

# 计及变压器负载的和应涌流产生机理与仿真分析

胡文旺<sup>1</sup>, 邓超平<sup>1</sup>, 江伟<sup>1</sup>, 郭健生<sup>1</sup>, 齐琛<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007;

2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

## Principle and Simulation Analysis of the Transformer Sympathetic Inrush Considering Transformer Load

HU Wenwang<sup>1</sup>, DENG Chaoping<sup>1</sup>, JIANG Wei<sup>1</sup>, GUO Jiansheng<sup>1</sup>, QI Chen<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, Fujian, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** In response to the issue that sympathetic inrush may occur in adjacent operating transformers during the no-load closing of a transformer, an analytical method for the generation mechanism of sympathetic inrush considering the load of the transformer and countermeasures to prevent maloperation of the protection are put forward. First of all, based on the flux variation model, the expressions for the flux variation of the transformer under load operation at each stage are derived, the principle and characteristics of the sympathetic inrush are systematically expounded, and the factors affecting the sympathetic inrush are extracted. Second, a real-time digital simulation system is used to model the primary system of a substation, successfully reproducing the sympathetic inrush phenomenon. Simulation analysis examines the effects of switching angle, system connection resistance and load on sympathetic inrush, the yielding results are consistent with theoretical analysis. It is proposed that the effect of the sympathetic inrush can be effectively suppressed by closing the breaker at the peak voltage time, strengthening the connection with the system and increasing the load of connected transformers. Finally, corresponding anti-maloperation countermeasures are proposed to address the impact of sympathetic inrush on protection.

**KEY WORDS:** transformer; sympathetic inrush; magnetizing inrush; flux; simulation; protection

**摘要:** 针对变压器空载合闸时相邻在运变压器会产生和应涌流的问题, 提出计及变压器负载的和应涌流产生机理分析方法及保护防误动对策。首先, 基于磁链变化模型, 推导出带

载运行变压器各阶段的磁链变化量表达式, 系统阐述了和应涌流的产生机理及变化特点, 提炼出了影响和应涌流的因素。然后, 利用实时数字仿真系统对变电站一次系统进行建模, 复现了和应涌流现象, 仿真分析了合闸角、系统联系电阻、负载对和应涌流的影响, 得出了与理论分析一致的结论, 并提出了在电压峰值时刻合闸、加强与系统间联系、增加运行变负载可有效抑制和应涌流的影响。最后, 针对和应涌流对保护的影响提出了相应防误动对策。

**关键词:** 变压器; 和应涌流; 励磁涌流; 磁链; 仿真; 保护

目前, 变压器和应涌流引起保护误动事件<sup>[1-6]</sup>仍频繁出现, 对电网的安全稳定运行构成严重危害, 对新型电力系统下大规模分布式新能源并网安全稳定运行提出了新的挑战。

长期以来, 和应涌流是继电保护领域的研究热点<sup>[7-13]</sup>, 大批学者开展了大量的研究工作, 多角度分析了和应涌流产生机理及基本特性<sup>[14-17]</sup>。文献[14]利用 Laplace 变换求解出机车变压器磁链的解析解, 分析了磁链变化过程以及多种条件下和应涌流的变化规律, 得出了运行电力机车和应涌流的产生机理。文献[15]分析得出在运变压器所接母线电压发生变化会引起变压器磁通饱和变化进而产生和应涌流。文献[16]基于和应涌流出现时间及幅值变化的特点, 提出了可利用时差法对和应涌流进行在线识别的方法。文献[17]指出合闸变压器产生的励磁涌流会引起系统电阻压降发生较大变化, 造成变压器工作母线电压发生变化, 引起在运变压器铁心发

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB2402800)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB2402800).

生饱和,进而产生和应涌流。文献[18]利用电磁暂态仿真软件 PSCAD 对变压器和应涌流进行仿真分析,得出和应涌流中二次谐波电流以负序为主,会对直流频率保护产生影响。文献[19]基于动模仿真试验得出断开空投变压器中性点接地刀闸可消除和应涌流的产生,但此法与实际系统运行方式不符。文献[20]利用 Matlab 进行和应涌流的仿真,对比研究了串联与并联和应涌流的产生和衰减特点,并分析了 2 种和应涌流对变压器差动保护的影响。文献[21-23]深入研究了互感器对和应涌流传变特性的影响,提出了相关保护防误动措施。然而现有文献理论分析多是基于运行变空载情况进行的,忽略了负载对和应涌流的影响。此外,理论分析得出的系统联系电阻对和应涌流的影响结论均是基于励磁涌流不变的情况下得出的,忽略了系统联系电阻对励磁涌流的影响。在仿真分析上,所用仿真工具的变压器模型建模精细化程度不够,无法精确模拟变压器饱和特性,仿真的波形与现场实际波形存在较大差异,导致研究结果存在较大误差。因此,有必要对带载运行方式下和应涌流的产生机理、特点及影响因素作进一步的研究探讨和仿真分析。

本文针对运行变压器带载模型解析,分析得出和应涌流发展过程中各阶段的磁链变化量表达式;分析得出合闸角、系统联系电阻、负载对和应涌流的影响;基于实时数字仿真系统(real time digital simulator, RTDS)建立了仿真模型,复现了实际案例波形,验证了理论分析结论,并在此基础上提出保护防误动措施。

## 1 和应涌流产生机理及特性分析

以 2 台变压器并联运行方式为例,分析和应涌流产生机理。

2 台变压器连接电路图如图 1 所示。图中,T1 为在运变压器、T2 为合闸变压器; $u_s$ 、 $R_s$ 、 $L_s$  分别为系统电压、电阻、电感; $R_{11}$ 、 $L_{11}$ 、 $R_{12}$ 、 $L_{12}$ 、 $R_{1m}$ 、 $L_{1m}$  分别为 T1 一次绕组、二次绕组、励磁支路的电阻和电感; $R_{21}$ 、 $L_{21}$ 、 $R_{22}$ 、 $L_{22}$ 、 $R_{2m}$ 、 $L_{2m}$  分别为 T2 一次绕组、二次绕组、励磁支路的电阻和电感; $R_l$ 、 $L_l$  为 T1 负载电阻、电感; $i_s$ 、 $i_1$ 、 $i_2$  分别为系统、变压器 T1、变压器 T2 电流。

变压器 T2 空载合闸前,T1 带载稳态运行,假设 T1 磁通为  $\phi_1 = \phi_{m1} \sin \omega t$  ( $\omega$  为角频率, $t$  为时间),则

电动势  $E_{T1}$  与主磁通  $\phi_1$  具有如下关系:

$$E_{T1} = 4.44fN_1\phi_{m1} \quad (1)$$

式中: $f$  为频率; $N_1$  为线圈匝数; $\phi_{m1}$  为变压器 T1 磁通幅值。

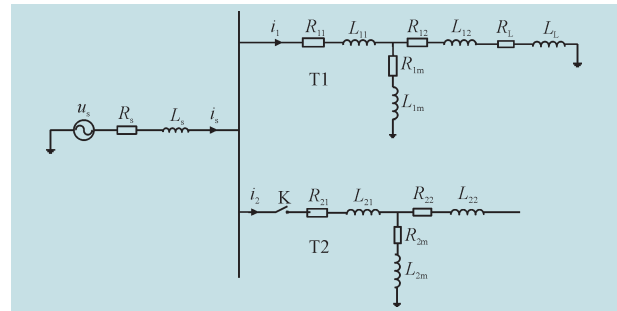


图1 并联变压器等效电路图

Fig.1 Equivalent circuit diagram of parallel transformers

假设负荷电流为  $I_l$ ,在  $R_s$ 、 $R_{11}$  及  $L_s$ 、 $L_{11}$  的压降为  $U_R$ 、 $U_X$ ,根据基尔霍夫电压定律,变压器电动势表达式为

$$\dot{E}_{T1} = \dot{U}_s - (\dot{U}_R + j\dot{U}_X) = \dot{U}_s - \dot{U}_Z \quad (2)$$

可以得出相同功率因数,不同负荷电流  $I_{l1}$ 、 $I_{l2}$  下变压器电动势相量图,如图 2 所示。

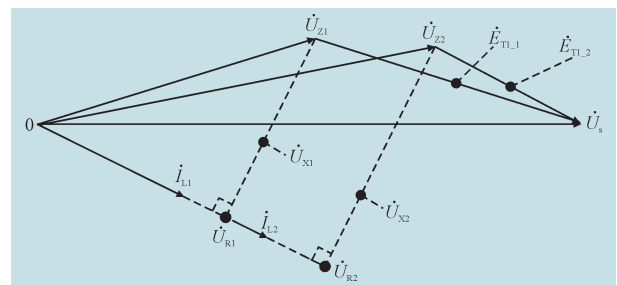


图2 变压器电动势相量图

Fig.2 Electromotive force phasor diagram of the transformer

从图 2 可以看出,负荷电流越大,则变压器电动势越小,根据式(1)可知对应的主磁通  $\phi_1$  将越小。

根据文献[24]可知,断路器 K 合闸后变压器 T2 铁心磁通  $\phi_2$  为

$$\begin{cases} \phi_2 = -\phi_{m2} \cos(\omega t + \alpha) + \phi_{m2} \cos \alpha e^{-\frac{t}{\tau}} + \phi_r \\ \phi_{m2} = U_s / (N_2 \omega) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\phi_{m2}$  为稳态磁通幅值; $U_s$  为电源电压幅值; $\alpha$  为合闸角; $\tau$  为衰减时间常数; $\phi_r$  为合闸前剩磁。

由式(3)可知,空投变压器的铁心磁通与合闸电压幅值、合闸角及剩磁有关。当磁通越大时,铁心越饱和、励磁涌流就越大。

图 1 等效电路中,断路器 K 合闸后,T1 的磁链

$\psi_1$  满足如下方程:

$$\frac{d\psi_1}{dt} = u_s - R_s(i_1 + i_2) - L_s \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} - R_{11}i_1 - L_{11} \frac{di_1}{dt} \quad (4)$$

在一个周期  $T$  内对式(4)等号两边进行积分, 由于  $u_s$ 、 $i_1$ 、 $i_2$  的周期分量在一个周期内积分为 0, 根据牛顿-莱布尼兹定理可得

$$\psi_1(t+T) - \psi_1(t) = -R_s \int_t^{t+T} (i_{1f} + i_{2f}) - L_s [i_1 + i_2]_t^{t+T} - R_{11} \int_t^{t+T} i_{1f} - L_{11} [i_1]_t^{t+T} \quad (5)$$

式中:  $i_{1f}$ 、 $i_{2f}$  分别为  $i_1$ 、 $i_2$  的非周期分量。

根据积分中值定理可得

$$\Delta\psi_1 = -R_s(i_{1fg} + i_{2fg})T - L_s [i_1 + i_2]_t^{t+T} - R_{11}i_{1fg}T - L_{11} [i_1]_t^{t+T} \quad (6)$$

式中:  $i_{1fg}$ 、 $i_{2fg}$  分别为  $i_{1f}$ 、 $i_{2f}$  在一个时间周期内满足中值定理的一个电流值。

同理可得 T2 变压器磁链变化为

$$\Delta\psi_2 = -R_s(i_{1fg} + i_{2fg})T - L_s [i_1 + i_2]_t^{t+T} - R_{21}i_{2fg}T - L_{21} [i_2]_t^{t+T} \quad (7)$$

在 T2 变压器空载合闸时, 产生励磁涌流, 偏向时间轴一侧, 出现间断角, 含有很大非周期分量。一个波形周期的首尾端均为间断角, 对应电流值为 0, 首尾端电流差为 0。而在和应涌流产生的初始阶段, 变压器 T1 中  $i_1$  非周期分量很小, 约等于 0, 在一个周期的积分值约为 0。此外, 稳态正弦负荷波形在一个周期内的首尾端电流之差为 0。基于以上分析, 化简式(6)可得

$$\Delta\psi_1 = -TR_s i_{2fg} \quad (8)$$

从式(8)可以看出, 合闸变 T2 电流  $i_2$  的非周期分量和系统电阻  $R_s$  决定了初始阶段运行变 T1 磁链的变化。

假设  $i_2$  中非周期分量数值为负, 则  $\Delta\psi_1$  数值为正, 磁链正向偏移, 磁链正方向增加, 并逐渐达到饱和点。在未达到饱和点前,  $i_1$  可认为还是负荷电流。当磁链  $\psi_1$  的交流分量在非周期分量的作用下, 每个周期中出现部分瞬时磁链超过正饱和点时, 产生与励磁涌流反向的涌流, 即和应涌流, 在非饱和磁通位置, 呈现为负荷电流特征。随着 T1 磁链的持续正方向增大, 和应涌流  $i_1$  也越来越大, 负荷电流间隔将减小。因此, 和应涌流是在励磁涌流持续一段时间以后才产生。由于在一个周期  $T$  内, T2 和 T1

磁链饱和是交错出现的, 即 T2 饱和时, T1 不饱和, T2 不饱和时, T1 饱和, 且饱和方向相反, 因此, T2 的励磁涌流和 T1 的和应涌流方向相反并在时间上交错。

当 T1 中出现和应涌流之后,  $i_1$  非周期分量的影响将不能被忽略, 在和应涌流的发展阶段, 磁链  $\psi_1$  的变化量将由  $i_1$  和  $i_2$  共同决定, 此时:

$$\Delta\psi_1 = -T(R_s + R_{11})i_{1fg} - TR_s i_{2fg} \quad (9)$$

$i_1$  非周期分量的出现使得 T1 磁链正向增加的速度减小, 但 T1 磁链仍在正向积累, 和应涌流  $i_1$  快速增大。由于  $i_{1fg}$ 、 $i_{2fg}$  方向相反且励磁涌流在衰减, 最终在一个周期中将出现  $\Delta\psi_1$  为 0, 此时和应涌流  $i_1$  达到最大, 之后  $\Delta\psi_1$  变号, 磁链开始衰减。变压器并联运行时电流非周期分量如图 3 所示。系统电流  $i_s$  的非周期分量随着  $i_1$  幅值增大,  $i_2$  幅值减小, 而迅速减小到 0 附近。根据式(6)和式(7)可知, 电阻  $R_s$  所起的衰减作用消失, 两台变压器涌流衰减速度减慢, 即

$$\begin{cases} \Delta\psi_1 = -R_{11}i_{1fg}T \\ \Delta\psi_2 = -R_{21}i_{2fg}T \end{cases} \quad (10)$$

以上从磁链变化的角度分析了带载变压器和应涌流产生的基本原理。在合闸变压器励磁涌流的驱使作用下两台变压器通过系统联系电阻发生了磁链交互, 从而使运行变压器产生和应涌流。

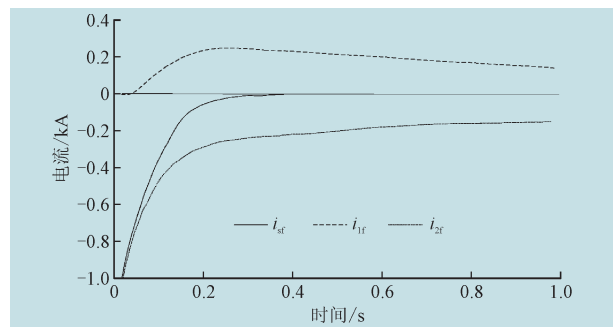


图3 变压器并联运行时电流非周期分量

Fig.3 Aperiodic component of current in parallel operation of transformers

## 2 和应涌流的影响因素

### 2.1 电源电压、合闸角、剩磁的影响

合闸变压器励磁涌流越大, 运行变和应涌流也越大。根据式(3), 合闸变压器的铁心磁通大小与电源电压幅值、合闸角及剩磁相关, 磁通越大, 铁心

越饱和,励磁涌流就越大。

电源电压  $U_s$  越高,  $\phi_{m2}$  磁通越大,励磁涌流就越大。式(3)第2项表明,当合闸角  $\alpha$  为  $0^\circ$  时,即电源电压瞬时值过零时空投变压器将出现最大磁通,铁心深度饱和,此时变压器励磁涌流数值最大。此外,合闸前若变压器铁心中的剩磁越大且与自由分量磁通同向时,励磁涌流将越大。因此,电源电压幅值、合闸角、剩磁均是影响和应涌流大小的因素。

## 2.2 系统联系电阻 $R_s$ 对和应涌流的影响

由式(8)可知,运行变压器磁链的变化值与系统联系电阻和励磁涌流成正相关,但系统联系电阻又影响励磁涌流的大小。当系统电阻越大,空投变压器时,励磁涌流就越小,两者存在非线性负相关。磁链的变化情况与电阻的变化存在不确定性,无法用定量公式表达。但大量的仿真测试表明,系统联系电阻主导和应涌流的产生和衰减。电阻越大,和应涌流越容易产生,且衰减速度减慢,易造成保护误动。

## 2.3 运行变压器负载对和应涌流的影响

根据式(1)的分析,负荷越大,变压器励磁支路的电动势越小,对应的主磁通越小,离饱和点就越远。另一方面,从戴维南等效电路的角度分析,假设运行变压器励磁阻抗无穷大,将合闸变压器当做外接电路时,从外电路端口看进去的系统联系阻抗与运行变一二次绕组及负载阻抗呈并联接线方式。当负荷越大时,对应的负载阻抗越小,并联等效阻抗越小。根据式(8)可知,磁链变化量将减小,磁链增幅变小,铁心进入饱和区时间延迟,对应和应涌流出现时间也延迟。当负载足够大时,和应涌流甚至不会产生。

## 2.4 新能源接入对和应涌流的影响

有新能源接入的系统中,主变压器的和应涌流产生机理与前文相同,但新能源间断性、波动性、电力电子化的特性会引起主变和应涌流波形特征发生细微变化。以光伏电站作为和应涌流产生的特殊场景为例,变压器两种涌流与系统联系电阻的相互作用会引起变压器连接母线电压发生变化,触发逆变器定电压控制环节快速调节,使得逆变侧输出电流的二次谐波含量较高,进一步增大和应涌流二次谐波含量。另外,与常规电源相比,其和应涌流具有上升时间延迟,峰值较大且衰减速率较慢的特点。

## 3 和应涌流仿真分析

### 3.1 仿真模型

基于 RTDS 对发生和应涌流事件的某地区 220 kV A 变一次系统进行建模。A 变 220 kV 全停期间电网运行方式如图 4 所示。仿真参数、系统运行方式与实际系统一致。该变电站 220 kV 全停检修,110 kV BC I 线-AC I 线单供该站,1 号主变带载运行,2 号主变中压侧 15B 开关合闸后 3 s,110 kV BC I 线距离 III 段保护动作跳闸。

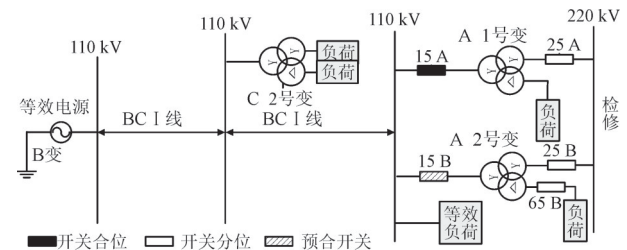


图4 A变220 kV全停期间电网运行方式

Fig.4 Operation mode of the power grid during the A substation 220 kV total shutdown

### 3.2 波形复现

初始阶段系统处于事故前稳定运行状态,以锁定 a 相电压合闸角为  $210^\circ$  控制 2 号主变中压侧 15B 开关合闸,仿真结果如图 5 所示。图 6 为现场实际波形。

对比图 5、图 6 波形,可以看出,RTDS 仿真成功复现了现场波形特征,包括 2 号变励磁涌流波形特征、1 号变和应涌流波形特征。经测试,励磁涌流、和应涌流谐波含量均大于 20%,仿真结果验证了仿真模型的正确性。

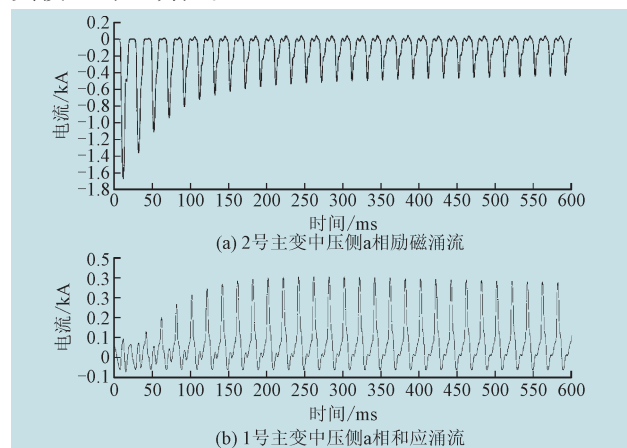


图5 RTDS仿真波形

Fig.5 RTDS simulation waveform

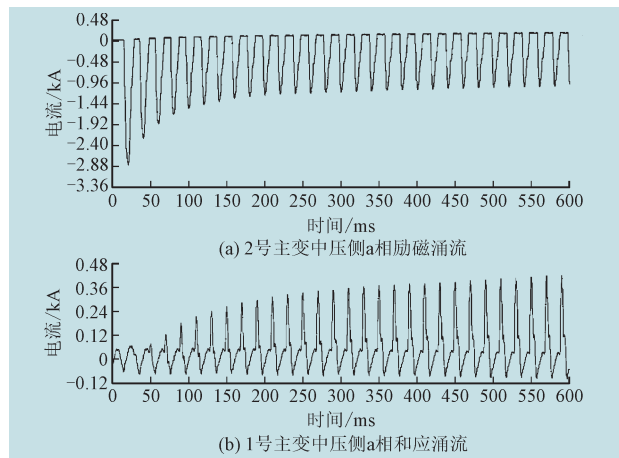


图6 现场波形

Fig.6 Field waveform

### 3.3 励磁涌流对和应涌流的影响分析

励磁涌流会影响和应涌流,而合闸角又是励磁涌流的重要影响因素之一。以下重点分析合闸角对和应涌流的影响,通过锁相环锁定 A 地 110 kV 母线 a 相电压正弦角度,控制 A 地 2 号主变中压侧开关合闸角在  $0^\circ \sim 360^\circ$  区间内,由于 a、b、c 三相开关同时合闸,电压相位相差  $120^\circ$ 。下面仅以 a 相为例,分析不同合闸角对励磁涌流及和应涌流最大值的影响,仿真结果如图 7 所示。

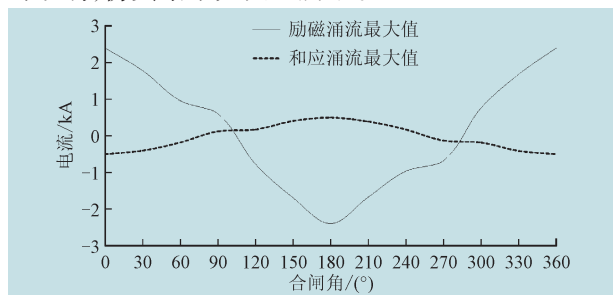


图7 不同合闸角下励磁涌流及和应涌流最大值

Fig.7 Maximum values of magnetizing inrush and sympathetic inrush under different closing angles

当合闸角为  $0^\circ$ 、 $180^\circ$  时,即电压瞬时值为 0 时合闸,变压器铁心饱和最严重,励磁涌流最大,对应和应涌流也最大。当合闸角为  $90^\circ$ 、 $270^\circ$  时,即电压峰值时刻合闸,合闸变压器铁心饱和程度不深,励磁涌流最小,对应和应涌流也最小。总体规律为开关合闸时刻电压瞬时值越小,产生的励磁涌流越大,对应的和应涌流也越大。此外,和应涌流的最大值比励磁涌流最大值小得多,因此,相关保护定值整定仍按照可能产生的最大励磁涌流考虑。

### 3.4 系统联系电阻对和应涌流的影响

根据理论分析,合闸变与运行变的磁通变化量

是通过两者的非周期电流分量与系统联系电阻的相互耦合建立联系的。

保持其他仿真参数不变,设置 BC I 线线路单位长度电阻分别为  $0.05 \Omega/\text{km}$ 、 $0.6 \Omega/\text{km}$ ,相当于改变系统联系电阻的大小,仿真结果分别如图 8 和图 9 所示。对比图可以发现:系统联系电阻的增大,一方面减小了 2 号变励磁涌流最大值及线路电流最大值,另一方面加快了 1 号变铁心饱和速度,加快了和应涌流的产生,同时也造成和应涌流的衰减速度减慢。由于 2 号变励磁涌流也相应减小,两者相互作用的积分结果使运行变压器饱和程度减弱,和应涌流最大值减小。总体而言,和应涌流幅值远小于励磁涌流大小,影响保护动作行为的主要因素是和应涌流的衰减速度。因此,加强与系统的联系,减小系统的联系电阻,加快涌流衰减速度,可以减小和应涌流对保护的影响。

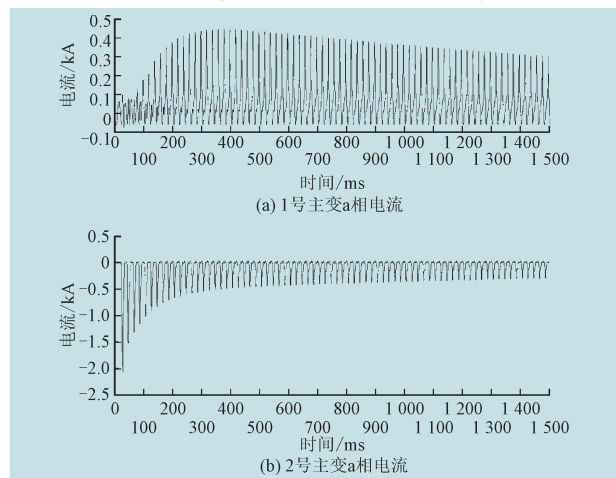


图8 线路单位电阻为  $0.05 \Omega/\text{km}$  时的主变涌流波形

Fig.8 The inrush current waveform of the main transformer when the line unit resistance is  $0.05 \Omega/\text{km}$

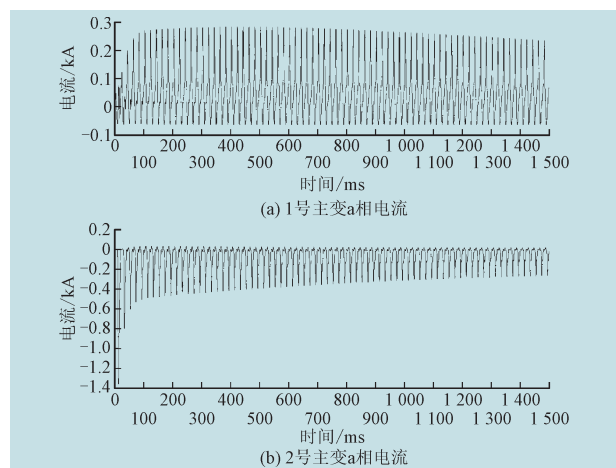


图9 线路单位电阻为  $0.6 \Omega/\text{km}$  时的主变涌流波形

Fig.9 The inrush current waveform of the main transformer when the line unit resistance is  $0.6 \Omega/\text{km}$

### 3.5 负载对和应涌流的影响

保持1号主变负载功率因数0.97不变,设置1号变低压侧负荷分别为有功8.52 MW、无功2.06 Mvar和有功51.12 MW、无功12.36 Mvar,仿真结果如图10所示。

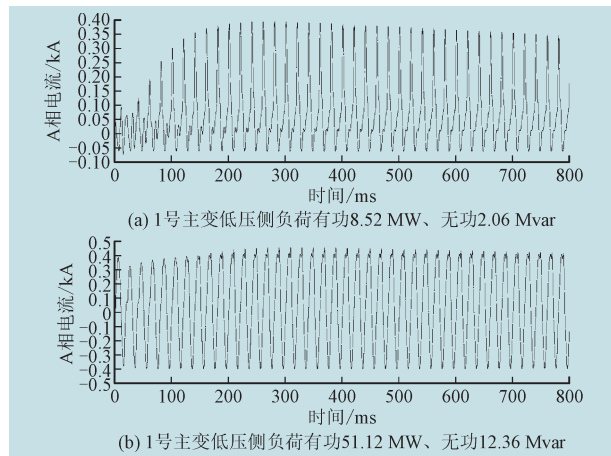


图10 负载对和应涌流的影响

Fig.10 The effect of load on the sympathetic inrush

从图10可以看出,运行变压器所带负载越大,和应涌流特征越不明显,在某些重载情况下和应涌流甚至可能消失,与理论分析一致。因此,为减小和应涌流的影响,主变空载冲击前应保证并联在运变压器所带负荷量处于较高水平。

## 4 和应涌流对保护的影响及对策

### 4.1 防止变压器差动保护误动

根据仿真结果及现场波形分析,励磁涌流及和应涌流的谐波含量仍是以二次谐波为主(大于15%),差动保护的二次谐波闭锁功能仍起作用,引起差动保护误动主要原因是涌流中衰减缓慢的直流分量引起电磁式CT饱和,使得CT传变的二次电流产生畸变,从而引起差动保护误动。因此,变压器差动保护应选用抗饱和能力强的CT绕组。

### 4.2 防止上级线路保护误动

由于和应涌流大小取决于励磁涌流大小,而励磁涌流最大值为变压器额定电流的6~10倍。对于三段式电流保护,过流I段、II段是主保护,动作时间短。按照躲最大短路电流整定,通过电流定值可躲过和应涌流及励磁涌流的叠加电流,而过流III段按躲最大负荷电流整定,仅能通过时间定值躲过励磁涌流,然而,在有和应涌流的场合,由于和应涌

流、励磁涌流衰减缓慢,导致在线路上的叠加电流也衰减缓慢,衰减时间存在很大不确定性,可能持续数分钟,靠时间元件难以躲过,虽然部分保护配置有二次谐波闭锁功能。但根据分析发现,当和应涌流出现时,线路电流将快速进入对称状态,偶次谐波消失,二次谐波闭锁功能失去作用。

事实上励磁涌流对系统电压影响较小,可考虑增设低电压闭锁元件,来防止和应涌流引起的过流III段误动。

对于距离保护,距离I段、II段反映的是短路故障下低电压、大电流的阻抗测量。由前述分析已知,在和应涌流场景下,母线电压并未出现大幅降低。因此,距离保护I段、II段可不采取相关闭锁措施,距离III段作为后备段,可以反映远端故障时的本侧较大电压、较小电流下的测量阻抗。通常采用带有偏移特性的测量元件,用较大延时保证选择性。由于和应涌流及励磁涌流方向相反,时间上交替出现,导致线路保护测量阻抗呈现线路阻抗特性。由于线路电流缓慢衰减,距离III段存在误动风险,采用低电压闭锁作为III段的闭锁条件可能导致保护拒动。通过对和应涌流场景及不对称故障情况下的母线电压进行序分量分析,发现和应涌流下电压负序分量小。因此,可考虑采用三个相间阻抗同时动作或负序阻抗动作作为距离III段保护动作条件。

## 5 结论

本文深入分析了计及变压器负载的和应涌流产生机理、特点及影响因素,并以实际案例进行RTDS仿真,得出以下结论。

1) 和应涌流产生的本质原因是,合闸变压器励磁涌流非周期分量流过系统电阻,引起在运变压器磁通逐步发生饱和。因此,和应涌流是在合闸变压器励磁涌流持续一段时间以后才产生,并且在几个周期内迅速达到最大值,随后磁通开始减小,和应涌流也逐渐减小。

2) 合闸变压器和在运变压器铁心饱和方向相反。因此,励磁涌流与和应涌流方向相反并在时间上交错。

3) 和应涌流的形成速度及大小与励磁涌流大小有关。因此,影响励磁涌流大小的电源电压幅值、剩磁、合闸角均是影响和应涌流的因素,可通过

消磁、选相合闸等方式减小和应涌流的影响。

4) 合闸变压器和在运变压器通过系统联系电阻发生磁链耦合,系统联系电阻的减小,可加快和应涌流的衰减速度。因此,与系统联系加强,可减小和应涌流的影响。此外,合闸变压器所带负载越大,和应涌流越不容易产生。

5) 为防止和应涌流引起保护误动,提出变压器差动保护应选用抗饱和能力强的 CT 绕组,线路过流Ⅲ段保护增设低电压闭锁元件,线路距离Ⅲ段保护采用 3 个相间阻抗同时动作或负序阻抗动作作为动作条件。

### 参考文献

- [1] 林国松,张硕,权伟,等.自耦变压器投入导致距离保护误动分析及改进[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(9):146-152.  
LIN Guosong, ZHANG Shuo, QUAN Wei, et al. Analysis and improvement of distance protection maloperation caused by autotransformer input[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(9): 146-152.
- [2] 李斌,彭伍龙,姚斌,等.基于复合环流与零序电流特征的换流变压器励磁涌流波形相关性识别方法[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8027-8038,8239.  
LI Bin, PENG Wulong, YAO Bin, et al. An algorithm of identifying inrush current of converter transformer based on waveform cross-correlation of composite circulation and zero sequence current characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8027-8038, 8239.
- [3] 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.  
ZHOU Ning. Analysis of sympathetic inrush current on transformer differential protection[J]. Electrotechnical Application, 2021, 40(3): 73-78.
- [4] 戚宣威,尹项根,张哲,等.变压器空投导致相邻元件差动保护误动分析及防范措施[J].电力系统自动化,2016,40(3):129-134.  
QI Xuanwei, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Analysis on mal-operation for current differential protection due to adjacent transformer switching-on and its countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 129-134.
- [5] 李海涛,刘北阳,滕文涛,等.基于可变合闸角的变压器励磁涌流抑制方法[J].中国电力,2022,55(9):70-78.  
LI Haitao, LIU Beiyang, TENG Wentao, et al. Research on inrush current suppression of transformer based on changeable closing angle[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 70-78.
- [6] 夏家辉,方园,刘卜瑞,等.基于特征电流波宽判据的变压器差动保护方法[J].电力工程技术,2020,39(1):184-190.  
XIA Jiahui, FANG Yuan, LIU Burui, et al. The transformer differential protection method based on characteristic current waveform width criterion[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 184-190.
- [7] 栗磊,梁亚波,赫嘉楠,等.基于差动电流相位差的和应涌流识别及其与内部故障的区分方法[J].电网与清洁能源,2023,39(8):64-72.  
LI Lei, LIANG Yabo, HE Jianan, et al. A method of identifying sympathetic inrush current based on phase difference of differential current and distinguishing it from internal faults[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(8): 64-72.
- [8] 赵学文,付泽宇,李乐,等.基于VMD和PSO-SVM模型的和应涌流识别[J].电工技术,2021(19):30-34.  
ZHAO Xuewen, FU Zeyu, LI Le, et al. Sympathetic inrush current identification based on VMD and PSO-SVM model [J]. Electric Engineering, 2021(19): 30-34.
- [9] 翁汉刚,李雪华,鲁俊生,等.特高压换流变压器对称性涌流的生成及其对大差保护的影响[J].电力系统自动化,2017,41(5):153-158.  
WENG Hanli, LI Xuehua, LU Junsheng, et al. Symmetrical inrush current mechanism of ultra-high voltage converter transformer and its impact on converter connection-transformer differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(5): 153-158.
- [10] 王业,袁宇波,陆于平,等.涌流引起的变压器三角形侧不平衡三次谐波影响及抑制方法[J].电力系统自动化,2015,39(22):145-151.  
WANG Ye, YUAN Yubo, LU Yuping, et al. Effects and suppression methods for inrush-caused unbalanced third harmonic on transformer delta-side[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 145-151.
- [11] 王奕,戚宣威,罗航,等.复杂和应涌流及其对电流差动保护的影响[J].电力系统自动化,2014,38(6):98-105.  
WANG Yi, QI Xuanwei, LUO Hang, et al. Complex sympathetic inrush and its influence on current differential protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 98-105.
- [12] 郑彬,杨鹏,滕文涛,等.换流站联络变充电励磁涌流对哈郑特高压直流运行影响分析[J].中国电力,2017,50(12):130-135.

- ZHENG Bin, YANG Peng, TENG Wentao, et al. Study on influence of coupling transformer charging inrush current to Hami-Zhengzhou UHV DC project[J]. Electric Power, 2017, 50(12):130-135.
- [13] 陈星宇. 基于最小二乘矩阵束的励磁涌流识别方案[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):44-49.  
CHEN Xingyu. Identification method for inrush current based on least-square matrix pencil algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2):44-49.
- [14] 赵元哲, 李群湛, 周福林, 等. 电力机车变压器和应涌流产生机理与影响因素[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12):44-52.  
ZHAO Yuanzhe, LI Qunzhan, ZHOU Fulin, et al. Mechanism and influencing factors of electric locomotive sympathetic inrush[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12):44-52.
- [15] 武万才, 边疆, 吴志勇. 变压器和应涌流产生机理及其特性分析[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6):112-115.  
WU Wancai, BIAN Jiang, WU Zhiyong. Principle and characteristics of transformer sympathetic inrush[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6):112-115.
- [16] 朱维璐, 闫彩红, 刘智敏. 电力变压器和应涌流的产生机理及影响因素[J]. 高电压技术, 2010, 36(2):380-384.  
ZHU Weilu, YAN Caihong, LIU Zhimin. Principle and influencing factors of power transformer sympathetic inrush[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):380-384.
- [17] 束洪春, 贺勋, 李立新. 变压器和应涌流分析[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10):7-12.  
SHU Hongchun, HE Xun, LI Lixin. Research on sympathetic inrush in operating transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10):7-12.
- [18] 行武, 郭晓, 胡兵, 等. 变压器和应涌流产生负序二次谐波的仿真分析[J]. 南方电网技术, 2017, 11(11):20-26.  
XING Wu, GUO Xiao, HU Bing, et al. Simulation and analysis of negative-sequence second harmonic created by sympathetic inrush current of transformer[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(11):20-26.
- [19] 于士谦, 胡宝, 郭子仪, 等. 和应涌流仿真测试研究及对变压器保护的影响[J]. 电工技术, 2018(7):16-17, 127.  
YU Shiqian, HU Bao, GUO Ziyi, et al. Simulation testing research and influence of sympathetic inrush current on transformer protection[J]. Electric Engineering, 2018(7):16-17, 127.
- [20] 孙向飞, 束洪春, 于继来. 变压器并联与串联和应涌流对差动保护影响的比较研究[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(3):36-41.  
SUN Xiangfei, SHU Hongchun, YU Jilai. Comparison of sympathetic inrush influence on differential protection between parallel and series transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(3):36-41.
- [21] 王育学, 潘远林, 刘玮, 等. 电流互感器暂态特性对涌流传变的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18):80-86.  
WANG Yuxue, PAN Yuanlin, LIU Wei, et al. Effect of CT transient characteristics on transfer of inrush[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18):80-86.
- [22] 栗磊, 赫嘉楠, 熊军辉, 等. 基于波形分区重构的变压器励磁涌流与故障电流识别方法[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(2):16-23, 32.  
LI Lei, HE Jianan, XIONG Junhui, et al. An identification method of inrush current and fault current based on waveform partition and reconstruction[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(2):16-23, 32.
- [23] 王冰清, 李本瑜, 宋晓亮. 基于瞬时功率理论的变压器CT接线校验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6):173-179.  
WANG Bingqing, LI Benyu, SONG Xiaoliang. Verification method for transformer CT wiring based on instantaneous power theory[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6):173-179.
- [24] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009:399-400.

收稿日期:2024-04-11。 修回日期:2025-07-28。

作者简介:

胡文旺(1987—),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护及柔性直流输电控制技术;

邓超平(1971—),男,博士,高级工程师,研究方向为继电保护及柔性直流输电控制技术;

江伟(1974—),男,博士,高级工程师,研究方向为继电保护及发电机励磁系统控制技术;

郭健生(1983—),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护及发电机励磁系统控制技术;

齐琛(1991—),男,硕士,高级工程师,研究方向为复杂电网故障分析与仿真研究。

(编辑 徐花荣)