[控制系统]

谐振接地电网对地电容电流测量系统

文/河北工业大学电气工程学院 董 浩 聂海龙 刘伯颖 朱天曈 高建森

谐振接地电网即中性点经消弧线圈接地的电网，这种电网的特点是可利用消弧线圈对电网电容电流进行补偿，而补偿电流的大小取决于电容电流的大小，故需对电容电流进行测量。为了提高测量的准确性与实时性，本文设计了电网对地电容电流自动测量系统。系统由基于AT89C51单片机的控制与信号处理电路、扫频信号源电路、电压电流测取电路、PT二次侧辅助测量电路、以及显示电路组成，采用了扫频法与三点法相结合的测量方法。硬件与软件两方面的设计，使系统拥有了测量准确、响应迅速的特点。

随着我国工业规模的扩大和城市扩容，电网也在逐步扩张，电缆出线增多，随之而来的问题就是电网对地电容电流的快速增长。当单相接地电流过大时，接地电弧无法自熄，就易产生间歇性弧光接地过电压，对电网造成危害，为了避免这种现象的发生，就需要在电网中性点与地之间加一消弧线圈来对电容电流进行补偿，这种中性点经消弧线圈接地的电网又称为谐振接地电网。需要多大的补偿电流，如何调节消弧线圈都需要知道电容电流的大小，所以电网对地电容电流的测量就显得尤为重要。如今，电网对地电容电流的测量方法有许多，但是都存在着一些不足之处，本论文所研究的就是一种谐振接地电网对地电容电流的测量系统，能够使电容电流的测量具有更好的实时性与准确性。

常用的电网对地电容电流测量方法

目前，电容电流的测量方法主要有直接测量法和间接测量法。直接测量法较典型的是单相金属接地法，将线路进行人为的单相接地，利用电流互感器直接测量电容电流，虽然这种方法测量较为准确，但接线复杂，对电网和操作人员具有很高的危险性，所以现在基本不采用这种方法。间接测量法包含两类方法，第一类包括：中性点外加电容法、中性点位移电压法、两点法和三点法等，该方法的测量是利用中性点位移电压、中性点电流和消弧线圈值电感值等参数，来计算电网的对地总容抗值，然后由单相故障时的零序回路来计算电容电流，这一类方法适用于不平衡度较大的电网。第二类为注入信号法，该方法分为变频信号法和扫频信号法，是通过从系统外注入异频电流的反馈信号，得到电网谐振频率。再根据相应等值电路计算得到电网对地电容电流，适用于平衡度高的电网。随着电力电缆的大面积使用，现在电网的平衡度越来越高，不平衡电压越来越小，所以注入信号法成为现在最具优势的方法，但是它也存在一些不足之处，当系统处于过补偿状态时，测量得到的谐振频率会偏大，扫频时间也会比较长，而如果系统的不平衡度较大时，测量结果就会不准确。

谐振接地电网对地电容电流测量系统

综合分析了以上电网对地电容电流的测量方法后，本文所设计的谐振接地电网对地电容电流

测量系统采用了将扫频信号法与三点法相结合的方法，以达到对取长补短的效果。

1. 系统的测量原理

当电网不平衡度较低时，应用扫频法测量电网电容电流较为准确，当电网不平衡度较高时，应用三点法测量较为准确。以下简要说明两种方法的测量原理。

图1为扫频法的测量电路图。扫频法是在消弧线圈电压互感器即PT低压侧进行测量的。图中N为电网中性点，U_S为扫频信号源，R为限流电阻（300 Ω/300 W），R_Q为取样电阻（1 Ω/ 1 W），该图将PT高压侧部分等效到PT低压侧，以便于分析。

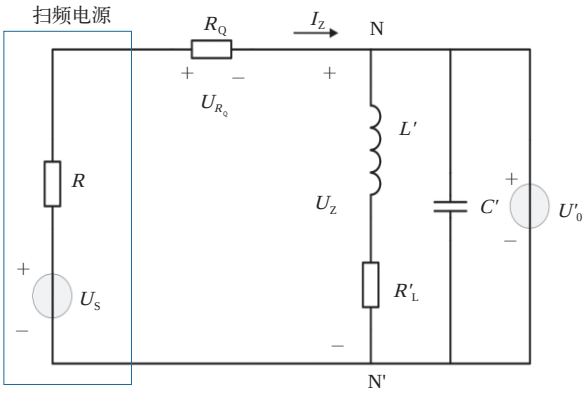

图1　扫频法测量电路图

图中的C'、L'、R_L'、U'_0分别表示电网对地电容C、消弧线圈电感L、消弧线圈等值损耗R_L、中性点位移电压U_0等效到PT低压侧所对应的值。图中所示的R_Q两端电压U_{R_Q}，和PT低压侧电压U_Z即为需要取出的信号，U_{R_Q}与电路中的电流I_Z同相位。当图1所示电路发生并联谐振时，电容等效为开路，电感等效为短路，所以此时U_z与I_Z同相位，又因为U_{R_Q}与I_Z同相位，由此可得U_{R_Q}与U_Z同相位，此时的频率就是电网的谐振频率 。由于

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{1}$$

式中，L为消弧线圈电感值；C为电网的对地电容值。

可以推出

$$C = (2\pi f_0)^{-2} L^{-1} \tag{2}$$

电网电容电流有效值可通过下式求得

$$I_C = 2\pi f_0 C U_p \tag{3}$$

式中，U_p为电网相电压的有效值。

应用三点法检测电容电流时，有

$$U_0 = \frac{U_{bd}}{\sqrt{v^2 + d^2}} = \frac{U_{bd}}{\sqrt{(\frac{I_C - I_L}{I_C})^2 + d^2}} \tag{4}$$

式中，U_0为电网的中性点位移电压有效值；U_{bd}为中性点对地电压的有效值；d为谐振接地电网阻尼率；v为脱谐度，是指谐振接地电网偏离谐振状态的程度，其计算公式为

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} \tag{5}$$

式中，I_C为电网电容电流，I_L为补偿电流。

利用消弧线圈自带电压互感器与电流互感器测得3组U_0和U_L，就是通过改变消弧线圈电感值，让其工作在3个不同的中性点位移电压U_{01}、U_{02}和U_{03}下，测取对应的3个补偿电流I_{L1}、I_{L2}和I_{L3}，将3组数据带入上式，有

$$\begin{aligned} U_{01} &= U_{bd} / \sqrt{(1 - I_{L1}/I_C)^2 + d^2} \\ U_{02} &= U_{bd} / \sqrt{(1 - I_{L2}/I_C)^2 + d^2} \\ U_{03} &= U_{bd} / \sqrt{(1 - I_{L3}/I_C)^2 + d^2} \end{aligned} \tag{6}$$

求解方程组就可求得I_C。

2. 系统的硬件设计

图2为该谐振接地电网对地电容电流测量系统的硬件结构图。本测量系统由基于AT89C51单片机的控制与信号处理电路、扫频信号源电路、电压电流测取电路、PT二次侧辅助测量电路及显示电路组成。首先利用消弧线圈自带的电压互感器测得此时电网的位移电压有效值U_0，将其输送给单片机，计算出位移电压的标准U_Z，由单片机将两者进行比较，当$U_0 \leqslant U_Z$时，采用扫频法进行电容电流的测量。应用扫频法进行测量时，单片机会向扫频信号源电路发出频率控制信号，信号源电路产生幅值恒定、频率变化的方波，输出到PT二次侧辅助测量电路的取样电阻和PT低压侧上，之后电压、电流测量电路对取样电阻和PT低压侧两端电压的测量，再将信号进行方波化、整形、滤波、光电隔离后送入信号处理电路，由信号处理

电路对这两个电压信号进行相位的比较，若相位不同，改变频率重新测量，若相位相同，则通过显示电路显示出来。当U_0>U_Z时，采用三点法进行测量，利用消弧线圈的电压互感器与电流互感器测得中性点位移电压和消弧线圈补偿电流，由单片机判断是否测量了三组数据，当测完三组数据后，通过信号处理电路进行计算，再由显示电路予以显示。

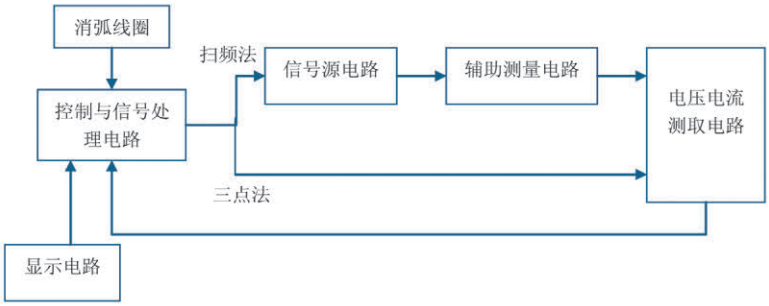

图2　系统硬件结构图

3. 系统的软件设计

本系统软件部分是先通过主程序判断采用扫频法还是三点法，若应用三点法，则执行三点法子程序，若应用扫频法，则执行扫频法子程序。

主程序如图3所示。系统初始化之后，设置标准电压U_Z，U_0>U_Z时，采用三点法；U_0≤U_Z时，采用扫频法。

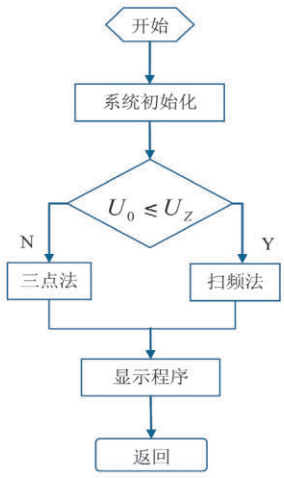

图3　主程序流程图

（1）三点法子程序

三点法流程图如图4所示，三点法是通过调节消弧线圈的电感值，来测出三组不同的U_0和I_Z值，当数据测取了三组后，通过解方程计算出电容电流。

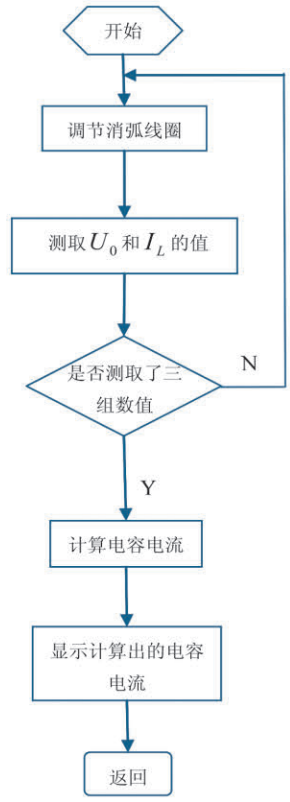

图4　三点法流程图

（2）扫频法子程序

扫频信号源发出频率变化的方波，扫频范围是30～80 Hz。扫频法流程图如图5所示，测量出谐振频率，再计算脱谐度和电容电流，谐振频率的误差允许范围为±0.1 Hz。而如果电网自振频率在49～51 Hz之间，会被工频陷波器滤除，则自振频率根据此范围内频率每增长0.1 Hz，电流相位差递减的规律进行推算。

结束语

本测量系统具有许多的优点，

1）首先，测量过程均在PT低压侧进行，所以系统的安全性较好，也便于工作人员进行维护与调试。

2）其次，该系统装置与设备较为简单，操作也十分简便，且成本较低。

3）最后，测量方法将扫频法与三点法相结合，以达到适应不同情况下进行测量的目的，保证了测量结果的准确性与实时性。所以本系统具

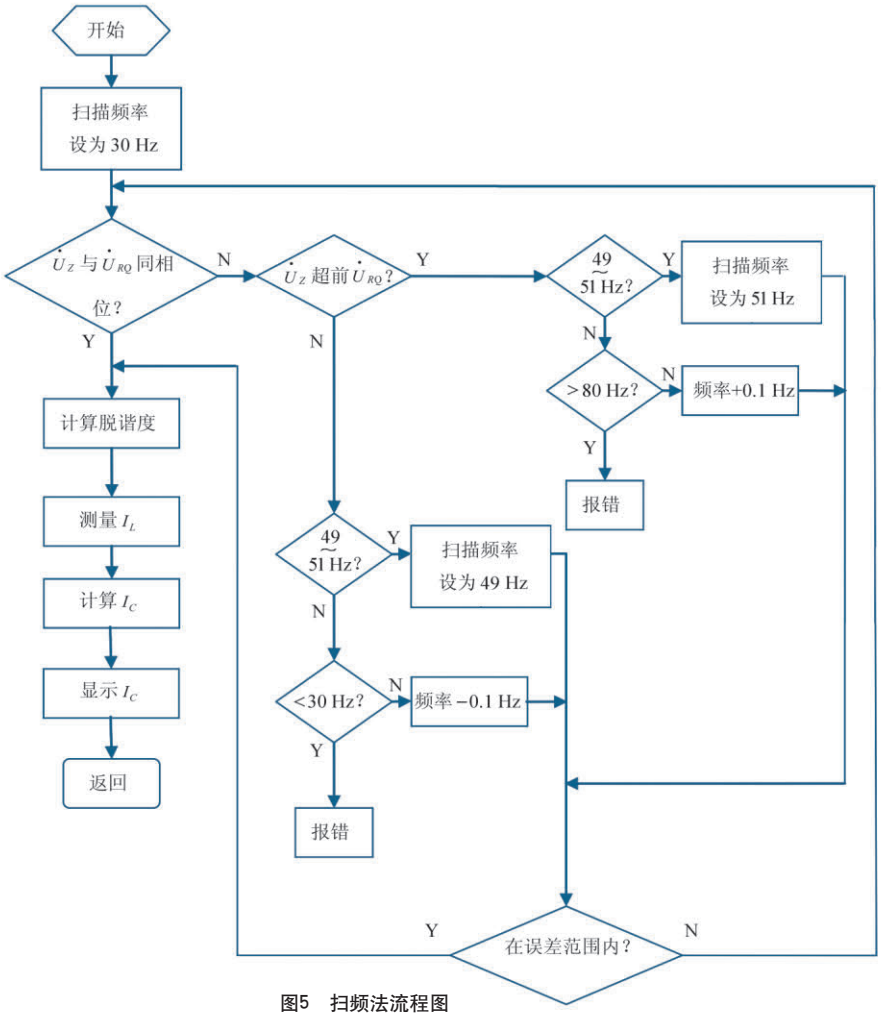

图5　扫频法流程图

有一定的实用价值。EA

河北省科技支撑计划项目（编号13212104）
天津市高等学校科技发展基金计划项目（编号20130423）
大学生创新创业训练计划国家级及省级立项项目（编号201310080017）
（收稿日期：2014.12.20）
[编辑：杨得润]

（上接第97页）

侧、上装置及下装置的运行状态制作成指示灯图案，状态颜色以红绿两色区分。输入输出点通过触摸屏的DP总线与CPU315－2DP进行数据交换，CPUC315－2DP与从站中的变频器的报文通信达到读写控制。

难点及解决方案

该改造方案的难点在于，改用普通异步电动机后，故障率较伺服电动机显著下降，但受到工况影响，机壳腐蚀明显，每台电动机的平均使用周期为7个月，改造效果仍不理想。

经分析，由于1#机的调宽电动机直接安装在结晶器坑内，工况较恶劣，温度高，水蒸气严重。必须对电动机进行重新选型。

原型号电动机无论防护等级还是密封情况都不适用于结晶器在线调宽装置。重新选型后，电动机防护等级提升到IP56，电动机表面壳体采用耐腐蚀钢材料，取消电动机后端刹车，后端完全密封，电动机重车头法兰盘与电动机壳体、电动机转子轴与法兰盘等连接处密封处理，取消电动机接线盒，直接引出1 m长电动机三相电缆，引出电缆处密封处理。重新选型后的电动机更加适应恶劣的工况，故障率大大降低，1#机在线调宽装置（SE－1#）技术改造工作顺利完成。

结束语

此次改造表明了在各种不同的工作环境下，选择相匹配的控制方式及设备类型的重要性。改造完成后设备故障率降低了95%，保证了高效快速的生产节奏，缩短了维护时间，降低了维护难度。EA

（收稿日期：2014.12.26）
[编辑：杨得润]