

DOI: 10.7667/PSPC160544

基于牛顿—拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法

闫腾飞, 李康, 李晓波, 丁欣

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 提出了一种基于牛顿—拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法。在消弧线圈并联阻尼电阻接地的系统中, 采用有效且快速收敛的牛顿—拉夫逊法, 寻找改变阻尼电阻之后保持中性点电压相位不变的消弧线圈电感量。在此基础上, 确定系统失谐量与系统总电导相位夹角不变并构建相位关系图, 实现系统对地电容和对地电导的精确测量, 最终实现配电网电容电流测量。通过在 Matlab 中搭建仿真模型并进行仿真实验, 验证了所提出的测量方法的正确性以及测量结果具有较高精度。

关键词: 牛顿—拉夫逊法; 中性点电压; 相位关系; Matlab

A new capacitive current measurement method of distribution network based on Newton-Raphson method

YAN Tengfei, LI Kang, LI Xiaobo, DING Xin

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China)

Abstract: A capacitive current measurement method of the distribution network is proposed based on Newton-Raphson Method. In the system of arc suppression coil and damping resistance grounding system, the Newton-Raphson method is of effectiveness and fast convergence calculation. After the damping resistance is changed, finding that the inductance of arc suppression coil which can keep constant neutral point voltage unchanged. On this basis, it is determined that the phase angle is constant between detuning size and total conductance of the system and the phase diagram is constructed. The accurate calculation of the capacitance and the ground electric conduction is realized. Finally, the capacitive current measurement is realized. By building the simulation model in Matlab and simulation experiment, the correctness of the proposed measurement method and higher accuracy of the measurement results are verified.

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

Key words: Newton-Raphson method; neutral voltage; phase relationship; Matlab

0 引言

我国的配电网系统中多采用消弧线圈接地, 消弧线圈的电感电流补偿了电网的电容电流, 限制了故障电流的破坏作用, 使残余电流的接地电弧容易熄灭^[1]。在配电网故障类型中较多出现单相接地故障, 在采用消弧线圈接地的配电网系统中, 出现单相接地故障时, 系统能够维持三相电压不变, 配电网系统可在故障时运行 2~3 个小时^[2], 因此采用消弧线圈接地的配电网系统降低了单相接地故障的危害。

为了更好地实现消弧线圈补偿, 需要对系统电

容电流进行精确测量^[3]。目前已有的电容电流测量方法包括注入信号法^[4-5]、极大值法^[6]、偏置法^[7-8]、阻抗三角形法^[9]以及其他一些方法^[10-13]。注入信号法中所注入信号的功率较小, 易受到系统谐波的干扰, 导致测量结果误差过大, 严重影响测量精度; 偏置法中, 无论是置偏电容还是置偏电阻, 外加电容或者电阻的选择都会影响测量精度且对电网安全造成一定影响; 阻抗三角形法通过两次调整构成的相位差来测量电容电流, 若调整之后所构成的阻抗三角形的角度偏小则会影响测量精度。

本文提出了一种基于牛顿—拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法。牛顿—拉夫逊法的运用将提高系统对地参数的测量精度, 进而提高电容电流测量精度。此外, 该方法在测量过程中受电压影响

小, 不仅可以实现系统对地电容的精确测量还可以实现系统对地电导的测量。

1 测量原理

1.1 基本原理

中性点经消弧线圈并联电阻接地系统的结构如图 1 所示, C_A, C_B, C_C 为三相对地电容, G_A, G_B, G_C 为三相对地电导, L 为消弧线圈电感, R 为与消弧线圈并联的阻尼电阻。当系统正常运行时, 中性点电压为

$$\dot{U} = \frac{-\dot{E}_A \dot{K}_Z}{jY_\omega + G_\Sigma + G_R} \quad (1)$$

式中: $Y_\omega = \omega C_\Sigma - 1/(\omega L)$ 为系统失谐量, 其中 $C_\Sigma = C_A + C_B + C_C$ 为系统总的对地电容; $\dot{K}_Z = j\omega C_A + G_A + \alpha^2(j\omega C_B + G_B) + \alpha(j\omega C_C + G_C)$ 为系统参数不对称矢量, 其中 $\alpha = e^{j120^\circ}$; $G_\Sigma = G_A + G_B + G_C$ 为系统总的对地电导。

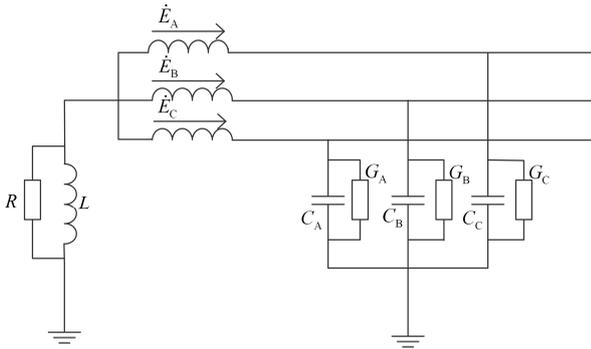


图 1 中性点经消弧线圈并联电阻接地系统

Fig. 1 Neutral grounded via arc-suppression coil with parallel resistance

上述系统根据戴维南定理可得其等值回路, 如图 2 所示。

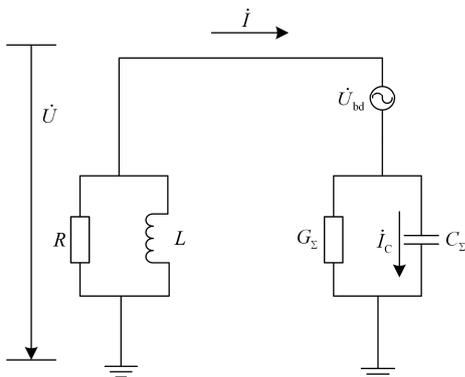


图 2 系统等值回路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the system

则可得电容电流为

$$\dot{I}_C = j\omega C_\Sigma (\dot{U} - \dot{U}_{bd}) \quad (2)$$

式中, $\dot{U}_{bd} = \dot{U}(v - jd)$ 为中性点自然不平衡电压,

其中 $v = \frac{Y_\omega}{\omega C_\Sigma}$ 为失谐度, $d = \frac{G_R + G_\Sigma}{\omega C_\Sigma}$ 为阻尼率。

1.2 测量方法分析

当系统消弧线圈电感量为 L_1 , 并联电阻为 R_1 时, 测量此时系统中性点电压为 \dot{U}_1 , 电压有效值为 U_{01} , 电压相位为 φ_1 。根据式(1)有

$$U_{01} \angle \varphi_1 = \frac{-\dot{E}_A \dot{K}_Z}{\sqrt{Y_{\omega 1}^2 + (G_\Sigma + G_{R1})^2}} \angle \delta_1 \quad (3)$$

式中, δ_1 为系统失谐量 Y_ω 与系统总电导 $G_\Sigma + G_{R1}$ 之间的相位夹角。

改变并联在消弧线圈两端的阻尼电阻为 R_2 , 消弧线圈电感量暂时不做改变, 即 $L_2 = L_1$ 。测量此时系统中性点电压为 \dot{U}_2 , 电压有效值为 U_{02} , 电压相位为 φ_2 , 根据式(1)有

$$U_{02} \angle \varphi_2 = \frac{-\dot{E}_A \dot{K}_Z}{\sqrt{Y_{\omega 2}^2 + (G_\Sigma + G_{R2})^2}} \angle \delta_2 \quad (4)$$

建立仅调整阻尼电阻时, 系统失谐量与系统总电导的相位关系, 如图 3 所示(以阻尼电阻增大为例)。

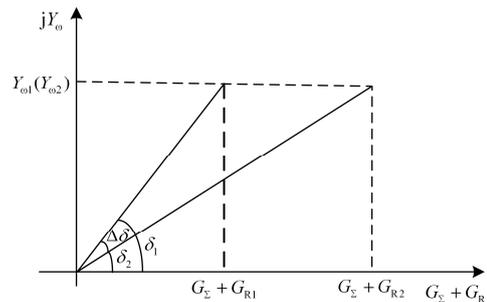


图 3 仅调整阻尼电阻时, Y_ω 与 $G_\Sigma + G_R$ 相位关系图

Fig. 3 Phase relationship between Y_ω and $G_\Sigma + G_R$ when only adjusting the damping resistance

假设在改变阻尼电阻为 R_2 之后, 寻找到某一数值的消弧线圈电感量 L_2 可以保持系统中性点电压相位前后不变, 即 $\varphi_1 = \varphi_2$, 根据式(3)、式(4), 可以得到系统失谐量 $Y_{\omega 1}$ 与系统总电导 $G_\Sigma + G_R$ 的相位夹角 δ 也恒定不变, 即 $\delta_1 = \delta_2$ 。此时, 系统失谐量 Y_ω 与系统总电导 $G_\Sigma + G_R$ 的相位关系如图 4 所示。

根据图 4 中的相角关系以及式(3)、式(4), 可对系统对地电容及对地电导进行计算, 进而根据式(2)实现配电网电容电流测量。因此, 寻找阻尼电阻改变之后保持中性点电压相位不变的消弧线圈电感量

L_2 是本方法的关键所在。

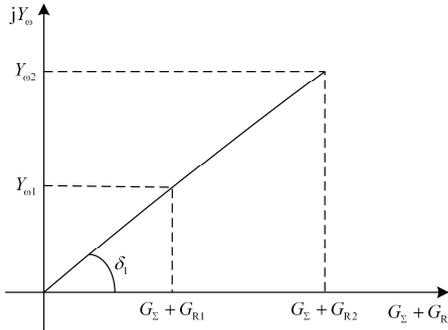


图4 确定电感量之后 Y_{ω} 与 $G_{\Sigma}+G_R$ 相位关系图

Fig. 4 Phase relationship between Y_{ω} and $G_{\Sigma}+G_R$ after the inductance is determined

1.3 牛顿—拉夫逊法应用

为确定上述消弧线圈电感量, 我们采用牛顿—拉夫逊法, 此时可将上述问题转化为以下数学模型, 由图3可知

$$\tan(\delta_1 - \delta_2) = \frac{\tan \delta_1 - \tan \delta_2}{1 + \tan \delta_1 \tan \delta_2} \quad (5)$$

$$\tan \delta_1 = \frac{\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_1}}{G_{\Sigma} + G_{R1}} \quad (6)$$

$$\tan \delta_2 = \frac{\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_2}}{G_{\Sigma} + G_{R2}} \quad (7)$$

另 $\tan \delta_1 = A$, 则当 $\Delta \delta = \delta_1 - \delta_2 = 0$ 时, 有 $\tan \delta_1 - \tan \delta_2 = 0$, 即

$$\frac{\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_2}}{G_{\Sigma} + G_{R2}} - A = 0 \quad (8)$$

根据牛顿—拉夫逊法的基本原理, 将式(8)写为以 L_2 为未知量的一阶非线性方程, 即

$$f(L_2) = \frac{\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L_2}}{G_{\Sigma} + G_{R2}} - A = 0 \quad (9)$$

设置其初始近似解为 $L_2^{(0)}$, 则在该初始近似解下的修正量以及近似解分别为 $\Delta L_2^{(0)}$, $L_2^{(1)}$ 。

$$\Delta L_2^{(0)} = -\frac{f(L_2^{(0)})}{f'(L_2^{(0)})} \quad (10)$$

$$L_2^{(1)} = L_2^{(0)} + \Delta L_2^{(0)} \quad (11)$$

在计算修正量 $\Delta L_2^{(0)}$ 的过程中, 忽略了高次项, 此时所得的修正量并非完全准确, 所以在此初始值下所得非线性方程的近似解 $L_2^{(1)}$ 也非完全准确, 需要进一步求解修正量逼近准确解。因此, 以 $L_2^{(1)}$ 作

为新的初始近似解, 计算新的修正量 $\Delta L_2^{(1)}$, 得到更加逼近准确解的值 $L_2^{(2)}$, 不断重复上述步骤, 至第 $k+1$ 次迭代, $\Delta L_2^{(k)} \rightarrow 0$ 时, 有 $f(L_2^{(k+1)}) \rightarrow 0$ 。给定任意小数 ε , ε 为非线性方程组的收敛标准, 当方程的近似解满足: $|f(L_2^{(k+1)})| < \varepsilon$, 此时 $L_2^{(k+1)}$ 满足收敛标准, 即该近似解可以作为准确解。

对于初始值的选择可通过 $f'(L_2)$ 和 $f''(L_2)$ 来分析。

$$f'(L_2) = \frac{1}{\omega L_2^2 (G_{\Sigma} + G_{R2})} \quad (12)$$

$$f''(L_2) = \frac{-2}{\omega L_2^3 (G_{\Sigma} + G_{R2})} \quad (13)$$

对于所有的 $L_2 > 0$, $f'(L_2) > 0$, $f''(L_2) < 0$, 故 $f(L_2)$ 是单调函数, 且 $f'(L_2)$ 也是单调函数, 则 $|f(L_2^{(k+1)})| < \varepsilon$ 一定成立, 其迭代过程一定收敛。

根据上述分析, 建立牛顿—拉夫逊法流程图, 如图5所示。

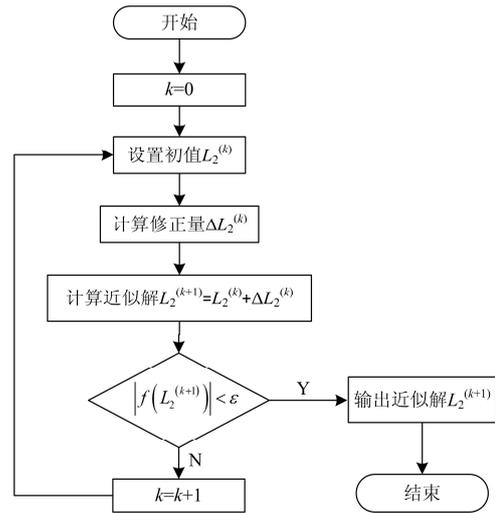


图5 牛顿—拉夫逊法流程图

Fig. 5 Flow chart of Newton-Raphson method

利用上述牛顿—拉夫逊法, 当迭代过程结束, 可确定一个保证在调节前后系统中性点电压相位不变的电感量 L_2 , 进而实现下一步的计算。

2 系统对地参数求解

根据上述分析, 可对系统对地参数进行求解, 式(3)除以式(4)得

$$\beta = \frac{U_{01}}{U_{02}} = \frac{\sqrt{Y_{\omega 2}^2 + (G_{\Sigma} + G_{R2})^2}}{\sqrt{Y_{\omega 1}^2 + (G_{\Sigma} + G_{R2})^2}} \quad (14)$$

根据图 4 及式(14)可得

$$\frac{Y_{\omega 2}}{Y_{\omega 1}} = \frac{G_{\Sigma} + G_{R2}}{G_{\Sigma} + G_{R1}} = \frac{\sqrt{Y_{\omega 2}^2 + (G_{\Sigma} + G_{R2})^2}}{\sqrt{Y_{\omega 1}^2 + (G_{\Sigma} + G_{R1})^2}} = \beta \quad (15)$$

则分别求得系统对地电容及对地电导的表达式为

$$C_{\Sigma} = \frac{\beta L_2 - L_1}{(\beta - 1)\omega^2 L_1 L_2} \quad (16)$$

$$G_{\Sigma} = \frac{G_{R2} - \beta G_{R1}}{\beta - 1} \quad (17)$$

根据所得表达式及式(2)即可计算系统电容电流。

3 仿真分析

利用 Matlab 搭建实验仿真模型, 如图 6 所示。模型中, 系统电压等级为 10 kV, 系统每相对地电阻均为 15 kΩ, 设置 A 相对地电容为 12 μF, B 相与 C 相对地电容均为 12.5 μF, 这样以保证系统对地参数具有一定的不平衡度。根据上述参数可计算得系统总的对地电容值为 37 μF, 对地总电导为 0.0002 S。

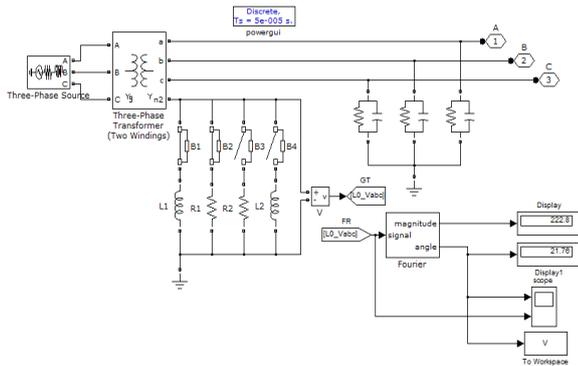


图 6 实验仿真模型

Fig. 6 Experimental simulation model

仿真模型中首先设置消弧线圈的电感量 L_1 为 100 mH, 电阻 R_1 为 300 Ω。为验证采用牛顿—拉夫逊法寻找满足条件的电感量的过程, 每次仿真中将电感 L_2 的值设置为每次迭代所得近似解 $L_2^{(0)}$ 。

$L_2^{(1)}, \dots, L_2^{(k+1)}$, 并将系统中的两组电感电阻均通过定时断路器接入。设置断路器 B_1 、 B_2 初始状态为接通, 断路器 B_3 、 B_4 初始状态为断开; 设置在 0.2 s 时刻断路器 B_2 断开, 同时断路器 B_3 闭合, 用于改变并联阻尼电阻大小; 设置在 0.6 s 时刻断路器 B_1 断开, 同时断路器 B_4 闭合, 用于验证通过牛顿—拉夫逊法迭代计算所得近似解是否满足要求。仿真实验所得中性点电压相位变化如图 7 所示。

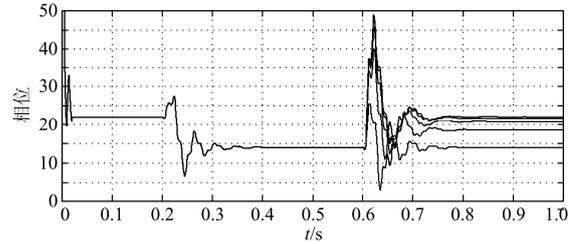


图 7 中性点电压相位变化图

Fig. 7 Phase transformation diagram of neutral voltage

从仿真波形中可以看出: 1) 系统开始运行后, 在 0.2 s 调整阻尼电阻, 经过短暂的波动之后, 系统中性点电压相位稳定下来; 2) 0.6 s 时刻接入每次迭代修正所得近似解, 中性点电压相位逐步逼近到变化之前, 并最终使电压相位在变化前后基本不变, 仿真结果与理论相符。

仿真验证了牛顿—拉夫逊法的正确性, 并且所得电压相位与电压初始相位基本一致。在此基础上可确定系统失谐量与系统总电导的相位关系变化, 进而可实现系统对地电容和对地电导测量。经过多次仿真测量及计算, 所得系统对地参数测量结果如表 1 所示。

从表 1 数据可以看出, 本文所提出的基于牛顿—拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法中, 对地电容的测量结果具有相当高的测量精度, 为电容电流测量提供了保证。同时对地电导的测量精度也可满足实际情况的需求。

表 1 系统对地参数的测量结果

Table 1 Measurement results of ground parameters

L_1/H	G_{R1}/S	L_2/H	G_{R2}/S	φ	U_1/V	U_2/V	$C_{\Sigma}/\mu F$	误差(%)	G_{Σ}/S	误差(%)
0.4	0.0025	0.47	0.0003	35.41	281.3	214.1	37.0147	0.039	2.0266	1.33
0.45	0.0022	0.64	0.0003	27.23	248.6	170.9	37.0211	0.057	2.0285	1.43
0.5	0.002	1	0.0003	22.01	225.1	140.8	37.0093	0.025	2.0193	0.97
0.55	0.0018	0.46	0.000 14	18.43	207.8	257.1	36.9910	-0.024	2.0180	0.90
0.6	0.0017	0.52	0.000 14	15.85	194.9	223.4	37.0276	0.074	2.0419	1.09
0.65	0.0015	0.6	0.000 14	13.90	184.9	196.8	36.9865	-0.026	2.0334	1.67

4 结束语

本文所提出的基于牛顿—拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法, 采用牛顿—拉夫逊法进行迭代计算, 寻找阻尼电阻改变之后保持中性点电压相位不变的消弧线圈电感量, 确定系统失谐量与系统总电导的相位关系, 实现系统对地电容及对地电导的精确测量, 最终实现配电网电容电流的测量。牛顿—拉夫逊法的使用可精确实现保持中性点电压相位不变的电感量的寻找, 进而提高系统对地参数的测量精度。此外, 该方法在计算过程中使用前后电压有效值的比值, 因此所得结果受电压影响较小, 进一步提高了测量精度。

参考文献

- [1] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 王崇林. 中性点接地方式与消弧线圈[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1999.
- [3] 贾晨曦, 杨龙月, 杜贵府, 等. 全电流补偿消弧线圈关键技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 145-154.
JIA Chenxi, YANG Longyue, DU Guifu, et al. Review of key technologies on full current compensation arc suppression coil[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 145-154.
- [4] 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.
- [5] 曾祥君, 易文韬, 刘张磊, 等. 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, et al. 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.
- [6] 朱帅, 李晓波, 程玉凯, 等. 一种消弧线圈调谐新方法的研究[J]. 电测与仪表, 2010, 49(8): 10-13.
ZHU Shuai, LI Xiaobo, CHENG Yukai, et al. Study on a new tuning method based on arc suppression coil[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 49(8): 10-13.
- [7] 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.
- [8] 李景禄, 周羽生, 唐跃进. 偏置电容法电容电流测量的应用经验[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 99-100.
LI Jinglu, ZHOU Yusheng, TANG Yuejin. Application experiences of capacitive current measuring with partially installing capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 99-100.
- [9] 靳维, 张栋梁, 张洋, 等. 一种基于阻抗角差对地电容测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 121-125.
JIN Wei, ZHANG Dongliang, ZHANG Yang, et al. A method of ground capacitance measurement based on impedance angle difference[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 121-125.
- [10] 刘宝稳, 李晓波. 跟踪补偿消弧装置变参调谐通用方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(9): 1-6.
LIU Baowen, LI Xiaobo. General automatic tuning method of change parameters arc-suppression coil compensation device[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(9): 1-6.
- [11] 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 Systems Protection and Control, 2013, 41(5): 6-9.
- [12] 赵军, 袁雪琼, 扈海泽, 等. 基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 51-56.
ZHAO Jun, YUAN Xunqiong, HU Haize, et al. A new method of accurately measuring ground parameters of distribution network based on variable resistor voltage disturbance[J]. Power Systems Protection and Control, 2015, 43(17): 51-56.
- [13] 靳维, 袁朋生, 张洋, 等. 基于调整中性点接地阻抗的配电网电容电流测量[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 37-41.
JIN Wei, YUAN Pengsheng, ZHANG Yang, et al. A method of measuring capacitive current in distribution network based on adjusting the neutral grounding impedance[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 37-41.

收稿日期: 2016-04-17; 修回日期: 2016-08-07

作者简介:

闫腾飞(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为供配电安全; E-mail: yantengfei100@126.com

李康(1991-), 男, 硕士研究生, 研究方向为供配电安全;

李晓波(1976-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为供配电安全、微机保护与智能电器。

(编辑 周金梅)