

# 基于半波真有效值的触/漏电故障电流检测

左金威<sup>1</sup>, 赵恒<sup>1</sup>, 陈重佑<sup>2</sup>, 肖先勇<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 电子科技大学, 四川 成都 610054)

**摘要:** 针对现有剩余电流保护装置存在的死区问题, 提出了一种基于半波真有效值的故障电流检测方法。将总剩余电流相邻的两个完整周波离散化后等相位点相减, 剔除总剩余电流中的正常剩余电流, 保留得到故障电流波形。首先利用幅值绝对值累加的方法确定故障发生周波, 接着计算故障发生周波之后的半个故障波形的真有效值, 从而实现了故障电流有效值的获取。利用建模仿真以及触/漏电实验实测数据对所提出的方法进行了验证, 证明了所提方法具有可靠性好、计算精度较高、有一定的抗噪声能力、响应时间短以及简便易行的优点, 很适合工程实际应用, 对新型剩余电流保护装置的开发有一定的参考价值。

**关键词:** 剩余电流保护技术; 故障电流; 幅值; 真有效值; 数字测量技术

**Abstract:** Aimed at the problem that the existing protective methods all have protective dead-zones, a method to detect fault current based on the true RMS of the half wave is proposed. After discretization, sampling point subtract the same phase point of total residual current to remove the normal residual current on the total residual current and remain fault current. Firstly, the sum of the absolute values of the amplitude is used to determine the occurrence of the fault current. Then the true RMS value of the half fault waveform is calculated after the fault occurs, thus obtaining the effective value of the fault current. The method can calculate the RMS of the shock/leakage current. The simulation and experimental samples are used for verification. The results show that the method has the advantages of good reliability, high precision, high anti-noise ability, short response time and simple operation. It is very suitable for engineering application, and has a certain reference value for the development of new residual current protection device.

**Key words:** residual current protection technology; fault current; amplitude; true RMS; digital measurement technology

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)03-0066-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.015

## 0 引言

电流动作型剩余电流保护装置(residual current devices, RCDs), 又称剩余电流动作断路器(RC-CB), 是目前中国应用最多的剩余电流保护装置, 其动作机理是利用低压供电回路总剩余电流的幅值大小与设定的基准值作比较, 当总剩余电流幅值大于基准值时, 通过直接激励脱扣器或者发出机械开闭信号的方式使开关电器断开。这种保护装置的動作机理是低压电网剩余电流保护装置的基本动作原理<sup>[1]</sup>。另一种比较常见的则是电流脉冲型剩余电流保护装置, 是利用低压回路总剩余电流矢量变化量的幅值大小作为动作判据。

由于故障电流与系统本身存在的正常剩余电流之间存在相位差, 而且相位差不确定, 导致发生故障

的时候总的剩余电流幅值或者总剩余电流变化量的幅值不一定会增大, 从而使得现有剩余电流保护装置存在死区。准确检测出故障电流, 以故障电流有效值作为动作判据, 实现电流分离型保护, 可以有效解决现有剩余电流保护装置死区的问题。

针对触/漏电故障电流提取这一问题, 国内的一些专家学者给出了自己的解决方法。文献[2]提出了一种利用特种波形比较的硬件分离人体触电流的方法, 但是不能说明该特种波形具有普适性。文献[3-4]提出了利用小波变换的方法分离触电流, 但是忽略了人体的电容引起的相位变化。文献[5-6]采用了B-P神经网络的方法, 文献[7]用到了支持向量机的方法提取人体触电流, 但是上述两种方法需要训练样本满足特定要求, 样本需求量大, 计算量很大, 而且在正常剩余电流发生变化的时候需要重新训练样本, 不具有保护所需要的实时性

和即时性。

以上方法均是通过求得触电故障波形后进行保护整定,实际上如果能直接计算得到故障电流的有效值就可以达到无死区保护的效果。这里采用了数字信号的处理技术,对总剩余电流的两个完整周波进行采样,将总剩余电流两个完整的离散波形同相位点对应相减,求得故障支路电流的离散波形。利用幅值变化总量整定的方法确定故障发生周波,接着求取故障发生周波之后半个周波的真有效值,即为故障电流的有效值。通过仿真分析以及触电物理实验数据分析,显示了所提方法在含噪声、实际漏电故障以及实际动物触电故障等情况下均有较高计算精度,证明了所提方法可靠性高,具有一定抗干扰能力,而且方法原理简便、响应速度特别快,很适合工程实际应用。

### 1 现有剩余电流保护装置存在的问题

现有的剩余电流保护装置基本上都是采用的鉴幅机制,是以检测到的总剩余电流幅值或者是总剩余电流变化矢量的幅值作为动作判据。电流动作型剩余电流保护装置是目前实际应用最多的触/漏电保护装置,它的工作原理是低压电网剩余电流保护装置的基本动作原理,见图1所示。

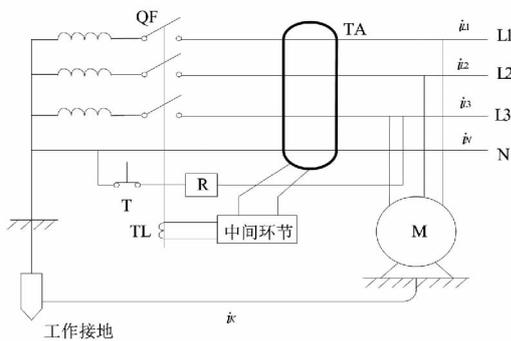


图1 剩余电流动作型漏电保护器工作原理图

图1为三相四线制中性点直接接地系统,三相线路以及零线穿过零序电流互感器一次侧的铁心,在正常情况下,三相线路中的电流*i<sub>L1</sub>*、*i<sub>L2</sub>*、*i<sub>L3</sub>*与零线中流过的电流*i<sub>N</sub>*会平衡,剩余电流互感器一次侧流过的电流矢量和*i*为0,铁心内磁通量也为0,零序电流互感器二次回路输出电压为0,动作器不动作。当有故障发生时,铁心包含的导体中的电流矢量平衡会被打破:

$$i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N = i \neq 0 \quad (1)$$

由于铁心内磁通量不再为0,零序电流互感器二次回路会有输出电压产生,可以直接激励脱扣器或者经放大电路后激励脱扣器脱扣,完成保护动作。

但是,由前面所述可知,由于供电回路绝缘性能不可能绝对良好,即使在系统正常运行情况下,剩余电流互感器一次侧流过的电流矢量和*i*也不是为0,有正常剩余电流*i<sub>0</sub>*存在,即正常情况下:

$$i_{L1} + i_{L2} + i_{L3} + i_N = i_0 = i \neq 0 \quad (2)$$

当故障发生时,剩余电流互感器一次侧流过的电流矢量和*i*则是故障电流*i<sub>r</sub>*与正常剩余电流*i<sub>0</sub>*的矢量和:

$$i_0 + i_r = i \quad (3)$$

*i<sub>r</sub>*与*i<sub>0</sub>*之间的相位差φ是任意的,假设额定动作电流有效值为*I<sub>m</sub>*,驱动保护装置动作的故障电流有效值临界值为*I<sub>rp</sub>*,那么保护装置动作的临界条件为

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0I_{rp}\cos\varphi} = I_m \quad (4)$$

由式(4)可知,当φ=π时:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0I_{rp}\cos\pi} = I_{rp} - I_0 = I_m \quad (5)$$

此时故障电流有效值需要达到正常剩余电流与额定动作电流的有效值之和装置才能动作,此时装置最易拒动。

当φ=0时:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0I_{rp}\cos\pi} = I_{rp} + I_0 = I_m \quad (6)$$

此时,当故障电流的有效值为额定动作电流与正常剩余电流有效值的差值时装置就会动作,此时装置最易误动或者无法投运。

运行实践表明,现有剩余电流保护装置经常会在发生触/漏电故障的时候无法及时动作;或者是在负荷较大的时候合不上闸而无法正确投运;或者遇到阴雨潮湿天气时候,由系统绝缘水平显著下降而误动作切除电源<sup>[5]</sup>。

### 2 基于幅值变化总量的故障周波定位

现有剩余电流保护装置的保护特性不理想,原因在于其动作电流或多或少受到电网三相不平衡漏电流的制约。如果能够从总剩余电流中获取故障支路汲出电流信号的有效值,以此作为动作判据,就能够在故障时候准确动作,而不受三相漏电流的影响。

电网在正常运行的时候存在一个正常剩余电流,其构成为基波电流与各整数次谐波电流(主要为3、

5、7次谐波,间谐波含量极少,可忽略)的矢量叠加,即使其大小和相位会受到电网运行特性以及天气等因素的影响,但基本上是一个稳定的周期信号,其基波频率与电网工频一致。在故障时候,总剩余电流是正常剩余电流与故障电流的矢量叠加。电网正常剩余电流及故障电流的变化情况如图2所示。

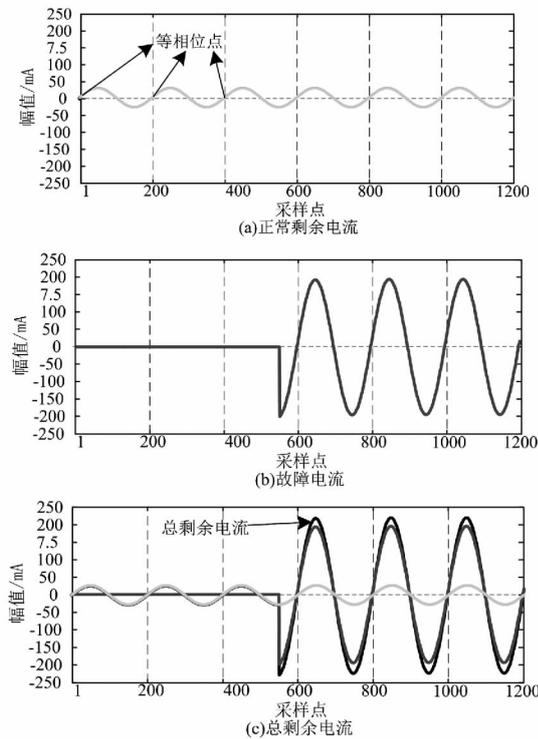


图2 正常剩余电流及故障电流变化情况

图2中的波形数据是仿真模拟人体触电情况得到。电源为有效值220V的正弦波,工频50Hz;正常剩余电流支路阻抗为11kΩ;故障支路阻抗采用IEC 60990推荐的人体阻抗模型<sup>[8]</sup>。采样频率为10kHz,每个波形周期采样200个点,共计6个波形周期1200个点。

正常剩余电流基波频率与电力系统频率一致,中国电力系统的额定频率为50Hz,规定频率偏差范围为±0.2~±0.5Hz,在忽略系统噪声的前提下,可以认为正常剩余电流为几个频率稳定的正弦波的矢量叠加。一个正弦波,其同相位点的幅值是相同的,如图2(a)中所示3个点均为0相位点,采样点的剩余电流幅值大小也相等,都为0。而整数次谐波的频率为基波频率的整数倍,那么基波的等相位点也一定是整数次谐波的等相位点,其等相位点处的采样值也一定是相等的。总剩余电流*i*为正常剩余电流*i<sub>r</sub>*与故障电流*i<sub>0</sub>*的矢量叠加,将总剩余电流相邻的两个完整周期等相位处的采样点对应相

减,就可以将正常剩余电流波形抵消掉。各个采样点的幅值突变量就构成了故障电流的离散波形。具体方法如下:

假设电力系统频率为*f*,采样频率为*f<sub>c</sub>*,每个周波的采样点数为*N*,*N*为正整数。

$$N = \frac{f_c}{f} \quad (7)$$

数据处理窗口一次取总剩余电流*i*的两个完整周波作为分析对象,共计2*N*个采样点,令第*j*个采样点信号为*I<sub>j</sub>*,*j*=1,2,⋯,*N*,*I<sub>j</sub>*采样点的下一个完整周波的等相位处的采样点则为*I<sub>j</sub>+N*,那么*I<sub>j</sub>*采样点的等相位点突变量Δ*I<sub>j</sub>*可以表示为

$$\Delta I_j = I_{j+N} - I_j \quad (8)$$

Δ*I<sub>j</sub>*可以认为是故障电流波形的一个采样点。相邻两个完整周波的采样点等相位相减以后就可以得到故障电流*i<sub>r</sub>*,一个周波的离散波形:

$$i_r = (\Delta I_1, \Delta I_2, \dots, \Delta I_j, \dots, \Delta I_N) \quad (9)$$

一个窗口数据处理完毕后,窗口滑动半个周波,即滑动步长为*N*/2个采样点,这样选择既可以保证有半个波形周期的数据处理时间,也可以保证在最多两个半波之内确定故障,最重要是能准确识别故障电流。处理方式如图3所示,此时*N*为200。步长过短会大大增加数据处理量,如果数据处理不及时就会使得计算结果紊乱;而当滑动步长大于半个周波时会有误差情况发生,在后面会进一步说明。

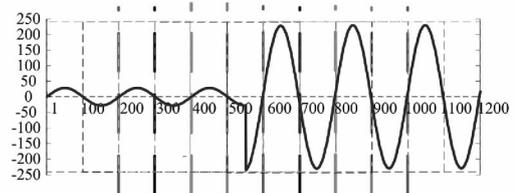


图3 数据处理窗口示意图

每个窗口经过这样的数据处理后就会得到由*N*个采样点组成的一个故障电流完整周波的离散波形。而在窗口滑动的过程中,故障波形电流也会在经过数据处理后的结果窗口中以半波*N*/2个采样点为步长滑动。结果如图4所示,此时*N*为200。

由图3所示总剩余电流波形的采样和处理过程中,在前2个窗口,故障尚未发生,处理得到的离散波形也是几乎为0,如图4(a)所示;第3个窗口中故障发生,计算得到的故障电流波形也出现,如图4(b)所示;而在第4个窗口的计算结果中,故障电流波形相比前一个窗口的计算结果向左移动了半个周

波100个采样点,如图4(c)所示;下一个窗口的计算结果中,故障电流波形依然向左平移半个周波,但是窗口右边半个周波会被前一个故障周波的等相位半波抵消掉一部分,如图4(d)所示;直到完全抵消,重新接近于0,如图4(e)、图4(f)所示。需要说明的是,由于故障支路阻抗呈容性,故障电流有一个逐渐稳定的过程,所以故障电流抵消的部分并不为0,直到故障电流稳定后才为0,但是这个对计算结果影响很小。

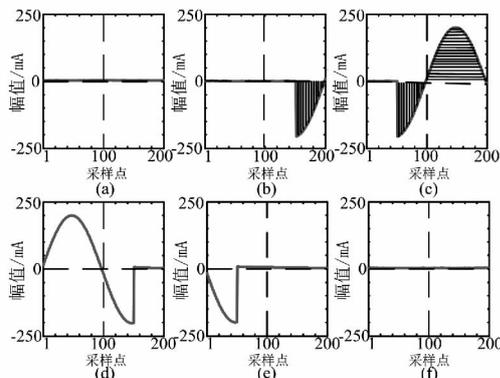


图4 故障电流波形在结果窗口滑动示意图

由前面的分析可知,在故障发生时刻所在窗口,计算结果中会有故障电流离散波形出现,可以根据所得离散波形的幅值绝对值的和来确定故障发生的周波。令第 $T$ 个窗口处理得到的故障电流离散波形为

$$i_{rT} = (\Delta I_{T_1}, \Delta I_{T_2}, \dots, \Delta I_{T_j}, \dots, \Delta I_{T_N}) \quad (10)$$

则其幅值绝对值之和为

$$\Delta I_{rT} = \sum_{j=1}^N |\Delta I_{T_j}| \quad (11)$$

定义故障发生时刻所在窗口判据为

$$\text{sgn}(\Delta I_{rT}) = \begin{cases} 1, & \Delta I_{rT} \geq K \\ 0, & \Delta I_{rT} \leq K \end{cases} \quad (12)$$

式中: $K$ 为阈值,根据系统噪声情况以及正常剩余电流大小进行设定;函数值为1表示发生故障,函数值为0表示没有故障发生。

利用式(8)~式(12)可以确定故障发生时刻所在的窗口。如果故障时刻发生在第 $T$ 个数据处理窗口,那么第 $T$ 个窗口中的后一个采样周波即为故障发生周波,如图4(b)中阴影部分所示。

### 3 基于半波真有效值的故障电流整定计算

确定故障发生周波以后,需要进一步计算得到

故障电流的有效值,才能进行无死区的剩余电流保护整定工作。在数字测量系统中,交流信号的有效值定义为

$$X_{eff} = \text{sqr}(\sum_{k=1}^N x_m^2(k) / N) \quad (13)$$

式中: $X_{eff}$ 为被测信号有效值; $\text{sqr}()$ 代表取平方根; $x_m(k)$ 为被测信号第 $m$ 个周波的第 $k$ 个采样点; $N$ 为交流信号一个周期采样点。

交流信号有效值的数字测量方法,主要有峰值测量法、平均值测量法和纯算法<sup>[9]</sup>。前两种只能计算正弦信号有效值,得不到波形的真有效值<sup>[10]</sup>。纯算法在满足奈奎斯特采样定理<sup>[11]</sup>并且满足整周期采样条件<sup>[12]</sup>(采样频率必须为波形频率的整数倍或有理分数倍)就可以计算得到交流信号的真有效值而不受到谐波的影响。若 $N$ 为常数或有理分数,只要满足奈奎斯特采样定理,式(13)得到的就是真有效值。

电力系统中主要存在的是3、5、7次谐波,故障电流也可以认为是由一个系统频率的基波与整数次谐波的矢量叠加构成,是一个非正弦的周期信号。非正弦量的有效值等于它的各次谐波有效值平方和的平方根值<sup>[9]</sup>。一个正弦波的有效值可以用连续的整数个半个周波来进行计算,一个周期信号,基波的连续半个周波一定是包含着整数个的整数次谐波的半个周波(系统中有少量的间谐波,这里忽略不计)因此含有整数次谐波的故障电流有效值可以利用故障电流连续的半个周波来进行求取。

根据式(7)可知:计算窗口得到的故障电流离散信号满足整周期采样条件;忽略系统含量极少的高次谐波,奈奎斯特采样定理也很容易满足。因此可以利用纯算法计算故障电流半波的真有效值来确定故障电流的有效值。

假设通过式(8)~式(12),确定了故障发生在第 $T$ 个数据处理窗,故障电流波形出现。由前面分析可知,在第 $T+1$ 个结果窗口里故障波形会向左平移半个周波,那么第 $T+1$ 结果窗口的右边半个周波一定是故障电流连续的半个周波。如图4(b)中出现了阴影部分所示的故障电流,那么在接下来图4(c)所示的结果窗口中,故障电流向左平移了半个周波,右边半个窗口的波形就是故障周波连续的半个周波,如图4(c)阴影部分所示。这里可以看出,

如果数据处理窗口滑动步长大于半个周波,就会导致图4(c)所示结果窗口右边连续的半波有可能被抵消一部分,就会出现误差。根据式(13)给定的交流信号有效值定义,可以计算出第 $T+1$ 个结果窗口右边半个周波的故障电流半波真有效值为

$$I_{rT+1} = \text{sqr}(\sum_{j=1}^N \Delta I_{T+1N+j}^2 / N) \quad (14)$$

由前面分析可知,由式(14)计算得到的即为故障电流的有效值,可以在故障后发生的两个半波之内得到结果。

接下来利用以下判据就可以实现无死区的剩余电流保护整定:

$$\text{sgn}(I_{rT+1}) = \begin{cases} 1, & I_{rT+1} \geq I_K \\ 0, & I_{rT+1} \leq I_K \end{cases} \quad (15)$$

式中 $I_K$ 为设定的动作电流阈值,函数值为1表示发生故障,函数值为0表示没有故障发生。

## 4 仿真数据以及实验数据验证分析

下面将通过仿真得到的数据以及实验室实测数据来验证上面所述的方法在建模仿真、实际漏电故障以及实际动物触电故障等情况下的可靠性和精确度。

### 4.1 数据获取

利用 Matlab 搭建模型,仿真模拟人体触电情况。模型参数:电源为有效值 220 V 的正弦波,工频 50 Hz;故障支路阻抗采用 IEC 60990 推荐的人体阻抗模型。改变正常剩余电流支路参数,改变总剩余电流信噪比,每种情况各测得 10 组样本数据,编号 1~10 保存,共获取 60 组样本数据。

搭建物理实验平台获取实际漏电故障情况。实验参数:市电,正常剩余电流支路参数为 12 kΩ 电阻与 0.47 μF 串联,故障支路参数为 15 kΩ 电阻。重复实验 10 次,共获取 10 组样本数据,编号 1~10 保存。

利用物理实验平台获取实际动物触电故障情况。实验参数为:市电,正常剩余电流支路参数为 10 kΩ 电阻与 0.47 μF 串联,故障支路实验对象为小兔子。兔子体重 2.5 kg,前肢和后肢剃除毛发作为触电极。重复实验 10 次,共获取 10 组样本数据,编号 1~10 保存。物理实验平台如图 5 所示。

物理实验用高精度录波仪 DL750 记录数据。仿真以及物理实验波形采样频率均为 10 kHz,每次仿真以及实验的故障发生时刻随机,保证故障时刻的故障电流初相位随机。

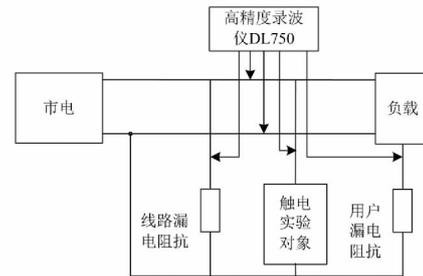


图5 物理实验平台

### 4.2 数据验证分析

利用仿真以及实验所得的数据对所提的基于幅值突变总量的故障周波定位方法进行计算验证,结果如表 1 所示。

表 1 故障发生周波检测效果

数据来源	$i_0$ 有效值 /mA	$i$ 信噪比 /dB	阈值 $K$ /mA	样本数	准确率 /%
仿真模拟		20	25	10	100
		20	30	10	100
		40	3	10	100
		20	30	10	100
		40	30	15	10
实际漏电	17	-	20	10	100
实际触电	18	-	20	10	100

注: $i_0$  为正常剩余电流,  $i$  为总剩余电流,与前面一致。

该方法的关键在于阈值  $K$  的确定,其大小取决于系统噪声含量以及正常剩余电流大小。由表 1 可以看出,在噪声含量较高以及正常剩余电流较大的时候  $K$  也需要取较大值。实际触/漏电故障实验中,直接采用 220 V 市电作为电压源,系统噪声以及谐波均自然存在,选取合适的阈值,检测准确率可以达到 100%,证明了所提方法具有一定的抗干扰能力。表 1 的数据计算表明,在系统正常运行时,只要根据系统情况选取合适的阈值,就能够保证故障周波的准确定位。方法所需要的计算时间为 0.002 1 s,准确性以及响应速度满足后期检测要求以及工程实际需求。

确定了故障发生周波之后,进一步利用所获取

表2 故障电流检测结果

数据来源	$i_0$ 有效值 /mA	$i$ 信噪比 /dB	$I_r$ 实际值 /mA	$I_r$ 计算值 /mA										$I_r$ 计算值最大误差 /%	$I_r$ 计算值均方根误差 /mA
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
仿真模拟	20	20	141.72	140.50	140.89	140.51	140.57	140.7	140.89	141.17	141.51	141.93	142.41	-0.86	0.87
	20	30	141.72	140.48	140.55	140.68	140.87	141.15	141.49	141.91	142.39	142.93	142.02	-0.87	0.84
	40	40	141.72	141.47	140.54	140.67	140.87	141.14	141.49	141.90	142.38	142.92	142.02	0.85	0.75
	20	20	143.37	145.09	145.02	144.85	144.59	144.23	143.78	143.20	142.55	141.79	140.96	-1.68	1.39
	40	30	143.36	145.12	145.03	144.86	144.59	144.24	143.79	143.21	142.56	141.80	140.96	-1.68	1.33
实际漏电	17	-	45.22	42.14	42.54	43.01	43.53	44.05	44.60	45.13	45.65	46.14	47.17	-6.81	1.76
	18	-	52.92	49.31	50.93	52.93	53.94	53.94	54.95	53.90	53.87	54.97	55.84	-6.82	1.94

注:  $i_0$  为正常剩余电流,  $i$  为总剩余电流,  $I_r$  为故障电流有效值, 与前面一致。由于故障支路并非纯阻性,  $I_r$  会随故障的进行略有变化,  $I_r$  实际值取故障发生周波的下一个完整周波的有效值。

的数据对所提的基于半波真有效值的故障电流整定计算方法进行验证, 结果如表2所示。

由表2可知, 无论是在仿真模拟的情况下, 还是在实际的触/漏电故障中, 所提方法均能够准确可靠地计算出故障电流的有效值。在仿真模拟情况下, 误差不超过2%; 在实际的触/漏电故障中, 误差不超过10%。均方根误差(RMSE)是观测值与真值偏差的平方和观测次数  $n$  比值的平方根, 能够很好地反映出测量的精确度。所提方法, 每次仿真或者实验所得的10组样本数据的计算值与实际值的均方根误差不超过2 mA。单次计算时间为0.0024 s, 相较现有方法<sup>[14]</sup>, 计算时间缩短了76%~99%, 证明了本方法具有较高的精确度以及较快的响应速度。

由表2还可以看出, 正常剩余电流的大小以及系统的噪声含量会影响计算精度; 实际的触/漏电故障中, 系统频率可能存在 $\pm 0.2 \sim \pm 0.5$  Hz的偏差, 系统中存在间谐波, 这些因素会影响计算精度。因此, 对处理的数据先进行消噪处理可以提高精确度, 但是会以更多的计算时间为代价。另外, 在保证计算速度并满足奈奎斯特采样定律和周期采样条件的前提下, 适当提高采样频率, 合理设定阈值  $K$ , 也可以提高最终计算结果的精确度。

## 5 结论

1) 提出了一种基于幅值变化总量的故障周波

定位方法, 可以在0.0021 s的时间内快速确定故障发生的周波。

2) 提出了一种基于故障电流半波真有效值的故障电流检测方法, 可以准确快速检测到触、漏电故障电流的有效值, 单次计算时间为0.0024 s, 相较现有方法, 计算时间缩短了76%~99%, 方法简便可靠, 响应速度特别快, 符合剩余电流保护工程应用领域对实时性的要求。

3) 搭建物理实验平台, 获取实测数据, 证明了所提方法在实际的触/漏电故障情况下的准确性和可靠性。故障电流有效值计算误差不超过10%, 作为动作判据, 能有效消除现有剩余电流保护装置的动作死区。

### 参考文献

- [1] 夏越, 杜松怀, 李春兰, 等. 中国剩余电流保护技术与装置的发展趋势[J]. 农业工程学报, 2010, 10, 26(22): 151-155.
- [2] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [3] 黄俊. 基于小波变换的触电电信号检测方法研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2010.
- [4] 林军. 小波变换在零序电流暂态高频信号分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2004, 19(4): 89-92.
- [5] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和BP神经网络的触电电信号检测模型[J]. 农业工程学报, 2010,

26( Z2): 130 - 134.

[6] 关海鸥,杜松怀,苏娟,等. 一种触电信号的自动快速检测模型[J]. 电网技术, 2013, 37( 8): 2328 - 2335.

[7] 韩晓慧,杜松怀,苏娟,等. 基于参数优化的最小二乘支持向量机触电电流检测方法[J]. 农业工程学报, 2014, 30( 23): 238 - 245.

[8] IEC. Methods of Measurement of Touch Currents and Protective Conductor Current [S]. IEC 60990, 1999 - 2008 ( 2nd Ed) .

[9] 徐垦. 交流信号真有效值数字测量方法[J]. 华中科技大学学报( 自然科学版), 2006, 34 ( 2): 51 - 54.

[10] Turner L W. Electronic Engineer's Reference Book ( 4th Edition) [M]. London : New aes Butterworths Co. Ltd. , 1976.

[11] 胡广书. 数字信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.

[12] Albu M , Heydt G T. On the Use of RMS Values in Power Quality Assessment [J]. IEEE Trans. on Power Delivery , 2003 , 18( 4) : 1586 - 1587.

[13] 熊晓祎,肖先勇,赵恒. 基于自适应算法的触电事故电流检测[J]. 电力系统保护与控制, 2017 , 45( 4) : 139 - 144.

作者简介:

左金威(1991) ,硕士研究生,研究方向为剩余电流保护技术;

赵恒(1983) ,博士研究生,研究方向为漏电保护与电气安全。

( 收稿日期: 2017 - 05 - 01)

( 上接第 38 页)

会造成单套保护故障退出和控制系统的严重故障。

## 5 结 论

前面在介绍特高压换流站 OCT 结构的基础上,分析了 OCT 故障对特高压换流站的影响,并从宜宾换流站实际出发分析了换流站中 OCT 的可靠性及故障原因,得出了如下结论:

1) OCT 是特高压直流换流站中常用且又十分重要的测量设备,其安全可靠运行对直流输电的可靠性有着重要的作用。当交流滤波器 OCT 故障时,检修期间滤波器必须处于停电状态,减少了换流站可用的滤波器组数,可能导致系统谐波超标、电压偏低等风险,甚至在某些方式下可能导致直流闭锁;当一组直流滤波器的 OCT 出现故障而检修时,直流滤波器单组运行,一旦运行的滤波器故障跳开,直流也会出现单极闭锁,难以满足检修  $N - 1$  的要求;直流出线 OCT 及阀厅 OCT 故障导致直流控制保护误动,极闭锁风险极高。

2) 直流 OCT 二次测量接口屏按照常规直流模式划分为极 I 区域和极 II 区域,但高低端阀组层、极层之间的测量设备没有按照区域单独配置,由此将导致故障影响范围严重扩大。

3) 宜宾站直流 OCT 共计故障 21 次,其中激光

发射板故障 8 次,远端模块故障 13 次。故障概率极高,因此增加 OCT 的备品备件,同时做好改造前故障处置预案对保障直流运行有着重要的意义。

### 参考文献

[1] 郑晓冬,郇能灵,杨光亮,等. 特高压直流输电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2012, 32( 7) : 10 - 14.

[2] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡. 交直流混联系统可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2011, 31( 7) : 10 - 16.

[3] Aik D L H , Andersson G. Power Stability Analysis of Multi - infeed HVDC Systems [J]. IEEE Trans. on Power Delivery , 1998 13( 3) : 923 - 931.

[4] IEEE PES Transmission and Distribution Committee. IEEE Guide for Planning DC Links Terminating at AC Locations Having Low Short - circuit Capacities [R]. New - york: IEEE , 1997.

作者简介:

孙文(1980) ,本科、高级工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

刘俊杰(1989) ,本科、助理工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

禹佳(1983) ,本科、高级工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

( 收稿日期: 2017 - 03 - 27)