

投运多台换流变压器时和应涌流波形特点

房雨浓

(东北电力大学, 吉林 吉林 132011)

摘要: 空投变压器会导致附近正在运行的变压器出现和应涌流, 而和应涌流会导致出现误动作和相应的过电压、过电流现象。以单台换流变压器和应涌流原理为基础, 进一步针对多台换流变压器同时投运进行研究。在研究投运换流变压器数量的基础上, 分析换流变压器容量、投运时间以及线路阻抗的不同对和应涌流产生的影响, 并通过改变合闸相角以及并联电阻等方式降低和应涌流。最后结合国内某实例工程, 证明所提方案的切实有效性。

关键词: 换流变压器; 和应涌流; 多台并联; 系统阻抗; 合闸角度

Characteristics of corresponding inrush current waveform when multiple transformers are put into operation

FANG Yunong

(Northeast Electric Power University, Jilin 132011, China)

Abstract: Airdrop transformers can cause reactive inrush currents in nearby transformers, which can lead to misoperation and corresponding overvoltage and overcurrent phenomena. Based on the principle of single converter transformer and corresponding inrush current, combined with the internal structure of converter transformers, further study the impact of multiple converter transformers operating simultaneously on corresponding inrush current. Based on the study of the number of transformers put into operation, the impact of different transformer capacity, operation time, and residual magnetism on the corresponding inrush current is analyzed. The corresponding inrush current is reduced by changing the closing phase angle and parallel resistance. Finally, the effectiveness of the proposed scheme is demonstrated through a domestic example project.

Key words: converter transformer; sympathetic inrush; multiple parallel connections; system impedance; closing angle

0 引言

近些年来, 高压直流输电技术凭借一系列优势成为电气行业重中之重^[1]。换流变压器作为高压直流输电工程中的重要设备, 能否安全运行直接关系到整个系统的稳定性^[2-6]。换流变压器是基于电磁感应原理进行能量的变化及转换, 其内部结构在电磁暂态过程中很容易出现幅值较大的各种励磁涌流, 例如空载合闸涌流、和应涌流

等, 造成换流变压器一次侧、二次侧电流失衡和换流变压器差动保护误动作^[7-9]。

目前针对和应涌流的研究文献分为两方面: 一方面是从变压器和换流变压器的结构基础着手, 分析和应涌流的产生机理以及各种影响因素^[10]; 另一方面是基于和应涌流对保护装置的影响问题以及相应的和应涌流的识别问题^[11-12]。现有的文献中针对励磁涌流及和应涌流

做出了充分的辨别,通过研究得出的结论能充分识别涌流,并采取相应的保护措施^[13-15]。但目前进行的研究中并未考虑在严苛的工况下,同时投运多台换流变压器对正在运行的换流变压器产生和应涌流的影响,也未考虑在和应涌流不断升高时,降低和应涌流的措施。

考虑同时投放多台换流变压器,并分别控制容量、合闸角度、合闸时间和线路阻抗,对比分析改变换流变压器投切数量对和应涌流产生的影响,并采取相应措施降低和应涌流。最后在国内某特高压直流输电工程中进行仿真对比,证明所提出结论的真实有效性。

1 和应涌流产生机理

除单台变压器运行情况外,在一般情形下,电网系统或换流站中有两台变压器同时运行,一台变压器的运行状态会影响另一台变压器。当电力系统中的一个变压器在不连接负载的情况下通电时,附近已经通电的变压器也产生涌流,称为和应涌流,因此和应涌流在某种程度上与励磁涌流形似。以两台变压器并联为例,考虑了系统以及变压器的损耗问题。图1为两台变压器并联运行时和应涌流简化电路图。此时的变压器 T_1 空载运行,变压器 T_2 空载分闸随时准备投运。如果关闭两台变压器之间的开关,和应涌流随之出现,下面进行具体推导。

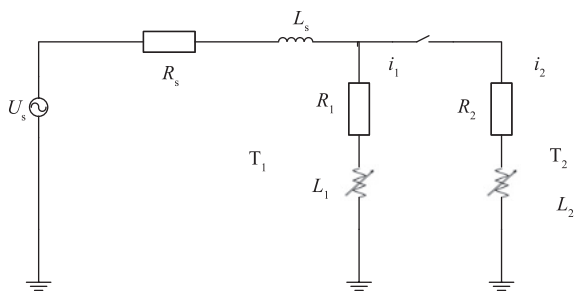


图1 两台变压器并联运行时和应涌流简化电路图

Fig. 1 Simplified circuit diagram of corresponding inrush current during parallel operation of two transformers

图1中, R_s 为电源等效电阻; L_s 为电源等效电感; R_1 为变压器 T_1 一次电阻, R_2 为变压器 T_2 一次电阻; L_1 、 L_2 分别是变压器 T_1 、 T_2 一次绕组漏

电感; i_1 、 i_2 分别是变压器 T_1 、 T_2 一次电流。电源电压为 $u(t)U_m\sin(\omega t+\alpha)$, α 为合闸角。运用KVL和KCL法可得到以下方程

$$\begin{aligned} R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_1 i_1 + \frac{d\Phi_1}{dt} &= u(t) \\ R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + R_2 i_2 + \frac{d\Phi_2}{dt} &= u(t) \\ i_s &= i_1 + i_2 \end{aligned} \quad (1)$$

式中, Φ_1 、 Φ_2 为 T_1 、 T_2 的磁通。

显然,式(1)此时为非线性方程,为了更方便分析,对式(1)进行处理。用变压器充磁电路的平均电感代替非线性励磁电感 L_m ,式(1)可以用常系数线性微分方程求解。假设两个变压器具有相同的参数,即 $R_1=R_2=R$, $L_1=L_2=L$ 。利用拉普拉斯变换和拉普拉斯逆变换,得到两个变压器磁通表达式为

$$\begin{aligned} \Phi_1(t) &= \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\Phi_1(0) - \Phi_2(0)] e^{\frac{R+2R_s}{L+2L_s}t} + \\ &\quad \frac{1}{2} [\Phi_1(0) - \Phi_2(0)] e^{\frac{R}{L}t} \\ \Phi_2(t) &= \frac{L}{Z} U_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{1}{2} [\Phi_1(0) - \Phi_2(0)] e^{\frac{R+2R_s}{L+2L_s}t} - \\ &\quad \frac{1}{2} [\Phi_1(0) - \Phi_2(0)] e^{\frac{R}{L}t} \end{aligned} \quad (2)$$

式中 $Z = \sqrt{(R+2R_s)^2 + (\omega(L+2L_s))^2}$ $\theta = \arctan \frac{\omega(L+2L_s)}{R+2R_s}$

$\Phi_1(0)$ 为变压器 T_1 初始磁通; $\Phi_2(0)$ 为变压器 T_2 的初始磁通。

针对式(2)中两磁通表达式进行分析,可以发现 Φ_1 和 Φ_2 具有类似的稳态分量,两个直接衰减分量。

为了能有效分析和应涌流的产生过程,分析两台变压器的偏置磁通衰减规律无疑是一种有效的手段,对一个周波内等式两边同时积分。将电压方程列为

$$\begin{aligned} \frac{d\Phi_1}{dt} &= U_s - (R_s + R_1)i_1 - R_s i_2 \\ \frac{d\Phi_2}{dt} &= U_s - R_s i_1 - (R_s + R_2)i_2 \end{aligned} \quad (3)$$

在式(3)的两侧分别进行一个周期的积分,分别求得变压器 T_1 、 T_2 磁通变化量为

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_1 &= -\int_t^{t+2\pi} (R_s + R_1) i_1(t) dt - \int_t^{t+2\pi} R_s i_2(t) dt \\ \Delta\Phi_2 &= -\int_t^{t+2\pi} R_s i_1(t) dt - \int_t^{t+2\pi} (R_s + R_2) i_2(t) dt\end{aligned}\quad (4)$$

在已有磁通表达式(3)及其衰减规律表达式(4)后,能够定性分析交感涌流产生的过程。

在变压器 T_2 重合闸的时刻,变压器 T_1 不会立即饱和。因此励磁电流 $i_1=0$,可以得出变压器 T_2 磁通量的变化,这一阶段磁通量的变化主要是由式(4)中的非周期分量 i_2 引起,每周周期增量磁通量是式(4)中的第二部分

$$\Delta\Phi_1 = -\int_t^{t+2\pi} R_s i_2(t) dt \quad (5)$$

一般地,第一个直接分量比第二个直接分量的衰减速率快。因此,变压器 T_2 磁通量向正方向增大,而在式(5)变压器 T_1 磁通量每周周期向反方向增大,使 T_1 逐渐进入饱和,并产生涌流 i_1 。在 i_1 逐渐增大的过程中,励磁电流 i_1 和 i_2 相互作用,使得 Φ_1 向负方向增大,但 Φ_1 的增大并不是无限的,当 $\Delta\Phi_1=0$ 时, Φ_1 达到负最大值,同时 i_1 的值也增大到最大值,然后 Φ_1 、 Φ_2 分别进入衰减阶段。通过式(4) i_2 达到最大值时,临界条件为

$$-\int_t^{t+2\pi} (R_s + R_1) i_1(t) dt = \int_t^{t+2\pi} R_s i_2(t) dt \quad (6)$$

在变压器 T_1 出现励磁涌流 i_1 后,通过电流 $i_s=i_1+i_2$,考虑到励磁电流 i_1 、 i_2 的波形性,此时不难发现系统电流的波形具有对称性。考虑对称函数定积分的相关性质,将式(4)变换为

$$\begin{aligned}\Delta\Phi_1 &= -\int_t^{t+2\pi} R_1 i_1(t) dt \\ \Delta\Phi_2 &= -\int_t^{t+2\pi} R_2 i_2(t) dt\end{aligned}\quad (7)$$

磁通目前分别以周期性衰减,系统电阻的阻尼作用消失,并按照基本时间常数衰减, L_1/R_1 、 L_2/R_2 使得衰减时间持续较长,使和应涌流的存在时间大于单个变压器励磁涌流的存在时间。

变压器和应涌流特点可以总结为:

1) 变压器产生励磁涌流一段时间后,将产生和应涌流。间隔时间主要由变压器参数以及此时的运行条件决定,在几个周波中会达到最大值,此时间隔时间逐渐缓慢衰减。

2) 通过分析可知,当变压器产生空载合闸而导致磁通发生正向变化时,正常运作的变压器铁心的磁通量会发生反向偏移,反之亦然。因此,单台变压器产生的励磁涌流和两台变压器并联运行导致的和应涌流磁通偏移方向相反。

3) 如果初始闭合条件相同,两台变压器之间的相互作用使励磁涌流的衰减过程比单台变压器闭合时励磁涌流的衰减过程慢得多。

2 仿真模型及参数设计

为验证本文所提策略的有效性,首先按图2所示,基于PSCAD/EMTDC建立两台Y/△连接的并联变压器模型进行数字仿真实验。

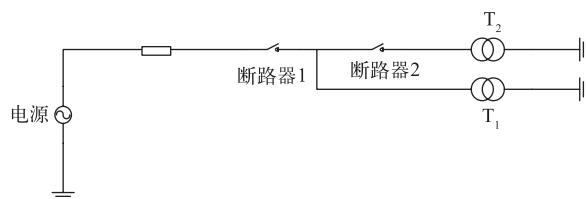


图2 投运单台换流变压器

Fig. 2 Running a single transformer into operation

其中运行变压器为 T_2 ,空投变压器为 T_1 ,断路器1的合闸时间为0 s,将空投变压器 T_2 的合闸时间设定为1 s,换流变压器 T_1 、 T_2 均为空载运行,且设定为三相同步合闸。

通过模型所得和应涌流验证前文所提结论,随后建立投运多台换流变压器如图3所示,并以此改变参数条件。进行对比,得出多台换流变压器投入时和应涌流变化特点。

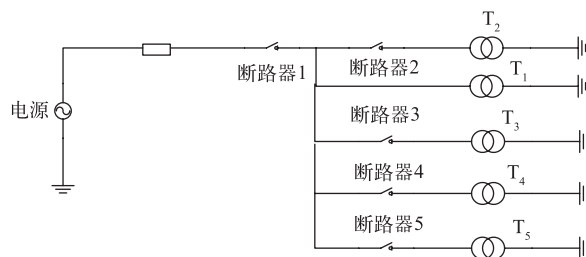


图3 投运多台换流变压器

Fig. 3 Running multiple transformers into operation

仿真中运行换流变压器以及投运换流变压器参数均为国内某特高压换流站内换流变压器运行

参数。该换流变压器为双绕组油浸式变压器，中性点直接接地，采用网侧自动有载调压，冷却方式为强迫油循环风冷，具体数值见表1。

表1 换流变压器电气参数

Tab.1 Electrical parameters of converter transformer

参数	运行换流变压器	投运换流变压器
电压比	500/297	500/297
容量/(MV·A)	1 215.6	800.6
正序漏抗(pu)	0.1	0.1
铜耗(pu)	0.002 4	0.002 4

该断路器采用带有合闸电阻的单相双断口SF₆断路器。闭合电阻堆栈为六列串联结构。每一组电阻串联组装并建立在绝缘棒上。绝缘杆两端带螺纹，一端直接与连接板相连，另一端装有弹簧、连接板和螺母，如图4所示。



图4 断路器合闸电阻示意图

Fig. 4 Schematic diagram of circuit breaker closing resistance

后续在图3基础上，改变投运换流变压器数量、容量、投运时间和线路阻抗，可得到随着投运换流变压器数量的增多，和应涌流的变化规律。并在此基础上，提出降低和应涌流的方法。通过对国内某特高压换流站模型进行验证，证明此方法的切实有效性。

3 仿真结果与分析

3.1 单台换流变压器投运

图5为投运一台换流变压器时，此时T₂的和应涌流波形。由图5可知，和应涌流发展分为两个阶段：第一个阶段是积累偏磁不断上升；

第二个阶段是当偏磁积累到最大值之后进行逐渐衰减。变压器T₂和应涌流在1 s时逐渐增加，在1.54 s时达到峰值，此时和应涌流最大有效值为0.585 0 kA。在达到峰值后，和应涌流逐渐下降，直至恢复正常。

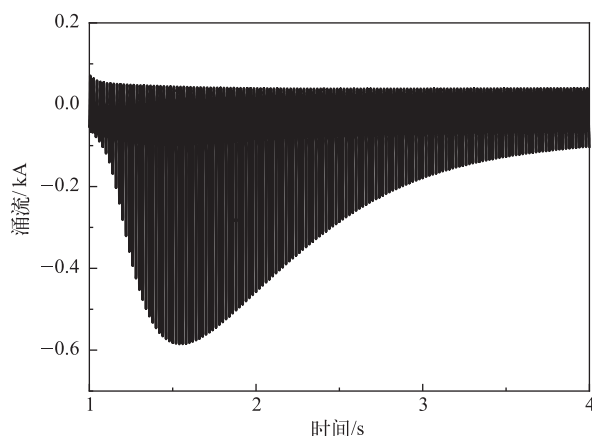


图5 单台换流变压器和应涌流

Fig. 5 Single transformer and corresponding inrush current

在投运单台换流变压器基础上改变投运换流变压器容量、线路阻抗。

图6为改变投运换流变压器容量时，和应涌流的峰值以及达到涌流峰值的时间对比。图7为改变线路阻抗时，和应涌流的峰值以及达到涌流峰值的时间对比。

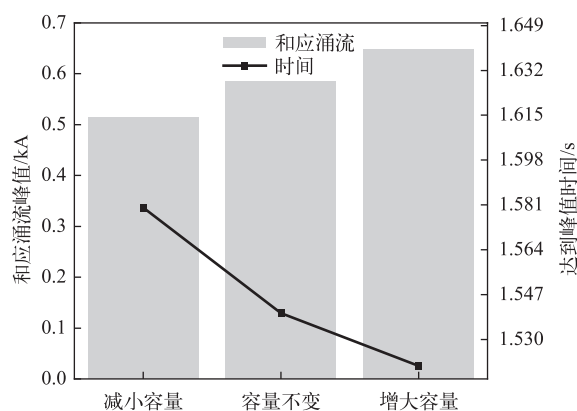


图6 单台换流变压器和应涌流随容量变化

Fig. 6 Single transformer and inrush current variation with capacity

由图6分析可知，在减小投运换流变压器容量时，和应涌流峰值相应减小，但抵达峰值时间会随容量减小而增大。

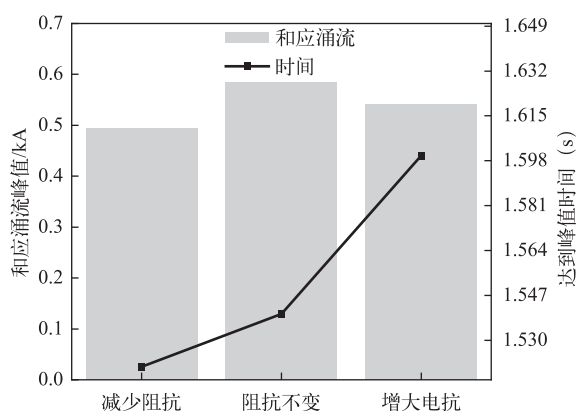


图7 线路阻抗对和应涌流的影响

Fig. 7 The influence of line impedance on corresponding inrush current

由图7可知,在增大电阻后,和应涌流的幅值明显减小,但是达到峰值的时间缩短。说明随着电阻的增加,涌流现象出现得更早,会更快达到峰值。在增大电抗时,和应涌流会变小,达到峰值的时间则会延长。

3.2 多台换流变压器投运

在并联空投多台换流变压器时,此时运行变压器和应涌流峰值以及衰减时间会随空投变压器数量以及投运时间的不同而发生改变。图8为投运两台相同容量变压器并在同一时间投运,此时运行变压器 T_2 和应涌流波形。

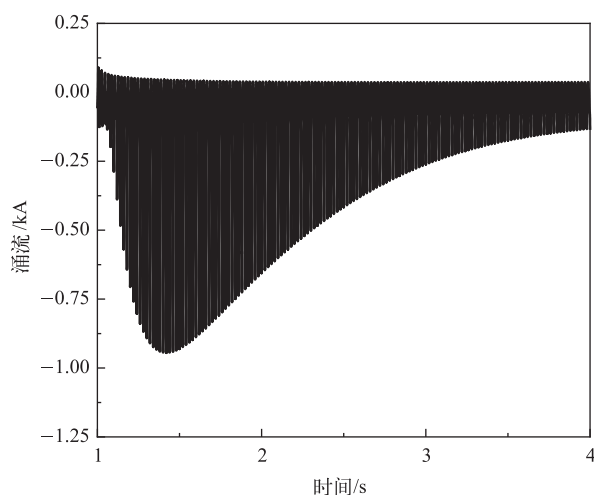


图8 投运两台换流变压器和应涌流波形

Fig. 8 Operation of two transformers and corresponding inrush current waveforms

由图8分析可知,投运两台变压器时,运行

变压器和应涌流在1.42 s达到峰值,此时和应涌流峰值为0.944 7 kA。相比于投运一台变压器时,和应涌流明显增大,且达到峰值时间更快。

当投运两台相同容量变压器时,改变投运时间,其中第一台变压器设定在1 s时投运,第二台变压器分别在1.40 s、1.42 s和1.44 s投运。图9为此时运行变压器和应涌流波形图,其和应涌流峰值分别为1.285 7 kA、1.286 1 kA和1.285 9 kA。其中1.42 s为同时投运两台相同容量变压器时,运行变压器达到和应涌流的时间。若改变变压器投运时间,越接近和应涌流峰值时间投运,其和应涌流越大,会对变压器内部造成更大伤害。

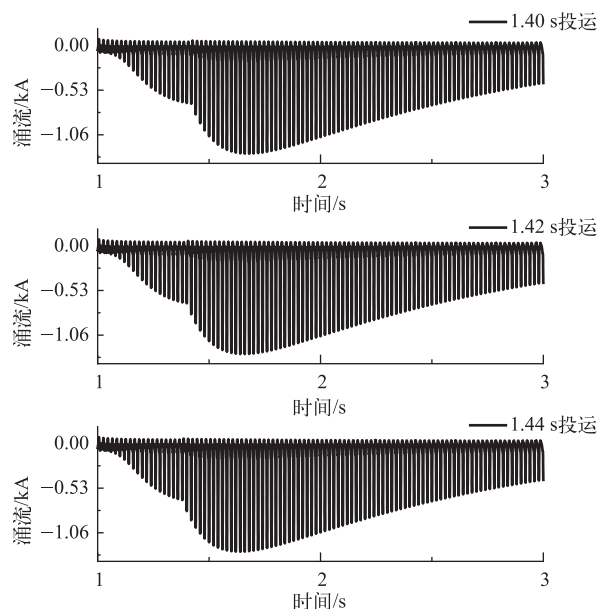


图9 投运时间对和应涌流的影响

Fig. 9 The impact of operation time on corresponding inrush current

图10为投运3~6台换流变压器时和应涌流波形。分析可知,投运3~6台变压器时,其到达峰值时间分别为1.36 s、1.34 s、1.24 s、1.22 s峰值分别为1.150 0 kA、1.280 3 kA、1.645 9 kA和1.735 5 kA。可以看出,随着投运变压器台数的增多,运行变压器和应涌流的峰值会随之增大,达到峰值的时间会提前。

在此分析投运换流变压器数量的基础上,减小换流变压器的容量,图11为改变每台空投换流变压器容量结果图。

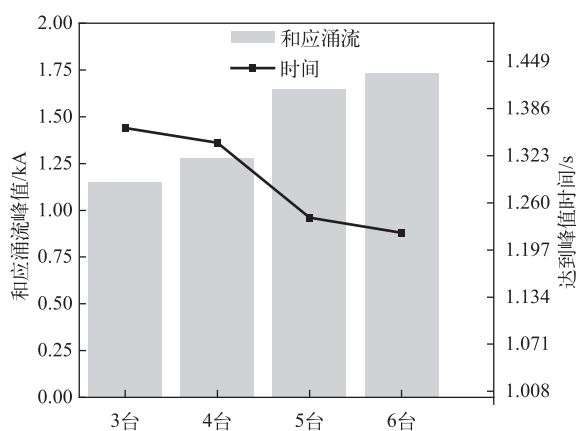


图 10 投运多台换流变压器时和应涌流波形

Fig. 10 When multiple transformers are put into operation, corresponding inrush current waveform

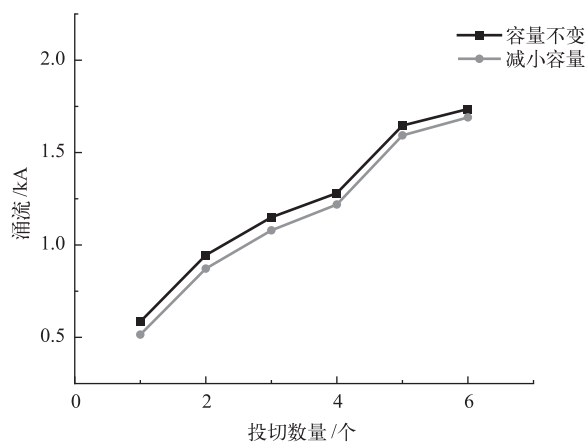


图 11 改变多台换流变压器容量

Fig. 11 Changing the capacity of multiple converter transformers

分析图11知，每台换流变压器改变相同的容量，在减小投运换流变压器容量时，和应涌流峰值会相应减小。从图11中不难看出，随着换流变压器投运数量的增加，换流变压器容量的减小对和应涌流峰值的影响逐渐减小，而换流变压器数量的增加对和应涌流峰值影响更大。

同理如图12所示，在投运每台换流变压器时，在其支路上增加相同的线路阻抗。可以看出在增大线路阻抗时，和应涌流峰值会相应减小。从图12中不难看出，随着换流变压器投运数量的增加，阻抗的增加对和应涌流峰值的影响逐渐减小，而换流变压器数量的增加对和应涌流峰值影响更大。

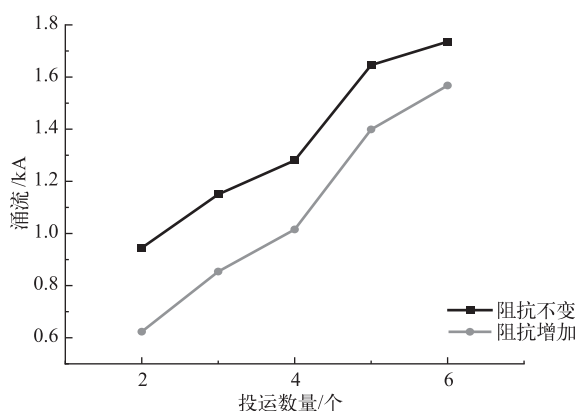


图 12 投运多台换流变压器改变线路阻抗

Fig. 12 Running multiple inverters to change line impedance

3.3 降低和应涌流

由上文分析可知，当增加投运变压器数量，增大投运变压器容量时，此时运行变压器会增加和应涌流的大小，严重时可达2 kA以上，会对变压器内部造成极大影响，所以应寻找合适方式减小其和应涌流。

在上文同时投运两台变压器基础上改变合闸角度。在1 s投运时间基础上，每次增加1 ms，即每次合闸角度增加18°。不同合闸角度时，运行变压器和应涌流峰值见表2。

表 2 合闸角度和应涌流的影响

Tab. 2 The influence of closing angle and inrush current

角度 (°)	和应涌流峰值 /kA
0	0.944 7
18	0.928 8
36	0.906 4
54	0.883 6
72	0.867 3
90	0.849 7

可以发现，控制合闸角度为0°时，此时和应涌流最大；在合闸角度为90°时，此时和应涌流最小。在合闸时选用合闸角度为90°时，和应涌流即可降到最低，可有效提高电能质量，保护变压器。

在采用断路器并联合闸电阻时，也可有效降低和应涌流的大小。投运两台变压器时，分别考虑接入合闸电阻阻值的变化以及接入时间的变化，分别接入600 Ω、800 Ω、1 000 Ω、1 200 Ω

和1 500 Ω 电阻,控制接入时间为6 ms、8 ms以及10 ms,如图13所示。

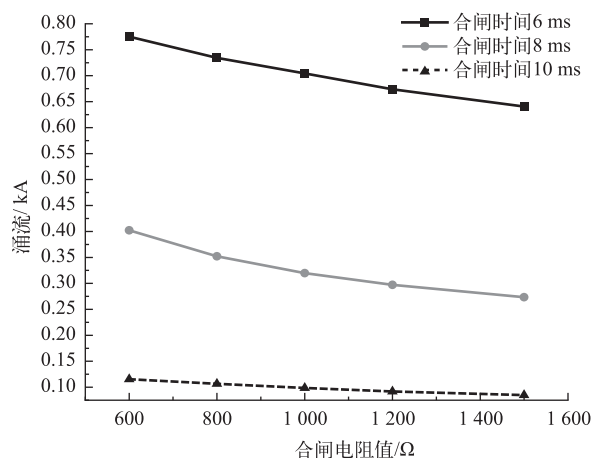


图 13 并联合闸电阻降低和应涌流

Fig. 13 Combined gate resistance reduction and corresponding inrush current

由图13析可知,随着合闸电阻阻值的增大,以及接入时间的延长,此时同时投运两台变压器产生的和应涌流明显降低。在接入合闸电阻为1 500 Ω ,接入时间为10 ms时,此时和应涌流可降到极低,说明该和应涌流抑制方法明显有效。

控制合闸角度并接入合闸电阻,可以使此时和应涌流降到极低,结果如图14所示,和应涌流降为0.098 4 kA,证明此措施可有效降低和应涌流。可见,在实际工况中,若需要投运多台换流变压器时,使用此方法可有效降低和应涌流,保护系统安全。

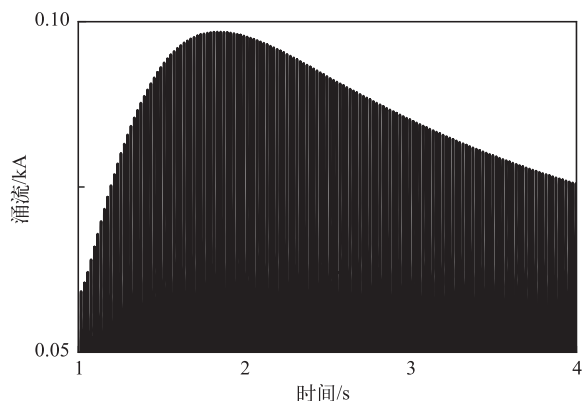


图 14 并联合闸电阻降低和应涌流

Fig. 14 Combined gate resistance reduction and corresponding inrush current

4 结束语

本文通过分析投运换流变压器等效电路图,分析了换流变压器内部磁链变化规律,并得到和应涌流产生机理。由投运单台换流变压器延伸到投运多台换流变压器,根据实际工程情况,控制多种变量与投运多台换流变压器相结合,得到和应涌流变化规律。在此基础上结合和应涌流的特点,在实际工程中针对和应涌流过大的情况,提出了有效降低和应涌流的解决方案。

结论及方案:

1) 随着换流变压器投运数量的增加,和应涌流的峰值随之增大,达到和应涌流峰值的时间缩短。

2) 多台换流变压器不同时间投运时,投运时间越接近同时投运时所达峰值时间,产生的和应涌流越大,远超同时投运所产生的和应涌流。

3) 减小投运换流变压器容量,所产生的和应涌流峰值随之降低,但随着换流变压器投运数量的增加,减小容量对和应涌流的影响逐渐降低。

4) 增大线路阻抗,和应涌流峰值相应减小,随着换流变压器投运数量的增加,阻抗的增加对和应涌流峰值的影响逐渐减小,而换流变压器数量的增加对和应涌流峰值影响更大。

5) 和应涌流过高时,可以通过控制合闸角度以及并联合闸电阻来降低和应涌流,保护系统安全。

参考文献

- [1] NI Qing, LUO Longfu, FAN Jichao, et al. Harmonic loss analysis of converter transformer in LCL-HVDC system[J]. Energy Reports, 2020(6): 352-357.
- [2] 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.
- [3] 王树东, 吴永勇, 刘春艳. 基于振动声学的变压器健康状况评估方法研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 84-86, 91.

- [4] 李宏玉, 毛泉, 祁忠伟, 等. 基于鲸鱼算法优化PNN的变压器故障诊断[J]. 电气自动化, 2022, 44(4): 102-104.
- [5] 欧阳凡. 基于PPNGA算法的变压器参数识别[J]. 电气自动化, 2019, 41(5): 100-102.
- [6] 曹馨予, 何东升, 李威. 基于变压器Γ形等效电路的参数辨识方法[J]. 电气自动化, 2017, 39(3): 96-98.
- [7] 李根. 变压器励磁涌流若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [8] 贺欣, 张应田, 王伟, 等. 变压器励磁涌流引起的线路保护误动作分析[J]. 河南科技, 2019(14): 74-75.
- [9] 丁苏阳, 林湘宁, 翁汉琨, 等. 换流变零差保护在故障切除恢复性涌流期间的误动风险分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(S1): 12-20.
- [10] 郑涛, 赵萍. 和应涌流对差动保护的影响因素分析及防范措施[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(3): 74-78.
- [11] THOTE P B, DAIGAVANE M B, DAIGAVANE P M, et al. An intelligent hybrid approach using KNN-GA to enhance the performance of digital protection transformer scheme[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2017, 40(3): 151-161.
- [12] ZHENG Tao, HUANG Ting, MA Yulong, et al. Histogram-based method to avoid maloperation of transformer differential protection due to current transformer saturation under external faults[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 32(2): 610-619.
- [13] 胡松, 江亚群, 黄纯. 基于偏度系数的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1954-1959.
- [14] 张小钊, 兰生. 基于GRNN神经网络的变压器励磁涌流识别方法[J]. 电测与仪表, 2016, 53(23): 84-89.
- [15] 明涛, 张龙军, 王巧莉. 依托聚类和时间序列分析的变压器状态评估研究[J]. 电气自动化, 2021, 43(5): 108-111.

作者简介

房雨浓（2000—），男，硕士研究生，主要研究方向为高压绝缘。

（收稿日期：2023-06-21）