

## 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究

陈川江<sup>1</sup>, 方春恩<sup>1,2</sup>, 曾俊龙<sup>1</sup>, 李伟<sup>1,2</sup>, 罗彦<sup>1,2</sup>, 任晓<sup>1,2</sup>

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039;

2. 四川省电力电子节能技术与装备高校重点实验室, 四川 成都 610039)

**摘要:** 随机合闸空载变压器产生的励磁涌流容易引起电力变压器差动保护装置误动、绕组机械应力增大以及电能质量降低等问题。采用选相合闸技术来抑制空载变压器励磁涌流。实现空载变压器选相合闸的关键是有效预估变压器切除后铁芯中的剩磁。在分析选相合闸空载变压器原理的基础上, 提出基于数值积分的铁芯剩磁测量方法。采用 PSCAD/EMTDC 软件对变压器空载合闸进行了仿真, 仿真结果验证了选相合闸技术的有效性。搭建空载变压器选相投切试验平台, 进行了空载变压器随机合闸、选相合闸试验。试验结果表明: 与随机合闸相比, 计及剩磁的空载变压器选相合闸能够有效地抑制励磁涌流, 同时验证了剩磁测量方法的有效性。最后, 针对三相联动断路器提出了相适应的空载变压器选相合闸策略, 仿真结果验证了其有效性。

**关键词:** 励磁涌流; 剩磁; 选相合闸技术; 空载变压器; 三相联动断路器

### Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux

CHEN Chuanjiang<sup>1</sup>, FANG Chunen<sup>1,2</sup>, ZENG Junlong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>, LUO Yan<sup>1,2</sup>, REN Xiao<sup>1,2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China; 2. Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving Technologies & Equipment, Chengdu 610039, China)

**Abstract:** Random energization of unloaded transformers may generate inrush currents, which easily causes protective relay mis-operation, imposes sever mechanical stresses on the transformer windings and reduces power quality of the system. Controlled switching technology is used for suppressing these inrush currents. The key to realize controlled switching is the effective estimation of the residual flux in transformer core after a transformer de-energization. Based on the analysis of the theories of controlled switching unloaded power transformer, a method of measuring the residual flux based on numerical integration is proposed. Energization of unloaded transformers is simulated with PSCAD/EMTDC, and simulation results validate the effectiveness of the controlled switching technology. Unloaded transformer controlled switching test platform is built, and the tests of random and controlled switching are conducted. The experimental results indicate that the controlled switching considering residual flux is effective in suppressing the inrush current compared with random switching, and validate the effectiveness of residual flux measurement method. Finally, the suitable controlled switching strategy of unloaded transformer with gang-operated breaker is proposed, and simulation results validate its effectiveness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477142), Sichuan Provincial Department of Education Project (No. 12ZB131 and No. 14ZB0123), and Innovation Fund of Postgraduate of Xihua University (No. ycjj2017060).

**Key words:** inrush current; residual flux; controlled switching technology; unloaded transformer; gang-operated breaker

## 0 引言

电力变压器是电力系统中的关键设备之一。由

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51477142); 四川省教育厅项目资助(12ZB131, 14ZB0123); 省部共建教育部重点实验室项目资助(SBZDPY-11-13, 14); 西华大学研究生创新基金项目资助(ycjj2017060)

于变压器励磁电感非线性以及铁芯磁通饱和特性, 随机投入空载变压器会产生幅值非常大的励磁涌流。涌流持续冲击变压器将会降低变压器使用寿命; 引发变压器差动保护误动作; 此外涌流中含有丰富的谐波成分, 将降低电网供电质量<sup>[1-5]</sup>。

针对变压器励磁涌流抑制的问题, 文献[6]利用断路器合闸电阻来限制涌流的幅值和暂态过程, 但该方法增加了投资费用和操作的复杂性; 文献[7]提

出了一种采用中性点串接电阻来限制变压器励磁涌流的方法, 但参数的整定和装置的机械实现方面都存在较大的困难; 文献[8]设计了一种基于二阶欠阻尼电路实现励磁涌流的抑制, 但只进行了理论上的分析。文献[9]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。虽然这些方法对抑制励磁涌流具有一定的效果, 但也是不可靠的或是昂贵的。随着断路器永磁机构、电机操动机构等可控操动机构的快速发展, 选相开关技术的应用快速增长<sup>[10-12]</sup>。采用选相开关技术, 在铁芯中的预感应磁通与剩磁相等时投入变压器, 可以有效地抑制空载变压器励磁涌流<sup>[13-15]</sup>。

铁芯剩磁的测量是选相合闸空载变压器的关键。文献[16]利用电磁暂态仿真建立了变压器剩磁-电流的计算模型, 通过对电流信号的分析得到环形变压器铁芯的剩磁; 文献[17]则在磁性材料 Preisach 模型上推导出了分段计算铁芯剩磁的数学关系式, 利用变压器分闸相位与励磁电流联系, 结合磁滞回线近似计算剩磁; 文献[18]根据变压器空载合闸后一次侧的电压、电流数据与合闸角寻找铁芯饱和时刻来估计变压器铁芯剩磁。上述方法的共同点是获取模型参数的过程复杂, 对于实际工程不是很适用。

本文首先分析了计及剩磁的选相合闸空载变压器的基本原理, 并通过仿真分析验证选相合闸技术的有效性; 提出利用绕组电压积分来预估铁芯剩磁的方法, 搭建了动模试验平台, 对选相合闸技术以及剩磁测量方法进行试验验证; 最后, 针对三相联动断路器提出了相适应的空载变压器选相合闸策略, 并进行了仿真验证。

## 1 选相合闸与剩磁测量基本原理

### 1.1 空载变压器选相合闸

当空载变压器投入时, 由于变压器励磁电感非线性以及铁芯磁通饱和特性, 变压器铁芯磁通迅速饱和, 产生幅值很大的励磁涌流。

选相合闸空载变压器抑制励磁涌流的实质就是控制断路器在铁芯剩余磁通和预感应磁通(合闸瞬间电压源在绕组内所产生的感应磁通)相等的相位合闸, 此时合闸铁芯磁通不会发生突变, 防止铁芯饱和, 从而有效地抑制空载变压器合闸涌流, 其基本原理如图1所示。

### 1.2 剩磁测量方法

当变压器空载运行时, 设其一次侧绕组的感应电动势瞬时值为  $e_1$ , 铁芯磁通瞬时值为  $\Phi$ , 绕组匝数为  $N$ , 根据法拉第电磁感应定律, 则有

$$e_1(t) = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

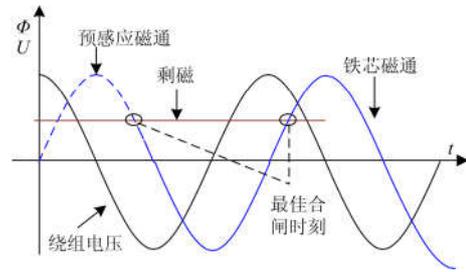


图1 考虑剩磁的空载变压器选相合闸原理

Fig. 1 Principle of controlled unloaded transformer switching considering residual flux

对等式两边积分处理得铁芯磁通瞬时值为

$$\Phi(t) = \Phi(0) - \frac{1}{N} \int_0^t e_1(t) dt \quad (2)$$

式中,  $\Phi(0)$ 为积分运算时的铁芯磁通初值。

通过绕组电压积分计算磁通时, 需要注意积分算法初值的选择, 根据积分信号过零时微分信号为峰值的原理, 本文的积分下限选取绕组电压的峰值时刻  $t_0$ , 此时磁通为零, 即以零初值开始积分。积分上限应选取变压器切除后绕组电压稳态零值点时刻  $t_1$ 。根据磁链守恒定律, 分闸后铁芯内磁通不会下降为零, 铁芯内存在剩余磁通为

$$\Phi_r = -\frac{1}{N} \int_{t_0}^{t_1} e_1(t) dt \quad (3)$$

由于变压器励磁电感、绕组和线路分布电容的存在, 断路器在开断空载变压器后, 绕组电压不会立即降为零。变压器绕组上会出现暂态电压  $U_T$ , 经一段时间后才能达到稳态零值<sup>[19]</sup>。因此利用电压积分预估铁芯剩磁时, 需要电压采集系统对分闸过程中的暂态电压进行特征参数提取, 求取暂态电压的衰减时间, 获得电压积分上限。图2所示为空载变压器开断等效电路。

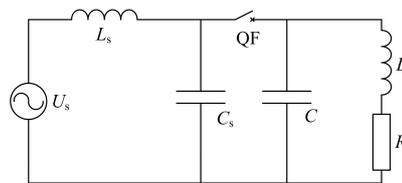


图2 开断单相空载变压器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of single phase unloaded transformer de-energization

图中,  $L_s$ 为系统电源和线路电感,  $C_s$ 为母线对地杂散电容,  $C$ 为变压器等值对地电容,  $R$ 为变压器绕组等效电阻,  $L$ 为空载变压器等效励磁电感, QF为高压交流断路器。设  $U_T$ 为电流开断后电容  $C$

上的电压, 根据基尔霍夫电压定律有

$$LC \frac{d^2 U_T}{dt^2} + RC \frac{dU_T}{dt} + U_T = 0 \quad (4)$$

解式(4)的微分方程可得变压器绕组上的暂态电压为

$$U_T(t) = kU_m e^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \beta) \quad (5)$$

式中:  $k$  为电压幅值系数;  $U_m$  为系统电压幅值;  $\omega_d$  为振荡角频率;  $\alpha$  为振荡电压衰减因子。

$$\begin{cases} \alpha = \frac{R}{2L} \\ \omega_d = \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}} \end{cases} \quad (6)$$

分析式(5)可知暂态电压呈现指数衰减振荡。为了得到积分上限, 首先求取暂态电压的绝对值曲线, 找到曲线的所有极值点; 然后对极值点包络线进行指数衰减拟合。在进行指数衰减拟合分析时, 采用的数学模型为

$$U = kU_m e^{-\alpha(t-t_{open})} \quad (7)$$

式中:  $t_{open}$  为断路器的分闸时刻;  $k$  和  $\alpha$  的值可以在进行指数衰减拟合时获得。积分上限取  $U \leq \varepsilon$  的时刻 ( $\varepsilon$  是一个非常小的数, 本文取  $\varepsilon=0.01$ ), 如图 3 所示。

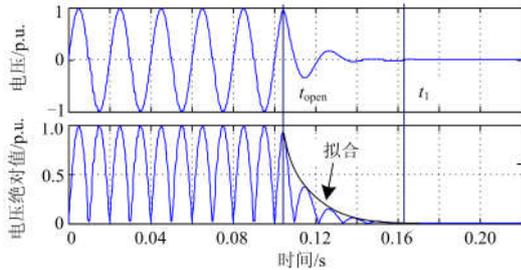


图 3 积分上限的计算方法

Fig. 3 Calculation method of integral upper limit

剩磁测量的原理如图 4 所示。变压器绕组电压数据由示波器测量并记录, 数据处理过程和积分计算均在 Matlab 软件中完成。

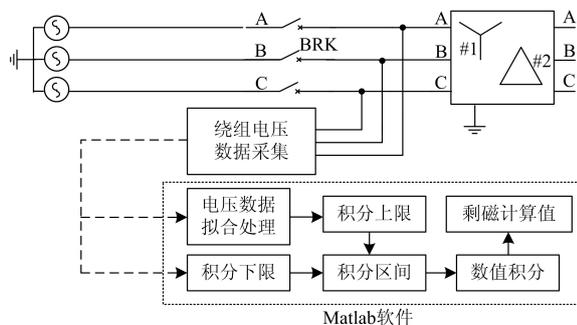


图 4 变压器剩磁的测量方法

Fig. 4 Estimation method of residual flux

## 2 选相合闸仿真与分析

基于 PSCAD/EMTDC 软件建立了合闸空载变压器暂态仿真模型。选取软件中精度较高的变压器统一等效磁路模型(UMEC)进行仿真。UMEC 变压器模型是完全基于铁芯的几何结构, 除考虑不同相绕组间的磁耦合关系外, 还计及了同相绕组的磁耦合关系、铁芯非线性等, 与工程实际吻合较好, 仿真时在一相低压侧进行空载合闸操作, 在低压侧绕组上引入可控直流电流源以模拟合闸前铁芯剩磁<sup>[20]</sup>。模型中变压器主要参数如表 1 所示。

表 1 变压器主要参数

额定电压/kV	联结组别	空载损耗/kW	短路损耗/kW	空载电流/%	短路阻抗/%
10/0.4	DYn11	0.15	0.78	3.5	3.96

分别仿真了不同剩磁水平情况下随机合闸、不考虑剩磁在电压峰值处合闸以及考虑剩磁的选相合闸, 仿真结果如图 5 所示, 其中典型的励磁电流波形如图 6 所示。

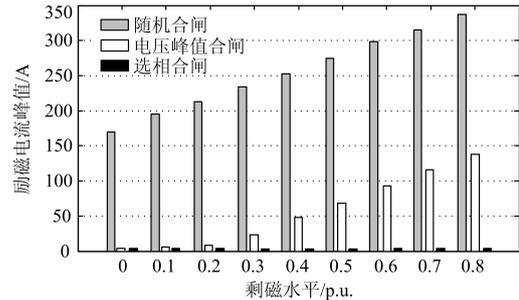


图 5 不同剩磁水平下的励磁涌流

Fig. 5 Inrush currents of unloaded power transformer with different residual flux levels

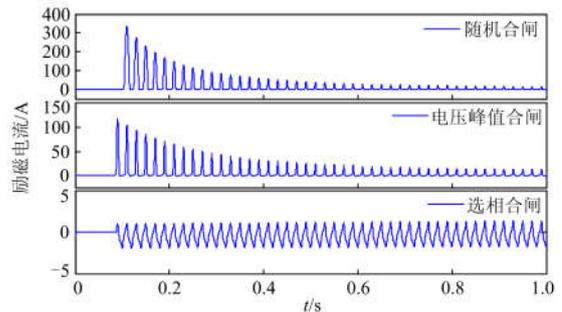


图 6 典型的空载变压器合闸励磁电流波形

Fig. 6 Typical magnetic current waveforms of unloaded transformer energization

由仿真结果分析可知, 在铁芯剩磁存在的情况下, 随机合闸会导致变压器绕组出现较大幅值的励

磁涌流; 不考虑剩磁的影响, 在电压峰值处合闸, 在剩磁较小的情况下对抑制涌流有一定的效果, 但剩磁较大时依然会产生较大幅值的励磁涌流; 而考虑剩磁的选相合闸, 能够有效地抑制空载变压器的合闸励磁涌流。因此, 在选相合闸空载变压器时必须考虑剩磁的影响, 以达到最佳的抑制效果。

### 3 试验验证

#### 3.1 试验方案及平台

为了验证剩磁测量方法的正确性以及选相合闸技术抑制励磁涌流的有效性, 搭建了动模试验平台。测试电路如图 7 所示。系统电压从动力电源柜接入, 经调压器进行调压; 断路器由基于模糊控制和脉宽调制技术的同步开关控制器进行选相合闸, 选相合闸参考电压经电压互感器接入同步开关控制器。试验用变压器的主要参数如下: 型号为 S7-30/10, 额定容量为 30 kVA, 额定电压为 10 kV/0.4 kV, 额定电流 43 A/1.73 A, 联结组别 Dyn11, 空载电流为 3.5%, 空载损耗为 150 W, 短路损耗为 780 W, 阻抗电压为 3.96%。在进行断路器的选相分/合闸试验时, 只接入了变压器 A 相, 其余两相悬空。分合闸过程中的绕组电压  $u_t$  和励磁电流  $i_m$  分别由电压探头和电流探头进行测量, 经由数字存储示波器进行采样。

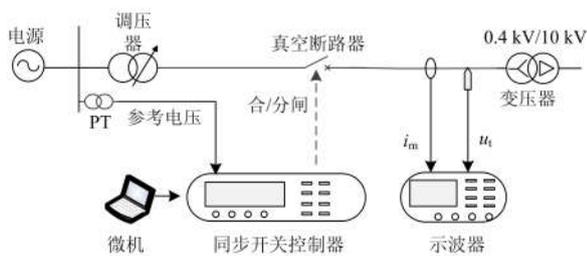


图 7 试验接线示意图

Fig. 7 Test circuit

#### 3.2 试验过程及结果分析

##### 3.2.1 随机合闸试验

操作真空断路器对空载变压器进行随机合闸并记录励磁电流波形, 如图 8 所示。变压器三相均出现了高幅值的励磁涌流。其中 C 相产生的涌流峰值最大约为 334 A, A 相次之, B 相最小也达到了 170 A, 试验结果显示随机合闸空载变压器易引发高达数倍稳态电流的励磁涌流。

##### 3.2.2 变压器切除后铁芯剩磁的测量

实验时, 先在较低的电压水平下使断路器处于合闸状态, 避免随机合闸产生较大的励磁涌流。然后, 调节调压器使电压缓慢上升至 230 V (相电压)。最后, 通过同步开关控制器控制断路器的分闸时刻。

用示波器记录分闸过程刻变压器绕组电压的暂态波形。根据第 1.2 节的剩磁测量方法计算出每次分闸后的剩磁大小和极性。表 2 列出了其中 32 组不同分闸时刻对应的剩磁测量值。

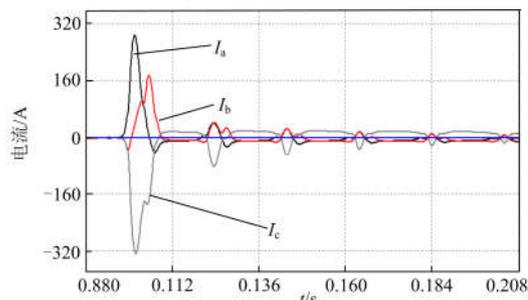


图 8 随机合闸试验波形

Fig. 8 Test waveform of random energization

表 2 剩磁测量结果

Table 2 Results of residual flux measurement

序号	分闸时刻/ms	剩磁/p.u.	序号	分闸时刻/ms	剩磁/p.u.
1	1.50	-0.31	17	4.60	0.07
2	1.60	-0.34	18	4.80	-0.05
3	1.70	-0.35	19	5.30	-0.03
4	1.90	-0.29	20	5.40	0.02
5	2.00	-0.22	21	5.70	0.04
6	2.20	-0.14	22	5.80	0.13
7	2.70	-0.25	23	5.90	0.18
8	2.80	-0.33	24	6.40	0.18
9	3.00	-0.32	25	6.80	0.23
10	3.20	-0.20	26	7.00	0.29
11	3.30	-0.13	27	7.40	0.31
12	3.40	-0.19	28	7.90	0.35
13	3.80	-0.17	29	8.00	0.60
14	3.90	-0.07	30	8.40	0.54
15	4.00	-0.09	31	8.80	0.39
16	4.40	-0.08	32	9.60	0.48

由表 2 可知, 试验中变压器铁芯剩磁分布于  $[-0.35 \text{ p.u.}, 0.6 \text{ p.u.}]$  范围内, 分闸相位越靠近电压零点, 剩磁越大; 分闸相位靠近电压峰值处, 变压器铁芯剩磁较低。

##### 3.2.3 选相合闸时刻的确定

选相合闸控制系统以系统电压零点为参考零点计算合闸所需的延时, 本文所用控制系统以电压负向过零点为参考零点, 设参考电压为

$$u_{\text{ref}} = -U_m \sin(\omega t) \quad (8)$$

根据磁通和电压关系, 则预感应磁通为

$$\Phi_{\text{prosp}} = \Phi_m \cos(\omega t) \quad (9)$$

理想合闸时刻为预感应磁通和剩磁相等的时刻, 即  $\Phi_r = \Phi_m \cos(\omega t)$ , 所以理想合闸时刻为

$$t = \arccos(\Phi_r / \Phi_m) / 2\pi f \quad (10)$$

受断路器合闸时间的分散性以及触头预击穿特性的影响, 断路器实际合闸时间与控制器预设合闸时间会出现一定的偏差。本文试验系统的电压水平较低, 合闸时间精度受预击穿的影响很小, 主要受合闸时间分散性的影响。试验用断路器的合闸时间精度测试结果如图9所示。

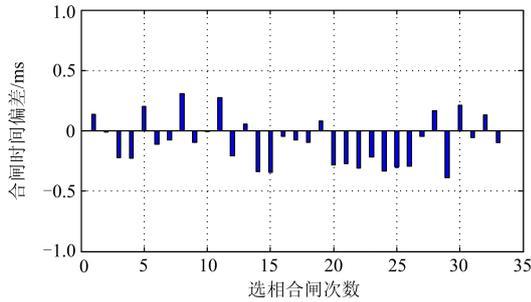


图9 合闸时间偏差分布

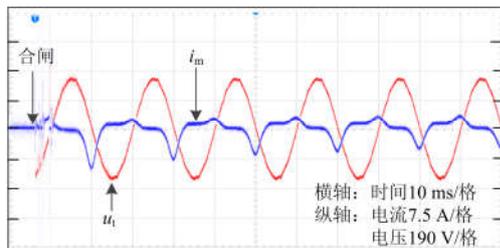
Fig. 9 Closing time deviation distribution

从图9可以看出, 该断路器的大部分合闸时间偏差在±0.3 ms以内, 远高于国际大电网会议(CIGRE)的±1 ms内的控制误差要求, 满足选相合闸的要求。

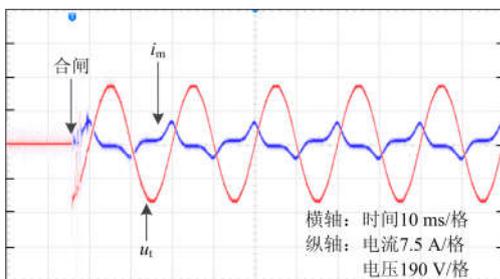
### 3.2.4 选相合闸试验

根据变压器切除后的铁芯剩磁水平, 在上位机界面输入最佳合闸时刻进行选相合闸操作。剩磁为-0.35 p.u.、-0.20 p.u.、0.31 p.u.时的选相合闸电流 $i_m$ 、电压 $u_t$ 波形如图10所示。

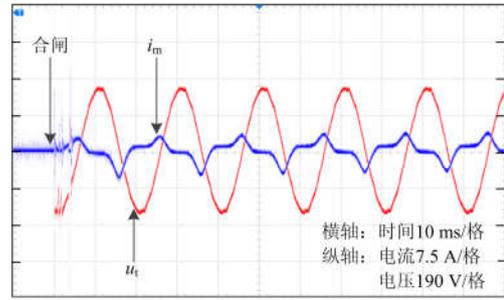
分析图10所示的试验结果可知, 由于合闸时间的偏差, 上述三次计及剩磁的选相合闸励磁涌流峰值分别为10.3 A、7.5 A、5.7 A, 比稳态时的励磁电流稍大。但三次选相合闸均可以将励磁涌流峰值抑制在额定电流的35%以内, 没有高幅值的励磁涌流



(a) 剩磁为-0.35 p.u.的选相合闸波形



(b) 剩磁为-0.20 p.u.的选相合闸波形



(c) 剩磁为0.31 p.u.的选相合闸波形

图10 计及剩磁的选相合闸典型电流电压波形

Fig. 10 Typical current and voltage waveforms of controlled energization with residual flux

产生。为进一步验证剩磁测量方法的正确性以及选相合闸技术抑制励磁涌流的有效性, 对10 kV油浸式变压器进行了64次选相合闸试验。

以变压器额定电流43 A为基准, 图11给出了试验中64次选相合闸操作的励磁涌流峰值与额定电流占比分布图。可以看出励磁电流峰值主要分布于 $0.1I_N \sim 0.7I_N$ 范围内, 平均值在 $0.26I_N$ 左右。

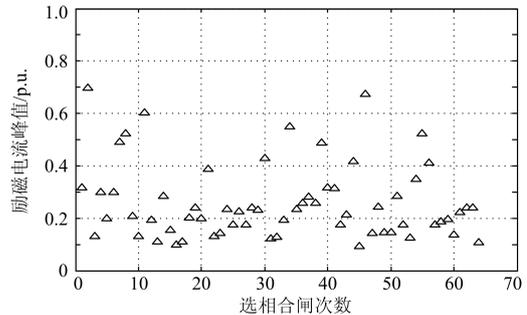


图11 励磁涌流峰值分布图

Fig. 11 Distribution of magnetic inrush current

上述试验结果表明, 计及剩磁的选相合闸能够有效地抑制空载变压器励磁涌流, 实现空投变压器的无冲击平滑过渡。验证了本文所用剩磁测量方法的正确性和选相合闸技术的有效性。

## 4 三相联动断路器的选相合闸策略

在电力系统中还广泛存在三相联动断路器, 无法单独控制每相的合闸时刻。因此, 每相剩磁与其对应的预感应磁通不可能同时相等。本文通过求解每相剩磁与其对应的预感应磁通偏差之和最小的时刻, 提出了针对三相联动断路器的空载变压器选相合闸策略, 如图12所示。

图中,  $\Phi_{Ar}$ 、 $\Phi_{Br}$ 、 $\Phi_{Cr}$ 分别为三相剩磁, 且 $|\Phi_{Ar}|$ 、 $|\Phi_{Br}| \geq |\Phi_{Cr}|$ ,  $\Phi_{Ap}$ 、 $\Phi_{Bp}$ 、 $\Phi_{Cp}$ 分别为三相预感应磁通。在 $t_{opt}$ 时刻同时合闸可以使得各相剩磁与其对应的

预感应磁通偏差相对较小。由图12可知, 最佳合闸时刻 $t_{opt}$ 为C相(剩磁水平最低)剩磁与预感应磁通相等的时刻。利用第2节建立的仿真模型对此策略进行了仿真验证, 设置合闸前A、B、C三相铁芯剩磁分别为0.7 p.u.、-0.5 p.u.、-0.2 p.u., 随机合闸与选相合闸过程的励磁电流波形如图13所示。

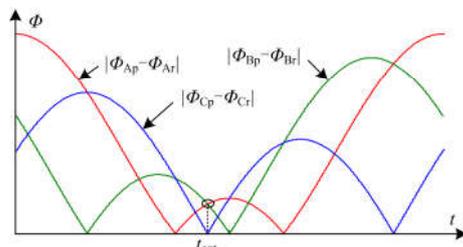
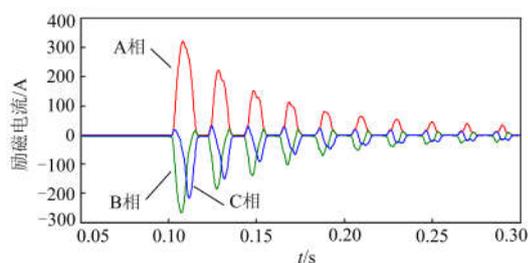
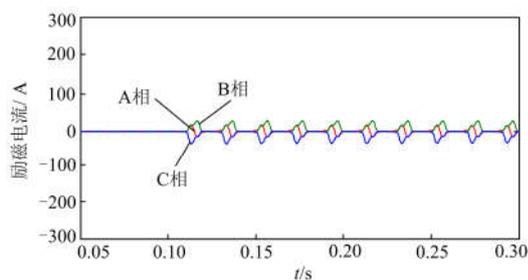


图 12 三相同步合闸时刻

Fig. 12 Optimal simultaneous closing instant of three phases



(a) 随机合闸



(b) 选相合闸

图13 随机合闸与选相合闸过程的励磁电流

Fig. 13 Magnetizing currents during random and controlled energization

由图13可知, 随机合闸产生了峰值高达332 A的励磁涌流; 采用针对三相联动断路器的选相合闸策略进行选相合闸, 合闸过程励磁电流峰值仅为34 A。因此, 本文提出的针对三相联动断路器的选相合闸策略可以显著减小空载变压器励磁涌流。

## 5 结论

1) 提出基于数值积分的铁芯剩磁测量方法, 通过采集分闸过程绕组电压数据, 导入Matlab处理并积分, 得到变压器分闸后的铁芯剩磁。

2) 搭建了选相投切空载变压器的试验平台, 试

验结果表明本文提出的剩磁测量方法可以有效预估变压器分闸后的铁芯剩磁; 计及剩磁的选相合闸能够显著地抑制励磁涌流。

3) 提出了针对三相联动断路器的空载变压器选相合闸策略, 仿真结果验证了其有效性。

## 参考文献

- [1] 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.
- [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] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 28-33.  
FU Wei, ZHAO Lihua, LIANG Yong, et al. Study on no-load closing inrush current of transformer group and suppression measures[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 28-33.
- [4] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [5] 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.
- [6] 李琥, 周海洋. 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.  
LI Hu, ZHOU Haiyang. Effect of closing resistor inside circuit breaker on inrush current of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 16-18.
- [7] 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.
- [8] 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, 35(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, 35(11): 141-149.
- [9] 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.
- [10] 杨庆, 张照辉, 席世友, 等. 相控断路器投切 10 kV 并联电容器的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1739-1745.  
YANG Qing, ZHANG Zhaohui, XI Shiyu, et al. Application of 10 kV switching shunt capacitor banks with controlled vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1739-1745.
- [11] 程婷婷, 李志兵, 柏长宇, 等. 基于 SF6 断路器动态击穿特性的选相合闸技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1805-1810.  
CHEN Tingting, LI Zhibing, BAI Changyu, et al. Synchronous closing technology based on dynamic breakdown characteristics of SF6 circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1805-1810.
- [12] 颜湘莲, 李志兵, 王承玉, 等. 特高压输电工程中选相断路器开合电容器组特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1772-1778.  
YAN Xianglian, LI Zhibing, WANG Chengyu, et al. Analysis on characteristics of phase-selectable circuit breaker for switching capacitor banks in UHV power transmission project[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1772-1778.
- [13] 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.
- [14] 王昊晴, 杨海芳, 林金阳, 等. 真空断路器选相合闸空载变压器的试验研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 172-177.  
WANG Haoqing, YANG Haifang, LIN Jinyang, et al. Experimental study on the phase control closing of vacuum circuit breakers for no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 172-177.
- [15] BRUNKE J H, FROHLICH 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.
- [16] 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.
- [17] 李钜, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 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.
- [18] 邢运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁心剩磁估量[J]. 电网技术, 2011, 35(2): 169-172.  
XING Yunmin, LUO Jian, ZHOU Jianping, et al. Estimation of remanence in transformer core[J]. Power System Technology, 2011, 35(2): 169-172.
- [19] 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.
- [20] 焦在滨, 行武, 王钊, 等. 变压器励磁涌流负序二次谐波特征及机理[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 146-151.  
JIAO Zaibin, XING Wu, WANG Zhao, et al. Features and mechanism of negative sequence second harmonics of magnetizing inrush current in transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 146-151.

收稿日期: 2017-12-02; 修回日期: 2018-02-27

作者简介:

陈川江(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能化电器理论及应用; E-mail: chuanjiang94@163.com

方春恩(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为智能化电器理论及应用。E-mail: fangchunen@163.com

(编辑 周金梅)