

# 全数字化保护系统性能测试方案设计

## (一) 系统运行特点与保护配置方案

杨丽<sup>1,2</sup>, 赵建国<sup>1</sup>, Peter A. Crossley<sup>1,2</sup>, 陈大超<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. School of E & EE, The University of Manchester, Manchester M60 1QD, U. K.)

**摘要:** 针对英国国家电网公司的网格型 (Mesh) 接线变电站, 分析其运行特点和保护要求。经反复论证, 采用 Areva 公司 MiCOM 系列保护 IED, 建立了适用于该变电站的数字化保护系统。母线主保护采用 P746 集中式数字母线保护 IED, 后备保护为两组 P841; 变压器高压侧主保护与后备保护分别采用 P643 和 P841, 低压侧保护为 P841; 馈线本地保护 A 柜和远端保护 B 柜各装设两组 P545, 主保护 I 设为光纤通信的电流差动保护, 主保护 II 设为距离保护; B 柜的 P545 采用常规硬接线形式并另设两组 P991 测试模块, 以利于 A 柜的性能参数对比; 保护 IED 的时间同步通过 P594 单元接收 GPS 信号实现。该保护系统已通过英国国家电网公司的验证, 并为其提出基于 OMICRON CMC 256 测试仪和 MiCOM PX4X 9-2LE Simulator 的性能测试方案, 测试合格后将进行现场投运。

**关键词:** IEC 61850; 数字化变电站; 电力系统; 继电保护; 性能测试

### Design of performance testing scheme for all-digital protection systems

#### part one system characteristics and protection hardware setup

YANG Li<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-guo<sup>1</sup>, Peter A. Crossley<sup>1,2</sup>, CHEN Da-chao<sup>2</sup>

(1. School of E&E, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. School of E & EE, The University of Manchester, Manchester M60 1QD, U. K.)

**Abstract:** The operational characteristics of a mesh topology substation from National Grid (NG), U.K. and the protection requirement are analyzed. After a thorough evaluation, a complete protection system is designed for this substation using MiCOM series protective IED from Areva T&D. P746 digital protective IED is used as the mesh corner busbar main protection and two P841 as backup protection; P643 and P841 are used as transformer HV main/backup protection, P841 is adopted for transformer LV protection; feeder local panel A and remote panel B have two P545 respectively, main I protection is configured as current differential scheme via fibre optic communication and main II distance protection; the P545 in panel B are configured as conventional hardwired scheme and two P991 testing blocks are installed, this is designed to facilitate the performance comparison with panel A; the time synchronization for the protective IEDs are achieved by P594 units receiving GPS signals. This protection system has been approved by NG and testing schemes based on the OMICRON CMC 256 test set and MiCOM PX4X 9-2LE Simulator are proposed, the system will be installed for on-site operation if the performance testing results meet the requirement.

**Key words:** IEC 61850; digital substation; power system; protective relay; performance testing

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0038-06

## 0 引言

数字化变电站以非常规互感器 (NCIT), 高速以太网交换技术和支持 IEC 61850 标准的变电站自动化系统的应用为标志<sup>[1]</sup>。作为数字化变电站技术应用的重要一环, 全数字化保护系统与常规保护系统相比, 无论在系统结构方面, 还是在构成元件方面都存在很大差异<sup>[2-3]</sup>。全数字化保护系统具有一系列突出优点<sup>[4]</sup>, 其各项性能指标可否达到甚至超越

常规硬接线保护系统, 成为推广该技术的关键所在。国内外<sup>[5-10]</sup>对常规保护系统的可靠性等已做了较多研究, 设计全数字化保护系统的性能测试方案, 对该技术的推广应用具有重要意义。

国外各大厂家已进入对全数字化保护系统进行兼容性和互操作性试验阶段, 并建立了若干试点工程。由英国国家电网, 苏格兰电力, 苏格兰南方电力, 法国阿海珐公司等资助, 在曼彻斯特大学国家电网电力系统研究中心组建了一套全数字化保护系

统, 并设计了性能测试方案。该保护系统针对英国国家电网广泛采用的网格型 (Mesh Corner) 变电站结构设计, 紧密贴合工程实际, 极大地方便了全数字化保护系统在实际工程中的性能测试, 对该技术的推广应用有重要的推动意义。

### 1 全数字化保护系统的特点

全数字化保护系统是数字化变电站的重要组成部分, 其应用具有非常重大的技术和经济意义。在技术上, 可以减少设备的退出次数和退出时间, 提高设备的使用效率; 减少自动化设备数量, 简化二次接线, 提高系统的可靠性; 设备具有互操作性, 方便了设备的维护和更新, 减少投运时间, 提高工作效率; 方便变电站的扩建及自动化系统的扩充。在经济上, 可以实现信息在运行系统和其他支持系统之间的共享, 减少重复建设和投资; 减少占地面积, 从而减少建设投资; 减少变电站寿命周期内的总体成本, 包括初期建设成本和运行维护成本。

全数字化保护系统一般由非常规互感器 (NCIT)、合并单元 (Merging unit, MU)、以太网交换机 (Ethernet Switch, E)、保护装置 (Protective Relay, R)、同步时钟源 (Time Source, TS)等组成。IEC 61850-9-2过程总线实现了非常规互感器和合并单元与间隔层装置如保护IED、间隔层控制器、测量装置等的数字化连接, 互感器、保护及断路器之间复杂的导线连接被光纤代替, 简化了二次回路设计。非常规互感器的输出由模拟信号变为数字信号, 并通过合并单元以多播方式发布到过程总线, 保护等智能电子装置从过程总线获取采样和控制信息。外部同步时钟源是全数字化保护系统的关键元件, 大部分保护功能都依赖于采样信号中时间标签的准确性。图1为一典型星形拓扑的全数字化保护系统。

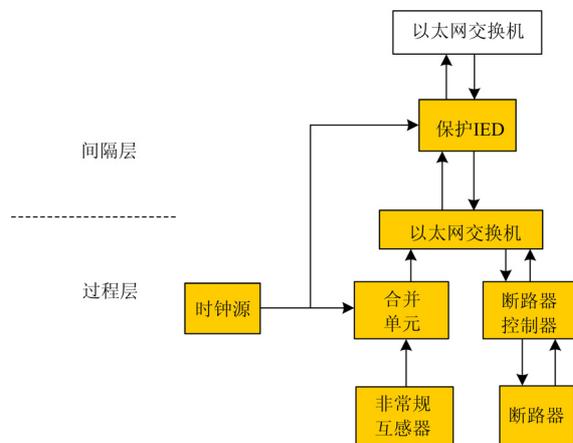


图1 星形拓扑全数字化保护系统

Fig.1 Star topology all-digital protection system

全数字化保护系统是继电保护发展的趋势, 其各项性能指标可否达到或优于常规硬接线保护系统, 是推广该技术的关键所在。设计全数字化保护系统性能测试方案非常必要。

### 2 全数字化保护系统应用对象的特点

在英国的输电网中, 除了常见的双母线接线和一个半断路器接线外, 因其出色的经济性, 网格接线变电站应用非常广泛。图2为一网格型母线接线及其母线保护配置。四台断路器经隔离开关连接组成一个网格, 每个网格角带一条输电线和一台变压器, 可以实现节省断路器的目标。其母线保护原则是任意网格角母线发生故障, 保护会断开与故障母线直接相连的网角上的两台断路器, 同时发送联锁跳闸信号断开远端的输电线和变压器断路器。

为了推动全数字化保护系统的应用, NG决定以网格型母线接线变电站为应用对象, 研究全数字化保护系统在该变电站中应用的性能表现, 如图3所示。

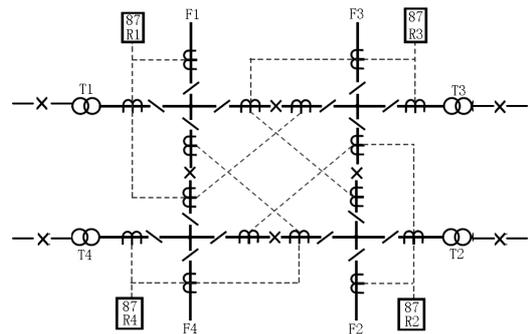


图2 网格型母线接线及其母线保护配置

Fig.2 Mesh busbar and its protection scheme

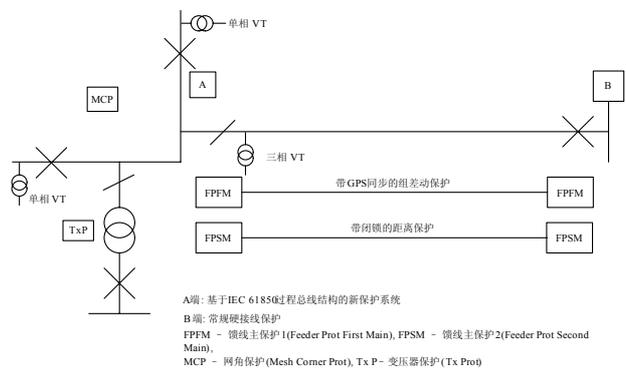


图3 全数字化保护系统的应用对象

Fig. 3 Application object of all-digital protection system

该变电站为一典型网格角, 与该网格角相连的两台断路器旁各装设一个单相VT, 馈线近网格角端A装设三相VT, 为节省投资, A端和变压器近网格角

端均不装设断路器，故障切除由B端和变压器低压侧的断路器完成。网格角配置母线保护，变压器端配备变压器保护，馈线第一套主保护设置为带GPS同步的组差动保护，第二套主保护为带闭锁的距离保护。为了便于比较全数字化保护与常规保护的性表现，馈线A端设置为基于IEC 61850过程总线的全数字化保护，B端则为常规硬接线保护，A、B端的保护通信由光纤实现。

### 3 保护硬件系统配置

Areva公司是国际知名的电力设备制造商，其MiCOM系列保护IED用于该测试系统的组建。

#### 3.1 网格角母线保护配置

网格角母线保护柜（Mesh Corner Panel）装设一套集中式数字母线保护MiCOM P746，两套控制和后备保护MiCOM P841，一套GPS时间同步单元MiCOM P594，如图4所示，其遵循IEC 61850-9-2LE的全数字化接口如图5所示。



图4 网格角母线保护柜

Fig. 4 Mesh corner panel

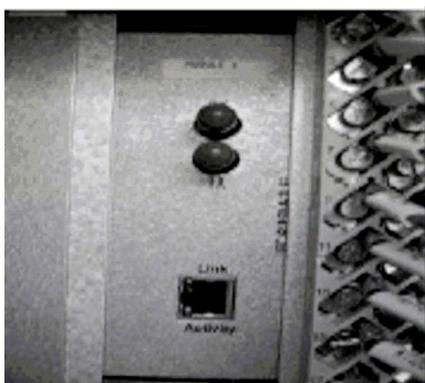


图5 IEC 61850-9-2LE接口

Fig.5 IEC 61850-9-2LE interface

P746的基本保护功能是分相比例差动保护，如选择HB/HS接点选项，典型动作时间为12 ms；如选择标准接点选项，典型动作时间为17 ms。P746应用比例制动原理，如图6所示，即使CT特性不一致和

误差也不会误动，确保区外故障时的稳定性。

为确保在断路器或隔离开关辅助接点状态错误情况下不会误动，P746引入大差元件（Check Zone）闭锁比例差动元件。P746还包含了主断路器失灵保护及死区保护、过流保护等功能，采用多重跳闸判据，确保硬件故障和信号错误情况下的可靠性，任何一个跳闸命令的产生都要至少满足5个判据或条件：

a.幅值判据：检测每一个区的两个门槛值，是否超过比例斜率特性（ $k_2$ ），是否超过差电流动作门槛（ $I_D > 2$ ）。

b.差动元件的跳闸命令需要大差元件的确认；是否超过比例斜率特性（ $k_{CZ}$ ）；是否超过差电流动作门槛（ $I_{DCZ} > 2$ ）。

c.电流相位比较判据。

d.电压判据（可选）

低电压： $U < OR, V_1 < OR$

负序电压： $V_2 > OR$

零序电压： $3V_0 > OR$

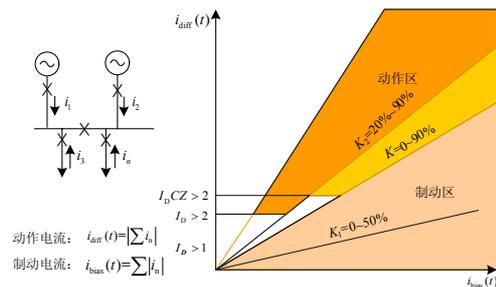


图6 比例差动特性

Fig. 6 Bias differential characteristics

P746采用的变电站泛拓扑处理算法可确保其动态地适应于母线拓扑结构的改变，依靠流过断路器或隔离开关的电流状态，确定最优的跳闸区间，并能将母线结构实时地显示在装有动态监视工具的PC界面中。

P841内设方向型过电流保护、接地保护、电压和频率保护等元件，是后备保护的理想选择。P594支持IRIG-B时间同步信号和秒脉冲(1PPS)同步信号输出，可同时产生四个同步源，其与GPS同步后的秒脉冲光纤输出误差小于±100 ns。

#### 3.2 馈线保护配置

由网格角引出的输电线装设馈线保护A（Feeder Local Panel）和馈线保护B（Feeder Remote Panel）两个保护柜，如图7所示。A柜装设两套带距离保护的电流差动保护P545和一套P594。B柜除两套P545和一套P594外，另设两套P991测试模块。

A柜和B柜的第一套P545(上)设置为光纤通信的电流差动保护,作为线路的第一套主保护,第二套P545(下)则设为三段式距离保护作为第二套主保护。B柜的两套P545通过硬件改装在常规保护系统模式下(硬接线)工作,如图8所示。输电线第一套主保护比例差动特性如图9所示,第二套主保护的三段式距离保护特性如图10所示。通过测试A柜和B柜保护的各項性能指标,可以统计比较全数字化保护系统和常规硬接线系统的性能。



图7 输电线保护柜

Fig. 7 Feeder local and remote panels

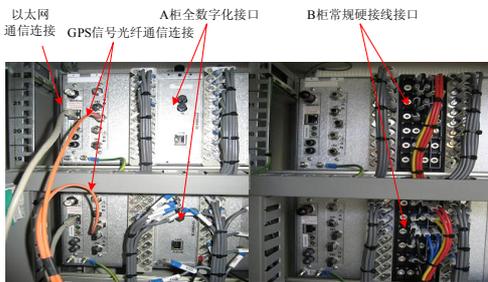


图8 A柜和B柜接口

Fig. 8 Feeder local and remote panels interface

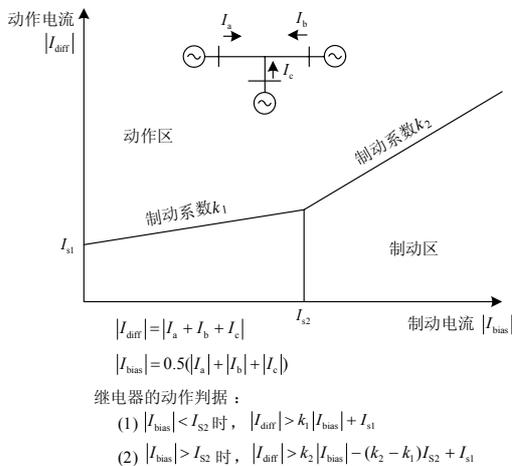


图9 A柜和B柜第一套主保护特性

Fig. 9 Feeder main 1 protection characteristics

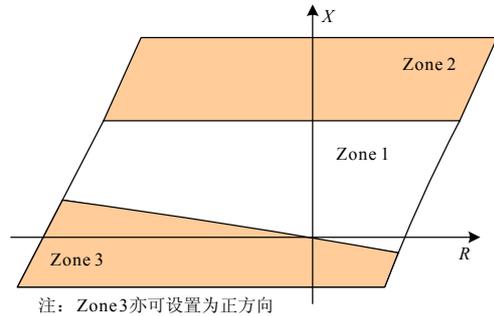


图10 A柜和B柜第二套主保护特性

Fig. 10 Feeder main 2 protection characteristics

### 3.3 变压器保护配置

变压器在高压侧(HV)和低压侧(LV)各装设一个保护柜。高压柜装设一套P643变压器保护和一套P841,低压柜装设一套P841和一套P594,如图11所示。P643是多功能的全数字化变压器保护IED,可实现差动保护,REF,过热/过励磁保护功能,同时兼具后备保护功能,其保护对象涵盖双绕组和三绕组变压器,可同时处理五组三相CT电流信号。



图11 变压器保护高压柜和低压柜

Fig. 11 Transformer protection HV and LV panels

## 4 保护系统性能测试工具

本项目采用OMICRON CMC 256 plus测试仪和Areva MiCOM PX4X 9-2LE Simulator作为测试工具。

### 4.1 OMICRON CMC 256 plus测试仪

OMICRON公司针对遵循IEC 61850的全数字化保护系统,开发了IEC 61850测试工具。对于采用IEC 61850 GOOSE和采样值的保护测试,相当于将CMC测试装置“连接”至站内网络,如图12所示。通过IEDScout可以对符合IEC 61850的装置的数据模型和配置进行研究。在整个测试工具支持标准的SCL格式配置信号的应用。

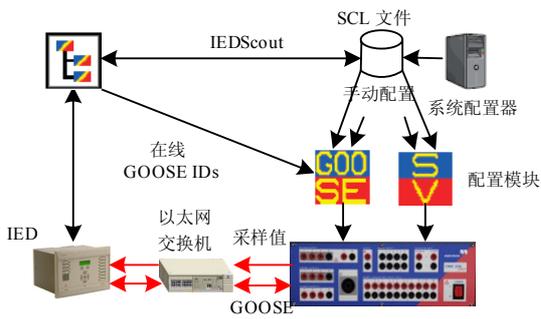


图12 OMICRON CMC 256 plus 的应用

Fig.12 Application of OMICRON CMC 256 plus

GOOSE配置模块可对映射配置, 将CMC测试装置设置为采用GOOSE消息在变电站网络上进行通讯。CMC测试装置所认知的GOOSE信息中的状态数据, 就如同是“连接”至其开关量输入与输出端一样。接收到的GOOSE信息中的数据属性控制测试装置的开关量输入(用于瞬时跳闸或启动信号)。开关量输出控制模拟(发布)的GOOSE信息中的数据。

采样值配置模块用于在测试装置中生成最多3路采样值(SV)数据流。CMC测试装置按照“采用IEC 61850-9-2的仪用互感器数字接口应用导则”, 即“9-2 LE”来生成采样数据, 提供通信参数和激活采样值输出设置。所发布的采样值与测试装置的电压和电流输出上面所生成的模拟量电压和电流相对应。由于二次模拟值仍然存在, 因此也支持混合应用。

NetSim网络仿真软件由数字化网络模型计算出暂态电压和电流, 得出对电网中真实事件的最佳近似。通过在标准网络配置上进行简单参数设置, 即时“点击运行”就可以通过CMC测试装置输出仿真信号, 可仿真单线路、平行线路(包括互感耦合)和三端线路的短路故障, 系统振荡, 转换性双重故障等。

#### 4.2 MiCOM PX4X 9-2LE Simulator

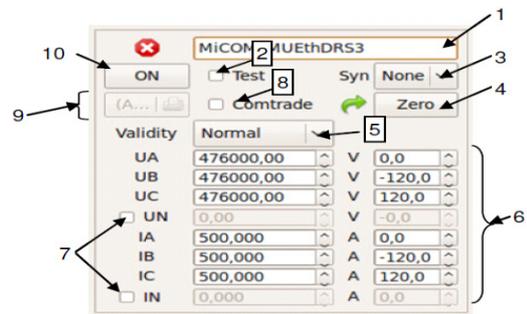
9-2LE Simulator仿真软件由Areva公司开发, 最多可模拟输出8组用户设置的IEC 61850 9-2LE以太网信息帧, 同时可回放Comtrade文件输出相应的电压电流信号。其主界面如图13所示。主界面支持8个逻辑节点, 每个逻辑节点可输出一组三相电压电流信号(模值和相角), 如图14所示。点击10可将逻辑节点激活, 在测试模式下输出的信号即为9-2LE信息帧。时间同步选项有“无同步”, “局域同步”和“全局同步”三个子菜单, 用于对输出信号(模拟合并单元输出)进行同步。采样值特性可设置为“正常”“无效”“问题信号”, 模拟实际系统中的情

形, 如图15所示。



图13 9-2LE Simulator主界面

Fig. 13 9-2LE Simulator main window



- 注: 1. 逻辑节点名称
- 2. 测试模式选项
- 3. 时间同步模式
- 4. 置零开关
- 5. 采样值特征
- 6. 电压/电流模值/相角
- 7. 中性点U/I控制
- 8. Comtrade模式选项
- 9. Comtrade管理器
- 10. 逻辑节点激活/闭锁

图14 逻辑节点界面

Fig. 14 Logical nodes control

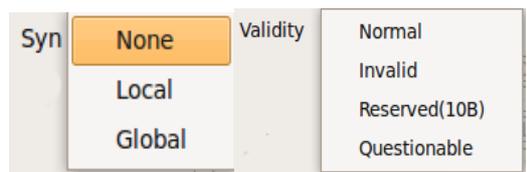


图15 时间同步和采样值特征选项

Fig. 15 Time synch and validity options

## 5 结论

本文从实际工程出发, 与国际知名保护制造商Areva合作, 为英国国家电网的网格角变电站设计了一套完整的保护系统, 涵盖了母线保护, 输电线路保护(距离和差动)和变压器保护, 组建相应的保护柜, 提出了基于OMICRON测试仪和9-2LE仿真器的测试方案, 为全数字化保护系统性能测试打造了硬件平台。国内正在大力推广采用全数字化保护系统的新一代变电站技术, 全数字化保护系统的性

能问题同样是关注的焦点。本项目的测试执行方案(本文的姊妹篇)对全数字化保护系统的设计应用有重要参考价值,为实现更好的经济技术指标和变电站建设的数字化革命具有重要的推动意义。

### 参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.  
GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(23): 67-71.
- [2] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 57-61.  
YIN Zhi-liang, LIU Wan-shun, YANG Qi-xun, et al. New method for implementing the synchronization of merging unit according to the IEC 61850 standard[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [3] IEC 61850 communication networks and systems in substation-part 9-2: specific communication service mapping(SCSM)-sampled analogue values over ISO 8802-3[S].
- [4] 张沛超, 高翔. 数字化变电站系统结构[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 73-77.  
ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. System architecture of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 73-77.
- [5] 王刚, 丁茂生, 李晓华, 等. 数字继电保护装置可靠性研[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 47-52.  
WANG Gang, DING Mao-sheng, LI Xiao-hua, et al. Reliability analysis of digital protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.
- [6] 贺家李, 郭征, 杨晓军, 等. 继电保护的可靠性与动态

性能仿真[J]. 电网技术, 2004, 28(9): 18-22.

HE Jia-li, GUO Zheng, YANG Xiao-jun, et al. Reliability and dynamic performance simulation of protective relays[J]. Power System Technology, 2004, 28(9): 18-22.

- [7] 李永丽, 李致中, 杨维. 继电保护装置可靠性及其最佳检修周期的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(6): 63-65, 71.  
LI Yong-li, LI Zhi-zhong, YANG Wei. Study of reliability and optimal routine test interval of protective relays[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6): 63-65, 71.
- [8] Anderson P M, Agarwal S K. An improved model for protective system reliability[J]. IEEE Trans Rel, 1992, 41(3): 422-426.
- [9] Anderson P M, Ghajar R F, Chintaluri G M, et al. An improved reliability model for redundant protective systems -Markov models [J]. IEEE Trans on Power Sys, 1997, 12(2): 573-578.
- [10] Schweitzer I E O, Anderson P M. (1998) Reliability analysis of transmission protection using fault tree methods[J/OL]. <http://www.Selinc.com/techpprs/6060.pdf>. 2006-04-21.

收稿日期: 2010-03-26; 修回日期: 2010-04-29

作者简介:

杨丽(1985-), 女, 博士研究生, 研究方向为数字化变电站继电保护技术; E-mail: li.yang-3@hotmail.com

赵建国(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和FACTS装置在电力系统中的应用技术;

Peter A. Crossley(1956-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和可再生能源技术。

(上接第 37 页 continued from page 37)

- [4] 王成山, 陈恺, 谢莹华, 等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(3): 38-42.  
WANG Cheng-shan, CHEN Kai, XIE Ying-hua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-42.
- [5] Mardaneh M, Gharehpetian M B. Siting and sizing of distributed generation units using GA and OPF[C].//IEEE Region 10 Conference Tencon. Chiang mai(Tailand): 2004

- [6] Lakshmi Devi A, Subramanyam B. Optimal DG unit placement for loss reduction in radial distribution system-a case study[J]. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 2007, 2(6): 57-61.

收稿日期: 2009-09-02; 修回日期: 2010-01-03

作者简介:

张勇(1972-), 男, 讲师, 硕士, 从事分布式发电、可再生能源和电力市场等方面的研究工作; E-mail: zhangf701@126.com

吴淳(1972-), 男, 工程师, 硕士, 从事分布式发电和配电网自动化方面的研究工作。