

基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法

桑振华¹, 苗晓鹏¹, 李晓波¹, 李慧敏²

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008; 2. 河南大有能源供电分公司, 河南 义马 472302)

摘要: 提出了一种基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿测量方法。对于消弧线圈并阻尼电阻接地的配电网, 通过投切并联在消弧线圈两端的阻尼电阻以增加系统的阻尼率, 同时调节消弧线圈的电感量, 保证调节前后零序电压的相位互差 90° , 即可根据已知信息计算出系统的对地电容和对地电导的精确值。通过在 Matlab 中建立仿真模型并进行仿真实验, 验证了所提出的新型调谐方法的正确性。这种调谐新方法操作简单, 易于实现, 并且在预调式和随调式消弧线圈中均可使用。

关键词: 谐振接地; 零序电压; 电压相位; 消弧线圈; 跟踪补偿

A new measurement method of automatic tracking compensation arc-suppression coil based on the phase modulation

SANG Zhen-hua¹, MIAO Xiao-peng¹, LI Xiao-bo¹, LI Hui-min²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Henan Da You Energy Co., Ltd, Yima 472302, China)

Abstract: A new method is proposed to measure the capacitive and impedance current of resonance grounding power networks based on phase modulation of zero-sequence voltage. For the arc suppression coil and damping resistance in parallel grounded power networks, the grid-to-earth capacitance and resistance can be calculated accurately through switching the parallel damping resistor to increase the damping rate, while adjusting the inductance of arc suppression coil to guarantee phase difference of zero sequence voltage be 90 degrees before and after the adjustment. The simulation model is established and experiments are carried out in MATLAB to verify the correctness of this tuning method. The tuning method is simple, implemented easily, and can be used in not only the follow-resonant arc-suppression but also the pre-resonant one.

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

Key words: resonant grounded system; zero-sequence voltage; voltage phase; arc-suppression coil; tracking compensation

中图分类号: TM475 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0104-04

0 引言

在我国, 中性点不接地或经消弧线圈接地的运行方式有着广泛的应用^[1]。这种运行方式在系统发生单相接地故障时仍能保持三相电压对称, 因而允许带故障运行 2~3 h。中性点不接地系统或经消弧线圈接地系统有诸多优点。当中性点不接地系统发生单相接地故障时, 会产生接地电容电流, 如果不加以抑制, 就会导致形成的电弧难以自动熄灭。所以我国电力系统运行规程规定, 当配电网电容电流大于一定值时, 应在中性点装设消弧线圈来补偿电容电流。

准确而快速地测量配电网电容电流是发生单相接地故障补偿电容电流的关键环节。目前已有的电容电流测量方法包括中性点位移电压极大值法、阻抗三角形法、相位调谐方法、注入信号法等。这几类方法都有一定的应用, 但存在测量精度不高、需要不断改变消弧线圈电感值或装置复杂等^[2-4]。除此之外, 这些方法只能测量系统对地电容, 却对系统对地电导的测量无能为力。针对以上情况本文提出了一种基于调相法的消弧线圈新型调谐方法, 该方法具有测量精度高、操作简单、易于实现、适用性广等特点^[5-6]。

1 测量原理

1.1 基本原理

自然不平衡电压 U_{bd} 的一般表达式^[1]为

$$U_{bd} = -\rho \frac{1}{1-jd_0} U_{ph} \quad (1)$$

式中: $\rho = \frac{C_A + \alpha^2 C_B + \alpha C_C}{C_A + C_B + C_C}$ 为电网的不对称因子,

主要由电网三相不平衡电容引起; U_{ph} 为电网相电压; d_0 为电网阻尼率; $\alpha = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$,

$\alpha^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ 为单位向量。

系统零序电压的表达式^[1]为

$$\dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_{bd}}{v-jd} \quad (2)$$

式(2)的脱谐度 v 亦可表示为 $\frac{\omega C - 1/\omega L}{\omega C}$,

阻尼率亦可表示为 $\frac{G + G_\Sigma}{\omega C}$, G 为消弧线圈两端并联的阻尼电阻。

1.2 测量步骤

中性点经消弧线圈并联电阻调谐系统结构图如图 1^[7]所示。图中, C_A 、 C_B 、 C_C 是线路的对地电容, g_A 、 g_B 、 g_C 是线路的对地电导。 L 为安装在中性点的消弧线圈, G_1 为消弧线圈两端并联的用于辅助测量的阻尼电阻。 G_1 的作用是为了增加系统的阻尼率。对于预调式消弧线圈, G_1 即为并联在消弧线圈两端的阻尼电阻; 对于随调式消弧线圈, 使用本方法时应在其两端增设电阻 G_1 , 用于辅助测量, 待测量结束后, 再将电阻 G_1 退出。

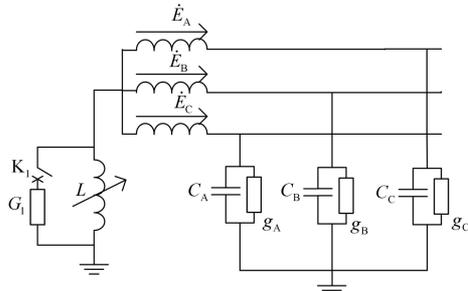


图 1 中性点经消弧线圈并联电阻调谐系统

Fig. 1 Tuning system of neutral grounded via arc-suppression coil with parallel resistance

由于系统运行方式经常发生变化, 将导致系统的对地参数发生变化, 所以应该定期对系统的对地电容和对地电导进行测量, 以实现消弧线圈的精确调谐和控制。

首先投入阻尼电阻 G_1 , 用以增加系统的阻尼率, 将消弧线圈的电感量调至最大值附近, 使消弧线圈调远离谐振点, 并且使其处于欠补偿状态。测量此时的中性点电压的有效值 U_1 、相位 θ_1 , 并记录此时消弧线圈的电感量 L_1 。将消弧线圈电感量向减小的方向调节, 同时观察中性点电压的相位变化, 待到中性点电压相位超前 $\theta_1 90^\circ$ 的时候, 调节结束, 测量此时的中性点电压有效值 U_2 和消弧线圈的电感量 L_2 。至此, 测量环节结束。对于随调式消弧线圈, 测量结束后将 G_1 退出运行。

1.3 算法分析

因为第二次调节后中性点电压相位较之前超前 90° , 则相对于向量 $v-jd$ 而言, 消弧线圈在完成第二次调节后的相位较之前则滞后 90° 。第二次调节前后向量 $v-jd$ 的变化表现为 v_2-jd 较 v_1-jd 的变化。而 $(\omega C - 1/\omega L) - j(G_\Sigma + G_1)$ 相位的变化与 $v-jd$ 的相位变化是相同的。则第二次调节前后向量 $(\omega C - 1/\omega L) - j(G_\Sigma + G_1)$ 的变化见向量图 2。从图 2 中可以看出, 与阻尼率相关的 $j(G_\Sigma + G_1)$ 在调节前后并没有发生变化, 发生变化的只有与脱谐度相关的 $(\omega C - 1/\omega L)$ 的部分。

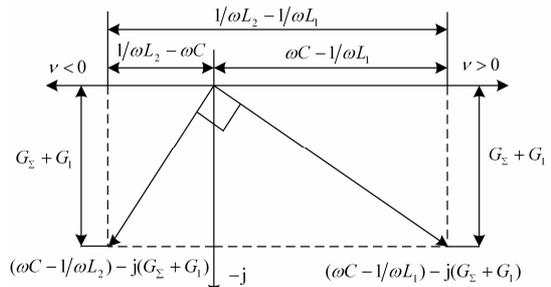


图 2 消弧线圈调节前后向量

$(\omega C - 1/\omega L) - j(G_\Sigma + G_1)$ 相位的变化

Fig. 2 Phase change of the vector of $(\omega C - 1/\omega L) - j(G_\Sigma + G_1)$ before and after the debugging of the arc-suppression coil

利用向量 $(\omega C - 1/\omega L) - j(G_\Sigma + G_1)$ 的变化, 以及式(2), 可得如下关系式(3)。

$$\alpha = \frac{\sqrt{(\omega C - \frac{1}{\omega L_2})^2 + (G_\Sigma + G_1)^2}}{\sqrt{(\omega C - \frac{1}{\omega L_1})^2 + (G_\Sigma + G_1)^2}} \quad (3)$$

其中, α 为两次调节前后中性点电压的比值, 即

$\alpha = \frac{U_1}{U_2}$ 。根据这些向量的角度关系,可得式(4)。

$$1 + \alpha^2 = \frac{\left(\frac{1}{\omega L_2} - \frac{1}{\omega L_1}\right)^2}{\left(\omega C - \frac{1}{\omega L_1}\right)^2 + (G_\Sigma + G_1)^2} \quad (4)$$

1.4 系统对地参数的求解

将式(3)和式(4)联立,可解得系统对地电容和对地电导的表达式为

$$C = \frac{1}{\frac{1}{L_2} - \frac{1}{L_1}} \frac{1}{1 + \alpha^2} \left[\frac{1}{\omega^2 L_2^2} - \alpha^2 \frac{1}{\omega^2 L_1^2} - (1 - \alpha^2) \frac{1}{\omega^2 L_1 L_2} \right] \quad (5)$$

$$G_\Sigma = \sqrt{\frac{\left(\frac{1}{\omega L_2} - \frac{1}{\omega L_1}\right)^2}{1 + \alpha^2} - \left(\omega C - \frac{1}{\omega L_1}\right)^2} - G_1 \quad (6)$$

依据式(5)即可实现消弧线圈的精确调谐,依据式(6)可实现消弧线圈补偿后残流的预测。

2 仿真实证

这种新型调谐方法在 Matlab 中的仿真模型^[8-11]见图 3。

模型中,系统电压级别为 35 kV,线路对地采用集中参数,每相对地电导均为 30 000 Ω,为保证系统对地参数具有一定的不对称度,设置 A 相对地电容为 10.5 μF, B 相 C 相对地电容为 10 μF。则计算可得系统总电容为 $C = 30.5 \mu\text{F}$,对地总电导为 $G_\Sigma = 0.0001 \text{ S}$ 。设置在 0.15 s 时刻并入测量用阻尼电阻,在 0.3 s 时刻调节消弧线圈电感量至合适值,观察中性点电压及相位的变化波形,如图 4。

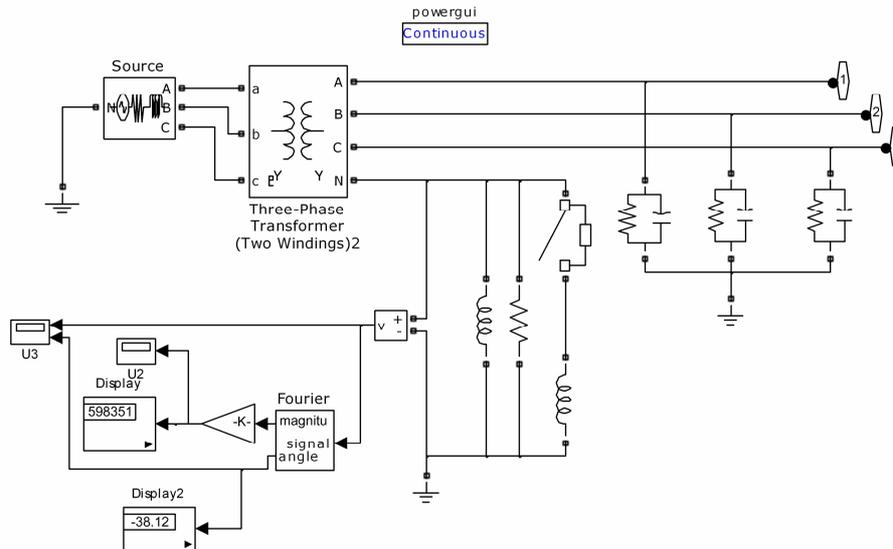


图 3 仿真模型

Fig. 3 Simulation model

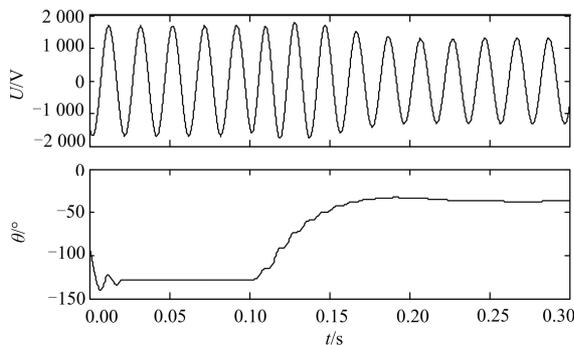


图 4 消弧线圈调节前后零序电压的波形及相位变化

Fig. 4 Waveform and the phase change of the zero-sequence

voltage before and after the debugging of the arc-suppression coil

从仿真波形中可以看出,在 0.1 s 调节消弧线圈电感量,经过大约 0.1 s 的波动之后,中性点电压的相位较调节前超前了 90°,同时中性点电压的幅值有所降低。说明仿真结果符合本文所提出的调谐方法的理论依据。

根据仿真计算出的数据见表 1。

由仿真数据结果可以看出,使用本文提出的这种基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿测量方法测量出的系统对地电容精度很高,误差甚微,对地电导的测量结果误差稍大,但也能够满足实际使用的需。

表 1 系统对地电容和对地电导测试结果

Table 1 Test result of the grid-to-earth capacitance and conductance

| L_1/H | L_2/H | U_1/V | U_2/V | $C/\mu F$ | 误差/% | $G_x/10^{-3} S$ | 误差/% |
|---------|---------|---------|---------|-----------|----------|-----------------|-------|
| 0.4 | 0.258 | 122.98 | 95.14 | 30.5 | 0.005 8 | 0.102 29 | 2.29 |
| 0.45 | 0.281 | 99.798 | 119.245 | 30.502 | 0.006 63 | 0.102 34 | 2.345 |
| 0.5 | 0.2906 | 85.005 | 130.204 | 30.502 | 0.006 3 | 0.102 1 | 2.145 |
| 0.6 | 0.2963 | 75.282 | 136.097 | 30.499 | 0.000 42 | 0.101 56 | 1.565 |

3 结语

本文提出的基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿测量方法, 通过投入消弧线圈两端并联的阻尼电阻增加系统的阻尼率, 同时联调消弧线圈, 保证零序电压相位在调节前后互差 90° , 即可实现对系统对地电容和对地电导的精确测量。这种测量方法操作简单, 测量精度高, 适用范围广。但是本方法也存在一定的不足, 比如该方法只适用于对地参数具有一定不对称度的系统。尤其是实际测量中, 电压的相位的测量误差较大, 这将会影响到整体的测量精度。

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.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Resonant grounding power system[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [2] 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 Xiang-jun, LIU Zhang-lei, MA Hong-jiang, et al. A capacitive current real time measuring technique for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 61-65.
- [3] 陈忠仁, 吴维宁, 张勤, 等. 调匝式自动补偿消弧装置调谐测量原理研究[J]. 继电器, 2005, 33(20): 49-52.
CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, ZHANG Qin, et al. Study on tuning principle of multi-tap automatic compensation arc-suppression device[J]. Relay, 2005, 33(20): 49-52.
- [4] 唐轶, 王涛, 罗建峰. 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.
- [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

- [6] 陈忠仁, 周程宏, 王妍. 配电网电容电流谐振测量方法的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 128-134.
CHEN Zhong-ren, ZHOU Cheng-hong, WANG Yan. Application of resonance measurement method for capacitive current of the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 128-134.
- [7] 李嗣名, 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-suppresson coil goer line[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 124-128.
- [8] 李涛, 李新年. 配电网消弧线圈自动跟踪补偿装置的初步设计与仿真研究[J]. 继电器, 2007, 35(增刊): 263-267.
LI Tao, LI Xin-nian. The primary design and simulation research on automation tracking and compensating arc suppression coil of distribution network[J]. Relay, 2007, 35(S): 263-267.
- [9] 盛建科, 陈乔夫, 熊娅俐, 等. 基于磁通可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 88-93.
SHENG Jian-ke, CHEN Qiao-fu, XIONG Ya-li, et al. A new type automatic resonant arc-suppressing coil based on controllable magnetic flux[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 88-93.
- [10] 肖湘宁, 陶顺. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 143-147.
XIAO Xiang-ning, TAO Shun. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part I[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 143-147.
- [11] 陶顺, 肖湘宁. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(二)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 156-159.
TAO Shun, XIAO Xiang-ning. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: part II[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(10): 156-159.

收稿日期: 2013-07-07; 修回日期: 2013-09-11

作者简介:

桑振华(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为供配电安全; E-mail: sangzhenhua2010@163.com

苗晓鹏(1986-), 男, 硕士研究生, 主要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。