

# 一种基于阻抗角差对地电容测量方法

靳维<sup>1</sup>, 张栋梁<sup>2</sup>, 张洋<sup>1</sup>, 李晓波<sup>2</sup>

(1. 徐州润泽电气有限公司, 江苏 徐州 221000; 2. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 对于自动跟踪补偿消弧线圈的控制, 主要在于对地电容的准确测量。针对消弧线圈串电阻接地系统, 提出了一种根据阻抗角差巧用阻抗三角形的等面积原理, 求解系统的对地电容。通过改变消弧线圈的电感值或者改变消弧线圈的串联电阻值, 测量调节前、后的零序电流的幅值和相位, 据阻抗角差构造等面积三角形, 利用求解不平衡电压计算对地参数。使用 Matlab 建立模型进行计算, 表明该方法调节方便、计算简单, 满足在线测量的要求。  
**关键词:** 对地电容; 不平衡电压; 阻抗角差; 等面积; 消弧线圈串电阻

## A method of ground capacitance measurement based on impedance angle difference

JIN Wei<sup>1</sup>, ZHANG Dongliang<sup>2</sup>, ZHANG Yang<sup>1</sup>, LI Xiaobo<sup>2</sup>

(1. Xuzhou Runze Electrical Co., Ltd., Xuzhou 221000, China; 2. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** It is important to measure the capacitance to ground accurately for arc-suppression coil's automatic control. The principle area of impedance triangle based on impedance angle difference is proposed to calculate the system capacitance to ground aimed at coil series resistance grounding system. Triangle is constructed based on impedance angle difference by changing the value of inductance or resistance of arc-suppression coil, measuring the magnitude and phase of zero-sequence current before and after arc-suppression coil regulation. Unbalanced voltage is solved to calculate ground parameters. Matlab simulation results show that the method is easy to adjust and simple to calculate. This method meets the requirements of online measurement.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51107143).

**Key words:** ground capacitance; unbalance voltage; impedance angle difference; area equal; arc-suppression coil series resistance

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0121-05

## 0 引言

消弧线圈在供电系统中被广泛使用<sup>[1-2]</sup>, 当发生单相接地故障, 其对地点流过的电容电流具有补偿作用。为了达到最优的补偿效果, 需要实时测量系统的对地电容<sup>[3]</sup>。目前的对地电容的测量方法有极大值法<sup>[4-5]</sup>、注入信号法<sup>[6-7]</sup>、偏置法<sup>[8]</sup>、阻抗三角形法<sup>[9]</sup>等方法。极大值法原理简单, 但是对于调匝式消弧线圈, 需要来回调节有载开关分接头, 测量速度慢, 影响设备的寿命。注入法的注入信号频率偏差会造成测量结果严重失真, 当 PT 有消谐装置也会使得测量不准确<sup>[10-11]</sup>。偏置法会造成系统三相不平衡加大, 对系

统的绝缘不利, 偏置设备接在一次侧, 存在安全隐患, 难以满足在线实时测量的要求。

本文提出了一种利用调节消弧线圈的电阻或者电感值, 根据零序电流的矢量关系构造出阻抗角差三角形, 利用三角形面积法, 计算出系统的不平衡电压, 据此计算出系统的对地容抗, 求得系统的对地电容。该方法巧妙利用调谐过程中阻抗角不同的特点, 构造阻抗角差三角形, 利用面积相等求解不平衡电压, 可以在线实时测量, 能够获得比较高的测量精度, 可以达到工程应用的要求。

## 1 等效模型的建立

在中性点经消弧线圈串电阻接地系统中,  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  分别为三相总的对地电容,  $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$  分

别为三相总的对地电导,  $L$  为消弧线圈的电感,  $R_L$  为消弧线圈串联的电阻。则根据节点电压方程, 可求得消弧线圈未投入时系统的自然不平衡电压为

$$\dot{U}_{bd} = \sum_{i=1}^3 \dot{E}_i Y_i / \sum_{i=1}^3 Y_i = \dot{k} \dot{E}_A \quad (1)$$

系统接入消弧线圈后, 利用戴维宁等效定理得到等效电路如图 1。

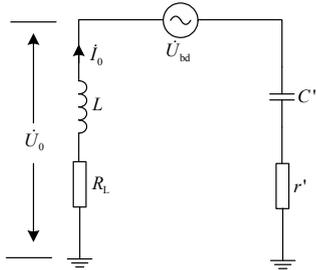


图 1 消弧线圈接地系统等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of arc-suppression coil grounding system

其中:  $C = C_A + C_B + C_C$ ;  $G = G_A + G_B + G_C$ ;  $r' = \frac{G}{G^2 + (\omega C)^2}$ ;  $C' = \frac{G^2 + (\omega C)^2}{\omega^2 C}$ 。由于系统的对地电阻很小  $G \ll \omega C$ , 且  $r' \ll R_L$ , 所以在计算时忽略  $r'$  的影响,  $C' \approx C$ 。

## 2 阻抗角差的原理

通过调节消弧线圈的电感量或者串联电阻, 利用系统阻抗变化量与调节前、后系统的阻抗的关系, 构造角差三角形。利用面积法原理求得系统不平衡电压, 根据零序电流的大小利用式(2)、式(3)计算系统的总阻抗, 求出系统的对地电容。

$$\dot{U}_{bd} = \dot{I}_0 Z \quad (2)$$

$$Z = R_L + j\omega L - j(1/\omega C) \quad (3)$$

当消弧线圈处于某状态时, 此时测得系统的零序电压幅值为  $U_{01}$ , 相位为  $\varphi_{u1}$ , 零序电流幅值  $I_{01}$ , 相位为  $\varphi_{i1}$ ; 保持消弧线圈串联电阻不变, 调节消弧线圈的电感值, 测量得到系统的零序电压幅值为  $U_{02}$ , 相位为  $\varphi_{u2}$ , 测量得到系统的零序电流幅值为  $I_{02}$ , 相位为  $\varphi_{i2}$ , 测量过程中, 认为系统参数不发生改变, 即  $\dot{U}_{bd}$  不变, 则阻抗角度差即为零序电流的角度差,  $\Delta\varphi_1 = |\Delta\varphi_{i1} - \Delta\varphi_{i2}|$ 。

### 2.1 调节电感量的阻抗角差法原理

假设系统不平衡电压的相位为  $\theta$ , 调节过程中, 保持消弧线圈的串联电阻  $R_L$  不变, 只改变消弧线圈的电感量, 可以作出如图 2 所示的关系图。

由图 2 可知,  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $\Delta X_L$  构成了一个三角

形。其中  $\Delta X_L = X_{L1} - X_{L2}$ ,  $X_{L1}$ 、 $X_{L2}$ 、 $R_L$  可以通过测量零序电压和零序电流的矢量关系计算得到。

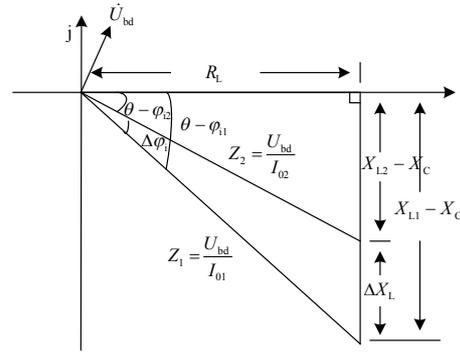


图 2 调节电感量形成的三角形

Fig. 2 Triangle formed by adjusting inductance

根据阻抗角差三角形面积相等  $S = \frac{1}{2} Z_1 \times Z_2 \times$

$\sin\Delta\varphi_1 = \frac{1}{2} R_L \times \Delta X_L$ , 系统不平衡电压为

$$U_{bd} = \sqrt{\frac{R_L \times \Delta X_L \times I_{01} \times I_{02}}{\sin(\varphi_{i2} - \varphi_{i1})}} \quad (4)$$

又因为  $\frac{U_{bd}^2}{I_{01}^2} = \frac{R_L \times \Delta X_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{i2} - \varphi_{i1}) \times I_{01}} = R_L^2 + (X_{L1} - X_C)^2$ ,

故可以求得系统的对地容抗。当调节前处于欠补偿时, 则

$$X_C = X_{L1} - \sqrt{\frac{R_L \times \Delta X_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{i2} - \varphi_{i1}) \times I_{01}} - R_L^2} \quad (5)$$

当调节前处于过补偿时, 则

$$X_C = X_{L1} + \sqrt{\frac{R_L \times \Delta X_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{i2} - \varphi_{i1}) \times I_{01}} - R_L^2} \quad (6)$$

### 2.2 调节电阻值的阻抗角差法原理

假设系统的不平衡电压相位为  $\theta$ , 调节过程中, 保持消弧线圈电感量  $X_L$  不变, 只改变消弧线圈的串联电阻  $R_L$  的值, 可以作出如图 3 所示的关系图。

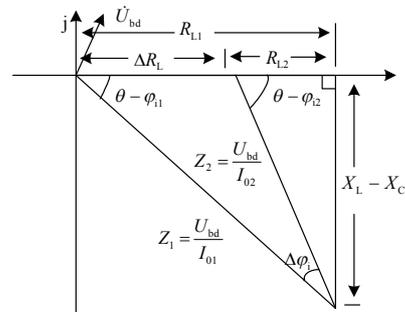


图 3 调节电阻值形成的三角形

Fig. 3 Triangle formed by adjusting resistance value

由图 3 可知,  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $\Delta R_L$  构成了一个三角形。其中  $\Delta R_L = R_{L1} - R_{L2}$ ,  $X_L$ 、 $R_{L2}$ 、 $R_{L1}$  可以通过零序电压和零序电流的矢量关系求解计算得到。

利用形成的阻抗角差三角形, 根据面积相等  $S = \frac{1}{2} Z_1 \times Z_2 \times \sin \Delta \varphi_1 = \frac{1}{2} X_L \times \Delta R_L$ , 计算系统的不平衡电压

$$U_{bd} = \sqrt{\frac{X_L \times \Delta R_L \times I_{01} \times I_{02}}{\sin(\varphi_{12} - \varphi_{11})}} \quad (7)$$

$$\text{因 } \frac{U_{db}^2}{I_{01}^2} = \frac{X_L \times \Delta R_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{12} - \varphi_{11}) \times I_{01}} = R_{L1}^2 + (X_L - X_C)^2,$$

故易求系统的对地容抗, 当系统调节前消弧线圈处于欠补偿时, 则

$$X_C = X_L - \sqrt{\frac{X_L \times \Delta R_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{12} - \varphi_{11}) \times I_{01}} - R_{L1}^2} \quad (8)$$

若系统调节前消弧线圈处于过补偿时, 则

$$X_C = X_L + \sqrt{\frac{X_L \times \Delta R_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{12} - \varphi_{11}) \times I_{01}} - R_{L1}^2} \quad (9)$$

### 2.3 消弧线圈补偿状态的确定

根据推导公式可知, 消弧线圈处于过补偿和欠补偿状态的公式不同, 为正确使用公式, 需判定消弧线圈的补偿状态。

当只调节消弧线圈电感量时候, 若随补偿容量的增加, 即电感值的减小, 零序电流是增大的, 则此时消弧线圈处于欠补偿状态, 反之, 则消弧线圈处于过补偿的状态。如果  $I_{01} \leq I_{02}$ , 则消弧线圈在调节前处于欠补偿状态, 则使用式(5)计算; 若  $I_{01} > I_{02}$ , 则说明调节后消弧线圈处于过补偿状态, 则使用式(6)计算。

当只调节消弧线圈的串联电阻时, 零序电流的相位是按照逆时针方向变化, 则消弧线圈处于欠补偿状态, 反之, 则消弧线圈处于过补偿的状态。如果调节消弧线圈后, 零序电流相位  $\varphi_{12}$  相对  $\varphi_{11}$  逆时针变化, 则消弧线圈处于欠补偿状态, 将参数代入式(8)进行计算, 若  $\varphi_{12}$  相对  $\varphi_{11}$  顺时针变化, 则为过补偿状态, 将参数代入式(9)进行计算。

### 2.4 消弧线圈调谐过程分析

系统在消弧线圈运行方式下, 其调谐过程是一个逐渐调节到目标档位的过程, 故调谐和测量是相辅相成的, 调谐并不能依赖于一次的测量结果, 脱谐度设定后, 应能准确地调节到目标位置。因调感法和调阻法类似, 故以调感法进行分析。根据式(5)、式(6)可知, 其系统的对地容抗是依据当前消弧线圈的感抗为基准计算得到, 即系统容抗由当前感抗值加上一个增量得到, 计作增量为  $\Delta$  (欠补偿时增量取

负, 过补偿时增量取正)。故:  $\Delta^2 = \frac{R_L \times \Delta X_L \times I_{02}}{\sin(\varphi_{12} - \varphi_{11}) \times I_{01}} - R_{L1}^2$ 。

当假定初始情况下, 消弧线圈远离谐振点, 每调节一次消弧线圈进行调谐时, 随着消弧线圈补偿向谐振点靠近, 即  $X_L$  向  $X_C$  逼近, 增量  $\Delta$  逐渐降低, 故其调谐的过程是一个不断逼近、精确的过程。通过计算的起步位置和步长, 调谐和测量形成一个有机整体, 其调谐与测量过程为一个收敛的过程, 故调谐的效率更高、更快, 更准确。

消弧线圈的补偿效果在于能够实时地跟踪系统的电容电流并且能够准确地调节到目标位置, 常规的系统零序电压和零序电流跟踪电容电路的方法难以判断是消弧线圈参数改变引起的, 还是系统参数变化引起的。基于阻抗角差的电容电流测量方法, 通过进一步计算系统的不平衡电压, 能够更好地反映系统参数的变化。

### 2.5 测量误差分析

根据分析可知, 其测量电容电流的误差主要取决于增量因子  $\Delta$  和起始感抗  $X_{L1}$ , 对于有档调节消弧线圈,  $X_{L1}$  一般可以直接得到, 对于连续调节消弧线圈,  $X_{L1}$  的计算误差是各种方法都难以有效避免的。因此, 系统电容电流的测量误差主要依赖于增量因子  $\Delta$ 。初始状态  $X_{L1}$  远离谐振时的感抗量, 调节电感量时, 每次调节的范围不大, 故计算得到的增量因子较大, 因为测量时消弧线圈工作在远离谐振点, 故系统零序电流测量较小, 存在一定的测量误差, 对计算的结果有影响。但是其计算过程是收敛的, 故消弧线圈依然向目标位置调节。

由于消弧线圈工作在谐振点附近, 消弧线圈调节到谐振点附近时, 零序电流较大, 而且变化不明显, 增量因子  $\Delta$  受到零序电流的影响迅速减小, 故测量误差的影响对计算结果的影响很小, 计算精度会得到提高, 在消弧线圈调谐过程中, 调谐精度随着起始位置靠近谐振点越来越高。

消弧线圈调节过程中, 如果调节的范围较小时, 则可认为零序电流变化量不大, 还可以对增量因子  $\Delta$  进行简化, 从而减少测量量, 提高测量效率。

## 3 仿真计算与分析

利用 Matlab 搭建 10 kV 消弧线圈串电阻接地配电网模型, 仿真使用分布参数线路模型, 如图 4 所示。为使系统存在一定不平衡, 在仿真模型中的线路 2、4 上分别设置了一个不平衡参数。仿真模型中线路 1、2 为架空线路, 线路 3、4 为电缆线路。线路 1、2、3 和 4 的长度分别为 7.3 km、5.6 km、33.4 km、16.7 km。架空线: 正序、零序电阻为 0.17  $\Omega$ /km、0.23  $\Omega$ /km, 正序、零序电感为 1.36 mH/km、

3.87 mH/km, 正序、零序电容为 0.061  $\mu$ F/km、0.022 76  $\mu$ F /km。电缆: 正序、零序电阻 0.024  $\Omega$ /km、0.196  $\Omega$ /km, 正序、零序电感为 0.516 mH/km、0.398 mH/km, 正序、零序的分布电容为 0.308  $\mu$ F /km、0.203  $\mu$ F /km。通过参数计算得到的系统的总对地电容为 37.3  $\mu$ F。

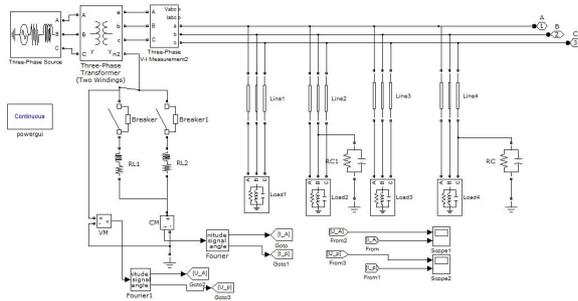


图 4 对地参数的测量仿真图

Fig. 4 Simulation of measuring ground parameters

仿真模型仿真通过在 0.2 s 时调节消弧线圈的电感值或者电阻值记录中性点零序电流的幅值和相位, 构建阻抗角差三角形, 求解系统的对地电容, 通过仿真结果对比, 基于阻抗角差利用等面积原理可以准确计算系统的对地电容, 满足消弧线圈调谐精度的要求。

图 5 是调节消弧线圈的电感量系统零序电流的波形, 通过消弧线圈参数变化构造出等面积三角形, 计算得到系统的电容电流。图 6 是调节消弧线圈的阻尼电阻的系统零序电流的仿真波形。

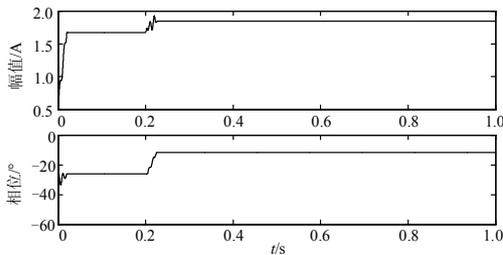


图 5 调节消弧线圈电感零序电流幅值相位图

Fig. 5 Diagram of zero sequence current magnitude and phase by regulating arc-suppression coil's inductance

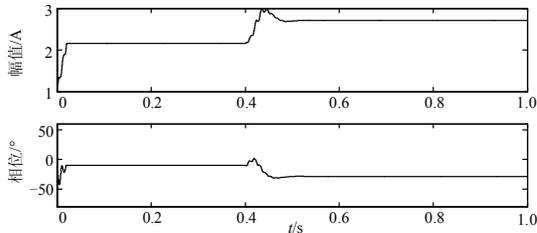


图 6 调节消弧线圈电阻零序电流幅值相位图

Fig. 6 Diagram of zero sequence current magnitude and phase by regulating arc-suppression coil's resistance

表 1 是改变消弧线圈电感量的仿真数据, 表 2 是改变消弧线圈阻尼电阻的仿真数据。

通过仿真数据可以看到, 本文采用的对角差电容电流法能够计算出系统的电容电流, 但是仿真结果与实际值之间存在一定的误差, 其主要是由于忽略系统的对地电阻而引起的, 即便实际应用时再加上测量误差带来的计算误差, 也能够控制在工程应用允许的误差范围内, 故能满足实际应用要求。

表 1 改变电感值的仿真结果

Table 1 Simulation results of changing inductance

$I_{01}$		$I_{02}$		$C/\mu\text{F}$		误差/%
幅值/A	相位/ $^\circ$	幅值/A	相位/ $^\circ$	计算值	理论值	
1.82	-19.05	2.18	-12.27	36.6	37.3	1.88
2.03	-15.23	2.60	-3.57	36.9	37.3	1.07
2.65	-2.41	3.34	17.51	36.7	37.3	1.61

表 2 改变电阻值的仿真结果

Table 2 Simulation results of changing resistance

$I_{01}$		$I_{02}$		$C/\mu\text{F}$		误差/%
幅值/A	相位/ $^\circ$	幅值/A	相位/ $^\circ$	计算值	理论值	
2.65	-2.41	3.02	-10.57	36.8	37.3	1.34
2.83	-6.22	3.22	-15.51	36.9	37.3	1.07
2.93	-8.32	3.50	-24.14	37.1	37.3	0.54

#### 4 结束语

本文是针对消弧线圈串电阻接地系统提出的一种对地电容的测量方法。该方法利用调节消弧线圈的电感值或者电阻值形成阻抗角差三角形, 巧妙地利用了三角形的面积法计算出系统的不平衡电压, 解决了其他一些调谐方法难以准确求解不平衡电压带来的无法实时跟踪系统对地电容的问题。

该方法相较其他的调谐方法, 可以通过零序电压、电流的变化情况, 进一步计算出系统的不平衡电压, 从而判定是否由于消弧线圈自身参数变化亦或是系统对地参数的变化引起的零序电压、电流的改变。该方法调节简单、只需要调节一次电感或者电阻, 对于不方便多次调节分接头的调匝式消弧线圈调谐尤为方便, 并且计算方便。适合于在线测量。

#### 参考文献

[1] 蔡旭, 李仕平, 杜永忠, 等. 变阻尼调匝式消弧线圈及接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 85-90.  
 CAI Xu, LI Shiping, DU Yongzhong, et al. An integrated controller of multi-tap arc-suppression with variational damp and detection of earth fault feeder[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 85-90.  
 [2] 李晓波, 张长彦, 王崇林. 一起消弧线圈控制装置异

- 常动作事件分析及改进措施[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 121-125.
- LI Xiaobo, ZHANG Changyan, WANG Chonglin. Analysis on abnormal action of an arc suppression coil control device and its improvement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 121-125.
- [3] 吴茜, 蔡旭, 徐波. 具有两级磁阀的消弧线圈关键参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 224-230.
- WU Xi, CAI Xu, XU Bo. Design of key parameters about two-stage magnetic valve arc-suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 224-230.
- [4] 李玲玲, 孙鹤旭, 王晓宏. 谐振接地电力网自动调谐的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 77-80.
- LI Lingling, SUN Hexu, WANG Xiaohong. A new automatic tuning method for resonance grounding over network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 77-80.
- [5] 刘宝稳, 李晓波. 基于失谐量的消弧线圈跟踪调谐方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 6-9.
- LIU Baowen, LI Xiaobo. New type of automatic tuning arc-suppression coil based on detuning size[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 6-9.
- [6] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊. 注入信号精确谐振测量配电网电容电流新技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 77-80.
- ZENG Xiangjun, YI Wentao, LIU Zhanglei. A novel technique of capacitive current resonance measurement with signal injected for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 77-80.
- [7] 丛伟, 李盼盼, 李洪涛, 等. 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 185-189.
- CONG Wei, LI Panpan, LI Hongtao, et al. Automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 185-189.
- [8] 李晓波, 苗晓鹏, 桑振华, 等. 基于偏置阻抗法的配电网电容电流测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 22-26.
- LI Xiaobo, MIAO Xiaopeng, SANG Zhenhua, et al. A new capacitive current measurement method of the distribution network based on bias impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 22-26.
- [9] 桑振华, 苗晓鹏, 李晓波, 等. 基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 104-107.
- SANG Zhenhua, MIAO Xiaopeng, LI Xiaobo, et al. A new measurement method of automatic tracking compensation arc-suppression coil based on the phase modulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 104-107.
- [10] 陈忠仁, 董浩斌, 李景禄. 调气隙式自动消弧装置测量原理研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(10): 25-27.
- CHEN Zhongren, DONG Haobin, LI Jinglu. Study on measuring principle of adjusting gapped-core type automatic arc suppression device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(10): 25-27.
- [11] 蔡旭, 刘勇, 胡春强, 等. 新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 44-49.
- CAI Xu, LIU Yong, HU Chunqiang, et al. New resonance system with magnetic bias and its protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 44-49.

收稿日期: 2014-05-17; 修回日期: 2014-09-02

作者简介:

靳 维(1987-), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为供配电安全与漏电保护; E-mail: jinweicumt@gmail.com

张栋梁(1975-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为轨道交通杂散电流的治理与配电安全;

张 洋(1982-), 男, 本科, 电气工程师, 研究方向为消弧线圈维护。

(编辑 葛艳娜)