

# 基于解析法的变电站一次系统仿真研究

刘东, 张炳达

(电力系统仿真控制教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072)

**摘要:** 针对由真实二次设备构成的仿真变电站, 提出了解析式仿真与解析变换器相结合的变电站一次系统仿真思想。把变电站一次系统等效为一个三阶系统, 用正弦指数型解析表达式描述其各点的电气量; 利用 Altera 公司的 EP3C25 FPGA 芯片和德州仪器公司的 AD5348 D/A 转换芯片搭建解析转换器; 采用直接数字频率合成技术, 精确控制实现状态转换的动作信号, 使解析转换器的输出信号与理论计算相符。实例测试表明: 解析转换器工作稳定, 真实二次设备运行正常, 能满足变电站培训仿真系统的需求。

**关键词:** 仿真变电站; 真实二次设备; 解析转换器; FPGA; 直接数字频率合成

## Research on analytical simulation of substation primary system

LIU Dong, ZHANG Bing-da

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control (Tianjin University), Ministry of Education, Tianjin 300072, China)

**Abstract:** A new simulation of substation primary system, based on the analytical simulation and the analytical signal converter (ASC), is proposed for the simulative substation composed of real secondary devices. The primary system of substation is simplified to third-order system and sinusoidal-exponential analytical expressions are employed to describe electrical variables. EP3C25 (Altera's FPGA chip) and AD5348 (TI's D/A converter) are used in the design of ASC. Direct digital frequency synthesis and precisely control of state-transition command signal enable the outputs of ASC correspond with theoretical calculation. Prototype tests show that ASC operates stably and secondary system devices run correctly, which can meet the requirements for substation simulation and training system.

**Key words:** simulative substation; real secondary devices; analytical signal converter; FPGA; direct digital frequency synthesis

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0146-05

## 0 引言

实物型变电站培训仿真系统真实感强, 培训效果好, 得到各级电力部门的广泛认可<sup>[1-7]</sup>。对于由真实二次设备构成的仿真变电站<sup>[1,3]</sup>, 提供给二次系统的实时信号可由变压器、线路等设备搭建的变电站一次系统产生。但是, 它存在故障设置点较少, 设备维护量大等问题。目前诸如 RTDS 等全数字实时仿真可以实现对变电站一次系统各点电气量的实时模拟, 但价格昂贵<sup>[6]</sup>。

为简化变电站一次系统的数字仿真, 本文提出了解析式仿真与解析变换器相结合的仿真思想。把变电站一次系统等效为一个三阶系统<sup>[8]</sup>, 用正弦指数型解析表达式描述其各点的电气量, 解析变换器根据解析表达式生成相应的模拟信号。这种仿真思想对计算机系统没有特殊要求, 适用于低成本培训

型仿真变电站。

## 1 变电站一次系统解析表达式模型

变电站一次系统各点电气量的稳定状态基本上 是正弦量, 而暂态过程可表示为:

$$y(t) = y'(t) + y''(t) \quad (1)$$

其中:  $y'(t)$  为强制分量, 是暂态过程结束后的稳定状态;  $y''(t)$  为自由分量, 由系统参数和状态变量的初值所确定。对于培训用仿真变电站, 其一次系统可简化成三阶系统。若系统参数满足过阻尼振荡条件, 则有:

$$y''(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + A_3 e^{-\frac{t}{\tau_3}} \quad (2)$$

若系统参数满足欠阻尼振荡条件, 则有:

$$y''(t) = A_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} \sin(\omega_0 t + \varphi_0) + A_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (3)$$

因此, 变电站一次系统各点电气量可统一表示

为:

$$y(t) = \sum_{i=1}^4 A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

把寻找  $A_i$ 、 $\tau_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\varphi_i$  参数描述变电站一次系统各点电气量的过程称为一次系统解析式仿真。式

(4) 称为一次系统解析模型, 是一个正弦指数型解析表达式。

## 2 仿真变电站的整体框架

在图 1 所示的仿真变电站中, PC 机完成一次系统的解析式仿真, 通过 UART 通信把解析表达式传递给解析转换器; 解析转换器按照解析表达式生成相应的模拟信号; 模拟信号经功率放大后供给真实的二次设备。同时, PC 机接收来自真实二次设备的控制信号, 实时改变一次系统的运行方式。

本文用 Altera 公司的 EP3C25 FPGA 芯片和德州仪器公司的 AD5348 D/A 转换芯片搭建解析转换器<sup>[9-16]</sup>。从功能上来说, 解析转换器由通信控制、解析表达式数字化、D/A 转换模块组成。通信控制模块负责接收来自 PC 机的解析表达式参数, 并在适当时机送给解析表达式数字化模块。解析表达式数字化模块采用直接数字频率合成技术, 分别生成正弦变化的数字量和指数衰减变化的数字量, 通过乘法电路和加法电路形成与解析表达式一致的数字量。D/A 转换模块定时将加载到 D/A 转换芯片上的数字量变成 0~5 V 的模拟量<sup>[14-15]</sup>。因此, 解析转换器实质上是一种特殊用途的信号发生器。

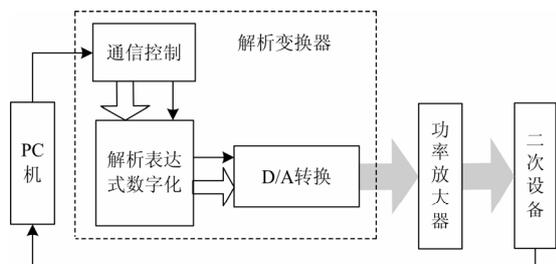


图1 仿真变电站的结构图

Fig.1 Structure of the simulative substation

## 3 解析表达式数字化

### 3.1 正弦函数

正弦函数  $y(t) = \sin(\omega t + \varphi)$  可按其泰勒级数展开式进行计算, 但需要较多的硬件资源。由于正弦函数为周期性函数, 可通过查表的方式确定其数值。本文按相角增量  $\Delta\theta = 2\pi/N$  建立查询表, 其中  $N$  是查询表的地址控制字, 其值的确定需考虑 FPGA 的硬件资源和 D/A 转换芯片的位宽。图 2 是实现正弦函数的一种逻辑电路。

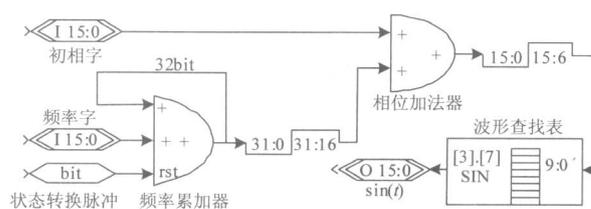


图2 正弦函数电路

Fig.2 Logical circuit of sine function

在图 2 中, 每来一个时钟节拍, 频率累加器 (字宽  $W = 32$ ) 按频率字  $\Gamma$  进行一次累加计算; 当频率累加值超过其字宽时, 高位自动丢弃; 频率累加值的高 16 位和初相字相加, 取相加数的高 10 位作为查询表的地址控制字。这样, 正弦函数电路能随时钟节拍产生按正弦变化规律的离散量。需要指出的是: 正弦函数电路的输出值在一段时间内始终不变, 仅当频率累加值的高 10 位发生变化时才可能发生改变; 由于频率累加器实行自动丢弃高位机制, 正弦函数的每个周期所包含的时钟节拍数不一定相等, 这使正弦函数的频率微调成为可能。正弦函数的频率  $f$  与频率累加器字宽  $W$ 、频率字  $\Gamma$ 、FPGA 的系统时钟  $F_{\text{sys}}$  有关, 其计算式为:

$$f = \frac{\Gamma}{2^W} \times F_{\text{sys}} \quad (5)$$

当  $W = 32$  和  $F_{\text{sys}} = 20 \times 10^6$  Hz 时, 正弦函数频率  $f$  的调整范围为 0.004 7 ~ 305.2 Hz。

### 3.2 指数衰减函数

指数衰减函数  $y(t) = e^{-t/\tau}$  没有周期性, 其产生电路不能简单地套用正弦函数电路。若以时钟节拍  $\Delta t$  为单位进行离散化, 其离散序列为  $y(n) = (e^{-\Delta t/\tau})^n$ , 且满足:

$$y(n) = (e^{-\Delta t/\tau}) y(n-1) \quad (6)$$

由此可见, 指数衰减函数可用累乘器来实现。为调整时间常数  $\tau$ , 既可直接修改  $e^{-\Delta t/\tau}$ , 也可改变累乘器的累乘速度。本文采用直接数字频率合成技术来改变累乘器的累乘速度, 以达到调整时间常数  $\tau$  的目的, 其实现电路如图 3 所示。

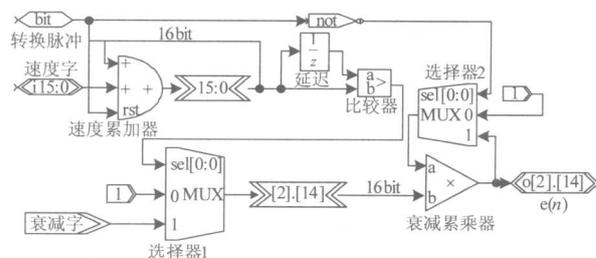


图3 指数衰减函数电路

Fig.3 Logical circuit of exponential decrease function

在图 3 中, 每来一个时钟节拍, 速度累加器(字宽  $W=16$ ) 按速度字  $r$  进行一次累加计算; 仅当速度累加值超过其字宽时, 比较器输出为 1, 衰减累乘器按衰减字  $P$  进行一次累乘计算。另外, 由于选择器 2 的作用, 在状态转换时能使衰减累乘器的输入端  $a$  为 1, 保证累乘运算从 1 开始。

衰减累乘器每隔  $2^W/r$  个时钟节拍累乘一次, 其相隔时间为  $2^W/(rF_{sys})$ 。若要求在一个时间常数  $\tau$  内进行  $n$  次累乘运算, 则有:

$$\begin{cases} P = e^{-1/n} \\ \tau = \frac{n2^W}{rF_{sys}} \end{cases} \quad (7)$$

当  $n=100$ 、 $W=16$  和  $F_{sys}=20 \times 10^6$  Hz 时, 时间常数  $\tau$  的调整范围为  $0.005 \sim 327.68$  ms。

### 4 状态转换控制

当学员操作真实二次设备时, 操作信号由 I/O 装置采集, 通过某种通信方式传递给 PC 机。解析式仿真系统根据学员的操作, 告诉解析转换器如何模仿变电站一次系统各点电气量的暂态过程。这样, 模仿量与实际量之间总存在着时间上的差异。同时, 如果原状态已经稳定, 新状态的自由分量可用原状态的相量角去描述。因此, 本文仅仅关心发生状态转换时原状态的相量角。取变电站一次系统中某个电气量作为基准量, 把其状态转换时的相量角称为触发角  $\phi_{tr}$ 。图 4 是精确控制状态转换的一种逻辑电路。

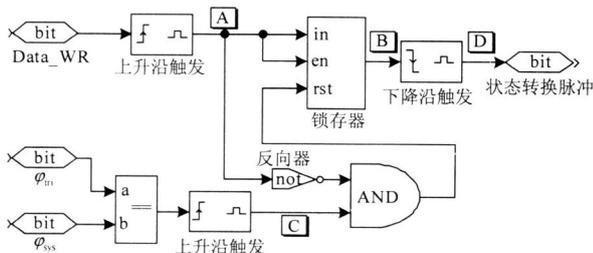


图4 状态转换控制电路

Fig.4 State transition control circuit

图 4 中的  $Data\_WR$  平时处在低电平, 仅当通信控制模块接受来自 PC 机的解析表达式参数时才出现高电平, 是状态转换控制电路的启动信号。当  $Data\_WR$  由低到高时, 在 A 点产生一个正脉冲, 锁存器锁存正脉冲信号, B 点的电平为高。当基准量的相量角  $\phi_{sys}$  到达触发角  $\phi_{tr}$  时, 比较器输出电平由低置高, C 点产生一个正脉冲, 锁存器的清零端为高电平, B 点的电平由高变低, D 点出现一个正脉冲。这脉冲称为状态转换控制电路的动作信号, 它

使新的解析表达式参数加载到解析表达式数字化模块。由于各模仿量的状态转换都由这个动作信号控制, 因而各模仿量在时间上始终保持同步。

为有效地解决相继状态转换问题(如断路器分闸时, 某相先断开, 其他两相后断开), 将相继状态转换的解析表达式参数以及触发角合并成一条消息。每当解析转换器接受到新的消息时, 状态转换控制电路的启动信号被激活。当状态转换控制电路出现动作信号时, 启动信号再次被激活, 直到消息中包含的状态转换都发生过为止。

### 5 D/A转换控制

当解析转换器的表达式量化速度达到  $10 \times 10^3$  Hz 时, 变电站二次设备就能够像在真实的环境中那样工作。因此, 本文采用廉价的 AD5348 芯片把量化数据变成模拟量。

AD5348 是一个八通道 12 位 DAC 芯片。数据在  $WR$  上升沿载入到输入寄存器, 在  $LDR$  上升沿载入到 DAC 寄存器。这种双缓冲机制, 使输出的模拟量能够同时更新。此外, AD5348 还提供了 CLR 功能, 可以将输入寄存器和 DAC 寄存器的内容全部复位至零。图 5 是 FPGA 控制 AD5348 有关引脚的时序。

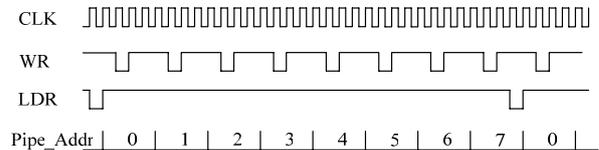


图5 D/A转换控制信号时序

Fig.5 Sequence chart of D/A conversion-control signal

在图 5 中, 通道选择地址每隔 4 个时钟节拍变更一次且按 0~7 规律重复。WR 在选择地址更换后的第 2 个时钟节拍位置上产生写脉冲, LDR 在选择地址重复之前产生更新脉冲。

### 6 实验与结论

本文以图 6 所示的 35 kV/6 kV 变电站为原型建立仿真变电站, 其正常运行方式是: SYS1 供电, SYS2 热备用, 35 kV I、II 段并列, T1 运行, T2 热备用, 6 kV I、II 段并列, 两组电容器均投入运行。各种保护的时间定值如表 1 所示。

用 DigSilent 对学员的各种操作和教员的各种设置进行模拟, 得到有关电气量的暂态过程。用式 (4) 的一次系统解析模型对暂态过程进行曲线拟合, 得到一套  $A_i$ 、 $\tau_i$ 、 $\omega_i$ 、 $\phi_i$  参数变量, 并保存在数据库中。当仿真变电站运行时, 按照学员操作或

教员设置从数据库中找出一套相应的参数, 并把它们发送给解析转换器。

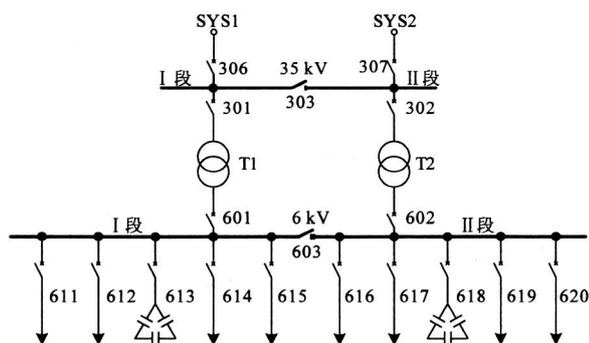


图6 仿真变电站主接线

Fig.6 Main electric connection of simulative substation

表 1 各种保护的时间定值

Tab.1 Time settings of protections

名称	保护	时间/s	名称	保护	时间/s
306,307	速断	0.5	611,612	速断	0.2
	过流	2.5		616,617	过流
	重合闸	2.5	619,620		重合闸
	后加速	0.5		后加速	0.2
T1,T2	差动	0.2	613,618	过流	0.2
	高压过流	1.5		低压	0.5
	重瓦斯	0.2		不平衡	0.5
	过负荷	9	603	过流	1

对仿真变电站进行各种试验, 包括: 线路近区短路, 线路远区短路, 母线短路, 变压器内部绕组短路, 变压器出口短路, 电容器故障, 以及它们与保护拒动或开关拒动形成的复杂故障。图 7 是在线路 611 保护装置电流信号输入端子上用录波仪存储的部分试验数据。

试验结果表明: 解析转换器能够准确提供仿真变电站一次系统的相关电气量, 二次设备工作正常, 动作准确。

本文针对包含真实二次设备的变电站培训仿真系统, 提出了用一次系统解析式仿真和解析转换器相结合的仿真思想。解析转换器采用直接数字频率合成技术, 分别生成正弦变化的数字量和指数衰减变化的数字量, 通过乘法电路和加法电路形成与解析表达式一致的数字量, 并实现了状态转换的精确控制。这种仿真思想有效地降低了仿真变电站的成本, 必将推动实物型变电站培训仿真系统的发展。

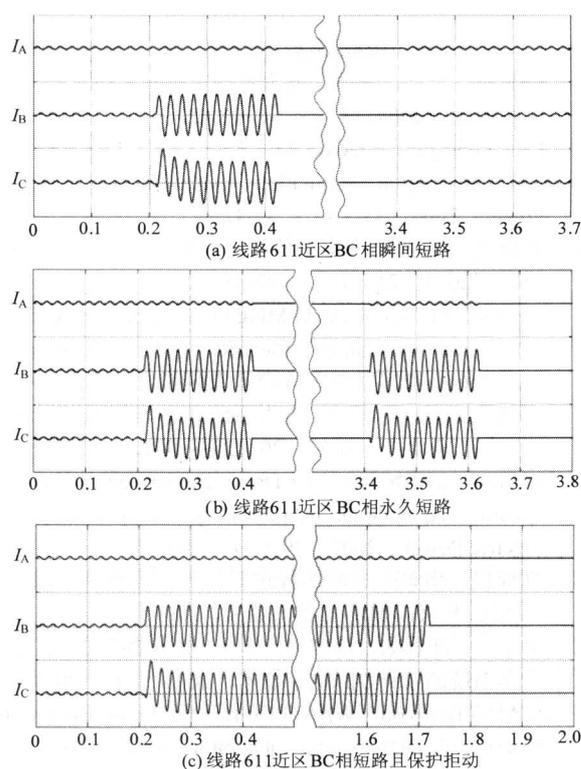


图7 线路611保护装置电流信号输入端子上的部分试验数据

Fig.7 Experiment data of current input on protection for line 611

## 参考文献

- [1] 梁旭, 张萍, 胡明亮, 等. 基于实时仿真技术的变电站数字物理混合仿真与培训系统[J]. 电力系统自动化, 2008, 29 (10): 79-81, 96.  
LIANG Xu, ZHANG Ping, HU Ming-liang, et al. Hybrid simulating and training system of substation based on real-time simulation technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 29 (10): 79-81, 96.
- [2] 方舒燕. 变电站培训仿真系统的应用与发展[J]. 高电压技术, 2005, 31 (4): 79-81.  
FANG Shu-yan. Application and development of substation training simulation system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (4): 79-81.
- [3] 韩念杭, 王苏, 张惠刚, 等. 面向维护人员的变电站自动化技术培训系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (2): 88-90, 106.  
HAN Nian-hang, WANG Su, ZHANG Hui-gang, et al. Maintainers oriented substation automation technique training system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (2): 88-90, 106.
- [4] 高源, 陈允平, 刘会金. 电力系统物理与数字联合实时仿真[J]. 电网技术, 2005, 29 (12): 77-80.  
GAO Yuan, CHEN Yun-ping, LIU Hui-jin. Joint

- physico-digital real-time simulation of power system[J]. Power System Technology, 2005, 29 (12): 77-80.
- [5] 柳勇军, 梁旭, 闵勇. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 中国电力, 2004, 37 (4): 39-42.  
LIU Yong-jun, LIANG Xu, MIN Yong. Power system real-time digital simulation technologies[J]. Electric Power, 2004, 37 (4): 39-42.
- [6] 张雨飞, 王明春. 变电站仿真培训系统[J]. 电力自动化设备, 2001, 21 (12): 23-25.  
ZHANG Yu-fei, WANG Ming-chun. Substation training simulation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21 (12): 23-25.
- [7] 李健, 陈涵, 李大路. 电力系统动态等值研究方法综述[J]. 广东电力, 2007, 20 (2): 1-4, 9.  
LI Jian, CHEN Han, LI Da-lu. Review on methods of dynamic equivalents in power system[J]. Guangdong Electric Power, 2007, 20 (2): 1-4, 9.
- [8] 郑亚民, 董晓舟. 可编程逻辑器件开发软件 Quartus II [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 王本有, 汪德如, 苏守宝. 基于FPGA的DDS信号发生器系统的设计[J]. 电子技术, 2008 (4): 40-42.  
WANG Ben-you, WANG De-ru, SU Shou-bao. On the design of DDS signal generator system based on FPGA[J]. Electric Technology, 2008 (4): 40-42.
- [10] 曾云, 韩顺锋. 基于FPGA的DDS信号源设计及误差分析[J]. 舰船电子工程, 2009, 29 (2): 72-74, 143.  
ZENG Yun, HAN Shun-feng. Design and error analysis of DDS signal generator based on FPGA[J]. Ship Electric Engineering, 2009, 29 (2): 72-74, 143.
- [11] 朱凯, 张坚. 基于解析信号处理的下变频系统 FPGA实现与天文应用[J]. 天文研究与技术, 2009, 6 (1): 51-56.  
ZHU Kai, ZHANG Jian. The FPGA realization of a DDC system based on analytical-signal processing and its application in astronomy[J]. Astronomical Research and Technology, 2009, 6 (1): 51-56.
- [12] 刘纯武, 黄芝平. 一种多通道信号处理复用结构及其FPGA实现方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2008, 22 (1): 72-75.  
LIU Chun-wu, HUANG Zhi-ping. Multiplexing-architecture and its FPGA realization for multi-channel signal processing[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2008, 22 (1): 72-75.
- [13] 王旭智, 丁晓青, 何平. 基于FPGA的模拟信号波形的实现方法[J]. 微计算机信息, 2005, 29 (3-2): 205-206, 220.  
WANG Xu-zhi, DING Xiao-qing, HE Ping. Realization method of the analogous wave-form based on FPGA [J]. Microcomputer Information, 2005, 29(3-2): 205-206, 220.
- [14] 付莉, 潘明. 基于FPGA数字移相信号发生器设计[J]. 微计算机信息, 2009, 25 (5-2): 175-176, 107.  
FU Li, PAN Ming. Design of digital phase shift signal generator based on FPGA[J]. Microcomputer Information, 2009, 25 (5-2): 175-176, 107.
- [15] Romero Troncoso R D J, Espinosa Flores verdad G. Phase accumulator synthesis algorithm for DDS applications[J]. Electronics Letters, 1999, 35 (10): 770-772.

收稿日期: 2009-11-19; 修回日期: 2010-01-14

作者简介:

刘东 (1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统仿真与控制; E-mail: liudongtju@tju.edu.cn

张炳达 (1959-), 男, 通讯作者, 教授, 研究方向为变电站培训仿真。E-mail:bdzhang@tju.edu.cn

(上接第 145 页 continued from page 145)

- JIN Hua-feng, YU Rong-yun, ZHU Xiao-tong, et al. Research on dynamic transmission delay of bi-directional multiplex section switching ring used for line pilot relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (3): 65-70.
- [5] 金华锋, 叶红兵, 凌昉, 等. 复用通道误码和延时对线路纵差保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (21): 63-67.  
JIN Hua-feng, YE Hong-bing, LING Fang, et al. Effect of bit error and transmission delay of multiplex channel on line current differential relay[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29 (21): 63-67.
- [6] 曹团结, 梁艳, 陈建玉, 等. 一种线路纵差保护通道监测的新方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (21): 65-67.  
CAO Tuan-jie, LIANG Yan, CHEN Jian-yu, et al. A new method of channel monitoring for fiber optic line differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32 (21): 65-67.

收稿日期: 2009-11-13; 修回日期: 2009-12-10

作者简介:

李钢 (1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作; E-mail: li.gang.b@ncgc.com.cn

冯辰虎 (1977-), 男, 高级工程师, 大学本科, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作; E-mail: fengchenhu@ncepri.cn

孙集伟 (1956-), 男, 高级工程师, 大学本科, 从事电力系统继电保护与安全自动装置的研究、试验及管理工作。