[控制系统]

小电流接地电网电容电流在线测量装置研究

文/河北工业大学电气工程学院　曹丽鹏　吕聪敏　聂海龙　高建森

针对目前电容电流测量装置不能实现测量过程与电网运行的双向无扰，且测量精度较低、实时性较差等问题，设计了一种适用于谐振接地电网的新型电容电流在线测量装置。此装置从消弧线圈二次侧注入变频电源信号分析得到电网的谐振频率，通过电容电流与谐振频率的关系计算得到被测电网的电容电流。与其他在线测量装置相比，本装置测量精度高、实时性强且安全性高，测量过程与电网运行的双向无扰，且成本低廉，可满足实际工业应用的要求。

在经济迅速发展的今天，确保直接面向用户的配电系统不发生供电中断显得越来越重要。要保证配电系统的连续不间断供电，减小系统故障范围是一个重要方面。准确测量系统的电容电流，是快速熄灭电弧以保证系统故障范围缩小的前提，且是决定是否装设消弧线圈和正确选择消弧线圈补偿电流的重要依据。

常用的电容电流测量的方法分为两大类，直接测量和间接测量。直接测量以单相金属接地法为主，即将配电网线路人为接地，通过电流互感器测量入地的电容电流。此方法可直接得出系统的对地电容电流，并可测出其中的无功分量和有功分量，但需要的操作和安全措施较烦琐并受各种因素的制约。而间接测量方法大多比较简单，利用电力系统正常运行和单相接地故障时系统对地总电容相等的原理，只需测量系统正常运行时系统对地总电容即可。

常用的电容电流测量方法

间接测量法主要包括中性点外加电容法、外加电压法和调谐法等。中性点外加电容法常应用于有中性点的配电系统。系统正常运行时中性点的电压很低，中性点外加电容法正是利用在中性点外加电容，先测量中性点的对地电压，然后计算中性点的位移电压，最后求得系统的电容电流。调谐法指的是通过调整消弧线圈的工作点，测得不同档位下的电气量，根据其变化求得对地电容电流的方法。

电网电容电流在线测量方法可以概括为两类：第一类是从电压互感器（TV）二次侧注入信号的三频率注入法、两频率注入法、相量法和谐振法；第二类是从中性点或者母线PT（消弧线圈）二次侧注入信号的扫频法和变频法。现有的两类在线测量方法存在的问题是：第一类方法在实际情况中实用性较差；第二类方法中，扫频法的测量时间较长、实时性不好，变频法的显著缺点则是注入信号频率的选择很复杂、频率过高或过低都会影响测量精度。

电网电容电流为在线测量装置的组成

本文设计了一种适用于中性点经消弧线圈接地的在线电网电流测量装置，其由信号处理主模块、变频电源模块、PT二次侧辅助测量模块、信号预处理与传输模块和输出显示模块组成。在线

测量装置结构框图如图1所示。

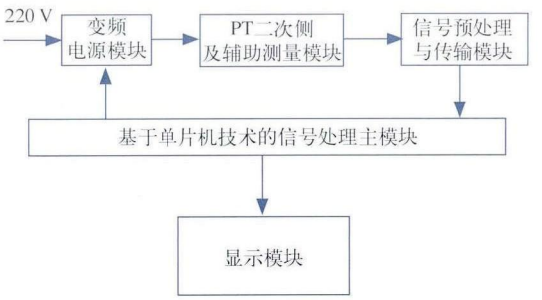

图1 信号处理主模块电路原理

变频电源模块的输入端与220 V交流电源相连接，其在信号处理主模块输出的频率控制信号的控制下输出一定频率的方波信号并到PT二次侧辅助测量模块上，PT二次侧辅助测量模块由限流电阻、取样电阻和PT二次侧构成以采集取样电阻端电压及消弧线圈PT二次侧电压并送入信号预处理与传输模块，信号预处理与传输模块对消弧线圈PT二次侧和采样电阻上的电压经滤波、整形、光电隔离处理后送入信号处理主模块，信号处理主模块进行相位分析以测出或推算出电网谐振频率，进而算出电网对地电容和电容电流，同时通过输出显示模块来完成对测量结果对地电容与电容电流的交替显示输出。

1．信号处理主模块

信号处理主模块为基于单片机的信号处理电路，主模块以AT89C51单片机芯片为核心，不仅能控制变频电源模块的频率变化，而且通过对送入的电压进行相位分析以确定电网的谐振频率并计算电网对地电容和电容电流。信号处理主模块电路原理图如图2所示。

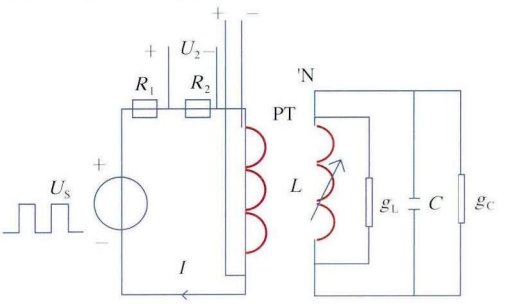

图2 信号处理主模块电路原理

图2中，$\dot{U}_S$为频率由信号处理主模块所控制的变频电源，$\dot{U}_1$与$\dot{U}_2$为需要取出的信号，$\dot{U}_1$为消弧线圈PT二次侧电压，$\dot{U}_2$为取样电阻R_2（1 Ω/1 W）两端电压，$\dot{U}_2$与电路中的电流$\dot{I}$同相位；取样电阻R_2的参数为1 Ω/1W，限流电阻R_1的参数为300 Ω/300 W；消弧线圈PT可视为一个理想变压器，设其变比为n，则变频电源对PT一次侧施加的影响相当于电压值为$n\dot{U}_1$的电压源作用在由消弧线圈L、消弧线圈的等值损耗电导g_L、电网对地电容C和电网对地漏电导g_C四者并联构成的电路中，设电压源$n\dot{U}_1$的参考方向为上正下负；当该并联电路发生GCL谐振时，电压$n\dot{U}_1$与流过该电压源的电流$\dot{I}'$是同相位的，设$\dot{I}'$与$n\dot{U}_1$为非关联参考方向；根据理想变压器的特性，可知电流$\dot{I}'$与图2中的电流$\dot{I}$同相位，电压$n\dot{U}_1$与$\dot{U}_1$同相位，因此当PT一次侧发生GCL并联谐振时，$\dot{U}_1$与$\dot{I}$同相位，即$\dot{U}_1$与$\dot{U}_2$同相位；可见，只要在某一频率下检测到$\dot{U}_1$与$\dot{U}_2$同相位，即证明PT一次侧发生了GCL谐振，此时变频电源$\dot{U}_S$的频率为f_0，则有

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

式中，L为消弧线圈当前电感量，可观察得知；C为电网对地电容。因此，电网对地电容为

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

记三相电源的相电压有效值为U_p，则电网电容电流的有效值为

$$I_C=2\pi f_0 CU_p \tag{3}$$

2．变频电源模块

变频电源模块由电源电路和方波信号发生电路连接构成，该电源电路由变压器、全波桥式整流电路及RC电路连接构成。变频电源模块电路原理如图3所示。

变压器的一次侧与220 V交流电源相连接，其副边通过全波桥式整流电路后，再通过1 500 μF的电容及其后续的输入电阻构成的RC电路获得一个基本保持在300 V的直流电压的方波信号发生电路供电。该方波信号发生电路由4个反相器和4个MOSFET管及其辅助电路连接构成，4个反相器可有效地隔离高电压信号，起到保护单片机的作用。四个MOSFET管及其辅助电路在AT89C51的控制下分成两组定时导通和截止。图3中左上角和右下角的MOSFET管及其辅助电路为一组，另外两个MOSFET管及其辅助电路为一组，当其中一组MOSFET管导通时另一组则截止，并由AT89C51控制使导通和截止的持续时间相等，从而获得高电平为300 V、周期等于MOSFET导通时间与截止时间之和的方波信号；变频电源模块的频率变化范围为［20，49］Hz以及［51，80］Hz。

www.eage.com.cn

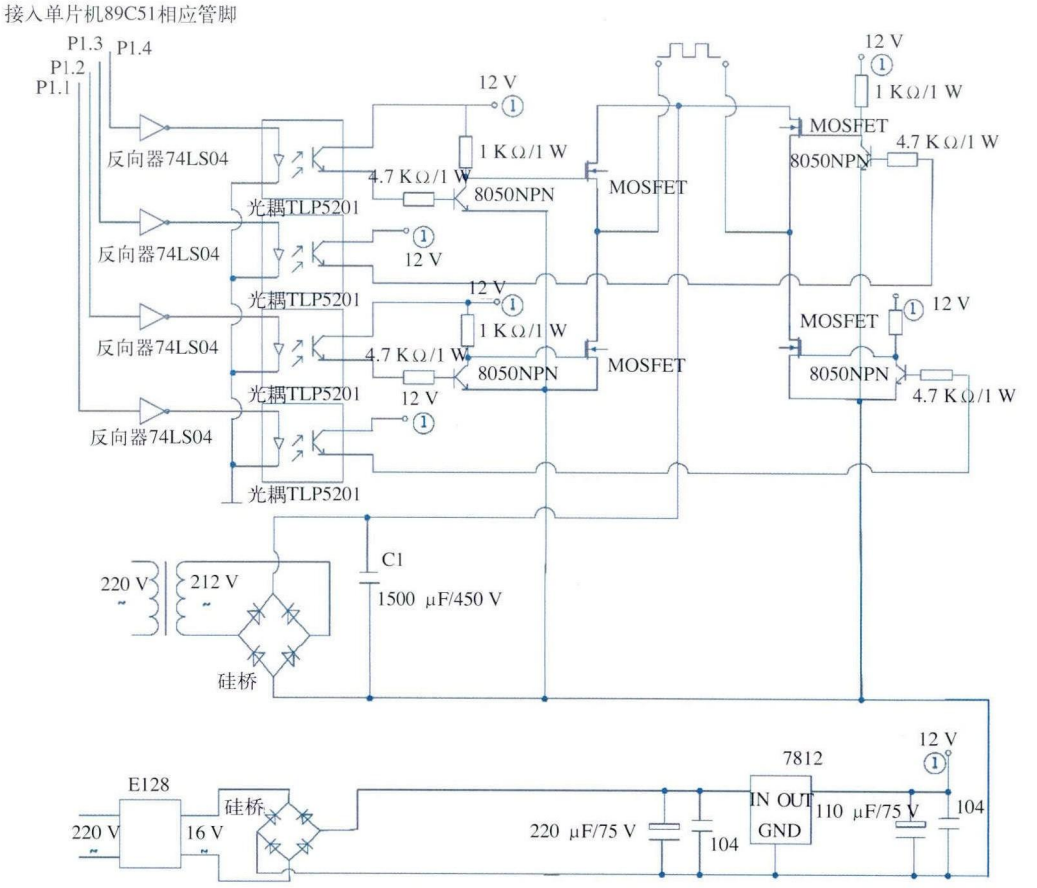

图3　变频电源模块电路原理

3．PT二次侧辅助测量模块

PT二次侧辅助测量模块由限流电阻、取样电阻和PT二次侧构成。其主要作用是采集取样电阻端电压及消弧线圈PT二次侧电压并送入信号预处理模块与传输模块。

4．信号预处理与传输模块

信号预处理与传输模块由滤波电路、整形电路和光电隔离电路依次连接构成。PT二次侧辅助测量电路采集的PT二次侧电压与取样电阻上的电压连接到滤波电路，这两个电压经过滤波、整形并经光电隔离处理后输入到信号处理主模块上由AT89C51进行相位分析。滤波电路仅滤除［49，51］Hz频率范围内的信号，旨在避免测量结果受电网本身50 Hz频率信号的干扰而导致测量精度降低。为了提高整形电路的测量精度，取自PT二次侧的电压与取样电阻上的电压尽量方波化，以便于进行相位比较。

5．显示输出模块

显示输出模块由一组八段数码管构成，该显示输出模块在信号处理主模块的控制下，完成对测量结果C与I_C的交替显示输出。单片机的一个I/O口控制八位八段数码管的段码，另一个I/O口控制位码，这8位数码管采用共阳极接法，动态显示方式。采用与两个输出端口接的发光二极管来区分显示结果是电流还是电容，一个输出端口连接的发光二极管发光代表显示结果为电容C的值，另一个输出端口连接的发光二极管发光代表显示结果为电容电流的值。

结束语

此在线测量装置通过变频电源模块并采集消弧线圈PT的二次侧的电压及取样电阻的电压，由信号处理主模块进行分析计算得到电网对地电容和电容电流，其测量过程完全在线进行，不需要调谐消弧线圈，实现了测量过程与电网运行的双向无扰功能。而且其测量工作完全在PT二次侧进行，对测试现场工作人员、电力系统以及测量装置自身来说都具有较高的安全性。就成本来说，这种装置在测量过程中，不需要任何辅助测试设备，装置自身的成本也不高，节省了许多不必要的开支。总的来说，此装置设计合理，实现了对中性点经消弧线圈接地电网电容电流的在线测量功能，具有测量精度高、实时性强、安全可靠、测量方便和成本低廉的优点。**EA**

（收稿日期：2015.05.08）

（编辑：杨得润）