

偏磁式消弧线圈自动调谐新原理及应用

贾雅君, 蔡旭

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

摘要: 通过对偏磁式消弧线圈原有控制方法的分析, 提出了新的电网电容电流自动跟踪测量方法, 即通过测量中性点电流及其相角差来检测, 进而提出了消弧线圈的双机控制原理, 并对该方法进行了仿真分析。研制出基于上述原理的调谐控制器。给出了控制器的软硬件框图, 并在低压模拟电网上进行了实验。实验结果表明该方法电容电流检测误差小于 2%, 动态过程的时间小于 2 个周期。该方法显著提高了电容电流的计算精度, 并将进一步在实践中应用。

关键词: 消弧线圈; 偏磁; 调谐; 电容电流

中图分类号: TM475 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0001-05

0 引言

随着经济的发展, 消弧线圈自动跟踪补偿装置得到了越来越广泛的应用。消弧线圈自动跟踪补偿装置除了具有调节方便, 无须停电, 精度和动作成功率高, 能限制弧光接地过电压及谐振过电压等优点外, 能自动跟踪系统电容电流的变化是其重要特点^[1]。

实现消弧线圈自动跟踪调节的关键在于在系统正常运行时, 准确快速实时地测量出系统对地电容, 据此计算出单相接地电容电流^[2]。针对此问题本文提出了新的电容电流的精确计算方法。

1 原偏磁式消弧线圈及其控制

1.1 偏磁式消弧线圈

偏磁式消弧线圈^[3]是一种随动式消弧线圈, 它采用全静态结构, 具有可靠性高、调节速度快、调节范围宽且可在承受高电压时调节电感值的特点, 是一种很有发展前途的消弧电抗器。它的工作原理是通过改变励磁绕组中的直流励磁电流, 使铁心的磁导率发生改变, 从而实现工作绕组电感 L 的连续调节。无论是在电网发生故障时, 还是在电网正常运行时, 偏磁式消弧线圈的电感值均唯一由励磁绕组中的控制电流决定, 由此可见, 我们只要精确地提供励磁绕组中的控制电流就可以准确地调整消弧线圈的电感。

1.2 自动调谐原理

偏磁式消弧线圈实施动态消弧补偿的过程是: 在电网正常运行状态下, 跟踪检测电网电容电流, 消

弧线圈的控制电流维持一很小值或为 0, 消弧线圈远离谐振点。电网发生单相接地后, 快速施加励磁, 调谐消弧线圈实现全补偿。接地消除后, 回到跟踪检测状态。

原装置电容电流的检测是采用信息综合方法^[4]来实现的, 其核心思想是依据中性点电压的不同采用不同的方法。在高度平衡的电网中电容电流的检测采取类似于谐振法的原理。在有一定不平衡电网中电容电流的检测, 采取三点法, 即利用三点电压值确定电网阻尼率及单相接地电容电流。采用信息综合方法检测电网电容电流, 被测量主要是中性点位移电压 U_N , 原方法是利用电压互感器测量 U_N , 经信号调理电路、A/D 转换电路和光电隔离后, 进入单片机系统。

该方法实现简单, 但是对中性点电压幅值有一定的要求, 如果该值太小, 控制精度就不能保证。原因是中性点电压太小时, 电压互感器偏离额定状态, 使得传感信号误差较大, 尤其是相位误差更大。此外由于互感器的非理想性, 使得变比和相位都存在较大的误差, 需要采用硬件或软件的方法补偿, 从而增加了系统的复杂程度, 由此我们不难看出电压互感器的测量结果将直接影响电容电流的测量精度, 需要一种新的测量手段来提高。

2 偏磁式消弧线圈控制新原理

针对上述问题, 本文采用霍尔电流传感器来检测消弧线圈调节前后中性点的电流信号, 在保证中性点电流精确测量的条件下, 提出了利用消弧线圈的中性点电流计算电网电容电流的新原理, 原理如下:

基金项目: 国家重点新产品计划项目 (编号: 2002FD620004)

2.1 单机运行控制原理

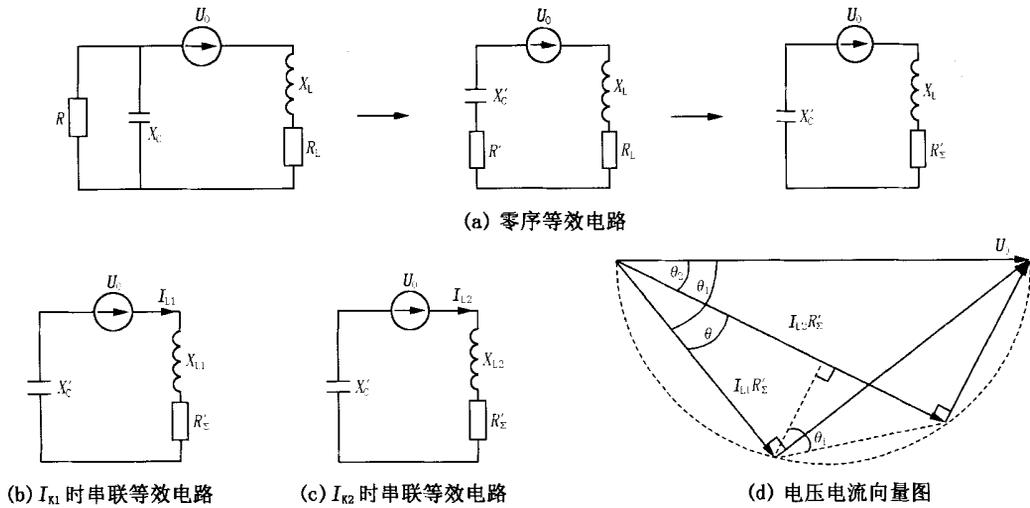


图 1 补偿电网常态下零序等效电路及电压电流向量图

Fig. 1 Zero-sequence equivalent circuit of compensation network and its current voltage vectors

图 1(a) 为偏磁式消弧线圈在补偿电网常态下的零序等效电路, U_0 为电网自然不平衡电压, 反映消弧线圈未接入前的情况。(b)、(c) 分别为消弧线圈工作在控制电流为 I_{K1} 和 I_{K2} 时的等效电路。 X_{L1} 、 X_{L2} 分别为消弧线圈工作在控制电流为 I_{K1} 和 I_{K2} 时对应的等效消弧线圈部分的感抗(可通过消弧线圈的控制特性曲线准确获得)。 R_L 代表它的有功损耗的等值电阻, X_C 和 R 为电网对地等值容抗和等值泄漏电阻。

$$\text{令: } k = \frac{R^2}{R^2 + X_C^2}$$

$$\text{则: } X_C = kX_C \quad R = (1 - k)R$$

$$\text{其中: } R_{\Sigma} = R + R_L$$

图 1(b)、(c) 中, 取 U_0 为参考电压, 得到下列方程:

$$X_{L1} - X_C = R_{\Sigma} \tan \theta_1 \quad (1)$$

$$X_{L2} - X_C = R_{\Sigma} \tan \theta_2 \quad (2)$$

θ_1 、 θ_2 分别为中性点电流 I_{L1} 、 I_{L2} 相对于 U_0 的相角, 求解(1)、(2)两式得:

$$X_C = X_{L1} - \frac{X_{L1} - X_{L2}}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \tan \theta_1 \quad (3)$$

因 U_0 不可测量, 所以 θ_1 、 θ_2 不可测定。但是 $\theta_1 - \theta_2$ 可以精确测定, 下面分析如何用 $\theta_1 - \theta_2$ 角计算 $\tan \theta_1$ 和 $\tan \theta_2$ 。图 1(d) 为 (b)、(c) 电路的电压电流向量图, 由图中可以得到:

$$\tan \theta_1 = \frac{I_{L2} R_{\Sigma} \sin \theta_2 - I_{L1} R_{\Sigma} \cos \theta_2}{I_{L1} R_{\Sigma} \sin \theta_2} = \frac{I_{L2}}{I_{L1}} \frac{1}{\sin \theta_2} - \frac{1}{\tan \theta_2} \quad (4)$$

$$\tan \theta_2 = \tan(\theta_1 - \theta) = \frac{\tan \theta_1 - \tan \theta}{1 + \tan \theta_1 \tan \theta} \quad (5)$$

可见只要精确地测定改变控制电流前后中性点电流的幅值及两者的相位差, 用式(4)、(5)代入(3)即可计算出电网对地总容抗 X_C 。

又由于 R 远远大于 X_C , 所以有:

$$X_C \approx X_C = \frac{X_{L2} \tan \theta_1 - X_{L1} \tan \theta_2}{\tan \theta_1 - \tan \theta_2} \quad (6)$$

即可计算出电网对地总容抗 X_C 。从而计算出电网电容电流 I_C , 按照预定的残流要求和补偿状态调节消弧线圈控制电流。

2.2 多机并运控制原理

图 2(a) 为 #1 补偿电网和 #2 补偿电网并网后

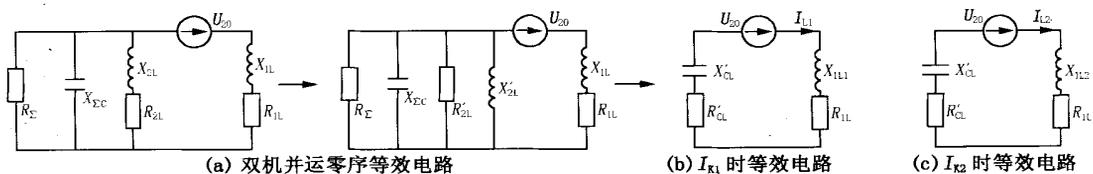


图 2 常态下两补偿电网并网后零序等效电路

Fig. 2 Zero-sequence equivalent circuit of two linked compensation networks

的零序等效电路,其中 R_{1L} 、 R_{2L} 分别为 # 1、# 2 消弧线圈等效电阻, X_{1L} 、 X_{2L} 分别为 # 1、# 2 消弧线圈等效电抗, R_{Σ} 为 # 1、# 2 电网并网后的总对地电阻, $x_{\Sigma C}$ 为 # 1、# 2 电网并网后的总对地容抗, U_{20} 为并网后 # 1 消弧线圈不投入,只有 # 2 消弧线圈投入时电网的中性点位移电压。图 2(b)、2(c) 为固定 # 2 消弧线圈不变,改变 # 1 消弧线圈控制电流,分别处于 I_{K1} 、 I_{K2} 时的简等值电路。此时 $R_{1L} + R_{2L}$ 不变。精确测定 # 1 消弧线圈改变控制电流后所得 I_{L1} 、 I_{L2} 电流,同 3.1 节推导过程,同理可得:

$$X_{CL} \quad X_{CL} = X_{1L1} - \frac{X_{1L1} - X_{1L2}}{\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2} \tan \alpha_1 \quad (7)$$

式中: $\tan \alpha_1 = \frac{I_{L2}}{I_{L1}} \frac{1}{\sin \alpha} - \frac{1}{\tan \alpha}$,

$$\tan \alpha_2 = \tan(\alpha - \alpha_1) = \frac{\tan \alpha_1 - \tan \alpha}{1 + \tan \alpha_1 \tan \alpha}$$

因为: $\frac{1}{X_{\Sigma C}} = \frac{1}{X_{2L}} + \frac{1}{X_{CL}}$,

而且: $I_{2L} = I_{2L}$

所以得:

$$I_{\Sigma C} = I_{2L} + \frac{U_{\phi}}{X_{CL}} \quad I_{2L} + \frac{U_{\phi}}{X_{CL}} \quad (8)$$

按照式(7)、(8)可以计算出两补偿电网并网后系统总的电容电流 $I_{\Sigma C}$ 。如为多个补偿电网并网,同理,可通过调节一台的消弧线圈控制电流来计算多机并网后电网总的电容电流。然后按照该值分配各消弧线圈的补偿份额,实现多机控制。

3 核心控制器的软、硬件设计

3.1 硬件实现

图 3 为用快速单片机实现的偏磁式消弧线圈动态调谐控制系统硬件框图。控制器主要由中性点位移电压 U_N 模拟输入通道,中性点电流 I_L 模拟输入通道、A/D 板、模拟量输入调理板、励磁控制电压 U_T 模拟量输出通道,母联开关状态开关量输入通道,双机并运信号输入通道、接地故障辨识及中断信号产生电路和单片机基本系统组成。采用模块化设计,全数字化处理技术及光电隔离技术,其性能稳定、抗干扰能力强、可靠性高。

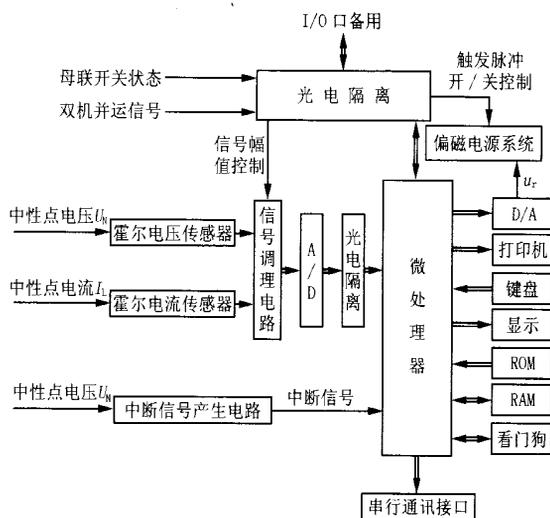


图 3 控制器硬件框图

Fig. 3 Block diagram of the controller hardware

由于采用了电容电流检测的新方法,因此中性点电流的测量精度就显得更加重要,在此,我们采用 HDC - 50LX(15) 霍尔电流传感器测量中性点电流信号。电路如图 4 所示。

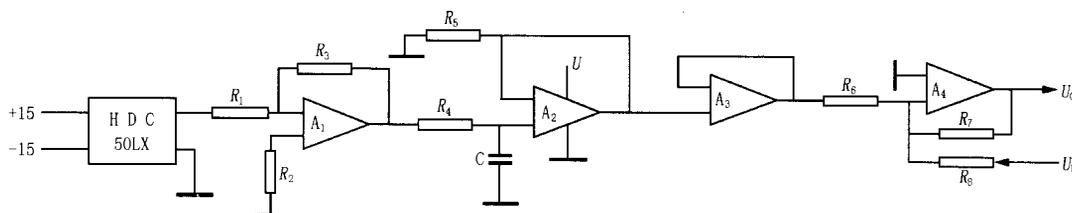


图 4 中性点电流测量电路

Fig. 4 Measuring circuit of neutral-point current

中性点电流经霍尔电流传感器 HDC-50LX,再经运算放大器放大、有源滤波和偏置处理电路,转换成符合要求的电压信号 U_0 ,通过 AD 采样送微机进行测量或处理。

使用霍尔电流传感器很方便地实现了无畸变、无延时的信号转换,并且达到原副边不失真传递,使

相位差的测量精度大大提高,而测量原理更为简便,从而保证了新原理的实现。

3.2 软件流程

动态调谐过程如下:在电网正常运行状态下,采用前述方法实时检测电网电容电流。将检测到的数值利用接地消弧变压器高压调节特性转换成电网一

旦发生单相接地后偏磁绕组需要施加的偏磁电流数值并保存该值。然后在电网正常运行状态下,消弧线圈的控制电流维持一很小值或为零,使消弧线圈远离谐振点,且处于欠补偿状态。电网发生单相接地后,瞬间施加偏磁电流到所需数值,实现全补偿,并通过串行通讯向上位机传送接地状态信息。经故障辨识模块确认接地消失后,退出偏磁,返回到检测状态。接地消除后,回到电网电容电流实时检测状态。主程序如图5所示。

主程序

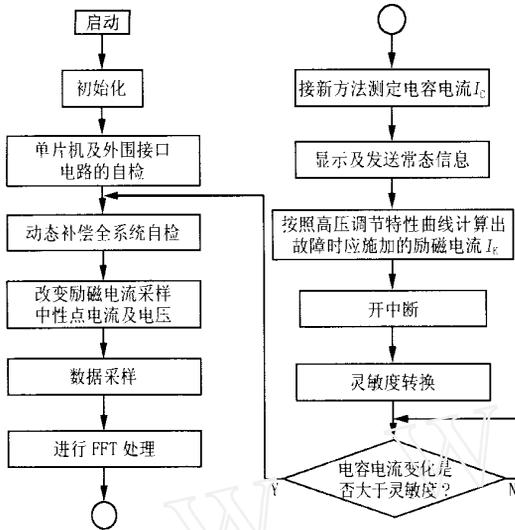


图5 软件结构框图

Fig. 5 Block diagram of the software

采用高速多路同时交流采样,同时对中性点电流 I_L 、中性点电压 U_N 直接交流采样,确保输入信号间相角的可比性,软件上经 DFT 计算出各量的工频幅值和相角、采用第3节原理实时测量电网电容电流,实现自动跟踪补偿。

4 仿真及试验研究

4.1 软件仿真分析

为了验证该方法的有效性,采用 Matlab 对上述方法进行仿真分析,令系统三相对地电容为 $C_A = 21 \mu\text{F}$, $C_B = 20 \mu\text{F}$, $C_C = 20 \mu\text{F}$,补偿电网的阻尼率 $d = 2\%$,实验假设三相电源和负荷对称。

调节控制电流 I_K 使消弧线圈的电感 L 的值分别为 0.6 H , 0.5 H , 0.4 H , 0.3 H , 0.2 H (其中 0.6 H 是远离谐振点处, 0.2 H 靠近谐振点处,且都处于欠补偿状态)。并将不同项两两组合作为控制电流分别为 I_{K1} 、 I_{K2} 时所对应的中性点电流 I_{L1} 、 I_{L2} 。仿真

计算结果如表1。

表1 仿真计算数据

Tab. 1 Data of simulated calculation

不同 I_K 时消弧 线圈电感 L	电网等效对地容抗 X_C			
	$L1=0.5 \text{ H}$	$L1=0.4 \text{ H}$	$L1=0.3 \text{ H}$	$L1=0.2 \text{ H}$
当 $L2=0.6 \text{ H}$ 时	52.013 6	52.020 0	52.032 1	52.049 2
当 $L2=0.5 \text{ H}$ 时		52.053 8	52.055 2	52.065 9
当 $L2=0.4 \text{ H}$ 时			52.055 7	52.067 2
当 $L2=0.3 \text{ H}$ 时				52.070 7

这样已知 X_C , 从而可利用电网相电压与 X_C 的比值计算出电网单相金属接地时对地电容电流 I_C 。由于 X_C 的理论值为 52.1819 , 由表1数据可得最大误差为 0.32% , 满足要求。调节过程中,每调节一次控制电流就计算一次电容电流。由仿真计算结果可以看出,离谐振点越近,计算结果越准确。

4.2 模拟试验

模拟试验是利用实验室已有的偏磁式消弧线圈和低压模拟电网进行的。模拟电网所接消弧线圈参数为 220 V , 调节范围 115 A 。模拟电网实验电压为 380 V 。在单台消弧线圈运行状态下,模拟电网最大接地电容电流约 14 A , 最小接地电流约 1 A 。可通过模拟电网的母联开关来控制系统为双台并运状态,在这种情况下,允许两套消弧线圈并联运行,两台控制器间需要互相通讯。

表2为单台消弧线圈运行状态下,在不同对地等效电容时,电网发生单相金属接地时对地电容电流 I_C (有效值) 的检测结果。表3为双机并运状态下,在不同对地等效电容时,电网发生单相金属接地时对地电容电流的 I_C 检测结果。由表可见检测误差小于 2% , 满足要求。

图6是在等效电容为 $75 \mu\text{F}$ 时,模拟电网做单相金属接地实验记录的补偿电感电流 I_L 和残流 I_x 波形,从波形可见,动态过程的时间小于2个周期。

表2 对地电容电流测量试验结果(一套)

Tab. 2 Test results for the earth capacitance current (one suit)

等效电容值/ μF	15	45	75	135	195
电容电流(理论)/A	1.036	3.108	5.180	9.324	13.468
电容电流(实测)/A	1.051	3.442	5.242	9.408	13.576
误差	1.4%	1.1%	1.2%	0.9%	0.8%

表3 对地电容电流测量试验结果(两套)

Tab. 3 Test results for the earth capacitance current (two suits)

等效电容值/ μF	210	240	270	330	390
电容电流(理论)/A	14.504	16.576	18.648	22.792	26.936
电容电流(实测)/A	14.693	16.825	18.872	23.066	27.205
误差	1.3%	1.5%	1.2%	1.2%	1.0%

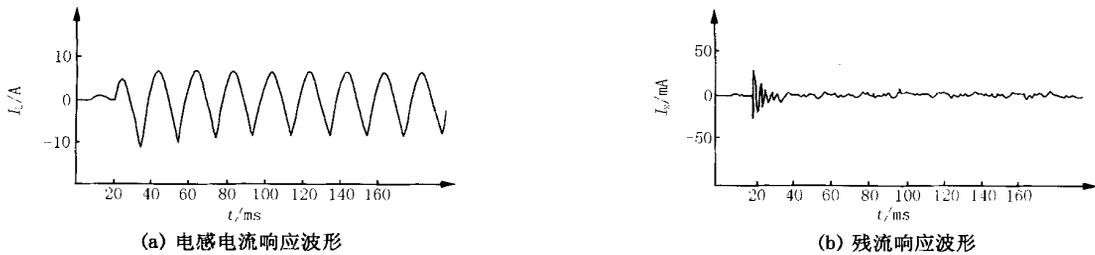


图6 电感电流及残流动态响应波形

Fig.6 Dynamic responsive waveforms of I_L and I_k

5 结论

本文针对偏磁式消弧线圈电容电流的检测问题,提出了用可以精确测定的中性点电流来检测电网电容电流的新方法,极大地提高了电容电流的检测精度。经过理论推导、软件仿真及模拟试验验证,证明效果良好。成套装置已开始投入运行,装置运行稳定,控制精确,补偿效果令人满意。

参考文献:

- [1] 要焕年,曹梅月(YAO Huan-nian, CAO Mei-yue). 电力系统谐振接地(Resonance Ground of Electric Power Systems) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing:China Electric Power Press),2000.
- [2] 李福寿(LI Fu-shou). 中性点非有效接地电网的运行(Operation of Electric Power System with Neutral Ineffective Grounding) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing:

Hydraulic and Electric Power Press),1993.

- [3] 蔡旭(CAI Xu). 新型偏磁式消弧线圈及其控制(New Arc-suppression Coil with Magnetic Bias and Its Control) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(10):32-35.
- [4] 蔡旭,刘杰(CAI Xu, LIU Jie). 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置(Dynamic Resonance Adjustment Device of Arc-suppression Coil with Magnetic Bias) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(15):53-56.

收稿日期:2003-09-02; 修回日期:2003-11-25

作者简介:

贾雅君(1973-),男,硕士,从事电能质量控制、继电保护研究与开发工作;

蔡旭(1964-),男,副教授,博士,长期从事供电安全、微机保护、电能质量控制等研究开发工作。

A new automatic tuning principle and its application of arc-suppression coil with magnetic bias

JIA Ya-jun, CAI Xu

(School of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: With the analysis of the former control method of the arc suppression coil with magnetic bias, the paper proposes a new method for automatically tracing the capacitance current of power system, which measures single-phase-to-earth capacitance current of the power network by measuring neutral point current and its phase angle difference. Then the principle of controlling two arc suppressions is presented, and this method is simulated and analyzed, based on which we have developed a tuning controller. And the block diagrams of the tuning controllers software and hardware are presented. The method is validated on the low voltage simulation network, and the result shows that the error in measuring capacitance current is less than 2% and the transient process of compensation is less than two cycles. The method obviously improves the precision of capacitance current calculation and will be further used in practice.

This project is supported by the Foundation of the National New Products Program(2002ED620004).

Key words: arc-suppression; magnetic bias; tuning; capacitance current