

一种光 IRIG-B/FT3 码自适应技术及其 在智能变电站测试仪器中的应用

石光¹, 赵勇², 杨经超^{3,4}, 孔圣立¹, 张道农⁵, 韩伟¹, 张克声³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052; 2. 中广核太阳能开发有限公司, 北京 100048

3. 华中科技大学, 湖北 武汉 430074; 4. 武汉凯默电气有限公司, 湖北 武汉 430223;

5. 华北电力设计院工程有限公司, 北京 100120)

摘要: 为适应电力设备测试仪器的低成本、智能化、便携化需求, 提出了一种光 IRIG-B/FT3 码自适应技术。该技术利用高频时钟对光串口 IRIG-B/FT3 码流进行处理, 并根据两种输入码在编码特征和码流速率上的差异, 自动识别光 IRIG-B 码报文和 IEC60044-8 (FT3) 采样值报文, 扩展了智能变电站测试仪器的功能。基于该技术研制的手持式智能变电站测试仪器, 已成功应用于多个国内变电站的系统联调和现场测试。实测结果表明该技术的有效性和实用性, 从而达到了减少测试仪器接口的数量、降低测试仪器功耗和成本的目的。

关键词: 智能变电站; 光 IRIG-B 码; 光 FT3 报文; 自适应技术; 测试仪器

Adaptive technique for optic IRIG-B/FT3 codes and its application in handheld test device for smart substation

SHI Guang¹, ZHAO Yong², YANG Jing-chao^{3,4}, KONG Sheng-li¹, ZHANG Dao-nong⁵, HAN Wei¹, ZHANG Ke-sheng³

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 2. CGN Solar Energy Development Co., Ltd,

Beijing 100048, China; 3. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 4. Wuhan Kemov Electric

Co., Ltd, Wuhan 430223, China; 5. North China Power Engineering Co., Ltd, Beijing 100120, China)

Abstract: To accommodate a low cost, portable and intelligent requirement for test devices of electrical equipments, this paper proposes an adaptive technique for optic IRIG-B codes and FT3 sample value codes. Based on the different structure properties and bit rate between IRIG-B codes and FT3 codes, the technique can automatically recognize those two kinds of codes by processing the input stream through a serial port with high frequency clock signal. This technique extends the functions of test device for smart substation. The handheld test device using this technique has been successfully applied in the system test and field test for several smart substations. The test results demonstrate the validity and practicability of the proposed technique, which reduces the number of ports of test device with decreasing its power consumption and cost.

Key words: smart substation; optic IRIG-B codes; optic FT3 codes; adaptive technique; test device

中图分类号: TM764 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0110-06

0 引言

电力系统的自动化和安全运行的一个要素就是电网时间的精确和统一。在电力系统的许多领域, 诸如时间顺序记录、继电保护、故障测距、电能计费、实时信息采集等都需要有一个统一的、高精度的时间基准^[1]。基于 GPS 的对时信号在电力系统的诸多领域中得到了广泛的应用。在基于 GPS 的对时信号中, 由美国国防部下属的靶场仪器组提出的

IRIG-B 串行码信息同步方式, 其时帧周期为 1 s, 适合人们的需求, 而且它对时精确并能简化对时回路, 而逐渐成为我国电力二次系统时钟管理实现装置和相关系统或设备的对时标准^[2]。由于 B 码信号既含有同步信号, 又包含时间信息, 需要对信号进行采集、分析, 而且变电站自动化系统对时间同步的要求又非常苛刻, 这就要求变电站智能测试仪器对 B 码信号的分析具有实时性和准确性^[1]。

FT3 是由国际电工委员会 (IEC) 制定的

IEC60044-8 电子式电流互感器标准中所规定的一种链路层的传输帧格式。IEC 60044-8 中规定了电子式互感器主要包含高压侧的数据采集转换模块和低压侧的合并单元 (MU) 两大部分,两者之间的数据传输就采用 FT3 帧^[3-4]。FT3 在智能变电站中的应用主要体现在电子式互感器与合并单元 MU 之间的交互, MU 与保护、测控之间的交互,以及合并单元之间的级联等几个方面。这种帧格式具有延时固定,在高速数据处理中能进行多点同步数据链接的优点。

近年来,智能变电站^[5-8]迎来了快速的发展。新建变电站大多按智能变电站设计建设,常规变电站也逐步进行智能化改造。同时,智能变电站二次设备网络化的发展,也给智能变电站测试仪器智能化与多功能化提出了更高的要求。为了完成智能变电站的系统联调、现场测试,需要多种光数字测试仪器,如网络测试仪,光数字继电保护测试仪、时间测试仪、光数字万用表、网络记录分析仪等仪器。根据智能变电站实际情况,这些光数字测试仪器不仅需要提供适用于 IEC60044-8 (FT3) 报文格式的光串口接入,还同时需要提供适用于光 IRIG-B 码的光串口接入,从而实现 FT3 格式的 SV 采样值报文交互和智能变电站时间同步系统光 IRIG-B 码信号交互。但是,光数字测试仪器接口数量的增加导致其功耗和成本的上升。手持式运维调试仪器因具有携带方便、测试快捷、可跨间隔实现移动检修和遥测、遥信对点等优点,使其在智能变电站运行维护、安装调试、故障检修等场合,具有广泛的应用前景。因此,解决光 IRIG-B 码和 FT3 报文自适应问题,对于降低智能变电站测试仪器,尤其是手持便携式测试仪器的功耗和成本,具有显著的现实意义。

针对该问题,本文提出了一种光 IRIG-B/FT3 自适应技术的基本原理和实现方法,并将其应用于手持式智能变电站运维调试仪器的研制。经多个智能变电站系统联调和系统的实际测试,证明了该光 IRIG-B/FT3 自适应技术的可行性和有效性。

1 基本原理与实现方法

1.1 IRIG-B 码和 FT3 报文的特性

IRIG-B 码的突出特点是将时间同步信号和秒、分、时、天等时间码信息加载到频率为 1 kHz 的信号载体中。GPS 系统接受卫星时间信号,输出 IRIG-B 时间码序列,变电站智能设备可以挂在统一的对

时总线上进行时间同步^[9-10]。根据 IRIG-B 编码技术规范^[1],IRIG-B 信号(如图 1)的每个码元固定为 10 ms,每秒发送 1 帧数据,即 100 个码元,其中将先高电平持续 2 ms,后低电平持续 8 ms 的码元定义为“0”;先高电平持续 5 ms,后低电平持续 5 ms 的码元定义为“1”;先高电平持续 8 ms,后低电平持续 2 ms 的码元定义为“P”,因此理论上通过 1 kHz 的时钟信号,即可实现 IRIG-B 码流的解析。

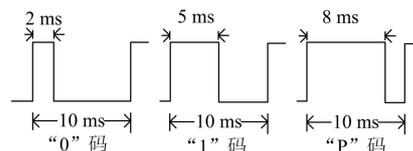


图 1 IRIG-B 码信息基本码元

Fig. 1 Elements of IRIG-B code

FT3 在智能变电站应用时,采用固定长度帧格式,传输延时固定,但仅支持点对点的传输。在行业标准《DL/T282-2012 合并单元技术条件》规定了电子式互感器 ECT/EVT 与合并单元 MU 之间采用 FT3 帧格式串行传输数据,固定长度帧格式分为 I、II、III、IV 四种,分别对应单相互感器、三相电流互感器、三相电压互感器、三相电流电压互感器与 MU 的数据传输帧格式。

FT3 格式数据串行传输时,可采用异步方式传输,也可采用同步方式传输。异步方式传输时,传输速率为 2.0 Mbit/s 或其整数倍,采样率为 4.0 kHz,帧格式 I、II、III 的传输速率宜为 2.0 Mbit/s,帧格式 IV 的传输速率宜为 4.0 Mbit/s。采样率为 12.8 kHz 时,帧格式 I、II、III 的传输速率宜为 6.0 Mbit/s,帧格式 IV 的传输速率宜为 8.0 Mbit/s。同步方式传输时,数字编码采用曼彻斯特编码,传输速率为 2.5 Mbit/s 或其整数倍,采样率为 4.0 kHz 时,帧格式 I、II、III、IV 的传输速率宜为 2.5 Mbit/s。采样率为 12.8 kHz,帧格式 I、II、III、IV 的传输速率宜为 5.0 Mbit/s。本文研制的测试仪器中采用同步传输方式,高位定义为“光纤亮”,低位定义为“光纤灭”,数字编码采用曼彻斯特编码:从低位转移到高位为二进制 1,从高位转移到低位为二进制 0,编码格式如图 2 所示。

可见,FT3 报文与 IRIG-B 码相比,前者的码流速率远高于后者,且前者的帧格式也较后者复杂得多。两者编码特征和码流速率具有明显的区别,正是这些差异性使得 IRIG-B/FT3 的自适应技术的实现成为可能。

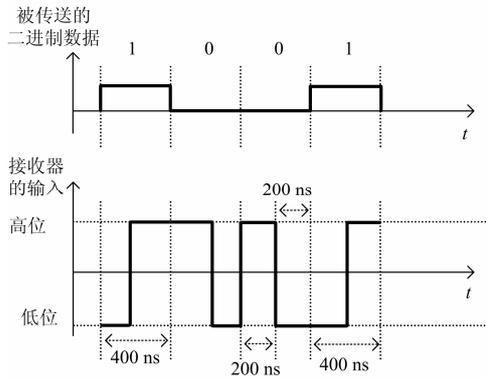


图 2 曼彻斯特编码

Fig. 2 Manchester coding

1.2 光 IRIG-B/FT3 自适应接收原理

考虑到信号发送对测试仪器来说属于主动行为，只需要将待发送的 IRIG-B 或者 FT3 数据经不同的编码电路有选择地输出，因此本文所述光 IRIG-B/FT3 自适应技术体现在光 IRIG-B/FT3 信号自适应接收方面。考虑到 FT3 码报文具有同步、异步两种传输方式，目前最高传输速率不超过 10.0 M bits/s；另一方面，IRIG-B 每个码元固定为 10 ms。因此，通过一个 20 MHz 以上的高频时钟对 IRIG-B/FT3 输入码流跳变进行计数，即可分辨出输入码流的信号类型。码流类型具体的判断规则为：首先，当输入信号在 10 ms 内仅跳变一次时可判断为 IRIG-B 码流；其次，若判别不为 IRIG-B 码流，则可根据测得的跳变周期进一步判别输入是否为不同传输速率的 FT3 码流。最终，在判断出码流类型和码流速率之后，将 IRIG-B/FT3 码流分配给不同的解码电路，即可实现 IRIG-B/FT3 的自适应接收、识别、解码等工作。

1.3 自适应技术的实现

本文实现光 IRIG-B/FT3 自适应接收及解码的总体原理见图 3。图中光 IRIG-B/FT3 信号经光电转换后进入自适应接收处理模块，它的自适应接收处理逻辑由大规模可编程逻辑器件 FPGA 实现^[11]。自适应接收处理模块包含了自适应码流判别模块、复用控制模块、IRIG-B 解码模块、FT3 解码模块、存储模块 RAM（外部 CPU 可以通过数据线访问 RAM）五个部分。

图 4 为 IRIG-B/FT3 自适应接收处理逻辑流程图。自适应码流判别模块首先采用高频时钟计数判别输入码流是否为 10 ms 跳变周期码，若是即为 IRIG-B 码；如输入不是，则根据跳变周期判别输入是否为不同传输速率的 FT3 码流；若两者均不是，则复用控制模块将 IRIG-B/FT3 解码模块输入置 0。

考虑码流在外界传输过程中会引入噪声造成变形，在这里对码流进行判断时，采取了大于传输码流速率 5 倍以上的时钟来进行，以消除融入噪声的影响。

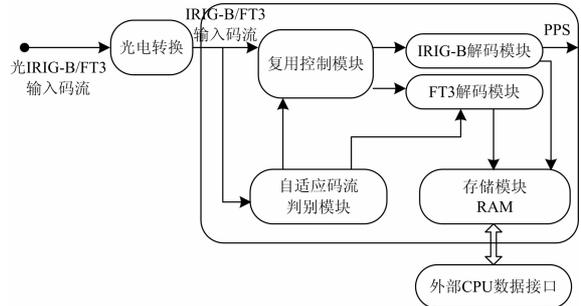


图 3 光 IRIG-B/FT3 自适应接收解码原理图

Fig. 3 Schematic diagram of adaptive optical IRIG-B/FT3 receiving and decoding

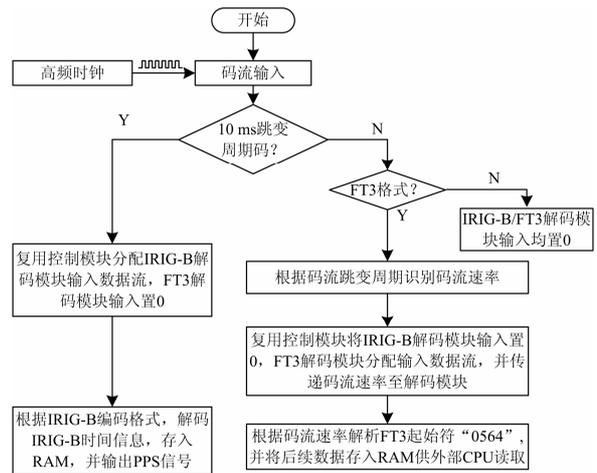


图 4 IRIG-B/FT3 自适应接收处理逻辑

Fig. 4 Logic diagram of IRIG-B/FT3 adaptive receiving

当判决输入为 IRIG-B 码流时，复用控制块将输入码流分配给 IRIG-B 解码模块，FT3 解码模块输入置 0。IRIG-B 解码模块根据 IRIG-B 编码规则首先识别两个 P 码，也即代表一帧开始帧的参考标示；接着根据 IRIG-B 码流存放信息位置，依次解码出秒信息、分信息、时信息、日信息等等，然后一一存放到存储器模块寄存器。

若判决输入为 FT3 码流时，复用控制块将输入码流分配给 FT3 解码模块，将 IRIG-B 解码模块输入置 0，并将码流速率传递给 FT3 解码模块。FT3 解码模块根据码流速率和 FT3 帧格式^[12-13]，首先识别帧起始符“0564”，接着根据 FT3 帧格式依次解码出用户数据和 CRC 校验码，并存放到存储器模块相应的地址寄存器。

外部 CPU 从存储器读取不同的地址寄存器，

可读出 IRIG-B 和 FT3 解码数据, 用于实际测试功能中。

2 自适应技术在手持式运维测试仪器的应用

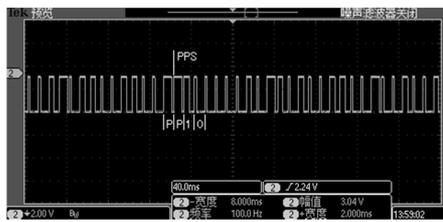
智能变电站手持式运维测试仪器具有携带方便, 测试快捷, 可跨间隔实现移动检修及遥测、遥信对点等优点。它在智能变电站运行维护、安装调试、故障检修等场合, 具有广泛的应用前景。如图 5 所示的智能变电站手持式运维调试仪器采用了本文提出的光 IRIG-B/FT3 自适应技术。该测试仪器对外设计 1 组光以太网口, 实现智能变电站 IEC61850-9-1/2 采样值 SV 报文、GOOSE 报文^[14] 的发送与接收、IEEE1588 对时报文的接收; 设计 1 组光串口, 实现 IEC60044-8 (FT3) 格式的采样值 SV 报文的发送与接收, 同时可自适应接收光 IRIG-B 码报文。

图 6(a)是光 IRIG-B 码经过测试仪器的该组光串口后用 Tektronix DPO 2024 示波器测量得到的信号波形图。图中可以看出, B 码具有明显的 10 ms 跳变周期, 并以 2 个 P 码开始。图 6(b)为 B 码解析



图 5 研制的智能变电站手持式运维调试仪器

Fig. 5 Designed handheld test device for smart substation



(a) 接收B码

B码对时			
日期	2013-09-12	时间	00:00:00
闰秒预告	0	闰秒标志	0-正闰秒
夏时制预告	0	夏时制标志	0-非夏时制
时间偏移	0x0: 正常工作状态, 时钟同步正常		

(b) B码解析后得到的时间信息

图 6 实测得到的一组 IRIG-B 码及其解析结果

Fig. 6 Measured IRIG-B message and its analyzed time information

结果示意图, 显示了 B 码时间、闰秒及时间质量信息。

图 7(a)是经同一光串口自适应实测得到的传输速率为 2.5 Mb/s 的 FT3 码波形图, 图中信号跳变周期 400 ns。图 7(b)为测试仪器收到的 FT3 扫描列表, 点击扫描列表, 可进一步显示如图 7(c)所示的 FT3 报文传递的详细电气量信。



(a) 接收的FT3码

序号	类型	APPID	描述
1	FT3	0x4011	[ML2201A]2211测控; CSN-15B

(b) FT3信号扫描列表

1/9-SMV有效值-0x4011-2211测控; CSN-15B-1/3	
频率	50.000 Hz
1-采样锁定延迟时间	750.000us
2-保护电流IA_1	2.999A ∠0.000°
3-保护电流IA_2	2.999A ∠0.000°
4-保护电流IB_1	2.999A ∠-120.001°
5-保护电流IB_2	2.999A ∠-120.001°
6-保护电流IC_1	2.999A ∠120.001°
7-保护电流IC_2	2.999A ∠120.001°
8-测量电流IA_1	18.539A ∠180.000°

(c) FT3码解析后得到的电气量

图 7 实测得到的一组 FT3 码及其解析结果

Fig. 7 Measured FT3 message and its analyzed electric parameters

基于本文提出的光 IRIG-B/FT3 自适应技术所研制的智能变电站手持式运维测试仪器, 具有轻便小巧的特点。在不牺牲功能的前提下, 它的接口数量少, 功耗低, 整机功耗小于 3 W。目前该测量仪器已参与了多个智能变电站(例如: 辽宁 220 kV 朝阳何家变电站, 山东 220 kV 怡明变电站, 湖北 220 kV 应城变电站, 湖北 500 kV 柏泉变电站)的现场测试和系统联调, 通过 1 组光串口, 实现了自适应接收和解析合并单元 FT3 采样值信号以及光 IRIG-B 码对时信号。该手持测试仪器可用于 FT3 格式的采样值信号示波监测、光 IRIG-B 码对时信号监测, 以及光串口光纤链路检查、信号异常查找

等用途。除此之外,该仪器还可完成智能 IED 设备工程配置参数检查、光纤以太网链路检查、网络报文监测、以及智能变电站互感器极性测试和二次核相,并能通过 SV/GOOSE 报文发送、接收来校验保护、测控等 IED 设备的动作行为。

3 结论

在智能变电站的建设进入快速发展期的当前情况下,二次设备网络化给变电站测试仪器的智能化与多功能化提出了更多的挑战。测试仪器因需要提供更多光接口来完成更多的测试功能,而导致其功耗和成本的增加。因此,解决光接口自适应问题,对智能变电站测试仪器,尤其是手持便携式测试仪器的研制,具有重要的现实意义。

针对这一问题,本文提出了一种光 IRIG-B/FT3 自适应技术。该技术在—组光串口上实现了 IEC60044-8 (FT3) 格式的采样值 SV 报文的发送与接收的同时,还可自适应接收光 IRIG-B 码报文。从而达到了减少光数字测试仪器接口数量,降低了测试仪器成本和功耗的目的。应用该技术研制的手持式智能变电站运维调试仪器,已成功应用于国内多个智能变电站的系统联调和系统测试之中。

参考文献

- [1] 周斌, 黄国方, 王耀鑫, 等. 在变电站智能设备中实现 B 码对时[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(9): 86-88.
ZHOU Bin, HUANG Guo-fang, WANG Yao-xin, et al. Time synchronization with IRIG-B code in substation IED[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(9): 86-88.
- [2] 赵文广, 任小勇. 智能设备直接实现 B 码对时的方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(10): 113-115.
ZHAO Wen-guang, REN Xiao-yong. Time synchronization with IRIG-B code in intelligent electronic devices[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10): 113-115.
- [3] 童悦, 李红斌, 张明明, 等. 一种全数字化高压电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 59-64.
TONG Yue, LI Hong-bin, ZHANG Ming-ming, et al. An all-digital on-line calibration system for high voltage current transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 59-64.
- [4] 廖泽友, 郭赞, 杨恢宏. 数字化变电站采样值传输规范的综述与对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 113-115.
LIAO Ze-you, GUO Yun, YANG Hui-hong. The summary and contrastive analysis of sampled values transmission communication protocol[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 113-115.
- [5] 曹楠, 李刚, 王冬青. 智能变电站关键技术及其构建方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 63-68.
CAO Nan, LI Gang, WANG Dong-qing. Key technologies and construction methods of smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 63-68.
- [6] 庞红梅, 李淮海, 张志鑫, 等. 110 kV 智能变电站技术研究状况[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 146-150.
PANG Hong-mei, LI Huai-hai, ZHANG Zhi-xin, et al. Research situation of 110 kV smart substation technology[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 146-150.
- [7] 李孟超, 王允平, 李献伟, 等. 智能变电站及技术特点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(18): 59-62.
LI Meng-chao, WANG Yun-ping, LI Xian-wei, et al. Smart substation and technical characteristics analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(18): 59-62.
- [8] 徐焜耀, 徐鑫, 侯兴哲, 等. 构建新一代智能配用电通信网建议[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(10): 1-5.
XU Kun-yao, XU Xin, HOU Xing-zhe, et al. Suggestions on next generation communication network for smart distribution and consumption Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(10): 1-5.
- [9] 庄玉飞, 黄琦, 井实. 基于 GPS 和 IEEE-1588 协议的时钟同步装置的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 111-115.
ZHUANG Yu-fei, HUANG Qi, JING Shi. Development of a clock synchronization device based on GPS and IEEE-1588 protocol[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 111-115.

- [10] 周水斌, 田志国, 赵应兵, 等. 满足 IEC61850 要求的站用时钟服务器[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(7): 56-58.
ZHOU Shui-bin, TIAN Zhi-guo, ZHAO Ying-bing, et al. Substation clock server meeting IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(7): 56-58.
- [11] 肖帅, 孙建波, 耿华, 等. 基于 FPGA 实现的可变模全数字锁相环[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 153-158.
XIAO Shuai, SUN Jian-bo, GENG Hua, et al. FPGA based ratio changeable all digital phase-locked-loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 153-158.
- [12] 沈健, 陆志浩, 潘勇伟, 等. 合并单元技术条件及测试规范[J]. 电力系统通信, 2010, 31(218): 56-59.
SHEN Jian, LU Zhi-hao, PAN Yong-wei, et al. The Description of merging unit's technical requirements and test standard[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2010, 31(218): 56-59.
- [13] 李英明, 郑拓夫, 周水斌, 等. 一种智能变电站合并单元关键环节的实现方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 93-98.
LI Ying-ming, ZHENG Tuo-fu, ZHOU Shui-bin, et al. A realization solution of key links for merging unit in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 93-98.
- [14] 莫峻, 谭建成. 基于并行冗余协议的高可靠性过程总线通信研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 263-268.
MO Jun, TAN Jian-cheng. Highly reliable process bus communication parallel based on redundancy protocol[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 263-268.

收稿日期: 2013-12-05; 修回日期: 2014-03-17

作者简介:

石光(1971-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护的研究与技术管理工作;

赵勇(1967-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电站自动化系统研究; E-mail: 13803819110@126.com

杨经超(1966-), 男, 通信作者, 博士后, 高级工程师, 主要从事继电保护及智能变电站自动化设备相关技术研究。E-mail: yjc@kemov.com