

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231099

考虑大规模风光分层接入的配电网多层协调无功优化方法

郭雪丽¹, 胡志勇¹, 王爽¹, 热依娜·马合苏提², 姚楠¹, 李婷婷¹, 周玮²

(1. 国网南阳供电公司经济技术研究所, 河南 南阳 473000; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 大量风光新能源分层、多点接入给配电网运行带来了电压越限等负面影响, 增加了不同电压等级无功协同优化的难度。兼顾不同电压等级调节需求, 从模型降维等值的角度, 提出了基于等值模型的配电网多层协调无功优化方法。该方法分别针对含有无功调节设备及没有无功调节设备的两种台区系统, 利用神经网络对大量台区相关运行数据进行训练得到台区拟合模型, 形成不可控和可控两种类型的台区等值模型, 并用这两类拟合模型分别代替两类台区系统的物理模型, 使台区以数据驱动的方式参与配电网无功优化, 形成馈线物理模型和台区拟合模型组成的单一电压等级物数混合优化调度模型。将原多层无功优化问题转换为单层系统优化问题, 再对该单层系统无功优化调度问题进行求解。该方法可降低配电网系统优化计算规模, 从而减小计算量, 以无功优化数学模型与数据驱动方法相结合的方式, 实现配电网馈线-台区多层协调无功优化。通过算例验证了所提方法对于解决分布式风光分层接入所导致电压越限问题的可行性、有效性和优越性, 能够保障配电网的经济安全稳定运行。

关键词: 配电网; 无功优化; 多层协调; 数据驱动

A multi-layer coordinated reactive power optimization method for a distribution network considering large-scale distributed wind-photovoltaic hierarchical access

GUO Xueli¹, HU Zhiyong¹, WANG Shuang¹, Reyina·Mahesuti², YAO Nan¹, LI Tingting¹, ZHOU Wei²

(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000, China; 2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The large number of layered multi-point accesses of wind and solar energy sources has brought a negative impact of voltage limit to the operation of a distribution network. It also increases the difficulty of reactive power collaborative optimization of different voltage levels. Considering the regulation requirements of different voltage levels, a multi-layer coordinated reactive power optimization method based on equivalent model is proposed from the perspective of dimension reduction equivalence of the model. Considering two station systems, one containing reactive power adjustment equipment and one not, this method uses a neural network to carry on the training to the massive station area correlation operation data to obtain the station area fitting model, forming two types of uncontrollable and controllable platform equivalent models. These two fitting models are used to replace the physical models of the two types of station areas, enabling the station areas to participate in the reactive power optimization of the distribution network in a data-driven manner. This forms a single voltage level object number mixed optimization scheduling model composed of the feeder physical model and the station areas fitting model. The original multi-layer reactive power optimization problem is transformed into a single-layer system optimization problem, and then the single-layer system optimization scheduling problem is solved. It can reduce the scale of optimization calculation for distribution network systems, and combine reactive power optimization mathematical models with data-driven methods to achieve multi-level coordinated reactive power optimization of distribution network feeders and station areas. The feasibility, effectiveness and superiority of the proposed method for solving the problem of voltage over-limit caused by distributed wind-photovoltaic access are verified by an example. This helps to ensure the economic, safe and stable operation of the distribution network.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 61873048).

Key words: distribution network; reactive power optimization; multi-level coordination; data-driven

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873048); 国网河南省电力公司2022年度重点科技项目“配电网分布式能源接纳能力评估与提升技术研究”资助(521780220001)

0 引言

为实现“双碳”目标，我国正加速推进风光可再生能源建设^[1]。随着整县光伏试点政策^[2]的实施，分布式光伏将实现进一步大规模发展。然而，分布式风光同时大规模分层接入对地区配电网运行带来的负面影响日益凸显^[3-5]。由于分布式风光出力具有较强的波动性和不确定性，大规模分层接入风光会带来潮流倒送、电压越限和电压随新能源发电动态波动的问题。特别当光伏接入到 10 kV 甚至 400 V 电网时，光伏发电量较大时对用户电压影响尤为严重，从而增加电网经济安全运行的风险。与此同时，不同电压等级的电压调节需求往往不同，且无功调节设备的调节范围各不相同。如何兼顾不同电压等级调节需求，综合利用各电压等级当前或未来各类可行的调节手段，在计及经济性、有效性等多目标前提下，实现电压的多层协调优化，是当前配电网在风光新能源大规模分层接入背景下亟待解决的问题。

现阶段大部分研究主要解决单电压等级网络出现的电压越限问题^[6-9]，少数针对多电压等级的配电网多层协调无功优化问题的研究主要分为两大类：集中式全局优化方法和多级协调优化方法，前者是传统的全局优化方法，受限于配电网规模，后者将全局优化问题分解成几个子问题，采用等价关系^[10]、最优性条件分解^[11]、拉格朗日松弛^[12-13]、Benders^[14-15]分解、主从分裂^[16-17]等方法对模型分解后进行协调求解，相比于直接用集中式全局优化^[18]，协调优化方法效率高、灵活性好，通信负担更小。然而，以上文献中的方法大多仅适用于理论层面的研究。实际上，配电网系统规模庞大，存在大量的用户节点，外加配电网中分布式电源安装容量小、规模大、地理位置分散，并且存在许多电压质量较差的台区，其数据量多、线路复杂，增大了配电网无功优化模型的规模，使计算量大大增加，因此，依赖于传统物理模型的传统全局无功优化或者复杂的协同优化方法效率低、适应性差^[18]。

随着电力系统数字化的快速发展，配电侧特别是台区系统的数据量与日剧增，受到了专家学者的重视^[19-21]。文献[17]利用神经网络、深度学习以及数据驱动技术，为配电网无功优化提供了新的思路和方法。由于配电网中邻近用户的数据存在相关性及周期性规律^[22]，将数据驱动技术应用于配电网优化问题具有可行性。文献[4,17]将数据驱动技术应用于中低压配电网，用物数结合的方法解决无功优化问题，提高计算效率，增强适应性。数据驱动技术是利用机器学习对大量的历史数据进行分析，

并从中寻找和建立内部特征之间的关系，以此来代替物理模型的求解方法。文献[23]验证了 BP 神经网络在面向海量历史数据问题的适用性，通过对 BP 神经网络的训练获得拟合模型，并用该模型指导配电网的优化运行。针对配电网无功优化方面的研究，主要是通过数据驱动的方式直接生成优化策略运用到系统中，但基本是用来应对传统单电压等级无功优化的局限，且历史优化调度策略获取比较受限。

针对上述问题，本文从模型降维等值的角度提出等值模型，即配电网台区层最小的不可再分的等值信息单元。对于实际配电网中的大量台区，通过采集某典型台区运行时的数据，利用神经网络在数据的基础上进行训练得到台区神经网络拟合模型，构造不可控和可控两种类型的台区等值模型。等值后各台区等效为馈线系统相应节点的等效负荷节点，将原来的馈线-台区物理模型降维等值，用前述两类神经网络拟合模型分别代替两类台区系统的物理模型，构造由馈线系统物理模型和台区拟合模型组成的单一电压等级物数混合优化模型，进而将原多层无功优化问题转换为单层系统优化问题。再对该单层系统进行优化调度，从而实现台区以数据驱动的方式参与配电网多层协调无功优化，提高优化效率。相比于对传统的纯配电网多层网络进行全局优化，本文方法可以减小配电网系统优化计算规模，提高计算效率，具有实用价值。因此，本文面向馈线及台区两电压等级配电网，提出了无功优化数学模型与基于数据驱动方法的台区混合优化调度模型，实现配电网馈线-台区多层协调无功优化，有效解决分布式风光分层接入所导致的电压越限问题，减少电网经济安全运行的风险。

1) 在网络参数及运行数据的基础上，分别建立馈线系统潮流模型，对没有无功调节装置的台区建立潮流拟合模型，对拥有无功调节装置的台区建立无功优化拟合模型。利用上述两种模型，构造对应的台区系统等值模型。

2) 通过对台区系统进行神经网络训练，引入台区潮流拟合模型和台区无功优化拟合模型，对原来的纯物理模型进行改进，从而建立基于混合模型的配电网馈线-台区多层协调无功优化调度模型。

3) 本文以 12.66 kV 馈线系统和若干个 400 V 台区系统组成的局部中低压配电网作为仿真算例，利用 Matlab 验证了本文所提方法的有效性和优越性，尤其在配电网规模较大、台区数量较多的情况下，本文所提方法能使优化规模大幅度减小，更好地保障系统安全运行，与传统的集中式全局无功优化相

比效果更优、效率更高、实际运用性更强。需要说明的是, 本文通过优化调度配电网内可调节设备的无功出力, 确定系统各节点最优电压分布, 属于配电网无功优化问题, 并不涉及系统因源荷波动或局部故障出现扰动变量后无功调节设备的协调控制方法。

1 基于神经网络的台区拟合模型

本文考虑馈线-台区构成的中低压配电网内两个电压等级之间的协调, 利用 BP 神经网络将每一个低电压等级系统等值处理为具有 PQV 特性的节点, 从而实现全局优化问题的降维简化, 提高大规模配电网无功优化问题的计算效率。在系统正常运行的情况下, 配电网内台区之间相互独立, 只是与上级馈线有关联, 因此为实现多层无功优化问题的降维简化, 引入 BP 神经网络拟合方法对配电网台区系统进行等值建模。其中, 对于馈线系统, 将每个台区视为等效负荷, 该等效负荷具有 PQV 节点特性, 构成台区等值模型; 台区系统将上级馈线系统所连接的节点视为等效平衡节点。将该节点的物理量作为神经网络的输入输出特征, 经训练后形成各台区等值拟合模型, 即对没有无功补偿装置的不可控台区建立潮流拟合模型, 对拥有无功补偿装置的可控台区建立台区无功优化拟合模型, 等值后各台区等效为馈线系统相应节点的等效负荷节点, 将原来的馈线-台区物理模型降维等值, 用不可控和可控两种类型的台区神经网络等值模型分别代替两类台区系统的物理模型, 构造由馈线物理模型和台区拟合模型组成的单一电压等级物数混合优化模型, 进而将原多层无功优化问题转换为单层系统优化问题, 再对该单层系统进行全局优化, 从而减小配电网系统优化计算规模, 提高计算效率。

1.1 基于神经网络的不可控台区潮流拟合模型

潮流模型是在基尔霍夫定律的基础上由线路参数信息建立的, 其能够准确地表示电力系统的运行状态。但由于缺乏完整的拓扑信息, 许多配电网中的台区无法建立物理潮流方程。在实际拓扑中, 配电网中潮流和电压分布取决于各节点的功率分布, 系统中各节点的注入功率和电压之间存在着某种隐函数关系^[17]。

对电力系统潮流方程中节点电压方程按泰勒级数展开, 由近似变换可得

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{N} \\ \mathbf{K} & \mathbf{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 、 ΔV 、 $\Delta \theta$ 分别为系统中各节点

的有功注入功率、无功注入功率、电压标幺值和相角的变化量; \mathbf{N} 、 \mathbf{H} 分别为有功注入功率对电压和相角的偏导阵; \mathbf{L} 、 \mathbf{K} 分别为无功注入功率对电压和相角的偏导阵。

由隐函数存在唯一性定理可知, 存在各节点电压 V 、相角 θ 对各节点有功功率 P 和无功功率 Q 的唯一映射。因此, 本文采用 BP 神经网络构建台区潮流拟合模型, 拟合馈线与台区连接节点处电压与功率之间的函数关系。为简化对台区的潮流训练, 本文省略相角特征, 分别将台区接入馈线处的节点功率和台区总网损作为输出特征量, 将馈线与台区连接节点的节点电压作为输入特征量, 建立如式(2)和式(3)所示的函数关系。

$$\begin{bmatrix} P_{0,a} \\ Q_{0,a} \end{bmatrix} = F_{BP,a}(U_{0,a}) \quad (2)$$

$$P_{loss,a} = F_{BP,loss,a}(U_{0,a}), a \in N_a \quad (3)$$

式中: $U_{0,a}$ 、 $P_{0,a}$ 和 $Q_{0,a}$ 分别为不可控台区 a 接入馈线处的节点电压、线路有功功率和无功功率; $P_{loss,a}$ 为不可控台区 a 的总网损; $F_{BP,a}(\cdot)$ 为不可控台区 a 训练得到的潮流拟合函数式; $F_{BP,loss,a}(\cdot)$ 为不可控台区 a 训练得到的网损拟合函数式; N_a 为没有无功补偿装置的不可控台区总数。

1.2 基于神经网络的可控台区无功优化拟合模型

为了提高可控台区系统的经济性、保证电压质量, 本文以降低系统总网损、减小电压偏移量为可控台区无功优化的目标。其中, 配电网中台区有功功率损耗最小的目标函数为

$$\min f_1 = \sum_{x,y \in n} R_{xy} I_{xy}^2 \quad (4)$$

式中: R_{xy} 为节点 x 、 y 之间的线路电阻; I_{xy} 为节点 x 、 y 之间的线路电流; n 为可控台区中输电线路的集合。

配电网中台区电压偏差最小的目标函数为

$$\min f_2 = \sum_{x=1}^N \left| \frac{\Delta V_x}{V_{x,max} - V_{x,min}} \right| \quad (5)$$

$$\Delta V_x = \begin{cases} V_{x,min} - V_x, & V_x \leq V_{x,min} \\ 0, & V_{x,min} < V_x < V_{x,max} \\ V_x - V_{x,max}, & V_x \geq V_{x,max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: V_x 为节点 x 处的电压; ΔV_x 为负荷节点 x 处的电压偏差值; $V_{x,max}$ 、 $V_{x,min}$ 分别为节点 x 处的电压上下限; N 为可控台区中所有节点的总数。

这里涉及到两个目标函数。若是只选择其中一个函数作为目标函数, 这会导致满足一个条件最优

时, 另一个条件可能无法达到最优。例如以电压偏差最小为目标函数时, 不能保证有功损耗最小。或者以有功损耗最小为目标函数时, 无法保证电压偏差最小, 甚至在降低有功损耗的过程中会导致电压剧烈波动, 极端情况下出现电压越限等问题。针对这一情况, 本文在构建配电网无功优化目标函数时综合考虑有功损耗和电压偏差两种情况。本文引入权重系数, 将两个目标联合即可得到配电网单层无功优化目标函数, 如式(7)所示。

$$\min f_{\text{tai}} = \eta_1 f_1 + \eta_2 f_2 \quad (7)$$

其中

$$\begin{cases} \eta_1 + \eta_2 = 1 \\ 0 < \eta_1 < 1 \\ 0 < \eta_2 < 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中, η_1 、 η_2 为权重系数。

为简化台区无功优化的训练过程, 分别将台区接入馈线处的节点功率和台区总网损作为输出特征量, 将该节点电压作为输入特征量, 建立如式(9)和(10)所示的函数关系。

$$\begin{bmatrix} P_{0,b} \\ Q_{0,b} \end{bmatrix} = F_{\text{BP},b}(U_{0,b}) \quad (9)$$

$$P_{\text{loss},b} = F_{\text{BP}_{\text{loss},b}}(U_{0,b}), b \in N_b \quad (10)$$

式中: $U_{0,b}$ 、 $P_{0,b}$ 和 $Q_{0,b}$ 分别为可控台区 b 接入馈线处的节点电压、线路有功功率和无功率; $P_{\text{loss},b}$ 为可控台区 b 的总网损; $F_{\text{BP},b}(\cdot)$ 为可控台区 b 训练得到的无功优化拟合函数式; $F_{\text{BP}_{\text{loss},b}}(\cdot)$ 为可控台区 b 训练得到的网损拟合函数式; N_b 为拥有无功补偿装置的可控台区总数。

由于馈线系统和台区系统仅仅是网架不同、节点数不同, 因此可控台区无功优化的约束条件形式同 2.2 节, 这里不再赘述。

利用上述两种模型, 给定输入即可得到相应的输出, 由此构造对应台区系统等值模型。

2 基于台区系统等值的配电网多层协调无功优化

2.1 配电网多层协调无功优化框架及流程

2.1.1 配电网多层协调无功优化框架

本文考虑低压配电网和中压配电网两个电压等级, 多层协调无功优化框架图如图 1 所示。在系统正常运行的情况下, 配电网内台区之间相互独立, 只是与上级馈线有关联, 因此本文引入台区拟合模型对配电网无功优化模型进行改进。

对于没有无功调节资源的不可控台区来说, 其

不进行无功优化, 而只是作为等效负荷传递给馈线, 该等效负荷具有 PQV 节点特性, 其值不会发生改变, 同时台区将馈线视为平衡节点, 这类台区的电压质量需要调用与上级馈线连接点附近的无功调节资源进行改善; 对于拥有无功调节资源的可控台区, 首先自身进行无功优化, 再将其无功优化的结果反馈给上级馈线。

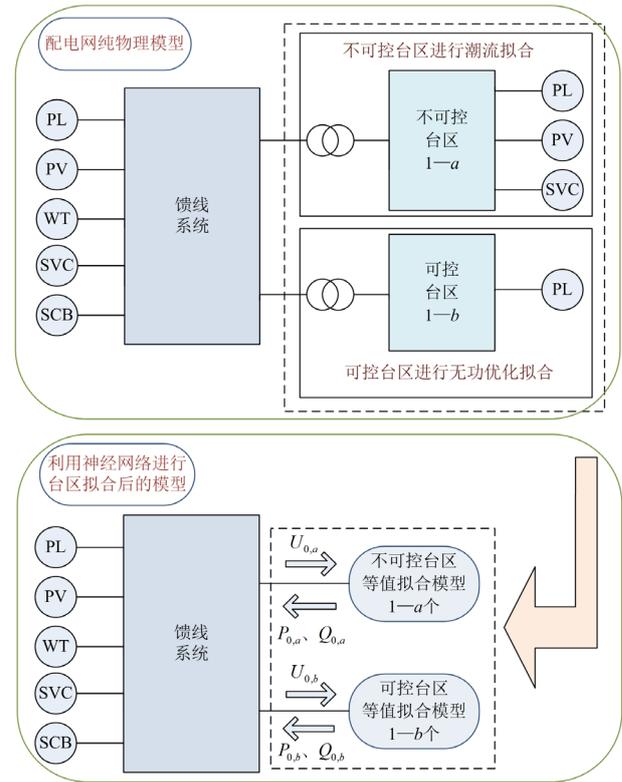


图 1 配电网多层协调无功优化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multi-layer coordinated reactive power optimization in distribution network

然而实际配电网系统规模庞大, 存在大量的用户节点, 同时台区数据量更多, 很难采用传统的集中式全局无功优化或者仅用于理论层面的复杂的协同优化方法进行求解。因此, 不可控台区的潮流模型可以用基于神经网络训练的台区潮流拟合模型代替, 而可控台区的集中式优化可以用台区无功优化的拟合模型代替, 形成两种类型的台区系统等值模型。相较于基于传统纯物理模型的配电网多层协调优化而言, 这种方法将多层协调优化等值为馈线系统单层优化问题, 使配电网系统变量数目大大减少, 从而在保证计算精度的同时, 提高配电网多层协调无功优化的效率。

2.1.2 配电网多层协调无功优化流程

配电网多层协调无功优化基于实时配电网的

运行状态, 采集到系统各节点注入功率和无功调节设备的调节范围后, 馈线和台区通过更新连接点处的功率和电压, 实现多层协调优化。其中, 利用 BP 神经网络训练的台区潮流拟合模型代替不可控台区的潮流物理模型, 用台区无功优化拟合模型来代替可控台区的集中式无功优化模型, 馈线系统采用内点法进行计算求解。流程图如图 2 所示, 具体步骤如下。

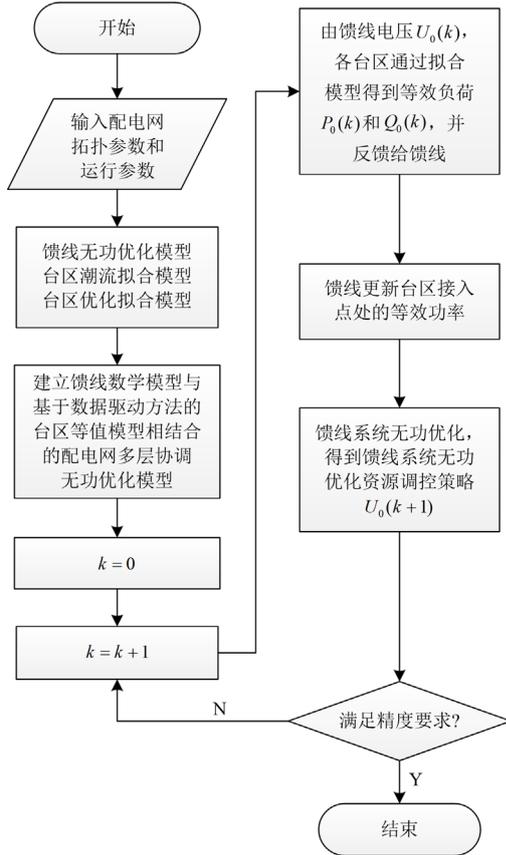


图 2 配电网多层协调无功优化流程图

Fig. 2 Flow chart of multi-layer coordinated reactive power optimization in distribution network

- 1) 输入配电网系统的拓扑参数和运行参数;
- 2) 建立馈线无功优化模型, 不可控台区的潮流拟合模型以及可控台区的无功优化拟合模型;
- 3) 基于两种类型的台区拟合模型形成对应的台区等值模型, 以数据驱动的方式参与配电网多层协调无功优化;
- 4) 将台区的物理模型用拟合模型代替, 台区将馈线视为平衡节点, 并作为等效负荷传递给馈线, 从而建立配电网多层协调无功优化模型, 设此时迭代次数 $k=0$;
- 5) 当 $k=k+1$ 时, 根据馈线系统各节点电压

$U_0(k)$, 不可控台区通过拟合模型得到潮流结果, 同时可控台区通过拟合模型迅速得到各台区无功调节资源的无功出力策略, 从而得到各台区反馈给馈线系统的等效负荷 $P_0(k)$ 和 $Q_0(k)$;

6) 馈线系统根据台区反馈结果更新与台区连接点处的等效功率, 进行馈线系统的无功优化, 得到馈线系统无功资源的优化策略 $U_0(k+1)$;

7) 进行新一轮迭代计算, 当满足精度(为一极小数)要求时, 结束循环迭代, 得到配电网多层协调无功优化策略; 若未满足, 则重新执行步骤 4)至步骤 6)。

2.2 配电网多层协调无功优化模型

2.2.1 目标函数

配电网无功优化是在考虑系统运行经济性与安全性的前提下, 制定系统内无功调节设备的优化策略。因此, 本文以配电网中的风光分布式电源、并联电容器组以及静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)出力作为控制变量, 以降低系统总体的网络损耗、减小电压偏移量为目标建立配电网无功优化模型, 从而达到降低接入分布式电源对系统电压和网损影响的目的, 提高配电网消纳分布式电源的能力。

1) 配电网总网损最小的目标函数为

$$\min f_3 = \sum_{i,j \in m} R_{ij} I_{ij}^2 + F_{BP_loss,a}(U_{0,a}) + F_{BP_loss,b}(U_{0,b}) \quad (11)$$

式中: R_{ij} 为馈线节点 i 、 j 之间的线路电阻; I_{ij} 为馈线节点 i 、 j 之间的线路电流; m 为馈线输电线路的集合。

2) 配电网总电压偏差最小的目标函数为

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^M \left| \frac{\Delta V_i}{V_{i,max} - V_{i,min}} \right| \quad (12)$$

式中: ΔV_i 为馈线负荷节点 i 的电压偏差值; $V_{i,max}$ 、 $V_{i,min}$ 分别为馈线节点 i 的电压上下限; M 为馈线系统中所有节点的总数。

于是, 配电网多层协调无功优化模型的总目标函数为

$$\min f_{kui} = \eta_3 f_3 + \eta_4 f_4 \quad (13)$$

式中, η_3 、 η_4 为权重系数。

2.2.2 约束条件

1) 潮流等式约束

系统电源注入的有功功率和无功功率与负荷保持平衡。

$$\begin{cases} P_i + P_{Gi} = P_{Di} + U_i \sum_{j=1}^M U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_i + Q_{Gi} = Q_{Di} + U_i \sum_{j=1}^M U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率; P_{Gi} 、 Q_{Gi} 分别为节点 i 处电源输入的有功功率和无功功率; P_{Di} 、 Q_{Di} 分别为节点 i 处负荷的有功功率和无功功率; U_i 、 U_j 分别为节点 i 、 j 的电压; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点 i 、 j 之间线路的电导和电纳; δ_{ij} 为节点 i 、 j 之间电压的相角差。当 $i=l$, $l \in a \parallel b$ 时, 即节点 i 为台区接入点时, P_i 、 Q_i 服从式(2)或式(9)。

2) 不等式约束

(1) 各点电压幅值约束为

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (15)$$

式中: $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$ 为节点 i 电压的上下限。当 $i=l$, $l \in a \parallel b$ 时, 即节点 i 为台区接入点时, 电压安全范围为 0.96~1.1 p.u.。

(2) 分布式风光发电机组出力约束为

$$\begin{cases} P_d^{\text{RDG}} = P_d^{\text{RDG,pre}} \\ Q_{d,\min}^{\text{RDG}} \leq Q_d^{\text{RDG}} \leq Q_{d,\max}^{\text{RDG}}, d \in N_{\text{RDG}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: P_d^{RDG} 、 Q_d^{RDG} 分别为第 d 台风光发电机组有功和无功出力; $P_d^{\text{RDG,pre}}$ 为第 d 台风光发电机组预测的有功出力; $Q_{d,\max}^{\text{RDG}}$ 、 $Q_{d,\min}^{\text{RDG}}$ 分别为第 d 台风光发电机组无功出力上下限; N_{RDG} 为风光发电机组的个数。

(3) 并联电容器组在投切时是成组操作, 根据优化结果确定投切组数, 其约束为

$$Q_{c,\min}^{\text{SCB}} \leq Q_c^{\text{SCB}} \leq Q_{c,\max}^{\text{SCB}}, c \in N_{\text{SCB}} \quad (17)$$

式中: Q_c^{SCB} 为第 c 台并联电容器组无功出力; $Q_{c,\max}^{\text{SCB}}$ 、 $Q_{c,\min}^{\text{SCB}}$ 为第 c 台并联电容器组无功出力上下限; N_{SCB} 为并联电容器组的个数。

(4) SVC 设备出力约束为

$$Q_{v,\min}^{\text{SVC}} \leq Q_v^{\text{SVC}} \leq Q_{v,\max}^{\text{SVC}}, v \in N_{\text{SVC}} \quad (18)$$

式中: Q_v^{SVC} 为第 v 台 SVC 无功出力; $Q_{v,\max}^{\text{SVC}}$ 、 $Q_{v,\min}^{\text{SVC}}$ 分别为第 v 台 SVC 无功出力上下限; N_{SVC} 为 SVC 个数。

3 算例分析

3.1 算例设置

本文仿真分析采用 Matlab 2018a, 以改进的 IEEE33 节点作为馈线系统接入 25 个台区系统的辐射状配电网为例, 其中, 馈线系统电压基准值取 12.66 kV, 台区系统电压基准值取 400 V, 电压安全范围为 0.96~1.1 p.u.。以 1 h 为时间间隔, 用内点法对未来 24 h 内系统中可控的无功调节设备进行优化求解, 以验证所建模型的正确性。改进的 IEEE33 节点系统是在标准系统的基础上接入分布式电源和无功补偿设备。具体连接方式如图 3 所示, 其中馈

线系统中, 14 号节点处接入分布式风电机组, 6、29 号节点处接入分布式光伏, 18、20 号节点处接入 SVC, 25、33 号节点处接入并联电容器。风电的有功出力为 1.28 MW、无功出力为[-5.80, 2.60] Mvar^[24]。光伏的有功出力为 1 MW, 无功出力按照式(16)确定。SVC 的无功调节范围是-600~600 kvar^[25]。电容器的无功调节范围是 0~600 kvar^[25]。

在馈线系统部分节点处接入可控台区, 其内部拥有分布式光伏、SVC 等无功补偿装置; 在其他节点处分别接入没有无功补偿装置的不可控台区。配电网结构如图 3 所示, 可控台区所接入的分布式光伏额定功率为 200 kW, SVC 的额定功率为 200 kvar。

3.2 结果分析

本文仿真算例中, 对于 1 号台区, 取其不同节点净负荷数据、分布式风光出力数据进行无功优化计算, 收集相应的台区与馈线连接点处功率和电压数据, 用内点法对可控台区进行无功优化, 其输入和优化结果构成相应的数据集, 进行神经网络训练, 从而利用台区无功优化计算的仿真结果代替可控台区与馈线连接点的实测数据。同理, 对于 2~25 号台区, 利用台区潮流计算的仿真结果代替不可控台区与馈线连接点的实测数据。创建 3 层神经网络, 其中隐藏层节点数为 3, 训练网络学习率为 0.06, 训练精度为 0.0001, 采用 Levenberg-Marquardt 算法进行参数优化。

3.2.1 配电网多层协调无功电压调节效果

为验证本文算法的有效性和优越性, 采用集中式全局优化算法进行对比优化计算。具体优化效果如下。

配电网多层协调无功优化以保障系统各节点电压质量为前提, 进行最小化网损的经济性优化。从图 4—图 8 可以发现, 本文所提出的算法与集中式全局优化算法的优化结果基本一致, 均可以保障电压质量。

由表 1 可知, 当配电网系统中只含有一个拥有无功调节设备可控台区时, 两种算法均可以在保证配电网内各节点电压质量的同时有效减少网损, 并且在本文算法下, 网损和电压偏移量更小, 优化效果更好。

此外, 对比表 1 中的数据可得, 本文所用方法在保障系统各节点电压质量的前提下可以实现系统网损最小化, 并且随着台区数量增多, 配电网规模增大, 其优化的效果比集中式全局优化方法更显著。同时, 由于本文方法直接将各台区平衡节点电压作为馈线模型的优化对象, 从而保证了台区各节点电压质量, 保障了配电网的安全稳定运行。

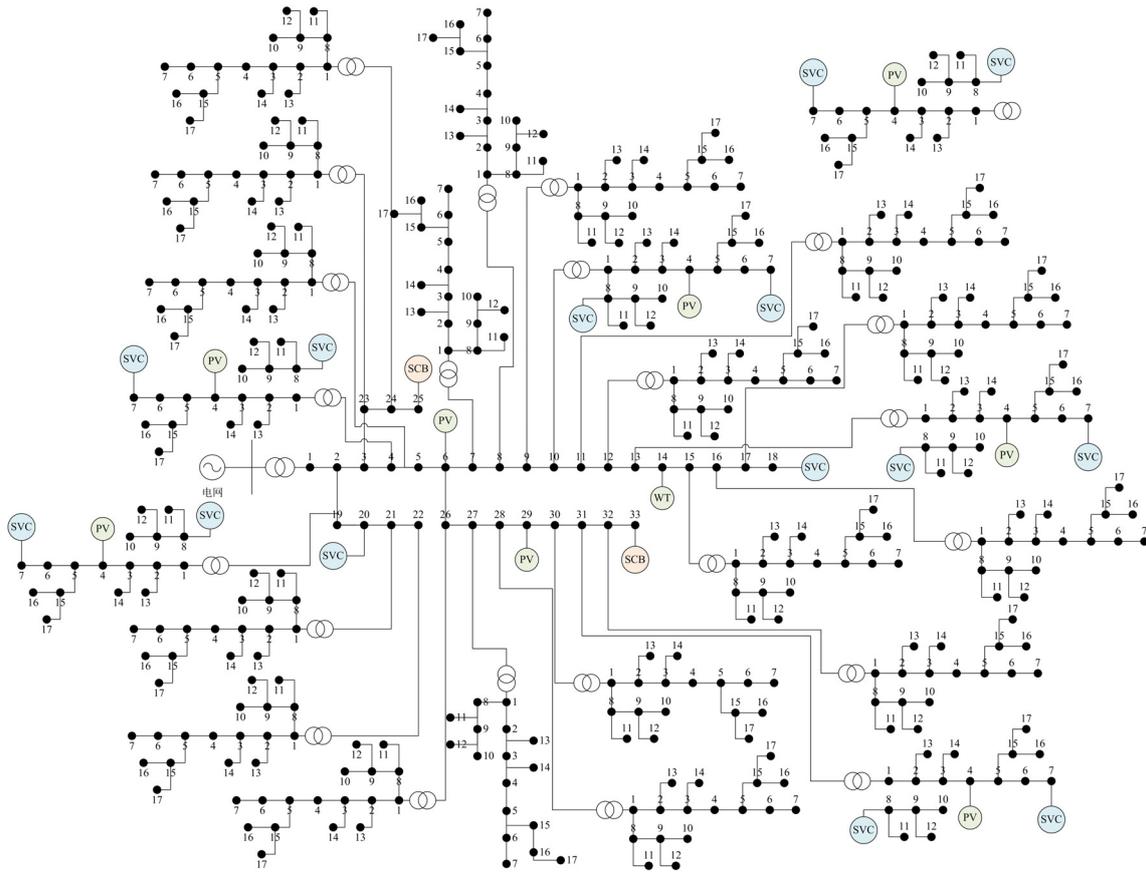


图3 配电网多层协调无功优化馈线-台区结构图(含 25 个台区)

Fig. 3 Structure diagram of multi-layer coordinated reactive power optimization feeder-station in distribution network (including 25 station areas)

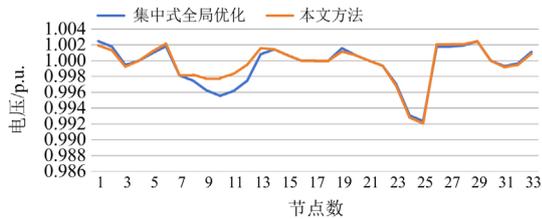


图4 不同算法下馈线电压分布情况(含 1 个台区)

Fig. 4 Feeder voltage distribution under different algorithms (including 1 station areas)

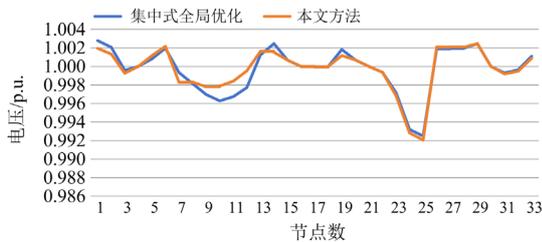


图5 不同算法下馈线电压分布情况(含 2 个台区)

Fig. 5 Feeder voltage distribution under different algorithms (including 2 station areas)

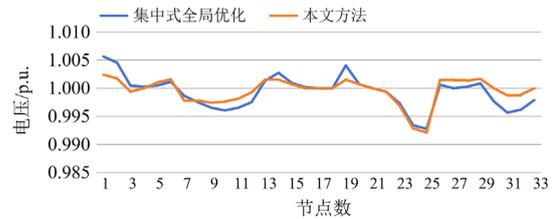


图6 不同算法下馈线电压分布情况(含 5 个台区)

Fig. 6 Feeder voltage distribution under different algorithms (including 5 station areas)



图7 不同算法下馈线电压分布情况(含 15 个台区)

Fig. 7 Feeder voltage distribution under different algorithms (including 15 station areas)



图 8 不同算法下馈线电压分布情况(含 25 个台区)

Fig. 8 Feeder voltage distribution under different algorithms (including 25 station areas)

表 1 不同算法下馈线网损对比情况

Table 1 Comparison of feeder losses under different algorithms

台区数	馈线系统网损/kW		馈线系统电压偏移量	
	全局优化	本文方法	全局优化	本文方法
1	55.2107	46.0585	0.3782	0.2951
2	56.0128	62.5294	0.4866	0.3715
5	79.1016	83.5527	0.7572	0.7153
15	161.3155	164.4691	1.3244	1.2805
25	283.5421	288.6539	1.4786	1.4212

因此，本文方法有效性得以验证，特别是在配电网规模较大、台区数量较多的情况下，本文所提出的配电网多层协调无功调节方法也能更好地保障系统安全运行，与集中式全局优化方法相比效果更优、效率更高。

3.2.2 配电网无功调节资源利用率对比

如图 9 所示，为更直观地对比集中式全局优化算法和本文所提出的算法，对比某时刻台区接入点附近的无功优化资源调节情况，分析两种算法的无功优化效果。

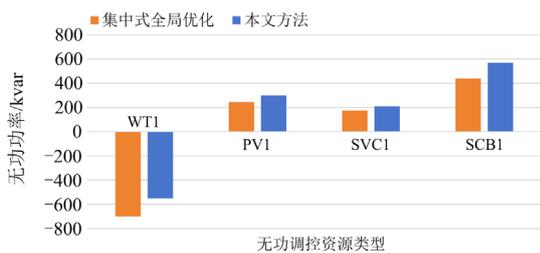


图 9 台区接入点附近无功设备实际运行情况

Fig. 9 Actual operation of reactive power equipment near the access point of the station area

由于在 10 号节点接入的台区内部拥有无功调节设备，因此本文策略下对 14 号节点处的风电无功出力相对较少；而由于 15、23、27 和 31 号节点处接入的台区内部均没有无功调节设备，因此 18 号节点处的 SVC、29 号节点处的光伏以及 33 号节点处

的 SCB 出力相对较多。通过对比可得，在无功调节资源可用容量充足的情况下，本文所用方法可以充分利用各台区接入点附近的馈线资源来改善台区各节点的电压质量，而集中式全局优化算法对相关资源利用较少。

3.2.3 配电网多层协调无功优化方法效率

随着配电网系统的规模增大，台区数量进一步增多，配电网无功计算量呈指数型增长，优化难度明显增大，很难采用传统的集中式全局无功优化或者仅用于理论层面的复杂的协同优化方法进行求解计算。

在利用本文方法求解配电网多层无功协调模型的过程中，无论台区数量如何增加，对于每一台区，其潮流或无功优化模型形式完全一致，因此对于单个台区潮流或无功优化问题，求解时间相对固定。与此同时，即使台区数量增加，在每一次迭代过程中，各台区潮流或无功优化模型的求解均以并行模式同步进行，因此单次迭代求解时间不会因配电网内台区数量增加而产生明显区别，仅仅受馈线系统规模的影响。如图 10 所示，相比于集中式全局优化每次迭代时间呈指数型增长，本文所提方法的每次迭代时间几乎不变。

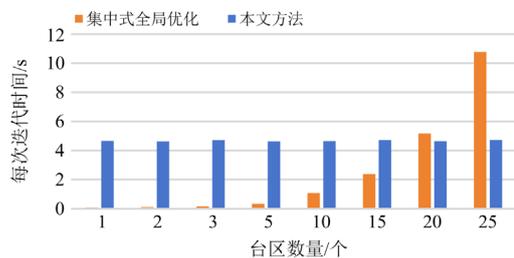


图 10 不同台区数量下不同算法迭代时间对比情况

Fig. 10 Comparison of iterative time of different algorithms under different number of stations

因此，在配电网规模较大、台区数量较多的情况下，本文所提出的配电网多层协调无功优化方法也能更好地保障系统安全运行，与传统的集中式全局无功优化或者仅用于理论层面的复杂的协同优化方法相比效果更优、效率更高、实际运用性更强。

4 结论

本文提出了一种基于等值模型的适用于配电网的多层协调无功电压调节方法。通过采集某典型台区运行时的数据，利用神经网络在数据的基础上进行训练，在馈线模型中引入台区潮流拟合模型和台区无功优化拟合模型，构成两种类型的台区等值模型，对原来纯物理模型进行改进，从而建立无功优

化数学模型与数据驱动方法相结合的混合模型, 实现配电网馈线-台区多层协调无功优化。算例验证了本文方法对于解决分布式风光分层接入所导致电压越限问题的有效性和优越性, 并得出如下结论:

1) 相较于集中式全局优化方法, 本文方法在保障系统各节点电压质量的前提下实现系统网损最小化, 效果显著, 有利于降低电网经济安全运行风险。

2) 相较于集中式全局优化方法, 在无功调节资源可用容量充足的情况下, 本文方法可以充分利用各台区接入点附近的馈线资源来改善台区各节点的电压质量, 从而保障配电网的安全稳定运行。

3) 相较于其他复杂的协同优化方法, 本文方法不涉及复杂的理论研究, 实际运用性更强, 并且模型求解时间相对固定, 故其优化效率随台区数量增多、配电网规模增大而明显提高。

参考文献

- [1] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见[EB/OL]. [2022-01-30]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm.
- [2] 国家发展改革委, 国家能源局. 关于报送整县(市、区)屋顶分布式光伏开发试点方案的通知[EB/OL]. [2022-06-20]. <http://www.chic.org.cn/home/index/detail/id/1100.html>.
- [3] 朱丹丹, 周前, 贾勇勇, 等. “规划-运行”融合框架下基于“源-荷”多时序联合场景的新型配电系统无功资源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(20): 62-78.
ZHU Dandan, ZHOU Qian, JIA Yongyong, et al. Optimal allocation of reactive power resources in a new distribution system based on the “source-load” multi-sequence scenario in a “planning-operation” fusion framework[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(20): 62-78.
- [4] 潘思蓉, 刘友波, 唐志远, 等. 含深度学习代理模型的有源配电网电压无功控制进化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(17): 97-106.
PAN Sirong, LIU Youbo, TANG Zhiyuan, et al. An evolutionary algorithm for Volt/Var control in an active distribution network with a deep learning surrogate mode[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 97-106.
- [5] 潘超, 王锦鹏, 包钰婷, 等. 考虑源荷侧灵活性资源的风光消纳互动调控[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 1-8.
PAN Chao, WANG Jinpeng, BAO Yuting, et al. Interactive control of wind and photovoltaic power consumption considering source-load side flexible resources[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 1-8.
- [6] 刘梦依, 邱晓燕, 张志荣, 等. 计及风光出力相关性的配电网多目标无功优化[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1892-1899.
LIU Mengyi, QIU Xiaoyan, ZHANG Zhirong, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network considering output correlation between wind turbines and photovoltaic units[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1892-1899.
- [7] 黄昊, 倪秋龙, 李震, 等. 考虑柔性负荷无功调节能力的配电网日前两阶段无功随机优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 23-33.
HUANG Hao, NI Qiulong, LI Zhen, et al. Day-ahead two-stage stochastic reactive power scheduling optimization for a distribution network considering the reactive power regulation capability of flexible loads[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 23-33.
- [8] HU Chunhao, CAI Zexiang, ZHANG Yanyu, et al. A soft actor-critic deep reinforcement learning method for multi-timescale coordinated operation of microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(3): 423-432.
- [9] 陈倩, 王维庆, 王海云. 基于需求侧响应的主动配电网双层优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 1-13.
CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Bi-level optimization model of an active distribution network based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 1-13.
- [10] JIANG Sifan, WAN Can, CHEN Chen, et al. Distributed photovoltaic generation in the electricity market: status, mode and strategy[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(3): 263-272.
- [11] NOGALES F, PRIETO F, CONEJO A. A decomposition methodology applied to the multi-area optimal power flow problem[J]. Annals of Operations Research, 2003, 120: 99-116.
- [12] 罗天, 汪可友, 李国杰, 等. 基于拉格朗日对偶松弛的多区域柔性直流互联电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 68-84.
LUO Tian, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Reactive power optimization in multi-area VSC-HVDC interconnected power grids based on Lagrangian dual relaxation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 68-84.
- [13] 乐健, 王曹, 李星锐, 等. 中压配电网多目标分布式优化控制策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(23): 4972-4981.
LE Jian, WANG Cao, LI Xingrui, et al. The multi-object distributed optimization control strategy of medium voltage distribution networks[J]. Transactions of China

- Electrotechnical Society, 2019, 34(23): 4972-4981.
- [14] LI Zhengshuo, GUO Qinglai, SUN Hongbin, et al. Coordinated transmission and distribution AC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1228-1240.
- [15] LI Zhengshuo, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Generalized master-slave-splitting method and application to transmission-distribution coordinated energy management[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5169-5183.
- [16] 赵晋泉, 张振伟, 姚建国, 等. 基于广义主从分裂的输配电网一体化分布式无功优化方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 108-124.
ZHAO Jinquan, ZHANG Zhenwei, YAO Jianguo, et al. Heterogeneous decomposition based distributed reactive power optimization method for global transmission and distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 108-124.
- [17] 胡珺如, 窦晓波, 李晨, 等. 面向中低压配电网的分布式协同无功优化策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(22): 47-54.
HU Junru, DOU Xiaobo, LI Chen, et al. Distributed cooperative reactive power optimization strategy for medium-and low-voltage distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 47-54.
- [18] 刘洪, 徐正阳, 葛少云, 等. 考虑储能调节的主动配电网有功-无功协调运行与电压控制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 51-62.
LIU Hong, XU Zhengyang, GE Shaoyun, et al. Coordinated operation of active-reactive power and voltage control for active distribution network considering regulation of energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 51-62.
- [19] WANG Yi, CHEN Qixin, HONG Tao, et al. Review of smart meter data analytics: applications, methodologies, and challenges[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 3125-3148.
- [20] 范荻, 皇甫成, 王丰, 等. 基于 MIT-LXPM 改进遗传算法的配电网时间序列三相不平衡优化调控策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(5): 9-16.
FAN Di, HUANGFU Cheng, WANG Feng, et al. Optimal regulation strategy of three-phase imbalance in time series of distribution network based on MIT-LXPM improved genetic algorithm[J]. Smart Power, 2022, 50(5): 9-16.
- [21] 马志斌, 侯哲帆, 张瑞雪. 基于智能终端和换相开关的台区三相不平衡治理方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 39-48, 57.
MA Zhibin, HOU Zhefan, ZHANG Ruixue. Research on the three-phase unbalance control method in the transformer area based on intelligent terminal equipment and commutation switch[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 39-48, 57.
- [22] HUANG Changqin, HUANG Qionghao, WANG Dianhui. Stochastic configuration networks based adaptive storage replica management for power big data processing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(1): 373-383.
- [23] 刘文字, 刘璐, 刘馨然, 等. 基于改进 BP 神经网络的低压配电台区智能电能表误差状态评估模型[J]. 电测与仪表, 2022, 59(11): 176-181.
LIU Wenyu, LIU Lu, LIU Xinran, et al. An error estimation method of smart electricity meter in low voltage distribution area based on improved BP neural network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(11): 176-181.
- [24] 孙航洋. 含风光储联合发电系统的配电网无功优化控制的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2014.
SUN Hangyang. Optimization of reactive power and control in distribution network considering the connection of wind-PV-ES hybrid system[J]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014.
- [25] 肖浩, 裴玮, 董佐民, 等. 基于元模型全局最优化方法的含分布式电源配电网无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5751-5762.
XIAO Hao, PEI Wei, DONG Zuomin, et al. Reactive power optimization of distribution network with distributed generation using meta model-based global optimization method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5751-5762.

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-11-14

作者简介:

郭雪丽(1976—), 女, 硕士, 正高级工程师, 主要研究方向为电网规划及新能源等; E-mail: 13462594879@163.com

胡志勇(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统规划和调度运行; E-mail: zyhu1980@163.com

周玮(1981—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为端对端能源交易、配电网调度与运行、智能电网能源管理。E-mail: zhouwei@dlut.edu.cn

(编辑 周金梅)