

# 基于多元统计分析方法的电网故障区域界定方法研究

徐岩<sup>1</sup>, 吴丹<sup>2</sup>, 张亚刚<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 河北省电力勘测设计研究院, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 提出了一种针对广域后备保护的故障区域的概念和新的基于广域测量系统 (Wide Area Measurement System, WAMS) 的故障区域界定方法。应用多元统计分析方法中的均值是否相等的 F 检验方法界定出: 后备保护加速区和后备保护闭锁区。该方法基于新的电力系统监控平台, 利用电压、电流量等电气量信息, 区域界定准确有效, 具有实时性、全局性等特点, 可在故障发生后, 后备保护动作前定位出故障区域, 为广域后备保护提供了更好的实现前提。

**关键词:** 故障区域界定; 多元统计分析方法; WAMS

## Method research of fault area location of power grid based on multivariate analysis

XU Yan<sup>1</sup>, WU Dan<sup>2</sup>, ZHANG Ya-gang<sup>1</sup>

(1. Lab of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Electric Power Design and Research Institute, Shijiazhuang 050031, China)

**Abstract:** This paper defines fault area for the wide area backup protection and puts forward a new method for fault area location based on WAMS (Wide Area Measurement System) system. It uses F testing algorithm (mean value equal or not) in multivariate statistical analysis to locate the backup protection speeding area and its locked area. Based on new power system monitoring system and using electrical quantity information like voltage and current vector, etc, this method can locate the fault area accurately and effectively and is real-time and global. It can locate fault area before the action of backup protection, which offers good preparation for the wide area backup protection.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No.50837002).

**Key words:** fault area location; multivariate statistical analysis; WAMS

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0034-04

## 0 引言

近些年来多起国内外大停电事故调查表明, 在事故的发展过程中潮流转移和保护的不合理动作导致的连锁跳闸, 是最终形成伴随各种失稳现象的大停电事故的根源<sup>[1-2]</sup>。同时, 主保护拒动时后备保护动作时限过长, 导致高压电网中故障切除时间无法满足要求, 也时时威胁着大电网的安全稳定运行。如何实现后备保护的在线自适应整定, 或者适当时候闭锁之同时进行切机切负荷等全局性的调配<sup>[3]</sup>, 以保证大电网的安全, 成为我们面临的新问题。基于 WAMS 系统的<sup>[4-5]</sup>, 广域后备保护系统可采集多

点信息, 不必牺牲动作时间来保证选择性, 它可以根据广域信息对故障定位, 克服主保护拒动、断路器失灵等情况下后备保护动作时间过长、停电范围扩大的问题; 还可以防止故障后相邻线路过负荷导致后备保护误动的现象。即: 可以很好地解决后备保护动作时限长、潮流转移时易误动的问题, 保证大电网的安全稳定运行。但是, 广域后备保护的实现前提是: 初始故障元件及故障区域被准确界定。本文提出一种利用 WAMS 系统提供的信息, 基于多元统计分析方法的电网故障区域界定方法。可以准确地界定故障区域, 为广域后备保护提供了可靠前提。

## 1 故障区域的概念

本文所说的故障区域包括两个概念: 1) 故障发

**基金项目:** 国家自然科学基金重点项目 (50837002); 河北省教育厅科学研究计划项目 (Z2009450)

生后故障切除前的影响区域; 2) 故障切除后潮流转移引起的故障影响区域。本文分别称其为: 后备保护加速区; 后备保护闭锁区(此处的后备保护为远后备保护)。

系统发生故障后, 若主保护拒动, 没能快速准确地切除故障, 并且这种原因是由于断路器拒动或二次直流消失引起的, 则需要远后备保护来切除故障。传统的保护, 每个继电器作为哪些元件的远后备是根据系统结构确定的, 其动作的选择性完全由动作时限的配合来保证。此种方式配合关系复杂, 动作时间长, 远远不能满足高压系统继电保护装置动作的快速性要求<sup>[6-8]</sup>。在这种情况下, 本文提出的方法可实时在线确定出故障发生后故障切除前的影响区域, 即: 后备保护加速区。并可实时监测故障是否消失, 若主保护和近后备保护的動作时限内故障未消失, 则直接加速远后备保护, 从而快速切除故障。

若主保护可以快速准确地切除故障, 则应考虑由于故障切除引起的潮流转移对系统中其他元件的影响, 需要进行预防连锁跳闸的后备保护闭锁及切机切负荷等全局性控制策略<sup>[9]</sup>。此时需要定位的故障区域即为: 故障切除后潮流转移引起的故障影响区域。即: 后备保护闭锁区域。

本文将如何确定以上两种故障区域进行说明及验证。

## 2 基于多元统计分析方法的电网故障区域界定方法

### 2.1 均值是否相等的 F 检验方法介绍

多元统计分析方法中的均值检验的思想沿袭一元统计中的检验概念, 即为: 对于两总体均值是否相等的检验。一般提出原假设  $H_0$ : 为两总体的均值是相等的; 备择假设  $H_1$ : 两总体均值不相等。如果  $H_0$  被否定则说明两个总体  $G_1$  和  $G_2$  确实可以区分 ( $G_1, G_2$  为  $m$  维总体), 如果  $H_0$  不能被拒绝则说明两总体的均值差异不显著。本文利用多元统计分析当中对于均值是否相等的 F 检验的方法, 以标志各元件特征的电气量值作为样本点, 界定故障区域。

依一元总体的方差未知时的均值是否相等的检验过程, 和威沙特<sup>[10]</sup>变量的可加性可知, 检验统计量取为:

$$F = \frac{(n+m-2) - p+1}{(n+m-2) \cdot p} T^2 \sim F(p, n+m-p-1) \quad (1)$$

$F$  统计量是假设  $H_0$  的似然比统计量。本文中结

合马氏距离计算  $F$  统计量的公式为:

$$F = \frac{(n_1+n_2-m-1)n_1n_2}{m(n_1+n_2)(n_1+n_2-2)} d^2(1,2) \quad (2)$$

式中:  $n_1, n_2$  为总体  $G_1$  和  $G_2$  的样本点数;  $m$  为样本维数;  $d^2(1,2)$  为两总体间的马氏距离<sup>[10]</sup>。

由观测样本计算  $F$  统计量的值:  $f$  在给定的显著性水平  $\alpha$  下计算显著性概率值  $p: p=P\{F \geq f\}$  若  $p < \alpha$  则否定  $H_0$ , 说明两总体均值差异显著。

### 2.2 电网故障区域界定方法

当电力系统中某元件发生故障时, 故障元件的电气量将会发生明显的变化。例如, 电压降低、电流增大等, 其相邻元件也可能会受影响。在一定的显著性水平下挑选出故障后电气量变化显著的元件组成元件组, 其中包含的元件即为故障区域中的元件。所以, 我们依次假设每个元件为故障元件, 利用该元件故障后的电气量变化值形成总体  $G_1$ , 系统其他元件电气量变化值形成总体  $G_2$ , 利用多元统计分析中的均值检验思想, 检验其均值差异性。如果该元件实为故障元件  $G_1, G_2$  均值必然有显著差异。则原假设  $H_0$ : 为两总体的均值是相等的, 被拒绝, 即:  $p < \alpha$ , 当显著性水平  $\alpha$  适当选取(在统计学中本文所用方法的显著性水平值通常取 0.05 或 0.1, 经多次仿真验证后, 本文选取  $\alpha$  为 0.1) 之后, 故障后所有电气量变化显著的元件均可检验出来, 从而获得故障区域界定的结果。

如果把故障的切除导致的某条线路无法供电和系统发生故障, 统一考虑会造成系统电气量信息变化的扰动, 上文提及的后备保护加速区和后备保护闭锁区这两种故障区域则可用一种方法来确定出来了, 只是随着不同性质的扰动发生的时间不同所选的表征系统运行状态的电气量信息的时标不同而已。例如: 系统中在第 0 周波时发生某线路单项短路故障, 该故障由主保护在第 1 周波时切除。利用故障发生后 0~1 周波的电气量信息值则可确定出后备保护加速区, 利用故障切除后 1~2 周波的电气量信息值则可确定出后备保护闭锁区。

电网故障区域界定方法流程图见图 1。

## 3 算例验证

本文以 IEEE39 节点系统(系统图见图 1) 为例进行了故障区域界定的仿真验证, 结果与初始故障设置相符, 同时对不同元件的多种故障进行多次验证, 充分证明本文提出方法的适用性及可靠性, 并选出合适标准, 即: 显著性水平  $\alpha$  值。

### 3.1 以 IEEE39 节点系统为例说明方法应用过程

以 IEEE39 节点系统 BUS-17~BUS-18 首端发生单相短路后，主保护在第 1 周波动作切除故障的情况为例，确定出后备保护加速区域及后备保护闭锁区域。说明方法如何应用。

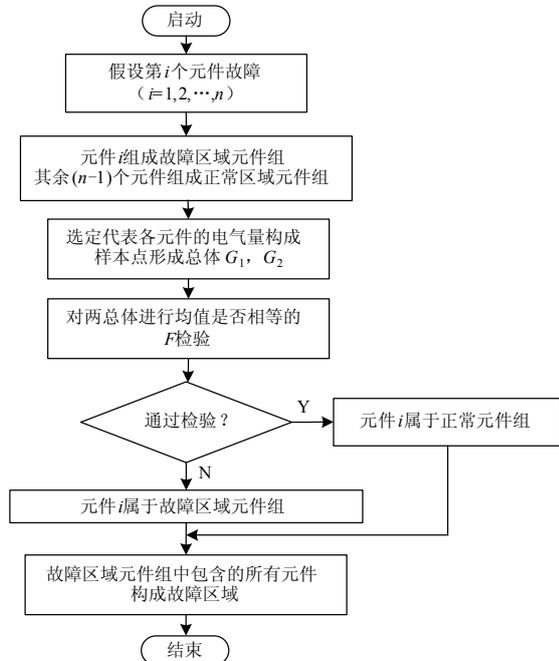


图 1 电网故障区域界定方法流程图

Fig.1 Method of fault area location flow process chart

以故障后的负序电流变化量为故障特征量，即利用 WAMS 系统实时采集的各元件故障后负序电流的变化量为各元件的代表构成样本点（如表 1 所示，[0.2895 0.2895]为代表 BUS1-BUS2 的样本点，[0.2695 0.2795]为代表 BUS1-BUS39 的样本点，以此类推）。依次假设每条线路为故障元件，其相应样本点构成总体  $G_1$ ，对应其他元件的样本点构成总体  $G_2$ ，依照多元统计分析方法中的 F 检验方法。求得每条线路对应的显著性概率值  $p$ ，筛选出  $p$  小于显著性水平  $\alpha=0.1$ （经验及多次仿真实验表明  $\alpha=0.1$  可以保证故障区域界定的有效性，详见表 2）的线路（不包含已经确定出的故障元件本身），作为故障发生后故障切除前的影响区域，后备保护加速区域。原始数据及区域界定结果见表 1。

由表 1 可见，当 BUS17-BUS18 发生故障后，故障区域界定为：BUS3-BUS18、BUS16-BUS17、BUS17-BUS27。此为后备保护加速区。

在第 1 周波切除故障，利用以故障发生时为基准 0 时刻的第 1 周波和第 2 周波（对应切除后第 0 周波和第 1 周波）线路电流值可以确定出后备保护闭锁区域。依同样方法的界定结果为：当

BUS17-BUS18 发生故障后，主保护正确动作切除故障后，故障区域界定为：BUS2-BUS3、BUS2-BUS25、BUS3-BUS18、BUS3-BUS4、BUS4-BUS14、BUS16-BUS17、BUS15-BUS16，此为后备保护闭锁区。即：故障切除后潮流转移可能的影响区域。

表 1 后备保护加速区的界定

Tab.1 Backup protection speeding area location

线路名	故障后电流变化		显著性概率值 $P$	元件属于故障区域?
	故障后 0 周波	故障后 1 周波		
BUS1-BUS2	0.289 5	0.279 5	0.871 9	0
BUS1-BUS39	0.269 5	0.279 5	0.730 2	0
BUS2-BUS3	0.649 3	0.659 3	0.817 1	0
BUS2-BUS25	0.124 9	0.114 9	0.767 0	0
BUS3-BUS18	1.634 9	1.644 9	0.006 8	1
BUS3-BUS4	0.610 6	0.600 6	0.929 4	0
BUS4-BUS14	0.143 5	0.133 5	0.780 7	0
BUS4-BUS5	0.414 8	0.404 8	0.920 3	0
BUS5-BUS6	0.192 4	0.182 4	0.814 8	0
BUS5-BUS8	0.236 4	0.226 4	0.842 6	0
BUS6-BUS11	0.154 2	0.144 2	0.788 5	0
BUS6-BUS7	0.192 8	0.182 8	0.815 1	0
BUS7-BUS8	0.076 0	0.086 0	0.602 7	0
BUS8-BUS9	0.137 8	0.127 8	0.776 6	0
BUS16-BUS19	0.814 1	0.914 1	0.701 3	0
BUS16-BUS17	3.286 2	3.276 2	$1.46 \times 10^{-6}$	1
BUS15-BUS16	0.861 9	0.871 9	0.748 4	0
BUS14-BUS15	0.539 2	0.529 2	0.935 9	0
BUS13-BUS14	0.412 0	0.402 0	0.919 6	0
BUS10-BUS13	0.363 0	0.353 0	0.904 1	0
BUS10-BUS11	0.153 8	0.143 8	0.788 2	0
BUS9-BUS39	0.140 6	0.130 6	0.778 6	0
BUS16-BUS21	0.749 8	0.739 8	0.885 6	0
BUS16-BUS24	0.342 6	0.352 6	0.766 6	0
BUS17-BUS27	1.089 7	1.079 7	0.082 1	1
BUS21-BUS22	0.463 7	0.453 7	0.930 5	0
BUS22-BUS23	0.042 0	0.032 0	0.701 2	0
BUS23-BUS24	0.436 5	0.426 5	0.925 5	0
BUS25-BUS26	0.482 3	0.472 3	0.933 0	0
BUS26-BUS27	0.919 8	0.909 8	0.784 0	0
BUS26-BUS28	0.226 4	0.216 4	0.836 6	0
BUS26-BUS29	0.213 2	0.203 2	0.828 3	0
BUS28-BUS29	0.188 2	0.198 2	0.681 3	0

注：表中未包含变压器线路，且未列出故障元件本身；电流幅值单位 kA。

故障区域界定结果,如图2所示。

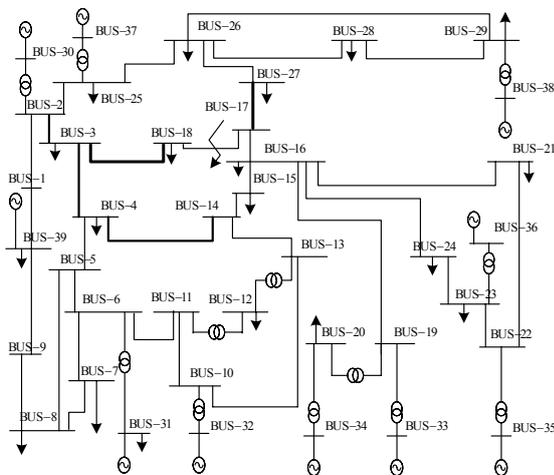


图2 故障区域界定结果

Fig.2 Result of fault area location

如图2所示, BUS17-BUS18为故障线路,粗线所示为故障后切除前的影响区域,即后备保护加速区;次粗线所示线路及 BUS3-BUS18、BUS15-BUS16两条粗线线路为故障切除后的影响区域,即后备保护闭锁区。

### 3.2 不同元件各种故障区域界定结果汇总

本文对不同元件的不同类型故障进行了故障区域界定的仿真验证,结果汇总如表2。并经多次验证后确定了普遍适用的显著性水平 $\alpha$ 。

由表2可见本文提出的方法对于不同元件的各种短路故障均适用。但不同的故障类型可应用的电气量信息并不相同,其中正序电压幅值,正序电流幅值是通用而且有效的。对于不对称故障还可应用负序和零序电压电流幅值,其有效性高于正序值。同时,选取显著性水平 $\alpha=0.1$ 可以保证故障区域界定的准确性要求。

表2 IEEE39节点系统各种短路故障的故障区域界定结果

Tab.2 Fault area locating of every short circuit fault for IEEE 39bus system

故障	Bus17 出口单相 短路		Bus17 出口两相 短路		Bus4 出口两相 短路接地		线路 Bus17- Bus18 中点三相短路		Bus17-Bus18 距首 端 40%单相短路		Bus4-Bus14 距首 端 60%两相短路	
	负序电流		负序电压		零序电压		线路电压		正序电流		负序电流	
加速 区 P 值	Bus3-18	0.0068	Bus-16	0.0192	Bus-3	0.0128	Bus-3	0.0017	Bus3-18	0.0035	Bus3-4	0.0096
	Bus16-17	0.0001	Bus-17	0.0002	Bus-4	0.0003	Bus-16	0.0256	Bus16-17	0.0001	Bus4-5	0.0216
	Bus17-27	0.0821	Bus-18	0.0637	Bus-5	0.0529	Bus-17	0.0002	Bus17-27	0.0863	Bus14-15	0.0549
			Bus-27	0.0923	Bus-14	0.0891	Bus-18	0.0615				
闭锁 区及 P 值	BUS2-3	0.0796	Bus-2	0.0847	Bus-3	0.0052	Bus-2	0.0779	BUS2-3	0.0826	Bus3-18	0.0012
	BUS2-25	0.0830	Bus-3	0.0023	Bus-16	0.0564	Bus-3	0.0015	BUS2-25	0.0801	Bus3-4	0.0034
	BUS3-18	0.0003	Bus-4	0.0884	Bus-17	0.0213	Bus-4	0.0723	BUS3-18	0.0004	Bus4-5	0.0412
	BUS3-4	0.0991	Bus-14	0.0902	Bus-18	0.0621	Bus-14	0.0891	BUS3-4	0.0988	Bus16-17	0.0211
	BUS4-14	0.0832	Bus-15	0.0590			Bus-15	0.0613	BUS4-14	0.0641	Bus17-18	0.0603
	BUS16-17	0.0008	Bus-16	0.0138			Bus-16	0.0098	BUS16-17	0.0011		
	BUS15-16	0.0428							BUS15-16	0.0383		
$\alpha$	0.1		0.1		0.1		0.1		0.1		0.1	

## 4 结语

本文提出了一种新的电网故障区域界定的方法,基于 WAMS 信息并应用多元统计分析方法对数据进行分析判别。主要优势在于基于先进的电力系统监测系统,抓住故障后,故障元件的电气量较其他元件变化很大,同时与其电气联系紧密的区域电气量亦有显著变化这一特点,故障区域界定准确有效。本文将故障和故障切除统一考虑为电力系统的

扰动,界定出后备保护加速区和后备保护闭锁区,为预防大停电的广域保护控制提供了较好的前提。

## 参考文献

- [1] 薛禹胜. 综合防御由偶然故障演化为电力灾难——北美“8.14”大停电的警示[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(18): 1-5.

(下转第 65 页 continued on page 65)

- planning based on particle swarm optimization[J]. Journal of North China Electric Power University, 2006, 33 (3) : 14-18.
- [4] DORIGO M, MANIEZZO V, COLORNI A. The ant system: optimization by a colony of cooperating agents[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part-B, 1996, 26 (1) : 1-13.
- [5] 李德毅, 杜鹤. 不确定性人工智能[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.  
LI De-yi, DU Yi. Artificial intelligence with uncertainty[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005.
- [6] 李德毅, 孟海军, 史雪梅. 隶属云和隶属云发生器[J]. 计算机研究与发展, 1995, 32 (6) : 15-20.  
LI De-yi, MENG Hai-jun, SHI Xue-mei. Membership clouds and membership cloud generators[J]. Computer R&D, 1995, 32 (6) : 15-20.
- [7] 孙薇, 商伟, 牛东晓. 改进蚁群优化算法在配电网网架规划中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30 (15) : 85-89.  
SUN Wei, SHANG Wei, NIU Dong-xiao. Application of improved ant colony optimization algorithm in distribution network planning[J]. Power System Technology, 2006, 30 (15) : 85-89.
- [8] 黄训诚, 庄奕琪, 耿阿因. 基于改进蚁群算法的配电网优化规划[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41 (6) : 727-731.  
HUANG Xun-cheng, ZHUANG Yi-qi, GENG A-nan. Power distribution network optimization planning based on improved ant colony algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2007, 41 (6) : 727-731.
- [9] 颜伟, 刘方, 王官洁, 等. 辐射型网络潮流的分层前推回代算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (8) : 76-80.  
YAN Wei, LIU Fang, WANG Guan-jie, et al. Layer-by-layer back/forward sweep method for radial distribution load flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (8) : 76-80.
- [10] DONG Yong-feng, GU Jun-hua, LI Na-na, et al. Combination of genetic algorithm and ant colony algorithm for distribution network planning[C].// Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics. 2007: 999-1002.

收稿日期: 2009-12-11; 修回日期: 2010-03-31

作者简介:

赵书强 (1964-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究;

王磊 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究. E-mail: wl\_313100@126.com

(上接第 37 页 continued from page 37)

- XUE Yu-sheng. The way from a simple contingency to system-wide disaster — lessons from the eastern interconnection blackout in 2003[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (18) : 1-5.
- [2] 韩祯祥, 曹一家. 电力系统的安全性及防治措施[J]. 电网技术, 2004, 28 (9) : 13-16.  
HAN Zhen-xiang, CAO Yi-jia. Power system security and its prevention[J]. Power System Technology, 2004, 28 (9) : 13-16.
- [3] 徐慧明. 可识别潮流转移到广域后备保护及其控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.  
XU Hui-ming. Wide area backup protection and control strategy to prevent cascading trips[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [4] 胡益胜, 张明. 广域测量系统在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (5) : 19-21.  
HU Yi-sheng, ZHANG Ming. Application of wide area measurement system in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (5) : 19-21.
- [5] Phake A G. Synchronizing-phasor measurements in power systems[J]. IEEE Trans Oil Computer Applications in Power, 1993, 6 (2) : 10-15.
- [6] 王艳. 贝叶斯网络及其在电网故障诊断中的应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2006.  
WANG Yan. Research on Bayesian network and its application in power system fault diagnosis[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2006.
- [7] Young Moon Park, Gwang Won Kim, Jin Man Sohn. A logic based expert system (LBES) for fault diagnosis of power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1) : 363-369.
- [8] 陈玉林, 陈允平, 孙金莉, 等. 电网故障诊断方法综述[J]. 中国电力, 2006, 39 (5) : 27-32.  
CHEN Yu-lin, CHEN Yun-ping, SUN Jin-li, et al. A survey of power system fault diagnoses[J]. Electric Power, 2006, 39 (5) : 27-32.
- [9] Jiang Joe-Air, Lin Ying-Hong, Yang Jun-Zhe, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines part II: PMU Implementation and performance evaluation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (4) : 1136-1146.
- [10] 高惠璇. 应用多元统计分析[M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.  
GAO Hui-xuan. Applied multivariate for data analysis[M]. Beijing: Beijing University Press, 2005.

收稿日期: 2009-12-28; 修回日期: 2010-09-20

作者简介:

徐岩 (1976-), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事电力系统继电保护, 变电站综合自动化方面的教学和研究; E-mail: wujin33221100@126.com

吴丹 (1985-), 女, 硕士研究生, 主要从事电网规划方面的工作;

张亚刚 (1978-), 男, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护和非线性复杂系统理论。