

1 000 kV 变压器励磁涌流的抑制策略研究

李亚莎, 敬禹圻

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 变压器励磁涌流作为一种常见的短时高幅值电流波动, 常对电气设备造成冲击。为了减少这一冲击, 文中研究了不同合闸策略对 1 000 kV 变压器励磁涌流的影响。采用 ATP 暂态仿真软件模拟了多级合闸时的电流波形及涌流参数。计算结果显示, 多级合闸相较单级合闸不仅能够有效降低涌流峰值, 还能加速电流的衰减过程, 优化了系统的运行稳定性。通过对不同合闸相角和合闸电阻组合的分析, 最终确定了最有效的涌流抑制组合为断路器延时合闸, 采用 900 Ω 合闸电阻投入 30 ms 且在合闸角度为 90°时合闸。合适的合闸策略能够显著改善变压器励磁过程中的电流特性, 具有较强的工程应用意义。

关键词: 励磁涌流; 多级合闸; 合闸策略; 特高压

Research on Suppression Strategy of Excitation Inrush Current of 1 000 kV

Transformer

LI Yasha, JING Yuqi

(College of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443000, China)

Abstract: As a common short-time high amplitude current fluctuation, transformer excitation inrush current often causes impact to electrical equipment. In order to reduce this impact, the effects of different switching strategies on the inrush current of 1 000 kV transformers are studied. The current waveform and inrush current parameters of multistage closing are simulated by ATP transient simulation software. The calculation results show that multistage closing can not only effectively reduce the peak of inrush current, but also accelerate the current decay process, and optimize the operating stability of the system. Through the analysis of different closing phase Angle and closing resistance combination, finally, it is determined that the most effective inrush current suppression combination is the delay closing of the circuit breaker, which uses 900 Ω closing resistance to put in 30 ms and closes at 90°. Suitable closing strategy can improve the current characteristics of transformer during excitation, and has strong engineering application significance.

Key words: excitation inrush current; multistage closing; closing strategy; extra-high voltage

0 引言

特高压输电技术因其可靠性和经济性而受到大力发展以满足中国持续增长的用电需求。因此, 作为特高压输电中不可或缺的器件, 变压器在其投运过程中的遇到的各种涌流问题越来越受到关注。励磁涌流是在变压器合闸瞬间由于剩磁与铁心饱和出现的高幅值、短时间的电流, 直接影响系统运行安全和设备寿命。变压器稳态运行时励磁涌流一般不超过额定电流的 2%~5%, 现代大型变压器的励磁涌流通常不大于额定电流的 1%, 当变压器在空载状态下突然并网时, 由于铁心的非线性特性, 其合闸瞬间产生的励磁涌流幅

值可能高达稳态运行时的数十倍甚至更高^[1]。此时这个瞬间的高幅值的涌流可能导致继电保护误动作, 从而导致断路器非正常断开, 甚至对变压器造成损害。一般情况下励磁涌流的衰减速度往往比短路电流衰减慢一些, 可能持续几个电网周期甚至几十秒钟^[2]。长时间存在的涌流会对电网产生更强烈的冲击, 延长系统恢复的时间, 并可能影响电力系统的稳定运行。

为抑制励磁涌流, 学者们提出了多种控制策略, 主要包括延时合闸、剩磁评估、合闸电阻设计及预先消磁等手段。合闸控制方面, 基于延时合闸的选相合闸技术可以通过精确控制各相合闸

时刻,有效削弱初始励磁涌流^[3-4]。结合剩磁评估与合闸电阻协同优化的方法进一步改善了励磁涌流特性,并在 PSCAD 仿真平台上得到了验证^[5]。基于剩磁测算的选相合闸技术经仿真与现场试验证明了其实用性^[6]。此外,基于磁偏流仿真的选相合闸技术可根据残余磁通状态精确定合闸时刻^[7];基于 DSP 的分相合闸控制方案展示了较好的自动化水平,尽管性能受限于断路器操作精度^[8]。选相合闸技术的发展也促进了永磁机构真空断路器在分相合闸应用中的推广^[9]。

由于变压器铁心磁特性高度非线性,准确建模较为困难,因此多采用仿真技术分析励磁涌流及其控制效果。基于改进的 Jiles-Atherton 磁滞模型,可更真实描述铁心磁滞特性,并分析预消磁、合闸电阻及选相合闸对涌流的影响^[10]。EMTP 平台通过折线段建模法揭示了合闸电阻对涌流的作用机制^[11];PSCAD 平台中的 UMEC 模型则广泛应用于选相合闸策略验证^[12]。同时,利用 MATLAB/PSB 展示了不同合闸角度和接线组别对涌流波形的影响^[13]。此外,通过推导磁通、电压与涌流关系的理论模型,定量揭示了涌流峰值与衰减特性^[14]。

在剩磁估算方面,已有学者推导了剩磁量化的计算公式^[15],并提出了基于暂态电压的剩磁估计方法,在考虑分布电容效应的基础上显著提升了评估精度^[16]。针对剩磁抑制,尽管基于磁滞回线的消磁仿真方法表现出一定优势,但实际工程应用仍较为有限^[17-18]。

在系统参数敏感性分析方面,通过对 500 kV 变压器模型的仿真研究发现,CVT 及断路器并联电容对涌流特性影响显著,提出了通过降低并联电容或调整励磁拐点优化系统暂态响应的方法^[19]。

在上述研究工作的基础上,文中进一步引入多级合闸控制策略,相较于已有文献中较多关注

的单一参数优化,文中注重探索不同合闸电阻值、合闸相角及电阻投入时间的组合变化条件下对励磁涌流的协同抑制作用。另外文中采用 ATP 仿真软件中较新的拟非线性变压器模型 XFMR,相比之前研究更多使用的 BCTRAN 变压器模型,能够较真实地模拟铁心饱和、涌流、非线性特性,更适合高压、超高压系统的暂态分析。

1 励磁涌流产生机理和分析

1.1 励磁涌流产生机理

在变压器空载合闸过程中,根据磁链守恒定律,铁心中的工作磁链会产生暂态直流偏置,其大小依赖于合闸时的相角^[20]。以图1单相变压器为例,假设合闸时刻变压器铁心剩磁为 ψ_r ,外施电压有效值为 U_m ,角频率为 ω ,初始相角为 α ,合闸后回路电压方程为

$$N_1 \frac{d\psi}{dt} + Ri_1 = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

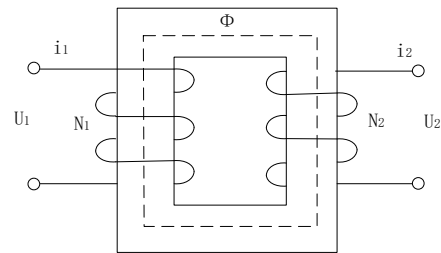


图 1 单相变压器铁心

Fig. 1 Single phase transformer core

此时变压器铁心磁链为

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (2)$$

为稳态磁通幅值,其大小见式(3)

$$\psi_m = \frac{U_m}{N_1 \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R}{L}\right)^2}} \quad (3)$$

式(2)中 $-\psi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通分量,

$(\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{R}{L}t}$ 为暂态磁通分量,两者均受合闸相角的影响,同时,铁心内的磁通峰值可达到 $2\psi_m + \psi_r$,而当磁通趋向饱和时,所需的励磁电流也会随之增加,说明励磁涌流与磁通饱和程

度呈现出正向关联^[21]。在变压器空载合闸的瞬间, 暂态磁通的迅速上升, 铁心会快速进入饱和状态, 从而触发励磁涌流的产生。为了充分发挥铁心的优异磁导性能并防止磁化曲线进入饱和状态, 变压器设计中通常将正常工作点设置在磁化曲线拐点附近^[22]。当稳态磁通与断电后铁心内残留的剩磁同向叠加时, 变压器会迅速达到磁饱和状态, 此时即使是极微小的磁通波动也可能引发显著的励磁涌流^[23]。由上述分析可以得到励磁涌流表达式为

$$i_1 = N_1 \frac{-\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) e^{-\frac{R}{L}t}}{L} \quad (4)$$

考虑到实际中变压器参数 R_1 远小于 ωL_1 , 即 $\arctan(L_1/R_1) \approx 90^\circ$, 则合闸瞬间时铁心中磁通瞬时值为

$$\psi = -\psi_m \cos(\omega t + \alpha) + (\psi_r + \psi_m \cos \alpha) \quad (5)$$

如果在 $\alpha=0^\circ$ 时合闸, 则铁心中磁通经过半个周期后将达到最大值(最大可达 3 倍额定磁通), 此时变压器严重饱和, 励磁涌流急速变大^[20]; 而 $\alpha=90^\circ$ 时合闸即可有效减少涌流。

由此分析可得涌流的大小受到磁滞回线、剩磁、电网条件、变压器参数以及合闸相位的影响, 特别是当合闸相位接近电压零值或铁心处于饱和状态时, 涌流幅值会显著增大^[24]。

1.2 特高压励磁涌流特殊性

1 000 kV 特高压励磁涌流相较于常规电压等级具有更高的峰值和更强的冲击特性, 由于变压器铁心体积庞大、磁化特性更显著, 极易进入深度饱和状态, 导致涌流幅值更大、衰减时间也明显延长。同时, 其谐波含量更丰富, 尤其是 2 次谐波占比更高^[25], 这可能影响继电保护的可靠性, 由于涌流信号与故障信号叠加, 容易引起保护装置误动, 使传统谐波制动算法面临挑战^[26]。

1.3 励磁涌流的抑制措施分析

目前针对励磁涌流的抑制措施普遍采用两类策略: 一是通过优化内部结构, 二是利用外部电

路调控。内部结构优化主要依赖于对变压器设计及性能的改进, 从而在根源上减少励磁涌流的发生。例如, 通过降低变压器磁化曲线的常规工作点、重新优化一次和二次侧绕组的布置, 以及应用虚拟气隙技术等措施等^[27]。而对变压器外部电路的调控可以采取在低压侧并联电容器、在断路器合闸时引入适当电阻, 或采用相控合闸技术等方法^[28]。

2 研究方法

本研究以 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压工程为参考, 使用 ATP 仿真软件构建了特高压线路仿真模型, 模拟了多级合闸及不同合闸相位对励磁涌流的影响。研究方法主要包括仿真模型的搭建、多级合闸策略的设计, 以及对不同合闸相位和时间间隔下涌流特性变化的分析。研究结果证明, 多级合闸在降低励磁涌流峰值和优化电流衰减过程中具有显著优势。

2.1 仿真模型

模拟的特高压仿真系统见图 2, 由一个等效电源, 一条 1 000 kV 输电线路, 一台断路器, 一组变压器组成。右端为 LCC 模块模拟的输电线路, 采用 Jmarti 模型。线路参数及杆塔参数见表 1。本实验采用了 XFMR 变压器模型, 这是一个由 3 台变压器单相变压器组成的变压器组。励磁支路是内嵌在模型里, 利用软件内部磁化方程 Frolich 自动拟合变压器的磁化曲线, 在本研究中非线性电感选用了 Pseudo-nonlinear98 模型。变压器额定参数如下: 容量 3 000 MVA、三相电压参数为 $(1\ 050/\sqrt{3})/(511/\sqrt{3})/110$ kV。对于电源部分, 使用了 500 kV 电压源, A 相初始相位为 90° 。

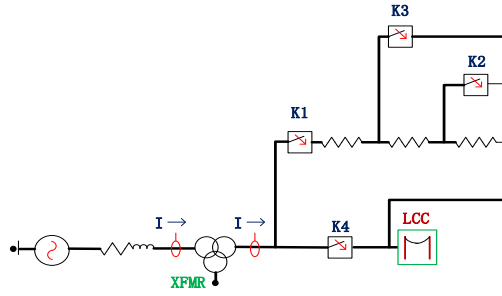


图 2 本研究使用的特高压仿真系统

Fig. 2 The UHV simulation system is used in this study

表 1 特高压模型的线路与杆塔参数

Table 1 Line and tower parameters of UHV model

编号	线路				杆塔				
	R_{in}/cm	R_{out}/cm	$R_{esis}(DC)/(\Omega \cdot km^{-1})$	H_{oriz}/m	V_{tower}/m	V_{mid}/m	S_{epar}/cm	相位/(°)	NB
1	0	1.4	0.06	-10	100	90	40	0	8
2	0	1.4	0.06	0	100	90	40	0	8
3	0	1.4	0.06	10	100	90	40	0	8
0	0	0.5	0.28	0	100	90	0	0	1

注： R_{in} 为送端侧等效串联电阻； R_{out} 为受端侧的等效串联电阻； $R_{esis}(DC)$ 为导线的直流电阻值； H_{oriz} 为相导线之间的水平几何间距； V_{tower} 为杆塔对地的等效电位节点； V_{mid} 为杆塔高度方向的中间电位节点； S_{epar} 为杆塔与导线之间的几何分离距离；相位为三相导线在空间排列中的相序编号； NB 为杆塔模型中的分段数量。

2.2 变压器建模细化

文中对 XFMR 变压器模型进行了细化，包括选用更准确的磁饱和和特性曲线、修正 FinalSlope(最终斜率电感 L_a)等。

基于 Frolich 方程 $\psi = \frac{i}{a+bi+c\sqrt{i}} + La * i$ ，选

择定义 9 个点(points in saturation)来描述铁心饱和的磁链-电流特性曲线，这是软件能取得最多的采样电流点，既覆盖低励磁，又覆盖极端饱和，对铁心深度饱和时的非线性特性拟合得更加准确。

L_a 是铁心完全饱和时的电感，表现为磁导率为零的介质，反映了铁心进入饱和后磁导率急剧下降的特性，对励磁涌流仿真结果具有重要影响。ATP 提供的计算公式为：

$$La = Lac - 1.5 * Lhl \quad , \quad Lac = \mu_0 \frac{N^2 A}{L} \quad ,$$

$$Lhl = \frac{Z_{short}}{2\pi f} \quad .$$

其中 Lac 为空芯电感， Lhl 为短路试验得到的电感(励磁支路电感)，根据短路试验阻抗

(P-S: 18%, P-T: 62%, S-T: 40%)以及变压器额定参数，最终将 L_a 设为 350 mH，以真实反映铁心饱和后的低磁导率特性。

2.3 合闸电阻策略

由于增加合闸电阻相当于增大了一次侧绕组的电阻，增大暂态过程励磁回路阻抗，限制励磁涌流，也可增大系统阻尼，加快励磁涌流衰减^[29]。在本实验中，断路器的操作顺序为：首先开关 K_1 、 K_2 和 K_3 依次动作，在合闸电阻预定的工作时段结束后， K_4 开关闭合，从而将含有合闸电阻的并联支路短路。

2.4 多级合闸策略

多级合闸策略的设计是通过逐步切换断路器各级的方式，分阶段切出电阻从而减少涌流的瞬态冲击，从而减小变压器初次激磁时产生的涌流。这种合闸方式避免了瞬时的高电压冲击，使得铁心逐步进入饱和状态，而不是直接进入深度饱和区^[30]。图 3(a)是单级合闸、图 3(b)是二级合闸、图 3(c)是多级合闸。相比单级合闸，涌流的衰减速度更快，持续时间更短。在仿真结果中，多级合闸通常会表现出更低的涌流峰值和更短的持续时间。

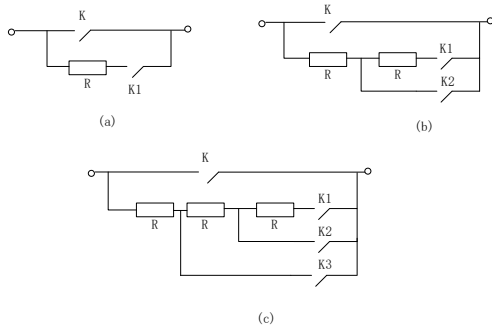


图 3 多级合闸电阻的断路器

Fig. 3 Circuit breakers with multistage closing resistance

3 仿真结果与分析

3.1 单级合闸、二级合闸与多级合闸对比

单级合闸、二级合闸与多级合闸策略下三相涌流高压侧分别的涌流峰值对比(均装设 900 欧合闸电阻)见图 4、5。从图 4、5 可以看到,从单级合闸到多级合闸,随着更多次的切换断路器各级,励磁涌流峰值逐渐降低。

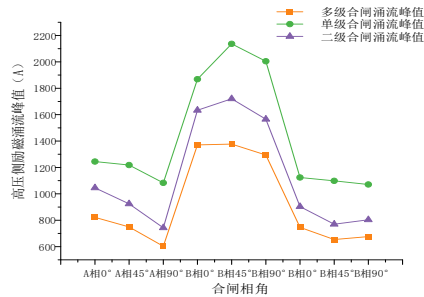


图 4 变压器高压侧三种断路器涌流峰值对比

Fig. 4 Comparison of peak inrush current of three kinds of circuit breakers on high voltage side of transformer

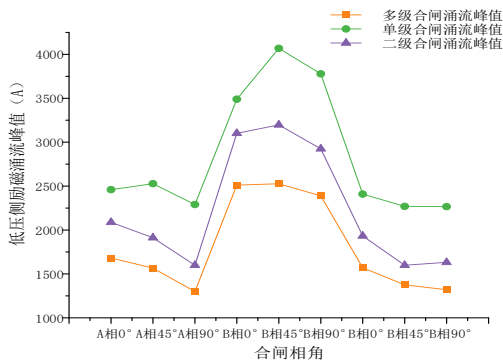


图 5 变压器低压侧三种断路器涌流峰值对比

Fig. 5 Comparison of peak inrush current of three types of circuit breakers on low voltage side of transformer

仿真结果显示,在变压器高压侧二级合闸相

较单级合闸平均涌流峰值降低 22.24%;多级合闸相较单级合闸平均涌流峰值降低 36.16%,在变压器高压侧二级合闸相较单级合闸平均涌流峰值降低 22.45%;多级合闸相较单级合闸平均涌流峰值降低 36.84%。可见采用多级合闸策略能显著降低变压器励磁涌流的峰值,从而减少电气设备所受到的热冲击和机械冲击,展现出广阔的应用前景。

3.2 合闸角度对涌流特性的影响

本研究对 0°到 180°合闸角度与 3 种合闸电阻值 (400、700、900 Ω)投入 30 ms 的情况下的励磁涌流进行了分析,实验数据见图 6、7。

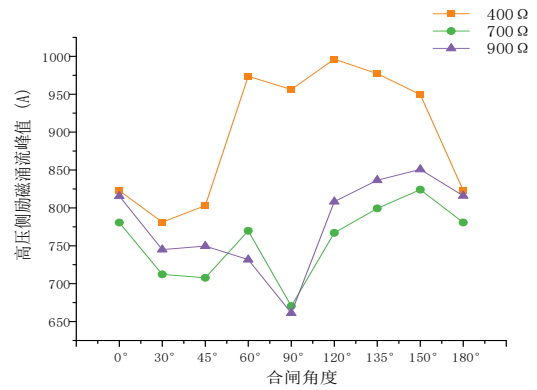


图 6 变压器高压侧涌流峰值受合闸角度影响

Fig. 6 The peak value of inrush current on the high voltage side of transformer is affected by the closing Angle

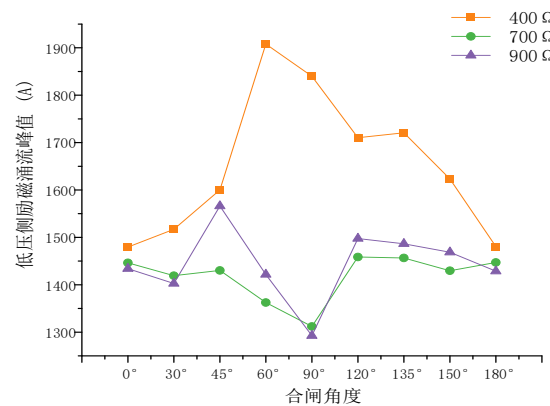


图 7 变压器低压侧涌流峰值受合闸角度影响

Fig. 7 The peak value of inrush current at low voltage side of transformer is affected by closing Angle

在变压器高压侧,当采用中等阻值(700 Ω)和较高阻值(900 Ω)时,涌流峰值在 90°合闸角度附近达到最低值,且随着合闸角度的增加,涌流峰值呈先下降后上升的趋势,特别是在 120°至 150°附

近涌流逐渐增大。相比之下,在较低阻值(400 Ω)条件下,虽然 90°附近的涌流峰值有所降低,但整体变化趋势不如中高电阻条件下明显,且最大涌流峰值出现在 120°至 135°合闸角度。由此可见,适当提高合闸电阻值不仅可以整体降低励磁涌流峰值,还能增强合闸角度对涌流抑制的敏感性,尤其在 90°合闸条件下能够实现更为理想的涌流抑制效果。

在变压器低压侧,较低阻值(400 Ω)下,涌流峰值波动较大,在 60°及 90°附近峰值最高,且规律性较弱。随着电阻增大至 700 Ω 及 900 Ω ,涌流峰值整体下降,且两侧均在 90°合闸角附近达到最低值,规律性明显增强。

此外,低压侧励磁涌流峰值普遍高于高压侧,显示出更强的磁饱和趋势和合闸角敏感性。因此,在工程应用中,推荐采用中高阻值(700 Ω 或 900 Ω)并优选 90°合闸,以有效抑制高低压侧励磁涌流,降低系统暂态冲击,提升设备运行的安全性与稳定性。

3.3 合闸阻值对涌流特性的影响

本研究选取了 3 种合闸角度(0°、45°、90°)、电阻投入 30 ms 时,分析合闸电阻值从 400 Ω 增加到 1 000 Ω 的励磁涌流变化规律,实验数据见图 8、9。

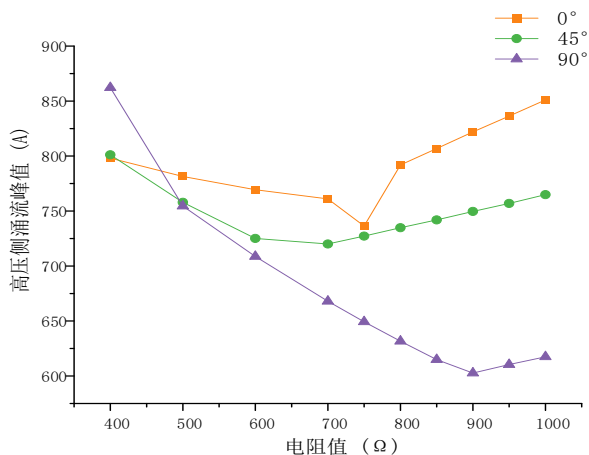


图 8 变压器高压侧涌流峰值受电阻值影响

Fig. 8 The peak inrush current of transformer high voltage side is affected by the resistance value

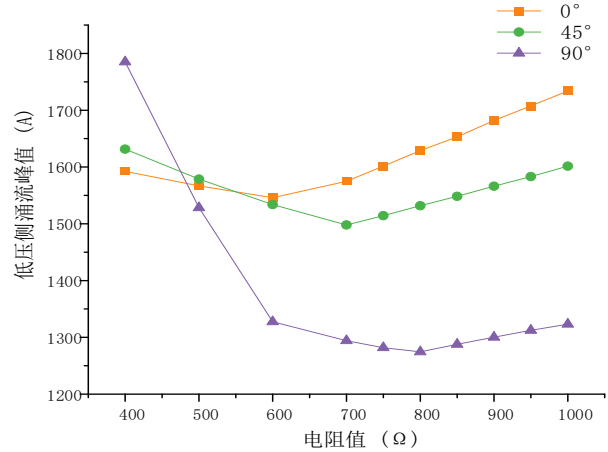


图 9 变压器低压侧涌流峰值受电阻值影响

Fig. 9 The peak value of inrush current at low voltage side of transformer is affected by the resistance value

高压侧在 0°和 45°合闸角下,涌流峰值随着电阻增大显著下降,但在阻值达到 800 Ω 之后局部出现小幅波动,存在一定反弹现象;而在 90°合闸角下,涌流峰值呈现出更加平滑、持续下降的特性,且在 900 Ω 时达到最低值 602.72 A,相比初始值下降近 28%。由此可见,选用 90°合闸并结合较高阻值(900 Ω),可更有效地抑制励磁涌流的幅值和波动性,具有更优的工程应用价值。

低压侧展现了和高压侧较为相似的趋势,在 0°与 45°合闸角下,合闸电阻值的增加整体导致涌流峰值上升,显示出电阻增大并未有效抑制低压侧励磁涌流;而在 90°合闸角下,合闸电阻的增加,尤其在 600 Ω 到 900 Ω 范围内,能够明显降低涌流峰值,最低下降至 1 281.9 A,相较初值降低约 28%。

综合比较高低压侧的抑制效果与变化趋势,确定 90°合闸角、900 Ω 阻值的组合,能够在高压低压侧同时实现较优的励磁涌流控制。

3.4 合闸电阻投入时间对涌流特性的影响

在固定合闸角度(90°)的前提下,通过改变合闸电阻的投入时间(10、20、30、40 ms),并设置 3 组电阻值(400、700、900 Ω)来测试励磁涌流变化规律,具体数据见图 10、11。

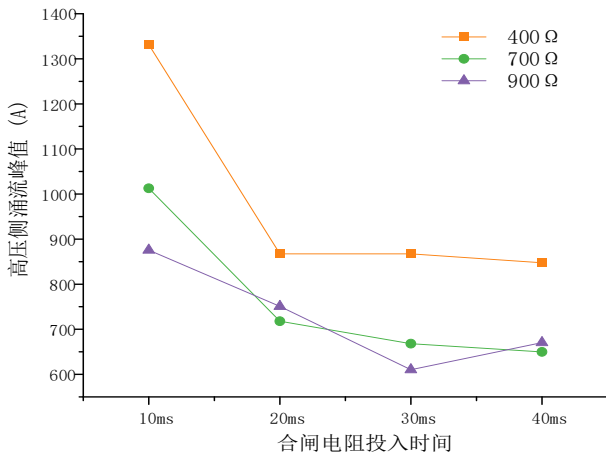


图 10 变压器高压侧涌流峰值受电阻投入时间影响

Fig. 10 The peak value of transformer high voltage side inrush current is affected by resistance input time

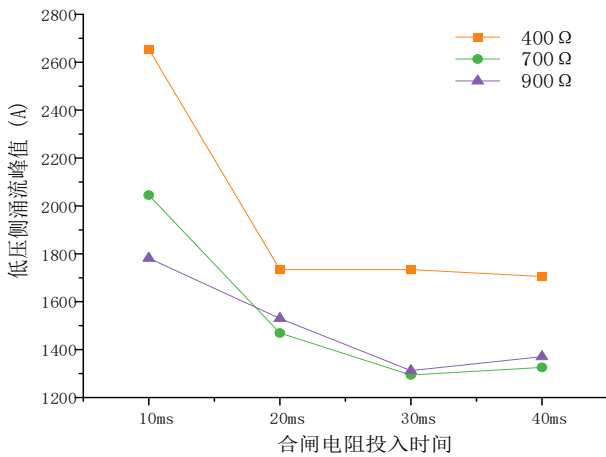


图 11 变压器低压侧涌流峰值受电阻投入时间影响

Fig. 11 The peak value of inrush current at low voltage side of transformer is affected by the time of resistance Input

观察高压侧三相励磁涌流峰值的变化趋势可得到随着电阻投入时间增加，涌流峰值呈明显下降趋势，尤其在 10 ms 至 20 ms 之间下降最为显著；而投入时间超过 30 ms 后抑制效果趋于稳定或略有反弹。此外，在固定投入时间下，阻值越大，整体抑制能力越强，但从 700 Ω 到 900 Ω 的提升幅度趋缓，甚至在部分时刻出现峰值略微升高的现象，说明最优阻值区间而非越大越好。合理的电阻投入时机与适中电阻阻值的配合是控制涌流的关键策略。

低压侧的涌流变化规律和高压侧大体相同。随着电阻投入时间增加，峰值整体呈下降趋势，

其中 10 ms 至 20 ms 区间的下降最为显著；当投入时间延迟至 30 ms 及 40 ms 后，下降幅度趋缓，部分情况下甚至出现反弹趋势。不同电阻投入时间下铁心磁链变化见图 12。

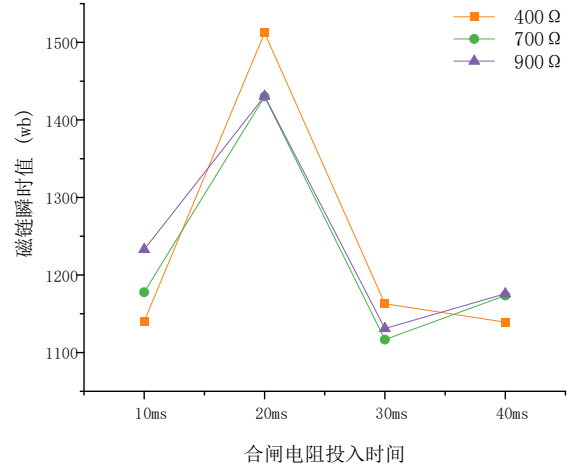


图 12 不同电阻投入时间下铁心磁链变化

Fig. 12 shows the variation of core magnetic flux linkage under different resistance input times

此时对变压器铁心饱和状态进行分析，采用 TACS 通用传递函数元件 $G(s)$ 对励磁电感端电压进行积分，得磁链瞬时值。由于本实验未考虑剩磁，瞬时磁链可直接简化为：
$$\psi(t) = \int_{t_0}^t u(\tau) dt$$

磁链的瞬时变化直接受电压波形及合闸瞬态特性的影响。特别地，当合闸初期电压上升迅速时，磁链积累速度最快，极易导致铁心进入饱和区，从而引发较大的励磁涌流。可以从图 12 分析当合闸电阻投入时间接近 20 ms 时，磁链峰值最大，铁心饱和程度最严重；在 10、30、40 ms 投入电阻时，磁链幅值明显较低，铁心未出现严重饱和现象。20 ms 时刻对应于系统电压上升斜率最大的阶段，电压积分导致磁链急剧累积；而在 10、30、40 ms 时，系统电压变化平缓，磁链积累速率较低，避免了铁心磁通密度超出饱和极限。

综合分析，在不同阻值的对比中，较高阻值 (900 Ω) 在投入 30 ms 的情况下抑制涌流效果最优，验证了抑制效果非单调增长，过高电阻可能引起电气动态反弹或磁链非线性积累的副作用。

3.5 合闸电阻值、投入时间与合闸角度协同抑制涌流的效果分析

基于文中所建立的变压器励磁涌流仿真模型,进一步探讨了合闸电阻值、投入时间与合闸角度的协同作用对涌流抑制效果的影响,仿真结果显示,三者之间存在显著的交互关系,合理的参数组合能够实现更优的涌流控制性能。具体而言:

1)电阻值与合闸角度的协同作用。在中高阻值(700~900 Ω)条件下,配合 90°合闸能够有效降低涌流峰值,并显著改善涌流波动性。尤其是在 900 Ω 电阻与 90°合闸角组合时,高低压侧涌流峰值均达到最低,系统暂态响应最为平稳。

2)电阻投入时间与电阻值的协同作用。在 10~20 ms 延时投入范围内,涌流峰值下降幅度最大,涌流持续时间显著缩短。当投入时间延迟至 30 ms 及以上时,抑制效果趋于饱和,部分情况下甚至出现涌流峰值反弹现象。不同电阻值下的最优投入时间有所不同,但整体趋势一致,即合理投入时间可充分发挥合闸电阻的抑制作用。

3)合闸角度与电阻投入时间的协同作用。在 90°合闸时,适当增加电阻投入时间可进一步提升抑制效果。特别是在 900 Ω 电阻、90°合闸角和 30 ms 投入时间组合下,涌流峰值降幅最大,且涌流衰减速率最快,系统恢复速度明显加快。

综上所述,合闸电阻值、投入时间与合闸角度在抑制变压器励磁涌流过程中具有明显的协同效应。单一参数优化虽然能在一定程度上降低涌流峰值,但通过三者的系统性协同优化,可在更广泛的工况下实现更稳健、可靠的涌流抑制效果。这一发现为后续工程应用中变压器合闸控制策略的制定提供了理论依据,具有重要的工程参考价值。

4 结论

本研究围绕 1 000 kV 变压器在不同合闸策略

下的励磁涌流特性进行了系统分析,结论如下:

1)二级与多级合闸策略可分别使高压侧励磁涌流峰值较单级合闸降低约 22%和 36%,显著抑制暂态冲击。

2)90°合闸角在中高阻值(700、900 Ω)下可实现最低涌流峰值,涌流变化受合闸角逐渐增加呈先降后升趋势;较低阻值(400 Ω)下规律性减弱,抑制效果下降。

3)在 10~20 ms 电阻投入时间区间内,涌流峰值下降最为显著;投入时间超过 30 ms 后抑制效果趋于饱和甚至出现反弹,但电阻投入 30 ms 的情况下抑制涌流效果最优。

4)阻值与投入时间对涌流抑制存在非线性关系,阻值过大可能引发电气动态反弹,应优选 700~900 Ω 范围。

5)90°合闸角、900 Ω 电阻及 30 ms 延时投入策略可有效降低高低压侧励磁涌流,提升系统运行的安全性与稳定性。

参考文献:

- [1] 王 顺, 张 健, 段瑞海, 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.
WANG Shun, ZHANG Jian, DUAN Ruihai, et al. The principle and practical case analysis of magnetizing inrush current in transformer[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(5): 86-91.
- [2] 陈丽萍. 变压器空载合闸励磁涌流与外部故障切除后恢复性涌流讨论[J]. 现代商贸工业, 2010, 22(5): 304-307.
CHEN Liping. Analysis of Transformer inrush currents: excitation inrush upon energization and recovery inrush after external fault clearance[J]. Modern Business Trade Industry, 2010, 22(5): 304-307.
- [3] 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, 41(2): 81-84.
HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al. Study on inrush current restraining technology when energizing no-load transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84.
- [4] 许家源, 华争祥, 朱苛姿, 等. 选相关合技术抑制空载

- 变压器励磁涌流的实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 135-141.
- XU Jiayuan, HUA Zhengxiang, ZHU Kelou, et al. Experimental research on inrush current suppression of unloaded transformers based on the controlled switching[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 135-141.
- [5] 周波, 常晓青, 张华, 等. 计及剩磁、合闸电阻及选相合闸策略的励磁涌流仿真评估方法[J]. 四川电力技术, 2018, 41(6): 37-40.
- ZHOU Bo, CHANG Xiaoqing, ZHANG Hua, et al. Evaluation method for inrush current simulation considering residual flux, closing resistance and phase-controlled switching strategy[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(6): 37-40.
- [6] 班连庚, 郑彬, 周佩朋, 等. 特高压交流变压器选相合闸技术研究及工程应用[J]. 电网技术, 2018, 42(4): 1226-1233.
- BAN Liangeng, ZHENG Bin, ZHOU Peipeng, et al. Research and engineering application of phase selection closing technology for UHV AC transformers[J]. Power System Technology, 2018, 42(4): 1226-1233.
- [7] HAN Pingping, TONG Qingyang, WANG Yan, et al. An inrush current suppression strategy for UHV converter transformer based on simulation of magnetic bias[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(6): 5179-5189.
- [8] 李明武, 梁冠安. 基于控制策略的变压器励磁涌流分析[J]. 高电压技术, 2004, 30(6): 14-16.
- LI Mingwu, LIANG Guan. Analysis of transformers inrush current based on control strategy[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(6): 14-16.
- [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(s1): 5-9.
- LIN Mingxing, LIAO Minfu. The study on the application of chose-phase divide and combine brake used to reduce the inrush current of transformer[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(s1): 5-9.
- [10] 王伟, 魏菊芳, 方琼, 等. 变压器3种励磁涌流抑制措施效果比较[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 101-107.
- WANG Wei, WEI Jufang, FANG Qiong, et al. Comparison of three kinds of magnetizing inrush current suppression measures for transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 101-107.
- [11] 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.
- LI Hu, ZHOU Haiyang, SHI Wei. Effect of closing resistor inside circuit breaker on inrush current of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(1): 16-18.
- [12] 陈川江, 方春恩, 曾俊龙, 等. 计及剩磁的空载变压器选相合闸研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 82-88.
- CHEN Chuanjiang, FANG Chunen, ZENG Junlong, et al. Research on unloaded transformer controlled switching considering residual flux[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 82-88.
- [13] WANG L, LIU R, HUANG Y, et al. Simulation study on transformer inrush current and its suppression[J]. Journal of Physics, 2021, 2029(1): 012010.
- [14] SUNG B C, KIM S. Accurate transformer inrush current analysis by controlling closing instant and residual flux[J]. Electric Power Systems Research, 2023(223): 109638.
- [15] 吴清华, 张彼德. 空载变压器的励磁涌流研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 37-39.
- WU Qinghua, ZHANG Bide. Study on excitation inrush current of no-load transformer[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1): 37-39.
- [16] 宋军. 变压器励磁涌流机理及抑制策略研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2024.
- SONG Jun. Research on the mechanism and suppression strategy of transformer magnetizing inrush current[D]. Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2024.
- [17] 张晓洁, 杨勃, 陈垒. 一种基于磁滞回线的变压器剩磁计算方法研究[J]. 变压器, 2015, 52(10): 11-13.
- ZHANG Xiaojie, YANG Bo, CHEN Lei. A method to calculate remnant magnetic flux of transformers based on hysteresis loop[J]. Transformer, 2015, 52(10): 11-13.
- [18] 黄金, 方春恩, 李天辉, 等. 计及剩磁的变压器励磁涌流的仿真研究[J]. 变压器, 2009, 46(11): 40-43.
- HUANG Jin, FANG Chun'en, LI Tianhui, et al. Simulation research on transformer inrush current in consideration of remnant magnetic flux[J]. Transformer, 2009, 46(11): 40-43.
- [19] ZHU S, WANG T, JIN H, et al. Simulation analysis of magnetizing inrush current of 500 kV transformer[J]. IOP

- Conference Series: Materials Science and Engineering, 2020, 853(1): 012027.
- [20]李春艳, 周念成, 王强钢, 等. 基于软启动的变压器励磁涌流抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3640-3651.
- LI Chunyan, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang, et al. A method to eliminate transformer inrush currents using soft-starter-based controlled energization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3640-3651.
- [21]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 Chun'en, 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.
- [22]刘 涛, 颜廷武, 卜新良, 等. 基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 109-114.
- LIU Tao, YAN Tingwu, BU Xinliang, et al. Research on phase-controlled technology of inrush current based on closing resistance[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(3): 109-114.
- [23]程 政, 魏 远. 1 000 kV 变压器励磁涌流及抑制方法仿真研究[J]. 电力勘测设计, 2019(11): 22-27.
- CHENG Zheng, WEI Yuan. Simulation study on magnetizing inrush current of 1 000 kV transformer and its suppression method[J]. Electric Power Survey & Design, 2019(11): 22-27.
- [24]任于展, 武仕朴, 汪友华, 等. 基于暂态电流差极值的电力变压器剩磁测量方法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(5): 1088-1097.
- REN Yuzhan, WU Shipiao, WANG Youhua, et al. Residual flux measurement method of power transformer based on extreme value of transient current difference[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(5): 1088-1097.
- [25]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.
- TENG Wentao. Research on the inrush current and its suppression of large capacity AC transformer[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [26]邓茂军, 孙振文, 马和科, 等. 1000 kV 特高压变压器保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015(10): 168-173.
- DENG Maojun, SUN Zhenwen, MA Heke, et al. Protection scheme for 1000 kV UHV transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015(10): 168-173.
- [27]李春艳. 计及三相关联性的励磁涌流识别与快速抑制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
- LI Chunyan. A thesis submitted to chongqing university in partial fulfillment of the requirement for the degree of doctor of engineering[D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [28]朱小清, 周宇斐, 宗 煜. 大型水电站主变压器励磁涌流仿真研究与分析[J]. 四川水力发电, 2024, 43(s1): 105-111.
- ZHU Xiaoqing, ZHOU Yufei, ZONG Yu. Simulation and analysis of magnetizing inrush current of main transformer in large hydropower projects[J]. Sichuan Water Power, 2024, 43(s1): 105-111.
- [29]王永胜, 张 祥. 高阻抗变压器励磁涌流引起保护误动原因分析[J]. 内蒙古电力技术, 2023, 41(1): 71-75.
- WANG Yongsheng, ZHANG Xiang. Misoperation cause analysis of excitation inrush current protection of high impedance transformer[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(1): 71-75.
- [30]吴 瑶. 变压器励磁涌流识别方法研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014.
- WU Yao. Research on transformer inrush current recognition methods[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014.
- 李亚莎(1967—), 男, 教授, 博士研究生导师, 目前主要从事电力系统绝缘老化与电磁场数值仿真计算等研究工作。
- 敬禹圻(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为特高压 (E-mail: aaaachar@163.com)。

