

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181194

基于改进凝聚算法的电磁环网解环方法

赵红生¹, 乔立¹, 王博¹, 胡钊², 凌汝晨²

(1. 国网湖北省电力公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 提出了一种电磁环网解环方法。首先利用电气距离矩阵对电网进行预分裂, 再利用所提出的基于复杂网络加权模块度的改进凝聚算法对预分裂得到的分区进行凝聚, 最后得到解环方案。该方法考虑了 500 kV 变电站分母运行方式, 得到的解环方案中各分区内形成了以 2~3 座 500 kV 变电站为核心的供电方式, 限制了各分区主变容量, 从而能够限制分区内短路电流, 提高了电网安全性。将所提出的电磁环网解环方法应用于某地区电网, 结果表明该方法是有效的。

关键词: 电气距离; 加权模块度; 电源点; 主变容量; 凝聚算法

Electromagnetic ring network decoupling method based on improved aggregation algorithm

ZHAO Hongsheng¹, QIAO Li¹, WANG Bo¹, HU Po², LING Ruchen²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Economic and Technological Research Institute, Wuhan 430077, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: An automatic loop unwrapping method for electromagnetic loop network is proposed in this paper. Firstly, the electrical distance matrix is used to pre-splitting the power grid, and then the improved coherent algorithm based on the complex network weighted modularity proposed is used to condense the pre-split partitions and get the solution finally. The denominator operation mode of 500 kV substation is considered. The power supply mode with two to three 500 kV substations as the core is formed in each partition of the obtained solution, which limits the main transformer capacity of each zone, thus limiting the short-circuit current in the zone and improving the security of grid. The proposed electromagnetic ring network unwinding method is applied to a regional power grid, and the results show that the method is effective.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015 AA050101).

Key words: electrical distance; weighted modularity; power point; main variable capacity; condensation algorithm

0 引言

电磁环网在提高地区间电网输送电能力、地区内部供电能力等方面发挥着十分重要的作用。但是, 在高电压等级系统尚未完善的过渡期, 电磁环网运行方式会带来电力系统热稳定、动稳定、短路电流超标、安全自动装置复杂等影响电力系统安全稳定运行的问题^[1-2]。《电力系统安全稳定导则》要求, 在电网网架结构不断复杂化并使之完善的过程中, 电磁环网应当逐步解开并按照电网电压等级和供电区域合理分层、分区^[3]。

电网分区的目的是为了更好更好地迎合未来电网的发展趋势^[4]。目前, 500/220 kV 电网分区往往是规划人员在短路电流即将越限或存在电磁环网潮流穿越问题时, 依据自身的工作经验, 选取电网中的特定线路将其开断或使母线分裂运行, 形成多个解环方案, 再通过短路电流、热稳定、暂态稳定等安全稳定校核指标^[5-6], 综合考虑网损、设备利用率等, 在所形成的方案中选取最优解环方案, 以解决电磁环网的环网问题。但是, 这种人工分区方法存在着较大的问题, 主要表现在: (1) 解环方案的制定仅仅基于规划人员的经验, 缺乏理论依据, 合理性受到规划人员自身能力的制约; (2) 工作量大, 为了搜索最优解环方案, 需要对所形成的大量解环方案进行校验与计算, 这一问题在网架结构十分复杂的情况

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)资助(2015AA050101)

下尤为突出；(3) 分片思路容易受到规划人员对现有分区和断面概念的限制，因而分区往往并没有按照电网的实际特征来进行，结果不尽合理。

文献[7-9]利用反映电网各节点之间耦合程度的电气距离矩阵对电网进行电网分区，保证了系统分区的电压可控性。文献[10]基于电气距离矩阵，提出一种映射分区方法，进一步保证了被控节点与其控制最灵敏的无功源节点在一个分区。文献[11]基于复杂网络理论提出了一种基于模块度的分区凝聚算法。但是，这些分区方法并没有考虑到电磁环网解环中的一些主要原则和实际做法，例如电磁环网解环后的供电区域宜形成以 2~3 座 500 kV 变电站为核心的供电区域，并与区外有 3 回及以上的 500 kV 联络线，分区内最好有一定容量的电源支撑，为了限制短路电流，分区内的 500 kV 主变容量应在一定范围内^[12-15]，因此，当直接用这些方法对电磁环网进行解环时会遇到各种问题。文献[16-17]利用复杂网络理论社团结构提出电网分区新方法，研究表明了将复杂网络理论与电网分区相结合的重要意义。文献[18]基于网络社团结构特性提出了一种基于 GN 算法的电磁环网解环方法，尽管考虑到解环过程中需要注意的一些实际因素，但其每个分区都只有一座枢纽变电站，分区供电可靠性较低。

本文提出利用电气距离矩阵进行预分裂，以减少将每个电网节点单独作为一个分区进行凝聚得到最终分区方案的计算量，再利用本文所提出的改进凝聚算法得到电网分区解环方案。这种电磁环网解环方法，可以自动产生解环方案，且能确保解环后的每个分区都有 2~3 座 500 kV 变电站对分区供电，限制了各分区主变容量，从而能够限制分区内短路电流，提高了电网安全性。

1 基本原理

1.1 电气距离矩阵

灵敏度是反应节点间耦合程度大小的指标。在对电网进行分层分区时，希望解环后各区域内的耦合程度较大，各区域间的耦合程度较小。

在 PQ 分解法中，潮流无功迭代方程为

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

式(1)中， $[\partial Q / \partial V]$ 为雅克比矩阵，将系统中所有 PV 节点作为 PQ 节点，即在式(2)中考虑系统的所有电源节点并对其作逆变换可得

$$[\Delta V] = [\partial V / \partial Q][\Delta Q] \quad (2)$$

式(2)中， $[\partial V / \partial Q]$ 为 $[\partial Q / \partial V]$ 的逆矩阵，是一个与网络阻抗矩阵具有相同性质的灵敏度矩阵。

假设在电压控制过程中，区域内系统各节点的电压变化是成比例的，即

$$\Delta V_i = \alpha_{ij} \Delta V_j \quad i, j \in S \quad (3)$$

式中： α_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电气灵敏度，反映了节点 i 和节点 j 之间的耦合程度； S 为系统中所有节点的集合。其中 α_{ij} 为

$$\alpha_{ij} = [\partial V_i / \partial Q_j] / [\partial V_j / \partial Q_j] \quad (4)$$

定义电气距离映射函数为

$$d_{ij} = -\log_{10}(\alpha_{ij} \cdot \alpha_{ji}) \quad (5)$$

d_{ij} 即为电气距离矩阵 D 中的元素，因此得到具有 n 个节点的电气距离矩阵 D 即

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} & d_{n2} & \cdots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

电气距离矩阵反映了电网各节点之间的电气连接的关系。提取全维电气距离矩阵 D 中负荷节点对应的行和电源节点对应的列，可以得到负荷节点和电源节点之间的电气距离矩阵 D_{LG} ，若系统中有 N_{Load} 个负荷节点， N_{Gen} 个电源节点，则 D_{LG} 为 $N_{Load} \times N_{Gen}$ 维矩阵。

1.2 加权模块度

复杂网络的社团结构是指整个网络由若干社团组成，各社团间的联系相对稀疏，而各社团内的联系则非常紧密。为了衡量社团划分的优劣程度，Newman 等人引入了模块度 Q 的概念^[19]用于评价加权网络中^[20]，使模块度的概念更具有实际意义即衡量社团内节点连接的紧密程度。加权模块度 Q 的定义为

$$Q = \frac{1}{2m} \sum_{ij} \left[A_{ij} - \frac{k_i k_j}{2m} \right] \delta(i, j) \quad (7)$$

$$\delta(i, j) = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 位于同一分区} \\ 0, & i, j \text{ 位于不同分区} \end{cases} \quad (8)$$

式(7)中： A_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的边的权重；

$k_i = \sum_j A_{ij}$ 表示与节点 i 相连的所有边的权重之和；

$m = \frac{1}{2} \sum_{ij} A_{ij}$ 表示网络中所有边的权重之和。

式(7)的物理意义是电力网络中连接分区内部节点的边权重的比例减去随机网络中连接分区内部节点的边权重的比例的期望值。随机网络的构造方法为：保持每个节点的社团属性和度不变，根据节点的度随机连接节点间的边。 Q 越接近其上限值 1，

说明网络的社团结构划分得越好。在实际网络中, Q 值通常位于 0.3~0.7。

1.3 分区电网合理规模

为保障分区供电安全, 应限制 500~220 kV 电磁环网解环后电网的短路电流^[12-15]。文献[14]提出了一定短路电流水平之内的分区电网合理规模, 如表 1 所示。其思想是通过限制分区内主变容量从而限制短路电流。

本文解环算法改进了分区凝聚过程从而限制分区主变容量及短路电流, 使得分区结果具有更好的供电安全性。

表 1 分区电网合理规模

Table 1 Reasonable scale of district power grid

| $S_{T1}+S_{T2}$ | 主变容量/GVA | 短路电流 50 kA | | 短路电流 60 kA | |
|-----------------|----------|------------|-----------|------------|-----------|
| | | 可接入电源/GW | 最大供电能力/GW | 可接入电源/GW | 最大供电能力/GW |
| 2×750 | 1.5 | 3.0 | 3.8 | 1.0 | 1.8 |
| 3×750 | 2.3 | 2.0 | 3.6 | 1.0 | 2.6 |
| 4×750 | 3.0 | 2.0 | 4.3 | 1.0 | 3.3 |
| 2×1000 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 1.0 | 2.0 |
| 3×1000 | 3.0 | 2.0 | 4.0 | 1.0 | 3.0 |
| 4×1000 | 4.0 | 1.5 | 4.5 | 1.0 | 4.0 |
| 2×1200 | 2.4 | 3.0 | 4.2 | 1.0 | 2.2 |
| 3×1200 | 3.6 | 2.0 | 4.4 | 1.0 | 3.4 |
| 4×1200 | 4.8 | 1.0 | 4.6 | 0.9 | 4.5 |
| 2×1500 | 3.0 | 3.0 | 4.5 | 1.0 | 2.5 |
| 3×1500 | 4.5 | 2.0 | 5.0 | 1.0 | 4.0 |
| 4×1500 | 6.0 | 1.0 | 5.5 | 0.6 | 5.1 |

2 解环算法

本文先利用电气距离矩阵对电网进行预分裂, 将其分成(电网电源点个数) N_{Gen} 个区, 将可分母运行的 500 kV 变电站当作两个电源节点, 将不可分母运行的 500 kV 变电站当作一个电源节点。再利用本文提出的改进的凝聚算法, 对电磁环网进行解环。

2.1 预分裂算法

为了确保每个分区内有一个以上的电源节点, 本文对电磁环网进行预分裂, 将每个电源节点作为一个分区, 再利用式(6)将每个负荷节点分到与其电气距离最近的电源节点所在区^[10]。预分裂的流程如图 1 所示, 其中, A_j^0 为预分裂时第 j 个电源节点所在的分区 j 所含节点的集合, l_i 为第 i 个负荷节点, N_{Load} 为负荷节点的个数, g_j^0 为 j 个电源节点。

2.2 改进的凝聚算法

考虑边权重的社团结构划分结果更能反映电力网络的实际特性。边权重代表该边连接的两个节

点之间的紧密程度。考虑电力网络的线路长度及参数特性, 本文选取支路电抗的倒数作为边权重, 即

$$w_{ij} = \frac{1}{x_{ij}} \quad (9)$$

式中, x_{ij} 为节点 i 和 j 节点之间的电抗, 边权重越大, 则该支路连接的 2 个节点之间的紧密程度越高。

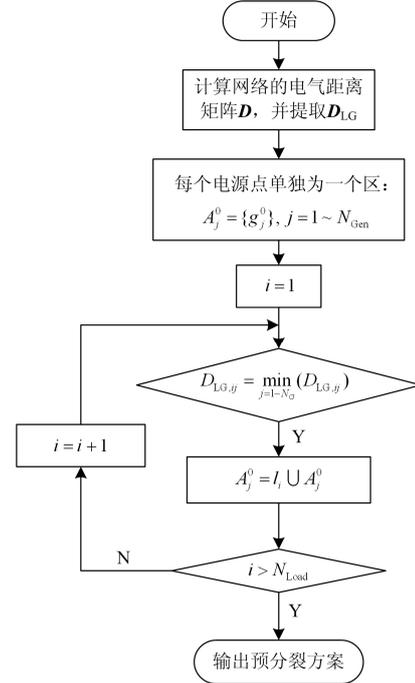


图 1 预分裂流程

Fig. 1 Pre-splitting process

本文利用模块度 Q 评价分区凝聚的优劣程度, 从而选择应该合并的分区。首先令迭代次数 $n=0$, 此时电网分区数等于其电源点数即 $N_{area} = N_{Gen}$, 计算初始分区模块度记为 Q^0 , 进而计算尝试合并任意两个分区 ($k=1, 2, \dots, N_{area}-1$) 和 ($m=k+1, k+2, \dots, N_{area}$) 后的模块度 $Q_{t,km}$, 若两个分区 k 和 m 合并后的主变容量 S_T 超过 $S_{T,max}$, 则令 $Q_{t,km}=0$, 这时不合并这两个分区, 以确保合并后分区主变容量不超过 $S_{T,max}$ 。通过上一步计算, 可以得到一个上三角矩阵 Q_t , 找到其最大值 $\max(Q_t)$ 所对应的坐标, 若其为 (p, q) , 则应合并 p 、 q 这两个分区, 即有 $A_p^n = A_p^n \cup A_q^n$ (A_p^n 和 A_q^n 分别为第 n 次迭代的分区 p 和 q 所含节点的集合), 再令 $N_{area} = N_{area} - 1$, $n=n+1$ 以及 $Q^n = \max(Q_t)$, 其中 Q^n 为第 n 次迭代后的模块度。重复以上过程, 直到所有分区合并后均出现 4 个电源点的分区(即 $\max(Q_t) = 0$) 为止。凝聚算法的流程如图 2 所示。

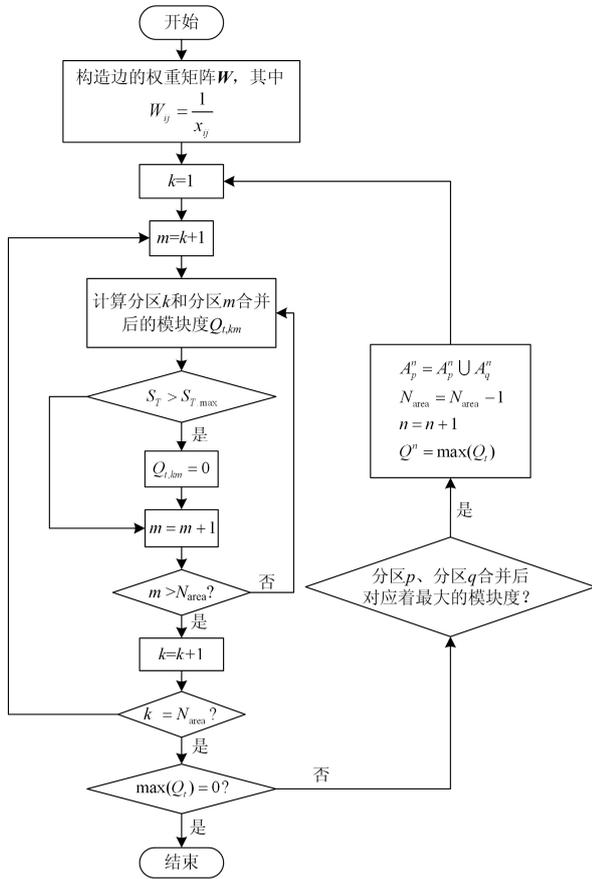


图2 凝聚算法流程

Fig. 2 Cohesion algorithm flow

2.3 解环算法

本文所提出的改进凝聚算法的核心是限制分区内 500 kV 主变容量以达到限制短路电流的目的, 从而确保供电安全性, 因此不将 220 kV 发电厂视为电源节点, 而只将其分配到与其电气距离最近的分区。电磁环网解环流程如图 3 所示。

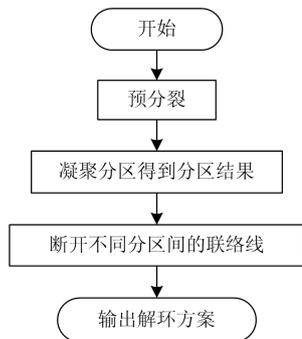


图3 电磁环网解环流程

Fig. 3 Electromagnetic ring network uncoupling process

3 算例分析

本文应用所提出的电磁环网解环方法对某地区

电网进行解环。该地区 220 kV 电网拓扑结构如图 4 所示, 其中有 4 座 500 kV 变电站, 分别为节点 1, 节点 10、11, 节点 27、28 和节点 34、35 所在的变电站。由于其中一座变电站只有 2 台 75 万 kW 主变, 不宜分母运行, 因而在算例中只作为 1 个节点(节点 1), 其余变电站均可以分母运行, 故视为 2 个节点。此外, 该地区还有 33 座 220 kV 变电站, 另有 3 座 220 kV 发电厂, 分别为节点 20、节点 21、22(2 台发电机分母运行)和节点 41。

利用电气距离矩阵预分裂后所得到的初始分区结果如表 2 所示, 分区凝聚过程如图 5 所示。

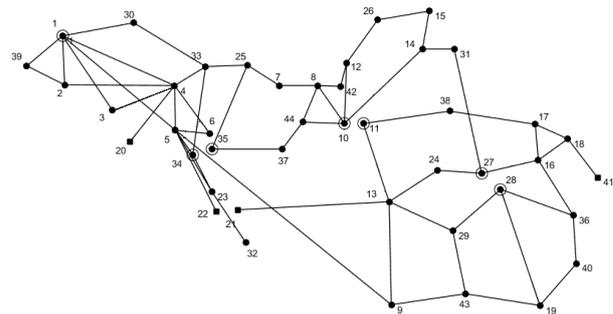


图4 某地区电网

Fig. 4 A regional power grid

表2 初始分区结果

Table 2 Initial partition results

| 分区号 | 电源节点号 | 负荷节点及 220 kV 发电厂节点号 |
|-----|-------|---------------------|
| 1 | 1 | 2、3、4、20、30、39 |
| 2 | 10 | 8、12、14、15、26、42、44 |
| 3 | 11 | 13、17、21、38 |
| 4 | 27 | 16、18、24、31、41 |
| 5 | 28 | 19、29、36、40、43 |
| 6 | 34 | 5、6、22、23、32、33、34 |
| 7 | 35 | 7、25、37 |

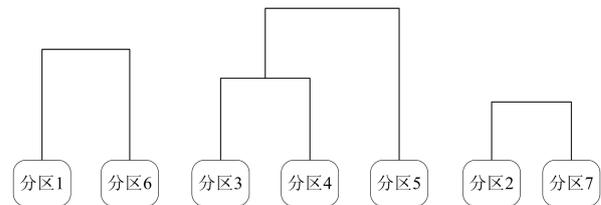


图5 分区凝聚过程

Fig. 5 A regional cohesion power grid

电网分区解环方案如图 6 所示, 其中分区 1 总负荷约为 308 万 kW, 由节点 1(2 台 75 万 kW 主变)和节点 34(2 台 100 万 kW 主变)供电, 供区内有节点 20 的 2 台 220 kV 机组(共计 60 万 kW)以及节点 22 的 1 台 66 万 kW 机组, 整个供区内 500 kV 主变容量为 350 万 kW, 220 kV 机组为 126 万 kW, 共

同向该地区内 308 万 kW 负荷供电, 分区内主变容量充足; 分区 2 总负荷约为 300 万 kW, 由节点 10(2 台 100 万 kW 主变)和节点 35(2 台 100 万 kW 主变)供电, 500 kV 容量能满足供电需求; 分区 3 总负荷约为 380 万 kW, 由节点 27、28(4 台 100 万 kW 主变)和节点 11(1 台 100 万 kW 主变)供电, 220 kV 机组有节点 41(1 台 66 万 kW 机组)和节点 21(1 台 66 万 kW 机组)。供区内主变容量充足。

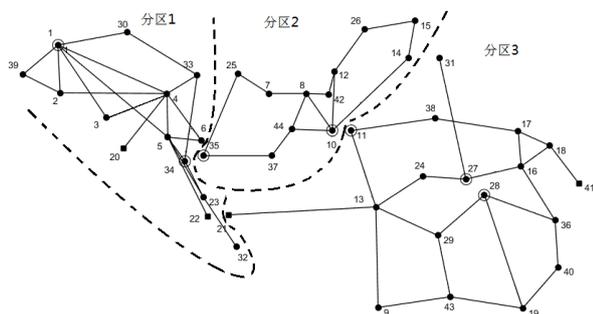


图 6 本文分区解环方案

Fig. 6 Partitioned loop solution

图 7 给出了该地区电网的经验分区方案。图 8 为采用映射分区算法[10]得到的分区方案, 该方案中只有节点 10 中的 2 台主变对分区 2 供电, 500 kV 主变容量不够充足, 明显劣于本文方案。

表 3 列出了本文所提出的分区方案、经验分区方案和映射分区方案的加权模块度指标, 由此可见, 本文所提出的分区方案加权模块度指标值最大, 这说明这种分区方法能够有效反映电力网络社团结构特性。

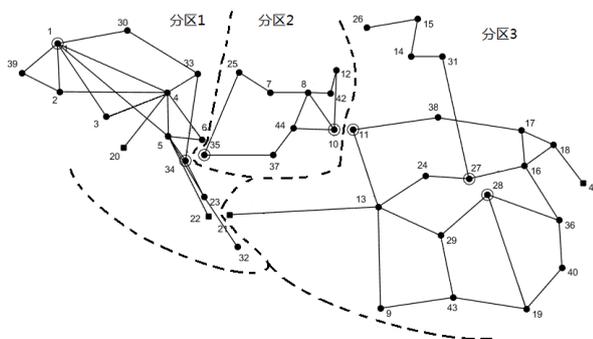


图 7 经验分区解环方案

Fig. 7 Empirical partition solution

表 3 三种分区解环方案的加权模块度指标

Table 3 Weighted modularity indicators for three partition resolving schemes

| 分区解环方案 | 加权模块度指标 |
|----------|---------|
| 本文分区解环方案 | 0.622 4 |
| 经验分区解环方案 | 0.542 1 |
| 映射分区解环方案 | 0.534 1 |

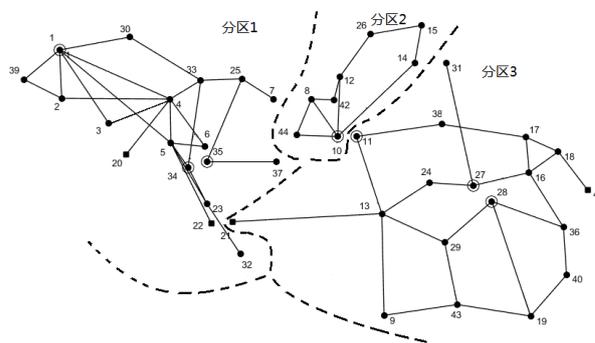


图 8 经验分区解环方案

Fig. 8 Partition de-looping scheme with map partition method

4 结论

本文对传统的凝聚算法作了改进并由此提出一种电磁环网解环方法。该方法采用电气距离矩阵对电网进行预分裂, 再基于改进的凝聚算法对预分裂后的分区进行合并, 最后得到解环方案。

本文所提方法可以将电磁环网运行方式下低电压等级网络划分成若干分区, 能够克服按照行政区或电网所属电力公司划分时主观因素占比较大的缺点, 所得到的解环方案比经验分区方法和映射分区方法能够更好地反映电网的社团结构特性。本文所提出的电磁环网解环方法所产生的每个分区都可形成以 2~3 座 500 kV 变电站为核心的供电方式, 考虑了变电站分母运行, 限制了各分区 500 kV 主变容量和短路电流, 确保解环后电网的供电安全性, 故而优越性更高。仿真结果表明, 本文的解环方法是有效且符合实际供电需求的。

参考文献

- [1] 唐文左. 电磁环网的最优解环方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
TANG Wenzuo. Research on the optimal solution method of electromagnetic ring network[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [2] 李通, 薛峰. 基于 Dijkstra 算法的电网分区方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 159-165.
LI Tong, XUE Feng. Power network partitioning method based on Dijkstra algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 159-165.
- [3] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 电力系统安全稳定导则: DL755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 1-5.
National Economic and Trade Commission of the People's Republic of China. Guidelines for safety and stability of power systems: DL755—2001[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 1-5.
- [4] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 一种大电网分区节点的快速选取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 116-121.
LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. A fast selection

- method of division node in large power grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 116-121.
- [5] 孔涛, 王洪涛, 刘玉田, 等. 500 kV-220 kV 电磁环网开环研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 13-16.
KONG Tao, WANG Hongtao, LIU Yutian, et al. On opening 500 kV-220 kV electromagnetic loop circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 13-16.
- [6] 吕凤磊, 李宏仲. 500/220 kV 电网的分区研究[J]. 上海电力学院学报, 2015, 31(3): 233-236.
LÜ Fenglei, LI Hongzhong. Research of 500/220 kV power grid partition[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2015, 31(3): 233-236.
- [7] LAGONOTTE P, SABONNADIÈRE J C, LEOST J Y, et al. Structural analysis of the electrical system: application to secondary voltage control in France[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 479-486.
- [8] 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.
- [9] 郭庆来, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.
GUO Qinglai, SUN Hongbin, ZHANG Boming, et al. Power network partitioning based on clustering analysis in Mvar control space[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 36-40.
- [10] 赵晋泉, 刘傅成, 邓勇, 等. 基于映射分区的无功电压控制分区算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(7): 36-39.
ZHAO Jinquan, LIU Fucheng, DENG Yong, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on a mapping division algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(7): 36-39.
- [11] 倪向萍, 阮前途, 梅生伟, 等. 基于复杂网络理论的无功分区算法及其在上海电网中的应用[J]. 电网技术, 2007, 31(9): 6-12.
NI Xiangping, RUAN Qiantu, MEI Shengwei, et al. A new network partitioning algorithm based on complex network theory and its application in Shanghai Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(9): 6-12.
- [12] 蓝海波, 范新桥, 张隽, 等. 基于分区等值模型的 500 kV 受端电网分区供电理论[J]. 中国电力, 2016, 48(2): 122-127.
LAN Haibo, FAN Xinqiao, ZHANG Jun, et al. Partition power supply theory of 500 kV receiving end grid based on partition equivalent model[J]. Electric Power, 2016, 48(2): 122-127.
- [13] 张祥成, 郭秋婷, 潘艳, 等. 750/330 kV 受端电网合理分区规模研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 137-142.
ZHANG Xiangcheng, GUO Qiuting, PAN Yan, et al. Study on reasonable zoning scale of 750/330 kV receiving power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 137-142.
- [14] 曹娜, 沈阅. 提高分区电网供电安全保障水平的分析[J]. 电力与能源, 2014, 35(5): 583-586.
CAO Na, SHEN Yue. Analysis of improving the security level of power supply in district power grid[J]. Electric Power & Energy, 2014, 35(5): 583-586.
- [15] 徐贤. 220 kV 电网短路电流预测的新方法及应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(16): 103-106.
XU Xian. A novel method for predicting short-circuit current of 220 kV sub-transmission network and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(16): 103-106.
- [16] 魏震波, 刘俊勇, 程飞, 等. 利用社区挖掘的快速无功电压分区方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 166-172.
WEI Zhenbo, LIU Junyong, CHENG Fei, et al. Fast power network partitioning method in Mvar control space based on community wining[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 166-172.
- [17] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 116-121.
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 116-121.
- [18] 杨冬, 刘玉田. 基于网络社团结构特性量化分析的电磁环网分区方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 66-71.
YANG Dong, LIU Yutian. Electromagnetic ring network partitioning method based on quantitative analysis of network community structure characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 66-71.
- [19] NEWMAN M E, GIRVAN M. Finding and evaluating community structure in networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 69(2): 026113.
- [20] NEWMAN M E J. Analysis of weighted networks[J]. Physical Review E Statistical Nonlinear & Soft Matter Physics, 2004, 70(5): 056131.

收稿日期: 2018-09-19; 修回日期: 2018-11-22

作者简介:

赵红生(1983—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划; E-mail: 183575350@qq.com

乔立(1988—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电网规划; E-mail: 604718648@qq.com

王博(1981—), 男, 工学博士, 高级工程师, 主要研究方向为电网规划. E-mail: 2293107@qq.com

(编辑 葛艳娜)