DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.220535 文章编号: 0258-8013 (2022) 08-2997-07 中图分类号: TM 41 文献标识码: A

通过改变外电路电容减小变压器剩磁的方法

袁炜颖,甘萌莹,袁建生*

(清华大学电机工程与应用电子技术系,北京市 海淀区 100084)

Method of Reducing Transformer Remanence by Changing Capacitance of External Circuit

YUAN Weiying, GAN Mengying, YUAN Jiansheng*

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Because of the magnetic hysteresis effect, there will be remanence in the iron core after the de-energization of the transformer. When the transformer is re-energized, if the closing angle is not appropriate, the remanence will make the iron core reach the saturation state and will cause inrush current. The inrush current will cause the action of relay protection devices and fail the re-energization. Besides, the non-sinusoidal inrush current may cause power system resonance and thus lose the stability. In order to eliminate the remanence, an oscillating attenuated current can be applied in the winding, but this requires a set of demagnetization power source and complicated operations, which are rarely used in practice. Therefore, the ideal situation is that the transformer directly has no or little remanence after the de-energization, and additional demagnetizing methods are not necessary. A method to reduce the transformer remanence based on the principle of automatic demagnetization was proposed. The idea is that utilizing the capacitance effect in the external circuit of the transformer, especially the parallel voltage equalizing capacitor of the circuit breaker, makes the current after the de-energization oscillate to a certain extent under the influence of the capacitance and the equivalent inductance of the transformer. The oscillating attenuated current is equivalent to the demagnetization current, and will make the magnetic field in the core decrease to a small value. The simulation results of the remanence variation characteristics with the capacitance in the external circuit were given, and then the value of the parallel voltage equalizing capacitor of the circuit breaker with sufficient core demagnetization effect was given. Besides, the influence of the ground capacitances of the circuit breaker and the transformer on the remanence was also analyzed. Finally, the comprehensive configuration scheme of the capacitors and the application scope of this method were given.

基金项目: 国家电网公司科技项目(52130A210003)。

Supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (52130A210003).

KEY WORDS: capacitance; external circuit; magnetic hysteresis; remanence; transformer

摘要:由于磁滞效应,变压器分闸后铁心中会有剩磁。再次 合闸时,若合闸角不合适剩磁会使铁心进入饱和区,引起励 磁涌流。励磁涌流会造成继电保护装置动作而使合闸失败, 另外,非正弦励磁涌流可能会引起电力系统谐振而使其失去 稳定性。如果要消除剩磁,可以在绕组中施加一个振荡衰减 的电流进行铁心消磁,但这需要一套消磁电源和复杂的操 作,实际中也鲜有应用。因此,理想的情况是让变压器分闸 后直接没有剩磁或剩磁很小,不再需要额外采取方法消磁。 文中提出一种基于自动消磁原理的减小变压器剩磁的方法, 思路是利用变压器外接电路中的电容效应,主要是断路器的 并联均压电容,使分闸后的电流在电容与变压器的等效电感 的共同作用下发生一定程度的振荡。该振荡衰减电流相当于 一个铁心退磁电流, 使铁心内的磁场终止于较小的量值。首 先给出剩磁大小随外电路中电容值的变化特性仿真结果,然 后通过仿真计算给出断路器上的并联均压电容在多大时能 够实现足够的铁心退磁效果。另外还分析断路器和变压器的 对地电容对剩磁的影响特性。最后,给出电容的综合配置方 案和此方法的适用范围。

关键词: 电容; 外电路; 磁滞; 剩磁; 变压器

0 引言

虽然变压器用硅钢片软磁材料的磁滞回线较 窄,但其剩磁磁密 B_r并不小。电力变压器一般设计 在磁密最大值为 1.7T 左右,已进入饱和区,其对应 的剩磁可达 B_r=1.3T。假如变压器分闸角在电流较 大时刻,且电流降为零后不振荡,则铁心剩磁值基 本上就是 B_r。由于变压器外电路中电容的作用,分 闸后的电流呈现振荡衰减,因此剩磁不会稳定在 B_r 处,会振荡衰减到小于 B_r的值。但变压器的剩磁仍 然比较大,有文献指出:变压器剩磁可达额定磁密 的 70%左右^[1]。

当变压器再次合闸时, 若合闸角不合适, 剩磁

会增大铁心的饱和程度,引发励磁涌流,其幅值可 达到额定电流的 6~8 倍^[2-3]。因难以分辨此大幅值电 流是励磁涌流还是故障电流,继电保护可能误动作 而造成合闸失败。此外,铁心高度饱和还会使漏磁 增加,引起油箱、铁心、金属构件等过热,使绝缘 纸逐渐老化^[4],且励磁涌流含有的大量高次谐波还 会影响电能质量和电网安全^[3]。

为了避免剩磁的危害,需要采取措施消除剩 磁。已有的消除电力变压器剩磁的方法主要有以下 几种。交流衰减退磁法使用幅值逐渐减小的交流电 流激励,逐渐降低铁心的磁通^[3]。直流换向减幅退 磁法通过施加交替变化且逐渐减小的直流电位,缩 小铁心的磁滞回环从而削弱剩磁^[5],但正反向的消 磁过程不易完全对称。变频常压退磁法使用交替变 化且时间逐渐缩短的直流电压,削弱变压器的剩 磁^[6]。这 3 种方法都需要配备一套消磁电源和复杂 的操作,实际中也鲜有应用。

剩磁的危害主要由其引发的励磁涌流引起,因 此还可以采取措施限制励磁涌流。主要方法有合闸 角控制法和增加电阻法。通过控制合闸角,使电源 将要产生的磁通与剩磁一致,实现合闸时的平稳过 渡,避免铁心饱和,从而限制励磁涌流的幅值[7-11]。 虽然理论上讲这种方法可以减小励磁涌流,但这需 要已知剩磁大小,且控制合闸角需要准确已知断路 器行程动态特性,需要一些自动化技术,而这都存 在很大的技术和实施难度。另一种方法是在回路中 串联电阻,在断路器合闸时增加投切电阻[12-13],或 者使用内插电阻法,在中性点串联接地电阻削弱励 磁涌流^[14]。这都需要增加电阻投切自动控制设备, 且可能会掩盖真正的变压器故障电流。除此之外, 还可使用涌流抑制器,在三相变压器第三绕组接入 幅值逐渐增加的交流电压,直至主磁通稳定,再合 上主绕组的开关并断开涌流抑制器[15]。此方法也需 要另外增设削减励磁涌流的设备。

因此,理想的情况是让变压器分闸后直接没有 剩磁或剩磁很小,不再需要额外采取方法消磁。本 文提出基于自动消磁原理减小变压器剩磁的方法, 利用变压器外接电路中的电容与变压器的等效电 感,使分闸后电流振荡衰减进行退磁。本文通过仿 真给出剩磁随电容的变化规律,并给出减小剩磁的 具体方法。

1 变压器剩磁大小与外电路的关系分析

变压器的剩磁与分闸角及分闸后的电流波形

特别是电流的振荡情况密切相关,而电流波形与变 压器所在外电路的其它元件有关。外电路中的电容 使得分闸后的电流发生振荡,形成振荡衰减过程, 这会影响铁心工作特性与剩磁大小。

1.1 等效电路与剩磁求解

电力变压器的运行规程^[16]要求,变压器停运时 应先停负载侧,后停电源侧。在运行中出现不正常 现象时也应按顺序停运。只有出现严重故障引发保 护装置动作时,才可能出现带载分闸的情况。因此, 大多数情况下,变压器都是空载分闸。本文针对变 压器空载分闸的情况进行分析。变压器的外电路主 要是断路器,分析变压器空载分闸的剩磁的等效电 路模型如图1所示,其中:*R*_m和*L*_m分别为变压器 励磁电阻和励磁电感;*R*₁和*L*₁分别为变压器一次 绕组电阻和漏电感;*C*_T为变压器端口等效电容;断 路器分为有电弧和无电弧两个阶段,断路器断口熄 弧后用可变电容 *C*_k表示,断口燃弧时 *C*_k由可变电 阻 *R*_k代替;*C*_g为断路器的对地电容;*C*^k太断路器 的并联均压电容;*U*_s为母线电压源。



图 1 变压器与断路器等效电路 Fig. 1 Equivalent circuit of the transformer and the circuit breaker

取通过变压器励磁电感 *L*_m的电流 *i*_{LM}、断路器 并联均压电容 *C*_k 两端的电压 *u*_k 为状态变量,电路 的状态方程为:

$$\frac{di_{LM}}{dt} = \frac{1}{L_1 + L_{md}} \left(-R_\Delta i_{LM} - u_k + U_s \right)$$
(1)

$$\begin{cases} \frac{du_{k}}{dt} = \frac{1}{C_{T\Delta} + C'_{k}} (i_{LM} - \frac{1}{R_{k}} u_{k} + C_{T\Delta} \frac{dU_{s}}{dt}) \\ \frac{du_{k}}{dt} = \frac{1}{C_{T\Delta} + C_{k\Delta}} (i_{LM} - \frac{dC_{k\Delta}}{dt} u_{k} + C_{T\Delta} \frac{dU_{s}}{dt}) \end{cases}$$
(2)

式中: $R_{\Delta} = R_1 + R_m$; $C_{T\Delta} = C_g + C_T$; $C_{k\Delta} = C_k + C'_k$; L_{md} 为动态励磁电感。式(2)中 2 个公式分别对应有 电弧和无电弧阶段。

断路器的模型和参数可从文献[17-19]及中国 西电 LW15A-550/Y5000-63 高压六氟化硫断路器产 品说明中获取。计算所用系统为 500kV 线路上的一 台 334MVA 单相变压器^[20-21],其铁心为宝钢 B27P100 硅钢片。铁心的磁特性使用场分离的动态 J-A 磁滞模型^[22]描述。因为本文的主要目的是阐述 增加断路器的并联电容可以减小剩磁的机理,并给 出减小趋势,所以在这里略去变压器和断路器的具 体结构尺寸和参数值。且不详细阐述具体的计算方 法,因为对此场路耦合问题的求解采用的是现有的 方法,对暂态电路的求解采用吉尔方法^[23],对变压 器磁场的求解采用考虑磁滞回线的有限元法^[24-25]。 本文采用 Fortran 语言编制了变压器剩磁计算软件。

1.2 从铁心工作 H-B 轨迹看电容的去磁作用

采用计算软件得到的电流波形如图 2 所示, 其中 0.25s 之前为变压器运行阶段,之后为分闸阶 段;在图的右上角给出了分闸之后的放大图。可以 看出,分闸后的电流存在振荡衰减的过程。振荡现 象主要是由于断路器电容与变压器电感的能量交 换。可见,电容值影响电流波形,从而影响铁心的 工作状态或 *H-B* 轨迹,进而影响铁心中各点的剩磁 大小。



图 2 分闸过程的暂态电流波形(分闸时刻为 0.25s) Fig. 2 Transient current waveform during the

de-energization process (de-energization moment: 0.25s)

另外从图 2 还可知,由于变压器正常运行时的 铁心磁密可达 1.7T,已进入饱和区,所以在变压器 正常工作时励磁电流的畸变非常严重。只是励磁电 流相对于正弦的负荷电流要小得多,对总电流的波 形影响不大。然而,由剩磁引起的励磁涌流这一电 流,其电流值和畸变性都要大得多,会向电力系统 注入较大的高次谐波,可能引起系统谐振而影响系 统稳定,或者造成电力设备损坏等。

图 3 为铁心某点的铁心工作 *H-B* 轨迹,外侧的 磁滞回线是变压器运行时的铁心工作 *H-B* 轨迹。在 *H*=11A/m 处分闸,电流和 *H* 逐渐降为零,记 *Q* 点 处的 *B* 为 *B*_Q。假如电流不振荡,*B*_Q就是剩磁,其



图 3 变压器铁心某点的铁心工作 H-B 轨迹 Fig. 3 H-B trajectory of one point of the iron core of the transformer

基本上就是变压器工作时那条磁滞回线的剩磁 B_r。 该剩磁较大,当不考虑外电路的电容效应时计算得 到的剩磁记为该值。显然该值是错误的,因为实际 电流不会停在零处,而是会向负值发展,铁心中的 H 值也会向负值发展。分闸后第一个电流极小值处 的 B 为 B_{S1}。之后 H 值又向正值方向发展,在第一 个电流极大值处到达 Z₁ 点,之后再次改变方向。依 此振荡循环,经历多个电流极值(对应的磁密依次为 B_{S1}、B_{Z1}、B_{S2}、B_{Z2}等)后,形成局部磁滞回线到达 最后的剩磁点。

该过程充分体现了外电路中电容对电流和剩 磁的影响作用。电容使电流出现振荡,而振荡的电 流"带着"铁心形成局部磁滞回线,使得 B 值逐渐 减小。铁心中每一点都经历了此过程,形成了最终 的剩磁分布结果。

最重要的是:分闸后的电流是振荡衰减的,而 振荡衰减的电流恰好是铁磁材料退磁的方法,分闸 后的暂态电流实际上起到了一定程度上的铁心退磁 作用。由此,本文提出可通过改变外接电路中的电 容,增强分闸后暂态电流的退磁作用,从而保证无 论在哪个相位角下分闸变压器都具有较小的剩磁。

图 4 为变压器铁心一个切面上的剩磁分布。可 见,剩磁不均匀,这是因为铁磁材料的"记忆效应" 和铁心结构的综合影响。在分闸后的暂态过程中, 铁心的状态沿 *H-B* 路径不断推移。当前所处的位置 是经由历史的轨迹得到的,铁心的当前状态与历史 状态有关,也就是铁磁材料有"记忆效应"。电流 的历史极值对应于 *H-B* 轨迹上 *H* 的极值点,此处的 磁密 *B* 的值是形成最终的剩磁状态必须经过的历史 状态。经历历史状态的变化过程到达当前铁心状 态,体现了历史极值对当前的影响,通过历史轨迹



图 4 剩磁密分布(计算中仅使用了变压器几何结构的 1/4, 仅画出了铁心和高压绕组的轮廓)



保留了极值的影响。在仿真中,使用动态 J-A 磁滞 模型描述了"记忆效应",得到了铁心状态的变化 轨迹,保留了磁密的历史极值的影响。由于铁磁材 料的"记忆效应",分闸后电流的历史极值产生的 磁密的极值影响效应都保留了下来。又由于铁心结 构有拐角,铁心中的磁场并不均匀,因此不同位置 处磁通密度的极大值和极小值并不一致。二者的共 同作用形成了最终的剩磁分布。

2 通过改变外电路电容减小变压器剩磁的 方法

由上文分析可知,变压器剩磁的大小与外接电 路中设备的参数密切相关,改变参数可以改变剩磁 大小。设备选定后其等效电容、电感和电阻均不易 改变。但断路器的并联均压电容很容易改变,且增 加该电容可以增强分闸后电流的退磁效果,使铁心 具有较小的剩磁。下文给出通过仿真得到的剩磁随 电容的变化特性,并给出达到足够的铁心退磁效果 所需的电容参考值。

2.1 外电路中电容对剩磁的影响特性

在此除了分析断路器的并联均压电容对剩磁 的影响特性外,还分析了断路器和变压器的对地电 容的影响特性。

2.1.1 断路器并联均压电容对剩磁的影响

改变断路器并联均压电容 Ck 的大小,变压器 剩磁 Br 的变化规律如图 5 所示,图中给出的为分闸 角约为 180°时的结果,该分闸角基本上就是剩磁 最大的分闸角,剩磁值取变压器铁心边柱磁场均匀 处的值。可见,随断路器并联均压电容的增加,剩 磁逐渐减小。因此,可考虑通过增大断路器的并联 均压电容削弱剩磁。



图 5 变压器剩磁 Br 随断路器并联均压电容 Ck 的变化 (分闸角约为 180°)

Fig. 5 Variation of transformer remanence *B*_r with parallel voltage equalizing capacitor *C*^k of the circuit breaker (de-energization phase angle: 180°)

可在断路器上直接并联新的电容。幸运的是, 在高压断路器中,断路器往往采取多断口。为使多 个串联断口上的电压分布均衡,断路器断口本身有 并联电容。且并联均压电容越大,均压的效果越好。 并联均压要求与减小剩磁的要求,都需要增大并联 的电容,二者要求是一致的。因此,增大此电容是 合理的。其次,由于并联均压电容的存在,可以直 接增大并联均压电容实现减小剩磁的目标,而不需 要额外增加电容。也就是说,不需要额外增加消除 剩磁的设备,直接改变已有设备的参数即可,节约 成本且易于操作。

2.1.2 断路器和变压器的对地电容对剩磁的影响

变压器剩磁 B_r 随断路器和变压器的对地电容 C_g+C_T的变化曲线如图 6 所示,由图可知,随着对 地电容的增大,剩磁也增大了。因此,若要减小剩







磁,需要减小断路器和变压器的对地电容。

若剩磁的减小需要增加电容,那么在该位置直 接并联电容即可。但是,现在需要减小电容,此要 求不易满足。断路器的对地电容是套管与大地之间 的电容,变压器的对地电容包括绕组、铁心及套管 的对地电容,这些电容在电力设备制造安装完成 后,很难再减小。因此,只能在考虑绝缘要求的基 础上,在设备制造和安装时,使断路器和变压器的 对地电容尽量小。

对比改变两处电容的合理性和难易程度。增大 断路器的并联均压电容可同时实现减小剩磁和均 压两个目的,且此改变不需要增加额外的设备,易 于实现。而减小断路器和变压器的对地电容,因设 备本身结构和安装的限制,很难做到。因此,主要 通过增大断路器的并联均压电容,达到削弱剩磁的 目的。

2.2 断路器并联均压电容的配置方案

通过仿真计算,给出实现足够的铁心退磁效果 所需的断路器并联均压电容的大小。

剩磁除了受到外电路电容的影响,也会受到分 闸角的影响。存在一个分闸角,在该分闸角分闸, 剩磁将接近零。在铁心饱和区一定范围内的不同相 位处分闸,剩磁比较接近。因为在这些情况下,分 闸后铁心都将经历一段较饱和的*H-B*轨迹,然后到 达剩磁状态。而在其他的分闸角分闸,剩磁值相差 较大。因此,本文只给出有代表性的分闸角下的剩 磁,省略了剩磁接近零和剩磁相差不大的分闸角下 的结果。代表性分闸角情况下,变压器剩磁 *B*_r随断 路器并联均压电容 *C*k的变化情况如图 7 所示。



图 7 变压器剩磁 Br 随断路器并联均压电容 Ck 的变化 (图例标注为分闸角)

Fig. 7 Variation of transformer remanence B_r with parallel voltage equalizing capacitor C_k of the circuit breaker (the legend: de-energization phase angle)

根据图 7 中的最大剩磁曲线,此处为分闸角为 144°时的 B_r-C_k曲线,给出断路器并联均压电容的 配置方案。不同配置方案及其削弱剩磁的效果如 表 1 所示。断路器并联均压电容 C_k原为 1000pF, 当 C_k增大至原先的 2 倍时,剩磁约为原先的 87.7%, 当 C_k增大至原先的 3 倍时,剩磁约为原先的 52.3%。 若将 C_k取为原先的 3.5 倍,剩磁可减少至原先的约 40.9%。均压电容每增大 1 倍,剩磁约减小 23.6%。 因此,为实现足够的铁心退磁效果,使剩磁减小至 原先的一半以下,可将断路器的并联均压电容 C_k 增大至原先的 3~4 倍。

表 1 断路器并联均压电容配置方案及效果 Table 1 Configuration schemes of parallel voltage equalizing capacitor of the circuit breaker and the effects

$C'_{\rm k}/{\rm pF}$	$B_{\rm r}/{ m T}$	Br占原先剩磁的百分比/%
1000	0.318	100.0
2000	0.279	87.7
3000	0.166	52.3
3500	0.130	40.9

2.3 增大断路器并联均压电容的不利之处

分闸后,由于断路器相当于一个电容,所以仍 会有小幅值的电流流经变压器。增大断路器的并联 均压电容,会使分闸后的稳态电流幅值增大,此部 分将分析电流增大的程度以及可能的负面影响。

分闸后稳态电流幅值 *I*m(pu)随断路器并联均压 电容 *C*k 的变化曲线如图 8 所示,电流基值取额定 电流幅值。由图可知,随着断路器并联均压电容 *C*k 的增大,分闸后稳态电流的幅值逐渐增大。*C*k 增大至原先的 3.5 倍时,分闸后稳态电流增大到原 先的 2.6 倍。但是,此时的电流幅值仍然很小,是







额定电流幅值的 0.0113%,不会造成明显危害。分 闸后进行检修等操作时,按照操作规程采取安全保 障措施即可。

3 结论

电力变压器一般设计在磁密最大值为1.7T,其 对应的剩磁可达 1.3T。尽管由于外电路的影响剩磁 不会达到如此之大,但在没有为减小剩磁而进行特 殊设计的外电路系统中,变压器剩磁仍然较大。本 文提出的一种基于自动消磁原理的变压器剩磁削 弱方法,简单易行且效果明显,它通过适当增大断 路器的并联均压电容加大分闸后的电流振荡幅度, 实现消磁效果减小变压器剩磁。断路器并联均压电 容越大、断路器和变压器的对地电容越小,剩磁越 小。据此给出了电容的综合配置方案。首先,在断 路器和变压器的制造和安装过程中,在满足绝缘要 求的基础上,尽量减小它们的对地电容。其次,根 据断路器的并联均压电容每增大1倍,剩磁约减小 23.6%的规律,将断路器的并联均压电容增大至现 在断路器要求值的 3~4 倍, 可将剩磁减小到原来的 一半以下,且增大该电容对断路器没有不良影响。 此方法适用于 220kV 及以上高压电力系统中,使用 多断口断路器的变压器的剩磁削弱。

参考文献

- BRUNKE J H, FRÖHLICH K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. Theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 276-280.
- [2] 郝治国,张保会,褚云龙,等.变压器空载合闸励磁涌 流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.
 HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al.
 Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84(in Chinese).
- [3] 戈文祺. 电力变压器铁芯剩磁的仿真、测量与削弱[D]. 天津:河北工业大学,2014.
 GE Wenqi. Simulation, measurement and demagnetization of the residual flux in the iron core of power transformer[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2014(in Chinese).
- [4] 柳泽荣. 变压器安装与运行(6)[J]. 变压器, 2007, 44(8): 66-70.

LIU Zerong. Transformer installation and operation (6)[J]. Transformer, 2007, 44(8): 66-70(in Chinese).

[5] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等. 电力变压器铁心剩磁的

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(in Chinese).

- [6] ZHANG Shuo, YAO Chenguo, ZHAO Xiaozhen, et al. Improved flux-controlled VFCV strategy for eliminating and measuring the residual flux of three-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1237-1248.
- [7] 丁富华,邹积岩,方春恩,等.相控真空断路器投切空载变压器的应用研究[J].中国电机工程学报,2005,25(3): 89-93.
 DING Fuhua, ZOU Jiyan, FANG Chunen, et al. Investigations on switching idle power transformer with phasing vacuum circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 89-93(in Chinese).
- [8] 乌云高娃.变压器励磁涌流的分析与控制研究[D].武汉:武汉大学,2009.
 WUYUN Gaowa. Analyze and study of control strategy of transformer inrush current[D]. Wuhan: Wuhan University, 2009(in Chinese).
- [9] BRUNKE J H, FRÖHLICH K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. II. Application and performance considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 281-285.
- [10] 张浩,郑宇宏,王娜. 同步关合控制技术的研究及工程应用[J]. 高压电器,2014,50(5):76-80,86.
 ZHANG Hao, ZHENG Yuhong, WANG Na. Investigation into synchronized closing control technology for circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(5):76-80,86(in Chinese).
- [11] HASE Y, KAMESAWA T, INOUE S, et al. Experimental study of transformer residual flux and the method of restraining inrush current[J]. Electrical Engineering in Japan, 2014, 188(4): 54-67.
- [12] 李钜,乌云高娃,刘涤尘,等. Perisach 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(in Chinese).
 [13] 彭涛. 变压器剩磁变化规律及励磁涌流抑制研究[D].
 - (因) 受保, 交压储渠城或交化风律及加强相机和中时时无[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 & Technology, 2017(in Chinese).

- [14] 陈艳,陈小川,高仕斌. 几种削减变压器励磁涌流的方法[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 282-285.
 CHEN Yan, CHEN Xiaochuan, GAO Shibin. Several methods to reduce transformer inrush current[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(4): 282-285(in Chinese).
- [15] 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(in Chinese).
- [16] 国家能源局. DL/T 572—2010 电力变压器运行规程
 [S]. 北京:中国电力出版社, 2010.
 National Energy Administration. DL/T 572—2010
 Operation specification for power transformer[S].
 Beijing: China Electric Power Press, 2010(in Chinese).
- [17] 全国高压开关设备标准化技术委员会. GB 1984—2003 高压交流断路器[S]. 北京:中国标准出版社,2004.
 High Voltage Switchgear and Controlgear. GB 1984—2003 High-voltage alternating-current circuit-breakers
 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2004(in Chinese).
- [18] 李威,张进,黄劼怡,等. 500kV 断路器断口电容及介 损测量影响因素研究[J].电力电容器与无功补偿,2019, 40(1): 71-76.

LI Wei, ZHANG Jin, HUANG Jieyi, et al. Study on influencing factors of measuring break capacitance and dielectric loss of 500kV circuit breaker[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 71-76(in Chinese).

- [19] 王娜. 特高压 GIS 中隔离开关操作引起的电磁暂态问题研究分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
 WANG Na. The study of electromagnetic transient problem caused by disconnector switching operation in UHV GIS[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013(in Chinese).
- [20] 全国变压器标准化技术委员会. GB/T 6451—2008 油 浸式电力变压器技术参数和要求[S]. 北京:中国标准 出版社,2008.

Transformers. GB/T 6451—2008 Specification and technical requirements for oil-immersed power transformers[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008(in Chinese).

- [21] GREENWOOD A. Electrical transients in power systems[M]. 2nd ed. New York: Wiley, 1991: 432-437.
- [22] BAGHEL A P S, KULKARNI S V. Dynamic loss inclusion in the Jiles-Atherton (JA) hysteresis model using the original JA approach and the field separation approach[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(2): 7009004.
- [23] 袁兆鼎,费景高,刘德贵. 刚性常微分方程初值问题的数值解法[M]. 北京:科学出版社,1987:68-76.
 YUAN Zhaoding, FEI Jinggao, LIU Degui. Numerical initial value problems in stiff ordinary differential equations[M]. Beijing: Science Press, 1987: 68-76(in Chinese).
- [24] TOMS H L, COLCLASER R G Jr, KREFTA M P. Two-dimensional finite element magnetic modeling for scalar hysteresis effects[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(2): 982-988.
- [25] SADOWSKI N, BATISTELA N J, BASTOS J P A, et al. An inverse Jiles-Atherton model to take into account hysteresis in time-stepping finite-element calculations[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2002, 38(2): 797-800.



收稿日期: 2022-03-07。 作者简介: 袁炜颖(1994), 女,博士研究生,研究

方向为电磁场数值计算及其应用,ywy16@ mails.tsinghua.edu.cn;

袁炜颖

*通信作者:袁建生(1959),男,博士 后,教授,研究方向为电磁场数值计算及 其应用,yuan@tsinghua.edu.cn。

(责任编辑 吕鲜艳)

Method of Reducing Transformer Remanence by Changing Capacitance of External Circuit

YUAN Weiying, GAN Mengying, YUAN Jiansheng* (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University)

KEY WORDS: capacitance; external circuit; magnetic hysteresis; remanence; transformer

When the transformer is re-energized, if the closing angle is not appropriate, the remanence will make the iron core reach the saturation state and cause inrush current. The inrush current will make the relay protection devices act and fail the re-energization. Besides, the non-sinusoidal inrush current may cause power system resonance and stability losing. In order to avoid these consequences, measures need to be taken to reduce the transformer remanence.

A method to reduce the transformer remanence based on automatic demagnetization is proposed in this paper. The idea is that utilizing the capacitance effect in the external circuit of the transformer, especially the parallel voltage equalizing capacitor of the circuit breaker, makes the current after the de-energization oscillate to a certain extent under the influence of the capacitance and the equivalent inductance of the transformer. The oscillating attenuated current is equivalent to the demagnetization current, and will make the magnetic field in the core decrease to a small level.

The field-circuit coupling method is used to calculate the remanence of an unloaded transformer after the de-energization. The H-B trajectory of the iron core fully reflects the influence of the capacitance in the external circuit on the current and remanence. The remanence variation characteristics with the capacitances are obtained through simulation. With the increase of the parallel voltage equalizing capacitor of the circuit breaker, the remanence decreases gradually. The increase of this capacitor does not conflict with the requirements of voltage equalizing, and it can be implemented by directly changing the parameters of existing equipment without adding additional demagnetizing equipment, which reduces the cost and is easy to be carried out. Besides, the smaller the ground capacitances of the circuit breaker and the transformer are, the smaller the remanence is, but it is difficult to reduce them after the manufacturing and installation of the power equipment.

The comprehensive configuration scheme of the capacitors is given. First of all, in the manufacturing and installation process of the circuit breaker and the transformer, with the basis of meeting the insulation requirements, minimize their ground capacitances as much as possible. Then, the parallel voltage equalizing

capacitor of the circuit breaker is increased. Under the condition of representative de-energization phase angles, the variation of transformer remanence B_r with parallel voltage equalizing capacitor C'_k of the circuit breaker is shown in Fig. 1. According to the maximum remanence curve in Fig. 1, different configuration schemes and their effects of remanence reduction are shown in Table 1. According to the tendency that the remanence decreases by 23.6% every time the parallel voltage equalizing capacitance of the circuit breaker increases by 1 time, increasing the parallel voltage equalizing capacitance to 3~4 times of the original required value can reduce the remanence to less than half of the original value. The increase of the capacitance has no adverse effect on the circuit breaker.



Fig. 1 Variation of transformer remanence *B*_r with parallel voltage equalizing capacitor *Ck* of the circuit breaker (the legend: de-energization phase angle)

Table 1	Configuration schemes of parallel voltage equalizing
	capacitor of the circuit breaker and the effects

$C'_{\rm k}/{\rm pF}$	$B_{\rm r}/{ m T}$	Percentage of the original B_{r} %
1 000	0.318	100.0
2 000	0.279	87.7
3 000	0.166	52.3
3 500	0.130	40.9

The method proposed in this paper can reduce the transformer remanence based on the principle of automatic demagnetization, which is convenient and effective. This method is applicable to the remanence reduction of transformers with multi-break circuit breakers in high-voltage power systems of 220kV and above.