

基于变分模式分解和变换器分位数回归的短期变压器油温区间预测

李锦程, 曾传瀚, 胡玉生, 毛荣军

(国网江西省电力有限公司综合服务中心, 江西 南昌 330029)

摘要:针对非平稳和长序列的电力变压器油温点预测缺乏变压器不确定性状态估计信息的问题,提出一种融合变分模式分解和变换器分位数回归(variational mode decomposition and transformer quantile regression, VMD-QR-Transformer)的区间预测模型。首先,利用VMD模型,将非平稳油温序列分解为5个更平稳的分量;然后,创建能够捕捉序列全局信息的自注意力机制Transformer模型及其分位数损失函数;其次,搭建QR-Transformer模型对各分量进行不同分位数的预测;最后,重构预测分量生成不同置信水平的油温预测区间。结合某实际变压器油温数据进行算例分析,结果显示,相比单一模型,所提组合模型显著提升了预测区间性能,为变压器状态评估提供有效决策依据。

关键词:变压器油温;区间预测;分解组合;Transformer

中图分类号:TM 76 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0027-04

0 引言

随着新能源高比例并网与负荷波动的加剧,对油温进行点预测无法量化间歇性和冲击性负荷带来的不确定性,难以满足新型电力系统对变压器状态精准评估的需求^[1]。因此,区间预测更能够为变压器状态估计提供重要支撑。当前主流研究偏向利用机器学习模型,从历史运行数据中挖掘油温变化规律,集中于点预测模型^[2-3]。油温序列具有长序列和非平稳性^[4],变分模式分解(variational mode decomposition, VMD)能够将非平稳时序信号分解为多个准稳态的模态分量^[5];Transformer因其出色的自注意力机制而广泛应用于当前大模型当中,通过自注意力机制,能够在不同位置对序列中的每个元素赋予不同的权重,从而有效地捕捉长序列的全局特征^[6];分位数回归(quantile regression, QR)能通过在不同分位点输出不同的预测值,从而构建出不同置信水平的预测区间。

为解决油温长序列和非平稳性及不确定性预测的

问题,文中提出一种基于VMD-QR-Transformer的分解组合区间预测模型。首先,利用VMD技术将非平稳油温序列分解成更具平稳的时序分量,消除预测的滞后性;然后,设计Transformer模型参数及其QR损失函数,搭建QR-Transformer模型,对各时序分量进行不同分位数的预测区间;最后,重构预测分量生成不同置信水平的油温预测区间。结合某变压器实际油温数据集进行实验,结果表明,VMD-QR-Transformer模型在90%和80%置信水平下,预测区间覆盖率PICP、预测区间平均宽度PIAW分别为(98.91%、93.80%)和(6.10%、3.61%),相比单模型,显著提升了区间预测性能。

1 VMD-QR-Transformer区间预测模型

VMD技术将非平稳变压器油温序列数据 $V(t)$ 分解为 k 个具有不同中心频率带宽的本征模态序列和残差序列,能够提取出不同时间尺度的特征,记为第 k 个 $vmd_k(t)$ 序列数据,式(1)为重构信号数据 $V(t)$ 与 $vmd_k(t)$ 的关系。

收稿日期:2026-01-06

作者简介:李锦程(1992),男,硕士,工程师,从事电网安全生产管控。

$$V(t) = \sum_{k=1}^K vmd_k(t) \quad (1)$$

基于 VMD-QR-Transformer 的短期变压器油温预测模型如图 1 所示,预测步骤如下:

1) 数据分解:利用 VMD,将短期变压器油温数据分解为 k 个分量序列。

2) 分量特征工程:每个分量的序列特征可能各不相同,分别对每个进行特征分析,从中挑选出合适的输入变量和时间步长。

3) 分位数预测建模:对每个数据分别采用 QR-Transformer 进行不同的分位数 q 预测, QR-Transformer 原理见文献[7]。

4) 预测区间重构:预测区间的重构方法为依次叠加各个分量的预测区间,即分别进行预测区间的上界累加和下界累加,见式(2)。

$$PI_r = \sum_{i=1}^k PI_i = \sum_{i=1}^k [P_{li}, P_{ui}] \quad (2)$$

式中: PI_r 为重构后的组合预测区间; PI 为分量预测区间; P_l 为分量预测区间下界; P_u 为分量预测区间上界。

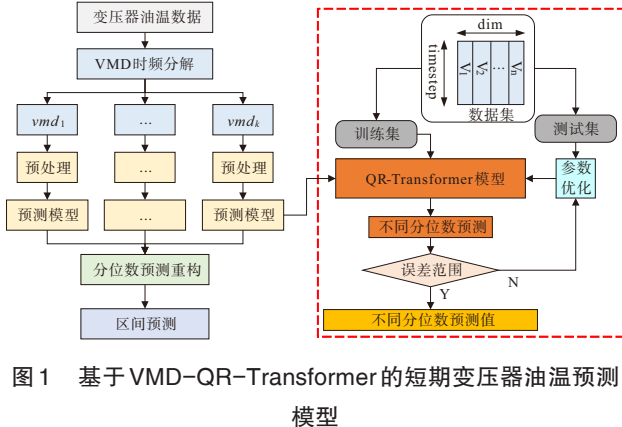


图1 基于VMD-QR-Transformer的短期变压器油温预测模型

2 短期变压器油温区间预测模型设计

2.1 油温数据处理

油温数据来源于开源数据集“ETDataset”^[8],采集国内某供电公司变电站实际运行的变压器油温数据,油温采样间隔为 1 h,油温数据 $V(t)$ 维度为 $(17\ 420, 1)$ 。为平衡 QR-Transformer 模型计算的复杂度,使用 VMD 技术将油温数据分解成 $4+1$ (残差) 个 $vmd_k(t)$ 序列, $vmd_k(t)$ 序列维度为 $(17\ 420, 5)$,可视化部分曲线见图 2。相比原油温数据,分解后的 $vmd(t)$ 序列会变得更平稳。

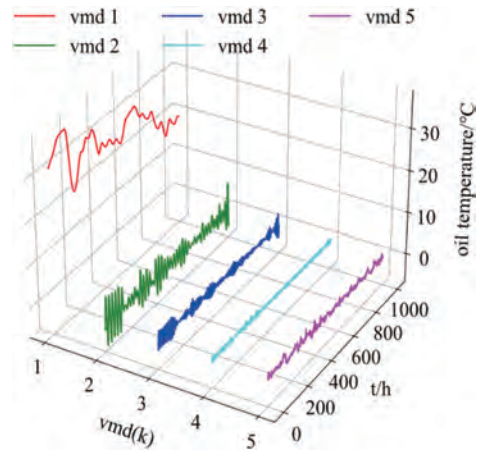


图2 短期变压器油温 $vmd(t)$ 序列曲线

为降低计算成本,减少变量维度,挑选合适的特征变量,使用 Pearson 相关系数^[9]对油温序列进行相关性分析。通过计算当前时刻 t 油温与过去两周 ($t-1 \sim t-336$) 油温序列的 Pearson 相关系数,选择原始油温序列 $v(t)$ 的 12 个最大相关性特征矩阵如图 3 所示,可明显看出时刻 t 油温与特征变量 $[t-1, t-2, t-3, t-4, t-24, t-23, t-25, t-22, t-26, t-5, t-21, t-27]$ 具有极强的相关性,并且具有强日周期性。 $vmd_k(t)$ 序列的特征选择同理,不再叙述。

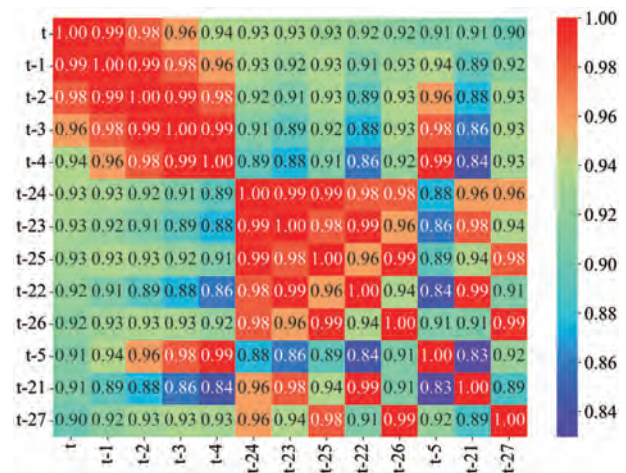


图3 油温序列的 Pearson 相关系数矩阵

2.2 QR-Transformer 模型架构及其参数设计

实验设计的 QR-Transformer 模型架构及其参数如图 4 所示,网络架构采用 3 层编码器和 3 层前馈神经网络,多头注意力的头数为 8,Transformer 的嵌入维度为 64,输入样本维度(样本数,时间步长=12,变量维数=1),模型采用小批量 (mini-batch=64) 输入模型训练采用 50 次 epochs 迭代训练计算,loss 函数采用分位数损失函数。

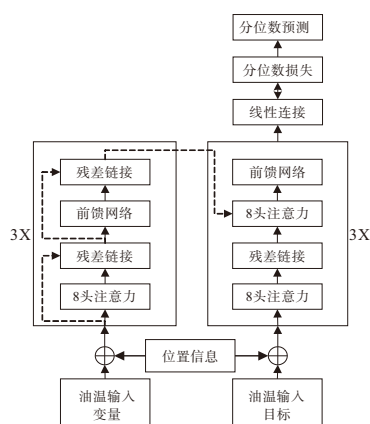


图4 QR-Transformer模型架构及其参数

置信水平 ($\alpha=95\%$ 、 $\alpha=80\%$) 对应分位数为 ($q=[0.025, 0.975]$ 、 $q=[0.10, 0.90]$)。使用 QR-Transformer 模型, 分别对 5 个 $vmd_k(t)$ 序列进行 4 个分位数 $q=[0.025, 0.10, 0.90, 0.975]$ 回归预测, 每个时刻的 $vmd(t)$ 序列都能够获得 4 个不同的分位数预测值 P_t , 得到一个 $(t, 4)$ 维的分位数预测矩阵 $P_{t \times 4}$, 见式(3)。将 5 个 $vmd_k(t)$ 序列预测区间依次叠加得到原油温数据 $V(t)$ 的预测区间, 见式(4)。

$$P_{t \times 4} = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_t \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} P_{1,0.05} & P_{1,0.10} & P_{1,0.90} & P_{1,0.95} \\ P_{2,0.05} & P_{2,0.10} & P_{2,0.90} & P_{2,0.95} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{t,0.05} & P_{t,0.10} & P_{t,0.90} & P_{t,0.95} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$PI_{V(t)}^\alpha = \sum_{k=1}^5 PI_{vmd_k(t)}^\alpha = \sum_{k=1}^5 \left[P_{vmd_k(t)}^{(1-\alpha)/2}, P_{vmd_k(t)}^{(1+\alpha)/2} \right] \quad (4)$$

式中: P_t 为第 t 个时刻的分位数预测向量; p_{tq} 为第 t 个时刻、第 q 个分位数预测值。

2.3 评价指标

采用 PICP 和 PIAW 作为评价指标, PICP 越大, PIAW 越小, 表示区间预测性能越强。PICP 和 PIAW 定义如下:

$$\begin{cases} E_{PICP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lambda_i \times 100\%, \lambda_i = \begin{cases} 1, & y_i \in P_w \\ 0, & y_i \notin P_w \end{cases} \\ E_{PIAW} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{p_u - p_l}{y_i} \times 100\%, P_w = [p_l, p_u] \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_w 表示区间宽度; n 表示预测数量; λ_i 是布尔变量; p_l 为预测下界; p_u 为预测上界; y_i 为实际值。

3 算例分析

预测实验采用的对比算法为梯度提升分位数回归

(gradient boosting regression machine quantile regression, QR-GBR)、长短期记忆分位数回归(long short-term memory quantile regression, QR-LSTM)。

在置信水平(95%、80%)下, 单模型和分解组合模型区间预测实验结果如表1所示。

表1 不同模型的区间预测结果

预测模型	置信水平	PICP	PIAW
QR-GBR	95	91.02	8.08
QR-LSTM		91.57	7.39
QR-Transformer		93.61	5.96
VMD-QR-GBR		98.68	7.48
VMD-QR-LSTM		97.07	6.27
VMD-QR-Transformer	80	98.91	6.10
QR-GBR		73.58	4.37
QR-LSTM		77.50	4.30
QR-Transformer		80.58	3.70
VMD-QR-GBR		92.62	3.87
VMD-QR-LSTM	80	88.74	2.97
VMD-QR-Transformer		93.80	3.61

单模型方面, QR-Transformer 相比 QR-GBR 和 QR-LSTM, 在 95% 置信水平下, PICP 分别提升 2.85% 和 2.17%, PIAW 分别降低 26.24% 和 19.08%; 在 80% 置信水平下, PICP 分别提升 9.51% 和 3.97%, PIAW 分别降低 15.33% 和 13.95%。实验表明, QR-Transformer 在单模型不同的置信水平下表现最优, 预测区间更窄, 精度更高。

分解组合模型方面, VMD-QR-Transformer 相比 VMD-QR-GBR 和 VMD-QR-LSTM, 在 95% 置信水平下, PICP 分别提升 0.23% 和 1.84%, PIAW 分别降低 18.45% 和 2.71%; 在 80% 置信水平下, PICP 分别提升 1.18% 和 5.06%, PIAW 分别降低 6.72% 和增加 21.55%。实验表明, VMD-QR-Transformer 在分解组合模型中综合表现最佳, 鲁棒性最佳。

VMD-QR-Transformer 相比 QR-Transformer, 在 95% 置信水平下, PIAW 增加 2.35% 情况下, PICP 提升 5.66%, 误差(未覆盖率)降低 83.33%; 在 80% 置信水平下, PICP 提升 16.41%, 误差降低 68.07%, PIAW 降低 2.43%, 分解组合模型相较单模型性能提升显著, 尤其在低置信水平(80%)下表现更稳健, 表明 VMD 分解有效捕捉数据特征, 增强预测可靠性。

在 95% 置信水平下, 单模型区间预测性能对比如图5所示。可看出 QR-Transformer 预测区间最窄, 预测边界相对更加光滑, 在峰谷预测区间上更窄; 但在油温大幅变化的时刻, 模型预测能力明显跟不上变化趋势, 存在滞后一个时刻的特性, 导致准确性降低。

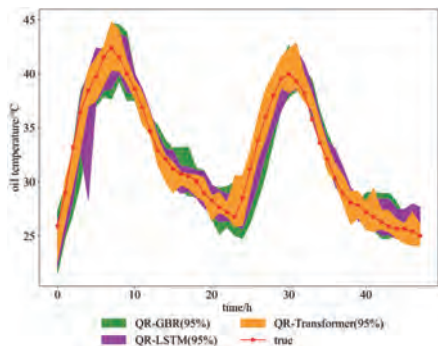


图5 单模型区间预测性能对比

在95%置信水平下,单模型和分解组合模型区间预测性能对比如图6所示。可看出分解组合模型预测区间边界明显更加光滑,且预测区间在谷峰和变化剧烈时刻明显更窄,真实数据在预测区间也更居中,但在部分谷底时刻预测时,预测区间反而更宽,重构方式为累计叠加,容易产生累计误差,导致谷底区间可能变宽。分解组合模型的波形与真实油温波形更加一致,从波峰波谷可明显看出滞后性被大幅度的消除,剧烈变化时刻的预测准确性得到明显提高。

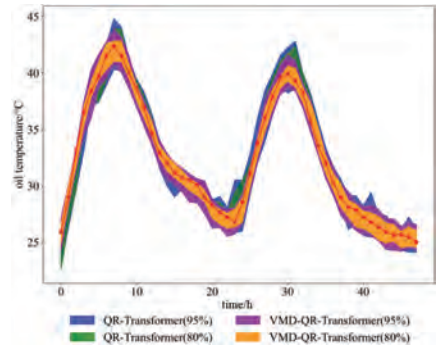


图6 单模型和分解组合模型区间预测性能对比

分解组合模型区间预测性能对比如图7所示。可看出 VMD-QR-Transformer 相比 VMD-QR-GBR, 预测区间明显更窄,相比 VMD-QR-LSTM,在谷底预测区间要更窄。

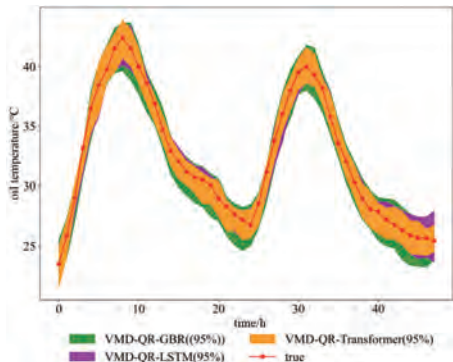


图7 分解组合模型区间预测性能对比

在置信水平(95%、80%)下,不同模型在 $vmd(k)$ 分量区间预测实验结果如表2所示。

表2 不同模型在 $vmd(k)$ 序列的区间预测结果

预测模型	$vmd(k)$	%			
		置信水平(PICP)		置信水平(PIAW)	
		95	80	95	80
QR-GBR	1	86.50	71.80	2.31	1.63
	2	86.39	65.88	3.55	1.71
	3	91.59	71.97	144.36	63.51
	4	92.02	72.37	183.16	77.72
	5	93.71	77.02	229.43	119.03
QR-LSTM	1	86.36	69.30	2.52	0.91
	2	80.47	61.11	3.57	1.40
	3	85.15	65.42	108.39	51.09
	4	86.50	66.03	131.80	66.72
	5	85.64	66.80	163.77	96.85
QR-Transformer	1	89.80	75.39	1.71	1.30
	2	86.82	71.14	2.87	1.73
	3	89.26	71.68	92.40	52.46
	4	90.49	73.35	128.02	72.69
	5	91.73	74.41	212.97	117.12

从表2可看出,各个模型在不同频率的分量预测性能表现上,存在不同的优劣。在低频分量 $vmd(1-2)$ 上,QR-Transformer相比QR-GBR和QR-LSTM,区间预测性能(PICP和PIAW)表现都更优异。在中高频分量 $vmd(3-5)$ 上,QR-Transformer相比QR-GBR, PICP性能更弱,PIAW性能更强;相比QR-LSTM, PICP性能更强,PIAW性能更弱;可见,QR-GBR在高频分量区间预测的准确性更高,QR-LSTM在高频分量预测区间的宽度更窄;而QR-Transformer在所有分量的预测性能鲁棒性更强,获得了更优异的区间性能。此外,从图2可明显看出,低频分量的幅值远高于高频分量,在分量预测重构上,低频预测占有更高的权重,低频预测决定了组合预测的基本性能,高频预测更侧重提高组合预测的局部变化性能。

4 结语

文中提出了一种 VMD-QR-Transformer 组合模型,并将其应用到变压器油温区间预测。设计 VMD-QR-Transformer 模型的预测流程,算例分析表明, VMD 分解算法能够显著提高模型的区间预测性能;对比 QR-GBR 和 QR-LSTM, QR-Transformer 在单模型和分解组合模型上具有更好的区间预测性能,在高低频分量预测上,具有更强的鲁棒性。下一步,结合不同模型在高低频分量预测的性能优势,对高低频分量采用混合模型的重构方式,有望提高预测区间的准确性和压缩预测区间的宽度。(下转第 63 页)

新型电力系统下的江西电网安全稳定研究

王 静, 聂更生, 陈田田, 郑 春, 薄明明

(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:在新型电力系统建设背景下,江西电源结构、电网形态将发生深刻变化,新能源装机规模占比不断提升,交直流混联电网特征愈加凸显,电网运行特性和电网安全稳定问题愈发复杂。文中介绍了新型电力系统安全稳定运行面临的挑战,分析了江西不同阶段交直流混联电网的稳定运行情况,以及大规模新能源接入对系统频率、功角和电压稳定性的影响,从规划和运行角度提出了提高系统稳定性的措施建议。

关键词:安全稳定;新能源;交直流混联;新型电力系统;功角稳定

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-348X(2026)02-0031-04

0 引言

随着直流输电系统和可再生能源的发展,大量不同类型、不同电压等级的电力电子设备将接入电网,给系统运行安全、系统分析控制、仿真建模计算等方面带来诸多挑战^[1]。含高比例可再生能源的交直流混联电网对电网电压更加敏感^[2];纯新能源机组集中馈入、远距离送出系统,动态的无功支撑能力较弱,需要通过加装动态无功补偿装置提升系统电压支撑能力^[3];直流功率水平降低,或同步发电机占比增加,或在直流受端母线配置同步调相机,系统电压稳定性显著提高^[4];文献[5]仿真计算结果表明,新能源渗透率越高,逆变型分布式发电对系统暂态稳定性的负作用越大,而电压控制的逆变型分布式发电能明显改善系统电压的稳定性;大规模风电接入电网后系统惯性和抗扰能力降低,对电网功角稳定性带来了严峻的挑战^[6-8];文献[9]仿真分析结果表明,当风电替换常规机组比例较低时,系统稳定性的主要表现为功角稳定,而替换比例较高时,则主要表现为电压稳定;文献[10]仿真分析结果表明,当系统中部分常规机组被新能源机组替换后,存在最大替换功率,当替换功率小于该值时,系统稳定问题的主要表现形式将是暂态稳定,而当替换功率大于该值时,则系统稳定问题的主要表现为电压失稳。因

此,新型电力系统的暂态稳定问题亟待深入研究。

1 江西电网现状及面临的挑战

1.1 电网现状

截至2024年底,江西省风电、光伏装机容量3578万kW,占总装机的44.7%,"十四五"前四年年均增速29.2%,已超过火电成为江西第一大电源。江西主网架结构更加完善,深入融入华中特高压交流环网,通过±800 kV雅湖特高压直流与西南联网,交流联络线通过1000 kV潇江双回线与湖南电网相联,通过1000 kV黄江双回线和500 kV黄永线、500 kV咸梦双回线与湖北电网相联。江西电网目前形成了完整的"一交一直"特高压网架,由华中末端电网发展升级为区域枢纽电网。

1.2 面临的挑战

为了满足江西电力保供需求,江西规划"十五五"引入第二回特高压直流、"十六五"引入第三回特高压直流,届时江西多直流馈入的交直流混联电网形态特征愈加凸显。同时,随着新能源装机占比的不断提升,电网运行特性发生复杂深刻变化。电网安全稳定面临以下挑战:

1) 外来电规模不断增大,交直流故障引起系统功角、频率、电压稳定问题愈发突出。"十五五"到"十六五"期间,江西将从"一交一直"向"两交两直"、"两交三直"的特高压电网格局发展。特高压直流容量

收稿日期:2026-01-06

作者简介:王静(1994),女,硕士,工程师,主要从事电网规划建设、电网安全稳定研究、新能源方面工作。

大、占电源比例高,若发生直流连续换相失败、直流瞬降等故障,将引起大规模潮流转移,系统功率冲击大,电网功角、频率、电压稳定问题将愈发突出。

2) 新能源占比持续增长,频率和电压稳定问题凸显。新能源占比持续增长,导致系统转动惯量、短路容量、一次调频能力下降;同时,新能源耐压水平差,易低电压或过电压脱网,将导致系统频率和电压稳定问题凸显。

3) 新能源集中的直流群受端地区,系统故障可能引发跨区联络线解列。当系统发生故障时,因电压瞬时跌落,可能造成大量新能源进入低穿状态,同时引发多回直流发生换相失败,二者功率缺额叠加可能导致跨区联络线解列。

4) 直流故障和大规模新能源接入将给系统带来暂态过电压风险。常规特高压直流发生闭锁等故障时,为满足直流故障恢复时间需求,配置的滤波器一般不会立即切除,导致直流无功补偿过剩,换流站交流母线存在暂态过电压风险;新能源在低电压穿越状态支撑电压,会增发无功电流,故障消失后无功电流不能突变,过多无功会产生暂态过电压。

2 江西电网安全稳定分析

文中所有仿真计算分析均在国家电网规划仿真计算分析平台中完成。该平台支持PSD-BPA机电暂态仿真程序,可实现潮流、短路、暂态稳定计算分析。计算中采用的江西电网负荷模型为感应电动机和恒定阻抗组合模型,已投运、在建设备选取调度实测参数或实际设计参数,规划设备根据典型参数选取。

本章重点校核分析夏季大负荷和春季午间新能源大发方式(简称“春午”方式)。夏季大负荷方式负荷系数为1,雅湖直流800万kW、江西第二回直流500万kW,风电出力系数0.05、光伏出力系数0;春午新能源大发方式负荷系数为0.6,雅湖直流800万kW、江西第二回直流800万kW,风电和光伏出力系数均为0.4。

2.1 “十五五”期间江西电网稳定特性研究

根据计算得到,若江西第二回特高压直流采用常规直流、配套500 kV送出方案,在2028年大负荷方式下,500 kV泰和—赣州北线路N-1故障将导致赣南电网部分500 kV和220 kV变电站母线电压低于0.6 p.u.,电压大幅跌落难以恢复;同时,引起直流系统持续换相

失败,故障影响范围加大;随后,赣州地区火电机组出现功角失稳,随着系统电压逐渐下降,机组功角逐渐增大。故障下暂态稳定曲线见图1。

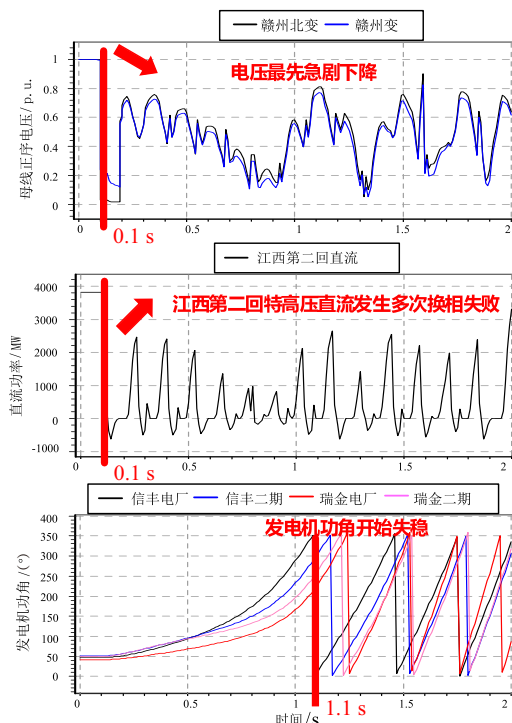


图1 2028年大负荷方式泰和—赣州北线路N-1故障的暂态稳定曲线(第二回特高压直流采用配套500 kV送出方案、常规直流技术路线)

在2028年春午方式下,若江西第二回特高压直流受端发生直流双极闭锁故障,系统会失稳。失稳的主要原因是该方式下常规机组开机容量和旋转备用不足,对电网电压调节能力相对其他方式差,闭锁后瞬间,常规直流换流站配置的滤波器尚未切除,电压急剧上升,换流站母线电压超过1.5 p.u.;交流滤波器切除后,电压逐渐降低低于0.6 p.u.,电压失稳。

若江西第二回特高压直流同步建设赣江特—赣南特1000 kV输变电工程,并采用柔性直流技术路线,2028年在各典型方式下,任一回直流双极闭锁均能保持系统稳定。

2.2 “十六五”期间江西电网稳定特性分析

计算得到,在2028年春午方式下,若雅湖直流双极闭锁,江西电网系统最低频率为49.4Hz,电压波动范围为0.92~1.05 p.u.;在2035年春午方式下,系统频率和电压在直流闭锁故障下的波动变大,系统最低频率为49.2 Hz,电压波动范围为0.90~1.19 p.u。故障下的频率和电压曲线见图2。因此,随着新能源出力

占比不断提升,系统频率在故障下的跌落速度加快、跌落深度不断增大,系统电压波动范围不断加大。

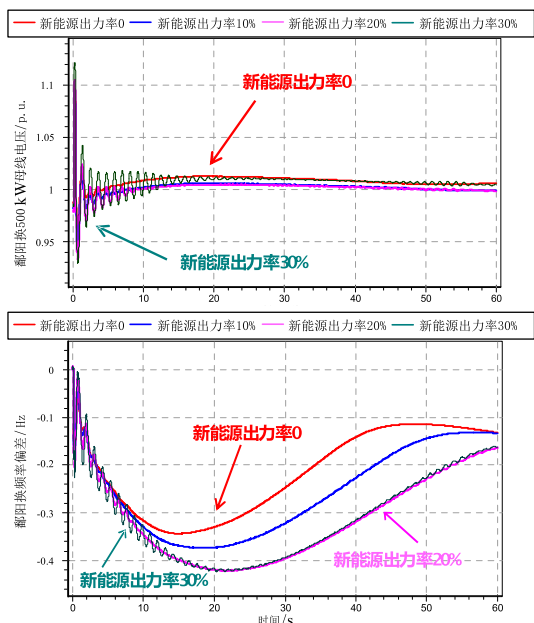


图2 2035年不同新能源出力下雅湖直流双极闭锁系统频率和电压

3 提升电网安全稳定措施研究

根据上一章的计算,可以判断赣南电网存在局部线路N-1和N-2故障下电网失稳问题。若第二回直流投运,不加强1000 kV通道,电网稳定问题将进一步加剧;同时,随着新能源占比不断提升,电网暂态稳定水平也有所下降。

为了解决以上问题,本章从规划仿真平台计算网架加强、调整发电机无功出力、加装动态无功补偿装置等方面,提出相应的措施。

1) 加强1000 kV特高压交流网架支撑,可显著提高直流电力疏散能力和电网稳定水平。

随着新能源装机快速增长、外电输送功率持续增大,省内火电机组开机空间受到严重挤压,小负荷新能源大发方式故障影响程度增加,特高压交流对直流的支撑作用愈发明显。江西第二回特高压直流同步建设1000 kV特高压交流输电工程,赣州地区部分重要500 kV线路潮流减轻,系统结构加强,直流和交流发挥各自优势,提高电网安全稳定水平。江西第二回特高压直流采用配套500 kV和配套1000 kV方案的稳定结果如表1所示。从表1结果可知,配套1000 kV方案稳定性更优。

表1 2028年第二回特高压直流采用不同方案的稳定校核情况

		%	
		常规直流+配套500 kV方案	常规直流+配套1000 kV方案
1	引起省内两回直流同时换相失败的500 kV线路N-1和N-2故障数比例	88	69
2	引起直流连续发生三次以上换相失败的500 kV线路N-1和N-2故障数比例	20	0

注:(1)柔性直流不会发生换相失败,但交流电网严重故障下可能采取主动闭锁措施。

(2)常规直流连续发生多次换相失败后,直流系统将暂时停止运行然后重启,再启动失败将导致直流系统闭锁。

2) 新增特高压直流采用柔性直流输电技术,可提高电网无功支撑能力。

交直流混联输电系统,在电网交流通道发生故障时,系统电压大幅跌落,导致直流持续换相失败,将进一步加重交流联络线输电压力,从而引发系统失稳。柔性直流输电技术不存在换相失败的问题,降低多直流同时换相失败的风险;同时,不需要交流电网提供无功功率,可起到静止同步补偿器的作用,可动态补偿无功功率,提高交流系统的频率和电压稳定性。江西第二回特高压直流采用柔性直流输电技术,可显著提高严重故障下电网稳定水平。江西第二回特高压直流受端采用不同直流技术路线的稳定结果如表2所示。从表2结果可知,采用柔性直流技术路线可进一步提高电网稳定性。

表2 2028年第二回特高压直流采用不同直流技术路线下的稳定校核情况

	常规直流+配套1000 kV方案	柔性直流+配套1000 kV方案
省内两回特高压直流同时发生双极闭锁严重故障	夏大 切全省一定负荷,可以保持系统稳定 夏平 失稳 春午 切全省一定负荷,可以保持系统稳定	稳定 切全省一定负荷,可以保持系统稳定 切全省一定负荷,可以保持系统稳定

3) 调整发电机功率因数、适当增大其无功输出功率,有助于提升系统电压暂态稳定水平。

根据计算可以确定,2028年江西第二回直流投运时,采用常规直流、配套500 kV送出方案,若大负荷方式将直流近区火电机组迟相运行,功率因数定为0.96或以下,系统在任意故障下,无需旋备,就能保持系统稳定;若功率因数为0.99,则需预留80万kW旋备。发电机在暂态过程中,不仅能够维持稳态运行时输出无功功率的基础容量;在励磁系统调控下,可进一步增加内电势与电网间的电压差,快速的大幅提升容性无功输出水平。因此,发电机稳态输出容性无功功率越多,对应的动态无功支撑能力就越强。

4) 在电网电压薄弱点配置动态无功补偿装置,可提升暂态过程无功支撑能力。

在2028年大负荷方式下,若发生500 kV泰和—赣州北线路N-1故障,赣南地区将出现电压失稳、伴

随功角失稳。故障暂态过程中,赣南地区 220 kV 变电站电压跌落程度将高于 500 kV 变电站。根据仿真计算发现,较 500 kV 层面,在电压最为薄弱的 220 kV 层面加装无功补偿装置,对电网稳定性改善效果更好;分布式调相机的暂态电压支撑能力效果高于 SVG 与 STATCOM。计算仿真结果见图 3。

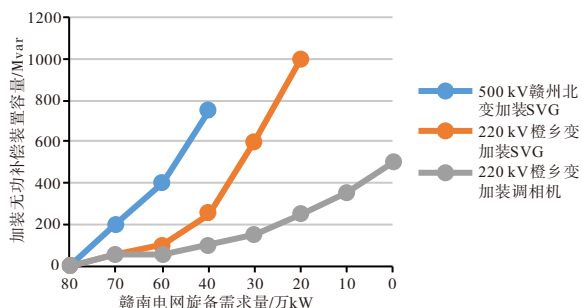


图3 2028年赣南电网不同位置加装 SVG/分布式调相机降低旋备情况

5) 新能源厂站 SVG 可靠运行,可加快新能源接入点电压恢复,提高系统稳定性。

采用 SVG 典型模型测算得到,若 SVG 稳态不吸收也不发出无功,在赣南电网 20% 新能源的 SVG 可靠运行时,2028 年赣南电网大负荷旋备需求量可减少 10 万 kW;若 60% 新能源的 SVG 能可靠运行,2028 年大负荷旋备需求量可减少 30 万 kW。SVG 的动态调节能力目前主要受两个因素影响,一是新能源不发有功时,功率因数要求超过 0.9,若低于 0.9 将被收取力调电费;二是 SVG 暂态过程无功响应性能与其初始运行状态有关,稳态吸收无功时动态无功裕度更大,电压支撑能力更强;稳态发出无功时动态无功裕度更小,电压支撑能力更弱。

4 江西电网安全稳定相关建议

基于以上两章的计算分析,为了应对新能源大规模发展、特高压交直流混联带来的暂态稳定问题,对电网规划和运行提出以下三点建议:

1) 构建科学合理的电网网架结构,充分融入华中“目字型”特高压交流环网。

建设以特高压交直流为骨干网架的坚强电网结构,华中特高压网架向南延伸至赣南、湘南站点,华中区域内形成“目”字型特高压电网,可有效抵御交直流任一通道故障导致的潮流大规模转移。

2) 加强新能源并网性能,防范新能源大规模脱

网风险。

确保新能源高低压穿越、耐频耐压符合《风电场接入电力系统技术规定第 1 部分:陆上风电》(GB/T 19963.1—2021)、《光伏电站接入电力系统技术规定》(GB/T 19964—2012)等标准要求;确保新能源场站具备自动电压控制功能和动态无功功率调节能力,SVG 动态无功调节设备配置满足要求、可靠运行;探索应用各类新型储能新技术,提升新能源主动支撑能力,提高系统频率稳定水平。

3) 加强电力系统安全稳定管理。

进一步深化新能源、常规电源和储能仿真建模管理,提升新能源机组故障穿越等关键环节的仿真准确性,强化电网安全风险管控;建立适应新型电力系统的稳定管理体系,确保《电力系统安全稳定导则》在新型电力系统全过程、全环节、全方位落实。

参考文献:

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(07):1893-1904,2205.
- [2] 葛怀畅,王彬,郭庆来,等.面向高比例可再生能源交直流混联电网的动态自动电压控制系统:设计与应用[J].中国电机工程学报,2020,40(16):5170-5179.
- [3] 孙华东,于琳,赵兵.基于故障后稳态电压安全约束的新能源并网系统电压支撑强度量化分析方法[J].中国电机工程学报,2023,43(09):3322-3332.
- [4] 赵兵,徐式蕴,兰天楷,等.新型电力系统标准算例(三):电压稳定 CSEE-VS[J].中国电机工程学报,2024,44(21):8353-8364.
- [5] 庄慧敏,巨辉,肖建.高渗透率逆变型分布式发电对电力系统暂态稳定和电压稳定的影响[J].电力系统保护与控制,2014,42(17):84-89.
- [6] 王科,秦文萍,张宇,等.双馈风机等效惯量控制比例系数对系统功角摇摆稳定的影响机理分析[J].电工技术学报,2023,38(03):741-753.
- [7] Mitra, Arghya, Chatterjee, et al. Active power control of dfig-based wind farm for improvement of transient stability of power systems[J].IEEE Transactions on Power Systems: A Publication of the Power Engineering Society,2016,31(01):82-93.
- [8] 严干贵,岳霖,张皓程,等.风电外送电力系统暂态稳定性分析及提升策略[J].电网技术,2024,48(12):4826-4832.
- [9] 陈磊,刘永奇,戴远航,等.电力电子接口新能源并网的暂态电压稳定机理研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(09):15-21.
- [10] 毛安家,马静,蒯圣宇,等.高比例新能源替代常规电源后系统暂态稳定与电压稳定的演化机理[J].中国电机工程学报,2020,40(09):2745-2756.