

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.004

## 均压方式对双断口真空断路器短燃弧开断特性的影响

管 臣<sup>1,2</sup>, 穆双录<sup>1</sup>, 王 琼<sup>1</sup>, 吉波波<sup>1</sup>, 姚晓飞<sup>2</sup>

(1. 西安西电开关电气有限公司, 西安 710075; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

**摘要:**文中建立了双断口真空断路器短路电流开断实验系统,设置7组变量对照试验,系统研究了电容均压、阻容均压两种均压方式对短燃弧时间、临界熄弧开距、断口分压特性及非同期击穿暂态过程的影响规律。试验结果表明:与无均压工况相比,电容均压与阻容均压均可显著缩短短燃弧时间、减小临界熄弧开距,提升短燃弧开断性能;电容均压下,增大均压电容可改善断口电压均衡性,但性能提升呈饱和趋势;阻容均压下,开断性能随串联电阻增大先提升后下降,电阻为40 k $\Omega$ 时综合性能最优。非同期击穿暂态过程分析表明,阻容均压可使击穿断口快速恢复承压,改善断口电压分配,而电容均压与无均压工况无此特性;纯电容均压的开断性能由分压均匀性主导,阻容均压则由分压均匀性与非同期击穿后的快速电压恢复共同决定。文中研究结论可为双断口真空断路器均压方案遴选、均压支路参数匹配设计提供理论支撑与工程实践参考。

**关键词:**双断口真空断路器;短燃弧开断;均压方式;短燃弧时间;临界熄弧开距

## Influence of Grading Mode on Interruption Characteristics with Minimum Arcing Time of Double-break Vacuum Circuit Breakers

GUAN Chen<sup>1,2</sup>, MU Shuanglu<sup>1</sup>, WANG Qiong<sup>1</sup>, JI Bobo<sup>1</sup>, YAO Xiaofei<sup>2</sup>

(1. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** In this paper, an experimental system for short-circuit current interruption of double-break vacuum circuit breakers is set up. Seven groups of controlled variable comparison tests are set up to systematically investigate the influence of capacitive grading and  $RC$  grading on minimum arcing time, critical arc-extinguishing gap, voltage distribution and transient characteristics across the breaker, and the transient process of asynchronous breakdown. The test results show that, compared to the case without grading mode, both capacitive and  $RC$  grading modes can effectively shorten the minimum arcing time, reduce critical arc-extinguishing gap and enhance minimum arcing interruption capability. In case of capacitive grading, increasing grading capacitance can improve voltage uniformity across open contacts, but the performance enhancement shows saturation trend. While, in case of  $RC$  grading, the interruption performance first increases and then decreases with the series resistance, reaching the optimum performance at resistance of 40 k $\Omega$ . The transient process analysis of asynchronous breakdown indicates that  $R-C$  grading enables the breakdown contacts to rapidly recover its voltage-withstanding capability and improves the voltage distribution across open contacts, whereas neither capacitive grading nor the condition without grading exhibits such characteristics. The interruption performance of pure capacitive voltage grading is governed by the uniformity of voltage distribution, while that of  $RC$  voltage grading is determined the uniformity of voltage grading and the rapid voltage recovery following asynchronous breakdown. The conclusion in this paper can provide theoretical support and engineering reference for grading scheme selection and parameter optimization of double-break vacuum circuit breakers.

收稿日期:2026-03-11; 修回日期:2026-05-16

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFB2403700)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2022YFB2403700).

**Key words:** double-break vacuum circuit breaker; interruption with minimum arcing time; grading mode; minimum arcing time; critical arc-extinguishing gap

## 0 引言

在中国“双碳”战略全面落地实施的行业背景下,高压开关领域六氟化硫(SF<sub>6</sub>)替代技术已成为行业研究热点<sup>[1-4]</sup>。真空断路器以真空灭弧室为核心灭弧单元,凭借环保、结构简单、免维护等优势,成为替代传统SF<sub>6</sub>断路器的主流技术路线之一<sup>[5-6]</sup>。研发可覆盖全电压等级的高压真空断路器,对推动高压输配电设备绿色化升级具有重要工程价值与现实意义。

当前,提升真空断路器电压等级主要分为两条技术路径。其一为研制高电压等级的单断口真空灭弧室,但真空间隙击穿耐压存在明显饱和效应<sup>[7]</sup>,单纯增大灭弧室开距难以实现电压等级的进一步突破,现阶段单断口真空断路器最高应用电压仅为252 kV<sup>[8-9]</sup>。其二为多断口串联技术路线,该方案可充分发挥真空小间隙的绝缘优势,目前基于该技术已成功研制出363 kV与550 kV真空断路器产品<sup>[10-11]</sup>,是高压、超高压等级真空断路器研发的核心技术方向。

多断口串联结构受对地电容影响,存在各断口电压分布不均问题,其中首端高压断口分担电压占比常超过总电压的70%,显著降低整机整体绝缘耐压水平<sup>[12-13]</sup>。为改善断口电压分布不均的问题,工程上通常在各断口并联均压支路,其中并联均压电容是目前应用最为广泛的均压方案<sup>[14]</sup>。现阶段相关研究主要围绕两大方向开展:一是均压电容对多断口真空断路器静态绝缘分布、绝缘水平的调控规律<sup>[15-16]</sup>;二是在较长燃弧时间条件下,均压电容对断路器弧后电压调控与开断能力的影响特性<sup>[17-18]</sup>。

结合选相分闸技术的相控短燃弧开断,是真空断路器开断短路电流的高效技术方案<sup>[19-20]</sup>,工作原理见图1<sup>[21]</sup>。电力系统出现短路故障后,借助故障识别与电流零点预测算法可定位电流过零点<sup>[22-23]</sup>;经过延时( $t_{\text{delay}}$ ),控制器驱动真空断路器执行分闸操作。动静触头在固有分闸时间( $t_{\text{opening}}$ )后分开,经历了一段燃弧时间( $t_{\text{arcing}}$ )后,于电流过零点熄灭。相控开断的成功与否取决于燃弧时间( $t_{\text{arcing}}$ )与短燃弧时间的关系,当燃弧时间大于短燃弧时间,则开断成功;反之,则开断失败。该方法可有效缩短燃弧时间、减轻触头电弧烧蚀,延长真空灭弧室使用寿命<sup>[24]</sup>。确定真空断路器短路电流可靠开断的短燃弧时间是该方法成功实现的基础。

综合现有研究来看,当前针对多断口真空断路

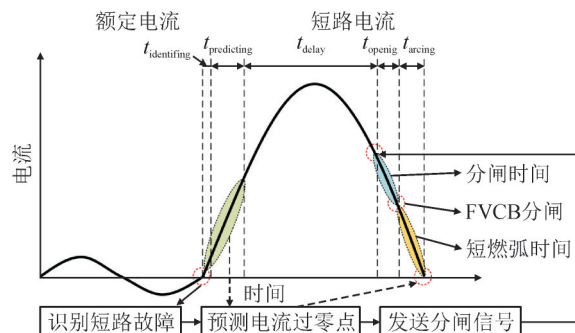


图1 真空断路器短路电流相控短燃弧开断原理

Fig. 1 Principle of controlled interruption for short-circuit current of vacuum circuit breaker within minimum arcing time

器均压技术的研究多集中于静态绝缘特性与常规长燃弧开断场景,关于均压方式对串联双断口真空断路器短燃弧开断特性、非同期击穿暂态过程的针对性公开研究仍相对有限,难以充分支撑双断口真空断路器相控短燃弧开断技术的精细化工程应用。

区别于现有静态分压规律、常规长燃弧开断特性的相关研究,文中的核心研究贡献主要体现在:聚焦串联双断口真空断路器短燃弧开断工况,系统对比电容均压、阻容均压两种主流均压方案,重点探究不同均压方式对断路器短燃弧开断边界、临界熄弧开距、断口动态分压特性及非同期击穿暂态演化规律的差异化影响。基于控制变量法搭建短燃弧开断试验平台,明确两种均压方案的适配逻辑与参数调控机理,研究成果可为双断口高压真空断路器均压方案选型、均压支路参数优化设计提供可靠的理论依据与工程参考。

## 1 实验设置

### 1.1 实验装置

文中选取两台结构参数完全一致的快速真空断路器(FVCB<sub>1</sub>、FVCB<sub>2</sub>)作为试验样机,样机结构见图2(a),其操动机构采用电磁斥力机构。两台快速真空断路器均配置型号为TD14A-12/1250-20N的真空灭弧室,该灭弧室内部搭载直径48 mm的杯状纵磁触头,触头材质为CuCr50合金,对应的真空灭弧室与杯状纵磁触头结构分别见图2(b)、(c)。

试验前,对两台快速真空断路器的分闸行程特性进行测试,测得的分闸行程曲线见图3。由测试结果可知,两台断路器分闸过程的前5 mm行程曲线基本重合。由于快速真空断路器短燃弧开断工况下的临界熄弧开距通常小于5 mm,可判定两台试验样

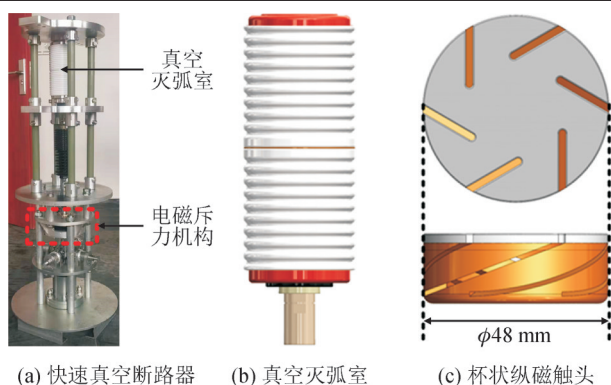


图2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

机的分闸运动特性基本一致,前5 mm的平均分闸速度约为3.6 m/s,能够满足本次对比试验的一致性要求。

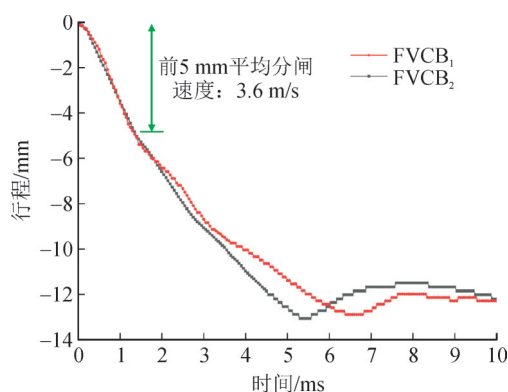


图3 两台快速真空断路器行程曲线测量结果

Fig. 3 Measurement results of travel curves of two fast vacuum circuit breakers

## 1.2 实验回路

文中基于高压合成试验回路开展7组短路电流开断试验。试验过程中,电流源输出有效值20 kA的短路电流,电压源提供暂态恢复电压(TRV),其峰值为63 kV,电压上升率为3.15 kV/ $\mu$ s。7组试验设置分为两种均压工况:第1组为无均压措施的双断口开断基准试验;第2、3、4组为电容均压试验,在两串联断口两端分别并联100、500、1 500 pF的均压电容( $C_g$ );第5、6、7组为阻容均压试验,固定并联均压电容为500 pF,依次匹配20、40、90 k $\Omega$ 的并联均压电阻( $R_g$ )。各组试验的详细工况参数见表1。

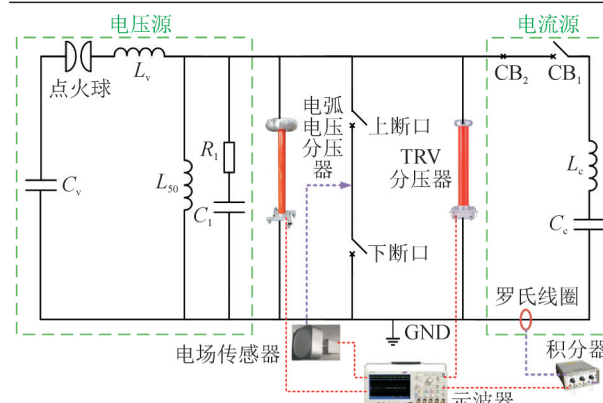
本次双断口开断试验系统见图4,分别对应无均压、电容均压、阻容均压3种试验工况。

试验测量系统配置如下:采用电弧分压器采集双断口总电弧电压,通过高精度校准TRV分压器获取双断口总暂态恢复电压 $U_{TRV}$ ,利用罗氏线圈搭配积分器采集短路试验电流,全部波形由多通道示波器同步采集存储。双断口中间悬浮电位是解析断口动态分压、非同期击穿暂态过程的核心参量,传统

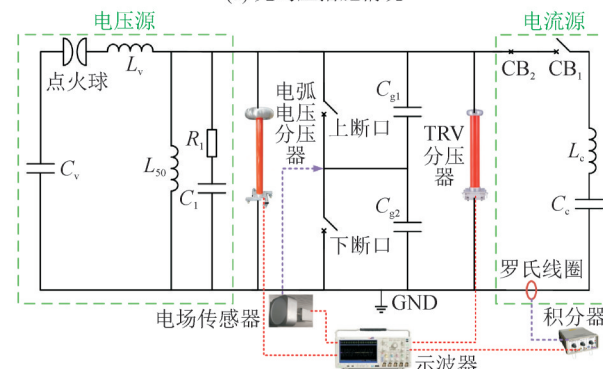
表1 实验条件

Table 1 Experimental conditions

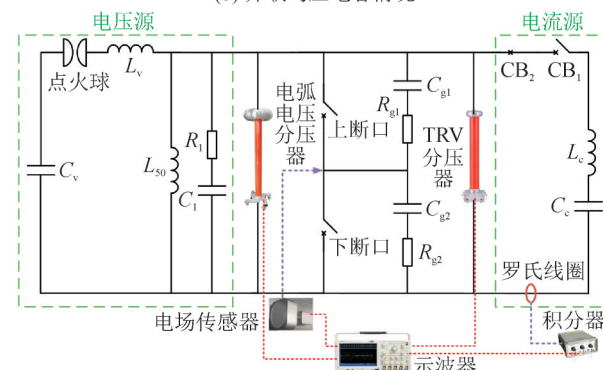
| 实验组号 | 并联电容( $C_g$ )/pF | 并联电阻( $R_g$ )/k $\Omega$ |
|------|------------------|--------------------------|
| 1    | 0                | 0                        |
| 2    | 100              | 0                        |
| 3    | 500              | 0                        |
| 4    | 1 500            | 0                        |
| 5    | 500              | 20                       |
| 6    | 500              | 40                       |
| 7    | 500              | 90                       |



(a) 无均压措施情况



(b) 并联均压电容情况



(c) 并联均压阻容情况

图4 双断口串联开断试验系统

Fig. 4 Dual-break series interrupting test system

高压探头、分压器存在寄生电容、寄生电感,会严重畸变悬浮电位测量结果。文中采用非接触式电场传感器测量中间悬浮电位,传感器有效测量带宽为0.04~300 kHz,可完整覆盖试验TRV暂态振荡频段,满足高频暂



态信号测试需求。

试验前完成整套测量系统全面标定:分别对单断口施加标准工频电压、典型 TRV 波形、雷电冲击电压三类激励,将电场传感器输出波形与经法定计量校准的标准分压器测量结果逐点比对校验。标定结果表明,全工况下整套测量系统最大相对误差不超过 1%,测量精度满足试验数据分析要求。

双断口整体总暂态恢复电压记为  $U_{TRV}$ ,通过经计量校准的标准 TRV 分压器直接采集;下断口暂态恢复电压  $U_{TRV\text{lower-break}}$  借助非接触式电场传感器实测获取;上断口暂态恢复电压  $U_{TRV\text{upper-break}}$  无法直接测量,通过总恢复电压与下断口恢复电压差值运算得到,其计算表达式为

$$U_{TRV\text{lower-break}} = U_{TRV} - U_{TRV\text{upper-break}} \quad (1)$$

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 典型短路电流开断波形

串联双断口真空断路器短路电流开断成功的典型试验波形见图 5。

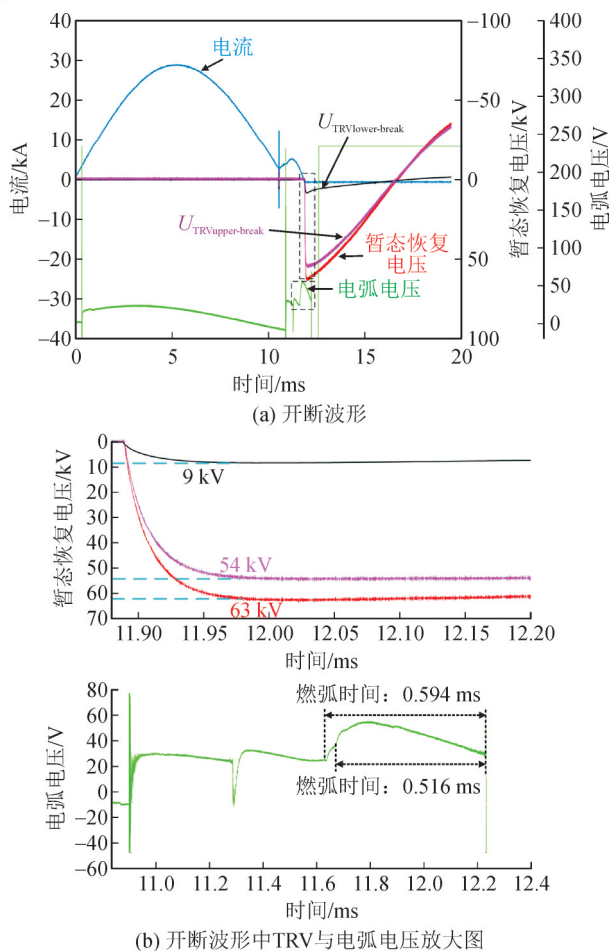


图 5 双断口断路器短路电流典型开断成功波形

Fig. 5 Typical successful waveforms for short-circuit current interruption of a double-break circuit breaker

主要包含短路电流、暂态恢复电压及电弧电压

3类特征波形。由波形可知,本次试验短路电流峰值为 28 kA,系统 TRV 峰值为 63 kV,电弧电压峰值约为 40 V。电弧电压波形结果表明,两组真空断路器断口的燃弧时间存在显著差异,整体表现为 FVCB<sub>2</sub>燃弧时间长于 FVCB<sub>1</sub>。在 11.641 ms 时刻, FVCB<sub>2</sub>触头率先分离并起弧,产生幅值约 20 V 的电弧电压;在 11.719 ms 时刻, FVCB<sub>1</sub>触头完成分离起弧,总电弧电压瞬时抬升并趋于稳定,峰值达到 40 V。经计算,两断口燃弧时间分别为 0.592 ms 与 0.516 ms。文中后续分析统一以 FVCB<sub>2</sub>的燃弧时间作为双断口开断的燃弧时间。

无均压措施下双断口间的 TRV 分布极不均衡,电压分配差异性显著。其中,上断口承担主要恢复电压, TRV 峰值可达 54.5 kV;而下断口承压幅值仅为 8.5 kV,大幅低于上断口承压水平。

串联双断口真空断路器短路电流开断失败的典型试验波形见图 6。

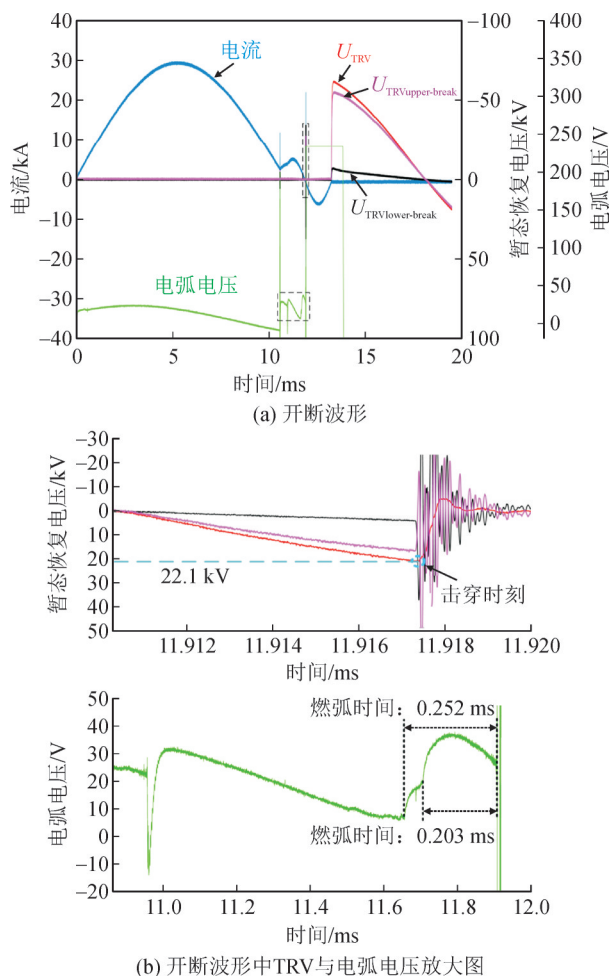


图 6 短路电流短燃弧典型开断失败波形

Fig. 6 Typical failed waveforms for short-circuit current interruption with minimum arcing time

本次试验的短路电流与 TRV 参数与上述成功开断试验保持一致,其中上、下断口的燃弧时间分别为 0.252、0.203 ms。在开断过程中,当总暂态恢

复电压瞬时值上升至22.1 kV时,上断口首先发生击穿,随后下断口相继击穿,双断口同时处于导通击穿状态,致使总暂态恢复电压迅速跌落至零,最终导致本次短路电流开断失败。

## 2.2 并联均压电容对短燃弧开断的影响

不同均压电容参数下双断口真空断路器短燃弧时间的变化特性见图7(a),临界熄弧开距见图7(b),试验工况包含无均压电容以及并联100、500、1 500 pF均压电容4种情况。由试验结果可知,存在一条短燃弧时间边界,可有效区分开断成功与开断失败区域,边界上方为开断成功区间,边界下方为开断失败区间,该分界线为基于现有试验点得到的经验边界。由变化规律可得,并联均压电容可显著降低双断口真空断路器的短燃弧时间。随着均压电容容值增大,短燃弧时间边界持续降低,但下降速率逐渐放缓,整体呈现明显的饱和特性。这表明并联均压电容能够有效改善双断口真空断路器的短燃弧开断能力,但其性能提升效果随电容增大逐渐趋于饱和。

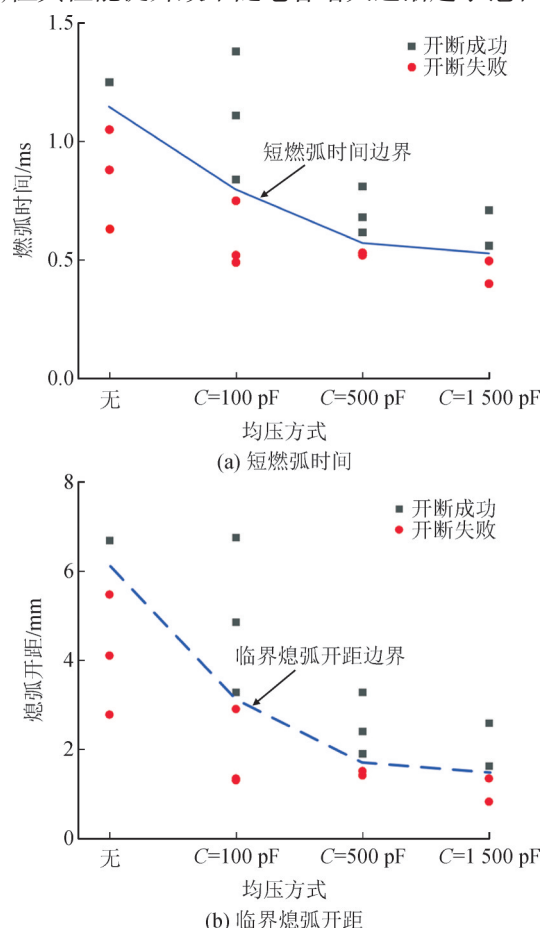


图7 均压电容对双断口开断短燃弧时间与临界熄弧开距的影响

Fig. 7 Influence of grading capacitance on minimum arcing time and critical arc-extinguishing gap of double-break circuit breaker

图7(b)揭示了均压电容容值对双断口真空断路

器短燃弧开断临界熄弧开距的影响规律(图7(b)中临界分界线为基于现有试验点得到的经验边界),文中熄弧开距定义为两个串联断口熄弧开距的总和。对比分析可知,临界熄弧开距边界随均压电容的变化趋势,与短燃弧时间的变化规律具有高度一致性。

## 2.3 并联均压阻容对短燃弧开断的影响

阻容均压回路中电阻参数对双断口真空断路器短燃弧时间与临界熄弧开距的影响规律见图8(图8中临界分界线为基于现有试验点得到的经验边界)。试验以单一500 pF均压电容工况为对照组,对比研究了500 pF/20 k $\Omega$ 、500 pF/40 k $\Omega$ 、500 pF/90 k $\Omega$  3组不同阻容均压参数下的开断特性。与纯电容均压方案相比,采用阻容均压时,断路器的短燃弧时间与临界熄弧开距随电阻阻值增大呈现先减小后增大的变化趋势。

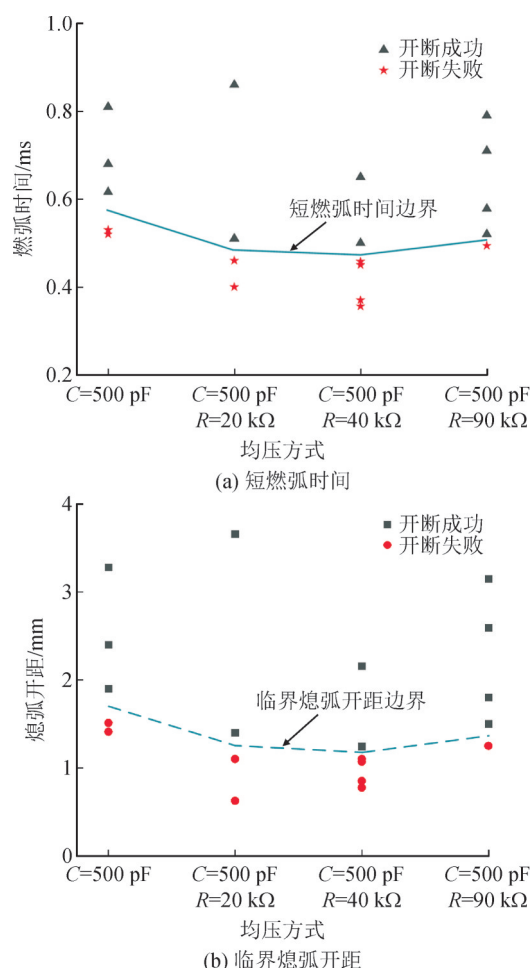


图8 均压阻容对双断口开断短燃弧时间与临界熄弧开距的影响

Fig. 8 Influence of grading resistor and capacitance on minimum arcing time and critical arc-extinguishing gap of double-break circuit breaker

当电阻阻值不高于 40 k $\Omega$  时,短燃弧时间与临界熄弧开距随阻值增大持续降低,表明在此阻值范围内,增大串联电阻可有效提升双断口真空断路器的短燃弧开断性能;当电阻阻值超过 40 k $\Omega$  后,继续增大阻值会使短燃弧时间与临界熄弧开距回升,导致断路器短燃弧开断能力出现衰减。

综上可知,相较于单一电容均压方案,阻容复合均压策略具备进一步优化双断口真空断路器开断性能的潜力,但电阻值存在最优取值区间,需通过参数优选以实现最佳均压与开断效果。

#### 2.4 双断口短路电流短燃弧开断非同期击穿后电压暂态变化规律

无均压措施工况下,短燃弧开断过程中双断口非同期击穿后各断口承压的暂态演变特性见图 9。在  $t_1$  时刻,TRV 开始施加于双断口整体两端。 $t_2$  时刻,上断口率先发生击穿,线路电感与上断口固有电容形成 LC 振荡回路,引发高频振荡过程。该振荡使上断口电压呈现正向波动,同时导致下断口承受的电压瞬时超过系统总 TRV 幅值。击穿振荡结束后,上断口绝缘性能逐步恢复并重新承担恢复电压,其承压数值以一定速率逐渐增加;而下断口所承受的电压则随时间持续降低,断口间电压分布再次发生动态重构。

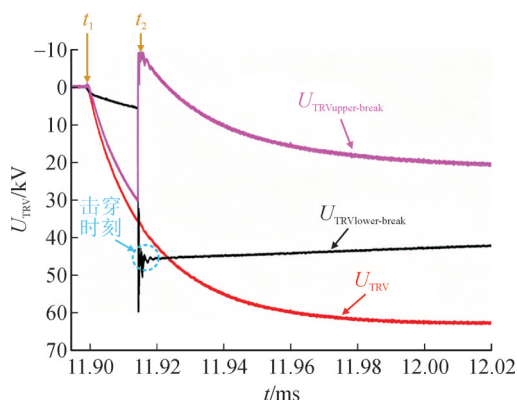


图 9 无均压措施工况下非同期击穿后各断口承压的暂态演变特性

Fig. 9 Transient evolution characteristics of voltage stress on each break after asynchronous breakdown without voltage grading mode

并联均压电容工况下,短燃弧开断过程中双断口非同期击穿过程中各断口承压的暂态演变特性见图 10。与无均压措施下的非同期击穿过程类似:在  $t_1$  时刻,暂态恢复电压开始施加于灭弧室两端,双断口同步承受恢复电压;在  $t_2$  时刻,上断口率先发生重击穿,断口电压瞬时跌落。此时,线路电感与上断口等效电容形成 LC 振荡回路,但由于并联了远大

于断口固有电容的均压电容,上断口电压围绕零值小幅振荡,而下断口电压则迅速抬升至系统总 TRV 水平。随后,随着上断口动态绝缘性能逐步恢复,其承压水平由零值以一定速率逐渐回升,而下断口承担的电压也随总 TRV 的持续增加而同步增加,断口间电压分布重新趋于稳定。

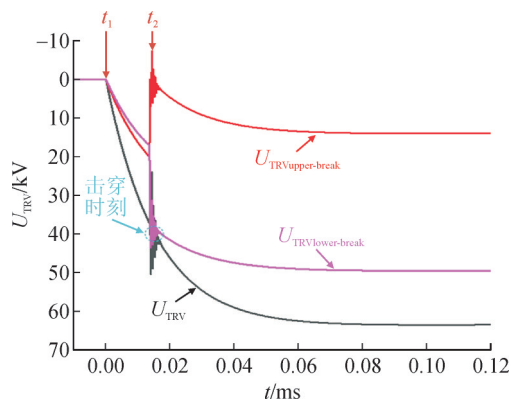


图 10 电容均压下非同期击穿后各断口承压的暂态演变特性

Fig. 10 Transient evolution characteristics of voltage stress on each break after asynchronous breakdown with capacitive grading

并联阻容均压工况下,双断口非同期击穿过程中各断口承压的暂态演变特性见图 11。该工况下的电压暂态行为与前述无均压、纯电容均压两种方式存在显著差异。上断口发生击穿后,其电压瞬时跌落至零值附近;随后在  $t_2$  至  $t_3$  时段内,上断口所承担电压呈现出快速上升的过程,之后再随系统 TRV 的整体变化持续缓慢增长。而在前两种均压方案中,上断口击穿后均未出现该阶段的电压快速回升现象,这一特性差异体现了阻容均压支路对断口暂态恢复过程的特殊调控作用。

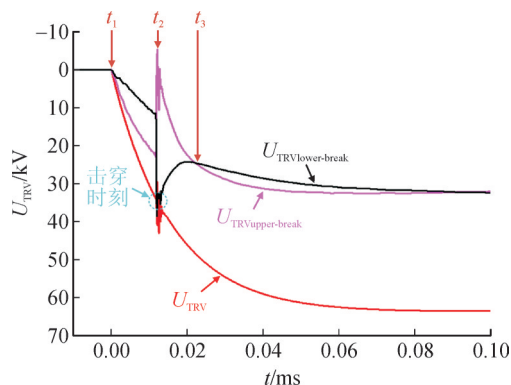


图 11 阻容均压下非同期击穿后各断口承压的暂态演变特性

Fig. 11 Transient evolution characteristics of voltage stress on each break after asynchronous breakdown with resistor and capacitive grading



### 3 讨论

#### 3.1 非同期击穿后电压暂态变化原因分析

对比图 10、11 波形特征可知,断口并联纯电容与并联阻容两种工况下,单断口击穿后的系统电压暂态演变规律存在显著差异。电流过零后双断口并联均压电容的等效电路模型见图 12,图 12 中:左侧绿色虚线框为提供暂态恢复电压的合成回路电压源; $C_{\text{upper-break}}$ 、 $C_{\text{lower-break}}$  分别为高压侧、低压侧真空断口的等效电容; $C_{g1}$ 、 $C_{g2}$  依次为高压侧与低压侧断口的并联均压电容; $C_{z1}$  为高压电位对地电容; $C_{z2}$  为中间悬浮电位对地电容。

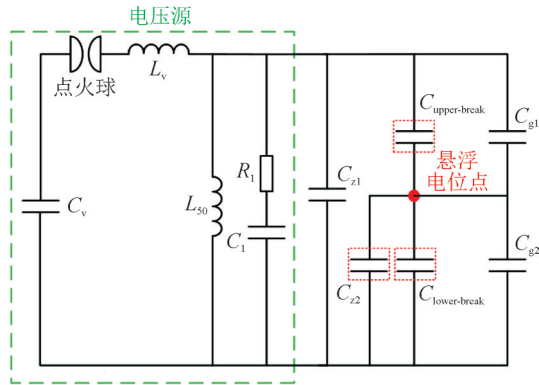


图 12 并联均压电容下双断口等效电路

Fig. 12 Equivalent circuit of double-break vacuum circuit breaker with capacitive grading

结合图 12 等效电路对图 10 电压波形进行机理分析。当上断口发生非同期击穿时,该断口可等效为短路状态,其并联均压电容  $C_{g1}$  正、负极板直接短接,极板储存电荷快速中和,电容两端电压迅速降至零。待上断口动态绝缘耐压能力逐步恢复后,合成回路电压源重新对上断口等效电容  $C_{\text{upper-break}}$  与均压电容  $C_{g1}$  充电,上断口电压从零开始缓慢抬升。

电流过零后双断口并联阻容均压模块的等效电路模型见图 13,相较于纯电容均压工况,新增  $R_{g1}$ 、 $R_{g2}$  分别为上、下断口的并联均压电阻。基于该等效电路对图 11 波形展开分析:上断口击穿后,断口等效电容  $C_{\text{upper-break}}$  内部储存电荷快速释放,断口两端电压瞬时降至零。此时上断口虽处于短路状态,但受并联均压电阻  $R_{g1}$  的限流作用,均压电容  $C_{g1}$  的电荷释放速率被显著抑制,电容两端电压仅出现小幅衰减,可维持较高的残余电压水平。

当上断口动态耐压性能恢复后,断口等效电容  $C_{\text{upper-break}}$ 、均压电容  $C_{g1}$  与均压电阻  $R_{g1}$  构成一阶动态电路,电路响应表现为零状态响应特性。对该充电回路列写电压、电流平衡方程,得到式(2);通过公式

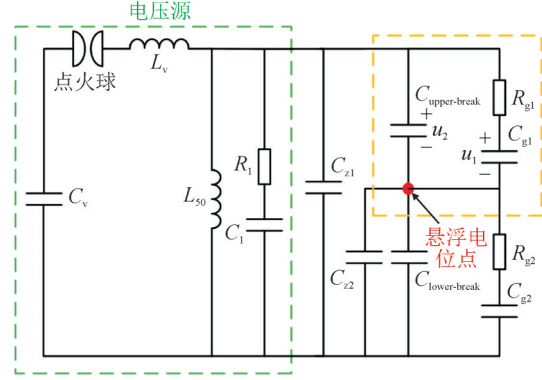


图 13 并联均压阻容下双断口等效电路

Fig. 13 Equivalent circuit of double-break vacuum circuit breaker with resistor and capacitive grading

变换推导得到式(3),进一步求解可得上断口两端电压动态表达式  $u_2$ , 见式(4):

$$\begin{cases} u_1 = R_{g1} C_{\text{upper-break}} \frac{du_2}{dt} + u_2 \\ C_{g1} \frac{du_1}{dt} = C_{\text{upper-break}} \frac{du_2}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

$$\frac{C_{\text{upper-break}}}{C_{g1}} u_2 = R_{g1} C_{\text{upper-break}} \frac{du_2}{dt} + u_2 \quad (3)$$

$$u_2 = Ae^{\int \frac{C_{\text{upper-break}}/C_{g1} - 1}{R_{g1} C_{\text{upper-break}}} dt} \quad (4)$$

式(2)-(4)中: $u_1$  为均压电容两端残余电压; $A$  为常数。

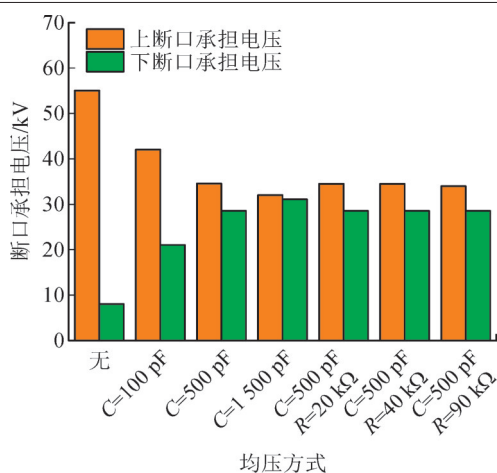
由公式推导结果可知,断口恢复耐压后,残余带电的均压电容会持续向上断口等效电容充电,直至二者电压趋于相等;同时,合成回路电压源输出的 TRV 持续攀升,同步为上断口与均压电容整体充电。上述双重充电作用使得图 11 中  $t_2$  至  $t_3$  时段内,上、下断口的电压配比可快速恢复至击穿前的水平。

根据式(4)的电压变化规律可进一步得出,均压电阻  $R_{g1}$  增大时,断口电压  $u_2$  的时域增长速率显著放缓。这表明均压电阻的存在会抑制击穿断口的充电速度,迟滞断口耐压恢复后的电压重建过程,对双断口电压分配的动态恢复特性具有调控作用。

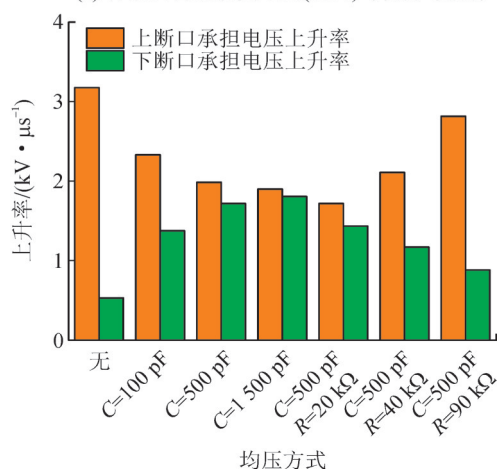
#### 3.2 双断口真空断路器短燃弧开断能力分析

不同均压方式下双断口真空断路器短燃弧开断过程的断口分压特性对比结果见图 14。纯电容均压工况下,随着均压电容容值增大,上、下断口的 TRV 峰值与电压上升率差异显著减小,双断口分压均匀性得到明显改善。阻容复合均压工况下,随着串联均压电阻阻值增大,双断口 TRV 峰值基本保持稳定,但电压上升率的分配特性发生明显偏移,表现为上断口电压上升率逐步升高、下断口电压上升率逐步降低。该结果表明,在 TRV 上升阶段,串联电阻的增大会加剧双断口瞬时电压分配的不均匀程度。

为综合量化断口所受电气应力与弧后动态绝



(a) 各断口暂态恢复电压(TRV)峰值分布规律



(b) 各断口电压上升率的变化特征

图14 均压方式对双断口开断过程中各断口分压特性的影响对比

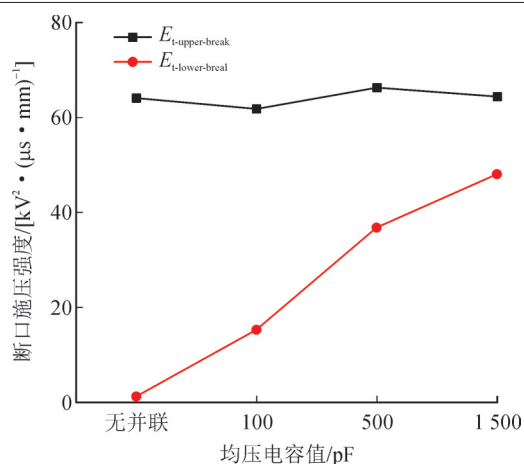
Fig. 14 The influence of voltage grading methods on voltage division characteristics of each break during the interruption process of double-break circuit breakers

缘恢复特性的匹配关系,文中提出 $E_t$ (断口施压强度)指标,用以全面表征断口承压水平与弧后耐压能力的耦合特性,其定义公式见式(5)

$$E_t = \frac{U_{\text{TRVbreak-peak}}}{d} \times U_{\text{TRVbreak-rrv}} \quad (5)$$

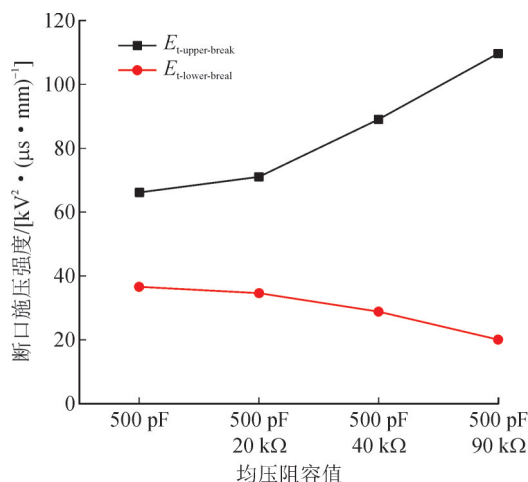
式(5)中: $U_{\text{TRVbreak-peak}}$ 为无击穿工况下断口稳态承受的TRV峰值; $d$ 为熄弧开距; $U_{\text{TRVbreak-rrv}}$ 为断口电压上升率。

基于式(5)分别计算无均压、纯电容均压两种工况下双断口的施压强度 $E_t$ ,计算结果见图15。由结果可知,随着均压电容容值提升,上、下断口的 $E_t$ 差值持续减小。结合图7试验结果可进一步推断:纯电容均压工况下,两个断口 $E_t$ 差值越小,短燃弧时间与临界熄弧开距越小;当两个断口 $E_t$ 趋于一致时,断路器可获得最小短燃弧时间与最小临界熄弧开距,短燃弧开断性能达到最优状态。

图15 均压电容容值对 $E_t$ 的影响Fig. 15 Effect of grading capacitance on  $E_t$ 

综合短燃弧开断能力、设备体积、制造成本约束,给出工程均压电容选取原则:在满足绝缘与短路开断指标前提下,控制双断口稳态承压比值小于1.1即可兼顾分压效果与设备经济性,无需无限制增大均压电容容值。

针对阻容复合均压工况,同理通过式(4)计算得到两个断口 $E_t$ 分布规律,结果见图16。计算表明,随着串联均压电阻阻值增大,两个断口 $E_t$ 差值逐渐增大,其根本原因是电阻阻值提升进一步扩大了双断口电压上升率的差异。但结合图8试验波形可知,增大串联电阻会使断路器短燃弧时间与临界熄弧开距呈现先减小后增大的变化规律,与纯电容均压工况下单一的变化规律存在明显区别。由此可见,阻容均压工况下,断路器短燃弧开断能力并非仅由两个断口 $E_t$ 差值单一因素决定,非同期击穿后独特的电压暂态恢复特性可能也会对开断性能产生关键影响。

图16 均压阻容阻值对 $E_t$ 的影响Fig. 16 Effect of grading resistance on  $E_t$ 

结合前文电压暂态机理可对该现象进行合理解释。当串联电阻阻值处于较小区间(文中工况 $\leq$



40 kΩ)时,随着电阻阻值增大,断路器短燃弧时间缩短、临界熄弧开距减小,整体开断性能逐步提升。其核心机理为:阻容均压结构可实现击穿断口电压的快速恢复,单断口击穿后电压经短暂跌落可迅速回升至击穿前水平,有效保障了TRV分配的均匀性。在该阻值范围内,非同期击穿后的电压快速恢复带来的正向开断增益,能够抵消并超过 $E_i$ 差值增大带来的负面作用,最终表现为开断性能优化。

当串联电阻阻值超过临界阈值(文中工况 $>40\text{ k}\Omega$ )时,影响机制发生反转。此时两个断口 $E_i$ 差值持续增大所产生的负面效应占据主导,逐步抵消甚至超越电压快速恢复带来的正向增益。因此,当电阻阻值增大至90 kΩ时,断路器短燃弧时间与临界熄弧开距均出现回升,双断口短燃弧开断性能显著劣化。

## 4 结论

文中基于高压合成试验回路搭建了短路电流开断试验平台,针对串联双断口真空断路器的短燃弧开断特性及不同均压策略的调控机理开展系统性试验研究,主要结论如下:

1)电容均压可有效优化双断口短燃弧开断性能。断口并联均压电容能够显著降低断路器的短燃弧时间与临界熄弧开距。随着均压电容容值的增大,两项关键特性参数持续减小,但优化增益逐渐衰减,参数改善效果呈现明显的饱和特性。

2)阻容均压对短燃弧开断特性的调控具有显著的参数区间特性。阻容均压方案同样能够有效降低短燃弧时间与临界熄弧开距,且相较于纯电容均压存在更优的参数匹配区间。当串联电阻阻值小于40 kΩ时,增大电阻可进一步缩短燃弧时间与临界熄弧开距,持续提升开断能力;当电阻阻值超过40 kΩ后,继续增大电阻将导致短燃弧时间与临界熄弧开距回升,断路器短燃弧开断性能逐步劣化。

3)不同均压方式下,双断口断路器短燃弧开断中的非同期击穿的暂态恢复特性存在本质差异。阻容均压工况下,击穿断口可在故障后快速恢复承压能力,呈现明显的电压快速回升特性;而无均压及纯电容均压工况下不存在该暂态恢复特征,断口电压重构过程相对平缓。

4)双断口开断性能的主导机制随均压方案的不同存在区别。电容均压工况下,断口瞬时电压分配的均匀性是决定短燃弧开断能力的核心因素,分压均衡性越好,断路器开断性能越优异;阻容均压工况下,开断特性由断口瞬时分压均匀性与非同期击

穿后的电压快速恢复特性共同耦合决定,两种机制共同调控双断口整体开断性能。

文中研究结果揭示了电容均压与阻容均压对双断口真空断路器短燃弧开断特性的调控机理,可为双断口真空断路器均压方案优选、均压支路参数匹配及工程优化设计提供理论依据与试验参考。

## 参考文献:

- [1] 赵 启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 16-24.  
Zhao Qi. Research status and prospect of environmental protection high voltage switchgear technology and equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 16-24.
- [2] 颜湘莲, 高克利, 王 雯, 等. 新环保绝缘气体应用于高压电气设备的研究进展[J]. 绝缘材料, 2025, 58(2): 1-8.  
Yan Xianglian, Gao Keli, Wang Wen, et al. Research progress on application of new eco-friendly insulating gas in high-voltage electrical equipment[J]. Insulating Materials, 2025, 58(2): 1-8.
- [3] 柳玉洁, 任 明, 王 凯, 等.  $\text{SF}_6/\text{N}_2$ 混合气体与纯 $\text{SF}_6$ 气体局部放电统计特性差异对比分析[J]. 高电压技术, 2025, 51(3): 1206-1219.  
Liu Yujie, Ren Ming, Wang Kai, et al. Comparative analysis of the difference in partial discharge statistical characteristics between  $\text{SF}_6/\text{N}_2$  gas mixture and pure  $\text{SF}_6$  gas[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(3): 1206-1219.
- [4] 王锦聪, 李毅恒, 郑 宇, 等. 基于丁达尔效应的新型环保绝缘气体稳定性评估[J]. 高电压技术, 2025, 51(6): 2672-2679.  
Wang Jincong, Li Yiheng, Zheng Yu, et al. Stability evaluation of new eco-friendly insulating gases based on tyndall effect[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2672-2679.
- [5] 钟建英, 孙广雷, 杨葆鑫, 等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 451-466.  
Zhong Jianying, Sun Guanglei, Yang Baoxin, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.
- [6] 贾申利, 贾荣照, 朱 璐. 真空开断型环保GIS发展现状及趋势[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 1-12.  
Jia Shenli, Jia Rongzhao, Zhu Lu. Advances in the development of vacuum-based eco-friendly GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 1-12.
- [7] 沈靖宇, 马浩东, 许志红, 等. 考虑场致发射电流自均压作用的串联多真空间隙击穿概率预测方法[J]. 电网技术, 2026, 50(3): 1330-1339.  
Shen Jingyu, Ma Haodong, Xu Zhihong, et al. Prediction method of breakdown probability for multiple vacuum gaps in series considering self-voltage sharing effect of field emission current[J]. Power System Technology, 2026, 50(3): 1330-1339.
- [8] 顾 乐, 苏海博, 王 勇, 等. 252 kV真空灭弧室绝缘结构优化设计[J]. 电气工程学报, 2025, 20(6): 145-154.  
Gu Le, Su Haibo, Wang Yong, et al. Optimization design of electric field for insulation structure in 252 kV vacuum interrupter

- [J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(6): 145-154.
- [9] 柴娜, 李小钊, 赵芳帅, 等. 252 kV 真空灭弧室波纹管结构及疲劳仿真[J]. 真空电子技术, 2025(1): 30-35.
- Chai Na, Li Xiaozhao, Zhao Fangshuai, et al. Structural design and fatigue simulation of the corrugated tube for 252 kV vacuum interrupters[J]. Vacuum Electronics, 2025(1): 30-35.
- [10] Yao Xiaofei, Guan Chen, Wang Chuan, et al. Design and verification of an ultra-high voltage multiple-break fast vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(5): 3436-3446.
- [11] 邓吉勇, 张建凯, 严伟, 等. 550 kV 快速真空断路器的设计与试验[J]. 高压电器, 2023, 59(2): 15-22.
- Deng Jiyong, Zhang Jiankai, Yan Wei, et al. Design and test of 550 kV fast vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(2): 15-22.
- [12] 葛国伟, 王文博, 程显, 等. 基于两间隙异步联动的一体化高压真空灭弧室电场设计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(17): 5555-5564.
- Ge Guowei, Wang Wenbo, Cheng Xian, et al. Electric field design of integrated high-voltage vacuum interrupter based on two-gap asynchronous linkage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5555-5564.
- [13] 程显, 杜帅, 葛国伟, 等. 环保型罐式多断口真空断路器均压配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3154-3162.
- Cheng Xian, Du Shuai, Ge Guowei, et al. Study on voltage-sharing configuration of environment-friendly tank type multi-break vacuum circuit breakers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3154-3162.
- [14] 吴高波, 阮江军, 黄道春, 等. 多断口真空断路器均压电容研究综述[J]. 高压电器, 2011, 47(3): 77-81.
- Wu Gaobo, Ruan Jiangjun, Huang Daochun, et al. Review of grading capacitors of multi-break vacuum circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(3): 77-81.
- [15] 吴文海, 吴晟玮, 沈丰慧, 等. 252 kV 环保型 GIS 双断口真空断路器并联电容的电场分析计算[J]. 高压电器, 2024, 60(9): 114-125.
- Wu Wenhai, Wu Shengwei, Shen Fenghui, et al. Electric field analysis and calculation of parallel capacitors for 252 kV environment-friendly GIS double-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(9): 114-125.
- [16] 廖敏夫, 邹继斌, 段雄英, 等. 多断口真空开关的绝缘与击穿统计特性[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 13-17.
- Liao Minfu, Zou Jibin, Duan Xiongying, et al. Dielectric strength and statistical property of single and multiple-break vacuum circuit breakers[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 13-17.
- [17] 曾祥浩, 张海传, 廖敏夫, 等. 模块化串联多断口真空断路器有限异步开断策略研究[J]. 高压电器, 2021, 57(2): 1-6.
- Zeng Xianghao, Zhang Haichuan, Liao Minfu, et al. Restrictive asynchronous breaking strategy of multi-break VCB with fiber controlled module[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2): 1-6.
- [18] 李秀广, 逯梓来, 姚晓飞, 等. 双断口快速真空开关分闸速度对短路电流短燃弧时间开断特性影响[J]. 高压电器, 2026, 62(3): 8-15.
- Li Xiuguang, Lu Zilai, Yao Xiaofei, et al. Influence of opening speed of double-break fast vacuum switch on the interruption characteristics of short-circuit current with short arcing time[J]. High Voltage Apparatus, 2026, 62(3): 8-15.
- [19] Zhang Bojian, Ren Li, Ding Jiangang, et al. A relationship between minimum arcing interrupting capability and opening velocity of vacuum interrupters in short-circuit current interruption[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 2822-2828.
- [20] Guan Chen, Yao Xiaofei, Zheng Jiaming, et al. A relationship between vacuum arc characteristics and short-circuit current interrupting capability at minimum arcing times[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2022, 50(9): 2670-2680.
- [21] Guan Chen, Ding Jiangang, Yao Xiaofei, et al. Study on short-circuit current interruption characteristics of double-break fast vacuum circuit breaker within the minimum arcing time[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023(147): 108865.
- [22] 李红蕾, 冯英, 袁召, 等. 基于 Prony 的故障电流相控分断零点预测算法[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 29-34.
- Li Honglei, Feng Ying, Yuan Zhao, et al. Zero-crossing prediction algorithm for fault current controlled breaking based on Prony method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(9): 29-34.
- [23] Zhang L, Yao X, Li Z, et al. A fast fault detection method for controlled fault interruption based on wavelet singularities and BP neural network[C]//International Conference on Control Science and Electric Power Systems (CSEPS), 2021: 354-359.
- [24] 艾杨, 付思, 李争博, 等. 电极旋转开断方式对真空电弧形态及电极表面烧蚀的影响[J]. 真空科学与技术学报, 2024, 44(12): 1098-1107.
- Ai Yang, Fu Si, Li Zhengbo, et al. The influence of electrode rotational interruption method on vacuum arc morphology and electrode surface erosion[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2024, 44(12): 1098-1107.
- 管臣(1994—), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为高压直流 GIS 与高压环保开关关键技术研究(E-mail: xj\_guanchen@163.com)。
- 姚晓飞(1985—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高压交流快速真空开关真空电弧理论和关键技术研究(通信作者)(E-mail: yaoxf85@mail.xjtu.edu.cn)。