

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180892

# 含分布式电源的配电网分区和主导节点选取方法研究

李香龙<sup>1</sup>, 付晓<sup>2</sup>, 朱洁<sup>1</sup>, 王立永<sup>1</sup>, 宫成<sup>1</sup>, 马龙飞<sup>1</sup>,  
赵向阳<sup>2</sup>, 焦然<sup>1</sup>, 杨烁<sup>1</sup>, 陈艳霞<sup>1</sup>

(1. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;  
2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 为了应对分布式电源及柔性负荷大规模接入给配电网电压控制带来的困难, 提出一种基于改进的粒子群优化算法的配电网分区方法, 通过分区使分布式电源主动参与到配电网的控制过程中。引入评价分区结果优劣的四个指标, 综合考虑分区内无功/有功储备、区域内强耦合和区域间弱耦合, 并结合无功/有功可控性和电压可观性, 构建主导节点选取公式。该方法将分区转化为优化求解问题, 使得分区结果能根据分布式电源运行参数和配电网结构的变化进行灵活调整。通过仿真证明了该分区科学合理, 在该方法基础上的分布式电压控制能有效缓解柔性负荷大规模接入所带来的节点电压越限等问题, 具有实际应用价值。

**关键词:** 分布式电源; 分区; 主导节点; 粒子群算法

## Research on partition method and selection of dominant nodes for distribution network with distributed generation

LI Xianglong<sup>1</sup>, FU Xiao<sup>2</sup>, ZHU Jie<sup>1</sup>, WANG Liyong<sup>1</sup>, GONG Cheng<sup>1</sup>, MA Longfei<sup>1</sup>, ZHAO Xiangyang<sup>2</sup>,  
JIAO Ran<sup>1</sup>, YANG Shuo<sup>1</sup>, CHEN Yanxia<sup>1</sup>

(1. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** In order to cope with the voltage control difficulties of the active distribution network with large-scale flexible load, this paper proposes a distribution network partition method based on improved particle swarm optimization algorithm. Distributed Generation (DG) can actively participate in the control of the distribution network, and introduces four indicators to evaluate the partition, including reactive/active reserve and strong coupling within the region, and the weak coupling between regions. Combined with reactive/active power controllability and voltage observability, the dominant node selection formula is constructed. This method regards the partition process as an optimal problem, so that the partition can be flexibly adjusted according to the DG parameters and the structure of distribution network. The simulation has proved this partition method is scientific and based on which the distributed voltage control can effectively alleviate the problem that the voltage exceeding limit caused by large-scale flexible load. It has practical application value.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52022316001P).

**Key words:** distributed generation (DG); partition; dominant node; particle swarm optimization (PSO)

## 0 引言

随着电力网络的发展, 越来越多的分布式电源(DG)和柔性负荷接入配电网, DG的接入改变了配电系统原有的电压分布情况, 大大增加了配电网运

行的不确定性和节点电压越限的可能性, 传统的配电网电压调节方法已经不能有效实施<sup>[1-2]</sup>。在当前的配电网中, 大规模的分布式电源接入, 其控制变得复杂, 传统的集中式电压控制计算量大, 控制效率低, 控制精度不高。考虑利用分布式电源进行区域自治电压调节, 充分发掘分布式电源与配电网电压控制的紧密联系, 在这个过程中, 对配电网进

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52022316001P)

行分区是必要的<sup>[3]</sup>。因此对配电网进行分区并选取区域内主导节点对每个区域进行监测和控制成为近年来研究的热点<sup>[4-5]</sup>。

近年来, 诸多文献提出不同的分区方法, 目前, 以每个区域内节点具有“相同特性”为基础的方法较多, 多为聚类分析法, 主要考虑节点之间的电压或能量灵敏度。如文献[6-7]提出了基于静态能量函数法和多阈值搜索进行配电网分区的方法, 提出节点能量相关度指标, 以此构建系统的能量灵敏度矩阵, 用多阈值分解法进行分区; 文献[8]提出基于社团结构理论的分区方法, 将每个节点看成一个社团, 选择临近节点更新社团, 遍历所有节点, 将最终的社团分布作为分区结果, 计算量较大。文献[9]与文献[8]相似, 提出基于 ward 距离的聚类分析, 把每个节点看作一个簇, 选取 ward 距离相近的簇合并成新的簇, 对配电网进行分区。基于地理位置的分区方法也有部分研究, 文献[10]提出了一种基于最大供电能力的分区方法, 根据地理位置确定几种备选方案, 确定供电能力差值最小的为最优方案。除此之外, 也有基于主导节点控制能力的分区方法研究, 文献[11]利用电压越限节点和其余节点之间的电压灵敏度确定中枢节点, 在其基础上采用聚类算法以中枢节点为中心进行区域划分, 分区只考虑了主导节点的控制能力, 文献[12-14]所规划的分只满足区域内无功储备充足这一个标准。以上文献在分区时, 衡量分区优劣的标准往往单一, 使分区只具有某一方面的优势, 不利于进行区域控制, 而且其计算量大, 应用于较大规模的配电网时, 效率低下。在实际应用中, 会有很大的局限性。

本文在前人研究的基础上, 结合分区的目的性及合理性, 提出一种基于改进粒子群算法的配电网控制分区方法, 将分区转化为优化求解问题; 并结合无功/有功可控性和电压可观性, 提出主导节点选取方法, 通过仿真验证了所提方法的科学性和现实意义。

## 1 节点电压变化灵敏度的计算

基于 P-Q 潮流分解的无功-电压灵敏度矩阵  $M_Q$  可以由式(1)得到, 同理可由式(2)得到有功-电压灵敏度矩阵  $M_P$ <sup>[15-16]</sup>。

$$[\Delta V] = [\partial V / \partial Q] \cdot [\Delta Q] = M_Q \cdot [\Delta Q] \quad (1)$$

$$[\Delta V] = [\partial V / \partial P] \cdot [\Delta P] = M_P \cdot [\Delta P] \quad (2)$$

$M_Q/M_P$  中元素  $M_{Qij}/M_{Pij}$  表示节点  $i$  处的无功/有功注入变化一个单位时, 节点  $j$  电压的变化量。由

式(1)可以得到  $N$  节点的配电网系统中任意两个节点之间的无功电压灵敏度关系, 如式(3)所示。

$$\Delta V_i^Q = [\partial V_i / \partial Q_1 \quad \dots \quad \partial V_i / \partial Q_N] \times \begin{bmatrix} \partial V_j / \partial Q_1 \\ \vdots \\ \partial V_j / \partial Q_N \end{bmatrix} \times \quad (3)$$

$$\left( \begin{bmatrix} \partial V_j / \partial Q_1 & \dots & \partial V_j / \partial Q_N \\ \vdots \\ \partial V_j / \partial Q_1 & \dots & \partial V_j / \partial Q_N \end{bmatrix} \right)^{-1} \times \Delta V_j^Q$$

式中:  $V_i$ 、 $V_j$  分别为节点  $i$  和节点  $j$  的电压;  $Q_i (i=1, \dots, N)$  为节点  $i$  的无功功率。

式(3)可以写为

$$\Delta V_i^Q = \alpha_{ij} \cdot \Delta V_j^Q \quad (4)$$

式中,  $\alpha_{ij}$  即表示节点  $i$  对节点  $j$  的无功电压变化的灵敏度, 由上述推导可得节点  $i$  对节点  $j$  的有功电压变化灵敏度  $\beta_{ij}$ , 如式(5)所示。

$$\Delta V_i^P = \beta_{ij} \cdot \Delta V_j^P \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可得节点  $i$  电压增量的表达式, 如式(6)所示。

$$\Delta V_i = \Delta V_i^Q + \Delta V_i^P \quad (6)$$

由上述推导可以得知,  $\alpha_{ij}$  和  $\beta_{ij}$  两个变量表征了节点电压变化的灵敏度, 根据这两个变量, 可以构造节点之间电气距离的表达式。由式(3)可知,  $\alpha_{ij} \neq \alpha_{ji}$ ,  $\beta_{ij} \neq \beta_{ji}$ , 而我们需要电气距离具有对称性, 因此定义配电网系统中两节点间电气距离的计算公式<sup>[17]</sup>如式(7)所示。

$$D = d_{ij} = d_{ji} = 1 / \left( \sqrt{\alpha_{ij}^2 + \alpha_{ji}^2} + \sqrt{\beta_{ij}^2 + \beta_{ji}^2} \right) \quad (7)$$

式中,  $D$  为节点  $i$ 、 $j$  之间的电气距离, 节点  $i$ 、 $j$  之间的电压灵敏度越大, 其电气距离越小。

## 2 含分布式电源的配电网优化分区评价指标

目前在配电网控制的研究中, 分布式控制逐渐取代集中式控制方式, 成为配电网的主要控制方式。实现区域自治的电压分布式控制, 需要合理的区域划分。在常见的分区方法中, 评价指标往往单一, 使分区结果只具有某一方面的优势。为了充分利用分布式电源可调的有功/无功功率在电压控制上的优势, 同时保证区域电压调节的高效性, 本文引入四个评价指标, 将分区过程转换为多目标函数的优化求解问题, 评价指标值越小, 表示分区结果越理想。

## 2.1 分区内的无功/有功储备度

在本文的研究中,分区电压控制是利用区域内分布式电源灵活调整其有功和无功功率进行电压调节,这就需要分区内有足够的无功和有功储备,即区域内要有足够的无功和有功可调容量,因此引入分区内无功/有功储备度 $f_{ik}$ 的评价指标,其计算公式如式(8)一式(10)所示。

$$f_{ik} = 1 - [(p_{ik} + q_{ik})/2], \quad i=1,2 \quad (8)$$

$$p_{ik} = [(U_{Mi}^h - U_{Mi})/U_{Mi}] \times 100\% \quad (9)$$

$$q_{ik} = [(U_{Mi} - U_{Mi}^l)/U_{Mi}] \times 100\% \quad (10)$$

式中: $U_{Mi}$ 表示该区域在当前运行状态下的主导节点控制电压设定值; $U_{Mi}^h$ 、 $U_{Mi}^l$ 分别表示该区域所有分布式电源节点分别运行在可行无功/有功上限和可行无功/有功下限时主导节点的电压值。

## 2.2 区域内强耦合

为了便于区域内控制,要求区域内的分布式电源节点和负荷节点之间有很强的耦合关系,其评价指标如式(11)所示。

$$f_{3k} = \left\{ (1/l_{kg} \cdot l_{kl}) \cdot \sum_{j=1, j \in k_g}^{l_{kg}} \sum_{i=1, i \in k_l}^{l_{kl}} D_{ij} \right\} / \max(D) \quad (11)$$

式中: $l_{kg}$ 为区域 $k$ 内分布式电源节点的个数; $l_{kl}$ 为区域 $k$ 内负荷节点的个数; $k_g$ 和 $k_l$ 分别为区域 $k$ 内分布式电源节点和负荷节点的集合; $D$ 为配电网系统中任意两个节点之间的电气距离。式中分子表示在区域 $k$ 内分布式电源节点与负荷节点之间的平均电气距离,分母表示配电网系统中负荷节点间的最大电气距离。

## 2.3 区域间弱耦合

为了避免区域内控制影响到其他的区域,确保每个区域之间的弱耦合性是必要的,该评价指标如式(12)所示。

$$f_{4k} = \left\{ (1/l_{kl} \cdot l_{kg}) \cdot \sum_{j=1, j \in k_l}^{l_{kl}} \sum_{i=1, i \in k_g}^{l_{kg}} D_{ij} \right\} / \min_{i \in k_g, j \in k} (D_{ij}) \quad (12)$$

公式的分子表示在区域 $k$ 内分布式电源节点与负荷节点的平均电气距离,分母表示区域 $k$ 内分布式电源节点与区域 $k$ 以外的负荷节点的之间的最小电气距离。

## 3 主导节点的选取方法

主导节点的选取考虑其两方面的特性,即无功/有功可控性和电压可观性。前者表征主导节点对分布式电源节点无功/有功功率变化的灵敏度,后者表

征主导节点对其他负荷节点电压变化的灵敏度。

### 3.1 可观性指标

可观性的计算要考虑区域内其他负荷节点电压对主导节点的电压灵敏度<sup>[15]</sup>,因此本文在分析了可观性原理的基础上,定义主导节点的可观性指标如式(13)所示。

$$OBS = \left( \sum_{k \in S_k} \sqrt{\alpha_{mk}^2 + \beta_{mk}^2} \right) / l_k \quad (13)$$

式中: $S_k$ 表示某区域内所有负荷节点的集合; $\alpha_{mk}$ 表示主导节点对区域内任意负荷节点的无功电压灵敏度; $\beta_{mk}$ 表示主导节点对区域内任意负荷节点的有功电压灵敏度,可由式(3)一式(5)计算得到。

### 3.2 可控性指标

可控性主要考虑主导节点对区域内分布式电源节点无功/有功功率变化的灵敏度,因此可以定义主导节点的可控性指标如式(14)所示。

$$CON = (\delta_1 \sum [\partial V_m / \partial Q_d] + \delta_2 \sum [\partial V_m / \partial P_d]) / l_d \quad (14)$$

式中, $V_m$ 表示主导节点电压; $Q_d$ 、 $P_d$ 分别表示区域内分布式电源节点的无功和有功功率; $l_d$ 表示区域内分布式电源节点的个数; $\delta_1$ 、 $\delta_2$ 为权重系数,且令 $\delta_1 = \delta_2 = 0.5$ 。式(11)中矩阵的元素表示分布式电源节点无功/有功注入变化时主导节点电压的变化量。

因此定义主导节点的选取公式如式(15)所示。

$$\rho = \max \{ \gamma_1 OBS + \gamma_2 CON \} \quad (15)$$

式中, $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 表示可观性和可控性各自的权重,由于本文研究的主导节点,其可观性和可控性同样重要,故对其分配相同的权重,即 $\gamma_1 = \gamma_2 = 0.5$ 。

## 4 优化分区及主导节点选择求解模型的构建

### 4.1 分区求解目标函数的构建

根据上述优化评价指标,本节建立多目标优化分区模型,目标函数 $F$ 如式(16)所示。

$$F = \sum_{i=1}^4 \lambda_i f_i \quad (16)$$

式中: $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 分别为所有区域相应评价指标的最大值; $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ 、 $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$ 分别为四个评价指标的权重。权重的确定采用相似系数法,根据专家系统的决策,确定评价指标的评价等级,计算出单指标测度评价矩阵,进而求出多指标综合测度评价向量,在计算出单指标评价向量与综合测度评价向量相近程度的相似系数的基础上即可得到每个评价指标的权重<sup>[17]</sup>。本文通过计算得到的权重分别为 $\lambda_1 = 0.21$ ,  $\lambda_2 = 0.23$ ,  $\lambda_3 = 0.32$ ,  $\lambda_4 = 0.21$ 。

约束条件的处理采用罚函数的处理方法,通过在目标函数中加入惩罚项,使不满足约束的粒子适

度变差而不能收敛<sup>[18]</sup>。约束条件包括:

- 1) 单个节点不能自成一个区域;
- 2) 单个区域的节点个数不超过总节点数的 2/3。

#### 4.2 优化分区及主导节点选取求解过程

本文采用带惯性权重的粒子群算法对上述多目标分区模型进行求解。求解过程流程图如图 1 所示。

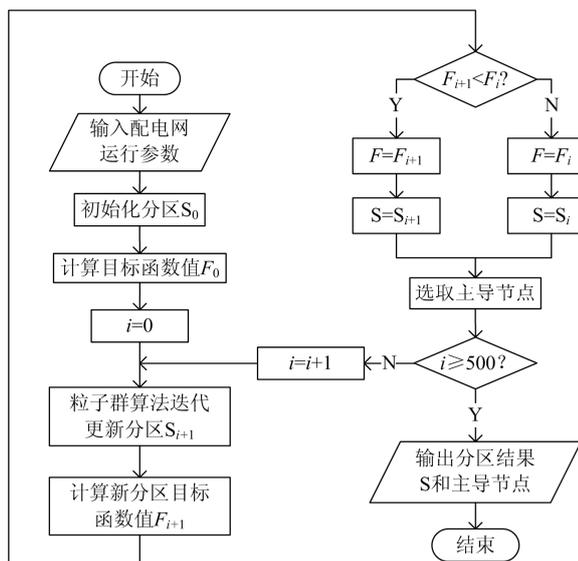


图 1 分区求解过程

Fig. 1 Partition solution process

## 5 算例分析

本文的分布式电源采用光伏发电设备,以 IEEE 33 节点标准配电网系统为例,电压等级为 10 kV,分布式电源安装位置分别为节点 3、6、8、11、14、16、18、20、22、25、29、32,采用带惯性权重的粒子群算法进行优化计算。粒子群算法中,优化过程中粒子的第  $j$  个元素的数值表示节点  $j-1$  所属的区域编号,粒子群规模取 500,惯性权重的计算中,最大权重  $\omega_{\max}=0.9$ ,最小权重  $\omega_{\min}=0.4$ ,最大迭代次数  $k_{\max}=500$ <sup>[18-20]</sup>。每次迭代更新粒子后,找到各个区域分别包含的节点编号,形成新的分区。计算评价指标值,并进行主导节点的选取,判断是否满足终止条件或达到循环上限,迭代完成后,输出最优分区结果即向量  $\mathbf{g}$  和主导节点选取结果。

确定分区数目的方法很多,通常,找出正确的分区数目依赖于节点分布的形状和尺度。目前已经有许多种估计分区数的方法,经验法对于包含  $n$  个点的集合,可以设置分区数大约为  $\sqrt{n/2}+1$  个,因此,设置分区数目为 5。

本文所述方案分区及主导节点选取结果如图 2 所示。

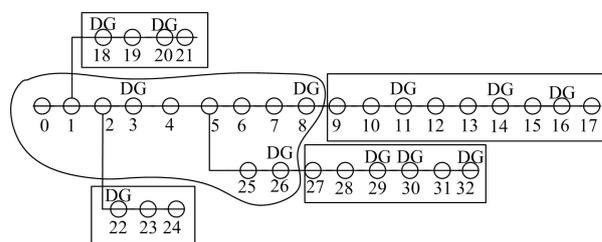


图 2 5 分区方案分区结果及主导节点选取结果

Fig. 2 Five-region partition results and dominant nodes selection results

为了验证本文所述分区方案和主导节点选取方法的科学有效性,选择多阈值搜索分区法<sup>[6]</sup>和仅考虑电压灵敏度的主导节点选取方法与本文所述方法作对比,在两种分区方案下,使节点 12 电压降落 12%,分布式电压控制对配电网系统进行调节。两种方案的分区结果对比如表 1 和表 2 所示。

表 1 两种分区方案分区结果及主导节点选取结果

Table 1 Two partition results and dominant nodes selection results

方案	结果
本文方案	区域 1: 1—7,25—26; 主导节点: 5
	区域 2: 9—17; 主导节点: 12
	区域 3: 18—21; 主导节点: 21
	区域 4: 22—24; 主导节点: 23
	区域 5: 27—32; 主导节点: 31
多阈值搜索分区方案	区域 1: 1—3,18—21; 主导节点: 2
	区域 2: 4—6,22—24; 主导节点: 23
	区域 3: 7,8,25; 主导节点: 7
	区域 4: 9—17; 主导节点: 10
	区域 5: 26—32; 主导节点: 28

表 2 两种分区方案配电网运行数据对比

Table 2 Comparison of distribution network operation

	本文方案	多阈值搜索分区方案
最大无功储备指标	0.85	1.22
最大有功储备指标	0.74	1.36
最大区域内强耦合指标	1.19	0.93
最大区域间弱耦合指标	0.96	0.87
网损/kW	69.64	80.64
最大电压偏差	4.49%	6.85%
最大主导节点可观可控性 $\rho$	1.21	0.92

由以上两表可知,基于本文分区方案的区域电压控制使配电网有更小的网损及电压偏差,多阈值搜索分区方案虽然能使分区的耦合程度更优,但其并未充分利用分布式电源的调压作用。本文在求解最优分区时,通过多目标优化,使每个分区有足够的无功和有功储备,区域内各负荷节点之间耦合关

系相对较强，与其他区域的负荷节点之间耦合关系相对较弱。

在主导节点的选取过程中，既考虑了无功/有功可控性，使分布式电源能够更有效率地参与配电网系统的电压调节，同时也考虑了电压可观性，使得主导节点的电压水平在一定程度上反映当前区域的整体电压水平。

因此，在进行控制时，本文所论述的方法比单纯考虑电压灵敏度的多阈值搜索分区和主导节点选取法更具科学性，通过该方法得到的最终分区更加合理。

### 6 结论

本文提出了一种含分布式电源的配电网节点分区方法，该方法基于改进的粒子群算法，将分区过程作为一个优化求解的问题，提出分区结果的评价指标作为粒子群算法的目标函数，从无功/有功可控性和电压可观性出发提出主导节点的选取方法，并通过算例分析验证了所提方法的科学性和有效性。所得结论如下：

1) 本文所提出的优化分区方法，使分布式电源主动参与到配电网的控制中，其在配电网中充当电源的单一功能得到很大提升，提高了资源利用率。

2) 本文所述分区和主导节点选取方法能够使区域本地控制达到更理想的效果，将分区过程转化为多目标优化求解的过程。综合考虑区域内和区域间的耦合关系以及分区内无功/有功储备度，在此基础上的区域电压控制实现了配电网系统较小的网损和较小的节点电压偏差。

3) 基于优化算法的分区可以根据分布式电源的运行参数和配电网拓扑结构的改变而重新进行调整，只需修改输入数据。因此该方法具有实际意义。

### 参考文献

[1] 王红利. 含分布式电源的配电网电压分区控制[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.  
WANG Hongli. The partition of distributed network for voltage control with distributed generation[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.

[2] ZHANG Delong, LI Jianlin, HUI Dong. Coordinated control for voltage regulation of distribution network voltage regulation by distributed energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 35-42. DOI: 10.1186/s41601-018- 0077-1.

[3] 张玮亚, 王紫钰. 智能配电系统分区电压控制技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 146-154. ZHANG Weiya, WANG Ziyu. Review of zonal-voltage

control techniques of smart distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 146-154.

[4] SUN H, GUO Q, ZHANG B, et al. An adaptive zone-division-based automatic voltage control system with applications in China[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1816-1828.

[5] 刘铠诚, 何光宇, 黄良毅, 等. 考虑可再生能源不确定性的输电网多目标混成自动电压控制[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 369-375.  
LIU Kaicheng, HE Guangyu, HUANG Liangyi, et al. Multi-objective hybrid voltage control of transmission network considering the uncertainty of renewable power sources[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 369-375.

[6] 崔惟, 颜伟, LEE W J, 等. 考虑区域无功平衡的主导节点选择和无功分区的优化方法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 164-170.  
CUI Wei, YAN Wei, LEE W J, et al. Optimal pilot- bus selection and network partitioning algorithm considering zonal reactive power balance[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 164-170.

[7] 郑武, 康勇, 李华强. 基于能量灵敏度矩阵和多阈值搜索的电压控制分区[J]. 四川电力技术, 2017, 40(5): 5-9.  
ZHENG Wu, KANG Yong, LI Huaqiang. Voltage control partition based on energy sensitivity matrix and multiple threshold search[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2017, 40(5): 5-9.

[8] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 基于社团结构理论的电网无功分区及主导节点选择方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 32-37.  
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Improved network partition and pilot node selection method for reactive power / voltage control based on community detection algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 32-37.

[9] 高道春, 卢继平, 戴钢, 等. 利用满维灵敏度矩阵进行电压控制分区[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 19-25.  
GAO Daochun, LU Jiping, DAI Gang, et al. Use full-dimensional sensitivity matrix to carry on voltage control area[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(5): 19-25.

[10] 李晓辉, 谭向红, 张轶君, 等. 基于最大供电能力的配电网分区方法[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 117-123.  
LI Xiaohui, TAN Xianghong, ZHANG Yijun, et al. A distribution network partition method based on total supply capability[J]. Electric Power, 2017, 50(3): 117-123.

- [11] 成煜, 杭乃善. 基于电网中枢点识别的无功电压控制分区方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 45-52.  
CHENG Yu, HANG Naishan. Reactive voltage control partitioning based on power network pilot node identification[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 45-52.
- [12] 陈明, 顾伟, 李鹏, 等. 主动配电网分区分布式无功优化控制方法[J]. 现代电力, 2017, 34(6): 40-44.  
CHEN Ming, GU Wei, LI Peng, et al. Distributed reactive power optimization control method for active distribution network based on subarea division[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(6): 40-44.
- [13] 余乐, 张茜, 刘燕, 等. 含分布式电源的配电网无功补偿分区平衡优化调节方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 58-64.  
YU Le, ZHANG Qian, LIU Yan, et al. An adjustment method of distribution network reactive power compensation partition balance with distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 58-64.
- [14] 刘公博, 颜文涛, 张文斌, 等. 含分布式电源的配电网动态无功优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 49-54.  
LIU Gongbo, YAN Wentao, ZHANG Wenbin, et al. Optimization and dispatching method of dynamic reactive power in distribution network with distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 49-54.
- [15] 龙启峰, 丁晓群, 刘小波, 等. 基于可控主导节点的电压分区及电压校正的研究[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 59-62.  
LONG Qifeng, DING Xiaoqun, LIU Xiaobo, et al. Study of voltage partition based on controllable pilot nodes and voltage correction[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 59-62.
- [16] 代飞, 黄磊, 徐箭, 等. 基于二级电压控制的河南电网分区和主导节点选择[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 101-105.  
DAI Fei, HUANG Lei, XU Jian, et al. Voltage partitioning and pilot nodes selecting of Henan power grid based on secondary voltage control[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 101-105.
- [17] 王耀瑜, 张伯明, 孙宏斌, 等. 一种基于专家知识的电力系统电压/无功分级分布式优化控制分区方法[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 221-224.  
WANG Yaoyu, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A expert knowledge based subarea division method for hierarchical and distributed electric power system voltage/VAR optimization and control[J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 221-224.
- [18] 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 57-63.  
ZU Qiwu, NIU Yugang, CHEN Bei. Study on multi-objective economic operating strategy of microgrid based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 57-63.
- [19] 于琳, 孙莹, 徐然, 等. 改进粒子群优化算法及其在电网无功分区中的应用[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(3): 89-95, 128.  
YU Lin, SUN Ying, XU Ran, et al. Vibration signal based diagnosis method for looseness fault of transformer winding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(3): 89-95, 128.
- [20] 吴小刚, 刘宗歧, 田立亭, 等. 基于改进多目标粒子群算法的配电网储能选址定容[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3405-3411.  
WU Xiaogang, LIU Zongqi, TIAN Liting, et al. Energy storage device locating and sizing for distribution network based on improved multi-objective particle swarm optimizer[J]. Power System Technology, 2014, 38(12): 3405-3411.

---

收稿日期: 2018-07-17; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

李香龙(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电动汽车能源补给、节能与新能源应用; E-mail: lx10\_0@163.com

付晓(1992—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为配电网系统控制与保护; E-mail: fuxiao\_c@163.com

朱洁(1972—), 女, 硕士, 研究方向为节能与新能源应用。E-mail: zhujie@bj.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)