

# 短暂扰动注入法对于小电流接地系统线路状态 在线监测的探讨

王新超<sup>1</sup>, 苏秀苹<sup>1</sup>, 张丽丽<sup>2</sup>, 李建<sup>3</sup>

(1. 河北工业大学, 天津 300130; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061;  
3. 华电青岛发电有限公司, 山东 青岛 266031)

**摘要:** 针对小电流接地系统对地绝缘问题较多, 探讨了一种基于短暂扰动注入的输配电线路状态在线监测新方法。根据电磁场和电磁波理论, 在平行线上运动的电压与电流行波, 将受到来自导体周围垂直平面内介质的本质属性和导体电阻的影响。基于这一原理, 设计在线路分叉处注入一高频短暂扰动, 实现线路的绝缘扫描并在终端接收和分析扫描结果。通过仿真验证该方法具有可以有效地发现绝缘异常, 甄别异常线路, 并可在一定范围内对异常部位进行定位分析等优点。

**关键词:** 状态监测; 小电流接地系统; 仿真; 在线监测; 绝缘监测; 故障选线

## Discussion on the online monitoring for non-solidly grounded system power line based on a temporary disturbance injection

WANG Xin-chao<sup>1</sup>, SU Xiu-ping<sup>1</sup>, ZHANG Li-li<sup>2</sup>, LI Jian<sup>3</sup>

(1. Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Hua-dian Qingdao Electric-power-generation Ltd, Qingdao 266031, China)

**Abstract:** A new on-line approach using a temporary disturbance injection signal to detect the electricity transmission and distribution lines is presented, since insulation problems between phase-line and ground arise frequently. Based on electromagnetic field and electromagnetic wave theory, voltage and current moving waves along parallel wires can be influenced by the essential characteristics of media around the wires. Based on the theory, a temporary high frequency disturbance is injected at the branch point to scan the whole line insulation around and pick up at the end terminals for analysis. Being proved by simulation, it is of several merits for effectively finding out the unusual insulation changing, discriminating abnormal line, and analyzing the location of error point around.

**Key words:** state-monitor; non-solidly grounded system; simulation; on-line monitor; insulation monitor; fault line selection

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0141-05

## 0 引言

电力设备状态的在线监测, 可以最大限度地降低设备故障所造成的损失, 缩短设备的维修时间、降低维护成本、延长设备的使用寿命, 这已成为越来越多人们的共识。在我国配电网中, 单相接地故障的发生机率很高, 如果能实现各段输配电线路绝缘状态的在线监测, 及时发现隐患, 并在适当的时间加以处理, 就能有效地避免较大故障的发生<sup>[1-3]</sup>。

## 1 线路在线监测方法概述

由于小电流接地系统的特点是中性点不直接接地, 所以零序对地回路交流阻抗比较大, 相线对地

没有工作负载。因此在各相线与地之间分别加注一定高频的轻微短暂扰动信号, 不会对整个电网运行产生很大影响。具体做法见图 1 所示。

以 A 相线路为例, 将扰动信号源连接于分叉母线上。信号源于特定时刻在极短暂的时间内对线路发出某一特定频率的扰动信号, 信号以电压波动的形式在各分支线路上流动, 并历经末端的接收器 Pi。由于电压波在线路上的移动状态, 将受到来自导体周围垂直平面内介质的本质属性和导体电阻的影响<sup>[4]</sup>。当电压行波通过线路某一绝缘问题区域时, 行波的幅值和相位就会发生相应改变<sup>[5]</sup>。这些变化最终被安装于末端的接收器 Pi 拾取。经过加工处理, 提取出有用信息, 并与历史纪录档案相对比,

从而实现问题判断。

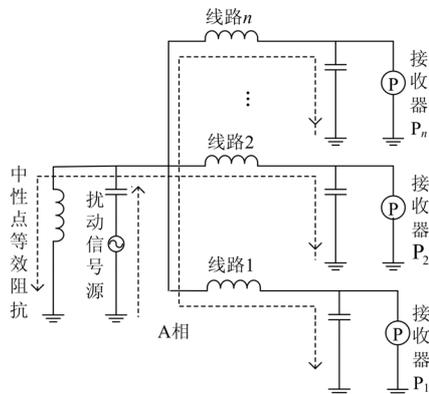


图 1 扰动注入监测法工作原理图

Fig.1 Diagram of online monitoring method by introducing disturbance signal

应当指出连接于分叉母线处的注入源，只要在注入时间内保持较低内阻，就可以通过电压嵌位作用，抑制各分支线路反射回来的行波的相互干扰，从而区分出问题支路，或在一定范围内实现隐患定位。单就注入法来说，已在电力系统有许多应用，其双端或单端检测也已比较成熟<sup>[6-10]</sup>。

## 2 理论分析与推导

### 2.1 传输方程与线元的描述

根据分布参数理论，流动于相线与地之间的电压和电流波，可以用公式(1)来描述。其中各参数分别为：线路电压  $u$ ；线路电流  $i$ ；线路由输入口延伸出去的导线长度  $x$ ；线路单位距离电阻  $R$ ；线路单位距离电感  $L$ ；线路单位距离对地导纳  $G$ ；线路单位距离对地电容  $C$ 。

$$-\frac{\partial u}{\partial x} = Ri + L \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} = Gu + C \frac{\partial u}{\partial t} \quad (1)$$

将公式(1)两边同时乘以一个足够小的线路长度增量  $\Delta x$ ，公式左边偏导数与增量的乘积，可以看作是增量距离上电压与电流的增量，右边  $\Delta x$  与单位参数系数合并，其意义分别代表该段距离上的相应参数值。按此方法整理后得到表达式(3)。根据传输线理论，只要  $\Delta x \ll \lambda_g$ ，上述近似即可成立。

$$-\frac{\partial u}{\partial x} \Delta x = (R\Delta x)i + (L\Delta x) \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\frac{\partial i}{\partial x} \Delta x = (G\Delta x)u + (C\Delta x) \frac{\partial u}{\partial t} \quad (2)$$

$$-\Delta u = R_x i + L_x \frac{\partial i}{\partial t}, \quad -\Delta i = G_x u + C_x \frac{\partial u}{\partial t} \quad (3)$$

如果用  $-\Delta u = u_x - u_{x+\Delta x}$ ， $-\Delta i = i_x - i_{x+\Delta x}$  表示，则式(3)可以近似等价于一小段电路网络见图 2(a)或(b)，通常称其为线元。将图 2(a)、(b)网络中的对地部分参数合并，即可得到网络双口对称性线元 T 型。一段距离  $x$  长线路的电气特性，可以等效为数个线元的串联。

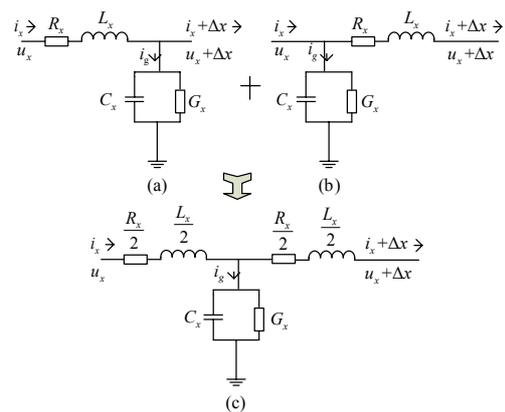


图 2 线元模型

Fig.2 Wire element model

### 2.2 传导导波的波长与波速

根据电磁波理论，式(1)的时域表示法，也可以写为式(4)的相量形式。

$$-\frac{dU(x)}{dx} = (R + j\omega L)I(x), \quad -\frac{dI(x)}{dx} = (G + j\omega C)U(x) \quad (4)$$

将式(4)中的电流项代换掉，就可得式(5)：

$$\frac{d^2 U(x)}{dx^2} - (R + j\omega L)(G + j\omega C)U(x) = 0 \quad (5)$$

这是一个简单的一元二次微分方程，其解形式为

$$U(x) = A_1 e^{-\gamma x} + A_2 e^{\gamma x} \quad (6)$$

其中传播常数：

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (7)$$

$A_1 e^{-\gamma x}$  和  $A_2 e^{\gamma x}$  根据其物理意义，可分别看作是沿线路前行的电压波和反行电压波。现在仅考察前行波  $A_1 e^{-\gamma x}$ ，将  $\gamma = \alpha + j\beta$  代入  $A_1 e^{-\gamma x} = (A_1 e^{-\alpha x}) A_1 e^{-j\beta x}$ ，其中  $(A_1 e^{-\alpha x})$  代表波的幅值衰减变化， $A_1 e^{-j\beta x}$  则表示相位的移动。由波长的物理意义知，波长为某一频率波沿运动方向移动完成一个  $2\pi$  相角的距离为一

个波长  $\lambda_g$ , 即  $\beta\lambda_g=2\pi$ , 因而波长为

$$\lambda_g = 2\pi / \beta \quad (8)$$

又波长与完成一个波长所传输的时间 (周期) 之比为波速, 即:

$$v_p = \lambda_g / T = \omega / \beta \quad (9)$$

显然运动波在线路上的衰减、波长与波速都与线路参数  $R$ 、 $L$ 、 $G$ 、 $C$  有关。

### 2.3 等效电路

由于每相线与大地平行架设, 因此可以近似把他们看成为均匀平行传输线系统。由于母线上扰动源的电压错位作用, 各分支电压变化可以独立考虑。借助前面的线元电路原理, 将每条支路等效为图 3 所示电路网络。为了体现线路元件的双向对称性, 这里采用了 T 型线元。

应当指出在小电流接地系统中, 负载端是不接地的, 因此与大地间没有直接的负荷电流, 但终端用电设备的内部导体与大地间存在着杂散电容和漏电导纳, 尽管可能很小不过与线路参数相比也不能忽略, 应作为网络计算参数的一个单元。

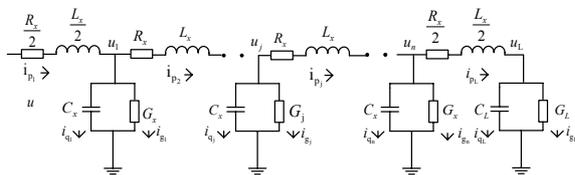


图 3 分支线路元等效电路

Fig.3 Equivalent element circuit of branch transmission line

图中导纳  $G_j$  所表达的意义为线元附近线路中的绝缘情况, 如果绝缘下降, 则体现为导纳  $G_j$  的增大。

由此等效网络可以看出,  $G$  参数的变化必然引起网络终端电压  $u_L$  的改变。这正是本监测方法实现的依据。

### 2.4 状态方程描述

对图 3 所示网络运行状态的研究, 可以有許多方法。本文在这里仅给出其状态方程描述。如果令线路各状态量为:

$$X = (u_1, i_{p1}, u_2, i_{p2}, \dots, u_j, i_{pj}, \dots, u_n, i_{pn}, u_L, i_{pL})^T,$$

则图 3 的网络可以由一状态方程来表达。限于篇幅式 (10) 仅给出了 5 个线元时的描述方程。

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \frac{G}{c} & \frac{1}{c} & 0 & \frac{1}{c} \\ \frac{2}{L} & \frac{R}{L} & & \\ 0 & 0 & \frac{G}{c} & \frac{1}{c} & 0 & \frac{1}{c} \\ \frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{G}{c} & \frac{1}{c} & 0 & \frac{1}{c} \\ & & & \frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} & \\ & & & & & \frac{G_x}{c} & \frac{1}{c} & 0 & \frac{1}{c} \\ & & & & & \frac{1}{L} & 0 & \frac{1}{L} & \frac{R}{L} \\ & & & & & & & \frac{G}{c} & \frac{1}{c} & 0 & \frac{1}{c} \\ & & & & & & & & \frac{G_L}{c_L} & \frac{1}{c_L} \\ & & & & & & & \frac{2}{L} & 0 & \frac{2}{L} & \frac{R}{L} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \\ L \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

### 2.5 线元主要参数的估算

根据电磁场理论, 对于平行导线参数  $C$ ,  $L$  可以采用:

$$C = \frac{\pi\epsilon}{\ln(2D/d)}, \quad L = \frac{\mu}{\pi} \ln(2D/d) \quad (11)$$

对于同轴电缆可以采用:

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D/d)}, \quad L = \frac{\mu}{2\pi} \ln(D/d) \quad (12)$$

## 3 仿真研究

由上面分析知, 各支路状态可以独立考虑。因此仿真只需选用一段支路即可。

### 3.1 线路参数的选取与计算

由式 (11) 取:  $L=2.67 \times 10^{-3}$  H/km,  $C=5.17 \times 10^{-9}$  F/km; 导线电阻  $R=2$   $\Omega$ /km (高频时要比直流电阻大), 对地导纳为  $G=10^{-7}$  S/km; 负载端  $C_L=1.0 \times 10^{-7}$  F,  $G_L=10^{-7}$  S; 线路长度 3 km, 扰动信号注入频率 30.022 kHz。根据式 (7) 和式 (8), 可以算出传播常数  $\gamma=\alpha+j\beta=0.000696+j0.700843$ , 因而信号波长为  $\lambda_g=2\pi/\beta \approx 8.97$  km。为了满足线元跨距  $\ll$  信号波长的要求, 仿真采用 12 个线元网络, 每个线元描述线长为 0.25 km。其波速  $v_p=\omega/\beta \approx 269152.8$  km/s。移动 3 km 需要经过  $t=3/269152.8 \approx 11.146$   $\mu$ s。

### 3.2 仿真计算及分析

仿真由支路的母线始端注入  $200\sin(188633.79t)$  V 电压扰动, 计时  $t=0$  时刻开始, 共计注入 3 个周波。注入信号在线路上的运行由状态方程的递推来计算。其末端仿真信号见图 4 所示。

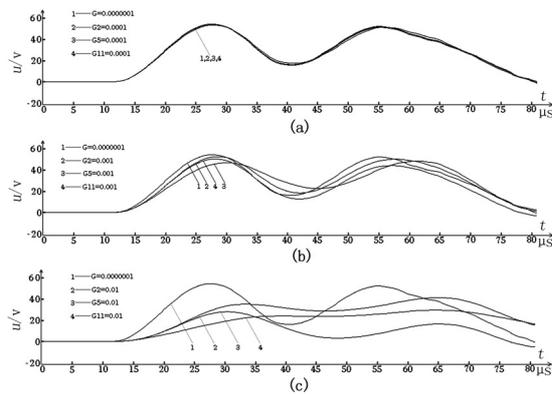


图 4 局部绝缘变化时的终端电压仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of terminal voltage changes caused by partial insulation variation

图中曲线 1 为绝缘正常情况下的末端电压波响应；曲线 2 为第二级线元附近绝缘下降时的末端电压波响应；曲线 3 为第五级线元附近绝缘下降时的末端电压波响应；曲线 4 为第十一级线元附近绝缘下降时的末端电压波响应。 $G_2$ 、 $G_5$ 、 $G_{11}$  分别代表反映二、五、十一级绝缘的漏电导纳单位西门子 S。图中各曲线变化表明末端接收电压波，不仅可以发现绝缘变化，而且还能反映出不同区域绝缘的变化。

为了进一步量化接收数据便于总结，特将图中仿真曲线的前两个波头进行傅氏和均值运算。按第一波头到达的时刻，约为 11.146  $\mu\text{s}$  开始取值计算，并将计算结果列于表 1、2、3。

表 1 第二级线元  $G_2$  变化时

Tab.1 Variation of the second wire element

	正常	$G_2=10^{-4}\text{S}$	$G_2=10^{-3}\text{S}$	$G_2=10^{-2}\text{S}$
相位	$-67.552^\circ$	$-68.789^\circ$	$-79.7209^\circ$	$-134.98^\circ$
幅值	18.129 V	18.211 4 V	18.343 8 V	10.797 5 V
均值	30.206 V	30.166 5 V	29.891 2 V	26.661 5 V

表 2 第五级线元  $G_5$  变化时

Tab.2 Variation of the fifth wire element

	正常	$G_5=10^{-4}\text{S}$	$G_5=10^{-3}\text{S}$	$G_5=10^{-2}\text{S}$
相位	$-67.552^\circ$	$-70.884^\circ$	$-95.48^\circ$	$150.179^\circ$
幅值	18.129 V	18.489 4 V	16.724 5 V	6.175 9 V
均值	30.206 V	29.993 8 V	0.290 2 V	19.573 4 V

表 3 第十一级线元  $G_{11}$  变化时

Tab.3 Variation of the eleventh wire element

	正常	$G_{11}=10^{-4}\text{S}$	$G_{11}=10^{-3}\text{S}$	$G_{11}=10^{-2}\text{S}$
相位	$-67.552^\circ$	$-68.153^\circ$	$-73.904^\circ$	$-112.81^\circ$
幅值	18.129 V	18.195 8 V	18.327 6 V	10.144 2 V
均值	30.206 V	29.692 7 V	25.744 V	11.101 3 V

表中数据反映出：①相相对局部绝缘变化最灵敏，并且随着绝缘的下降 ( $G$  值升高) 其变化幅度会迅速增加；②幅值在绝缘较小下降时，不能有效反映绝缘变化；③对同样的  $G$  值，相移变化在前后各级之间并不成比例关系；④信号的均值对绝缘的变化和级数成反比关系。

基于上述分析，我们可以得出这样的结论，通过相移和幅值的历史性比较，可以及时地发现线路的绝缘异常，并且能够在一定的范围内，评估其异常的程度。如果结合均值一起考虑，还可以对异常部位实现定位。

## 4 小结

相比较于其它线路检测方法<sup>[12]</sup>，本文提出的短暂扰动注入法，至少有如下几个优点：(1) 对线路状态可以实现在线监测；(2) 当线路出现绝缘异常时，可以根据检测结果实现异常支路的甄别；(3) 可以在一定范围内对异常部位进行定位分析；(4) 适用于高阻接地选线。

同时应当指出，本方法需要有历史记录作为判断依据，对于线路或设备发生更新，应及时更新历史纪录。

## 参考文献

- [1] 庄兴元. 电力设备在线监测技术现状及实际开发应用前景[J]. 电工技术杂志, 2003(5): 19-21.  
ZHUANG Xing-yuan. On-line Monitoring Technology of Electrical Equipment and Its Prospects for the Practical Development and Application[J]. Electrotechnical Journal, 2003(5): 19-21.
- [2] 李燕青,等. 我国电气设备状态维修的发展与实现[J]. 中国电力, 2003, 36(2): 16-19.  
LI Yan-qing, et al. Development and Implementation of Condition Based Maintenance for Electrical Equipments in China[J]. Electric Power, 2003, 36(2): 16-19.
- [3] 苏鹏声,王 欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 61-65.  
SU Peng-sheng, WANG Huan. Technology Analysis of State Monitoring and Fault Diagnosis in Electric Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(1): 61-65.
- [4] 邹澎,周晓萍. 电磁场与电磁波[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.  
ZOU Peng, ZHOU Xiao-ping. Electromagnetic Fields and Electromagnetic Waves[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2008.
- [5] Jongs A T, Agrawal P. New Approach to Power Line Protection Based upon the Detection of Fault Induced High Frequency Signals[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 1990, 137(4): 307-313.
- [6] 赵正军, 姜新宇. 信号注入法在配电网电容电流测量

- 中的研究[J]. 广东电力, 2004, 17(6): 25-28.  
ZHAO Zheng-jun, JIANG Xin-yu. Research on Capacitive Current Measurement with Signal Injection in Distribution Network[J]. Guangdong Electric Power, 2004, 17(6): 25-28.
- [7] 季涛, 薛永端, 孙同景, 等. 配电线路行波故障测距初探[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 66-71.  
JI Tao, XUE Yong-duan, SUN Tong-jing, et al. Fault Location for Distribution Feeders Based on Traveling Waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 66-71.
- [8] 徐丙垠, 李京, 陈平, 等. 现代行波测距技术及其应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 62-65.  
XU Bing-yin, LI Jing, CHEN Ping, et al. Modern Fault Location Techniques Based on Fault Generated Travelling Waves and Their Applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 62-65.
- [9] 桑在中, 潘贞存. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 50-53.  
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun. A New Approach of Fault Line Identification, Fault Distance Measurement and Fault Location for Single Phase-to-ground Fault in Small Current Neutral Grounding System[J]. Power System Technology, 1997, 21(10):50-53.
- [10] 何正友, 李伟华. 基于 S 注入法的自闭贯通线路故障定位系统[J]. 西安交通大学学报, 2005, 40(5): 569-574.  
HE Zheng-you, LI Wei-hua. Fault Location System for Automatic Block and Continuous Transmission Lines Based on S-Injection Method[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2005, 40(5): 569-574.
- [11] 徐志祥, 刘健, 王晓明. 控制系统动态特性精细积分数字仿真[J]. 大连理工大学学报, 2000, 40(5): 582-585.  
XU Zhi-xiang, LIU Jian, WANG Xiao-ming. Precise Integration Numerical Simulation Method for Dynamic Response of Linear Control System[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2000, 40(5): 582-585.
- [12] 肖登明. 电力设备在线监测与故障诊断[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2005.  
XIAO Deng-ming. On-line Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Equipment[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press, 2005.

收稿日期: 2009-12-03; 修回日期: 2009-12-30

作者简介:

王新超 (1962-), 男, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力设备状态监测与安全运行; E-mail: wangxinchao@sdu.edu.cn,

苏秀苹 (1966-), 女, 教授 (博导), 博士, 主要研究方向为电器现代设计技术;

张丽丽 (1985-), 女, 研究生, 学士学位, 研究方向为电力设备状态监测与安全运行。

(上接第 136 页 continued from page 136)

太网, 加装了间隔层的交换机; 测控及保护装置通过以太网直接接入监控系统, 取消了前置机; 将原 PLC 五防系统改为由 NSD500 测控装置实现。从数据安全方案上, 保障了站端数据、调度端数据、五防闭锁逻辑的完整性。从施工方案上, 制定了过渡方案, 保证了改造工作的安全性, 确保了自动化系统数据备份和软件版本控制。整个方案的实施, 有效降低了改造的现场安全风险, 保障了变电站综合自动化系统改造工作的顺利进行。

改造完成后, 该 500 kV 变电站综合自动化系统运行稳定, 缺陷发生率大大降低, 相比改造前, 设备硬件性能及易维护性大大提高, 系统结构得到简化, 调整了间隔层五防的实现方式, 减少了设备数量及二次接线, 且易于故障的排查, 经过改造还优化了自动化系统通信网络, 提高信息传递的速率和稳定性。

## 参考文献

- [1] 王海峰, 丁杰. 对变电站内若干网络通信问题的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28 (24): 65-68, 73.  
WANG Hai-feng, DING Jie. Research on Several Issues

of Substation Network Communications[J]. Power System Technology, 2004, 28 (24): 65-68, 73.

- [2] 孙军平, 盛万兴, 王孙安. 新一代变电站自动化网络通信系统研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (3): 16-19, 145

SUN Jun-ping, SHENG Wan-xing, WANG Sun-an. Study on the New Substation Automation Network Communication System[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (3): 16-19, 145.

- [3] 蒋德年, 魏育成. 变电站综合自动化系统体系结构研究[J]. 电网技术, 2003, 27 (10): 48-51.

JIANG De-nian, WEI Yu-cheng. Study on Structure of Integrated Substation Automation System[J]. Power System Technology, 2003, 27 (10): 48-51.

收稿日期: 2009-04-11; 修回日期: 2009-12-15

作者简介:

霍建彬 (1980-), 男, 硕士, 工程师, 现从事变电站自动化运行管理工作; E-mail: jianbinhuo@163.com

吴国沛 (1975-), 男, 高工, 现从事电力系统继电保护及调度自动化管理工作;

黄欣 (1970-), 男, 高工, 现从事电力系统调度自动化管理工作。