

电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法

戈文祺¹ 汪友华² 陈学广² 肖树欣² 杨晓光² 吕殿利²

(1. 河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

2. 河北省电磁场与电器可靠性省部共建重点实验室 天津 300130)

摘要 大型电力变压器在各种检测以及运行之后，由于其铁心结构的封闭性以及铁磁材料固有的磁滞现象，会在铁心中留有剩磁。剩磁的存在将加速电力变压器铁心的磁化饱和，产生励磁涌流。本文提出一种新的剩磁测量方法，通过分析剩磁产生的原理，对已知电力变压器进行电磁暂态仿真分析建立剩磁-电流的关系式。选取环形变压器铁心搭建实验检测电路，处理实验得到暂态测量电流信号，并将结果代入已建立的剩磁-电流关系式中，得到电力变压器铁心中的剩磁。在已知剩磁的基础上研究已有的去磁方法，选取直流法削弱剩磁，根据测量得到的剩磁进行去磁电流设定。通过消磁前后的测量电流波形对比说明能够有效地削弱剩磁，达到减小涌流的目的，验证了去磁方法的有效性。

关键词：剩磁 测量电流 环形电力变压器铁心 直流去磁

中图分类号：TM406

Method to Measure and Weaken the Residual Flux of the Power Transformer Core

Ge Wenqi Wang Youhua Chen Xueguang Xiao Shuxin Yang Xiaoguang lü Dianli

(1. School of Mechanical Engineering Hebei University of Technology Tianjin 300130 China

2. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical

Apparatus Reliability Tianjin 300130 China)

Abstract When the power transformer is de-energized, there will be a certain amount of residual magnetic flux due to the inherent hysteresis in the ferromagnetic material and the closed structure of the transformer core. The residual flux may increase saturation of the iron core and lead to high transient magnetizing inrush current. This paper presents a novel method to measure the residual flux. Starting from analyzing the principle of residual magnetic flux, the transient electromagnetic simulation for the power transformer is analyzed and a formula of the residual magnetic flux and the current is established based on the results. A toroidal transformer iron core has been selected. Through analyzing the transient measurement current signals observed from the oscilloscope, the analyzed signals were substituted into the relational formula obtained by simulation. The DC (direct current) current method were identified, through a literature review to weaken the residual flux and set the demagnetization current according to the obtained residual flux. The comparison of the measurement current waveforms before and after demagnetization shows that this method can effectively weaken the residual flux and achieve the goal of weakening the inrush current, which finally proves the effectiveness of the demagnetizing method.

Keywords: Residual magnetic flux, measurement current, iron core of toroidal power transformer, DC demagnetization

0 引言

电力变压器投入运行再切出运行的过程，由于铁磁材料的磁滞特性，铁心中会留有剩磁。在轻载或者空载的情况下合闸通电，可能导致绕组产生励磁涌流^[1-3]。较高的励磁涌流将产生过电压使断路器跳闸、电力变压器合闸操作频频失效，甚至烧毁器件，造成一定的经济损失。

变压器励磁涌流产生的原因在于铁心因合闸角、剩磁等条件的综合作用而进入饱和区甚至是深度饱和区^[1]。由于剩磁是励磁涌流的主要影响因素之一，正确检测剩磁对减少涌流的研究有很大帮助。现有的剩磁分析方法基本上分为以下几种：

(1) 依据实际操作经验估计剩磁，一般认为实验运行后剩磁为20%~80%饱和磁通值范围^[4,5]，激励时根据经验选取剩磁，这种方法目前被广泛运用于各大变压器厂家出厂检测空载合闸前的剩磁预测中。

(2) D. I. Taylor 等提出一种预充磁(pre-fluxing)分析法^[7,8]，即给铁心加载激励至一个较大的已知磁通值，使得原有剩磁被覆盖，然后以新的已知剩磁为基础进行分析，利用选相合闸操作削弱励磁涌流。

(3) 武汉大学的乌云高娃等在分析磁性材料的时效特性的基础上，结合 Preisach 模型及其特性，通过记录切出电流，推导了分段计算铁心剩磁的方法^[6]。提出单相变压器抑制励磁涌流的合闸角策略，并用选相合闸操作去除剩磁对励磁涌流的影响。

(4) 通过搭建外接检测电路，在变压器运行结束时，记录电压的波形和相角变化，对切除时刻的电压积分求取剩磁值^[9,10]。

前面提到的两种方法没有准确得到原剩磁值，虽然预充磁法有一定的可行性，但是对大型铁磁结构的器件，加载较大的磁通需加载大电流，而电流将会对电力变压器铁心本身产生较大影响，存在实际操作的局限性。后两种方法没有考虑到感性元件电流不能突变为零的特点，直接将切除时刻的铁心磁通等效为剩磁。感性元件电流衰减过程实际也可以等效一个去磁过程，使得测量剩磁值并不准确，且选相合闸检测设备费用高，操作复杂^[9]。

现有电力变压器励磁涌流分析方法中，并没有一种能够便捷高效地确定剩磁影响的方法。鉴于以上情况，本文提出一种新的剩磁测量方法，以铁磁材料的特性曲线(*B-H*关系曲线)为基础，建立电力变压器电磁暂态仿真模型。加载直流恒流激励模

拟合空变操作前剩磁情况，通过对待测变压器的空载合闸电磁暂态过程的分析，检测电流变化分布，建立剩磁与电流变化值的对应关系式，实验表明，能较精确地得到变压器再次投入运行前铁心中的剩磁。

1 铁磁材料剩磁的产生原理分析

各类磁性材料的共同点是都存在着磁畴结构，不同点是磁畴结构形式及其在外磁场作用下运动变化方式不同。磁性材料受外磁场作用，发生磁畴转动(简称畴转)或畴壁位移(简称壁移)，是指铁磁体在外磁场作用下通过磁畴转动和畴壁位移，使原有磁畴消失，代之以新的磁畴结构，使材料从磁中性状态变到所有磁畴都取外磁场方向的磁饱和状态的一种过程，称为磁化过程。

磁性材料的磁化，其实质是材料受外磁场的作用，其内部磁畴结构发生变化。沿外磁场强度 H 方向上的磁化强度 M_H 。当外磁场强度 H 改变 ΔH 时，与 ΔH 相对应的磁化强度的改变为 ΔM_H 。在磁化过程中，可写成

$$\Delta M_H = \Delta M_{\text{位移}} + \Delta M_{\text{转动}} \quad (1)$$

由大多数铁磁体的磁化曲线表明，从磁中性状态磁化到磁饱和，整个磁化过程要经历畴壁位移过程和磁畴转动过程。在低磁场强度下，一般是以位移磁化为主，而在高磁场强度下则以磁畴转动为主。根据磁化曲线的变化规律，磁化过程在一般情况下，可以分为三个阶段：①弱磁场范围是可逆畴壁位移；②中等磁场范围是不可逆畴壁位移，即有巴克豪生跳跃发生；③较强的磁场范围是可逆的磁畴转动过程，随着磁场增加而逐渐趋于磁饱和。图1示出多数磁性材料磁化过程的磁化曲线与其各阶段主要的磁畴结构变化。

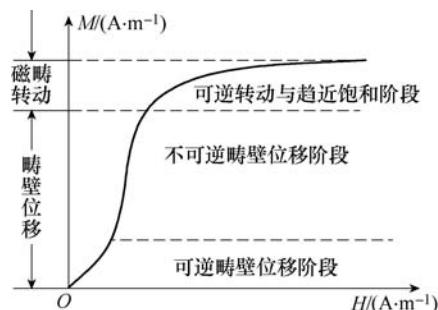


图1 磁化过程各阶段磁畴结构变化

Fig.1 Various stages of the magnetization process of the magnetic domain structure

要判断磁化机制，应结合具体磁体分析。无论是畴壁位移磁化，还是畴转磁化，在外磁场作用下，磁化从起始状态转变到另一个磁化状态后，当去掉外磁场时，这个磁化状态既不是按照原来同一路径，又不回到原来的起始磁化状态，这就是不可逆磁化过程。当励磁电流产生的磁场对变压器铁心进行磁化结束以后，磁通密度不能跟随磁场强度下降到零；磁通密度 B 与磁场强度 H 相差一个相位，称为磁滞现象。磁滞现象是铁磁性材料的独特性能。

铁磁体在磁场作用下磁化到饱和，再将磁场单调地减小到零，并假定磁场闭合，无退磁场影响，由于磁滞现象的存在，铁磁体的磁化状态不能恢复到磁中性状态，而保持一稳定的磁化强度，为剩余磁化强度，用 M_r （或剩磁 B_r ）表示。剩余磁化强度 M_r 的大小，决定于材料从饱和磁化降到 $H=0$ 的反磁化过程中磁畴结构的变化。剩磁是不可逆磁化的标志，也是决定磁滞回线形状大小的一个重要物理量，是铁磁性材料重要技术应用的磁性参数。不同的磁场强度对应的最大磁通密度 B_m 和剩磁 B_r 不同，因此，测定某具有封闭回路的铁磁材料器件的剩磁，不仅要用响应的结构参数，而且需要对应的材料属性。

2 铁心剩磁的计算

2.1 数学模型分析

封闭磁路铁磁材料器件中的剩磁无法直接测量，需准确建立剩磁和可测量参数的关系，进一步得到剩磁。本文选取环形电力变压器铁心进行分析，选择硅钢规格为 30ZH120。用等效电路来替代铁心线圈电路进行分析，忽略漏磁等影响因素^[11]，可以得到环形变压器的等效电路如图 2 所示。

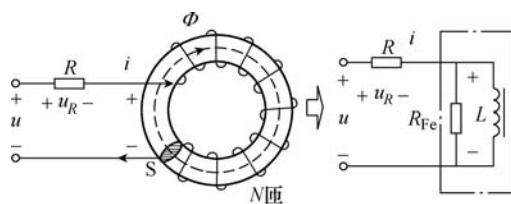


图 2 环形变压器等效电路

Fig.2 Equivalent equivalent circuit of toroidal transformer

由环形变压器的等效电路以及基尔霍夫电压定律，可得铁心线圈中的瞬时感应电流 $i(t)$ 满足下列方程

$$L \frac{di(t)}{dt} + i(t)R = \varepsilon(t) \quad (2)$$

$$i(t) = -\frac{L}{R} \frac{di(t)}{dt} + \frac{\varepsilon(t)}{R} \quad (3)$$

式中， $\varepsilon(t)$ 是磁场突变时在检测线圈中产生的感应电动势。检测线圈的匝数和面积分别为 N 和 S ，其中磁感应强度的瞬时值为 $B(t)$ ，则

$$\varepsilon(t) = -NS \frac{dB(t)}{dt} \quad (4)$$

代入式 (3)，得

$$i(t) = -\frac{L}{R} \frac{di(t)}{dt} - \frac{NS}{R} \frac{dB(t)}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dB(t)}{dt} = -\frac{i(t)R}{NS} - \frac{L}{NS} \frac{di(t)}{dt} \quad (6)$$

$$B(t) = -\frac{R}{NS} \int_0^t i(t) dt - \frac{L}{NS} i(t) \quad (7)$$

由上式可知，在暂态过程中，已知某一时刻 t 的 $i(t)$ ，对应可得一个磁感应强度 $B(t)$ 值^[11]。将正负向暂态激励产生的磁感应强度叠加可得

$$\Delta B = B_1 + B_2 = B_r + B + B_r - B = 2B_r \quad (8)$$

$$B_r = \frac{B_r + B(t) + B_r - B(t)}{2} = \frac{B_1(t) + B_2(t)}{2} = \frac{B(t)}{2} \quad (9)$$

由式 (9) 可知剩磁与某一时刻 t 的 $i(t)$ 存在对应关系。进一步通过建模仿真求解剩磁与电流的关系。

2.2 铁心剩磁的仿真计算

电力变压器涌流的大小主要取决于激励电压强度、合闸角度以及铁心中的剩磁。本文采用暂态直流检测，可避免交流合闸角度分析。

采用电磁仿真软件建立环形变压器铁心的磁路简化模型。在仿真电路中，一侧绕组中加载直流恒流源^[12]，模拟剩磁存在，一侧绕组加载直流电压源激励，观察剩磁与直流电压暂态合闸过程产生的磁通叠加作用时，瞬态电流变化。

在此突变的过程中，检测线圈中可产生感应电动势 $\varepsilon(t)$ ，铁磁回路中将产生瞬时感应电流 $i(t)$ 。一旦铁心中电流达到稳恒后， $i(t)$ 变为稳定的 U_2/R 。 $i(t)$ 的产生是暂态的，暂态时间的长短取决于铁磁回路（ LR 电路）的时间常数 $\tau=L/R$ 。由于电力变压器可以等效为阻感性元件，当铁心材料和结构确定时，可以认为电感相对稳定。由时间常数关系式可知，通过设置不同电阻值，即改变外电阻 R ，可对应改变瞬态过程时间，进一步分析可以确定瞬态过程所需

最佳时间。

对存在剩磁的电力变压器进行空合变的暂态过程中, 铁心激励侧绕组中的暂态电流由 0 变到 I , 与此相应铁心中的磁感应强度由 B_r 变到 B_1 ($B_1=B_r+B$), 当反向加载直流电压源激励时, 铁心中的磁感应强度由 B_r 变到 B_2 ($B_2=B_r-B$), 仿真得到的磁通变化结果如图 3 所示。

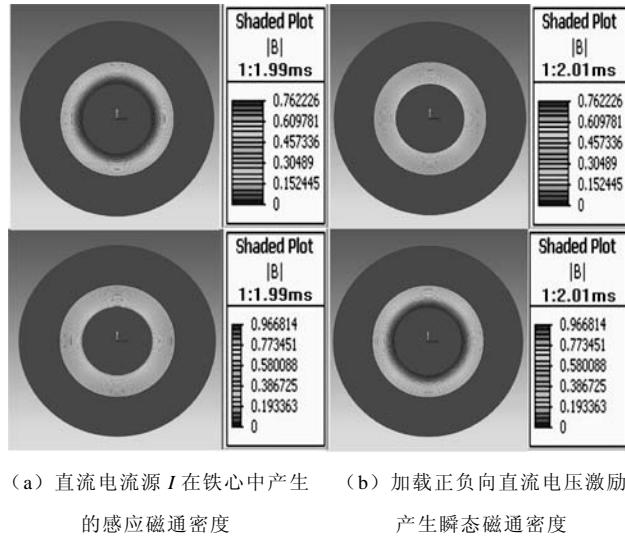


图 3 铁心感应磁通密度变化

Fig.3 Variation of the induced magnetic flux density

对应同一剩磁, 加载固定大小的正负向(与剩磁同向及反向)直流电压激励, 可由电磁暂态仿真软件得到电流变化情况, 暂态电流变化对比图形如图 4 所示。

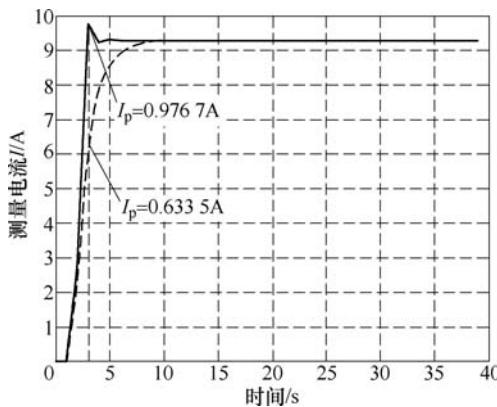


图 4 固定剩磁下改变直流电压源激励方向对应电流的波形变化

Fig.4 Magnetizing current waveforms corresponding to the change of the DC voltage source direction with a constant residual flux

通过设定剩磁变化范围(见表 1), 由电磁仿真软件可以求得每一个剩磁对应的瞬态电流的变化

值, 从而建立 $B_r-\bar{I}$ 对应关系趋势如图 5 所示。

表 1 剩余磁通密度范围

Tab.1 Range of the preset residual flux

剩余磁通密度	B_{r1}	B_{r2}	B_{r3}	B_{r4}	B_{r5}	B_{r6}	B_{r7}
数值/T	0	0.20	0.35	0.50	0.70	1.05	1.26

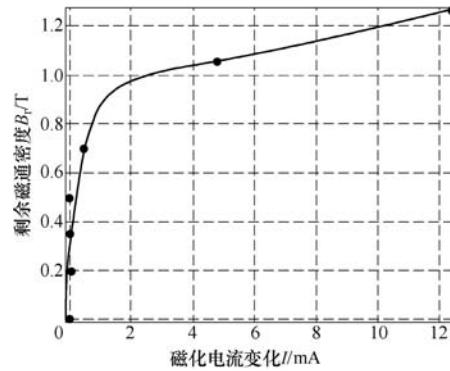


图 5 剩余磁通密度与直流电压源激励下暂态仿真得到的瞬态感应电流变化值的关系

Fig.5 Relationship of the residual magnetic flux density and the transient induced current changes of the DC voltage excitation of the transient simulation

由于模型的尺寸以及加载瞬态电流的限制, 检测到的电压和电流变化的信号的幅度较小。但从变化趋势上看, 它可以正确反应剩余磁通密度与感应电流变化值的关系。将仿真数据曲线拟合得到二者的数学表达式为

$$B_r = 0.9424e^{23.38\bar{I}_p} - 0.687e^{-1971\bar{I}_p} \quad (10)$$

2.3 验证实验及结果分析

2.3.1 剩磁值的设置

为预设剩磁, 本文进行了静态磁滞回线的实验, 实验测得系列激励电流 I 作用下, 铁心材料的静态磁滞回线簇如图 6 所示, 取磁场强度 $H=0$ 点对应磁感应强度 B 值作为实验的系列剩磁设置值。

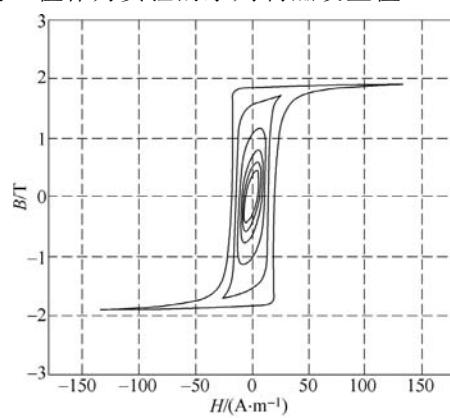


图 6 静态磁滞回线簇

Fig.6 Static hysteresis loop clusters

在设置好剩磁的基础上进行电磁暂态验证实验。选取环形电力变压器铁心、直流恒流源、直流电压源、数字示波器、断路器和电阻等器件进行实验电路的搭建，原理图如图 7 所示。

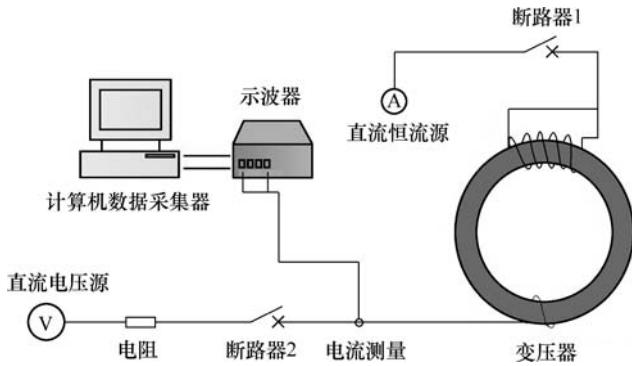


图 7 环形变压器铁心的暂态实验原理图

Fig.7 Experimental schematic diagram of toroidal transformer core

利用数字示波器对断路器 2 暂态合闸过程中的暂态电磁实验数据进行采集。

2.3.2 示波器测量电流的信号分析

舍去错误信息对采集到的多组数据进行信号分析。图 8 为加载正向电压激励（产生磁通方向与铁心剩磁相同）和负向电压激励时，示波器得到的测量电流波形对比。

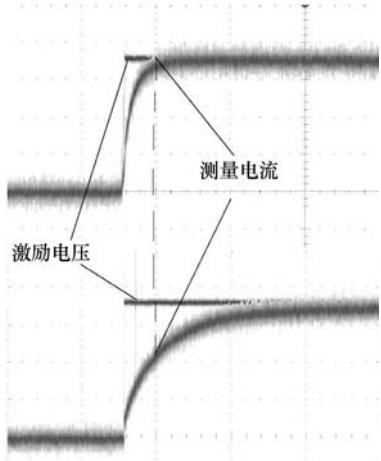


图 8 示波器显示正、负向暂态激励测量电流波形

Fig.8 The measurement current waveforms obtained by positive and negative excitation from the oscilloscope

通过加载直流激励的方向，以及测量电流波形的变化情况，可确定剩磁的方向。图 8 显示示波器中测量电流信号表明，同一剩磁下加载正负向激励时，同一时刻对应测量电流的幅值有明显变化。剩磁方向与加载直流激励产生的磁通方向一致时，测量电流的幅值增大。

采集正负向激励产生的测量电流数据进行信号处理^[12]，并将信号处理结果代入仿真拟合公式，计算铁心内的实际剩磁。进一步得到剩磁与预设剩磁值的关系见表 2。

表 2 预设剩余磁通密度与计算值比较

Tab.2 Comparison of the preset residual flux in the experiment and the values calculated from the approximation formula obtained through simulation

计算的剩余磁通密度/T	预设的剩余磁通密度/T
0.428 3	0.458 6
0.639 0	0.676 0
0.818 2	0.828 5
1.059 2	1.111 8
1.369 9	1.455 6

3 退磁原理及结果分析

3.1 退磁原理

退磁处理最重要的两个条件：磁极交迭和磁场强度递减。若使铁磁性材料退磁必须打乱其磁畴排列的一致性，使其磁畴的排列杂乱无章对外不显磁性。

(1) 磁极交迭的方法。测量电流采用交流电；交替改变直流电方向，转变磁场中试件的方向。

(2) 磁场强度递减的方式。试件渐离磁场或磁场渐离试件，由电源控制电流衰减或分段步降。

退磁是将工件置于交变磁场中，产生磁滞回线，当交变磁场的幅值逐渐递减时，磁滞回线的轨迹也越来越小，当磁场强度降为零时，使工件中残留的剩磁 B_r 接近于零。退磁时电流与磁场的方向和大小的变化必须“换向衰减同时进行”。具体退磁方法如下。

3.1.1 加热工件退磁

通过加热提高工件温度至居里点以上，是最有效的退磁方法，但这种方法不经济，也不实用。

3.1.2 交流退磁

(1) 交流电退磁通过法。对于中小型工件的批量退磁，可把工件放在装有轨道和拖板的退磁机上退磁。

(2) 衰减法。由于交流电的方向不断的变换，故可用自动衰减退磁器或调压器逐渐降低电流为零进行退磁。

3.1.3 直流电退磁

经直流电磁化的工作用直流电退磁，可采用直流换向衰减或超低频电流自动退磁。

(1) 直流换向衰减退磁——通过不断改变直流

电的方向，同时使通过工件的电流递减到零进行退磁。电流衰减的次数应尽可能多，每次衰减的电流幅度应尽可能小，如果衰减的幅度太大，则达不到退磁目的。

(2) 超低频电流自动退磁——超低频通常指频率为0.5~10Hz，可用于对电磁化的小型工件进行退磁。

3.2 退磁实验

本文根据仿真分析得到的剩磁，综合以上退磁方法并结合电力变压器封闭磁路的特性，确定通过直流退磁法进行剩磁的削弱。

首先进行了直流换向衰减退磁实验，实验原理如图9所示。根据已知剩磁确定首次加载直流的大小与方向，再减小直流幅值并反向激励，加载一定时间以后再次反向，通过不断改变直流电的方向，同时使加载在工件两端的电流递减到零进行退磁。

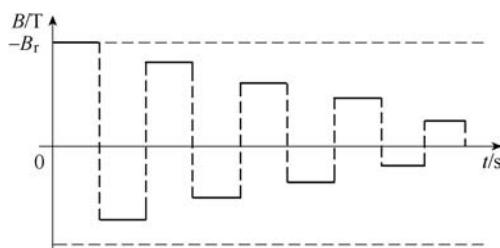


图9 直流换向衰减退磁原理图

Fig.9 The principle diagram of the DC reversible attenuation demagnetization

通过搭建去磁电路，手动控制直流换向电流，直流换向衰减退磁方法可以基本达到去磁的目的，但是手动去磁误差大，难于精确控制。

为此进一步加载正负幅值方波电压源进行去磁。这种方法类似于交流去磁法，但是方波信号并非缩减幅值，而是升高频率，结果是铁心中的磁通随着每个循环降低直到达到零磁通。去磁原理如图10所示。

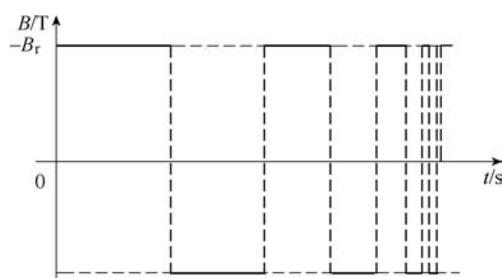


图10 方波升频电流退磁原理

Fig.10 The principle diagram of the square wave demagnetization through increasing the frequency

方波直流去磁的优点在于相对于交流去磁，它仅需较少的电能，电压等级低因而安全系数高。去磁过程利用可编程电源进行控制，并不需要操作者手动操作。这个方法的缺点是它需要一定的去磁时间，尤其是在大型电力变压器的去磁过程，当电压等级很高时，大约需要几分钟的去磁时间。

图11对比了实验中环形电力变压器铁心存在剩磁与削弱剩磁后示波器测量的电流波形。

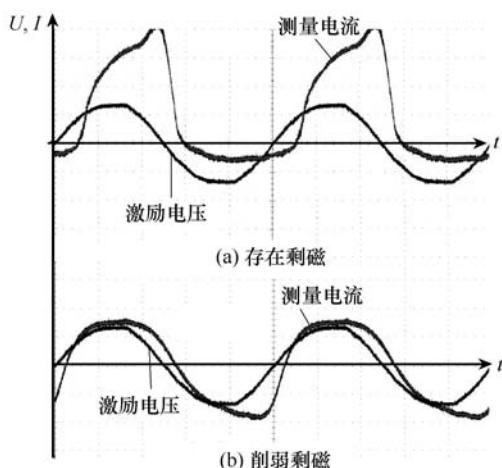


图11 示波器测量的电流波形

Fig.11 Current waveforms measured by oscilloscope

4 结论

本文提出一种测量剩磁、削弱剩磁的方法。从剩磁产生的原理出发，在铁心绕组中加载小信号直流激励，对已知电力变压器进行电磁暂态仿真分析，并基于仿真分析结果建立剩磁与电流的关系式。搭建环形变压器铁心的实验检测电路。分析示波器中读取的暂态测量电流信号并将结果代入建立的剩磁-电流关系式中，通过剩余磁通的测量值与计算值的比较，测量结果同预设剩磁的相对误差在7%以内，说明该剩磁检测方法具有较高的精度。

研究已有的去磁方法，根据测量分析得到的剩磁，选取直流法削弱剩磁。通过消磁前后的测量电流波形对比，证明能够更有效地削弱剩磁。本方法通过监测暂态合闸时刻铁心电流的大小，可有效地检测铁心剩磁的实时情况，消除剩磁影响，避免正常加载运行时铁心进入深度饱和状态，从根本上减少励磁涌流对电力变压器的影响。

参考文献

- [1] 何越,林湘宁,黄景光.一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J].电工技术学报,2011,26(11):

- 141-149.
- He Yue, Lin Xiangning, Huang Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(11): 141-149.
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] Corrodi Y, Member S, Kamei K, et al. Influence of system transients on the residual flux of an unloaded transformer[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1-7.
- [4] Wu Yunfei, Hu Huiran, Luo Wei, et al. Research on no-load test of 1000kV ultra-high voltage transformer[C]. IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011: 1-6.
- [5] 李钷, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 37-41.
- Li Po, Wuyun Gaowa, Liu Dichen, et al. Calculation of residual flux based on presiach model and entering phase control of transformer to eliminate inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 37-41.
- [6] Taylor D I, Law J D, Johnson B K, et al. Single-phase transformer inrush current reduction using prefluxing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 245-252.
- [7] Taylor D I, Fischer N, Law J D, et al. Using lab view to measure transformer residual flux for inrush current reduction[C]. IEEE North American Power Symposium(NAPS), 2009: 1-6.
- [8] Chiesa N, Avendano A, Hidalen H K, et al. On the ring down transient of transformers[C]. International Conference on Power Systems Transients(IPST'07) in Lyon, France, 2007.
- [9] 邢运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁心剩磁估量 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 169-172.
- Xing Yunmin, Luo Jian, Zhou Jianping, et al. Estimation of remanence in transformer core[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 169-172.
- [10] Corrodi Y, Kamei K, Kohyama H, et al. Influence of system transients on the residual flux[J]. IEEE Transactions on Power and Energy, 2010, 130: 484-490.
- [11] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011.
- [12] 赵小军, 李琳, 程志光, 等. 基于直流偏磁实验的叠片铁心磁化特性分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 7-13.
- Zhao Xiaojun, Li Lin, Cheng Zhiguang, et al. Analysis of magnetizing characteristic of laminated core based on the DC-biasing experiment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 7-13.

作者简介

戈文祺 女, 1986 年生, 博士后, 研究方向为工程电磁场与磁技术。

汪友华 男, 1964 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为工程电磁场与磁技术、电磁冶金与全局优化设计。(通信作者)