

## 基于偏置阻抗法的配电网电容电流测量新方法

李晓波<sup>1</sup>, 苗晓鹏<sup>1</sup>, 桑振华<sup>1</sup>, 蔡旭<sup>2</sup>

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116; 2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 分析了目前配电网电容电流测量方法所存在的问题, 提出了一种偏置阻抗法测量电容电流的新方法。该方法通过在配电网中任意一相与地之间串入一固定电阻和可调电抗, 调节电抗器, 同时观察和测量中性点电压与偏置相对地电压的相角差, 来配合电抗器的进一步调节, 当该相角差接近 $90^\circ$ 时, 即可精确地测量出电网对地参数。通过Matlab仿真和理论计算得到了一致的结果, 同时验证了该方法能够取得比较精确的测量效果。该方法具有操作简单, 测量精度高, 不会引起中性点过电压等优点, 可以应用于配电网电容电流的测量。

**关键词:** 配电网; 偏置阻抗法; 相角差; 对地参数; 测量效果

### A new capacitive current measurement method of the distribution network based on bias impedance

LI Xiao-bo<sup>1</sup>, MIAO Xiao-peng<sup>1</sup>, SANG Zhen-hua<sup>1</sup>, CAI Xu<sup>2</sup>

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** A new capacitive current measurement method of the distribution network is proposed based on the analysis of the problems existed in the current capacitive current measurement methods. First, a fixed resistance and an adjustable inductor are installed in series between any one phase and the ground; second, the adjustable inductor is regulated, and at the same time, the phase angle difference between the neutral voltage and the bias phase voltage is observed; then the system ground capacitance and resistance can be calculated when the phase angle difference mentioned above is close to 90 degrees. The corresponding simulation is carried out by using Matlab, which obtains the same results with the theoretical calculation. The results show that this method is feasible. Apart from these, this method is operated simply, of high measurement accuracy, and not leading to neutral overvoltage. This method can be used in the capacitive current measurement in the distribution network.

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

**Key words:** distribution network; bias impedance method; phase angle difference; parameters to ground; measurement effect

中图分类号: TM473 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)04-0022-05

## 0 引言

电网中所发生的故障大多是由单相接地时电容电流<sup>[1-4]</sup>过大引起的。随着配电网容量的增加, 线路的增长, 尤其是电缆的使用, 使得故障接地时电容电流增大<sup>[5-6]</sup>。电容电流的测量精度决定消弧线圈调控以及选线<sup>[7]</sup>与保护装置<sup>[8-9]</sup>的准确动作, 尤其是10 kV以下的煤矿中压电网, 大多采用电缆供电, 电容电流值比较大, 根据《煤矿安全规程》规定煤矿电网的电容电流必须限制在20 A之内, 所以对电容电流测量的精确<sup>[10]</sup>度要求更高。

目前的电容电流测量技术主要有人工中性点法<sup>[11]</sup>、偏置电容法<sup>[12]</sup>、注入信号法<sup>[13]</sup>等方法。人工中性点法中只要人工电容组发生微小的改变, 就会产生较大的测量误差; 偏置电容法加入较大的电容会造成非偏置相电压升高<sup>[14-15]</sup>, 容易使电网绝缘薄弱处发生短路; 注入信号是最近几年提出的测量电网电容新方法, 但是注入信号的频率幅值选取不当都会严重影响测量结果<sup>[16]</sup>。

本文提出的偏置阻抗法电容电流测量方法, 加入固定电阻, 调节电感能够实现中性点电压的偏移, 通过观察中性点电压与单相电压相位角的变化, 再进一步调节电抗器的电抗值, 同时测量中性点电压与偏置相对地电压的有效值即可对对地参数进行计

基金项目: 国家自然科学基金(51107143)

算。这种方法操作简单, 能够获得比较高的测量精度。

## 1 偏置阻抗法测量电容电流原理

采用偏置阻抗法在单相所加的阻抗在计算时需要进行相应变换, 把串联阻抗变成并联如图 1 所示 (主要为了方便计算), 变换过程如下。

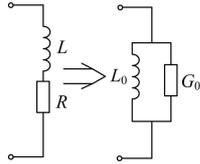


图 1 阻抗变换

Fig. 1 Impedance transformation

$$G_0 + \frac{1}{j\omega L_0} = \frac{1}{R + j\omega L}$$

$$G_0 + \frac{1}{j\omega L_0} = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} - \frac{j\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} \quad (1)$$

$$G_0 = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \quad L_0 = \frac{R^2 + (\omega L)^2}{\omega^2 L}$$

如图 2 所示, 针对中性点不接地系统进行线路对地参数的测量都可以用上面的偏置电抗法进行测量, 偏置电抗法测量的基本原理如下。

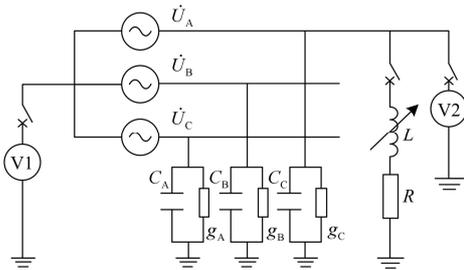


图 2 偏置阻抗法测量电容电流等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of using the bias impedance to measure capacitor current

设三相电网中性点对地电压为  $\dot{U}_n$ , 三相电源电压分别为  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$ , 偏置电感加入后 A 相线路的对地电压为  $\dot{U}'_A$ , 可知中性点电压  $\dot{U}_n$  可以用三相电容  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  以及对地电导  $g_A$ 、 $g_B$ 、 $g_C$ , 电抗器电抗  $L$ , A 相电压表示  $\dot{U}_A$ , 结合电路知识, 利用结点电压法求解可得

$$(Y_A + Y_B + Y_C)\dot{U}_n = Y_A\dot{U}_A + Y_B\dot{U}_B + Y_C\dot{U}_C$$

$$\dot{U}_n = \frac{Y_A\dot{U}_A + Y_B\dot{U}_B + Y_C\dot{U}_C}{Y_A + Y_B + Y_C}$$

$$\frac{(g_A + j\omega C_A + G_0 - j\frac{1}{\omega L_0})\dot{U}_A + (g_B + j\omega C_B)\dot{U}_B + (g_C + j\omega C_C)\dot{U}_C}{G_0 + (g_A + g_B + g_C) + j\omega(C_A + C_B + C_C - \frac{1}{\omega^2 L_0})} \quad (2)$$

由于正常运行状况下三相对地的参数 (对地电容  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  和对地电导  $g_A$ 、 $g_B$ 、 $g_C$ ) 之间值相差不大, 就是可以认为是三相对称电路参数, 分别设为 ( $C_0$  和  $g_0$ ), 则可以化简为

$$\dot{U}_n = \frac{(G_0 - j\frac{1}{\omega L_0})\dot{U}_A}{3g_0 + G_0 + j\omega(3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0})} \quad (3)$$

$$\dot{U}'_A = \dot{U}_A + \dot{U}_n$$

$$\frac{\dot{U}'_A - \dot{U}_A}{\dot{U}_A} = \frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_A} = \frac{\left[ G_0(G_0 + 3g_0) - \frac{1}{L_0} \left( 3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0} \right) \right] - j(3\omega G_0 C_0 + \frac{3g_0}{\omega L_0})}{(G_0 + 3g_0)^2 + \omega^2 \left( 3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0} \right)^2} \quad (4)$$

## 2 状态判定与计算

由上面的式子可知: 调节偏置电抗器的电抗值, 可以改变  $\dot{U}_n$  的值, 通过观察、测量  $\dot{U}_n$  与  $\dot{U}_A$  的夹角  $\Delta\varphi$  来判断  $\dot{U}_n$  与  $\dot{U}_A$  是否正交, 当  $\dot{U}_n$  与  $\dot{U}_A$  正交时, 呈如图 3 示的关系。

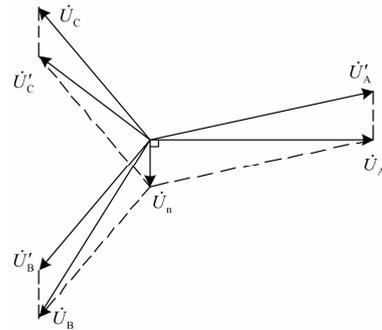


图 3 电压相量关系分析

Fig. 3 Voltage phasor relationship analysis

$$\operatorname{Re}\left(\frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_A}\right) = \frac{\left[ G_0(G_0 + 3g_0) - \frac{1}{L_0} \left( 3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L} \right) \right]}{(G_0 + 3g_0)^2 + \omega^2 \left( 3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0} \right)^2}$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_A}\right) = \frac{(3\omega G_0 C_0 + \frac{3g_0}{\omega L_0})}{(G_0 + 3g_0)^2 + \omega^2 \left( 3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0} \right)^2}$$

$$\operatorname{Re}\left(\frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_A}\right) = 0 \quad (5)$$

$$C_0 = \frac{1}{3\omega^2 L_0} + \frac{1}{3} G_0 L_0 (G_0 + 3g_0)$$

$$\operatorname{Im}\left(\frac{\dot{U}_n}{\dot{U}_A}\right) = \frac{U_n}{U_A} \quad (6)$$

$$\begin{cases} g_0 = \frac{U_A}{3\omega L_0 U_n} - \frac{1}{3} G_0 \\ C_0 = \frac{1}{3\omega^2 L_0} + \frac{G_0 U_A}{3\omega U_n} \end{cases} \quad (7)$$

通过测量中性点电压有效值  $U_n$  与 A 相电压有效值  $U_A$ ，计算对地电容与电阻。

$\Delta\varphi$  可以通过求解  $\dot{U}_n / \dot{U}_A$  的余切值，进而求解出来

$$\Delta\varphi = \operatorname{arccot} \frac{G_0(G_0 + 3g_0)\omega L_0 - \omega(3C_0 - \frac{1}{\omega^2 L_0})}{3\omega^2 G_0 C_0 L_0 + 3g_0} \quad (8)$$

### 3 仿真验证与分析

利用 Matlab 软件搭建 10 kV 系统仿真模型，通过测量单相对地电压与中性点的电压来测量实现对地参数的测量，仿真模型如图 4 所示。

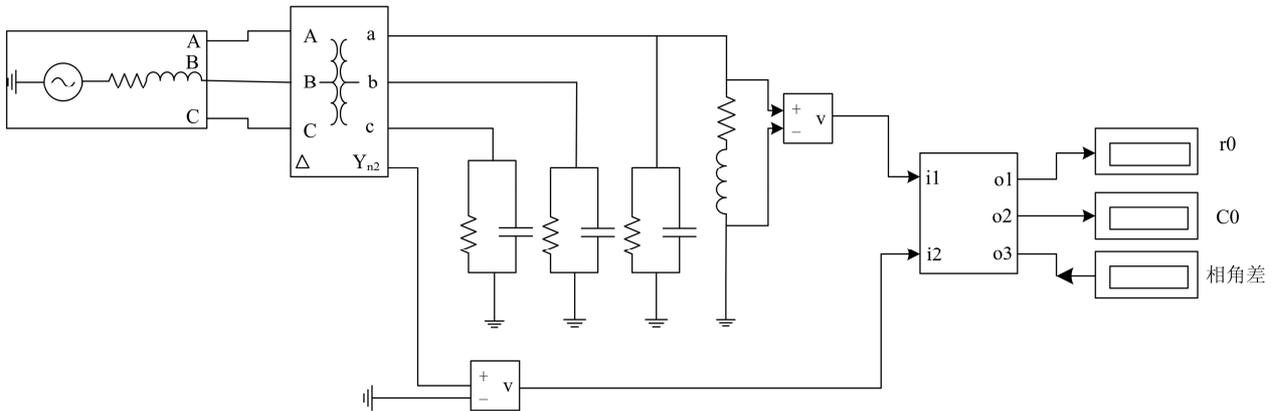


图 4 仿真模型

Fig. 4 Simulation model

模型中线电压 10 kV，相电压为 5 774 V， $r_A = r_B = r_C = 30\ 000\ \Omega$ ， $C_A = C_B = C_C = 10\ \mu\text{F}$ ，这里假设三相对地参数是对称的，可以设定阻抗中的偏置电阻为一常量，假设分别取 1 000  $\Omega$ 、5 000  $\Omega$ ，通过观察中性点电压与 A 相电压相角差  $\Delta\varphi$  来调节电感的值，进而测量出线路对地电阻  $r_0$  ( $g_0$  的倒数)及对地电容  $C_0$ ，同时代入式 (8) 计算相角差  $\Delta\varphi'$ ，然后进行数值比较。

通过搭建子系统，进行相关数学运算，可以从仿真模型上直接观察和记录对地电容  $C_0$ 、对地电阻  $r_0$  与相角差  $\Delta\varphi'$  等数据，并进行数值比较与分析。

当  $R=1\ 000\ \Omega$  时，通过调节电抗器的值，并观察和记录相角差，相角差在接近  $90^\circ$  时的部分仿真数据如表 1 所示。

当  $R=5\ 000\ \Omega$  时，通过调节电抗器的值，并观察和记录相角差，相角差在接近  $90^\circ$  时的部分仿真数据如表 2 所示。

由表 1 可以看出当  $R=1\ 000\ \Omega$  时，在  $L=0.398\ 5$

H 与  $L=0.401\ 1\ \text{H}$  时，中性点电压与偏置相电压相角差接近  $90^\circ$  时，测量结果与实际结果之间的误差非常小，经过 Matlab 计算  $L=0.401\ 3\ \text{H}$  时，相角差为  $90^\circ$ ，与实际值很接近，由表 2 可以看出当  $R=5\ 000\ \Omega$  时，在  $L=0.506\ 6\ \text{H}$  时，中性点电压与偏置相相角差已非常接近  $90^\circ$ ，此时测量结果与实际结果之间的误差几乎为零，经过 Matlab 计算  $L=0.506\ 63\ \text{H}$  时，相角差为  $90^\circ$ ，与实际误差非常小。

表 1  $R=1\ 000\ \Omega$  时仿真数据  
Table 1 Simulation data at  $R=1\ 000\ \Omega$

$\Delta\varphi/^\circ$	$L/\text{H}$	$\sqrt{2} U_n$	$C_0/\mu\text{F}$	$r_0/10^4\Omega$	电容		$\Delta\varphi'$
					误差/ %	电阻	
					误差/ %		
80.33	0.312 2	864.1	12.464	2.145 6	24.56	28.48	80.44
87.32	0.356 6	864.1	10.526	2.838 4	5.26	5.387	87.45
88.56	0.398 5	864	10.065	2.978 7	0.65	0.71	88.94
89.12	0.401 1	864	9.954 8	2.984 2	0.452	0.526	89.01
87.01	0.453 2	863.6	8.456 5	2.795 6	15.435	6.81	87.12
80.63	0.503 2	863	7.658 2	2.423 6	23.428	19.21	80.96
79.72	0.552 8	862.2	7.021 4	2.158 8	29.786	28.07	79.65

表 2  $R=5\ 000\ \Omega$  时仿真数据  
Table 2 Simulation data at  $R=5\ 000\ \Omega$

$\Delta\varphi/(^\circ)$	$L/H$	$\sqrt{2} U_n$	$C_0/$ $\mu F$	$r_0/$ $10^4\Omega$	电容 误差/ %	电阻 误差/ %	$\Delta\varphi'$
85.21	0.352 3	173	11.323	3.455 1	13.23	15.17	85.33
88.31	0.402 6	173	10.412	3.111 2	4.12	3.707	88.43
89.23	0.451 2	173	10.032	3.012 1	0.32	0.408	89.41
89.87	0.506 6	173	10.002	2.998 1	0.02	0.063	89.96
89.12	0.553 2	173	9.958 1	2.988 5	0.419	0.3833	89.01
88.22	0.602 1	173	9.567 2	2.864 7	4.338	4.51	88.35
85.01	0.655 4	173	8.488 7	2.510 8	15.113	16.307	85.13

综上所述, 该方法在选取一合理电阻阻值时, 通过观察中性点电压与偏置相电压之间的相位关系, 来调节电抗器电抗值, 可以实现对地参数的精确测量。

#### 4 结语

本文提出的基于偏置阻抗法测量电容电流的新方法, 可以通过 PT 在二次侧测量出中性点电压与偏置相 (A 相) 电压的数值, 并且可以在二次侧观察它们的相角差变化, 来跟踪调节电抗器的电抗值, 可以实现对地电容和电阻的准确测量。该方法具有操作简单, 安全性高, 不会造成中性点过电压, 测量方便等优点, 可以应用于配电网电容电流的精确测量。

#### 参考文献

[1] 唐轶, 王涛, 罗建锋. 用于消弧线圈控制的单相接地电流测量方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2242-2245.  
TANG Yi, WANG Tao, LUO Jian-feng. Measurement method of the phase-to-earth fault current used in the control of arc-suppression coils[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2242-2245.

[2] 江渝, 刘和平, 冉立, 等. 连续调节消弧线圈接地系统单相接地故障谐振状态在线监测的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 35-40.  
JIANG Yu, LIU He-ping, RAN Li, et al. Study on the judgement of resonance state during the single phase ground in the distribution with the continuously adjustable ASC[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 35-40.

[3] 王玉梅, 郭浩, 惠胜达. 基于残流增量法的谐振接地系统故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(2): 62-66.

WANG Yu-mei, GUO Hao, HUI Sheng-da. Fault location approach for resonant ground system based on remnant current increment method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(2): 62-66.

[4] 张海平, 何正友, 张钧. 基于量子神经网络和证据融合的小电流接地选线方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(12): 171-178.  
ZHANG Hai-ping, HE Zheng-you, ZHANG Jun. A fault line detection method for indirectly grounding power system based on quantum neural network and evidence fusion[J]. Transactions of China Eleetrotechnical Society, 2009, 24(12): 171-178.

[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 Bao-wen, LI Xiao-bo. New type of automatic tuning arc-suppression coil based on detuning size[J]. Power Systems Protection and Control, 2013, 41(5): 6-9.

[6] 孔宁, 尹忠东, 杨坡, 等. 基于 PWM 可控电抗器的自调谐消弧线圈的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 133-137.  
KONG Ning, YIN Zhong-dong, YANG Po, et al. Study on automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 133-137.

[7] 朱珂, 裴佑楠, 陈晨. 自适应控流型故障选线方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 174-182.  
ZHU Ke, PEI You-nan, CHEN Chen. Self-adaptable and current controllable faulted line identification scheme[J]. Transactions of China Eleetrotechnical Society, 2009, 24(8): 174-182.

[8] 马静, 王增平, 吴劫. 利用基波幅值变化特征快速识别励磁涌流和故障电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 166-171.  
MA Jing, WANG Zeng-ping, WU Jie. A novel method to rapidly identify inrush current and internal fault current based on variation characteristic of fundamental current amplitude[J]. Transactions of China Eleetrotechnical Society, 2009, 24(6): 166-171.

[9] 朱国防, 陆于平. 扇环型制动区差动保护算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(11): 171-177.  
ZHU Guo-fang, LU Yu-ping. A novel differential protection with sector-ring restraint region[J]. Transactions of China Eleetrotechnical Society, 2009, 24(6): 171-177.

- [10] 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 Xiao-bo, ZHANG Chang-yan, WANG Chong-lin. Analysis on abnormal action of an arc suppression coil's control device and its improvement[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 121-125.
- [11] CHEN Zhong-ren, CHEN Fang-jing, LI Wei-bo. Improvement method of measuring and tuning of automatic arc-suppression coil[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 77-80.
- [12] 李景禄, 周羽生, 唐跃进. 偏置电容法电容电流测量的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(2): 99-100.  
LI Jing-lu, ZHOU Yu-sheng, TANG Yue-jin. Application experiences of capacitive current measuring with partially installing capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(2): 99-100.
- [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 Xiang-jun, YI Wen-tao, LIU Zhang-lei, 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] 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 Pan-pan, LI Hong-tao, 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.
- [15] 李晓波, 王崇林. 零残流消弧线圈综述[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 116-121.  
LI Xiao-bo, WANG Chong-lin. Survey of zero-residual-current arc suppression coil[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 116-121.
- [16] 李嗣明, 何婧, 张熙军, 等. 消弧线圈投入后引起系统电压不平衡原因分析及解决办法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 124-128.  
LI Si-ming, HE Jing, ZHANG Xi-jun, et al. Causing analysis and design solution of system voltage's unbalance when arc-suppression coil goer line[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 124-128.

收稿日期: 2013-04-28; 修回日期: 2013-05-03

作者简介:

李晓波 (1976-), 男, 副教授, 研究方向为供配电安全、微机保护与智能电器; E-mail: xbli\_cumt@126.com

苗晓鹏 (1986-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统接地方式、继电保护; E-mail: miaoxiaopeng123@126.com

桑振华 (1988-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统接地方式、继电保护。