

# 一种基于相位相关电流差动的站域后备保护算法

李 倍, 和敬涵, Tony Yip

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

**摘要:** 传统站域电流差动后备保护, 存在当比率系数单调变化时, 区内区外故障的灵敏性呈现相斥变化的缺点; 以及在区外故障 CT 饱和情况下保护误动的弊端。为了克服上述缺点, 提出了相位相关电流差动的站域后备保护算法。理论分析表明其随着比率系数的单调增加, 在区内与区外故障灵敏性都增加; 而随着接地电阻的增大, 其相较传统差动灵敏性提高; 同时其还能克服传统站域电流差动在区外故障 CT 饱和情况下保护误动的缺点。最后利用 PSCAD 软件搭建了站域模型, 仿真结果验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 相位相关; 站域电流差动; CT 饱和; 接地电阻; 后备保护

## A study of substation-area backup protection based on phase related current differential

LI Bei, HE Jing-han, Tony YIP

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** There is a drawback in traditional substation area current differential protection, when the scale factor  $k$  monotonously changes, the sensitivity of the internal and external fault will vary oppositely. This paper proposes a substation-area backup protection based on phase related current differential which use the multi points redundancy information. The analysis shows that when the scale factor  $k$  monotonically increases, sensitivity of the internal and external fault will increase together. As the increasing of ground resistance, sensitivity of fault will increase. On the other hand, when the external faults cause CT saturation, the traditional protection will mis-operate, but the new algorithm can overcome the shortcoming. At last, PSCAD/EMTDC is used to build a 220 kV substation model, simulation results verify the theoretical analysis.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277009).

**Key words:** phase related; substation area current differential; CT saturation; grounding impedance; backup protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)24-0001-05

## 0 引言

现有数字化变电站的后备保护采用传统的整定配合方式, 存在定值整定配合复杂、主动延时较长、缺乏应对多种运行方式的自适应能力的缺点<sup>[1]</sup>。而智能变电站技术的快速发展, 多点、快速、可靠地获取站域内的信息将不再困难<sup>[2]</sup>, 研究基于多点冗余信息的站域后备保护将是未来的趋势<sup>[3]</sup>。

近年来研究利用冗余信息实现站域范围的后备保护已有多种算法<sup>[4-9]</sup>被提出。但是相较而言站域电流差动由于原理简单、利用的信息少其优势明显。然而就其原理而言, 其存在当比率系数单调变化时, 区内区外故障的灵敏性呈现相斥变化的缺点, 即比

率系数偏小时, 可能造成区外故障时保护误动; 当比率系数过大时又影响差动保护在内部故障时的灵敏性<sup>[9-12]</sup>。

本文提出了相位相关电流差动<sup>[12]</sup>的站域后备保护算法。理论分析表明其随着比率系数的单调增加, 在区内与区外故障灵敏性都增加; 而随着接地电阻的增大, 其相较传统差动灵敏性提高; 同时其还能克服传统站域电流差动在区外故障 CT 饱和情况下保护误动的缺点。最后利用 PSCAD 软件搭建了站域模型, 仿真结果验证了理论分析的正确性。

## 1 基于相位相关电流差动的站域后备保护算法

### 1.1 站域结构

图 1 描述的是一个典型的站域结构图, 包括变

电站及其进出线。站域后备区域包括如图所示的 I、II 两个区。站域保护通过获取站域内的多节点冗余信息实现保护逻辑，相较传统保护优势明显，而相较广域保护工程应用更易实现<sup>[13]</sup>。

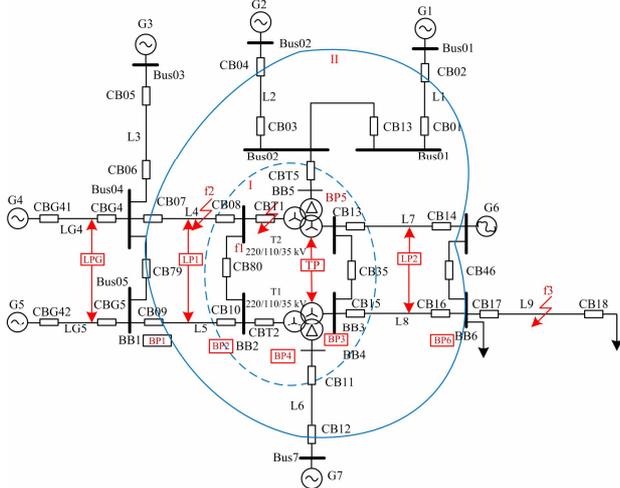


图 1 站域结构图  
Fig. 1 Substation area structure

### 1.2 基于相位相关电流差动的站域后备保护算法

传统比率制动电流差动保护存在，当比率系数单调变化时，区内区外故障的灵敏性呈现相斥变化的缺点。为了克服这一缺点，同时提高内外故障时的电流差动灵敏性，本文提出相位相关电流差动站域后备保护。

依据图 2 系统，相位相关电流差动的判据（判据 3）为

$$|I_1| + k_3 \cdot |I_2| \cdot \cos(\phi_1 - \phi_2) + k_3 \cdot |I_3| \cdot \cos(\phi_1 - \phi_3) + \dots + k_3 \cdot |I_M| \cdot \cos(\phi_1 - \phi_M) > I_{fz}$$

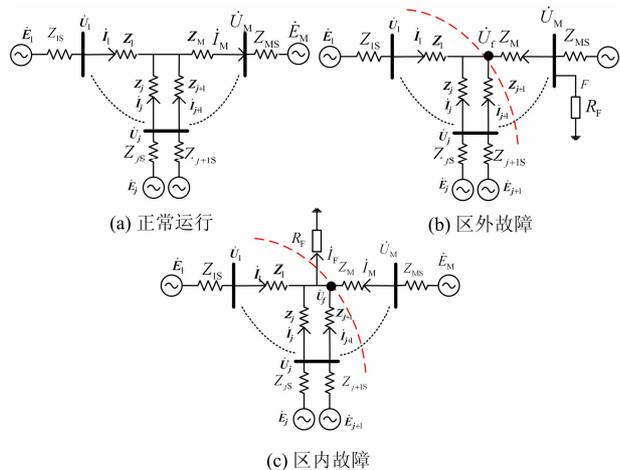


图 2 故障等效图  
Fig. 2 Equivalent diagram of the fault

传统站域电流差动判据为

$$|I_1 + I_2 + \dots + I_M| - k_1 \cdot (|I_1| + |I_2| + \dots + |I_M|) > I_{fz} \quad (\text{判据 1})$$

$$|I_1 + I_2 + \dots + I_M| - k_2 \cdot |I_1 - I_2 - \dots - I_M| > I_{fz} \quad (\text{判据 2})$$

下面将比较分析上述判据。通过理论计算图 2 系统在故障情况下的各点电流，并计算出不同判据的理论值，可分析理论情况下不同判据的动作情况。

首先分析内部故障时的原理，如图 3 所示。将图 2(c)粗虚线下面的系统等效，如图 3 所示。

粗虚线下面的系统等效成  $\dot{E}_\Sigma$  和  $Z_\Sigma$  为

$$\begin{cases} \dot{E}_\Sigma = Z_\Sigma \cdot (\dot{E}_1/Z_{1\Sigma} + \dot{E}_2/Z_{2\Sigma} + \dots + \dot{E}_j/Z_{j\Sigma}) \\ Z_\Sigma = \frac{1}{1/Z_{1\Sigma} + 1/Z_{2\Sigma} + \dots + 1/Z_{j\Sigma}} \end{cases}$$

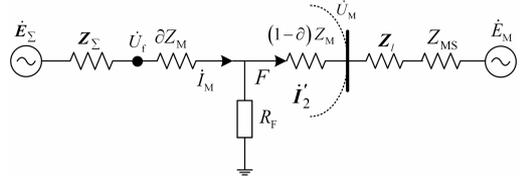


图 3 内部故障等效图

Fig. 3 Equivalent diagram of the internal fault

根据图 3 可求得电流  $\dot{I}_M$  和  $\dot{I}'_2$  为

$$\begin{cases} \dot{I}_M = \frac{\dot{E}_\Sigma - \frac{\dot{E}_M - \dot{E}_\Sigma}{Z_{MS} + Z_l + (1-\delta)Z_M} \cdot R_f}{(Z_\Sigma + \delta Z_M) + \left(1 + \frac{Z_\Sigma + \delta Z_M}{Z_{MS} + Z_l + (1-\delta)Z_M}\right) \cdot R_f} \\ \dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}_M - \dot{E}_\Sigma}{Z_{MS} + Z_l + (1-\delta)Z_M} + \frac{Z_\Sigma + \delta Z_M}{Z_{MS} + Z_l + (1-\delta)Z_M} \cdot \dot{I}_M \end{cases}$$

根据电流  $\dot{I}_M$  和  $\dot{I}'_2$  可求得  $\dot{U}_M$  和  $\dot{U}_f$  为

$$\begin{cases} \dot{U}_M = (\dot{I}_M + \dot{I}'_2) \cdot R_f + (1-\delta)Z_M \cdot \dot{I}'_2 \\ \dot{U}_f = \dot{E}_\Sigma - \dot{I}_M \cdot Z_\Sigma \end{cases}$$

根据  $\dot{U}_f$  即可求得  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_j$  为

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_f}{Z_{1\Sigma}} \\ \dot{U}_1 = \dot{U}_f + \dot{I}_1 \cdot Z_l \\ \dot{I}_j = \frac{\dot{E}_j - \dot{U}_f}{Z_{j\Sigma}} \\ \dot{U}_j = \dot{U}_f + \dot{I}_j \cdot Z_j \end{cases}$$

系统外部故障时，由图 2(b)可得外部故障等效

图如图 4。

同理将粗虚线下面的系统等效成  $\dot{E}_\Sigma$  和  $Z_\Sigma$ , 根据图 4 可求得电流  $\dot{I}_M$  为

$$\dot{I}_M = \frac{\dot{E}_\Sigma - \frac{\dot{E}_M - \dot{E}_\Sigma}{Z_{MS} + (1-\delta)Z_l} \cdot R_F}{(Z_\Sigma + Z_M + \delta Z_l) + \left(1 + \frac{Z_\Sigma + Z_M + \delta Z_l}{Z_{MS} + (1-\delta)Z_l}\right) \cdot R_F}$$

根据  $\dot{I}_M$  可求出  $\dot{U}_f$  为

$$\begin{cases} \dot{U}_f = \dot{E}_\Sigma - \dot{I}_M \cdot Z_\Sigma \\ \dot{U}_M = \dot{E}_\Sigma - \dot{I}_M \cdot (Z_\Sigma + Z_M) \end{cases}$$

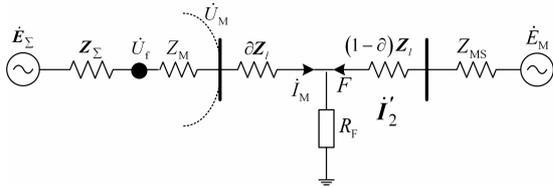


图 4 外部故障等效图

Fig. 4 Equivalent diagram of the external fault

根据  $\dot{U}_f$  即可求得  $\dot{I}_1, \dots, \dot{I}_j$ , 其与系统内部故障时计算方法相同。

基于上述公式利用 Matlab 计算了一个三端系统 ( $\dot{E}_n$  和  $\dot{E}_k$  代表粗虚线下部的两端,  $\dot{E}_m$  代表粗虚线外部第三端) 的相位相关电流差动及传统比率制动电流差动的动作曲线。

三端系统参数<sup>[14]</sup>为

$$\dot{E}_n = 220 \angle 0^\circ \text{ kV}, \quad \dot{E}_k = 220 \angle -10^\circ \text{ kV}, \quad \dot{E}_m = 220 \angle -5^\circ \text{ kV}$$

$$Z_{MS} = Z_{ms} = Z_{ks} = 35 \angle 86^\circ \Omega$$

$$Z_n = (0.0705 + 0.40024j) \cdot 200$$

$$Z_k = (0.0705 + 0.40024j) \cdot 200$$

$$Z_m = Z_l = (0.0705 + 0.40024j) \cdot 400$$

不同位置短路用  $\delta$  代表, 定值都取为

$$I_{tz} = 0, \quad k_1 = 0.5, \quad k_2 = 0.5$$

图 5~图 7 描述的是一个等效三端系统在不同情况下三种电流差动保护的動作特性。图 5 可以看出在区内故障时, 三种保护判据可靠动作, 但新判据灵敏性更高; 图 6 可以看出区外故障时, 三种保护判据可靠不动作, 新判据的灵敏性更高, (判据 2 和 3 动作曲线几乎重合); CT 饱和情况下, 本文取饱和后的电流  $I'_m = \rho I_m$ , 其中  $\rho$  为饱和系数, 图 7 可以看出在区外故障, CT 饱和情况下, 传统保护判据出现误动, 然而新判据依然可靠地不误动, (判据 2 和 3 动作曲线几乎重合)。另外还可以看出随着接

地电阻的增大, 新判据相较传统判据灵敏性更高。

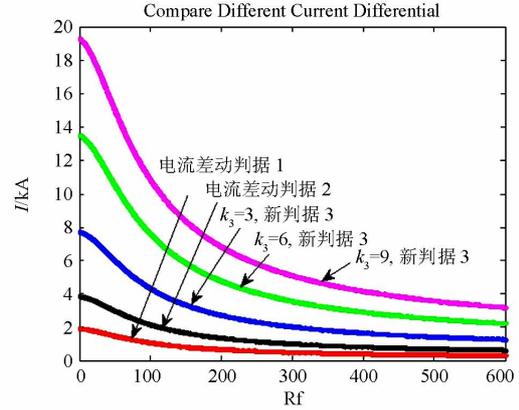


图 5 内部故障不同判据的動作特性

Fig. 5 Operating characteristics of different criteria of internal fault

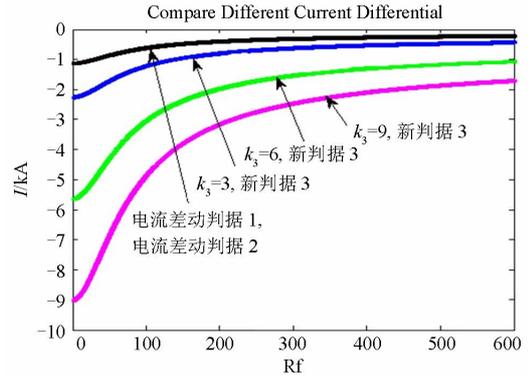


图 6 外部故障不同判据的動作特性

Fig. 6 Operating characteristics of different criteria of external fault

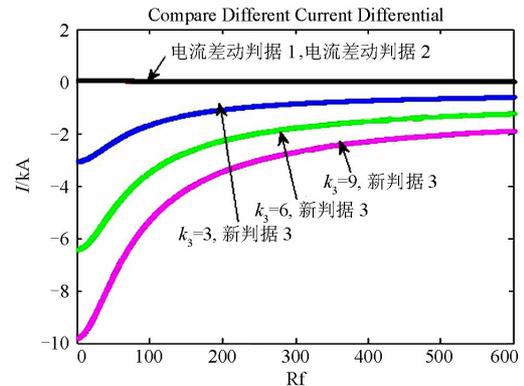


图 7 CT 饱和和外部故障时不同判据的動作特性

Fig. 7 Operating characteristics of different criteria when CT saturation with external fault

## 2 仿真算例

### 2.1 相位相关电流差动算法

本文利用 PSCAD 搭建了如图 1 所示的一个 220

kV 变电站仿真模型<sup>[11]</sup>。仿真了 I、II 区的相位相关电流差动算法 (0.5 s I 区内 f1 故障, 1.0 s II 区内 f2 故障, 1.5 s II 区外 f3 故障, 故障均持续 0.2 s)。线路采用架空导线, 贝杰龙模型, 参数设置选取 220 kV 等级。图 8、图 9 给出 A-G 故障的仿真图。



图 8 I 区 A 相不同判据电流差动

Fig. 8 Current differential of different criteria of A phase in zone I



图 9 II 区 A 相不同判据电流差动

Fig. 9 Current differential of different criteria of A phase in zone II

从如图 1 所示, 可知

I 区动作判据为

$$\begin{aligned} & \left| \dot{I}_{08} \right| + k_3 \cdot \left\{ \left| \dot{I}_{10} \right| \cdot \cos(\varphi_{08} - \varphi_{10}) + \left| \dot{I}_{11} \right| \cdot \cos(\varphi_{08} - \varphi_{11}) + \right. \\ & \left. \left| \dot{I}_{15} \right| \cdot \cos(\varphi_{08} - \varphi_{15}) + \left| \dot{I}_{13} \right| \cdot \cos(\varphi_{08} - \varphi_{13}) + \right. \\ & \left. \left| \dot{I}_{75} \right| \cdot \cos(\varphi_{08} - \varphi_{75}) \right\} > 0 \end{aligned}$$

II 区动作判据为

$$\begin{aligned} & \left| \dot{I}_{07} \right| + k_3 \cdot \left\{ \left| \dot{I}_{09} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{09}) + \left| \dot{I}_{12} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{12}) + \right. \\ & \left. \left| \dot{I}_{16} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{16}) + \left| \dot{I}_{14} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{14}) + \right. \\ & \left. \left| \dot{I}_{01} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{01}) + \left| \dot{I}_{03} \right| \cdot \cos(\varphi_{07} - \varphi_{03}) \right\} > 0 \end{aligned}$$

从图中可以看出传统判据 (判据 1) 和新判据在区外故障时可靠不动作, 区内故障时可靠动作, 即: f1 故障时, I、II 区保护都将动作; f2 故障时, I 区保护不动作、II 区保护动作; f3 故障时, I、II 区保护都将不动作。同时, 新判据在区内故障时, 其动作值量明显大于传统判据; 而在区外故障时, 其动作值量明显小于传统判据。新判据较传统判据有很高的灵敏性。

### 2.2 CT 饱和情况动作特性

下面研究的是在 f2 故障导致 CB08 互感器饱和

时, I 区相位相关电流差动判据的动作特性。

图 10 描述的是 CB08 A 相电流出现饱和的情况。图 11 描述的是传统电流差动(判据 1)以及相位相关电流差动(判据 3)动作特性, 可以看出, 在 I 区外 f2 故障 CB08 电流互感器饱和的情况下, 传统电流差动可能会误动, 而相位相关电流差动却可靠地不动作。图 12 描述的是相位相关电流差动取不同的系数  $k_3$  时的动作特性, 可以看出,  $k_3$  值越大, 其灵敏性越高。

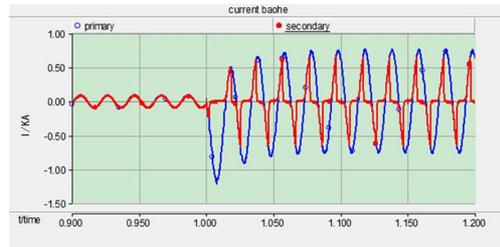


图 10 CB08 A 相电流饱和

Fig. 10 CB08 phase A CT saturation

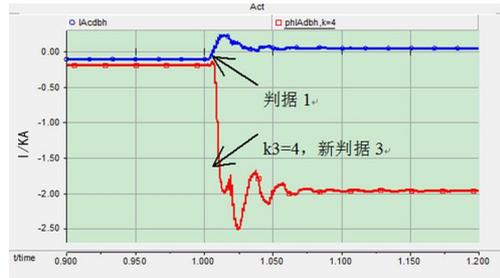


图 11 不同判据电流差动动作特性

Fig. 11 Operating characteristic of current differential of different criteria

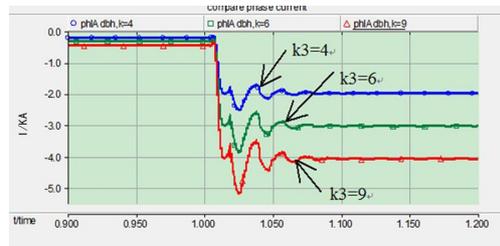


图 12 相位相关电流差动不同 k 值时的动作特性

Fig. 12 Phase related current differential act with different k value

### 3 结论

利用多点冗余信息实现快速、简单、可靠的站域后备保护将是未来的研究趋势。本文提出相位相关电流差动的站域后备保护。通过理论分析表明:

相位相关电流差动保护随着比率系数的单调增加, 区内与区外故障的灵敏性都增加; 而随着接地电阻的增大, 其相较传统差动灵敏性提高; 同时其还能克服传统站域电流差动在区外故障 CT 饱和情况下保护误动的缺点。最后仿真结果也证实了理论分析的正确性。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] LI J, ZHANG Y, ZHANG H, et al. Wide area equipment protection system based on substation panoramic information[C] // 9th Control Conference (ASCC), 2013 Asian: IEEE, 2013: 1-6.
- [3] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.  
WANG Zeng-ping, JIANG Xian-guo, ZHANG Zhi-chao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [4] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhen-xing, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [5] NAMDARI F, JAMALI S, CROSSLEY P A. Power differential based wide area protection[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(12): 1541-1551.
- [6] 王媛, 焦彦军. 基于多 Agent 技术的站域保护系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 80-85.  
WANG Yuan, JIAO Yan-jun. Research on substation-area protection system based on multi-Agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 80-85.
- [7] 何志勤, 张哲, 尹项根, 等. 基于故障电压比较的广域后备保护新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 274-283.  
HE Zhi-qin, ZHANG Zhe, YIN Xiang-gen, et al. A novel wide area backup protection algorithm based on fault voltage comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 274-283.
- [8] 吴浩, 李群湛, 夏焰坤, 等. 基于概率神经网络的广域后备保护故障判别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 43-49.  
WU Hao, LI Qun-zhan, XIA Yan-kun, et al. Fault identification for wide area backup protection based on probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 43-49.
- [9] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 一种基于电流差动原理的变电站后备保护[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1113-1120.  
ZHOU Ze-xin, WANG Xing-guo, DU Ding-xiang, et al. A substation backup protection based on current differential protective principle[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1113-1120.
- [10] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 智能变电站站域保护研究综述[J]. 华东电力, 2013, 41(5): 947-953.  
CHEN Lei, ZHANG Kan-jun, XIA Yong-jun, et al. Research overview of substation area protection in intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(5): 947-953.
- [11] 刘益青. 智能变电站站域后备保护原理及实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
LIU Yi-qing. Study on principle and implementation technology of substation-area backup protection in intelligent substation[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [12] 李斌, 范瑞卿, 于绚, 等. 相位相关电流差动保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 96-101.  
LI Bin, FAN Rui-qing, YU Xuan, et al. A novel principle of phase related current differential protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 96-101.
- [13] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.  
WANG Zeng-ping, JIANG Xian-guo, ZHANG Zhi-chao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [14] 李捷, 苗世洪, 刘沛, 等. 基于分相有功功率差动原理的线路高阻接地保护判据[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 197-201.  
LI Jie, MIAO Shi-hong, LIU Pei, et al. A protection criterion for high resistance grounding of transmission line based on phase-segregated active power differential principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 35(8): 197-201.

收稿日期: 2014-03-15; 修回日期: 2014-05-25

作者简介:

李 倍 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、智能电网、智能变电站; E-mail: 827596067@qq.com

和敬涵 (1964-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制;

Tony Yip (1952-), 男, 博士, 主要研究方向为继电保护、智能电网、智能变电站、新能源。