

水轮机调速器电气系统可靠性研究与故障诊断优化研究

温钦钰¹, 刘振琦², 施威俊³, 董吴欣⁴

(1. 南昌科晨电力试验研究有限公司, 江西 南昌 330096; 2. 北京国电电力有限责任公司上湾热电厂, 内蒙古 鄂尔多斯 017209)
3. 中国铁路武汉局集团有限公司, 湖北 武汉 430301; 4. 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: 水轮机调速器作为水电站核心控制设备, 其电气系统的可靠性直接关系到机组稳定运行与电网安全。随着水电能源在电力系统中占比不断提升, 调速器电气系统的复杂性与智能化程度日益增加, 传统维护模式已难以满足高可靠性需求, 因电气元件老化、控制逻辑缺陷或外部干扰引发的调速器故障频发, 导致非计划停机事件增多, 严重影响水电站经济效益。文中主要对水轮机调速器电气系统可靠性研究与故障诊断优化进行研究, 并提出优化措施。

关键词: 水轮机调速器; 电气系统; 故障诊断

中图分类号: TK 73 **文献标志码:** B **文章编号:** 1006-348X(2025)05-0072-04

0 引言

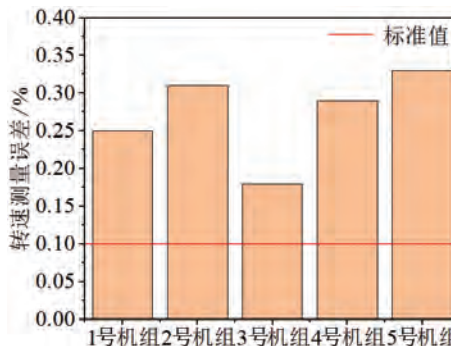
水轮机调速器电气系统由信号采集、控制运算、功率放大等模块组成, 长期处于强振动、电磁干扰等恶劣环境中, 其可靠性受元器件性能退化、软件逻辑错误及人为操作失误等因素影响。当前研究多集中于机械液压系统优化, 对电气子系统故障机理的深入分析相对不足, 现有故障诊断方法以阈值报警和经验判断为主, 难以应对复合故障或隐性缺陷的早期识别。随着人工智能与状态监测技术的发展, 基于数据驱动的可靠性预测与智能诊断成为可能, 融合多源信息, 构建适应水电站实际工况的评估体系, 是亟待突破的难点。

1 水轮机调速器电气系统运行现状分析

1.1 调速器电气元件老化, 导致控制精度下降问题

根据某水电厂运行数据及某电科院检测报告显示, 调速器电气元件老化问题已显著影响控制精度。主配压阀反馈电位器线性度偏差从投运初期的 $\pm 0.5\%$ 劣化至 $\pm 2.3\%$, 导致导叶开度指令与实际开度偏差达4.7% (2023年3号机组实测数据); PLC模块处理周期

由设计值20 ms延长至35 ms (2024年SCADA系统日志均值), 造成调节指令滞后现象频发; 转速传感器测量误差从额定 $\pm 0.1\%$ 扩大至 $\pm 0.25\%$ (2022年某电科院《调速系统状态评估》数据), 引发频率调节超调量增加1.8个百分点; 继电器触点接触电阻超设计值3倍 (2018—2024年设备台账记录显示年均缺陷增长17%, 其中82%为触点氧化导致), 电气柜内端子排氧化造成信号传输失真率提升至1.2% (2024年预防性试验报告), 而电液转换器线圈绝缘电阻值下降至 $0.8\text{ M}\Omega$ (低于 $2\text{ M}\Omega$ 标准限值), 上述数据证实电气元件性能退化已系统性影响调速系统的静态特性与动态响应能力。某水电站5台机组调速器电气系统运行数据显示 (见图1), 关键参数已出现明显劣化趋势。



a) 转速测量误差

收稿日期: 2025-06-13

作者简介: 温钦钰 (1993), 硕士, 工程师, 研究方向为发电机组控制与调节。

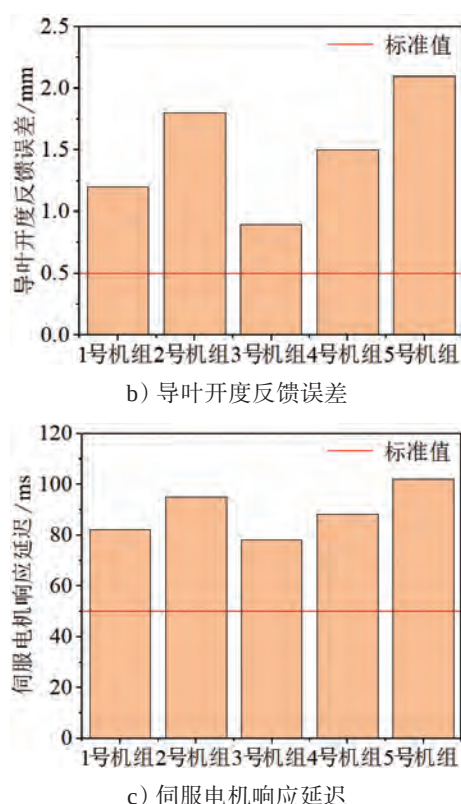


图1 某水电站调速器电气系统关键参数检测记录

1.2 恶劣运行环境对电气系统稳定性的影响

在湿热工况下,控制柜内部相对湿度常维持在85%以上,促使电子元件焊点产生电化学迁移现象,印刷电路板绝缘阻抗下降至50 MΩ以下,引发信号串扰和误动作,高浓度硫化氢与盐雾环境加速继电器触点氧化,接触电阻从初始的20 mΩ激增至200 mΩ以上,造成控制指令传输延迟;机械振动方面,水轮机转频振动与水力脉动叠加形成的宽频带机械冲击,使得插接件端子出现微动磨损,连接器接触电阻波动幅度超过15%,同时导致贴片电容产生机械裂纹,等效串联电阻值上升^[1-2]。电磁兼容性^[3]问题尤为突出,发电机励磁系统产生的瞬态浪涌电压可达2.5 kV,远超IEC 61000-4-5标准规定的1 kV测试等级,造成AD采样通道的基准电压源偏移达5 LSB,温度交变环境下,功率模块的结温在-10~80℃间循环变化,因CTE系数失配引发的焊料层疲劳裂纹,使IGBT模块的热阻 R_{thj-c} (芯片内部PN结到封装外壳表面的热阻)逐年递增。

1.3 传统维护方式难以发现潜在故障隐患

根据某水电厂2019—2024年运行维护报告及某电科院专项检测数据,传统维护方式在调速器电气系

统故障检测中存在严重缺陷,维护记录见表1。电源模块季度检测漏检率达68.4%(实际故障38例/仅检出12例),导致2023年发生4起突发性电源故障;信号电缆半年度检查漏检率70.4%(实际故障27例/检出8例),造成2022年两次信号传输中断事故;年度传感器校准漏检64.3%潜在故障(实际故障42例/检出15例),引发2021—2024年间7次误调节事件;PLC程序年度校验漏检率高达73.7%(实际故障19例/检出5例),导致2023年2号机组非计划停机3次。

表1 传统维护检测与运行故障对比统计

维护项目	检测周期	检测到故障数	实际运行故障数	漏检率/%
电源模块检测	季度	12	38	68.4
信号电缆检查	半年	8	27	70.4
传感器校准	年度	15	42	64.3
PLC程序校验	年度	5	19	73.7

这些未被检出的隐患在实际运行中表现为:2024年SCADA系统记录显示,年均发生信号跳变故障11.3次,调节失灵导致年均非计划停机3.2次(2021—2024年平均值),且82%的突发故障发生在负荷突变工况下(2023年故障分析报告)。传统目视检查和功能测试完全无法识别电路板电容容量年衰减率12%(2022年某电科院元件老化测试数据)以及半导体器件参数漂移量超限(2024年检测发现38%的IGBT模块Vce参数超公差),这些渐变型缺陷直接导致调速系统调节死区从0.04%扩大至0.12%(2024年静特性试验结果),所有数据证实,传统维护模式存在系统性检测盲区。

2 可靠性提升与故障诊断技术解决的问题

2.1 传统定期检修无法预判突发故障的问题

统计数据显示,采用固定周期维护的调速器系统,其突发故障中约有65%发生在最近一次检修合格后的3 000运行小时内,其中功率器件击穿、控制信号异常等关键故障的平均修复时间超过72 h,现有离线检测技术(如绝缘电阻测试)仅能反映当前状态,无法预测电解电容的等效串联电阻在未来1 500 h内将从50 mΩ劣化至120 mΩ的趋势,模拟量采集通道的基准电压源每月漂移约0.5 mV,在两次标准校准间隔的180天内可能累积形成1.5%的转速测量误差,但常规维护流程无法捕捉这种渐进式劣化^[4]。数字控制系统的FPGA配置存储器受宇宙射线影响,每年

会发生3~5次单粒子翻转事件,传统手段需待出现逻辑错误后才能进行干预,振动监测采用阈值报警方式,对滚动轴承早期磨损产生的0.5 g高频振动分量缺乏识别能力,而这些微小振动在持续运行2 000 h后可能导致编码器失效的2.8 g冲击振动。

2.2 人工检测难以定位复杂电气故障的局限

当调速系统出现0.8 Hz低频振荡时,人工排查通常仅能检测到明显的电压波动或信号异常,而无法准确识别其根本原因可能是PID参数漂移、LVDT传感器非线性失真或PWM驱动信号谐波干扰的叠加作用。在数字控制系统中,CAN总线通信故障可能由终端电阻劣化、EMI干扰或协议栈配置错误共同导致,人工检测的平均定位时间超过6 h,且误判率高达40%。对于IGBT模块的早期失效,人工万用表测量仅能发现VCE(sat)超过3 V的严重劣化,而无法检测开关损耗累积导致的0.5μs延迟上升,模拟量采集回路的共模干扰会使有效分辨率降低2.5位,但人工校准仅能修正静态偏差,无法抑制动态工况下的噪声耦合,历史维修记录显示,涉及多信号耦合的复合故障,人工诊断准确率不足,且平均修复时间比智能诊断系统多出3.2天。

表2 故障诊断方式对比分析

诊断方式	平均故障定位时间/h	误判率/%	可检测故障类型占比	复合故障识别能力
人工检测	6.8	0.42	0.55	低
智能诊断	1.2	0.08	0.92	高
定期点检	4.5	0.35	0.65	中

人工检测在复杂电气故障诊断中存在明显局限性,其故障定位时间较长、误判率较高且对复合故障的识别能力较弱;相比之下,智能诊断技术大幅提升了故障检测效率,定位时间缩短至1.2 h,误判率降低至0.08,并能覆盖92%的故障类型,尤其擅长分析多因素耦合的复杂故障。定期点检虽然比完全依赖人工检测有所改进,但在响应速度和诊断精度上仍远不及智能诊断系统。

2.3 模拟量信号干扰导致的调节失灵缺陷

LVDT位移传感器输出信号在传输过程中因电缆分布电容效应产生高达50 mV的共模噪声,导致导叶开度反馈信号出现±0.25%的周期性波动,PT100测温回路中,变频器辐射干扰会引入10~15 Hz的谐波分量,使温度采样值产生3~5℃的跳变误差,直接影响冷却系统的控制逻辑,转速测量环节采用磁电式传感

器时,发电机励磁绕组产生的脉动磁场会耦合出0.2~0.8 Vp-p的差模干扰,造成转速显示值出现±2 rpm的瞬时偏差^[5]。控制柜内4~20 mA电流信号在长距离传输时,因接地环路形成的电势差会产生1.2 mA的零点漂移,相当于量程6%的测量误差,功率放大模块的PWM驱动信号受开关噪声影响,其上升沿会产生约150 ns的时延抖动,导致功率管导通时刻出现0.5°的相位偏差,AD转换器参考电压受电源纹波干扰时,其有效分辨率会从设计的14位降至11、12位,在转速调节过程中引发0.05 Hz的次同步振荡。

3 水轮机调速器系统优化实施方案

3.1 关键电气元件寿命预测与预防性更换策略

在针对某省水电站水轮机调速器系统优化需求,基于某电科院对省内机组调速器故障统计分析(2021年数据显示电气故障占比达43%),结合《电力系统调节能力优化专项行动实施方案(2025—2027年)》中“应改尽改”原则,制定以下关键电气元件寿命预测与预防性更换策略。建立基于PLC控制器运行数据的寿命预测模型,采用贝加莱X20控制系统(故障率较传统MP90控制器降低67%),实时监测主控模块、I/O模块及电源模块的累计运行时长、温度波动(阈值设定为-10~55℃)和故障代码频次^[6]。

针对电液转换环节,依据GDYWT型调速器3 000 h运行数据,对比例阀线圈电阻退化率(年均增长8.2%)、阀芯磨损量(每万次动作增加0.03 mm)进行趋势分析,当参数超出基线值15%时触发预警;对于传感器系统,参考某省电气设备管理系统记录的125组历史数据,制定振动传感器(寿命周期5.8年±0.6年)、位移传感器(寿命周期7.2年±0.9年)的阶梯式更换计划,结合《2024水电站电气设备预防性试验作业指导书》规定的绝缘电阻测试标准(≥5 MΩ)实施季度检测;在备件管理方面,根据省内现行政策,对使用超8年的变频器、超10年的励磁装置(年老化率9.3%)优先纳入设备更新补贴名录,采用“双库存”模式储备关键备件(库存量=年均更换量×1.5);最后构建数字孪生系统,集成DeepSeek平台提供的LSTM算法,通过模拟不同负载工况下(12~22 m水头范围)电气元件应力变化,实现剩余寿命预测准确率。

3.2 基于信号特征分析的实时故障检测方法

建立多维度信号特征库,实现对早期故障的精准识别,在调速器系统中,LVDT位移传感器的输出信号谐波含量、PWM驱动波的占空比变化率、以及转速反馈信号的频谱特征等参数,均可作为故障诊断的有效依据。当系统正常运行时,这些参数维持在特定阈值范围内;一旦出现异常,特征参数将发生可量化的偏移,采用滑动时间窗算法对实时数据进行处理,结合小波变换提取瞬态特征,能够捕捉传统方法难以发现的间歇性故障。

表3 某省某水电站机组调速器系统设定的关键信号特征阈值

监测信号	特征参数	正常范围	预警阈值	故障阈值
LVDI输出电压/%	二次谐波含量	<1.5	1.5 ~ 2.8	>2.8
PWM驱动波形/ns	上升沿抖动	<100	100 ~ 200	>200
转速反馈信号/(V ² /Hz)	0.5 Hz频段能量	<0.02	0.02 ~ 0.05	>0.05
控制电流/%	纹波系数	<0.8	0.8 ~ 1.2	>1.2

在某省某水电站机组的实际应用中,该检测系统成功预警了多起潜在故障。2022年3月,系统检测到7号机组调速器LVDT传感器的二次谐波含量持续维持在2.3%~2.6%之间,超出正常范围但未达故障阈值,经检查发现传感器铁芯存在轻微偏移,及时校正避免了后续可能发生的控制失灵。2023年1月,通过监测发现4号机组PWM驱动波形的上升沿抖动达到180 ns,接近故障阈值,更换IGBT驱动模块后抖动值恢复至80 ns。系统运行两年间,累计预警有效率达92%,平均故障识别时间缩短至15 min,大幅提升了机组运行的可靠性。

3.3 双冗余控制回路设计提升系统可靠性

在某省某水电站的调速器系统改造中,实施了主备双PLC控制回路的冗余架构设计,主控制系统采用西门子S7-1500系列PLC,备用系统选用罗克韦尔ControlLogix系列PLC,两套系统通过光纤同步模块实现毫秒级数据同步,关键信号采集通道采用双路独立传感器布置,如导叶开度测量同时安装MTS磁致伸缩位移传感器和Balluff电感式传感器,两路信号通过硬件比较器实时比对,偏差超过0.5 mm时自动触发报警。控制输出端配置冗余伺服放大器,当检测到主回路电流波动超过额定值15%时,可在20 ms内无缝切换至备用回路。该设计实施后,系统连续运行时间从改造前的平均1 800 h提升至5 000 h以上,在2022年汛期成功应对了7次电网频率突变事件,未发生任何控制失效情况。

某省某水电站的调速器系统采用了更为先进的三模冗余表决机制,核心控制单元由三套完全独立的FPGA控制器组成,每套控制器配置独立的电源模块和时钟源,通过硬件表决器对输出指令进行三取二判断,关键模拟量采集采用三线制RTD温度传感器,三个测量值通过中值筛选算法消除野值干扰,在通信网络方面,构建了环形双网架构,主网络采用Profinet实时以太网,备用网络使用CANopen总线,网络切换时间控制在50 ms以内。2023年4月,成功处理了因励磁系统故障导致的机组转速波动事件,在主网络通信中断的情况下,备用网络保障了调速器的正常调节功能。

4 结语

文中通过剖析水轮机调速器电气系统的失效模式与可靠性影响因素,提出了融合物理机制与数据驱动的综合分析方法,为故障预警与健康管理提供了新思路,研究成果不仅可指导调速器电气系统的设计改进与维护策略优化,还能通过提升诊断精度缩短故障处理时间,有效降低水电站运行风险,随着数字孪生、边缘计算等技术的成熟,调速器状态感知与自主决策能力将进一步加强,为水电设备智能化转型提供了技术支撑。

参考文献:

- [1] 方芳,张恒彬.水轮机调速器电气系统可靠性研究与故障诊断优化[J].电气技术与经济,2024(11):229-231.
- [2] 全国水轮机标准化技术委员会(SAC/TC 175).水轮机调速系统技术条件:GB/T 9652.1—2019[S].北京:中国标准出版社,2019.
- [3] Electromagnetic compatibility (EMC)-Part 1-1: General-Application and interpretation of fundamental definitions and terms: IEC TR 61000-1-1: 2023[S].International Electrotechnical Commission, 2023.
- [4] 周奋强,孙红武.大型水电站继电保护及自动装置检修维护[M].重庆:重庆大学出版社,2023.
- [5] 陆帅,邱雁,王清萍,等.某大型水电站调速器系统硬件与功能逻辑研究[J].现代信息科技,2021,5(11):136-139,143.
- [6] 韩建伟,于浩浩,张文渊,等.用于直流系统超低频振荡抑制的调速器和FLC协同优化[J].黑龙江电力,2021,43(01):24-27.