DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.027

换流变压器交流消磁及验证装置的研究

刘志远[1]，于晓军[1]，邹洪森[1]，张帅[2]，史磊[3]，郝治国[4]
(1. 国网宁夏电力有限公司检修公司,宁夏 银川 750000;2. 保定市泰达电力设备有限公司,河北 保定 071002;3. 国网宁夏电力有限公司,宁夏 银川 750000;4. 西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘　要:为解决传统交流消磁设备存在的消磁时间长、所需电压高和设备体积大等问题,在分析换流变压器剩磁产生及传统消磁原理的基础上,提出了一种基于正弦脉冲宽度调制(SPWM)技术的低电压交流消磁法。采用高稳定性 SPWM 数字电源技术和高计算性能微控制器,通过数字方式精确控制 SPWM 电源输出交流电压幅度和频率,实现低电压条件下获取较大交流消磁电流并能够精确调节电流幅度的目的,同时低电压条件可极大减小设备体积、重量,缩短消磁时间。采用无锁相环、无严格同步要求的准同步采样技术,实现了宽频率范围交流电压、电流有效值的高精度测量。研制了换流变压器消磁及验证装置,对具有剩磁的换流变压器进行消磁试验,其消磁后的励磁涌流明显降低,体现了该装置显著的消磁效果。提出了通过对换流变压器接入低压交流测试电压,对比消磁前后变压器空载电流大小的消磁效果验证方法,试验结果表明该验证方法有效可行。

关键词:换流变压器;正弦脉冲宽度调制(SPWM);剩磁;交流消磁;励磁涌流
中图分类号:TM432　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3203(2020)04-0194-07

0　引言

电力变压器在运行过程中,其内部会产生稳态磁通。当变压器断电切除时,由于回路磁通守恒,稳态磁通不会立即消失,而会保留一个与最末时刻稳态磁通大小相关、极性相同的剩磁。同时,由于铁磁材料固有的磁滞现象,在对电力变压器进行电压比、直流电阻测量等操作后同样会在铁芯中残留剩磁。直流偏磁和大容量换流变压器的剩磁会导致空载或轻载合闸时产生较大的励磁涌流[1],所产生的过电压会导致断路器跳闸、换流变压器合闸操作失效,甚至器件烧毁,同时也会对换流变压器产生冲击造成损伤。

当变压器容量较大时,剩磁的危害也会相应增大[2]。在剩磁的估算方面,依据模型计算剩磁提出较早,效果也比较突出,主要是 Stoner-Wohlfarth 模型(简称 SW 模型)、Pruduct 模型和变压器模型[3]。通过分析耦合变压器的互感电路模型,基于场路耦合能量平衡原理计算电感参数和耦合系数[4]。通过模型进行剩磁的优化估算,其结果比较准确,但估算过程比较繁复。采用磁通传感器通过测量漏磁场得到剩磁数值,但其精确性受限于传感器的安装位置,且仅适用于无油箱的变压器[5]。上述方法在合闸前对剩磁数值进行计算。有学者在对变压器进行暂态仿真分析的基础上得到了电流-剩磁的表达式,通过对铁芯进行激励,根据测量得到的剩磁进行去磁电流设定[6]。还有学者采用磁滞回线的变压器剩磁计算方法[7],提出基于时间-电流曲线的变压器剩磁检测手段[8],得到铁芯的部分饱和磁滞回线,实现铁芯剩磁通和剩磁系数的计算[9]。对于剩磁的消磁方式[10],主要分为交流消磁法和直流消磁法。有学者基于直流消磁技术研制了消磁装置,对不同结构变压器进行了消磁实验[11—13]。当变压器空载合闸时,铁芯中的剩磁使变压器产生较大的励磁涌流,对变压器造成严重冲击,增加了变压器的无功消耗[14]。通过确定励磁涌流与剩磁及合闸初相角之间的关系,可得励磁涌流中的谐波含量及谐波频率[15—17]。基于磁隔离的交流电流峰值检测电路,结合峰值电流控制可有效抑制初级电流的直流偏置[18—21]。通过集成电路工艺设计的 Ruthroff 型传输线变压器,可应用于宽带功率放大器,实现负载阻抗的转换[22—23]。综上所述,学者对变压器剩磁估算及直流消磁法做了大量研究,而对交流消磁法及其应用方面还需要进一步的探索分析。

文中首先对变压器消磁原理进行分析,提出一种采用交流消磁控制正弦脉冲宽度调制(sinusoide pulse width modulation,SPWM)波来对换流变压器进行消磁的方法,研制交流消磁装置,对电力换流变压器进行试验验证。

收稿日期:2020-02-27;修回日期:2020-04-03
基金项目:国家自然科学基金-智能电网联合基金资助项目(U1866603)

1 变压器消磁原理分析

在电流产生磁场强度 H 的激励下,铁磁材料(如铁芯)被磁化并以感应强度 B 描述磁化程度。磁化后的铁芯,若去除电流激励,使 $H=0$,铁磁材料中的磁感应强度虽减小,但并不为零,即 $B\neq0$,这种现象称为铁磁材料具有剩磁特性。

当有正弦电流 $i_L=\sqrt{2}I_L\cos(\omega t+\varphi_i)$ 通过电感时,根据电感的电压-电流的时域关系(式(1)所示),说明电感上的电压-电流都为同频正弦量。

$$u_L=-\sqrt{2}\omega LI_L\sin(\omega t+\varphi_i) \tag{1}$$

式(2)为上式变换后的相量形式,从中可以看出电感 L 上的电流大小将跟随频率和电感电压的变化而变化。

$$U_L=\omega LI_L\Rightarrow I_L=U_L/(2\pi fL) \tag{2}$$

铁磁材料的剩磁可通过施加适当的反向磁场进行减弱或消失。电力变压器消磁原理主要是通过缩小铁芯的磁滞回环,达到消除剩磁的目的。

交流消磁主要是通入特定规律性交流电流,逐渐减小磁滞回环。由式(2)可知,电感中交流电流幅值与所施加的交流电压幅值成正比,与交流电压频率成反比,因此当保持交流电压幅度不变时,通过改变交流电压频率可以控制电感中交流电流的幅度。基于 SPWM 的数字高精度频率控制技术,可实现电感中交流电流幅度的精确控制,同时电流控制精度不受控制芯片的响应时间和电流信号采样所用的 A/D 转换器采样速率的影响。

传统交流消磁的原理如图 1 所示。向被试变压器一侧施加 50 Hz 交流电压(如采用发电机),幅值变化规律如图 1 所示,以被试变压器侧的平均值电压表读数为准,逐渐升高电压至额定电压,逐渐降低剩磁,然后将电压幅值缓慢减小,使得磁滞回环逐渐缩小,直到完全去磁。该方法的弊端是随着变压器设备容量的逐渐增大,对消磁装置的容量要求越高,不仅延长了消磁时间,还增加了装置制作成本,且不利于移动操作。基于此,文中采用控制 SPWM 波来对换流变压器进行消磁。

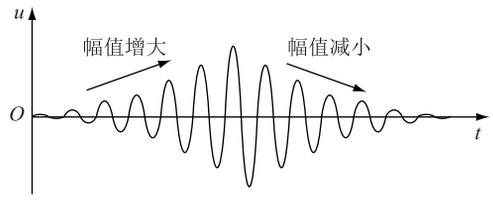

图 1 交流消磁原理(频率不变)

Fig.1 AC degaussing principle(frequency unchanged)

基于交流消磁原理,保持交流电压幅度不变,将变频电源提供的频率可变的 SPWM 波施加到被试变压器一侧,SPWM 波的波形如图 2 所示,在脉冲宽度调制(pulse width modulation,PWM)的基础上改变调制脉冲方式,脉冲宽度时间占空比按正弦规率排列,这样输出波形经过适当的滤波可以做到正弦波输出。当 SPWM 基波频率变低时,变压器绕组电流变大,当其频率变高时,变压器绕组电流变小。首先降低基波频率至设定频率,逐渐降低剩磁,然后将频率逐渐增高,使得磁滞回环逐渐缩小,直到完全去磁。

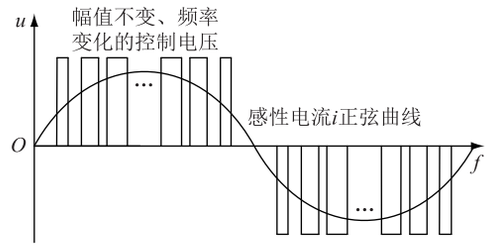

图 2 SPWM 波

Fig.2 SPWM wave

文中改变 SPWM 的调制信号频率,基于感抗与频率的相关原理,通过改变电流大小,在交流正弦波形下,提高小电流的控制精度,提升消磁效果。通过增加载波电压实现电压抬升时间,在电压提高后,仍具有较好的小电流控制精度。该消磁原理只需调整电压频率变化而保持电压幅值不变,磁化曲线如图 3 所示。

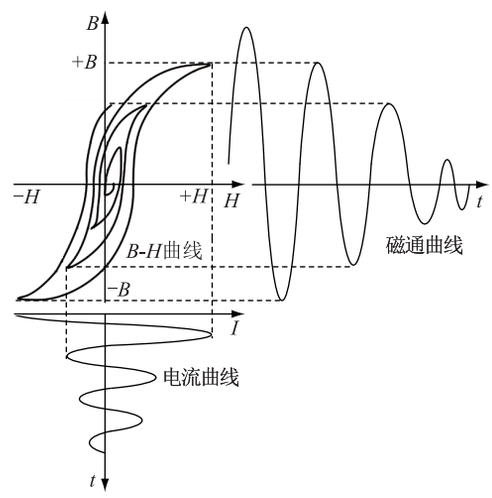

图 3 剩磁量与交流信号的磁化曲线

Fig.3 Remanent magnetization and magnetization curve of AC signal

2 消磁装置设计

文中研制的变压器消磁装置主要由核心微控

制器、变频电源、电压和电流采集、保护电路、通信接口和人机交互等功能模块组成，硬件设计方案如图 4 所示。

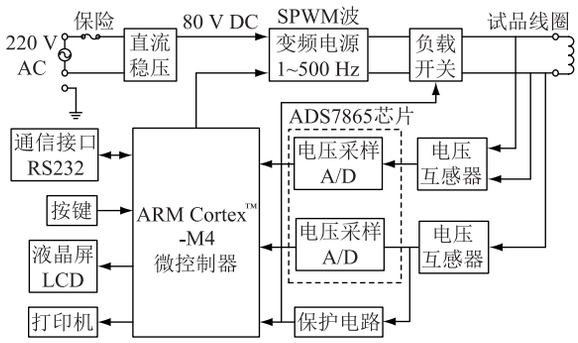

图 4　消磁装置设计框图

Fig.4　Block diagram of degaussing device design

核心微控制器控制变频电源输出幅值及频率可调的交流电压信号，同时采集待消磁试品线圈上的交流电压和交流电流，根据所采集的信号大小调整变频电源输出信号的电压和频率，形成数字闭环控制系统。依据基本消磁原理，微控制器程序自动逐渐减小数字参考量，数字闭环控制系统在待消磁试品线圈中产生由大逐渐变小的交流磁通（如图 3 所示），实现交流消磁的目的。消磁装置通过按键、液晶屏和打印机，实现人机接口功能，并通过 RS232 通信接口实现远程通信和控制功能。保护电路实现过流保护功能，在试品线圈短路或变频电源故障等情况下对装置进行保护。消磁装置最大消磁电流有效值 10 A，消磁电流频率范围 1～500 Hz，消磁最大电压有效值 50 V，消磁验证电压交流 220 V，消磁验证电流 I_{AC}测量范围 1～500 mA，电流测量分辨率 1 mA。

2.1　基于 ARM Cortex™-M4 内核的高性能计算

装置中由于被测电压、电流的频率范围较宽，对于交流信号的采样和有效值计算，设计中摒弃传统的锁相环电路和整周期采样算法，采用更为先进和复杂的非整周期准同步采样算法实现电压、电流有效值计算。为使准同步算法达到较高的精确度，采样数据的计算量较传统方法大大增加，常用的 8 位或 16 位微控制器 1 次运算时间将达到几秒甚至几十秒，无法满足实际工程应用，因此核心处理器在满足低功耗、小体积等要求的同时，必须具有强大的运算性能。文中装置的核心处理器选择了以 ARM Cortex™-M4 为内核的具有独立浮点运算单元的高性能微控制器，其工作主频可达 168 MHz，在满足 0.1%的精度要求下完成 1 次有效值计算的时间约为 0.3 s，完全满足工程应用的要求。

2.2　高稳定性数字电源技术

变频电源是装置的核心模块，其输出交流电压的幅值和频率的稳定性直接影响消磁电流的控制精度，因此高稳定性变频电源设计技术是装置的特点和难点之一。文中变频电源采用数字电源技术，温度稳定性好，输出电压幅值和频率稳定度高。硬件系统由数字信号处理（digital signal processing，DSP）芯片、隔离栅极驱动、H 桥驱动电路和电压、电流检测电路等组成，其方案框图如图 5 所示。变频电源的设计基于 SPWM 调制原理，DSP 芯片及软件算法根据通信接口传入的输出信号幅值和频率参数，产生相应的 SPWM 调制信号。该调制信号经过隔离栅极驱动器、H 桥驱动电路进行功率放大，最终由 H 桥驱动电路输出大功率 SPWM 波信号驱动待消磁变压器的线圈。为保证输出电压幅值的稳定性，变频电源采用数字电压闭环反馈控制技术，通过在算法中对系统环路零点和极点不断调整优化，实现输出交流信号幅值的高稳定性和快速响应性。数字 SPWM 调制技术以石英晶体振荡器为时钟基准，因此具有固有的高频率稳定性。电流检测功能用于实现 H 桥驱动电路的过流保护功能，提高变频电源可靠性。ARM Cortex™-M4 微控制器通过通信接口向 DSP 芯片发送控制指令，控制变频电源输出的信号幅值和频率，进而改变消磁电流的大小。

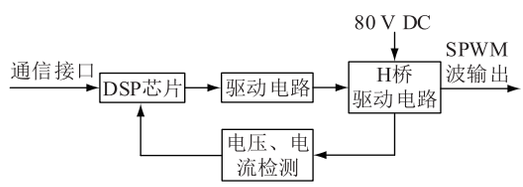

图 5　变频电源方案框图

Fig.5　Variable frequency power supply scheme block diagram

2.3　电路保护技术

在进行消磁或者验证消磁的情况下，文中装置可能会由于试品线圈短路、变频电源故障等原因，导致变压器中的电流过大，对试验人员、仪器和试品产生一定危害。为了避免这种情况发生，在电路中设计过流保护电路。

如图 6 所示，保护电路将电流互感器得到的消磁电流值与保护设定值进行对比，如果电流过大，则立即切断负载开关，与微处理器通信，使得微控制器采取下一步安全措施。相对于微控制器通过软件程序控制负载开关的通断来说，这种方式是从硬件层面进行控制，更加快速、可靠。

负载开关方案有 2 种，一是通过分立元件实现的负载开关，其特点是功能简单，元器件数量较多，

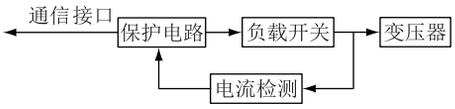

图 6 保护电路方案框图

Fig.6 Block diagram of the protection circuit

元器件选型灵活。二是使用集成负载开关,相比于分立元件负载开关,其特点是外围元器件数量少、减小了物理尺寸并缩短了开发时间,具有栅极驱动、控制逻辑、输出放电和保护等多种功能。因此文中采用集成负载开关。

2.4 高精度交流电信号测量技术

装置在消磁及验证消磁的过程中,需要测量交流电压和交流电流有效值,设计中采用电压、电流互感器获取被测量,再利用 16 位 A/D 转换器对被测量进行采样,最后由微控制器完成有效值的计算。

传统的交流电压、电流信号有效值计算方法要求对交流信号整周期采样,因此需锁相环电路控制 A/D 转换器进行同步采样来达到整周期采样的目的,并在软件算法中使用整周期同步采样算法完成交流有效值的计算功能。本装置中变频电源输出的信号频率变化范围宽,传统的锁相环电路无法在整个信号频率范围内实现锁相功能,传统方法不再适用。因此文中摒弃交流信号采样和有效值计算的传统方法,采用以数值积分为基本理论的非整周期准同步采样方法实现交流电压、电流有效值计算。电路理论中交流电压(即均方根值)计算如下:

$$U=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2(t)\,\mathrm{d}t} \tag{3}$$

式中:$u(t)$ 为电压的瞬时值;T 为交流电压信号周期。由于微处理器所能处理的是离散化的数字信号,因此需要对上式进行离散化处理,其相对应的离散化公式如下:

$$U=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N} u_k^2} \tag{4}$$

式中:N 为每周期均匀采样点数;u_k 为第 k 点电压采样值。若在一个周期内采样 128 个点,则 A/D 转换器采样频率应为 128×50 = 6 400 Hz。

交流电流有效值的计算公式与上述交流电压有效值的计算公式类似,不再赘述。

式(4)为传统的有效值计算方法,该式要求采样频率与信号频率严格同步,因此文中不能直接使用。式(4)的计算核心可转化为求均值问题,因此可利用数值积分方法计算电压采样值平方运算后的均值,进而得到有效值。由于该方法允许一定的同步采样偏差,因此称为准同步采样算法,在不使用锁相环电路的情况下仍然可以达到与同步采样方法相同的计算精度。

假设待测量信号模型记为 $x(t)$,采样的周期数为 L,为了计算 $x(t)$ 在区间 $[t_0, t_0+L(T-\Delta)]$(Δ 为同步偏差)内的平均值,需要在这个区间内对 $x(t)$ 进行等间隔采样,采样点数为 $LN+1$,将各采样点依次记为 $x(k)$,$k=1,2,\cdots,LN+1$。按照数值积分公式进行递推运算:

$$F_{i,1}=\sum_{k=i}^{N+i}\rho_k x(k)\Big/\sum_{k=i}^{N+i}\rho_k \tag{5}$$

$$F_{i,l}=\sum_{k=i}^{N+i}\rho_k F_{k,l-1}\Big/\sum_{k=i}^{N+i}\rho_k \tag{6}$$

式中:i 为运用上述递推公式计算平均值的子区间序号,且 $i=1,2,\cdots,(L-1)N+1$,长度为 N 的第 i 个子区间为$[t_0+(i-1)T_s,\ t_0+(i-1+N)T_s]$,在该子区间内对应的采样点为 $x(i)$, $x(i+1)$,$\cdots$, $x(i+N)$;ρ_k $(k=i,i+1,\cdots,i+N)$ 是由数值积分公式和 N 所确定的权系数;l 为迭代次数($l=1,2,\cdots,L$)。使用式(6)对数值积分结果进行迭代运算,即可实现准同步采样算法。理论上迭代次数越多,算法结果越接近理想同步采样,但是所需运算量也会变得非常大,所以实际应用中根据所需精度选择合适的迭代次数。

文中装置采用准同步采样算法,不仅省去了锁相环及其相关的硬件电路,而且使非同步采样情况下的电压、电流有效值测量精度接近理想同步采样算法的精度。经过实际测量,采用准同步采样算法计算得到的电压、电流有效值结果误差小于 0.5%。

3 消磁试验验证

3.1 消磁试验影响因素分析

影响消磁试验效果的因素主要包括消磁频率、波形、幅值及周期与消磁效果的关系。

(1) 消磁频率对消磁效果的影响主要体现在涡流损耗对消磁场能量的消耗。交变磁场中,铁磁材料除产生涡流以外,由于磁感应强度 B 的变化滞后于外磁场的变化,B 的振幅由铁磁体表面向内逐渐减弱,有可能导致磁场只存在于铁磁体表面的一层,造成集肤效应,会对消磁效果产生一定的影响。

(2) 消磁波形与消磁效果的关系。给出一个函数 $f(x)$,对其中任意的 $x\in(-\infty,+\infty)$ 收敛,经过傅里叶变换可得:

$$F(\omega)=\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\,\mathrm{e}^{i\omega x}\,\mathrm{d}x \tag{7}$$

由式(7)可得,矩形波、三角波等都可分解成不同频率的正弦波的叠加,消磁过程频率越高,产生

涡流和集肤效应对消磁效果的影响也越大。因此为了减小交流磁场中高频谐波的影响,应选择便于在实际试验条件下实现频率单一的低频正弦波形。

(3) 消磁幅值与消磁效果的关系。消磁过程是将固定取向的磁畴排布变成没有固定取向的过程,是通过外加磁场对材料作用来实现的。通过提供足够的能量,将磁畴分布打散,这要求外加磁场的能量大于材料原来固有磁场的能量。但实际情况下对材料的剩余磁感应强度测量难度大,故消磁幅值一般选取接近饱和磁通的值,以确保消磁效果。

(4) 不同的电磁特性会对消磁效果产生不同的影响,包括电阻率和磁导率的影响。电阻率对消磁效果的影响主要通过涡流损耗体现。在同一消磁频率下,电阻率较大的材料,涡流损耗较小,这样消磁效果带来的误差影响较小。磁导率对消磁效果的影响主要是对集肤效应的影响,磁导率大的材料,集肤深度低,则应用较低频率的消磁场进行消磁。

3.2 消磁功能及效果验证试验结果分析

通过微控制器控制变频电源产生 SPWM 波,微控制器首先输出较高频率的 SPWM 波并进行交流电流的测量,根据所测电流降低 SPWM 的频率以便提高消磁电流,当消磁电流有效值达到 10 A 时,开始进行消磁过程。消磁过程中,微控制器控制变频电源所产生的 SPWM 频率逐渐升高,相应的消磁电流逐渐降低。根据基本原理可知,此时铁芯中的磁通正反交替并逐渐减小,该过程如图 3 所示,最终当交流电流小于设定的最小电流时,消磁过程完成。剩磁的消磁试验回路如图 7 所示,剩磁测量接线如图 8 所示。通过检测换流变压器测量线圈电流变化,验证消磁能力。

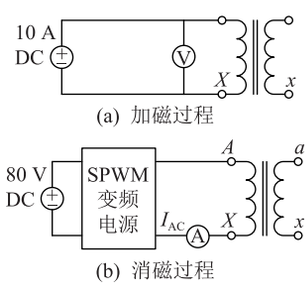

图 7 变压器加磁及消磁示意

Fig.7 Schematic diagram of transformer magnetization and demagnetization

图 9 为给定对应铁芯剩磁时,加载正弦电压激励换流变压器,测量得到的线圈中的电流波形。图 10 对比了试验中环形换流变压器铁芯存在剩磁与消磁后,通过示波器读取的测量线圈中电流变化值

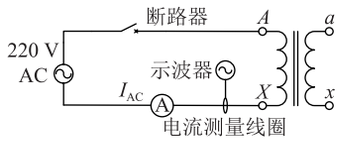

图 8 变压器剩磁测量接线

Fig.8 Transformer residual magnetic measurement wiring diagram

波形。可见,存在剩磁与消磁后对应的电流波形有明显变化。通过图形分析可知,存在剩磁时,电流存在明显偏向一侧的励磁涌流,而换流变压器铁芯剩磁经消磁试验后,加载正弦激励后,励磁涌流基本消失。

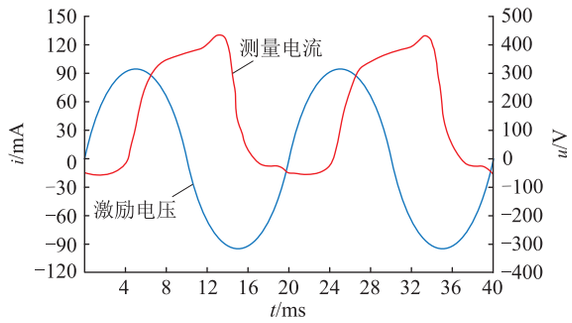

图 9 剩磁存在下的电流波形

Fig.9 Current waveform in the presence of residual magnetism

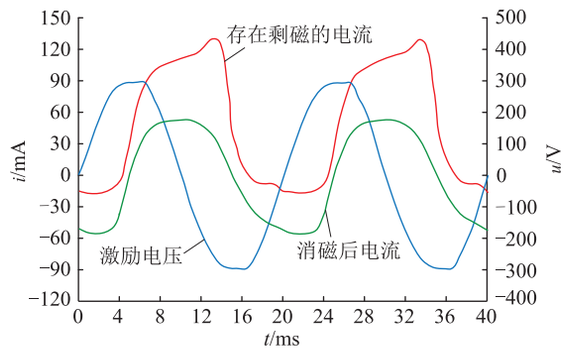

图 10 剩磁存在与消磁后的电流波形对比

Fig.10 Comparison of current waveforms after residual magnetization and degaussing

测量结果表明交流换向减幅消磁方法具有很好的消磁效果,验证了文中所研制的应用于换流变压器的消磁装置具有很好的消磁功能。该方法通过监测暂态合闸时刻铁芯测量线圈中电流变化值的大小,可有效地测量铁芯剩磁的实时情况。这将延长电力换流变压器寿命并将为使用各种试验方法进行状态评估时提供更可靠的测试结果。

为验证自制 TD-6910 变压器消磁及验证装置的消磁效果,在国网±660 kV 银川东换流站对容量为 401 MV·A 的换流变压器进行测试,测试原理接线如图 7、图 8 所示。使用 10 A 电流充磁后进行消磁

试验,消磁时间 162 s,在变压器低压侧进行消磁效果验证,施加 220 V 交流测试电压,频率 50 Hz,测量低压侧回路电流,电流波形如图 11 所示。结果表明,与消磁前相比,消磁后电流波形无直流偏移,电流幅值减小,实测回路的空载电流有效值由 0.011 A 下降到 0.006 A。

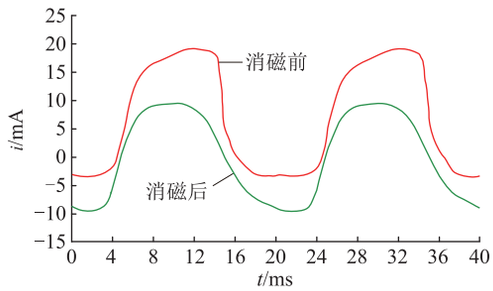

图 11 消磁前后电流对比

Fig.11 Comparison of the current before and after degaussing

4 结论

文中针对电力换流变压器铁芯剩磁产生的励磁电流瞬时增大问题及其对电力换流变压器安全运行的影响,对换流变压器消磁原理进行分析,提出了一种采用交流消磁控制 SPWM 波对换流变压器进行消磁的方法,研制交流消磁装置,详细介绍了微控制器、稳压/变频电源、保护电路、电压/电流采样电路的设计。对电力换流变压器进行了消磁试验,通过测量环形铁芯的励磁涌流,观察消磁装置的消磁效果。试验结果表明,换流变压器铁芯剩磁通过加载正弦电压激励后,励磁涌流明显降低,通过对比消磁前后的测量电流波形,证明了选取的去磁方法能够更有效地削弱剩磁。对暂态激励时刻铁芯测量线圈中电流变化进行连续测量,掌握铁芯剩磁的实时情况,对其进行有效消磁,从根本上减少了励磁涌流对变压器的影响。

参考文献:

[1] 刘从法,殷飞,周楠,等. ±1 100 kV 古泉换流站接地极对变压器直流偏磁的影响[J]. 电力工程技术,2018,37(3):145-151.
LIU Congfa, YIN Fei, ZHOU Nan, et al. Impact on DC bias magnetic of the power transformers by grounding electrode current of ±1 100 kV Guquan convertor station[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(3):145-151.

[2] 刘连升,阴丽美,李宁,等. 剩磁对大型电力变压器的危害及消除方法[J]. 变压器,2016,53(5):56-59.
LIU Liansheng, YIN Limei, LI Ning, et al. Harm and elimination method of remanence to large power transformer[J]. Transformer,2016,53(5):56-59.

[3] JAMET M, WERNSDORFER W, THIRION C, et al. Magnetic anisotropy in single clusters[J]. Physical Review B,2004,69(2):1129-1133.

[4] 潘超,郑永健,王旭,等. 倍频 ICPT 系统松耦合变压器电磁耦合特性研究[J]. 电力电子技术,2017,51(4):105-107.
PAN Chao, ZHENG Yongjian, WANG Xu, et al. Research on the electromagnetic coupling characteristics of loosely coupled transformer in multi-frequency ICPT system[J]. Power Electronics,2017,51(4):105-107.

[5] CAVALLERA D, OIRING V, COULOMB J L, et al. A new method to evaluate residual flux thanks to leakage flux, application to a transformer[J]. IEEE transactions on magnetics,2014,50(2):1005-1008.

[6] 戈文祺,汪友华,陈学广,等. 电力变压器铁芯剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报,2015,30(16):10-16.
GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(16):10-16.

[7] 张晓洁,杨勃,陈垒. 一种基于磁滞回线的变压器剩磁计算方法研究[J]. 变压器,2015,52(10):11-13.
ZHANG Xiaojie, YANG Bo, CHEN Lei. A method to calculate remmant magnetic flux of transformers based on hysteresis loop[J]. Transformer,2015,52(10):11-13.

[8] 牛帅杰,赵莉华,陈凌,等. 基于时间-电流曲线的变压器剩磁检测方法研究[J]. 电测与仪表,2017,54(7):64-68.
NIU Shuaijie, ZHAO Lihua, CHEN Ling, et al. Study on transformer residual flux detection method based on the time-current curve[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(7):64-68.

[9] 刘涛,刘鑫,梁仕斌,等. 基于极性变化直流电压源的铁磁元件铁芯剩磁通测量方法[J]. 电工技术学报,2017,32(13):137-144.
LIU Tao, LIU Xin, LIANG Shibin, et al. Residual flux measuring method on the core of ferromagnetic components based on alternating polarity DC voltage source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2017,32(13):137-144.

[10] IEEE B E. IEEE standard requirements for instrument transformers[S]. 2008.

[11] FIORILLO F. Measurements of magnetic materials[J]. Metrologia,2010,47(2):114-142.

[12] LEON F D, FARAZMAND A, JAZEBI S, et al. Elimination of residual flux in transformers by the application of an alternating polarity DC voltage source[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2015,30(4):1727-1734.

[13] 方园,施仁毅,夏家辉,等. 一种基于 J-A 磁滞模型的变压器在线运行状态监测的方法[J]. 电力工程技术,2019,38(5):177-184.
FANG Yuan, SHI Renyi, XIA Jiahui, et al. Transformer online operation monitoring method based on J-A hysteresis model[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(5):177-184.

[14] 仇明. 大型变压器铁芯剩磁的危害及消除方法[J]. 变压

器,2018,55(2):74-75.
QIU Ming. Harm and elimination method of core remanence of large transformer[J]. Transformer,2018,55(2):74-75.
[15] 宁铎,尤磊,李英春,等. 变压器差动保护动作特性的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(4):99-106.
NING Duo,YOU Lei,LI Yingchun,et al. Simulation research on the operating characteristic of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control,2017,45(4):99-106.
[16] 常勇,沈志刚,张鹏. 换流变套管末屏电压采集器铁磁谐振机理分析及抑制[J]. 电力工程技术,2018,37(5):81-85.
CHANG Yong,SHEN Zhigang,ZHANG Peng. Ferromagnetic resonance mechanism of voltage divider ofthe converter transformer bushing and its suppression[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(5):81-85.
[17] 郭艳梅,龚春英,邓翔. 一种磁隔离的交流电流峰值检测电路[J]. 电力电子技术,2018,52(12):32-36.
GUO Yanmei,GONG Chunying,DENG Xiang,et al. A magnetic isolation circuit for peak detection of alternating current[J]. Power Electronics,2018,52(12):32-36.
[18] JACEK H. Reduction of inrush current by demagnetization of magnetic core[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,2012(39):1013-1019.
[19] 张瑞,甘战,张鹏,等. 换流变压器空载励磁涌流选相关合控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):69-77.
ZHANG Rui,GAN Zhan,ZHANG Peng,et al. Controlled switching strategies to eliminate the inrush current of converter transformer[J]. Power System Protection and Control,2019,47(15):69-77.
[20] 夏海涛,周小平,洪乐荣,等. 一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(15):4345-4356.
XIA Haitao,ZHOU Xiaoping,HONG Lerong,et al. An adaptive current deviation control method for suppressing following commutation failures[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(15):4345-4356.
[21] 张喜乐,何松坡,王建民,等. 换流变压器绕组损耗及热点温升的仿真研究[J]. 变压器,2019,56(7):24-28.
ZHANG Xile,HE Songpo,WANG Jianmin,et al. Numerical simulation of winding loss and hot spot temperature rise for converter transformer[J]. Transformer,2019,56(7):24-28.

作者简介:

刘志远

刘志远(1970),男,学士,高级工程师,从事电力系统继电保护及直流输电控制工作(E-mail:345105340@qq.com);

于晓军(1984),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护工作;

邹洪森(1982),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及直流输电运维工作。

AC degaussing and verification device of converter transformer

LIU Zhiyuan[1], YU Xiaojun[1], ZOU Hongsen[1], ZHANG Shuai[2], SHI Lei[3], HAO Zhiguo[4]

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co.,Ltd. Maintenance Company,Yinchuan 750000,China;
2. Baoding Taida Electric Power Equipment Co.,Ltd.,Baoding 071002,China;
3. State Grid Ningxia Electric Power Co.,Ltd.,Yinchuan 750000,China;
4. School of Electrical Engineering,Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract:In order to solve the problems of long demagnetization time,high required voltage and large equipment required of traditional AC demagnetization equipment,a low-voltage AC degaussing method based on sinusoidal pulse width modulation (SPWM) technology is proposed based on the analysis of the residual magnetization of the converter transformer and the traditional demagnetization principle. Using high stability SPWM digital power supply technology and high computing performance microcontroller,the AC voltage amplitude and frequency is output from SPWM by digitally controlling to achieve the purpose of obtaining a large AC demagnetization current under low voltage conditions and being able to accurately adjust the current amplitude,while the low voltage conditions can greatly reduce the size and weight of the equipment and shorten the demagnetization time. Using quasi-synchronous sampling technology without phase-locked loop and without strict synchronization requirements,high-precision measurement of the effective value of AC voltage and current in a wide frequency range is realized. A degaussing and verification device for the converter transformer is developed and a degaussing test is carried out for the converter transformer with residual magnetism. The results show that the demagnetizing inrush current after demagnetization is significantly reduced,reflecting the significant degaussing effect of the device. A degaussing effect verification method is proposed by connecting the low-voltage AC test voltage to the converter transformer and comparing the no-load current of the transformer before and after degaussing. The test results show that the verification method is effective and feasible.

Keywords:converter transformer;sinusoidal pulse width modulation(SPWM);residual magnetism;AC degaussing;magnetizing inrush current

(编辑 方晶)