

基于变频信号法的一种对地电容电流检测系统

林凌, 刘明光

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 现有的基于变频信号法的对地电容电流检测系统多采用 PWM 逆变的方式作为扫频信号源, 在应用中受到较多制约。对地电容电流检测系统进行重新设计, 检测系统的测量单元采用双单片机模式, 信号源部分使用单片机控制 DAC 芯片作为数控信号源, 经模拟实验验证在该应用中其性能优于传统的 PWM 逆变方式扫频信号源。相位测量部分由 C8051F20 片上系统兼顾相位检测与通信功能, 上位机软件基于 C/S 构架搭建。该检测系统测量一次电容电流的时间不超过 10 s, 经现场实验验证了样机的测量误差在 $\pm 2\%$ 以内, 可直接应用于中压配电网的预调式消弧线圈, 进一步设计后可应用于随调式消弧线圈。

关键词: 对地电容电流; 消弧线圈; 变频信号法; 双单片机系统; 系统通信

A capacitive current detecting system based on variable frequency method

LIN Ling, LIU Ming-guang

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The existing line-to-earth capacitive current detecting system based on variable frequency method uses PWM inverter as variable frequency source, which has many constraints in practical use. This paper redesigns the detecting system. Each measure unit is constructed with double single-chip computer model and uses single-chip to control the DAC chip as the variable frequency source. The model experiment proves that the DAC type variable frequency source has better performance than the source based on PWM inverter. The system-on-chip of C8051F20 is in charge of the phase detection and communication function. The build of upper computer software is based on the C/S architecture. This detection system can detect the capacitive current within 10 seconds and the field experiment proves that the measuring error is under $\pm 2\%$. This system can be directly applied to the preset arc suppression coil in medium voltage distribution network; it can also be applied to the post-set arc suppression coil after further designed.

Key words: line-to-earth capacitive current; arc suppression coil; injecting variable frequency method; double single-chip computer model; system communication

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)23-0044-06

0 引言

我国大部分 6~35 kV 的中压配电网都已经采用中性点经消弧线圈接地系统^[1-2]。由于电网中电缆线路的比重不断增大, 而电缆线路产生的对地电容电流比同等长度架空线路大几十倍, 从而使系统发生单相接地时将产生较大的对地电容电流, 极易使接地点无法正常熄弧, 甚至产生弧光接地过电压引起相间短路^[3-4], 故能否一直保持对配电网对地电容电流的准确跟踪, 使消弧线圈一直处于正确的补偿位置, 是保证配电网安全稳定运行的重要环节^[5]。

目前国内外对消弧线圈的调谐, 已有实际经验或者理论较为成熟的方法包括极值法、相位法和附加电源法等^[6-7]。极值法通过调节消弧线圈档位使

中性点位移电压达到最大值, 认为此时消弧线圈对电容电流实现全补偿^[8], 这种方法的灵敏度太低。相位法在测量过程中假设两相对地分布电容相等^[9], 同样在测量精度上达不到要求。附加电源法包括附加恒频电源和附加变频电源, 附加恒频电源法在二次侧附加恒定频率电源, 通过调节消弧线圈电抗值使一次侧达到谐振状态, 此时可认为消弧线圈处于全补偿状态^[10]。这些方法在调谐时均需要调节消弧线圈的分接头, 不仅响应速度缓慢, 而且降低了消弧线圈的使用寿命。采用注入变频信号法可以避免上述缺点。

1 注入变频信号法测量电容电流

注入变频信号法的原理图与等效电路图如图 1 所示。

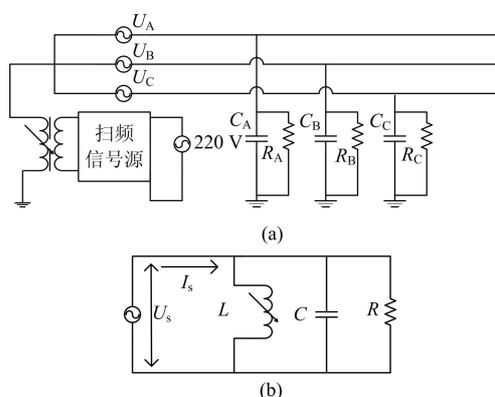


图1 注入法原理图与等效回路

Fig. 1 Schematic diagram and equivalent circuit of variable frequency method

图1(a)中 U_A 、 U_B 、 U_C 为系统相电压, C_A 、 C_B 、 C_C 分别为每相对地的分布电容, R_A 、 R_B 、 R_C 为每相对地的泄露电阻。在消弧线圈的二次侧附加变频信号源, 信号源的电源由 220 V 交流电源经降压整流后提供。

忽略系统中性点不平衡电压、线路自身阻抗及系统零序阻抗, 等效到二次侧的注入信号等值电路图如图 1(b)所示, 其中 I_s 为注入的电流信号, U_s 是注入信号在回路上产生的压降, L 、 C 和 R 分别为消弧线圈电感、系统对地电容以及系统对地电阻的等效值。当信号源在某一频率下使 L 和 C 发生并联谐振时, 可以推算出对地电容, 从而算出电容电流。一般采用脱谐度 v 表明消弧线圈对电容电流的补偿情况, 如式(1)所示。

$$v = \frac{I_C - I_L}{I_C} = 1 - \frac{X_C}{2\pi f L} = 1 - \frac{f_x^2}{f^2} \quad (1)$$

式中: I_C 为系统对地电容电流; I_L 为消弧线圈提供的补偿电流; X_C 为配电网对地电容容抗; L 为消弧线圈投入电感; f 为系统频率; f_x 为注入信号源频率。

当在 f_x 下发生谐振时, 将 $L=1/(2\pi f_x)^2 C$ 带入式(1), 则对地电容电流可以表示为式(2)。

$$I_C = \frac{U_\phi}{X_C} = \frac{U_\phi f}{2\pi L f_x^2} \quad (2)$$

式中: U_ϕ 为系统相电压; L 为消弧线圈投入电感。

当 L 与 C 发生并联谐振时, 显然有 $R=U_s/I_s$, 通过装设的电流和电压互感器测得 U_s 和 I_s 的值, 即可计算出对地绝缘电阻, 从而算出电网阻尼率 $d=1/R\omega C$ 。阻尼率代表了电网的绝缘情况, 当阻尼率大于 10%时, 表示电网的绝缘发生了一定程度的降低, 因此可以通过监测电网的阻尼率来监测电网

的绝缘程度。

为了能够线性地补偿对地电容电流, 消弧线圈往往工作在远离磁化曲线膝点的线性区域, 当在二次侧附加变频电流 I_s 后, 在消弧线圈的铁芯中产生磁通为

$$\phi_s = N_s I_s \frac{\mu A}{l_c} \quad (3)$$

式中: N_s 为消弧线圈二次侧匝数; A 为铁芯横截面积; l_c 为铁芯磁路长度; μ 为铁芯磁化率。

补偿电流在消弧线圈中产生的磁通为

$$\phi_L = N_L I_L \frac{\mu A}{l_c} \quad (4)$$

式中, N_L 为消弧线圈一次侧匝数。

一般而言, 中压配电网消弧线圈一二次侧的变比 $N_L/N_s > 10$, 补偿电流达到十几安培, 而附加电源的电流在两三安培左右, 所以 ϕ_L 比 ϕ_s 大几十到上百倍, 假如 ϕ_L 与 ϕ_s 方向相同, 也不会使消弧线圈出现饱和而影响正确补偿, 但在实际的装设过程中仍应使 ϕ_L 与 ϕ_s 反向, 保证消弧线圈的正常运行。

现有的基于注入变频信号法的电容电流检测系统, 多采用开关电源的方式作为扫频电源^[11-12], 此种方法在产生 PWM 波形时, 通过不停改变调制周期来实现扫频。假如通过更改调制波的频率改变调制周期, 就意味着还需要在调制波上先实现扫频效果; 而采用微处理器控制 PWM 波形变频的话, 在每次频率改变时, 不仅需要改变调制周期, 还需要对 PWM 脉冲序列的每个脉冲宽度进行重新计算, 同时还要避免开关管在工作时进入饱和区^[11], 在控制上比较复杂。此外, 由于 PWM 逆变根据冲量等效原理, 对于阻性和感性负载效果较好, 而消弧线圈测量和调谐的过程中不可避免会出现欠补偿的情况, 从而使负载呈容性, 此时 PWM 波形不能等效于其希望输出的波形。为此, 本文对电容电流检测单元的信号源及相位测量部分进行重新设计, 并结合系统通信功能设计了一套电容电流检测系统。

2 电容电流测量单元的软硬件设计

式(2)中, U_ϕ 可由电压互感器获知, f 为系统工频, L 根据补偿需要确定, 故电容电流测量单元的主要目的是测得谐振频率 f_x 。

每个测量单元的硬件包括信号源部分和相位测量部分。信号源部分主要由 AT89C52 单片机和 DAC0832 组成。而相位测量系统则由 SoC 片上系统 C8051F20 为核心构成。之所以采用双单片机结构, 是因为 89C52 单片机的定时器控制产生扫频信

号, 兼顾其他任务的话会由于中断优先级等原因导致定时器中断被打断, 从而导致输出的波形失真; 而相位测量部分需要兼顾与信号源控制芯片和上位机之间的通信, 需要至少两个串行通信接口和其他较为完善的片上资源, C8051F20 作为一个完整的片上系统可以胜任这种要求。每个测量单元的结构图如图 2 所示。

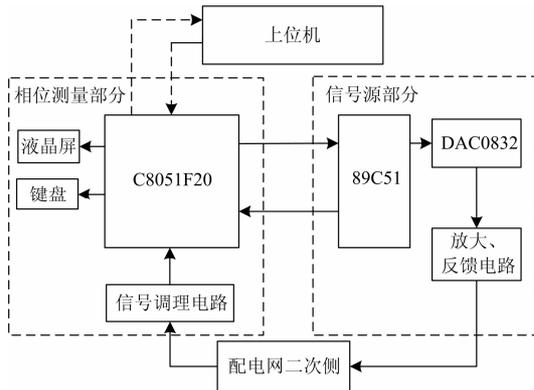


图 2 测量单元结构图

Fig. 2 Structure of the measuring unit

2.1 扫频信号源的实现

检测系统中的扫频信号源不仅需要保证足够的扫频范围, 还需要确保扫频的精度。除此以外信号源的幅值需保持适中, 太大可能对配电网产生不良影响, 太小则增加了测量难度。经研究表明^[11,13], 当注入信号源的电流幅值在 1~5 A 时, 经电压互感器折合到一次侧仅为毫安级别, 不会影响电网运行; 而扫描频率在 20~90 Hz 之间可以满足检测系统对扫频范围的需要。

为了提高测量速度, 扫频的方式采用二分法。先由整个扫频范围的中点开始进行扫描, 根据 I_s 和 U_s 的相位关系, 判断扫描频率偏大还是偏小, 假如 I_s 超前 U_s , 就向频率表正方向上溯下一个中点频率, 反之则向负方向下溯下一个中点频率, 逐渐逼近最终的谐振频率, 每完成一次扫频过程用时不超过 10 s。扫频程序的流程图如图 3 所示。

通过单片机控制 DAC 芯片的方式可以方便地产生符合要求的扫频信号。8 位 DAC0832 芯片内部结构为倒 T 型 R-2R 网络, 采用双极性电压输出电路输出交流信号。在单片机程序中存储一个长度为 256 的字符型数组, 每个元素的值根据波形幅度变化确定, 以一定的时间间隔将数组元素送入 DAC 芯片就能产生相应的波形。扫频时对频率的改变就是通过改变将数组元素送入 DAC 的时间间隔来实现的。该时间间隔由单片机的十六位定时器确定,

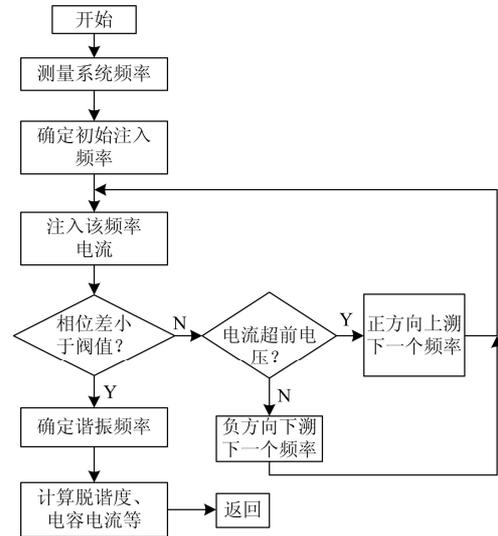


图 3 扫频程序流程图

Fig. 3 Block diagram of the sweep frequency program

十六位定时器共有 65 536 个不同的定时时间, 通过外接晶振细分两个定时时间之间代表的频率间隔, 可以使扫频信号相邻两个频率的差值在 0.1 Hz 以内。

DAC 芯片输出的电压信号经过两级运放放大后通过引入电流负反馈稳定输出的电流。由于双极性晶体管的驱动电流较大, 输出电流过小而几乎不可取, 故电流负反馈由场效应管引入, 场效应管不仅驱动电流小、输出电流大、电流噪声低, 而且在热稳定性及功耗上也有较好表现。稳流电路示意图如图 4 所示。

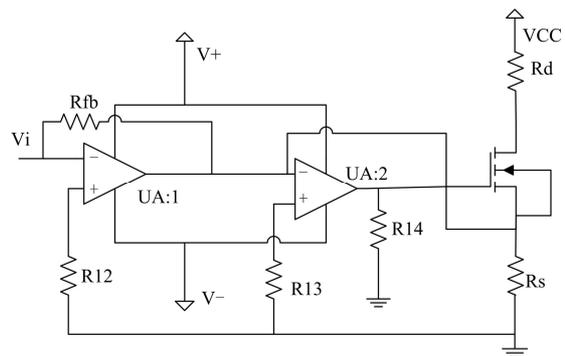


图 4 电流反馈电路示意图

Fig. 4 General view of the current feedback circuit

从场效应管漏极取输出电流, 末级运放的输出端经由 N 沟道场效应管源极连接至反向输入端构成负反馈。通过运放输入端的电压控制源极电流, 忽略较小的栅极电流, 从而控制漏极输出电流, 实现稳定电流输出的效果。通过此种方式大大提高了扫

频电源的内阻, 使运行过程中配电网折合到二次侧的内阻与扫频电源内阻相比几乎可以忽略, 避免了对地电容电流检测时配电网对检测系统的干扰。

将式(2)对 f_x 进行求导:

$$\Delta I_C = \frac{U_\varphi f}{2\pi L f_x^3} \cdot \Delta f_x \quad (5)$$

$$\left| \frac{\Delta I_C}{I_C} \right| = \frac{2\Delta f_x}{f_x} \quad (6)$$

由式(6)可见, 当扫频电源的频率为 20 Hz 时, 测量的最大误差为 $0.1\Delta f_x$; 当扫频电源的频率为 90 Hz 时, 测量的最大误差为 $0.02\Delta f_x$, 故总体误差范围为 $[0.02\Delta f_x, 0.1\Delta f_x]$ 。当 Δf_x 精确到 0.1 Hz 时, 最大误差在理论上不超过 $\pm 1\%$ 。

采用单片机配合 DAC 芯片产生变频信号, 与采用开关电源进行变频相比, 在控制时只需要由定时器控制输入 DAC 芯片的数组的时间间隔即可实现扫频, 在控制上远比采用开关电源逆变的方式简单; 由于采用 DAC 的方式产生波形且经过电流反馈, 无论负载呈感性或者容性, 都不会对注入信号的效果产生不良影响, 其通用性优于采用开关电源的扫频信号源。除此以外, 这种扫频信号源还避免了开关电源元器件易于损坏的缺点, 在造价和维护上比采用逆变器更有优势。

2.2 相位测量部分

如前所述, 扫频信号注入后产生相位不同的 U_S 和 I_S , 在相位检测时, 将 I_S 经电阻也转换为电压信号, 它与 U_S 经信号调理电路处理后送入单片机进行相位比较。信号调理电路主要由施密特触发器和 JK 触发器构成。施密特触发器将正弦电压信号整形为方波信号, 再将方波信号送入接为反相器的 JK 触发器的时钟口, 将方波占空比整形为 50%。再把两个方波信号相与, 输出方波的占空比即为两个正弦电压信号的相位差。由 C8051F20 测量输出方波信号的占空比, 对谐振状态进行判断, 并与产生信号源的控制芯片和上位机进行通讯。方波占空比的测量由外接高精度晶振配合 SoC 中的定时器搭建计数器来实现。先记录在整个方波周期里计数器的计数次数, 再记录方波为高电平时计数器的计数次数, 后者除以前者即为方波占空比。

设定一“谐振阈值”为 N , 在实际应用时仅检测计数器在方波为高电平时的计数次数, 当次数小于 N 时, 相当于测出的相位差为 0。显然, 设定的“谐振阈值”越低, 测量的精度越高。对于每个扫频频率默认设定测量四次, 当有三次以上计数次数低于 N 时, 则认为在此频率下已经发生了谐振。

2.3 系统通信设计

电网中各个测量单元之间的通信采用主从机模式, 主机同样以 C8051F20 为核心, 对每处测量单元的状态进行轮询, 各个测量单元则回应主机的请求将检测结果不断上报给主机。测量单元通过串行总线与主机进行通信, 通信协议采用 Modbus 协议, 每帧信息包括设备号、对地电容值、对地电容电流以及消弧线圈档位状态, 主机将这些信息处理后上报给上位机。

上位机的软件系统采用 C/S (Client/Server) 构架, 服务器为客户机提供网络数据, 客户机向服务器发出数据请求, 以获得网络资源。客户机采用 C# 为用户编写可视化的操作界面, 可以直观地显示出每个检测单元对地电流检测结果、对应消弧线圈补偿状态等。

3 实验测试

3.1 模拟实验测试

在实验室中用电容器组和 33.3 mH 的可调电抗器以图 1(b)为原型搭建模拟实验电路, 分别以传统的逆变方式扫频信号源和 DAC 方式的数控信号源结合相位测量部分对实验电路进行模拟实验, 通过测量电容值间接验证系统的可行性, 并对不同的扫频方式测量出的结果进行比较。测量结果如表 1 所示。

表 1 模拟实验结果

Table 1 Result for the model experiment

电容/ μF	DAC 扫频结果/ μF	PWM 扫频结果/ μF
14.1	13.96	13.50
15.6	15.49	15.87
16.5	16.61	16.27
9.4	9.50	9.25
8.1	8.05	7.89

由实验结果可以看出, 显然采用 DAC 数控信号源方式进行扫频测得的电容值更接近于实际值。由于在扫频的过程中采用二分法, 当相位检测系统检测出电流信号超前于电压信号时, 信号源负载呈容性, 此时冲量等效原理对负载已不适用, PWM 波形的等效效果失真, 造成相位检测系统测出的谐振点有偏差, 而 DAC 扫频方式则不会有此问题, 故在本应用中, 其扫频效果优于 PWM 方式。

3.2 现场运行测试

以某 35 kV/10 kV 降压变电站为检测对象, 用样机对 10 kV 侧配电网的对地电容电流进行检测。10 kV 侧母线主接线为单母线分段形式, I 段母线有

4 回出线，II 段母线有 3 回出线，正常运行时母联断开，仅投入 I 段母线，故样机仅对 I 段母线进行适配。I 段母线有四回电力电缆，其中 L1 为油浸纸电缆，导体截面为 240 mm²，长度为 6.56 km，L2、L3、L4 为交联聚氯乙烯电缆，导体截面为 240 mm²，长度分别为 4.25 km、1.85 km、1.55 km。根据电工手册，10 kV 油浸纸电缆每公里电容电流的经验值为 1.4 A/km，240 mm² 的 10 kV 交联聚氯乙烯绝缘电缆电容电流的经验值为 2.09 A/km。分别就线路不同投入情况下的电容电流进行测量并与理论值进行比较，结果如表 2 所示。

表 2 电容电流现场测量结果

Table 2 Result for the capacitive current in field experiment

投入 线路	消弧线圈 档位	谐振 频率/Hz	I _c 测量 值/A	I _c 理论 值/A
L1 L3	II	38.3	17.93	18.07
L1 L4	II	45.7	12.53	12.42
L2 L3	II	44.9	12.97	12.75
L2 L4	II	46.2	12.32	12.12
全投入	IV	45.8	25.52	25.17

本次样机测试中不包括单相接地故障情况的对地电容电流测量，因此在测试中消弧线圈主要起辅助测量电流的作用，只需保持远离工频谐振点即可，无需对原配电网进行太多改造。因实验条件所限测量单元直接将信息上报给上位机。上位机中运行的客户端将检测结果实时地显示在界面上，如图 5 所示。



图 5 上位机交互界面

Fig. 5 Interface of upper computer

由表 2 可见测量值与理论值的误差不超过 ±2%，这在工程上是完全可以接受的。产生误差的原因可能包含如下几个方面：

1) 检测系统本身误差，这个值受到测量设备精

度以及系统不对称度的影响；

2) 由于消弧线圈自身电阻的存在可能使等效电路变为混连，导致系统计算结果产生偏差；

3) 在实际运行中变电站对地存在容性泄露电流；

4) 理论值根据经验得出，本身就不够准确。

由于测量值和理论值之间的误差较小，故本设计方案是可行的，但在较为复杂的配电网中的表现，尤其是通信系统的配合方面还需实验检验。

可以直接将本系统应用于各 6~35 kV 采用了预调试消弧线圈的中压变配电所中，根据系统测量结果提前对消弧线圈档位进行调节；而对于能带高压调整的随调试消弧线圈，为了能够实现故障时快速调谐，在对本系统进行应用时还需根据调谐方式的不同对消弧线圈的控制设计接口。

4 结论

1) 采用 C8051 结合 DAC 芯片的方法产生扫频信号源，在扫频速度上可以达到要求，精度可达 0.1 Hz。扫频程序采用二分法，能够大大提高扫频速度，使每次测量时间在 10 s 以内。

2) 对于扫频信号源，在输出端通过电流反馈稳定输出电流，使测量单元和配电网之间的运行不互相干扰。

3) 采用 DAC 方式的扫频信号源比传统采用逆变器的 PWM 信号源在控制上大为简化，通过模拟试验验证 DAC 方式扫频避免了 PWM 信号在容性负载上等效果不佳的问题。

4) 检测现场的通信采用主从机模式，上位机软件基于客户机/服务器架构实现，实现了检测系统模块化和智能化。

5) 现场实验验证了本设计方案样机的测量结果误差不超过 ±2%，可将本系统直接应用于采用了预调试消弧线圈的变配电所中，进一步设计之后可应用于随调试消弧线圈。

参考文献

[1] 贾清泉, 石磊磊, 王宁, 等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.
 JIA Qing-quan, SHI Lei-lei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
 [2] 陈忠仁, 周程宏, 王妍. 配电网电容电流谐振测量方法的

- 应用[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 128-134.
CHEN Zhong-ren, ZHOU Cheng-hong, WANG Yan. Application of resonance measurement method for capacitive current of the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 128-134.
- [3] 吴茜, 蔡旭, 徐波. 具有两极磁阀的消弧线圈关键参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 224-230.
WU Xi, CAI Xu, XU Bo. Design of key parameters about two-stage magnetic valve arc-suppression coil[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 224-230.
- [4] 朱珂, 裴佑楠, 陈晨, 等. 自适应控流行故障选线方案[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 174-182.
ZHU Ke, PEI You-nan, CHEN Chen, et al. Self-adaptable and current controllable faulted line identification scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 174-182.
- [5] 苏继峰. 配电网中性点接地方式的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 141-148.
SU Ji-feng. Research of neutral grounding modes in power distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 141-148.
- [6] 孔宁, 尹忠东, 杨坡, 等. 基于 PWM 可控电抗器的自动调谐消弧线圈的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(23): 133-136.
KONG Ning, YIN Zhong-dong, YANG Po, et al. Study on automatic tuning arc suppression coil based on PWM-controlled reactor[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 133-136.
- [7] 赵牧函, 纪延超. 消弧线圈自动调谐原理的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(4): 50-54.
ZHAO Mu-han, JI Yan-chao. Study of automatically tuning principle of arc suppression coil[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2002, 14(4): 50-54.
- [8] 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(560): 10-13.
ZHU Shuai, LI Xiao-bo, CHENG Yu-kai, et al. Study on a new tuning method based on arc suppression coil[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(560): 10-13.
- [9] 王世欣, 刘桂同, 王崇林. 消弧线圈自动调节原理的分析与应用[J]. 煤矿开采, 2001, 43(增刊): 81-83.
WANG Shi-xin, LIU Gui-tong, WANG Chong-lin. Analysis and application of the theory of extinction coil automatic resonance tuning[J]. Coal Mining Technology, 2001, 43(S1):81-83.
- [10] 从伟, 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(9): 185-188.
CONG Wei, LI Pan-pan, LI Hong-tao, et al. Automatic arc suppression coil compensation technology based on fixed-frequency signal injection method[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 185-188.
- [11] 李毅敏, 蔡旭. 中压电网对地电容检测的注入信号源设计[J]. 继电器, 2007, 35(9): 45-57.
LI Yi-min, CAI Xu. Design of injecting signal source applied in measuring capacitive current of distribution network[J]. Relay, 2007, 35(9): 45-57.
- [12] 程路, 陈乔夫, 谢冰若, 等. 注入变频信号检测电网对地电容的改进[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 39-48.
CHENG Lu, CHEN Qiao-fu, XIE Bing-ruo, et al. Improved injecting variable-frequency signal method for detection of distribution network line-to-earth capacitance[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 39-48.
- [13] 李玲玲, 孙鹤旭, 王晓宏. 谐振接地电力网自动调谐的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 77-80.
LI Ling-ling, SUN He-xu, WANG Xiao-hong. A new automatic tuning method for resonance grounding power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 77-80.

收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-04-01

作者简介:

林 凌(1991-), 男, 硕士研究生, 从事变电站在线监测相关研究; E-mail: 12121518@bjtu.edu.cn

刘明光(1959-), 男, 教授, 博士生导师, 从事供电系统故障诊断与自动化装备相关研究。