

## 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识

张富超<sup>1</sup>, 谢成荣<sup>2</sup>, 沈立新<sup>3</sup>, 张富春<sup>4</sup>, 黄家栋<sup>1</sup>, 刘金龙<sup>4</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网浙江绍兴市供电公司, 浙江 嵊州 312400; 3. 国网冀北电力有限公司卢龙供电公司, 河北 卢龙 066400; 4. 国网冀北电力有限公司秦皇岛供电公司, 河北 秦皇岛 066000)

**摘要:** 快速、准确和全面地辨识关键线路对预防连锁故障、保障电网安全稳定运行具有重要意义。提出一种基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识方法, 该方法首先建立电网有向加权拓扑模型, 然后基于源流路径链生成算法, 搜索源流节点间的所有潮流传输路径。根据输电介数的定义, 计算各线路的输电介数并排序, 按照排序结果辨识电网关键线路。最后, 通过对 IEEE39 节点的算例测试, 验证了所提算法的有效性和准确性。

**关键词:** 源流路径链; 输电介数; 关键线路; 连锁故障; 功率传输分布因子

### Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness

ZHANG Fuchao<sup>1</sup>, XIE Chengrong<sup>2</sup>, SHEN Lixin<sup>3</sup>, ZHANG Fuchun<sup>4</sup>, HUANG Jiadong<sup>1</sup>, LIU Jinlong<sup>4</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. State Grid Shengzhou Electric Power Company, Shengzhou 312400, China; 3. State Grid Lulong Electric Power Company, Lulong 066400, China; 4. State Grid Qinhuangdao Electric Power Company, Qinhuangdao 066000, China)

**Abstract:** Fast, accurate and comprehensive identification of the critical lines is important for preventing cascading failures and guaranteeing security and stability operation of grid. An identification method of the key lines in grid based on path chains and transmission betweenness is proposed, which firstly establishes an directed and weighted topological model, and then searches for power transmission path between sources and flows based on path chains generation. The transmission betweenness value of each line is calculated and sorted according to the definition of transmission betweenness and the critical lines are identified according to the sorting results. Finally, the analysis results of IEEE-39 verify the validity and accuracy of the proposed algorithm.

**Key words:** path chain between sources and flows; transmission betweenness; critical lines; cascading failures; power transmission distribution factor

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)21-0007-06

## 0 引言

近年来, 国内外发生的大面积停电事故多是由于电网连锁故障引发的<sup>[1-3]</sup>, 事故初期主要表现为少量元件相继开断, 而在事故扩大阶段则与电网的关键线路紧密相关。因此, 快速准确地辨识电网的关键线路对电网的调度与控制、预防连锁故障的发生具有重要意义。

目前, 主要的研究方法是基于复杂网络理论<sup>[4-10]</sup>通过电网脆弱性评估辨识电网的关键环节。文献[11]提出了基于电路方程计算得出的线路电气介数, 并将其作为关键性指标识别电力系统中的关键线路。

该方法克服了假设潮流沿着源流节点间最短路径传输的缺陷, 但是假设电源与负荷节点对之间的潮流传输经由所有线路, 这与电力系统中电源向负荷传输只沿着某些线路的实际情况不符。文献[12]在文献[11]的基础上做出了一些改进, 提出有向电气介数指标, 并将其用于电力系统中脆弱线路的选取, 但该方法在模型中假设发生连锁故障时, 有向电气介数最大的线路必然发生故障, 这与实际情况不符。文献[13]综合功率传输关系、电网拓扑结构和系统运行状态, 提出了功率介数的概念, 并将其用于电网关键环节辨识。该方法综合考虑了电网拓扑结构和系统运行状态定量评估线路的关键性, 避免了单

一从结构性视角和运行状态视角对电网进行评估导致的评估结果的片面化的缺点，但是该方法在线路功率介数计算过程中，发电机因子和负荷因子的权重取值具有一定的主观性，其取值的变化，将会影响线路功率介数值，对线路关键性评估有干扰。

鉴于现有研究的不足，本文提出基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识方法，该方法建立了电网有向加权拓扑模型，利用源流路径链生成算法，快速、准确和全面地求取电源-负荷节点间潮流传输的所有可能路径，且输电介数指标能够综合反映功率传输、电网拓扑结构和系统运行状态，其物理背景更贴合电力系统的实际。

### 1 电网有向加权拓扑模型的建立

现有电网关键环节辨识多是基于图论知识<sup>[14]</sup>建立无向加权模型，无向使得网络拓扑图的邻接矩阵总为对称矩阵，而实际电网是由发电机、变压器、输电线路、母线等一次设备组成的复杂网络，当电网的结构、运行方式确定后，系统的运行状态是确定的，也就是说线路传输的潮流是具有方向性的。因此，本文基于图论基本理论将电网的支路抽象为图中的边，将母线抽象为图中的节点，以有功潮流的传输方向为支路方向，以线路电抗为变的权值，建立电力网络对应的有向拓扑模型更加符合电网自身实际特性。

建模过程中对复杂的实际电网进行了适当简化，其简化条件如下：1) 仅将输电网作为研究对象，而不考虑配电网，发电厂以及变电站的内部主接线也暂不考虑；2) 划分电网节点为源节点、联络节点和流节点，只计算源流节点对间的潮流传输容量；3) 将同杆并架的输电线路进行合并，忽略并联电容支路，避免自环或多重边的出现，使模型成为简单图。

简单示例系统如图 1 所示，按照上述方法建立该系统当前运行状态下的电网有向加权拓扑模型如图 2 所示。

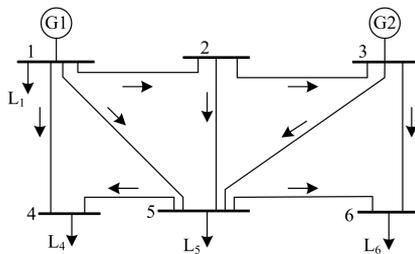


图 1 简单示例系统

Fig. 1 A simple example system

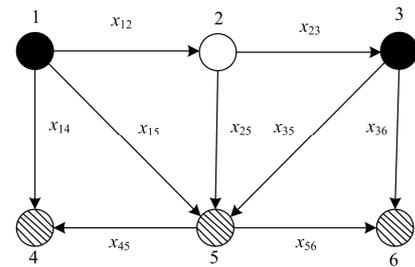


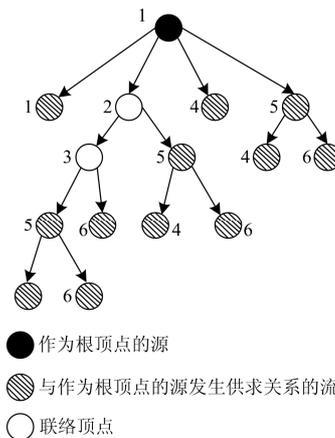
图 2 有向加权拓扑模型

Fig. 2 Directed and weighted topological model

### 2 源流路径链生成算法

所谓源流路径链是指以源节点为始点以流节点为终点的中间无分叉的有向通路，有向通路中所包含的所有支路为源流路径链的组成支路。

基于电力系统网络拓扑模型，分析某一源的送电路径可得，当潮流从源出发经多条传输路径输送到与之相关的流节点，即生成了从源节点到流节点的源流路径链集合。在电网有向加权模型中，可将这种源流路径链集合抽象为图的一棵有向生成树，将源节点作为树的根，流节点作为树的叶，联络节点作为树的分支节点，送电支路作为树的枝。对图 2 所示有向加权拓扑模型的源节点 1 经过拓扑分析得到的有向生成树如图 3 所示。



● 作为根顶点的源  
 ⊘ 与作为根顶点的源发生供求关系的流  
 ○ 联络顶点

图 3 源 1 作为根顶点的有向生成树

Fig. 3 Directed spanning tree with source 1 as the root

基于源流路径链的定义，其具体获取方法<sup>[15]</sup>如下：1) 对电力网络的拓扑结构进行分析，确定电源节点的数目，以所有的电源节点为根节点，逐一进行源流路径搜索，得到的所有的源流路径树即为全网源流路径集合；2) 选定某棵特定的源流路径树，从根节点开始进行遍历搜索，首先遍历第二层的所有节点，若第二层中某节点是流节点，则说明该节

点没有送电支路, 停止搜索, 连接该流节点与根节点构成了一条源流路径链, 将其放入预先定义的源流路径集中; 若第二层中某节点非流节点, 则记录该节点与根节点之间的支路, 并且准备继续搜索该节点的送电支路; 3) 完成对第二层节点的遍历搜索后, 以第二层各节点为根节点重复上述操作, 逐层遍历; 4) 当遍历到某个节点后, 整个源流路径树再次生成时, 结束源流路径链搜索, 至此就获得了对应该树的所有源流路径链; 5) 对电力网络中所有的源流路径树进行上述操作, 就可以得到整个网络中的所有源流路径链。获取图 3 所示有向生成树(1,4)源流节点对间的全部源流路径链如图 4 所示。

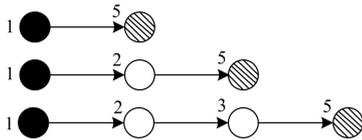


图 4 源流节点对(1,5)间的路径链

Fig. 4 Path chains between source 1 and flow 5

### 3 电网关键线路辨识

#### 3.1 功率传输分布因子

电力市场环境下, 源流节点对之间往往存在购售电合同, 当合同发生变化时, 电力系统的运行状态可能要随之发生变化, 引起系统中功率的重新分配。因此, 定义功率传输分布因子(Power Transmission Distribution Factor, PTDF)为源流节点对之间传输功率变化导致支路传输功率的变化量<sup>[16]</sup>。

本文采用直流功率传输分布因子, 假设电力网络中源节点  $s$  与流节点  $t$  之间存在电能交易, 交易引起线路  $i-j$  传输的功率变化, 可以通过式(1)计算得到线路的直流传输分布因子。

$$a_{st} = \frac{X_{is} - X_{js} - X_{it} + X_{jt}}{x_{ij}} \quad (1)$$

式中:  $X_{is}$  为电网阻抗矩阵中的第  $i$  行  $s$  列元素,  $X_{it}$ ,  $X_{js}$ ,  $X_{jt}$  类同;  $x_{ij}$  为支路  $i-j$  的电抗值;  $a_{st}$  为节点对  $(s, t)$  之间单位功率交易在支路  $i-j$  上引起的功率传输变化量。

式(1)的物理意义为: 功率传输分布因子量化了源流节点对  $(s, t)$  之间的功率传输对各支路的利用情况, 其大小表明各支路对潮流传输贡献的灵敏度, 主要受电网结构影响, 反映电力网自身的结构属性。需要强调的是, 同一条线路, 对不同源流节点对之间功率传输的功率传输分布因子是不同的。

#### 3.2 源流节点对间的传输容量

定义单一源流节点对间的传输容量为

$$C_{st} = \min_{m \in L} \frac{P(m)}{|a_{st}(m)|} \quad (2)$$

式中:  $P(m)$  为线路  $m$  在系统当前运行方式下传输的有功功率;  $L$  为输电线路集合;  $m$  为源流节点对  $(s, t)$  之间的各源流路径链的组成支路。

式(2)的物理意义为: 仅从源节点  $s$  注入有功功率、流节点  $t$  吸收有功功率, 当传输功率不断增加直至电网中某条线路最先达到当前潮流时的注入有功功率。该指标反映了源流节点对  $(s, t)$  在当前潮流分布限制下的传输容量, 其大小由网络拓扑结构和潮流分布共同决定。

#### 3.3 输电介数

线路介数是指被网络中所有发电机与负荷节点之间最短路径经过的次数<sup>[8]</sup>。本文借鉴线路介数的概念, 综合考虑电网的拓扑结构和运行方式, 从电网源流节点对输电能力的角度出发, 定义全局线路  $l$  的输电介数指标为

$$B_l = \sum_{i \in G, j \in D} C_{st} |a_{st}(l)| \quad (3)$$

式中:  $G$  为发电机节点集合;  $D$  为负荷节点集合。

由功率传输分布因子和传输容量的物理意义可知, 输电介数能够同时反映电网拓扑结构和系统当前运行状态, 比线路介数、线路加权介数和电气介数等指标<sup>[17-19]</sup>更能准确、全面地辨识电网的关键线路。

#### 3.4 电网关键线路辨识流程

基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识流程如图 5 所示。

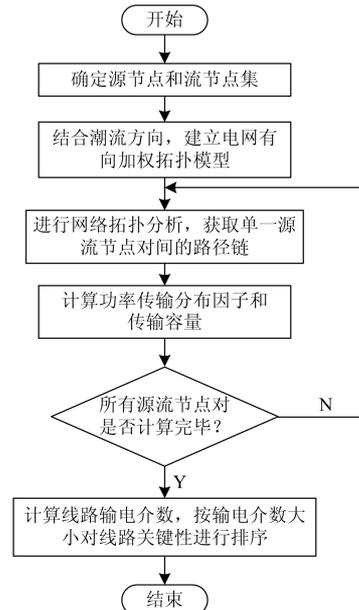


图 5 电网关键线路辨识流程图

Fig. 5 A flowchart of critical lines identification

### 4 算例分析

为验证本文所提方法的正确性和有效性，以北美新英格兰州的一个区域电力网—IEEE39 节点系统作为算例，其系统接线图如图 6 所示，系统参数参考文献[20]。该算例系统包含 10 台发电机，19 个负荷节点和 46 条线路，其中，发电机 G31 为该系统的平衡机。

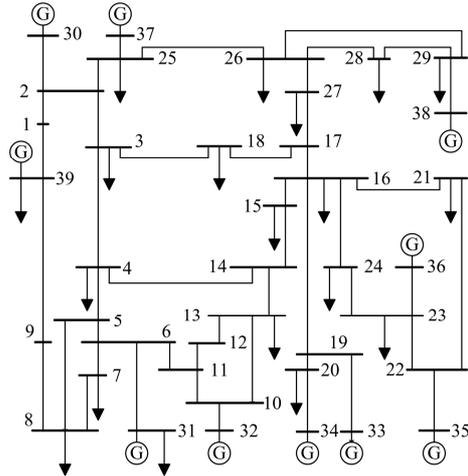


图 6 IEEE 39 节点系统接线图

Fig. 6 Connection diagram of IEEE 39-bus system

利用本文所提算法进行 Matlab 编程，计算各输电线路的输电介数，根据线路输电介数指标的大小进行排序，由于篇幅有限，只列出指标比较大的线路。本文基于输电介数的 IEEE39 节点系统的关键线路辨识结果如表 1 所示。

由表 1 所示结果可以得出，发电机的出口线路输电介数较大，排序较靠前，多为电网的关键线路。由图 6 可知这些线路均为发电机功率输出的唯一通道，其故障将直接导致发电机的功率不能外送，造成系统局部区域功率缺额。以线路 38-29 为例，其连接的发电机发电 G38 容量 830 MW，容量较大，占系统总发电量的 13.2%，属重载线路且为发电机 G38 功率外送的唯一输电通道，若发生故障将导致系统大功率缺额，系统不能稳定运行。所以，该线路在电网拓扑结构和维持系统的正常运行状态中都占有重要位置，将其列为关键线路符合系统实际。

除了各发电机的出口线路外，其余关键线路也多处于电网的重要输电通道上，其故障会直接导致输电通道的中断，部分区域功率供给不足，系统发生功角失稳。比如线路 16-17、19-16 和 16-15，这些线路一旦故障，将直接导致发电机 G33、G34、G35 和 G36 的功率外送通道中断或解列为辐射网，系统受到严重破坏而失去稳定。

表 1 关键线路辨识结果

Table 1 Identification result of critical lines

排序	线路	输电介数
1	38-29	1 524
2	22-21	1 321
3	16-17	1 085
4	6-7	1 019
5	37-25	800
6	36-23	708
7	2-3	671
8	17-18	654
9	21-16	625
10	31-6	597
11	19-16	586
12	30-2	554
13	17-27	508
14	32-10	505
15	10-11	503
16	35-22	472
17	33-19	467
18	10-13	418
19	23-24	401
20	25-2	400
21	16-15	400

将本文方法辨识出的关键线路，与基于电气介数方法<sup>[11-12]</sup>和功率介数方法<sup>[13]</sup>辨识出的关键线路绝大多数相同，只是在排序结果上略有不同，差异主要来自模型考虑的因素不同，而本文提出的输电介数指标能够综合电网的拓扑结构和系统运行状态辨识出电网的关键线路，能很好地适应复杂多变的大电网，为有效预防连锁故障的发生提供重要参考。

为进一步验证本文所提方法的正确性和有效性，选择三种策略对网络进行攻击，并通过网络效能<sup>[17]</sup>指标表征不同攻击方式下的网络状态变化。策略 1 为每次随机开断一条线路，共进行 10 次攻击，每次攻击后计算网络效能；策略 2 为依次开断电气介数<sup>[9]</sup>最高的 10 条线路，每次攻击后计算网络效能；策略 3 为依次开断输电介数最高的 10 条线路，每次攻击后计算网络效能。三种不同攻击方式下的网络变化如图 7 所示。

由图 7 可以看出，与随机攻击方式相比，输电介数攻击方式下的网络效能下降速度很快，表明输电介数高的线路对电网影响很大，将其作为电网中的关键线路是合理的；与电气介数攻击方式相比，输电介数攻击方式下的网络效能曲线均位于电气介

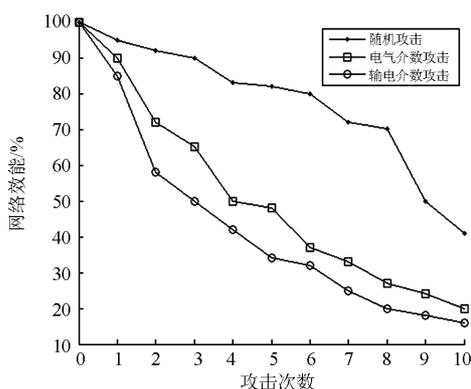


图 7 不同攻击方式下的网络状态变化

Fig. 7 Grid indices under different attack models

数攻击对应的网络效能曲线之下, 表明采用输电介数确定的关键线路比采用电气介数确定的关键线路更有效。综上所述, 根据输电介数指标排序确定电网中的关键线路的做法是正确的、有效的。

## 5 结论

本文提出基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识方法, 为快速准确辨识电网关键线路提供了新的思路, 其优越性在于:

1) 基于电网拓扑结构和当前运行状态, 建立有向加权拓扑模型, 该模型更符合电网自身实际特性。

2) 利用源流路径链生成算法能够快速、准确和全面地求取在电力系统实际运行下的电能传输路径, 克服了潮流沿源流节点间最短路径传输问题的缺陷。

3) 提出的输电介数指标能够综合反映线路对源流节点间潮流传输的影响, 从电网拓扑结构和运行状态角度定量评估线路在电网中的关键性, 克服了单一从电网拓扑结构或运行状态角度辨识关键线路的缺点。

## 参考文献

- [1] CAMERAS B A, LYNCH V E, DOBSSON I, et al. Complex dynamics of blackouts in power transmission system[J]. *Chaos*, 2004, 14(3): 643-652.
- [2] KINNEY R, CRUCITTI P, ALBERT R, et al. Modeling cascading failures in the North American power grid[J]. *The European Physical Journal*, 2005, 46(1): 101-107.
- [3] 张良栋, 石辉, 张勇军. 电网事故原因分类浅析及其预防策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(4): 130-133, 150.  
ZHANG Liangdong, SHI Hui, ZHANG Yongjun. Analysis of causes and prevention methods for power

network accidents[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(4): 130-133, 150.

- [4] ALBERT R, JEONG H, BARABASI A L. Error and attack tolerance of complex networks[J]. *Nature*, 2000, 406(6794): 378-382.
- [5] WATTS D J, DODDS P S, NEWMAN M E J. Identity and search in social networks[J]. *Science*, 2002, 296(5571): 1302-1305.
- [6] DODDS P S, MUHAMAD R, WATTS D J. An experimental study of search in global social networks[J]. *Science*, 2003, 301(5634): 827-829.
- [7] NEWMAN M E J. The structure and function of complex networks[J]. *Nature*, 2003, 425(2): 167-256.
- [8] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. *电力自动化设备*, 2006, 26(12): 1-5, 31.  
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2006, 26(12): 1-5, 31.
- [9] 梁颖, 方瑞明, 卢小芬, 等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(20): 151-155.  
LIANG Ying, FANG Ruiming, LU Xiaofen, et al. Research status of power system vulnerable line identification based on complex-network theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(20): 151-155.
- [10] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(9): 6-12.  
JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(9): 6-12.
- [11] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(1): 33-39.  
XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2010, 30(1): 33-39.
- [12] 程临燕, 张保会, 李光辉, 等. 采用有向电气介数的脆弱线路选取[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(6): 91-96.  
CHENG Linyan, ZHANG Baohui, LI Guanghui, et al. Search for vulnerable line based on directed electric

- betweenness[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 45(6): 91-96.
- [13] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1907-1913.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1907-1913.
- [14] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 24-27.
- [15] 陈彬, 于继来. 电力网络拓扑分析与源流路径链生成算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 25-31.  
CHEN Bin, YU Jilai. Algorithm of power network topology analysis and path chains generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(1): 25-31.
- [16] 华科, 谢开, 郭志忠. 采用直流和交流功率传输分布因子的输电权交易[J]. 电网技术, 2007, 31(13): 71-74.  
HUA Ke, XIE Kai, GUO Zhizhong. Research on power flow-based transmission right transaction by use of DC and AC power transfer distribution factor[J]. Power System Technology, 2007, 31(13): 71-74.
- [17] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 89-93, 100.  
LIU Yaonian, ZHU Xi, KANG Kefei, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-93, 100.
- [18] 何俊, 庞松龄, 禹冰, 等. 基于容量介数指标的电网脆弱性线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 30-35.  
HE Jun, PANG Songling, YU Bing, et al. Vulnerable line identification of power grid based on capacity betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 30-35.
- [19] 王仁伟, 张友刚, 杨阳, 等. 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 40(20): 1-6.  
WANG Renwei, ZHANG Yougang, YANG Yang, et al. Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 1-6.
- [20] PADIYAR K P. Power system dynamics stability and control[M]. Kent, UK: J Wiley Press, 1996.

收稿日期: 2015-03-03; 修回日期: 2015-07-02

作者简介:

张富超(1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及电力系统安全控制; E-mail: 645529490@qq.com

谢成荣(1962-), 男, 工程师, 研究方向为配电网建设运行维护以及智能配电网建设等; E-mail: syxiecr@163.com

沈立新(1975-), 男, 本科, 研究方向为电力工程及自动化、生产管理等。

(编辑 周金梅)