

基于串联电阻开关的电容器组投切重燃过电压仿真研究

王雪松¹, 岳永刚¹, 吕鑫¹, 张庆如², 王超², 张立国¹, 杨兰均²

(1. 内蒙古超高压供电公司, 呼和浩特 010080; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要:研究了在 500 kV 超高压变电站的电容器组补偿系统中,通过采用串联电阻开关来限制并联电容器组投切过程中的过电压和涌流问题。通过仿真分析了不同串联电阻阻值的影响,并提出推荐阻值,对比了使用普通断路器、相控断路器和串联电阻开关对过电压与过电流的限制效果。结果表明,串联电阻开关能有效降低重燃概率,同时可降低重燃后的过电压水平。从经济和技术角度分析,认为串联电阻开关具有较低的断路器要求、更好的经济性和实用性。

关键词:并联电容器组; ATP-EMTP; 重燃过电压; 相控断路器; 串联电阻开关

Research on Simulation of Switching Re-ignition Over-voltage of Capacitor Bank Based on Series Resistance Switch

WANG Xuesong¹, YUE Yonggang¹, LYU Xin¹, ZHANG Qingru², WANG Chao²,
ZHANG Liguo¹, YANG Lanjun²

(1. Inner Mongolia EHV Power Supply Company, Hohhot 010080, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In this paper, the issue of limiting the over-voltage and inrush current by way of series resistance switch during the switching of shunt capacitor bank in the capacitor bank compensation system of a 500kV EHV substation is studied. The influence of different series resistance values is analyzed through simulation, the recommended resistance values are proposed, and the limiting effects of using ordinary circuit breaker, phase-controlled circuit breaker and series resistance switch on over-voltage and over-current are compared. The results show that the series resistance switch can effectively reduce the probability of reignition and can, at the same time, reduce the over-voltage level after reignition. It is thought from the economic and technical perspective that the series resistance switch has lower circuit breaker specifications, better economic performance and practicality.

Keywords: shunt capacitor bank; ATP-EMTP; re-ignition over-voltage; phase-controlled circuit breaker; series resistance switch

0 引言

500 kV 超高压变电站通常使用 35 kV 或 66 kV 并联电容器组来补偿无功功率,提高母线电压。然而,由于其单组容量大且投切频率高,常常会出现合闸涌流和分闸过电压现象^[1],增加了设备非正常损坏事故的发生率。虽然 SF₆ 断路器具有较高的耐受涌流和过电压能力,但由于其投切方式仍然是三相联动的随机投切方式,无法有效抑制或削弱产生的涌流和过电压。因此,在投切过程中引起的涌流

和重燃现象常常会导致无功补偿装置及其附属设备故障而引发事故,如文献^[2]中在利用 SF₆ 断路器投切 35 kV 并联电容器组时,涌流和过电压导致电抗器发生匝间短路故障;文献^[3]中投入 66 kV 并联电容器组时,开关合闸瞬间对串联电抗器绝缘造成冲击;文献^[4-5]中投切 66 kV 并联电容器组过程中的重燃过电压引起电容器组损坏。针对某 500 kV 变电站发生故障,低压侧开关开断并联电容器过程中出现复燃,导致低压侧站内变故障的现象。本文利用 ATP-EMTP 程序对投切电容器引起的过电压和涌

收稿日期:2023-05-22

基金项目:内蒙古超高压供电公司科技项目(LX99222990)。

流现象进行了分析。

为解决并联电容器组投切时的合闸涌流和分闸过电压问题,国内外已开展了大量研究。研究方法包括机理分析、仿真计算和现场实验。由于现场实验受限制较多,通常采用机理分析^[6]或计算机仿真建模^[7-12]来研究并联电容器的投切过程。目前,解决合闸涌流和分闸过电压问题的常见开关技术有晶闸管投切电容器和相控断路器^[2]。此外,还有文献通过改变补偿回路结构,加装被动性阻尼限压装置来抑制涌流和过电压现象,包括串联电阻开关^[13]、RC 阻容保护装置^[14]、L-R 过电压保护装置^[15]、金属氧化物避雷器^[16]等抑制方法。其中,串联电阻开关通过把较严重的暂态现象分割成两个较弱小的过程来降低过电压。本文利用 EMTF 仿真分析了在各种投切情况下并联电容器可能出现的暂态过电压,

并对采用普通断路器、串联电阻开关和相控断路器的效果进行了评估。文献^[17-18]指出,串联电阻开关可能导致开关更加复杂、成本更高,并且抑制效果不稳定,存在较大的离散度。然而,通过对比分析,本文认为串联电阻开关在降低过电压方面表现更佳,相较于相控断路器,它对动作时间没有严格要求,并且成本更低。

1 仿真模型

以某 500 kV 变电站 SF₆ 断路器投切电容器为仿真实例,变电站系统接线图见图 1,该变电站有 4 台变压器,变压器联接组别标号为 YNa0d11,在 66 kV 侧并联配置了补偿电容器组。220 kV 侧采用双母分段接线方式,共有 15 条进线,500 kV 侧有 2 条出线,其主要电气参数见表 1。

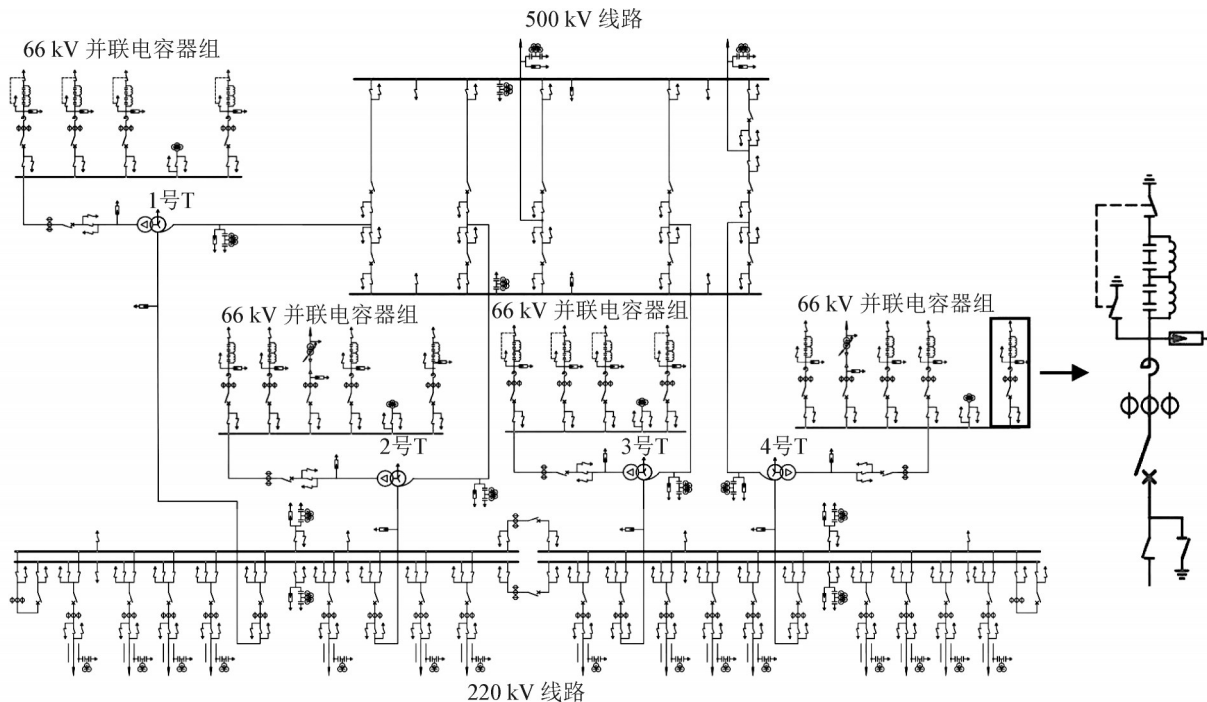


图1 变电站系统接线图
Fig. 1 Wiring diagram of substation system

表1 变电站主要设备的电路参数
Table 1 Circuit parameters of main equipment of the substation

设备名称	型号	参数
主变压器	ODFS-400000/500×3	空载损耗 $P_0=85.4$ kW, 空载电流(标么) $I_0=0.026\%$, 短路损耗 $P_{k_{1-2}}=507.0$ kW, $P_{k_{1-3}}=149.1$ kW, $P_{k_{2-3}}=148.9$ kW, 阻抗电压(标么) $U_{k_{1-2}}=18.43\%$, $U_{k_{1-3}}=52.97\%$, $U_{k_{2-3}}=29.18\%$
并联电容器组	BAM11.5-500-1W	$C_e=12.20$ μ F, $U_e=11.5$ kV, $Q_e=500$ kvar, 每相由4×10个BAM11.5-500-1W电容器组成
串联电抗器	CKDK-2400/66-12	$I_e=434.8$ A, 电抗率 $k=12\%$, $L=40.4$ mH, $R=0.083$ Ω
放电线圈	FDG-23-5-1W	$U_e=23$ kV, $Q_e=5\ 000$ kvar, $R=8.4$ k Ω , $\omega L=105.8$ Ω

该变电站为汇流站,仿真电力富裕时 220 kV 为进线、500 kV 为出线的工况,即将 15 条 220 kV 进线等值为系统电源、500 kV 线路等效为恒定阻抗模型。串联电抗器的电抗率为 12%;并联电容器组采用 Y 型中性点不接地方式,每组容量为 60 Mvar,每相由 40 个 BAM11.5-500-1W 单元组成,采用国网的 4 串方案连接,仿真中等效为 4 个 122 μ F 电容器串联,两组放电线圈与其并联;母线侧对地的寄生电容取 150 000 pF,负载侧对地的寄生电容取 50 000 pF,中性点对地的寄生电容取 50 pF^[19-20],变压器 1 号 T 66 kV 侧部分 EMTP 仿真模型见图 2。

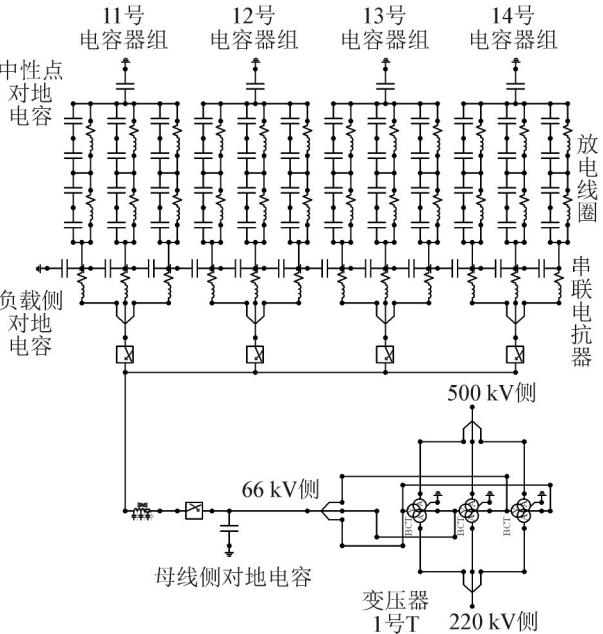


图2 EMTP仿真建模示意图
Fig. 2 Schematic diagram of EMTP simulation modeling

通常情况下,随着已投电容器组数量的增加,追加投入时的涌流逐渐增大。然而,目前背靠背电容器组都安装了串联电抗器,用于限制合闸涌流。若采用大电抗率,合闸涌流的变化不明显,接近于某一常数^[21]。本次仿真模型中电抗率约为 0.12,属于大电抗率,已投切的组数对各类操作过电压的大小影响较小。在仿真中考虑一台变压器低压侧已投入 3 组电容器、并投切第 4 组电容器的情况。

依据 DL/T 620—2016《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[22],规定电容器组高压端对地电压为额定电压的 4 倍。依据 DL/T 604—2020《高压并联电容器装置使用技术条件》^[23],12% 电抗率的 66 kV 并联电容器组额定电压标准值为 44 kV,因此其相对地操作冲击耐受水平约为 248 kV。依据电容器设备的操作冲击绝缘水平,66 kV 电容器组极间操

作冲击耐受水平(U_s)应为其额定电压的 2.5 倍,约为 155 kV。同时可以算出并联电容器组相间操作耐压水平($\sqrt{3}U_s$)为 269 kV。在仿真结果中,电流值使用标么值表示,即与额定电流幅值(615 A)的比值;电压值使用标么值表示,即与相电压幅值(54 kV)的比值。按照 GB 50227—2017^[24]的规定计算,合闸涌流以 14.1 p.u. 为限值^[25],并联电容器相对地操作冲击电压绝缘水平约为 4.61 p.u.,极间操作冲击电压绝缘水平约为 2.87 p.u.,相间操作冲击电压绝缘水平约为 4.98 p.u.。

2 串联电阻开关与相控断路器对比

2.1 合闸情况

在电容器合闸过程中,合闸过电压和涌流与断路器合闸时间有关。合闸过程可以分为三相同时合闸和三相非同时合闸两种情况,普通断路器三相依次合闸时的过电压与涌流见表 2。在表 2 中,计算了合闸过程中最严重的情况,即三相断路器依次在两侧电压达到最大时进行合闸操作^[26]。

表2 普通断路器三相依次合闸时的过电压与涌流
Table 2 Over-voltage and inrush current in case of successively closing operation of three phases of ordinary circuit breaker

参数	数值
中性点电压/p.u.	1.919 9
相对地电压/p.u.	4.116 1
极间电压/p.u.	2.299 7
相间电压/p.u.	3.926 2
串联电抗电压/p.u.	3.347 5
合闸涌流/p.u.	3.734

表 2 中,普通断路器三相依次合闸时,电容器相对地和极间过电压都在可承受范围之内,因此,合闸过程中一般不会产生威胁电容器绝缘的过电压^[15]。由于串联电抗器的作用,合闸涌流远小于规定的 14.1 p.u.。针对该变电站模型,可以不采用串联电阻开关或者相控断路器来抑制合闸过程中可能产生的涌流和过电压。

2.2 分闸情况

2.2.1 普通断路器

针对采用普通断路器的情况,已有许多研究对分闸过程进行了分析。并联电容器的操作过电压主要由于分闸过程中的重燃产生的,当电容器组分闸时,如果三相开关同时分闸,且开关不发生重燃,不会产生危害电容器装置的过电压和涌流。如果开关发生重燃,相当于是—次带初始条件的合闸,所

以仿真中断路器模型设定为在重燃时刻重合闸。为了区分击穿效应的严重程度,根据 GB/T 2900.20 规定^[27],在开断过程中,触头间非剩余电流在电流过零点后的 1/4 工频周期内复现被称为“复燃”,而在 1/4 工频周期及以上时间的复现则称为“重击穿”。实际系统中,出现单相重燃和两相重燃的概率较高,而三相重燃的发生概率较低。因此,只考虑了单次及两次单相重燃和两相重燃的情况,其中两相重燃包括两相同时重燃以及非同时重燃。具体如表 3 所示,包括正常分闸情况下无重燃发生、某相断路器断口电压最大时发生单相重燃、某两相断口电压之和最大时发生两相同时重燃、发生单相重燃后某

相断口电压最大时发生两相非同时重燃、发生两相同时重燃熄弧后该两相断口电压之和最大再次同时发生两相同时重燃以及两相非同时重燃熄弧后在断口电压最大时再次发生两相非同时重燃的 6 种情况。

表 3 中,发生单相和两相重燃时,发生两相非同时重燃的情况最为严重,过电压高于电容器绝缘水平,其电流甚至超过电容器投入时的涌流。发生两次两相重燃的过电压要高于发生单次重燃的过电压,本文将其作为串联电阻开关的限制效果参考,重点关注分闸过程中不发生重燃和发生单次两相非同时重燃两种的极端情况。

表 3 使用普通断路器多种分闸情况对比
Table 3 Comparison of various opening conditions in case of using ordinary circuit breaker

工况	断口电压/p.u.	中性点电压/p.u.	相对地电压/p.u.	极间电压/p.u.	相间电压/p.u.	串联电抗电压/p.u.	电流/p.u.
正常分闸	3.031 5	0.543 3	1.678 3	1.560 3	2.696 6	0.381 9	0.967 2
单相重燃	7.466 6	4.060 9	5.598 2	1.560 3	2.697 7	2.669 8	0.967 2
两相同时重燃	3.031 5	0.890 8	3.290 7	2.844 4	5.359 2	2.570 0	5.857 5
两相非同时重燃	7.466 8	4.530 0	6.962 5	2.859 3	5.292 8	7.082 0	6.279 6
两次两相同时重燃	8.870 6	1.045 7	4.780 2	4.148 5	7.886 0	5.224 2	8.842 8
两次两相非同时重燃	24.000 2	10.106 2	12.787 7	2.929 0	5.447 3	14.707 7	6.776 4

2.2.2 串联电阻开关

现行电力系统中有采用串联电阻开关的方法来抑制过电压现象,其具体结构见图 3。该结构包括主开关、辅助开关以及串联电阻。断路器动作时序见图 4,整个过程三相断路器同时动作,在开断并联电容器组时,辅助开关先闭合,延迟 t_0 后主开关断开,使得串联电阻和辅助开关串入回路,在经过 Δt 的时间后,辅助开关断开,完成开断操作。本文中, Δt 被设定为一个周期,即 20 ms^[13,28]。

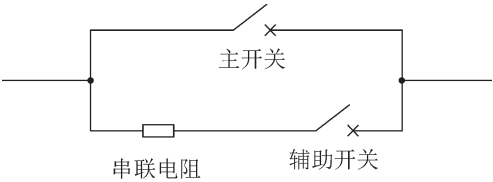


图 3 串联电阻开关原理示意
Fig. 3 Schematic diagram of series resistance

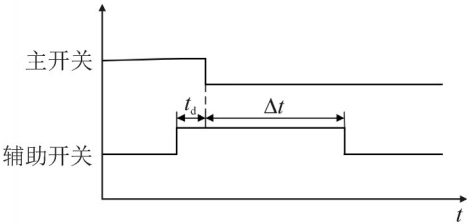


图 4 串联电阻开关动作时序图
Fig. 4 Operation time sequence diagram of series resistance switch

串联电阻接入电路后,与断路器投切容性负载

时,电流和电压的相位差小于 90°。在电流过零时,电压尚未达到峰值。同时,电阻与电容器串联,共同分担正常运行时的电压。因此,其对主开关和辅助开关支路断口电压的影响不同,当主开关开断时,电阻已串联到回路中,电阻越大,主开关上的断口电压越大,容易引起重燃;而在辅助开关开断时,电阻 R 越小,辅助开关上的断口电压越大。因此,在分闸过程中也存在合适的串联电阻能使得两个阶段的断口电压最小化。

根据分闸时重燃概率和重燃产生过电压与断路器的断口电压相关的特性,通过改变仿真中的串联电阻阻值来寻求最优解。断路器断口电压随串联电阻的变化见图 5。

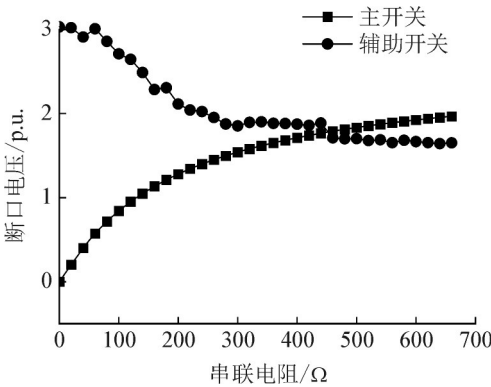


图 5 断路器断口电压随串联电阻的变化
Fig. 5 Variation of voltage across open contacts of circuit breaker with the series resistance

图 5 中,随着串联阻值的增加,主开关的断口电压逐渐降低,辅助开关的断口电压逐渐升高,当串联电阻为 $460\ \Omega$ 时,两个开关断口电压相等。针对不同的变电站参数,可以在 450% 电阻率周围进行仿真,以寻求合适的串联电阻使得两个过程断口电压相等,其中电阻率为电阻与工频下电容器容抗的比值^[13]。

由于分闸过程中分为主开关和辅助开关切除两个阶段,分闸过程中可能出现不同的重燃情况。在第一阶段中,主开关进行分闸操作,这个过程中

主开关有可能发生重燃。而在第二阶段中,辅助开关进行分闸操作,由于主开关先于辅助开关分闸,并且二者两端的断口电压相同,因此在第二阶段中只有辅助开关可能发生重燃。 $460\ \Omega$ 串联电阻开关下多种工况的过电压与电流见表 4。表 4 中仿真分析了可能出现的重燃情况,将发生重燃的时刻设置为断路器某一相断口电压或某两相断口电压之和最大的时刻。除主开关发生两相重燃时,其中某一相的重燃时间距离熄弧时间小于 $1/4$ 个周期外,其他情况下的重燃时间均大于 $1/4$ 个周期。

表 4 $460\ \Omega$ 串联电阻开关下多种工况的过电压与电流
Table 4 Over-voltage and current for various operating conditions under $460\ \Omega$ series resistance switch

工况	断口 电压/p.u.	中性点 电压/p.u.	相对地 电压/p.u.	极间 电压/p.u.	相间 电压/p.u.	串联电抗 电压/p.u.	电流/p.u.
正常分闸	1.790 2	0.345 9	1.298 7	1.462 8	2.448 5	0.139 7	0.967 2
主开关单相重燃	2.567 0	1.505 0	2.125 4	1.461 8	2.448 3	1.789 7	0.967 2
辅助开关单相重燃	2.717 3	1.482 0	1.770 2	1.462 4	2.448 3	1.646 0	0.967 2
主开关两相同时重燃	1.820 8	0.521 9	2.528 5	2.525 2	4.582 3	1.696 6	4.471 5
主开关两相非同时重燃	2.567 0	1.505 0	2.367 7	2.162 8	4.326 6	2.565 3	3.722 4
辅助开关两相同时重燃	1.790 2	0.432 9	1.298 6	1.462 8	2.448 5	1.508 0	0.967 2
辅助开关两相非同时重燃	2.717 3	1.482 0	1.770 2	1.462 4	2.448 5	2.374 7	0.967 2
主开关两次两相同时重燃	2.605 2	0.524 6	3.292 8	3.078 3	6.111 4	2.471 8	5.847 6
主开关两次两相非同时重燃	3.919 7	1.929 8	3.578 7	3.057 4	5.692 3	3.917 9	5.150 2
辅助开关两次两相同时重燃	1.790 2	0.434 6	1.298 8	1.462 8	2.448 5	1.508 6	0.967 2
辅助开关两次两相非同时重燃	4.202 7	1.834 1	2.095 2	1.462 8	2.448 5	3.553 5	0.967 2

在正常分闸情况下,对比采用普通断路器,采用 $460\ \Omega$ 串联电阻开关可以将断口电压从 $3.03\ \text{p.u.}$ 降到 $1.79\ \text{p.u.}$,从而减小重燃的概率。在采用 $460\ \Omega$ 串联电阻开关时,主开关发生两相重燃的情况较严重,但过电压水平都在电容器可承受范围之内。主开关发生两次两相重燃可能会对电容器极间绝缘与相间绝缘造成威胁,但过电压明显低于普通断路器,且发生的概率更低。与主开关发生重燃相比,辅助开关发生重燃时,由于串联电阻的存在,产生的过电压较小。

从主、辅助开关发生重燃概率的角度来看, $460\ \Omega$ 串联电阻开关能够很好的兼顾二者发生重燃的概率。从限制过电压水平的角度来看,由于辅助开关回路电阻的存在,重燃产生的过电压水平较低。可以适当降低串联电阻以降低主开关的重燃概率和产生的过电压、略微增加辅助开关的重燃概率和产生的过电压。主、辅助开关发生两

相重燃时过电压与涌流随见图 6。图 6 中显示了主、辅助开关发生两相重燃后的过电压与涌流随串联电阻的变化,在主开关发生重燃的过电压和涌流整体随着串联电阻的减小而减小,而辅助开关发生重燃的过电压和涌流整体随着串联电阻的减小而增大。

实际中,可根据具体电容器与串联电抗器绝缘水平选择合适的串联电阻范围。例如,根据并联电容器相对地操作冲击电压绝缘水平为 $4.61\ \text{p.u.}$,极间操作冲击电压绝缘水平为 $2.87\ \text{p.u.}$,相间操作冲击电压绝缘水平为 $4.98\ \text{p.u.}$,可将串联电阻选择范围限制在 $100\sim 460\ \Omega$ 范围内。为了使得中性点电压和串联电抗电压最小,可选用 $460\ \Omega$ 串联电阻开关。为了使得相对地电压水平最低,可选用 $300\ \Omega$ 串联电阻开关,本文选用 $300\ \Omega$ 串联电阻开关与普通断路器、相控断路器进行对比。

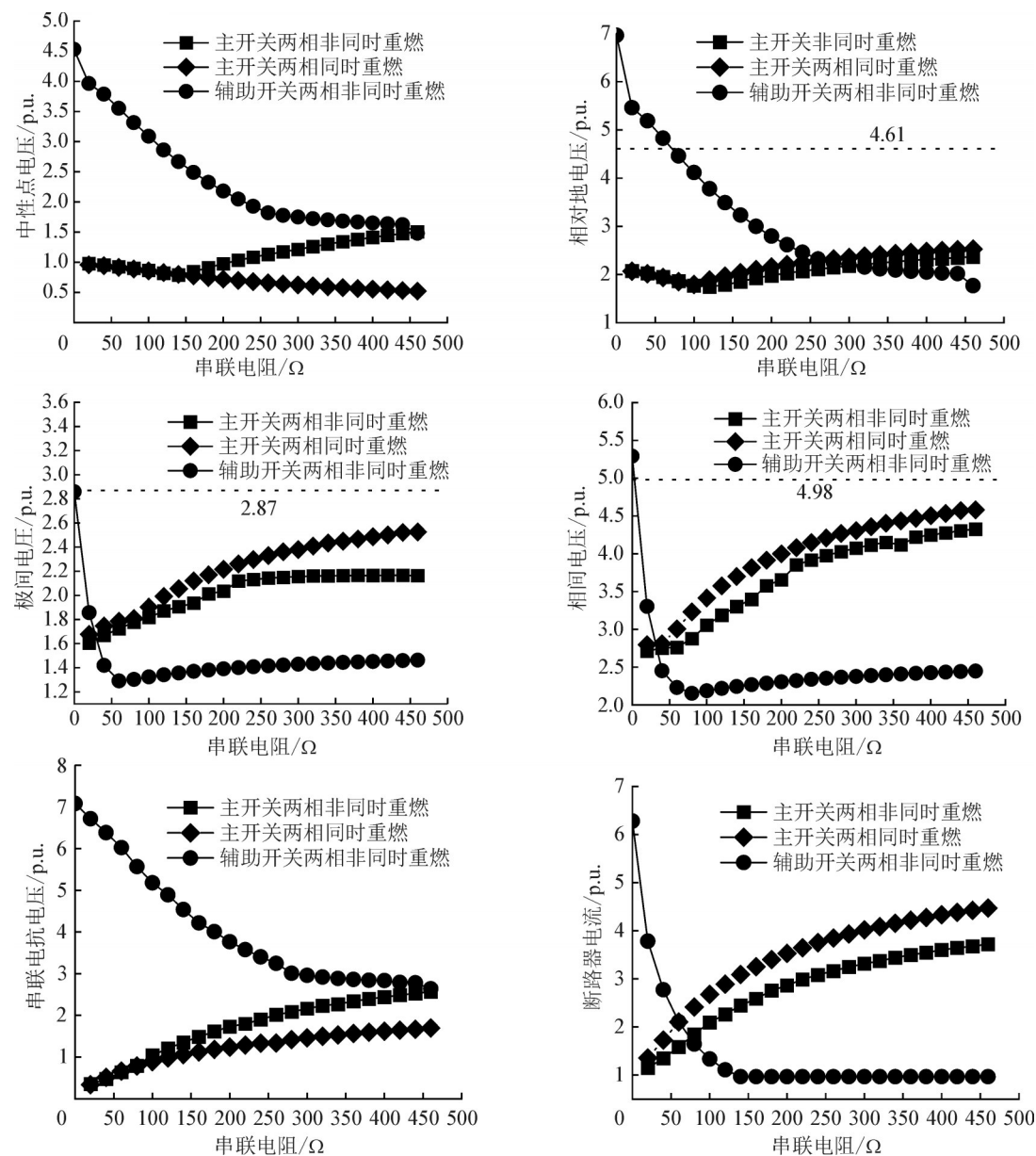


图6 主、辅助开关发生两相重燃时过电压与涌流随串联电阻的变化
Table 6 Variation of over-voltage and inrush current with series resistance in case of two-phase re-ignition of auxiliary switches

2.2.3 相控断路器选相分闸

相控断路器的选相分闸通过确保在电弧过零点时刻断路器主开关的开距足够大,从而减少重燃现象的发生。当开断中性点不接地的并联电容器组时,以流过断路器的电流为参考信号来进行分闸。如以某相电流为参考,在工频电流过零点后的2~3 ms 内控制开关分离,经过 7~8 ms 的燃弧时间后被开断。随后,另外两相的电流大小相等且方向相反,在经过 5 ms 后同时过零开断。然而,相控断路器只是增加了断路器绝缘介质恢复的时间,无法抑制开断以及重燃时产生的过电压。因此,其仿真结果与普通断路器的结果相同,具体见表 5,其中两相重燃与两次两相重燃均取发生同时与非同时重

燃产生的过电压较大值。

表 5 中,在采用相控断路器的选相分闸和串联电阻开关进行正常分闸时,由于串联电阻的阻尼作用,其产生的过电压减小,而电流的最大值都是额定工作时的电流。采用串联电阻开关正常分闸时,将断路器的断口电压从 3 p.u. 降低到 1.8 p.u.,降低了断路器的断口电压,从而降低分闸时发生重燃的概率,该过程中仿真计算得出串联电阻吸收的能量最大约为 166 kJ。而选相分闸给足断路器介质恢复的时间,二者都能降低重燃的概率。采用串联电阻开关可以降低重燃发生后产生的过电压和电流,并将电压限制在承受范围内,而选相分闸则无法实现这一点。

表5 采用普通断路器分闸、选相分闸和300 Ω 串联电阻开关对比
Table 5 Comparison among opening of common circuit breaker opening, opening of phase selection and 300 Ω series resistance switch

工况		断口 电压/p.u.	中性点 电压/p.u.	相对地 电压/p.u.	极间 电压/p.u.	相间 电压/p.u.	串联电抗 电压/p.u.	电流/p.u.
普通/相控 断路器	正常分闸	3.031 5	0.543 3	1.678 3	1.560 3	2.696 6	0.381 9	0.967 2
	两相重燃	7.466 8	4.530 0	6.962 5	2.859 3	5.359 2	7.082 0	6.279 6
	两次两相重燃	24.000 2	10.106 2	12.787 7	4.148 5	7.886 0	14.707 7	8.842 8
串联300 Ω 电阻	正常分闸	1.840 2	0.468 9	1.213 2	1.486 0	2.377 4	0.139 7	0.967 2
	两相重燃	3.052 5	1.750 0	2.354 4	2.379 9	4.306 7	2.960 2	4.061 2
	两次两相重燃	5.392 2	2.197 3	2.927 3	2.871 4	5.494 2	3.570 2	4.857 4

2.3 经济性及技术讨论

串联电阻开关应用于投切 66 kV 并联电容器组,由于 66 kV SF₆断路器为三相联动断路器^[2],仅需额外增加一套三相联动断路器及 3 个串联电阻。而相控断路器要求断路器的每个相都被独立控制^[1],需要更换为三相分相断路器,且每个断路器额外增加一套控制设备,成本远高于采用串联电阻开关的方案。同时相控断路器要考虑投切时间的分散性和预击穿问题,对于控制投切的时间精度要求很高,即使是较小的延时也会错过最佳投切时机,对断路器的要求非常严格。且当选相合闸装置的参数设置不当时,抑制作用被大幅度削减,实际效果不理想,限制了其技术产品化和现场应用^[2, 16, 29-30]。国内外尽管已经有机构研发出相应的产品,但在实际现场应用还有所欠缺。相比之下,串联电阻开关对断路器的动作时间没有要求,可以在任何时间进行投切,降低了对断路器投切时机的要求。目前阶段来看,采用串联电阻开关优于相控断路器。随着智能变电站的发展和设备集成度的提高,也许在综合智能单元中实现选相投切功能将成为更好的选择。

3 结语

1)通过仿真分析,串联电阻开关可以有效限制并联电容器组分闸过程中产生的过电压和涌流。从主、辅助开关发生重燃概率的角度来看,460 Ω 串联电阻开关能够很好的兼顾二者发生重燃的概率。从限制过电压水平的角度来看,由于辅助开关回路电阻的存在,重燃产生的过电压水平较低。可以适当降低串联电阻以降低主开关的重燃概率和产生的过电压、略微增加辅助开关的重燃概率和产生的过电压。实际中,可根据具体电容器与串联电抗器绝缘水平选择合适的串联电阻。

2)通过仿真分析,采用串联电阻开关可以降低断路器断口电压,从而极大地降低了分闸时发生重

燃的概率。而选相分闸能够给足断路器介质恢复的时间,两者都能降低重燃的概率。但采用串联电阻开关可以降低重燃后产生的过电压和涌流,将电压限制在承受范围内,而选相分闸则不能实现这一点。

3)在投切 66 kV 并联电容器组的情况下,串联电阻开关仅需额外增加一套三相联动断路器和 3 个电阻,而相控断路器方案需要更换为三相分相断路器并增加额外的控制设备。相控断路器对时间精度要求高,而串联电阻开关对动作时间没有要求,可以在任何时间进行三相投切,降低了对断路器的要求,目前阶段采用串联电阻开关更为理想。

参考文献

[1] DAS J C. Analysis and control of large-shunt-capacitor-bank switching transients[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1444-1451.

[2] 王铠,张晶焯,伍国兴,等. 智能相控断路器在 35 kV 并联电容器投切中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(1): 133-139.

WANG Kai, ZHANG Jingchao, WU Guoxing, et al. Application of intelligent phase-controlled circuit breakers in 35 kV switching shunt capacitor banks[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(1): 133-139.

[3] 安海清,李振动,和立伟,等. 一起 66 kV 串联电抗器起火事故分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(2): 93-98.

AN Haiqing, LI Zhendong, HE Liwei, et al. Analysis and prevention measures of a fire accident of 66 kV series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(2): 93-98.

[4] 李胜川,高殿滢. 一起 66 kV 电容器故障的分析及预防措施[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3): 51-56.

LI Shengchuan, GAO Dianying. Analysis of a 66 kV capacitor fault and preventive measures[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 51-56.

[5] 梁义明,史明彪. 66 kV 高压并联电容器故障分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 41-44.

LIANG Yiming, SHI Mingbiao. Analysis of the fault in 66 kV

- high voltage shunt capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 41-44.
- [6] 徐东晟. 真空断路器投切电容器组时的过电压及其预防措施[J]. 福建电力与电工, 1995(4): 40-44.
XU Dongsheng. Analysis and preventive measures on overvoltage caused by vacuum breaker switching on/off capacitors[J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 1995(4): 40-44.
- [7] 张森峰, 商立群. 并联电容器组分闸重燃过电压仿真[J]. 高压电器, 2011, 47(12): 1-5.
ZHANG Senfeng, SHANG Liqun. Simulation of restrike overvoltage due to switching off shunt capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12): 1-5.
- [8] 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.
- [9] FENG Shunping, LIU Wenzhe. Overvoltage simulation of circuit breaker switching off shunt capacitor banks[C]//2011 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S. l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [10] 刘生辉, 刘文泽, 王克英. 真空断路器切除电容器组导致两相重燃的 EMTP 建模[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 26-30.
LIU Shenghui, LIU Wenzhe, WANG Keying. EMTP modeling of two-phase reignition due to vacuum breaker removal of capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 26-30.
- [11] 陈鹏云, 苏梓铭, 鲁铁成, 等. 无功补偿装置电磁暂态仿真计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5): 5-9.
CHEN Pengyun, SU Ziming, LU Tiecheng, et al. Electromagnetic transient simulation calculation on reactive power compensation system[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(5): 5-9.
- [12] YANG Qing, CHEN Song, ZENG Xianglong, et al. Suppression measures for overvoltage caused by vacuum circuit breaker switching off 10 kV shunt reactor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(2): 540-548.
- [13] 张华赢, 杨兰均, 李良书, 等. 投切电容器组专用真空断路器性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2011, 32(3): 38-44.
ZHANG Huaying, YANG Lanjun, LI Liangshu, et al. Research on the performance of vacuum circuit breakers for switching capacitor banks[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2011, 32(3): 38-44.
- [14] 于群英, 赵春明, 杨代勇, 等. SF₆ 断路器投切 66 kV 干式并联电抗器过电压及抑制防护技术研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 223-228.
YU Qunying, ZHAO Chunming, YANG Daiyong, et al. Study on the overvoltage and suppression protection technology of SF₆ circuit breaker switching 66 kV dry-type shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 223-228.
- [15] 陈辰杰, 郑学贤. 35 kV 投切并联电容器组的过电压分析与抑制[J]. 大众科技, 2012, 14(10): 87-90.
CHEN Chenjie, ZHENG Xuexian. Analysis and suppression of overvoltage in 35 kV shunt capacitor bank[J]. Popular Science and Technology, 2012, 14(10): 87-90.
- [16] 王明旭. 并联电容器投切暂态过程分析与过压抑制研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [17] 于忠前. 并联电容器组相控投切技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.
- [18] 吕传玉. 基于选相控制技术的并联电容器组投切系统[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [19] 司马文霞, 姜雄伟, 彭庆军, 等. 35 kV 并联补偿电容器组继电保护动作时过电压的分析及防护[J]. 高压电器, 2017, 53(8): 1-8.
SIMA Wenxia, JIANG Xiongwei, PENG Qingjun, et al. Analysis and protection of overvoltage of 35 kV shunt compensation capacitor bank when relay protection take action[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(8): 1-8.
- [20] 蒋国顺, 蒋苏静, 李继光. 并联电容器组分闸操作过电压的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(3): 68-73.
JIANG Guoshun, JIANG Sujing, LI Jiguang. Simulation analysis of overvoltage in shunt capacitor group gate operation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 68-73.
- [21] 方世琦, 王敏. 电容器组合闸涌流计算公式的改进[J]. 中国电力, 1993(4): 6-10.
FANG Shiqi, WANG Min. Improvement of the formula for calculating the inrush current of capacitor combination gate[J]. China Electric Power, 1993(4): 6-10.
- [22] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—2016[S]. 2016.
Overvoltage protection and insulation fit of AC electrical installations: DL/T 620—2016 [S]. 2016.
- [23] 高压并联电容器装置使用技术条件: DL/T 604—2020 [S]. 2020.
Technical specification of high-voltage shunt capacitor installations: DL/T 604—2020 [S]. 2020.
- [24] 并联电容器装置设计规范: GB 50227—2017[S]. 2017.
Code for design of installations of shunt capacitor: GB 50227—2017 [S]. 2017.
- [25] 杨昌兴, 赵启承, 王明毫. 并联电容器装置设计及应用若干议题(续)[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 1-8.
YANG Changxing, ZHAO Qicheng, WANG Minghao. Some topics on the design and application of shunt capacitor de-

- vices (continued) [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 1-8.
- [26] 陆华. 配电网并联补偿电容器组操作过电压的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [27] 电工术语高压开关设备和控制设备: GB/T 2900.20—2016[S]. 2016.
- Electrotechnical terminology—High-voltage switchgear and controlgear: GB/T 2900.20—2016 [S]. 2016.
- [28] 刘赫. 配电网并联补偿电容器组分合闸过电压研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [29] 李付永, 张帆, 李海涛, 等. 相控断路器选相关合闸问题分析及应用研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(9): 141-147.
- LI Fuyong, ZHANG Fan, LI Haitao, et al. Analysis on making operation in phase selection of phase-controlled circuit breaker and its application[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(9): 141-147.
- [30] 向真, 伍国兴, 张欣, 等. 电容器组开关选相分合闸装置运行分析及控制策略改进[J]. 南方电网技术, 2022, 16(12): 54-59.
- XIANG Zhen, WU Guoxing, ZHANG Xin, et al. Operation analysis and control strategy improvement of capacitor bank switch phase-selective breaking device[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(12): 54-59.
- 作者简介:**
- 王雪松(1985—)男, 高级工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 岳永刚(1979—)男, 高级工程师, 从事电能质量分析及控制技术工作。
- 吕鑫(1990—)男, 工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 张庆如(2000—)男, 硕士, 研究方向为电力系统过电压。
- E-mail: 18335798325@stu.xjtu.edu.cn。
- 王超(1997—)男, 博士, 研究方向为离子体放电和脉冲功率技术。
- 张立国(1991—)男, 工程师, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 杨兰均(1968—)男, 教授, 研究方向为脉冲功率等离子体科学与技术、新型电力设备等。