前　言

按照“关于开展2022年江西电力优秀科技论文评选活动的通知”（赣电机【2022】10号）文件要求，各会员单位组织了论文申报。论文内容涵盖了火力发电及水力发电，太阳能、风力等可再生能源发电，输配电，供用电，高压，电机与电器，继电保护与安全自动装置，电气测量与仪表，建设运行管理，规划与设计等多个专业，特别是现场问题分析和处理方面较以往有大幅增加。

本次征文共收到有效论文111篇，学会学术工作委员会组织专家按照《江西省电机工程学会优秀论文奖励办法（试行）》评审选拔，综合考虑获奖分布、论文查重、论文发表时间等因素，经学会批准，评选出优秀论文一等奖2篇，二等级8篇，三等奖20篇。

根据作者意愿，本论文集将获奖论文30篇、其他未公开发表和编入其他论文集的优秀论文49篇共计79篇集结成册，汇编形成《2022年江西省电机工程学会年会论文集》，供读者交流。

促进电力科技进步，激发科技工作者的创新、创造能力，提高电力行业整体学术水平是学会的一项重点工作，科技论文评奖和优秀论文集的出版是科技工作者施展才华和交流技术的重要舞台。

科技为生产服务，解决电力行业在规划、设计、制造以及现场运行关键技术问题并进行提炼总结是今后学会论文评审的方向。今后，学会继续加强与《江西电力》及其他科技期刊的联系，推荐优秀论文在刊物上发表。

论文编辑出版得到有关单位和人员的大力支持。在此，向积极组织推荐论文的各单位领导、工作人员和提交论文的作者表示衷心的感谢！

江西省电机工程学会秘书处

2022年12月

目 录

第一部分 获奖论文

一等奖

基于小波能谱熵和PSO-SVM的输电线路故障类型识别.....邹丹旦，项成恩，廖昊爽，胡京，张宇 1
某超临界燃煤机组湿法脱硫系统降低厂用电率措施.....徐鹏，严剑文，吴顺 7

二等奖

基于模糊层次分析的高压变电站网络攻击预算评估方法研究.....肖勇才，杨良翰，李俊，徐健，刘旷也 11
双碳目标下江西新能源参与电力中长期交易模式及品种设计.....宫嘉炜 19
GIS内光信号传播及传感器布局方式研究.....吴诗优，郑书生，钟爱旭 24
基于闭锁信号的主变压器低压侧后备保护改进方案.....欧阳琦，苏乾坤，周飘，胡俏，王思尹 32
1000MW燃煤机组一次风机振动原因分析及处理.....孙德计，訾娟 36
火电厂给水泵小机停机组件优化研究.....罗文轩，周大勇，董卫强，李辉，刘逸峰 39
高再管排改造浅析.....邓山 43
海上风电场输电方式研究.....李克，吴迪 47

三等奖

对一次发电机定子接地故障的探究.....罗文轩，吴晴，李辉，尹天晟，周大勇 50
基于傅里叶变换与最大关联距离相结合的配电网故障选线新方法.....
.....邓志祥，潘建兵，黄灿英，刘伟博，魏向向，郭亮，郭紫华，郝钰，王晓卫 55
基于K近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法.....李卿鹏，陈磊，王煜晗 62
GIS组合电器内部放电诊断试验及原因分析.....吴星，潘春晖，吴组应，邱剑，尹天晟，马鑫禹 67
以鄱阳湖换流站为参考的受端换流站加装调相机仿真计算.....严一凡，甘祎扬，黄峰 72
考虑风光水多重不确定性置信风险的多目标动态分解优化调度.....孙惠娟，巩磊，彭春华，温泽之 76
含考虑IDR的冷热电联供微网的主动配电网经济优化调度.....
.....杨晓辉，张柳芳，吴龙杰，冷正旸，刘康，徐正宏 83
基于ATTENTION机制优化CNN-SEQ2SEQ模型的非侵入式负荷监测.....
.....王琪凯，熊永康，陈瑛，夏永洪，叶宗阳，余礼苏 92
变压器的最佳经济寿命区间评估方法.....黄俊 100
基于熵权计算的光伏电站电能质量评估方法.....熊建英，吴文宝，熊敏 104
机组运行过程中轮叶反馈传感器挂钩断裂的后果及对机组危害的探究.....陈宇晖 107
先进AGC控制策略在660MW超超临界二次再热机组的研究与应用.....刘逸峰，李辉，董卫强 109
山地光伏电站单立柱支架结构安装技术.....吴建鹏，尹康华，尹杰 111
基于激光雷达测风仪的风机功率曲线对比研究及应用研究.....吴玉华 115
SIPOS 5系风机动叶执行机构反馈丢失故障原因分析及缺陷防治措施.....王浩 118
哈汽1000MW超超临界二次再热汽轮机垫铁安装质量和进度控制研究.....陈芳权 122
火电机组磨煤机动态分离器自动调节控制策略及效果研究.....郑熙 125
一起胶球清洗装置收球异常诊断及处理.....肖承明 128
风电机组偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙测量及调整方法探究.....朱定福 132
水导冷却器改进及应用.....刘晨光，王星 134

第二部分 优秀论文

一种变电站三维空间内多源局部放电定位方位.....吴诗优，张征，郑书生 137
接地变在新能源场站中的运用.....余幸 145
电动机轴承加油脂原理及温度升高原因分析.....宋皓月 148

基于BIM的电缆精细化管理在火力发电厂的应用.....吴利平,李华，覃席彪 150
基于BAS-GRNN模型的电力电缆线芯温度预测方法研究.....毛梦婷，徐锐，刘专，曾庆煜 154
调相机与换流站交流滤波器的协调控制措施.....周鹏杰，甘祎扬，李宣 159
VB2-PLUS-12 型开关结构剖析及常见故障处理.....段超 162
1000MW发电机出口半绝缘电压互感器交流耐压试验方法研究.....陶霞 165
多模式自适应新型区域备自投方案的探讨.....黄鑫 168
电量变送器检定装置不确定度评定.....马振天 171
发电机出口隔离开关9201G缺陷处理.....刘清艳 173
不同工况下XLPE电缆中电树枝起始前空间电荷特性研究.....吴诗优，张征，郑书生 177
一起220kV线路保护接地故障跳闸分析.....陈敏 187
坝顶门式起重机穿销故障原因分析及处理.....钟斌 189
光伏直流升压系统中级联DC/DC变流器的均流/均压控制策略.....
.....陈波，蔡礼，谢凡，王晓晨，邱日强，涂睿 191
高压电机槽楔脱落故障的原因分析与应对措施.....袁强 201
某电厂凝泵变频器跳闸故障分析.....曾水生 204
碳刷在线监测在万安水电厂的应用.....钟波，邱全源 206
EPS装置作为某水电厂机组动力应急电源的探讨.....赖泽湖 210
浅谈发电企业网络安全防护措施.....刘卫国 213
万安水电厂220kV GIS设备改造.....肖晓，巩华 216
一起变压器绝缘油溶解气体含量异常分析.....涂海彬 220
主变中性点加装直流偏磁抑制装置对零序过流保护的影响分析.....邹建中 223
浅析赞比亚配网EPC项目全过程实施要点.....周文发，熊星，李渭饶，赵小波，宋银河 225
某风电场2.0MW机组偏航软启故障的触发原因分析及处理探究.....唐文清 228
优化运行方式 提高发电效益.....王军 231
智能数字化动态煤场管理系统的研究与应用.....李辉，刘逸峰，夏季 235
万安水力发电厂2号机组推力瓦更换工艺及注意事项.....何云，徐文波 238
智慧电厂建设的5G应用实践.....边泽楠，雷苏雨 242
叠盘式吹灰器在百万机组锅炉水平烟道上的应用.....沈佳乐，陈绍光 245
220kV GIS设备改造期间保厂用电措施探讨.....温邦春 247
石膏湿法脱硫系统建模与应用.....王浩 250
电力建设工程高处坠落事故分析及预防措施研究.....马玉磊，李辉，李昕光，周大勇 254
水轮发电机启励失败的原因分析.....罗海春 257
现场总线控制技术在辅网DCS系统的应用研究.....宋晨晨，李辉，刘逸峰 259
1000MW机组PCV阀控制系统可靠性分析及改造.....曾宪平，夏润章，许俊，付钦学 262
探究风力发电机叶片的防覆冰技术.....侯遥平 265
660MW超超临界二次再热机组深度调峰控制系统研究与应用.....李祥，李辉，阳斌 267
运用QC方法提高工程混凝土外观质量.....张俊华，张庭 269
QC小组活动在提高光伏组件钢结构支架螺栓连接初验合格率中的应用.....赵忠杰，吴泽南，刘强 272
高密池絮凝强化装置频繁堵塞问题分析与治理.....李庆超 276
MGC4000型调速器在某水电厂的运行经验探讨.....吴雨霏，陈宸 279
光伏组件状态感知深度神经网络的功率预测模型.....张书启，熊敏 282
高山风电场雷区架空线路隐身防雷的研究与治理.....曾志平 286
谈大型光伏项目EPC全过程管理.....汪延寿，杨威 288
地铁FAS系统调试方法及常见问题原因分析.....蔡超 292
高山风电场风机偏航控制策略优化的研究与分析.....廖强 295
降低离心脱水机故障发生率的方法研究.....高新开 297
风力发电机组防雷技术研究与应用分析.....侯遥平 300

基于小波能谱熵和PSO-SVM的输电线路故障类型识别

邹丹旦[1]，项成恩[1]，廖昊爽[2]，胡京[2]，张宇[2]

（1.华东交通大学，南昌 330013；2.国家电网江西省电力有限公司电力科学研究院，南昌 330096）

摘要：采用多分辨分析快速小波变换和信息熵相结合的方法，对某省电网公司近年来故障录波数据进行分析识别。提取故障三相电流小波能谱熵值，并引入零序电流组成故障特征输入向量，建立基于 PSO-SVM 的短路故障类型识别模型。考虑实际数据中线路故障类型的不平衡性，又基于实际线路参数搭建仿真模型获取大量均衡故障样本，以实际数据和仿真数据分别对模型进行训练及测试，最终证实该方法的可行性及实用性。

关键词：故障录波；小波能谱熵；PSO-SVM

1 引言

我国电力输送网络的高压、长距离输电实情，使部分输电线路长期暴露野外，途经的地区环境、气象条件多变，工作情况复杂，造成线路跳闸故障频发[1-3]。故障发生后迅速明确故障类型，对精准确定故障点，故障快速排除及供电恢复具有重要的意义。

输电线路故障类型智能识别主要包括故障信号特征量提取和故障识别方法两部分。对于故障特征提取，线路故障特征多直接用故障时的某些暂态量来表征，或借助小波分析[4-6]、S 变换[7]、变分模态分解（VMD）[8-9]等方法，经处理计算得到表征故障特性的特征量。而用于输电线路故障类型识别的方法则有很多，如支持向量机[10-11]、随机森林[12]和深度学习[13-14]等等。文献[15]以故障三相及零序电流小波奇异值为特征量，并考虑数据集的不平衡度，对输电线路故障类型进行了分类识别。文献[16]提出了一种利用稀疏性约束与深度字典学习的输电线路故障识别方法。文献[17]利用对称分量法提取线路故障特征，采用多支持向量机诊断模型准确的识别了故障类型。文献[18]基于电压信号多尺度排列熵值并结合 PSO-SVM(粒子群算法优化的支持向量机)算法，实现了线路故障相别的智能选取。文献[19]依据一种神经网络构建模型，采用 VMD 排列熵为特征参数，提出了故障类型的识别方法。

目前相关研究都取得不错成果，但绝大多数仅建立在仿真数据基础上，仿真线路参数单一不变，并没有考虑在实际故障数据中的识别效果，以及实际数据的小样本特性。因此本文基于某省级电网公司 2018-2021 年的故障录波数据，利用能谱熵对故障信号突变敏感的特性，提出一种基于三相电流小波能谱熵和适于小样本的 PSO-SVM 输电线路故障类型识别方法。又根据实际线路参数搭建仿真模型以获取大量的故障类型样本，以实际数据和仿真数据分别对模型进行训练及测试，结果表明，无论对于实际数据还是仿真数据，该方法都可对不同故障类型作出准确的识别。

2 基本原理

2.1 小波能谱熵定义

小波变换处理非平稳故障信号具备优越的时频局部化分析能力，设函数 $f(t)\in L^2(R)$，a 为尺度因子，b 为位移因子。

则对应的连续小波变换为

$$(W_\psi f)(a,b)=|a|^{-\frac{1}{2}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\overline{\psi(\frac{t-b}{a})}dt \quad (1)$$

对应的离散小波变换为

$$(W_\psi f)(m,n)=a_0^{-\frac{m}{2}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\overline{\psi(a_0^{-m}t-nb_0)}dt \quad (2)$$

在此基础之上，多分辨分析的快速小波变换则通过小波基函数将信号分解、单支重构后，得信号的各高频及低频分量。

设一时间窗内的信号 $S(n)$，经快速变换，其高频细节和低频近似系数分别为 $cD_j(k)$ 及 $cA_j(k)$，经单支重构，得到各分解层数下信号分量 $D_j(k)$，$A_j(k)$（k 为时刻，j 为分解层数）。则各分量信息频带的宽度为

$$\begin{cases}D_j(k):\left[2^{-(j+1)}f_s,2^{-j}f_s\right]\\A_j(k):\left[0,2^{-(j+1)}f_s\right],j=1,2,\mathrm{K}\ ,J\end{cases} \quad (3)$$

式中，f_s 是采样频率，则 $S(n)$ 经过变换后，可为如下形式

$$S(n)=D_1(n)+A_1(n)=D_1(n)+D_2(n)+A_2(n)=\sum_{j=1}^{J}D_j(n)+A_j(n)=\sum_{j=1}^{J+1}D_j(n) \quad (4)$$

令 $E_{jk}=\left|D_{jk}\right|^2$ 为 $S(n)$ 在相应分解层数及时刻时的小波能量，则在层数 j 上信号分量的能量为

$$E_j = \sum_{k=1}^{N} E_{jk} \quad , k = 1,2,\mathrm{K} \quad ,N \qquad (5)$$

其中 N 为总的采样点数，则各分量的能量之和为 E，根据信息熵理论有 $p_j = E_j / E$， $S(n)$ 在分解层数 J 时小波能谱熵值为

$$\begin{cases} WEE(J) = -\sum_{j=1}^{J} p_j \log(p_j) \\ \sum_{j=1}^{J} p_j = 1 \end{cases} \qquad (6)$$

当设置时间窗宽度小于信号采样点数 N 时，随着窗的滑动，得到能谱熵随时间的变化关系，从而反映信号的动态变化，且信号越复杂能谱熵值越大。

2.2 PSO-SVM理论

SVM 可最小化结构风险，是基于统计学原理的智能分类算法。其可用核函数将最初输入空间变换到高维空间，以建立特征参数与类型标签间的非线性映射关系，求得最优分类超平面。在处理分析小样本、非线性分类问题时优势显著。SVM 网络结构如图1所示。

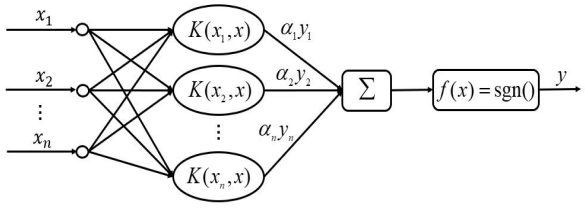


图1. SVM网络结构

考虑到输电线路故障数据难以形成大样本，是典型的小样本问题，且各因素与故障类型之间属于非线性分类问题，因此本文采用基于RBF核函数的SVM构建模型。核函数表达式（g为核参数）为

$$K(x,y) = \exp\left\{-\|x-y\|^2 / 2g^2\right\}, \ g>0 \qquad (7)$$

设 x_i 为各特征参数，y_i 为故障类型，则样本集为 $Z = \{(x_1,y_1),(x_2,y_2),\mathrm{K} \ ,(x_n,y_n)\}$。对于线性分类，可确定分类超平面为

$$f(x) = w^{\mathrm{T}} \cdot x + b = 0 \qquad (8)$$

w 是权重、b 是阀值，两者共同确定超平面的位置。

对于非线性的线路故障类型分类识别，则需将向量 x_i 映射到高维空间后变换为 $\Phi(x_i)$，构建 $\Phi(x_i)$ 与 y_i 间的关联，此时分类超平面为

$$f(x) = w^T \cdot \Phi(x_i) + b \qquad (9)$$

并由下列优化问题解得

$$\begin{cases} \min \frac{1}{2}(w \cdot w) + C\sum_{i=1}^{k} \xi_i \\ s.t. y_i (w \cdot \Phi(x_i) + b) \geq 1 - \xi_i, \xi_i \geq 0, i = 1,2,\mathrm{K} \ \ k \end{cases} \qquad (10)$$

式中为 C 惩罚因子，ξ_i 为增加的松弛项，用于考虑实际应用中的可能出现的线性不可分情况。则式（10）对应的对偶问题为

$$\begin{cases} \max \sum_{i=1}^{k} \alpha_i - \frac{1}{2}\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k} \alpha_i \alpha_j y_i y_j K(x_i \cdot x_j) \\ s.t. \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_i = 0; C \geq \alpha_i \geq 0, i = 1,2,\mathrm{K} \ \ k \end{cases} \qquad (11)$$

由上式问题可解得最优分类函数为

$$f(x) = \mathrm{sgn}(\sum_{i=1}^{k} \alpha_i^* y_i K(x_i, x) + b^*) \qquad (12)$$

式中 α_i^* 为最优解， b^* 为分类的域值。

由于不同的惩罚参数C和核参数g，对应SVM模型识别的精准性有很大差异。优化算法PSO有简单、全局搜索能力强等优点，可用于寻找SVM的最优参数。PSO 算法借鉴动物的群集行为，将群集中个体喻为动态粒子，而动态粒子指代为问题的潜在解。粒子通过不断更新空间位置及速度以搜寻到最优解，设粒子在空间中位置为 $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \mathrm{K} \ \ x_{id})$ 、速度为 $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \mathrm{K} \ \ v_{id})$，则有 PSO 寻优公式

$$\begin{cases} v_{ij}^{n+1} = w^{'} \cdot v_{ij}^{n} + c_1 \cdot rand1_{ij} \cdot [pbest_{ij}^{n} - x_{ij}^{n}] \\ + c_2 \cdot rand2_{ij} \cdot [gbest_{ij}^{n} - x_{ij}^{n}] \\ x_{ij}^{n+1} = x_{ij}^{n} + v_{ij}^{n+1} \end{cases} \qquad (13)$$

式中 c_1、c_2 为初始参数，$rand1_{ij}$ 与 $rand2_{ij}$ 为(0,1)内的随机值， $pbest$ 和 $gbest$ 为个体及全局最优值。

在寻优过程中，根据故障数据形成训练集，获得由 SVM 参数 C 、 g 构成的初始粒子并对参数迭代计算，得到针对线路故障数据的最优SVM参数。

3 基于实际数据的故障类型识别

3.1 故障特征提取

本文基于某省电网公司2018-2021输电线路故障录波，利用多分辨分析小波变换及信息熵理论，提取故障三相电流小波能谱熵值作为特征向量，对输电线路短路故障类型进行智能识别。如下图2、3为两类输电线路短路故障电流录波实例。

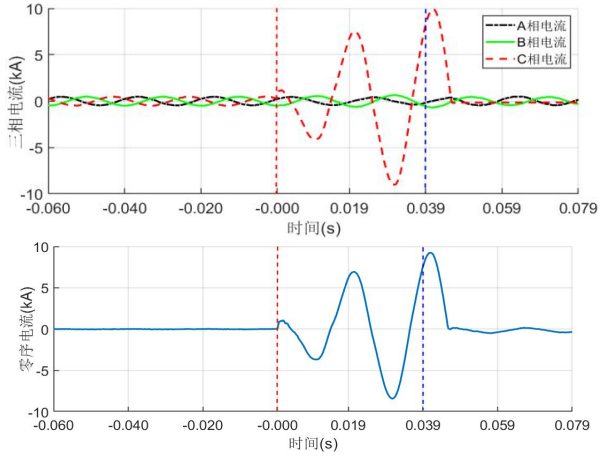


图2. C 相接地短路电流录波

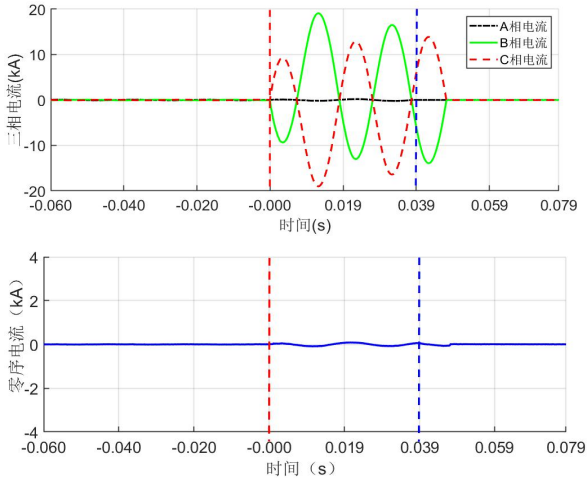


图3. BC 两相短路电流录波

采用多分辨分析小波变换对电流录波进行处理，以计算故障特征量。以图2中的故障录波 C 相电流信号为例，选用db4小波基函数，最大分解层数 $J=5$，对信号变换分解并单支重构。如图4所示，故障相电流信号经变换分解后，得到各层数下的高频及低频分量。

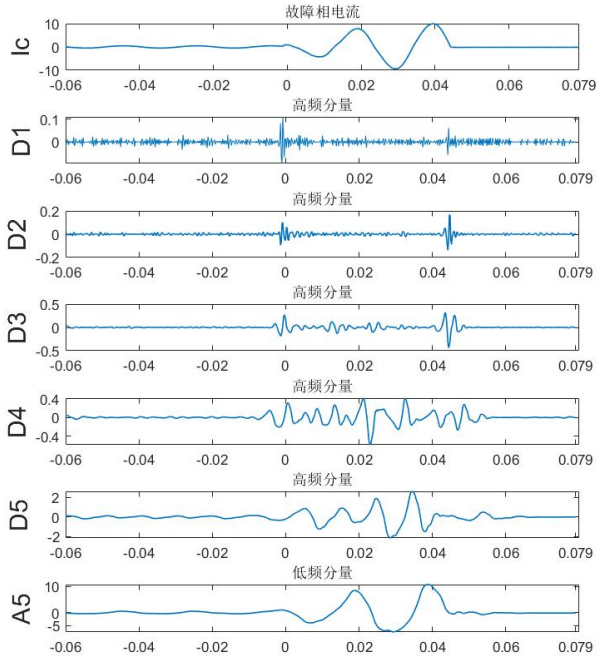


图4. 电流信号5层分解结果

由分解结果得到各层数下分量的系数 D_{jk}，选取时间窗宽度为100T(T为采样点时间间隔)，窗口逐点滑动，根据能谱熵定义，可计算得到能谱熵随时间变化曲线。

如图5所示，当输电线路处于正常状态时，电流的能谱熵值很小且基本保持不变。而故障发生时，电流开始突变，电流信号中出现大量高频分量，能谱熵也同步突变。此外故障相电气参数比非故障相突变的更为显著，因此两者能谱熵之间会存在着明显差异，且经分析发现能谱熵不受被分析电流、电压幅值的影响。

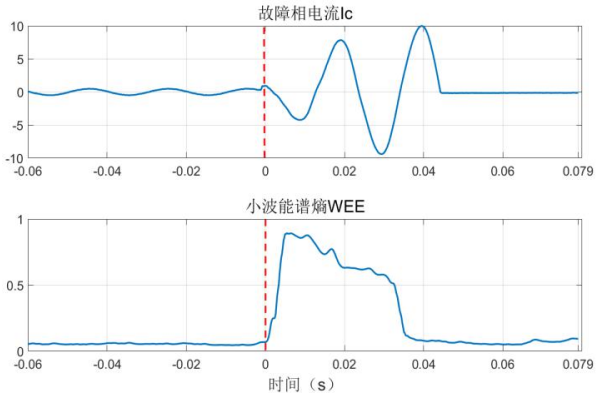


图5. 小波能谱熵变化曲线

本文以熵值为特征量，由于故障后信号高频分量会迅速衰减，选取故障后一个周期的数据计算熵值，更具故障特征表征性，根据式（6）计算得到C相接地短路时，$WEE_C(5)=0.5829$，同理可得 $WEE_A(5)=0.3892$，$WEE_B(5)=0.2812$，而BC两相短路时有 $WEE_A(5)=0.5563$，$WEE_B(5)=0.9713$，$WEE_C(5)=0.9740$。

3.2 故障类型识别

本文基于PSO-SVM算法建立相应的识别网络，分别以故障三相电流能谱熵和故障类型为输入及输出，初步测试发现仅以能谱熵为特征量，模型识别准确率相对较低。通过对实际故障录波分析，单相与两相接地短路时出现很大的零序电流(记I_0=1)，而相间短路时零序电流只在0值附近轻微波动(记I_0=0)，因而本文引入零序电流与三相电流能谱熵共同组成特征向量，以提高识别准确率。

获取某省电网公司2018-2021年间的298组输电线路故障录波数据，同前文所述方法，提取出每组故障数据的故障三相电流小波能谱熵及零序电流，获得识别网络的输入特征向量，部分数据如下表1所示，A、B、C、g分别代表相别及接地。数字1-9为对应的类别标签。

表1. 输电线路故障特征数据

故障类型（标签）	$WEE_A(5)$	$WEE_B(5)$	$WEE_C(5)$	I_0
Ag(1)	0.8722	0.4717	0.2560	1
Bg(2)	0.2498	1.0258	0.2959	1
Cg(3)	0.4671	0.4357	0.7939	1
ABg(4)	0.8211	0.8251	0.2862	1
BCg(5)	0.1045	0.8051	0.8158	1
ACg(6)	0.8970	0.2768	0.7886	1
AB(7)	0.9300	0.9180	0.2080	0
BC(8)	0.3238	0.6199	0.6208	0
AC(9)	0.8594	0.1782	0.9408	0

选取各故障类型数据中的一半，共149组用于识别模型的训练，另外一半则用于训练后模型的测试。设置 PSO 参数，迭代数为300，种群数量为30，

c1＝1.5、 c2＝1.7，以获取基于输电线路故障数据的最优SVM参数，结果如图6所示。

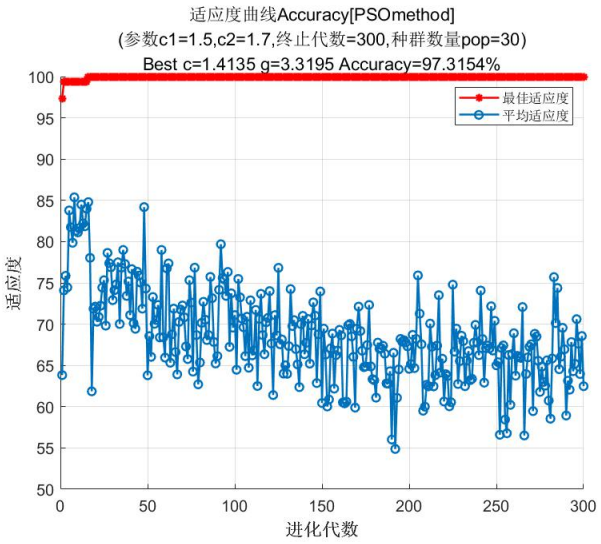


图6. PSO适应度曲线

得到SVM 最优参数c=1.4135、g=3.3195，最佳识别准确率为97.3154%（145/149）。测试数据集中各故障类型具体识别情况及识别率，如图7及表2所示。

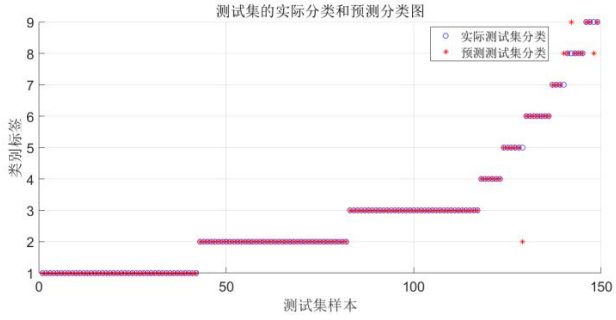


图7.识别分类图

表2. 各故障类型识别结果

故障类型	测试数	识别数	识别率
Ag	42	42	100%
Bg	40	40	100%
Cg	35	35	100%
ABg	6	6	100%
BCg	6	5	83. 33%
ACg	7	7	100%
AB	4	3	75%
BC	5	4	80%
AC	4	3	75%

由图表可知，识别模型对单相接地短路故障的识别率为100%，而对两相短路的识别率则较低，考虑这是由于实际情况下输电线路故障多以单相接地短路为主，从而导致数据中各故障类型样本数存在明显的不平衡性，造成训练后的模型对样本数少的故障类型识别正确率低。

4 仿真分析

考虑到实际数据中，数据类型的不平衡性对模型识别效果的影响，且实际情况下三相短路极为罕见，缺少样本，方法普适性待验证，因此根据实际线路参数搭建了输电线路仿真模型，仿真共10种故障类型，以获得大量故障样本。模型如图所示

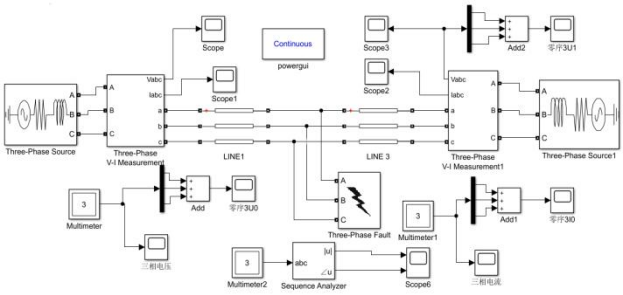


图8. 输电线路仿真模型

选取某500kV 实际线路参数设置仿真参数，如线路长度 L＝125.68km， 工频50Hz， 正序参数：R_1＝0.0159Ω/km ， X_1＝0.2991Ω/km ， C_1=13.74 nF/km；而零序参数：R_0＝0.2861Ω/km，X_0＝0.1422Ω/km， C_0＝7.952 nF/km 。故障发生在距左端 50km 处，采样频率为 20kHz，仿真10种故障后便可得仿真波形数据，如下图为仿真电流波形示例。

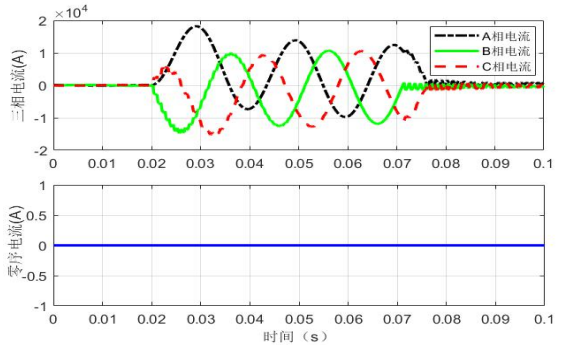


图9. 三相短路电流仿真波形

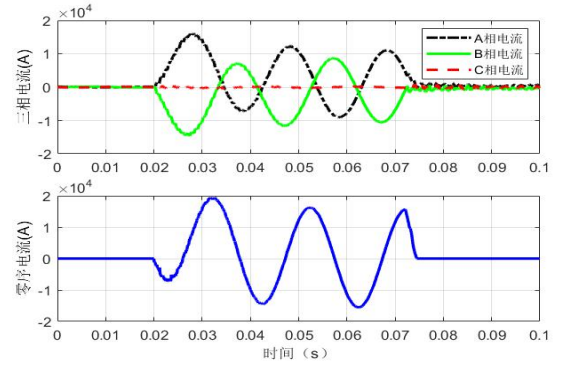


图10. AB 接地短路电流仿真波形

仿真下发生接地故障时有很大零序电流，而相间短路时零序电流保持为0。按照前文所述方法，

对仿真故障后一个周期电流信号进行小波变换而后计算其小波能谱熵值，进而获得仿真下的特征向量数据，如表3所示。

表3. 仿真故障特征数据

故障类型（标签）	$WEE_A(5)$	$WEE_B(5)$	$WEE_C(5)$	I_0
Ag(1)	0.1862	0.0798	0.0813	1
Bg(2)	0.0727	0.3436	0.0736	1
Cg(3)	0.0689	0.0698	0.3276	1
ABg(4)	0.2490	0.4233	0.0641	1
BCg(5)	0.0242	0.4801	0.4892	1
ACg(6)	0.2176	0.0698	0.4530	1
AB(7)	0.4682	0.4670	0.1369	0
BC(8)	0.1566	0.4830	0.4831	0
AC(9)	0.5012	0.1331	0.5006	0
ABC(10)	0.4781	0.4661	0.4554	0

实际数据与仿真数据相比，在值上普遍偏大，这是因为实际故障时情况更为复杂，导致电流信号频率成分也更复杂，从而导致值偏大。为了获取大量样本并模仿实际情况下故障发生的随机性，在仿真模型的基础之上，分别设置故障点位置25km、50km、75km、100km，初相角0°、45°、90°，故障电阻1Ω、10Ω、100Ω、500Ω，电压等级500kV、220kV，仿真10种短路故障类型，获得4×3×4×2×10共960组数据，同样选取各故障类型数据中的一半，共480组用于识别模型的训练，另外一半则用于训练后模型的测试。PSO-SVM模型训练及测试结果如图11所示。

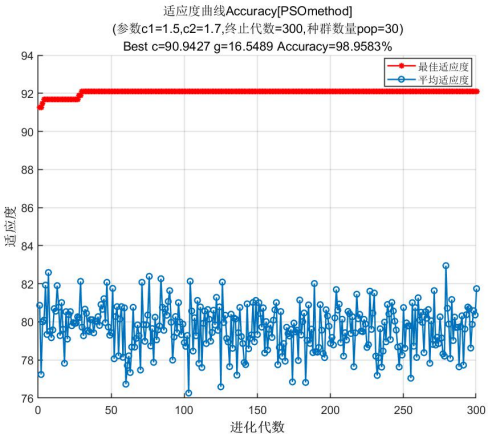


图11. PSO适应度曲线

得到SVM最优参数c=90.9427、g=16.5489，最佳识别准确率为98.9583%（475/480）。测试数据集中各故障类型具体识别情况，如表4所示。

表4.各故障类型识别结果

故障类型	测试数	识别数	识别率
Ag	48	48	100%
Bg	48	48	100%
Cg	48	48	100%
ABg	48	48	100%
BCg	48	47	100%
ACg	48	46	95.83%
AB	48	47	97.92%
BC	48	46	95.83%
AC	48	48	100%
ABC	48	48	100%

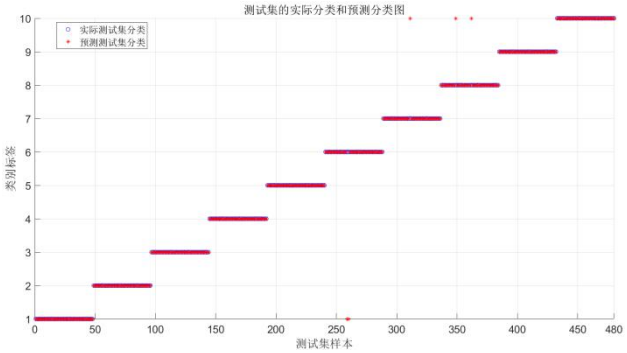


图12. 识别分类图

5 结论

本文利用小波变换和信息熵理论，提取故障电流信号小波能谱熵并结合零序电流构成特征向量，提出基于小波能谱熵和PSO-SVM的输电线路故障类型识别方法，分别以实际录波数据和仿真数据进行了分析验证。

（1）故障三相电流小波能谱熵对电流信号的变化具有较强的敏感性，能很好的反映输电线路的故障相别，且不受电流幅值的影响，零序电流则反映是否为接地故障。

（2）基于实际故障录波数据的识别模型对单相接地短路达到100%识别率，虽然由于缺少样本，导致对其余几类故障识别率不佳，且未考虑三相短路故障，但实际情况下，线路故障绝大多数为单相接地，其占比可超80%，甚至90%，因此该方法仍具有很好的实用性。

（3）基于仿真数据的识别模型，由于各类型故障样本在数量上分布均衡，且样本数量较多，模型对各类故障均能准确识别，进一步说明该方法的可行性与实用性。

综上所述，该方法对输电线路短路故障类型具有很好的识别效果，对于实际数据中两相短路及三相短路故障样本缺少问题，将在后续研究中进一步完善。

参考文献：

[1]张思豪. 中国特高压的发展状况及前景[J]. 安徽科技, 2021(8):4.

[2]卢银均, 李翊嘉, 姜金节, 等. 输电线路故障统计分析及防控对策研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(04):47-52.

[3]陆佳政,周特军,吴传平，等.某省级电网 220 kV及以上输电线路故障统计与分析[J].高电压技术,2016,42(1)：200-207.

[4]Liu Z， Han Z， Zhang Y，et al. Multiwavelet Packet Entropy and its Application in Transmission Line Fault Recognition and Classification[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2014, 25(11):2043-2052.

[5]肖文龙,王维博,刘勇,等.基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(17):90-96.

[6]He Z， Ling F， Sheng L，et al. Fault Detection and Classification in EHV Transmission Line Based on Wavelet Singular Entropy[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2156-2163.

[7]刘栋,邹贵彬,王昕，等.基于S变换的输电线路故障快速选相方法[J].电网技术,2015，39(12):3603-3608.

[8]徐耀松,张原.基于改进VMD-MSE方法的输电线路故障特征分析及分类[J].电子测量与仪器学报,2019,33(06):89-95.

[9]王桥梅,吴浩,胡潇涛，等.基于VMD多尺度模糊熵的HVDC输电线路故障识别方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(05):134-144.

[10]费春国,霍洪双.基于电流振幅与SVM的输电线路故障分类[J].电力系统及其自动化学报，2019,31(04):139-144.

[11]Huang S，Huang J，Ou Y，et al. Transmission Line Faults Classification Based on Alienation Coefficients of Current and Voltage Waveform and SVM[C]// 2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). 2020.

[12]杨杰,吴浩,董星星，等.基于电流故障分量特征和随机森林的输电线路故障类型识别[J].电力系统保护与控制,2021,49(13):53-63.

[13]徐舒玮,邱才明,张东霞，等.基于深度学习的输电线路故障类型辨识[J].中国电机工程学报,2019,39(01):65-74+321.

[14]杨毅,范栋琛,殷浩然,等.基于深度-迁移学习的输电线路故障选相模型及其可迁移性研究[J].电力自动化设备,2020,40(10):165-172.

[15]黄建明,李晓明,瞿合祚，等.考虑小波奇异信息与不平衡数据集的输电线路故障识别方法[J].中国电机工程学报,2017,37(11):9.

[16]张宇博,郝治国,林泽暄，等.基于深度字典学习的输电线路故障分类方法[J/OL].电力自动化设备:1-12[2022-04-19].

[17]吴笑民,曹卫华,王典洪，等.多支持向量机模型的输电线路故障诊断方法[J].高电压技术,2020,46(03):957-963.

[18]宁琦,耿读艳,王晨旭,等.基于多尺度排列熵及PSO-SVM的输电线路故障判别[J].电子测量与仪器学报,2019,33(07):173-180.

[19]付华,金岑.VMD-PE协同SNN的输电线路故障辨识方法[J].电子测量与仪器学报，2020，34(06):86-92.

作者简介：

邹丹旦(1985)，男，博士，副教授，研究方向为放电等离子体、电力系统故障诊断，E-mail：ddzou@ecjtu.edu.cn

项成恩(1996)，男，硕士研究生，研究方向为放电等离子体、电力系统故障诊断，E-mail：2313923882@qq.com

张宇(1979)，男，通信作者，博士，教授级高工，研究方向为输电线路运行及故障防治技术，E-mail：zhangyuemc@163.com

某超临界燃煤机组湿法脱硫系统降低厂用电率措施

徐鹏，严剑文，吴顺

（江西赣能股份有限公司丰城二期发电厂，江西 丰城 331100）

摘要：介绍了脱硫系统的设计特点、运行情况及优化方案。对某电厂 700MW 燃煤机组湿法烟气脱硫系统厂用电率主要影响因素包括耗电设备、入炉煤含硫量、脱硫效率、脱硫系统运行方式、石灰石品质等进行分析，试验确定了脱硫系统降低厂用电率具体措施。具体优化措施为：调整 2 台锅炉的配煤方式；确定了不同负荷下脱硫效率及循环浆液泵最佳运行组合，将单台锅炉脱硫系统中循环浆液泵运行数量由原来的 3—5 台调整为 2 台；对吸收塔浆液喷嘴及支管进行了清理疏通，降低了循环浆液泵运行出口压力，有效提高了脱硫系统运行液气比，满负荷情况下吸收塔适应含硫量由 0.87%提升到 1.24%。优化措施实施后，全厂脱硫系统厂用电率从 1.038%降至 0.733%，脱硫系统运行经济性得到了改善。

关键词：燃煤机组；湿法脱硫；厂用电率；经济性

0 前言

石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺具有吸收剂容易获取、脱硫效率高、脱硫副产物能够回收利用等优点[1-3]，在我国燃煤电厂中被广泛使用，工程应用占比超过85%[4]。随着电力工业和市场经济的发展，火力发电厂装机容量不断增大，石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺中整体配套的单体设备容量也逐渐增大。石灰石-石膏湿法烟气脱硫系统耗电量约占机组发电量的1.0%~1.5%[5-6]，耗电成本约占脱硫系统总运行成本的60%[7-9]。

在节能降耗、降本增效的大背景下，降低脱硫系统厂用电率成为电厂首要任务[10]。降低脱硫系统厂用电率，不仅能提高脱硫系统运行经济性，还能降低发电成本，对火电厂长远发展具有重要意义。胡燕宾[2]、王刚[3]、贾西部等[4-10]对锅炉脱硫系统的用电设备、配煤掺烧、工艺系统等进行了的优化调整，达到了节能降耗的目的。但对降低700MW燃煤机组湿法烟气脱硫系统厂用电率的具体措施还缺乏进一步的研究。

本文对某电厂700MW燃煤机组湿法烟气脱硫系统厂用电率主要影响因素包括耗电设备、入炉煤含硫量、脱硫效率、脱硫系统运行方式、石灰石品质等进行分析；并通过调整2台锅炉配煤方式、减少循环浆液泵运行台数、清理疏通吸收塔浆液喷嘴及支管，提高了脱硫系统运行经济性。

1 脱硫系统简介

某电厂5号、6号机组为700MW燃煤机组，其烟气脱硫系统采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺。该系统主要包括：2台机组共用的石灰石浆液制备系统、石膏脱水系统、工艺水系统、废水处理系统，以及每台机组单独使用的烟气系统、SO2吸收系统、排放系统。

随着这两台锅炉运行时间的增加，脱硫系统厂用电率上升明显，2018年比2017年上升0.06%，2019年第一季度比2018年上升0.12%。

2 脱硫系统厂用电率主要影响因素

燃煤电厂脱硫系统厂用电率的主要影响因素包括耗电设备、入炉煤含硫量、脱硫效率、脱硫系统运行方式、石灰石品质等。

1）耗电设备

5号、6号机组脱硫系统有3套制浆系统，3套脱水系统，4台氧化风机，每个吸收塔各有5台浆液循环泵。优化调整耗电设备运行，是降低脱硫系统厂用电率的主要方法[11-13]。

2）入炉煤含硫量

入炉煤含硫量是影响脱硫系统厂用电率的重要因素。含硫量低的煤，脱硫系统厂用电率低，但采购成本高；含硫量高的煤价格相对便宜，但会增加脱硫系统出力来达到环保排放要求，造成厂用电率高。综合燃煤成本考虑，合理的配煤掺烧能够满足锅炉的设计煤种、保证锅炉安全经济运行[14]，同时有效降低脱硫系统厂用电率。

3）脱硫效率

脱硫效率高，脱硫系统厂用电率降低，反之，脱硫系统厂用电率则升高。脱硫效率下降是影响脱硫系统厂用电率增加的主要因素。该脱硫系统2019年脱硫效率下降明显。

4）石灰石品质

石灰石品质对脱硫系统用电量的影响则表现在[12]：同等工况下，高品质的石灰石制出的浆液利用率提高，使用时间延长，磨机及制浆设备的运行小时数减少，厂用电率降低；反之，则会缩短浆液使用时间，增加磨机运行小时数，厂用电率升高。

3 降低脱硫系统厂用电率措施

综合以上几方面的因素，本文对该厂脱硫系统运行情况进行分析，确定目前造成该厂脱硫系统厂用电率高的主要原因为：循环浆液泵运行数量较多，运行方式不合理；配煤方式不合理。因此，将降低脱硫系统厂用电率的主要措施确定为：对循环浆液泵运行方式及组合的调整，以及对配煤方式的优化调整。

3.1 脱硫系统参数设定

1）浆液pH值

pH值越高，脱硫效率越高，但pH值过高，会使石膏浆液在设备中结垢[15]，因此确定浆液pH值为5.2~5.5，正常运行时控制值为5.3。

2）浆液密度

浆液密度太低，石膏不易结晶析出，过高则会造成设备结垢，影响脱硫能力[16]。根据以往运行经验及相关数据分析，决定将浆液密度控制为1090~1120kg/m^3，当浆液密度达到1120kg/m^{3}时，启动石膏排出泵，将石膏排出。若旋流子处溢流，则将石膏排出泵再循环阀开启一部分。

3）吸收塔液位

吸收塔的浆液液位过高会造成溢流，增大氧化风机出力；过低会降低氧化反应空间增加塔内泡沫，容易造成浆液循环泵汽蚀。根据前期运行经验及相关数据分析，决定将吸收塔液位控制为12.5~13.0m，正常运行吸收塔液位为12.8m左右。

4）补水方式

吸收塔补水方式主要有3种：工艺水补水、除雾器冲洗及管路冲洗。使用除雾器冲洗水可在除雾器上形成水膜来冲洗盐雾，降低除雾器差压，同时，会对烟气二次洗涤。因此，确定优先使用除雾器冲洗对吸收塔进行补水。

3.2 实施措施

环比2018年，2019年5号、6号锅炉脱硫效率，均有明显下降，且2台锅炉脱硫效率存在较大偏差。因此，对脱硫系统5台循环浆液泵运行状况、运行数量、不同运行组合下所能适应最大含硫的性能进行试验，为配煤掺烧精准控制吸收塔入口含硫量及循环浆液泵运行方式提供依据。具体实施措施如下。

1）改变配煤方式

各负荷段下原烟气含硫控制范围见表1，根据表1数据，于2019年4月对5号、6号锅炉原均等配煤方式进行调整。

表1 5号、6号锅炉各负荷段下原烟气含硫控制范围

单位：mg/m3

项目	450 MW以下	450~550 MW	550 MW以上
5号锅炉原烟气含硫控制范围	2 050~2 350	1 900~2 200	1 800~2 150
6号锅炉原烟气含硫控制范围	2 300~2 700	2 250~2 550	2 100~2 500

以2台锅炉上仓加权含硫量保持基本不变为原则，适当下调5号锅炉入炉煤含硫量，适当上调6号锅炉入炉煤含硫量（表2）。

表2 5号、6号锅炉入炉煤含硫量 单位：%

项目	调整前	调整后	全年平均
5号锅炉入炉煤含硫量	0.86	0.82	0.83
6号锅炉入炉煤含硫量	0.86	0.98	0.89
全厂入炉煤含硫量	0.86	0.9	0.86

2）优化循环浆液泵运行方式

优化前，2台锅炉配煤方式相同，按均等含硫配煤，脱硫系统运行过程中，5号锅炉需要4台或5台循环浆液泵，6号锅炉需要3台循环浆液泵。

通过2台锅炉脱硫最大含硫试验，不同负荷下2台锅炉脱硫效率存在差别，在相同情况下，5号锅炉脱硫效率明显低于6号锅炉。5号、6号锅炉在各负荷段下，均为1号、4号、5号3台循环浆液泵运行时，脱硫效率最高。

综合给煤机煤量调整及制粉系统切换等运行措施，2019年8月在全工况下采用脱硫效率高的循环浆液泵，将循环浆液泵运行数量由原来的3~5台调整为2台，实现了循环浆液泵利用效率最大化。

当原烟气含硫量刚好在启动循环浆液泵的临界值附近时，通过适当调整给煤机煤量，及调整磨煤机运行方式，以减少循环浆液泵运行台数。

3）5号机组吸收塔喷淋管及喷嘴清堵

2019年6月，在5号锅炉脱硫系统中，保持吸收塔液位12.8m、浆液密度1105kg/m^{3}稳定情况下，有4台循环浆液泵出口压力及电流波动较大，运行参数见表3。

表3 5号锅炉脱硫系统循环浆液泵运行参数

项目	1号泵	2号泵	3号泵	4号泵	5号泵
运行电流/A	80	85~95	94	94~104	91~98
出口压力/MPa	0.26	0.32~0.36	0.36~0.38	0.30~0.36	0.40

2019年6月在5号机组停机期间，对吸收塔浆液喷嘴以及支管进行清理疏通，共清理647个喷嘴，260个喷淋母管及支管。疏通喷嘴以及支管后，各循环浆液泵出口压力下降0.06~0.12MPa，下降幅度最高达31.5%，有效提高了脱硫系统运行液气比，满负荷工况下吸收塔适应含硫量由0.87%提升到1.24%。

此时，3台循环浆液泵能完成入炉煤含硫1.3%以内的脱硫效果。而清堵前5号锅炉脱硫系统中，3台循环浆液泵只能完成入炉煤含硫量0.7%以内的脱硫效果。

4 优化效果

2019年4月改变5号、6号锅炉配煤方式，2019年6月对5号机组吸收塔浆液喷嘴及支管清堵，2019年8月调整2台锅炉脱硫系统中循环浆液泵运行数量为2台后，2台锅炉脱硫系统厂用电率明显下降，达到了节能降耗的目的。

4.1 5号锅炉脱硫系统厂用电率

2019年5号锅炉脱硫系统厂用电率变化如图1所示。从图1可看出，5号锅炉在2019年4月调整配煤方式后，脱硫系统厂用电率于4月、5月有所下降，但在6月出现明显上升，这是由于吸收塔喷嘴和支管存在堵塞现象。

2019年6月对吸收塔浆液喷嘴及支管清堵后，脱硫效率大幅上升，7月开始5号锅炉脱硫系统厂用电率大幅下降，由6月的1.095%降至7月的0.646%。2019年8月将循环浆液泵运行数量调整为2台后，8~12月每个月脱硫系统厂用电率保持在0.622%~0.811%。相比优化调整前，5号锅炉脱硫系统厂用电率由1.017%~1.079%降至0.622%~0.811%。

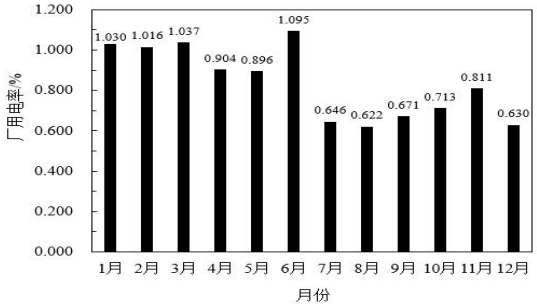


图1 2019年5号锅炉脱硫系统厂用电率变化

4.2 6号锅炉脱硫系统厂用电率

2019年6号锅炉脱硫系统厂用电率变化如图2所示。从图2可看出，6号锅炉在2019年4月调整配煤方式后，脱硫系统厂用电率逐渐下降至1%以下。2019年8月将循环浆液泵运行数量调整为2台后，脱硫系统厂用电率逐渐维持0.612%~0.715%。相比优化调整前，6号锅炉脱硫系统厂用电率由1.017%~1.155%降至0.612%~0.715%。

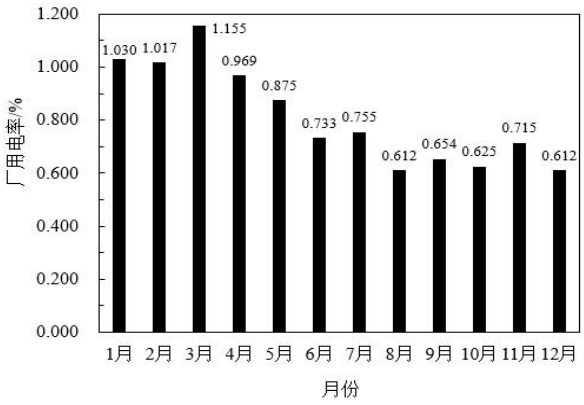


图2 2019年#6锅炉脱硫系统厂用电率变化

4.3 全厂脱硫系统厂用电率

全厂2019年脱硫系统厂用电率变化如图3所示。从图3可以看出，2019年3月全厂脱硫系统厂用电率为1.079%，2019年4月调整配煤方式后，在燃煤含硫量基本稳定的情况下降低了脱硫系统厂用电。2019年4月脱硫系统厂用电率为0.936%，环比下降0.143%。

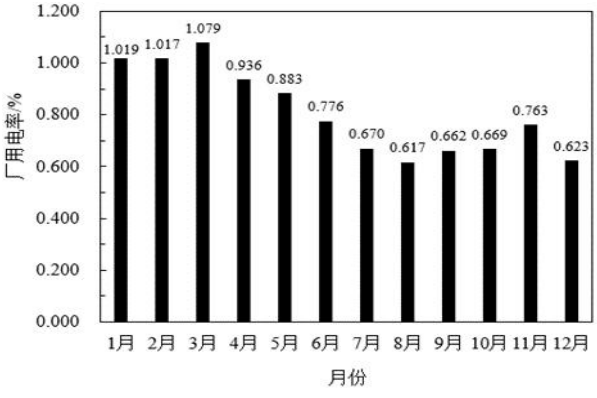


图3 2019年全厂脱硫系统厂用电率变化

2019年8月将2台锅炉脱硫系统中的循环浆液泵运行数量调整为2台，8~12月脱硫系统厂用电率维持在0.617%~0.763%，相比优化前脱硫系统厂用电率显著下降。

全厂2019年脱硫系统平均厂用电率见表4。从表4可看出，全厂2019年脱硫系统平均厂用电率由调整前的1.038%降至调整后的0.733%，下降了

0.305个百分点，下降幅度达29%。若以全年发电量70亿度计算，可节省厂用电2135万度，节能效果显著。

表4 5号、6号锅炉脱硫系统平均厂用电率 单位：%

项目	调整前（1—3月平均）	调整后（4—8月平均）	全年平均
5号锅炉	1.028	0.776	0.839
6号锅炉	1.060	0.728	0.811
全厂	1.038	0.733	0.810

5 结论

1）通过调整2台锅炉入炉煤含硫量的配煤方式，在燃煤含硫基本保持稳定的情况下，脱硫系统厂用电率由1.079%降至0.936%，提高了脱硫系统运行经济性。

2）通过对脱硫系统进行不同负荷最大含硫试验，确定了不同负荷下脱硫效率及循环浆液泵最佳运行组合，将单台锅炉脱硫系统中循环浆液泵运行数量由原来的3~5台逐渐调整为2台，不仅降低了耗电设备用电率，而且实现了循环浆液泵效率最大化。

3）在5号机组停运检修时，对吸收塔浆液喷嘴及支管进行了清理疏通，降低了循环浆液泵运行出口压力，有效提高了脱硫系统运行液气比，满负荷情况下吸收塔适应含硫量由0.87%提升到1.24%。

4）通过调整2台机组配煤方式、减少循环浆液泵运行数量、清理吸收塔浆液喷嘴和支管，2019年全厂脱硫系统平均厂用电率由调整前的1.038%降至调整后的0.733%，下降了0.305个百分点，下降幅度达29%。若以全年发电量70亿度计算，可节省厂用电2135万度，节能效果显著，对同类电厂节能降耗、降本增效具有借鉴意义。

参考文献：

[1]余昭,何育东,李兴华,曹陈军.石灰石-石膏法串联脱硫塔系统[J].热力发电,2016,45(02):91-95.

[2] 胡燕宾.湿法脱硫系统节能降耗研究[J].科学技术创新,2019(34):52-53.

[3]王刚.火电厂脱硫节能降耗技术的改进[J].科技创新与应用,2016(25):162.

[4]贾西部.湿法脱硫超低排放工艺路线的探索[J].工业锅炉,2021(01):41-45.

[5] 李皎,廖国权,马殿学.石灰石-石膏湿法脱硫系统节能降耗探讨[J].电力科技与环保,2014,30(03):51-54.

[6]许智莹,陈婷,刘凌.降低脱硫厂用电率的创新探索与实践[J].上海节能,2020(08):906-910.

[7]牛拥军,宦宣州,李兴华.燃煤电厂烟气脱硫系统运行优化与经济性分析[J].热力发电,2018,47(12):22-28.

[8] 李珍兴,刘翔宇,李春玉,王毅佳,张明法,张洪涛.论火电厂脱硫节能降耗技术的改进措施[J].节能,2019,38(03):95-97.

[9]戴迎根.关于火电厂脱硫节能降耗技术的改进策略[J].山东工业技术,2018(10):168.

[10] 郭欣.降低湿法脱硫系统的电耗分析[J].山西电力,2009(03):19-24.

[11] 程永新，胡玲玲. 湿法脱硫系统的节能降耗优化措施[J]. 浙江电力,2014,33(08):35-39.

[12] 祁聪.电厂湿法烟气脱硫系统运行过程节能降耗分析研究[J].科技创新与应用,2017(13):99.

[13]罗跃彬.石灰石-石膏湿法脱硫装置节能运行技术研究[J].节能,2020,39(09):78-81.

[14]夏季,彭鹏,华志刚,陆潘,张成,陈刚.燃煤电厂分磨掺烧方式下磨煤机组合优化模型及应用[J].中国电机工程学报,2011,31(29):1-8.

[15]成黎明.降低660MW机组湿法烟气脱硫系统厂用电率措施[J].科技与企业,2015,(20):182.

[16] 李迎军.浅析火电厂燃煤机组脱硫厂用电率控制[J].设备管理与维修,2021(02):156-157.

作者简介：

徐鹏（1972），大学本科，高级工程师，主要从事火力发电厂安全生产及经营管理工作，E-mail：xupeng6406741@sina.com

严剑文（1974），大学本科，高级工程师，主要从事火力发电厂生产管理工作，E-mail：yanwen7613@163.com

吴顺（1981），大学本科，高级工程师，主要从事火力发电厂集控运行管理工作，E-mail：183660301@qq.com

基于模糊层次分析的高压变电站网络攻击预算评估方法研究

肖勇才，杨良翰，李俊，徐健，刘旷也

（国网江西省电力有限公司电力科学研究院，江西 南昌 330096）

摘要：高压变电站的安全防护水平，一方面取决于电力公司的考量、其受到的威胁程度，以及对应的资产价值，另一方面，面对可控的威胁，变电站的应对策略和防护水平取决于拥有的防御设备数量。因此，应当根据每个变电站的状态和投资率及其重要性来估计这些对策的质量。本文研究基于模糊层次分析的高压变电站网络攻击预算评估方法，将变电站分为四个不同的组进行检查：地缘战略、工业战略、自动化和控制系统以及易受攻击的系统。根据模糊层次分析法(FAHP)的决策方法，给出各变电站的防御成本函数，包括软硬件设备、数据传输电缆和电缆屏蔽层的优化布线。从所提出的防御方法来看，变电站所使用的通信电缆和硬件设备的最优路径比其他情况更重要。通过改变变电站 2 号和变电站 4 号的标准权重，3 号策略的防护预算需求对比其他策略排名第一，约占总防护预算的 49.5%，比 S4 号策略需要多 11.2%的防护预算。除此以外，本文还提供了敏感性分析来检查各种因素的影响以及确认结果的准确性。

关键词：智能电网；高压变电站；网络攻击；网络防御；模糊层次分析过程

1 概述

变电站自动化系统的网络安全威胁包括物理方面和软件方面[2][14]。最近几年，由于电网的数字化改造，变电站逐渐变为远程访问的模式，相对应的网络攻击威胁也有所增加[34][48]。智能电网的网络威胁愈演愈烈，这其中的原因有很多。首先，如今电网的发展伴随着先进的计量系统，该系统给智能电网带来了未知的网络安全威胁和漏洞风险[38]。其次，我们应该认识到网络攻击比物理攻击更容易进行。物理攻击需要物理工具真实存在，而网络攻击可能是基于计算机的[31][4]。第三，（智能电表）智能计量设备在局域网中与智能家居和能源管理系统中的其他计量设备互联互通。这使的智能电网面临远程控制威胁[9]。第四，过去的网络安全经验表明，如果系统从一开始就没有得到充分的预防和防御，网络攻击可能非常严重且难以处理[6]。同时，攻防之间的相互作用是一个非常复杂的过程，几乎不可能考虑的面面俱到。为简单起见，攻击级别由攻击方可以成功更改的测量数量来描述[19]。由于攻击方和防御方的目标是最大化资产损失和最小化损失，攻击方和防御方可以制定不同的资源分配策略。高压变电站的保护通常最少，但这并不意味着他们能承受的住高强度攻击的风险，原因其实在于除非他们受到攻击，否则就不会在相关方面投入足够的预算[13]。相关风险可以通过智能化的特殊手段以及智能安全漏洞来进行评估。安全条例可能决定变电站的保护和防御措施水平，但在某些情况下，现有的政府法规或财务标准也可能改变这一水平[28][36]。系统的使用寿命也会影响防御措施的性能，从而影响防御的决策水平，并决定系统的使用量及其修复时间[2]。同时，防御方法的有效性以及与高压变电站保护方法的结合对于评估变电站自动化系统高安全性的有效方法并做出相应决策是必要的[22]。有了足够的攻击资源，攻击方可能渗透到具有多级控制的各种变电站电网，并向本地现场设备发送虚假命令[3][49]。对于关键基础设施的任何保护，所投入的成本必须基于所用设施和设备的重要性[40]。对于防火墙、网关和隔离区等由供应商提供的安全设备，每个设备都包含如何使用的规定[17]。此外，网络防御解决方案会影响交换信息的速度和时间延迟，并且通常需要对系统进行更改。

符号表

B_{max}	从现场测量中获得的侵入散射场值
B_{avg}	从模拟中获得的侵入散射场值
C_C	远程通信容量（bit/s）
d	对结果的影响
f	屏蔽源距离（m）
M	矩阵
P	概率/功率 (W)
R	目标函数
S_k	成对比较矩阵的每一行
t	屏蔽层厚度（m）
W	带宽 (Hz)
W_g	重量
α	脆弱系数
λ	脆弱系数
μ_T	导磁率
σ_T	电导率
i	选项
j	标准
K	行号
N	噪声/目标
S	信号
BA	攻击预算
BD	防御预算

EMC *电磁兼容*
IEEE *电气和电子工程师学会*

然而，如果不分配足够的预算来确保设备的安全，对应网安防护手段就没办法更新迭代[23]。为了有效保护智能电网中变电站的自动化系统，应分析信息流量的速率[24]。异常检测、入侵检测和入侵防御系统用于识别和阻止攻击并防止其发展[44]。防御方有必要对攻击的影响做好预先的反应；因为攻击常常会随着防御水平的变化而增强[20]。接入互联网的这些安全设备常被认为是不可靠区域。因此，应该对与这些不可靠区域的通信进行分区、监控和控制[25]。攻击方可能会修改他们使用远程访问工具的手段，或使用智能远程守卫程序，智能远程隧道来通过防火墙[1]。因此，针对此类攻击，应采取预防措施来防止执行非法程序[53]。然而，为了提升智能电网应对网络攻击的最大防护能力，防护方要以消除系统中可能出现的漏洞风险来分配其有限的防护资源[16]。 由于SCADA中心的测量数据和从变电站接收的信息缺乏安全性，这容易引起安全攻击，因此，变电站的线路和断路器被切断这种信息也难以辨别[26]。到目前为止，已经进行了一些研究来为电网的网络安全提供解决方案，其中一些最重要的已经被提及。

Sun等人回顾并讨论智能电网中的网络设备以及网络安全和行业行动的规定[37]，总结了当前最新的安全设备和安全防护形式。此外，还描述了目前无法解决的网安风险和下一步的工作计划。HaSan等人确定了高压电站中解决攻防问题和实现电网网络安全的关键[15]。他们发现，详尽的分析在计算上无法识别高强度的攻击和防御。而智能化部署防御资源能显著的减少消耗，时间效率和准确率上都能大大提升。 Xi-ang 和 Wang尝试用最优的预算分配[46]，来最大限度地减少受负载再分配攻击带来的悲观影响。他们通过基于 IEEE 系统的各种攻击状态的博弈论方法对攻击和放大相互作用进行建模。结果证实所提供的方法是有用的。Xiang等人提出了幂律分布的网络攻击事件模型[47]。该研究分别基于马尔可夫和静态博弈的连续攻击和个体攻击。此外，他们提出了一种评估电力系统充足性的整体方法。他们发现，针对有限资源的分配实施有效的网络安全措施有助于提高信息物理系统的总体充足性。 Poudel 等人开发了一种基于OPAL-RT、SEL 351S系统、高运算计算机的实时网络系统[32]。他们通过优化功率密度研究了两种不同的缓解方案，通过重新配置系统以恢复正常状态。此外，在他们的工作中，检查了实时网络攻击对多机系统的影响，以了解生产损失和电压稳定性。他们发现该平台适用于控制实验和实时模式的稳定性。Tripathi等人提供了设计时方法来映射和调查随机 Petri 网的安全性[39]。他们对一个核电站评估了方法性能。结果表明，信息物理系统的早期安全建模是一个突出的问题，需要有一个原则性的框架来建模和运行评估另一个类似的计划。他们用控制理论考虑了多次网络攻击。结果表明，发电机的无功和有功功率分别上升了16.5%和0.13%。Zhou等人通过网络安全框架为不良数据分析提供了非对称因子修改模式与虚假数据注入攻击[53]。他们测量了实时多并发和因素错误的数据输入处理。他们的模型能够修改具有平衡和不平衡参数的攻击。此外，它还可以防止破坏参数攻击的可能性，可以考虑使用最先进的隐身模式。电网防御问题可以通过考虑网络和物理协同攻击来解决。他们提供了负载再分配攻击的离散模型，以简化基于对偶性的高级方法的使用，以及包括攻击后缓解操作的后果和意义。通过在IEEE 14总线和IEEE RTS79系统上进行测试，确认了它们的建模准确性。Sengan等人通过将PTDI视为通过基于代理的方法显示度量的攻击[35]，调查了智能电网物理层中虚假数据网络攻击的总体情况。他们将提出的模型的生产力与先进的监督深度学习模型进行了比较，发现通过重放网络攻击，错误数据检测的准确性提高了约20%。

在实践中，用于防御和预防网络攻击的预算往往是有限的，因此可能无法实现完整的保护策略。因此，确定最合适和最佳的网络防御设备以最大限度地减少网络攻击的影响是十分有用的。由于问题的复杂性以及在确定电网的脆弱性和安全性时存在不同的选项和各种定量和定性标准，可以使用分层方法。本论文的目的是调查和确定保护高压变电站免受网络攻击的重要性。考虑了四种不同的变电站：地缘战略、工业战略、自动化和控制系统以及易受攻击的变电站。根据模糊层次分析法（FAHP）的决策方法，给出各变电站的防御成本函数，包括软硬件设备、数据传输电缆和电缆屏蔽层的优化布线，方法假设防御方和攻击方之间同时做出决策，并且利用敏感性分析来检查各种因素的影响以及确认结果的准确性，希望该结果对电力系统的设计人员和工程师以及网络攻击专家有用。

2 理论方法

每个变电站在智能电网中都扮演着重要的角色。一些变电站可以使用防火墙和入侵检测系统以及密码学特征来进行网络防御和安全，而其他变电站仅使用防火墙。但是，提高安全级别会导致安全成本增加[32]。通过分析变电站的安全级别及其在智能电网中的重要性，攻击方可以使用策略来瞄准变电站，从而在电网中制造一系列事件[42]。高压变电站按应用可分为四类：地缘战略变电站、工业战略变电站、从自动化和控制系统的角度来看的变电站以及易受攻击的高压变电站[51]。地缘战略高压变电

站由于地理位置特殊，距离国家中心较远，容易受到外国网络攻击。在这些变电站中，保护电信和通信设备以及优化电缆布线以防止电磁波对敏感控制和电子设备的影响是当务之急[7]。对于主要用于石油和天然气行业的工业战略变电站以及发电厂和输电变电站，其硬件和软件部门的安全防护预算优先于其他项目。此外，由于在第三类变电站的自动化中使用了IT，为了防止网络攻击，需要在其中使用软硬件防御设备[39]。最后，在易受攻击的高压变电站中，大部分安全防护预算应分配给通信设备和电缆的最佳布线，以及编码、加密和认证等保护和软件设施[12]。一个具有N个目标的成功概率函数被认为可以显示攻击方-防御方的关系。攻击方有BA的总预算或信用（作为攻击源），而防御方有BD的总预算或信用来防御。一旦攻击方和防御方将他们的预算分配给 N 个目标，攻击成功的概率就确定了。因此，脆弱程度确定如下[12]：

$$P_i(BA_i) = 1 - \exp(-\lambda_i \cdot BA_i) \quad (1)$$

其中，BA_i 和 λ_i 分别表示攻击的预算或投资和漏洞系数（表示攻击的难度级别）。请注意，漏洞系数可以通过与攻击的每个阶段相关的对策和防御来确定。此外，攻击成功的概率随着电网的脆弱性和攻击来源的增加而增加，这符合网络安全的原则。防御方的漏洞证明了成功攻击的概率。防御方投资的脆弱性（攻击成功的概率）随着 D_i 率的增加而降低，计算公式为[45]：

$$P_i(BD_i) = \exp(-\alpha_i \cdot BD_i) \quad (2)$$

其中，BD_i 和 α_i 分别指资产 (i) 的最少防御资源和脆弱性系数。因此，利用资产的攻击方和防御方漏洞，对第 i 个目标，成功攻击的概率可以表示如下[12]：

$$\begin{aligned} P_i(BA_i,BD_i) &= P_i(BA_i) \cdot P_i(BD_i) \\ &= [1 - \exp(-\lambda_i \cdot BA_i)] \cdot [\exp(-\alpha_i \cdot BD_i)] \end{aligned} \quad (3)$$

因此，每个目标中风险的总体关系可以通过将攻击概率和攻击后果相乘来定义。此外，系统的整体风险可以定义为[41]：

$$R_i(BA_i,BD_i) = \sum_{i=1}^{N} P_i(BA_i,BD_i) \times d_i \quad (4)$$

其中，d_i 是对目标的影响。请注意，当攻击成功时，d_i 是造成的伤害或目标损失的成本。目标网格风险等级受主要防御方和攻击方脆弱性以及每个目标的伤害的影响。很明显，可以通过提高防御源和/或减少攻击源来降低风险。公式 (4) 符合博弈论，是一个只有两个玩家的零和游戏。因此，目标函数可以定义为防御方和攻击方对资源的最优分配，关系如下[41]：

$$\begin{aligned} &\text{Min}(\text{Max}(R)) = \\ &\quad \text{Min}\ \left[\text{Max}\ \left(\sum_{i=1}^{N} P_i(BA_i,BD_i) \times d_i\right)\right] \end{aligned} \quad (5)$$

，限定条件为 $\begin{cases} BA_i \geq 0 \\ BD_i \geq 0 \end{cases}$ 时

经验丰富的攻击方可以用较少的投资攻击高优先级目标。然而，为了降低系统的脆弱性和整体风险，防护方必须通过分配足够的资源来保护重要性高的中心。根据每个变电站的应用，所需的网络防御供应和实际上的防御预算数额会有所不同。

2.1 防护方法

智能电网有多层网络，每一层网络和所使用的技术都指明了一条容易受到攻击的路径。提高变电站的自动化水平将增加控制单元的潜在风险。为了在高压变电站中提供适当的防护，需要尽可能的减少人力物力成本。如今，大多数电网的控制系统都没有足够的测量标准来确保免受网络或物理攻击，这使得该系统非常容易受到攻击。本文采用电缆保护器、软件、硬件和布线的方法来提高高压变电站的安全等级。在所有金属材质的外壳中，电磁兼容性（EMC）问题是设计的基础。蓄意和破坏性地以噪声或信号的形式向电气和电子系统产生电磁能量会导致出于犯罪目的而对系统造成破坏、干扰或损坏。同时，系统中用于承载信息的电缆和包含显示信号、测量和传输命令的电缆被认为是敏感电缆，会受到现有干扰场的影响。以下等式表示电磁兼容性与散射干扰场之间的关系[12]：

$$EMC \propto \frac{\sum_{k=1}^{p} \left[\alpha_1 \cdot \left(B_{p,\max}^{k} - \Delta B_{p,\max}^{k}\right) + \alpha_2 \cdot \left(B_{p,avg}^{k} - \Delta B_{p,avg}^{k}\right)\right]}{\alpha_{1\max,S} + \alpha_{2\max,S}} \quad (6)$$

，限定条件为 $\begin{cases} 1 \leq \alpha_1 \leq 10 \\ 1 \leq \alpha_2 \leq 5 \\ \alpha_2 \leq \alpha_1 \end{cases}$ 时

其中，$B_{\max}$ 和 B_{avg} 分别表示从现场测量和模拟中获得的侵入散射场值。ΔB^k 模拟场减少方法。在使用共模去除虚拟导体的情况下，对于所有 k 值，$\Delta B_{p,\max}^{k}$ 和 $\Delta B_{p,avg}^{k}$ 都是恒定值。然而，在使用导管的情况下[12]，可以从以下等式获得 ΔB^k：

$$\begin{cases} \Delta B^k = 20 \times \log\left(\dfrac{B_{out}^{k}}{B_{in}^{k}}\right) \\ \Delta B^k = 3.34t \times \sqrt{\mu_r \cdot \sigma_r \cdot f} + 168 - 10 \times \log\left(\dfrac{\mu_r \cdot f}{\sigma_r}\right) \end{cases} \quad (7)$$

其中，t、f、μ_r 和 σ_r 分别表示屏蔽层厚度、源到屏蔽层的距离以及屏蔽材料的磁导率和电导率。ΔB^k（或屏蔽效能）是描述屏蔽在减少发射电磁波方面的效能的量。

另一方面，由于网络攻击的发生可能导致信息发送方式出现噪声和错误，因此需要降低风险率，并在信号传输中使用信道编码确认信息的传递。电信信道的容量可以通过香农公式获得[8]：

$$C_C = W \times \log_2\left(1 + \frac{P_S}{P_N}\right) \quad (8)$$

其中，W、P_S和P_N分别代表带宽（Hz）、信号

功率（W）和噪声功率（W）。根据上述等式，要获得显着的容量，除了使用信道编码外，一般没有其他方法。为此，在数字传输系统中，总是采用信道编码来增加频谱增益，降低系统风险的可能性。网络攻击对通信系统的影响和使用编码的影响如图 1 所示。屏蔽通道比非屏蔽通道更安全，屏蔽通道的容量比非屏蔽通道传递更多信息。此外，防火墙和虚拟专用网络，以及路由器、以太网交换机和网关等设备（通过通信协议防止未经授权的入侵）被用作变电站网络防御的硬件设备。必须考虑成本、电压降和 EMC 等标准，以便在变电站实现最佳路由。换言之，相关路径应远离电源变压器等干扰场产生源。此外，应考虑价格和电压降来完成最小路线。防护费用范围见表1

表1 防护费用价格范围.

项目	价格范围 ($)
硬件装备	3200-8200
软件防御	920-2200
最佳路由	5200-7200
屏蔽通信电缆	1200-4200

2.2 模糊层次分析过程

在本文中，FAHP 方法用于基于多准则决策的高压变电站防御成本最小化。在这种方法中，一个复杂的情况被分解成更小的部分，然后将这些组件放置在一个层次结构中，并根据每个变量的重要性分配主观判断，然后识别出最重要的变量。因此，首先要正确确定选择标准，确定每一项的价值。所提出方法的基础是基于成对比较。图2说明了本文提出的层次分析方法，以确定每个因素的权重。分层树具有以下三层[30]：

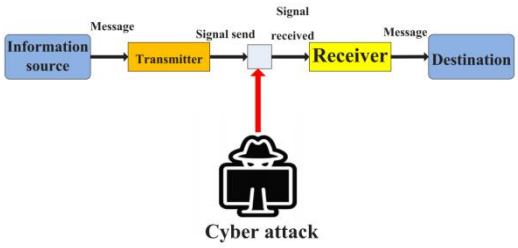


图1 网络攻击对通信系统的影响以及使用编码的影响

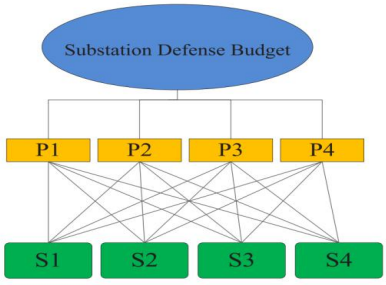


图2 用于确定防护预算的层次结构树

(1) 目标层：确定安全防护预算数额；

(2) 标准层：包括具有特定战略的地理区域的变电站、用于重要和战略性行业的变电站、出于技术考虑和控制系统的变电站、具有电信风险和信号的易受攻击的变电站；

(3) 选项层：包括网络安全中的保护、软件、硬件和通信电缆的最优路径选择等基本因素。

由于口头判断比明确的答案更容易做出决定，因此在决策中使用模糊概念更为重要。Chang方法主要用于使用模糊三角数的模糊层次分析。模糊层次分析法中定义的模糊数见表2。使用三角模糊数的配对比较矩阵用作 $M=(1,m,u)$[41]:

$$\begin{cases} M_1 \times M_2 = (l_1 \times l_2, m_1 \times m_2, u_1 \times u_2) \\ M_1 + M_2 = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2) \end{cases} \quad (9)$$

利用决策者的意见，可以根据多个决策者的意见形成由三角模糊数构成的两两比较矩阵如下[43]：

$$\tilde{A} = \begin{bmatrix} (1,1,1) & \left(a_{12}^{l}, a_{12}^{m}, a_{12}^{u}\right) & \cdots & \left(a_{1n}^{l}, a_{1n}^{m}, a_{1n}^{u}\right) \\ \left(\frac{1}{a_{21}^{u}}, \frac{1}{a_{21}^{m}}, \frac{1}{a_{21}^{l}}\right) & (1,1,1) & \cdots & \left(a_{2n}^{l}, a_{2n}^{m}, a_{2n}^{u}\right) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \left(\frac{1}{a_{m1}^{u}}, \frac{1}{a_{m1}^{m}}, \frac{1}{a_{m1}^{l}}\right) & \left(\frac{1}{a_{mn}^{u}}, \frac{1}{a_{m2}^{m}}, \frac{1}{a_{m2}^{l}}\right) & \cdots & (1,1,1) \end{bmatrix} \quad (10)$$

表2 模糊层次分析法中定义的模糊数[33].

Equal	Weak advantage	Not bad	Preferable	Good
(1,1,1)	(1,2,3)	(2,3,4)	(3,4,5)	(4,5,6)
Fairly good	Very good	Absolute	Perfect	
(5,6,7)	(6,7,8)	(7,8,9)	(8,9,10)	

对于成对比较矩阵的每一行，S_k 定义如下：

$$S_k = \sum_{j=1}^{n} M_{kj} \times \left(\sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} M_{ij} \right)^{-1} \quad (11)$$

其中，k、i 和 j 分别表示行号、选项和标准。下一步是确定 S_k 值相对于彼此的大小程度。一般来说，确定 M_2 相对于 M_1 的大小程度可以由[50]Zhang等人（2015）的研究成果进行计算：

$$V(M_1 \le M_2) = \begin{cases} 0 & l_2 \ge u_1 \\ 1 & m_2 \ge m_1 \\ M_1 \cap M_2 = \dfrac{l_1 - u_2}{(m_2 - m_1) + (l_1 - u_2)} & 0.W \end{cases} \quad (12)$$

最后，通过对权重向量进行归一化，得到归一化的权重[29]：

$$Wg = \left[\frac{d(A_1)}{\sum_{i=1}^{n} d(A_i)}, \frac{d(A_2)}{\sum_{i=1}^{n} d(A_i)}, \cdots, \frac{d(A_n)}{\sum_{i=1}^{n} d(A_i)} \right]^T \quad (13)$$

从上述等式获得的权重是确定的权重。重复这个过程，得到所有矩阵的权重。

3 结果与讨论

如前所述，本文根据以往的数据和经验，基于专家的知识和教育数据，确定了四种类型的高压变

电站抵御网络攻击的重要性。考虑的四个子站包括地缘战略 (P1)、工业战略 (P2)、自动化和控制系统 (P3) 和易受攻击 (P4)。使用通过 FAHP 方法从调查和分析中获得的信息，所需的预算份额计算了高压变电站的各类网络防御。此外，还研究了四种屏蔽（S1）、软件（S2）、硬件（S3）和路由选择（S4）策略。将结果作为四个不同变电站以及四种不同策略的相对标准的成对比较矩阵进行检查和讨论。表3显示了标准相互比较的矩阵。每个变电站相对于自身的权重等于(1, 1, 1)，称为Equal condition。变电站 P4 相对于 P1 和 P3 的权重为 (2, 3, 4)，被认为条件不错。此外，变电站 P4 相对于 P2 的权重为 (4, 5, 6)，认为状态良好。此外，每个变电站与其他变电站相比的准则评估表明，变电站P3相对于P2的权重为Preferable condition ((3, 4, 5))。还发现，变电站 P1 相对于 P2 和 P2 相对于 P1 的权重被认为是相等的条件。表4给出了四种变电站的每个标准的策略两两比较结果。对于变电站 P1，策略 S1 和 S3 是 Equal 标准。此外，策略 S1 和 S3 相对于策略 S2 是优选标准。还发现策略 4 相对于策略 1 和 3 的权重具有弱优势标准。此外，策略 S4 相对于策略 S2来说是非常好的标准。

表3 标准相互比较的矩阵

	P1	P2	P3	P4
P1	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(0.25,0.33,0.5)
P2	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.17,0.2,0.25)
P3	(1,2,3)	(3,4,5)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)
P4	(2,3,4)	(4,5,6)	(2,3,4)	(1,1,1)

表4 四种类型变电站的每个标准的策略成对比较结果

地缘战略变电站（P1）

S1	(1,1,1)	(3,4,5)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)
S2	(0.2,0.25,0.33)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.14,0.16,0.2)
S3	(1,1,1)	(3,4,5)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)
S4	(1,2,3)	(5,6,7)	(1,2,3)	(1,1,1)

工业战略变电站（P2）

S1	(1,1,1)	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)
S2	(1,1,1)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.33,0.5,1)
S3	(2,3,4)	(3,4,5)	(1,1,1)	(1,2,3)
S4	(1,2,3)	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)

自动化控制系统变电站(P3)

S1	(1,1,1)	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(0.33,0.5,1)
S2	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)	(0.2,0.25,0.33)	(0.33,0.5,1)
S3	(2,3,4)	(3,4,5)	(1,1,1)	(1,2,3)
S4	(1,2,3)	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)

防护能力弱的变电站(P4)

S1	(1,1,1)	(1,2,3)	(0.33,0.5,1)	(0.33,0.5,1)
S2	(0.33,0.5,1)	(1,1,1)	(0.25,0.33,0.5)	(0.17,0.2,0.25)
S3	(1,1,1)	(2,3,4)	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)
S4	(1,2,3)	(4,5,6)	(1,2,3)	(1,1,1)

对于战略产业变电站(P2)，战略S1和S2是平等标准。此外，策略S3相对于策略S4和策略S4相对于策略S1和S2具有弱优势标准的权重。此外，策略3相对于策略S1和S2的权重分别为Not bad和Preferable标准。还发现在变电站P3中，策略S3相对于策略S2具有优先权准则。此外，在变电站P4中，策略S4相对于策略S2具有良好的标准。图3显示了选项相对于标准的最终权重。根据最终值，通信电缆的布线对所考虑变电站的网络防御预算的评估影响最大。原因是电缆的成本，特别是它们在连续导管中的使用以防止场效应。在优化电缆布线之后，下一个优先事项是变电站自动化的硬件防御成本，例如防火墙、路由器交换机和入侵检测系统。下一个优先事项是屏蔽通信电缆，根据以往的经验，这将使变电站的成本增加约15%。正如预期的那样，单独的软件成本并不高。

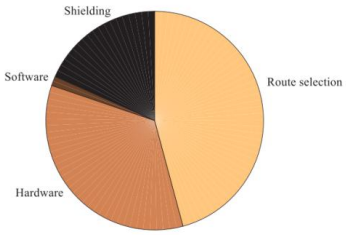


图3 策略相对于标准的最终权重

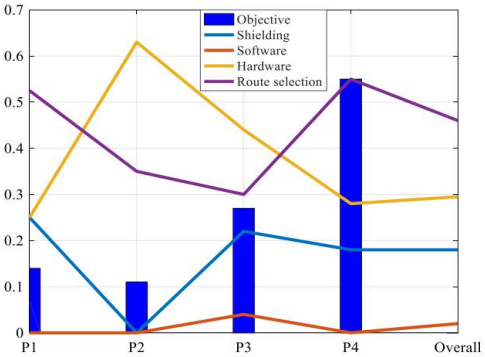


图4 关于计算的最终权重的敏感性分析

为了确认所呈现结果的准确性，敏感性分析用于研究标准转移权重对策略排名变化的影响。为此，每个标准的权重与其他标准的权重成对移动，并通过计算选项的最终权重，检查其最终排名的变化。图4描述了关于计算的最终权重的敏感性分析。可以看出，通信电缆策略（S4）的最佳路由是防御网络攻击的安全防护预算中的首要任务。还发现，

所有策略都有自己的排名。进行了另外两项敏感性分析以研究标准权重转移对策略排名变化的影响。一是自动化控制系统高压变电站和脆弱高压变电站权重转移的敏感性分析，二是工业战略高压变电站和脆弱高压变电站的敏感性分析。这两种敏感性分析的结果显示在图1和2中。分别为5和6。从图5可以看出，通过移动变电站P3和P4的标准的权重，所需安全防护预算中考虑的策略的排名没有改变。还发现，策略S1、S2和S3的份额分别增加了6.5%、92.3%和8.5%。然而，战略S4在所需安全防护预算中的份额下降了11.4%。此外，通过改变变电站P2和P4标准的权重，战略S2和S3在所需安全防护预算中的份额分别增加了61.5%和43.7%。然而，战略S1和S4在所需安全防护预算中的份额分别下降了56.8%和20.5%。还发现，通过对变电站P2和P4的标准权重进行转移，战略S3（硬件设备）在其他战略中安全防护预算需求排名第一，约占安全防护预算总额的49.5%。需要比策略S4（路由选择）多11.2%的防御预算。然而，在初始条件下，战略S4在总安全防护预算中的份额比战略S3高11.6%（见图6）。因此，设计人员必须在实施拟议战略的成本和安全防护预算数额之间取得合理的平衡。

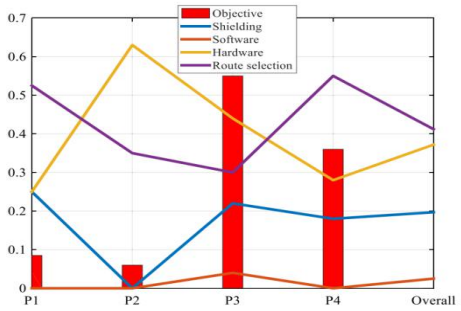


图5 变电站 P3 和 P4 的重量位移敏感性分析

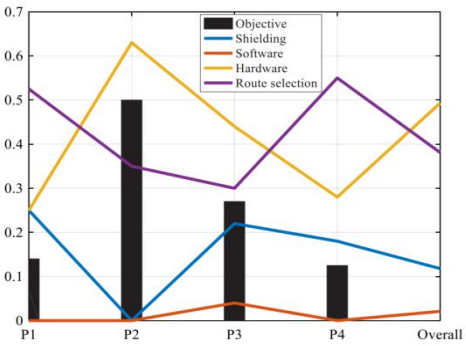


图6 变电站P3和P4的重量位移敏感性分析

4 结论

在本文中，研究并确定了保护高压变电站免受网络攻击的四个不同变电站（地缘战略、工业战略、自动化和控制系统以及弱防护能力）的重要性。基于FAHP的决策方法，给出了各变电站的防御成本函数（包括硬件和软件设备以及数据传输电缆和电缆屏蔽的优化布线）。此外，防御方和攻击方之间同时做出决定。结果发现，通信电缆的布线对所考虑变电站的网络防御预算的评估影响最大。其他主要结果如下

•每个变电站相对于自身的权重是Equal的标准。此外，变电站P4相对于P1和P3的权重被认为是Notbad标准；

•变电站P4相对于P2的权重被认为是Good标准。此外，变电站P3相对于P2的权重是Preferable标准。此外，变电站P1相对于P2和P2相对于P1的权重被视为Equal标准；

•对于变电站P1，策略S1和S3是Equal标准。此外，策略S1和S3相对于策略S2是Preferable标准；

•策略S3相对于策略S4和策略S4相对于策略S1和S2具有Weak advantage标准。此外，策略S3相对于策略S1和S2的权重分别为Not bad和Preferable标准；

•单独的软件成本不高，没有硬件也没有太大的用处。此外，战略S4在安全防护总预算中的份额比策略S3高11.6%；

•通过移动变电站P2和P4的标准权重，策略S3在其他策略中安全防护预算需求排名第一，约占安全防护总预算的49.5%，比策略S4多11.2%。

在接下来的研究中，可以研究顺序决策。希望该结果对电力系统的设计人员和工程师以及网络攻击专家有用。但是，设计者必须在实施拟议战略的成本和安全防护预算之间取得合理的平衡。

参考文献：

[1]Aghajani, G., Ghadimi, N., 2018. Multi-objective energy management in a micro-grid. Energy Rep. 4, 218－225.

[2]Akbary, P., et al., 2019. Extracting appropriate nodal marginal prices for all typesof committed reserve. Com-put. Econ. 53 (1), 1－26.

[3]Alghamdi, M.I., 2021. Determining the impact of cyber security awareness on employee behaviour: A case of Saudi Arabia. Mater. Today: Proc.

[4]Alghamdi, M.I., 2021. 确定网络安全意识对员工行为的影响：以沙特阿拉伯为例. Mater. Today: Proc..

[5]Arend, I., et al., 2020. Passive- and not active-risk tendencies predict cyber security behavior. Comput. Secur. 97, 101964.

[6]Bayer, B., Marian, A., 2020. Innovative measures for integrating renewable energy in the german medium voltage grids. Energy Rep. 6, 336－342.

[7]Chang, D.-Y., 1996. Applications of the extent analysis method on fuzzy ahp. European J. Oper. Res. 95 (3), 649 – 655.

[8]Chen, D., Wawrzynski, P., Lv, Z., 2021. Cyber security in smart cities: A review of deep learning-based applic-ations and case studies. Sustainable Cities Soc. 66, 102655.

[9]Ebrahimian, H., et al., 2018. The price prediction for the energy market based on a new method. Econ. Res.-Ekonomska Istraživanja 31 (1), 313 – 337.

[10]Fan, X., et al., 2020. High voltage gain DC/DC converter using coupled ind-uctor and VM techniques. IEEE Access 8, 131975-131987.

[11]Fardad, N., Soleymani, S., Faghihi, F., 2018. Cyber defense analysis of smart grid including renewable energy resources based on coalitional game theory. J. Intell. Fuzzy Systems 35 (2), 2063 – 2077.

[12]Gunduz, M.Z., Das, R., 2020. Cyber-security on smart grid: Threats and potential solutions. Comput. Netw. 169, 107094.

[13]Hamian, M., et al., 2018. A framework to expedite joint energy reserve payment cost minimization using a custom-designed method based on mixed integer genetic algorithm. Eng. Appl. Artif. Intell. 72, 203 – 212.

[14]Hasan, S., et al., 2020. A game-theoretic approach for power systems defense against dynamic cyber-attacks. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 115, 105432.

[15]Hassani, H., et al., 2021. Unsupervised concrete feature selection based on mutual information for diagnosing faults and cyber-attacks in power systems. Eng. Appl. Artif. Intell. 100, 104150.

[16]He, J., et al., 2021a. An immune-based risk assessment method for digital virtual assets. Comput. Secur. 102, 102134.

[17]He, H., et al., 2021b. A tri-level optim-ization model for power grid defense with the consideration of post-allocated DGs against coordinated cyber – physical attacks. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 130, 106903.

[18]ji, Z., et al., 2021. Harmonizing safety and security risk analysis and prev-ention in cyber – physical systems. Process Safety Environ. Protect. 148, 1279 – 1291.

[19]Judge, M.A., et al., 2021. Price-based demand response for household load management with interval uncer-tainty. Energy Rep.

[20]Lallie, H.S., et al., 2021. Cyber security in the age of COVID-19: A timeline and analysis of cyber-crime and cyber-attacks during the pandemic. Comput. Secur. 105, 102248.

[21]Lee, C., Han, S.M., Seong, P.H., 2020. Development of a quantitative meth-od for identifying fault-prone cyber security controls in NPP digital i&c systems. Ann. Nucl. Energy 142, 107398.

[22]Li, L., et al., 2021a. Cyber attack estimation and detection for cyber – physical power systems. Appl. Math. Comput. 400, 126056.

[23]Li, H., et al., 2021b. Energy conscious management for smart metro traction power supply system with 4G comm-unication loop. Energy Rep. 7, 798 – 807.

[24]Li, X., et al., 2021c. Optimization and control of cyber – physical power systems under dual-network intera-ctive cascading failure. Control Eng. Pract. 111, 104789.

[25]Marahatta, A., et al., 2021. Priority-based low voltage DC microgrid sy-stem for rural electrification. Energy Rep. 7, 43 – 51.

[26]Maruf, M.H., et al., 2020. Adaptation for sustainable implementation of smart grid in developing countries like Bangladesh. Energy Rep. 6, 2520 – 2530.

[27]Mehrpooya, M., et al., 2021. Numerical investigation of a new combined ene-rgy system includes parabolic dish solar collector, stirling engine and thermoelectric device. Int. J. Energy Res.

[28]Meng, F.-Y., et al., 2016. An approach for group decision making with interval fuzzy preference relations based on additive consistency and consensus analysis. IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 47 (8), 2069 – 2082.

[29]Pambudi, G., Nananukul, N., 2019. A hierarchical fuzzy data envelopment analysis for wind turbine site sele-ction in Indonesia. Energy Rep. 5, 1041 – 1047.

[30]Peng, J., et al., 2021. Anti-disturbance TUBE MPC method of wireless power transmission system based on state feedback. Energy Rep. 7, 411 – 418.

[31]Poudel, S., Ni, Z., Malla, N., 2017. Real-time cyber physical system testbed for power system security and control. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 90, 124 – 133.

[32]Ruth Naveena, N., et al. , 2021. Linear and non-linear neutrosophic pentad-ecagonal fuzzy number with symm-etry. Mater. Today: Proc.

[33]Saeedi, M., et al., 2019. Robust optimization based optimal chiller loading under cooling demand

uncertainty. Appl. Therm. Eng. 148, 1081－1091.
[34]Sengan, S., et al., 2021. Detection of false data cyber-attacks for the asse-ssment of security in smart grid using deep learning. Comput. Electr. Eng. 93, 107211.
[35]Shamel, A., et al., 2016. Designing a PID controller to control a fuel cell voltage using the imperialist compe-titive algorithm. Adv. Sci. Technol. Res. J. 10 (30).
[36]Sun, C.-C., Hahn, A., Liu, C.-C., 2018. Cyber security of a power grid: State-of-the-art. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 99, 45－56.
[37]Tan, S., et al., 2021. Attack detection design for dc microgrid using eigen-value assignment approach. Energy Rep. 7, 469－476.
[38]Tripathi, D., et al., 2021. Model based security verification of cyber-physi-calsystem based on Petrinet: A case study of nuclear power plant. Ann. Nucl. Energy 159, 108306.
[39]Uuganbayar, G., et al., 2021. Optimis-ation of cyber insurance coverage with selection of cost effective se-curity controls. Comput. Secur. 101, 102121.
[40]Wang, Y.-M., Chin, K.-S., 2011. Fuzzy analytic hierarchy process: A logar-ithmic fuzzy preference programming methodology. Internat. J. Approx. Reason. 52 (4), 541－553.
[41]Wang, Q., et al., 2021. Methods of cyber-attack identification for power systems based on bilateral cyber－physical information. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 125, 106515.
[42]Wu, F.-G., Lee, Y.-J., Lin, M.-C., 2004. Using the fuzzy analytic hierarchy process on optimum spatial allocation. Int. J. Ind. Ergon. 33 (6), 553－569.
[43]Wu, G., Li, M., Li, Z.S., 2021. A gene importance based evolutionary algo-rithm (GIEA) for identifying critical nodes in cyber－physical power systems. Reliab. Eng. Syst. Saf. 214, 107760.
[44]Xiang, Y., Ding, Z., Wang, L., 2015. Power system adequacy assessment with load redistribution attacks. In: 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). IEEE.
[45]Xiang, Y., Wang, L., 2017. A game-theoretic study of load redistribution attack and defense in power systems. Electr. Power Syst. Res. 151, 12－25.
[46]Xiang, Y., Wang, L., Zhang, Y., 2018. Adequacy evaluation of electric power grids considering substation cyber vulnerabilities. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 96, 368－379.
[47]Ye, H., et al., 2020. High step-up interleaved dc/dc converter with high efficiency. Energy Sources, Part A: Recov. Util. Environ. Effect. 1－20.
[48]Yu, D., Ghadimi, N., 2019. Reliability constraint stochastic UC by consid-ering the correlation of random varia-bles with copula theory. IET Renew. Power Gener. 13 (14), 2587－2593.
[49]Zhang, Y., Wang, L., Xiang, Y., 2015. Power system reliability analysis with intrusion tolerance in SCADA systems. IEEE Trans. Smart Grid 7 (2), 669－683.
[50]Zhang, F., et al., 2020. Simulation comparison of SSE and TDOA met-hods for UHF direction finding of partial discharge in substation area. Energy Rep. 6, 416－423.
[51]Zhao, Z.-g., et al., 2021. Control-theory based security control of cyber－phy-sical power system under multiple cyber-attacks within unified model framework. Cognit. Robot. 1, 41－57.
[52]Zhou, T.L., et al., 2021. Multi-agent-based hierarchical detection and miti-gation of cyber attacks in power systems. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 125, 106516.

作者简介：
肖勇才（1987），男，江西吉安人，硕士研究生，高级工程师，主要研究电力系统网络安全，E-mail：441028731@qq.com

双碳目标下江西新能源参与电力中长期交易模式及品种设计

宫嘉炜

（国网江西省电力有限公司经济技术研究院，江西 南昌 330096）

摘要：随着“双碳”目标的提出和新一轮电力市场改革的深入，构建适合我国新能源消费的电力市场体系已成为一个迫切需要解决的问题。本文首先介绍了江西电网的概况，并对江西省的能源结构和新能源利用进行了研究。然后，以江西省中长期市场为研究对象，分析了现阶段江西省的中长期分时交易制度。然后，在上述研究的基础上，重点分析了江西省新能源消费面临的问题。最后，结合江西省的实际情况，提出了分三个不同阶段新能源的参与中长期电力市场交易模式和品种设计。

关键词：中长期电力市场；新能源消纳；交易模式；中长期交易

1 引言

2022年5月30日，国家发改委、国家能源局发布《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》。方案提出[1]，要实现到2030年风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上的目标，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系。2022年1月28日，国家发改委发布《关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见》。意见提出[2]，完善适应高比例新能源的市场机制，有序推动新能源参与电力市场交易，以市场化收益吸引社会资本，促进新能源可持续投资。建立与新能源特性相适应的中长期电力交易机制，引导新能源签订较长期限的中长期合同。

在“双碳”目标的背景下，风光等新能源要继续大规模和高质量发展，“十四五”期间，新增装机容量将大幅增加。同时，随着电力体制的不断改革，新能源进入市场是未来电力市场的发展趋势。

目前，许多学者都进行了相关研究。文章[8]参考智利电力市场，设计了一种适应云南省高比例水电的市场机制。文章[9]介绍了中国电力改革的历史和广东省电力市场。江西省的能源结构一方面火电占比极高，另一方面新能源快速发展。这与中国南方的电力市场试点省份的情况差异巨大，很难照搬它们的经验建立适应江西情况的电力市场。由此，本文立足于江西省的自身情况，借鉴江西省已有的中长期分时段交易的经验，参考双碳目标的时间节点，分三阶段设计江西省新能源参与电力中长期市场交易模式。

2 江西电网概况

2.1 电源结构

截至2021年底，江西省总装机容量3454万千瓦，其中水电345万千瓦，占10%；煤电2226万千瓦，占64.5%；风力发电523万千瓦，占15.2%；光伏发电359万千瓦，占10.4%。江西省的供电结构如图1所示。目前，江西电网最大峰谷差已达到约55%，并在逐步扩大。电源调节灵活性严重不足，调峰形势严峻。

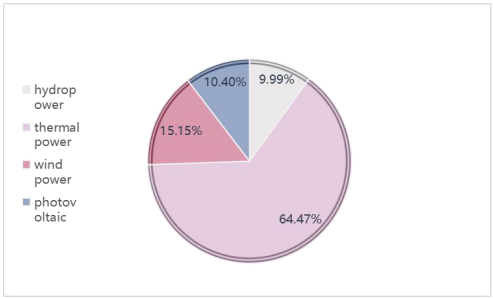


图1 2021江西省的电力结构

截至2021年底，江西省累计发电1425.2亿千瓦时；2021年1-12月，江西省主要有四种发电类型，其中火电发电量1233.5亿千瓦时，约占江西发电量的86.55%，是江西省最大的发电类型。江西省每种电力类型的发电比例如图2所示。

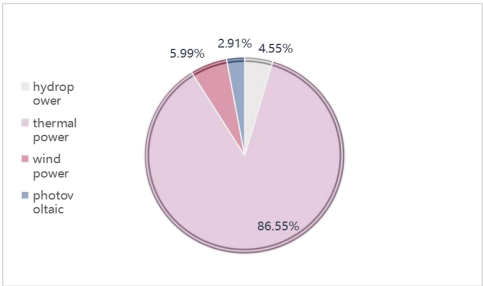


图2 2021江西省每种电力类型的发电百分比

2.2 江西省可再生能源发展概况

江西省可再生能源资源包括水力发电、风力发电、光伏发电、生物质能发电、地热能等。在现有技术下，除水电开发程度较高外，其他可再生能源的开发利用率相对较低，大多数能源的利用率低于30%。江西省各种新能源的利用和开发情况见表1。

表1 江西省各类新能源利用开发情况

类型	技术可开发量		现已开发量		开发比例（现已开发量/技术可开发量）（%）
	产能（万千瓦）	电量（亿千瓦时）	产能（万千瓦）	电量（亿千瓦时）	

水电	577.97	197.6	497	49.15	86.9
风电	310	62	67	10.42	21.61
光伏发电	1000	120	43	0.61	4.3
生物质能发电	1685	398.3	36.71	8.7	2.18

江西省新能源应用主要包括风能利用、太阳能利用和生物质能利用，均以发电形式为主。截至2022年第一季度，江西省全口径发电装机4980.85万千瓦，新能源发电项目总装机1614.85万千瓦。新能源占江西省全口径发电总装机容量的32.43%。其中，风力发电548.16万千瓦（11%），光伏发电942.22万千瓦（18.9%），生物质能发电124.47万千瓦（2.5%）。在后续工作中，我们将积极有序地推动新能源发展。预计到2025年，风力发电、光伏发电和生物质发电的装机容量将分别达到700万千瓦、1100万千瓦和100万千瓦以上。图3显示了近六年江西省新能源的概况。

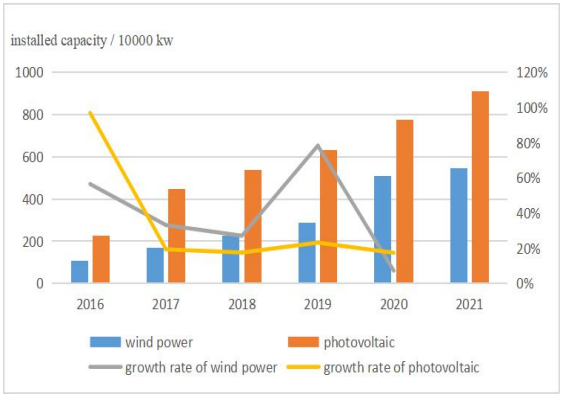


图3 2016-2021江西省新能源概况

2.3 新能源的利用情况

2021年风电、光伏发电量合计183.9亿千瓦时，占江西总发电量的11.31%，新能源电力略有弃风。其中，风电发电量103.6亿千瓦时、同比增长46.53%，弃风0.14亿千瓦时，利用率99.87%；光伏发电量80.3亿千瓦时、同比增长30.11%，利用率100%。

3 现阶段江西省电力中长期市场概况

3.1 电力中长期交易市场体系

2021年江西电力中长期市场分为常规交易模式（不分时段）和时段交易模式。常规交易按照“中长期双边协商为主、月度集中交易为辅”的原则，建立年度、月度、月内交易模式。时段交易按照“中长期双边协商为主、月度集中交易为辅”的原则，建立年度、月度、月内交易模式，参与时段交易的电力用户和售电公司适当放宽偏差考核标准。考虑江西省以火电为主的电源结构和负荷的季节性特点，按月进行时段划分，以各时段电量为标的，形成各个独立的子市场，各市场分别组织交易，独立结算。在双边自主协商的基础上，通过竞价或滚动撮合方式形成时段价格，合理反映峰谷价差、体现电能分时价值，如图4所示。

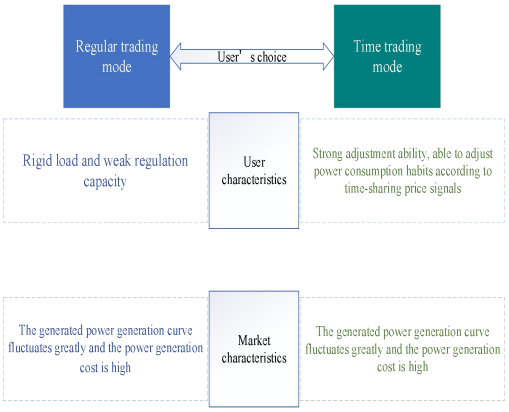


图4 用户自主选择参与市场模式

3.2 市场运行情况

现阶段，各时段交易价格上限为：高峰时段价格上限为0.61元/千瓦时；尖峰时段价格上限为0.91元/千瓦时；平价时段价格上限为0.4143元/千瓦时；低谷时段价格上限为 0.245 元/千瓦时。2021年度夏季高峰期间参与时段交易用户转移尖峰负荷35万千瓦（最大缺口量164万千瓦），分时段交易对缓解江西省内供需紧张的贡献度达21%。目前，江西省仅有996家电力用户参与市场化分时段交易[4]。

4 江西省新能源消纳存在问题分析

4.1 市场化程度不够

在“双碳”目标的背景下，风光等新能源要继续大规模和高质量发展、“十四五”期间，新增装机将大幅度提升。与此同时，随着电力体制的不断改革，新能源入市是未来江西电力市场的发展趋势。2021年10月15日，江西电力交易中心组织完成江西省首笔绿色电力交易，但由于一些原因，绿色电力交易未能继续下去。目前，江西省大部分新能源主要通过固定电价进行消纳，市场参与意识较为薄弱，无法进一步通过市场进行有效消纳。

4.2 新能源发电装机占比持续提升

2021年，江西省风力发电装机容量547.00万千瓦，年均增长44.4%。2021年，风力发电量占新能源发电量比重最高，占比为44.0%。2021年，江西省太阳能发电量80.31亿千瓦时，占新能源发电量比重为34.1%。期末装机容量达911.15万千瓦，成为规模最大的新能源发电品种。

预计到2025年，江西电网全口径风电、光伏发电装机容量分别为830万kW、1100万kW，全口径新能源占比将由2019年的24.2%提升至28.2%，新能源发电装机占比持续提升。

随着新能源装机占比逐渐提高，新能源发电具有随机性、波动性和间歇性，中长期交易实施带曲线交易，但并不能满足新能源发电的特性，例如，

某购电主体交易时段为标准化的峰时段、谷时段、平时段、尖峰时段，则导致6:00～18:00时段有发电能力的光伏项目无法参与谷时段、平时段的交易，且参与的峰时段、尖峰时段的电量块按时间段分解为电力平直曲线，也不符合光伏项目的出力曲线形状。粗放的交易方式增加了新能源企业签约曲线的难度。

4.3 现阶段中长期交易品种有限

2021年江西省主要电源还是煤电，装机占比46.6%，统调煤电装机占比64.5%，发电量占比86.55%。如何促进新能源消纳的同时保障江西省煤电的利益是一个重要的问题。但现阶段中长期交易品种有限，主要是与电力用户的电量交易，缺乏能够处理好火电和新能源之间的关系的机制，很难在促进新能源消纳的同时保障江西省煤电的利益。

5 江西省新能源分阶段参与电力中长期交易机制研究

随着江西省新能源装机比例的不断提高，本文第三章提出的问题会日益严重。建立促进江西省新能源消纳的电力市场机制刻不容缓。

本文以国家政策为主，并参考国外新能源发展趋势，同时考虑江西新能源发展来设计新能源参与市场的近期目标、中期目标和长期目标规划。因此，江西电力市场可划分为发展初期、发展中期和成熟期三个阶段。江西电力市场阶段图见图5所示。

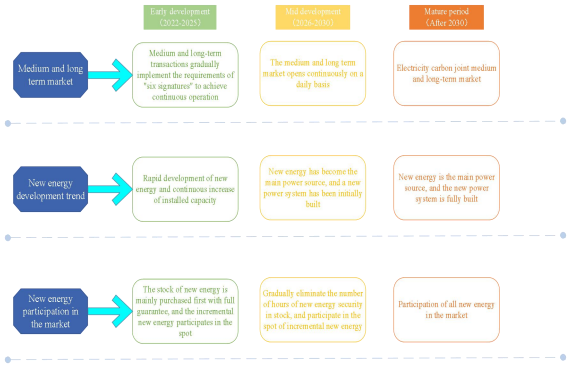


图5 江西电力市场阶段图

5.1 发展初期

在发展初期（2022-2025），中长期市场将逐步落实“六签”要求，实现持续经营。这一阶段，新能源和市场发展还处于起步期，应该用尽可能简单的机制激励新能源发电投资，促进新能源消纳。综上所述，在发展初期，统调风电、光伏企业和电网企业之间将建立“保量保价”的新能源交易，根据江西省能源局的相关文件，将在完全市场化的新能源企业和确定发布的电力用户之间建立绿色电力交易。同时，考虑到江西省超高燃煤发电比例的特殊情况，应增加新能源和火电转让交易这一中长期交易类别。新能源和火电的转移是指D-3之前，当新能源的预计产量增加时，火电机组以较低的价格与其交易，以提高自身收入，增加新能源的消耗。当新能源的预计产量下降时，火电机组可以与其进行交易，以弥补不足的产量。如图6所示。

中长期交易按年度（多年）、月度和“D-3”日进行，如图7所示。中长期交易方式包括双边协商、集中竞价交易、挂牌交易及滚动撮合交易等。交易标的为月电量4时段，日电量24时段。

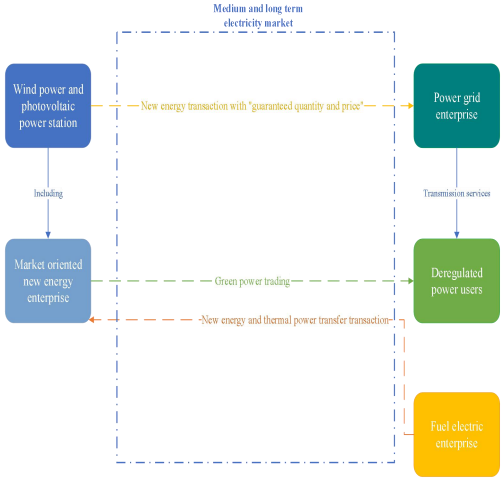


图6 江西发展初期新能源参与中长期市场的机制

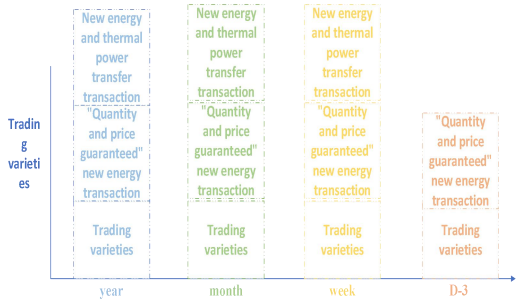


图7 江西发展初期新能源参与的中长期市场框架

5.2 发展中期

在中期发展阶段（2026-2030年），中长期市场按日运营。同时江西新能源成为主要电源，新型电力系统逐步建成。同时江西着力大比例新能源参与现货，逐步取消存量新能源保障小时数，不断完善促进新能源消纳的市场机制，电能量、辅助服务、容量市场衔接机制进一步完善。这一阶段新能源参与中长期电力市场交易品种主要有：“保量溢价”新能源交易、绿色电力交易、新能源与火电转让交易、源荷互动交易、一次调频。

碳达峰、碳中和目标下，光伏和风电等间歇性新能源比例升高并逐步成为主体电源、各种类型储能的成本逐渐降低，需求侧响应将更全面地参与系统调节，需要推进中长期交易向更短周期延伸、向更细时段转变。所以中长期市场交易标的是日电量24小时。

中长期交易以年度（多年）、月度、“D-3”日24时段交易为周期开展。中长期交易方式包括双边协商、集中竞价交易、挂牌交易及滚动撮合交易等。

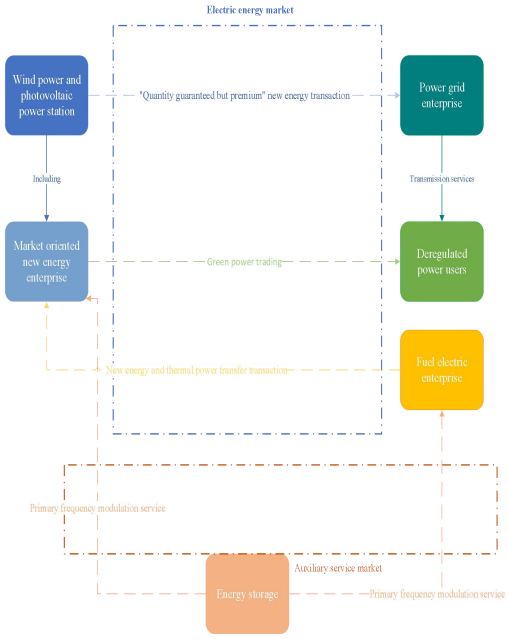


图8 江西发展中期新能源参与中长期市场的机制

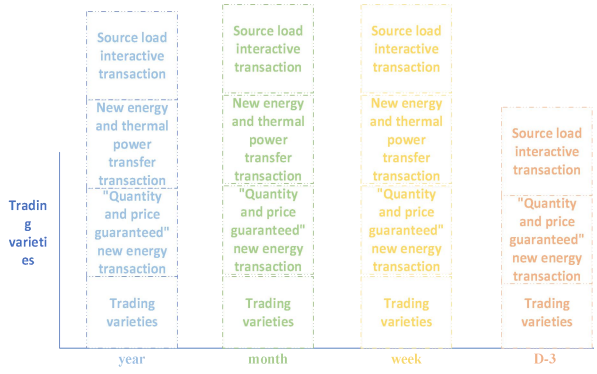


图9 江西发展中期新能源参与的中长期市场框架

5.3 成熟期

成熟发展期（2030年后），配套政策完善，市场主体多元化；跨省、跨区市场已经形成。中长期市场将建成中长期电－碳联合市场。此时，将此时将开展电—碳联合中长期市场下的绿色电力交易、新能源与火电转让交易、源荷互动交易和一次调频。

中长期交易以年度（多年）、月度、“D-3”日24时段交易为周期开展。中长期交易方式包括双边协商、集中竞价交易、挂牌交易及滚动撮合交易等。

发电侧市场主体包括：统调燃煤发电、新能源企业、新型市场主体等。

用电侧市场主体包括：售电公司（含拥有配电网运营权的售电公司）、工商业电力用户、电网企业、新型市场主体等。

交易标的：日电量24时段。

5.3.1 电－碳联合市场

“电－碳”联合市场的本质在于，将能源转型与气候变化问题量化分解为促进清洁能源发电与减少碳排放两个关键目标，并将两个目标统筹规划、统一设计，通过联合市场机制确保两个目标同步达成。

“电－碳”联合市场不仅能够实现能源清洁转型与碳减排的核心效益，还可通过有效引导清洁发电投资以及市场联合协同，创造经济、社会、环境等多元效益。

随着电力市场不断深入和新技术（如区块链技术）的引入，电力双边交易方式和弹性负荷调度越来越受到关注。下文采用双边交易方式开展市场主体之间的碳电交易，将负荷侧的电力用户纳入市场范畴。

首先，根据碳权市场的碳权核发和配额机制锁定电力出清阶段的电力市场主体预核发与配额的碳权量；其次，结合实际电力交易的执行情况，分别修正电力市场交易的执行电量和核发与配额的碳权量。

电碳交易出清阶段锁定电力交易电量和各市场主体的碳权量，根据出清的电力交易中标信息可以确定交易市场主体的电力交易量价，同时根据锁定的碳权量和历史碳权交易供需情况可以确定碳权市场价值。

在基于高比例新能源接入的前提下，向负荷侧电力用户开放市场，引导电力用户参与不平衡电量的消纳，碳权市场根据参与市场不平衡电量消纳的量分别核减新能源核发量并将对应碳权核发给响应不平衡电量的市场主体。获得电碳的市场主体通过参与碳权市场将碳权销售给火电机组。获得碳权的火电市场主体按碳排放量申报发电许可并参与电力交易。电碳联合市场交易机制如图10所示。

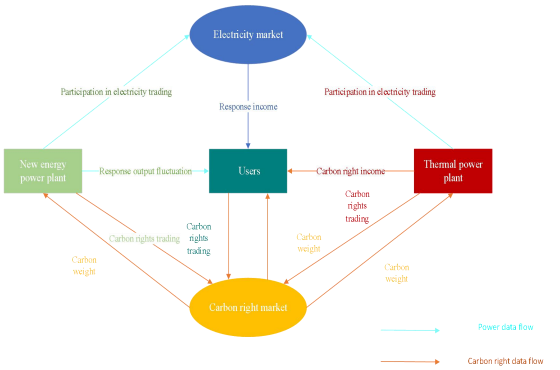


图10 电力碳联合市场交易机制

5.3.2 其他交易品种

“绿色电力交易、新能源与火电转让交易、源荷互动交易、一次调频”这四类交易品种执行发展中期的交易标的日电量24时段，不同之处在于，成熟期的中长期考虑了电碳联合交易、而发展中期的中长期市场主要考虑电力市场交易。在双边协商、集中竞价和滚动撮合交易模式下，市场环境发生变化。上述四类交易品种将按下列流程执行：

根据碳权市场的碳权核发和配额机制锁定电力出清阶段的电力市场主体预核发与配额的碳权

量；

结合实际电力交易的执行情况，分别修正电力市场交易的执行电量和核发与配额的碳权量。

电碳交易出清阶段锁定电力交易电量和各市场主体的碳权量，根据出清的电力交易中标信息可以确定交易市场主体的电力交易量价。

6 总结

现阶段江西新能源参与市场意识较为薄弱，市场竞争力有限，市场设计应充分考虑新能源主体参与市场交易，并基于新能源特点设计针对性的中长期交易品种，推动新能源入市，提高新能源消纳，是深化江西新能源参与电力市场改革的关键。

本文主要研究江西省新能源参与电力中长期交易机制设计。首先分析江西省电网概况。接着深入剖析江西省现阶段中长期电力交易机制。然后根据江西省电网概况和现阶段中长期交易机制，分析出江西省新能源消纳存在问题。最后，基于上述研究分析，设计江西省三阶段的新能源参与电力中长期市场交易机制。

本文通过设计双碳背景下三阶段的新能源参与电力中长期交易机制，并设计针对新能源的中长期交易品种，推动新能源入市，提高新能源消纳，助力深化江西新能源参与电力市场改革。

参考文献：

[1]国务院办公厅转发国家发展改革委国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知[J].中华人民共和国国务院公报,2022(17):24-27.

[2]关于加快建设全国统一电力市场体系的指导意见[J].大众用电,2022,37(02):8-10.

[3]苏毅, 新能源工程 江西省新能源发展概况. 王宏 执行主编,长江年鉴,长江年鉴社,2021,168,年鉴.

[4]陈刚,谢忠华,范琨,刘敦楠.非现货省份电力中长期分时段交易市场建设探索与实践[J].中国电力企业管理,2022(07):62-65.

[5]王涛,蒋旭光,冯树海.德国英国葡萄牙电力市场建设经验及我国电改的启示[J].上海节能,2022(06):705-715.

[6]王小昂,邹鹏,任远,赵兴泉,李鸣镝,王其兵,李宏杰,常伟.山西电力现货市场中长期与现货衔接问题及对策[J].电网技术,2022,46(01):20-27.

[7]黄龙,陈皓勇,钟佳宇,刘雨梦.促进可再生能源消纳的电力市场体系[J].广东电力,2020,33(02):10-17.

[8]C. Mu et al., "The coordination mechanism of forward market and spot market under the cost-based electricity market model for Yunnan," 2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), 2021.5.

[9]X. Zhang, W. Liu, Y. Chen, Y. Bai, J. Li and J. Zhong, "Electricity Market Design and Operation in Guangdong Power," 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2018.

作者简介：

宫嘉炜（1993），男，江西南昌，工学硕士，中级工程师，从事政策及能源研究，E-mail：imgjw@outlook.com

GIS内光信号传播及传感器布局方式研究

吴诗优[1]，郑书生[2]，钟爱旭[2]

（1.国网江西省电力有限公司南昌供电分公司，江西 南昌 330012；2.华北电力大学新，北京 102206）

摘要：光学检测法在局部放电检测领域具有不可替代的优点，但目前还未应用在实际运行的气体绝缘组合开关(gas insulated switchgear，GIS)设备上。该文首先在TracePro仿真软件中分别搭建T形、L形GIS仿真模型，在其内部设置探测面，获得探测面上的总光通量分布图(total flux map, TFM)和相对辐照度平均值(average value of relative irradiance, AVRI)，研究局放源在不同位置、不同角度时探测面上的光强分布特性。仿真结果表明：GIS内部的复杂结构对光信号造成了较大的衰减，尤其是T形GIS垂直部分腔体的转折，光强衰减约77.5%，L形GIS垂直部分腔体内的光强相比T形高50%左右。进一步提出荧光光纤的3种布局方式：在手孔盖板下、直线形紧贴外壳内壁、围绕导杆紧贴外壳内壁。通过仿真对这3种方式进行灵敏度分析，表明结合方式2和3综合布局具有更佳检测的效果。最后应用荧光光纤在GIS内开展测试，测试结果表明传感器布局方式1的2个测试结果与仿真结果平均偏差分别为9.84%和11.46%，方式2、3的平均偏差分别为11.94%、12.11%。研究成果可为GIS内光学检测法提供一定的依据。

关键词：局部放电；气体绝缘组合开关；总光通量分布图；相对辐照度平均值；布局方式

1 引言

气体绝缘组合开关(gas insulated switchgear，GIS)是电力系统中的关键设备，在世界范围内已获得广泛应用，具有占地面积小、易于安装、可靠性高的优点[1-2]。但其在安装运行的过程中难以避免会产生一些细微的缺陷，如金属微粒等长时间运行可能会导致局部放电，降低设备绝缘能力，缩短运行寿命[3]，若不及时采取检修措施可能会带来事故。

局部放电发生时会产生一些物理量，如超声、光信号、电磁波等，由此发展出了局部放电检测技术[4]。光学法作为非电量的检测方法，具有抗电磁干扰能力强、信号传输损耗小的优点[5-6]。随着光纤、光电转换技术的进步，光学法的灵敏度大大提高，出现了荧光光纤传感器、光纤超声传感器等[7-8]，目前已有研究将其应用在GIS内的局部放电检测，但依然处在试验的阶段[9]。有学者将制作的荧光光纤传感器内置在GIS手孔的盖板下面，并与特高频(ultra-high frequency, UHF)传感器组合，形成复合传感器[2]，发挥各自的优点，具有较好的效果，相比单一的UHF法综合性能更优，同时更适应GIS的运行环境。实际的GIS运行环境复杂，电磁干扰强，常规的方法必须采取相应的抗干扰措施，但光学法作为非电量的检测方法具有不可替代的优势[6]，因此将其应用在GIS内的局部放电检测具有非常广泛的应用前景。

制约光学检测法应用的瓶颈之一是传感器的安装，直接接收光信号的光学传感器只能安装在GIS内部，而光线只能直线传播，受阻挡后能量衰减严重。GIS内部结构较为复杂，对光信号传播有显著影响[10]。因此必须优化传感器布局，安装合适数量的传感器以覆盖更大区域。了解光信号在GIS内的传播特性对于传感器的布局具有重要作用。通过仿真方式更方便研究，学者们在仿真软件中搭建不同形状的GIS模型，对光信号的传播特性进行仿真，在一定程度上对模型进行了简化。文献[10]建立的GIS仿真模型未包含绝缘子，仿真结果可能与实际存在一定偏差，并且对于仿真结果也未开展相应的实验进行验证。上海交通大学许永鹏等人对GIL内的局部放电光信号传播特性进行仿真[11]，研究结果表明腔体的转折角度以及局放源的位置对光信号的传播特性影响较大，但其对GIL内部的材料表面参数进行设定后，并未通过试验来验证仿真参数设定的合理性。国外学者的研究主要集中在GIS内局部放电的电磁波传播特性的仿真[12]，以及光学检测系统的搭建[13-14]。

本文在TracePro73光学仿真软件中根据实际复杂结构的GIS搭建了1:1的仿真模型，分别研究了T形和L形GIS内光信号的传播特性，以及当局放源在不同位置、不同角度时，获得探测面上的总光通量分布图(total flux map, TFM)和相对辐照度平均值(average value of relative irradiance, AVRI)的差异。随后提出了光纤传感器的3种布局方式，并分别进行仿真对比灵敏度。最后利用制作的荧光光纤传感器对提出的布局方式进行灵敏度测试，测试结果证明了仿真结果的有效性，研究成果将为GIS内局部放电光学检测法的工程应用提供一定的依据。

2 仿真模型及设置

2.1 光通量、辐照度定义以及局放源设置

光通量是用来描述光强度的量，常用的单位有W和flux，本文使用的单位是W。辐照度是指单位面

积上的光通量大小[10]，假设以E表示，定义如下：

$$E=\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}S} \tag{1}$$

式中：P为光通量；S为被辐射面的面积。

在SF_6气体中，电晕放电的光谱受气压、电极和放电过程等的影响，但光信号的波长主要在300~500nm范围内[15]，能量主要集中在紫外光。局放源假设为一个理想光源，以一个半径为1mm的球体代替局放源，放置在高压导杆表面，假设光信号垂直球体表面以光通量的形式向各个方向均匀的辐射光线。光源的总光通量为100W，辐射的总光线数量为5000000，波长与实际电晕放电光谱保持一致，设置在紫外光频率范围，中心波长为400nm。由于实际的局放源与仿真的局放源总光通量存在一定的差别，仿真结果不能说明在某个位置实际辐射的光通量大小，但能说明在不同位置的差别。仿真软件的计算精度为10^{-15}，得到的结果有较高的计算精度。

2.2 材料设置及漫反射函数

光信号在表面的折、反射特性取决于表面参数和入射角度，为了定量描述光信号在表面的传播，应使仿真模型的表面参数更接近实际，得到的结果更加准确[10]。本文采用的是漫反射模型为双向分布函数(bi-directional distribution function, BRDF)，其描述的是以某个角度入射的光线，在以入射点为半球面单位立体角的辐照度分布情况[16]，如图 1 所示。其中θ_i、Φ_i、ω_i为入射光的仰角、方位角和立体角，θ_r、Φ_r、ω_r为反射光的仰角、方位角和立体角。

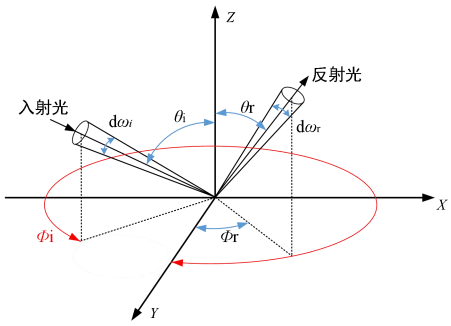


图1 双向分布函数示意图

BRDF 的定义为[16]：

$$f(\theta_i,\phi_i,\theta_r,\phi_r)=\frac{\mathrm{d}L(\theta_r,\phi_r)}{\mathrm{d}E(\theta_i,\phi_i)} \tag{2}$$

式中：dL 为单位面上以某个方向的反射光线的辐照度；dE为以某个方向的入射光线的辐照度，通过 BRDF 能定量地描述光线在表面漫反射、折射、镜面反射的关系。此外，光线入射的表面必须满足式(3)[8]

$$\alpha+R+T=1 \tag{3}$$

式中：α为吸收系数；R为镜面反射系数；T为漫反射系数。对本文建立的GIS模型，外壳和导杆材料设置为抛光并氧化的中等光滑的铝，其表面参数为：吸收系数0.3，镜面反射系数0.25，漫反射系数0.45；绝缘子材料设置为环氧树脂，其表面参数：吸收系数0.35，镜面反射系数为0.1，漫反射系数为0.55。

此外，GIS 内部的 SF_6气体也需要做相应的设置，气体的压强设置为 0.4 MPa，气体的折射率为 1.000 783。SF_6对光信号的吸收主要是在 2 个波段，一个波段是在中红外 10.482~0.638 μm，另一个波段是在 16 μm 附近[10]，不在本文设置的局放源的波长范围内，因此吸收系数可以设置为 0。

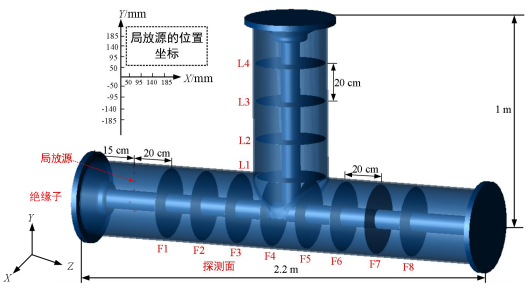
3 GIS内光信号传播特性仿真

3.1 T 形 GIS 仿真模型

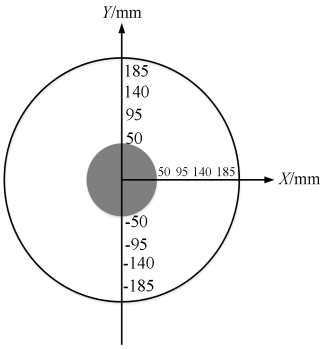
根据实际单相 T 形 GIS 并参照文献[10-11]搭建了 1:1 的仿真模型，如图 2(a)所示。高压导杆半径为 45mm，外壳半径为 190mm，外壳厚为 8mm，水平部分腔体的总长度为 2.2m，垂直部分腔体长度为 1m，腔体的末端含有绝缘子。局放源分别在 X、Y 轴的不同位置，如图 2(b)所示，在 Y轴上 8 个位置(记为 y50，y95，…y－185)，在 X轴 4 个位置（记为 x50，x95，…x185），距离最左端 15cm，距离第 1 个探测面 20cm。在 GIS 模型内的 Z轴上设置 8 个探测面(F1—F8)，在 Y轴上设置 4 个探测面(L1—L4)，所有探测面均垂直于导杆和外壳。探测面对光信号的传播没有任何影响，可以直接透射。后文通过获得探测面上的总光通量分布图(TFM)和相对辐照度平均值(AVRI)，研究光信号传播特性[9]。

3.2 局放源在不同位置的仿真结果

移动局放源的位置分别进行仿真，得到探测面的 TFM 和 AVRI。由于探测面的数量较多，因此取 F1、F5、L1 探测面为例分别代表腔体的 3 部分，TFM 的部分结果如图 3 所示，其中 E_{ij}表示坐标(i，j)处的辐照度值，局放源的位置分别为 y50、y95、y140、y185，代表从导杆表面逐渐向外壳靠近。对于 F1 探测面，当局放源逐渐靠近外壳时，上半平面的颜色逐渐变浅表明光强逐渐变弱，整个探测面的光强分布逐渐均匀，弧形区域的面积增大。因为靠近导杆时被阻挡的光线数量更多，导致直射下半平面的光线数量更少。对于 F5 和 L1 探测面也得到同样的结果，F5 上半平面因受到垂直导杆的阻挡，光强大的区域主要分布在下半平面。



(a) GIS仿真模型



(b) 局放源的位置

图2 T形GIS仿真模型及局放源位置

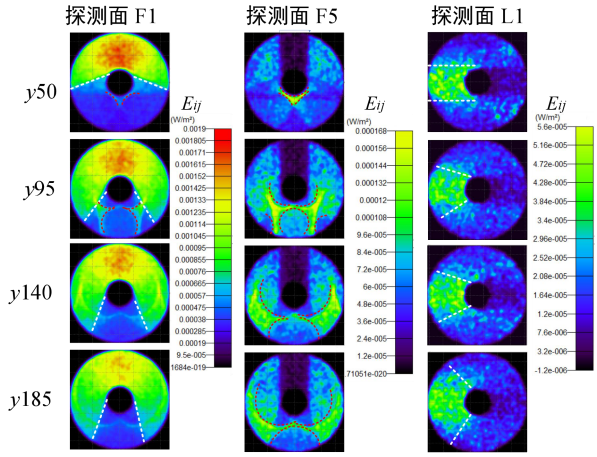
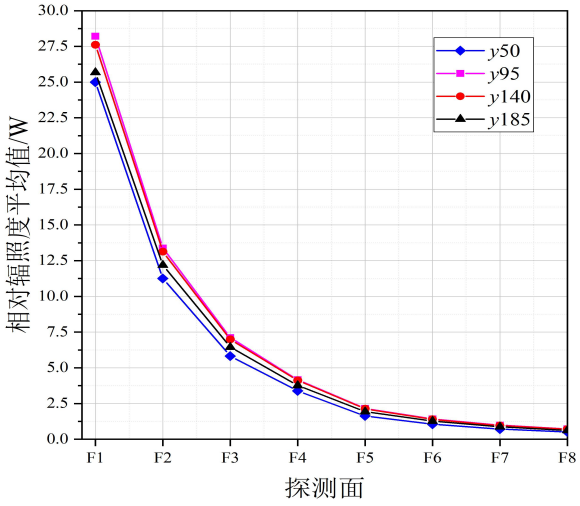


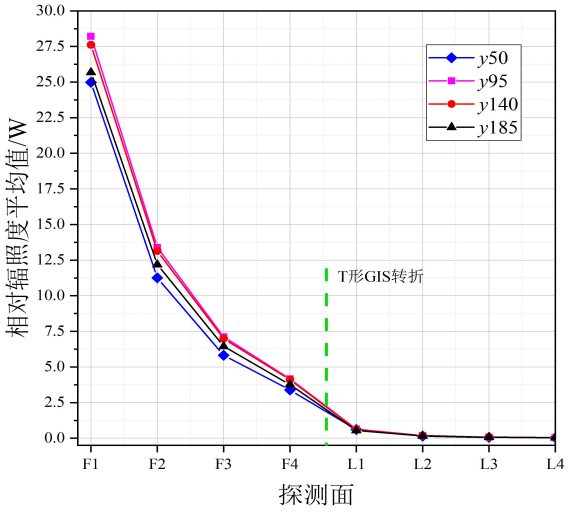
图3 探测面上的TFM

局放源在不同位置时探测面上的 AVRI 大小如图 4 所示。图 4(a)为随着局放源从导杆表面向外壳靠近过程中探测面 F1-F8 的 AVRI 大小，当局放源在位置 *y*95 时各个探测面的 AVRI 最大，但在这 4 个位置差异较小。由图可见随着局放源源和探测面距离的增大，探测面的 AVRI 衰减较快，F4 的 AVRI 为 F1 的 20%左右，探测面 F8 的 AVRI 低于 1 W。F4 与 F5 之间存在竖直导杆的阻挡，但从图中不能看出 AVRI 的陡减，实际上从数值上比较也未出现陡减，衰减大约 31.2%。原因是此时局放源和探测面的距离较大，直射光线由于衰减能量较低且数量较少，因此 AVRI 的大小主要由反射光决定。反射光的方向具有很大的随机性，因此导杆对反射光的阻挡作用不显著，主要对直射光影响大。图 4(b)为探测面 F1-F4、L1-L4 的 AVRI 大小，研究 T 形 GIS 的转折对光信号的影响，在 F4 和 L1 之间存在转折，从图中可以明显看出曲线的陡降，L1 相比 F4 的 AVRI 最大衰减了 77.5%，垂直部分的腔体光信号较难传播进去。

当局放源在导杆上的不同角度时也进行了仿真，选取位置*y*50、*x*50、*y*-50开展仿真，相邻两个位置夹角为90° 。当局放源处于这3个位置时探测面F1-F4的AVRI几乎没有差别，因此不再进行对比。取F5-F8以及L1-L4为例进行比较，得到的结果如图5所示，F5-F7的AVRI都比L1大， T形GIS的转折对光信号造成的衰减较大。对于探测面F5-F7，当局放源位于位置*y*-50时AVRI最大，位置*x*50其次，位置*y*50最小，原因是随着局放源的旋转，能够直射T形GIS垂直部分腔体的光线数量增多。对于L1-L3探测面，局放源位于这3个位置时AVRI的差异不大。



(a) F1-F8探测面上的AVRI



(b) F1-F4、L1-L4探测面上的AVRI

图4 当局放源在不同位置时不同探测面上的AVRI大小

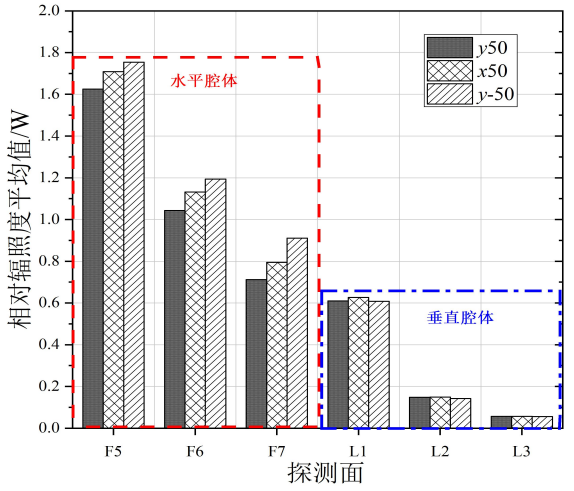


图5 当局放源在不同角度时不同探测面上的AVRI大小

3.3 L 形 GIS 仿真

根据实际的单相L形GIS并参照文献[8，10]搭建的仿真模型如图6所示，水平部分的腔体长度为1.2 m，竖直部分的腔体长度为1 m，其他所有的设置与上文一致。在水平腔体上设置3个探测面，在垂直腔体上设置3个探测面，局放源位置及探测面位置与上文一样。分别对局放源在位置*y*50、*y*95、*y*140、*y*185进行仿真，由于探测面F1-F3与上文得到的结果基本一致，此处不再赘述。研究探测面K1-K3的TFM和AVRI，并与上文T形GIS的L1-L3对比，这2组探测面的位置相同。TFM的结果如图7所示，随着局放源从导杆靠近外壳的过程，探测面K1的光强分布逐渐均匀，弧形的面积逐渐增大，与T形GIS探测面L1相比，K1右边的光强更大，因为L形GIS右端截面反射作用更强，更多的反射光入射至垂直部分腔体。对于探测面K2、K3，光强的分布较均匀，此时入射的光线几乎全是反射光，光线的能量较低。

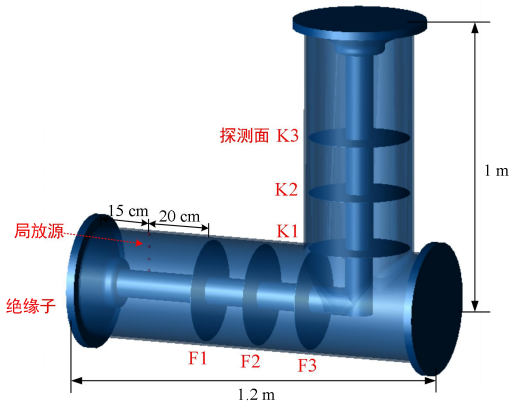


图6 L形GIS仿真模型

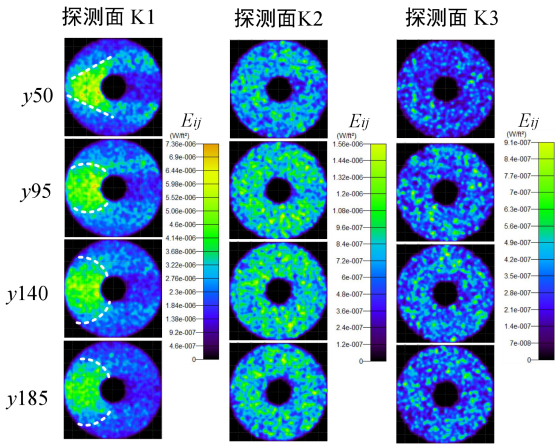


图7 探测面上的TFM

为了对比T形和L形GIS在竖直部分腔体内的光强差异，仿真研究了探测面K1—K3和L1—L3的AVRI数值大小，得到的结果如表1所示。表中的AVRI只保留2位小数，平均差异 δ 定义为：

$$\delta=\left(\sum_{i=1}^{3}(E_{\mathrm{K}}{}^{i}-E_{\mathrm{L}}{}^{i})/3\right)\times 100\% \qquad (4)$$

式中：$E_{\mathrm{K}}{}^{i}$为探测面K*i*的AVRI；$E_{\mathrm{L}}{}^{i}$为探测面L*i*的AVRI。从表1可看出，L形GIS探测面的AVRI均比T形的更大，且平均差异在50%左右，随着局放源与导杆表面距离增大，平均差异略微增大。GIS的形状对竖直部分腔体内光信号传播特性有较大的影响，原因是竖直部分腔体内的光线主要是反射光，L形GIS右端界面更多的反射光进入了竖直部分腔体，导致AVRI更大。

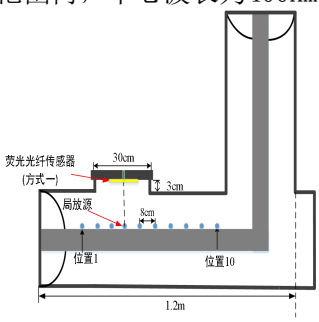
表1 L形和T形GIS垂直部分腔体内的光强对比

局放源位置	L1/W	K1	L2	K2	L3	K3	平均差异/%
*y*50	0.61	0.86	0.15	0.24	0.06	0.09	50.3
*y*95	0.64	0.94	0.18	0.28	0.08	0.12	50.8
*y*140	0.60	0.89	0.18	0.28	0.08	0.12	51.3
*y*185	0.55	0.80	0.16	0.26	0.07	0.11	55.3

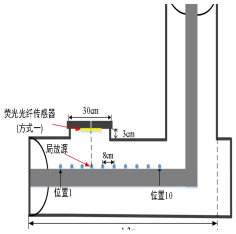
4 传感器布局方式仿真

4.1 手孔盖板处

西安交通大学韩旭涛将荧光光纤缠绕成阿基米德螺旋线形状[2]，固定在GIS手孔盖板的下方，结果表明其具有不错的检测效果，但传感器能覆盖的区域较小，受局放源的位置影响较大。本文以L形GIS为对象，对此布局方式的传感器灵敏度进行仿真研究。搭建的仿真模型如图8所示，L形GIS整体仿真模型如图8(a)所示，传感器的仿真模型如图8(b)所示。仿真模型的尺寸及局放源的位置如图9所示，手孔的直径为30cm。荧光光纤的长度为80cm，直径为1mm，材料设置为聚甲基丙烯酸甲酯(polymethyl methacrylate，PMMA)。内部的荧光物质Alexa Fluor 305 Dye是一种荧光染色剂，激发光谱主要在紫外光波长范围内，与电晕放电辐射的光信号频谱具有较高的重合度。其他仿真设置与上述一致，局放源的总光通量为100W，波长范围在紫外光频率范围内，中心波长为400nm。



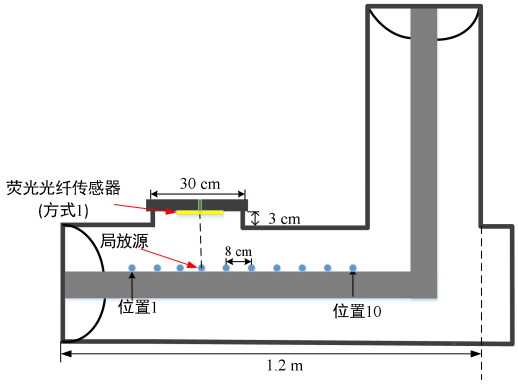
(a) GIS仿真模型



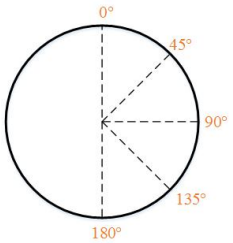
(b) 传感器仿真模型

图8 GIS和传感器仿真模型

仿真研究了局放源在导杆上不同位置及绕导杆旋转不同角度时，传感器检测信号的幅值差异，如图9所示，每个位置间隔8 cm，一共10个位置，每个位置都在导杆上表面的一条直线上，局放源每次移动1个位置。局放源在导杆上的不同角度也影响光信号的传播，本文研究了局放源在导杆上的5个不同角度，左视图如9(b)所示，由于0°~180°和180°~360°是对称的因此不重复研究，局放源每次旋转45°。在仿真时检测荧光光纤末端截面的总光通量值，此光通量值代表检测信号的强弱，并以此来表征传感器布局方式的灵敏度。



(a) 仿真模型示意图



(b) 缺陷旋转的角度

图9 GIS仿真模型及缺陷位置示意图

4.2 直线形紧贴外壳内壁

上述方式传感器能够覆盖的区域较小，为此提出荧光光纤紧贴在GIS外壳的内壁，如图10所示的方式2，光纤的长度、直径与上述一致，此布局方式光纤能够覆盖GIS内部的区域相对方式1更大。由于光纤的直径只有1mm，并且PMMA材料的绝缘性能好，对GIS内部的电场影响非常小。依然探测光纤末端截面的总光通量，仿真的结果如图11所示。

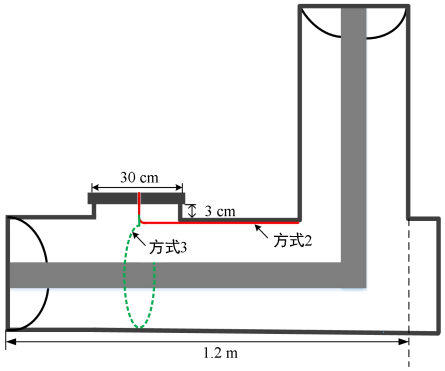


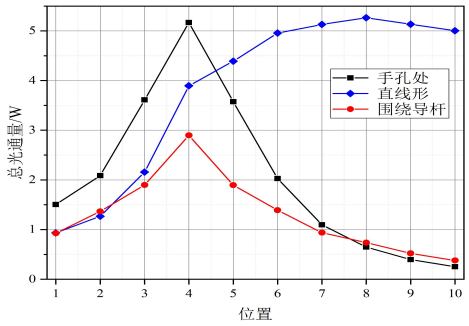
图10 传感器布局示意图

4.3 围绕导杆紧贴外壳内壁

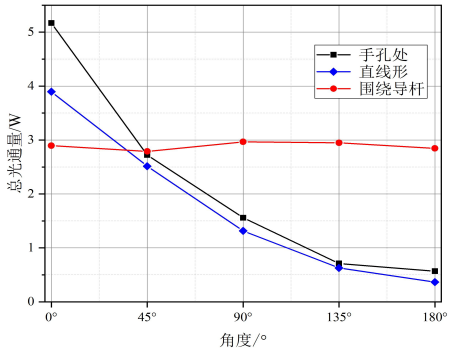
当缺陷在导杆上的不同角度时，上述2种方式由于受导杆的阻挡，检测的效果会受一定的影响，因此提出将荧光光纤围绕导杆紧贴在GIS外壳的内壁。长度、直径与上述仿真一致，局放源与光纤所贴的内壁在同一侧，如图10所示的方式3。仿真时依然探测光纤末端截面的总光通量。

4.4 仿真结果

上述3种传感器布局方式得到的仿真结果如图11所示，当局放源从位置1向位置10移动，对于方式1、2传感器检测的最大光通量均约为5.2W，方式3最大光通量约为2.8W。方式1随着距离的增大衰减较快，最小值相比最大值衰减约94.1%；方式2整体位置的光通量相比方式1、方式2都更大，能覆盖的检测区域大；方式3整体检测的光通量较小，但随着距离的增大幅值衰减相对更小。当局放源绕导杆旋转时，对于方式1、2幅值衰减均较大，如图11(b)所示，当旋转至导杆背侧时，检测的光通量均约为0.5W，由此可见导杆对于光线的阻挡影响较大；对于方式3几乎不受影响，光纤对局放源进行了全覆盖。综上可见，当局放源在导杆上的不同位置时，直线型光纤紧贴GIS外壳内壁最佳，能覆盖的区域最大；而当局放源在不同角度时，围绕导杆紧贴内壁最佳。因此，若综合方式2、3进行合理的布局，能实现在光纤长度最小的情况下达到最优的配置。



(a) 当局放源位置移动时3种传感器布局方式检测的总光通量



(b) 当局放源角度旋转时3种传感器布局方式检测的总光通量

图11 3种传感器布局方式检测的光通量变化

5 局部放电检测试验

为了对上述仿真进行验证，在实验室开展测试，将一段L形的单相GIS腔体作为对象，仿真模型

的尺寸根据此GIS尺寸搭建。利用荧光光纤作为传感器，与仿真模型一致。荧光光纤作为探头，通过带密封圈的法兰与带护套的传输光纤相连，将光信号传输至光电倍增管后连接示波器，其中光电倍增管的检测光谱为210~890nm，电压电流转换系数为1V/μA，使用直流电源供电。对传感器的布局方式1进行测试验证，将荧光光纤固定在GIS手孔盖板的下方，形状为阿基米德螺旋线。光纤长度为80cm，直径1mm，纤芯材料和内部的荧光物质与仿真中的保持一致。为了对光学法的灵敏度进行验证，采用传统脉冲电流法进行对比，从耦合电容处连接检测阻抗，并用示波器对波形进行显示，如图13所示。

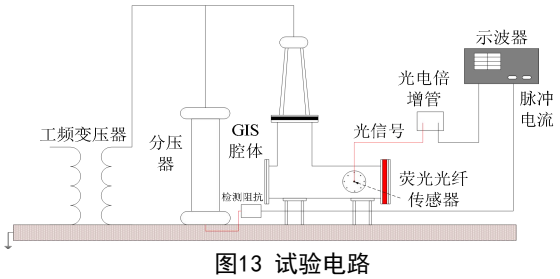


图13 试验电路

在GIS高压导杆上固定一根长度为35mm、直径为0.8mm、曲率半径为30μm的钢针作为缺陷，产生局部放电向外辐射光信号，试验的电路图如图13所示。缺陷的位置和在导杆上的角度与仿真一致，为保证每次试验的局部放电向外辐射的光信号总通量一致，每次试验结束后更换同一批次的钢针，每次施加的电压大小一致。当缺陷在位置4，施加工频电压，传感器检测到的局放信号如图14所示，脉冲电流和光电倍增管输出的电流经过示波器的50Ω匹配电阻转换为电压信号，然后进行显示。列举了2个电压下的检测结果，记录了工频电压1个周期的波形，总时间为20ms。由图14可见，光学法的波形相比脉冲电流法波形更加“平稳”，局放首先出现在负相位上[17-20]，放电信号密集但幅值小，正相位放电信号幅值更大但稀疏。经过标定，图14(a)的放电量大约为350pC，图14(b)的放电量大约为540pC。当缺陷在位置4时，逐渐降低施加的电压，进一步对比光学法和脉冲电流法的检测灵敏度，测试的结果表明，两者的灵敏度差别不大，几乎在同一电压下能检测到放电信号，但光学法更容易辨识放电信号[21-23]。然而光学法受局放源的位置影响较大[23]，增大传感器与局放源的距离，或者在光线传播途径中存在遮挡物，则光学法的灵敏度降低。

随着钢针在导杆上移动，当传感器与局放源距离较大时，为使传感器依然能检测到光信号，试验施加较高的电压，使局部放电辐射的光信号能量大[24]，经过多次测试确定施加电压为85kV(有效值)。但由于仿真的局放源与实际的局放源辐射的光信号总通量不是完全一致，为比较仿真与试验结果，对检测的光信号幅值进行归一化的处理[25]。试验时记录的光信号幅值为 ϕ_i，其

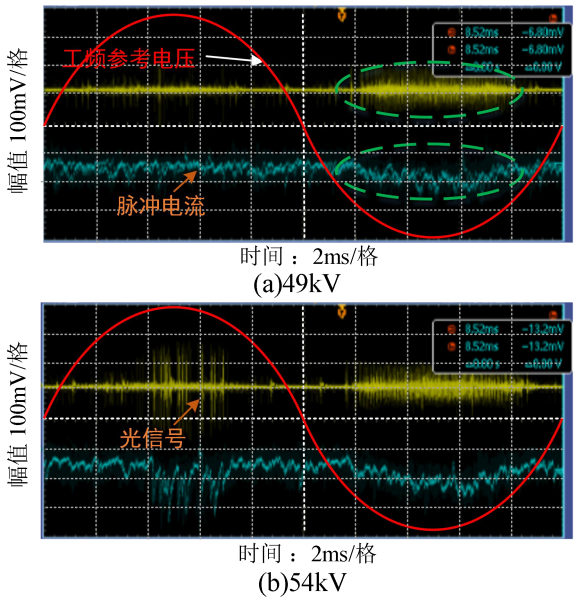
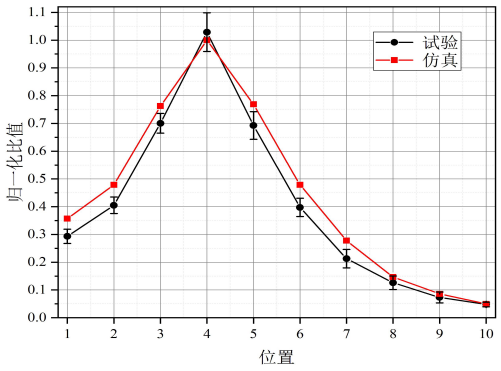


图14 试验检测结果

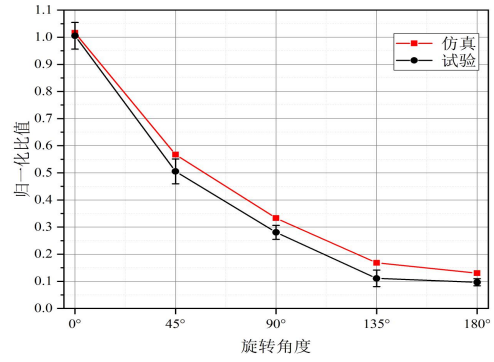
中 i 为局放源所处的位置编号，以光信号幅值的最大值为单位1，对仿真和试验的结果分别进行归一化：

$$\omega = \frac{\varphi_i}{\varphi_{j\max}} \tag{5}$$

式中 ω 为归一化的结果，$\phi_{j\max}$ 为光信号幅值的最大值。通过归一化的结果能够反映局放源在不同位置时，传感器检测信号幅值的变化趋势。为避免单次试验的随机性，钢针在每个位置开展5次测试，以均值作为最终值。



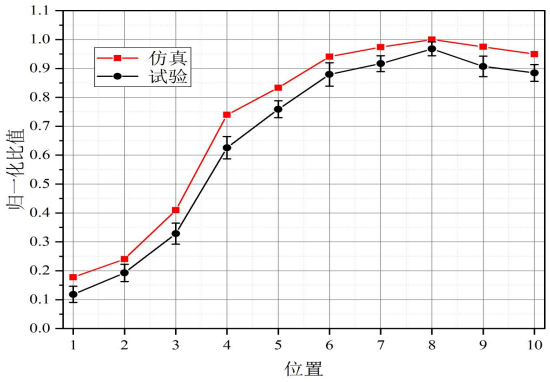
(a) 当局放源位置移动时仿真和试验归一化结果



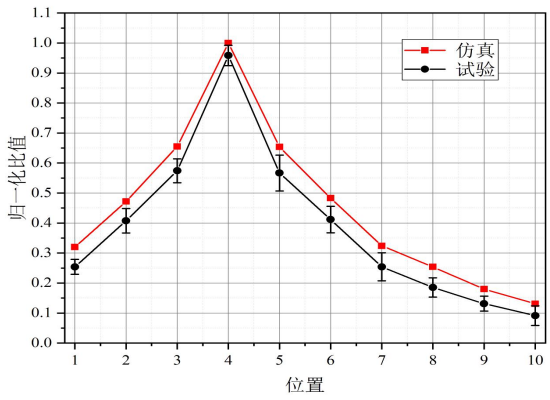
(b) 当局放源角度旋转时仿真和试验归一化的结果

图15 传感器布局方式1仿真和试验归一化的结果对比

传感器布局方式1的试验与仿真的归一化结果如图15所示，定义2条曲线的平均偏差：每个位置下仿真结果减试验结果的绝对值除以前者，所有位置求和再求平均值，最后得到百分值。经过计算，图15(a)中,2条曲线的平均偏差为9.84%，图15(b)中2条曲线的平均偏差为11.46%。偏差产生的主要原因为：每次试验不能保证辐射的光信号总通量完全一致；缺陷的位置和角度可能偏差及读数带来误差。但试验与仿真的偏差在能接受的范围内，通过试验对仿真的结果进行了验证。进一步对传感器布局方式2、3进行验证，当钢针在导杆上移动不同位置时，试验和仿真的归一化结果如图16所示，图16(a)的仿真与试验归一化结果平均偏差为11.94%，图16(b)的仿真与试验归一化结果平均偏差为12.11%。



(a)传感器布局方式2仿真和试验归一化结果



(b)传感器布局方式3仿真和试验归一化结果

图16 当局放源在不同位置时传感器布局方式2、3的仿真和试验归一化结果对比

6 结论

本文对复杂结构的T形、L形GIS内局部放电光信号的传播特性进行仿真研究，并对比了两者的差异。取L形GIS为对象对3种传感器布局方式的检测灵敏度进行分析，并在实际的L形GIS上开展试验对仿真的结果验证，有以下结论：

（1）当局放源从导杆表面向外壳内壁靠近时，探测面的光强分布都趋向于均匀，靠近导杆或者外壳时探测面的AVRI更小，不利于光信号的检测。随着局放源与探测面距离的增大，光信号衰减非常大，T形GIS水平部分腔体导杆两侧探测面的AVRI没有出现陡减，衰减了约31.2%；而垂直部分腔体转折处的2个探测面的AVRI出现陡减，衰减了约77.5%，垂直部分腔体光线难以入射进去。

（2）局放源在导杆上旋转不同角度时，对于垂直部分腔体有一定的影响。T形和L形GIS在垂直部分腔体内探测面的AVRI存在一定的差异，差距在50%左右，并且随着局放源由导杆表面向外壳内壁靠近，差距值也略微增大。

（3）对于L形的GIS提出了手孔盖板下、直线形紧贴外壳内壁、围绕导杆紧贴内壁这3种荧光光纤的布局方式，仿真结果表明：当局放源在导杆上移动距离时，方式1受影响程度最大，方式2受影响最小其能覆盖的检测区域最大；当局放源在导杆上的不同角度时，方式3的受影响程度最小。因此综合方式2、3是荧光光纤的最佳布局。

（4）基于实际的L形GIS腔体对荧光光纤的布局方式1进行验证，检测的结果表明传感器能检测到放电信号，放电首先出现在负相位，光学法相对脉冲电流法波形更加“平稳”。与仿真的结果对比，当局放源在导杆上不同位置时，3种布局方式平均偏差分别为9.84%、11.94%、12.11%；当局放源旋转不同角度时布局方式1的平均偏差为11.46%。通过试验对仿真的结果进行了验证。

参考文献：

[1]孙才新，许高峰，唐 炬，等. 检测GIS局部放电的内置传感器的模型及性能研究[J]. 中国电机工程学报，2004，24(8)：89-94.

[2]韩旭涛，刘泽辉，李军浩. 基于光电复合传感器的GIS局放检测方法研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(22)：6760-6768.

[3]刘轩东，张玲俐，谭向宇，等. 波前时间对GIS典型绝缘缺陷放电特性的影响[J]. 高电压技术，2018，44(9)：2889-2896.

[4]郭 俊，吴广宁，张血琴，等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报，2005，20(2)：29-35.

[5]MANGERET R，FARENC J，AI B，et al. Optical detection of partial discharges using fluorescent fiber[J] . IEEE Transactions on Electrical Insulation，1991，26(4)：783-789.

[6]徐 阳，喻 明，曹晓珑，等. 局部放电光脉冲测量法及与电测法的比较[J]. 高电压技术，2001，27(4)：3-5.

[7]魏念荣，张旭东，曹海翔，等. 用荧光光纤技术检测局部放电信号传感器的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版)，2002，42(3)：329-332.

[8]李 威，鲁华祥，陈天翔，等. 采用荧光光纤检测局部放电的自适应阈值方法[J]. 西安交通大学学报，2017，51(4)：59-66.

[9]LI J H，HAN X T，LIU Z H，et al. A novel GIS partial discharge detection sensor with integrated optical and UHF methods[J]. IEEE Transactions on Power Delivery，2018，33(4)：2047-2049.

[10]钱 勇，张 悦，刘 伟，等. T型GIS模型中局部放电光学信号传播特性仿真[J]. 高电压技术，2019，45(5)：1510-1517.

[11]XU Y P，QIAN Y，SHENG G H，et al. Simulation analysis on the propagation of the optical partial discharge signal in I-shaped and L-shaped GILs[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2018，25(4)：1421-1428.

[12]HIKITA M，OHTSUKA S，WADA J，et al. Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with L branch structure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation，2011，18(5)：1678-1685.

[13]BINNS D F，MUFTI A H，MALIK N H. Optical discharge detection in SF6-insulated systems[J] . IEEE Transactions on Electrical Insulation，1990，25(2)：405-414.

[14]KAUFHOLD M，BAMJI S S，BULINSKI A T. Optical detection of partial discharges in gas-insulated systems[C]//Proceedings of Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena-CEIDP'96. Millbrae，CA，USA：IEEE，1996：618-623.

[15]FUJII K，YAMADA M，TANAKA A，et al. Emission spectrum of partial discharge light in SF6 gas[C]//Conference Record of the 1992 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Baltimore，MD，USA：IEEE，1992：332-335.

[16]QI C，YANG C L，LI W，et al. Stray light suppression in BRDF measurement infrared optical system[J]. Chinese Optics Letters，2003，1(7)：398-400.

[17]欧阳有鹏. 电力变压器局部放电荧光光纤检测系统研制[D]. 重庆：重庆大学，2011.

[18]陈继明,许辰航,李鹏,等.基于时频分析与分形理论的GIS局部放电模式识别特征提取方法[J].高电压技术,2021,47(01):287-295.

[19]吴诗优,郑书生,钟爱旭,等.基于智能聚类算法的UHF法变电站空间多源局部放电定位方法[J].高电压技术,2020,46(12):4309-4318.

[20]何宁辉,李秀广,周秀,等.GIS固体绝缘不同类型气隙缺陷的放电特征[J]. 高电压技术,2021,47(06):2073-2083.

[21]S. Zheng and S. Wu, "Detection Study on Propagation Characteristics of Partial Discharge Optical Signal in GIS," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement,2021. 70, pp. 1-12.

[22]S. -Y. Wu and S. -S. Zheng, "Detection of Partial Discharge in GIS and Transformer Under Impulse Voltage by Fluorescent Optical Fiber Sensor," IEEE Sensors Journal, 2021. 21, (9), pp. 10675-10684.

[23]黄 超. 基于光信号特征的变压器局部放电检测技术研究[D]. 上海：上海电机学院，2016.

[24]饶章权，郑书生，王增彬，等.负极性OLIV下GIS局部放电UHF信号的相位特征[J]. 高电压技术,2019,45(12):3924-3931.

[25]唐 炬，曾福平，范庆涛，等. 基于荧光光纤检测GIS局部放电的多重分形谱识别[J]. 高电压技术，2014，40(2)：465-473.

作者简介：

吴诗优（1997），男，江西赣州，硕士，主要研究输电线路缺陷检测、XLPE电缆局部放电检测，E-mail：wushiyou97@163.com

郑书生（1979），男，北京，博士，主要研究电力设备状态检测，E-mail：zss@ncepu.edu.cn

钟爱旭（1990），男，内蒙古赤峰，硕士，主要从事变压器局部放电检测方面的研究工作，E-mail：927643252@qq.com

基于闭锁信号的主变压器低压侧后备保护改进方案

欧阳琦[1,2]，苏乾坤[2]，周飘[2]，胡俏[2]，王思尹[2]

(1.国网江西省电力有限公司吉安县供电分公司，江西 吉安 343000；2.长沙理工大学电气与信息工程学院，湖南 长沙 410114)

摘要：以吉安电网一起 35kV 变电站出线越级跳闸故障为例，发现两条及以上 10kV 出线极短时间内连续故障情况下可能造成主变压器低后备保护动作跳闸，扩大停电范围。本文提出一种设计方案，当出线短时连续故障时对主变低压侧后备保护进行闭锁，直至出线保护动作使断路器跳闸才解除闭锁，并且还对闭锁元件是否需要引入跳闸位置接点进行论证。还对出线短时连续故障情况下变压器低压侧母线再故障这种特殊情况，提出利用构建新的差流回路来识别低压母线故障，并在这种情况下解除闭锁功能。该方案减少了变电站越级跳闸事故的发生，提高了电网系统运行的安全性和稳定性。

关键词：越级跳闸；后备保护；主变压器；差流回路；线路保

0 引言

在变电站中，对于主变低压侧出线发生的远距离故障，位于电流II或电流III段保护范围内，保护动作有一定的延时。如果此时在该出线断路器没有完全切除故障前，同一母线上另一条出线发生电流II段或电流III段保护故障，从第一条出线故障的时刻算起到第二条出线保护出口，所需的时间可能会超过主变低压侧后备保护的时限，那么就会造成主变低压侧断路器越级跳闸。本文对主变低后备保护进行了改进设计，根据各保护动作时限和断路器全开断时间，在主变低后备保护出口设置闭锁元件，发生短时连续故障时在出线跳闸前闭锁变压器低后备保护；并且在低压母线故障时，通过构建差动回路判别低压母线故障退出闭锁功能，大幅降低了故障的停电范围，提升了供电的可靠性[1-2]。

1 短时间内连续故障情况下发生越级跳闸

1.1 吉安电网某35kV变电站越级跳闸事故

2021年06月25日19时52分，吉安电网某35kV变电站#1主变901、#2主变902开关同时过流III段跳闸，造成全站失压。该变电站局部一次接线图如图1所示。其中，10kV各出线的限时电流速断保护动作时限均为0.2s，10kV各出线的过电流保护动作时限均为0.4s，两台主变的低压侧复合电压闭锁电流保护动作时限均为0.6s。

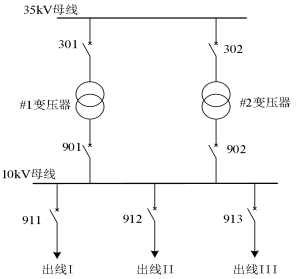


图1 吉安电网某35kV变电站局部一次接线图

根据检修人员事后对保护装置报文的核查分析，本次故障原因为10kV出线I发生相间短路故障，出线I过流III段保护启动，同时相间短路故障造成10kV母线电压下降，二次电压低于主变复合电压低压定值90V，#1主变和#2主变低压侧复合电压保护启动。出线I过流III段保护经过0.4s延时向911开关发出跳闸命令，在出线I保护发出跳闸指令的14ms时刻，出线II又发生过流III段保护范围内的BC两相故障，本应是过流III段保护经过0.4s延时将出线II开关912断开。但由于在出线I开关分闸过程的14ms时刻，考虑断路器机构动作时间和熄弧时间，故障没有被隔离，系统仍然有短路电流，所以主变901开关和902开关在复合电压闭锁过流保护启动后一直没有返回，时间继电器一直在计时。在出线II保护经过大约0.2s延时后，两台主变的复合电压闭锁过流保护时间继电器计时满0.6s，出口跳开901开关和902开关。此时系统故障完全被切除，出线II的过流III段保护动作返回，没有达到0.4s的切除时限，出线II保护装置显示“未动作”。

1.2 短时间内连续故障情况下产生越级跳闸的特征分析

本次故障保护设备定值设置正确，站内一次、二次设备和线路均无故障，属于正常的保护动作，但是却造成越级跳闸。究其根本原因就在于该变电站两条10kV线路故障发生的时间间隔很短(毫秒级)，导致主变低压侧复合电压闭锁后备保护达到规定的动作时间，造成两台主变低压侧断路器抢先动作。该情况下发生故障的各保护动作时序图如图2所示，其中，根据相关文献的研究数据，断路器的开断时间按照60ms来考虑[3-5]。

根据时序图可以看出，在出线I发生故障时，出线I的电流III段保护以及两台主变的低压侧后备保护均启动。在400ms时刻出线I断路器接到跳闸命令开始动作，而在此之后的14ms出线II发生故障，即在出线I故障电流还没有完全切除的情况下，

出线II的故障电流又接续上了，这种情况导致整个系统的故障电流一直是连续的，使得两台主变低压侧保护达到动作条件且一直没有返回，时间继电器继续计时。此时主变低后备保护时间继电器已经计时414ms，只要再过186ms故障若还没有被切除，就会达到600ms的延时使主变低压侧断路器动作跳闸。而414ms时刻，出线II保护才刚达到动作条件，按照定值要过400ms，即在814ms时刻才会出口跳开912断路器将故障切除。显然，此时出线II的保护已经不起作用了，因为在660ms时刻主变低压侧901和902断路器已经动作将系统的故障完全切除。从时序图中不难看出，在此变电站中当其中一条10kV出线发生过电流III段保护范围内故障后，只要是在260ms~460ms时刻内，如果另一条10kV出线又发生过电流III段保护范围内故障，就会造成越级跳闸。

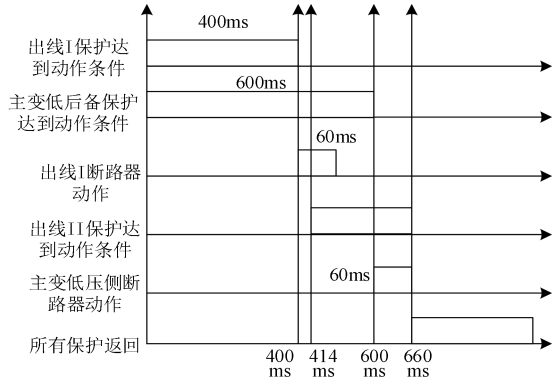


图 2 短时间内连续故障情况下保护动作时序图

上述分析是根据吉安电网的实际故障建立在连续两条线路故障都发生在过流III段保护范围内而得出的，下面针对两条出线不同范围内的故障来分析在哪个时间段内会发生越级跳闸，仍然以该35kV变电站各保护动作时限为例(10kV各出线电流II段时限0.2s、电流III段时限0.4s，主变低后备保护时限0.6s)，如表1所示。可以看出，两条线路连续故障的9种情况中，有3种情况会发生越级跳闸风险。

表1 短时间内连续故障情况下发生越级跳闸的时间段

出线I故障保护范围	出线II故障保护范围	存在越级跳闸的时间段
电流III段	电流III段	260ms~460ms
电流III段	电流II段	400ms~460ms
电流III段	电流I段	不存在
电流II段	电流III段	200ms~260ms
电流II段	电流II段	不存在
电流II段	电流I段	不存在
电流I段	电流III段	不存在
电流I段	电流II段	不存在
电流I段	电流I段	不存在

当然，出线短时连续故障发生越级跳闸一方面与保护整定时限有关(吉安电网此次故障如果主变低后备动作时限为出线的电流三段时限2倍以上，越级跳闸就不会发生)，另一方面又与故障地点及范围有关，在实际电网系统中确实很难碰到。但是从理论上来讲，只要有足够的出线，短时间内连续故障情况下发生越级跳闸不可能完全避免，因为不同的出线可以相继故障，使短路电流一直连续，直至主变低后备保护动作。所以，需要找到一种方法来识别短时间内连续发生的故障，用来避免变电站越级跳闸。

2 变压器低压侧后备保护改进方案

2.1 变压器低压侧后备保护改进方案设计

通过研究各保护的动作情况，发现要想解决越级跳闸必须在系统发生两条及以上出线短时间连续故障时，闭锁主变低压侧后备保护，待低压侧出线的保护出口将断路器跳闸后，再解除主变低压侧的后备保护闭锁[6-7]。按照此思路进行如下设计。

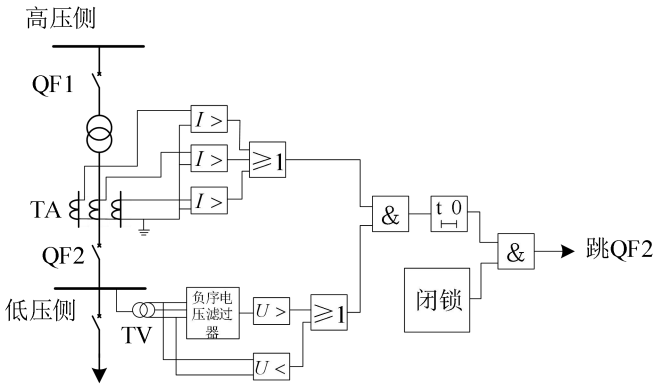


图 3 主变低压侧后备保护改进原理图

如图3所示，在变压器复合电压闭锁过电流保护原理上，设置一个闭锁元件在保护的出口，在达到闭锁条件时输出为0，没有达到闭锁条件则输出为1。“闭锁”是指出线保护对变压器低压侧后备保护的闭锁，即某条出线故障时，只有当出线上的保护发出出口跳闸命令且出线断路器跳闸后，才允许变压器后备保护出口跳闸。

以两条10kV出线为例的闭锁元件逻辑图如图4所示，应用在实际变电站中，要将全部出线都加入到闭锁元件逻辑中。只要任一出线保护启动，则闭锁元件输出为0。闭锁元件输出为1的情况有两种：①所有出线的保护没有启动；②任一出线保护启动后经过延时t。闭锁元件中时间继电器KT的延时t应满足式t=该出线保护动作时限+断路器全开断时间60ms。

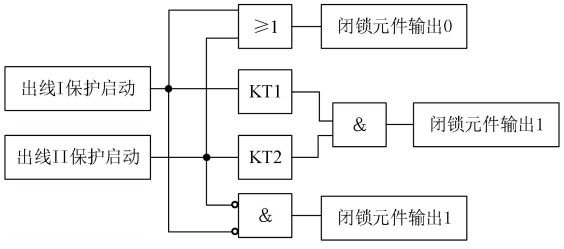


图 4 闭锁元件逻辑图

按照此设计思路重新分析该变电站6月25日的故障。当出线I发生故障时，闭锁元件立刻输出0，

经过460ms的时间继电器KT延时，闭锁元件输出1，允许变压器后备保护出口，但此时还没到变压器后备保护动作的时限。同时，在414ms时刻，出线II的短路电流接续上了出线I的故障电流，闭锁元件立刻输出0，又要经过460ms的时间继电器KT延时，即在874ms时刻，闭锁元件才会输出1，这样就避免了主变断路器在600ms时刻的跳闸，其余10kV出线仍然正常运行，不至于造成全站停电。

2.2 出线故障后低压侧母线再故障情况分析

上述改进方案对线路故障时主变低压侧开关的越级跳闸有着很好的防范，避免了大面积停电事故的发生，增加了电网的可靠性和稳定性。但是，当出线故障后短时间内变压器低压侧母线再故障时，此方案有一定的不足。仍以吉安电网该35kV变电站为例来分析，当运用主变低压侧后备保护改进方案后，在出线II414ms时刻发生的故障能够在814ms时刻保护出口。如果在0~214ms时刻主变低压侧母线或其引出线上故障，主变低压侧后备保护会因为改进方案的闭锁而使得低压侧断路器拒动，带来的后果可能是上级变电站或者线路跳闸，扩大停电范围[8]。这里分析的母线故障情况，指的是该母线没有配置母差保护，母线故障属于变压器后备保护范畴。如果有母差保护，由于闭锁元件并不对母差保护闭锁，所以也就不用单独分析。

为此，参考变压器保护中的差动速断功能，需要找到一种方案来判断低压侧母线范围内的故障，当判定确实是低压母线发生故障时，立即退出主变后备保护出口的闭锁元件，让主变后备保护正常动作跳闸[9]。其实现方式如图5所示，将变压器低压侧开关电流互感器与低压侧各出线电流互感器组成一个差流回路，当故障是发生在差流回路的保护范围时，差流继电器检测到差流 $I > I_{set}$，立即解除出线保护对主变后备保护的闭锁元件功能[10]，I_{set} 按照躲过外部短路故障时的最大不平衡电流，满足式(1)

$$I_{set} = K_{rel} I_{unb.\max} \tag{1}$$

式中 K_{rel} 为可靠性系数，取1.3。差流继电器进行电流比较判断的时间按20ms考虑，解除闭锁元件功能按照5ms考虑，再考虑10ms的裕度，即当母线发生故障时，能够在35ms内将闭锁元件完全退出，这个时限远远低于主变后备保护时限。

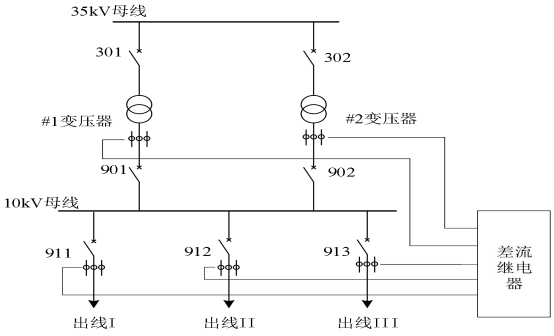


图5 判断低压侧母线故障原理图

3 变压器低压侧后备保护改进方案分析

3.1 闭锁元件是否需要引入跳闸位置接点

对于变压器低压侧后备保护改进方案，设计中闭锁元件的闭锁时长采用的是时间继电器的延时60ms，该延时是结合了断路器机构跳闸动作时间和切断电弧时间，并且考虑一定的裕度而得到的。这个延时会比实际断路器开断短路电流时间大一些，如果引入跳闸位置接点，以低压侧母线短时连续故障来分析。当断路器因为某个原因拒绝动作时，该断路器失灵，那么跳闸位置接点就不会被接通，闭锁元件长期保持闭锁功能，主变低压侧后备保护一直被闭锁，故障由上级变电站或者线路来切除，造成停电范围的扩大。相反，如果不引入跳闸位置接点，当出线断路器失灵时，仍然会经过60ms的延时解除闭锁功能，让主变低后备保护动作切除故障。因此，不将跳闸位置接点作为解除闭锁的条件，该变压器低压侧后备保护改进方案还能够起到出线断路器失灵保护的作用。在实际的运用中，可以将时间继电器的延时和跳闸位置接点分两组逻辑都接入到闭锁元件回路中，提高闭锁元件的可靠性。

3.2 变压器低压侧后备保护改进方案的应用

对于该方案的闭锁元件功能，设计相应的二次回路和元件，由出线保护内部提供保护启动回路和保护延时回路，再与时间继电器串联，最后将出线的若干回路连接至“与门”来判断是否进行闭锁。对于该方案变压器低压侧母线故障判别，将主变的低压侧电流互感器和所有出线的电流互感器二次接线送入到差流继电器中，在差流继电器中设置比较判断环节来决定闭锁功能是否解除。

总的来说，本文改进方案只需将变电站内二次接线和部分保护装置的逻辑进行改动，而无须增加一次设备，即使在没有备用屏柜间隔的变电站也能进行改造。

4 结论

本文首先以吉安电网的一起35kV变电站10kV出线故障引起主变跳闸事故为例进行分析，发现在极短时间内两条及以上出线连续故障时会造成越级跳闸，从而扩大停电范围。然后画出保护动作时序图具体观察越级跳闸发生的时刻，并对两条出线不同范围短时间内相继故障9种情况下的越级跳闸进行详细分析，提出一种设计方案，当出线短时连续故障时对主变低压侧后备保护闭锁，直至出线保护动作断路器跳闸才解除闭锁。接着对出线短时连续故障情况下变压器低压侧母线再故障这种特殊情况进行分析，将变压器低压侧电流互感器和全部出线电流互感器组成一个差流回路，利用差流回路来识别低压母线范围故障并在这种情况下解除闭锁功能。最后对该方案中闭锁元件是否需要引入跳闸位置接点进行论证。该方案减少了变电站越级跳

闸事故的发生，提高了电网系统运行的安全性和稳定性，且实际改造中方便易行，具有较强的实用性。

参考文献：

[1]刘枫, 荆秋锋, 邝石, 等. 主变压器中压侧后备保护改进设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21):118-120.

LIU Feng, JING Qiufeng, KUANG Shi, et al. Improved design for main transformer middle-voltage side backup protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 118 - 120.

[2]汤大海,陈永明,曹斌,等.快速切除220kV变压器死区故障的继电保护方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 115 - 122.

TANG Dahai, CHEN Yongmin, CAO Bin,et al. Relay protection scheme of rapid removal of 220kV transformer fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 115 - 122.

[3]胡泽鹏,李斌,姚斌,等. 3/2接线互感器优化布置的继电保护改进新方法[J].电力系统及其自动化学报, 2020, 33(03): 109-116.

HU Zepeng, LI Bin, YAO Bin, et al. A new improved method of relay protection based on the optimized arrangement of transformers under 3/2 connection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 33(03): 109-116.

[4]陈国平,王玉玲,王德林,等.基于站域信息缩短3/2接线失灵故障切除时间的策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21):119-127.

CHEN Guoping, WANG Yuling, WANG Delin, et al. Strategy of shortening circuit breaker failure and dead zone removal time for 3/2 breaker connection based on substation area information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 119 - 127.

[5]朱晓彤, 戴光武,赵青春,等.按串集成的分布式快速断路器失灵及死区保护系统[J]. 电力工程技术, 2019, 38(4):99-105.

ZHU Xiaotong, DAI Guangwu, ZHAO Qingchun, et al. Distributed fast breaker failure and dead zone protection system by string integrated[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(4): 99 - 105.

[6]余南华, 代仕勇,梁晓兵.一种网络化10kV母线快速保护系统的试验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20):168-171.

YU Nanhua, DAI Shiyong, LIANG Xiaobing. Experimental analysis of 10kV fast busbar protection based on networking technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 168 - 171.

[7]薛炳磊,张盛晰,张德坤.基于闭锁信号的主变低压侧加速跳闸保护方法[J]. 山东电力技术, 2017, 44(10):36-39.

XUE Binglei, ZHANG Shengxi, ZHANG Dekun. Accelerated trip protection scheme based a blocking signal for low voltage side of main transformer[J]. Shandong Electric Power, 2017, 44(10): 36 - 39.

[8]赵佰成,徐炜彬,曲绍杰,等. 220kV典型保护死区问题的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 130 - 132.

ZHAO Baichen, XU Weibin, QU Shaojie, et al. Discussion about the problem of 220kV typical protection's dead-zone[J]. Power Systems Protection and Control, 2010, 38(13): 130 - 132.

[9]吴雨,柯联锦.高压电网死区保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(06): 148-154.

WU Yu, KE Lianjin. Review on dead time protection of high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(06): 148-154.

[10]欧阳琦,吕璐,胡喆,等. 变压器死区故障的继电保护方案设计[J]. 江西电力, 2021, 45(06): 2 - 5.

[11]OUYANG Qi, LV Lu, HU Zhe, et al. Design of relay protection scheme for transformer dead time fault[J]. Jiangxi Electric Power, 2021, 45(06): 2 - 5.

作者简介：

欧阳琦（1995），男，长沙理工大学研究生，助理工程师,现任国网江西省电力有限公司吉安县供电分公司变电检修班班长，主要研究方向为电力系统保护与控制，Email：1543542972@qq.com

苏乾坤（1997），男，长沙理工大学研究生，主要研究方向为电力系统保护与控制；

周飘（1998），女，长沙理工大学研究生，主要研究方向为电力系统保护与控制；

胡俏（1995），女，长沙理工大学研究生，主要研究方向为电力系统保护与控制；

王思尹（1997）女，长沙理工大学研究生，主要研究方向为电力系统保护与控制。

1000MW燃煤机组一次风机振动原因分析及处理

孙德计，訾娟

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332000）

摘要：国能神华九江发电有限责任公司（以下简称九江发电公司）1A 一次风机投运以来，轴承座水平振动有上涨趋势，导致警报频发。以下通过对 1A 一次风机运行参数进行深度分析，并结合现场检查，发现因其传动芯轴发生弯曲引起警报频发，并采取了更换芯轴、清理叶片根轴锈迹的措施，最终消除了 1A 一次风机水平振动偏大的隐患，保证了机组安全稳定运行。

关键词：一次风机；轴瓦；芯轴弯曲；振动

0 引言

一次风机是锅炉风烟系统的主要设备，因运行过程中具有工作风量小、风压高的特点，国内60万kW等级以上机组通常配套使用高速双级动叶可调轴流一次风机。双级动调轴流风机结构复杂，且长期处于风烟系统高压头工作状况，其振动及噪声超标问题突出，严重影响机组的安全稳定运行。九江发电公司1A一次风机投产后，运行中振动逐步劣化，通过对振动现象进行频谱分析，利用排除法查找振动异常的根本原因，制订检修方案，并提出相应的解决措施，及时排除隐患，为机组的安全稳定运行奠定良好的基础。

1 设备概况

九江发电公司总装机容量为2×1000MW超超临界燃煤机组，1号机组投产于2018年7月7日，配置1台成都电力机械厂生产的GU23836-11型轴流式双级动叶可调一次风机，BMCR工况下主要参数见表1，水平对称布置的两级动叶叶片个数均为22个。一次风机运行时，通过液压调节装置叶柄末端的调节杆和叶片调节滑块进行出力调节，并使其保持在一定位置上。调节杆和叶片调节滑块由液压伺服装置通过油缸推动，叶片调节-36°~+20°。中心筒内轴承座内安装水平和垂直振动传感器，传感器型号为瑞士vibro-meter生产的CV160压电式速度传感器，振动报警值4.6mm/s。

表1 一次风机主要参数

参 数	数 值
流量/(m^3-s^{-1})	106.4
总压升/Pa	16080
风机一阶临界转速/(r-min^{-1})	1937
风机转速/(r-min^{-1})	1450
电机功率/kW	2800
全压效率/%	87.6

2 振动现象

（1）1号机组调试过程中，一次风机启动多次，1A一次风机中心筒内的轴承座径向振动逐渐增大：水平振动烈度从2018年2月份的1.25mm/s增大到5月份的3.5mm/s，垂直振动从2月份的0.7mm/s增大到2.5mm/s；尤其是在2018年5月8日启动后，中心筒内的轴承箱水平振动烈度达3.9mm/s，垂直振动烈度2.89mm/s，且运行过程中有逐步增大的趋势。

（2）使用振动仪进行就地测量，1A一次风机机壳下支撑的最大振动10mm/s，而并联运行的1B一次风机相同位置处振动为3mm/s，同时查看PI系统，发现1号炉并联运行的2台一次风机振动偏差越来越大，说明1A一次风机振动情况真实存在，如图1所示。

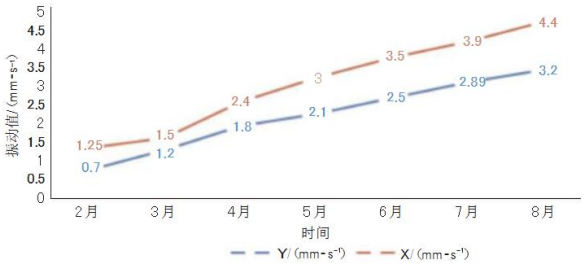


图1 1A一次风机轴承箱振动历史趋势

（3）调取一次风机运行参数曲线进行分析，并实地检查风机运行状况，未发现一次风机有异常状态，动叶开度、出口挡板开度、电流、风压、轴承温度均无明显变化，但轴承箱内X/Y向振动随着运行时间有明显增大的趋势，严重影响机组安全稳定运行。

3 产生振动因素的排查

3.1 频谱分析

使用艾默生CSI2140[1]对1A一次风机的振动情况进行频谱测量，图2为风机壳体中分面上水平向振动频谱，振动以1倍频为主，有明显的22倍频分量，没有低频幅值和高频振动分量。通过风机参数可以得出，风机动叶个数为22个，22倍频为风机的叶片通过频率，而引起1倍频分量增大主要从支撑系统的动刚度和转子平衡2个方面进行考虑[2]。

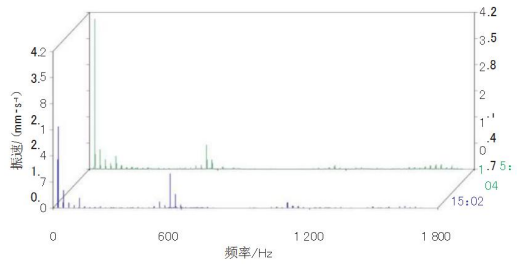


图2 1A一次风机振动频谱

3.2 轴承排查

轴承损坏的振动特征为稳定性差，与负荷无关，最大振动可能出现水平、垂直或者轴向，且伴有轴承温度升高现象。从中心筒内轴承箱温度曲线可以看出，1A一次风机从2018年4月至8月轴承温度一直保持平稳（50~60℃）；从振动频谱测量来看，频谱中除了较高的22倍频（叶片通过频率）外，并未出现轴承的故障特征频谱或者高次频谱，而且振动探头是从热工引出线的孔洞牵引至轴承箱内测量，此位置能真实反映轴承箱的振动情况；从振动频谱和轴承温度趋势来看，可排除中心筒内轴承损坏造成的一次风机振动可能性，如图3所示。

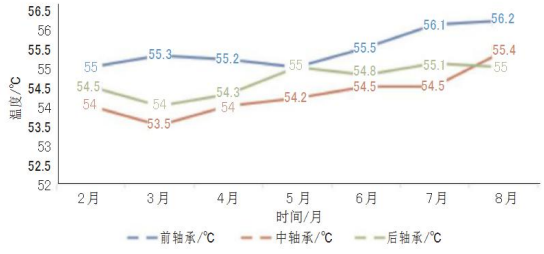


图3 1A一次风机内轴承温度趋势

3.3 联轴器安装质量排查

AP系轴流风机膜片式联轴器找正要求：电机侧上张口、叶轮侧下张口，间隙0.05~0.10mm。经查阅，1A一次风机安装找中心的检修记录：电机侧上张口0.10mm，叶轮侧下张口0.12mm，左右张口尺寸均合格，排除中心不正引起的振动。

3.4 风机性能特征与系统匹配性排查[3]

风机的叶片采用机翼理论进行设计和分析，正常工况下，风机气流方向与风机叶片前缘点、后缘点连线（称为翼弦）形成的正冲角很小，气流保持流线形通过翼型叶片，当正冲角逐渐增大，翼型上下表面压差减小，升力降低，气流产生较大的涡流逐步脱离叶片凸面，电流下降，振动升高，失速现象向叶片旋转的反方向蔓延。通过查看，相同工况下并联运行的1A、1B2台一次风机电流变化趋势相同，电流偏差值<5A，电流与压力未出现大幅度脉动，同时观察风机进出口管道是否出现剧烈振动现象，且风机失速报警装置未动作，说明一次风机运行中未发生失速问题。

3.5 风机机壳和风道壁外观排查

当烟风道的气流脉动频率与风机本身的固有频率形成整数倍，会产生共振，增大一次风机气流冲击，产生额外受力。如果一次风机后导叶磨损，造成中心筒连接刚度减小，将会引起风机大幅振动。通过一次风机内部进行检查，轴承箱连接、后导叶、机壳及中心筒等情况良好，未发现连接松动、磨损及裂纹现象。

3.6 风机机壳与风道基础质量排查

基础灌浆不良、地脚螺栓松动、垫片松动、机座连接不牢固都将引起剧烈的强迫现象。经测量，发现一次风机驱动端轴承箱基础振动特征为下支撑壳体与基础地脚螺栓处的振动烈度，振动烈度1.7~1.8mm/s，基础台板与风机壳体底座的差别振动<5μm，表明各结合面的连接刚性不存在问题。监测时发现，虽然振动值很小，但机壳外壁水平振动沿垂直梯度方向逐渐增大，从风机到电机方向的振动也逐步增大，如图4所示。

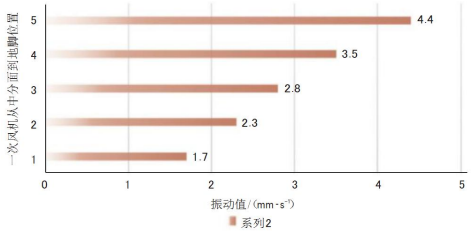


图4 1A一次风机从中分面到地脚振动分布

3.7 转子不平衡[4]排查

①在关注设备自身故障问题的同时注意连接设备，因为电机为端盖式结构，风机轴承座坐落在中心筒内，两者的刚性相对较差，所以作为风机外伸端的电机一旦出现振动异常时，很可能传递至风机轴承上。对1A电机的振动进行测量，电机驱动端振动最大烈度为2.5mm/s，各方向的振动都体现了明显的1倍频分量。因此，排除风机外伸端不平衡的可能性。

②中心筒内的轴承座振动表现出以下特性：①轴承箱内的水平振动值与DCS画面显示一致。②轴承箱水平振动分布为：顺着轴向方向，距离入口风道越近（第一级动叶），振动值越大，距离第二级动叶越近，水平振动呈下降趋势。③从频谱中可以看出，轴承箱的振动频谱主要表现为1倍频分量，还有少量的22倍频成分存在，没有其他的分数倍高频振动，轴承箱水平振动的变化量主要体现在1倍频分量的变化上，前后叶片通过频率幅值变化不大。由此可以判断， 振动的主要原因发生在第一级动叶上，是调试期一次风机RB试验的反复启动时，第一级叶片有漂移现象，引起动叶开度不一致，导致风道内的流体扰动产生放大作用。通过故障诊断以及历史数据分析处理故障，需要停运风机，揭盖进一步检查。

4 处理措施

通过以上振动排查，并结合现场实际，决定对1A一次风机进行揭盖处理，重点对其内部进行检查。

4.1 检修发现问题

（1）传动芯轴弯曲度达4mm/m，超过0.2mm/m的厂家标准值。现场测量情况如图5所示，测量数据如图6所示。

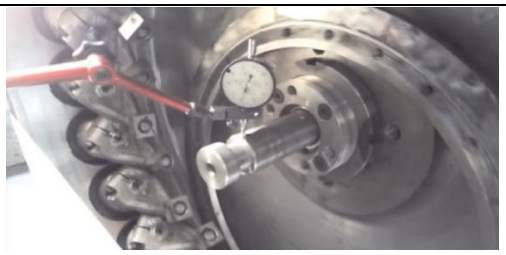


图5 现场揭盖芯轴弯曲度测量

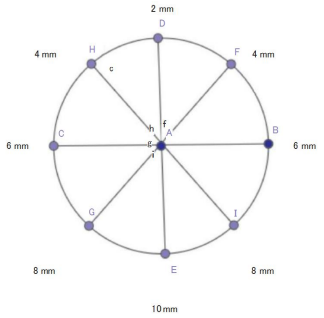


图6 弯曲度最高处数据

（2）第一级动叶组存在漂移现象。一次风机第一级动叶的22级叶片进行漂偏测量，通过表2发现，第一级动叶9~17叶片数据偏差值较大。

表2 第一级动叶9~17叶片角度漂移值

编号	9叶片	10叶片	11叶片	12叶片	13叶片	14叶片	15叶片	16叶片	17叶片
漂移角度/(')	7.5	8	7.8	9	8.5	8	8.5	8	8

（3）第一级动叶9~17叶片根部有锈蚀、卡涩现象。对应动叶偏差大者进行拆卸时，发现其叶根的连接螺栓有部分锈蚀现象、转动不灵活的现象。

（4）第一级动叶9~17叶片调节滑块存在磨损，如图7所示。



图7 新、旧滑块对比

4.2 原因分析及调整

4.2.1 一次风机振动大原因分析

（1）南方天气雨水多、湿度大，在基建期，长期露天停放，当雨水或者潮气通过风机的机壳渗入到叶片时，造成叶片根部与衬套接触部位出现锈蚀，影响叶柄的转动。当风机试运行时，一、二级叶片的叶柄因为锈蚀程度不一致，导致芯轴在两端受力不均匀，而传动芯轴为细长轴，长期作用，从而导致芯轴发生塑形弯曲变形。

（2）当芯轴弯曲后，同级叶片的角度会不一致，发生漂移，气流通过叶片进行加压时会产生扰动，产生明显的叶片通过频率，引起风机振动。

4.2.2 处理措施

根据出现的故障与原因分析，制定了2种处理措施[5]：

（1）利用停机机会对1A一次风机的两级动叶传动芯轴进行更换，用百分表测量弯曲值为0.1mm，其弯曲度在标准范围内，如图8所示。

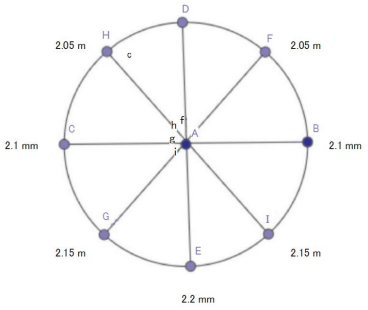


图8 新芯轴弯曲度最高处数据

（2）对锈蚀的叶根螺栓进行清洗，充分保证其均匀转动，并全部更换叶片调节滑块。

其他所有数据均按图纸要求进行间隙测量并回装，轴承箱与风机壳体间的压紧间隙在0.05~0.10mm的标准过盈配合，重新复查对轮中心，1A一次风机运行至今，振动一直维持在1.0~1.5mm/s水平，最终消除1A一次风机振动故障。

5 结语

一次风机作为锅炉的重要辅机设备，发生振动故障的危害较大。九江发电公司通过对一次风机振动偏大原因进行频谱分析，采取排除法，初步怀疑一次风机的第一级动叶处是引起振动劣化的主要矛盾。通过解体检查发现，一次风机第一级动叶的芯轴弯曲度严重超标，制订针对性的治理方案，消除了振源，为预防和解决同类型轴流风机振动问题提供了一定的参考价值。

参考文献：

[1] 艾默生过程控制有限公司.CSI2130 分析使用手册（Emerson Process Management）[M]. 上海：艾默生过程控制有限公司，2007：1-2.

[2] 陈江，沙德生. 火电厂精密点检及故障诊断案例分析 [M]. 北京： 中国电力出版社，2010：20-23.

[3] 王锋，刘新民，郎建新，等. 一次风机振动大原因分析与处理 [J]. 内蒙古电力技术，2014，32（3）：81-85.

[4] 曾宪江. 引风机叶片调节滑块损坏原因分析 [J]. 内蒙古电力技术，2017，35（1）：66-68.

[5] 闪恒杰，张道瑞，李瑞华，等. 双级动叶调节轴流式一次风机振动分析及处理 [J]. 风机技术，2017，59（2）：83-86.

作者简介：

孙德计（1985），男，高级工程师，从事设备维护管理工作，E-mail：16101030@chnenergy.com.cn

火电厂给水泵小机停机组件优化研究

罗文轩[1]，周大勇[2]，董卫强[2]，李辉[1]，刘逸峰[1]

（1.华能安源发电有限责任公司，江西 萍乡 337200；2.华能江西分公司，江西 南昌 330000）

摘要：对大型火电机组而言，重要辅机控制、保护系统的可靠性攸关机组的安全稳定运行。而给水泵小汽轮机是驱动给水泵满足锅炉上水需求的重要设备，在大型火电厂中应用广泛。本文以华能安源电厂给水泵小汽轮机为研究对象，通过对给小机停机电磁阀组件改造，从跳闸回路，电源回路，停机电磁阀 DO 卡输出逻辑等方面进行优化，大大降低了停机电磁阀误动而引起机组跳闸的可能性，为火电厂给小机的安稳运行提出了新的方案。

关键词：火电厂；给水泵小机汽轮机；停机电磁阀

0 引言

在生产过程中，当机组带高负荷时，若给水泵小汽轮机停机，将导致锅炉给水流量低，极易引发机组“非停”事故。METS是汽动给水泵危机跳闸保护系统，在汽动给水泵启停过程和正常运行时，出现故障或参数危及系统情况时，输出跳闸信号，停机电磁阀动作，泄掉速关阀中的速关油，使速关阀关闭，切断进入汽动给水泵汽轮机的汽源，以避免发生严重后果影响到汽动给水泵及发电机组的运行安全。

汽动给水泵硬跳闸回路是METS保护动作的直接作用对象。METS内部由大规模集成电路构成，电子元器件稳定性受老化周期影响导致后期故障率增加，同时，硬跳闸回路因为设计的缺陷，METS保护误动和拒动的风险较大，威胁机组安全运行。尤其是采用全容量汽动给水泵的大型机组，汽动给水泵保护与大机主保护的地位几近相同，其重要性和可靠性不言而喻。因此其停机电磁阀的灵敏性，可靠性问题一直是大家研讨的焦点。

1 原状概述

华能安源电厂“上大压小”工程建设2×660MW超超临界二次再热机组，每台机组配置一台100%B-MCR容量汽动给水泵，两台机组公用一台30%B-MCR容量的电动给水泵。汽动给水泵为杭州汽轮机股份有限公司生产的WK63/80双流凝气式汽轮机，其控制系统为上海艾默生过程控制有限公司生产的OVATION 3.5，其速关组合件实现汽动给水泵的启动，快速停机以及在线试验[1]。

改造前：原给小机METS跳闸回路（硬接线）为：手动停机按钮、超速、DCS跳闸条件三者串联后，分别与常带电的停机电磁阀1、2相连，一旦满足跳闸条件，任一电磁阀失电，将导致汽泵跳闸（见图1之改造前），该硬跳闸回路设计有四种保护动作方式，第一种是DCS逻辑上满足跳闸条件后由DCS软逻辑跳闸继电器失电动作;第二种由汽轮机超速通过硬线实现“三取二”逻辑后保护动作；第三种是同时按下操作员站两个汽动给水泵紧急停机按钮，第四种为拉动就地手动停机机械电磁阀动作（见图3.1.1）。其中硬跳闸回路的供电电源为24VDC，由220VAC UPS电源和电气保安电源两路220VAC==24VDC电源转换后经冗余电源切换模块输出一路24VDC提供；手动停机按钮信号为操作员站台上两个汽动给水泵紧急停机按钮的常闭触点并联后的输出信号；超速停机信号为CTRL45 METS控制柜内不同分支上的三个转速卡的六个超速常闭输出触点进行“三取二”硬连线的输出信号；DCS软逻辑跳闸继电器正常运行时带电，失电时保护动作，其常开触点接入硬跳闸回路。

针对以上说明的原汽动给水泵硬跳闸回路，从硬件配置的冗余性和各硬件自身的性能上对该跳闸硬回路的可靠性进行分析，发现有以下几点隐患：

1、硬跳闸回路供电电源只输出一路24VDC电源，冗余性不够，若电源转换器和冗余电源切换器出现故障，导致停机电磁阀失电动作，汽泵误跳闸。

2、两个手动停机按钮信号在操作员站端子排处并联后，通过一根电缆连接到电子间控制柜内硬跳闸回路接线端子，冗余性不够，若此根电缆线路出现问题导致硬跳闸回路断开，则停机电磁阀失电动作，汽泵误跳闸。

3、原来硬接线跳闸回路只有两个停机电磁阀，采取的是“二取一”动作逻辑，若单个电磁阀或其线路出现故障导致误动作，停机电磁阀失电，汽泵误跳闸。

4、汽动给水泵运行时DCS软逻辑跳闸继电器长带电,若继电器或其所在继电器卡件出现故障导致跳闸继电器失电，则停机电磁阀失电动作，汽泵误跳闸。

5、原汽动给水泵安装有六个磁阻式转速传感器探头并配有六块转速卡件，原硬跳闸回路只用到其中CTRL45 METS控制柜内的三个转速卡A1、B1、C1，冗余性不够。

2 改造方案

2.1 改造思路

依据《防止电力生产事故的二十五项重点要求》，贯彻落实“坚持预防为主，落实安全措施，确保安全生产”的方针，为了提高METS 可靠性和机组运行安全稳定性，加强热工专业检修维护质量，针对原汽动给水泵硬跳闸回路的隐患，提出了以下思路：将安全油设计改为4个跳闸电磁AST1~AST4，采用分组并、串联的连接方式，即电磁阀AST1、AST3并联，作为通道1，AST2、AST4并联，作为通道2，两组电磁阀串联使两个通道串联。当单个电磁阀失电时，不会导通安全油泄油油路，汽泵不跳闸。当两组电磁阀各有一个失电，才可导通整个安全油泄油油路，泄压跳闸汽动给水泵（见图1之改造后）。

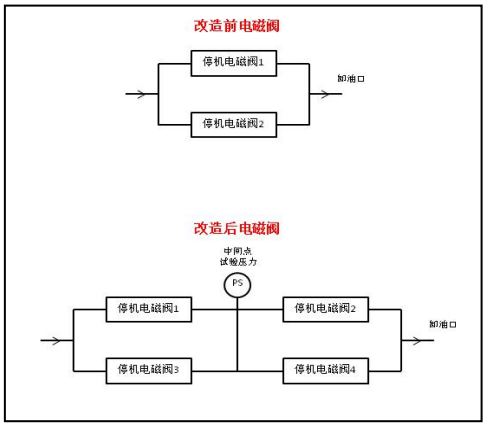


图1 跳闸油路示意图

2.2 改造项目

2.2.1 速关组件改造：更换原速关组件，改为串并联的“四取二”模式，保持原速关组件其他功能及对应油管路接口保持不变；

2.2.2 供电电源改造：拆除原220VAC==24VDC电源转换器、冗余电源切换器及电源输入、输出回路。变更硬跳闸回路工作电压等级，由24VDC改为110VDC；从电气110V直流馈线柜1、3取A、B两路110VDC电源至CTRL45 METS控制柜，A、B两路110VDC电源分别为停机电磁阀1、3及停机电磁阀2、4供电，同时，新增两路硬跳闸回路110VDC工作电源丢失报警继电器R1、R2，并引入一级光字牌报警监视。（如图2.1）

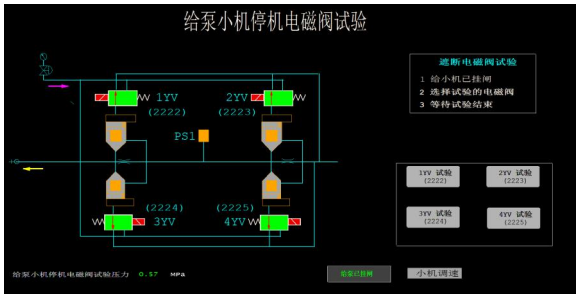


图2.1 汽动给水泵停机电磁阀动作试验操作画面

2.2.3 新增一套跳机硬接线回路；

2.2.4 新增单个停机电磁阀试验逻辑、画面操作面板；

2.2.5 修改给泵小机停机电磁阀的DO输出逻辑，并同步将给泵小机停机电磁阀DO卡的输出触点类型由常开接点改为常闭接点（即采用继电器得电动作方式）图2.2、图2.3、图2.4（逻辑图）、图2.5、2.6、2.7（电气回路图）；

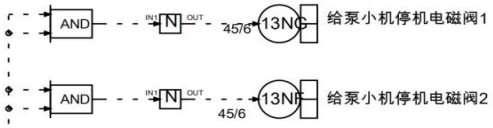


图2.2 改造前停机逻辑图（Drop45-2-BFPT-A ETS1）

注：原跳闸回路原理图（给泵小机停机电磁阀DO卡的输出触点选用常开接点，运行时常带电，失电跳给小机。

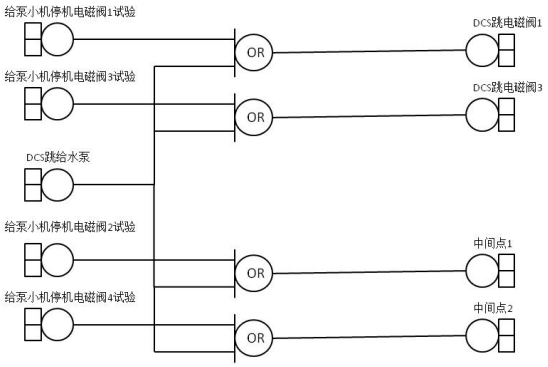


图2.3 改造后停机逻辑（Drop45-2-BFPT-A ETS1）

注：给泵小机停机电磁阀DO卡的输出触点选用常闭接点，运行时不带电，带电跳给小机

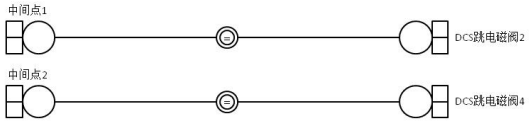


图2.4 DCS中DO点输出点逻辑及接线修改

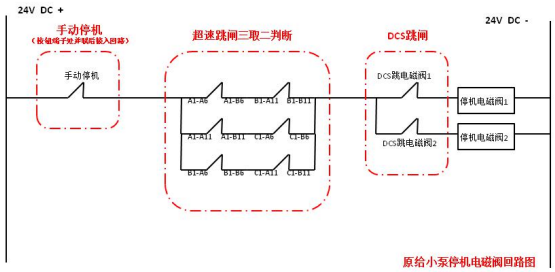


图2.5 改造前硬接线电气图

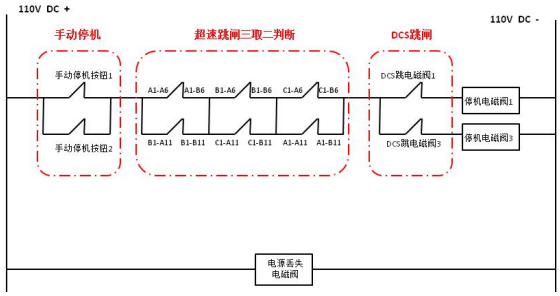


图2.6 改造后电气图 电气来110VDC Ⅰ段（直流馈线柜1）

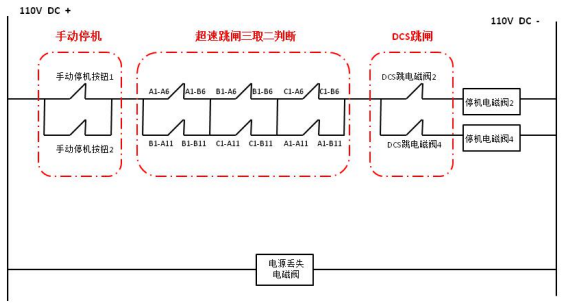


图2.7 改造后电气图 电气来110VDC Ⅰ段（直流馈线柜3）

2.3 施工方案

2.3.1 拆除原速关组合件、新增速关组合件（厂家技术指导）；

2.3.2 取消原电气来的220VAC转24VDC切换装置及电源输入、输出回路；

2.3.3 敷设自#1机组电气110V直流馈线柜来的两路110VDC电源至#1机组汽机电子间#45控制柜（METS）（两路电源输出后分别为停机电磁阀1、3及停机电磁阀2、4供电）。

注：给泵小机电磁阀110V电源自#1机控制直流110V的I段、II段备用空开引接线位置：

I段：#1机110V直流馈线柜1，备用空开编号137Z，接线位置在屏后左侧4D13、4D14

II段：#1机110V直流馈线柜3，备用空开编号237Z，接线位置在屏后左侧4D13、4D14

2.3.4 新增电磁阀中间试验压力显示测点；

2.3.5 跳闸硬接线回路；

2.3.6 手动停机按钮；

A、保留原集控室操作员站原有的两个“手动停机”按钮上各取一对常开接点，在按钮处串联后，送至CTRL23控制柜，作为SOE数据采集。

B、在两个“手动停机”按钮上各取两对常闭接点、一对常开接点引至#1机汽机电子间给小机#45控制柜（METS）内新增端子排处，并作如下用途：

第一路：各取一对常闭接点在端子排处并联后，接入电磁阀硬接线跳闸回路1（新增）；

第二路：各取一对常闭接点在端子排处并联后，接入电磁阀硬接线跳闸回路2（新增）；

第三路：各取一对常开接点在送到CTRL45控制柜不同支路DI卡上，在逻辑中相与后，送出DCS软回路手动跳机信号（新增）。

注：接线图如图2.8、2.9。

2.3.1 跳闸回路

2.3.1.1 超速跳闸：

（1）分别从给泵小机#44控制柜（MEH）内不同支路的3块转速卡上各取2对超速常闭触点，进行“三取二”逻辑判断连线后，输出至停机电磁阀1、3回路。

（2）分别从给泵小机#45控制柜（METS）内不同支路的3块转速卡上各取2对超速常闭触点，进行“三取二”逻辑判断连线后，输出至停机电磁阀2、4回路。

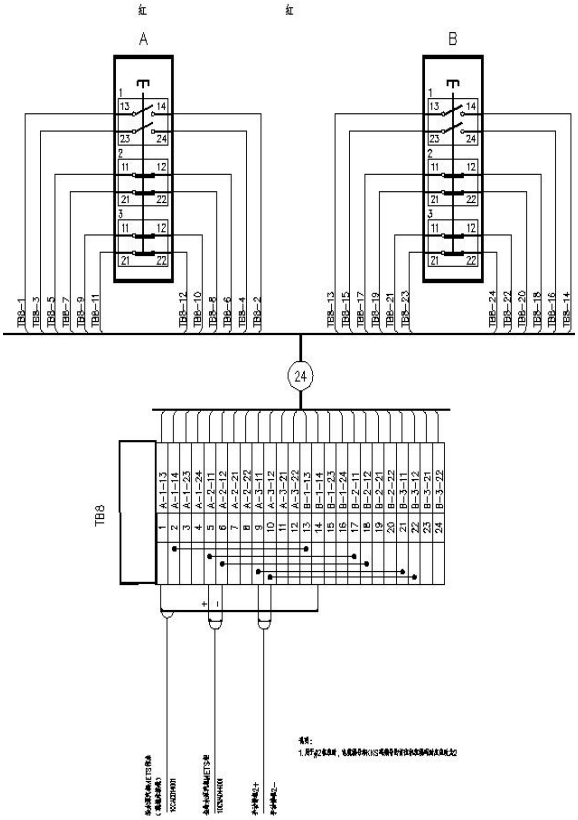


图2.8 改造前按钮出线图

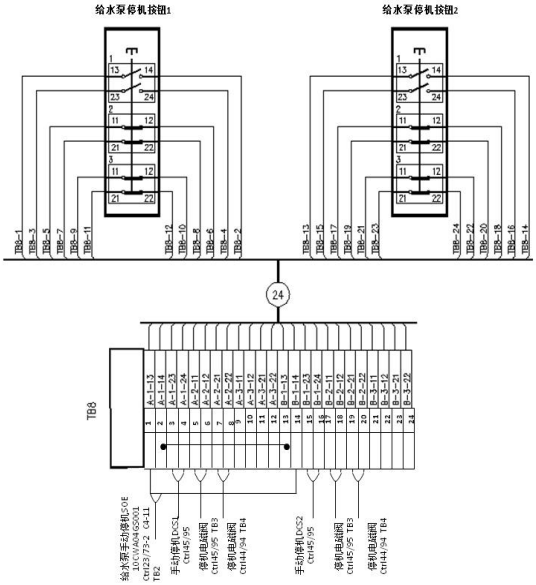


图2.9 改造后按钮出线图

注：原理图详见附录图三的修改后三取二超速部分。

2.3.1.2 DCS跳闸：

（1）保留原给小机#45控制柜（METS）内跳闸DO输出点1、2，作为跳闸指令1、3，分别控制停机电磁阀1、3。

（2）增加DCS逻辑:设计#45控制柜（METS）至

#44控制柜（MEH）跳闸信号中间点，作为跳闸指令2、4的输出，分别控制停机电磁阀2、4。并在#44控制柜（MEH）内新增一块DOX卡件。(注：跳闸信号共计4个DO点，分别位于不同支线上)。

（3）新增电磁阀试验逻辑：（详见图3）

（4）新增停机电磁阀画面操作面板;

（5）新增停机电磁阀电源任一路消失报警:

将Ⅰ段110VDC输出接入电源丢失报警继电器R1，并将R1辅助常开触点接至DI卡通道11;

将Ⅱ段110VDC输出接入电源丢失报警继电器R2，并将R2辅助常开触点输出接至DI卡通道12。

注：R1、R2为新增110VDC继电器，DI卡件位置为#44控制柜（MEH）的A3。

注：原理图见图4。

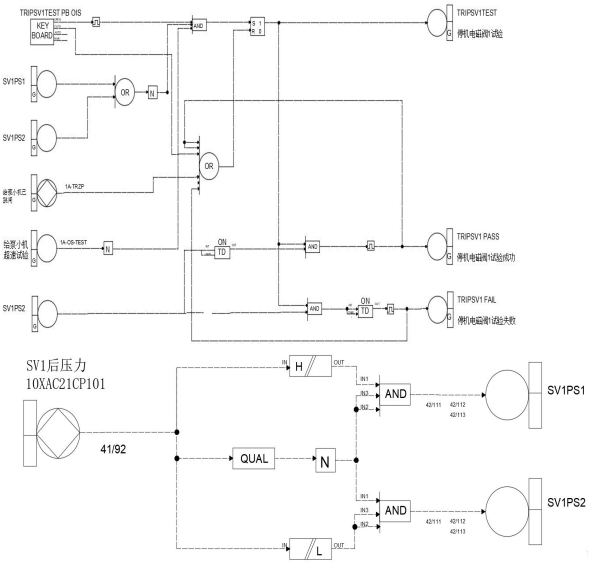


图3 新增电磁阀试验逻辑

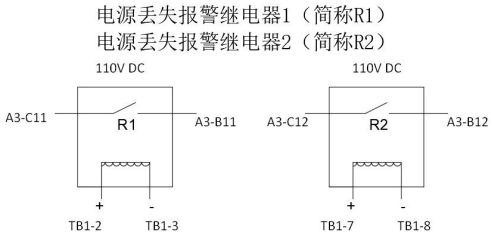


图4 电源丢失报警继电器R1、R2原理图

3 优化点分析

本方案经上述方案优化后，有以下五大主要优势：

当给小机转速超速，急需停给小机时，由超速卡控制的串并联“四取二”模式的硬接线回路，从逻辑上大大降低了由于故障导致停机电磁阀动作而停机的概率。

本次改造简化去除汽动给水泵硬跳闸回路中电源切换装置，减少电源装置切换时间差和故障带来的误动风险；配置跳闸条件独立，跳闸动作配合的硬跳闸回路A、B，任何一路110VDC电源丢失都不会使汽动给水泵跳闸，减少误动的可能，当硬跳闸回路A、B两路110VDC电源都丢失时，汽动给水泵跳闸，避免拒动。

新增的手动停机按钮，分2个硬回路和1个软回路同时发出跳机信号，使运行人员在紧急情况下，能快速可靠的打闸给小机。

新增的停机电磁阀试验逻辑，通过中间点压力来判断，当给小机满足停机条件时，停机电磁阀1、3和2、4是否正常动作而卸油，遮断汽轮机，检验速关组件是否正常运行，从而提高了系统稳定性。

新增的电源失电报警显示，通过新增的110VDC继电器来控制报警信号，并在新增画面中显示，让运行人员能在电源异常时，及时缩小故障范围，发现问题，保证整个回路供电的可靠性。

4 结语

针对华能安源电厂给水泵小机系统，本文根据热工保护“杜绝拒动，防止误动”以及保护“独立性”的基本配置原则，结合给小机跳闸油路图、DCS跳闸回路逻辑图、硬接线电气图，从变更速关组件、新增冗余电源、新增中间点压力、新增硬接线跳机回路、新增逻辑判断模块等八个方面进行了优化，大大提高了给小机运行的稳定性，在电力行业具有一定的推广意义。

参考文献：

[1]600MW超临界机组给水泵汽机保护优化[J].万一熊.李劲松.东方汽轮机.2019,（02）

[2]浅谈妈湾电厂三期ETS和METS改造[J]. 饶峰.南方能源建设,2017,4(S1):62-67.

[3]火力发电厂热控可靠性与经济性的优化措施[J].唐焱.通讯世界.2014(23)

[4]电厂给水泵汽机存在的问题分析及改进措施浅谈[J].王林林.科技风.2013(05)

[5]自动化控制系统供电可靠性探讨与改进[J].周飞船.杨平平.刘跃伟.世界有色金属2018,（11）

作者简介：

罗文轩（1998），男，江西萍乡，本科，助理工程师，E-mail：937186175@qq.com

高再管排改造浅析

邓山

（华能秦煤瑞金发电有限责任公司，江西 赣州 341108）

摘要：本文通过高再倒 U 型管排吊挂方式等改造，较好地解决了电厂长期以来高再管排错乱引起的爆管、超温等安全隐患，同时还提高了再热汽温，提升了机组效率，对同类型机组具有很好的借鉴作用。

关键词：高温再热器；管排错乱；倒 U 型管

1 设备简介

RJ电厂2X350MW超临界工程是哈锅设计制造的国内首台350MW等级超临界机组，于2008年12月15日投入商业运行。

锅炉炉型为HG-1100/25.4-PM1型，为一次中间再热、超临界压力变压运行直流锅炉，π型布置，设计煤种为贫煤。

锅炉再热器系统分为低温再热器和高温再热器两段布置，中间无集箱连接，低温再热器布置于尾部双烟道中的前部烟道，高温再热器布置于水平烟道中逆、顺流混合与烟气换热。

高温再热器布置于水平烟道内，与立式低温再热器直接连接，采用逆顺混合换热布置。高温再热器沿炉宽排列65片，横向节距为230mm，每片管组采用8根管，入口段管子为材料为12Cr1MoVG，中间段（即倒U型弯部分）管子材料为SA-213 T91，出口段管子材料为SA-213 TP347H。

2 改造必要性分析

2.1 原高温再热器运行状况

2.1.1 高再管排脱焊下垂较为严重

#1机组于2013年7月29日，锅炉冷却后，检修人员进入水平烟道，检查发现锅炉低温再热器出口至高温再热器之间的烟道内结焦积灰非常严重，整个水平烟道通流被堵塞面积约有80%，折燃焰角处积灰高度达1.5米左右。清理完焦渣后，重点检查高温再热器，发现高温再热器靠炉前管屏有12屏的吊挂脱落，即与顶棚的钢板或同一屏管子间的钢板脱焊，导致管排下垂，如图1所示。

2.1.2 高温受热面管排散乱突出

2009年下半年以来，发现屏式过热器、末级过热器、高温再热器管排存在错列、散乱逐渐严重。由于管排各段长度及材质不同，导致各段管子的热膨胀量不同；同时，受运行中烟气气流扰动，当管子热膨胀受力变形后，加剧管排与管排之间机械碰磨，在机组长期的运行中，现有的管排固定方式将无法起到预期的固定效果，高温再热器管排错列、散乱、减薄等现象越来越严重。



图 1 高再管排与顶棚钢板脱焊、管排下垂图

2009年下半年以来，RJ电厂分几次对屏过、末过管排散乱较严重的部分进行了分批整治，高再管排虽然也存在管排错列较严重的问题，但考虑到费用较紧，高再管屏数量较多（高温再热器65屏，末级过热器、屏式过热器各22屏）、管内蒸汽压力较小，危险性较屏式过热器、末级过热器小，因此高温再热器管屏没有进行整治。

2013年，5000Kj\Kg的易结焦印尼煤造成高再管排大量结焦，形成烟气走廊[1][2][3]将高再管屏连成一个整体，单个的管排“热胀冷缩”受阻，很多连接、固定的部位出现拉伤、脱焊、变形等问题，管排错列、散乱的现象进一步加剧；同时部分管段存在过热及吹损的现象。

2.1.3 高温再热器超温现象较突出

RJ电厂为哈尔滨锅炉厂生产的前后墙对冲锅炉，两侧烟气温度存在偏差，最大可达约50℃。技改前，部分高温再热器管屏超温现象较突出，特别是8、9、14、14-23号屏经常超过610℃报警值，如

表1所示。高温再热器管屏超温成为常态，为防止管屏发生蠕变，产生氧化皮[4][5][6]，日常运行中必须控制管屏超温。控制再热温度通常可以通过改变制粉系统运行方式、吹灰、降低机组升负荷速率起到一定作用，但不能从根本上解决高温再热器超温现象。

表 1 高温再热器技改前管壁超温情况

高再出口管屏		8	9	12	14	15	16	17	18	19	20	21	23	26	27
管屏超温测点温度（℃）	改前	620	616	612	615	612-619	617	618-622	614	612-622	615-621	620-626	616	612	612

以上问题，每年利用检修机会，实施高再管排整形，但未能从根本上解决存在的问题，很有必要进一步实施高温再热器改造。

2.2　改造必要性

2.2.1　原有高温再热器吊挂方式不合理

原有高温再热器炉内前部管屏采用膜式倒U型吊挂布置形式，膜式管子之间设计采用了不锈钢焊接，不锈钢和合金钢两种材质焊接在一起，在锅炉长期运行后，存在焊缝脱焊和管子本材拉裂现象，导致高再管排脱焊下垂，迫使整屏高温再热器管的重量将全部靠出口段管子承受，炉前方向半屏管子无吊点，长时间运行将会使前半部管子下垂越来越严重，造成出口段管子受额外应力而被拉裂，导致管子爆管[7][8][9]；因运行中挂焦较多时，严重时还可能造成整屏管子脱落发生跨踏，炉膛发生爆炸，造成严重的后果。

2.2.2　连接板与管子膨胀存在差异

原设计考虑锅炉稳定运行状态下连接板与管子膨胀差的因素，从而设计每层连接板长度不同，但在锅炉长期运行和启停过程中，不排除存在快启、快停的变负荷现象，从而导致两者因膨胀差过大而使焊缝产生裂纹，影响机组安全运行。

2.2.3　出厂时存在焊接缺陷

由于制造原因，产品出厂时存在咬边、浅表裂纹等原始焊接缺陷，导致现场运行时，焊缝缺陷逐渐扩展成较大裂纹甚至开裂，影响机组安全运行。

2.2.4　管排散乱管子碰磨减薄

高温受热面管排散乱，造成碰磨到管子减薄，影响锅炉的可靠运行。

基于以上原因，很有必要优化高温再热器连接方式设计，从根本上提高高再可靠性。

3　改造方案

3.1　高温再热器∩型改造

高再管屏整个长度较长，靠近上端的∩型部分管是薄弱部位，考虑技改成本，本技改不考虑整体更换高再管屏的方案，只更换高温再热器∩型管圈整体，管子规格51×4.5/7，材质SA-213T91 保持不变，并提升至顶棚管以上。

（1）设计管路穿顶棚，在与顶棚管接触部位安装护套管、梳形板，以保护管子，并防止保温材料脱落。为缓解穿顶棚管与顶棚鳍片的机械磨损，套管不与顶棚管鳍片焊接，每个∩型管圈与顶棚相交部位增加16个套管，材质SA-213TP347，套管只与顶棚管鳍片焊接。

（2）∩型管外数第1--8圈原为定位筋焊接连接方式，现更改为连环抱箍连接方式（高温再热器吊挂改造示意图），再与炉外吊挂耳板焊接固定；∩型管外数第9、10圈由于结构问题，无法改为抱箍连接，故两侧定位筋焊接连接方式不变。高温再热器倒U型技改前后对照见图2、图3。

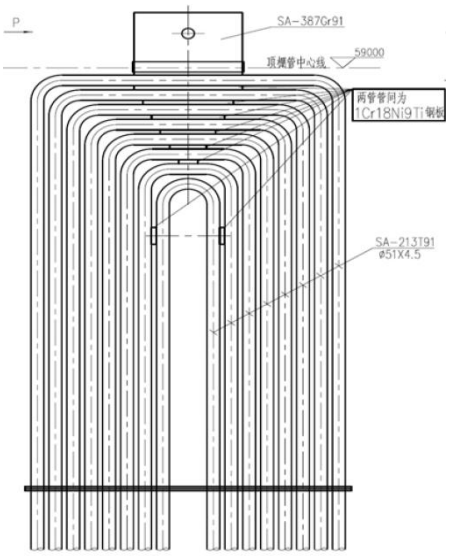


图 2 改造前倒 U 型管示意图

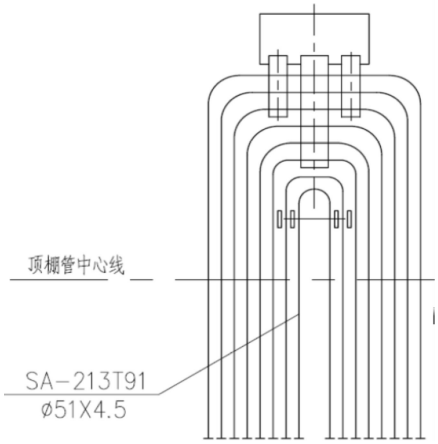


图 3 改造后倒 U 型管示意图

（3）将吊杆下部截短，并加工螺纹重新利用，同时吊挂耳板、吊挂钢板、吊挂板上移。

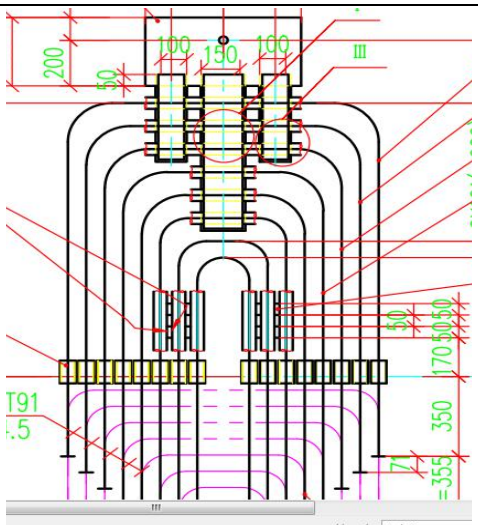


图 4 改造后管屏倒 U 型管段上体抱箍式吊挂连接

（4）为防止顶棚漏灰，对高再∩型管圈穿顶棚位置用密封弯板与密封板进行密封焊接。改变原设计不合理的管屏吊挂耳板结构，管屏自重不至于集中在某个点上，保证高温再热器运行安全可靠性，密封机构结构简图如图5所示。

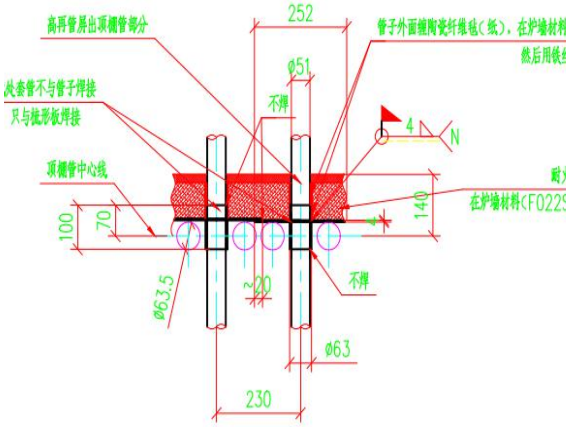


图 5 改造后顶棚管密封结构简图

3.2 管屏整形

为进一步巩固技改效果，提高高再可靠性，对高再管排变形严重的部分进行整治。按照锅炉厂设计的锅炉管排固定方式，在原来的管排固定方式上，重新加管夹固定，其结构如图6。

根据RJ电厂管排布置的特点，采用耐热高铬铸钢808型管夹及梳形卡的固定方式。管夹及梳形卡的耐热温度可以达到1050度，同时对管排的检修也比较方便，只需要更换管夹及梳形卡，不用对管排进行施焊，尤其是对T91管材而言，可以大大减轻检修压力和风险。

根据以往屏过、末过管排整治经验及效果（到目前已运行三年左右，现场管排仍然较整齐，管夹没有烧损迹象），对高再错列、散乱严重的管排错乱整治继续采用ZG1Cr25Ni20Si2Re耐热不锈钢制作的专用管夹。



图 6 高再管排同屏间管夹示意图

4 项目实施

1号炉高温再热器倒U型管屏改造项目施工工期40天，施工开始时间为2019年04月23日，工期紧，按照常规单组施工方式，无法在短短40天内完成该技改项目。为此，甲、乙双方及施工队伍三方经过现场核实，商讨决定采用多组同时施工，将65屏管排平均分成5组，大大缩短了工期，确保了在施工工期内完成项目改造。

4.1 项目实施主要内容

主要工程内容包括：拆除原有高温再热器倒U型管,割除高温再热器上部顶棚过热器管段密封板65排，单排约1500mm；割除高再∩型弯管520件，安装1040件管口封堵；安装∩型弯管组件65件，焊口约1040道；焊后局部退火热处理焊口热处理及检验1040道；增加12Cr1MoVG或15CrMo、347H套管；更换吊挂耳板65件；缩短、安装炉顶吊杆；施工时对管屏固定采取临时措施；∩型弯管安装完成后对该区域进行密封施工；对该区域进行大包内炉顶密封及保温浇注料施工。

4.2 同屏管子采用管夹固定

为进一步稳固管子，减少同屏管散乱，采用管夹固定，改造后的管夹如图7所示。



图 7 改造后高再管排同屏管架

4.3 焊后局部退火热处理

根据热处理有关规定，采用电加热绳/链片缠绕方式对接管子，消除应力,加热带及边缘要覆盖保温材料，加热宽度从焊缝中心起每侧不小于

100mm，保温宽度为每侧比加热宽度增加不小于150mm，热处理严格按照图8T91热工艺曲线实施。

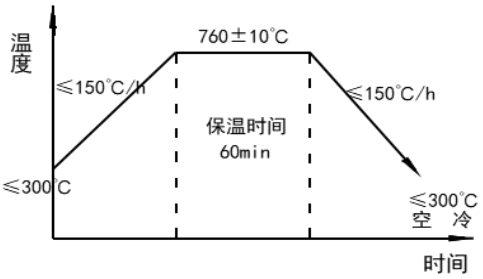


图 8 T91 热处理工艺曲线图

高温再热器现场套管如图9所示。



图 9 高温再热器现场套管图

5 改造效果简介

6月20日，在1号机组A修期间完成并网运行至10月3日，运行百天未发生泄漏等可靠性事件。

5.1 水压试验结果

5.1.1 水压试验规定

锅炉所有受压部件全都装焊完毕，所有焊口都探伤检验合格，所有鉴证资料准备齐全后，进行水压试验。水压试验时，压力应缓慢升降，速度一般不超过0.3Mpa/分钟。当水压达到3Mpa 时，应做初步检查，如未发现泄露可升至工作压力并再次检查有无漏水和异常现象，然后再升至试验压力，保压 20 分钟，然后降至工作压力进行全面检查，整个水压试验过程中，未发现破裂、变形和漏水现象，而且再热器压力5分钟内下降速度压降值≯0.25MPa，则认定为水压合格[10]。

5.1.2 水压试验结果

6月8日，改造完毕后，高温再热器进行水压试验，由于大面积换管，采用超压试验检验本次技改的是否达标。经过水压试验，二次汽系统水压试验5分钟压降值0.038MPa，高温再热器元件未发现变形，焊缝未见水珠，对照试验标准，本次高温再热器超压试验合格。

5.2 管排未出现超温现象

再热器倒U型弯头管改造更换及管排整形，原来经常超温的8、9、12、及14-23、26、27管屏（16、17屏仍超温，但较改前有所好转）在技改后超温现象基本得到控制，如表2所示。

表 2 高温再热器技改前后管壁超温情况对照表

高再出口管屏		8	9	12	14	15	16	17	18	19	20	21	23	26	27
管屏超温测点温度（℃）	改前	620	616	612	615	612-619	617	618-622	614	612-622	615-621	620-626	616	612	612
	改后	<605					614	616	<605						

5.3 管排未出现错乱现象

技改后运行百天后，锅炉临停，检查未发现管排错乱，技改前管排错乱现象得到很好抑制。

综上所述，RJ电厂本次高温再热器技改从根本上解决了高温再热器存在的安全隐患，消除了技改前管排错乱及超温现象，有利于锅炉的安全稳定经济运行。

6 结语

RJ电厂高温再热器改造项目改变了原有管排吊挂连接方式，并将管排由顶棚下面提高至顶棚外，有效解决了高再管排错乱及超温问题，提高了高再可靠性和锅炉经济性。

参考文献：

[1] 舒宜. 燃煤锅炉飞灰特性研究[J]. 动力工程,1990,10(3):15-21.
[2]王鹏程,陈廷章.锅炉烟气走廊的危害及防治措施[J].河南电力,2013(4):50-51.
[3]邓剑华,池作和,等.锅炉烟气走廊形成原因及消除措施[J].广西电力技术,2002,25(1):30-32.
[4]王学礼.1000 MW超超临界锅炉过热器爆管原因分析及防范措施[J].华电技术,2019,41(7):70-72.
[5]朱朝阳,刘绍强.超超临界机组过/再热器氧化皮生长试验研究[J].热力发电,2016,0(7):120-124
[6]张志远,丁明青.660MW超临界锅炉氧化皮防治介绍[J].锅炉技术,2011,42(3):63-66.
[7]李冰,刘小赟.大型火电机组“四管”爆漏原因分析与防治措施[J].华电技术,2012,34(3):57-59.
[8]王莹,吴少华,秦裕琨,李长志,解海龙,.大型电站锅炉过热器爆管原因综述及对策[J]. 中国电力,1998,31(10):26-29.
[9]莫耀伟.1000MW超超临界燃煤机组锅炉爆管原因分析[J].华东电力,2008,36(2):16-21.
[10]（DLT 612-2017 电力行业锅炉压力容器安全监督规程 国家能源局发布 2017-11-15发布）

作者简介：

邓山（1979），男，江西宁都，研究生，高级工程师，发电厂锅炉监督管理方向，E-mail：379766139@qq.com

海上风电场输电方式研究

李克[1]，吴迪[2]

（1.中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096；2.中国电建集团国际工程有限公司，北京 海淀 100101）

摘要：本文首先概述海上风电场的分类，并分析海上风电场的输电方式以及存在的问题，进而提出海上风电场输电方式的比较，以及不同区域海上风电场推荐使用的输电方式，希望对我国海上风电场的输电发展提供一定参考。

关键词：海上；风电场；输电方式

0 前言

为了更好的落实我国产业转型的绿色发展，减轻我国电力能源的供应负担，现阶段我国开始重视浅水区海上风电场的项目建设发展，随着相关科学技术的发展，海上风电场也逐渐走向规模化和深海化的发展。

1 海上风电场的分类

海上风电场一般可以分为近海风电场、深海风电场以及潮间带风电场三种，潮间带风电场指的是在沿海区域多年的平均大潮高潮线下降到理论中该区域的最低潮水位 5 米水深内区域开发建设的海上风电场；近海风电场指的是在理论最低潮水位以下 5 米到 50 米水深区间进行开发建设的海上风电场；深海风电场指的是其大于理论最低潮水位以下 50 米区域进行开发建设的海上风电场。

以国内外相关工程建设经验来看，海上风电场所在区域的水深越大，则其建设的成本便越高，建设技术越复杂，所以，现阶段我国开展的海上风电场项目建设主要是对近海风能资源进行开发利用[1]。

2 海上风电场的输电方式以及存在的问题

2.1 交流输电方式以及其存在的问题

交流输电方式主要是在规模较小且离岸距离较近的海上风电场群的输电工作中进行使用。交流输电方式具有技术方案成熟度较高、结构较为简单、可靠程度较高、浅水区海上风电场输送成本较小以及工程运行经验十分丰富的优势。但是，交流输电方式在实际应用阶段，也存在下列问题：

在海上风电场群进行长距离电力资源输送时，电缆内的电容效应较为明显；控制交流输电方式的无功电压补偿难度较大；交流输电方式的过电压问题较为显著；海上风电场和陆地电网之间产生的交互影响较大，没有做到故障隔离。使用交流输电技术的海上风电场结构主要为：集电系统、海上风电场、海上升压站、无功补偿设备以及海底交流电缆等。

以现阶段我国已经并入陆地电网的海上风电场群项目来看，其大多属于离岸距离较近的浅水区还剩风电场，因此使用的输电方式为交流输电方式。当下我国还海上风电场项目中使用的交流海缆电压等级主要有 35 千伏、110 千伏以及 220 千伏三种。而 35 千伏和 110 千伏电压等级的交流海缆会受到输送容量的限制，在输电过程中产生的电力资源损耗较大，海底走廊占用面积也较大，基于此，国内使用的主流交流输电方式选择的交流海缆电压等级在 220 千伏，电缆规格结构为单回三芯结构，具有 18 万千瓦到 35 万千瓦的输电能力。而 220 千伏的交流海缆具有更大的截面面积，在 500 千伏规格海缆的输电能力可以达到 40 万千瓦以上，但是由于受到绝缘技术、制造技术以及敷设技术等影响，应在考虑备用相的情况下，使用单芯结构，电缆铺设数量为 3 根到 4 根（单回条件下），需要占用的海底走廊资源较多。

2.2 柔性直流输电方式以及其存在的问题

柔性直流输电方式主要是用于海上规模较大且输电距离较远的海上风电场群的电力资源传输中。其主要的应用优势主要体现在以下几点：其在长距离输电中的输送容量更大；汇集输送时灵活程度和扩展程度较高；输电线路数量更少；海域资源占用较少；体积较小，方便进行施工以及扩建；对电力资源传输过程中的电压控制更加简单；在潮流反转时更加快速有效；可以提高系统的输电能力；输电阶段出现问题，在解决问题后可以快速恢复供

电功能；可以为无源电网进行供电。柔性直流输电方式的不足为：造价较高；现阶段技术不够成熟，输电稳定程度和可靠程度无法得到保障；相关工程项目的运行使用经验不足。现阶段国外部分国家在离岸距离较远的海上风电场电力资源传输时，使用的输电方式便是柔性直流输电[2]。

2.3 混合直流输电方式以及其存在的问题

就直流输电方式的技术发展路线分析可知，直流输电方式的未来发展分布会形成传统直流输电和柔性直流输电共同存在的情况。现阶段已经开始对二者联系使用方面进行研究，即形成混合直流输电系统的拓扑结构。这种方式可以将传统直流输电和柔性直流输电的优点进行充分利用，对两种输电方式的不足进行优化。混合直流输电技术具有独特的技术特点，可以在特定条件下展现出比传统直流输电和柔性直流输电更加优秀的性能，具有比柔性直流输电方式使用成本造价更少，应用场景更加广泛的特点。并通过进一步利用换流器的优势，可以形成混合多端直流输电的系统，实现系统的弱交流输送供电，并成为海上风电场连接的主要备选方案，可以满足海上风电场的功率输送需求。但是，现阶段对于混合直流输电方式的相关研究成果较少，其作为一种新兴的输电技术，还没有得到广泛的应用。

3 海上风电场输电方式的比较和推荐

3.1 输电方式技术经济的比较

就交流输电方式来看，其在不同风电输送容量下，陆地上的集控站点和基础平台造价在 400 兆瓦到 1000 兆瓦的容量范围区间内，其海上升压变的造价和海上风电场的装机容量有关，无功补偿部分的每千米单位造价和电缆的参数以及回数有关。而直流输电方式中，在 400 兆瓦的风电输送容量下，输送端的海上换流站的单位造价最高，即直流电缆的单位造价和输送容量成正比关系，在海上风电场容量由 800 兆瓦提高到 1000 兆瓦时，直流电缆单位长度造价上升近一倍，并且输送端的海上换流站单位造价需要考虑海上平台部分，即海上换流站需要考虑 5%的容量裕度。

由此得出结论：在不同容量下的交流输电方式和直流输电方式，其在容量 400 兆瓦以上的海上风电场电力资源汇集输送时，在 60 千米到 70 千米的输送距离区间中，两种输电方式的造价相同，若是海上风电场输电距离在 70 千米以内时，则应使用交流时段的方式，若是海上风电场输电距离大于 70 千米，则应根据实际情况选择合适的柔性直流输电方式[3]。

3.2 输电方式占海域资源的比较

以输送 100 万千瓦的海上风电场为例，其在不同输电方式中占用的海域资源也存在差异，若是使用 220 千伏的海缆进行输送则需要 3 回到 4 回，截面使用的海缆数量应为 3 根到 4 根（单回三芯结构），若是使用 500 千伏的海缆进行输送则只需要 1 回，海缆数量同样为 3 根到 4 根（单芯结构），其中考虑到备用相时应设计为 4 根，其对应的海缆保护区域为 250 米到 1150 米，在水深 25 米的情况下则需要占用海水宽度在 170 米。若是使用柔性直流输电的方式，则需要使用 1 回的±320 千伏的柔直海缆 2 根，截面为 2000 平方毫米，海缆的保护区为 150 米到 1050 米，占用海水宽度为 70 米。

由此得出结论：在输送相同大容量规模的海上风电场产生的电力资源时，柔性直流输电方式占用的海域资源更少，而交流输电方式在 500 千伏和 220 千伏形同。再结合海缆和升压站等配套设施的投资建设以及现阶段施工和制造技术的基础上，不会考虑使用 500 千伏的交流输电方式。

3.3 海上风电场输电方式的推荐

3.3.1 浅水区海上风电场输电方式

海上浅水区的风电场通常帘距离为 60 千米之内，因此选择使用交流海缆的方式进行输电。结合海上风电场使用的装机规模差异进行分析，推荐使用的输电方式如下：

第一，海上风电场装机规模小于 10 万千瓦时，应选择使用 35 千伏的交流海缆直接进行送出登陆操作。

第二，海上风电场装机规模大于 10 万千瓦时，应进行交流升压站的建设，将交流升压站建设在海上风电场附近的岛屿或者使用海上平台的方式进行交流升压站建设，将海上风电场的输出电流进行升压后，使用 110 千伏或者 220 千伏的交流海缆直接进行送出登陆操作。

3.3.2 深水区海上风电场输电方式

海上深水区的风电场通常离岸距离在 60 千米以上，使用的输电方式一般为柔直海缆的输电方式，结合海上风电场使用的装机规模差异进行分析，推荐使用的输电方式如下：

第一，海上风电场装机规模在 50 万千瓦到 100 万千瓦时，应进行海上柔直换流站的建设，使用单回柔直海缆的方式进行送出登陆操作，柔直海缆的规格应选择为电压在±200 千伏到±320 千伏之间。

第二，海上风电场装机规模大于 100 万千瓦时，可以使用的输电方式有两种类型：使用大容量柔直海缆输电的方式，即借助风电场附近的岛屿进行大容量柔直换流站的建设，岛屿的选择最好为无人岛屿，之后将海上风电场群产生的电力能源在海上进行汇集后，利用大容量柔直输电通道进行登陆操作。使用多端柔直输电的方式，即进行多个海上柔直换流站的建设工作，将海上风电场群产生的电力资源通过柔直海缆进行汇集并进行登陆操作。柔直海缆的规格应选择为电压在±320 千伏到±800 千伏之间。

就多端柔直输电方式和大容量柔直输电方式进行对比可知，根据相关规定原则，单个海上风电场的外部边线划定的海上风电场面积应控制在每 10 万千瓦孔子在 16 平方千米。针对海上风电厂需要将产生的输出电流进行汇集传输，应选择使用将每个海上风电场建设为平均规模在 40 万千瓦，海域面积占用在 64 平方千米的大小。对于大容量的海上风电场群而言，在选择使用大容量柔直输电通路进行输电系统外送操作，并且由于海上风电场群中最远距离的风电场位置可能会出现超过交流海缆的输送距离，容易发生过电压等电压控制方面的问题，对此类问题进行解决的方式应选择试用多端柔直输电的方式，以此提高海上风电场运行阶段的灵活程度和可扩展程度[4]。

举例而言，在越南南部建设的海上风电场群（越南金瓯 1 号 350 兆瓦海上风电项目），其规划在 27 个月之内完成建设，该项目共分成 4 个区域（A 区、B 区、C 区、D 区），计划布置 75 台单机容量 5 兆瓦风电机组，总装机容量 375 兆瓦，是截至目前整个东南亚地区规模最大的海上风电场开工建设项目。其中 A 区和 B 区为 190 兆瓦，这两个区域计划于 2022 年 10 月投入运行，并入当地电网发电，C 区和 D 区为 185 兆瓦，这两个区域计划于 2023 年 6 月投入运行，并入当地电网发电。为了有效降低其对海上资源的占用，需要将海上风电场之间的互补特性进行强化，降低电网受功率波动产生的冲击问题，在相关开发建设技术成熟后，再进行多端柔性直流输电系统的建设。基于越南南部建设的海上风电场群的建设时间以及空间布局的角度进行分析可知，可考虑在海上进行多个换流站的建设，使用多端柔直海缆将海上风电场群生产的电力资源输送到陆地上的换流站。

4 结束语

综上所述，在海上风电场群工程中使用的主要输电方式为交流输电以及 柔性直流输电两种，而由于交流输电方式存在充电功率较高和过电压的问题，一般在 40 千米的交流输电距离时，需要在海缆的一端安装高抗设备，而在交流输电距离在 40 千米到 80 千米之间时，需要在海缆两端安装高抗设备，若是交流输电距离超过 80 千米，则需要在海缆中间进行中继站建设，并将高抗设备安装在中继站处。现阶段，国内以及并入电网的海上风电场离岸距离较近，使用的输电方式均为交流海缆输电方式，随着海上风电场的开发，未来在浅水区的海上风电场群项目仍会采取交流海缆输电方式，在深水区的海上风电场群项目则需要结合实际情况选择使用柔性直流输电技术的输电方案。

参考文献：

[1]王鑫,王海云,王维庆.大规模海上风电场电力输送方式研究[J].电测与仪表,2020,57(22):55-62.

[2]刘景晖,万振东,李飞科.大规模海上风电场集群交直流输电方式的等价距离研究[J].电力勘测设计,2020(04):1-5.

[3]蔡晖,彭竹弈,吴晨,祁万春,谢珍建,徐政.海上风电场运用柔性直流方式并网的无功控制研究[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(03):153-157+164.

[4]吴峰,韩庭苇,黄弘扬,史林军,华文.含柔性直流输电的海上风电场群无功控制策略[J].可再生能源,2019,37(05):676-682.

作者简介：

李克（1982），男，山东烟台人，硕士，正高级工程师，电力勘测设计与研究，E-mail：best_like@163.com

吴迪（1986），男，黑龙江哈尔滨人，硕士，工程师，新能源及电力系统研究，E-mail：wudi304@126.com

对一次发电机定子接地故障的探究

罗文轩[1]，吴晴[1]，李辉[1]，尹天晟[2]，周大勇[3]

（1.华能安源电厂，江西 萍乡 337200；2.南昌科晨电力试验研究有限公司，江西 南昌 330096；3.华能江西分公司，江西 南昌 330000）

摘要：发电机是电力系统中最主要的电力设备之一，也是大型火力发电厂的核心主机，其重要性不言而喻。如何使发电机长期稳定的安全运行？当突发故障时，该如何把故障快速切除并在最短的时间内找到故障原因？我们要采取什么措施来预防，有哪些好的防范措施呢？这些话题一直是众多专家学者关注的焦点，也正是本文论述的主题。

关键词：发电机；继电保护与自动装置；事故分析；预防方案

0 引言

本文根据一次发电机的典型事故展开研究与分析，从事故前，事故时，事故后三个时刻，体现了继电保护与自动装置切除故障的选择性、速动性、灵敏性以及可靠性，也反映出事故发生的突然性，事故处理的严谨性。此次事故教训也使人们总结出更好的反事故措施以及预防方案。

1 运行工况介绍

某电厂机组为超超临界二次再热凝汽式发电机组，容量为660MW，三大主机采用哈—东—东配置，发电机为东方电机有限公司生产的QFSN-660-2-22B型汽轮发电机，是汽轮机直接拖动的隐极式、二极、三相同步发电机。发电机采用水-氢-氢冷却方式，即定子线圈(包括定子引线)直接水冷，定子出线氢内冷，转子线圈直接氢冷（气隙取气方式），定子铁心氢冷。[1]

发电机—变压器组采用南京南瑞继保电气有限公司生产的PCS-985B型发电机变压器成套保护装置。发变组保护由发变组保护A、B、C屏配置组成。发变组保护A、B屏各配置PCS-985B装置作为发电机、主变压器、励磁变压、高厂变的电量保护；C屏配置一套PCS-974FG发变组非电量保护装置。

发变组保护按双套主保护、双套异常运行保护、双套后备保护配置，符合电力系统保护双重化配置要求，每套保护具有主保护、异常保护及后备保护的全部功能，能反应被保护设备的各种故障运行状态。

发变组保护两套PCS—985B电量保护取不同组CT，主保护、后备保护共享一组CT，出口对应不同的跳闸线圈。

注入式定子接地保护辅助电源装置RCS-985U提供低频外加电源，注入到发电机定子绕组侧，与RCS-985发电机保护装置配合，构成一套完整的外加电源式定子接地保护。[2]

2 事故过程

2.1 事故发生前

该机组发电机第一次检修期间，打开励端侧人孔门进入发电机出线罩内对开裂的2个支撑瓷瓶进行了更换，并对发电机励侧定子端部下半部外部线圈、绝缘支架及紧固件、手包绝缘、绝缘引水管、汇流管及紧固螺丝进行了检查，未发现异常现象，发电机预防性试验未发现异常；第二次检修期间，对发电机转子接地铜辫进行了更换，清洁了外部端盖油污，对发电机汽、励两端人孔门打开进行了局部清灰，检查未见异常。

2.2 事故发生时

2.2.1 08:34:07，机组负荷574MW，主汽压力：25.8MPa，主汽温度：596℃，总燃料量：233t/h，给水流量：1589t/h，1A、1B、1C、1D、1F磨运行。1A定子冷却水泵运行，定子冷却水流量105t/h，定子冷却水压力0.3MPa，发电机氢压409kpa。

2.2.2 08:34:07:538ms时，发变组保护启动（查阅发变组保护装置波形图，为定子接地保护启动，169ms后即08:34:07:707ms时，发电机差动保护启动见图1）。



图1

2.2.3　08:34:07:748ms时，#1机发变组保护A、B套发电机比率差动保护跳闸出口，出口方式为跳灭磁开关、高压侧断路器201、关主汽门、跳高厂变A分支、跳高厂变B分支、启动厂变A分支切换、启动厂变B分支切换、解除失灵电压闭锁、启动断路器失灵。距离发变组保护启动210.15ms（见图2），距离发电机差动保护启动40.96ms（见图3）

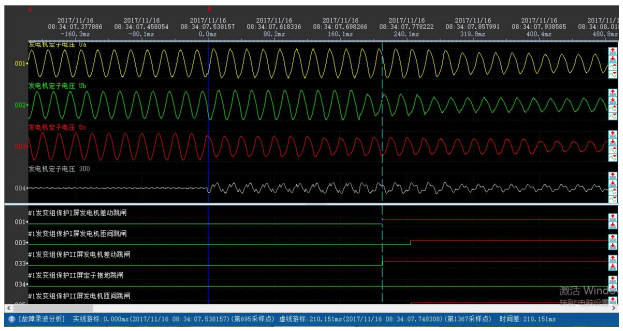


图2

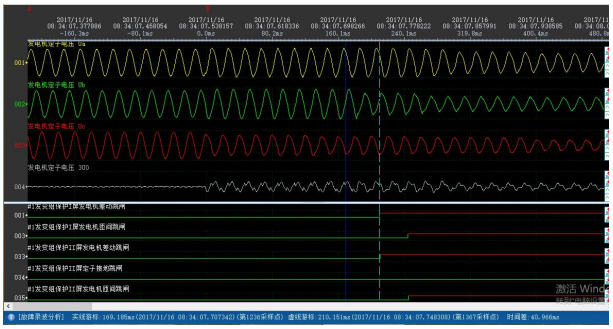


图3

2.2.4　08:34:07:782ms时，#1机发变组保护A、B套发电机匝间保护动作。距离发变组保护启动244.2ms。（见图4）

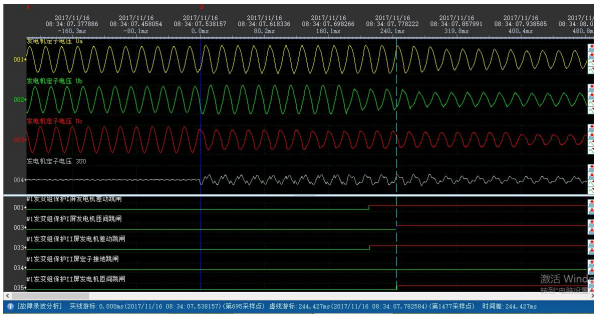


图4

2.2.5　08:34:08:508ms时，发变组保护B套注入式定子接地保护动作，距离发变组保护启动970.6ms。（见图5）（机组已跳闸）。

12s后发变组保护B套转子接地保护动作（机组已跳闸）。

2.3　事故发生后

2.3.1　事故发生后，立即调阅故障录波图（见图6-1，6-2），分析如下：

2.3.2　08.34.07.538时，发电机机端C相电压开始下降，发电机机端零序电压开始上升，发电机定子接地保护启动

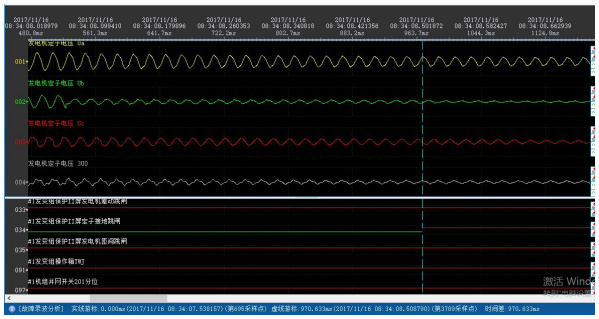


图5

2.3.3　08.34.07.721时，发展为BC两相接地短路，此时BC相短路电流分别为28.198A、26.405A.（见图6-3）

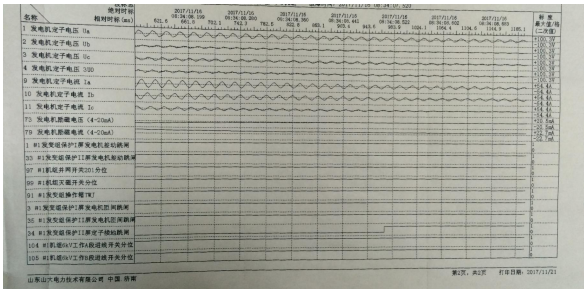


图6-1

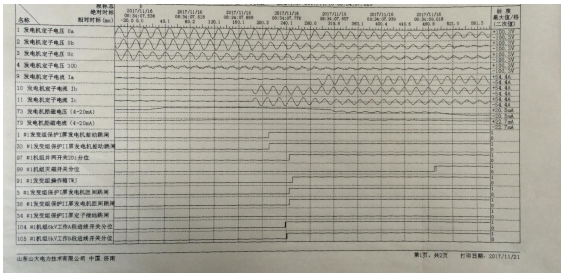


图6-2

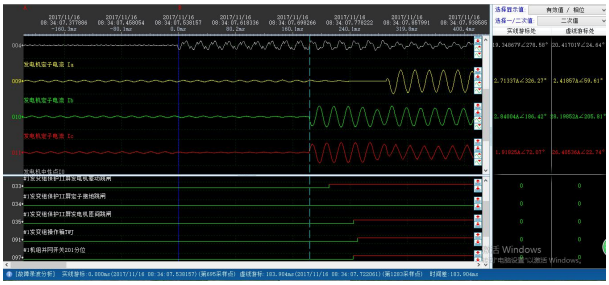


图6-3

2.3.4　08.34.07.748时，发电机比率差动保护动作跳闸(距离发电机差动保护启动

40.96ms)，此时的发电机中性点ABC三相电流分别为2.1A、29.11A、27.81A。（见图7）

2.3.5　08.34.07.782时，高压侧断路器201跳闸，距离发电机差动保护动作34.27ms（见图8）。

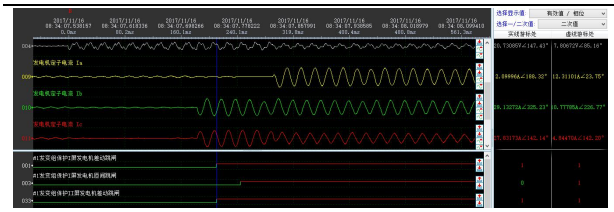


图7

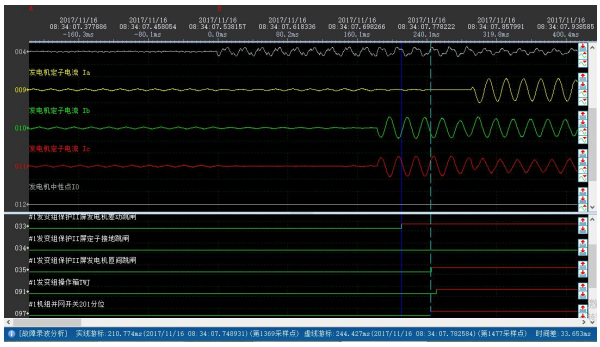


图8

2.3.6　此时灭磁开关还未分开，发电机中性点ABC三相电流分别为0.044A、27.233A、27.393A.（见图9）

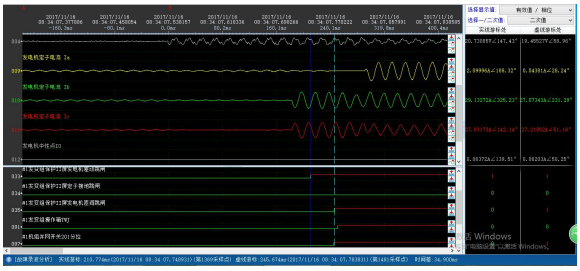


图9

2.3.6 08.34.07.829时，故障发展为三相短路（灭磁开关还未跳开）。此时发电机中性点ABC三相电流分别为27.305A、27.277A、13.241A.（见图10）

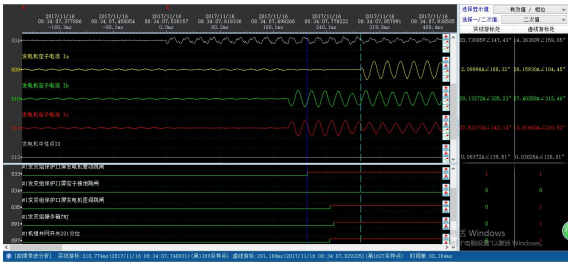


图10

2.3.7　08.34.08.028时，灭磁开关跳开，距离发电机差动保护动作279.46ms。（见图11）

2.3.8　08.34.08.508时，发变组保护B柜定子接地保护动作。

2.3.9　经检查，各保护功能出口正确动作。励磁变、励磁调节器及各个整流柜等部件无损坏。检查发电机出口及中性点CT二次回路完好，绝缘合格，无断线和短路。初步判断发电机中性点由C相接地发展为BC接地相间短路最后发展为三相短路。发变组双套保护动作正确。后根据发电机内部参数的变化情况，确定故障发生在发电机内部。

安排进行发电机氢置换以便进入发电机内检查。[3]

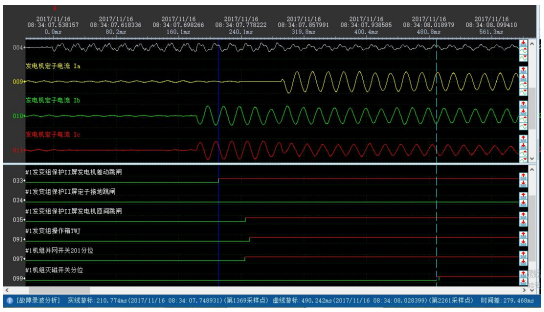


图11

2.4　发电机内部检查及损伤情况

2.4.1　发电机氢置换完成后，吊出氢气冷却器，技术人员进入发电机励端进行检查。发现1号发电机励端绕组在时钟两点半位置附近上、下层绕组均有电弧烧断现象，发电机内部污染严重。故障后测定子、转子绕组对地绝缘均为零。[4]发电机打开端盖抽出转子，技术人员进入到发电机内部进行了详细检查，检查结果如下：

2.4.1.1　发电机励侧端部整体污染严重，端部线棒、汇水管、绝缘支架等部件均覆盖有黑色粉末，故障点附近发现有少量的电弧烧熔的铜颗粒；

2.4.1.2　励侧端部两点半位置中间靠近槽口区域部分线棒烧断，烧坏的线棒为C相下层32号、33号、34号线棒，B相上层25号、26号、27号、28号线棒，A相下层30号、31号线棒。线棒受损位置附近的铜屏蔽也被局部烧坏。（见图12）；



图12

2.4.1.3　励侧端部绝缘支架与故障点对应位置两个紧固螺栓缺失，图13为正常螺栓布置；图14中红色箭头所指位置螺栓已脱落，脱落的螺栓在励侧下部七点钟位置找到，螺栓原为M24×70规格，现螺栓的螺纹已严重磨损（见图15），与缺失螺栓材质尺寸匹配；黄色箭头所示位置，螺栓连接的外部未见，残留部分在螺孔内，螺栓外部部分是烧掉还是烧断脱落不好确定，没有找到外部残留部分，也没有找到原装配的止动锁片（两个），既有锁片规格为43×55×1.2、直径为28mm（见图16），经金相分析材质均为不锈钢（SS304），与故障点对应的端部压圈、压指有局部受损，烧损部分线棒间距约15mm。



图13

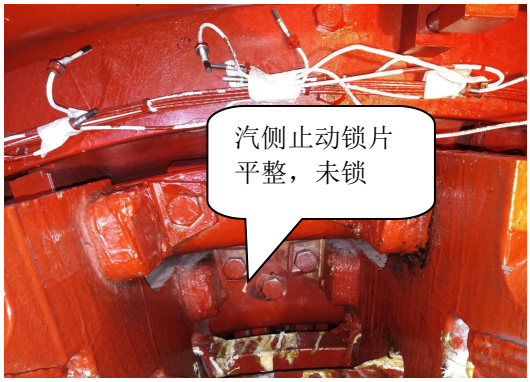


图14



图15

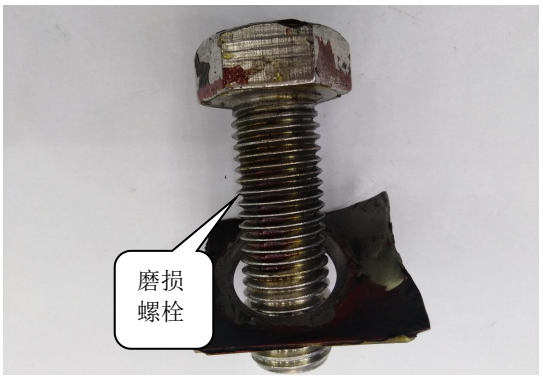


图16

2.4.1.4　检查所有端部绝缘支架，发现励端、汽端各有一个紧固螺栓的止动锁片未锁；

2.4.1.5　发电机转子励侧污染严重，励侧护环有高温烘烤痕迹，表面油漆变色，端部线圈已发现一根线圈绝缘破损。

3　故障原因分析

3.1　从投产至故障发生时，机组已运行接近18000小时，而且交接时各项试验合格，两次检修时正常的发电机预防性试验，结果均为合格，基本可说明线棒无原始绝缘缺陷。

3.2　本次发电机故障点在励侧端部绕组约两点半位置，故障点在端部绕组中间靠近槽口，与故障点对应的端部支架原有的两个固定螺栓，一个脱落掉在发电机励端底部七点位置（已找到）、一个烧熔螺栓头部（未找到），两个止动锁紧片（未找到），未找到的螺栓及锁片已在发电机发生两相或三相短路时完全烧熔（分析残渣里有螺栓及锁片金属成份）。

3.3　从脱落掉下的螺栓看，螺栓螺纹磨损严重，说明螺栓的止动锁片有松动现象，螺栓在发电机振动作用下产生松动并最终脱落。

3.4　根据绕组烧损部位与脱落、烧熔的两个螺栓处同一位置，基本可以推定螺栓、锁片脱落是故障的起因。脱落的金属件（止动锁片）掉落在线棒上，在机械振动的作用下对线棒绝缘造成了损坏，导致绝缘性能降低直至破坏，最终引发发电机故障。

3.5　从图17、图18示意图看，故障点短路放电损坏的线棒运行电位都比较低，正常情况下应不会产生绝缘击穿，从此角度上讲也可说明线棒是受到外部因素导致绝缘破坏。

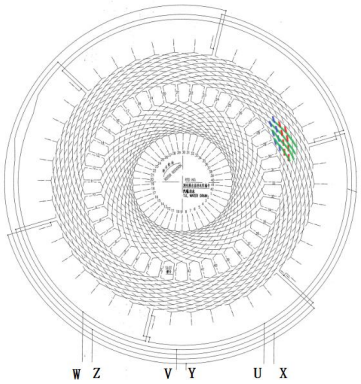


图17 线棒受损部位

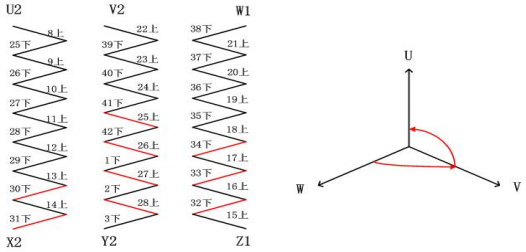


图18 故障短路点示意图

3.6 综合故障录波图、螺栓脱落位置、铜屏蔽局部烧熔部位以及定子线棒损坏位置之间的藕合关系，可以确定发电机故障是按如下方式发展的：

发电机励侧端部滑销上的螺栓止动锁片未锁好，螺栓松动，在机组运行过程中逐渐退出，螺栓最终掉落发电机底部（约七点钟位置），止动锁片由于振动及氢气气流影响，锁片卡在B相上层的#25、26线棒和C相下层#31、32线棒之间。在运行过程中止动锁片磨破线棒绝缘，首先造成C相接地，定子接地保护启动（0.5S延时出口），由于B相绝缘已受损严重，很快发展成B、C两相短路（185毫秒），导致发电机差动保护动作跳闸，由于短路热容量大，111毫秒后发展成发电机A、B、C三相短路故障。

4 反事故措施以及预防方案

从发电机故障看，故障发生与发电机励侧两点半位置定子绕组端部支架固定螺栓脱落有因果关系，掉下的金属件对临近绕组造成了损伤。故障起因主要是支架螺栓止动锁片锁紧不可靠，在发电机运行中的振动力作用下发生了松动脱落。因此，在后续发电机的进一步检查和修复过程中要对该部位和相同部位高度重视，查清楚其它点是否还有相同缺陷存在。根据本次事故提出以下反措：

（1）对其它螺栓及紧固件进行彻底检查，建议厂家改进止动措施；

（2）修复过程中制造工艺严格按制造标准工艺执行，加大质量监督力度；

（3）修复过程中所有绑扎、紧固、螺栓全面排查，防止松动；

（4）加强监造质量，做到监造过程中无死角。

（5）建议加强新机交接验收检查，消除类似隐患。

（6）在平时的检修中要多仔细谨慎，排除死角。

参考文献：

[1] 申恩保发电机定子接地分析与处理 [J].建筑工程技术与设计,2019,(22):3537.doi:10.12159/j.issn.2095-6630.2019.22.3449.

[2] 发电机定子接地保护动作分析及处理 [J] . 王立荣 . 电世界 . 2020,第003期

[3] 一起典型发电机定子接地故障的综合分析及现场应急处置建议[J]. 张晶. 科技资讯. 2016(03)

[4]660MW超超临界机组真空泄漏原因分析及处理 [J] . 华陆平 ,郝庆丰 ,项林 .

作者简介：

罗文轩(1998)，男，本科，助理工程师，从事继电保护工作，E-mail：937186175@qq.com

基于傅里叶变换与最大关联距离相结合的配电网故障选线新方法

邓志祥[1]，潘建兵[1]，黄灿英[2]，刘伟博[3]，魏向向[4]，郭亮[1]，郭紫华[5]，郝钰[1]，王晓卫[3]

（1.国网江西省电力有限公司电力科学研究院，江西 南昌 330000；2.江西建设职业技术学院，江西 南昌 330000；3.西安理工大学电气工程学院，陕西 西安 710054；4.柏林工业大学电气与计算机学院，德国 柏林 10115；5.国网江西省电力有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：针对现有配电网故障选线准确率与可靠性均偏低的问题，提出了一种基于傅里叶变换与关联距离相结合的故障选线新方法。当发生单相接地故障时，利用快速傅里叶变换（fast Fourier transformation，FFT）提取暂态零序电流第 2 个周期内的稳态工频分量，反演后得到暂态零序电流的整体工频分量；剔除暂态零序电流中工频分量后得到非工频自由振荡分量，在此基础上，利用非工频自由振荡分量构建基于关联距离的故障选线新判据；将具备最大关联距离所对应的线路判定为故障线路，与此同时，将其他线路判定为健全线路。仿真结果表明，该方法不受故障电阻、故障相角与故障位置的影响，同时还可抵抗噪声干扰，具有较强的鲁棒性。

关键词：故障选线；快速傅里叶变换；工频分量；关联距离

0 引言

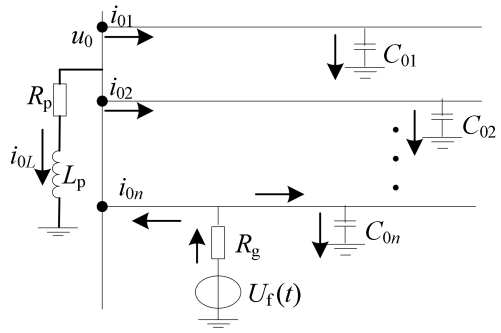
目前，我国配电网中经消弧线圈接地的运行方式已经广泛应用。现场运行表明，单相接地故障占所有故障类型的80％以上。当发生单相接地故障时，由于故障电流比较微弱，外加消弧线圈的补偿作用，而导致故障特征微弱。近年来针对此问题，国内外学者做了大量的研究工作，取得了很大的进步，但由于恶劣的现场环境，现有选线装置的适用性有所降低[1-3]。

发生单相接地故障时，现有的故障选线方法主要分为基于稳态信息、人工注入信息与基于暂态信息的故障选线方法。其中，基于稳态信息的选线方法[4-5]主要包括比幅比相法、零序功率以及零序导纳法等，该类方法易受系统运行方式、互感器反接与强噪声干扰等因素的影响，若发生高阻故障，则会使选线方法失效；基于人工注入法是通过检测所注入的特定电流信号实现选线，但该方法的准确性与接地电阻的大小有关，且选线效果受限于电压互感器的容量[6]；由于故障发生初始阶段的故障特征信息较为丰富，所以基于暂态信息的故障选线方法时效性强、准确率高，现有基于暂态信息的选线方法大都着眼于暂态特征量的提取，如能量法[7]、相关分析法[8]、小波分析法[9]、S变换[10]、HHT（Hilbert-Huang transformation, HHT）方法[11-12]等。文献[7]提出了多尺度能谱熵测度的故障模式分类方法，解决了强故障、小角故障和弱故障3类模式。文献[8]基于各线路零序电流相关系数矩阵实现接地选线，该方法的耐接地电阻能力有限。Michalik等[9]利用零序电压与零序电流小波系数之间的相位位移，提出了基于小波分析的故障选线方法，但该方法易受采样频率、母小波类型与分解尺度的影响。文献[10]提出了一种基于S变换的配网高阻故障检测方法，该方法在识别信号的不连续、重复与非平稳性方面显示出较高的准确性，其可靠性优于小波变换。HHT由希尔伯特-黄变换与经验模态分解算法构成，HHT算法在提取故障暂态信息时，无需设定基函数，且分解过程具备一定的自适应性，但基于HHT的故障选线方法的准确性容易受到采样频率、终止条件、模态混叠等的影响，所以在实际应用时，该方法的适用范围有限[11-12]。

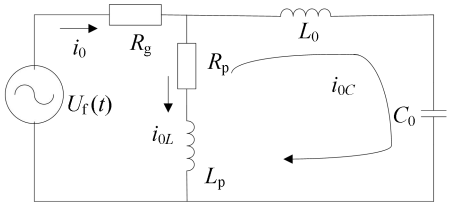
通过分析零序电流中的暂态信息与稳态信息，本文提出一种基于FFT分析与最大关联距离的配电网接地故障选线的新方法。该方法具体为：当发生单相接地故障时，首先利用FFT分析零序电流，计算零序电流中含有的工频分量；进而，剔除工频分量，得到非工频自由振荡分量；最后，根据非工频自由振荡分量的首半波极性，通过冒泡排序法，对振荡分量进行重新排列，以此构建出基于最大关联距离的配电网故障选线的新方法。

1 单相接地故障分析

谐振接地配电网发生单相接地故障时，零序电流在系统中的分布见图1(a)。其中：i0n为线路n的零序电流；C0n为线路n的零序电容；Rg为接地电阻；Lp、Rp分别为消弧线圈的等效电感与等效电阻；Uf(t)为故障的零序电动势。为了便于计算和分析，将图1(a)所示的零序电流分布系统等效为图1(b)所示的暂态零序电路。其中：i0L为电感电流分量；C0为系统等效对地零序电容；L0为线路零序等值电感。



(a) 谐振接地配电网电流分布



(b) 暂态等值电路

图1 暂态零序电流分析

由图1可知，在单相接地故障发生瞬间，健全线路的零序电流从母线流向线路，而故障线路的零序电流从故障点流向母线。另外，由于消弧线圈的电感Lp远大于线路的电感L0，所以可利用L0、C0、Rg组成的回路计算容性电流 i_{0C}。最终，可求得流过故障点的暂态零序电流i0(t)为[13]

$$i_0(t)=i_{0L}+i_{0C}=I_{Lm}\cos\varphi e^{-\frac{t}{\tau_L}}+(I_{Cm}-I_{Lm})\cos(\omega t+\varphi)+ I_{Cm}(\frac{\omega_f}{\omega}\sin\varphi\sin\omega t e^{-\delta t}-\cos\varphi\cos\omega_f t e^{-\delta t}) \quad (1)$$

式中：i0C(t)，i0L(t)分别为暂态零序电流的电容电流分量和电感电流分量；I_{Lm}，I_{Cm} 分别为电感电流和电容电流的幅值；ω为工频角频率；ωf、δ 分别为暂态自由振荡分量的角频率和衰减系数，且 $\delta=1/\tau_c$，其中 τ_c 为电容回路的时间常数；τ_L 为电感回路的时间常数；Φ为接地时故障线路相电压的初始相位。

由式(1)可知，当故障发生后，i0(t)由自由振荡的衰减分量与基频分量两部分组成。根据文献[14]，衰减因子δ受故障距离与Rg的影响较大，具体表现为：当Rg=1Ω，故障距离为10 km时，架空线路 $i_0(t)$ 的衰减时间为7.86 ms，电缆线路 $i_0(t)$ 的衰减时间为2.82 ms，且随着接地电阻的增大，衰减时间逐渐减小。因此，当发生高阻(Rg>100 Ω)接地故障时，随着时间的推移，工频分量很快在 $i_0(t)$ 中占据主导成分。基于此，为准确构建选线判据，本文引入傅里叶变换方法去除暂态零序电流中的稳态工频信号。

2 选线基本理论

2.1 离散傅里叶变换

2.1.1 基本理论

由第一节分析可知，发生单相接地故障瞬间，暂态零序电流呈现高频振荡衰减特性，但高频振荡衰减特性均持续时间很短。由于故障特征的持续时间段短，且故障特征不明显，导致现有接地故障选线技术的准确度一直不高；而在短暂的暂态零序电流信号中却蕴藏了丰富的故障暂态特征信息，如果能够获得并充分利用暂态信息，势必会增加故障选线的准确度。在此之前，需要准确地提取暂态零序电流中的高频振荡衰减信号，傅里叶(FFT)分析算法为提取高频振荡分量提供了一种变换途径[15]。具体为：通过提取故障发生后的第2个工频周期的工频信号，反演故障发生时刻第1个周期内包含的工频信号。

傅里叶变换的本质是将信号看成一系列正弦信号的叠加，故可利用FFT分析原始信号的谐波含量[16]。假设暂态零序电流信号i(t)满足狄里赫利条件，即

$$\int_{-\infty}^{+\infty}|i(t)|\mathrm{d}t<\infty \quad (2)$$

已知FFT变换存在，并定义为

$$I(\omega)=\hat{i}(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}i(t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}t \quad (3)$$

其反变换为

$$i(t)=\frac{1}{2\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}I(\omega)\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}\mathrm{d}\omega \quad (4)$$

由此可见，通过傅里叶变换可求得信号中的各谐波分量的参数，包括其频率、幅值与相位。

2.1.2 FFT提取暂态零序电流工频分量有效性分析

为证明傅里叶分析在提取暂态零序电流中工频分量时的有效性，本文利用ATP软件搭建仿真模型模拟单相接地故障，利用FFT提取暂态零序电流的工频分量，获取零序电流中含有的高频振荡分量。以线路1发生故障为例，设定故障瞬间时刻为0s，得到所获取4条线路的暂态零序电流信号，见图2。

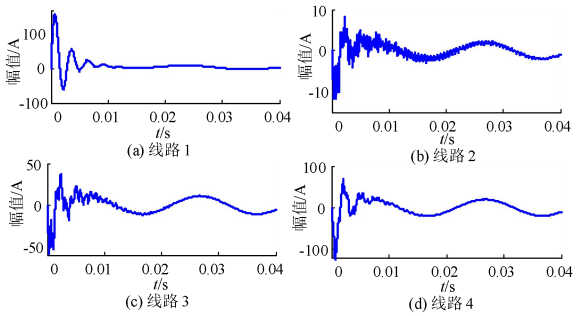


图2 暂态零序电流示例

依据图2，截取0.02~0.04s的电流数据，利用傅里叶分析拟合，得到工频结果为

$$\begin{cases} W_1 = 6.93\cos(100\pi t\text{-}1.318\ 6) \\ W_2 = 1.98\cos(100\pi t - 2.126\ 0) \\ W_3 = 10.8\cos(100\pi t - 2.130\ 2) \\ W_4 = 19.63\cos(100\pi t - 2.131\ 2) \end{cases} \tag{5}$$

将式(5)延长至前一个周期（0~0.02s），红线为FFT获得的工频信号，蓝线为暂态零序电流原始信号，最终得到的结果见图3。

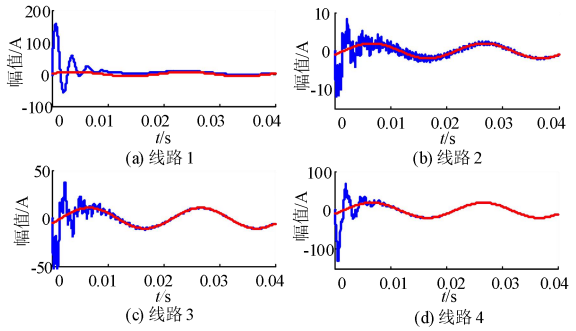


图3 FFT分析工频信号反演后波形

由图3可知，利用FFT分析得到的工频信号能够很好地拟合实际故障暂态零序电流中的工频分量，即工频信息经过延长后可准确地表示暂态零序电流中的工频信号。为了求取信号中的高频振荡分量，将原始暂态零序电流减去工频信息，获得的结果见图4。

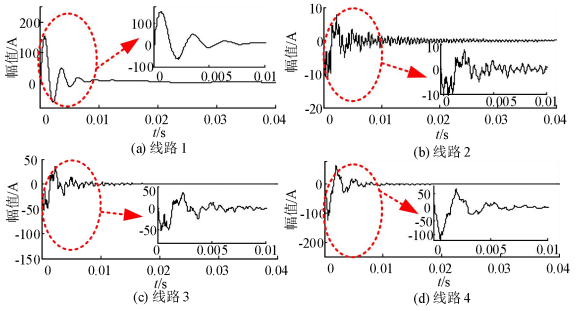


图4 高频振荡分量

由图4可知，通过剔除暂态零序电流中的工频信息，获得了准确的暂态零序电流中的非工频自由振荡分量，为获得故障选线判据提供了前提条件。

2.2 冒泡排序法基本原理

为构造故障选线判据，本文引入冒泡排序法对求得的非工频分量进行处理，其基本原理为[17]：依次比较相邻两个数的大小，若逆序，则交换。若为升序排序，则将较大的数后移；若为降序排序，则将较小的数后移。

以离散信号$f_{0j}(m)=f_{0j}(1)$，$f_{0j}(2)$，$f_{0j}(3)$，…，$f_{0j}(p)$为例，利用冒泡排序法进行升序排序，得到$S_j(m)$结果为

$$S_j(m) = S_j(1) < S_j(2) < S_j(3) < \mathrm{L} \prec S_j(p) \tag{6}$$

若采用降序排序，则得到$S_j(m)$结果为

$$S_j(m) = S_j(1) > S_j(2) > S_j(3) > \mathrm{L} > S_j(p) \tag{7}$$

3 基于FFT分析与最大关联距离的故障选线方法

根据上述分析可知，当单相接地故障发生时，工频分量会影响暂态零序电流的故障暂态特性。为了提高故障选线的准确性和可靠性，本文提出了一种基于FFT和最大关联距离的配电网故障选线方法，具体实施步骤如下。

步骤1：采样2个工频周期内线路j对应的暂态零序电流信号$i_{0j}(t)$。

步骤2：FFT分析第2个周期内的$i_{0j}(t)$，获得各线路基频信号；并反向延长基频信号的时间长度至2个周期，获得线路j的2周期内的工频信号$b_j(t)$。本文暂态零序电流的采样时长为0.04s，在求得其0.02~0.04s区间内的$b_j(t)$后，通过对其反向地延长0.02s，可得到0~0.04s区间内的基频信号，即暂态零序电流中含有的基频信号。

步骤3：计算线路j的非工频自由振荡分量Z_j，计算公式为

$$Z_j(t) = i_{0j}(t) - b_j(t) \tag{8}$$

步骤4：根据非工频自由振荡分量的首半波极值，将非工频自由振荡分量Z_j重新排列，得到排列后的分量P_j。排列规则为：若首半波极值$\mu>0$，则将Z_j降序排序；若首半波极值$\mu<0$，则将Z_j升序排序。

步骤5：计算P_j与其余线路的关联距离D_{ij}，计算公式为

$$D_{ij} = \left(\sum_{i,j=1}^{m} (P_i - P_j)^2 \right)^{1/2} \tag{9}$$

已知，当$i=j$时，$D_{ij}=0$。最终得到的互关联距离矩阵 $\boldsymbol{D}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & D_{12} & \mathrm{L} & D_{1m} \\ D_{21} & 0 & \mathrm{L} & D_{2m} \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & 0 & \mathrm{M} \\ D_{m1} & D_{m2} & \mathrm{L} & 0 \end{bmatrix}$。

步骤6：计算线路j的改进关联距离$\bar{D}_j$，计算公式为

$$\bar{D}_j = \frac{\sum_{i=1}^{m} D_{ij}}{m-1} \tag{10}$$

步骤7：选取$\bar{D}_j$的最大值$\bar{D}_{\max}$所对应的线路为故障线路。

根据上述选线步骤可知，所提故障选线方法通过对自由振荡分量进行重新排列，可增大故障线路与健全线路的差异，由此克服了故障特征微弱的问题；同时，对于健全线路与故障线路的工频信号强相关的故障情况，可实现准确、可靠与快速的选线。为使本文方法更加清晰，给出该方法的选线流程，见图5。

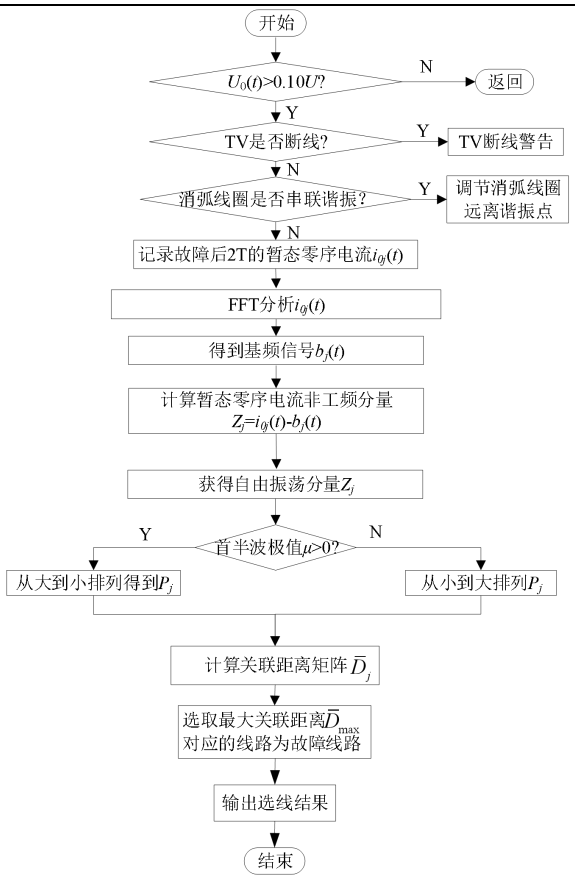


图5 选线流程

4 仿真与验证

4.1 仿真建模

利用电磁暂态仿真软件（alternative transients program, ATP）建立系统仿真模型，见图6，具体的线路参数见文献[13]。

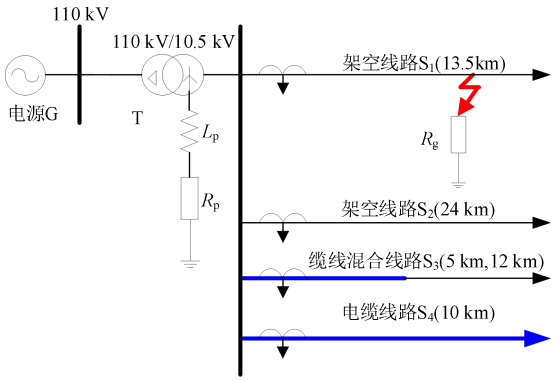


图6 10 kV谐振接地配电网

图6中：仿真模型的采样频率f_s为100kHz；周期T为0.02s；单相接地故障发生于0.02s；仿真时长为0.04s。

4.2 选线方法验证

以S_1发生故障为例，故障初相角θ为0°，故障位置与母线的距离为5km，接地电阻为100Ω。仿真得到各线路对应的暂态零序电流$i_{0j}(t)$，见图7。

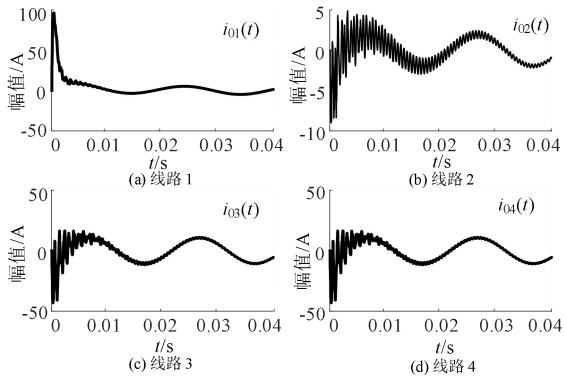


图7 暂态零序电流

由图7可知，暂态零序电流在0～0.02s内衰减较快，在第1个周期内工频分量占据主导振荡模态。利用FFT分析第2周期内的暂态零序电流信号，可求得工频分量幅值和相位信息。最终得到各线路工频信号b_j的表达式为

$$\begin{cases} b_1 = 5.08\cos(100\pi t - 1.269) \\ b_2 = 1.94\cos(100\pi t - 2.0983) \\ b_3 = 10.66\cos(100\pi t - 2.1037) \\ b_4 = 19.4\cos(100\pi t - 2.1051) \end{cases} \tag{11}$$

为验证求得信号的准确性与有效性，将原始暂态零序电流第2周期内的信号与求得的工频信号进行比较，对比结果见图8。

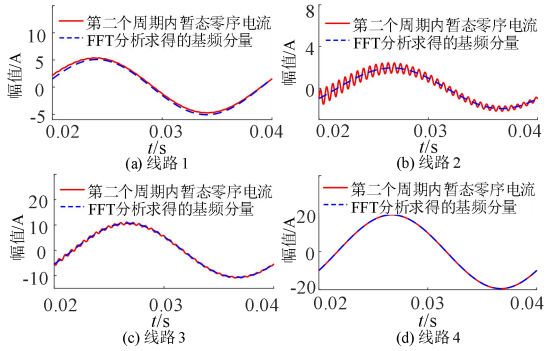


图8 各线路工频信号与FFT求得的基频信号对比

由图8可知，利用FFT能够准确获取暂态零序电流的工频信号。进而将FFT后求得的0.02~0.04s区间内工频信号的表达式反向延长，使得工频信号时长达到0.04s。依据式(8)，计算各线路的自由振荡分量Z_j，结果见图9。

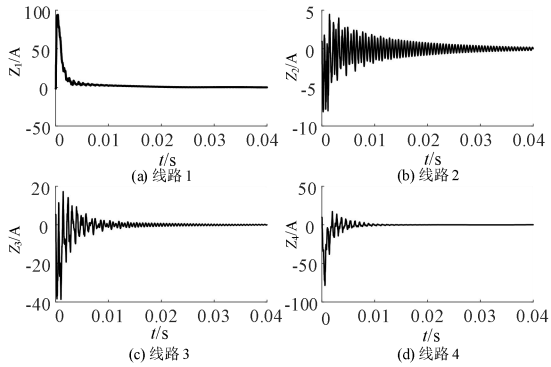


图9 各线路自由振荡分量

由图9可知，利用式(8)，去除工频信号后的暂态零序电流呈现高频振荡衰减特性，一个周期后信号的幅值很小，从而验证了FFT分析可用来提取非工频自由振荡分量。

由故障线路与健全线路暂态零序电流的流向分析可知，二者方向相反，这一特点在图9中表示为故障线路与健全线路的自由振荡分量的首半波极性相反。基于此，计算各线路自由振荡分量Z_j的关联距离矩阵。

首先根据Zj的首半波极性对其重新排列得到排列后的分量Pj，结果见图10。

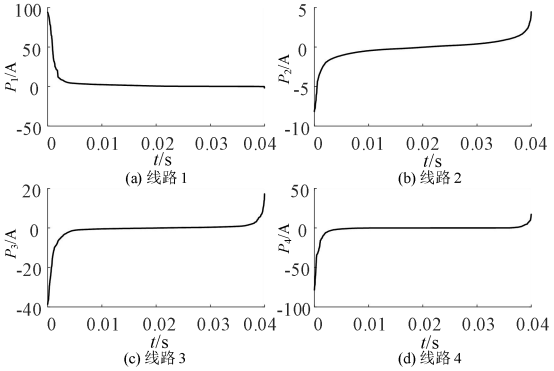


图10 各线路自由振荡分量

由图 10 可知，重新排列后的 Pj 加大了故障线路与健全线路的差异，也即故障线路与健全线路之间的关联距离普遍大于健全线路之间的关联距离，最终求得各线路互关联距离矩阵 Dij，见表 1。

表1 各线路互关联距离

线路	分量1	分量2	分量3	分量4
分量1	0.0000	873.15	1098.72	1273.08
分量2	873.15	0.0000	233.32	414.64
分量3	1098.72	233.32	0.0000	195.91
分量4	1273.08	414.64	195.91	0.0000

由表1可知，对于列向量$D_{i1}(i\neq1)$中各元素的值均大于该元素所在行的其他元素值，也即说明了，故障线路与健全线路之间的关联距离普遍大于健全线路之间的关联距离。依据式(10)，可得各线路改进的关联距离 $\bar{D}_j$=[1 081.65 507.04 509.32 627.88]，由于存在 $\bar{D}_{\max}=\bar{D}_1=1081.65$，最终线路1被选取为故障线路，验证了选线结果的准确性。

5 适用性分析

分别改变接地电阻Rg、故障初相角 β、故障距离H以及注入噪声强度，以验证本文故障选线方法的适用性，限于篇幅，仅列出部分选线结果。

5.1 改变接地电阻

以架空线S_1发生故障为例，此时，β 为90°，H为10km，当R_g分别为1 Ω、10 Ω、100 Ω和1000 Ω时，所得选线结果见表2。结果表明，当接地电阻改变时，利用本文方法能够准确地选出故障线路。

表2 不同电阻下选线结果

R_g/Ω	选线判据	最大值	选线结果
1	[3826.60 1805.90 1804.90 2390.50]	3826.60	S_1
10	[2580.49 1215.42 1216.14 591.89]	2580.49	S_1
100	[1042.10 483.74 484.86 606.11]	1042.10	S_1
1000	[314.12 179.80 237.52 239.79]	314.12	S_1

5.2 改变故障相角

当选取缆线混合线S_3发生单相接地故障时，R_g分别为1Ω、500Ω，H为5km，且 β 分别为0°、60°和90°，利用本文方法的选线结果见表3。由表3可知，当初相角改变时，利用基于改进关联距离的故障选线方法依然能够准确地选取故障线路。

表3 不同相角下选线结果

β /（°）	R_g/Ω	关联距离矩阵	选线结果
0	1	[1686.96 1687.03 3594.47 2814.53]	S_3
	500	[205.53 224.70 319.17 274.50]	S_3
60	1	[1685.93 1685.06 3566.97 2811.79]	S_3
	500	[245.89 242.88 487.77 410.29]	S_3
90	1	[1108.79 1102.78 2392.76 1732.62]	S_3
	500	[221.62 208.93 283.80 263.96]	S_3

5.3 改变故障距离

以混合线路S_3发生故障为例，当改变故障距离时，利用本文方法的选线结果见表4。设定R_g分别为1Ω、500Ω，β 为0°，且故障距离H分别为2km、9km和17km。由表4可知，本文方法的准确性不会受故障距离影响。

表4 不同故障距离下选线结果

H/km	R_g/Ω	选线判据	选线结果
2	1	[2040.54 2041.16 4190.82 3218.28]	S_3
	500	[194.06 203.50 274.93 210.77]	S_3
9	1	[1442.72 1441.37 3007.68 2474.08]	S_3
	500	[206.76 218.95 291.40 215.21]	S_3
17	1	[1030.25 962.15 1338.36 1144.21]	S_3
	500	[160.38 148.44 269.56 217.73]	S_3

5.4 不同噪声强度

众所周知，噪声对零序电流存在较大影响，当噪声过大时，本文方法是否有效，应做进一步测试。一般用SNR(signal noise ratio)表示噪声与原始信号的比例关系，具体测试为：当电缆线S_4发生接地故障时，β 为30°，R_g分别为5 Ω、500 Ω，H为6km，利用本文方法所得结果见表5。由表5可知，本文方法具有较强的抗干扰能力。

表5 不同噪声下选线结果

SNR/dB	R_g/(Ω)	选线判据	选线结果
10	5	[1407.73 1408.95 2331.84 2992.36]	S_4
10	100	[312.40 311.36 520.11 681.51]	S_4
10	1000	[132.76 127.04 130.03 197.72]	S_4

5.5 电弧故障

在配电网中经常发生高阻故障，但用普通的继电保护装置很难检测出来。另外，电弧闪络容易造成火灾隐患与人身伤害，因此准确检测电弧故障很有必要，且意义重大[18]。

Mayr电弧模型被广泛应用于配电网的电弧故障建模以及断路器电弧故障建模之中[19]。该模型基于弧柱能量平衡理论，是燃弧过程中电弧实时功率与耗散功率的比值，其表达式为

$$\frac{1}{g}\frac{\mathrm{d}g}{\mathrm{d}t}=\frac{1}{\tau}\left(\frac{ei}{P_0}-1\right) \tag{12}$$

式中：g为电弧电导；τ为燃弧时间常数；e为单位长度电弧电压；i为燃弧电流；P_0为单位长度弧柱功率损耗。在本文中，电弧长度l为400cm，τ为2.85×10^{-5}，仿真得到电弧电压与电流见图11。

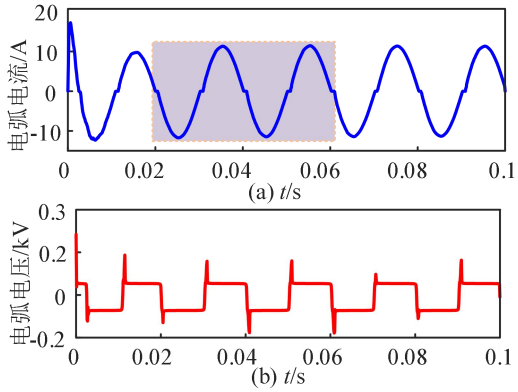


图11 电弧电压与电弧电流

由图11(a)可知，电弧电流的形状类似正弦函数，电弧电压的曲线表现为方波形式。当电弧电流过0时存在短暂的零休时刻，对应的电压增大达到峰值；在零休期间电弧熄灭，之后电弧重燃，电流幅值增加。

将上述电弧模型应用于辐射状配电网，当线路1、线路2、线路4分别发生电弧故障时，故障距离设定为5km，选线结果见表6。由表6可知，发生电弧故障时，本文方法依然可实现准确的故障选线。

表6 电弧故障下选线结果

电弧故障线路	选线判据	选线结果
S_1	[235.52 176.79 127.36 137.15]	S_1
S_3	[137.44 157.08 196.85 110.35]	S_3
S_4	[187.77 239.65 127.78 273.10]	S_4

通过适应性分析可知，本文选线方法适用于线性接地电阻以及非线性电弧的情况，且不受故障距离、故障电阻和故障初相角的影响；此外，在低信号噪声比10 dB的条件下，该方法仍能保持良好的性能。

6 结语

本文提出了基于FFT分析与改进关联距离的故障选线方法。通过FFT得到暂态零序电流工频分量，进而可得暂态非工频自由振荡分量；根据暂态非工频自由振荡分量的首半波极性，利用冒泡排序法重新排列自由振荡分量，求取各暂态零序电流的关联距离，进而实现故障选线。该方法放大了故障线路与健全线路的差异，提高了选线的可靠性，仿真结果验证了方法的有效性与适用性。

参考文献：

[1]WEI X, YANG D, WANG X, et al. Faulty feeder detection based on fundamental component shift and multiple-transient-feature fusion in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12(2): 1699-1711.

[2]WANG X, GAO J, WEI X, et al. Single line to ground fault detection in a non-effectively grounded distribution network [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 3173-3186.

[3]LIU P, HUANG C. Detecting single-phase-to-ground fault event and identifying faulty feeder in neutral ineffectively grounded distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(5): 2265-2273.

[4]薛永端，张秋凤，颜廷纯，等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化，2014，38(24)：80-85.

[5]庄伟，牟龙华. 融合零序电流衰减直流分量的矿山电网接地选线[J]. 电网技术，2014，38(4)：1087-1095.

[6]樊淑娴，徐丙垠，张清周. 注入方波信号的经消弧线圈接地系统故障选线方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(4)：91-95.

[7]王清亮，付周兴. 基于能谱熵测度的自适应单相接地故障选线方法[J]. 电力系统自动化，2012，36(5)：103-107,111.

[8]束红春，徐亮，彭仕欣，等. 谐振接地电网故障选线相关分析法[J]. 电力自动化设备，2008，28(9)：6-9，48.

[9]MICHALIK M, REBIZANT W, LUKOWICZ M,et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(4): 1793-1802.

[10]SAMANTARAY S, PANIGRAHI K , DASH P. High impedance fault detection in power distribution networks using time-frequency transform and probabilistic neural network [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2008, 2(2): 261 - 270.

[11]金涛，褚福亮. 基于暂态非工频零序电流的含DG新型配电网的接地选线方法[J]. 电工技术学报，2015，30(17)：96-105.

[12]任志玲，张媛媛. 基于改进的HHT变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制，2015，43(10)：

8-13.

[13]魏向向，温渤婴. 基于2阶累加生成相关性的谐振接地系统

故障选线方法[J]. 电网技术，2017，41(5)：1674-1682.

[14]薛永端，李娟，徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报，2015, 35(22)：5703-5714.

[15]WANG X, WEI X, YANG D, et al. Fault feeder detection method utilized steady state and transient components based on FFT backstepping in distribution networks[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 114.

[16]ABBAS SA , SUN Q , FOROOSH H . An exact and fast computation of discrete fouriertransform for polar and spherical grid [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2017, 65(8):2033-2048.

[17]王萧博，黄文焘，邰能灵，等. 一种源-荷-储协同的电热微网联络线功率平滑策略[J]. 电工技术学报，2020，35(13)：2817-2829.

[18]WANG X, WEI X, GAO J, et al. High-impedance fault detection method based on stochastic resonance for a distribution network with strong background noise [J]. IEEE Transactions on Power Delivery. Doi: 10.1109/TPWRD.2021.3075472.

[19]王宾，魏向向，张国辉，等.. 换流站交流滤波支路断路器燃弧故障建模分析[J]. 中国电机工程学报，2018，38(5)：1496-1503.

作者简介：

邓志祥（1990），男，硕士，工程师，研究方向为配电网继电保护、行波定位；

潘建兵（1986），男，硕士，高级工程师，研究方向为配电网继电保护；

黄灿英（1975），女，硕士，高级工程师，研究方向为配电网区段定位；

刘伟博（1997），男，硕士研究生，研究方向为配电网区段定位；

魏向向（1990），男，博士研究生，研究方向为配电网接地故障处置；

郭亮（1986），男，硕士，高级工程师，研究方向为配电网继电保护、配电自动化；

王晓卫（1983），男，博士，副教授，研究方向为配电网接地故障处置、故障选线与区段定位。

基于K近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法

李卿鹏[1]，陈磊[2]，王煜晗[1]

（1.国网江西南昌供电公司，江西 南昌 330200；2.南昌理工学院，江西 南昌 330200）

摘要：异常值检测是数据挖掘领域的重要研究分支，在设备运行状态监测和系统运营控制等方面应用广泛。电力数据异常值检测在电力系统中发挥着越来越重要的作用。密度峰值聚类是一类基于密度的聚类算法，其原理简单、运行高效，具有好的应用前景。但密度峰值聚类算法的聚类结果受截断距离的影响较大，参数敏感性强。针对密度峰值聚类算法的不足及电力数据的特点，本文提出了一种基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法。新算法引入 K 近邻思想，统一了密度峰值聚类算法的局部密度定义方式，且只需要确定一个参数 K，消除了截断距离对算法聚类结果的影响。实验结果表明：新算法能更加准确检测出电力数据异常值，具有好的应用前景。

关键词：异常值检测；密度峰值；电力数据；聚类分析；K 近邻

1 引言

随着智能电网的建设与发展，电力企业积累了大量形式多样、来源各异、结构复杂的电力数据。随着人工智能技术的快速发展[1,2]，对电力数据进行有效挖掘，可推动电网从传统以物理模型为核心的业务模式向以数据为基础的业务模式转变[3,4]，助推电网打造数字化新业态（数字经济）。

电力行业中的异常主要包括电力数据主属性丢失、电力数据统计口径不一致、用户异常用电行为、电力设备故障等。电力异常检测能够发现电力运行中的异常用电行为，在电力系统中应用广泛[5]。早期的电力异常检测采用的方法比较简单，多采用技术人员在现场进行排查，这种方法需要技术人员具有较好的经验积累，浪费了大量的人力物力资源，而且检测结果往往滞后于电力故障发生时间，并不能实时维护电网的运行状态；另外，这种检测的结果精准率不高，其结果与技术人员的经验相关程度高。通过数据驱动的方法对电力数据进行异常检测，可以减少对人力资源的依靠，实时监控电网运行状态，在电网处于警戒状态或异常状态时，能够及时发出警报或切断电源，不让故障扩散，减少电网经济损失，是电力异常检测的新趋势和未来发展方向[6-7]。

目前，电力数据异常值检测算法主要包括基于概率统计模型的异常值检测方法、基于分类的异常值检测方法、基于距离的异常值检测方法和基于聚类的异常值检测方法等。

基于概率统计模型的异常值检测方法假定被检测数据符合某一统计模型分布，诸如高斯混合的参数模型或诸如核密度估计的非参数模型等。将被检测数据与统计模型进行拟合，比较被检测数据与模型的偏差判断数据是否存在异常，实现对异常数据的检测。文献[8]和文献[9]分别介绍了基于有参数统计模型的异常数据检测方法和基于无参数统计模型的异常数据检测方法。实验结果表明，该类方法在数据的统计规律简单且数据规模不大时，能够获得好的检测结果。然而，电力数据具有典型的时间强耦合、高维复杂等特点，面对这类数据集，该类方法往往得不到好的检测结果。虽然这类方法具有良好的理论基础，但在实际应用中，由于无法预先知晓被检测数据满足那类统计模型，使得检测结果存在很大的盲目性和不确定性，限制了该类方法的应用。

基于分类的异常值检测方法属于半监督学习方法[10]。该类方法的检测过程分为训练和检测两阶段，训练阶段要求有足够多的已标记样本，训练分类器，然后通过分类器判断被检测数据是正常值还是异常值。这类方法的缺陷在于，它需要足够多的已标记样本用于训练分类器，且分类器性能的好坏直接影响着检测精度。神经网络是一种基于分类的异常值检测算法，该算法具有较好的自主学习能力，但其推导过程缺乏可解释性[11]。

基于距离的异常值检测基于如下假设：即若一个数据对象和大多数点距离都很远，那这个数据对象就是异常值。基于距离的异常值检测方法比基于统计模型的异常值检测方法简单，因为为一个数据集合定义一个基于距离的度量标准比确定这个数据集合的分布容易的多。樊瑞宣[12]等人提出了一种个性化 k 近邻的离群点检测算法（Outlier Detection Algorithm with Personalized k-Nearest Neighbor，PKNN），该算法中每个样本的 k 近邻数不需要人为设置，由算法自动确定，使得处于密集区域的样本拥有较多的近邻，稀疏区域的样本拥有较少的近邻，更符合数据集的实际分布。该类方法的思想简单，由于需要计算两数据点间的距离，其时间复杂度高，且方法对参数 K 敏感，不同的 K 值，其检测结果差异较大。

基于聚类[13,14]的异常值检测方法属于无监督学习方法。通过假定正常的数据属于某一或某几个类

簇，而不属于任何类簇的样本则视为异常点。异常值检测其实是聚类分析中寻找数据集中奇异点的过程。常用于异常值检测的聚类算法有：DBSCAN、BIRCH、CLARANS、STING、CLIQUE、KNN[15, 16]等。基于聚类的异常值检测算法的检测效果较好，但其时间复杂度一般较高，且聚类结果受参数的影响较大。

密度峰值聚类（Density Peaks Clustering, DPC）算法是 2014 年 Rodriguez 等人[17]提出的一种新的基于密度的聚类方法。该算法的主要思想在于对聚类中心的刻画上，作者认为聚类中心是由一些密度较大且相对距离较远的样本所组成。DPC 算法能自动确定类簇个数且能聚类任意现状类簇，是目前聚类分析的研究热点。但 DPC 算法也存在一些问题：1）算法的聚类结果依赖截断距离的取值，但截断距离的取值确定较困难；2）算法的局部密度定义方式未考虑数据规模及其分布，致使聚类精度不高[18]。

针对电力数据的特点，本文提出一种基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法。目前，很少有文献将密度峰值聚类算法用于异常值检测。本文利用 K 近邻思想重新定义 DPC 算法的局部密度，改善原始算法没有考虑数据局部特点以及局部密度定义不统一的不足；同时只需要确定一个参数 K，消除了截断距离对算法聚类效果的影响，且参数较易确定其取值。将新算法应用于电力数据异常值检测，实验结果表明，新算法能够准确实现电力数据的异常值检测。

2 密度峰值聚类算法

DPC 算法的基本思想如下：1）密度峰值的局部密度较大，并且被密度均不超过它的邻居包围；2）各密度峰值间的距离相对较远。DPC 算法提出了两种变量来表征样本 i 的密度和距离，即局部密度 ρ_i 和到最近更高局部密度样本的相对距离 δ_i。局部密度 ρ_i 的计算公式为：

$$\rho_i = \sum_j x(d_{ij} - d_c) \tag{1}$$

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & x < 0 \\ 0 & x \geq 0 \end{cases} \tag{2}$$

其中，d_{ij} 为样本 i 与 j 之间的欧氏距离，d_c 为截断距离。当数据集规模较小时，局部密度采用高斯核函数计算，计算公式为：

$$\rho_i = \sum_j \exp(-\frac{d_{ij}^2}{d_c^2}) \tag{3}$$

样本 i 到较高局部密度样本的最近距离由 δ_i 表示，δ_i 的计算公式如下：

$$\delta_i = \begin{cases} \min\limits_{j:\rho_j > \rho_i} \left(d\left(x_i, x_j\right) \right), \text{ if } \exists \text{j s.t. } \rho_j > \rho_i \\ \max\limits_{j} \left(d\left(x_i, x_j\right) \right), \text{ otherwise} \end{cases} \tag{4}$$

从式(4)可以看出，如果样本 i 具有最大的局部密度，则其对应的相对距离也是最大的。

DPC 算法将 ρ_i 和 δ_i 均较大的样本作为密度峰值。为寻找密度峰值，DPC 算法绘制以 ρ_i 为横坐标，δ_i 为纵坐标的决策图来选择密度峰值。为更好地表示密度峰值，DPC 算法定义了一个决策值参数 γ_i：

$$\gamma_i = \rho_i \times \delta_i \tag{5}$$

DPC 算法认为局部密度大且距离远的样本为密度峰值，即选择 γ_i 值大的点作为密度峰值。找到密度峰值后，剩余的样本被分配给比其密度高的最近样本所在类簇。

3 基于K近邻密度峰值聚类的电力异常值检测算法

3.1 基于 K 近邻的密度峰值聚类算法

DPC 算法的高斯核和截断核的局部密度均与截断距离相关，且不同数据集的最佳截断距离取值存在较大差异[19]；此外，DPC 算法的局部密度主要由截断距离范围内的样本决定，截断距离范围外的样本对局部密度的贡献低，导致局部密度大的区域内会有更大概率出现密度峰值，对密度分布不均数据而言，就会使类簇中心集中在稠密区域，稀疏区域没有类簇中心。经过分析可知，一个样本与其 K 个近邻点的相对密度能更真实反映该样本是否为密度峰值。

定义 1 基于 K 近邻的局部密度。新的样本局部密度定义为：

$$\rho_i = \exp(-\frac{\sum\limits_{j=knn(i)} d_{ij}^2}{\sum\limits_{j=knn(i)} \sum\limits_{v=knn(j)} d_{vj}^2}) \tag{6}$$

其中，d_{ij} 为样本 i 与样本 j 间的欧氏距离，$knn(i)$ 为样本 i 的 K 个近邻点的集合，$\sum\limits_{j=knn(i)} d_{ij}^2$ 为样本 i 与其 K 个近邻点的欧氏距离之和，它代表 i 点的离群程度，该值越大，说明样本 i 的离群程度越大，该样本的局部就越稀疏。$\sum\limits_{j=knn(i)} \sum\limits_{v=knn(j)} d_{vj}^2$ 代表样本 i 的 K 个近邻点的离群程度之和，该值越大，该点的局部密度就越大。

这样设计局部密度的优势在于，它使样本的局部密度仅与其 K 个近邻点有关，排除了远处无关点的干扰，而且它计算的局部密度为该点与其 K 个近邻点的相对密度，能够调节不同密度分布类簇中样本的局部密度大小，使得稀疏类簇样本的局部密度升高，密集类簇样本的局部密度降低，更有利于找

到稀疏类簇中的密度峰值，从而提高对疏密程度相差较大的数据集的聚类效果。

3.2 异常值检测原理

求出数据集中所有样本点的(ρ_i,δ_i)后，绘制ρ_i和δ_i的决策图，从决策图中找到同时具有较大ρ值和δ值的点，这些点作为数据集的类簇中心。从异常值检测的角度看，在决策图中同样可以直观看出具有较小ρ值和较大δ值的点，这些点可认定为异常点。

考虑到电力数据的特点，本文设定异常值应满足以下条件：局部密度小于局部密度阈值$\rho_i < \rho_f$，同时相对距离大于相对距离阈值$\delta_i > \delta_f$时，据此判定电力数据的异常值。局部密度阈值ρ_f的公式为：

$$\rho_f = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\rho_i - \varepsilon_\rho \tag{7}$$

相对距离阈值δ_f的公式为：

$$\delta_f = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\delta_i - \varepsilon_\delta \tag{8}$$

式中，N 表示电力数据集的样本总量；ε_ρ与ε_δ表示经验参数。

3.3 异常值检测流程

输入：电力负荷数据 X，邻近个数 K。

输出：异常数据。

步骤 1：数据预处理。对负荷数据进行预处理，用均值替代法补上缺失值等。

步骤 2：计算样本间的欧氏距离，构建样本的距离矩阵。

步骤 3：根据式(6)和(4)，分别计算样本的局部密度ρ_i和相对距离δ_i。

步骤 4：依据领域专家的经验，设置ε_ρ与ε_δ；根据式(8)和(9)，计算局部密度阈值ρ_f和相对距离阈值δ_f。

步骤 5：将$\rho_i < \rho_f$和$\delta_i > \delta_f$时的样本i认定为异常值，输出异常数据。

4 实验结果与分析

4.1 数据来源

为验证基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法的有效性，本文选用某地区交流 10 kV 配电变压器 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日共 366 天的负荷数据。该电力负荷数据属于仓储行业，其采集频率为 0.5h，日负荷曲线有 48 个数据点。其中案例 1 为单台变压器数据，案例 2 为 10 台变压器 2020 年 9 月 22 日至 27 日共 6 天的日负荷数据。本文使用均值替代法，即使用除缺失点外的其他值的均值代替该属性缺失值。

4.2 单台变压器异常负荷曲线检测

单台交流 10KV 配电变压器 2020 年 1 月 1 日至 2020 年 12 月 31 日共 366 天的负荷数据曲线如图 1 所示。

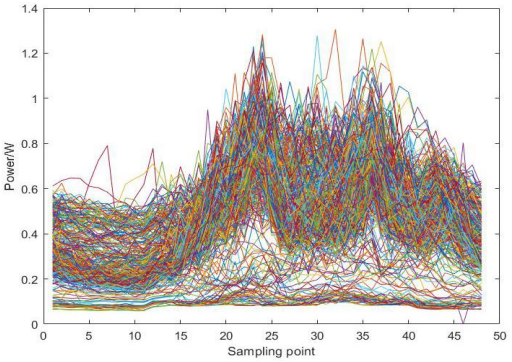


图 1 单台变压器的日负荷曲线

从图 1 可以看出，该台变压器的日负荷运行趋势大致相同，但个别曲线较大程度偏离了正常运行模式。按照基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法的步骤，画出该台变压器的异常值检测决策图，如图 2 所示。

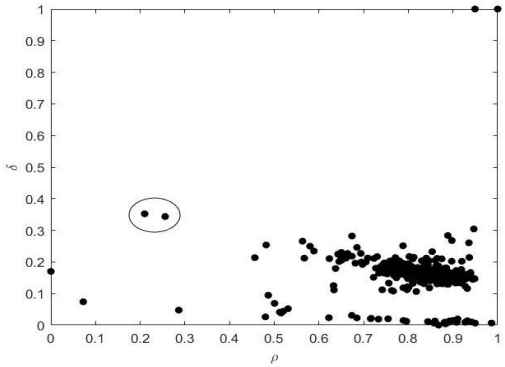


图 2 单台变压器的异常值检测决策图

从图 2 可知，大部分样本的局部密度和相对距离落在局部密度大于 0.4 且相对距离小于 0.3 的区域，只有极个别样本的局部密度和相对距离落在上述区域之外。根据异常值的局部密度和相对距离应满足局部密度较小，相对距离较大的原则，可以清晰的找出其异常值分布。图 2 中已用空心圆圈标注出异常点。

设置经验参数$\varepsilon_\rho = 0.4$，$\varepsilon_\delta = 0.14$，按照公式(7)和(8)将电力数据中的异常值找出，为图 2 中所圈出的点。单台变压器的异常负荷曲线如图 3 所示。

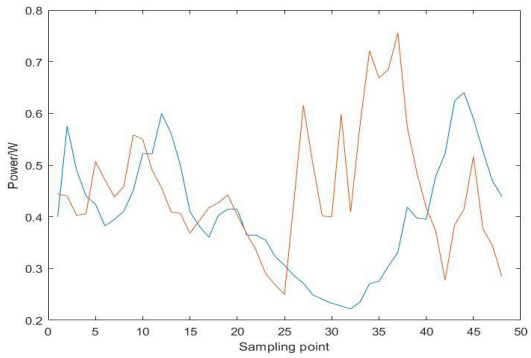


图 3 单台变压器的异常值

对比图 1 与图 3 可知，基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法可以从负荷数据中将不同于常规用电模式的曲线检测出来。在总共 366 条电力日负荷数据中，共检测出 2 条异常电力数据，分别是 2020 年 9 月 26 日和 9 月 27 日。图 3 中的蓝色和红色曲线分别表示 2020 年 9 月 26 日和 2020 年 9 月 27 日的日负荷曲线。从图 1 和图 3 可以看出，正常情况下，第 25 号采样点会有一个用电高峰，而 9 月 27 日的第 25 号采样点达到一天中用电最小值，9 月 26 日的第 25 号采样点用电量也非常低且在 25 号采样点和 35 号采样点间没有用电峰值，明显不符合此行业的正常用电规律，是异常数据。

4.3 多台变压器异常负荷曲线检测

对 10 台变压器的日负荷数据同时进行异常检测，步骤与案例 1 相同，10 台变压器 2020 年 9 月 22 日至 27 日共 6 天的日负荷曲线如图 4 所示，从图 4 发现个别天数数据出现异常。

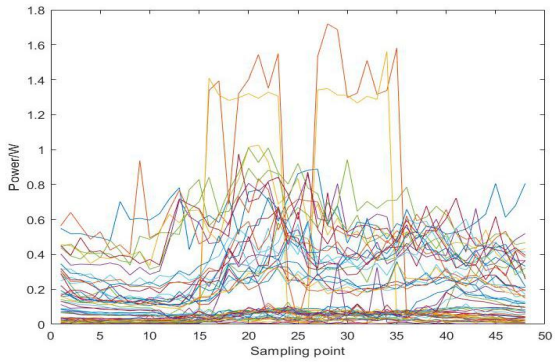


图 4 10 台变压器 6 天的日负荷

依据本文提出的电力数据异常值检测算法画出上述数据的异常值决策图，如图 5 所示。从图 5 可知，大部分样本的局部密度和相对距离落在局部密度大于 0.5 且相对距离小于 0.4 的区域，设置经验参数 $\varepsilon_\rho = 0.4$， $\varepsilon_\delta = 0.3$，按照公式(7)和(8)将电力数据中的异常值找出，异常用电数据为图 5 中用空心圆圈标注出的两个数据点。

图 6 检测出的 10 台变压器的异常值，这两个异常值均是第五台变压器中的日负荷数据，分别是该台变压器 2020 年 9 月 24 日和 2020 年 9 月 25 日这两天的日负荷数据。由图 6 可以看出，两条异常曲线均从第 15 号采样点到第 35 号采样点间出现了用电异常升高和下降的情况，明显异于其他变压器及其他日期的用电情况。

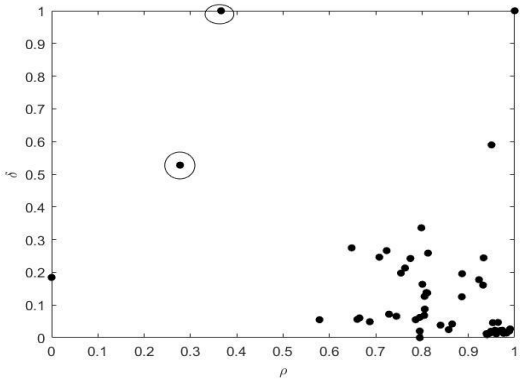


图 5 10 台变压器的异常值检测决策图

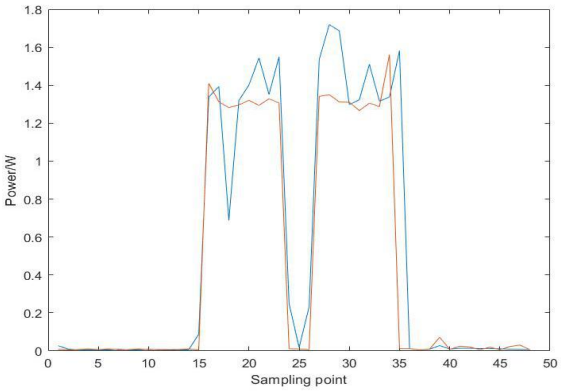


图 6 10 台变压器的异常值

综上，本文提出的基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法不仅能够检测单一变压器的负荷数据的异常值，在面对多变压器的日负荷数据时也能得到好的检测结果，说明了该算法的普适性。

5 结论

本文提出了一种基于 K 近邻密度峰值聚类的电力数据异常值检测算法。该算法使用样本的 K 近邻信息重新定义局部密度，统一了样本的局部密度定义及消除了截断距离对算法聚类效果的影响；定义了判断异常值的规则，从异常值检测角度对其进行优化。新方法在单台及多台变压器日负荷曲线的仿真实验中表现出了良好的性能，验证了该算法的有效性和普适性。

参考文献：

[1]Jia Zhao, Wenping Chen, Renbin Xiao, Jun Ye. Firefly algorithm with division of roles for complex optimal scheduling [J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2021, 22(10): 1311-1333.

[2]Li Lv, Jia Zhao, Jiayuan Wang, Tanghuai Fan. Multi-objective Firefly Algorithm Based on Compensation Factor and Elite Learning[J]. Future Generation Computer Systems, 2019,91:37-47.

[3]董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11. (Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. From Smart Grid to Energy Internet:Basic Concept and Research Framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.)

[4]陈超. 电力大数据质量评价模型及动态探查技术研究[J]. 现代电子技术, 2014, 37(04):153-155.(Chen Chao. Research for electric power big data quality evaluation model and dynamic exploration technology[J]. Modern Electronics Technique, 2014, 37(04):153-155.)

[5]王桂兰, 周国亮, 赵洪山, 等. 大规模用电数据流的快速聚类和异常检测技术[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(24): 27-33.(Wang Guilan, Zhou Guoliang, Zhao Hongshan, et al. Fast Clustering and Anomaly Detection Technique for Large-scale Power Data Stream[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24): 27-33.)

[6]Jia Zhao, Zhi-feng Xie, Li Lv, Hui Wang, Hui Sun, Xiang Yu. Firefly Algorithm with Deep Learning[J]. Acta Electronica Sinica, 2018, 46(11): 2633-2641.

[7]Li Lv, Jia Zhao. The Firefly algorithm with Gaussian disturbance and local search[J]. Journal of Signal Processing Systems for Signal Image and Video Technology, 2018, 90(8-9):1123-1131.

[8]卫薇, 龙玉江, 钟掖. 基于概率统计模型的电力IT监控对象特征异常检测[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2019, 50(4): 612-618.(Wei Wei, Long Yujiang, Zhong Ye. Anomaly Detection for Characteristics of Power IT Monitoring Objects Based on Probability Statistic Mode[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2019, 50(4): 612-618.)

[9]Zheng Kedi, Chen Qixin, Wang Yi, et al. A Novel Combined Data-Driven Approach for Electricity Theft Detection[J]. IEEE transactions on industrial informatics, 2018, 15(3): 1809-1819.

[10]Lee S C, Nevatia R. Hierarchical abnormal event detection by real time and semi-real time multi-tasking video surveillance system[J]. Machine Vision & Applications, 2014, 25(1): 133-143.

[11]Dau H A, Ciesielski V, Song A. Anomaly Detection Using Replicator Neural Networks Trained on Examples of One Class[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2014, 38(1): 311-322.

[12]樊瑞宣, 姜高霞, 王文剑. 一种个性化k近邻的离群点检测算法[J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41(04): 752-757.(Fan Ruixuan, Jiang Gaoxia, Wang wenjian. Outlier Detection Algorithm with Personalized k-Nearest Neighbor[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2020, 41(04): 752-757.)

[13]Jia Zhao, Jingjing Tang, Aiye Shi, Tanghuai Fan, Lizhong Xu. Improved Density Peaks clustering based on Firefly Algorithm[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2020,15(1): 24-42.

[14]Jia Zhao, Zhanfeng Yao, Li Lv, Tanghuai Fan. Density peaks clustering based on mutual neighbor degree[J]. Control and Decision, 2021, 36(3): 543-552.

[15]Sander J, Ester M, Kriegel H P, et al. Density-Based Clustering in Spatial Databases: The Algorithm GDBSCAN and Its Applications[J]. Data Mining & Knowledge Discovery, 1998, 2(2): 169-194.

[16]Jia HongJie, Ding ShiFei, Shi ZhongZhi, et al. Approximate Weighted Kernel k-means for Large-Scale Spectral Clustering[J]. Journal of Software, 2015, 23(1): 12-17.

[17]Rodriguez A, Laio A. Machine learning. Clustering by fast search and find of density peaks[J]. Science, 2014, 34(1): 14-22.

[18]Mehmood R, Bie R, Dawood H, et al. Fuzzy Clustering by Fast Search and Find of Density Peaks[C]// International Conference on Identification. IEEE, 2016: 785-793.

[19]Li Lv，Jiayuan Wang，Runxiu Wu，Hui Wang，Ivan Lee. Density peaks clustering based on geodetic distance and dynamic neighborhood[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2021, 17(1): 24-33.

作者简介：

李卿鹏（1981），男，江西东乡，硕士研究生，从事电力系统及其自动化研究，E-mail：liqp@jx.sgcc.com.cn

GIS组合电器内部放电诊断试验及原因分析

吴星[1]，潘春晖[1]，吴组应[1]，邱剑[1]，尹天晟[2]，马鑫禹[1]

（1.江西省送变电工程有限公司，江西 南昌 330032；2.南昌科晨电力试验研究有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：由于组合电器（GIS）免维护且占地面积小，越来越多新建工程特别是城市电网建设采用 GIS，GIS 日常例试定检主要以带电检测方式开展，目前 GIS 带电检测项目主要有 SF6 成分分析、SF6 微水检测、特高频局放检测、超声波局放检测等。本文介绍了一起通过带电检测成功发现 220kV GIS 内部放电事件，利用特高频局放检测和超声波局放检测两种方法联合成功诊断并定位某 500kV 变电站 220kV GIS 电压互感器气室内部悬浮性放电事件，对故障电压互感器气室进行返厂解体检查，确认了内部存在金属垫片脱落引起悬浮放电，与局放检测结果完全一致。

关键词：组合电器；超声波局放检测；特高频局放检测；悬浮放电

1 前言

GIS因免维护且占地面积小，被越来越多新建工程特别是城市电网建设选用，但随着GIS设备推广，异常事件增多，GIS日常例试定检逐渐引起关注，开展带电检测工作是目前日常运维的主要方式，GIS带电检测项目主要有SF6成分分析、SF6微水检测、特高频局放检测、超声波局放检测等，但受设备及人员影响，带电检测的实施效果有所差异，本文介绍了一起利用特高频局放检测和超声波局放检测两种方法联合成功诊断并定位的典型案例，为现场开展带电检测工作提供先进经验。[1-5]

2 故障经过

2 月 24 日，对某 500kV 变电站 220kV GIS 进行了带电检测时，发现 220kV Ⅱ母电压互感器 A 相气室存在局放信号异常，确认放电位置为 220kV GIS II 母 A 相母线电压互感器 A 相气室法兰与下方盆式绝缘子连接处，初步判断为金属垫片等异物引起的悬浮放电，建议立即停电处理。3 月 7 日，对 500kV 某变电站 220kV GIS II 母 A 相母线电压互感器气室进行了更换。3 月 21 日对更换下来的电压互感器进行了返厂解体，法兰与下方盆式绝缘子连接处发现放电痕迹，罐体内有尼龙螺栓、垫片等异物掉落，垫片表面也存在放电痕迹，与局放试验结果完全吻合。3 月 30 日，按照交接试验规程对再次更换的电压互感器气室进行了局放试验，未检测到异常局部放电信号，设备投运。

3 带电局部放电检测情况

3.1 检测对象

220kV Ⅱ母线电压互感器A相气室，设备型号JDQXH-220，结构为单相内敷式，生产厂家:平高集团有限公司，出厂时间:2016年5月。设备外形及测点布置如下图1所示：



图1 设备外观图及测点布置图

特高频信号检测位置：1）A 相电压互感器连接刀闸气室的盆式绝缘子浇注口；2）A 相避雷器气室连接刀闸气室的盆式绝缘子浇注口；3）A 相电压互感器靠隔离开关的内置传感器；4）刀闸气室靠近电压互感器气室的非气隔绝缘子浇注口。

检测项目：1）特高频局放检测；2）超声波局放检测；3）SF6 气体湿度及成分检测。

3.2 检测仪器及装置

表1 检测仪器信息

序号	仪器名称	型号	生产厂家
1	局部放电检测与定位仪	PDS-G1500	上海华乘电气科技有限公司
2	局部放电检测与定位仪	PDS-T90	上海华乘电气科技有限公司
3	超声波局部放电检测仪	AIA-(2)	挪威 TransNor As
4	SF6 气体综合分析仪	JH5000D-4	厦门加华

3.3 特高频局部放电检测

采用 PDS-T90 对 GIS 进行特高频局部放电检测，测试仪选择高通滤波模式。在 A 相隔离开关处的内置特高频传感器处（图 1 中 3 号测点）检测到的放电信号（特高频 PRPD 及 PRPS 图谱）如图 2 所示，放电间隔比较均匀，信号幅值为 67dB, 一个工频周期有两簇放电信号，相位稳定，具有一定的对称性，与悬浮电位典型图谱具有很高的相似性。

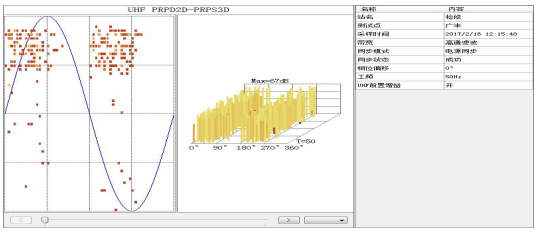


图2 A相隔离开关内置特高频传感器处特高频PRPD及PRPS图谱

检查空气背景信号如图 3 所示，未检测到明显放电信号说明局部放电来自于 GIS 内部。

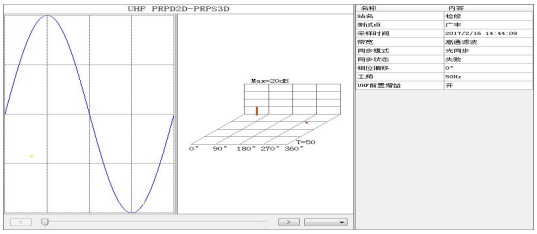


图3 空气背景信号特高频PRPD及PRPS图谱

在 B、C 相隔离开关的内置特高频传感器处也检测到的放电信号，信号幅值依次减小分别为 63dB、62dB，图 4 为 B 相特高频 PRPD 及 PRPS 图谱。检测电压互感器 A、B、C 相盆式绝缘子浇注口处（图 1 中 1 号测点）特高频信号，信号幅值依次减小分别 63dB、62dB、51dB，根据幅值定位法，判断放电位置在 A 相。

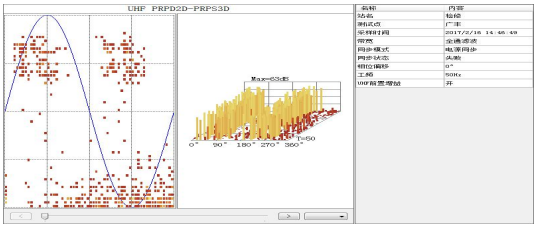


图4 B相隔离开关内置特高频传感器处特高频PRPD及PRPS图谱

3.4 超声波局放检测

采用 AIA-(2)对 GIS 进行超声波局放检测，超声波信号检测位置如图 5 所示。

超声波测点位置：1）电压互感器 A 相气室下方法兰靠近盆式绝缘子处测点（最强信号点）；2）法兰水平面其他测点；3）盆式绝缘子下方的法兰测点；4）最强信号点对侧测点。

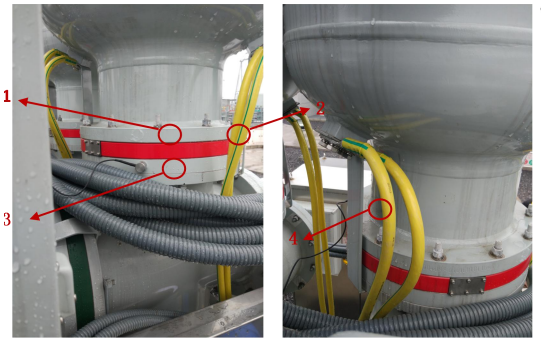


图5 超声波传感器测点布置图

1号测点的超声波经过轴向和径向多点测量对比，超声波信号（10kHz~100kHz）最强，幅值达100mV，100Hz相关性强，所测相位图谱的每簇信号与悬浮电位典型图谱具有很高的相似性，且A相超声波信号最强点处局部放电幅值达到100mV（>20mV），如图6、7所示。

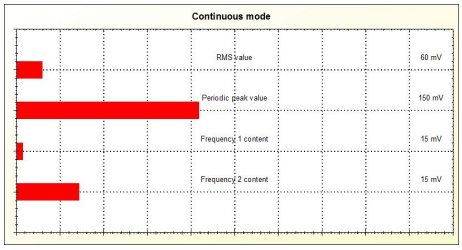


图6 1号测点信号图谱

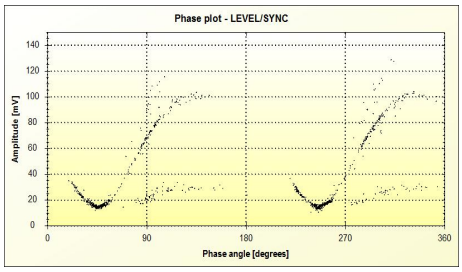


图7 1号测点相位图谱

2号测点的超声波信号（10kHz~100kHz）强度为40mV，相比较明显减少，如图8、9所示。3号测点的超声波信号（10kHz~100kHz）强度为5mV，幅值很小。4号测点的超声波信号强度（10kHz~100kHz）为13mV。根据幅值定位法，判断放电位置在1号测点附近。

对1号测点的50kHz~100kHz超声波信号检查，如图10、11所示，幅值达50mV，相较之前10kHz~100kHz幅值100mV，减小较大，说明放电点靠近罐体外壳。

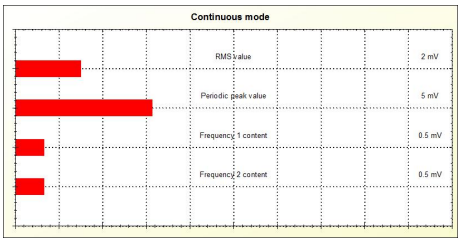


图8 2号测点信号图谱

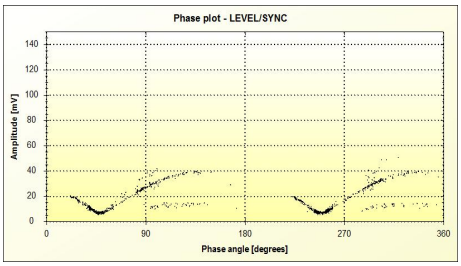


图9 2号测点相位图谱

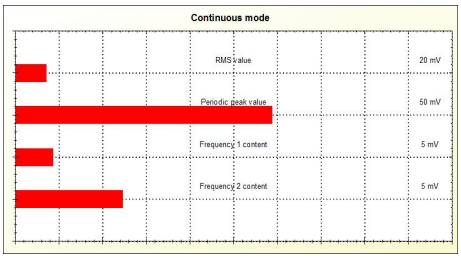


图10 1号测点的50kHz~100kHz信号图谱

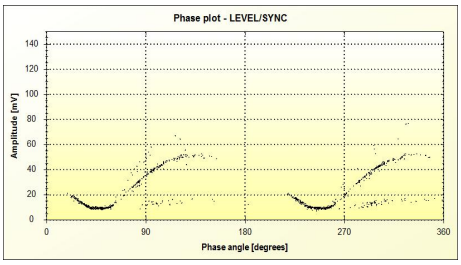


图11 1号测点的50kHz~100kHz相位图谱

3.5 声电联合、电电联合试验

声电联合试验，使用 PDS-G1500 仪器同时接三个信号。三个信号分别是 A 相电压互感器连接刀闸气室的盆式绝缘子浇注口的特高频信号（图 1 中 1 号测点、黄色波形），A 相隔离开关处的内置特高频传感器的信号（图 1 中 3 号测点、绿色波形），220kV Ⅱ母母线电压互感器盆式绝缘子处的超声波信号（图 5 中 1 号测点、紫色波形）。检测到存在最大 400mV 周期性放电信号，三个信号都具有 100Hz 周期性，如图 12 所示。

检查超声波脉冲信号波形，如图 13 所示，超声波局部放电信号（紫色波形信号）与特高频局部放电信号（黄、绿色波形信号）时间间隔相差 11.6 μs，A 相内置传感器特高频波形信号和 B 相内置传感器波形信号时间是同步的。可以知道超声波的声信号比特高频的电信号延迟了 11.6μs，由于电信号传播的速度 3×10^8m/s 远远大于声信号的速度，可以认定检测到的电信号的时间就是局部放电源放电的时间，声信号在铝合金罐体中的传播速度大约是 6400m/s，于是通过计算可得放电点距离超声波传感器 7.42cm。

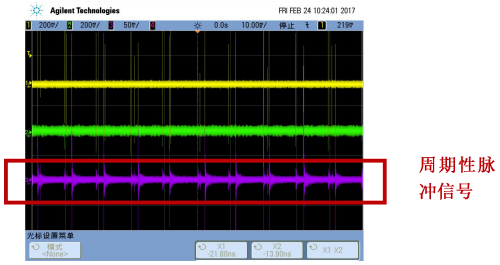


图12 特高频信号与超声信号

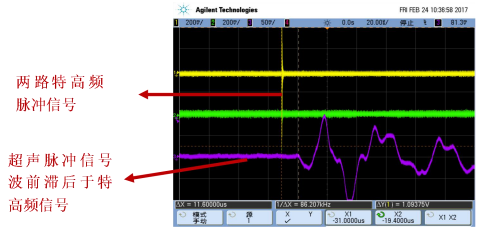


图13 超声波脉冲信号波形

电电联合试验，使用PDS-G1500仪器同时接两个信号。信号分别是A相隔离开关处的内置特高频传感器的信号（图1中3号测点、黄色波形），220kV Ⅱ母母线电压互感器盆式绝缘子浇注口的特高频信号（图1中1号测点、绿色波形）。如图14所示，黄色波形信号与绿色波形信号时间间隔相差10.6ns，电信号传播的速度为3×10^8m/s，通过计算可得两个检测点距离相差3.18m。实际现场两个特高频传感器之间的距离为3.2m，由此可知两个特高频的局部放电信号是同源信号。

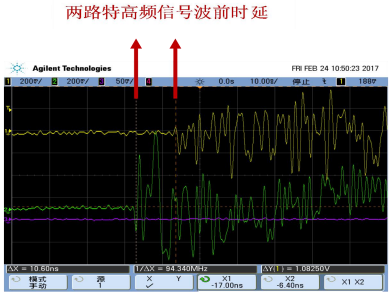


图14 特高频脉冲信号波形

3.6 试验结论及建议

超声局放检测与特高频检测能同时检测到有局部放电信号，采用声电联合和电电联合定位，可以判断 220kV GIS II 母 A 相母线电压互感器气室法兰与下方盆式绝缘子连接靠径向 7.4 厘米处存在

放电，放电原因可能是遗落的螺丝、垫片或者螺栓松动导致的悬浮放电。

建议：根据《Q/GDW 11059.1-2018 气体绝缘金属封闭开关设备局部放电带电测试技术现场应用导则 第1部分 超声波法》，当220kV GIS设备悬浮电位放电信号幅值Vpeak>20mV，应停电处理。220kV Ⅱ母线电压互感器A相气室法兰与下方盆式绝缘子相连的处幅值达100mV，应及时停电进行解体处理。在未停电处理前，运行中加强监测，宜每月进行一次特高频、超声波、SF6组分、微水带电检测。

4 返厂解体检查情况

对220kV GIS II母A相母线电压互感器气室进行了更换后。为验证局部放电检测结论及确认电压互感器是否存在缺陷，3月27日,对更换下来的第一台电压互感器进行了返厂解体（图15）。



图15 更换及返厂解体图片

4.1 电压互感器结构

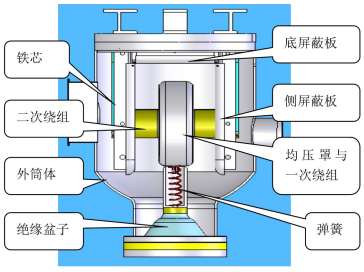


图16 JDQXH-220型电压互感器

JDQXH-220型电压互感器如下图所示（倒装），主要由绝缘子、屏蔽管、一次引线、均压罩、一次及二次绕组、侧屏蔽板、底屏蔽板、铁芯、二次接线盘、爆破片、吸附剂及外筒体组成。

其中，高压部分为一次引线、绝缘子电联接、屏蔽管及均压罩，其余部位均为低压端。均压罩为均匀电场作用，屏蔽管、侧屏蔽板、底屏蔽板起屏蔽PT结构尖端作用。侧屏蔽板与底屏蔽板通过接地线进行连接接地。

4.2 解体情况

PT解体前，对需拆除的连接部位进行划线标记，明确拆解位置，便于分析放电原因。



图17 解体前标记放电部位

盆式绝缘子表面靠近罐体法兰处发现黑色放电分解物，与盆式绝缘子连接的罐体法兰对应位置处也发现黑色分解物（图22）。

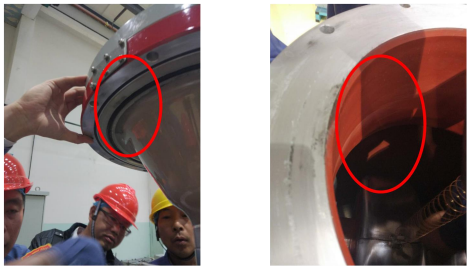


图18 黑色放电分解物

盆式绝缘子表面此处黑色分解物分布形成圆形图案与垫片尺寸相似（疑似此处存在垫片），如图19所示。



图19 盆式绝缘子表面黑色分解物分布

罐体底部发现散落三副尼龙螺栓（尼龙螺栓、螺帽、垫片、弹片）异物，尼龙螺栓都已断裂（图20）

检查发现电压互感器绕组两侧低压屏蔽罩存在三处尼龙螺栓缺失，与掉落在罐体底部的三副断裂尼龙螺栓对应，且高压屏蔽罩存在明显偏移，未正中安装（图21）。

发现一处垫片表面有明显放电痕迹（图22）



图20 罐体内发现的断裂的尼龙螺栓

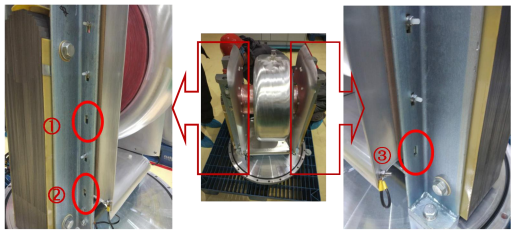


图21 低压屏蔽罩存在三处尼龙螺栓缺失



图22 垫片上存在烧蚀痕迹

4.3 解体检查结论

解体检查情况说明，罐体法兰与下方盆式绝缘子连接处存在放电，放电原因为金属垫片引起的悬浮放电。

解体检查得到的结论与局放试验结论吻合，解体检查的放电位置与局放试验确定的局放源位置吻合。

5 故障原因分析

结合解体发现的尼龙螺栓断裂情况，判断运输过程中碰撞导致尼龙螺栓断裂，垫片掉落，在电压互感器运行过程中产生悬浮放电。尼龙螺栓断裂暴露出以下可能的问题：

1）三处尼龙螺栓若为运输过程中断裂，厂家确实存在运输过程中未安装三维冲撞记录仪的情况，应立即整改；

2）交接试验未严格按照试验要求执行，出现垫片掉落情况，耐压试验和局放试验都未检测出异常。

3）厂家这种尼龙螺栓设计是否存在强度不够等设计问题，也未就尼龙螺栓在多大碰撞力下会断裂的情况进行试验分析，生产运输安装过程中无相对应的管控要求。

6 结语

本次事件是一起通过带电检测成功发现220kV GIS内部放电典型案例，利用特高频局放检测和超声波局放检测两种方法联合成功诊断并定位某500kV变电站220kV GIS电压互感器气室内部悬浮性放电事件，对故障电压互感器气室进行返厂解体检查，确认了内部存在金属垫片脱落引起悬浮放电，与局放检测结果完全一致。说明了特高频局放检测和超声波局放检测的有效性和必要性。

参考文献：

[1]梁之林，王朔.220 kV电流互感器故障分析[J].变压器,2010,21(3):11-15.

[2]李新星.一起220 kV电流互感器故障的原因分析[J].变压器,2016,27(8):20-22.

[3]张利燕，郭猛，陈志勇，等.电流互感器故障诊断与分析[J].变压器,2011,48(11):57-59.

[4]纪宏伟. 220 kV电流互感器缺陷原因分析[J].东北电力技术,2002,23(1):30-32.

[5]赵军，张志刚，邢超，等.一起220 kV电流互感器冒顶故障的诊断与处理[J].东北电力技术,2017,38(8):29-33.

作者简介：

吴星（1982）男，江西南昌，本科，高级工程师，主要从事电力系统一次设备检测工作,E-mail:12891609@qq.com

以鄱阳湖换流站为参考的受端换流站加装调相机仿真计算

严一凡，甘祎扬，黄峰

（国网江西超高压公司，江西 南昌 330038）

摘要：由于我国在特高压输电系统的研究实力增强，越来越多的特高压输电线路布局在我国境内。2021 年江西省作为受端系统引入了江西电网的第一条特高压直流输电线路——雅中—江西±800 kV 特高压直流输电工程，标志着江西电网特高压时代的进一步推进。而同步调相机具有优秀的暂态无功补偿性能，适合于减缓特高压直流线路接入后带来的受端交流系统冲击。因此，必须详细研究特高压直流输电系统加装同步调相机的特性行为。本文根据特高压输电系统的结构特性建立了仿真模型，通过分别加装同步调相机、SVC 及 STATCOM 模型对其无功补偿特性、母线交流电压的动态行为进行了分析，并比较了其对电网系统稳定性的性能差异。结果表明，在受端加装同步调相机的效果要优于其他两种无功补偿设备，仿真测试验证了同步调相机良好的动态无功输出能力。

关键词：特高压直流输电；调相机；暂态电压

1 特高压直流输电系统的分析方法

通过仿真模拟计算加装同步调相机 UHVDC 是一种了解并优化同步调相机控制的手段。常用的电工仿真软件有 PSCAD 和 PSD-PBA 软件。PSCAD 基于 EMTDC 仿真计算核心，该软件是目前在电力行业内广泛应用的软件。PSD-PBA（电力系统分析软件）是一种潮流及暂态稳定计算软件，经过升级的版本目前能计算电网联网规划问题及暂态稳定仿真问题。本章将使用 PSCAD 软件作为分析手段，建立适合弱受端 UHVDC 加装同步调相机后对电网的无功与电压支撑模型，并对比加装 SVC 或 STATCOM 的性能分析。

1.1 特高压直流输电系统的模型建立

首先，我们在 PSCAD 中建立了一个 T 型等值网络的单极运行的特高压直流输电线路模型，采用的直流电压为 400kV，三相容量为 4000MW（模拟 12 台 360MW 容量），如图 1.1 所示。

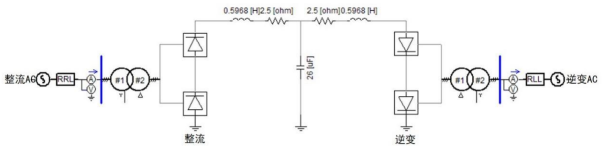


图 1.1 UHVDC 仿真模型

其中，对整流和逆变侧分别加装了滤波电容对线路进行无功补偿。整流端 AC 的额定电压为 345.0kV，母线电压为 382.9kV，基波阻抗为 46.66∠84.3Ω，短路比为 1.5，三次谐波阻抗角于基波值基本一致。逆变端 AC 的额定电压为 230.0kV，母线电压为 215.0kV，基波阻抗为 21.20∠75.0Ω，短路比为 2.0，三次谐波阻抗角低于基波值。

整流侧 AC 的阻抗表示为 RRL 形式，如图 1.2 所示。

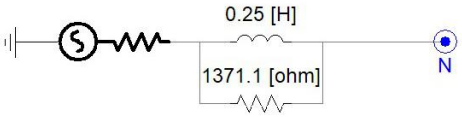


图 1.2 整流侧 AC 阻抗 RRL 模型

逆变侧 AC 的阻抗表示为 RLL 形式，如图 1.3 所示。

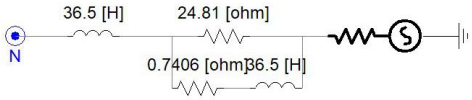


图 1.3 逆变侧 AC 阻抗 RLL 模型

该系统在受到扰动将会很快失稳，从而使仿真结果较为明显。

换流站的模型采用双桥串联结构，逆变后直流电压必须达到线路设定的 500kV。同时换流站在后续的调试中加装无功补偿设备（同步调相机、SVC 及 STATCOM）。由于两侧的短路比分别为 1.5 和 2.0，因此该模型为弱送端-弱受端模型，符合我们弱受端 UHVDC 的仿真要求。

2 接入同步调相机的模拟分析

为了获得同步调相机后的线路情况，我们对比了加装和未加装两种情况，通过在整流侧和逆变侧各加装一台 300Mvar 同步调相机，与换流站的母线通过升压变压器相接。此时的逆变侧模型如图 2.1 所示。同步调相机的励磁系统受到母线电压的控制，调相机的数值列举如下，如表 2.1 所示。在这里为了我们使用了 PSCAD 同步电机模型作为同步调相机模型，并去除了原动机和调速系统，可以很好的满足我们的设计要求。

表 2.1 300Mvar 调相机的主要参数

参数	值（单位）
额定出力	300(Mvar)
短路比	0.682
直轴同步电抗X_d	1.66 p.u.
直轴暂态电抗	0.196 p.u./0.172 p.u.
直轴次暂态电抗	0.123 p.u.
直轴短路暂态时间常数	1.16(s)

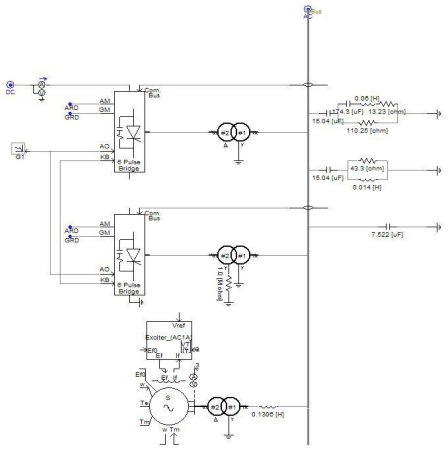


图 2.1 逆变侧电网图

加装同步调相机是为了改善 UHVDC 系统故障的恢复状态，通过仿真，我们在系统运行至 5 s 时，分别对逆变侧的换流站的母线上设置单相短路故障和三相短路故障，并持续 0.1 s。通过数值分析，调取未加装同步调相机和加装同步调相机两种情况下的曲线，并对比不同情况下它们的各种信号，如励磁情况、交流母线电压、直流功率等。相关曲线汇总如下。

首先，如图 2.2 所示，我们可以看出无论是发生单相短路或三相短路时，励磁电流都会瞬间提升，超过初始值 2p.u.的 4 倍多，在短时间后，由于系统逐步接近稳定，励磁电流也会快速回落至故障后水平，整体的无功支撑受到励磁电流的回落也逐渐回落。可以说，励磁电流能一部分反应同步调相机的工作能力。

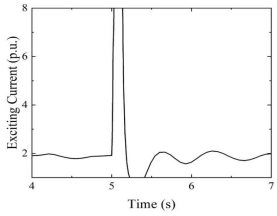


图 2.2 励磁电流随时间变化图

可以看到，在单相故障中，加装同步调相机的逆变侧交流母线电压和直流功率的从故障开始的百毫秒内快速恢复至故障后稳态正常值，而未加装同步调相机的线路则伴随着巨大的震荡，电压跳动和功率跳动都非常猛烈，并且，在未加装同步调相机线路的电压最低点及功率最低点，都明显要低于加装同步调相机的情况。尤其是，单相故障下未加装的整体的电压会下降至一半，而同步调相机则仅下降了 30%，这种情况同样出现在功率输出的第一个峰位中。在峰位内，无论是加装还是未加装，交流和功率都会出现高频的振动。而在后续两个参数的影响中，都能观察到未加装下系统的不稳定性，在电网中表现为随时可能引发二次故障。在功率输出的振幅上，我们发现未加装的情况严重超出了合理工作参数的建议，整个系统在初期的响应后，快速在 0-1000MW 之间震荡，振幅过大，使得系统变得极其不稳定，且无法再通过自身条件恢复，不能调节至稳态。

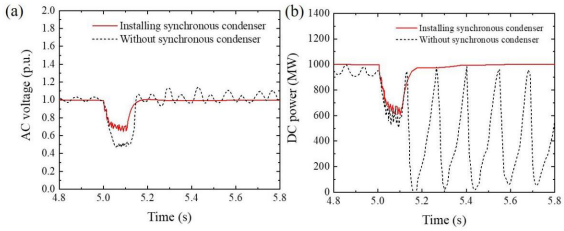


图 2.3 单相故障下的（a）交流母线电压、（b）直流功率与加装同步调相机的关系

三相故障下，加装同步调相机的逆变侧交流母线电压和直流功率的行为和单相故障相类似。未加装同步调相机的情况下，母线电压快速回落至零点，随后拉升会 0.9p.u.附近，但并不能快速维持稳定，系统内的电压在 0.9-1.2p.u.反复高频震荡，在 0.6s 后才减小振幅到正常值附近。直流功率同样也产生巨幅震荡，但与单相故障不同，三相故障下系统的直流功率的拉升导致系统最终能够恢复，但如果故障情况更加严重，则可能引发换向失败等故障。在加装同步调相机以后，无功输出由于大容量调相机的加持，可以在数毫秒内快速提升至最大 1.5p.u.状态系统无论是在交流电压上还是在直流功率上，我们都可以看到比较顺滑的曲线，这意味着，在提供无功支撑的同时，能够消除系统内因故障产生的过激的动态调整，整个拉升过程较为迅速且顺利。因此，加装了同步调相机的逆变侧交流母线电压和直流功率，虽然在短时间内也产生了巨大的波动，但是能快速通过调相机提供足够的动态无功输出，稳定整体 UHVDC 电网的电力支撑，将其在短时间内恢复至正常水平。

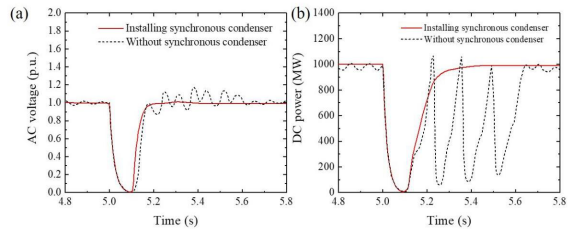


图 2.5 三相故障下的（a）交流母线电压、（b）直流功率与加装同步调相机的关系

3 接入其他无功补偿方式的模拟分析

虽然我们在两种故障下分析了加装和未加装同步调相机后，电网的变化情况，验证了同步调相机对整体系统的有效补偿，但同样属于无功补偿设

备的除了同步调相机还包括静止无功补偿器(SVC)和静止同步补偿器（STATCOM）。

本节将着重分析这俩者对于 UHVDC 系统的影响，从而比较同步调相机带来的优势，验证其效果。建模依然是建立在逆变侧，以更好地符合南昌换流站的接入情况。首先我们分别对加入 SVC 或 STATCOM 的逆变侧模型进行构建。

针对 SVC 和 STATCOM 参数的设置，参考 300MW 同步调相机，SVC 配置 2 路 TSC（300Mvar）及 1 路 TCR（150Mvar），STATCOM 配置 300Mvar 的无功容量。

同样的，为便于与同步调相机进行比较，我们同样在系统运行 5s 后在 UHVDC 系统的整流、逆变两侧的母线各设置两种故障类型（单相及三相），故障时间维持 0.1s 后切除故障，通过观察三种无功补偿设备的差异。

3.1 线路两侧发生单相短路的情况

图 3.1 展示了整流侧及逆变侧在发生单相短路情况下的母线交流母线电压及直流功率输出情况。首先看到整流侧的情况，加装 STATCOM 的情况是最差的，交流电压在故障发生时快速下降至 0.4p.u.附近，随后响应进行无功补偿，在 0.2s 内拉升至 1.0p.u.以上，但由于 STATCOM 的无功补偿不是动态变化的，只能依靠系统内的相互协调将无功输出拉回稳态值，但整体上能够稳定系统内的电压变换。直流功率的补偿受到交流电压的影响，同样也掉落至了三者最低位置，~200MW，但后续回复能力与其他两种相当。在交流电压方面，也是在电压坠落后快速响应，但响应结束后，电压仍处在一个低频的震荡上，没有完全稳定呈现一条直线。由故障电压恢复至正常值的速率上，同步调相机在整流侧的恢复效果是最好的，优于 SVC 及 STATCOM 设备。在整流侧发生短路故障时，由于母线电压会迅速断崖式下降，导致调相机进入强励状态，在交流电压跌落至 0.5p.u.附近时快速响应，在 0.05s 后通过动态的无功补偿，将母线电压维持在合适的水平线上，随后电压恢复到故障后正常值，且非常稳定，保证 UHVDC 系统的正常运行。

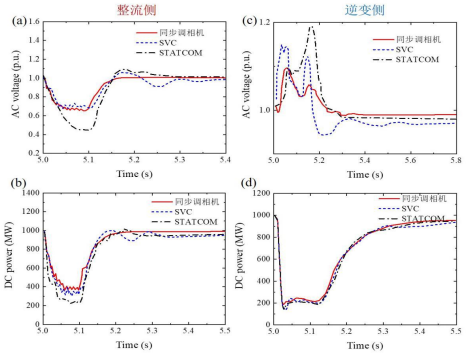


图 3.1 单相故障下的整流侧（a）交流母线电压、（b）直流功率与三种无功补偿装置的关系及逆变侧（c）交流母线电压、（d）直流功率与三种无功补偿装置的关系

逆变侧的情况和整流侧略有不同，相同的是在交流母线电压的恢复速度上，同步调相机都要远远优于 STATCOM 及 SVC。可以看到，在故障开始时，含同步调相机的系统电压偏移值仅为 1.1p.u.，而 SVC 的系统电压升高至了 1.15p.u.附近。在第二次电压波动下，此时同步调相机的峰值回落至 1.05p.u.附近，但 SVC 系统仍接近第一次的电压变化峰值位置，STATCOM 则情况更加严重，电压偏离了正常值 0.2p.u.。不同的是，逆变侧直流功率三者的变化情况没有整流侧明显，三者的变化趋势基本一致。简单而言，在发生短路故障的时候，电压瞬间升高，同步调相机对瞬时过电压的抑制效果要明显好于 SVC 及 STATCOM。通过在发生故障时迅速吸收系统中的富裕的无功功率来快速维稳电压水平，在同步后依然可以通过励磁系统的欠励来达到吸收系统多出的无功，在 UHVDC 系统的稳定上要更胜一筹。

从整流侧和逆变侧发生故障后的直流功率变化情况下可以看出，同步调相机、SVC 及 STATCOM 三种设备从相应速度、恢复速度上步调都比较一致，同步调相机的直流功率恢复要稍优于其他两种。由于三种设备受电压影响的情况不同，可以明显看出 SVC 由于设备中 TSC 的反复投切，带动了电压震荡，使直流功率随之震荡，而 STATCOM 受到电压的迅速下降而导致直流功率在开始阶段输出不够。调相机的直流功率曲线则显得更加平滑，在单相短路故障中对功率恢复起到的最好的效果。

3.2 线路两侧发生三相短路的情况

图 3.2 展示了在 UHVDC 系统在稳定运行 5s 后，在整流侧及逆变侧发生 0.1s 三相故障时，三种无功补偿方式下其交流母线电压及直流功率输出的情况。

在整流侧，同步调相机的电压变化基本和单相故障相一致，三种无功补偿装置下的系统在发生故障后，电压下降至 0.1p.u.，随后在故障切除后拉升电压，除 SVC 外，电压维持稳定的情况发生在 5.2s 处。SVC 由于器件特征的原因，依然在恢复后出现小范围的波动。在直流功率输出方面，同步调相机虽然在瞬间功率输出方面下降至零点附近，但其恢复的速度是调相机、SVC 和 STATCOM 三者中恢复最快的，提前了约 0.1s。在功率拉升的波纹中也是三者波动最小的。逆变侧的情况比整流侧略微复杂。在交流电压方面，同步调相机、STATCOM 及 SVC 加入的系统都出现了一定程度的抖动。我们先看到 SVC 的情况，在故障发生时，电压被提升至了 1.18p.u.，在 0.2s 内发生了 4 次震荡，在第 5 次震荡下电压瞬间下降至了零点，说明了电压补偿能力的不足，并在 0.5s 后未保持系统的稳定。STATCOM 加入的系统同样在 0.2s 中也出现了 4 次震荡，但第一次震荡的幅度要低于 SVC，

第 5 次下降的最低点未到达零点，整体在 0.35s 内恢复稳定，但稳定后的电压值偏离了故障前电压值，低于 1.0p.u.。同步调相机是在电压调整方面最好的，在 0.2s 内仅出现了 2 次较大的波动，在第 3 次电压降落后快速恢复到了稳态值。整体上看，同步调相机的恢复速率比 STATCOM 快~30ms，比 SVC 快~200ms。在母线电压剧烈下降时，STATCOM 与 SVC 受其影响较大。虽然在单相故障时，同步调相机与 STATCOM 的恢复速率相仿，但在三相故障时，同步调相机的优势就体现了出来。

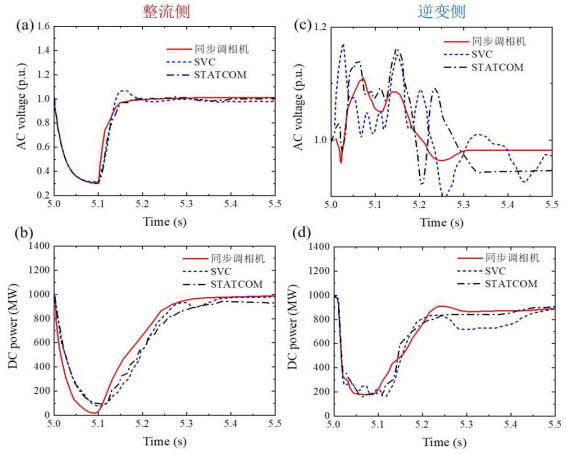


图 3.2 三相故障下的整流侧（a）交流母线电压、（b）直流功率与三种无功补偿装置的关系及逆变侧（c）交流母线电压、（d）直流功率与三种无功补偿装置的关系

我们将整流及逆变侧不同故障下的交流母线电压恢复时间整理在了表 3.1 中。从交流母线电压故障恢复时间可以看出，同步调相机和 STATCOM 在不同侧表现不一，在整流侧 STATCOM 的性能略好于同步调相机，但在逆变侧，同步调相机的性能要优于 STATCOM。这说明在 UHVDC 的弱受端加装同步调相机更为合理。对比图 3.1 的过电压值，和单相故障的结果相一致，同步调相机对电压的调控更好，能够通过吸收系统的无功来压低整体的交流母线电压水平，从而降低由于短路故障所引发的换相失败问题的概率。

表 3.1 两侧无功补偿设备的交流母线电压变化情况

参数	整流侧恢复时间(ms)		逆变侧恢复时间(ms)	
	单相故障	三相故障	单相故障	三相故障
同步调相机	261	275	369	303
SVC	384	488	630	478
STATCOM	285	305	289	334

综上，在发生单相短路或三相短路的情况下，我们比较了三种无功补偿设备各自加装在 UHVDC 线路的情况。通过对整流侧或逆变侧的交流母线电压、直流功率、无功输出分析，由于同步调相机的响应最快、过电压抑制最好、电压恢复力最佳以及能够向系统中提供的无功支撑最优，因此，同步调相机是三种无功补偿方法中最适合加装在 UHVDC 系统，尤其是弱受端 UHVDC 系统。

4 结语

本文主要通过电气商业软件 PSCAD/EMTDC 进行 UHVDC 系统的仿真模拟，模拟了针对弱受对加装 300 Mvar 同步调相机后，UHVDC 线路的电气问题，并对比了同为无功补偿的另外两种方式 SVC 及 STATCOM。通过两种短路故障分析，证明了同步调相机的可用性和实用性。因此，同步调相机可以作为具有优秀性能的无功补偿设备在 UHVDC 系统发生故障时，起到维持电网稳定，提供无功输出保障的作用。

参考文献：

[1]赵静波，孟侠，朱鑫要. 同步调相机对受端省级电网运行影响及控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2019, 47(20): 25-32。

[2]赫英明. 弱送端HVDC系统中同步调相机的性能分析[D]. 哈尔滨理工大学，2019。

[3]陶骞，王庆，阮羚，等. 特高压直流工程大型调相机组启动调试及关键技术[J]. 中国电力，2017，50(12): 51-56

[4]吴凯. 300Mvar调相机静止变频器起动及并网的技术研究[D]. 上海电机学院，2019.

[5]崔一铂，李冰，沈骏杰，等. 大型调相机组调试及运行维护保障技术研究[J]. 湖北电力，2016，40(05): 5-8+12.

[6]桑建斌，包明磊，李玉平，等. 300 Mvar调相机继电保护的分析与改进[J]. 电力自动化设备，2019，39(06): 217-223.

作者简介：

严一凡（1991），男，江西南昌，硕士研究生，工程师，从事特高压直流输电研究，E-mail：361212647@qq.com

考虑风光水多重不确定性置信风险的多目标动态分解优化调度

孙惠娟[1]，巩磊[1]，彭春华[1]，温泽之[2]

（1．华东交通大学 电气与自动化工程学院，江西 南昌 330013；2．江西瑞林电气自动化有限公司，江西 南昌 330031）

摘要：为更加合理灵活地评估风光水多重不确定性给优化调度带来的风险性，本文基于分类机会约束提出了风光水出力高估/低估功率偏差置信风险量化计算方法，并计及多重不确定性置信风险构建经济/风险多目标优化调度模型。同时，充分利用智能电网可控资源，通过优化控制发电机出力、变压器变比和无功补偿容量等，实现在满足安全约束下系统运行成本最低和风险性最小的源网协调优化调度目标。为了实现对所提复杂模型的高效求解，将高效优势可行解约束处理方法与具有动态资源分配策略的分解多目标进化算法相结合，提出了一种新型的多目标动态分解进化算法；并采用改进的 TOPSIS 法自动提取最优折衷解以实现多目标优化调度决策。算例分析证明了本文方法的有效性和可行性。

关键词：可再生能源；机组出力高估/低估；置信风险；优化调度；多目标动态分解进化

1 引言

当前，我国能源结构加速优化升级，呈现“风光领跑、多源协调”的态势[1]。风电、光伏和径流式小水电等可再生能源发电存在较强的波动性和不确定性，因此将其并网调度会给电力系统带来许多不确定性影响。

目前，国内外学者已对多种可再生能源并网调度问题展开了广泛的研究。文献[2]采用高斯混合模型来拟合风电出力预测误差，通过将含风电和负荷的随机概率约束模型转换为确定性模型，进而应对调度过程中的不确定性；文献[3]中应用区间数来描述风电变化范围，并通过有效识别关键场景来应对多种能源接入下的传统 SCED 问题；文献[4]采用分类概率法得到风光荷的机会约束不确定性集合，使调度方案满意度更高；然而，目前风光水电功率预测误差现象仍然存在，其出力将很大程度上被低估或高估，使调度过程的准确和灵活程度较低。

此外，在多种可再生能源大规模接入电力系统的背景下，为解决电压稳定等安全问题，调度过程中源网间的关联程度日益紧密。文献[5]提出将电网设备状态作为决策变量，通过互补的形式来表达电网设备运行约束，构建源网协调的调度模型；文献[6]定义了 3 种不同的源网关系状态，通过固定电网结构使得经济调度中源网关系处于冲突状态，显示了考虑源网协调的必要性。因此，为使智能电网调度决策更合理，本文考虑将可控电网元件的状态纳为决策变量，并充分利用网端资源实现源网协调优化调度。

综上分析，本文为了合理灵活地评估风光水多重不确定性给优化调度带来的风险性，将基于分类机会约束来准确评估可再生能源出力高估/低估功率偏差置信风险量化指标，构建经济/风险多目标优化调度模型，如图 1 所示。同时，在调度过程中综合考虑风光水多重不确定性功率偏差置信风险的源网协调优化调度模型。

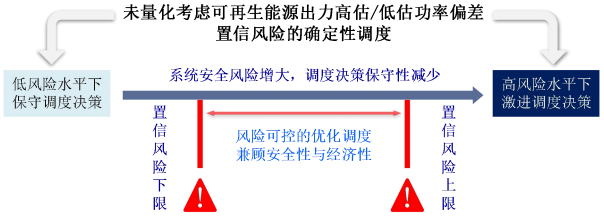


图 1 机组出力高估/低估功率偏差置信风险示意图

对于电力系统多目标优化调度问题的求解，采用启发式智能优化算法是一种较好的选择。文献[7]提出一种基于分解的多目标进化算法(MOEA/D)，算法将多目标优化问题分解为多个标量子问题，并同时对其进行优化；文献[8]对 MOEA/D 的固定参数进行改进，采用变异算子和自适应的领域值。上述文献证明了此算法在简单优化问题求解上的优越性，但面对复杂问题时存在帕累托前沿收敛性较差的缺点。鉴于本文模型具有多目标强耦合性、非凸非线性、高维数不连续性以及拓扑复杂性等特点，求解难度很大。为此，本文提出一种将高效优势可行解约束处理方法与具有动态资源分配策略的分解多目标进化算法相结合的多目标动态分解进化(MODDE)算法，并采用改进 TOPSIS 法对优化结果进行决策。

2 风光水多重不确定性描述

2.1 风电不确定性模型

风电机组出力不确定性很大程度上归因于风速的随机波动，因此本文采用三参数Burr分布函数来拟合风速分布，具体表示为：

$$f(v_t \mid a_t, c_t, k_t) = \frac{\frac{k_t c_t}{a_t}\left(\frac{v_t}{a_t}\right)^{c_t-1}}{\left(1+\left(\frac{v_t}{a_t}\right)^{c_t}\right)^{k_t+1}} \tag{1}$$

式中：v_t 为 t 时段风速；a_t、c_t、k_t 分别为 t 时段比例参数、第一形状参数和第二形状参数。

t 时段风电机组出力 $W_{w,t}$ 与风速 v_t 的相关性可近似表示为：

$$W_{w,t}=\begin{cases}0 & v_t<v_{in},v_t>v_{out}\\ \dfrac{v_t^3-v_{in}^3}{v_{wr}^3-v_{in}^3}W_{wr} & v_{in}\le v_t<v_{wr}\\ W_{wr} & v_{wr}\le v_t<v_{out}\end{cases} \tag{2}$$

式中：v_{wr}、v_{in}、v_{out} 分别为风机额定风速、切入风速和切出风速；W_{wr} 为风机额定输出功率。

2.2 光伏不确定性模型

太阳辐射度作为影响光伏出力不确定性的重要因素，可采用对数正态分布来描述其概率密度：

$$f(I_t\mid\mu_t,\sigma_t)=\frac{1}{I_t\sigma_t\sqrt{2\pi}}\exp\left\{\frac{-(\ln I_t-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right\} \tag{3}$$

$$\begin{cases}\mu_t=\ln\left(m_t^2/\sqrt{n_t+m_t^2}\right)\\ \sigma_t=\sqrt{\ln\left(n_t/m_t^2+1\right)}\end{cases} \tag{4}$$

式中：I_t 为 t 时段太阳辐射度；m_t、n_t 分别为 t 时段对数正态随机变量的均值和方差。

t 时段光伏电站出力 $W_{s,t}$ 与太阳辐射度 I_t 的相关性可近似表示为：

$$W_{s,t}=\begin{cases}\dfrac{I_t^2}{I_{std}r_c}W_{sr} & 0<I_t\le r_c\\ \dfrac{I_t}{I_{std}}W_{sr} & I_t>r_c\end{cases} \tag{5}$$

式中：I_{std} 为标准环境下太阳辐射度；r_c 为某一特定太阳辐射度；W_{sr} 为光伏阵列的额定输出功率

2.3 径流式小水电不确定性模型

河流流量作为影响径流式小水电出力不确定性的重要因素，可采用 Gumbel 分布[9]来描述其概率密度：

$$f(q_t\mid\lambda_t,\gamma_t)=\frac{1}{\gamma_t}\exp(\omega_t)\exp\left[-\exp(\omega_t)\right] \tag{6}$$

$$\omega_t=\frac{q_t-\lambda_t}{\gamma_t} \tag{7}$$

式中：q_t 为 t 时段河流流量；λ_t、γ_t 分别为 t 时段Gumbel分布的位置、比例参数。

t 时段径流式小水电出力 $W_{h,t}$ 与河流流量 q_t 的相关性可近似表示为：

$$W_{h,t}=\eta\rho g q_t H_w \tag{8}$$

式中：η 为涡轮发电机组装效率；H_w 为有效压力水头。

3 功率偏差置信风险分析

由于风光水电具有较强的不确定性和波动性，其实际出力将很大程度上被高估或低估。本文对风光水电不确定性区间引入式(9)所示的机会约束，提出了风光水电高估/低估置信风险评估方法。

$$\begin{cases}\Pr\left\{u^d(\tilde{u},\alpha)\le u\le u^u(\tilde{u},\alpha)\right\}=1-\alpha\\ 0\le\alpha\le1\end{cases} \tag{9}$$

式中：Pr 表示概率，u 和 $\tilde{u}$ 分别为不确定性变量及其预测值；$1-\alpha$ 为置信水平，$u^d(\tilde{u},\alpha)$ 和 $u^u(\tilde{u},\alpha)$ 分别表示不确定性置信区间的下限和上限。

3.1 风电出力高估/低估置信风险

风速不确定性若满足Burr分布，其累积分布函数为：

$$F(v_t\mid a_t,c_t,k_t)=1-\frac{1}{\left(1+\left(\dfrac{v_t}{a_t}\right)^{c_t}\right)^{k_t}} \tag{10}$$

由式(1)可得风电机组出力 $W_{w,t}$ 位于0到 W_{wr} 之间的概率密度函数 $f(W_{w,t})$ 为：

$$\begin{cases}f(W_{w,t})=\psi^{c_t-1}\left[\dfrac{k_tc_t(v_{wr}-v_{in})}{a_tW_{wr}}\right]\Big/\left(1+\psi^{c_t}\right)^{k_t+1}\\ \psi=\dfrac{v_{in}+\dfrac{W_{w,t}}{W_{wr}}(v_{wr}-v_{in})}{a_t}\end{cases} \tag{11}$$

由式(2)可得 t 时段风电机组出力置信上限 $W_{w,t}^u(\alpha)$ 和置信下限 $W_{w,t}^d(\alpha)$ 分别为：

$$W_{w,t}^u(\alpha)=\begin{cases}W_{wr} & v_t^u\ge v_{wr}\\ \dfrac{(v_t^u)^3-v_{in}^3}{v_{wr}^3-v_{in}^3}W_{wr} & v_t^u<v_{wr}\end{cases} \tag{12}$$

$$W_{w,t}^d(\alpha)=\begin{cases}0 & v_t^d<v_{in}\\ \dfrac{(v_t^d)^3-v_{in}^3}{v_{wr}^3-v_{in}^3}W_{wr} & v_t^d\ge v_{in}\end{cases} \tag{13}$$

式中：v_t^u 和 v_t^d 分别为 t 时段风速置信区间上下限。

综上所述，可以得到 t 时段风电机组在置信水平 $1-\alpha$ 下出力高估功率偏差置信风险 $d_{w,t}^H(\alpha)$ 和出力低估功率偏差置信风险 $d_{w,t}^L(\alpha)$。

当 $W_{w,t}^d(\alpha)=0$ 时：

$$\begin{aligned}d_{w,t}^H(\alpha)=&\int_0^{W_{w,t}}(W_{w,t}-W_w)f(W_w)dW_w\\ &+W_{w,t}P\{W_w=0\}\end{aligned} \tag{14}$$

当 $W_{w,t}^d(\alpha)>0$ 时：

$$d_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{H}}(\alpha)=\int_{W_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)}^{W_{\mathrm{w},t}}\left(W_{\mathrm{w},t}-W_{\mathrm{w}}\right)f(W_{\mathrm{w}})dW_{\mathrm{w}} \tag{15}$$

当 $W_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)=W_{\mathrm{wr}}$ 时：

$$\begin{aligned}d_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)=&\int_{W_{\mathrm{w},t}}^{W_{\mathrm{wr}}}\left(W_{\mathrm{w}}-W_{\mathrm{w},t}\right)f(W_{\mathrm{w}})dW_{\mathrm{w}}\\&+\left(W_{\mathrm{wr}}-W_{\mathrm{w},t}\right)P\{W_{\mathrm{w}}=W_{\mathrm{wr}}\}\end{aligned} \tag{16}$$

当 $W_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)<W_{\mathrm{wr}}$ 时：

$$d_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)=\int_{W_{\mathrm{w},t}}^{W_{\mathrm{w},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)}\left(W_{\mathrm{w}}-W_{\mathrm{w},t}\right)f(W_{\mathrm{w}})dW_{\mathrm{w}} \tag{17}$$

式中：$P\{W_{\mathrm{w}}=0\}$ 和 $P\{W_{\mathrm{w}}=W_{\mathrm{wr}}\}$ 分别为风电机组出力等于 0 和 W_{wr} 时的累积概率。

3.2 光伏出力高估/低估置信风险

太阳辐射度不确定性若满足对数正态分布，其累积分布、概率密度函数较复杂，因此采用可用出力直方图来计算光伏电站出力高估/低估功率偏差置信风险[10]。光伏电站可用出力直方图如图 2 所示：

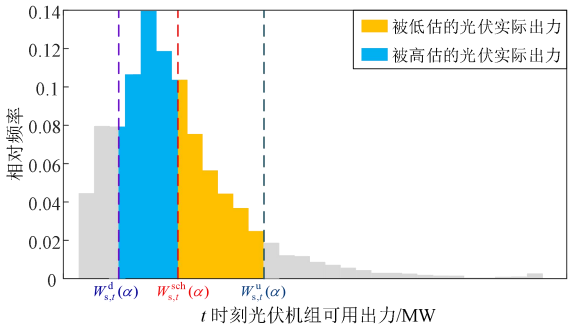


图2 t时段光伏电站可用出力直方图

图中：$W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)$、$W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)$、$W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)$ 分别为 t 时段光伏电站预估出力、置信上限、置信下限，由式(5)推导得出：

$$W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)=\begin{cases}\dfrac{(I_t^{\mathrm{u}})^2}{I_{\mathrm{std}}r_{\mathrm{c}}}W_{\mathrm{sr}} & 0<I_t^{\mathrm{u}}\le r_{\mathrm{c}}\\[2ex] \dfrac{I_t^{\mathrm{u}}}{I_{\mathrm{std}}}W_{\mathrm{sr}} & I_t^{\mathrm{u}}>r_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{18}$$

$$W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)=\begin{cases}\dfrac{(I_t^{\mathrm{d}})^2}{I_{\mathrm{std}}r_{\mathrm{c}}}W_{\mathrm{sr}} & 0<I_t^{\mathrm{d}}\le r_{\mathrm{c}}\\[2ex] \dfrac{I_t^{\mathrm{d}}}{I_{\mathrm{std}}}W_{\mathrm{sr}} & I_t^{\mathrm{d}}>r_{\mathrm{c}}\end{cases} \tag{19}$$

式中：I_t^{u} 和 I_t^{d} 分别为 t 时段太阳辐射度置信区间上下限。

综上所述，可得 t 时段光伏电站在置信水平 $1-\alpha$ 下出力高估功率偏差置信风险 $d_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{H}}(\alpha)$ 和出力低估功率偏差置信风险 $d_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)$ 分别为：

$$\begin{cases}d_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{H}}(\alpha)=R_{\mathrm{f}}[W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s},t}\le W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)]\times\\ \quad\{W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)-E[W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s},t}\le W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)]\}\\ d_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)=R_{\mathrm{f}}[W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s},t}\le W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)]\times\\ \quad\{E[W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s},t}\le W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)]-W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\}\end{cases} \tag{20}$$

式中：R_{f}、E 分别表示在置信水平 $1-\alpha$ 下光伏电站实际出力被高估/低估的相对频率和期望值。

3.3 光伏-径流式小水电联合出力高估/低估置信风险

径流式小水电分布广泛，其平均出力较小，因此采用可用出力直方图来计算其联合出力高估/低估功率偏差置信风险，如图 3 所示：

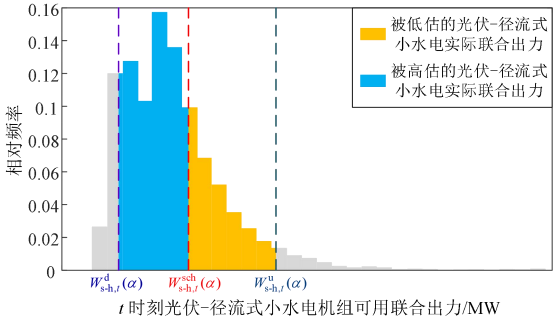


图3 t时段光伏-径流式小水电可用联合出力直方图

图中：$W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)$ 为 t 时段光伏-径流式小水电预估联合出力；$W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)$、$W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)$ 分别为 t 时段光伏-径流式小水电联合出力置信上限和置信下限。

$$\begin{cases}W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)=W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)+W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)\\ W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)=W_{\mathrm{s},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)+W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)\\ W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)=\eta\rho g q_t^{\mathrm{u}}H_{\mathrm{w}}\\ W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)=\eta\rho g q_t^{\mathrm{d}}H_{\mathrm{w}}\end{cases} \tag{21}$$

式中：$W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)$、$W_{\mathrm{h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)$ 分别是 t 时段径流式小水电出力置信上限和置信下限；q_t^{u}、q_t^{d} 分别是 t 时段河流流量置信区间上下限。

综上所述，可得 t 时段光伏-径流式小水电在置信水平 $1-\alpha$ 下出力高估功率偏差置信风险 $d_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{H}}(\alpha)$ 和出力低估功率偏差置信风险 $d_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)$ 分别为：

$$\begin{cases}d_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{H}}(\alpha)=R_{\mathrm{f}}[W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)]\times\\ \quad\{W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)-E[W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{d}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)]\}\\ d_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{L}}(\alpha)=R_{\mathrm{f}}[W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)]\times\\ \quad\{E[W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}\le W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{u}}(\alpha)]-W_{\mathrm{s\text{-}h},t}^{\mathrm{sch}}(\alpha)\}\end{cases} \tag{22}$$

4 考虑多重不确定性置信风险的源网协调优化调度模型

4.1 目标函数

4.1.1　总运营成本最优目标

本文在调度周期内总运营成本最优目标 C_{op} 主要由常规机组总燃料成本 C_{f}、环境成本 C_{e}、总开机成本 C_{on}、总停机成本 C_{off}、全寿命周期内风电机组的运营成本 C_{w}、全寿命周期内光伏电站的运营成本 C_{s} 以及全寿命周期内光伏-径流式小水电联合发电的运营成本 $C_{\text{s-h}}$ 组成：

$$\begin{cases} C_{\text{f}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}\left\{b_i+g_iP_{i,t}+h_i{P_{i,t}}^2+\left|p_i\sin[s_i(P_{i,t}^{\min}-P_{i,t})]\right|\right\} \\ C_{\text{e}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}r_i[(\varphi_i+\phi_iP_{i,t}+\varepsilon_i{P_{i,t}}^2)+\tau_i\exp(\xi_iP_{i,t})] \\ C_{\text{on}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}u_{i,t}(1-u_{i,t-1})S_i^{\text{U}}\ ,\ C_{\text{off}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\text{G}}}u_{i,t-1}(1-u_{i,t})S_i^{\text{D}} \\ C_{\text{w}}=\sum_{t=1}^{T}K_{\text{w}}W_{\text{w},t}\ ,\ C_{\text{s}}=\sum_{t=1}^{T}K_{\text{s}}W_{\text{s},t}\ ,\ C_{\text{s-h}}=\sum_{t=1}^{T}K_{\text{s-h}}W_{\text{s-h},t} \end{cases} \tag{23}$$

$$\min C_{\text{op}}=C_{\text{f}}+C_{\text{e}}+C_{\text{on}}+C_{\text{off}}+C_{\text{w}}+C_{\text{s}}+C_{\text{s-h}} \tag{24}$$

式中：$P_{i,t}$、$P_{i,t}^{\min}$ 分别为 t 时段常规机组的有功出力和最小有功出力；b_i、g_i、h_i 为常规机组的发电燃料成本系数；p_i、s_i 为常规机组的阀点效应系数；r_i 为常规机组的环境成本系数；φ_i、ϕ_i、ε_i、τ_i、ξ_i 为常规机组的污染气体排放系数；$u_{i,t}$ 为0-1变量；S_i^{U} 和 S_i^{D} 分别表示常规机组的开机成本、停机成本；K_{w}、K_{s}、$K_{\text{s-h}}$ 分别为寿命周期内风电、光伏、光伏-径流式小水电联合发电的运营成本系数。

4.1.2　风光水多重不确定性置信风险最低目标

本文中风电、光伏、光伏-径流式小水电联合出力总功率偏差置信风险 $D(\alpha)$ 由出力高估功率偏差置信风险 $D^{\text{H}}(\alpha)$ 和出力低估功率偏差置信风险 $D^{\text{L}}(\alpha)$ 组成：

$$\min D(\alpha)=D^{\text{H}}(\alpha)+D^{\text{L}}(\alpha) \tag{25}$$

$$\begin{cases} D^{\text{H}}(\alpha)=\sum_{t=1}^{T}[d_{\text{w},t}^{\text{H}}(\alpha)+d_{\text{s},t}^{\text{H}}(\alpha)+d_{\text{s-h},t}^{\text{H}}(\alpha)] \\ D^{\text{L}}(\alpha)=\sum_{t=1}^{T}[d_{\text{w},t}^{\text{L}}(\alpha)+d_{\text{s},t}^{\text{L}}(\alpha)+d_{\text{s-h},t}^{\text{L}}(\alpha)] \end{cases} \tag{26}$$

4.2　约束条件

4.2.1　电网潮流等式约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{\text{I}}-P_{i,t}^{\text{O}}-U_{i,t}\sum_{j=1}^{N_{\text{D}}}U_{j,t}[G_t(i,j)\cos\theta_{ij,t}+ \\ \qquad B_t(i,j)\sin\theta_{ij,t}]=0 \\ Q_{i,t}^{\text{I}}-Q_{i,t}^{\text{O}}-U_{i,t}\sum_{j=1}^{N_{\text{D}}}U_{j,t}[G_t(i,j)\sin\theta_{ij,t}- \\ \qquad B_t(i,j)\cos\theta_{ij,t}]=0 \end{cases} \tag{27}$$

式中：$i\in\{1,2,\cdots,N_{\text{D}}\}$；$P_{i,t}^{\text{I}}$、$P_{i,t}^{\text{O}}$ 分别为 t 时段节点 i 输入的有功、无功功率；$Q_{i,t}^{\text{I}}$、$Q_{i,t}^{\text{O}}$ 分别为 t 时段节点 i 输出的有功、无功功率；$U_{i,t}$、$U_{j,t}$ 分别为 t 时段节点 i 和节点 j 的电压幅值；$G_t(i,j)$、$B_t(i,j)$ 分别为 t 时段节点 i 与 j 之间的支路导纳元素实部和虚部；$\theta_{ij,t}$ 为节点 i 与 j 之间的电压相角差。

4.2.2　机组相关约束

1）常规机组爬坡速率约束

$$-R_i^{\text{down}}\Delta T\le P_{i,t}-P_{i,t-1}\le R_i^{\text{up}}\Delta T \tag{28}$$

式中：$i\in\{1,2,\cdots,N_{\text{G}}\}$；$R_i^{\text{up}}$ 和 R_i^{down} 分别为第 i 台常规机组出力的上升和下降速率；ΔT 为调度间隔时长。

2）常规机组最小开停机时间约束

$$\begin{cases} (T_{i,t-1}^{\text{u}}-T_{i,\min}^{\text{u}})(u_{i,t-1}-u_{i,t})\ge 0 \\ (T_{i,t-1}^{\text{d}}-T_{i,\min}^{\text{d}})(u_{i,t}-u_{i,t-1})\ge 0 \end{cases} \tag{29}$$

式中：$T_{i,t-1}^{\text{u}}$ 和 $T_{i,t-1}^{\text{d}}$ 分别为 $t-1$ 时段常规机组 i 已连续开机和停机的时间；$T_{i,\min}^{\text{u}}$ 和 $T_{i,\min}^{\text{d}}$ 分别为常规机组 i 最小开机和停机的时间。

5　多目标动态分解进化算法

鉴于所建立的源网协调优化调度模型具有多目标强耦合性、非凸非线性、高维不连续性等特点，求解难度很大。因此，本文拟采用高效的分解多目标进化算法(multi-objective evolutionary algorithm based on decomposition，MOEA/D)对其求解。

然而，MOEA/D 在处理约束条件的罚函数法时存在不合理的问题。因此，为了使算法最大程度利用不可行域解的种群信息，本文拟在 MOEA/D 中考虑动态资源分配策略与高效优势可行解约束处理方法，提出多目标动态分解进化算法(multi-objective dynamical decomposition evolutionary，MODDE)。最后，采用改进的逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution，TOPSIS)来选取帕累托最优折衷解，从而合理地评价各方案的优劣程度。

5.1　动态资源分配策略

MOEA/D 所得各子问题存在寻优难度不一致的问题。因此，可采用动态资源分配策略，为不同难度子问题分配不同的计算资源，具体公式如下：

$$\pi_i=\begin{cases} 1 & \Delta_i\ge 0.001 \\ \left(0.95+\dfrac{0.05\Delta_i}{0.001}\right)\pi_i & \Delta_i<0.001 \end{cases} \tag{30}$$

$$\Delta_i=\frac{f_{i,j}(x)-f_{i,j}^{'}(x)}{f_{i,j}(x)} \tag{31}$$

式中：$i \in \{1,2,\cdots,N\}$；$j \in \{1,2,\cdots,m\}$，m为目标数；Δ_i为每50次迭代后第i个子问题的目标值变化率；$f_{i,j}(x)$、$f'_{i,j}(x)$分别为第i个子问题中第j个目标每50次迭代前后的目标值。

5.2 高效优势可行解法

高效优势可行解处理多目标优化问题的约束条件时，可以充分利用不可行域解的种群信息，得到质量更高的帕累托最优解集。不可行域解的总约束违反量$\zeta(x)$计算如下：

$$\begin{cases} \zeta(x)=\dfrac{\sum_{k=1}^{N_T} w_k G_k(x)}{\sum_{k=1}^{N_T} w_k} \\ w_k=\dfrac{1}{G_k^{\max}(x)} \end{cases} \tag{32}$$

式中：w_k为自适应权重参数；$G_k(x)$、$G_k^{\max}(x)$分别为第k个约束条件的约束违反量和累计最大约束违反量；N_T为约束条件总数。

5.3 改进 TOPSIS 法

TOPSIS 法是一种多目标决策方法，该方法存在距离正负理想目标值都很近的解。因此，本文通过建立虚拟负理想目标值，对计算各方案与负理想目标值的相对接近度计算公式改进如下：

$$Y_i = L'_i/(L_i^+ + L'_i) \tag{33}$$

$$L'_i = 2L_i^- - L_i^+ \tag{34}$$

$$\begin{cases} L_i^+=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(z_{ij}-z_j^+)^2} \\ L_i^-=\sqrt{\sum_{j=1}^{m}(z_{ij}-z_j^-)^2} \end{cases} \tag{35}$$

式中：$i \in \{1,2,\cdots,N\}$，$j \in \{1,2,\cdots,m\}$；Y_i为各方案与负理想目标值的相对接近度；L_i^+、L_i^-分别为各方案与正负理想目标值的接近度；L'_i为各方案与虚拟负理想目标值的接近度；z_j^+、z_j^-分别为第j个正负理想目标值；z_{ij}为第i个方案中目标j的值。

5.4 MODDE 算法流程

本文提出的用于求解考虑风光水多重不确定性置信风险的源网协调优化调度模型的 MODDE，具体求解步骤如下：

1）输入预测所得的各分布参数、IEEE30 节点负荷需求值；

2）输入风光水火机组等各项系统参数；设定算法参数、置信水平、邻域规模；

3）计算各权重向量的邻域向量；初始化种群，得到各约束违反总量、总运营成本目标C_{op}和总功率偏差置信风险目标$D(\alpha)$；

4）采用锦标赛择优法，根据更新后的实际效率值选取N_{sp}个子问题，设置$k=1$；

5）根据概率选取子问题更新范围，在更新范围内执行 DE 进化操作；

6）计算进化后子问题决策变量对应的目标函数值和各约束违反总量；

7）满足择优条件，则更新该子问题；重复 5）和 6），执行k+1 直至达到N_{sp}；

8）重复 4）至 7），不断迭代直至满足g_{max}；

9）输出结果，并基于改进的 TOPSIS 法选取帕累托最优折衷解。

6 算例分析

6.1 算例概况

本文采用改进型 IEEE30 节点系统进行仿真计算。系统中包含 4 台常规机组光伏电站、2 台联合发电的光伏-径流式小水电机组。算法设定种群规模为 300，子问题领域规模为 30。

6.2 结果分析

6.2.1 不同置信水平对比分析

不同置信水平所得的最优折衷解如表 1 所示。对应的帕累托前沿对比如图 4 所示。

表 1 不同置信水平的最优折衷解

优化目标	1−α			
	95%	90%	85%	80%
C_{op}(元)	152032	152764	153542	157326
D(MW)	394.21	315.53	228.69	146.78

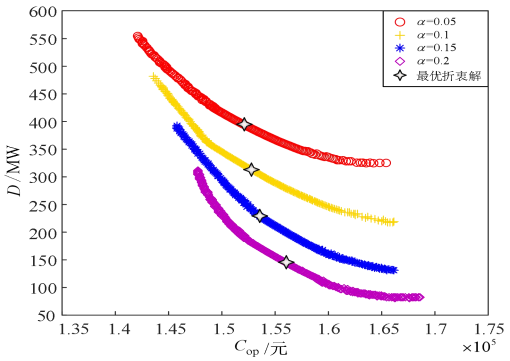


图 4 不同α下 Pareto 前沿

由图 4 可知，出力总功率偏差置信风险与总运营成本存非线性关系，要想实现更低的总运营成本就需要承受更高的出力总功率偏差置信风险。

为验证调度方案所承受的调度风险概率对系统可控裕度的影响，求解得到不同置信水平下各机组的运营成本如图 5 所示。

由图 5 可知，当负荷需求一定时，随着目标置信水平越小，系统中风光水机组的出力占比逐渐低于常规机组出力，常规发电总运营成本越高，风光

水机组发电运营成本越低，发电调度受不确定性影响降低，相应的系统可控裕度越高。

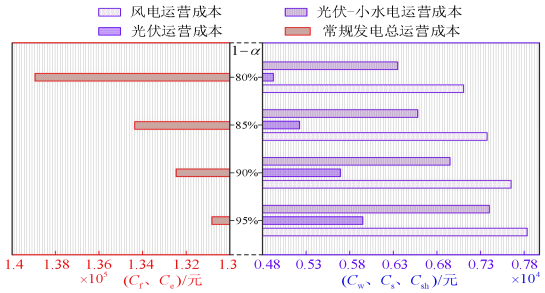


图5 不同置信水平的各机组总运营成本

6.2.2 不同调度方法对比分析

为验证源网协调处理不确定调度问题的优越性，本文将考虑风光水多重不确定性置信风险的源网协调与采用常规发电优化调度结果作对比。统一采用 MODDE 算法求解模型，两种调度方法优化求解所得帕累托前沿对比如图 6 所示。

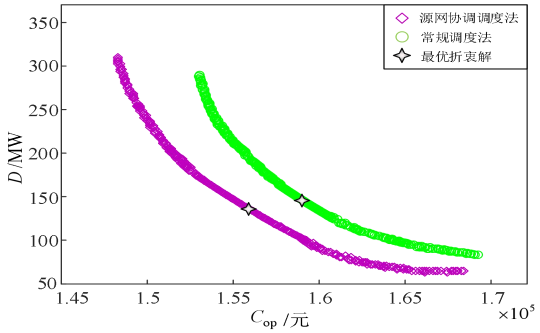


图6 不同调度方法的Pareto前沿

同时，为了验证源网协调模式下对网络节点电压分布与偏差的影响，本文将 80%置信水平下两种调度结果最优折衷解的第 3 时段各节点电压幅值作对比，如图 7 所示。

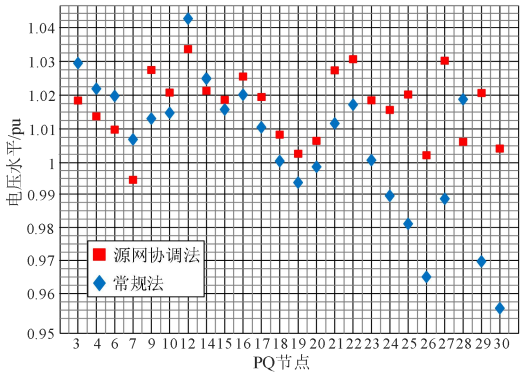


图7 不同调度方法的网络节点电压

由图 6 可知，源网协调较常规调度的帕累托前沿分布范围更广，这是由于约束条件中考虑有载调压变压器和电容器组无功补偿装置等电力电子设备的特性，可以解决电压稳定等调度安全问题。

另外从图 7 可以看出，源网协调优化调度时网络各节点电压分布更为均衡，能很好改善常规调度时总体电压偏差较大的问题。

6.2.3 不同优化算法对比分析

为验证算法的优越性，分别采用 MOEA/D、NSGA-II 和 MODDE 三种优化算法来求解考虑风光水多重不确定性置信风险的源网协调优化调度模型，优化求解得到的帕累托前沿对比如图 8 所示。

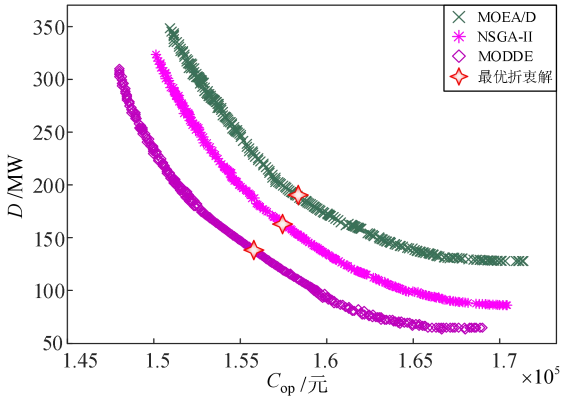


图8 不同算法的Pareto前沿

由图 8 可知，MODDE 算法在承受出力总功率偏差置信风险相同的情况下经济性最优，得到的帕累托前沿具有更好的个体多样性与均匀性。

此外，本文采用 MODDE 算法进行了 20 次重复寻优，并计算每次所得帕累托前沿的 Hypervolume (HV)指标。数据统计结果如表 2 所示

表2 Pareto前沿HV指标统计

	最大值	最小值	平均值	标准差
HV指标	0.8411	0.8399	0.8405	0.0028

综上分析，本文提出的 MODDE 算法性能优越，由于考虑了动态资源分配策略和高效优势可行解约束处理方法，能够实现多目标复杂优化模型的准确高效求解，具有很好的应用价值。

7 结论

本文提出了一种考虑风光水多重不确定性置信风险的源网协调优化调度模型，以出力总功率偏差置信风险和总运营成本为优化目标；同时融合动态资源分配策略、高效优势可行解约束处理方法和 MOEA/D 算法，提出了 MODDE 多目标优化算法求解此模型；最后在改进的 IEEE30 节点系统进行算例分析，并采用改进 TOPSIS 法选取最优折衷解，证明了所提模型和算法的合理性与高效性。结论如下：

1）采用多种分布来分别描述风、光、水电多重不确定性，通过不确定分布区间和可用出力直方图，并基于机会约束概率方法能准确评估可再生能源出力高估/低估功率偏差置信风险的量化指标。

2）调度模型充分体现了风险性和经济性的协调制约关系，兼顾网络电力电子设备的灵活控制潜力，实现了更为合理的源网协调不确定优化调度。

3）MODDE算法相比其他常规智能优化算法具有更好的寻优深度与寻优速度，得到兼具更好收敛性、多样性和分布性的帕累托前沿。

本文提出的模型与算法为电动汽车储能、负荷需求响应和多目标智能优化算法提供了新思路，可将其进一步结合到源-网-荷-储协调优化计算中。

参考文献：

[1]Bilgili M，Ozbek A，Sahin B，et al. An overview of renewable electric power capacity and progress in new technologies in the world[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2015，49：323-334

[2]易明月，童晓阳. 考虑风荷预测误差不确定性的动态经济调度[J]. 电网技术，2019，43(11)：4050-4057.

[3]白杨，汪洋，夏清，等. 水－火－风协调优化的全景安全约束经济调度[J]. 中国电机工程学报，2013，33(13)：2-9.

[4]彭春华，刘兵，孙惠娟. 基于分类不确定性集合的电力系统环境经济鲁棒调度[J]. 中国电机工程学报，2020，40(07)：2202-2212+2399.

[5]孙东磊，韩学山，张波. 电力系统源网间协同的经济调度模型及矩量半定规划法[J]. 电力自动化设备，2016，36(05)：74-80+86.

[6]刘国静，韩学山，杨明，等. 经济调度中源网间的三种状态分析及验证[J]. 电网技术，2013，37(02)：431-437.

[7]Zhang Q, Li H. MOEA/D: A multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition[J]. IEEE Transactions on evolutionary computation, 2007, 11(6): 712-731.

[8]李二超，陈瑞婷.基于变异算子和邻域值自适应的MOEA/D算法[J]. 计算机工程与应用，2019，55(09)：49-55.

[9]Bhagat N. Flood frequency analysis using Gumbel's distribution method：a case study of Lower Mahi Basin，India[J].Journal of Water Resources and Ocean Science，2017，6(4)：51-54.

[10]张鸿羽. 计及风电惩罚成本的电力系统区间经济调度[D]. 燕山大学，2019.

作者简介：

孙惠娟(1982)，女，江西南昌人，硕士，副教授，硕士生导师，研究方向为智能电网优化调度与配电网规划，E-mail：sunhuijuan1982@163.com

巩磊(1997)，男，甘肃陇南人，硕士，研究方向为智能电网优化调度，E-mail：gonglei501@126.com

彭春华(1973)，男，江西乐平人，博士，教授，博士生导师，研究方向为电力系统优化运行及配电网规划，E-mail：chinapch@163.com

含考虑IDR的冷热电联供微网的主动配电网经济优化调度

杨晓辉，张柳芳，吴龙杰，冷正旸，刘康，徐正宏

（南昌大学信息工程学院，江西 南昌 330031）

摘要：多个冷热电联供微网接入主动配电网后，微网和配网作为不同利益主体，系统经济调度更具复杂性。为保护各自隐私，提出了一种含冷热电联供微网的主动配电网经济优化调度模型。运用机会约束规划来处理冷热电联供微网群中新能源及冷热电负荷的随机性，采用分布式建模方法，以各自区域的运行成本最小化为目标，运用目标级联法来并行求取各自区域的最优经济调度结果。同时在冷热电联供微网用户侧引入综合需求响应(Integrated Demand Respond, IDR)，有利于降低供用能成本。通过改进的 IEEE33 节点系统算例验证表明，引入 IDR 后，能有效降低系统运行成本，运用目标级联法能在保护各自区域隐私的基础上求取主动配电网和冷热电联供微网各自最优的经济调度结果。

关键词：冷热电联供微网；主动配电网；综合需求响应；机会约束规划；目标级联法

0 引言

“十四五”规划以来，能源互联网已上升至国家战略发展地位，我国正在大力推进能源改革，提升能源利用率[1]。冷热电联供(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)微网不仅可以实现能量的梯级利用，还能提升能源的利用率，引起了国内外广泛的关注[2-4]。传统配电网由于存在自身能耗高、自动化水平低等问题，难以适应越来越多的分布式电源(Distributed Generation, DG)接入后管理的新需求[5]。主动配电网凭借其具有灵活的网络拓扑结构的优势，能主动地控制和管理局部的分布式电源[6-7]。CCHP微网的用户侧冷、热、电等负荷均可作为柔性负荷参与其运行调度，且三种负荷同时参与调度的灵活性相比于电力需求响应会更高[8]。若在用户侧引入IDR，有利于提升能源利用率，降低供用能成本[9-10]。因此，研究含考虑IDR的CCHP微网的主动配电网经济优化调度具有重要的意义。

目前，含多微网的主动配电网经济优化调度在国内外均有研究，分布式优化凭借其所需交互信息量少、保护各主体隐私、求解速度快等优势，引起广泛关注[11]。文献[12]研究配网和微网互动调度模式， 配网以自身利益最优为目标合理安排各机组出力，微网则在此基础上根据自身条件进行二次协调，该方法不能实现多微网和配网的并行求解。文献[13]建立含多微电网的主动配电网动态经济调度模型，但未考虑到冷、热负荷需求。文献[14]考虑多个CCHP微网接入主动配电网的分布式经济优化调度，但并未考虑风电及冷热电负荷的随机性。上述文献均未考虑在CCHP微网的用户侧引入IDR。

IDR的引入能够有效地提高电力系统中新能源利用率，降低系统运行成本[15-16]。文献[17]提出了一种基于综合需求响应的源荷协调CCHP微网模型，同时运用场景法来处理微网中新能源出力的随机性。文献[18]在需求侧构建综合能源需求响应模型，建立多能互补的热电联供型微网优化运行模型。文献[19]基于微型热电机组，对居民侧综合需求响应进行了研究。上述文献均未研究考虑IDR的CCHP微网群接入主动配电网后实际运行状态，分析两者的经济优化调度问题。

针对现有研究存在的不足，本文提出了一种含考虑IDR的CCHP微网的主动配电网经济优化调度模型，以各自区域的运行成本最小化为目标，采用分布式建模方法，运用目标级联法(Analytical Target Cascading, ATC)来并行求取各自区域的最优经济调度结果。本文运用机会约束规划(Chance Constrained Programming, CCP)来处理CCHP微网群中新能源及冷热电负荷的随机性，在用户侧引入IDR来降低系统运行的成本。最后，对改进的IEEE33节点系统进行仿真分析，验证了所提出模型和方法的有效性。

1 含CCHP微网的主动配电网结构

1.1 含CCHP微网的主动配电网结构

含CCHP微网的主动配电网结构图如图1所示，二者通过联络线电功率交互信息。在考虑IDR的条件下，各CCHP微网合理安排与配网的交互功率、制定分布式电源和不同类型设备的出力计划，在满足自身冷、热、电负荷的需求条件下，使CCHP微网的总运行成本最少。主动配电网协调各CCHP微网的交互功率，合理安排各DG的发电量和从大电网的购电量，在满足自身电负荷的同时使主动配电网的总运行成本最少。

1.2 CCHP微网组成

本文研究的CCHP微网包含冷热电能源供应与转换设备、IDR项目和电动汽车等单元，具体结构如图2所示。

1.3 CCHP微网设备模型

1） 燃气轮机和燃料电池

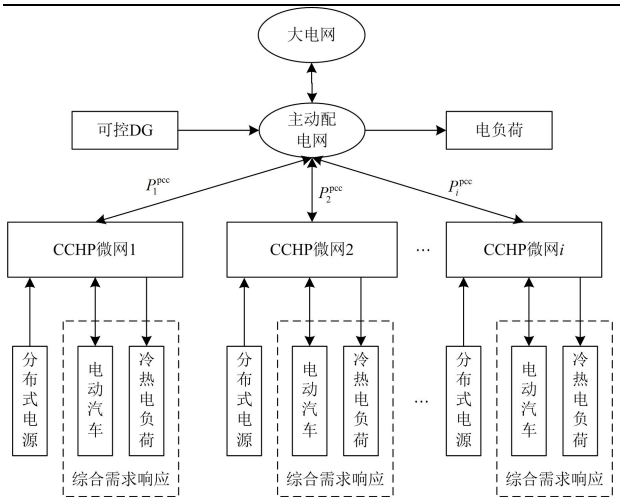


图1 含CCHP微网的主动配电网结构图

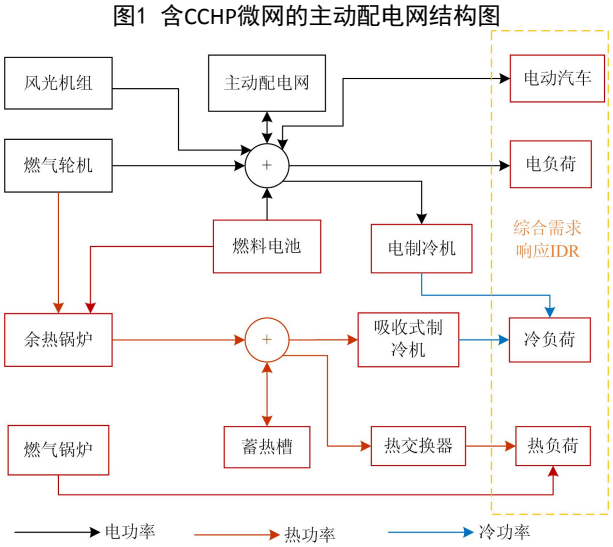


图2 CCHP微电网结构图

燃气轮机输出功率如式(1)所示。

$$P_{\mathrm{mt},n}(t)=\eta_{\mathrm{mt},n}P_{\mathrm{gas},n}(t) \tag{1}$$

燃气轮机的热电比一般为常数，其表达式为

$$T_{\mathrm{mt},n}(t)/P_{\mathrm{mt},n}(t)=\theta_{\mathrm{mt},n} \tag{2}$$

燃气轮机运行约束为

$$\begin{cases} P_{\mathrm{mt},n}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{mt},n}(t)\leqslant P_{\mathrm{mt},n}^{\max} \\ r_{\mathrm{mt},n}^{\mathrm{down}}\leqslant P_{\mathrm{mt},n}(t)-P_{\mathrm{mt},n}(t-1)\leqslant r_{\mathrm{mt},n}^{\mathrm{up}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$P_{\mathrm{mt},n}(t)$、$P_{\mathrm{gas},n}(t)$、$T_{\mathrm{mt},n}(t)$、$\eta_{\mathrm{mt},n}$、$\theta_{\mathrm{mt},n}$分别表示CCHP微网内第n台燃气轮机在时段t的电功率、消耗的天然气功率、热功率、发电效率、热电比；$P_{\mathrm{mt},n}^{\max}$、$P_{\mathrm{mt},n}^{\min}$、$r_{\mathrm{mt},n}^{\mathrm{down}}$、$r_{\mathrm{mt},n}^{\mathrm{up}}$分别表示第$n$台燃气轮机的有功出力上下限、向下和向上爬坡率。燃料电池的数学模型与燃气轮机类似，不再赘述。

2) 燃气锅炉和余热锅炉

燃气锅炉的数学模型如式(4)所示。

$$\begin{cases} T_{\mathrm{gb}}(t)=\eta_{\mathrm{gb}}T_{\mathrm{gb}}^{\mathrm{gas}}(t) \\ T_{\mathrm{gb}}^{\min}\leqslant T_{\mathrm{gb}}(t)\leqslant T_{\mathrm{gb}}^{\max} \end{cases} \tag{4}$$

余热锅炉收集燃气轮机和燃料电池的余热，输出功率与其效率有关。

$$T_{\mathrm{re,out}}(t)=\eta_{\mathrm{re}}T_{\mathrm{re}}(t) \tag{5}$$

式中：$T_{\mathrm{gb}}(t)$、$T_{\mathrm{gb}}^{\mathrm{gas}}(t)$、$\eta_{\mathrm{gb}}$、$T_{\mathrm{gb}}^{\min}$、$T_{\mathrm{gb}}^{\max}$分别表示燃气锅炉在时段$t$输出的热功率、消耗的天然气功率、热效率、最小输出功率、最大输出功率；$T_{\mathrm{re}}(t)$、$T_{\mathrm{re,out}}(t)$、η_{re}分别表示余热锅炉在时段t的输入功率、输出功率、集热效率。

3) 吸收式制冷机和电制冷机

余热锅炉和蓄热槽收集的余热部分被吸收式制冷机吸收用于供给系统的冷负荷。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{ac,out}}(t)=\eta_{\mathrm{ac}}P_{\mathrm{ac}}(t) \\ P_{\mathrm{ac}}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{ac}}(t)\leqslant P_{\mathrm{ac}}^{\max} \end{cases} \tag{6}$$

式中：$P_{\mathrm{ac}}(t)$、$P_{\mathrm{ac,out}}(t)$、η_{ac}、$P_{\mathrm{ac}}^{\min}$、$P_{\mathrm{ac}}^{\max}$分别表示吸收式制冷机在时段t的输入功率、输出功率、制冷效率、最小输入功率、最大输入功率。

电制冷机的输出功率如式(7)所示。

$$\begin{cases} P_{\mathrm{ec,out}}(t)=\eta_{\mathrm{ec}}P_{\mathrm{ec}}(t) \\ P_{\mathrm{ec}}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{ec}}(t)\leqslant P_{\mathrm{ec}}^{\max} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$P_{\mathrm{ec}}(t)$、$P_{\mathrm{ec,out}}(t)$、η_{ec}、$P_{\mathrm{ec}}^{\min}$、$P_{\mathrm{ec}}^{\max}$分别表示电制冷机在时段t的输入功率、输出功率、能耗比、最小输入功率、最大输入功率。

4) 热交换器

余热锅炉和蓄热槽收集的余热部分被热交换器吸收用于供给系统的热负荷。

$$T_{\mathrm{ex,out}}(t)=\eta_{\mathrm{ex}}T_{\mathrm{ex}}(t) \tag{8}$$

式中：$T_{\mathrm{ex}}(t)$、$T_{\mathrm{ex,out}}(t)$、η_{ex}分别表示热交换器在时段t的输入功率、输出功率、能耗比。

5) 蓄热槽

蓄热槽可以储存微网系统内的余热并加以利用，其数学模型为

$$\begin{cases} E_{\mathrm{b}}(t)=E_{\mathrm{b}}(t-1)+\eta_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}T_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)-T_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)/\eta_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}} \\ E_{\mathrm{b}}^{\min}\leqslant E_{\mathrm{b}}(t)\leqslant E_{\mathrm{b}}^{\max} \\ I_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)T_{\mathrm{chr}}^{\min}(t)\leqslant T_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)\leqslant I_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)T_{\mathrm{chr}}^{\max}(t) \\ I_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)T_{\mathrm{dis}}^{\min}(t)\leqslant T_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)\leqslant I_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)T_{\mathrm{dis}}^{\max}(t) \\ I_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)+I_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)\leqslant 1 \end{cases} \tag{9}$$

式中：$E_{\mathrm{b}}(t)$、$T_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)$、$T_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)$、$\eta_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}$、$\eta_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}$分别表示蓄热槽的在时段$t$的存储热能、蓄热功率、放热功率、蓄热效率、放热效率；$E_{\mathrm{b}}^{\min}$、$E_{\mathrm{b}}^{\max}$分别表示蓄热槽的存储能量的最小值、最大值；$T_{\mathrm{chr}}^{\min}(t)$、$T_{\mathrm{chr}}^{\max}(t)$分别表示时段$t$蓄热功率的最小值、最大值；$T_{\mathrm{dis}}^{\min}(t)$、$T_{\mathrm{dis}}^{\max}(t)$分别表示时段$t$放热功率的最小值、最大值；$I_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)$、$I_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)$分别为蓄热槽的蓄放热状态标记位，且蓄放热状态满足互斥条件。

6） 电动汽车

具备车联网功能的电动汽车接入微网以后可以参与到IDR中。电动汽车闲置时其蓄电池能够接受调度进行充电或放电操作，改善微网的负荷曲线。

$$\begin{cases} E_n^{\mathrm{ev}}(t)=E_n^{\mathrm{ev}}(t-1)+\eta_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{ev}}P_n^{\mathrm{evc}}(t)- \\ P_n^{\mathrm{evd}}(t)/\eta_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{ev}}-\Delta D_n^{\mathrm{ev}}\Omega_{\mathrm{ev}} \\ E_{\min}^{\mathrm{ev}}\leqslant E_n^{\mathrm{ev}}(t)\leqslant E_{\max}^{\mathrm{ev}} \\ P_{\min}^{\mathrm{evc}}(t)I_n^{\mathrm{evc}}(t)\leqslant P_n^{\mathrm{evc}}(t)\leqslant P_{\max}^{\mathrm{evc}}(t)I_n^{\mathrm{evc}}(t) \\ P_{\min}^{\mathrm{evd}}(t)I_n^{\mathrm{evd}}(t)\leqslant P_n^{\mathrm{evd}}(t)\leqslant P_{\max}^{\mathrm{evd}}(t)I_n^{\mathrm{evd}}(t) \\ I_n^{\mathrm{evc}}(t)+I_n^{\mathrm{evd}}(t)\leqslant 1-TF_n^{\mathrm{ev}}(t) \end{cases} \tag{10}$$

式中：$E_n^{\mathrm{ev}}(t)$、$\eta_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{ev}}$、$P_n^{\mathrm{evc}}(t)$、$\eta_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{ev}}$、$\Delta D_n^{\mathrm{ev}}$、$\Omega_{\mathrm{ev}}$、$I_n^{\mathrm{evc}}(t)$、$I_n^{\mathrm{evd}}(t)$分别代表第$n$台电动汽车在时段$t$的荷电量、充电效率、充电功率、放电效率、放电功率、电动汽车行驶里程和单位行驶里程消耗的电能、充放电状态标记位；$E_{\min}^{\mathrm{ev}}$、$E_{\max}^{\mathrm{ev}}$分别表示电动汽车荷电量的最小值、最大值；$P_{\min}^{\mathrm{evc}}(t)$、$P_{\max}^{\mathrm{evc}}(t)$分别表示时段$t$充电功率的最小值、最大值；$P_{\min}^{\mathrm{evd}}(t)$、$P_{\max}^{\mathrm{evd}}(t)$分别表示时段$t$放电功率最小值、最大值；$TF_n^{\mathrm{ev}}(t)$表示电动汽车行驶的状态标记位，为0-1变量，1表示电动汽车处于行驶状态，电动汽车充放电状态和驶停状态满足互斥条件。

7） 风力发电机

风力发电机的输出功率和风速有关，具体公式可以用以下分段函数表示。

$$P_{\mathrm{wind}}(t)=\begin{cases} 0 & V_{\mathrm{w}t}(t)\leqslant V_{\min} \\ p_{\mathrm{r}}\cdot\left(\dfrac{V_{\mathrm{w}t}(t)-V_{\min}}{V_{\mathrm{r}}-V_{\min}}\right)^3 & V_{\min}<V_{\mathrm{w}t}(t)<V_{\mathrm{r}} \\ p_{\mathrm{r}} & V_{\mathrm{r}}\leqslant V_{\mathrm{w}t}(t)\leqslant V_{\max} \\ 0 & V_{\mathrm{w}t}(t)\geqslant V_{\max} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$P_{\mathrm{wind}}(t)$表示时段t的风电出力；p_{r}表示风力发电机额定功率；$V_{\mathrm{w}t}(t)$代表时段t的发电机叶片风速；$V_{\max}$、$V_{\min}$分别代表产生发电功率的最大、最小风速；V_{r}表示使风机产生额定功率的最小风速。

8） 光伏发电

光伏机组出力与其光伏电池板面积和辐照强度有关，其表达式为

$$P_{\mathrm{pv}}(t)=\eta_{\mathrm{pv}}S\varphi_{\mathrm{pv}}(t) \tag{12}$$

式中：$P_{\mathrm{pv}}(t)$为光伏机组在时段t的出力；η_{pv}为太阳能电池板效率；S为电池板面积；$\varphi_{\mathrm{pv}}(t)$为光伏机组单位面积光照强度。

2 含CCHP微网的主动配电网优化调度模型

2.1 主动配电网优化调度模型

2.1.1 目标函数

主动配电网优化调度模型的目标函数是总运行成本最小。

$$\min C_{\mathrm{dn}}=C_{\mathrm{dg}}+C_{\mathrm{grid}}-C_{\mathrm{sell}} \tag{13}$$

$$C_{\mathrm{dg}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{dg}}}\left[a_{\mathrm{dg}}P_{\mathrm{dg},m}^2(t)+b_{\mathrm{dg}}P_{\mathrm{dg},m}(t)+c_{\mathrm{dg}}\right] \tag{14}$$

$$C_{\mathrm{grid}}=\sum_{t=1}^{T}\lambda_{\mathrm{grid}}(t)P_{\mathrm{grid}}(t) \tag{15}$$

$$C_{\mathrm{sell}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{mg}}}\lambda_{\mathrm{e},i}(t)P_i^{\mathrm{pcc}}(t) \tag{16}$$

式中：C_{dn}为配网总生产成本；C_{dg}为配网发电机组的发电成本；C_{grid}为配网从大电网的购电成本；C_{sell}为配网向各个微网传送功率的收益；T为调度周期；$P_{\mathrm{dg},m}(t)$为第m台发电机组在时段t的出力；a_{dg}、b_{dg}、c_{dg}分别为各机组对应的成本系数；N_{dg}表示配网机组的数量；$P_{\mathrm{grid}}(t)$为t时段配网向大电网购电的功率；$\lambda_{\mathrm{grid}}(t)$为配网向大电网购电的实时电价；$P_i^{\mathrm{pcc}}(t)$为$t$时段由配网向微网$i$传送的功率，其值为正时表示配网向微网售电，其值为负时表示配网向微网购电；$\lambda_{\mathrm{e},i}(t)$为配网与微网$i$间日前市场交易电价；$N_{\mathrm{mg}}$为微网数量。

2.1.2 约束条件

1） 功率平衡约束

$$P_{\mathrm{grid}}(t)+\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{dg}}}P_{\mathrm{dg},m}(t)-\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{mg}}}P_i^{\mathrm{pcc}}(t)=P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{dn}}(t) \tag{17}$$

2） 发电机组出力上下限约束

$$P_{\mathrm{dg},m}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{dg},m}(t)\leqslant P_{\mathrm{dg},m}^{\max} \tag{18}$$

3） 机组爬坡约束

$$r_{\mathrm{dg},m}^{\mathrm{down}}\leqslant P_{\mathrm{dg},m}(t)-P_{\mathrm{dg},m}(t-1)\leqslant r_{\mathrm{dg},m}^{\mathrm{up}} \tag{19}$$

4） 与大电网交互功率约束

$$P_{\mathrm{grid}}^{\min}\leqslant P_{\mathrm{grid}}(t)\leqslant P_{\mathrm{grid}}^{\max} \tag{20}$$

5） 联络线功率约束

$$P_{\min}^{\mathrm{pcc}}\leqslant P_i^{\mathrm{pcc}}(t)\leqslant P_{\max}^{\mathrm{pcc}} \tag{21}$$

式中：$P_{\mathrm{d}}^{\mathrm{dn}}(t)$为配网在时段$t$的负荷预测值；$P_{\mathrm{dg},m}^{\max}$和$P_{\mathrm{dg},m}^{\min}$为第$m$台发电机组的有功出力上下限；$r_{\mathrm{dg},m}^{\mathrm{down}}$、$r_{\mathrm{dg},m}^{\mathrm{up}}$分别为第$m$台发电机组的向下和向上爬坡率；$P_{\mathrm{grid}}^{\max}$、$P_{\mathrm{grid}}^{\min}$为配网与大电网交互功率的上下限；$P_{\max}^{\mathrm{pcc}}$、$P_{\min}^{\mathrm{pcc}}$为配网向微网传输功率的上下限。

2.2 CCHP微电网优化调度模型

2.2.1 目标函数

CCHP微网优化调度的目标函数为微网总运行成本最小。

$$\min C_{\mathrm{mg},i}=C_{\mathrm{fuel},i}+C_{\mathrm{om},i}+C_{\mathrm{buy},i}+C_{\mathrm{IDR},i} \tag{22}$$

式中：$C_{\mathrm{mg},i}$为第i个CCHP微电网总生产成本；$C_{\mathrm{fuel},i}$为CCHP微网i内可控机组的燃料费用；$C_{\mathrm{buy},i}$为CCHP微网i向主动配电网的购电成本；$C_{\mathrm{om},i}$为CCHP微网i内设备的总维护费用；$C_{\mathrm{IDR},i}$为CCHP微网i内综合需求响应的成本。

$$C_{\mathrm{fuel},i}=\frac{\lambda_{\mathrm{ng}}}{H_{\mathrm{ng}}}\sum_{t=1}^{T}\left[\frac{P_{\mathrm{m}t,n}(t)}{\eta_{\mathrm{m}t,n}}+\frac{P_{\mathrm{fc},n}(t)}{\eta_{\mathrm{fc},n}}+\frac{T_{\mathrm{gb}}(t)}{\eta_{\mathrm{gb}}}\right] \tag{23}$$

$$C_{\mathrm{IDR},i}=C_{x}^{\mathrm{dr}}+C_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{dr}} \tag{24}$$

$$C_{\mathrm{buy},i}=\sum_{t=1}^{T}\lambda_{\mathrm{e},i}(t)P_{i}^{\mathrm{pcc}}(t) \tag{25}$$

$$C_{x}^{\mathrm{dr}}=\sum_{t=1}^{T}\{\sum_{n=1}^{N_{x}^{\mathrm{dr}}}[\beta_{x,n}^{\mathrm{dr}}P_{x,n}^{\mathrm{dr}}(t)]+\beta_{x,\mathrm{real}}^{\mathrm{dr}}P_{x,\mathrm{real}}^{\mathrm{dr}}(t)\} \tag{26}$$

$$C_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{dr}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{ev}}}[\beta_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{dr}}P_{n}^{\mathrm{evd}}(t)] \tag{27}$$

$$\begin{aligned}C_{\mathrm{om},i}=&\sum_{t=1}^{24}\{\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{m}t}}[R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{m}t}P_{\mathrm{m}t,n}(t)+(R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{re}}+R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ex}}\eta_{\mathrm{re}})T_{\mathrm{m}t,n}(t)]+\\&\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{fc}}}[R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{fc}}P_{\mathrm{fc},n}(t)+(R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{re}}+R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ex}}\eta_{\mathrm{re}})T_{\mathrm{fc},n}(t)]+\\&R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ex}}[T_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)-T_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)-P_{\mathrm{ac}}(t)]+R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ac}}P_{\mathrm{ac}}(t)+\\&R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ec}}P_{\mathrm{ec}}(t)+R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{gb}}T_{\mathrm{gb}}(t)+R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{b}}[T_{\mathrm{dis}}^{\mathrm{b}}(t)+T_{\mathrm{chr}}^{\mathrm{b}}(t)]\}\end{aligned} \tag{28}$$

式中：λ_{ng}、H_{ng}分别为天然气价格和天然气热值；$P_{\mathrm{fc},n}(t)$、$T_{\mathrm{fc},n}(t)$分别为CCHP微网i内第n台燃料电池的电功率、热功率；C_{x}^{dr}、和$C_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{dr}}$分别为CCHP微网$i$内$x$类负荷和电动汽车参与IDR项目中的成本，其中$x=\{\mathrm{e,t,c}\}$，依次指电、热、冷负荷；$\beta_{x,n}^{\mathrm{dr}}$、$P_{x,n}^{\mathrm{dr}}(t)$分别表示第$n$个$x$类负荷参与激励型需求响应的预定削减负荷的补偿价格和预定削减负荷；$\beta_{x,\mathrm{real}}^{\mathrm{dr}}$、$P_{x,\mathrm{real}}^{\mathrm{dr}}(t)$分别表示$x$类负荷参与激励型需求响应的实际削减负荷的补偿价格和实际削减负荷；N_{x}^{dr}表示x类负荷参与激励型需求响应的数目；$\beta_{\mathrm{ev}}^{\mathrm{dr}}$、$N_{\mathrm{ev}}$分别表示电动汽车参加需求响应的补偿价格和数量；$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{m}t}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{fc}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{re}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ex}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ac}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{ec}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{gb}}$、$R_{\mathrm{em}}^{\mathrm{b}}$分别为燃气轮机、燃料电池、余热锅炉、热交换器、吸收式制冷机、电制冷机、燃气锅炉、蓄热槽的运行维护费用。

2.2.2　约束条件

1)功率平衡约束

电平衡约束为

$$\begin{aligned}&\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{m}t}}P_{\mathrm{m}t,n}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{fc}}}P_{\mathrm{fc},n}(t)+P_{i}^{\mathrm{pcc}}(t)-P_{\mathrm{ec}}(t)+P_{\mathrm{e,real}}^{\mathrm{dr}}(t)+\\&P_{\mathrm{wind}}(t)+P_{\mathrm{pv}}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{ev}}}[P_{n}^{\mathrm{evd}}(t)-P_{n}^{\mathrm{evc}}(t)]=P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)\end{aligned} \tag{29}$$

热平衡约束为

$$T_{\mathrm{ex,out}}(t)+T_{\mathrm{gb}}(t)+P_{\mathrm{h,real}}^{\mathrm{dr}}(t)=P_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t) \tag{30}$$

冷平衡约束为

$$P_{\mathrm{ac,out}}(t)+P_{\mathrm{ec,out}}(t)+P_{\mathrm{c,real}}^{\mathrm{dr}}(t)=P_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t) \tag{31}$$

式中：$P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$、$P_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$、$P_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$分别表示微网$i$内在$t$时在价格型需求响应引导后的电、热、冷负荷。

2)IDR运行约束

本文综合考虑了冷热电负荷的价格型需求响应和激励型需求响应，三种负荷的需求响应的数学模型类似，本文以电负荷需求响应为例说明：

(1)价格型需求响应，通过电价引导用户的负荷在不同的时段转移以达到错峰的目的。用户通过比较各个时段电价的差异来主动调整负荷值，以此来降低用电成本。本文采用实时电价机制来对负荷进行时序上的调整，用户根据电价改变其用电量，将部分高电价时段负荷转移到低电价时段。可转移电负荷量受一定比例的限制如式(33)和式(34)。在总调度时段内，用户负荷的总量不会改变，如式(32)。

$$P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)=P_{\mathrm{e,d}}(t)+DR_{\mathrm{e,up}}(t)-DR_{\mathrm{e,down}}(t) \tag{32}$$

$$\sum_{t=1}^{T}DR_{\mathrm{e,up}}(t)=\sum_{t=1}^{T}DR_{\mathrm{e,down}}(t) \tag{33}$$

$$0\leqslant DR_{\mathrm{e,up}}(t)\leqslant P_{\mathrm{e,d}}(t)\alpha_{\mathrm{up}} \tag{34}$$

$$0\leqslant DR_{\mathrm{e,down}}(t)\leqslant P_{\mathrm{e,d}}(t)\alpha_{\mathrm{down}} \tag{35}$$

式中：$P_{\mathrm{e,d}}(t)$表示在时段t的用户电负荷；$DR_{\mathrm{e,up}}(t)$、$DR_{\mathrm{e,down}}(t)$分别表示价格型需求响应引导下t时刻增加、减少的负荷量；α_{up}、α_{down}表示最大可转移负荷的比例。

(2)激励型需求响应

激励型需求响应是指能源供应商与用户签订合同，使得前者可以在有负荷削峰需要时切断用户的部分负荷，并给予一定的补偿金。其中，补偿成本包括预订削减补偿和实际削减补偿，削减补偿量需要满足的约束条件为

$$0\leqslant P_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}(t)\leqslant\alpha_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i} \tag{36}$$

$$P_{\mathrm{e,real}}^{\mathrm{dr}}(t)\leqslant\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{dre}}}P_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}(t) \tag{37}$$

式中：$\alpha_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}$表示第$n$个电激励型响应占总负荷比例。

3)旋转备用的机会约束

风力、光伏发电的预测过程会存在不确定性。

冷、热、电负荷预测容易受到外界因素的影响。由于负荷与风光电的预测误差服从正态分布[20]，运用机会约束规划能描述随机变量的不确定性[21]，设定相应等级的置信水平，能够将旋转备用约束表达为以下的概率形式。

$$P\left\{\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{mt}}}P_{\mathrm{mt},n}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{fc}}}P_{\mathrm{fc},n}^{\max}+P_i^{\mathrm{pcc}}(t)-P_{\mathrm{ec}}(t)+P_{\mathrm{pv}}(t)+\delta_{\mathrm{pv}}(t)+P_{\mathrm{wind}}(t)+\delta_{\mathrm{wind}}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{dre}}}P_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{ev}}}[P_n^{\mathrm{evd}}(t)-P_n^{\mathrm{evc}}(t)]\geqslant P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+\delta_{\mathrm{e,load}}(t)+R_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)\right\}\geqslant\alpha_1 \tag{38}$$

$$P\left\{T_{\mathrm{ex,out}}(t)+T_{\mathrm{gb}}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{drt}}}P_{\mathrm{h},n}^{\mathrm{dr}}(t)\geqslant P_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+\delta_{\mathrm{h,load}}(t)+R_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)\right\}\geqslant\alpha_2 \tag{39}$$

$$P\left\{P_{\mathrm{ac,out}}(t)+\eta_{\mathrm{ec}}P_{\mathrm{ec}}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{drc}}}P_{\mathrm{c,n}}^{\mathrm{dr}}(t)\geqslant P_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+\delta_{\mathrm{c,load}}(t)+R_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)\right\}\geqslant\alpha_3 \tag{40}$$

式中：$\delta_{\mathrm{wind}}(t)$、$\delta_{\mathrm{pv}}(t)$和$\delta_{\mathrm{e,load}}(t)$、$\delta_{\mathrm{h,load}}(t)$、$\delta_{\mathrm{c,load}}(t)$分别表示在$t$时刻风电、光伏和电、热、冷负荷的预测误差的均值，在本文均值取0；$R_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$、$R_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$、$R_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)$分别表示微网$i$内在$t$时刻电、热、冷的备用负荷；置信水平$\alpha_1$、$\alpha_2$、$\alpha_3$分别表示该备用约束条件下成立所满足的概率值。

3 基于目标级联法(ATC)的调度模型求解

3.1 目标级联法(ATC)

ATC是一种常用的求解双层模型的方法。本文中上层系统对应主动配电网，下层对应CCHP微网。本文将联络线功率$P_i^{\mathrm{pcc}}(t)$等效为配网虚拟负荷值$P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)$与微网虚拟电源值$P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)$，分别在各自系统层中计算，在各层目标函数加入拉格朗日罚函数。

CCHP微网i的目标函数修改为

$$\min C_{\mathrm{mg},i}+\sum_{t=1}^{T}\omega_i(t)\left[\overline{P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}-P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)\right]+\sum_{t=1}^{T}\gamma_i(t)\left[\overline{P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}-P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)\right]^2 \tag{41}$$

主动配电网的目标函数修改为

$$\min C_{\mathrm{dn}}+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{mg}}}\omega_i(t)\left[P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)-\overline{P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}\right]+\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{mg}}}\gamma_i(t)\left[P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)-\overline{P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}\right]^2 \tag{42}$$

式中：ω_i、γ_i分别为拉格朗日罚函数乘子；$\overline{P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}$和$\overline{P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}$分别为从对方系统获知的耦合变量。通过引入罚函数，使耦合变量在迭代过程中不断靠近对方系统交互反馈的边界功率值，最终使耦合变量与边界值达到一致[22]。

3.2 机会约束处理

由式(38)—式(40)可知，风光及冷热电负荷的预测误差等随机变量使模型不能求解。因此，本文将式(38)—式(40)转化为式(43)—式(45)等价确定形式。经转换后的确定模型不含随机变量可以直接求解[23]。

$$\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{mt}}}P_{\mathrm{mt},n}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{fc}}}P_{\mathrm{fc},n}^{\max}+P_i^{\mathrm{pcc}}(t)-P_{\mathrm{ec}}(t)+P_{\mathrm{pv}}(t)+P_{\mathrm{wind}}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{dre}}}P_{\mathrm{e},n}^{\mathrm{dr}}(t)+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{ev}}}[P_n^{\mathrm{evd}}(t)-P_n^{\mathrm{evc}}(t)]\geqslant P_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+R_{\mathrm{e,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+F^{-1}(\alpha_1) \tag{43}$$

$$T_{\mathrm{ex,out}}(t)+T_{\mathrm{gb}}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{drt}}}P_{\mathrm{h},n}^{\mathrm{dr}}(t)\geqslant P_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+R_{\mathrm{h,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+F^{-1}(\alpha_2) \tag{44}$$

$$P_{\mathrm{ac,out}}(t)+\eta_{\mathrm{ec}}P_{\mathrm{ec}}^{\max}+\sum_{n=1}^{N_{\mathrm{drc}}}P_{\mathrm{c,n}}^{\mathrm{dr}}(t)\geqslant P_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+R_{\mathrm{c,load}}^{\mathrm{mg},i}(t)+F^{-1}(\alpha_3) \tag{45}$$

式中：$F^{-1}(\alpha_1)$、$F^{-1}(\alpha_2)$、$F^{-1}(\alpha_3)$分别表示风光出力及电、热、冷负荷的随机分布函数的反函数。

3.3 求解算法流程

基于ATC的含CCHP微网的主动配电网优化调度模型算法流程具体步骤如下：

1) ATC迭代数据初始化，设置罚函数乘子初值，置迭代次数k=1。

2) 各CCHP微网根据式(23)—式(37)、式(41)和式(43)—式(45)进行自身优化调度问题求解，将计算出的虚拟发电值$\overline{P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}$传递至主动配电网。

3) 主动配电网接收到微网传递数据后，根据式(14)—式(21)、式(42)进行自身优化问题求解，将计算出的虚拟负荷值$\overline{P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc}}(t)}$传递至CCHP微网。

4) 利用式(46)判断是否满足收敛准则，若满足则输出最优调度结果，若不满足则根据式(47)更新罚函数乘子，返回步骤2)，迭代次数$k=k+1$。

$$\begin{cases}\left|P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc},k}(t)-P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc},k}(t)\right|\leqslant\varepsilon_1\\ \left|\dfrac{f_a^{(k)}(t)-f_a^{(k-1)}(t)}{f_a^{(k)}(t)}\right|\leqslant\varepsilon_2\end{cases}\quad\forall a\in DN\cup MG \tag{46}$$

$$\begin{cases}\omega_i^k(t)=\omega_i^{k-1}(t)+2\gamma_i^{k-1}(t)^2\left[P_{\mathrm{dn},i}^{\mathrm{pcc},k-1}(t)-P_{\mathrm{mg},i}^{\mathrm{pcc},k-1}(t)\right]\\ \gamma_i^k(t)=\beta\gamma_i^{k-1}(t)\end{cases} \tag{47}$$

式中：ε_1、ε_2表示收敛精度；$f_a(t)$表示区域a的目标函数；DN和MG分别表示主动配电网和CCHP微网集合；β为常数，一般取值为$2<\beta<3$；ω_i和γ_i的初值一般取较小的常数。

4 算例分析

本文对改进的IEEE33节点配电网络进行算例仿真分析，具体结构图如图3所示。每个微网包含1台风电机组、1台光电机组、2台燃气轮机、2台燃料电池、20台电动汽车，CCHP微网数据参考文献[24]。主动配电网中分布式电源机组参数引用文献[13]。动态经济调度周期为1天，日前市场交易电价采用实时电价，参考文献[24]，如图4所示。罚函数乘子ω_i、γ_i初值都设为1，收敛精度ε_1、ε_2都设置为0.001。本文在Matlab R2018b运行环境下调用YALMIP工具箱以及商业求解器CLPEX来求解所提出的模型。

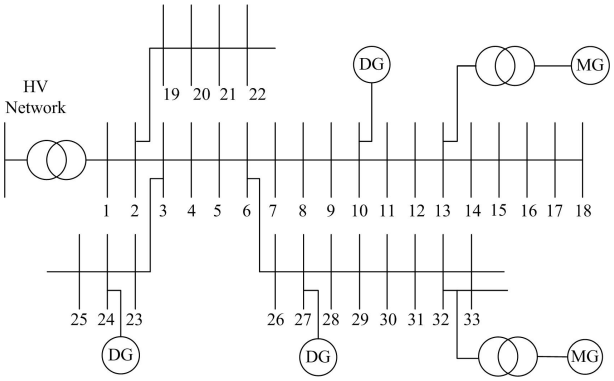


图3 改进的IEEE33节点结构图

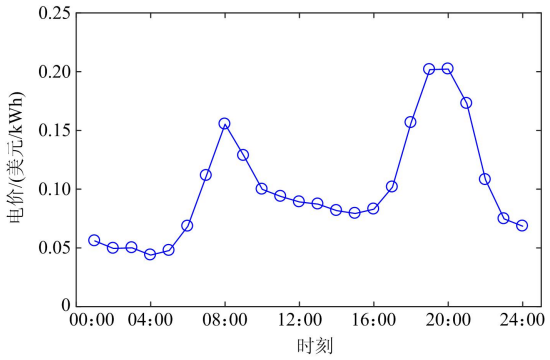


图4 日前市场交易电价

4.1 考虑IDR的系统调度结果分析

假设在运用ATC求解双层模型时，置信度$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=80\%$，配网虚拟负荷初值选取为0。

4.1.1 考虑IDR的系统运行成本分析

为验证CCHP微网侧综合需求响应策略的有效性，对比分析以下三种模式下系统的运行成本。

1) 模式1。用户侧不参与需求响应。

2) 模式2。用户侧仅电负荷参与需求响应

3) 模式3。用户侧冷、热、电负荷和电动汽车均参与需求响应

表1为三种模式下系统的运行成本。由表1可知，当仅有电负荷参与需求响应时，系统总成本由74 014.07元下降至72 124.67元，当冷、热负荷与电动汽车也参与后，系统运行成本进一步降低至71 439.62元。因此，在CCHP微网的用户侧引入综合需求响应能有效降低系统运行成本。

4.1.2 考虑IDR的系统优化结果分析

1) CCHP微网层优化调度结果

表1 三种模式下的运行成本

模式	配网成本/元	多微网成本/元	总成本/元
模式1	40 172.48	33 841.59	74 014.07
模式2	40 172.48	31 952.19	72 124.67
模式3	40 172.48	31 264.14	71 439.62

本文以CCHP微网1为例分析考虑IDR的冷、热、电负荷日前优化调度结果，其优化调度结果如图5—图7所示。由图5可知，CCHP微网1中的电负荷和电制冷机的耗电功率由燃气轮机、燃料电池、风光联合出力、从配网购电、电动汽车放电提供。电动汽车在负荷高峰期放电，在低谷期充电，起到削峰填谷的作用。在23：00时用户参与激励性电需求响应，削减部分负荷。由图6可知，CCHP微网1中的热负荷由热交换器和燃气锅炉提供，热交换器收集燃气轮机和燃料电池的余热和蓄热槽的蓄热供给用户，当热交换器无法满足需求时，燃气锅炉补充供给。由图7可知，CCHP微网1中的电制冷机和吸收式制冷剂供给用户的冷负荷，二者无法满足全部用户的需求。因此，在冷负荷高峰期，部分用户参与了激励性冷需求响应。

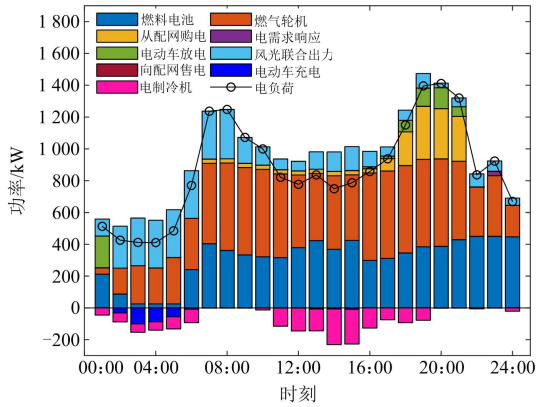


图5 CCHP微网1电负荷平衡曲线

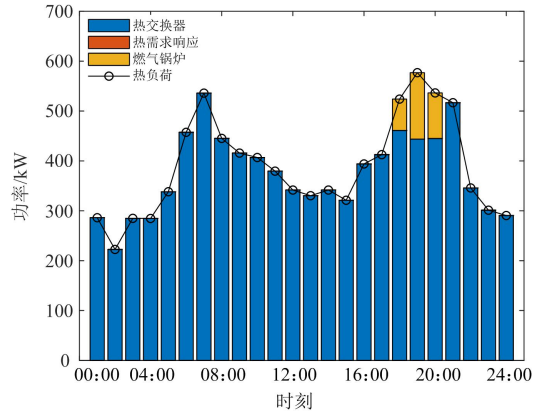


图6 CCHP微网1热负荷平衡曲线

本文采用实时电价机制来对负荷进行时序上的调整。图8表示的是CCHP微网1在需求响应前后负荷曲线对比图，由图8可知，在价格需求响应引导下，用户根据电价改变其用电量，将部分高电价时段负荷转移到低电价时段，不会改变用户负荷的总

量，在实现经济性同时也达到了削峰填谷的目的。

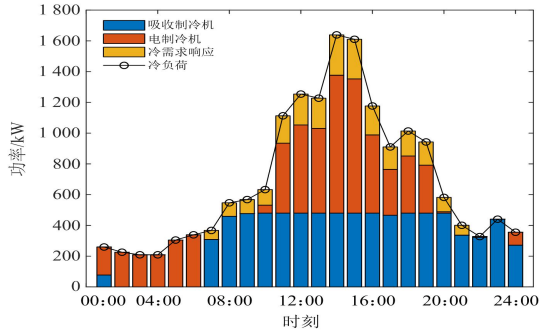


图7 CCHP微网1冷负荷平衡曲线

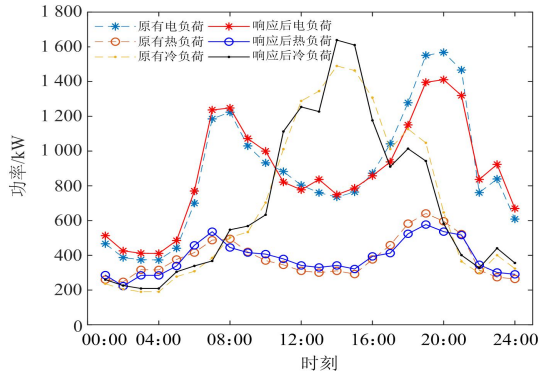


图8 CCHP微网1需求响应前后负荷曲线对比图

2) 主动配电网层优化调度结果

主动配电网层电负荷平衡曲线如图9所示。主动配电网层的电负荷平衡由从大电网购电、3台DG出力、与微网间交互功率这三部分构成。DG出力随负荷的变化而变化，在07：00—21：00时段，主动配电网向CCHP微网售电。

4.2 考虑预测误差的影响分析

当考虑预测误差时，假设风光发电波动方差为0.1 p.u.，冷热电负荷波动方差取值为0.01 p.u.。置信水平α_1、α_2、α_3取值不同也会影响系统运行成本。表2表示不同置信水平下考虑综合需求响应下系统运行的总成本。

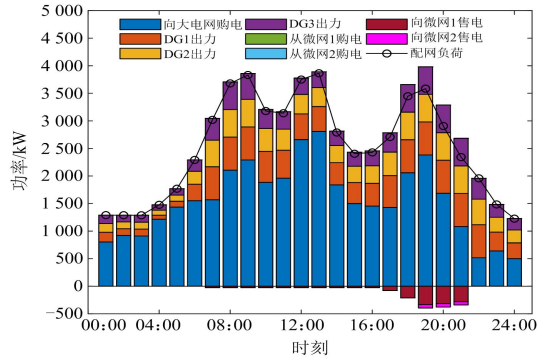


图9 主动配电网电负荷平衡曲线

表2 不同置信水平下的运行成本

置信度	配网成本/元	多微网成本/元	总成本/元
无误差	40 172.48	30 544.56	70 717.04
$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=60\%$	40 172.48	30 662.37	70 834.85
$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=70\%$	40 172.48	30 784.88	70 957.36
$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=80\%$	40 172.48	30 909.48	71 078.96
$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=90\%$	40 172.48	31 201.16	71 373.64

从表2可以看出，在考虑误差时，配网成本保持不变，这是由于配网并未接入风光机组。在仅考虑CCHP微网的风光机组预测误差和冷热电负荷误差条件下，多微网的运行成本是增加的，并且随置信度的不断提高，系统运行成本也随之不断增加。

4.3 不同建模方法结果对比分析

为体现本文所提出的分布式建模方法的优越性，采用集中式和分布式两种方法分别计算系统的总运行成本进行对比。集中式建模方法是将CCHP微网和主动配电网看成一个整体，对其进行优化，但这种方法所需的通信交互信息多，且无法显现配网和微网作为不同主体各自的利益需求。分布式建模方法是将配网和微网看成两个不同主体分别建模，分析自身区域的优化调度问题，运用ATC求解，通过不断交替迭代计算，最终求解出各自系统的经济调度结果。

在分布式优化时，配网和微网只需通过传递配网虚拟负荷值与微网虚拟电源值即可得到最优解，保护了微网与配网的隐私。而集中式优化时，配网和微网需要传递各自区域的隐私数据，传递数据较多。集中式和分布式建模方法所需传递的数据量如表3所示。由表3可知，采用集中式建模时，配网和微网间传递数据数量为4 776，而分布式建模时，配网和微网间传递的数据量仅为96，约为集中式建模的1/50。由此可见，采用分布式建模方法不需要传递各自区域的隐私数据，保护了微网与配网各自区域的隐私。

表3 不同建模方法传递数据量

方法类别	配网和微网间传递数据量
集中式	4 776
分布式	96

集中式和分布式建模计算的系统运行成本如表4所示。由表4可知，通过ATC求解模型时，系统运行成本几乎接近于集中式。同时，分布式建模所需的交互信息少，能在保护各自区域隐私的基础上使主动配电网和冷热电联供微网群能够同时达到各自的经济最优。随着智能小区理念的推广，越来越多售电主体进入市场，本文所提分布式建模方法有较好的适用性。

表4 集中式与ATC计算结果对比

方法类别	配网成本/元	多微网成本/元	总成本/元
集中式	40 173.04	28 758.20	68 931.24
ATC	40 173.16	28 784.72	68 957.88

5 结论

本文提出了一种含考虑IDR的CCHP微网的主动配电网经济优化调度模型，采用目标级联法求取各自区域的最优调度结果。通过算例分析，主要得出以下结论：

1) 在CCHP微网的用户侧引入综合需求响应，考虑冷热电负荷和电动汽车作为柔性负荷参与需求

响应，可有效降低系统的运行成本。

2)针对CCHP微网群中新能源及冷热电负荷的随机性，运用机会约束规划处理，仿真表明置信度越高，系统运行成本越高。

3)通过目标级联法求解模型时，能够在保护各自区域隐私的同时使主动配电网和CCHP微网达到各自经济最优，为日后不同售电主体进入电力市场后的能量管理提供了新思路。

参考文献：

[1]刘涤尘, 彭思成, 廖清芬, 等. 面向能源互联网的未来合配电系统形态展望[J]. 电网技术, 2015, 39(11):3023-3034.

LIU Dichen, PENG Sicheng, LIAO Qingfen, et al. Outlook of future integrated distribution system morphology orienting to energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3023-3034.

[2]胡荣, 马杰, 李振坤, 等. 分布式冷热电联供系统优化配置与适用性分析[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 418-425.

HU Rong, MA Jie, LI Zhenkun, et al. Optimal allocation and applicability analysis of distributed combined cooling heating power system[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 418-425.

[3]何黎君, 程杉, 陈梓铭, 等. 考虑交互功率控制和双边竞价交易的多微电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 10-17.

HE Lijun, CHENG Shan, CHEN Ziming, et al. Two-layer optimal dispatching of multi-micro grid considering interactive power control and bilateral bidding transaction[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 10-17.

[4]YANG Xiaohui, LENG Zhengyang, XU Xiaoping, et al. Multi-objective optimal scheduling for CCHP microgrids considering peak-load reduction by augmented ε -constraint method[J]. Renewable Energy, 2021, 172: 408-423.

[5]吕天光, 艾芊, 孙树敏, 等. 含多微网的主动配电系统综合优化运行行为分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 122-132.

LÜ Tianguang, AI Qian, SUN Shumin, et al. Behavioural analysis and optimal operation of active distribution system with multi-microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 122-132.

[6]叶亮, 吕智林, 王蒙, 等. 基于最优潮流的含多微网的主动配电网双层优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 27-37.

YE Liang, LÜ Zhilin, WANG Meng, et al. Bi-level programming optimal scheduling of ADN with a multi-microgrid based on optimal power flow[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 27-37.

[7]JAMALI S, BAHMANYAR A, RANJBAR S. Hybrid classifier for fault location in active distribution networks[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(2): 174-182.

[8]崔鹏程, 史俊祎, 文福拴, 等. 计及综合需求侧响应的能量枢纽优化配置[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 101-109.

CUI Pengcheng, SHI Junyi, WEN Fushuan, et al. Optimal energy hub configuration considering integrated demand response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 101-109.

[9]RAKIPOU D, BARATI H. Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response[J]. Energy, 2019, 173: 384-399.

[10]江岳春, 曾诚玉, 邬嘉嘉, 等. 计及人体舒适度和柔性负荷的综合能源协同优化调度[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 254-260.

JIANG Yuechun, ZANG Chengyu, HUAN Jiajia, et al. Integrated energy collaborative optimal dispatch considering human comfort and flexible load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 254-260.

[11]WU Junfeng, YANG Tao, WU Di, et al. Distributed optimal dispatch of distributed energy resources over lossy communication networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 3125-3137.

[12]艾欣, 许佳佳. 基于互动调度的微网与配电网协调运行模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 143-149.

AI Xin, XU Jiajia. Study on the microgrid and distribution network co-operation model based on interactive scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 143-149.

[13]谢敏, 吉祥, 柯少佳, 等. 基于目标级联分析法的多微网主动配电系统自治优化经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4911-4921.

XIE Min, JI Xiang, KE Shaojia, et al. Autonomous optimized economic dispatch of active distribution power system with multi-microgrids based on analytical target cascading theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4911-4921.

[14]徐青山, 李淋, 盛业宏, 等. 冷热电联供多微网主动配电系统日前优化经济调度[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1726-1734.

XU Qingshan, LI Lin, SHENG Yehong, et al. Day-ahead optimized economic dispatch of active distribution

power system with combined cooling, heating and power-based microgrids[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1726-1734.

[15]ZHENG Shunlin, SUN Yi, LI Bin, et al. Incentive-based integrated demand response for multiple energy carriers considering behavioral coupling effect of consumers[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11: 3231-3245.

[16]YANG Zhao, HU Junjie, AI Xin, et al. Transactive energy supported economic operation for multi-energy complementary microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 12: 4-17.

[17]袁桂丽, 董金凤, 魏更, 等. 基于需求响应和多能互补的冷热电联产微网优化调度[J]. 电力建设, 2019, 40(9): 64-72

YUAN Guili, DONG Jinfeng, WEI Geng , et al. Optimal scheduling of combined cooling heating and power microgrid based on demand response and multi-energy coordination[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9): 64-72.

[18]程杉, 魏昭彬, 黄天力, 等. 基于多能互补的热电联供型微网优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 160-168.

CHENG Shan, WEI Zhaobin, HUANG Tianli, et al. Multi-energy complementation based optimal operation of a microgrid with combined heat and power [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 160-168.

[19]HOUWING M, NEGENBORN R R, DE S B. Demand response with micro-CHP systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1): 200-213.

[20]朱建全, 段翩, 刘明波. 计及风险与源-网-荷双层协调的电力实时平衡调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3239-3247.

ZHU Jianquan, DUAN Pian, LIU Mingbo. Electric real-time balance dispatch via bi-level coordination of source grid-load of power system with risk[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3239-3247.

[21]周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 70-77.

ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 70-77.

[22]张旭, 王洪涛. 高比例可再生能源电力系统的输配协同优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 67-83, 115.

ZHANG Xu, WANG Hongtao. Optimal dispatch method of transmission and distribution coordination for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 67-83, 115.

[23]庞碧君. 线性规划与随机线性规划[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2009.

[24] ALIREZA S, NEJAD F, SHAHRZAD H, et al. A novel stochastic energy management of a microgrid with various types of distributed energy resources in presence of demand response programs[J]. Energy, 2018, 160: 257-274.

作者简介：

杨晓辉(1978)，男，通信作者，博士，教授，研究方向为智能控制，新能源发电与微电网技术,E-mail：yangxiaohui@ncu.edu.cn

张柳芳(1995)，女，硕士研究生，研究方向为电力系统优化运行调度,E-mail：506610174@qq.com

基于ATTENTION机制优化CNN-SEQ2SEQ模型的非侵入式负荷监测

王琪凯，熊永康，陈瑛，夏永洪，叶宗阳，余礼苏

（南昌大学信息工程学院，江西 南昌 330031）

摘要：非侵入式负荷监测(non-intrusive load monitoring,NILM)是智能用电的一个关键环节。本文提出一种基于 Attention 机制优化的 CNN-seq2seq 模型用于提高 NILM 的分解精度。首先，通过 K-means++算法对各设备进行聚类操作，并将其转换成对应的独热码；其次，通过 CNN 结构提取总负荷数据的特征，并利用 seq2seq 结构捕捉负荷特征的时序依赖关系；最后，使用 Attention 机制优化 CNN-seq2seq 模型的整体结构。该模型通过将时间序列数据与设备状态编码之间形成一一映射关系，简化了模型结构；借助于能关注负荷重要特征的 Attention 机制，提升了模型的分解精度，并使用 AMPds2 开源数据集验证了模型的有效性。

关键词：非侵入式负荷监测；卷积神经网络；序列到序列；Attention 机制

0 引言

非侵入式负荷监测[1-3](non-intrusive load monitoring，NILM)又称非侵入式负荷分解，与传统需要在每个设备上安装传感器，来获取用户用电信息的侵入式负荷监测(intrusive load monitoring，ILM)不同，该技术只需要在用户入口处安装监测装置，采集功率、电压、电流等汇总的总负荷信息，就能分解得到所需单个设备的用电信息。NILM 技术在成本以及后期维护上，相比 ILM 更具优势[4-5]。在用户用电需求持续增长、智能电网[6]等技术快速发展的今天，NILM 技术在兼顾用户隐私[7-8]的同时，可以推动电网侧和用户侧友好互动，鼓励用户积极参与到节能计划中[9-10]，对于实现“碳达峰、碳中和”目标具有重要意义。

非侵入式负荷监测最早由 Hart 于 20 世纪 80 年代提出[11]，负荷特征一般可以分为 2 类：暂态特征和稳态特征[2]。其中，基于暂态特征的算法，以瞬时功率变化、启动电流波形、电压噪声等特征信息来判断负荷状态是否发生改变。文献[12]提出一种改进的基于时频分析的 NILM 方法，结合多分辨率 S 变换的瞬态特征提取方案和改进的 0-1 多维背包算法来识别设备运行情况。文献[13]将设备状态转换过程中的暂态功率波形及状态改变前后的功率变量作为负荷特征，采用 DTW 算法将其与历史暂态事件波形匹配并进行动态聚类，使用关联规则分析找出属于同一设备的暂态事件集。即便如此，基于暂态特征识别的算法，存在需要获取高频采样数据、对设备硬件要求高的特点；相比较而言，基于稳态特征识别的算法，所需要的低频采样数据，智能电表一般就能提供支持[1]。根据辨识的负荷类型、用户对识别精度的要求等情况分析，居民用户可以考虑选择低频负荷特征[1]。基于稳态特征的算法，一般以有功、无功信号作为输入来分解得到单个设备运行情况。文献[14]提出一种情境自适应和贝叶斯优化的双向长短期记忆(bidirectional long short-term memory，BiLSTM)网络模型，使用三种开源数据集，从季节、地理、设备型号等角度证明模型具有良好的适用性。文献[15]提出一种数据扩充技术，提高了训练数据集的质量，使用深度卷积神经网络(convolutional neural networks，CNN)模型进行分解，同时提出一种后处理技术，可以有效剔除一些不合理的结果，对 II 类负荷(多状态设备)具有良好的分解性能。

以上所述基于稳态特征的算法，其核心结构都是基于深度学习网络框架建立的。文献[16]提出了一种 CNN-BiLSTM 算法应用于 NILM 领域，是目前公认的利用深度学习所达到的综合性能最优的模型[17]。为了进一步提高模型的分解性能，本文在文献[16]的基础上，对其所述算法进行改进：

1）序列到序列(sequence-to-sequence，seq2seq)模型的独特优势是能将一个序列问题，转换成另一个序列问题(seq2seq 的基本单元是仍是 BiLSTM 和 LSTM)。使用 seq2seq 结构替代 BiLSTM 结构，更适合 NILM 的分解模式，且能有效地挖掘时序特征信息，同时在模型的搭建上也更加灵活；

2）引入 Attention 机制优化整体模型，使得模型能够更加关注重要部分的特征。

1 模型流程图

本文所用非侵入式负荷监测的流程图如图 1 所示，可以分为以下步骤：

1）对原始数据进行归一化后，进行数据切片。该步骤有利于不割裂地处理每一时刻的信息，因为设备运行是一个连续的过程，当前时刻设备的状态一定程度上也与前面时刻运行状态相关。将处理后的序列数据作为输入传入训练模型中。

2）对历史的设备数据进行聚类操作，生成负荷聚类-编码表。这是因为设备实际运行过程中，由于

噪声等原因，其运行过程中会存在一定的波动，因此本文使用这些聚类结果代替设备不同状态(模式)下的功率，从而降低分解难度和提高分解精度。

3）将聚类结果转换成状态编码，作为输出传入到训练模型中，这一步骤简化了模型的输出结构，并有助于和步骤(1)中的输入形成一一映射关系。

4）将处理好的数据分成训练集和测试集，训练集用于训练模型，测试集用于检验模型分解性能。

5）本文所搭建的模型根据步骤(1)和步骤(3)传入的数据，不断训练、迭代，找出数据之间的映射关系，调整模型内部参数。

6）将当前时刻总功率序列数据(测试集)传入训练好的模型中，模型就能自主地给出当前时刻每个设备对应的状态概率分布矩阵，并根据所得设备状态结果，与负荷聚类-编码表进行比对，得到具体的有功功率值。

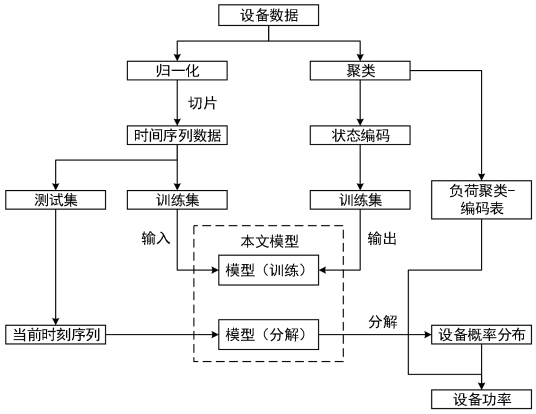


图1 模型流程图

2 数据预处理图

2.1 负荷特性分析

电力负荷按照行业性质主要可以划分为商业负荷、工业负荷和居民负荷等[2]。这些负荷之间的特征存在明显差异，如工业负荷一般功率较大，受订单、季节等因素影响；商业负荷以照明、电脑用电等为主，受工作日、节假日等时间因素影响；居民负荷种类众多且功率范围跨度广，受用户习惯影响。因此，对于不同行业，工程项目的负荷分解难度、具体分解方法和细节也有所不同。家电设备可以分为开/关二状态型、有限多状态型、连续变状态型和永久运行型四类[2]。居民负荷多为前 2 种，其工作示意图如图 2 所示。

2.2 K-means++聚类

本文选择 6 种家电设备作为分解负荷，分别为干衣机、热泵、冰箱、洗碗机、电视和地下室灯(数据描述见 5.1)。使用 K-means++算法对上述设备进行聚类操作，包括以下步骤：

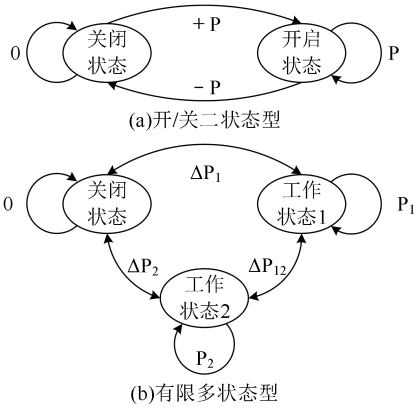


图2 开/关二状态及有限多状态负荷

1）在当前设备N个样本点中，随机抽取一个点作为第一个聚类中心 c_1；

2）使用公式(1)计算每个样本点与当前已确定聚类中心之间的最短距离 $D(x_i)$；

$$D(x_i)=\min(\sum_{j=1}^{k}\left\|x_i-c_j\right\|) \tag{1}$$

其中，x_i 表示第i个样本点；c_j 表示第j个聚类中心；k表示当前已确定的聚类中心个数；$\|\cdot\|$ 表示欧式距离；$\min(\cdot)$ 表示最小值函数。

3）使用公式(2)计算每个样本点成为下一个聚类中心的概率 $P(x_i)$；

$$P(x_i)=\frac{D(x_i)^2}{\sum_{i=1}^{N}D(x_i)^2} \tag{2}$$

4）重复步骤2和3，直至选出的初始聚类中心个数达到该设备的状态个数；

5）计算每个样本点与所选聚类中心的距离，将其划分给距离最近的聚类中心，并标记所属簇的标签；

6）计算每个簇中所有样本点坐标的平均值，以此作为该簇新的聚类中心；

7）重复步骤5和6，直至算法收敛。

K-means++聚类所得结果如表1所示，状态0-3为本文根据聚类结果定义的设备工作状态，并匹配对应的独热码，表中数据单位为瓦(W)。

表1 负荷聚类-编码表

设备状态	状态0	状态1	状态2	状态3
独热码	1000	0100	0010	0001
干衣机	0	266.93	4729.44	/
热泵	0	36.01	1777.97	2381.05
冰箱	0	131.19	507.70	/
洗碗机	0	142.23	774.38	/
电视	0	24.06	215.07	/
地下室灯	0	274.39	339.42	/

2.3 负荷特性分析

神经网络模型激活函数的有效工作范围一般为[-1,1]，因此需要使用公式(3)对总有功功率数据进行归一化处理。

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \tag{3}$$

其中，x'为归一化后的结果；x为真实值；x_{max}、x_{min}分别为有功功率的最大值和最小值。

当前时刻各设备的状态不仅与当前时刻的总负荷信息相关，还和之前时刻有关，因此需要将数据切片化处理，使其成为时间序列向量，如公式(4)所示。

$$\boldsymbol{x}_t^{in} = [y_{t-L+1}, y_{t-L+2}, \cdots, y_t] \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{x}_t^{in}$表示t时刻的总有功功率时间序列向量；L表示序列长度；y_t表示t时刻的总有功功率值。

根据表1所得聚类结果，将原始数据中每个设备所记录的实际有功功率值，转换为对应设备状态，然后通过独热码处理以匹配本文模型。如将状态0编码为1000。因此，NILM技术中每个设备状态独热码和时间序列数据的映射关系可表示为如式(5)所示。

$$[\boldsymbol{y}_t^1, \boldsymbol{y}_t^2, \cdots, \boldsymbol{y}_t^i, \cdots, \boldsymbol{y}_t^n] = g(\boldsymbol{x}_t^{in}) \tag{5}$$

其中，$\boldsymbol{y}_t^i$表示t时刻设备i所处状态的独热码；n表示设备个数；$g(\cdot)$函数表示本文所用分解算法；$\boldsymbol{x}_t^{in}$表示t时刻的总有功功率序列向量。

3 基于Attention机制优化的CNN网络

卷积神经网络在自然语言处理、计算机视觉等领域被广泛应用，主要由卷积层、池化层和全连接层构成。其中一维卷积神经网络在时间序列数据的特征信息提取上具有良好表现，一维卷积的计算公式如式(6)所示。

$$\boldsymbol{x}_j^l = f\left(\sum_{i \in M} \boldsymbol{x}_i^{l-1} * \boldsymbol{w}_{ij}^l + \boldsymbol{b}_j^l\right) \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{x}_j^l$表示当前层的第j个输出；$\boldsymbol{x}_i^{l-1}$表示上一层的输出特征；$\boldsymbol{w}_{ij}^l$表示对应卷积核；$*$表示卷积运算；$\sum_{i \in M}$表示遍历输入特征；$\boldsymbol{b}_j^l$表示当前层的偏置参数；$f(\cdot)$表示网络所用的非线性激活函数。

本文引入SENet(Squeeze-and-Excitation Network)模块[18]，它是一种优化CNN网络特征通道的Attention机制。该结构通过学习全局信息，能够选择性地提高重要特征通道的权重，同时抑制非显著特征，从而达到提高CNN网络性能的目的，其结构如图3所示。本文将公式(4)所得到的总有功功率时间序列向量，通过2层卷积层得到$B \times C \times W$的特征矩阵$\boldsymbol{U}$，其中B表示模型的批处理个数，C表示特征通道数，W表示特征长度。

SENet模块的优化过程分为Squeeze和Excitation两个步骤。如图3所示，Squeeze操作使用全局平均池化将负荷的全局信息压缩，计算公式如式(7)所示。

$$z_c = \frac{1}{W}\sum_{i=1}^{W} u_i \tag{7}$$

其中，z_c表示通道c的压缩值；W表示特征长度；u_i表示通道c上第i个特征值。

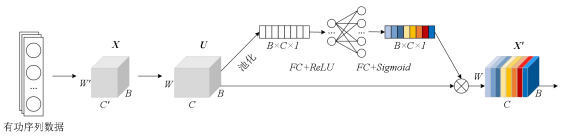


图3 SENet模块

Excitation操作利用两层全连接层(fully connected layers，FC)捕获通道之间的依赖关系。第一层全连接层将式(7)所得压缩信息转换成$B \times \frac{C}{k} \times 1$维度，然后使用第二层全连接层将其再次变为$B \times C \times 1$。这种处理方式使得通道之间的压缩信息能够进行充分非线性交互。有利于捕捉依赖关系，得到通道权重系数，其计算公式如(8)所示。

$$\boldsymbol{s} = \sigma(\boldsymbol{w}_2 \delta(\boldsymbol{w}_1 \boldsymbol{z})) \tag{8}$$

其中，$\boldsymbol{s}$表示通道权重向量；$\boldsymbol{w}_1$、$\boldsymbol{w}_2$分别表示第一层、第二层全连接层的参数；$\boldsymbol{z}$表示式(7)所得所有通道信息压缩值；δ表示第一层全连接层的ReLU激活函数；σ表示第二层全连接层的Sigmoid激活函数。

最后通过式(9)将特征矩阵$\boldsymbol{U}$和所得通道权重向量$\boldsymbol{s}$相乘，得到优化后的特征矩阵$\boldsymbol{X}'$。

$$\boldsymbol{X}' = \boldsymbol{s}\ \boldsymbol{U} \tag{9}$$

本文所用卷积神经网络为2层，第一层卷积层的卷积核个数为16、尺寸为3，激活函数选择ReLU函数；第二层卷积层的卷积核个数为32、尺寸为3，激活函数选择ReLU。

4 基于Attention机制优化的seq2seq网络

4.1 Encoder 结构

seq2seq模型分为编码(Encoder)和解码(Decoder)2个部分，常被用于处理序列到序列的任务。本文所用seq2seq网络的核心思想为：通过Encoder-Decoder结构将CNN网络处理得到的特征序列转换为状态概率分布序列，如图4所示，其中seq2seq的基本单元为长短期记忆(long short-term memory，LSTM)网络。

Encoder结构使用BiLSTM网络替换单向LSTM，因为BiLSTM网络能够更加充分地利用输入的所有序列信息[19]。BiLSTM网络当前时刻的隐藏层状态计算公式如式(10)所示。

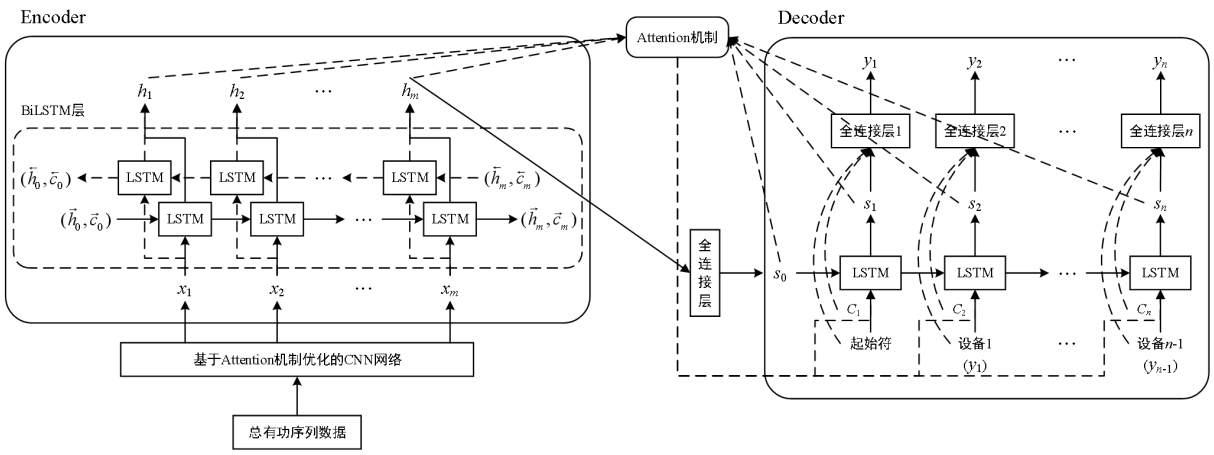


图4 基于Attention机制优化的seq2seq结构

$$\begin{cases}\vec{\boldsymbol{h}}_t=\mathrm{LSTM}(\boldsymbol{x}_t,\vec{\boldsymbol{h}}_{t-1})\\ \overleftarrow{\boldsymbol{h}}_t=\mathrm{LSTM}(\boldsymbol{x}_t,\overleftarrow{\boldsymbol{h}}_{t-1})\\ \boldsymbol{h}_t=[\vec{\boldsymbol{h}}_t;\overleftarrow{\boldsymbol{h}}_t]\end{cases}\tag{10}$$

其中，$\vec{\boldsymbol{h}}_t$、$\overleftarrow{\boldsymbol{h}}_t$分别为正向、反向LSTM单元的当前时刻隐层状态；$\boldsymbol{x}_t$为当前时刻输入向量；$\vec{\boldsymbol{h}}_{t-1}$和$\overleftarrow{\boldsymbol{h}}_{t-1}$分别为正向、反向LSTM单元的上一时刻隐层状态；$\boldsymbol{h}_t$为BiLSTM单元当前时刻的隐藏层状态；$\mathrm{LSTM}(\cdot)$函数表示LSTM单元内部处理方法。

LSTM单元包含遗忘门、输入门和输出门。输入门控制当前时刻的输入值，遗忘门对上一时刻记忆单元状态进行选择性地遗忘，输出门汇总两者信息决定输出值，从而能够实现对时间序列数据的特征提取。计算公式如式(11)所示。

$$\begin{cases}\boldsymbol{i}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{ix}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{ih}\boldsymbol{h}'_{t-1}+\boldsymbol{b}_i)\\ \boldsymbol{f}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{fx}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{fh}\boldsymbol{h}'_{t-1}+\boldsymbol{b}_f)\\ \tilde{\boldsymbol{c}}_t=\tanh(\boldsymbol{W}_{cx}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{ch}\boldsymbol{h}'_{t-1}+\boldsymbol{b}_c)\\ \boldsymbol{o}_t=\sigma(\boldsymbol{W}_{ox}\boldsymbol{x}_t+\boldsymbol{W}_{oh}\boldsymbol{h}'_{t-1}+\boldsymbol{b}_o)\\ \boldsymbol{c}_t=\boldsymbol{f}_t\quad\boldsymbol{c}_{t-1}+\boldsymbol{i}_t\quad\tilde{\boldsymbol{c}}_t\\ \boldsymbol{h}'_t=\boldsymbol{o}_t\quad\tanh(\boldsymbol{c}_t)\end{cases}\tag{11}$$

其中，$\boldsymbol{i}_t$、$\boldsymbol{f}_t$、$\tilde{\boldsymbol{c}}_t$、$\boldsymbol{o}_t$、$\boldsymbol{c}_t$和$\boldsymbol{h}'_t$分别为输入门、遗忘门、候选记忆单元状态、输出门、记忆单元状态和当前时刻隐层状态；$\boldsymbol{W}_{ix}$、$\boldsymbol{W}_{fx}$、$\boldsymbol{W}_{cx}$和$\boldsymbol{W}_{ox}$为相应门与当前时刻输入$\boldsymbol{x}_t$的权重矩阵；$\boldsymbol{W}_{ih}$、$\boldsymbol{W}_{fh}$、$\boldsymbol{W}_{ch}$和$\boldsymbol{W}_{oh}$为相应门与上一时刻隐层状态$\boldsymbol{h}'_{t-1}$的权重矩阵；$\boldsymbol{b}_i$、$\boldsymbol{b}_f$、$\boldsymbol{b}_c$、$\boldsymbol{b}_o$为相应门中的偏置向量；σ为激活函数sigmoid；$\tanh(\cdot)$为双曲正切函数；$\cdot$表示向量中元素按位相乘。

4.2 Attention 机制

如图4所示，本文在seq2seq模型中引入Attention机制[20]。Decoder结构在产生新状态前，先读取Encoder中所有时序的隐藏层输出向量$\boldsymbol{H}=[\boldsymbol{h}_1,\boldsymbol{h}_2,\ldots,\boldsymbol{h}_m]$($m$表示隐藏层状态个数)，并使用Attention对$\boldsymbol{H}$分配不同比重，使得网络能够有针对性地关注有效特征信息。Decoder结构产生新状态的公式如过式(12)所示。

$$\boldsymbol{s}_t=\mathrm{LSTM}(\boldsymbol{s}_{t-1},\boldsymbol{C}_t,\boldsymbol{y}_{t-1})\tag{12}$$

其中，$\boldsymbol{s}_t$表示Decoder结构中当前时刻的隐藏层状态；$\boldsymbol{s}_{t-1}$表示上一时刻隐藏层状态；$\boldsymbol{C}_t$表示当前时刻时序向量；$\boldsymbol{y}_{t-1}$表示上一时刻设备的状态概率密度分布向量；$\mathrm{LSTM}(\cdot)$函数表示LSTM单元内部处理方法。

动态可变的时序向量$\boldsymbol{C}_t$，能够储存当前时刻模型输入的完整有效信息，其计算过程可分为3个步骤。

第1步：通过2个全连接层计算注意力机制得分，如式(13)所示。

$$e_{ti}=\boldsymbol{V}_e^T*\tanh(\boldsymbol{W}_e\cdot[\boldsymbol{s}_{t-1},\boldsymbol{H}])\tag{13}$$

其中，$\boldsymbol{V}_e$、$\boldsymbol{W}_e$表示相关权值矩阵；e_{ti}表示当前时刻第i个隐层状态的注意力得分；H表示Encoder中所有时刻隐藏层的输出向量。

第2步：对式(13)得到的e_{ti}使用softmax函数计算各隐层状态的权重，如式(14)所示。

$$\alpha_{ti}=\frac{\exp(e_{ti})}{\sum_{k=1}^{m}\exp(e_{tk})}\tag{14}$$

其中，m表示Encoder中所输出的隐藏层状态个数；$\exp(\cdot)$表示指数函数；α_{ti}表示当前时刻第i个隐层状态所对应的权重；e_{tk}表示公式(13)所得第k个e_{ti}的值。

第3步：根据式(14)所得各隐层状态权重α_{ti}和其对应隐层状态$\boldsymbol{h}_i$，加权相加得到动态时序向量$\boldsymbol{C}_t$，如式(15)所示。

$$\boldsymbol{C}_t=\sum_{i=1}^{m}\alpha_{ti}\boldsymbol{h}_i\tag{15}$$

其中$\boldsymbol{h}_i$表示公式(10)所得的第i个$\boldsymbol{h}_t$。

4.3 Decoder 结构

Decoder结构用来得到最终的分解结果，该部分将CNN网络所得总有功功率时序特征序列转换为设备状态序列。与Encoder部分不同，Decoder必须使用单向LSTM网络，因为Decoder是设备状态生成器，需要按顺序生成每个设备的状态编码。从图4可以看出，Decoder结构中LSTM层的初始状态 $\boldsymbol{s}_0$，源自Encoder中BiLSTM层最后一个隐层状态 $\boldsymbol{h}_m$。值得注意的是，隐层状态 $\boldsymbol{h}_m=[\vec{\boldsymbol{h}}_m;\overleftarrow{\boldsymbol{h}}_m]$，是由正向、反向的2个隐层状态拼接而成，其维度与 $\boldsymbol{s}_0$ 所需维度不匹配，因此需要经过一个全连接层将 $\boldsymbol{h}_m$ 压缩后传入Decoder。

图4中Decoder接收上一时刻(上一个设备)隐层状态 $\boldsymbol{s}_{t-1}$、当前时刻时序向量 $\boldsymbol{C}_t$ 和上一时刻设备的概率输出 $\boldsymbol{y}_{t-1}$(第一个时刻需要设置起始符)，通过公式(12)可以得到当前时刻的隐层状态 $\boldsymbol{s}_t$。利用式(16)将 $\boldsymbol{s}_t$、$\boldsymbol{C}_t$ 和 $\boldsymbol{y}_{t-1}$ 拼接后，通过全连接层得到当前设备的概率密度分布 $\boldsymbol{y}_t$。

$$\boldsymbol{y}_t = f(\boldsymbol{s}_t, \boldsymbol{C}_t, \boldsymbol{y}_{t-1}) \tag{16}$$

其中，$f(\cdot)$ 表示全连接层的内部处理方式。

每个设备的状态个数不同，因此不同设备进行概率分布 $\boldsymbol{y}_t$ 预测时，需要使用如图4所示不同的全连接层处理，其中全连接层神经元个数为设备状态类别数目。值得注意的是，设所有设备中最大状态个数为 k_{max}，当使用上一个设备概率分布向量 $\boldsymbol{y}_{t-1}$ 来预测当前隐层状态 $\boldsymbol{s}_t$ 时，如果 $\boldsymbol{y}_{t-1}$ 的维度小于 k_{max}，需要将其用零向量扩展至 k_{max} 维。

本文模型得到的 $\boldsymbol{y}_t$，通过式(17)选取概率最大的状态作为该设备当前时刻的分解状态，最后将其转换为如表1所对应的功率值。

$$d_t = \arg\max(\boldsymbol{y}_t) \tag{17}$$

其中，$\arg\max(\cdot)$ 为最大值索引函数。

本文所用BiLSTM层的隐藏层神经元个数为32，LSTM层的隐藏层神经元个数为32。

4.4 模型训练

本文模型通过聚类和编码操作，将分解问题转换为求解各个设备状态的多分类问题，因此使用CrossEntropyLoss交叉熵函数作为模型训练的损失函数，如式(18)所示。

$$\begin{cases} loss_i(x_{ti}, class_i) = -x_{ti}[class_i] + \ln\left(\sum_{j=0}^{\tilde{n}-1}\exp(x_{ti}[j])\right) \\ loss = \sum_{i=1}^{N} loss_i(x_{ti}, class_i) \end{cases} \tag{18}$$

其中，$loss_i$ 表示第 i 个样本的损失；x_{ti} 表示第 i 个样本各个状态的概率分布；$\tilde{n}$ 表示设备状态个数；$class_i$ 表示第 i 个样本的所属真实状态类别；N 表示样本个数。

为避免网络出现过拟合现象，本文在模型训练中引入Teacher Forcing机制，即在Decoder部分，50%的概率将上一个设备真实状态编码作为输入，50%概率以模型预测值 $\boldsymbol{y}_{t-1}$ 作为输入。最后本文使用Adam优化器根据梯度更新网络参数，学习率为0.001，迭代次数为100次。

5 算例分析

5.1 数据集选取

本文采用AMPds2开源数据集[21]，该数据集记录了加拿大一居民2年间的各种设备监测数据，采样时间为一分钟。本文使用该数据的干衣机、热泵、冰箱、洗碗机、电视和地下室灯这6种设备(2年间的有功功率)作为分解负荷，同时选取10万组数据作为测试集用来验证本文模型效果。

5.2 硬件环境及软件平台

本文硬件环境为Intel(R) Core(TM) i5-9300H CPU @ 2.40GHz，8G DDR4内存以及GeForce GTX 1650的笔记本；Intel(R) Xeon(R) Gold 5218 CPU @ 2.30GHz 2.29 GHz，256G DDR4内存以及GeForce RTX 2080 Ti的服务器。

软件平台为Windows10操作系统，Python 3.6.8(64位)及PyTorch 1.9.0深度学习框架，在训练网络时使用GPU进行硬件加速。

5.3 评价指标

本文所用评价指标分为2部分：评价设备状态分解准确率和评价设备功率分解准确性。使用状态识别准确率 A_S 评价模型对于单个设备整体的分解效果，如式(19)所示。由于家电设备的关闭状态时间远大于开启状态时间，使用该评判标准可能并不能很好地体现模型的性能，因此定义设备运行(非关闭)状态识别准确率 A_{RS}，如式(20)所示。数学公式(21-22)分别为全部状态、运行状态的归一化 *RMSE*，其值越小则表示设备分解准确度越高。

$$A_S = \frac{\sum_{i=1}^{n'} T_{Si}}{N_S} \tag{19}$$

$$A_{RS} = \frac{\sum_{i=1}^{m'} T_{RSi}}{N_{RS}} \tag{20}$$

$$RMSE_S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_S}(p_i - \hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_S} p_i^2}} \tag{21}$$

$$RMSE_{RS}=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_{RS}}(p_i-\hat{p}_i)^2}{\sum_{i=1}^{N_{RS}}p_i^2}} \tag{22}$$

其中，N_S 表示样本点总数；n' 表示正确识别设备状态的样本点个数；T_{Si} 表示第 i 个正确识别设备状态的样本点；N_{RS} 表示运行状态的样本点总数；m' 表示正确识别设备运行状态的样本点个数；T_{RSi} 表示第 i 个正确识别设备运行状态的样本点；p_i 表示第 i 个真实功率值；$\hat{p}_i$ 表示第 i 个分解功率值；A_S、A_{RS} 分别表示全部状态识别准确率和运行状态识别准确率；$RMSE_S$、$RMSE_{RS}$ 分别表示全部状态的归一化均方根误差和运行状态的归一化均方根误差；

5.4 结果分析

为验证本文所提算法的效果，将其与文献[16]所述CNN-BiLSTM算法(简称CB算法)进行比较，同时也与CNN-seq2seq算法(无Attention机制优化，简称CS算法)进行比较。部分分解曲线如图5和图6所示(由于同一时刻并不是所有家电设备都处于运行状态，为了更好地展示分解效果，所展示设备并非处于同一时刻)。图5中虚线为真实总功率曲线，实线为本文算法分解得到的拟合总功率曲线，图案填充的轮廓曲线为各设备的分解曲线，从图中可以看出不同时刻有多个设备共同叠加运行。图6为单个设备的分解结果，虚线为设备真实功率，实线为本文算法分解的结果，灰色填充的轮廓曲线为对照模型CB的分解结果。从图中可以看出，相比较而言，本文算法的分解效果更好。

表2 不同模型的状态识别准确率

设备	A_S /%			A_{RS} /%		
	本文	CS	CB	本文	CS	CB
干衣机	99.98	99.96	99.89	99.35	98.94	97.28
热泵	99.37	99.40	99.29	99.52	99.55	99.44
冰箱	97.18	96.97	96.20	95.43	93.87	91.74
洗碗机	99.59	99.57	99.53	89.65	88.75	85.79
电视	98.58	98.54	98.22	98.58	98.54	98.22
地下室灯	96.99	96.97	96.46	78.89	78.10	74.08
平均值	98.62	98.57	98.26	93.57	92.96	91.09

状态识别准确率、功率分解准确性的结果如表2、表3所示。结合表1各设备的聚类结果可以看出，设备单状态、组合状态之间具有相似性：如冰箱状态1和洗碗机状态1功率相近；冰箱状态1、洗碗机状态1的组合状态与地下室灯状态1相近等。此外设备运行过程中功率会产生波动等因素(如图6(e)中电视功率波动尤为明显)，也增大了负荷分解的难度。

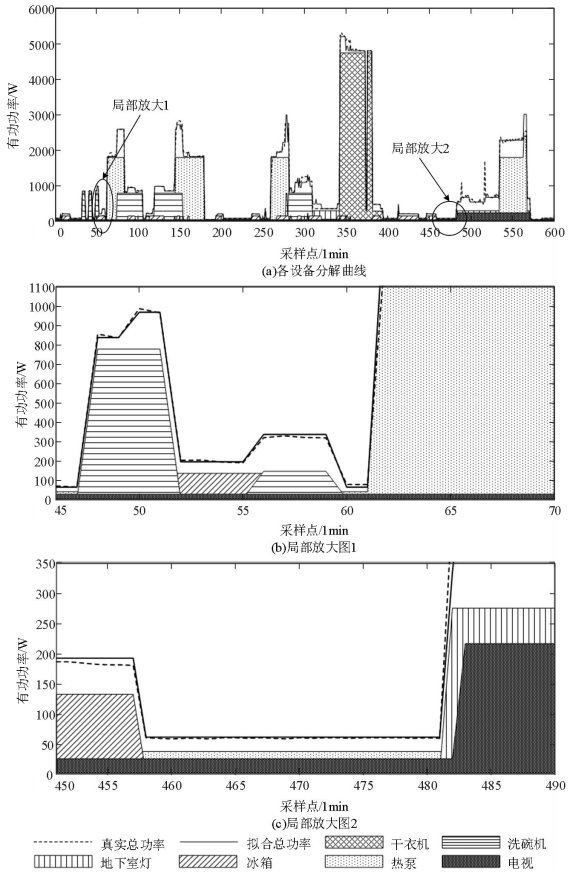
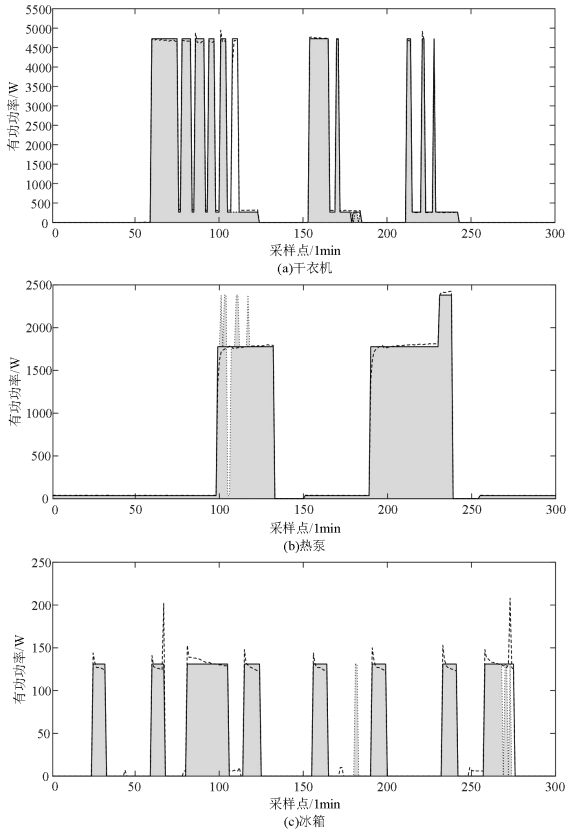


图5 负荷叠加曲线



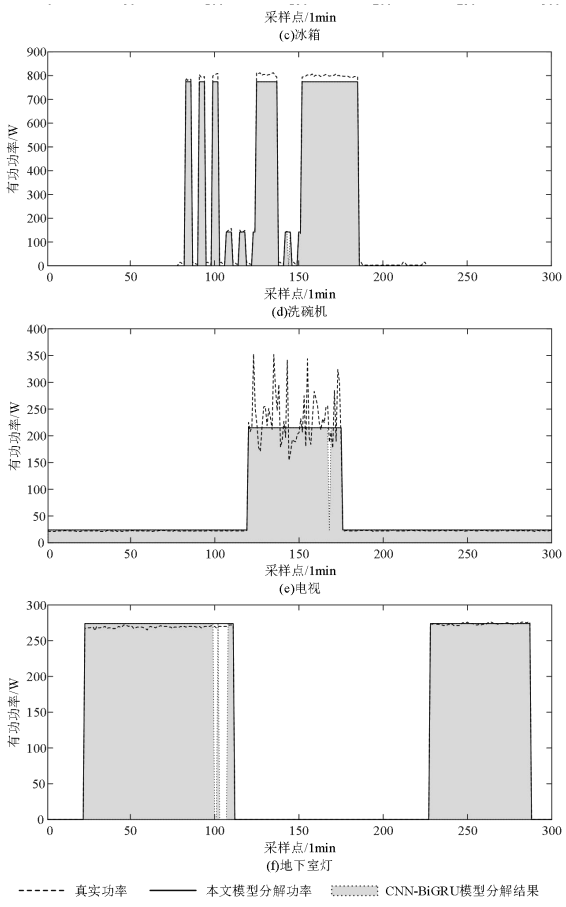


图6 各设备分解结果

从表2、表3可知，CS模型的状态识别准确率、均方根误差结果都优于CB模型，即使用seq2seq结构替代BiLSTM提高了模型分解精度；同时，本文模型的整体结果优于CS模型，表明在模型中引入Attention机制，能够使得模型更加有效关注重要部分的信息，进一步提高了模型精度。

表3 不同模型的功率分解准确性(均方根误差)

设备	$RMSE_S$			$RMSE_{RS}$		
	本文	CS	CB	本文	CS	CB
干衣机	0.030	0.096	0.189	0.029	0.050	0.107
热泵	0.107	0.119	0.134	0.094	0.104	0.106
冰箱	0.381	0.396	0.427	0.325	0.353	0.373
洗碗机	0.305	0.306	0.343	0.264	0.270	0.317
电视	0.371	0.377	0.407	0.371	0.377	0.407
地下室灯	0.260	0.279	0.343	0.205	0.241	0.313
平均值	0.242	0.262	0.307	0.215	0.233	0.270

总体上，本文所用模型的识别准确率 A_S 和 A_{RS} 都高于CB模型，其中冰箱、洗碗机和地下室灯的准确率提升较大。而在均方根误差方面，本文模型的平均 $RMSE_S$ 比对照模型降低了21.17%，平均 $RMSE_{RS}$ 比对照模型降低了20.37%，分解精度有显著提升。总体而言，从算例分析中可以看出，本文对CB算法的2点优化都是有效的，并取得良好的分解效果。

6 结论

本文提出了一种基于Attention机制优化的CNN-seq2seq模型用于非侵入式负荷监测。将总有功功率数据构建成时间序列向量作为模型输入，通过Kmeans++聚类将功率数据转换成状态编码作为模型输出，简化了模型结构。同时Attention机制使模型能够更加关注重要特征信息。与在深度学习领域中具有较优性能的CNN-BiLSTM模型相比，本文模型的设备识别准确率较高，而在均方根误差上，本文模型的误差显著降低。

下一阶段将在指导居民用电行为、减少能耗等方面开展进一步研究。

参考文献：

[1]郭红霞，陆进威，杨苹，等（Guo Hongxia，Lu Jinwei，Yang Ping，et al）.非侵入式负荷监测关键技术问题研究综述（Review on key techniques of non-intrusive load monitoring)[J].电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment），2021，41(1)：135-146.

[2]程祥，李林芝，吴浩，等（Cheng Xiang，Li Linzhi，Wu Hao，et al）.非侵入式负荷监测与分解研究综述（A survey of the research on non-intrusive load monitoring and disaggregation）[J].电网技术（Power System Technology），2016，40(10)：3108-3117.

[3]Zhuang M，Shahidehpour M，Li Z.An overview of non-intrusive load monitoring:approaches,business applications，and challenges[C]// 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON)，Guangzhou，China，2018：4291-4299.

[4]Gillis J M，Morsi W G.Non-intrusive load monitoring using semi-supervised machine learning and wavelet design[J].IEEE Transactions on Smart Grid，2017，8(6)：2648-2655.

[5]李亚前，杨滨，杨宇全，等（Li Yaqian，Yang Bin，Yang Yuquan，et al）.非侵入式负荷事件监测的曲线拟合方法（Curve fitting method for non-intrusive load event monitoring）[J].电力系统及其自动化学报（Proceedings of the CSU-EPSA),2021,33(5):100-105.

[6]江泽昌,刘天羽,江秀臣,等(Jiang Zechang,Liu Tianyu，Jiang Xiuchen，et al）.智能电网下多时间尺度家庭能量管理优化策略（Multi-time scale home energy management optimization stratery in smart grid）[J].太阳能学报（Acta energiae solaris sinica），2021，42(1)：460-469.

[7]Singh S，Majumdar A.Non-intrusive load monitoring

via multi-label sparse representation-based classification[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1799-1801.

[8]Wang H, Zhang J, Lu C, et al. Privacy preserving in non-intrusive load monitoring: A differential privacy perspective[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(3): 2529-2543.

[9]Chen K, Zhang Y, Wang Q, et al. Scale- and context-aware convolutional non-intrusive load monitoring[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2362-2373.

[10]Ji T Y, Liu L, Wang T S, et al. Non-intrusive load monitoring using additive factorial approximate maximum a posteriori based on iterative fuzzy c -means[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 6667-6677.

[11]Hart G W. Nonintrusive appliance load monitoring[J]. Proceedings of the IEEE, 1992, 80(12): 1870-1891.

[12]Lin Y, Tsai M. Development of an improved time–frequency analysis-based nonintrusive load monitor for load demand identification. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63(6): 1470-1483.

[13]赵文清，张诗满，李刚(Zhao Wenqing, Zhang Shiman, Li Gang).基于聚类和关联分析的居民用户非侵入式负荷分解(Non-intrusive load decomposition of residential users based on cluster and association analysis)[J]. 电力自动化设备(Electric Power Automation Equipment), 2020, 40(6): 8-19.

[14]Kaselimi M, Doulamis N, Voulodimos A, et al. Context aware energy disaggregation using adaptive bidirectional LSTM models[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(4): 3054-3067.

[15]Kong W, Dong Z Y, Wang B, et al. A practical solution for non-intrusive type II load monitoring based on deep learning and post-processing[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 148-160.

[16]Kelly J, Knottenbelt W. Neural NILM: Deep neural networks applied to energy disaggregation[C]// Proceddings of the 2nd ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments. Seoul, South Korea: ACM, 2015.

[17]赵文清，张诗满，李刚（Zhao Wenqing, Zhang Shiman, Li Gang）.基于聚类和关联分析的居民用户非侵入式负荷分解（Non-intrusive load decomposition of residential users based on cluster and association analysis）[J]. 电力自动化设备（Electric Power Automation Equipment）, 2020, 40(6): 8-19.

[18]Hu J, Shen L, Albanie S, et al. Squeeze-and-Excitation Networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(8): 2011-2023.

[19]朱凌建，荀子涵，王裕鑫，等(Zhu Lingjian, Xun Zihan, Wang Yuxin）.基于CNN-BiLSTM的短期电力负荷预测（Short-term power load forecasting based on CNN-BiLSTM)[J].电网技术(Power System Technology), 2021, 45(11): 4532-4539.

[20]Bahdanau D, Cho K, Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate[J]. arXiv preprint arXiv: 1409.0473, 2014.

[21]Makonin S, Ellert B, Bajic I V, et al. Electricity, water, and natural gas consumption of a residential house in Canada from 2012 to 2014[J]. Scientific Data, 2016, 3(160037): 1 - 12.

作者简介：

王琪凯（1995），男，硕士研究生，研究方向为非侵入式负荷监测、风电功率预测，Email：1018903353@qq.com

熊永康（1992），男，通讯作者，博士，讲师，研究方向为新能源发电与并网技术、主动配电网控制技术等，Email：yongkang_xiong@foxmail.com

陈 瑛（1973），女，硕士，副教授，研究方向为电机电磁场分析、电气装备及其控制等，Email：chenying108@aliyun.com

变压器的最佳经济寿命区间评估方法

黄俊

（中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：为了对设备的经济寿命进行准确的评估，提出了一种电力变压器最佳经济寿命区间评估方法。此方法首先假定变压器的故障率符合三参数威布尔分布，再利用基于 Levenberg-Marquardt（L-M）算法的最小二乘曲线拟合法对故障率进行拟合，确定分布参数，得到变压器的故障率；然后由得到的变压器的故障率计算全寿命周期运维成本和故障成本；最后通过基于区间分析法的全寿命周期最小年均成本确定电力变压器的最佳经济寿命区间。通过算例描述方法的计算过程，验证了方法的有效性。

关键词：变压器故障率；Levenberg—Marquardt 算法；威布尔分布；区间分析法；全寿命周期成本(LCC)

.

0 引言

电力设备的运行效益对电网的效益有重大影响，因此利用全寿命周期成本(life cycle costs, LCC)理论对设备的采购、运行、检修及退役等全过程进行科学管理，可以有效改善电网的效益[1]。LCC是指设备在整个寿命周期内发生的总费用，研究设备的LCC经济寿命对电力行业设备的经济运行有着重要意义。

本文提出了一种基于故障率曲线拟合和全寿命周期最小年平均成本的变压器经济寿命区间的评估方法。首先利用变压器故障率历史数据进行变压器故障率曲线拟合；再通过所得的故障率计算全寿命周期成本中的运维成本和故障成本；最后基于区间分析法计算最小年均成本来确定变压器经济寿命区间。

1 变压器全寿命周期模型

根据电网实际投资运行过程中设备的投资构成，参照LCC理论可划分为：初始投资、运行成本费用、维护成本费用、故障成本费用以及设备残值回收。其中各类成本费用可分为随故障率变化的可变成本（包括维护成本、故障成本）和不随故障率变化的固定成本（包括初次投资成本、运行成本以及设备残值）2类。

初始投资属于一次性投入，用 C_I 表示。运行成本费用主要是变压器因功率损耗（包括空载损耗和负载损耗）产生的费用：

$$\Delta W = (P_0 + K_T\beta^2 P_K)\times t \tag{1}$$

其中ΔW为变压器负载损耗电量； P_0 为空载损耗； K_T 表示负载波动系数，一般可取1.05； β 表示负载率，即时间内平均负载和最大负载的比值； P_k 为负载损耗；t为运行时间。故年运行费用为 C_O ，

$$C_O = \left(P_0 + K_T\beta^2 P_K\right)\times\eta\times t\times c_d \tag{2}$$

其中而一年的损耗费用可以利用最大负荷运行小时数计算年负荷损耗 η ：

$$\eta = K\frac{T_{\max}}{8760} + (1-K)\left(\frac{T_{\max}}{8760}\right)^2 \tag{3}$$

设备退役成本：设备退役成本是指其退役时可回收的残余价值和设备退役处置成本。设备报废时的设备退役成本用 C_D 表示。本文为方便计算，设备退役成本 C_D 取投资初值的某个百分比。

为了量化变压器的维修费用和故障费用，将变压器故障分为一般、较大、严重故障，其中还包括各类故障的风险成本都可参见文献[12]。则变压器的维修成本和故障成本计算公式为：

$$C_M = \sum_{i=1}^{3} M_i\lambda_i(t) \tag{4}$$

$$C_F = \sum_{i=1}^{3} F_i\lambda_i(t)\beta \tag{5}$$

式中 $i=1,2,3$ 分别表示一般故障、较大故障、严重故障； $\lambda_i(t)$ 为变压器i类故障； M_i 为设备i类故障后的维修和部件更换成本； F_i 为设备i类故障造成的综合损失，包括停电损失费，设备性能及寿命损失及间接损失等； β 为设备在电网中的重要性修正参数。

2 变压器故障率预测模型

2.1 三参数威布尔分布的故障率模型

一般情况下，通常可使用威布尔分布来描述电

气设备的故障率参数随时间的变化规律。设备累计故障概率F(t)是指设备在规定的条件和时间内发生故障的概率。

$$F(t)=1-R(t) \tag{6}$$

式中 $R(t)$ 为设备的可靠度函数。变压器寿命分布累计失效概率函数符合三参数的威布尔分布的

$$F(t)=1-\exp\left[-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m}\right] \tag{7}$$

式中：m表示形状参数，m>0；η 为尺度参数，η >0；γ 为位置参数，表示设备在 γ 之前通常不会失效，γ >0；t为设备的运行时间。则变压器故障率可表示为

$$\lambda(t)=-\frac{dR(t)/dt}{R(t)}=\frac{dF(t)/dt}{1-F(t)} \tag{8}$$

如图所示：

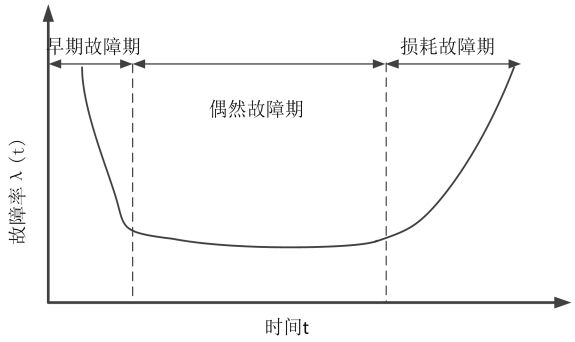


图1 设备寿命全过程故障率变化

上述曲线其可很好地用威布尔分布来拟合，故障率函数可以表示为：

$$\lambda(t)=\left(\frac{m}{\eta}\right)\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1} \tag{9}$$

利用历史统计数据，对故障率曲线进行分段拟合，得到故障曲线各阶段的形状参数m，尺度参数 η，以及位置参数 γ，求出故障率函数。

2.2 模型参数估计

根据故障率数据 $(t_1,\lambda_1),(t_1,\lambda_1),...(t_1,\lambda_1)$。首先假设位置参数已知，则可以利用基于Levenberg—Marquardt算法对威布尔分布的参数进行估计求出形状参数m和尺度参数 η，然后再根据非线性拟合方法估算位置参数。具体步骤如下：

先假设 γ 为已知参数，再由公式，对形状参数m、尺度参数 η 进行求偏导：

$$\frac{\partial\lambda(t)}{\partial m}=\frac{1}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}+\frac{m}{\eta}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}\ln\left(\frac{t}{\eta}\right) \tag{10}$$

$$\frac{\partial\lambda(t)}{\partial\eta}=-\frac{m}{\eta^2}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}-\frac{m}{\eta^2}\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{m-1}(m-1) \tag{11}$$

1)由上述所得的公式确定参数的初值，选取位于威布尔分布上两个数据点，构造方程组

$$\begin{cases}\dfrac{m}{\eta}\left(\dfrac{t_1}{\eta}\right)=\lambda(t_1)\\[2ex]\dfrac{m}{\eta}\left(\dfrac{t_2}{\eta}\right)=\lambda(t_2)\end{cases} \tag{12}$$

由方程组求得初值 $m^{(0)}$、$\eta^{(0)}$。

2)由初值 $m^{(0)}$、$\eta^{(0)}$ 和 n 组数据利用 matlab 基于 Levenberg—Marquardt 算法进行迭代计算。

3)通过计算可得威布尔分布的形状参数 m 和尺度参数 η。

4)再选取的处于 n 组数据中的部分进行非线性参数拟合求得位置参数，即是故障率的阶段分界点。

5)由 matlab 计算得到的拟合曲线和误差 ε，将故障率区间化：

$$[\lambda_t^{\min},\lambda_t^{\max}]=[(1-\varepsilon)\lambda_t,(1+\varepsilon)\lambda_t] \tag{13}$$

式中：λ_t 为第 t 年设备故障率预测值。

3 年平均成本区间计算

根据变压器故障率曲线进行年平均成本区间计算，求取变压器的年平均成本，其全寿命周期的模型得到其总成本为

$$LCC=C_I+\sum_{t=1}^{n}(C_O+C_M+C_F)\frac{(1+R)^t}{(1+r)^t}+C_D\frac{(1+R)^n}{(1+r)^n} \tag{14}$$

则其第n年平均成本为

$$E_{LCC}=LCC/n \tag{15}$$

由于各种成本的单一定值往往会造成较大的误差，使用区间分析法采用区间数进行计算。变压器等各项参数都可以采用区间表示，计算各类成本区间，求得年平均成本最小区间范围，即是变压器的最佳经济寿命区间。

4 算例分析

以中国南方某地区型号为SFPSZ-120000/220的变压器为例，利用本文方法进行最佳经济寿命区间评估。

4.1 故障率参数预测

由SFPSZ7-120000/220型变压器的故障率历史数据，得到下图的故障率离散点图。

首先由图中可以看出威布尔分布的老练期为0-5年之间，而可用期与损耗期分界点大概在12年左右，而变压器故障率前两个阶段对本文计算的全

寿命周期成本影响不大，故本文不做具体分析。

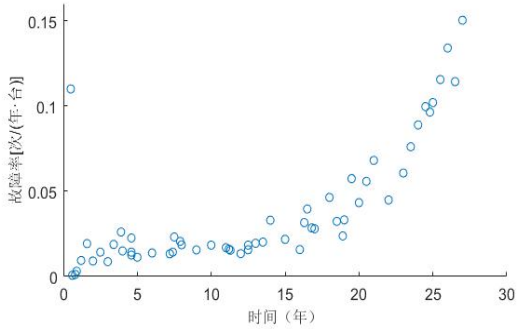


图2 变压器故障率分布曲线

故下面进行变压器损耗故障期的曲线拟合，可以先假定三参数威布尔分布的位置参数为12，即假设12年时变压器进入损耗故障期，即12年以后为盆浴曲线的第三阶段，下面根据故障率数据利用基于LM算法的最小二乘曲线拟合方法进行变压器损耗故障期的曲线拟合和参数估计，得到形状参数m=2.4606，尺度参数$\eta=16.5805$；然后进行非线性拟合，求得位置参数$\gamma=11.7737$，最终得到故障率曲线图如图3。同时得到三参数的威布尔分布的故障率如式(16)。

$$\lambda(t)=\left(\frac{2.4606}{16.5805}\right)\left(\frac{t-11.7737}{16.5805}\right)^{1.4606} \tag{16}$$

然后再根据图3和式(17)所示，将故障率区间化

$$[\lambda_t^{\min},\lambda_t^{\max}]=[(1-\varepsilon)\lambda_t,(1+\varepsilon)\lambda_t] \tag{17}$$

最后得到的故障率上下限如图3。

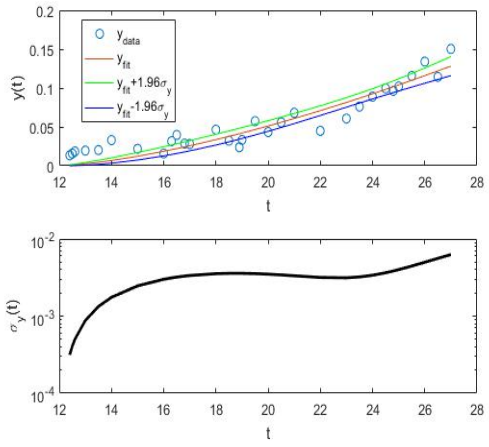


图3 变压器故障率拟合曲线

4.2 变压器的年平均成本区间计算

由上面得到的变压器故障率可以计算出变压器全寿命周期的年平均成本区间。变压器计算全寿命周期的参数如表1。

根据表中数据和前述所求的故障率可以计算出变压器在不同运行年数时的年平均成本上下限值，绘制成曲线如下图4。

表1 变压器成本参数表

各项成本计算参数		
初始投资成本	购置费	1150万元
运行成本参数	平均负载率	[0.6, 0.65]
	最大负荷利用小时数	[5600, 6300](h)
	经验系数K	0.3
	空载损耗	96（kw）
	负载损耗	432（kw）
	电费	[0.55, 0.65]
退役成本参数	占百分比	[30%, 40%]
维修成本和故障成本参数	三类故障概率	(64.2%, 34.1%, 3.7%)
	一般故障维修成本	[10, 12]万元
	较大故障维修成本	[121, 128]万元
	严重故障维修成本	[406, 419]万元
	故障损失成本	[800,900]万元
其他参数	通货膨胀率	[3%, 3.5%]
	折现率	[6%, 8%]

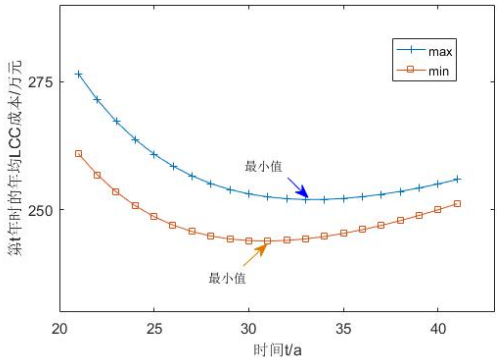


图4 变压器年平均成本

由图4可知，当变压器各参数取上限时，第33年左右全寿命周期年平均成本达到最小为251.9802万元；当变压器各参数取下限时，第31年左右全寿命周期年平均成本达到最小为243.8777万元。故可以认为该变压器的最佳经济寿命区间为31~33年，该年限与相关变压器寿命统计数据相差不大。当变压器到达经济寿命区间31~33年时，可以考虑变压器的整体维修或者更换。

5 结束语

本文提供了一种基于故障率拟合和全寿命周期年平均成本确定变压器最佳经济寿命区间的方法，为制定电力设备的运维和退役策略，提供了科学支撑。利用三参数的威布尔分布对设备的故障率进行拟合，精度更高；同时采用Levenberg—Marquardt算法进行参数估计，能较准确的得到符合实际的数据；通过求取的故障率函数进行故障率估计，可以为设备的维修策略提供科学支持。在计算变压器的成本费用时进行区间化计算，充分考虑

了不确定信息对设备经济寿命评估结果的影响，消除了单一定值带来的成本计算误差，具有一定的合理性和可信度。

参考文献：

[1]蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制,2011,(17): 149-154.

[2]罗晓初, 李乐, 魏志连, 等. 全寿命周期成本理论在配电变压器改造投资决策中的应用[J]. 电网技术,2011,(02): 207-211.

[3]柳璐, 王和杰, 程浩忠, 等. 基于全寿命周期成本的电力系统经济性评估方法[J]. 电力系统自动化,2012,(15): 45-50.

[4]秦金磊, 牛玉广, 李整. 电站设备可靠性问题的威布尔模型求解优化方法[J]. 中国电机工程学报,2012,(S1): 35-40.

[5]王慧芳, 杨荷娟, 何奔腾, 等. 输变电设备状态故障率模型改进分析[J]. 电力系统自动化,2011,(16): 27-31.

[6]刘有为, 马麟, 吴立远, 等. 电力变压器经济寿命模型及应用实例[J]. 电网技术,2012, 36(10): 235-240.

[7]于继来, 王成福, 张博, 等. 在役电力变压器经济寿命评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2010, 22(3): 86-90.

[8]李卫国, 俞乾, 罗日成. 基于风险分析的大型电力变压器经济寿命预测算法研究[J]. 计算技术与自动化,2012,(01): 74-77.

[9]张镱议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 综合考虑可靠性与经济性的电力变压器检修方案优选[J]. 电工技术学报,2014,(11): 191-200.

[10]江修波, 吴文宣, 陈祥伟. 区间分析法在电力变压器全寿命周期成本模型中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,(09): 50-53.

[11]孙鹏, 陈绍辉, 张彩庆. 基于Marquardt法参数估计的变电设备寿命周期故障率评估[J]. 电力系统保护与控制,2012,(01): 85-90.

作者简介：

黄俊（1990），男，硕士，工程师，主要从事电力系统规划、优化运行研究工作，E-mail：418208305@qq.com

基于熵权计算的光伏电站电能质量评估方法

熊建英，吴文宝，熊敏

（中国电建集团江西省电力建设有限公司，江西 南昌 330001）

摘要：随着“双碳”目标的实施，光伏并网容量将迎来迅猛增长。本文结合并网工程要求，提出电能质量评估体系，利用熵权组合层次分析法分别确定客观、主观权重值。主观权重由专家意见利用层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）求各自权重，客观权重由熵权法计算，最后采用变形雷达图直观表示出电能质量评估指标状态。通过对某光伏电站的真实数据进行评估，算例证明了算法的可行性。

关键词：熵权；电能质量；光伏发电；权重分析

0 引言

“双碳”战略下，我国的光伏装机容量将迎来进一步的快速增长。然而，随着光伏电站并网数量的不断增加，给电网带来的问题也逐渐凸显。光伏发电对电网的电能质量影响是其中重要问题[1-2]，电能质量问题可以导致用电设备故障或不能正常工作，严重的时候甚至影响电网的稳定运行。

通常对光伏电站并网时电能质量的要求是[3]：（1）光伏电站向当地交流负载提供电能和向电网发送电能的质量，在谐波、电压偏差、电压不平衡度、直流分量、电压波动和闪变等方面应满足国家相关标准。（2）光伏电站应该在并网点装设满足 IEC61000-4-30<电磁兼容第 4-30 部分试验和测量技术电能质量>标准要求的 A 类电能质量在线监测装置。对于大型或中型光伏电站电能质量数据应能够远程传送到电网企业，对于小型光伏电站，电能质量数据应具备年及以上的存储能力，必要时供电网企业调用。

评估可以从多个维度进行，评估过程包括指标选取、权重计算、评估结果确定。在本文中，为使方法具有普适性，对光伏电站的电能质量评估主要依据现行的《光伏发电系统接入配电网技术规定》标准作为其评估指标来源的依据。权重计算方法有专家赋值、网络分析法，主成分分析、熵权法等[4-6]。评估结果计算可采用模糊评价或线性加权法等[7]。

为此，本文提出了一种改进层次分析法的电能质量评估方法，从电压变动、谐波分析、频率变动三个项目，共 8 个指标去评估电能质量；提出基于熵权法的权重分析法计算权重，改善专家赋值的主观差异弊端。

1 评估模型的建立

1.1 构建评估指标体系

反映光伏电站并网电能质量的评估指标很多，如何根据各个指标对于电能质量综合状态的不同影响程度对其进行科学的选择是关键。本文采用二级综合评估，将各指标层分为两级，并按照分层评估理论对其进行分级评估。本文建立的电能质量评估体系如图 1 所示。

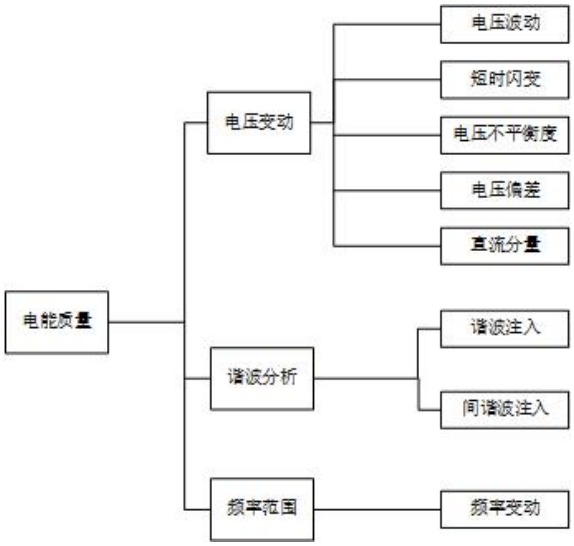


图 1 光伏电站电能质量指标体系

1.2 权重计算方法

采用主客观权重结合的方法，主观权重根据通过集中检验的数名专家意见采用 AHP 并结合熵权法分析；客观权重采用熵权法计算，最终权重由主客观权重线性加权得到。

1.2.1 客观权重计算

熵最早由香农引入信息论中，目前已在工程应用、经济金融方面得到了广泛应用。熵权法的基本思路是根据指标变异性的大小来确定客观权重，这样的评价相对客观准确。通常来说，某个评价指标的信息熵值越小，表明指标变异程度大，提供的价值信息越大，其在综合评价中起到的作用也越大，故其权重也就越大。同理，一个指标熵值越大，则该指标的权重也越小。熵权确定步骤如下：

(1)对各个评价项目进行去量纲归一化处理。

设 8 个指标集合为 $X_1,X_2,X_3\cdots X_n$，其中，$X_i=\{x_1,x_2,x_3\cdots x_m\}$。各指标数据标准化后的值为：$Y_1,Y_2,Y_3\cdots Y_n$，则有：

$$Y_{ij}=\frac{X_{ij}-\min\ (X_i)}{\max(X_i)-\min\ (X_i)}$$

(2)求各指标在各个评价项目下的比值，即第 j 项指标在第 i 个项目中占该指标的比重，其实也就是为了计算该指标的变异大小：

$$P_{ij}=\frac{Y_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}Y_{ij}}$$

(3)求各指标的信息熵。根据信息熵的定义有：

$$E_j=-In(n)^{-1}\sum_{i=1}^{m}P_{ij}InP_{ij}$$

(4)计算权重 W_j。

$$W_j=\frac{1-E_j}{k-\sum E_j}\quad(j=1,2,\cdots n;k=n)$$

1.2.2　主观权重计算

主观权重计算利用层次分析法，该方法通过将复杂的分体划分为若干层次的逐渐具体的指标，再对每一层指标之间的重要程度进行比较，建立判断矩阵，通过计算该矩阵的最大特征值及相应的特征向量，得出不同指标的权重，从而为系统规划的评估提供重要的依据。记某一层的指标为 $Z_1,Z_2,Z_3\cdots Z_n$，则其判断矩阵为：

$$A=\begin{pmatrix}a_{11}&a_{12}&\cdots&a_{1n}\\a_{21}&a_{22}&\cdots&a_{2n}\\\vdots&\vdots&\ddots&\vdots\\a_{n1}&a_{n1}&\cdots&a_{nn}\end{pmatrix}$$

其中的a_{ij}表示表示z_i与z_j对于上一层指标相对的重要程度，用1~9表示，数字越大则表示重要程度越高。当i＞j时，z_i与z_j重要程度差距越大，则a_{ij}的值越大，a_{ij}可以表示为：

$$a_{ij}=\begin{cases}\dfrac{z_i}{z_j},j\le i\\[2ex]\dfrac{1}{a_{ji}},j>i\end{cases}$$

因此判断矩阵对角线上元素均为1。矩阵构造完之后，计算其最大特征值及其相应的特征向量，通过归一化以及一致性检验，便能得到所选层次指标的排序权值。n阶矩阵一致的充分必要条件为最大特征值 $\lambda_{max}=n$。一致性指标CI与一致性比例CR计算如下：

$$CI=\frac{\lambda_{max}-n}{n-1}$$

$$CR=\frac{CI}{RI}\quad RI=\frac{\lambda_{max}'-n}{n-1}$$

其中，RI 为对应的随机一致性指标。若CR<0.1，认为判断矩阵一致性可接受，若 CR≥0.1，应修改判断矩阵直到一致性可接受。

将其应用于每一层次，便能获得底层指标对于总目标重要程度的排序权重，从而完成考核指标的权重选取。此外，按规定，电力系统运行中有着各参数的强制限制条件，将其作为评价体系的绝对标准，一旦越界将危害系统运行。由此得到电能质量参数权重及限制条件在低压、变动频率较少时的情况如表 1 所示。注意为了区别限制条件，其中指标参数尚未归一化。

表 1　指标权重分布及限制条件表

指标参数	权值	限制条件
电压波动	0.12	(-3%，3%)
短时闪变	0.08	(-1%,1%)
电压不平衡度	0.26	(-1.3%,1.3%)，短时(-2.6%,2.6%)
电压偏差	0.60	(-7%，7%)
直流分量	0.28	(-0.5%，0.5%)
谐波畸变率	0.63	(-5%，5%)
频率变动	0.28	±0.2Hz

1.2.3　组合权重计算

本文研究的电能质量评价指标综合权重由下式确定：

$$\omega_j=\frac{\omega_{1j}\omega_{2j}}{\sum_{j=1}^{n}\omega_{1j}\omega_{2j}}$$

其中，ω_{1j}、ω_{2j}分别为主观权重和客观权重。

2　数据分析与结果

2.1　测试环境

测试原理图如图2所示。电压测点接在光伏逆变侧电压互感器二次侧，电流用电流钳取自电流互感器二次侧。采用便携式电能质量仪测试结果，I1，I2，I3分别接ABC三相的电流，U1，U2，U3分别接ABC三相的电压，N接零线，可以测不平衡电流。

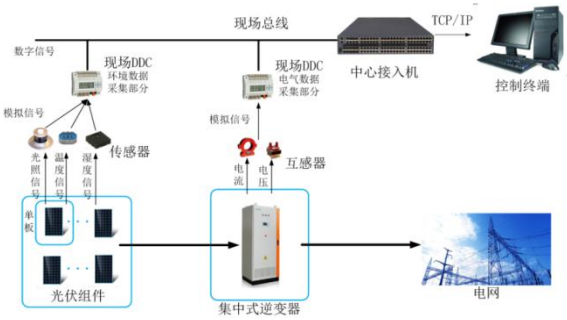


图 2　电能质量户外测试原理

电能质量各项指标测量结果和参考的限值如表2所示。

表 2 测量结果（晴天）

基本电能质量测试项目	测量结果		要求值
	测量值	偏差值	
频率偏差（基准值：50Hz）	49.96Hz	-0.04Hz	±0.2Hz
电压偏差%（基准值：21kV）	A相 21.9	4.29	±7%
	B相 22	4.76	
	C相 22	4.76	
三相不平衡度%	0.2		≤1.3%，短时≤2.6%
谐波畸变率%（电压）	A相 3.1		5%
	B相 2.1		
	C相 3.9		

表3给出了两种电站电能质量指标计算的结果。

表 3 指标计算及对比表

指标%	光伏电站		
	A相	B相	C相
Indexf	20		
IndexV	4.76	5	5.12
	平均值：4.96		
Index ΔV	0.3		
Index’ ΔV	0.3		
IndexUnV	0.2		
IndexTHD	3.1	2.1	3.9
	平均值：3.0		
IndexVDC	0.86	1.41	1.55
	1.27		
加权平均值	4.87		

为了更为直观地反映出光伏电站各项指标对其电能质量的影响程度，从而准确客观地评价光伏电站地电能质量，将归一化后的实际指标参数置入变形雷达图中，如图3所示。变形雷达图依据不同指标参数的权重大小限制在图中各指标参数可能的绘制范围，再在测得实际数据后，将实际的指标参数绘制于图中。相比普通的雷达图，变形雷达图能够通过形变表现出每个指标参数的相对重要关系，也即体现出权重这一概念。通过观察变形雷达图中实际指标参数中框定区域的面积，即可了解到光伏系统电能质量偏离理想情况的程度。

从光伏电站电能质量变形雷达图3中，可以很清楚地观察到光伏电站在电能质量各项指标参数的数值比较关系以及对于总体电能质量的影响程度。在波动、不平衡以及直流分量等方面光伏电站都符合电能质量高标准的要求，偏差不超过3%，而在主要的电压、频率谐波方面影响稍大但均能符合要求。

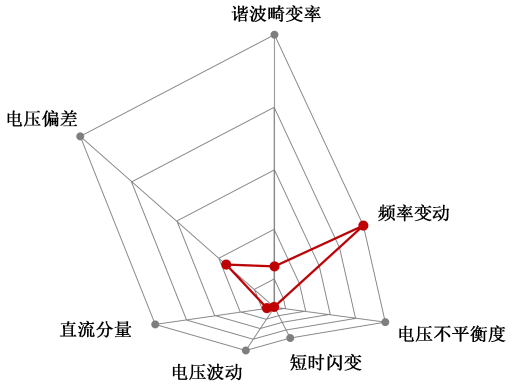


图 3 光伏电站电能质量变形雷达图

3 结语

本文基于熵权—层次分析法对光伏并网电能质量进行评价，提出了一种基于熵值的客观权重计算方法，同时组合主观权重值，使得权重结果更为可靠，避免因专家打分主观因素太强而导致评价结果偏差大的弊端。以某光伏电站实际数据为例进行评价，通过变形雷达图展示，可直观地表现出各个指标的状态，对并网测试人员有很好的指导意义。

参考文献：

[1]余娜. 吴鸣：分布式光伏电能质量恶化怎样破解？[N]. 中国工业报,2021-11-09(002).
[2]朱明星,张毅恒,张华赢,吴显,赵誉洲.考虑指标特性的区域电网电能质量评估方法[J/OL].电力系统及其自动化学报:1-10[2021-11-13]
[3]刘善伟,郭建龙,刘文泽,闻成胜,周文青.10kV配电网电能质量综合等级评估方法研究[J].机电工程技术,2021,50(08):152-156.
[4]王玉梅,刘婧岩,李自强.基于改进熵权法的煤矿电能质量评估方法[J].电子科技,2021,34(07):31-36+78.
[5]梁海峰,刘子嫣.基于AHP—熵权法—模糊综合分析的智能配电网综合效益评估[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版):1-8[2021-11-13].
[6]郭嘉琦,蒋建东.可变模糊云模型电能质量综合评估[J].郑州大学学报(理学版),2021,53(03):110-118.
[7]云玉新,辜超,陈新岗,谭悦,朱莹月,陈姝婷,朱辉.基于组合赋权和集对分析的油浸式配电变压器质量评估模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(03):199-206.

作者简介：

熊建英（1974），女，大学本科，高级工程师，主要从事电气、新能源等专业技术工作。

机组运行过程中轮叶反馈传感器挂钩断裂的后果及对机组危害的探究

陈宇晖

（国能万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：某厂 1 号发电机组在运行过程中，轮叶反馈传感器挂钩断裂，导致监控显示轮叶由 8%突变到 0，有功从 35MW 降到 8MW，频报水导摆度和下机架振动越限，当值运行人员对该情况冷静却正确处理，现对该现象进行原因分析，对处理人员的做法进行再学习。

关键词：厂用电断裂；振动；协联破坏；故障

1 引言

12 月 4 日 1 点 25 分 21 秒监控显示轮叶由 8%突变到 0（但在 1 点 26 分 51 秒轮叶实际开度已 100%），有功从 35MW 降到 8MW，频报水导摆度和下机架振动越线。

2 该厂1号机调速器系统介绍

该厂 1 号机调速器采用武汉“能事达”MGC4000 PD 双微机系列调速系统，即“比例伺服阀（P）+伺服电机（D）”冗余方式，电调柜 A 套为伺服电机、B 套为比例伺服阀控制模式，整个调速系统主要由调速柜（电气柜、机械柜）、接力器、油压装置等组成。控制柜包括用于自动调节的双冗余微机调节器（微机调节器Ⅰ、Ⅱ）、彩色液晶显示器、交直流电源、转速检测装置、按钮、指示灯、测量显示仪表、接线端子等。

电气控制柜由两套（A、B 套）微机控制系统互为备用，故障自诊断进行双机切换，严重故障时（如伺服阀卡）可自动切换至手动运行。

表 1 开度反馈来源

名称	来源
电柜轮叶开度	永磁机旁轮叶拉线传感器
机柜轮叶开度	电气调速器柜模拟量输出

所以当永磁机旁轮叶拉线传感器失去作用时，电调无法收到正确的轮叶位置信号，因此会影响机组的正常协联曲线破坏，导致机组无法稳定运行。

2.2 1 号机运行过程中轮叶反馈传感器挂钩断裂事故过程

12 月 4 日 1 点 25 分 21 秒监控显示轮叶由 8%突变到 0，有功从 35MW 降到 8MW，频报水导摆度和下机架振动越限。

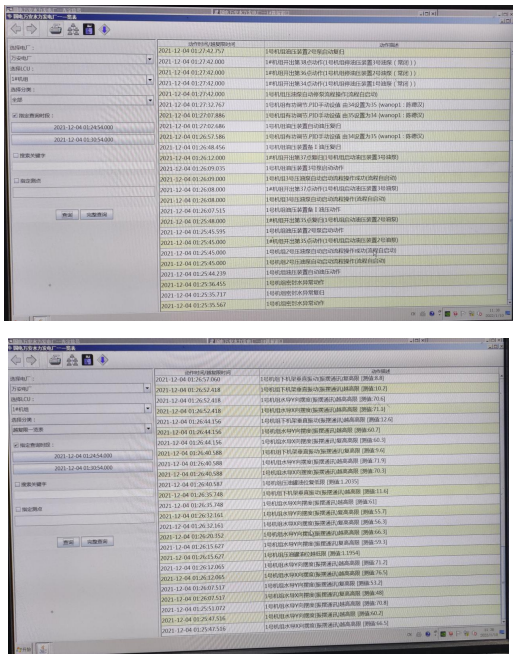


图1 监控显示画面

经现场查看现场查看为 A 套调速器事故、桨叶电机故障、桨叶侧大故障。且永磁机处拉线式传感器挂钩断裂。

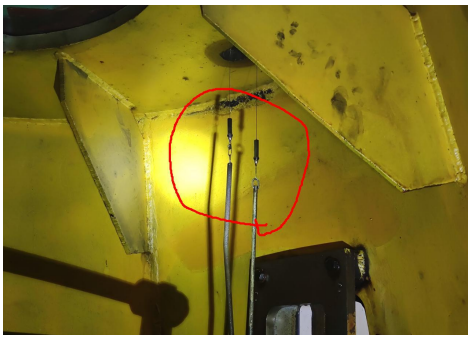


图2 永磁机处轮叶开度传感器拉线

调看曲线在 1 点 26 分 51 秒，轮叶实际开度已到 100%，此时机组协联破坏，负荷不稳定，水导轴承 X 向摆度最大为 86.4、Y 向摆度最大为 91.6。

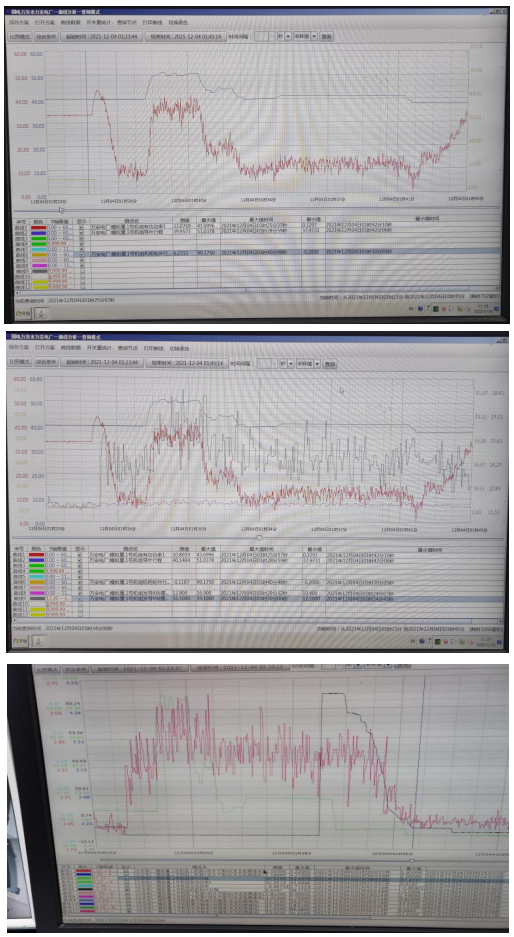


图3 水导轴承摆度曲线

3 1号机轮叶反馈传感器挂钩断裂事件分析

当出现该种现象时，信号与简报信息并没有反应事件造成原因，因此我们只能通过现象判断造成该种现象的方向与可能原因，并通过到现场查看来确认事件原因并处理。

当机组振摆度指标都超限时，同时我们观察到导叶未变，轮叶显示变化，并且负荷也发生了改变，这就可以判定是水力不平衡造成的。此时立刻到发电机层与水车层检查轮叶实际位置，与调速器电调柜上的故障信号。（由于出现该故障时，监控、电调故障信息未发出，A 套电调未报故障也未切至 B 套运行，且电调桨叶突变未能自动切换或闭锁，AB 套桨叶差值大未闭锁。）

该厂“能事达 MGC4000 PD 双微机系列调速系统”有控制器硬件的容错机制：当单套控制器中硬件系统出现故障时，切换到正常的另一套微机运行，双套控制器中都出现故障时，调速器切手动运行，维持导叶开度不变。主机出现严重故障时，备用机替代原主用机成为当前主用机工作，当调速器双套控制器都出现严重故障，此时调速已经无法按照既有的流程执行对导叶接力器的操作，需要执行“机手动”操作停止机组运行或者紧急停机。

4 该厂其他机组运行过程中会不会遇到类似情况

该厂 2 号机组大修结束后，调速器也更换为武汉能事达 MGC4000 PD 双微机系列调速系统，此时某厂 1、2、3、4 号机组调速器均为同一型号，且电柜轮叶开度、机柜轮叶开度信号取自部位相同，故其他机组也存在出现该情况的可能。

该厂 5 号机组采用的是东方电机厂 HGS-E222 型调速器，机柜轮叶开度信号取自电柜输出模拟量，电柜轮叶开度信号也是取自永磁机处拉线式传感器，但是不确定 5 号机调速系统是否有设置轮叶突变闭锁或 AB 套轮叶差值大闭锁功能，故不能确定 5 号机是否会出现类似情况。

表 2 故障描述

故障名称	故障属性	人机界面显示	故障原因排查	调速器操作
接力器反馈故障	严重故障	反馈故障&调速器事故	1.传感器损坏 2.连接电缆断开 3.反馈装置固定支架与传感器可活动部分连接松脱 4.反馈信号存在大波动干扰	主备用自动切换，需手动复归

但是“能事达 MGC4000 PD 型”调速器只对导叶做了该故障切换与开度限制机制，故导致此次 1 号机运行过程中轮叶轮叶反馈传感器挂钩断裂并没有顺利切换至 B 套运行，也没有闭锁使得轮叶无法突变。故导致电调按照错误的情况对机组进行调节，如果该情况运行时间一长必会导致机组（1）机组振动摆度过大，导致瓦温上升；（2）无法调节所需负荷，并且可能造成励磁电流不断升高，定转子温度上升。

此时事件处理要点是，根据现象迅速判断故障方向与可能部位，并立即布置人员现场查看，确定故障部位后冷静处理，轮叶切手动，调整轮叶角度至协联，切 B 套控制，观察运行正常包括数据，轮叶切回自动。

5 结束语

通过该事故现象与当时师傅们的现场处理，并结合运行规程与查阅资料，巩固了该厂调速器运行知识和逻辑，并获得运行人员对事故处理的一些经验与心得。通过该事故的发生，发现了调速器对轮叶信息的漏洞，虽说该现象发生几率很小，此次也是机组投运 30 年来第一次出现这种情况，但是几率小不代表没有，小情况如果放任不管或者处理不当就会酿成大事故。

作者简介：

陈宇晖（1996），男，江西省九江市，本科，从事水轮发电机组检测研究，E-mail：401851165@qq.com

先进AGC控制策略在660MW超超临界二次再热机组的研究与应用

刘逸峰[1]，李辉[1]，董卫强[2]

（1.华能安源电厂，江西 萍乡 337200；2.华能江西分公司，江西 南昌 330000）

摘要：针对 AGC 控制中存在的负荷调节精度差，机组的调峰、调频能力差的问题，利用神经网络，预测控制，模型自适应等多种先进控制技术，通过分析机组状态，建模，调试，优化，在不断试验中，提出更优的控制方案，使得机组的性能得以提高，机组运行更加平稳，AGC 反应更加迅速，达到了 AGC 零考核的目标，可实现提高年经济效益达 2000 多万。

关键词：ACG 控制；神经网络；预测控制；模型自适应

1 实施背景

自动发电控制AGC是现代火电机组DCS的核心控制部分，作为桥梁将电网与单元机组连接起来，其主要任务是调整锅炉和汽轮机侧的各闭环控制系统，响应调度负荷指令[1]，其控制性能直接影响机组AGC运行的稳定性、安全性、经济性以及电网有功调节水平[2]。

安源电厂是2x660MW二次再热超超临界燃煤机组,DCS系统为Ovation 3.5.0,原AGC调节方式为负荷指令反馈+ PID反馈的组态逻辑。该方案理论上可减小反馈环节对整个控制系统的影响，尽可能使之整定为开环控制系统。但由于现场环境复杂，配煤掺烧过程中，煤质、煤源不稳定，测量设备精准度不高等因素，系统扰动消除能力差，容易出现参数大幅波动和振荡，机组负荷响应速度低等现象，控制效果始终无法达到预期，经济性方面也有影响。

因此为有效提高机组的综合协调控制性能，同时保证机组AGC协调、一次调频、主再热汽温及脱硝等重要性能指标达到技术要求，AGC优化是必要的。

2 优化策略

安源电厂此次优化是通过现场已有的INFIT系统的硬件平台（S7-300 PLC）来实现660MW机组辅助服务控制系统性能优化的目标，并通过应用神经网络、智能前馈及模型自适应、预测控制等多种现代控制技术，在机组50%-100%pe负荷段，对机组AGC控制，一次调频，协调控制，主汽温控制，一、二次再热汽温控制，脱硝控制以及辅助服务自动控制等功能完善的先进升级优化控制系统（以下简称为“升控系统”）。有效的提高了机组的综合协调控制性能，同时保证机组AGC协调、一次调频、主再热汽温及脱硝等重要性能指标达到技术要求。

2.1 明确升控系统的可操作性

升控系统硬件配置如表2-1所示。

表 2-1 升控系统硬件配置

	硬件平台	硬件配置
升控系统	Siemens S7 系列 PLC	双冗余电源、CPU模块、modbus通讯模块

通过Modbus实现了PLC与DCS的双向通讯，将传统的DCS系统中AGC控制系统的参数，包括例如给煤量指令，给水流量指令，汽机阀门开度指令，主汽压力反馈等大量数据打包送至PLC内，通过PLC内部的函数语句编写，设计出另一套新的控制系统，相当在原有的DCS基础上扩展出一套升控系统，以提高控制品质。但是升控系统与原有DCS系统彼此独立，并且可以实现无扰切换。也就是说，运行人员可根据需要在二者中进行选择，无论是从升控系统切换至原DCS系统，还是从原DCS系统切换至升控系统，各控制量均能平稳过渡，保证机组安全稳定运行。

同时采取多种软、硬件技术手段，避免由通讯、测量或系统本身所引起的故障发生时机组DCS系统的无法正常运行的问题，也即，当故障发生时，升控系统的控制权交回给原DCS系统，同时各控制量能够平稳过渡，保障升控系统和DCS系统的可靠协作。

2.2 选定预测控制技术保证控制高效稳定

相较于原DCS系统的PID控制，在对机组负荷、压力、主再热汽温及脱硝控制系统进行优化时，升控系统虽然在整体上仍采用前馈+反馈的控制模式，但反馈控制采用了适用于大惯性热工对象的预测控制，根据系统的历史信息预测系统未来变化趋势，通过提前动作减小控制偏差，从而有效改善控制效果。同时，升控系统还应用智能模糊前馈消除

外部扰动，从而减小控制过程动态偏差；利用神经网络自适应等技术使得控制参数随工况变化不断调整，保证整个控制过程的合理性。此外，在对机组辅助调频进行优化时，升控系统采用数据挖掘技术分析影响机组辅助服务性能的因素，建立辅助服务性能的预估模型，计算机组的辅助服务性能指标KP；综合机组稳定性及机组性能指标，采用多目标寻优技术确认当前机组控制目标的权重的控制策略进行控制；采用了基于快速模糊控制技术的先进辅助服务性能控制策略进行控制。采用多目标寻优技术确认当前机组控制目标的权重的控制策略；辅助服务性能的快速模糊控制软件：采用了基于快速模糊控制技术的先进辅助服务性能控制策略。

2.3 对机组运行状态分析及建模

通过数学建模对热力系统设备进行研究，根据动态特性试验分析机组动态特性，基于AGC运行要求针对性地设计660MW超超临界机组的控制优化策略，其中包括：机组AGC控制、机组协调控制、过热汽温控制、再热汽温控制、脱硝自动控制、辅助服务控制。在多个负荷点，通过仿真软件进行静态试验，初步拟定控制方案及控制参数。

2.4 控制系统优化调试，确保控制品质

根据升控系统热态调试方案，安排试验计划和向电力调度中心申请负荷，并按照最终确定的试验时间进行系统热态调试工作。

调试工作步骤如下：

在调试工作开始前，对工作人员进行技术交底，详述辅助服务工程系统的工作模式、投/切操作规范、调试项目、试验内容、预期目标以及事故应急方案。

在机组稳定工况下，逐步投入升控系统各项控制功能[3]。

进行必要的投/切试验，保证切换过程无扰[4]。

对每个控制回路进行外扰试验、定值扰动试验、变负荷试验，并综合考虑控制系统在稳定工况、吹灰或启停制粉系统等大幅扰动工况下的运行性能，不断调整“升控系统”控制策略及控制参数，以获得满意的性能品质达到所求的全部功能和性能指标[4]。

3 实施效果

3.1 有效提高了机组的运行稳定性

在升控系统优化前，机组协调控制系统投入时存在主汽压力，过再热汽温达不到额定值，脱硝控制系统投入时存在稳定工况喷氨量大、变负荷工况NOx易超标等问题。升控系统投入使用后，在原机组各主辅设备动作正常、调节裕量充足的情况下，保证机炉协调控制系统及主要子系统满足国家规定的品质指标，同时使主汽压力、过再热汽温和NOx浓度控制平稳且不超规定指标。

3.2 缩短了机组负荷响应时间，提升了机组负荷响应速度有效改善机组负荷跟踪能力。

升控系统采用的负荷精度补偿技术，通过机组实发功率直接跟踪AGC目标负荷减少偏差，补偿机组负荷改善负荷调节精度，提升机组负荷响应速度。

3.3 有效提高了在AGC大幅变负荷下的控制性能，提高经济效益

升控系统投入后，在日常运行中，实现了机组AGC零考核的目标，全年AGC补偿可达2000多万元，大大提高企业的经济效益，提升了我两台机组在行业中的竞争力。

4 推广展望

升控系统利用先进的控制策略，预测控制技术、神经网络学习技术及自适应控制技术，提出了现代火电机组AGC控制的先进解决方案[5]，该方案成功在华能安源发电有限公司机组AGC控制中应用，并已在江西区域其他电厂中得到推广。

参考文献：

[1]黄宏伟,刘宗奎.基于预测控制等先进技术的1000MW超超临界AGC优化控制[C].2014年中国发电厂热工自动化技术论坛,2014.

[2]现代火电机组AGC控制问题的解决平台—INFIT .互联网文档资源,2018.11.27.

[3]周富田.火电厂SCR脱硝喷氨自动控制策略探讨[J].科技成果纵横,2020,(2):291.

[4]聂静.SNCR配合SCR在W型锅炉脱硝中的应用.龙岩学院学报,2020.03.12 .

[5]方吉吉.先进预测控制在超超临界机组机炉协调系统上的应用.2014年江西省电机工程学会年会.2014.03.27.

作者简介：

刘逸峰（1996），男，江西萍乡，大学本科，助理工程师，研究方向为火电厂热控技术，E-mail:458997055@qq.com

山地光伏电站单立柱支架结构安装技术

吴建鹏，尹康华，尹杰

（中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：光伏发电技术是近年来国家新能源发展的重要风向标，其依靠雄厚又丰富的可再生资源太阳能作为中转站，源源不断的提供优质又清洁的电能。本文从广西某光伏项目着手，结合山地光伏地势变化较大的特点，考虑使用单立柱支架结构，其降低成本、缩短工期、安装便捷。但需严格按照设计图纸施工，统筹各模块安装顺序，稳固斜梁倾角，及时检查校准。最后该安装技术提高了项目整体美观度、质量合格率，组件稳定性。且节能环保，收益显著。

关键词：山地光伏；单立柱支架安装；斜梁倾斜角控制

1 项目简介

广西某光伏项目场址位于广西壮族自治区，土地类型为未利用荒地或一般农业用地，地势情况复杂且用地多而分散，场区总占地面积约为2730亩。本工程建设规模为100MW，配置32台3150kW集中式逆变器，光伏组件全部采用固定支架安装。

本文根据项目实际情况及设计要求出发，选择单立柱支架结构，完善单立柱支架结构安装工艺原理与流程，配合质量控制措施，确保项目合格率与高质量。

2 单立柱支架结构介绍与工艺流程

单立柱支架结构是指使用一根立柱支撑上部组件[1]。是应用广泛的固定式支架[2]。相对双立柱支架结构有三个优点：一是降低成本，单立柱支架结构节省材料，降低相应成本[3]，同时也可以缩减桩基数量，减少混凝土方量，优化项目支出，提高经济效益。二是缩短工期，本文内单立柱支架结构安装技术简易，通俗易懂，组装速度快，提高施工效率，从而减少项目工期。三是安装便捷，山地光伏电站项目地形差异大[4]，双立柱的间距可能导致两立柱标高相差大，提高支架调平工作难度。而单立柱支架安装完美避开此项作业[5]。

但是单立柱支架结构稳定性，可靠性，承载能力等相对较差[6-7]。在设计方面针对抗横向、竖向承载力验算等方面必将更严谨，同时对材料强度、刚度、稳定性等要求更高，使其能达到规范要求。

作者在广西某光伏项目实操，制定单立柱支架结构安装工艺流程，见下图2.1所示。

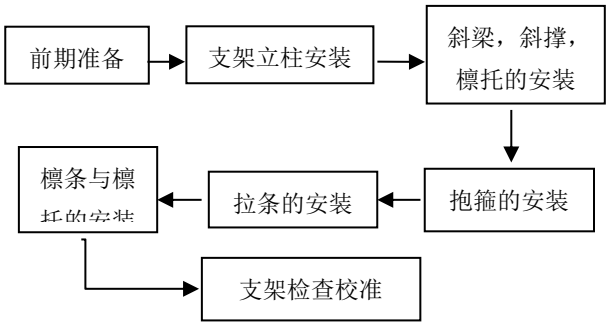


图2.1 工艺流程图

3 山地光伏电站单立柱支架结构安装技术

3.1 前期准备

材料准备：将材料分类堆放至规划区，分散至桩基附近，完成工作。

工具准备：套筒扳手、梅花扳手、内六楞扳手、水准仪、指北针、钢卷尺、力矩扳手、线绳、水平尺、铅锤、经纬仪、移动脚手架等必须符合工程施工需要及质量检测要求。

支架安装前应检查灌注桩基础的平面位置、几何尺寸、轴线、标高、平整度、预埋件、混凝土强度、桩基试验、桩身完整性等是否符合规范及设计要求。

3.2 支架立柱安装

将立柱的柱底钢板放置在的灌注桩基础内预埋件上，检查孔隙位置是否正确；调整灌注桩基础轴线与支柱中心线重合，将水平尺放至立柱，调整立柱的水平度。用螺栓将柱底钢板与预埋件连接。若桩基表面标高有偏差则用垫块将立柱垫平后紧固地脚螺栓。垫块必须与立柱底座三面围焊，见下图3.2-1所示。

将装好的一组立柱，在桩顶拉线，根据现场情况，调整上下立柱高度，确保同组立柱顶端在同一

直线上，见下图3.2-2所示。



图3.2-1 支架立柱安装示意

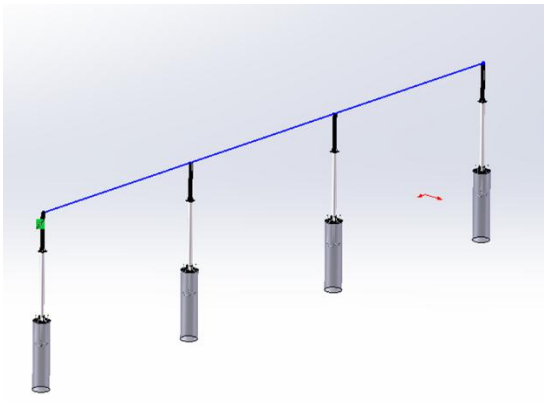


图3.2-2 立柱整体安装示意图

3.3 斜梁，斜撑，檩托的安装

在地面上将檩托用螺栓连接在斜梁上，再使用外六角螺杆将斜梁分别与前斜撑、后斜撑连接，通过斜梁上两端侧的固定孔洞位置来控制前斜撑与后斜撑与斜梁衔接处的位置，从而固定前后斜撑的方位。见右图3.3-1所示。

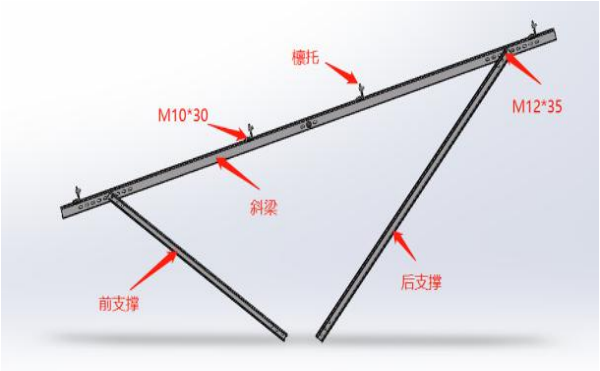


图3.3-1 檩托，前后斜撑与斜梁安装

3.4 抱箍的安装

在立柱上距离柱底钢板固定尺寸X处安装大小抱箍，大小抱箍抱住立柱下端，抱箍间用螺栓连接，防止其产生滑移；将装好的斜梁部件放在立柱上，用螺栓将其连接，再使用外六角螺杆将前后斜撑通过与大抱箍固定孔洞处进行连接。见下图3.4-1所示。

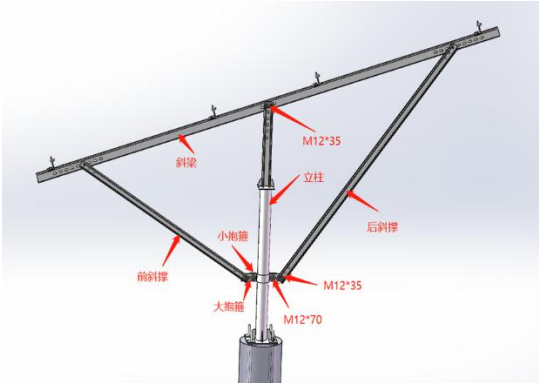


图3.4-1 前后斜撑与抱箍连接，斜梁立柱连接安装示意图

通过上述固定位置的螺栓连接，在材料满足设计、规范要求，且不发生形变等其余因素干扰的情况下，则可保证安装斜梁角度为固定角度。若存在其余因素干扰情况下，可将水平尺放在斜梁上，通过微调距离X保证斜梁固定角度。

3.5 拉条的安装

将水平拉条穿过斜梁中间孔位用拉杆转接件通过双螺母安装在斜梁上连接紧固。将相邻支架斜梁之间搭设好交叉水平拉条，见上图3.5-1所示。

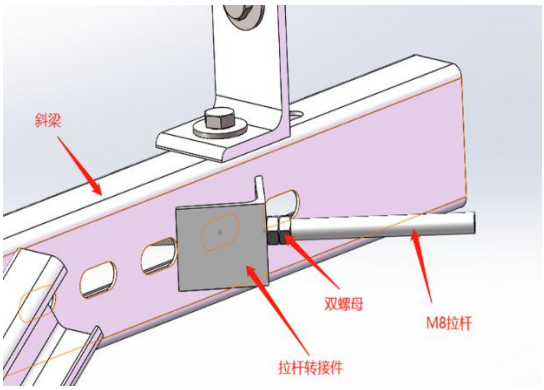


图3.5-1 水平拉条装配示意图

将垂直拉条穿过上立柱孔位用拉杆转接件通过双螺母安装在立柱上端连接紧固，在下半端用小抱箍抱住立柱，用拉杆转接件将立柱和拉杆连接，见下图3.5-2和图3.5-3所示。

3.6 檩条和檩托的安装

在地面上，把两根檩条用檩条连接件搭接上，使用螺栓连接，檩条全部连接好后，使用移动脚手架，共同操作将檩条抬上至斜梁，根据已连接在斜梁上的檩托定位，使用螺栓将檩托长边与檩条腹板

连接。锁紧螺丝后，确保檩托与斜梁垂直，檩托与檩条连接处不可倾斜。见下图3.6-1和3.6-2所示。

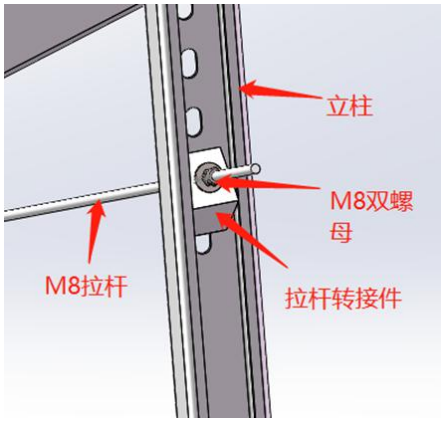


图3.5-2 柱间拉条上半部装配示意图

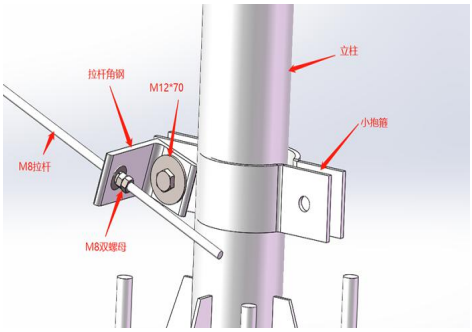


图3.5-3 柱间拉条下半部装配示意图

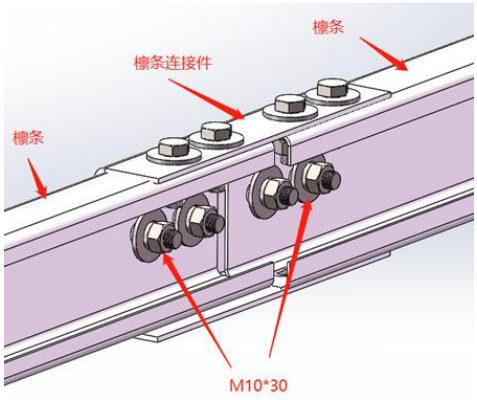


图3.6-1 檩条连接示意图

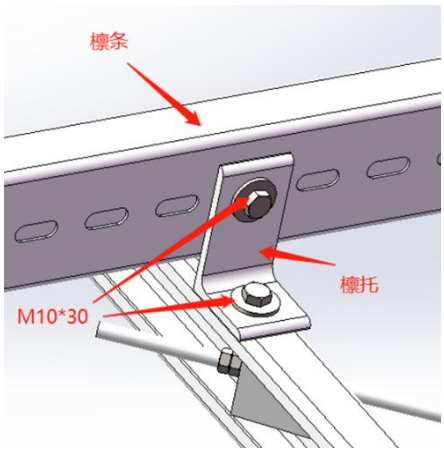


图3.6-2 檩条与檩托安装示意图

3.7 支架检查校准

安装结束后，对支架进行检查，主要检查支架构架及整体安装标准规范，斜梁角度是否为固定角度，是否横平竖直、整齐美观，螺栓是否紧固可靠，是否满足设计规范要求。见下图3.7-1和图3.7-2所示。

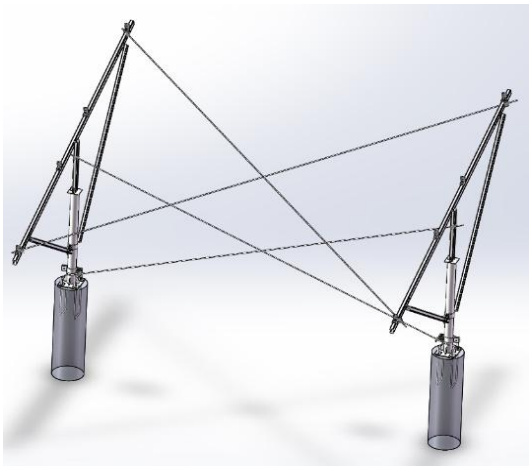


图3.7-1 拉条装配完成示意图

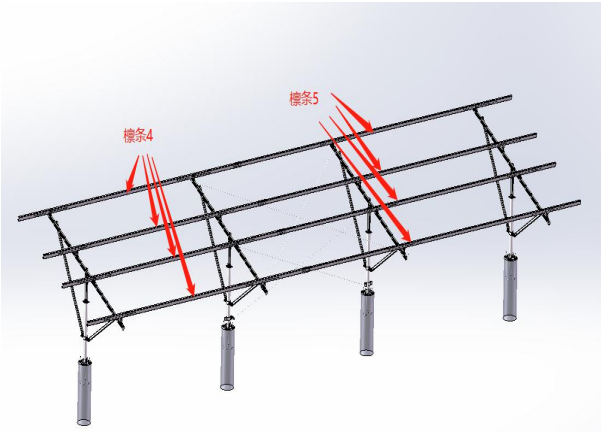


图3.7-2 支架安装校准示意图

4 结语

本文以实际项目为背景，针对山地光伏地势特点选用单立柱支架结构，再根据设计方案完善单立柱支架安装工艺流程。采用流水施工、阶段性核准、固定支架配件及相关距离以稳固支架斜梁的角度的办法。确保了支架的合格率及稳定性，为上部组件的安装做好充足的准备。该工艺流程简单易懂，施工过程安全有保障，节能又环保，安装完成的支架质量好，结构稳定，且降低财务投资。

参考文献：

[1]聂晓鹏. 山地光伏电站用单立柱和双立柱光伏支架结构的受力对比分析[J]. 太阳能, 2021(10):59-63.

[2]张德晶,贺广零,赵前波,王韶纤,胡海罗.基于LCOE的光伏支架选型研究[J].太阳能,2022(04):93-101.
[3]宋金鹏, 一种单立柱三脚架及其支架与水上光伏电站.安徽省,阳光电源股份有限公司,2017-09-12.
[4]陈伟.山地型光伏电站系统优化与应用研究[D].中国矿业大学,2021.
[5]罗生元,王敏杰,戚海敏,康开胜,苏成中.配重式可调光伏支架的应用和推广[J].冶金管理,2021(21):56-57.
[6]文锋. 固定式光伏支架结构选型及构件优化[C]//.《工业建筑》2017年增刊III.[出版者不详],2017:269-274.
[7]王武林.sss强风地区平单轴光伏电站稳定性分析与优化研究[J].光源与照明,2021,No.160(10):51-53.

作者简介：

吴建鹏（1996），男，江西抚州人，研究生；研究方向：光伏发电，E-mail：812420646@qq.com

尹康华（1972），男，江西吉安人，大学本科；正高级工程师，研究方向：光伏发电；

尹杰（1994），男，江西九江人，大学本科；助理工程师，研究方向：光伏发电。

基于激光雷达测风仪的风机功率曲线对比研究及应用研究

吴玉华

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：风电属于开发新能源当中最具规模化、技术成熟化、发展前景优良的一种发电方式。功率曲线可实现对机组特性直观反映，测定分析功率曲线属于风电场广大运营商重点关注内容。伴随风机装机实际容量持续增大，主流的风机单机实际容量也不断增长，对风机功率相应曲线测定分析提出更高要求。故本文主围绕着以激光雷达的测风仪为基础测定风机功率相应曲线开展对比分析及探讨。本次课题研究可谓是运用到各种学科方法、基础理论及成果，并从整体入手综合研究本课题，以保证本次课题研究的客观性及精准性，期望可以为后续更多技术工作者和研究学者对此类课题的实践研究提供有价值的指导或者参考。

关键词：风机；测风仪；激光雷达；功率曲线；应用

0 前言

伴随我国风电持续发展，风电机组具体种类、型号逐步增加，风电场国内运营商持续增加对风电机组的功率特性相关测定需求。但机组功率传统曲线测试法往往会受地形以及测风设备相关条件限制，规范化、准确性以及低成本测定复杂地形环境当中风机性能有着一定难度性。故对比分析以激光雷达的测风仪为基础测定风机功率相应曲线，对于今后更为直观且高精度测定分析风机功率相应曲线来说，现实意义和价值较为突出。

1 概述激光雷达专用测风仪

所谓激光雷达专用测风仪，即以光多普勒的频移为基础原理，经对空气当中光波反射遇到伴随风所运动气溶性胶粒子而产生相应频率变化后获取风向以及风速信息的有效测定，对特定高度矢量风向、风速数据实施计算分析，优势特点集中表现为测定功率曲线操作精准性、快速性、较为广泛的测定范围、高精度化测定等等，多选定地面类型激光雷达专用测风仪，测定以及对比分析风机功率相应曲线。

2 试验测试

2.1 测试风机基本功率特性方法

依照着IEC现行标准规定以及各项要求，经测试分析所获取相应功率曲线属于机组标准化的功率曲线，即为风机机组动态化的功率曲线。测试试验分析整个过程当中，需较长时间采集机组总体运行状态以及周边气象动态变化情况相关数据信息。处于合理化风向扇区范围，所需记录数据信息主要包含着持续10min范围平均的功率、风向、风速、平均，还包含着轮毂高度之下气温、气压，特殊情况之下还需结合所采集获取湿度数据修正处理空气密度，借助区间分析法，把相应功率曲线绘制出来。IEC现行标准规定以及各项要求当中，风机机组功率基本特性曲线测定务必将测风塔确立起来，且需把湿度、温度、气压等相应传感装置、风杯风速计相应设施设备均布设好。结合湿度、气压、气温相关数据有效修正空气密度。布设测风塔期间，需确保布设位置科学合理。测风塔具体位置和风机机组相互间距离应当是待测定风机机组的风轮直径约2~4倍左右，测风塔务必处于所布设测量扇区范围当中。在风电机组处于主风向上位置2.5倍风轮直径，为测风塔布设最佳位置。依照着IEC现行标准规定以及各项要求，测风系统装置和所有气象装置布设、记录法有效运用下所获取相应功率曲线应有一定的精准度。但因测风塔始终存在着如实际布设时间长，较长测试周期，且不便于后续维护相关缺陷问题。故本文提出以激光雷达专用测风仪为基础代替测风塔测定独分析功率特性基本曲线方法。

2.2 标幺处理功率曲线

在一定程度上，标幺值属于电力系统内部数值标记常用的一种手段，用于点各个物理量以及参数实际相对值，便于直观对比分析相关结果。因型号不同风机功率有差异性存在，对比分析有着一定难度系数。如果想更好地标幺处理型号不同风机功率，直观性对比分析功率曲线，则所需参值标幺值列式即为：S*=S/Sb，在该列式当中，S*代表着表幺值，Sb代表基准值，S代表实测值。

2.3 复杂地形环境当中激光雷达专用测风仪之下风机机组功率基本特性测试

此次测试场区属于温带大陆的季风性气候，该地区四季分明，以西北风为主风向。年均气温为5.8

℃，90~140天的无霜期。年降水最多564.3 mm，年降水最少269.4 mm。每年＞8级大风日数约40天。此次测试场区高度为70m年均的风速7.7 m/s，此次测试时间是2019年2月～2019年10月。计算分析过后确定此处地形与IEC现行标准规定以及要求相吻合。此次布设测风设备过程即为：测试分析过程当中，风电场以西北345°为主风向，激光雷达专用测风仪布设至WT20西北的345°处，选定英国的ZE-PHIR公司所生产，4. 3 350. 10. 0型号激光雷达专用测风仪，风速测定精度0. 2%，风向0.500测定精度，同等方向和风电机组相距232.5 m位置布设测风塔，风速测定精度0.2%，风向0. 50测定精度，气温传感装置精度0.5℃，气压传感装置精度0.02mbn。结合IEC现行标准规定以及各项要求扇区算方，以激光雷达专用测风仪下地理位置，确定测试扇区308.9°~28.9°范围。以测风塔所在地理位置，确定测试扇区范围是324.6°~32.2°。为确保测试最终结果可对比性优良，测量数据最终选定308.9°~28.9°扇区。

2.4 结果分析

1）在一期～二风机的功率曲线实测层面

经此次试验测定可了解到，一期～二风机实际所测得相应湍流强度处于时间维度层面呈较大变化，为确保对比分析更具精准化，一期～二风机的具体测定数据当中，湍流强度即0.10~0.12。计算分析过后获取一期#15与二期#22的风机功率实测数据，详见表1~2。

表1一期#15的风机功率实测数据

风速区间/(m·s⁻¹)	平均湍流强度	平均风速/(m·s⁻¹)	平均功率/kW	样本数量
2.75-3.25	0.118	3.01	37.21	84
3.25-3.75	0.117	3.52	93.24	78
3.75-4.25	0.114	4.04	147.83	71
4.25-4.75	0.109	4.55	217.34	61
4.75-5.25	0.113	5.02	303.25	52
5.25-5.75	0.112	5.53	410.40	45
5.75-6.25	0.104	5.99	531.35	34
6.25-6.75	0.111	6.50	624.86	35
6.75-7.25	0.105	7.00	730.62	34
7.25-7.75	0.110	7.44	968.33	30
7.75-8.25	0.109	7.97	1190.36	31
8.25-8.75	0.108	8.50	1320.82	28
8.75-9.25	0.106	9.01	1513.60	30
9.25-9.75	0.109	9.48	1663.00	18
9.75-10.25	0.103	10.00	1866.50	12
10.25-10.75	0.108	10.51	1980.86	10
10.75-11.25	0.104	11.01	1986.00	6

表2 一期#15与二期#22的风机功率实测数据

风速区间/(m·s⁻¹)	平均湍流强度	平均风速/(m·s⁻¹)	平均功率/kW	样本数量
2.75-3.25	0.116	3.00	45.01	93
3.25-3.75	0.113	3.51	98.24	87
3.75-4.25	0.115	4.03	178.21	83
4.25-4.75	0.113	4.53	245.21	77
4.75-5.25	0.112	5.01	371.34	72
5.25-5.75	0.108	5.59	609.83	80
5.75-6.25	0.108	6.00	693.72	82
6.25-6.75	0.107	6.48	890.23	82
6.75-7.25	0.111	6.98	1038.03	63
7.25-7.75	0.119	7.48	1256.34	54
7.75-8.25	0.113	8.01	1559.50	43
8.25-8.75	0.115	8.49	1703.14	31
8.75-9.25	0.107	8.88	1755.88	31
9.25-9.75	0.110	9.45	1980.84	14
9.75-10.25	0.110	10.03	2117.69	22
10.25-10.75	0.106	10.54	2150.06	16
10.75-11.25	0.109	10.99	2190.85	11

2）在对比分析一期～二风机的功率曲线层面

因一～二期风机为同等额定功率，标幺处理此次一期～二期风机基本功率曲线当中功率进行，获取标幺化过后相应功率值，功率经相应标幺处理过后，如图1所示，一期#15与二期#22的风机功率处于2~5m/s、＞10m/s风速段呈较小曲线差异；风速段为5~10m/s条件下，相对比一期#15的风机，二期#22的风机基本功率曲线占据一定优势，此次测试分析结果能够实现对比分析风机功率相应曲线有着良好直观性、可靠性。

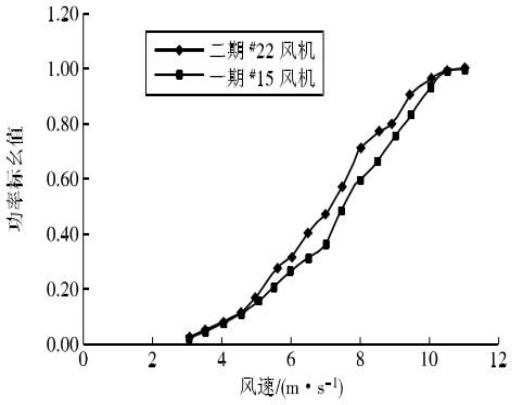


图1 对比分析一期#15与二期#22的风机功率两者标幺值

3 结语

综上所述，风机功率的曲线测定在评估风机性能、质结束保之前验收以及健康运行当中应用的相对广泛，但复杂地形环境当中规范化、准确性以及低成本测定风机性能往往难度系数高。此次以激光雷达的测风仪为基础，依照着IEC现行标准规定以及各项要求，测定对比分析风机功率相应曲线整个过程直观、精准、高效且规范，所获取测量数据更为可靠真实，不仅能够为风电场及整个机组实现高效选型优化提供关键性的数据支撑。同时，大幅缩短安装设备周期，对设备后期维护也提供便利条件，对风电机组的功率曲线有效测试技术持续进步发展以及广泛化应用研究来说有着促进作用。

参考文献：

[1]梁志, PaulMazoyer. 风电场后市场领域中测风激光雷达在功率曲线测试方向上的应用综述与案例讨论[C].中国风电后市场交流合作大会. 2019，12（018）：215-216.

[2]申璞. 基于等效风轮风速的风电机组功率曲线测试分析[J]. 东北电力技术, 2020, 41(015):298-301.

[3]曹松青、郝万君、王昊、孙志辉、周嘉玉. 基于激光雷达-Armax的风机轮毂处有效风速预测[J].激光与光电子学进展.2020, 57(017):228-230.

作者简介：

吴玉华（1990），男，江西上饶，大学本科，助理工程师，从事风电研究，E-mail：1135333458@qq.com

SIPOS 5系风机动叶执行机构反馈丢失故障原因分析及缺陷防治措施

王浩

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332504）

摘要：本文针对神华九江电厂 2 号机组 A 送风机动叶执行机构因开度反馈信号突降至零而引起的自动退出缺陷，通过故障检测，同类事故分析，外部调研的方式逐步查找可能导致故障的因素及处理措施。并梳理了该系列执行机构常见故障，提出了可行的应对措施，为保障机组安全稳定运行提供了依据。

关键词：风机可调动叶；电动执行机构；SIPOS 5 系

1 事件介绍及处理过程

1.1 事件经过：

2022年2月24日12时40分43秒神华九江电厂2A送风机动叶开度反馈突然为零，2A送风机动叶自动退出，4秒后恢复，因过程短暂未对机组运行产生明显干扰。

1.2 初步分析判断：

通过对当日历史曲线（图1-1）分析，判断如下：



图1-1 2A送风机动叶故障曲线

40分43秒动叶开度变为0时，DCS控制指令、动叶控制油压、风量、风机电流和出口压力均未发生变化，判断实际阀门未发生动作，该起故障原因为反馈信号问题。

1秒钟后控制油压出现降低趋势，随之风机出口压力上升，3秒后风机电流出现上升。而整个过程DCS开度指令未发生变化，判断执行机构内部反馈回路故障，使内部反馈测量归零，执行机构内部闭环控制回路开启动叶，以便反馈值回归指令值。

40分47秒反馈信号从0变为40.51%，控制油压此时恢复稳压值而后再次下降，风机出口压力和电流此时达到最高值，判断此时反馈信号已正常，由于此时实际开度高于指令值，动叶由开方向运行转为关方向运行。

40分53秒动叶关至32%，与指令值一致，各参数恢复至事件前，动叶执行机构恢复正常。

1.3 进一步检查结果：

由于风机动叶执行机构过于重要，为保障安全运行，于当日夜间低负荷期间更换了2A送风机动叶执行机构反馈回路各部件（信号齿轮单元和分体电缆）并对更换下部件进行检查，厂家检查结果显示信号齿轮单元存在老化现象。

根据事件过程和各部件检查结果，初步判断为执行机构内部信号齿轮单元老化，反馈电阻跳变，控制板误判反馈归零。

2 神华九江电厂同类执行机构缺陷汇总分析

神华九江电厂锅炉减温水调节门，动叶执行机构、锅炉旁路给水调节门均使用该品牌调节门，供30台阀门，2018年投产至今共发生设备故障类缺陷8条，按故障原因分为两类（表1-1）。

表1-1 SIPOS阀门设备故障统计表

序号	缺陷内容	时间	类型
1	1B引风机动叶自动退出	2018/9/6	电源功率模块故障
2	1号炉给水调节门电源板故障	2018/5/23	电源板故障
3	1号机组右侧二级减温水调节门故障退出自动	2019/10/5	信号齿轮单元故障
4	1B一次风机动叶执行机构波动	2020/9/17	信号齿轮单元故障
5	1号炉再热器左侧事故减温水电动调节阀报“运行超时”故障报警，无法调节	2021/5/21	信号齿轮单元故障
6	2号炉再热器左侧事故减温水电动调节阀卡涩	2021/6/19	信号齿轮单元故障
7	2号炉过热器二级减温水A侧电动调节阀齿轮单元更换	2021/8/21	信号齿轮单元故障
8	1号锅炉右侧过热器二级减温水调节阀前电动门无开到位信号	2021/10/15	信号齿轮单元故障

第一类为电源模块故障，发生2起，占比25%。其中1号炉给水调节门为电源板烧损，执行机构断电。该故障表象清晰，容易判断；1B引风机动叶自动退出缺陷，表现为执行机构出现间隙性“卡涩”现象，卡涩期间就地执行机构屏幕无报警，进入观察菜单查询到有一条“变频器故障”报警记录。在依次更换主控板，电源板，信号齿轮单元均无果后，最终确认为功率模块散热不良导致，更换功率模块并重新涂抹硅胶后，阀门恢复正常。



图2-1 1B一次风机动叶执行机构波动曲线

第二类为信号齿轮单元故障。缺陷发生6起，占比75%。故障现象分为两类：一是以1B一次风机动叶执行机构波动为例，阀门可正常操作，无报警信息，但反馈信号存在波动现象（图2-1）；二是以“1号机组右侧二级减温水调节门故障退出自动”缺陷为例，故障时阀门表现为“卡涩”现象（图2-2），就地阀门显示面板报“fault”故障，进入观察菜单查询具体故障原因为“runtime error”。

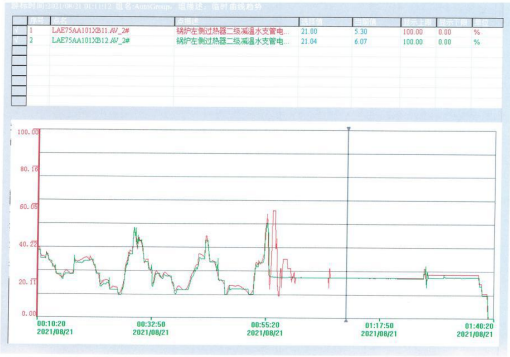


图2-2 1号机组右侧二级减温水调节门故障曲线

通过对多起故障齿轮单元的检测发现，齿轮单元故障均为滑线变阻器磨损导致反馈电阻线性度不良引起。在磨损早起，反馈信号偶尔出现轻微的尖波（图2-3），此时阀门尚可正常开关工作。随着磨损严重，反馈信号频繁出现波动，在DCS指令值不变的情况下，执行机构控制板的闭环作用开始控制阀门频繁小幅度的开关动作，例如1B一次风机动叶执行机构波动缺陷。进一步磨损后，反馈信号线性度失真，与指令信号长期存在偏差，触发“runtime error”报警，阀门故障停运，表现为“卡涩”现象。

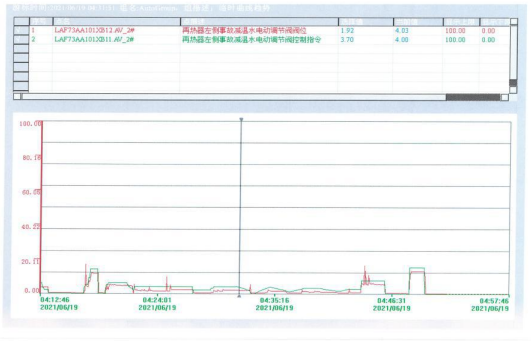


图2-3 齿轮单元早期磨损曲线

通过本次故障与历次故障现象对比，可以看出本次故障并不符合齿轮单元磨损的故障特点。判断除信号齿轮单元老化外还存在其他导致故障因素。

3 外部调研情况介绍

调研了原国华电力公司8家同类型机组的风机动叶执行机构品牌和使用情况见下表2。

表3-1 8家同类型机组调研表

序号	调研对象	使用品牌	使用情况
1	台山电厂	美国贝尔	未发生故障，价格高昂
2	寿光电厂	罗托克	电源板、力矩板故障率高
3	绥中电厂	EMG	控制板故障率高
4	定州电厂	SIPOS	5系齿轮单元故障率高，正逐步改为7系
5	锦界电厂	SIPOS	7系，出现2台7系编码器故障缺陷
6	孟津电厂	SIPOS	5系齿轮单元故障率高，正逐步改为7系
7	沧东电厂	SIPOS	5系齿轮单元故障率高，正逐步改为7系，出现1台7系编码器故障
8	陈家港电厂	SIPOS	5系齿轮单元故障率高，正逐步改为7系

经调研风机动叶执行机构均为进口品牌配置，美国贝尔执行机构故障率最低，但价格高昂，单台价格近10万元；罗托克、EMG、SIPOS三个品牌价格和故障率相当。其中SIPOS品牌使用最多，原因是SIPOS故障多集中在反馈部件上，故障对执行机构影响相对较小，且阀门接线为集成式，阀门参数可通过电脑读写，阀门在线维修方便。

调研过程中发现2016年沧东电厂出现一起故障，风机动叶突然关闭，几秒后恢复正常，旧阀门检测未发现问题。同时成都凯凯凯风机厂现场调试人员的介绍，确认有部分电厂出现过类似瞬时故障，现场诊断发现执行机构支架焊接在风机罩壳

上，受风机振动影响大。将执行机构支架与风机罩壳连接断开后，故障消失。

调研过程中还对国家能源集团近三年内热控非停事件进行了收集统计，其中与执行机构有关4项。

表3-2 国家能源集团近三年热控执行机构非停事件统计表

序号	事件	原因	备注
1	2019年4月24日国电九江发电有限公司#7机组B引风机调节执行器控制板故障故障原因非计划停运	引风机调节执行器控制板故障故障	
2	2020年10月布连电厂1号机组给水流量低调整非停	1C磨煤机因热风调阀故障全关导致风量低跳闸,炉膛负压波动,燃烧不稳,运行手动操作不当给水流量低跳闸非停	
3	2021年4月霍州电厂2号机组定子冷却水压力低	阀门自动关闭,造成定子冷却水压力低保护动作	EMG电动执行机构突发故障(2009年产品)
4	2021年2月某电厂3号机组增压风机动叶故障	增压风机动叶执行机构故障,在指令不变时开度突增,引发炉膛压力高保护动作	EMG电动执行机构控制板突发故障

分析近年来执行机构非停事件，原因在于使用年限过长（均在十年左右），因此对重要执行机构进行有计划更换，极为重要。

4 故障诊断与调研结论

神华九江电厂采用分体式风机动叶执行机构，电机执行机构安装在与风机罩壳连接的支撑架上（振动影响较大），控制头安装在风机附近的支架上（环境较好），中间通过分体电缆连接。反馈部件在电机执行机构内部，因此从前述故障分析与调研结果看，原因很可能存在受风机振动影响，导致老化的反馈部件内部信号跳变，控制板误判反馈归零。

检查分体电缆接线和接头均未发现松脱情况，测量绝缘电阻良好。查询设备台账信息，2A送风机执行机构信号齿轮单元已使用超过3年，厂家检查结果显示信号齿轮单元存在老化现象。且故障自动恢复后至夜间检修更换期间约十个小时内未再次出现故障。固判断为老化的信号齿轮单元内部接线在振动影响下出现的短暂信号跳变。

5 缺陷防治措施

对内外部调研统计情况综合分析，SIPOS执行机构存在以下四个主要故障因素。

1、信号齿轮单元故障。该类故障是SIPOS执行机构最主要故障类型，占到70%以上。从神华九江电厂的使用情况看，该厂2018年7月投产，最早于2019年10月出现第一起故障，至2021年开始频繁出现故障。平均使用寿命约在3年左右。考虑到目前神华九江电厂C级以上检修周期约为18个月，对于风机动叶执行机构考虑每个C级以上检修周期更换一次信号齿轮单元；其余重要调节机构每两个检修周期应更换一次。

2、电源模块故障。该类故障一是受本身寿命影响，二是在振动环境中容易产生振动间隙，引起散热不良造成执行机构工作不正常。神华九江电厂对振动环境（风机动叶）的执行机构进行了分体式改造，将控制部分移至环境较好地区，19年至今未再发生同类故障。同时参考近三年四起国家能源集团内执行机构非停事件，尤其2019年国电九江电厂，在检修中更换了控制板但未对整体执行机构进行更换，修后出现故障引发停运。因此建议对动叶执行机构每个A修周期进行整体更换，避免过长期使用。

3、设备进水引发故障。该故障分为两类，一是日常运行时设备防雨措施不到位，导致设备进水。如2009年某电厂电动执行机构就地控制面板有裂纹，进水导致机组RB。二是设备检修期间，阀门拆卸后防护不到位，下雨进水导致接线柱积盐结垢引起执行机构信号异常。针对该类故障在日常维护中做好设备防雨措施，对阀门接线处，控制面板进行全包防护；另外设备检修期间不但要做好解体阀门的防护，也要注意拆卸后的接线防护，尤其要注意机务施工过程中对固定好的接线头挪动，造成接线葵花盘进水积盐结垢。

4、振动环境引发故障。经调研，动叶执行机构大部分瞬时发生的故障大多与振动环境有关。如某电厂动叶突关等，事后检查执行机构各部件均未发现故障，进行分体改造后近五年内未发生类似故障。建议对振动过大区域执行机构在基建期间进行根本性治理，如神华九江电厂二期基建时可考虑单独浇灌执行机构基础，独立制作执行机构支架，避免受风机罩壳振动影响。投产期机组基础浇灌受空间限制，可采用阀门分体式改造形式，将主要控制部门移至环境良好地区。仍处于振动区域的齿轮单元和电机部分执行定期更换策略保障设备安全。

6 其他控制措施

本次故障中2A送风机动叶执行机构已经偏离指令值向开方向动作，因反馈信号及时恢复，未造成严重后果。可以预见若反馈信号不能恢复，则2A送风机动叶会很快达到全开状态，2B送风机在自动状态下会全关，届时两侧风机运行严重不平衡，且

风量失去调节能力。风机的运行安全和锅炉的燃烧控制面临极大威胁，很可能触发锅炉MFT。

因此在原有动叶指令与反馈偏差大退出自动光字牌报警基础上，增加两侧风机电流偏差大报警，当动叶故障造成风机出力不平衡时及时提醒运行人员密切关注风机运行情况，发生不可控状况时果断采取措施，降低事故风险等级。

7 结论

通过前述分析基本确认了本次故障原因，同时对SIPOS 5系电动执行机构可靠性进行了评估，从调研与分析结果上看，在严格执行前述防治措施的基础上可有效控制SIPOS 5系电动执行机构二类以上障碍。同时本文的调研分析与防治措施，对采用该型号执行机构的同类电厂亦有较强的参考作用。

参考文献：

[1]SIPOS 5系列专业型电动执行机构设备说明书

[2]神华九江电厂设备维护台账

[3]国家能源集团2019/2020/2021年非停事故案例

作者简介：

王浩（1984），男，河北石家庄，大学本科学历，工程师，目前从事火电厂热控控制优化、智能电站建设工作,E—mail：99qingtian@163.com

哈汽1000MW超超临界二次再热汽轮机垫铁安装质量和进度控制研究

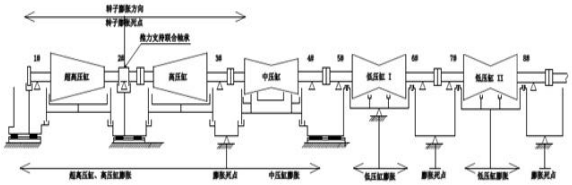
陈芳权

（江西赣能股份有限公司丰城三期发电厂，江西 丰城 331100）

摘要：汽轮机垫铁安装是汽轮发电机组安装的第一步重要工序，垫铁安装的质量和进度对汽轮机安装有着重要的影响，垫铁安装的质量和进度取决于垫铁安装的方法，以哈尔滨汽轮机厂生产的 1000MW 超超临界二次再热机组为例，对现场汽轮机垫铁安装工艺和质量控制进行简单介绍。

关键词：汽轮机；垫铁；1000MW；二次再热；超超临界

本机组是哈尔滨汽轮机厂生产的 1000MW 超超临界二次再热机组，机组型号为 CCLN1000-31/600/620/620 型汽轮机组，五缸四排汽，机组由超高压缸、高压缸、中压缸和两个低压缸组成，共 6 个轴承箱，#1、#2、#4 轴承箱与基架检查结合面设计有滑动板，#3、#5、#6 轴承箱基架和低压缸基架为柔性基架，#3、#5、#6 轴承箱和两个低压缸中心形成机组的 5 个膨胀死点（如图一所示），轴承箱与基架之间要求 0.03mm 塞尺不入。基架落在汽轮机厂供的调整垫铁上部，调整垫铁为斜垫铁形式，调整垫铁与基架之间要求 0.03mm 塞尺不入，接触面达到 75%以上。厂家图纸设计要求现场加工平垫铁，采用平垫铁与混凝土毛面研磨的传统方法安装垫铁，垫铁数量 270 块。



图一 机组滑销系统图

本机组图纸设计的垫铁安装方法是基础与平垫铁配研的方法，使平垫铁底部与基础表面接触面积达到 75%以上且结合面 0.03mm 塞尺不入，厂供调整垫铁再与平垫铁研磨，使调整垫铁与平垫铁接触面积达到 75%以上且结合面 0.03mm 塞尺不入，由于汽轮机基座的钢筋安装标高误差较大，混凝土中掺有小石块，给垫铁与基础研磨带来较大的困难，所以，此安装方法研磨工作量很大，研磨水平不一，施工工期较长，施工进度难以控制，施工质量也较难控制，因此，我们对汽轮机垫铁安装方法进行了较为细致的研究，并在过程中严格把控垫铁的安装质量。

1 垫铁安装方法介绍及选用

1.1 基础与垫铁配研安装方法

基础与垫铁配研法是采用人工凿研混凝土的方法，要求混凝土毛面与平垫铁接触密实，混凝土毛面与平垫铁接触面积 75%以上，垫铁四角无翘动，垫铁标高和垫铁水平在标准范围内。这种方法需要大量的人工，以哈汽 1000MW 二次再热机组为例，汽轮机垫铁共 270 块,每人每天平均研磨 2 块垫铁，需要 135 个工日。

平垫铁研磨符合要求后，平垫铁需要进行上表面加工来达到垫铁标高要求，由于平垫铁研磨后的基础标高不一致，每一块垫铁厚度都需要精准加工来保证垫铁顶部标高一致，垫铁表面粗糙度要求不高于 6.3,以本机组为例，270 块垫铁加工，大约需要 10 天时间。

平垫铁研磨完成并加工完成后，平垫铁与可调垫铁之间还需要研磨，要求接触面积达到 75%以上，且接触均匀。

人工凿研混凝土的方法具有较大的不确定性，对施工人员的经验和操作水平要求较高，每一块垫铁研磨后的混凝土深度不一致，且很容易出现汽轮机基础主筋妨碍垫铁研磨，垫铁研磨质量就难以控制。

1.2 砂浆垫块的安装方法

砂浆垫块的安装方法是先对汽轮机基础进行凿毛处理，露出坚实的骨料，再标出垫块具体位置，清理基架表面并调整基架的标高和扬度，基架调整完成后制作灌浆模盒，模盒制作完成后开始进行灌浆，灌浆养护 3 天后开始拆除模盒，并用千斤顶将基架与垫块脱离，并对基架与垫块接触面进行检查，基架与垫块的接触密实且接触面积达到 75%以上为合格。

采用砂浆垫块的安装方法最大的优势是人工成本，基础准备需要 20 工日，模盒加工配置需要 20 工日，灌浆需要 20 工日，基架与垫块接触检查和处理需要 20 工日。

砂浆垫块安装方法工艺简单、涉及专业较少，整个制作过程类似于混凝土浇筑，节省大量的人工

成本和时间成本，缺点是砂浆垫块对环境和温度要求较高，灌浆垫块不具备可调性，返工较为麻烦。由于本台机组对标高要求很高，轴承箱扬度要求与轴系扬度一致，轴承箱扬度和轴系扬度需要多次调整，此种方法质量和进度难以控制，不适用本台机组设计理念，在此不过多的介绍。

1.3 埋置垫铁安装方法

埋置垫铁是砂浆垫块与垫铁配研方法的结合，结合了两者的优点。埋置垫铁方法是先加工 20mm 平垫铁，将平垫铁布置在图纸要求的垫铁位置上，平垫铁用 4 个调整螺钉支撑，平垫铁底部距混凝土表面 20mm-100mm，通过 4 个调整螺钉将平垫铁找平找正，平垫铁找平找正后制作模盒，在模盒中灌浆，灌浆高度略低于平垫铁上表面。

此方法需要对混凝土基础表面进行简单凿毛，去掉浮浆层，大约需要 20 个工日；加工 20mm 平垫铁 270 块，需要 Q235 钢板 9 平米，提前加工即可，需要灌浆料 2.5 吨，支模及灌浆需要 40 工日。

埋置垫铁的安装方法操作相对简单，安装方法简单易学，质量和进度很好控制，也是现在应用最为广泛的一种基础垫铁安装方法。

1.4 垫铁安装方法选用

通过以上方法对比分析，埋置垫铁安装方法具有操作简单、质量可控、工期较短、成本不高的特点，本台机组决定选用埋置垫铁安装方法，并经得厂家设计人员的同意，由于是更改了图纸设计要求的垫铁安装方法，为保证垫铁安装质量，编制了埋置垫铁安装的实施方案。

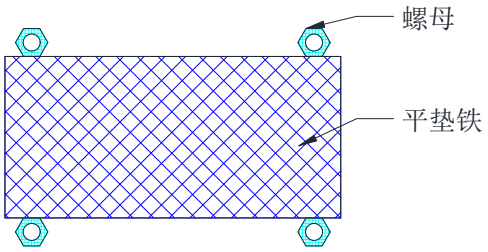
2 埋置垫铁安装实施步骤

1、基础凿毛，去除表面浮浆层，同时保证预埋平垫铁底部距基础凿毛面的灌浆层厚度应为 20mm～50mm。基础毛面需清理干净，不得存有油污或者杂物。

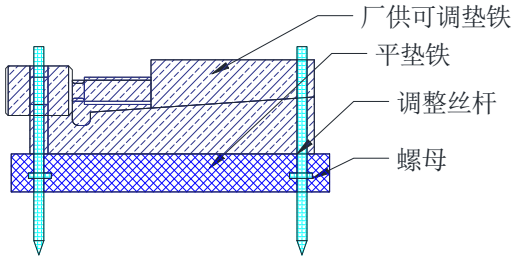
2、按照厂家设计图纸，在汽轮机基础上画出每块垫铁准确位置。

2.3 灌浆料采用巴斯夫 MF870 无收缩灌浆料，灌浆料强度能达到 80MPa，养护期为 7 天。

3、预埋垫铁采用 20mm 厚平垫铁，在平垫铁两边焊接螺母（如图二所示），使用丝杆对垫铁标高进行调整（如图三所示）。



图二 平垫铁示意图



图三 垫铁调整示意图

5、各垫铁沿轴线方向均应按一定的标高调整布置，布置标高与计算值相差小于 0.50mm，布置时应将厂供可调垫铁调整在中间位，保证垫铁抬高或降低的调整余量，为了保证垫铁与基架的接触，垫铁布置时还应考虑纵向扬度与轴颈扬度基本一致。

6、预埋平垫铁灌浆前须清理干净，不得沾有油污或者起锈皮现象。

7、垫铁布置完成后制作模盒，对其进行灌浆，灌浆过程严格按照灌浆料厂家说明书进行，同时对平垫铁底部进行刮气泡处理，刮气泡的工作要与灌浆工作保持同步。

8、灌浆养护期过后，反向旋转调整丝杆，使其退出一至半圈，而后沿平垫铁上表面切除调整丝杆。

9、复测平垫铁的标高、纵向水平扬度和横向水平扬度，保证标高和扬度在标准范围内，否则，砸掉灌浆层重新进行灌浆，灌浆层需清除干净并露出原混凝土毛面。

10、巴斯夫 MF870 无收缩灌浆料灌浆后 3 天强度就能达到 60MPa，灌浆料养护期满后就可以进行平垫铁与垫铁接触面研磨，预埋平垫铁与可调垫铁之间的接触应密实，0.03 mm的塞尺不入，接触面积达到 75%以上，接触均匀。

3 埋置垫铁安装过程控制要点

1、垫铁标高测量要准确，测量仪器必须经检验合格，多次测量验证测量的准确性。

2、平垫铁标高要测量准确，按照图纸设计要求，标高误差在 0.50mm 范围内，纵向扬度与轴颈扬度基本一致，横向水平扬度控制在 0.20mm 范围内。

3、灌浆前基础毛面浸润 24 小时以上，且灌浆前基础毛面不能有明水。

4、垫铁灌浆模盒制作牢固，密封性要好，防止出现漏浆问题。

5、垫铁灌浆料强度高于基础混凝土强度，选用质量较好的无收缩型灌浆料。

6、灌浆料配合比严格把控，灌浆料搅拌严格按照厂家说明书执行，在空气潮湿地区，配合比尽量取厂家要求的下限，在空气干燥地区，配合比尽量取厂家要求的上限。

7、灌浆过程中要消除平垫铁底部可能存在的

气泡，主要用细铁丝进行来回刮除。

8、垫铁灌浆完成后，要严格按照灌浆料厂家说明书要求做好灌浆养护工作，防止出现强度不够或者开裂现象。

9、灌浆料养护 7 天，并制作同养条件下试块，试块及时送检，送检试块强度报告必须符合厂家技术指标并满足设计要求。

4 垫铁安装过程容易出现的问题

1、垫铁安装位置不准确，导致垫铁与#1、#2、#4 轴承箱基架下部的筋板不能完全接触。

2、垫铁标高计算错误，导致轴承箱及基架标高超标，无法靠调整垫铁调整。

3、平垫铁下部灌浆层厚度不够或者厚度超标。

4、垫铁灌浆前基础浸润养护存水过多，导致灌浆强度不达标。

5、垫铁灌浆后的养护不到位，导致灌浆料强度不达标或者开裂现象。

6、垫铁灌浆过程中碰到垫铁，是垫铁位置发生偏移，导致垫铁标高和扬度不符合设计要求。

5 结束语

本台机组通过采用埋置垫铁安装方法，汽轮机垫铁安装工作共安排施工作业人员 10 人，基础凿毛用了 2 天时间，垫铁布置、调整和灌浆仅用了 8 天时间，垫铁灌浆养护要求 7 天，由于垫铁布置是分批进行，垫铁安装、灌浆养护与基架就位无缝衔接，整个垫铁安装过程质量可控在控，操作简单，施工进度也较为理想，垫铁灌浆料强度均达到厂家要求的 80MPa，比汽轮机基础混凝土强度 40MPa 和二次灌浆强度 60MPa 均要高出不少，强度完全满足机组设计及使用要求。所以，埋置垫铁的安装方法操作简单、质量和进度相对好可控，大量节省人工成本。

参考文献：

[1]DL/T 5210.3-2018，电力建设施工质量验收规程 第3部分：汽轮发电机组；

[2]穆遵明，《汽轮机采用砂浆垫块与垫铁的安装对比》，四川电力技术，第30卷第1期：84-86页

[3]杨成海，《汽轮机垫铁安装的比较》，新疆电力技术，2009（1）：66-67页

作者简介：

陈芳权（1988），男，江西高安，大学本科，工程师，从事汽轮机安装与检修，E-mail：陈芳权198807@163.com

火电机组磨煤机动态分离器自动调节控制策略及效果研究

郑熙

（国能黄金埠发电有限公司，江西 上饶 335101）

摘要：对火电机组来说，合适的煤粉细度，有利于降低不完全燃烧热损失，提高锅炉效率，降低磨煤机电耗，也有利于降低 NOx 的生成量。近几年许多火电厂进行了磨煤机动态分离器改造以更好地调节煤粉细度。但由于当前煤粉细度的在线测量无论从经济成本、准确度、稳定性都存在较大局限，动态分离器转速只能通过运行人员手动设置，无法适应变负荷、变工况下的自动调节，不能充分利用动态分离器的优势。本文通过对动态分离器频率控制策略的研究与应用，实现了磨煤机动态分离器频率自动，经过半年多地观察证明该策略能显著降低磨煤机煤粉细度，提高了锅炉效率，降低了 NOx 生成，也大大降低了运行人员劳动强度。

关键词：动态分离器；火电机组；控制策略；煤粉细度

0 引言

在火力发电厂中，磨煤机分离器是制粉系统的关键部件之一，其主要作用是对磨煤机磨制出来的煤粉进行分选，将磨煤机磨出的较粗的不合格煤粉分离出来返回磨内重新研磨，合格的煤粉经煤粉管道直接送入锅炉燃烧。近几年来，随着火电厂配煤掺烧比例的增加导致煤质下降，造成锅炉着火延迟，燃烧不稳定，锅炉经济性降低，甚至影响锅炉安全可靠运行，加上环境问题愈加受到人们重视，要求从燃烧的角度降低 NOx 生成，因此提高入炉前煤粉细度，尽可能达到均匀的颗粒度分布有着重要意义，为此，不少发电厂对磨煤机进行了动态分离器的改造。

与静态分离器相比，动态分离器由垂直动叶片组成的旋转转子及与其同轴的带回粉锥的静叶片（导向百叶窗）组成，利用空气动力学和离心力将细煤粉从粗煤粒中分离出来，分离效率、煤粉均匀性均较静态分离器有所提高。

1 存在的问题

江西某电厂#1、2 机组锅炉是由上海锅炉厂引进技术制造的国产超临界参数、变压运行、螺旋管圈直流锅炉，单炉膛、一次中间再热、四角切圆燃烧方式、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊Π型结构、露天布置的燃煤锅炉。锅炉型号：SG1913/25.4-M966。每台锅炉配备六台由北京电力设备总厂生产的 ZGM113 型液压变加载中速磨煤机，磨煤机转速为 24.2rpm，配套驱动电机额定功率：630kW，电机额定电压：6kV，电机额定电流：75.4A。磨煤机分离器采用北京电力设备总厂ZDXF113型动态分离器，通过调整变频器控制1台交流变频电动机带动减速箱的齿轮进行传动来驱动，电机额定频率50Hz,额定转速1500r/m,如图1所示。

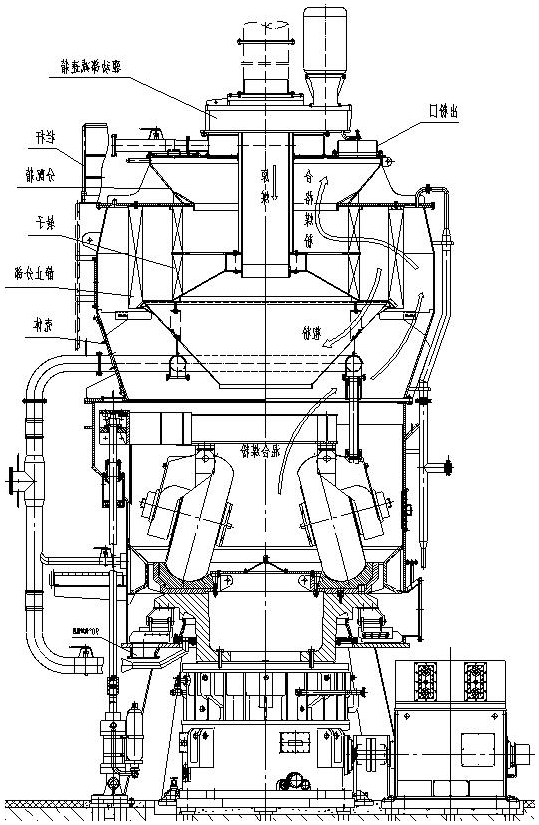


图1.磨煤机动态分离器结构图

运行人员通过DCS设定变频器频率来控制动态分离器的转动速度，从而改变煤粉细度，以对锅炉燃烧状态进行调整。由于改变动态分离器转速是运行人有手动进行操作，而火力发电机组随着负荷不断变化，运行工况也在随着不断改变，运行人员设定好分离器频率后，通常不会或难以随时主动进行调节，当现场工况变化，设定频率过高会导致煤粉过细，过细的煤粉细度，又会导致磨煤机单耗高、制粉出力小、内部部件磨损大、磨煤机振动大及再热汽温过低等现象，而煤粉细度过粗会增大高温腐

蚀的风险[1]，同时也失去了动态分离器本身“动态”的优势。

因此，将动态分离器频率投入自动控制，将有效解决运行人员对动态分离器频率调节的及时性问题。

2 动态分离器自动控制策略研究

动态分离器控制的实际被调量是煤粉细度，而目前行业内锅炉煤粉细度实时、在线测量需要对制粉系统进行大量改造，成本较高，且测量的准确度、分辨率[2]、稳定性还难以满足实际需要，因此笔者考虑对动态分离器自动采用开环的控制模式。

2.1 根据给煤量实时对动态分离器频率进行调节

首先以A磨为例进行磨煤机动态分离器特性试验，维持给煤机出力、通风量、加载力等参数不变，通过改变动态分离器的频率，摸索得出动态分离器频率与煤粉细度对应关系，如图2，可见A磨动态分离器对煤粉细度有较好的调节作用，随着动态分离器频率增加，磨煤机出口的煤粉细度R90呈降低趋势，在25~30Hz区间尤为明显。

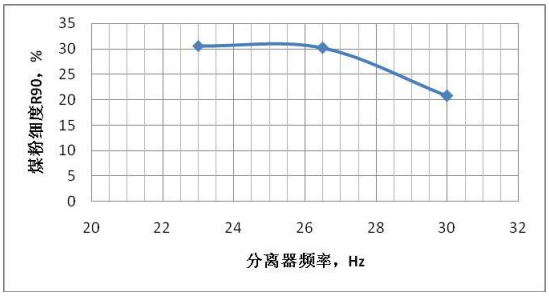


图2. 分离器频率与煤粉细度对应关系

通过与锅炉专业运行人员沟通，确定动态分离器指令调节范围为10Hz-35Hz,当磨煤机煤量超过16t/h，基准指令变为23Hz，运行中每增加1吨煤，频率增加0.1Hz，运行人员可用偏置进行调整，逻辑原理如图3。

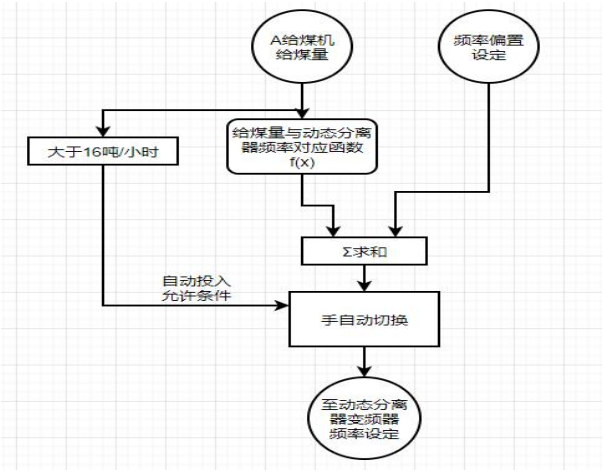


图3. 分离器频率随给煤量变化逻辑原理图

2.2 设置磨煤机电流高降低分离器频率联锁保护

为防止磨煤机煤粉过细导致磨煤机单耗高，振动大，影响设备运行安全，设置有关联锁保护：当磨煤机电流大于52A，频率降至20Hz，直到电流降至45A以下，频率恢复当前煤量对应的频率值；当磨煤机电流大于55A，频率降至18Hz，直到电流降至45A以下，频率恢复当前煤量对应的频率值，逻辑原理如图4。

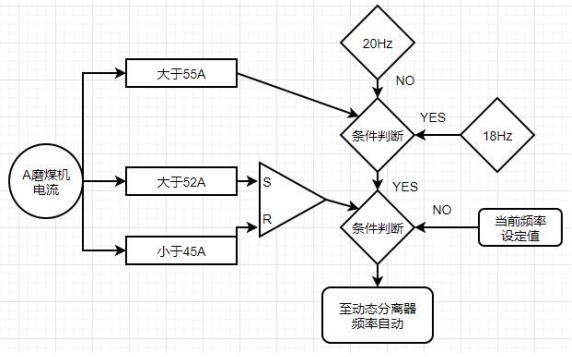


图4. 磨煤机电流高联锁降低分离器频率保护

2.3 设置快速升负荷降低动态分离器频率逻辑

为了提高AGC响应速度，在快速升负荷时，充分利用磨煤机里的煤粉加大出粉量，提高升负荷响应速率，设置以下逻辑：当负荷指令瞬间增幅超过50MW，动态分离器频率自动减小至20Hz，若15分钟内负荷指令未再次发生瞬间增幅超过50MW的情况，各磨分离器指令恢复当前煤量对应的频率值，逻辑原理如图5。

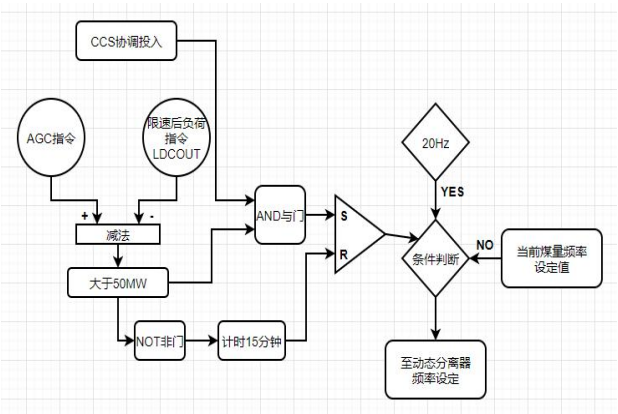


图5. 快速升负荷降低分离器频率逻辑原理

3 应用效果

该电厂磨煤机分离器自动逻辑实施后，经过半多时间的运行测试，从化验班调取近一年的煤粉细度R90数据进行比对分析，形成的变化图标如图X所示。可见，在自动逻辑投入后，平均煤粉细度R90有了明显的降低，改善了锅炉燃烧，降低了磨能耗，同时大大减少了运行人员的操作量，改善了磨煤机动态分离器频率调节的及时性，对其他火电机组具有较好的借鉴意义和推广价值。

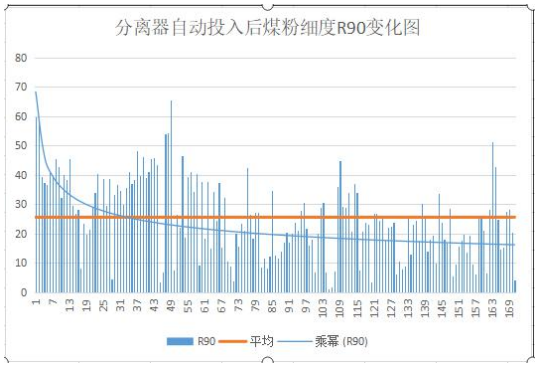


图6. 该厂近一年煤粉细度R90对比

参考文献：

[1]王海,孙毅,朱明泽.中速磨制粉系统煤粉细度优化试验.黑龙江电力.2019,41(5),2015.

[2]张琳,周大慧.基于灰色模型的锅炉煤粉细度测量的不确定度评定.安徽工业大学学报(自然科学版),2020,37(4):351-355.

作者简介：

郑熙（1989），男，学士，工程师，主要从事发电厂热工自动控制优化工作，E-mail：362626870@qq.com

一起胶球清洗装置收球异常诊断及处理

肖承明

（国家能源集团江西电力有限公司，江西 南昌 330029）

摘要：650MW 机组运行中凝汽器一侧胶球清洗装置出现收不到胶球的异常情况，通过开展现场验证实验摸清收球异常的特征参数，现场逐一排查原因，确定收球异常原因为胶球清洗装置进、出水管路堵塞引起，制定在线检查方案并实施后，准确找出胶球堵塞部位予以疏通，恢复胶球清洗装置的正常投运，在较短的时间内消除了影响机组经济运行的重大隐患，为发电厂胶球清洗装置异常在线处理提供了宝贵的经验。

关键词：汽轮机；凝汽器；胶球清洗装置；收球异常；诊断；处理

0 引言

某发电公司建设有 2 台 650MW 超临界发电机组，汽轮机采用双背压凝汽式汽轮机，凝汽器采用双流程循环水系统，每个循环水流程设计一套胶球清洗装置，机组运行中同时投入两套胶球清洗装置运行，保持凝汽器不锈钢管的清洁。衡量胶球清洗装置投运效果的指标为胶球收球率，电力行业对胶球收球率的评价标准为：＞90%合格；＞94%良好；＞97%优秀[1-2]，公司两台机组近年来胶球清洗装置投运情况良好，胶球收球率大于 97%，达到优秀的水平。

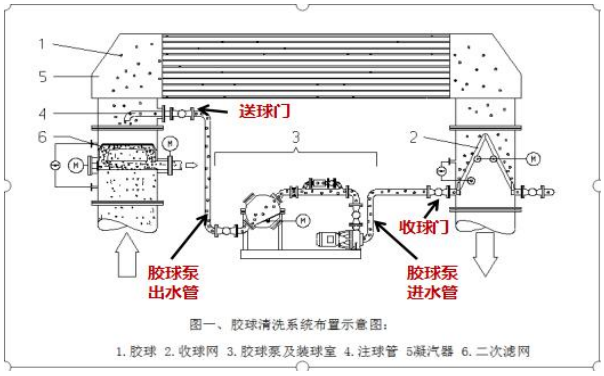
2021 年 03 月底，维护人员对#1 机组进行胶球清洗装置清点胶球定期工作，发现#1 机凝汽器 B 流道胶球清洗装置收球为 0 个，凝汽器 A 流道胶球清洗装置收球为 1450 个（投球 1500 个），#1 机凝汽器 B 流道胶球清洗装置收球出现异常。

文献表明[3-7]，胶球清洗装置收球率低的主要原因为收球网故障、胶球泵故障、胶球浸泡不足、凝汽器水室积空气等。

1 设备介绍

1.1 凝汽器胶球清洗系统是发电厂汽轮机系统的一个重要辅助系统，主要包括胶球泵、装球室、集球阀、收球网、胶球输送管路等设备（见图一），主要作用是借助水流的作用将大于凝汽器钢管内径的海绵胶球挤进凝汽器钢管，对凝汽器钢管进行擦洗，维持凝汽器钢管内壁清洁，保证凝汽器设计换热效率不下降，从而保证凝汽器的端差和汽轮机排汽压力在规定的范围以内；同时避免凝汽器钢管内壁腐蚀，改善运行条件，延长机组寿命。

1.2 公司 1、2 号机组凝汽器胶球清洗系统为上海达极水技术工程有限公司配套、德国生产，主要技术参数：厂家设计收球率为≥95%，胶球投入系统后连续 1 个月内不更换胶球；收球网为开关型油缸驱动，收球网网板为隔栅型，隔栅间隙 7mm；运行水阻为<300mmH20；胶球泵流量为 10-25kg/s、出口压力为 1.1－1.4bar；胶球规格为Φ26；凝汽器钢管规格为Φ25×0.5。



图一 胶球清洗系统设备示意图

2 现场验证实验

2.1 #1机B流道胶球清洗装置投运实验

为了验证#1 机凝汽器 B 流道胶球清洗装置是偶发因素跑球还是装置存在缺陷导致跑球，有必要运行和检修人员一起到现场再试投一次 B 流道胶球清洗装置，试投准备投放 500 个胶球，按照胶球清洗厂家的规定，首先将 500 个胶球放入装球室进行浸泡，浸泡时间为 48 小时，两天后检查胶球浸泡良好，胶球均沉入装球室底部，首先由运行人员和检修人员共同检查 B 流道胶球清洗装置收球网确在关闭状态，手动盘胶球泵转子灵活无卡涩，检查胶球泵轴承油位正常，再由运行人员启动胶球泵运行，检查胶球泵运行正常，通过观察孔检查装球室内胶球翻滚浮沉，最后由运行人员开启集球阀将胶球送入循环水进水管，随循环水进入凝汽器清洗不锈钢管，试投过程中检修人员现场监视收球网是否存在

误开情况，专业技术人员现场通过观察孔观察装球室胶球流通情况。

2.2 试投结果

#1 机 B 流道胶球清洗装置投运后，汽机专业技术人员现场通过观察孔观察装球室开始还能看到胶球在流动，2 分钟以后就基本上看不到一个胶球了，投运实验持续进行了半小时，又进行了 1 小时的收球，整个过程检修人员监视收球网未发生自开情况，胶球清洗装置收球结束后打开装球室进行检查，装球室一个胶球也没有收到。

2.3 验证实验结果分析

验证实验结果表明，#1 机 B 流道胶球清洗装置投运时胶球进入凝汽器后就再也没有回到装球室，胶球收球率为 0%，胶球清洗装置存在重大跑球缺陷。

3 胶球清洗装置收球异常原因排查

3.1 收球网误开跑球排查

根据厂家说明书介绍，胶球清洗装置投运过程中，一旦收球网差压大于 50mba,胶球清洗装置收球网将强制打开，进行收球网反冲洗，此时投运的胶球毫无遮拦随循环水流走，全部跑到冷却水塔填料层，胶球会跑得一个不剩。

查阅 DCS 历史数据，#1 机凝汽器 B 流道胶球清洗装置收球网差压数值历史趋势一直在 20mba 左右，最大不超过 30mba，不会发生差压大收球网自开的情况。

3.2 收球网关闭不严跑球排查

胶球清洗装置投运过程中，如果收球网关闭不严,胶球将从收球网不严密处跑球，随循环水流跑到冷却水塔填料层，长时间的运行，胶球将逐渐减少，最后胶球全部跑掉。

会同检修人员一道，对#1 机凝汽器 B 流道胶球清洗装置收球网进行手动开关试操，现场检查收球网开、关均正常，检查收球网在关闭状态阀杆已关闭到位，外观上看收球网已关严。如果是收球网不严跑球，有一个时间过程，不会一下胶球就跑光，胶球装置投运时装球室应该能看到胶球流动，从验证实验情况看，胶球是一下就跑光了，收球网关不严跑球可以排除。

3.3 收球网内部故障跑球排查

如果收球网传动杆连接处松脱，收球网实际位置未变保持开启位置，则会发生胶球全部跑走；或者收球网格栅大量破损，胶球也有可能从收球网格栅破损处跑走。

为了排查胶球是否从收球网跑走，检修人员穿雨衣进入冷却水塔运转层，逐个区域掀开部分除水器检查，看填料层上是否有胶球积存，经过全面检查，填料层只看到个别磨损变小的胶球，没有看到完整正常的胶球，收球网跑胶球也予以排除。

3.4 装球室集球阀关闭不严收不到球

胶球清洗装置收球过程中，如果集球阀关闭不严,胶球将一直随循环水循环流动，装球室收不到胶球。

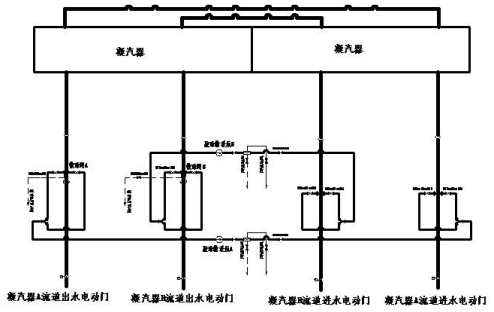
检修人员对集球阀进行检查，集球阀开、关动作均正常，在关闭状态下实际位置关闭严密，不会跑胶球。

如果集球阀关闭不严收不到球，胶球清洗装置投运时装球室应该连续不断的有胶球流过，与验证实验的结果不相符。

从上述情况来看，集球阀关闭不严收不到胶球也应予以排除。

3.5 排查结论

由双流程凝汽器循环水系统简图可知（图二），将以上设备跑球排除外，胶球在整个清洗流通过程中就只剩下凝汽器水室、凝汽器不锈钢管、胶球装置进水管和出水管了。凝汽器水室集空气会造成部分胶球浮在水面上进入不了凝汽器，只会造成部分收不到球，可以排除，凝汽器不锈钢管堵球也是只会部分球收不到，排查的重点就剩下胶球装置进水管和出水管了。



图二 双流程凝汽器循环水系统简图

4 胶球清洗装置进、出水管检查

4.1 检查目标确定

如果胶球清洗装置进、出水管路发生堵塞，胶球经胶球泵打出装球室后进入不了凝汽器或流经凝汽器出来后进入不了胶球泵（见图二），胶球清洗装置投入运行后装球室内的胶球只出不进，很快装球室的胶球就会打空，从理论上看这种可能性比

较大，这种情况也与验证实验结果相符。

4.2 检查方案确定

机组运行中要对胶球清洗装置进、出水管路进行检查时，可以利用带压的循环水对胶球清洗装置注水进行管路流通实验，具体方案为：先关闭#1 机 B 流道胶球泵#1、#2 收球门和#1 机 B 流道胶球分配器后#1、#2 送球门，四个阀门关闭以后则#1 机 B 流道胶球清洗装置完全与循环水系统隔离出来，然后拆除#1 机 B 流道胶球分配器观察孔，使胶球分配器形成开口作为观察点，再稍开#1 机 B 流道胶球泵#1 收球门，循环水通过#1 收球门注入胶球清洗装置进口管路，观察胶球分配器开口处是否有水流出，水流是否带压，即可以判断该段管路是否堵塞，检查完该段管路后关闭 B 流道胶球泵#1 收球门。以此例推，再逐个试开#1 机 B 流道胶球泵#2 收球门和#1 机 B 流道胶球分配器后#1 或#2 送球门，完成全部胶球清洗装置进、出水管路是否发生堵塞的排查。

4.3 检查实施

2021 年 4 月 12 日，按照#1 机 B 流道胶球清洗装置进、出水管检查方案，检修上票进行检查，运行做好安措后配合检修进行检查，在试开#1 机 B 流道胶球分配器后#1 送球门时，发现 B 流道胶球分配器开口处只有少量的静压水流出，其余三处阀门试开时胶球分配器开口处均有较大的带压水喷出，由此可以判断出#1 机 B 流道胶球分配器后#1 送球门至胶球分配器之间管道堵塞，检修人员拆下这段管路用高压水进行管路冲洗，结果冲洗出大量的胶球和一些破碎的冷却塔填料，还有几根断裂的喷淋头支架（见图三）。恢复管路后再次试投#1 机 B 流道胶球清洗装置，在装球室观察孔可以看到连续的胶球流动，收球后清点胶球，胶球全部收回，#1 机 B 流道胶球清洗装置已恢复正常状态。



图三 现场清理出来的胶球及杂物

5 收球异常原因分析及防范措施

5.1 原因分析

由图三可以看到，清理出来的杂物有几根较长的喷淋头支架管，而胶球清洗装置进、出水管的管径为 110mm，在分配器进口有一个 90° 的弯头，长的喷淋头支架管被卡在弯头处，随着时间推移，一些破碎的填料和胶球也被阻拦在此，越积越多，最后管道弯头处被胶球和碎填料完全填满，胶球失去流通面积，由于循环水压力不高，胶球内部有很多孔隙，聚集的胶球群不能构成一道密实的阻力墙，前后不会产生大的压差，胶球群无法被循环水冲走，投入的胶球全部聚集在管路中，导致收球为 0 个。

5.2 防范措施

为了防止冷却塔喷淋设备和填料碎片进入胶球清洗系统，要从源头上加以控制，一是定期检查冷却塔喷淋头淋水状况，发现喷淋头直喷水时及时更换喷淋头；二是对填料实行寿命管理，到期的填料及时进行更换，防止填料碎片掉落进入循环水系统；三是胶球清洗装置每次投运后开启收球网进行反冲洗，防止杂物聚集在收球网上进入胶球清洗系统；四是定期清理循环水泵入口滤网，防止杂物进入循环水系统【8-10】。

6 结论

（1）运行中发生胶球清洗系统收球异常时首先要开展现场验证实验，深入现场，摸清丢球的实际状况，以便对症诊断分析，确定故障范围，避免盲目处理。

（2）闭式循环水系统没有二次滤网过滤杂质，要特别注意控制杂物进入循环水系统，防止胶球清洗系统管路堵塞收不到球。

（3）胶球清洗装置停止投运对机组的经济运行影响较大，机组运行中能够隔离检查的设备应及时逐一检查，迅速排除故障，减少胶球清洗装置的停运时间。

（4）胶球泵进、出口没有设计压力表计，发生胶球清洗装置进、出口管道堵塞时不易判断，建议增加就地表计，通过压力下降快速诊断管道堵塞异常。

参考文献：

[1]肖承明.循环水泵变极后凝汽器胶球清洗装置存在的问题与对策[J].华电技术,2012,34(10):49-51+79.

[2]高亚敏.凝汽器胶球清洗装置技术可行性及经济性分析[J]. 热力透平,2018,47(03):213-216+224. DOI:10.13707/j.cnki.31-1922/th.2018.03.01

[3]张金果.汽轮机凝汽器胶球清洗装置收球率低的原因与解决方法[J]. 内燃机与配件,2018(18):232-233.DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2018.18.124.

[4]王且兵,郭剑锋. 胶球清洗装置收球率低分析处理[C]//.第十三届电力工业节能减排学术研讨会论文集.[出版者不详],2018:210-212.

[5]吕欢欢.探析提高凝汽器胶球清洗装置收球率的措施[J].内燃机与配件,2017(17):125-126. DOI:10.19475/j.cnki.issn1674-957x.2017.17.069.

[6].胡伟,王守强.胶球清洗系统收球率低的原因分析与解决对策[J]. 华北电力技术,2012(05):60-62.DOI:10.16308/j.cnki.issn1003-9171.2012.05.021.

[7]赵小波,倪加伟.胶球清洗收球率低的原因分析及处理[J]. 科技资讯,2019,17(34):82+84.DOI:10.16661/j.cnki.1672-3791.2019.34.082.

[8]陈荣虎.100MW汽轮机组胶球清洗装置存在的问题与对策研究[J]. 科技风,2016(18):88.DOI:10.19392/j.cnki.1671-7341.201618074.

[9]周磊.#3机凝汽器胶球清洗收球率低的原因分析及解决措施[J]. 机电信息,2016(21):132-133.DOI:10.19514/j.cnki.cn32-1628/tm.2016.21.072.

[10]王谦.330MW机组凝汽器胶球清洗装置收球率低原因分析[J].科技展望,2016,26(05):55.

作者简介：

肖承明（1972），男，江西萍乡人，本科学历，高级工程师职称，研究方向：汽轮机运行优化，E-mail：jjpcxcm@163.com

风电机组偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙测量及调整方法探究

朱定福

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：本文针对某风电场风电机组偏航减速器驱动齿断齿的原因进行了分析，介绍了偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙测量的两种方法，并对偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙的调整方法进行了探究和验证。

关键词：偏航齿圈；驱动齿；间隙调整

1 引言

风电机组出现偏航齿圈与减速器驱动齿啮合不良的情况会造成偏航减速器偏载，加速偏航减速器驱动齿齿面磨损，在大风高负荷运行工况下长时间偏载运行甚至会造成齿面因承受应力过大而出现断齿[1-2]。因此，研究偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙测量及调整方法，及时纠正偏航齿圈与减速器驱动齿啮合不良的问题，对确保风电机组偏航系统安全可靠运行具有重要意义。

2 故障现象及原因分析

某风电场进行风机点检作业时发现一台偏航减速器有断齿，如图 1 所示。通过对断齿检查发现，断裂的纹路是从齿的上部分开始，断裂的位置为三分之二的齿面。从齿轮黏合痕迹来看，上端接触面积大于下端接触面积，初步判定为偏航减速器偏载导致[3]。检查偏航齿圈与驱动齿的啮合情况，发现啮合部位主要为齿面的上半部分，测量齿面间隙上部分为 0.90mm，下部分为 1.05mm（间隙正常范围是 0.6-1.0mm），可以看出存在偏载现象。将偏航减速器拆除后，检查减速器底座不存在变形、损坏现象，可排除出厂安装不到位导致啮合不良。综上所述，可以确定该台偏航减速器断齿是由偏航减速器偏载导致。



图1 偏航减速器断齿

3 啮合间隙的测量方法

更换新的偏航减速器后，首先需要测量偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙是否在正常范围内。以下介绍两种测量方法。

3.1 压铅丝测量法

先找出偏航齿圈3个绿齿（最大齿厚位置），将铅丝弯成U型，压到三个绿齿任意的两个齿之间，偏航大齿上下各一个，如图2所示。然后手动偏航驱动偏航电机，让铅丝进入偏航大齿与减速器驱动齿的啮合面进行挤压[4]。将压过的铅丝收集好，标记上下，将铅丝压扁的两边重叠起来，最薄的面与最薄的面相叠合，用卡尺测量间隙，间隙要求标准为0.6～1.0mm之间，若超过该范围则需调整啮合间隙。

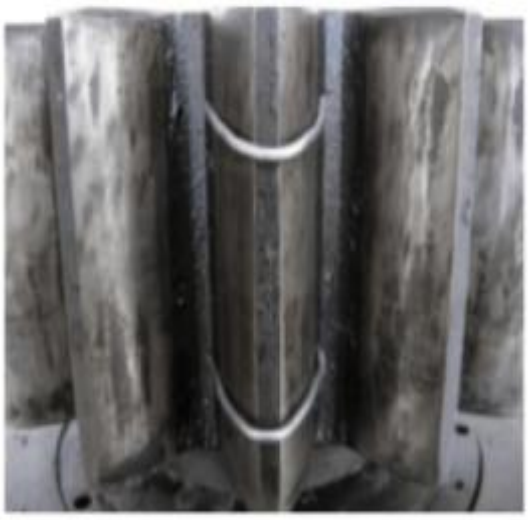


图2 压铅丝测量法

3.2 塞尺测量法

先找出偏航齿圈3个绿齿（最大齿厚位置），然后手动偏航，让减速器驱动齿与三个绿齿的中间齿完全啮合，如图3所示。用塞尺测量绿齿与减速器驱动齿啮合面的间隙，左侧间隙加右侧间隙相加要求标准在0.6～1.0mm之间，若超过该范围则需调整啮合间隙。

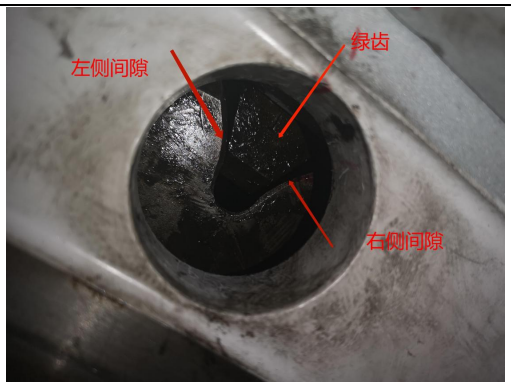


图3 塞尺测量法

4 啮合间隙的调整方法

当用压铅丝测量法或塞尺测量法测量偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙不符合标准时，则需要进行调整偏心距[5]。

首先用17号内六角套筒等工具将减速器与机舱的固定螺栓拆解，然后解下偏航电机保护罩，抬起抱闸手柄，转动偏航电机风扇，如图4所示。由于偏航减速器驱动齿与偏航齿圈啮合后驱动齿是固定不动的，当顺时针（逆时针）旋转电机风扇，偏航减速器本体则是逆时针（顺时针）旋转[6]。通过转动偏航电机风扇带动偏航减速器向左或向右转动一个螺栓孔的距离后，再用4个螺栓将其固定，用塞尺测量间隙是否在标准内，若不符合则继续调整。若超过该范围则需调整啮合间隙。



图4 啮合间隙的调整

5 调整效果检验

将偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙调整至正常范围内后，通过偏航齿圈与减速器驱动齿接触面积判断偏航减速器有无偏载，检验调整效果。先用抹布将驱动齿和偏航齿圈上的润滑油清理干净，然后用毛刷将红丹漆均匀涂抹在减速器驱动齿任意三个齿面上，手动偏航驱动偏航电机，检查同一个齿啮合后其正反两面的接触面积，看驱动齿有无偏载现象。如图 5 所示，啮合面积覆盖整个齿面，说明啮合情况良好。



图5 调整效果检验

6 结语

风电机组偏航齿圈与减速器驱动齿啮合是否良好直接影响到偏航减速器使用寿命，根据本文阐述的方法定期测量偏航齿圈与减速器驱动齿啮合间隙，对存在偏载现象的偏航减速器及时调整偏心距，可以避免造成偏航减速器断齿损坏，节约部件更换成本，减少风电机组故障电量损失。

参考文献：

[1]韩克信,李建力. 偏航减速器损坏原因分析及预防[A]. 中国农业机械工业协会风力机械分会.第七届中国风电后市场交流合作大会论文集[C].中国农业机械工业协会风力机械分会:中国农业机械工业协会风力机械分会,2020:130-135

[2]崔奎虎,郭磊. 风电机组偏航减速器损坏故障分析及解决方案[A]. 中国农业机械工业协会风力机械分会、中国可再生能源学会风能专业委员会.第八届中国风电后市场交流合作大会论文集[C].中国农业机械工业协会风力机械分会、中国可再生能源学会风能专业委员会:中国农业机械工业协会风力机械分会,2021:46-53

[3]白金亮.风力发电机组偏航系统常见机械故障原因分析[J].中国设备工程,2021(16):8-9

[4]张新旺.浅谈风电机组偏航轴承齿侧间隙及调整[J].风能,2016(05):66-68

[5]风力发电机组偏航齿侧啮合间隙的检查与调整[A]. 章滔,阳雪兵,王石林,何录忠,刘明,殷萍.风能产业（2017年10月）[C]. 2017

[6]吴一凡,张锁怀.偏航减速器行星传动系统静力学均载特性研究[J].组合机床与自动化加工技术,2014,(03):58-62

作者简介：

朱定福（1993），男，江西赣州人，本科学历，电气工程及其自动化专业，助理水动工程师，风力发电运行检修员，高级工，E-mail：1095118913@qq.com

水导冷却器改进及应用

刘晨光，王星

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 吉安 343800）

摘要：分析了某水电厂水导轴承瓦温偏高的问题，通过技术改进箱式水导冷却器结构，底部增加 50mm 高的油道，增加隔板隔离冷热油，优化油循环路线，强迫热油流经通道充分冷却，加大热量交换能力，提高冷却效率，使水导轴承运行安全稳定。

关键词：水导轴承；冷却器；改进结构；冷却效率

1 引言

某水电厂5台机组全部是由东方电机有限公司生产，前期1-4号机组（4×100MW）是全伞式结构机组，水轮机型号为ZZ440-LH-850，1992年12月全部投产；5号机组（113MW）是半伞式结构机组，水轮机型号为ZZD345E—LH—850，于2005年11月01日投产发电。电厂兼有防洪、航运、灌溉、养殖等综合效益，是江西赣南、赣北电网的联络枢纽和调峰、调频、事故备用的主力电厂。

该厂1-4号机组在多年的运行中，水导瓦温及油温偏高，水导轴承长时间超50℃运行。瓦温及油温长期过高会导致水导瓦损坏、润滑油变质等诸多问题，影响机组长期安全稳定运行。因此，对水导轴承存在的问题进行技术改造迫在眉睫。

2 水导轴承结构特点

该厂1-5号机水轮机水导轴承采用分块瓦式稀油自润滑，由水导瓦、外油箱、轴承体、冷却器等组成，冷却器在水导油槽内的轴承体下部，1-4号机为箱式结构，5号机为铜管式结构。万电运行规程规定水导轴瓦运行最高温度65℃，报警温度60℃，停机温度70℃；轴承冷却水进口压力0.1-0.4MPa，冷却水由机组技术供水提供，其结构如图1所示。水导轴承的主要作用是承受水轮机轴的径向载荷，以固定机组轴线位置，保证轴心稳定。水导冷却器的作用就是热油通过冷却器表面接触，与冷却器内的冷却水进行热交换，冷却热油，带走热量。

该厂1-4号机采用水箱式分半结构。安装在水导外油盆和内挡油筒上组成水导油槽。其主要特点是由两个相对设置的半圆形冷却器组成并相互连通，两个半圆形冷却器围成环形结构，均不是单独的冷却单元，每个半圆形冷却器均采用Q235B冷却器板材拼成的截面积为方形冷却水管，冷却水管的出水口和进水口均位于同一侧，两个半圆形冷却器的出水口和进水口分别汇集后再经法兰连接外部的进水管和排水管。

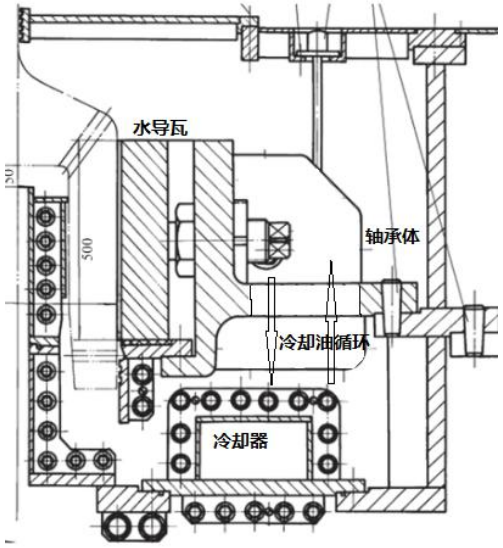


图1 水导轴承结构图

3 问题分析

水导瓦温偏高的基本原因在于运行产生的轴承热量大于冷却系统的能带走的热量，热量逐渐积累，导致瓦温持续升高。导致水导瓦温升高有很多原因，譬如轴承安装质量差、润滑油劣化、冷却水故障等，在机组检修过程中，检查轴瓦及各旋转部件磨损情况，未发现异常及磨损；在调整机组轴线、水导瓦间隙达到设计规范的优良范围内等常规措施后，水导瓦温情况未见明显效果，排除了因检修质量造成额外热量产生的可能。

通过对水导轴承及冷却器结构分析，可以看到冷却器设计结构未将油槽内的冷热油进行隔开处理，水导油槽内外油通过冷却器上端部进入到油槽内侧，热量交换不充分，不能达到设计理想状态，且因冷却器内部筋板较多，致使泥沙易淤积不易清理，最终导致运行中油循环冷却冷却效果不好。

4 改进方案

根据该厂机组检修技改五年滚动计划，2020年对1号机进行A修，并提出了更换水导冷却器计划，由于经过上次大修更换过原东电设计水导冷却器后，瓦温偏高情况并未缓解，该厂决定：与东电设计部门沟通交流，对1号机水导冷却器进行优化设计。

要求在保持接口尺寸和基本外形尺寸不变的情况下进行重新设计更换，改变其结构及增加其冷却功能，增大冷却总面积，提高冷却效果，并起到安装、拆卸快捷方便的作用，使水导轴承运行稳定。

4.1 改进油循环路线增加冷却面积

水导冷却器由原来的不带隔板结构，在冷却器顶部增加带隔板结构，水导油槽内外油的通道设在冷却器底部，并抬高其安装高度50mm，将水导油槽内冷热油之间完全隔开，油槽内外润滑油的循环通道设在冷却器底部，增加润滑油与冷却器的接触面积，提高热交换能力，即将原有的上、侧面三面冷却形式改变为上、下、侧面四面进行冷却，提高冷却效果，水导轴承油循环示意图如图2所示。

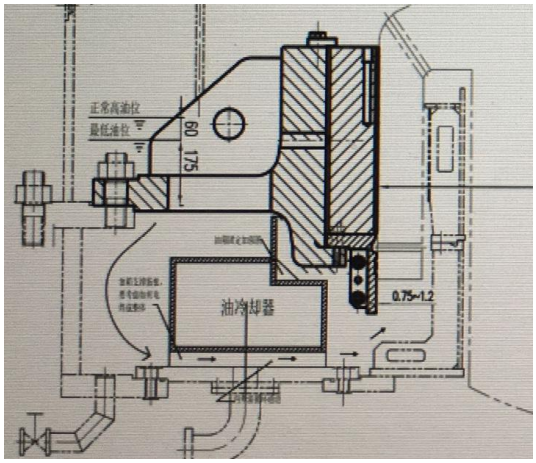


图2 改进后水导轴承水导轴承油循环示意图

4.2 提升冷却器安全稳定可靠性

冷却器继续采用分半结构，便于检修维护，但冷却器每半边结构各自采用独立结构，防止冷却器分半接口处渗漏，造成水导轴承油槽内油的浮化变质，减少机组安全隐患点。同时在新型冷却器整个底部和底板一周上增设6个清淤孔口，以便在平时检修时，通过进入顶盖内清理冷却器内污物，减少冷却器堵塞，保证冷却水流量。

4.3 冷却器安装

安装前检查：水导冷却器组合检查内外两个结合面平整无高低，内外弧面无错牙；水导冷却器整体与内油箱整体预装，检查相互的配合间隙，检查螺孔是否对齐，如果有错孔则进行处理；水导冷却器整体与外油箱整体预装，检查相互的配合间隙，检查螺孔是否对齐，如果有错孔则进行处理。

（1）装好上、下内油箱后组装水导油冷却器，要求结合面无渗漏，冷却器上面两个法兰盖无渗漏。

（2）回装水导油冷却器，清扫内、外油箱与水导冷却器的结合面，更换内、外油箱结合面上密封条，按位置标记将水导冷却器吊至安装位置，紧固把合螺栓。要求结合面紧密无缝隙，用0.05mm塞尺不能通过，允许有局部间隙，用0.10mm塞尺检查，深度不应超过组合面宽度的1/3，总长不应超过周长的20%；组合螺栓及销钉周围不应有间隙。

（3）水压试验，将水导油冷却器内的水打压升至0.40Mpa，保压30分钟压力无下降，否则应重新组装。

（4）煤油渗漏试验，内油箱和油冷却器回装后就形成了水导油槽，将水导油槽清扫干净，用齿轮油泵先注入少量煤油，只浸满水导冷却器与内、外油箱结合缝，检查结合缝是否渗油，确认后继续注入煤油，使油面浸过上、下内油箱结合缝隙为止，渗漏试验时间4个小时。

5 新水导冷却器的效果

水导冷却器更换后对1-4号机水导瓦温在2021年1月-10月连续10个月的观察测温，并对1月-10月水导瓦温极值情况进行统计。

表1:2021年1-10月1-4号机水导瓦温最高温分布情况记录表（单位℃）

机组/月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月
1号机	41.1	42.5	43.7	45.3	47.6	51.3	53.3	54.2	54.1	53.7
2号机	47.2	47.4	48.5	50.3	52.5	55.7	56.4	57.3	56.8	56.4
3号机	46.7	47.1	48.3	50.4	53.1	54.9	55.9	57.5	55.7	55.3
4号机	47.1	47.5	48.6	50.4	52.9	55.4	55.8	57.1	55.5	54.8

表2：4号机水导瓦温相同时间段瓦温极值对比

日期时间	最高水导瓦温（单位℃）			
	1#	2#	3#	4#
2021年5月28日16:02	46.5	52.7	36.1	53
2021年8月25日07:37	53.7	56.7	43.3	53.6
2021年4月1日-5月31日	49.7	55	55.7	54.5
2020年4月1日-5月31日	54.2	54.9	56.3	54
2019年4月1日-5月31日	56.1	56.3	56.2	55.4
2021年7月1日-8月31日	54.2	57.2	57.1	56.8
2020年7月1日-8月31日	57.6	57.5	57.2	57.0
2019年7月1日-8月31日	58.2	57.9	57.4	57.1

综合对比1号机水导瓦温极值、1-4号机水导瓦温相同时间段瓦温极值，更换新水导冷却器后，水导瓦温得到较大的改善，同时段的最高水导瓦温比其他机组低3℃，同时期最高水导瓦温比往年低3℃以上，说明油循环更合理，改进后水导冷却器冷却效果更好，热交换能力更强，机组稳定性得到提高。

6 结束语

此结构改进可实现水导冷却器检修在小修中迅速处理，清扫、检修方便快捷，有效降低水导瓦温3℃，提高了水导冷却器冷却效率，保证机组不因水导瓦温高引起的降负荷或倒换机组。

该厂决定将此次优化设计后的水导冷却器结构推广到其他机组实施，提高水导轴承运行的安全性和可靠性，为万电增加了发电经济效益，并起到能源保供的积极作用。

参考文献：

[1]徐志保. 铜管式冷却器在水轮机导轴承中的应用可行性分析[J]. 技术与市场, 2016, 23(1)

[2]吴仕虎, 郭鸿鹅. 瑞丽江一级水电站水导冷却器技改[J]. 云南水力发电, 2014, 30(1)

作者简介：

刘晨光（1992），男，江西南康，大学本科，工程师，研究方向水轮发电机组检修，E-mail：475861013@qq.com

王星（1984），男，江西安福，本科，高级工程师，研究方向水轮发电机组检修，E-mail：12016800@ceic.com

一种变电站三维空间内多源局部放电定位方位

吴诗优[1]，张征[1]，郑书生[2]

（1.国网江西省电力有限公司南昌供电分公司，江西 南昌 330012；2.华北电力大学，北京 102206）

摘要：以往的局部放电定位研究往往只针对单放电源，但实际变电站的环境更加复杂，时常存在多个放电源的场景。本文提出了一种使用特高频（UHF）法结合聚类算法定位变电站三维空间内多放电源的方法，解决了变电站内多个放电源和干扰源难以定位的问题。使用 4 个全向特高频天线，检测频带为 250MHz~3GHz，使用矢量网络分析仪进行扫描，天线在检测频带内的驻波比小于 2，满足后续检测要求。首先在实验室对多局放源的场景进行模拟，通过 4 个特高频天线采集信号的到达时间差（TDOA），对比了 K-mean 和 Two Step 算法的聚类效果。基于 TDOA 的正态分布特性，对更优的 Two Step 算法进行改进，提出了 3σ-Two Step 算法对 TDOA 进行处理，输出最终的 TODA 中心。使用牛顿迭代算法对定位方程组进行求解，结果表明双局放源的定位的平均误差为 0.44m，三源为 0.67m。在某实际的变电站内开展局部放电试验，提出的方法在一处支柱绝缘子和一处隔离开关定位到了电晕放电，通过使用紫外相机进行验证，得到定位的误差每处在 0.6m~2m 范围内。

关键词：变电站；局部放电定位；三维空间；多放电源；聚类算法

1 引言

局部放电（partial discharge, PD）在高压电力设备中是一种常见的现象[1]，它会降低设备的绝缘性能，长期发展可能引起设备的绝缘击穿[2,3]，带来严重的事故，因此其对电力设备的安全稳定运行具有较大的威胁[4]。

局部放电时辐射的高频电磁波，可以通过特高频（ultra-high frequency, UHF）传感器进行检测，目前这一项技术已经比较成熟[5]。通过布置 UHF 传感器阵列，得到电磁波信号到达各个传感器的时间差（time difference of arrival, TDOA），再求解双曲线交点的定位方程组就能实现局部放电的定位[6]。目前的局部放电定位研究主要是在实验室开展，试验的环境更加理想，存在的干扰信号较少，且主要针对的是单个放电源[7,8]。实际变电站内的设备较多，包括套管、变压器、变压器等，站内出现多处 PD 的概率较大，并且站内的干扰源较多也会对 PD 定位产生影响，如果不对 TDOA 进行处理，使用以往的定位方法可能失效[9]。当出现多放电源时获得的 TDOA 数据是混乱的，直接对每个 TDOA 进行求解可能出现不收敛的情况，并且将浪费大量的求解时间，因此有必要对 TDOA 进行处理然后进行方程组的求解。文献[10]开展了多放电源定位，但是将变电站进行了二维空间简化，无法进行三维空间的定位，因此定位的精度无法进行保证。

为了实现变电站内三维空间内的多放电源定位，本文首选在实验室内开展了多放电源的定位实验，使用 2 种聚类算法进行对比。根据 TDOA 的正态分布特性，处理了无效的数据，结合更优的 Two Step 聚类算法提出了 3σ-Two Step 算法，实现了多 PD 源的定位，定位的结果具有较高的精度。最后使用传感器阵列和提出的算法在实际的变电站进行应用，成功找出两处电晕放电，具有不错的定位效果。

2 变电站内局部定位原理

在三维空间内通过TDOA的方法实现定位至少需要4个天线，如图1所示。PD代表放电源，S_1~S_4代表天线，d_1~d_4代表天线和放电源的距离。以S_1天线为参考，假设电磁波信号到达它的时间为T_1，电磁波到达的时间差$t_{1i}=T_1-T_i$（i=2,3,4），可以通过高速的数字采样设备获得。定位方程组如式(1)所示，其中c为光速。当存在多个放电源时，每个放电源到达两个天线之间都有一组时间差，以双源为例，PD_1和PD_2到达天线分别有t_{1i}和t'_{1i}（i=1,2,3）这两组时间差，若能够它们分开再通过式(1)进行求解，便能得到两个放电源的坐标。

$$\begin{cases} d_1=\sqrt{(x-x_1)^2+(y-y_1)^2+(z-z_1)^2}=cT_1 \\ d_2=\sqrt{(x-x_2)^2+(y-y_2)^2+(z-z_1)^2}=c(T_1+t_{12}) \\ d_3=\sqrt{(x-x_3)^2+(y-y_3)^2+(z-z_3)^2}=c(T_1+t_{13}) \\ d_4=\sqrt{(x-x_4)^2+(y-y_4)^2+(z-z_4)^2}=c(T_1+t_{14}) \end{cases} \tag{1}$$

式(1)是一个非线性方程组，很难得到精解，目前有较多的算法能得到近似解，本文用牛顿迭代算法进行求解，将式(1)转换为式(2)的矩阵形式。牛顿迭代法的原理是将(2)在一组初值处X=[x_0, y_0, z_0, t_0]进行泰勒展开，如式(3)所示。

$$\begin{cases} f(X)=0 \\ X=[x,y,z,t]^T, F=[f_1,f_2,f_3,f_4]^T \end{cases} \tag{2}$$

$$f(X)=f(X_0)+\sum_{i=1}^{4}\frac{\partial}{\partial X^i}f(X_0)(X^i-X_0{}^i) \quad (3)$$

取一阶导以下的部分，便可以得到牛顿迭代的向量形式如式(4)所示，其中X_0为当前已知的向量，X_1为下一次迭代要求的向量，J为雅克比矩阵。每次迭代都需要更新雅克比矩阵，使结果不断地接近真实坐标$X=[x^*, y^*, z^*, t^*]$。当前后两次迭代的值小于设定的误差时停止迭代，输出近似的解向量$X_k=[x_k, y_k, z_k, t_k]$作为最后的值。

$$X_1=X_0-J^{-1}f(X_0) \quad (4)$$

$$\left|X_{i+1}-X_i\right|<\varepsilon \quad (5)$$

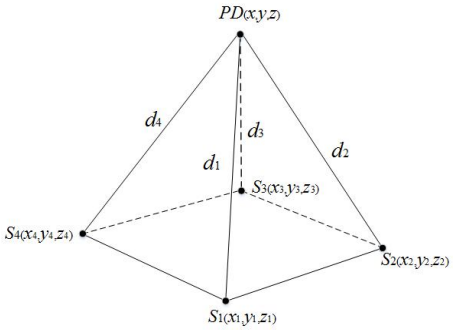


图1 局部放电定位示意图

2 实验室内多源局放TDOA采集测试

2.1 测试步骤

为了模拟实际变电站的环境，在含有较多电力设备的高压试验大厅内开展定位测试，使用4个小等角螺旋天线，其体积小并且具有较好的全向性，检测的频带为250MHz~3GHz，使用HP8753C矢量网络分析仪对天线的电压驻波比特性进行扫描，得到的结果如图2所示。频率在250MHz~3GHz范围内，天线的驻波比小于2，说明天线对此频段的信号具有很好的响应。使用Lecroy 8620A示波器对数据进行采集，其模拟带宽为0GHz ~6GHz，单通道采样频率20GHz，采样间隔为0.05ns，满足实验的精度要求。

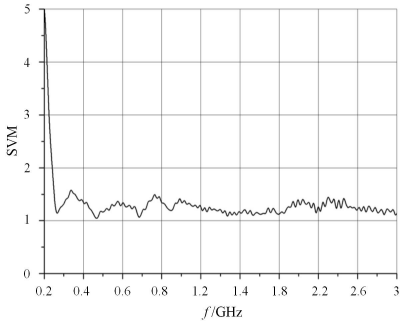


图2 天线的电压驻波比特征

为了模拟实际变电站的放电源，使用手持式静电枪在三维空间内产生UHF信号[11]，模拟放电信号的时域和频域特性如图3所示，频率中心在400MHz处，主要分布在300MHz~800MHz范围内，变电站内空气中的电晕放电信号的频率集中在300MHz~900MHz[12]，可以用此信号模拟变电站内放电的电磁波信号。

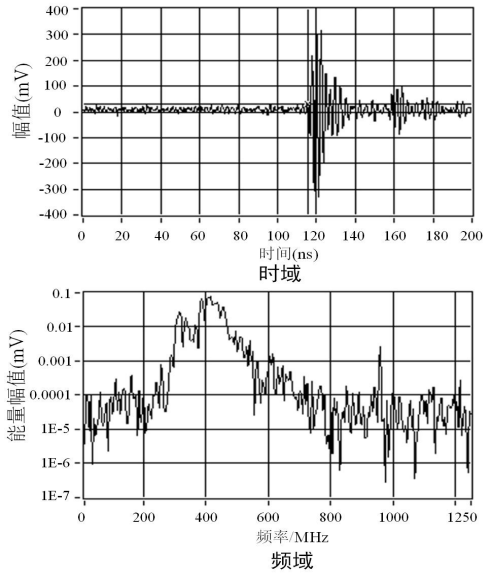
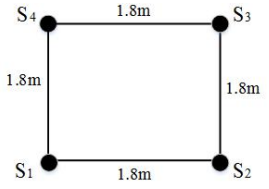
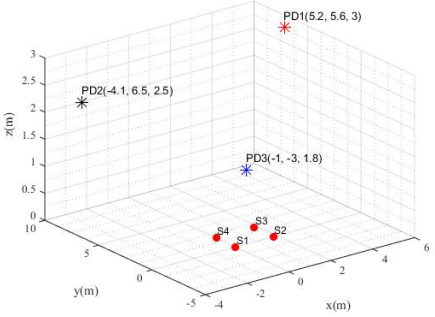


图3 模拟局放信号的时域和频域特性

定位的4个天线采用正方形的布置方式，天线之间间隔1.8m，如图4(a)所示，有学者研究表明采用此布局的天线阵列具有较高的定位精度[10]，满足实际的定位要求。定位测试的坐标位置如图4(b)所示，S_1-S_4分别代表天线，PD_1-PD_3分别代表放电源，分别开展以下测试：1)PD_1和PD_2双放电源同时放电。2) PD_1和PD_3双放电源同时放电。3) PD_1、PD_2和PD_3三放电源同时放电。



（a）天线的布置



（b）放电源的坐标

图4 天线的布置和放电源的坐标

2.2 测试结果

采用能量累积算法对TDOA进行计算，当没有放电的电磁波信号到达时能量累积非常低，信号到达时能量累积曲线出现转折点[13]，此点为信号的到达时刻。测试中当PD_1和PD_2放电，示波器获得波形如图5所示，通过计算可以得到2组TDOA，可以看出两个放电源的放电时间间隔大约在50μs。

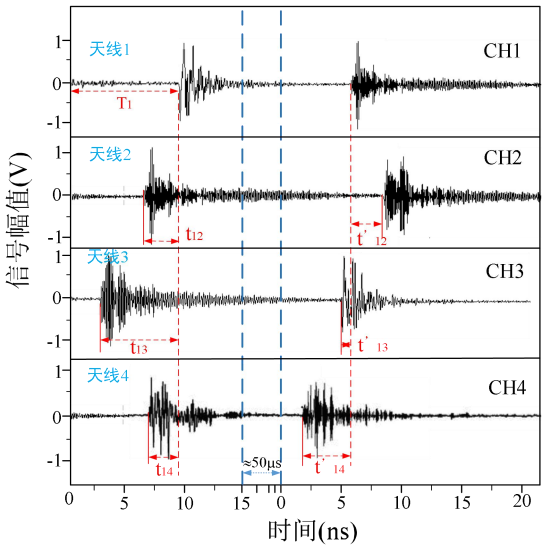
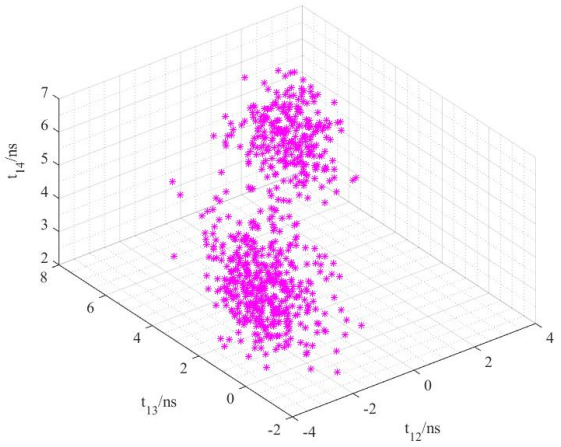
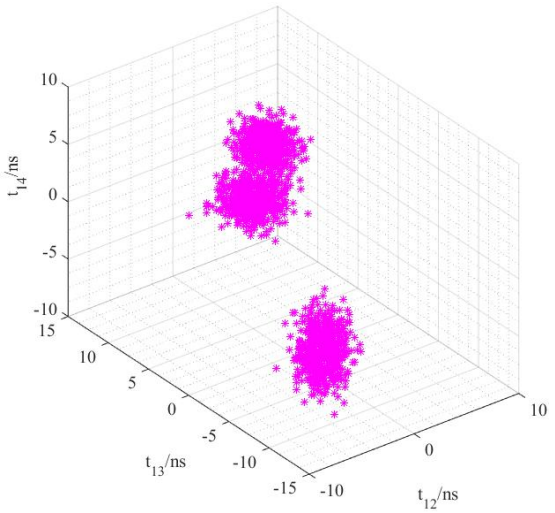


图5 天线阵列检测的UHF信号

由于测试环境噪声、信号的反射、时间差计算误差等的影响，得到的TDOA是分散的数据，但在理论TDOA处是最集中的[11]。为了获得较多的数据来表征规律，经过120s时间差数据采集。 PD_1和PD_2放电时获得的TDOA数据总共有大约有1200组，对于偏差非常大的数据首先进行剔除，如图6(a)所示，在三维坐标系中每个点的坐标为(t_{12}, t_{13}, t_{14})。PD_1、PD_2和PD_3放电时获得的时间差如图6(b)所示，由于(b)图的坐标范围更大所以点看起来更加集中，但实际双源放电的数据更加集中。



(a) PD1和PD2放电的TODA



(b) PD1和PD2放电的TODA

图6 测试时获得的TODA

3 TDOA数据的处理

采集的TDOA数据是分散的数据，每组TDOA能求解得到一个PD源的坐标，但只有那个理论TDOA才能得到正确的PD源位置，因此需要找到那个“理论TDOA”。单个PD源时的处理方式有两种：求取均值或者找概率密度中心的值。对于第一种方式偏差很大的“坏数据”对结果影响很大，会使其与理论TDOA产生很大的偏移。对于第二种方式寻找概率密度中心较困难，并且不能保证理论TDOA处是概率密度中心。多源放电的TDOA数据处理更加困难。通过算法的聚类，得到不同属于不同放电源的TDOA聚类中心是一种可行的方法，但目前的研究并未对不同的算法进行对比，得到聚类效果较好的算法。

3.1 K-mean 算法

K-mean算法是最经典的聚类算法[14]，其原理比较简单被广泛的应用在数据的聚类，对于数据的大小没有限制，具有很强的适应性。其步骤如下：

（1）人为给定聚类的类别数。

（2）根据给定的类别数，随机选择聚类中心，分别计算每个数据到各个中心的欧式距离，根据到各个中心的距离，划分到最近的聚类中心的那一类。

（3）对划分的各类求均值作为新的聚类中心，重复第2步，直到相邻两次循环的聚类中心的变化小于设定的阈值，跳出循环输出聚类中心。

将时间差数据导入使用算法进行聚类，得到的聚类中心如表1所示。

3.2 Two Step 算法

Two Step算法是在1996年提出的一种智能聚类算法[15]，其思想是“自下而上”的二层聚类，实现过程相对更加复杂，适合的数据容量没有限制，算法能自动给出最佳的类别数，但若有误也可手动输入，其步骤如下：

（1）预聚类。基于构建CF(clustering feature)树的思想，对数据中的每个点进行读取，对点较密集的区域进行小范围聚类，利用对数似然距离就近构建CF树，最后形成诸多小的子簇。

（2）子簇聚类。构建的诸多子簇通过凝聚法逐个根据对数似然距离就近合并，根据贝叶斯信息准则(Bayesian information criterion, BIC)直到达到最佳的簇数。

（3）离群数据处理。对于没有归簇的离散数据点，同样根据对数似然距离归到最近的簇中。最后输出各个簇的中心。

算法的复杂度更大，耗费的时间要比K-mean算法更长。经过两种算法处理后输出的时间差中心如表1所示，在这几次聚类中都不需要输入聚类中心个数，算法自动识别正确，而且从表1可以看出整体Two Step算法更优。

3.3 改进的 3σ-Two Step 算法

有学者的研究表明当采集的时间差数据足够多时近似满足正态分布[16]，但是一部分离散的“坏数据”影响正态分布，直接求均值得到的并不是正态分布的中心。上述的两种算法都未对离散的“坏数据”进行处理，基于更优的Two Step算法，提出用正态分布的原理对数据进行剔除，得到了改进的3σ-Two Step算法。根据以往的测试表明采集的时间差数据 t_{1i}近似为正态分布，d维正态分布的概率密度公式如(6)所示，双源则有2个3维正态分布，三源则有3个3维正态分布。

$$\begin{aligned} p(X)&=\frac{1}{(2\pi)^{d/2}|\sum|}\exp\left(-\frac{1}{2}(X-\mu)^T\sum{}^{-1}(X-\mu)\right)\\ \mu&=E\{X\}=[\mu_1,\mu_2,\ldots\mu_d]^T\\ \sum&=E\left\{(X-\mu)(X-\mu)^T\right\}\end{aligned} \tag{6}$$

其中μ为样本的均值，Σ为协方差矩阵，|Σ|为它的行列式。根据概率学原理，每一维 t_{12}，t_{13}，t_{14} 分别满足一维的正态分布，概率密度公式如下，其中μ和σ分别为均值、标准差。

$$f(t_{1i})=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left(-\frac{(t_{1i}-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{7}$$

一维正态分布的样本分布在[(μ-σ),(μ+σ)]区间内的概率为68.2%，最集中的数据总是分布在这个区间。对于采集的三维TDOA数据，数据分布在此概率区间变为[(μ_1, μ_2, μ_3)-(σ_1, σ_2, σ_3)，(μ_1, μ_2, μ_3)+(σ_1, σ_2, σ_3))]，经过大量的测试表明：理论TDOA基本上在这个区间，因此可以将这个区间的数据提取出来，将离散的“坏数据”都进行剔除，最后的得到数据再求均值，相比于直接求均值能使结果更加精确。根据此思想提出的3σ-Two Step流程图如图8所示，利用Two step算法输出每一类和中心，然后利用3σ准则剔除数据，对剔除数据后的每一类输出均值。利用此边界剔除的区域是一个椭球体，如式(8)所示，是一个椭球体的标准方程。其中σ_1, σ_2, σ_3分别为 t_{12}, t_{13}, t_{14}的标准差，t^c_{12}, t^c_{13}, t^c_{14} 分别为均值。

$$\frac{\left(t_{12}-t^c_{12}\right)^2}{\sigma_1^{\,2}}+\frac{\left(t_{13}-t^c_{13}\right)^2}{\sigma_2^{\,2}}+\frac{\left(t_{14}-t^c_{14}\right)^2}{\sigma_3^{\,2}}=0 \tag{8}$$

表 1 两种算法聚类输出的 TDOA 中心及误差

测试编号	理论TODA (*ns*)	K-means算法输出的中心 (*ns*)	Two Step算法输出的中心(*ns*)
1 (PD1, PD2)	(3.33,7.63,3.67) (-3.5,0.43,4.53)	(2.96,7.32,4.02) (-3.09,0.25,4.92)	(3.10,7.35,4.03) (-3.29,0.24,4.73)
误差	-	(0.36,0.31,0.35) (0.41,0.18,0.39)	(0.23,0.28,0.36) (0.21,0.19,0.20)
2 (PD1, PD3)	(3.33,7.63,3.67) (-2.8, -7.33, -5.27)	(3.58,7.25,3.38) (-3.19, -7.15, -5.56)	(3.31,7.45,3.83) (-2.91, -7.52, -5.18)
误差	-	(0.25,0.38,0.29) (0.39,0.18,0.29)	(0.02,0.18,0.16) (0.11,0.19,0.09)
3 (PD1, PD2, PD3)	(3.33,7.63,3.67) (-3.5,0.43,4.53) (-2.8, -7.33, -5.27)	(3.92,6.95,3.15) (-2.45,1.11,4.12) (-3.29, -7.15, -4.28)	(3.82,7.15,4.06) (-3.17,1.01,3.99) (-2.41, -7.98, -4.86)
误差	-	(0.59,0.68,0.52) (1.05,0.68,0.41) (0.49,0.18,0.99)	(0.49,0.48,0.39) (0.43,0.58,0.54) (0.39,0.65,0.41)

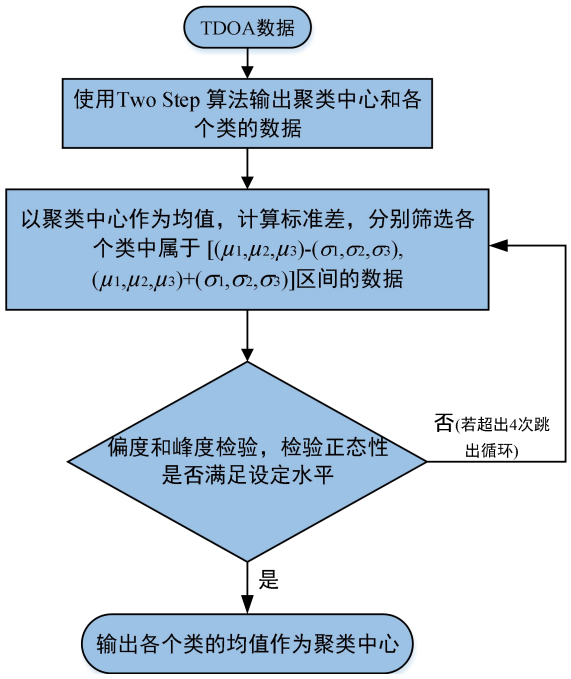
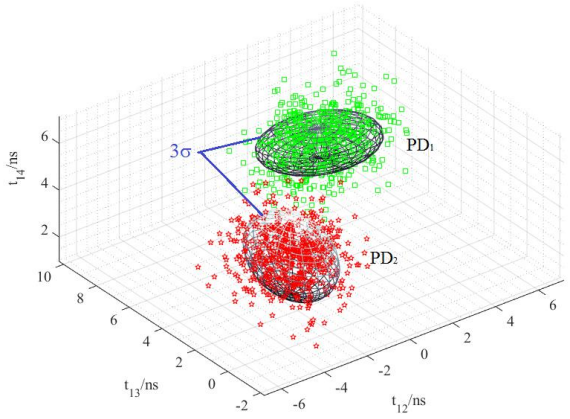


图8 3σ-Two Step算法的流程图

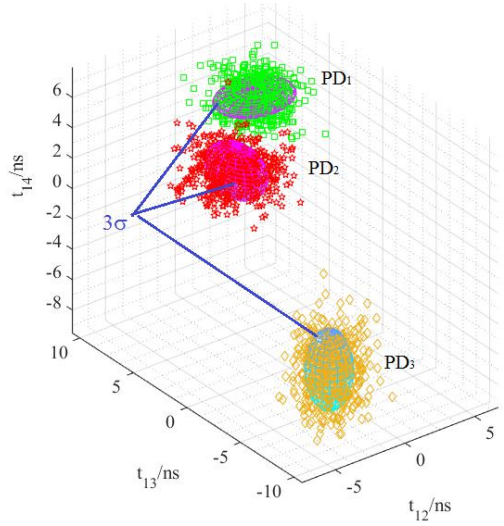
为了保持数据的原始正态分布，对剔除后的数据还需要进行正态性检验。正态性检验的方法是运用数学上正态分布的偏度和峰度检验，假设随机变量的总体为(X, Y, Z)，其标准变量 $[(X,Y,Z)-E(X,Y,Z)]/\sqrt{D(X,Y,Z)}$ 的三阶和四阶矩分别称为(X, Y, Z)的总体峰度与偏度，分别用 ν 和 ν 表示，其求法如式(9)所示。若满足正态分布则 $\nu=(0,0,0)$ 且 $\nu=(3,3,0)$，其中 $E(X, Y, Z)$、$D(X, Y, Z)$ 分别为样本的期望和方差。假设样本 $[(X_1, Y_1, Z_1), (X_2, Y_2, Z_2), \cdots, (X_n, Y_n, Z_n)]$ 来自总体(X, Y, Z)，则 ν 与 ν 的矩估计量分别为 G_1 和 G_2，代表样本偏度与样本峰度，计算如式(10)所示，其中 B_k 为样本的 k 阶中心矩，其中 $k=2\sim4$。通过矩估计量与标准值的偏离程度来检验样本的正态性，达到一定的水平则可认为满足正态分布，本文设定的是偏离≤20%，即为满足正态性分布。

$$\upsilon_1=\frac{E\left[\left((X,Y,Z)-E(X,Y,Z)\right)^3\right]}{\left(D(X,Y,Z)\right)^{3/2}}$$
$$\upsilon_2=\frac{E\left[\left((X,Y,Z)-E(X,Y,Z)\right)^4\right]}{\left(D(X,Y,Z)\right)^{2}} \quad (9)$$

$$G_1=B_3/B_2^{3/2},G_2=B_4/B_2^{2} \quad (10)$$



(a) 经过3σ-Two Step算法聚类后的PD1和PD2放电时的TDOA



(b) 经过3σ-Two Step算法聚类后的PD1、PD2和PD3放电时的TDOA

图9 3σ-Two Step处理后的TDOA

3.4 三种算法的误差分析

利用三种算法对测量得到的TDOA数据进行聚类，输出聚类中心，并将算法输出的结果与理论值进行比较，定义平均误差如式(11)所示，其中 (t_{12}, t_{13}, t_{14}) 为算法输出的时间差中心，$(t^*_{12}, t^*_{13}, t^*_{14})$ 为理论时间差，n 为放电源的数目。三种算法的平均误差见图10，可以看出改进的3σ-Two Step算法在三组测试中效果都是最好的，Two Step和3σ-Two Step都不需要手动输入聚类中心的个数。

$$t_e=\frac{(t_{12}-t^*_{12})+(t_{13}-t^*_{13})+(t_{14}-t^*_{14})}{3n} \quad (11)$$

在第一组测试中3σ-Two Step算法的平均误差分别比Two Step算法和K-mean算法小36.4%，47.3%；在第二组测试中分别小27.2%，39.1%；在第三组测试中分别小19.6%，23.7%。随着放电源数目的增加，算法的平均误差增大，

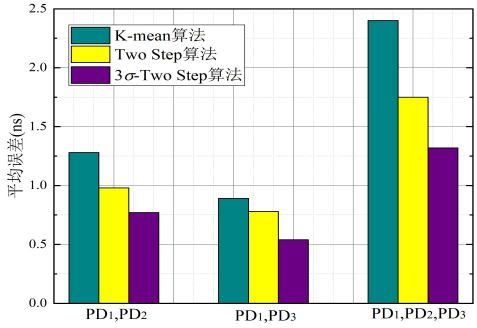


图10 三种算法处理TDOA的误差

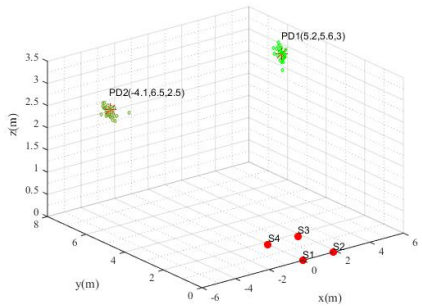
当两个放电源之间的距离更小时平均误差更大。

3.5 改进算法的定位结果

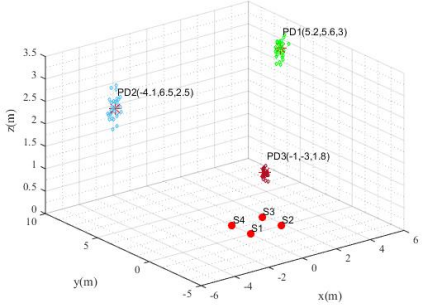
利用改进的3σ-Two Step输出的TDOA中心，进行牛顿迭代法求解，为了避免单次定位的随机性，进行了20次定位，PD_1和PD_2放电定位的结果如图11(a)所示，定义定位的平均误差如下：

$$e=\frac{\sqrt{(x-x_r)^2+(y-y_r)^2+(z-z_r)^2}}{n} \tag{12}$$

其中(x_r, y_r, z_r)为实际局放源的坐标，n为放电源的数目，(x, y, z)为定位的结果，经过计算平均每点的定位误差为0.44m。PD_1、PD_2和PD_3放电同样进行了20次定位，定位的结果如图11(b)所示，经过计算平均每点误差为0.67m，三源的定位误差要稍大于双源的定位误差。再增加一个放电源进行测试发现定位的误差增加较大，后文继续对放电源的数量对定位误差的影响开展了研究。



(a) PD1和PD2放电的定位结果



(b) PD1和PD2和PD3放电的定位结果

图11 定位的结果

增加放电源的数量进行定位测试，得到的平均定位误差如下图所示，测试的PD源最高数目为5个，经过大量的测试，求得平均每点误差的均值，结果如图12所示。随着局放源数目的增加，误差逐渐增大，并且增大的速度加快，当局放源的数目达到5个时误差已经超过了2m。但在实际中超过5个局放源的场景非常少，通常是在3个以内，因此改进的算法具有不错的效果。

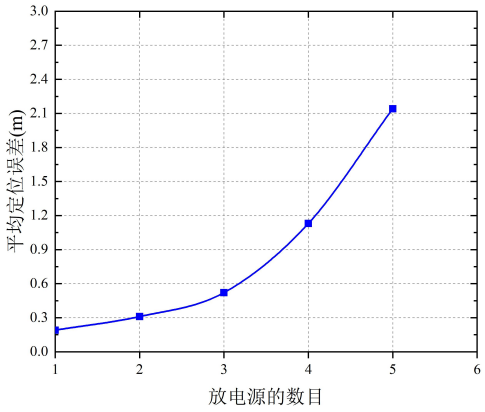


图12 定位误差与放电源数目的关系

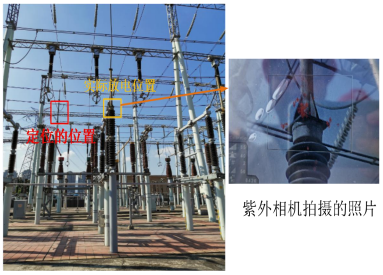
4 变电站现场测试

进一步在实际变电站验证提出算法和装置的有效性，将其应用在某个户外空气绝缘110 kV变电站。定位装置如图13(a)所示，测试时可以通过绝缘支架增大天线阵列离地面的高度。当在设备较高的场景时，应该增大阵列的离地高度。

在变电站较难发现多处的局部放电，并且站内存在较多的干扰信号，对定位的影响较大。因此只能通过不断的移动装置的位置进行定位，并且对输出的放电坐标使用紫外相机进行检验是否存在放电。在移动位置的过程中发现输出了两个坐标，利用紫外相机进行拍摄，发现在输出的2个坐标附件的一处支柱绝缘子和一处隔离开关存在电晕放电，如图13(b)和13(c)所示。此时1个天线接收的波形如图14所示，红色的线为时域，黄色的线为频域，可以看到检测出了两个时间间隔非常短的放电信号。对频率曲线进行分析，电晕放电的UHF信号在400MHz~700MHz范围内最突出。在1GHz~1.2GHz范围内和1.4GHz处存在一些的干扰信号。

经过多次的定位，发现定位的结果与实际的位置每处偏差在0.6m~2m范围内。比在实验室的定位精度更低，原因是在变电站的干扰信号较多，并且电磁波的反射对定位有较大的影响。但配合其他检测方式进行验证，此定位方法具有不错的效果，能

够满足实际的要求。



紫外相机拍摄的照片

支柱绝缘子外观

(a) 在变电站使用的定位天线阵列



紫外相机拍摄的照片

支柱绝缘子外观

(b) 支柱绝缘子处的电晕放电



紫外相机拍摄的照片

隔离开关外观

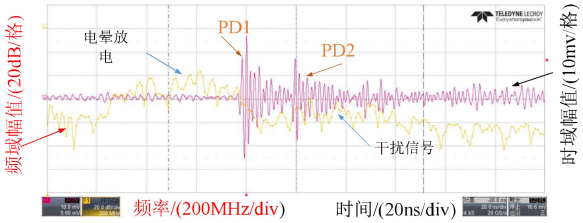
(c) 隔离开关处的电晕放电

图13 实际变电站内的定位结果

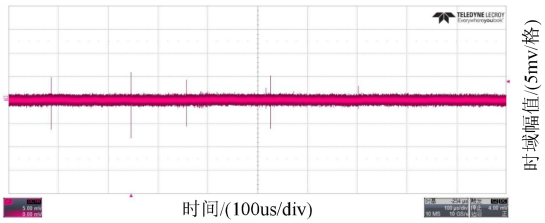
5 结论

（1）在实验室开展了多局部放电源定位测试，获得了多放电源的三维TDOA，对比了K-mean和Two Step算法的聚类效果。在双源测试中，提出的3σ-Two Step算法平均误差分别比K-mean和Two Step算法小36.4%，47.3%；三源测试中分别小19.6%，23.7%。

（2）使用提出的算法和装置精度定位，双源的定位结果平均误差为0.4m，三源的平均误差为0.67m。随着放电源数目的增多，定位误差增大，当放电源数目达到5个时，平均误差超过2m。



(a) 单个放电时域和频率的波形



(b) 长时间记录的放电时域和频域波形

图15 单个天线检测的时域和频域波形

（3）将提出的算法和装置应用某个在户外空气绝缘变电站进行定位测试，经过多次定位在一处支柱绝缘子和一处隔离开关查找出了电晕放电，经过紫外相机的验证，每处的定位误差在0.6m~2m范围内。

参考文献：

[1]李军浩，韩旭涛，刘泽辉，等. 电气设备局部放电检测技术述评[J].高电压技术，2015，41(8)：2583-2601.

[2]Judd, M.D., Yang, L., Hunter, I.B.: "Partial discharge monitoring of power transformers using UHF sensors. Part I: sensors and signal interpretation", IEEE Electr. Insul. Mag., 2005, 21, (2), pp. 5-14.

[3]Hou, H.J., Sheng, G.H., Jiang, X.C.: "Localization algorithm for the PD source in substation based on L-shaped antenna array signal processing",IEEE Trans. Power Deliv., 2015, 30, (1), pp. 472-479.

[4]齐歌，郭俊，吴广宁，等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报，2005，20(2)：29-35.

[5]周文俊,李鹏飞,杨 帅,等.变电站局部放电的定向天线多方位检测定位方法[J]. 高电压技术，2017，43(5)：1476-1484.

[6]唐志国，李成榕，常文治，等. 变压器局部放电定位技术及新兴UHF 方法的关键问题[J]. 南方电网技术，2008，2(1)：36-40.

[7]杨 森，熊 俊，郑服利，等. 基于特高频无线智能传感器的局部放电定位法[J]. 电气自动化，2017，39(02)：110-112+115.

[8]李 臻，罗林根，陈敬德，等. 基于特高频无线传感阵列的新型局部放电定位方法[J]. 高电压技术,2019,45(2)：88-95.

[9]侯慧娟，盛戈皞，孙 岳，等. 基于电磁波信号传播衰减

模型的变电站局部放电定位方法[J]. 电工技术学报，2014，29(6)：326-332.

[10]朱明晓，刘青，王彦博，等. 基于平面相交法的敞开式变电站多源局部放电定位方法[J]. 高电压技术，2018，44(09)：2970-2976.

[11]郁琦琛，罗林根，贾廷波，等. 特高频信号RSSI统计分析下的变电站空间局部放电定位技术[J]. 高电压技术，2020，6(18)：1-9.

[12]侯慧娟，盛戈皞，孙 岳，等. 基于电磁波信号传播衰减模型的变电站局部放电定位方法[J]. 电工技术学报，2014，29(6)：326-332.

[13]印海洋. 套管局部放电UHF检测与定位方法的研究[D]. 华北电力大学(北京)，2016.

[14]王 千，王 成，冯振元，等. K-means 聚类算法研究综述[J]. 电子设计工程，2012，20(7)：21-24.

[15]Bioucas-DiasJ M, Figueiredo M AT. A new TwIST: two-step iterative shrinkage/thresholding algorithms for imagerestoration [J]. IEEE Transactions on Image processing, 2007, 16(12): 2992-3004.

[16]郑书生，李成榕，何梦. 变压器局部放电复数域牛顿迭代网格搜索定位方法[J]. 中国电机工程学报，2013，33(9)：155-161.

作者简介：

吴诗优（1997），男，江西赣州，硕士，主要研究输电线路缺陷检测、XLPE电缆局部放电检测，E-mail：wushiyou97@163.com

张征（1993），男，江西南昌，硕士，从事输电线路运行维护与检修相关研究，E-mail：whu_zhangzheng@163.com

郑书生（1979），男，北京，博士，主要研究电力设备状态检测，E-mail：zss@ncepu.edu.cn

接地变在新能源场站中的运用

余幸

（华能江西清洁能源，江西 南昌 330000）

摘要：新能源变电站主变低压侧通常为 d 联结，需要人为构造中性点来限制短路电流。本文对 Z 联结接地变的结构特点及保护配置进行了分析，提出了改进措施。

关键词：接地变压器、保护、整定

1 概述

1.1 接地变背景

新能源场站35kv线路多为三角形接线法，无中性点。所以，当中性点绝缘系统在单相接地情况下，由于接地电流不能直接构成回路，所以其值一般比负荷电流要小很多。但是却也存在以下缺点：

①架空线路受周围环境的影响而聚集感应电荷，高悬浮电压将危及人员和设备；

②随着系统容量增加，长电缆馈线越来越多、线路电容电流越来越大，在系统单相接地时故障电流是正常线路对地电容电流的 3 倍且产生间歇电弧，接地电弧如若不能可靠熄灭将产生过电压危害设备；

③系统发生高压振荡时无有效措施来降低振荡程度。

鉴于以上原因，需要以接地变压器的方式来人为引出一个系统中性点，该中性点可以直接接地，也可以经消弧线圈或高阻接地。对于接地变，要求其必须有一个可以接地的中性点，在系统单相接地时故障电流可以通过变压器线圈流回线路，便于与自动装置的配合。

2 接地变在新能源场站的作用

假设新能源场站无接地变运行，则如图1所示当A相发生单相接地时，B相对地电压变为Uba，C相对地电压变为Uca，此时三相系统线电压仍然是对称的，但相电压上升，对系统的绝缘可能会产生影响，因此只允许短时运行。随着电力系统越来越复杂，电缆长度大等原因，线路对地电容变得不可忽略，而故障时A相电流为非故障相对地电容电流之和，即正常情况下的3倍，因此需要对短路电流进行限制。

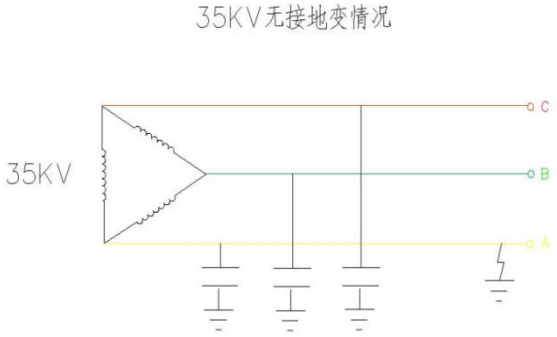


图1

当配置接地变后，则如图2所示，故障电流通过对地电容、接地电阻和接地变绕组形成回路，回路中串入接地电阻，能明显限制短路电流。

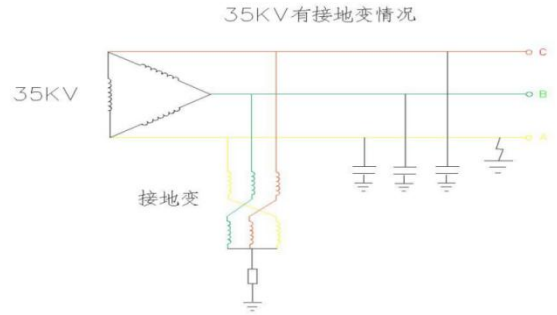


图2

3 接地变的结构原理

接地变压器的作用是在系统为△型接线或Y型接线中性点无法引出时，引出中性点用于加接消弧线圈或电阻，此类变压器采用Z型接线（或称曲折型接线）。与普通变压器的区别是：每相线圈分成两组分别反向绕在该相磁柱上。这样连接的好处是零序磁通可沿磁柱流通，而普通变压器的零序磁通是沿着漏磁磁路流通，所以Z型接地变压器的零序阻抗很小，而普通变压器要大得多。

如图3所示，其铁芯为三相三柱式，每一铁芯柱上有2个绕组，匝数相等绕向相反，反极性串联成曲折形绕组，形成曲折变压器的中性点N。

其二次绕组视工程具体需要设置。如需要兼做电厂或变电站的自用电源变压器时，应设置二次绕组。

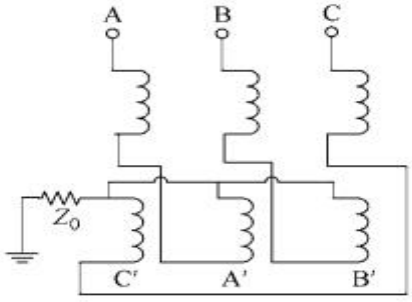


图3

Z型接地变具有以下特点：正序、负序电流呈现高阻抗，相当于励磁阻抗绕组中只流过很小的励磁电流。由于每个铁心柱上两段绕组绕向相反，同心柱上两绕组流过相等的零序电流时，两绕组产生的磁通相互抵消，所以对零序电流呈现低阻抗，相当于漏抗，零序电流在绕组上的压降很小。由于在同一相的两绕组反极性串联，其感应电动势大小相等、方向相反，正好相互抵消，因此呈低阻抗。

4 在新能源场站接地变保护配置

通常，接地变压器保护配置有速断保护、定时限过电流保护、中性点零序保护。

4.1 电流速断保护的整定：

1)躲过母线单相故障流过接地变的单相故障电流：

$$3I_0=\frac{U_n}{\sqrt{3}R_0}$$

$$I_{op.I}=\frac{K_{rel}I_0}{n_{TA}}$$

K_{rel}：可靠系数，可取1.3；

R_0：接地变等效阻抗；

U_n：接地变额定电压；

n_{TA}：接地变高压侧相电流TA变比。

2）躲过变压器的励磁涌流：

一般取额定电流的7~10倍。

3）按灵敏系数反推：

$$I_{op.I}=\frac{I_{k.\min}^{(2)}}{K_{sen}n_{TA}}$$

$I_{k.\min}^{(2)}$：最小运行方式下保护安装处两相短路时，流过互感器的电流值；

K_{sen}：灵敏系数，取2.0。

4）动作时间：一般取0s。

4.2 过电流保护的整定：

1）躲过变压器最大负荷电流：

$$I_{opII}=\frac{K_{rel}I_{FH}}{K_r n_{TA}}$$

K_{rel}：可靠系数，取1.5；

I_{FH}：接地变的额定电流；

K_r：返回系数，取0.9；

2）动作时间：大于母线各连接元件后备保护动作时间。

4.3 零序电流保护的整定：

1）零序电流I段按单相接地故障灵敏度整定，灵敏度系数不小于2，并于汇集母线各连接元件零序电流II段配合：

$$3I_0=\frac{U_n}{\sqrt{3}R_0}$$

$$I_{0op.I}=\frac{I_{k.\min}^{(1)}}{K_{sen}n_{TA0}}$$

$I_{k.\min}^{(1)}$：35kV母线单相接地短路电流；

n_{TA0}：接地变高压侧零序电流TA变比。

2）零序电流II段按线路电容电流整定：

$$I_{0op.II}=K_{rel}I_C$$

K_{rel}：可靠系数，取1.5；

I_C：最大方式运行下线路电容电流之和；

3）零序电流II段按正常运行时由于不平衡

引起的最大零序电流整定：

$$I_{0.\max} = 15\% I_{FH.\max}$$

$$I_{0op.II} = \frac{K_{rel} I_{0.\max}}{n_{TA0}}$$

K_{rel}：可靠系数，取1.5；

$I_{FH.\max}$：汇集线路最大额定电流。

4）动作时间：

零序电流I段时间按大于母线各连接元件零序电流II段最长动作时间整定；

零序电流II段时间按大于零序电流I段时间整定。

5 改善及建议

接地变压器的继电保护配置在实际运行中存在保护装置灵敏度不足、保护拒动等问题接地变压器接二次线圈有时还兼作所用变，其短路阻抗一般较大，而一、二次侧绕组容量相差又很大，当接地变压器发生内部绕组匝间短路或二次侧绕组发生相间短路故障时，一次侧的故障电流数值就会很小，以至于过电流保护的灵敏度不足。

5.1 投入接地变非电量保护

接地变一般为干式变，无瓦斯保护，因此温度保护是接地变唯一的非电量保护，而单独的温度接点又容易引起接地变保护误动，所以必须确保温度保护的安全可靠。由于接地变是分相布置的，因此在每一相配置一个温度传感器，考虑到正常运行时内层二次绕组的上部温度最高，应将该传感器装设在该位置。由于目前接地变温度定值尚没有统一的规程要求，应根据现场时间运行情况和环境条件，确定温度告警及跳闸值。同时为了防止温度保护误动，保护装置处应提高温度保护继电器的动作功率值，一般需要大于5W，不要求快速动作。

5.2 配置零序差动保护

变压器的零序差动保护能够最大范围地保护内部绕组的接地故障，同时消除相间差动保护在靠近中性点20%~30%区域内的死区。由于零序差动保护不受内部磁路的影响因此空载合闸时的励磁涌流、外部故障切除引起的涌流以及过励磁电流等不会流入差动回路，可将其作为接地变辅助保护，专门用于切除变压器内部绕组故障特别是靠近中性点的部分绕组的接地故障。

5.3 将三相电流互感器二次侧绕组增加△接线方式

接地变压器的过电流保护接线方式通常采用星形接线，保护装置取的是高压侧的相电流。当外部发生接地故障时，该相电流是零序电流与低压侧的负荷电流叠加值，过电流保护定值需躲过该叠加值，整定过大致使灵敏度不足。若将电流互感器二次侧绕组接成三角形，保护装置取的是高压侧的线电流，此时零序电流相互抵消，线电流只反映二次绕组的负荷电流，过电流保护只需躲开其低压侧额定电流即可，保护整定值大大降低，提高了保护灵敏度。星形接线方式仍需保留，确保发生中性点引出线直接接地故障时及时切除。

5.4 选用适当的零序CT变比

根据母线任意点单相故障流过接地变的单相故障电流大小确定接地变零序CT一次值，二次值则固定选用1A或者5A。当CT一次值过大，会使零序保护动作值整定偏小，保护容易误动，一次值过小，CT易进入饱和状态，造成保护拒动。

6 小结

接地变在新能源场站中起着不可替代的作用。由于35kv母线不允许无接地变运行，所以当接地变故障退出运行会联锁导致机组停运。本文结合当前技术规范，对接地变保护配置进行了整理、归纳，并提出了改进方案。

参考文献：

[1]DL/T 1631－2016 并网风电场继电保护配置及整定技术规范

[2]DL_T 1502-2016 厂用电继电保护整定计算导则

作者简介：

余幸（1996），助理工程师，运检员，E-mail：935107188@qq.com

电动机轴承加油脂原理及温度升高原因分析

宋皓月

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：为减少轴承磨损，提高电动机使用寿命，定期对长期运行的电动机进行加油、换油显得尤为必要。我厂一些高压电机在运行时加入润滑油脂后，会出现轴承温度短时间内升高，接近或超过保护定值，面临损坏轴承甚至打闸停机的危险。通过分析，决定从油脂方法、检修工艺、轴承选取等方法解决轴承发热问题。

关键词：大中型电动机；轴承；润滑脂

0 引言

良好的润滑是保证电动机轴承正常运转的必要条件，它对提高轴承的承载能力和使用寿命有着重要作用。对轴承润滑的主要目的是在运动表面形成油膜以避免滚道、滚动体、保持架之间直接接触，减少摩擦阻力，降低磨损和擦伤，减小摩擦发热。油膜的形成增大了接触面积，减少了接触应力，这时轴承磨损较小，几乎可以忽略不计。当润滑剂在使用中受到温度、空气、金属催化、机械剪切等环境和作业因素的影响，基础油成分氧化降解和添加剂失效，会形成对轴承有害的物质，影响油膜的形成，导致接触表面之间的应力变大，从而加大轴承磨损，导致轴承运行温度升高。如不能及时发现处理，会导致轴承抱轴事故发生。如果电动机出现轴承抱轴故障，轻则退出运行，重则导致生产系统或整个装备无法正常工作，进而可能造成巨大的经济损失。为避免因轴承润滑问题导致的停机，提出一种规范化的轴承加油脂方案，对电动机日常维护保养和应急处理具有较好的作用。

1 电动机轴承加油、换油的原理

加油管安装在电动机外油盖上，外油盖、大端盖和内油盖间有一油脂通道，使得从加油管挤入的润滑脂直接进入电机内油盖，当内油盖的油脂加满后油脂便被挤入轴承中，可通过监听轴承声音变化确定油脂是否进入轴承。持续往加油管中挤入大量油脂，油脂便从电机内油盖持续被挤入轴承中，而轴承里原有的旧油便被替换掉被挤入电机外油盖通过外油盖下方的排油口排出电机达到换油的效果。

2 运行中加润滑脂的目的

电动机运行时添加油脂是为了润滑、冷却和密封。电机轴承的润滑是依靠润滑脂内的三维纤维网状结构在剪切作用下被拉断时被析出的润滑油在轴承的转动元件，轴承和轴承座圈上形成一层润滑膜而起润滑作用的，当新装的润滑脂的轴承开始转动时，润滑脂首先从转动元件上被甩出，并快速的在轴承盖的腔内循环，冷却。随后润滑脂又从旋转的轴承座圈外侧切入到转动元件上，紧贴着转动元件表面上的那部分脂在剪切作用下拉断了纤维网状结构，使少量析出的润滑油在转动元件和座圈表面形成一层润滑膜。其余的部分的润滑脂仍然保持完好的纤维网状结构，起了冷却和密封作用。由于润滑脂包含重组分和轻组分。在使用过程中，轻组分会逐渐蒸发，仅留下重组分，所以应定期对电机轴承进行补油、换油。

3 电动机轴承温度升高的原因及解决方法

3.1 加油脂方法

油脂加入过多或过快。如果电动机运行中轴承室内短时间加入较多润滑脂，会导致：（1）电机阻力增大，增加了电机运转时的负荷，使电机电流也升高；（2）电机散热空间较小；（3）轴承摩擦发热较大导致温度升高。所以电机加油脂不是越多越好，应在轴承室容积的1/2左右。加油脂前应先将加油孔清理干净，加油脂时一人监听轴承声音一人挤压油枪少量多次加入润滑脂，如果加多了可通入氮气将多余油脂吹出同时进行物理降温。

3.2 检修工艺

轴承装配质量的影响在轴承装配过程中，应严格按照装配工艺规程操作，冷打、冲击、磕碰、轴承滚道混入杂质、外表面沾满油污、不到位、轴的挠曲过大，定位不好、轴与轴承套的精度差，均影响到轴承装配质量，从而影响轴承的使用。

3.2.1 电机轴承及油盖未清洗干净，测量轴承数据及安装轴承时未佩戴干净手套，造成手汗或杂质污染轴承，轴承涂抹的油脂不够、型号不对或有杂质。应认真做好轴承、油盖的清洗工作，使用型号、质量合格的油脂对轴承内加入1/2~2/3左右的油脂。

3.2.2 轴承与端盖配合过松或过紧未进行有效处理。轴承的配合轴承安装时轴承内径与轴、外径与外壳的配合非常重要，当配合过松时，配合面会产生相对滑动称做蠕变。蠕变一旦产生会磨损配合

面,损伤轴或外壳,而且磨损粉末会侵入轴承内部,造成发热、振动和破坏。过盈过大时，会导致外圈外径变小或内圈内径变大，减小轴承内部游隙。过松时对端盖进行镶套,不是很松端盖打麻点涂固持剂，过紧时重新加工端盖。

3.2.3　电机两侧端盖或轴承盖没装配好。应进行重新装配。

3.3　轴承选取

轴承质量不良或选型不当。选用轴承时应注意该轴承的极限转速、负载能力，不能超转速、超负荷使用，那样只会缩短轴承的使用寿命，得不偿失。轴承安装前应测量轴承游隙及轴承内、外径满足要求方可使用。轴承间隙过小时，由于油脂在间隙内剪力摩擦损失过大,也会引起轴承发热,同时，间隙过小时，油量会减小，来不及带走摩擦产生的热量，会进一步提高轴承的温升。但是，间隙过大则会改变轴承的动力特性，引起转子运转不稳定。因此需要针对不同的设备和使用条件选择合适的轴承间隙。轴承与轴应采用过盈配合，轴承台公差为k6或m5，当k6、m5出现上差而所选轴承径向游隙较小、内圈公差也较小时,则径向配合相对较紧，装配后其径向游隙将受到一定的影响。热态运行时，内圈的较大膨胀，有可能导致负游隙。微量的负游隙有利于轴承正常运行,但较大负游隙对轴承运行很不利，温度较高，此时轴承外圈须放松，通过外圈的膨胀减小负游隙的程度。

4　结语

由上可知，为解决电动机轴承运行中温度异常升高的问题,有关人员要积极对相关工艺和方法进行探讨，最大限度的保证设备的正常运行。

参考文献：

[1] 阳建宏，黎敏，丁福焰，等. 滚动轴承诊断现场实用技术 [M] . 北京: 机械工业出版社，2015: 28-63.

[2] 刘泽九. 滚动轴承应用手册 [M] . 3 版. 北京: 机械工业出版社，2014: 16.

[3] 成大先. 机械设计 手 册: 单 行 本. 轴 承 [M] . 6 版. 北京: 化学工业出版社，2019: 8-233.

作者简介：

宋皓月（1994），男，江苏徐州，本科，助理工程师，从事电机检修，E-mail： 496429491@qq.com

基于BIM的电缆精细化管理在火力发电厂的应用

吴利平[1],李华[1]，覃席彪[2]

(1.华能秦煤瑞金发电有限责任公司，江西 赣州 341000；2.杭州建普科技有限公司，浙江 杭州 310000)

摘要：本文针对火电基建工程中，电缆及桥架在设计采购、施工管理中存在的问题，提出了基于 BIM 技术的电缆精细化管理办法，经实际工程应用，验证了该管理办法的实施能有效降低工程造价，提高项目精细化管理水平。

关键词：火力发电厂；信息模型；电缆优化；采购；管理

0 引言

火电是我国目前电力行业的发电主体[1]，新建火电工程电缆用量大，造价高昂，且一般由甲方供货、乙方施工，若管理衔接不当，易导致投产后库存较高，导致浪费。造成以上问题的原因有多种：在设计阶段，电缆清册数量较粗放，与工程实际需求存在一定量的余量或误差，电缆选型保守；在施工阶段，电缆敷设时预留接线长度过长，电缆型号混用或者错用，电缆敷设路径不合理，桥架通道拥堵，因工期、工序问题，桥架安装与管道安装出现碰撞，导致误工、返工；传统的电缆采购与安装方法问题众多，弊端明显。通过电缆敷设优化系统和SketchUp搭建的三维信息模型能有效的实现电缆与桥架安装前的策划、事中的精细化管理。

1 基于BIM的电缆精细化管理

BIM是建筑信息模型（Building Information Modeling）的缩写，此概念从2002年由Autodesk公司提出至今，虽然没有固定统一的定义，但被大家广泛认可的BIM是利用开放的行业标准，对既定项目的某个生命周期内的各类信息用图像、视频或者数据的形式展现出来，以便于项目管理者制定相关的决策，更好的为项目增值[2]。BIM技术具有可视化、协调性、模拟性、优化性及可出图性等特点，常见的应用场景在民用建筑，基础设施等领域，在电力领域的应用案例很少。此次BIM技术在火力发电厂电缆精细化管理项目应用的核心是通过电缆敷设优化系统搭建电缆通道信息模型，分级导入电缆清册统计汇总电缆信息，结合图纸与现场实际情况完成设备接线点定位，利用计算机模拟电缆敷设，完成电缆长度计算，输出最优的电缆采购与敷设方案。录入电缆到货入库数据与现场敷设数据，通过数据分析实现电缆库存精细化管理。同时利用SketchUp搭建桥架与管道模型，实现三维模型的可视化，指导桥架安装前的碰撞检查，针对电缆模拟敷设时暴露的桥架容积率不足或过剩的问题，制定桥架优化方案，指导电缆敷设与桥架安装，从电缆及桥架的采购与施工两个方面实现电缆精细化管理。其工作流程如图1-1所示。

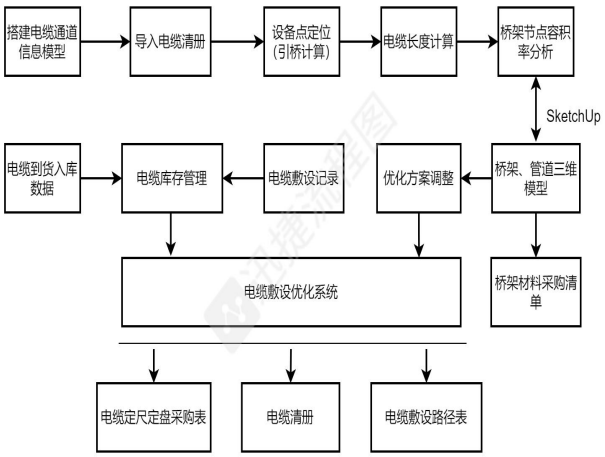


图1-1 电缆精细化管理流程图

1.1 最优电缆长度算法研究

利用电缆敷设优化系统实现电缆长度计算，输出最优敷设路径的流程是设置公共参数，录入节点一览信息搭建电缆通道信息模型，导入基础数据电缆清册，通过引桥计算实现设备接线点定位，进行电缆长度计算，最后进行桥架段容积率分析，调整电缆敷设方案，输出最优的电缆敷设路径与下料长度。其中公共参数的设置是为了给不同型号电缆附加横截面积，电压等级等物理信息以及最后定盘允许的最大盘长，给不同型号桥架添加横截面积以便进行桥架容积率分析。要实现最优电缆长度计算的关键步骤是搭建电缆通道信息模型、设备点定位（引桥计算）、电缆长度计算三个部分，因此就这三个部分的原理做详细介绍。电缆敷设优化系统功能模块如图1-2所示。

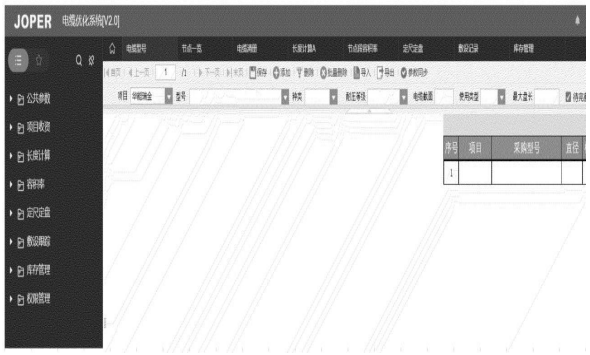


图1-2 电缆敷设优化系统功能模块图

1.1.1　电缆通道信息模型

收集整理主厂房、锅炉、辅助厂房等各个区域电缆构筑物图及电缆敷设图，在设计院编制的桥架节点的基础上，测量相邻桥架节点距离，每两相邻节点连结生成主桥通道，在系统里定义桥架物理信息和功能信息，一、为了电缆在模拟敷设时按桥架功能分层，实现动力、控制电缆分开敷设。二、在电缆模拟敷设完成后对相应的桥架段容积率进行分析。汇总所有桥架节点间信息，生成节点一览表，如图1-3所示。

节点一览

序号	设计节点1	节点1	设计节点2	节点2	节点间距	桥架规格与型号	电缆类型	描述	可用?	卷册号	区域	桥架规格与型号	节点1-节点2
365		30ZCF001		30ZCF003	3.5	600x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF001-30ZCF003
366		30ZCF001		30ZCF003	3.5	600x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	600x150x2	30ZCF001-30ZCF003
367		30ZCF002		30ZCF003	5.4	600x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF002-30ZCF003
368		30ZCF002		30ZCF003	5.4	600x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	600x150x2	30ZCF002-30ZCF003
369		30ZCF002		30ZCF015	1.6	1000x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	1000x150x2	30ZCF002-30ZCF015
370		30ZCF002		30ZCF015	1.6	1000x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF002-30ZCF015
373		30ZCF003		30ZCF004	3.9	600x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	600x150x2	30ZCF003-30ZCF004
374		30ZCF003		30ZCF004	3.9	600x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF003-30ZCF004
375		30ZCF003		30ZCF014	1.6	1000x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	1000x150x2	30ZCF003-30ZCF014
376		30ZCF003		30ZCF014	1.6	1000x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF003-30ZCF014
379		30ZCF004		30ZCF005	6.1	600x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	600x150x2	30ZCF004-30ZCF005
380		30ZCF004		30ZCF005	6.1	600x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF004-30ZCF005
381		30ZCF004		30ZCF013	1.6	1000x150x1	动力		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层	1000x150x2	30ZCF004-30ZCF013
382		30ZCF004		30ZCF013	1.6	1000x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF004-30ZCF013
385		30ZCF005		30ZCF006	3.6	600x150x1	控制		是	F7012015-DF-K-1UMX-51-BZ-00003	#3主厂房0米层		30ZCF005-30ZCF006

图1-3 节点一览表

从节点一览表可以看出#3机主厂房0米层桥架中，与桥架节点30ZCF002相邻的桥架节点有30ZCF001与桥架节点30ZCF003，其中节点30ZCF002与节点30ZCF001之间是两层600×150的桥架连通，一层桥架敷设动力电缆，一层桥架敷设控制电缆，两个节点之间距离是3.5m。将节点一览表导入系统，完成电缆通道信息模型搭建，如图1-4所示。

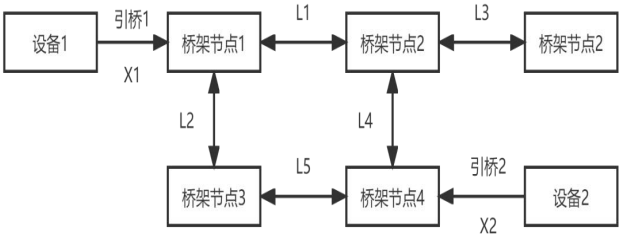


图1-4 电缆通道信息模型

电缆通道信息模型中L1、L2、L3、L4、L5既为相邻节点间的距离。将这些数据完善后，利用Java的迭代计算公式完成每一条主桥路径长度计算，基本思路：以主桥的任意桥架节点为起点，寻找最近的桥架节点，计算路径长度，依次寻找下一个节点，以上一次路径长度计算结果为新的初始值进行本次计算，直到找到目标节点，完成所有主桥路径计算，过程中把最近的节点序列和路径长度保留，删除非最近的节点序列与路径长度，减少数据库容量。

迭代算法是用计算机解决问题的一种基本方法。它利用计算机运算速度快、适合做重复性操作的特点，让计算机对一组指令（或一定步骤）进行重复执行，在每次执行这组指令（或这些步骤）时，都从变量的原值推出它的一个新值[3]。迭代算法的三个关键步骤是确定变量、建立关系式、过程控制即终止条件。在主桥路径的计算过程中，变量是相邻节点间的距离L,因为桥架节点是有限的，所有在利用迭代公式计算时，不会无限循环计算下去，满足其过程控制的终止条件。

迭代关系式：

F（Ln）=F（Ln-1)+MIN(L)

在搭建电缆通道模型这一步，完成了所有主桥最短路径的计算，在实际应用过程中，出现某一节点因设计变更或其他原因导致此处无法继续敷设电缆时，可以通过设置必经桥架节点的方式改变电缆敷设路径，其电缆敷设路径主桥部分长度就是起点桥架节点到必经桥架节点的距离加上必经桥架节点到终点桥架节点的距离。

1.1.2　设备点定位

将电缆清册汇总整理，导入电缆敷设优化系统，系统根据电缆清册将每一根电缆的起点、终点设备生成一条待赋值的引桥，同一个设备生成的引桥会合并为一条数据。此处赋值是指录入此设备接线点到电缆通道信息模型中最近的桥架节点的距离，称之为引桥计算，如图2-2电缆通道信息模型中的设备1到主桥通道中最近的桥架节点1的引桥是需要赋值的对象，X1为引桥长度。完成所有引桥的赋值，生成引桥计算表。如图1-5所示。

引桥信息　　当前总完成：5955 / 16135；本查询：311/318

序号	起（终）点设备名称	桥架节点	接线长度	直线距离	弯头	计算引桥	录入人	时间
1	#3BEST小机盘车控制箱	30ZCF069	3	18	2	21.56	qinxb	2021-02-09 23:10:05
2	#3BEST小机润滑油泵A接线盒	30ZCF069	3	18	2	21.56	qinxb	2021-02-09 23:10:34
3	#3BEST小机润滑油泵B接线盒	30ZCF069	3	18	2	21.56	qinxb	2021-02-09 23:10:34
4	#3BEST小机直流油泵启动柜	30ZCF069	3	18	2	21.56	qinxb	2021-02-09 23:10:43
5	#3厂用电监控通讯管理机柜(30CKZ03GU001)	JPZY3J004	3	4	1	7.18	qinxb	2021-02-10 10:50:58
6	#3发变组保护管理机屏(30CHF01GU001)	JPJDQ3007	3	2.5	1	5.65	qinxb	2021-02-09 23:24:55
7	#3发变组保护管理机屏(30CHH01GU001)	JPJDQ3007	3	2.5	1	5.65	qinxb	2021-02-09 23:24:55
8	#3发变组非电量保护屏(30CHE01GU001)	JPJDQ3006	3	2.5	1	5.65	qinxb	2021-02-09 23:25:23
9	#3发电机CT端子箱	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-09 23:45:54
10	#3发电机PT端子箱(30MKA01GH502)	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-10 13:56:32
11	#3发电机出口PT避雷器柜(30BAA10GH201)	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-09 23:45:54
12	#3发电机大轴	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-09 23:45:55
13	#3发电机交流密封油泵A压力开关	30ZCF102	3	28	1	31.66	qinxb	2021-02-09 23:54:07
14	#3发电机交流密封油泵B压力开关	30ZCF102	3	28	1	31.66	qinxb	2021-02-09 23:54:08
15	#3发电机局放监测就地接线盒(30MKA01GH302)	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-10 13:56:32
16	#3发电机绝缘过热监测就地接线盒(30MKA01GH303)	31ZCF085	3	30	1	33.7	qinxb	2021-02-10 22:03:09
17	#3发电机直流事故油泵启动柜	31ZCF046	3	26	1	29.62	qinxb	2021-02-09 23:56:09
18	#3发电机直流事故油泵启动柜	31ZCF048	3	24	1	27.58	qinxb	2021-02-09 23:57:22

图1-5 引桥计算表

1.1.3　电缆长度计算

在完成电缆通道信息模型搭建与引桥长度计算后，电缆长度的计算转换为起点设备至终点设备的桥架长度计算即电缆长度=主桥长度+引桥长度。

1.2　桥架安装量统计方法

通过 SketchUp 建立桥架的三维模型，利用它的组件功能，创建不同型号的桥架组件，例如 2 米的 1000×150 的梯形桥架，1000/1000×150 的梯形

桥架弯通等，然后用桥架组件完成桥架的预安装，最后通过 SketchUp 的组件信息统计功能获取不同类型桥架的安装数量，如图 1-6 所示。

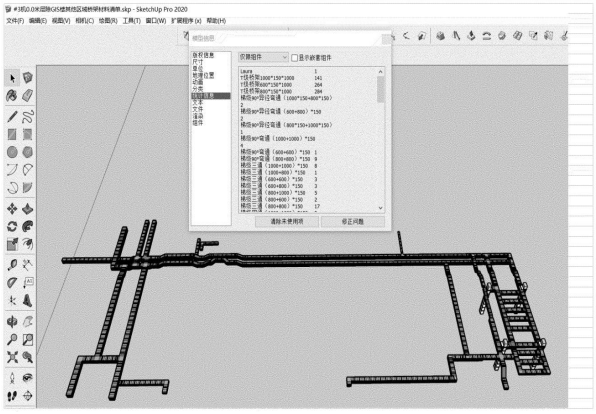


图1-6 三维桥架模型

2 电缆精细化管理在某电厂二期扩展工程中的应用情况

某电厂二期扩建工程是建设两台100万千瓦超超临界燃煤机组，总投资约70亿，其中电缆概算约8200万，桥架概算约1800万，电缆与桥架的工程造价高，电缆及桥架的精细化管理对节约项目成本，提高工程管理质量有重要意义。

在此工程中，按照上文中电缆精细化管理流程与方法实现了电缆与桥架在采购与施工过程中的精细化管理。

2.1 电缆及桥架采购管理

在电缆桥架采购前，收集整理电缆敷设图，电缆构筑物图，电缆清册，各专业设备布置图等设计图纸，按照上文中电缆敷设优化系统流程和原理，完成电缆最优长度计算，对部分选型保守的电缆进行截面优化，然后输出电缆定尺定盘采购表和电缆敷设路径表，如图2-1，2-2所示。通过SketchUp三维软件搭建该工程的三维桥架模型，利用组件功能完成全厂桥架的预安装，准确的统计了桥架实际安装需求量，三维桥架模型如图2-3所示。

定尺定盘查询

序号	电缆型号与规格	电缆型号	电缆盘长	通用序号	起点设备	终点设备	定盘长度	最大盘长	替换型号
11966	N-YJV-0.6/1.0kV-2x95	HNRIEI6-DQ-02-V1.0-021	574	380	30BUA01GH1011004	#3机220V直流馈线屏1（30BUA01GH101）	#3BEST小机直流油泵	72	1800	
11967				229	30BUB01GH1021014	#3机110V直流A段馈线屏2(30BUB02GH102	10kV工作3A段110V直流分馈电屏电源1	124	1800	
11968				230	30BUB01GH1021015	#3机110V直流A段馈线屏2(30BUB01GH102	10kV工作3A段110V直流分馈电屏电源1	125	1800	
11969				312	30BUB02GH1021014	#3机110V直流B段馈线屏2(30BUB02GH102	10kV工作3A段110V直流分馈电屏电源2	126	1800	
11970				313	30BUB02GH1021015	#3机110V直流B段馈线屏2(30BUB02GH102	10kV工作3B段110V直流分馈电屏电源2	127	1800	
11971		HNRIFI6-DQ-04-V1.0-016	263	640	40BUA01GH1011003	#4机220V直流馈线屏1（40BUA01GH101）	#4BEST小机直流油泵	55	1800	
11972				503	40BUB01GH1021014	#4机110V直流A段馈线屏2(40BUB02GH102	10kV工作4A段110V直流分馈电屏电源1	52	1800	
11973				504	40BUB01GH1021015	#4机110V直流A段馈线屏2(40BUB01GH102	10kV工作4A段110V直流分馈电屏电源1	52	1800	
11974				581	40BUB02GH1021014	#4机110V直流B段馈线屏2(40BUB02GH102	10kV工作4A段110V直流分馈电屏电源2	52	1800	
11975				582	40BUB02GH1021015	#4机110V直流B段馈线屏2(40BUB02GH102	10kV工作4B段110V直流分馈电屏电源2	52	1800	
11998	N-YJV-0.6/1.0kV-3x25	HNRIEI6-DQ-02-V1.0-023	673	401	30BRU01GW0011005	#3机UPS馈线柜（30BRU01GW001）	辅网DCS控制柜电源1(KXCXA11)	197	2000	
11999				403	30BRU01GW0011008	#3机UPS馈线柜（40BRU01GW001）	#3脱硝吸收区控制柜电源	476	2000	
12000		HNRIEI6-DQ-03-V1.0-013	608	358	30BMA01GH0101601	380V保安PC3A段GH010-6柜30BMA01GHD10-6	#3机锅炉电梯电源1	198	2000	
12001				359	30BMA01GH0101701	380V保安PC3A段GH010-7柜30BMA01GHD10-7	#3机锅炉吹灰动力柜电源	217	2000	
12002				419	30BMA02GH0101601	380V保安PC3B段GH010-6柜30BMA01GHD10-6	#3机锅炉电梯电源2	193	2000	
12003		HNRIFI6-DQ-04-V1.0-018	527	665	40BRU01GW0011005	#4机UPS馈线柜（40BRU01GW001）	辅网DCS控制柜电源2(KXCXA11)	135	2000	
12004				667	40BRU01GW0011008	#4机UPS馈线柜（40BRU01GW001）	#4脱硝吸收区控制柜电源	392	2000	
12005		HNRIFI6-DQ-09-V1.0-056	547	358	40BMA01GH0101601	380V保安PC4A段GH010-6柜40BMA01GHD10-6	#4机锅炉电梯电源1	188	2000	N-YJV-0.6/1.0kV-3x25
12006				359	40BMA01GH0101701	380V保安PC4A段GH010-7柜40BMA01GHD10-7	#4机锅炉吹灰动力柜电源	174	2000	N-YJV-0.6/1.0kV-3x25
12007				420	40BMA02GH0101601	380V保安PC4B段GH010-6柜40BMA01GHD10-6	#4机锅炉电梯电源2	185	2000	N-YJV-0.6/1.0kV-3x25

图2-1 电缆定尺定盘采购表

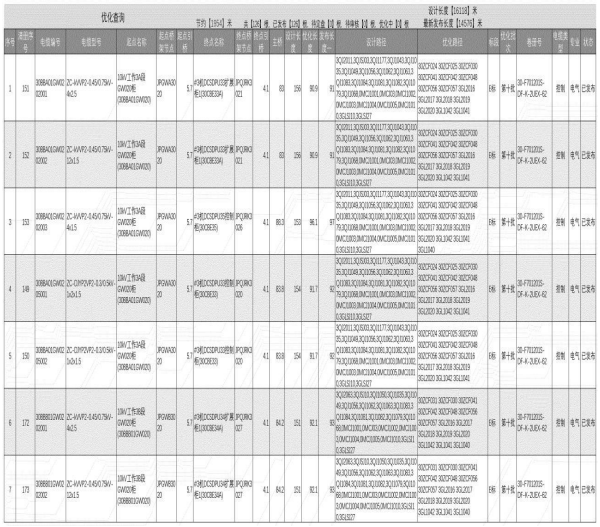


图2-2 电缆敷设路径表

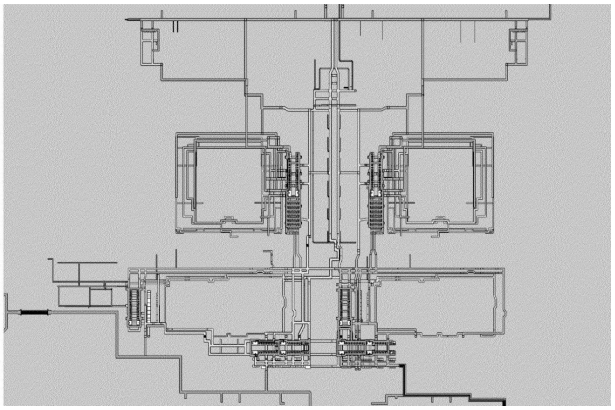


图2-3 三维桥架模型

此工程全厂设计27000多根电缆，电缆总设计长度约3200km，经优化系统优化设计以后发布采购2850km，节省电缆近380km，电缆采购费用节省约930万，桥架节省约300吨，节省金额约250万。

2.2 电缆及桥架施工管理

2.2.1 施工方案检查与优化

在桥架安装前，通过桥架段容积率分析，发现主厂房与煤仓间连接处的桥架段容积率为120%，分析原因是主厂房两列式的布置与侧煤仓的结构特点决定了从主厂房配电间到炉后的动力电缆都经过此处桥架，因此路径无法调整，只能在原有的桥架基础上增加一层规格型号1000×150的桥架，优化后桥架的容积率降为40%。优化方案如图2-4所示。类似的桥架拥堵问题在此工程中还存在6-8处，本文不再一一枚举。

在施工过程中还存在因工期跟不上，出现桥架比管道提前安装的情况，比如需要完成煤仓间的桥架安装，才能打通主厂房到锅炉及炉后区域的电缆通道，送粉管道密集排布在桥架上方，会导致出现桥架支吊架与送粉管道碰撞，通过三维桥架与管道模型，进行桥架支吊架的模拟安装，从送粉管道的间隙穿插安装桥架支吊架能避免出现碰撞问题，优化方案如图2-5所示，

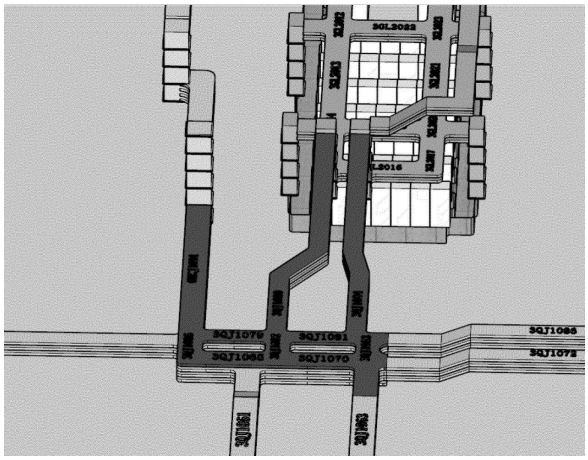


图2-4 优化方案

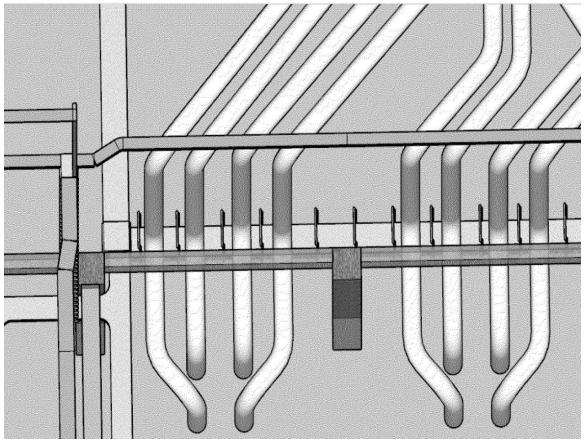


图2-5 优化方案

2.2.2 现场监督与库存管理

现场不定期对施工队伍的电缆敷设工作进行抽检，检查电缆是否是按照优化路径敷设，电缆盘的使用是否遵循定尺定盘的要求，电缆敷设至盘柜或者就地设备时预留长度是否过长，将这些可能导致电缆浪费的因素提前发现，及时解决。根据工程进度，整理电缆敷设记录，导入电缆敷设优化系统，通过对比电缆的到货量与使用量，准确的把握电缆库存量，及时调整采购计划。在此工程结束收尾时，桥架库存基本为“0”，电缆仅库存23km，库存量占比采购量为1.2%。

3 结论

基于BIM技术的电缆精细化管理完成了电缆和桥架数量的准确统计，电缆敷设路径的合理规划以及桥架安装前优化设计，解决了传统火电项目中电缆与桥架存在的采购超量，库存量高，因工序、工期导致的误工、返工等问题，对于降低工程造价，打造精品工程做出巨大贡献。

参考文献：

[1] 北极星电力网,2020年全国电力版图,2020,https://m.bjx.com.cn/.

[2]周子龙,李铁英,阎立军.基于计算机三维建模理论的户内变电站电缆敷设技术研究[J].微型电脑应用,2020,36(04):97-100.

[3]蔺宏伟.几何迭代法及其应用综述[J].计算机辅助设计与图形学学报,2015,27(04):582-589.[2017-10-05].

作者简介：

吴利平（1975），男，电气工程师，从事电气设备管理工作，E-mail：147912936@qq.com

基于BAS-GRNN模型的电力电缆线芯温度预测方法研究

毛梦婷[1]，徐锐[1]，刘专[1]，曾庆煜[2]

（1.国网江西电科院，江西 南昌 330096；2.南昌大学通信工程，江西 南昌 330100）

摘要：温度是判断电力电缆是否正常运行的重要参数，因此监测电缆温度可及时发现电缆运行故障。但受限于电缆安装环境及温度监测手段，目前难以直接测量电缆线芯温度。针对上述问题，提出一种基于天牛须搜索算法（BAS）优化的广义神经网络（GRNN）模型进行电缆线芯温度预测研究。利用电缆外护套温度、环境参数及负荷电流建立预测模型，结合已有的电缆运行试验数据进行分析研究，研究结果表明利用 BAS 优化 GRNN 算法具有收敛速度快等优点，且能够准确预测电缆线芯温度，符合工程实际要求，具有很大的工程应用价值。

关键词：电力电缆；线芯温度；广义回归神经网络（GRNN）；天牛须搜索算法（BAS）

0 引言

随着城市发展与经济建设的不断推进，电力电缆逐渐成为输配电网络的一大主力。与此同时，电缆安全稳定运行也成为人们关注的研究热点。

由现场运行经验可知，超过90%的电缆运行故障发生在电缆接头处[1]。研究表明，当电缆接头内部存在缺陷或者发生绝缘老化时，容易引起局部温度升高[2]。当接头内部温度超过137℃，电缆绝缘介质将发生电-热击穿[3]，严重时会发生接头爆炸或引起火灾，造成巨大经济损失。电缆的老化、载流量均与温度密切相关，因此监测电缆接头线芯温度可以提前预防故障的发生。然而依靠现有技术手段难以直接测量电缆接头线芯温度，采用内置温度传感器会影响电缆运行及绝缘状况。为保障电缆的安全运行，如何测量电缆接头线芯温度成为电力电缆亟待解决的难题之一。

电力电缆线芯温度计算方法主要包括热路法[4]、数值解析法[5]以及预测法[6]。文献[7]同时考虑单芯电缆径向与轴向传热，建立三维热路模型，提高模型准确性，计算电缆线芯温度。文献[8]基于IEC标准建立三芯电缆稳态热路模型，采用形状因子法计算热阻参数，反推线芯温度。文献[9]利用有限元法计算得到表面温度与线芯温度的对应关系曲线，并利用最小化方法辨识电缆热参数用于修正仿真模型，所提方法需计算得到对应的曲线。文献[10]利用有限元分析方法得到不同条件下的温度数据，并通过仿真数据建立BP神经网络线芯温度预测模型。

电缆接头温度变化是一个复杂的非线性过程，利用电缆表皮温度推导线芯温度，受到负荷电流、环境温度等影响，接头线芯温度推导是一个多元非线性回归的问题。而热路法和数值解析法需依赖于电缆材料参数及环境热参数，各结构热参数不仅难以获取且存在因电缆老化现象而发生改变的问题。以上方法结合电磁学、传热学等理论知识，计算复杂、难度大，故难以适用于实际工程中。因此采用神经网络算法可以避免热损、热阻、热容等参数的计算，不失为一种更好的选择。BP神经网络结构复杂，收敛速度慢。对此，本文通过GRNN对电缆接头线芯温度进行预测，应用BAS优化光滑因子，建立了基于BAS-GRNN的电力电缆接头线芯温度预测模型，并搭建实验平台获得相关数据在MATLAB中进行仿真预测，将预测值与实验值进行对比，验证该模型的可靠性，为电力电缆安全运行提供判断依据。

1 优化广义回归神经网络

1.1 广义回归神经网络

GRNN是美国学者于1991年提出的一种径向基神经网络[11]，拥有很强的非线性映射能力的同时，具有高容错性和鲁棒性，学习速度快、结构简单、拟合及预测非线性模型的能力较强的优点。

算法假设随机变量 x和随机变量 y的联合概率密度函数为 $f(x,y)$,已知 x的观测值为 x_0,计算 y相对于x_0的回归，表示为：

$$\overline{y} = E\ (y/x_0) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} y f(x_0,y)dy}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x_0,y)dy} \tag{1}$$

估计值为所有样本观测值的加权平均，每个观测值的权重因子为相应的样本与之间Euclid距离平方的指数。

GRNN有4层神经元结构，分别为输入层、模式层、求和层和输出层。输入层神经元的数目等于输入向量的维数，神经元接收输入量并直接向前传递

给模式层。模式层神经元通过传递函数：

$$p_i = exp\left[-\frac{(X-X_i)^T(X-X_i)}{2\sigma^2}\right] \quad (2)$$

得到输出，求和层包含2类神经元，按照不同的传递函数对模式层进行输出。将求和层中神经元的加权求和输出与算数求和输出进行相除，得到预测结果为：

$$Y_j = \frac{S_{Nj}}{S_D}, j = 1,2\cdots,k \quad (3)$$

由以上分析可知，GRNN的平滑因子取值对神经网络的预测性能有较大影响[12]，而诸如遗传算法、粒子群算法、共轭梯度法及交叉验证法等[13-14]算法运算量大，效率低，因此本文采用天牛须搜索算法（beetle antennae search，BAS）对GRNN的参数进行优化，所得优化模型用于预测电缆接头线芯温度。

1.2 天牛须搜索算法优化广义回归神经网络

BAS算法是2017年提出的一种智能优化算法。算法仿生受天牛觅食启发，不同于遗传算法、粒子群算法等群体智能算法，该算法只需要一个个体，运算量大大降低。且算法收敛非常快；具有全局寻优能力强，容易实现的特点。利用天牛须搜索算法优化广义回归神经网络的光滑因子（BAS-GRNN）能提高网络的性能，其算法流程如图1所示。

由上文可知，GRNN的训练过程不进行迭代，当输入样本确定后．GRNN网络的结构与权值随即确定，待调参数只有平滑因子。因此，训练网络的过程就是寻找最优的平滑因子。为提高预测精度，采用BAS[16]动态调整平滑因子的值来优化GRNN模型[17]。

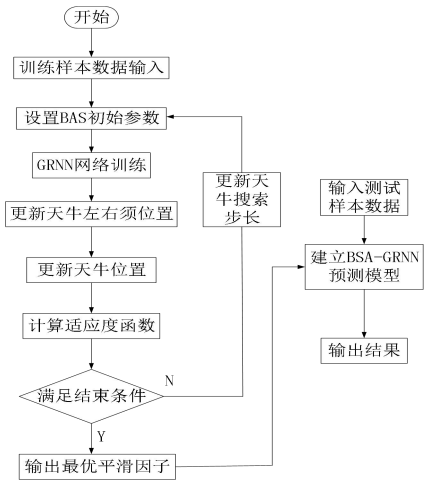


图1 预测算法流程

以平滑因子σ为天牛须质心位置，选取网络训练预测值和实际值的均方差（RMSE）为适应度函数。

2 搭建实验平台及MATLAB仿真预测

2.1 搭建实验平台

在实验室环境下搭建模拟电缆接头工作状况的试验平台。试验选择10kv配网常用的YJV22-8.7/15-3×400的XLPE三芯电缆，并按照工艺流程制作电缆接头。敷设温度传感器检测环境温度以及接头表面温度，采用内置传感器获取线芯温度，通过电流互感器检测电缆电流，采集数据仪上传至上位机。考虑温度分布不均，电缆接头外护套“三点式”检测，将温度传感器每隔120°环形放置，取其平均值作为预测输入量。

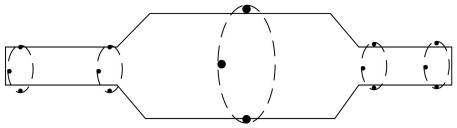


图2 电缆接头温度传感器布点情况

通过试验平台，每隔1h采集一次数据，共记录72组数据，将试验数据划分为训练样本和测试样本，其中训练样本50组，测试样本22组，作为实验1。另重新记录720组数据，其中训练样本698组，测试样本22组，作为实验2。每组数据包含接头线芯温度和与其相关的各变量值。以外护套温度、负荷电流、环境温度为输入样本，线芯温度为输出样本。

表1 实验1数据

序号	环境温度/℃	加载电流/A	外护套温度/℃	接头线芯温度/℃
1	24	200	38.43	44.98
		300	41.30	49.79
		400	43.87	55.24
		500	47.24	63.84
2	25	200	39.86	47.23
		300	42.43	52.03
		400	44.79	57.48
		500	48.13	66.08
…	…	…	…	…
71	28	200	41.72	50.59
		300	43.93	55.39
		400	46.09	60.84
		500	49.58	69.44
72	28	200	43.31	53.95
		300	45.29	58.75
		400	47.39	64.20
		500	51.21	72.80

2.2 MATLAB仿真预测

在MATLAB环境下，编写程序进行网络训练，得到预测模型。BAS算法参数设置如下：eta为1，步长step为1，变步长因子为0.95，迭代次数为100次，初始平滑因子σ_0设为10。

```
% 初始化参数
x = Sigma0;%x表示Sigma的变化，初始值可以设置为1~100，可能比较好
xbest = x;
fbest = myGRNN(x,TrainX,TrainY,TestX,TestY);
fbest_store = fbest;
x_store = [0;x;fbest];
for i = 1:iterNum
    d0 = step/eta;
    dir = rands(Dim,1);
    dir = dir/(eps+norm(dir));
    xleft = x + dir*d0;
    xright = x - dir*d0;
    while xleft<0 || xright <0
        d0 =  d0/1.5;
        xleft = x + dir*d0;
        xright = x - dir*d0;
    end
    fleft = myGRNN(xleft,TrainX,TrainY,TestX,TestY);
    fright = myGRNN(xright,TrainX,TrainY,TestX,TestY);
    x = x - dir*d0*sign(fleft-fright);
    f = myGRNN(x,TrainX,TrainY,TestX,TestY);
    if f < fbest
        xbest = x;
        fbest = f;
    end
    x_store = cat(2,x_store,[i;x;f]);% 将迭代次数、x当前值、当前error记录下来
    fbest_store = [fbest_store;fbest];% 将当前error和最佳（最小）error记录下来
    step = step*alpha;
```

图3 MATLAB仿真程序

3 分析与对比

3.1 实验数据分析

分别输入实验1和实验2的训练样本，得到预测模型，输入测试样本，所得到得预测结果如图4及图5所示。

对实验1及实验2结果进行分析，实验1预测结果最大相对误差为5.46%，平均相对误差为0.30%，实验2预测结果最大相对误差为6.67%，平均相对误差为0.106%。由上述结果可知，BAS-GRNN算法预测接头线芯温度具有很好的精准度。

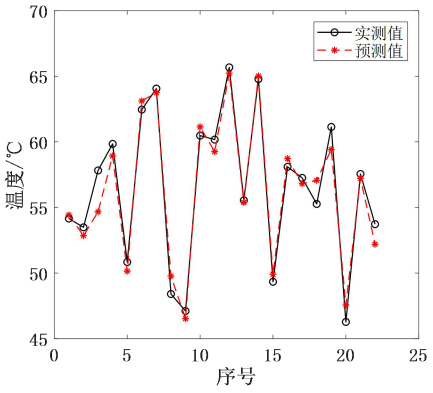


图4 实验1预测结果

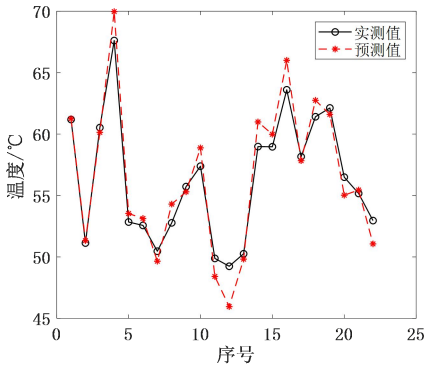


图5 实验2预测结果

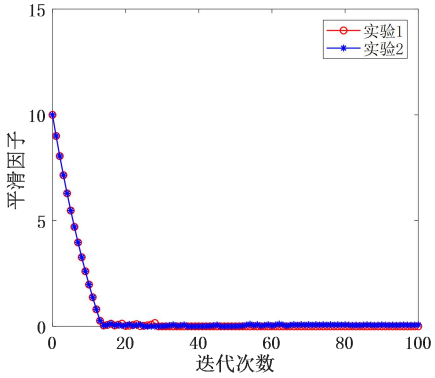


图6 模型计算迭代过程

模型计算迭代过程如图5所示，两次计算均在迭代13次后达到收敛，实验1最佳平滑因子为0.105，实验2为0.0629，验证了BAS-GRNN模型计算快，具有全局寻优能力强的特点。

3.2 BAS-GRNN模型与其他模型对比

将BAS-GRNN模型与未经优化GRNN、BP神经网络算法进行比较。未经优化的GRNN模型采用交叉验证方法进行训练。BP神经网络采用3层网络结构，输入变量维数为3，输入层节点取3，由经验公式 $l=\sqrt{m+n}+a$ 进一步确定隐含层节点数，选择为6；输出变量维数为1，输出节点取1；选择S型正切函数tansig作为隐层神经元的激励函数。同时，预测模型选择S型对数函数logsig作为输出层神经元的激励函数。网络迭代次数epochs为5000次，完成训练并输出结果。

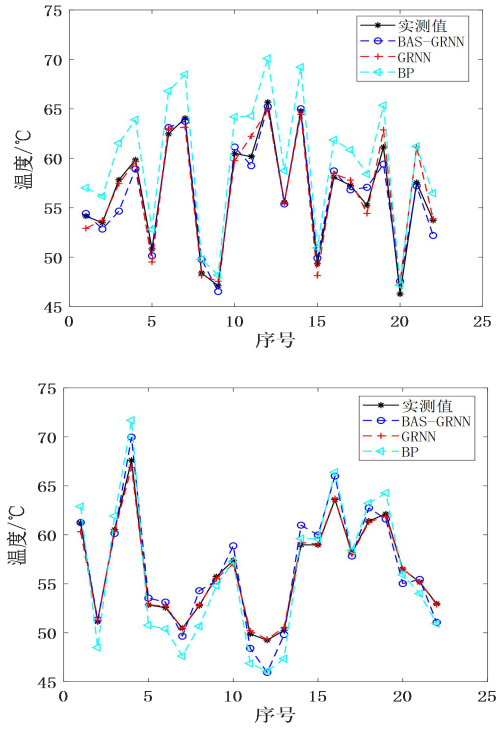


图7 BAS-GRNN（上图）、GRNN-BP（下图）结果对比

采用交叉验证方法的GRNN经过41次迭代，两次实验得到的最佳平滑因子分别为0.4、0.1。由测试集预测结果可以看出，GRNN网络预测值相比于BP神经网络预测效果更好，其中BP神经网络两次实验平均相对误差分别为5.49%和1.16%，最大相对误差分别为6.95%和6.45%，GRNN网络在拟合非线性样本方面能力更强。

将实验1以及实验2结果进行比较发现随着样本容量的增加，GRNN网络及BP神经网络的预测精度都有所提高，但BP神经网络在训练小样本数据预测精度稍逊一筹，且容易陷入局部最优，GRNN网络在回归预测小样本优越性明显。对比未经优化的GRNN网络与BAS-GRNN网络预测结果，未经优化的GRNN网络得到的平滑因子相对更大，且计算迭代次数更多，所需计算时间更长。

根据BAS-GRNN算法模型，对电缆接头线芯温度各预测输入变量进行分析，以实验1结果为例，结果如图8所示。

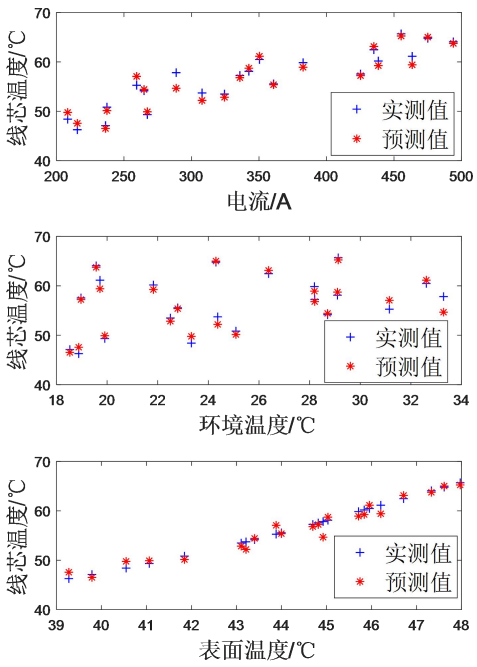


图8 预测输入量与线芯温度变化趋势

可以发现接头线芯温度随电缆运行电流近似线性，随环境温度随变化不是线性，而线芯温度随接头表面温度变化呈线性变化。这是因为接头线芯因运行电流而产生焦耳热的过程存在延时性，而环境温度的变化与线芯温度的变化相互之间并不直接发生影响，线芯电流及环境温度与线芯温度之间的变化关系复杂，接头表面温度可以很好地反映线芯温度的变化趋势，两者变化趋势一致。表面温度的有效获取在线芯温度预测模型精准度中具有重要的影响。

4 结论

以概率计算为理论基础的广义回归神经网络具有强大的非线性拟合能力，本文提出一种优化的广义回归神经网络算法用于电力电缆接头线芯温度预测。通过BAS算法优化GRNN网络光滑因子参数，可以避免人为设置造成的影响，提高网络性能。主要结论如下：

（1）将BAS-GRNN算法与未经优化的GRNN算法和BPNN算法比较，验证本文提出的模型有效性。与BP神经网络相比．GRNN无需反复调节阈值与权值，网络训练速度更快。克服了BP神经网络预测时训练过程中存在局部最小点、收敛速度慢等缺点，网络具有更好的预测效果，在拟合小样本方面具有优越性。与未经优化的GRNN算法相比，BAS-GRNN算法计算速度更快。

（2）通过对本文电缆接头线芯温度各预测输入变量进行分析，相较于线芯电流及环境温度，接头表面温度的有效获取是开展线芯温度预测的关键，对预测温度结果影响更大。

BAS优化算法相比较于遗传算法及粒子群算法，结构简单，易于实现，所提算法对电缆在不同运行状态和不同环境下的线芯温度预测均适用，可以“因地制宜”根据需要修改输入参量即可，通用性较强，具有较大的工程应用价值。

参考文献：

[1]高云鹏，谭甜源，刘开培，et al．电缆接头温度反演及故障诊断研究[J]．高电压技术，2016,042(002):535-542.

[2]彭超，张宇娇，秦威南．基于有限体积法的超高压电缆接头绝缘性能研究[J]．高电压技术，2014,40(012):3695-3701.

[3]高小庆，罗俊华．XLPE电力电缆过负荷温升与早期损坏机理的研究[J]．高电压技术，1997，23(2):62-64.

[4]Institution B S . Electric cables. Calculation of the current rating. Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses. General[J].

[5]梁永春,李延沐,李彦明,柴进爱,王正刚,李忠魁.利用模拟热荷法计算地下电缆稳态温度场[J].中国电机工程学报,2008(16):129-134.

[6]何邦乐，黄勇，叶颋，et al．基于PSO-LSSVM的高压电力电缆接头温度预测[J]．电力工程技术，2019,38(01):37-41.

[7]刘刚,雷鸣,阮班义,周凡,李应宏,刘毅刚.考虑轴向传热的单芯电缆线芯温度实时计算模型研究[J].高电压技术,2012,38(08):1877-1883.

[8]李文祥,刘刚,王振华,王鹏.XLPE三芯电缆稳态并联热路模型及实验验证[J].南方电网技术,2015,9(03):57-62.

[9]周鑫, 彭迎, 李靖,等. 基于反演的电力电缆缆芯温度间接测量研究[J]. 三峡大学学报(自然科学版), 2018, v.40;No.161(02):70-75.

[10]郭文强,张梦梦,李清华,王立贤,董瑶.基于有限元的电力电缆缆芯温度预测方法研究[J].电子器件,2020,43(01):46-51.

[11]Specht DF. A general regression neural network[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991, 2(6):568-76.

[12]Polat O , Yildirim T . Genetic optimization of GRNN for pattern recognition without feature extraction[J]. Expert Systems with Applications, 2008, 34(4):2444-2448.

[13]雷雨, 赵丹宁. 广义回归神经网络在卫星钟差短期预报中的应用[J]. 宇航计测技术, 2013, 33(004):39-44.

[14]肖微, 韩钦, 朱文滔, et al. 基于广义回归神经网络的电缆接头温度预测[J]. 电气应用, 2013(13):34-37.

[15]Xia C , Lei B , Wang H , et al. GRNN Short-term Load Forecasting Model and Virtual Instrument Design[J]. Energy Procedia, 2011, 13:9150-9158.

[16]骆正山, 姚梦月, 骆济豪, et al. 基于KPCA-BAS-GRNN的埋地管道外腐蚀速率预测[J]. 表面技术, 2018, 47(11):183-190.

[17]曹岩枫, 徐诚. 基于果蝇算法优化广义回归神经网络的机枪枪管初速衰减建模与预测[J]. 兵工学报, 2017(01):1-8.

作者简介：

毛梦婷（1995），女，江西南昌，硕士研究生，中级工程师，研究方向为电缆监测，E-mail：823845857@qq.com

调相机与换流站交流滤波器的协调控制措施

周鹏杰，甘祎扬，李宣

（国网江西超高压公司，江西 南昌 330038）

摘要：在我国电网企业快速发展的今天，已经处于世界的领先行列。但是在日常的供电工作中，需要进行一定的电能源供应调节工作，这样才能够保证日常的供电需求，应该做好相关思考工作。在科学技术不断发展的今天，特别需要做好调相机与特高压直流换流站交流滤波器的协调控制工作，这样才能够实现供电与环流作业的有效开展。在日常的应用时，也会出现一系列问题，需要进行及时解决，从而能够实现供电系统的稳定。本文首先针对调相机控制措施和交流滤波器控制措施进行阐述，然后了解无功功率协调控制措施，最后进行仿真实验分析，包括无功率平衡控制实验、交流系统故障实验以及直流系统故障实验。旨在能够有效实现高度协调控制，促进电网供电作业的快速开展。

关键词：调相机；特高压直流换流站；交流滤波器

1 调相机控制措施

现阶段，我国的特高压供电作业具有长足而稳定的发展，很多供电企业都采取高压的方式来进行电力传输工作。因此，就需要做好高压输出的稳定设计，还应该发挥直流滤波器的有效作用，有效促进调相机的融合，这样才能够实现电力传输支持。在特高压供电时，应该运用科学的方法来进行电力传输，主要是需要调相机与交流滤波器的协调控制才能够实现，需要进行一定的研究与讨论。

在我国日常的特高压供电作业中，可以对调相机与滤波器进行有效使用。调相机主要是在特高压输电工作中发挥着极其重要的作用，通过无功电压协同控制的方式来进行带能的输出，从而实现双环控制的效果。内环为换流器中十分重要的元器件之一，通过内环的使用可以在很大程度上确保电压的稳定输出。在进行调相机换流器的运用时，还可以提升高压线的安全性，可以使得整个电网可以进行电力的稳定输出。外环是无功率控制母线的重要组成部分之一，可以实现平衡母线和电压的有效协调，实现电压的稳定输出。还可以利用开关的切换来做好特高压的调整，从而达到控制的目的[1]。

2 特高压直流换流站交流滤波器控制措施

在日常的特高压直流输电过程中，交流滤波器主要作用是提供直流系统所需无功，滤除相应次数谐波，调节交流母线电压的目的，为保障直流系统稳定运行，在直流系统运行过程中必须投入一定数量的交流滤波器（必须满足交流滤波器组数最小运行方式）。交流滤波器由电阻、电抗和电容串并联组成，可以利用自动投切控制技术来进行一定的应用，使得电压稳定输出。还可以利用交流滤波器来进行特高压控制，实现无做功方式的控制。

我国特高压直流输电工程交流滤波器形式多样。其中，根据滤波次数的不同，分为 3 次谐波滤波器、11/13 次谐波滤波器、24/36 次谐波滤波器；根据电源的不同，可分为无源交流滤波器、有源交流滤波器、连续可调交流滤波器。根据调谐方式的不同，可分为调谐滤波器（单调谐、双调谐、三调谐）、高通滤波器、调谐滤波器与高通滤波器结合。

交流滤波器的控制模式包括 ON 模式和 OFF 模式。ON 模式包括手动模式和自动模式，手动模式由运行人员手动在 OWS 机上执行滤波器的投切，自动模式由无功控制（RPC）自动完成所需要的滤波器投切；在 OFF 模式下，无功控制不投切滤波器也不发报警信号，此时直流系统不能启动，当双极运行时，若极间通讯中断，无功控制自动进入 OFF 模式。

3 无功功率协调控制措施

在直流输电过程中，如果采用无功控制方式进行启动，会具有比较长的延时情况。若是在此时出现系统故障，从而导致无法及时做出相应，造成交流滤波器无法进行快速投退。而利用调相机能够在这样的状况下进行强励或者强减操作，能够实现无功率平衡，在暂态情况下能够利用调相机进行单独相应。在进行特高压输电过程中，需要进行调相机系统与滤波器进行协调控制。主要是获取调相机的运行状态和无功功率，并不进行暂态工况的考量，只需要进稳态无功功率进行获取。还需要对站内换流器所消耗的无功功率、交流滤波器的无功功率进行总体计算，从而能够实现交流滤波器投入数量的计算，有效实现输电控制。与此同时，根据无功功率总量来计算调相机的无功出力调制量。为了可以更加有效实现动态无功功率的储备，还需要对调制量进行一定的设置，要求需要控制在设置好的无功出力范围之内。当调相机系统获取相应的指令之

后，需要进行外环控制的引入，并且进行调相机的调节，从而使得换流站和交流系统的无功功率等效交换量趋于 0。如图 1 所示：

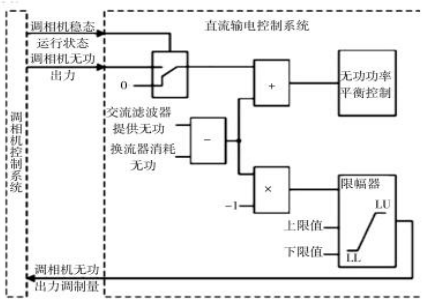


图1 无功功率协调控制策略示意图

对于调相机而言，其无功功率不同于交流滤波器，可以进行平稳的调节，并且调节速度比较快。那么在进行换流站和交流系统无功功率的日常交换工作中，若是无功总额出现变动且未达到交流滤波器动作限值时，就可以依靠调相机的动态响应能力就地平衡无功功率，让其总额逐步趋于 0。当其达到一定的界限时，可以利用直流输电控制系统来进行无功总额的控制，使其可以处于人工控制范围之内。从而能够看出通过协调控制能够使得电力平衡输出，有效进行平衡控制，还可以降低交流滤波器的投退次数。

4 调相机/交流滤波器协调控制仿真试验

4.1 无功率平衡控制试验

通过无功率平衡控制实验可以进行协调控制措施的检验，明确其是否具有一定的效果。本次分析主要是针对鄱阳湖站的实验来进行具体阐述，首先需要进行实验条件进行设置，设定为功率正送模式。通过调相机的使用能够实现无功自动控制模式。通过直流输电系统的有效使用，能够进行调制量的范围设定为（0Mvar,80Mvar）。通过该系统来进行换流器的解锁工作，并且要求直流功率为 5300MW，直流功率从原有的 600MW/min 提升到现在的 5800Mw/min。具体的实验录波波形如图 2 所示：

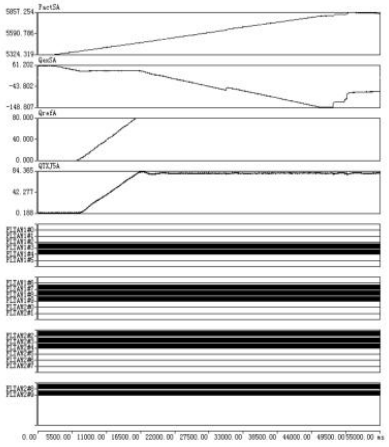


图2 平衡控制实验波形

从按图我们可以看到，齐总的 PactSA 是公共功率，QexSA 是无功功率，QrefA 为无功出力调制量，QTXJ5A 是调相机的稳态无功出力。根据该图能够发现，在直流功率提升时，无功功率反而出现下降。在其下降到槛值之前，需要保证调制量为 0Mvar。当下降到槛值之后，需要无功调制量提升到 80Mvar。通过调相机的使用，能够维持槛值不变。当调相机出力达到一定的极限时，而交流电网的无功功率出现下降。因为调相机的使用能够使得无功下降减少，不会超出设置范围，并且保证滤波器不会出现投退的动作。

4.2 交流系统故障试验

该实验主要考察系统故障对电网的影响，需要设置为功率正送模式，并且进行两台条星级的使用。要求双极四换流器进行解锁，并且保证直流功率控制在 10000MW 左右，设置稳态无功出力为 0Mvar，模拟交流母线接地故障 100ms，电抗值为 0.001H。从而能够得到图 3 和图 4 两个波形图，如下所示：

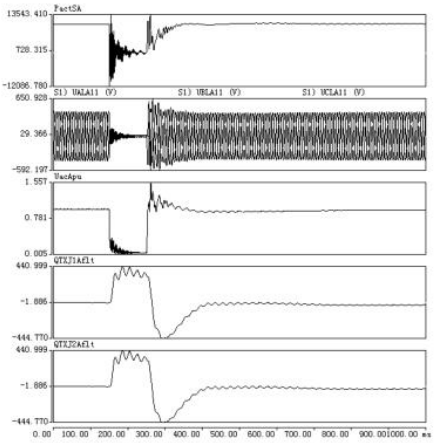


图3 交流系统故障实验波形-0Mvar

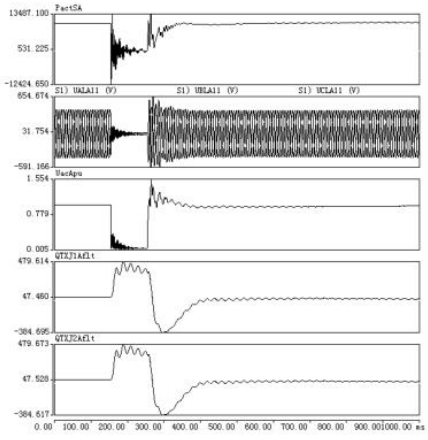


图4 交流系统故障实验波形-50Mvar

通过两个波形图的对比可以看到，在交流母线出现短路故障时，其所具有的电流和电压会发生快速的下降。通过调相机的使用，可以使得交流电压拨动相同。而且调相机所具有的变化量也不会出现

太大的变化，从而能够证明调相机在交流故障中可以实现电压的动态控制[2]。

4.3 直流系统故障试验

该实验主要是测定调相机对直流保护系统故障的影响，设定该实验为功率正送模式，并且使用两台调相机。要求直流功率为 5000MW，调相机无功出力为 50MVar，故障时间为 100ms，接地电阻为 0.01Ω，波形图如下所示：

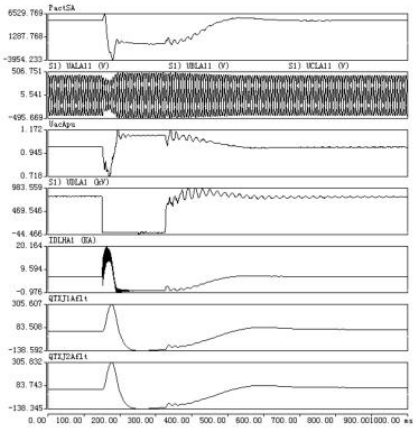


图5 直流线路故障实验波形

从图中能够看到，当接地故障出现 100ms 之后，可以实现直流线路的有效保护，从而能够实现直流系统的重新启动。在进行重启时，会出现电压突然下降然后又快速提升，这样能够实现动态支撑[3]。

5 结束语

综上所述，为了可以有效保证高压输电的稳定性，需要做好输出量的调节工作。因此，在进行系统设备的调节时，需要做好调相机与交流滤波器的有效协调使用，这样才能够确保电压的稳定输出。还应该针对其调谐控制结果做好仿真实验，对特高压电力运输具有非常重要的实际价值。

参考文献：

[1]王少雄,潘学萍,颜君凯,李乐,王正风. 大容量调相机参与下特高压交直流电力系统稳态电压协同控制[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(24):120-127.

[2]陈波,熊华强,舒展,程思萌,陶翔,李升健,汪硕承. 含同步调相机的直流换流站稳态无功协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):156-164.

[3]洪权,李辉,宋军英,郭思源,吴晋波,朱维钧,欧阳帆,徐浩. ±800kV湘潭换流站调相机与特高压直流输电无功电压协调控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(05):35-39.

作者简介：

周鹏杰（1988），男，江西南昌，硕士研究生，工程师，研究方向特高压直流输电，E-mail：361212647@qq.com

VB2-PLUS-12 型开关结构剖析及常见故障处理

段超

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：高压开关柜作为对电能进行交换、控制以及监测的重要设备，将会影响到重要设备的稳定运行，针对 VB2-PLUS-12 型开关结构及原理进行剖析，深入了解其作用机制，从而采取有效的维护及故障排查措施，提升设备在运行中的可靠性，减少故障对企业造成严重经济损失及危害安全运行的可能性，对提高发电能力至关重要。

关键词：高压真空断路器；故障分析；防范措施

1 引言

现如今，在高压配电室中使用了大量的 6KV 真空断路器，同样的，这些断路器所带动的设备也是非常重要的设备，在发电企业，6KV 断路器出故障会极大的影响机组的运行稳定，进而造成不可挽回的损失，因此对 6KV 断路器使用过程中的故障问题进行分析，加强相关专业工作人员对 6KV 断路器的认识，从基本结构和定期维护的角度制定合理的方案，针对性的解决这些故障现象且避免故障的重复发生，有利于提升现代设备的稳定运行，本论文以 VB2-PLUS-12 断路器为例，对 6KV 开关进行剖析。

2 VB2-PLUS-12断路器结构原理

2.1 主体结构

断路器的导电回路为固封式结构，导电回路设置在绝缘件内，这种结构能有效地防止包括外力冲击、污秽环境等外界因素对真空灭弧室的影响。断路器导电回路安装在机构箱后部，与机构连成一个整体，断路器在合闸位置时主回路电流路径为：由上出线座 20 到真空灭弧室内部静触头，经动触头及其连接的导电夹、软连接，至下出线座 22，由绝缘拉杆 23 与内部碟形弹簧经过断路器连杆来完成断路器的操作运动及保持触头接触。(见图 2)

2.2 操作机构

断路器操作机构为弹簧储能机构，机构箱内有合闸单元，由一个或几个脱扣电磁铁组成的分闸单元，辅助开关，指示装置等部件；前方设有合、分按钮，手动储能操作孔，弹簧储能状态指示牌，合、分指示牌（见图 1、图 2，其中 1 合闸弹簧 2 合分闸指示牌 3 分闸半轴 4 储能指示牌 5 计数器 6 微动开关 7 储能电机 8 手动储能轴 9 电机输出轴 10 小齿轮 11 大齿轮 12 合闸线圈 13 合闸板 14 分闸线圈 15 过流线圈或第二分闸线圈 16 储能保持挚子 17 储能保持块 18 合闸联锁板 19 手车联锁板 20 上出线座 21 真空灭弧室 22 下出线座 23 绝缘拉杆 24 输出拐臂 25 分闸弹簧

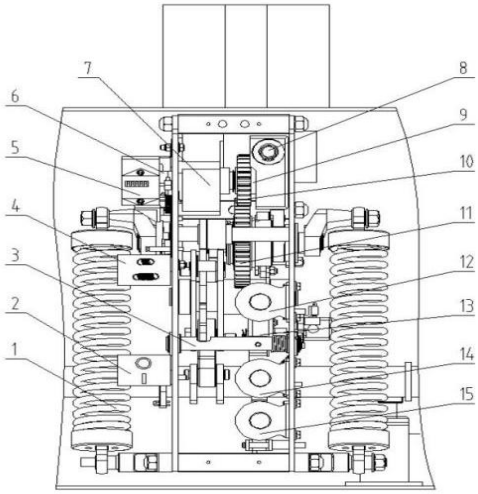


图 1 断路器操作机构正视

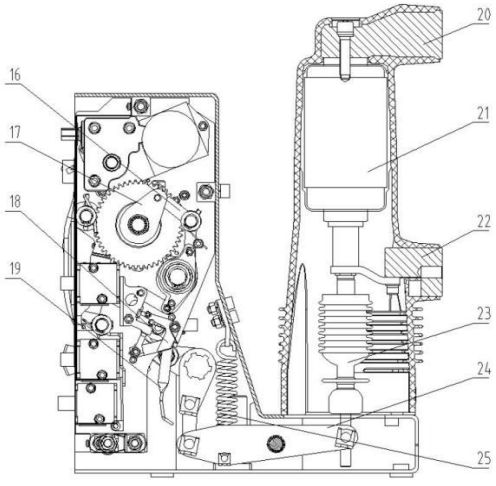


图2 断路器操作机构侧视

2.2.1 储能

断路器合闸所需要的能量由合闸弹簧提供。储能即可以由电机电动完成，也可以使用储能手柄手动完成。

储能操作：由固定在框架上的储能电机 7 进行，或者将储能手柄插入手动储能轴 8 中顺时针摇动进行。电动储能时由电机输出轴 9 带动齿轮系统进行，手动储能时通过手动储能轴 8 带动齿轮系统进行。小齿轮转动时，带动大齿轮一起运动，从而

拉动储能弹簧进行储能。到达储能位置时，储能保持挚子顶住储能保持块，使离合器分离，保持储能位置。储能指示牌显示拉簧拉伸状态，储能完成。微动开关切断储能电机供电电源，此时断路器处于合闸准备状态。

2.2.2 合闸

在合闸过程中，不论用手动按下“合闸”按钮或远方操作使合闸线圈 12 动作，均可使储能保持挚子转离储能保持块，在合闸弹簧力的作用下，带动凸轮转动，凸轮又驱动连杆机构带动绝缘拉杆 26 和灭弧室的动触头进行合闸。合闸动作完成后分闸保持挚子与分闸半轴保持扣接状态，同时储能指示牌、辅助开关复位，电机供电回路接通。若外接电源也接通则再次进入储能状态，连杆拉动合分指示牌，指示“┃”的位置，同时拉动计数器实现计数，传动连杆拉动主轴，带动辅助开关切换。当断路器已处于合闸状态或选用合闸闭锁装置而未接通外接电源、手车式断路器在推进过程中时，均不能进行合闸操作。

2.2.3 分闸

既可按“分闸”按钮，也可接通外部电源使分闸线圈或过流线圈动作，使分闸保持挚子与分闸半轴解锁而实现分闸操作。由触头弹簧和分闸弹簧 28 储存的能量使灭弧室 22 动静触头分离。在分闸过程后段，由液压缓冲器吸收分闸过程剩余能量并限定分闸位置。由连杆拉动合分指示牌显示出“0”的位置，由传动连杆拉动辅助开关切换。

2.2.4 欠压保护功能

断路器合闸动作完成后，分闸保持挚子与轴保持在合闸位置，二次控制电压小于等于额定电压 90％时，欠压模块必须启动对元件储能，进入保持状态；当二次控制电压下降至额定电压的 65％时，欠压模块能量释放给断路器的分闸线圈，使分闸保持挚子与分闸半轴解锁从而实现分闸操作。

2.3 防误联锁

断路器能提供完善的防误联锁操作功能

1）断路器合闸操作完成后，合闸联锁板 18 转动顶住合闸板 13，在断路器未分闸时将不能再次合闸。

2）断路器在合闸结束后，如合闸电信号未及时去除，断路器内部防跳控制器将切断合闸回路防止多次重合闸。

3）手车式断路器在没有到达试验位置或工作位置时，由手车联锁板 19 扣住合闸板，同时切断合闸回路，防止断路器处于合闸状态进入负荷区。

4）手车式断路器在工作位置或试验位置合闸后，由滚轮压住推进机构，手车将无法移动，防止在合闸状态拉出或推进负荷区。

5）如果选用电气合闸闭锁，在二次控制电源未接通情况下阻止手动进行合闸操作。

3 故障及处理方法

3.1 无法合闸

3.1.1 合闸电磁铁不动作

1）合闸电磁铁烧坏，更换合闸电磁铁。2）合闸电磁铁二次线脱落，接好二次线。3）辅助开关接触不良，检查辅助开关，有问题更换。

3.1.2 合闸电磁铁动作但无法合闸

1）合闸电压过低，测量合闸电压，恢复电压。2）二次导线接头松动，检查二次导线，更换问题导线。3）超程太大，调节超程到规定范围。4）小车不在工作位置，也不在试验位置，机械联锁作用导致不能合闸，检查小车是否到位，如有零件损坏，及时更换。

3.2 无法分闸

3.2.1 分闸电磁铁不动作

1）分闸电磁铁烧坏，更换分闸电磁铁。2）分闸电磁铁二次线脱落，接好二次线。3）辅助开关接触不良，检查辅助开关，有问题更换。

3.2.2 分闸电磁铁动作但无法分闸

1）分闸电压过低，测量分闸电压，恢复电压。2）二次导线接头松动，检查二次导线，更换问题导线。

3.2.3 不能电气分闸和手动分闸

分闸脱口失灵，跟厂家联系更换机构。

3.3 其他问题

1）错误判断小车位置，S8、S9 辅助开关失效，或小车变形，应更换辅助开关或修理小车。2）电机不动作，二次接线松脱或电机烧坏，检查二次导线或更换电机。3）电机不能停止，行程开关失灵，更换行程开关。

3.4 在实际运行中已遇到的问题

1）综合故障(F 黄闪):控制回路断线或加热器故障，最常见的是开关的位置节点 S8、S9 不到位应该是“控制回路断线”。

2）地刀位置显示错误，地刀柜前面靠近地刀把插孔位置行程微动开关接触不好或卡涩。

3）地刀插孔的小舌头压不下去（地刀无法插入），地刀柜后地刀连杆的末端小舌头位置不对或强制电磁铁故障。

4）储能电机无法储能，模块烧坏或机构螺丝松动、掉落导致机构无法咬合，以及电机烧坏等。

4 VB2-PLUS-12断路器故障预防措施

正常运行的断路器应定期进行维护检查，每 5 年或操作次数满 5000 次进行一次。出现绝缘不良、元件损坏、拒分、拒合和其它异常时应该维护检查，并测试；测试项目包括：工频耐压测试，机械特性

测试，机械动作测试，紧固件检查，超程开距的测量。断路器操作满 30000 次应进行调换；运行满 25 年应进行设备评估，确定是否需要调换。具体操作步骤，拆开两侧封板目测线圈外围是否完好，然后万用表检测线圈电阻，再检查线圈绝缘性能，是否对地。在正常情况下，电气专业人员应根据实际运行工况，制定计划性的检修维护试验，以及采用现代化监测设备，实时监测断路器在运行中的情况，确保断路器的可靠性。

5 结束语

综上所述，VB2-PLUS-12 断路器是一种比较便利的电气设备，其发生的故障比较少，维护成本相对较低，但是随着长时间使用还是会导致一些问题的发生，只有针对这些故障问题进行有效解决，才可以排除这些使用故障，保证供电设备可以正常运转，从而达到最佳的运行效果。通过加强对相关工作人员的培训工作，才可以减少人为因素导致的的故障问题。

参考文献：

[1]肖良骐.高压断路器二次回路常见故障分析、解决及改进[J].科技信息. 2012(21)

[2]唐红巧.探究电气二次回路常见故障的分析与处理[J].科技资讯. 2017(17)

[3]高照.一起6kV真空断路器自合故障分析[J].民营科技. 2014(06)

[4]王奉冲,王倩,韩本帅.高压断路器防跳及监视回路的方案分析[J]. 电工技术. 2018(01)

作者简介：

段超（1993年），男，湖南娄底，大学本科学历，助理工程师，研究方向：火电电气设备，E-mail：981554841@qq.com

1000MW发电机出口半绝缘电压互感器交流耐压试验方法研究

陶霞

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344128）

摘要：对 100MW 火力发电机组的发电机出口浇筑型电磁式电压互感器（简称 PT）进行交流耐压试验时，因为 PT 变比较大且单个二次绕组对一次绕组、其他二次绕组及地的电容较大，如果采用传统的三倍频感应耐压试验，其二次绕组很容易过载，解决办法有两个：1、可以采用电抗器并联补偿的方式减少流过二次绕组的电流；2、采用串联谐振装置直接从一次侧加压。

关键词：半绝缘；浇筑型；电磁式；三倍频感应耐压；串联谐振

.

0 引言

现在国内的100MW的火力发电机组的发电机出口电压互感器（简称PT）多数采用电磁式电压互感器，并且一般设有三组，其中一组采用浇筑型全绝缘结构，两组采用浇筑型半绝缘结构。电磁式电压互感器的交流耐压试验有两种加压方式。一种是外施工频试验电压的方式，适用于额定电压为35kV及以下的全绝缘电压互感器的交流耐压试验，试验是将互感器一次侧首位短接加压，二次则接地。对于110kV及以上的串级式或者分级绝缘式的电压互感器，《电力设备交接和预防性试验规程》（以下简称《规程》）推荐采用倍频感应耐压的方式。这是因为分级绝缘的互感器及一次绕组的末端绝缘水平很低，约为5kV。因此，一次绕组末端不能与首端承受同一试验电压。而采用感应耐压的方法，可以把电压互感器的一次末端接地，从某一个二次绕组激磁，在一次绕组首端感应出所需要的电压[1]。另外，PT铁心的伏安特性曲线，一般设计在额定频率和电压时接近弯曲部分，若在额定频率时，用高于额定电压2倍（《规程》中规定的PT的耐压值一般都大于其额定电压的两倍）施加于被试PT的二次侧，铁芯会饱和，必然使空载电流急剧增加，达到不能允许的程度。为了使在高于两倍额定电压下，铁芯任不致饱和，可采用提高电源频率的方法。这一点可用变压器感应电动势的公式来说明：

$$E = 4.44fWBS = KfB,$$

式中E—感应电动势；

f—电源频率；

W—线圈匝数；

S—铁芯截面积；

B—磁通密度；

K—比例常数。

由此可知：若保持B不变，K为常数，当作感应耐压需要电动势增加一倍时，则频率必须增加一倍，因此感应耐压的频率要大于额定电源频率的两倍及以上，半绝缘PT最常用的方法是采用三倍频感应耐压试验。全绝缘PT外施工频试验时，因为首尾短接，一次绕组内没有电流，一次绕组对二次绕组及地的电容很小，所以耐压设备需要的提供的电流很小，一般的交流耐压设备都可以满足需要。

1 三倍频电源的获取及选择

1.1 三倍频电源的获取

三倍频电源的获取方式常用的有两种：1）利用三台单相变压器，一次侧接成星形，二次侧接成开口三角形，如图1所示。当在一次侧加压，使变压器的铁芯过励磁时，由于是星形接法，则一次侧没有3次谐波电流，由于铁芯中有三次谐波磁通，每相绕组便感应出三次谐波电动势，当励磁电流为正弦波，在铁芯饱和情况下，主磁通的波形时平顶波，这样，在主磁通波中包含了较大的3次谐波[2]。

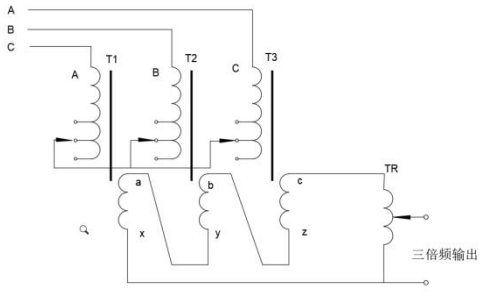


图1.三台单相变压器获取三倍频电源图

2）利用可控硅变频器组合电源。如图二，三相交流电源输入，通过整流电路，利用二极管的单向导电性将正负变化的交流电压变成单向脉动电压，再经过滤波电路，调整成平直的直流电压，然

后由逆变电路根据不要或者设定采样，将直流电压变成我们需要的频率的交流电压。

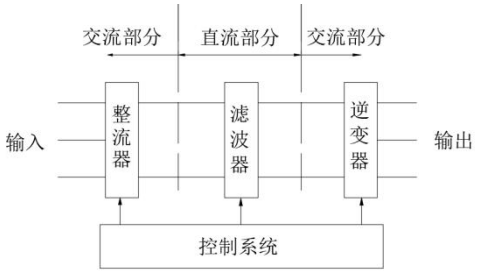


图2. 可控硅获取三倍频电源图

1.2 三倍频电源的选择

现场应用实际中发现，利用三台单相变压器，一次侧接成星形，二次侧接成开口三角形的方式得到的三倍频电源，在其主磁通的波形时平顶波时，除了得到较大分量的三次谐波之外，还有其他多次谐波，而外电路没有很好的滤波电路，在实际的试验中，我们发现电压浮动很大，特别是在磁通没有饱和之前，电压可以30V到100V之间跳变，稳定性非常不好。所以不推荐此方法来获取三倍频电源。利用可控硅变频器组合电源的到的三倍频电源，因为电路本身是一个交流-直流-交流的过程，中间又有较好的滤波电路，所以得到的交流波形比较平稳而且波形比较好，推荐现场采用这种变频电源进行三倍频感应耐压试验。

2 百万机组发电及出口半绝缘PT耐压试验方法选择

2.1 百万机组发电及出口半绝缘PT耐压面临的问题

以我厂发电机出口半绝缘PT为例，其名牌数据如下：

表1. 厂发电机出口半绝缘PT铭牌数据

型号：JDZX1-27	标准代号：GB1207-2006	频率：50HZ	质量：114kg
额定电压比：27/ /0.1/ /0.1/ /0.1/3 kV			极限输出：400VA
二次绕组			
端子标志	1a1n	2a2n	dadn
准确级	0.2	3p	6p
额定输出（VA）	65	70	100

按照《规程》推荐，一般我们从PT二次侧侧选取容量最大的一组绕组加压，在这我们一般选择dadn绕组进行三倍频感应耐压试验。按照极限输出的电压计算机二次能承受的最大电流：

$$I=\frac{P}{U}=\frac{400}{0.1/3}=12A$$

按照《规程》要求，额定电压为27 kV的非有效接地系统的电压互感器其一次耐压值应该为71 kV，按照变比换算到dadn绕组后其电压为151.6V。采用该方法试验时，需要在PT的一次测接高压电压表，二次侧接低压电压表，以检测一次、二次侧电压，防止一次侧电压过高而损坏PT绝缘。现场实际，我们用150HZ的交流电从dadn绕组加压到50V的时候，二次电流已经达到了10A,而绕组承受的极限电流只有12 A，显然用直接加压的方法是行不通的。

2.2 百万机组发电及出口半绝缘PT的耐压试验方法

2.2.1 二次侧电抗补偿电流法

在进行交流耐压而容量不够时，一般会考虑补偿，补偿方式有两种：1）串联补偿，一般用于试验设备电流可以满足而电压不能满足被试物的情况；2）并联补偿，一般用于试验设备电压可以满足而电流不能满足被试物的情况。为了解决上述dadn绕组加压时二次电流过大的问题，可以考虑在二次侧并联电感进行补偿。由于PT二次绕组对一次绕组及地的电容值直接测量比较困难，可以用现场实际试验值进行计算。具体做法如下：在PT一次侧不加电压检测装置的情况下，从dadn绕组加工频电压到20-30V时（可以偏离这个电压，但是要实时关注二次电流，防止二次过电流），记录二次电流，根据：

$I=WCU=2\prod fCU$可得C= $\frac{I}{2\pi fU}$ 由此计算得到PT二次绕组对一次绕组及地的电容值C,然后根据该电容值计算完全补偿时需要的电感值。当被试物和补偿电抗的容抗等于感抗时，形成谐振，达到完全补偿。即：$WL=\frac{1}{WC}$ 则补偿电感 $L=\frac{1}{CW^2}=\frac{1}{C(2\pi f)^2}$ 该式中，当用三倍频时f取150HZ，电容值C已经计算得到，所以可以计算出补偿电感 L。实际应用中我们发现按照计算出来的电感进行补偿时，效果并不好，二次电流还是会出现超极限的情况，原因是PT的二次绕组本身也是电感，但是在计算补偿的时候我们将流过PT的二次绕组的电感电流也当做电容电流来计算了，而且电感之间还有极性问题等，所以要想用该方法减少二次电流，还需要在计算得到的电感的基础上，增大或者减小电感，反复尝试才能得到一个合理的补偿电感。

2.2.2 取消PT一次侧电压检测回路

在PT一次侧接电压检测回路的情况下，二次绕组加压，一次侧感应出高电压，检测装置通过电容

对地构成回路，所以有电容电流，一次绕组为电感有电感电流，这些电流虽然很小，但是百万机组发电机出口PT变比较大，这些电流折算到二次侧还是占二次电流的很大份量。现场实际证明，当取消PT一次侧电压检测回路时，能大幅度降低耐压时PT二次侧电流，但是失去一次侧的电压检测，有可能我们在二次侧加压的时候一次侧出现过电压导致PT绝缘损坏而成为机组安全稳定运行的隐患。所以不推荐使用该方法进行PT耐压试验。

2.2.3　利用工频耐压设备直接从PT一次侧加压

由于半绝缘PT的尾端绝缘水平只有5kV左右，所以不能将其首尾段短接加压，但是可以将其尾端接地，将电压加在首端，采用这种方式加压，到电压达到其额定电流的两倍多的时候，其电流大概在2A左右，则所需要的耐压设备的容量会很大。以发电机出口电压为27kV为例计算需要的耐压设备的容量：

按照《规程》其耐压等级是71kV，按照标准试验变压器的规格，只能选择输出电压为100kV，电流2.5A的试验变压器，则其容量为$S=UI=100+2.5=250KVA$,容量如此大的，试验变压器的体积会非常庞大，不适合现场实施，所以该方法有也不推荐。

2.2.4　利用串联谐振设备直接从PT一次侧加压

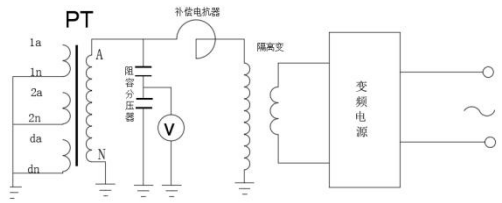


图3. 利用串联谐振设备从PT一次加压图

如图3所示，利用串联谐振设备从PT一次侧加压时，PT二次侧所有绕组单端接地，用于电压检测的阻容分压器接在高压侧，随时检测PT一次侧电压。该方法的优点在于：1、频率可调，（按照《规程》要求频率一般不大于200HZ），根据公式1，在使用倍频的情况下可以明显减少铁芯的饱和程度，从而减小电流。2、串联谐振可以明显减少电源的输出电压（原理这里不再冗述）。3、基于优点1和2，则耐压设备的体积和重量都比工频设备小很多，现场容易搬运和操作。4、一次侧电压随时可以检测，防止超压损坏设备绝缘。现场应用实际也证明利用串联谐振设备从PT一次侧加压是目前做百万机组发电机出口半绝缘PT耐压试验比较简单易操作的试验方法。

3　结束语

综上所述，百万机组的半绝缘出口PT因为变比及绝缘材料的原因，用普通的三倍频感应耐压的试验方法对其进行交流耐压试验比较困难。利用串联谐振设备从PT一次侧加压的方法是目前操作性较强的一种试验方法。如果发电机出口PT改用电容式电压互感器，将更加方便试验。

参考文献：

[1]陈化刚 程林 吴旭涛 电力设备预防性试验方法及诊断技术（第二版）【M】北京：中国水利水电出版社，2017

[2]李建明 朱康 高压电气设备试验方法（第二版）【M】北京：中国电力出版社，2015

作者简介：

陶霞（1980），女，甘肃，硕士研究生，高级工程师，研究方向：电气试验，E-mail：147704946@qq.com

多模式自适应新型区域备自投方案的探讨

黄鑫

（国网江西南昌供电公司，江西 南昌 330069）

摘要：对于由 1 个 220kV 变电站送出的同杆并架或同沟敷设的双路电源供电方式，并不能有效提高所接带 110kV 变电站的供电可靠性。将不同 220kV 变电站供电的 110kV 变电站进行串接虽然在物理上实现了双电源供电，但多回进线的串接方式并不适用于当前所提出的区域备自投，其供电可靠性仍无法得到保障。按照电网实际的正常运行和正常检修两种方式，穷举了该类 110kV 变电站接线方式下的所有运行方式，提出了自适应每种运行方式的备自投动启动模式和动作策略，对提高该类接线方式变电站的供电可靠性提供了参考与借鉴。

关键词：多回进线串接方式；区域备自投；多模式；自适应

1 引言

备用电源自动投入（简称备自投）是提高供电可靠性的一种有效手段[1]，适用于具备两路及以上电源的接线方式，因此在供电可靠性要求较高的地区广泛建设两路电源供电的单母分段或内桥接线的变电站。但因线路走廊、土地资源等因素影响，早期电网建设时往往采用由 1 个 220kV 变电站送出的同杆并架或同沟敷设的双路电源来提高所接带 110kV 变电站的供电可靠性，该类供电方式虽然可以确保当一路电源失压时通过备自投自动将失压部分转供至另一路正常电源供电，但受到外破导致两路电源同停的风险巨大，且当一路电源故障时，经常由于安全距离不足导致需要另一路电源陪停才可消缺，大大降低了该变电站的供电可靠性。

将 110kV 变电站串接在两座 220kV 变电站中间，形成“手拉手”式闭环连线开环运行的网架结构，再装设区域备自投，可以很好的兼顾电网投资与供电可靠性。对于已经采用双路电源同杆并架或同沟敷设供电的 110kV 变电站，将由不同 220kV 变电站供电的 110kV 变电站进行单回联络形成多回进线的串接方式是实现双电源供电的最优方式，但当前诸多文献提出的区域备自投并不适用于此类接线方式[2-4]。为此，笔者针对南昌电网实际情况，针对该类接线方式下的各类运行方式提出了多模式自适应新型区域备自投动作方案。

2 多回进线串接方式

110kV 变电站 1、2 分别由不同 220kV 变电站送出的进线 1、2 进行供电，通过联络线对接形成了多回进线串接方式，如图 1 所示。图中的 PT 表示电压互感器，DL 表示断路器。

考虑不能长期电磁环网运行，联络线与同一段段母线的进线不同时运行。考虑实时监测联络线运行情况，联络线始终保持带电运行。按照电网生产实际运行情况，该类主接线方式的变电站运行方式分为正常方式和检修方式两类。

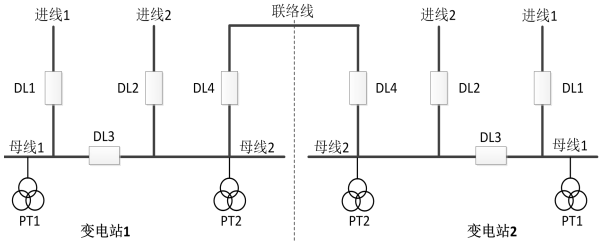


图 1 多回进线串接方式

2.1 正常方式

正常方式为 110kV 变电站的两回进线为主供电源，联络线处于送电空载状态，分段开关处于热备用状态，按照联络线开关状态分为 2 种，如图 2 所示：

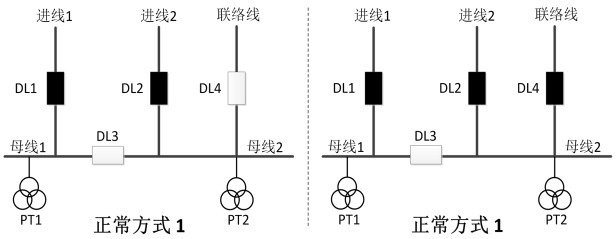


图2 2种正常方式

2.2 检修方式

检修方式仅考虑一回进线处于检修即 N-1 方式，此时变电站全站由另一回进线供电或由另一回进线与联络线共同供电，不考虑两回进线同时检修时全站由联络线供电的运行方式，共有 5 种运行方式，如图 3 所示。

3 备自投动作方案

3.1 备投通信方式

由于目前 110kV 线路光纤保护的广泛投入，区域备自投之间的信息传输可以依靠光纤通道，光纤

通信具备无误差、传输速度快、传输容量大且不受外界电磁干扰等多方面优势[5]，因此采用光钎通信是站间区域备自投的最佳通信方式。

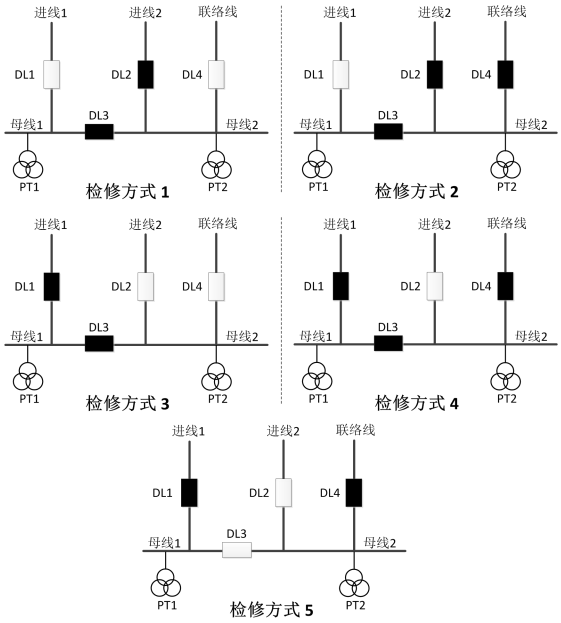


图3 5种检修方式

3.2 备投运行方式

按照 2 种正常方式和 5 种检修方式，将变电站 1、2 进行方式组合，共计 7×7=49 种组合方式，排除联络线停运、进线与联络线同时运行以及变电站未正常供电的组合方式后，符合电网实际运行的备自投适用运行方式共计有 24 种，远远多于常规“手拉手”式的 6 种运行方式[6]，具体运行方式组合如下表所示：

表1 运行方式组合图

变电站1	变电站2				方式数量
正常方式1	正常方式2	检修方式2	检修方式4		3
正常方式2	正常方式1	检修方式1	检修方式3	检修方式5	4
检修方式1	正常方式2	检修方式2	检修方式4		3
检修方式2	正常方式1	检修方式1	检修方式3	检修方式5	4
检修方式3	正常方式2	检修方式2	检修方式4		3
检修方式4	正常方式1	检修方式1	检修方式3	检修方式5	4
检修方式5	正常方式2	检修方式2	检修方式4		3
合计					24

3.3 备投启动模式

备自投启动模式分为就地分段备自投模式以及区域备自投模式，根据不同运行方式下的不同跳闸情况自适应启动相应模式。对于正常方式，一回进线跳闸，优先启动就地分段备自投模式，若就地分段备自投动作不成功，再启动区域备自投模式。对于各类检修方式，自适应启动就地分段备自投模式或区域备自投模式。

设置 7 种备投方式的软压板进行方式的投退，以便开展相关的传动、调整和检修等工作。引入母线 PT 三相电压用于有压、无压判别，引入进线、联络线三相电流防止母线 PT 故障造成备投误动作。引入各开关的跳闸位置接点作为运行方式的判别，引入各开关的合后位置信号作为各种运行方式下的手跳闭锁。区域备自投模式的充放电条件如下：

充电条件：

（1）母线 1、2 均三相有压；

（2）联络线、对侧母线 2 有压；

（3）开关状态满足相应备投方式。

放电条件：

（1）联络线、对侧母线 2 不满足有压条件；

（2）断路器拒跳或位置异常；

（3）开关状态不满足相应备投方式；

（4）没有跳闸出口时，开关合后位置继电器为 0；

（5）备自投方式的控制字或压板退出；

（6）备自投动作；

（7）闭锁备自投；

（8）通道正常时，收到对侧闭锁区域备自投信号。

就地分段备自投模式充电条件不考第 2 点，放电条件不考虑第 1、8 点，其他与区域备自投模式相同。当所有充电条件均满足且所有放电条件均不满足备自投经延时充电，任一放电条件满足备自投经延时放电。

3.4 备投动作策略

以变电站 1 为例，对其在 2 种正常方式和 5 种检修方式下的动作过程进行详细说明。

3.4.1 正常方式1

（1）当进线 1 跳闸，检测进线 1 无流、母线 1 无压、进线 2 有流、母线 2 有压，启动就地分段备自投模式，跳开 DL1 开关，延时合上分段 DL3 开关。

（2）当进线 2 跳闸，检测进线 2 无流、母线 2 无压、进线 1 有流、母线 1 有压，启动就地分段备自投模式，跳开 DL2 开关，延时合上分段 DL3 开关。当备自投发出合闸命令后，检测 DL3 开关在分位、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、对侧 DL4 开关在合位，启动区域备自投动作模式，延时合上 DL4 开关。

（3）当进线 1、2 同跳，检测进线 1 无流、母线 1 无压、进线 2 无流、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、对侧 DL4 开关在合位，启动区域备自投模式，跳开 DL1、DL2，延时合上 DL4 开关。

3.4.2 正常方式2

（1）当进线 1 跳闸，检测进线 1 无流、母线 1 无压、进线 2 有流、母线 2 有压，启动就地分段备自投模式，跳开 DL1 开关，延时合上分段 DL3 开关。

（2）当进线 2 跳闸，检测进线 2 无流、母线 2 无压、进线 1 有流、母线 1 有压，启动就地分段备

自投模式，跳开 DL2 开关，延时合上分段 DL3 开关。当备自投发出合闸命令后，检测 DL3 开关在分位、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、DL4 开关在合位，启动区域备自投动作模式，延时合上对侧 DL4 开关。

（3）当进线 1、2 同跳，检测进线 1 无流、母线 1 无压、进线 2 无流、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、DL4 开关在合位，启动区域备自投模式，跳开 DL1、DL2，延时合上对侧 DL4 开关。

3.4.3 检修方式1

当进线 2 跳闸，检测进线 2 无流、母线 1 无压、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、对侧 DL4 开关合位，启动区域备自投模式，跳开 DL2 开关，延时合上 DL4 开关。

3.4.4 检修方式2

当进线 2 跳闸，检测进线 2 无流、母线 1 无压、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、对侧 DL4 开关分位，启动区域备自投模式，跳开 DL2 开关，延时合上对侧 DL4 开关。

3.4.5 检修方式3

当进线 1 跳闸，检测进线 1 无流、母线 1 无压、母线 2 无压、对侧母线 2 有压、对侧 DL4 开关合位，启动区域备自投模式，跳开 DL1 开关，延时合上 DL4 开关。

3.4.6 检修方式4

当进线1跳闸，检测进线1无流、母线1无压、母线2无压、对侧母线2有压、对侧DL4开关分位，启动区域备自投模式，跳开DL1开关，延时合上对侧DL4开关。

3.4.7 检修方式5

（1）当进线 1 跳闸，检测进线 1 无流、母线 1 无压、联络线有流、母线 2 有压，启动就地分段备自投模式，跳开 DL1 开关，延时合上分段 DL3 开关。

（2）联络线跳闸，检测联络线无流、母线 2 无压、进线 1 有流、母线 1 有压，启动就地分段备自投模式，跳开 DL1 开关，延时合上分段 DL3 开关。

（3）当进线 1、联络线同跳，检测进线 1 无流、联络 2 无流、母线 1 无压、母线 2 无压，备自投不启动。

4 结语

本文针对当前提出的区域备自投无法适用的多回进线串接的接线方式，全面列举了该类接线方式下符合电网生产实际的运行方式，提出了不同运行方式下备自投不同优先级的启动模式，针对各类运行方式逐一探讨了备自投的动作策略，极大提高了正常运行方式的供电可靠性，有效保障了各类检修方式的供电可靠性，较当前提出的区域备自投适用性更为广泛，具有较好的工程应用价值和推广价值。

参考文献：

[1]任祖怡,窦乘国,许华乔.新型智能备用电源自投装置[J].电力系统自动化,2003,27(9):86-87.REN Zuyi,DOU Chengguo,XU Huaqiao.A new intelligent equipment for automatic bus transfer[J].Automation of Electric Power Systems,2003,27(9):86-87.

[2]周伊琳,孙建伟，陈炯聪.区域网络备自投及其测试关键技术[J].电力系统自动化.2012,36(23):109-113.

[3]杨合民,路小俊,王 军，等.一种适用于串联电网接线的远方备自投装置[J].电力系统自动化.2011.35(20):94-97.

[4]杨合民,路小俊,王 军，等.链式接线变电站备自投方案的探讨[J].电力系统自动化.2011.35(20):94-97.

[5]卜明新,武晋文,吴孔松,等.基于光纤通信交互式远方自投装置的研发与应用[J].电力系统保护与控制.2009.37(22):126-128.

[6]施雄华,郭云川，金 震，等.适用于串行供电网络的区域备用电源自动投入系统[J].电力系统自动化.2013.37(23):88-92.

作者简介：

黄鑫（1988），男，江西高安，硕士研究生，高级工程师，继电保护技术，E-mail：154759092@qq.com

电量变送器检定装置不确定度评定

马振天

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：本文介绍了不确定度相关概念及测量中影响不确定度评定的多种因素，通过实际应用对实验室一台电测量变送器检定装置不确定度做出评定。

关键词：电量变送器检定装置；不确定度评定

1 不确定度相关概念

1.1 测量不确定度

测量不确定度是表征赋予被测量值分散性的非负参数，是一个表征测量结果可靠度的参数。测量不确定度越小，表明测量结果可靠度越高。一组测量值只是被测量的估计值，在测量的过程中的随机效应及系统效应均会导致测量不确定度。

1.2 不确定度的来源

在实际测量中，有许多可能导致不确定度的来源。

a)被测量的定义不完整；

b)被测量定义的复现不理想；

c)取样的代表性不够，即被测样本可能不完全代表所定义的被测量；

d)对测量受环境条件的影响认识不足或对环境条件的测量不完善；

e)模拟式仪器的人员读书偏移

f)测量仪器的计量性能的局限性，即导致仪器不确定度；

g)测量标准或标准物质提供的标准值的不确定；

h)引用的常数或其他参数值的不确定；

i)测量方法和测量程序中的近似和假设；

j)在相同条件下，被测量重复观测值的变化。

1.3 不确定度的评定

a)A 类评定方法

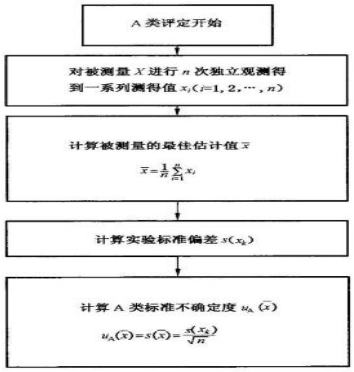


图1 A类评定流程图

b)B 类评定方法

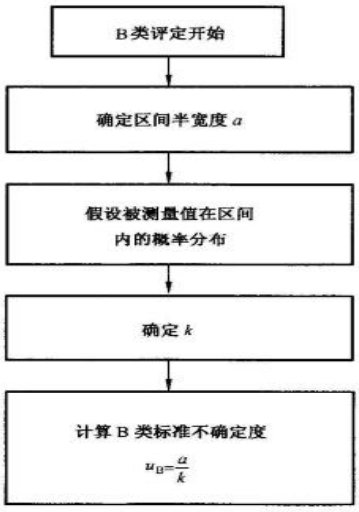


图2 B类评定流程图

1.3 电量变送器检定装置不确定度的评定

1.3.1 测量仪器及被测对象

测量仪器：电量变送器检定装置 CL3601B。仪器相关参数如下：

表1-1

交流电压	单相（0~600）V	三相（0~1000）V	±0.05%RG
交流电流	单相（0~100）A	三相（0~50）A	±0.05%RG
直流电压	（0~1000）V		±0.01%RG
直流电流：	（0~30）A		±0.01%RG
有功功率	25mA-100A ，30V—600V,PF≥0.5		± 0.05%RG

被测对象：有功功率变送器 FPWT-201 型（0~866W/4~20mA）

测量环境:电测实验室（环境温度：26℃、环境湿度：56%）

1.3.2 不确定度来源分析

a)由测量标准器测量重复性引入的不确定度 u(p)

b)标准器本体功率输出准确度引入 u(I1)

c)标准器直流输入测量准确度引入 u(I2)

d)由实验室环境及操作人员不稳定引入的不确定度 u(A)

1.3.3　不确定度评定方法

本文中仅用有功功率点为例，为简化实验步骤，每次检定可只检定 866W 的一点，但每次检定时必须回零。u(p)由标准器的测量重复性引入，可通过独立重复测量一个功率点 n 次，并通过 A 类不确定度评定方法来评定；u(I1)及 u(I2)为标准器输出、输入测量准确度引入的不确定度，通过查阅标准器说明书可得其功率输出基本误差限：+0.05%RG、直流输入测量基本误差限：+0.01%RG；通过 B 类不确定度评定方法评定。

a）A 类不确定度评定方法：

用本标准装置对实验室一台专用的有功功率变送器（0-866W）进行重复性测量，选取其中 866W 一点并使用标准器对其重复进行 10 次测量（测量数据用 y 表示，本次所使用数据均为示值表示，如表 1-2），重复 10 次测量所得平均值为：

$$\bar{y}=19.99995$$

表1-2

测量次数	测得值
1	19.99990
2	19.99989
3	19.99997
4	19.99988
5	19.99988
6	20.00010
7	19.99996
8	19.99993
9	20.00009
10	19.99991
y	19.99995

单次测量结果的实验标准偏差为：

$$s(y_i)=\sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}=0.00008$$

标准不确定度：

$$u(\bar{y})=s(\bar{y})=\frac{s(y_i)}{\sqrt{n}}=\frac{0.00008}{1}=0.00008$$

自由度为：　　V_i=(n-1)=9

b）B 类不确定度评定方法：

通过查阅标准器说明书可得其功率输出基本误差限：±0.05%RG，在此范围内可认为服从正态分布，包含因子 k=3（p=99%），所以有功功率输出区间半宽 a=0.05%，其不确定为：

$$u(I_1)=\frac{0.05\%}{3}=1.67\times10^{-4}$$

自由度为：

$$\frac{\delta(u_1(I_1))}{u_1(I_1)}\approx0.02$$

通过查阅 JJF1059.1-2012 表 4，其自由度 V1=12。

通过查阅标准器说明书可得其直流输入测量基本误差限：+0.01%RG，在此范围内可认为服从正态分布，包含因子 k=3（p=99%），所以直流输入测量区间半宽 a=0.01%，其不确定为：

$$u(I2)=\frac{0.01\%}{3}=3.33\times10^{-5}$$

自由度为：

$$\frac{\delta(u_2(I_2))}{u_2(I_2)}\approx0.02$$

通过查阅 JJF1059.1-2012 表 4，其自由度 V1=12。

c）合成不确定度：

$$u_c(y)=\sqrt{u(I_1)^2+u(I_2)^2+u_y{}^2}$$

$$=\sqrt{(1.67\times10^{-4})^2+(3.33\times10^{-5})^2+(0.8\times10^{-4})^2}$$

$$=0.00018814888$$

$\cdots\approx1.88\times10^{-4}$

有效自由度：

$$V_{eff}=\frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^{N}\frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

$$\because V_{eff}=\frac{12\times1.88^4}{1.67^4+1.33^4}$$

$$\therefore V_{eff}\approx13$$

d）扩展不确定度：

查阅 JJF1059.1-2012 附 B 中 t 分布点表，取置信概率 p=95%（Veff≈13）得 k=2；则

$$U_{0.95}=ku=2\times1.88\times10^{-4}=3.76\times10^{-4}$$

$$U_{0.95}=0.0376\%$$

验证合格，可满足生产变送器检定要求，可作为校验相应等级变送器标准装置。

参考文献：

[1]JJF 1059.1-2012测量不确定度评定与表示
[2]JJG-596-2012电子式交流电能表
[3]JJG-597-2005交流电能表检定装置检定规程

作者简介：

马振天（1993-04-23），男，甘肃武威，本科，助理工程师，从事继电保护工作，E-mail：2836001496@qq.com

发电机出口隔离开关9201G缺陷处理

刘清艳

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：保护二次设备及控制回路在运行一定时间周期后，往往随着设备及元器件老化的发生，产生出各类缺陷。而处理缺陷的方法工艺决定缺陷处理的质量如何。在充分分析控制回路工作原理，了解元器件结构及参数，能有效提高缺陷处理质量。

关键词：继电保护；控制回路；元器件；缺陷处理

1 引言

水轮发电机出口侧一般装设机组出口断路器和机组隔离开关，机组出口隔离开关不仅作为发电机与220kV主变的明显电气断开点，同时隔离开关分合闸的成功还决定着机组开停机的成功。

2 现象

2021年6月19日，2号机开机过程中由于发电机出口刀闸9201G自动合闸不到位导致了开机失败，经调整辅助开关的接点位置后，2号机出口隔离刀闸9201G在合闸时合闸接点接通良好，并且在监控和现地多次操作分合闸时，分合正确，监控显示也正确。2021年6月25日，2号机自动开机过程中又因为发电机出口刀闸9201G合闸失败而造成开机流程退出。

3 隔离开关工作原理及原因分析

3.1 隔离开关原理接线图

2号发电机出口隔离开关其原理图如图1

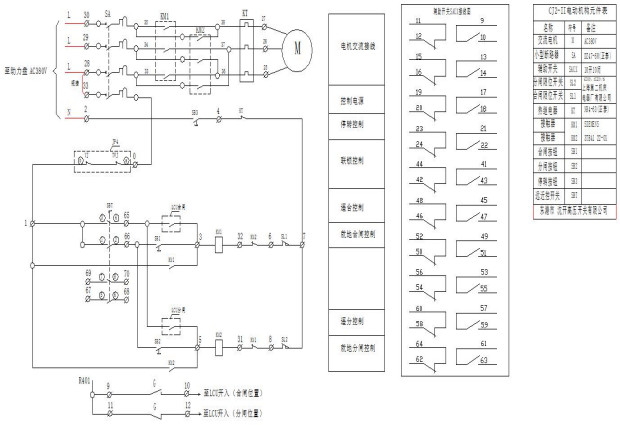


图1 隔离开关原理接线图

由图分析其工作原理如下：

1）控制电源火线经空气开关接入出口开关分闸断路器辅助接点与机端电压继电器YJ的常闭接点组成的闭锁回路（原用的为TWJ接点，后经出口隔离开关操作机构改造后，加入了机组出口断路器辅助开关常闭接点），当断路器在合闸状态时，断路器辅助开关常闭接点断开，闭锁隔离开关操作。机端电压继电器为辅助闭锁，避免因TWJ失电返回造成TWJ接点闭合，而断路器实际位置为合位状态误分合隔离开关。

2）合闸过程：当出口开关在分闸位置，机端无压的状态下，控制回路中火线送至隔离开关现地控制柜中端子排1上，经远近控切换把手的①、③端，当处于远方方式时，切换开关③、④接通，监控发出合闸令，LCU合闸接点接通，经端子排3至合闸接触器KM1线圈，经互锁接点KM2至合闸限位开关SL1至端子排7，接入至电机热继电器常闭接点KT，经停止按钮SB3回到零线N，当所有的常闭接点均闭合时，合闸接触器接受监控合闸令使KM1励磁动作，接触器主触头接通三相电源使电机正转进行合闸动作，接触器KM1辅助常开触点闭合，即使监控或现地手动合闸令返回，也能通过合闸接触器辅助常开触点KM1对合闸回路进行自保持供电，直到合闸到位限位开关SL1动作，接点断开合闸回路使KM1失电返回，同时使自保持常开辅助接点KM1返回。

3）分闸过程：当出口开关在分闸位置，机端无压的状态下，控制回路中火线送至隔离开关现地控制柜中端子排1上，经远近控切换把手的①、③端，当处于远方方式时，切换开关③、④接通，监控发出分闸令，LCU分闸接点接通，经端子排5至分闸接触器KM2线圈，经互锁接点KM1至合闸限位开关SL2至端子排7，接入至电机热继电器常闭接点KT，经停止按钮SB3回到零线N，当所有的常闭接点均闭合时，分闸接触器接受监控合闸令使KM2励磁动作，接触器主触头接通三相电源使电机反转进行分闸动作，接触器辅助常开触点闭合，即使监控或现地手动分闸令返回，也能通过分闸接触器辅助常开触点KM2对分闸回路进行自保持供电，直到分闸到位限位开关SL2动作，接点断开分闸回路使KM2失电返回，同时使自保持常开辅助接点KM2返回。

由隔离开关的工作原理分析可知，有可能导致隔离开关合闸不到位的电器元器件有：停止按钮（如图2）、热继电器（如图3）、合闸继电器（如图4）、限位开关（如图5）。



图2 停止按钮

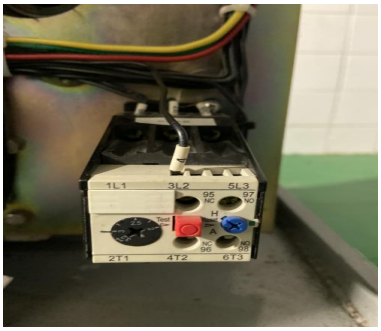


图3 热继电器



图4 合闸继电器

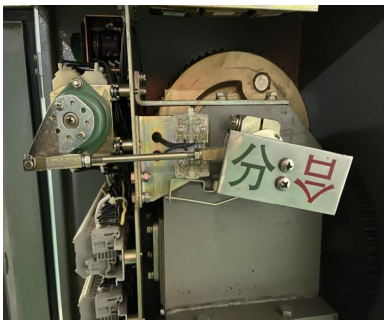


图5 限位开关

3.2 缺陷原因分析

1）手动分合闸过程中模拟机构轻微震动热继电器，机构不会停止操作，说明分合闸不到位的原因不在于热继电器。

2）手动分合闸过程中模拟机构轻微震动停止按钮，机构会停止操作，说明分合闸不到位的原因可能在于停止按钮。

3）模拟分合闸过程中自保持接点轻微震动（切除了电源，手动按压KM1和KM2，模拟接触器动作），发现合闸自保持用的辅助接点经常接触不良，说明分合闸不到位的原因可能在于合闸继电器。

4）对合闸限位开关SL1、SL2进行了检查，接点压力及弹力非常好，接触良好，说明合闸不到位的原因不在于限位开关。

4 缺陷处理措施及后期状态跟踪

经过检查及原因分析过程，判定出可能造成隔离开关分合闸不到位的原因有两个：停止按钮接点接触不好和合闸继电器KM1辅助接点接触不良。对这两个原因采取了以下措施：

1）在端子排上将停止按钮接点短接；

2）拆下合闸接触器KM1，发现辅助接点有变黑的情况（如图6）对辅助接点进行了打磨，打磨后再次模拟接触器动作，手动按压接触器，自保持接点接通良好。



图6 合闸继电器辅助接点

另外虽然合闸不到位的原因不在于限位开关，但为了设备的稳定运行，对合闸限位开关压片进行了调整，使压片断开SL1时无阻碍。

以上措施全部实施了之后，在日常巡检过程中开始密切追踪2号发电机出口隔离开关的运行状态。通过近三个月的跟踪，2号机自缺陷处理后共开停机36次（截止至9月20日），如表1所示，自动开停机成功率100%（数据来源于运行值长日志中开停机记录统计）。

表1 自缺陷处理后2号机开停机情况统计表

9201G缺陷处理后运行状态跟踪			
序号	状态	时间	描述
1	开机	6月30日 8:02:00	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	6月30日 22：25	2号机自动解列停机正常。
2	开机	7月5日 08：12	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	7月5日 11:52	2号机组自动解列停机正常。

3	开机	7月14日 13：44	2号机组自动开机并网正常，负荷带至105MW。
	停机	7月14日 14：06	2号机组自动解列停机正常。
4	开机	7月16日 08：15	2号机组自动开机并网，负荷带至100MW，投入AGC。
	停机	7月16日 11：45	2号机自动解列停机。
5	开机	7月17日 00:08	2号机自动开机，负荷带35MW。
	停机	7月17日 02：24	2号机组自动解列停机正常。
6	开机	7月18日 23：05	2号机自动开机并网正常，空载运行。
	停机	7月19日 08：14	2号机自动解列停机正常。
7	开机	7月22日 20：19	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	7月23日 03：01	2号机组自动解列停机正常。
8	开机	7月25日 10：31	2号机自动开机并网。
	停机	7月25日 11：49	2号机自动解列停机。
9	开机	7月25日 23：42	2号机自动开机并网，负荷带35MW运行。
	停机	7月26日 07：12	2号机组自动解列停机正常。
10	开机	7月31日 14：53	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	7月31日 17：47	2号机组自动解列停机正常。
11	开机	8月5日 10：02	2号机开机至空载正常；
	停机	8月5日 10：14	2号机自动停机正常
12	开机	8月7日 14：48	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月7日 20：57	2号机组自动解列停机正常。
13	开机	8月8日 20:36	2号机自动开机并网正常。20:38 投入2号机AGC。
	停机	8月9日 19：00	做2号机1号滤水器清扫安全措施。09：33操作结束。
14	开机	8月10日 01：15	2号机自动开机并网，空载运行。
	停机	8月10日 07：47	2号机自动解列停机正常。
15	开机	8月10日 09：06	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月10日 11：54	2号机组自动解列停机正常。
16	开机	8月10日 13：36	2号机组自动开机并网正常。
	停机	8月10日 16:01	2号机自动解列停机正常。
17	开机	8月10日 22：45	2号机自动开机并网正常，空载运行。
	停机	8月11日 08:14	2号机自动解列停机正常。
18	开机	8月11日 22：08	2号机自动开机并网正常，空载运行
	停机	8月12日 00：12	2号机自动解列停机正常
19	开机	8月12日 23：50	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月13日 00：14	2号机自动解列停机正常。
20	开机	8月13日 05：54	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月13日 09：17	2号机自动解列停机正常。
21	开机	8月13日 12：04	2号机自动开机并网正常，空载运行。
	停机	8月13日 13：59	2号机自动解列停机正常。
22	开机	8月16日 06：06	2号机自动开机并网正常，将负荷带35MW后投入AGC。
	停机	8月16日 12：22	2号机自动解列停机正常。
23	开机	8月17日 01：07	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月17日 07:18	2号机自动解列停机正常；
24	开机	8月19日 16:26	2号机自动开机并网正常。
	停机	8月20日 04：07	2号机自动解列停机正常。
25	开机	8月28日 09：13	2号机空载开机正常。
	停机	8月28日 09：23	2号机空载停机正常。
26	开机	8月28日 15：46	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	8月28日 19：33	2号机组自动解列停机正常。
27	开机	8月31日 17：10	2号机自动开机并网正常，负荷带满后投入AGC
	停机	8月31日 20：26	2号机自动解列停机正常
28	开机	9月3日 14:30	2号机自动开机并网正常，负荷带满后投入AGC

	停机	9月3日 14：45	2号机组自动解列停机正常
29	开机	9月3日 14：56	2号机自动开机并网正常，负荷带到35MW投AGC
	停机	9月3日 18：03	2号机自动解列停机正常
30	开机	9月3日 20：27	2号机组自动开机并网正常，负荷带至35MW
	停机	9月3日 21：42	2号机组自动解列停机正常。
31	开机	9月7日 17：08	2号机自动开机并网，负荷空载。
	停机	9月7日 19：44	2号机组自动解列停机。
32	开机	9月10日 16:15	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW，投入AGC。
	停机	9月10日 17:37	2号机自动停机。
33	开机	9月10日 18:50	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW，投入AGC
	停机	9月10日 20：49	2号机组自动解列停机正常。
34	开机	9月14日 14：47	2号机组自动开机并网正常，空载运行。
	停机	9月14日 15：27	2号机组自动解列停机正常。
35	开机	9月14日 21：44	2号机组自动开机并网，负荷带至35MW
	停机	9月15日 00：58	2号机减负荷后自动解列停机。
36	开机	9月20日 09：23	2号机自动开机并网。
	停机	9月20日 10：05	2号机自动解列停机正常。

5 结束语

发电机出口隔离刀闸合闸不到位将直接影响机组无法开机，通过原理分析，对控制回路中缺陷处理能采取有效措施，消除了隐患，保证了设备的安全稳定。

作者简介：

刘清艳（1990），女，江西新干，大学本科，工程师，继电保护，E-mail：liuqingyangk@sina.com

不同工况下XLPE电缆中电树枝起始前空间电荷特性研究

吴诗优[1]，张征[1]，郑书生[2]

（1.国网江西省电力有限公司南昌供电分公司，江西 南昌 330012；2.华北电力大学，北京 102206）

摘要：电树枝在 XLPE 电缆中是一种常见的现象，空间电荷的注入-抽出是导致电树枝产生的原因之一。在不同的工况下电荷的分布特性差异较大，导致电树枝产生的难易程度不一。基于双极性载流子模型，应用修正的载流子动态平衡模型对二维 XLPE 电缆模型中缺陷的空间电荷进行数值模拟。分析了电压类型、温度、材料老化和针尖曲率半径对电荷的分布的影响。研究表明，负极性直流电压下积聚的电荷密度最大，在针尖处对场强的削弱也是最大；交流电压下积聚的电荷密度和电荷注入的深度远小于直流电压下，随着电压频率的增大电荷密度和注入的深度均减小；温度的升高使电荷的迁移加速，注入深度和电荷密度增大，但针尖处的电荷达到饱和状态的时间缩短；针尖的曲率半径增大使电荷积聚区域的面积增大，但电荷密度减小。最后根据现有文献和课题组的实验，浅析了不同工况下空间电荷特性与电树枝起始的联系。研究成果将为电树枝的产生机理、XLPE 电缆的安全运行提供一定的依据。

关键词：电树枝；XLPE 电缆；空间电荷；电压类型；温度

1 引言

电树枝（Electrical tree）是绝缘介质中常见的绝缘劣化现象，在高压电力设备中广泛存在，在交联聚乙烯（XLPE）电缆中尤其突出[1,2]。电树枝是电缆击穿前的征兆，其会降低材料的绝缘性能，缩短设备的使用寿命。电树枝的产生是一个复杂的电-热-化学过程，涉及到复杂的反应[3]，其产生机理在学术界至今依然无肯定的解释。

XLPE 由于其出色的绝缘性能和轻便性，1963 年作为绝缘材料应用于中压电缆[4]。随着制作工艺的进步，绝缘性能得到提升，被用在了更高电压等级的电缆中。1988 年 500 kV XLPE 高压交流电缆被实际应用在了国土资源紧张的日本[5]，进行大容量的电力传输，相比传统的输电方式能大大缩减电力设备的占地面积。高压直流输电的兴起促进了 XLPE 高压直流电缆的发展，现在 ABB 和北极星等国外公司已经能制造 500kV XLPE 高压直流电缆[6]。威胁 XLPE 电缆安全运行的关键问题之一便是电树枝，大部分的电缆击穿是由电树枝导致的。电缆经常面临高场强、高温和受机械应力的环境，会使绝缘介质逐渐老化，当绝缘水平降低至一定限度，气泡、杂质等缺陷便会导致电树枝的产生[7,8]。有关于电树枝的研究较多，自从 1936 年 Robinson 报道了在电缆的绝缘介质中出现一种树形的破坏结构[9]，学者们从电树枝的引发机理、形貌以及与局部放电的联系等方面开展了大量的研究。根据电树枝的实验现象，学者们提出了一些电树枝的引发机理，在某些方面能对实验现象进行解释，但无法对所有的宏观现象解释。电荷注入-抽出理论、陷阱理论、光降解理论和麦克斯韦电-机械理论是其中较为经典的解释。1978 年 Tanaka 和 Greenwood 提出了电荷注入-抽出理论[8]，在电荷的注入和抽出的过程中，对大分子进行撞击造成分子链的断裂，产生了电树枝。Tanaka 总结的绝缘材料产生电树枝的过程以及原因如图 1 所示[8]，其系统的归纳了内在和外在的过程导致材料的老化。不可否认电荷的行为与电树枝的产生具有一定的联系，因此开展电介质内电树枝起始前电荷分布特性的研究具有实际的意义。

上海交通大学的李光道研究表明空间电荷对直流接地电树枝具有显著的影响[10]，并提出了空间电荷“有效注入深度”这一概念。华北电力大学的徐晓彬基于双极性载流子输运模型对直流电压下 XLPE 内电树枝产生前的空间电荷进行仿真[11]，研究表明直流接地电树枝的生长长度与电荷的注入深度、电荷密度具有非常紧密的联系。绝缘材料通常面临的环境比较复杂，影响电荷积聚的因素较多，在不同的工况下电树枝的生长特性存在较大的差异。电压的类型对电树枝的生长影响显著，直流电压下的起树电压远大于交流电压[12]，并且交流电压下电树枝的生长速度也远快于直流电压下，主要原因是交流电压下随着电压极性的快速反转，电荷反复的注入-抽出，对分子链破坏性更强。电压的频率是影响电树枝生长的一个重要因素，清华大学的周远翔等人研究了在不同频率的交流电压下电树枝的生长[12]，结果表明在一定范围内电压的频率越高，起树电压越低，电树枝的生长速度越快，但当频率达到一定的限值起树电压和生长速度逐渐稳定。电荷的行为对电树枝的产生有很大的影响，在不同的工况下，例如不同类型的电压、不同温度、材料的老化等，XLPE 起树前空间电荷分布的研究鲜有报道。然而，造成电树枝的缺陷通常尺寸较小[3]，用仪器测量的方法获得电荷分布难以实现，随着数值模拟技术的提高，能高精度的得到电荷分布的结果，双极性载流子输运模型被广泛应用在计算电荷积聚领域[13]。

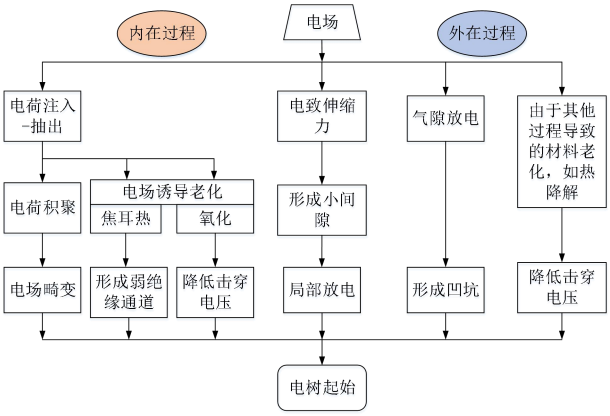


图1 电树枝在XLPE电缆中的产生过程

本文采用数值模拟的手段，对典型的金属尖端缺陷在产生电树枝前的空间电荷分布进行仿真，基于双极性载流子模型，利用修正的载流子动态平衡模型得到电荷分布曲线。并进一步研究在电压类型、温度、材料老化对电荷分布特性的影响，并根据陷阱理论对仿真结果进行解释。根据获得的电荷分布特性，结合开展的电树枝的相关实验和现有文献的研究，对电荷分布与电树枝的产生机理进行浅析。

2 电荷积聚的仿真模型

2.1 典型缺陷

XLPE 电缆在世界范围内得到了大规模应用，而电树枝现象大部分存在于电缆中，每年由于电树枝造成电缆击穿的事故不在少数[14]。导致电树枝出现的缺陷主要有金属尖端、气泡，制作工艺、电缆附件在安装时的不规范等原因，引入这些缺陷，导致电场发生畸变，电缆的长期运行逐渐发展为电树枝，发展的时间数小时、数天，有的甚至数年。本文以金属尖端缺陷为例进行仿真，如图 2 所示，搭建简化的电缆截面二维仿真模型。XLPE 的厚度为 10mm，其最外层接地，内芯为金属，半径为 10mm。投入运行的 XLPE 电缆都是经过出厂实验和现场耐压实验，较为极端的缺陷都能被检测出来，只存在一些难以发现的缺陷，因此电缆中的电树枝通常都是经过较长的时间发展而来的。而在实验室为了开展研究，快速观察到电树枝，制造的缺陷通常较为极端，针尖处形成的场强往往较大[3, 4]。假设在内芯和 XLPE 之间存在一个金属尖端缺陷，针尖的曲率半径为 30μm，角度为 30°，针尖与最外层之间的距离为 3mm，底部与内芯接触，经过仿真表明针尖处的最大场强小于 100kV/mm。使用商用有限元软件 COMSOL 进行计算，网格剖分时在针尖处的网格更密，最大单元格为 0.2μm。

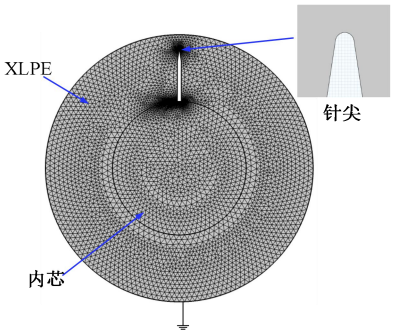


图2 二维XLPE仿真模型及网格剖分

2.2 双极性载流子输运模型

在绝缘介质中由于陷阱的存在，载流子在运输过程中会被陷阱捕获从而导致电荷的积聚，陷阱理论被广泛的应用在电荷积聚方面的研究[15]。介质中的载流子主要来源于电极和杂质离子，在强电场作用下电极内的空穴和电子通过电离作用注入材料中。双极性载流子输运模型认为在电介质中的载流子为电子和空穴，表现出双极性的特征。经过对此模型的不断完善，其能全面的反映载流子在传输过程中的行为，得到的结果具有较高的准确度，此模型的示意图如图 2 所示。注入的载流子为电子和空穴，模型描述了载流子的入陷、脱陷和载流子之间的复合的过程。陷阱为单一的能级，电子被陷阱截面捕获、脱陷（B_e、D_e），空穴被陷阱捕获、脱陷（B_h、D_h）。假设载流子之间的复合过程包括受陷电子和受陷空穴、自由电子和受陷空穴、自由空穴和受陷电子、自由电子和自由空穴，分别用 S_0、S_1、S_2、S_3 表示。

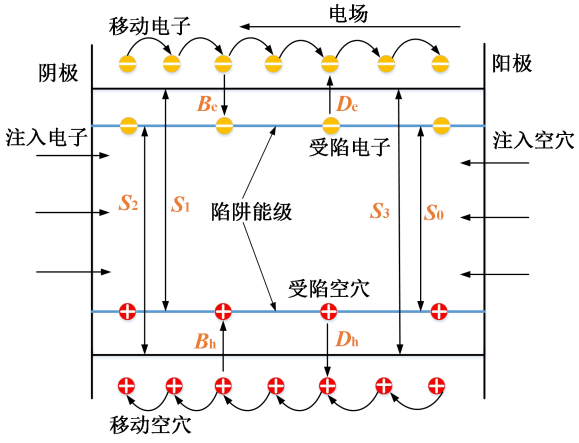


图3 双极性载流子输运模型示意图

当场强小于 100kV/mm 时，电荷的注入遵循 Schotty 模式[11, 13, 15]，如式 (1) 和 (2) 所示，其中 $j_e(0, t)$ 和 $j_h(d, t)$ 分别为阴极和阳极的电流密度，A 为 Richard 常数，T 为温度，ψ_{ei} 和 ψ_{hi} 分别为阴极和阳极与材料的注入势垒，k_B 为玻尔兹曼常数，e 为电子电量，E 为电场强度，ε_0 为真空的介电常数，ε_r

为介质的相对介电常数，下标 e 和 h 分别表示电子和空穴。此外考虑载流子在界面的抽出，如式(3)所示，C_e为抽出系数，设置为 0.1，μ为载流子的迁移率，q_u为自由电荷。

$$j_e(0,t)=AT^2\exp(-\frac{\Psi_{ei}}{k_BT})\exp\left(\frac{e}{k_BT}\sqrt{\frac{eE(0,t)}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}}\right) \quad (1)$$

$$j_h(d,t)=AT^2\exp(-\frac{\Psi_{hi}}{k_BT})\exp\left(\frac{e}{k_BT}\sqrt{\frac{eE(0,t)}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}}\right) \quad (2)$$

$$j_{out}(x,t)=C_e\mu E(x,t)q_u \quad (3)$$

载流子在电介质内部的传输过程基本方程组为传输方程、连续方程和泊松方程[13,15]，分别如式(4)-(6)所示，其中传输方程用于求解载流子传输瞬时的电流密度，连续方程确定载流子的瞬时密度，泊松方程则用于得到瞬时的电场分布。

$$\frac{\partial q_a(x,t)}{\partial t}+\frac{\partial j_a(x,t)}{\partial x}=s_a(x,t) \quad (4)$$

$$j_a(x,t)=(\mu_e q_{eu}+\mu_h q_{hu})E(x,t) \quad (5)$$

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial x}=\frac{q_e+q_h}{\varepsilon_r+\varepsilon_0} \quad (6)$$

式中：q_a和j_a分别表示载流子的密度和电流密度，下标a表示电子和空穴，S_a为源项，μ_e和μ_h分别为电子和空穴的迁移率，下标eu和hu表示自由电子和自由空穴，et和ht表示受陷电子和空穴。源项则描述了入陷、脱陷、复合等，分别用S_{eu}、S_{et}、S_{hu}、S_{ht}表示。在介质内部由非电荷传输引起的电荷密度变化的总和作为源项，用下式表示。

$$s_{eu}=-S_1q_{ht}q_{eu}-S_3q_{hu}q_{eu}-B_eq_{eu}(1-\frac{q_{et}}{q_{oet}})+D_eq_{et} \quad (7)$$

$$s_{et}=-S_2q_{hu}q_{et}-S_0q_{ht}q_{et}+B_eq_{eu}(1-\frac{q_{et}}{q_{oet}})-D_eq_{et} \quad (8)$$

$$s_{hu}=-S_2q_{hu}q_{et}-S_3q_{hu}q_{eu}-B_eq_{hu}(1-\frac{q_{ht}}{q_{oht}})+D_hq_{ht} \quad (9)$$

$$s_{ht}=-S_1q_{hu}q_{et}-S_0q_{ht}q_{et}+B_eq_{hu}(1-\frac{q_{ht}}{q_{oht}})-D_hq_{ht} \quad (10)$$

式中B_e和B_h分别为电子和空穴的俘获截面系数，q_{oet}和q_{oht}为最大电子陷阱密度和最大空穴陷阱密度。D_e和D_h为入陷电子和空穴的脱陷系数，可以用陷阱深度求得，如式(11)和(12)所示，v为受陷电子和空穴的脱陷率，ψ_{tre}和ψ_{tre}为电子和空穴的脱陷势垒。

$$D_e=v\exp\left(-\frac{\Psi_{tre}}{k_BT}\right) \quad (11)$$

$$D_h=v\exp\left(-\frac{\Psi_{trh}}{k_BT}\right) \quad (12)$$

2.3 修正的载流子动态平衡模型

随着学者们对数值模拟技术研究的深入，发现双极性载流子模型存在一些缺点。电介质传输电荷的能力是有限制，但在双极性载流子输运模型中缺少对电荷密度的限制项，可能会导致计算的电荷密度过大与实际的情况不符[16]，并且双极性载流子模型也未考虑杂质离子的影响。天津大学的梁虎成基于电介质中载流子动态平衡的思想[16]，提出了载流子动态平衡模型，将电介质传输电荷的能力与宏观的电导率联系起来，经过测试验证在大部分场景比双极性载流子输运模型更加准确。介质中的动态平衡过程可以是能带激发过程或者是杂质电离-复合过程，平衡态的本征载流子是电子和空穴，通过杂质电离或者能带激励产生，满足式(13)，其中c_0为常数系数，E_q为载流子的活化能，q_i为本征载流子的浓度。本征载流子的浓度可以通过(14)得到，σ为介质的电导率，μ_e和μ_h为电子和空穴的迁移率。

$$q_i^{\,2}=c_0e^{-\frac{E_q}{k_BT}} \quad (13)$$

$$q_i=\frac{\sigma}{\mu_e+\mu_h} \quad (14)$$

在介质中由于外界因素平衡态会转向非平衡态，本征载流子单位时间内的浓度变化为式(15)，其中τ为非平衡态载流子的寿命。在源项S_{eu}和S_{hu}中添加本征载流子的浓度变化，可以得到(16)和(17)，即为动态载流子平衡模型。

$$P=\left[(q_{eu}+q_{hu})-\sqrt{(q_{eu}-q_{hu})^2+4q_i^{\,2}}\right]\Big/2\tau \quad (15)$$

$$s_{eu}=-S_1q_{ht}q_{eu}-S_3q_{hu}q_{eu}-B_eq_{eu}(1-\frac{q_{et}}{q_{oet}})+D_eq_{et}+P \quad (16)$$

$$s_{hu}=-S_2q_{hu}q_{et}-S_3q_{hu}q_{eu}-B_eq_{hu}(1-\frac{q_{ht}}{q_{oht}})+D_hq_{ht}+P \quad (17)$$

在初始状态电介质处于平衡态，因此需要对载流子的初始值进行设定，在初始平衡状态下自由电子和自由空穴的初始密度为式(18)，受陷电子和受陷空穴的初始密度为式(19)。

$$q_{eu}(t=0)=q_{hu}(t=0)=q_i \quad (18)$$

$$q_{et}(t=0)=q_{ht}(t=0)=q_iB_e(D_e+q_iB_e/q_{oet}) \quad (19)$$

2.4 仿真参数设置

仿真参数的大小对得到的结果影响显著，电介质为XLPE参照文献[17]和[18]中的参数设置结合文中的测试结果，进行相关参数的设定，具体设定见表1。图2所示模型的边界条件，假设电缆最外层接地，内芯为高压，缺陷的底部和内芯接触。内芯和缺陷附近的电荷在迁移的过程中符合洛平边界条件[15]。

表1 仿真参数设置

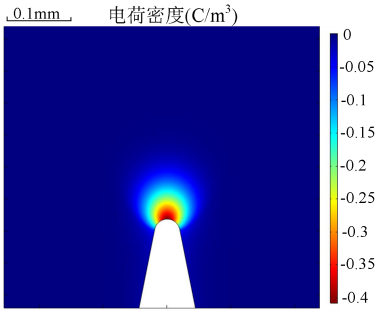
符号	单位	数值	描述
ε	1	2.3	相对介电常数
T	K	303	温度
ψ_{ei}, ψ_{hi}	eV	1.1,1.21	电子、空穴的注入势垒
k_B	J/K	1.38×10^{-23}	玻尔兹曼常数
S_0-S_2	$m^3\cdot(C\cdot s)^{-1}$	0.1	电荷之间的复合系数
μ_e	$m^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$	1.3×10^{-13}	电子迁移率
μ_h	$m^2\cdot(V\cdot s)^{-1}$	8.3×10^{-14}	空穴迁移率
q_{oet}	C/m^3	100	电子陷阱最大密度
q_{oet}	C/m^3	100	空穴陷阱最大密度
B_e	1/s	0.1	电子被陷阱俘获截面系数
B_h	1/s	0.1	空穴被陷阱俘获截面系数
ψ_{tre}, ψ_{trh}	eV	0.94,0.95	电子、空穴陷阱深度
S_3	$m^3\cdot(C\cdot s)^{-1}$	0	电荷之间的复合系数
τ	s	0.01	非平衡态载流子寿命

3 不同工况下电荷积聚特性

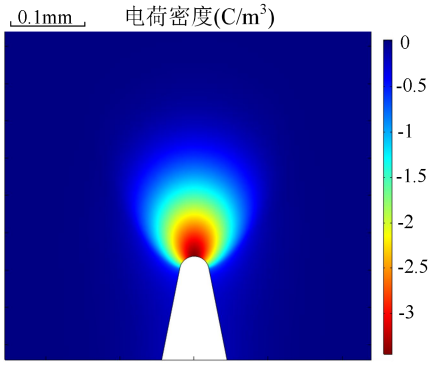
3.1 电压类型

3.1.1 负极性直流电压下

根据实际电缆的电压等级，在内芯上施加的电压为-30kV，假设 XLPE 未老化相对介电常数为 2.3，研究 60min 内电荷的积聚过程。得到的电荷分布如图 4 所示，图 4(a)为加压 100s 后的电荷分布，图 4(b)为加压 3600s 后的电荷分布，随着加压时间的延长，电荷注入的深度变大，3600s 时电荷注入的深度约为 0.25mm。由于针尖处的场强较大，注入的电荷数量更多，因此针尖处的电荷密度更大。但由于介质中陷阱数量的限制，电荷密度不会无限制的增大。从图中可以看出，电荷逐渐向外端推移，100s 时电荷分布的形状类似“圆形”，3600s 时的电荷分布类型“椭圆形”。载流子受的电场力的方向是由内芯向 XLPE 外层，加压时长为 100s 时陷阱被占用的数目较少，注入的电子大部分在针尖处被陷阱捕获；而当加压时长为 3600s 时陷阱被占用的数目较多，注入的电子更少在针尖附近被捕获，未捕获的电子则由于电场力向外移动，导致电荷分布呈现出“椭圆形”。



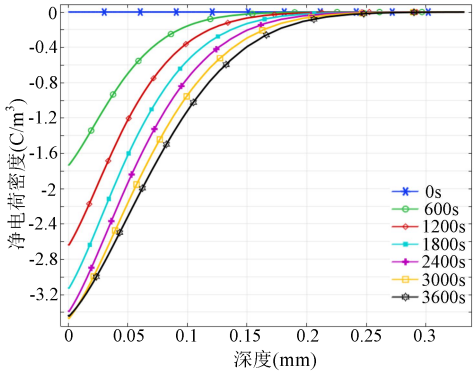
(a) 加压100s时的电荷分布



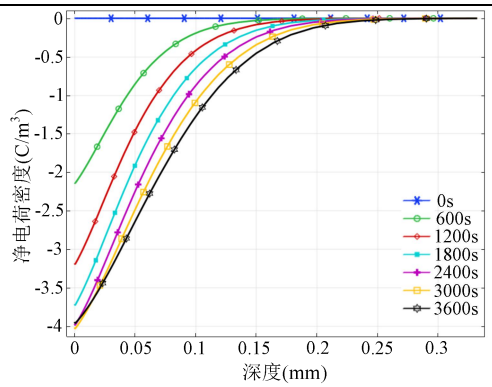
(b) 加压3600s时的电荷分布

图4 不同加压时间针尖处的电荷分布

为了进一步分析电荷分布的数值大小，从针尖处沿着直径向外层做一条二维截线，分析线上的电荷分布情况。电树枝的生长方向通常是沿着电场方向，因此分析此方向上的电荷分布。双极性载流子模型得到的电荷分布如图 5(a)所示，针尖处的最大电荷密度为-3.5C/m^3，从图中可以看出随着加压时间的延长，针尖处的最大电荷密度增幅逐渐减小，当时间达到 3600s 时已经饱和，但电荷向材料内迁移。图 5(b)为载流子动态平衡模型得到的结果，针尖处的最大电荷密度为-4.1C/m^3，稍大于双极性载流子模型得到的结果，因为考虑了杂质离子的作用，但两者的差异不大。从图中还能看出载流子动态平衡模型得到的结果更快达到饱和状态，到达饱和状态后针尖处的最大电荷密度反而有逐渐减小的趋势，原因是此时针尖处的电荷已经饱和，电荷几乎不再积聚，但在界面处存在电荷的抽出，当增大的幅值小于减小的幅值时，最大电荷密度则表现出减小。二维截线上的电场强度分布如图 6 所示，可以看出随着加压时间的延长，针尖处的电场强度减小了 17.5kV/mm。由于针尖处积聚了大量的同极性的电荷，形成了“空间电荷包”，相当于增大了针尖的曲率半径，起到了匀化电场的作用，这与文献[11]中的结论一致。后文以载流子动态平衡模型得到的结果进行分析。



(a) 双极性载流子输运模型



(b) 载流子动态平衡模型

图5 两种模型得到的电荷分布结果

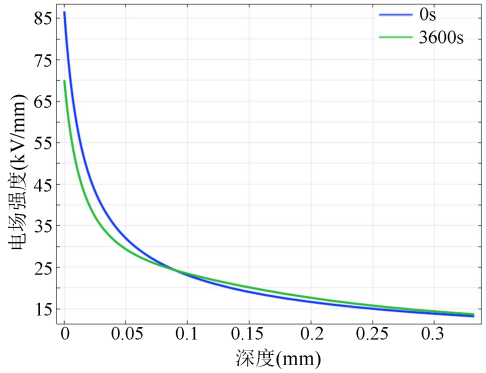


图6 针尖处的场强分布

3.1.2 正极性直流电压下

在模型上施加电压 30kV 时二维截线上的电荷分布如图 7 所示，针尖处的最大电荷密度为 2.75 C/m³，相较于在负极性直流电压下更小，原因是空穴从电极注入 XLPE 需要克服的势垒更高，导致注入的空穴数量更少。从图可以看出当加压时间达到 3600s 时电荷积聚并未达到饱和状态，原因是针尖处未被占用的陷阱还有较多，能继续捕获空穴。此外，由于电荷密度相较于在负极性电压下更小，电场的削弱幅度更小，场强大则能注入更多的电荷，因此在正极性电压下电荷达到稳态的时间会更长。电荷的注入深度约为 0.15mm，比电子注入的深度更小，由于电子的迁移率更大，在相同电场力的作用下电子的迁移速度更快。

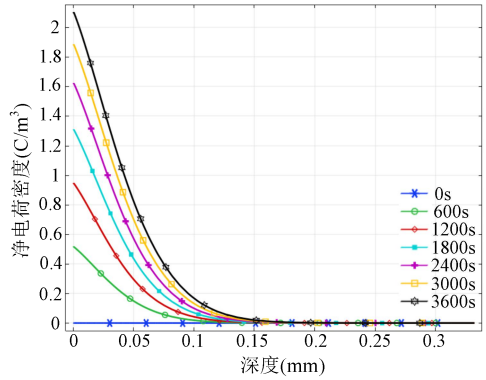


图7 正极性直流电压下的电荷分布

3.1.3 交流电压下

交流电压下由于电场方向的快速变化，现有的空间电荷测量方法受时空分辨率的限制，得到的结果准确度相较于在直流电压下更低，进行数值计算时难度也更大。交流电压由于电压幅值的变化，并不是在整个周期均会向材料中注入电荷，当场强较低时不足以使电荷跳过势垒注入材料中。如图 8 所示，交流电的频率为 50Hz，幅值为 30kV。吴建东以及 Zeller H R 等人均指出当场强超过一个阈值时[19, 20]，电荷才能克服势垒注入电介质中。当施加的电压超过阈值 U_0时，注入的自由电荷密度 n 超过处于热平衡时的密度 n_0，此电压为式(20)，其中 d 为试样厚度，e_0为基本电荷，ε为介电常数。参照文中[21]和[22]的设定，设定注入电荷的场强阈值为 10kV/mm，当针尖处的场强大于阈值时向介质中注入电荷。

$$U_0 \approx \frac{n_0 e_0 d^2}{2\varepsilon} \tag{20}$$

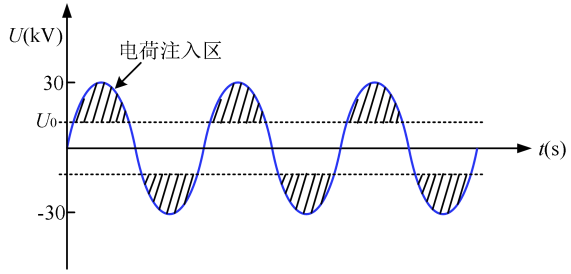


图 8 交流电压下电荷注入区间示意图

交流电压的周期为 0.02s，时间步长的设定影响求解的速度和收敛性，经过测试设置步长为 0.001s 时具有较好的效果，时间步长过小求解的时间很长。此外时间步长和网格大小还需满足 Courant-Friedrich-Lewy (CFL)条件[10]，如下式所示：

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{\mu E} \tag{21}$$

其中Δt 为时间步长，Δx 为网格剖分，E 为局部电场强度，μ为载流子迁移率。交流电压下经过计算得到了收敛的结果，电荷分布如图 9 所示，针尖处的最大电荷密度为-0.125 C/m³，远小于在直流电压下的，主要原因是：交流电压下电子和空穴交替注入，大量的电荷在针尖附近发生了复合；此外正、负电荷在被陷阱捕获后，由于极性相反，净电荷为两者电荷量的差值。净电荷表现为负极性，原因是电子的注入势垒低，因此注入材料中的电子数量更多，与空穴抵消后表现出负极性。电荷的注入

深度约为 5μm，远远小于在直流电压下的注入深度，与现有文献[22]中的测试和仿真结论一致，是因为电场方向的交替变化，载流子受的电场力方向交替反转，导致电荷难以向介质内部迁移。

从图 9 中看出电荷分布曲线上存在一个“峰”，并逐渐向材料内移动，形成的原因是：一方面在交流电压下存在“不注入电荷”区，电压在此区间时没有电荷注入介质的内部，但在针尖界面存在电荷的抽出；另一方面空穴的迁移率更小，空穴相比电子的注入深度更小，在针尖界面处的狭小区域内存在大量电子和空穴发生复合，导致净电荷密度的减小，这两个原因导致“峰”的出现。经过 3600s 加压电荷积聚并未达到稳态，但最大电荷密度的增幅逐渐减小，趋向于饱和状态。“峰”向内部移动的速度也逐渐减小，趋向于稳定。

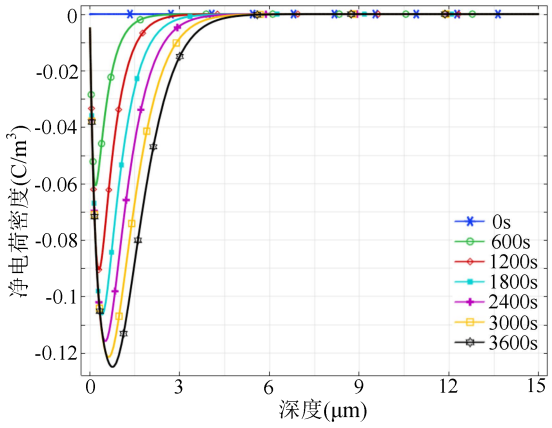


图9 频率为50Hz时的电荷分布

交流电压的频率也是影响电荷积聚的一个因素，有关于电压频率对电树枝生长速度、形貌的研究较多。本文对不同频率的正弦电压下的电荷积聚亦开展了仿真工作，得到针尖处的电荷分布。列举交流电压频率为 100Hz 时的电荷分布如图 10 所示，最大电荷密度为-0.078 C/m³，电荷的注入深度约为 3μm，相比频率为 50Hz，最大电荷密度和注入深度均减小，与文献[21]中的结论一致。电压频率变大则电场方向反转的速度变快，电荷受的电场力方向反转变快，更难向介质内部迁移。周期减小，每个周期注入电荷的时间变短，注入的电荷数量减小，此外由于电荷积聚在更狭小的区域，正、负电荷发生复合的概率增大[21]，导致电荷密度的减小。经过对不同频率进行计算，净电荷最大密度与频率的关系如图 11 所示，随着频率的增大净电荷密度减小，但减小的幅度缩小，当超过 80 Hz 时基本不变化。频率超过一定值时，电荷的移动跟不上电场方向的反转，即使再增大频率对电荷的迁移几乎无影响，最大电荷密度以及电荷注入深度变化细微。

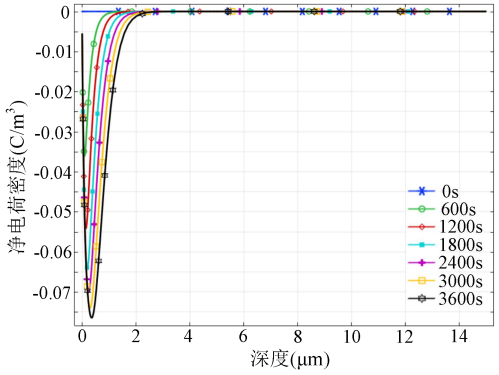


图10 频率为100 Hz时的电荷分布

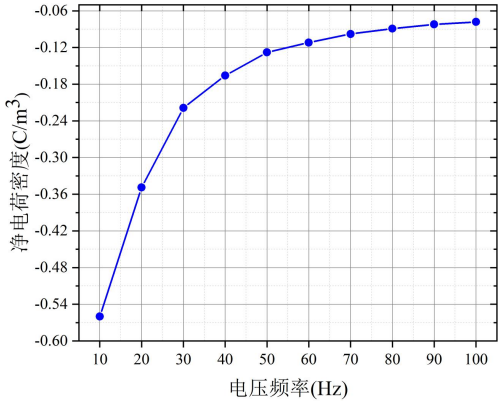


图11 最大净电荷密度与频率的关系

3.2 温度

温度是影响电荷积聚的关键因素之一，实际运行的 XLPE 电缆，由于环境、负载的变化导致运行的温度差值较大。在不同温度下电荷分布差异较为明显，有较多学者研究了温度对电树枝发展的影响[23]，包括在高温和超低温的环境。清华大学的周远翔等人研究热老化对硅橡胶中电树枝生长的影响[24]，结果表明热老化后电树枝的生长速度加快，起树电压降低。本文将温度提高 30K 至 333 K 进行电荷分布的计算。陷阱深度、温度、载流子迁移率三者的关系如式(22)所示，式中λ为载流子的逃逸频率，R是陷阱局域态间的距离，e为基本电荷，Ψ_{tre}为陷阱深度，T为开氏温度。迁移率与扩散系数遵从爱因斯坦关系[23]，如式(23)所示，D为载流子的扩散系数。

$$\Psi_{tre} = -k_B T \ln\left(\mu \frac{k_B T}{veR^2}\right) \tag{22}$$

$$D = \mu \frac{k_B T}{e} \tag{23}$$

以在负极性直流电压-30kV 下为例，将温度升高至 333K，得到的电荷分布如图 12 所示，针尖处的最大电荷密度为-12.8 C/m³，是在 303K 时的 3.1 倍。温度升高导致注入的电荷数目增多，迁移率的

增大使电荷注入的深度变大。并且从图能看出针尖处电荷达到饱和状态的时间缩短，达到饱和后电荷密度开始减小，主要原因是：一方面迁移率增大电子向材料内部移动的速度加快，并且温度升高入陷电荷的脱陷系数增大，更多电荷向介质内部注入；另一方面此时电荷密度较大导致电场强度的削减幅度大，场强的减小使注入的电子数目减少。

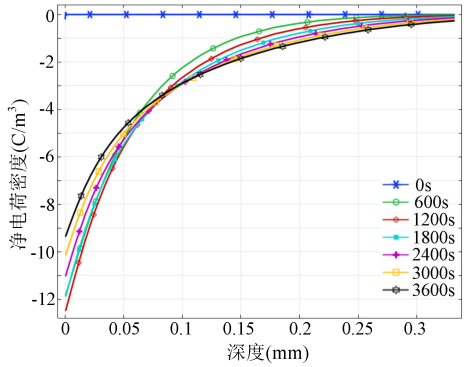


图12 温度为333K时的电荷分布

3.3 材料老化

电缆长期运行在电-热的作用下逐渐老化，XLPE 绝缘性能逐渐下降，产生电树枝的概率也增大。材料老化时内部发生了一些化学反应，材料的性能发生了改变，形成了新的产物或者大分子的化合物降解为小分子化合物。电-热老化对 XLPE 产生的反应主要有交联反应和裂解反应，交联反应使分子间形成了紧密的分子链，导致陷阱的密度减小；裂解反应使大分子化合物断键形成小分子化合物，会引入新的断键和极性基团，导致陷阱密度增大。通常的老化方式有电老化、热老化和电热老化，电热老化在实际运行的电缆中最常见，因此以电热老化方式作为研究。文献[25]报道了 XLPE 在电-热老化后电气参数的改变，本文根据实验测的结果对相应的参数进行更改，得到老化后电荷分布特性。在温度 90℃，场强 40kV/mm 下 XLPE 老化 50 天，测量其陷阱密度和陷阱深度，陷阱深度变化较小，约增大了 0.2eV，陷阱密度变化较大，增大了约 5.7 倍。此外，材料的介电常数也是影响电荷仿真结果的一个关键因素，交联反应使 XLPE 中产生稳定的晶体结构，极性基团数量减少，导致介电常数减小；裂解反应使稳定的晶体结构发生裂解，产生了新的极性基团或者分子，导致介电常数的增大[25]，因此相对介电常数的变化取决于两种反应速率。经过 50 天电热老化后相对介电常数增大，但增大的幅度较小，约为 0.3。

根据文献[25]中的测试结果进行设定后，电热老化 50 天的电荷分布如图 13 所示，电荷密度增大较为显著，为了与文献中的测试结果对比，定义平均电荷密度，见式(24)，文[25]中测试的结果为：老化 50 天后的 XLPE 加压 30min 积聚的平均电荷密度为未老化的约 3.3 倍。经过对仿真结果的计算，加压 30min 后平均电荷密度老化后为老化前的 3.6 倍，两者偏差不大，证实了仿真参数设置的合理性。

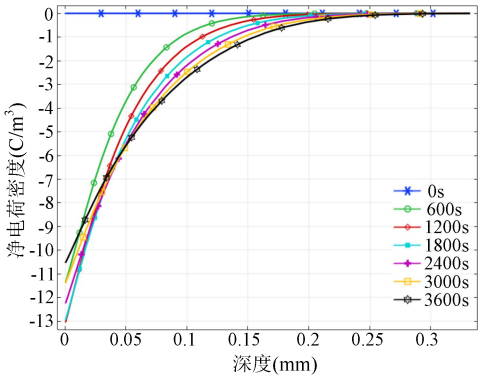


图13 XLPE电热老化50天后的电荷密度

$$q_{\min}(t)=\frac{1}{d}\int_0^d q(x,t)dx \tag{24}$$

3.4 针尖的曲率半径

缺陷的尺寸会影响场强的大小，进而影响电荷的分布。在实际运行电缆中存在的缺陷多样，尺寸有较大的差异。将针尖的曲率半径设置为 50μm，在-30kV 直流电压下经过 3600s 加压，得到 3600s 时针尖处的电荷分布如图 14 所示，电荷呈现出类似“圆形”，最大电荷密度为-1.67 C/m³。由于场强的减小导致注入的电荷数量减少，电荷的注入深度也减小，但在针尖处积聚较多电荷的区域面积增大。对于更大尺寸的缺陷，虽然积聚的电荷密度更小，但电荷积聚的区域更大。若在更高的电压下使场强达到足以产生电树枝的阈值，电树枝发展的面积将更大，介质劣化的面积也更大。

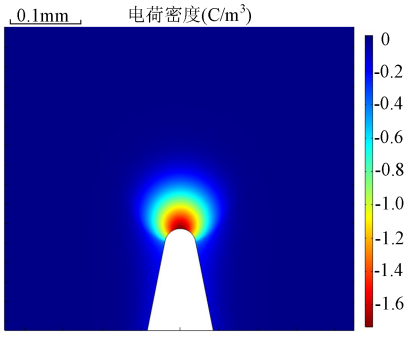


图14 负极性电压下针尖曲率半径为50μm电荷分布

4 电荷分布特性与电树枝起始的联系

4.1 电压类型

对在正、负极性直流和交流电压下针尖电荷分

布特性进行了仿真。由于电荷的积聚会导致场强的畸变，如图 15 所示，在负极性直流电压下，施加的场强为 E_0，在离针尖很近的位置 1，假设施加的场强方向为水平方向，位置 1 左边电荷形成的场强为 E_l，右边电荷形成的场强为 E_r，则形成的合成场强为式(25)。由于在位置 1 右边电荷的数目比左边电荷的更多，因此形成的场强 $E_r>E_l$，导致合成场强比施加的场强小，即场强被削弱。在位置 2 离针尖较远，右边电荷的数目比左边的少，则形成的场强 $E_r<E_l$，场强被加强，但由于离针尖较远电荷密度较小，增大的幅度不明显，与图 6 仿真的场强分布结果一致。

$$E = E_0 + E_l - E_r \tag{25}$$

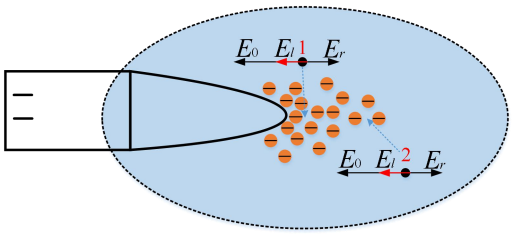


图15 针尖处的合成场强示意图

刘贺晨等人开展了正、负极性电压下的电树枝实验[25]，其实验结果发现直流电压下的起树电压较高，均超过了 60kV。负极性电压下电树枝的起树电压稍低，但正极性电压下的电树枝生长速度更快。在直流电压下由于空间电荷的积聚导致针尖处的场强被削减，“空间电荷包”的形成相当于增大了缺陷的曲率半径。负极性电压下起树电压更低的原因是：虽然负极性电压下针尖处的场强更小，但电荷密度更大并且电子的迁移率更大，对材料分子链的撞击更剧烈。生长速度则与产生电树枝后的局部放电等现象有关。

在交流电压下的起树电压远小于在直流电压下，结合上述的空间电荷仿真结果进行解释：一方面在交流电压下空间电荷的密度远小于在直流电压，因此电场强度基本不受影响；另一方面虽然净电荷密度更小，但在电压的正、负半周，电荷反复的撞击材料，并且材料被撞击的区域较小，在数微米级别，此小部分的分子链受大量的载流子撞击。并且电子和空穴在复合过程中还伴随着其他能量的释放，进一步导致材料被破坏。清华大学的周远翔和郑州大学的尹琪等人均表明随着电压频率的增大，电树枝的起树电压降低，主要受电荷注入-抽出和 Maxwell 应力[26]（见式(26)）的影响，其中 ε_0 为真空的介电常数，ε_r 为介质的相对介电常数，E 为场强。电压的频率越大，电荷注入的深度越小，则更小区域的分子链受到电荷的撞击，此外由于电荷注入的深度小，大部分的电荷未向材料内部迁移，而是在针尖处发生了复合，产生了能量对材料破坏。

$$F = (\varepsilon_0 / 2)\nabla(\varepsilon_r - 1)E^2 \tag{26}$$

4.2 温度

在不同温度下电荷分布特性差异较大，结合文献中在不同温度下开展电树枝起始特性的测试。西安交通大学的陈向荣研究在不同温度下 XLPE 中电树枝的生长特性[27]，温度对电树枝的影响非常明显，温度越高电树枝的引发时间越短。当温度升高时，XLPE 中的片晶(lamella)融化，材料的透明度增加，电介质的中无定形相增加，自由体积主要存在于无定形相中，因此材料中的自由体积增大更容易形成“热电子”，注入材料中的电荷数目增大，对分子链的破坏更大。此外在更高的温度下，材料内发生化学反应的速率也更快，在电荷撞击大分子时，会产生自由基，在氧气的作用下发生氧化连锁反应，继续导致分子链的断裂，形成含有微孔的裂化区。

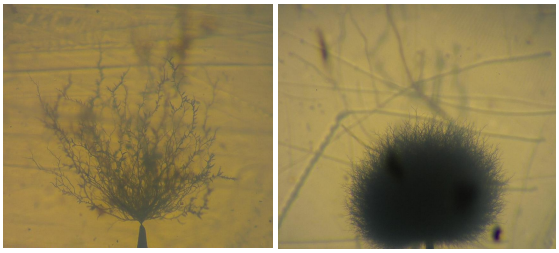
4.3 针尖曲率半径

场强对电树枝起始特性影响的研究鲜有报道。在实验内开展研究通常都是在较高的场强下，低场强下电树枝的引发时间较长，但实际运行的电缆中电树枝的引发时间往往都较长。结合上述的仿真结果，针尖的曲率半径越大，电荷密度减小，电荷积聚的速度也更慢，但积聚的区域面积更大，长期发展则电树枝劣化的面积更大。为此本文开展了场强对电树枝引发以及生长的影响，使用 XLPE 针-板模型开展实验，如图 16 所示，为了避免针尖处引入微气隙，使用两个小孔对 XLPE 进行固定，针-板的间距为 3mm。为了对比场强的影响，两个模型的针尖曲率半径分别为 20μm 和 40μm。在工频电压下，以 1kV 为单位逐级升压，当达到 5kV 后每个电压等级保持至少 30min，直到电树枝产生后，保持电压不变，利用显微镜长时间对电树枝进行观察。曲率半径为 20μm 的模型在电压为 8kV 保持 2h31min 产生了电树，而曲率半径为 40μm 的模型在 12kV 电压保持 6h42min 才产生电树枝，之后便长时间（超过 8h）对电树枝进行观察，同时利用脉冲电流法对局部放电进行检测，局放仪型号为德国 Double Lemke，在专业屏蔽室内开展实验，干扰小于 2pC，检测时已滤去。



图16 XLPE针-板模型

恒压对电树枝的生长进行观察，保持电压时间为 7h 时两个模型的电树枝形貌如图 17 所示，针尖曲率半径小的为枝状电树枝，曲率半径大的为丛状电树枝。针尖曲率半径大的电荷的积聚区域大，在电场的长时间作用下，劣化的面积大，产生丛状电树枝的概率更大。而曲率半径小的，在针尖处电荷积聚较明显，劣化的面积相对更小，发展为枝状电树枝的概率大。长时间恒压施加在模型，发现局部放电存在“间歇性”的特点，如图 18 所示，即局部放电信号每隔一段时间才出现，并且枝状电树枝此现象更加明显，这个现象鲜有报道。产生此现象的原因可能与电树枝微通道的导电性有关，微通道刚形成时导电性较差，因此电势降较大，场强较大。随着微通道的逐渐碳化，电导率逐渐增大导致电势降减小，场强减小。



(a)枝状　　(b)丛状

图17 枝状电树枝和丛状电树枝

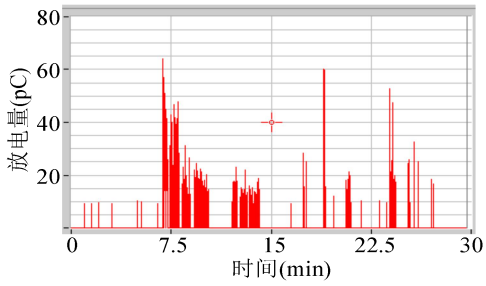


图18 枝状电树枝局部放电的间歇性

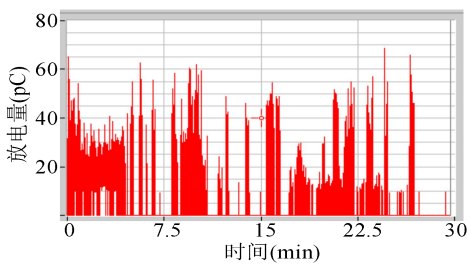


图19 丛状电树枝局部放电的间歇性

5 结论

本文利用载流子动态平衡模型对电树枝起始前的空间电荷进行了数值模拟，研究了在不同工况下针尖处的电荷分布差异，并结合文献和实验对空间电荷与电树枝的联系进行了浅析，可以得到以下结论：

（1）直流电压下载流子动态平衡模型得到的电荷密度稍大于双极性载流子模型。负极性直流电压下积聚的电荷密度大于正极性直流电压下，正极性直流电压下针尖处的电荷达到饱和状态需要的时间更长。由于同极性电荷的积聚针尖附近的场强被削弱，较远处的场强被加强。

（2）交流电压下积聚的电荷密度远小于直流电压下，注入的深度也远低，在50Hz时电荷注入的深度约为5μm。随着电压频率的增大，电荷密度减小但逐渐稳定，电荷注入的深度也减小。频率越高电荷对越小区域的分子链反复撞击，此外，正、负电荷的复合作用释放的能量进一步造成材料的破坏。

（3）温度显著影响电荷密度，在更高的温度下，针尖向材料内注入更多的电荷，同时迁移率的增大导致电荷注入的深度增大，针尖处的电荷密度更快达到饱和状态。材料老化会增加陷阱的密度，根据文献中的实验，仿真计算表明XLPE电热老化50天后平均电荷密度增大了3.6倍，测试结果为增大了3.3倍。

（4）在同一电压下针尖曲率半径增大电荷密度减小，但电荷注入区域的面积增大。结合本课题组的电树枝实验，发现曲率半径大更大概率发展为丛状电树枝，更小则发展为枝状电树枝。长时间保持恒压局部放电出现“间歇性”的特点，并且枝状电树枝更加明显。

参考文献：

[1]廖瑞金，周天春，刘玲，等. 交联聚乙烯电力电缆的电树枝化试验及其局部放电特征[J].中国电机工程学报，2011，31(28)：136-143.

[2]Jingan Su, Boxue Du, Jin Lin. Electrical tree degradation in high-voltage cable insulation: progress and challenges[J]. High voltage.2020, 5(4):353-364.

[3]周远翔，刘睿，张云霄等.硅橡胶电树枝的引发与生长过程[J]. 高电压技术，2014，40(12)：3656-3664.

[4]苏金刚. 多场耦合作用硅橡胶电树枝产生机理研究[D]. 天津：天津大学，2014.

[5]Blodgett R B, Fisher R G. Insulations and jackets

for cross-linked polyethylene cables’, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems[J],1963, 82(69):971－980

[6]Kubota T, Takahashi Y, Sakuma S, et al. Development of 500-kV XLPE cables and accessories for long distance underground transmission line-part I: insulation design of cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1994, 9(4):1741－1749.

[7]Gustafsson A, Jeroense M, Sunnegårdh P, et al. New developments within the area of extruded HVDC cables[C], 11th IET International Conference on AC and DC Power Transmission, Birmingham, 2015, pp. 1-5.

[8]Tanaka T, Greenwood A. Effects of charge injection and extraction on tree initiation inpolyethylene[J], IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1978,97(5):1749－1759.

[9]Robinson D M. Dielectric phenomenon in high voltage cables[R]. Chapmanand Hall, London, 1936.

[10]李光道. 极不均匀直流电场聚合物空间电荷与电树枝仿真实验研究[D]. 上海：上海交通大学，2017.

[11]徐晓彬，刘爱静，乐彦杰，等. 直流预压对针板电极下XLPE中空间电荷及电树枝的影响[J/OL].中国电力：1-8[2021-03-23]

[12]聂琼，周远翔，陈铮铮，等. 频率对硅橡胶起树电压及电树枝形态的影响[J].高电压技术，2009，34(01)：141-145.

[13]李进，梁虎成，杜伯学，等. 基于双极性载流子输运模型的高压直流电缆附件绝缘EPDM/LDPE界面电荷的数值模拟[J].高电压技术，2018，44(05)：1443-1449.

[14]成睿. 不同气压下交联聚乙烯电缆电树枝的引发生长特性及老化研究[D]. 成都：西南交通大学，2015.

[15]李长云，冀章，闫宏伟.绝缘纸特性和极性反转对油纸绝缘空间电荷效应的影响[J].中国电机工程学报，2020，40(14)：4708-4718+4748.

[16]Liang Hucheng, Du Boxue, Li Jin. Improved space charge transport model in bi-layer dielectrics-considering carrier dynamic equilibrium [J]. High voltage, 2020,5(2):176-183.

[17]Yani Wang, Feng Guo, Jiandong Wu, et al. Effect of DC Pre-stressing on Periodic Grounded DC Tree in Cross-Linked Poly-ethylene at Different Temperatures[J]. IEEE Access, 2017:25876-25884.

[18]Alison M, Hill R M. A model for bipolar charge transport, trapping and recombination in degassed crosslinked polyethene[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27(6): 1291-1299.

[19]吴建东. 低密度聚乙烯纳米复合介质中电荷输运的实验研究和数值模拟[D]. 上海：上海交通大学，2012.

[20]Zeller H R. Prebreakdown in diverging fields[C]. Annual Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Pocono Manor, PA, USA, 1990, pp. 457-464.

[21]H. Ren, H. Gao, C. Li, et al. Numerical Research on Space Charge inside Solid Dielectrics under Unipolar and Bipolar Voltage Conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021,28(1): 98-106.

[22]H. Ren et al. Research on the Effect of Unipolar Pulse Wave Voltage on Space Charge Characteristics for High-Frequency Equipment Insulation[J].IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021,28(1):150-157.

[23]秦司晨，屠幼萍，金花，等.不同温度下环氧树脂空间电荷特性仿真研究[J].高压电器，2018，54(05)：144-149+155.

[24]周远翔，张云霄，张旭，等.热老化时间对硅橡胶电树枝起始特性的影响[J]. 高电压技术，2014，40(04)：979-986.

[25]刘贺晨. 高压直流电缆绝缘老化对空间电荷特性的影响及其电树枝特性研究[D]. 北京:华北电力大学(北京)，2017.

[26]陶文彪，朱光亚，宋述勇，等.交联聚乙烯中丛状电树枝的生长机制[J].中国电机工程学报，2018，38(13)：4004-4012+4042.

[27]陈向荣，徐阳，王猛，等. 高温下110kV交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性[J]. 高电压技术，2012，38(03)：645-654.

作者简介：

吴诗优（1997），男，江西赣州，硕士，主要研究输电线路缺陷检测、XLPE电缆局部放电检测，E-mail：wushiyou97@163.com

张征（1993），男，江西南昌，硕士，从事输电线路运行维护与检修相关研究，E-mail：whu_zhangzheng@163.com

郑书生（1979），男，北京，博士，主要研究电力设备状态检测，E-mail：zss@ncepu.edu.cn

一起220kV线路保护接地故障跳闸分析

陈敏

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 吉安 343800）

摘要：对一起 220kV 线路单相接地故障跳闸过程及信号分析，快速判断事故原因，从而给予尽快的解决。

关键词：线路保护；录波；跳闸

0 前言

2019 年 3 月 5 日 02：16：29，万安电厂发生了一起 220kV 线路保护跳闸事件，万虎Ⅱ线方向保护和高闭保护动作出口、保护动作单跳 A 相，重合闸 A 相，并重合于永久性故障转三相跳闸，事故引起发出监控光字信号近 20 条；2021 年 8 月 4 日同样也发生一起线路保护跳闸事件，事故现象与前次跳闸事件相似，故对其动作过程情况及事故信号进行全面分析。

1 检查情况

(1)保护装置录波检查

线路方向屏 RCS-901B 保护：工频变化量阻抗、距离Ⅰ段、纵联变化量方向、纵联零序方向动作，4ms 工频变化量阻抗保护动作，51ms 跳 A 相；769ms 重合闸动作。

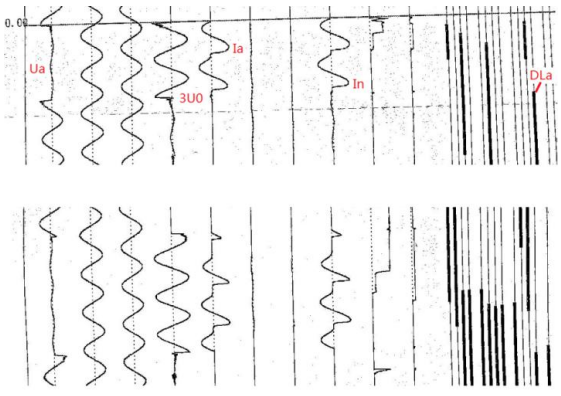
A 相重合失败后：距离加速动作，距离Ⅰ段动作，零序加速动作，纵联变化量方向；791ms A 相合闸，874ms 距离加速保护动作，约 900ms 三相分闸。保护测距 1.1Km，第一次 A 相故障电流 71.09A（折算一次约为 14.2kA）。RCS-901 装置无第二次短路电流报告，从图上看不出多大。

线路高闭屏 PSL602G 保护：快速距离、接地距离Ⅰ段、纵联保护动作，8ms 快速距离保护动作，792ms 重合闸动作。

A 相重合失败后：纵联距离加速动作，距离加速动作，接地距离Ⅰ段动作；791ms A 相合闸，874ms 距离加速保护动作。两次短路测距均为 1.03Km，A 相故障电流：第一次 69.58A，第二次 44.726A（CT 有饱和）。

从录波结果来看，双套保护装置动作一直，动作行为正确，判断为近区发生单相接地故障。

(2)相关班组在接到值班电话后，立即赶往现场检查，对 GIS 室开关间隔和坝顶等一次设备检查未发现明显异常，开关确已三相跳闸，油气压正常；全面检查设备无异常，复归相关信号，排除站内设备故障引起的保护动作，随后用望远镜检查了出线#1 杆塔情况，未发现放电现象。



第二次短路时，电流波形显示CT有饱和现象

(3)对厂站内保护范围内的二次设备检查未发现异常；检查厂区内架空线塔未发现明显异常。运行人员对线路高频通道交换信号发现，线路高频闭锁保护通道（A 相）告警，方向高频保护通道（B 相）交换信号正常，说明接地故障一直存在。

2 录波分析

综合现场设备检查和保护动作报告录波分析判断：

(1)根据保护动作录波图分析，线路 A 相发生永久故障，保护动作正确；因故障发生期间为雷雨天气，初步判断为雷击引起的接地短路故障，故障位置在离本厂架空线出线不远的位置。

(2)根据高频通道交换信号情况分析，线路 A 相通道异常，线路两侧阻波器之间应该存在故障点。

3 故障信号分析

在线路发生接地故障时，监控报：开关站 2E 高闭保护跳闸动作、开关站 2E 保护重合闸动作、开关站 212DL 三相不一致动作、开关站 212DL 合闸压力闭锁动作、开关站 212DL 分闸压力闭锁动作、开关站 212DL 电源及回路故障动作、开关站 212DL 间隔油压异常动作、开关站 110kV 母差电压开放动作、开关站 1E 失灵启动动作、开关站 3E 方向保护收发信机动作、开关站 4E 高闭保护收发信机动作、1 号发变组保护 A 屏装置异常动作、公用 1 号渗漏

泵电源故障动作、5 号机组 1、3 号压油泵电源消失及 1 号主变冷却器断水动作等信号，全厂监控信号发生近 20 条，事后对故障信号进行分析，大致将信号分为三类。

(1)本线路保护相关动作信号：包括保护跳闸信号、重合闸信号、三相不一致动作、因线路在故障期间发生了多次跳合，操作结构正常释放压力引起开关的分合闸压力闭锁信号；因线路开关位置继电器 TWJa 动作时 HWJa 未及时返回引起的开关电源及回路故障动作等。

(2)根据故障分析，故障测距在 1km 左右，故障点离我厂较近，阻抗接近零，根据第二次故障录波电流发生饱和现象来看，故障二次电流超过 70A，220kV 母线二次电压降低至 7V,系统受到较大冲击，我厂各电压等级系统在冲击期间电压波动都比较大，从而引起了其它保护相关动作信号，如 110kV 母差电压开放动作、至吉安线路收发信机动作、1 号发变组保护 A 屏装置异常动作，但冲击过后又自动复归，都确认为正常现象。

(3)线路接地故障冲击导致厂用电电压波动，引发的公用设备相关动作信号：公用 1 号渗漏泵电源故障动作、5 号机组 1、3 号压油泵电源消失及 1 号主变冷却器断水动作等，这些都是因为相关继电器在厂用电电压波动期间接点抖动引发的暂时信号，在冲击过后以上信号均自动返回。

4 结语

保护装置和故障录波装置能将故障量记录下来，详尽的分析故障录波信息是准确判断故障性质的重要前提，必须予以足够的重视。通过对故障波形的分析，有利于事故原因的判断，从而给与尽快的解决，这对于学习分析故障、了解保护装置特性都有好处的。

而事后在在对线路全线进行巡线时发现在我厂线路坝顶出线第二个架空线塔 A 相有一绝缘瓷瓶闪络，造成绝缘瓷瓶全击穿，我厂保护动作正确，避免了事故的进一步扩大。

2021 年 8 月 4 日 9:19:27，220kV 万芙线 A 相发生近区单相接地故障，监控报本线断路器非全相动作、跳合闸压力闭锁动作、控制回路异常动作、光差 A、B 套保护动作、重合闸动作、1 号发变组保护 A 屏装置异常动作和 110kV 母差电压开放动作、1 号主变冷却器断水等信号，220kV 万芙线 213 开关跳闸，通过现场检查发现这两次线路保护动作现象基本一致，再次验证了此次线路保护动作信号分析。

当保护发生动作事件后，除了结合故障录波进行分析，还应结合故障发生时的环境因素的影响，具体问题应具体分析，希望本文能给大家带来一些参考价值。

参考文献：

[1]国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]北京：中国电力出版社, 2001

[2]王维俭编. 电力系统继电保护基本原理. 北京：清华大学出版社, 1991

作者简介：

陈敏（1983）,男，湖北荆门，大学本科，工程师，主要从事继电保护专业工作，E-mail：12101997@ceic.com

坝顶门式起重机穿销故障原因分析及处理

钟斌

（国家能源集团万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：本文主要阐述了门式起重机穿销系统组成及动作原理，分析了门式起重机穿销系统在实际工作中出现的一些故障，并进行了原因分析，提出了处理办法。

关键词：穿销组成与动作原理；故障原因分析；处理

0 引言

某厂坝顶门式机采用的是双向门式起重机，设计主钩起吊重量为2×160吨，起吊高度为50米，门机右悬臂吊机吨位30吨，起吊高度为50米。两台门机是供机组大、小修落提闸门、坝顶清污及防洪的重要辅助设备，其中门机穿销部分是直接影响门机提、落闸门的关键。如何在最短时间内解决门机穿销部分故障，快速恢复设备运行这是摆在我们面前的一个技术难题。

1 门机穿销系统的组成及动作原理

设备故障的发现需要追本溯源，就门机穿销故障而言，其本源就是门机穿销系统的组成与动作原理。了解门机穿销系统的组成与穿销动作原理是快速准确判断门机穿销故障的基础。

1.1 门机穿销系统的组成

1.1.1 穿销同步位移传感器

（1）技术参数

型号 WZ-IV 880MM

指数范围：0-90CM

分辨力：1CM

绝对误差：±1CM

（2）穿销同步位移传感器内部集成有单片机系统，主要功能是对传感器采集的信号进行采集、分析处理后直接输出为标准的RS485通讯信号供上位机（即WZ-IV型门机综合监测仪）采集显示，该装置置于一根与油缸相适应的不锈钢管中，平行安装于穿销油缸的上方，当油缸推动销轴运动时带动滑块运动，传感器就会检测到销轴的准确位置，并且每一个同步位移传感器都有一个特定的地址，模块引出一根四芯电缆，其中有两根是提供模块直流24V电源（红色、兰色），还有两根是RS485传输线（均为白色）。

传感器采集信号是通过装在装置外的磁铁与钢管内的磁感应元件相互作用而产生的。

1.1.2 WZ-IV 型门机综合监测仪

该监测仪采用模块化结构，整个装置由重量传感器、同步位移传感器、主钩光电编码器，信号调理模块、模拟/数字转换模块、全中文图型显示模块、专用键盘、电源模块等部分组成。为了提高系统的稳定性和抗干扰能力，抓梁穿销、主钩高度与主机均采用数字信号传输。

1.1.3 控制元件

门机穿销部分的控制元件主要有：主联动台上的穿销操作开关，电磁阀控制接触器，油泵电机控制接触器。

1.1.4 执行元件

主要包括：装在抓梁上的油箱内穿、脱销电磁阀；油泵电动机。

1.2 穿销系统动作原理

由一台ABB1.5KW油泵电机和穿销电磁阀，脱销电磁阀配合动作。在工作状态下，只有抓梁就位信号发出后，进入PLC，而后输出信号启动油泵，穿销电磁阀动作时，此时销子开始穿销，直至穿销到位时发出穿销到位信号并自动切断穿销回路。脱销电磁阀动作时，此时销子开始脱销至脱销到位发出信号并自动切断脱销回路。由PLC与主驾驶室内门机综合监控仪共同完成。

2 门机穿销系统故障原因分析及处理

2.1 故障一 发出穿、脱指令后，油泵不动作。

序号	故障原因	处理方法
1	油泵接触器损坏。	测量接触器吸合线圈电阻值及绝缘电阻值，视情况更换同型号接触器。
2	油泵有漏电现象，跳穿销回路总空气开关。	打开密封油箱，检查油泵本体及一次回路的漏电原因，并处理。
3	油泵热继器动作。	手动恢复后再试一次，若故障现象仍存在，应调整整定值或更换热继电器

2.2 故障二发出穿、脱指令后，油泵动作，但销子不动作。

序号	故障原因	处理方法
1	电磁阀动作了，但是阀体太紧，电磁力低于阻力。	打开油箱除去阀体上阻碍物，并手动来回顶动阀体，测量电磁阀动作接点情况。

2	电磁阀没有动作	1、检查提供给电磁阀的电压是否正常。若不正常，检查专用电源模块输入、输出电压。 2、检查电磁阀输出继电器是否动作，若继电器不动作，检查逻辑图中相关条件是否符合。分别应检查PLC输入模块中9.11（9.09），8.08，穿销时9.11应亮，退销时9.09应亮，正常时8.08应不亮。输出模块中104.09，104.10，103.11。穿销电磁阀输出时104.09应亮，退销电磁阀输出时104.10应亮，油泵输出时103.11应亮。 3、若在检查电磁阀电压相关电磁阀中间继器都动作正常后，可检查主起升房内电缆卷筒处滑环及电刷接触情况及接线有无松动。 4、电磁阀处电缆插口是否松动。
3	油箱内油面下降或无油。	找出漏点并处理，加入25#变压器油至上刻度线

2.3 故障三监控仪上显示穿、脱销到位后，但不停油泵。

序号	故障原因	处理方法
1	一般是穿、脱销到位，输出小中间继电器故障所致	此时操作人员应立即手动将把手拔回空位。 并更换小中间继电器。

2.4 故障四销子实际行程与监控仪上显示数据不同。

序号	故障原因	处理方法
1	监控仪上穿销参数设置不合理。	按F1进入设置状态，输入密码1234，进入参数设置表。 设置参数，单销时参数填入左销，没有参数的填0或不填。 标定上限为标定量程时的实际值，当时对应的当前模数值填入相应的上限模数； 如：当前穿销位移值是30CM，此时的当前模数值是667，则将30写入穿销列中标定上限栏处，将667写入穿销列中当前模数栏处即可。 标定下限为标定量程时的实际值，当时对应的当前模数值填入相应的下限模数。 如：当前穿销位移值是0CM，此时的当前模数值是3，则将0写入穿销列中标定下限栏个，将3写入穿销列中当前模数栏处即可。 当前模数值用于标定时查看相应的模数值；即各种传感器的实际状态。 穿销就位传感器与主机采用RS485通讯方式交换数据，因此要改变他们的地址数据。否则主机将读不到传感器的数据。
2	传感器的感应点连续三个以上损坏，读不到销子的准确数值	更换传感器。方法如下： 1、准备好同型号的传感器、环氧树脂和固化剂。 2、将环氧树脂和固化剂放在烘箱内洪热，温度控制在60度左右，时间在2小时以上。 3、传感器先应接好线试验，确保其完好。 4、停电情况下，拆除旧传感器，锯断传感器电缆。 5、将新传感器、旧传感器上电源+极与+极相联，负极与负极相联，剩下两根白色线先任一相联。注意的是：旧传感器电源正、负极可以通过对线找出，新传感器的正、负极在新产品包装纸上有标明，这两根线一定不能接错，否则会损坏传感器。 6、送上电源，修改综合显示仪内穿销参数地址（地址在新产品上有标明）。 7、操作穿销开关，看综合显示仪穿销显示栏亮光会不会随销子走动。会，说明四根线接线正确，不会，则将两根白线对换，再试，应正常。确定接线正确后，做好记号。 8、确定接线正确后，做好记号，将两线头装入接线盒内，用砂纸将线头处打磨光亮，将线按上记号对接好，用电烙铁焊接牢固。 9、完成以上步骤后，才能将加热好的两个胶按1：1比例调和均匀，灌入接线盒，将电缆线固定好，等待胶固化，一般放置24小时后，才能下水使用。 10、待固化后，再试穿销，进行参数设置。

2.5 故障五销子动作正常，但监控仪无显示

序号	故障原因	处理方法
1	传感器感应磁铁位置偏移	调整感应磁铁位置
2	传感器感应磁铁因固定螺杆断裂，没有跟销子移动	1、更换固定螺杆及隔磁板。 2、注意操作时要精神集中，销子到位后及时将操作开关拔回“空”位。

3 结束语

门式起重机现在已是最常用的一种起重设备，其中门机穿销部分的好坏是直接影响门机是否能正常工作的关键，这对门式起重机维护人员解决穿销故障技能也提出了更高的要求，这就需要我们不断学习新的门机知识，不断的积累经验。

参考文献：

[1]GB/T14406—2011 《通用门式起重机》 北京 中国国家标准化委员会

作者简介：

钟斌（1972），男，江西信丰，大专，高级技师，E-mail：12097861@ceic.com

光伏直流升压系统中级联DC/DC变流器的均流/均压控制策略

陈波[1]，蔡礼[1]，谢凡[2]，王晓晨[3]，邱日强[1]，涂睿[1]

（1.国网江西省电力有限公司南昌供电分公司，江西 南昌 330000；2.国网江西省电力有限公司，江西 南昌 330000；3.国网能源研究院有限公司，北京 102209）

摘要：输入并联输出串联级联 DC/DC 变流器可以减小开关器件承受的电流/电压应力，适用于低电压输入高电压输出的光伏直流升压系统。为了保证级联变流器的稳定工作，必须确保各模块的输出电压均衡。分析了统一占空比控制策略的缺点，提出采用均流型 MPPT 控制策略实现输出均压和光伏模块的最大功率跟踪，针对均流型 MPPT 控制策略在光照强度发生变化时的暂态特性的不足提出在均流环的基础上叠加输出电压环的均流均压型 MPPT 控制策略，以改善系统的动态均压能力。并提出了光伏直流升压系统中输入并联输出串联级联 DC/DC 变流器的模块化设计结构。仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词：光伏；DC/DC 变流器；输入并联输出串联；输出电压均衡

0 引言

作为光伏发电系统新的联网形式，光伏直流汇集系统减少了功率变换环节、电缆数量、无功环流引起的损耗等，可提高电能转换效率，且易于融入未来的直流配电网[1]，因此随着直流输配电技术的发展将有望获得实际应用。光伏直流汇集系统中的核心设备是高压大功率的DC/DC变流器，需要将低压侧光伏单元通过升压变化接入中高压侧的直流配电网，同时需要实现低压侧光伏单元的最优功率跟踪控制[2-5]。但是目前DC/DC变流器中电力电子器件的耐压水平，还无法满足大功率光伏直流升压变流器输出侧承受高耐压的需求，因此需要采用多模块输入并联输出串联(Input parallel output series，IPOS)[6-9]的结构。为确保直流升压单元的稳定高效工作，需要研究IPOS结构各子模块间的均流/均压控制策略。

多模块IPOS级联结构多用于燃料电池和光伏发电系统，对于燃料电池发电系统，IPOS级联结构的输入侧为直流源，输出侧为负载，目前大多数文献关于IPOS级联结构的控制的都是运用于这种结构，文献[6]提出采用主从式控制策略实现IPOS级联结构的输入电流均分，从而可以实现输出均压。文献[7]提出将输出电压和输入电流通过解耦控制的方法可以实现输出均压。文献[8]提出使用单独的电压环控制可以使得各模块占空比一致，从而实现各模块间的输出均压。这些控制方法的共同特点是每个子模块的控制方法都一致，但对于光伏发电系统，光照和温度外界条件对光伏模块的输出直流电压影响较大，需要额外的子模块实现最大功率跟踪（Maximum power point tracking，MPPT）[9]，以保证光伏系统的发电效率，文献[10]虽然提出光伏级联IPOS结构采用统一占空比的控制策略，但是当MPPT控制与均压/均流控制耦合在一起时，会使系统偏离最大功率点，甚至无法稳定运行。所以对于光伏IPOS级联结构需要一个单独的子模块实现光伏单元的MPPT控制，这就导致这个模块的控制方法与其它模块控制方法的不同，由于MPPT模块是被动实现均压/均流，当光照强度发生变化等情况时，控制MPPT的模块电流变化趋势与其余模块不一致，导致模块间输出电压差值较大，会对器件造成损坏，因此对其余模块的均压/均流控制的动态特性要求更高。

本文提出了一种光伏直流汇集系统中IPOS级联模块的均流/均压控制方法，该方法由均流环和输出电压环双环组成，均流环保证输出电压的均衡，输出电压环控制级联模块之间的压差大小，在双环控制方法中，占空比将按输入电流的差值和输出电容的压差进行动态调节以实现输入均流和输出均压，为了保证模块故障退出运行时维持光伏单元的MPPT控制及方便系统的冗余设计，提出了模块化设计结构。最后在Matlab中搭建仿真系统，验证了提出的控制策略的有效性。

1 光伏直流汇集系统的结构及统一占空比控制策略

1.1 集中式光伏直流汇集系统

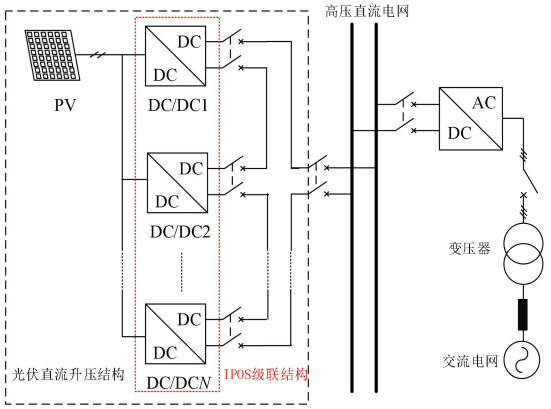


图1 集中式光伏直流汇集系统

图1为集中式光伏直流汇集系统，采用IPOS级联形式的DC/DC模块将低压侧光伏单元的电能经过升压的变换传输至高压直流电网，IPOS级联结构子模块间采用输出均压控制策略，最后经过逆变器的统一逆变经变压器电压变换接入交流电网。

集中式光伏直流汇集系统的核心部分在于光伏直流升压结构，实现光伏阵列MPPT控制的同时需要实现IPOS级联结构的输出均压，使得光伏阵列始终工作于最高效率点以及提高系统的稳定性。

1.2 光伏IPOS级联系统结构

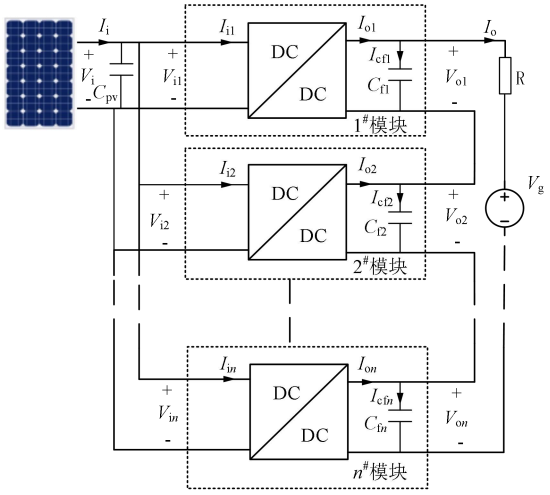


图2 光伏IPOS级联系统结构图

光伏IPOS级联系统结构如图2所示。图中

V_i——IPOS级联系统的输入电压，即光伏模块的输出电压

I_i——IPOS级联系统的输入电流，即光伏模块的输出电流

I_o——IPOS级联系统的输出电流

I_{i1}，I_{i2}，…，I_{in}——各模块的输入电流。

I_{o1}，I_{o2}，…，I_{on}——各模块的并网电流。大小与I_o相等。

V_{i1}，V_{i2}，…，V_{in}——各模块的输入电压，大小与V_i相等。

V_{o1}，V_{o2}，…，V_{on}——各模块的输出电压，即并网电压。

为了保证IPOS级联系统输入输出不能共地，各模块必须实现电气隔离，隔离式变换器中有源箝位隔离升压全桥变换器(Isolated Boost Full Bridge Converter，IBFBC)通过控制箝位开关管的滞后开通和提前关断实现各开关管的软开关，而且IBFBC结构简单，由于升压变压器采用工频变压器，变压器副边采用二极管构成的全桥整流电路使得制造成本较低，适合于大功率变换的光伏直流升压系统[11-13]，所以本文选取IBFBC作为级联结构的基本模块，拓扑图如图3所示，开关管的控制方式为传统的PWM控制，不会有移相控制存在的占空比丢失而导致输出不能实现均压的问题。

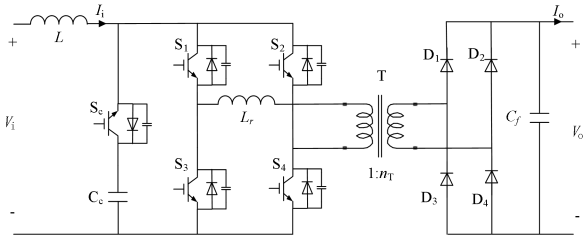


图3 IBFBC拓扑结构

从图2中可以看出IPOS级联结构输入侧采用并联形式可以减小每个变流器输入侧器件所承受的电流应力，输出侧采用串联的连接形式可以减小每个变流器输出侧器件所承受的直流电网的电压应力，对于输出侧采用串联连接方式的IPOS级联结构，忽略模块内部损耗，如果每个子模块间输出电容两端的电压不相等，则输出端电容之间会产生电压差，电压差过大会导致输出端器件击穿造成器件的损坏，影响变流器的工作效率，也使得IPOS级联系统的不稳定工作[14]，所以对于IPOS级联结构必需保证每个模块的输出端电容电压相等。

1.3 IPOS级联系统的统一占空比MPPT控制策略

在实现IPOS级联系统输出均压的控制策略中，统一占空比的控制算法较为常见，其控制框图如图4所示，各模块采用统一的占空比。

其中，V_{cpv}为光伏模块的输出电压，I_i为光伏模块的输出电流。采用的 MPPT算法为电导增量法[15],[16]。模块1实现光伏模块的MPPT，其对应的

占空比为d_1，占空比d_1与单位锯齿波$V_{ramp\,i}$相比较，产生第i个模块的PWM驱动信号。

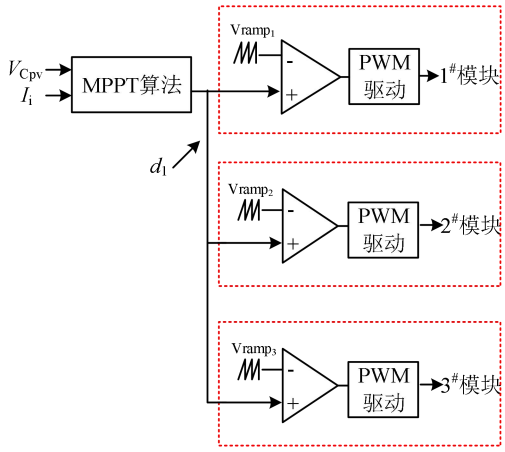


图4 光伏IPOS级联结构统一占空比控制策略

当各模块内部参数一致时，各模块输入输出侧功率平衡，则自然实现均压(OVS)，采用统一占空比的控制策略的优点是结构简单，且每个模块使用同一占空比信号可以保证均流/均压，但是当变流器内部参数不一致时会导致IPOS级联结构不能实现均流/均压的功能。

第i个IBFBC模块的输出滤波电容C_{fi}与输出电压纹波ΔV_{oi}的关系如下所示[17]。

$$C_{fi}=\frac{(I_o)\cdot(\frac{T_s}{2}-T_{DR})}{\Delta V_{oi}} \tag{1}$$

$$T_{DR}=\frac{n_T\cdot V_i}{2\cdot V_{oi}\cdot f_s\cdot(1+\frac{L_{ri}}{L_m})} \tag{2}$$

其中每个模块变流器的开关周期T_s，开关频率f_s是相同的，变压器变比n_T在工艺上是可以匹配的，变压器一次侧漏感与磁化电感的比值L_{ri}/L_m可以忽略不计。级联结构各模块的输入电压V_i和输出电流I_o相等，稳态的输出电压V_{oi}也相等，则输出电压纹波ΔV_{oi}只与电容值C_{fi}有关。所以当各个模块的输出滤波电容C_{fi}数值大小不一致时，会导致各个模块输出电压V_{oi}的纹波大小不同。输出电压纹波大小不同导致输出电压发生变化时，模块1的占空比就会发生改变，以实现输出均压。若多个模块的占空比同时发生改变，即各个模块的输出电压不能理想的达到平衡状态，就会造成模块1的调节负荷加重，甚至引起系统的不稳定工作。

第i个模块的输入储能电感L_i与输入电流纹波ΔI_{il}的关系下所示：

$$L_i=\frac{V_i\cdot(D-0.5)}{\Delta I_{il}\cdot f_s} \tag{3}$$

其中，D为各模块稳态占空比。可以看出当各模块的输入储能电感值不同时，各模块的输入电流会不断的在稳态值附近波动，造成系统的不稳定工作。

实际上，各模块的参数很难做到完全一致，IBFBC的输出端电压等级较大，输出滤波电容一般采用容量较大的电解电容，电解电容的实际容量值与标称值会有±20%的制造误差，电感和电容的参数也会随着工作时长而发生变化，此外，驱动系统中一旦有脉冲不同步或脉冲丢失发生，也会造成各模块功率不平衡而导致产生过压问题。因而工程运用上不适合采用统一占空比控制策略。

虽然可以在统一占空比控制策略的基础上叠加均流或者均压控制环，通过改变各模块之间的占空比实现各个模块间的输出电压相等，但是这种均流或者均压控制策略会与MPPT控制耦合，当均流或者均压控制改变模块的输入功率时，MPPT控制会起作用寻找最大功率点，而均流或者均压也随之起作用，因此系统将处于不稳定的工作状态。

2 光伏IPOS级联结构均流型MPPT控制策略

为了使得光伏直流升压系统中IPOS级联结构在各DC/DC模块内部电感电容参数不一致时的稳定工作，需要使得光伏模块MPPT与IPOS级联结构输出均压解耦控制，即使得IPOS结构中的一个DC/DC模块实现MPPT控制，其余DC/DC模块间实现OVS。各DC/DC模块的输出电压参考值为V_g/n，则由于电网电压的钳位作用，控制MPPT模块的输出电压与其它模块相等，IPOS级联结构各DC/DC模块间即实现了OVS。

由图1可知，系统在稳态工作时，第i个模块的输出电容C_{fi}上经过的电流值为0，则

$$I_{oi}=I_o \tag{4}$$

忽略损耗，则根据功率守恒定律可得

$$V_i\cdot I_{ii}=V_{oi}\cdot I_o \tag{5}$$

对于IPOS级联结构，每个模块的输入电压V_{ii}和输出电流I_{oi}分别相等，如果各模块输入均流，即

$$I_{i1}=I_{i2}=\cdots=I_{in} \tag{6}$$

由式（5）和式（6）可以得到

$$V_{o1}\cdot I_{o1}=V_{o2}\cdot I_{o2}=\cdots=V_{on}\cdot I_{on} \tag{7}$$

由式（7）可以看出，对于IPOS级联结构只要实现输入电流均流(Input Currents Sharing, ICS)就可以保证OVS。由此可以提出光伏IPOS级联系统的均流型MPPT控制策略，如图5所示。

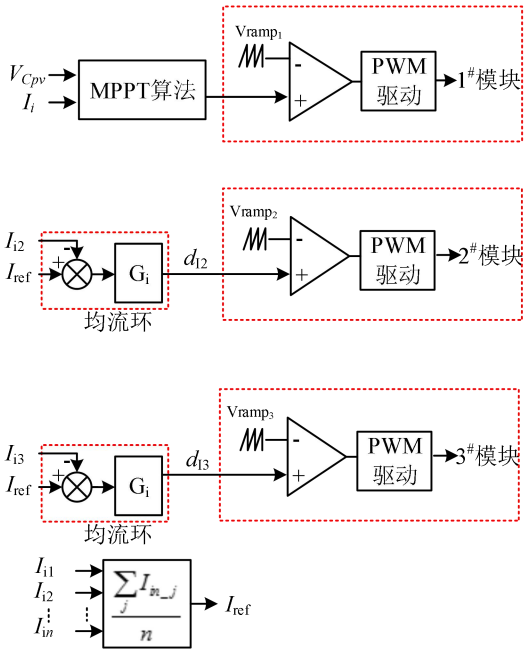


图5 光伏IPOS级联系统均流型MPPT控制策略

光伏模块通过模块1的MPPT算法产生的占空比，与锯齿波V_{ramp1}比较产生模块1的PWM驱动信号。均流环产生的调节信号d_{I2}和d_{I3}分别与锯齿波V_{ramp2}和V_{ramp3}比较产生模块2和模块3的PWM驱动信号。均流环使得模块2和模块3的输入电流均为$I_i/3$，从而与第一个模块的输入电流也相等。当级联系统各模块参数不一致时，每个模块通过调节各自的占空比实现ICS和OVS。

均流环可以保证稳态时各模块间的OVS，但是当光照强度发生改变，暂态时，三个模块的输入电流变化趋势不一致，导致各模块输入电流不断波动，最后到达稳态，如果光照强度变化较大，将导致输入电流的波动幅度较大，使得输出电压过压，对开关管产生电压冲击，对器件造成损坏。

采用均流型MPPT控制策略时当每个模块均流环控制结果产生误差时，第一个模块产生的电流误差将是其余模块误差的叠加，导致模块1的输出电压会与其余模块间产生输出电压差。图6为光伏直流汇集系统IPOS级联结构简图

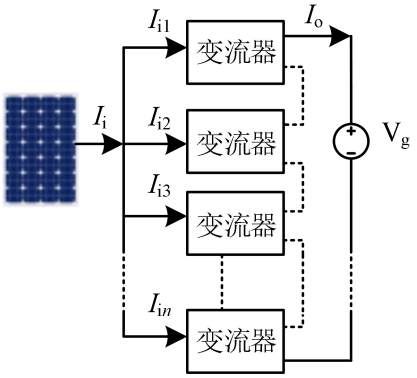


图6 光伏IPOS级联结构简图

如果均流环产生的电流误差大小为ΔI，则有

$$\begin{cases} I_{i2}=I_{i3}=\cdots=I_{in}=\dfrac{I_i}{n}-\Delta I \\ I_{i1}=I_i-\sum_{i=2}^{n}I_{ii}=\dfrac{I_i}{n}+(n-1)\Delta I \end{cases} \tag{8}$$

网侧电压V_g为恒定值，则有

$$I_o=\frac{P_i}{V_g} \tag{9}$$

其中P_i为光伏模块的输出功率，各模块的输出电压V_{o_i}如式（10）所示

$$\begin{cases} V_{o1}=\dfrac{P_{i1}}{I_o}=\dfrac{V_i\cdot I_{i1}}{I_o} \\ V_{o2}=V_{o3}=\cdots=V_{on}=\dfrac{P_{ii}}{I_o}=\dfrac{V_i\cdot I_{ii}}{I_o}, \\ (i\neq 1) \end{cases} \tag{10}$$

其中$P_{i\,i}$为各模块的输入功率，也即输出功率。然后由式（8）、（9）和式（10）可以求得模块1和其余模块输出电容的压差ΔV为

$$\begin{aligned} \Delta V=V_{o1}-V_{oi}&=\frac{V_i\cdot I_{i1}}{I_o}-\frac{V_i\cdot I_{ii}}{I_o} \\ &=\frac{V_i}{I_o}(I_{i1}-I_{ii}) \\ &=\frac{V_g}{I_i}\left[\frac{I_i}{n}+(n-1)\cdot\Delta I-\frac{I_i}{n}+\Delta I\right] \\ &=\frac{n\cdot V_g\cdot\Delta I}{I_i}, \quad (i\neq 1) \end{aligned} \tag{11}$$

当光照强度不发生改变时，I_i为光伏模块的最大功率输出电流，大小恒定，而且ΔI的值也不会变化太大，从式（11）可以看出模块1和其

余模块的压差 Δ *V*与级联模块数n成正比，而且由于光伏IPOS级联结构输出的电压等级较大，可以达到I_i的几倍甚至十几倍，所以尽管 Δ *I*的值较小只有几安培，但是 Δ *V*可以达到几百伏甚至上千伏。

Δ *V*过大会引起系统不稳定，可以提高开关频率或者增大电容值来减小输出电容之间的压差 Δ *V*，但是提高开关频率会增大开关损耗，而增大电容值会增加器件体积和成本[18]。

3 光伏IPOS级联结构均流均压型MPPT控制策略

3.1 均流均压型MPPT控制策略原理

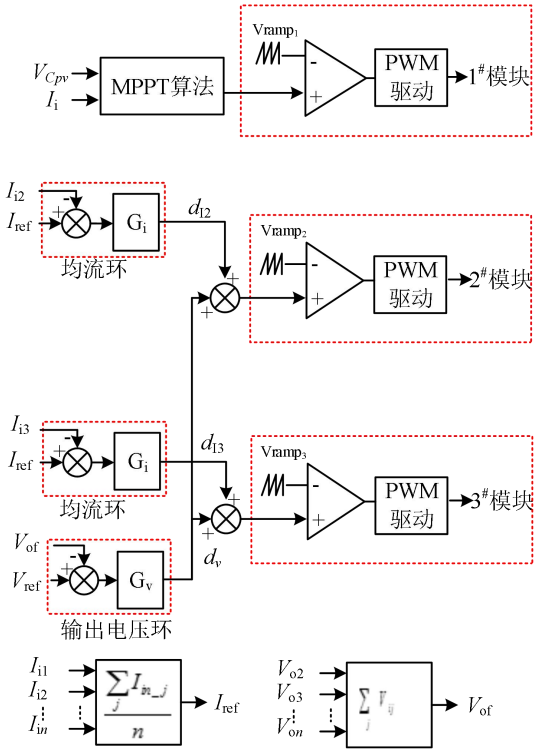


图7 光伏IPOS级联结构均流均压型MPPT控制策略

为了解决均流型MPPT控制策略存在的系统暂态特性较差的问题，加入输出电压环组成均流型均压型MPPT控制系统，通过直接测量压差值然后进行反馈控制减小模块间的压差 Δ *V*。图7为本文提出的均流均压型MPPT控制策略原理图。

图7中，$V_{ref}=V_g\cdot(n-1)/n$。光伏模块通过MPPT算法产生的占空比，与锯齿波V_{ramp1}比较产生模块1的PWM驱动信号。输出电压环产生的调节信号d_v与均流环产生的调节信号d_{I2}和d_{I3}分别叠加，与锯齿波V_{ramp2}和V_{ramp3}比较产生模块2和模块3的PWM驱动信号。

当系统启动阶段和光照动态变化过程中模块1与其余模块产生电压差时，此时$V_{of}<V_{ref}$，导致均压环的调节信号d_v增大，由于电流的差值较小，可以认为均流环的调节信号d_{Ii}不变，则模块*n*的占空比增大，模块*n*的输出电压增大，而模块2至模块*n*采用相同的控制方法，则模块2和模块*n*的输出电压会同时增大，而由于电网电压不变，模块1的输出电压则会减小，导致模块1与其余模块间的输出电压差减小。

均流环和输出电压环调节器G_i、G_v的参数设计可以采用频域分析法，通过Bode图借助系统的幅相特性曲线对调节器进行设计使得系统的相位裕量和增益裕量满足要求[19]，本文采用的是PI调节器。输出电压环调节模块间的输出电压，则必然会使得模块间的输入电流发生变化，所以输出电压环调节器G_v的PI系数如果太大，则各模块的输入电流发生较大变化，从而使得均流环调节过于剧烈，系统的暂态响应较差，而G_v的PI系数如果太小又造成压差环对占空比的调节能力有限，本文采用的压差环的PI系数为均流环PI系数的1/2。

3.2 系统稳定性分析

光照强度不发生改变时，输入输出功率相等，则系统的输出电流I_o恒定；如果某时刻外界产生扰动导致控制光伏单元MPPT的模块1的输出电压V_{o1}增大，由于直流电网电压的钳位作用，则模块2和模块3的输出电压V_{o2}和V_{o3}之和减小。由于均流环的作用将会使得各个模块的输入功率即输出功率相等且恒定。当V_{o1}上升时，模块1的输出电流I_{o1}减小，而由于系统的输出电流I_o恒定，则$I_{o1}<I_o$，则模块1的的输出端电容C_{f1}放电，导致V_{o1}减小，形成一个负反馈；同时V_{of}减小，输出电压环的调节信号d_v增大，使得模块2和模块3的占空比增大，则模块2和模块3的的输出电压V_{o2}和V_{o3}增大，即输出电压之和V_{of}增大，最后系统回到平衡点。同理，当外界产生扰动导致控制光伏单元MPPT的模块1的输出电压V_{o1}减小时，系统也可以稳定工作。所以光伏IPOS级联系统采用均流均压型MPPT控制策略时，系统可以稳定运行。

3.3 均流均压型MPPT控制策略减小压差的原理

当级联模块数n增加时，假设均流环产生的误差 Δ *I*不发生改变，根据式（11）模块1与模块2和模块3的输出电压差 Δ *V*增大，此时输出电压环输出的调节信号值d_v增大，使得模块2和模块3

的占空比变大，V_{o2}和V_{o3}增大，则根据功率守恒定律输入电流I_{i2}和I_{i3}增大，则$I_{i\,i}$与额定值I_i/n的误差ΔI随之减小，根据式（11）压差值ΔV就会减小，所以当级联模块数增加时，虽然n增大，但是通过输出电压环的调节，ΔI的值会减小，使得压差值ΔV减小。

3.4 光伏IPOS级联结构模块化结构

对于n个模块组成的级联系统，均流均压控制对各模块的占空比进行调节并将调节结果叠加，所以均流均压控制之间是耦合的，调节器的参数设计较复杂，若使得均流环与输出电压环解耦控制，则可以独立的设计均流环的调节器参数，降低系统设计的难度。

本文采用的DC/DC模块为IBFBC，每个模块的输入输出电压的关系为[19]

$$K\cdot V_{\mathrm{i}}=(1-d_i)\cdot V_{oi} \tag{12}$$

式中，K=n_{T}/2，d_i为第i（$i\neq1$，下同）个模块的占空比，由两部分组成

$$d_i=d_{\mathrm{I}\,i}+d_v \tag{13}$$

式中，d_v由输出电压环产生，$d_{\mathrm{I}\,i}$由均流环产生，由式（12）和式（13）可以写出其小信号扰动方程

$$\begin{aligned}K\cdot(V_{\mathrm{i}}+\hat{V}_i)=(V_{oi}+\hat{V}_{oi})\cdot\\(1-D-\hat{d}_v-\hat{d}_{\mathrm{I}i})\end{aligned} \tag{14}$$

式中，V_{i}、D和$V_{o\,i}$为变流器参数的稳态量，$\hat{V}_i$、$\hat{d}_v$、$\hat{d}_{\mathrm{I}i}$和$\hat{V}_{oi}$为扰动量。

化简消去式（14）中的直流分量和二阶扰动量，然后从i=2至i=n进行求和可以得到

$$\begin{aligned}(1-D)\cdot\hat{V}_{of}=&K\cdot(\mathrm{n}-1)\cdot\hat{V}_i+\frac{V_g}{n}\cdot(\mathrm{n}-1)\cdot\hat{d}_v+\\&\frac{V_g}{n}\cdot\sum_{i=2}^{n}\hat{d}_{\mathrm{I}i}\end{aligned} \tag{15}$$

由式（15）可以看出，如果$\sum_{i=2}^{n}\hat{d}_{\mathrm{I}i}=0$，则可以得到

$$(1-D)\cdot\hat{V}_{of}=K\cdot(\mathrm{n}-1)\cdot\hat{V}_i+\frac{V_g}{n}\cdot(\mathrm{n}-1)\cdot\hat{d}_v \tag{16}$$

由式（15）和式（16）可以看出，如果均流环输出占空比信号的和为0，则均流环的扰动对系统的输出电压不产生影响，两个电压环与均流环之间也互相不产生影响，所以就实现了均流环和电压环的解耦控制，这样就实现了均流环的独立设计。设计控制电路时，只要把第2个模块至第n-1个模块均流环产生的调节信号$d_{\mathrm{I}i}$（i=2，3，…，n-1）相加取反作为第n个模块均流环输出的调节信号$d_{\mathrm{I}n}$就可以实现$\sum_{i=2}^{n}\hat{I}_{\mathrm{pwm}i}=0$，均流环输出的调节信号$d_{\mathrm{I}n}$可以化简如下[20]

$$\begin{aligned}d_{\mathrm{I}n}&=-(d_{\mathrm{I}2}+\cdots+d_{\mathrm{I}(n-1)})\\&=-[(I_{ref}-I_{\mathrm{i}1})G_i+\cdots+(I_{ref}-I_{\mathrm{i}(n-1)})G_i]\\&=-G_i[(n-2)I_{ref}-(I_{\mathrm{i}1}+\cdots+I_{\mathrm{i}(n-1)})]\\&=-G_i\left\{(n-2)I_{ref}-\left[(n-1)I_{ref}-I_{in}\right]\right\}\\&=G_i(I_{ref}-I_{in})\end{aligned} \tag{17}$$

由式（17）可以看出$d_{\mathrm{I}n}$的形式与其余模块相一致，均流环和输出电压环互相不产生影响，方便系统的模块化设计，输出电压环的设计不会影响电流均流环的稳态值，只是对暂态响应产生影响。为了保证IPOS级联结构中控制MPPT的模块发生故障退出运行时，IPOS结构能维持光伏模块的MPPT控制，需要各子模块都封装MPPT控制算法，则光伏直流汇集系统中IPOS级联结构模块化设计如图8。

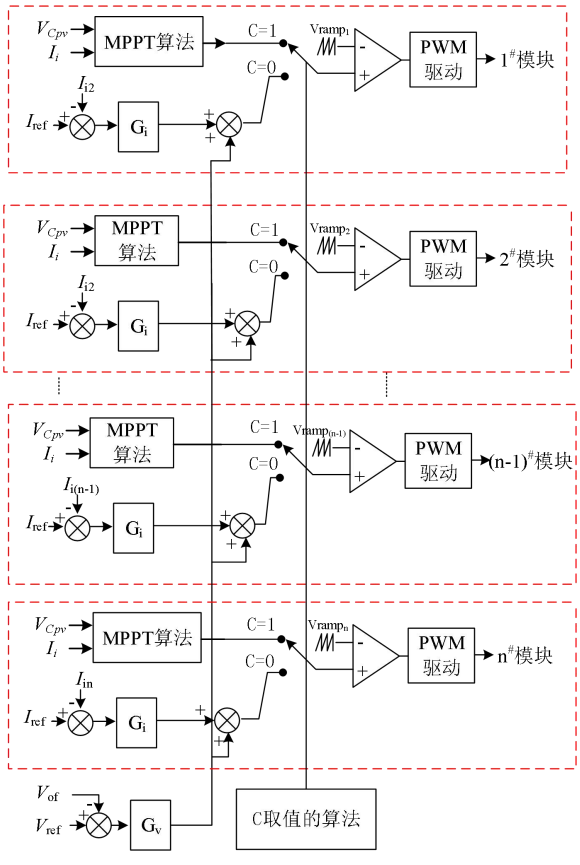
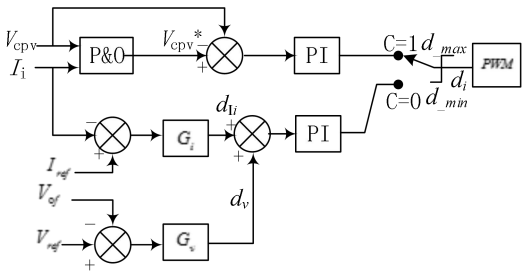


图8 光伏IPOS级联结构模块化设计图

图 9 是光伏 IPOS 级联结构控制策略图。每个子模块有两种控制模式可以选择。MPPT 控制模式：控制信号 C=1，利用电导增量法计算光伏最大功率点电压值和电流值作为直流升压模块输入电压和电流的参考值并与实际值做差，经过 PI 调节器调

节输出误差数据至 PWM 处理，最后输出 IBFBC 模块的占空比信号,最终实现光伏阵列的 MPPT 控制，提高能量的利用率。



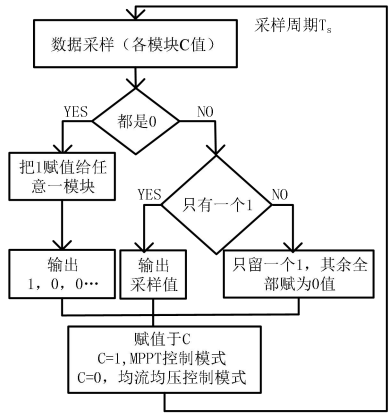


图9 光伏IPOS级联结构控制策略图

均流均压控制模式：控制信号C=0，采用输出电压环和子模块内部单独的均流环调节的方式，具体实现过程如下：采集IPOS模块的输出电压平均值并将其与各子模块输出电压采集值做差，经比例调节器构成输出电压环；采集不同子模块的输入电流并分别与光伏模块输出电流值的1/n进行比较，经比例调节器构成均流环。叠加后经过PI调节器调节实现各个子模块的输入电流跟随相应的参考值的。这样就可以实现输入均流和输出均压，同时由于输出电压环的存在，又减小了各子模块间的动态压差。

C取值的算法逻辑过程：采样软件对各个子模块的C值每隔Ts秒进行采样，并对采样值进行逻辑运算，如果运算结果显示C都为0，则把C=1赋值给任意模块，其余模块C值还是0；如果运算结果显示有多个1则C=1只赋值于其中一个模块，其余C=1的模块C都赋值为0；如果运算结果显示只有一个1，则输出采样值。

4 仿真验证

为了验证本文提出的均流均压型MPPT控制策略的优点，在Matlab/Simulink仿真平台上搭建了容量为1MW的光伏电站联结IPOS级联结构的光伏直流升压系统，直流电网的并网电压设置为15000V。分别采用统一占空比MPPT、均流型MPPT和均流均压型MPPT的控制方法在系统处于不同的工况下进行仿真分析。仿真中模块1实现光伏的MPPT控制。

仿真中采用的光伏组件参数如表1所示。表2是仿真中采用的IBFBC模块的参数的额定值。表3是仿真中模拟的3种不同的工况。

表1 SunPower SPR-305-WHT型光伏阵列参数

参数	符号	数值
串联模块数/个		15
并联模块数/个		220
光照强度1000w/m²时最大功率点电压/V	V_{mpp1}	820
光照强度1000w/m²时最大功率点电流/A	I_{mpp1}	1200
光照强度750w/m²时最大功率点电压/V	V_{mpp2}	810
光照强度750w/m²时最大功率点电流/A	I_{mpp2}	900
光照强度500w/m²时最大功率点电压/V	V_{mpp3}	800
光照强度500w/m²时最大功率点电流/A	I_{mpp3}	600

表2 DC/DC模块基本参数值

参数	符号	数值
输入储能电感/mH	L_i	0.3
输出滤波电容/μF	C_{fi}	200
开关频率/HZ	fS	5000
变压器匝数比	n_T	1:5
变压器一次侧漏感/μH	L_{ri}	5
变压器磁化电感/H	L_m	0.286

表3 不同的工况下系统的参数值

参数 / 工况	C_{fi}/μF	L_i/mH	光照/w/m²	网侧电压/V
工况1	C_{f1}=200 C_{f2}=200 C_{f3}=200	L_1=0.3 L_2=1 L_3=2	0.5s--(1000—500)；1s--(500—750)	15000
工况2	C_{f1}=200 C_{f2}=150 C_{f3}=250	L_1=0.3 L_2=0.3 L_3=0.3	0.5s--(1000—500)；1s--(500—750)	15000

图10为光伏IPOS结构采用统一占空比MPPT控制策略在各子模块输入储能电感不一致时三个模块的仿真波形对比，仿真工况如表3工况1。

从图10中可以看出当光伏IPOS结构各模块输入储能电感参数不一致时，采用统一占空比控制策略在启动阶段和光照变化的动态过程中各模块的输入电流和输出电压波动幅度而且处于震荡状态，系统的动态响应差，模块1与其余模

块差值大，不能实现输入均流和输出均压控制。

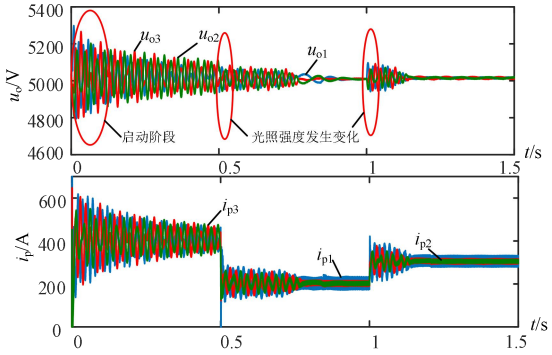


图10 输入储能电感不一致时采用统一占空比MPPT控制策略的仿真波形

图11是光伏IPOS结构各模块采用统一占空比控制策略在输出滤波电容不一致时三个模块的输入电流和输出电压的仿真波形对比，仿真工况如表3工况2。

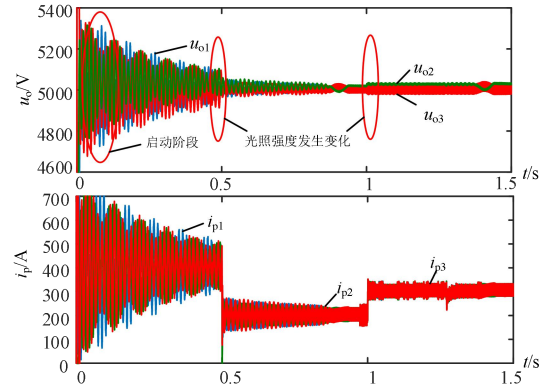


图11 输出滤波电容不一致时采用统一占空比MPPT控制策略的仿真波形

从图11中可以看出当光伏IPOS结构各模块输出滤波电容不一致时，统一占空比控制策略在系统的启动阶段和光照变化的动态过程中三个模块的输入电流和输出电压波动较大，暂态特性差，系统处于震荡状态，系统输入不均流导致输出不均压。

为了验证本文提出的均流型MPPT控制策略和均流均压型MPPT控制策略的控制效果，在以上的两种相同工况下分别采用本文提出的这两种控制策略进行仿真验证。

图12和图13分别为采用均流型MPPT控制策略、采用均流均压型MPPT控制策略在光伏IPOS结构三个模块间的输入储能电感不一致时的仿真波形对比，仿真工况如表3工况1。

对比表一参数，图12和图13仿真结果表明采用均流型MPPT控制和均流均压型MPPT控制策略都能实现了光伏模块的MPPT控制，但在系统的启动阶段和光照变化的动态变化过程中，采用均流型MPPT控制时，对比采用均流均压型MPPT控制时，模块1与其余模块会有较大的输出电压差。

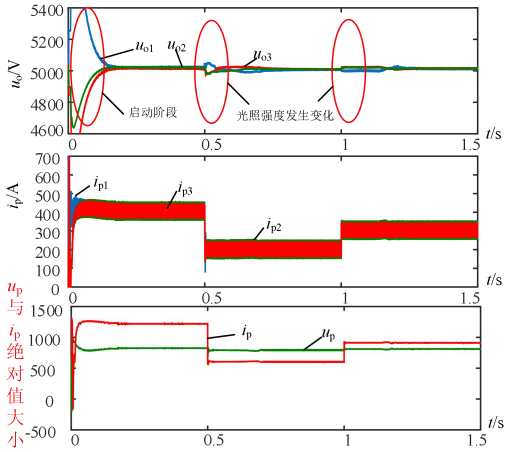


图12 输入储能电感不一致时采用均流型MPPT控制策略的仿真波形

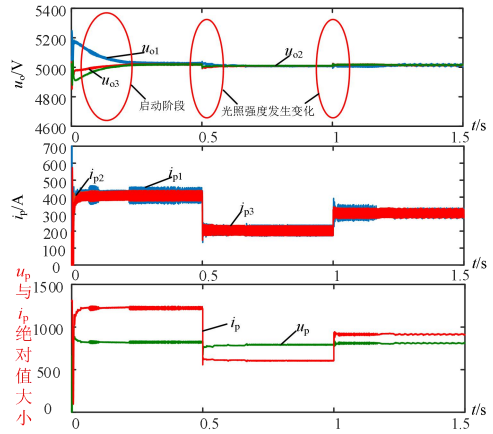


图13 输入储能电感不一致时采用均流均压型MPPT控制策略的仿真波形

图14和图15分别为光伏IPOS结构采用均流型MPPT控制策略和均流均压型MPPT控制策略在三个模块输出端滤波电容参数不一致时的仿真波形对比，仿真工况如表3工况2。

仿真结果表明在系统启动和光照变化的动态过程中采用均流型MPPT控制相对于均流均压型MPPT控制，模块1与其余模块会有较大的输出电压差。

图16为采用均流型MPPT控制策略和均流均压型MPPT控制策略在光伏IPOS结构级联模块数量分别为3、4、5个时模块1的输出电压对比图，仿真工况为在表3工况2的基础添加参数一致的子模块。

从图16中可以看出随着级联模块数的增多，在系统的启动阶段和光照变化的动态变化过程中，采用均流型MPPT控制策略时模块1与其余模

块的输出电压差随着级联模块数的增多会逐渐增大，而采用均流均压型MPPT控制策略时模块1与其余模块的输出电压差变化量较小。

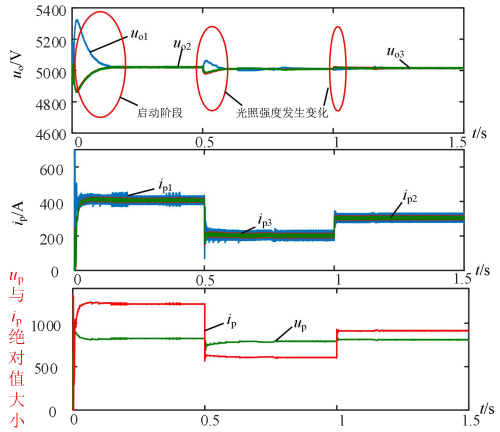


图14 输出滤波电容不一致时采用均流型MPPT控制策略的仿真波形

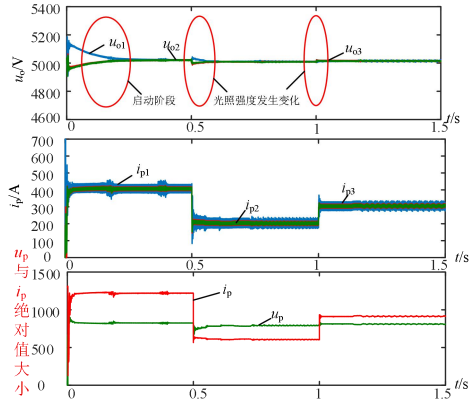


图15 输出滤波电容不一致时采用均流均压型MPPT控制策略的仿真波形

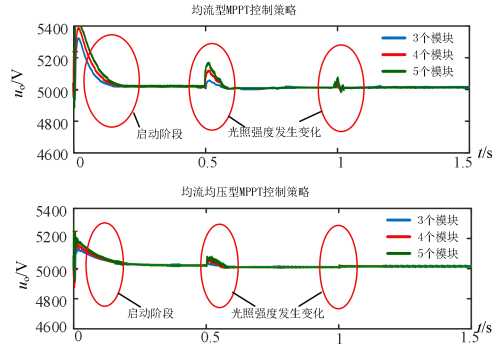


图16 级联模块数量不同时均流型MPPT和均流均压型MPPT控制策略的仿真波形

表4为均流型MPPT控制策略（策略一）和均流均压型MPPT控制策略（策略二）在以上工况下模块1与其余模块的输出电压差的差值对比表。从表4中可以得知，采用均流型MPPT控制策略时，在输入储能电感和输出滤波电容不一致时，压差值大小大约是采用均流均压型MPPT控制策略3倍，而且当级联模块数增多时，采用均流型MPPT控制策略时压差值放大了n倍，而采用均流均压型MPPT控制策略压差值变化较小。

表4 两种控制策略在不同工况下压差值

策略 \ 工况	输入储能电感不一致	输出滤波电容不一致	级联模块数为3个	级联模块数为4个	级联模块数为5个
策略一系统启动阶段压差（V）	1150	400	900	1210	1450
策略二系统启动阶段压差（V）	310	160	200	250	300
策略一光照强度变化阶段压差（V）	125	155	160	200	290
策略二光照强度变化阶段压差（V）	35	45	40	50	60

5 结论

（1）光伏直流升压系统中IPOS级联结构采用统一占空比控制策略在子模块IBFBC输入储能电感和输出滤波电容参数不一致时不能实现模块间的输出均压。

（2）对此本文提出了均流型MPPT控制策略，该策略通过单独的DC/DC模块实现MPPT控制，其余DC/DC模块实现输入均流控制，使得单独控制MPPT的模块实现被动均流，从而实现模块间的输出均压。

（3）均流型MPPT控制在光伏IPOS系统启动阶段和光照变化的动态过程中，由于实现MPPT控制的模块会与其它模块间的输入电流变化趋势不一致，导致各模块输入电流不断波动，输出端产生较大的压差，而且随着IPOS结构级联模块数的增多电压差值会逐渐增大，并且与级联模块数n成正比，对此提出在均流型MPPT控制策略的基础上叠加输出电压环，以减小暂态时输出电压差，并为了方便IPOS级联结构的控制，设计了模块化结构。

参考文献：

[1]曹文远,韩民晓,谢文强,李蕊.交直流配电网逆变器并联控制技术研究现状分析[J].电工技术学报,2019,34(20):4226-4241.

[2]李广林,樊艳芳,王一波,高文森,常喜强.IPOS型光伏直流升压外送系统控制策略研究[J].太阳能学报,2021,42(08):166-176.

[3]陈波.光伏直流汇集系统中升压变流器的均压控制策

略[D].华北电力大学,2019.
[4]鞠昌斌，王环，冯伟，等.应用于柔性直流输电网的光伏直流并网变流器研究[J].可再生能源，2014，32(09)：1274-1280.
[5]MAndreasson,D.V.Dimarogonas,HSandbergandK.H.Johansson.DistributedControllersforMultiterminalHVDCTransmissionSystems[J].IEEETransactionsonControlofNetworkSystems,2007,04(03):564-574.
[6]ManiasSN,KostakisG.Modulardc-dcconverterforhighoutputvoltageapplications.Proc.Inst.Elect.Eng.1993,140(2):97-102
[7]陈武，阮新波，颜红.DC/DC多模块串并联组合系统控制策略[J].电工技术学报，2009，24(07)：93-102.
[8]GiriR,ChoudharyV,AyyanarR,MohanN.Common-duty-ratiocontrolofinput-seriesconnectedmodulardc-dcconverterswithactiveinputvoltageandloadcurrentsharing.IEEETrans.OnIndustryApplications,2006,42(4):1101-1111.
[9]张容荣，阮新波，陈武.输入并联输出串联变换器系统的控制策略[J].电工技术学报,2008,(08)：86-93.
[10]李广林,樊艳芳,王一波,高文森,常喜强.IPOS型光伏直流升压外送系统控制策略研究[J].太阳能学报,2021,42(08):166-176.
[11]U.R.PrasannaandA.K.Rathore.Analysisanddesignofzero-voltage-switchingcurrent-fedisolatedfull-bridgeDc/Dcconverter[C].IEEENinthInternationalConferenceonPowerElectronicsandDriveSystems，Singapore，2011.
[12]P.URandA.K.Rathore.ExtendedRangeZVSActive-ClampedCurrent-FedFull-BridgeIsolatedDC/DCConverterforFuelCellApplications:Analysis,Design,andExperimentalResults[J].IEEETransactionsonIndustrialElectronics，2013，60（7）：2661-2672.
[13]姜雪松.隔离升压全桥DC-DC变换器拓扑理论和控制技术研究[D].中国科学院研究生院（电工研究所），2006.
[14]D. C. Huynh and M. W. Dunnigan.Development and Comparison of an Improved Incremental Conductance Algorithm for Tracking the MPP of a Solar PV Panel [J] . IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 07(04) : 1421-1429.
[15]周东宝,陈渊睿.基于改进型变步长电导增量法的最大功率点跟踪策略[J]. 电网技术,2015,39(06):1491-1498.
[16]易伟.光伏模块化直流升压汇集系统及控制策略研究[D].沈阳工业大学,2019.
[17]马学军，牛金红，康勇.输入串联输出并联的双全桥变换器输入电容均压问题的研究[J].中国电机工程学报，2006，(16)：86-91.
[18]R.Giri , V.Choudhary , R.AyyanarandN.Mohan.Common-duty-ratiocontrolofinput-seriesconnectedmodularDC-DCconverterswithactiveinputvoltageandload-currentsharing[J].IEEETransactionsonIndustryApplications,2006，42（04）：1101-1111.
[19]鞠昌斌,冯伟,王环,王一波,许洪华.基于Boost隔离升压拓扑的光伏直流并网变流器的设计与实现[J].太阳能学报,2016,37(03):752-758.
[20]朱守让，王伟，汤海宁，等. 大型光伏电站巨量控制点操作模式设计与应用[J]. 电力系统自动化，2014，38（14）.

作者简介：

陈波（1994），男，江西，硕士，工程师，光伏发电并网，E-mail： 812944721@qq.com

高压电机槽楔脱落故障的原因分析与应对措施

袁强

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：本文结合某发电厂高压机电机槽楔脱落损坏异常情况事件，针对现场实际情况对高压电机槽楔脱落原因进行分析探讨，并提出针对性的预防措施，来提高设备的安全可靠性。

关键词：高压电机；槽楔；故障

1 概述

某发电厂装有2台1000MW燃煤发电机组，配备11台空压机，3台仪用空压机，8台除灰空压机，每台空压机配备一套冷干机，空压机电机型号IY3554-4，电机负荷侧轴承型号NU322C3，电机非负荷侧轴承型号6322C3，电机功率25kW，额定电流29.3A，额定电压6kV、频率50HZ、额定转速1482r/min。火力发电运用蒸汽锅炉，锅炉发生的高压蒸汽驱动叶轮机，从而带动发电机发电。而锅炉是燃油或燃煤的，会发生很多的尘埃，如果粘附在锅炉的壁面，就会下降锅炉的热传导功率，除灰体系用来避免尘埃进入锅炉。空压机电厂运用是用来吹扫管道或在检修机器压缩机的供气量，除此之外，机组的运行需求很多的操控外表来支撑操作，而这些操控外表的动作都是靠空压机电厂运用来操控的，空压机是发电企业重要的辅机设备。

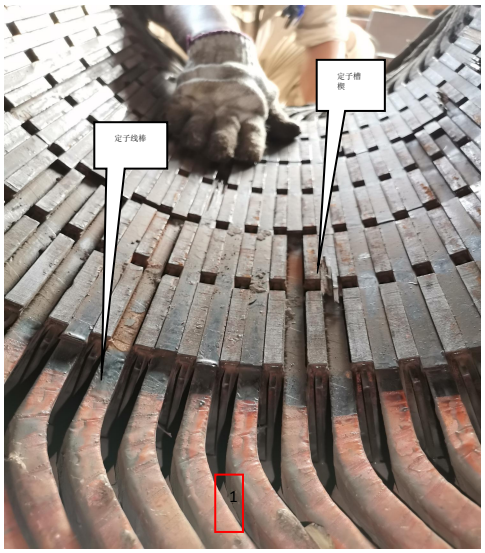
2 事件发生前工况

2021年9月9日，3号仪用空压机运行是有异音，为排除机务齿轮箱产生的异音，电气检修班组对3号仪用空压机进行空载试运（齿轮箱与电机分离），启动动过程中从电机风扇散热通风孔中散发一股烟雾，且空气中伴有绝缘过热散发的异味，电气值班人员立即同运行人员沟通，将3号仪用空压机停运，并测量电机绕组绝缘及值阻均正常，初步判断可能是电机槽楔脱落，决定对其进行解体检查。

3 事件处理经过

2021年9月10日检修班组对3号仪用空压机进行抽转子解体检查，检查发现：定子槽楔脱落严重，60槽有21槽脱落，脱落数量占电机总槽数的1/3左右。

如下图所示：





4 异常发生的原因

4.1 上次检修情况分析

2018年7月5日对3号仪用空压机进行定期检修，电机更换前后轴承，驱动端轴承内圈跑套，外送加工镶套，电机返修后装复至6号除灰空压机，6号除灰空压机更换前后轴承，定子膛内有1块槽楔

脱落磨损，更换槽楔（竹片）并涂抹环氧树脂胶凝固后，将6号除灰空压机电机装至3号仪用空压机处，电机试运正常。

4.2 导致此次槽楔大面积脱落的原因分析

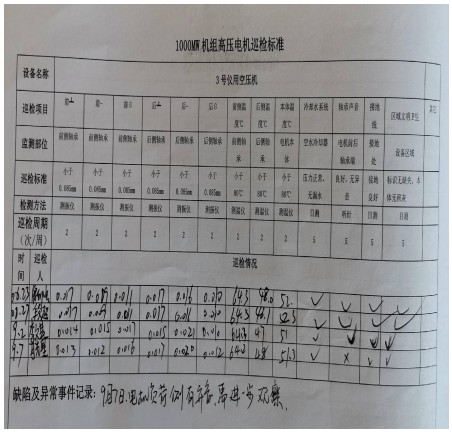
槽楔出现脱落已经不是偶然现象，有必要对槽楔在正常运行时受到的各种力及实际装配工艺进行分析，这不仅为我们如何使用槽楔、选择哪种槽楔提供理论依据，更有助于我们分析槽楔损坏的根本原因，从而有效避免槽楔损坏带来更大的设备事故。分析槽楔脱落主要有以3方面原因：

1. 电机温升变化导致槽楔物理变化，热胀冷缩开裂松动。

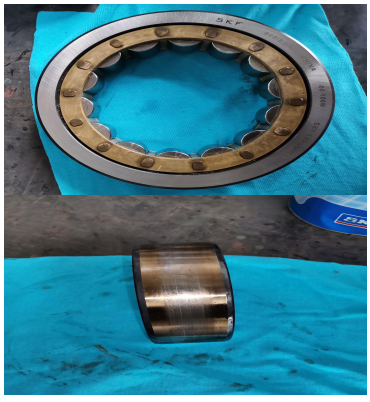
2. 电机运行振动，引起的槽楔松动、脱漏。电机在运行情况下如果槽楔在槽内安装质量不良存在一定程度的松动。。

3. 工艺装配不良，槽楔与槽口配合太松，刷上去的环氧胶在浓度较大时难以流进槽楔与铁芯之间的间隙。

1.1 电机温升变化导致槽楔物理变化，热胀冷缩开裂松动。（巡检发现空压机运行温度较为稳定，温度波动幅度不大，此原因为次要原因）巡检数据如下图所示：

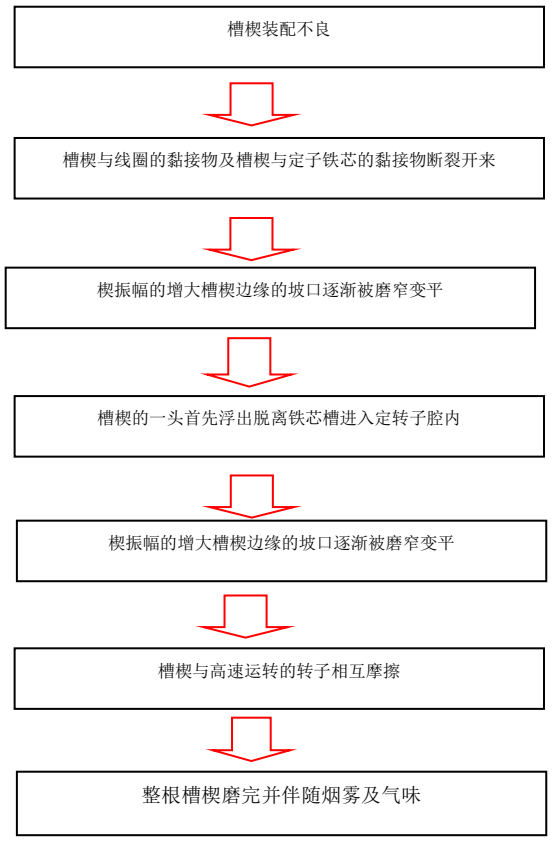


2.1 电机本体振动大，导致槽楔松动。（电机解体检查负荷侧电机轴承：保持架完好，无过热、变形、松动、脱落，轴承滑道光滑，无过热、毛刺等现象，且电机振动良好在合格范围内，此原因可排除）如下图所示：



3.1 工艺装配不良，根据《交流电动机定子模压磁装配工艺导则》SD243—87 装配规定，在槽楔与铁芯之间的接触面应当刷涂环氧胶进行粘接。当槽楔与槽口配合太松时，刷上去的环氧胶在浓度较大时难以流进槽楔与铁芯之间的间隙，环氧胶在浓度较稀时又难以填满槽楔与铁芯之间的间隙，都将导致实际粘接面较小，粘接效果不理想。当槽楔与槽口配合过紧时，增加了装配的难度，在用力打入时就会造成槽楔所受挤压力度超过设计限度，导致性槽楔出现内伤，经不起长期运行，即使刷了环氧胶也容易脱落。（此原因为主要原因）

综合以上原因分析及2018年11台空压机电机解体检修情况：{有5台电机槽楔有不同程度的脱落，2号仪用空压机定子槽楔脱落（10根）、6号除灰空压机定子槽楔脱落（1根）、2号除灰空压机，共60根槽楔下部出现了不同程度的垫条不实、3号除灰空压机空压机定子槽楔脱落（3根）、4号除灰空压机定子槽楔脱落（3根）}分析发现槽楔脱落现象属于该批电机的共性，原工艺装配不良是导致槽楔脱落的主要原因，槽楔的脱落过程：



5 采取的防范措施

5.1 针对这种情况，首先空压机高压电机采取主动维修。

5.2 针对检修回来的电机，应将检修前后电机的运行技术数据进行比较，特别是夏季注意监测电 机的运行电流和绕组温度。

5.3　和生产部门进行沟通，避免电动机频繁启动，电机的冷态、热态启动时间间隔应严格执行运行规程。

5.4　现场巡检人员实行按区域负责制，严格执行电气设备巡回检查制度。特别对槽楔脱落严重的电机，日常巡检时，除了监测运行电流和温度，并配备听诊器听电机内腔噪声的变化，出现明显刮擦声及时上报，排查原因。必要时对噪声变化大的电机做空载试验，当电磁噪声减小，刮擦声明显时，必须进行抽芯检查。

5.5　电气人员对已更换槽楔的高压电机建立特护记录，记录电机的绕组温度、机身温度、运行电流、振动值；对同型号的电机，温升偏高的应建立温升曲线。通过测得的数据判断电机的运行状态是否良好。特别是温升曲线持续增高且温升居高不下的电机，就需要安排抽芯检查。

5.6　建立完整的电机检修档案和缺陷记录，根据检修档案和缺陷记录，实行定检、定修，发现问题及时处理。

6　结束语

任何事故或缺陷的发生都有一个孕育的过程，任何缺陷一旦形成必然也一定有它的外在表现形式，所以现场巡检和运用科学的管理措施尤其重要。缺陷不因巡检而存在，但能被巡检所发现。巡检的目的之一就是在事故或缺陷的孕育期发现它；管理科学是合理组织本专业电气员工、用先进的测量工具、将所测得数据进行分析来诊断电机的运行状态，提前发现电机存在的隐患并消除它。本文通过对高压电机槽楔脱落故障原因分析与应对措施，提出了高压电机槽楔更换后在日常维护管理中的注意事项，希望对电气维护人员的了解有一定的帮助。

参考文献：

[1] 王绍禹.磁性槽楔交流电机 [M] 北京：水利电力出版社，1987

[2]赵家礼.电机节能技术问答——磁性槽楔与磁性槽泥的运用 [M] .北京：水利电力出版社，1994

[3] SD243—1987 交流电动机定子模压磁性槽楔装配工艺导则标准 [S]

作者简介：

袁强（1990）男，江西抚州，本科，从事发电厂电气，E-mail：，627128417@qq.com

某电厂凝泵变频器跳闸故障分析

曾水生

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：某电厂凝泵变频器运行过程中 6kV 母线电压跌落，变频器跳闸，装置报整流器过电流故障、变频单元欠压。对整个过程进行分析，发现为变频器主电源失电，飞车重启失败，导致故障报警。

关键词：母线电压跌落；变频器跳闸；飞车重启

1 概述

1.1 凝泵变频器介绍

该电厂凝结水泵变频器为东芝三菱电机产业系统株式会社产品，设备型号为 TMdrive-MV，设备于 2015 年 12 月 29 日正式投产使用。变频器主电源为交流 6000V,被驱动电机额定电压为 6000V。

1.2 变频器逻辑说明

1)变频器检测主电源电压下降到 85%额定电压以下，变频器触发低电压穿越；

2)低电压穿越时间小于 0.3s，变频器可保持当前出力运行；

3)低电压穿越时间 0.3s-6s,变频器降低自身出力，若该时间段内主电源恢复正常，变频器可成功飞车重启；

4)低电压穿越时间超过 6s，主电源还未恢复，变频器跳闸。

1.3 变频器飞车重启说明

“飞车启动”通俗的讲，也就是转速跟踪。也就是说对旋转中的电机实施再启动。

高压变频器“飞车启动”是在电机定子与变频器或工频电网都脱离时，电机定子“无源”,电机转子处于转动状态，但转速随机不确知情况下，将高压变频器接入电机定子,使电机定子从“无源”到“有源”，电机定子旋转磁场从无到有，最后电机定子旋转磁场拖动电机转子进入正常驱动的过程。

高压变频器“飞车启动”是否成功的关键是输出和转子速度（频率）相同的频率。而电机转子频率是随机的,为此必须进行电机转子频率的搜索,即“飞车启动”开始先搜索电机转子频率,搜索到电机转子频率后,变频器再按搜索到的转子频率作为输出频率。这样,既不会出现过流也不会出现电容电压泵升过压的现象。

2 过程说明

2.1 维持出力阶段

凝结水泵变频器电源故障录波总时间为 500ms，主电源为额定电压的 80%，300ms 内(故障过程变频器内部录波图显示实际维持出力时间为 420ms)变频器运行频率为 80.25%额定频率，DCS 曲线读取的对应运行频为 42Hz，变频器维持主电源故障前频率运行。

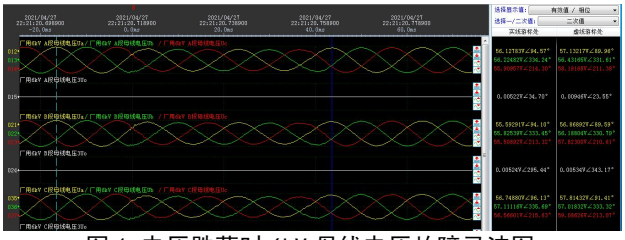


图 1 电压跌落时 6kV 母线电压故障录波图

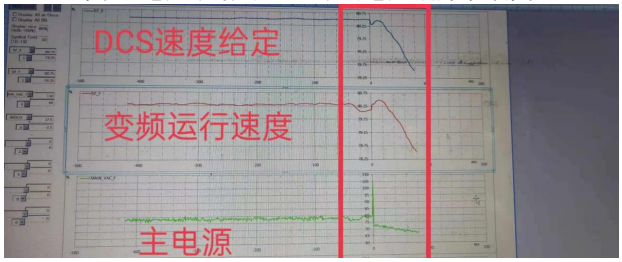


图 2 故障过程变频器内部录波图

2.2 变频器飞车重启阶段

低电压穿越 420ms 后,变频器飞车重启,出力降低。

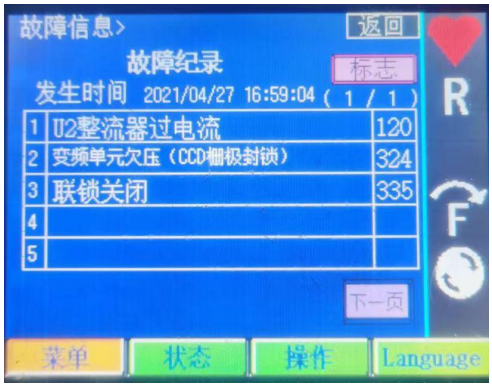


图 3 故障过程变频器内部报文

主电源故障 420ms 以后至变频器自动切除的瞬间（对应故障录波时间轴为 0ms 至 80ms），图 4 中报文“变频单元欠压（CCD 栅极封锁）”，表明变频器检测到电压降低,变频器进入飞车重启阶

段。变频器内部下发降速指令，降低变频器出力。电源故障时间 500ms 后(对应故障录波时间轴为 80ms 的点)，变频器频率降低至 37Hz。由于变频器故障录波只能记录 500ms，后续过程变频器无录波记录。电压恢复后，电机转速跌落至 25Hz 时，变频

器成功跟踪电机转速，恢复正常运行。由图 3 故障过程 DCS 曲线看出，变频器频率最低降至 25HZ(DCS 画面上频率为变频器转速计算得到的，非实际变频器输出频率),变频器指令和反馈偏差大于切除自动定值（10Hz）自动切除。自动切除后，运行人员手动快速增加变频器频率（由 25Hz 增加到 40Hz），变频器出力增大，导致单元控制板检测到瞬间电流超过单元电流 150%，报出整流器过电流软故障。

3 结论

凝泵变频器运行过程中 6kV 母线电压跌落，变频器跳闸并进入飞车重启状态，飞车重启过程中，变频器指令和反馈偏差大于切除自动定值（10Hz）自动切除。运行人员手动快速增加变频器频率（由 25Hz 增加到 40Hz），变频器出力增大，导致单元控制板检测到瞬间电流超过单元电流 150%，报出整流器过电流软故障。对整个过程进行分析，发现为变频器主电源失电，手动调整变频器频率导幅度过大，致故障报警。

参考文献：

[1]参乔宏琦，吕艳秋，李猛 变频器过电压故障分析处理与防护研究[J].科技创新与应用

作者简介：

曾水生（1993），男，江西赣州，本科，助理工程师，从事电厂电气，E-mail：1357061240@qq.com

碳刷在线监测在万安水电厂的应用

钟波，邱全源

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：本文介绍了碳刷在线监测系统在万安水电厂 1 号发电机的运用。刷架是发电机的重要部件，通过碳刷与集电环的滑动接触，实现电流在固定件与旋转件之间的传导。碳刷易出现高温、电流分布不均、异常声音、磨损等问题，碳刷状态监控尤其重要。

关键词：发电机；刷架；碳刷；监测

1 智能水电站

智能水电站是采用先进、可靠、集成和环保的智能设备，以全站信息数字化、通信平台网络化、信息共享标准化为基本要求，自动完成信息采集、测量、控制、保护、计量和检测等基本功能，当设备出现问题时，会发出预警并提供状态参数等，在一定程度上降低运行管理成本，减少隐患，提高发电机运行可靠性。碳刷在线监测系统是具有较高性能的通电设备，配有传感器和显示器，可对碳刷的温度、电流和磨损量进行实际监控，并形成报警模块，对发电机碳刷中的各种故障进行管理。

2 碳刷系统基本情况

碳刷是发电机动静接触和交换能量的设备，它的运行情况直接影响到发电机的安全运行，在实际运行中，发热和异常声音故障极为普遍。

2.1 碳刷系统在运行中主要存在的问题

发电机励磁主要有无刷励磁和有刷励磁两种方式，下面就介绍有刷励磁系统中电刷在运行中存在的主要问题：

(1)电刷研磨不良,接触面积小。应重新磨电刷或使发电机在低负荷下作长时间运行,直到磨好为止。

(2)电刷和引线,引线和接线端子间的连接松动,接触电阻大,造成负荷分配不均匀.应检查电刷与铜辫的接触及引线回路中各螺丝是否上紧,接触是否良好。

(3)电刷牌号不符合规定,或部分换用了不同牌号的电刷。应检查电刷牌号,更换成制造厂指定的或经试验合适的电刷。

(4)电刷压力不均匀或不符合要求，应用弹簧称检查电刷压力,并进行调整(电刷的压力应按制造厂的规定,一般为 0.2～0.3MPa),特别注意使各电刷压力均匀。

(5)电刷磨短。电刷磨短至规定值时,必须更换。

(6)滑环和电刷表面不洁,随不洁的程度,可能在个别电刷上,也可能在全部电刷上出现火花。用白布浸少许酒精擦试滑环,用干净白布擦电刷表面,在研磨工具上,覆以细玻璃砂纸研磨滑环。

(7)电刷在刷框中摆动或动作滞涩,火花随负荷而增加.应检查电刷在刷框内的情况,能否上下自由活动,更换摇摆和滞涩的电刷，电刷在刷框内应有 0.1～0.2mm 的间隙。

(8)滑环研磨不均匀,电刷松弛或机组振动等原因造成电刷振动,火花依振动的大小而不同.应查明振动的原因并消除。

(9)滑环不圆,表面不平,严重磨损或撞动，应进行车磨。

3 刷架及碳刷监控系统在万安水电厂1号发电机的施工过程

3.1 改造施工

2020 年,万安水电厂结合 1 号发电机组 A 级检修，对 1 号发电机的碳刷系统进行了改造，主要改造内容包括刷架的安装，新型碳刷的安装，调试和参数设置等。

3.1.1 三级标题刷架安装

1）将挡尘块置于上机架内圆处，挡尘块的安装孔与上机架的螺纹孔对齐（图 1）。

2）将刷架装配吊进上机架，刷架底环的安装孔与上机架上的螺纹孔对齐。

3）调整刷架导电环与集电环基本同心，拧紧固定螺栓（图 2）。

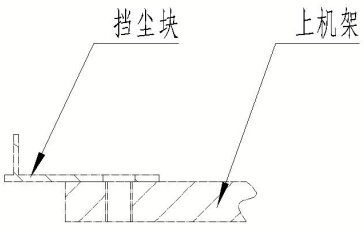


图 1：挡尘块安装

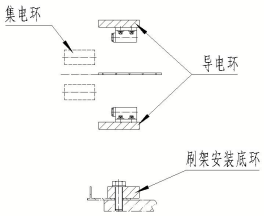


图 2：调整刷架导电环与集电环

4）将刷握装入刷座中，调整刷座使刷握前端至集电环的距离为 3～5mm。（见图 3）

5）调整刷架高度，使碳刷全部在滑环面内。

6）安装数据接收装置

7）将数据接收装置的 2 块焊接块焊接于筋板上（见图 4）。

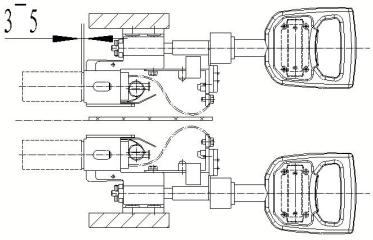


图 3：刷握安装

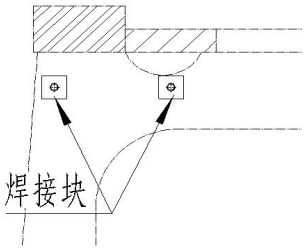


图 4：数据接收装置安装

8）将数据接收装置安装于焊接块上（见图 5）。

9）圆周共布置 7 个数据接收装置。

10）安装现地显示储存装置

11）将现地显示储存装置的 4 块焊接块焊接于盘柜或挡油筒上。

12）将现地显示储存装置安装于焊接块上。

13）布线

14）将 7 个数据接收装置串联起来，接到现地显示储存装置。

15）从现地显示储存装置接两根线到机坑外控制箱，途径上机架、定子（见图 6）。

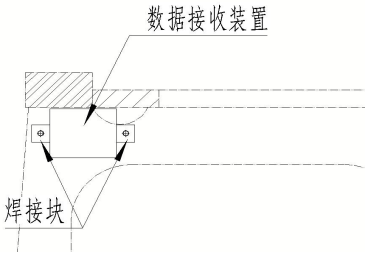


图 5：安装数据接收装置

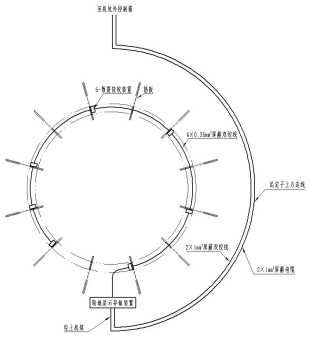


图 6：机坑外控制箱接线示意图

3.2 1 号发电机碳刷在线监视系统调试

滑环装置在线监测系统，安装在万安水电厂 1 号机 JP2 盘上（1F LCU 测温盘），主要分为前端数据采集装置、数据接收装置、现地显示储存装置，而现地显示装置关系到数据分析和参数设定等问题。

1）启动连接电源，打开现地显示储存装置开关，现地显示接收装置应能实现观察碳刷温度、电流、磨损等功能。

2）滑环装置在线监测系统界面主菜单分为六个子选项，可查询相应的数据，分别为：实时数据、警告查询、预警设定、通讯设置、亮度调节、时间设定。（见图 7）



图 7：碳刷在线监测系统实时数据界面

3.3 碳刷在线监测系统数组设置

1）实时数据：左侧为五列监测数据，分别为编号、温度、电流、电池温度、电池电压 5 项数据，可实时查看对应数据。右侧可选择上一页或下一页查询，同时还有磨损数据的按钮按下会跳转至对应的界面：

2）磨损数据：此界面左侧为碳刷的编号和对应碳刷的磨损数据显示值为剩余长度百分比，右侧可选择上一页或下一页查询，同时还有常规数据和距离校准的按钮按下会跳转至对应的界面。

3）距离校准：此界面展示了距离运算的参数初始距离和末端距离，校准方法为把刷握全插上滑环等待 10 分钟左右按下初始校准，把碳刷的长度放到最大磨损量等待 10 分钟左右按下末端校准。也可单个校准，电机校准 ID 的输入框输入对应的碳刷编号可实行单独校准。

4）警告查询：当系统报警后，此界面会生成对应的数据，报警碳刷的编号、时间、温度、电流、

电压等信息，并会生成列表，右侧可上下翻页，如工作人员现场处理，可点击已读按钮，清除设备报警发讯，如处理结束则可点击数据清除当前列表报警记录。此界面间右下角为可存报警数据容量，可根据实际情况清除数据或者保存报警记录。

5）预警参数：此处有四个参数，分别为预警温度、预警电流、低压警告、磨损量；预警温度表示当碳刷温度达到设定值 100℃时，系统报警；预警电流表示碳刷电流达到设定值 130A 时，系统报警；低压警告则为电池电压低于 3200mv 时报警；磨损量为碳刷磨损达到 20%时报警。

3.4 通讯设置

通讯设置里面有三个子选项，分别为模块设置、检测频率、外部通讯

1）模块设置：此界面顶部可设置从机总数，一个模块对应 8 个从机数，可根据实际情况设置，比如设置 16 个从机数，则显示 2 个模块数据，如设置 18 个从机，非 8 的整数倍，则显示 3 个模块；设置结束后需要点击下方确认按钮以写入数据。同时，此界面可点击修改按钮，则可以将任意模块编号设置为自己想要的编号，修改后一样点击其下方确认按钮。

2）频率检测：进入此界面后，可修改从机检测频率和 U 盘存储频率，即碳刷数据刷新频率和 U 盘存储数据频率，修改后点击确认按钮。

3）波特率设置：此界面可设置装置的 MODBUS 地址和波特率。按确认键生效。

4）亮度调节可通过滑动条改变屏幕亮度，注意拖动改变后需要点击确认按钮才能生效。

5）时间设定：此处可设置主界面显示时间，可设置年、月、日、时、分、秒，设置结束点击确认按钮

6）其它运行操作及注意事项：数据存储和读取：现地显示储存装置设有数据存储功能，将 U 盘直接插入下方 USB 口，便可按照设定频率将数据存入 U 盘（频率设定参考 4.4），当需要使用数据时，可将 U 盘内容拷贝到其他电脑以 CSV 格式打开。

4 改造后的效果

4.1 改造结束后数据测量对比

工作人员对 1 号发电机空载、100%励磁、带 100%负荷三种工况下的部分碳刷实测数据与碳刷在线监测系统的数据进行了对比，结果见表 1、表 2、表 3：

表 1 1 号发电机空载部分碳刷实测数据与监测数据对比（2021 年 12 月 1 日）

碳刷编号	实测温度	监测温度	实测磨损量	监测磨损量	实测电流	监测电流
1	21	23	100	100	0	0
2	21	23	100	98	0	0
3	21	23	100	100	0	0
4	20	23	100	100	0	0
5	21	23	100	100	0	0
6	21	23	100	100	0	0
7	21	23	100	82	0	0
8	21	23	100	95	0	0
9	21	23	100	100	0	0
10	21	23	100	87	0	0
11	20	22	100	88	0	0
12	21	23	100	100	0	0
13	20	23	100	90	0	0
14	21	23	100	100	0	0
15	21	23	100	93	0	0
16	21	23	100	100	0	0
17	20	22	100	100	0	0
18	21	23	100	100	0	0
19	21	23	100	100	0	0
20	21	23	100	89	0	0
21	21	23	100	100	0	0
22	21	23	100	89	0	0

表 2 1 号发电机 100%励磁部分碳刷实测数据与监测数据对比（2020 年 12 月 1 日）

碳刷编号	实测温度	监测温度	实测磨损量	监测磨损量	实测电流	监测电流
1	39	41	100	100	30	34
2	39	41	100	98		31
3	38	44	100	100		41
4	41	43	100	100		40
5	39	41	100	100	28	31
6	39	41	100	100		36
7	39	41	100	82		31
8	38	40	100	95		30
9	39	41	100	100		30
10	38	40	100	87		27
11	39	41	100	88		27
12	37	39	100	100	35	39
13	37	39	100	90		29
14	39	41	100	100		30
15	38	40	100	93		42
16	40	42	100	100		37
17	41	44	100	100	52	57
18	38	40	100	100		41
19	38	40	100	100		38
20	38	40	100	89		28
21	38	40	100	100		30
22	38	41	100	89		39

备注：表中实测电流用钳形表测

表 3 1 号发电机带 100%负荷部分碳刷实测数据与监测数据若干 2020 年 12 月 1 日

碳刷编号	实测温度	监测温度	实测磨损量	监测磨损量	实测电流	监测电流
1	42	45	100	100	37	42
2	43	46	100	100		37
3	43	46	100	100		42
4	43	45	100	100		39
5	43	45	100	100		36
6	43	45	100	100	40	45
7	42	44	100	98		36
8	41	43	100	98		34
9	41	44	100	100		36

10	42	43	100	96	32	37
11	41	43	100	100		37
12	38	41	100	100		31
13	39	43	100	90		38
14	41	44	100	100	37	42
15	40	42	100	90		35
16	42	44	100	96		54
17	44	46	100	100		38
18	41	43	100	100	42	46
19	43	43	100	100		37
20	43	43	100	86		36
21	42	45	100	100		45
22	40	43	100	92		35

备注：表中实测电流用钳形表测量，实测温度与监测温度有 2～3 度误差，实测电流为瞬态范围浮动，取较大值，与监测电流误差 5～10A，实测磨损量由于运行时间短、磨损量小，现场用肉眼判断比较困难。

综合表 1、表 2、表 3 结果得出以下结论：

1）发电机组在运行过程中，其碳刷会出现电流不平衡的情况。个别碳刷电流不平衡率相差很大达到 40%，引起发电机碳刷在线监测电流告警，如未及时处理，碳刷会继续发热升温，以至于产生环火、烧刷辫等故障，致使发电机组负荷降低甚至发电机组停机事故，给企业造成一定的经济损失。

2）通常情况下，现场运行维护人员定时使用红外测温仪测量集电环和碳刷的温度，或用钳形表检测碳刷电流来判断发电机碳刷运行状态，同时通过人工测量、分析、判断励磁碳刷的工作状况，不能够做到实时采集励磁碳刷电流，如万一有疏忽会引起触电事故。而碳刷在线监测设备可以实时传递数据，碳刷编号、温度、电流、电池温度、电池电压 5 项数据，实时准确监测发电机碳刷的信号，避免了错误报警的现象，有效降低了发电机组降负荷及机组事故停机的几率。

4.2 针对碳刷在线监测设备在万安水电厂使用 2 年多来，其在使用过程中存在以下问题

1）由于传感器是采用充电电池驱动，在电池电量不足的情况下致使采集的电流值不准确，采集的数据存在很大的漂移，以至于常发生错误报警，给现场维护工人带来很大的工作困扰，现在对策是只要发电机有机会停电检修，及时给电池人工充电。

2）由于电流传感器是通过安装在发电机的励磁碳刷的刷辫铜导线上对励磁碳刷电流信号进行采集取样；碳刷温度测量是通过标准碳刷加工，埋置测温元件于碳刷中，非标准件，是加工件，给购买备品带来非常大的难度，现在对策是及时联系供货商在国能易购平台上货。

3）更换碳刷测量装置时必须注意，碳刷测量装置是从 0 开始编号的，不然引起编号混淆，无法精准定位碳刷。

5 结束语

碳刷在线监测装置是智能水电站的项目，给运维人员带来了便利，提升了设备的运行可靠性。但运行中也存在一定问题，比如监测电流误差没有计算百分比，应在设备升级过程中解决，同时对已存在问题加强跟踪，确保设备稳定运行。

参考文献：

[1]参考文献内容：《电机学》孙旭东、王善铭编著，清华大学出版社

[2]参考文献内容：《电工学》秦曾煌编著，高等教育出版社

[3]参考文献内容：《电力电子学---电力电子变换和控制技术》陈坚编著，高等教育出版社引进

[4]参考文献内容：《电力电子技术》.徐德鸿编著. 科学出版社

作者简介：

钟波（1985），男，江西万安，大学，工程师，继电保护，E-mail：12102118@chnenergy.com.cn

邱全源（1971），男，江西南康，大学，工程师，发电机检修，E-mail：445765393@qq.com

EPS装置作为某水电厂机组动力应急电源的探讨

赖泽湖

（国能万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：某水电厂的轴流转桨式水轮发电机组一旦失去动力电源，只能维持低负荷安全运行10~30分钟，且机组黑启动时存在等诸多问题及困难，不能确保机组黑启动成功。

采用EPS装置，可以有效防止机组因动力电源消失而产生的非计划停运，可以确保机组A类黑启动快速成功，并为机组实现“一键A类黑启动”提供必要支撑。

EPS 装置作为某水电厂机组动力应急电源的研究内容、预期目标及实时方法等方面的探讨。

关键词：轴流转桨式发电机组；动力电源；非计划停运；黑启动；EPS；一键 A 类黑启动

1 说明

1.1 EPS(紧急电力供给)

由UPS不间断电源发展而来，是一种独立的、允许短时电源中断的交流应急电源，装置主要由电池组、逆变器、充电模块、输入输出单元等部分组成。

1.2 黑启动

水电站在全厂失电情况下，仅仅利用储存的能量完成机组自启动，快速恢复厂用电，并在电网事故时迅速配合电网调度恢复电网运行。

机组具有黑启动功能不仅是电站在全厂失电情况下安全生产自救的必要措施，也是电网发展的需要。

1.2.1 A类黑启动

仅利用蓄电池及液压系统储存的能量进行的黑启动。

1.2.1 B类黑启动

由柴油发电机提供黑启动电源进行的黑启动。

2 机组失去动力电源的影响

某水电厂作为江西电网的主力调频、调峰和事故备用电厂，所安装的5台轴流转桨式水轮发电机组（105MW*4+113*1），机组的两段由厂用电系统供电的动力电源，存在着因厂用电故障而全部消失的风险，虽然泄洪坝段设有一台防汛备用柴油机，可通过厂用电系统供电机组动力电源，但因其功率小、操作繁琐、操作用时长、非直接供电机组等问题，所以无法起到机组动力应急电源的作用。

轴流转桨式水轮发电机组的安全稳定运行，比混流式水轮发电机组更加依赖于机组动力电源的可靠运行，一旦出现动力电源消失，就可能造成机组非计划停运或黑启动困难。

2.1 造成机组非计划停运

正常运行时轴流转桨式水轮发电机组一旦失去动力电源，将出现设备冷却系统失效（或效果降低）、顶盖积水无法排出等影响机组安全运行的重要问题，只能有限维持低负荷安全运行10~30分钟，之后就必须停机以保证机组设备安全，造成非计划停运。

2.2 机组黑启动困难

2.2.1 黑启动条件不足

机组黑启动条件中，压油罐油压需不小于3.5MPa、油位不小于1200mm。正常情况下，压油装置会自动维持油压在3.5~3.9MPa（对应油位1250mm~1750mm）之间波动。

机组失去动力电源，压油泵无法补油，压油罐油压油位将在以下三种情况下无法满足机组黑启动要求：

（1）机组进行了大油量的操作导致压油罐油压油位低于正常最低值（即黑启动条件最小值）。

因为该类型机组在进行调速器用油量大的操作（如开停机、事故甩负荷、大负荷调整等）时，是允许压油罐油压油位短时低于正常最低值的，只要保证压油泵能及时完成补油即可。

如机组刚进行了大油量的操作导致压油罐油压油位低于正常最低值，而此时压油泵失电，则机组黑启动的油压油位条件必然不足。

（2）在机组失去动力电源后，机组还在执行用油操作。

事故失电时，如机组还在执行之前下发的用油操作（负荷调整、正常开停机、事故同时造成的事故停机和事故甩负荷等），就会使压油装置只有用油而无补油，导致压油罐的油压油位下降而失去黑启动条件。

（3）机组压油装置残存油压（油位）自然下降而不满足黑启动条件。

即使机组没有用油操作，机组压油装置的油压（油位）也会因为压力油系统正常的轻微内部渗漏而自然下降。统计并计算该厂机组停机备用时失去动力电源后满足黑启动油压油位条件最大概率如表1。

表 1 机组失去动力电源后
黑启动油压油位条件满足最大概率表

失电时间	2号机	1（3）号机
0 小时	100%	100%
0.5 小时	80%	93.75%
1 小时	60%	87.5%
1.5 小时	40%	81.25%
2 小时	20%	75%
2.5 小时	0	68.75%
8 小时		0
说明1：黑启动只使用带高压厂变的1、2、3号机组。		
说明2：机组停机备用时压油罐油压（油位）由3.9MPa（1750mm）自然下降至3.5MPa（1250mm），2号机组为2.5小时，1（3）号机组为8小时。		

2.2.2 机组黑启动操作困难

轴流转桨式水轮发电机组的轮叶操作用油量极大，黑启动时，只能采用“轮叶切手动位置不操作、手动开启导叶、手动起励”的非常规开机方式，来保证开机用油量。但此种非常规操作，会使调速器导叶/轮叶协联关系严重破坏，导致操作相当困难。对操作人员来说，这是一种非常规的、实际经验极少而技术要求又非常高的操作。已经实际进行过的多次机组黑启动试验也证明了该种开机操作困难重重。

（1）操作人员数量需求多

现有机组黑启动操作因需现地操作调速器等设备，至少需7人才能满足全过程需求，具体需求统计如表2。

表2：机组黑启动所需人员统计表

工作地点	工作任务	所需人数
中控室	指挥/监控	2人
油压装置	监视油压油位	1人
调速器	启动/稳定机组	1人
励磁装置	起励操作	1人
厂用电	恢复厂用电	2人
		合计7人

（2）操作用时长

已进行的多次机组黑启动试验证明，从召集人员到开导叶启动机组，再到手动起励、厂用电恢复，直至机组恢复自动运行，整个操作过程用时在25-30分钟。开对比正常的自动开机1分钟、手动开机5分钟、自动倒厂用电1分钟，操作用时大大增加。

（3）存在机组黑启动操作失败可能性

现机组黑启动时，机组调速器操作难度大、对运行操作人员技术水平要求高，而机组黑启动又是一种事故应急处理性质的操作，操作人员的安排存在着一定的随机性，不能每次确保是技术水平比较好的人员进行调速器操作，导致整个操作过程中都有因经验不足，导致机组因残存油压油位过低、无法起励或起励后自动灭磁等问题而导致黑启动失败。

之前该水电厂的机组黑启动试验中，就有因调速器因手动切回自动运行操作不当，机组转速发生了异常波动（106%~89%Ne)造成机组自动逆变，导致当次黑启动不成功的情况。

3 EPS装置作为该水电厂机组动力应急电源的设想

通过以上分析可以看出，该水电厂一旦发生机组动力电源消失，将可能造成机组非计划停运，同时其机组黑启动能力有所不足，迫切需要设置一套可靠的机组应急电源，以提高机组运行可靠性及黑启动能力。

当今，EPS装置技术成熟，已广泛应用于重要建筑物和厂矿中作为电力保障和消防安全保安电源，但在水电站中的应用较为少见。

但EPS装置的响应速度快、操作便捷、可靠性高且经济性好等显著优点，使其极其适合作为水电站机组的应急动力电源，特别是对动力电源只允许短暂中断的轴流转桨式水轮发电机组和“无人值班、少人值守”模式的水电站更是合适。

近两年已有乌东德、向家坝等几个巨型混流式机组水电站成功应用EPS作为机组应急电源的报道。如：2020年向家坝电站成功完成了运用EPS+蓄电池进行的巨型水力发电机组“一键A类黑启动”试验，黑启动完成用时仅4分28秒。

4 采用EPS作为某水电厂机组动力应急电源的作用

采用EPS(紧急电力供给)装置可以有效防止该水电厂机组因动力电源消失而产生的非计划停运，可以确保机组A类黑启动快速成功，并为机组实现“一键A类黑启动”提供必要支撑。

4.1 利用EPS可以防止机组动力电源消失后的非计划停运

4.1.1 防止全厂厂用电消失时所有运行机组的非计划停运

在全厂厂用电消失并判定无法立即恢复时，选择任意一台可带厂用电的机组，投入EPS作为其动力应急电源，就可维持该机组正常发电运行或对其进行“黑启动”，可在3分钟左右迅速恢复厂用电，从而可以防止所有运行机组的非计划停运，并在电网允许的情况下保持向外供电正常。

4.1.2 防止任意运行机组动力电源故障消失时的非计划停运

在任意一台运行机组动力电源故障消失并判定无法立即使用厂用电恢复时，投入EPS作为该机组的动力应急电源，可保障该机组正常稳定发电运行60~120分钟，在这个时间段内足以完成故障处置并恢复厂用电供电该机组动力电源，从而可以防止

该机组非计划停运。

该水电厂机组具备A类黑启动能力，但因轴流转桨式水轮发电机组的固有特点，

4.2 利用EPS可以确保机组A类黑启动快速成功，并为机组实现“一键A类黑启动”提供必要支撑

4.2.1 可确保任意一台机组黑启动快速成功

如采用EPS作为机组动力应急电源，将有效解决原黑启动时存在诸多问题及困难，可以确保任意一台机组A类黑启动快速成功。有无SPS具体对比如表3。

表 3：机组有无 EPS 应急电源进行 A 类黑启动对比表

序号	表现方面	无EPS应急电源	有EPS应急电源
1	黑启动条件	机组液压储能、顶盖水位等黑启动条件不足、或随失电时间的推移而不足，严重时将使全厂失去机组黑启动可能性。	有应急电源可供电压油泵/顶盖泵等设备，可确保任意一台机组黑启动条件满足。
2	开机操作难度	需采用“轮叶不动/导叶手动”的非常规开机方式，操作人员技术水平要求高，存在操作失败可能性。	常规自动开机方式，对操作人员无特殊要求，无操作失败可能性。
3	所需人数	至少需7人以上。	运行值守的3人即可完成。
4	完成用时	至少用时25分钟左右（全厂停电-机组黑启动-厂用电恢复），白班以外时间还需增加运行应急人员赶赴厂房用时10分钟。	3分钟以内。
5	对机组影响	非常规开机，导/轮叶协联严重破坏，机组振动摆度加剧，轴瓦摩擦增大/温度上升，存在对机组本体损伤可能性。	正常开机，导/轮叶协联正常，对机组无损伤。

4.2.2 为实现机组“一键A类黑启动”提供必要支撑

在利用EPS确保机组黑启动快速成功的基础上，将机组黑启动及恢复厂用电所需的所有人工操作进行流程化、自动化，就可以做到一键实现机组A类黑启动开机并恢复厂用电。

对“无人值班、少人值守”运行值班模式的万安水电厂，“一键A类黑启动”操作可保证两人以上相互监督执行，避免了机组黑启动时的单人现地操作，对保障电厂安全运行具有重要意义。

5 所需研究内容、预期目标、实施方法

5.1 所需研究内容

（1）该水电厂轴流转桨式水轮发电机组动力应急电源的需求。

（2）该水电厂5台机组共用一套EPS装置作为机组动力应急电源的综合解决方案。

（3）所需EPS装置输出电源质量及容量、现场布置及安装等具体要求。

（4）利用EPS实现机组“一键A类黑启动”的可能性。

（5）EPS装置与厂区分布式光伏发电系统的互补及配套可能性。

5.2 预期目标

（1）制定出该水电厂5台机组共用一套EPS装置作为动力应急电源的综合解决方案并实施完成。

（2）完成验证试验，验证EPS装置可确保全厂任意一台机组：黑启动完成时间3分钟以内；厂用动力电源消失后不限制负荷安全运行60分钟以上。

（3）将EPS装置投入运行，并制定完成相应的维护、操作和检修规程。

（4）研究并完成《机组“一键A类黑启动”的可行性分析报告》。

（5）与厂区分布式光伏发电系统形成互补。

5.3 实施方法

建议采用外部委托研究方式进行研究。

该水电厂完成相应的项目筹建组织、招标和委托手续、提供必要的基础资料、设备订购、设备安装和试验等各项生产准备工作。

外委单位研究制定出5台机组共用一套EPS装置作为动力应急电源的综合解决方案、完成机组“一键A类黑启动”可行性报告。

6 结束语

通过对某水电厂机组动力应急电源缺失造成机组安全稳定运行影响的分析，提出了利用EPS(紧急电力供给)装置作为机组应急电源的设想，并对所需研究内容、预期目标及实时方法进行了探讨，为该水电厂的机组安全稳定运行提供了一个有益的建议。

作者简介：

赖泽湖（1973），男，江西于都，本科，高级技师，水力发电运行， E-mail：jxydlzh@126.com

浅谈发电企业网络安全防护措施

刘卫国

（万安水电厂，江西 万安 343800）

摘要：随着信息技术和信息产业的发展，生产企业面临着越来越多的网络安全威胁，采取必要措施加强安全防护显得越来越重要。如果不很好地解决这个问题，必将阻碍信息化发展的进程。而且会影响我们的工作、生活、甚至是国家经济发展、社会稳定、国防安全等等，因此网络安全在国家发展中具有非常重要的地位和作用，本文介绍了发电企业网络安全主要防护措施，针对目前存在的网络安全问题提出了安全对策和解决方案，为在网络安全防护工作中提供了借鉴。

关键词：网络安全；防护措施；对策

1 引言

随着信息化水平的不断提高，人们的工作、学习和生活方式正在发生巨大变化，效率大为提高，信息资源得到最大程度的共享。但随之而来的网络安全形势的日益严峻，如何建设高质量、高稳定性、高可靠性的社会发展所要面临和解决的重大课题，如何确保发电企业的网络安全是维护能源安全的重中之重。

2 网络安全的主要特征

2.1 保密性

不得向未经授权的用户、实体或功能披露信息以供其使用和修改。

2.2 完整性

数据未经授权不能没有及时进行研究不断发展改变的特性。也就是说，在存储或传输中未修改、销毁和丢失的信息的特征。

2.3 可用性

可以被授权实体访问并按需使用的特性。即当需要时能否存取所需网络技术安全问题解决这些措施的信息。比如拒绝服务、破坏网络正常运行以及网络环境中的相关系统，都是对可用性的攻击。

2.4 可控性

控制信息流动和内容的能力。

2.5 可审查性

出现信息进行安全风险管理存在问题时提供审查依据及手段。

3 网络安全的威胁

3.1 外网安全

3.1.1 机房安全

机房是企业通过网络技术设备进行运行的关键场所，物理安全（火灾、雷击、盗窃等）、电气工程安全（停电、负载不均）等安全管理问题是重点。

3.1.2 病毒的侵入和黑客的攻击

互联网的开拓性发展使病毒成为一场灾难成为可能。黑客对计算机网络构成的威胁大致可以分为两类:一类是对网络中信息的威胁，另一类是对网络中设备的威胁。

3.1.3 管理不健全而造成的安全漏洞

从广义的网络安全来看，网络安全不仅是一个技术问题，更是一个管理问题，管理健全是网络安全的关键。

3.2 内网安全

3.2.1 服务器没有固定防火墙

企业上网人员操作不当，可能导致病毒感染局域网，电脑中病毒后，硬盘上的资料没有作保密、防护处理，导致资料外泄。

3.2.2 网络 IP 在没有防火墙的干涉下，无人员身份验证

例如，如果笔记本电脑连接到局域网，则网络处于空闲状态，不进行身份验证(由 IP 确定)，笔记本电脑中的数据就会被窃取。

3.2.3 移动设备的乱用

通过使用U盘或移动通信网络系统硬盘把资料从电脑中拷出带走。共享移动存储设备也是无关人员获取信息的方式之一。

3.2.4 资料的频繁的共享

设定档案可随意分享，方便非员工或外人取得企业内部资料、在办公室人员不在时打开电脑、浏览和复制电脑上的资料。

4 安全防护措施

4.1 管理层面

全面贯彻落实《网络安全法》，建立网络安全管理制度，强化网络安全常态化考核，健全监控预警、处置整改、考核通报、工作约谈等网络安全管理体系。明确信息化领导小组和护网工作组的职责，加强关键信息基础设施保护，提高风险防范能

力；建立部门信息安全员联系人群和信息化工作群，组织安排安全防护工作，形成上情下达、上下联动、互相学习的良好工作氛围，激发全全员参与的热情。定期在企业开展计算机网络知识、计算机应用及网络安全的宣传教育活动。普及相关知识，提高企业人员的计算机应用水平，及网络安全保密意识。

4.2 技术层面

4.2.1 安全分区

将全厂网络分为三个区，控制区（Ⅰ区）、非控制区（Ⅱ区）、管理信息大区（Ⅲ区），将计算机监控系统（DCS）、相量测量装置（PMU）、继电保护装置、调速系统、励磁系统、五防系统等直接控制生产运行以及具有实时控制功能的系统分到Ⅰ区，将电能量采集装置、故障录波装置、保护信息子站等间接影响生产运行的监控系统分到Ⅱ区，将其他行政类办公系统分到Ⅲ区。

4.2.2 边界防护

Ⅰ区和Ⅱ区之间应使用防火墙进行逻辑隔离，Ⅱ区和Ⅲ区须使用隔离装置，检查隔离装置是否满足网络安全要求，强度是否达到近似物理隔离。加强与能源局、省防指等政府部门沟通协调，安装单向隔离装置，将不必要的通讯在特殊保障阶段尽量切断，必须要运行无法切断的，提前与相关部门做好沟通，确保安全。

4.2.3 综合防护

根据实际的网络结构绘制详细的网络拓扑图，并标注与现场一致网络设备和网络节点的 IP 地址等信息，便于在防守过程中准确定位。持续开展因建设年代久远、未统一管理、责任人不在原岗位等情况的信息系统梳理工作，实时更新信息系统账号与权限。在特殊保障期间，尽量关闭不必要的系统，运行的系统越多越会增加核心系统被攻破的可能性，特别是老旧系统，安全性参差不齐。

4.3 网络安全意识

4.3.1 根据网络安全防护工作经验，点击钓鱼邮件很容易造成重大损失，甄别邮件的安全性难度大，所以日常工作中不得打开邮件中的链接、文件等，如果必须打开，须与发件人联系确认安全后方能打开。

4.3.2 所有人员清理电脑，禁止在电脑中保存密码及其他敏感信息，清理公共社交平台、协同办公、邮箱等发布的敏感信息，防止被利用。

4.3.3 在内网终端上禁用微信、QQ 等聊天工具，防止社工冒充同事、供应商骗取密码等敏感信息，若需即时通讯工具，可使用安全、可靠的通讯工具。

4.3.4 组织开展网络安全知识培训，宣贯相关规定，提升全员网络安全意识。

4.3.5 加强安保巡逻工作，防止社工通过非正常手段进入厂区。加强机房安全保卫工作，严格执行机房进出审批及记录制度。特殊保障阶段原则上一律谢绝外部人员进入厂区，如果必须进入，则不允许使用自带电脑，全程在企业人员监护下进行工作。

5 风险排查治理

5.1 全面梳理 IT 资产，建立设备台账，摸清全厂网络设备和软件的使用情况。

5.2 组织开展渗透测试工作，对网站系统、协同办公系统及其他重要互联网系统开展渗透测试和整改工作。

5.3 组织开展网络安全风险隐患排查整改工作，排查生产控制大区隔离装置是否符合要求，网络终端是否落实责任人，排查食堂、公众场所等安全保卫薄弱的终端和服务器。

5.4 组织开展信息系统安全评估整改工作，发现问题及时整改。

5.5 加强内容发布及供应链安全管理，重点针对网站、LED 发布内容，采取防篡改措施，杜绝数据被窃、供应链攻击等网络安全事件发生。

5.6 排查违规互联网应用，堵塞突破口，尤其是外包商的测试环境，极易被忽略。应禁止供应商将带有公司及公司所属单位名称、项目信息、Logo 标识、敏感数据等相关信息的系统在互联网进行发布，防止被发现并利用。

5.7 强互联网内容发布审核管理，重点对关键字、敏感字进行检索，要采取切实措施监测和预防不良言论发布行为。

6 应急保障措施

6.1 编制完善网络安全总体应急预案和专项预案，制定完善网络安全事件预案，明确责任部门、指挥机制、响应流程和处置措施,并根据预案开展应急演练工作，确保在发生突发事件时，可按照预案快速进行分析、处置。

6.2 网络安全事件处置原则：按照“统一领导、分级负责、快速反应，协同应对”的原则组织开展网络安全事件处置。网络安全事件发生后，应立即启动应急预案，实施处置并及时报送信息。

6.3 网络安全事件处置流程：值班人员从日常监控、业务部门或其他途径得到报警信息，及时进行分析判断，如发现系统主页被篡改、攻击、页面异常等现象，用手机拍照并及时上报当班领导和分管领导。如发生网络与网络安全事件，值班人员负责向相关职能部门报告，由管理部门领导向分管领导报告，并按照程序逐级上报上级公司。应对信息系统出现的突发事件，须快速地采取应对措施予以解决，保证信息系统的持续、正常运行。

7 结束语

本文以发电企业常见情况为例，分析了生产型

网络安全现状，指出目前存在的风险，主要根据提出了一些完善的管理方案，从规章制度的完善，到技术手段的改进；从单机系统的安全加固，到整体网络的安全管理。总之，生产技术企业的网络信息安全风险管理是一项综合性、长期性的工作，企业发展必须根据我国网络进行安全教育问题的各种诱发因素和漏洞，采取切实可行的网络安全防护措施。

参考文献：

[1]张家庆、王晓华:浅谈生产型企业网络安全风险及防护手段

作者简介：

刘卫国（1982），男，江西省万安县，大学本科，高级工程师，自动控制，网络安全，E-mail：12067995@ceic.com

万安水电厂220kV GIS设备改造

肖晓，巩华

（国能万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：万安水电厂 220kV GIS 气体绝缘开关设备运行中目前存在的问题。从改造方案的选择与确定出发，到新设备安装应注意的事项全方面考虑了万安水电厂 220kV GIS 设备改造注意的几个方面，从而保证安全、高效、高质地完成工程施工，为 GIS 组合电器的拆除和安装提供了良好的借鉴。

关键词：GIS 改造；GIS 设备；拆除；安装；经验

1 改造的必要性

万安水电厂开关站属于国内首套 GIS 设备，三相分设，由西安高压电气研究所生产，于 1987 年出厂安装，1990 年投运，至今运行近 30 年。220kVGIS 有 4 回主变进线，5 回线路出线，采用双母线联络接线方式。母线筒之间导电杆的接头较多，接头采用绝缘盆固定、弹簧压紧触指结构，运行多年后弹簧势必存在疲劳、压紧力逐渐变小、触头电阻增大等趋势，大负荷运行时易发热而破坏绝缘盆绝缘强度，存在导电杆对母线筒外壳放电的安全隐患。因此 GIS 室 220KV 母线及隔离开关、接地刀闸为目前设备安全可靠的运行的主要隐患，进行技术改造迫在眉睫。

2 GIS改造环境

万安水电厂接入系统现况为 220、110kV 两级电压等级接入，其中#1 机组以 110kV 电压等级接入，出线 3 回，分别至埠头、泰和和万安 110kV 变电站各 1 回；#3~5 机组以 220kV 电压等级接入，出线 5 回，分别至虎岗 220kV 变电站 2 回和黄埠、芙蓉（万安）、雩田 220kV 变电站（开关站）各 1 回；#2 机组以 220kV、110kV 电压等级接入，与#1、#3~5 机组共用 220kV、110kV 母线。220kVSF6 GIS 采用双母线接线，共有 12 个间隔，其中出线五回、进线四回、保护间隔两个、母联间隔一个，主母线采用分相结构。现根据电网系统要求，将 220kV 母线分为完全独立的两段，#2、3、4 主变及赣州方向 3 回出线采用双母线运行，#5 主变及吉安方向 2 回出线采用单母线运行。其中 220kV4 回主变进线、4 回出线（万虎 I 线、万虎 II 线、万雩线、万芙线）采用 SF6 套管与架空线连接；万黄线采用电缆与 GIS 设备连接。

3 改造范围

从 220kV GIS 进线套管（含）至出线套管（含）间的所有一次 GIS 设备及部分二次设备，具体包括：220kV GIS 设备双母线 I 段 II 段、两组母线 PT、所有 CT、34 组隔离刀闸、34 组接地刀闸、24 支进出线套管、10 台断路器、12 个汇控柜、12 个动力电源柜、12 个转接端子柜、2 个进线电源柜、1 个计量电压切换盘柜、1 个测量电压切换盘柜以及相关二次电缆等设备，220kV 单母线母差保护两套（安装在副控室）、220kV PT 一组及 PT 柜一台（安装在 GIS 室）、220kV 高压电缆终端及其延长套管、控制电缆、信号电缆及相关辅件，具体改造范围如示意图 1 所示。改造后 220kV GIS 设备主母线采用共箱结构，分支母线采用分箱结构。

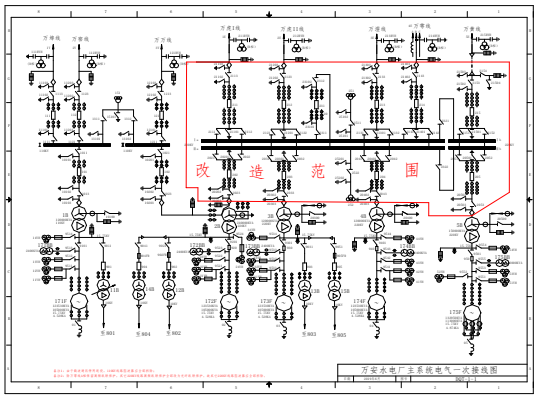


图1 改造范围示意图

4 三种改造方案的选择与确定

4.1 第一种方案：220KV GIS设备整体一次性更换

将 220KV GIS 整体一次性全部更换，包括出线间隔、进线间隔、双母线、隔离开关、隔离刀闸、母联间隔，一次性更换。改造期间，理论上可保证 110kV 出线回路及 1#、2#发电机的正常运行，但由于我厂 110KV 出力受限只能带 6 万负荷，因此在改造期间只能 1#机组发电。待原 220kV 设备整体拆除，安装调试及试验合格后再恢复投运。母线原采用是三相分体式上下层布置，占地面积大，故障点多，将母线更换为三相共箱式。提高设备运维安全性，运检操作简便。

方案一优点：安全性高，整体更换，土建预埋件可利用原有基础，拆装安全。

方案一缺点：停电超过 3 个月，停电时间长，此时我厂仅有 171F 一台发电机组发电，断开了江西电网 220KV 系统南北联络。该方案安全性高但可实时性很低。

4.2 第二种方案：将220KV母线从建设二期和三期交界处分开，分段改造

改造方案：我厂220kV SF6 GIS采用双母线接线，共有12个间隔，其中出线五回、进线四回、保护间隔两个、母联间隔一个，主母线采用分相结构。本次改造，设备主母线采用共箱母线，额定电流2500A；保留出线侧原断路器，基础不再进行土建施工，改造后设备的布置安装在原土建承重点上，满足原厂房设计要求，所有设备的通过原吊物孔通道运输到GIS室。

4.2.1 方案具体实施：220kV GIS改造分两个阶段实施，见图2、图3。第一阶段,172F机组、173F机组和174F机组带211DL、212DL、213DL、214DL四条出线；第二阶段，175F机组带215DL出线。

第一阶段改造前在215DL户外出线端加装电压互感器（保证其二次保护、监控、测量等功能恢复正常使用），恢复205DL进线及215出线，确保175F发电机的正常运行，然后拆开2321G及2322G母线隔离开关，做好安全接地措施后，完成211DL、212DL、213DL、214DL四回出线、202DL、203DL、204DL三回进线、进出线路CT更换、两个保护间隔及一个母联间隔的一、二次设备安装及现场试验工作，恢复172F、173F、174F三台发电机220kV侧及四回出线的运行；

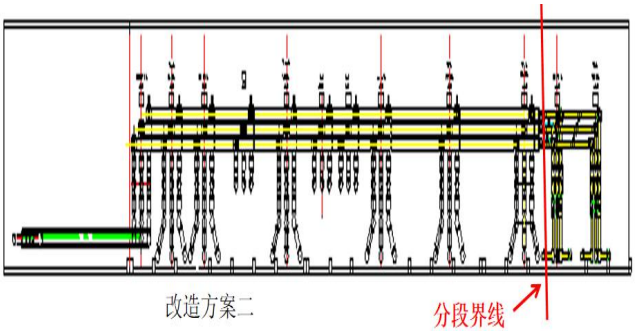


图2 改造分段界限位置图

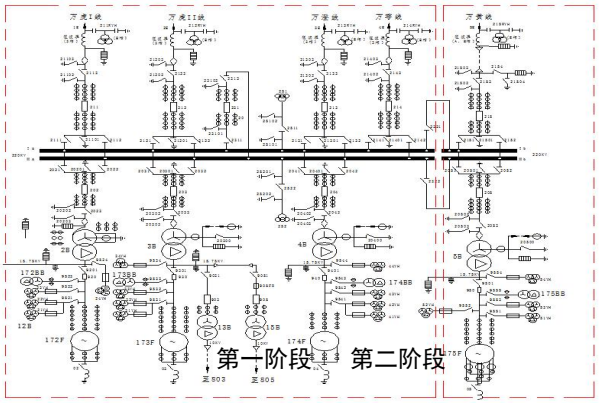


图3 改造分段实施示意图

第二阶段完成205DL进线、215DL出线间隔的改造、主母线对接及现场试验，恢复175F发电机及出线的运行，完成所有改造工作。

4.2.2 工期：第一阶段实施工期预计70天（包含原设备拆除及新设备的安装），第二阶段实施工期预计30天，计划安排在枯水期10月-下一年1月份实施，具体时间需根据当年的水库调度及来水情况再作细化调整。

4.2.3 方案二优缺点

优点：施工期间可保证有两台机组在发电态，确保。第一次全部一次性拆除更换后，更容易将新设备找回原有的土建承重点上进行安装。两次分期实施方案保证改造期间有两台机组发电，结合水调分析，安全及效益可得到保障。

缺点：在改造前我厂有11B、12B、13B三条独立的厂用电支路。在第一阶段改造期间，我厂仅有11B一条厂用电支路。

4.3 第三种方案：将220KV母线从一期和二期交界处分开，如图4、图5所示

4.3.1 实施方案：第一阶段保证不停电，使I母和II母分别运行，回收主母线联接处的气室的SF6气体，拆除联接导体，安装屏蔽电极，充气完成后恢复2#、3#机220kV侧及万虎I线、万虎II线两回出线的运行；做好安全接地措施后，拆除其余间隔、完成拆除的间隔及两个保护间隔的一、二次设备安装及现场试验工作）。

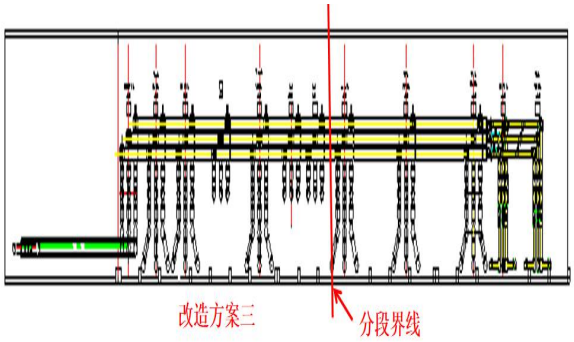


图4 方案三改造分段界限图

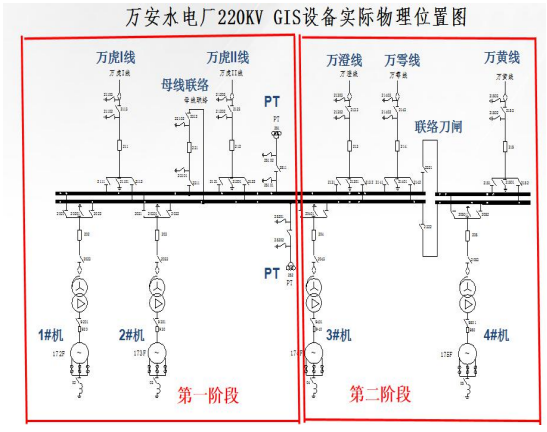


图5 方案三改造实际物理位置图

4.3.2 方案三优缺点

优点：在改造的任何时期，都能满足至少有两台机组可同时发电。工期时间短，第一阶段实施40

天，第二阶段实施50天。

缺点：在改造的第二阶段，与方案二一样，只有11B一台主变带厂用电。

4.3.4　方案比较分析与选择

4.3.4.1　方案一改造期间，要求全厂四台机组停机，只有1号机组带60MW负荷运行，可能存在大量弃水，不经济。

4.3.4.2　方案二分两个阶段改造，在第一阶段改造期间，由于220KV b段母线没有母线PT，因此，在停电改造施工前，需要临时增加母线PT才能安全运行。由于万黄出线通过约500米220kV　电缆至出线塔，220kV　电缆与GIS采用插拔连接，PT只能布置在出线塔附近，由于距离太远，技术不可行；同时在第一阶段改造期间，只有两台机组运行，根据历年水文资料分析，也存在弃水风险。

4.3.4.3　方案三分两个阶段改造，较方案一、二有如下优点：1）每个阶段均能够保证至少两台机组运行，改造期间基本保证不弃水；2）改造期间厂用电供电可靠性相对较高。不足之处，在主接线中，两个母线PT间隔及母联间隔位置调整，但对方案实施没有实质影响。

综上所述，方案三具有技术、经济优势，采用方案三。

5　水情调度分析

根据查询近几年万安水电厂在10-1月份的入库流量如下表1：

万安水电厂一台机组满发10.5MW所需流量在550m3/s左右，由于出力受限在改造期间1#机只能带6MW负荷，5#机组可发11.3MW，因此，在改造期间发电流量在800 m3/s左右。通过表1近几年来在10月-1月期间的入库流量表对比分析，初步把改造时间安排在10月—下一年的1月之间，把改造时间放在10月至1月份较为合理，但具体水库调度方式再根据改造时期的实际水情再细化水库调度方案。改造期间基本可保持水库水位高度相对平衡，基本可避免发生弃水现象发生。

表 1　万安水电厂近几年入库流量表

序号	年份	1月	10月	11月	12月
1	2013	584	253	240	497
2	2014	244	245	259	212
3	2015	230	640	1328	1493
4	2016	1619	826	1123	712
5	2017	515	379	297	221
6	2018	572	373	648	520
7	2019	596	402	652	490

6　改造期间厂用电保障

厂用电是负荷机组自用电(励磁系统，断路器分合闸等)、公用系统用电(油系统，水系统，气系统，消防等)、照明用电、大坝液压启闭机开启关闭等用电等用电。发生事故时，能尽量缩小对厂用系统的影响，避免引起全厂停电事故，即各机组厂用电系统具有较强的独立性。在改造期间，有4路保厂用电措施，确保该厂厂用电安全可靠。具体运行方式如下：正常情况下采用11B带10KV I段拖II段，防汛备用电站通过833DL供10KV III段单独运行，如图6。在紧急情况下，可采用3路柴油发电机组向33B倒送电及4路生活区向827DL倒送电，如图6。

（1）1号发电机组给11B供电，正常使用。

（2）小水电发电机组通过备用电源线向833DL倒送电至10KV III段母线，供机组机组厂用电电源需要。

（3）柴油发电机组通过向16坝顶母线向33B倒送电至10KV II段母线，供机组机组厂用电电源需要。

（4）生活区万安县有两路单独电源可通过827DL断路器向10KV II段母线倒用电（目前此线路已解除，待东门桥修好成后可恢复此线路作为厂用电备用电源线）。

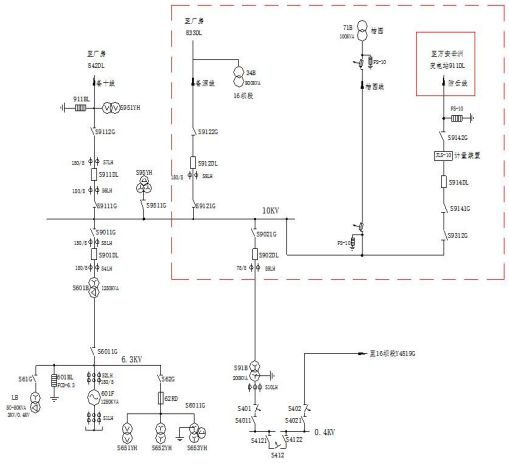


图6 防汛备用电站一次系统图



图7 厂用电保障电源

7 实施中注意的事项

7.1 GIS 设备拆除的注意事项

设备拆除。拆除设备时工作人员必须穿着专用防化服，带护目镜和专用呼吸器利用吸尘器、毛扫等仔细收集气室内壁上粘附的粉末，无关人员应离开工作现场一定距离。对吸尘器等附有粉末的物品工具收集深埋。按照方案在GIS设备上标注的拆卸位置拆卸，并应事前做好预防气体泄漏措施，被拆开的气体室应以专用设备抽空回收气体。

由于该套GIS设备已投入运行30余年，有弧隔室中的SF6气体在断路器多次灭弧过程中产生了大量有毒的气体分解物和金属粉末，该气体一旦泄漏，将会对人身安全构成极大威胁，拆除的废物回收装置不好，会造成污染。使用专用工具回收气体，并须联系有资质的气体处理厂家进行废气的回收处理。

7.2 安装施工的注意事项

7.2.1 确保施工场所环境卫生干净，设备安装前应做好除尘措施。安装人员必须穿戴专用工作服、工作鞋、工作帽。新设备安装前，应画出各间隔的中心线，要确保与主母线中心线相垂直。盆式绝缘子、导电体、均压罩等表面均应使用干净的餐巾纸或棉布蘸酒精仔细清洗干净，表面不得有毛刺。

7.2.2 对母线及分支母线筒内的清理应彻底、干净使用大功率的吸尘器进行筒内除尘。

7.2.3 连接导体时，导体连接面处应涂抹适量的导电脂，连接完毕后清理干净母线筒的内部后用塑料布包好端部。整个回路的导体安装后必须测量导电回路的直流电阻，要求同一部位的直流电阻值不得大于制造厂规定值(或出厂试验值的120%)。

7.2.4 导体、屏蔽罩、盆式绝缘子、母线筒等部件，每安装一个部位均要组织进行班组、部门、生产技术部、生产厂家、监理等全面检查验收、签字，确保安装质量。

7.2.5 回装气室盖板前，用干净的棉布蘸酒精对密封面和密封槽进行认真清洗和检查，确认没有伤痕和杂物，对密封面、气室内部进行班组、分场、生产厂家、厂部等四级全面检查验收、签字，确保内部干净、无异物。

7.2.6 所有盖板回装时均要使用新密封圈，应核对新密封圈的尺寸，密封胶应涂抹在密封槽的外部空气侧并用手抹平，放置密封圈后，要求在密封圈的外圈处涂敷密封胶且用手抹平，用手指在外部空气侧的整个法兰面上薄薄涂抹一层密封胶。使用桥吊对接时，应注意防止对接面的磕碰。

7.2.7 所有螺栓的紧固均应使用力矩扳手，其力矩值应符合产品的技术规定。

7.2.8 对打开气室的所有吸附剂盖板均应进行拆除，更换吸附剂及密封圈后回装，回装时间应尽量短，回装完毕后及时抽真空。

7.2.9 设备抽真空时，在确认泵的旋转方向正确后方可开动真空泵。抽真空应有专用电源，专人管理操作人员不得离开现场。抽真空时发生停电或关掉真空泵前，必须先关掉GIS充气口的阀门。抽真空到133Pa后，应加抽30min，进行真空泄漏试验，要求在5h起始和最终压力差不超过133Pa。

7.2.10 充气时应使用回收装置，充气前测量气瓶气体的微水，测量值不大于64ppm(1ppm=0.01‰)；充气后静置24h后测量气室微水，要求断路器气室微水值≤150ppm，其他气室微水值≤250ppm。

7.2.11 进行整个GIS机械闭锁机构的试验和调整，以及电气防误闭锁回路传动试验，要求电气闭锁逻辑符合设计要求，监控闭锁逻辑正确。

7.2.12 GIS交流耐压试验：通过出线套管对GIS分区域施加电压，对检查是否存在杂质(如自由导电微粒)比较敏感。现场交流耐压试验电压值为出厂施加电压值的80%，时间为1min。

7.2.13 GIS局部放电测量：可作为现场绝缘试验的有用补充，可检查出某些类型缺陷。

8 改造结果

万安水电厂ZF16-252型SF6气体绝缘金属封闭开关主母线采用三相共箱型大大的缩小了设备体积，减少了设备巡视人员的登高作业次数，降低了人身安全隐患。该项目自投运以来，运行稳定可靠，消除了弹簧触指压紧力变小、松动、触头电阻增大，大负荷运行时发热绝缘强度下降的安全隐患，大大减少了对GIS开关设备的检修、维护工作量，提高了涉网设备的安全可靠性，为我厂的安全、可靠运行提供有力的保障。

参考文献：

[1] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册:电气一次部分 [K] .北京:中国电力出版社，1996.

[2] 刘建让，周洪林.安康水电厂330kV GIS整体改造.水电厂自动化，2010(4) : 32 — 34.

[3]《电气工程师手册》编辑委员会.电气工程师手册[M].中国电力出版社.2008

作者简介：

肖晓（1985），男，汉族，硕士研究生，中级工程师，主要从事电力一次专业，E-mail： 15779667827@163.com

巩华（1989），女，汉族，硕士研究生，中级工程师，主要从事电力控制工程，E-mail：554285414@qq.com

一起变压器绝缘油溶解气体含量异常分析

涂海彬

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，抚州 临川 422000）

摘要：针对某厂 500kV 主变压器 C 相绝缘油连续 2 次色谱分析溶解气体含量超标异常事件，利用特征气体法、三比值法、产气速率法以及 CO_2/CO 比值法并结合设备运行工况、检修记录、电气高压试验数据对异常进行综合分析，最后判断变压器无明显内部故障点，考虑到其气体含量超标客观存在，应该引起注意并提高警觉，加大设备巡检力度，并缩短其绝缘油化验周期，减少偶然因素造成的误判，发现问题及时分析并消除。

关键词：绝缘油；溶解气体；特征气体；三比值法；故障

1 异常概况

2020 年 4 月，某厂 2 号主变压器 C 相 2 次绝缘油化验结果表征溶解气体含量存在突增(详见表 1）。该变压器型号为 DFP-380000/500，额定容量 380MVA，额定电压 525/√3/27kV，2015 年 1 月出厂，2016 年 4 月投产运行。第 1 次突增发生在 4 月 14 日，当日例行常规油色谱分析试验后显示变压器油中气体含量为 5.1%，较 2019 年 12 月 16 日测量结果 1.0%对比，含气量的增长明显异常，在 4 月 20 日进行第二次试验，此次试验结果显示气体含量为 4.9%，虽然结果相对稳定，但是较历次试验结果均是突增明显，且都超过 GB/T 7595-2017《运行中变压器油质量》规定含气量不大于 3%的标准值要求，且 O_2/N_2 比值为 0.1162，低于正常比值 0.5，存在异常。

表1. 该厂2号主变C相溶解气体含量

检测日期	标准	含气量	结论
2019.12.13	≤3	1.0%	不满足标准
2020.04.14	≤3	5.1%	不满足标准
2020.04.20	≤3	4.9%	不满足标准
备注：参考标准 DL/T7595-2017			

2 异常原因排查及分析

2.1 气相色谱试验特征值

气相色谱法是检测变压器油中溶解气体含量最有效的方法，其中用以表征变压器各类故障的特征气体为别为 H_2、CH_4、C_2H_2、C_2H_4、C_2H_6、CO、CO_2 七种，此外氧（O_2）、氮（N_2）虽不作判断指标，但可作为辅助判据，也应尽可能的分析。

表2 该厂2号主变C相特征气体含量（uL/L）

气体	标准	2020.4.22	2019.12.5	2019.10.13
CH_4	/	18.3	15.9	16.2
C_2H_4	/	0.9	0.8	0.8
C_2H_6	/	1.9	1.6	3.1
C_2H_2	＜1	0	0	0
总烃量	＜150	21.1	18.3	20.1
H_2	＜150	33	25	31
CO	/	1192	969	1010
CO_2	/	3325	2912	2823
分析结论		正常	正常	正常
备注：参考标准 DL/T722-201				

对比结合表格中色谱试验报告给出数据及结论可以看出，该厂主变 C 相变压器油无明显异常，特征气体含量均在标准范围内，但是这里要重点强调的是，在分析特征气体与故障类型的时候，单一气体含量并不能故障作为唯一判据，还要结合气体产生速率以及特征气体法确定是否存在故障，并利用三比值法来确定故障类型，因此这里先根据近一年的特征气体含量计算一下该厂 2 号主变 C 相各气体相对产生速率。

2.2 气体产生相对速率

气体相对产生速率公式：$yr=(Ci_2-Ci_1)/Ci_1\times 1/\Delta t\times 100\%$；

其中，Ci_2 为第二取样测量所得油中某气体浓度；Ci_1 为第一取样测量所得油中某气体浓度；Δt 为两次间隔时间（/月），为尽量减小误差，取用异常前后两组数据进行计算分析，如下表：

表3. 该厂2号主变C相特征气体产气速率

气体	2020.04.22-2019.12.5		
	A 相	B 相	C 相
CH_4	2.8%	1.8%	3.7%
C_2H_4	6.3%	/	3.1%
C_2H_6	5.5%	7.1%	4.7%
C_2H_2	/	/	/
H_2	2.1%	8.9%	8%
CO	5.3%	2.5%	5.7%
CO_2	2.5%	/	3.5%
备注：产气速率的注意值为 10%			

由表 3 所示气体产生速率可以看出，在 2020 年 04 月 22 日-2019 年 12 月 5 日异常发生前后时间间隔内，该厂 2 号主变 A、B、C 三相绝缘油中溶解气体及总烃量产生速率均小于 10%，无法判定

绝缘油故障。事实上油中含气量或气体产生速率很大程度上还与机组负荷、故障类型以及内部绝缘材料老化成都等因素有关，为进一步分析判断，将继续用三比值法进行确认，如下所示：

2.3 三比值法与 CO_2/CO 比值法

表4. 故障类型判断

C_2H_2/C_2H_4	CH_4/ H_2	C_2H_4/C_2H_6	故障类型 判断	故障事例
0	0	1	低温过热（低于150℃）	绝缘导线过热，注意 CO 和 CO2 的含量以及 CO2/CO
	2	0	低温过热（150~300℃）	分解开关接触不良，引起夹件螺丝松动或接头焊接不良，涡流引起铜过热，铁芯漏磁，局部短路，层间绝缘不良，铁芯多点接地等
	2	1	中温过热（300~700℃）	
	0,1,2	2	高温过热（高于700℃）	
	1	0	局部放电	高湿度，高含气量引起油中低能量密度的局部放电
2	0,1	012	低能放电	引线对电位未固定的部件之间连续火花放电，分接抽头引线和油隙闪络，不同电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的火花放电
	2	012	低能放电兼过热	
1	0,1	012	电弧放电	线圈匝间，层间短路，相间闪络，分接引线间油隙闪络，引起对箱壳放电，线圈熔断，分接开关飞弧，因环路电流引起对其他接地体放电等
	2	012	电弧放电兼过热	

表5. 三比值法编码规则表

气体比值范围	比值范围的编码		
	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
＜0.1	0	1	0
≥0.1~＜1	1	0	0
≥1~＜3	1	2	1
≥3	2	2	2

表6. 该厂主变特征气体三比值法编码

项目	20200422	20191205	20191013
C_2H_2/C_2H_4	0	0	0
CH_4/H_2	0.55	0.64	0.52
C_2H_4/C_2H_6	0.47	0.5	0.26
C_2H_2/C_2H_4编码	0	0	0
CH_4/H_2编码	0	0	0
C_2H_4/C_2H_6编码	0	0	0

由上表数据可以看出，该厂变压器历次特征气体三比值对应编码均为“000”，未发现变压器存在内部故障。

此外，根据相关统计资料显示，当变压器内部故障涉及到固体绝缘时，将会引起溶解 CO 和 CO_2 含量的明显增长，这是因为固体绝缘的正常老化过程与故障情况下的劣化分解，最终都会以 CO 和 CO_2 含量变化的形式表现出来，一般没有严格的界限，规律也不明显。这主要是由于从空气中吸收的 CO_2、固体绝缘老化及油的长期氧化形成 CO、CO_2 的基值过高造成的，在密封设备里，空气也可能经泄露而进入设备油中，因而有油中的 CO_2 浓度将以空气的比率存在。

相关经验证明，当怀疑设备固体绝缘材料老化时，一般 CO_2/CO>7；当怀疑故障涉及到固体绝缘材料时（高于 200℃），可能 CO_2/CO<3,必要时，应从最后一次的测试结果中减去上一次的测试数据，重新计算比值，以确定故障是否涉及到了固体绝缘。

表7. CO_2/CO比值分析

气体	2020.04.22	2019.12.5	2019.10.13
	C 相	C 相	C 相
CO	1192	969	1010
CO_2	3325	2912	2823
比值	2.8	3	2.8

如上表所示，该厂 2 号主变 C 相绝缘油中溶解 CO_2/CO 比值虽然无较大差别，但最近两期试验数据对此增长量明显，疑似为绝缘油老化过程中产生的 CO_2 和 CO 气体的积累。

2.4 其他试验指标

查阅近年提供试验报告显示该厂 2 号主变 C 相绝缘油酸值、耐压（表 8）、闪点、介损以及水分等各项指标均合格，异常前后 SIS 系统监测变压器油温、绕组温度、电流曲线均平稳，未发现异常。

表8. 该厂主变C相变压器油耐压试验数据

时间	标准	C 相	结果
2020.03.30-04.02	≥55KV	100KV	合格
2019.12.16-12.23		87KV	合格
2019.10.22		100KV	合格
2019.07.11		68KV	合格
2019.03.28-05.07		87KV	合格
备注：参考标准 GB/T 7595-2017			

上述各环节数据分析表明：该厂 2 号主变 C 相绝缘油中溶解特征气体量、气体相对产生速率、三比值法分析结果以及 CO_2/CO 比值法均符合标准，变压器内部未发现明显故障点。

3 绝缘油中溶解气体超标原因

a.2020 年 3 月至 4 月，该厂 2 号主变经历了机组从长期低负荷率到高负荷率的状态转变，高负荷率意味着变压器内部铁芯及绕组温度升高，绝缘油状态改变，引起油中低碳碳氢化合物发生分解，生成 H_2 和 CH_4 类气体，致使油中含气量升高。

b.该厂 2 号机组近期频繁启停，启停过程中将引起变压器内绝缘油所承受电压的状态变化，产生局部放电，油中气泡被击穿，释放出 H_2 和甲烷，致使油中溶解气体量超标。

c.在密封的设备里，考虑到 O_2 和 N_2 的相对溶解度，正常来说油中 O_2/N_2 的比值间接的反应出空气的组成，其比值接近于 0.5，但是在运行的变压器中，内部时刻发生着绝缘油的氧化或纸的老化，

则比值可能会降低，因为油中 O_2 的消耗比扩散更迅速，其次，上面所提到的负荷和保护系统的变化也可能影响这个比值，但是当 O_2/N_2 比值低于 0.3 时，则怀疑是出现氧被极度消耗的迹象。鉴于异常时该厂 2 号主变 C 相绝缘油 O_2/N_2 比值约为 0.1，虽然其他证据不足以证明其变压器内部存在故障，但也要引起足够的重视。最后，O_2 和 N_2 溶解量的突然增大，换个角度分析，变压器器身、油管路、阀门及油枕泄漏或绝缘油取样、运输和试验过程中发生泄漏的可能性是存在的。

d.此外，色谱柱污染、色谱仪电路故障、管道漏气等试验设备原因引起的基线不稳，同样也会影响试验结果的准确性。

4 分析总结

综上分析，该厂 2 号主变 C 相绝缘油暂未发现明显内部故障，但两次气相色谱试验均显示油中含气量超标，应提高警觉，加大设备巡检力度，并在接下来的几个月内缩短其绝缘油化验周期，减少偶然因素造成的误判，发现问题及时分析并消除。

参考文献：

[1]GB/T 17623-2017 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法；

[2]GB/T 7595-2017 运行中变压器油质量；

[3]李文志，孙威，朱娟.变压器油中特征气体含量超标的故障原因分析【B】.电工电气.1007-3175(2019)10-0039-03

作者简介：

涂海彬（1993），男，江西吉安，大学本科，助理工程师，从事发电厂电气部分，E-mail：1071036204@qq.com

主变中性点加装直流偏磁抑制装置对零序过流保护的影响分析

邹建中

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 抚州 344000）

摘要：本文针对主变中性点接入直流偏磁抑制装置后零序网络的变化，通过绘制不同运行方式下的等值阻抗序网图、计算系统发生单相接地故障时的零序电流，用来对主变零序过流保护定值进行校核，根据校核的结果，分析其对零序过流保护定值的影响，为零序过流保护定值的调整提供依据。

关键词：直流偏磁抑制装置；主变；零序过流保护；校核

1 引言

随着高压直流输电的广泛投入运行，由此产生的直流偏磁现象对变压器的安全运行造成了较大危害，采用在主变中性点加装直流偏磁抑制装置，是当前减小直流偏磁对变压器影响的普遍方法，但主变中性点加装直流偏磁抑制装置后改变了主变中性点的零序阻抗，因此需要计算此时系统发生单相接地故障时流过主变中性点的零序电流，根据计算结果决定主变零序过流保护是否需要调整。

2 问题描述

抚州发电厂为限制流过主变中性点的直流电流值，拟在1、2号主变中性点分别加装电阻为3Ω的直流偏磁抑制装置，主变的零序阻抗随之发生变化，需要重新计算500kV母线发生单相接地短路时流过主变中性点的最小短路电流，根据计算结果决定主变零序过流保护定值是否需要进行调整。

3 系统及设备等值阻抗

3.1 500kV系统等值阻抗（电网提供）

运行方式	最大运行方式	最小运行方式
X_1	0.0035	0.0055
X_0	0.0067	0.0077
基准值	Sj=100MVA Uj=525kV	

3.2 发电机、变压器等值阻抗

	发电机	主变	启备变
X_1	0.0163	0.0158	
X_0		0.0158	0.225
基准值	Sj=100MVA Uj=525kV		

3.3 直流偏磁抑制装置等值阻抗

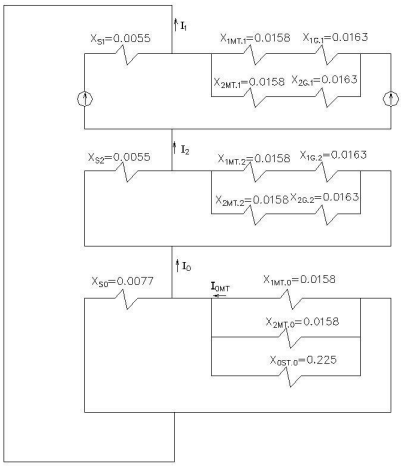
直流偏磁抑制装置电阻值为3Ω，归算至基准值下的等值阻抗为

$$3R=\frac{3\times3}{Z_j}=3\times3\times\frac{S_j}{U_j^2}=3\times3\times\frac{100}{525^2}=0.00326$$

4 计算不同运行方式下的单相接地短路电流

4.1 计算两台机组同时运行方式下（系统为最小运行方式、主变中性点未加装直流偏磁抑制装置）的单相接地短路电流

4.1.1 等值阻抗序网图



图一 500kV 系统单相接地等值阻抗序网图

4.1.2 根据系统单相接地时的序网图、进行等值阻抗计算

$$X_{1\Sigma}=X_{S1}//(X_{1G}+X_{1MT})//(X_{2G}+X_{2MT})$$
$$=0.0055//(0.0163+0.0158)//(0.0163+0.0158)$$
$$=0.0041=X_{2\Sigma}$$
$$X_{0\Sigma}=X_{S0}//X_{0MT}//X_{0MT}//X_{0ST}$$
$$=0.0077//0.0158//0.0158//0.225$$
$$=0.00383$$

4.1.3 计算单相接地时流过接地点的短路电流

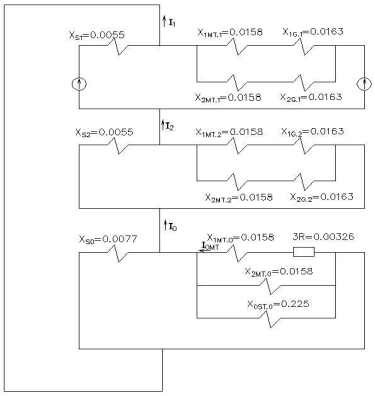
$$3I_0=\frac{3}{X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\times I_j=\frac{3}{0.0041+0.0041+0.00383}\times110$$
$$=27431(A)$$

4.1.4 计算单相接地时流过任一台主变中性点的短路电流

$$3I_{0MT}=\frac{X_{S0}//X_{0ST}//X_{0MT}}{X_{S0}//X_{0ST}//X_{0MT}+X_{0MT}}\times3I_0=\frac{0.0077//0.225//0.0158}{0.0077//0.225//0.0158+0.0158}\times3I_0$$
$$=\frac{0.00506}{0.0208}\times27431=6673(A)$$

4.2 计算两台机组同时运行方式下（系统为最小运行方式、仅一台主变中性点加装直流偏磁抑制装置）的单相接地短路电流

4.2.1 等值阻抗序网图



图二 500kV 系统单相接地等值阻抗序网图（1 台主变加限流电阻）

4.2.2 根据系统单相接地时的序网图、进行等值阻抗计算

$$X_{1\Sigma}=X_{S1}/\!/\left(X_{1G}+X_{1MT}\right)/\!/\left(X_{2G}+X_{2MT}\right)$$
$$=0.0055/\!/\left(0.0163+0.0158\right)/\!/\left(0.0163+0.0158\right)$$
$$=0.0041=X_{2\Sigma}$$
$$X_{0\Sigma}=X_{S0}/\!/\left(3R+X_{0MT}\right)/\!/X_{0MT}/\!/X_{0ST}$$
$$=j0.0077/\!/\left(0.00326+j0.0158\right)/\!/j0.0158/\!/j0.225$$
$$=j0.00506/\!/\left(0.00326+j0.0158\right)=0.00386\angle 87.23^{o}$$

4.2.3 计算单相接地时流过接地点的短路电流

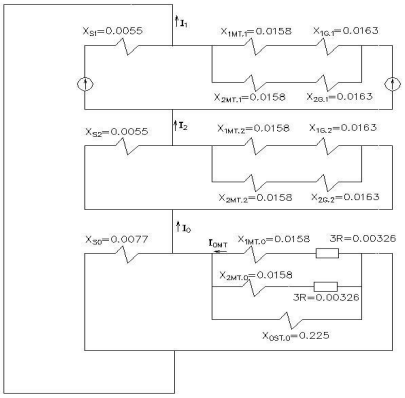
$$3I_0=\frac{3}{X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\times I_j=\frac{3}{j0.0041+j0.0041+0.00386\angle 87.23^{o}}\times 110$$
$$==\frac{3}{0.01206\angle 89.12^{o}}\times 110=27386\angle -89.12^{o}\left(A\right)$$

4.2.4 计算单相接地时流过接入了直流偏磁抑制装置的主变中性点的短路电流

$$3I_{0MT}=\frac{X_{S0}/\!/X_{0ST}/\!/X_{0MT}}{X_{S0}/\!/X_{0ST}/\!/X_{0MT}+(3R+X_{0MT})}\times 3I_0$$
$$=\frac{j0.0077/\!/j0.225/\!/j0.0158}{j0.0077/\!/j0.225/\!/j0.0158+(0.00326+j0.0158)}\times 3I_0$$
$$=\frac{j0.00506}{0.00326+j0.02086}\times 27386\angle -89.12^{O}=\frac{j0.00506}{0.0211\angle 81.12^{O}}\times 27386\angle -89.12^{O}$$
$$=6567\angle -80.24^{O}\left(A\right)$$

4.3 两台机组同时运行方式下（系统为最小运行方式、且两台主变中性点均加装直流偏磁抑制装置）的单相接地短路电流计算

4.3.1 等值阻抗序网图



图三 500kV 系统单相接地等值阻抗序网图（2 台主变加限流电阻）

4.3.2 根据系统单相接地时的序网图、进行等值阻抗计算

$$X_{1\Sigma}=X_{S1}/\!/\left(X_{1G}+X_{1MT}\right)/\!/\left(X_{2G}+X_{2MT}\right)$$
$$=0.0055/\!/\left(0.0163+0.0158\right)/\!/\left(0.0163+0.0158\right)$$
$$=0.0041=X_{2\Sigma}$$
$$X_{0\Sigma}=X_{S0}/\!/\left(3R+X_{0MT}\right)/\!/\left(3R+X_{0MT}\right)/\!/X_{0ST}$$
$$=j0.0077/\!/\left(0.00326+j0.0158\right)/\!/\left(0.00326+j0.0158\right)/\!/j0.225$$
$$=j0.0077/\!/j0.225/\!/\left(0.00163+j0.0079\right)$$
$$=j0.00743/\!/0.00807\angle 78.34^{o}$$
$$=j0.00389\angle 84.41^{o}$$

4.3.3 计算单相接地时流过接地点的短路电流

$$3I_0=\frac{3}{X_{1\Sigma}+X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\times I_j=\frac{3}{j0.0041+j0.0041+0.00389\angle 84.41^{o}}\times 110$$
$$==\frac{3}{0.01266\angle 88.2^{o}}\times 110=26066\angle -88.2^{o}\left(A\right)$$

4.3.4 计算单相接地时流过任一台主变中性点的短路电流

$$3I_{0MT}=\frac{X_{S0}/\!/X_{0ST}/\!/(3R+X_{0MT})}{X_{S0}/\!/X_{0ST}/\!/(3R+X_{0MT})+(3R+X_{0MT})}\times 3I_0$$
$$=\frac{j0.007445/\!/(0.00326+j0.0158)}{j0.007445/\!/(0.00326+j0.0158)+(0.00326+j0.0158)}\times 3I_0$$
$$=\frac{0.00513\angle 86.34^{O}}{0.00513\angle 86.34^{O}+(0.00326+j0.0158)}\times 26066\angle -88.2^{O}$$
$$=\frac{0.00513\angle 86.34^{O}}{0.0212\angle 80.27^{O}}\times 26066\angle -88.2^{O}$$
$$=6221\angle -82.13^{O}\left(A\right)$$

5 结论

经计算，主变中性点未加装直流偏磁抑制装置时，当500kV系统发生单相接地短路时，通过主变中性点的最小短路电流为6673A；在仅一台主变中性点加装直流偏磁抑制装置的情况下，当500kV系统发生单相接地短路时，通过主变中性点的最小短路电流为6567A；在两台主变中性点均加装直流偏磁抑制装置的情况下，当500kV系统发生单相接地短路时，通过主变中性点的最小短路电流为6221A。主变零序过流保护一次定值为300A，灵敏系数为20.7，完全满足要求，因此主变零序过流保护定值无需调整。

6 结束语

通过计算主变中性点接入直流偏磁抑制装置后的单相接地短路电流，对主变零序过流保护进行灵敏度校核，分析直流偏磁装置接入后对主变零序过流保护定值的影响，为主变零序过流保护定值是否需要调整提供了依据。此次问题的分析过程，也为其他单位处理类似问题提供了借鉴。

参考文献：

[1]高春如.大型发电机组继电保护整定计算与运行技术-2.北京：中国电力出版社，2010.10

[2]许建安，王风华.电力系统继电保护整定计算.北京：中国水利电力出版社，2007

作者简介：

邹建中（1974），男，江西上高，大专，工程师，从事继电保护维护工作，E-mail：635148336@qq.com

浅析赞比亚配网EPC项目全过程实施要点

周文发[1]，熊星[1]，李渭饶[2]，赵小波[3]，宋银河[3]

（1.中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096；2.中国电建集团国际工程有限公司，北京 100036；3.中国电建集团成都电力金具有限公司，四川 成都 610100）

摘要：大部分非洲国家电力缺口明显，农村电气化率普遍较低，非洲配网电力市场潜力巨大。本文主要阐述赞比亚配网 EPC 项目全过程实施要点，旨在对企业开拓非洲配网市场提供借鉴和参考。

关键词：非洲；农村电气化；EPC；项目管理

0 项目背景

2015年，赞比亚的农村电网和太阳能接入电气化率只有11.8%,为实现2030年农村电气化率达51%的愿景目标，赞比亚正在积极推进农村电气化接入建设。赞比亚西方省、西北省电力服务接入建设项目，属于公开竞标类EPC总承包项目，资金来源于世界银行,境内母公司A与当地业主签订CIP(Carriage and Insurance Paid，不含进口关税和进口增值税）合同。线路全长约90km，电压等级涉及11kV和400V，项目范围包含线路整体设计、物资采购（变压器、导线、金具和木杆等）和施工。本文从前期投标、评标中标签约和项目履约三大阶段简析赞比亚配网EPC项目执行要点。

1 投标阶段

1.1 标书制作流程

购买标书→组建投标团队，明确各自分工和时间节点→组织评审技术和商务文件→打印定稿标书并按时参加开标会。

1.2 投标注意要点

1）前方商务人员应熟悉当地施工分包或人材机资源，掌握所在国同类型项目造价水平和税收政策，为国内报价决策做准备；

2）鉴于全球新冠疫情常态化和复杂多变的国际贸易环境，投标报价时应综合考虑美元或欧元贬值、国际物流费上涨和大宗商品价格飙升风险，巧妙运用不平衡报价法，争取中标并且获得最大经济利益。

3）近年来，中资企业被多边金融机构制裁的事件时有发生，归根是企业欠缺合规经营意识，未配备合规管理团队和未制定投标合规认证机制。常规的投标合规风险包括腐败、欺诈、串通和胁迫[1]，典型问题包括诉讼和仲裁信息披露不完整或虚假、关键人员信息不属实、业绩造假或使用不规范和安全、环境方面的声明文件作假等。

4）针对自身把控不足且耗时长的资料需提前筹划，如木杆厂家授权，木杆型式试验报告和银行授信等。

2 评标中标签约阶段

评标过程中，前方商务人员应全程跟进，及时掌握项目评标进展，澄清投标文件。

授标通知下发后需积极准备授标前会议，确认授权代表、合同内容（价格、工期和工作范围等）、项目实施计划、厂验计划和相关保函等细节。

项目签约后，需及时办理预付款保函、履约保函和ESHS保函（Environmental, Social, Health and Safety Security,若有）和工程保险等。

3 项目实施

3.1 财务模型设计

境内母公司A负责国内物资（变压器、导线、金具等）和第三国木杆采购合同签订，办理境内出口物资退税，同时母公司A委托境外分公司B执行当地施工。CIP合同既不是免税项目也不是含税项目，根据当地税法规定，该项目需缴纳进口关税、进口增值税和当地增值税。项目执行过程中，将CIP合同拆分Offshore（母公司负责境内设备物资和第三国木杆采购）和Onshore（当地分公司负责当地施工）两部分，Offshore部分进口关税和进口增值税由业主缴纳，Onshore部分当地进项增值税由当地分公司B在履约过程中缴纳，后期申请含税施工进度款。

项目合同流、资金流和发票流如下：

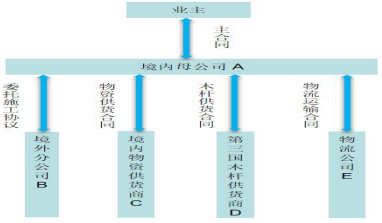


图1 项目合同流

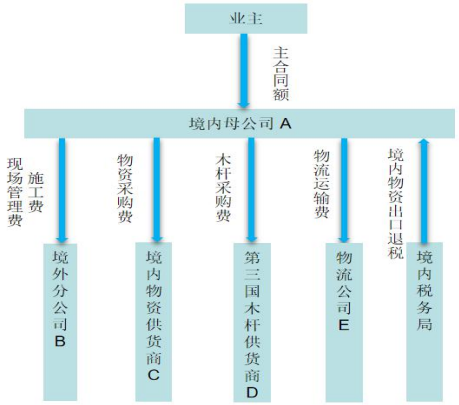


图2 项目资金流

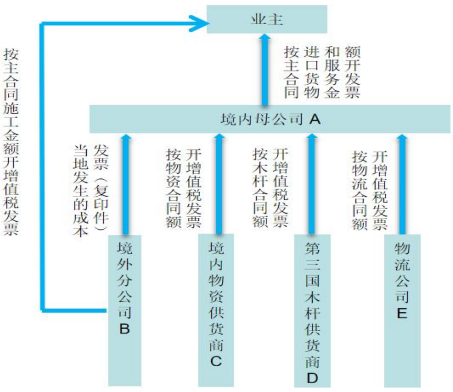


图3 项目发票流

3.2 设计方面

项目前期复测阶段，设计人员应全程参与现场踏勘，了解沿线周边环境，提前规避线路交叉跨越电气间隙不够、拉线空间不足和支撑选型不确定等风险。综合当地相关规范和现场实施经验，线路踏勘应重点关注以下几点：①考虑支撑受力性能发挥，拉线或木杆支撑对地倾斜角宜按30°~60°设置；②线路交叉跨越电气间隙要求详见附表1，当不满足要求时，应考虑采用水平横担，实现导线由垂直转水平排列或增加木杆呼称高；③正常条件下，11kV线路最大档距100m，400V线路最大档距50m；④永久建筑物（房子或厕所）离线路中心线间距应满足标书要求，其中11kV线路不应小于5m和400V线路应不低于1m；⑤每种杆型的支撑（拉线或木杆）数量设置应考虑节点实际受力状态，合理设置支撑数量；⑥在一定条件下，可以优化杆型，节省造价成本。

附表1 11kV线路对地距离（m）

铁路，主干道	7.95
城镇道路	6.60
交通道路	6.10
城镇，最小对地距离	5.50
城镇外，最小对地距离`	5.30
建筑物、非电力木杆及构筑物	3.00
通信线	1.00

备注：以上电气间隙数据来源于雇主DS-EGE-010标准。

3.3 采购

针对第三国木杆采购，发货前需办理相关文件，木杆进口许可证书（当地林业部和农业部颁发）、植物检疫证书（第三国农业部颁发）、木杆出口许可（第三国林业部颁发）和SADC 证书(Southern African Development Community Certificate，第三国税务局颁发）。

采购建议：1）发货前应仔细核对物资种类和数量，避免漏发或少发。大部分非洲国家工业薄弱，无镀锌产业，若漏发镀锌构件，则需从第三国进口，价格偏高且时间不可控；2）采购前应充分调研当地和国内市场，从经济性和时效性两方面综合确定货物来源，如大体积PVC管可以考虑当地采购，节省物流成本。

3.4 厂验

鉴于当前全球疫情肆虐，旅行不便的客观事实，积极推荐具有公信力的第三方检测机构开展实施厂验计划。厂验依据包括但不限于招标文件规定需要厂验的设备或材料、技术参数和产品批复图纸。

个别情况下，当招标文件提供的技术参数过于严格时，可以找到对应国际标准（IEC、BS和ANSI等）与业主沟通协商。

针对重要受力构件（如拉线预绞丝和拉线棒），尽管招标文件未提相关厂验要求，可以考虑新增相关厂验子项，规避后期可能出现的安全风险。

3.5 清关

进口国清关材料：①商业发票；②装箱单；③原产地证明；④保险单；⑤货物提单；⑥中转港口清关代理授权信；⑦派车单。

3.6 退税方面

本项目是通过集团公司的风控系统对接税务局退税系统，因无法直接从海关系统下载退税数据，故需手动整理核对，产品型号、数量和金额等信息必须与报关单数据一致。

出口退税工作特别琐碎，总结十二字口诀：“前期筹划，中期把控，后期梳理”。

前期筹划：签订采购和运输合同后，及时预录计划发运批次、货代和报关信息（货物申报明细、合同金额、品牌商标和货源地），注意箱单、发票与报关单三者信息应一致[2]。

中期把控：收集货物申报和发运过程文件，仔细核对供应商开票信息，重点核实货物规格型号是否与报关单数据一致，文字和数字内容是否对应，规避重开发票风险。

后期梳理：后期梳理相关出口退税资料并提交。

3.7 变更和结算管理

项目付款条件：25%预付款，65%进度款，5%投运款和5%质保金。

1）变更：依据设计批复量和主合同单价确定变更额，针对新杆型综合单价应考虑当前汇率、物流和物价水平等因素。

2）结算:单价合同，依据招标量、设计批复量和实际施工量调整合同总价，按照主合同付款条件申请结算款。设备进度款结算示例详见附表2。

附表2 设备进度款结算示例

序号 描述	工程量	单位	综合单价	签约合同价	实际合同价
	招标量	实际量	（USD,CIP)	（USD,CIP)	（USD,CIP)
	①	②	③	④= ①×③	⑤= ②× ③
001 钢芯铝绞线（4线*100mm²)					
	5000	6000	m	2.00	10,000.00	12,000.00
002 100kVA变压器					
	5	5	台	5000.00	25,000.00	25,000.00
				小计：	35,000.00	37,000.00
扣25%预付款(④×25%)					-8,750.00	
扣10%保留金（5%投运款+5%质保金，⑤×10%）					-3,700.00	
设备进度结算款					24,550.00	

注：缺陷责任期内，5%质保金可以用质保金保函置换。

3.8 现场施工管理

配网项目属于线性工程，当地普工不固定，需安排专职人员负责劳工招聘、出勤记录，准时发放工资；应重视员工健康防护，及时发放劳保用品，备齐急救药箱；落实安全生产教育，利用早班会时间，安排专职安全员讲安全、讲隐患、讲预防，编制专项施工方案，防范高空作业风险，确保现场安全施工；重视当地环境和现场防疫管理。

配网项目具有点位分散、作业面广特点，社会风险相对突出，只有融入社区才能保证项目顺利履约，具体可以从以下四点入手：1）提前拜会当地酋长、地区专员、供电公司和警察局等，解释相关工作并取得对方支持和帮助；2）编制专项控制方案，最大程度减弱项目对当地受影响社区和社会造成的负面影响：①合理确定线路路径，避免或减少大面积占地，②在满足接入住户的前提下，避免树木、果树砍伐，针对项目可能出现的砍伐，项目部与业主安置补偿小组应事前联合评估、听取社区意见，配合业主完成安置补偿计划;3)参与社区援助计划，为当地居民创造就业机会，并提供技能培训；4）建立健全执行-监测-反馈-报告机制[3]，及时、高效解决现场存在的社会风险。

按业主和世行规定流程执行项目，合规经营，遇到困难，要积极与业主沟通，不要“想当然”履约。

3.9 质量通病和应对策略

附表3 质量通病和应对策略

序号	质量通病	应对策略
01	木杆端头尺寸过大、开裂、防腐处理不到位和“歪脖子”	厂验合格后发货，针对木杆端头尺寸过大问题，严禁切削木杆，应配套长号螺栓使用
02	场清不到位，部分树枝与导线有接触	通电前，应巡检线路，保证场清符合业主要求
04	杆子栽歪或雨季原因，导致地基下陷，杆子倾斜	严格遵守栽杆施工细则，夯实地基，保证木杆直立
05	拉线鸡心环外露	严格遵守施工细则，避免鸡心环外露
06	拉线套环暴芯	利用铝丝重新绑扎处理
07	线路弧垂过大，相线间隙不均匀	严格遵守放线施工细则，避免线路弧垂过大，保证相线间隙均匀
08	终端导线尾部预留不足，且处理随意，未绑扎固定	建议终端导线尾部预留20cm-30cm，并用铝丝绑扎固定
09	接地铜线搭接采用铜线绑扎	利用LINE TAP BRASS连接

3.10 项目投运

项目投运前，需做好相关投运准备工作，确保变压器绝缘电阻、变压器耐压、接地系统的接地电阻和电缆绝缘电阻等各项指标均能满足业主技术参数要求，保证项目顺利移交。

4 结语

本文以项目前期投标、项目评标中标签约和项目履约为抓手，详细阐述赞比亚配网EPC项目全过程实施要点，旨在对企业开拓非洲市场提供借鉴和参考。

参考文献：

[1]南锦林,袁雯琪.国际工程项目中的合规风险解析[J].国际工程与劳务,2020(03):20-23.

[2]李文静,胡志强,赵旭红.对外总承包企业出口退税操作要点及风险防范[J].国际商务财会,2022(02):38-40.

[3]佟刚,董昌林,姬话懿,凌霄.境外投建营项目中管理和适用赤道原则的若干问题[J].国际工程与劳务,2022(03):30-33.

作者简介：

周文发（1985），男，江西抚州，硕士研究生，高级工程师，农村电气化，E-mail： 664214143@qq.com

熊星（1982），男，江西南昌，本科，高级工程师，电力工程海外市场开发，E-mail：56160651@qq.com

李渭饶（1987），男，湖南岳阳，硕士研究生，中级工程师，电力工程海外市场开发，E-mail：liweirao@powerchina-intl.com

赵小波（1987），男，四川宣汉，本科，助理工程师，农村电气化，E-mail：scu_zxb@163.com

宋银河（1981），男，四川乐至，本科，国际项目物资出口报关与退税，E-mail：syhe2002@126.com

某风电场2.0MW机组偏航软启故障的触发原因分析及处理探究

唐文清

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 赣州 341000）

摘要：偏航系统是确保风机正常运行的重要组成部分，在风机的整个安全稳定运行生命周期内履行着重要使命。在小风期间，风速风向不稳，切入风速在 3m/s 左右，来回波动将引起偏航次数增多，进而引发偏航软启故障。通过数据分析，寻找规律，结合技改，稳定电压，优化控制逻辑，达到降低偏航软启故障的目的。

关键词：2.0MW 机组；偏航软启；触发原因；故障

1 偏航概述

正常偏航条件：风速、风向仪进行对风，当风速达到切入风速（一般为3m/s）时启动，机组自动偏航或解缆。偏航系统位于机舱和塔筒的连接部位，其主要由偏航轴承、偏航制动盘、偏航制动器、偏航驱动器、偏航传感器和偏航控制系统组成。如图1所示。

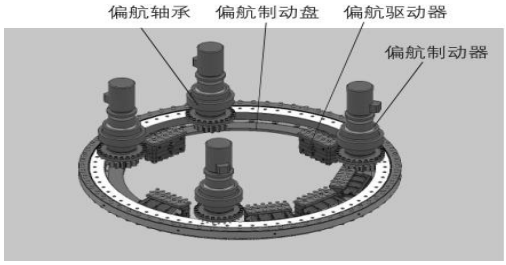


图1 偏航系统结构图

（1）偏航驱动器由驱动电机、减速齿轮箱和偏航轴承组成。驱动电机为带钳盘式电磁制动装置的三相异步交流电机；减速齿轮箱为四级行星减速齿轮，连接机架后，输出齿轮与安装在塔筒顶端的偏航轴承内齿圈啮合；偏航轴承为带内齿的四点接触球轴承，其外圈连接机架，与偏航减速齿轮箱的输出配合实现偏航驱动。集中润滑系统向偏航轴承供油，液压系统为偏航制动器提供制动力。

（2）偏航制动系统以盘式制动钳为执行机构，由液压单元驱动，主要部件为偏航制动器、偏航制动盘、液压单元。偏航制动器为六缸主动式制动器，液压泵一次工作后由蓄能器保压，摩擦片磨损后会自动调整压力。

（3）偏航传感器主要由风速风向仪、偏航计数器组成。风速风向仪通过测量风速和风向给控制系统风速和角度偏差，由控制系统判断是否应进行偏航动作。而偏航计数器记录风机的实际动作情况，并向控制系统反馈结果，若大于580°或小于-580°，则系统会根据该信号使机组停机并驱动偏航系统工作，反向偏航，实现自动解缆。如图2所示。

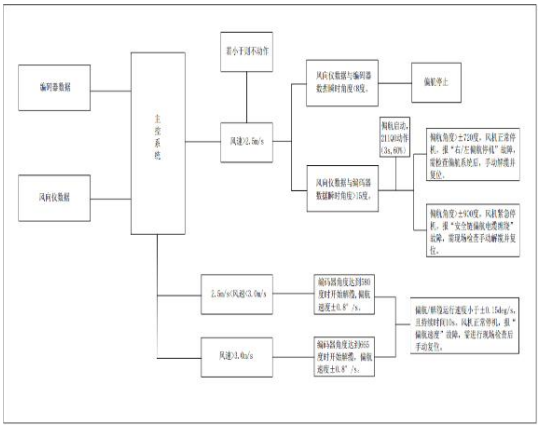


图2 偏航系统逻辑图

2 偏航软启故障现象

2.0MW机组出现偏航软启故障。上机检查，发现211Q1断路器跳闸，风机不可偏航，不可复位，偏航软启211Q0的24V信号反馈回路无异常，偏航电机绝缘无异常。

3 故障分析及处理过程

偏航软启故障可分为211Q1断路器跳闸故障、偏航软启211Q0故障、偏航电机故障和偏航减速齿轮箱故障。

（1）211Q1断路器跳闸。出现断路器跳闸时，检查线路是否正常，并紧固相关接触点。

（2）偏航软启211Q0故障。①硬件损坏，需更换偏航软启动器；②211Q0偏航软启偏航次数达到上限故障。

不同月份风机偏航次数情况如图3所示。

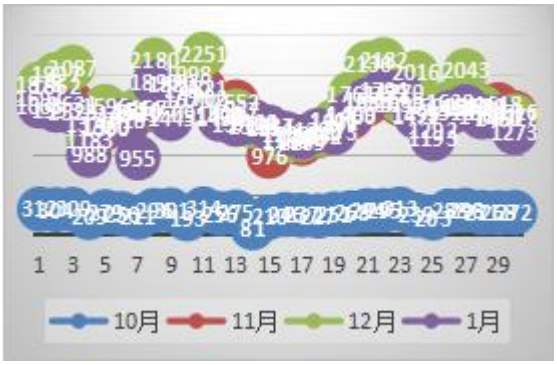


图3 不同月份风机偏航次数

（3）偏航电机故障和偏航减速齿轮箱故障。滚动偏航系统中，机舱通过偏航轴承与塔筒连接，偏航时通过驱动系统带动轴承旋转，由刹车系统配合保持系统稳定。从偏航电机驱动回路来看，偏航电机尾部电磁刹车与电机共用一路电源，通过整流后到达电磁刹车线圈，电磁刹车克服弹簧阻力将刹车打开，在这个暂态过程中存在滞后现象，也会给电机启动带来额外负载，造成冲击电流增大。

分析随着温度的降低（冬天气温较低），系统有可能存在摩擦力矩增加的情况，导致偏航电机驱动力矩增加，引起电机过载，另外，偏航系统的偏航次数较为频繁，平均每台风机一年的偏航次数高达上万次，长时间高频次的启动冲击和过载运行使电机加速损坏。

根据采集到的数据，重点分析偏航电机启动停止的功率冲击情况、电机功率平衡性、不同温度条件下偏航电机的功率情况和偏航电机的功率时间关系，具体波形如图4。

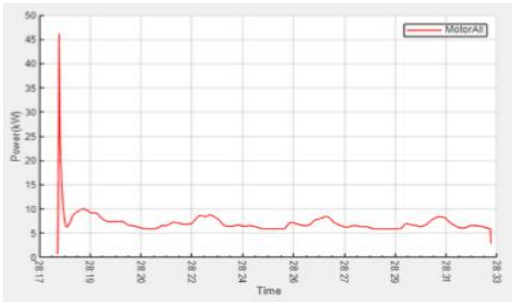


图4 偏航电机启动停止典型波形

从波形上可以看出：偏航电机在启动瞬间，总功率峰值约为47kW，冲击时长约为0.5s，进入稳态之后，功率约为6-9kW，直至停止偏航，稳态功率在电机额定功率范围内运行，但是偏航电机启动时产生了较大的冲击电流。加之每年高达上万次的偏航动作次数。因此，偏航电机承受高频次的启动冲击是使其加速损坏的主要原因之一。

三台电机功率数据情况分布如图5所示。

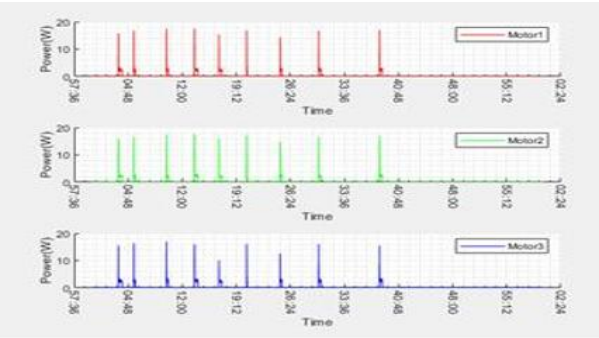


图5 偏航电机功率分布

从三台电机功率数据看，稳态情况下功率均分性较好，三台电机功率偏差较小，启动暂态时，瞬时功率达到额定功率的6倍左右，再次印证了启动功率冲击电机的事实。

偏航电机功率随温度变化情况，具体如图6所示。

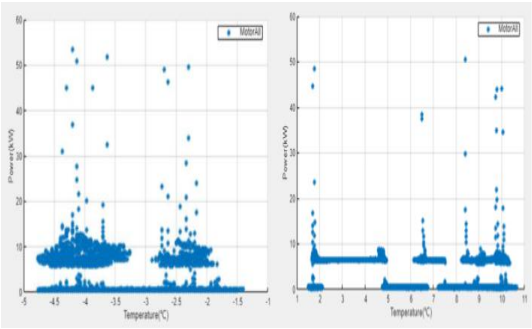


图6 偏航功率-温度散点图

“偏航功率-温度散点图”以散点形式展示了不同温度下电机瞬时功率的分布情况。由图5可知：温度在-4℃附近时，电机总功率主要集中在7-15kW之间，稳态功率约为8kW，启动时功率冲击最大可达54kW。三台电机额定总功率约为9kW，在低温环境下，稳态功率最高达15kW，过载高达167%，远高于理论水平，经数据分析，电机过载时长占比达到了37%以上。在0℃附近时，电机总功率主要集中在6-10kW之间，稳态功率约为7kW，启动时，功率最大冲击约为49kW。在5℃以上时，电机总功率主要集中在5-9kW之间，稳态功率约为6kW，启动时，功率最大冲击约为50kW。

由此可以看出，温度变化对电机运行功率影响很大，存在低温过载的情况，过载比例和过载时长占比都很高，因此，低温环境下电机过载运行也是导致冬季偏航故障激增的重要原因之一。

偏航功率随时长的变化情况如图7所示。

从图6可以看出：偏航功率在5-8kW之间，稳态功率约为6.5kW，属于正常运行范围，因此偏航时间对偏航功率的影响可以忽略不计。

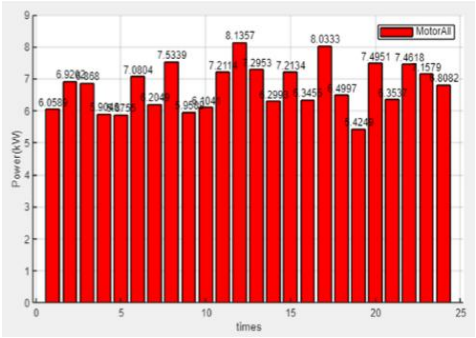


图7 偏航功率-时间变化图

4 原因分析

经过对某风电场2.0MW机组偏航软启故障的触发原因分析及处理探究，得出以下结论。

（1）偏航软启故障多发生在小风时期，或风向改变频繁时期，或大风速长时间运行后小风速处于不稳定运行时期。

（2）小风季节风速不稳定，加上天气寒冷，机组在单位时间内频繁偏航导致偏航次数超限，造成偏航软启故障频发。

（3）低温天气条件下，偏航电机存在过载现象，频繁偏航时启动冲击较大，易引发过载跳闸现象，导致主控报偏航软启故障。

5 解决措施

（1）风机需要定期维护，首先需要彻底清理塔基、机舱控制柜内安全链模块、继电器等的灰尘，其次需要紧固塔基、机舱控制柜内各接线端子及相关接线，并进行相应试验。

（2）偏航电机启动时间越短，状态电流越大。可考虑适当调整偏航软启211Q0的启动时间，以避免瞬间电流过大导致偏航软启动器故障。

（3）对塔基、机舱控制柜门上的冷却风扇进行技改，增加上部风扇，使柜内风向呈下进上出模式循环，并定期清理滤网和柜内灰尘。同时考虑加强机舱散热，在炎热季节，及时检查风扇温控装置是否正常，否则强制运行风扇。

（4）风电场在冬季时，对偏航阻尼力矩进行调整，在保证机舱不摆动的前提下，适当减小螺栓力矩，防止减速机过载，避免设备损坏。

（5）优化偏航控制逻辑，适应高山风场小风天气稳定运行需求，比如将偏航启动风速由2.5m/s提高到2.8m/s，降低偏航启动次数。

参考文献：

[1]陶辉.风场某2.0MW机组偏航软启故障的处理及探究，江苏：江苏华电灌云风力发电有限公司，2019.

作者简介：

唐文清（1991.09），男，江西赣州，大学本科学历，助理工程师，电气工程及其自动化电力电子与电力传动方向。E-mail：779300395@qq.com

优化运行方式 提高发电效益

王军

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：提高发电效益一直是电厂孜孜不倦追求的目标，本文结合万安水电厂实际，从提高机组运行效率、减少机组技术供水使用量、降低厂用电率等三个方面综合分析了优化运行的方法。

关键词：水电站；效益；机组运行效率；技术供水使用量；厂用电率

0 前言

万安水电厂地处江西省中南部的赣江中游，电站为河床式厂房，装设五台轴流转桨式水轮发电机组，总装机容量4×105MW+1×113MW，水轮机型号：ZZ440-LH-850（1F-4F）和ZZD345E-LH-850（5F），额定转速76.9r/min，额定水头23.0米（1F-4F）、22米（5F），最大水头32.3米，最小水头15米。水库正常蓄水位96米，设计多年平均发电量11.5亿千瓦时。万安水电厂库区降雨主要受季风气候影响，降水量的年际、季际变化也很大，在汛期的径流量占据了全年降雨量的60%～80%，这就导致了年内的分布不均，甚至出现连续丰水年或连续枯水年的情形，使水力资源合理利用问题尤为突出，且由于水库运用未达最终设计要求，防洪与发电矛盾特别突出。从近年月度来水量对比可以看出，近年万安水库进入枯水年份，发电量也屡创新低。

表1 万安水电厂历年月入库水量

万安水电厂历年月入库水量（百万立方米）				
年份	1月	2月	3月	4月
2019	863.4031	1966.7067	5725.1008	4052.1534
2020	483.2032	1184.2805	2206.1812	3635.7592
2021	388.5807	608.1338	715.2524	893.5157
历年均值	1146.1537	1342.1098	2524.7346	3436.9034

面对严峻的发电形势，如何提高发电效益，是一项值得研究的课题，本文以发电运行的角度，从提高机组运行效率、减少机组技术供水使用量、降低厂用电率等三个方面进行分析，提出优化运行方式的办法，提效、节水、省电，最终达到提高发电效益的目的。

1 提高机组运行效率

1.1 勤调水头

轴流转桨水轮发电机组效率受导叶、轮叶协联关系影响较大，调速器按照既定水头下导叶、轮叶的协联曲线控制导轮叶开启角度，以达到最佳效率。万安水电厂上下游水位变化快，汛期上游库容受汛限88m水位的影响急剧减小，导致上游日水位变化最多可达3米；下游水位则从单机基荷的67m到全厂满负荷的70.5m之间变化，而万安水电厂是江西电网的主调频厂，日负荷曲线变化大，这就导致机组运行水头不但变化快，并且数值相差非常大。调速器协联曲线在不同水头下数值不一，而目前调速器水头受数值波动影响不能自动运行，无法保持导轮叶协联的高效率。并且导轮叶失去协联，机组振动摆度也会增大，机组工况恶化，影响设备运行安全和使用寿命。

所以，这就必须及时手动调整调速器的水头。要求值班人员时常查看上下游水情数据，必要时询问经济运营部，精确掌握当值的动态水位情况，当调速器设置水头与实际水头相差超过0.5米时必须及时调整，保持导叶、轮叶的协联，维持轴流转桨机组在高效率区运行。并且不定期对调速器水头参数进行检查，对没有及时调整参数的值班人员进行考核。此外开展技术攻关解决调速器水头不能自动运行的问题。

1.2 勤分析

历年来，万安水库进入汛期，上游漂浮物增多，堵塞机组拦污栅。受水流的影响不同机组拦污栅堵塞情况各不相同，负荷接带能力也会出现较大差异。发电部坚持统计各水头下机组接带最大负荷的数据，并在机组间进行横向对比分析，为拦污栅清污提供数据分析依据，同时优化机组启停顺序，对于水头损失小、效率高的机组，人为调整增加其运行时间，先开后停，提高水能利用率。

1.3 巧应用

目前万安水电厂没有实用的机组流量测量手段，机组耗水率由经济运营部每日计算后在在日报中提供，发电部运行人员在调整机组开停和负荷时没有及时的耗水率数据进行指导，定负荷条件下机组开停数量和单机接带负荷大小是否达到最高效率的判断是个盲区。

为解决这个问题，发电部从水轮机制造厂提供的水轮机模型试验资料、发电机效率关系等设计资料着手，研究水轮机综合运转特性曲线和效率、流量的关系，转化绘制水轮机水头-出力-效率表和水轮机水头-出力-流量表，对定负荷条件下的负荷分配给出科学的指导，提高机组运行效率。

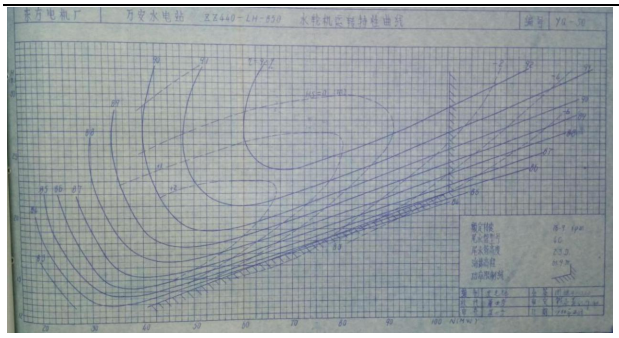


图1 万安水电厂ZZ440-LH-850水轮机运转特性曲线

在水轮机运转特性曲线上从横轴15米水头开始依次读取该水头水平线与纵轴相应负荷线交叉的效率值，依次填入下表，形成水轮机水头-出力-效率表。

表 2 国电万安水力发电厂 ZZ440-LH-850 水轮机水头-出力-效率表

水头\出力	20MW	25MW	30MW	35MW	40MW	45MW	50MW	55MW	60MW	65MW	70MW	75MW	80MW	85MW	90MW	95MW	100MW
15m		84	85.3	86.3	86.7	86.4	85.3	83.5									
16m	82.8	84.5	86	87.2	87.5	87.7	87.2	86.4	85								
17m	83.5	85	86.3	87.4	88.2	88.5	88.3	87.8	87	85.8	84						
18m	83.8	85.4	86.7	87.8	88.6	89.2	89.3	89	88.5	87.6	86.5	85					
19m	84.2	85.7	87	88.2	88.9	89.5	89.9	90	89.7	88.8	88.2	87.1	85.9				
20m	84.4	86	87.4	88.3	89.2	89.8	90.3	90.5	90.4	90.1	89.3	88.6	87.7	86.6	85.5		
21m	84.6	86.3	87.5	88.6	89.4	90.1	90.6	90.8	91	90.7	90.3	89.6	88.8	88.2	87.2	86	
22m	84.7	86.4	87.7	88.8	89.6	90.2	90.7	91.2	91.3	91.3	91	90.3	89.9	89.2	88.3	87.6	86.8
23m			87.9	88.9	89.7	90.4	91	91.3	91.6	91.7	91.5	91.3	90.8	90.2	89.4	88.7	87.9
24m			88.1	89.1	89.8	90.5	91.1	91.4	91.7	91.9	92	91.7	91.4	91	90.3	89.7	89
25m			88.1	89.2	89.9	90.6	91.2	91.5	91.8	92.1	92.1	92.1	91.8	91.6	91.1	90.5	89.9
26m			88	89.2	90	90.6	91.2	91.6	91.9	92.2	92.4	92.3	92.2	92.1	91.7	91.2	90.7
27m			87.9	89.2	90	90.6	91.2	91.6	92	92.3	92.5	92.6	92.6	92.4	92.1	91.7	91.3
28m				89.1	89.9	90.6	91.2	91.6	92	92.3	92.5	92.7	92.7	92.7	92.4	92	91.7
29m				89	89.8	90.6	91.1	91.6	91.9	92.3	92.6	92.7	92.8	92.9	92.8	92.5	92.2
30m				88.8	89.7	90.5	91.1	91.5	91.8	92.2	92.6	92.8	93	93.1	93	92.8	92.5

将上表中的数据依次代入下式

$Q=P/9.8H\eta$

得到水轮机水头-出力-流量表。并由此表数据可绘制出流量特性曲线。

表 3 国电万安水力发电厂 ZZ440-LH-850 水轮机水头-出力-流量表

水头\出力	20MW	25MW	30MW	35MW	40MW	45MW	50MW	55MW	60MW	65MW	70MW	75MW	80MW	85MW	90MW	95MW	100MW
15m		202.46	239.25	275.89	313.85	354.31	398.75	448.08									
16m	154.05	188.68	222.47	255.98	291.55	327.24	365.69	405.98	450.18								
17m	143.77	176.54	208.66	240.37	272.22	305.21	339.89	376.00	413.96	454.73	500.20						
18m	135.30	165.95	196.16	225.98	255.93	285.99	317.41	350.33	384.33	420.64	458.76	500.20					
19m	127.57	156.67	185.19	213.12	241.65	270.03	298.70	328.20	359.24	393.12	426.24	462.45	468.91				
20m	120.90	148.32	175.13	202.23	228.79	255.67	282.51	310.07	338.63	368.07	399.94	431.89	436.32	500.78	537.06		
21m	114.87	140.76	166.60	191.95	217.41	242.68	268.16	294.33	320.38	348.23	376.67	406.73	410.40	468.28	501.51	536.76	
22m	109.52	134.21	158.66	182.81	207.06	231.40	255.69	279.72	304.81	330.21	356.79	384.38	386.95	441.98	472.75	503.00	534.36
23m			151.42	174.67	197.84	220.85	243.77	267.26	290.60	314.48	339.41	364.45	366.46	418.08	446.63	475.17	504.73
24m			144.78	167.01	189.39	211.41	233.35	255.85	278.19	300.72	323.50	347.74	348.68	397.14	423.76	450.29	477.72
25m			138.99	160.15	181.61	202.73	223.77	245.34	266.77	288.06	310.22	332.38	333.47	378.75	403.23	428.46	454.02
26m			133.79	153.99	174.43	194.93	215.17	235.65	256.23	276.68	297.32	318.90	319.25	362.21	385.19	408.82	432.71
27m			128.99	148.29	167.97	187.71	207.20	226.92	246.48	266.15	286.00	306.10	306.10	347.66	369.31	391.53	413.94
28m				143.15	162.15	181.01	199.80	218.82	237.67	256.64	275.79	294.85	294.85	334.16	354.97	376.32	397.42
29m				138.37	156.73	174.77	193.12	211.27	229.73	247.79	265.99	284.68	284.37	321.94	341.25	361.37	381.63
30m				134.06	151.68	169.13	186.68	204.45	222.31	239.79	257.12	274.89	292.59	310.54	329.16	348.20	367.71

从水轮机水头-出力-效率表中可以直观地读出各水头下机组不同负荷时的效率，可以作为调整工作机组最优台数、机组间负荷的最优分配的判据，有利于人工判断操作。从水轮机水头-出力-效率表中，我们借助颜色的区分，很容易地看出哪些工况效率在90%的区域。

举一个例子，如果全厂负荷在150-200MW之间运行一小时，该如何安排机组（仅考虑ZZ440-LH-850水轮机）运行。从图中我们不难分析出在22米--26米水头之间时（非汛期机组大多处在这段水头）应该开三台机组并平均分配负荷是最佳方案，而不是开两台机平均分配负荷。

1.4 勤联系

作为江西电网主调频厂，万安水电厂的机组启停、运行机组的组合、机组间的负荷分配等都由调度决定，厂内经济运行的操作空间较小。机组启停由调度依据上报的水情数据、日负荷计划以及电网的负荷需求、调频需求、备用容量需求下达启停指令，其主要要求是确保系统的功率平衡及系统的整体经济运行；机组间负荷分配一般由AGC执行，但目前AGC的控制模式为单机模式，其分配策略是单机依次调节，依然是以保证系统功率平衡为主，对经济运行的要求不高。

故时有4台机组各带35MW负荷（避开0-35MW运行振动区）或某台机组满负荷运行而另外一台机组只带35MW运行的情况发生，从1.3章节我们可以确定：此状况机组的运行效率不高。另外，在非汛期，因系统调频顶峰需要，日负荷曲线时常不能按计划执行，造成上游水位下降，降低了运行水头，增大了耗水率。当天气预报的准确度没有达到完美，实际水情与预报水情有较大出入，而万安水库库容较小，之前依据预报做出的腾空库容方案以及负荷计划就会造成机组效率急剧下降或者出现弃水。

为调解这些矛盾，提高机组发电效率，值长应勤与调度联系，积极沟通，尽量提高机组发电效率。如当遇有4台机组各带35MW负荷的类似情况时，及时申请停两台机，让剩余两台机组各带70MW，以达最高效率；当遇顶峰要求，机组负荷偏离日负荷曲线，造成水位下降时，积极联系中调申请其他时段降低负荷，以使日计划电量不至于偏离太大，尽量维持较高水位高效率运行；当预报出现偏差，更加需要值长应用沟通技巧，向中调申请调整负荷计划，避免上游水位下降过多或造成弃水，最终提高水能利用率。

2 减少机组技术供水使用量

2.1 技术供水概述

万安水电厂技术供水系统采用单元供水设计，每台机组设置一个供水单元，经坝前取水口和蜗壳取水口从上游水库取水，可自流或经水泵加压供水（库水位＞88m时自流供水、库水位小于88m时加压供水），分为机组技术供水和主变冷却供水两类。其中机组技术供水对象包括：发电机导轴承冷却器、推力轴承冷却器、水轮机导轴承冷却器、发电机空气冷却器、主轴密封备用水源、顶盖泵充水水源等。万安水电厂主变为强油循环水冷散热方式，各台主变均由单元联结的技术供水系统提供冷却水水源。5台主变之间设有冷却水联络水管和阀门，正常运行时5台主变冷却水按单元分段运行，当机组检修停运技术供水而主变还需运行时，由联络水管从其它主变取得冷却水。

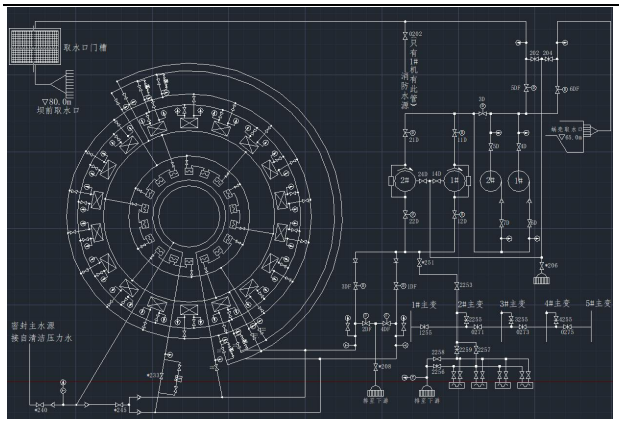


图2 万安水电厂技术供水简图

2.2 存在的问题：

万安水电厂技术供水系统仅在机组、主变检修时才相应停运，当机组停机备用和主变退网备用时水库水量无效流失，若按每台机一台空气冷却器铭牌参数40T/h流量计算，每年仅空气冷却器因停机未停水而造成的电量损失达：

W=H*T/K

=40*18*5*24*(365*0.523-20)/18=820296KWH

H——单机空冷器流量：空冷器铭牌流量40T/h，全厂空冷器个数18

T——5台发电机组全年停机备用小时数：5*24*(365*0.523-20)(统计万安水电厂五台机组近5年年均运行小时数为20927小时，运行小时占比约47.77%，平均机组检修时间约20天。)

K——5台发电机组近10年平均耗水率，约为18m3/KWH

2.3 减少机组技术供水使用量的可行性分析

2.3.1 其它水电厂经验

龚嘴水电厂和吉林台水电厂主变冷却器均未使用水冷，其技术供水系统均设置电动阀门，技术供水随机组的启停流程自动开启和停用，停机即停水。其中吉林台水电厂每台机技术供水系统都装设有电磁流量计，用以计量技术供水的用水量，方便分析技术供水运行状况。两厂停机即停技术供水的运行方式经过多年检验，可以借鉴。

2.3.2 停机即停技术供水的设备分析

万安水电厂技术供水系统采用了冗余设计，每台机两个技术供水取水口、两台技术供水泵、两台滤水器，互为备用；发变组虽为单元接线，机组技术供水系统之间没有管路联系，但是主变冷却水系统在各主变之间设计了联络阀门，运行方式比较灵活。

（1）发电机导轴承冷却器、推力轴承冷却器、水轮机导轴承冷却器、机组空气冷却器等设备仅在机组运行时需要使用冷却水，停机后完全可以停用。

（2）机组主轴密封采用技术供水水源和水厂清洁水源双路供水，并以清洁水源为主，正常情况下技术供水作为备用水源，中断后对其无影响。

（3）顶盖泵充水也采用技术供水水源和水厂清洁水源的双路供水，且其用水量很小，正常情况下将技术供水作为备用水源，中断后对其也无影响。

（4）主变冷却器用水因2-5号主变在停机后仍需运行而使停用技术供水变得相对复杂，但各主变冷却水系统之间的联络阀给停机即停机组技术供水提供了条件。

2.3.3 技术供水流量分析

为掌握机组技术供水实际流量，在2号机组1DF阀前以及2253阀前分别装设一只电磁流量计。通过测量分析不同工况以及不同阀门开度下机组和主变用水量的数据，得出当208阀门开度在35%时为适宜流量，能兼顾技术供水对水量的需求和节约用水的要求，此时流量大约为1150T/h；主变冷却水流量一般在80T/h，单台机组技术供水提供3台主变冷却水时，仍可基本满足3台主变冷却水的流量需求。

2.4 优化运行方式

2.4.1 停机后停用机组技术供水，保留主变冷却水供水（适用于全部机组），操作方法：停机后关闭机组用水的正反向供水阀门1（或3）DF。试验阶段使用监控远方单步操作，试运行成熟后将其加入开停机流程。

2.4.2 1号机组停机后全停机组及主变技术供水（1号发变组用1号主变高压侧开关并网，停机后1号主变也转备用（停电）状态）。操作方法：停机后关闭1号机组用水的正反向供水阀门1（或3)DF及1号主变正反供水阀1257、1259阀。试验阶段使用监控远方单步操作，试运行成熟后将其加入开停机流程。

2.5 技术供水运行方式优化取得的效益

2.5.1 5台机组停机停水节约的水量折算成增发电量约为：

W=H*T/K

=1150*5*24*(365*0.523-20)/18=1310195kwh

H——单机技术供水平均测流流量1150T/h

T——5台发电机组全年停机备用小时数：5*24*(365*0.523-20)

（统计万安水电厂五台机组近5年年均运行小时数为20927小时，运行小时占比约47.77%，平均机组检修时间约20天。）

K——5台发电机组近10年平均耗水率，约为18m3/kwh

2.5.2 单台主变停电停水节约的水量折算成增发电量约为：

W=H*T/K

=80*24*(365*0.523-20)/18=18228kwh

H——单台主变技术供水平均测流流量80T/h

T——单台主变全年停机备用小时数

24*(365*0.523-20)

K——5台发电机组近10年平均耗水率

3 降低厂用电率

3.1 厂内用电分析

万安水电厂厂内用电对象主要有： 机组用电、厂用公用电、备用励磁、厂内照明等。其中，照明用电经过节能改造后再度降低的空间不大；备用励磁正常情况下不会使用，仅在试验状态会产生电量，数值不大。占比较大且有下降空间的在机组用电和公用厂用电，这两类负荷中大多为机组辅设电机和公用辅设电机。图3为各类电机年度电量统计，其中压油泵、技术供水泵用电量突出，有较大下降空间。



图3 2020年度各类电机用电量

因顶盖排水泵、压油泵、主变潜油泵等机组辅设用电量受机组运行小时数、AGC调节频度影响较大，单独的用电量数值对比无意义，故作定性分析。

3.2 优化主变冷却水运行方式减少技术供水泵运行时间

每年主汛期（3个月左右），上游水位下降至88米以下，每台机组启动一台技术供水泵运行，以保证机组、主变冷却用水。技术供水泵启动后，其出水压力达0.3MPa，水量满足单机单变的冷却用水还有余量，可以优化运行方式充分利用。

虽然各机组之间的技术供水管路没有直接的联络方式，但是主变的技术供水管路可以进行联络运行，这就为机组间的联络运行提供了可能。经过试验，证明当1、2号主变技术供水联络后，只启动1号机组的技术供水泵，其高压水流会通过1号主变流至2号主变，再经2号主变的253、251阀门流向2号机组，使得2号机组技术供水即使不启动水泵也能满足用水设备的要求。经过不同运行方式的调整试验，在管路通畅、各主变水流分配均匀的理想情况下，5台主变技术供水联络运行，只启动两台水泵即可满足各设备用水，减少了三台水泵的运行。

汛期减少三台技术供水泵运行节约的电量约为：

W=3PT=75*3*24*90=486000kwh

P——单台技术供水泵功率75kw；

T——汛期三台技术供水泵运行小时数3*24*90；

3.3 减少压油泵运行时间

压油泵运行时长和机组运行调节导轮叶开度时长成正比，要降低压油泵运行时长一般必须减少调节次数，但万安电厂作为江西电网主调频厂必须承担这个责任，压油泵用电量较难下降。但是当调速系统存在较大内漏情况，其压力油损耗较大，压油泵启动就较为频繁。2021年上半年通过运行分析，发现5号机组停机状态压油泵大约5-6分钟启动一次，非常频繁，最后检查为轮叶控制油路密封破坏造成内漏引起。经及时恢复密封性能，将5号机组压油泵的运行时间降低至正常水平。故应加强运行分析，尽早发现并消除压力油系统的缺陷，压油泵耗电占比较高，减少压油泵运行时间对降低厂用电率有一定的作用。

3.4 及时清理主变冷却器，减少潜油泵运行时间

当主变冷却器水管结垢，其热交换能力大幅下降，进出油温差减小，主变油温持续保持较高温度运行，增加了潜油泵的启动数量。目前5号主变冷却器热交换能力较差，进出油温差只有1摄氏度左右，潜油泵长期保持两台泵运行，增加了能量消耗，建议及时对所有主变冷却器进行清理保养，提高热交换能力。

3.5 减少厂房渗水，降低渗漏排水泵运行时间

渗漏集水井收集厂房地面积水，空压机排污水，消防排水，坝伸缩缝渗漏水，机组蜗壳、尾水管进入孔漏水，机组导叶套筒漏水，射流泵清污排水等。做好设备及大坝维护，减少漏水。

3.6 降低检修排水泵运行时间

维护好进水工作门，确保每次落门密封可靠。维护好机组安全运行，及时清理上游漂浮物，减少剪断销剪断可能，减少临检次数。

4 结语

提高经营效益是每个企业的必然追求，优化运行方式是提高水电厂发电效益的一种方法。提质增效、节能降耗，需要不断总结经验，需要不断创新思路，需要聚少成多积沙成塔，本文一些做法在实际工作中取得了一定的成效，供大家参考。

作者简介：

王军（1976），男，江西婺源，大学本科，高级技师，水轮发电机组运行，E-mail：wasdcwj@163.com

智能数字化动态煤场管理系统的研究与应用

李辉[1]，刘逸峰[1]，夏季[2]

（1. 华能安源发电有限责任公司，江西 萍乡 337200；2. 武汉华中思能科技有限公司，湖北 武汉 430000）

摘要：煤场是火力发电企业智能化的短板，实现煤场的数字化和智能化是建设智慧电厂的首要任务。本文提出了智能数字化动态煤场管理整体架构及系统建设方案，可为我国大部分燃煤电厂的智能化煤场管理提供参考和借鉴。

关键词：煤场管理；智慧电厂；系统集成

0 引言

燃料是火力发电企业的生命线，火力发电企业70%以上的生产成本为燃料成本。如何保障燃煤火力发电煤炭高效清洁利用的同时降低发电成本，是当前火力发电企业践行新时代下“绿水青山就是金山银山”理念的关键课题。进入新时代，大数据、人工智能与能源领域的深度融合是国家能源行业发展的新战略，智慧电厂建设方兴未艾，其中，智能煤场是智慧电厂的重要基础组成部分，也是保障机组配煤掺烧和经济环保运行的关键环节。

在多煤种条件下如何有效实现配煤掺烧，使锅炉安全、高效、经济运行，挖掘燃料全流程各环节的价值，实现综合效益最大化，是燃煤电站锅炉面临且亟待解决的重要问题，也是对智能煤场建设提出的关键需求[1-3]。

1 煤场管理工程实践中主要存在的问题

目前我国大部分燃煤电站存在以下几个方面的共性问题：

（1）煤场数字化的硬件基础较弱。由于煤场空间大、调度频繁，以及燃煤的散货特性等，使得用数字化方式描述煤场会产生大量的数据。但目前煤场监视和检测的设备和传感器较为有限，导致数字化煤场建设十分困难。从各类报道来看，国内真正实现了煤场数字化的电厂寥寥无几。可见，煤场的硬件及其信息化和智能化是实现煤场数字化的关键。

（2）入炉煤的实时跟踪较困难。对内地电厂而言，由于入厂煤种复杂，且从接卸、堆放、掺配、上仓、制粉、入炉等环节时间流程较长，另外由于原煤仓的存在使得上仓到入炉存较大滞后，这些都使得对入炉煤种的在线跟踪十分困难。而在运行中，只有掌握了实时入炉煤种的煤质，才能对锅炉燃烧进行相应的优化调整。

（3）配煤掺烧下同时保障安全、环保和经济性较困难。科学高效的煤场管理是为了更好的进行配煤掺烧，这是燃煤电厂的共识。配煤掺烧的目的一是平衡入炉煤质，二是降低燃料成本。但是，由于掺烧情况下煤质波动较大，燃烧的稳定性，负荷的适应性，炉膛结渣防治，磨损防护等诸多安全问题，以及环保设备的适应性，排放达标等都需要综合考虑。这些都导致科学的确定配煤掺烧方案较为困难，需要借助智能化模型和平台进行辅助决策。

2 智能数字化动态煤场管理系统建设方案

针对以上存在的问题，本文在理论研究、模型构建和算法构建的基础上，开发了一套智能化、数字化煤场动态管理系统。通过该系统拟实现对电厂燃煤从进厂到燃烧的全流程辅助决策和管理；能对堆煤、存煤、配煤、取煤、燃烧、购煤等做出全自动的决策；能够精确计算不同煤种的综合经济性（度电成本）。

其具体架构包括智能硬件层、系统监视层、智慧应用层和智慧决策层，如下图1所示。

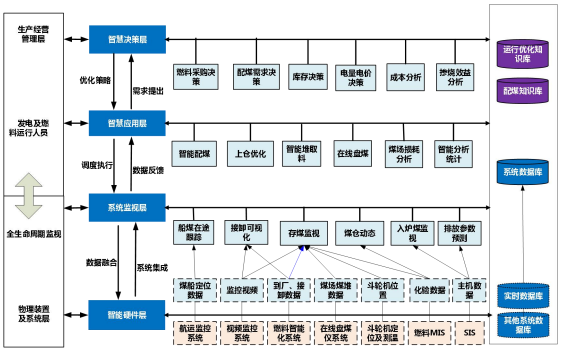


图1 智能数字化动态煤场管理总体架构

2.1 智能硬件层

数字化煤场的目标是实现对所有煤场基于三维点阵的煤堆堆形、煤种、煤量、煤质、煤价、位置、时间等信息的在线监视和数字化显示，为配煤掺烧提供实时准确的场存信息。智能硬件是建设数字化煤场的关键，由于传统煤场管理硬件基础较薄弱，应首先加装或改造煤场自动监视、测绘、定位等智能装置。

（1）实时自动在线盘煤。通过固定式盘煤系统实现实时在线自动盘煤功能。在斗轮机大臂两侧各安装一套固定激光扫描仪和红外测温探头，通过载重云台、激光扫描仪、行程编码器、俯仰编码器、回转编码器、射频模块完成煤场盘点，同步进行煤场测温，整个扫描过程无盲区，完全覆盖整个煤场

区域的扫描，一次部分或完整盘煤可在10分钟内完成。同时，通过三维建模全面直观的展示煤场图形，动态显示各个煤场中的燃煤信息，具体包括不同种类的入厂煤种、各煤种库存、煤区温度等[4]，也可以生成煤场库存报表。

（2）堆取料机智能化。通过堆取料机智能化改造，实现堆取料过程无人化。以圆形煤场为例，在煤场中每隔5°设置一组定位识别信号，与堆取料臂的识别定位设备组成一套智能堆取料的系统。所有转动部件实现智能控制开关、角度、速度、位置等，智能前端监视设备安装在堆取料机上关键部位，实现无死角监视。

（3）智能视频监控。通过加装高清摄像头以及智能视频分析系统，实现对航运、接卸、存放、堆取料等全过程的在线监控和视频分析，及时准确的识别现场人员和设备运动情况，辅助实现航运可视化、接卸可视化、煤场盘点、堆取料无人值守、事故报警、预警等功能。

（4）软硬件集成平台。以煤场信息实时掌控为目标，集成所有智能设备采集煤场实时数据，以数字化和图形化形式多维度展示煤场情况[5]。

2.2 系统监视层

对于燃煤电厂而言，燃煤的全生命周期应从煤源地开始，包括燃料在途、到厂、接卸、堆存、配煤、上仓、入炉、排放等环节。对每个环节的监视方案如下：

（1）在途监视。通过集成船讯网的数据接口，从煤船装港开始，对煤船的整个运输过程实现在线监视，并可进行来煤预报。

（2）到厂和接卸监视。通过集成已经建设的燃料智能化系统的数据，实现来煤到厂和接卸过程可视化，对火车和船舱的实时状态进行在线监视，对来厂煤量、在卸煤量、已卸煤量，卸煤效率等进行统计分析。

（3）堆存监视。基于前述的数字化煤场，实现对场存的量、价、质、处在线监视。

（4）上仓监视。通过接口输煤程控系统数据，开发数字化原煤仓，实现入仓和出仓煤种、煤量的在线可视化。

（5）入炉监视。开发入炉煤种实时分析模块，基于数字化煤场和数字化原煤仓，结合磨煤机内煤种的辨识，实现实时入炉煤种、煤质的在线监视。

（6）排放监视。开发排放监视模块，基于SIS数据关联入炉煤种对排放数据进行分析。

2.3 智慧应用层

智慧应用层包括了燃料生产过程中的堆料、配煤、上仓、取料、煤场管理等内容。

（1）智能配煤掺烧。根据配煤掺烧知识库、数字化煤场，利用多目标优化算法，根据安全、环保、经济目标约束，及不同掺配规则自动生成配煤掺烧方案以及上仓方案，配煤掺烧方案内容包括对应时段锅炉各原煤仓配煤质量、煤质指标、燃煤成本等信息。

（2）智能堆取料。根据来煤状况和场存情况，自动计算最佳的堆煤决策指导燃料运行人员选择煤场进行堆煤。同时，根据配煤和上仓方案自动计算具体的取料位置，并可将取料指令发往堆取料机无人值守系统。

（3）在线一键盘点。开发在线激光盘煤系统的通讯接口，开发应用模块，与盘煤仪系统进行对接，实现远程一键盘点，并自动上传盘煤数据。

（4）煤场损耗分析。开发与现场测温系统等硬件设备（包括红外测温系统和测温杆）的数据接口，自动获取煤堆内部的温度数据，并开发煤种损耗预测模型，对煤堆温度变化趋势、煤种损耗进行预测分析。

2.4 智慧决策层

智慧决策层包括了生产经营层面的燃料采购、燃料库存、电量电价、成本效益分析等内容。

（1）智能燃料采购决策。基于“市场指导掺配、入炉指导采购”的核心思路，结合市场煤的信息库和配煤掺烧后评价的结果，系统自动计算最佳的燃煤采购决策。

（2）配煤需求决策。根据市场煤信息，待采购煤种的热值、硫分、灰分范围，以及机组、制粉系统检修计划的信息，自动寻优计算出最优的锅炉煤种需求菜单。

（3）库存量决策。结合月度发电量预测情况，综合考虑消耗量和采购量，对燃料库存进行优化计算，在库存安全性和经济性之间寻找最佳点。

（4）电量电价决策。为电力市场营销提供报价前实时单位变动成本数据，并根据机组具体情况给出建议电量和电价方案；同时能根据报价方案，分析计算每次交易的边际利润情况。

（5）成本效益分析。结合SIS和煤价数据，自动记录掺烧的实时数据，统计分析不同掺配方案下的总体成本，并计算每日/每班组的实际利润和由配煤掺烧带来的经济效益。

（6）配煤掺烧后评价。通过系统自学习能力，自动对各运行工况条件下的掺烧效果进行分析，关联负荷、煤质、煤价得到燃煤成本，形成不同配煤方案下的对比关系，发现不同掺烧方案的优劣。

3 智能数字化煤场管理系统的应用与探究

3.1 经济效益分析

（1）通过智能数字化动态煤场管理系统，实现燃煤掺烧精细化管理，适当增加经济煤种掺烧量，以一年多掺烧20万吨经济（不低于3000 kcal/kg）煤种为例，平均每吨节省燃料成本30元，此一项即节省燃料成本600万元[6]；

（2）在同等掺烧情况下，科学制定上仓方案，减少厂内热值差，减小飞灰含碳量[6]，可有效降低供电煤耗，假设2台600MW机组全年发电小时数为4500小时，以0.3 g/kW·h计，则可节省标煤约5400吨，以标煤价850元/吨计算，则可节省燃料成本150万元；

（3）通过协同优化堆、配、取、烧，合理控制煤场库存，减少煤场自燃损耗，节省燃料热值[6]，同时减少资金占用，节省财务费用，可节省成本约50万元/年。

综上，项目预期一年至少可创造经济效益800万元以上。

3.2 创新点分析

（1）开发了全过程数据不落地的数字化煤场系统，通过集成在线固定式盘煤仪、斗轮机定位、煤场测温等硬件基础数据，并打通与燃料智能化、视频监控的数据接口，实现了煤场煤堆的煤种、煤质、位置、煤量、损耗等信息的自动记录、更新与统计分析。

（2）提出与建立了多维度多变量的燃料全生命周期监视系统，在燃料全生命周期流程上，将视频监控、大数据、实时跟踪、煤流可视化、优化决策、统计分析等多个维度的图像、数据、模型、知识库等进行集成开发与展示，使电厂管理人员能够实现全方位的燃料管控。

（3）建立了基于智慧模型的配煤掺烧决策系统，实现了多煤种条件下安全经济环保的智能掺配策略。通过优化配煤方案，提高了配煤方案的决策效率，在同等煤种条件下提高了锅炉燃烧效率。

4 结论

本文提出了一种广泛适用的智能数字化动态煤场管理系统的建设方案，该系统可实现对电厂燃煤从进厂到燃烧的全流程管理，提高煤场智能化水平；实现燃料全流程环节的决策指导，最终达到机组效益最大化的目的。其研究结果可为我国大部分燃煤电厂的数值化、智能化建设提供参考和借鉴。

参考文献：

[1]苏永健,郑广庆,马琳等.燃煤发电企业燃料全过程智能化管理建设[J].煤质技术,2018(03):39-43.

SU Yongjian, ZHENG Guangqing, MA Lin, et al. Intelligent management construction study on fuel coal power generation enterprises in fuel whole process [J]. Coal Quality Technology, 2018(03): 39-43.

[2]潘文忠,马俊,花永清.基于高效卓越管理的火电厂数字化煤场建设与应用[J].自动化应用,2019(01): 66-67.

PAN Wenzhong, MA Jun, HUA Yongqing. Construction and Application of Digital Coal Yard in Thermal Power Plant based on Efficient and Excellent Management [J]. Automation Applications, 2019(01): 66-67.

[3]祁根录. 数字化煤场建设的难点分析[J].中国电力企业管理, 2018(13): 83.

Qi Genlu. Analysis of difficulties in the construction of digital coal yard [J]. China Power Enterprise Management, 2018(13): 83.

[4]倪世安.智能燃料管理控制系统设计与应用[J].电力勘测设计.2018(10): 38-44.

NI Shian. Design and Application of The Intelligent Fuel Management Control System [J]. Electric Power Survey & Design, 2018(10): 38-44.

[5]刘怡君.电力行业“数字化煤场”初探[J].通讯世界.2013(10): 123-124.

Liu Yijun. Preliminary Exploration of "Digital Coal yard" in power industry [J]. Telecom World, 2013(10): 123-124.

[6]黄国新,汤利民,陈坚等.集束式蜂窝型煤场调度优化研究[J].能源与环境.2020. (04): 104-105.

Huang Guoxin, Tang Limin, Chen Jian, et al. Research on scheduling optimization of cluster honeycomb Coal yard [J]. Energy and Environment, 2020. (04): 104-105.

作者简介：

李辉（1991），男，江西萍乡，本科，工程师，火电厂热控技术方向，E-mail：1968697041@qq.com

万安水力发电厂2号机组推力瓦更换工艺及注意事项

何云，徐文波

（国家能源集团江西电力有限公司万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：介绍了 2 号机组推力瓦更换原因、工艺要求及作业过程中的注意事项。

关键词：水轮发电机；推力瓦；更换工艺；注意事项

1 工程概况

万安水电厂位于赣江中游惶恐滩头,地处江西省吉安市万安县城，是目前江西省最大的水力发电厂，共安装5台轴流转桨式水轮发电机组，1-4号机单机容量105MW，5号机单机容量113MW。

2号机组为立式水轮发电机，发电机型号为SF105-78/12800，机组于1991年10月投产发电，于2010年对2号机组推力进行改造，将巴氏合金扇形瓦更换为弹性金属塑料瓦（EMP推力瓦）。

2 弹性金属塑料瓦的结构与性能

2.1 弹性金属塑料瓦的结构

弹性金属塑料瓦由三层材料组成，即聚四氟乙烯、青铜丝和钢基体。塑氟料层厚度一般为2～3mm，青铜丝为5mm左右。氟塑料是无极性螺旋直铰链型的聚四氟乙烯聚合物结晶体，白色、无毒、无味、耐热250℃、不燃烧、不粘附、即使融化也不会与金属粘附，它与钢和巴氏合金的干摩擦系数分别为μ=0.04～0.08和μ=0.15～0.20，具有自润滑性，不受是否有润滑剂的影响，安装时不需要涂动物油亦能盘车，它酸物候性好，自然老化期长达数十年之久。氟塑料是绝缘体，虽对轴电流起到良好的绝缘作用，但是导热性能比钢和巴氏合金低99.4%，使瓦面热量不容易传散。氟塑料的性能弹性金属氟塑料瓦是七十年代发明的高分子复合材料在机械工程中的成功应用,其表面的氟塑料一般有两种:一种是纯聚四氟乙烯,呈白色；另一种是改性聚四氟乙烯,呈灰色。

2.2 弹性金属塑料瓦的性能

（1）优点：在运行时能迅速降低摩擦区内接触压力，特别是主轴发生倾斜时尤为明显；轴瓦可预先设计成有规定弹性的轴承；在液体摩擦状态下，对轴瓦弯曲补偿能力比巴氏合金瓦相对要大；能保证明显的接触液体动力效果，包括有较大油膜厚度；耐磨性比巴氏合金瓦大2.5～3倍；摩擦系数小，是巴氏合金瓦的1/2～1/3；有高度的减振特性，可降低转动部分传到固定部分的振动；耐高温。

（2）缺点：

1)寿命较短。按有关文献介绍,弹性金属塑料瓦的运行寿命为40～50年,目前的运行情况表明,瓦面磨损较快,很难达到预期寿命。

2)制造质量难以保证。弹性金属塑料瓦对其材质、瓦面形状(包括进口边型线)、粘贴工艺等都有严格要求,而目前国内生产研制塑料瓦的厂家比较多,质量、技术水平也相差很大。

3)严重烧瓦难以修复，且祸及镜板镜面。塑料瓦万一发生烧损事故，速度极快。原因在于塑料层的融化，青铜丝层外露，旋转摩擦产生高温，造成恶性循环。此外,塑料瓦烧损后,青铜丝层与镜面直接摩擦,易严重损坏镜面。

4)水头较高、导叶漏水量较大的水轮发电机组，采用塑料瓦后，会造成停机困难。

3 推力瓦更换原因

2号机组推力瓦于2010年更换为弹性金属塑料瓦，至今已使用11年，2020年7月2日，2号机运行带53MW负荷，发现有8块推力瓦瓦温均过高，最低瓦温53.2度，瓦温上升速率较快，散热性能降低。经抽瓦检查，发现四个方位的推力瓦上磨损圆环槽磨损严重，最内端的圆环槽已消失，且中间的圆环槽只剩2圈，瓦面局部有黑点，为确保设备的安全稳定运行，提高机组运行经济效益，决定更换2号机组18块推力瓦。

万安水电厂结合2021年2号机组A修对推力瓦进行更换，为确保产品及检修质量，产品由东方电机厂提供。

4 新推力瓦验收

4.1 新推力瓦清洗

结合历年检修经验及现场工作实际需要，新推力瓦到货后：

（1）新的推力瓦到货后，将推力瓦吊出包装箱并定置摆放，使用清洗剂对瓦上的防锈油、脂进行清洗干净，瓦上所有螺孔、测温孔应仔细清理干净，塑料瓦面极易碰伤、划伤，在搬运、清洗时应特别注意。

（2）使用干净的绸布加酒精擦拭推力瓦瓦面和弹性复合层四周侧面，若有单根弹簧丝外露扎手，可来回折断后用小平锉挫平，不得向内敲打。

（3）塑料瓦面一旦划伤或碰触伤痕，应用05#金相砂纸去高点及毛刺，但不可将该处砂出凹坑。

（4）塑料瓦的瓦面和瓦底在出厂前已精加工好，不允许再修刮。

4.2 新推力瓦检查、测量

（1）推力瓦清理干净后，检查推力瓦瓦底键槽、挂钩或定位孔，瓦间档块安装槽、孔等重要尺寸是否符合设计要求，若有碰伤、划伤或残留高点及毛刺，应及时去除，瓦面及瓦底不允许修刮。

（2）取相等的推力瓦键安装至新推力瓦键槽处，检查推力瓦键与键槽的配合度。

（3）检查推力瓦测温孔，将校验好的测温电阻进行预装，确保能顺利安装。

（4）检查有 4 块推力瓦上的圆环槽是否符合设计要求。

（5）测量内外径侧的瓦厚尺寸（不计进、出油边斜面的平台部分）及环境温度，并做好记录，见表 4-2、表 4-3。

设计图纸数据要求瓦基厚度 $51.8^{0}_{-0.1}$，弹性复合层厚度 $60.3^{0}_{-0.2}$，弹性复合层的四周表面允许保留约 1mm 的焊料，但应清理平整光滑，根部保留约 R2mm 的圆角。

表4-1 EMP推力瓦相关技术参数

推力瓦数量(块)	18	平均线速度(s/m)	12.284
额定功率（KVA）	123530	单位压力（MPa）	4.777
额定转速（r/min）	76.923	允许油温(℃)	10-50
飞速转速（r/min）	160.4	汽轮机油润滑	L-TSA46
推力瓦支撑方式	弹性油箱支撑	最低刹车转速	17%额定转速
推力瓦设计载荷（吨）	2500	钢基	70钢板 Q235-A
推力瓦偏心值（°）	36	弹性复合层	DP-6.0

表4-2 推力瓦瓦基厚度测量（单位：mm）

测点	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
A	52.76	52.75	52.79	52.78	52.80	52.84	52.77	52.80	52.78
B	52.80	52.75	52.81	52.80	52.83	52.78	52.76	52.83	52.78
C	52.78	52.76	52.77	52.79	52.81	52.78	52.69	52.80	52.71
D	52.75	52.78	52.76	52.65	52.71	52.83	52.72	52.75	52.77
测点	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
A	52.83	52.79	52.77	52.77	52.79	52.71	52.75	52.82	52.77
B	52.78	52.76	52.75	52.82	52.81	52.76	52.76	52.81	52.82
C	52.81	52.80	52.79	52.82	52.84	52.79	52.79	52.81	52.85
D	52.79	52.77	52.74	52.77	52.80	52.78	52.74	52.80	52.82

表4-3 推力瓦弹性复合层厚度测量（单位：mm）

测点	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
A	60.18	60.20	60.20	60.21	60.20	60.18	60.19	60.20	60.18
B	60.16	60.17	60.18	60.15	60.16	60.15	60.16	60.15	60.15
C	60.17	60.20	60.20	60.17	60.17	60.17	60.18	60.19	60.17
D	60.21	60.23	60.22	60.19	60.21	60.22	60.21	60.26	60.20
测点	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
A	60.21	60.16	60.19	60.16	60.22	60.20	60.20	60.19	60.20
B	60.18	60.11	60.15	60.16	60.18	60.16	60.17	60.17	60.16
C	60.21	60.16	60.21	60.23	60.18	60.19	60.19	60.18	60.19
D	60.23	60.19	60.21	60.19	60.21	60.23	60.24	60.23	60.23

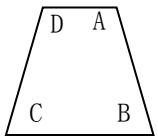


图4-1 推力瓦测点图

经对新推力瓦瓦基、弹性复合层厚度进行测量，数据符合设计要求。

5 推力瓦更换工艺及注意事项

5.1 拆前数据测量

（1）镜板工作面到推力瓦架距离

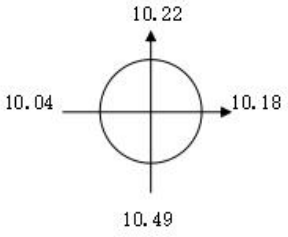
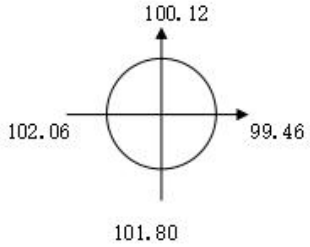


图5-1 镜板工作面到推力瓦架距离（基数：263mm）

（2）下导轴领到瓦架距离



在机组检修前期，分别测量四个方位的镜板工作面到推力瓦架距离、下导轴领到瓦架距离。

5.2 旧推力瓦拆除，托瓦清扫

（1）拆除旧推力瓦与托瓦连接螺栓和定位螺栓。

（2）旧推力瓦吊出后，按要求吊回物资部门存储，处理托瓦上结合面、键槽等部位存在的高点和毛刺，并用刀口尺检查。

（3）使用绸布和酒精清扫托瓦上结合面和键槽等部位。

5.3 新推力瓦安装

（1）拆除旧推力瓦与托瓦连接螺栓和定位螺

栓。

（2）旧推力瓦吊出后，按要求吊回物资部门存储，处理托瓦上结合面、键槽等部位存在的高点和毛刺，并用刀口尺检查。

（3）使用绸布和酒精清扫托瓦上结合面和键槽等部位。

（4）将新推力瓦按顺序回装，并将4块有圆环槽的推力瓦间隔对称布置，记录安装的瓦号及相应的油槽窗口号码，使用塞尺检查推力瓦和托瓦之间的间隙是否符合要求。

（5）安装后连接推力瓦与托瓦的连接螺栓和定位螺栓。

（6）待推力瓦与重力机架一同掉入机坑后，安装飞机架和风洞盖板，将弹性油保护罩打成刚性。

（7）安装下限位螺栓，要确保螺栓旋到位后留有间隙。

5.4 推力受力调整

（1）各部检查工作：

1）检查推力瓦限位螺母已松开。

2）检查托瓦下限位螺母已松开。

3）对称抱紧+X、-X、+Y、-Y四个方向下导瓦，使其单边向隙为0.03～0.05mm，并装二块互成90度百分表监视主轴的位移、其余方向下导瓦全部松开。

4）顶转子油泵试验、严密关闭1307阀。

5）制动器油管路、气管路接头已全部装复完毕。

6）主轴处于自由状态：抱紧四个方向下导瓦，确认主轴受扰动后不会影响轴领到瓦架的距离；并用手或用脚踢水导轴领处主轴应有明显的晃动；重点检查可能卡住主轴的地方：转轮室与浆叶处无异物卡阻、水导油槽盖与主轴四周间隙不小于1mm，随着调整主轴中心随时调整密封盖处的间隙、托瓦底部限位大螺母（设计间隙为4mm）、侧面限位螺母（设计间隙为双边间隙1.6mm）、发电机空气间隙处不得有异物、甩油盘处、水导瓦处瓦不能扛住，要把水导瓦脱离主轴。

7）在弹性油箱上保护罩上装好测杆，并装好A（内）、B（外）两只百分表，调整好百分表小针指2，大针指零。

（2）检查镜板刚性水平，合格后，顶转子，将弹性油箱保护罩打弹性。

（3）落转子，进行机组调受力调整，需符合技术要求：

1）弹性油箱中心压缩值最大值—最小值≤0.20mm；

2）镜板水平合成值≤0.03mm/m；

3）迷宫环最小间隙≥0.70mm；

4）相邻弹性油箱的压缩量不得超过0.15mm；

5）发电机空气间隙合格。

表5-1 弹性油箱压缩值（单位：mm）

瓦号	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#	9#
A	50.0	40.0	43.0	48.0	55.0	42.0	58.0	53.0	53.0
B	45.0	37.0	39.5	43.0	4735.0	38.0	49.0	45.5	46.0
P	33.3	30.0	31.3	31.3	30.0	28.7	28.0	28.0	29.7
瓦号	10#	11#	12#	13#	14#	15#	16#	17#	18#
A	46.0	45.0	40.0	57.5	38.0	50.5	43.5	60.0	44.0
B	41.0	38.0	35.5	48.0	35.0	43.0	39.0	52.5	41.0
P	29.3	21.7	25.0	25.8	28.0	25.5	28.5	35.0	34.0

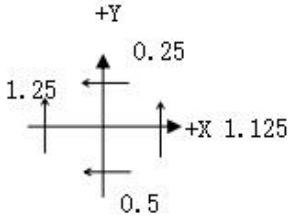
经计算：Pmax- Pmin=0.1333 mm

相邻两个弹性油箱压缩量差值最大值：0.0767 mm

镜板水平：

合成值：1.25格（靠13号瓦）

合成角度：107.53 度



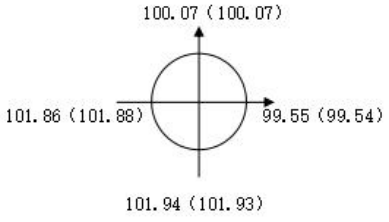
（4）初调受力或首次落下转子时，应注意不要使个别塑料瓦严重过载（一般不能超过10MPa的平均压强）。

6 推力轴承回装

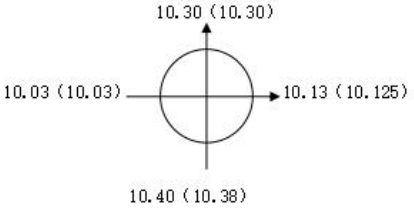
6.1 推力瓦受力调整合格，在下导轴领对称抱紧8块瓦，抱瓦时要在互成90度方向架设百分表监视主轴位移不得超过0.02mm。

6.2 水导+X、-X、+Y、-Y四个方向对称抱瓦，抱瓦时要在互成90度方向架设百分表监视主轴位移不得超过0.02mm。

6.3 测量受力调整合格后轴领到瓦架的距离，并仔细检查是否会影响到下导瓦楔子板的安装。



6.4 测量镜板工作面至推力瓦架的4个方向的距离，并和大修前记录数据相对照无异常再进行下一步。



6.5　轴瓦最终调整定位后，各间隙应符合设计要求，确保定位正确、且各瓦摆动灵活，不得有任何卡阻。

6.6　将各弹性油箱扛重螺栓的锁定螺母用锁片锁死，注意锁片锁定方向要保证抗重螺栓不会向下旋松。

6.7 在转子顶起情况下将推力瓦与托瓦外侧两个定位螺栓紧固。

6.8　顶起转子时，推力瓦可能被镜板吸起，此时必须注意轴瓦的轴向限位间隙（进、出油边，内、外径侧），一般为2-3mm左右。不能使键、托盘或抗重螺丝从键槽或沉孔内脱出，落下转子后轴瓦定位正确，无任何卡阻，确保轴瓦的灵活摆动不受影响。

6.9　调整弹性油箱保护罩间隙并将保护罩外圈锁定螺母锁紧。

6.10　调整托瓦侧面和下限位螺母间隙。

6.11　下导瓦、推力瓦测温线和测温计装复。

6.12　推力油槽内挡油板回装。

6.13　油槽检查无遗留物并清扫干净。

6.14　推力油冷器回装。

6.15　油位计装复。

6.16　推力油槽静止油位加至+12mm。

7　更换后的试验工作

7.1　新推力瓦更换后，机组开机空载试验2小时，瓦温正常。

7.2　机组冷态、热态起动各2次，推力瓦无异常。

7.3　机组惰性停机一次，推力瓦温无异常。

7.4　机组过速115%、140%推力瓦无异常。

7.5　机组分别甩额定负荷25%、50%、75%、100%推力瓦无异常。

7.6　机组带额定负荷72小时连续运行，瓦温正常。

8　结论

万安水力发电厂2号机于2021年11月更换为新的弹性金属塑料瓦后，机组开机后对新推力瓦进行了冷态启动、热态启动、空载2小时、过速、甩负荷、满负荷72小时试运行试验，推力瓦正常，推力油槽油温正常，瓦温正常。机组试运行满负荷72小时后推力瓦温最高为35.8℃　推力瓦温最低为33.4℃，因此2号机的推力瓦更换工作取得圆满成功。

参考文献：

[1]陈秀芝：水轮发电机机械检修，中国电力出版社

[2]DLT 622-2012 立式水轮发电机弹性金属塑料推力轴瓦技术条件

[3]DLT 817-2014 立式水轮发电机检修技术规程

作者简介：

何云（1992），男，江西上饶，本科，助力工程师，水轮发电机组检修，E-mail：790676074@qq.com

徐文波（1975）男，江西进贤人，本科，助力工程师，水轮发电机组检修，E-mail：27053132@qq.com

智慧电厂建设的5G应用实践

边泽楠，雷苏雨

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332500）

摘要：5G+行业应用是目前产业数字化、智能化转型的具体措施之一，也是国家大力鼓励和提倡的新基建的一个重要领域。本文主要是结合智慧电厂主题，对 5G 技术应用在智慧电厂建设过程中的实践做分享，提供 5G 在电厂在数字化转型和安全生产具体案例，为丰富智慧电厂建设实践提供有益的参考。

关键词：5G；智慧电厂；安全生产

1 引言

当前，以 5G 和人工智能为代表的先进信息技术与电力行业加速融合，数字化、网络化、智能化发展快速。国能神华九江电厂作为一家新建的燃煤发电厂，顺应电力行业数字化发展的技术趋势，把企业生产经营的数字化、信息化、智慧化作为公司安全运营、提质增效的重要手段，建立了智慧电厂顶层设计方案和建设规划，并实施了以 5G 应用为核心的智慧电厂建设项目，经过两年多的持续努力，国能神华九江电厂智慧电厂建设已经初具成效。

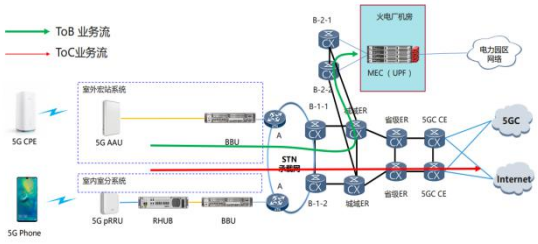
2 厂区5G+MEC基础设施简介

2.1 5G无线覆盖

利用 AAU、pRRU、CPE 等 5G 产品，实现厂区 5G 网络全覆盖，以满足厂区人员定位、智能巡检、高清视频、移动控制等应用需求。本次项目共部署室外宏站 5 个，室内分基站 4 个，天线类 175 个，全面覆盖发电厂区。

2.2 厂区MEC部署

移动边缘计算 MEC 是把移动网络和互联网两者技术有效融合在一起，在移动网络侧增加了计算、存储、数据处理等功能，满足低延迟、高带宽、数据安全等需要。在本智慧电厂的实际应用场景中，MEC 部署于厂区机房，利用无线接入网络就近提供厂区所需服务和云端计算功能。通过 5G+MEC 的部署，构建 5G/4G/NB 的电力无线虚拟专网，并与发电厂专网进行安全可靠互联，实现运营商网络与企业内网的深度融合。在厂区内，用户访问本地业务，MEC 服务器通过深度的包解析，可识别为本地业务，则将业务转发至本地网络，进入相应的内容和应用服务器访问，避免通过外部互联网访问本地内容的路由迂回，减少数据集中处理的网络消耗，能有效降低用户访问业务的时延，提升用户的业务体验，同时能有效缓解传输网和核心网的压力。



3 智慧电厂建设的5G应用实践

智慧电厂是以现代数字信息化技术、通信技术以及智能传感与执行、智能控制和管理决策等技术为基础，从而形成智能发电模式，以实现高效、安全、环保地运行，并与智能电网相互协调的发电厂。根据燃煤电厂的特点，结合本厂实际，智慧电厂的建设分层进行，各个层级紧密联系，包括：智能设备层、智能控制层、智能生产监管层和智能管理层，通过搭建数字化、标准化网络信息平台，以功能需求、安全运营为目标，完善监控数据采集，建立智能分析决策系统，实现智能自动调节运行。5G 先进的技术特性，天然匹配智慧电厂需求，目前已经将 5G 应用贯穿到电厂的建设基建期、调试期及运行优化期，实现电厂全生命周期的智慧运行管理。

3.1 5G智能巡检实现人机结合提升安全保障水平

安全是构建智慧电厂的重要部分，也是最能体现 5G、智能化、互联网应用场景结合地方。

3.1.1 安全监控痛点

安全是发电企业生产发展的基础和保障。国能神华九江电厂生产区域大，空间受限作业区域较多，涉及燃料、锅炉、汽机、酸碱区、储水罐、竖井等各种区域，安全风险突出，是公认的普遍存在的安全监控难点。这些痛点主要体现在如下几个方面：

（1）监测点多面广实时要求高。由于厂区内部设备众多，很多设备无法进行联网，如果采用人工巡检，劳动强度大，效率低，漏检出错频繁。

（2）现场检修人员的人身安全风险。空间受限区域内部结构复杂、设备线缆密集，环境恶劣，各种危险的情况如有毒气体、含氧量不足、触电风险等等。

（3）空间受限区域作业检修过程监管困难，外部监督人员如何实时了解内部工作情况并进行互动，并进行应急性救援准备和施救，是业界普遍头疼的地方。

3.1.2 5G智能巡检创新应用实践

本厂区完成 5G 移动网络覆盖后，实施了下列结合 5G 网络技术的智能化应用的，强化安全生产保障，降低安全风险。

（1）上线智能巡检机器人，代替部分区域的人进行现场巡检，帮助维护人员进行远端设备维护和风险预警。

（2）技术人员戴 AR 眼镜进入空间受限区域，提取现场数据通过 5G CPE 设备传输至后台远程，可实现远程专家与现场人员视觉共享，以及信息共享，保证交流的精确性和有效性。

（3）智能安全帽增加监测模块，实时报警，实现巡检人员生命体征监测，以保障巡检人员的安全。

（4）智能摄像自动识别设备，通过一体化平台获取数据，叠加在设备上，并给出运行状态数据，故障预防警报提醒；实时记录过程，提高巡检质量与效率。

（5）基于电厂设备数字化与三维建模，大幅提升员工对复杂部件的结构认知与操作规范，从而降低培训成本，提升整体员工素质与工作效率。

3.2 智能控制以精细化操作提升生产效率

电厂各个生产环节紧密协调、高效运行是智慧电厂的内在要求，充分利用 5G+MEC 的优势，采用多个具体应用实现智能控制和精细化操作达到高效运行的目标。

（1）实现全厂机组一键启停，实现无人值守大集控管理模式，有效减少运行人员手动操作的误差，提高机组安全性和运行操作的精细化水平。

（2）基于 5G 对高清视频和控制信号的大带宽、低时延数据传送能力，利用激光雷达扫描和建模以及人工智能目标识别引擎构建的机器视觉定位技术，对采集的实时高清视频数据做深度的挖掘和应用，实现亚米级的人员定位能力。未来还可以基于对视频数据的进一步挖掘实现高风险作业形态识别等深度应用。

（3）5G+DCS 分布式控制系统的实现汽水系统电控阀门的远程高精度控制，保障系统高效运行。

（4）5G 智能燃烧管理应用通过智能燃烧优化决策和高温腐蚀监测及预警系统，智能化测量手段，得到相对全面、及时、准确、系统的锅炉运行数据，借助 MEC 上运行的决策系统指导运行调整，使锅炉在最优工况下运行，提高了精细操作水平。

3.3 5G+AI视觉大数据安全管理

通过 5G+AI 的技术搭建 5G+AI 视觉大数据安全平台数据，并以不同颜色显示不同风险等级的施工作业点位、违章行为数量等，以各种图表显示按时间段统计的各类安全风险数据，综合展示安全风险态势，使管理人员直观了解高风险设备、作业点位、违章行为等，及时做出针对性的防控部署，减少安全隐患。

（1）安全可控，实时监控重大危险源重点参数以及视频智能分析，极大程度减少了安全风险

（2）集中管控，重大危险源数据汇聚统一平台，分级管理，避免数据信息碎片化

（3）智能管控，不规范行为的实时告警。对作业区域进行作业规范、作业流程和作业风险的大数据分析，实时监测、实时告警，确保作业流程的规范化和可控化。

3.4 5G掌上应用平台提升现场工作效率

推进智慧电厂建设，降低管理成本提供人员生产率，打破传统的管理模式，转变在岗员工工作方式是关键环节。国能神华九江电厂 5G 掌上平台围绕这个目标，建立了包括业务平台、数据平台、值班平台的三大智慧应用平台。

（1）三大平台从门户管理、数据集成、智慧办公方面各个破除行政、生产、经营管理之间的信息孤岛，努力实现信息共享，达到物在线，人在线，管理始终在线的效果。

（2）智能协同工作链上的数据，把涉及 10 多项业务的流程电子表单化，实现了行政、安全生产、财务管理、经营管理等审批流程的快速流转，提升工作效率。

（3）数据决策系统形成了 10 多张生产数据报表，实现了数据自动采集和填报。统计报表可以一键生成、导入，还具有自纠错、校准功能，简化值班人员操作，减轻工作量。

3.5 5G应用的网络及数据安全防护

智慧电厂的安全运行既包括生产全过程中遵守安全生产规章，不发生生产异常中断，避免人身、设备故障损失，也包括厂区的信息通信控制网络正常运行，抵御外界攻击入侵，信息数据不被外界窃取，避免信息泄露事故。在智慧电厂高度数字化、网络化和智能化的当下，保障厂区网络及数据安全就格外重要。我们采用了多种措施保障 5G+MEC 技术应用的安全。

（1）5G 固有的安全能力比 4G 有显著增强，包括：增强的加密算法，相比 4G 128 位加密算法，5G 能够支持 256 位加密算法；用户面完整性保护，5G 对比 4G 新增了用户面的完整性保护，保证了更好的空口安全；增强用户隐私保护，对比 4G 用户身份信息明文传输，5G 用户身份信息采用加密传

输，能够更加完善地保护用户隐私。

（2）基于零信任的 5G 安全接入。厂区的 5G 应用需要做二次认证，即 5G 终端设备向核心网认证，而设备上的应用向业务系统认证将二次认证进行统一，绑定设备与应用，并增强行为分析能力，保障 5G 应用安全。

（3）建设涵盖 5G+MEC 的全厂区网络信息控制系统的态势感知系统，实现包括 5G 移动终端在内的各类资产定位、管理，持续检测包括工控指令在内的各类信息流量，发现风险隐患，执行风险评估，完成合规有序、有效保护、高效运行的目标。

（4）基于网络切片技术实现电力业务的安全隔离，基于电力行业建设需求，利用 5G 网络切片技术，实现神华电厂按照专网与公网业务的安全隔离，定制化分配资源。5G 网络切片包括接入、传输、核心网、通信终端切片使能技术。通过端到端网络切片服务，为国能神华九江电厂业务打造定制化的“行业专网”服务。

（5）加强与运行商、第三方安全厂商的合作，畅通 5G 应用安全生态，提升网络信息数据安全防护能力。保障网络安全，首先是不断提高企业自身员工网络安全保障能力。另外，运营商提供的通信基础实施安全、安全厂商提供的 IT 安全以及设备产商的功能安全是整个智慧电厂安全生态不可或缺的内容。

4 结束语

近年来，国家经济增速放缓，使得电力需求的增长速度放慢，而电煤价格持续攀升，火电企业发电成本不断上升。燃料成本上涨、财务负担加重、发电量低于预期，发电企业在增产增收不增效的情况下，经营形势愈加严峻，扭亏增盈的压力巨大。除去多产化发展，区域性发电公司经营形势严峻，面临如何通过集约化管理和经营有效促进“开源节流”，改善经营状况，快速实现扭亏增盈的问题。即面临如何开展“经营提效”。进入数字化时代，火电企业作为支撑经济社会运转的技术密集型企业，必然应该顺应时代发展运用“互联网+”和“大数据”等技术推进自身信息化建设的加速转型和升级，以更好地实现安全可靠、高效环保、管理科学、规范智能的目标。

发电厂作为人员多、面积大、环境复杂、危险系数高的企业，安全生产始终是电厂运营最为重要的工作。根据数据显示，我国某大型国有发电企业集团 146 起重大事故的调查分析，总结发现物因造成的事故占 21%；人因为主的事故占 77%；其他类事故占 2%。目前影响发电安全生产的主要有误操作、巡检及检修执行过程操作不规范、外包工管理疏漏等因素。

智慧电厂是新的技术革命下的电力生产方式的技术转型，5G 技术扩展了移动通信的服务范围实现真正的万物智能互联。5G 技术和发电场景的结合，满足了电厂数字化、智能化转型的需求，利用 5G 多场景应用能力指导设备优化控制，促进了机组安全和经济、环保运行，实现了生产业务标准化、高效化管理；通过设备故障预警及诊断分析，促进了设备精细化管理；提高运营管控与经营分析能力，促进了企业提质增效；国能神华九江电厂将继续探索拓展 5G 技术在智慧电厂中的应用，为丰富智慧电厂建设实践提供更多有益的参考。

参考文献：

[1]中国自动化学会发电自动化专业委员会. 智能电厂技术发展纲要. 中国电力出版社出版时间，2016年12月

[2]3GPP TS33.501. Security architecture and procedures for 5G system(Release 16)

[3]代晓辉.第五代移动通信(5G)在电力行业的应用研究[J].信息周刊,2019(6):1

[4]杨雄毅. 智慧电厂建设的思考[J]. 通信电源技术,2018,35(05) : 263-264.

[5]瞿水华 , 郭钊杰 , 许乐飞 .5G 技术在智能电网中的实践和验证 [J]. 供用电 ,2021,5.

作者简介：

边泽楠（1983），男，内蒙古赤峰市，本科，工程师，现主要从事智慧电站、工业互联网安全研究方向，E-mail：bianzenan@163.com

叠盘式吹灰器在百万机组锅炉水平烟道上的应用

沈佳乐，陈绍光

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332500）

摘要：锅炉水平烟道积灰严重，影响其安全高效经济运行。通过在锅炉折焰角水平斜坡加装叠盘式吹灰器，有效解决锅炉水平烟道积灰严重问题，使用效果明显，效益显著。

关键词：锅炉水平烟道；积灰；叠盘式吹灰器；效益

国能神华九江发电有限责任公司#1、#2锅炉投产后折焰角水平斜坡在设计时未安装吹灰器，导致锅炉水平烟道积灰严重，会把高再管屏管埋在积灰里，而此处烟气温度非常高，造成高温灰腐蚀，在高过、高再下端管壁形成腐蚀麻坑，导致管壁减薄，必须定期检查、更换管道，增加了投资和运行维护成本。同时在极端情况下积灰厚度达到一定程度时，在烟气的扰动下积灰会象雪崩一样突然倒灌入炉膛，有可能导致锅炉灭火保护动作启动，造成突然停炉的事故发生，严重威胁着锅炉的主汽系统的安全运行。鉴于锅炉折焰角水平斜坡现状，在无法重新设计避免积灰、且目前国内外均未有较好的技术实现在线清除锅炉水平烟道的积灰的情况下，经过多次调研后，决定在锅炉折焰角水平斜坡安装叠盘式吹灰器来解决积灰严重、实现在线清灰的问题。

1 叠盘式吹灰器工作原理

叠盘式吹灰器由两层吹灰孔构成，下面一层吹灰孔有8个拉瓦尔射流吹灰扁平孔，向八个方向以压缩空气喷出吹灰射流，一定压力、流量的压缩空气卷起积灰，破坏原积灰的沉降平衡状态，迫使积灰变为紊流状态跟随烟气的流动而流走，从而达到清除积灰的目的。上面一层8个小吹灰射流孔为防堵吹灰孔，其流阻比下面吹灰孔大，在叠盘式吹灰器非工作状态的情况下，烟气中的沉降灰会通过吹灰孔进入吹灰器中，当沉降灰堵上下层吹灰孔时，吹灰器启动时压力增大，下面吹灰孔由于被堵流阻增大，上面吹灰孔流阻反而变小，此时压缩空气从上面吹灰孔卷吸吹灰器内的粉尘喷出，不断清扫吹灰器内的粉尘，直到吹通下面叠层吹灰孔，从而达到自清扫吹灰器内部积灰的目的。

1.1 叠盘式吹灰系统的构成

叠盘式吹灰系统由多台吹灰器以矩阵分布组成，以全自动可调定时工作方式运行，并通过专用电缆实现与DCS系统的联接。系统由气源系统、吹灰系统、控制系统和管道系统组成，气源系统提供吹灰器所需的一定压力的压缩空气；吹灰系统喷出吹灰射流、清除积灰，其中吹灰专用阀接受控制柜的指令，控制气源的进入，即控制吹灰系统的启停；控制系统用于控制调节吹灰器的运行。

1.2 叠盘式吹灰器的特点

（1）没有机械运动部分，也没有电机、膜片等易损部件，不需更换部件，结构简单可靠，启停操作方便，运行安全，几乎免维护，可有效降低检修、维护工作量和维护成本。

（2）叠层盘式声波吹灰器布置在折焰角内部水冷壁上方、高温再热器受热面下方，而不是布置在炉墙面上。安装时采用进气联箱左、右两侧墙分别进气，在炉墙管排鳍片合适位置开3～5个Φ40孔，安装进气联箱，不需要在炉墙换热器管排做让位弯，不在水平斜坡管与管间开孔。

（3）可以根据受热面的大小、积灰情况布置吹灰器组数以及每组吹灰器台数，吹灰过程不存在死角问题。

2 叠盘式吹灰器在百万机组的应用

2021年10月#1机组检修期间，国能神华九江发电有限责任公司对#1炉水平烟道叠盘式吹灰器进行了技术改造。#1锅炉水平斜坡前后墙方向距离5米，左右侧墙距离34米；水平斜坡水冷壁管道外径Φ31.8，所有管道节距Φ63.6，管间没有焊接鳍片。根据每台锅炉折焰角水平斜坡积灰情况和面积大小，以水平斜坡34米中心处为界，向左、右两侧各安装1组叠盘式吹灰器组，每组吹灰器组由6台吹灰器组成，共安装12台叠盘式吹灰器。由于吹灰效果良好，达到了彻底清除水平烟道积灰的目的，于是于2022年4月#2机组检修修期间，对#2炉水平烟道

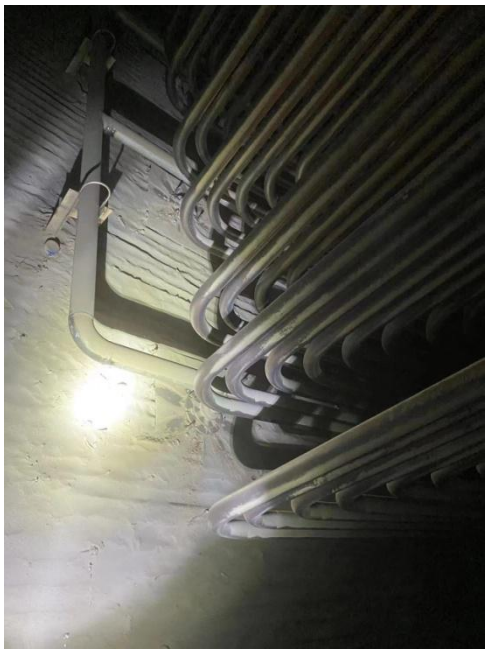
叠盘式吹灰器进行了技术改造。

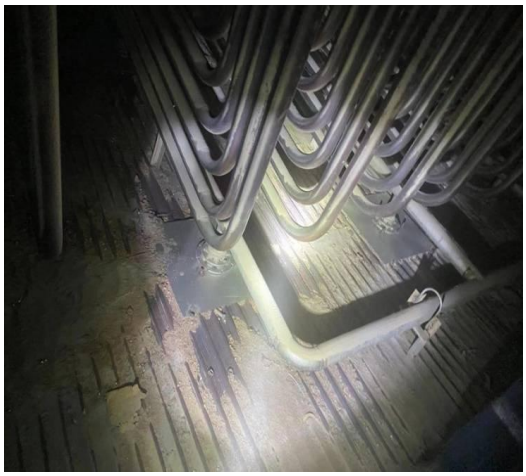
为了保证有足够的压缩空气使吹灰器可以有效地工作，在吹灰系统工作时，先启动第一组吹灰器的电磁阀进行吹灰，运行2分钟后关闭；间隔1分钟后，启动第二组吹灰器的电磁阀进行吹灰，运行2分钟后关闭；之后关闭气源总阀，一个吹灰周期结束。间隔4小时，再进行上述运行循环。

3 应用效果

3.1 吹灰效果

叠盘式吹灰器投运至今已近8个月，运行状况良好，清灰效果明显。在临停时对水平烟道进行了检查，此区域无明显积灰。吹灰效果如下图所示：





锅炉叠盘式吹灰器吹灰效果

3.2 经济效益

通过在锅炉折焰角水平斜坡上安装叠盘式吹灰器后,能够解决折焰角积灰问题,提高了锅炉换热效率,可有效降低排演温度

4 结语

通过#1锅炉折焰角水平斜坡上安装叠盘式吹灰器，有效解决了锅炉水平烟道积灰严重的问题，每年可节约能耗运行成本98.94余万元。此外，这种叠盘式吹灰器清灰不留死角，工艺简单，投资少，易于维护，安全、可靠，不吹损管束，效果好，有望得到进一步推广。

作者简介：

沈佳乐，男，内蒙古鄂尔多市，大学本科，助理工程师，E-mail：821359446@qq.com

220kV GIS设备改造期间保厂用电措施探讨

温邦春

（国能万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：本文主要介绍了某厂 220kV GIS 设备改造期间，根据施工的不同阶段机组运行方式的改变，而采取相应措施，确保厂房内的生产、辅助、照明等设备设施电源的可靠供应，希望对电力行业同类设备改造施工提供些许参考和借鉴。

关键词：GIS；220kV；水电厂；厂用电

1 前言

GIS 是气体绝缘全封闭组合电器的英文简称。GIS 由断路器、隔离开关、接地开关、互感器、避雷器、母线、连接件和出线终端等组成，这些设备或部件全部封闭在金属接地的外壳中，在其内部充有一定压力的 SF6 绝缘气体，故也称 SF6 全封闭组合电器。

该厂开关站采用 GIS 户内布置，主变布置在楼房一层，220kV GIS 设备布置于厂房的二楼，出线套管布置在楼顶。110kV 有 3 回出线；220kV 现有 5 回出线，分别至万虎Ⅰ线、万虎Ⅱ线、万澄线、万雩线、万黄线。其中 4 回为架空出线，万黄线采用电缆终端出线。其中，220kV GIS 设备是国产首批投入使用的 220kV GIS 设备，于 1987 年出厂安装，1990 年投运，已接近设计使用寿命，老化趋势明显，故障率明显上升，设备的可靠性得不到保证。

2021 年，该厂针对近几年设备相继发生了母线导体触指连接处直流电阻超标、运行温升高、绝缘损坏、气隔 SF6 气体渗漏等故障决定更换新设备，这将影响机组发电和厂用电的稳定。

水电厂厂用电是指水电厂的生产、辅助和公用设备及照明所使用的电源。如果厂用电系统供电可靠性差，一旦发生全厂交流系统失电，则可能导致发电机组与电网解列。如果厂房动力设备失电处理不及时或不正确，也有可能造成事故扩大，导致发电机组主、辅设备损坏或全厂停电。

2 工程概况

2.1 GIS 设备改造范围

该厂从 220kV GIS 进线套管（含）至出线套管（含）间的所有一次 GIS 设备及部分二次设备具体包括：220kV GIS 设备双母线Ⅰ段Ⅱ段、两组母线 PT、210 个线路 CT、34 组隔离刀闸、34 组接地刀闸、24 支进出线套管、10 台断路器、12 个汇控柜、12 个动力电源柜、12 个转接端子柜、2 个进线电源柜、1 个计量切换盘柜、1 个测量盘柜以及相关二次电缆等设备。

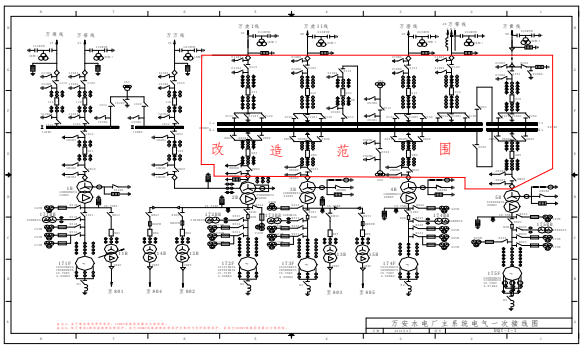


图1 GIS设备改造范围

2.2 GIS 设备改造阶段

综合考虑现场基建施工周期及难度，原则上保留原基建基础，尽量减少土建施工，改造后的设备布置安装满足原厂房设计要求，所有设备的安装及试验应满足安全性及发电的需求，尽量避免弃水现象，此次施工共分两期 4 个阶段

2.2.1 第一阶段

220kV GIS 设备双母全停，进行 220kV 电压互感器间隔与 204DL 间隔分离

2.2.2 第二阶段

恢复 220kV 部分双母线运行，对 205DL 间隔、213DL 间隔、214DL 间隔、215DL 间隔进行改造施工

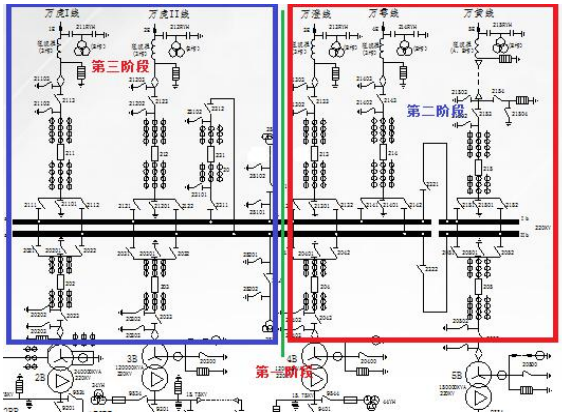


图2 GIS设备改造阶段

2.2.3 第三阶段

220kV 双母线停电改造，对 202DL 间隔、203DL 间隔、211DL 间隔、212DL 间隔进行改造施工，恢

复 5 号机、万芙线（214DL）、万雩线（215DL）运行。

2.2.3　第四阶段

恢复改造后的 GIS 设备运行。

3　厂用电运行方式

3.1　厂用电正常运行方式

该厂共设有 3 台 10kV 厂用变，电源取自机组与主变低压侧之间，厂用电正常运行方式为 2 号主变带 12B-10kV Ⅱ段母线通过 812DL 联络 10kV Ⅰ段母线，3 号主变带 13B-10kV Ⅲ段母线。该厂的 10kV 厂用电如图所示。

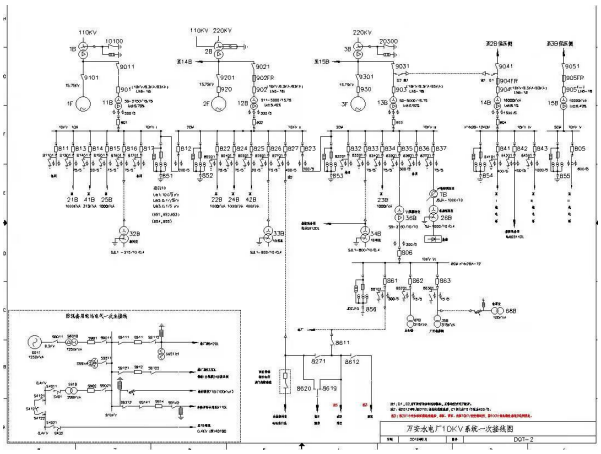


图3 厂用电

3.2　厂外厂用电源

第一条由并列于县网万安云洲变电站运行的小水电 10kV 母线--S912DL--经 833DL 送至 10kV Ⅲ段母线；

第二条由万安新村变电站（富坑口变电站）--西区竹林电杆处开关 D04DL、刀闸 FD041G、FD043G—经 827DL 送至 10kV Ⅱ段母线。

3.3　各阶段厂用电运行方式

3.3.1　第一阶段

（1）1F 机组开机并网至 110kV 系统 10kV Ⅰ段、Ⅱ段联络运行；

（2）厂外厂用电源开关 833DL 供 10kV Ⅲ段运行；

（3）400Ⅴ厂用电方式为Ⅲ带Ⅱ，其余Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ段分段运行。

3.3.2　第二阶段

（1）1F 机组开机并网至 110kV 系统带 10kV Ⅰ段；

（2）3B---13B 供电至 10kV Ⅲ段、Ⅱ段联络运行；

（3）400Ⅴ厂用电方式为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ段分段运行。

3.3.3　第三阶段

（1）1F 机组开机并网至 110kV 系统带 10kV Ⅰ、Ⅱ段联络运行；

（2）厂外厂用电源开关 833DL 供 10kV Ⅲ段运行；

（3）5 号机停机时，400Ⅴ厂用电方式为Ⅲ带Ⅱ，其余Ⅰ、Ⅳ、Ⅴ段分段运行。

（4）5 号机开机时，400Ⅴ厂用电方式分段运行。

3.3.4　第四阶段

（1）2B--12B 供电至 10kV Ⅱ段带Ⅰ段联络运行；

（2）3B--13B 供电至 10kV Ⅲ段；

（3）400Ⅴ厂用电方式为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ段分段运行。

4　保厂用电的措施及实施

4.1　管理上

安排技术扎实、能力过硬的值长和值班员进行不间断值班，确保事故发生第一时间进行处理，确保机组安全发电运行；

提前谋划，制定保厂用电方案，并对全体部门人员进行多次培训，确保每一名运行人员熟悉该方案和应急处置。

4.2　技术上

根据 220kV GIS 设备改造四个阶段中机组运行方式，制定厂用电运行相适应的方案，确保了厂用电的安全，保障厂房机组、辅助设备、公用设备和照明设备的正常运行；另外，对厂用电进行风险分析并制定相应的应急处置。

4.2.1　827DL 核相及检验带负荷能力

利用 827DL 送电至 10kV Ⅱ段母线--824DL(24B)--400Ⅴ Ⅳ段母线，试启动 1、3 号高压机进行核相，相序正确后启动 1、3 号检修排水泵做带负荷试验；

4.2.2　833DL 核相及检验带负荷能力

由于 S912DL 开关经过更换，需要核相，要求其倒送电至厂房 10kV Ⅲ段，送电至 400Ⅴ Ⅲ段，联络 400Ⅴ Ⅳ段，来启动 400Ⅴ Ⅳ段负载 1#高压机，通过电机旋转顺序来检验其相序与厂房设备一致；如相序一致，再启动 400Ⅴ Ⅳ段负载 1、3#检修排水泵，检验 833DL 带负荷能力。

4.2.3　3 号机黑启动及检验带厂用电能力

利用 3 号机组压油装置残余储能，进行“黑启动”，成功后带本厂大负荷（检修排水泵），检验 3 号机组“黑启动”带厂用电能力；

4.2.4　厂内柴油机试验

该厂进行事故应急演练，组织人员快速响应、紧急处理，启动柴油发电机进行供电至十六坝段 400VⅡ段--S912DL--经 833DL--厂用电 10kV Ⅲ段母线。

4.2.5　改造期间各风险分析及应急处置

针对 GIS 设备改造期间各阶段的厂用电运行特点分析存在的风险，编制相应的应急处置预案。

5 结论

该厂提前部署、严格执行制定方案，确保保厂用电措施的执行、落实，在 220kV GIS 设备大型技改项目中，圆满地完成了保电任务，确保了施工进度和厂内设备用电需求。

参考文献：

[1]任煜峰，水轮发电机组值班，中国电力出版社

[2]国网宁夏电力有限公司电力科学院,GIS设备典型故障案例与分析，中国电力出版社

作者简介：

温邦春（1996），男，江西省赣州市，本科，水轮发电机组，E-mail：1427080163@qq.com

石膏湿法脱硫系统建模与应用

王浩

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 九江 332504）

摘要：本文以某电厂一期 2*600MW 燃煤机组石灰石-石膏湿法脱硫系统为例，利用实际生成中获取各个参数的阶跃响应曲线的方法，采用阶跃响应曲线法求解吸收塔浆液 PH 值的传递函数。并在 matlab 软件中建立吸收塔浆液 PH 值的模型，进行仿真实验。并以所建模型为基础，进行吸收塔浆液 PH 值调节器的 PID 参数整定。

关键词：湿法脱硫；自动控制；PID 调节

吸收塔浆液PH值调整主要是靠调节浆液供给调节门来实现的。系统主要的扰动因素为烟气流量和烟气SO2浓度。因此吸收塔浆液PH值模型建立的关键是确定浆液流量，烟气流量，烟气SO2浓度对吸收塔PH值的传递函数。

1 浆液流量传递函数确定

利用电厂SIS系统某日浆液PH值曲线计算石灰石浆液对PH值的传递函数。当日工况参数如下：5:54浆液流量由12t/h升至26.28t/h，直至7:20浆液流量未作变化；期间烟气流量维持在125m3/s左右，SO2浓度维持在1100mg/m3，浆液密度1200kg/m3，基本未变。浆液PH值变化如图1-1所示。



图1-1 浆液PH值曲线

根据两点法选取的计算点如表1-1。设5:54为零时刻条件

表1-1 浆液流量阶跃相应曲线数值表

时间t	5	17	58	86
PH值	5.04	5.22	5.40	5.49
Y*（t）	0	0.18	0.36	0.45

t1/t2=0.29，得出n=1，验证曲线为一阶惯性环节。传递函数形式近似为

$$G(s)=\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}$$

由阶跃响应法计算公式得

$$k=\frac{y(\infty)-y(0)}{\Delta u}=\frac{0.45}{14.3}=0.03147$$

$$T=\frac{t_2-t_1}{In[1-y^*(t_1)]-In[1-y^*(t_2)]}$$

$$=\frac{58-17}{In[1-0.18]-In[1-0.36]}$$

$$=\frac{41}{0.8232}=49.81$$

$$\tau=\frac{t_2In[1-y^*(t_1)]-t_1In[1-y^*(t_2)]}{In[1-y^*(t_1)]-In[1-y^*(t_2)]}$$

$$=\frac{58*In[0.82]-17*In[0.64]}{In[0.82]-In[0.64]}$$

$$=-\frac{1.137}{0.1157}=10.8$$

得到传递函数为

$$G(s)=\frac{0.03147e^{-10.8s}}{49.81s+1}$$

使用simulink仿真软件对得到的传递函数模型进行仿真检验。

设置“step1”中参数“step time”=10，“final value”=14.28，产生浆液流量的阶跃信号。

设置“transfer fcn1”中参数“num”=[0.03147]，“den”=[49.81,1]，得到传递函数G(s)。

设置“transport delay”中参数“time delay”=10.8，产生延迟时间。

进行仿真，得到仿真图像如图1-2。

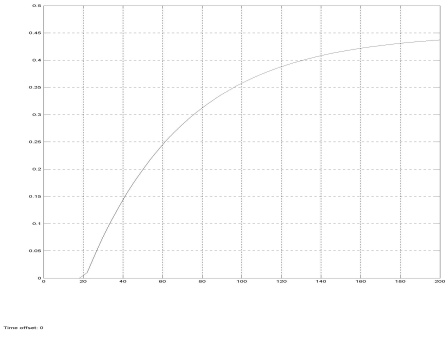


图1-2 浆液流量仿真曲线

仿真图像基本与PH值实际曲线近似。

2 烟气流量传递函数确定

利用电厂SIS系统中某日浆液PH值曲线计算烟气流量对PH值的传递函数。当日工况参数如下：14:02烟气流量开始由136m3/s升至158m3/s，，期间浆液流量维持在17t/h左右，SO2浓度维持在1390mg/m3，浆液密度1200 kg/m3，基本未变。浆液PH值变化如图2-1。

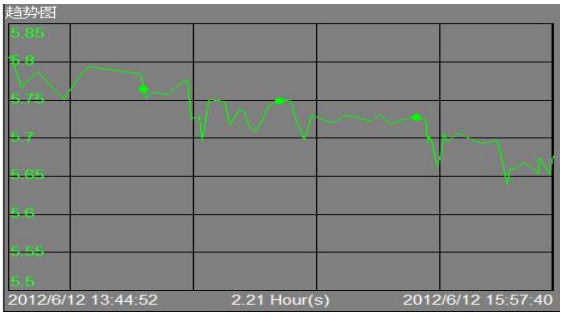


图2-1 浆液PH值变化曲线

从图像上看PH开始变化时间为14:06，延迟时间4分钟。，先截取纯延迟部分，利用两点法拟合计算传递函数。根据两点法选取的计算点如表2-1。设14:02分为零时刻条件.

表2-1 烟气流量阶跃相应曲线数值表

时间t	4	34	64	95
PH值	5.80	5.756	5.712	5.69
Y*（t）	0	0.044	0.088	0.11

t1/t2=0.53，得出n=3，验证曲线为三阶惯性环节。

传递函数形式近似为

$$G(s)=\frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts+1)^n}$$

由阶跃响应法计算公式得

$$k=\frac{y(\infty)-y(0)}{\Delta u}=\frac{0.11}{22}=0.005$$

$$\tau\approx 4$$

$$T\approx\frac{1}{2.16n}(t_1+t_2)=\frac{34+64}{2.16*3}=15.12$$

得到传递函数为

$$G(s)=\frac{0.005e^{-4s}}{(15.12s+1)^3}$$

使用simulink仿真软件对得到的传递函数模型进行仿真检验

设置“step1”中参数“step time”=10，“final value”=-21，产生烟气流量的阶跃信号。

设置“transfer fcn1”中参数“num”=[0.005]，“den”=[3456.65 685.83 45.36 1]，得到传递函数G(s)。

设置“transport delay”中参数“time delay”=4，产生延迟时间。进行仿真，得到仿真图像如图2-2。

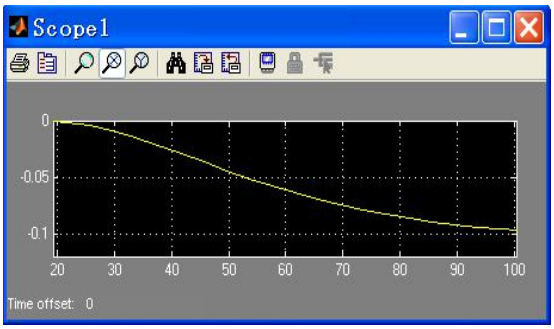


图2-2 烟气流量仿真曲线

3 烟气浓度传递函数确定

利用 SIS 系统浆液 PH 值曲线计算二氧化硫浓度对 PH 值的传递函数。当日工况参数如下：19:31 二氧化硫浓度开始由 1802 mg/m3 降至 1438mg/m3，期间浆液流量维持在 40t/h 左右，烟气流量维持在 210m3/s，浆液密度 1200 kg/m3，基本未变。浆液 PH 值变化如图 3-1。

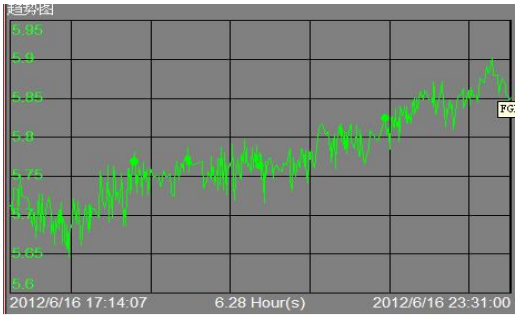


图3-1 浆液PH值变化曲线

从图像上看PH开始变化时间为19:35，延迟时间4分钟。先截取纯延迟部分，利用两点法拟合计算传递函数。根据两点法选取的计算点如表3-1。设14:02分为零时刻条件

表3-1 烟气浓度阶跃相应曲线数值表

时间t	4	87	161	201
PH值	5.748	5.793	5.838	5.861
Y*（t）	0	0.0452	0.0904	0.113

t1/t2=0.54，得出 n=3，验证曲线为三阶惯性环节。

传递函数形式近似为

$$G(s)=\frac{Ke^{-\tau s}}{(Ts+1)^n}$$

由前面介绍的公式计算得出

$$k=\frac{y(\infty)-y(0)}{\Delta u}=\frac{0.113}{364}=0.00031$$

$$\tau\approx 4$$

$$T\approx\frac{1}{2.16n}(t_1+t_2)=\frac{87+161}{2.16*3}=38.27$$

得到传递函数为

$$G(s)=\frac{0.00031e^{-4s}}{(38.27s+1)^3}$$

使用 simulink 仿真软件对得到的传递函数模型进行仿真检验。

设置“step1”中参数“step time”=1，“final value”=364，产生烟气二氧化硫浓度的阶跃信号。

设置“transfer fcn1”中参数“num”=[0.00031]，“den”=[5604.97 4393.78 114.811]，得到传递函数G(s)。

设置“transport delay”中参数“time delay”=4，产生延迟时间。

进行仿真，得到仿真图像如图3-2。

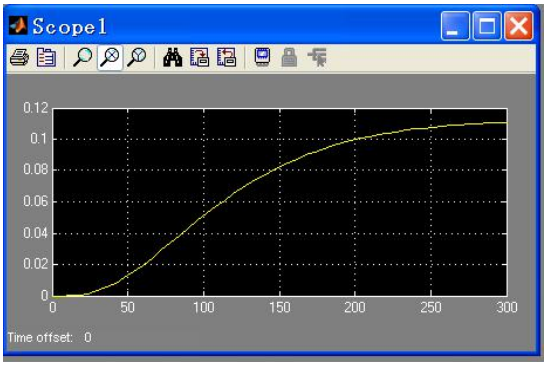


图3-2 烟气浓度仿真曲线

仿真图像基本与 PH 值实际曲线近似。

4 浆液PH值模型建立与仿真

根据所得到的传递函数，便可得出建立的浆液PH值模型结构图。如图4-1

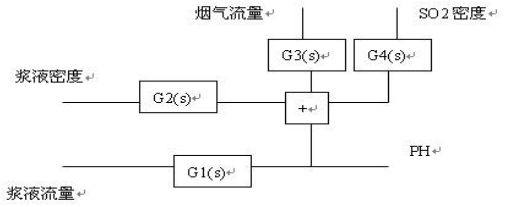


图4-1 浆液PH值模型结构图

单一参数变化时的拟合效果，由前面的仿真例子可见，较为符合实际情况。而整合在一起组成的模型拟合效果，可以用实际运行数据来检验。通过对一个较长时间段内各个参数的值取样，进行计算机仿真检验。

选取电厂 SIS 系统中代表性运行数据。将某日 4:30 至 16:00 时间段内，现场各参数曲线采样输入 matlab，并赋值给参数变量 U 和时间变量 T

利用 simulink 仿真软件，对该段时间内的浆液 PH 值变化曲线进行仿真。仿真组态如图 4-2。

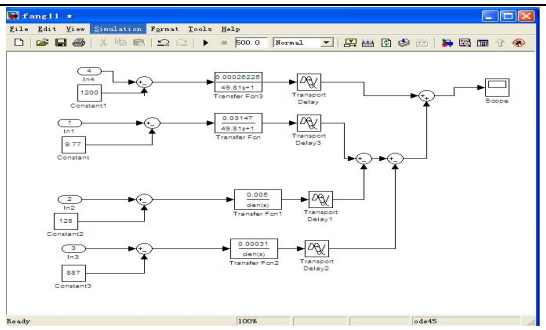


图4-2 浆液PH值仿真组态图

仿真结果与实际浆液 PH 值，分别如图 4-3, 4-4。

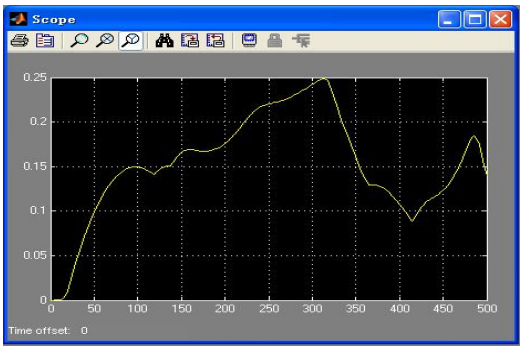


图4-3 浆液PH值仿真曲线

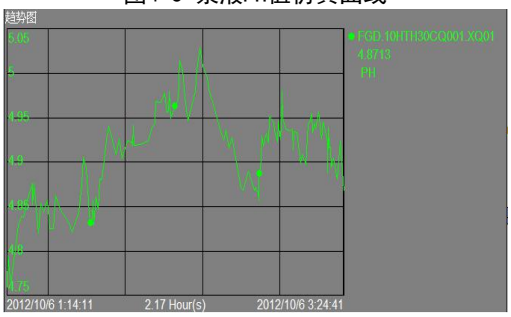


图4-4 浆液PH值实际曲线

从图形上看，仿真结果与实际曲线基本一致。

5 浆液PH值自动控制PID参数整定

在已取得的传递函数和建立浆液 PH 值控制系统模型的基础之上，由 matlab 实时仿真的功能所得到的调节曲线，利用衰减曲线法和经验试凑法一步步的获取所建立模型的最佳 PID 参数。

依据衰减曲线法，首先需在纯比例作用下得到衰减比为 4:1 的曲线。在 simulink 仿真软件中搭建组态图形如图 5-1。

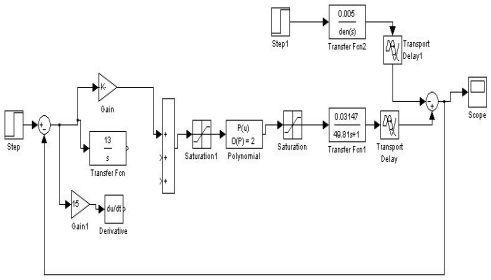


图5-1 k调节浆液PH值控制系统仿真组态图

设置step阶跃响应开始时间为10，响应幅值为0.5。step1为扰动，设置为0，即不加扰动。首先设置一个较大的比例作用，K=140，得到曲线如图5-2。

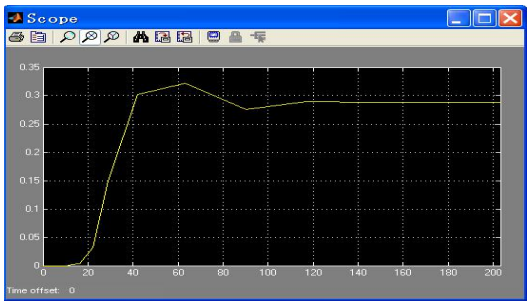


图5-2 K=140浆液PH值控制系统仿真曲线

衰减比不满足要求，逐渐加大K值，直至出现衰减比为4:1的曲线，此时的K值为157，即&S=1/157曲线如图5-3。

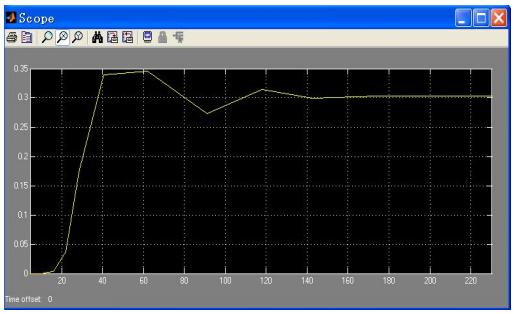


图 5-3 K=157 浆液 PH 值控制系统仿真曲线

从曲线上可以得出TS=62。由前面介绍的衰减曲线法整定PID参数计算公式，可以计算得到PID参数为&=196.25，TI=18.6，TD=6.2。用整定好的参数重新仿真，查看系统阶跃响应输入下的PID调节曲线，组态图与调节曲线如图5-4,5-5。

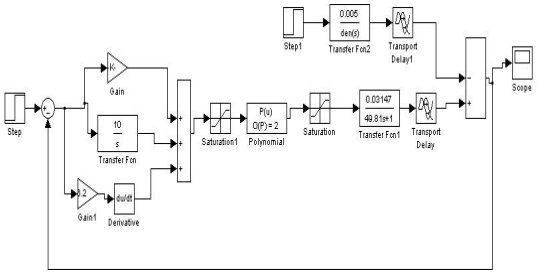


图5-4 PID调节浆液PH值控制系统仿真组态图

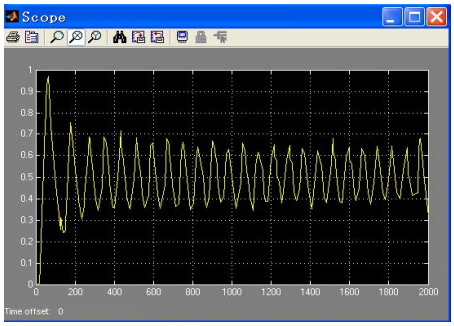


图5-5 PID调节浆液PH值控制系统仿真曲线

从调节曲线上看，调节效果并不好，需要利用检验法，对PID参数进行修正。首先调节曲线收敛不明显，波动过大，应减小积分速度。经反复修正后，直至TI减小至10时，曲线收敛较为满意。调节曲线如图5-6。

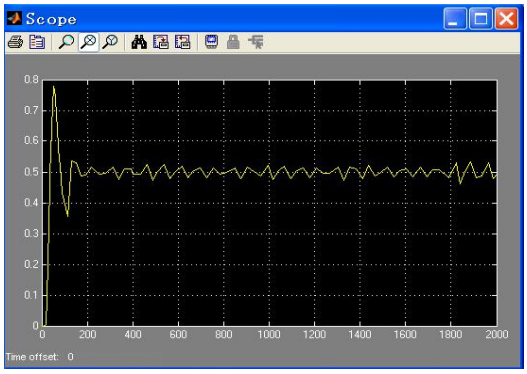


图5-6 TI=10的PID调节仿真曲线

从图形上看出，调节曲线衰减比过大，应增大比例增益 K，经反复修正后，直至 K=200 时，调节曲线衰减比约为 4:1。调节曲线如图 5-7。

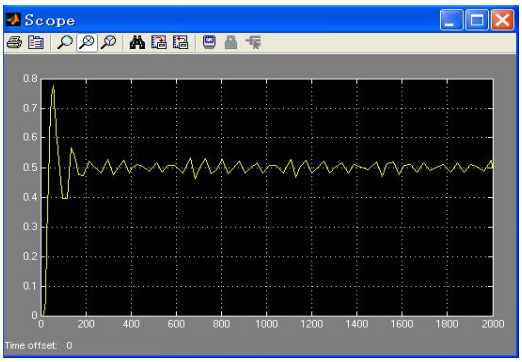


图5-7 K=200的PID调节仿真曲线

6 结束语

通过建立系统的近似模型可将实际问题转化为数学问题，并利用matlab等仿真软件对系统进行仿真实验。既可以利用数学方法来解决实际生产中遇到的问题，又解决了实际系统难以进行实验的问题。

参考文献：

[1]胡寿松、自动控制原理、科学出版社。

[2]孙祥、徐流美、吴清、MATLAB7.0基础教程、清华大学出版社。

作者简介：

王浩（1984），男，河北石家庄，大学本科学历，工程师，从事火电厂热控控制优化、智能电站建设工作，E—mail：99qingtian@163.com

电力建设工程高处坠落事故分析及预防措施研究

马玉磊[1]，李辉[1]，李昕光[1]，周大勇[2]

（1.华能安源电厂，江西 萍乡 337000；2.华能江西分公司，江西 南昌 330000）

摘要：自从“3060 碳达峰碳中和”目标提出以来，在电力行业掀起了深化结构调整、推进绿色发展的新高潮，各个发电企业都在抢建新能源项目（如；风电、光伏），然而在电力建设工程中发生的人员伤亡事故时有发生，其中高处坠落事故发生的概率居各类事故之首。通过对电力建设工程中三起高处坠落事故进行分析，总结出本类事故发生所暴露的共性问题，提出相关的防范措施，减少高处坠落事故的发生的概率，保证人员的生命财产安全，维护企业的声誉及利益。

关键词：电力建设；高处坠落；事故分析；预防措施

1 研究背景

2021年新修订的《安全生产法》第三条明确规定：安全生产工作应当以人为本，坚持人民至上、生命至上，把保护人民生命安全摆在首位，树牢安全发展理念，坚持安全第一、预防为主、综合治理的方针，从源头上防范化解重大安全风险。

根据不完全统计2005-2021年电力建设的231起事故，按照事故类型和事故性质分析，高处坠落事故共65起，占事故总数的28.13%，事故发生的概率最高。通过对住房和城乡建设部2017年-2021年5年全国房屋市政工程生产安全事故的分析，高处坠落事故平均每年发生340起，占事故总数的51.88%，且事故数量呈逐年上升趋势。从国家能源局、住房和城乡建设部公布的事故情况看，高处坠落事故发生的概率位居各类事故之首，且随着国民经济活动的增长、行业监管力度的加大，高处坠落事故呈现增加趋势，应引起高度重视，采取可靠的防范事故措施，规范从业人员的安全作业行为，减少高坠事故的发生。为此，国家能源局在认真分析研究2005—2020年电力建设工程施工安全事故的直接原因、提炼反事故实践经验的基础上，结合现行标准、规范，编制了《防止电力建设工程施工安全事故三十项重点要求》（参照行业习惯称谓，以下简称《施工反措》）。

本文通过对典型事故案例的分析研究，在剖析、总结事故发生的原因及暴露问题的基础上进一步提出防范事故发生的措施，以期对后续电力建设过程中减少高处坠落事故的发生发挥一定的作用。

2 典型案例

案例一：北方A新能源公司在测风塔拆除作业时发生一起高处坠落人身伤亡事故，造成1人死亡。2022年7月20日，A新能源公司将所辖区域内的12座测风塔改造工作外包给B公司，7月23日B公司与高某签订了《安装工人劳动合同》，由高某从事拆卸及安装工作，高某又以口头约定方式按日计薪聘请王某配合拆装地面工作。2022年7月29日，高某在拆卸到仅剩余底部15节塔架（高约45米）和三层缆风绳（每15米设置一层缆风绳，每层3根缆风绳）时，高某站立在第12节塔架处（高约36米），通知地面上的王某剪断最高处的第三层缆风绳。王某剪断位于塔架东南侧的第三层缆风绳后，该缆风绳拉力释放后快速弹开，测风塔上部失去平衡，上部5节塔架（长15米）在第二层缆风绳与塔架连接处（高约30米）向西北侧弯折，站立在高约36米处的高某坠落至距离塔架底部水平方向约4米的西北侧地面，最终经抢救无效死亡。

案例二：新疆C能源公司2×660MW机组建设工程施工现场发生烟囱高处坠落事故，造成1人死亡，直接经济损失230万元。2021年5月13日20时30分，施工负责人李某在烟囱施工口召开班前会进行技术交底。会后施工人员来某（带班）、李某1（安装工）、李某2（安装工）、贺某（焊工）四人佩戴安全带、防坠绳乘坐施工升降作业平台于21时30分进入烟囱第5层钢平台作业面（185米高）进行烟囱钢内筒安装施工。来某在平台南面东侧部位打磨钢梁焊口，贺某在南部焊接东侧牛腿，李某1、李某2在平台北侧打磨焊口。03时10分左右，来某搬铝合金梯子至南侧西部位将梯子靠在烟囱内壁，在未系挂安全带情况下爬上梯子打磨焊口，凌晨03点40分左右，来某失去重心自施工平台与烟囱筒壁之间的空隙坠落至地面，坠落高度185米。事故发生后，立即将来某送往医院进行抢救，最终经抢救无效死亡。

案例三：中国水利水电D公司承建安徽E公司抽水蓄能电站地下厂房副厂房非施工区域，发生一起人员高处坠落事件，造成1人死亡。2021年8月16日上午7时许，D公司胡某（带班人员）带领28人在主变洞#3主变段以及地下厂房副厂房EL184.7m、EL193.4m高程进行砌墙、抹灰作业。上午9时左右，普工程某离开EL184.7m层工作地点去上卫生间，未去设置在地下厂房副厂房通风兼安全洞的移动厕所，就近到非施工区域方便，私自将EL188.9m进风

井侧墙预留风管口挡板移开后进入进风井临时钢板盖上，不慎意外坠落。现场人员发现EL148.5m层异响和程某长时间未归后，对EL148.5m层进风井底部外墙进行凿洞，12时左右发现程某，13时30分将程某救出，14时50分将程某送至医院抢救，最终经抢救无效死亡。

3 事故致因

通过对以上典型案例的介绍，本文主要从人的不安全行为、物的不安全状态、管理上的缺陷、环境因素四个方面总结电力建设工程中造成高处坠落事故的成因。

3.1人的不安全行为

作业人员安全意识淡薄，作业过程中未佩戴安全防护用品并出现了违规操作、违反劳动纪律，致使意外发生，这是事故发生的最常见、直接原因；作业人员长时间工作导致身体负荷增大，感知延迟、辨识错误也是事故发生的主要原因之一；监理单位对工程现场监管不到位、管理人员指挥失误或违章指挥也是因为人的不安全行为导致事故发生的原因。

3.2物的不安全状态

在电力建设工程中，物的不安全状态极容易出现，物的不安全状态往往又与人的不安全行为紧密联系在一起，如：高处作业平台未设置防护栏杆或明显的警示标志，因为年久失修导致承重平台承载能力下降等。物的不安全状态既反映了物体本身特性，也反映了人的管理水平。当人的不安全行为与物的不安全状态相遇，将在此时间、空间发生事故，两者都是事故发生的主要原因。

3.3管理上的缺陷

建设单位未对现场安全生产工作进行统一协调、管理，“以包代管”问题突出，现场安全管理严重失控。安全管理责任不落实，安全管理基础不牢，安全风险管控不到位。对承包单位审查不严，未及时发现施工单位违规违章的情况。现场管控不到位，对施工单位在未完成开工许可即擅自入场工作的情况不掌握。日常工作不严不实，对外包单位人员安全教育培训流于形式，现场反违章工作不到位。管理欠缺是事故发生的深层次原因。

3.4环境因素

在电力建设工程中，影响高处坠落的环境因素主要是突然的大风天气以及冰雪、霜冻、雨雾天气未采取有效的防滑、防寒、防冻等安全防护措施；作业环境不良也是发生高处坠落的原因之一，如设备、设施的设计或作业位置不符合人机功效学要求引起作业人员疲劳、劳损或事故的作业姿态。环境因素是事故发生的间接原因。

4 防范措施

4.1 严格遵守《施工反措》

国家能源局下发的《施工反措》第二部分对防止高处坠落事故有以下亮点和针对性的有效措施，将对电力建设施工生产安全管理防控带来较大的促进作用：1.结合电力建设高处坠落事故的特点、事故频发情况，本项重点要求归纳了一般规定，防止脚手架高处坠落，防止模板施工高处坠落，防止钢筋及混凝土施工高处坠落，防止安装作业高处坠落，防止高处作业吊篮坠落等六个部分，32条具体措施。2.造成高处坠落的事故原因主要包括“作业人员缺乏高处作业的安全知识”、“作业人员患有高血压、心脏病、 癫痛病、精神病等”、“作业人员产生胆怯心理手忙脚乱”、“高空作业未系好安全带或安全带低挂高用”、“防高处坠落的安全设施不完善，脚手架、高处作业吊篮、平台等设施不合格”、“室外高处作业受风、雨、雪、 冰等气象条件的影响”，对通用性的要求总结归纳了一般规定7条针对性措施。针对防止高处作业吊篮坠落从产品质量、作业人员数量、安全装置、自制支架、环境温度针对性总结了5条具体措施。3.充分分析了高处坠落的6种主要起因，即“高处作业人员立足点、平台、设施等损坏坠落”；“高处作业人员立足点、平台、设施等摇晃、失稳坠落”；“高处作业人员立足点、平台、设施等倒塌、失稳坠落”；“行走失足、踩空坠落”；“脚打滑、失稳坠落”；“操作失误、失控坠落”，归纳了针对性防范措施，实际施工组织过程中予以落实，实现防范高处坠落事故的目的。从高处作业行走，失稳或踏空坠落、承重物体的强度不够，被压断裂坠落和作业人员站位不当或操作失误，被外力碰撞坠落三种坠落类型考虑，采取提高作业的安全意识、加强进场前体检、正确使用安全劳动用品、确保安全设施及设备配置以及恶劣天气作业限制等措施防止各类工序作业中高坠事故发生。

4.2 加强承包单位管理

4.2.1 加强招标管理

对施工类标段，应在招标文件中明确安全业绩或安全资质（如需）要求，明确满足安全施工的技术力量、设备等方面的要求，明确是否可分包以及分包范围。

4.2.2 加强入场审核

施工单位应按照合同要求如实报审相关人员（包括但不限于项目负责人、技术负责人、安全管理人员）、设备和施工机具的相关资料。应持证（如专业技术资格、安全资质、特种作业人员资质、特种设备检验合格证明等）而未持证的人员、设备、机具不得入场。监理单位、建设单位应按照“谁检查谁负责”的原则加强查验和复核。

4.2.3 加强过程管控

监理、建设单位应按照相关法律法规、行业规范、合同等加强对承包单位的管理，重点加强对重要项目节点、重要工序、关键环节及“危大工程”

的管理与监控，做好方案编审批、现场旁站监督等工作，确保措施落实落地。

4.2.4　如实评价

按照相关法律法规、行业规范、企业制度，对承包商的技术能力、安全管理水平等进行如实评价，对安全管理混乱的承包商，应通过供应商评价机制如实体现。

4.3　强化风险管控措施

4.3.1　严肃开展三措两案审查

对施工单位报审的施工组织设计、专项施工方案等技术文件，监理、建设单位应组织专业技术力量进行审查，确保方案与现场实际相符，满足安全、质量等方面的要求。如有必要，可组织专题会议进行会审。审查人员应在审查记录上签字，并对审查结果负责。

4.3.2　加强“危大工程”管理

对于危险性较大的分部分项工程施工方案，施工单位应严格按照相关规定履行编、审、批程序。监理、建设单位应重点加强审查。对于超过一定规模的“危大工程”， 施工单位应当组织召开专家论证会对专项施工方案进行论证。专项施工方案应当由施工单位技术负责人审核签字、加盖单位公章，并由总监理工程师审查签字、加盖执业印章后方可实施。

4.3.3　做好技术交底

通过设计联络会、站班会等方式，做好单位和单位之间（如设计和监理、施工单位）以及单位内部之间的安全技术交底，确保施工人员清楚掌握其应该掌握的技术要求和安全措施。严肃查处“假交底”“代签字”“交底不全”等情形。

4.3.4　做好开工管理

应履行而未履行相应审批程序的作业，不得开工。包括但不限于：施工方案未完成审核、应旁站而无旁站、应监护而无监护、现场实际情况与施工方案严重不符、现场气象条件不满足施工要求等。

4.3.5　加强个人安全防护

所有现场人员均应配备并熟练使用与其岗位相适应的安全防护装备，包括安全帽、安全带、防滑鞋、手套、护目镜等。上述装备应有合格证明，质量应符合国家标准，达到更换标准的应及时更换。

4.3.6　加强违章查处

对违章“零容忍”，保持高压态势。施工单位，监理、建设单位均应进行检查并严格考核。对不戴安全帽、高处作业不系安全带等习惯性违章重点整治。

4.3.7　加强现场巡视和监督

监理、建设单位应通过技术和管理手段加强施工现场巡视和监督，及时掌握各工作面作业情况，防止未经审批的人员、车辆、机具在现场作业，及时查处私自入场、违规施工的情形。

5　结论

“十四五”是我国绿色发展转型的关键期，清洁能源发电是重要的一环，因此，电力行业“大基建”浪潮已是势在必行，高处坠落又是电力建设过程中突出的事故类型。做好高处坠落的防范措施需要从建设单位、监理单位、施工单位、作业人员等各个方面入手，时刻绷紧“安全”这根弦，为不断提升各施工现场的安全管理水平增添力量，为确保电力能源转型建设总体安全保驾护航。

参考文献：

[1]国家能源局关于印发《防止电力建设工程施工安全事故三十项重点要求》的通知（国能发安全〔2022〕55号）

[2]全国电力事故和电力安全事件汇编（2021年）

作者简介：

马玉磊（1993），男，河南新乡，硕士学历，工程师，研究知识产权、安全质量，E-mail：1301526253@qq.com

水轮发电机启励失败的原因分析

罗海春

（国家能源投资集团江西公司万安水电厂，江西 万安 343800）

摘要：介绍了我厂发电机启励方式和启励的条件，分析了导致同步发电机启励失败的原因，总结了故障的处理经验。

关键词：同步发电机；启励；失败；原因分析

1 引言

同步发电机组的启励操作是通过一定的方式给转子提供一个初始的励磁电流，建立一个有一定磁场强度的旋转磁场，以确保在初励过程结束前发电机机端电压能满足主励系统正常工作的条件，并且将机端电压升高到电压给定值。它是机组并网发电过程中一项至关重要的操作，励磁系统能否正常启励直接关系到机组是否能正常建压、是否能顺利并入电网，启励是机组发电操作的关键环节，关系到电力系统的安全与稳定。因此熟悉并掌握同步发电机启励的原理，认真分析与探讨引起启励失败的各种原因，对于正确快速处理励磁系统启励方面的故障，提高励磁系统设备运行可靠性，从而提高机组开机操作的成功率，都具有相当重要的现实意义。

我厂发电机组的启励方式有残压启励和直流电源启励两种，1#~5#机组均采用残压启励为主，直流电源（220V蓄电池）启励为辅的启励方式。对于采用自动同期并网的发电机来说，励磁系统正常启励的外部条件为机组转速≥95%Ne和机组启动令（即开机令）。要确保励磁系统的启励操作成功，除了要满足外部的启励条件外，励磁系统内部也应具备必要的条件，如启励电源开关必须在合闸、自动启励压板应在投入位置，有“远方”、“现地”运行方式的应设置为“远方”，灭磁开关及主励刀闸在合闸，励磁系统各部件应工作正常等。

2 启励失败的现象及动作原理

启励失败是指励磁条件满足后发电机定子电压未能在规定时间内建压成功（即机端电压＜85%Ue）。

故障现象：若励磁调节器没有启动启励程序，在励磁调节器不会有任何故障信息，但在计算机监控系统会有“电压升不到85%Ue，发电操作失败”等故障信号；若励磁调节器启动启励程序后，建压不成功，调节器转入逆变程序，关闭触发脉冲输出，自动断开机组启励接触器，调节器故障显示画面将显示“启励失败”，监控系统报“启励失败”信号。

故障动作原理：励磁系统在接收到自动起励命令后在起励时限内（一般为10-15秒）机端电压仍低于85％额定值时，启励建压失败。

3 原因分析

当励磁系统出现启励失败时，要根据机组运行状况、控制系统的动作过程，综合分析故障前后机组的实时参数、信号指示及其变化情况和系统故障记录，以确定故障检查的重点和故障处理的步骤，达到快速处理故障、消除隐患的目的。一般说来，导致启励失败的原因很多，在实际工作中我们按先易后难、由简到繁的原则进行排查，根据设备工作状况进行推理分析。下面结合我厂设备的情况对启励失败的原因进行分析总结：

3.1 励磁系统外部的原因

3.1.1 无机组95％Ne转速信号会导致励磁调节器启励条件不满足，不能正常启励。我厂通过SJ-22D转速装置检测机组95％Ne转速，再由此启动中间继电器44ZZJ，该继电器动作将信号送达励磁调节器。SJ-22D转速装置故障、95％Ne转速信号回路存在问题、调速器水头设置不合理导叶开不到空载、调速器空载调节不稳定机组转速波动大、励磁调节器开入信号检测存在问题等，都可能导致调节器采集不到95％Ne转速信号，造成启励失败。如173F开机过程中就曾因44ZZJ烧坏，励磁调节器没有检测到95％Ne转速信号，导致启励失败。

3.1.2 远方起励信号（开机令）没有送达励磁调节器或信号的接通时间太短。接入励磁调节器的所有开关量信号，在其内部都会有防抖电路，所以对开关量的变位时间必须大于防抖动时间，这样励磁调节器才会判断开关量正确性，否则励磁调节器将不会有响应。这类故障的原因可能是用于启励的开出继电器没有正常励磁、接点接触不良或继电器动作时间太短（一般设置动作时间为3秒），监控系统与调节柜之间的电缆连接端子松动、断线、接地等。

3.2 励磁调节器方面的原因

3.2.1 励磁调节柜触摸屏上控制界面设置的运行方式不正确。例如远控、现地方式的设置，残压起励、零起升压方式的设置不符合要求。我厂五台机组均为微机励磁，运行方式的设置直接影响自动启励成败。正常情下励磁调节器应设置为“远方”控制方式且启励电源空气开关应投入，自动启励压板投入即可。工作逻辑方式：若残压起励未投，调节器收到启励信号10秒后未能建压，起励自动中断，对外发“起励失败”信号；残压起励投入，起励10秒后未能建压，自动投辅助启励电源，5秒后未能建压起励自动中断，对外发“起励失败”信号。若残压起励、零起升压方式均在退出状态则无法响应启励命令。2号机、3号机都曾

出现励磁调节器在现地控制方式下造成远方启励不成功的现象。所以在我们的日常维护中，若在励磁调节器上进行了工作，在工作结束后工作负责人要全面检查励磁调节器中的各项设置和整定参数，一定要恢复到工作前的状态。

3.2.2　励磁调节器故障，无脉冲输出，整流柜部分或全部硅整流管损坏无法工作，脉冲回路有关元件损坏，导致启励失败。这是导致启励不成功的最多因素所在，在此情况下，可通过小电流试验检查原因。对此类原因引起的故障，要停机检查处理。

3.2.3　励磁调节柜有逆变命令投入。当励磁调节器一直有逆变命令或停机令时，励磁调节器不接受启励命令，这种情况多为逆变按钮没有退出。例如我厂175F励磁调节柜上有一个“整流”、“逆变”转换开关，当它置于“逆变”位置时不能正常启励。

3.2.4　启励过程中出现同步故障，导致启励失败。同步信号是可控硅触发脉冲的计时参照点，若没有同步信号，励磁调节器的触发脉冲就无法按触发角度发出，不能正确有效地调节励磁电流的大小。我厂的励磁系统的可控硅均采用阳极同步，即极阳电压通过同步变压器降压至100V输入调节器，作为励磁调节器的同步输入信号。机组在运行过程中，当同步电压消失或降低时，励磁调节器会报同步故障，并进行通道切换，但双套均报同步故障时，将电压控制切换到恒电流控制；若机组启励过程中报同步故障，会造成启励不成功。例如1号机组有一次小修后开机，因同步信号输入端子接线松脱，造成同步故障，导致启励失败。另外同步变压器的原边的熔断器熔断，同步信号有关回路接触不良，同步变压器故障等也会导致同步信号故障出现。

3.2.5　励磁调节器电压测量故障。无论是定子电压还是同步电压，在启励过程中都起了重要作用。若在电压控制方式下启励，定子电压是励磁调节器状态转换、调节量计算等的必备参数。若双通道同时出现电压测量故障，则可能导致励磁系统启励失败。若某一套电压测量故障，则调节器切另一套控制不成功，也将造成启励失败。

3.3　励磁主回路方面的原因

3.3.1　转子直流回路存在开路或短路现象，转子回路绝缘不合格有接地。转子直流回路开路则不能形成励磁电流，转子直流回路短路或两点接地则会减小转子线圈励磁电流，影响机组建压。在检修及实验过程中可能存在主励刀闸未合、功率柜直流输出开关未投入，转子回路电缆或连接头甩开后未恢复，直接影响启励成功。

3.3.2　灭磁开关未合上，或灭磁开关合上后辅助开关未到位，合闸位置信号不能送达励磁调节柜，导致启励条件不满足不能正常启励。所以在恢复措施、设备检查时，应注意查对励磁工控机上显示的灭磁开关位置状况。

3.3.3　大修后励磁回路极性接反，导致建压不成功，启励失败。这种情况励磁调节器一般不报任何故障，励磁电压、励磁电流指示亦无明显异常。2008年，我厂175F小修结束后试验过程中，手动启励不成功，就是这种现象，停机后检查发现滑环处极性接反，纠正后开机启励无异常。

3.3.4　功率柜交流侧无输入，阳极开关未合、励磁变高压侧隔离开关未合，励磁变故障，都可能因没有阳极电压导致启励失败。在机组检修后应特别注意安全措施的恢复，是否存在漏项。

3.4　励磁系统操作回路方面的原因

3.4.1　直流操作电源未投，熔断器熔断或接触不良。没有直流操作电源则励磁系统控制回路无法工作，初励无法投入，自然导致启励失败。

3.4.2　起励电源未投入或启励操作的有关元件损坏。用万用表检查起励电源是否正常，观察启励时有关元件的动作情况，以判断故障元件，确定启励失败的原因。

3.4.3　功率柜的脉冲开关置于切除位置。设备制造商在每个功率柜上设计一个“脉冲投退”开关，主要用于某个功率柜存在故障时便于将其退出运行，但功率柜上这个开关误投入则可控硅触发脉冲封闭，开机过程中不能正常启励。

4　结束语

导致启励失败的原因有很多，对不同的原因就会有不同的故障现象，所以对故障的原因分析一定要以故障发生时的即时信息为依据，结合励磁系统相关设备的现场检查的情况进行综合分析，准确找到故障原因。启励失败故障是机组在运行过程中发生的设备缺陷，对这类故障需申请停机处理。若系统紧急情况下，必须在开机状态下消除故障，在故障处理前则要求做好完备的安全措施，防止空载误强励的事故发生；必要时可将灭磁开关、主励刀闸、启励电源开关拉开。另外即使在安全措施完好的情况下，在励磁系统上工作时也要与可控硅的阳极设备保持一定的安全距离，因为在发电机旋转的情况下它们都属于带电设备。对启励失败的故障处理完毕后的试验，要做好再次启励不成功的准备，试验过程中要特别加强对灭磁开关的监护，必要时手动跳开灭磁开关。另外不允许连续进行启励的操作试验，以防止启励不成功造成220V蓄电池电压急骤下降，扩大故障负面影响。

参考文献：

[1]吴龙。发电机励磁设备及运行维护【M】。北京：中国电力出版社，2019

[2]国能万安水力发电厂：计算机监控系统及自动装置检修规程，2020.11.

作者简介：

罗海春（1970），男，江西省瑞金市，本科，高级工程师，从事水电厂自动化维护工作，E-mail：ch18866lhc@163.com

现场总线控制技术在辅网DCS系统的应用研究

宋晨晨，李辉，刘逸峰

（华能安源发电有限责任公司，江西 萍乡 337200）

摘要：近年来，总线控制系统已经广泛地应用于发电厂。本文将讨论总线技术及优势，并以火力发电厂辅控系统为对象，讨论总线技术在火电厂辅控系统的应用现状与存在问题，探索现场总线的技术发展现状，为火电企业总线技术推广应用提供参考与借鉴。

关键词：辅网 DCS；现场总线；应用

1 概述

作为信息化科技时代的重要组成部分之一的数据，衍生了一个新名词——大数据，这个时下已经流行了很多年的热门词汇，在后互联网时代，让我们都不可避免的成为大数据收资的一份子，数据化不仅渗透到我们日常生活中，同时也影响到当下每一个行业和业务职能领域，在能源行业特别是火力发电厂，设备自动化的程度越来越高，而实现火电机组自动化控制程度达到99.9%依托的就是数据化的最大利用，因此两者的联系已经越来越紧密，而伴随人们对数据的要求越来越高，应运而生了一种海量数据传输的通讯技术——现场总线。

现场总线作为一种开放、全数字化、双向传输、多站的通信系统，近年来得到了迅猛发展和应用。华能安源电厂在机组DCS控制系统中就大范围使用了现场总线技术，运用了大量仪表及控制装置，将现场总线技术运用在机组日常生产过程中，在现场总线使用上积累了一定的经验。本文阐述了现场总线技术的优势及在火电厂辅网系统的应用。

2 现场总线技术简介

现场总线作为应用在一个数字化的、串行、双向传输、多分支结构的通信网络系统，广泛应用于工厂/车间仪表和控制设备的局域网。而现场总线技术，就是把现场测量、控制设备连接成一个全新的网络系统，按公开、规范的通信协议，在现场测量、控制设备、以及这些设备与监控计算机（或DCS控制站）之间，实现双向数据传输和信息交换，构成由现场总线测量、控制设备集成的自治式控制系统，作为一整套完整的控制系统,操作人员可通过现场总线网络对现场测量、控制设备进行实时分析、诊断和相关维护。[1]

3 现场总线技术优势

3.1 多个数据并时传输：

在测量控制设备之间实现了双向串行多节点的数字传输，相对于传统的电压电流信号的传输，以总线通讯协议，通过在DCS上选择对应GSD模块，并在模块上输入、输出通道放入相应中间点，对点信息进行读取就能获得全数据的交换。从而能够实现海量的信息集成，真正做到底层现场设备与上位机的全数据信息交换。

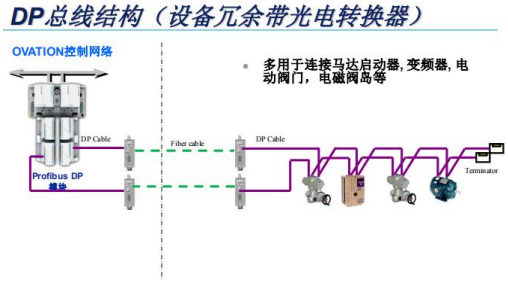
以四方831M马达保护器为例，通过总线通讯，可以直接在操作员站或者工程师站获取现场设备的过流时间、过载曲线速率等关键信息，再结合电厂机组DCS控制系统，便能够完整记录所有的历史数据，而历史数据又能以历史曲线的形式直观的显示出来，有利于运行人员及检修人员分析设备当前的状态，可以实现同一平台内不同系统设备并时多数据双向传输。这些数据信息读取都是传统硬接线实现不了的，通过总线技术，将过去只能离线查看设置的数据及运行参数变成了实时的在线的查看了。

3.2 节省硬件投入

采用现场总线技术，可节省一些电缆，电缆桥架，IO卡件。在常规DCS中，电动门，气动门与DCS之间通常需敷设2根控制电缆，电机与DCS之间通常也需要2~3根控制电缆，电磁阀岛箱与DCS间至少需敷设4~5根电缆，一条profibus DP总线最多能挂接32个设备，根据通讯距离不同，通讯速率（波特率）存在不同，通讯速率选择在93.75 kbit/s -12 Mbit/s之间。

我们以电厂除灰系统为例，一台机组除灰系统通常有5个电场，每个电场分A,B侧，若一侧配备8个阀岛箱，则一台机组总共需要40个阀岛箱。一台阀岛箱控制入口顶阀，开关阀，料位开关，料位计等等。若采用普通硬接线的方式，以上设备的开关量反馈、指令和模拟量反馈都需要耗费大量的电缆和不同类型的IO卡件。但如果采用总线通讯技术，则只需敷设少量通讯电缆及动力电缆即可实现多个不同类型设备的控制与监控，而且在设备调试过程中，接线、对线的工作量也能相对应减少很多，这样也能极大减少人员、线路及控制单元出错的概率。

同样，在节省各类电缆耗件的同时还能节省IO卡件：以安装20个开关型电动门为例，控制器至少需配备5块DI卡件，3个DO卡件。若采用总线通讯，只需要一块DP卡件的一个端口，就可以实现一对多，双向信号传输控制，在实现相同功能情况下大大节省设备成本与后期维护费用。



3.3 数据数字化，提升精度

现场总线传输的信号均为数字信号，消除了传统集散控制系统A/D,D/A模块转换和模拟量信号在信号传输过程中的损耗，以及外部环境带来的各种干扰，导致最终的精度结果有所损失。而总线传输技术将开关量信号，电压信号，电流信号以统一的形式打包传输，不仅保持了一致性，同时还能大幅削减外部恶劣环境带来的重重干扰。

3.4 提升设备管理能力，提升工作效率

将设备故障诊断由事后分析变为实时检测，检修人员可以通过定期巡检，由设备参数的结果反馈及偏差等等来综合确定设备是否故障或失准。同时可以不用去生产现场就能远程实现对相关参数的修改，即减少了繁琐的工作量，改善了作业环境，达到提高工作效率的目的。另外，现场控制系统的报警不仅可以对现场控制站出现的硬件故障进行诊断分析，查明原因，还可以通过报警信息来查看是否需要维修，真正实现设备故障检修由被动变为主动。

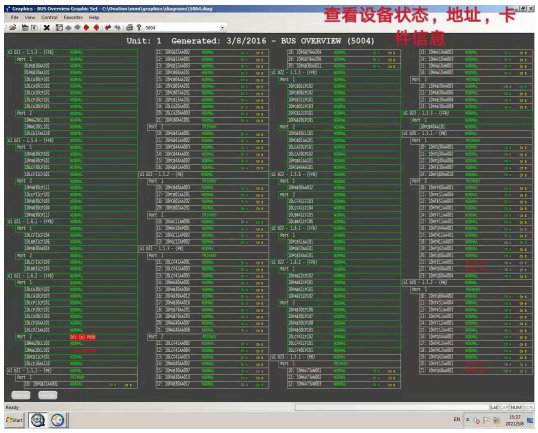
4 现场总线设备在辅网系统的应用实践

如何充分开发总线设备的优势，一直是困扰电力行业全自动发展的一个重要研究难题。华能安源电厂2×660MW超超临界二次再热机组，努力发掘现场总线在实际系统设备中的广泛应用，最大程度上利用好了总线设备的优势，在双机组汽轮机、锅炉和辅网系统大量采用各类总线控制方式，使总线设备覆盖率高达60%以上，实现最大优势开发总线设备。

以辅网控制系统为例，整个辅网系统包含脱硫系统、化学水处理系统、输煤系统、除灰系统、灰库系统、空压机系统、氨站系统和燃油泵房系统等8个子系统，所使用总线设备数量高达942台，共配置55对冗余DP卡件、29对FF卡件。控制设备涵盖了马达保护器、压力变送器、料位计、电动执行器和电磁阀岛箱等设备，使用了EMG、扬州恒春、瑞基、博睿、四方、万龙、罗斯蒙特、EJA、Honeywell、E+H、VEGA,Festo等多个品牌。目前，已通过总线协议将从现场设备采集到的数字量信号传入DCS，并通过相应的逻辑组态及点的配置，已成功实现在DCS画面上能实时监控设备通讯状态以及卡件信息读取，从而真正做到现场总线设备的统一管理，为今后电厂更加数字化、智能化管理作好了铺垫。

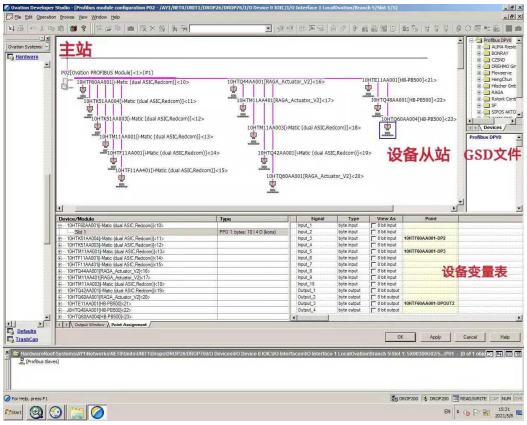
4.1 设备通讯状态实时查看

通过读取卡件信息来读取该卡件下所配置的设备的状态、卡件状态、A、B冗余网段的通讯情况、设备通讯地址、设备名称等等，并创建对应的DCS总线监视画面，方便运行及检修人员实时查看相关数据变化。当设备状态异常时，能第一时间显示异常标志，同时有对应的变色及报警功能进行相应提醒，让运行与检修人员可以及时发现故障点相关信息并进行针对性的操作处理。



4.2 数据读取与修改

通过导入GSD文件，设备地址设置，变量地址表参数配置，实现了在DCS上对现场设备信息读取，修改，发送及设备互联互操。GSD文件作为总线设备与DCS之间数据通信的规约文件，规定了总线设备与DCS之间通信数据的类型和数量。[2]变量地址表则解释了GSD文件内各数据模块的功能，解决了数据分配的问题。在DCS上对设备的地址进行定义，获取数据，操作设备。



5 应用中存在的问题

虽然现场总线技术在电厂中越来越普及并且

在实际应用方面取得了较快的发展，但任何技术都不会是十全十美的，特别是在其经济性、安全性和稳定性方面仍存在着一些争议。

现场总线目前依然归属于数据通讯范畴，所以对设备的现场安装要求较高。特别是布线、接线方面若存在随意操作或操作不规范，均极易造成设备通讯的不稳定现象。在安装时一定要严格按照《火力发电厂现场总线设备安装技术导则》的要求安装，遵守通讯电缆与动力电缆需交叉布线的原则，同时不同桥架平行敷设时也需保持一定的距离等等。

目前虽然有很多厂商在推广总线设备，但现阶段熟练掌握现场总线的应用技术和开发技术的人才较少，企业在调试和运行时偶尔也会遇到困难。总线数据技术相对于传统通讯技术，优势不仅在于控制方面，更多还是在于自我诊断、自我校正等自动管理方面，但目前在实际运用中，还是以设备监控为主，对于现场总线丰富的设备数据信息挖掘较少，对于管理自动化及远程故障诊断等功能未充分开发，这也是未来现场总线的发展研究方向。

6 总结与展望

现场总线在信息传递以及简化DCS硬件配置、减少电缆总量上确实有优势，而且对于发电厂主网与辅控系统而言，因其各系统设备工艺差异大，设备和测点地理分布广，采用现场总线可以很大程度上实现方便快捷控制，不仅节省了很多硬件成本的投入，对于实现辅网一体化DCS控制也有着助推作用。但由于目前仍处于推广阶段，本着安全、稳定的原则，对于电厂主体设备投入使用还是需要多加考虑。

随着精细化管理的要求越来越高，对于设备控制及状态监视的要求也在不断提升，总线技术发展应用的良好发展趋势，对实现电厂数字化将提供保证基础，对于今后的智能化管理意义尤其深远。随着控制策略的完善，就地设备的智能化升级，及总线控制系统自身的改进，依托现场总线系统的可靠性、安全性将逐渐得到增强，相信在未来的火电厂自动化控制应用方面一定能更好的发挥现场总线系统的智能化功能，从而降低运行维护费用，达到提升发电厂的管理品质的最终目的。

参考文献：

[1]现场总线技术及其应用(第2版)，清华大学出版社，2008
[2]楼锐，浅谈现场总线技术在火电厂的应用，《广东省电力设计研究院》，2011-02-02

作者简介：
宋晨晨（1992），江西萍乡，本科，助理工程师，华能安源发电有限责任公司热控专业，E-mail：351976833@qq.com

1000MW机组PCV阀控制系统可靠性分析及改造

曾宪平，夏润章，许俊，付钦学

（国能神华九江发电有限责任公司，江西 湖口 332504）

摘要：介绍了某电厂 1000MW 机组锅炉 PCV 阀控制系统的原理，对其运行的可靠性进行了分析，取消了现场 PLC 控制器，重新设计 PCV 阀控制系统图,将原来的 PCV 阀单一压力接入 PLC 控制改为由 DCS 的 3 个参与主保护的三个主蒸汽压力信号进行三取二逻辑判断后控制，增强了设备的可靠性，降低了 PCV 阀的误动和拒动的几率。

关键词：1000MW；PCV 阀；可靠性分析；DCS；控制回

1 引言

某电厂一期装设二台 1052MW 燃煤发电机组，锅炉为东方锅炉厂生产的 DG3035/29.3-II1 型超超临界压力、变压运行、单炉膛、一次中间再热、平衡通风、露天布置、固态排渣、全钢构架、全悬吊结构、Π型布置燃煤直流炉，主蒸汽额定压力为 29.3MPa，额定蒸汽温度 605℃，最大连续蒸发量 3035t/h。锅炉左右侧过热器出口管道上各安装一套压力释放阀（PCV 阀），PCV 阀主要功能是防止锅炉蒸汽压力超过规定值的保护装置，在安全阀动作之前开启，排除多余蒸汽，以避免安全阀频繁起跳而缩短使用寿命，避免浪费过多的蒸气。

PCV 阀的控制回路主要分为气动控制和电气控制两大部分，气动部分结构简单，安全可靠无需改造。由于电气控制部分主要集中在现场控制箱，内设置 PLC 控制，配备有一台触摸屏，型号为 MICRO830 2080-IF2，自动模式下，由现场单一压力变送器引至 PLC，通过逻辑判断 PCV 阀开关。该控制系统如果 PLC 死机、故障，则 PCV 阀就无法操作，单点控制也存在误动风险。本文主要针对目前 PCV 阀控制系统进行分析，为了防止以后机组运行过程中单一测点波动、PLC 故障等情况而发生拒动、误动风险，严重影响机组的安全稳定运行，提出此 PCV 阀控制系统改造方案。

2 PCV阀控制回路介绍

2.1 PCV 阀气动控制部分

PCV 阀气动控制回路控制气源由空压机系统提供，经过过滤器减压阀送至电磁阀入口[1-3]。双控电磁阀出口分两路，一路送至上缸，另一路送至下缸。当双控电磁阀开启指令通电时，气缸下缸通气，上缸通大气压，PCV 阀开启；当双控电磁阀关闭指令通电时，气缸上缸通气，下缸通大气压，PCV 阀关闭。双控电磁阀线圈的通断带动阀芯动作，最终改变上下气缸气路，从而控制阀门的开启与关闭[4-5]。

2.2 PCV 阀电气控制部分

在 PCV 阀电气控制回路中,PCV 阀接收指令一般包括 DCS 指令、集控室操作台指令、就地指令和 PCV 阀前压力传感器信号的联锁指令，这些指令都是先通过 PLC 后作用于电磁阀上来改变气路使阀门动作。电气回路由气缸位置反馈、1 个压力变送器、就地控制箱、集控室硬操台以及 DCS 逻辑画面组成。其中，就地控制箱由 PLC、触摸屏、双控电磁阀、电源转换器、就地操作面板等组成。

3 改造前的PCV阀控制系统

PCV阀控制系统接线图1所示。PCV阀控制系统采用智能控制型PLC,支持4-20mA变送器输入,配有就地控制回路和远程控制回路，控制回路电压均为24VDC。DCS指令、压力信号自动联锁指令、就地控制指令、集控室操作台控制指令均进入PLC，然后通过PLC输出控制电磁阀动作改变气路实现PCV阀开启与关闭。

为了保证PCV阀动作的灵活性，其控制模式分为自动和手动两种。在“自动模式”下，

PCV阀前单一压力变送器信号进入PLC，通过逻辑判断进行控制PCV阀，当压力大于等于30.8MPa时，PCV阀开启，压力小于等于29.88MPa时，PCV阀关闭。在“手动模式”下，允许通过就地控制箱面板、集控室操作台面板或DCS系统进行操作。

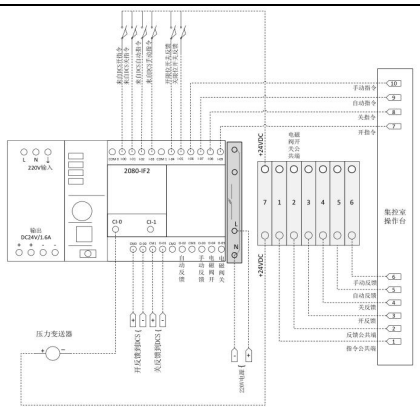


图1 改造前的PCV阀控制系统接线图

4 PCV阀控制系统可靠性分析

在机组运行期间，PCV阀控制在“自动模式下”，由PCV阀前压力变送器来控制PCV阀的开启与关闭。2020年1月，在执行“防寒防冻”措施时，热控人员发现1号机组右侧PCV阀前压力变送器及PCV阀控制箱内触摸屏显示数字不变，查看DCS数据，机组负荷为670MW，主蒸汽压力为23.22MPa，而就地压力变送器及触摸屏显示压力为26.33MPa，PCV阀控制在“自动模式”。原因是取样管冻住了。取样管重新铺设保温及加装伴热带后，测点恢复正常。2021年3月，在做1号机组PCV阀传动试验时，切至“手动模式”下，运行人员在DCS画面及集控室硬操台操作时，PCV阀无动作，就地检查发现PCV阀就地控制箱内PLC死机，指令无法从PLC输出。重新启动PLC后，恢复正常操作。通过上述两种现象，可分析出PCV阀控制系统至少存在以下问题。

（1）机组运行时，PCV阀控制是在“自动模式”下，由PCV阀前压力变送器控制，单一压力变送器测量回路可靠性不高，如附近有电焊作业信号容易受到干扰，可能导致压力数值跳变失真，PCV阀误动；如单一压力变送器取样管冻住了，数值不变，或者变送器故障，而该测量点又没有引至到DCS，运行人员很难发现上述故障，PCV阀存在拒动风险。

（2）PCV阀控制回路在“自动模式”下，为单回路控制，以单一条件作为判据，也不符合重要设备保护要求，极容易造成PCV阀误动。重要设备保护应以多重冗余信号作为判据，判断方式可采用“三取二”、“二取二”或者“三取中”等。

（3）PCV阀是通过PLC输出控制，一旦PLC故障或者死机，就会导致就地控制箱操作面板、DCS系统、集控室操作台都无法对PCV阀进行控制，如PLC故障时误发指令，就不能及时对PCV阀控制，可能造成机组运行工况不稳甚至机组非停。

5 PCV阀控制系统改造

通过对PCV阀控制系统可靠性分析，为了防止PCV阀控制系统因单一压力变送器控制不可靠、PLC故障或者死机而出现误动、拒动风险，影响机组安全稳定运行，特提出此PCV阀控制系统改造。

5.1 PCV 阀电气控制系统改造

首先根据PCV阀系统可靠性分析取消PLC控制思路绘制PCV阀的电气控制图，如图2所示。SA为自动/手动切换开关，采用2开2闭旋钮开关，2开2闭都采用并联方式连接，防止单回路接触不良。旋转按钮安装在集控室操作台，就地控制箱不安装自动/手动切换开关。

旋转按钮切至手动控制方式时，就地控制箱控制面板HL6和集控室操作台上HL2指示灯会亮，显示PCV阀控制在“手动模式”。此时可在就地控制箱控制面板和集控室操作台上操作按钮对PCV阀进行开启与关闭。当按下开按钮时，双控电磁阀YA1线圈带电，PCV阀打开；当按下关按钮时，双控电磁阀YA2线圈带电，PCV阀关闭。

旋转按钮切至自动控制方式时，就地控制箱控制面板HL5和集控室操作台上HL1指示灯会亮，显示PCV阀控制在“自动模式”。此时PCV阀控制完全由DCS控制，可由运行人员在DCS画面手动操作，也可由DCS的控制逻辑控制，后面将详细介绍。

就地控制箱及集控室操作台都设计了阀门开、关到位指示灯，方便检修人员实际观察阀门状态。HL3、HL7为阀门开到位指示灯，HL4、HL8为阀门关到位指示灯。继电器K01、K02常开接点引至DCS，分别为自动、手动模式。继电器K03、K04常开接点引至DCS，分别为开到位、关到位信号。同时还设计有电源监视报警，当直流控制电源失去时继电器K00失电，继电器的常闭接点接通，触发失电报警功能。

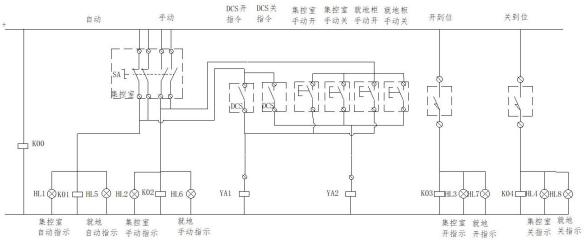


图2 改造后PCV阀电气控制图

5.2 PCV 阀 DCS 控制逻辑

根据绘制出的电气控制图对就地控制箱进行重新配线和加装相关设备，取消控制箱内PLC及就地单一压力变送器。原设计是单点与动作值比较，取消PLC后，可将参与主保护的三个主蒸汽压力测点在DCS替代原设计单点，在DCS逻辑对PCV阀的联锁压力信号进行三取二逻辑处理（如图3所示），三个压力信号均设置速率限制功能，并具有品质判断，当有压力信号异常时，品质出现坏点时，自动剔除该异常点，剩下两个压力信号改为二取二逻辑处理，这样设计增加了控制回路的可靠性，大大降低了PCV阀的误动几率。

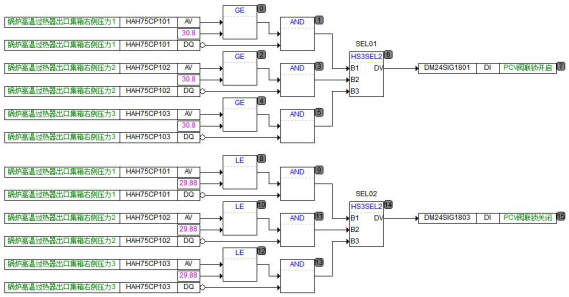


图3 PCV阀控制逻辑

5.3 现场实施及应用

基于对PCV阀控制系统所需功能的分析，设计了上述的控制回路，该控制回路在现场进行了实际安装和调试，取得了非常好的效果。本控制系统主要有以下优点：

取消了就地PLC控制，避免一旦PLC故障所有指令都无法发出，PCV阀失去了控制，改成由DCS软回路和就地控制箱及集控室操作台硬回路完成，操作方式灵活，自动/手动切换开关安装在集控室操作台上，还避免了就地人员误操作风险。

设计了电源故障监视功能，在DCS画面上设置了光字牌报警，为运行及检修人员提供了实时监视，可以及早发现并处理故障。

整个控制回路简单，未设计继电器触点引至控制回路中，减少了继电器长时间运行触点氧化而接触不良的风险，还避免反馈开关及开关接线故障等引起的PCV阀非正常情况开启的风险。

DCS逻辑对PCV阀的联锁压力信号进行三取二逻辑处理及相关设置。能有效保证PCV阀的正确动作，同时也避免了PCV阀故障开启导致运行机组减负荷甚至非停的风险。

6 结论

通过这次对PCV阀控制系统的改造，使得PCV阀控制指令都要从PLC发出改由DCS的软回路和就地控制箱及集控室操作台的硬回路完成。DCS系统编程灵活，操作简单，控制逻辑易读，便于热控人员日常维护，PCV阀控制的硬回路无继电器触点参与，故障率低，安全可靠，可避免拒动或者误动异常发生，对使用同类型PCV阀控制系统具有一定参考意义。

参考文献：

[1]柯昭,郝翰,王钢.超超临界机组PCV阀控制系统优化策略[J].华电技术,2018,40(6):56-57.

[2]王振宇,王云飞.300MW机组锅炉PCV阀控制系统改造[J].电气开关,2011,49(4):56-59.

[3]谢梵.600MW锅炉动力泄放阀控制回路优化及改造[J].电力自动化,2019(4):106-109.

[4]张衔.1000MW机组PCV阀控制系统可靠性分析及优化[J].自动化应用,2017(7):1-2.

[5]吴吉.PCV阀控制回路优化[J].自动化应用,2015(6):36-37.

作者简介：

曾宪平（1984），男，江西永丰，硕士研究生，工程师，从事火电厂热控相关技术及管理工作，E-mail：16312013@chnenergy.com.cn

探究风力发电机叶片的防覆冰技术

侯遥平

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：现今，风力发电已成为我国电能生产的主要方式之一，其不仅具有较强的清洁无污染特性，而且还能有效降低生产成本，提高资源、能源利用率。但是有些风能发电地区的冬季温度较低，一旦外界环境温差较大，就会导致风力发电机叶片上出现覆冰情况，进而严重影响机组的正常运行，使得风力发电质量和效率大大降低，因此，要想改善现状，就要对风力发电机叶片的防覆冰技术的应用加大研究力度。本文也会结合风力发电机叶片结冰原因及危害，对相应的防覆冰技术进行着重分析，并提出科学合理的除冰措施，仅供参考。

关键词：风力发电机；叶片覆冰；防控技术；除冰措施

0 引言

在风力发电过程中，机组叶片经常在大雾或冻雨天气下出现明显的覆冰现象，这样就会增加叶片重量，使其在运行过程中出现失稳、失速等不良情况，严重时，还会导致风机变桨控制和偏航控制出现判断失误现象，进而影响到最终的发电质量。因此，要想避免覆冰情况的发生，就要对风力发电机叶片材质和结构进行全面改进，并采取科学合理的防覆冰和除冰技术，保证机组运行安全，最大化减少发电损失。

1 风机叶片覆冰原因及产生的危害分析

1.1 覆冰原因

由于大部分风能发电地区都处于比较寒冷的地带，而每年11月至次年的2、3月份，这些地区就会出现较多的大雾及冻雨天气，所以这种环境下就会极易导致风机叶片出现覆冰情况，如雾凇、雨凇等结冰情况。这其中，雾凇是一种霜，其是由密度为0.25g/cm3白色不透明粒状结构物沉积而成，当风速过大时，冷却水与0℃以下的风机叶片一旦接触，就会在叶片表面形成一层毛玻璃状密度较大的晶状雾凇；反之，若风速不大，且冷却水较少时，也会在风机叶片表面形成粒状雾凇。由于这类覆冰结构比较密室，所以一旦形成就很难清除和脱落，若是冰层过厚过重势必会导致风机叶片出现弯折或断裂情况。而雨凇是由超冷却的雨水遇到温度低于0℃的风机叶片时所形成，这种冰透明坚硬，密度大约为0.85g/cm3，一旦形成就会导致整个风机外表面形成一层冰铠甲，并且机组背风面和迎风面的冰层厚度不尽相同。

1.2 结冰危害

首先，人员安全，当风机叶片表面的结冰随着机组运行出现旋转状态时，就会因为离心力所影响而被甩出，这在某种程度上不仅会给附近机组造成一定的破坏和影响，而且还会威胁到周围工作人员的人身安全；其次，设备自身安全，当风机叶片处在运行状态下时，受结冰程度不一致所影响，叶片质量分布也会出现不均匀的情况，这样就会导致机组运行部件出现明显的震动情况，严重时，甚至还会导致叶片被折断，进而引发较大的安全事故，大大缩短机组使用寿命，增加其故障发生几率。

2 风机叶片覆冰预防技术应用要点分析

2.1 溶液防冰技术

该风机叶片防覆冰技术在具体实施过程中主要是指在机组叶片表面涂抹一层防冻液，这样随着叶片的运转，防冻液就会和水滴融合在一起，进而达到减小溶液冰点、防止结冰现象发生的目的。但是该防冰技术在应用过程中也存在一定的弊端，不仅持续时间短、操作难度高、所耗费的防冻液量大，而且在外界环境温度较低的情况下，其防冰效果也会大打折扣。

2.2 热能防冰技术

该防覆冰技术在具体实施过程中主要是对风机的各个零部件进行提前加热，使其温度大于冰点温度，达到去除覆冰的目的。一般情况下，热能防冰技术可分为电热和气热两种技术形式，其中，前者的应用范围相对广泛一些，其是指在叶片制作过程中，要加装相应的防冰装置，进而将叶片上的电能转换成热能，实现对叶片的重点保护，避免其产生覆冰情况。而后者加热技术是指在叶片空腔内增设相应的通风管道，以便可以有效提升加热器温度，通过鼓风机作用就可将热风传递给各个零部件，使其产生加热效果，进而有效避免覆冰情况的发生。

3 风机叶片覆冰除冰技术措施分析

3.1 机械除冰措施

该除冰措施是指通过机械或人工技术来将风

机叶片上的覆冰层去除掉，在实际操作时，要先采用相应的机械设备或人工方式将叶片冰层击碎，然后再使用物理技术将冰层全部去除掉。这种除冰技术不仅操作简便，而且实用性和经济性也是十分突出，但在实施阶段必须停机进行操作，以免产生一定的安全事故。

3.2 气动带除冰措施

该除冰措施是指在叶片前端边缘部位安装相应的膨胀管或膨胀袋，并配备相关的外加装置，如输气管、充气泵等，进以通过这些外加装置来促使膨胀管或袋内充满气体，这样借助泄压阀将气体排出时所产生的振动反应来将叶片表面的覆冰击碎。在该技术研发初始阶段，其应用范围一般被应用在飞机防覆冰工作中，在实际操作时，也是借助膨胀作用将飞机机翼部位和尾翼部位的冰层去除掉，进而更好的保障飞机的稳定运行。目前，该技术已成为风机发电防覆冰技术体系中不可或缺的除冰手段之一。

3.3 热能除冰措施

3.3.1 自身散热除冰措施

该除冰措施是指在风机叶片上设置相应的除冰抗冻系统，进以通过该系统来对电机热量进行全面吸收，随后再通过循环系统将热量传递给整个叶片内部，进而达到除冰目的。但是一旦风机叶片表面存在较厚冰层，并且外界环境温度较低时，该除冰措施所达到的除覆冰效果就会大大降低。

3.3.2 叶片微波除冰措施

该除冰措施主要借助微波加热功能来达到去除风机叶片覆冰的目的，其在具体实施过程中，要在风机叶片上设置多个微波装置，进而通过这些装置对叶片进行加热，以便使其表面的冰层黏附力逐渐减小，最终从叶片上脱落下去。虽然该除冰技术具有一定的应用效果，但由于微波装置安装难度高，后期维护难度大，所以一旦安装不均匀，就会影响叶片加热效果，进而使其冰层去除效果大打折扣，严重时，还会导致叶片出现一定的损伤情况。

3.3.3 碳纤维电热除冰措施

该除冰措施是指在风机叶片表皮下预埋碳纤维网布，并借助电源、温度传感器、过热保护装置以及防覆冰控制系统等装置来促使碳纤维网布产生热量，进而达到去除叶片冰层的目的，更好的保障风电机组的安全稳定运行。但是该除冰技术在实际应用过程中却存在一定的弊端，究其原因，主要是因为叶片在制作过程中要提前预埋加热元件，并且对工艺要求较高，需要投入一定的经济成本。

3.4 超声波除冰措施

该除冰措施是指借助超声波在传播过程中所产生的能量来使叶片振动，进而将其表面覆冰去除掉。因为超声波在介质中传播时会产生谐波振动和水平剪切波，两种波之间由于存在速度差，所以在与叶片冰层接触时就会产生一定的剪切应力，这样一旦超声波频率达到最佳除冰频率时，就会直接将覆冰击碎去除。但是该技术在应用过程中由于需要投入一定的经济成本，并且还要在叶片上安装压电换能器，所以应根据实际情况进行合理选择和应用。

3.5 电磁脉冲除冰措施

该除冰措施是指在风机叶片上设置电磁线圈，进而通过线圈的反复通电和断电后产生的电磁反应来快速振动叶片，使其表面覆冰去除掉。现今，该技术在航空领域中有着很广泛的应用范围和良好的使用效果，但由于其在实际应用过程中会对叶片的可靠性和气动性造成影响，所以在选择时应尽量根据实际情况进行使用。

4 结束语

综上所述，在风力发电过程中，为了更好地保障发电机组的安全稳定运行，关键任务就是要在机组运行过程中采取科学合理的防覆冰及除冰技术对风机叶片表面容易出现的覆冰情况进行有效控制和处理，提高机组运行性能，使其发电效率和质量达到最大化。

参考文献：

[1]吴光军，孙志禹等.风电机组叶片防覆冰技术研究分析[J].风能，2019,(09):62-64.

[2]申晓东，时连斌等.风力发电机组防覆冰技术研究[J].电气技术，2020,(06):48-51.

作者简介：

侯遥平（1991），男，江西九江，大学本科，助理工程师，风电，E-mail：872465562@qq.com

660MW超超临界二次再热机组深度调峰控制系统研究与应用

李祥，李辉，阳斌

（华能安源电厂，江西 萍乡 337200）

摘要：采用智能多模型预测控制技术，对660MW超超临界火电机组的动态特性进行建模分析得出控制方式及控制参数，在超低负荷下投入相关的协调控制对机组进行深度调峰。

关键词：深度调节；智能控制；建模

0 背景

随着可再生能源在我国的迅速发展，火电机组越来越承担起了电网调峰的任务，这就对我们电厂深度调峰能力提出了更高的要求。针对我厂两台660MW超超临界机组深度调峰的实际需求，研究适用于机组深度调峰的智能多模型预测控制技术，并进一步提出我厂660MW超超临界机组深度调峰的预测协调控制系统。应用后，能使我厂两台超超临界机组在AGC协调控制方式下的最低负荷从目前的50%Pe，直接控制至30%Pe，从而满足深度调峰的实际需要，填补国内在同类型机组上的深调空白。

1 工程概况

华能安源电厂2×660MW机组在50%-100%Pe负荷段采用以西门子S7-300 PLC为平台的INFIT优化控制系统进行优化控制，效果良好，运行平稳。为了满足深度调峰的需要，增加了一套硬件平台（S7-300 PLC）来实现2×660MW机组的AGC协调、汽温控制系统，并通过应用神经网络、智能前馈及模型自适应、同预测控制等多种现代控制技术使机组最低稳定负荷达到25%铭牌出力即165MW（以干态工况下的锅炉最低稳燃负荷为下限），同时机组AGC协调、一次调频、主再热汽温及脱硝等重要性能指标达到技术要求。

2 深调方案

2.1 概述

2.1.1 机组运行状况分析

在机组25－50%pe负荷段，利用功能完善的先进优化控制系统，包含机组如下闭环控制系统的优化控制功能：机组AGC控制、机组协调控制（CCS）、燃料量控制、给水流量控制、燃水比控制、主汽温度控制、再热汽温控制、壁温控制、SCR脱硝控制。

2.1.2 深调系统与原有的DCS系统关系

深调系统的应用不改变DCS系统的原有控制功能，通过操作运行画面上的投/切按钮，运行人员可以自由选择上述闭环控制系统是受控于深调系统或者原DCS系统，深调系统和原DCS系统实现无扰切换。深调系统在发生通讯故障、系统故障、I/O信号故障时优化控制系统立即交出控制权，无扰切换至原DCS控制系统，机组可平稳过渡到原DCS控制的合理运行方式下。

2.1.3 增加的硬件

增加一套的PLC作为深控系统的硬件实施平台。由于机组灵活性调峰深度优化控制系统（25%-50%负荷）与机组原有先进AGC协调、汽温优化控制系统（50%-100%负荷）在功能上联系密切，整个硬件平台更加简单和可靠。

深控系统与我们机组DCS系统进行相关的通讯，其接口支持标准的RS485连接方式。深控系统与DCS系统重要的通讯数据，采用通讯和硬件线两种方式确保系统的可靠。深控系统控制扫描周期<100ms；I/O信号最大容量：模拟量1024，开关量1024。

2.2 技术路线

2.2.1 对我厂两台机组动态特性进行相关的变负荷试验，试验记录相关的各项数据，试验完成后进行建模，得出机组的控制特性，根据机组的特性分析结果，设计基于现代智能控制手段的AGC控制、机组协调控制、燃料量控制、给水流量控制、燃水比控制、主汽温度控制、再热汽温控制、壁温控制、脱硝自动控制方案；

2.2.2 利用“深调系统”实时优化控制装置完成AGC控制、机组协调控制（CCS）、燃料量控制、壁温控制、给水流量控制、燃水比控制等相关的各个子系统，并进行仿真，确定控制方案和控制系统的相关参数；

2.2.3 待#1机组、#2机组停机时，完成深调控制系统相关的设备安装、DCS组态、通讯接口调试、工作；

2.2.4 待#1机组、#2机组启动后，进行进一步的调试试验工作，逐步投入各个子系统，并进行相关的试验。

3 #1机组INFIT系统30%深度调峰控制效果分析

3.1 系统的性能指标

“深控系统”，在现场投用中必须稳定达到如下性能指标要求：

表1 系统主要性能指标

系统性能指标		
项目	稳态指标	CCS及AGC变负荷动态指标
变负荷率	N/A	>1.0Pe%/min
负荷响应延迟	N/A	<20s
负荷控制精度	<0.5%	<1.5%
主汽压力偏差	<±0.3MPa	<±0.6MPa
主汽温度偏差	<±3℃	<±8℃
再热汽温度偏差	<±4℃	<±10℃
NOx浓度偏差	<±10mg/m3	<±15mg/m3

注：（1）上述性能指标是在一次设备正常并有调节余量的前提下实现。

（2）25%-50%负荷段变负荷率动态考核指标>1.0Pe%/min，具体以电网要求为准。

（3）深调最低负荷25%为初定值，具体将以机组干态工况下的最低稳燃负荷为下限，机组低负荷下的脱硝最低温度将由电厂保证，与优化控制系统性能无关。

3.2 深度调峰控制效果分析

3.2.1 深调系统经过现场调试及完善，使机组的各个子系统的控制品质均有了明显的提高。下面通过相关的试验说明深调系统的整体控制性能。

3.2.2 CCS方式3~6MW速率变负荷试验的运行性能

#1机组投入INFIT优化系统后以3~6MW/min（330MW~250MW负荷区间6MW/min的速率，250MW~200MW负荷区间3MW/min的速率）的变负荷率在200MW~330MW负荷区间进行了变负荷试验以检验控制性能：

约在5-13 12:10～14:10，#1机组以6MW/min的速率由300MW降负荷至250MW，后再以3MW/min的速率由250MW降负荷至200MW。在200MW负荷稳定15min之后又以3MW/min的速率由200MW升负荷至250MW，后再以6MW/min的速率由250MW升负荷至300MW。该过程中，汽泵再循环门投入自动控制，给水主路电动门一直保持开启状态。该过程中的负荷、主汽压力、过热汽温控制的控制曲线见图1。

从图1可以看出#1机组投入深度调节控制系统后在200MW~330MW的低负荷段以3~6MW范围内的速率进行变负荷试验的主要参数的数据曲线：

负荷控制：在试验中，我们可以看出机组负荷速率在我们允许的范围内变化，未超出限制，并且变化过程稳定，精度满足我们的要求；

主汽压力控制：在试验中，主汽压力的动态偏差始终能够控制在±0.5MPa以内，机组负荷在稳定状态时，偏差<±0.23MPa，控制非常稳定，满足我们的要求；

主汽温度控制：在试验中，机组负荷降低阶段，我们可以看到主汽温度由579℃降低至566℃，负荷升高，主汽温度由566℃升至583℃。我们可以看到即使未投入减温水，主汽温度的变化完全在规定范围；

汽泵再循环门控制：此次新增汽泵再循环门控制，该自动控制设计为三段式控制。第1段：负荷低于250MW，汽泵再循环门指令开至26%；第2段；负荷低于230MW，汽泵再循环门指令开至50%；第3段，负荷低于210MW，汽泵再循环门指令开至65%。从控制曲线中可以发现，在深调至200MW负荷试验期间，汽泵转速基本维持在3020rpm以上，最低至3012rpm，满足正常使用要求。

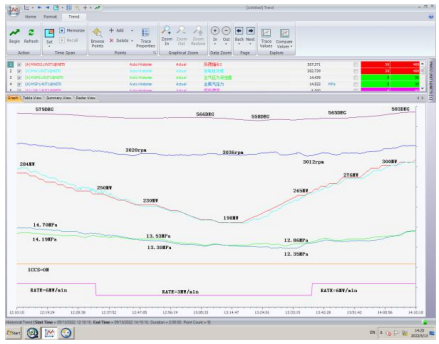


图1 #1机组200MW～300MW区间变负荷试验控制曲线

因此，本次试验后，#1机组在保证机组安全可靠运行的前提下，具备深调至200MW（30%BMCR）负荷的能力。

4 结论

该深度调节控制方式提出660MW超超临界机组深度调峰（最低负荷30%额定负荷）的智能多模型预测控制技术,并设计和开发相关的预测协调控制系统，确保AGC协调控制系统在负荷（30%-100%Pe）范围内均具有理想的控制品质，提出负荷在（30%-100%Pe）范围内的过热汽温及再热汽温优化控制策略，确保了机组在深度调峰下的汽温控制品质，经多次试验优化完全合格。

参考文献：

[1]DL/T 657－2015 火力发电厂模拟量控制系统在线验收测试规程

[2]DL/T 659－2016火力发电厂分散控制系统在线验收测试规程

[3]ANSI/IEEE488.1 可编程仪表的数字接口

[4]ANSI/IEEE 1046 电场分布式数字控制和监视导则

[5]ANSI/ISA S82.01 电气和电子设备、测量和控制机相关设备的一般要求

[6]ISA S5.3 分散控制 / 共享显示仪表的图例符号、逻辑和计算机系统

[7]SAMAPMC 22.1 仪表和控制系统功能图表示法

作者简介：

李祥（1991），男，江西萍乡人，中级工程师，主要研究方向为热工自动化，主要从事热控专业工作，E-mail：1324753733@qq.com

运用QC方法提高工程混凝土外观质量

张俊华，张庭

（中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：通过对混凝土外观成型质量情况进行统计，应用 QC 活动过程控制与 PDCA 循环理论，调查分析影响混凝土外观质量的各种末端因素，确认了要因，制定了针对性的对策和措施，通过 QC 活动，使得施工质量得到提高。

关键词：质量控制；外观质量；PDCA 循环

0 概述

2016年10月11日，国家发改委、国家能源局发布了《有序放开配电网业务管理办法》，高安市建陶220千伏输变电工程作为增量配电业务改革试点项目、江西省重点建设项目，设计院作为EPC承包方希望在新的业务领域树立良好的质量形象。

公司对本项目要求是争创优质工程，项目上要求管理团队在质量管理上有所突破，减少因质量问题造成的经济损失及工期损失。

本QC课题开始前现场已经完成部分铁塔基础及设备基础，我小组对已经施工完成的基础进行总结性检查后，发现现场混凝土结构物多处出现质量外观缺陷，需要进行修复。

1 工程概况

高安市建陶 220 千伏输变电工程 EPC 总承包项目位于宜春市高安市江西省建筑陶瓷产业基地，本项目含 220kV 变电站新建工程、对侧间隔扩建工程以及双回 220kV 架空线路工程三个单项工程，其中混凝土工程主要为设备基础、配电室主体结构，以及铁塔基础。

2 混凝土外观质量现状调查

对已完成的铁塔基础、设备基础及验评资料进行检查；通过现场观察、实测实量方法，对现场调查数据进行统计与归纳，调查情况如表1。

表1 现场混凝土外观质量调查统计表

项目	检查点数	问题数	频率（%）	累计频率（%）
麻面气泡	100	42	45.7	45.7
外观错缝、磕碰	100	33	35.8	81.5
蜂窝	100	8	8.7	90.2
平整度、垂直度偏差	100	6	6.5	96.7
其他	100	3	3.3	100.0
合计	500	92		

从表1可分析得出，“麻面气泡”及“混凝土外观错缝、磕碰”是影响混凝土外观质量合格率的主要因素，因此减少“麻面气泡”及“混凝土外观错缝、磕碰”是提高混凝土外观质量的关键。

3 设定目标

根据质量问题调查分析可以得出混凝土一次性拆模后外观质量不合格率为18.4%，即合格率为81.6%；其中麻面气泡及混凝土外观错缝、磕碰占比高达81.5%，若能有效解决这两个问题，使其发生率降低80%，观感质量合格率可以提高18.4%×81.5%×80%=12.0%，混凝土结构物外观质量合格率可以提升至81.6%+12%=93.6%，目标具有可实现性。

4 原因分析及末端因素统计

QC小组通过现场调查，全面结合工程实际，混凝土结构物外观质量缺陷主要集中在蜂窝麻面、光滑度不足，小组成员集思广益，采用头脑风暴法，分别从人、机、料、法、环五个方面进行原因分析，并绘制原因分析关联图（图1）。

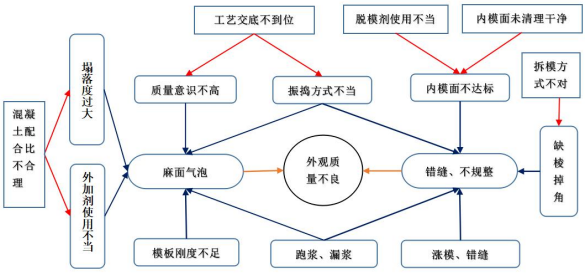


图1 影响混凝土外观质量原因分析关联图

通过原因分析关联图，小组统计分析得到了影响混凝土外观质量的8个末端因素分别为：（1）工艺交底不到位；（2）脱模剂使用不当；（3）内模未清理干净；（4）拆模方式不对；（5）模板加固方式不当；（6）模板拼接不严密；（7）模板、方木质量差；（7）混凝土配合比不合理。

5 要因确认

根据小组提出的8条末端因素开展要因确认活动，并对末端因素进行逐项调查分析、安排专人进行确认，具体调查情况见表2。

表2 要因确认表

末端因素	现场确认情况	要因确认
工艺交底不到位	新进人员未达到100%交底，交底考试合格率不达标	要因
脱模剂使用不当	采用油性传统脱模剂，粘稠度高，不易溢出气泡	要因
内模未清理干净	内膜清理到位，表面光滑无异物	非要因
拆模方式不对	未严格执行拆模程序，凭借经验判断强度拆模	要因
模板加固方式不当	依据方案加固到位，浇筑过程中未出现明显变形	非要因
模板拼接不严密	模板安装拼缝顺直平整，拼接缝处宽度均小于2mm	非要因
模板、方木质量差	模板、方木符合要求	非要因
混凝土配合比不合理	到场混凝土性能符合要求	非要因

6 制定对策

根据要因确认的结果，QC小组对此进行了分析讨论，针对：“工艺交底不到位”、“脱模剂使用不当”以及“拆模方式不对”三个要因，制定了相应要因对策。

（1）工艺交底不到位：1）加强施工人员质量教育培训，定期对施工人员进行考核，开展以进场培训、专题会、质量管理交流等质量教育培训；2）组织国网质量通病案例学习；3）通过定期教育考核作业人员稳定施工水平；4）通过以上措施使得作业人员工艺考核合格率达到100%的目标。

（2）脱模剂使用不当：1）选用合适的脱模剂；2）封模前由必须报验合格后方可封模。

（3）拆模方式不对：1）落实拆模报检制度；2）确定专职管理人员。

7 对策实施

实施一：工艺交底不到位

采取措施：对全体施工人员进行质量教育培训，从质量意识教育、质量知识教育、质量技能培训三个方面入手，提高全体作业人员的质量责任意识，提升作业人员基础知识水平；定期进行质量教育考培，邀请现场质量管理人员、作业工人观看质量通病事故视频；坚持每日施工前站班会制度，落实技术交底。

阶段性效果：通过对现场作业人员质量教育培训及技术交底，上岗人员考试合格率达到100%，考核优秀人数达到85%，现场作业人员作业技能及质量意识提高明显，现场施工出现工人偷工现象显著减少。

实施二：脱模剂使用不当

采取措施：选用优质的水性脱模剂，对现场模板安装工人进行技术交底，加强落实封模报批程序、三检制度。

阶段性效果：现场换用水性脱模剂，易溶于水，有助于混凝土与模板接触处气泡快速浮出，现场混凝土外观质量出现气泡的现象急剧减少，表观达到清水混凝土预期效果。

实施三：拆模方式不对。

采取措施：严格执行拆前报检制度，保证强度能保证其表面、棱角不因拆模而受损坏，且报经监理、现场质检员同意后方可拆模。

阶段性效果：现场拆模报检率达到100%，有效减少因拆模方式导致的质量外观缺陷。

8 效果检查




图2 对策实施前后现场混凝土基础图

对策实施完成后，QC小组对新建的混凝土结构质量外观检查，共收集1000个检查量数据；并对结果进行统计与分析，调查情况见表3。

表3 对策实施后混凝土外观质量调查统计表

项目	检查点数	问题次数	频率（%）	累计频率（%）
蜂窝	200	20	41.7	41.7
平整度、垂直度偏差	200	10	20.8	62.5
麻面气泡	200	8	16.7	79.2
混凝土外观错缝、磕碰	200	6	12.5	91.7
其他	200	4	8.3	100
合计	1000	48		

结论：根据如上统计分析表（图）可以看出麻面气泡及混凝土外观错缝、磕碰已经成为外观质量缺陷的次要原因，主要原因已经转变为蜂窝及平整度、垂直度偏差，并且对策实施后混凝土外观质量

达到了95.2%，已经超过了设定目标值93.6%，也就是达到了本次QC课题目标要求。

9 QC小组成果总结

至QC活动完成时，根据本工程实际情况，经过估算得出本次QC活动的经济效益为21825元：

本次QC活动使得施工质量提高，改善了本工程混凝土外观麻面气泡及混凝土外观错缝、磕碰的问题，提高了混凝土结构外观质量，加快了施工进度，缩短了工期，得到了业主和监理单位的一致好评。

作为QC小组成立完成的第一个课题，这次活动提高了小组成员参与质量管理意识和技术水平，增强了项目小组解决问题和协同协作的能力，为以后开展小组活动打下了坚实的基础。小组本次课题获得了“中国电力规划设计协会”二零二二年度电力工程行业优秀QC小组三等奖。

参考文献：

[1]混凝土结构工程施工质量验收规范GB 50204-2015［S］. 北京：中国建筑工业出版社.

[2]质量管理小组活动准则：T/CAQ 10201-2020［S］. 北京：中国标准出版社.

[3]田佳平，黄 炜.通过 QC 活动减少软土地基水泥土搅拌桩成桩故障率，水电与新能源［A］.2019(2):9-13

作者简介：

张俊华（1993），男，江西临川，本科，助理工程师，从事工程质量管理工作，E-mail：843006300@qq.com

张庭（1985），男，江西武宁，研究生，高级工程师，从事工程项目管理工作。

QC小组活动在提高光伏组件钢结构支架螺栓连接初验合格率中的应用

赵忠杰，吴泽南，刘强

（中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：本文通过对光伏组件支架螺栓连接初验合格率开展 QC 小组活动，确定了导致初验合格率低的主要原因是螺栓扭矩低于设计值和螺母松动，进一步对初验合格率低进行要因分析和确认，进而制定针对性措施解决了初验合格率低的问题，活动后初验合格率达到 96.8%，较活动前提升了 9.8%。

关键词：QC 小组；支架螺栓；初验合格率

1 概述

QC(Quality Control, 质量管理）小组是以改进质量、降低消耗为目的，运用质量管理的理论和方法,通过自身的专业技能去解决工作中出现的问题，并按计划开展活动的群众性组织[1]。市场经济竞争日益激烈,企业提高管理质量是企业提升竞争力的重要手段[2]。蒋永辉[3]针对大屿岛项目片石混凝土挡土墙施工过程中出现较为严重的外观质量缺陷开展了 QC 小组活动，及时解决了工程质量问题。马国师等[4]将 QC 小组活动应用到了杨房沟水电站大坝工区危岩体治理施工安全管理中，有效降低了危岩体治理施工安全隐患率。可见，QC 小组活动在企业质量管理中发挥着越来越重要的作用。

越南富美 330MWp 光伏电站项目设计总装机容量 330MWp，项目光伏组件全部采用固定式钢结构支架安装，共涉及 6 种规格的螺栓连接安装，螺栓安装总量 300 多万套。且项目场址位于海边，属于台风多发区域,组件支架安装质量不合格将产生重大的安全和质量隐患。此外,由于螺栓数量巨大，安装质量不合格引起的返工将增加巨大的项目成本。在光伏项目的建设中和后期运行中，光伏组件被强风吹离安装位置、支架变形等情况时有发生，原因之一就是螺栓连接质量不合格,造成巨大的安全隐患和经济损失。为此，项目管理团队成立了一支以项目经理为组长、项目质量和施工管理工程师为核心成员的 QC 活动小组，以“提高光伏组件钢结构支架螺栓连接初验合格率”为课题，着力解决支架螺栓连接质量问题,以期达到提高支架螺栓连接初验合格率、保障施工安全的目的。

2 QC小组活动的应用

2.1 现状调查

2.1.1 螺栓数量统计及质量控制目标

小组成员根据项目一期 216MWp 的施工图、工程量清单、支架安装说明等材料整理并计算出项目一期螺栓安装数量如表 1 所示。

表1 螺栓安装数量统计

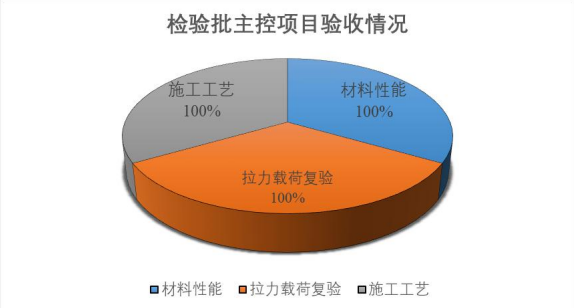
方阵	3x28 阵列	3x19 阵列	螺栓数量/套
A1	172	31	107136
A2	171	34	107658
A3	172	39	110016
A4	186	26	113148
A5	259	20	151722
A15	191	21	114138
A16	179	35	112482
B1	181	23	109278
B2	190	15	111420
B3	187	23	112626
B4	190	14	111060
B5	190	15	111420
B6	177	26	108126
B7	176	30	109008
B8	198	25	119484
B9	215	0	119970
B10	204	10	117432
B11	209	5	118422
B12	191	9	109818
B13	196	6	111528
B14	197	3	111006
B15	185	14	108270
C1	185	31	114390
C2	204	6	115992
C3	210	0	117180
C4	209	0	116622
C5	194	20	115452
C6	186	28	113868
C7	196	13	114048
C8	197	15	115326
C9	183	33	113994
合计	5765	570	3422070
备注：螺栓数量=3x28 阵列数量*x+3x19 阵列数量*y=3422070；x=558，y=360。			

由上表可知，本工程一期组件支架螺栓连接

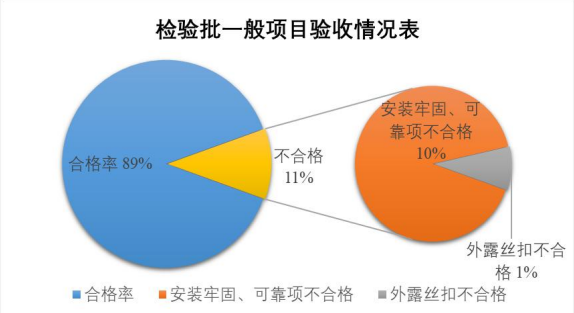
安装总数 3422070 套。本项目质量验收标准为：主控项目最小拉力载荷复验 100%合格；一般项目螺栓紧固应牢固、可靠，外露丝扣不应少于 2 扣 88%以上合格。

2.1.2　质量问题统计分析

检查已施工完成的 A1、A2、B1、B2、B3、B4、B5、B6、C1、C2、C3、C4、C5 方阵组件支架螺栓连接验收记录，其中检验批记录中主控项目验收合格率 100%，一般项目验收合格率 89%，不合格量占比 11%。按方阵进行检验批划分，共验收 13 批次，其中一般项目检查记录 1300 条（检验批每项记录 100 条），不合格数 143 条，分别为螺栓紧固不牢固 130 条，外露丝扣不合格 13 条，如图 1 所示：



a 检验批主控项目验收情况



b 检验批一般项目验收情况表

图1 检验批验收情况

在项目施工过程中，小组成员对施工完成的 A3、A4、B7、B8 方阵螺栓连接施工质量进行 10%数量的抽查验收。在主控项目合格率 100%情况下，验收一般项目，记录数据如下表所示。

表2 A3/A4/B7/B8方阵抽查验收一般项目情况表

方阵	螺栓总量	验收数量	合格数量	不合格数量		合格率
				安装牢固、可靠项不合格	外露丝扣不合格	
A3	110016	11002	9864	1054	84	90%
A4	113148	11315	10082	1121	112	89%
B7	109008	10901	9348	1417	136	86%
B8	119484	11948	10003	1773	172	84%
合计	451656	45166	39297	5365	504	87%

通过上述调查，一般项目验收合格率仅为 87%，低于验收要求中的 88%合格标准，有很大的提升空间，故作为本次活动需解决的课题。小组明确方向后，进一步对此次验收存在的 5869 个不合格情况进行梳理分析，统计情况如表 3 所示。

据表 3 可以看出，组件支架螺栓连接主要问题是螺栓扭矩低于设计值和螺母松动，不合格占比分别达到了 52%和 27%。如果能将“螺栓扭矩低于设计值”、“螺母松动”这两个主要问题发生率降低 60%，螺栓连接合格率就可以提升为=87%+(1-87%)*79%*60%=93.2%，可见组件支架螺栓连接合格率提升空间巨大。因此，小组经过分析讨论后将活动目标值设为：光伏组件支架螺栓连接初验合格率达到 94%。

表3 一般项目验收不合格类型统计表

序号	不合格类型	总数量	不合格数量	频率	累积频率
1	螺栓力矩低于设计值	5869	3052	52%	52%
2	螺母松动		1585	27%	79%
5	外露丝扣不足		646	11%	90%
6	其他		586	10%	100%

2.2　原因分析

上文经过现场调查、统计分析后明确了造成支架螺栓验收合格率低于验收标准的主要原因是“螺栓扭矩低于设计值”、“螺母松动”，因此 QC 小组立即从“人、机、料、法、环、测”六个方面入手，对上述两个主要问题开展现场调查，在调查分析过程中共统计出二十余项造成支架螺栓验收合格率低于验收标准的因素，在剔除不可抗因素后绘制出原因分析关联图如图 2 所示。

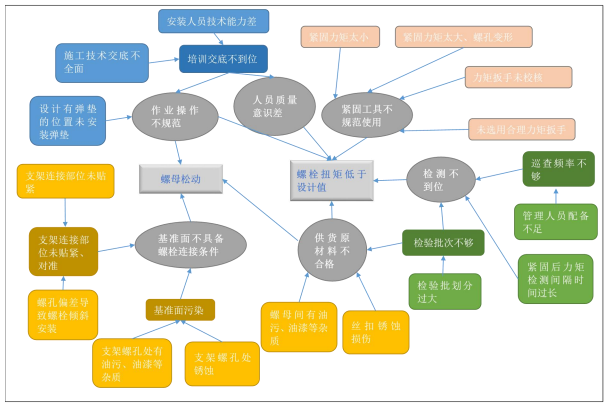


图2 原因分析关联图

2.3　要因确认

原因分析关联图的成功绘制，为 QC 小组后续活动开展的方向提供了重要依据，QC 小组通过对原因分析关联图中的各个因素展开了充分的论证分析，编制的要因确认表如表 4 所示。

QC 小组通过对上表中统计的 16 项因素结合现场实际再次进行了充分的论证，最终总结出造成支架螺栓验收合格率低的五条主要原因：施工技术交底不全面；安装人员技术能力差；设计有弹垫的位

置未加装弹垫；螺栓紧固力矩太大导致螺孔变形；　　螺栓紧固力矩太。

表4 要因确认表

序号	末端原因	确认方法	确认标准	截止时间
1	施工技术交底不全面	现场验证	有，且100%实施	2020/11/12
2	安装人员技术能力差	现场验证	操作考试合格率98%以上。	2020/11/12
3	力矩扳手未校核	调查分析	有，且100%实施	2020/11/13
4	未选用合理力矩扳手	调查分析	按设计要求选择	2020/11/13
5	管理人员配备不足	调查分析	各岗位配备齐全	2020/11/14
6	检验批划分过大	调查分析	检验批按方阵划分	2020/11/14
7	螺栓扭矩验收与紧固时间间隔过长	调查分析	间隔时间=5天	2020/11/14
8	螺母间有油污、油漆等杂质	现场抽查	螺母上无油污、油漆等杂质	2020/11/16
9	设计有弹垫的位置未安装弹垫	现场复查	全部按设计要求安装	2020/11/18
10	螺孔偏差导致螺栓倾斜安装	现场复查	倾斜角度小于等于10°	2020/11/18
11	支架连接部位未贴紧	现场复查	连接部位相互贴紧	2020/11/18
12	支架螺孔处有油污、油漆等杂质	现场复查	安装螺孔处无油污、油漆等杂质	2020/11/18
13	支架螺孔处锈蚀	现场复查	螺孔处无锈蚀	2020/11/18
14	丝扣锈蚀损伤	现场抽查	丝扣无锈蚀和损伤	2020/11/18
15	螺栓紧固力矩太大导致螺孔变形	现场复查	螺栓已紧固处支架凹陷变形小于等于3mm	2020/11/18
16	螺栓紧固力矩太小	现场验证	达到设计的检测力矩	2020/11/20

2.4　制定对策及对策实施

针对影响螺栓初验合格率的主要原因，QC 小组逐项进行了认真的探讨和研究，根据制定的目标并结合工程实际情况，制定了如图 3 所示对策。

对策实施过程是 QC 小组活动能否成功的关键环节，应当根据对策与措施图严格执行，在执行过程中应采取动态纠偏措施，若执行未能达到预期效果，应重新对问题进行分析讨论，制定新的对策并实施，具体实施过程如下：

对策实施一：技术交底做到全面、细致

项目部组织施工人员认真学习工艺流程，核对施工图纸并统计出每个区域的弹垫使用位置和数量，核对统计完毕后，施工员做了全面、细致的交底，对容易出现弹垫遗漏的位置进行重点交底，使操作人员掌握螺栓安装的技术要求，明确了弹垫安装位置。

对策实施二：对操作人员进行培训

项目部组织螺栓紧固班组操作人员进行学习，开设了为期一天的技术培训课，使他们认识到螺栓施工质量的好坏直接影响到发电系统运行的安全。要求其严格按照规范和技术交底内容进行施工，尽快掌握施工工艺并熟练运用。通过培训、教育，提高了操作工人的责任心及技术水平，使其掌握了操作要领，增强了质量意识。

对策实施三：制定严格的质量检查制度

项目部制定质量检查制度，责任明确，增加深入工地巡回检查的人员和次数，进行质量监督，严把质量关，发现问题，及时解决，以免返工造成浪费。

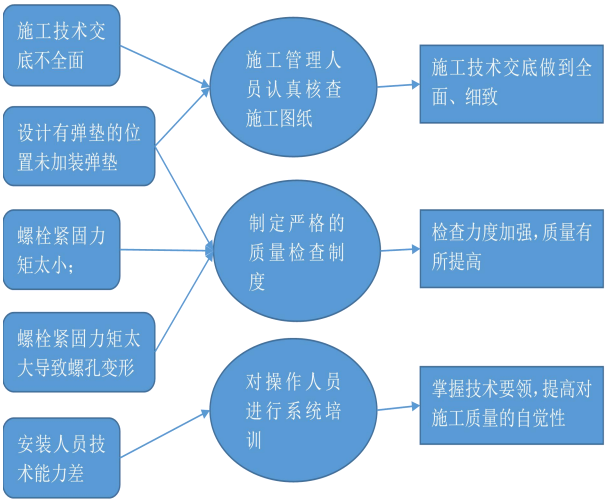


图3 对策与措施图

2.5　效果检查

小组成员认真落实对策，B11 和 C8 方阵 233748 套支架螺栓连接安装完工后，QC 小组组织人员进行了 10%抽查验收，统计的螺栓连接安装施工质量一般项目的情况表 5 所示：

表5 对策实施后一般项目验收情况统计表

序号	质量问题	实施前抽查数量	实施后抽查数量	实施前不合格项	实施后不合格项	实施前不合格数量	实施后不合格数量	实施前不合格率	实施后不合格率
1	螺栓力矩低于设计值	45166	23375	5869	748	3052	351	6.8%	1.5%
2	螺母松动					1585	164	3.5%	0.7%
5	外露丝扣不足					646	140	1.4%	0.6%
6	其他					586	93	1.3%	0.4%
合计		45166	23375	5869	748	5869	748	13.0%	3.20%
光伏组件钢结构支架螺栓连接初验合格率					1-748/23375*100%=96.8%				

经统计计算，开展 QC 活动后，光伏组件钢结构支架螺栓连接初验合格率有了显著提升，从对策实施前的 87%提升到对策实施后的 96.8%，并且高于 94%的设定目标，如图 4 所示：

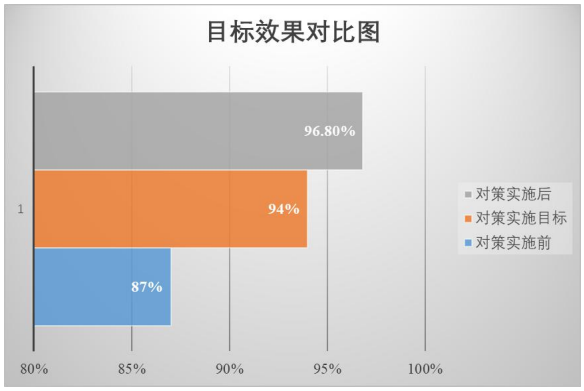


图4 目标效果对比图

2.6 成果巩固

在 QC 小组活动目标达成后，还应制定相应的巩固措施，以防在后续的施工过程中再次发生类似问题，本次 QC 小组活动形成以下几条巩固措施：

加强对班组人员的技术培训，提高班组人员的技术水平，熟练掌握施工工艺；

抓好质量前期策划，加强质量教育，增强质量意识；

在本次活动的基础上继续深入开展 QC 活动和经验交流，加强 QC 小组的科研攻关能力。

同时，QC 小组将影支架螺栓初验合格率的各项因素及相应对策编制成作业指导书上报公司，在公司审核批准后将纳入企业作业指导书，为给后续类似工程项目提供施工经验。

2.7 活动总结

QC 小组活动按照 PDCA 程序进行，依照逻辑性思维分析并诊断问题，进行科学的决策，选用最佳控制措施来解决问题，全面提高了小组成员分析问题和解决问题的能力。

3 结论

越南富美 330MWp 光伏电站项目通过开展 QC 小组活动，成功解决了支架螺栓初验合格率低的问题。本次 QC 小组活动过程对其他工程项目 QC 小组活动的开展具有一定的借鉴作用，相关活动成果可为给后续类似工程项目提供施工经验。

参考文献：

[1]中国质量协会, 刑文英. QC小组基础教材 (第二版)[M]. 中国社会出版社, 2003.

[2]裴宗敏.QC小组活动在企业质量管理中的作用探讨[J].企业改革与管理,2021(22):53-54.DOI:10.13768/j.cnki.cn11-3793/f.2021.2242.

[3]蒋永辉.浅谈QC小组活动在工程项目中的开展与应用[C]//2021年工业建筑学术交流会论文集（上册）.[出版者不详],2021:439-441.DOI:10.26914/c.cnkihy.2021.011096.

[4]马国师,段昊衡,赵亚鹏,孔鑫鑫.浅谈QC小组活动在危岩体治理施工安全管理中的应用[J].四川水利,2020,41(06):132-134.

作者简介：

赵忠杰（1988），男，汉族，河北省魏县，硕士研究生，工程师，国际工程项目管理，项目管理，E-mail：jxepdi-zhaozhongjie@powerchina.cn

高密池絮凝强化装置频繁堵塞问题分析与治理

李庆超

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 临川 344000）

摘要：絮凝强化装置（如图 2）安装于絮凝反应池顶部，污泥回流泵将沉淀/浓缩区底部部分污泥送入絮凝强化装置进行活化，最后将活化污泥回流到絮凝强化区与待处理水接触反应，提高混凝效率。每座高密度沉淀池设絮凝强化装置 1 台，絮凝强化装置所需的助凝剂及絮凝剂药液箱（罐）分别与加药间的助凝剂及絮凝剂药液（罐）共用.每座高密沉淀池设污泥回流泵 2 台，1 用 1 备，采用单螺杆泵，污泥循环量按原水进水流量的 2~4%，且流量变频可调。

关键词：絮凝强化装置；堵塞；污泥回流；反冲洗

1 概述

江西大唐国际抚州发电有限责任公司补水水源取自抚河，原水预处理采用高密度沉淀池处理工艺，处理后作为循环水和工业水的补充水，处理后出水浊度≤3NTU，设计出力4×900m³/h，工艺流程如图1所示。高密沉淀池由凝聚、絮凝、沉淀工艺设备和土建结构组成，分为：凝聚（混合微絮凝）区、强化絮凝区、熟化区、沉淀区、浓缩区、泥渣回流系统、剩余泥渣排放系统。原水 进入凝聚（混合微絮凝）区，在此投加凝聚剂，通过搅拌器快速混合，发生凝聚（混合微絮凝）反应，生成小颗粒矾花；而后进入强化絮凝区及熟化区，在强化絮凝区投加助凝剂，在搅拌叶轮作用下与沉淀/浓缩区回流泥渣接触反应生成大颗粒密实矾花；出水以推流方式进入沉淀区，泥水分离，清水由池顶集水槽收集，泥渣在浓缩区浓缩，浓缩泥渣部分回流至强化絮凝区，剩余部分污泥采用重力方式排出。

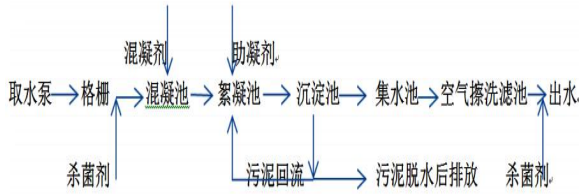


图1 原水预处理工艺流程图

絮凝强化装置（如图2）安装于絮凝反应池顶部，污泥回流泵将沉淀/浓缩区底部部分污泥送入絮凝强化装置进行活化，最后将活化污泥回流到絮凝强化区与待处理水接触反应，提高混凝效率。每座高密度沉淀池设絮凝强化装置1台，絮凝强化装置所需的助凝剂及絮凝剂药液箱（罐）分别与加药间的助凝剂及絮凝剂药液（罐）共用。每座高密沉淀池设污泥回流泵2台，1用1备，采用单螺杆泵，污泥循环量按原水进水流量的2~4%，且流量变频可调。



图2 絮凝强化装置现场图

经过统计，在机组运行过程中，四台絮凝强化装置及污泥回流泵均不同程度的出现堵塞， 改造前半年缺陷统计结果如表1：

表1 治理前缺陷统计（2019.06-2019.12）

缺陷内容	絮凝强化装置出口管堵塞	絮凝强化装置底部排污管堵塞	污泥回流泵堵塞不出力
数量	10	8	25

近半年的时间缺陷数量高达43条，严重影响絮凝反应的效果，现场紧急处理只能停运污泥回流系统，将底部排污门前法兰解开，拆出顶部搅拌器由装置顶部盖板处外接引水进行冲洗，清理装置内大量淤泥。频发堵塞缺陷给检修维护人员增加了极大的工作量，既浪费了人力、物力，同时对机组制水安全带来了影响。

2 原因分析

2.1 从“人、机、料、法、环”五个方面分类寻找了造成高密池絮凝强化装置频繁堵塞的原因，并

绘制了鱼骨图，如图3。

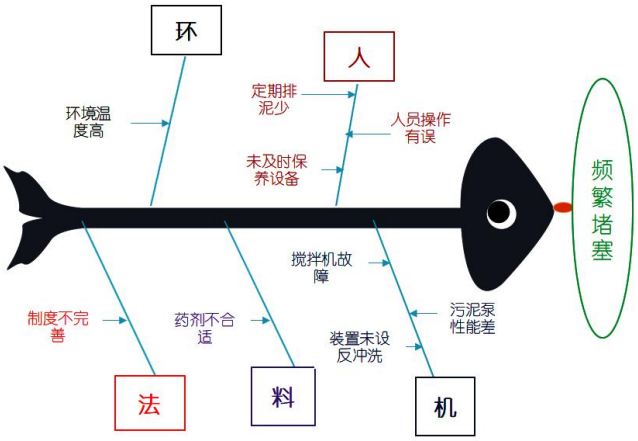


图3 鱼骨

2.2 通过以上分析，共找到9项末端因素，针对末端因素，制定要因确认表：

表2 要因确认表

序号	末端因素	验证内容	验证标准	验证情况	检查时间
1	人员操作有误	运行人员启、停设备是否合适	查询规程，向运行人员询问设备操作情况	经询问，运行人员严格执行规程要求	2020.01.10
2	未及时保养设备	检修人员是否进行转动设备定期保养	是否按照制度要求开展定期工作	查询对电机、搅拌机轴承、油室的加油保养记录，符合要求	2020.01.15
3	定期排泥频次少	排泥频次是否太少	询问班组安排人员排泥的频次	检查班组安排人员巡检、排泥的频次，频率较高	2020.02.15
4	制度不完善	查询有关设备管理的规章制度	运行和检修人员是否定期巡检，设备异常是否及时汇报及处理	缺陷管理制度很完善，运行人员发现缺陷后下达，点检策划后检修人员负责处理	2020.02.19
5	搅拌机故障	检查确认搅拌机是否频繁故障	对比搅拌机故障是否引起堵塞频次变化	经检查，各装置出现搅拌机故障次数较少，且与装置堵塞不相关	2020.03.09
6	药剂不合适	检查装置内所投加药剂的化学成分	说明书显示应投加聚合氯化铝作为絮凝剂	对助凝剂加药进行取样，经化验班化验成分合格	2020.03.24
7	环境温度高	季节温度是否决定堵塞频次	对比冬季，夏季堵塞情况是否不同	查询近两年缺陷，5—8 月堵塞情况并未比其他时期偏多，只是迎峰度夏期间负荷较高，机组制水需求较大	2020.04.04
8	污泥泵的性能差	不同污泥泵是否对回流造成影响	不同泵是否引起缺陷次数不同	回流泵间有螺杆和渣浆两种形式泵，螺杆泵甩泥和堵塞故障频发	2020.04.18
9	装置本身未设置反冲洗	定期冲洗是否可减少堵塞	堵塞次数是否有改善	检查定期清洗后，设备运行效果	2020.04.20

经过调查验证，用于絮凝强化装置污泥回流的泵为德国耐驰污泥螺杆泵，型号为：NM053BY01L06B，定子为橡胶形式，与螺杆接触形成密封腔室输送介质。我厂原水水源杂物较多，且存在硬质杂物，易造成转子与定子卡涩或定子橡胶磨损而影响泵体出力。同时，絮凝强化装置罐体以及相连所有泥渣管道均未设置反冲洗系统，泥渣长时间累计板结极易造成管道堵塞所以污泥回流泵的性能差、装置本身未设置反冲洗是高密池絮凝强化装置频繁堵塞的主要原因。

3 处理措施

要解决高密池絮凝强化装置频繁堵塞的现象，主要解决污泥回流泵的性能差、装置本身未设置反冲洗这两大问题，具体处理措施如下：

3.1 针对污泥回流泵性能差的问题，需要对高密池污泥回流系统输送泵进行改型处理，将原德国耐驰污泥螺杆泵改型成污泥渣浆泵，其叶轮形式为开放式叶轮：型号40D-A25，并增加轴封密封水，更加适合我厂高密池水质环境。

3.2 针对絮凝强化装置本身未设置反冲洗，需要从工业水管引出反冲洗水源（如图4）。具体措施如下：

3.2.1 在高密池絮凝强化装置排污门前管道处加装反冲洗管道，可关闭排污门后进行反冲洗，也可打开排污门进行管道冲洗。

3.2.2 在高密池絮凝强化装置排泥管隔离门后加装冲洗管道，可关闭排泥管隔离门对排泥管进行冲洗。

3.2.3 在高密池顶部加装地面冲洗水，用于高密池顶部冲洗清洁工作，方便日后池顶工作的开展。

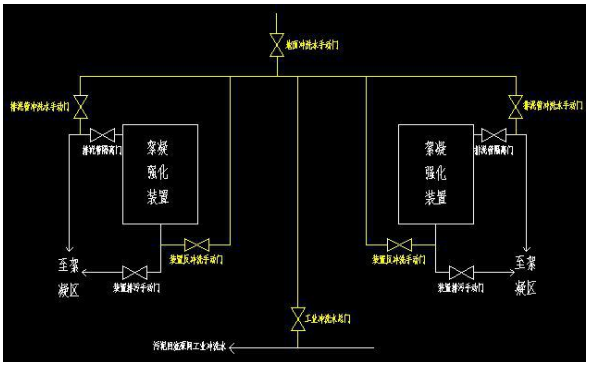


图4 反冲洗系统图

4 效果评估

4.1 污泥回流泵改型前如图5，更换为出力、密封等性能更好的新式泵后，减少了甩泥、堵塞、不出力等故障频次，确保给絮凝强化装置加泥稳定、避免药与泥的投加比例不合适导致的污泥提前板结。



图5 污泥回流泵改型后效果图

4.2 絮凝强化装置反冲洗管道安装后如图6，管道

材料选用高质量ppr水管及阀门，安装简单快捷且经久耐用，安全可靠。



图6 反冲洗安装效果图

4.3 经过调查统计，改造后近半年絮凝强化装置及污泥回流泵缺陷明显下降，达到预期目标具体数据见表3：

表3 治理后缺陷统计（2022.01-2022.06）

缺陷内容	絮凝强化装置出口管堵塞	絮凝强化装置底部排污管堵塞	污泥回流泵堵塞不出力
数量	0	0	3

5 结论

絮凝强化装置为脱稳胶体颗粒提供优质的“絮凝核子”，通过改善絮体凝聚特性、吸附特性、沉降特性以及脱水特性；提高对原水水质和水量适应性、提高水处理效能及抗冲击负荷的能力及出水水质。所以絮凝强化装置也是保障机组正常补水的重要设备之一，提高其运行的可靠性、降低缺陷的发生率也是保证发电机组安全稳定运行的重要措施。经过对设备缺陷的统计分析，设备性能评估最终确定污泥回流泵的性能差、装置本身未设置反冲洗是高密池絮凝强化装置频繁堵塞的主要原因，并通过污泥回流泵改型，加装反冲洗系统从根本上解决了高密池絮凝强化装置频繁堵塞的问题。

参考文献：

[1]电厂化学设备检修[M].中国电力出版社，2017
[2]电厂化学设备及系统[M].中国电力出版社，2015
[3]抚州电厂化学设备运行规程[M]，2020
[4]抚州电厂化学设备检修规程[M]，2020

作者简介：

李庆超（198909），男，山东菏泽，本科，助理工程师，研究方向汽机和化学，E-mail：13829920904@163.com

MGC4000型调速器在某水电厂的运行经验探讨

吴雨霏，陈宸

（国能万安水力发电厂，江西 万安 343800）

摘要：调速器是水轮发电机的重要控制设备．它的运行品质和在不同工况下的调节性能，将直接关系到水轮发电机组甚至水电厂的安全稳定运行。因此，运行人员必须熟练掌握解调速器的操作方法和性能特点，重视调速器的运行和维护，熟悉调速器在各种不同工况下的故障处置和注意事项，才能避免事故的发生，保证水轮发电机组安全稳定运行。

关键词：调速器；运行操作；故障处理；注意事项

0 引言

某水力发电厂位于赣江中游，安装有 5 台轴流转桨式水轮发电机组，发电机型号：SF105-78/12800、水轮机型号：ZZ440-LH-850，总装机容量 533MW，设计运行水头 23 米。近年来，该厂陆续将机组调速器改造为能事达 MGC4000 型。本文从运行人员角度出发，对该型调速器的使用经验进行总结、分析和探讨，望能对安装有同类型调速器的水电厂提供经验参考。

1 调速器简介

MGC4000型调速器通过机组水头、频率、有功功率、导叶开度等传感器将机组的信息送至控制器，控制器将这些信息与监控系统或者调速器面板上的控制指令进行综合，判定机组当前的工作状态以及控制目标，并且将控制信号送至执行机构，将控制指令经过电液转换之后最终作用在导叶（桨叶）接力器上，从而改变机组的运行状态，达到预期的控制目标。

机组在并网运行前，调速器需先将机组调整到额定转速运行，此时调速器的作用为频率调节器，其调整目标是把机组频率调整到额定值。机组在并网运行后，机组向电网输出有功功率，调整水轮机的导叶开度/桨叶开度能够改变机组输出的有功功率大小，此时调速器作为有功功率调节器工作，其调整目标是把机组发出的有功功率调整到电网需求的数值。当电网频率波动超过设定值后，调速器自动变为频率调节器，将机组频率稳定在机组额定值。

2 调速器关于机组运行状态的判定

2.1 关于机组运行状态的判定

MGC4000型调速器根据设定好的逻辑自动判定机组当前状态，进而通过预设程序控制调速器进入对应工况，如：1）当导叶开度＞6%、断路器在分，则判定机组在“空载态”，调速器进入“空载运行”工况；2）当导叶开度＞6%、断路器在合，则判定机组在“发电态”，调速器进入“负载运行”工况；3）当机组在“发电态”、断路器在分，则判定机组进入甩负荷过程，调速器从“负载运行”工况进入“甩负荷过程”工况；4）当机组在“发电态”下停机令，则判定机组进入停机过程，调速器从“负载运行”工况进入“停机过程”工况；5）当导叶开度=0%、机频＜15Hz，则判定机组在“停机态”，调速器进入“停机等待”工况；6）当机组在“停机态”下发开机令，则判定机组进入开机过程，调速器从“停机等待”工况进入“开机过程”工况；

需要注意的是：当调速器进入对应工况后，会将导叶、轮叶开度调整为适应当前工况的开度；如果因信号、电源、故障等因素导致电调误判了机组当前状态，调速器依然会根据预设程序进入对应工况，这可能会导致意料之外的情况发生。

2.2 调速器对机组运行状态判定不当导致的后果

在一次试验中，某厂1号机组通过相邻主变中压侧开关甩85MW负荷后，频率迅速升高至68Hz，由于并非1号机出口开关101DL跳闸，所以1号机带1号主变和110KV系统进入孤网运行方式按50Hz调节。1号机转速上升后调速器迅速关闭导叶，在6秒钟内快速直线从86.7%关闭至3.663%（由于分段关闭阀动作后减缓了导叶关闭速度，这增大了调速器在关闭导叶过程中的调节量），频率持续下降到40Hz时，调速器判断该发电机处于空载状态而将导叶限制在空载开度。尽管此时调速器已缓慢回调至空载开度，但由于此时1号机实际仍带有1.6万负荷，空载开度下水动力严重不足，导致转速持续下降至56%ne。因1号机频率降低，其电压、电流波形发生严重畸变，已经超出了保护装置的设计能力（按工频设计），导致1号机匝间保护动作停机。

在后续防范措施中，该厂优化了调速器孤网运行控制方式。将因倒送厂用电方式下增加的“频率低于40Hz（此时101DL在合位）时强置101DL在分位（即强置调速器处于空载态）”的逻辑取消。为解决倒送厂用电时调速器判定状态转换的问题，在接入调速器的101DL信号回路中串接一个压板，规

定倒送厂用电时断开压板、正常开机前合上压板。为防止调速器误判机组状态，修改开停机流程，即停机后自动投入紧急停机电磁阀，开机时自动复归紧急事故电磁阀。

3 调速器的日常操作

3.1 关于水头设置

在设置人工水头时，必须给调速器A/B套分别设置相同的水头值，否则当调速器发生故障进行主/备用切换时，备用套电调会依然在旧水头下运行。由于电调电气开限不会自动跟踪当前水头，当运行人员将人工水头从高值设为低值时，需要在调速器软件界面中人为增大电气开限或将调速器在“自动”和“电手动”控制模式下来回切换一次，以便电气开限自动跟踪当前水头。

3.2 关于事故停机电磁阀

由于某厂曾出现过1号机复归事故停机电磁阀时，调速器自动打开导叶导致机组空转的意外情况，且目前尚未查明原因。故只能暂时做出如下运行操作规定：1）当机组处于停机备用状态下时，如果要复归调速器机械柜事故电磁阀，须先将调速器切换为“自动”运行状态；2）当机组处于停机备用状态时，如果要将调速器切“电手动”，需要先投入调速器机械柜“事故电磁阀”，防止此类情况再次发生。

3.3 关于紧急停机按钮

按下紧急停机按钮之后，比例阀/电机的控制不再发挥作用，调速器机柜紧急停机电磁阀动作，直接控制主配压阀关闭导叶。此时，调速器将会以最快速度关闭导叶，但不会跳发电机出口开关，这将导致机组进入异常工况或事故停机，可能会对设备产生损坏，其操作必须慎之又慎！ 当机组故障原因查明并排除之后，在开机之前可以按下紧急停机复归按钮，使得控制油路恢复正常。

3.4 关于调速器“手动/自动”切换

虽然调速器机械柜和电气柜的“手动/自动”切换按钮设置有联动，但在实际运行中发现，当在调速器机械柜上将运行方式从“手动”切换为“自动”时，电气柜并不会自动跟随，还需要在电气柜上按下“自动”按钮，调速器才会切换到“自动”工作状态。建议厂家改进调速器机械柜和电气柜的联动机制，省去上述操作步骤，防止人为疏漏引发安全隐患。

3.5 关于主/备用切换

在运行实践中发现：当调速器其中一套发生故障，自动切换至另一套运行时，需要人为将调速器导叶和轮叶进行手/自动来回切换一次,这样才能确保在当前套再次发生故障时调速器会自动切换回另一套运行。

4 调速器在“黑启动”中遇到的问题

4.1 通过上位机下发“空载令”机组无法升至额定转速

对于轴流转桨式机组来说，由于“黑启动”要求尽量减少调速系统用油，运行人员在开机过程中须将用油量最大的轮叶切“手动”控制，并保持不操作，持续到厂用电恢复为止。此时，由于轮叶保持在启动角+5°不变，未回关至0°，与空载工况下导叶开度不协联。当导叶开至当前水头下默认的空载开度16.8%时，水轮机动力力矩不足，机组转速仅能够达到80%ne即40Hz。虽然此时调速器工作在“频率模式”下（按50Hz调节），但受调速器“空载运行”工况下默认导叶开度限制，无法通过监控下发“空载”令实现快速自动开机。操作期间，运行人员曾尝试将水头从26.5m设置为22m，但仍无法继续打开导叶将机组转速升至100%ne。须人为将导叶切“手动”控制开大至28.7%左右，才能将机组转速升至100%ne。

改进措施：1）不通过“空载令”开机，将导叶切“手动”控制，手动开机将机组转速升至100%ne；2）由于轮叶切手动，机组实际的启动开度比空载开度大很多，机组转速可能达不到95%Ne，机组不能自动建压，此时可根据油压、油位情况（应谨慎操作，严防出现事故低油压），手动适当减少轮叶开度，调节机组转速维持在额定，确保机组励磁建压正常。

4.2 调速器切“自动”控制后导叶回关至空载开度

在黑启动试验过程中，操作人员曾三次尝试将机组导叶切“自动”控制，希望调速器能够按照频率50Hz自动调节稳定机组转速。但受调速器“空载运行”工况下默认导叶开度限制，在第一次机组处于“空转态”时将导叶切“自动”后，导叶回关至当前水头下默认空载开度16.8%，机组转速重新下降至80%ne。第二次机组处于“空载态”时将导叶切“自动”后，由于调速器将导叶回关导致了机组转速下降至84.6%ne，更是出现了励磁调节器低频逆变的后果！在第三次机组处于“空转态”时将导叶和轮叶同时切“自动”后 ，调速器经过了30秒左右的调节过程，机组转速经过短暂波动后才稳定在100%ne。

改进措施：1）全程保持调速器导叶在“手动”控制，安排专人监视和调整机组转速；2）机组建压、厂用电恢复后若调速器导叶开度与当前水头下默认空载开度不符，不可直接将调速器导叶切“自动”控制，谨防因导叶回关，导致励磁调节器低频逆变。如需将调速器切回“自动”控制，应在瞬间同时将导叶和轮叶切回“自动”，或者在确认厂用电和压油装置恢复正常的情况下，人为手动微调导叶和轮叶开度，使其尽量接近当前水头下的空载开度值并保持协联，再将导叶和轮叶同时切回“自动”

控制。

4.3 励磁调节器自动低频逆变

在发电机空载情况下，当发电机频率低于45Hz时，励磁调节器进行逆变灭磁，保护发电机或主变免于过激磁损坏。09时54机组处于“空载态”时将导叶切“自动”后，由于调速器将导叶回关导致了机组转速下降至84.6%ne，满足了机组频率低于45Hz的逆变条件，发电机低频逆变。这种情况在实际黑启动或事故处理中应当极力避免发生！

预防措施：1）机组建压后应避免机组频率下降至45Hz以下，改进措施同上述4.2条目；2）若机组建压后发生低频逆变，在厂用电未恢复的情况下须手动操作导叶将转速回升至额定，通过监控重新下发“空载”令或现地手动建压的方式恢复机端电压。

5 结束语

通过对MGC4000型调速器在实际运行中遇到的问题进行分析，对其中重要事项进行总结，可更好帮助运行人员了解和使用该型调速器，望能为安装有同类型调速器的水电厂提供经验参考，有助于提高水电厂机组运行安全性和经济性。

参考文献：

[1]陈铁华,水轮发电机原理及运行,水利水电出版社
[2]中国电力出版社,电力工程设计手册,中国电力出版社,
[3]电力行业职业技能鉴定指导中心,水轮发电机组值班员,中国电力出版社
[4]吴长利,水轮发电机组典型案例分析,国网湖南省电力公司电力科学研究院

作者简介：

吴雨霏（1990），男，安徽，本科，工程师，发电运行，E-mail：791608300@qq.com

陈宸（1996），女，吉安，本科，助理工程师，发电运行。

光伏组件状态感知深度神经网络的功率预测模型

张书启，熊敏

（中国电建集团江西省电力建设有限公司，江西 南昌 330001）

摘要：随着近年来光伏新能源业务快速发展，各新能源企业持有的光伏电站已形成规模，光伏电站的功率预测上送准确率直接影响着电站收益，同时功率预测的准确性也影响着各企业管理层的战略决策，因此提升功率预测的准确性是各新能源企业需要迫切解决的问题。制约光伏电站功率预测的准确性的主要原因在于两点，一方面是气象预报数据的准确性，另一方面在于无法感知到光伏组件的状态。由于气象预报数据无法干预，因此通过深度神经网络对光伏组件建立预测模型，实时感知光伏组件的状态进而提高整个光伏电站的预测准确性。

关键词：大数据平台；光伏组件；功率预测；神经网络

0 引言

最近十几年来，中国的光伏行业急速扩增（截止2021年我国累计达到的装机容量是3.06亿千瓦），也因此光伏发电已经成为了中国电力系统中极为要的组成部分，提高对功率预测的准确性对于电站的收益以及企业的决策有着至关重要的作用，通过深度神经网络以及精细化建模能够有效的提升功率预测的准确性，进而提升企业的收益。

由于5G的发展，在一定程度上推进了物联网的发展，数据采集的粒度得到了有效的提升，从而提供了精细化建模的能力。传统做法只能做到对逆变器进行建模，基于江西电建公司的大数据平台的数据优势，使得感知光伏组件的状态，对光伏组件进行建模成为了可能。与此同时，深度神经网络有着强大的建模能力，利用深度神经网络使得预测的准确性得到了极大的提升。由于传统的深度神经网络如果层次过深会导致梯度消失或者梯度爆炸的问题，受到残差神经网络(ResNet)[1]的启发，由于残差的连接，梯度的问题得到了有效的缓解。不仅仅短期和超短期的预测，对于更长的时间周期下仍然能够保持较高的准确性。由于将时间戳纳入到样本的特征之后，对于现实场景下的白噪声也能很好的学习到，对于准确性的提高有着极大的帮助。同时使用实时修正模型以提高应对突发性故障的能力，使得在突发的持续性的故障在发生后，模型能够迅速做出反应并且修正预测值。

得益于其强大的自然预测能力，对于得到的相对偏差可以进行二次学习，从而对故障类型进行分类。对于光伏组件而言，不像逆变器等设备具备自我故障检测的能力，传统的运维方式往往是通过人工到现场巡查的时候发现，或者肉眼对比相邻组件的电压、电流、功率等数据从而发现组件的问题，但是这样的方式往往效率低下且不准确的。

因此使用准确率高且泛化能力强的模型学习到组件的输入数据与输出数据之间的深层次的联系，在可靠的模型下对组件的正常态功率做出预测。同时生成预测功率与实际功率的相对偏差，经过二次学习判断出故障类型，同时对模型进行修正进一步提升预测的准确性。一方面由于上送预测功率准确性的提高能够直接带来经济收益，另一方面提供了一种组件的综合自然衰减率的判断方法，从而给出正确的更换建议以带来经济效益，其次由于其实时性，能够快速发现组件的故障情况。

1 理论基础及设计依据

从模型粒度上来看，传统功率预测系统无法获取到每一个光伏组件的实时数据，因此往往是通过对整个光伏方阵或者逆变器进行建模，但是当某个光伏组件发生故障时，系统则难以感知到从而导致预测的准确性下降。对于时间序列模型中典型的有LSTM，即便LSTM与传统RNN模型相比，能够学习到更长的序列信息，但是对于序列长度仍然有限制。而对于BP神经网络而言，其具备表示任何函数的能力，其缺点在于参数量过于庞大，且对样本的数量有着更高的要求，同时过深的隐层会带来梯度问题。SVR是效果很好的浅层模型，但是难以挖掘到更深层次的特征。残差神经网络给深度学习带来了很大程度上的提高，即便加深隐层的层数也不会对预测的准确性造成太大的影响。

(Long Short-Term Memory)LSTM[2]：与传统的RNN模型相比，LSTM同样也是循环神经网络，但是RNN存在的问题是对于长序列中位于首部的神经元的参数梯度会消失。LSTM是由多个LSTM单元以链状的方式进行相连，同时由于遗忘门的存在，模型可以选择性遗忘不重要的信息。在功率预测中，使用LSTM可以有效学习到时间序列信息，仍然会丢失长期序列信息，对于白噪声的捕捉是乏力的。

BP(back propagation)[3]:BP神经网络最早是在1986年所提出的，从形式上看由多个线性分类器加上非线性层构成一层隐层，同时隐层可以多层堆叠并且前向传播以及逆向误差更新从而计算出最

优解。由于其简单性以及其强大的表示能力，是目前应用最广泛的神经网络模型之一。

SVR[4]:支持向量回归(SVR)是一种回归算法，它应用支持向量机（SVM）的类似技术进行回归分析，回归数据包含连续的实数。为了拟合这种类型的数据，SVR模型在考虑到模型的复杂性和错误率的情况下，用 ε 管（epsilon-tube， ε 表示管子的宽度）的给定余量来接近最佳值。

多元线性回归模型，通过多变量之间的互相交互从而能够学习到更加复杂的曲线。

残差神经网络：残差神经网络的提出一开始用于解决图像识别的问题，各个层次之间通过残差相连，由于残差的存在可以有效的使得梯度消失的问题得到缓解，因此也具备了学习到更深层次特征的能力。

2 模型

通过“5G+物联网”与大数据平台有效融合，数据粒度和精度都有了极大的提升，通过对更细化的发电单元建立功率预测模型，针对光伏设备运行状态，光伏设备的发电能力，建立深层神经网络模型，同时对设备状态进行实时的更新，从而使得预测准确性得到提升。之所以通过残差神经网络模型对光伏组件进行建模主要是由于其优秀的表示能力，使得其能挖掘出数据更深层次的特征，由于初始特征数量的限制，这样的建模方式更专注在于特征之间的关系，加入了时间戳之后对于组件长周期下的预测效果较佳，并且考虑到了白噪声的情况，更能反应设备自然的状态。对于突发性故障则可以通过模型修正的方式，从而提高其抗干扰能力，进而提高其预测的准确性。并且对于光伏的运维而言，具备及时而又准确的发现设备表象问题以及潜在问题的能力是更为重要的。

2.1 数据的采集和清洗

构建出智慧监测平台，对于光伏设备的检测和监控能力将有着极大的提升。数据采集是大数据的源泉，只有对光伏发电设备的各个发电单元的运行状态和数据进行了全面、合理的采集，才能够更加针对化的进行数据清洗，并且通过预测模型对数据进行二次清洗，以及从模型中获得更详细的设备状态信息。数据主要分为两类：电气数据，气象数据。电气数据包括光伏组件的电压，电流，有功等，气象数据则包括辐照度，温度等数据。

其中数据的采集流程如图1所示，受到供电和无线信号的影响，为了减少数据的缺失，通过SFTP的方式获取设备保存的历史数据。而不是采用其上送的实时数据。能够在一定程度上保证数据的质量。

由于采集装置的供电来源于光伏组件，因此在组件的功率很低的时候则采集装置无法继续供电，从而造成部分数据的缺失，因此有进行数据清洗的必要性。清洗的方案为：对于某个样本的某个特征缺失，则将整个样本以辐照度，温度和电气量设置为0±0.0001。即用于训练的数据所属的设备未发生故障，在自然条件下的其所具备的发电能力。

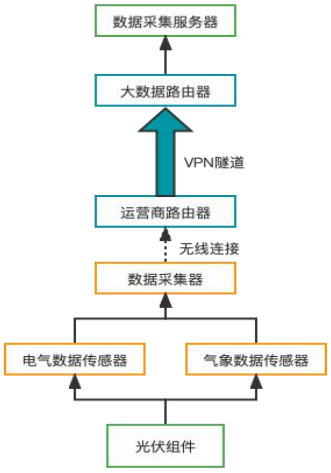


图1：数据采集流程

2.2 模型结构

通过特征工程，分析数据特征，从而更有针对性的构建回归模型，通过对数据进行分析，使用残差神经网络对光伏组件进行建模。为了解决长周期下设备的衰减问题，纳入了时间戳作为样本的一个特征，经过模型的训练能够学习到设备的自然损耗。模型的架构如图2所示，输入数据经过嵌入层，N个Residual层，全连接层后输出结果。

嵌入层：输入数据由三类构成，分别是电气数据，气象数据，时间戳。如图2中下方所示，输入数据经过嵌入层转变为高维特征向量。其中时间戳中包含了设备的转化率等信息，因此将时间戳作为其中一个特征，能够有效的学习到设备的转化率，衰减率等信息，从而使得预测的准确度更高。

Residual层：经过带残差连接的深层网络之后获得特征的深层次表示，同时也并不会丢失浅层的信息。如果前N层已经学习到了足够的特征，那么后续的残差模块则并不会带来新的特性，因此对于无法肯定隐层层数的选取的情况下采用残差相连可以提高模型的优化速率。

全连接层：到达全连接成的特征向量充分生成了特征之间的隐含信息，因此经过全连接将维度压缩成1维，表示为当前的功率。

损失函数：损失函数使用均方误差MSE，其中n为样本个数，y_i为预测功率，$\hat{y}$为实际功率

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$$

光伏组件的状态感知：当连续多点的预测功率与实际功率偏差较大时，可以判断为光伏组件受到非正常干扰，如组件损坏或者突然被物品遮挡。通过对模型的动态修正，从而满足功率预测的准确性。同时发出组件状态异常告警，使得运维人员能够定位到具体的组件从而能够快速处理组件的故障。偏差率为1则表明了光伏组件发生严重故障，如偏差率为0.5则

表名了光伏组件的发电能力因以外情况大幅降低，如组件的大面积遮挡，组件覆冰等情况。对于白噪声的处理通过将所有数据的时间戳设置为起始初始时间戳，即认为设备的衰减率固定，通过两者损失的对比就可以得到光伏组件的衰减率。

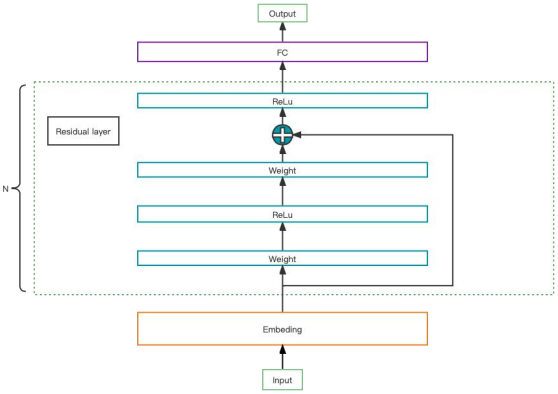


图2：模型结构

3 实验

3.1 评价指标

模型的评价指标为MSE损失，超短期准确率和短期准确率。其中MSE衡量了预测数据的整体误差，超短期和短期衡量的是预测数据的相对误差。

均方误差MSE：使用未来24小时的预测和实际功率数据，其中每1分钟一个预测功率和实际功率共1440个数据点。其计算公式为：

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2$$

超短期准确率：使用未来4小时的预测和实际功率数据，其中每15分钟一个预测功率和实际功率共16个数据点。超短期准确率体现了预测数据在较短时间周期内的预测性能。

短期准确率：使用未来72小时的预测和实际功率数据，其中每15分钟一个预测功率和实际功率共288个数据点。短期准确率则体现了长时间周期内的预测性能。

对于更长时间的场景下，模型预测的准确率也并没有体现出明显的下降，如图10所示，可以看到再往后预测10天的数据仍旧保持了同样的效果。

$$Acc_{day-ahead} = 1 - \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}[(p_i - p_i')^2 \cdot \frac{|p_i - p_i'|}{\sum_{i=1}^{n}|p_i - p_i'|}]}}{Cap}$$

其中n为样本个数，P_i为预测功率，p_i'为实际功率。

3.2 实验结果

3.2.1 自然情况下的预测

即样本的输入是{”时间戳”,”辐照度”,”温度”}，样本的标签是{”功率”}，得到的超短期，短期，损失函数分别如图3、图4和图5所示，其中超短期预测的精确率为97.94%，短期预测的准确率为95.21%。其中训练的样本个数为传感器在150天采集到的216000个样本，用于测试的样本为第151，152，153天采集到的4320个样本。

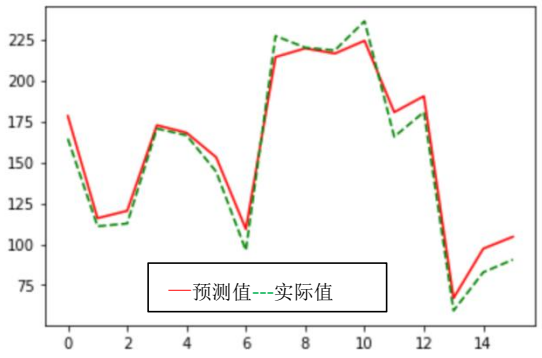


图3：超短功率期预测曲线

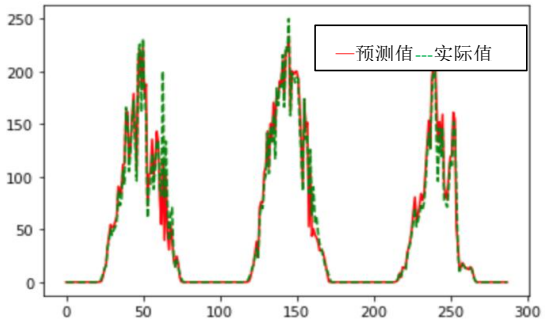


图4：短期功率预测曲线

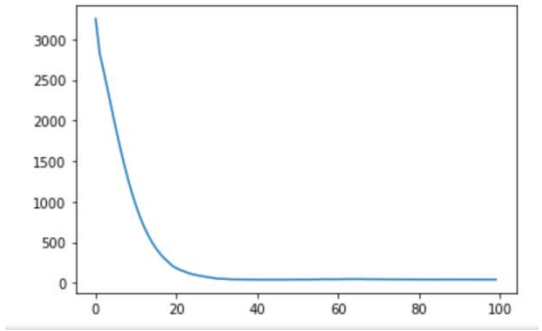


图5：均方差损失曲线

3.2.2 组件衰减率预测

对于白噪声的处理通过将所有数据的时间戳设置为起始初始时间戳，即认为设备的衰减率固定，通过两者损失的对比就可以得到光伏组件的衰减率。即输入为{”时间戳”=固定值,”辐照度”,”温度”}，样本的标签是{”功率”}，使用正常考虑白噪声情况下的模型参数，得到的100天时的损失为34.95，而在输入为{”时间戳”=固定值,”辐照度”,”温度”}，样本的标签是{”功率”}下第100天的损失为33.95，通以相对偏差为衰减率计算得出综合衰减率为0.43%，其中计算公式如下：

$$F(p,p') = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n} p - p'}{\sum_{i=1}^{n} p}$$

其中p为预测功率，p’为实际功率，n为样本数量

图6是计算每天的综合衰减率，即同时考虑了

覆灰和组件老化等情况下的综合的功率损失。图7是仅考虑组件老化的情况下的衰减率，可以看到两者趋势相同。趋势符合实际情况，且根据国家规定，对于单晶硅类型的组件而言，其首年的衰减率不超过3%，多晶硅组件的首年衰减率不超过2.5%，后续的衰减率不超过0.7%，通过曲线拟合得知在考虑覆灰，老化等白噪声的年综合衰减率为1.57%。

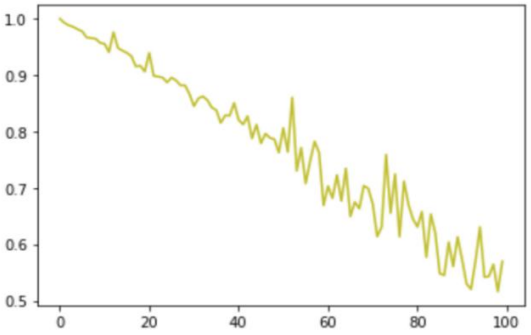


图6：综合衰减率曲线

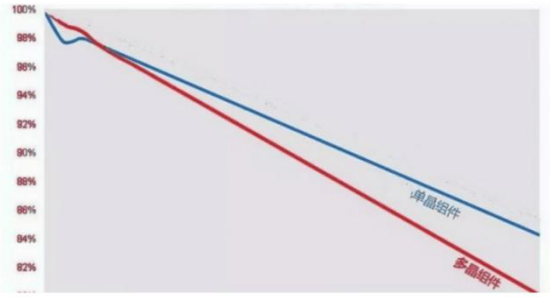


图7：精准测试下的组件衰减率曲线

3.2.3　组件模型修正

当预测的功率连续4小时大幅度的出现单向偏差，能够得出光伏组件在4小时前突然发生了大面积遮挡等情况，具体的曲线如图8所示。此时一方面发出组件需要检修的信号，另一方面修正模型，以满足后续4小时的超短期预测准确率的要求。同时消除异常点，并且原模型继续持续对正常态下的功率做出预测。同时修正策略为预测功率系数修正，修正率为相对偏差。及实时检测相对偏差，根据相对偏差对功率进行修正，即可满足在发生突发性时间后，模型能够正确做出调整。修正后的功率曲线如图9所示。

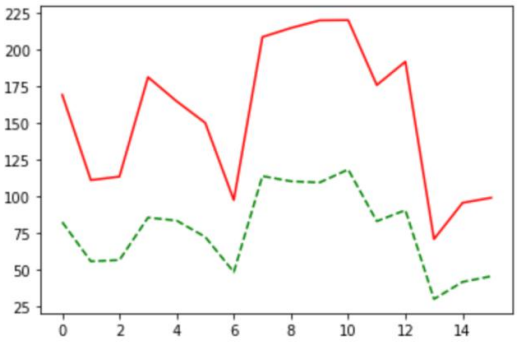


图8：组件严重遮挡情况下的曲线

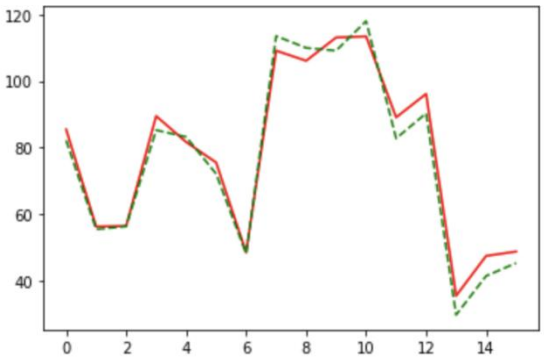


图9：组件严重遮挡情况下预测功率修正后的曲线

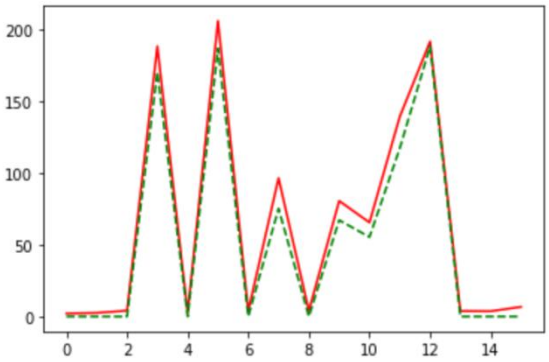


图10：10天之后的超短期预测曲线

4　结语

本文对光伏组件建立了功率预测模型，达到了建模粒度最小化以及精细化，对于光伏电站运维工程师而言，能够实时跟踪到具体的光伏组件的实时状态，从而满足精细化运维的要求，通过模型对光伏组件的实时状态做出判断并修正模型。并且得益于其强大的自然预测能力，通过利用相对偏差进行二次学习，根据故障程度进行分类，由于其实时性和有效性，对光伏电站的运维起到了极大的作用。

参考文献：

[1]He K，Zhang X，Ren S，et al. Deep Residual Learning for Image Recognition[J]. IEEE, 2016.

[2]Gers, Felix A，Schmidhuber, et al. Learning to Forget: Continual Prediction with LSTM.[J]. Neural Computation, 2000.

[3]Rumelhart D E . Learning internal representation by error propagation[J]. Parallel Distributed Processing, 1986, 1.

[4]Cortes C，Cortes C，Vapnik V，et al. Support-vector networks[J]. 1995.

作者简介：

张书启（1983），男，河南淮阳，本科，高级工程师，主要从事电力工程安装、调试和运维研究，E-mail：zkzhangsq@foxmail.com

高山风电场雷区架空线路隐身防雷的研究与治理

曾志平

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：本文针对某高山风电场雷雨天气架空线路容易跳闸的原因进行了分析，从传统架空线路防雷技术着手探究了新的隐身防雷技术，给出了隐身防雷的设计方法，阐述了隐身防雷治理的改造方案，并对防雷改造后的效果进行了对比分析。

关键词：风电场；架空线路；隐身防雷

1 引言

新能源风电行业地处风能密度较大，地势复杂，雷害严重环境，特别是高山风场尤为显著。高山风电场位于雷暴天气高发地区，传统的架空线路塔架防雷通过避雷线、避雷针及降低接地电阻来解决线路跳闸、雷击造成设备损失已达不到明显的效果[1]。为此通过采用基于均匀电场线路隐身防雷这一新技术的应用，具有施工工期短，改造成本低，工程实施方便的特点，进行架空线路塔架防雷改造后，明显地降低了雷电灾害，极大地提高了设备的运行安全，降低设备的运维成本，经济效益、社会效益较为明显。

2 雷击跳闸原因分析

某风电场架空线路因雷击导致故障跳闸的事故频发，该风电场位于海拔高程 900m～1347.9m 的高山上，输电线路采用 2 条由风机箱变到升压站的 35KV 双回路的架空线路，总长 6km，20 基杆塔，架空线路的路径在海拔 540～1350m 之间。由于架空线路所处位置海拔高，这就增加了杆塔落雷的机会，一旦出现如雷电等恶劣天气，就可能对风电场架空线路造成严重破坏，导致线路跳闸，风机停运[2]。高海拔区的架空线路杆塔周边较为空旷，再加上土壤电阻率远超出平均范围，夏季雷雨多发季就会带来严重的雷击危害，引发雷击跳闸现象，严重时甚至可能击穿设备，造成设备损坏[3]。该风电场架空线路受环境条件的影响较大，无论是地势地形还是天气情况，都可能成为导致雷击跳闸事故发生的原因。

3 隐身防雷的探究

该风电场防雷改造前采用传统的架空线路塔架防雷技术，通过加装避雷线、避雷针及降低杆塔接地电阻的方式，在雷电天气引雷于自身释放雷电能量。由于高山风电场所处环境条件复杂，使用这种传统的防雷手段已不能适合雷电对带电运行以及更严格的防雷物体保护要求，通过地线释放电流时回路产生的瞬间脉冲感应电压对电子元件产生的损坏非常严重。对于高山风电场长距离的架空线路，传统防雷保护存在明显无法克服直击、反击、绕击雷问题[4]。

传统避雷针只有一根针体，当雷电先导接近针体尖端时，尖端附近极不均匀的电场很容易形成能使空气电离和产生流注的电场强度，从而引发雷电放电。通过对传统防雷进行新的改造，如果能够改变这种极不均匀的空间电场环境，避免形成局部电场集中的空间，就能够防止雷电在避雷针处形成先导放电，使架空线路少受雷击甚至不受雷击，达到隐身防雷的效果。

4 隐身防雷的设计

雷电环境下传统避雷针造成了极不均匀的空间电场环境，这就使得避雷针成为雷云放电的聚集点，形成了极易遭受雷击的目标。为防止传统避雷针存在的这种弊端，该风电场防雷改造设计的新型避雷针采用五根针体，共分为三层。第一层包含一根针体，方向与传统避雷针一样垂直向上；第二层包含两根针体，针体形成一个与垂直方向之间大于 45° 的夹角；第三层针体数量与第二层一样包含两根针体，针体形成一个与垂直方向之间大于70° 的夹角。五根针体组成了一种状如松针似的结构，其实物图如图1所示，由于每根针体的尖端指向不同的方位，在雷云先导通道空间电场的作用下就能形成相对均匀的电场。与只有一根针体的传统避雷针相比，避免了异号电荷在某一根针体的尖端过度聚集形成局部强场区，能有效阻止雷云先导通道向上发展迎面先导，从而使架空线路对雷电“隐身”[5]。



图1 新型避雷针实物图

5 隐身防雷的治理

基于均匀电场线路隐身防雷是以电荷形式抑制了雷电击穿向上发生先导，因此出现隐身防雷的效果，能在几百米高空发生偏离原有的雷电轨迹。由于防雷有保护半径（35kV 线路保护半径约 100 米），隐身防雷能远离原有的雷击点，降低感应过电压。此外，隐身防雷是通过电荷形式防雷，所以改造不需要考虑接地电阻，水泥杆塔也可以直接安装这种新型避雷针而不用设计接地网，在防雷设计上可以做到免维护。按照隐身防雷的方法，为治理好 35kV 架空线路因雷击而频繁跳闸的问题，该风电场进行了防雷改造，在全线 20 基杆塔，逐基加装 2 根新型避雷针，全线总共安装了 40 根避雷针。每基杆塔的避雷针安装示意图如图 2 所示，两根避雷针等高架设在杆塔两端，形成了扩大保护范围的联合保护。此外，在架空线进出两端每一相安装线路避雷器，共 24 只。线路避雷器采用氧化锌避雷器，利用氧化锌良好的非线性伏安特性，使在正常工作电压时流过避雷器的电流极小;当过电压作用时，电阻急剧下降，泄放过电压能量，达到保护的效果[6]。

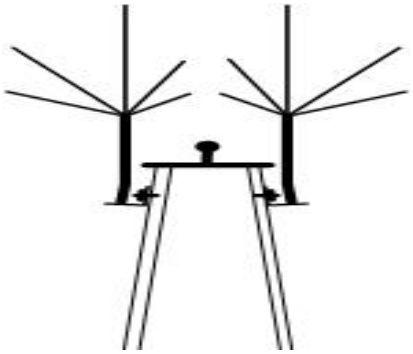


图2 避雷针杆塔安装示意图

6 隐身防雷的效果

统计该风电场防雷改造前两年架空线路雷击跳闸情况，两年累计跳闸次数 14 次，累计造成损失电量 2823.6MWh。其中，第一年架空线路因雷击跳闸 7 次，损失电量 1466.7Mwh,第二年架空线路因雷击跳闸 7 次，损失电量 1356.9Mwh。统计该风电场采用隐身防雷后两年架空线路雷击跳闸情况，两年累计跳闸次数 1 次,累计造成损失电量 112.6MWh。其中，第一年架空线路因雷击跳闸 1 次，损失电量 112.6Mwh,第二年未发生架空线路因雷击导致跳闸的事故。

与防雷改造前两年相比，防雷改造后两年架空线路因雷击而跳闸的总次数下降 13 次，总损失电量减少 2711MWh。按照每度电 0.61 元计算，防雷改造后两年相比改造前两年减少经济损失 165.37 万元，减少的经济损失远远超过隐身防雷改造花费的成本 13.54 万元。由此可见，隐身防雷改造对减少架空线路雷击跳闸事故的效果显著，并且具有良好的经济效益。

7 结语

高山风电场雷电天气偏多、架空线路受雷击跳闸次数多一直是困扰着风电行业的一大难题。由于环境条件、地形地势复杂，利用避雷针引雷释放雷电能量的传统防雷手段对架空线路的保护作用有限。本文研究了新型隐身防雷技术，通过改造避雷针结构，使避雷针在雷电环境中形成均匀电场，避免触发雷云放电，从而达到对雷电隐身的防雷效果。该隐身防雷技术在风电场的实际应用中取得了良好的效果，有效降低了架空线路雷击跳闸事故的发生频次，避免了不必要的电量损失，具有较好的经济效益和应用推广价值。

参考文献：

[1]单光华. 多雷地区风电场架空集电线路防雷改造与技术创新[A]. 中国农业机械工业协会风力机械分会.第七届中国风电后市场交流合作大会论文集[C].中国农业机械工业协会风力机械分会:中国农业机械工业协会风力机械分会,2020:100-104

[2]刘昌衡. 风电场风机组和架空线路防雷设计的研究[D]. 上海应用技术大学,2021

[3]朱继新. 山地风电场35kV系统防雷研究[A]. 中国农机工业协会风能设备分会《风能产业》编辑部.风能产业(2017年11月）[C].:中国农业机械工业协会风力机械分会,2017:82-86

[4]陈磊. 大型风电场35kV集电线路防雷保护的研究[D].昆明理工大学,2019

[5]王鹏. 一种基于均匀电场理论野外孤立带电装备对雷电隐身的防雷技术[P]. 吉林省:CN109236588A,2019-01-18

[6]杨琳,黄灏. 风电场35kV集线线路防雷改造新措施[J]. 农技服务,2017,34(16):61-62

作者简介：

曾志平（1989），男，福建龙岩人，本科学历，电气工程及其自动化专业，水动工程师，风力发电运行检修员高级工，E-mail：937606493@qq.com

谈大型光伏项目EPC全过程管理

汪延寿，杨威

（中国电建集团江西省电力设计院有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：本文针对大型的复杂地形条件（水面、地面、山丘）光伏项目，分别从策划、设计、采购、施工等方面进行阐述分析。并结合某 100MWp 光伏电站工程实例，分别从基础选型及施工，组件、支架施工组织安排等方面进行分析，形成网格化管理局面，给出大型光伏电站项目全过程管理的合理化建议。

关键词：光伏电站；EPC；项目管理；工期；网格化管理

1 概述

近年来，随着“碳中和、碳达锋”政策推进，国内光伏项目建设迅猛加速，对适合其特点的项目管理理论和方法的需求迫切。本文在对 EPC 总承包模式分析的基础上，根据光伏电站的特点，提出了如何在短时间内，高效率、高质量、高标准的建设完成光伏电站。最后，结合某 100MWp 光伏电站的实例，对 EPC 管理模式进行阐述，旨在引入实际可行的项目管理方法，研究其在光伏发电项目全过程管理中的具体应用，从而总结出适合光伏项目全过程项目管理的特点和方法，以期为国内光伏项目的建设提供借鉴。

2 整体规划

随着国内光伏电站建设的高潮期，光伏电站的建设速度越来越快，如何在短时间内，高效率、高质量、高标准的建设完成光伏电站，作为 EPC 总承包单位应该从策划、设计、采购、施工等多方面进行综合考虑。

2.1 设计思路及要求

光伏电厂的项目建设和设计要体现因地制宜、经济适用、施工方便、易于管理、安全可靠、利于生产的原则。

（1）建成后的光伏电厂环境、景观和视觉效果能够达到与现实环境的整体和谐统一；

（2）设计方案经济合理，技术先进，充分考虑光伏发电项目的功能和特点；

（3）根据项目所在场地及植被等特点，项目建设及运行期应尽量避免环境污染、必须符合环保要求；

（4）在施工布置中，根据场区地形地貌条件，力求紧凑、节约用地，统筹规划、合理布置相关设施，尽可能使永久用地和临时用地结合；

2.2 采购

项目设备的采购直接影响项目的工期及成本，合理的优化设计及保证设备的供应是确保项目顺利完成的关键。针对项目采购，结合主要设备进行如下阐述。

2.2.1 预制舱

高、低压开关柜、接地变等一次设备，计算机监控系统、视频监控系统等二次设备全部采用预制舱。

与常规变电站相比，使用预制的组合式预制舱可以有效减少建筑物的占地面积。所有设备均在工厂内安装完成并进行调试，作为整个或多套设备运送到现场，直接在现场吊装。即节省了结构，砖石，装饰和电气安装，有效减少了环境污染，且有效地保证了设备的安全性和可靠性。同时减少了施工的物料折损，将传统的串联施工方式改为施工方式，可以有效提高设计施工效率，有效缩短施工周期，也大大减少了二次施工。同时还可以有效地减少二次光/电缆的长度，最终达到缩短工期并降低工程成本。

2.2.2 组件供应保障

针对光伏电站的抢装期，光伏组件供应会出现抢货期，那么在短时间内完成组件的供货对于厂家来说难度较大，尤其是针对同一档位的供货尤其困难，在这种条件下建议根据实际情况，调整设计提供两种档位的组件规格供应。例如可以调整单一的 450kW 档供货调整为 450kW、490kW 供货，确保短时间内组件供应能满足项目工期的要求。

2.2.3 管桩供应及规划

大型水面、地面光伏的建设，管桩供应也是确保项目能如期完成的关键。为确保项目按期完工，应根据施工进度计划编制管桩供货总体网络进度计划，并将责任落实到人，通过严格科学的管理，确保计划得到落实。

管桩的供应，首先应考虑距离项目较近的管桩厂家，并分析项目期间每天的供货量，项目供货周期来确定项目供货厂家的数量。

综合考虑管桩供应厂家生产基地所在地、产

品质量、生产资质、产能等多方面因素，并结合项目现场实际情况，通过市场询价、生产基地现场考察等多种途径了解，初步拟定管桩供应商及数量。

2.3 施工

2.3.1 施工标段划分

针对项目特点及工期进度安排，对光伏场区、升压站、外送线路及间隔扩建等进行施工标段细致划分，组织协调施工队伍，实现多工作面平行作业，流水作业。

针对大型的光伏厂区应根据容量进行划分施工标段，综合考虑施工性质、施工机械、人员调配、施工区域等因素，建议按照 40MWp-60MWp 规划一个施工标段，升压站划分一个施工标段、外送线路根据长度划分一个或多个施工标段。

2.3.2 网格化施工

针对大型的复杂地形条件（水面、地面、山丘）光伏项目，综合考虑区域位置、道路交通、机械设备、人员安排、工期要求等因素，形成网格化施工：

（1）优化设计、采购，满足项目工期要求；

（2）合理的设置施工堆场；

（3）光伏区土建施工：针对不同地形进行基础选型并根据标段划分合理安排施工；

（4）光伏区设备安装：根据组件、支架合理安排人员、机械设备，形成平行作业、流水施工；

（5）形成各区域的网格化管理。

3 工程管理实例

结合某 100MWp 光伏项目实际施工案例，新建光伏区 100MWp，110kV 升压站、外送 110kV4.5km。其地形条件为 10%水塘、20%山丘、30%平地，40%电厂灰场；项目工期为 10 月-12 月期间总共 76 天；

3.1 施工标段划分

综合考虑施工性质、施工机械、人员调配、施工区域等因素，本项目施工划分为 4 个区域标段。

光伏区 I 标段：10%水塘、20%山丘、30%平地区域共 60MWp 全部施工、安装及调试工作；

光伏区 II 标段：40%电厂灰场共 40MWp 全部施工、安装及调试工作；

升压站 III 标段：升压站的进站道路、场平、建筑安装工作（含升压站内的建筑、结构、暖通、水工、消防、电气安装及调试等工作）。

外送线路 IV 标段：110kV 外送线路及间隔扩建的建筑安装、设备采购、青苗赔偿等所有工作。

3.2 施工堆场设置

本场地周边路网较为发达，道路条件较好，电场大件运输方案可由：高速－国道－乡道－各乡镇村村通道路－施工现场。结合施工现场具体情况，统筹安排，进行科学合理的布置；结合本工程光伏区施工场地的平面布置，减少预制管桩和光伏支架材料的二次转运；以经济适用为原则，合理地选择临时堆场的形式；符合安全文明施工和现场防盗要求，按照节约用地的原则布置，根据光伏区总体平面布置图地形分布情况，并结合施工标段划分总体设置 7 个堆场（含水塘码头）。其中 40%电厂灰场 40MWp 区域设置两个堆场；10%水塘 10MWp 区域设置一个码头；20%山丘 20MWp 区域设置一个堆场、30%平地 30MWp 区域设置一个堆场；升压站设置一个堆场；外送线路设置一个堆场。

每个堆场配置一名专职材料管理员，对该堆场的材料进场数量的验收，出场的数量、品种的登记，同时负责项目所进场的各种材料的产品合格证、质检报告的收集，负责对材料的保管工作，还要对各分项工程的剩余材料按照规格、品种进行清点记录，并及时向技术负责人汇报。

3.3 基础选型及施工

3.3.1 基础选型

光伏电站建设地点与普通建筑物不同，一般处于荒山、坡地、市民啊等施工条件较差的位置，占地面积大，对地表环境、植被和水土保持影响较大。支架基础选型除了考虑结构安全和经济性外，还需考虑地质、环保和施工条件等因素。常用的光伏支架基础型式的特点简要叙述如下：

1）浅埋钢筋混凝土条形基础

浅埋钢筋混凝土条形基础靠基础自重和土共同抗拔和保持稳定，基础埋深 300mm~600mm。此类型基础的优点是混凝土用量比重力式基础要少，可靠性高；缺点是土方开挖量较大，破坏和扰动自然地表，现浇基础需现场支模、搅拌混凝土，施工周期长，对场地平整度要求较高。

2）预应力管桩

靠桩和桩土摩擦力共同抗拔和保持稳定，支架可直接连在桩顶。由于是工厂化制作，桩身质量可靠。管桩由于可提前批量生产，不占用施工养护周期，沉桩完毕后桩体既有强度，承载力达到最终承载力 80%以上。施工进度快，投资周期短，具有良好的经济效益。施工过程中无震动和噪音，对周边环境影响小，与混凝土灌注桩相比无砂石料、混凝土及泥浆等污染。管桩混凝土强度高，单桩承载力大，施工时送桩到位率高，截桩小，质量可靠，材料损耗小，工程造价低，经济效益高。



条形基础



管桩基础

就本项目地形条件为 10%水塘、20%山丘、30%平地，40%电厂灰场而言，综合考虑灰场地形地质、

施工便利、施工周期、经济效益等因素，光伏支架基础型式 40%电厂灰场区域采用浅埋钢筋混凝土条形基础，其余区域采用预制管桩基础。

3.3.2　基础施工

1）陆上桩基施工方案

针对桩基出露地面高度不同，分别采用履带式打桩机、直臂履带式打桩机；针对特殊灰岩地质条件，打桩困难的情况，采用旋挖机或潜孔钻等设备引孔。



履带式打桩机



履带式打桩机(高桩)



旋挖引孔



潜孔钻引孔

2）水上桩基施工方案

针对水上桩基施工情况，拟采用 JDJ30 柴油打桩船锤击打桩进行施工，部分临水区域采用用浮挖机进行打桩。



打桩船



浮挖机

区段	容量	区域	桩基方案	安装方案
I 标段	10MWp	10%水塘	1 台浮挖机+打桩机	移动脚手架、船脚手架
	20MWp	20%山丘	2 台履带式打桩机+1 台旋挖引孔+1 台潜孔钻引孔	移动脚手架
	30MWp	30%平地	3 台履带式打桩机	移动脚手架
II 标段	40MWp	40%电厂灰场	商混、模板浇筑	移动脚手架

10%水塘区：1 台浮挖机+打桩机，部分临水区域，进行抽水后采用浮挖机打桩；

20%山丘：2 台履带式打桩机进行桩基施工；局部灰岩区域，利用旋挖钻及潜孔钻引孔后打桩；

30%平地区：3 台履带式打桩机桩基施工；

40%电厂灰场区：运用商混、模板浇筑。

3.4　组件、支架安装施工

本项目部分桩基露出地面过高，达到 3.0-4.5m 高，安装过程脚手架的搭设极为困难，综合各种情况及以往项目的施工经验，考虑采用移动式脚手架、船脚手架。



移动式脚手架



船脚手架

3.5　网格化施工组织

3.5.1　网格化施工原则

项目网格化施工实行项目经理负责制，各区段实行区域施工经理负责制，网格化管理明确各区域施工经理是第一责任人，全面负责本区段的生产工作。为了确保各区段管理目标的实现，项目部配备足够的管理人员，并建立如下管理机构，全面负责本项目的网格化施工管理工作。

各区段管理人员配置

项目	60MWp 光伏区	40MWp 光伏区	升压站	集电线路
施工经理	1	1	1	1
施工副经理	1	1	1	1
区段总工	1	1	1	1
安全员	3	3	3	3
材料员	3	3	2	3

3.5.2　光伏区管桩与支架、组件施工组织

针对 100MWp 光伏区的土建、安装工程量，合理安排工期、确保工程质量的情况下，规划好施工队伍、施工人员，详见下表网格化施工组织。

网格化施工组织：

序号	项目	工作内容	工程量	工期天	施工队伍	工人数量
1	10%水塘 10MWp	桩基基础（根）	2500	35	2	110
		支架安装（组）	400	40	10	
		组件安装（组）	400	40	10	
2	20%山丘 20MWp	桩基基础（根）	5000	35	2	210
		支架安装（组）	800	40	20	
		组件安装（组）	800	40	20	
3	30%平地 30MWp	桩基基础（根）	7500	35	3	315
		支架安装（组）	1200	40	30	
		组件安装（组）	1200	40	30	
4	40%电厂灰场 40MWp	条形基础（个）	2996	40	35	575
		支架安装（组）	1498	40	40	
		组件安装（组）	1498	40	40	

备注：每组组件按照 6*9 布置，工期已冬雨季等特殊条件施工影响。

根据以上网格化管理，项目在 76 天完成了 100MWp 光伏的全容量并网目标，实现了 EPC 项目管理的任务。

4 结论

针对大型的复杂地形条件（水面、地面、山丘）光伏项目，从设计优化、采购保证、施工组织等多方面综合考虑，围绕施工堆场设置，基础选型及施工，组件、支架安装施工组织安排等，形成系统性的网格化施工组织，确保在短时间内完成全容量并网的目标，可以为国内大型光伏项目提供了很好的借鉴。

参考文献：

[1]《光伏发电站施工规范》（GB/T 50794-2012）
[2]《光伏发电工程施工组织设计规范》（GB/T 50795-2012）
[3]《光伏发电工程验收规范》（GB 50796-2012）
[4]《光伏发电站设计规范》（GB 50797-2012）
[5]《建设工程项目管理规范》（GB/T 50326-2017）
[6]《建设项目工程总承包管理规范》（GB 50358-2017）

作者简介：

汪延寿（1984），男，江西，硕士，高级工程师，主要从事电力工程EPC项目管理工作，E-mail：wyssysy@qq.com

地铁FAS系统调试方法及常见问题原因分析

蔡超

（中国电建集团江西省水电工程局有限公司，江西 南昌 330096）

摘要：地铁 FAS 火灾报警系统是地铁安全稳定运行的重要保障，在系统设备安装完后，需对系统联动的各项设备进行调试。本文介绍了地铁 FAS 火灾报警系统调试方法，并对系统调试常见问题进行了归纳和原因分析，以期为类似工程提供一定参考。

关键词：地铁 FAS 系统；调试方法；问题分析

1 地铁全线FAS系统构成

FAS 系统主要对轨道交通范围内各类建筑及轨行区的火警火灾，进行监控及相关联动控制。全线 FAS 火灾报警系统由中央控制中心及车站控制室、列车区段控制室的车站级 FAS 系统、各种车站现场设备以及网络通讯设备组成。

2 地铁FAS系统调试方法

2.1 准备工作

2.1.1 按照调试要求，为调试工作准备好稳定的低压交流电源，电压的额定输出电压为 220V，输出的交流电频率为 50HZ。

2.1.2 将设备的位置标识与设计图纸进行详细对比，保证设备的实际位置与设计图纸的位置标识完全一致。如果设备发生变动，必须要在设计图纸上标明。

2.1.3 用专业的遥测装置检测设备的接地电阻，使接地电阻控制在 4 欧姆以内。

2.1.4 使用绝缘摇表检测每一条线路绝缘装置的电阻，包括电源线路、通讯线路、传输线路、对地线路等，保证每一条线路绝缘装置的电阻在 20M 欧姆以上。

2.2 具体步骤

2.2.1 按照设计图纸的标识逐一检查各回路上，各类型火灾报警探测器、手动报警按钮、消火栓按钮，各类模块、火警电话等设备，保证这些设施设备的实际位置与设计图纸当中的标识一一对应。

2.2.2 检查每条线路的设备连线情况，保证所有的连线都能形成一个完整的闭合回路，避免回路及设备的短路接地。

2.2.3 检查消防专用广播的连接情况，保证消防专用广播能够正常使用，而且其编号要与设计图纸当中的编号相对应。

2.2.4 检查消防专用电话的连线情况以及接口的插线情况，保证消防专用电话的正常使用，而且其编号要与设计图纸当中的编号相对应。

2.2.5 检查 FAS 系统与电梯、自动闸机、防火卷帘、气体灭火系统、区间感温光纤系统等联动控制线路与逻辑关系是否准确，受控设备能否正常启停，并接收到相应动作反馈。出现故障时，FAS 系统能够及时接收到故障反馈。

2.2.6 检查回路线路与消防控制中心的连接是否准确，消防专用广播与消防控制中心、消防专用电话等设施的连接是否准确。

2.3 系统主要设备单体调试

2.3.1 主机单体功能检查

系统通电后，先按国家标准的技术要求对报警控制工作以下功能检查：（1）火灾报警自检功能；（2）消音、复位功能；（3）故障报警功能；（4）火灾优先功能；（5）报警记忆功能；（6）电源自动切换和备用电源的自动充电功能；（7）备用电源的欠压和过压报警功能，检查、核实报警控制器的电源和备用电源，其容量应分别符合国家标准，并给备用电源连续充放电三次，检查主电源和备用电源的自动转换功能是否正常。

2.3.2 地铁 FAS 系统各类型报警设备的调试

（1）点型感烟、感温火灾探测器调试

模拟火灾逐个检查每只火灾探测器的报警功能，探测器应能发出火灾报警信号。

（2）线型感温火灾探测器调试

模拟火灾使其发出火灾报警信号，并在终端盒上模拟故障，探测器应能分别发出火灾报警和故障信号。

（3）红外光束感烟探测器调试

调整光路调节装置，使探测器处于正常监视状态；用减光片遮挡光路，能正常发出火灾报警信号。

（4）管路采样吸气式火灾探测器调试

在采样管最末端（最不利处）采样孔加入试验烟，探测器或其控制装置在 120S 内发出报警信号。根据产品说明书，改变探测器的采样管路气流，使探测器处于故障状态，探测器或其控制装置应在 100S 内发出故障信号。

（5）手动火灾报警按钮调试

对所有手动报警按钮，逐个插入电话对讲机，测试其与报警控制器间的联系情况，按下按钮，观察报警控制器是否收到报警信号，相关的警铃是否

打响，最后要注意让报警按钮复位。

（6）光纤光栅感温火灾探测器调试

分别对各段光纤光栅感温探测器用加热器进行加热，模拟火灾现场状况，观察光纤光栅火灾探测系统报警控制器上，是否有根据报警环境要求，设定的差温报警值和定温报警值信号显示，并测量开始发出信号时的感温探测器的温度是否符合要求。

2.3.3 系统主要设备与各站后系统的综合联调测试

（1）火灾报警控制系统首先按回路顺序逐楼层开通，火灾探测器控制模块、监视模块、手动报警按钮、消火栓按钮、声光报警各部件均应工作正常。

（2）施放足量的烟量给感烟探测器，使探测器报警灯亮，并将报警信号送至消防中心，报出的地址正确。

（3）手动报警按钮动作或探头报警，即为人工确认现场发生火灾（即确认火灾），应有下列系统动作。

1）本层及上、下两层的声光报警发出声光警报；

2）接通本层及上下两层消防广播；

3）切断非消防电源；

4）接通应急疏散照明和疏散指示灯。

（4）火警优先功能的试验

1）取下本层的一个探测器，设定该探测器为人为故障，对本层的另一探测器施放的烟量，该探测器应能正常报警，消防中心应能显示其报警的部位和信号，同时报出故障的位置。

2）取下本层的一个探测器，设定该探测器为人为故障，对本层的手动报警按钮动作，该手动报警按钮应能正常报警，消防中心应能显示其报警的部位和信号，同时报出故障的位置。

（5）消防泵的联动控制试验

1）将消火栓泵动力柜置于自动位置；

2）消火栓泵处于一用一备（或二用一备）状态；

3）按动消火栓按钮，消防中心报出地址和信号，并直接启动消防泵。

（6）消火栓泵动力柜故障切换检查

1）消火栓泵按一用一备（或二用一备）启动后处于工作运行状态；

2）当 1#消火栓泵在工作时突然发生故障（人工模拟）1#消火栓泵停止运行，2#备用消火栓泵启动，投入运行，主备泵切换正常。

（7）火灾确认后的消防广播试验

发生火灾，宜先接通地下各层及首层。

（8）消防电话的试验

为保证消防中心同有关设备间的工作联系，消防控制室与值班室、消防水泵房、配电房、通信机房，信号机房，通风空调机房、电梯机房等机房的消防对讲电话通话，语音清楚。外接 119 电话通话正常。

（9）与 BAS、AFC、电梯、门禁、非消防电源等站后专业的接口联动调试

确认火灾发生后，FAS 系统能够根据火灾发生的位置，联动站后各系统进入火灾应急处置状态。防排烟系统风阀打开，风机启动。车站所有垂直电梯归于首层，且处于开门状态，AFC 系统闸机全部打开，门禁系统门磁全部打开。同时，切断车站所有非消防电源，防止电气火灾事故的发生。

（10）气体灭火装置的联动调试

联系气体灭火专业的调试人员，通过气体灭火系统控制盘，输出火灾报警信号、火灾确认信号、系统故障信号、气体释放信号、手动/自动状态信号，检查气体灭火控制系统主机是否接收到信号，区域控制盘是否有正确显示，以及气体灭火控制系统主机是否能通过通讯接口，将气体灭火系统相关动作信号，发送至车控室 FAS 系统主机。

3 地铁FAS系统调试常见问题原因分析

地铁 FAS 系统一般由多家单位共同施工，而各单位间协同性不强，造成调试过程中遇到问题，各专业相互推诿，找不出原因，进而影响调试效果，阻碍施工进度。对此，根据地铁 FAS 系统中各种受控或受监设备相同的联动工作原理，结合以往调试经验，对调试常见问题进行了归纳和原因分析，以便“对单”快速准确找出问题原因。

3.1 FAS系统现场模块不能正确接收各类型设备反馈信号

在现场模块控制箱模拟接收反馈的动作信号，模块不能正常接收，未接收到动作信号可能出现的问题有：线路故障，逻辑关系编程错误，模块设备损坏等原因，接收正常则排除此项原因。

3.2 受控设备无动作反馈信号

首先考虑排除受控设备手动启动故障，有无外部挤压变形影响启闭的情况；其次考虑受控设备是否存在接线错误；检查现场接线状况是否正确，若接线符合厂家产品说明且能正常工作，则排除设备本体故障的原因：在现场采用检测其信号反馈回路。

3.3 车控室不能接收现场控制传送的反馈信号

分别在控制室和现场控制箱检测信号是否收到或发出，符合则排除此项原因。

3.4 FAS系统中央控制平台程序指令错误

校验控制程序中的要求的反馈信号是否符合系统工作的要求，符合则排除此项原因。

3.5 FAS系统中央控制平台程序控制对象错误或地址错误

校验控制程序中的要求反馈信号的对象是否就是现场的对象，符合则排除此项原因。

4 结束语

综上所述，对地铁 FAS 火灾报警系统的调试方法进行规范和建立标准化流程，可提高调试质量和效率。对地铁 FAS 火灾报警系统调试遇到的问题进行归纳和原因分析，可解决系统因多方施工协同性不强而导致调试过程故障判断不准确的问题。本文已在工程实践中得到成功应用，保证了地铁安全稳定运行，具有一定推广价值，可为今后类似工程提供有效指导。

参考文献：

[1]周志恒.火灾自动报警系统与消防设备的接口设计[J].广东科技，2018(2) : 44-46

[2]魏晓东. 城市轨道交通自动化技术系统与技术 [M]. 北京: 电子工业出版社，2017

[3]植成海，宋文婷. 城市轨道交通 FAS 系统与 AFC 系统联调探讨 [J] . 信息通信，2016(6) : 72-73

[4]高佳剑. 浅谈 FAS 与综合监控接口及综合联调 [J] . 科技创新与应用，2018(15) : 24

[5]武汉市轨道交通11号线东段工程综合监控系统联调大纲

作者简介：

蔡超（1980），男，江西南昌，本科，高级工程师，系统调试，E-mail：82104373@qq.com

高山风电场风机偏航控制策略优化的研究与分析

廖强

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：本文针对高山风电场风向多变、风电机组频繁偏航的问题进行了分析，研究了风电机组偏航控制策略，探讨了偏航参数定值的合理设定问题，在此基础上提出偏航控制策略优化方案，并对优化后的效果进行了分析。

关键词：风电场；偏航；控制策略

1 引言

高山风电场海拔高，地形复杂，地势起伏大，地表粗糙程度高，气候变化无常，风机受风切变、大气湍流的影响大，且风电机组大多安装在山脊上，气流通过山脊时流动速度会产生急剧变化，气流被压缩和加速，虽然使风电机组获得了更多的风能，但其风速变化快、风向不稳定的特点却容易导致风机频繁偏航对风，增加了机组的疲劳载荷和机件磨损[1]。对于已安装的风电机组来说，其地理位置已经固定，所处环境的影响已不可避免，只能从偏航控制策略上来寻求优化。研究风电机组的偏航控制策略，使风电机组适应高山风电场的风速特点，对提高风电机组运行经济性具有重要意义[2]。

2 偏航控制策略概述

某高山风电场 33 台 2MW 风电机组建设在山脊上，山脊海拔高程介于 900m～1347.9m，山势高差较大，受地形地势影响，该风电场风向容易突变，导致风电机组存在频繁偏航的情况。该风电场的风电机组为双馈异步机组，其偏航控制策略如下。当检测到扭缆位置大于设定值（710°）时左/右偏航限位开关动作，执行正常停机。当检测到偏航角度超过偏航位置绝对值设定值（750°）时，风电机组偏航扭缆限位开关动作，执行安全链停机。当检测到 30s 平均风速值大于设定值（3m/s）后启用偏航逻辑。当检测到 30s 平均风速值大于设定值(20m/s)后禁止偏航。以 30s 平均风速值(7 m/s)来做判断区分低风速偏航和高风速偏航。当在低风速偏航模式下偏航时，检测到风向角偏差小于设定值（4°）时停止偏航。在低风速偏航模式下，当检测到风向角偏差大于设定值（6°）时，经过设定延时时间（60s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（10°）时，经过设定延时时间（40s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（70°）时立即开始偏航。当在高风速偏航模式下偏航时，检测到风向角偏差小于设定值（3°）时停止偏航。在高风速偏航模式下，当检测到风向角偏差大于设定值（5°）时，经过设定延时时间（60s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（8°）时，经过设定延时时间（40s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（70°）时立即开始偏航。

3 偏航控制策略分析

从风电机组的偏航控制策略可以看出，风向角设定值影响着偏航是否动作。因此，优化偏航控制策略应考虑其风向角如何设定更佳[3]。如果风向角设定值设置过大，就会导致实际风向允许偏离机舱的角度Φ变大而偏航不动作。假设风轮最大扫掠面积为 S，则风电机组实际扫掠面积 S1=S •cosΦ，Φ变大会造成风电机组实际扫掠面积 S1 减小，而风电机组的输出功率 P 与实际扫掠面积 S1 成正比，最终造成风电机组的输出功率减小。如果风向角设定值设置过小，就会导致实际风向允许偏离机舱的角度范围变窄，也就是说风向稍有变化就会造成风电机组启动偏航，从而造成风电机组频繁偏航。另一个需要考虑的就是偏航延时时间设定值。如果偏航延时时间设定值设置过大，就会导致风电机组偏航动作迟缓，不能实现实时跟踪风向变化，存在较大的滞后性。如果偏航延时时间设定值设置过小，则风向在短时间内的扰动和变化就可能导致偏航动作，对风电机组造成了较大的干扰[4]。

4 偏航控制策略优化

风电机组通过四个偏航电机来驱动偏航，这本身是一个耗电的过程。在低风速天气下，风电机组频繁偏航对提高输出功率的作用不明显，且大大增加了自耗电和偏航驱动齿的磨损[5]。为避免低风速下频繁偏航，适当提高了风电机组风向角设定

值，并增大了延时时间设定值以避开短时间的风向扰动，优化后的低风速偏航控制策略如下。在低风速偏航模式下偏航时，检测到风向角偏差小于设定值（6°）时停止偏航。在低风速偏航模式下，当检测到风向角偏差大于设定值（8°）时，经过设定延时时间（300s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（15°）时，经过设定延时时间（120s）后开始偏航，当检测到风向角偏差大于设定值（70°）时立即开始偏航。此外，将禁止偏航的 30s 平均风速值大于设定值由 20m/s 改为 22m/s，以提高风电机组高风速天气下的风向跟踪能力。同时，考虑到安全性，对偏航限位停机的控制策略优化如下。当检测到扭缆位置大于设定值（690°）时左/右偏航限位开关动作，执行正常停机。当检测到偏航角度超过偏航位置绝对值设定值（715°）时，风电机组偏航扭缆限位开关动作，执行安全链停机。

5 优化效果分析

以偏航控制策略优化前后各一年的运行数据为样本，选取风况、年平均空气密度、可利用率相近的 6 台风电机组作分析。优化前后各一年风电机组的偏航次数统计图如图 1 所示，从图中可以直观地看出，偏航控制策略优化后各台风电机组的偏航次数均有大幅减少。其中，偏航次数减少最多的是 23 号风机，优化后偏航次数比优化前减少了 29731 次；偏航次数减幅最大的是 24 号风机，优化后偏航次数比优化前减少了 52.06%。

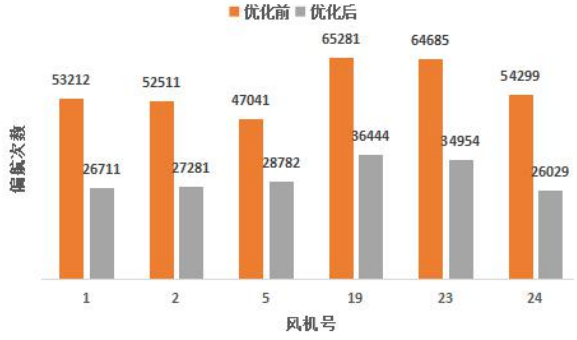


图1 偏航次数统计图

除考虑偏航次数有无明显下降外，还应分析偏航控制策略优化后对风电机组发电量有无较大影响。如果优化后风电机组发电量大幅下降，即使达到了减少偏航次数的目的也是不经济的。优化前后各一年风电机组的发电量统计图如图 2 所示，从图中可以直观地看出，偏航控制策略优化后，2 号风机发电量略有下降，下降幅度 0.49%，其余风电机组优化后发电量均有上升，上升幅度介于 1.16%～2.66%之间。总体而言，优化后 6 台风电机组的发电量之和比优化前提升 1.73%。

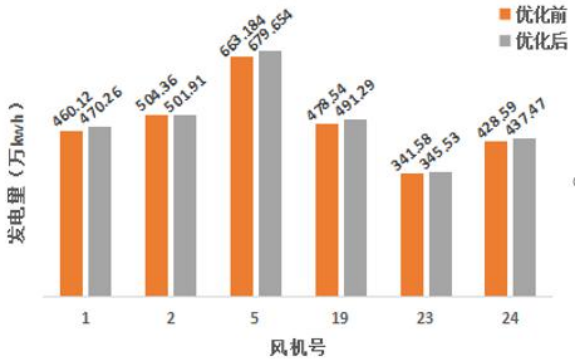


图2 发电量统计图

6 结语

高山风电场由于处在高海拔地区，气候随着山地的坡度、坡向、地形起伏等条件的不同而呈现出不同的变化。在这种多变气候下，风电机组受到的风向也具有较大的变化性，容易造成机组频繁偏航对风[6]。本文研究了风电机组的偏航控制策略优化，优化后大幅减少了风电机组的偏航次数，且对发电量提升有一定的效果，为高山风电场风电机组频繁偏航的问题治理提供了一种思路。

参考文献：

[1]杨晓涛,邱健,李光明. 实例分析湍流对风力发电机组偏航系统的影响及优化措施[A]. 中国农业机械工业协会风力机械分会.第七届中国风电后市场交流合作大会论文集[C].中国农业机械工业协会风力机械分会:中国农业机械工业协会风力机械分会,2020:87-93

[2]曹弘,孙建平. 风力发电机偏航系统控制策略研究[J]. 电力设备管理,2019,(02):81-83

[3]路宏,田德,庞辉庆,吴志学,王若愚. 基于风向预测的偏航控制策略研究[J].风能,2018,(12):66-70

[4]杜杨超. 风力发电机组偏航控制策略的设计[J]. 机械管理开发,2015,30(08):23-24+123

[5]陈思,郭鹏. 基于综合经济效益目标的风电机组偏航控制策略研究[J]. 动力工程学报,2019,39(04):286-292

[6]孔令行. 一种自适应风况的风电机组偏航优化控制策略[D].华北电力大学(北京),2019

作者简介：

廖强（1994）男，江西新余人，专科学历，发电厂及电力系统专业，助理水动工程师，风力发电运行检修员高级工，E-mail：489620332@qq.com

降低离心脱水机故障发生率的方法研究

高新开

（江西大唐国际抚州发电有限责任公司，江西 临川 433000）

摘要：污泥离心脱水机作为污泥处理环节的重要的组成部分，其运行的好坏直接影响预处理系统污泥的无害化处理及污水排放系统的运行能力，离心脱水机经常发生故障及异常振动情况，对机组安全稳定运行带来极大隐患，本文通过探寻研究，找到解决的办法，最终将脱水机故障发生率降到合理范围内。

关键词：离心脱水机；故障发生率；方法研究

1 概述

污泥离心脱水机作为污泥处理环节的重要的组成部分，其运行的好坏直接影响预处理系统污泥的无害化处理及污水排放系统的运行能力，现场图如图 1 所示。剖视图如图 2 所示。



图1 离心脱水机外形图

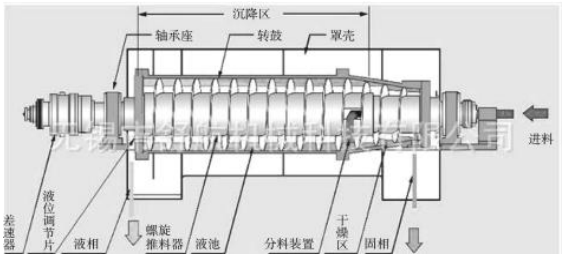


图2 离心脱水机剖视图

经过调查研究，发现单位要求故障发生率≤0.5条/月　振动≤0.05㎜/s，而生产现状如下表所示：

表1：离心脱水机月度缺陷统计

离心脱水机月度缺陷（2021）							
一月	二月	三月	四月	五月	六月	七月	八月
2	3	4	2	5	3	1	0

表2：离心脱水机振动监测

振动监测（2021）					
07.06-07.10	07.13-07.17	07.20-07.24	07.27-07.31	08.03-08.07	08.10-08.14
0.22	0.18	0.04	0.20	0.05	0.22

由上表可知，2021年离心脱水机缺陷发生率达2.3条/月，而合格值是0.5条/月；振动有四个星期超过合格值，我厂仅有一台离心脱水机，发生缺陷就意味着效率变低，异常振动是不稳定运行的表现。

根据电厂化学设备质量要求，离心脱水机故障发生率降低到同类产品先进水平，即≤0.5条/月。

2 原因分析

针对31条发生的缺陷，对缺陷先进行了单一分析，再进行归集分析，得出离心脱水机月度缺陷类型统计表。

表3 离心脱水机月度缺陷类型统计表

序号	缺陷类型	数量	百分比
1	异常振动缺陷	15	48%
2	出泥率低缺陷	11	35%
3	电机发热缺陷	4	13%
4	操作面板报警缺陷	1	3%

根据统计表制作扇形图



图3 扇形图

由表3可知，异常振动、出泥率低是离心脱水机发生故障的症结所在。由以上分析可知，造成离心脱水机故障的主要因素是异常振动和出泥效率低缺陷，占到缺陷总数的77%。如果能解决这两个问题，则平均每月发生的缺陷数量i可以达到：

$$i=\left(1-\frac{26\ \le(\text{异常振动和出泥效率低缺陷数})}{31(\text{总缺陷数})}\right)*100\ \%*2.3\approx 0.42\ \le 0.5(\text{目标值})$$

我厂离心脱水机选自国外知名品牌ABB，主要研究对象就是卧式离心脱水机，至今已有四十多年，在离心脱水机行业处于领先地位。

对于同款离心脱水机，在其他厂的缺陷率均保持在0.5条/月以下，相信通过努力，我们也能达到这一目标。

运用头脑风暴法，从“人、机、料、法、环”五个方面分类寻找了造成离心脱水机异常振动及出泥效率低的原因，并绘制了鱼骨图。

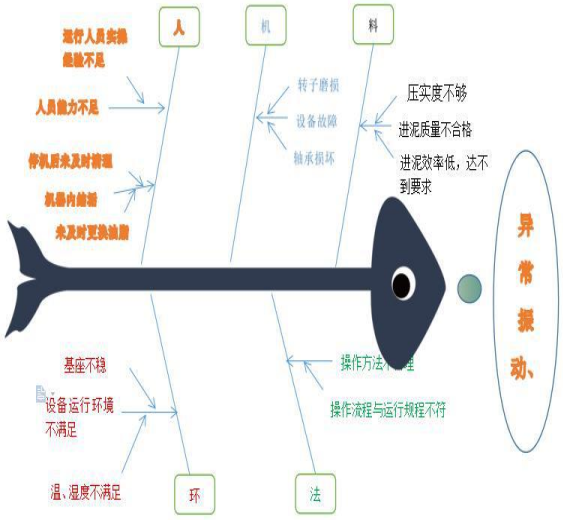


图4 鱼骨图

通过以上分析，共找到 10 项末端因素，详细见表

表4 末端因素统计表

序号	末端因素	序号	末端因素
1	运行人员实操经验不足	7	进泥效率低，达不到要求
2	停机后未及时清理	8	基座不稳
3	未及时更换油脂	9	温、湿度不满足
4	转子磨损	10	操作流程与运行规程不符
5	轴承损坏		
6	压实度不够		

针对末端因素，制定要因确认表：

表5 要因确认表

序号	因素名称	确认内容	确认办法	确认标准	时间
1	运行人员实操经验不足	运行人员考核情况满足规程	现场调查	考核合格率≥98%	09.02
2	停机后未及时清理	停机后操作日志是否清理	现场调查	有操作日志 满足要求	09.03
3	未及时更换油脂	维护日志中是否按时更换或加油脂	现场调查	有维护日志 满足要求	09.06
4	转子磨损	拆开检查转子情况	现场调查 试验确认	机器定期检修	09.07
5	轴承损坏	拆开检查轴承磨损情况	现场调查 试验确认	机器定期检修	09.07
6	压实度不够	现阶段配比的助凝剂和泥相互作用符合要求	现场调查 试验确认	在规定时间内能凝结成要求的泥水	09.10
7	进泥效率低，达不到要求	进泥效率满足要求	现场调查	规定时间内能进泥	09.12
8	基座不稳	基座牢固，不振动	现场调查 试验确认	基座振动≤0.02mm	09.15
9	温、湿度不满足	温、湿度满足运行要求	现场调查 试验确认	温度≥0℃ 湿度≤80%	09.16
10	操作流程与运行规程不符	操作流程符合运行规程	现场调查	有操作报告 符合运行规程	09.18

调查不同转子磨损量对振动值及出泥效率、异常振动的影响值，并做了以下统计。

表6 不同转子磨损量与异常振动、出泥效率低

转子磨损量（mm）	0.5	1	1.5	2	2.5
振动值（mm/s）	6	9	13	18	23
出泥效率（标准值450kg/h）	90%	80%	70%	65%	60%

随着转子磨损量的增大，离心脱水机的振动值与出泥效率的变化差异很大，这表明了转子磨损对症结影响很大，是造成离心脱水机故障的主要原因之一。

另一方面的调查结果显示：离心脱水机不能够在规定的时间内凝结出符合要求的泥水，只达到原有要求的1/3甚至更低。而现场调查发现，离心脱水机的出泥都很稀，达不到原有的泥饼压实度标准，压实度标准值为1.3kg/dm³，而现场确认的压实度仅为0.5kg/dm³，随着压实度的增大，离心脱水机的出泥效率的变化差异很大，基本上成线性关系，这表明了助凝剂与泥配比不合理对症结影响很大，是造成离心脱水机故障的主要原因之一。

3 制定措施

针对转子磨损和压实度不够两个要因，运用头脑风暴法，提出了诸多改进措施，并进行了整理。

表7 对策方案汇总表及评估表

序号	要因	初步方案	经济性	时间性	可实施性	有效性	可靠性	综合得分
			0.1	0.3	0.2	0.3	0.2	
1	减少转子磨损	补焊	5	5	5	3	5	4.9
		更换新转子	1	1	1	5	5	3.1
2	增加压实度	调配合适的助凝剂	5	5	5	3	5	4.9
		更换新的助凝剂	1	2	1	5	5	3.4

4 效果评估

对方案 1 实施的效果如下图所示

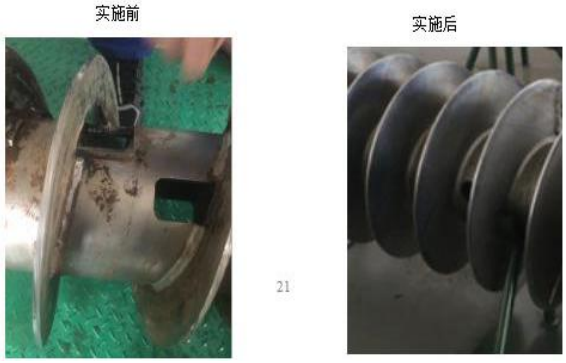


图 4 效果图

对于方案2：离心脱水机进泥口的含泥污水系抚河水经沉淀池沉淀后的泥浆，其中含有的锌、铝、铁等金属离子较少，适用聚丙烯酰胺（PAM）阴离子型药剂做助凝剂。聚丙烯酰胺在酸性或碱性介质中均呈阳电性，适用于对悬浮颗粒带阴电荷的污水进行絮凝沉淀。颗粒状聚丙烯酰胺絮凝剂不能直接投加到污水中，使用前必须先将它溶于水，并根据聚丙烯酰胺的品种型号和污水的性质来调整浓度配比，再用该水溶液去处理污水。在实验室进行实验，以期找到最佳配比浓度，在提高离心机工作效率的同时避免药剂的浪费。

主要实验方案如下：为迅速发挥效力，先用常温自来水将固体聚丙烯酰胺溶解成0.1%～0.5%浓度的水溶液，阴离子性助凝剂通常溶解浓度为0.1%（但自系统投运以来，根据离心机厂家调试，控制离心机助凝剂浓度为0.3%～0.5%），提高温度可稍微促进溶解，但水温不得超过40℃（40℃以上会使聚合物加速降解，影响使用效果）。称取1g药剂加入1L水中充分溶解，溶解时加水至容器的一半，边搅拌边加入干粉，使之分散在水中，避免形成疙瘩，否则不易溶解，现场操作更会堵塞管道并造成浪费；接着继续搅拌至干粉完全溶解，再添水至1L，配成0.1%浓度、呈透明胶体状水溶液。

根据实验结果，采用0.1%～0.3%的药剂水溶液进行助凝沉淀时，泥浆明显形成了粘连的泥巴状态，说明此时系统的脱泥效果最佳。药剂浓度为0.3%～0.5%时泥浆为细小絮状物，成泥效果不佳。实验最佳药剂浓度为0.1%～0.3%，应根据现场泥浆浓度，随时调控药剂浓度范围，达到最佳脱泥效果，同时避免药剂的浪费。

我厂助凝剂加药是对高密池的水进行，在进入离心脱水机前的污泥输送泵的助凝剂浓度达不到0.1%，所以我们采用加装一台助凝剂加药泵直接连接离心脱水机的进泥口。

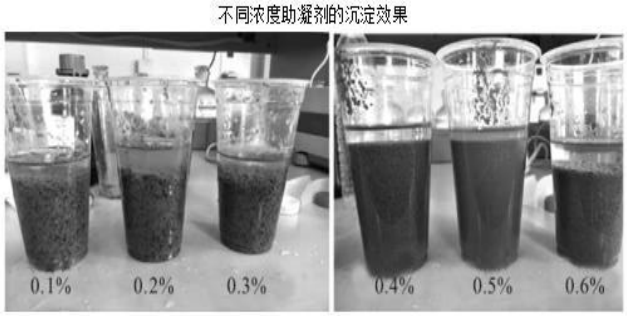


图5 沉淀效果图

经过两项措施实施后，对运行的离心脱水机的缺陷情况进行了统计，离心脱水机的缺陷达到0.25条/月，远低于目标值0.5条/月，目标成功实现,可以推广开来。

参考文献：

[1]电厂化学设备检修[M].中国电力出版社，2017
[2]电厂化学设备及系统[M].中国电力出版社，2015
[3]抚州电厂化学设备运行规程[M]，2020

作者简介：

高新开（198303），男，湖北黄冈，本科，工程师，研究方向汽机和化学，E-mail：7588455@qq.com

风力发电机组防雷技术研究与应用分析

侯遥平

（江西大唐国际新能源有限公司，江西 南昌 330000）

摘要：随着我国清洁能源的不断发展，风力作为最普遍的一种可再生清洁能源，有着巨大的发展潜力。现阶段，我国风电发电项目在逐年递增，在建设期间要特别注重风力发电机组的防雷技术的应用。雷电作为一种自然灾害，对风力发电机的影响和危害十分巨大，而风力发电机一般处于荒野或高山之上，且其自身高度较高，导电性较好，容易受到雷击的几率极大。因此，为了避免由于雷电引发的风力发电机组设备的损坏，必须积极应用防雷技术，来避免雷击造成的风力发电机的损失。为此，本文对风力发电机组的防雷技术进行了应用分析和研究，希望能够为我国的风力发电机组防雷提供一定的参考价值。

关键词：风力；发电机组；防雷技术

0 引言

随着我国的风力发电机组装机数量的逐年提高，风力发电机组受到雷击的风险也在增加。因此，风力发电机组中的防雷技术应用和设计是满足风力发电所必备的设施。所以为了更好地保障风力发电机组在发电时能有更好的稳定性，防止由于雷击而造成的发电不稳和对风力发电机组的损害，研究和设计人员必须设计风力发电机组更好的防雷技术的应用，保证发电机的正常发电。

1 雷击的类型

1.1 直接雷击

直接雷击是雷击的主要类型之一，其产生的现象就是云层中的电荷在某一时刻对大地上的一个点进行猛烈的放电。这种雷击主要表现为雷电直接击打在建筑物的表面，其可能造成雷电击打的建筑物或人体和牲畜遭受到十分严重的损害，产生的破坏力较大，同时雷电击打处由于电流过大，很可能会起火，导致建筑物或其他设施出现严重的火灾。而面对这种直接雷击的防雷技术就是及时地将雷击所产生的电流迅速导向大地，才能够避免遭受损害。

1.2 雷电波的侵入

雷电波是建筑物在遭受雷击时产生的一种破坏力较大的雷电灾害。在雷击发生的过程中，雷电通过击打在建筑物的金属管线或架空的线路上，就会使雷电波沿着管线向建筑物的内部入侵，从而产生严重的后果，危害建筑物内部的人员和相关电气设备的安全。

1.3 感应过电压

感应过电压也是雷击危害的类型之一，它主要发生在相关的电气设备或者电气线路的附近。其发生的原因是闪电由于自身释放的电荷在电源和数据传输线路，还有金属管道上感应生成的过电压。感应过电压往往会造成电气设备设施的损坏和数据传输的异常。

1.4 浪涌

浪涌是雷击发生过程中，电子设备的电源和通信线路中感应的电流浪涌造成电子设备损坏的雷击形式。这种雷击危害的发生主要因为电子设备的内部结构高度集成，从而使电子设备的耐压，耐过电流的整体水平不足以抗衡雷击产生的感应电流浪涌，还有一部分原因是电子设备的信号来源路径增加，使得浪涌的电流电压可以通过电源和信号线来对电子设备造成损害。

2 风力发电机组雷击特性

2.1 雷击部位

一般来说，风力发电机组的建设地点不一致，有可能是沿海还有可能是在山地之上，因此风力发电机组的各个部位都有可能遭受雷击。根据相关的调查数据显示，有关风力发电机组各个部位的雷击概率大小分别是控制系统最高电气系统其次是叶片系统，发电机受到雷击的概率最低。所以应将重点主要放在容易被雷击中的风力发电机位置做为防止雷击的重点部位。

2.2 雷电损坏机制

首先，在雷电进入到风力发电机内部时，由于发电塔和特殊的引线将风力发电机的塔身与地面连接，使得雷电通过导体传输到地面，在这个过程中由于强大的雷电电流通过，使得雷电流经过的导体产生强大的热效应和机械效应，并且在周围产生一个强大的电磁场，损坏风力发电机内部的电子设备。其次就是叶片在雷击之下容易受到伤害，虽然风力发电机的发电叶片使用高电阻率的材料，但是在强大的雷击条件下，仍然会使其产生导电的作用，甚至会由于雷击带来的强大破坏力和温度上升使叶片造成损坏。最后就是雷电对轴承的损坏，轴承的损坏和雷电的电流传导路径

有着非常重要的关系，雷电沿着传导路径会对轴承的相关设备造成一定程度的破坏。

3 风力发电机组防雷设计

3.1 接地系统

所谓的接地系统，就是利用导电效率好的材料将容易受到雷击的部分与大地连接在一起，使风力发电机在遭受雷击时能够及时地将大量的雷电流导出到地下，让其无法对风力发电机造成伤害。但是有些风力发电机建设在电阻率很高的土地上，这就使得按照一般的接地方法来进行接地系统的建立，无法达到一定的防雷效果。因此，在进行接地系统的建设时还会布置接地网，甚至将接地网连接在一起来降低土地的电阻率，使接地系统能够真正发挥导出雷电流的作用。

3.2 防雷叶片设计

叶片是风力发电机组正常运行的重要部位。虽然目前的风力发电机叶片的制造材料大多采用高电阻的材料，但是由于雷击所释放的能量过于巨大，使得叶片仍然会由于其产生高温和爆炸出现损坏。为此，设计人员需要将防雷设计应用到叶片之中，在叶片中安装高度绝缘的电涌保护器，实现设备和叶片之间的绝缘，防止叶片带来的雷击电流破坏电子设备。其次，要通过在叶片上设置叶片式避雷器来躲避和防止雷击对叶片的影响，实现通过避雷器将吸引过来的雷电电流直接释放到地面，使其无法造成对叶片的损伤。

3.3 机舱防雷设计

发动机的机舱也需要进行防雷设计，由于发动机的机舱大多由金属，且其外部的环境一般十分恶劣，所以机舱被雷击中的概率较高。为此，机舱的防雷设计需要在其后方安装避雷针，并将避雷针和机架紧密相连使其价成为一个有力的接地体，能够将雷击所产生的电流直接导引入地下，无法对机舱造成损坏。另外，对于机舱外的传感器也应该加重其雷电防护功能，防止雷击对其造成的破坏。

3.4 电子系统防雷设计

电子系统是作为风力发电机的控制部门的重要装置，其在风力发电机上一般由变压器，通信接口和发电机等相关电子设备组成。风力发电机的电子系统防雷设计能够有效防止电子设备的损坏，为风力发电机的正常运转提供保障。电子系统受到雷击危害的不仅仅是电流，还有雷电引发的电磁脉冲和强大的磁场。而只有通过外围的金属装置形成法拉第笼，才能够更好地保护设备和电路。另外，在电子系统的线路上还需要进一步加装金属的外壳，才能够保护设备和电源的安全不受雷电产生的干扰，最后还可以通过将设备线路的金属外壳接地实现对缆线的保护。

3.5 发电机防雷设计

发电机是风力发电机组的重要部分，它是整个风力发电机组能够产生源源不断的电力的根本部件。因此，发电机的防雷设计必须要进行格外的重视，如果发电机被雷击中，那么雷电的电流会在一瞬间产生极高的电压和电涌电流，使得电线和信号线都会受到十分严重的破坏。为此，发电机的线路和信号线都应该使用电涌保护器来防止雷击电流的破坏。另外，如果风力发电机组所建立的地点实在是自然条件过于恶劣，雷击十分常见，那么就应该考虑到所建立的变阻器和电涌保护器能否经受住高强度的雷电打击，这就需要在自然条件恶劣的地点设置多级保护的回路，防止发电机受到雷电的损害。

4 结语

风力发电技术的发展促进了我国实现可持续发展的目标，提高我国能源的安全性和稳定性，为我国的经济发展提供保障。但是对于风力发电机组的防雷技术，研究人员需要进行进一步的分析和应用研究，实现风力发电机组能够更好地防止雷击造成的损害，为风力发电的稳定性和安全性提供保障，也能够避免由于自然灾害造成的重大经济损失。

参考文献：

[1]姚林玲，崔婷茹，杨瑜.风力发电机组的防雷设计方法分析[J].科技创新导报，2016，13（33）：51+53.

[2]王艳姣.风电机组防雷保护研究[D].西南交通大学，2018.

[3]薛成亮.风力发电机组防雷的研究分析[J].现代国企研究，2015（20）：178+180.

作者简介：

侯遥平（1991），男，江西九江，大学本科，助理工程师，风电，E-mail：872465562@qq.com