

# 基于网络采样的变压器差动保护异步闭锁技术研究

高吉普, 徐长宝, 陈建国, 秦健

(贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550002)

**摘要:** 以网络采样的智能变电站为背景, 提高变压器差动保护的网路适应性为目的, 提出了基于网络采样的变压器差动保护异步闭锁机制。阐述了网络采样及其同步方式, 并分析产生异步的各种原因; 分析了不同厂家变压器稳态量差动在异步情况下的动作特性; 根据负荷变化及不同差动启动值得出保护动作时的角差, 并据此分析出导致差动误动的采样异步帧数, 提出了解决方法。采用该闭锁机制的变压器差动保护已经在智能变电站工程中投入运行, 在避免因异步导致的保护误动方面取得良好效果。

**关键词:** 智能变电站; 变压器差动保护; 异步闭锁机制; 网络采样; 稳态量差动

## Research on asynchronous blocking technology of transformer differential protection based on network sampling

GAO Ji-pu, XU Chang-bao, CHEN Jian-guo, QIN Jian

(Guizhou Electric Power Research Institute, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** This paper presents asynchronous blocking mechanism of transformer differential protection based on network sampling. The purpose is to improve the network adaptability of the transformer differential protection based on the background of smart substation of network sampling. It introduces the network sampling and its synchronism mode, as well as the reasons of asynchronous state. It studies the operation characteristic of steady-state differential transformers in the asynchronous situation from different manufacturers. Then the deviation angle of operation of transformer differential protection can be achieved according to the load change and different start values. Then the sampling asynchronous frames causing the mal-operation of differential protection are analyzed and solutions are presented. The transformer differential protection which uses the asynchronous blocking mechanism has been put into practice in the smart substation projects and it achieved good results in avoiding the protection mal-operation caused by asynchronous performance.

**Key words:** smart substation; transformer differential protection; asynchronous blocking mechanism; network sampling; steady-state differential

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0105-06

## 0 引言

随着光纤通信技术、数字化技术的发展, 智能变电站已经从科技项目向工程化转化, 国家电网和南方电网已经把智能变电站纳入到十二五规划的重点方向, 智能变电站必然成为变电站发展的方向<sup>[1-3]</sup>。但随着智能变电站的投运, 也将带来一系列的新问题, 特别是时钟同步问题, 严重时可能导致主变差动误动作<sup>[4-5]</sup>。

对于智能变电站保护的研究, 包括原理、算法、可靠性等各个方面<sup>[6-12]</sup>, 文献[6]提出了新型的站域

后备保护。文献[7]提出了一种方向原理的母线保护方案, 是一种实现起来低成本并且对网络通信几乎不增加任何负担的方案。文献[8]提出了基于智能变电站的集中式保护的概念。文献[9]提出一种基于智能变电站数据源统一、数据共享特点的系统保护装置的实现方案。文献[10]研究了在使用电子式互感器的智能变电站和使用电磁式互感器的传统变电站之间, 如何实现光纤差动保护。文献[11]进行了IEC61850标准智能与传统继电保护的比较, 并说明了智能变电站引起了继电保护实现方式上的变革。文献[12]提出了解决智能变电站中保护装置失效和

电子式互感器失效的新型可靠性技术方案。

以网络采样的智能变电站为基础，根据现场实际运行情况提出网络化采样的主变差动保护存在的新问题。针对主变差动保护在采样不同步的情况下的闭锁机制进行定量分析，得出相关的结论和建议。

### 1 网络采样

#### 1.1 网络结构

网络采样的智能变电站结构示意图如图1所示。物理结构上，由三个层次构成，分别为过程层、间隔层、站控层，每层均由相应的设备及网络设备构成<sup>[13]</sup>。采样值(SV)组成独立的A、B网。间隔层主变保护采用双配置，过程层合并单元、智能终端均双配置，分别挂在A、B上；其中合并单元SV数据按DL/T860.92方式传输。

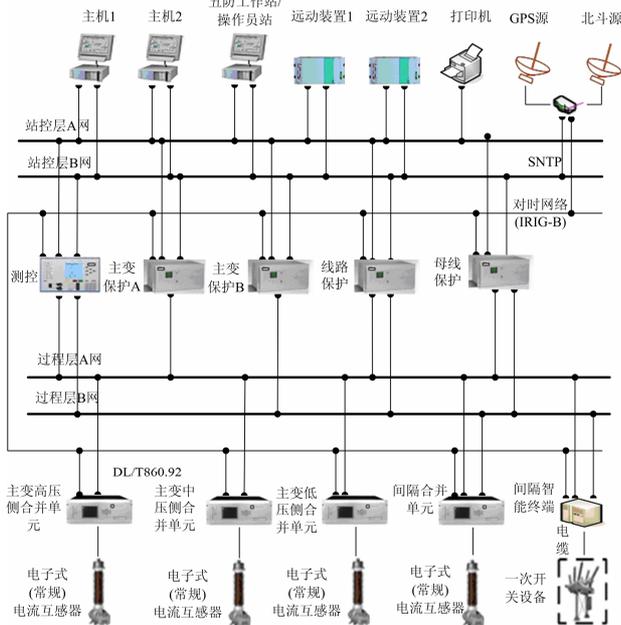


图1 网络采样的智能变电站网络结构示意图

Fig. 1 Network structure of the digital substation based on network sampling

#### 1.2 网络采样的同步方式

在网络采样模式下，采样值从合并单元以 9-2 方式输出，采样率为 4 000 Hz，其同步方式采用 9-2 报文中的同步标记位和采样值计数位 (SmpCnt) 来实现。当同步标记位为 1 时，表示其同步有效，采样值可以参与运算，而同步标记位为 0 时，表示其同步无效，采样值不参与同步相关的运算；当整秒时，SmpCnt 位清 0，每发一个帧采样值，SmpCnt 就加 1，直到 3 999 然后又从 0 开始计数。网络上的 IED 设备，只有收到 SmpCnt 相同的报文时，表示

同一时刻的数据。

主变差动保护读取采样值报文中的 SmpCnt 位，当三侧的 SmpCnt 位相同时，表示这三个点为同时刻的数据，可以参与保护的重采样处理。主变保护在接收到某一侧的报文后，会等待其他侧 SmpCnt 相同的报文，如图 2。等待时间  $\Delta t = t_3 - t_1$ ，其中延时  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  为各侧合并单元处理延时、网络延时等延时总和。

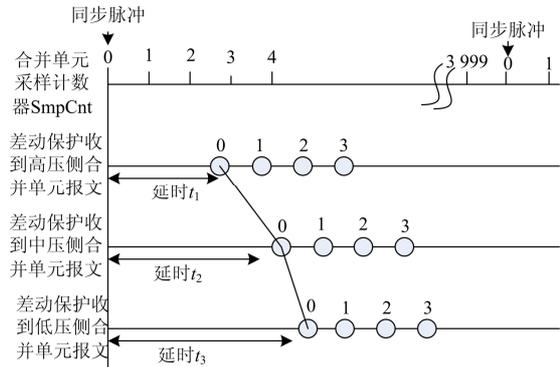


图2 网采网跳的采样同步方式

Fig. 2 Sampling synchronism mode of network sampling

#### 1.3 网络采样的异步原因

在智能变电站发展过程中，出现传统变电站没有遇到的问题，特别是网络采样模式下的采样同步问题。在正常运行中，采样值异步时，其同步标记为 FALSE，表示不同步，相关保护会闭锁；但在一些特殊情况下，采样值异步，但其同步标志为 TRUE，相关保护不会闭锁，这样就可能导致保护误动，特别是差动保护。下面讨论的异步原因都是在其同步标志为 TRUE 情况下发生的异步。

##### 1.3.1 同步对时系统导致采样异步

同步对时系统在网络采样模式下尤为重要，其好坏直接影响整个变电站的正常运行。但由于厂家对时系统制造工艺、硬件元件的选择，导致存在很多问题，如光 B 码端口发送功率过低；GPS 源和北斗源无法正常切换；对时系统时间跳变；对时精度差；某一时钟扩展板的输出时间与其他扩展板的输出时间存在较大差别、长期稳定性等问题。特别是对时系统时间跳变、某一时钟扩展板的输出时间与其他扩展板的输出时间存在较大差别是导致采样异步的重要原因。

合并单元厂家对采样值的处理方式是绝对依赖对时系统，也就是当对时系统时间跳变时，合并单元采样 SmpCnt 位也跳变。

如果因时钟同步系统出现故障，导致某一侧的

合并单元和标准时钟相差 2 ms, 也就是此合并单元 SmpCnt 位和其他的合并单元 SmpCnt 位相差 8 帧报文, 即主变保护在接收到两侧 SmpCnt 位相同的报文时, 采样数据实际相差  $36^\circ$ 。

### 1.3.2 合并单元同步处理方式导致采样异步

当合并单元失去外部同步时, 在同步守时机制的影响下, 可能会出现合并单元失去同步, 但由于不同的同步守时处理机制导致 MU 的同步标志是 TRUE, 但实际合并单元处在异步工作模式下, 从而在变压器差动保护内产生了一个固定的相位角差。

合并单元对时处理机制是导致异步的一个原因, 合并单元接收到对时信号后, 对信号进行处理存在延时, 因此输出的 SV 的 SmpCnt 位需要进行补偿, 但由于处理方式不同, 导致合并单元采样异步。

## 2 主变差动保护原理

主变差动保护稳态量差动动作特性如图 3 所示<sup>[14-15]</sup>。

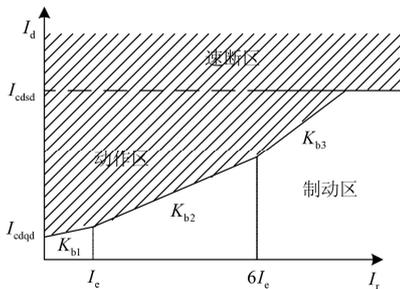


图 3 主变差动保护稳态量差动动作特性

Fig. 3 Operating characteristics of steady state of the transformer differential protection

比率差动保护的动作为<sup>[13]</sup>

$$\begin{cases} I_d > K_{b1}I_r + I_{cdqd}, & I_r \leq I_e \\ I_d > K_{b2}(I_r - I_e) + K_{b1}I_e + I_{cdqd}, & I_e < I_r \leq 6I_e \\ I_d > K_{b3}(I_r - 6I_e) + K_{b2}(6I_e - I_e) + K_{b1}I_e + I_{cdqd}, & I_r > 6I_e \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $K_{b1}$  为第一段折线的比率制定系数; 根据不同厂家的主变差动保护原理,  $K_{b1}$  取 0~0.2, 当取 0 时, 第一段折线平行于横坐标的直线;  $K_{b2}$  为第二段折线的比率制动系数,  $K_{b2}$  取 0.2~0.7;  $K_{b3}$  为第三段折线的比率制定系数。

差动电流  $I_d$  为

$$I_d = \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| \quad (2)$$

制动电流  $I_r$  为

$$I_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |\dot{I}_i| \quad (3)$$

式中,  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_n$  分别为差动各侧电流。

## 3 差动保护闭锁机制

### 3.1 采样值异步的动作特性

启动值  $I_{cdqd} = K_1 I_e$  ( $K_1$  取 0.2~0.5)<sup>[13]</sup>, 假设变压器的工作电流为  $K_2 I_e$  ( $K_2 \leq 1$ ), 高压侧合并单元因采样异步产生  $\alpha$  角度的偏差, 根据式 (2), 算出差动电流为

$$I_d = \left| \sum_{i=1}^n \dot{I}_i \right| = 2K_2 I_e \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (4)$$

根据式 (3), 计算出制动电流为

$$I_r = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |\dot{I}_i| = K_2 I_e \quad (5)$$

由式 (1) 可得差动动作的条件为

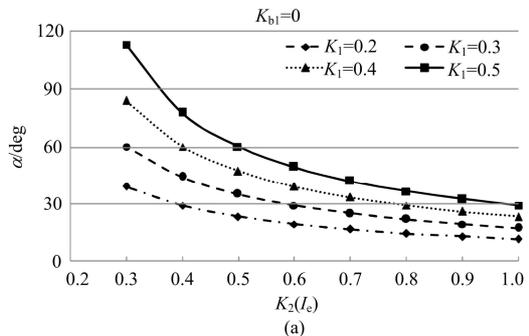
$$2K_2 I_e \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) > K_{b1} K_2 I_e + K_1 I_e \quad (6)$$

得

$$\alpha > 2 \arcsin\left(0.5K_{b1} + \frac{K_1}{2K_2}\right) \quad (7)$$

根据不同厂家的稳态量差动动作特性, 分别对  $K_{b1}$  取 0、0.1、0.2 进行讨论。

$K_{b1}$  取 0、0.1、0.2, 其差动动作时  $\alpha$  角随变压器运行电流的变化曲线分别如图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 所示。差动保护动作时偏差角  $\alpha$  随着变压器负荷的增加而减小, 也就是在重负荷情况下, 采样异步更容易导致差动保护的误动; 保护启动值整定得越小, 采样异步越容易引起误动; 第一段折线的比率制定系数  $K_{b1}$  越大, 采样异步引起的误动越小。



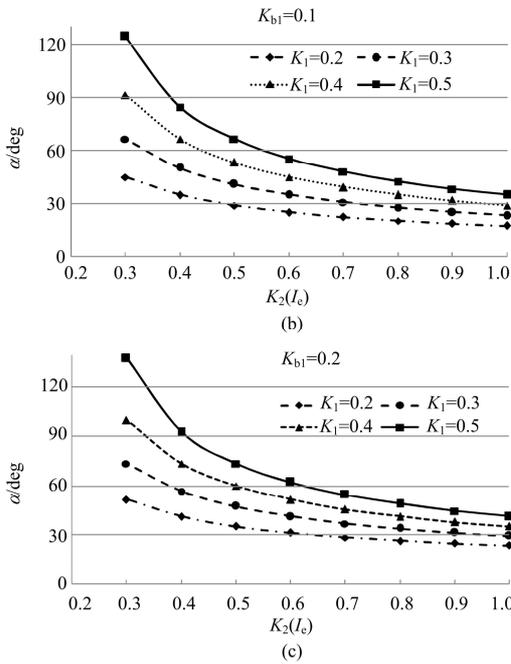


图 4  $K_{bi}=0、0.1、0.2$  时差动动作的偏差角  $\alpha$  与  $K_2I_c$  的关系  
Fig. 4 The relation between  $\alpha$  and  $K_2I_c$  of differential protection when  $K_{bi}=0、0.1、0.2$

### 3.2 合并单元及电子互感器的绝对延时

根据相关技术规范或规程要求，合并单元和电子互感器的处理延时应小于 2 ms，根据现场对不同主流厂家不同型号的合并单元和电子互感器的绝对延时测试，一般在 0.90~1.65 ms 之间，测试结果如表 1 所示。

当主变三侧采用不同的电子互感器及合并单元时，最大延时相差小于 0.75 ms，最小延时相差为 0 ms。此延时不影响 SmpCnt 位，但会影响相同 SmpCnt 位到达主变保护的等待时间  $\Delta t$ 。

表 1 合并单元及电子互感器的绝对延时测试结果

Table 1 Test results of absolute delay of merging units and electronic transformers

型号代码	平均绝对延时/ms	最大绝对延时/ms	最小绝对延时/ms
001	0.914 9	1.002 0	0.904 8
002	0.939 4	1.038 0	0.910 7
003	1.169 3	1.172 7	1.164 4
004	1.152 9	1.149 5	1.155 3
005	1.139 5	1.143 7	1.135 4
006	1.148 7	1.153 2	1.143 5
007	1.591 9	1.624 6	1.566 0
008	1.693 1	1.699 7	1.683 9

### 3.3 采样值网络传输延时

一般采样值 9-2 报文，以 22 通道计算，其一帧报文长度约 250 Byte，正常情况下 250 Byte 报文在交换机 2 级级联的情况下的传输延时在 70~90  $\mu$ s 之间，即满流量时传输延时不超过 90  $\mu$ s，其延时抖动不超过 20  $\mu$ s，可以忽略网络传输延时的影响。

### 3.4 采样异步的闭锁机制

主变差动保护在采样异步时应及时闭锁差动保护，防止误动，但异步情况下，异步多少帧或多长时间最合适，如果异步太小就闭锁，可能导致保护正常情况下经常闭锁，反而有拒动风险；如果异步太大才闭锁，存在误动风险。

重负荷情况下，差动动作的偏差角如表 2 所示。合并单元采样率为 4 000 Hz，采样异步相差 1 帧，角度就偏差 4.5°，把差动动作的偏差角转换成采样异步偏差的帧数，如表 3 所示。数据显示，差动保护的启动整定值和第一段折线的比率制动系数越大，则允许异步的角度越大，允许采样异步的帧数越多，即能更好地避免误闭锁。

表 2 重负荷情况下差动动作偏差角

Table 2 Deviation angle of operating of transformer differential protection under heavy load

$K_{bi}$	$K_1=0.2$	$K_1=0.3$	$K_1=0.4$	$K_1=0.5$
0	11.48°	17.25°	23.07°	28.96°
0.1	17.25°	23.07°	28.95°	34.92°
0.2	23.07°	28.96°	34.92°	40.97°

表 3 重负荷情况下差动动作采样异步帧数

Table 3 Frames of operating of transformer differential protection when sampling is not synchronized

$K_{bi}$	$K_1=0.2$	$K_1=0.3$	$K_1=0.4$	$K_1=0.5$
0	3	4	6	7
0.1	4	6	7	8
0.2	6	7	8	10

从表 3 中可以看出，当差动启动值为  $0.2I_c$ ，第一段折线的比率制定系数为 0 时，采样异步相差 3 帧就达到差动动作值。也就是等待其他侧 SmpCnt 相同的数据的间隔时间相差 0.75 ms 就应该闭锁差动。

差动保护在考虑闭锁时，应有一定冗余度，充分考虑各种延时因素，则采样异步的闭锁帧数  $m$  为

$$m = n + |(\Delta T_1 + \Delta T_2) / 0.25| + 1 \quad (8)$$

式中： $n$  为重负荷情况下差动动作采样异步帧数，即表 3 中的值； $\Delta T_1$  为主变各侧合并单元及电子互感器延时之差的绝对值，最大不超过 0.75 ms；

$\Delta T_2$  为主变各侧网络延时之差的绝对值, 一般可以忽略。

考虑避开主变各侧合并单元及电子互感器延时之差, 根据式 (8), 则采样异步的闭锁帧数为表 4 所示。

表 4 采样异步的闭锁帧数

$K_{b1}$	$K_1=0.2$	$K_1=0.3$	$K_1=0.4$	$K_1=0.5$
0	7	8	10	11
0.1	8	10	11	12
0.2	10	11	12	14

### 3.5 结论与建议

(1) 基于网络化采样的差动保护在采样值异步情况下应闭锁差动, 但闭锁的帧数应根据实际情况有所不同, 一般取 7~14 帧。

(2) 主变保护差动曲线的启动整定值、第一段折线的比率制定系数、以及负荷情况对保护采样异步的闭锁帧数都有影响。为防止误闭锁, 启动整定值和第一段折线的比率制定系数应选择较大的。

(3) 合并单元及电子互感器的绝对延时对采样不同步闭锁帧数也有影响, 厂家应把差动异步闭锁帧数作为整定值, 并根据差动保护曲线设定最小值及最大值, 而不是把闭锁值固化到差动保护程序中。

(4) 采用该闭锁机制的变压器差动保护已经在智能变电站工程中投入运行, 在避免因异步导致的保护误动方面取得良好效果。

## 4 结语

智能变电站作为变电站自动化的发展方向, 依旧存在一些问题。提出网采智能变电站存在的新问题, 对差动保护在特定情况下出现的采样异步的闭锁机制进行定量分析, 并提出采样不同步时闭锁机制应根据实际情况进行整定, 避免特定情况下的误闭锁或误动。希望在实际应用中有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 黄益庄. 智能变电站是变电站综合自动化的发展目标[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 45-48.  
HUANG Yi-zhuang. Smart substation is the further objective of SAS[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 45-48.
- [2] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-12.  
BO Zhi-qian, ZHANG Bao-hui, DONG Xin-zhou, et al.

The development of protection intellectualization and smart relay network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 1-12.

- [3] 王建华, 荣命哲, 耿英三, 等. 数字化电力设备的概念与内涵[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 138-145.  
WANG Jian-hua, RONG Ming-zhe, GENG Ying-san, et al. Concept and connotation of digital electrical equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 138-145.
- [4] 刘洋, 张道农, 于跃海, 等. 时间同步误差对电力自动化系统影响的定量分析[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(3): 15-19, 24.  
LIU Yang, ZHANG Dao-nong, YU Yue-hai, et al. Quantitative analysis of time synchronization disturbance for electric power automation system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(3): 15-19, 24.
- [5] 任平力, 郑珂. 一起数字化变电站保护受干扰误动分析[J]. 中国高新技术企业, 2010(33): 100-101.  
REN Ping-li, ZHENG Ke. Analysis of a malfunction caused by interference to digital protection[J]. China High-Tech Enterprises, 2010(33): 100-101.
- [6] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-38.  
GAO Hou-lei, LIU Yi-qing, SU Jian-jun, et al. New type of substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [7] 王攀峰, 周晓龙, 杨恢宏. 一种面向数字化变电站的母线保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 48-51.  
WANG Pan-feng, ZHOU Xiao-long, YANG Hui-hong. A scheme of busbar protection in digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 48-51.
- [8] 吴国旻, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 15-18.  
WU Guo-yang, WANG Qing-ping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 15-18.
- [9] 黎强, 李延新. 基于数字化变电站的系统保护装置设

- 计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 77-81.
- LI Qiang, LI Yan-xin. Design of system protecting devices based on digital substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 77-81.
- [10] 张兆云, 刘宏君, 张润超. 数字化变电站与传统变电站间光纤纵差保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 58-60, 66.
- ZHANG Zhao-yun, LIU Hong-jun, ZHANG Run-chao. Research on optical-fiber line differential protection between digitized substation and traditional substation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 58-60, 66.
- [11] 杜浩良, 李有春, 盛继光, 等. 基于 IEC61850 标准数字化与传统继电保护的比较[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 172-176.
- DU Hao-liang, LI You-chun, SHENG Ji-guang, et al. Comparison between standard digital on the IEC61850 and traditional protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 172-176.
- [12] 于军, 熊小伏, 张媛. 数字化变电站保护系统可靠性新措施及仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 28-33.
- YU Jun, XIONG Xiao-fu, ZHANG Yuan. Research and simulation on new reliability measures for digital substation[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 28-33.
- [13] 朱林, 陈金富, 段献忠, 等. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
- ZHU Lin, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong, et al. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [14] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 172-177.
- ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sector-ring restraint region[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 172-177.
- [15] 变电站综合自动化原理与运行编写组. 变电站综合自动化原理与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- The writing group of principle and operation of the integrated automation substation. The principle and operation of the integrated automation substation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.

收稿日期: 2013-05-21; 修回日期: 2013-06-13

作者简介:

高吉普(1982-), 男, 硕士, 工程师, 从事智能化变电站和智能电网相关研究; E-mail: jipugao@sina.com

徐长宝(1977-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事智能化变电站技术研究;

陈建国(1972-), 男, 工学硕士, 高级工程师, 从事智能化变电站相关研究。