

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.01.003

断路器重击穿过电压对电容器组的影响及抑制策略研究

赵彦军, 雷乔舒, 王国喜, 高扬, 魏文文

(无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214100)

摘要: 本文针对断路器重击穿过电压对电容器组的危害展开研究,通过建立 35 kV 并联电容器装置的 EMTP 仿真模型,验证理论与建模的正确性,对比分析正常切除及单相、两相、三相重击穿,在有避雷器时的过电压特性。结果表明,无避雷器时,正常切除时电容器组两端间最大过电压 1.366 p.u.,单相重击穿时相对地最大过电压 5.18 p.u.,两相、三相重击穿时极间过电压分别是 2.34 p.u.、2.53 p.u.;有避雷器可将相对地过电压限制在约 3 p.u.以下,但无法抑制极间过电压。结合标准的相关要求,提出投切断路器应满足 C2-M2 级,10 kV 及以下建议采用经老炼的真真空断路器或接触器,35 kV 及以上建议采用 SF₆ 断路器或负荷开关,以降低重击穿的风险,为设备的选型及安全运行提供依据。

关键词: EMTP; 断路器; 重击穿; 过电压; 电容器组

Research on the Impact of Circuit Breaker Restrike Overvoltage on Capacitor Banks and Suppression Strategies

ZHAO Yanjun, LEI Qiaoshu, WANG Guoxi, GAO Yang, WEI Wenwen

(Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214100, China)

Abstract: In this paper, the hazards of circuit breaker restrike overvoltage to capacitor banks is studied. The correctness of theory and modeling is verified by setting up EMTP simulation model of 35 kV shunt capacitor device. The overvoltage characteristics in case of normal switching, single-phase, two-phase and three-phase restrike as well as with and without surge arresters are compared and analyzed. The results show that in case of no arresters, the maximum voltage across the capacitor bank during normal switching is 1.366 p.u.; the maximum overvoltage of phase to ground during single phase reclosing is 5.18 p.u.; the overvoltage between poles during two-phase and three-phase restrike is 2.34 p.u. and 2.53 p.u. respectively. With arresters, phase-to-ground overvoltages are limited below approximately 3 p.u., but overvoltage between poles remains uncontrolled. Based on relevant standards, it is proposed that circuit breakers for capacitive switching should meet class C2-M2 requirements. For 10 kV and below, it is recommended to use aged vacuum circuit breaker or contactor. While for 35 kV and above, SF₆ circuit breakers or load switches are recommended to minimize the risk of restrike and provide a basis for the selection of equipment and its safe operation.

Keywords: EMTP; circuit breaker; restrike; overvoltages; capacitor bank

0 引言

在现代电力系统中,电容器装置作为实现无功补偿与电压调节的关键设备^[1-7],其频繁的投切操作对系统稳定性与设备可靠性提出了严峻挑战。断路器作为投切电容器组的核心执行器件,在开断过

程中因电弧重击穿产生的过电压,不仅会对电容器组的绝缘介质造成累积性损伤,还可能引发设备故障甚至电网事故,严重威胁电力系统的安全运行^[8-11]。近年来,随着新能源并网规模的不断扩大,系统无功需求激增,电容器组的投切频率显著提升,断路器重击穿对电容器组的影响愈发突出。尽管已有

收稿日期:2025-12-01; 修回日期:2025-12-08

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

Project Supported by National Key R & D Program of China(2021YFB2401504)。

学者针对断路器重击穿问题展开研究^[9-24],但尚未结合电容器组的允许耐受电压、避雷器的接线方式及对断路器的性能要求进行系统的综合性分析。

工程实践中因断路器重击穿导致电容器套管断裂、鼓肚的案例偶有发生,如图1所示。这引发了业内的疑问:既然电容器装置已配备避雷器,为何“操作过电压”(实际常被误认的重击穿过电压)仍会造成电容器鼓肚、套管炸裂?是避雷器未发挥保护作用,还是电容器存在质量缺陷?本文将围绕上述问题展开深入研究。

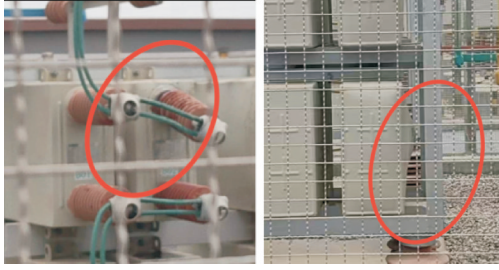


图1 电容器鼓肚、套管断裂
Fig. 1 Capacitor bulging and bushing rupture

1 正常切除电容器装置无重击穿的过电压

35 kV 并联电容器装置的一次原理图见图2。采用 EMTF 对图2电路建立仿真模型,电源用理想三相电压源模型,因断路器周围的杂散电容对投切的高频振动过程有影响,为提高仿真精度,仿真模型中增加母线对地电容。假定电源侧对地电容 0.05 μF ,断路器侧母线对地电容 0.002 μF ,中性点对地电容 50 pF,对 TBB35-10000/417-ACW(电抗率 5%)进行仿真,图2中 L 为 23.091 mH、 C 为 21.94 μF 。需要注意的是仿真没有考虑断路器开断燃弧、合闸预击穿和机械分散特性。

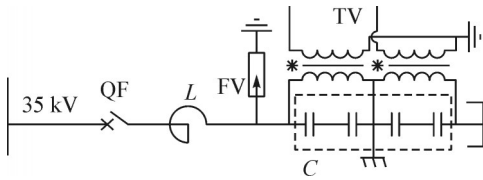


图2 35 kV 并联电容器装置的一次原理图
Fig. 2 Primary principle diagram of 35 kV shunt capacitor device

1.1 理论计算

正序三相对称相电压数学表达式^[25-26]为

$$\begin{cases} u_a(t) = U_{\max} \cos \omega t \\ u_b(t) = U_{\max} \cos \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) \\ u_c(t) = U_{\max} \cos \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $U_{\max}$ 为相电压的幅值,指定 $U_{\max}$ 为标么值的

基值; u_a 、 u_b 、 u_c 分别是电源 A、B、C 三相的相电压; u_{AN} 、 u_{BN} 、 u_{CN} 分别是电容器组 A、B、C 三相的两端间电压; u_N 是电容器组中性点对地电压; ω 为工频频率。假设 $t=0$ 时开关动作,则

$$\begin{cases} u_{AN}(0) = u_{AN}(0^-) = 1.0 \text{ p.u.} \\ u_{BN}(0) = u_{BN}(0^-) = -0.5 \text{ p.u.} \\ u_{CN}(0) = u_{CN}(0^-) = -0.5 \text{ p.u.} \\ u_N(0) = u_N(0^-) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$t=0^+$ 时, A 相灭弧, B 相和 C 相串联, $t=0^+$ 时电容器组端电压三相电压数学表达式为

$$\begin{cases} u_{AN}(t_0^+) = U_{\max} \\ u_{BN}(t_0^+) = -0.5U_{\max} + \\ \quad \frac{1}{2}U_{\max} \left[\cos \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) - \cos \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right) \right] \\ u_{CN}(t_0^+) = -0.5U_{\max} - \\ \quad \frac{1}{2}U_{\max} \left[\cos \left(\omega t - \frac{2}{3}\pi \right) - \cos \left(\omega t - \frac{4}{3}\pi \right) \right] \end{cases} \quad (3)$$

化简为

$$\begin{cases} u_{AN}(t_0^+) = U_{\max} \\ u_{BN}(t_0^+) = -0.5U_{\max} + \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\max} \sin \omega t \\ u_{CN}(t_0^+) = -0.5U_{\max} - \frac{\sqrt{3}}{2}U_{\max} \sin \omega t \end{cases} \quad (4)$$

由上式可知,过 5 ms 后 B 相和 C 相同时灭弧。

$$\begin{cases} u_{AN}(5) = u_{AN}(0) = 1.0 \text{ p.u.} \\ u_{BN}(5) = u_{BN}(5^-) = 0.366 \text{ p.u.} \\ u_{CN}(5) = u_{CN}(5^-) = -1.366 \text{ p.u.} \\ u_N(5) = u_N(5^-) = 0.5 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (5)$$

所以,正常切除,电容器组只承受 1.366 p.u. 过电压,该值小于 GB/T 11024.1—2019^[5]允许的合闸过电压值。

1.2 仿真

仿真波形图(195 ms 开关动作切除,对应理论计算 t_0 时刻)如图3所示。由图3可以看出: 1) 195 ms A 相首先切除, 200 ms B 相和 C 相同时切除; 2) 200 ms 时,电容器组两端间电压 A 相 1.0 p.u.、B 相 0.366 p.u.、C 相 -1.366 p.u.; 3) 三相对地电压, A 相 1.5 p.u.、B 相 0.87 p.u.、C 相 -0.87 p.u.; 4) 中性点电压 0.5 p.u., 因中性点电容很小,所以自放电常数很小,中性点电压在 1 ms 内降至 0。仿真波形图与理论计算的结果一致,互证理论分析与建模是正确的。

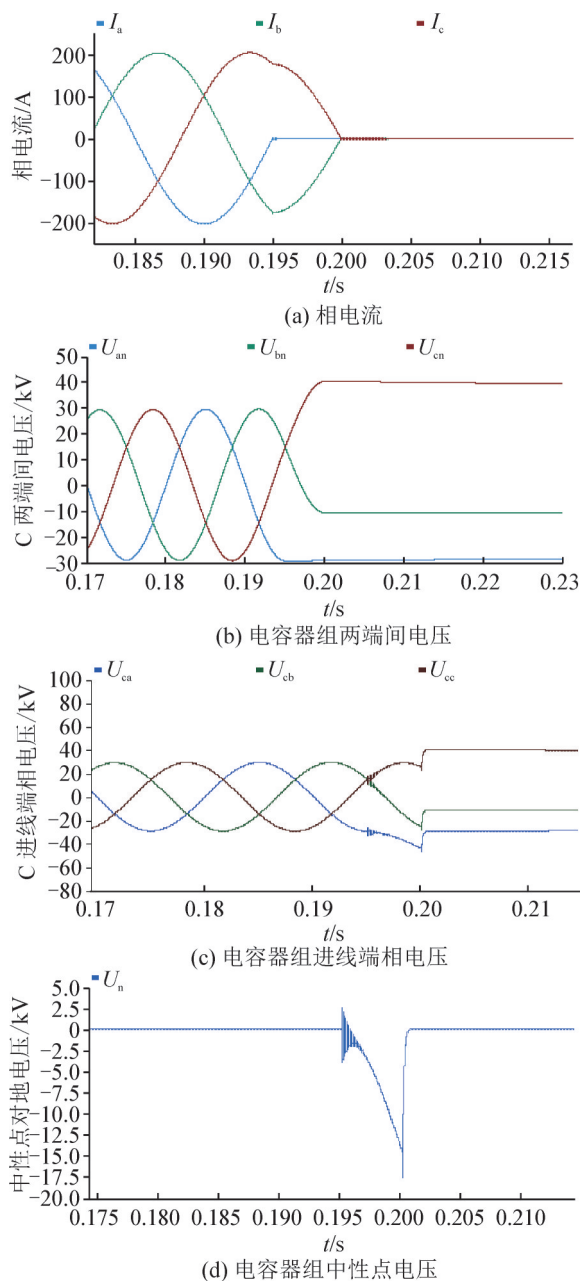


图3 正常切除的波形图

Fig. 3 Waveform diagram of normal switching-off

2 单相重击穿1次的过电压

涉及断路器是否重击穿理论分析有两大基石理论:George Slepian 提出的弧隙介质恢复理论和 Harry Kersey 提出的能量平衡理论。Slepian 认为电弧电流过零后,弧隙变为介质且无电导,其电压恢复与介质强度恢复过程互不影响,电弧熄灭或重击穿取决于二者恢复速度。Kersey 认为电弧重击穿是电路及弧隙之间能量平衡的结果,交流电流过零电弧暂时熄灭时,弧隙温度较高,热游离未停止,弧隙仍是具有一定电导的通道,恢复电压会引发弧后电流,若电源输入热能大于散出热能,弧隙将热

击穿导致重击穿。其中,弧隙介质恢复理论适用于真空断路器等快速开断场景,能量平衡理论适用于油断路器等慢开断场景,本文采用弧隙介质恢复理论。

2.1 理论计算

根据 George Slepian 的弧隙介质恢复理论,是否重击穿取决于断路器断口间电压恢复和介质强度恢复的竞速。断路器断口间恢复电压见图 4 所示。

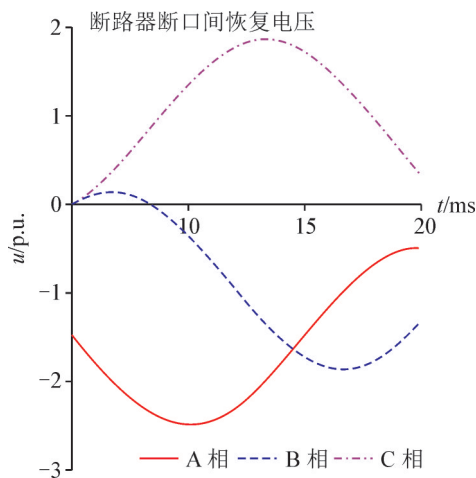


图4 断路器断口间恢复电压

Fig. 4 Recovery voltage across break of circuit breaker

从图 4 可以看出,首开相 A 相断路器断口间恢复电压在 10 ms 达到最大值-2.5 p.u.,所以 A 相发生单相重击穿的概率最大。

10 ms A 相重击穿, $t=10^{-}$ 各设备电压状态方程为

$$\begin{cases} u_a(10^-) = -1.0 \text{ p.u.} \\ u_{AN}(10^-) = u_{AN}(0) = 1.0 \text{ p.u.} \\ u_{BN}(10^-) = u_{BN}(5) = 0.366 \text{ p.u.} \\ u_{CN}(10^-) = u_{CN}(5) = -1.366 \text{ p.u.} \\ u_N(10^-) \neq u_N(5) = 0 \text{ (自放电至0)} \end{cases} \quad (6)$$

计算 $t=10$ 各设备电压状态方程为

$$\begin{cases} u_{AC}(10) = -1 \times 2 - 1 - 0 = -3.0 \text{ p.u.} \\ u_N(10) = -3 - 1 = -4.0 \text{ p.u.} \\ u_{BC}(10) = 0.366 + (-4.0) = 3.634 \text{ p.u.} \\ u_{CC}(10) = -1.366 + (-4.0) = -5.366 \text{ p.u.} \end{cases} \quad (7)$$

式中, u_{AC} 、 u_{BC} 、 u_{CC} 分别是电容器组 A、B、C 三相进线端对地电压。

2.2 仿真分析

无避雷器的仿真波形(215 ms A 相开关重击穿,对应理论计算 t_{10} 时刻,225 ms A 相再次切除)见图 5 所示。由图 5 可以看出 A 相单相重击穿 1 次:1)单相重击穿的相电流很小;2)单相重击穿时,

电容器组两端间电压维持不变, A相 1.0 p.u.、B相 0.366 p.u.、C相 -1.366 p.u.; 3) 三相对地电压波形均是振荡衰减, 振荡源自母线对地电容, A相 2.78 p.u., B相 3.42 p.u., C相 5.18 p.u.; 4) 中性点电压 3.79 p.u., 波形振荡衰减。

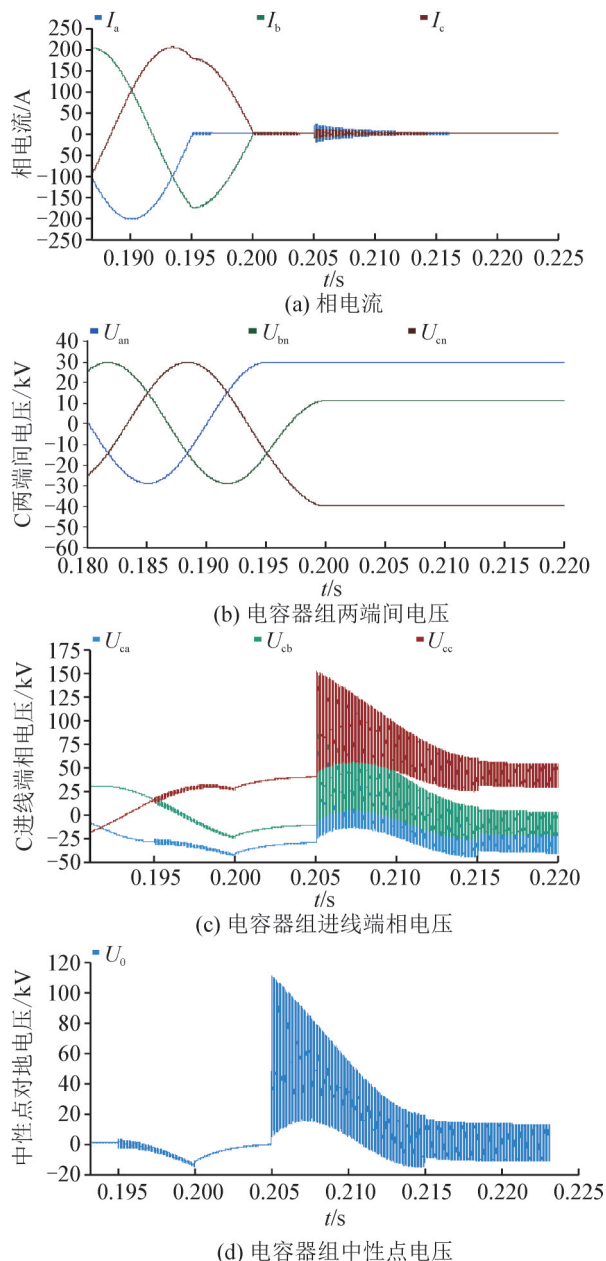


图5 无避雷器时单相重击穿1次的波形图
Fig. 5 Waveform diagram of single-phase restrike (1 time) without surge arrester

对比仿真和理论计算的数值, 仿真结果比理论计算的结果均小 0.21 p.u.。分析原因是重击穿瞬间因能量守恒产生的反向电压并不能达到理想的 2 倍, 会有部分能量损耗, 只有约 1.8 倍, 仿真结果相比理论计算更贴近产品实际情况。单相重燃时断路器的断口电压见图 6。

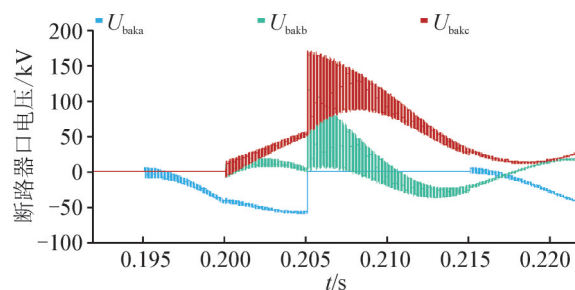


图6 单相重燃时断路器的断口电压
Fig. 6 Voltage across break of circuit breaker during single-phase reignition

3 两相重击穿的过电压

从图 6 可以看出, A 相单相重燃后, 因中性点电压上升很快, 很快断路器断口电压 B 相达 4.08 p.u.、C 相达 5.83 p.u., 所以 C 相可能继 A 相后重燃。C 相可能与 A 相同时重燃, 也可能比 A 相稍晚重燃。因 C 相稍晚于 A 相重燃的过电压倍数更大(但是过电流倍数更小), 本文以 C 相晚于 A 相 5ms 重燃进行分析。无避雷器两相重击穿 3 次的仿真波形见图 7。

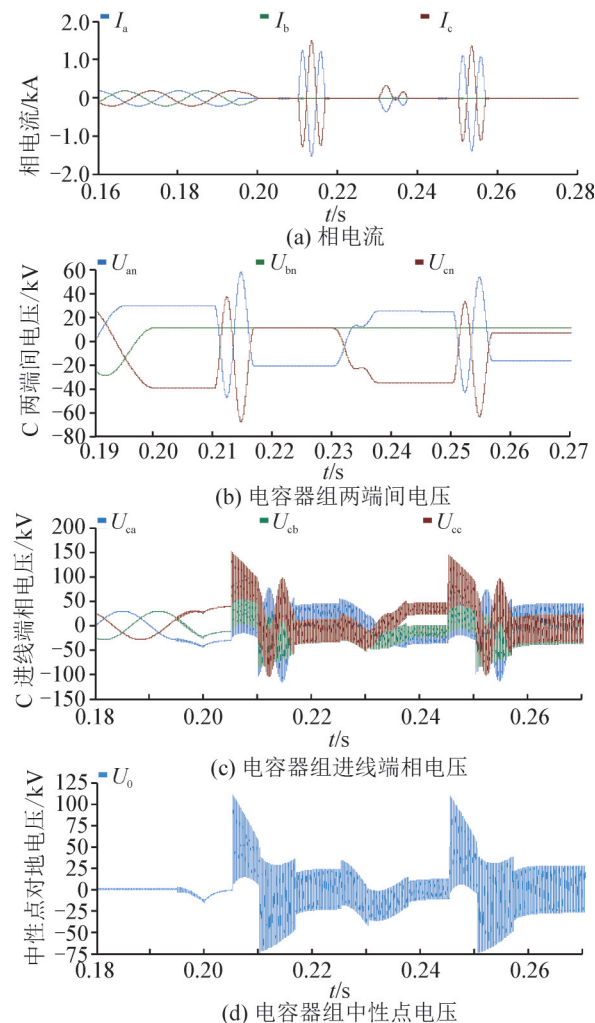


图7 无避雷器时两相重击穿3次的波形图
Fig. 7 Waveform diagram of two-phase restrike (3 times) without surge arrester

由图7可以看出A相和C相重击穿3次:1)A相和C相的电流7.57 p.u., B相电流为0;2)电容器组两端间电压A相1.96 p.u., B相1 p.u., C相2.34 p.u.;3)三相对地电压A相3.95 p.u.、B相3.40 p.u.、C相5.18 p.u.;4)中性点电压3.80 p.u., 波形振荡衰减。两相重击穿, 重击穿3次的过电压倍数比重击穿1次的值稍增大。

4 三相重击穿1次的过电压

从图6可以看出, A相重击穿后, 断路器断口电压B相达4.08 p.u., B相可能和C相一起重击穿, 下文以B相、C相晚于A相5 ms后同时重击穿进行分析。无避雷器三相重击穿1次的仿真波形见图8。

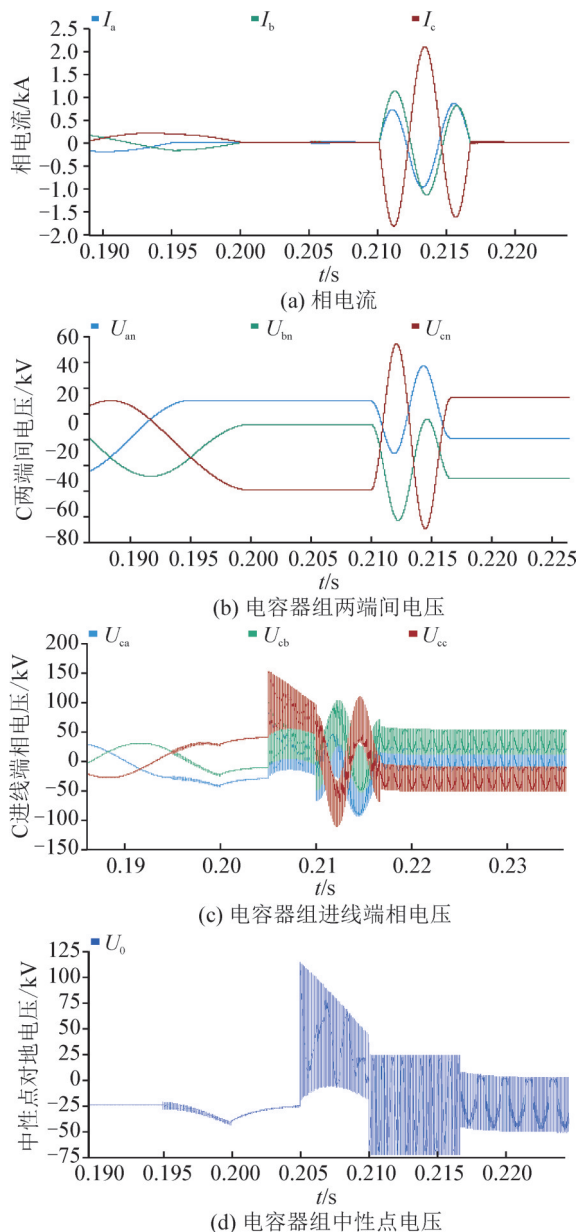


图8 无避雷器时三相重击穿1次的波形图
Fig. 8 Waveform diagram of three-phase restrike (1 time) without surge arrester

由图8可以看出三相重击穿1次:1)A相电流4.86 p.u., B相电流5.69 p.u., C相电流10.32 p.u.;2)电容器组两端间电压A相1.94 p.u., B相2.18 p.u., C相2.53 p.u.;3)三相对地电压A相3.24 p.u., B相3.48 p.u., C相5.16 p.u.;4)中性点电压3.78 p.u., 波形振荡衰减。三相重击穿相比两相重击穿, 过电压倍数基本接近, 但C相过电流倍数增大至10.32 p.u.。

5 避雷器I型接线限制重击穿过电压的局限性

避雷器内部装有非线性氧化锌电阻片, 其伏安特性曲线^[27]见图9所示。从图9可以看出, 当过电压幅值超过避雷器阈值时, 避雷器呈低阻值, 吸收过电压能量。GB/T 30841—2014、GB 50227—2017、GB/T 604—2020 等标准^[1-4]推荐采用I型相-地接线(如图2), 即3只避雷器分别装于每相相地之间。该接线可有效限制单相重击穿时的相对地及中性点过电压, 但无法保护电容器极间过电压^[1-2], 这一点也由表1的仿真结果得到验证。安装避雷器后, 对重击穿进行仿真分析。

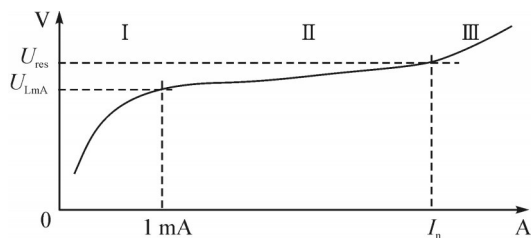


图9 避雷器的伏安特性曲线
Fig. 9 V-A characteristic curve of surge arrester

5.1 单相重击穿3次的过电压

有避雷器单相重击穿3次的仿真波形见图10所示。由图10可以看出A相单相重击穿3次相比无避雷器时有以下变化:1)A相第1次重击穿时有一个单脉冲相电流, 幅值1 p.u., B相和C相电流为0;2)电容器组两端间电压维持不变, 但在第1次重击穿时, A相和C相电压跌落0.366 p.u., 最大幅值仍是1.366 p.u.;3)三相对地电压均是衰减波形, 但不再高频振荡, 每多重击穿1次, 电压的幅值不随重击穿次数增加增大, 第1次重击穿的幅值最大, 且最大幅值比无FV时减小, A相1.61 p.u., B相1.49 p.u., C相3.03 p.u.;4)中性点电压幅值大幅减小至1.88 p.u., 且由波形振荡衰减变为3个单脉冲波;5)C相避雷器有一个单脉冲电流, 幅值1 p.u.。

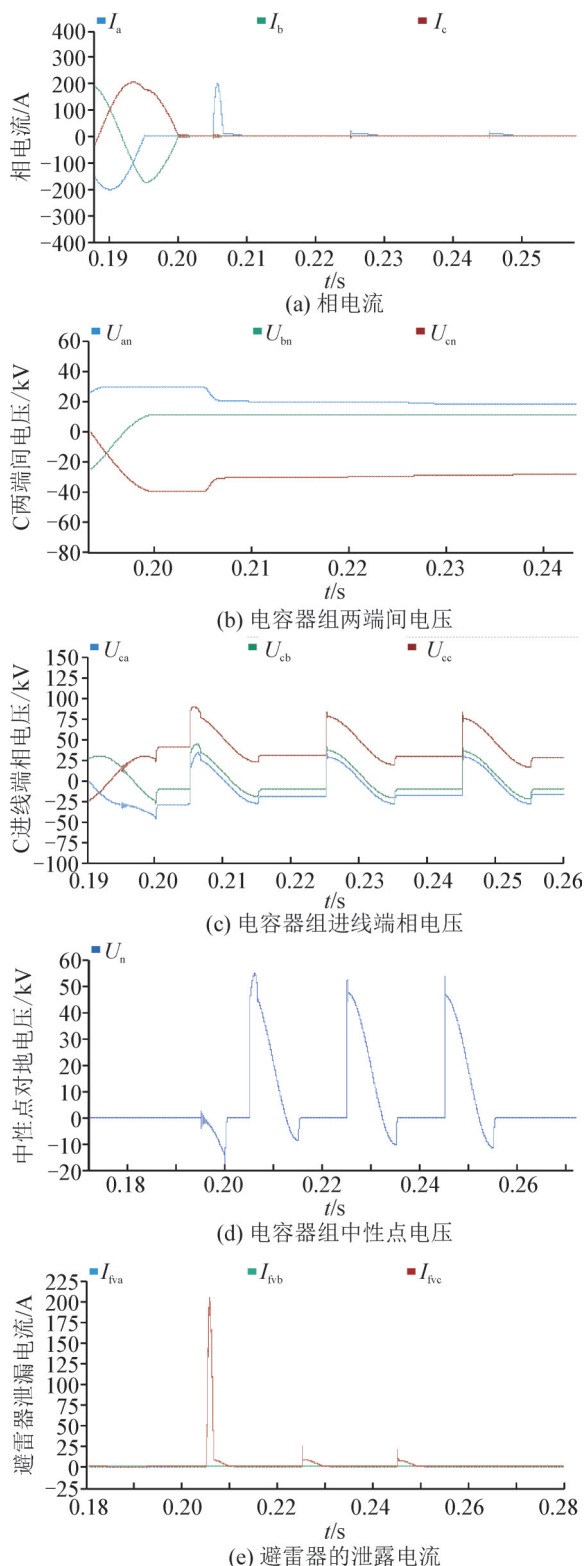


图10 有避雷器时单相重击穿3次的波形图
Fig. 10 Waveform diagram of single-phase restrike (3 times) with surge arrester

5.2 两相重击穿3次的过电压

有避雷器两相重击穿3次的仿真波形见图11所示。由图11可以看出A相和C相重击穿3次相比无避雷器时有以下变化:1)A相电流6.18,C相电流6.17 p.u.,B相电流为0;2)电容器组两端间电压

A相1.66 p.u., B相1 p.u., C相2.04 p.u.;3)三相对地电压A相2.15 p.u., B相1.60 p.u., C相3.03 p.u.;4)中性点电压1.96 p.u.,波形振荡衰减。两相重击穿,重击穿3次的过电压倍数比重击穿1次的值稍增大;5)C相避雷器有一个单脉冲电流,幅值1 p.u.。

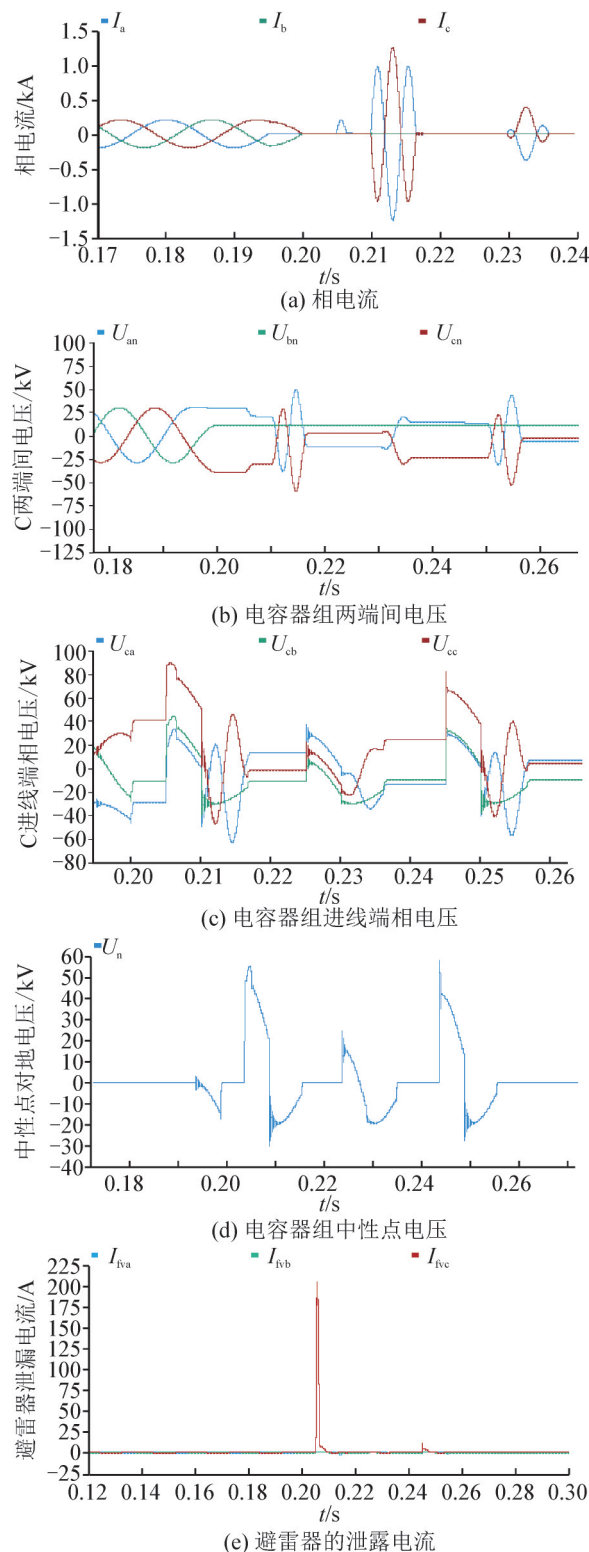


图11 有避雷器时两相重击穿3次的波形图
Fig. 11 Waveform diagram of two-phase restrike (3 times) with surge arrester

5.3 三相重击穿1次的过电压

有避雷器, B相、C相晚于A相5 ms后同时重击穿, 三相重击穿1次的仿真波形见图12。

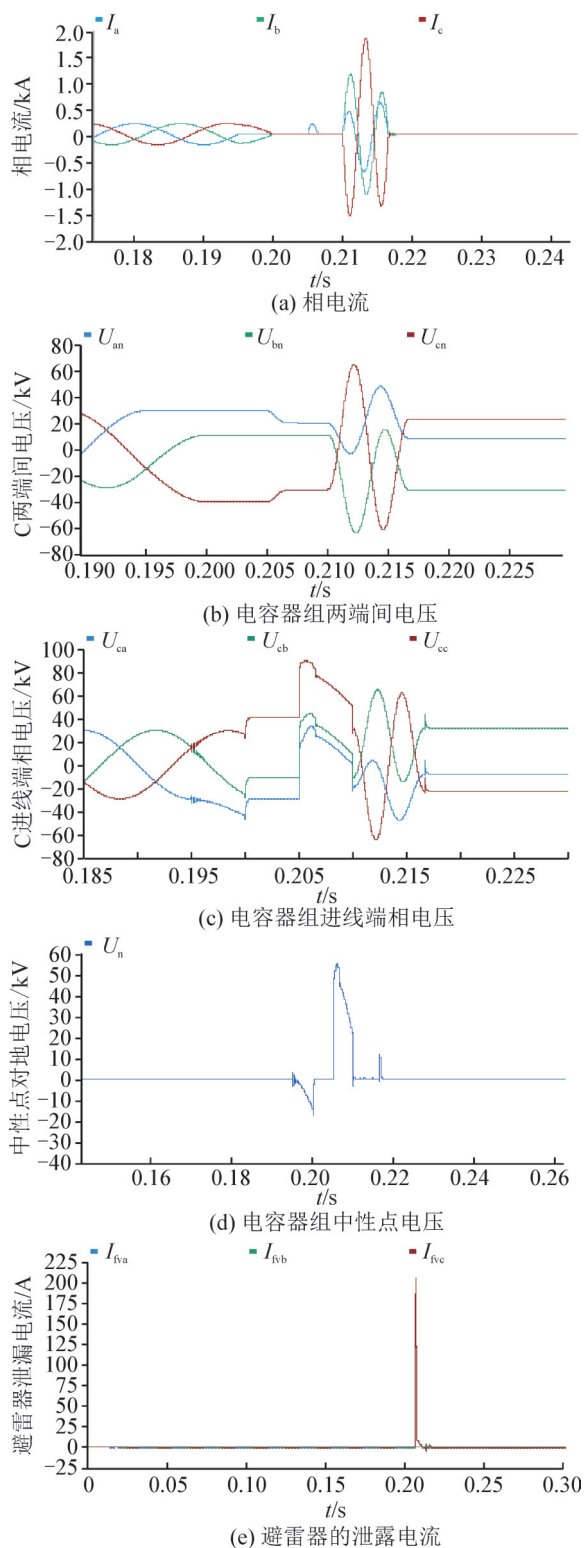


图12 有避雷器时三相重击穿1次的波形图

Fig. 12 Waveform diagram of three-phase restrike (1 time) with surge arrester

由图12可以看出三相重击穿1次相比无避雷

器时有以下变化: 1) A相电流3.53 p.u., B相电流5.71 p.u., C相电流9.03 p.u.; 2) 电容器组两端间电压A相1.64 p.u., B相2.17 p.u., C相2.20 p.u.; 3) 三相对地电压A相1.64 p.u., B相2.17 p.u., C相3.02 p.u.; 4) 中性点电压1.87 p.u., 且由波形振荡衰减变为3个单脉冲波; 5) C相避雷器有一个单脉冲电流, 幅值1 p.u.。

5.4 避雷器对电容器装置过电压的限制作用分析

断路器动作后, 高压电容器装置各仿真方案的电压和电流的幅值(p.u.)详见表1。从表1可以看出, 3只I型接线^[1]的避雷器, 在断路器单相重击穿、两相重击穿、三相重击穿时:

1) 断路器单相重击穿、两相重击穿、三相重击穿时, 避雷器均能把相对地电压限制在约3 p.u.及以下, 可以有效限制各种重击穿情况下相对地过电压。

2) 均能把中性点对地电压限制在约2 p.u.及以下, 可以有效限制各种重击穿情况下中性点过电压。

3) I型接线的避雷器不能限制电容器组两端间过电压, 是否安装避雷器对电容器组两端间的过电压无显著影响。如想限制电容器组两端间过电压, 理论上可以采用4只避雷器的接线, 但在多年前的实践中多次发生避雷器炸裂事故, 目前最新版相关标准均已不推荐4只避雷器的接线方式, 限于篇幅, 本文不展开讨论避雷器其它接线方式, 仅限于在国家标准推荐的3只避雷器接线方式下讨论过电压。

4) 单相重击穿各相电流基本是零, 但两相和三相重击穿在重击穿相产生高幅值的振荡电流。

从表1还可以获得以下信息:

1) 单相重击穿产生的过电压主要分配在中性点对地, 电容器组极间电压基本无变化, 电容器组绝缘洼地是极间绝缘, 且已安装相对地避雷器, 所以单相重击穿对电容器组的危害相对较小。

2) 单相重击穿时, 三相对地过电压的发展源自中性点过电压的快速发展。

3) 单相重击穿时, 相对地过电压幅值最大值发生在非重击穿相, 故障相、避雷器动作的相、避雷器中流过1 p.u.的单脉冲电流。

4) 电容器组极间幅值: 单相重击穿1.37 p.u.、两相重击穿2.34 p.u.、三相重击穿2.53 p.u.。

表1 各仿真方案电压和电流的幅值
Table 1 Voltage and current amplitude for each simulation scheme

方案	C两端间电压			C进线处对地电压			中性点 电压	相电流			避雷器泄露电流			备注
	A相	B相	C相	A相	B相	C相		A相	B相	C相	A相	B相	C相	
正常切除无重击穿	1.00	0.37	1.37	1.61	1.00	1.375	0.50	0	0	0	0	0	0	有避雷器
A相重击穿1次	1.00	0.37	1.37	2.78	3.42	5.180	3.79	0	0	0	—	—	—	无避雷器
A相重击穿3次	1.00	0.37	1.37	3.26	3.89	5.630	4.26	0	0	0	—	—	—	无避雷器
A相重击穿3次	1.00	0.37	1.37	1.61	1.49	3.030	1.88	1.00	0	0	0	0	1	有避雷器
A、C相重击穿1次	1.98	0.37	2.01	3.57	3.40	4.990	3.77	7.57	0	7.57	—	—	—	无避雷器
A、C相重击穿3次	1.96	0.37	2.34	3.95	3.40	5.180	3.80	7.57	0	7.57	—	—	—	无避雷器
A、C相重击穿3次	1.66	0.38	2.04	2.15	1.60	3.030	1.96	6.18	0	6.17	0	0	1	有避雷器
三相重击穿1次	1.94	2.18	2.53	3.24	3.48	5.160	3.78	4.86	5.69	10.32	—	—	—	无避雷器
三相重击穿1次	1.62	2.17	2.20	1.64	2.17	3.020	1.87	3.53	5.71	9.03	0	0	1	有避雷器

注:以上标幺值的基值均是器件自身正常运行的峰值。

6 电容器允许过电压能力

结合 GB/T 11024.1—2019^[5]和 IEEE Std 18—1992^[28]的规定,电容器运行允许的电压水平详见表 2。

表2 电容器运行允许的电压水平
Table 2 Allowable voltage level for capacitor operation

电压/p.u.	最大持续时间
1.00	连续
1.10	每 24 h 中 12 h
1.15	每 24 h 中 30 min
1.20	5 min
1.30	1 min
1.40	15 s
1.70	1 s
2.00	0.3 s
2.20	0.12 s

电容器可耐受而无明显损伤的过电压幅值取决于过电压的持续时间、施加的次数和电容器的温度。表 2 中给出的其值高于 1.15 p.u.的过电压是以在电容器寿命期之内发生不超过 200 次为前提确定的。

工程中有时需估算在非表 2 中过电压倍数下的承受时间,为提供工程参考,假设按照绝缘的累积损伤模型来估算,按表 2 数据绘制曲线,电容器允许过电压与耐受时间的关系符合反幂律^[28-29],反幂律公式为

$$t = \frac{k}{U^m} \tag{8}$$

式中: k 是与介质材料、环境温度、湿度等相关的常数; m 称为寿命指数, m 越大说明电压对耐受时间的影响越显著; U 是施加电压的 p.u.; t 是施加电压的时间。电压越低,介质能耐受的时间越长,电压

升高,耐受时间会急剧缩短。绘制曲线详见图 13 所示。

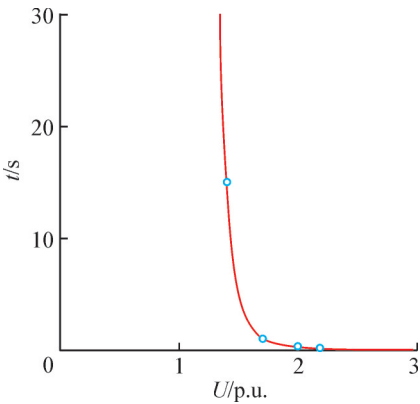


图13 电容器允许承受电压与时间的关系
Fig. 13 Relationship between allowable withstand voltage of capacitors and time

查图 13,电容器组极间 2.34 p.u.时(两相重击穿),最大允许持续时间约不大于 0.047 s;电容器组极间 2.53 p.u.时(三相重击穿),最大允许持续时间约不大于 0.025 s。

7 相关标准对电容器组用断路器的要求

因断路器重击穿会危害电容器组,且 GB/T 30841—2014、GB 50227—2017、GB/T 604—2020 等^[1-4]标准推荐的避雷器 I 型相-地接线方式难防护断路器两相、三相重击穿两端间过电压,相关标准对断路器灭弧、重击穿抑制等提出以下要求:

1) GB/T 30841—2014、GB 50227—2017、GB/T 604—2020 要求:并联电容器装置所选用的断路器,其开合电容器组的性能应满足 GB 1984 中 C2 级断路器的要求,机械寿命应满足 GB 1984 中 M2 级断路器的要求。C2 级断路器在容性电流开断中具有非常低的重击穿概率。

2) GB/T 30841—2014、GB 50227—2017 要求:

真空断路器应在出厂前进行高压大电流老炼处理,以降低重击穿概率。

3)GB 50227—2017 要求:对于 10 kV 及以下并联电容器装置宜选用真空断路器或真空接触器,对于 35 kV 及以上并联电容器装置宜选用 SF₆ 断路器或负荷开关。真空断路器介质强度恢复极快(微秒级),重击穿率低。SF₆ 断路器灭弧能力强,开断短路电流能力强,开断容性负载时,恢复电压特性平稳,重击穿风险较低。

8 结语

1)根据典型接线的 TBB35-10000/417-ACW 电容器装置,建立电磁暂态仿真模型,对比正常切除的理论计算值与仿真结果,互证理论分析与建模的正确性。

2)单相重击穿 3 次,对比无、有避雷器,相对地最大电压由 5.63 p.u.降低至 3.03 p.u.,电容器组两端间最大电压无变化。

3)两相重击穿 3 次,对比无、有避雷器,相对地最大电压由 5.18 p.u.降低至 3.03 p.u.,电容器组两端间最大电压由 2.34 p.u.降低至 2.04 p.u.。

4)三相重击穿 1 次,对比无、有避雷器,相对地最大电压由 5.16 p.u.降低至 3.02 p.u.,电容器组两端间最大电压由 3.24 p.u.降低至 1.64 p.u.。

5)断路器单相重击穿、两相重击穿、三相重击穿时,避雷器均能把相对地电压限制在约 3 p.u.及以下,可以有效限制各种重击穿情况下相对地和中性点过电压的发展。

6)国标推荐的避雷器 I 型接线(3 只相对地接线)不能限制电容器组两端间过电压的发展,是否安装避雷器对电容器组两端间的过电压发展无显著影响。

7)单相重击穿各相电流基本为零,但两相和三相重击穿在重击穿相产生高幅值的振荡电流。

8)电容器组极间电压大于 2.2 p.u.时,最大允许持续时间不大于 0.12 s。假设按照绝缘的累积损伤模型来估算,电容器组极间 2.34 p.u.时(两相重击穿),最大允许持续时间约不大于 0.047 s;电容器组极间 2.53 p.u.时(三相重击穿),最大允许持续时间约不大于 0.025 s。

9)根据 GB/T 30841—2014、GB 50227—2017 和 GB/T 604—2020 的要求:投切电容器的断路器应选用 C2-M2 级,10 kV 及以下选用真空断路器或真空接触器、35 kV 及以上选用 SF₆ 断路器或负荷开关,

真空断路器应在出厂前进行高压大电流老炼处理,以抑制断路器重击穿。

参考文献

- [1] 倪学锋. 并联电容器装置技术及应用[M]. 北京:电力工业出版社,2011.
- [2] 高压并联电容器装置的通用技术要求:GB/T 30841—2014[S]. 2014.
General requirements for high-voltage shunt capacitor installations:GB/T 30841—2014 [S]. 2014.
- [3] 并联电容器装置设计规范:GB 50227—2017 [S]. 2017.
Code for design of installation of shunt capacitors: GB 50227—2017 [S]. 2017.
- [4] 高压并联电容器装置使用技术条件:DL/T 604—2020 [S]. 2020.
Technical specification of shunt capacitors: DL/T 604—2020 [S]. 2020.
- [5] 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器第 1 部分:总则:GB/T 11024. 1—2019 [S]. 2019.
Shunt capacitors for a. c. power systems having a rated voltage above 1 000 V—Part 1: General: GB/T 11024. 1—2019 [S]. 2019.
- [6] 赵彦军,王林松. 就地补偿柜式并联电容器装置设计问题探讨[J]. 电力电容器与无功补偿,2018, 39(1):13-16.
ZHAO Yanjun, WANG Linsong. Discussion on the design of local compensation cabinet type shunt capacitor installation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(1): 13-16.
- [7] 赵彦军,马维勇. 20 kV 并联电容器装置设计方案的选取[C]//2010 输变电年会. 2010.
- [8] 马勇,范忠,张照辉,等. 江苏电力电容器缺陷统计分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2018, 39(3):16-20.
MA Yong, FAN Zhong, ZHANG Zhaohui, et al. Statistical analysis of capacitor defects in Jiangsu electric power company[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 16-20.
- [9] 郭志红,逯怀东,朱振华. 山东电网电容器运行情况统计分析[J]. 山东电力技术,2008, 13(3):8-12.
- [10] 荀华,张翔宇,李国浩,等. 内蒙古电网并联电容器装置缺陷统计分析[J]. 内蒙古电力技术,2017, 35(2):10-14.
XUN Hua, ZHANG Xiangyu, LI Guohao, et al. Defect analysis of parallel capacitors in Inner Mongolia power grid[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2017, 35(2): 10-14.
- [11] 刘文山,徐林锋,周菲. 广东电网电力电容器运行统计分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2008, 29(4):28-29.
LIU Wenshan, XU Linfeng, ZHOU Fei. Statistic and analysis on the power capacitors operating in Guangdong power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2008, 29(4): 28-29.
- [12] 刘天宇,车传强,赵磊,等. 35 kV 真空断路器开断并联电

- 容器过电压分析[J]. 东北电力技术, 2024, 45(5): 34-36.
- LIU Tianyu, CHE Chuanqiang, ZHAO Lei, et al. Analysis of overvoltage of 35 kV vacuum circuit breaker breaking parallel capacitors[J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(5): 34-36.
- [13] 王雪松, 岳永刚, 吕鑫, 等. 基于串联电阻开关的电容器组投切重燃过电压仿真研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(4): 124-132.
- WANG Xuesong, YUE Yonggang, LYU Xin, et al. Research on simulation of switching re-ignition over-voltage of capacitor bank based on series resistance switch[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(4): 124-132.
- [14] 刘斌, 岳永刚, 张庆如, 等. 基于串联非线性电阻组合开关的补偿电容器组投切重燃过电压研究[J]. 高压电器, 2024, 60(8): 183-192.
- LIU Bin, YUE Yonggang, ZHANG Qingru, et al. Research on switching reignition over-voltage of compensation capacitor bank based on series nonlinear resistor combination switch[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 183-192.
- [15] 苗俊杰, 杜俊杰, 邢超. 一起断路器重燃引起的电容器组群爆故障分析[J]. 河北电力技术, 2016, 35(4): 54-55.
- MIAO Junjie, DU Junjie, XING Chao. Fault analysis on colony explosion in capacitor bank caused by switch restrike[J]. Hebei Electric Power, 2016, 35(4): 54-55.
- [16] 齐进. 楼兰变真空开关投切电容器组过电压事故分析[J]. 新疆电力, 1997(1): 16-17.
- QI Jin. Analysis of overvoltage accident in capacitor bank switching by vacuum switch at Loulan substation[J]. Xinjiang Electric Power, 1997(1): 16-17.
- [17] ABDULAHOVIC T, THIRINGER T, REZA M, et al. Vacuum circuit-breaker parameter calculation and modelling for power system transient studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1165-1172.
- [18] 李电, 金百荣, 陈晓宇, 等. 投切电容器组产生重击穿及NSDD过电压对电容器影响分析[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 154-159.
- LI Dian, JIN Bairong, CHEN Xiaoyu, et al. Analysis of the influence of overvoltage caused by the restrike of switching capacitor bank and NSDD on capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 154-159.
- [19] 倪涛, 金涌涛, 蔡重凯, 等. 10 kV 并联电容器开关重燃过电压参数统计分析[J]. 浙江电力, 2014, 33(10): 15-17.
- NI Tao, JIN Yongtao, CAI Chongkai, et al. Statistical analysis on restrike overvoltage parameters of 10 kV shunt capacitor switches[J]. Zhejiang Electric Power, 2014, 33(10): 15-17.
- [20] 白云, 王雪松, 吕鑫, 等. SF₆断路器投切66 kV并联电容器组仿真分析[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(6): 72-81.
- BAI Yun, WANG Xuesong, LYU Xin, et al. Simulation analysis of SF₆ circuit breaker switching 66 kV shunt capacitor bank[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(6): 72-81.
- [21] 邹密, 王江林, 段盼, 等. 真空断路器的EMTP-ATP电磁暂态仿真教学研究[J]. 电气电子教学学报, 2022, 44(1): 120-123.
- ZOU Mi, WANG Jianglin, DUAN Pan, et al. Research on EMTP-ATP electromagnetic transient simulation teaching of vacuum circuit breaker[J]. Journal of Electrical & Electronic Education, 2022, 44(1): 120-123.
- [22] KAM S, NIELSEN S, LEDWICH G. A systematic review of a statistical vacuum circuit breaker model for condition monitoring[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 620-627.
- [23] HELMER J, LINDMAYER M. Mathematical modeling of the high frequency behavior of vacuum interrupters and comparison with measured transients in power systems[C]// Proceedings of 17th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. [S.l.]: IEEE, 1996(1): 323-331.
- [24] NISHIKAWA H, 刘乾业. 评价电容器组开关的方法和重燃过电压的抑制[J]. 电力电容器, 1987(4): 70-77.
- NISHIKAWA H, LIU Qianye. The method of evaluation the breaker of capacitor banks and the restrike voltage suppression[J]. Power Capacitor, 1987(4): 70-77.
- [25] 周任军, 曾祥君. 电力系统分析[M]. 第4版. 北京: 中国电力出版社, 2023.
- [26] 邱关源(原), 罗先觉(修订). 电路[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [27] 周泽存. 高电压技术[M]. 第3版. 北京: 水利电力出版社, 1988.
- [28] Standard for shunt power capacitors: IEEE Std 18—1992 [S]. 1992.
- [29] 电气绝缘材料和系统交流电压耐久性评定: GB/T 29311—2020 [S]. 2020.
- Electrical insulating materials and systems—AC voltage endurance evaluation: GB/T 29311—2020 [S]. 2020. [S]. 2020.
- 作者简介:**
- 赵彦军(1981), 男, 高级工程师, 长期从事电力电容器装置的技术工作。E-mail: 93434614@qq.com。
- 雷乔舒(1979—), 女, 高级工程师, 长期从事电力电容器的产品设计研发工作。
- 王国喜(1982—), 男, 高级工程师, 长期从事电力电容器装置的技术工作。
- 高扬(1980—), 男, 工程师, 长期从事电力电容器质量管理工作。
- 魏文文(1991—), 男, 工程师, 长期从事电力电容器装置的技术工作。