

# 一种谐振接地系统电容电流测量新方法

张 珊<sup>1</sup>, 梁志瑞<sup>1</sup>, 张丽芳<sup>2</sup>, 李 梁<sup>2</sup>, 杜鹏宇<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 国网石家庄供电公司, 河北 石家庄 050000)

**摘 要:**系统电容电流的精确测量是谐振接地系统中消弧线圈正确调谐的前提和关键。通过分析现有配电网电容电流测量方法中存在的问题,提出一种测量电容电流的新方法。该方法通过改变消弧线圈电感值的大小,测量电感值改变前后,系统中性点位移电压和中性点电流的幅值和相位,并根据公式计算系统对地总电容及对地总电导,进而计算出系统对地额定电容电流值。最后通过 MATLAB 仿真验证该方法能够取得较高的测量精度。该方法操作方便,计算简单,可用于消弧线圈的调谐计算。

**关 键 词:**谐振接地系统;消弧线圈;中性点位移电压;中性点电流;对地额定电容电流

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.01.014 中图分类号:TM76 文章编号:1673-9140(2020)01-0109-06

## A new capacitor current measurement method for resonance grounding system

ZHANG Shan<sup>1</sup>, LIANG Zhirui<sup>1</sup>, ZHANG Lifang<sup>2</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, DU Pengyu<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. State Grid Shijiazhuang Electric Power Supply Company, Shijiazhuang 050000, China)

**Abstract:** The accurate measurement of system capacitance current is the precondition and key factor for the correct tuning of the arc suppression coil in the resonance grounding system. On the basis of analyzing the existing problems in the capacitor current measurement method of distribution network, a new method for capacitor current measurement is proposed. By changing the inductance value of the arc suppression coil, the amplitude and phase of the neutral point displacement voltage and neutral point current of the system are measured before and after changing the inductance value. According to the formula, the total capacitance and conductance of the system are calculated. And then the rated capacitor current of the system is calculated. Finally, the MATLAB simulation proves that the method can achieve high measurement accuracy. The method is easy to operate and simple to calculate, and it can be used for the tuning calculation of arc suppression coil.

**Key words:** resonance grounding system, arc-suppression coil, neutral point displacement voltage, neutral point current, rated capacitor current

近年来,随着电力行业的发展,配电网的电缆化率不断提升,由此,系统的电容电流也不断增大。当

系统发生单相接地故障时,若对地电容电流过大,则容易导致间歇电弧接地过电压的产生,对电力设备

的安全以及电网的安全运行带来严重影响,若接地电弧长时间不能自熄,还可能引发更为严重的短路事故<sup>[1]</sup>。因此,当系统对地电容电流超过标准规定时,就需要采取措施以减小电容电流。通常采用谐振接地方式,利用消弧线圈的电感电流来抵消系统的电容电流,从而减小电容电流过大给系统带来的影响。因此,消弧线圈的合理调谐对电网的安全运行十分重要,一方面可以有效避免单相接地的弧光过电压,另一方面又不影响继电保护的选择性和可靠性<sup>[2]</sup>,从而使电力系统维持安全可靠的运行状态。实现系统电容电流的精确测量是提高消弧线圈补偿性能的重要因素。

目前,根据消弧线圈的调谐原理不同,测量系统电容电流的方法有多种。虽然各种测量方法不尽相同,但其基本思路都是依据电网在正常运行情况下,利用系统中性点电压和电流的幅值或相位,以及消弧线圈的电感值和串(并)联电阻值等参数之间的相关关系,采用不同的计算方法得到系统的对地总电容及对地总电导,从而计算出系统总的对地电容电流。电容电流的测定方法主要有两点法、三点法、偏置法、注入信号法以及其它一些方法。两点法<sup>[3]</sup>由于在计算过程中忽略了电网阻尼率,因此,计算结果在电网阻尼率偏大时将会产生较大误差。三点法在计算时考虑了阻尼率,弥补了两点法的一点不足,其计算理论误差相对较小,但其未考虑消弧线圈损耗等阻尼,因此,采用三点法计算系统对地参数仍会存在较大的误差。偏置法<sup>[4]</sup>中,测量精度会因外加偏置元件的选择不同而受影响,此外,外加偏置元件可能会给电网安全带来某些方面的问题。注入信号法<sup>[5-6]</sup>是依据消弧线圈的电感与系统对地电容发生谐振的原理,在系统二次侧注入变频信号,以求得系统谐振频率,继而得出系统的对地总电容。由于该方法向系统注入了一个非工频信号<sup>[7]</sup>,因此或多或少会给系统带来一定程度的不利影响。

消弧线圈的调谐应当配合电网运行方式的变化<sup>[8]</sup>。电网电容电流的计算准确度会直接影响消弧线圈能否正确调谐,接地电弧能否可靠熄灭<sup>[9-11]</sup>。而目前电容电流的测量方法<sup>[12-14]</sup>,都存在一定程度的不足,因此,为提高电容电流的测量精度,该文提

出了一种全新计算方法,从而有效降低了系统对地参数的计算误差,有效改善了消弧线圈的补偿效果。

## 1 测量原理

谐振接地系统的电网等值接线如图1所示。图中 $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$ 分别为系统三相对地分布电容; $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$ 分别为系统三相对地分布电导; $L$ 为消弧线圈的电感; $r_L$ 为消弧线圈的等值损耗电阻。

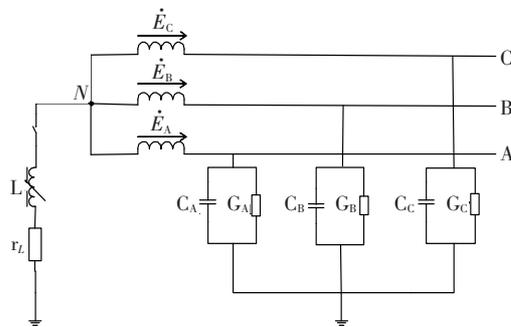


图1 电网等值接线

Figure 1 Equivalent circuit diagram of power grid

在正常运行情况下,谐振接地系统中电网的三相对地电容与消弧线圈的电感形成电压谐振回路,如图2所示。由于配电网自然不平衡电压 $\dot{U}_{bd}$ 的存在,图2电路中便有零序电流 $\dot{I}_0$ 流过,消弧线圈使得系统的中性点N对地之间有了一定的电位差,该电位差称为中性点位移电压 $\dot{U}_0$ 。图中 $C = C_A + C_B + C_C$ ,为系统对地总电容; $G = G_A + G_B + G_C$ ,为系统对地总电导。 $R_L = r_L + R$ ,R为限压电阻。对于随调式消弧线圈,由于中性点不加限压电阻,则R为零。该电路可以适用于预调式和随调式消弧线圈。

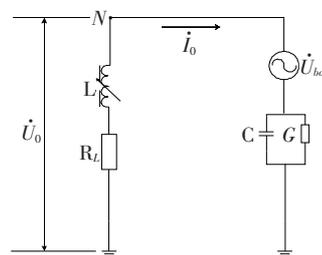


图2 电压谐振等值电路

Figure 2 Equivalent circuit of voltage resonance

根据图 2 等值电路,可得:

$$\dot{U}_{bd} = \dot{U}_0 + \frac{\dot{I}_0}{G + j\omega C} \quad (1)$$

并可,通过改变消弧线圈电感值的大小,系统中性点位移电压  $\dot{U}_0$  和电流  $\dot{I}_0$  均会发生改变。由式(1)可知,系统对地参数与  $\dot{U}_0$  和  $\dot{I}_0$  有关系,因此,可以调节消弧线圈值,利用系统对地参数与中性点位移电压和电流之间的相关关系,求得系统电容电流值,从而实现消弧线圈的合理调谐。

## 2 系统对地参数的精确测量

### 2.1 测量方法

首先在消弧线圈的电感量为  $L_1$  时测量系统中性点位移电压  $U_{01}$  和相位  $\varphi_1$  以及中性点电流  $I_{01}$  和相位  $\theta_1$ ;然后调节消弧线圈的电感值为  $L_2$ ,再次测量系统中性点位移电压  $U_{02}$  和相位  $\varphi_0$  以及中性点电流  $I_{02}$  和相位  $\theta_2$ 。

### 2.2 系统对地总电容及总电导的计算

当电网运行方式一定时, $G$  和  $C$  不会发生变化, $\dot{U}_0$  和  $\dot{I}_0$  都可以采样得到。计算时利用消弧线圈的电感值进行调节,将前后采样得到的中性点位移电压、中性点电流值分别代入式(1),可得方程组:

$$\begin{cases} \dot{U}_{bd} = \dot{U}_{01} + \frac{\dot{I}_{01}}{G + j\omega C} \\ \dot{U}_{bd} = \dot{U}_{02} + \frac{\dot{I}_{02}}{G + j\omega C} \end{cases} \quad (2)$$

解此方程组,消去  $\dot{U}_{bd}$  后,可得:

$$G + j\omega C = \frac{\dot{I}_{01} - \dot{I}_{02}}{\dot{U}_{02} - \dot{U}_{01}} \quad (3)$$

则系统对地总电容为

$$C = \frac{\text{Im}(G + j\omega C)}{\omega} \quad (4)$$

系统对地总电导为

$$G = \text{Re}(G + j\omega C) \quad (5)$$

根据式(3)、(4)可得:

$$C = \frac{I_{01} [U_{02} \sin(\theta_1 - \varphi_2) - U_{01} \sin(\theta_1 - \varphi_1)]}{\omega [U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]} +$$

$$\frac{I_{02} [U_{01} \sin(\theta_2 - \varphi_1) - U_{02} \sin(\theta_2 - \varphi_2)]}{\omega [U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)]} \quad (6)$$

根据式(3)、(5)可得:

$$G = \frac{I_{01} [U_{02} \cos(\theta_1 - \varphi_2) - U_{01} \cos(\theta_1 - \varphi_1)]}{U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} + \frac{I_{02} [U_{01} \cos(\theta_2 - \varphi_1) - U_{02} \cos(\theta_2 - \varphi_2)]}{U_{01}^2 + U_{02}^2 - 2U_{01}U_{02} \cos(\varphi_1 - \varphi_2)} \quad (7)$$

以上计算过程中,对公式的推导严谨有序,没有进行任何近似或化简,因而,大大提高了计算结果的准确度。通过式(6)可精确计算出系统对地总电容,通过式(7)可精确计算出系统对地总电导。

### 2.3 系统对地额定电容电流的计算

为了合理调谐消弧线圈,减小接地点的故障残流,使接地电弧能够可靠熄灭,在得到系统对地总电容后,需要计算出系统的对地电容电流值。当系统发生单相接地故障时,对地电容电流为

$$I_C = \omega C U_0 \quad (8)$$

式中  $U_0$  为故障时接地点的零序相电压, $C$  为系统三相对地总电容。

$U_0$  随接地故障点的过渡电阻及系统的运行电压变化而变化,所以实际中  $I_C$  不是一个定值。所谓的“系统对地电容电流”实际上是假定系统的运行电压等于额定电压且接地故障点的过渡电阻为零的情况下系统对地电容电流。这是一个确定的值,准确地应该称其为“系统对地的额定电容电流”,用  $I_{CN}$  来表示,即

$$I_{CN} = \omega C U_{\varphi N} \quad (9)$$

式中  $U_{\varphi N}$  为系统的额定相电压。

消弧线圈铭牌上标注的各档位对应的电感电流都是当系统运行电压为额定值时所能提供的补偿电感电流,此电流与式(9)计算的  $I_{CN}$  共同用于对系统的调谐计算。

## 3 仿真验证

利用 Matlab/simulink 仿真软件搭建 10 kV 系统仿真模型,如图 3 所示,用来验证该文所提的电容电流测量方法的准确性。在仿真模型中,系统每相对地电阻均为 9 k $\Omega$ ,设置 A 相对地电容  $1.2 \times 10^{-6}$  F, B 相与 C 相对地电容均为  $1.5 \times 10^{-6}$  F,这样可以保证系统对地参数具有一定的不平衡

度。通过改变消弧线圈的电感值,测量改变前后中性点位移电压与中性点电流的幅值和相位。根据以上参数设置计算可得系统对地总电容  $C = 4.2 \times 10^{-6} \text{ F}$ , 对地总电导为  $G = 0.0003 \text{ S}$ , 谐振电感为  $L = 2.4124 \text{ H}$ 。

当消弧线圈电感值发生变化时,为了方便测量系统中性点位移电压以及中性点电流的幅值和相位,中性点通过 2 个断路器  $K_1$ 、 $K_2$  分别与 2 个不同电感值的消弧线圈连接在一起,如图 3 所示。仿真设置情况为断路器  $K_1$  初始状态为闭合,在  $t = 0.5 \text{ s}$  时,断路器  $K_1$  断开,同时断路器  $K_2$  闭合。消弧线圈的电感值由  $L_1$  改变为  $L_2$ 。在此过程中,中性点位移电压的变化波形如图 4 所示(其中虚线表示中性点位移电压相位的变化波形,实线表示中性点位移电压的变化波形)。消弧线圈电感值的改变对中性点电流波形的影响如图 5 所示(其中虚线表示电

感值为  $L_1$  时的中性点电流波形,实线表示电感值为  $L_2$  时的中性点电流波形)。

从仿真波形中可以看出,在  $0.5 \text{ s}$  时刻改变消弧线圈电感值的大小,系统中性点位移电压、电流的幅值和相位都发生相应的变化。通过测量电感值调节前后的中性点位移电压、电流的幅值和相位,代入公式可以计算出系统对地总电容及对地总电导。

仿真过程共采集 3 组消弧线圈处于不同补偿状态时的相关数据进行计算,其电感值分别取自消弧线圈位于过补偿区域、全补偿附近以及欠补偿区域。以此验证处于不同补偿状态的消弧线圈电感值对于测量精度的影响情况。利用“Fourier”模块分别测量不同电感值时的中性点位移电压、电流的幅值和相位,并进行记录。将数据代入公式计算后得到系统对地总电容和对地总电导的测量误差结果,如表 1 所示。

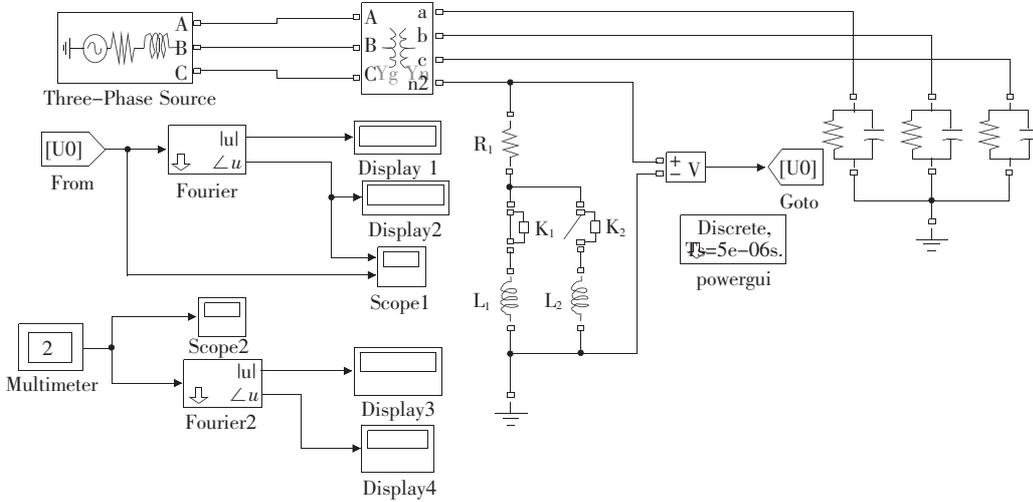


图 3 仿真模型

Figure 3 Simulation model

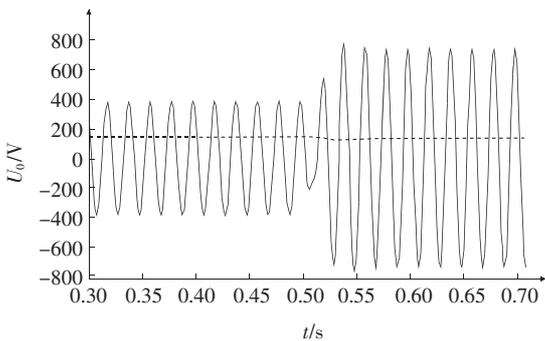


图 4 中性点位移电压波形

Figure 4 Neutral point displacement voltage waveform

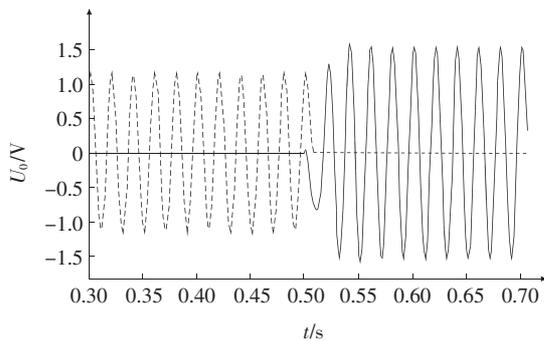


图 5 中性点电流波形

Figure 5 Neutral point current waveform

表 1 系统对地总电容和对地总电导的测量误差

Table 1 Measurement error of total capacitance to ground and total conductance to ground

补偿状态	$L/H$	$U_0/V$	$\varphi/^\circ$	$I_0/A$	$\theta/^\circ$	$G/(10^{-4} S)$	电导误差/%	$C/(10^{-6} F)$	电容误差/%
过补偿区域	1.0	382.1	141.20	1.159	68.87	3.048 2	1.607	4.199 9	-0.002
	1.5	735.2	132.70	1.526	54.69				
全补偿附近	2.0	1 226.2	111.60	1.927	30.65	3.046 4	1.547	4.202 7	0.064
	2.5	1 540.1	82.11	1.945	-0.64				
欠补偿区域	3.0	1 472.1	58.57	1.553	-25.37	3.054 9	1.830	4.202 4	0.057
	3.5	1 301.3	44.74	1.178	-40.06				

根据表 1 中数据可以看出,无论消弧线圈的补偿状态是处于过补偿、欠补偿还是全补偿附近,对地电容的测量结果都具有很高的测量精度,从而为电容电流的测量提供了保证。同时对地电导的测量精度也可以满足实际情况的需求。

## 4 实测中的几点注意事项

1)在实际测量过程中,消弧线圈电感值的调节量可依据消弧线圈的不同档位进行设定。

2)测量所用电压互感器和电流互感器等设备,应具有较高的测量精度。

3)测量过程中应在消弧线圈电感值调节完成后,待系统电压稳定后再提取所需计算数据,避免测量过程中系统存在冲击负荷,对系统电压稳定构成威胁。

## 5 结语

该文提出的一种谐振接地系统电容电流测量新方法在实际测量过程中,只需改变一次消弧线圈电感值的大小,因此操作方便。而且该方法在计算过程中,未对公式进行任何近似或简化,因此各参数的计算结果更加准确。通过仿真实例可以看出,该方法可以取得较高的测量精度,从而可以有更好的调谐效果。

## 参考文献:

[1] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地(第二版)[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[2] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.

[3] 陈忠仁,陈芳靖,李微波. 自动消弧线圈的测量及调谐改进方法[J]. 高压电器,2009,45(2):77-80.  
CHENG Zhongren, CHEN Fangjing, LI Weibo. Improvement method of measuring and tuning of automatic arc-suppression coil [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2): 77-80.

[4] 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.

[5] 贺良华,葛来,孙宝金. 基于谐振频率预测模型的配电网电容电流测量方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(2):149-153.  
HE Lianghua, GE Lai, SUN Baojin. Capacitive current measuring method for distribution networks based on resonant frequency prediction model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 149-153.

[6] 周求宽,张旭俊,张科杰,等. 电力行业标准异频法公式勘误与电容电流测试新方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(1):167-173.  
ZHOU Qiukuan, ZHANG Xujun, ZHANG Kejie, et al. Formula erratum for non-power frequency method in power industry standard and new measuring method of capacitive current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 167-173.

[7] 吴斌,陈纲,金云奎,等. 一种新型的消弧线圈自动跟踪补偿装置[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(19):157-163.

- WU Bin, CHEN Gang, JIN Yunkui, et al. A new type of arc-suppression coil automatic tracking compensation device [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 157-163.
- [8] 滕昊. 带阻尼电阻的谐振接地系统电容电流精确测量方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 97-102.
- TENG Hao. Accurate measurement method of capacitive current in resonant grounding system with damping resistance[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 97-102.
- [9] 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]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2015, 27(9): 1-6.
- [10] 朱珂, 殷鹏, 刘颖英, 等. 利用电力电子扰动技术的系统对地电容检测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(23): 150-156.
- ZHU Ke, YIN Peng, LIU Yingying, et al. Detection method for system grounding capacitance using power electric disturbance technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(23): 150-156.
- [11] 闫腾飞, 李康, 李晓波, 等. 基于牛顿-拉夫逊法的配电网电容电流测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-17.
- YAN Tengfei, LI Kang, LI Xiaobo, et al. A new capacitive current measurement method of distribution network based on Newton-Raphson method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-17.
- [12] 方涛, 陈豪威, 王媛媛, 等. 基于主频分量相关性的谐振接地配电网故障定位方法[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 90-94.
- FANG Tao, CHEN Haowei, WANG Yuanyuan, et al. A novel fault location method based on the waveform correlation of main frequency component for resonant grounding distribution system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 90-94.
- [13] 黄宇浩, 陈豪威, 周佳铭, 等. 基于暂态零序电流频谱灰关联分析的谐振接地系统故障选线方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(3): 71-76.
- HUANG Yuhao, CHEN Haowei, ZHOU Jiaming, et al. Faulty feeder detection using grey relation analysis of transient zero-sequence current spectrum in resonant grounding system [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(3): 71-76.
- [14] 李明贤, 解洪光, 张喜玲, 等. 基于谐波分量的配电网分相对地参数辨识新方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(4): 99-104.
- LI Mingxian, XIE Hongguang, ZHANG Xiling, et al. A new method for relative parameter identification of distribution network based on harmonic component [J]. Smart Power, 2019, 47(4): 99-104.