

中压电网对地电容检测的注入信号源设计

李毅敏, 蔡旭

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 在中性点经消弧线圈接地的中压配网里, 为了使接地故障时的补偿达到最好的效果, 必须准确检测配网的对地电容。利用信号注入法测量中压配网的对地电容, 具有诸多其他方法所不具备的优点, 且可达到所要求的精度。而应用信号注入法的前提是需要具备一系列特殊要求的注入信号源, 提出了一种新型的基于 DSP 控制芯片和智能功率模块 IPM 的变频恒流信号源设计。试验结果表明该变频恒流信号源可控性强, 工作稳定, 精度高。

关键词: 对地电容电流; 变频恒流源; DSP; PID

Design of injecting signal source applied in measuring capacitive current of distribution network

LI Yi-min, CAI Xu

(Electrical Engineering Department, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the distribution network with neutral grounding via arc suppression coil, for the purpose of getting the best compensation result in the ground fault, the capacitive current of the network must be detected correctly. And the injecting approach on measuring the capacitive current meets this target and has much advantages compared with other methods. But this approach is based on an injecting source with special requirement. This paper proposes an innovative fixed-current variable-frequency signal source design with DSP and IPM. And the experiment result shows this signal source possesses the outstanding controllable ability and high accuracy.

Key words: capacitive current; fixed-current variable-frequency source; DSP; PID

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)09-0045-07

0 引言

中压电网一般泛指 110 kV 以下的电网。在我国主要为 3、6、10、(20)、35 和 66 kV 电网; 在国外则还有许多其它电压等级。从电网组成来考虑, 中压电网可分为架空线路电网、电缆线路电网和混合电网等。在我国电力系统的中低压电网中, 大多是采用中性点不接地方式运行。这主要是因为在这种运行方式下, 当发生单相接地故障时(单相接地故障比重很大, 占电力系统故障和事故的 60%以上), 三相电压仍能保持对称而继续保持对用户的供电。但近二十年来随着供电系统规模的扩大, 供电电压的提高, 特别是这几年大范围、大规模的电网改造, 大批电缆线路的投入运行使得单相接地电容电流增大, 使愈来愈多的瞬时接地故障不能自动消除, 间歇性电弧又会在系统中引起很高的过电压而进一步诱发短路事故的发生。为此必须采取有效措施加以

解决, 把这种电网改造成经消弧线圈接地运行方式能有效地解决这个问题。我国电力规程也明确规定: 单相接地电容电流超过 30 A 的 6~10 kV 系统和超过 10 A 的 20~60 kV 系统必须采用消弧线圈接地方式。最近电力部门建议规程为: 单相接地电容电流超过 10 A 的 6~10 kV 系统必须采用消弧线圈接地方式。在消弧线圈接地运行方式下, 单相接地也不改变电源电压的对称性, 消弧线圈产生的电感电流有效地补偿了接地点的电容电流, 并且降低了故障相电压的恢复速度, 使接地点电弧自动熄灭, 消灭了间歇性电弧的产生, 减少了弧光接地过电压产生的机率, 使电网能够自动恢复正常, 从而保证了对用户的正常供电。

要使消弧线圈发挥应有的作用, 前提是要准确地检测出配网的对地电容电流。信号注入检测法是一种不需要借助调谐机构的操作而可以直接测量电容电流 I_c 的方法, 而且在电缆线路不断取代架空线路的今天, 电网的不平衡度将越来越小, 这使不需要依靠不平衡度维持测量精度的信号注入法成为最有前途的测量方法之一。

基金项目: 国家重点新产品计划项目 (2002ED620004); 上海市科委 2003 年重大专项基金 (03DZ14014)

1 注入信号检测法的基本原理及对信号源的要求

1.1 注入信号法测量电容电流原理

消弧线圈的调节方式分为预调式和随调式两种：预调式消弧线圈在接地故障发生前预先调整好消弧线圈电感，等待接地发生，由此引起的串联谐振过电压通过阻尼电阻限制在安全范围内。随调式消弧线圈在接地发生前调整自身电感远离谐振点，接地发生后快速调整消弧线圈电感实现最佳补偿。在随调式消弧补偿系统中，由于消弧线圈远离谐振点，常态下电网中性点电压较低，采用常规的中性点电压、电流量测量电容电流的方法有较大的局限性。而注入信号法作为随调式消弧补偿系统的检测方法有较大的优越性。

在系统正常运行时，从消弧线圈上的零序电压互感器注入变频电流信号，测量系统电容电流接线图如图 1 所示。其等值电路如图 2 所示，其中：

$$\begin{cases} X_L \gg X_1 \\ X_L \gg X_2 \end{cases}。因此可忽略 X_1、X_2，注入信号等值$$

回路中消弧线圈感抗 X_L 与电网三相对地电容并联。通过改变注入信号的频率，使电感和电容发生并联谐振，找到系统的谐振频率 f_0 ，则：

$$3C = \frac{1}{\omega_0^2 L} \quad (1)$$

式中： ω_0 为谐振角频率， $3C$ 电网三相对地电容。

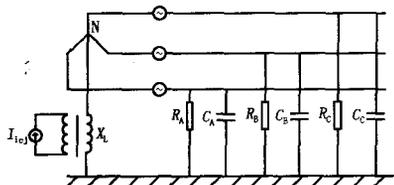


图 1 注入信号法测量电容电流原理图

Fig. 1 Principle diagram of injecting signal measure system

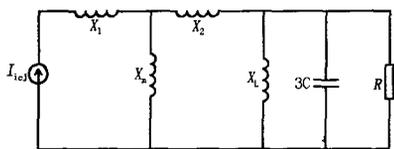


图 2 注入信号法测量电容电流等值电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of injecting signal measure system

则系统单相金属性接地故障时的电容电流为：

$$I_C = 3\omega CU = \frac{\omega U}{\omega_0^2 L} \quad (2)$$

式中： ω 为系统角频率； U 为系统相电压。

系统正常运行时，测量系统的谐振频率 f_0 ，再由式(1)可以直接通过系统谐振频率计算出电网对地电容。可见，这种方法的测量精度取决于变频信号源的性能。

1.2 信号源设计要求

测量精确是任何测量系统的基本要求，对于要利用信号注入法测量对地电容的信号源来说，要做到精确测量的前提是信号源与被测配网互不影响，或者可以忽略其相互之间的影响。基于这样的目的，信号源的设计采用恒流信号源，原因如下：

要达到配网系统不受信号源的影响，这就要求信号源的阻抗应足够大，以减小附加信号源对电力系统的影响和提高信号的注入效率，而理想的恒流源具备无限大的内阻抗，符合要求。另外，当系统发生接地故障时，注入恒流源相对系统零序回路处于开路状态，不影响消弧线圈的熄弧效果。所以，采用恒流源作为信号源可使得配网系统无论在正常工作状态还是发生接地故障时，均不受信号源的影响。

另外，信号源是经过零序电压互感器 PT 来注入的，这是因为信号电流从 PT 二次侧注入方式受线路故障距离、过渡电阻等的影响较小，保证检测节点的可靠检测。以 10 kV 系统为例，假设 PT 的变比为 100，则原、副边阻抗折合系数为 10 000，即使线路故障距离较长而阻抗增加 10 Ω ，接地点过渡电阻 1 000 Ω ，由此折合到 PT 副边仅为 0.101 Ω ，相对于恒流源无限大内阻来说极小，对信号电源几乎没影响。这就说明了当信号源为恒流源时，其工作不受配网系统的影响。

注入信号源及其功率容量的选择应以精确性、可靠性、方便性、经济性为目标。在信号功率源注入及调节方便、功耗小的原则下来选定信号源。以线路发生最不理想故障（高阻接地及衰减度最大）的情况下，保证线路探测节点能够灵敏可靠地检测信号电流为原则来确定注入信号源的功率。基于这样的要求和现实运用器件的限制，恒流信号源的电流大小设计为 1~5 A 的可调电流，以满足测量的需要。另外，1~5 A 的电流经过 PT 感应到配网中变成的电流是毫安级的，不会影响配网的工作。

由 1.1 的基本原理可知，是通过改变注入信号频率来测量谐振频率的，所以频率的设定范围也是该信号源的基本要求之一。由于测量的目的是找到系统的谐振频率，所以谐振频率有可能的范围应在信号源所产生的信号频率的范围。本文确定谐振频

率 f_0 的范围为

$$f_0 \in \left[50\sqrt{1.5} \sqrt{\frac{I_{L1}}{I_{L2}}}, 50\sqrt{1.5} \right] \quad (3)$$

式中: $\frac{I_{L1}}{I_{L2}}$ 为消弧线圈电流调节的上限值与电流调

节的下限值之比, 为消弧线圈调节深度的倒数, 这里选择消弧线圈的调节深度为 9。为配电网选择消弧线圈容量裕度是可以变化的, 此处选择的是数值 1.5。并且由式(3)可以得出, 谐振频率 f_0 的范围与额定电压和额定电流无关, 与消弧线圈的调节深度有关。综上所述, 则有:

$$\text{上限 } f_0 = 50\sqrt{1.5} = 61.237(\text{Hz})$$

$$\text{下限 } f_0 = 50\sqrt{1.5} \sqrt{\frac{I_{L1}}{I_{L2}}} = 20.413(\text{Hz})$$

由此可确定变频信号源的频率范围为 10~90 Hz。

综上所述, 注入信号源应设计为幅值为 1~5 A, 频率为 10~90 Hz 的变频恒流源。

2 注入信号源设计

2.1 原理拓扑结构与电路实现

恒流信号源的工作原理实际上是通过一个 AC-DC-AC 转换来实现的。考虑到当发生接地故障时, 将会有一大约为 110 V 的电压加在信号源上, 因此输入的 AC 有效值选择为 150 V, 这样就可以有效压制有可能因发生接地故障而传递过来的电压, 此电压可由 380 V 通过三相变压器转换得到。因此, 恒流信号源的工作过程为: 先把有效值为 150 V 的三相交流电通过三相全桥电路整流大约为 220 V 直流电源 (AC-DC), 再通过单相全桥电路把 220 V 的直流变换成所需要的恒定交流信号 (DC-AC), 即最后由单相 H 桥输出恒流信号。原理如图 3 所示。

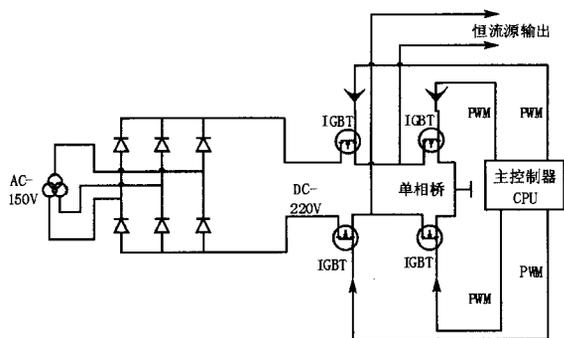


图 3 恒流信号源拓扑结构图

Fig. 3 Topology of the fixed-current signal source

在具体的电路设计中, 主控制器采用 TI 公司的 DSP 芯片 TMS320LF2407A; 在单相逆变桥的选择上, 根据恒流源本身特点, 选用集成了 IGBT 作为 H 桥的智能功率模块 IPM PS21564; 选择 CAN 总线作为通讯器件和 82C250 作为 CAN 的接口芯片。

2.2 控制策略、控制算法与保护措施

恒流信号源的核心控制思想是通过 DSP 控制器向 IPM 发出一系列的 PWM 波, 来控制 IPM 内部的 IGBT 管的开断, 继而产生所需要的恒流信号。具体的 DSP 实现过程为: 通过定时器 TIMER1 产生 PWM 波, 即在 TIMER1 上、下溢都将发生中断, 相当于每个 PWM 周期都将发生两次中断, 每次中断处理的事情就是根据参考波形以及实测波形计算 PWM 的脉宽, 从而改变 PWM 的占空比, 然后通过 IPM 改变输出。在此过程中, 必须根据开关频率确定 TIMER1 周期寄存器数值, 此数值精确性直接影响到系统的精度。另外, 在对恒流信号源进行控制策略开发的过程中, 要特别注意结合应用的要求与所选取控制芯片的特性来设计。产生正弦信号的具体实现是通过数值逼近的方法, 通过使用 5 阶的多项式对正弦函数进行逼近, 可以采用通过 matlab 求出这种方法的误差值是 3.1×10^{-3} , 而就一个周期均方差为 6.6947×10^{-4} , 该方法有相当高的精度, 完全达到了工程要求。

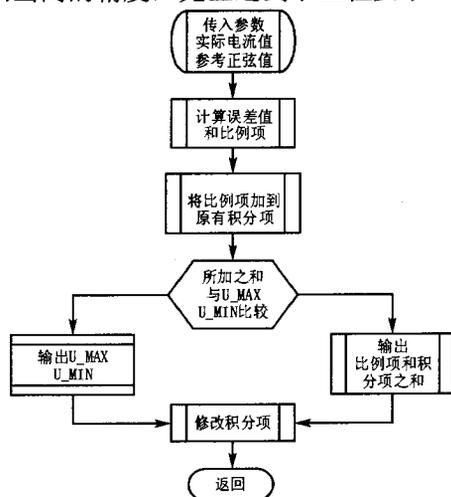


图 4 抗积分饱和 PI 算法流程图

Fig. 4 Diagram of PI with anti-integrator saturation flow

在计算 PWM 的脉宽时, 采用抗积分饱和的 PI 控制算法。PI 控制具有算法简单、鲁棒性好及可靠性高等优点, 而抗积分饱和的 PI 算法可防止控制量因为超出正常范围而进入饱和区所造成的失控现象, 进一步提高了可靠性, 其基本思路为: 在计算输出控制量 $u(k)$ 时, 首先先判断上一时刻的控制量 $u(k-1)$ 是否已超出限制范围。若 $u(k-1) > u_{max}$,

则只累加负偏差; 若 $u(k-1) < u_{\max}$, 则只累加正偏差, 由此避免了控制量长时间停留在饱和区。图 4 为应用抗积分饱和的 PI 算法流程图。

设计中存在本身适用环境的特点: 要考虑在发生配网接地故障时对恒流信号源的保护。由于注入信号源是经过 PT 接入配网的, 而且是通过不断向配网注入恒流信号来达到检测的目的。在正常状况下, 信号源按照上述的控制策略就可以正常工作, 但当发生接地故障时就不一样了, 这时配网将会产生一个约为 110 V 的电压在信号源上, 所以必须采取保护措施, 防止信号源因为过流而被打坏。为了防止故障以及其可能造成的过电压对信号源的损坏, 这里采用在信号源的输出端加装一个继电器开关来达到保护信号源的目的。但有一个矛盾就是继电器开关的动作时间为 5~20 ms, 而故障的发生和发展是瞬间的, 单单靠继电器开关并不能够保证对信号源的瞬间保护。采取的解决方法是在探测到故障发生时, 从软件上实现对 IGBT 管的封锁, 尽可能降低故障所带来的瞬时影响, 然后再由继电器开关来彻底关断故障。由于对 IGBT 管的关断所需的时间是微秒级, 所以在故障发生瞬间它就能及时动作, 弥补了继电器的不足。所以, 这里实质上采用两段保护, 使得信号源在故障发生时免遭损坏。从下面的仿真分析中可验证此保护方案的有效性。故障消失后, 继电器开关重新闭合, IGBT 管打开, 信号源恢复正常工作。

2.3 仿真分析

为了验证恒流信号源的工作原理与控制策略的正确性, 构建了基于 matlab/simulink 平台上的仿真模型。仿真模型按照图 3 的原理拓扑图搭建, 使用 PI 控制策略, 具体参数为: 输入幅值为 150 V 的三相工频电压; PI 控制器中的系数 $K_p=9$, $K_i=0.6$; PWM 发生器的载波频率为 10 kHz。通过改变输入的参考正弦波, 即调制波的频率, 即可得到所需要的对应频率的恒流信号。图 5 与图 6 是取恒流信号频率为 10 Hz 所得到的出口电压波形与输出电流波形图(其中电压波形的横坐标单位为 ms, 纵坐标为 V; 电流波形的横坐标单位为 s, 纵坐标为 A)。

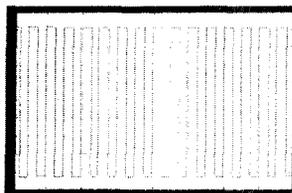


图5 恒流信号源出口电压仿真波形

Fig. 5 Simulation waveform of the output voltage

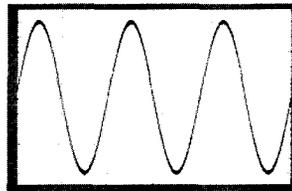


图6 恒流信号源输出电流仿真波形

Fig. 6 Simulation waveform of the output current

由仿真波形可知, 恒流信号源所采取的工作方式与控制策略是可行的, 由此所设计的装置可以产生稳定、频率可调的恒流信号。

下面是当接地短路故障突然发生时, 按照上一部份所描述的保护控制方法采取保护信号源的措施, 图7与图8为恒流信号源的出口电压波形与输出电流波形图。

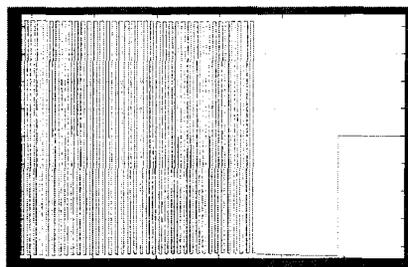


图7 接地故障发生时出口电压仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of the output voltage

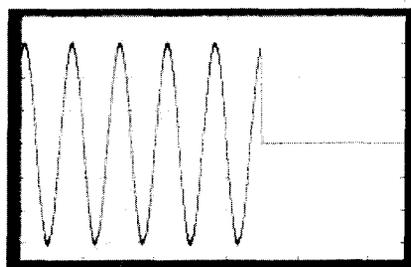


图8 接地故障发生时信号源的电流输出波形

Fig. 8 Simulation waveform of the output current

由图 7、图 8 可知, 按照上一节所描述的保护措施, 在检测到发生接地短路故障的瞬间, 第一步所采取的措施是立即关断 IGBT, 封闭其 PWM 脉冲输出(此时, 由于恒流信号源连接的平波电抗器所具有的感性, 使得出口电压不能突变, 直到电流释放完全为止, 正如图 7 所描述的波形), 同时启动继电器开关, 命令其断开, 使信号源实现与故障的彻底隔离, 有效地保护信号源。

由上面对信号源不同的工作状态的仿真结果可知, 所设计的恒流信号源具有良好的稳态响应特性, 从暂态到稳定的响应时间在一个周波以内。另外, 所制定的保护控制措施可以方便且有效地使信号源

免受短路接地故障所带来的损坏。

2.4 软件开发

恒流信号源的软件设计主要分为主程序设计和中断处理程序设计, 图 9 和图 10 分别为各自的程序流程图。

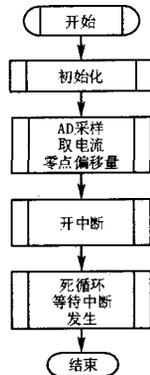


图9 主程序流程图

Fig.9 Diagram of the main program flow

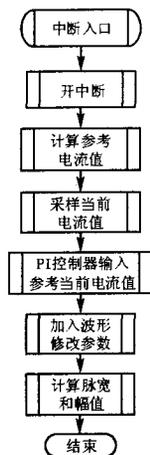


图10 中断处理程序流程图

Fig.10 Diagram of the interrupt program flow

主程序里的初始化是指 TMS320LF2407 控制器功能寄存器的初始化过程, 而且值得注意的是, 对 PWM0, PWM1, CANTx, CANRx 等具有特殊引脚在复位的时候是把它们设成 GPIO, 而当有需要时, 才通过改变控制寄存器, 把它们设为特殊功能。其中主要工作是对定时寄存器数值赋值。另外, 在实际当中, 由于各种干扰的存在, 当输入信号量为零的时候, AD 采样转换以后的数值不一定为零。这就需要在信号量为零的时候采样, 计算得到一个零点偏移量。在以后采样中要减去这个零点偏移量, 才是实际信号量的反映。在中断处理程序中, 参考正弦信号波形的计算是通过 5 阶泰勒展开式近似函数来计算的, 然后采样电流值输入 PI 控制器, 计算脉宽。

3 信号源引起的测量误差分析

由上述测量原理可知, 信号源的测量精度取决于信号的频率, 所以对频率的误差分析是必不可少的。由式 (2) 可知

$$I_C = 3\omega CU = \frac{\omega U}{\omega_0^2 L},$$

由此式对 ω_0 求导, 可得

$$\frac{\Delta I_C}{\Delta \omega_0} = -2 \frac{\omega U}{L} \times \frac{1}{\omega_0^3},$$

$$\text{即 } \Delta I_C = -2 \frac{\omega U}{L} \times \frac{1}{\omega_0^3} \times \Delta \omega_0,$$

由测量误差的综合处理方法, 可以得到由频率引起的相对误差为:

$$\left| \frac{\Delta I_C}{I_C} \right| = \left| \frac{-2 \frac{\omega U}{L} \times \frac{1}{\omega_0^3} \times \Delta \omega_0}{\frac{\omega U}{\omega_0^2 L}} \right| = 2 \times \frac{1}{\omega_0} \times \Delta \omega_0 = 2 \times \frac{1}{f_0} \times \Delta f_0 \quad (4)$$

由方程 (4) 可知, 测量电容电流的相对误差与信号源频率 f_0 成反比。而由第一部分可知, 信号源的频率设计范围为 10~90 Hz, 所以相对误差的最大误差出现在 10 Hz 处, 即

$$\left| \frac{\Delta I_C}{I_C} \right|_{\max} = \left| \frac{\Delta I_C}{I_C} \right|_{f_0=10} =$$

$$2 \times \frac{1}{10} \times \Delta f_0 = 0.2 \Delta f_0 \quad (5)$$

当 $\Delta f_0 = 0.05$ Hz 时, $\left| \frac{\Delta I_C}{I_C} \right| = 0.2 \times 0.05 = 0.01$ 。即对于

信号源频率为 0.05 Hz 的分辨率, 电容电流测量的相对误差的最大偏离值为 $\pm 1\%$ 。而且这只是最坏情况的误差, 实际上 f_0 将会是一个大于 10 Hz 的值, 所以如果信号源的频率精度在 0.05 Hz 以上, 那么由此所引起的电容电流测量的相对误差将在 $\pm 1\%$ 以内, 此测量精度是令人满意的。

4 试验验证

4.1 试验线路

试验线路主要分为两个部分：恒流信号源与模拟电网，它们之间通过变比为 10000:200 的 PT 连接。PT 的一次侧（高压侧）用来模拟实际电网，实际试验用的是 10 kV 的模拟电网，模拟电网里的电容是模拟电网中线路对地电容，而且模拟电网中还接有消弧线圈；PT 的二次侧（低压侧）是恒流信号源。该实验目的是检测该信号源的工作稳定性和精确度。试验接线图如图 11 所示。

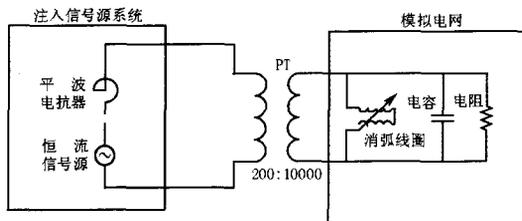


图 11 试验接线图

Fig.11 Diagram of the experiment circuit

4.2 波形与品质

根据上述试验线路进行试验，下面记录当频率设定为 10 Hz 时，恒流信号源正常工作状况下的出口电压与输出电流的实验波形图，如图 12、13 所示。

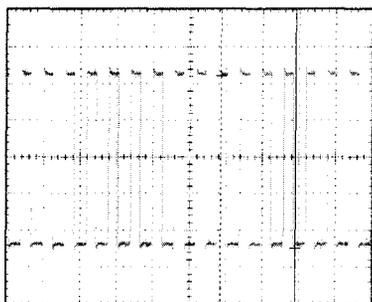


图 12 恒流信号源出口电压实验波形（正常工作）

Fig.12 Experiment waveform of the output voltage in the normal working state

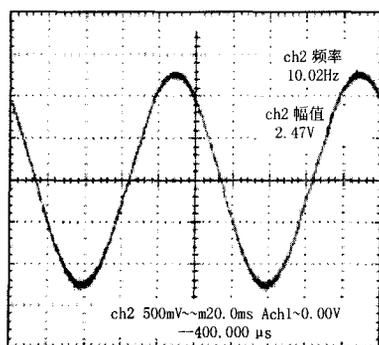


图 13 恒流信号源输出电流实验波形（正常工作）

Fig.13 Experiment waveform of the output current in the normal working state

当发生接地故障时，启动保护控制措施，得到以下的出口电压与输出电流的实验波形，如图 14、15 所示。

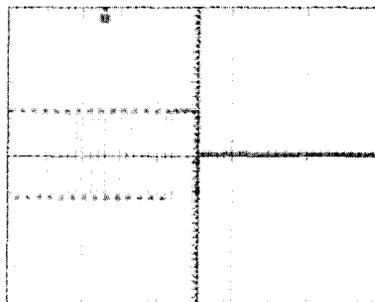


图 14 恒流信号源出口电压实验波形（故障发生）

Fig.14 Experiment waveform of the output voltage in the ground fault

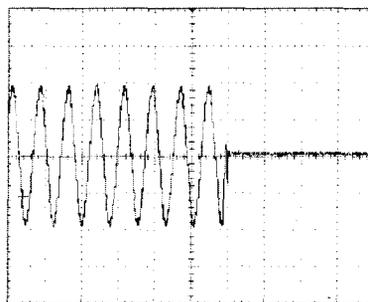


图 15 恒流信号源输出电流实验波形（故障发生）

Fig.15 Experiment waveform of the output current in the ground fault

由上面的波形记录可看出，恒流信号源在正常工作与发生故障时的电压电流波形都与仿真模型的一致，从而在实验层面证明了设计的正确性。

为了进一步检验信号源所产生的波形的质量，改变恒流信号源的输出频率，并对各个波形进行频谱能量分析：用功率计测量 10 Hz、30 Hz 和 60 Hz 三个频率波形的能量分布情况，可测得在这三个基频上的能量占总能量的百分比为：99.1%、98.9%和 98.6%。由此可知，信号源所产生的波形的能量绝大部分集中在所设定的频率上，这充分说明信号源的精度很高，具有较好的性能。

由于信号的频率是决定测量精度的最主要因素，所以对信号源所产生的恒流信号的频率作进一步误差分析是必须的。观察电流频率稳定性，需要多次采样频率，观察其变化特点。在某个固定的频率上，多次测量频率可以观察频率在该频率上是否稳定。表 1 为实验数据的记录表格。

对收集的数据分析，计算采样得到的数据把均值与设定值进行比较，可以看出除了个别频率点外其它的误差都在 0.05 Hz 以下。并且当中心频率越

大, 离散程度就越大。这是符合客观规律的。

5 结论

本文开发了一个基于 DSP 和智能功率模块的变频恒流信号源, 该装置实际用于应用注入法检测配网的对地电容。论述了该信号源的设计原理、要求

与控制方法, 并对该装置可能引起的误差进行了理论分析。经过对各种工作状况下的仿真与实验研究, 结果表明所设计的变频恒流信号源具有较高的精度, 完全符合设计要求, 为将来应用注入法检测配网对地电容奠定了坚实的基础。

表 1 各个频率点上采样数据的处理结果

Tab.1 Data of the sampled frequency

设定频率值	实际频率平均值	偏差	反应离散程度	均方差	标准偏差
10	9.990 938	-0.009 1	0.034 952 591	0.019 547	0.036 099
30	29.995 63	-0.004 4	0.109 770 713	0.192 794	0.113 371
40	40.050 63	0.0506 3	0.124 923 414	0.249 694	0.129 02

参考文献

- [1] 要焕年, 等. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
YAO Huan-nian, et al. Resonant Grounding in the Power System[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [2] 曾祥君, 等. 基于注入变频信号法的消弧线圈接地系统控制与保护新方法[I]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 31-36.
ZENG Xiang-jun, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequent Current[I]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 31-36.
- [3] 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.
WANG Chong-lin. Neutral Grounding and Arc Suppression Coil[I]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1999.
- [4] 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.
- [5] 李景禄, 等. 配电网自动跟踪补偿消弧装置[J]. 变压器, 2000, 37(10): 33-37.
LI Jing-lu, et al. Automatic Tracking Compensation Arc-suppression Apparatus Used for Distribution Networks[J]. Transformer, 2000, 37(10): 33-37.
- [6] 李玲玲, 等. 消弧电抗器自动跟踪的调谐技术[J]. 低压电器, 2003.
LI Ling-ling, et al. Technology of Automatic Tuning for Arc-Extinguishing Reactor[J]. Low Voltage Electric, 2003.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 2 版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
LIU Jin-kun. Advanced PID Control and MATLAB Simulation(2nd Edition)[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004.
- [8] 徐明远, 邵玉斌. MATLAB 仿真在通信与电子工程中的应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2004.
XU Ming-yuan, SHAO Yu-bin. Application of MATLAB Simulation on Communication and Electronics Engineer[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004.

收稿日期: 2006-11-18; 修回日期: 2006-12-21

作者简介:

李毅敏(1981-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备在线检测与配网自动化; E-mail: carrot2004@sjtu.edu.cn

蔡旭(1964-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 配网安全与电力电子、电能质量控制与用户电力、配网自动化与保护。

(上接第 40 页 continued from page 40)

- [9] Roy R, Kailath T. ESPRIT-estimation of Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques [J]. IEEE Trans on Acoust, Speech, Signal Process, 1989, 37(7):984-995.
- [10] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG Xian-da. Modern Signal Processing, Second Edition[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [11] Manolakis D G, Ingle V K, Kogon S M. Statistical and Adaptive Signal Processing[M]. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [12] Bollen M H J, Styvaktakis E, Gu I Y H. Categorization and Analysis of Power System Transients[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3):2298-2306.

收稿日期: 2006-10-22; 修回日期: 2006-12-23

作者简介:

牛卢璐(1981-), 女, 讲师, 主要从事电能质量, 信号处理, 机电一体化方面的教学和研究工作。E-mail: niululunl@gmail.com