

电力行业标准异频法公式勘误与电容电流测试新方法

周求宽¹, 张旭俊¹, 张科杰², 刘 衍¹, 吴细秀²

(1. 国网江西省电力科学研究院, 江西省南昌市 330096; 2. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省武汉市 430070)

摘要: 指出并验证了电力行业标准中“三异频等幅电流阻抗法”计算电容和电容电流公式的错误, 推导得出了正确的计算公式。此外, 针对从电压互感器开口三角注入异频电流测量电容电流方法存在效率低、安全性及准确性不高等缺点, 提出了一种从电容器组中性点注入异频电流测量电容电流的方法, 通过数学理论推导、模拟试验和现场测试对该方法的准确性进行验证, 同时由模拟试验结果分析了各种因素对新方法测试误差的影响。

关键词: 电力行业标准; 电容电流测量; 电容器组; 数学理论推导

0 引言

随着配电网的不断扩大, 尤其是电缆线路大面积的应用, 使得中性点不接地系统对地电容增加, 导致单相接地时电容电流过大^[1], 电弧难以自动熄灭, 引起故障, 需要加装消弧线圈; 在有源电网中, 分布式电源并网运行同样会考虑电容电流的大小, 在主网安装消弧线圈^[2-4]。因此, 准确地测量配电网电容电流, 是决定消弧线圈安装与否和选型的依据, 尤为重要。

DL/T 308—2012《中性点不接地系统电容电流测试规程》^[5] (以下简称规程), 将测量方法分为两大类: 一是直接测量法, 如单相金属性接地法, 测量准确度较高, 但需要将高压一次系统直接接地, 危险度高; 二是间接测量法, 无需接地, 利用接入的原件或注入的信号来测量。

间接法在国内研究较多, 然而大多存在适用范围较小的缺点, 或有现场测试准备时间较长, 测试复杂精度不高的弊端。其中, 中性点外加电容法适用于对称的网络, 但必须在变压器中性点外加相当数量的电容器, 现场有时难以实现^[5]; 偏置电容法加入电容选取不当会造成非偏置相电压升高, 容易使电网绝缘薄弱处发生短路^[6-7]; 谐振法多在有消弧线圈或串可调电感的条件下使用^[8-10], 一般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, 使用范围较小, 测量误差大^[11-12]; 单频法^[13-14]需

要外接变压器等设备, 测量方法复杂; 文献^[15]介绍了一种从系统电压互感器(TV)开口三角注入信号的异频电流法, 但现场测试时操作复杂, 准备时间长。规程也介绍了一种“三异频等幅电流阻抗法”(以下简称三异频法), 仅给出了公式, 经研究推导发现计算公式有明显的错误。

本文从规程三异频法测量电容电流法入手, 首先验证了规程给出的三异频法计算电容和电容电流公式的错误, 然后由三异频法原理严谨地推导出了正确的计算公式。此外, 考虑到从系统 TV 开口三角注入信号的局限性, 针对性地提出了从电容器组中性点注入异频电流, 测量计算电容电流的方法, 为合理配置消弧线圈的容量提供了新方法。并利用数学方法, 模拟实验和现场测试进行验证和误差分析, 最后得到相关结论。

1 规程三异频法的错误

异频电流注入法是一种间接测量电容电流的方法, 它是将异频电流从变电站母线 TV 的开口三角注入电网来测量不接地系统对地电容及电容电流。

规程不经推导直接给出的三异频法测量计算系统对地电容和电容电流的公式如下:

$$C = \frac{3 \times 10^6}{K^2} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} - \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2} - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_3^2}}{z_3^2(\omega_2^2 - \omega_1^2) - z_1^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) - z_2^2(\omega_2^2 - \omega_1^2) + z_1^2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}} \quad (1)$$

$$I_c = \frac{942 \times 10^6}{K^2} U_\varphi \cdot \sqrt{\frac{\frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} - \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2} - \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2} + \frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_3^2}}{z_2^2(\omega_2^2 - \omega_1^2) - z_1^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) - z_3^2(\omega_2^2 - \omega_1^2) + z_1^2(\omega_2^2 - \omega_1^2)}} \quad (2)$$

式中： C 为系统电容； I_c 为系统电容电流； U_φ ($\varphi = a, b, c$) 为相电压； $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为异频电流的角频率； z_1, z_2, z_3 为开口三角实测值求出的阻抗值。

观察发现，式(1)和式(2)错误十分明显，根号中的分母本来应该是相同的，但却彼此矛盾。这不是印刷错误，因为两个公式均错误。下面简单证明上述公式的错误。

假设系统零序回路是纯电阻时，必有 $z_1 = z_2 = z_3$ ，将其代入式(1)，可得公式的分母项并不为零，也就是说得到的电容值 C 并不趋于无穷大。而这也与假设零序回路是纯电阻回路矛盾。由此可知，规程中三异频法求电容和电容电流的公式是错误的。

2 三异频法正确公式推导

下面详细推导从 TV 开口三角注入三异频恒流计算系统对地电容和电容电流的公式。

2.1 三异频法等效零序电路的简化

三异频电流注入法测量接线图如图 1 所示。

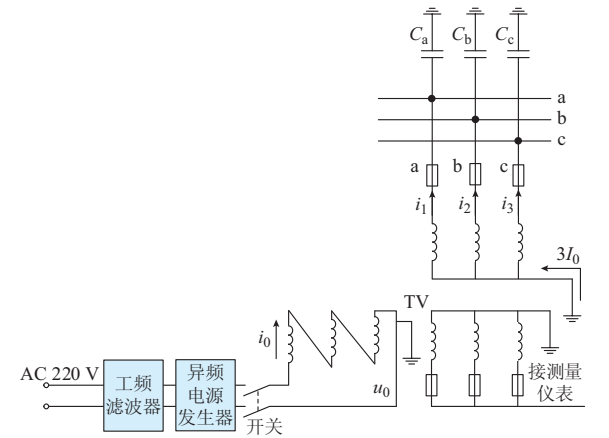


图 1 异频电流注入法测量接线图
Fig.1 Wiring diagram for measurement method of injecting non-power frequency currents

若在 TV 开口三角注入一个恒定电流 i_0 ，互感器 a, b, c 三相绕组励磁电流分别为 i_a, i_b, i_c ，一次绕组电流为 i_1, i_2, i_3 ，互感器变比为 K ，则有如下关系式：

$$\begin{cases} K(i_1 - i_a) = i_0 \\ K(i_2 - i_b) = i_0 \\ K(i_3 - i_c) = i_0 \end{cases} \quad (3)$$

根据图 1，三异频法高压侧励磁阻抗在工频下大约为几兆欧，而绕组电阻、漏抗和对地电容的容抗之和只有几千欧到几十千欧。因此高压侧可以视作开路，TV 的励磁电流 i_a, i_b, i_c 几乎为零，可以忽略不计。由此，可以认为从 TV 高压侧流出的三相电流是相等，记为 I_0 ，即有如下关系式：

$$\begin{cases} i_1 = i_2 = i_3 = I_0 \\ KI_0 = i_0 \end{cases} \quad (4)$$

得到简化的等值电路如图 2 所示。

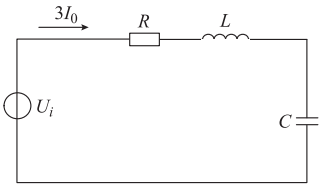


图 2 简化后三异频法等值电路
Fig.2 Simplified equivalent circuit for three non-power frequency method

根据图 2，在三相 TV 开口三角注入 3 个异频等幅电流 i_0 时，可以得到高压侧流出的三相电流 I_0 。在三相 TV 与系统对地电容间产生的 3 个电压 U_i ，则高压侧阻抗可以表示为：

$$Z_i^2 = \left(\frac{U_i}{3I_0} \right)^2 = R^2 + \left(\omega_i L - \frac{1}{\omega_i C} \right)^2 \quad i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

通常认为 TV 的三相参数是对称的，则 R, L, C 存在以下关系： $R = R_a/3 = R_b/3 = R_c/3, L = L_a/3 = L_b/3 = L_c/3, C = 3C_a = 3C_b = 3C_c$ 。

规程公式中 z_i 是由开口三角实测电压值 u_0 求出的低压侧的阻抗，因此这里需要得出开口三角注入时的等值电路，参见图 3。

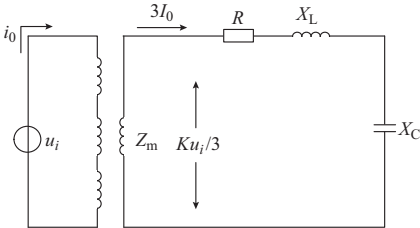


图 3 考虑开口三角注入时的等值电路
Fig.3 Equivalent circuit with open triangle injection

规程中规定如下关系式：

$$z_i = \frac{u_i}{3i_0} \quad (6)$$

则根据图 4 和式(5)、式(6)可得到高低压阻抗的关系式：

$$Z_i = \frac{U_i}{3I_0} = \frac{K^2 u_{0i}}{3 \cdot 3i_0} = \frac{K^2}{3} z_i \quad (7)$$

2.2 电容电流公式推导

在三相 TV 开口三角形注入 3 个异频恒流的 i_0 时,根据式(5)可得三相 TV 高压侧阻抗公式:

$$Z_1^2 = \left(\frac{U_1}{3I_0} \right)^2 = R^2 + \left(\omega_1 L - \frac{1}{\omega_1 C} \right)^2 \quad (8)$$

$$Z_2^2 = \left(\frac{U_2}{3I_0} \right)^2 = R^2 + \left(\omega_2 L - \frac{1}{\omega_2 C} \right)^2 \quad (9)$$

$$Z_3^2 = \left(\frac{U_3}{3I_0} \right)^2 = R^2 + \left(\omega_3 L - \frac{1}{\omega_3 C} \right)^2 \quad (10)$$

将上式消去电阻 R 后得:

$$Z_2^2 - Z_1^2 = (\omega_2^2 - \omega_1^2) L^2 - \frac{1}{C^2} \left(\frac{\omega_2^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2 \omega_1^2} \right) \quad (11)$$

$$Z_3^2 - Z_1^2 = (\omega_3^2 - \omega_1^2) L^2 - \frac{1}{C^2} \left(\frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_1^2 \omega_3^2} \right) \quad (12)$$

联立式(11)和式(12),消去电感 L 后并变形可得电容 C 表达式如下:

$$C^2 = \frac{-(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{\omega_1^2 \omega_2^2 \omega_3^2 [Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)]} \quad (13)$$

式(13)的下标具有循环对称特点,不妨令三异频有如下关系式: $\omega_1 > \omega_2 > \omega_3$,则 $(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_3^2 - \omega_1^2)$ 的乘积必定为负数,所以能确保式(13)的分子是正数,从而保证开方后 C 是实数,则开方后有

$$C = \frac{1}{\omega_1 \omega_2 \omega_3} \cdot \sqrt{\frac{-(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}} \quad (14)$$

注意如下一个恒等式:

$$-(\omega_1^2 - \omega_2^2)(\omega_2^2 - \omega_3^2)(\omega_3^2 - \omega_1^2) = \omega_1^2 \omega_2^2 \omega_3^2 \left[\frac{(\omega_2^2 - \omega_3^2)}{\omega_1^2} + \frac{(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{\omega_2^2} + \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_3^2} \right] \quad (15)$$

将此关系代入式(14),可得电容 C 的另一种表达式:

$$C = \sqrt{\frac{\frac{\omega_2^2 - \omega_3^2}{\omega_1^2} + \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2} + \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_3^2}}{Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}} \quad (16)$$

式(16)为高压侧的表达式,因此不能通过已知的注入电流 i_0 和低压侧测得的电压 u_0 直接求得。需要将公式转换为低压侧已知参量的表达式,将式(7)代入式(16)并换算单位后,可得与规程对应的

由低压阻抗表达的电容公式如下:

$$C = \frac{3 \times 10^6}{K^2} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\omega_2^2 - \omega_3^2}{\omega_1^2} + \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2} + \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_3^2}}{z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}} \quad (17)$$

系统电容电流 I_c 可以表示为: $I_c = \omega C U_\varphi$,其中 ω 为工频角频率。将式(17)代入上式可得电容电流表达式:

$$I_c = \frac{942 \times 10^6}{K^2} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\omega_2^2 - \omega_3^2}{\omega_1^2} + \frac{\omega_3^2 - \omega_1^2}{\omega_2^2} + \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{\omega_3^2}}{z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)}} \quad (18)$$

3 推导公式正确性验证

以下进一步验证式(17)和式(18)计算电容和电容电流的正确性。式(16)和式(17)是电容 C 的不同表达方式,它们是相通的,并且式(17)和式(18)是由式(16)推导而来,那么只需验证式(16)的正确性即可。

下面利用 3 种极端情况来验证公式的正确性。

1)假设:零序回路是纯电阻 R

由式(5)可知,此时阻抗有 $Z_1 = Z_2 = Z_3$ 的特点,将其代入式(16),根号内分母可化简为:

$$Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2) = Z_1^2[(\omega_2^2 - \omega_3^2) + (\omega_3^2 - \omega_1^2) + (\omega_1^2 - \omega_2^2)] = 0 \quad (19)$$

式(16)根号内分母为 0 时,有 $C \rightarrow \infty$ 。将此结果代入式(11)和式(12)可得 $L = 0$ 。这与假设零序回路是纯电阻性相呼应,结论正确。

2)假设:零序回路是纯电感 L

由式(5)可知,此时阻抗有如下特点: $Z_1/\omega_1 = Z_2/\omega_2 = Z_3/\omega_3$ 。将其代入式(16),根号内分母可化简为:

$$Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2) = \frac{Z_1^2}{\omega_1^2}[\omega_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + \omega_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + \omega_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2)] = 0 \quad (20)$$

式(16)根号内分母为 0 时,有 $C \rightarrow \infty$ 。将此结果代入式(8)一式(10),可得 $R = 0$ 。这与假设零序回路是纯电感性相呼应,结论正确。

3)假设:零序回路是纯电容 C

由式(5)可知,此时阻抗有如下特点: $Z_1\omega_1 = Z_2\omega_2 = Z_3\omega_3$ 。将其代入式(16),根号内分母可化简为:

$$Z_1^2(\omega_2^2 - \omega_3^2) + Z_2^2(\omega_3^2 - \omega_1^2) + Z_3^2(\omega_1^2 - \omega_2^2) = Z_1^2\omega_1^2 \left[\frac{(\omega_2^2 - \omega_3^2)}{\omega_1^2} + \frac{(\omega_3^2 - \omega_1^2)}{\omega_2^2} + \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{\omega_3^2} \right] \quad (21)$$

代入式(16),得 $C = 1/Z_1\omega_1$,将其代入式(8)——式(10),可得 $R = 0, L = 0$,这与假设零序回路是纯电容性相呼应,结论正确。

4 电容器组中性点注入异频电流法介绍及其误差分析

4.1 方法介绍

从电容器组中性点注入异频电流法的系统接线原理图如图 4 所示。

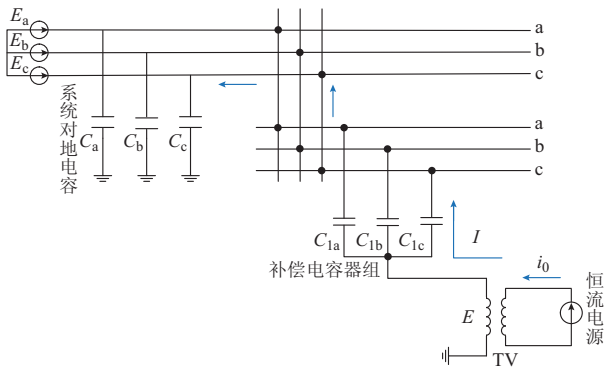


图 4 从电容器组注入异频电流法接线图
Fig.4 Wiring diagram for the method of injecting non-power frequency current from capacitor bank

由图 4 可以看出,异频恒流电流 i_0 经过外接单相 TV 注入电容器组中性点(单相 TV 仅起隔离作用,在确保安全的情况下可直接将测试信号注入至电容器组中性点),TV 高压侧电流 I 由三相电容组进入系统,与三相对地电容形成回路,简化的等值电路图如图 5 所示。

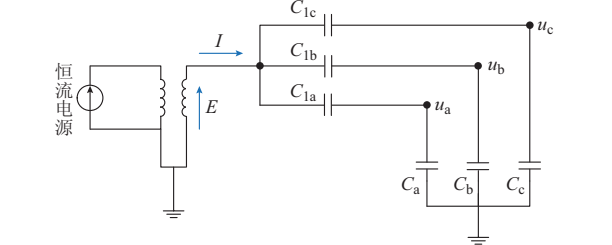


图 5 从电容器组中性点注入异频电流法等值电路
Fig.5 Equivalent circuit for the method of injecting non-power frequency current from neutral point of capacitor bank

为了准确计算,假定电容器组三相电容量和系统三相对地电容均不对称。那么由 a 相可得:

$$u_a = \frac{\frac{1}{C_a}}{\frac{1}{C_a} + \frac{1}{C_{1a}}} E = \frac{C_{1a}}{C_a + C_{1a}} E \quad (22)$$

解出 $[(E - u_a)/u_a]C_{1a} = C_a$,得出三相对地电容总和为:

$$\frac{E - u_a}{u_a} C_{1a} + \frac{E - u_b}{u_b} C_{1b} + \frac{E - u_c}{u_c} C_{1c} = C_a + C_b + C_c = C \quad (23)$$

由于 u_a, u_b, u_c 都包含 50 Hz 的基波电压分量,而异频电压分量要小得多,因此用这个公式测量计算的结果误差会很大。这里假定有:

$$3U_0 = u_a + u_b + u_c \quad (24)$$

利用上式计算电容,因为在这里基波电压已经被滤去,得到下式:

$$\frac{3U_0}{E} = \frac{C_{1a}}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_{1b}}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_{1c}}{C_c + C_{1c}} \quad (25)$$

从零序回路的异频分量看,还有如下关系:

$$\frac{I}{E} = \left[\frac{C_a C_{1a}}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_b C_{1b}}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_c C_{1c}}{C_c + C_{1c}} \right] \omega_f \quad (26)$$

联立式(25)和式(26)可以解得:

$$\frac{I}{3U_0 \omega_f} = \frac{\frac{C_a C_{1a}}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_b C_{1b}}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_c C_{1c}}{C_c + C_{1c}}}{\frac{C_{1a}}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_{1b}}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_{1c}}{C_c + C_{1c}}} \quad (27)$$

式中: U_0 和 I 通过 TV 开口三角形低压侧电压表和交流互感器电流表测得; ω_f 为注入电流的频率。

对式(27)提取出三相对地电容之和,有

$$C_\varphi = \frac{I}{3U_0 \omega_f} = \frac{\frac{C_{1a} \Delta_a}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_{1b} \Delta_b}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_{1c} \Delta_c}{C_c + C_{1c}}}{\frac{C_{1a}}{C_a + C_{1a}} + \frac{C_{1b}}{C_b + C_{1b}} + \frac{C_{1c}}{C_c + C_{1c}}} + \frac{C_a + C_b + C_c}{3} \quad (28)$$

式中: Δ_j 为三相对地电容差别评估值, $\Delta_j = C_j - (C_a + C_b + C_c)/3, j = a, b, c; \Delta_a + \Delta_b + \Delta_c \equiv 0$ 。

式(28)即可用来估算对地电容的大小。

4.2 误差分析

4.2.1 外接单相 TV 对测量精度影响的考量

TV 的铁芯励磁特性对测试结果会产生一定影响。当被测系统电容量较大时,为提高测试精度,一般要选择较低的注入信号频率,TV 的励磁阻抗相对工频时将减小,这时若仍将其忽略将带来一定的误差,而且 TV 的额定磁密选择越大,则误差越大。因此必须对 TV 的励磁特性进行单独设计。

TV 的变比也将对测试精度产生较大的影响。考虑测试仪器容量的限制,一般输出的电流值不大,例如当输出 1 A 恒流注入 TV 二次侧时,二次侧电压一般只有几伏甚至零点几伏(10 kV/0.1 kV 的 TV),这么小的信号要经采样、傅里叶分析,很容易产生较大的误差。因此,为了增大采样电压幅值,提高测试精度,可以根据实际情况,选择变比较小的 TV。

4.2.2 计算公式误差分析

很明显,式(28)中等式右边第一项为需要分析误差项,下面根据几种情况来讨论误差大小。

1)情形 1

当 $C_a/C_{1a}=C_b/C_{1b}=C_c/C_{1c}$ 时,三相对地电容有如下关系: $C_\varphi=(C_a+C_b+C_c)/3=C/3$ 。此时为理想情况,利用式(28)计算得到电容值精准。

2)情形 2

当 $C_a=C_b=C_c$ 时,三相电容有如下关系: $C_\varphi=(C_a+C_b+C_c)/3=C/3$ 。由此,利用式(28)计算得到电容值精准。

3)情形 3

当情形 1 和 2 的条件都不满足时,令 $k_a=C_{1a}/(C_a+C_{1a})\leq 1, k_b=C_{1b}/(C_b+C_{1b})\leq 1, k_c=C_{1c}/(C_c+C_{1c})\leq 1$,代入式(28)可得:

$$C_\varphi = \frac{I}{3U_0\omega_f} = \frac{k_a\Delta_a + k_b\Delta_b + k_c\Delta_c}{k_a + k_b + k_c} + \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = \frac{\Delta_{ka}\Delta_a + \Delta_{kb}\Delta_b + \Delta_{kc}\Delta_c}{k_a + k_b + k_c} + \frac{C_a + C_b + C_c}{3} \quad (29)$$

$$C = C_a + C_b + C_c = 3(C_\varphi - \Delta C_\varphi) \quad (30)$$

其中误差表示为 $\Delta C_\varphi = (\Delta_{ka}\Delta_a + \Delta_{kb}\Delta_b + \Delta_{kc}\Delta_c)/(k_a + k_b + k_c)$,其中: $\Delta_{ka}=k_a-(k_a+k_b+k_c)/3, \Delta_{kb}=k_b-(k_a+k_b+k_c)/3, \Delta_{kc}=k_c-(k_a+k_b+k_c)/3$ 。

情形 3 为实际情况,当三相对地电容 C_a, C_b, C_c 差别不大,且 k_a, k_b, k_c 差别也不大时,这时用式(30)来计算系统对地电容 C ,其误差是高阶的,基本可以忽略。综合上面 3 种情形可知,可以利用式(31)来估算系统对地电容的大小,且估算结果准确度较高。

$$C_\varphi = \frac{I}{3U_0\omega_f} = \frac{C_a + C_b + C_c}{3} = \frac{C}{3} \quad (31)$$

4.3 实验室模拟实验验证

在实验室,对电容器组中性点注入异频电流法进行了相关模拟实验。实验原理如图 5 所示,对利用本文提出的新方法研制的测试仪进行实验,实验结果数据如图 6 和附录 A 表 A1 所示,其中每条线后括号内数据表示:电容器组容量、电容器组相间偏

差和系统三相电容偏差。

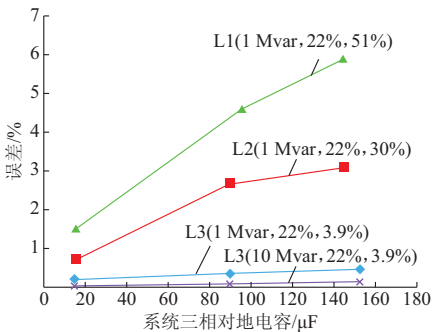


图 6 计算结果误差分析图
Fig.6 Error analysis of calculation results

由实验结果数据可以得到如下结论。

- 1)系统三相电容量越大,测试误差就越大。
- 2)系统三相电容量偏差越大,测试误差就越大。并且当系统三相电容量不大、系统三相电容量偏差在 50% 内,误差都比较小。
- 3)电容器组电容量相对系统三相电容量越大,测试的误差就越小。
- 4)电容器组相间电容量偏差越大,测试的误差就越大。

以上实验结论与 4.2 节分析一致,即电容器组中性点注入异频电流法测量误差小,可使用范围广。

4.4 现场实测

在 5 座变电站采用本文介绍电容器组中性点注入异频电流法进行现场测试。

考虑到消弧线圈退出后,因发生单相不稳定接地电弧形成弧光接地过电压问题,为此,采取两项措施:一是要求在测试时天气良好、雷雨天禁止进行试验、试验期间线路状况应良好、系统无重大操作。二是在试验程序上进行优化,因本文介绍的新方法具有测试时间短的优点,可以采取在仪器接线准备完毕后断开消弧线圈间隔的断路器,待几分钟测试后,即刻投入消弧线圈断路器。这样几乎可以避免系统单相接地的发生。测试结果参见附录 A 表 A2。

现场实测结果说明,与从系统 TV 开口三角注入法比较,电容器组中性点注入法准确度更高,尤其是系统电容电流较大时愈明显;测试时间也更短,这对全网大量变电站电容电流普测具有明显的时间优势。

4.5 新方法的优势

通过理论研究分析和现场测量操作,新方法在操作、安全和准确度几个重要方面的优势突出。

操作上,系统 TV 开口三角注入法测量前需要停电准备,操作琐碎,测量时间较长;而电容器组中

性点注入法不需要停电,测量时间短。

安全方面,系统 TV 开口三角注入法中 TV 一、二次消谐装置退出运行,有铁磁谐振风险;对于抗谐振型 4TV 无法继续测试,限制多。电容器组中性点注入法的测量不影响系统,且有单相 TV 隔离,操作安全。

准确度上,系统 TV 开口三角注入法受三相 TV 励磁特性等参数影响严重;而电容器组中性点注入法不受三相 TV 励磁特性影响;外加 TV 可以自己选择以减小误差。

综上所述,电容器组中性点注入法非常适合现场测量电容电流,极大提高了测试的安全性、便捷性及准确性。目前该方法已经被国家电网公司总部认可并推广至全公司系统广泛采用,反映良好。

5 结论

为了适应配电网的扩建,本文围绕不接地系统对地电容和电容电流测量展开研究,有以下主要结论和发现。

- 1) 规程中给出的三异频法计算系统电容和电容电流的公式错误。
- 2) 本文推导了三异频等幅电流阻抗法计算系统电容和电容电流的公式,并验证了它的正确性。
- 3) 本文提出了一种从电容器组中性点注入异频电流测量电容电流的新方法,并经过数学理论的误差分析、模拟实验及现场测试对比,验证了该方法具有更便捷、更安全、更准确等优点,适用于现场测量不接地系统电容电流。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

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

[2] 要焕年,曹梅月.电力系统谐振接地[M].2 版.北京:中国电力出版社,2009.

[3] 薛永端,郭丽伟,张林利.有源配电网中性点接地方式的选择问题[J].电力系统自动化,2015,39(13):129-136.DOI: 10.7500/AEPS20140717003.
XUE Yongduan, GUO Liwei, ZHANG Linli, et al. Selection problems of neutral grounding mode in active distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(13): 129-136. DOI: 10.7500/AEPS20140717003.

[4] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏.配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J].电力系统自动化,2004,28(10):84-87.

CHEN Zhongren, WU Weining, CHEN Jiahong. Measuring and tracing of automatic arc-suppression devices in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 84-87.

[5] 全国高电压实验技术标准化分技术委员会.中性点不接地系统电容电流测试规程:DL/T 308—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.

[6] 王庆军,王贻平,朱胜龙.配电系统电容电流的测量[J].工程与建设,2016,30(2):161-163.
WANG Qingjun, WANG Yiping, ZHU Shenglong. Measurement of capacitance current in distribution system[J]. Construction and Engineering, 2016, 30(2): 161-163.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 张海申,何正友,张钧,等.谐振接地系统单相接地故障频谱特征分析[J].电力系统自动化,2012,36(6):79-84. DOI: 10.7500/AEPS201103163.
ZHANG Haishen, HE Zhengyou, ZHANG Jun. Frequency spectrum characteristic analysis of single-phase grounding fault in resonant grounded systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 79-84. DOI: 10.7500/AEPS201103163.

[10] 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.

[11] 何锡祺,齐郑,杨以涵,等.并联电抗器组合式消弧线圈的研究[J].电力系统自动化,2008,32(3):92-96.
HE Xiqi, QI Zheng, YANG Yihan, et al. Research on combined arc-suppression coil with shunt reactor [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 92-96.

[12] 靳维,袁朋生,张洋,等.基于调整中性点接地阻抗的配电网电容电流测量方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(7):65-66.
JIN Wei, YUAN Pengsheng, ZHANG Yang, et al. A method of measuring capacitive current in distribution network based on adjusting the neutral grounding impedance [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 65-66.

[13] 李京民,李毅,王静爽.电容电流外加信号测量法[J].电力系统自动化,2001,25(10):65-66.
LI Jingmin, LI Yi, WANG Jingshuang. Measurement of capacitor current of electric power network using externally applied signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 65-66.

[14] 肖明,宋锐,李绉绉,等.10 kV 不接地系统电容电流测试研究[J].电气开关,2016,54(2):51-53.
XIAO Ming, SONG Rui, LI Xuanxuan, et al. Discussion on

capacitive current testing for 10 kV non-grounded system[J].
Electric Switch, 2016, 54(2): 51-53.

[15] 姜楠,李随朝.非有效接地电力系统对地电容电流的测试方法的研究[J].高压电器,2015,51(7):121-124.

JIANG Nan, LI Suichao. Testing method for capacitance current of insufficiently grounded power system to ground[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 121-124.

高压电气状态诊断及试验。E-mail: zqk0791@163.com

张旭俊(1937—),男,教授级高级工程师,主要研究方向:高压电气设备特性分析及故障诊断、电工测量。E-mail: zxj1937@sohu.com

张科杰(1991—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电气设备绝缘与电力系统分析。E-mail: 418634898@qq.com

周求宽(1981—),男,高级工程师,硕士,主要研究方向:

(编辑 蔡静雯)

Formula Erratum for Non-power Frequency Method in Power Industry Standard and New Measuring Method of Capacitive Current

ZHOU Qiukuan¹, ZHANG Xujun¹, ZHANG Kejie², LIU Yan¹, WU Xixiu²

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China;

2. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: The errors in formulas for calculating the capacitance and the capacitive current by the “three non-power frequency current with equal amplitude impedance method” in the power industry standard are introduced and verified, the correct calculation formulas are derived. In addition, the shortcomings of low efficiency, insufficient security and accuracy in measuring capacitive current by injecting non-power frequency current from the potential transformer (PT) open delta side are studied. Then a new capacitive current measuring method of injecting non-power frequency current from the neutral point of a capacitor bank is proposed. With the help of mathematical theory-based derivation and experimental results and field tests, the accuracy of this method is verified while the influence of various factors on the test error with the new method is analyzed by the simulation test results.

Key words: power industry standard; capacitive current measurement; capacitor bank; mathematical theory-based derivation