

文章编号:1671-251X(2015)04-0090-04

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.04.023

侯文宝,李德路,罗艳芳,等.煤矿电网三相五柱式消弧线圈改进型调谐方法[J].工矿自动化,2015,41(4):90-93.

煤矿电网三相五柱式消弧线圈改进型调谐方法

侯文宝^{1,2}, 李德路¹, 罗艳芳³, 李波⁴

(1. 江苏建筑职业技术学院 建筑设备与市政工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 江苏省建筑节能工程技术研究中心, 江苏 徐州 221116;

3. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008;

4. 天地(常州)自动化股份有限公司, 江苏 常州 213015)

摘要:针对煤矿电网中三相五柱式消弧线圈采用谐振法调谐时存在谐振点难以确定导致电容电流测量存在误差的问题,提出了一种改进型调谐方法。根据调谐过程中阻尼率不变、脱谐度改变的特点,以总对地电导为导纳三角形固定边,可变总对地电纳和总对地导纳作为导纳三角形可变边,利用导纳角的变化计算电容电流。仿真与实验结果表明,改进型调谐方法较谐振法测量精度更高,且测量误差随着阻尼率的增大而减小。

关键词:煤矿电网;三相五柱式消弧线圈;谐振法;电容电流;阻尼率;导纳角

中图分类号:TD611

文献标志码:A

网络出版时间:2015-03-31 08:43

网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150331.0843.023.html>

Improved tuning method of arc suppression coil with three phases and five columns in coal mine power grid

HOU Wenbao^{1,2}, LI Delu¹, LUO Yanfang³, LI Bo⁴

(1. Construction Equipment and Municipal Engineering Institute, Jiangsu Jianzhu Institute, Xuzhou 221116, China; 2. Jiangsu Building Energy Efficiency Engineering Research Center,

Xuzhou 221116, China; 3. School of Information and Electrical Engineering,

China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

4. Tiandi (Changzhou) Automation Co., Ltd., Changzhou 213015, China)

Abstract: For problem that resonance point is difficult to determined which lead to measuring error of capacitive current when arc suppression coil with three phases and five columns in coal mine power grid is tuned by use of resonance method, an improved tuning method was proposed. Admittance triangle composed by fixed side of edge-to-ground conductance and variable sides of edge-to-ground susceptance and admittance according to characteristics of damping ratio unchanged and out-of-resonance degree changed in tuning process. Capacitance current is calculated according to change of admittance angle. The simulation and experimental results show that the improved tuning method has higher measuring accuracy than the resonance method, and measuring error decreases with increase of damping ratio.

Key words: coal mine power grid; arc suppression coil with three phases and five columns; resonance method; capacitive current; damping ratio; admittance angle

收稿日期:2014-08-18;修回日期:2015-01-30;责任编辑:盛男。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107143);江苏建筑职业技术学院校级课题资助项目(JYA14-16)。

作者简介:侯文宝(1982—),男,江苏徐州人,讲师,硕士,研究方向为电力系统及其自动化,E-mail:h_wb@qq.com。

0 引言

中国煤矿电网中低压配电系统广泛采用小电流接地系统^[1-3]。小电流接地系统包括中性点不接地系统、中性点经高阻接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。当小电流接地系统发生单相接地故障时,流过接地点的电流主要是电容电流,由于线电压对称不变,可以继续对负荷供电,故供电可靠性高。但是长时间带故障运行,接地点持续流过较大电流,容易烧毁线路,造成相间短路,扩大事故范围,对煤矿设备与人身安全带来严重威胁。因此,《煤矿安全规程》规定电容电流超过 20 A 需要装设消弧线圈^[4-6]。

为保证生产与人身安全,煤矿电网多采用中性点经消弧线圈接地系统。消弧线圈可对接地点的电容电流进行补偿,降低接地点电流。调节消弧线圈到合理的状态需要准确测量配电系统的电容电流。目前电容电流的测量方法有偏置元件法^[7]、信号注入法^[8-9]、谐振法^[10-11]等。偏置元件法测量速度慢,需要在一次侧增加偏置设备,测量过程中造成配电系统的三相不平衡度加大,且该方法不能实现在线测量与调谐。信号注入法易受系统的谐波干扰,且注入的信号功率较小,传输过程中功率损耗大,测量偏差较大;其次,为了避开工频干扰,注入信号的频率并非工频,故折算到工频时也存在误差。谐振法适用于连续无级调节的消弧线圈,可实现在线测量与调谐,但为了降低正常运行时配电系统的零序电压,往往通过提高系统的阻尼率来实现,而当阻尼率较大时,谐振点附近零序电压随脱谐度变化的变化率小,谐振点难以准确确定,容易产生测量误差。

三相五柱式消弧线圈占地面积小,安装、调节方便,在煤矿电网得到广泛应用。当前三相五柱式消弧线圈采用谐振法进行调谐,然而因谐振点难以准确确定,故电容电流的测量不精确,另外在消弧线圈容量不足的情况下,不存在谐振点,无法测量电容电流。因此本文对其调谐原理进行了改进,根据调谐过程中线路的三相对地电导和消弧线圈的阻尼电阻不变,即总对地电导不变的特性,提出利用总对地电导为导纳三角形固定边,以总对地电纳和总对地导纳为导纳三角形可变边,利用导纳角的变化求解配电系统的电容电流,调谐过程简单,测量结果更准确。

1 三相五柱式消弧线圈接地系统等效模型

三相五柱式消弧线圈采用二次调感式结构,其二次侧部分由补偿电抗器与阻尼电阻并联连接组

成。对于三相五柱式消弧线圈接地系统,利用戴维南定理,其等效电路如图 1 所示。其中, $\dot{U}_0$ 为系统的零序电压; $\dot{U}_{bd}$ 为系统的不平衡电压,即中性点开路电压; C 为线路的等效总对地电容; G_C 为线路的等效总对地电导; G_L 为消弧线圈的并联阻尼电阻的等效电导; L 为消弧线圈的等效电感。

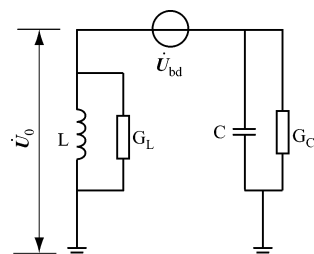


图 1 三相五柱式消弧线圈接地系统等效电路

根据图 1,由串联分压定律可得

$$\dot{U}_0 = \frac{Y_C}{Y_\Sigma} \dot{U}_{bd} = \frac{Y_C}{Y_C + Y_L} \dot{U}_{bd} = \frac{\omega C \dot{U}_{bd}}{(\omega C - 1/\omega L) - j(G_L + G_C)} = \frac{\dot{U}_{bd}}{\nu - jd} \exp\left[j\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)\right] \quad (1)$$

式中: Y_C 为线路对地电导和对地电容的等效导纳; Y_L 为消弧线圈的阻尼电阻和电感的等效导纳; Y_Σ 为系统总的等效导纳; ω 为系统的角频率; ν 为系统的脱谐度, $\nu = (\omega C - 1/\omega L)/\omega C$; d 为系统的阻尼率, $d = (G_L + G_C)/\omega C$; φ 为系统导纳角。

当线路对地参数不发生改变时,调谐过程中只调节消弧线圈的电感,故只有 ν 改变, d 保持不变。当 $\nu = 0$, 即 $\omega C = 1/\omega L$ 时,系统的零序电压达到最大值,此时系统处于谐振状态。三相五柱式消弧线圈调谐时,通过连续调节电感来找到谐振点。

由式(1)可知,当消弧线圈调节到谐振点附近, $\nu \approx 0$, 即 $\omega C \approx 1/\omega L$, 此时 $\nu \ll d$, $\dot{U}_0 \approx \frac{\dot{U}_{bd}}{-jd}$, 故谐振点附近调节消弧线圈电感时,系统的零序电压大小基本不变,谐振点不易精确确定。因此,使用谐振法无法准确测量系统的电容电流。然而 $\tan \varphi = \frac{\omega C - 1/\omega L}{G_L + G_C} = \frac{\nu}{d}$, 导纳角正切值与脱谐度呈线性关系,故在谐振点附近时,导纳角变化率比零序电压变化率大,且导纳角与零序电压的相位相关,可据此计算系统的电容电流。

2 改进型调谐原理

消弧线圈的电感 L 减小时,脱谐度 ν 减小,系统

的电纳减小,零序电压相位逆时针方向变化。欠补偿时,等效电路为阻容性,系统的导纳角 φ 为正;过补偿时,等效电路为阻感性,系统的导纳角 φ 为负。无论调谐过程中系统导纳角 φ 如何变化,系统的阻尼率一直不变,即系统的等效电导不变,变化的只是系统的脱谐度,即系统的电纳。

假定系统的对地参数不变,消弧线圈调谐前后的电感分别为 L_1, L_2 。调谐时系统的总对地电导 $G=G_L+G_C$ 不变,因此以其作为导纳三角形固定边,可得如图 2 所示的导纳三角形。 Y_1, Y_2 分别为消弧线圈电感为 L_1, L_2 时对应的系统总导纳; B_1, B_2 分别为消弧线圈电感为 L_1, L_2 时对应的系统总电纳; φ_1, φ_2 分别为消弧线圈电感为 L_1, L_2 时对应的系统导纳角; $\theta=\varphi_1-\varphi_2$ 。

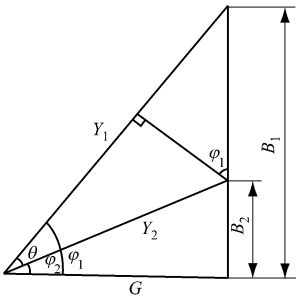


图 2 等效导纳三角形

根据图 2 可得

$$\tan \varphi_1 = \frac{Y_1 - Y_2 \cos \theta}{Y_2 \sin \theta} = \frac{U_{02} - U_{01} \cos \theta}{U_{01} \sin \theta} \tag{2}$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{B_1}{G} = \frac{B_C - B_{L1}}{G} \tag{3}$$

$$\tan \varphi_2 = \tan(\varphi_1 - \theta) = \frac{B_2}{G} = \frac{B_C - B_{L2}}{G} = \frac{\tan \varphi_1 - \tan \theta}{1 + \tan \varphi_1 \tan \theta} \tag{4}$$

式中: U_{01}, U_{02} 分别为消弧线圈电感为 L_1, L_2 时对应的零序电压幅值; $B_C = \omega C$; $B_{L1} = 1/\omega L_1$; $B_{L2} = 1/\omega L_2$ 。

由式(2)一式(4)推导可得

$$B_C = \frac{(B_{L1} - B_{L2})(\tan \varphi_1 - \tan \theta)}{\tan \theta(1 + \tan^2 \varphi_1)} + B_{L1} \tag{5}$$

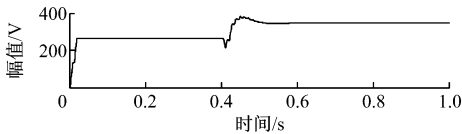
调谐时电感 L_1, L_2 已知, B_{L1}, B_{L2} 可通过电感计算得到,因此,只需 2 次测量零序电压的幅值 U_{01} 和 U_{02} 及其相位 ϕ_{01} 和 ϕ_{02} , 计算得到 φ_1 和 $\theta(\theta=\phi_{02}-\phi_{01})$, 就可准确求得 B_C , 再根据 $B_C=\omega C$ 求出总对地电容,得到系统的电容电流,该方法有效避免了谐振法寻找谐振点不精确的问题。为提高测量精度,可多次测量取平均值。

在利用改进型调谐方法测量电容电流时,为避免可控硅不完全导通产生的谐波干扰,调谐时可控硅可控硅全导通或不导通,故可控制投入 1 组电抗器、2 组电抗器,以及不投入电抗器,该方式兼顾了调感范围和测量精度,且易于实现,不需反复测量寻找谐振点,测量次数少、速度快。

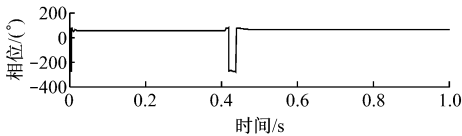
3 仿真计算

利用 Matlab 搭建 10 kV 配电网仿真模型,并采用集总参数线路模型。仿真参数设置:配电系统三相总对地电容为 $33.5 \mu\text{F}$;系统三相总对地电阻为 $5\,000 \Omega$;系统的自然阻尼率不大于 6%。

初始状态下,设定脱谐度为 20%,在 0.4 s 时调节消弧线圈电感,保持阻尼电阻不变,调节脱谐度至 5%。零序电压幅值和相位仿真曲线如图 3 所示,可知欠补偿状态时,随着脱谐度减小,零序电压增大,相位逆时针方向变化。



(a) 零序电压幅值



(b) 零序电压相位

图 3 零序电压幅值和相位仿真曲线

调节消弧线圈电感时,需等待 1~2 个工频周期,稳定后再进行测量,以使测量结果更加可靠。阻尼电阻分别为 $600, 300 \Omega$ 时的仿真结果见表 1、表 2。

表 1 阻尼电阻为 600Ω 时的仿真结果

U_{01}/V	U_{02}/V	$\phi_{01}/(^{\circ})$	$\phi_{02}/(^{\circ})$	C		
				计算值/ μF	理论值/ μF	误差/%
290.25	331.27	41.54	43.16	33.47	33.5	0.09
273.37	301.14	40.28	41.74	33.48	33.5	0.06
257.33	281.41	39.57	40.84	33.48	33.5	0.06

由表 1、表 2 可知,利用改进型调谐方法计算电容电流准确,测量误差较小,且随着阻尼电阻的减小,即系统阻尼率增加,测量误差更小,有效避免了谐振法随系统阻尼率提高而测量不准的情况。

根据测量的电容电流调节消弧线圈到全补偿状态,在 0.1 s 系统发生单相接地故障时,测量接地点

表2 阻尼电阻为300 Ω时的仿真结果						
U_{01}/V	U_{02}/V	$\phi_{01}/(^{\circ})$	$\phi_{02}/(^{\circ})$	C		
				计算值/	理论值/	误差/%
				μF	μF	
271.93	308.97	49.09	51.85	33.48	33.5	0.06
256.39	282.44	47.95	49.87	33.49	33.5	0.03
243.80	261.84	45.37	48.26	33.49	33.5	0.03

的残流波形如图4所示。可看出根据改进型调谐方法设置消弧线圈电感量,已将残流降到了5 A,达到了良好的补偿效果。

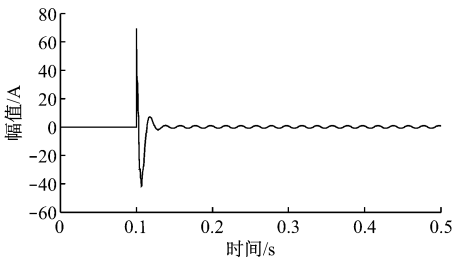


图4 接地点残流波形

4 实验测量

搭建660 V低压实验平台进行验证,实验平台连接关系如图5所示。380 V三相电压经隔离变压器后通过升压变压器变换成660 V,三相五柱式消弧线圈和线路模型接于660 V侧,且线路模型接入电动机负载。2组电抗器并联接在三相五柱式消弧线圈的零序回路上,通过控制器控制可控硅的导通角来连续调节消弧线圈的电感。

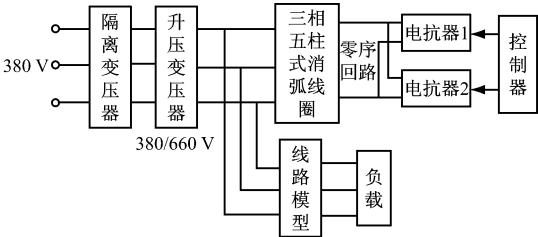


图5 实验平台连接关系

线路模型采用集总参数模型,三相均采用电容器并联电阻的形式,总电容为239 μF,消弧线圈的最大补偿电流为40 A,变比为380/100,二次侧并联阻尼电阻为1 Ω。实验时通过分组投切电容器的形式来模拟系统的电容电流变化情况,设置系统的阻尼率为15%。

分别采用谐振法和改进型调谐方法进行反复测量,结果见表3。可看出改进型调谐方法的测量精度比谐振法高。

表3 谐振法与改进型调谐方法测量结果比较			
谐振法		改进型调谐方法	
C/ μF	误差/%	C/ μF	误差/%
228.7	4.31	236.2	1.17
251.1	5.06	237.3	0.71
226.1	5.40	233.9	2.13

5 结语

针对煤矿电网三相五柱式消弧线圈的改进型调谐方法不需反复测量寻找谐振点,测量次数大幅减少,测量速度更快;克服了阻尼率较大、脱谐度接近于零时,改变脱谐度后零序电压变化量不明显的问题,测算精度得到提高;解决了因消弧线圈容量不足,利用谐振法无法寻找谐振点,导致无法测量电容电流的问题。该方法可更好地发挥消弧线圈的补偿效果,为煤矿供电安全提供可靠保障。

参考文献:

[1] 王崇林. 中性点接地方式与消弧线圈[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1999.

[2] 李辉,唐轶,孙常青. 谐振接地系统单相接地故障仿真分析[J]. 工矿自动化,2012,38(1):47-51.

[3] 牟龙华,周伟,岳清玉. 消弧线圈并串电阻接地式与接地保护原理研究[J]. 煤炭学报,2009,34(8):1138-1143.

[4] 纪飞峰,王崇林,牟龙华,等. 基于对称法与相位法的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化,2004,28(22):73-77.

[5] 陈维江,蔡国雄,蔡雅萍,等. 10 kV 配电网中性点经消弧线圈并联电阻接地方式[J]. 电网技术,2004,28(24):56-60.

[6] 朱帅,李晓波,程玉凯,等. 一种消弧线圈调谐新方法的研究[J]. 电测与仪表,2012,49(8):10-13.

[7] 李晓波,苗晓鹏,桑振华,等. 基于偏置阻抗法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(4):22-26.

[8] 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.

[9] 丛伟,李盼盼,李洪涛,等. 基于恒频注入信号的消弧线圈自动跟踪补偿技术研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(19):185-189.

[10] 桑振华,苗晓鹏,李晓波,等. 基于调相法的消弧线圈自动跟踪补偿的测量方法[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(10):104-107.

[11] 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.