

# 基于调整中性点接地阻抗的配电网电容电流测量方法

靳维<sup>1</sup>, 袁朋生<sup>1</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:** 提出了一种同时调节消弧线圈电感量和阻尼电阻保持系统零序电压相位不变的测量电容电流的方法。为限制消弧线圈接地系统中性点位移电压, 常常并联电阻提高系统的阻尼率。通过增加或者减小消弧线圈并联阻尼, 调节消弧线圈电感量保持零序电压相位不变, 即可以通过零序电压的幅值比例关系计算得到系统的电容电流。该方法计算简单, 测量方便。利用 Matlab 建立仿真模型进行仿真计算, 表明该方法具有很高的测量精度。

**关键词:** 电容电流; 零序电压; 相位不变; 阻尼; Matlab

## A method of measuring capacitive current in distribution network based on adjusting the neutral grounding impedance

JIN Wei<sup>1</sup>, YUAN Pengsheng<sup>1</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:** A method of measuring capacitive current is proposed based on simultaneously adjusting the arc-suppression coil inductance and damping resistor to keep the system zero-sequence voltage phase unchanged. To limit neutral displacement voltage in arc-suppression coil grounding system, the parallel resistance is often adopted to improve the damping rate of system. The zero-sequence voltage phase keeps unchanged by increasing or decreasing the arc suppression coil damping and adjusting arc-suppression coil inductance, capacitive current of system can be calculated by amplitude ratio between the zero-sequence voltage. It is simple and convenient to measure by the method. Simulation model is simulated by Matlab, which shows that the method has high measuring accuracy.

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

**Key words:** capacitive current; zero-sequence voltage; constant phase; damping resistors; Matlab

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)07-0037-05

## 0 引言

6~35 kV 配电系统中常常采用小电流接地系统运行方式<sup>[1-3]</sup>。由于系统发生单相接地故障后, 系统的线电压依然对称, 负荷供电不受影响, 故可以继续维持供电, 不必立即跳闸。这使得系统的供电可靠性大大提高, 但长时间的带故障运行, 接地点持续流过电流, 容易烧毁线路绝缘, 造成短路故障, 扩大事故范围, 特别对于非稳定性接地故障, 相电压冲击可达相电压的数倍, 严重危害系统的绝缘, 影响设备的寿命。电力规程规定电容电流超过一定值需要装设消弧线圈以降低接地点的电流<sup>[4-5]</sup>。

消弧线圈的使用降低了单相接地故障对系统的危害程度。目前消弧线圈分为预调式和随调式, 预调式在单相接地初期即可实现接地点电流的补偿, 故抑制电弧性接地系统过电压的效果更好。为了达到最优的补偿效果, 发挥消弧线圈的效果, 需要对系统电容电流进行准确的测量。目前电容电流的测量方法有偏置法<sup>[6]</sup>、谐振法<sup>[7-8]</sup>、阻抗三角形法<sup>[9]</sup>、注入信号法<sup>[10-11]</sup>以及其他一些方法<sup>[12-13]</sup>。偏置法将偏置元件接入一次测, 需要人工操作, 不能实时跟踪系统的电容电流, 系统的零序电压位移度较小时, 测量的误差较大。谐振法在连续调节的消弧线圈中广泛使用, 且该方法多并联或者串联电阻增加系统的阻尼率, 避免系统的零序电压过高。阻抗三角形法利用两次调谐过程中零序电压或电流信号的相位

差构造阻抗三角形计算系统电容电流，角度差过小时测量误差较大。注入信号法需要在 PT 二次测注入变频信号实现电容电流的测量，其功率较小，也容易受到系统谐波的干扰。其他的一些方法，利用调节阻尼的失谐量法也可以实现系统电容电流的测量，通过调节阻尼电阻很容易判断系统的补偿状态，测量电容电流也极为方便。

零序电压相位不变法通过同时调节消弧线圈和阻尼电阻，补偿状态判定也方便，其电容电流的测量利用电压比值测量，测量的结果受电压波动影响小，测量电容的精度较高。利用 Matlab 搭建的仿真模型验证了该方法的有效性，计算简单，实施方便。

### 1 系统等效原理图

中性点经消弧线圈接地系统的等效原理图如图 1 所示， $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  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， $G_L$  为消弧线圈串联的电阻。

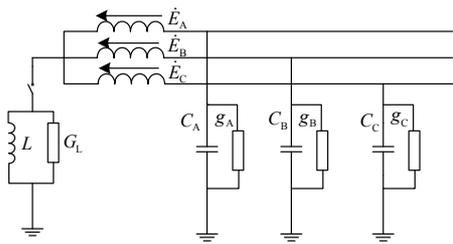


图 1 消弧线圈接地系统等效原理图

Fig. 1 Arc-suppression coil grounding system equivalent circuit diagram of the system

图 2 是系统根据戴维南定理的等效电路图， $\dot{U}_{bd}$  为中性点直接接地时的电流，为等效电压源， $C = C_A + C_B + C_C$ ，为系统的等效对地总电容。 $g = g^A + g^B + g^C$ ，为系统总的对地电导。

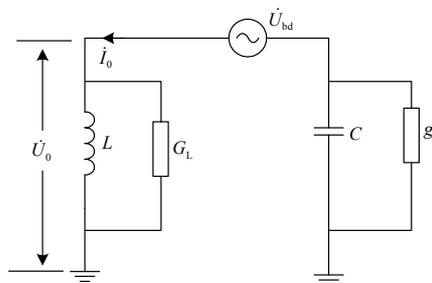


图 2 系统等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the system

根据图 2，可以求得系统的零序电压值为

$$\dot{U}_0 = \frac{j\omega C \dot{U}_{bd}}{(G_L + g) + j(\omega C - 1/\omega L)} = \frac{\dot{U}_{bd}}{v - jd} \quad (1)$$

其中： $v = \frac{\omega C - 1/\omega L}{\omega C}$ ； $d = \frac{G_L + g}{\omega C}$ 。当调节系统阻尼率和脱谐度时，系统零序电压会发生改变。根据公式(1)可知，通过改变系统的阻尼率和脱谐度均可以做到保持零序电压相位不发生改变，因此，可以在测量系统的电容电流时，通过改变脱谐度和阻尼率求得系统的电容电流。

### 2 消弧线圈的调谐原理

#### 2.1 测量方法

首先在消弧线圈的电感量为  $L_1$ ，并联阻尼为  $G_{L1}$  时测量系统零序电压的幅值  $U_{01}$  和相位  $\varphi_U$ 。然后通过消弧线圈阻尼电阻两端并联投入阻尼电阻  $\Delta G$ ，以改变系统的阻尼率。调节消弧线圈的电感量，使得系统的零序电压的相位保持  $\varphi_U$  不变，此时测量系统零序电压的幅值，记作  $U_{02}$ ，消弧线圈的电感量记作  $L_2$ ，消弧线圈的并联阻尼为  $G_{L2}$ 。测量结束后，可以选择将  $\Delta G$  退出系统，也可以作为增加系统的阻尼率，限制中性点的电压。再次测量时，只需要利用投切  $\Delta G$  重新测量即可。

#### 2.2 电容电流的计算

在调节电感量和投切阻尼电阻  $\Delta G$  前，根据公式(1)可得

$$U_{01} \angle \varphi_U = \frac{\dot{U}_{bd}}{\sqrt{v_1^2 + d_1^2} \angle \theta_1} \quad (2)$$

式中， $\theta_1 = \arctan \frac{d_1}{v_1}$ ，当投切消弧线圈阻尼电阻  $\Delta G$  后，调节消弧线圈的电感量，使零序电压的相位为  $\varphi_U$  不变。则

$$U_{01} \angle \varphi_U = \frac{\dot{U}_{bd}}{\sqrt{v_2^2 + d_2^2} \angle \theta_2} \quad (3)$$

根据式(2)、式(3)，由于系统零序电压的相位没有发生改变，故可以推出  $\theta_1 = \theta_2$ 。故调节消弧线圈的过程中，阻尼率和脱谐度是成比例变化的。图 3 中，实线部分为调节消弧线圈过程中系统零序电压的变化关系，虚线部分为调节消弧线圈前后系统脱谐度与阻尼率的关系。

根据零序电压相位不变，可以得到虚线构成的调节消弧线圈前后的脱谐度与阻尼率三角形是相似三角形。根据虚线的两个三角形相似可知

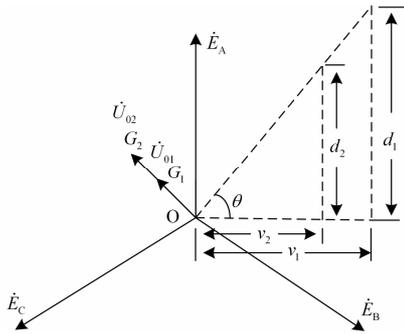


图 3 零序电压改变时脱谐度与阻尼率的关系

Fig. 3 Relationship of resonance degree and damping rate according to zero-sequence voltage

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{v_1^2 + d_1^2}}{\sqrt{v_2^2 + d_2^2}} \quad (4)$$

又根据式(2)、式(3),

$$\frac{U_{02}}{U_{01}} = \frac{\sqrt{v_1^2 + d_1^2}}{\sqrt{v_2^2 + d_2^2}} = k \quad (5)$$

故可以得到

$$k = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\omega C - 1/\omega L_1}{\omega C - 1/\omega L_2} \quad (6)$$

$$k = \frac{d_1}{d_2} = \frac{G_{L1} + g}{G_{L2} + g} \quad (7)$$

由式(6)、式(7), 作进一步的化简, 则可以推导出如下公式。

$$C = \frac{k/L_1 - 1/L_2}{\omega^2(k-1)} \quad (8)$$

$$g = \frac{G_{L1} - kG_{L2}}{k-1} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可知, 该方法可以对系统的电容电流进行精确测量, 对地电导的计算可以实现接地点阻性电流的估计。

### 2.3 调谐的分析

该方法的实现需要使得调节前后零序电压的相位保持不变。根据推导公式可知, 当同时保持阻尼率与脱谐度线性变化时, 系统零序电压相位不发生改变, 故调谐测量电容电流时, 如果投入阻尼电阻  $\Delta G$  增加系统的阻尼率时, 为了保证零序电压相位保持不变, 消弧线圈处于欠补偿时, 需要增加消弧线圈的电感量, 增加脱谐度; 如果消弧线圈处于过补偿时, 需要降低消弧线圈的电感量, 增加脱谐度。如果利用切除  $\Delta G$  来测量, 其调节方式与之相反。据此可以避免在寻找零序电压相位不变点时的无序调节, 缩短调节测量时间。

阻尼电阻的变化量或者消弧线圈的电感变化量

影响测量的精度, 当变化量较小时, 零序电压的比值接近 1, 测量误差较大。为了能够保证系统电容电流的测量精度, 调节前后系统的阻尼率变化量应不小于 20%。

其调谐过程的流程图如图 4。

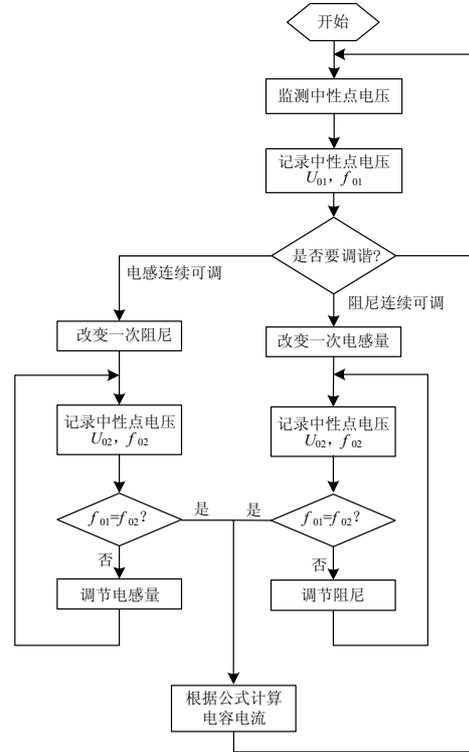


图 4 程序流程图

Fig. 4 Program flow chart

### 3 仿真计算

利用 Matlab 建立 10 kV 配电网仿真模型, 见图 5。使用集总参数模型进行仿真计算, 设置 A 相和 B 相的对地电容为 12.5  $\mu\text{F}$ , C 相的对地电容为 12  $\mu\text{F}$ 。三相对地电阻均设置为 150 000  $\Omega$ 。通过计算可以得到系统对地总电容为 37  $\mu\text{F}$ , 总的对地电导为 0.000 2 s。

消弧线圈正常运行时, 测量系统零序电压的相位, 在 0.4 s 调节消弧线圈的电感和阻尼, 一直到调节后的零序电压相位与调节前相同, 则停止调节消弧线圈, 测量过程结束。调节消弧线圈前后中性点零序电压幅值和相位关系见图 6。

由零序电压波形可知, 增加系统阻尼率和脱谐度, 零序电压的相位经过短暂的震荡, 稳定后与调节前相位相同, 并且零序电压幅值降低, 这是系统阻尼率和脱谐度增加造成的, 与理论是相符的。

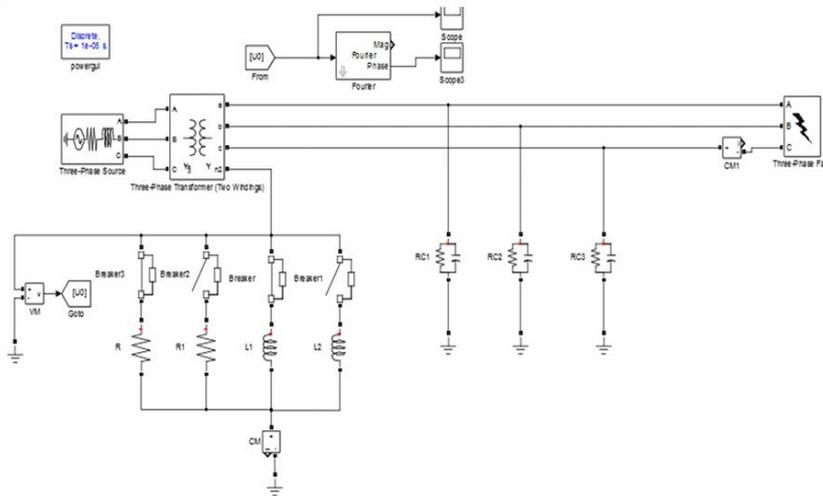


图 5 电容电流测量仿真图

Fig. 5 Simulation of measuring capacitance current

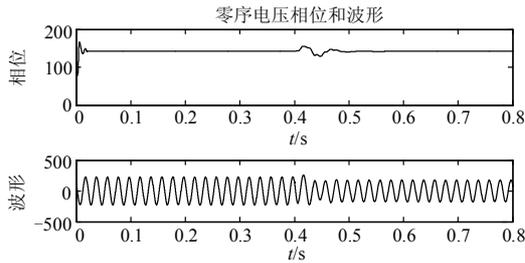


图 6 零序电压和相位波形

Fig. 6 Waveforms of zero-sequence voltage and phase

利用仿真模型, 将消弧线圈的电感量从  $L_1$  调节

至  $L_2$ , 阻尼从  $G_1$  调节至  $G_2$ , 调节前与调节后零序电压的相位保持不变, 然后将零序电压的幅值记于表 1、表 2, 代入式(8)、式(9), 计算出系统的对地电容和对地电导, 其仿真结果与测量数据见表 1、表 2。

根据仿真数据可知, 利用零序电压相位不变法可以准确地计算出系统的电容电流, 其测量误差较小。测量的精度高。对地电导的计算误差与对地电容相比, 误差较大, 但测量结果在工程测量允许的误差范围之内, 达到工程测量的精度要求。

表 1 阻尼连续可调时仿真结果

Table 1 Simulation results of damping adjustable continuously

$L_1/H$	$L_2/H$	$G_1/S$	$G_2/S$	$U_{01}/V$	$U_{02}/V$	$C/\mu F$	误差/%	$g/10^{-4}S$	误差/%
0.35	0.42	0.001 488	0.002 5	421.03	263.48	37.127 7	0.048	2.042	2.81
0.4	0.5	0.001 683	0.002 5	310.85	216.86	37.019	0.051	2.032	1.56
0.45	0.53	0.001 987	0.002 5	253.83	205.64	37.018 6	0.050	2.027	1.35
0.5	0.65	0.001 91	0.002 5	226.23	176.88	37.025 2	0.068	2.037	1.85

表 2 电感量连续可调时仿真结果

Table 2 Simulation results of inductance adjustable continuously

$L_1/H$	$L_2/H$	$G_1/S$	$G_2/S$	$U_{01}/V$	$U_{02}/V$	$C/\mu F$	误差/%	$g/10^{-4}S$	误差/%
0.362	0.327	0.001 6	0.002 5	327.14	490.44	36.986 6	-0.036 3	2.029 8	1.488
0.44	0.366	0.001 6	0.002 5	248.57	372.72	37.005 2	0.014 0	2.019 6	0.979
0.517	0.399	0.001 6	0.002 5	210.15	315.12	36.997 1	-0.007 8	2.018 0	0.900
0.631	0.44	0.001 6	0.002 5	180.48	270.88	36.943 5	-0.152 8	1.968 1	-1.593

#### 4 结束语

本文提出的基于零序电压相位不变的电容电流测量方法, 通过增加或减小系统的阻尼率, 同时调节消弧线圈的电感量, 保证零序电压相位与调节前

相位相同, 就可以实现系统电容电流的精确计算。该方法测量方便, 计算简单。并且该方法利用零序电压比例计算, 故不受互感器非线性的影响。对于电感量不能连续无级调节的消弧线圈, 相位调节误差大, 其测量精度会受到一定的影响。

对于系统本身对称度较小,零序电压很小的系统,为了提高测量精度,可以在接地变压器某一相增加或减小匝数,人为地增加系统不对称度进行解决。本文提出的电容电流测量方法,适用于三相五柱式、偏磁式等电感量连续可调的消弧线圈。若增加连续可调阻尼设备,适用范围更广。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2013, 27(8): 172-178.  
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 27(8): 172-178.
- [4] 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.
- [5] 王异凡, 陈国柱, 张曙. 一种连续磁阀式消弧线圈及其数学模型[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 239-245.  
WANG Yifan, CHEN Guozhu, ZHANG Shu. A continuously magnetic valve arc-suppression coil and its modeling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 239-245.
- [6] 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.
- [7] 纪飞峰, 王崇林, 牟龙华, 等. 基于对称法与相位法的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 73-77.  
JI Feifeng, WANG Chonglin, MOU Longhua, et al. New type of arc-suppression coil based on symmetry and phase tuning principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 73-77.
- [8] 陈维江, 蔡国雄, 蔡雅萍, 等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 56-60.  
CHEN Weijiang, CAI Guoxiong, CAI Yaping, et al. Neutral grounding mode in 10 kV distribution network via peterson coil with parallel resistance[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 56-60.
- [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] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.

收稿日期: 2014-06-22; 修回日期: 2014-08-30

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

袁朋生(1971-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

张洋(1982-), 男, 本科, 工程师, 研究方向为接地保护与消弧线圈。

(编辑 葛艳娜)