



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 101706527 A

(43) 申请公布日 2010. 05. 12

(21) 申请号 200910218707. 9

(22) 申请日 2009. 10. 30

(71) 申请人 西安交通大学

地址 710049 陕西省西安市咸宁路 28 号

(72) 发明人 张国钢 宋政湘 柯春俊 翟小社

耿英三 王建华

(74) 专利代理机构 西安通大专利代理有限责任

公司 61200

代理人 徐文权

(51) Int. Cl.

G01R 19/25(2006. 01)

G01R 15/18(2006. 01)

G01R 23/16(2006. 01)

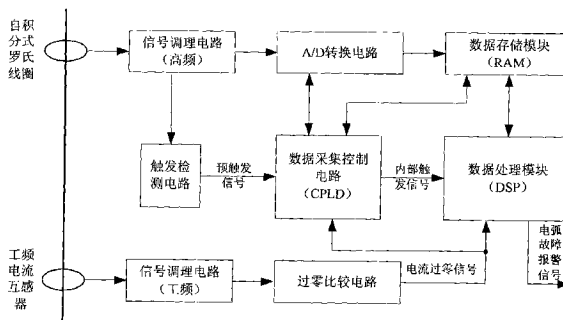
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 2 页

(54) 发明名称

基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法

(57) 摘要

基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,采用自积分式罗氏线圈测量一次回路中的暂态高频电流,并对高频电流作频谱分析;采用中断触发和定时器/计数器计数方法测量工频电流过零时刻和暂态高频电流信号出现时刻的时间差,以确定高频电流出现在被保护回路负载电流的相角位置,并根据高频电流的频谱特征和工频电流信号出现的相角位置及其规律性判断是否产生电弧故障。本发明能在正常供电时检测电弧故障,受安装位置局限小,并能将其与正常分/合电路时产生的暂态电流及开关电源等电力电子负载电流相区别,减少和避免误动作。



1. 基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,通过检测被保护回路的电流的高频分量确定是否产生电弧故障,其特征包括以下步骤:

1) 将被保护回路导线穿过罗氏线圈,导线中电流通过耦合在罗氏线圈的磁场产生感应电流,感应电流经取样电阻转换为电压信号,再经过高频信号调理电路,转化为输入 A/D 转换电路和触发检测电路的模拟信号;由触发检测电路产生的预触发信号送入数据采集控制电路;在数据采集控制电路的控制下,通过 A/D 转换电路将调理后的信号转化为数字量,并存储在数据存储模块中;

同时,被保护回路导线穿过工频电流传感器,工频电流传感器的输出信号经过工频信号调理电路,转化为输入过零比较电路的工频模拟信号,再经过过零比较电路处理后,生成工频电流过零信号,并以边沿触发信号的形式分别输入到数据采集控制电路和数据处理模块;

2) 数据采集控制电路接收到工频电流过零信号后,启动内部的定时/计数器,当在计时时间 5ms-10ms 内检测到预触发信号,判定为有效触发信号;数据采集控制电路启动 A/D 转换,并将转换结果连续地记录在数据存储模块的缓冲区中;当数据缓冲区(16KB)满时,数据采集控制电路停止 A/D 转换和内部的定时/计数器,并向数据处理模块发出内部触发信号;

3) 数据处理模块检测到过零比较电路输出的触发信号时,启动数据处理模块内部的定时/计数器,当检测到数据采集控制电路发出的内部触发信号时,以中断方式启动高频电流出现时工频电流相位和低频电流频谱特征分析的计算任务;

4) 数据处理模块中,依据内部的定时/计数器的当前计数值和工作频率计算高频电流出现时的工频电流相位,将求取的高频电流出现的时刻值与上个工频电流半波周期的计算结果比较,若相位误差大于 $\pi/50$ 弧度或时间误差大于 0.2ms,则复位电弧故障计数器;存储当前的相位计算结果,作为后续比较的参考值;

5) 数据处理模块中,利用数据存储模块中记录的波形数据计算高频电流的特征频率值序列以及其与参考值序列的平均相对误差,若高频电流特征频率值与参考值的平均相对误差大于 5%,则复位电弧故障计数器;存储当前高频电流的特征频率值序列作为后续比较的参考值,并关闭内部的定时/计数器;

6) 重复上述步骤 2) ~ 5), 计算下个工频电流半波周期内,高频电流出现的工频电流相位、高频电流特征频率等参数,并将其与上次结果作比较,若在设定误差范围内即高频电流出现时工频电流相位的误差 $< \pi/50$, 高频电流特征频率的平均相对误差 $< 5\%$, 则指示为一个电弧故障周期,电弧故障计数器加 1, 否则,电弧故障计数器置 0; 将本次测量数据作为新参考值,重复上述步骤 2) ~ 5);

当连续检测到多个电弧故障周期,即电弧故障计数器 ≥ 20 , 对应于连续在 10 个工频电流周期中确认发现电弧故障,时间总计约 200ms, 则判断电路中有电弧故障产生,由数据处理模块输出电弧故障报警信号。

2. 根据权利要求 1 所述的基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,其特征在于:所说的罗氏线圈是工作于自积分式状态,将一次回路中的高频电流信号即电流的高频分量转化为相同频率的电压信号;当测量高频信号时,自积分式罗氏线圈输出的电压大小与一次回路中高频电流大小近似呈线性关系。

3. 根据权利要求 1 所述的基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,其特征在于:所说的 A/D 转换电路采用采样率为 100MSPS 的 ADC 芯片,并利用 CPLD 构成信号采集控制电路,来控制 A/D 转换电路对信号进行采样和数值化,并将转换结果按照数据存储模块的时序要求,传送给数据存储模块。

4. 根据权利要求 1 所述的基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,其特征在于:所说的计算高频电流出现时被保护回路负载电流相位的计算方法为,数据处理模块通过采集过零比较电路输出的电流过零信号获得工频电流过零时刻,再对工频电流过零信号与内部触发信号之间间隔时间计时的方法计算相位。

5. 根据权利要求 1 所述的基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,其特征在于:所说的数据处理模块:

1) 对存储模块中记录的高频电流的数据进行 FFT(快速傅里叶变换)变换,获得反映信号功率密度与频率关系的频谱曲线,利用数学形态滤波方法对该频谱曲线进行平滑处理后,求取曲线上信号功率密度峰值对应的频率点,并按照信号功率密度值“由大向小”对这些频率进行排序,顺次取出对应于功率密度最大的前 M 个频率 F_1 、 F_2 …… F_M 作为特征频率值序列,其中 M 取 3 ~ 7 内的整数;

2) 利用过零比较电路输出的工频电流过零信号启动数据处理模块内部的定时/计数器,利用中断方式获取数据采集控制电路输出的内部触发信号,并在中断服务程序中计算高频电流出现时被保护回路负载电流相位、分析高频电流特征频率值、计算该序列即当前的特征频率测量结果与参考值序列即上一次的特征频率测量结果的平均相对误差,以及判断电路中是否发生电弧故障;

3) 数据处理模块利用不同工频电流半波周期(10ms)中,高频电流信号的频谱参数和工频电流发生时刻的工频电流相位等特征参数的相关性来判别电路中是否发生电弧故障;即,计算当前工频电流半波周期中出现的高频信号的特征参数,并与前一次即上一个工频电流半波周期中的测量计算结果比较,若频谱、相位与前次测量结果满足设定的相关性条件即相位误差 $< \pi/50$,特征频率的平均相对误差 $< 5\%$,则电弧故障计数器加 1,否则计数器复位;每次计算任务执行完毕时,检查电弧故障计数器的计数值,若达到或超过设定阈值,该阈值为电弧故障计数器 ≥ 20 ,则给出电弧故障标志,发出报警信号;否则重复步骤 1)、2)。

基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种在低压供配电线路或供配电系统的电弧故障的检测方法,特别涉及一种基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法。

背景技术

[0002] 电弧故障常由于一束导线中某几根导线绝缘损伤或导电回路接头处脱开而引起,其电流可能小于线路的额定电流。在低压供配电线路和楼宇、家电、汽车、飞机等供用电系统内,都一定程度地存在着电弧故障的威胁。电弧故障的高隐蔽性,以及其强大的破坏力,容易造成设备损坏,引起火灾甚至爆炸,严重危害了大众的生命财产的安全。由于电弧的能量大,对设备、人员的危害很大,但是目前的熔断器、断路器等保护装置只能对过流、短路等情况进行检测和保护,不能起到对电弧故障的检测和保护的作用。因此,电弧故障的检测和保护的需要很迫切,而且其应用的领域非常广泛。

[0003] 利用电弧放电时的光、热、声音和电磁辐射等特性,国内外学者提出了一些方法来检测电弧。近年来,利用电弧的光效应,国外开发出了弧光检测与保护系统。如德国 Moeller 公司用于低压开关柜的电弧故障保护系统、ARCON ABB 的 ARC Guard System 电弧故障保护系统、芬兰 Vaasa 公司的 VAMP 系统等。这些系统都是基于检测电弧故障时发出的弧光以及过流双判据。对于利用弧光或者温度等物理量检测电弧故障,由于检测这些参数的传感器都必须安装在电弧故障发生的地方,而电弧故障发生的地点是不确定的,这就给全面检测供电线路中的电弧故障带来了不便。在已有的电弧故障检测技术中,如专利《电弧故障检测方法及其保护装置》等,分别从被保护回路电流幅值是否小于正常电流的幅值、电流波形正负半周是否对称、波形在过零点处有无平肩现象、波形陡峭 di/dt 是否过大等方面来判断是否产生电弧故障具有一定的实用性,但是以被保护回路电流时域波形的变化为判据的检测方法无法准确区别电弧故障所引起的电流波形畸变与一些电力电子负载所引起的电流波形畸变,会在一定程度上造成误判。

发明内容

[0004] 由于上述方法只利用电弧的光、热、声音、电磁辐射或电流突增 / 突降等时域特征来检测电弧故障的局限性和不足性。研究和实验发现,当用电回路中产生电弧时会同时将引发电路中出现暂态的高频电流,这种高频电流信号具有其规律性。本发明的目的在于提供了一种基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,通过判断电弧故障所引发的高频电流是否周期性产生以区别正常的开关动作产生的正常电弧;通过检测高频电流的频谱范围以区别于由于使用电力电子器件等而产生的一般高频谐波电流;并提供电弧故障报警信号以提示潜在的电弧故障危险,或输出控制信号供相应的保护装置动作,对发生电弧故障的电路进行保护。

[0005] 为达到上述目的,本发明采用的技术方案是:通过检测被保护回路的电流的高频分量确定是否产生电弧故障,其特征包括以下步骤:

[0006] 1) 将被保护回路导线穿过罗氏线圈,导线中电流通过耦合在罗氏线圈的磁场产生感应电流,感应电流经取样电阻转换为电压信号,再经过高频信号调理电路,转化为输入 A/D 转换电路和触发检测电路的模拟信号;由触发检测电路产生的预触发信号送入数据采集控制电路;在数据采集控制电路的控制下,通过 A/D 转换电路将调理后的信号转化为数字量,并存储在数据存储模块中;

[0007] 同时,被保护回路导线穿过工频电流传感器,工频电流传感器的输出信号经过工频信号调理电路,转化为输入过零比较电路的工频模拟信号,再经过过零比较电路处理后,生成工频电流过零信号,并以边沿触发信号的形式分别输入到数据采集控制电路和数据处理模块;

[0008] 2) 数据采集控制电路接收到工频电流过零信号后,启动内部的定时/计数器,当在计时时间 5ms-10ms 内检测到预触发信号即边沿触发,判定为有效触发信号;数据采集控制电路启动 A/D 转换,并将转换结果连续地记录在数据存储模块的缓冲区中;当数据缓冲区(16KB)满时,数据采集控制电路停止 A/D 转换和内部的定时/计数器,并向数据处理模块发出内部触发信号;

[0009] 3) 数据处理模块检测到过零比较电路输出的触发信号时,启动数据处理模块内部的定时/计数器,当检测到数据采集控制电路发出的内部触发信号时,以中断方式启动高频电流出现时工频电流相位和高频电流频谱特征分析的计算任务;

[0010] 4) 数据处理模块中,依据内部的定时/计数器的当前计数值和工作频率计算高频电流出现时的工频电流相位,将求取的高频电流出现的时刻值与上个工频电流半波周期的计算结果比较,若相位误差大于 $\pi/50$ 弧度或时间误差大于 0.2ms,则复位电弧故障计数器;存储当前的相位计算结果,作为后续比较的参考值;

[0011] 5) 数据处理模块中,利用数据存储模块中记录的波形数据计算高频电流的特征频率值序列以及其与参考值序列的平均相对误差,若高频电流特征频率值与参考值的平均相对误差大于 5%,则复位电弧故障计数器;存储当前高频电流的特征频率值序列作为后续比较的参考值,并关闭内部的定时/计数器;

[0012] 6) 重复上述步骤 2) ~ 5),计算下个工频电流半波周期内,高频电流出现的工频电流相位、高频电流特征频率等参数,并将其与上次结果作比较,若在设定误差范围内即高频电流出现时工频电流相位的误差 $< \pi/50$,高频电流特征频率的平均相对误差 $< 5\%$,则指示为一个电弧故障周期,电弧故障计数器加 1,否则,电弧故障计数器置 0;将本次测量数据作为新参考值,重复上述步骤 2) ~ 5);

[0013] 当连续检测到多个电弧故障周期即电弧故障计数器 ≥ 20 ,对应于连续在 10 个工频电流周期中确认发现电弧故障,时间总计约 200ms,则判断电路中有电弧故障产生,由数据处理模块输出电弧故障报警信号。

[0014] 所说的罗氏线圈是工作于自积分式状态,将一次回路里的高频电流信号即电流的高频分量转化为相同频率的电压信号;当测量高频信号时,自积分式罗氏线圈输出的电压大小与一次回路里高频电流大小近似呈线性关系。

[0015] 所说的 A/D 转换电路采用采样率为 100MSPS 的 ADC 芯片,并利用 CPLD 构成信号采集控制电路,来控制 A/D 转换电路对信号进行采样和数值化,并将转换结果按照数据存储模块的时序要求,传送给数据存储模块。

[0016] 所说的计算高频电流出现时被保护回路负载电流相位的计算方法为,数据处理模块通过采集过零比较电路输出的电流过零信号获得工频电流过零时刻,再对工频电流过零信号与内部触发信号之间间隔时间计时的方法计算相位。

[0017] 所说的数据处理模块:

[0018] 1) 对存储模块中记录的高频电流的数据进行FFT(快速傅里叶变换)变换,获得反映信号功率密度与频率关系的频谱曲线,利用数学形态滤波方法对该频谱曲线进行平滑处理后,求取曲线上信号功率密度峰值对应的频率点,并按照信号功率密度值“由大向小”对这些频率进行排序,顺次取出对应于功率密度最大的前M个频率 F_1 、 F_2 …… F_M 作为特征频率值序列,其中M取3~7内的整数;

[0019] 2) 利用过零比较电路输出的工频电流过零信号启动数据处理模块内部的定时/计数器,利用中断方式获取数据采集控制电路输出的内部触发信号,并在中断服务程序中计算高频电流出现时被保护回路负载电流相位、分析高频电流特征频率值、计算该序列即当前的特征频率测量结果与参考值序列即上一次的特征频率测量结果的平均相对误差,以及判断电路中是否发生电弧故障;

[0020] 3) 数据处理模块利用不同工频电流半波周期(10ms)中,高频电流信号的频谱参数和工频电流发生时刻的工频电流相位等特征参数的相关性来判别电路中是否发生电弧故障;即,计算当前工频电流半波周期中出现的高频信号的特征参数,并与前一次即上一个工频电流半波周期中的测量计算结果比较,若频谱、相位与前次测量结果满足设定的相关性条件即相位误差 $< \pi/50$,特征频率的平均相对误差 $< 5\%$,则电弧故障计数器加1,否则计数器复位;每次计算任务执行完毕时,检查电弧故障计数器的计数值,若达到或超过设定阈值,该阈值为电弧故障计数器 ≥ 20 则给出电弧故障标志,发出报警信号;否则重复步骤1)、2)。

[0021] 本发明以自积分式罗戈夫斯基线圈(Rogowski Coil,简称罗氏线圈)为高频电流传感器,具有线性度范围宽,抗干扰能力强、与一次回路有效电隔离等优点。通过高速A/D采样电路和高速数据处理芯片,在电流半波周期内检测和分析高频电流的特征参数,当连续若干周期检测到频谱特征相近且发生在被保护回路工频电流确定相角位置处的暂态高频电流信号时,则判断有电弧故障产生,连续累计10个工频电流周期中均检测到规律性出现的高频电流信号时,确认电弧故障并发出电弧故障报警信号。该方法能够在正常供电时检测电弧故障,并能将其与正常分/合电路时产生的电弧相区分,减少误动率,且不受安装位置限制。

附图说明

[0022] 图1是本发明的系统硬件整体结构示意图;

[0023] 图2是本发明中所采用的自积分式罗氏线圈结构及其等效电路图

[0024] 图3是本发明中数据处理模块中断响应过程的算法流程图

具体实施方案

[0025] 下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

[0026] 参见图1,本发明的系统硬件整体结构包括自积分罗氏线圈、信号调理电路(高

频)、A/D 转换电路、触发检测电路、工频电流互感器、信号调理电路(工频)、过零比较电路、数据采集控制电路、数据存储模块和数据处理模块。

[0027] 罗氏线圈输出的高频信号经信号调理电路(高频)和触发检测电路处理后,产生预触发信号,该信号被送入数据采集控制电路,启动高频信号采集;在数据采集控制模块的控制下,通过 A/D 转换电路将调理后的信号转化为数字量,并记录在数据存储模块中,供后级的数据处理模块使用;数字采集控制电路完成数据采集后发出内部触发信号,该信号启动数据处理模块的相角计算和频谱分析任务;

[0028] 工频电流传感器的输出信号经过工频信号调理电路,转化为模拟电压信号输入过零比较电路,经过零比较电路处理后,生成工频电流过零信号,该信号以脉冲触发的形式输入到数据采集控制电路和数据处理模块,分别用于启动数据采集控制电路和数据处理模块中的定时/计数器;

[0029] 数据处理模块利用其内部定时/计数器的脉冲计数方法来测量过零比较电路输出的工频电流过零信号和数据采集控制电路输出的内部触发信号之间的时间差,从而计算高频电流出现时被保护回路中工频电流的相位角。数据处理模块对数据存储模块中保存的高频电流信号的波形数据进行频谱分析,依据高频电流的频谱特征、出现时被保护回路电流相角等特征参数以及其发生的规律性来判断其是否为电弧故障所引发的高频电流,利用电弧故障计数器进行记录;当连续 10 个以上的工频电流周期中均检测到这种规律性的高频电流信号,则判断为被保护的电路中有电弧故障产生。

[0030] 参见图 2,本发明所采用的罗氏线圈为非磁性空心线圈(其尺寸为:内径 $a = 40\text{mm}$,外径 $b = 80\text{mm}$,高 $h = 24\text{mm}$,匝数 $N = 36$ 匝,用 $\Phi = 0.5\text{mm}$ 的铜线绕制),被保护导线回路穿过罗氏线圈,导线中电流通过磁场耦合在罗氏线圈的二次侧中产生感应电流,该电流经过线圈取样电阻 ($R_f = 0.5\Omega$) 转化为电压。该罗氏线圈电流传感器为自积分式工作状态,上限截止频率约为 45.5MHz 。

[0031] 本发明提出的基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法,具有以下技术特点:

[0032] 1. 基于电流高频分量时频特征的电弧故障检测方法检测被保护回路里出现暂态高频电流,对于由电弧故障引起的暂态高频电流其频率只与回路特征参数有关,而其频率远高于电网中通用的工频电流传感器检测到的谐波频率。

[0033] 2. 该检测方法通过判断电弧故障所引发的电流高频分量周期性出现的规律,以区别于开关电器正常操作、插头插拔等操作引起的一般性电弧(单次出现);由于电弧故障引起的被保护回路暂态高频电流频率较高 ($> 0.5\text{MHz}$),通过对高频电流的数字滤波及频谱判断等处理,能够将电弧故障引起的高频电流与由于应用普通电力电子负载引起的高频分量(一般小于 100kHz)相区分,减少误判;

[0034] 3. 罗氏线圈作为本发明的核心电流传感器其特征在于:罗氏线圈本身与被测电流回路没有直接的电的联系,而是通过电磁场耦合,因此与主回路有着良好的电气绝缘;由于没有铁芯饱和问题,测量范围宽,同样的绕组,电流测量范围可以从几安培到数百千安;频率范围宽,一般可设计到从 $0.1 \sim 100\text{MHz}$ 以上;测量准确度高,可设计到优于 0.1% ,一般为 $0.5\% \sim 1\%$ 之间。

[0035] 4. 利用在一个工频半波周期内对过零比较电路输出的工频电流过零信号和数据

采集控制电路输出的内部触发信号这两个脉冲信号之间的时间间隔计时,计算高频电流出现时刻被保护回路中工频电流的相角,分析其是否周期性出现,结合数据处理模块对不同工频半波周期内所采集到高频电流信号的频谱特征的相关性分析,作为判定该高频电流是否为电弧故障所引发的判据。

[0036] 基于上述特征,电流高频分量出现时被保护线路回路负载电流的相位角计算和电流高频分量的频谱分析包括以下步骤:

[0037] 1、被保护回路负载电路电流由罗氏线圈的采样电阻变换为电压信号,经过高频信号调理电路,分别输入 A/D 转换电路和触发检测电路,当触发检测电路判断高频电流超过设定阈值(可按照实测信号的峰-峰值的 10%-15% 设定,该实验装置中设置为 1V)发出预触发信号,该信号启动数据采集控制模块进行数据采集和存储;在数据采集控制模块的控制下,通过 A/D 转换电路将调理后的高频电流信号转化为数字量,并存储在数据存储模块中;

[0038] 工频电流传感器的输出信号经过工频信号调理电路,输入过零比较电路,过零比较电路检测到工频电流过零时,发出工频电流过零信号,该信号分别输入到数据采集控制模块和数据处理模块;

[0039] 2、数据处理模块检测到过零比较电路输出的工频电流过零信号时,启动内部定时/计数器,并记录内部定时/计数器的当前值;在定时/计数器计数过程中若检测到数据采集控制电路发出的内部触发信号,则再次记录定时/计数器当前值;求取两次计数差值,并根据其工作频率计算时间间隔以及对应的工频电流相位;

[0040] 计算相位完成后,数据处理模块利用数据存储模块中记录的波形数据计算高频电流的特征频率值序列以及其与参考值序列(上一个工频半波中高频电流的计算结果)平均相对误差,若高频电流特征频率值与参考值的平均相对误差计算结果大于 5%,则复位电弧故障计数器;否则,电弧故障计数器加 1,并存储当前高频电流的特征频率值序列作为后续比较的参考值,关闭内部的定时/计数器;

[0041] 3、重复上述过程,在每个工频半波周期内,计算高频电流出现的相位角和频谱特征参数,并将其与上个半波周期作比较,若在设定误差范围内(相位误差 $< \pi/50$, 频率平均相对误差 $< 5\%$),则进行计数。当连续检测到 10 个工频周期(计数值超过 20)出现高频电流,则判断有电弧故障产生,发出电弧故障报警信号。

[0042] 一次回路中电流高频分量测量及分析技术方案的实施包括以下步骤:

[0043] 1、选取适合高频电流测量的罗氏线圈参数,设计自积分式罗氏线圈用以测量一次回路中的电流高频分量。罗氏线圈的集总参数的等效电路如图 2 所示,其中 M 、 L_0 、 R_0 、 C_0 、 R_f 分别代表线圈与一次载流导体互感、线圈等效自感、线圈等效内阻、线圈等效电容以及线圈端接电阻。当测量高频电流信号时,自积分式罗氏线圈输出的电压大小与一次回路里高频电流大小近似呈线性关系, $i_1(t) \approx -L_0 u_0(t) / MR_f$ 。定义自积分式罗氏线圈的转移阻抗为线圈输出电压与一次回路高频电流的比值,该值可由通过数值计算获得或者利用标准信号源进行标定。

[0044] 2、罗氏线圈输出的电压信号经过高通(下限截止频率为 100kHz)滤波器滤除其中的低频干扰后,再经带宽为 50MHz 的运算放大器进行幅值调理,使之处于高速 A/D 电路和触发控制电路的模拟量输入电平范围内。

[0045] 3、采用高速的比较器（信号传播延迟时间 $< 7\text{ns}$ ），设定电弧故障暂态高频电流比较阈值（按照实测高频信号峰-峰值的 $10\% - 15\%$ 设定）。通过设定阈值可从硬件上滤除其他能量较小的射频干扰，提高存储模块对高速A/D转换器输出结果的存储有效性。当输入信号满足触发条件（超过阈值）时，发出预触发信号。

[0046] 4、高速A/D转换模块采用采样率为 100MSPS 的高速器件，其采样时钟由数据采集控制模块的CPLD电路提供；数据采集控制模块与数据存储模块构成高速FIFO（先入先出）存储器，以存储采集的信号波形，数据存储模块的存储容量由A/D采样率和采样总时间确定（如采样率 100MSPS ，采样时间 0.080ms ，可设计为 16KB ）；

[0047] 数据采集控制模块在工频电流过零信号后 $5\text{ms} - 10\text{ms}$ 内接收到预触发信号时，数据采集控制模块判定该预触发信号有效，启动A/D采样，并根据A/D转换器输出的状态信号，在转换完成时将数据取出送入数据存储模块。当数据采集缓冲区满时，数据采集控制模块给数据处理模块发出内部触发信号启动数据处理任务，并置数据存储模块在数据处理模块取走数据之前处于写操作无效状态。

[0048] 5、数据处理模块采用DSP作为核心，当接收到数据采集控制模块发出的内触发信号时，数据处理模块以中断响应方式执行工频电流相位计算和高频电流的频谱分析等处理任务，读取数据存储模块内的数据进行处理，判断是否产生电弧故障，并当处理完成后重置数据存储模块写操作有效以等待重新写入高频数据。

[0049] 6、在每个工频半波周期内，如果出现高频电流，则该高频电流信号被采样、存储和分析处理，并将其与上个半波周期的分析结果作比较，若在设定误差范围内（相位误差 $< \pi/50$ ，频率平均相对误差 $< 5\%$ ），则进行累计。当连续检测到20个工频半波周期中出现高频电流，则判断有电弧故障产生，发出电弧故障报警信号。

[0050] 如图3所示，数据处理模块中断响应过程的软件流程如下：

[0051] (1) 数据处理模块收到数据采集控制模块发出的内部触发信号，进入中断处理，然后到步骤(2)；

[0052] (2) 利用定时/计数器当前值与前一次记录值的差值，计算本次高频电流出现时刻与电流过零时刻的时间间隔 T ，然后到步骤(3)；

[0053] (3) 计算当前高频电流出现时刻与电流过零时刻的时间间隔 T 与参考值 T_{ref} 的误差 $|T - T_{\text{ref}}|$ ，如果计算结果小于 0.2ms （等价于工频电流的相位误差 $< \pi/50$ ），则到步骤(4)，否则到步骤(10)；

[0054] (4) 读入数据存储模块中的高频电流波形数据到DSP内部的存储器变量 $X[n]$ ，然后到步骤(5)；

[0055] (5) 对 $X[n]$ 中的波形数据进行FFT（快速傅里叶变换）变换，获得信号的频域数据（功率密度与频率的对应关系），存入内存变量 $Y[n]$ ，然后到步骤(6)；

[0056] (6) 利用数学形态滤波方法对变量 $Y[n]$ 中的频域数据进行平滑处理，将结果存入变量 $Z[n]$ ，然后到步骤(7)；

[0057] (7) 在变量 $Z[n]$ 中进行比较查找，依次求取 $Z[n]$ 所代表的功率密度与频率曲线上功率密度的峰值所对应的频率点，存入变量 $F[N]$ ，然后到步骤(8)；

[0058] (8) 并按照信号功率密度值“由大向小”对这些频率进行排序，顺次取出对应于功率密度最大的前 M 个频率点 F_1, F_2, \dots, F_M 作为该次测量信号的特征频率值， M 为常量，一般

可选取为 3 ~ 7 之间的整数), 然后到步骤 (9) ;

[0059] (9) 计算该次测量获得信号特征频率 $F[M]$ 与参考特征频率 $F_{ref}[M]$ 的平均相对误差

$$\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \left| \frac{F(i) - F_{ref}(i)}{F_{ref}(i)} \right| ; \text{若计算结果小于 } 0.05, \text{到步骤 (11), 否则到步骤 (10) ;}$$

[0060] (10) 清除电弧故障计数器, $Flag = 0$, 然后到步骤 (14)

[0061] (11) 设置电弧故障计数器, $Flag = Flag+1$, 然后到步骤 (12)

[0062] (12) 判断电弧故障计数值, 如果 $Flag < 20$, 到步骤 (14), 否则到步骤 (13) ;

[0063] (13) 发出电弧故障的报警信号, 然后到步骤 (14) ;

[0064] (14) 保存当前高频电流出现时刻与电流过零时刻时间间隔 T 为参考值 T_{ref} , 然后到步骤 (15) ;

[0065] (15) 保存当前高频电流的特征频率 $F[M]$ 为参考值 $F_{ref}[M]$, 然后到步骤 (16) ;

[0066] (16) 退出中断处理。

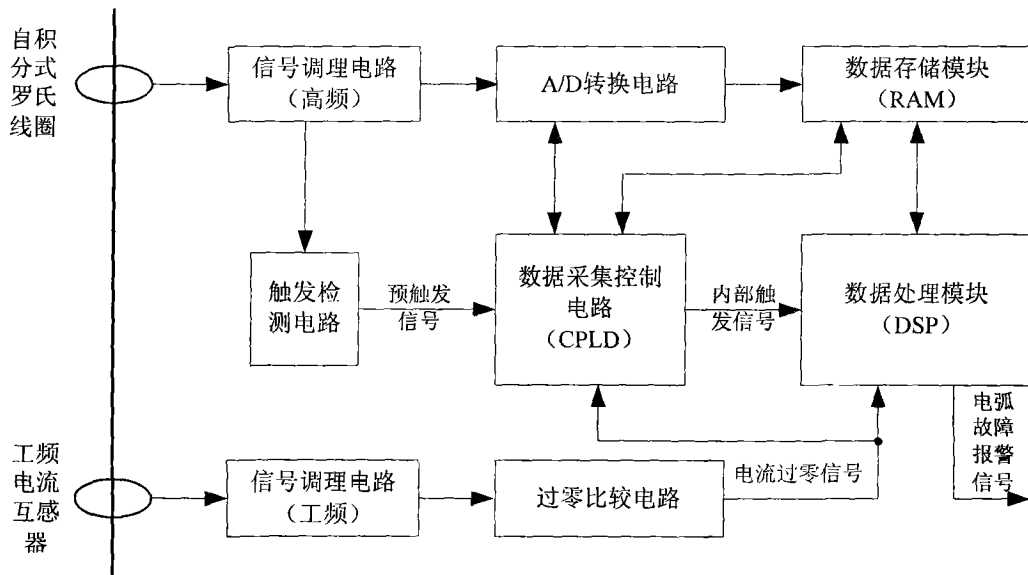


图 1

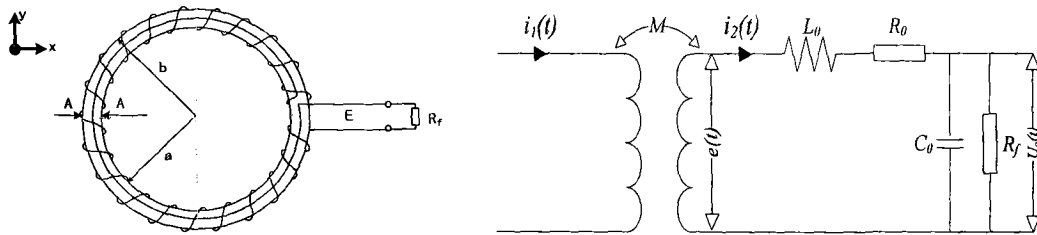


图 2

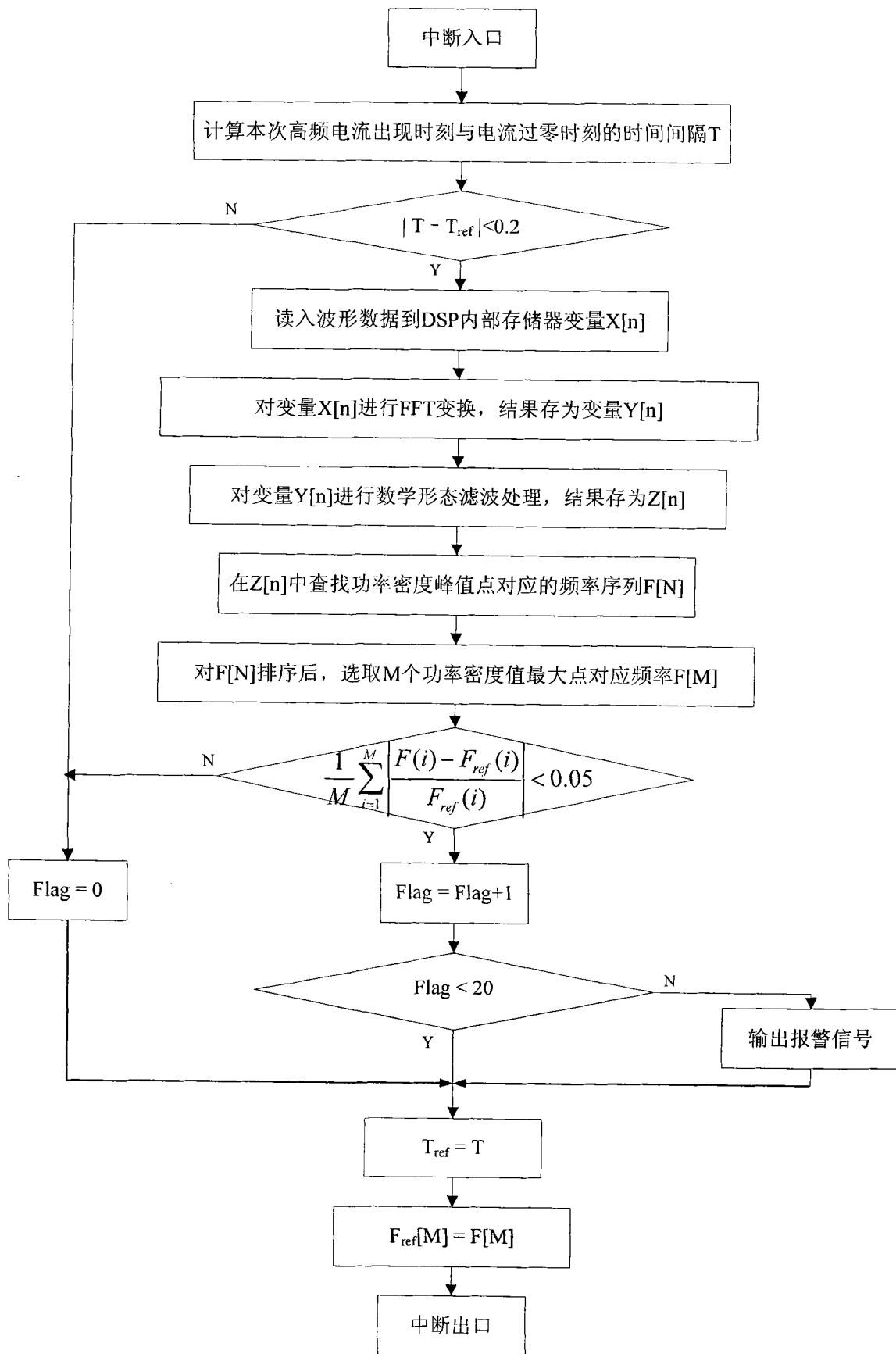


图 3