

DOI: 10.7667/PSPC171063

# 一种大电网分区节点的快速选取方法

刘辉, 刘强, 张立, 丁宁

(河北冀研能源科学技术研究院有限公司, 河北 石家庄 050051)

**摘要:** 针对网架结构和电气距离在电网分区中的重要作用, 提出了一种基于波纹扩散机理的大电网分区节点的快速选取方法。根据电力网络分区过程中是以高压变电站为支撑站点的特点以及波纹从中心源向外扩散时最先到达与中心源距离最短点的原则, 将电力网络转换成拓扑图。然后通过模拟波纹扩散过程搜索距离源点最短路径在规定的距离内的站点, 将符合要求的站点与源点划分至同一分区。最后以 500 kV/220 kV 电网为例, 选取 500 kV 站点为初始源点, 最终确定以 500 kV 站点为支撑的电网分区。IEEE 39 节点系统和华东地区某实际电网验证了所提方法的准确性和实用性。

**关键词:** 电网分区; 网架结构; 电气距离; 波纹扩散; 最短路径

## A Fast Selection Method of Division Node in Large Power Grid

LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, DING Ning

(Hebei Ji-Yan Energy Science and Technology Research Institute Co. Ltd, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** Regarding the important role of grid structure and electrical distance in power grid division, a fast selection method of power grid division node based on ripple diffusion mechanism is proposed. According to the characteristic that the high voltage substation is selected as the central point in the grid division and the principle that ripples first arrive at the shortest distance from the central source when they diffuse outward, firstly, the power network is transformed into a topological graph. Then, by simulating the ripple diffusion process, the points whose shortest path from the source node within the prescribed distance will be searched, and these nodes are partitioned into the same partition with the source node. Finally, taking 500 kV/220 kV power grid as an example, the 500 kV site is selected as the initial source node, and the grid division with the support of the 500 kV site is determined. The accuracy and practicability of the proposed method are verified by the IEEE39 node system and the actual power grid in East China.

**Key words:** power grid division; grid structure; electrical distance; ripple diffusion; shortest path

## 0 引言

随着用电需求的增加, 电网的网架结构日趋复杂, 对电网进行合理运行调度的困难程度也逐渐增大<sup>[1-2]</sup>。以前对于电网的分区, 主要是从地理、行政区域等角度进行划分, 而对网架结构本身没有考虑太多, 但是随着网架结构的发展完善, 问题逐渐显现出来, 网架结构错综复杂、站点间电气距离逐渐减小、短路电流超标严重<sup>[3-4]</sup>、连锁故障时有发生等。因此, 对电网结构进行合理的分区, 是保证电网正常运行、有效控制的前提条件。除此之外, 当电网结构发展到一定阶段的时候, 将电磁环网解开使电

网分层分区运行<sup>[5-6]</sup>也是以后电网的发展方向。

电网分区的目的是为了更好更快地迎合未来电网的发展趋势。电网分区的特征是各个分块内部联系较为紧密, 但是各个分区之间的联系就比较稀疏。通过系统联络线进行分区的连接, 既可保证分区之间的联系, 又可在某一分区出现大故障时及时断开联络线以避免波及相邻区间, 减小连锁故障发生的概率<sup>[7]</sup>。但在网架结构发展还不够完善的情况下, 分区完成后, 不同分区的低电压等级网架的联系被削弱, 当高压网架发生故障时, 将会造成大面积的功率缺额, 严重时可能会威胁电网的运行。因此, 应综合考虑当地网架的发展状况, 逐步进行分层分区运行<sup>[8-9]</sup>。

电网完成分层分区后, 高电压等级的输电线路

作为骨干网架,起到电压支撑的作用<sup>[10]</sup>。电压等级比较低的线路之间存在的联系进一步减少,它们主要是用于负荷供电。现在的关于电网分区的研究,很多都是把电气距离作为该课题研究的切入点。文献[11]以节点间电压—无功灵敏度作为节点间的电气距离,提出一种基于 D-S 证据理论的电网分区方法。文献[12]通过等值阻抗来衡量两个节点之间的电气距离,根据电网分区的原则,选择评判的指标,从而得到综合最优的分区方案。文献[13]利用复杂网络理论中社团发现方法与对实际电网分区极为相似的特点,将线路潮流和阻抗参数作为边权值建立网络模型进行分区处理。文献[14]借鉴物理学中场和势的概念,用电压对节点的影响来表征节点与周围的关联度,并且该方法可自动确定电网分区数目。文献[15]采用的是信息熵的理论,首先把节点间电压—电压灵敏度的对数值当作两点之间的电气距离的度量值,然后利用层次聚类与动态分散两者相结合的方式对网络中的节点聚类处理。

针对电网分区的目标以及现有处理方法的不足,本文将 500 kV 网架作为研究的主干网架,根据波纹扩散的机理,提出了一种新的电网分区方法。基于波纹扩散机理的电网分区方法可以很好地识别电气距离较为紧密的站点,同时通过编程可以实现多个站点同步进行分区,而且简单易实现,运算速度较快,对于规模较大、结构复杂的电网同样适用。在将电网转换成拓扑图后,采用波纹扩散机理,把 500 kV 站点作为波纹扩散的源点,模拟水面上的波纹传播,寻找距离源点电气距离符合要求的若干个站点,将符合要求的站点与初始源点划入同一分区。同时为了保证供电的可靠性,将两个相邻的 500 kV 变电站划到同一分区。

## 1 基于波纹扩散机理的最短路径搜索

### 1.1 波纹扩散的现象

水面上波纹向四周扩散<sup>[16-17]</sup>的过程可以描述为:当水面上布置许多露出水面的木桩时,向水中抛掷一块石头,石头的落水处作为源点,会向四周均匀的扩散出一系列的波纹。波纹如果在传播过程中遇到木桩后,会因为反射作用在反方向产生新的波纹。新波纹沿着自己的方向也向前传播。类似于接力,新旧波纹在障碍物的位置完成交接,开始了新的扩散。本文在进行电网分区时所寻找的最短路径问题可以看作某一个节点处的能量变化向外进行传播的过程。因此,可以采用波纹扩散的机理来解决电网分区中搜寻最短路径的问题。

水面波纹在向外扩散的过程中所体现的最优化

原理可以用来求解网络节点之间最短路径的问题<sup>[18-20]</sup>。水面上的波纹在均匀地向四周扩散的过程中会按照与源点距离远近的原则依次到达其他各个节点,即先到达与源点距离最小的位置。

### 1.2 波纹扩散的机理

采用波纹扩散机理搜索网络结构中最短路径的详细过程如下所述。

站点 1 作为源点、站点 5 为终点,假设所有线路权重皆为 1 作为研究问题的背景,如图 1(a)所示,现搜索两节点间的最短路径。

波纹是用同样的速度向四周传播的,当碰到障碍物后,产生的新波纹会沿着相邻的支路继续前行。初始波纹从源点向外传播的过程中会有许多波纹接力现象,而且路径基本都为曲线,为了便于研究分析,可以把这些路径等效为只有源波纹路过的直线路径。如图 1(b)等效直线路径概念图所示。

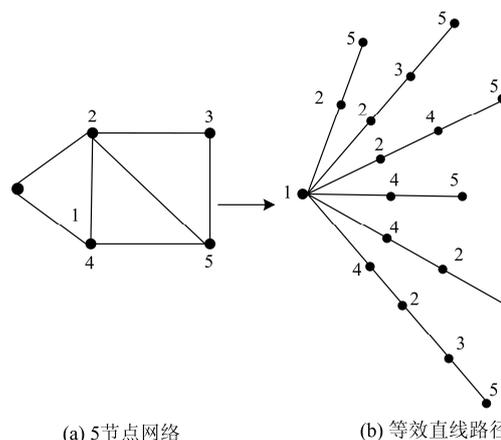


图 1 5 节点网络的等效路径

Fig. 1 Equivalent path of five node network

在图 2 中,点 1 为产生波纹源点,源波纹从源点出发,定速沿着源点及中间节点的相邻支路一直向外传播,直到终点 5。当目的节点首次有波纹到达时,搜索过程结束。通过查询最先到达目的节点的波纹路过的节点,就可以推断出最短路径是由哪些支路组成。图 2(a)是  $t=1$  的时候,此时的源波纹向前扩散了一个步长的距离,还没有抵达任何中间节点;图 2(b)表示  $t=2$  时,波纹已经过节点 2 和节点 4;之后波纹继续向前传播,当如图 2(c)中  $t=3$  所示时,源波纹从路径 1-2-5 和 1-4-5 分别抵达最终节点 5。因此波纹扩散可停止进行,最短路径即为 1-2-5 和 1-4-5。图 2(d)为波纹继续扩散图。在实际的电网结构当中,由于每条线路的权重值是不完全相同的,因此,像图 2 中这种出现两条最短路径的情况比较少见,大多数情况只有一条最短路径。

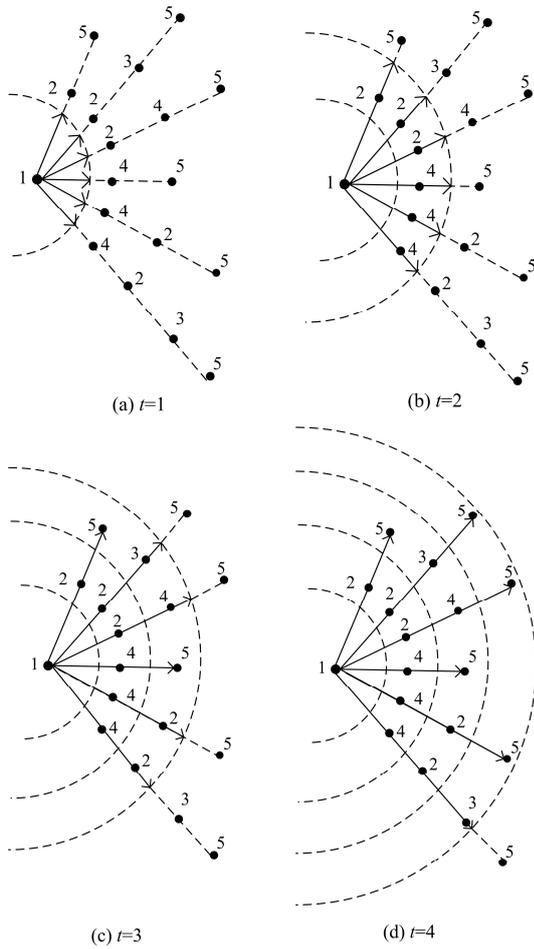


图 2 波纹随时间变化图

Fig. 2 Graph of ripple over time

### 2 波纹扩散机理在电网分区中的应用

电网分区后在分区内部，各个分块联系较为紧密，但是各个分区之间联系比较稀疏。所以，在对电网进行分区时，把 500 kV 网架作为主干网架，而且使每个分区内有 2 个或以上 500 kV 站作为相互备用。倘若分区内仅有一个 500 kV 变电站，无法满足上述要求，那么利用弱开环的方式，让该分区和相邻的 220 kV 分区相互备用。

下面对电网分区的步骤进行介绍。

(1) 首先找到网架结构中的 500 kV 站点，选取合适的 500 kV 站点作为电网分区后的支撑站点  $i$ ，并且选取的支撑点  $i$  也为最短路径搜索的源点。

(2) 锁定源点  $i$  以后，距离源点  $i$  由近至远的节点依次分别看成终端  $j$ 。然后应用最短路径搜索的方法求出各终点距离源点的最短路径电抗  $X_{ijmin}$ 。

(3) 将节点  $i$  作为源点，节点  $j$  作为终点取得的最短路径电抗  $X_{ijmin}$  与分区截止电抗  $X_M$  进行比较，如果  $X_M > X_{ijmin}$ ，则说明该终点到源点的电气距离较

近，在符合要求的范围内，将该节点划分至该电网分区中。

(4) 若某一节点距离选取的两个源点都符合电气要求，则将其划分至电气距离较近的源点确定的电网分区中。

基于波纹扩散机理的电网分区流程图如图 3 所示。

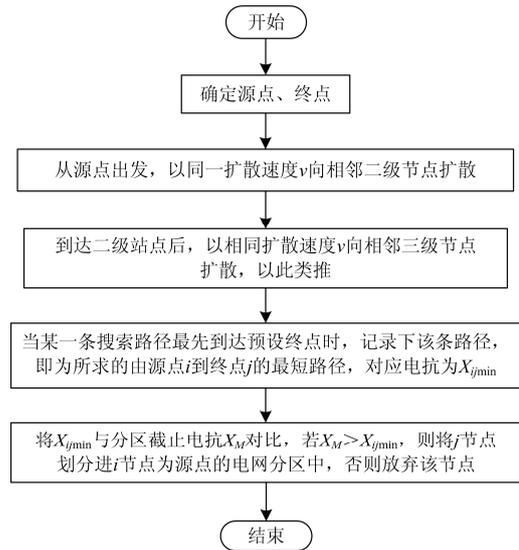


图 3 基于波纹扩散机理的分区流程图

Fig. 3 Partition flowchart based on the ripple diffusion mechanism

为便于描述，本文将源点定义为一节点，将与其相邻的节点定义为二级节点，然后以此类推。

值得一提的是，分区截止电抗  $X_M$  的取值较为关键，是根据网架结构的特性确定的，若  $X_M$  取值较小，则会有未被分区选中的剩余节点，若  $X_M$  取值较大，则会有较多被两个甚至多个源点所选中的节点，这些节点需要进行比较后再划分，使运算变得繁琐。 $X_M$  的取值由所要进行分区的实际网架决定。

### 3 算例分析

#### 3.1 IEEE39 节点系统

IEEE39 节点系统接线如图 4 所示，这个系统结构包含 39 个节点，46 条边，其中有 10 个节点表示发电机节点。还有 1 个负荷节点和 12 个变压器节点。

从 IEEE 新英格兰 39 节点参数中提取出线路和变压器参数，忽略线路电阻，选用线路电抗值作为边权值。由于电网分区过程中截止电抗选取的过大或过小都不适宜，经过反复验证，在保证没有剩余节点的情况下，截止电抗  $X_M$  取值为 0.3。采用 IEEE 39

节点系统对基于波纹扩散的电网分区方法的步骤进行验算, 消去悬挂节点, 其中选取的源点为 5、16、17 节点。因 IEEE 39 节点系统不是实际电网, 因此不考虑互为备用的情况, 只是应用该方法对分区的步骤进行验证。分区后的结果如图 5。

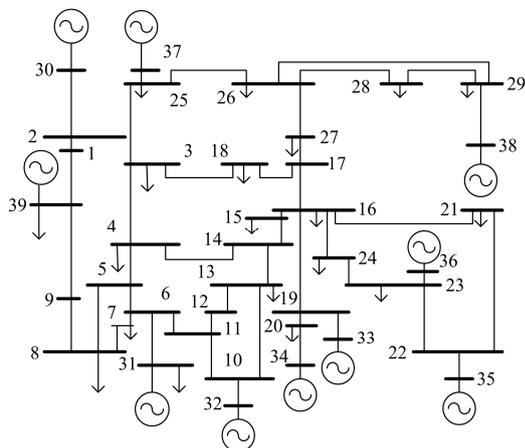


图 4 IEEE 39 节点系统接线

Fig. 4 IEEE 39 node system

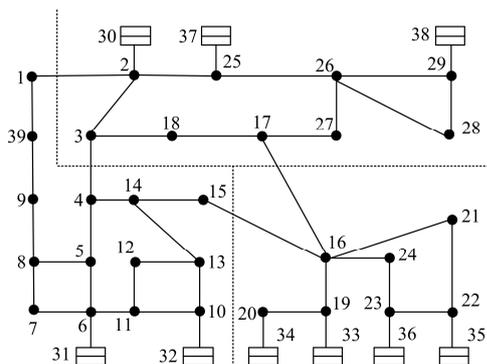


图 5 分区后的结构图

Fig. 5 Structure diagram of network partition

结论: 结合图 4、图 5 可知, 按地理位置进行分区划分与按基于波纹扩散机理的电网分区方法进行分区划分会有一些差别。在电网的实际架构中, 节点数目较多, 该方法可以有效地将电气联系紧密的站点划分为同一分区。

### 3.2 某地区实际电网

近些年, 华东某地区电网发展较为迅速, 同时也伴随着出现了电气距离缩短、潮流转移较大、短路电流超标、运行调度不方便等诸多问题。由于该地区网架发展已经较为完善, 故本文选取该地区电网进行分区规划。

调研所得数据为 PSD 电力系统分析软件中的该地区的基础数据, 在所得数据中找到\*.dat 潮流程序, 其中线路卡(L卡)中包含有线路电抗值, 变压器

卡(T卡)中包含有变压器电抗值, 均为标么值形式。根据所提供的线路和变压器电抗值, 在保证无剩余节点的前提下, 选取适合的参数作为截止电抗值, 本算例选取值为 1.5。选取 500 kV 站点为分区源点, 分别为 TYY、HLD、FJH、FRN、LT、GZD, 进行路径搜索结果如表 1 所示。

表 1 某实际电网络径搜索结果

Table 1 Path search results of practical power systems

分区源点	搜索节点
TYY	CL XT CZ ZXZ BFC
HLD	XT DG LSY FJZ
FJH	SC FG DFB TPZ
FRN	JGG QAS TG
LT	TY PYG WCS GM
GZD	SHR JSG

TYY 500 kV、LT 500 kV、HLD 500 kV、FRN 500 kV、FJH 500 kV、GZD 500 kV 为分区的源点, 并且为了保证电网供电的可靠性, 将两个 500 kV 站互相作为备用, 划分进同一分区, 整个网络最终分成了 3 个分区。具体的分区结果如图 6 所示。

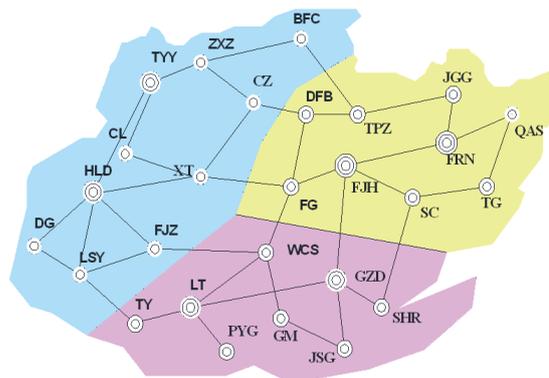


图 6 分区后电网图

Fig. 6 Power grid diagram before partition

结论: 应用所述方法对华东某地区进行分区划分, 并将两相邻的 500 kV 站点划分进同一分区。根据该地区现有的电网发展情况, 将该地区网架分为三个电网分区。通过分区可达到梳理网架结构, 便于运行调度的目的。同时电网分区后, 选择适合的分区联络线, 断开不再适合的线路, 也可达到降低短路电流的目的, 这将作为后续的研究。

## 4 结语

在电网的快速发展以及网架结构日趋复杂的同时, 过去电网分区的不足逐渐凸显出来。为此本文以电气距离为切入点, 提出了一种基于波纹扩散机理的电网分区节点快速选取方法。该方法利用波纹扩散的理论, 通过编程可快速实现最短路径的搜索,

找到距离源点电气距离符合要求的站点, 然后根据电气距离进行电网的区间划分。IEEE39 节点系统以及华东某地区电网的分区结果论证了所研究的方法对于电网分区具有较好的实用性。

### 参考文献

- [1] 鲁宗相. 电网复杂性及大停电事故的可靠性研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(12): 93-97.  
LU Zongxiang. Survey of the research on the complexity of power grids and reliability analysis of blackouts [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(12): 93-97.
- [2] 李鹏, 黄河, 吴小辰, 等. 中国与欧美输电网安全稳定标准比对[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 127-133.  
LI Peng, HUANG He, WU Xiaochen, et al. Comparison of security and stability standards of transmission network in China and EU & USA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 127-133.
- [3] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.  
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [4] 黄娟娟, 郑英芬. 特高压网架对华中电网短路电流水平的影响分析及限流措施[J]. 中国电力, 2007, 40(3): 49-52.  
HUANG Juanjuan, ZHENG Yingfen. Analysis of the influence of UHV on the short circuit current level of central China power grid and the current limiting measures[J]. Electric Power, 2007, 40(3): 49-52.
- [5] 孙艳, 凌武能, 李如琦, 等. 采用分布系数和相角匹配分析的电磁环网潮流监控形式[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 22-28.  
SUN Yan, LING Wuneng, LI Ruqi, et al. Power flow control of electromagnetic loop network based on distribution coefficient and phase angle matching analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 22-28.
- [6] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [7] 宋毅, 王成山. 一种电力系统连锁故障的概率风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 27-33.  
SONG Yi, WANG Chengshan. A probabilistic risk assessment method for cascading failure of power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 27-33.
- [8] 徐玉琴, 李文帅, 赵蓓蓓. 基于改进汽车接力模型的电网分区方法[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3546-3551.  
XU Yuqin, LI Wenshuai, ZHAO Beibei. Power network partitioning method based on improved automotive relay [J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3546-3551.
- [9] 杨秀媛, 董征, 唐宝, 等. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10.  
YANG Xiuyuan, DONG Zheng, TANG Bao, et al. Power network partitioning based on fuzzy clustering analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22): 6-10.
- [10] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.  
YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38.
- [11] 卢志刚, 秦四娟, 常磊, 等. 基于 Dempster-Shafer 证据理论的无功/电压控制分区[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 99-104.  
LU Zhigang, QIN Sijuan, CHANG Lei, et al. Network partitioning for reactive power/voltage control based on Dempster-Shafer evidences fusion[J]. Power System Technology, 2010, 34(10): 99-104.
- [12] MULLER N, QUINTANA V K. A sparse eigenvalue-based approach for partitioning power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4979-4987.
- [13] 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.
- [14] 许立雄, 刘俊勇, 刘洋, 等. 基于负荷电流场的电网分区方法[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 1039-1044.  
XU Lixiong, LIU Junyong, LIU Yang, et al. A load current field-based algorithm for partitioning power networks[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 1039-1044.
- [15] 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.
- [16] HU Xiaobing, WANG Ming, HU Di, et al. A

- ripple-spreading algorithm for the k shortest paths problem[C]//2012 Third Global Congress on Intelligent Systems, Nov. 6-8, 2012, Wuhan, China: 202-208.
- [17] HU Xiaobing, WANG Ming, Lesson M S, et al. Deterministic ripple-spreading model for complex networks[J]. Physical Review E, 2011, 83(4): 046123.
- [18] 刘小丽, 毛弋, 梁杉, 等. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121. LIU Xiaoli, MAO Ge, LIANG Shan, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 116-121.
- [19] 潘莉丽, 刘建华, 彭铖, 等. 电网结构发生变化时潮流转移的快速识别[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 117-120. PAN Lili, LIU Jianhua, PENG Cheng, et al. Fast recognition of power flow transferring under change of power network topology[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 117-120.
- [20] 黄飞, 宋璇坤, 周晖, 等. 基于效果与基础互动的电网智能化水平综合评价指标体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 142-148. HUANG Fei, SONG Xuankun, ZHOU Hui, et al. Study on the comprehensive evaluation index system of power grid intelligent level based on the interaction of effect and foundation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 142-148.

---

收稿日期: 2017-07-17; 修回日期: 2017-10-16

作者简介:

刘 辉(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、电网规划、分布式电源优化配置等;

刘 强(1988—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统自动化、高电压与绝缘技术、高电压实验技术;

张 立(1979—), 男, 工程师, 主要研究方向为高压设备绝缘状态评估、电力系统继电保护装置检测。

(编辑 张爱琴)