

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221743

基于 XGBOOST-PSO 提高受端电网电压暂态稳定的 发电机无功优化方法

郭培^{1,2}, 陈波³, 高云超^{1,2}, 谌艳红⁴, 刘柳³, 彭晓涛^{1,2}

(1. 综合能源电力系统装备及系统安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 4. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330096)

摘要: 考虑发电机稳态输出无功对其支撑暂态电压恢复稳定能力的影响, 基于机器学习研究优化发电机稳态输出无功提高电压对故障扰动保持暂态稳定能力的预防控制方法。该方法采用加权多二元表暂态稳定裕度指标量化母线暂态电压对不同预想故障扰动的综合稳定裕度, 并基于指标排序确定稳定裕度薄弱母线。同时基于发电机无功调节对预想故障下各薄弱母线电压暂态稳定裕度综合作用灵敏度排序, 选择作用灵敏发电机。在利用 XGBoost 建立根据系统稳态特征向量预测薄弱母线暂态电压稳定的分类模型基础上, 以系统对预想故障扰动保持暂态电压稳定为约束、以减小发电机稳态无功调节对网损产生影响为目标, 基于潮流计算寻优灵敏发电机稳态输出无功, 以提高薄弱母线的暂态电压稳定性。最后采用雅湖直流接入江西电网的 PSASP 计算模型验证了所提方法的有效性。
关键词: 暂态电压稳定; XGBoost; 综合暂态电压稳定裕度; 无功调节综合灵敏度; 发电机无功优化

A generator reactive power optimization method based on XGBOOST-PSO to improve the voltage transient stability of a receiving terminal network

GUO Pei^{1,2}, CHEN Bo³, GAO Yunchao^{1,2}, CHEN Yanhong⁴, LIU Liu³, PENG Xiaotao^{1,2}

(1. Key Laboratory for Hubei Province Integrated Energy Power System Equipment and System Security, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanchang 330096, China; 4. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330096, China)

Abstract: Considering the effect of generator steady-state output reactive power on the ability to support transient voltage recovery stability, preventive control through optimizing that power to improve the ability of grid maintaining transient voltage stability under severe fault disturbance is studied based on machine learning. The method uses a weighted multi-binary table transient stability margin index to quantify the comprehensive stability margin of bus transient voltages to different expected fault disturbances. Then it determines the bus with weak stability margin based on the index ranking. At the same time, based on the comprehensive action sensitivity ranking of generator reactive power regulation on the voltage transient stability margin of each weak bus under the expected fault, the action sensitive generator can be determined. Then an XGBoost classification model for predicting transient voltage stability based on the system steady-state characteristics vector is developed. This considers the constraint of grid voltage maintaining transient stability under expected severe fault. It has the objective of reducing the impact on grid active power loss caused by generator reactive power. A regulation method of using power flow calculation to optimize the steady-state reactive power output of the sensitive generator is proposed. Finally, the validity of the proposed method is verified based on the PSASP calculation model for Yahu DC transmission fed-in Jiangxi power grid.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52237004).

Key words: voltage transient stability; XGBoost; comprehensive transient voltage stability margin; comprehensive sensitivity of reactive power regulation; generator reactive power optimization

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52237004); 江西电网公司科技项目资助(52182020008J)

0 引言

直流输电在减小受端电网发电机并网运行数量的同时,也弱化了系统对母线电压受扰后的暂态无功支撑能力,从而增加暂态电压失稳风险。同时,直流输电的换流站无功需求也使接入点附近电压在故障后容易出现持续低悬浮,从而引起连续换相失败导致的直流闭锁,使局部电压失稳转变为全局失稳^[1-4]。上述问题使直流受端电网的暂态电压稳定控制措施研究受到关注。文献[5-6]从提高系统动态无功储备和同步调相机协调传统动静态无功装置快速恢复暂态电压稳定出发,研究了调相机在暂态、准稳态和稳态等时间尺度参与AVC控制的策略;文献[7]利用轨迹灵敏度研究了提高受端电网暂态电压稳定的最小切负荷优化方法;文献[8]基于灵敏度和控制代价最小,研究了直流功率提升、调相机无功支撑和切负荷等协调提高受端电网暂态电压稳定的紧急控制策略;文献[9]研究了换流站无功调节在暂态电压响应期间从恢复直流功率转换为暂态电压支撑的低压限流控制策略。与聚焦暂态期间快速恢复电压稳定的紧急控制不同,文献[10]考虑系统稳态无功构成对暂态电压稳定恢复的影响,指出增加发电机稳态无功输出、减小并联电容补偿有助于提高电压暂态恢复动态特性。文献[11]从提高换流站暂态电压稳定性出发,研究了利用换流站调相机输出无功置换滤波器无功补偿的稳态无功协调策略;文献[12]研究了调相机协同特高压换流站站域无功设备、近区常规发电机组稳态无功电压控制。然而这些稳态无功协调预防控制没有考虑发电机,并且如何优化稳态输出无功也缺乏进一步讨论。

虽然文献[13]在建立发电机无功备用容量与其机端电压关系的基础上,研究了发电机稳态无功考虑网损、母线电压偏差和无功备用容量等多目标的优化方法,但该方法没有考虑发电机稳态无功优化对暂态电压稳定性的改善作用。基于此,考虑系统无功与电压暂态稳定关系存在解析困难问题,本文采用机器学习研究了通过优化发电机稳态输出无功以提高系统电压对故障扰动保持暂态稳定能力的预防控制方法。在建立母线电压对预想故障集扰动的综合暂态稳定裕度、发电机无功调节对不同母线在预想故障下的电压暂态稳定裕度综合作用灵敏度两个指标基础上,利用指标排序选择暂态稳定裕度薄弱母线和对其稳定裕度调节灵敏发电机。采用XGBoost建立基于系统稳态特征向量预测系统电压对预想故障扰动是否保持暂态稳定的分类模型。在此基础上,以系统电压对故障扰动保持暂态稳定为

约束、以减小发电机稳态无功调节对网损影响为优化目标,提出通过潮流计算寻优灵敏发电机稳态输出无功,以提高薄弱母线暂态电压稳定性的方法。

1 电压暂态稳定裕度的作用灵敏发电机选择

发电机计及暂态电势的无功输出表达式如式(1)所示^[14]。

$$\begin{cases} Q_G = E'_q(E'_q - U \cos \delta) / x \\ E'_q = (E_{fd} - I_d(x_d - x'_d)) / (1 + sT'_{d0}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: E'_q 和 δ 分别表示发电机的暂态内电势和功角; U 表示发电机机端电压; x 表示同步发电机并网等值电抗; E_{fd} 表示励磁电压; I_d 表示定子电流 d 轴分量; x_d 和 x'_d 分别表示定子电抗 d 轴分量及其暂态分量; T'_{d0} 表示 d 轴开路时间常数。式(1)表明,励磁系统能够在电压跌落期间通过强行励磁提高发电机的 q 轴暂态电势,从而增加无功输出以阻尼电压的跌落幅度,并且较高的初始内电势可以使暂态内电势在受扰后保持较高水平,从而使发电机在电压扰动期间提供更多无功支撑。因此适当增加发电机输出无功占系统无功需求的比重,将有利于提高系统电压的暂态稳定性。

由于系统各节点电压的暂态稳定响应特性呈现区域相似特点,电压暂态稳定裕度薄弱区域是引发电压失稳的主要原因,考虑无功优化和电压稳定属于系统区域问题,因此优化对薄弱区域电压暂态稳定具有灵敏调节作用的发电机输出无功,利用灵敏发电机对电压薄弱区进行无功调控,能在相同的无功置换量之下缩小无功调控范围,更大程度地提高电压稳定性。根据上述分析,本文基于多二元表的暂态电压稳定裕度 η_v ^[15],在利用二项式系数赋权建立量化母线电压对不同故障扰动所具有综合暂态稳定裕度指标 $\Sigma \eta_v$ 、利用线性加权建立量化发电机调节无功对不同母线暂态电压稳定裕度作用综合灵敏度指标 S_r 基础上,提出基于 $\Sigma \eta_v$ 排序确定需要改善电压暂态稳定裕度的薄弱区域、基于 S_r 排序选择对薄弱区域暂态电压稳定裕度作用灵敏发电机的方法。

该方法首先建立潮流和暂态稳定计算模型,并进行预想故障扰动的暂态稳定计算,利用母线 i 电压对故障扰动 j 的 η_{vi}^j 构建矩阵 $A = [\eta_{vi}^1 \cdots \eta_{vi}^q]_{m \times q}$ (m 和 q 分别为待分析母线和预想故障的数量)。然后基于 A 的列向量求取 $\xi^j = [\eta_{vi}^j \cdots \eta_{vm}^j]^T$ ($j = 1, \dots, q$), 并从中向两边依次按照 ξ^j 由小到大排序,形成反映各预想故障对暂态电压稳定影响严重程度的行向量,即行向量中间元素所对应故障最严重。在此基础上,

利用式(2)计算母线 i 的 $\Sigma \eta_v$ 指标, 并根据 $\Sigma \eta_v$ 的从小到大排序确定需提高暂态电压稳定裕度的区域。其次, 依次增加各发电机无功输出, 同时调节并联无功补偿以保持系统无功供需不变, 以建立不同无功调节作用下的潮流作业方式。然后对各潮流进行严重预想故障扰动 l 的暂态稳定计算, 并依据式(3)评估各发电机无功调节对所选定薄弱区域各母线暂态电压稳定裕度的综合作用灵敏度, 进而选择 S_r 值较大的机组为灵敏调节发电机。

$$\begin{cases} \sum \eta_{vi} = \sum_{j=1}^q \omega_{\eta_j} \eta_{vi}^j & (2) \\ \omega_{\eta_j} = c_{q-1}^{j-1} / 2^{q-1} \\ S_r = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{|\eta_{vi}^* - \eta_{vi}^l|}{\Delta Q_r^G} \quad (r=1, 2, \dots, n_G) \\ \omega_i = \frac{1/\eta_{vi}^*}{\sum_{i=1}^m 1/\eta_{vi}^*} & (3) \\ \eta_{vi}^* = \frac{\eta_{vi}^l - \min([\eta_{v1}^l \ \eta_{v2}^l \ \dots \ \eta_{vm}^l]^T)}{\max([\eta_{v1}^l \ \eta_{v2}^l \ \dots \ \eta_{vm}^l]^T) - \eta_{vi}^l} \end{cases}$$

式中: ω_{η_j} 表示基于二项式系数法确定的 η_{vi}^j 的权重; c_{q-1}^{l-1} 表示二项式组合数, l 由 ξ^l 在故障严重程度行向量所处的列位置确定^[16]; n_G 表示发电机数量; η_{vi}^l 和 η_{vi}^* 分别表示发电机无功输出不变时母线 i 在故障 l 作用下的 η_v 及其正则化值; η_{vi}^* 表示发电机 r 输出无功增加 ΔQ_r^G 后的 η_{vi}^l ; ω_i 用于量化 η_{vi}^l 对 ΔQ_r^G 响应的线性加权重, 随 η_{vi}^l 减小而增大。

2 电压暂态稳定的 XGBoost 分类器

用于暂态电压稳定评估的方法主要有时域仿真和能量函数法, 然而利用时域仿真评估暂态稳定不仅耗时长, 而且评估结果受建模准确性影响, 难以在线应用, 能量函数法虽然通过将系统状态代入能量函数求解能够直接快速判断稳定性, 但用于稳定判别的能量函数构造困难^[17-18]。由于机器学习可以避免复杂机理建模, 能够利用数据挖掘建立输入特征向量与暂态响应间的非线性映射关系, 因此近年来被广泛应用于电力系统的暂态稳定评估与调控^[19-21]。一方面利用故障发生和切除时刻的系统状态进行受扰程度评估, 或利用系统状态故障后运动轨迹评估暂态稳定恢复能力, 为扰动后的紧急控制实施提供决策依据; 另一方面利用系统状态故障前稳态值预测系统在预想故障作用下的暂态稳定性, 为提高系

统暂态稳定性的预防控制提供决策依^[22]。由此, 本文从优化发电机稳态输出无功以提高薄弱区域暂态电压稳定性出发, 研究利用 XGBoost 建立基于系统稳态特征预测电压暂态稳定的分类器建模方法。

2.1 分类器特征输入向量

暂态电压稳定是指系统电压受扰后经无功调节恢复至允许范围内的能力。考虑系统暂态无功响应与运行方式存在相关性, 并且确定运行方式下系统电压对不同扰动作用恢复稳定的结果具有确定性, 因此利用机器学习挖掘确定运行方式下系统稳定运行状态与电压暂态稳定之间的映射关系具有可行性。文献[23]基于对暂态电压稳定影响的源网荷要素分析, 指出发电机输出功率、新能源机组、输电线路、负荷需求、母线电压水平、直流换流阀触发角等状态变量是影响暂态电压稳定的关键因素。为了避免各状态变量所包含信息存在耦合所导致的冗余, 以及过多维度状态变量给机器学习建模造成的输入向量维数灾等问题, 从降低输入向量维度、提高分类器预测准确性和鲁棒适用性出发, 本文从故障类型、薄弱区域详细稳态特征、系统平均稳态 3 个方面构建了表 1 所示的分类器特征输入向量。

表 1 暂态电压稳定分类模型的特征输入向量

Table 1 Feature input vector for transient voltage

stability classification model

| 分量名称 | 分量含义 | 特征分类 |
|----------|--------------|------|
| F_0 | 预想故障 | 故障特征 |
| F_1 | 薄弱母线电压幅值 | |
| F_2 | 薄弱母线电压相位 | 目标母线 |
| F_3 | 灵敏发电机无功输出 | 所在区域 |
| F_4 | 灵敏发电机有功输出 | 状态变量 |
| F_5 | 薄弱母线所在区域负荷无功 | 的稳态值 |
| F_6 | 薄弱母线所在区域负荷有功 | |
| F_7 | 发电机总无功输出 | |
| F_8 | 发电机总有功输出 | 受端系统 |
| F_9 | 系统总负荷无功 | 状态变量 |
| F_{10} | 系统总负荷有功 | 的平均 |
| F_{11} | 系统母线平均电压幅值 | 稳态值 |
| F_{12} | 系统母线平均电压相位 | |

如表 1 所示, 考虑分类器预测母线所在区域因暂态稳定裕度薄弱, 故障扰动下更容易发生电压暂态失稳, 因此利用 F_1 — F_6 分量对薄弱区域故障前稳态特征进行详细刻画。同时为了综合体现系统稳态运行特征并减少特征分量维度, 利用 F_7 — F_{12} 所述状态变量平均值对系统层面稳态运行特征进行宏观描述。此外, 考虑母线注入功率和电网结构确定情况下, 潮流求解母线电压及其相位具有唯一性, 为

提高分类器对电网结构和故障类型变化的适应性, 特征向量设置了预想故障类型和电压相位两个分量。

2.2 分类器建模

XGBoost 是一种基于多重加性回归树的集成算法, 不仅能够准确预测结果, 而且能够通过合适选取决策树的数目和深度提高建模的泛化能力。另外, 能够在目标函数中通过加入正则项以避免模型过拟合, 并且通过最大化树模型分叉信息增益, 使分类器建模对二值学习样本的比例失衡表现不敏感^[24]。针对该算法在分类建模方面的特点, 以及系统暂态稳定计算产生的稳定与不稳定学习样本存在比例失衡问题, 本文研究了利用 XGBoost 建立电压暂态稳定分类器的建模方法。建模步骤具体如下。

步骤 1: 在确定运行方式下, 随机调节灵敏发电机的稳态输出无功并进行潮流计算, 同时对收敛潮流开展预想故障扰动的暂态稳定计算。

步骤 2: 以暂态电压稳态结果恢复到 0.9 p.u. 及以上为稳定判断依据, 对暂态电压稳定的收敛潮流, 标定机器学习样本的输出变量 $y=1$, 反之为 $y=0$; 同时基于收敛潮流的状态变量稳态值和预想严重故障类型, 构建学习样本对应的特征输入向量 \mathbf{X} 。重复上述方法, 基于不同收敛潮流对预想故障集的电压暂态响应结果构建机器学习的样本集。

$$\hat{y}_i = \sum_{j=1}^{N_R} f_j(\mathbf{X}_i) \quad (4)$$

$$\begin{cases} O_{bj} = \sum_{i=1}^n l(y_i, \hat{y}_i) + \sum_{i=1}^n \Omega(f_k) \\ \Omega(f_k) = \gamma T + \frac{1}{2} \lambda \|W\|^2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: \hat{y}_i 为分类器计算值; $f_j(\mathbf{X}_i)$ 为分类器第 j 棵决策树, \mathbf{X}_i 为训练集样本 i 的特征输入向量; N_R 为迭代训练停止时的决策树个数; O_{bj} 为损失函数;

$l(y_i, \hat{y}_i)$ 为模型预测值与真实值之间的误差; $\Omega(f_k)$ 为用于避免模型过拟合的正则项; γ 和 λ 为正则项的惩罚系数; T 用于控制树模型中叶子节点数量以防止树模型过于复杂; W 用于避免叶子节点权重向量过大。

步骤 3: 将样本集按 7:3 的比例分成训练集和测试集, 训练集样本 i 的特征输入向量 \mathbf{X}_i 作为式(4)所示分类器第 j 棵决策树 $f_j(\mathbf{X}_i)$ 的输入, 将分类器计算值 \hat{y}_i 作为基于特征输入向量预测暂态电压稳定结果, 同时通过增加式(4)决策树个数 N_R , 直到损失函数 O_{bj} 取值最小, 停止 XGBoost 分类器建模的迭代训练, 进而得到该训练集的电压暂态稳定分

类器。

为避免模型的过拟合并增强模型泛化能力, 上述建模首先在训练集上采用十折交叉验证进行 XGBoost 分类器最优参数设计, 然后采用最优模型参数, 基于训练集建立电压暂态稳定分类器。

3 提高暂态电压稳定的发电机无功优化方法

利用电压暂态稳定分类器建模方法建立确定运行方式的电压暂态稳定分类预测模型, 不仅能够实时通过潮流计算优化灵敏发电机稳态输出无功, 为调度人员提供使系统电压对预想故障保持暂态稳定的预防措施, 而且可以有效避免采用暂态计算进行无功优化所面临的复杂计算和耗时问题。然而, 通过优化发电机稳态无功提高系统电压暂态稳定性, 发电机稳态无功出力的增加也必然会引起发电厂和变电站之间不合理无功流动, 从而对电网经济运行造成影响。由此, 本文从上述两个方面出发, 将暂态电压稳定分类预测与无功优化相结合, 以网损最小为目标、以系统电压对预想故障扰动保持暂态稳定为约束, 建立式(6)所示优化灵敏发电机稳态输出无功的数学模型。

$$\begin{aligned} \min F(\Delta Q_1^{SG}, \dots, \Delta Q_k^{SG}) &= P_{\text{loss}} \\ \begin{cases} h(\mathbf{X}) = 1 \\ P_{G,i} + P_{in,i} - P_{L,i} - \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \\ Q_{G,i} + Q_{in,i} - Q_{L,i} - \\ U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \\ Q_{k \min}^{SG} \leq Q_k^{SG} \leq Q_{k \max}^{SG}, \quad k \in [1, r] \\ U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n \\ I_{ij}^{\min} \leq I_{ij} \leq I_{ij}^{\max}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $Q_{k \max}^{SG}$ 、 $Q_{k \min}^{SG}$ 和 Q_k^{SG} 分别表示第 k 台灵敏发电机的无功输出上下限值和稳态无功输出; P_{loss} 表示系统网损; $h(\mathbf{X})$ 表示系统电压基于 XGBoost 分类器暂态稳定的分类结果; \mathbf{X} 为表 1 所示特征输入向量; $P_{G,i}$ 和 $Q_{G,i}$ 、 $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别表示母线 i 的发电机注入有功和无功、负荷的有功和无功需求; $P_{in,i}$ 和 $Q_{in,i}$ 分别表示母线 i 的节点注入有功和无功; U_i 和 U_j 分别表示母线 i 、 j 的电压幅值; G_{ij} 、 B_{ij} 和 θ_{ij} 分别表示支路 ij 的电导、电纳和电压相位差; U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 表示母线 i 电压的允许上下限值; I_{ij}^{\max} 和 I_{ij}^{\min} 表

示支路 ij 允许的电流上下限值; k 和 n 分别表示灵敏发电机和系统母线的数量。

将灵敏发电机的稳态无功输出设为寻优粒子, 式(6)所示优化模型的粒子群算法求解过程如图1所示。首先初始化寻优粒子群位置与速度以及寻优过程的循环迭代次数。然后根据各寻优粒子所处可行域空间位置调节各灵敏发电机的无功输出并计算潮流。接着对收敛潮流进一步利用所建立 XGBoost分类器, 根据系统稳态特征输入向量预测系统电压对预想故障扰动的暂态稳定。如果稳定则依据目标函数计算适应度值, 然后基于适应度值进行比较, 寻优得到粒子的最佳适应度值和最佳位置, 并进行更新; 对不收敛潮流或者故障扰动下电压暂态失稳潮流, 则不进行更新。再次更新粒子的位置和速度, 开始新一轮粒子最佳适应度值和位置、种群最佳位置的寻优, 直至收敛条件满足或者循环迭代次数达到设定值。最后输出灵敏发电机组输出无功指令值。

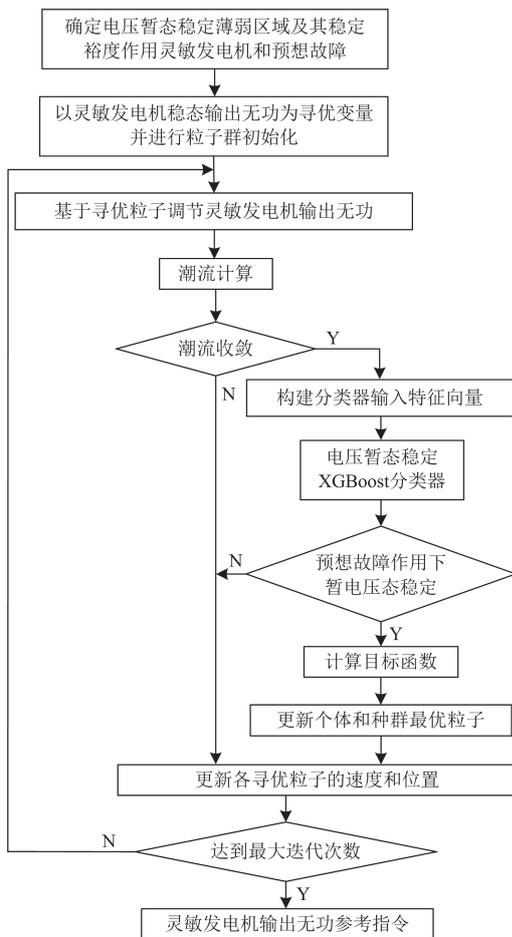


图1 基于粒子群算法的无功优化模型求解流程图

Fig. 1 Flowchart of solving reactive power optimization model based on particle swarm algorithm

4 仿真研究

江西电网作为雅湖直流的受端电网, 直流馈入后的 500 kV 主网架如图2所示, 其中系统有功负荷为 19 000 MW, 发电机输出有功为 11 900 MW, 直流馈入 5500 MW。利用 PSASP 建立电网的潮流和暂态计算模型, 对通过优化灵敏发电机稳态无功提高电网暂态电压稳定的方法进行有效性验证。

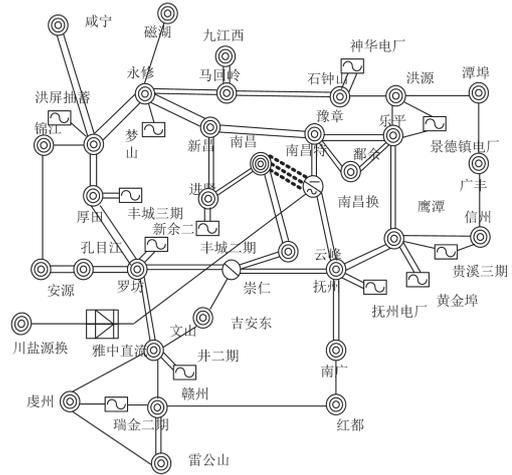


图2 雅湖直流接入江西电网的 500 kV 主网架

Fig. 2 500 kV network of Jiangxi power grid under Yahu DC feed-in

研究中设置系统基准容量为 100 MVA, 500 kV 基准电压为 525 kV; 电压暂态稳定判据设为故障后 500 kV 母线电压能够恢复到 0.9 p.u.以上。同时, 根据文献[23]规定的暂态电压稳定判据, 在确定 4 组临界电压参考值 V_{cr} 、以及暂态电压低于 V_{cr} 最大可接受持续时间 T_{cr} 的基础上, 基于文献[15]的式(6)求解, 确定表2中用于 η_v 计算的不同临界电压区间的加权积分系数 K , 其中 V_N 为标准电压参考值。

表2 多二元表暂态电压稳定裕度计算参数($V_N = 1.0$ p.u.)

Table 2 Calculation parameters of multi-binary table transient voltage stability margin ($V_N = 1.0$ p.u.)

| (V_{cr}, T_{cr}) | (0.95,60) | (0.80,10) | (0.75,1) | (0.70,1) |
|--------------------|-----------|-----------|----------|----------|
| K | 0.333 | 0.417 | 3.600 | 25.714 |

4.1 灵敏发电机选择

典型运行方式下基于预想故障集进行各母线电压暂态稳定响应计算, 基于 $\sum \eta_{vi}$ 从小到大排序确定的电压暂态稳定薄弱母线如表3所示。由图2可知, 各薄弱母线所构成区域分布在南昌换流站周围, 说明直流接入对接入点附近的电压暂态稳定裕度会产生影响, 提高该区域的电压暂态稳定性对保障直流

安全运行具有重要意义。

表 3 基于 $\sum \eta_{vi}$ 排序确定的电压暂态稳定薄弱母线

Table 3 Weak bus for voltage transient stabilization determined based on $\sum \eta_{vi}$ ranking

| 母线 | $\sum \eta_v$ |
|----|---------------|----|---------------|----|---------------|----|---------------|
| 云峰 | -1.43 | 进贤 | -1.12 | 崇仁 | -0.60 | 豫章 | -0.40 |
| 南昌 | -0.35 | 抚州 | -0.23 | 永修 | 0.13 | — | — |

在确定灵敏发电机暂态无功调节作用母线后, 以对母线暂态电压稳定裕度影响最严重的南进双回进侧三相短路接地故障作为扰动, 依据式(3)得到表 4 所示各发电机暂态无功补偿对薄弱母线暂态电压稳定裕度的综合作用灵敏度 S_r , 进而选择 S_r 较大的丰城二期 05、丰城 01/02、贵三期 02、黄金埠 01、抚州电厂 01 等发电机作为调节灵敏发电机。

表 4 严重预想故障作用下的发电机 S_r

Table 4 Generator S_r under severe expected faults action

| 机组名称 | S_r | 机组名称 | S_r | 机组名称 | S_r |
|---------|--------|----------|--------|---------|--------|
| 丰城二期 05 | 0.4719 | 丰城三期 | 0.4622 | 神华浔阳 01 | 0.4622 |
| 丰城 02 | 0.4670 | 双林 01 | 0.4622 | 九江电 07 | 0.4622 |
| 丰城 01 | 0.4670 | 瑞金电 01 | 0.4622 | 九江电 05 | 0.4622 |
| 贵三期 02 | 0.4666 | 万安 01 | 0.4622 | 新昌 01 | 0.4622 |
| 黄金埠 01 | 0.4654 | 井冈山二期 01 | 0.4622 | 瑞金二期 01 | 0.4622 |
| 抚州电厂 01 | 0.4632 | 井冈山 01 | 0.4622 | 万安 02 | 0.4622 |
| 安源电 01 | 0.4624 | 景二期 01 | 0.4622 | — | — |

4.2 XGBoost 分类器建模

开发 Matlab 与 PSASP 的数据读写交互程序, 利用 Matlab 修改 PSASP 潮流计算参数, 实现潮流和暂态稳定批量计算调用。基于获取的特征输入向量和电压暂态稳定判断结果生成学习样本数据。依据此方法, 设置灵敏发电机无功出力随机增长, 同时配合调节系统无功补偿以维持系统无功供需平衡, 直至发电机无功满发。调用 PSASP 进行潮流计算, 对于收敛潮流, 基于表 5 所示严重预想故障进行暂态稳定计算, 共生成 1885 组学习样本, 其中稳定样本 541 组, 失稳样本 1344 组。各样本的 35 维特征输入向量具体定义如附录 A 表 A1 所示。由于针对实际电网所构建的输入特征向量维度过高, 考虑不同输入特征之间可能存在信息重叠与冗余, 从而增加模型的复杂程度, 影响模型分类预测的准确性, 因此在构建电压暂态稳定分类模型前, 本文首先利用皮尔逊相关系数进行特征变量的筛选, 然后将样本数据集按照 7:3 的比例随机划分为训练集和测试集, 在基于训练集样本使用十折交叉验证确定附录 A 表 A2 所示的 XGBoost 分类器模型参数基础上, 进一步利用训练集建立预测电压暂态稳定的分类器。

表 5 严重预想故障集

Table 5 Set of severe expected faults

| 故障编号 | 故障描述 | 故障扰动设置 |
|------|----------------|---|
| 故障 1 | 进云 I 线进侧瞬时三相接地 | 设置 $t = 1.0$ s 发生瞬时故障, $t = 1.1$ s 瞬时 故障消失 |
| 故障 2 | 南进双回进侧瞬时三相接地 | |
| 故障 3 | 云崇 I 线云侧瞬时三相接地 | |
| 故障 4 | 咸梦双线梦侧瞬时三相接地 | |
| 故障 5 | 进云双回进侧瞬时三相接地 | |

采用支持向量机(support vector machine, SVM)、随机森林(random forest, RF)、多层感知机(multilayer perceptron, MLP)等方法建立分类模型, XGBoost 分类器与上述方法所建立分类器的训练时长和在测试集上的准确率、召回率和精确率如表 6 所示。表 6 所示对比结果表明, XGBoost 分类器不仅具有较好的预测精度, 相比于其他学习方法建立的分类器具有更高的召回率和精确率, 因此采用所设计特征输入向量, 所建立 XGBoost 分类器在样本失衡情况下仍具有很好的学习和泛化能力。同时在训练时长方面, XGBoost 也表现出了较好的性能, 能够快速更新模型, 从而适应大规模电网的状态变化。

表 6 不同机器学习方法所建立分类器的性能指标对比

Table 6 Comparison of performance indexes of classifiers

built by different machine learning methods

| 方法 | 准确率/% | 召回率/% | 精确率/% | 训练时间/ms |
|---------|-------|-------|-------|---------|
| XGBoost | 99.82 | 99.38 | 100 | 165 |
| SVM | 99.65 | 99.38 | 99.38 | 462 |
| RF | 95.23 | 94.12 | 88.89 | 389 |
| MLP | 97.53 | 93.21 | 98.05 | 7015 |

图 3 进一步分析了 XGBoost 训练过程中各输入特征分量的 F-score 得分, 分数越高代表该特征分量对于暂态稳定的准确分类越重要。从图 3 中可以看出 f_0 (故障类型)、 f_3 (丰城二期 05 无功出力)、 f_4 (抚州电厂 01 无功出力) 的得分明显高于其他特征分量, 因此在采集电力系统运行数据时应当重点关注。图 4 分析了 f_3 和 f_4 两个分量对样本稳定情况分布的影响作用。对于特征分量 f_3 , 稳定样本在 $[3.9, 4]$ p.u. 区间较为集中, 但该区间内丰城二期 05 发电机无功出力已接近额定值。对于特征分量 f_4 , 稳定样本的分布则较均匀, 即抚州电厂 01 的无功不一定满发, 就可使系统保持稳定。分析结果也可为发电机无功出力优化范围的设置提供依据。

4.3 发电机稳态无功优化

以 4.1 节所确定灵敏发电机无功出力作为寻优粒子, 设置粒子群规模为 30, 迭代次数为 40, 以表 5 中故障 1 和故障 2 两种严重预想故障为例, 进行

提高系统暂态电压稳定性的灵敏发电机稳态输出无功优化研究。各灵敏发电机针对预想故障的最优无功出力如表 7 所示。

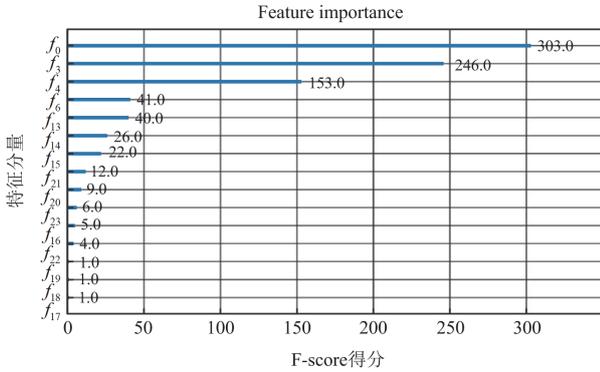


图 3 特征输入分量的 F-score 图

Fig. 3 F-score diagram of feature input components

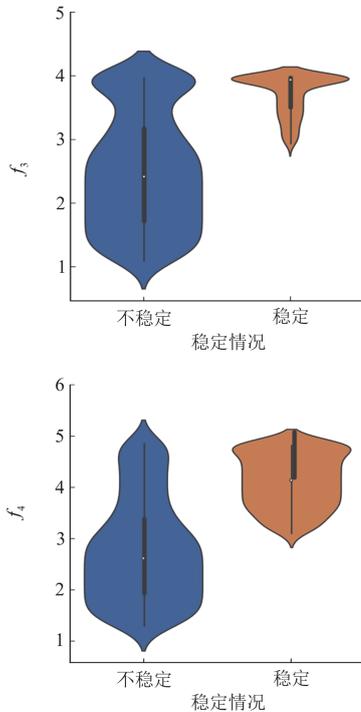


图 4 重要特征分量对暂态电压稳定情况影响分布图

Fig. 4 Influence of important characteristic components on transient voltage stability distribution

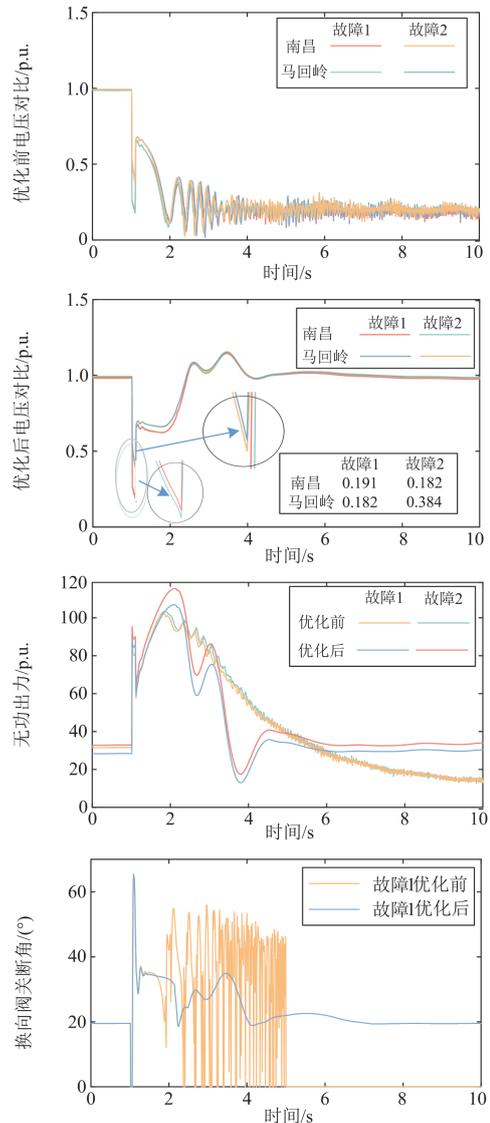
表 7 不同故障下灵敏发电机无功出力的优化结果

Table 7 Optimization results of output reactive power of sensitive generator under different faults

| 发电机无功出力/MW | 故障 1 | 故障 2 | 发电机无功出力/MW | 故障 1 | 故障 2 |
|------------|--------|--------|------------|--------|--------|
| 丰城 01 | 185.00 | 185.00 | 抚州电厂 01 | 291.88 | 330.20 |
| 丰城 02 | 185.00 | 185.00 | 贵三期 02 | 459.19 | 484.00 |
| 丰城二期 05 | 312.12 | 350.44 | 黄金埠 01 | 271.27 | 309.59 |

按照所得到两组灵敏发电机无功输出优化结果对初始运行方式下的发电机进行调整，调整前后的南昌和马回岭 500 kV 母线电压暂态响应、全网发电机和 500 kV 变电站电容抗器的暂态无功出力之和，以及赣昌换 51 高直流换向阀的关断角的动态响应过程如图 5 所示。

对比图 5 的系统暂态响应可见，由于优化前系统故障后的暂态无功支撑不足，因此电压暂态响应无法恢复稳定，换向阀关断角在多次换向失败后发生闭锁；由于优化后暂态无功支撑能力增加，母线电压暂态稳定恢复能力提高，两种故障扰动下的换向阀关断角在暂态响应后都能恢复初始稳态。并且由于南昌位于电压暂态稳定薄弱区域，因此两种故障扰动下的电压跌落幅度相较于马回岭更深，暂态稳定恢复过程更慢。同时由于故障 2 的 N-2 故障比故障 1 的 N-1 故障更为严重，因此两个母线电压



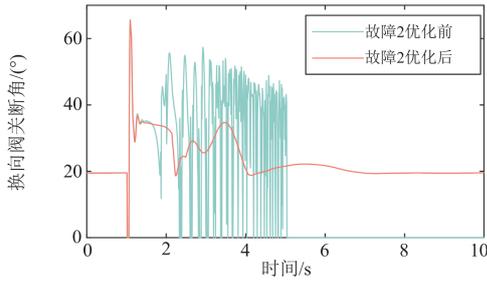


图5 灵敏发电机稳态输出无功优化前后的母线电压、系统无功和换向阀关断角的暂态响应对比

Fig. 5 Transient response comparison of bus voltage, system reactive power and reversing valve closing angle before and after sensitive generator reactive power output optimization

在故障2作用下的跌落幅度更大, 暂态无功支撑幅度也更大。仿真结果也表明, 所建立 XGBoost 分类器对故障类型具有鲁棒适应性, 利用所提优化方法能够为系统暂态电压不稳定制约故障提供基于发电机稳态无功调节的预防控制策略, 通过优化发电机稳态无功能够改善系统暂态电压稳定性、提高直流输电的安全运行。

表8是采用本文所提的优化策略后暂态电压稳定薄弱区域和全网的发电机和电容电抗稳态无功出力情况。对比表8优化前后的稳态无功可见, 两种不同严重预想故障下, 优化前后发电机和电容电抗器无功变化主要还是集中在本文所划分的薄弱区域内, 因此能够避免稳态运行时无功大幅度跨区域流动, 减小对网损的影响。

表8 优化前后系统的稳态无功出力变化

Table 8 Change of grid steady-state reactive power output before and after optimization

| 故障名称 | 薄弱区域/p.u. | | 全网/p.u. | |
|---------|-----------|--------|---------|-------|
| | 灵敏发电机 | 电容电抗 | 发电机 | 电容电抗 |
| 优化前 | 8.98 | 1.36 | 32.09 | 0.57 |
| 优化后 故障1 | 16.21 | -11.61 | 41.69 | -8.62 |
| 优化后 故障2 | 18.43 | -13.05 | 42.49 | -9.87 |

图6是优化灵敏发电机稳态输出无功后, 两种故障扰动后电压暂态跌落过程中, 薄弱区和全网的发电机无功、并联无功补偿的出力变化对比。图中 Q_g 和 Q_c 表示发电机和并联无功补偿的无功出力。由故障扰动前后的无功变化可知, 薄弱区灵敏发电机的无功出力在故障1和故障2扰动下, 分别由初始的 16.21 p.u.和 18.43 p.u.跃升至故障后 $t = 2$ s 时的 39.17 p.u.和 42.49 p.u., 薄弱区域电容电抗的无功出力分别由 -11.61 p.u.和 -13.05 p.u.提升至 -5.11 p.u.和 -5.69 p.u., 无功变化幅度的对比表明发电机提供的无功支撑起主导作用, 表明提升系统电压暂态稳

定性的主要措施在于优化同步发电机的无功输出。图7表明在故障1和故障2扰动下, 全网发电机无功出力分别由初始的 41.69 p.u.和 42.49 p.u.变化至 121.29 p.u.和 121.99 p.u.。薄弱区域灵敏发电机的暂态无功输出增幅占总增幅的 30%左右, 这是由于暂态过程中, 全网母线电压均有不同程度跌落, 因此故障后的暂态期间各区域发电机无功都会提供暂态无功支撑从而使全网发电机的无功输出得到大幅提升。

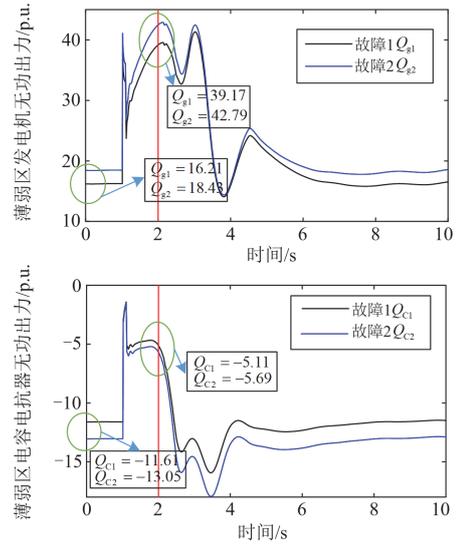


图6 稳定薄弱区的暂态无功变化

Fig. 6 Transient reactive power change in weak stability area

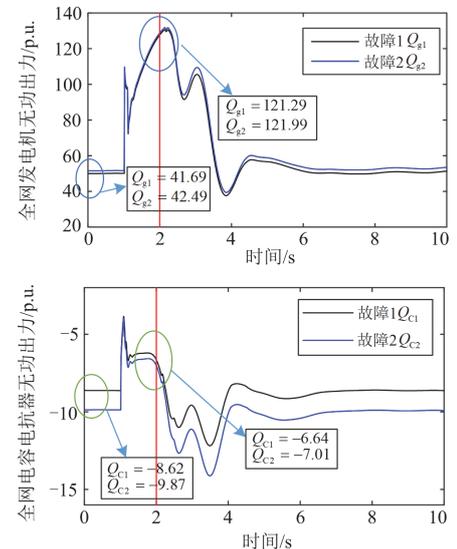


图7 全网的暂态无功变化

Fig. 7 Transient reactive power change in whole grid

表9对比了灵敏发电机稳态无功输出优化前后的系统网损, 针对故障1和故障2的无功优化, 分别使网损相比于优化前增加 0.44%和 0.67%。对比结果表明, 虽然稳态无功优化使网损有一定程度增

加, 但利用灵敏发电机稳态无功调节以提高暂态电压稳定, 相较于预留旋转备用方法, 是一种值得考虑的预防控制方法。

表 9 灵敏发电机稳态无功优化前后的网损对比

Table 9 Comparison of active power loss before and after sensitive generator reactive power output optimization

| 故障 | 优化前 | 故障 1 | 故障 2 |
|-------|--------|--------|--------|
| 网损/MW | 231.61 | 232.63 | 233.17 |

设置寻优粒子为薄弱区域外安源电 01、丰城三期 07、井冈二期 01、景二期 01、瑞金二期 01、神华浔阳 01 和新昌 01 等机组无功出力, 在表 5 所示故障 1 作用下, 研究对比利用所提方法优化薄弱区域灵敏发电机和区域外其他发电机无功出力对提高电压暂态稳定性的作用。无功优化前后, 两种无功优化方式下的系统网损变化情况如附录 A 表 A3 所示, 基于灵敏发电机稳态无功优化的网损较优化前增加 0.44%, 对其他发电机稳态无功进行优化的网损较优化前增加 5.3%, 结合附录 A 表 A4 可知, 这是由于对其他发电机无功进行优化, 在整体上而言需要更大的稳态无功变化量来给电压薄弱区域在暂态电压跌落期间提供无功支撑, 这会导致无功大范围跨区域流动, 从而使系统网损有所增加。南昌 500 kV 母线电压的暂态响应如附录 A 图 A1 所示。两种优化方式下的对比结果表明, 南昌 500 kV 母线电压均可以保持暂态稳定, 并且采用所提方法优化灵敏发电机时, 电压恢复的速度较快。但相比于优

附录 A

化其他非灵敏发电机, 电压的稳态恢复值较低, 这是由于在该种优化方式下薄弱区域的发电机稳态无功出力较多, 因此相应的 500 kV 变电站的电抗器无功投入较多, 从而导致稳态电压略低。对比分析结果也表明, 对薄弱区域发电机稳态无功出力进行优化, 可以在相同无功置换量下提供更大的暂态无功支撑能力。

5 结语

提出一种基于机器学习优化发电机稳态输出无功以提高电压暂态稳定的预防控制方法, 克服了基于暂态计算优化发电机稳态输出无功所存在的复杂计算和耗时不足。仿真结果说明:

- 1) 利用所设计特征输入向量, 采用 XGBoost 建立基于系统稳态特征预测系统电压对预想故障暂态稳定的分类器, 具有较好的泛化能力和预测准确性;
- 2) 利用综合暂态稳定裕度和发电机对薄弱区暂态电压稳定裕度综合作用灵敏度, 能够有效确定提高电压暂态稳定的作用母线和灵敏发电机;
- 3) 所提灵敏发电机输出无功优化方法能够实现系统电压对预想故障保持暂态稳定的预防控制, 同时兼顾无功优化对网损产生的不利影响。

值得指出的是, 研究对运行方式具有泛化能力的电压暂态稳定分类器建模方法, 以及在输入特征向量设计中考虑源荷不确定性和直流运行方式对电压暂态稳定的影响, 是以后工作中继续深入研究的内容。

表 A1 特征输入向量

Table A1 Feature input vector

| 分量编号 | 分量含义 | 特征分类 | 分量编号 | 分量含义 | 特征分类 | |
|----------|--------------|-------------------|----------|--------------|--------|-----------------------|
| f_0 | 故障类型 | 暂态特征 | f_{18} | 崇仁 500 电压幅值 | 薄弱区域特征 | |
| f_1 | 丰城 01 无功 | 直流馈入区域状态变量 稳态值 | f_{19} | 永修 500 电压幅值 | | |
| f_2 | 丰城 02 无功 | | f_{20} | 赣昌换 51 高电压相角 | | |
| f_3 | 丰城二期 05 无功 | | f_{21} | 南昌 500 电压相角 | | |
| f_4 | 抚州电厂 01 无功 | | f_{22} | 进贤 500 电压相角 | | |
| f_5 | 贵三期 02 无功 | | f_{23} | 云峰 500 电压相角 | | |
| f_6 | 黄金埠 01 无功 | | f_{24} | 豫章 500 电压相角 | | |
| f_7 | 丰城 01 有功 | | f_{25} | 崇仁 500 电压相角 | | |
| f_8 | 丰城 02 有功 | | f_{26} | 永修 500 电压相角 | | |
| f_9 | 丰城二期 05 有功 | | f_{27} | 薄弱区负荷无功 | | |
| f_{10} | 抚州电厂 01 有功 | | f_{28} | 薄弱区负荷有功 | | |
| f_{11} | 贵三期 02 有功 | | f_{29} | 发电机总无功 | | |
| f_{12} | 黄金埠 01 有功 | | f_{30} | 发电机总有功 | | |
| f_{13} | 赣昌换 51 高电压幅值 | | f_{31} | 系统负荷总有功 | | 受端系统状态 变量平均 稳态值 |
| f_{14} | 南昌 500 电压幅值 | | f_{32} | 系统负荷总无功 | | |
| f_{15} | 进贤 500 电压幅值 | | f_{33} | 系统母线平均电压幅值 | | |
| f_{16} | 云峰 500 电压幅值 | | f_{34} | 系统母线平均电压相角 | | |
| f_{17} | 豫章 500 电压幅值 | | — | — | | |

表 A2 XGBoost 分类器模型最优参数

Table A2 Optimal parameters of XGBoost classifier model

| 参数名称 | 最优取值 | 参数名称 | 最优取值 |
|------------------|------|------------------|--------------------|
| Learning-rate | 0.04 | Reg_alpha | 1 |
| Max_depth | 5 | Reg_lambda | 1×10^{-5} |
| Min_child_weight | 1 | subsample | 0.6 |
| N_estimators | 160 | colsample_bytree | 0.5 |
| gamma | 0.05 | Scale_pos_weight | 3 |

表 A3 两种优化方式下的网损对比

Table A3 Comparison of network loss under two optimization modes

| 优化方式 | 优化前 | 优化灵敏发电机 | 优化其他发电机 |
|-------|--------|---------|---------|
| 网损/MW | 231.61 | 232.63 | 243.89 |

表 A4 两种优化方式下的系统稳态无功出力对比

Table A4 Comparison of steady-state reactive power output of the system under two optimization modes

| 故障名称 | 薄弱区/p.u. | | 全网/p.u. | |
|---------|----------|--------|---------|--------|
| | 发电机 | 电容电抗 | 发电机 | 电容电抗 |
| 优化前 | 8.98 | 1.36 | 32.09 | 0.57 |
| 优化灵敏发电机 | 16.21 | -11.61 | 41.69 | -8.62 |
| 优化其他发电机 | 11.03 | -4.77 | 43.25 | -11.71 |

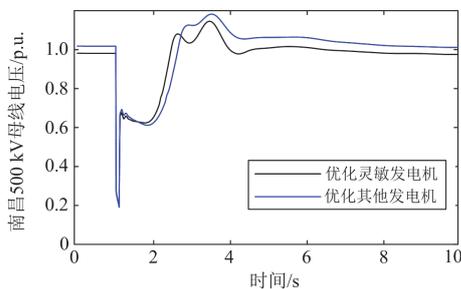


图 A1 两种优化方式下南昌 500 kV 母线电压暂态响应

Fig. A1 Voltage transient response of Nanchang 500 kV bus under two optimization modes

参考文献

- [1] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.
WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170.
- [2] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [3] 边宏宇, 徐友平, 邵德军, 等. 直流馈入受端电网“空心化”形势下的稳定特性分析及解决措施[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(18): 164-170.
BIAN Hongyu, XU Youping, SHAO Dejun, et al. Analysis of stability characteristics and solutions with the hollowing of a DC feed power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(18): 164-170.
- [4] 王云玲, 李婷, 杨伟峰, 等. 一种送端电网单回直流极限承载能力评估方法[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 82-89.
WANG Yunling, LI Ting, YANG Weifeng, et al. An evaluation method of single-circuit HVDC ultimate feed-out capacity of sending-end grid[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 82-89.
- [5] 巩伟峥, 肖洋, 夏潮, 等. 华东电网调相机 AVC 控制策略研究[J]. 电网技术, 2020, 44(8): 3106-3113.
GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in east China grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3106-3113.
- [6] 李锴, 邵德军, 徐友平, 等. 基于新一代调相机的多目标无功电压协调控制系统研究[J]. 电网技术, 2019, 43(8): 2961-2967.
LI Kai, SHAO Dejun, XU Youping, et al. Research on coordinated multi-objective reactive voltage control system based on new type synchronous condenser[J]. Power System Technology, 2019, 43(8): 2961-2967.
- [7] 续昕, 张恒旭, 李常刚, 等. 基于轨迹灵敏度的紧急切负荷优化算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 143-148.
XU Xin, ZHANG Hengxu, LI Changgang, et al. Emergency load shedding optimization algorithm based on trajectory sensitivity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 143-148.
- [8] 赵晋泉, 汤建军, 吴迪, 等. 直流馈入受端电网暂态电压与频率稳定紧急协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 45-53.
ZHAO Jinquan, TANG Jianjun, WU Di, et al. Emergency coordination control strategy for transient voltage and transient frequency stability in HVDC infeed receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 45-53.
- [9] 吕哲, 葛怀畅, 郭庆来, 等. 面向受端电网暂态电压稳定的高压直流系统主动控制研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-14[2022-04-06]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212281.
LÜ Zhe, GE Huaichang, GUO Qinglai, et al. Research on active control of HVDC system for transient voltage stability of receiving end grid[J]. Proceedings of the CSEE: 1-14[2022-04-06]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.212281.
- [10] 郑超, 汤涌, 马世英, 等. 网源稳态调压对暂态无功支撑能力的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 115-122.
ZHENG Chao, TANG Yong, MA Shiying, et al. Study on the influence of steady-state voltage regulation schemes on transient reactive power supporting capability[J].

- Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 115-122.
- [11] 陈波, 熊华强, 舒展, 等. 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.
CHEN Bo, XIONG Huaqiang, SHU Zhan, et al. Steady-state reactive power coordinated control strategy for DC converter station with synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 156-164.
- [12] 王少雄, 潘学萍, 颜君凯, 等. 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.
WANG Shaoxiong, PAN Xueping, YAN Junkai, et al. Coordinated control of steady-state voltage for UHVDC/AC power systems with large-scale synchronous condenser integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 120-127.
- [13] 熊虎岗, 程浩忠, 徐敬友. 考虑提高系统无功备用容量的无功优化调度[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 36-40.
XIONG Hugang, CHENG Haozhong, XU Jingyou. Optimal dispatch of reactive power considering increase of system reactive power reserve[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 36-40.
- [14] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [15] 薛安成, 周健, 刘瑞煌, 等. 采用多二元表判据的实用暂态电压稳定裕度指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4117-4125.
XUE Ancheng, ZHOU Jian, LIU Ruihuang, et al. A new practical transient voltage stability margin index based on multiple-two-element notation criterion[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4117-4125.
- [16] 王婕, 刘翠善, 刘艳丽, 等. 基于静态和动态权重的流域水文模型集合预报方法对比[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 32-38.
WANG Jie, LIU Cuishan, LIU Yanli, et al. Comparison of hydrological model ensemble forecasting methods based on static and dynamic weights[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2019, 40(6): 32-38.
- [17] ZADKHA S, JATSKEVICH J, VAAHEDI E. A multi-decomposition approach for accelerated time-domain simulation of transient stability problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 30(5): 2301-2311.
- [18] XIAO Tannan, ZOU Yu, XIA Yanhui, et al. Design and tests of a super real-time simulation-based power system real-time decision-making emergency control system[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(9): 1714-1725.
- [19] CHENG Shan, YU Zihao, LIU Ye, et al. Power system transient stability assessment based on the multiple paralleled convolutional neural network and gated recurrent unit[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 586-601.
- [20] 刘鸣, 王长江, 李斌, 等. 基于轨迹簇和 MBLDA 的受端电网暂态电压稳定评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 27-37.
LIU Ming, WANG Changjiang, LI Bin, et al. Transient voltage stability evaluation of a receiving-end power grid based on a trajectory cluster and MBLDA[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 27-37.
- [21] 赵冬梅, 谢家康, 王闯, 等. 基于 Bagging 集成学习的电力系统暂态稳定在线评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 1-10.
ZHAO Dongmei, XIE Jiakang, WANG Chuang, et al. On-line transient stability assessment of a power system based on Bagging ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 1-10.
- [22] 刘俊, 孙惠文, 吴柳, 等. 电力系统暂态稳定性评估综述[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 44-53, 122.
LIU Jun, SUN Huiwen, WU Liu, et al. Overview of transient stability assessment of power systems[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 44-53, 122.
- [23] 朱林, 张健, 陈达, 等. 面向暂态电压稳定评估的卷积神经网络输入特征构建方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(1): 85-93.
ZHU Lin, ZHANG Jian, CHEN Da, et al. Construction method for input features of convolutional neural network for transient voltage stability assessment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(1): 85-93.
- [24] 张晨宇, 王慧芳, 叶晓君. 基于 XGboost 算法的电力系统暂态稳定评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 77-83, 89.
ZHANG Chenyu, WANG Huifang, YE Xiaojun. Transient stability assessment of power system based on XGboost algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 77-83, 89.
- [25] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定计算技术规范: DL/T1234—2013[S]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
Technical Committee for Standardization of National Power Grid Operation and Control of China. Technique specification of power system security and stability calculation: DL/T 1234—2013[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2013.

收稿日期: 2022-11-03; 修回日期: 2023-01-10

作者简介:

郭培(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源并网控制及其优化; E-mail: 2021282070106@whu.edu.cn

陈波(1986—), 男, 博士, 教授级高工, 研究方向为电力系统分析与稳定运行控制; E-mail: orchis1986@126.com

彭晓涛(1971—), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源并网控制及其优化, 储能技术及其电力系统应用。E-mail: pengxiaotao@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)