

电力变压器剩磁测量方法研究

李勇¹, 金明亮¹, 李海涛², 李根³, 陈卫³, 陈德树³, 谢俊¹

(1. 国家电网华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 南京南瑞继保工程技术有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为了进行电力变压器稳态剩磁的定量研究, 提出了一种直流励磁模拟剩磁的间接测量方法, 用来解决常规的磁通测量方法不能直接用于测量变压器分闸后的剩磁问题。通过变压器空载合闸后的励磁涌流第一峰值, 借助直流励磁峰值曲线, 得到相应直流磁化力。再通过变压器峰值磁化曲线导出相应的磁通, 该磁通即为相应空投前的剩磁。最后通过物理模拟试验验证了该方法的可行性。该方法可以用于研究变压器铁芯的剩磁特性, 也可以用于对剩磁估算结果的验证。

关键词: 电力变压器; 剩磁测量; 直流励磁; 动模试验; 涌流抑制

Study on measurement method of remanence of power transformer

LI Yong¹, JIN Mingliang¹, LI Haitao², LI Gen³, CHEN Wei³, CHEN Deshu³, XIE Jun¹

(1. State Grid Central China Division, Wuhan 430077, China; 2. Nanjing NARI-RELAYS Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For the quantitative study of steady-state remanence of power transformers, an indirect measurement method for simulating remanence by DC magnetization is proposed. It is used to solve the problem that the conventional flux measurement method can not be directly used to measure the remanence of transformer after switching off. Through the first peak value of inrush current after no-load switching on of transformer, the corresponding DC magnetization force is obtained by means of the peak value curve of DC excitation. Then the corresponding flux is deduced from the peak magnetization curve of the transformer, which is the remanence before the corresponding no-load switching on. Finally, the feasibility of the method is verified by physical simulation. This method can be used to study the remanence characteristics of transformer core and to verify the estimation results of remanence.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902901).

Key words: power transformer; remanence measurement; DC additional magnetic; dynamic simulation test; inrush current inhibition

0 引言

电力变压器是借助电磁感应实现能量转变的重要设备, 转变的介质主要是铁磁物质, 通常是硅钢片。不同的铁磁物质其物理属性有所不同, 但都存在着饱和问题和磁滞问题^[1]。当变压器从电网中退出运行时, 其铁芯的磁场突然失去激励, 由于磁滞作用, 将保持一定的剩磁, 剩磁的大小和方向主要由电压的分闸角决定。电力变压器铁芯剩磁在空载

合闸的瞬间可能使铁芯迅速饱和, 产生幅值较大的励磁涌流, 引起变压器保护误动作。经过长期的研究, 防止保护误动的励磁涌流识别方法已比较成熟^[2-6], 但是励磁涌流引起的其他危害却无法避免^[7-10]。近年来关于选相控制断路器抑制涌流技术的研究逐渐引起关注^[11-16], 即根据合闸前剩磁状态控制合闸角, 使合闸瞬间铁芯内磁通的综合非周期分量为零, 避免铁芯饱和。但由于缺乏剩磁测量手段, 对合闸前铁芯剩磁情况只限于一些初步的认识。

变压器退出运行后, 铁芯中的剩磁基本属于稳态, 不能利用电磁感应原理进行测量, 而铁芯是闭

合环路, 又不能用磁通计插入磁路中进行测量。因此当需要剩磁参数时, 只能利用其基本物理属性进行估计, 但其结果的可信程度难以评估。关于铁磁材料的剩磁特性, 物理学家们已有相当详细的研究, 但多限于定性的理论分析, 对于剩磁的定量与时变问题未做明确的分析。文献[17]提出一种依据变压器空载合闸后在变压器一次侧检测到的电压电流数据和空载合闸角寻找变压器的铁心饱和时刻, 从而估量变压器分闸后铁心中剩磁的方法。文献[18]提出了基于时间-电流曲线的变压器剩磁检测的方法。通过在电力变压器原边加载幅值相同的正负恒压源, 对变压器进行充放电, 得到变压器的“时间-电流”曲线以判定变压器中是否有剩磁及剩磁的极性, 但是不能得到剩磁的大小。文献[19]在分析磁性材料时效特性的基础上, 结合 Preisach 模型及其特性, 推导出了分段计算铁心剩磁的方法。

以上估算剩磁的方法大都依赖于铁芯的磁滞特性, 且存在较多的不确定因素, 其可信度有待实验验证。本文提出一种电力变压器剩磁的间接测量方法, 利用直流助磁模拟剩磁的方法对电力变压器剩磁进行定量, 可以得到比较精确的定量结果。

1 铁磁材料的剩磁变化

铁磁材料的剩磁变化可用图 1 来说明^[20]: 设 t_0 时刻把外加磁场 H_0 去掉, 这时磁感应强度并不是马上从 B_0 降到 B_r , 而是先立即降到 B' , 然后才逐渐达到平衡态 B_r (磁滞回线 AB_r 是平衡态的值)。总的磁感应变化 $\Delta B = B_1 + B_2$, 其中 $B_1 = B' - B_0$ 与时间无关, $B_2 = B_r - B'$ 是后效部分, 这是一种弛豫过程。这里的磁滞回线 AB_r 是指静态磁滞回线, 是在磁场做缓慢变化时得到的。而在电力系统中, 通常测出的磁滞回线是动态磁滞回线。由于涡流效应等影响, 动态磁滞曲线的形状和面积大小都与静态磁滞回线不同。

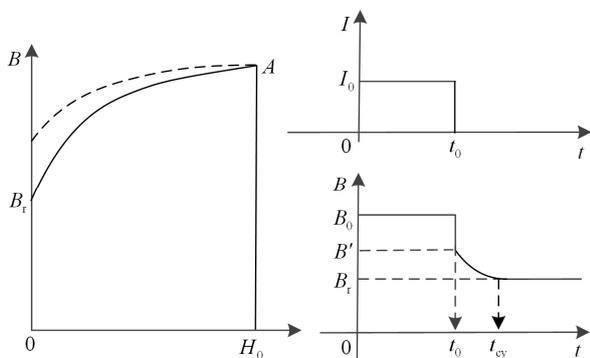


图 1 铁磁材料剩磁变化

Fig. 1 Change of remanence of ferromagnetic materials

2 励磁涌流的产生机理

变压器空载合闸的电路是简单的电阻和电感串联电路。

$$u = L_{\mu} \frac{di}{dt} + ri \quad (1)$$

但由于 L_{μ} 随 i 变化, 式(1)为非线性微分方程, 求解困难。一般先由电压求解磁通 ϕ , 然后再由磁通根据磁化曲线求解电流 i 。

忽略变压器的漏抗和绕组的电阻, 令铁芯主磁通为 ϕ , 则

$$\frac{d\phi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

$$\phi = \int u dt = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + C \quad (3)$$

$$\Phi_m = \frac{U_m}{\omega} \quad (4)$$

令合闸初瞬间 ($t=0$) 时铁芯的剩磁为 Φ_r , 则积分常数为

$$C = \Phi_m \cos \alpha + \Phi_r \quad (5)$$

于是有

$$\phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_r \quad (6)$$

式中, 第一项为稳态磁通, 后两项为暂态初始分量。剩磁的大小由合闸前铁芯的磁畴状态决定。由于合闸后有交变磁化力的存在, 磁畴状态不断变化, 其对励磁涌流的影响也随之逐渐减弱, 一般衰减不会太快。

电力变压器的饱和磁通一般为 $\Phi_{\text{sat}} = 1.15 \sim 1.4$ 。若铁芯的剩磁 $\Phi_r > 0$, $\cos \alpha > 0$, 合闸半个周期后 ϕ 达到最大值, 即 $\phi = 2\Phi_m \cos \alpha + \Phi_r$ 。最严重的情况是在电压过零时刻合闸, ϕ 的最大值为 $2\Phi_m + \Phi_r$, 造成变压器的严重饱和。此时 ϕ 的波形如图 2 所示。

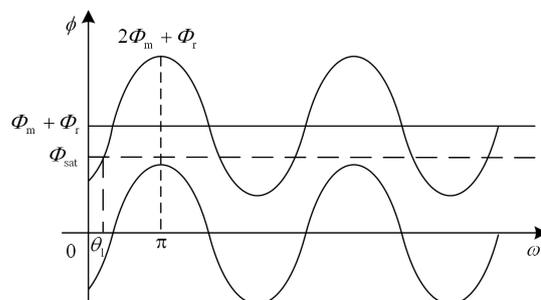


图 2 变压器暂态磁通

Fig. 2 Transient magnetic flux of transformer

令 $\theta = \omega t + \alpha$ 。在 $(0, 2\pi)$ 周期内, $\theta_1 < \theta < 2\pi - \theta$ 时发生饱和, 而 $\theta = \pi$ 时饱和最严重。令 $\phi = \Phi_{\text{sat}}$ 可得

$$\theta_1 = \arccos \left(\frac{\Phi_m \cos \alpha + \Phi_r - \Phi_{sat}}{\Phi_m} \right), 0 < \theta_1 < \pi \quad (7)$$

为了得到变压器的励磁电流,采用变压器的近似磁化曲线如图 3。铁芯不饱和时磁化曲线的斜率 $L_{\mu 1}$ 很大,励磁电流近似为零;铁芯饱和后磁化曲线的斜率 $L_{\mu 2}$ 很小,励磁电流 i_{μ} 大大增加,形成励磁涌流。在 $(0, 2\pi)$ 周期内有

$$i_{\mu} = \begin{cases} \frac{-\Phi_m \cos \theta + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_r}{L_{\mu 1}}, & 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ 或 } \theta \geq 2\pi - \theta \\ \frac{\Phi_{sat}}{L_{\mu 1}} + \frac{\Phi_m}{L_{\mu 2}} (\cos \theta_1 - \cos \theta), & \theta_1 < \theta < 2\pi - \theta \end{cases} \quad (8)$$

忽略饱和前的励磁电流,则励磁涌流的峰值可以表示为

$$I_m = \frac{1}{L_{\mu 2}} [\Phi_m (\cos \alpha + 1) + \Phi_r - \Phi_{sat}] \quad (9)$$

由涌流峰值表达式可知,当合闸角一定时,涌流峰值由剩磁唯一确定,因而可以从电压的合闸角及励磁涌流的第一峰值反推剩磁大小。

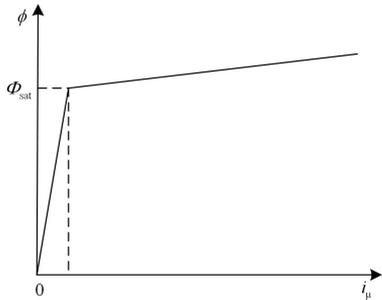


图 3 变压器近似磁化曲线

Fig. 3 Approximate magnetization curve of transformer

3 变压器铁芯剩磁测量问题

3.1 传统磁通测量方法

对交变的电磁回路,通常采用对电压积分的方法测量磁通,但变压器失电后电压为零,无法用积分方法求此时的稳态剩磁。在物理实验中测量静态磁通,一般采用霍尔效应片,利用其输出电势与垂直穿过的磁通量成正比的效应,由其输出电势测量静态磁通。这种方法要求被测磁通垂直穿过霍尔效应片。对电力变压器而言,其磁路是不可能被破坏的。所以,这种方法也不适用于求稳态剩磁。一种通行的办法是将断电前由电压积分的方法得到的磁通作为稳态剩磁,但是该方法获得的剩磁数值并不准确。此外,电压互感器在电压传变的暂态失真也存在影响。

3.2 直流助磁等效的剩磁测量方法

通常电力变压器空载合闸时,能得到其电压和

电流的录波数据,得不到此前的剩磁状况,变压器分闸断流后,由于铁芯的磁粘滞性,磁通继续变化,经过短时间后才稳定下来,形成其后合闸时遇到的实际剩磁。鉴于变压器剩磁测量的困难,本文采用空余绕组外加直流磁化力,产生一个直流磁场,用以模拟剩磁。考虑到自然合闸和模拟剩磁合闸产生的励磁涌流基本相同,可以由直流电流的大小间接找出当时的磁通,即可得到对应的剩磁,本文后续试验研究证明该方法的可行性和正确性。

由于铁芯具有强非线性特性,一个电流对应的磁通值可能不是唯一的。为了解决上述矛盾,需要找出一个“电流-磁通”唯一性的关系,也就是峰值磁化曲线。对一条磁滞回线来说,只有该回线的两个顶点是唯一的。作出多条磁滞回线后,将所有顶点连接即可构成一条峰值磁化曲线。从物理概念上看,这与“静态磁化曲线”相对应。但对变压器来说,由于不能直接测量磁通,不可能得到静态磁化曲线,采用峰值磁化曲线则可以解决变压器的剩磁定量问题。

本文提出一种通过试验测量变压器空载合闸前剩磁的间接测量方法。在电力系统动态模拟实验室中,对已知参数的模拟变压器进行试验,试验接线图如图 4。其中 22 W、23 W 为无穷大电源, JQF 由合闸角控制器控制其在预定的角度分合闸,其过程如下。

(1) 让变压器在预定的电压角度分闸(假定为 180°),再让其在预定的电压角度合闸,记录涌流峰值。

(2) 用可调压的 22 W 无穷大电源使被测试变压器从额定电压逐渐降至零压进行消磁后,在变压器的空置绕组上加入直流电流,以此磁化力产生助磁磁通,用以模拟剩磁。再让变压器在同样的角度合闸,记录直流电流和涌流峰值。

(3) 如果两次试验的涌流峰值相等,由式(9)可知,两次试验空投前的磁通应当相等。再根据变压器的峰值磁化曲线,由直流电流导出相应的磁通,该磁通即可作为相应空投前的剩磁。

需要说明的是,合闸后剩磁引起的非周期分量不断衰减,而直流助磁电流一直加在绕组上,是不衰减的。本文假定在合闸后的第一个周波,剩磁引起的非周期分量衰减很小,可以忽略。第 5 节验证了该假定的合理性。

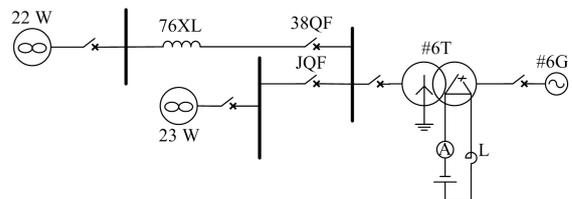


图 4 接线图

Fig. 4 Wiring diagram

4 剩磁特性的物理模拟试验例证

选用图 4 中由三个单相变压器组成的#6 变压器作为剩磁特性系列试验的试验变压器, 具体相关参数见表 1。按上述原理及方法, 直流回路接入高电抗 L , 用以抑制交流感应电势产生的交流电流分量。为了避免三相相间的相互影响使分析复杂化, 开始试验时, 变压器低压侧三角绕组开环。

电力系统动态模拟上的模拟电力变压器是按物理的“相似原理”设计的。其主要参数的“标么值”和实际电力系统中的变压器基本一致。

表 1 变压器参数

Table 1 Transformer parameters

名称	额定工况	备注
额定容量/kVA	31	—
高压侧额定电压/V	800	—
低压侧额定电压/V	220	—
接线方式	Y0/Δ	测试时三角侧断开

4.1 直流助磁下的励磁涌流

#6 变压器绕组匝数: 交流绕组 $N_{a1a9} = 144$, 直流绕组 $N_{A4.48} = 143.5$ 。空载合闸时, 调整好合闸角控制器, 在 A 相电压 0° 时合闸, 以取得较大的励磁涌流。然后在不同的直流助磁电流下合闸, 记录其涌流峰值 $i_{\max}^{0^\circ}$, 作出 $i_{\max}^{0^\circ} = f(i_d)$ 的相关曲线如图 5 所示, 其中横坐标为直流助磁电流(mA), 纵坐标为涌流峰值(A)。本文主要以电压 180° 分闸后的剩磁为例, 因而直流助磁按同样的极性接入。当然也可以选择别的角度合闸, 只要保证正常合闸与直流助磁合闸的合闸角相同, 对试验结果并不产生影响。

采用与上面试验相同的方法改变合闸角, 可作曲线 $i_{\max}^\alpha = f(i_d)$, 其中 α 为合闸角。已知正常合闸条件下涌流最大峰值及合闸角, 由 $i_{\max}^\alpha = f(i_d)$ 曲线即可查得其对应的直流助磁电流值。

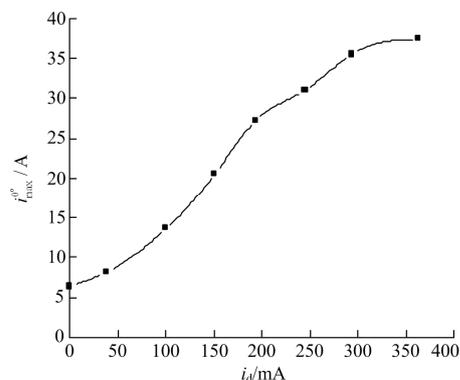


图 5 不同直流助磁下的涌流峰值

Fig. 5 Peak value of inrush current under different DC additional magnetic fields

4.2 峰值磁化曲线

由直流励磁电流得到磁通值需要用到变压器的磁化曲线。本文采用示波器法测量#6 变压器各线电压下的磁滞回线, 并利用相关参数换算到实际电流与磁通单位, 连接各磁滞回线的顶点, 由此得到峰值磁化曲线如图 6 所示。

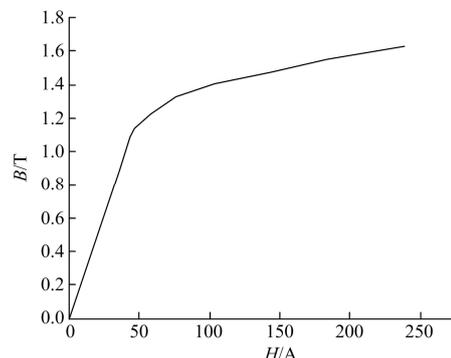


图 6 峰值磁化曲线

Fig. 6 Peak magnetization curve

具体峰值磁化曲线数据记录于表 2。

表 2 峰值磁化曲线数据

Table 2 Data of peak magnetization curves

参数	数值								
U/V	500	600	650	700	750	800	840	880	920
H/A	36	43.2	46.08	57.6	76.32	103.68	144	184.3	239.04
B/T	0.891	1.085	1.137	1.227	1.324	1.408	1.473	1.55	1.631

4.3 直流助磁的定量分析

以 830 V 电压下 A 相 180° 分闸 0° 合闸试验为例, 说明剩磁的定量方法, 其他角度分闸后的剩磁可以按相同的方法得到。试验录波图如图 7 所示, A 相涌流最大峰值为 32.632 A。

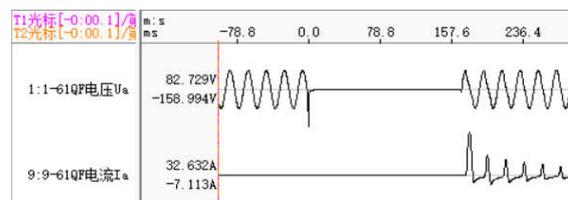


图 7 试验录波图

Fig. 7 Test record

根据涌流峰值与助磁电流的关系曲线, 当涌流峰值为 32.632 A 时, 直流助磁电流为 254 mA, 相应的磁动势为 36.45 A。再根据峰值磁化曲线, 当直流助磁磁动势为 36.45 A 时, 相应的磁感应强度约为 0.89 T, 830 V 电压下的磁感应强度峰值约为 1.473 T, 即该变压器 180° 分闸后的剩磁系数约为

0.6。而试验测得工频磁滞回线上的剩磁点(磁滞回线与纵轴的交点)的剩磁系数约为 0.78,可见工频磁滞回线所得到的剩磁与实际剩磁相差较大。

5 直流助磁与剩磁的对比

为了证明可以用直流助磁替代合闸时的剩磁状态,还需进行直接对比试验。图 8 是一次空载合闸试验,在 A 相电压 0° 时合闸,此前分闸角为 180°,励磁涌流峰值为 33.944 A。图 9 为直流助磁时空载合闸, U_a 的合闸角为 0°。直流助磁电流为 293 mA,相应的磁动势为 42.05 A,涌流峰值 $i_{a,max} = 35.05 A$ 。

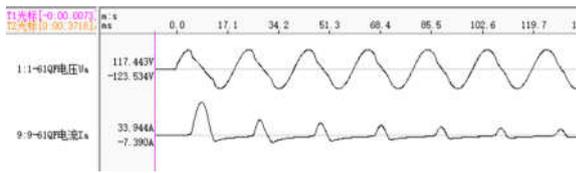


图 8 空载合闸试验
Fig. 8 Unload closing test

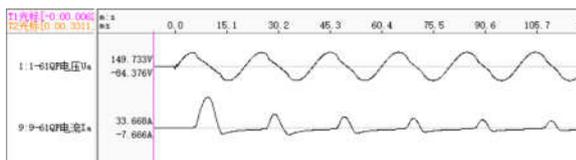


图 9 直流助磁合闸
Fig. 9 DC magnetic closing

将两次试验的各涌流峰值在同一图上进行对比,如图 10 所示。可见,两次试验结果几乎完全重合,用直流助磁模拟剩磁的方法在合闸后短时间内是可行的。

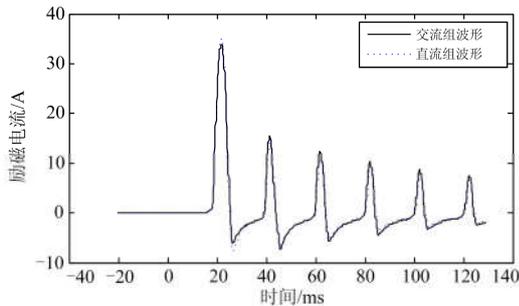


图 10 涌流波形对比
Fig. 10 Comparison of inrush waveforms

6 结论

现有的磁通测量方法不能直接用于测量电力变压器的剩磁。本文提出的直流助磁模拟剩磁的间接测量方法适用于电力变压器铁芯剩磁特性的研究,即利用励磁涌流第一峰值电流,借助直流励磁峰值曲线,得到相应直流磁化力,再通过变压器峰值磁

化曲线导出相应的磁通。这一磁通就可作为相对应的空投前剩磁。该方法也可用于剩磁估算结果的验证,为涌流抑制技术的研究奠定了良好基础。

参考文献

- [1] 杨汾艳, 王豹. 基于PSCAD V4.6考虑磁滞的变压器模型[J]. 广东电力, 2017, 30(6): 67-72, 85.
YANG Fenyan, WANG Bao. Transformer model considering hysteresis based on PSCAD V4.6[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(6): 67-72, 85.
- [2] 孙庆森, 张海峰, 王猛, 等. 小波算法在变压器励磁涌流中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 121-125.
SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, WANG Meng, et al. Application of wavelet algorithm in the transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 121-125.
- [3] 姚东晓, 张凯, 贺要锋, 等. 变压器多特征励磁涌流识别方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 149-154.
YAO Dongxiao, ZHANG Kai, HE Yaofeng, et al. Research on multi feature recognition scheme of transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 149-154.
- [4] 张召峰, 孙庆森, 张海峰, 等. 变压器励磁涌流中的信息熵识别[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 107-111.
ZHANG Shaofeng, SUN Qingsen, ZHANG Haifeng, et al. Identification of information entropy in transformer inrush current[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 107-111.
- [5] 谭江平. 基于磁通轨迹特征的变压器励磁涌流识别新方法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 77-80.
TAN Jiangping. Identification of transformer magnetization inrush current based on magnetic flux track[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 77-80.
- [6] 公茂法, 接怡冰, 李美蓉, 等. 基于小波包与改进的PSO-PNN变压器励磁涌流识别算法研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(8): 17-23.
GONG Maofa, JIE Yibing, LI Meirong, et al. Research on algorithm of transformer inrush current identification based on wavelet packet and improved PSO-PNN[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(8): 17-23.
- [7] 陈聪, 李晓华, 张冬怡, 等. 变压器涌流对直流 50 Hz 保护的影响机理与对策[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 91-96.
CHEN Cong, LI Xiaohua, ZHANG Dongyi, et al.

- Influencing mechanism and countermeasures of transformer inrush current on DC 50 Hz protection[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(9): 91-96.
- [8] 樊丽娟, 黄莹, 徐迪臻, 等. 送端励磁涌流对溪洛渡直流 50 Hz 保护的影响[J]. 南方电网技术, 2015, 9(6): 34-38.
FAN Lijuan, HUANG Ying, XU Dizhen, et al. Impact of magnetizing inrush current at sending end on 50 Hz protection of Xiluodu HVDC Transmission Project[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(6): 34-38.
- [9] 种芝芝, 粟小华, 刘宝宏. 西北电网主变充电引起青藏直流闭锁的原因分析及对策[J]. 电力建设, 2013, 34(3): 88-91.
ZHONG Zhiyi, SU Xiaohua, LIU Baohong. Analysis and countermeasures of Qinghai-Tibet DC blocking caused by main transformer charging in Northwest Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(3): 88-91.
- [10] 魏巍, 向天堂, 丁理杰, 等. 励磁涌流引发的谐波过电压机理分析及抑制措施研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(24): 24-32.
WEI Wei, XIANG Tiantang, DING Lijie, et al. Research on mechanism of harmonic overvoltage due to exciting inrush current and its suppression method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(24): 24-32.
- [11] 李洁. 南澳柔性直流输电系统涌流抑制措施及试验分析[J]. 广东电力, 2017, 30(3): 112-115.
LI Jie. Suppression measures on inrush current of Nan'ao HVDC flexible transmission system and experimental analysis[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(3): 112-115.
- [12] 黄金, 梁兆庭. 基于剩磁测量的选相关合技术[J]. 低压电器, 2009, 46(11): 40-43.
HUANG Jin, LIANG Zhaoting. Controlled closing technology based on remanence measurement[J]. Low Voltage Apparatus, 2009, 46(11): 40-43.
- [13] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 32-36.
WO Jiandong, ZHENG Tao, WAN Lei, et al. Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 32-36.
- [14] 兀鹏越, 余信, 李毅, 等. 变压器励磁涌流抑制器工程应用及探讨[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 145-149.
WU Pengyue, YU Xin, LI Yi, et al. Engineering application of transformer excitation inrush suppressor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(6): 145-149.
- [15] WUYUN Gaowa, LI Po, LIU Dichen. Phase control to eliminate inrush current of single-phase transformer by using approximate calculation of residual flux[C] // 2006 International Conference on Power System Technology, October 22-26, 2006, Chongqing, China: 1-6.
- [16] RIOUAL M, DIGARD H, MARTIN C, et al. Field application of a synchronous controller based on the measurement of residual fluxes for the energization of a step-up transformer[C] // 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 24-29, 2011, San Diego, CA, USA: 1-8.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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, WUYUN Gaowa, 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.
- [20] 北京大学物理系《铁磁学》编写组. 铁磁学[M]. 北京: 科学出版社, 1976.

收稿日期: 2018-08-11; 修回日期: 2018-09-17

作者简介:

李勇(1981—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 500ly@163.com

金明亮(1978—), 男, 博士, 高工, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: brightust@163.com

李海涛(1984—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电网保护与智能控制装置。E-mail: 15852933911@163.com

(编辑 许威)