

变压器励磁涌流的抑制方法综述

张文韬¹, 王渝红¹, 丁理杰², 史华勃², 宋雨妍¹, 李天泽¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 变压器作为电力系统中的关键设备, 其运行状态能否正确、稳定会影响到电网供电的可靠性。而变压器的励磁涌流不仅容易影响到变压器差动保护的正确率, 严重时还会对电力系统的其他设备造成严重的电气污染。这里指出了励磁涌流产生的原因以及影响, 并对当前抑制励磁涌流的措施, 如一次侧串电阻法、电压侧并联电容法、选相合闸法等方法的原理进行了综述, 从经济和技术上对各方法的优缺点进行了分析, 并对这些方法在国内外的实际应用进行了介绍, 展望了今后励磁涌流的抑制方法研究的发展趋势及研究方向。

关键词: 变压器; 励磁涌流; 抑制方法

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)05-0056-07

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.012

Review of Attenuation Methods for Transformer Inrush Current

Zhang Wentao¹, Wang Yuhong¹, Ding Lijie², Shi Huabo², Song Yuyan¹, Li Tianze¹

(1. College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: As the key equipment in power system, whether the operation status of transformer is correct or stable will affect the reliability of power supply. The inrush current of transformer can not only affect the correct rate of differential protection of transformer, but also cause serious electrical pollution to other equipment of power system. The occurring causes and influence of inrush current are pointed out. The current measures for the suppression of inrush current are reviewed, such as series resistance method in primary side, shunt capacitance method in voltage side and phase selection method. The advantages and disadvantages of each method are analyzed from the economic and technical aspects, the practical application of these methods at home and abroad is introduced, and the developing trend and research direction of the future attenuation methods for inrush current are prospected.

Key words: transformer; inrush current; attenuation method

0 引言

变压器是电力系统中最重要设备之一, 变压器的稳定运行与否, 与电力系统的稳定运行密切相关。变压器的一次侧在空载合闸或者外部故障切除后恢复时会产生极大的励磁涌流, 其值可能达到变压器额定电流的6~8倍, 而正常情况下励磁电流应该仅占额定电流的2%~5%^[1]。过大的励磁涌流不仅会导致变压器的差动保护装置误动作, 导致电网电压骤降或骤升, 严重时可能会造成电网大面积停电。变压器也会因为励磁涌流导致内部结构受到

损害, 同时造成变压器变形, 损害变压器的绝缘, 减少变压器的使用寿命。如今针对变压器的励磁涌流主要都采取以识别为主的方法来保证差动保护不发生误动^[2-6], 但变压器的励磁涌流并没有被去除, 励磁涌流中的直流分量和高次谐波的存在会导致电力系统的供电质量下降, 严重时可能还会导致电压暂降以及过电压的问题。近年来随着高压直流输电系统的不断发展, 交流系统与直流系统之间的联系越来越紧密, 在直流近区中交流系统中产生的励磁涌流会对直流系统造成影响。因此, 为了有效地抑制励磁涌流的大小, 以便减小励磁涌流对变压器及整个系统的危害, 抑制励磁涌流成为了国内外学者研

究的重点问题。

下面将对各文献中提出的励磁涌流的抑制方法进行归纳总结,分别对其原理及优缺点进行分析,并结合变压器的实际情况对将来励磁涌流的抑制方案进行了展望。

1 励磁涌流的产生原因及其影响

变压器在正常运行时,励磁电流的值最大仅为额定电流的2%~5%。而在发生外部故障时,电压降低,励磁电流也将随之减小。因此变压器正常运行或发生外部故障时,都不会出现励磁涌流。

但当变压器空载投入或将外部故障切除后变压器重新投入运行时,由于电压的突然变化,磁场急剧增大,导致变压器内部的铁心饱和。饱和磁通的大小取决于铁心材料的磁导率、磁路长度及截面等因素,铁心磁通饱和导致励磁电感减小,励磁电流激增为励磁涌流。设变压器的高压侧电压为 U , U_m 为变压器正常运行时的电压最大值。变压器稳态运行情况下设绕组端电压为

$$U(t) = U_m \sin(\omega t + \theta) \quad (1)$$

忽略变压器漏抗和绕组电阻,则用标么值表示的电压 U 与磁通 Φ 之间的关系为

$$U(t) = N \frac{d\Phi}{dt} \quad (2)$$

式中: N 为变压器匝数; Φ 为铁心磁通。设 $N=1$,当变压器空载合闸时,由电压 U 与磁通 Φ 之间的微分方程求解可得

$$\Phi = \int U(t) dt = -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + C \quad (3)$$

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

式中: θ 为变压器投入时刻的初相角; ω 为角速度; C 为积分常数; Φ_m 是变压器稳态工作时的磁通幅值。由于铁心中的磁通不能骤变,设变压器空载投入瞬间($t=0$)铁心的剩磁为 Φ_r ,则积分常数

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

于是,空载合闸时变压器铁心中的磁通为

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \theta) + \Phi_m \cos\theta + \Phi_r \quad (6)$$

式中:第1项为稳态磁通;后两项为暂态磁通,在计及变压器损耗的情况下,暂态磁通将随着时间的衰减而衰减。假设后两项参数同为正或同为负,则半个周期后铁心磁通会达到 $2\Phi_m \cos\theta + \Phi_r$ 。变压器空

载投入时,合闸初相角 θ 决定了磁通量的大小。在电压过零点($\theta=0^\circ$)空载合闸半个周期后将产生最大磁通 $2\Phi_m + \Phi_r$,远远大于变压器的饱和磁通 Φ_s [1]。

在变压器铁心饱和后,励磁电流将急剧增大,最大可能达到额定电流的6~8倍。励磁涌流具有以下特点:

- 1) 励磁涌流具有非对称性,含有大量的非周期分量,其波形会比正常情况下的励磁电流更为接近时间轴的一侧。
- 2) 励磁涌流的波形存在间断,有明显的波形间断角。波形间断角随着涌流的大小而变化,铁心饱和程度越高,涌流越大,间断角也就越大。
- 3) 励磁涌流中含有大量以偶次谐波为主的谐波分量,其中二次谐波的含量最多。

目前针对励磁涌流的各种抑制方法主要可以分为两大类。一类是通过外接设备或者改变变压器内部结构等方法来进行抑制。这类方法主要有变压器一次侧串电阻、改变变压器绕组接法、变压器低压侧接电容、采用电力电子器件抑制励磁涌流法等。另一类主要是通过改变变压器内部的相应参数来达到控制励磁涌流的目的。这类方法主要包括预充磁法、选相合闸法、消除剩磁法等。近年来,随着研究领域的扩大以及研究层次的深入,国内外学者将两类方法结合起来,又提出了很多新的抑制励磁涌流的方法。这些方法的提出,为未来解决励磁涌流的抑制这一课题提供了新的思路。下面对以上方法进行综述。

2 外接设备或改变内部结构的抑制方法

2.1 变压器一次侧串电阻

该方法原理是在变压器空载合闸时在变压器高压侧绕组串联一个合闸电阻。这样在励磁涌流产生时,励磁涌流会因为该合闸电阻的影响而被减弱。当变压器进入稳态运行时候,再利用旁路开关将此合闸电阻切除掉。选择合适的合闸电阻阻值还可以加快励磁涌流的衰减速度。

文献[7]提出了一种利用时间继电器与串联合闸电阻结合的装置,利用时间继电器来控制变压器主回路和串联合闸电阻的投切时间。投入实际应用后表明效果良好。文献[8]结合了合闸电阻的等效

电路,通过理论分析证明了串联合闸电阻抑制励磁涌流的可行性,并在 ± 800 kV的换流变压器上加装了不同阻值的电阻进行了对比研究,可看出合闸电阻的大小与励磁涌流不是线性关系,在实际应用中应进行优化。文献[9]中在变压器一次侧主断路器两端附加了并联电阻和辅助开关,变压器空载合闸时令并联电路先接入电路,待一段时间后,主断路器合上,短路并联电阻并断开辅助开关,完成变压器的合闸过程。利用电阻的阻尼作用,使得励磁涌流的衰减速度变得更快。同时通过对多组数据的仿真,综合考虑电阻的能耗以及抑制效果,得出针对于该仿真模型的最优合闸电阻值。

该类方法的操作比较复杂,而且增加了设备的投资。尤其对于大容量的变压器,其阻值也相应需要很大,并且还可能对大容量变压器的高压侧的功率送出造成一定的影响。因此该方法一般仅适用于小容量的变压器空载合闸时使用。

2.2 改变变压器绕组接法

铁心的磁导率在铁心饱和时会近似等于真空的磁导率。变压器的一次绕组在变压器产生励磁涌流时可以看作是一个不包含铁心的空心线圈。由于励磁电感随着截断面积的增大而增大,如果能够通过改变变压器绕组分布,改变其截断面积,这样就能通过增大励磁电感来抑制励磁涌流。

文献[10]以3层式的S-P-S结构和4层式的S-P-S-P结构的变压器为例进行分析,从机理上叙述了如何通过改变绕组的方式来抑制励磁涌流。文献[11]通过对多组S-P-S结构的变压器进行实验,验证了改变绕组方法抑制励磁涌流的可行性。文献[12]提出了一种新型的改变绕组的方法,该方法利用了扇形绕组的设计,通过提高变压器的饱和电感值来达到抑制励磁涌流的目的,不需要增设其他元件。该文通过仿真发现扇形绕组接法应用在大型变压器上时对励磁涌流有较好的抑制效果。文献[13]提出了一种改变一、二次绕组分布,通过增加合闸过程中变压器的自感来对励磁涌流进行抑制。

改变变压器绕组接法的缺点在于需要改变变压器的内部结构,可能会影响到变压器的绝缘特性,而且对已投运的变压器,改造的成本过高。

2.3 变压器低压侧并联电容器

变压器产生励磁涌流的主要原因是铁心饱和,

如果能采取措施令变压器绕组内的磁通被限制在饱和值以下,励磁涌流相应地也就会被抑制。基于这种思想,在变压器的低压侧并联电容器,通过电容器在低压侧产生与高压侧磁性相反的磁通,降低铁心饱和度,使得抑制励磁涌流得以实现。若取用合适的电容参数与励磁电感产生谐振,励磁阻抗的值会在额定频率下达到无穷大,在这种情况下可以完美地抑制励磁涌流。

文献[14-15]简单介绍了此方法的原理,并且通过荷兰PGEM公司在1992年的实际试验,提出了并联电容器取值对励磁涌流抑制效果的影响问题。文献[16]通过对变压器等效电路的分析,提出先利用等效瞬时电感求取瞬时励磁电感,再用求得的励磁电感来确定用于抑制励磁涌流的电容值。并通过仿真验证了变压器低压侧并联电容器抑制励磁涌流的可行性。但计算出的并联电容值可能存在计算误差而不能完美地抑制励磁涌流。文献[10]为了解决计算误差的问题,在变压器低压侧并联电容器的基础上,将选相合闸技术与之结合,通过仿真计算发现在两种抑制方法结合的情况下,较之单独使用其中的某一种方法,结合使用后励磁涌流的抑制效果较好。

低压侧并联电容器的主要缺点在于难以确定合适的电容值,不同电容值的选取,会导致励磁涌流的变化很大。因此单独使用变压器电压侧并联电容时必须了解变压器的励磁特性。一般考虑将此方法与其他几种抑制励磁涌流的方法结合使用,以达到较好的抑制效果。

2.4 利用电力电子器件抑制励磁涌流

近年来电力电子技术发展迅速,其快速发展对电力系统的运行和控制都带来了巨大的影响。因此有学者将电力电子技术运用在抑制励磁涌流方面,也取得了较好的效果。

文献[17]讨论了分别利用直流电抗器和串联联结的电压源PWM转换器来限制励磁涌流。直流电抗器应用在单相变压器上后几乎不产生励磁涌流,在三相变压器上励磁涌流会被很好地抑制。单相和三相变压器在采用PWM转换器后,励磁涌流均不会产生。文献[18]设计了一种基于二阶欠阻尼电路实现的涌流抑制器。此涌流抑制器可根据特定时间常数变化幅值的电压施加在变压器的第3绕组上,有效地抑制在暂态过程中产生的励磁涌流。

充电完成后,涌流抑制器退出运行,不会对电力系统造成影响。文献[19]提出将超导故障限流器(superconducting fault current limiter, SFCL)应用于励磁涌流的抑制上。将限流电阻(current limiting resistance, CLR)与超导故障限流器(SFCL)结合在一起使用,根据变压器的具体数据,通过仿真计算得出最合适的阻值,仿真结果验证了此方法在抑制励磁涌流中的应用有效性。

现阶段由于成本以及控制复杂的原因,电力电子器件抑制励磁涌流的各种方法还未大规模地应用于实际工程上。但是随着电力电子技术的不断发展,新的应用在励磁涌流的抑制上可能会出现。

3 改变变压器的相应参数的抑制方法

3.1 变压器预充磁

在交流系统中,电压总是超前磁通 90° 相位角。合闸的最优情况是在当电压相位角为最大时,此时合闸磁通的瞬间值也为0,这种情况下变压器就不会产生励磁涌流。在其他时刻合闸时,磁通值不为0,由于铁心中的磁通不能突变,因此铁心中就会产生式(6)中的非周期分量,非周期分量越大,铁心越容易饱和,铁心饱和就会产生极大的励磁涌流。如果考虑在变压器合闸前对变压器的原边进行预充磁,通过预充磁产生的磁通令合闸时的磁通不是突变的状态,可以减小非周期分量的幅值,同时也就达到了抑制励磁涌流的目的。

文献[20]从励磁涌流的产生原理出发,分析了预充磁技术的实现原理。文献[21]对变压器实例进行预充磁操作,通过工程实例验证了预充磁能够有效地抑制励磁涌流。文献[22]研究了串接小容量变压器预充磁抑制励磁涌流可行性,并结合船舶电力系统的工程实际,进行了建模仿真和动模系统物理试验验证。文献[23]设计了一种由直流电压源、开关、电容、二极管、熔丝和双熔点断路器组成的预充磁装置。针对不同剩磁的情况做了仿真实验,结合仿真结果与变压器的极限磁滞回线,确立了预充磁装置的充磁目标值,最后确立预充磁装备断路器的关断角。文献[24]对船用变压器的两种预充磁技术进行了分析研究。其中串接电阻预充磁方法对励磁涌流的抑制效果较差,串联小容量变压器预充磁的效果较好。但前者实现方便,成本较低;后者

虽然实用性较高,但是不能单独使用。

预充磁技术单独使用虽然也能够一定程度上抑制励磁涌流,但实际工程中为了达到更好的效果,一般考虑将预充磁技术与选项合闸技术以及剩磁消除技术等方法结合起来一起使用,以达到更好的抑制效果。预充磁技术在使用时也应当考虑到实现难度,做到经济性与实用性并存。

3.2 选相合闸技术

选相合闸技术最早提出于20世纪70年代,主要用于降低操作过电压及合闸涌流。近年来随着国内外学者的不断深入研究,此技术在空载变压器合闸上也得到了应用。选相合闸技术的原理是通过控制断路器的投切时间,以达到减少式(6)中暂态分量的目的,从而抑制励磁涌流。文献[10]与文献[25-27]对选项合闸的原理进行了分析,并提出了3种常用的针对三相变压器的选项合闸策略。

1) 快速合闸策略:此策略下,假设A相剩磁 $\Phi_A = 0$,B相剩磁 $\Phi_B = -0.8\Phi_m < 0$,C相剩磁 $\Phi_C = 0.8\Phi_m > 0$ 。当电压为峰值时令A相合闸,并在A相合闸后 $1/4$ 个工频周期后将B和C两相进行合闸,这样就能防止B和C两相铁心中的磁通饱和,达到抑制励磁涌流的目的。

2) 延迟合闸策略:在某一项剩磁为已知的情况下可以采用这种方法。假定A相剩磁为已知,令A相在其电压峰值时刻(此时合闸不会产生暂态磁通)合闸,B与C两相在经过 $2\sim 3$ 个工频周期后合闸。设B、C两相中的磁通情况为 $\Phi_B > \Phi_C$,当B相感应磁通进入饱和区后,C相的感应磁通还未饱和。在此暂态过程中应有: $L_B \gg L_C$,且B相的感应电动势也远远大于C相的感应电动势。B、C两相的磁通均会逐渐增加,但由于C相的增加速度大于B相的增加速度,最后两相铁心内部的剩磁会达到平衡状态,并且相位超前A相 180° ,消除剩磁的影响。

3) 同步合闸策略:此方法需要控制断路器,令三相中任意一相(设为A相)剩磁等于0,另外两相(设为B、C两相)剩磁不等于0且一相为正、另一相为负,并且剩磁幅度不能太小。此时可以令三相同时选择在A相的最佳相位合闸点处合闸,但此方法的实现前提条件较为严苛。

文献[28]提出了一种不考虑剩磁的选相合闸方法。利用SF₆断路器对三相变压器绕组进行控制,设置每相 60° 的机械延时相角,以B—C—A的顺

序每隔 1 ms 分相合闸能最后结果显示能有效抑制励磁涌流。该方法已经在匈牙利的两个变电站中进行了实际应用且效果良好。文献[29]利用 MATLAB 仿真软件中的 PSB(power system block) 建立了三相变压器空载合闸的仿真模型,并针对无剩磁和有剩磁两种情况下的选项合闸技术进行了仿真分析。并提出将 DSP 技术应用到选相合闸技术的控制系统中的展望。文献[9]对合闸涌流以及和应涌流两种情况下应用选相合闸技术后的抑制效果进行了分析,最后结合工程实例,得到以剩磁检测装置辅助于选相合闸装置后,抑制效果会更好的结论。文献[30]分析了针对直流系统中的换流变压器,提出了一种新的控制逻辑来控制选项合闸技术对换流变压器励磁涌流的抑制。文献[31]详细分析了通过电压积分求取剩磁的方法与剩磁的大小和极性对抑制励磁涌流的影响。文献[32]在分析选相合闸技术原理的基础上,结合现有的剩磁计算方法,详细分析了快速合闸策略和延迟合闸策略。但是现阶段的剩磁一般都是通过电压积分得到,在某些情况下不能精确地得出剩磁的值,因此会影响到抑制效果。文献[33]从铁心的磁学特性角度入手分析了选相合闸技术的原理,并指出抑制励磁涌流仅需式(6)中的两项暂态分量——偏磁与剩磁的极性相反即可。只要偏磁与剩磁不叠加,磁路就不会饱和。此方法大大减小了对选相合闸操作的精度要求。文献[34]通过建立变压器空载合闸时的详细数学模型,分析了变压器分闸时电流相位角对于剩磁量的影响,以数学关系式的形式展现了分闸时的电流相位角和励磁电流相位角的联系。通过分析这些因素之间的联系,再应用于选相合闸技术上。文献[35]在分析选相合闸技术的原理基础上,设计了一种硬件系统以 DSP 为基础并且具有采样、控制、通信功能的永磁真空断路器。通过 C 语言进行编程,使之能够在空载变压器进行合闸时对选相合闸操作进行控制。应用于实例后发现该断路器有较好的抑制效果。文献[36]将晶闸管技术应用于选相合闸技术,提高了断路器的精度。文献[37]对近年来提出的各种选相合闸方法进行了详细的仿真分析,提出了选相合闸技术中断路器的误差应当不超过 0.5 ms。并提出考虑应用 DSP 技术或者模糊 PID 或者神经元 PID 等算法进行闭环控制,对断路器的误差时间进行进一步控制。文献[38]通过四川某电网空充

主变压器的实例,分析了励磁涌流带来的谐波危害,并提出在空载主变压器合闸前,先利用测磁器对主变压器剩磁进行测量,判断出剩磁最大相的磁性,同时利用选项合闸技术与一次侧串联合闸电阻的方法来抑制励磁涌流。并在最后提出若无法测试剩磁方向,可以考虑先对主变压器进行消磁操作,再应用该综合策略。文献[39]根据剩磁量的不同情况提出了 4 种选相合闸策略,分析了其抑制涌流的效果。文献[40]针对三相中性点不接地的变压器,提出了一种测量其剩磁量的方法并通过测得的剩磁量进行选相合闸操作。文献[41]针对电压降低情况下的变压器,通过磁通量函数求得变压器中的剩磁量,确定选相合闸的最佳时刻。虽然该文指出其方法不能完全抑制励磁涌流,但是此方法是低电压情况下性价比最高的。文献[42]考虑通过控制断路器来对剩磁进行控制,将剩磁从未知量变为已知量,针对已知的剩磁量再调整选相合闸装置的参数,以有效地抑制励磁涌流。

选相合闸技术是目前应用最广泛的抑制励磁涌流的技术之一。较之其他几种抑制技术,它的抑制效果较好且不会对电力系统造成负面影响。但是此方法不可能完全实现三相同相位合闸,所以不能彻底消除励磁涌流,且实现难度较大,需要考虑的因素也较多,其中最关键的影响因素是变压器中的剩磁。如何改善选相合闸技术,使其能更经济地应用于实例成为了今后研究的重点方向。

3.3 削弱变压器剩磁

剩磁是影响励磁涌流的重要因素之一,在选相合闸技术中,能否得知准确的剩磁值是设置合闸时间的关键。如今尚未有一种能够精确测量剩磁值的方法。如果在变压器空载合闸前能够消除或减弱剩磁,即使不测量,也能使得变压器空载合闸时产生励磁涌流的概率大大降低。文献[43]对大容量变压器在直流测试后产生的剩磁进行了消除试验,并提出了直流消磁和交流消磁两种方法。其中直流方法研发更为成熟,并已广泛应用于实际生产中。文献[44]分析了剩磁对于变压器投运的危害,并联系实例分析阐述了上述两种消磁方法的效果。文献[45]从铁心本身的结构性质出发,提出了一种基于剩磁预测的消磁方法。文献[46]等利用低功率超低频电压源、电力电子开关和一个简单的控制器设计了一种减小剩磁的元件,此元件能够产生单相的

矩形电压波形来对剩磁进行削弱。文献[47]提出了一种通过测量变压器空载时某相的电压来估算剩磁的方法,并通过控制变压器的断电时刻使得变压器中的剩磁减小到最低水平。最后结合工程实际,将该方法与变压器绕组接法、断路器的特性及选相合闸技术结合使用来对励磁涌流进行抑制。

消除剩磁可以减小磁通的暂态分量,使铁心不容易达到饱和状态。消除剩磁后,可以配合前面提到的其他几种方法进一步抑制励磁涌流,减小励磁涌流对变压器以及电力系统的危害。

4 结 语

目前励磁涌流的抑制方法已有许多较为成熟的方法,且近年来国内外学者又在已有的抑制方法的基础上进行改进。例如文献[48-49]提出了一种基于控制合闸电压幅值抑制励磁涌流的思想。但是由于影响励磁涌流的因素较多,现有的方法没有一种能够完美地抑制励磁涌流,很多方法也仅仅停留在实验阶段。不能大规模地应用于工程实际。因此针对此问题还需要进一步研究与完善。建议实际生产过程在选择方法时,可以同时采用不同原理的消磁技术,以达到抑制励磁涌流的目的。

参考文献

[1] 贺家李. 电力系统继电保护原理(第四版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010:266-270.
[2] 李晓华,张冬怡,吴立珠,等. 换流变压器励磁涌流的特殊性分析[J]. 电网技术 2017 41(12):3869-3875.
[3] 姚东晓,张凯,贺要峰,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.
[4] 凌光,苏斌. 一种基于差流波形特征的励磁涌流识别方法[J]. 电力系统保护与控制 2015 43(6):19-24.
[5] 葛宝明,王祥珩,苏鹏声,等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化,2003,27(22):1-5.
[6] 张小钊,兰生. 变压器励磁涌流的识别方法综述[J]. 电气开关 2016(3):1-6.
[7] 王景丹,龚晓伟,牛高远,等. 变压器频繁空载投入的励磁涌流抑制技术研究[J]. 自动化技术与应用,2017,36(10):92-95.
[8] 余世峰,聂定珍,项冰. 特高压直流换流变压器励磁

涌流及其抑制[J]. 电力建设 2014 35(10):26-30.
[9] 滕文涛. 大容量交流变压器励磁涌流及其抑制措施研究[D]. 北京:华北电力大学 2017.
[10] 张严. 变压器励磁涌流识别和抑制技术的研究[D]. 长沙:湖南大学 2014.
[11] Cheng C K ,Liang T J ,Chen J F ,et al. Novel Approach to Reducing the Inrush Current of a Power Transformer [J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications , 2004 ,151(3) : 289 - 295.
[12] Saeed J ,Dogan R ,Koban B ,et al. Reduction of Inrush Currents in Toroidal Transformers by Sector Winding Design [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2016 , 31(10) : 6776 - 6780.
[13] Cheng C K ,Liang T J ,Chen J F , et al. Novel Approach to Reducing the Inrush Current of Power Transformer [J]. IEE Proceedings - Electric Power Applications , 2004 , 151(3) : 289 - 295.
[14] 李琥,段乃欣,周海洋,等. 两种削弱励磁涌流的方法[J]. 电力系统保护与控制 2003 31(4):35-37.
[15] 陈丽,姜国涛. 几种变压器励磁涌流抑制方法的性能分析[J]. 变压器,2010,47(6):37-41.
[16] 张荣海. 变压器励磁涌流的识别与抑制技术研究[D]. 重庆:重庆大学 2010.
[17] 邹必昌. 变压器空载投入时励磁涌流抑制新方法研究[J]. 中国农村水利水电 2014(3):113-116.
[18] 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.
[19] Seo HC ,Kim CH ,Rhee SB ,et al. Superconducting Fault Current Limiter Application for Reduction of the Transformer Inrush Current: A Decision Scheme of the Optimal Insertion Resistance [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 2010 ,20(4) :2255 - 226.
[20] 陈瑞. 预充磁在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的作用[J]. 船电技术 2009 29(1):24-26.
[21] 李占元,张伟红,杜秀红. 预充磁绕组在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的应用实例[J]. 变压器,2013,50(3):56-58.
[22] 钱伟康,陈婷婷,王良秀,等. 船用变压器励磁涌流及预充磁技术研究[J]. 船舶工程 2014 36(6):56-59.
[23] 何小庆,刘淑萍,李攀宏,等. 一种消除单相变压器励磁涌流的预充磁策略[J]. 电力系统保护与控制,2014 42(17):120-124.
[24] 张琦兵,郝能灵,王鹏,等. 船舶变压器预充磁分析研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(18):145-

- 149.
- [25] Brunke J H, Fr Hlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part I: Theoretical Considerations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2001 ,16(2) : 276 – 280.
- [26] Brunke J H , Fr Hlich K J. Elimination of Transformer Inrush Currents by Controlled Switching – Part II: Application and performance Considerations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2001 ,16(2) : 281 – 285.
- [27] Abdulsalam S G , XuW. A Sequential Phase Energization Method for Transformer Inrush Current Reduction – transient Performance and Practical Considerations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2007 22(1) : 208 – 216.
- [28] Laszlo P ,Gyorgy B ,Gabor B , et al. Reducing the Magnetizing Inrush Current by Means of Controlled Energization and De – energization of Large Power Transformers [C]. International Conference on Powersystem Transients ,New Orleans 2003.
- [29] 唐博 彭安金 王高丰 等. 采用选相位关合技术消除变压器空载合闸的励磁涌流 [J]. 电器开关 ,2007 (3) : 22 – 25.
- [30] 杨通贇 李晓华 戴扬宇 等. 换流变励磁涌流特性分析及其抑制 [J]. 电网与清洁能源 2017 33(1) : 64 – 70.
- [31] 李伟 黄金 方春恩 等. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究 [J]. 高压电器 2010 46(5) : 9 – 13.
- [32] 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.
- [33] 乌云高娃 刘涤尘 叶念国. 基于变压器励磁涌流成因的涌流抑制策略 [J]. 武汉大学学报(工学版) , 2008 41(6) : 83 – 86.
- [34] 顾春阳 王爱元 李健 等. 一种有效抑制变压器空载合闸励磁涌流的方法 [J]. 变压器 2015 52(11) : 33 – 36.
- [35] 倪海妙. 基于选相控制的空载变压器关合励磁涌流抑制方法的研究 [D]. 南京: 东南大学 2016.
- [36] 张铁军 陈颖 陈刚 等. 基于晶闸管开关的变压器励磁涌流抑制方法 [J]. 电力电子技术 2011 45(4) : 95 – 97.
- [37] 范兴明 葛琳 张鑫 等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析 [J]. 高压电器 2014 50(2) : 54 – 59.
- [38] 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以及抑制措施研究 [J]. 电测与仪表 , 2016 53(24) : 24 – 32.
- [39] Cano – Gonzalez R ,Bachiller – Soler A ,Rosendo – Macias JA , et al. Controlled Switching Strategies for Transformer Inrush Current Reduction: A Comparative Study [J]. Electric Power Systems Research , 2017 ,145(4) : 12 – 18.
- [40] Cano – Gonzalez R ,Bachiller – Soler A ,Rosendo – Macias JA , et al. Inrush Current Mitigation in Three – phase Transformers with Isolated Neutral [J]. Electric Power Systems Research 2015 ,121(4) : 14 – 19.
- [41] Cano – Gonzalez R ,Bachiller – Soler A ,Rosendo – Macias JA , et al. Optimal Gang – operated Switching for Transformer Inrush Current Reduction [J]. Electric Power Systems Research 2016 ,131(2) : 80 – 86.
- [42] Fang SH , Ni HM , Lin HY , et al. A Novel Strategy for Reducing Inrush Current of Three – phase Transformer Considering Residual Flux [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics 2016 63(7) : 4442 – 4451.
- [43] 康真,张梅. 大容量变压器直阻测试产生的剩磁危害及消除 [J]. 宁夏电力 2014(5) : 18 – 22.
- [44] 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.
- [45] Ge W , Wang Y. Calculation and Elimination of the Residual Flux in the Closed Magnetic Core [C]. IEEE International Magnetics Conference (Intermag) ,Beijing , 2015.
- [46] Kovan B ,de Leon F ,Czarkowski D , et al. Mitigation of Inrush Currents in Network Transformers by Reducing the Residual Flux with an Ultra – low – frequency Power Source [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2011 , 26(3) : 1563 – 1570.
- [47] Parikh U ,Bhalja BR. Inrush Current Mitigation in Three – phase Transformers with Isolated Reutral [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems , 2016 ,76(5) : 156 – 164.
- [48] 丛伟 王伟旭 肖静 等. 控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案 [J]. 电力系统自动化 2017 41(8) : 159 – 165.
- [49] 王伟旭. 控制合闸电压幅值的变压器空载合闸励磁涌流抑制方案研究 [D]. 济南: 山东大学 2017.

作者简介:

张文韬(1994) 硕士研究生,研究方向为电力系统稳定与控制;

王渝红(1971) 教授、硕士生导师,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源并网方式等。

(收稿日期:2018 – 05 – 10)