

## 真空断路器切容重击穿过电压研究

王一涵<sup>1</sup>, 于力<sup>1</sup>, 贾延超<sup>2</sup>, 王艺骢<sup>1</sup>, 周鸿宇<sup>1</sup>, 王宇福<sup>1</sup>

(1. 沈阳工程学院, 沈阳 110136; 2. 沈阳华德海泰电器有限公司, 沈阳 110141)

**摘要:**近年来,在配电网和中压系统中仍然普遍使用真空断路器来进行频繁的投切操作。尤其是在并联电容器组的无功补偿装置中,真空断路器因其优异的开断特性被广泛用于电容器组的分闸操作中。然而,在开断电容器组过程中,真空断路器易发生弧后延时重击穿现象,这不仅会加速电容器绝缘老化、缩短设备寿命,还会产生高幅值重击穿过电压,严重威胁补偿装置及系统的安全运行。真空断路器的重击穿是微秒级的瞬态过程,且电压变化具有高频振荡、陡升陡降的特点,普通的电压互感器难以准确捕捉该过程。因此,本文基于PSCAD仿真软件建立了包含变电站和真空断路器在内的电磁暂态模型,对开断电容器组时可能出现的多种重击穿工况进行了仿真分析。仿真结果表明:当断路器发生两相或三相重击穿时,电容器组极间过电压倍数可达系统基准电压的2~4倍;若发生多次连续重击穿,则过电压水平将进一步升高,对设备绝缘和系统安全构成更为严重的威胁。研究结果可为真空断路器在电容器组投切中的选型、保护配合及过电压抑制措施提供理论依据和工程参考。

**关键词:**真空断路器; PSCAD 建模; 并联电容器组; 重击穿过电压; 仿真分析

### Study on Restrike Overvoltage of Vacuum Circuit Breakers in Capacitor Bank Switching

WANG Yihan<sup>1</sup>, YU Li<sup>1</sup>, JIA Yanchao<sup>2</sup>, WANG Yicong<sup>1</sup>, ZHOU Hongyu<sup>1</sup>, WANG Yufu<sup>1</sup>

(1. School of Electric Power, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, China;

2. HUADE HIGH-TECH Electric, Shenyang 110141, China)

**Abstract:** In recent years, vacuum circuit breakers are still widely used in distribution network and medium voltage system for frequent switching operation. Especially in the reactive power compensation device of shunt capacitor bank, vacuum circuit breakers are widely used in the opening operation of capacitor bank due to their excellent interruption characteristics. However, during switching capacitor bank, the vacuum circuit breakers are prone to delayed restrikes after current zero. This not only accelerates the insulation aging of the capacitor and shortens the equipment's service life, but also generates high-amplitude restrike overvoltages, which seriously threatens the safe operation of the compensation device and the power system. Re-strike of vacuum circuit breaker is a transient process of microsecond, and the voltage variation has the characteristics of high frequency oscillation, steep rise and steep fall, which is difficult to be accurately captured by ordinary voltage transformer. To address this issue, an electromagnetic transient model incorporating substations and vacuum circuit breakers is set up using PSCAD simulation software so to perform simulation analysis of likely occurred multiple re-strike condition in switching capacitor bank. The simulation results show that in case of two-phase or three-phase re-strike in the circuit breaker, the inter-pole overvoltage factor in capacitor banks can reach 2-4 times the reference voltage of system. In case of multiple consecutive re-strike, the overvoltage levels will escalate further, posing more severe threats to insulation of equipment and safety of system. The research findings offer theoretical support and practical guidance for type selection, protection coordination, and overvoltage mitigation strategies of vacuum circuit breakers in switching capacitor banks.

**Keywords:** vacuum circuit breaker; PSCAD modeling; shunt capacitor bank; Re-strike over voltage; simulation analysis

## 0 引言

随着风电和光伏等新能源规模化并网和现代电力负荷结构的多元化发展,电网运行特性正经历深刻变革。因此,如何有效提高电力系统的供电质量,已成为电力部门的急切需求和电力系统研究领域的热点之一<sup>[1-2]</sup>。并联电容器组由于具有经济性和部署灵活性的特点,在各级变电站中发挥着不可替代的作用,是目前应用最广泛的电力系统无功补偿装置之一<sup>[3-4]</sup>。但并联电容器组需要根据系统状态进行频繁分闸操作,其中分闸操作过程中的暂态过电压问题尤为突出。这种频繁的投切工况,对开关设备的电气寿命、运行可靠性等方面都提出了严峻的挑战<sup>[5-6]</sup>。在中低压(10~35 kV)配电网及无功补偿系统的开关设备选型中,真空断路器凭借优异的开断特性、长机械寿命、环境友好及低维护需求等优势,已逐渐成为并联电容器组投切操作的主流设备之一,尤其适用于需频繁启停的无功补偿场景。但是真空断路器在切除过程中长期面临重击穿问题的困扰,不仅威胁电容器组本身的安全,还会损坏相邻设备,导致绝缘故障甚至引发电气火灾<sup>[7-8]</sup>。因此,本文主要针对真空断路器开断并联电容器组过程中的重击穿现象开展研究,从而得出过电压、电流的规律,为电容器组的抑制措施提供依据,目的是减少或避免此类事故,减少经济损失<sup>[9]</sup>。

国内外的研究主要集中在断路器投入过程中产生涌流和切断时产生重燃过程的变化及对系统的影响方面,研究方法则以仿真设计和现场试验为主<sup>[10-11]</sup>。仿真设计利用软件研究暂态过程,通过简化实物参量模拟操作,获得相应结果,这种方法灵活且易实现。现场试验则因复杂参数变化、条件限制及安全问题,进展相对缓慢<sup>[12]</sup>。

国外研究起步较早,侧重过电压的物理本质、跨系统传播及设备通用特性,成果为国际标准提供支撑。美国学者首次揭示了暂态过电压与电路结构、参数值的关联,并用 TAN 模型验证了这一过程<sup>[13]</sup>。此后,国际学者深入研究了高压电容器开关操作时的瞬态问题,并从多角度进行了全面分析。Shipp、Dionise 等学者通过真空断路器开断电弧炉试验发现,重燃过电压的高频电流源于断口两侧工频电源与电容残压的振荡,且重燃时间与触头绝缘恢复强度负相关<sup>[14]</sup>。文献[15]在考虑了3个关键参数:截流值、介质动态绝缘强度、高频电流熄弧能力,在此基础上使用 Simulink 对真空断路器开断并联电抗器

的过程进行了仿真,得出首开相易发生复燃,复燃产生的高频电流会通过相间耦合引发其他两相强制熄弧,导致多次重燃的结论。

国内研究始于20世纪80年代,随着特高压、新能源并网需求提升,逐步从定性分析转向定量仿真与设备适配研究。近年来,我国学者对真空开关并联电容器装置进行了投切试验,分析了在投切过程中出现的涌流和过电压现象,为实现现场投切试验提供了重要参考<sup>[16]</sup>。文献[17]通过对40.5 kV 真空断路器在 OrCAD/PSpice9 仿真中的表现,指出合闸弹跳会导致高频截流熄弧现象,使串联电抗器过电压达到相电压峰值的两倍。文献[18]以三门峡110 kV 变电站为原型,用 EMTP 仿真得出:单相重燃时中性点电压、非重燃相对地过电压的变化情况,以及发生两相重燃时会形成 LC 振荡回路,使过电压呈现出“级升”的现象。文献[19]则强调了杂散电容的作用:忽略杂散电容的简化模型会导致波形简化,但对过电压倍数影响较小。文献[20]通过在真空断路器上加装串联电阻的方式有效降低了重击穿过电压的水平。由此可见,重击穿过电压的存在仍然是真空断路器切容过程中不可避免的问题之一。

现有研究虽对真空断路器重击穿相关现象展开初步探究,但仍存在显著局限性:仿真建模多采用理想开关假设,未融合设备核心物理特性,暂态过程模拟精度受限;工况分析聚焦单一重击穿类型,针对多次重击穿与电流零点至电压击穿时间间隔大于半个周期且未发展为击穿的电压击穿现象(non-sustained disruptive discharge, NSDD)的复合工况研究匮乏,难以匹配实际运行场景的复杂需求。

针对上述问题,本文从建模与工况分析两大维度实现创新:其一,突破 PSCAD 内置理想开关模型缺陷,融合截流特性、介质恢复强度、高频熄弧能力3大关键参数。通过动态关联开关动作时间,以一阶多项式量化参数随动作进程的变化规律,还原初始过电压生成过程与重击穿动态博弈过程,将重击穿发生时间偏差从毫秒级缩小至微秒级,大幅提升过电压模拟精度;其二,首次系统覆盖单相、两相、三相重击穿及“多次连续重击穿+NSDD”复合工况,该类工况在设备老化、负荷波动、恶劣天气等工程场景中客观存在,占重击穿相关事故的8%~15%,且因过电压累积、相间耦合等效应,对电容器绝缘及系统稳定的冲击风险显著更高,极间电压峰值较单一工况最高提升20%~35%。本文通过复刻复杂工

况下的电压电流演化规律,可精准识别极端场景安全隐患,为设备全生命周期管理、运维策略优化及安全防护设计提供工程化技术支撑。

基于上述理论分析与创新思路,本文以某厂家 35 kV 并联电容器补偿装置为研究对象,基于 PSCAD 搭建变电站及真空断路器电磁暂态仿真模型,重点对并联电容器组分闸过程中多种重击穿工况下的过电压特性展开仿真分析,揭示重击穿电压变化的统计规律,为电力系统中重击穿过电压的抑制策略制定提供理论参考与数据支撑。

1 真空断路器模型搭建

PSCAD 软件内置的断路器是理想开关模型,难以精确表征真空断路器实际动作过程中的暂态特性<sup>[21]</sup>。为此,依托软件的自定义组件功能,结合真空断路器的截流特性、介质恢复强度以及高频熄弧能力等关键参数,构建真空断路器仿真模型,以此提升切容操作中冲击穿过电压变化规律的模拟精度。

该模型以线路电流与断路器两端电压作为输入量,通过多维度条件判定后反馈控制断路器的运行状态,实现对其动作过程的实时调控,真空断路器开断流程图如图 1 所示。

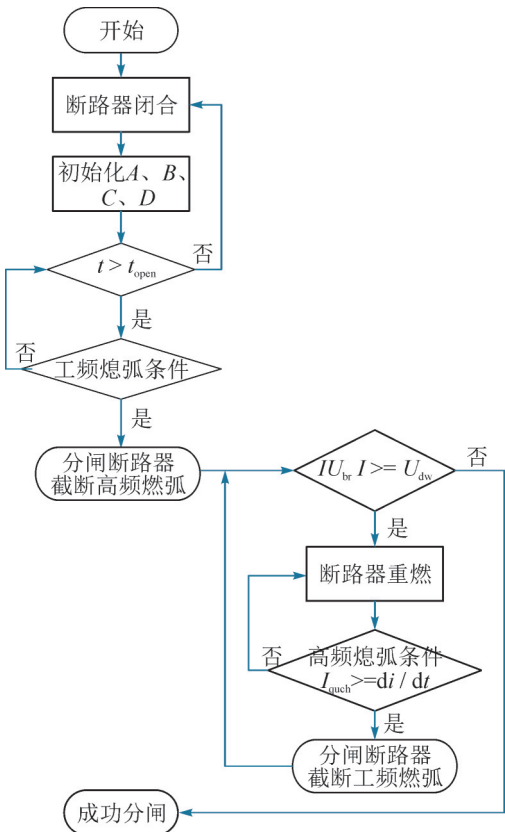


图1 真空断路器开断流程图  
Fig. 1 Interruption flowchart of vacuum circuit breaker

由图 1 可知,断路器的初始状态为闭合,当时间达到  $t_{open}$  时,断路器发出分闸指令,此时断路器触头开始分离,进入工频燃弧阶段,当燃弧电流小于等于断路器的截流值时,断路器首次断开。随后,断路器两端出现恢复电压  $U_{br}$ ,若  $U_{br}$  的绝对值大于等于断路器的介质恢复强度  $U_{dw}$ ,断路器发生重燃,断路器进入高频燃弧阶段。若高频燃弧电流在第一次过零时的电流变化率  $di/dt$  大于断路器的高频熄弧能力  $I_{quch}$ ,断路器继续重燃,反之,断路器重新进行开关恢复电压和介质恢复强度的比较,直至断路器的介质恢复强度大于开关恢复电压,判定断路器成功分闸。其中,  $U_{dw}$  和  $I_{quch}$  为真空断路器的介质恢复强度和低频熄弧能力的设定值,对于真空断路器的切容操作来说,触头间隙的介质恢复强度和低频熄弧能力可以简化表示为一个与开关动作时间相关的一阶多项式<sup>[22-23]</sup>。

$$U_{dw} = A(t - t_{open}) + B \tag{1}$$

$$I_{quch} = C(t - t_{open}) + D \tag{2}$$

式中,  $t_{open}$  表示断路器接收到断路器断开信号的时刻和触头分开的时间。受系统运行随机因素的影响,实际绝缘介质恢复强度曲线并非是固定不变的,应该根据现场试验的结果选择合适的开断曲线,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  的典型值如表 1 所示<sup>[24]</sup>。

表1 A、B、C、D典型值  
Table 1 Typical vaule of A, B, C and D

| 电压等级 | $A(V/\mu s)$ | $B/kV$ | $C/(A/\mu s^2)$ | $D(A/\mu s)$ |
|------|--------------|--------|-----------------|--------------|
| 高压   | 17.00        | 3.40   | -0.034          | 255          |
| 中压   | 13.00        | 3.40   | 0.310           | 255          |
| 低压   | 0.47         | 0.69   | 1.000           | 190          |

2 过电压产生机理分析

仿真配置以某 220 kV 变电站为原型,电源通过不同等级的变压器,转换为 35 kV 的电压等级后并联了 20 Mvar 无功补偿容量的电容器组,每相的电容器配置采用相同的阻抗值,电抗率(线路中串联的电抗器感抗对容抗的比值<sup>[25]</sup>)大小为 12%,因为串联电抗器的电感值为几十毫亨,远大于回路中的杂散电感值,因此可不再考虑杂散电感对回路的影响,试验原理接线图如图 2 所示。

并联电容器组模型参数由厂家提供,具体参数如表 2 所示。

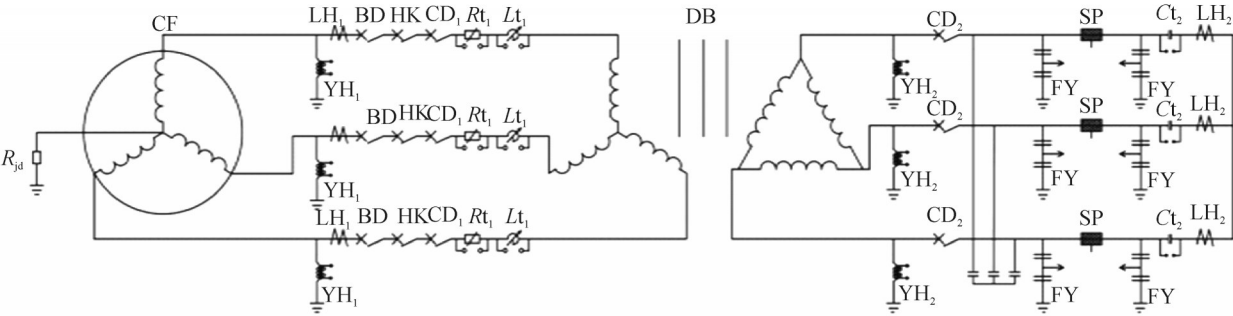


图2 试验原理接线图及相关线路参数  
Fig. 2 Test principle wiring diagram and relevant line parameters

图2中,CF为短路发电机;BD为保护断路器;BK为合闸开关;CD<sub>1</sub>为操作断路器;*R<sub>t1</sub>*为功率因数调节电阻;CD<sub>2</sub>为操作断路器;DB为短路变压器;YH为电压互感器;*L<sub>t1</sub>*为调节电抗器;FY为分压器;CT<sub>2</sub>为模拟电容;LH<sub>1</sub>为电流互感器;*R<sub>jd</sub>*为接地电阻;SP为试品;C<sub>π</sub>为模拟电容;YH<sub>2</sub>为电压互感器;LH<sub>2</sub>为电流互感器。

表2 设备参数表  
Table 2 Parameter list of equipment

| 设备     | 参数        | 数值     |
|--------|-----------|--------|
| 并联电容器组 | 额定电压/kV   | 35     |
|        | 单相电容值/μF  | 52     |
|        | 额定容量/kvar | 20 016 |
|        | 接线方式      | Y      |
| 串联电抗器  | 额定电抗率/%   | 12     |
|        | 单相电感值/mH  | 23.4   |

2.1 正常开断过程分析

在进行系统电路模型的简化处理过程中,如果忽略系统阻抗的影响,并且假设不存在串联电抗器,那么可以参考图3来对开关在正常分闸状态下的三相等值电路进行深入分析。

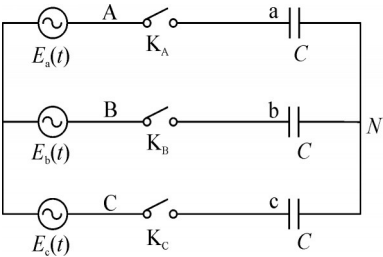


图3 正常开断下等值电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram at normal interruption

假设  $t=0$  瞬间断路器分闸,A相为首开相,此刻各相电压为

$$U_{AN} = U_{aN} = U_m \quad (3)$$

$$U_{BN} = U_{bN} = U_m \cos\left(-\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}U_m \quad (4)$$

$$U_{CN} = U_{cN} = U_m \cos\left(\frac{2\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2}U_m \quad (5)$$

1/4周期后,即角频率  $\omega t$  为  $\pi/2$  时,B相和C相的电流同时穿越零点,B相和C相的开关能够正常地断开。此时,B相和C相电容器极间以及中性点的电压情况为

$$U_{bN} = -\frac{1}{2}U_m + \frac{1}{2}U_{BC} = 0.37U_m \quad (6)$$

$$U_{cN} = -\frac{1}{2}U_m - \frac{1}{2}U_{BC} = -1.37U_m \quad (7)$$

$$U_{NO} = \frac{1}{2}U_m \left(1 - \cos\frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2}U_m \quad (8)$$

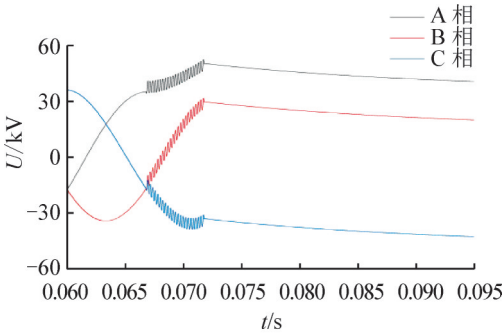
各相电容器极对地电位分别为

$$U_{aO} = U_{aN} + U_{NO} = \frac{1}{2}U_m = 1.5U_m \quad (9)$$

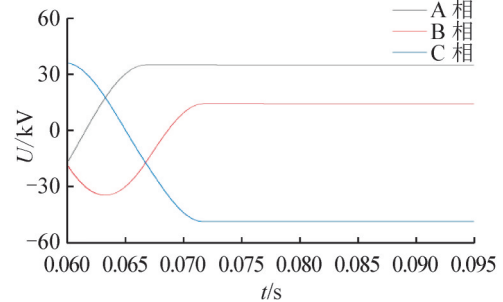
$$U_{bO} = U_{bN} + U_{NO} = 0.37U_m + \frac{1}{2}U_m = 0.87U_m \quad (10)$$

$$U_{cO} = U_{cN} + U_{NO} = -1.37U_m + \frac{1}{2}U_m = -0.87U_m \quad (11)$$

正常开断波形见图4。



(a) 正常开断情况下电容器极对地电压



(b) 正常开断情况下电容器极间电压

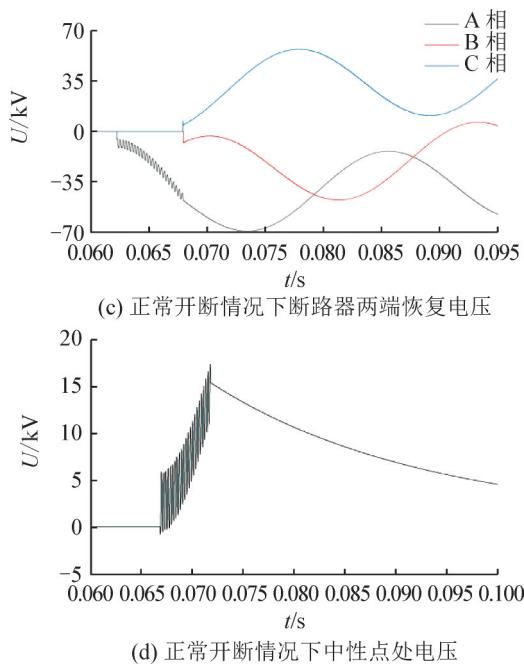


图4 正常开断下线路各位置电压变化  
Fig. 4 Voltage variation of each position of lines at normal interruption

表4 三相电容器组(单个)开合试验方式BC2试验数据  
Table 4 Test data of switching test duty BC2 of three-phase capacitor bank (single)

| 操作<br>顺序 | 试验相电压<br>峰值/kV | 相别 | 合闸涌流<br>峰值/kA | 开断电流 |       | 涌流<br>频率/Hz | 开关恢复电压<br>第1幅值 | 试品<br>状况 |
|----------|----------------|----|---------------|------|-------|-------------|----------------|----------|
|          |                |    |               | 相值/A | 平均值/A |             |                |          |
| CO       | 33.2           | A  | 1.7           | 647  | 654   | 298         | 68.7           | 正常       |
|          |                | B  | 3.2           | 655  |       |             |                |          |
|          |                | C  | 3.9           | 659  |       |             |                |          |
| CO       | 33.1           | A  | 3.6           | 648  | 653   | 317         | 68.4           | 正常       |
|          |                | B  | 3.9           | 654  |       |             |                |          |
|          |                | C  | 1.4           | 657  |       |             |                |          |
| CO       | 33.2           | A  | 3.8           | 662  | 657   | 313         | 68.9           | 正常       |
|          |                | B  | 4.8           | 657  |       |             |                |          |
|          |                | C  | 6.4           | 653  |       |             |                |          |
| CO       | 33.2           | A  | 4.3           | 657  | 663   | 297         | 68.7           | 正常       |
|          |                | B  | 3.6           | 664  |       |             |                |          |
|          |                | C  | 6.2           | 668  |       |             |                |          |

2.2 单相重击穿暂态过程分析

在设计单相重击穿时,假设A相为首开相,当断路器断开后,A相的电流会首先过零,而B、C两相之间的电压将继续为B、C两相的电容充电。根据正常断开状态下开关的恢复电压波形可以看出,此时A相开关的恢复电压值最高,最有可能出现单相重击穿,具体等值电路详见图5。

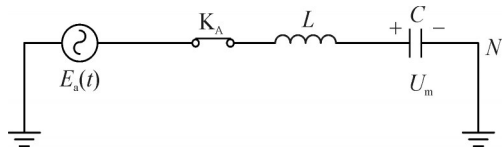


图5 单相重击穿等值电路图  
Fig. 5 Equivalent circuit diagram of single-phase re-strike

表3给出了各相电压对系统的电压倍数,均符合上式推导值,这说明电压、电流在正常的分闸操作下并没有特别波动,系统还处于稳定状态。

表3 正常开断时各位置电压对系统电压倍数  
Table 3 Voltage multiples at various positions over system voltage during normal interruption

| 相别 | 电容器<br>极间  | 电容器<br>极对地 | 开关恢复<br>电压 | 中性点<br>电压 |
|----|------------|------------|------------|-----------|
| A相 | $U_m$      | $1.49 U_m$ | $2.31 U_m$ |           |
| B相 | $0.37 U_m$ | $0.87 U_m$ | $1.81 U_m$ | $0.5 U_m$ |
| C相 | $1.37 U_m$ | $0.87 U_m$ | $1.85 U_m$ |           |

表4为厂家进行单个三相电容器组开合试验下的试验数据,其中,开关恢复电压最大值的平均值为68.7 kV,仿真值如图4所示,通过理论与试验的验证,证明了仿真模型的正确性。

此时,电容器三相极对地电压及其中性点对地电压的最大值为

$$U_{a0} = 2 \times (-U_m) - U_m \quad (12)$$

$$U_{b0} = U_{NO} + U_{bN} = -4U_m + 0.37U_m \quad (13)$$

$$U_{c0} = U_{NO} + U_{cN} = -4U_m - 1.37U_m \quad (14)$$

$$U_{NO} = U_{a0} - U_{aN} = -3U_m - U_m \quad (15)$$

仿真结果见图6。A相重击穿时线路中电流见图7。如图在0.065 s时将断路器进行分闸,在电流达到零点的瞬间,即0.066 7 s时,首开相A相被断开。又经过8.7 ms后,相较于真空断路器的介质恢复强度,断路器的恢复电压更高,A相位出现单相重击穿。各相过电压倍数如表5所示。

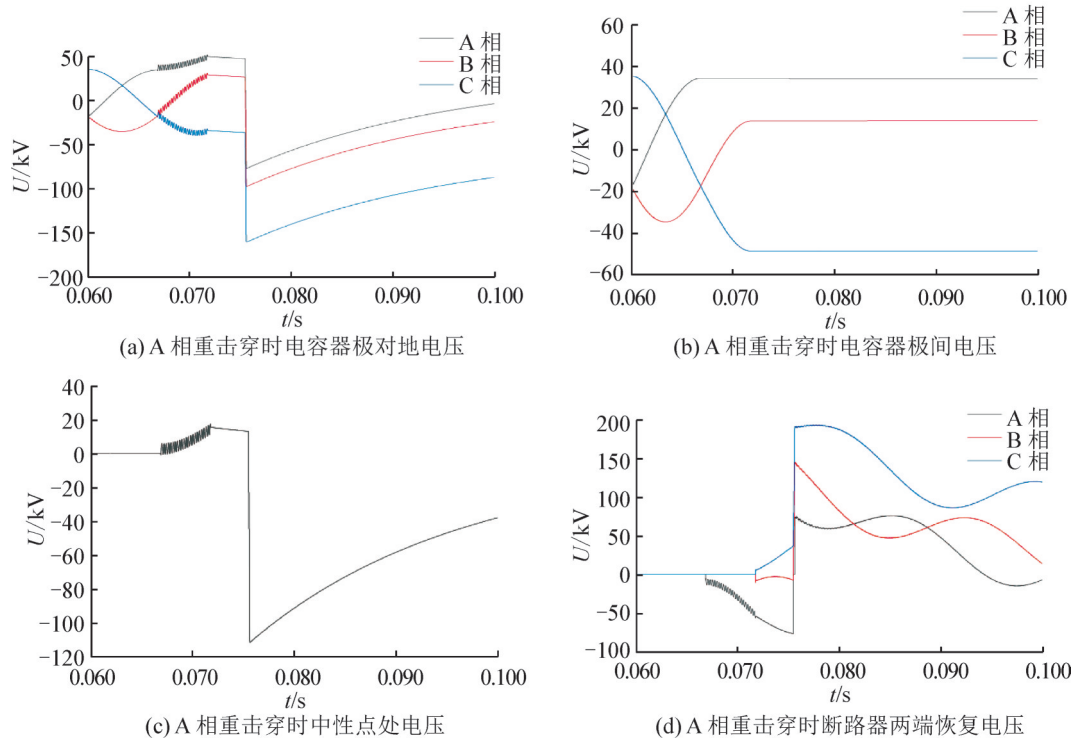


图6 A相重击穿时线路各位置电压变化  
Fig. 6 Voltage variation of each position of line in re-strike of phase A

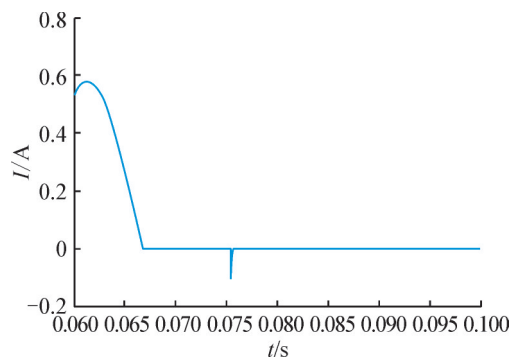


图7 A相重击穿时线路电流  
Fig. 7 Current in the line during the re-strike of phase A

表5 A相重击穿时各位置电压对系统电压倍数  
Table 5 Voltage multiples at various positions over system voltage during restriking of phase A

| 相别 | 电容器极间      | 电容器极对地     | 开关恢复电压     | 中性点电压      |
|----|------------|------------|------------|------------|
| A相 | $U_m$      | $2.57 U_m$ | 0          |            |
| B相 | $0.37 U_m$ | $3.23 U_m$ | $4.14 U_m$ | $3.39 U_m$ |
| C相 | $1.37 U_m$ | $4.88 U_m$ | $5.57 U_m$ |            |

通过分析发生单相重击穿时的仿真波形图,可以发现,与正常分闸的情况相比,尽管单相重击穿未引起电容器极间电压的改变,却使得中性点电位上升,进而导致电容器极对地电压增加,同时也会使得其他两相的开关恢复电压提升,增加了其他两相发生重击穿的可能性。

2.3 两相重击穿暂态过程分析

两相重击穿可以被进一步分为两相相继重击穿和两相同时重击穿<sup>[26-30]</sup>。由单相重击穿可知,当三相电路中的某一相发生重击穿时,其他两相的开关恢复电压会增大,从而发生重击穿,这种情况被称为两相相继重击穿。此时,电容器极间会产生很大的过电压严重威胁电容器组的安全运行。因真空断路器重击穿而损坏的电容器组见图8。



图8 重击穿后损坏的电容器组  
Fig. 8 Damaged capacitor bank after restriking

若两相在相间开关恢复电压最大的情况下发生重击穿,则称为两相同时重击穿,两相同时重击穿相较于两相相间重击穿发生的概率更低。通过

图 9 中的模型分析两相重击穿的电容器极间电压变化。

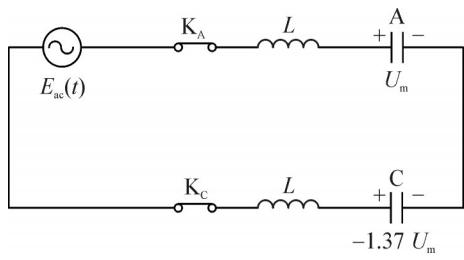
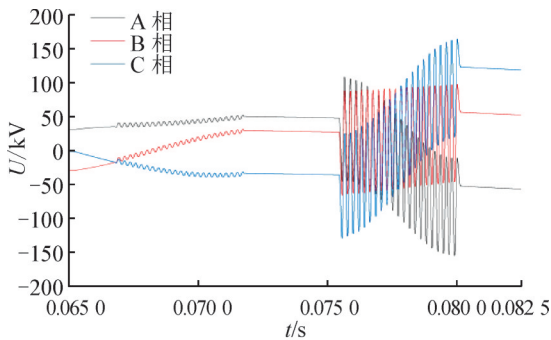


图 9 两相重击穿时等值电路图  
Fig. 9 Equivalent circuit diagram in restrike of two phases

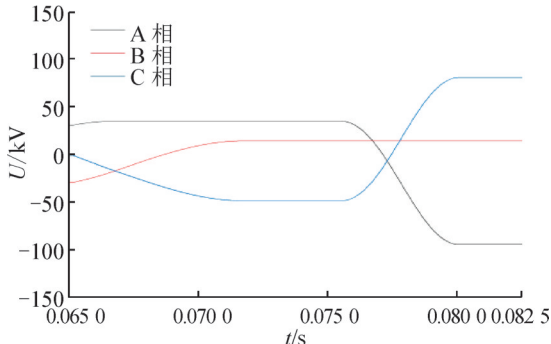
以两相相继重击穿为例,则 A、C 两相电容器的极间电压最大值为

$$U_{ac} = -2\sqrt{3}U_m - [U_m - (-1.37U_m)] \quad (16)$$

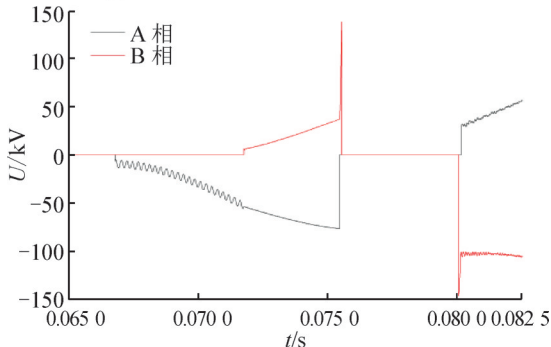
两相相继重击穿波形图见图 10-11。



(a) A、C 两相重击穿时电容器极对地电压



(b) A、C 两相重击穿时电容器极间电压



(c) A、C 两相重击穿时断路器两端恢复电压

图 10 A、C 两相重击穿时线路各位置电压变化  
Fig. 10 Voltage variations at each position of line in restrike of phase A and C

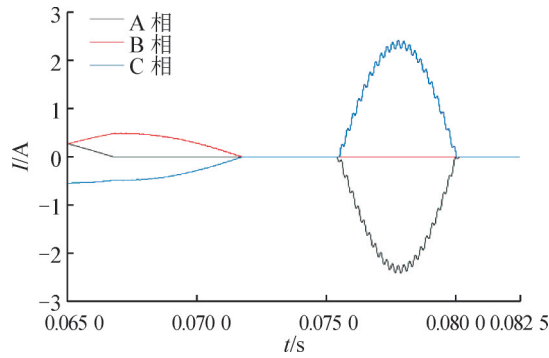


图 11 A、C 两相重击穿时线路中电流  
Fig. 11 Current in the line in restrike of phase A and C

分析两相重击穿现象是在三相断路器完全断开之后,依据两相依次发生重击穿的情况进行的。模拟测试条件仍设定为三相断路器在 0.065 s 时同步断开,其中 A 相作为首开相,在 0.066 7 s 时断开。紧接着,在 8.7 ms 后,A 相的恢复电压超过介质此时的恢复强度,导致了重击穿的发生,随后 C 相开关恢复电压由于 A 相发生重击穿而增大同样发生重击穿,此时 A、C 两相相继击穿。表 6 为两相重击穿时各电压对应的系统电压倍数,从图表中可以观察到 A、C 两相重击穿会形成新的电流回路,该回路会引发更加复杂的振荡现象,从而导致 A、C 两相极间电压的急剧变化,振荡电路的形成使得过电流倍数为稳定情况下电流值的 4.87 倍,暂态变化更为剧烈;若系统内有多设备同时工作,将对稳定运行造成重大威胁。

表 6 A、C 两相重击穿时各位置电压对系统电压倍数

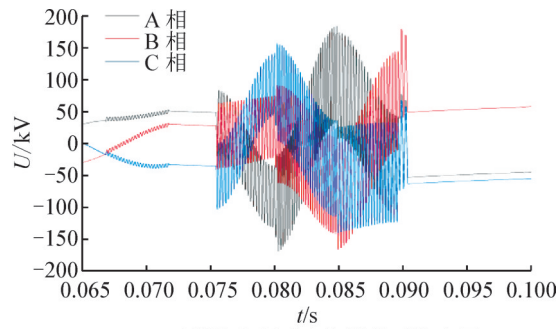
Table 6 Voltage multiples of each position over the system voltage in restrike of phase A and C

| 相别  | 电容器极间      | 电容器极对地     | 开关恢复电压     | 中性点电压      |
|-----|------------|------------|------------|------------|
| A 相 | $2.71 U_m$ | $4.76 U_m$ | 0          |            |
| B 相 | $0.37 U_m$ | $3.19 U_m$ | $4.63 U_m$ | $2.78 U_m$ |
| C 相 | $2.64 U_m$ | $5.01 U_m$ | 0          |            |

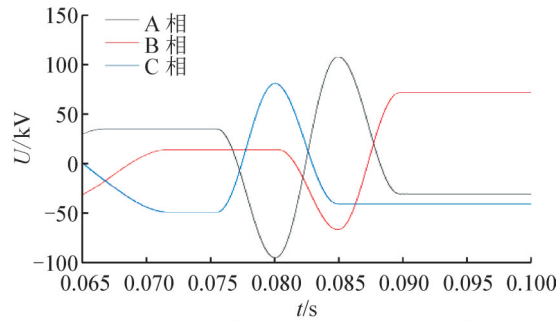
### 2.4 三相重击穿暂态过程分析

由两相重击穿过程可知:当断路器三相均发生重击穿时,三相均会产生过电压、电流。波形见图 12-13。

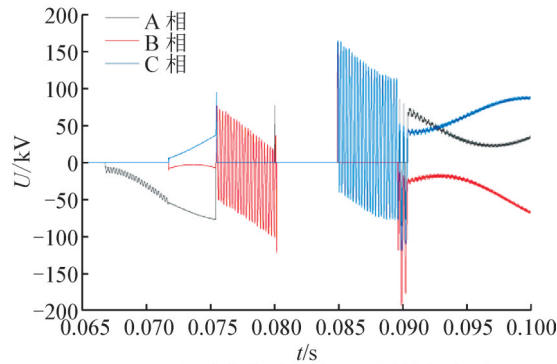
由图 12-13 可知:当线路中发生三相重击穿时,三相电容器极间均会产生很大的过电压、电流,且危害大于两相重击穿,各位置电压对应的系统电压倍数如表 7 所示。



(a) 三相重击穿时电容器极对地电压



(b) 三相重击穿时电容器极间电压



(c) 三相重击穿时断路器两端恢复电压

图12 三相重击穿时线路各位置电压变化

Fig. 12 Voltage Variation of each position in three-phase restrike

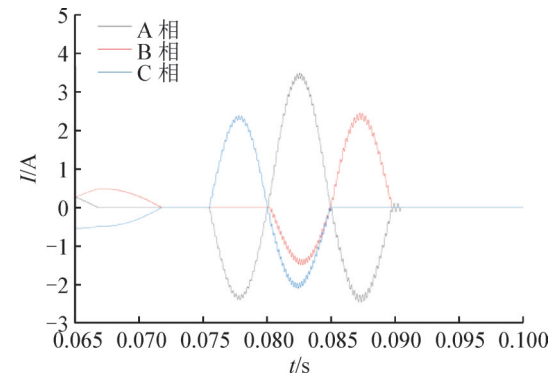


图13 三相重击穿时线路中电流

Fig. 13 Current in the line in three-phase restrike

表7 三相重击穿时各位置电压对系统电压倍数

Table 7 Voltage multiples of each position over system voltage in three-phase restrike

| 相别 | 电容器极间      | 电容器极对地     | 开关恢复电压 | 中性点电压      |
|----|------------|------------|--------|------------|
| A相 | $3.46 U_m$ | $5.37 U_m$ | 0      | $1.93 U_m$ |
| B相 | $1.97 U_m$ | $3.45 U_m$ | 0      |            |
| C相 | $2.53 U_m$ | $4.24 U_m$ | 0      |            |

### 3 多次重击穿暂态过程仿真分析

在实际电力系统的运行中,重击穿的发生并不是完全按照理论分析产生的,由于系统运行的随机性,重击穿的产生也是随机的,重击穿现象有可能不止一次地发生。此外,重击穿的发生还可能伴随着 NSDD 现象的出现。鉴于重击穿现象的复杂性和 NSDD 现象的特殊性,以前文为基础,进一步深入研究多次重击穿和 NSDD 现象。

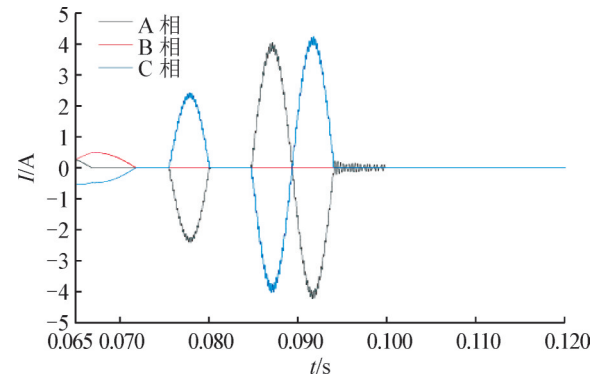
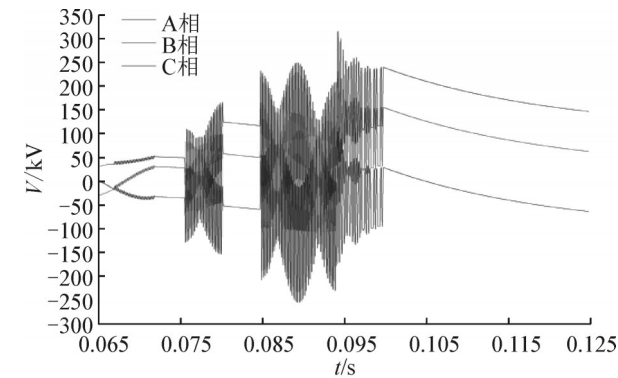
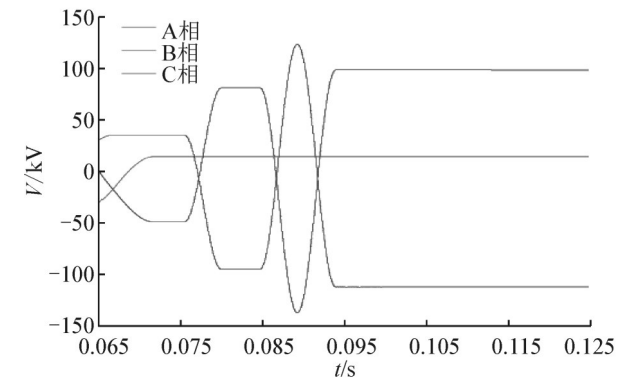


图14 发生A、C两相多次重击穿时线路中电流

Fig. 14 Current in line in multiple restrike of phase A and C



(a) 发生A、C两相多次重击穿时电容器极对地电压



(b) 发生A、C两相多次重击穿时电容器极间电压

图15 发生A、C两相多次重击穿时线路各位置电压变化

Fig. 15 Voltage variation of each position of line in multiple restrike of phase A and C

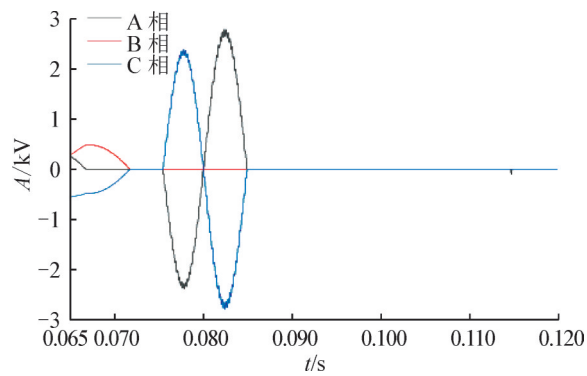
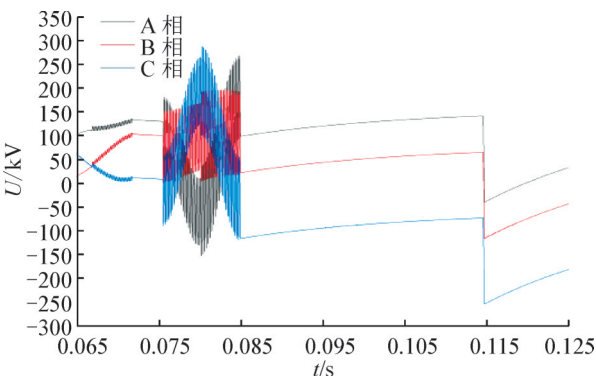
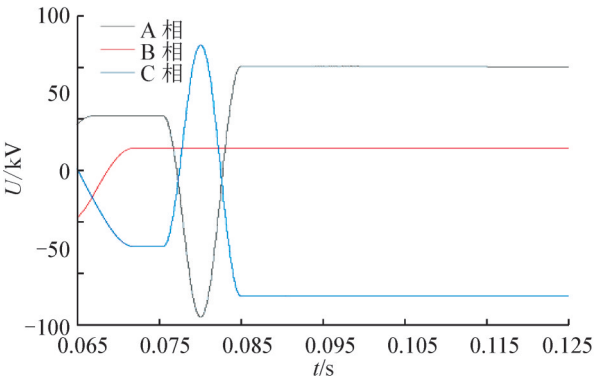


图16 发生A、C两相重击穿和NSDD时线路中电流  
Fig. 16 Current in the line in restrike of phase A and C as well as NSDD



(a) 发生A、C两相多次重击穿时电容器极对地电压



(b) 发生A、C两相多次重击穿时电容器极间电压

图17 发生A、C两相重击穿和NSDD时线路各位置电压变化  
Fig. 17 Voltage variation of each position during restrike of phase A and C as well as NSDD

分析图 14-15 可得:1)真空断路器在 0.065 s 分闸后,A 相在 0.066 7 s 首次电流过零。接着,A、C 相在 8.7 ms 后(0.075 4 s)发生两相重击穿,第 1 次持续 4.7 ms(0.080 1s)后电流熄灭,4.6 ms 后(0.084 7 s)发生第 2 次重击穿;2)多次重击穿工况下,电流呈现高频大幅震荡,且峰值随重击穿次数递增;3)故障相的极对地电压与极间电压随重击穿次数增加持续升高,其中极对地电压峰值的增幅尤为显著,会严重威胁电容器对地绝缘的安全运行。

图 16-17 表明:1)真空断路器在 0.066 7 s 首次

电流过零后,A、C 相在 8.7 ms 后(0.075 4 s)发生两相重击穿,第 1 次持续 9.2 ms(0.084 6 s)后电流熄灭,当线路中电流第 2 次过零后断路器并没有再次发生重击穿,而是经过 29.9 ms 后(0.114 5 s),A 相发生 NSDD;2)重击穿和 NSDD 工况下,电流振荡幅度较多次重击穿工况显著减小,且在 NSDD 阶段逐渐趋于平稳;3)极对地电压受 NSDD 影响,极对地电压发生重构,但极间电压基本维持稳定,极间绝缘相对安全。

两种情况下的过电压倍数如表 8-9 所示。由表中数据可知,当发生两相多次重击穿时,重燃相电容器极间电压最高水平会由原来 2.71 倍升高至 3.92 倍,对电容器组的安全运行造成更严重的威胁。而 NSDD 并未升高电容器极间电压的水平,不直接影响电容器组的安全运行。

表8 发生A、C两相多次重击穿时各位置电压对系统电压倍数

Table 8 Voltage multiples at each position over system voltage in restrike of phase A and C

| 状态     | 相别 | 电容器极间      | 电容器极对地     |
|--------|----|------------|------------|
| 第1次重击穿 | A相 | $2.71 U_m$ | $4.28 U_m$ |
|        | B相 | $0.37 U_m$ | $2.72 U_m$ |
|        | C相 | $2.64 U_m$ | $4.71 U_m$ |
| 第2次重击穿 | A相 | $3.52 U_m$ | $7.09 U_m$ |
|        | B相 | $0.37 U_m$ | $4.57 U_m$ |
|        | C相 | $3.92 U_m$ | $8.94 U_m$ |

表9 发生A、C两相重击穿和NSDD时各位置电压对系统电压倍数

Table 9 Voltage multiples at each position over system voltage in restrike of phase A and C as well as NSDD

| 状态   | 状态 | 电容器极间      | 电容器极对地     |
|------|----|------------|------------|
| 重击穿  | A相 | $2.69 U_m$ | $4.24 U_m$ |
|      | B相 | $0.37 U_m$ | $2.94 U_m$ |
|      | C相 | $2.45 U_m$ | $3.57 U_m$ |
| NSDD | A相 | $2.69 U_m$ | $2.03 U_m$ |
|      | B相 | $0.37 U_m$ | $3.56 U_m$ |
|      | C相 | $2.45 U_m$ | $6.21 U_m$ |

#### 4 结语

本文针对真空断路器在开断并联电容器组过程中易发生的重击穿现象及其对系统安全运行的潜在威胁,利用 PSCAD 软件,基于真空断路器的截流、介质恢复强度和高频熄弧能力等特性,构建了包含变电站和真空断路器在内的电磁暂态模型,系统分析了 35 kV 并联电容器组开断过程中不同重击穿工况下的过电压特性。主要结论如下:

1)单相重击穿的连锁反应:单相重击穿本身不

会改变电容器的极间电压水平,但会提高非重燃相的恢复电压至正常开断水平下的2~3倍,为后续的重击穿创造条件,从而可能发展为两相或三相重击穿,显著提升过电压风险。

应对措施:①选型上优先选用介质恢复强度动态响应快的真空断路器,缩短触头分离后的绝缘恢复时间差;②优化电容器组中性点接地方式,增设阻尼电阻,抑制中性点电位偏移引发的极对地电压升高。

2)多相重击穿的直接危害:两相及以上的重击穿会直接导致电容器极间电压升高到电源相电压峰值的2~4倍,这对电容器的绝缘性能和使用寿命构成直接威胁。重击穿次数越多,过电压累积效应越明显,危害程度也随之加剧。

应对措施:①断路器选型需核查切容专用认证,确保电容器组投切中,具备多次开断无重击穿的运行能力;②通过采用“串联电阻+避雷器”的复合方案,降低重击穿过电压的倍数。

3)NSDD现象的间接影响:NSDD(非同期重击穿)现象虽不直接对电容器设备造成损害,但其会改变重击穿后电容器极间电压的分布,进而增大其他相的开关恢复电压,增加了后续发生重击穿的概率,对系统的安全稳定运行构成潜在威胁。

应对措施:①优化断路器分闸控制策略,根据NSDD发生频次调整触头分离速度,减少电压重构引发的绝缘应力;②在电容器组出口侧加装过电压在线监测装置,响应时间 $\leq 1\mu\text{s}$ ,实时跟踪极对地电压变化,避免隐性风险累积。

综上所述,本文的仿真研究揭示了不同重击穿模式下的过电压演化规律,为真空断路器在电容器组投切应用中的选型、保护配合设计以及过电压抑制策略的制定提供了重要的理论依据和工程参考。

## 参考文献

- [1] 刘洋,林英明,余达,等. 构网型虚拟同步化光储并网系统的频率支撑策略[J]. 电源学报,2025,23(3):152-161.  
LIU Yang, LIN Yingming, YU Da, et al. Frequency support strategy for grid-forming virtual synchronization PV-storage grid-connected system[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 152-161.
- [2] 卢军,杨沛豪,何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报,2024,22(4):182-191.  
LU Jun, YANG Peihao, HE Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid[J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191.
- [3] 盖斌,蔡俊,赵亮,等. 并联电容器装置投切的仿真分析与试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(6):1-7.  
GE Bin, CAI Jun, ZHAO Liang, et al. Simulation analysis and test study on switching of shunt capacitor device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 1-7.
- [4] 廖斌,梁晨,陈松,等. 一起35 kV并联电容器装置故障原因分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2022,43(5):1-6.  
LIAO Bin, LIANG Chen, CHEN Song, et al. Fault analysis on 35 kV shunt capacitor device[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2022, 43(5): 1-6.
- [5] 马钊昊,刘志林,王琼,等. 并联电容器过电压事故分析及其抑制措施现场测试验证[J]. 电瓷避雷器,2025(5):70-76.  
MA Kehao, LIU Zhilin, WANG Qiong, et al. Overvoltage accidents in shunt capacitors and field testing verification of suppression measures[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(5): 70-76.
- [6] 徐龙,王声学,陈义东,等. 真空断路器辅助开关失灵问题分析与处理[J]. 中国设备工程,2023(S2):61-63.  
XU Long, WANG Shengxue, CHEN Yidong, et al. Analysis and treatment of auxiliary switch failure in vacuum circuit breakers[J]. China Equipment Engineering, 2023(S2): 61-63.
- [7] 王毅钊,陈兴贵,韩寅峰,等. 双断口真空断路器非同步关合直流预击穿特性[J]. 高压电器,2025,61(8):61-66.  
WANG Yizhao, CHEN Xingguo, HAN Yinfeng, et al. DC pre-breakdown characteristics of double-break vacuum circuit breaker in synchronous making operation[J]. High Voltage Apparatus, 2025, 61(8): 61-66.
- [8] 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 recurring overvoltage compensation by switching capacitor banks based on series-connected nonlinear resistor combinatorial switches[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(8): 183-192.
- [9] 汤宗尧,陈昊,纪洁,等. 一种基于电场分布特性的断路器外瓷套绝缘失效诊断方法[J]. 电瓷避雷器,2024(2):137-146.  
TANG Zongyao, CHEN Hao, JI Jie, et al. Fault diagnosis method for outer porcelain bushing of circuit breaker based on electric field distribution characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(2): 137-146.
- [10] LIU K, PALMIERO A, CHOPRA N, et al. Dual beam-current transformer design for monitoring and reporting of electron ultra-high dose rate (FLASH) beam parameters[J]. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 2023, 24(2): 13891.

- [11] LIU Hongmei, GUO Yongquan, WANG Xinshuo, et al. Design of compact complex impedance transformer with frequency and terminal impedance tunability[J]. Electronics, 2022, 11(7):116-124.
- [12] 付思, 曹云东, 李静, 等. 触头分离瞬间真空金属蒸气电弧形成过程的仿真[J]. 电工技术学报, 2020, 35(13): 2922-2931.
- FU Si, CAO Yundong, LI Jing, et al. Simulation researches on vacuum metal vapor arc formation at the initial moment of contact parting[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2922-2931.
- [13] M SOFTIC, A TOKIC. Vienna international conference on mathematical modeling measurement modeling and simulation of capacitor bank switching transients[J]. IFAC Proceedings, 2012, 45:1254-1259.
- [14] SHIPP D D, DIONISE T J, LORCH V, et al. Vacuum circuit breaker transients during switching of an LMF transformer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(1): 37-44.
- [15] GENG Yun, DONG Jinlong, CHEN Xinggui, et al. Three-phase modeling of 40.5 kV vacuum circuit breaker switching off shunt reactors and overvoltage suppression measure analysis[J]. Electric Power Systems Research, 2021, 194: 107058.
- [16] 吴诚威, 张居宁, 朱晓光, 等. 投切并联电容器时真空断路器连续重燃事故的机理分析[J]. 高压电器, 2024, 60(6):181-187.
- WU Chengwei, ZHANG Juning, ZHU Xiaoguang, et al. Mechanism analysis of sustaining reignition of vacuum circuit breaker in shunt capacitor switching[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 181-187.
- [17] 王金辉, 郎福成. 40.5 kV 真空断路器开合并联电容器组产生过电压的仿真分析[J]. 电工材料, 2015(4): 15-20.
- WANG Jinhui, LANG Fucheng. Simulation analysis of overvoltage for 40.5 kV vacuum circuit-breaker breaking-making shunt capacitor banks[J]. Electrical Engineering Materials, 2015(4): 15-20.
- [18] 李智敏, 南春雷, 马力. 等. 并联电容器分闸重击穿操作过电压研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(3): 41-47.
- LI Zhimin, NAN Chunlei, MA Li, et al. Research on overvoltage during breakdown operation of parallel capacitors[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2009, 30(3): 41-47.
- [19] 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 and analysis on the switching overvoltage of shunt capacitor bank[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3): 68-73.
- [20] 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.
- [21] 辛妍丽, 周文婷, 余泽远, 等. 40.5 kV 真空断路器分闸并联电抗器重燃过电压及抑制方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4):231-240.
- XIN Yanli, ZHOU Wenting, YU Zeyuan, et al. Reignition overvoltages caused by 40.5 kV vacuum circuit breaker switching-off shunt reactors and suppression methods[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 231-240.
- [22] 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: 323-331.
- [23] 王建东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11):99-103.
- WANG Jiandong, LI Guojie. Economic comparison of different collector networks for offshore wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 99-103.
- [24] 林晓璐, 张泽宇, 唐文虎, 等. 面向过电压仿真的真空断路器数据-知识联合驱动建模方法[J]. 高电压技术, 2026, 52(1):359-370.
- LIN Xiaolu, ZHANG Zeyu, TANG Wenhui, et al. Data-knowledge-driven modeling of vacuum circuit breakers for overvoltage simulation[J]. High Voltage Engineering, 2026, 52(1): 359-370.
- [25] 马飞越, 马青, 崔巍, 等. 宁夏电网 35 kV 电容器组关合涌流计算与仿真分析[J]. 宁夏电力, 2024(4):41-48.
- MA Feiyue, MA Qing, CUI Wei, et al. Calculation and simulation analysis of closing surge currents in 35 kV capacitor banks in the Ningxia power grid[J]. Ningxia Electric Power, 2024(4): 41-48.
- [26] 李永康, 杜振斌, 石建. 一起 220 kV 电力变压器线端交流耐压试验击穿故障[J]. 变压器, 2024, 61(7): 73-75.
- LI Yongkang, DU Zhenbin, SHI Jian. Breakdown failure of line terminal AC withstand voltage test for 220 kV power transformer[J]. Transformer, 2024, 61(7): 73-75.
- [27] 陈俊林, 王亚, 刘洋, 等. 低频条件下盐雾环境对硅橡胶外绝缘表面击穿特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2025(3):112-119.

(下转第 43 页)

- WANG Donglei, CHEN Qi, XU Daqian, et al. The selection of power cycle technology for the power generation island of a thermonuclear fusion power plant [J]. Southern Energy Construction, 2025, 12(4): 20-34.
- [37] 黄静波, 姚锋, 陈超, 等. 基于改进NSGA-II算法的多目标矩阵组织人力资源调度研究[J/OL]. 控制与决策, 1-11 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- HUANG Jingbo, YAO Feng, CHEN Chao, et al. Research on multi-objective human resource scheduling in matrix organization based on improved NSGA-II algorithm[J/OL]. Control and Decision, 1-11 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- [38] 顾靖达, 白小会, 李伟, 等. 新型电力系统变电站绿色低碳技术分析[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 111-117.
- GU Jingda, BAI Xiaohui, LI Wei, et al. Analysis on green and low carbon technologies for new power system substations[J]. Southern Energy Construction, 2024, 11(4): 111-117.
- [39] 何富华, 罗彪, 杨侨, 等. 基于NSGA-II与欧氏距离法的齿轮多目标综合修形设计[J/OL]. 哈尔滨工程大学学报, 1-9 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- HE Fuhua, LUO Biao, YANG Qiao, et al. Multi-objective comprehensive modification design of gears based on NSGA-II and euclidean distance method[J/OL]. Journal of Harbin Engineering University, 1-9 [2026-01-28]. <https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract>.
- 作者简介:**
- 吕意飞(1986—), 男, 高级工程师, 研究方向为智能运检技术、嵌入式应用和开发、继电保护、直流微机技术等。E-mail: 287443662@qq.com。
- 王英(1978—), 男, 教授, 研究方向为牵引“源-网-荷-风光储”多源供电、高速铁路“弓-车-网-桥-隧”动力学和人工智能、信息处理在电力系统的应用等。E-mail: 2324509003@qq.com。
- 金超(1991—), 男, 工程师, 主要从事继电保护专业、变电设备运维检修等工作。E-mail: 2453655992@qq.com。
- 曹阳(1987—), 女, 工程师, 主要从事变电检修、党建管理工作。E-mail: 47512695@qq.com。
- 文秀梅(1991—), 女, 工程师, 主要从事继电保护、党建基础工作。E-mail: 626884341@qq.com。
- 康龙龙(1995—), 男, 工程师, 主要从事直流系统技术应用工作。E-mail: 1498847793@qq.com。
- 葛裕诚(2002—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多脉波整流以及谐波耦合等方面应用。E-mail: 2324509003@qq.com。

(上接第32页)

- CHEN Junlin, WANG Ya, LIU Yang, et al. Surface breakdown characteristics of silicone rubber external insulation under low frequency salt spray environment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(3): 112-119.
- [28] 王进, 袁曼曼, 石存金, 等. 极端热环境下套管硅油纸绝缘特性与击穿特性对比研究[J]. 变压器, 2025, 62(7): 51-60.
- WANG Jin, YUAN Manman, SHI Cunjin, et al. Comparative study on physicochemical and breakdown characteristics of silicone oil-paper insulation under extreme thermal environment [J]. Transformer, 2025, 62(7): 51-60.
- [29] 向常圆, 宋宝同, 李笑彤, 等. 北京地区500 kV变电站66 kV侧PT间隔故障仿真及铁磁谐振过电压抑制方法研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 77-84.
- XIANG Changyuan, SONG Baotong, LI Xiaotong, et al. Simulation of 66 kV side pt interval faults in 500 kV substations in Beijing and research on methods for suppressing ferromagnetic resonance overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 77-84.
- [30] 朱惠君, 张子琪, 秦秀颖, 等. 雷击和操作过电压双重作用下的牵引站避雷器故障仿真[J]. 电瓷避雷器, 2025(6): 60-68.
- ZHU Huijun, ZHANG Ziqi, QIN Xiuqi, et al. Simulation of lightning arrester fault in traction station under the dual action of lightning strike and switching overvoltage[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(6): 60-68.
- 作者简介:**
- 王一涵(2001—), 男, 从事智能电器分析与优化设计工作。E-mail: 1438777965@qq.com。
- 于力(1976—), 女, 副教授, 通信作者, 从事高电压与绝缘技术、电力系统开关设备与无功补偿技术工作。
- 贾延超(1970—), 男, 高级工程师, 从事高压开关设计及仿真研究工作。
- 王艺聪(2001—), 男, 硕士, 从事高电压与绝缘技术工作。
- 周鸿宇(2001—), 男, 硕士, 从事电力系统优化调度工作。
- 王宇福(2001—), 男, 硕士, 从事电力系统优化调度工作。