

DOI: 10.7667/PSPC170537

# 选相关合技术抑制空载变压器励磁涌流的实验研究

许家源<sup>1</sup>, 华争祥<sup>1</sup>, 朱苛娄<sup>1</sup>, 方春恩<sup>2</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 肖杨<sup>2</sup>, 张彼德<sup>2</sup>

(1. 国网平高集团有限公司, 河南 平顶山 467001; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

**摘要:** 针对随机合空载变压器产生励磁涌流的问题, 采用选相关合技术来抑制励磁涌流。在分析选相关合空载变压器原理的基础上, 研究了同时合闸策略、快速合闸策略和延时合闸策略下铁芯磁通的变化规律, 并对分析三种合闸策略的适用条件。最后搭建选相投切 10 kV 空载变压器实验平台, 对有无剩磁时不同合闸相位下的励磁涌流进行分析。实验结果表明: 变压器铁芯无剩磁时, 在电压峰值处合闸可以有效抑制励磁涌流; 铁芯存在剩磁时, 在电压峰值处合闸仍会产生励磁涌流。因此, 有必要预测铁芯剩磁以确定最佳合闸相位, 实现空投变压器的无冲击平滑过渡。

**关键词:** 励磁涌流; 剩磁; 选相关合技术; 选相合闸策略

## Experimental research on inrush current suppression of unloaded transformers based on the controlled switching

XU Jiayuan<sup>1</sup>, HUA Zhengxiang<sup>1</sup>, ZHU Kelou<sup>1</sup>, FANG Chunen<sup>2</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, XIAO Yang<sup>2</sup>, ZHANG Bide<sup>2</sup>

(1. State Grid Pinggao Group Co., Ltd., Pingdingshan 467001, China;

2. School of Electrical and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Random energization of unloaded transformers may generate inrush current. In order to solve this problem, controlled switching technology is used for suppressing the inrush current. Based on the analysis of the principle of controlled switching of unloaded transformers, the changing laws of magnetic flux under circumstances of simultaneously, rapidly and delayed closing strategies are studied, and the applicable conditions of the three closing strategies are compared and analyzed. Finally, the test platform for controlled switching of 10 kV unloaded transformer is built and the inrush currents under different closing phases are analyzed when residual flux is zero or not. Tests results show that closing at the voltage peak can effectively reduce the inrush currents when the core has no residual flux; but inrush current still can be generated when the core has residual flux. Therefore, it is necessary to estimate the residual flux in order to obtain the optimal closing phase and realize the no impact transition of energizing unload transformer.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477142) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5229CG15003Q).

**Key words:** inrush current; residual flux; controlled switching technology; controlled switching strategies

## 0 引言

电力变压器是电力系统中的核心设备, 由于变压器励磁电感非线性以及铁芯磁通饱和特性, 变压器在空投时会产生6~8倍额定电流的励磁涌流, 涌流短时冲击变压器会引发变压器差动保护误动作, 导致

绕组电动力剧增、局部过热甚至形变; 此外涌流中含有丰富的谐波成分, 将降低电网供电质量<sup>[1-4]</sup>。

目前针对励磁涌流问题的研究主要集中在变压器差动保护对于内部故障电流与励磁涌流的正确识别上, 意图通过准确的辨识方法来提高差动保护躲避涌流的快速性和可靠性<sup>[5-8]</sup>, 却不能彻底消除涌流。除了采用断路器合闸电阻等传统方法削弱涌流外, 近年来国内外学者提出一些抑制励磁涌流的新途径。文献[9]提出变压器中性点串电阻, 三相分相延时合闸的方法抑制涌流, 但中性点可能出现过电压。文献[10]则针对三绕组变压器, 提出了一种基

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51477142); 国家电网公司科技项目资助(5229CG15003Q); 四川省教育厅项目资助(12ZB131); 省部共建教育部重点实验室项目资助(SBZDPY-11-13, 14)

于二阶欠阻尼电路和分压器构成的涌流抑制器，通过在低压侧快速建立稳定磁通后再从高压侧合闸。文献[11]通过给变压器进行预充磁，使得剩磁接近极限剩磁，再选相投切变压器。文献[12]利用变压器投切瞬间铁芯偏磁和剩磁极性互克原理，通过保持断路器分/合闸相位前后不变来减少励磁涌流，并成功应用于工程实践，但忽略剩磁幅值对涌流的影响，若剩磁抵消的不彻底可能导致合闸瞬间磁通饱和。

空载变压器的随机投切相位和铁芯剩磁是导致励磁涌流产生的重要因素，选相关合技术在空载变压器上的运用为抑制励磁涌流提供了切实可行的方法<sup>[13-17]</sup>。本文基于断路器的选相关合技术，分析了快速合闸策略、同时合闸策略、延时合闸策略原理以及铁芯磁通变化规律；搭建投切空载变压器的动模实验平台，研究剩磁为零时，断路器不同合闸相角对励磁涌流的影响规律，为选相合闸抑制空载变压器励磁涌流提供了理论参考。

## 1 选相合闸抑制励磁涌流原理

### 1.1 励磁涌流产生机理

单相变压器等值电路如图1所示， $R_1$ 为原边绕组内阻， $R_2$ 为副边绕组内阻， $L_1$ 为励磁支路电感。设合闸时系统电压为

$$u_s = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中： $U_m$ 为系统电压峰值； $\omega$ 为系统电压角频率； $\alpha$ 为合闸初相角。

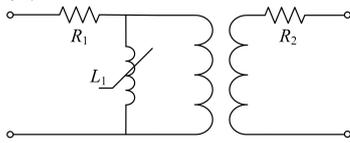


图1 单相变压器等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of single-phase transformer

忽略变压器漏抗压降，原边绕组回路方程为

$$i_1 R_1 + N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

式中： $\Phi$ 是与绕组交链的主磁通； $i_1$ 为励磁电流； $N_1$ 为原边匝数。铁芯未饱和时，绕组电感 $L_1 \approx \Phi/i_1$ ，代入式(2)得

$$R_1 \frac{\Phi(t)}{L_1} + N_1 \frac{d\Phi(t)}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

解微分方程得

$$\Phi(t) = -\frac{U_m}{N_1 \omega} \cos(\omega t + \alpha) + C \cdot e^{-R_1 t / L_1} \quad (4)$$

式中， $\Phi_m = U_m / N_1 \omega$ 为稳态磁通最大值。常数 $C$ 由铁芯磁通的初始状态决定，由于铁磁材料的磁滞特性，变压器在被切除后，铁芯的磁通密度不能随着

磁场的消失下降到零，会长期保持为稳定的磁通，称为剩磁 $\Phi_r$ 。设变压器在 $t=0$ 时合闸，根据磁链守恒定律可知 $\Phi(0^-) = \Phi(0^+) = \Phi_r$ ，结合式(4)得

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

则动态磁通的表达式为

$$\Phi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\Phi_m \cos \alpha + \Phi_r) e^{-R_1 t / L_1} \quad (6)$$

式中： $-\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态分量； $(\Phi_m \cos \alpha + \Phi_r) \cdot e^{-R_1 t / L_1}$ 为暂态分量。不失一般性，三相变压器合闸动态磁通均可归纳为“稳态分量+暂态分量”的表现形式。而励磁涌流的最大峰值 $I_{pk}$ 可以由式(7)近似计算。

$$I_{pk} = \frac{U_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}} \left( \frac{2B_N + B_R - B_S}{B_N} \right) \quad (7)$$

式中： $B_R$ 为变压器铁芯剩余磁通密度； $B_S$ 为铁芯材料饱和磁密度； $B_N$ 为铁芯额定磁密度。因此励磁涌流的大小主要取决于系统电压幅值、合闸相位角以及铁芯中的剩磁水平<sup>[18]</sup>。

### 1.2 选相合闸原理

选相合闸技术抑制空载变压器涌流的实质就是控制断路器在最佳合闸相位关合，消除式(6)中的暂态分量，以防止铁芯磁通饱和，达到抑制励磁涌流的目的。该方法需要对铁芯内的剩磁水平(包括幅值和极性)进行测量，再确定系统电压投入的相角 $\alpha_0$ <sup>[19-21]</sup>。针对式(6)中的暂态分量，则令

$$\Phi_m \cos \alpha_0 + \Phi_r = 0 \quad (8)$$

可得最佳合闸相角 $\alpha_0$ 为

$$\begin{cases} \alpha_0 = 1 + \arccos(\Phi_r / \Phi_m), & \Phi_r > 0 \\ \alpha_0 = -\arccos(-\Phi_r / \Phi_m), & \Phi_r < 0 \end{cases} \quad (9)$$

其合闸时序控制图如图2所示，以系统电压为合闸参考电压，当控制系统接收到合闸命令 $t_{com}$ ，经过延时 $T_w$ 检测到最近的电压过零点，并根据断路器预击穿特性计算最佳关合时间，经过 $N \cdot T_{zero}$ 后到达最佳关合时刻前最近的电压过零点，再经过延时 $T_m$ 后控制主触头合闸，图2中 $t_{making}$ 为触头动作时刻， $T_{prestriking}$ 为预击穿时间。

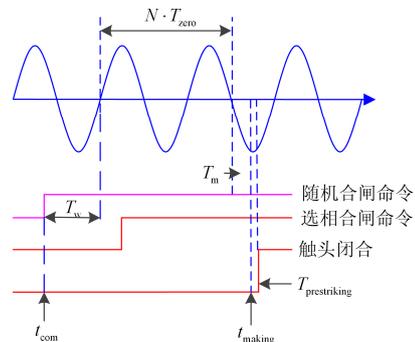


图2 选相合闸时序图

Fig. 2 Sequence of controlled closing

## 2 选相控制策略

### 2.1 选相控制策略的基本原理

与单相变压器不同, 三相变压器各相绕组在不同的联结组别以及铁芯结构下, 彼此之间存在紧密的电磁联系。根据剩磁类型以及断路器合闸相位对铁芯磁通影响规律, 空载变压器的选相合闸衍生出了三种合闸控制策略。本文针对我国普遍采用的Y/Δ联结组别的三柱式变压器, 对不同合闸策略下励磁涌流的抑制进行理论分析。令A、B、C三相初始磁通为 $(0, -\Phi_r, \Phi_r)$ , 且三相稳态磁通对称相等, 各相磁通为

$$\begin{cases} \Phi_A = \Phi_m \cos(\omega t + \alpha) \\ \Phi_B = \Phi_m \cos(\omega t - 2\pi/3 + \alpha) \\ \Phi_C = \Phi_m \cos(\omega t + 2\pi/3 + \alpha) \end{cases} \quad (10)$$

1) 同时合闸策略: 由于A相剩磁为零, 选取A相电压峰值 $(\alpha=\pi/2)$ 为三相同时合闸时刻, 合闸后铁芯瞬态磁通分别为

$$\begin{cases} \Phi'_A = \Phi_m \cos(\omega t + \alpha) \\ \Phi'_B = \Phi_m \cos(\omega t - 2\pi/3 + \alpha) + [\Phi_r + \Phi_m \cos(\alpha - 2\pi/3)]e^{-R_t t/L_1} \\ \Phi'_C = \Phi_m \cos(\omega t + 2\pi/3 + \alpha) + [-\Phi_r + \Phi_m \cos(\alpha + 2\pi/3)]e^{-R_t t/L_1} \end{cases} \quad (11)$$

若使B、C两相合闸时磁通暂态分量被消除, 剩磁水平需要满足式(12)或式(13)所示条件。

$$\Phi_r + \Phi_m \cos(\alpha - 2\pi/3) = 0 \quad (12)$$

$$-\Phi_r + \Phi_m \cos(\alpha + 2\pi/3) = 0 \quad (13)$$

将 $\alpha=\pi/2$ 代入上式可得

$$\Phi_{Br} = 0.87\Phi_m, \quad \Phi_{Cr} = -0.87\Phi_m$$

$$\text{或 } \Phi_{Br} = -0.87\Phi_m, \quad \Phi_{Cr} = 0.87\Phi_m$$

实际上只要B、C剩磁足够大, 暂态分量均能有效消除, 涌流得到削弱。

2) 快速合闸策略: A相同样首先在电压峰值处合闸, 由于B、C两相铁芯绕组未通电, A相产生的磁通沿着主磁路与其他两相绕组交链, 若磁阻相同, 则B、C两相瞬时磁通大小为A相的一半, 且极性相反, B、C相叠加上含剩磁的暂态分量并随着A相继续变化, 则瞬态磁通 $\Phi'_B$ 和 $\Phi'_C$ 的表达式为

$$\begin{cases} \Phi'_B = -\Phi_A/2 + \Phi_r e^{-R_t t/L_1} \\ \Phi'_C = -\Phi_A/2 - \Phi_r e^{-R_t t/L_1} \end{cases} \quad (14)$$

经过 $\frac{1}{4}T$ 后, B、C相预感应磁通为

$$\Phi_{Bp} = \Phi_{Cp} = \Phi_m/2 \quad (15)$$

此时三相瞬态磁通分别为

$$\begin{cases} \Phi''_A = -\Phi_m \\ \Phi''_B = \Phi_m/2 + \Phi_r e^{-R_t t/L_1} \\ \Phi''_C = \Phi_m/2 - \Phi_r e^{-R_t t/L_1} \end{cases} \quad (16)$$

可认为 $\Phi_{pB} \approx \Phi''_B$ ,  $\Phi_{pC} \approx \Phi''_C$ 。故B、C相在首合相动作 $\frac{1}{4}T$ 后同时合闸, 能够避免铁芯磁通饱和。

3) 延迟合闸策略: 又令三相剩磁为 $(\Phi_{Ar}, \Phi_{Br}, \Phi_{Cr})$ , 由式(9)得A相的最佳关合相位 $\alpha_A$ 为

$$\alpha_A = \arccos(-\Phi_{Ar}/\Phi_m) \quad (17)$$

A相在 $\alpha_A$ 合闸后, 其余两相磁通不再是静止, 而是随着A相磁通变化而变化的感应磁通, 其起始点分别为各自的剩磁, 并沿着磁滞回线的相同方向移动, 由式(6)可表示为

$$\begin{cases} \Phi'_B = -\Phi_A/2 + (\Phi_{Br} - \Phi_m \cos \alpha_A/2)e^{-R_t t/L_1} \\ \Phi'_C = -\Phi_A/2 + (\Phi_{Cr} - \Phi_m \cos \alpha_A/2)e^{-R_t t/L_1} \end{cases} \quad (18)$$

B、C两相铁芯磁通相互作用趋于平衡, 剩磁在此作用下经过2~3个工频周期的过渡衰减后为零。则B、C两相的瞬态磁通可近似为

$$\Phi'_B \approx \Phi'_C \approx -\Phi_A/2 \quad (19)$$

此时在首合闸相电压过零时刻B、C相同时合闸, 恰好与预感应磁通相同, 三相磁通均进入稳态。

### 2.2 三种合闸策略的区别讨论

同时合闸策略和快速合闸策略适用于如一相剩磁很低的情形, 延时合闸策略只需某一相的剩磁确定最佳关合相位; 快速合闸策略和延迟合闸策略要求断路器能进行分相操作, 各相必须拥有独立的操动机构; 而三极共用一个操动机构的情形在中低压电力系统中比较普遍, 因而适合采用同时合闸策略; 快速合闸策略与延迟合闸策略相比, 前者要求在电压峰值处合闸, 可能产生预击穿过电压; 后者与之相较而言, 对各种剩磁普遍适用, 灵活性更高。

## 3 空载变压器选相投切实验

空载变压器投入相位和铁芯剩余磁通是影响励磁涌流幅值的主要因素。为研究合闸相位对涌流的影响程度, 本文通过搭建实验平台, 对不同合闸角下的励磁电流进行录波分析。实验用变压器为S7-30/10油浸式变压器, 变压器主要参数: 额定电压为10 kV/0.4 kV, 联结组别为Dyn11, 空载电流为4.6%, 阻抗电压为4%, 空载损耗为150 W, 短路损耗为780 W, 副边额定电流为 $I_n=43$  A。为了提高实验的测量精度, 增强实验效果, 选择在低压侧进行投切实验。

### 3.1 实验平台介绍

实验平台如图3所示，其中图3(a)为实验接线图，图3(b)为实验现场图。系统电源从动力电源柜接入，用以模拟无穷大系统；调压器输出电压为0~430 V，VCB为单稳态永磁机构真空断路器，受控于一个基于模糊控制和脉冲调制技术的同步开关控制器，并通过人机界面设置合分闸时间。选相合闸参考电压从电源侧经PT接入至控制器中，调压器输出电压有效值为230 V，实验中采用FLUKE435三相电能质量分析仪对励磁电流 $I_m$ 、系统电压 $U_s$ 和变压器端电压 $U_T$ 波形进行精确地测量。

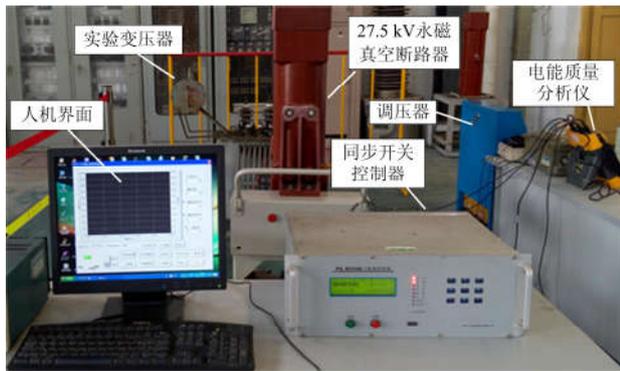
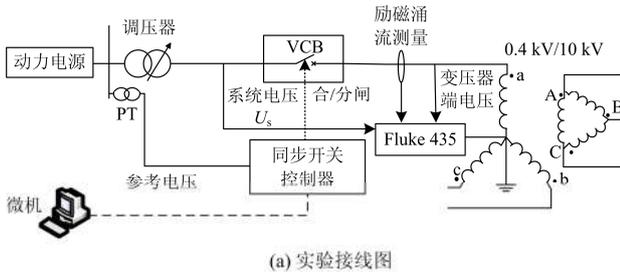


图3 实验接线及实验现场  
Fig. 3 Test circuit and test field

### 3.2 铁芯退磁方法

考虑到铁芯剩磁效应的影响，在每次合闸操作前对变压器进行退磁处理。本实验选择交流退磁法，即对A相绕组缓慢施加电压有效值230 V，再缓慢降至零，其原理是通过逐渐递减施加在铁芯上的交变磁场强度，磁滞回线的面积随之收窄，当磁场强度降为零时，铁芯内剩磁接近于零。

## 4 实验过程及结果分析

### 4.1 随机合闸

首先测量稳态时变压器励磁电流，图4(a)为A相励磁电流波形，其最大值为3 A，随后采用弹簧机构真空断路器对空载变压器进行随机合闸，图4(b)为

随机合闸时的励磁电流，三相电流 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 均出现了典型的偏向于横坐标轴一侧的励磁涌流波形，间断角为 $130^\circ$ ，涌流持续了120 ms，其中C相产生的涌流峰值最大，约为334 A( $8I_n$ )，A相次之，B相峰值电流最小也达到了170 A( $3.9I_n$ )，显然空载变压器的随机投切易产生高达上百倍稳态励磁电流的涌流。

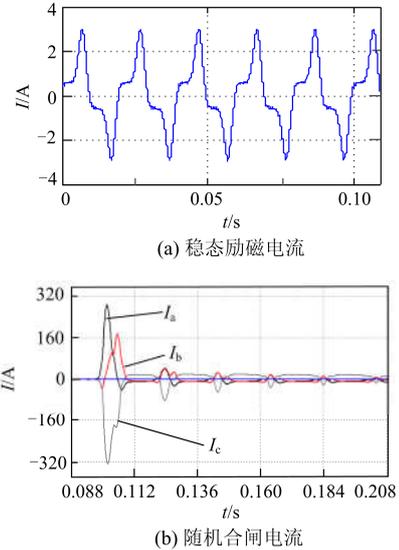
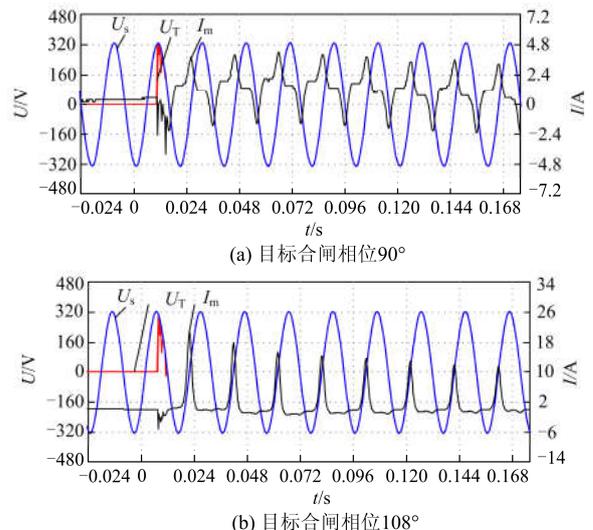


图4 稳态励磁电流与随机合闸实验波形

Fig. 4 Test waves of normal magnetizing current and random energization

### 4.2 选相合闸

实验中选相合闸相位范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$ （设置合闸时间0~10 ms），在每次合闸操作前对铁芯进行交流退磁处理，每间隔 $18^\circ$ 对变压器进行三次分合闸操作，并用三相电能质量分析仪对系统参考电压、变压器A相绕组端电压以及励磁电流进行录波，图5给出了合闸相位为 $90^\circ \sim 162^\circ$ 时的电流、电压波形。



(b) 目标合闸相位 $108^\circ$

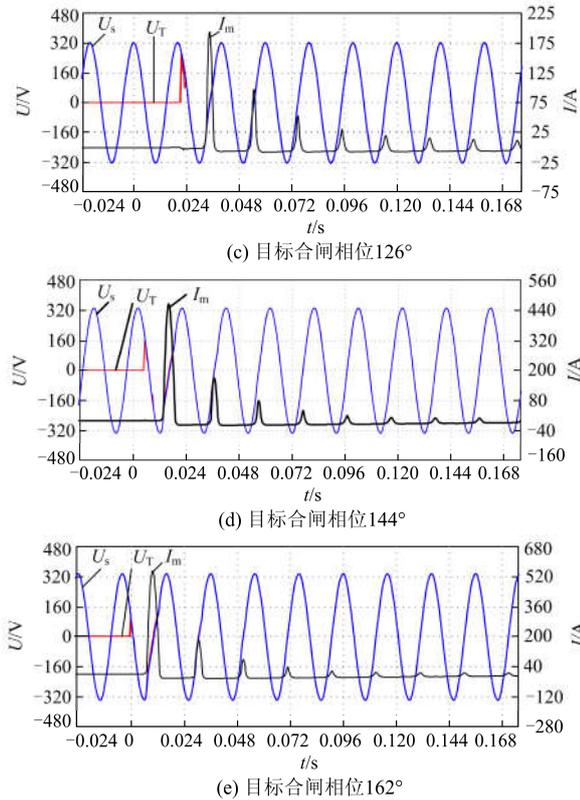


图 5 不同合闸相位的实验录波

Fig. 5 Waves recorded at different closing phases

图5(a)中合闸相位为 $90^\circ$ , 即关合相位为绕组电压峰值, 合闸电流峰值仅为 $3.8\text{ A}$ , 基本与图4(c)中的稳态励磁电流一致, 合闸后直接进入稳态运行, 表明无剩磁情况下在电压峰值合闸能有效抑制励磁涌流; 而合闸时刻越靠近绕组电压零点, 合闸瞬间预感应磁通幅值越大, 铁芯磁通饱和程度也随之加深, 图5(b)—(e)中励磁电流均出现了明显的尖顶波, 而图5(e)中励磁涌流高达 $552.3\text{ A}(13I_n)$ , 且持续了 $10\sim 12$ 个周波才彻底衰减, 由式(6)估算可知, 此时合闸瞬态磁通接近 $2\phi_m$ , 铁芯磁通已过度饱和; 图6为铁芯未经退磁处理下, 合闸相位在电压峰值附近的励磁电流波形, 此时涌流峰值为 $191\text{ A}(4.4I_n)$ , 表明不考虑剩磁效应, 选择在电压峰值(预感应磁通为0)合闸无法抑制涌流。

表1给出了不同合闸相位下励磁涌流幅值测量结果。由于在低压侧实验不考虑合闸预击穿, 合闸动作时间偏差为 $\pm 0.3\text{ ms}$ , 并分析不同剩磁条件和合闸相位下的涌流情况(见表2)。对比结果表明: 铁芯无剩磁时, 在电压峰值处合闸可以有效抑制励磁涌流; 存在剩磁时, 在电压峰值处合闸仍会产生励磁涌流, 因此需要剩磁和合闸相位的准确配合。

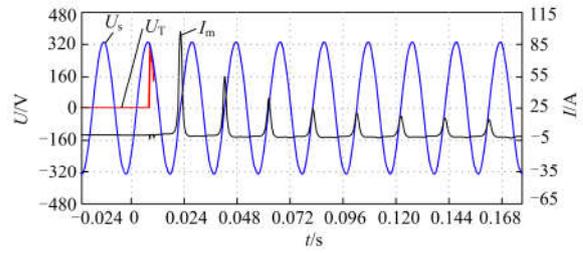


图 6 合闸相位在峰值附近(未退磁)

Fig. 6 Close phase at voltage peak (no demagnetization)

表 1 不同合闸相位的励磁涌流实验结果

Table 1 Test results of inrush current with different closing phases

预期合闸相位/ $^\circ$	合闸次数	实际合闸相位/ $^\circ$	$I/A$
90	①	95.4	6.5
	②	90.0	2.7
	③	91.8	3.8
108	①	109.8	26.5
	②	113.4	20.1
	③	111.6	34.5
126	①	126.0	193.6
	②	129.6	182.5
	③	129.6	187.2
144	①	142.2	416.2
	②	140.4	486.0
	③	144.0	471.1
162	①	158.4	552.3
	②	162.0	543.7
	③	162.0	534.1

表 2 不同剩磁条件和合闸相位下涌流对比

Table 2 Comparison of inrush current under different magnetic residual flux conditions and closing phase

剩磁情况	合闸相位/ $^\circ$	$I/A$
有剩磁	90	191.1
剩磁为 0	162	552.3
剩磁为 0	90	3.8

## 5 结论

1) 本文结合空载变压器选相关合技术, 分析了同时、快速以及延迟合闸策略的基本原理和铁芯磁通的变化规律, 断路器能否进行分相操作以及铁芯剩磁水平决定合闸策略的选择。

2) 通过搭建选相投切空载变压器实验平台, 研究了不同合闸相位对励磁涌流的影响规律。结果表明: 铁芯无剩磁时, 在电压峰值处合闸可以有效抑

制励磁涌流；存在剩磁时，在电压峰值处合闸仍会产生励磁涌流。因此必须考虑铁芯剩磁效应，合理选择断路器的最佳投切相位，实现空投变压器无冲击平滑过渡。

本文下一步工作是研究测量剩磁的方法，通过预测铁芯剩磁的大小和极性来确定最佳关合相位，以达到抑制涌流的目的。

## 致谢

本文受到国家电网科技项目“配磁力操动机构的 126 kV 真空智能断路器关键技术研究及产品研制”资助，特此感谢！

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] 姚东晓, 邓茂军, 倪传坤, 等. 变压器多侧励磁涌流产生机理及对差动快速动作区影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 36-41.  
YAO Dongxiao, DENG Maojun, NI Chuankun, et al. Transformer's multi-side inrush current generation mechanism and its influence on the differential protection's fast action zone[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 36-41.
- [3] 宁铎, 尤磊, 李英春, 等. 变压器差动保护动作特性的仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 99-106.  
NING Duo, YOU Lei, LI Yingchun, et al. Simulation research on the operating characteristic of transformer differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 99-106.
- [4] 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.
- [5] 朱可, 姜杰, 张太勤. 基于等效瞬时电感参数辨识的变压器励磁涌流判别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 12-16.  
ZHU Ke, JIANG Jie, ZHANG Taiqin. Distinguishing magnetizing inrush based on characteristic of equivalent instantaneous inductance[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 12-16.
- [6] 邵文权, 乔妮, 焦在滨, 等. 利用电流变化率极值特征的变压器涌流识别研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 64-70.  
SHAO Wenquan, QIAO Ni, JIAO Zaibin, et al. A method to detect inrush currents in power transformer using current derivation characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(22): 64-70.
- [7] 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.
- [8] 郑涛, 陆格野, 赵彦杰, 等. 基于虚拟等效电感的特高压调压变压器励磁涌流判别算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(7): 118-125.  
ZHENG Tao, LU Geye, ZHAO Yanjie, et al. A discriminating algorithm for identifying inrush of UHV voltage-Regulating transformer based on virtual equivalent inductance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 118-125.
- [9] CUI Y, ABDULSALAM S G, CHEN S, et al. A sequential phase energization technique for transformer inrush current reduction-part I: simulation and experimental results[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 943-949.
- [10] 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.
- [11] TAYLOR D I, LAW J D, JOHNSON B K, et al. Single-phase transformer inrush current reduction using prefluxing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 245-252.
- [12] 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.
- [13] 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.

- LI Wei, HUANG Jin, FANG Chunen, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [14] 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.
- [15] CHIESA N, HOIDALEN H K. Novel approach for reducing transformer inrush currents: laboratory measurements, analytical interpretation and simulation studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2609-2616.
- [16] 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.
- YANG Tongyun, LI Xiaohua, DAI Yangyu, et al. Analysis on magnetizing inrush current characteristic of converter transformer and its suppression[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(1):64-70.
- [17] 张帆, 段雄英, 吕洋, 等. 选相投切特高压线路及对其操作冲击绝缘的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(5): 1151-1157.
- ZHANG Fan, DUAN Xiongying, Lü Yang, et al. Controlled switching UHV line and its effect on line switching impulse insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(5): 1151-1157.
- [18] CORRODI Y, KAMEI K, ITO H, et al. Interpolation of no-loaded transformer residual flux pattern, based on limited set of measurements[J]. IEEE General Meeting in Tokyo, 2010, 137(5): 204-205.
- [19] 李振强, 谷定燮, 戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-392.
- LI Zhenqiang, GU Dingxie, DAI Min. Analysis and suppression method of no-load ultra high voltage transformer resonance overvoltage and inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 387-392.
- [20] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of transformer inrush currents by controlled switching. I. theoretical considerations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(2): 276-280.
- [21] 刘涛, 刘鑫, 梁仕斌, 等. 基于极性变化直流电压源的铁磁元件铁心剩磁通测量方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(13): 137-144.
- LIU Tao, LIU XIN, LIANG Shibin, et al. Residual flux measuring method on the core of ferromagnetic components based on alternating polarity DC voltage source[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 137-144.

收稿日期: 2017-04-13; 修回日期: 2017-07-17

作者简介:

许家源(1982—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为磁力操动机构及选相控制断路器;

华争祥(1986—), 男, 硕士, 研究方向为磁力操动机构及选相控制断路器; E-mail: 84670926@qq.com

朱苛娄(1983—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高压开关及其弹簧操动机构, 永磁、磁力、斥力、电磁机构的研发和仿真分析技术等工作。

(编辑 魏小丽)