

10 kV 配电网扫频法测量电容电流有效性分析

陈先飞¹, 何山¹, 王维庆¹, 杨桂兴², 李朋宇¹, 王杰¹

(1. 新疆大学电气工程学院可再生能源发电与并网技术教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049;

2. 国网乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要:针对新疆配电网为减弱单相接地故障时电容电流的危害而装设消弧线圈较多的现状,介绍了基于谐振原理的扫频法测量电容电流,此法只需选定电网一个消弧线圈低压侧进行测量,简单方便。实际测试乌鲁木齐市骑马山变电站10 kV 母线电容电流,并对其不同频率电流信号注入下消弧线圈的电压波形进行仿真,判断出谐振频率,计算脱谐度。比较测试值与实际值,验证了该测量方法的准确性以及在新疆电网中测量的有效性。

关键词:扫频法; 谐振频率; 脱谐度

Abstract: In order to reduce the harms of capacitance current during single-phase grounding fault for low-voltage distribution network in Xinjiang, there are many arc suppression coils installed. So frequency sweeping method for measuring capacitance current based on resonance principle is introduced, which is only required to select a grid arc suppression coil in low-voltage side for measurement, and is simple and convenient. The capacitance current of 10 kV busbar in Qimashan substation of Urumqi city is actually measured, and the simulation for voltage waveform of arc suppression coil when injecting different frequency current signal is carried out to determine the resonant frequency and calculate the out-of-resonance degree. The test value is compared with the actual value, which verifies the accuracy of the proposed measurement method and the validity of the measurement in the Xinjiang power grid.

Key words: frequency sweeping method; resonant frequency; out-of-resonance degree

中图分类号: TM933.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0001-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.001

0 引言

随着新疆经济发展,人口增加,乌鲁木齐市用电量日益增长,电网规模逐渐扩建。然而电力电缆的大面积使用,导致一些中性点非有效接地的中低压配电网中,单相接地故障时,流过故障点的电容电流过大,接地电弧难以自熄,由此产生的弧光过电压,很容易引起相间短路等事故。为了保证接地电弧自行熄灭,需要安装消弧线圈来补偿电容电流^[1]。在《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》中规定:当10 kV和35 kV配电网电容电流分别大于20 A和10 A时,应装设消弧线圈补偿容性电流^[2]。因此在电力系统运行中,是否安装消弧线圈^[3-4]、消弧线圈装设容量大小,由配电网故障时电容电流的大小决定,故测量系统运行时的电容电流值不可或缺。

配电网测量电容电流的方法主要有位移电压最

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金资助项目(2016D01C054)

大法、位移电压曲线法和信号注入法等。前两者测量原理都是利用电网的不平衡电压进行测量,但随着电缆应用日益广泛,电网的平衡度越来越高,其不平衡电压也越来越小,因此这两种传统方法已不能满足测量需求。而信号注入法适用于不对称度小的电网系统,能在线检测电容电流,安全方便,可分为两频法、三频法和扫频法等方式^[5]。文献[6]讨论了在母线TV低压侧两次注入不同频率的电流信号,通过矢量计算列写方程组求解电容电流,虽操作简便,但测量范围较小。文献[7]提出了一种基于中性点直接注入的三频法测量电容电流,测量精度显著提高,但操作复杂。而目前在新疆低电压配电网中,消弧线圈应用广泛,所以选择合适的电容电流测量方法,显得尤为重要。

扫频法是基于谐振原理的一种新的测量电容电流方法,可用于具有多个消弧线圈的配电网中,这时只要选定一个线圈的低压侧向系统注入变频恒流信号,测算出谐振频率即可。无需对消弧线圈的电感

值进行试探性调整,也不需要消弧线圈的任何参数进行测量,而且把测量回路从高压侧转移到低压侧,更加安全可靠,且适应新疆电网环境。

下面基于乌鲁木齐市骑马山变电站的分段断路器断开和闭合两种情况,进行消弧线圈端电压的研究,分别得出其理论计算结果。利用扫频法对其仿真分析,通过对比理论值,证明了该方法测量电容电流的有效性。

1 测量原理

扫频法测量原理是,当电网正常运行时,中性点位移电压较低^[8],此时从消弧线圈的二次绕组注入一个幅值不变的变频电流信号测量系统的容性电流,其原理接线^[9]如图1所示。

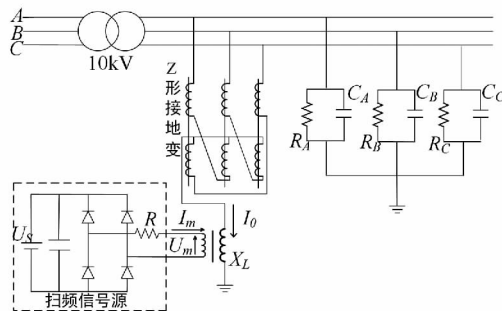


图1 扫频法测量容性电流原理图

图1中虚线框内为扫频信号源,接在消弧线圈的低压侧,用来向系统注入频率可变的电流信号 I_m , I_m 为直流电源 U_s 通过单相全桥电路产生变频信号 I_m , I_m 会在消弧线圈一次侧感生一个零序电流 I_0 。 I_0 会流经线路对地电阻以及对地电容,与大地形成回路。

令系统对地电容为 C 和对地电阻为 R 做出如下变换:

$$\frac{1}{3R} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} \quad (1)$$

$$\frac{1}{3C} = \frac{1}{C_A} + \frac{1}{C_B} + \frac{1}{C_C} \quad (2)$$

则可得到图1原理图的等效简化图,如图2所示。

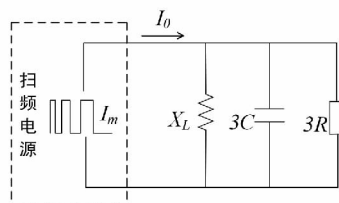


图2 测量电容电流简化等效电路图

由图2知,当扫频电流信号 I_m 的频率 f 变化到 f_0 时,会使对地电容和消弧线圈电感发生谐振,此时 f_0 为谐振频率,可表示为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L \times 3C}} \quad (3)$$

结合电网脱谐度定义:

$$v = 1 - \frac{I_L}{I_C} = 1 - \frac{j\omega_0 L}{-U_\varphi \times 3j\omega C} = 1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2} = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} \quad (4)$$

式中: I_L 为消弧线圈的补偿电流; I_C 为电网对地电容电流; ω 为电源角频率; f 为电源频率50 Hz; ω_0 为电网谐振角频率。

新疆配电网中消弧线圈多采用调档式,线圈电感电流可根据档位直接读取,从而推出电容电流计算公式为

$$I_C = \frac{I_L}{1-v} = \frac{I_L \times f^2}{f^2 - f_0^2} \quad (5)$$

由于系统零序阻抗折算到消弧线圈低压侧一般小于 10Ω ,采用扫频法测量容性电流时,向系统注入的电流信号功率一般小于20 W,不会影响电网正常运行。即使系统发生接地故障,扫频电源相对系统回路处于开路状态,也不会影响消弧线圈的熄弧效果。

由式(5)知,扫频法的关键就是测算出谐振频率 f_0 ,而扫频的过程是在电网正常运行情况下进行的,由图2知,此时系统对地电容与消弧线圈一次侧的感抗并联的总阻抗 Z_1 为

$$Z_1 = \frac{X_C \cdot X_L}{X_C + X_L} = \frac{j\omega L \cdot \frac{1}{3j\omega C}}{j\omega L + \frac{1}{3j\omega C}} = \frac{\frac{L}{3C}}{j(\omega L - \frac{1}{3\omega C})} \quad (6)$$

设 Z_1 与系统对地电阻 R 并联的等值阻抗为 Z_2 ,则有:

$$Z_2 = \frac{R \cdot Z_1}{R + Z_1} = \frac{R}{1 + \frac{R}{Z_1}} \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可以看出,当注入的变频电流信号使系统发生谐振时, Z_1 理论上无限大,而系统的等效阻抗 Z_2 就有最大值,同时 Z_2 上的电压也为最大值,即消弧线圈两端的电压为最大值,此时对应的注入信号的频率即为谐振频率 f_0 。因此只要通过这样的连续测量,比较消弧线圈两端的电压值,就可

以得到系统的谐振频率 f_0 , 进而根据式(5)就可算出系统对地容性电流值。

2 谐振频率范围及误差分析

2.1 谐振频率变化范围的确定

扫频法的扫频范围决定了测量一次容性电流所需要的时间。如果测量范围太小,可能会测量不到谐振频率;而如果测量范围过大,又会导致测量时间变长;因此在使用扫频法测量系统电容电流之前,确定电网的谐振频率范围是很有必要的^[10]。

当系统处于谐振时有:

$$3\omega_0 C = \frac{1}{\omega_0 L} \quad (8)$$

可得到谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{3LC}} \quad (9)$$

当线圈工作在最大过补偿状态时:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{3L_{\min}C}} \quad (10)$$

而在消弧线圈选型时,必可实现当 $L_x \in (L_{\min}, L_{\max})$ 的某一值,系统在工频 50 Hz 下可以实现谐振,即:

$$50 = \frac{1}{2\pi \sqrt{3L_x C}} \quad L_x \in (L_{\min}, L_{\max}) \quad (11)$$

因此可以得到:

$$f_0 \in [50 \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}, 50 \sqrt{\frac{I_{\max}}{I_{\min}}}] \quad (12)$$

式中 I_{\max}/I_{\min} 为消弧线圈补偿深度,是可调的。

当线圈工作在最大欠补偿状态,在工频 50 Hz 实现谐振时,可得到谐振频率范围为

$$f_0 \in [50 \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}}, 50] \quad (13)$$

一般取 $I_{\max}/I_{\min} = 2$, 可确定出谐振频率范围为

$$f_0 \in [35.35, 70.71] \quad (14)$$

2.2 扫频法的误差分析

通过对扫频法测量容性电流进行误差分析^[11-12]的综合处理方法可知,脱谐度的误差为

$$\Delta v = \left| \frac{\partial v}{\partial f_0} \Delta f_0 \right| = \frac{2f_0}{f^2} \Delta f_0 \quad (15)$$

式中 f 为电网工频 50 Hz。因此 Δv 与信号源谐振

频率 f_0 成正比,脱谐度最大出现在 70.71 Hz 处,即:

$$\Delta v|_{f_0=70.71} = \frac{2 \times 70.71}{50^2} \Delta f_0 = 0.05656 \Delta f_0 \quad (16)$$

即对于信号源频率取 $\Delta f_0 = 0.5$ Hz 的分辨率时,系统测量脱谐度的最大误差为 2.83%,这是满足实际测量精度需求的。

3 仿真实例

通过扫频法对乌鲁木齐骑马山变电站进行仿真测试,仿真分为分段断路器断开和闭合两种情况。图1中扫频电源参数为 300 V,频率为 25 ~ 70 Hz, 取样电阻为 1 Ω , 限流电阻 R 为 300 Ω 。对消弧线圈两端电压进行采样,然后通过图3所示电压峰值检测^[13-15]流程测算出端电压幅值,通过比较判断是否达到最大值。



图3 电压峰值检测

3.1 分段断路器断开

图4为谐振附近频率包括谐振频率点测到的消弧线圈端电压波形,消弧线圈 $L = 0.2$ H, 理论计算得到的脱谐度为 -15%。

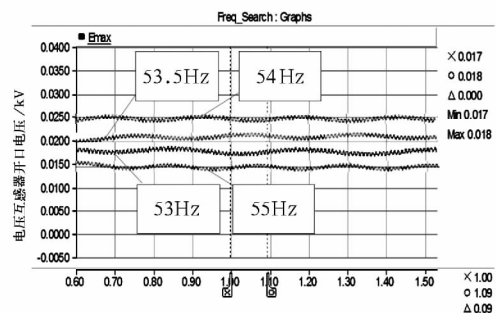


图4 骑马山变电站消弧线圈端电压波形
(母联断路器断开)

由图4可以找出谐振频率在 53.5 Hz 左右,取 $f_0 = 53.5$ Hz, 计算得到脱谐度 ν 为

$$\nu = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} = \left(1 - \frac{53.5^2}{50^2}\right) \times 100\% = -14.49\%$$

考虑到理论计算本身就有一定的误差,测量结果误差还是控制在允许范围内。

3.2 分段断路器闭合

消弧线圈电感值保持不变,测量仿真结果如图

5 所示。

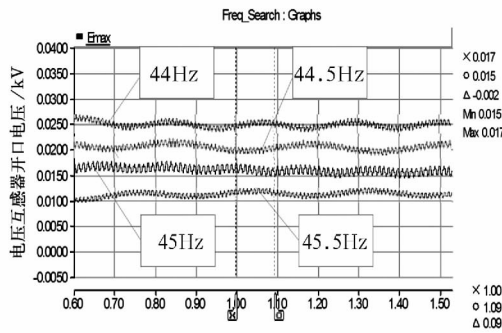


图5 骑马山变电站消弧线圈端电压波形
(母联断路器闭合)

由图5可找出谐振频率 $f_0 = 44.5 \text{ Hz}$, 计算得到脱谐度 ν 为

$$\nu = 1 - \frac{f_0^2}{f^2} = \left(1 - \frac{44.5^2}{50^2}\right) \times 100\% = 20.79\%$$

仿真中, 测量到母联闭合后系统电容电流为 31.12 A , 计算电容为 5.46 uF , 理论计算得到母联断路器闭合后的脱谐度为

$$\nu = 1 - \frac{1}{3\omega^2 LC}$$

$$= 1 - \frac{1}{3 \times 314^2 \times 0.8 \times 5.46 \times 10^{-6}} = 22.6\%$$

理论分析与仿真结果接近, 验证了该方法的有效性。

4 结 论

通过扫频法对乌鲁木齐骑马山站消弧线圈注入不同电压波形进行仿真, 判断出消弧线圈电感值和系统对地电容总值的谐振频率, 计算出脱谐度。这种测量方法不改变系统运行状态, 不依靠电网平衡度, 且在二次回路测量, 简单方便, 安全可靠。通过仿真实验和理论分析比较显示, 该方法在低压配电网中有较高测量精度, 是切实可行的。

参考文献

[1] 肖明, 宋锐, 李绚绚, 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.
[2] 赵晓东, 黄小彬. 自动跟踪补偿消弧系综述[J]. 机电工程, 2013, 30(10): 1293-1296.

[3] Mazon A J, Zamora I, Zabala L, et al. First Resonant Neutral Grounding Implantation in Spanish Distribution System [J]. IEEE Power Tech Proceedings, 2001, 4(2): 6-10.
[4] Zamora I, Mazonai, Sagastabeitia K J, et al. Verifying Resonant Grounding in Distribution Systems [J]. IEEE Computer Applications in Power, 2002, 15(4): 45-50.
[5] 宋晓燕, 孙岩洲, 宋紫嫣, 等. 基于零序PT二次侧注入信号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(19): 134-138.
[6] 程玉凯, 杜文凤. 基于双信号注入法的配电网电容电流测量[J]. 电测与仪表, 2012, 49(557): 21-24.
[7] 赵威, 徐永强, 郭晓霞. 中性点注入三频法电网电容电流测量[J]. 山东工业技术, 2016(14): 271-273.
[8] 严干贵, 李果雪, 张正茂, 等. 基于扫频法配电网电容电流测量装置研制[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(3): 64-68.
[9] 王磊, 严干贵. 基于扫频法电容电流测量装置的研制[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
[10] 张宇, 陈乔夫, 谢冰岩, 等. 扫频检测电网对地电容的改进型方法[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 40-45.
[11] 于月平. 交流采样量测量误差来源及解决办法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 118-121.
[12] 田建设, 韦良, 李天旭. 基于改进信号注入法的配电网电容电流测量[J]. 广州电力, 2008, 21(7): 28-31.
[13] 李凌, 虞礼贞. 电压幅值可达毫伏数量级的小信号峰值检测电路的设计[J]. 南昌大学学报(理科版), 2003, 27(4): 382-386.
[14] 缪希仁. 低压配电系统全范围选择性协调保护技术[J]. 电器与能效管理技术, 2014(9): 19-22.
[15] Yang X M. Comparison of the LS-SVM Based Load Forecasting Models [C]. 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), 2011: 2942-2945.

作者简介:

陈先飞(1994), 硕士研究生, 从事主动配电网控制技术;

何山(1974), 副教授、硕士生导师, 研究方向为可再生能源及其控制技术。

(收稿日期: 2017-03-05)