

选相投切对特高压变压器操作冲击绝缘的影响分析

张帆¹,段雄英¹,吕洋²,刘芮彤³,杨滢璇³

(1. 大连理工大学 电气工程学院, 辽宁 大连 116024; 2. 国网辽宁省电力有限公司大连供电公司, 辽宁 大连 116001;

3. 国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院, 辽宁 沈阳 110055)

摘要:基于特高压断路器的电场强度分布给出了合闸预击穿时间的均值和标准差,再利用 ATP-EMTP 软件对空载变压器进行合理建模,并进行不同剩磁情况下的电磁暂态仿真,对考虑预击穿和机械分散性影响下的操作过电压进行了统计分析。同时,对最佳相位合闸时产生的励磁涌流进行了分析讨论。结合低压模拟实验的最终分析表明:即使考虑断路器预击穿、机械分散性以及励磁涌流的变化后,选相投切技术仍具有抑制过电压的作用,再结合避雷器可将过电压完全限制在标准要求值内。根据 GB/Z24842—2009 标准给出了变压器操作冲击绝缘水平的推荐值,可供工程设计参考使用。

关键词:特高压变压器;预击穿;选相投切;ATP;绝缘

中图分类号:TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.030

0 引言

特高压电网建设已成为我国当前电力布局的大方向,因此特高压变压器得到了国家科技部的重点关注^[1-4]。然而空载变压器投切带来的过电压和励磁涌流会给电力系统运行带来巨大的隐患。

运用选相投切技术可以对低电压三相双绕组变压器^[5-6]的截流过电压和励磁涌流^[7-8]加以抑制。然而选相投切控制技术目前应用的最高电压等级为 550 kV(550 kV 瓷柱式断路器)。由于特高压断路器运动部件多、质量大,导致运动时间长,稳定性相对差,合闸时间分散性都在 ± 10 ms 左右。但未来随着特高压断路器的发展,将采用更高能量密度的操作机构降低运动质量从而大幅减少操作功,在此基础上再通过动作时间补偿算法^[9]可使机械分散性降低到 ± 1 ms。

本文应用 SF₆ 气体流注理论击穿判据计算特高压断路器的合闸预击穿电压特性曲线,并结合机械分散性确定最佳关合时间。在电磁暂态仿真软件 ATP-EMTP 中建立特高压变压器分合闸模型,仿真结果表明选相投切技术结合避雷器能够有效地抑制操作过电压和励磁涌流,从而降低特高压变压器的操作冲击绝缘等级。

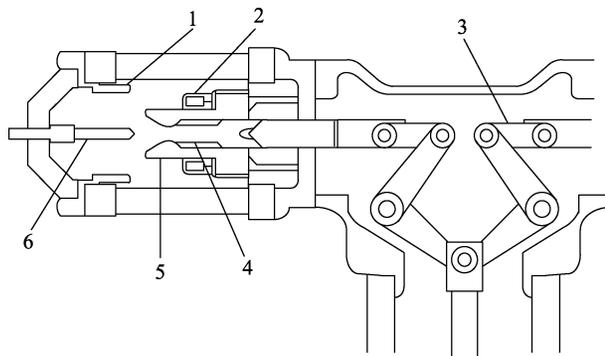
1 1 000 kV 特高压变压器投切原理与仿真

选相投切^[10-11]的核心问题之一便是最佳动作相

位的确定,而最佳动作相位与断路器的预击穿和机械分散性密切相关。

1.1 预击穿时间计算

特高压 SF₆ 断路器^[12]灭弧室结构简图如图 1 所示。灭弧系统的开距 $L=190$ mm,为改善断口间电压分布,在各断口均装设 1 000 pF 并联电容器组。



1—静主触头,2—动主触头,3—连杆
4—动弧触头,5—喷嘴,6—静弧触头

图 1 灭弧室结构简图

Fig.1 Simplified structure diagram of arc-extinguish chamber

特高压断路器合闸速度 $v=5.1$ m/s,分闸速度为 13.28 m/s,充气压力为 0.7 MPa,介质密度为 42 kg/m³,平均最大场强为 26 kV/mm^[13]。

断路器触头间为稍不均匀电场,根据流注理论计算 SF₆ 气体介质击穿电压。计算得出临界击穿场强和电压值为:

$$\begin{cases} E_{\text{crit}} = 1.167\rho \\ U_p = \frac{E_{\text{crit}}}{E_{1V}} \\ E_{1V} = 10.92d^{-1.657} \end{cases} \quad (1)$$

其中, E_{crit} 为临界击穿场强值; U_p 为介质击穿电压值; ρ 为气体介质密度; E_{1V} 为触头间电压为 1 V 时的

收稿日期:2017-07-03;修回日期:2018-07-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777025,51477024,51337001);国家电网公司 2017 年总部科技项目(SGTYHT/16-JS-198)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51777025,51477024,51337001) and the 2017 Headquarters Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGTYHT/16-JS-198)

电场分布值^[14](单位为 kV/mm); d 为触头间开距(单位为 mm)。

当触头间电场强度 $E > E_{crit}$ 时,弧隙可能被击穿。断路器关合过程更关注短开距范围内的介质绝缘强度,断路器关合过程中击穿电压值随触头间开距的变化曲线如图 2 所示,表达式如式(2)所示。

$$u_p = 35.39d^{0.676} \quad (2)$$

其中, u_p 为击穿电压(单位为 kV)。

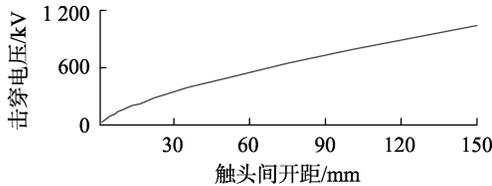


图 2 关合击穿电压随触头间开距变化曲线

Fig.2 Curve of closing breakdown voltage vs. opening distance

预击穿电压与时间的关系曲线一般称为关合特性曲线,可简化为一直线,其斜率的绝对值即为绝缘强度下降率 k_{RDDS} ,如式(3)所示。

$$k_{RDDS} = \frac{du_p}{dt} = \frac{du_p}{ds} \frac{ds}{dt} \quad (3)$$

关合系数 k 可表示为式(4)。

$$k = \frac{k_{RDDS}}{\omega U_m} = \frac{Ev}{\omega U_m} \quad (4)$$

其中,电源电压零点时斜率为 ωU_m , ω 为电源角频率; U_m 为特高压系统最高运行电压。代入数据计算得到关合系数 $k = 0.353$ 。

当 $k < 1$ 时,外施电压与绝缘强度下降率的关系如图 3 所示。由于外施电压的极性变化对预击穿电压影响不明显,故可用外施电压的绝对值来分析预击穿特性。

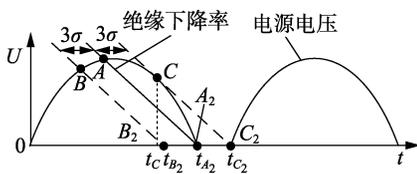


图 3 外施电压与绝缘强度下降率的关系

Fig.3 Relationship between k_{RDDS} and applied voltage

图 3 中,关合特性曲线与电压波形的交点 A 、 B 、 C 为预击穿发生时间,与时间轴的交点 A_2 、 B_2 、 C_2 为开关触头机械接触(闭合)时间;直线 AA_2 两侧的虚线为考虑到开关关合时间分散性及放电分散性的耐压特性边界线,实际合闸位置应在图中的 B_2 到 C_2 的范围内、呈标准方差为 σ 的正态分布;直线 CC_2 与电源电压相切于点 C ,此时预击穿点将出现在点 C 左边的区域,从而点 B 成为关合特性曲线与外施电压相交的最小相位点。在特定的机械分散特性下,应选择点 A_2 为最佳目标关合时刻。

$U(t) = U_m \sin(\omega t)$ 在点 C 的切线斜率的大小与关合绝缘特性相等,可得:

$$t_c = \frac{1}{\omega} \left(\pi - \arccos \frac{k_{RDDS}}{\omega U_m} \right) = \frac{1}{\omega} (\pi - \arccos k) \quad (5)$$

利用点 C 坐标 $(t_c, U_m \sin(\omega t_c))$ 可以求得直线 CC_2 、 AA_2 和 BB_2 的表达式,进而得到最佳关合时间为:

$$t_{A_2} = \frac{\sqrt{1-k^2}}{k\omega} - \frac{\arccos k}{\omega} - 3\sigma \quad (6)$$

预击穿时间 t_A 由式(7)求得。

$$U_m [-k\omega t_A + 3\sigma + \sin(\omega t_c) + k\omega t_c] = U_m \sin(\omega t_A) \quad (7)$$

利用 MATLAB 可以计算出 $k = 0.353$, $3\sigma = 1$ ms 时预击穿时间 t_A 、 t_B 、 t_C 和实际关合时间 t_{A_2} 、 t_{B_2} 、 t_{C_2} ,如表 1 所示。如果设置断路器实际关合时间为 0.01 s,则预击穿时间符合均值为 0.004 6 s、标准差为 0.000 33 s 的正态分布。如果设置断路器实际关合时间为电压峰值时间 0.005 s,则在 0.001 33 s 时发生预击穿,无法实现电压峰值时合闸,将产生过电压及励磁涌流。

表 1 预击穿时间和实际关合时间

Table 1 Pre-arcing time and optimal closing instants

预击穿时间/s			实际关合时间/s		
t_B	t_A	t_C	t_{B_2}	t_{A_2}	t_{C_2}
0.004 0	0.004 6	0.006 1	0.009	0.010	0.011

断路器的投切过程不仅是断路器自身机械结构的动作过程,也包括检测和运算环节。目前相控技术使用的控制核心(现场可编程门阵列(FPGA))时钟晶振频率可达到 50 MHz,相控算法的计算过程耗时为微秒级,而断路器动作时间的分散性通常为毫秒量级,计算过程所消耗的时间可近似忽略不计。另外使用具有极高灵敏性和稳定性的高精度电子式传感器可以有效降低检测误差及分散性。在编写 FPGA 的控制程序时也可引入补偿算法对上述过程中出现的误差进行补偿。故本文重点考虑断路器灭弧室预击穿与操动机构机械分散性对相控合闸变压器的影响。

1.2 选相投切 1 000 kV 空载变压器仿真

仿真系统模拟的是晋东南—南阳—荆门 1 000 kV 交流特高压试验示范工程,系统的相关参数也均按照特高压工程数据设置。

利用 ATP-EMTP 软件,建立 1 000 kV 空载变压器模型(如附录中图 A1 所示),对分合闸的情况进行仿真研究。

BCTRAN 元件用于定义变压器的电压及其他参数等。单相三绕组自耦变压器(降压)参数^[15]如下:高压、中压、低压绕组额定容量分别为 1 000、1 000、334 MV·A;高压、中压、低压绕组额定线电压分别为

1 050、525、110 kV;以高压绕组额定容量为基准,高压-中压短路阻抗为 18.07%,高压-低压短路阻抗为 62.57%,中压-低压短路阻抗为 39.74%;空载电流为 0.05%;空载损耗为 185 kW。

Type 96 非线性电感用于模拟磁路饱和特性,RLC 电路用于模拟变压器的高压侧对地电容。磁通计算采用 TACS 传递函数元件和 $G(s)$ 的积分功能,通过对相电压进行积分得到磁通的瞬时值。

变压器剩磁由前一次开断时间 t_{oA} 、 t_{oB} 和 t_{oC} 决定,仿真时由统计开关模拟断路器动作。特高压 SF₆ 断路器的截流值为 10 A。不考虑剩磁,断路器随机合闸时的变压器过电压波形如图 4 所示。

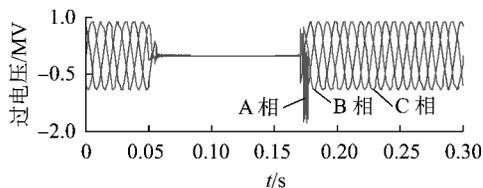


图 4 随机合闸时变压器过电压波形

Fig.4 Over-voltage waveforms of transformer during random closing

由图 4 可见,随机合闸时变压器会产生高达 1 787.7 kV (1.99 p.u.) 的过电压,这对变压器及电网的冲击是非常明显的,因此合闸时间的确定需要考虑变压器剩磁的影响。

当 B、C 相在两相磁通相等处分闸,经过 1/4 周期后开断 A 相,此时三相的剩磁最小。当 A、B 相在正向电压相等时刻分断,随后 C 相在相电压为 0 处分断时,剩磁最大^[7]。

根据上文计算所得的预击穿时间服从均值为 0.004 6 s、标准差为 0.000 33 s 的正态分布,将合闸时间设为 0.174 6 s,对不同剩磁下的合闸策略讨论如下。

a. 三相中某相磁通为 0、其他两相磁通大小相等极性相反时采用快速合闸策略,即在 A 相合闸 (0.174 6 s) 后的 1/4 个工频周期投入其他两相,变压器过电压波形如图 5 所示。

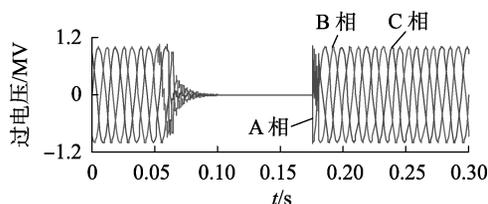


图 5 快速合闸策略下的变压器过电压波形

Fig.5 Over-voltage waveforms of transformer under rapid closing strategy

b. 三相中某相磁通为 0 时采用延时合闸策略,即 A 相在最佳相位合闸 (0.174 6 s) 后延时几个工频周期,其他两相磁通达到相等时再同时合闸 (0.21 s),变压器过电压波形如图 6 所示。

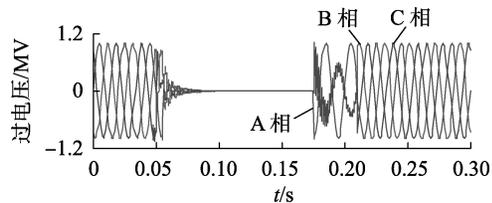


图 6 延时合闸策略下的变压器过电压波形

Fig.6 Over-voltage waveforms of transformer under delayed closing strategy

c. 某相剩磁为 0、其他两相剩磁需足够大且极性相反时采用三相同步合闸 (0.174 6 s) 策略,变压器过电压波形如图 7 所示。

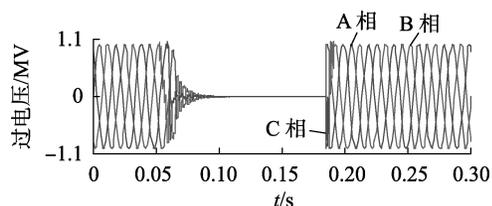


图 7 同步合闸策略下的变压器过电压波形

Fig.7 Over-voltage waveforms of transformer simultaneous closing strategy

由图 5—7 可见,根据不同剩磁分别采取快速、延时及同步合闸相控策略,3 种合闸策略均可抑制过电压的形成。

在统计开关中设置时间均值、标准差 0.000 33 s 和截流值 10 A,利用 ATP 软件进行 100 次合闸操作仿真可得到特高压变压器操作过电压概率分布,如图 8 所示。1 000 kV 侧加装额定电压为 828 kV 的金属氧化物避雷器后,操作过电压概率分布如图 9 所示,图中横轴为标么值。

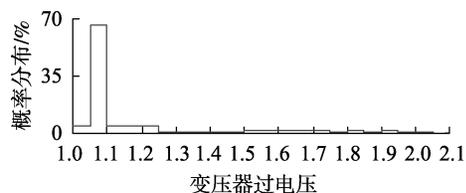


图 8 变压器过电压概率分布

Fig.8 Probability distribution of transformer overvoltage

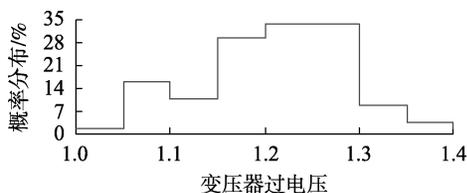


图 9 加装避雷器的变压器过电压概率分布

Fig.9 Probability distribution of transformer overvoltage with MOV

基准电压 $U = 1\ 100\sqrt{2}/\sqrt{3} \approx 898.146$ (kV),相控操作过电压平均值为 1.05 p.u.,标准差为 0.021 1 p.u.。根据现有规范的推荐值,变电站最大的相对地统计操作过电压不宜大于 1.6 p.u.,最大的相间统计操作

过电压不宜大于 2.9 p.u.。由图 8 可见,选相投切技术可将约 87%的操作过电压控制在 1.6 p.u.内;由图 9 可见,加装避雷器后可将过电压完全控制在要求范围内。

避雷器的参数为:额定电压有效值为 828 kV,持续运行电压有效值为 638 kV,30/60 μs 的 2 kA 电流下的操作冲击残压不超过 1 460 kV,2 ms 方波耐受电流为 4×2 kA,避雷器应吸收的能量公式为:

$$W = \int |ui| dt \quad (8)$$

其中, u 为避雷器两端电压; i 为流过避雷器的电流。

在大多数操作过电压下避雷器吸收能量较小,只有当系统发生振荡解列时,避雷器吸收的能量较大^[16]。仿真中结合选相投切技术,避雷器吸收能量为 A 相 11.4 kJ、B 相 15.2 kJ、C 相 7.6 kJ,均远小于避雷器最大吸收能量 27 MJ^[16];随机投切时避雷器吸收能量为 A 相 202.4 kJ、B 相 219.9 kJ、C 相 166.5 kJ。由此可见,选相投切可以降低操作过电压,降低避雷器吸收能量,减小避雷器的损耗。另一方面,采用相控技术可降低避雷器的操作冲击保护水平,减少避雷器的安装成本。

1.3 选相投切技术对励磁涌流的影响

选相投切技术可从根本上抑制合空载变压器的操作过电压,然而抑制过电压的最优相位对于励磁涌流而言一般是不利的,因此在降低过电压的同时还需要考虑励磁涌流的大小。

本文就不同剩磁情况下在最优相位合闸产生的励磁涌流进行讨论。不同剩磁情况下的合闸涌流仿真波形如图 10—12 所示。

a. 无剩磁情况下采用快速合闸策略,磁通和励磁电流波形如图 10 所示。由图 10 可见,励磁电流小于额定电流,无励磁涌流产生,不会对变压器及电能质量造成影响。

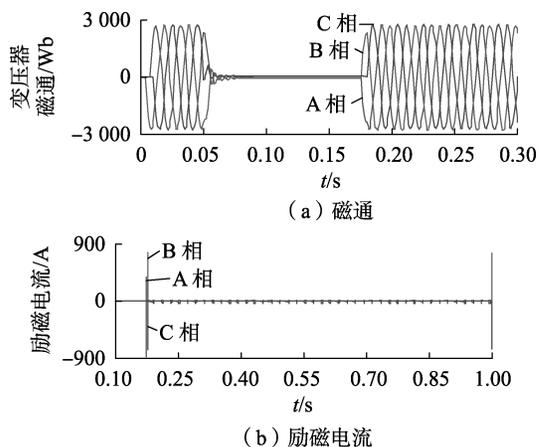


图 10 无剩磁情况下进行快速合闸时的磁通和励磁电流波形

Fig.10 Waveforms of flux and magnetizing inrush current under rapid closing strategy, without remanence

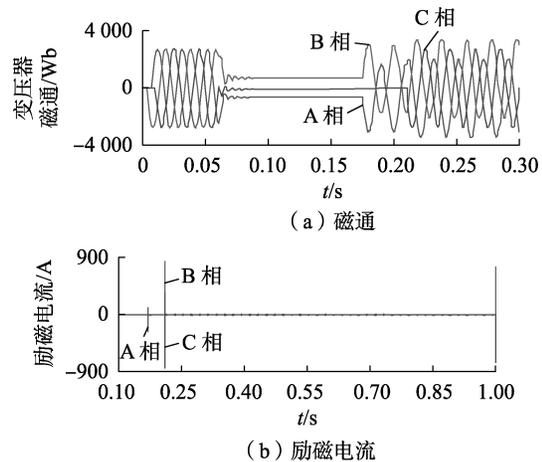


图 11 A 相、B 相、C 相剩磁分别为 $-0.3 B_m$ 、 0 、 $0.3 B_m$ 时,进行延时合闸的磁通和励磁电流波形

Fig.11 Waveforms of flux and magnetizing inrush current under rapid closing strategy, when remanence of phase-A, phase-B, phase-C are respectively $-0.3 B_m$, 0 and $0.3 B_m$

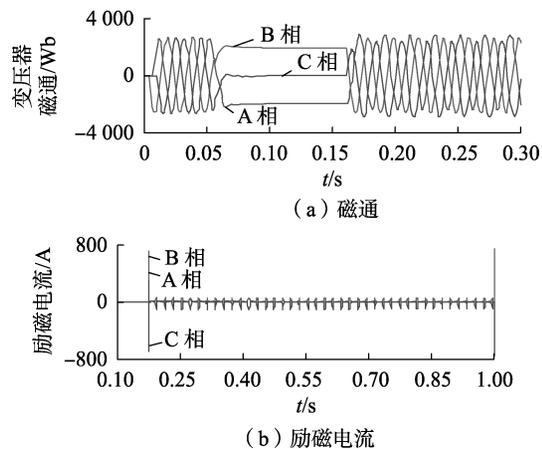


图 12 A 相、B 相、C 相剩磁分别为 $-0.8 B_m$ 、 0 、 $0.8 B_m$ 时,进行同步合闸的磁通和励磁电流波形

Fig.12 Waveforms of flux and magnetizing inrush current under simultaneous closing strategy, when remanence of phase-A, phase-B, phase-C are respectively $-0.8 B_m$, 0 and $0.8 B_m$

b. 剩磁很小(本节中取 A 相、B 相、C 相剩磁分别为 $-0.3 B_m$ 、 0 、 $0.3 B_m$)时采用延时合闸策略,磁通波形和励磁电流波形如图 11 所示。由图 11 可见,延时合闸策略效果较好,不会产生励磁涌流,但合闸时间长。

c. 当某相剩磁为 0,其他两相剩磁量足够大并且极性相反(本节中取 A 相、B 相、C 相剩磁分别为 $-0.8 B_m$ 、 0 、 $0.8 B_m$)时,采取同步合闸策略,磁通和励磁电流波形如图 12 所示。由图 12 可见,此时没有励磁涌流产生。

励磁涌流中含有相当大的 2 次谐波,极大地降低了电能质量。抑制励磁涌流的方式为预感应磁通与剩磁相等时合闸。由仿真结果可见,3 种选相合闸策略结合可降低变压器在不同剩磁情况下励磁涌流产生的不利影响。

2 实验测试

实际特高压试验测试由于缺乏条件尚未展开,因此通过低压模拟实验测试选相合闸的有效性,实验电路见图 13。实验选取的变压器额定电压为 220 V,施加电压为 20 V 工频电压。通过观察实验中合闸电压电流的变化趋势验证本文提出的相控策略的合理性。

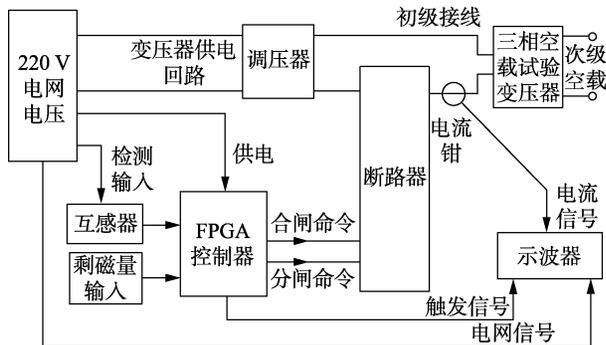


图 13 三相实验电路

Fig.13 Three-phase experimental circuit

断路器 10 次合分闸时间测试结果如表 2 所示。

表 2 断路器合闸、分闸时间

Table 2 Closing time and opening time of breaker

参数	合闸时间/ms			分闸时间/ms		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
最小值	12.360	10.88	12.08	3.696	5.780	6.520
最大值	12.960	11.60	12.52	4.056	5.960	7.160
平均值	12.712	11.152	12.300	3.771	5.867	6.740
标准差	0.194 36	0.178 76	0.125 38	0.098 62	0.050 04	0.175 10

取测 10 组数据的平均值作为对应相的合闸、分闸固有时间。

示波器采集时间为 0.2 s,随机合闸下过电压波形如图 14 所示。

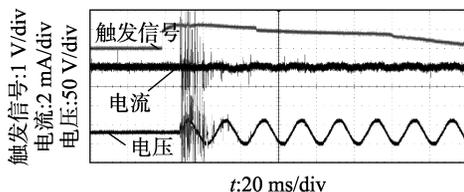


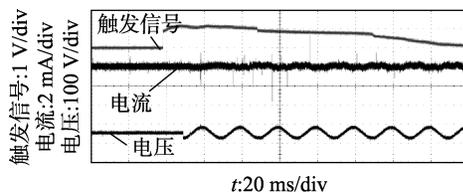
图 14 随机合闸下的过电压波形

Fig.14 Overvoltage of random switching

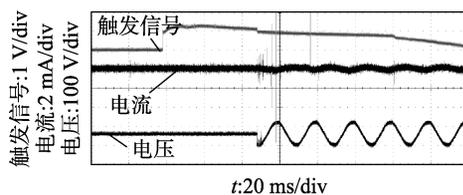
由图 14 可见,随机合闸过程中存在振荡过电压,幅值最大可达到 3 p.u.。为消除过电压,分别采用快速合闸、延时和同步合闸策略,电流、电压波形如图 15 所示。

如图 15 所示,在剩磁不同时采用不同的相控合闸策略可以抑制过电压,减少暂态过程对变压器绝缘以及电网的影响。

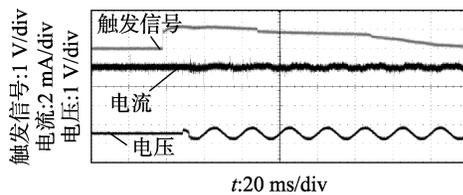
前文所述的断路器预击穿同样会导致合闸时刻的偏移,在实验中这一偏差与机构分散性综合表现为合闸时刻的分散性。调整断路器的固有合闸时间



(a) 快速合闸策略



(b) 延时合闸策略



(c) 同步合闸策略

图 15 不同合闸策略下的电流、电压波形

Fig.15 Waveforms of current and voltage in different closing strategies

使得分散性 3σ 分别为 0.6 ms、0.8 ms 和 1 ms,如图 16—18 所示。

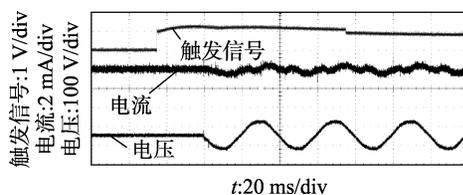


图 16 $3\sigma=0.6$ ms 时的电流、电压波形

Fig.16 Waveforms of current and voltage when 3σ is 0.6 ms

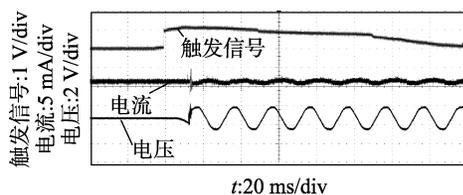


图 17 $3\sigma=0.8$ ms 时电流、电压波形

Fig.17 Waveforms of current and voltage when 3σ is 0.8 ms

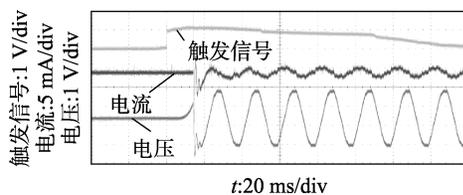


图 18 $3\sigma=1$ ms 时电流电压波形

Fig.18 Current and voltage waveform in $3\sigma=1$ ms

由图 16—18 可见,当 $3\sigma=0.6$ ms 时没有产生过电压;当 $3\sigma=0.8$ ms 时过电压开始出现,幅值为 1.03 p.u.;当 $3\sigma=1$ ms 时过电压幅值进一步增大为 1.32

p.u.。由此可见随着分散性的增加,振荡过电压逐渐增大,符合仿真的结果。

3 操作过电压下的变电站绝缘配合

根据上文仿真计算得到的变压器过电压标么值确定相控时操作过电压下的特高压变压器内外绝缘值。

a. 变压器内绝缘。

参照 GB/Z24842—2009 标准^[17],特高压变压器的操作冲击绝缘与代表性过电压(代表性过电压为变电站最大操作过电压或避雷器操作冲击保护水平)成正比,当统计计算得到的最大操作过电压为 1.6 p.u. 时,变压器操作过电压下的内绝缘取 1 800 kV。考虑开关动作时间和预击穿问题,采用避雷器结合相控技术后,操作冲击绝缘可降为 1 200 kV。理论上,选相投切技术结合避雷器可将变压器内绝缘耐压减少 29%。

b. 变压器外绝缘。

考虑相关的距离因素和海拔高度引起的气象条件变化对于电气设备外绝缘放电电压的校正之后,对于 1 000 m 及以下地区特高压电气设备外绝缘的耐受电压可取该设备内绝缘相应耐受电压的同一值^[18]。

4 结论

本文基于特高压断路器的预击穿和机械分散性特性建立了更贴近实际的特高压变压器模型,并对采用选相投切后的操作过电压进行了统计分析,得出了以下结论。

a. 特高压断路器的预击穿特性对相控时间的影响是显著的。在考虑特高压断路器预击穿和机械分散性的前提下,只采用选相投切技术可将 87% 的变压器操作过电压抑制在 1.6 p.u. 内,加装避雷器后过电压值完全控制在标准范围内。同时选相投切技术可以使得避雷器吸收能量较随机合闸操作时减小 15~21 倍,为避雷器的选型优化及变压器绝缘优化提供了依据。

b. 针对特高压变压器不同剩磁情况,分别采用快速、延时及同步合闸策略相控策略,可有效抑制选相投切技术对励磁涌流的不利影响。

c. 低压模拟实验验证了合空载变压器过程中会产生过电压;在考虑断路器预击穿及操作机构分散性的前提下,选相合闸效果仍优于随机合闸。

d. 对比操作过电压下变压器内外绝缘的仿真计算值与标准值,结果表明采用选相投切技术结合避雷器的方法可将变压器内外绝缘耐压减少 29%,为降低变压器操作冲击绝缘等级的研究提供了依据。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] HAN Bin, XIANG Zutao, BAN Liangeng. Study on transients and effect on capacitor voltage transformer caused by disconnecter switching of UHV series capacitor banks[C]//2014 International Conference on Power System Technology. Chengdu, China: IEEE, 2014: 2293-2298.
- [2] KADER A, DONG Xinzhou, WANG Haiyun. A novel directional comparison pilot protection scheme based on neutral-point zero-sequence current of UHV auto-transformer[C]//12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014). Copenhagen, Denmark; IET, 2014: 1-6.
- [3] ZHENG Tao, CHEN Peilu, LU Ting. Research on a mal-operation case of differential protection in UHV transformer[C]//2013 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (AP-PEEC). Hong Kong, China: IEEE, 2013: 1-5.
- [4] 田书欣,程浩忠,常浩,等. 特高压电网社会效益分析及评价方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 145-153.
TIAN Shuxin, CHENG Haozhong, CHANG Hao, et al. Analysis and evaluation of social benefit from UHV power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 145-153.
- [5] 廖才波,阮江军,刘超,等. 油浸式变压器三维电磁-流体-温度场耦合分析方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 150-155.
LIAO Caibo, RUAN Jiangjun, LIU Chao, et al. Comprehensive analysis of 3-D electromagnetic-fluid-thermal fields of oil-immersed transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 150-155.
- [6] 徐岩,陈昕. 基于合作博弈和云模型的变压器状态评估方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(3): 88-93.
XU Yan, CHEN Xin. Transformer status assessment based on cooperative game and cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(3): 88-93.
- [7] 陈建华. 电缆连接变压器选相投切技术研究[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
CHEN Jianhua. Research on controlled switching of no-load transformers with cable[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] 黄金. 空载变压器选相关合技术研究[D]. 成都:西华大学, 2010.
HUANG Jin. Research on controlled switching of no-load transformers[D]. Chengdu: Xihua University, 2010.
- [9] 段雄英,黄智慧,廖敏夫,等. 基于多元线性回归法的相控开关操作时间的补偿与预测[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(7): 72-75.
DUAN Xiongying, HUANG Zhihu, LIAO Minfu, et al. Prediction and compensation of operating time based on multi-element linear regression for controlled switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(7): 72-75.
- [10] ZHANG Fan, LÜ Yang, DUAN Xiongying, et al. Investigation on phasing controlled vacuum circuit breaker for switching overvoltage of 110 kV power system[C]//The 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV). Suzhou, China: IEEE, 2016: 597-600.
- [11] 吕洋,李锐锋,张帆,等. 燃弧时间影响下断路器相控切除并联电抗器特性研究及实现[J]. 电器与能效管理技术, 2016(15): 17-22.
LÜ Yang, LI Ruifeng, ZHANG Fan, et al. Characteristics research

- and realization of phase-controlled circuit breaker opening shunt reactors considering the effect of arcing time[J]. *Electrical & Energy Management Technology*, 2016(15):17-22.
- [12] 卢鹏,韩书谟,赵文强,等. 1 100 kV GIS 关键技术研究[J]. *高压电器*, 2010,46(3):1-5.
LU Peng, HAN Shumo, ZHAO Wenqiang, et al. Study on key technology of 1 100 kV GIS[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010,46(3):1-5.
- [13] 叶玮. 特高压断路器液压操动机构设计[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2013.
YE Wei. Design of hydraulic operating mechanism for ultra high circuit breaker [D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.
- [14] 林莘,王飞鸣,刘卫东,等. 高压 SF₆断路器关合预击穿特性计算与试验研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(5):1445-1452.
LIN Xin, WANG Feiming, LIU Weidong, et al. Research on calculations and experiments of closing pre-strike characteristics in high voltage SF₆ circuit breakers[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(5):1445-1452.
- [15] 岳昊,徐永海,刘颖英,等. 特高压交流系统三绕组自耦变压器非线性模型的研究[J]. *电工电能新技术*, 2010,29(3):44-53.
YUE Hao, XU Yonghai, LIU Yingying, et al. Study of nonlinear model of three-winding autotransformer in ultrahigh voltage AC transmission system[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2010,29(3):44-53.
- [16] 罗晓晓. 特高压避雷器的结构设计及主要性能参数[J]. *河北电力技术*, 2015,34(6):67.
LUO Xiaoxiao. Structural design and main performance parameters of UHV arrester[J]. *Hebei Electric Power*, 2015,34(6):67.
- [17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 1 000 kV 特高压交流输电工程过电压和绝缘配合:GB/Z24842—2009[S]. 北京:中国标准出版社, 2009.
- [18] 李光范,张翠霞,李金忠,等. 1 000kV 变压器绝缘水平的探讨[J]. *电网技术*, 2009,33(18):1-4.
LI Guangfan, ZHANG Cuixia, LI Jinzhong, et al. Discussion on insulation level of 1 000 kV Transformer[J]. *Power System Technology*, 2009,33(18):1-4.

作者简介:



张帆

张帆(1986—),女,辽宁大连人,博士研究生,主要研究方向为特高压、绝缘配合(E-mail: zhangfan_lirma@163.com);

段雄英(1974—),女,辽宁大连人,教授,博士,通信作者,主要研究方向为智能开关电器理论及应用、电力设备在线检测与绝缘诊断等(E-mail: xyduan@dlut.edu.cn)。

Analysis of impacts of controlled switching on switching impulse insulation of UHV transformer

ZHANG Fan¹, DUAN Xiongying¹, LÜ Yang², LIU Ruitong³, YANG Yingxuan³

(1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. State Grid Dalian Power Supply Company, Dalian 116001, China;

3. State Grid Liaoning Electric Power Research Institute, Shenyang 110055, China)

Abstract: Based on the electric field intensity distribution of UHV circuit breaker, the mean and standard deviation of the pre-breakdown time are given. Then the ATP-EMTP software is used to model the no-load transformer reasonably, and the electromagnetic transient simulation is carried out under different remanence conditions, and the switching overvoltages are statistically analyzed with the consideration of the influences of pre-breakdown and mechanical dispersion. At the same time, the inrush current generated during the optimal phase closure is analyzed and discussed. The final analysis of the low-voltage simulation experiment shows that even considering the pre-breakdown, mechanical dispersion and the change of inrush current, the controlled switching technology still has the effect of overvoltage suppression, and combining with the arrester the overvoltage can be completely limited within the standard requirements. Finally, according to the standard GB/Z24842—2009, the recommended value of switching impulse insulation level for transformer is given, which can be used for engineering design reference.

Key words: UHV transformer; pre-breakdown; controlled switching; ATP; insulation

附录

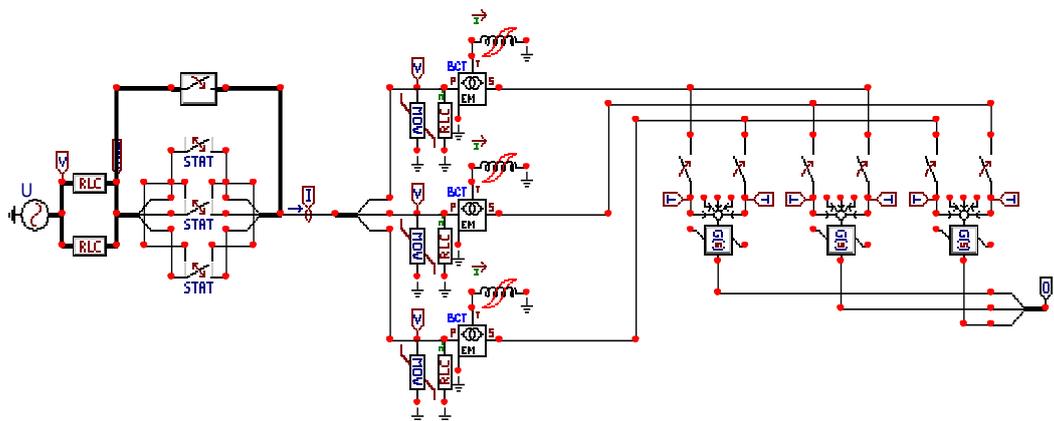


图 A1 特高压变压器仿真模型

Fig.A1 Simulation model of UHV transformer