

基于小世界加权拓扑模型的配电网接地故障选线研究

陈忠仁, 陈果, 何业军

(中山职业技术学院电子信息工程学院, 广东 中山 528404)

摘要: 为解决传统的利用电气特征量进行接地选线存在的诸多问题, 提出了基于小世界加权拓扑模型的配电网接地选线新方法。首先, 对一单母线的 10 kV 配电网进行了小世界建模, 计算得到了相同线路发生不同接地故障的特征参数, 所得的特征参数可以显著地区分不同类型的接地故障。然后建立了不同线路发生相同接地故障的小世界加权拓扑模型, 根据线路的长度设定了权值, 并计算得到不同线路发生接地故障时的加权平均距离。模拟实验结果表明, 越长的线路发生接地故障后其加权平均距离越小, 因此可将加权平均距离作为接地故障选线的判据。在同一条线路发生高阻接地相较于金属性接地来说, 加权平均距离明显降低, 这反映了高阻接地因增大了零序回路的阻抗, 而导致了故障传播深度的减小。

关键词: 小世界; 加权拓扑模型; 配电网; 接地故障; 选线

Grounded fault line selection of distribution grid based on small-world weighted topology model

CHEN Zhong-ren, CHEN Guo, HE Ye-jun

(School of Electronic Information Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China)

Abstract: In order to solve the problems existing in grounded fault line selection using the traditional method of the electrical characteristics, a new grounded fault line selection method for compensation grid based on small-world weighted topology model is proposed. Firstly, the small-world model of high-voltage simulation network built in lab is established and the characteristic parameters under different grounded fault on the same line are calculated out. Obviously the characteristic parameters can distinguish out the different grounded fault. Then the small-world weighted topology models under the same grounded fault on the different line are created. According to lines' length, the weighted value formula of lines is proposed and weighted average distances under the same grounded fault on the different lines are calculated out. Lastly, the simulation test is done and the results show that if the longer line is grounded, its small-world model's weighted average distance is shorter. Therefore the weighted average distance can be acted as criterion of grounded fault line selection. And the results also show that compared to the metal grounded fault, the high-resistance grounded fault has shorter weighted average distance, which explains that the depth of the fault propagation decreases due to increasing impedance of the zero-sequence circuit.

Key words: small-world; weighted topology model; distribution grid; grounded fault; line selection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0098-06

0 引言

配电网接入消弧线圈之后即成为补偿电网。作为配电网的一种特殊形式, 补偿电网的选线一直是继电保护领域的难点和热点问题。这是因为接入消弧线圈之后, 改变了配电网接地故障的电气特征量的性质, 给利用电气特征量进行接地选线带来了诸多困难。首先, 经消弧线圈补偿后接地点的残流大大减小, 继电保护的选择性因而无法实现, 且由于消弧线圈按规程要求运行在过补偿状态, 接地故障

电流由容性变为感性, 使得故障线路、非故障线路零序电流的方向均为由母线流向线路, 这就导致诸如群体比幅法、群体比相法等一些选线方法失效。此外, 现有的选线方法无法适应复杂多变的单相接地类型, 如瞬时性接地、高阻接地、低阻接地、间歇性电弧接地等, 导致误选、漏选、拒选等情况时有发生, 选线正确率低, 效果不佳^[1-6]。而近年来发展的小世界网络理论为接地选线提供了解决问题的新思路。

国外和国内的一些研究成果已证实电力网具有小世界网络特征, 小世界网络模型已经应用在电

网的连锁故障分析、电力系统安全性评估以及大面积停电的事故分析^[7-8]。补偿电网属于电力网的一个重要组成部分, 其规模也随着我国城市规模的不断扩展而扩大。小世界网络理论属于图论与统计物理学中的分析方法, 将其应用在补偿电网的接地选线上, 摒弃了将电气特征量作为选线判据而带来的种种弊端, 因而是一种新型的有发展前途的选线方法。文献[9]已经证明补偿电网具有小世界特性, 因此可建立小世界网络模型进行分析。

1 补偿电网的小世界拓扑模型的建立

1.1 小世界拓扑模型的特征参数

Watts 等人在 1998 年提出小世界网络理论后, 为了定量描述小世界特性, 引入了特征参数^[8], 将本文用到的特征参数公式阐述如下^[10]。

(1) 平均距离 L : 在一个网络中节点 i 与节点 j 的距离 d_{ij} 被定义为连接这两个节点间的最短路径所包含的边的数目。对所有节点对的平均距离求平均值就可以得到该网络的平均距离为

$$L = \frac{1}{n \times (n-1)} \sum_{i \neq j \in G} d_{ij} \quad (1)$$

(2) 聚类系数 C : 假设节点 v 有 k_v 个近邻节点, 则 k_v 个近邻节点间至多存在 $k_v(k_v-1)/2$ 条边, 假设 k_v 个近邻节点之间只存在 t_v 条边, 则

$$C_v = \frac{2t_v}{k_v(k_v-1)} \quad (2)$$

整个网络的聚类系数定义为

$$C = \frac{1}{n} \sum_{v=1}^n C_v \quad (3)$$

(3) 网络平均度数 K : 在网络中, 节点的度数是指连接这个节点的边数。对所有节点的度数求平均值, 即得到网络的平均度数 K 。对于一个边数为 E 、节点数为 n 的网络的平均度数可表示为

$$K = \frac{2E}{n} \quad (4)$$

1.2 某 10 kV 单母线补偿电网的小世界拓扑模型的建立

为了研究方便, 以某具有单母线、6 条出线的 10 kV 补偿电网为例, 开展建模研究。在如图 1 所示的补偿电网中, 变压器 T 为接地变压器, 目的是引出中性点, 在其中性点接入消弧线圈 XH 与阻尼电阻 R, 各条出线均存在分布电容, 以集中参数 C 替代其分布电容, 不影响分析结果; 在某出线的任一相接入断路器 DL, 当其闭合时单相接地发生。

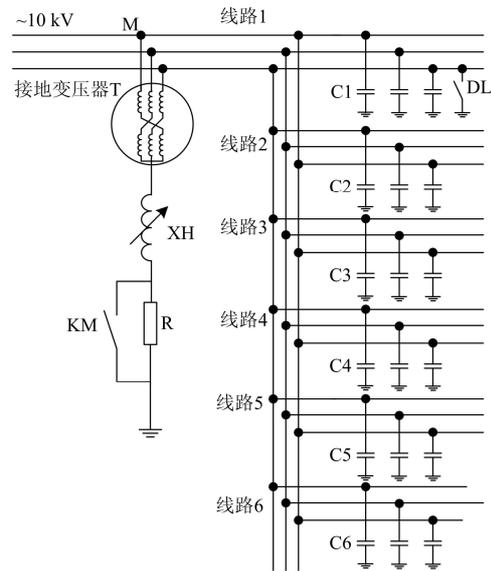


图 1 某单母线 10 kV 补偿电网的一次接线图

Fig. 1 Diagram of a 10 kV compensation grid with a single bus

考虑到接地故障选线研究的主要目标是电网单相接地时的零序回路, 而零序回路主要包括出线的对地分布电容 C 、消弧线圈 (阻尼电阻 R 在接地时被切除)、变压器等。因此, 补偿电网接地故障选线的建模数据只能来自单相接地时的零序回路, 根据接地后零序回路中所存在的设备、母线和线路的分布电容, 建立电网的拓扑模型, 终端的负荷设备不在零序回路中, 故无须列入。在进行简化的时候, 考虑到目前小世界网络模型是定义在加权、无向、简单、稀疏和连通图的基础上。因此从简化分析过程的角度出发, 在对图 1 所示的补偿电网进行拓扑建模之前做如下假定:

(1) 线路对地分布电容 C 、电压源 (变压器 T)、母线 M 和消弧线圈 XH 定义为节点, 而连接各个部件之间的导线被定义为边。

(2) 线路分布电容 $C1 \sim C6$ 和消弧线圈 XH 通过接地连接在一起;

(3) 线路分布电容 $C1 \sim C6$ 均和母线 M 连接在一起;

(4) 消弧线圈 XH 与变压器 T 的中性点连接在一起;

(5) 变压器 T 的相线和母线 M 相连。

当补偿电网发生金属性接地时, 对应图 1 中的断路器 DL 闭合, $C1$ 被短接, 母线 M 通过大地与 XH 相连, 此时的小世界网络模型如图 2 所示, 图中的 $C1$ 被短接后以虚线表示。由图可知节点数 $n=8$, 边数 $E=23$, 根据式 (1)~式 (4) 分别计算得到平均度数为 5.75, 聚类系数为 0.821 4, 平均距

离为 1.321。

当补偿电网发生高阻接地时, 出线 1 的分布电容 C1 被短接。但由于接地点的过渡电阻 $R_d > 1000 \Omega$, R_d 不能忽略, 可视为一个节点, 由此带来小世界网络模型的节点数增加, 如图 3 所示, 图中的节点数 $n=9$, 边数 $l=29$, 计算得到平均度数为 6.444, 聚类系数为 0.797 6, 平均距离为 1.361。

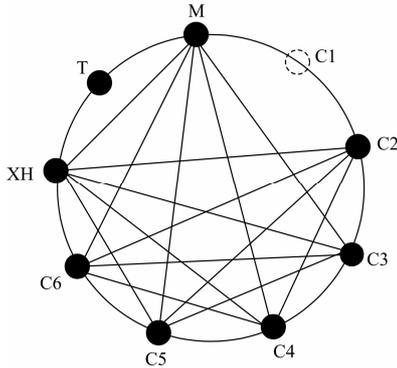


图 2 金属性接地时的小世界网络模型

Fig. 2 Small-world network model under metal grounded

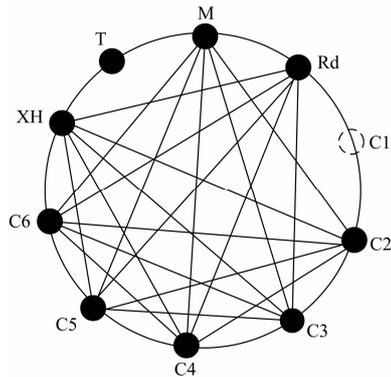


图 3 高阻接地时的小世界网络模型

Fig. 3 Small-world network model under high-resistance grounded

用同样的方法对出线 2 发生金属性接地和高阻接地时的情况分别建模, 并计算得到平均度数、聚类系数、平均距离等特征参数, 如表 1 所示。

表 1 补偿电网不同状态下的小世界模型特征参数

Table 1 Characteristic parameters of small-world model under compensation grid's different states

电网状态		平均度数 k	聚类系数 C	平均距离 L
出线 1	金属性接地	5.75	0.821 4	1.321
	高阻接地	6.444	0.797 6	1.361
出线 2	金属性接地	5.75	0.821 4	1.321
	高阻接地	6.444	0.797 6	1.361

由表 1 可知, 在同一出线发生的金属性接地和高阻接地具有显著不同的平均度数、聚类系数和平均路径长度, 因此不同的接地故障可以轻易地被区分开来。而对于不同出线、相同接地故障来说, 其平均度数、聚类系数和平均路径长度均相同, 无法从特征参数上进行区分, 因此需要对不同线路相同故障的小世界拓扑模型进行加权处理运算, 以实现有效的接地选线。

2 小世界加权拓扑模型下的补偿电网接地选线

2.1 加权平均距离与权值计算

在无电电网, 不管线路的距离多长, 线路对地容抗作为一个节点来说对故障的影响和对特征量的贡献是相同的, 而在加权电网, 按照线路距离长短, 赋予该线路容抗节点一定的权重, 线路越长, 该节点权重越大; 不同长短的线路发生接地表现在平均距离上也不同。由此可在平均距离上显著地区分是哪条线路发生了接地故障^[11]。

此外, 考虑到不同线路由于长度不同, 对地容抗不同, 它们的接地故障传播的深度亦不同, 对选线产生的影响亦有很大的不同, 故而不同线路接地故障的小世界加权拓扑模型的平均距离亦应有所不同。为此, 本文仍按最短路径经过的边数计算加权电网中线路的长度, 各线路长度的均值为加权拓扑模型的平均距离。如此处理后, 可使加权前后的小世界拓扑模型的平均距离具备可比性, 用公式表示为

$$L' = \frac{1}{n \times (n-1)} \sum_{i \neq j \in G} d'_{ij} \quad (5)$$

式中: L' 为加权电网的平均距离; d'_{ij} 为最短路径经过的边数; n 为补偿电网中节点的总数。

本文采用式(5)计算加权拓扑模型的平均距离。加权模型的其它基本特征参数包括聚类系数、平均度数及节点度数分布规律与线路的权值无关, 均保持不变。

设补偿电网各出线的长度为 $D_i(\text{km})$, 则其对应节点的权值 m_i 可设置为

$$m_i = \text{round}(D_i) \quad (6)$$

节点的权值为线路长度的四舍五入取整。除了出线 (C1~C6) 节点之外, 其他节点的权值不变, 仍为 1。

加权网络中节点 i 与节点 j 的距离 d'_{ij} 被定义为连接这两个节点间的最短路径所包含的边的数目 d_{ij} 乘以节点 i 与 j 的权值, 由此可得到式(7)。

$$d'_{ij} = m_i m_j d_{ij} \quad (7)$$

2.2 不同出线相同接地故障的小世界加权拓扑模型及选线

确定了线路的权值之后, 其出线(电容)节点要赋予相应的权值, 于是得到出线1和出线2分别发生金属性接地时的小世界加权拓扑模型如图4、图5所示。

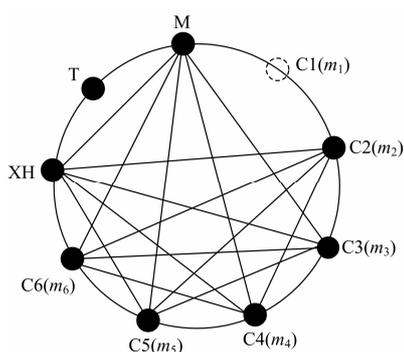


图4 出线1金属性接地的加权拓扑模型

Fig. 4 Weighted topology model under metal grounded in line 1

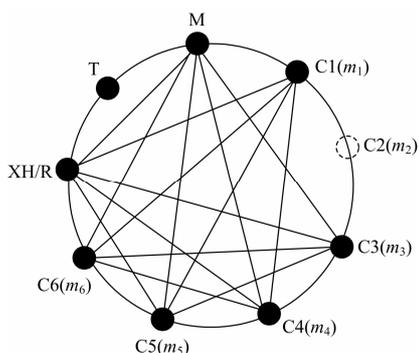


图5 出线2金属性接地的加权拓扑模型

Fig. 5 Weighted topology model under metal grounded in line 2

由图4, 根据式(5)~式(7)计算其加权平均距离为

$$L'_{j1} = \frac{1}{n \times (n-1)} \sum_{i \neq j \in G} d'_{ij} = \frac{1}{28} (3 + 4m_2 + 5m_3 + 6m_4 + 5m_5 + 4m_6) + \frac{1}{28} (m_2 \sum_{i=3}^6 m_i + m_3 \sum_{i=4}^6 m_i + m_4 \sum_{i=5}^6 m_i + m_5 m_6) \quad (8)$$

由图5, 计算其加权平均距离为

$$L'_{j2} = \frac{1}{n \times (n-1)} \sum_{i \neq j \in G} d'_{ij} = \frac{1}{28} (3 + 4m_1 + 5m_3 + 6m_4 + 5m_5 + 4m_6) + \frac{1}{28} (m_1 \sum_{i=3}^6 m_i + m_3 \sum_{i=4}^6 m_i + m_4 \sum_{i=5}^6 m_i + m_5 m_6) \quad (9)$$

对比式(8)和式(9)发现, 出线1和出线2分别发生金属性接地故障时, 其加权平均距离出现了明显的差别。设 $m_1=15$, $m_2=16$, $m_3=23$, $m_4=33$, $m_5=39$, $m_6=50$ 将其代入式(8)和式(9)分别计算得到加权平均距离为

$$L'_{j1} = 385.3, \quad L'_{j2} = 379.9 \quad (10)$$

比较式(10)可知, 在越长线路发生接地故障的小世界模型加权平均距离反而越小, 平均距离反映故障的传播深度, 长线路发生接地后, 则故障传播的深度变小; 从另一个角度理解, 长线路对故障传播的深度贡献大, 发生接地后, 则故障传播的深度相应变小, 这和配电网实际的接地故障情况相符。

以上例子考虑到最极端的情况下, 若线路1和线路2长度相差0.5 km, 权值相差 $\Delta m = m_2 - m_1 = 1$, 则加权平均距离之差

$$\Delta L' = L'_{j1} - L'_{j2} = 385.3 - 379.9 = 5.4$$

这样的平均距离之差已足可以区分不同线路的接地故障。计算出线1和出线2分别发生高阻接地时的小世界加权平均距离, 可以得到相同的结论。

3 小世界加权拓扑模型下的补偿电网接地故障模拟实验

对补偿电网的小世界加权拓扑模型下的平均距离进行实验, 对不同长度的出线发生接地故障计算得到其各自的加权平均距离, 利用C语言编制程序, 代入线路长度, 生成反映加权平均距离与线路二者之间的关系曲线分别如图6、图7所示。

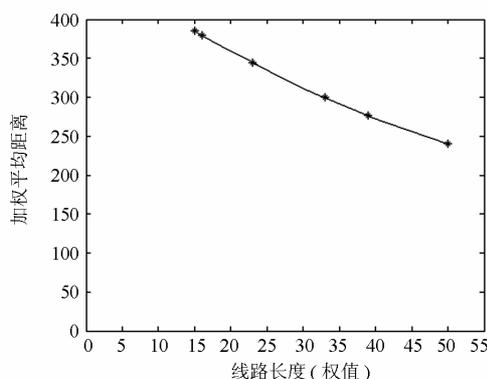


图6 金属性接地故障的加权平均距离关系曲线

Fig. 6 Weighted average distance curve under metal grounded

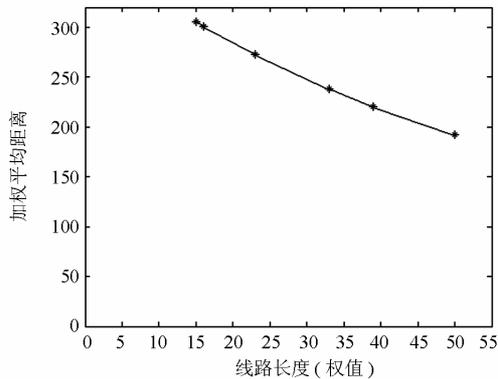


图 7 高阻接地故障的加权平均距离关系曲线

Fig. 7 Weighted average distance curve under high-resistance grounded

图 6 为金属性接地故障的小世界加权平均距离与线路长度 (权值) 的关系曲线, 图 7 为高阻接地故障的小世界加权平均距离与线路长度 (权值) 的关系曲线, 可见, 无论是金属性接地还是高阻接地, 越长的线路发生接地故障后其加权平均距离越小, 曲线随着权值的增加而逐渐下降, 这验证了前面得出的结论, 因此将加权平均距离作为接地故障选线的判据, 可以得到正确的结果。此外, 对比图 6 和图 7 可以得到另外一个结论, 在同一条出线发生高阻接地相较于金属性接地来说, 加权平均距离明显降低, 这反映了高阻接地因增大了零序回路的阻抗, 而阻碍了故障传播, 导致故障传播深度的减小^[12-13]。

4 结论

本文在对配电网进行小世界建模, 得出了同一出线不同接地故障具有明显不同的特征参数, 以此可以显著区分金属性接地故障和高阻接地故障的基础上, 对不同出线的相同接地故障进行了小世界加权拓扑模型建模, 对影响接地故障的关键因素 (线路长度) 进行了权值设定, 计算得到不同线路发生相同接地故障的加权平均距离, 通过实验模拟了金属性接地故障和高阻接地故障, 得到二者的加权平均距离关系曲线。实验结果表明, 越长的线路发生接地故障后其加权平均距离越小, 不同线路发生接地故障的加权平均距离有明显的区别, 因此可将加权平均距离作为接地故障选线的判据; 在同一条出线发生高阻接地相较于金属性接地来说, 加权平均距离明显降低, 这反映了高阻接地因增大了零序回路的电抗, 而阻碍了故障传播, 导致故障传播深度的减小。

参考文献

[1] 郭清滔, 吴田. 小电流接地系统故障选线方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 147-152.
 GUO Qing-tao, WU Tian. Survey of the methods to select fault line in neutral point ineffectively grounded power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 147-152.

[2] 罗建, 何建军, 王官洁. 消弧线圈接地系统的单相接地选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(4): 1-4.
 LUO Jian, HE Jian-jun, WANG Guan-jie. Research on fault line selection in network grounded with arc extinguishing coil[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(4): 1-4.

[3] 陶利国, 许云峰. 采用数字技术的小电流接地选线和故障定位装置[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 86-90.
 TAO Li-guo, XU Yun-feng. Grounded fault identification device based on the digital technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 86-90.

[4] 马珂, 张保会. 中性点非直接接地系统故障选线原理的发展与展望[J]. 继电器, 2003, 31(5): 65-70.
 MA Ke, ZHANG Bao-hui. Development and prospect of the single-phase grounded fault detection in unearthed or compensated neutral networks[J]. Relay, 2003, 31(5): 65-70.

[5] 魏震波, 刘俊勇, 朱国俊, 等. 基于可靠性加权拓扑模型下的电网脆弱性评估模型[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 131-137.
 WEI Zhen-bo, LIU Jun-yong, ZHU Guo-jun, et al. Vulnerability evaluation model to power grid based on reliability-parameter-weighted topological model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 131-137.

[6] 徐梅, 杨文荣, 吴淑梅, 等. 基于零序电流比值变化的小电流接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 68-92.
 XU Mei, YANG Wen-rong, WU Shu-mei, et al. A method of single-phase grounded feeder detection in indirectly earthed power system based on judging the change of zero-sequence current ratios[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 68-92.

[7] 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 Zong-xiang. 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.
- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
MENG Zhong-wei, LU Zong-xiang, SONG Jing-yan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] 陈忠仁, 张波. 基于小世界网络模型的补偿电网单相接地故障识别与选线[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 86-90.
CHEN Zhong-ren, ZHANG Bo. Single-phase grounded fault identification and line selection of compensation grid based on small-world network model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 86-90.
- [10] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of small-world network[J]. Nature, 1998, 393(4): 440-442.
- [11] 丁明, 韩平平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.
DING Ming, HAN Ping-ping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [12] 卢锦玲, 朱永利. 基于暂态能量裕度的电力系统脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 96-103.
LU Jin-ling, ZHU Yong-li. Power system vulnerability assessment based on transient energy margin[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(6): 96-103.
- [13] 陈晓刚, 孙可, 曹一家. 基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 138-144.
CHEN Xiao-gang, SUN Ke, CAO Yi-jia. Structural vulnerability analysis of large power grid based on complex network theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 138-144.

收稿日期: 2014-01-08; 修回日期: 2014-04-09

作者简介:

陈忠仁(1971-), 男, 副教授, 主要从事配电网自动化技术与智能仪表的研究; E-mail: chenzhen0520@163.com

陈果(1982-), 男, 工程师, 研究方向为电力电子与电力传动;

何业军(1982-), 男, 讲师, 研究方向为电力系统自动化。