

换流变压器励磁涌流问题分析

刘华臣, 李文帅, 常东旭, 常 振, 刘鹏华

(国网河南省电力公司直流中心, 河南 郑州 450000)

摘要: 换流变压器是换流站的重要组成部分。在换流变压器轻载或者空载合闸时, 换流变压器的一次绕组内产生励磁涌流, 励磁涌流的大小与换流变压器铁心剩磁及合闸角度等因素有关。励磁涌流中含有大量二次谐波分量, 为避免换流变压器比例差动保护误动作, 保护一般具有二次谐波闭锁功能。零序过电流保护为换流变压器后备保护, 一般不设置二次谐波闭锁功能, 在励磁涌流过大时存在换流变压器保护误动作情况。从原理上介绍了励磁涌流产生的根本原因, 分析了影响励磁涌流的主要因素, 并结合实际案例对换流变压器励磁涌流相关的二次保护措施进行分析, 同时还介绍了减小换流变压器励磁涌流的消磁措施。经过分析二次保护措施及其他各种消磁方法的优劣, 在不进行技改的前提下, 提出了升级零序过电流保护策略和新的消磁方法。

关键词: 换流变压器; 励磁涌流; 换流差动保护

Analysis of the converter transformer inrush current problem

LIU Huachen, LI Wenshuai, CHANG Dongxu, CHANG Zhen, LIU Penghua

(State Grid Henan Electric Power Company DC Center, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Converter transformer is an important part of converter station. when the converter transformer closes in the case of no-load, there will be inrush current at the primary winding, the size of the inrush current related to the close angle and the core remanence of the converter transformer. The percent differential protection will block when the second harmonic of the inrush current exceeds the preset value, but the zone sequence overcurrent protection will not block, so the protection of the converter transformer will misoperate when the size of the inrush current is too large. In order to avoid the generation of inrush current, the core of converter transformer before the closing switch without load must be demagnetized. What's more, the zone sequence overcurrent protection should be improved, only in that way can skip the inrush current.

Key words: converter transformer; inrush current; transformer differential protection

0 引言

根据我国东西部能源分布状况和经济发展现状, 我国适合大功率、远距离电力传输, 为此国家电网公司积极建设全国范围内的特高压电网^[1-2]。特高压电网建设的重点是特高压直流工程, 直流输电具备传输功率大、输电线路损耗少和输电走廊占地少等优势, 可提高跨区域电网间

错峰容量、调剂余缺以及互为备用, 并在紧急情况下可提供功率支援^[3]。

特高压直流工程由送端换流站、直流线路和受端换流站组成, 换流变压器是换流站的重要组成部分, 在交直流转换过程中占有很重要的地位。换流变压器在换流站调试、运行方式转换和 OLT 试验等过程中要进行空载充电操作, 能够成

功进行空载充电操作是换流变压器正常工作的一项重要标准。在空载合闸时,要检验换流变压器是否存在短路故障、绝缘配合等问题。与普通交流变压器一样,换流变压器在空载合闸时也会产生励磁涌流。针对励磁涌流问题,换流变压器的稳态比率差动主保护对涌流进行判别,若判定为励磁涌流,会闭锁该保护,起到防止误动作的作用。但是在生产实践中,由于励磁涌流导致的换流变压器保护误动作的状况常有发生。励磁涌流是调度考核换流站工作的重要标准之一,励磁涌流过大会影响换流变压器整体性能,使换流变压器本体发生形变,对临近带电设备产生一定的危害,大量谐波进入电网使电网电压发生振荡。因此,尽可能地避免励磁涌流的产生有着重要的实际意义。

本文从原理上分析了励磁涌流产生的机理,着重分析了影响励磁涌流大小的主要因素,结合换流变压器现有的保护和减少励磁涌流的策略进行分析,最后针对导致误动作的因素提出相应的改进策略。

1 励磁涌流的产生机理及影响因素分析

励磁涌流问题是由于变压器铁心饱和造成的,为了清晰地介绍该问题的产生机理,以单相变压器励磁涌流问题为例^[4]。换流变压器三相是相互独立的,因此以单相变压器为例进行分析有着很重要的实际意义。以变压器额定电压幅值 u 和额定磁通量幅值 Φ 为基准值进行标么值计算,其中变压器的额定磁通量是变压器工作在额定电压时铁心中产生的磁通量,电压 u 和磁通量 Φ 的关系为

$$u = \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

设变压器在 $t=0$ 时进行空载合闸,变压器的额定电压 $u=U_m \sin(\omega t + \alpha)$,代入式(1),求微分方程得

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_{(0)} \quad (2)$$

式中, $-\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态分量; $\Phi_{(0)}$ 为自由分量,如果不考虑变压器自身损耗, $\Phi_{(0)}$ 是一个

常数。

在 $t=0$ 时,变压器铁心的剩磁量为 Φ_r ,其大小和方向与变压器关闭时刻的磁通量有关系,代入式(2)有

$$\Phi_{(0)} = \Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_r \quad (3)$$

变压器的饱和磁通量 Φ_{sat} 一般为额定磁通量 Φ_m 的1.15~1.4倍,用标么值表示 $\Phi_{sat}=1.15 \sim 1.4$,但是变压器的运行电压一般不会超过额定电压的10%,对应状态的磁通量 Φ 不会超过饱和磁通量 Φ_{sat} ,因此在稳态运行时铁心是不饱和的。但是在变压器空载合闸的暂态过程中,由于 $\Phi_{(0)}$ 的存在,会使 $\Phi > \Phi_{sat}$,造成变压器磁通量饱和。

假设变压器铁心剩磁量 Φ_r 和 $\cos(\alpha)$ 为正,在合闸后的半个周期($\omega t = \pi$)时磁通量 Φ 达到最大值,即 $\Phi = 2\Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_r$ 。如果变压器在电压过零点合闸,此时 $\alpha=0$,磁通量 Φ 达到最大值 $2\Phi_m + \Phi_r$,此时 $\Phi \gg \Phi_{sat}$ 变压器的磁通量严重饱和。变压器的暂态磁通量如图1所示。

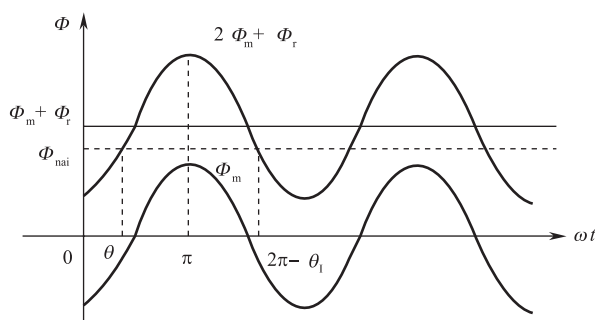


图1 变压器的暂态磁通量

Fig. 1 Transient flux of transformer

为了简化分析过程,常用 $\theta = \omega t + \alpha$ 代替时间变量,这样磁通量 Φ 是以 2π 为周期进行变化的。由图1可知,在第一个周期 $(0, 2\pi)$ 内, Φ 在 $\theta_1 < \theta < 2\pi - \theta_1$ 内达到饱和,且 $\theta = \pi$ 时饱和最为严重。在 $\theta = \theta_1$ 时磁通量 Φ 达到饱和磁通 Φ_{sat} ,代入式(2)可得

$$\theta_1 = \arccos \left[\frac{\Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_r - \Phi_{sat}}{\Phi_m} \right], 0 < \theta_1 < \pi \quad (4)$$

变压器近似磁化曲线如图2所示。

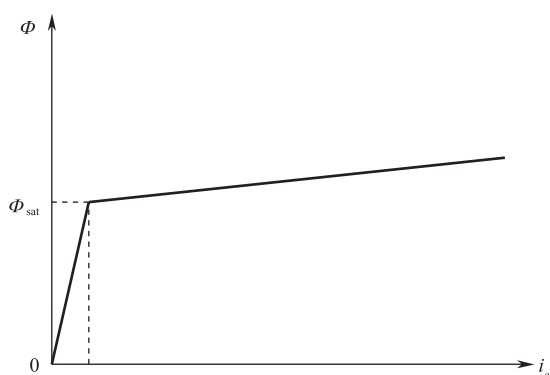


图2 变压器近似磁化曲线

Fig. 2 The approximate magnetization curve of transformer

变压器空载运行时，如果铁心磁通量不饱和，则铁心的磁化曲线斜率很大，励磁电流 i_e 近似为零；如果铁心磁通量饱和，则铁心的磁化曲线斜率很小，导致励磁电流 i_e 大大增加，形成励磁涌流。在理想情况下，在铁心磁通量饱和时磁化曲线近似为直线，其斜率为 L_e ，此时 $\Phi - \Phi_{sat} = L_e L_e$ ，因此在一个周期内 $(0, 2\pi)$ 有

$$i_e = \begin{cases} 0 & 0 \leq \theta \leq \theta_1 \text{ 或 } 2\pi - \theta_1 \leq \theta \leq 2\pi \\ I_m(-\cos \theta + \cos \theta_1) & \theta_1 \leq \theta \leq 2\pi - \theta_1 \end{cases} \quad (5)$$

式中， $L_m = \Phi_m / L_e$ 。

励磁涌流波形如图3所示。

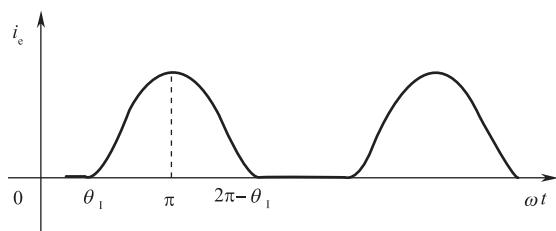


图3 励磁涌流波形

Fig. 3 The inrush current

由图3可知，励磁涌流波形完全偏离时间轴一侧，且波形不连续；如果考虑到换流变压器铁心损耗，波形呈衰减趋势。

两个波形之间的宽度称为间断角 θ_J ，由图3可知， $\theta_J = 2\theta_1$ 。间断角 θ_J 的大小是判断励磁涌流是否存在故障的重要标准，铁心饱和越严重，间断角越小。由式(4)可知，间断角 θ_J 的大小与变压器稳态磁通 Φ_m 、合闸角度 α 、铁心剩磁 Φ_r 和铁心饱和磁通 Φ_{sat} 有关，其中稳态磁通 Φ_m 、铁心

饱和磁通 Φ_{sat} 由变压器本身决定，合闸角 α 以及铁心剩磁 Φ_r 在变压器空载合闸时存在随机性。

以上叙述的是 $\Phi_{(0)} > 0$ 时的情况，此时磁通 $\Phi > 0$ ，称之为正向饱和；根据式(3)可知，合闸角 α 在一定情况下可使 $\Phi_{(0)} < 0$ ，此时磁通 $\Phi < 0$ ，称之为反向饱和。与正向饱和类似，反向饱和在 $\theta = 2\pi$ 时饱和最为严重，励磁涌流达到最大值，在计算 Φ_1 时， Φ_{sat} 和 Φ_r 均取负值，此时 $\pi < \theta_1 < 2\pi$ ，间断角 $\theta_J = 4\pi - 2\theta_1$ 。

由式(5)可知，励磁涌流波形中除了基波分量之外，还有大量的谐波分量和非周期分量。在理想情况下把励磁涌流波形看作周期函数，可根据傅里叶级数展开为

$$i_e = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\theta + b_n \sin n\theta) \quad (6)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_e \cos n\theta d\theta, \quad b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} i_e \sin n\theta d\theta$$

$$(n=1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

将式(5)代入式(7)可以计算出励磁涌流中非周期分量和各次谐波分量的幅值：其中非周期分量 $I_{e0} = a_0/2$ ；基波分量 $I_{e1} = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ ；高次谐波分量 $I_{en} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ ， $n=2, 3, 4, \dots$ 。一般情况下只关心励磁涌流中非周期分量和高次谐波分量的大小，用它们的值与基波分量值的相对大小进行衡量。这种情况下，比值的大小与励磁涌流的幅值无关，只与间断角 θ_J 有关。几种间断角下非周期分量和各谐波分量的相对含量见下表。

表 不同间断角下励磁涌流中各分量的相对含量

Tab. The relative amount of inrush current at different dead angle

间断角 θ_J	I_{e0}/I_{e1}	I_{e2}/I_{e1}	I_{e3}/I_{e1}	I_{e4}/I_{e1}
$\theta_J = 81.9^\circ$	0.837	0.078	0.055	0.032
$\theta_J = 113.4^\circ$	0.767	0.156	0.083	0.022
$\theta_J = 153.8^\circ$	0.576	0.316	0.130	0.021

由上表可知，励磁涌流中含有大量的非周期分量和二次谐波分量，高次谐波分量相对较少。间断角 θ_J 越小，非周期含量的相对含量 I_{e0}/I_{e1} 越大，波形偏移越严重，铁心饱和越严重；间断角

θ_d 越小, 各次谐波分量越小, 各次谐波分量随着谐波次数的增加而变小。

综上所述, 可以得到单相变压器励磁涌流的特点如下^[5-6]。

1) 在变压器铁心饱和磁通幅值、电压额定幅值和铁心剩磁等参数确定前提下, 其空载合闸时是否产生励磁涌流及励磁涌流大小与合闸角 α 有关, 且在合闸角 $\alpha=0$ 和 $\alpha=\pi$ 时励磁涌流最大。

2) 励磁涌流波形周期为 2π , 偏移时间轴一侧且有间断, 励磁涌流越严重, 波形偏移越为严重, 间断角越小。

3) 励磁涌流波形中含有大量非周期分量, 励磁涌流越严重, 非周期分量越大。

4) 励磁涌流波形中含有大量的高次谐波分量, 其中二次谐波分量最多, 励磁涌流越严重, 各次谐波分量越少。

2 某换流站换流变保护原理

某换流站换流变压器保护为南瑞继保PCS-977D换流变压器成套保护装置, 该装置适用于200 kV及以上电压等级, 需提供双套主保护、双套后备保护的各种接线方式的换流变压器, 同时支持电子式互感器和常规互感器。装置中提供一台换流变压器所需的全部电量保护、主保护和后备保护可用同一电流互感器。由于换流变压器的两侧电压比和接线方式的不同, 在换流变压器运行时, 各侧电流的相位及大小也不同。在采样送入继电器前要消除这些影响, 现在的数字式变压器保护装置都利用数字方法对电压比和相位进行补偿, 在计算整定过程中所采集的量均为整定后的。

2.1 换流变压器主保护

换流变压器保护包括稳态比率差动保护、纵差差动速断保护和纵差工频变化量比率差动保护等^[7], 其中稳态比率差动为励磁涌流的主要保护。稳态比率差动保护包括低值比率差动保护和高值比率差动保护, 图4为稳态比率差动保护的动态特性图。

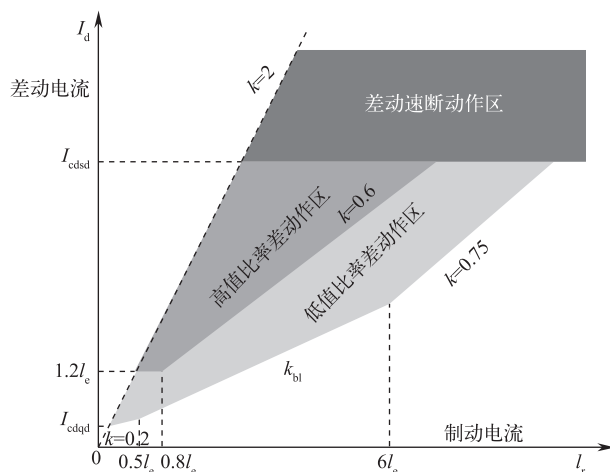


图4 稳态比率差动保护的动态特性

Fig. 4 The dynamic characteristics of the steady rate differential protection

稳态比率差动的动作逻辑如图5所示。涌流判别元件开放后稳态比率差动保护才能正确动作, 因此三相中某一相出现励磁涌流时可以闭锁该相稳态比率差动保护, 跳过励磁涌流。

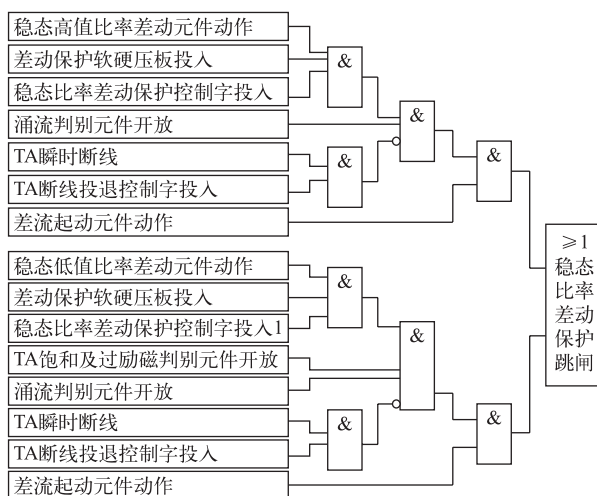


图5 稳态比率差动保护的逻辑框图

Fig. 5 The logic diagram of the steady rate differential protection

2.2 换流变压器零序过电流保护

零序过电流保护, 主要作为变压器中性点接地运行时接地故障后备保护。某换流站零序过电流各段保护均投入, 且“零流 $\times$ 段电流选择”控制字为“1”, 本段零序过电流所采用的零序电流为自产零序电流, 零序电流报警电流定值为0.16 A, 零序电流报警动作延时6 s, 其逻辑框图

如图6所示。由图6可知,该装置不具备励磁涌流闭锁零序过流保护的能力。在发生励磁涌流时,零序电流会发生畸变,如果延时6 s故障电流仍然大于元件动作值0.16 A,零序过电流保护动作导致合闸失败。

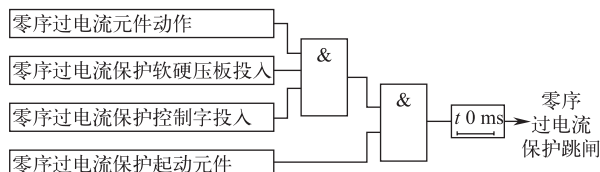


图6 零序过流保护的逻辑框图

Fig. 6 The logic diagram of the zone sequence overcurrent relay protection

2.3 励磁涌流判别原理

PCS-977D系列变压器成套保护装置设有“纵差涌流闭锁原理”。当“纵差涌流闭锁原理”为1时,装置利用谐波原理识别励磁涌流;当“纵差涌流闭锁原理”为0时,装置利用波形畸变识别励磁涌流。

2.3.1 利用谐波识别励磁涌流

装置采用三相差动电流中的二次谐波含量来识别励磁涌流,判别方程为

$$I_{2nd} > K_{2xd} I_{1st} \quad (8)$$

式中, I_{2nd} 为每相差动电流中的二次谐波分量; I_{1st} 为对应相的差流基波分量; K_{2xd} 为二次谐波制动系数整定值。

当三相中某一相被判别为励磁涌流时,只闭锁该相比率差动元件。

2.3.2 利用波形畸变识别励磁涌流

故障时差流基本上是工频正弦波,而励磁涌流时有大量的谐波分量存在,波形发生偏移畸变,偏向时间轴一侧,间断且不对称。可以根据波形情况结合算法识别这种畸变,即可识别出励磁涌流。

故障时,有

$$\begin{cases} S > k_b S_+ \\ S > S_t \end{cases} \quad (9)$$

式中, S 为差动电流的全周积分值; S_+ 为“差动电流的瞬时值+差动电流半周前的瞬时值”的全

周积分值; k_b 为某一固定常数; S_t 为门槛定值。

S_t 表达式为

$$S_t = \alpha I_d + 0.1 I_e \quad (10)$$

式中, I_d 为差动电流的全周积分值; α 为比例常数。

当三相中某一相不满足式(9)时,被判别为励磁涌流,只闭锁该相比率差动元件。

2.4 某特高压换流站励磁涌流故障实例

某特高压换流站在年度检修结束后进行OLT试验,2022年3月18日14时04分27秒合上5143开关进行极I高端换流变压器充电时,三套换流变压器保护角接零序过电流保护同时动作,导致5143开关跳闸。对换流变压器本体保护及外观检查没有发现异常,对保护装置定值及二次回路检查无异常,油化试验结果无异常,分接开关档位无异常。故障录波如图7所示。星接换流变压器网侧首端和尾端套管电流幅值较大,且偏向时间轴一侧,其余两相故障不明显,因此造成零序电流幅值较大,是典型的励磁涌流波形。经过延时6 s后幅值仍然较大,超过零序过电流保护0.15 A延时6 s,三套保护动作并经三取二逻辑出口。经过再次充电,极I高端换流变压器充电成功。

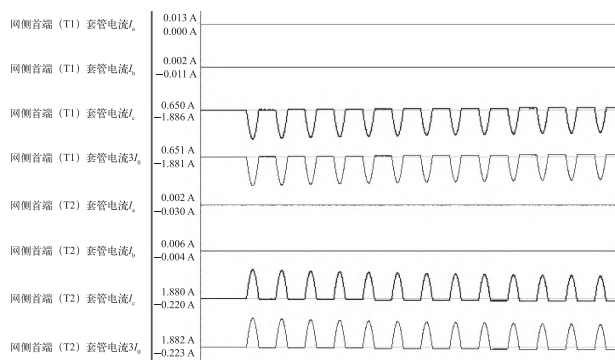


图7 换流变励磁涌流波形

Fig. 7 The inrush current waveform of the converter transformer

2.4.1 保护未能躲过励磁涌流的原因

由于自身特点,换流变压器在充电时存在着较大的励磁涌流,且持续时间较长,经常有因励磁涌流导致换流变压器充电失败的案例。该换流变压器的保护装置型号为许继SBH-101A,该

保护装置带有二次谐波闭锁比率差动保护功能，也具备二次谐波闭锁零序过电流保护功能，但根据《国家电力调度控制中心继电保护定制单》要求，角变零序谐波控制和星变零序谐波控制定值均为零，二次谐波闭锁零序过电流保护没有投入使用，因此没有躲过励磁涌流。

2.4.2 整改措施

硬件方面，在换流变压器合闸前，特别是对换流变压器做绕组直流测试后合闸前，要对换流变压器铁心进行多次消磁；软件方面，升级SBH-101A保护装置零序过电流保护动作策略，对故障类型进行等级划分。当识别到明显的励磁涌流并超过相应等级时要及时闭锁该保护，当识别到其他故障时要及时对零序过电流保护进行解锁。

2.5 某换流站换流变压器保护对比分析

南瑞继保PCS-977D换流变压器保护装置带

有二次谐波闭锁比率差动保护功能，但不具备二次谐波闭锁零序过电流保护功能，如果空载合闸过程中零序电流中励磁涌流超出整定值，则不能有效闭锁零序过电流保护，也不能躲过励磁涌流。

自投运至今，站内换流变压器没有因为励磁涌流导致合闸不成功的情况，以最近检修后换流变压器空载合闸为例，合闸后极Ⅱ高端星接换流变压器一次侧套管首端和尾端电流如图8所示。由图8可知，设合闸时间为 $t=0$ ，换流变压器二次电压由零开始升压，此时星接换流变压器一次侧套管电流开始周期性变化，由于励磁电流非常小，没有很直观的波形显示。从空载合闸开始后，可以很明显地观察到零序电流周期性变化，但是电流值远没有达到零序过电流保护整定值，换流变压器能够正常充电。

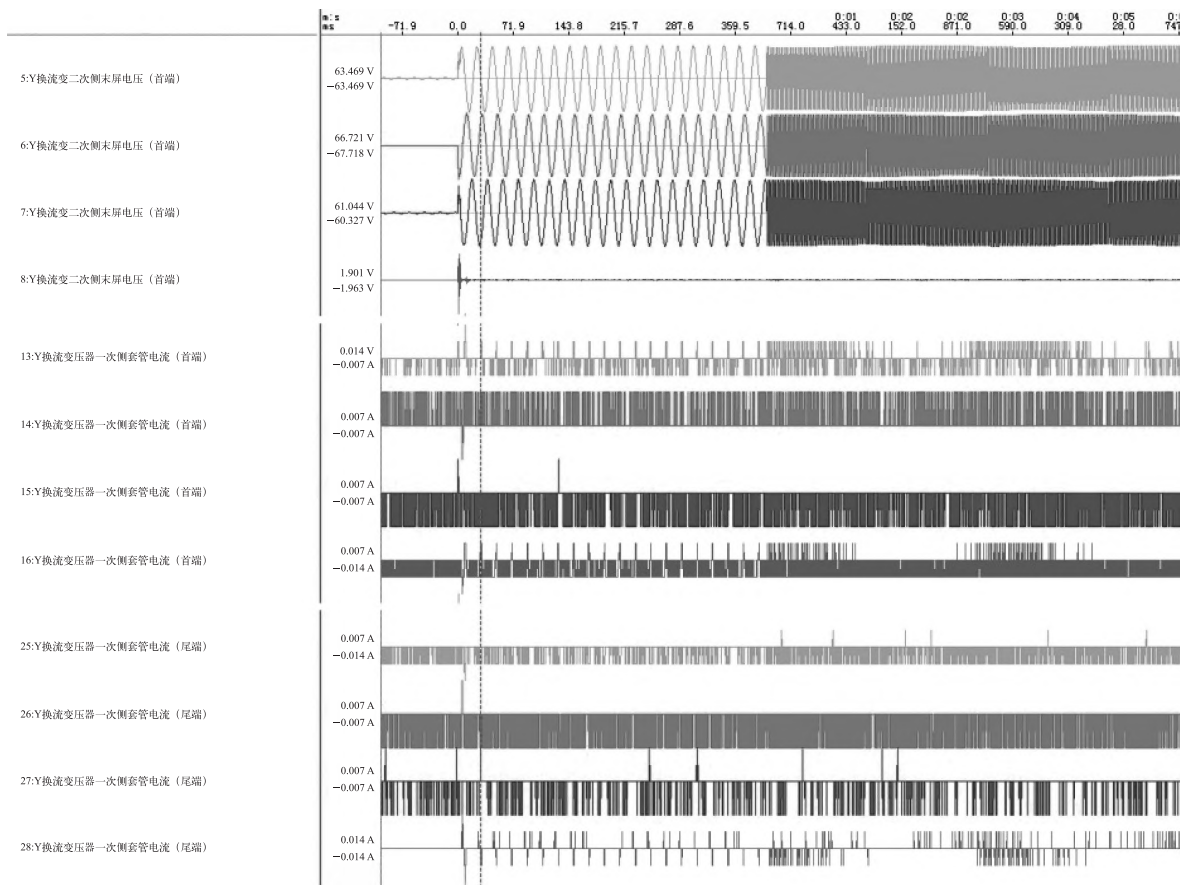


图8 某换流站换流变空载合闸电流波形

Fig. 8 The no-load switching current waveform of the converter transformer

对于南瑞继保PCS-977D换流变压器保护装置,不具备二次谐波闭锁零序过电流保护功能,也没有发生因为励磁涌流导致合闸不成功的案例,但要防微杜渐,建议升级零序过电流保护程序并增加谐波闭锁功能。零序过电流保护延时为6 s,如果增加了二次谐波闭锁零序过电流保护功能,则在励磁涌流较大情况下零序电流过大会引起整个换流站地电位升高,严重干扰其他保护的正常动作。因此要提高零序过电流保护的正确性,一方面要缩短零序过电流保护的延时,避免因注入地电流过大导致地电位升高影响其他保护动作;另一方面要针对谐波闭锁过电流保护功能进行优化,在零序电流大于一定值时解除由于励磁涌流引起的保护闭锁,在保证站内其他设备正常运行的情况下真正躲过励磁涌流。

3 换流变压器励磁涌流解决方法

要避免换流变压器因励磁涌流导致换流变压器空载合闸不成功,一方面要从励磁涌流对换流变压器保护影响出发,改进优化换流变零序过电流保护策略,增加谐波闭锁零序过电流保护功能,不能在识别到励磁涌流问题后仅仅闭锁该保护,还要防止地电位对换流站内其他设备保护的影响;另一方面要从一次设备出发,最大程度上减小铁心剩磁及控制换流变压器合闸角度,从根本上防止励磁涌流的产生。常用的消磁方法及控制合闸角度的方法如下。

3.1 换流变压器铁心消磁

换流变压器剩磁一旦产生不会自动消失,并长期存在,因此在换流变压器空载合闸前,采取消除或者减少铁心剩磁的措施是很有必要的。根据铁心剩磁产生的原因,要消除铁心剩磁,就要用外力使铁心中有序排列的小磁极恢复到杂乱的自状态,目前比较成熟的方法有以下几种。

3.1.1 直流消磁法

在变压器一侧绕组两端正向、反向分别通入一个固定大小的直流电流^[8],正向和反向电流保持时间相同,从大电流开始,之后减小电流并重复以上过程,如图9所示。这种方法可以缩小铁

心的环形磁滞曲线,从而达到减小剩磁的目的。但实现该类型电流,消磁仪需要整流和调压,且消磁耗时较长,现场选用较少。

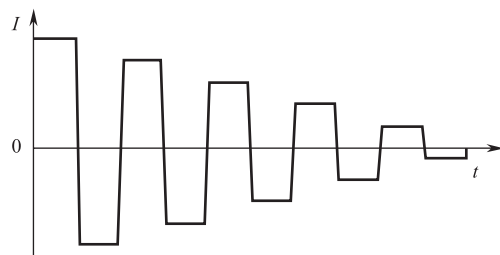


图9 直流消磁法电流示意图

Fig. 9 The diagram of the direct current demagnetization method

3.1.2 交流消磁法

在变压器一侧加注50 Hz交流电流,另一侧短接接地,从零电压开始缓慢升高,再缓慢降低到零电压,如图10所示。在电流波动下降过程中,铁心磁滞回线向原点靠拢,铁心剩磁减少并逐渐消失。这种办法在实质上和直流消磁法一样,都是反复转换电流方向并缓慢减小电流值,避免铁心内电流在一个较大电流值时中断。由于工频衰减电流容易实现,换流变压器检修后使用消磁仪一般采用此交流消磁原理,单次消磁时间约5 min。

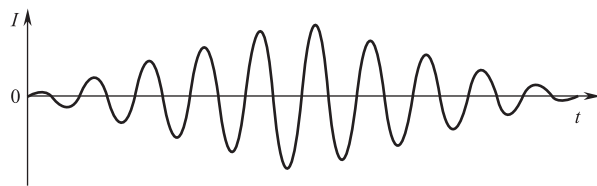


图10 交流消磁法电流示意图

Fig. 10 The diagram of the AC current demagnetization method

3.2 选相分合闸技术

选相分合闸技术又称为相位控制技术,其实质就是通过分相控制断路器的分合闸时间,即合闸时控制系统电压或电流的初相角,减少开关合闸操作时的过电流,消除分闸重燃过电压,提高断路器的开断能力和系统的可靠性、经济性,随着电器制造水平和微电子的自动控制技术的进步,该技术已经在电力系统各方面得到广泛应用。

通过控制合闸相位角度减小励磁涌流大小，其中快速合闸策略、延迟合闸策略、同步合闸策略和相控投切策略都可以有效地抑制涌流的产生^[9]。运用选相分合闸技术，通过控制断路器合闸时电压的初相角，在铁心中的预感应磁通与剩磁相等时合闸，可以避免铁心饱和，从而有效地减小励磁涌流，简化保护装置并减小对电力系统的暂态冲击；通过选相分合闸，可以控制变压器的剩磁大小，为选相分合闸提供基础参数。

国内的直流工程中，换流变压器网侧接线为3/2接线方式，绝大部分与换流变压器直接相连的断路器没有选相分合闸功能，选相分合闸装置主要用在小组交流滤波器相关的断路器^[10-11]。南方电网的云广直流安装有选相分合闸功能，通过选相分合闸，该站没有出现过励磁涌流导致合闸不成功的情况，因此可以通过增设选相分合闸功能降低励磁涌流。

3.3 断路器合闸电阻

换流变压器网侧进线断路器串联有合闸电阻，可作为一种限制换流变压器空载合闸过程中过电压及励磁涌流的措施，其原理是在断路器合闸瞬间，在主触头闭合前先在负荷回路中短时串入一个合闸电阻，从而利用阻尼作用迫使励磁涌流快速衰减，达到抑制励磁涌流的作用^[12-13]。

某换流站换流变压器网侧采用3/2接线方式的气体绝缘封闭式组合电器设备（GIS），换流变压器进线两侧的断路器带有合闸电阻，电阻大小为1 500 Ω 。

4 结束语

励磁涌流是换流变压器空载合闸过程中的常见问题，当励磁涌流大小在限定范围内时，对换流变压器本身并没有很大影响；但是当一组换流变压器进行空载合闸时，如果有一相换流变压器存在励磁涌流会引起零序过电流保护动作，导致整组6台换流变压器合闸不成功。一般情况下，经过2~3次合闸，换流变压器都能够合闸成功，但在一定程度上影响到换流变压器调试工作的进度，冲击电流使换流变压器线圈发生形变，影响

换流变压器性能，因此尽可能地避免励磁涌流存在必要性。

对于一定电压等级和容量的换流变压器，影响其励磁涌流大小的主要因素是换流变压器铁心剩磁量和合闸相位角度，单独消磁或单独控制合闸角度并不能明显地消除励磁涌流。铁心剩磁和合闸相位角度相互影响，在一定情况下两个因素同时存在产生抵消，减小励磁涌流的产生，因此要综合考虑两个因素的影响。对于换流变压器的常规停送电，由于换流变压器关闭时刻产生的铁心剩磁引起换流变压器励磁涌流的概率不是很大，但是在年度检修时，需要对换流变压器铁心进行一系列测试，比如直阻测试。这在换流变压器铁心中产生大量剩磁，如果空载合闸时不采取消磁措施，会增大合闸不成功的概率。为了尽量减小换流变直流测试过程中铁心剩磁的产生，在测试过程中，对于换流变压器不同档位的测量要依次转换电流方向，不同档位的不同方向的测试电流产生的剩磁相互抵消，因此整个测试过程产生的剩磁相对减小，经过消磁措施，换流变压器铁心剩磁对励磁涌流的产生相应减小。

现有的抑制换流变励磁涌流方法中，通过换流变压器铁心直流消磁方法能够在一定程度上减小涌流的大小，但是还存在可能导致合闸不成功的概率，因此要从根本上解决励磁涌流导致换流变压器保护误动作的问题。一方面可以通过优化换流变压器零序过电流保护策略，当系统识别到励磁涌流之后，可以在限定时间内闭锁零序过电流保护，在闭锁保护之后，要对峰值电流衰减速度、持续时间进行综合评定，如果影响到地电位的变化，则要解锁零序过电流保护；另一方面可以在换流变压器网侧断路器增加选相重合闸功能，再结合消磁技术才能真正地跳过励磁涌流。

参考文献

- [1] 周宁. 和应涌流对变压器差动保护影响分析[J]. 电气应用, 2021, 40(3): 73-78.
- [2] 梁旭明, 张平, 常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 1-9.

- [3] 王顺, 徐超, 张健, 等. 变压器励磁涌流原理及实际案例分析[J]. 电气应用, 2022, 41(5): 86-91.
- [4] 张建松. 变压器励磁涌流形成机理以及电流互感器仿真模型研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
- [5] 刘炼, 陈雨强, 李旭阳, 等. 海上油田孤岛电网变压器励磁涌流抑制技术的研究及应用[J]. 电气应用, 2019, 38(6): 95-99.
- [6] 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, 4(2): 81-84.
- [7] 杨垒, 张鹏. 励磁涌流抑制器在220 kV变压器投运中的应用[J]. 电气应用, 2016, 35(14): 78-81.
- [8] 张召峰, 孙庆森, 王华兴, 等. 变压器励磁涌流的识别与抑制[J]. 电气应用, 2016, 35(4): 20-22.
- [9] 林明星, 廖敏夫. 选相分合闸削弱变压器励磁涌流的应用研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(8): 5-9.
- [10] 贺勋, 束洪春, 李立新. 变压器和应涌流现象分析及应对措施[J]. 电气应用, 2006, 25(4): 43-46.
- [11] 陈向宜, 甄威, 刘明忠. 特高压直流换流站选相合闸控制装置现场调试技术[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 17-22.
- [12] 李琥, 周海洋, 施围. 断路器合闸电阻对变压器励磁涌流的影响[J]. 高压电器, 2003, 39(1): 16-18.
- [13] 黄浩军. 适用于三相联动操动机构断路器的变压器涌流抑制技术[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 87-96.

作者简介

刘华臣（1988—），男，硕士，高级工程师，主要从事特高压换流站一次设备运维工作。

（收稿日期：2022-04-04）