

DOI: 10.7667/PSPC161657

## 小差比率制动系数校验的优化方案

李智<sup>1</sup>, 张安安<sup>2</sup>, 胡志威<sup>1</sup>, 朱林<sup>1</sup>, 唐纲<sup>1</sup>

(1. 国网德阳供电公司, 四川 德阳 618000; 2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

**摘要:** 针对传统小差比率制动系数校验方法存在校验结果可能不准确的问题, 从固定相位调节幅值校验方法出发, 得到了其简化的等价模型, 并根据校验需满足的条件, 提出了一种小差比率制动系数校验新方法。该方法能保证校验过程中所测小差比率系数是母差差动动作所需满足条件中最后一个满足的条件, 从而保证测得的小差比率系数必定是装置实际的小差比率制动系数门槛值。通过对常规比率差动的 RCS-915AB 装置和复式比率差动的 BP-2CS 装置的现场调试和校验, 验证了所提方法的有效性和正确性。

**关键词:** 母差保护; 比率制动; 大差; 小差; 调试; 校验

### Optimization scheme of small range differential ratio braking coefficient test

LI Zhi<sup>1</sup>, ZHANG Anan<sup>2</sup>, HU Zhiwei<sup>1</sup>, ZHU Lin<sup>1</sup>, TANG Gang<sup>1</sup>

(1. State Grid Deyang Power Supply Company, Deyang 618000, China; 2. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the result of traditional small range differential ratio braking coefficient test method may not be correct, starting from the test method whose phase is fixed and amplitude is adjusted, its simplified equivalent model is obtained and a new method of small range differential ratio braking coefficient test is proposed according to the test conditions to be fulfilled. The method can ensure that the measured small range differential ratio coefficient is the last fulfilled one among all conditions which bus differential protection action needs to be fulfilled, so that the gotten small range differential ratio coefficient definitely is the actual small range differential ratio braking coefficient threshold of the protection device. The effectiveness and correctness of the proposed method are verified by on-site debugging and test of RCS-915AB whose ratio braking is conventional and BP-2CS whose ratio braking is complex.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107107).

**Key words:** bus differential protection; ratio braking; overall differential; small range differential; debugging; test

## 0 引言

电网的安全稳定运行离不开不断发展的电力系统保护与控制<sup>[1]</sup>。作为电力系统保护与控制的关键设备, 继电保护装置的動作可靠性至关重要。为此, 在继电保护微机化<sup>[2]</sup>前后, 有众多学者在研究其研发生产过程中的测试方法<sup>[3-4]</sup>和投入运行后的检修调试方法<sup>[5-9]</sup>。母差保护是继电保护的重要组成部分, 文献[10-15]对其调试方法进行了专门研究。母线大差比率差动用于判别故障是区内还是区外, 小差比率差动用于选择故障母线, 两者的動作判断在

任何型号的母差保护装置中都是相互独立的, 因此在母差保护调试中有必要对其系数分别进行校验。文献[11, 13]给出了小差比率制动系数校验的具体方法, 但与国内各母差保护装置生产厂家给出的方法一致, 都存在一个共同的问题: 从逻辑上讲校验测得的小差比率制动系数不一定是保护装置实际的小差比率制动系数。

本文分析了传统小差比率制动系数校验方法存在的校验结果可能不准确的问题, 然后从实际工程应用中普遍采用的固定相位调节幅值校验方法出发, 提出了一种小差比率制动系数校验新方法。通过对 RCS-915AB 装置和 BP-2CS 装置的现场调试和校验, 验证了无论是常规比率差动还是复式比率差动, 无论母联开关电流极性端靠近哪侧母线, 所提

基金项目: 国家自然科学基金项目(51107107); 中国博士后基金面上项目(2014M562335)

方法都能正确和有效地测得装置实际的小差比率制动系数。

## 1 传统小差比率制动系数校验方法

根据动作判据不同, 比率差动可分为常规比率差动和复式比率差动, 但其判据方程均可用式(1)表示。

$$\begin{cases} I_d > I_{dset} \\ I_d > kI_r \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $I_d$  表示差动电流;  $I_{dset}$  表示差动电流门槛值;  $I_r$  表示制动电流;  $k$  表示统一格式的比率制动系数。  $k$  与保护装置实际的比率制动系数  $k_r$  的关系是: 对于常规比率差动,  $k=k_r$ ; 对于复式比率差动,  $k=k_r/(1+k_r)$ 。由于  $k$  的值与  $k_r$  的值是一一对应的关系, 从而无论是常规比率差动还是复式比率差动, 对  $k_r$  的校验方法均可等效于对  $k$  的校验方法。本文从  $k$  的角度出发研究比率制动系数的校验方法。

目前, 现有文献<sup>[11,15]</sup>和国内各母差保护装置生产厂家给出的校验小差比率制动系数的方法是: 将母联置于合位, 任选同一母线上两条变比相同的支路, 在其相同相加入大小相同、方向相反的电流, 固定其中一条支路电流, 调节另一条支路电流大小, 使母线差动动作, 记录所加电流, 验证小差比率系数。以 I 母小差比率制动系数校验为例, 其模型如图 1 所示。

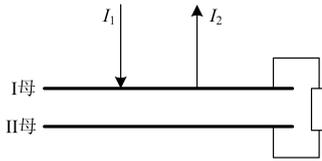


图 1 传统小差比率制动系数校验模型

Fig. 1 Traditional small range differential ratio braking coefficient test model

此方法中, II 母差流为 0, I 母差流和大差差流相同且都为  $|I_1 - I_2|$ , I 母小差比率系数和大差比率系数相同且都为  $|I_1 - I_2|/|I_1 + I_2|$ 。因此, 该方法无法保证母差差动动作时小差比率系数刚好满足其动作条件。也就是说, 从逻辑上讲, 此方法测得的小差比率制动系数不一定是保护装置实际的小差比率制动系数。例如, 如果装置实际的小差比率制动系数小于装置实际的大差比率制动系数, 那么在试验过程中随着支路电流的调节, 小差动作条件会比大差动作条件先满足, 而随着电流的继续调节, 在大差动作条件也满足并且是刚好满足时母线差动动作。此时测得的比率系数是装置实际的大差比率制动系数。

## 2 小差比率制动系数校验新方法

### 2.1 基于幅值调节的母差保护分析模型

校验母差保护时, 通流试验方法有三类: 固定相位调节幅值、固定幅值调节相位和既调节幅值又调节相位。固定相位调节幅值方法普遍采用将电流相位固定为同相或反相仅调节幅值的方式, 由于其直观性和计算的简便性, 是实际调试校验中最常用的方法, 其通用模型如图 2 所示。

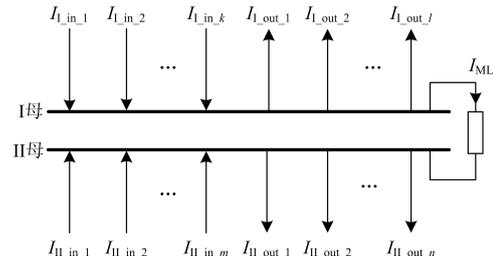


图 2 固定相位调节幅值校验方法通用模型

Fig. 2 Common model of phase fixed and amplitude adjusted method

图中,  $I_{1\_in\_x}$  表示 I 母上方向为流入的第  $x$  条支路的电流幅值,  $I_{1\_out\_x}$  表示 I 母上方向为流出的第  $x$  条支路的电流幅值,  $I_{11\_in\_x}$  表示 II 母上方向为流入的第  $x$  条支路的电流幅值,  $I_{11\_out\_x}$  表示 II 母上方向为流出的第  $x$  条支路的电流幅值,  $I_{ML}$  表示母联开关电流幅值(本文在分析中假定其极性以 I 母流向 II 母为正)。该模型中, I 母小差的差动电流和制动电流为

$$\begin{cases} I_{d\_I} = \left| \sum_{i=1}^k I_{1\_in\_i} - \sum_{i=1}^l I_{1\_out\_i} - I_{ML} \right| = \\ \quad \left| I_{1\_in} - I_{1\_out} - I_{ML} \right| \\ I_{r\_I} = \sum_{i=1}^k I_{1\_in\_i} + \sum_{i=1}^l I_{1\_out\_i} + I_{ML} = \\ \quad \left| I_{1\_in} + I_{1\_out} + I_{ML} \right| \end{cases} \quad (2)$$

可以看出, 对于 I 母小差, 同一母线上所有相位相同的支路电流可以合并等价于一条支路的电流  $I_{1\_in}$  或  $I_{1\_out}$ , 并且不难得出, 该合并等价同样适用于大差和 II 母小差的差动电流及制动电流。因此, 图 2 所示的通用模型可等价于如图 3 所示的简化模型, 图中  $I_{11\_in}$  和  $I_{11\_out}$  分别表示 II 母上方向为流入和流出的合并等价电流。

### 2.2 小差比率制动系数校验新方法

简化的等价模型中, 大差、I 母小差和 II 母小差的差动电流和比率系数分别为

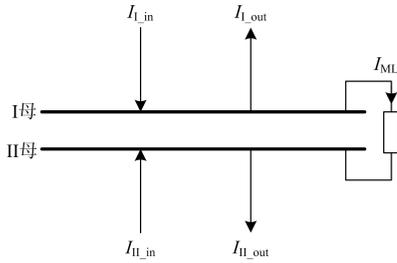


图3 固定相位调节幅值校验方法等价模型  
Fig. 3 Equivalent model of phase fixed and amplitude adjusted method

$$\begin{cases} I_{d\_大} = |I_{I,in} - I_{I,out} + I_{II,in} - I_{II,out}| \\ k_{大} = \frac{|I_{I,in} - I_{I,out} + I_{II,in} - I_{II,out}|}{I_{I,in} + I_{I,out} + I_{II,in} + I_{II,out}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} I_{d\_I} = |I_{I,in} - I_{I,out} - I_{ML}| \\ k_I = \frac{|I_{I,in} - I_{I,out} - I_{ML}|}{I_{I,in} + I_{I,out} + I_{ML}} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} I_{d\_II} = |I_{II,in} - I_{II,out} + I_{ML}| \\ k_{II} = \frac{|I_{II,in} - I_{II,out} + I_{ML}|}{I_{II,in} + I_{II,out} + I_{ML}} \end{cases} \quad (5)$$

通过图3及式(3)一式(5)可以看到,简化的等价模型中有5条支路,即在校验中有5个可调节的量。要利用该模型校验小差比率制动系数,一方面尚无法直观地知道如何对这5条支路进行通流,另一方面必须考虑一些继电保护测试仪仅支持三相(3条支路)电流输出的限制。因此,必须根据校验需满足的数量关系条件以及对模型中不超过3条支路通流的限制,进一步分析得出简单实用的校验方法。

要校验小差比率制动系数,  $k_{大}$  必须大于  $k_I$  或  $k_{II}$ , 而由于三者的变化范围都为  $[0, 1]$ , 因此最理想的条件是  $k_{大} = 1$ 。而要使  $k_{大} = 1$  成立, 则需要  $I_{I,in} = I_{II,in} = 0$  或者  $I_{I,out} = I_{II,out} = 0$ 。

当  $I_{I,in} = I_{II,in} = 0$  时, 大差、I母小差和II母小差的差动电流和比率系数分别为

$$\begin{cases} I_{d\_大} = I_{I,out} + I_{II,out} \\ k_{大} = 1 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} I_{d\_I} = I_{I,out} + I_{ML} \\ k_I = 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} I_{d\_II} = |I_{ML} - I_{II,out}| \\ k_{II} = \frac{|I_{ML} - I_{II,out}|}{I_{II,out} + I_{ML}} \end{cases} \quad (8)$$

此时, 由于  $k_I = 1$ , 因此该情况无法用于校验 I 母小差比率制动系数, 而要将其用于校验 II 母小差比率制动系数, 就必须进一步要求  $I_{d\_I} < I_{dset}$ 、 $I_{d\_大} > I_{dset}$  且  $k_{大} > k_{II}$ , 从而  $I_{II,out} \neq 0$ 、 $I_{ML} \neq 0$  且  $I_{II,out} > I_{ML}$  成立。此时, I 母小差动作条件不满足, 并且大差动作条件比 II 母小差动作条件先满足。因此, 这种情况完全符合校验 II 母小差比率制动系数需满足的数量关系条件以及对模型中不超过 3 条支路通流的限制。此外, 通过以上关系以及式(6)一式(8)可以看出,  $I_{I,out}$  的取值除了必须小于  $I_{dset}$  外, 对大差动作条件和 II 母小差动作条件几乎没有任何影响, 完全可以选择使  $I_{I,out} = 0$ , 从而校验 II 母小差比率制动系数的模型可进一步简化为如图 4 所示的模型。

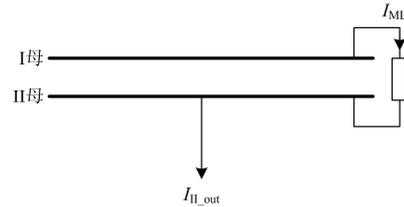


图4 II母小差比率制动系数校验模型  
Fig. 4 Small range differential ratio braking coefficient test model of bus II

最终, II 母小差比率制动系数的校验方法为: 将母联(假定其极性以 I 母流向 II 母为正)置于合位, 在其任一相加入幅值小于  $I_{dset}$  的电流, 相位为  $0^\circ$ ; 在 II 母上任选一条变比与母联相同的支路(假定其极性以母线流向支路为正), 在同一相加入大小相同、相位  $0^\circ$  的电流; 固定母联电流不变, 逐渐增大 II 母上所选支路的电流, 使母线差动动作, 记录所加电流, 验证 II 母小差比率系数。

同理, 当  $I_{I,out} = I_{II,out} = 0$  时, 令  $I_{II,in} = 0$ 、 $I_{ML} < I_{dset}$ , 同样可以得到如图 5 所示的 I 母小差比率制动系数校验模型, 并且此时大差、I 母小差和 II 母小差的差动电流和比率系数分别式(9)一式(11)所示。

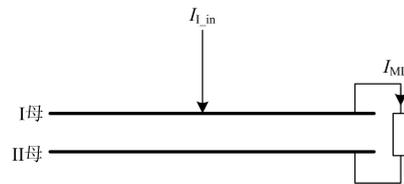


图5 I母小差比率制动系数校验模型  
Fig. 5 Small range differential ratio braking coefficient test model of bus I

$$\begin{cases} I_{d\_大} = I_{I,in} \\ k_{大} = \frac{I_{I,in}}{I_{I,in}} = 1 \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{dI} = I_{Lin} - I_{ML} \\ k_I = \frac{I_{Lin} - I_{ML}}{I_{Lin} + I_{ML}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} I_{dII} = I_{ML} \\ k_{II} = \frac{I_{ML}}{I_{ML}} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

最终, I 母小差比率制动系数的校验方法为: 将母联(假定其极性以 I 母流向 II 母为正)置于合位, 在其任一相加入幅值小于  $I_{dset}$  的电流, 相位为  $0^\circ$ ; 在 I 母上任选一条变比与母联相同的支路(假定其极性以母线流向支路为正), 在同一相加入大小相同、相位  $180^\circ$  的电流; 固定母联电流不变, 逐渐增大 I 母上所选支路的电流, 使母线差动动作, 记录所加电流, 验证 I 母小差比率系数。

值得注意的是, 上述分析得出的方法是针对母联开关电流极性以 I 母流向 II 母为正的情况。如果母联开关电流极性以 II 母流向 I 母为正, I 母和 II 母的校验方法在上述方法基础上母线支路电流方向取反即可。

### 3 案例分析

本文选取某两个 220 kV 变电站中常规比率差动的 RCS-915AB 装置和复式比率差动的 BP-2CS 装置, 通过在设备年检期间对 I 母小差比率制动系数的现场调试和校验, 验证本文方法的有效性。

#### 3.1 RCS-915AB 装置

该装置的母联开关电流极性以 I 母流向 II 母为正。装置中相关定值整定为: 差动启动电流高值为 2.0 A, 差动启动电流低值为 1.8 A, 比率制动系数高值为 0.6, 比率制动系数低值为 0.5。试验过程中, 选择 A 相加入幅值 1.6 A(相当于 0.8 倍  $I_{dset}$ )的起始电流, 母线差动动作时所加支路电流为 6.442 A。

整个过程中, 大差、I 母小差及 II 母小差的差动电流和比率系数变化情况如图 6 所示。得出结论如下。

1) 虽然 II 母小差的比率系数始终为 1, 但其差动电流始终小于动作门槛值, 从而 II 母小差的动作条件始终不会满足。

2) 大差的差动电流始终大于 I 母小差的差动电流, 并且大差的比率系数始终为 1, 从而大差的动作条件必然比 I 母小差的动作条件先满足。

3) I 母小差的差动电流和比率系数都随着 I 母支路电流的增加而增大。当 I 母支路电流达到 3.6 A 左右时, I 母小差的差动电流即达到差动电流门槛

值附近, 而此时大差的动作条件完全满足, 但母线差动未动作, 说明母差差动动作所有所需满足条件中只剩下 I 母小差的比率系数不满足动作条件。直到所加支路电流达到 6.442 A 时母线差动动作, 此时必定是 I 母小差的比率系数刚好满足动作条件, 从而测得的 I 母小差比率系数必定是装置实际的小差比率制动系数门槛值。

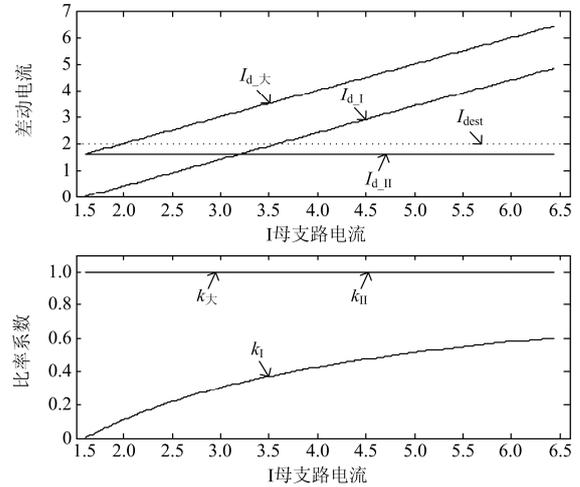


图 6 RCS-915AB 试验过程中数据变化情况

Fig. 6 Data changes during the test of RCS-915AB

最终, 测得的 I 母小差比率制动系数为 0.602, 与装置整定值一致, 具体计算过程为

$$k_I = \frac{6.442 - 1.6}{6.442 + 1.6} = \frac{4.842}{8.042} \approx 0.602$$

#### 3.2 BP-2CS 装置

该装置的母联开关电流极性以 II 母流向 I 母为正。装置中相关定值整定为: 差动保护启动电流定值为 2.5 A。试验过程中, 起始电流幅值为 2 A, 母线差动动作时所加支路电流为 6.029 A。

整个过程中, 大差、I 母小差及 II 母小差的差动电流和比率系数变化情况如图 7 所示。复式比率差动的 BP-2CS 装置与常规比率差动的 RCS-915AB 装置在试验过程中的数据变化情况相比, 得出以下两点。

1) 两者变化情况相似, 都能保证 II 母小差的动作条件始终不会满足、大差的动作条件比 I 母小差的动作条件先满足和 I 母小差的差动电流比 I 母小差的比率系数先满足动作条件, 从而都能保证 I 母小差比率系数是母差差动动作所需满足条件中最后一个满足的条件。

2) 不同的是, 复式比率差动的 BP-2CS 装置在试验过程中, 大差和 II 母小差的比率系数为正无穷大, I 母小差的比率系数随 I 母支路电流的增加呈线

性变化。但是, 这些不同仅仅是复式比率差动与常规比率差动之间制动特性差异的体现, 与小差比率差动系数校验的逻辑无关。

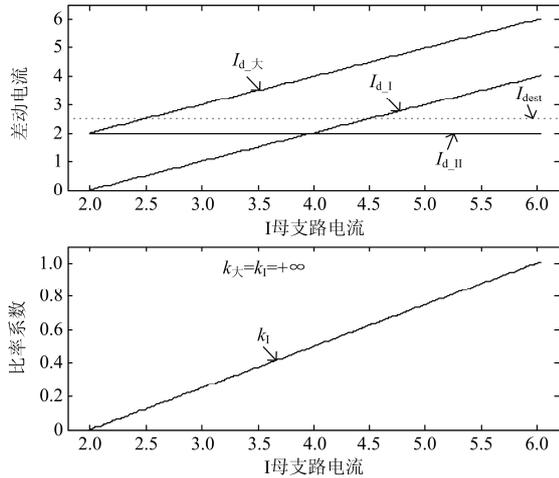


图 7 BP-2CS 试验过程中数据变化情况

Fig. 7 Data changes during the test of BP-2CS

最终, 测得的 I 母小差比率制动系数为 1.007, 与装置内部整定固化值一致, 具体计算过程为

$$k_1 = \frac{6.029 - 2}{(6.029 + 2) - (6.029 - 2)} = \frac{4.029}{4} \approx 1.007$$

## 4 结论

本文从固定相位调节幅值校验方法出发, 提出了一种小差比率制动系数校验新方法。无论是常规比率差动还是复式比率差动, 无论母联开关电流极性端靠近哪侧母线, 该方法都能保证测得的小差比率系数必定是装置实际的小差比率制动系数门槛值, 解决了传统小差比率制动系数校验方法存在校验结果可能不准确的问题。

## 参考文献

- [1] BO Zhiqian, LIN Xiangning, WANG Qingping, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0012-2
- [2] 舒逸石, 马勇, 于培杰, 等. 浅谈母差保护微机化的几点感受[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 116-121.  
SHU Yishi, MA Yong, YU Peijie, et al. Discussion on microprocessor-based bus bar protection[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 116-121.
- [3] 温东旭, 杨辉, 王旭宁, 等. 电力保护装置保障性自动

- 测试方案研究与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 135-138.
- WEN Dongxu, YANG Hui, WANG Xuning, et al. Research and practice on the scheme of automatic testing of power protection device security[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 135-138.
- [4] 王忠, 张晓莉, 李忠安, 等. 继电保护装置自动测试系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 130-135.  
WANG Zhong, ZHANG Xiaoli, LI Zhongan, et al. Design of automatic test system for relay protection device[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 130-135.
- [5] 李刚. 继电器自动化调试装置初探[J]. 继电器, 1988, 16(2): 48-57.
- [6] 姚勇. BUS1000型母线差动保护的原理和调试体会[J]. 华东电力, 1993(1): 12-14.
- [7] 郭小丽, 王为华, 王述明. 双母线保护在调试及运行中应注意的问题[J]. 山西电力, 2012(4): 13-15.  
GUO Xiaoli, WANG Weihua, WANG Shuming. Issues to concern on duplicate-busbar protection in the commissioning and operating process[J]. Shanxi Electric Power, 2012(4): 13-15.
- [8] 浮明军, 刘昊昱, 董磊超. 智能变电站继电保护装置自动测试系统研究和应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 40-44.  
FU Mingjun, LIU Haoyu, DONG Leichao. Research and application of relay protection automatic test system for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 40-44.
- [9] 王玉财, 吕飞鹏, 何奎. 满足可靠性要求的继电保护装置预防检修模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 49-53.  
WANG Yucai, LÜ Feipeng, HE Kui. Preventive maintenance model for relay protection device based on reliability requirements[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 49-53.
- [10] 王翠霞, 张国平. BP-2B复式比率差动保护分析与调试[J]. 继电器, 2007, 35(增刊): 184-187.  
WANG Cuixia, ZHANG Guoping. Analysis and debugging of BP-2B duplex ratio-differential protection [J]. Relay, 2007, 35(S): 184-187.
- [11] 林焯. 优化RCS-915AB型母差保护检验方法的讨论[J]. 继电器, 2007, 35(14): 70-72, 76.  
LIN Kui. Discussion on the testing method of optimizing the RCS-915AB-differential protection[J]. Relay, 2007, 35(14): 70-72, 76.

- [12] 谭小华. 母线差动保护回路的检验方法[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2009, 26(2): 53-54.  
TAN Xiaohua. Testing methods to busbar differential protection circuit[J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2009, 26(2): 53-54.
- [13] 朱锴, 方陟亨. 母线保护试验方法与讨论[J]. 大众用电, 2012, 28(7): 45-47.  
ZHU Kai, FANG Zhiheng. Test method and discussion of busbar protection[J]. Popular Utilization of Electricity, 2012, 28(7): 45-47.
- [14] 王海洋, 张锦标. BP-2B 母差保护调试方法研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2014, 10(2): 151-155.  
WANG Haiyang, ZHANG Jinbiao. Research on adjustment methods for BP-2B busbar differential protection[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2014, 10(2): 151-155.
- [15] 谷斌, 王世祥. 母线保护调试方法分析与研究[J]. 电工技术, 2014, 35(2): 3-5.

GU Bin, WANG Shixiang. Analysis and research on debugging method of bus protection[J]. Electric Engineering, 2014, 35(2): 3-5.

收稿日期: 2016-10-08; 修回日期: 2017-02-20

作者简介:

李 智(1987—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统二次设备检修和电压无功优化控制; E-mail: lizhi5saisen@126.com

张安安(1977—), 男, 工学博士(后), 副教授, 工程师, 青年专家, 研究方向为电压无功控制和智能电网;

胡志威(1989—), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统二次设备检修。

(编辑 葛艳娜)