

基于特定频率方波激励的保护用电流互感器剩磁检测研究

张欣¹, 龚成尧^{1,2}, 陈云龙¹, 胡茵¹, 黄陈铖³, 郑太英³

(1. 杭州电力设备制造有限公司, 杭州 310018;
2. 杭州市新能源汽车服务有限公司, 杭州 310012;
3. 浙江大学 电气工程学院, 杭州 310027)

摘要: 精准检测保护用电流互感器铁心剩磁, 对实现铁心消磁, 并防止因电流互感器饱和引发的保护误动具有重要意义。为此, 提出一种基于特定频率方波激励的剩磁检测方法。该方法通过单相逆变器在电流互感器二次侧施加特定频率与幅值的方波电压, 使铁心双向深度饱和, 在激磁电流中提取检磁信号并计算出铁心剩磁。利用 EMTP-RV 平台在不同频率、幅值及幅频组合的方波电压激励下进行铁心剩磁检测和误差分析。仿真实验结果表明, 所提方法能够快速准确地检测出铁心剩磁, 增大检磁电压幅值和降低频率可进一步减小误差, 检测完成后铁心剩磁回归到检测之前的状态, 为后续基于已知剩磁的快速消磁研究提供了保障。

关键词: 电流互感器; 残留剩磁; 剩磁检测; 方波激励

DOI: 10.19585/j.zjdl.202604010

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

Study on residual-magnetism detection of protection current transformers based on square-wave excitation at a predefined frequency

ZHANG Xin¹, GONG Chengyao^{1,2}, CHEN Yunlong¹, HU Yin¹, HUANG Chencheng³, ZHENG Taiying³

(1. Hangzhou Electric Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou 310018, China;
2. Hangzhou New Energy Vehicle Service Co., Ltd., Hangzhou 310012, China;
3. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Accurate detection of residual magnetism in protection current transformer (CT) cores is essential for effective demagnetization and for preventing protection misoperations caused by CT saturation. To address this issue, a residual-magnetism detection method based on square-wave excitation at a specific frequency is proposed. A single-phase inverter applies a square-wave voltage at a predefined frequency and amplitude to the CT secondary circuit, driving the core into bidirectional deep saturation. The magnetizing current is analyzed to extract the detection signal and calculate the residual magnetism. CT core residual-magnetism detection and error analysis are conducted on the EMTP-RV platform under square-wave excitation with different frequencies, amplitudes, and combined amplitude-frequency settings. Simulation results demonstrate that the proposed method can rapidly and accurately detect residual magnetism. Increasing the excitation voltage amplitude and reducing the frequency further reduce the error. After testing, the core residual magnetism returns to its initial state, providing a foundation for subsequent rapid demagnetization studies based on known residual magnetism.

Keywords: CT; residual magnetism; residual-magnetism detection; square-wave excitation

0 引言

为保障电力系统的安全稳定运行, 需要实时监测和控制系统中的物理量, 其中电流互感器是

重要的测量设备, 其性能直接影响到电能计量的准确性和保护装置动作的正确性。由于铁磁材料存在磁滞效应, 电流互感器断电后, 铁心内仍存有一定的残留剩磁, 且正常工作状况下该剩磁难以消除。当运行过程中出现较大的故障电流时, 铁心可能进入饱和状态, 导致二次侧电流发生畸变, 进而引发继电保护误动作, 而残留剩磁会加

速这一过程,并显著增加电流互感器发生饱和的概率^[1-4]。电流互感器的饱和状态和深度受到故障电流幅值、故障相角、一次与二次时间常数以及剩磁大小等因素的影响^[5]。通过检测电流互感器的饱和状态可在一定程度上解决因电流互感器饱和引起的保护误动作问题。然而,此类方法通常会在检测到饱和后暂时闭锁保护功能^[6-7]。

对电流互感器进行消磁操作是避免其发生饱和的重要手段。迄今为止,学术界已提出多种消磁方式。由于剩磁大小和方向通常未知,这些方法一般先将铁心磁化至单向饱和,随后通过互感器二次侧外接可控电源,逐渐将剩磁降至0。该过程需要在离网条件下进行^[8]。这种消磁方法操作较为繁琐,若能准确检测出剩磁的大小和方向,消磁过程将更加高效和精确。

目前应用较为广泛的剩磁检测方法是电压积分法^[9]。该方法基于电磁感应定律的积分形式,通过在检磁过程中对电压进行积分获取磁链的变化量,由此确定剩磁。该方法具有参数易获取、计算简单、适用范围广等优点^[10]。然而,该方法仅能获取磁链的变化量,且需预设磁链初值。由于该初值与实际剩磁之间存在偏差,将直接影响检测结果的准确度。此外,在非理想状况下,电流中断会导致电压积分不准确,因而该方法的准确性较差。

从电路结构上来说,电流互感器为单相变压器的一种。因此,部分变压器的剩磁检测方法也可用于电流互感器,例如涌流法^[11]、暂态电流法^[12-15]、频率响应法^[16]、漏磁通法^[17]和建模算法^[18-19]等。涌流法^[11]的原理是基于变压器空载合闸时产生的励磁涌流峰值与铁心剩磁或偏磁之间的关联。通过结合合闸后的电压、电流数据以及合闸角度,利用涌流计算公式,可推算出空投操作前变压器铁心的剩磁大小。暂态电流法^[11-15]的原理是利用变压器剩磁与瞬时感应电流的对应关系。通过观测电流暂态变化过程中的磁化电流变化量参数,如相角差^[12]、时间常数^[13]、积分值^[14]或瞬时电流差^[15]等,对剩磁进行拟合计算,从而建立剩磁与对应变化量之间的关系。频率响应法^[16]的原理是铁心剩磁会对变压器频率响应的低频段产生影响,而对中高频段的影响微乎其微。因此,通过对比运行后的变压器的频率响应特性

曲线与交接试验的存档曲线,若在低频阶段重合,则表明基本无剩磁;若存在偏差,则表明存在剩磁,且偏差大小与剩磁含量正相关。漏磁通法^[17]是基于变压器铁心内部主磁通与周围漏磁的传递关系,通过在变压器的铁心外部布置磁通传感器以监测漏磁强度,再利用由预实验确定的漏磁-剩磁传递函数,即可计算出铁心的剩磁大小。建模算法^[18-19]是基于铁磁材料的磁化理论,通过建立和分析铁心磁滞模型以计算铁心剩磁。目前主流铁心磁滞模型有Preisach模型和Jiles-Atherton模型等。Preisach模型^[18]将磁滞曲线划分为4个区域,并推导出各区域断电后残余磁链的计算公式;Jiles-Atherton模型^[19]通过对铁心施加微小信号激励,观测在不同剩磁水平下的局部磁滞回线,并基于其斜率确定剩余磁链。

尽管上述方法能够对铁心剩磁进行检测,但是均存在局限性。例如,涌流法和暂态电流法无法判断铁心剩磁方向,且会在检测过程中改变铁心剩磁,这与为消磁而预先检测剩磁的目的相悖;漏磁通法需要重新在电流互感器内部安装磁通传感器,因而不适用于已投运的电流互感器;电压积分法、涌流法、暂态电流法、频率响应法和建模算法均无法实现“在线”检磁,应用这些方法需要依赖额外的设备与检测手段,且通常需要将待检测电流互感器从变电站拆除并移动到实验室内进行操作,极大地限制了这些方法的适用范围。

本文提出了一种基于特定频率方波激励的保护用电流互感器剩磁检测方法。该方法通过在电流互感器二次侧施加特定频率和幅值的方波电压激励,使铁心在单个检磁周期内双向饱和。此时,二次侧回路中会产生一个与铁心剩磁呈线性关系、频率为检测频率2倍的电流分量。通过检测该2倍频电流分量,即可计算出电流互感器铁心剩磁。为验证本文方法的有效性,在EMTP-RV软件中进行大量仿真,在多种频率、幅值及幅频组合的方波电压激励条件下,对不同铁心剩磁进行检测和误差分析。

1 基于特定频率方波激励的电流互感器剩磁检测方法

在电流互感器的二次侧绕组上施加特定频率的方波电压,可引起铁心磁场的双向饱和,从而

在二次侧回路中产生频率为所施加频率2倍的检磁信号。在进行剩磁检测时,电流互感器一次侧接入电网,二次侧施加特定频率和幅值的方波电压。此时,可将含方波激励的电流互感器等效为电流互感器一次侧电流激励,二次侧电压激励,如图1所示。其中, i_s 为电网侧电流, S_1 和 S_2 分别为一、二次侧回路开关, N_1 和 N_2 分别为互感器一、二次侧绕组匝数, u_s 为用于激励的方波电压,CT为电流互感器。

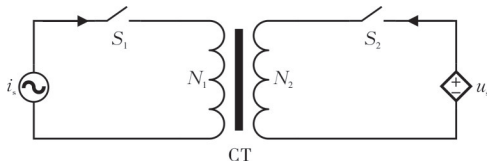


图1 含方波激励的电流互感器等效电路

Fig.1 Equivalent circuit diagram of a current transformer with square-wave excitation

当电流互感器处于离线状态时,即一次侧开路,其铁心磁链将不受一次侧电流的影响。因此,可通过在二次侧施加电压的方式对铁心磁链进行调制,实现在单个周期内达到对称双向饱和的效果。电流互感器二次侧的激励电压 u_s 计算如下:

$$\begin{cases} u_s(t) = U_{\text{det}}, t < 1/4T_{\text{det}} \\ u_s(t) = -U_{\text{det}}, 1/4T_{\text{det}} \leq t < 3/4T_{\text{det}} \\ u_s(t) = U_{\text{det}}, 3/4T_{\text{det}} \leq t \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_{det} 和 T_{det} 分别为激励电压的幅值、周期。

根据电磁感应定律的积分形式,由于二次侧电阻压降为0,激励电压与感应电动势相等,此时电流互感器中的磁链 $\psi(t)$:

$$\begin{cases} \psi(t) = U_{\text{det}}t + \psi_{\text{rem}}, t < 1/4T_{\text{det}} \\ \psi(t) = U_{\text{det}}(0.5T_{\text{det}} - t) + \psi_{\text{rem}}, 1/4T_{\text{det}} \leq t < 3/4T_{\text{det}} \\ \psi(t) = U_{\text{det}}(t - T_{\text{det}}) + \psi_{\text{rem}}, 3/4T_{\text{det}} \leq t \end{cases} \quad (2)$$

式中: ψ_{rem} 为铁心残留剩磁的磁链。

在完整周期的二次侧激励下,铁心的磁链将恢复为原始剩磁,从而实现剩磁检测过程结束后,铁心剩磁不改变。

铁磁材料的磁化特性表明,铁心接近饱和时,其磁导率下降;反之,铁心的饱和程度降低时,磁导率则相应增加。若励磁引起的磁链变化幅值大于饱和磁链,铁心将在单个周期内两次进入饱

和状态。铁心的磁导率和磁阻率分别如图2(a)、(b)所示。

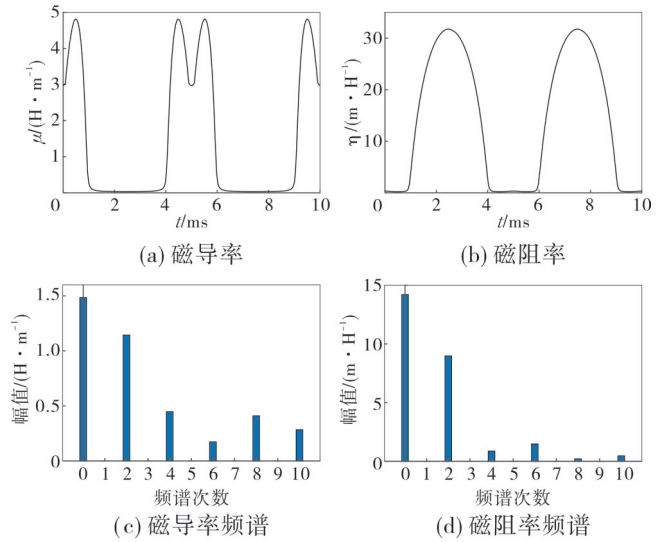


图2 铁心的磁导率和磁阻率

Fig.2 Magnetic permeability and magnetic reluctivity of the core

铁心的磁化曲线关于原点对称,且其磁导率在不同方向上大小相等。在时域上,铁心的双向饱和能将磁导率调制为周期是2倍方波电压频率 f_{det} 对应时长的偶函数,如图2(a)所示。因此,铁心磁导率 μ 的频率为 $2f_{\text{det}}$,且不含 f_{det} 的奇次谐波。由于磁导率是偶函数,其傅里叶级数中正弦分量的系数为0,可以展开为:

$$\mu(t) = \mu_d + \sum_{n=1}^{\infty} \mu_n \cos 2n\omega_{\text{det}}t \quad (3)$$

式中: μ_d 为铁心磁导率的直流分量; μ_n 为铁心磁导率的第 n 次谐波分量的幅值; ω_{det} 为方波电压频率对应的角速度,数值为 $2\pi f_{\text{det}}$ 。

磁导率和磁阻率频谱分别如图2(c)、(d)所示。磁阻率是磁导率的倒数:

$$\frac{1}{\mu(t)} = M_{R_d} + \sum_{n=1}^{\infty} M_{R_n} \cos 2n\omega_{\text{det}}t \quad (4)$$

式中: M_{R_d} 和 M_{R_n} 分别为磁阻率的直流分量幅值、第 n 次谐波分量幅值。

根据安培环路定理和磁链定义,可以得到二次侧电流 i_2 和磁链 ψ 之间的关系:

$$\begin{cases} \psi = \mu H N_2 S \\ i_2 N_2 = H L_{\text{eq}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H 为电流互感器铁心磁场强度; N_2 为二次

侧绕组匝数; S 为铁心截面积; i_2 为二次侧电流, L_{eq} 为电流互感器铁心的等效磁路长度。

联立式(2)、(4)、(5)可得二次侧电流:

$$i_2(t) = [M_{Rd} L_{eq} / N_2^2 S] [\psi_{rem} + (U_{det} / \omega_{det}) \sin \omega_{det} t] + (U_{det} L_{eq} / 2 N_2^2 S \omega_{det}) \sum_{n=1}^{\infty} M_{Rn} [\sin(2n+1) \omega_{det} t] - (U_{det} L_{eq} / 2 N_2^2 S \omega_{det}) \sum_{n=1}^{\infty} M_{Rn} [\sin(2n-1) \omega_{det} t] + \psi_{rem} \sum_{n=1}^{\infty} (M_{Rn} L_{eq} / N_2^2 S) \cos 2n \omega_{det} t \quad (6)$$

由式(6)可知,偶次谐波分量仅取决于剩磁 ψ_{rem} 。因此,在获得偶次谐波分量后,可通过式(6)求得剩磁大小。此时,电流互感器的工作状态等效于一个带有非线性铁心且处于空载运行的单相升压变压器,其中二次侧接入有电压激励源。

在电流互感器二次侧电流的各次谐波中,以二次谐波的幅值 I_{2nd} 最大,可以表示为:

$$I_{2nd} = \psi_{rem} (M_{R1} L_{eq} / N_2^2 S) \cos 2 \omega_{det} t \quad (7)$$

N_2 、 S 和 L_{eq} 由互感器设计决定,可视为常数; M_{R1} 取决于铁心饱和状态,受铁心的磁化特性及电压源频率和幅值的影响。当电压源的频率和幅值恒定时,铁心饱和状态不变, M_{R1} 也保持不变。该情况下,剩磁为唯一变量,且与二次侧电流中的二次谐波幅值成正比关系。通过特定的传递函数,可利用二次谐波幅值测定剩磁大小。此外,剩磁极性不同会导致二次谐波方向的改变,通过分析谐波相位信息可进一步确定剩磁方向。上述结论成立的条件是剩磁远小于饱和磁链,铁心双向饱和深度接近,磁导率是以 $2f_{det}$ 为频率的函数。此时磁导率中的奇次谐波被高度稀释,可忽略不计。

2 电流互感器剩磁检测电路设计

电流互感器剩磁检测电路如图3所示。该电路主要由电流互感器(含铁心和线圈)、逆变器和谐波分析模块等关键组件构成。单相逆变器的主要功能是生成用于检磁的特定频率和幅值的方波电压。谐波分析模块负责提取二次谐波电流 i_{2nd} 的幅值和相位信息,以供后续剩磁计算和方向判断。

在检磁过程中,逆变器输出一个特定频率和幅值的方波电压,持续时间为一个完整周期。通

过对二次侧电流进行实时采样,谐波分析模块以方波频率为参考频率,通过FFT(快速傅里叶变换)计算该周期内二次侧电流的二次谐波成分。将二次谐波的幅值代入预实验确定的其与铁心剩磁间的线性关系中,即可计算铁心剩磁。

为验证上述的剩磁检测方案的可行性,在EMTP-RV软件中进行仿真。在电流互感器的建模中,需考虑铁心的磁滞特性,采用软件内置的“Hysteretic reactor device”磁滞反应模型进行仿真分析。该模型基于闭合函数模拟铁磁材料的磁链与励磁电流关系,分别通过饱和方程与磁滞方程计算出磁链和励磁电流,电流互感器及铁心模型参数如表1所示。

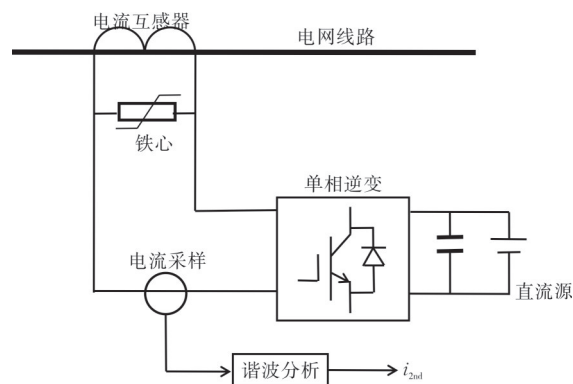


图3 电流互感器剩磁检测电路

Fig.3 Circuit for residual-magnetism detection of a current transformer

表1 电流互感器及铁心模型参数

Table 1 Parameters of the current transformer and core model

参数	描述	数值
Ψ_s / Wb	饱和磁链	0.113
R_{Ratio}	额定电流变比	2 000:5
R_L / Ω	负载电阻	0.5
准确级/P	测量精度	10
S_{hv}	磁滞曲线垂直渐近线斜率	47.49
S_{hh}	磁滞曲线水平渐近线斜率	0.971
C_{hyst}	磁滞曲线曲率	8.389×10^{-5}
C_{oer}	主磁滞回环半宽度	1.150×10^{-2}
S_{sv}	饱和曲线垂直渐近线斜率	0.999
S_{sh}	饱和曲线水平渐近线斜率	2.497×10^{-4}
C_{sat}	饱和曲线曲率	2.512×10^{-2}
Y_{sh}	饱和曲线水平渐近线的Y轴截距	0.149

在进行剩磁检测时,设定一次侧无电流,选取频率80 Hz、幅值200 V的方波电压作为励磁电压。检测时长取决于激励频率,采用80 Hz频率可快速检磁,且避免检磁信号与工频及其倍频在频域上的混叠,从而保障检测精度与效率。为确保检磁过程中铁心双向饱和深度,激励幅值选用200 V,在检测过程中铁心可以进入深度饱和,满足检磁需求。励磁电压分为3个阶段:1/4周期正向电压、1/2周期负向电压、1/4周期正向电压。电流互感器二次侧等效电压的波形如图4(a)所示,此过程中电压积分值为0,不改变剩磁。逆变器生成幅值为250 V、占空比为80%的二次侧电压如图4(b)所示。经计算,铁心所能达到的最大磁链为0.625 Wb。鉴于铁心的饱和磁链为0.113 Wb,可知此时铁心达到5.531倍饱和深度,满足检磁过程中的双向深度饱和条件。当电流互感器运行在无剩磁情况下,施加正向电压时铁心中磁链增加。初始情况下铁芯处于未饱和状态,此时二次侧电流极小;随着磁链增大至铁心饱和时,二次侧回路有明显的饱和电流。电流互感器磁链和二次侧电流分别如图4(c)、(d)所示。

在检磁过程中,对二次侧电流进行实时采样,并通过FFT提取其中的二次谐波大小及相位信息。其中,二次谐波幅值用于计算铁心剩磁大小,相位信息用于判断铁心剩磁方向。通过在不同剩磁条件下进行检测,建立了二次谐波幅值、相位与剩磁之间的关系;二次电流谐波的正负号表示方向相位不同,差值为180°。二次谐波电流与剩磁关系如图5所示。

对于谐波幅值与剩磁的线性关系,可通过最小二乘法的方式获得其拟合函数:

$$I_{2nd} = 4(\psi_{rem}/\Psi_s) + 0.0035 \quad (8)$$

理论推导中二次谐波幅值与剩磁大小成严格正比关系,但拟合函数中存在一个较小的稳态偏差。该偏差主要由拟合算法误差及电源自身所含的二次谐波引起,其数值非常小,对计算的影响不大。

在检测过程中,通过获得二次谐波幅值与相位,由二次谐波幅值 I_{2nd} 推导铁心剩磁 ψ_{rem} :

$$\psi_{rem} = \frac{I_{2nd} - 0.0035}{4} \Psi_s \quad (9)$$

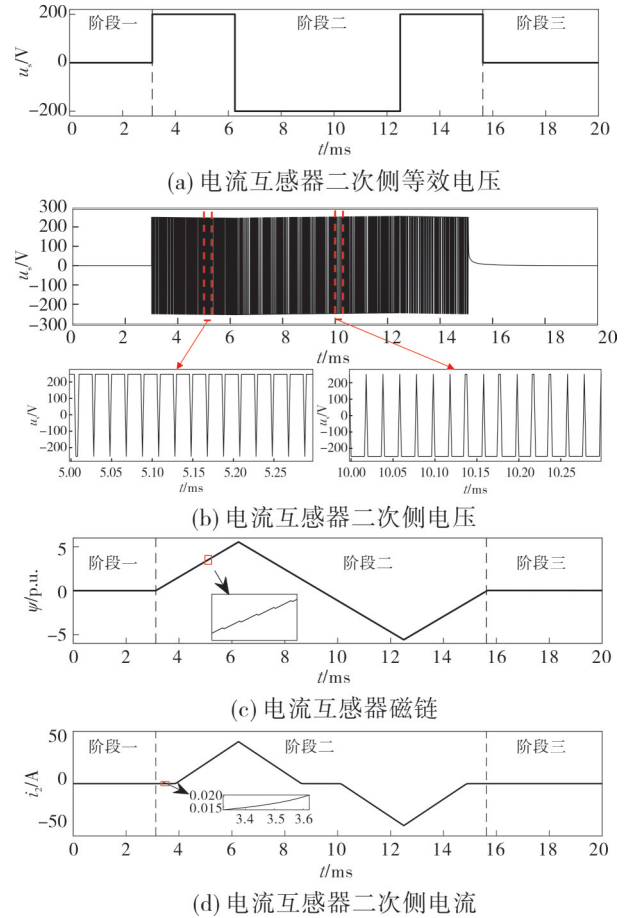


图4 无剩磁情况下检测波形

Fig.4 Detection waveforms under zero residual magnetism

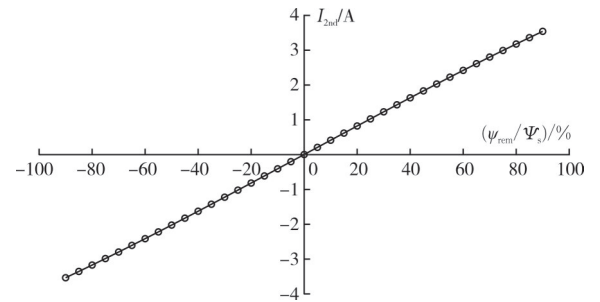


图5 二次谐波电流与剩磁关系

Fig.5 Relationship between second-harmonic current and residual magnetism

3 剩磁检测方法的性能验证

3.1 基准案例分析

为验证所提检磁方案的性能,基于EMTP-RV仿真软件做了大量的案例分析。选取200 V/80 Hz的方波电压作为激励电压对电流互感器进行剩磁检测。预设铁心剩磁为饱和磁链的-90%~

+90%,以5%为间隔设定实验案例,获得二次谐波幅值、相位与剩磁的拟合函数,将测得的二次谐波幅值代入其中,计算得到对应条件下的铁心剩磁。

以初始剩磁为50%饱和磁链为例,测得二次侧电流二次谐波幅值为2.029 6 A,代入式(9)可得对应的铁心剩磁 $\psi_{50\% \text{ cal}}$:

$$\psi_{50\% \text{ cal}} = \frac{2.0296 - 0.0035}{4.0} \Psi_s \approx 50.65\% \Psi_s \quad (10)$$

绝对误差 $\delta_{50\%}$ 与相对误差 $\epsilon_{50\%}$ 分别为:

$$\delta_{50\%} = 50.65\% \Psi_s - 50\% \Psi_s = 0.65\% \Psi_s \quad (11)$$

$$\epsilon_{50\%} = \frac{50.65\% \Psi_s - 50\% \Psi_s}{50\% \Psi_s} \times 100\% = 1.30\% \quad (12)$$

在初始剩磁为50%饱和磁链的条件下,所提方案能够较为精确地检测到剩磁。

将不同剩磁采样点所测得的二次谐波电流都按照上述方式进行计算,不同剩磁下的检测误差如图6所示,其绝对误差低于 $1.5\% \Psi_s$,相对误差低于3%,检测精度较高。当剩磁较小时,计算相对误差的分母数值较小,因此即便绝对误差很小,但仍会导致相对误差较大。

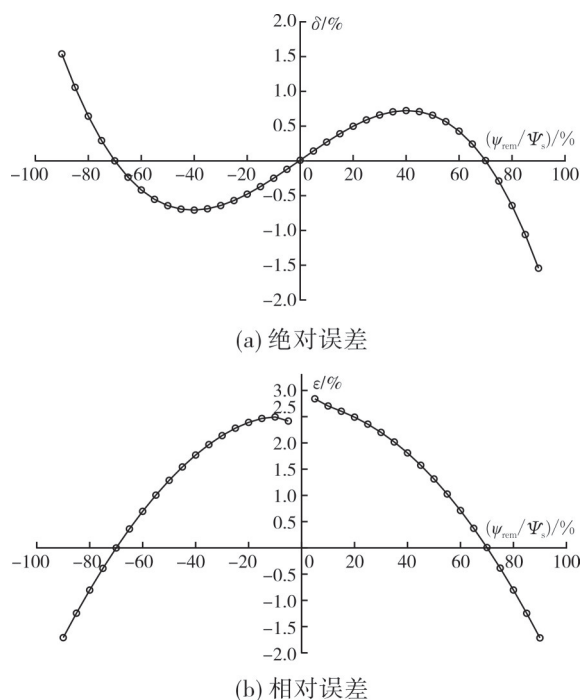


图6 不同剩磁下的检测误差

Fig.6 Detection error under different residual-magnetism levels

3.2 检磁电压源的不同频率分析

在理论推导过程中,认为铁心进入了双向对称饱和的情况,磁导率中仅存在直流和偶次谐波分量。然而,实际情况下由于铁心存在剩磁,呈现非对称饱和,磁导率仍存有少量奇次谐波分量,这会对结果造成干扰。下文将在基准案例的基础上改变检磁电压源的频率进行分析。检磁过程中达到的饱和深度随频率改变。具体来说,当检磁电压源的频率变小时,其饱和深度将增大。

保持检磁电压200 V不变,互感器一次侧离线,使用频率为40 Hz、80 Hz、120 Hz的3种方波电压分别对铁心剩磁进行检测,预设铁心剩磁为饱和磁链的-90%~+90%,以10%为间隔设定实验案例,对全部57组实验的检测结果进行误差分析,不同频率时的检测误差如图7所示。

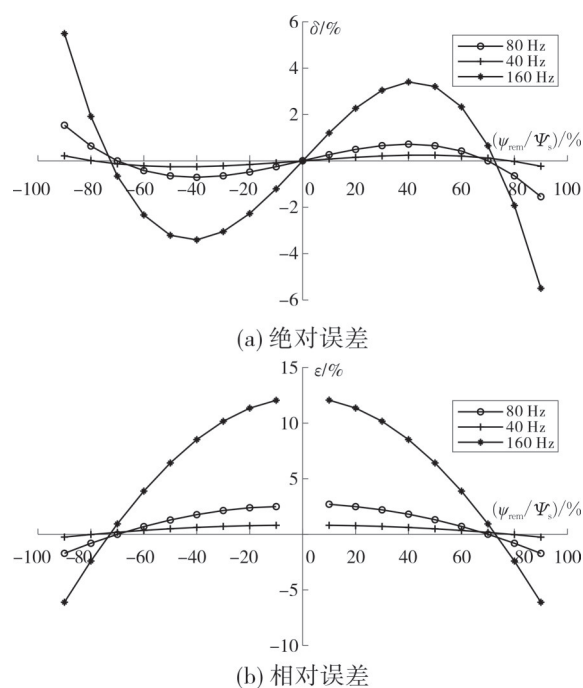


图7 不同频率时的检测误差

Fig.7 Detection errors at different frequencies

由图7可知,随检磁电压源频率升高,饱和深度降低,检测误差随之增大。这主要是因为当饱和深度降低时,铁心在单个周期内两次进入饱和状态的非对称性增强,导致磁导率中其他谐波的含量增大,导致检测误差增大;当饱和深度进一步降低时,铁心在单个周期只会进入一次饱和状态。因此,为提高检测精度,需要保证一定的饱

和深度；同时，检测时长为单个方波周期，选用较短的方波周期能够缩短检磁时间。

3.3 检磁电压源的不同幅值分析

通过调节检磁电压源的幅值，可改变单个方波周期内铁心到达的饱和深度。保持检测电压80 Hz不变，互感器一次侧离线，分别采用100 V、200 V、400 V 3种幅值的方波电压对铁心剩磁进行检测。预设铁心剩磁为饱和磁链的 $-90\% \sim +90\%$ ，以10%为间隔设定实验案例，对57组实验的检测结果进行误差分析。不同幅值时的检测误差如图8所示。随着检磁电压源的幅值降低，铁心单个周期内饱和深度下降，趋向于非对称饱和，导致检测精度下降。

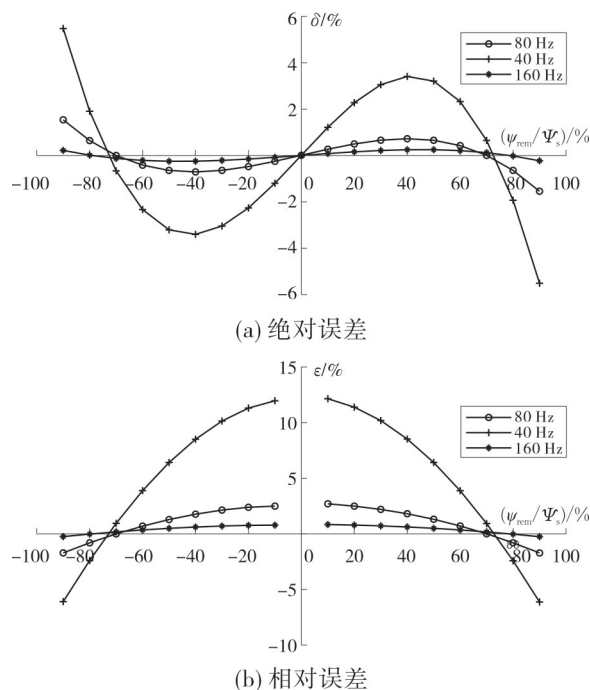


图8 不同幅值时的检测误差

Fig.8 Detection errors at different amplitudes

3.4 检磁电压源的不同幅频组合分析

鉴于检测电压源的幅值与频率均可调节饱和深度，本文方法参数选择灵活。为综合分析检磁电压源的幅值和频率对饱和深度与检磁精度的影响，取幅频比(幅值和频率的比值)作为衡量因素。为验证相同幅频比的不同组合能否达到相同的检磁精度，分别选取400 V/80 Hz为第一系列，200 V/40 Hz为第二系列，100 V/20 Hz为第三系列。预设铁心剩磁为饱和磁链的 $-90\% \sim +90\%$ ，以10%

为间隔设定实验案例，对57组实验的检测结果进行误差分析。不同幅频组合时的检测误差如图9所示。

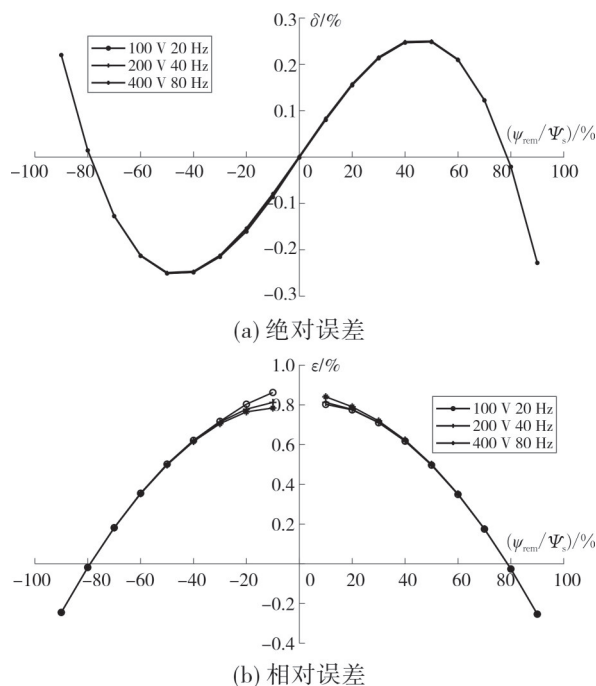


图9 不同幅频组合时的检测误差

Fig.9 Detection errors under different amplitude-frequency combinations

由图9可知，幅频比相同的3个系列的检磁精度基本一致。比较大的检测频率可以降低检测所用的时间，但对元器件的耐压要求较高，且需要考虑二次侧绝缘水平，实际操作中根据需要选择合适的检测电压。

3.5 剩磁检测方法讨论

与传统方法相比，基于特定频率方波激励的剩磁检测方法有较多优势。涌流法和暂态电流法无法判断铁心剩磁的方向，并会在检测过程中改变铁心剩磁，而本文方法基于谐波相位信息可判别铁心剩磁方向，且检测周期内电压激励积分为0，不改变铁心剩磁。漏磁通法需要安装磁通传感器并改变电流互感器的结构，本文方法则无需改动电流互感器原有结构，适用于已经投运的电流互感器。传统方法需要额外的检测设备和措施，并将待检电流互感器移至实验室内进行操作，本文方法无需将电流互感器从变电站拆除，实现“在线”检磁。

不同容量及铁心材料的电流互感器，其铁磁

特性存在差异,具体表现为饱和磁链、磁阻率与磁导率等参数不同。其中,饱和磁链直接决定检磁过程中饱和深度,磁阻率、磁导率会影响电流互感器二次侧电流二次谐波与铁心剩磁的传递函数。对不同型号的电流互感器进行检磁,需要优化激励幅频组合。本文方法在高电磁干扰环境下铁心难以实现双向对称饱和,铁心剩磁受环境磁场影响而不断变化,故对其进行检测的实际意义有限。

4 结语

本文提出了一种保护用电流互感器剩磁检测方法,通过单相逆变器在电流互感器二次侧施加单个周期、特定频率和幅值的方波检磁电压,对铁心磁链进行调制,使其双向深度饱和,并通过提取激磁电流中的检磁信号获取铁心中的残留剩磁。为验证本文方法的有效性,在EMTP-RV中进行仿真研究,在不同频率、幅值及幅频组合的方波电压激励下,对铁心剩磁进行检测和误差分析。

仿真结果表明,本文方法具有较高的检磁精度:绝对误差低于0.001 5 Wb,相对误差低于3%;提高检磁电压幅值或降低频率可进一步减小误差;增强磁场饱和深度有助于提升剩磁检测的精度。此外,应用本文方法检测铁心剩磁之后,铁心剩磁会回归到检测之前的状态,为后续基于已知剩磁的快速消磁工作提供了保障。

参考文献

- [1] HAJIPOUR E, SALEHIZADEH M, VAKILIAN M, et al. Residual flux mitigation of protective current transformers used in an autoreclosing scheme [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(4): 1636-1644.
- [2] ZHENG T, WANG Y. Fast and *in situ* remanent flux detection method for a protection current transformer based on the fluxgate theory [J]. AIP Advances, 2021, 11: 015034.
- [3] 王鹏玮,徐丙垠,陈恒,等.零序电流互感器误差对小电流高阻接地保护影响及选型[J].电力系统自动化,2023,47(12):154-162.
WANG Pengwei, XU Bingyin, CHEN Heng, et al. Influence of error of zero-sequence current transformer on small-current high-resistance grounding protection and type selection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(12): 154-162.
- [4] 王风光,杜兴伟,李力,等.母线差动保护电流互感器断线处理逻辑[J].电力系统自动化,2023,47(14):167-173.
WANG Fengguang, DU Xingwei, LI Li, et al. Processing logic against current transformer disconnection of busbar differential protection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(14): 167-173.
- [5] 王雨霏.计及剩磁的保护用电流互感器饱和特性研究及基于磁通门理论的快速在线剩磁检测策略[D].杭州:浙江大学,2021.
Research on saturation characteristics of protection current transformers with remanent flux and fast, *in situ* remanent flux detection method based on Fluxgate Theory [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [6] RAJIĆ T, STOJANOVIĆ Z. An algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 94: 276-286.
- [7] BAYNES T M, RUSSELL G J, BAILEY A. Comparison of stepwise demagnetization techniques [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(4): 1753-1758.
- [8] 杨志强,陈卫.电流互感器铁心剩磁测量方法研究[J].电力工程技术,2018,37(3):38-42.
YANG Zhiqiang, CHEN Wei. Research on the method of measuring residual flux in the core of current transformer [J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(3): 38-42.
- [9] 陈文臣,雷晓燕,王磊.电力变压器铁心剩磁检测方法研究[J].四川电力技术,2009,32(6):45-48.
CHEN Wenchen, LEI Xiaoyan, WANG Lei. Study on residual magnetism detection method of power transformer core [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(6): 45-48.
- [10] 彭涛.变压器剩磁变化规律及励磁涌流抑制研究[D].武汉:华中科技大学,2017.
PENG Tao. Research on remanence variation and inrush current suppression of transformer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [11] GE W Q, WANG Y H, ZHAO Z H, et al. Residual flux in the closed magnetic core of a power transformer [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 0502404.
- [12] WANG Y H, REN Y Z, LIU C C. Residual flux density measurement method of the single-phase transformer based on phase difference [C]//2022 IEEE 20th Biennial Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC). October 24-26, 2022. Denver, CO, USA. IEEE, 2022: 1-2.
- [13] HUO C L, WANG Y H, WU S P, et al. Residual flux den-

- sity measurement method for transformer core considering relative differential permeability[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2021, 57(2): 8400204.
- [14] HUO C L, WANG Y H, WU S P, et al. Research on residual flux density measurement for single-phase transformer core based on energy changes[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 6011909.
- [15] 赵紫薇, 汪友华, 火彩玲. 变压器环形铁芯建模和剩磁测量[J]. 电测与仪表, 2023, 60(7): 116-121.
ZHAO Ziwei, WANG Youhua, HUO Cailing. Toroidal iron core modeling of transformer and residual flux density measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7): 116-121.
- [16] 金雷, 谢齐家, 罗维, 等. 基于绕组变形测量的电力变压器剩磁大小估算[J]. 变压器, 2019, 56(10): 61-64.
JIN Lei, XIE Qijia, LUO Wei, et al. Estimate of remanence of power transformer based on measurement of winding deformation[J]. Transformer, 2019, 56(10): 61-64.
- [17] 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): 7024904.
- [18] 李钜, 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, WU Yungaowa, LIU Dichen, et al. Calculation of residual flux based on preisach model and entering phase control of transformer to eliminate inrush current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(19): 37-41.
- [19] 陶风波, 张刚, 李建生, 等. 基于局部磁滞回线斜率的变压器铁心剩磁估算[J]. 变压器, 2019, 56(2): 27-33.
TAO Fengbo, ZHANG Gang, LI Jiansheng, et al. Remanent magnetism estimation of transformer CoreBased on local hysteresis loop slope[J]. Transformer, 2019, 56(2): 27-33.
-
- 收稿日期: 2025-07-21; 修回日期: 2025-08-15
- 作者简介:
- 张欣(1973), 男, 高级工程师, 硕士, 研究方向为智能配电网控制与设备。
- 郑太英(1982), 男, 副教授, 博士, 研究方向为新能源电力系统控制与保护。(通信作者)
- (本文编辑: 张瑞敏)