

配电网电容电流谐振测量方法的应用

陈忠仁¹, 周程宏², 王妍²

(1. 中山职业技术学院, 广东 中山 528404; 2. 河南信阳供电公司, 河南 信阳 464000)

摘要: 谐振法测量电容电流在自动消弧线圈中得到广泛的应用, 但存在测量误差偏大的问题。由此推导出连续无级可调消弧线圈谐振测量法的改进公式; 推导出有级可调消弧线圈谐振法的一般公式。试验和现场运行表明, 基于改进的谐振法所研制的自动消弧线圈电容电流测量精度明显提高, 具有推广应用的价值。

关键词: 消弧线圈; 电容电流; 谐振; 测量方法

Application of resonance measurement method for capacitive current of the distribution network

CHEN Zhong-ren¹, ZHOU Cheng-hong², WANG Yan²

(1. Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China; 2. Xinyang Electric Power Company, Xinyang 464000, China)

Abstract: The resonance method to measure capacitive current is applied to automatic arc-suppression coils widely. But it has a little big measurement error at the same time. The corrective formula of the resonance method is deduced for arc-suppression coils with continuously adjusting inductance, and common formula of resonance method is also deduced for arc-suppression coil with discontinuously adjusting inductance. Experimental result and scene operation show that measurement accuracy of arc-suppression coils developed with the new resonance method is improved obviously and the method is worth using widely.

Key words: arc-suppression coil; capacitive current; resonance; measurement method

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0128-03

0 引言

我国的配电网多采用谐振接地方式, 近年来随着配电网自动化的迅速发展, 自动消弧线圈得到广泛的应用。自动消弧线圈能够精确地补偿电网的电容电流, 在单相接地发生时, 限制残流在一个理想的范围内, 使接地点的电弧易于熄灭, 避免弧光接地过电压的产生, 这对配电网持续可靠的供电大有裨益。精确补偿的前提是电容电流的精确测量, 这和电容电流的测量方法密切相关。谐振法由于具有测量准确, 算法简单等优点, 在自动消弧线圈中应用广泛, 如电感无级可调的调气隙式消弧线圈、调偏磁式消弧线圈^[1,2], 但在实际应用中, 存在测量误差偏大的问题; 对于电感有级可调的消弧线圈, 如调匝式消弧线圈、调容式消弧线圈, 传统上应用两点法测量电容电流^[3,4], 由于忽略了阻尼电阻, 测量误差较大, 为减少误差计, 也可考虑采用谐振法进行电容电流的测量。

但无论是预调式还是随调式消弧线圈, 应用谐振法的前提是电网存在不平衡, 即中性点有不对称电压存在, 故对于高度平衡的电网, 应人为调整接

地变压器的一次绕组的分接开关, 造成三相不平衡, 便于测量。因调谐测量时经过谐振点, 为避免线性谐振过电压的发生, 需要在消弧线圈末端串联电阻进行限压和阻尼。

1 电感无级可调消弧线圈谐振测量方法的改进

中性点经消弧线圈接地电网正常运行时的零序等值电路为一串联谐振电路^[5], 如图 1 所示。 U_m 表示不对称电压, U_0 为中性点位移电压, X_L 表示消弧线圈的感抗, X_C 是线路对地容抗, R 为阻尼电阻, 线路对地的泄露电阻可以忽略。

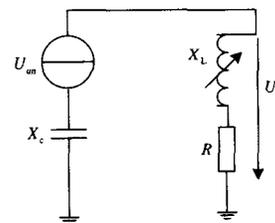


图 1 系统正常时的零序等值电路
Fig.1 Zero-sequence equivalent circuit

一般应用谐振法, 在消弧线圈调谐时不断检测比较 U_0 , 由公式 1,

$$U_0 = \frac{U_{un}}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (1)$$

调感使 $v = 0$, 得到 $U_0 = U_{0max}$, 电网处于串联谐振状态, $X_C = X_L$ 。

为了检验谐振法测量电容电流的精度, 在实验室用调压器、升压变压器和高压电容器建立了等效的 10 kV 模拟电网, 以电容器 (集中参数) 模拟线路分布电容, 接线如图 2 所示。图中 KC 为短接电阻的接触器的常开触点, 所接入的阻尼电阻为 20Ω , 电容电流测量结果如表 1 所示。

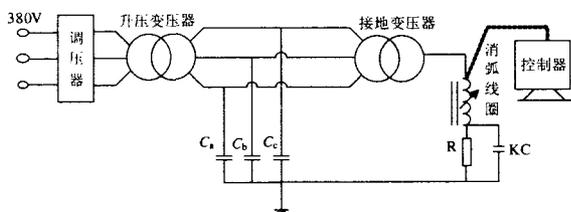


图 2 模拟电网中的电容电流测量试验

Fig.2 Measuring capacitive current test in simulator network

表 1 电容电流测量试验 1

Tab. 1 Measuring capacitive current test

组数	相对地电容/ μF			电容电流/A		测量精度 / (%)
	C_a	C_b	C_c	实际值	测量值	
1	5.64	5.64	5.68	32.0	33.6	5
					34.0	6.3
					33.8	5.6
					45.3	6.6
2	7.51	7.48	7.57	42.5	45.5	7.1
					45.7	7.4
					68.9	8.7
					69.2	9.1
3	11.3	11.1	11.3	63.4	69.6	9.8

由表 1 可知, 消弧线圈的测量误差偏大, 且随着系统电容电流的增加, 测量误差有增大的趋势。对谐振法进行深入研究发现, 串联谐振时电流虽然在谐振点达到最大值, 但位移电压并没有达到最大, 即此时 $U_0 \neq U_{0max}$, 推导如下。

由图 1 知位移电压 U_0 ,

$$U_0 = \frac{U_{un} \sqrt{R^2 + X_L^2}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}} \quad (2)$$

感抗 X_L 可变, 为自变量, 欲使 $U_0 = U_{0max}$, 使其

导数 $\frac{dU_0}{dX_L} = 0$, 可得,

$$X_L^2 - X_C X_L - R^2 = 0 \quad (3)$$

$$X_L = \frac{X_C \pm \sqrt{X_C^2 + 4R^2}}{2}$$

舍去不合实际的负值, 得到

$$X_L = \frac{X_C}{2} + \sqrt{\left(\frac{X_C}{2}\right)^2 + R^2} > X_C \quad (4)$$

由于 R 的存在, 在 U_0 达到 U_{0max} 时, $X_L > X_C$, 两者并不相等。此即为表 1 测量误差偏大的原因所在。由式 (3) 得到修正公式,

$$X_C = X_L - \frac{R^2}{X_L} \quad (5)$$

修正前后所测得的系统容抗的绝对误差为,

$$\nabla X_C = X_L - X_C = \frac{R^2}{X_L} \quad (6)$$

由式 (6) 可知, 系统电容电流增加, 对应的补偿电流也随之增加, 则 X 减小, 而 R 为一定值, 故 ∇X_C 增加, 由此可解释表 1 测量误差随系统电容电流增大而增大的原因。

引入修正公式 (5), 修改消弧装置的软件, 重新在实验室的模拟电网进行测量试验, 电容电流测量结果如表 2 所示。

表 2 电容电流测量试验 2

Tab.2 The second measuring capacitive current test

组数	相对地电容/ μF			电容电流/A		测量精度 / (%)
	C_a	C_b	C_c	实际值	测量值	
1	5.64	5.64	5.68	32.0	31.5	1.7
					32.3	0.9
					32.5	1.6
					41.6	2.1
2	7.51	7.48	7.57	42.5	42.8	0.7
					43.3	1.9
					63.9	0.8
					64.7	2.0
3	11.3	11.1	11.3	63.4	65.1	2.7

对比表 1、表 2 可知, 采用修正公式后, 电容电流的测量误差明显减少, 且不再随系统电容电流增大而增大。

2 电感有级可调消弧线圈谐振测量方法的实现

一般来说, 电感连续可调的消弧线圈应用谐振

法可直接找到谐振点，而调匝式或者调容式消弧线圈由于电感不连续，无法直接找出谐振点，但可以找出在谐振点左右的三个点，由此三点，拟合出曲线方程，再求出该曲线方程的极大值点（谐振点）的感抗值，在此点，系统容抗等于感抗，于是计算出系统电容电流。

由脱谐度的公式，

$$v = \frac{X_L - X_C}{X_L} \quad (7)$$

当 $X_L = X_C$ 时， $v = 0$ ，电网处于谐振状态，中性点电流 $I_0 = I_{0max}$ ；而当 $X_L > X_C$ 或 $X_L < X_C$ 时， $v^2 > 0$ ， $I_0 < I_{0max}$ 。 X_L 偏离 X_C 愈远， I_0 愈小，在 X_C 两边 I_0 呈现出急剧下降的趋势。在 $X_{Lmin} \leq X_L \leq X_{Lmax}$ 范围内， I_0 只有一个顶点，如图 3 所。

I_0 和 X_L 的函数关系可用抛物线近似表示，

$$I_0 = f(X_L) = aX_L^2 + bX_L + c \quad (8)$$

消弧线圈在各挡的感抗 X_L 已知， I_0 可以测得。将谐振点左右 3 挡的 X_L 和测得的 I_0 代入式 (7)，得到 3 个方程，用行列式计算，

$$|D| = \begin{vmatrix} X_{L1}^2 & X_{L1} & 1 \\ X_{L2}^2 & X_{L2} & 1 \\ X_{L3}^2 & X_{L3} & 1 \end{vmatrix} \quad (9)$$

$$|D1| = \begin{vmatrix} I_{01} & X_{L1} & 1 \\ I_{02} & X_{L2} & 1 \\ I_{03} & X_{L3} & 1 \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$|D2| = \begin{vmatrix} X_{L1}^2 & I_{01} & 1 \\ X_{L2}^2 & I_{02} & 1 \\ X_{L3}^2 & I_{03} & 1 \end{vmatrix} \quad (11)$$

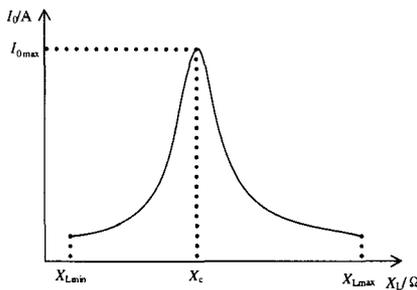


图 3 I_0 和 X_L 函数关系

Fig.3 I_0 and X_L function relation

$$a = \frac{|D1|}{|D|} \quad (12)$$

$$b = \frac{|D2|}{|D|} \quad (13)$$

抛物线的顶点，

$$X_L = -\frac{b}{2a} \quad (14)$$

为系统的谐振点， $X_C = X_L$ ，由此求出电容电流 I_C 。

在实际的调谐测量中，为消除 I_0 幅值过小而带来的测量误差，可以 U_0 的检测取代 I_0 的检测，将公式 (8) ~ (11) 中的 I_0 皆替换为 U_0 ，求得的容抗再代入式 (5) 修正即可。

上述的调谐方法即为谐振法结合曲线拟合法；消弧线圈在谐振点附近调谐，为避免产生线性谐振过电压，需要串接电阻进行限压和阻尼。

应用此法研制的调匝式消弧线圈在实验室搭建的模拟电网进行测量试验，电容电流测量结果如表 3 所示。可见测量精度优于 3%，完全可以满足工程需要。

表 3 电容电流测量试验 3

Tab.3 The third measuring capacitive current test						
组数	相对地电容/ μF			电容电流/A		测量精度 / (%)
	C_a	C_b	C_c	实际值	测量值	
1	5.64	5.64	5.68	32.0	31.8	2.2
					32.2	0.6
					43.7	2.8
2	7.51	7.48	7.57	42.5	41.9	1.4
					41.6	2.1
					62.7	1.1
3	11.3	11.1	11.3	63.4	65.2	2.8
					65.1	2.7

3 结论

串联谐振为电流谐振，由于阻尼电阻的存在，使得电感连续可调消弧线圈在谐振点处的位移电压并非为最大，采用修正公式后，电容电流的测量精度得到了提高，这在实验室搭建的模拟电网电容电流测量试验和现场运行中都得到了验证。采用新的测量方法的调气隙式消弧线圈已在现场运行一百多套，用户普遍反应装置测量准确，状态良好；采用谐振法结合曲线拟合法的调匝式消弧线圈在现场运行有十余套，和原有两点法比较测量精度提高不少，值得进一步推广应用。

(下转第 134 页 continued on page 134)

根据上述讨论, 对交流操作方式的五种改进方案从不同角度作了简略比较, 结果见表 1。

表 1 改进方案的比较结果

Tab.1 Comparing result of improvement plans

序号	改进方案	可靠性	后续供电时间	成本
1	电容器储能	低	无	低
2	永磁操作机构	高	无	较低
3	UPS 电源	高	短	较高
4	壁挂式电源	高	长	最高
5	互补供电	较高	根据实际情况	较低

4 结束语

上述五种改进方案都有各自的优缺点, 我们可以根据现场实际情况进行选择应用, 对于成本要求苛刻的不太重要场合, 可选用电容储能方案; 对于没有综合自动化系统的可靠性要求较高的场合, 可选用永磁操作机构方案; 对于配备综合自动化系统的场合可选用增设 UPS 方案或增设壁挂式电源方案; 对于双电源供电系统, 可根据实际情况选用互补供电和其他方案相结合的改进方案。

(上接第 130 页 continued from page 130)

参考文献

[1] 李景禄, 林玉怀, 陈忠仁, 等. ZXB 系列自动跟踪补偿消弧装置[J]. 中国电力, 1998, 31 (8): 42-44.
LI Jing-lu, LIN Yu-huai, CHEN Zhong-ren, et al. ZXB Series Arc Suppression Device with Automatic Following and Compensation[J]. Electric Power, 1998, 31 (8): 42-44.

[2] 蔡旭, 刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (15): 53-56.
CAI Xu, LIU Jie. Dynamic Resonance Adjusting Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (15): 53-56.

[3] 裴善鹏, 连鸿波, 李万彬, 等. 快速调匝式消弧线圈及接地选线一体化装置研究[J]. 现代电力, 2006, 23 (1): 20-24.
PEI Shan-peng, LIAN Hong-bo, LI Wan-bin, et al. Research on the Incorporate Device of Quick Multi-tap Arc-suppression Coil and Detection of Earth Fault Feeder[J]. Modern Electric Power, 2006, 23 (1): 20-24.

[4] 徐玉琴, 陈志业, 李鹏. 晶闸管投切电容式消弧线圈

参考文献

[1] 高友权. 配电系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
GAO You-quan. Relay Protection of Power Distribution System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

[2] 刘建戈. 小型变电所断路器操作电源的供电方式[J]. 农村电气化, 2005, (4): 21-22.
LIU Jian-ge. Power Supply Mode of Breaker Operation in Mini-substation[J]. Rural Electrification, 2005, (4): 21-22.

收稿日期: 2009-05-10

作者简介:

张延辉 (1973-), 男, 硕士, 从事电力系统配电检修、运行的技术管理工作; E-mail: zh0899@sina.com;

马运亮 (1980-), 男, 本科, 从事电力系统微机继电保护产品的设计开发工作;

吴战伟 (1982-), 男, 本科, 从事电力系统微机继电保护产品的设计开发工作。

的设计与应用研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (13): 38-41.

XU Yu-qin, CHEN Zhi-ye, LI Peng. Design and Application Research on Arc Suppression Coil with Thyristor Series Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (13): 38-41.

[5] 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): 85-87.

CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong. Measuring and Tracing of Automatic Arc-suppression Devices in Distribution Networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (10): 85-87.

收稿日期: 2008-12-09; 修回日期: 2009-05-03

作者简介:

陈忠仁 (1971-), 男, 副教授, 主要从事消弧线圈和接地选线技术的研究; E-mail: chenzh0520@163.com

周程宏 (1973-), 男, 助理工程师, 主要从事变电设备检修与维护工作;

王妍 (1979-), 女, 助理工程师, 主要从事电力市场营销工作