

# 基于变电阻电压扰动的配电网对地参数精确测量新方法

赵军<sup>1</sup>, 袁雪琼<sup>1</sup>, 扈海泽<sup>1</sup>, 王林<sup>1</sup>, 阮琦<sup>1</sup>, 张春辉<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气工程学院, 湖南 长沙 410004; 2. 长沙信长电力科技有限公司, 湖南 长沙 410009)

**摘要:** 为了获得配电网精确对地参数, 提出基于变电阻电压扰动法的电网对地参数测量方法。对于中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统, 由于系统正常运行时参数的不平衡, 将在中性点产生一定的电压偏移。通过在中性点投入不同阻值的电阻, 引起中性点电压的改变, 测量改变前后的电压幅值, 由电压幅值和其他已知参数通过一定的运算可先计算出配电网对地电导, 将电代入再求出系统对地电容精确值。Matlab 仿真分析和实验模拟网测试结果表明该方法具有很高的精确度, 且该方法简单、安全、适用范围广、可操作性强。同时指出实际现场测量时, 应选用适当阻值电阻, 以减小测量误差。

**关键词:** 中低压配电网; 可变电阻; 对地电导; 对地电容; 精确测量

## A new method of accurately measuring grounded parameters of distribution network based on variable resistor voltage disturbance

ZHAO Jun<sup>1</sup>, YUAN Xueqiong<sup>1</sup>, HU Haize<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, RUAN Qi<sup>1</sup>, ZHANG Chunhui<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410004, China;  
2. Changsha Xinchang Electricity Technology Co., Ltd., Changsha 410009, China)

**Abstract:** In order to obtain accurate grounded parameter of distribution network, a method of measuring grounded parameter of power grid based on variable resistor voltage disturbance is put forward. Due to the unbalanced parameters during system normal operation, voltage will deviated in the neutral point for neutral point grounding system and neutral point via arc suppression coil grounded system. By adding resistors with different resistance in the neutral point to change the neutral point's voltage, this paper measures the voltage amplitude before and after the change, uses the voltage amplitude and other known parameters by certain operations to calculate the distribution network grounded conductance, and substitutes conductance into the equation to obtain accurate grounded capacitance. Matlab simulation analysis and experimental test results show that the method is highly accurate, simple, safe and has wide application and operability. It also points out that appropriate resistance values should be chosen in actual measurement to reduce the measurement error.

**Key words:** low-voltage distribution network; variable resistor; grounded conductance; capacitance to ground; accurate measurement

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0051-06

## 0 引言

随着现代配电网的发展, 配电线路长度的增加以及城市电网中大量采用电缆线路, 使得故障时线路对地电容电流增加。对地电容的测量精度决定了消弧线圈的补偿电流, 影响着其他保护装置的准确动作<sup>[1-5]</sup>。对地电导的测量能够及时了解系统对地的绝缘情况, 了解系统的安全性。因此对地参数的测量在实际现场应用中具有非常重要的意义。

现在已有多种方法能够实现配电网对地电容的测量<sup>[6]</sup>, 如单相金属接地测量法<sup>[7]</sup>、中性点外加电容法<sup>[8]</sup>、中性点开短路法<sup>[6]</sup>、偏置电容法<sup>[9]</sup>、偏置阻抗法<sup>[10]</sup>等, 针对经消弧线圈接地系统有两点法、三点法<sup>[11]</sup>、阻抗三角形法<sup>[6]</sup>、注入信号法<sup>[12-15]</sup>、谐振法<sup>[16-17]</sup>等测量方法。两点法、三点法只适用于不接限压电阻的“随调式”消弧线圈, 且测量精度不高, 阻抗三角形法一般只用于带限压电阻的“预调式”消弧线圈, 注入信号法向系统中注入了一个非工频

信号会对系统波形、频率产生影响,在实际测量中也往往会由于测试的方法不当产生一定的偏差<sup>[18]</sup>。单相金属接地法由于人为地制造了接地故障,引起非故障相电压升高可能会造成故障扩大。偏置阻抗法实际上是对偏置电容法的改进,通过改变可调电抗器使得中性点电压与偏置阻抗所在相电压相位刚好偏差  $90^\circ$ ,实现对地电容和对地电导的准确测量。实际上要精确地测量出系统对地电容就不可避免地要测出系统对地电导,而现场常用的方法一般是在忽略对地电导的情况下实现对地电容的测量,这样不可避免地产生较大误差。

本文提出在中性点接入可变电阻测量配电网对地电导和对地电容。该方法只需通过两次改变接入中性点的电阻,测量三次中性点电压幅值,即可通过一定的运算,测量出系统对地电容和对地电导。该方法对中低压配电网系统都非常有效,通过仿真和 10 kV 真值模拟网实地验证了该方法具有较高精度。相较于传统和最近提出的测量方法,本文所提方案具有简单、安全、实用、适用范围广、可操作性强的显著优点。

## 1 配电网对地参数测量的实现

图 1 为中低压配电网中性点常用接地方式简化系统图,可通过两个开关的转换选择中性点不接地方式、经消弧线圈直接接地方式、消弧线圈串、并联阻尼电阻接地方式,图中消弧线圈的感抗为  $L$ ,并联电阻的阻值为  $R_B$ ,串联电阻阻值为  $R_C$ ,三相电源为  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$ ,系统 A 相、B 相、C 相对地导纳分别为  $Y_A$ 、 $Y_B$ 、 $Y_C$ ,系统对地总电容为  $C_\Sigma$ ,对地总电导为  $G_\Sigma$ 。

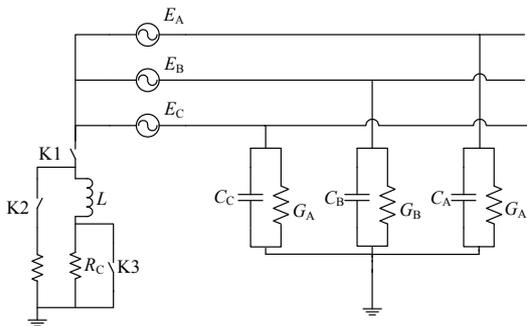


图 1 配电网简化电路图

Fig. 1 A simplified distribution network circuit

### 1.1 中性点不接地系统

中性点不接地系统对地参数由线路和变电站内其他设备对地电容、对地电导共同决定,应用节点电压法可得未接入电阻时,中性点位移电压为

$$\dot{U}_{N0} = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma} \quad (1)$$

接入阻值为  $G_1$  的电阻时,中性点位移电压为

$$\dot{U}_{N1} = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma + G_1} \quad (2)$$

再次改变电阻阻值,再次测量中性点电压,改变后的电阻值为  $G_2$ ,中性点位移电压为

$$\dot{U}_{N2} = -\frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma + G_2} \quad (3)$$

联立方程式(1)~(3)得

$$\begin{cases} \frac{U_{N0}}{U_{N1}} = \frac{\sqrt{\omega^2 C_\Sigma^2 + (G_\Sigma + G_1)^2}}{\sqrt{\omega^2 C_\Sigma^2 + G_\Sigma^2}} \\ \frac{U_{N0}}{U_{N2}} = \frac{\sqrt{\omega^2 C_\Sigma^2 + (G_\Sigma + G_2)^2}}{\sqrt{\omega^2 C_\Sigma^2 + G_\Sigma^2}} \end{cases} \quad (4)$$

设  $G_1 < G_2$ ,由方程(4)可解得

$$\begin{cases} G_\Sigma = \frac{k^2 G_1^2 - m G_2^2}{2m G_2 - 2k^2 G_1} \\ C_\Sigma = \frac{\sqrt{U_{N1}^2 (G_1 + G_2)^2 - U_{N0}^2 G_\Sigma^2}}{\omega \sqrt{U_{N0}^2 - U_{N1}^2}} \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $k = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$ ;  $m = \frac{U_{N0}^2 - U_{N1}^2}{U_{N0}^2 - U_{N2}^2}$ 。

### 1.2 中性点经消弧线圈接地系统

现在常用的消弧线圈主要有两种,一种是“随调式”消弧线圈,正常工作时其远离谐振点,因此可不带阻尼电阻,另一种为“预调式”消弧线圈,为防止谐振过电压,一般在其上并联或串联一个阻尼电阻<sup>[19]</sup>。首先分析中性点经消弧线圈直接接地方式下的电路,对于随调式或不带阻尼电阻的“预调式”消弧线圈,可等效为电感与自身电导的并联。此时对地电导  $G_\Sigma$  为消弧线圈自身电导与线路电导以及其他设备对地电导之和。应用节点电压法,中性点未接入电阻时,中性点电压为

$$\dot{U}_{N0} = -\frac{j\omega L (\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{1 - \omega^2 L C_\Sigma + j\omega L G_\Sigma} \quad (6)$$

中性点接入电阻  $G_1$  时,中性点电压为

$$\dot{U}_{N1} = -\frac{j\omega L (\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{1 - \omega^2 L C_\Sigma + j\omega L (G_\Sigma + G_1)} \quad (7)$$

中性点接入电阻  $G_2$  时, 中性点电压为

$$\dot{U}_{N2} = -\frac{j\omega L (\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C)}{1 - \omega^2 LC_\Sigma + j\omega L (G_\Sigma + G_2)} \quad (8)$$

联立式(6)~式(8)得

$$\begin{cases} \frac{U_{N0}}{U_{N1}} = \frac{\sqrt{[(1-\omega^2 LC_\Sigma)^2 + \omega^2 L^2 (G_1 + G_\Sigma)^2]}}{\sqrt{[(1-\omega^2 LC_\Sigma)^2 + \omega^2 L^2 G_\Sigma^2]}} \\ \frac{U_{N0}}{U_{N2}} = \frac{\sqrt{[(1-\omega^2 LC_\Sigma)^2 + \omega^2 L^2 (G_2 + G_\Sigma)^2]}}{\sqrt{[(1-\omega^2 LC_\Sigma)^2 + \omega^2 L^2 G_\Sigma^2]}} \end{cases} \quad (9)$$

由方程(9)解得

$$\begin{cases} G_\Sigma = \frac{k^2 G_1^2 - m G_2^2}{2m G_2 - 2k^2 G_1} \\ C_\Sigma = \frac{1}{\omega^2 L} - \frac{\sqrt{U_{N1}^2 (G_1 + G_\Sigma)^2 - U_{N0}^2 G_\Sigma^2}}{\omega \sqrt{U_{N0}^2 - U_{N1}^2}} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $k = \frac{U_{N1}}{U_{N2}}$ ;  $m = \frac{U_{N0}^2 - U_{N1}^2}{U_{N0}^2 - U_{N2}^2}$ ;  $L$  在每次测量前是已知量, 因此将其他已知参数代入式(10)就可以分别求出对地电导和对地电容。

对于带并联阻尼电阻的“预调式”消弧线圈, 可以等效为电感与其自身电导、并联阻尼电阻的并联。因此对于带并联阻尼电阻  $G_N$  的消弧线圈, 则只需要将式(10)中的  $G_\Sigma$  替换为  $G_\Sigma + G_N$ , 代入  $G_N$  可求出  $G_\Sigma$ 。对于带串联阻尼电阻的消弧线圈, 由于消弧线圈自身电导远远小于阻尼电导, 因此可将其简化为带串联阻尼的电感支路与自身电导的并联, 而不会产生较大误差。所以对于带串联电阻的消弧线圈支路, 可将串联支路转化为电感与电导的并联。设转换后的电感为  $L_0$ , 转换后的电导为  $G_0$ , 电路如图 2 所示。再将式(10)中的  $G_\Sigma$  替换为  $G_\Sigma + G_0$ , 代入  $G_0$  即可求出  $G_\Sigma$ , 电路转换公式为

$$\begin{cases} G_0 = \frac{R_N}{R_N^2 + \omega^2 L^2} \\ L_0 = \frac{R_N^2 + \omega^2 L^2}{\omega^2 L} \\ G_L = \frac{\omega L}{R_L (R_C + \omega L)} \end{cases} \quad (11)$$

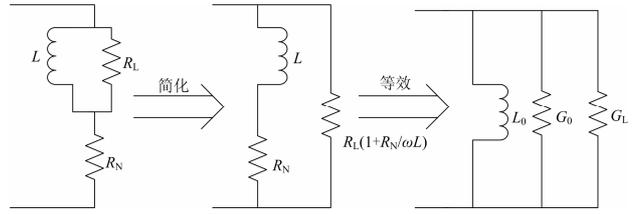


图 2 串并联转换电路

Fig. 2 Series-parallel converting circuit

### 1.3 误差分析

在以上的分析过程中可知, 公式的推导几乎没有省略项, 因此理论测量精度将非常高, 误差主要来源于用集中参数模拟线路分布参数时产生的偏差<sup>[20]</sup>。由式(5)、式(10)可知无论是中性点不接地系统或者是经消弧线圈接地系统, 系统对地参数只与中性点所投电阻阻值、中性点电压幅值测量精度有关。

## 2 仿真实验

利用 Matlab 仿真软件进行仿真实验, 选用 10 kV 理想电压源, 以集中参数替代线路分布参数, 选用三相并联 RLC 模型。共设置四组出线, 模型参数为: 每组出线对地绝缘电阻设置为 120 kΩ, 对地电容为 0.5 μF。在 C 相并接一个对地电容, 模拟系统参数不对称, 其电容值设为 0.1 μF, 系统对地总电容为 6.1 μF。中性点接入两组电阻  $R_1$ 、 $R_2$ , 其中电阻  $R_1$  阻值为 1 000 Ω, 电阻  $R_2$  阻值为 500 Ω。消弧线圈处在过补偿 10% 状态, 其电感值为 1.510 H。通过理想开关 K1 控制电阻  $R_1$  在 0.2 s 投入 0.4 s 退出、电阻  $R_2$  在 0.4 s 投入 0.6 s 退出。图 3 为基于 Matlab 仿真软件的中性点不接地系统模型电路图, 图 4 为中性点电压仿真波形图。

分别模拟中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统、中性点带 50 Ω 串联阻尼电阻的消弧线圈接地系统, 所得数据如表 1 所示。

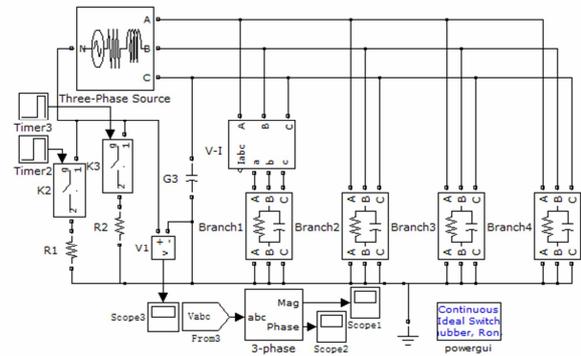


图 3 模拟仿真电路图

Fig. 3 Simulation circuit

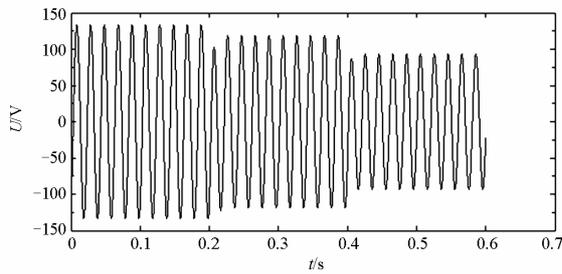


图 4 中性点电压幅值仿真波形图

Fig. 4 Simulation waveforms of neutral voltage amplitude

表 1 不同接地方式下仿真数据

Table 1 Simulation data with different grounding modes

接地方式	不投电阻/V	电阻 $R_1$ /V	电阻 $R_2$ /V	总电导/ $\mu\text{S}$	总电容/ $\mu\text{F}$
不接地	94.664	83.747	65.327	10.099	6.101
消弧线圈直接接地	945.691	176.468	89.855	10.191	6.102
消弧线圈串联阻尼接地	636.694	146.159	81.136	10.203	6.099

由图 4 可知该方法对系统电压影响非常小。分析表 1 中的数据，仿真计算对地电导最大误差为 2.03%，对地电容最大误差为 0.23%。仿真实验结果表明本文所提方法正确且具有较高精确度。

### 3 实验验证

在长沙信长电力科技有限公司开发的 10 kV 室内真值模拟网上进行实验验证。模拟网模型如图 5 所示，380 V 电源经调压器升压至 400 V，通过 400/10 000 V 主变压器升压至 10 kV。10 kV 母线引出三条绝缘架空导线，每条馈线长度为 20 m，馈线通过三个开关柜投切。以集中电容器组模拟系统对地分布电容，电容器组并接在馈线中部。采用 10 kV

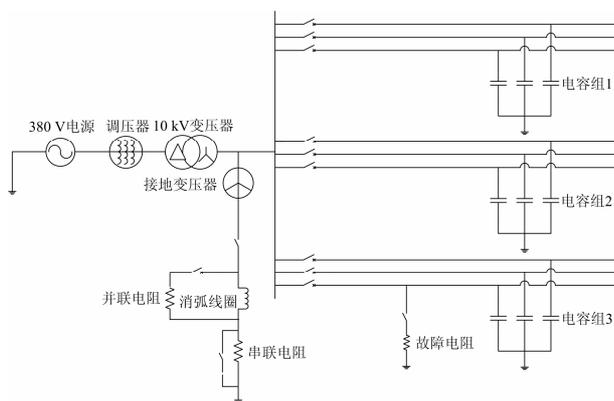


图 5 模拟网接线图

Fig. 5 Analog network wiring diagram

ZXB-20 可调箱式电阻柜模拟单相接地故障。模拟网中性点通过一台 20 kVA 的干式接地变压器引出，模拟网系统绝缘良好。模拟网开关及设备的投入与退出、各参数的获取通过基于西门子 S7-200PLC 开发的总控制台实现。由于实验条件限制，试验将仅限于中性点不接地系统。

在馈线 1 上接三相对地电容器组，电容大小为 1.26  $\mu\text{F}$ ；馈线 2 上 A、B 相接大小为 1.20  $\mu\text{F}$  电容器，C 相接大小为 1.29  $\mu\text{F}$  电容器；馈线三不接电容器，在 C 相并接电阻柜接地，手动调整电阻值为 5 000  $\Omega$ ，经实测其值为 4 980.62  $\Omega$ ；实验所投电容总值为 7.47  $\mu\text{F}$ 。系统对绝缘电阻远远大于接地故障电阻，可忽略其对故障时电导测试结果的影响。实验并接在中性点的电阻为 BX8 型耐压可调电阻器。实验步骤如下：

(1) 升压前将中性点电阻调整到预定值，实际测量其阻值为 4 990.68  $\Omega$ 。在控制台升压至 10 kV 全压，投入馈线 1、馈线 2 电容组，投入接地故障电阻，待中性点电压读数稳定后，记录中性点电压有效值；投入中性点电阻，读数再次稳定后，记录中性点电压有效值。降压，退出各设备，对电容器放电。

(2) 再次调整中性点电阻至预定值，测量其实际阻值为 4 008.54  $\Omega$ ，按步骤 1，记录投电阻后中性点电压有效值。

(3) 退出馈线 1、馈线 2 上电容组，仅投入故障电阻，保持其他参数不变，测量系统自身电容。再次按照步骤(1)和步骤(2)，升压至 5 kV，记录中性点绝缘、投中电阻时中性点电压有效值。

(4) 按步骤(1)~(3)，测量投入三组不同中性点电阻时，所测得模拟网在投入同一阻值故障电阻时的对地电容和对地电导。相关数据以及所得实验数据如表 2、表 3 所示。

分析表 2、表 3 数据，在实验室条件下，结合投入的电容组以及模拟网自身对地电容，投入不同中性点电阻时，电容测量误差分别为 2.95%、3.35%、3.75%，平均误差为 3.35%。投入故障电阻时，实验对地电导测量误差分别为 3.45%、3.67%、4.89%，平均误差为 4.0%。由数据可知，中性点投入电阻越大，电阻自身误差对结果影响越小，测量结果越精确。在实际测量时，所取电阻应当既能引起中性点电压发生较明显变化，又不会因自身阻值偏差而引起较大测量误差，一般取数千欧即可，如试验中取 5 000  $\Omega$  左右即可满足实际工程精度要求。模拟网实验验证了基于变电阻电压扰动法测量对地参数的正确性和高精度。

表2 带电容组实验数据

Table 2 Experimental data with grounding capacitor banks

$R_1/$ $\Omega$	$R_2/$ $\Omega$	不投 电阻/V	投 $R_1/V$	投 $R_2/V$	电 导/ $\mu S$	电 容/ $\mu F$
4 990.68	4 008.54	490.160	485.144	483.446	206.92	7.81
3 010.56	1 995.83	490.048	483.958	475.840	207.37	7.83
502.37	301.38	491.006	371.498	283.742	209.82	7.86

表3 不带电容组的实验数据

Table 3 Experimental data without grounding capacitor banks

$R_1/$ $\Omega$	$R_2/$ $\Omega$	不投 电阻/V	投 $R_1/V$	投 $R_2/V$	电导/ $\mu S$	电容/ $\mu F$
4 990.68	4 008.54	2 839.078	1 456.675	1 300.774	205.92	0.12
3 010.56	1 995.83	2 839.273	1 103.430	840.875	206.73	0.11
502.37	301.38	2 839.765	272.441	169.879	210.73	0.11

## 4 结论

本文中提出通过在中性点接入不同阻值电阻精确测量配电网对地电容和对地电导的新方法。该方法的优点有:

1) 该测量方法具有极高的理论精度, 经过模拟网测试验证, 电导、电容平均测量误差仅为4.0%、3.35%。

2) 本文所提出的测量方法简单、安全、适用范围广、可操作性强。

## 参考文献

- [1] 苏继锋. 配电网中性点接地方式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.  
SU Jifeng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.
- [2] 徐波, 张建文, 蔡旭, 等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
- [3] 李斌, 束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-190.  
LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.
- [4] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.  
JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [5] 方杰, 缪伟, 高伟. 新型小电流接地故障选线设备的研制与应用[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(9): 62-65.  
FANG Jie, MIAO Wei, GAO Wei. New small current grounding fault selection line equipment development and application[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(9): 62-65.
- [6] 李景禄. 配电网实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [7] 荀明利. 矿井高压电网单相接地电容电流的测量[J]. 矿山机械, 2012, 40(8): 140-141.  
XUN Mingli. Measurement of high voltage single-phase ground capacitive current in coal mine[J]. Mining & Processing Equipment, 2012, 40(8): 140-141.
- [8] 王敬侃. 在 6-10 千伏配电网中应用中性点外加电容法测量电容电流[J]. 高电压技术, 1983, 38(1): 40-43.
- [9] 连鸿波, 杨以涵, 谭伟璞, 等. 偏置电容法测量中压电网电容电流的误差分析[J]. 电网技术, 2005, 29(14): 54-58.  
LIAN Hongbo, YANG Yihan, TAN Weipu, et al. Offset capacitance measurement error analysis of medium voltage power grid capacitance current[J]. Power System Technology, 2005, 29(14): 54-58.
- [10] 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.
- [11] 黎新吉, 张平, 陈博, 等. 中性点不接地配电网电容电流在线测量方法比较[J]. 电力科学与技术学报, 2008, 23(2): 66-71.  
LI Xinji, ZHANG Ping, CHEN Bo, et al. Capacitive current on-line measurement methods comparing for unearthed distribution systems[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2008, 23(2): 66-71.
- [12] 曾祥君, 刘张磊, 马洪江, 等. 配电网电容电流实时测

- 量技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 61-65.  
ZENG Xiangjun, LIU Zhanglei, MA Hongjiang, et al. A capacitive current real-time measuring technique for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 61-65.
- [13] 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.
- [14] 宋晓燕, 孙岩洲, 宋紫嫣, 等. 基于零序 PT 二次侧注入信号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(19): 134-138.  
SONG Xiaoyan, SUN Yanzhou, SONG Ziyan, et al. A new method of distribution network capacitive current measurement based on injecting signals into the secondary side of the zero sequence PT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 134-138.
- [15] 刘力, 孙结中. 一种测量配电网电容电流的新方法[J]. 电网技术, 2001, 25(5): 63-65.  
LIU Li, SUN Jiezhong. A new method to measure the capacitance current of distribution network[J]. Power System Technology, 2001, 25(5): 63-65.
- [16] 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.
- [17] 冉启鹏, 胡之荣, 字美荣, 等. 配电网电容电流测试研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 81-85.  
RAN Qipeng, HU Zhirong, ZI Meirong, et al. Study on the test of distribution network's capacitive current[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(4): 81-85.
- [18] 孙岩洲, 邱毓昌. 配电网电容电流的测量方法分析[J]. 高压电器, 2002, 38(5): 27-28, 32.  
SUN Yanzhou, QIU Yuchang. Measurement of capacitive current in power distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2002, 38(5): 27-28, 32.
- [19] 周默, 孙岩洲. 电网中性点不同接地方式下铁磁谐振的消谐研究[J]. 高压电器, 2015, 51(1): 80-85.  
ZHOU Mo, SUN Yanzhou. Neutral point under different grounding modes of harmonic elimination of ferroresonance[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(1): 80-85.
- [20] 焦彦军, 于江涛, 王增平. 计算架空线路分布参数的新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(4): 55-60.  
JIAO Yanjun, YU Jiangtao, WANG Zengping. A new method for calculating the distribution parameters of overhead lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2015, 27(4): 55-60.

---

收稿日期: 2014-11-17; 修回日期: 2015-01-20

作者简介:

赵军(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化; E-mail: zjcsust@163.com

袁雪琼(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化。

(编辑 周金梅)