

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210947

考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略

侯祖锋, 陈建钊, 丘冠新, 杨叶昕, 徐春华, 曹安琪

(广东电网有限责任公司珠海供电局, 广东 珠海 519000)

摘要: 针对传统配电网两级动态无功调度策略存在的均衡度低、耗时长的问题, 提出了考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略。根据分布式电源的无功调节原理, 设计了配电网安全态势功能模型, 在引入数据处理技术的基础上, 评估了配电网的网络安全态势。利用配电网两级的输出信道带宽, 构建了影响配电网两级电力负载的期望方程。基于配电网节点耗能因子矩阵, 得到了配电网两级动态无功调度的负载输出项, 完成配电网两级动态无功调度的统计分析。通过制定配电网两级动态无功调度策略, 实现了配电网两级的动态无功调度。实验结果表明, 考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略的均衡系数大于 0.7, 调度耗时在 5 s 以下, 不仅具有更高的均衡度, 还可以确保配电网两级动态无功调度具有更高的效率。

关键词: 分布式电源; 无功调节; 配电网; 无功调度; 安全态势; 统计分析

Two-level dynamic reactive power scheduling strategy in a distribution network considering reactive power regulation of distributed generation

HOU Zufeng, CHEN Jiandiao, QIU Guanxin, YANG Yexin, XU Chunhua, CAO Anying
(Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: There are problems of low balance and longtime consumption in the traditional two-level dynamic reactive power dispatching strategy of a distribution network. Thus a two-level dynamic reactive power dispatching strategy of the distribution network considering the reactive power regulation of distributed power generation is proposed. According to the principle of reactive power regulation of distributed power, a functional model of the security situation of the distribution network is designed. Based on the introduction of data processing technology, the network security of the distribution network is evaluated. The two-stage output channel bandwidth of the network is used to construct the expectation equation affecting the two-level power load. Based on the node energy consumption factor matrix of the network, the load output item of the two-level dynamic reactive power dispatch is obtained, and the statistical analysis of the two-level dynamic reactive power dispatch of the network is completed. By formulating the two-level dynamic reactive power dispatching strategy of the distribution network, the two-level dynamic reactive power dispatching is realized. The experimental results show that the equilibrium coefficient of the two-level dynamic reactive power dispatching strategy of the network considering the distributed power reactive power regulation is greater than 0.7, and the dispatching time is fewer than 5 seconds. This not only has a higher degree of equilibrium, but also can ensure that the distribution network two-level dynamic reactive power dispatch has higher efficiency.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20201748).

Key words: distributed power supply; reactive power regulation; distribution network; reactive power dispatching; security situation; statistical analysis

0 引言

伴随着社会的发展, 电力系统也在飞速发展,

配电网中承载的业务越来越多, 电力负荷也越来越大, 因此有必要对配电网进行无功调度设计, 以提高其调度能力^[1]。为了提高配电网的稳定性和安全性, 对配电网进行两级动态无功调度设计, 基于分布式电源无功电源调节结合网络均衡调度法, 构建

基金项目: 南方电网公司科技项目资助 (GDKJXM20201748)

配电网两级动态无功调度均衡模型, 根据该模型对配电网进行两级动态无功均衡调度, 有效优化配电网的负荷能力, 提升配电网两级动态无功调度的效果, 从而实现配电网的稳定运行^[2]。基于分布式电源无功调节, 研究配电网两级的动态无功调度策略, 对配电网的优化设计具有十分重要的意义^[3]。

文献[4]针对配电网在业务数据增大后运行不稳定等问题, 提出了基于主动配电网的动态无功调节方法。该方法可以有效地降低配电网的整体运行成本, 利用线性化技术将主动配电网动态无功转化为最小二阶函数, 并对函数进行求解, 实现对配电网的优化。仿真实验证明, 该主动配电网的动态无功调节方法, 可以有效提高配电网的稳定性。文献[5]基于模型控制提出了一种配电网两级动态无功调度方法, 用来降低配电网运行的开销。首先利用主动配电网构建两级动态无功调度模型, 根据模型对配电网运行数据进行实时反馈, 同时考虑到配电网的耦合性, 减少其他因素对配电网运行负荷带来的影响, 通过两级动态无功调度来优化配电网, 从而降低无功设备的运行成本, 在保证配电网稳定运行的条件下成功降低配电网的运行开销。通过仿真计算分析可证明, 基于模型控制的配电网两级动态无功调度方式可有效降低配电网运行的开销。但是上述两种方法进行配电网两级动态无功调度的均衡度较低, 导致调度效果较差, 调度效率较低。

随着配电网的应用越来越广泛, 配电网两级动态无功调度的难度逐渐增大。为了保证配电网运行的稳定性, 降低其运行成本, 并根据上述方法存在的问题, 本文基于分布式电源无功调节条件, 以配电网的负载均衡为基础, 对配电网两级动态无功调度方法进行研究。通过采用分布式电源的无功调节原理, 构建了配电网安全态势功能模型; 应用数据处理技术对配电网的网络安全态势进行评估, 根据评估结果, 对配电网两级动态无功调度进行统计分析; 构建配电网两级动态无功调度的目标函数, 采用遗传算法对目标函数进行求解, 得到最优解即完成配电网两级动态无功优化调度。最后通过仿真实验证明了本文所提方法的有效性。

1 配电网两级动态无功调度策略设计

1.1 配电网的网络安全态势评估

在对配电网两级实施动态无功调度的过程中, 首先根据分布式电源的无功调节原理^[6], 将态势感知应用到配电网的安全态势感知中。因此设计了配电网安全态势功能模型, 如图 1 所示。

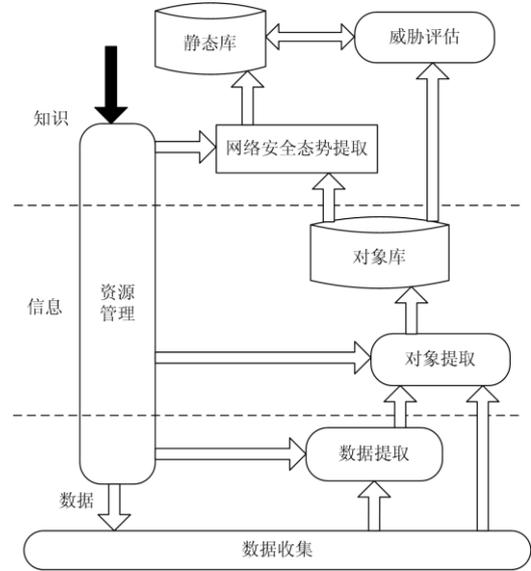


图 1 配电网安全态势功能模型

Fig. 1 Function model of distribution network security situation

在图 1 中, 数据层的主要功能是配电网两级数据的采集与提取^[7], 信息层的功能是融合配电网两级的数据, 知识层则负责提取与评估配电网的安全态势。

基于分布式电源无功调节构建配电网两级动态无功调度模型, 并应用数据处理技术^[8], 得到配电网的网络安全态势评估步骤如下:

Step 1 根据配电网两级动态无功调度模型建立配电网的二级指标体系^[9], 以此确定配电网评估的区域。

Step 2 构建一个基于配电网的辨别矩阵, 对配电网两级动态无功调度模型进行量化评估, 确定配电网的隶属度, 得到评估矩阵。

Step 3 构建配电网的辨别矩阵。

整个辨别过程中最关键的步骤就是确定权重系数^[10], 利用数据处理基础构建辨别矩阵, 即

$$S = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, a_{ij} 表示矩阵系数。

辨别矩阵的特性包括:

$$a_{ii} = 1, a_{ij} > 0, a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (2)$$

Step 4 对配电网辨别矩阵进行运算。

辨别矩阵的运算是求取配电网两级动态无功调度的特征向量的过程^[11], 通过辨别矩阵运算出配电

网的特征向量的值。

Step 5 通过求取配电网的特征向量值, 计算出每一个无功调度评估指标的权重, 并将其进行归一化处理。

Step 6 将归一化处理后的合成配电网进行安全态势评估^[12], 利用上述步骤中的辨别矩阵, 结合权重向量对配电网进行评估运算, 如式(3)所示。

$$\mathbf{S} \times \mathbf{R} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1m} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{p1} & r_{p2} & \cdots & r_{pn} \end{bmatrix} = \mathbf{B} \quad (3)$$

式中: \mathbf{R} 为权重矩阵; r_{ij} 为权重系数; \mathbf{B} 为评估矩阵。

根据上述计算结果, 采用加权平均法^[13], 对配电网的安全态势进行评估。

Step 7 综合配电网安全态势的评估结果。

首先对配电网的网络安全态势进行论述, 确定配电网两级动态无功调度过程中的评估内容, 在配电网的网络安全态势中提取样本信息, 对样本进行指标提取, 在配电网的网络安全态势评估中分析构建配电网两级动态无功调度的策略, 确定需要选择的评估方法, 最后基于配电网的网络安全态势感知过程, 完成对配电网的网络安全态势的评估。

1.2 配电网两级动态无功调度的统计分析

在对配电网的网络安全态势进行评估的过程中, 设定配电网两级动态无功增长率为 m , 一维矢量为 X_n , 配电网两级动态无功调度输出信号的带宽为

$$s(t) = X_n \sum_{i=1}^N a_i \delta(m - \tau_i) e^{j\omega t} \quad (4)$$

式中: N 为配电网两级动态无功调度输出信号的个数; τ_i 和 a_i 分别为第 i 条配电网两级动态无功调度输出信号的延时值和包络值; δ 为配电网无功调度的权重; $e^{j\omega t}$ 为配电网传输过程中的无功调度流失率。从而构建配电网两级动态无功调度的期望方程为

$$V_1(x(t)) = \mathbf{x}^T(t) P s(t) + \int_{t-d_1(t)}^t \mathbf{x}^T(s) Q_1 x(s) + \int_{t-d_2(t)}^t \mathbf{x}^T(s) Q_2 x(s) \quad (5)$$

式中: P 为配电网的输出功率; $x(t)$ 和 $x(s)$ 分别为调度时间和调度距离; $\mathbf{x}^T(t)$ 和 $\mathbf{x}^T(s)$ 分别为调度时间与调度距离的协方差矩阵; Q_1 和 Q_2 分别为调度统计的期望系数。

设配电网中的节点有 N 个, 得到配电网两级动态无功调度的因子矩阵 $\mathbf{B}_{N \times L}$ 为

$$\mathbf{B}_{N \times L} = \mathbf{S}_{N \times L} \cdot \mathbf{T}_{L \times 1} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{S}_{N \times L}$ 为网络因子矩阵; $\mathbf{T}_{L \times 1}$ 为调度矩阵。

由于配电网两级动态无功调度的信号强度受配电网负载的影响^[14-16], 在配电网最大负载的情况下, 得到配电网两级动态无功调度的目标函数为

$$F_Y(\lambda) = 1 - \frac{1}{2^{a-1} \Gamma(a)} \int_{2y/\sqrt{\lambda}}^{\infty} \omega^a K_{a-1} V_1(x(t)) \quad (7)$$

式中: K_{a-1} 为配电网的输出频率; ω^a 为配电网中各个控制器的权重向量; λ 为配电网的两级动态无功调度峰值。通过对配电网两级动态无功调度进行均衡配置^[17-18], 完成配电网两级动态无功调度的统计分析, 提高配电网运行的稳定性。

1.3 制定配电网两级动态无功调度策略

配电网两级动态无功调度策略的制定, 首先采用遗传算法对配电网两级动态无功调度的目标函数进行求解, 得到最优解, 完成配电网两级动态无功优化调度, 具体算法如下:

Step 1 对配电网进行编码。配电网两级动态无功调度包括两种方式, 一是利用用户分配比特进行动态无功调度^[19], 二是利用子载波进行动态无功调度^[20]。假设配电网的传输信道中有 N 个子载波, 配电网中存在 K 个客户, 那么给配电网中 N 个子载波分配 K 个客户, 得到第 k 个用户被分配的子载波为 n 。结合遗传学算法, 设配电网的子载波是长度为 N 的染色体, 那么染色体中存在的基因为第 k 个客户分配的子载波为 n , 并对配电网中的子载波设置进行上限设定, 该子载波的上限代表整个配电网两级动态无功调度过程中和用户分配的关系^[21]。

Step 2 形成配电网的初始群体。首先将子载波分配给配电网中传输数据最多的用户, 要求满足配电网中每个用户在使用网络时最低传输率需要的子载波不低于 R_k ^[22], 则第 k 个用户被分配的子载波为 m_k , 计算公式如式(8)所示。

$$m_k = NR_k / \sum_{k=1}^K R_k \quad (8)$$

当用户 k 在配电网中的子载波数量达到 m_k 值时, 停止对 k 用户的分配, 剩下的用户分配剩余的子载波, 直到全部分配完为止, 形成配电网的初始群体。

Step 3 计算配电网两级动态无功调度的适应度。当配电网两级为用户分配载波时, 需要结合无功调度的约束条件, 计算出电能可在配电网两级传输的时速, 将其作为适应度计算的约束条件, 适应度越高传输时速越快。

Step 4 对配电网两级动态无功调度进行运算。采用遗传学的子载波选择方法对配电网两级动态无功调度进行运算, 防止子载波的局部分布呈现不均的问题^[23]。

Step 5 利用遗传学算法进行操作。影响配电网两级动态无功调度的因素主要有两个, 分别是变异因素 P_m 和交叉因素 P_c ^[24]。以遗传学计算方法构建配电网两级动态无功调度模型, 通过遗传算法对该模型进行操作, 在遗传学中个体的生成速度受交叉因素 P_c 影响, 当交叉因素 P_c 变大时, 个体就会遭到破坏, 从而对遗传算法的运算过程造成影响, 导致搜索变慢。当变异因素 P_m 变小时, 新的基因结构无法生成, 从而出现搜索停滞的现象。利用遗传学算法进行操作得到最优解, 使变异因素和交叉因素均匀分布, 此时将 P_c 逐渐变小, 为了避免局部收敛的现象, 搜索过程中基因变异的几率较大^[25-29]。配电网两级动态无功调度方法通过变异因素 P_m 和交叉因素 P_c 完成对策略的调整。

$$P_m = P_{m2} + g_{\text{now}}(P_{m1} - P_{m2})/g_{\text{max}} \quad (9)$$

$$P_c = P_{c1} - g_{\text{now}}(P_{c1} - P_{c2})/g_{\text{max}} \quad (10)$$

式中: P_{c1} 的值为 0.9; P_{m1} 的值为 0.1; P_{c2} 的值为 0.6; P_{m2} 的值为 0.001; g_{now} 为当前配电网代数; g_{max} 为配电网的最大代数。

Step 6 保留精英。配电网两级动态无功调度采用精英保留的方式, 不仅保留了不同时代的精英个体, 还避免了精英个体间的交叉和变异, 将精英个体保留到下一代中。

Step 7 终止条件。当遗传搜索算法计算出配电网两级动态无功调度的精英个体迭代次数达到 M 时, 终止迭代操作, 得到最优解, 完成配电网的两级动态无功调度。

根据以上步骤, 制定了配电网两级动态无功调度策略, 实现了配电网两级的动态无功调度。

2 仿真实验分析

为了验证考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略在应用时的有效性, 在实验环境为 Intel(R) Core(TM) i5-2520M 处理器、8 GB 内存、Linux 操作系统下进行一次仿真实验分析。所有分析模型均采用 Matlab 软件实现。配电网的均衡系数为

$$\varphi = \frac{\max R_k - \min R_k}{\max R_k + \min R_k} \quad (11)$$

式中: R_k 为用户在配电网中的传输速率; $\max R_k$ 和 $\min R_k$ 分别为用户在配电网中的最大传输速率

和最小传输速率。 φ 值越大, 说明用户之间的配电网两级资源分配结果具有更高的均衡度, φ 值越小, 说明用户之间的配电网两级资源分配结果具有较低的均衡度。

采用均衡系数 φ 测试了考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略、文献[4]的无功调度策略和文献[5]的无功调度策略, 结果如图 2 所示。

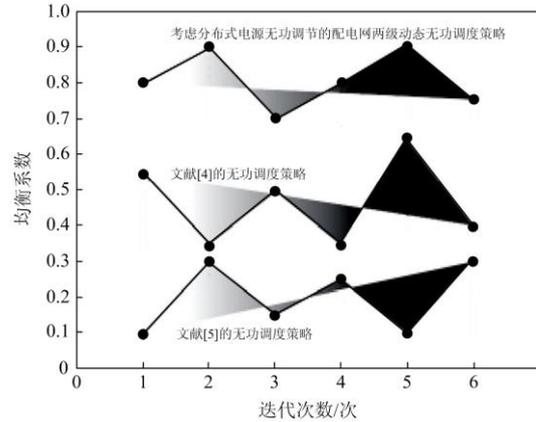


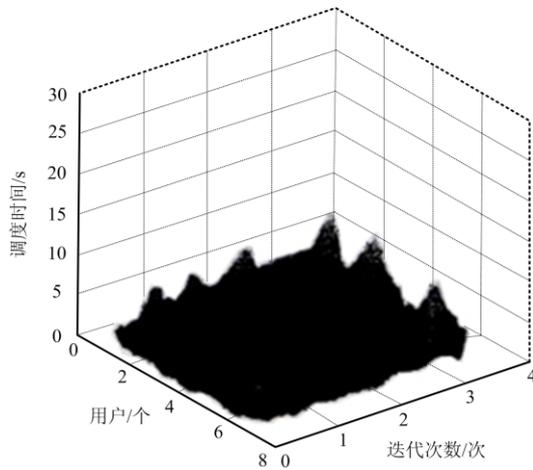
图 2 均衡系数测试结果

Fig. 2 Equalization coefficient test results

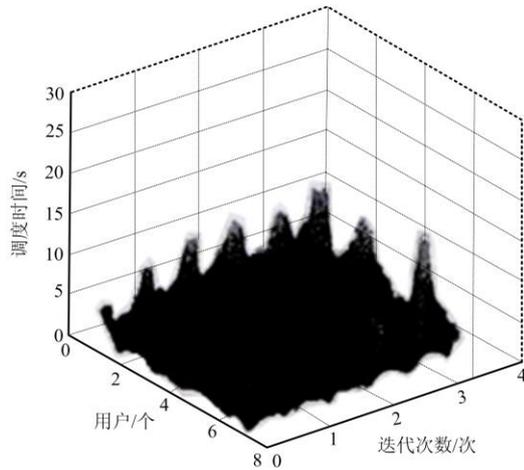
从图 2 的结果可以看出, 在多次迭代过程中, 采用考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略时, 经过式(11)的计算, 得到该方法的均衡系数都大于 0.7, 采用文献[5]的无功调度策略时, 均衡系数为 0.1~0.3, 采用文献[4]的无功调度策略时, 均衡系数为 0.3~0.6。通过对比可知, 考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略得到的均衡系数最高。原因是本文设计的无功调度策略可以根据分布式电源无功调节的原理, 保证配电网两级动态无功调度的均衡度。

在分布式电源无功调节作用下, 对比测试了文献[4]的无功调度策略、文献[5]的无功调度策略和考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略, 采用调度耗时衡量三种调度策略的调度效率, 结果如图 3 所示。

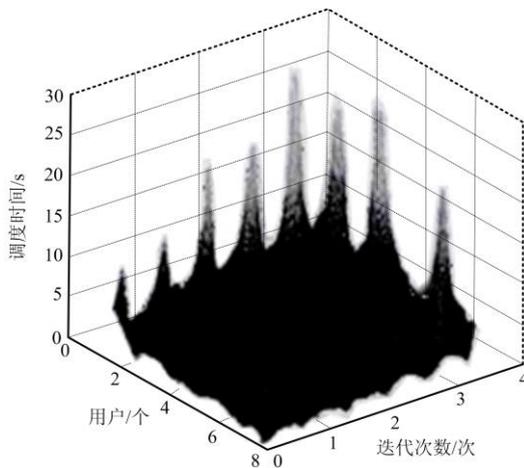
从图 3 的结果可以看出, 采用考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略时, 调度耗时在 5 s 以下, 其他两种无功调度策略的最大调度耗时分别为 10 s 和 25 s。通过对比可知, 考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略通过选择遗传算子, 避免出现局部早熟和收敛的情况, 大大缩短了配电网两级动态无功调度耗时, 从而提高了配电网两级动态无功调度效率。



(a) 考虑分布式电源无功调节的配电网
两级动态无功调度策略



(b) 文献[5]的无功调度策略



(c) 文献[4]的无功调度策略

图3 调度耗时对比结果

Fig. 3 Comparison results of scheduling time-consuming

3 结论

本文提出了考虑分布式电源无功调节的配电网两级动态无功调度策略, 考虑到分布式电源无功调节的原理, 评估了配电网的网络安全态势, 通过对配电网两级动态无功调度的统计分析, 制定了配电网两级动态无功调度策略, 实现了配电网两级的动态无功调度。结果显示, 本文设计的无功调度策略可以保证调度的均衡度, 提高调度效率。

参考文献

[1] 黄伟, 葛良军, 华亮亮, 等. 基于概率潮流的主动配电网日前一实时两级优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(12): 51-57, 105.
HUANG Wei, GE Liangjun, HUA Liangliang, et al. Day-ahead and real-time optimal scheduling for active distribution network based on probabilistic power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(12): 51-57, 105.

[2] 李知艺, 宋克轩. 基于云边协同计算的主动配电网调度研究评述[J]. 浙江电力, 2021, 40(6): 15-21.
LI Zhiyi, SONG Kexuan. An overview of ADNs dispatching based on coordinated cloud-edge computing[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(6): 15-21.

[3] 徐妍, 邓振立, 朱旭, 等. 有源配电网多阶段动态无功高效求解策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 18(9): 24-31.
XU Yan, DENG Zhenli, ZHU Xu, et al. Multi-stage dynamic reactive power efficient solving strategy for active distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(9): 24-31.

[4] 杭晨辉, 黄哲, 孟凡成, 等. 基于两阶段优化的主动配电网有功无功协调调度方法[J]. 可再生能源, 2019, 37(1): 71-78.
HANG Chenhui, HUANG Zhe, MENG Fancheng, et al. Two-stage optimization based active and reactive power coordinated dispatch approach for active distribution network[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(1): 71-78.

[5] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
REN Jiayi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive

- control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [6] 吴晓飞, 戴晖, 黄晓剑, 等. 挖掘光伏无功能力的配电网无功电压协调控制策略[J]. 电力建设, 2019, 40(5): 78-89.
WU Xiaofei, DAI Hui, HUANG Xiaojian, et al. Coordinated voltage control strategy of distribution network considering PV's reactive power[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(5): 78-89.
- [7] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.
- [8] 凌松, 张莹. 计及相关性的主动配电网动态鲁棒规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 177-187.
LING Song, ZHANG Ying. Research on dynamic robust planning method of active distribution network considering relevance[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 177-187.
- [9] 叶畅, 苗世洪, 李超, 等. 基于改进并行子空间算法的输配两级电网协同优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5509-5522.
YE Chang, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Coordination optimal scheduling strategy for transmission and distribution system based on improved CSSO algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5509-5522.
- [10] 鲍兴川, 彭林. 智能配电网通信多信道调度策略[J]. 计算机应用, 2018, 38(5): 1476-1480, 1516.
BAO Xingchuan, PENG Lin. Multi-channel scheduling strategy in smart distribution network[J]. Journal of Computer Applications, 2018, 38(5): 1476-1480, 1516.
- [11] 韩迪, 刘敏, 顾业锐, 等. 考虑用户行为的主动配电网优化调度策略研究[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(10): 22-28.
HAN Di, LIU Min, GU Yerui, et al. Research on optimal schedule strategy of active distribution network considering user behavior[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(10): 22-28.
- [12] 黄伟, 熊伟鹏, 华亮亮, 等. 基于动态调度优先级的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 3486-3498.
HUANG Wei, XIONG Weipeng, HUA Liangliang, et al. Multi-objective optimization dispatch of active distribution network based on dynamic schedule priority[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 3486-3498.
- [13] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 10-19.
WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 10-19.
- [14] 姜建, 楼健, 吴舜裕, 等. 基于负荷重组的城市配电网供电能力提升研究[J]. 浙江电力, 2020, 39(1): 9-15.
JIANG Jian, LOU Jian, WU Shunyu, et al. Study on power supply capacity of urban distribution network based on load restructuring[J]. Zhejiang Electric Power, 2020, 39(1): 9-15.
- [15] 孙舟, 田贺平, 王伟贤, 等. 含新能源接入的配电网中储能系统协调控制策略[J]. 现代电力, 2018, 35(1): 19-25.
SUN Zhou, TIAN Heping, WANG Weixian, et al. Coordinated control strategy of energy storage systems in distribution network with the integration of new energy[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(1): 19-25.
- [16] 熊郁芬, 苏洁莹, 王奖, 等. 含多园区综合能源系统的配电网双层分布式调度[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 53-61.
XIONG Yufen, SU Jieying, WANG Jiang, et al. Bi-level distributed scheduling for distribution network with integrated energy system in parks[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 53-61.
- [17] 黄鹏翔, 周云海, 徐飞, 等. 基于灵活性裕度的含风电电力系统源荷储协调滚动调度[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 82-92.
HUANG Pengxiang, ZHOU Yunhai, XU Fei, et al. Source-load-storage coordinated rolling dispatch for wind power integrated power system based on flexibility margin[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 82-92.
- [18] 张煜, 牟龙华, 王蕴敏, 等. 计及可控负荷动态调节的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 104-110.
ZHANG Yu, MU Longhua, WANG Yunmin, et al. Optimal dispatch of active distribution network considering controllable load dynamic regulation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 104-110.

[19] 杨晓楠, 孙博, 郎燕生. 基于深度学习的特高压直流闭锁故障智能调度决策[J]. 中国电力, 2020, 53(6): 8-17.
 YANG Xiaonan, SUN Bo, LANG Yansheng. Intelligent dispatch decision-making for UHVDC blocking fault based on deep learning[J]. Electric Power, 2020, 53(6): 8-17.

[20] 俞晓峰, 魏天伟. 配电网运行方式的调度及其发展[J]. 通信电源技术, 2018, 35(11): 273-274.
 YU Xiaofeng, WEI Tianwei. Dispatching and development of distribution network operation mode[J]. Telecom Power Technologies, 2018, 35(11): 273-274.

[21] 宁柏锋, 田松林. 多时间尺度下主动配电网能量调度优化[J]. 电测与仪表, 2019, 56(6): 93-99.
 NING Baifeng, TIAN Songlin. Energy scheduling optimization of active distribution network in multi-time scales[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(6): 93-99.

[22] 王晗雯, 鲁胜, 周照宇. 光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 37-42.
 WANG Hanwen, LU Sheng, ZHOU Zhaoyu. Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system[J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 37-42.

[23] 庄慧敏, 张江林, 刘兴茂. 基于多时间尺度的主动配电网双层电压优化协调控制策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(6): 52-59.
 ZHUANG Huimin, ZHANG Jianglin, LIU Xingmao. Two-level voltage optimal coordination control strategy of active distribution network based on multi timescale[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(6): 52-59.

[24] 汤奕, 孙大松, 周毅, 等. 含分布式电源的主配一体化电网日前-实时协调风险调度方法研究[J]. 智慧电力, 2020, 48(8): 8-14, 23.
 TANG Yi, SUN Dasong, ZHOU Yi, et al. Coordinated day-ahead and real-time risk dispatch method for main distribution integrated network containing distributed generation[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 8-14, 23.

[25] 吴乐川, 于群. 基于场景分析的风光储协调的配电网动态无功优化[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2020, 51(1): 102-105, 117.
 WU Lechuan, YU Qun. Dynamic reactive power optimization for distribution network of wind-solar storage coordination based on scene analysis[J]. Journal of Shandong Agricultural University (Natural Science Edition), 2020, 51(1): 102-105, 117.

[26] 刘芳芳, 吕林, 刘友波, 等. 高渗透清洁能源的城市高压配电网转供调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(11): 7-15.
 LIU Fangfang, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer scheduling strategy for urban high-voltage distribution network with highly-penetrated renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(11): 7-15.

[27] 张开宇, 冯煜尧, 余颖辉, 等. 中压配电网合环电流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 148-155.
 ZHANG Kaiyu, FENG Yuyao, YU Yinghui, et al. Study of calculation of current induced by closing-loop operation in medium-voltage distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 148-155.

[28] 陈宏岩, 唐治国, 陈琦, 等. 基于区间潮流算法的低压配电网分散无功补偿优化方法[J]. 华电技术, 2020, 42(6): 5-9.
 CHEN Hongyan, TANG Zhiguo, CHEN Qi, et al. Optimized method on distributed reactive power compensation in low-voltage distribution network based on interval power flow calculation[J]. Huadian Technology, 2020, 42(6): 5-9.

[29] 马天祥, 程肖, 贾伯岩, 等. 基于不确定二层规划模型的主动配电网故障恢复方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 48-57.
 MA Tianxiang, CHENG Xiao, JIA Boyan, et al. Service restoration method for active distribution network based on uncertain bi-level programming model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 48-57.

收稿日期: 2021-07-22; 修回日期: 2021-09-15

作者简介:

侯祖锋(1985—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配网自动化信息系统建设; E-mail: houzufeng198508@163.com

陈建钿(1983—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气工程及其自动化;

丘冠新(1974—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电气工程与自动化。

(编辑 张爱琴)