第62卷 第11期:0001-0007
2026年11月16日

高压电器
High Voltage Apparatus

Vol.62,No.11:0001-0007
Nov. 16, 2026

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.11.001

研究与分析

# 短路故障电流相控短燃弧时间快速真空开断技术

王卫东[1]， 刘 洋[1]， 姚晓飞[2]， 曹 宏[1]， 刘志远[2]， 王建华[2]
（1. 河南森源电气股份有限公司，河南 长葛 461500；2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049）

**摘要：** 快速真空开关相比传统真空断路器，具有合分闸时间短、分散性低等显著优势，可实现系统短路故障电流的快速精准相控开断，对电力系统安全稳定运行和电能质量的改善具有重要作用。文中旨在介绍电力系统短路故障电流相控短燃弧时间快速真空开断技术。该技术构成主要包括：快速真空开关短路电流开断最小分闸速度和最短燃弧时间的确定、短路故障快速辨识和电流过零点预测算法、快速真空开关合分闸时间低分散性斥力机构优化设计。论文以40.5 kV单断口快速真空开关为例，分析了相控短燃弧时间快速真空开断技术实现的具体方法，并介绍了其在252kV/2500A-40kA母联快速真空断路器和363kV/5000A-63kA敞开式快速真空断路器单相样机的应用验证。快速真空开关在电力系统故障和负荷电流的精准相控投切技术方面，具有实现电能传输与控制平滑过渡的巨大潜能，可显著避免系统因开断操作引起的电磁暂态冲击，是未来电力开断技术发展的重要方向，其推广应用可加速我国电力系统“双碳”目标的实现。

**关键词：** 短燃弧时间；短路故障快速辨识；快速真空开关；电磁斥力机构

# Short-circuit Fault Current Phase-controlled Fast Vacuum Interruption Technology with Minimum Arcing Time

WANG Weidong[1], LIU Yang[1], YAO Xiaofei[2], CAO Hong[1], LIU Zhiyuan[2], WANG Jianhua[2]
（1. Henan Senyuan Electric Company, Henan Changge 461500, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China）

**Abstract:** The fast vacuum switch, compared with a traditional vacuum circuit breaker, exhibits such signficant advantages as short closing-opening time and lower dispersion, and can achieve fast and precise phase-controlled interruption of short circuit currents in power system, playing an important role in ensuring safe and stable operation of power systems and improving power quality. This papers aims to introduce the phase-controlled fast vacuum interruption technology with short arcing time for short circuit fault currents in power systems. This technology mainly includes the determination of the minimum opening speed and minimum arcing time for short circuit current interruption by fast vacuum switches, fast identification of short circuit faultd and current zero-crossing prediction algorithms, as well as optimal design of low dispersion repulsion mechanism for the opening/closing time of fast vacuum switches.In this paper a 40.5 kV single-break fast vacuum switch is taken as an example to analyze the specific methods for implementing the phase-controlled fast vacuum interruption technology with minimum arcing time, introduce its application verification in a 252 kV/2500A-40kA bus-tie fast vacuum circuti breaker and a 363kV/5000A-63kA single phase prototype of a live tank fast vacuum circuti breaker. In terms of precise phase-controlled switching of fault and load currents in power systems, fast vacuum switches have great potential for achieving smooth transition of power transmission and control, can significantly avoid electromagnetic transient impacts caused by switching operations, and represent an important direction for the future development of power interruption technology. Their

**收稿日期：**2026-05-13； **修回日期：**2026-07-21

**基金项目：**国家自然科学基金重点项目(51937009)；电工材料电气绝缘全国重点实验室资助(EIPE26102)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51937009), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(EIPE26102).

promotion and application can accelerate the realization of “dual carbon” goals in the power systemin China.

**Key words:** minimum arcing-time; short-circuit fault fast identification; fast vacuum switch; electromagnetic repulsion mechansm

## 0 引言

中国能源与负荷呈逆向分布，随着电力能源和用电负荷快速发展，电力系统规模不断扩大，电网短路电流水平随着网架结构的不断增强而逐年提升，尤其在大型能源基地和负荷密集区域系统短路电流超在运断路器开断能力的问题凸显，严重威胁系统和设备的安全稳定运行，限制输电线路暂态输送容量极限，制约输电走廊利用率的提升[1-3]。此外，系统短路故障点附近母线电压跌落时间，受在运断路器较长合分闸时间影响，存在供电中断时间过长问题，易造成新能源系统如风力发电机的解列和脱网，严重威胁半导体、光电子等敏感负荷产业供电质量[4]，制约新能源系统发展和消纳水平的显著提升。

为解决上述问题，大量研究人员针对系统超标短路电流的故障电流限制技术进行了研究[5-6]。一方面，在电网结构和运行机制方面，采用环网解列、母线分裂、延长线路、加装串抗等技术措施，保障系统短路电流水平处于可控制范围内；另一方面，发展能有效抑制系统短路电流的电力设备，提高系统抑制短路电流的能力[7]，如超导故障电流限制器(superconducting fault current limiters，SFCL)、液态金属故障电流限制器(liquid metal fault current limiters，LMFCL)、固态故障电流限制器、混合式故障电流限制器等[8-9]。

同时，大量研究人员致力于提升$SF_6$或真空开关设备及其成套装置的开断容量，以实现超标短路电流的直接切除[10-11]。然而，现有系统普遍在运高压和超高压开关设备，受熄弧技术和操动机构技术客观条件限制，已逐渐难以满足电力系统对大容量短路故障快速、可靠切除，以及经济环保运行的需求。对于输电等级$SF_6$开关设备，其额定短路开断电流≤63 kA，分闸时间≥30 ms，可靠开断的燃弧时间≥15 ms，考虑系统继电保护动作时间，其短路故障切除时间普遍超50 ms[10,12]，在开断容量、分闸时间、环保运行等方面，逐渐难以满足未来电力系统发展需求。

近年来，采用电磁斥力机构作为合分闸驱动的快速真空开关设备，以其合分闸时间短、分散性低等显著优势，在交直流开断技术领域得以推广应用，是目前国内外高压开关技术领域研究热点[13-20]。快速真空开关合分闸时间相比传统真空开关设备降低了近一个数量级，使之便于精准相控投切技术的实现。以40.5 kV快速真空开关为例，其典型合闸时间(自合闸线圈得电至触头金属接触)为(12±0.2) ms、典型分闸时间(自分闸线圈得电至触头金属分离)为(2.0±0.1) ms。研究表明，由于快速真空开关相比传统开关设备具有较高的分闸速度，当40.5 kV快速真空开关以短燃弧时间进行大电流开断时，其可靠开断的短路电流水平将从其灭弧室的额定短路开断电流31.5 kA提升至40 kA[21-22]。此外，大电流真空开断电弧呈正伏安特性，使得快速真空开关便于采用多断口并联技术，实现63 kA以上短路电流的快速、可靠开断[23]；另一方面，串联多断口相对同开距单断口真空间隙击穿电压的增益特性，使快速真空开关具备在高压和超高压输电系统的应用潜力[24-25]。因此，快速真空开关可作为126~252 kV高压和363~750 kV超高压输电等级快速真空开关的基本单元，通过模块化串、并联同步开断技术，实现63 kA以上短路电流20 ms内的快速切除，对电力系统运行暂态稳定性的提升具有重要意义。

文中旨在介绍快速真空开关短路故障电流相控短燃弧时间快速真空开断技术，其技术构成主要包括：快速真空开关短路电流开断最小分闸速度和最短燃弧时间的确定、短路故障快速辨识和电流过零点预测算法、快速真空开关合分闸时间低分散性斥力机构优化设计。研究结果可为电力系统短路故障的快速切除提供理论依据和技术支撑。

## 1 相控短燃弧时间快速真空开断技术

### 1.1 速真空开关短路电流开断最小分闸速度和最短燃弧时间确定

真空开关分闸速度对其大电流开断电弧发展和演变过程，以及弧后介质恢复特性具有显著影响，直接决定其能否成功开断。真空开关在大电流拉弧开断过程中，真空电弧由起始的液态金属桥逐渐向强电弧(intense arc)、扩散态电弧(diffuse arc)、点状斑点(footpoint)或阳极斑点(anode spot)等模式发展和演化，并在电流过零点完成开断。当真空开关以较高的分闸速度进行拉弧开断时，其强电弧模式可快速转变为扩散态模式，然而较高的分闸速度易导

致相同燃弧时间条件下触头开距的增大，加剧电弧在阳极表面的箍缩，促使阳极斑点的形成。燃弧过程强电弧模式条件下，自阳极触头表面发展的阳极射流具有较高的温度，直接扩展并覆盖阴极触头表面，对阴极和阳极触头表面具有剧烈的烧蚀作用；阳极斑点模式条件下，触头表面阳极斑点区域温度达材料沸点，且自阴极和阳极分别扩展出阴极射流和阳极射流，同时伴随有阴、阳极触头材料的剧烈蒸散。扩散态电弧模式条件下，燃弧过程电弧呈扩散态，其对阴极触头和阳极触头表面具有一定的老炼效应，便于电流过零后触头间隙残余等离子体和金属蒸气原子等的扩散，利于成功开断。

燃弧过程持续时间过长强电弧模式和阳极斑点模式，不利于弧后介质强度的快速恢复，主要体现在：一方面，强电弧模式或阳极斑点模式易导致电流过零后触头表面仍保持有较高的温度，在恢复电压作用下，新阴极(燃弧过程的阳极)表面的热电子发射、场致电子发射、二次电子发射效应以及泰勒锥的形成，易引发弧后介质恢复阶段的重击穿和延迟击穿；另一方面，易导致电流过零后触头间隙仍残余大量等离子体、金属蒸气和液滴，在弧后恢复电压作用下，带电粒子(电子和离子)与金属原子的碰撞、电离和激发，严重迟缓鞘层由弧后阴极向阳极的快速发展，且过高的金属蒸气密度，易导致Paschen击穿的发生。

因此，有必要确定大电流快速真空开断的最短燃弧时间和最小分闸速度。以大容量真空灭弧室常用的纵磁触头为例，实验获得了其在不同分闸速度、燃弧时间条件下的真空电弧阳极放电模式的演变。用于40.5kV/2500A-31.5kA真空灭弧室、直径68 mm的杯状纵磁触头结构，及其开断40 kA时的真空电弧阳极放电模式演变过程见图1。其中，强电弧模式自0.44 ms开始演变为扩散态模式，开断过程总燃弧时间为0.2 ms。强电弧模式向扩散态模式的演化，以阴极触头表面可观测到明显的阴极斑点扩散运动为表征。杯状纵磁触头以不同的分闸速度开断大电流时，真空电弧阳极放电模式由强电弧向扩散态电弧演变的临界时间(即强电弧模式持续时间)$t_{intense}$与分闸速度$v$和电弧电流$I_{rms}$的关系为

$$t_{intense}=-0.253\cdot v+0.024\cdot I_{rms}+0.830 \quad (1)$$

式(1)中，分闸速度$v$为自触头刚分至灭弧室1/2额定开距范围的平均分闸速度。

据此，将$t_{intense}$与分闸速度$v$相乘，可获得强电弧模式演变为扩散态模式的临界触头开距$d_{intense}$与分闸速度$v$的关系，见图2。当开断过程灭弧室瞬时触头开距$d$低于临界触头开距$d_{intense}$时，电弧将保持为强电弧模式，反之则演变为扩散态模式。由图中数据可知，存在一个最小分闸速度$v_{th}$，当快速真空开关以高于$v_{th}$=3.5 m/s分闸速度进行40 kA拉弧开断时，其对应的临界触头开距将显著低于$d_{th}$=3.2 mm，真空电弧将更快的由强电弧演变为扩散态电弧，反之当以较低的分闸速度进行分断时，虽然强电弧演变为扩散态的临界触头开距与图示2.5 mm相等，但强电弧演变为扩散态所需的临界燃弧时间$t_{intense}$时速度将显著大于$v$=5.2 m/s，因此快速真空开关应以高于最小分闸速度$v_{th}$的速度进行短燃弧时间内的开断。

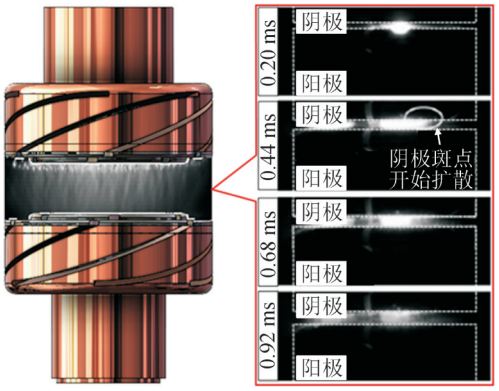



图1　真空电弧阳极放电模式的演变过程

Fig. 1　Evolution process of anode discharging mode of vacuum arc

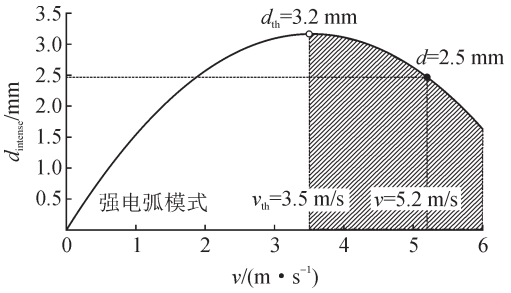



图2　临界触头开距$d_{intense}$与分闸速度$v$的关系

Fig. 2　The relationship of critical contact gap $d_{intense}$ between opening velocity $v$

高压合成实验回路见图3，对40.5 kV快速真空开关进行了系列开断试验，结果显示，当其分闸速度为5.2 m/s时，可靠开断的最短燃弧时间为0.5 ms，最长燃弧时间为9.8 ms。因此，当快速真空开关以5.2 m/s的分闸速度、高于0.5 ms且远低于9.8 ms的燃弧时间，进行40 kA(高于额定短路开断电流31.5 kA)相控短燃弧时间开断时，其可实现上述短路故障的可靠切除。此外，较短的燃弧时间易削弱电弧对触头的烧蚀，显著提升快速真空开关的电寿命性能。

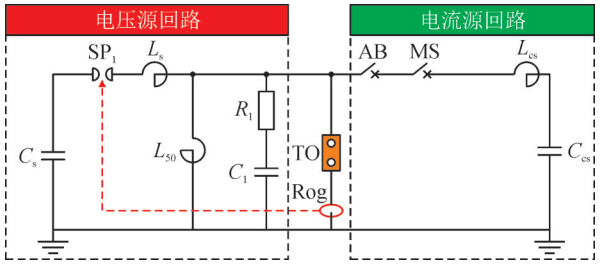



图3 高压合成实验回路

Fig. 3 The system setup of short-circuit current interruption experiment.

### 1.2 基于波形曲率突变的短路故障快速辨识和电流过零点预测算法

为实现电力系统短路故障的快速切除，当快速真空开关大电流可靠开断的最小分闸速度与燃弧时间确定后，有必要研究确定短路电流过零点快速辨识方法，一方面可显著降低系统继电保护指令出口动作时间；另一方面可指令快速真空开关以预期大于最短燃弧时间的故障电流相位进行分闸开断。相控短燃弧时间快速真空开断短路故障电流幅值和过零点快速辨识算法流程图见图4。当快速真空开关检测到系统短路故障时，短路电流幅值和过零点快速辨识算法立即启动，并指令快速真空开关经一定的延时 $t$ 后进行分闸开断。该延时与快速真空分闸时间、预期燃弧时间、电流幅值和零点辨识时间紧密相关。

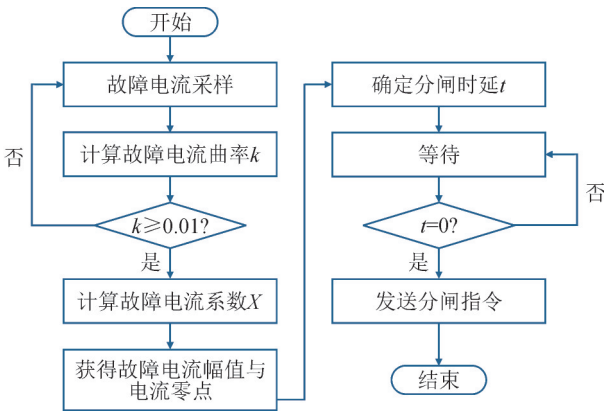



图4 相控短燃弧时间快速真空开断短路故障电流幅值和过零点快速辨识算法流程

Fig. 4 The algorithm process of identifying short-circuit fault and predicting the current zero for fast vacuum circuit breaker breaking short-circuit current within minimum arcing time

图4所示短路故障快速辨识算法基于以下电流波形曲率突变量的检测方法：

$$\Delta\alpha=\arctan\left(\frac{i_{n+1}-i_n}{T_S}\right)-\arctan\left(\frac{i_n-i_{n-1}}{T_S}\right) \tag{2}$$

$$\Delta s=\frac{\sqrt{\left(i_{n+1}-i_n\right)^2-T_S^2}-\sqrt{\left(i_{n+1}-i_n\right)^2-T_S^2}}{2} \tag{3}$$

式(2)、(3)中：$\Delta\alpha$ 为电流波形切线的角度变化率，rad/s；$i_{n+1}$、$i_n$、$i_{n-1}$ 为相邻电流采样点，kA；$\Delta s$ 为相邻采样点距离，kA；$T_S$ 为采样周期。

据此，可获得电流波形的曲率为

$$k=\frac{\Delta s}{\Delta\alpha}\cdot T_S \tag{4}$$

式(4)中，$k$ 为电流波形的曲率，kA·s/rad。当 $k$ 值大于某阈值时(如，对于40.5 kV快速真空开关控制器而言，其典型值为0.01)，认为短路故障发生，控制系统即可启动电流幅值和过零点辨识算法，同时获得 $k$ 值所对应的故障电流相位。

短路电流幅值和过零点快速预测方法，基于最小二乘法。以单相短路故障电流为例，其表达式为

$$\begin{aligned}i_{SC}=&I_m\sin(\omega t+\alpha-\varphi)+\\&\left[I_{m|0|}\sin\left(\alpha-\varphi_{|0|}\right)-I_m\sin(\alpha-\varphi)\right]e^{-t/\tau}\end{aligned} \tag{5}$$

式(5)中各参数可通过其正交方程获得。

$$i_{SC}=\boldsymbol{X}_1\sin(\omega t)+\boldsymbol{X}_2\cos(\omega t)+\boldsymbol{X}_3\cdot t-\boldsymbol{X}_4 \tag{6}$$

式(6)中，$\boldsymbol{X}_1$-$\boldsymbol{X}_4$ 为短路电流方程的系数向量，可通过引入单位矩阵 $\boldsymbol{U}$ 和其 $n\times4$ 正交矩阵 $\boldsymbol{A}$ 分别获得。上述向量/矩阵的维数 $n$ 与短路电流采样率紧密相关。由此，可通过式(7)的求解来获得方程(5)所示短路电流各参数

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_1\\\boldsymbol{X}_1\\\boldsymbol{X}_3\\\boldsymbol{X}_4\end{bmatrix}=\left(\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{U}\boldsymbol{A}\right)^{-1}\cdot\left(\boldsymbol{A}^T\boldsymbol{U}^T\boldsymbol{U}\right)\cdot\begin{bmatrix}i_{SC}(t_1)\\i_{SC}(t_2)\\\cdots\\i_{SC}(t_n)\end{bmatrix} \tag{7}$$

上述用于40.5 kV快速真空开关的短路故障快速辨识算法和电流过零点预测算法，采用STM32H7B0单片机实现，并在电力系统实时仿真平台(real-time digital simulation，RTDS)上进行了可行性校验，其采样率设置为50 kHz，采样窗长为4.0 ms，每隔1.0 ms进行一次滑窗采样。期间，控制系统进行电流变化率突变量 $k$ 检测，确定系统是否发生短路故障。一旦检测到 $k$ 值大于阈值，控制系统即可开始进行短路电流表达式各项系数的计算，并最终输出电流幅值和过零点信号。算法的检测计算结果见图5。考虑故障起始相角、故障电流信号信噪比(*SNRs*)、谐波分量和基波频率等影响，短路电流过零点预测所需时间为(4.0±0.4) ms。其中，故障起始相角范围为0°到360°，每10°取一档；*SNRs* 取值分别为10、20、30 dB；谐波分量取15次和17次谐波，幅值为基波幅值的10%；基波频率的变化范围取值49.5~50.5 Hz，每0.1 Hz取一档。

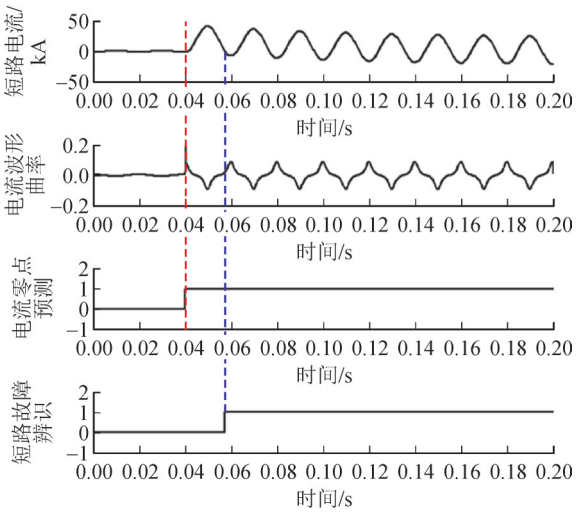



**图5　算法检测计算结果**

**Fig. 5　The calculated results of the algorithm**

### 1.3　快速真空开关合分闸时间低分散性斥力机构优化设计

快速真空开关要实现系统短路故障的快速切除，其低分闸时间和分散性对相控短燃弧时间快速真空开断技术的实现至关重要。较低的分闸时间意味着快速真空开关需具备较高的分闸响应速度，要求快速斥力机构在开关起始分闸动作时，提供较高的电磁斥力，且具备较高的机械可靠性；此外，开关设备的分散性，一方面体现在单台开关设备多次操动之间的分散性；另一方面体现在多台相同开关设备彼此之间操动的分散性。因此，快速真空开关要执行较短燃弧时间的短路电流精准相控开断操作，有必要对其电磁斥力机构进行优化设计。

快速真空开关分闸时间分散性主要由传动部件在多次合分闸操动过程中，电磁斥力、合分闸位置处的冲击应力等引起的部件形变产生。用于40.5 kV快速真空开关的集成气体缓冲的电磁斥力机构见图6。其中，斥力盘将气缸分割为两个缓冲气室，分别使快速真空开关在接近合闸或分闸位置时，通过斥力盘压缩运动方向气室内的空气，提供合闸缓冲力或分闸缓冲力，降低快速真空开关传动部件在合分闸位置处的冲击应力。在气缸接近斥力盘合闸或分闸位置处，设置系列直径1 mm的排气孔，用以降低合闸或分闸反弹。

文中采用多体运动、流固耦合、涡流场等多物理场耦合仿真计算对集成气体缓冲的电磁斥力机构结构参数进行优化设计，优化目标为提升斥力机构分闸速度的同时，降低机构在合、分闸位置处的冲击应力。集成气体缓冲的电磁斥力机构优化结果见表1。40.5 kV快速真空断路器运动质量由优化前的7.5 kg降至4.5 kg；合闸和分闸速度分别为2.5 m/s和5.2 m/s；经2 000次合分闸操作后，快速真空开关合闸与分闸时间及其分散性分别为(12.5±0.3) ms和(2.5±0.05) ms。优化后的集成气体缓冲电磁斥力机构2 000次合分闸操动过程中的合分闸时间及其分散性测量结果见图7。

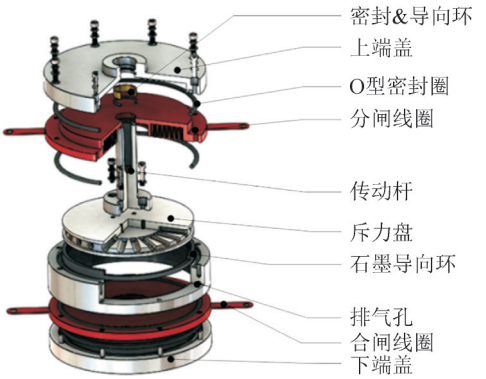



**图6　用于40.5 kV快速真空开关的集成气体缓冲的电磁斥力机构**

**Fig. 6　The electromagnetic actuator using in 40.5 kV fast vacuum circuit breakers with a gas pressure buffer**

**表1　集成气体缓冲的电磁斥力机构参数优化结果**

**Table 1　The calculated results of electromagnetic actuators with a gas pressure buffer**

| 参数 | 符号 | 单位 | 数值 |
|---|---|---|---|
| 分合闸线圈匝数 | $N$ | — | 15 |
| 分合闸线圈高度 | $H$ | mm | 15 |
| 分合闸线圈内径 | $r$ | mm | 60 |
| 分合闸线圈外径 | $R$ | mm | 200 |
| 斥力盘厚度 | $T$ | mm | 15 |
| 斥力盘直径 | $D$ | mm | 200 |
| 线圈与斥力盘气隙 | $\delta$ | mm | 1 |
| 分合闸电容 | $C$ | mF | 15 |
| 分闸电容充电电压 | $U_{op}$ | kV | 0.65 |
| 合闸电容充电电压 | $U_{clo}$ | kV | 0.65 |
| 运动质量 | $m$ | kg | 4.5 |

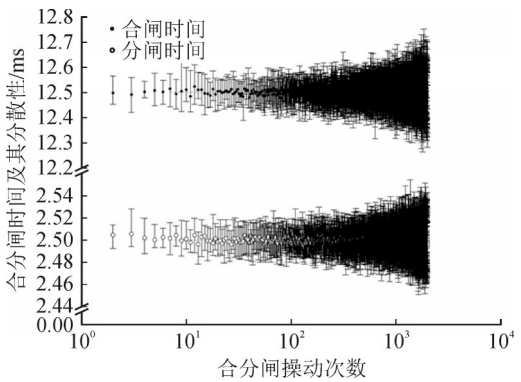



**图7　2 000次合分闸操动过程中的合分闸时间及其分散性**

**Fig. 7　The 2 000 results of the closing and opening time and their deviation**

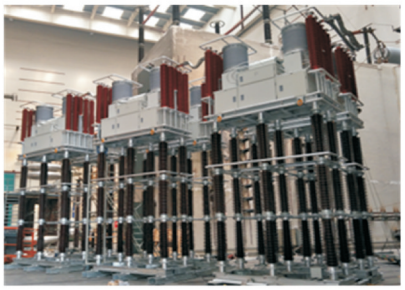
## 2 相控短燃弧时间短路电流开断技术的试验及应用验证

现阶段基于相控短燃弧时间短路故障快速切除技术已应用于宁夏电力有限公司与西安交通大学、安徽徽电等联合研发的252kV/2500A-40kA母联快速真空断路器、363kV/5000A-63kA敞开式单相快速真空断路器样机。上述样机采用单断口40.5 kV快速真空开关作为模块化单元，通过多断口串并联技术(252 kV单相样机为4断口串联技术、363 kV单相样机采用6断口串联2支路并联技术)，形成对应的快速真空断路器样机，相关样机的开断性能已经在国家高压电器质量监督检验中心通过试验验证。此外，相控短燃弧时间开断技术在双电源快速切换装置(即，配网备自投装置)、快速开关型经济性故障限流器等装置上已获得初步的应用验证。

252 kV母联快速真空断路器和单相363 kV快速真空断路器样机见图8。其中，252 kV母联快速真空断路器群已在宁夏电网陶乐变电站挂网运行示范应用，人工短路试验结果显示，其可在20 ms内完成母线短路故障电流的快速开断，采用单母单分断的方式，仅用一台即可实现整站超标短路电流的治理。363 kV快速真空断路器采用相控短燃弧时间快速开断技术，其对称和非对称短路开断电流达80 kA，T100s(b)和T100a两种试验方式记录的示波图见图9。



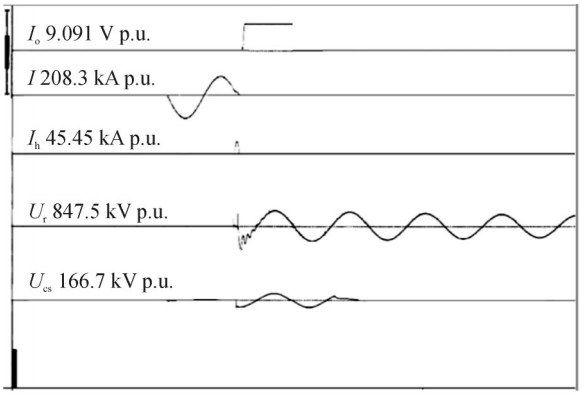
(a) 252kV/2500A-40kA母联快速真空断路器



(b) 363kV/5000A-63kA敞开式快速真空断路器

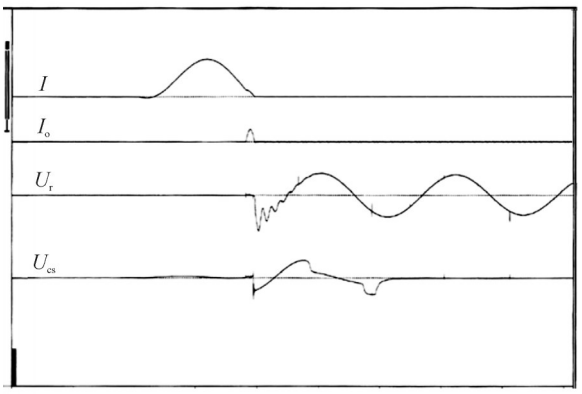
**图8 应用短路故障电流开断相控短燃弧时间开断技术的典型快速真空断路器**

**Fig. 8 The typical fast vacuum circuit breakers using the switching technology to break short-circuit fault within minimum arcing time**




(a) T100s

| T100s(b) | | | |
|---|---|---|---|
| 操作序列 | | O | |
| 电流源电压 | | kV | 19.8 |
| 开断电流，相电流 | | kA | 80.6 |
| 开断电流，直流分量 | | % | 8 |
| d$i$/d$t$ | | A/μs | 35.5 |
| 恢复电压，相电压 | | kV | 250 |
| TRV,$u_c$ | | kV | −539 |




(b) T100a

| T100a | | |
|---|---|---|
| 操动序列 | O | |
| 开断电流，相电流 | kA | 80.2 |
| 最后电流半波峰值 | kA | 205 |
| 最后电流半波持续时间 | ms | 16.4 |
| 恢复电压，相电压 | kV | 246 |
| TRV,$u_c$ | kV | −526 |
| $T_h$ | μs | 233 |

**图9 363 kV快速真空断路器80 kA相控短燃弧时间开断实验记录**

**Fig. 9 The test record of 80 kA short-circuit interruption within minimum arcing time of the 363 kV fast vacuum circuit breaker**

上述252 kV母联快速真空断路器挂网运行示范应用结果以及363 kV快速真空断路器试验结果，均验证了短路故障电流相控短燃弧时间开断技术的可行性。现阶段，由于系统运行调度和继电保护动作时序控制的原因，快速真空断路器产品及与之匹配的相控短燃弧时间快速真空开断技术尚未在电流系统大范围推广应用，然而快速真空开关在电力系统故障和负荷电流的精准相控投切技术方面，具有实现电能传输与控制平滑过渡的巨大潜能，可显著避免系统因开断操作引起的电磁暂态冲击，是未来电力开断技术发展的重要方向。

## 3　结论

文中介绍了短路故障电流相控短燃弧时间快速真空开断技术，具体包括：

1)相控短燃弧时间快速真空开断技术构成主要包括：快速真空开关短路电流开断最小分闸速度和最短燃弧时间的确定、短路故障快速辨识和电流过零点预测算法、快速真空开关合分闸时间低分散性斥力机构优化设计。

2)相控短燃弧时间快速真空开断技术已在252kV/2500A-40kA母联快速真空断路器和363kV/5000A-63kA敞开式快速真空断路器单相样机上分别通过试验验证，其中252 kV母联快速真空断路器人工短路试验表明，其通过相控短燃弧时间快速真空开断技术，可实现单母单分断母线短路电流在20 ms内的快速开断。

3)快速真空开关在电力系统故障和负荷电流的精准相控投切技术方面，具有实现电能传输与控制平滑过渡的巨大潜能，可显著避免系统因开断操作引起的电磁暂态冲击，是未来电力开断技术发展的重要方向。

## 参考文献：


[1] 郑健超. 故障电流限制器发展现状与应用前景[J]. 中国电机工程学报，2014，34(29)：5140-5148.
Zheng Jianchao. Current status and application prospect of fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE，2014，34(29)：5140-5148.

[2] 李　力，李爱民，吴科成，等. 广东电网短路电流超标问题分析和限流措施研究[J]. 南方电网技术，2009，3(s1)：20-24.
Li Li，Li Aimin，Wu Kecheng，et al. Analysis of short-circuit current exceeding standard of Guangdong power grid and research on limitation measures[J]. Southern Power System Technology，2009，3(s1)：20-24.

[3] Kothari D P，Nagrath I J. 现代电力系统分析[M]. 北京：清华大学出版社，2016.
Kothari D P，Nagrath I J. Analysis of modern power system[M]. Beijing：Tsinghua University Press，2016.

[4] IEEE Std 1564：2014 Guide for voltage sag indices[S].

[5] 朱　佳，刘　玮，卢建刚，等. 配电网故障下构网变流器功率解耦与限流两阶段协同控制策略[J]. 电网与清洁能源，2026，42(4)：72-80.
Zhu jia，Liu wei，Lu jiangang，et al. A two-stage coordinated control strategy for power decoupling and fault current limiting of grid-forming converters under distribution network fault conditions[J]. Power System and Clean Energy，2026，42(4)：72-80.

[6] 韩　雪，梁慧琳. 基于限流电感的MMC-HVDC电网故障检测与保护方案[J]. 电力工程技术，2026，45(1)：39-50.
Han Xue，Liang Huilin. Fault detection and protection scheme of MMC-HVDC power grid based on current limiting inductance[J]. Electric Power Engineering Technology，2026，45(1)：39-50.

[7] 邱清泉，肖立业，张志丰，等. 高压及超高压故障电流限制技术分析[J]. 电工电能新技术，2017，36(10)：46-54.
Qiu Qingquan，Xiao Liye，Zhang Zhifeng，et al. Analysis of fault current limiting technology used in high voltage and ultrahigh voltage power grid[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy，2017，36(10)：46-54.

[8] WG A3. 10. Fault current limiters in electrical medium and high voltage systems[R]. Pairs：CIGRE，2003.

[9] 孙树敏，刘洪顺，李庆民，等. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术，2008，32(21)：75-79.
Sun Shumin，Liu Hongshun，Li Qingmin，et al. A summarization of research on fault current limiter of power system[J]. Power System Technology，2008，32(21)：75-79.

[10] CIGRE. Green book：switching equipment[M]. Switzerland：Springer International Publishing AG，2018.

[11] WG A3. 27. The impact of the application of vacuum switchgear at transmission voltage[M]. Pairs：CIGRE，2014.

[12] Smeets R，Sluis L，Kapetanovi M，et al. Switching in electrical transmission and distribution systems[M]. UK：John Wiley & Sons，2015.

[13] 何俊佳，袁　召，经　鑫，等. 电磁斥力机构研究综述[J]. 高电压技术，2017，43(12)：3809-3818.
He Junjia，Yuan Zhao，Jing Xin，et al. Review of research on repulsion mechanism[J]. High Voltage Engineering，2017，43(12)：3809-3818.

[14] 赵　莹，贾晨曦，韩英爽. 磁控真空断路器机械特性的影响因素研究[J]. 电器与能效管理技术，2025(1)：33-38.
Zhao Ying，Jia Chenxi，Han Yingshuang. Study on factors influencing mechanical characteristics of magnetically controlled vacuum circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology，2025(1)：33-38.

[15] 余银钢，潘天红. 新型双机构快速机械开关断路器结构与性能分析[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(20)：144-153.
Yu Yingang，Pan Tianhong. Structure and performance analysis of a new type of fast mechanical switch circuit breaker with a double mechanism[J]. Power System Protection and Control，2024，52(20)：144-153.


(下转第16页)

Zhang Ye, Qi Xiaogang. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breaker optimized by acoustic signal characteristics[J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(12): 181-183.

[13] 刘云鹏,韩 帅,廖思卓,等. LW30-252型$SF_6$高压断路器潜伏性故障声信号识别方法[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(5): 45-55.
Liu Yunpeng, Han Shuai, Liao Sizhuo, et al. Latent fault identification method of LW30 - 252 $SF_6$ HV circuit breaker operating mechanism acoustic signal[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(5): 45-55.

[14] 易 林,夏小飞,彭在兴,等. 基于非参数检验的高压断路器机械故障声信号特征值提取方法[J]. 高压电器, 2021, 57(10): 83-90.
Yi Lin, Xia Xiaofei, Peng Zaixing, et al. Acoustical signal feature extraction method on mechanical fault of high voltage circuit breaker based on nonparametric test[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(10): 83-90.

[15] Yuan Jing, Yao Ze, Zhao Qian, et al. Dual-core denoised synchrosqueezing wavelet transform for gear fault detection[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70): 1-11.

[16] 王宗炼,任会兰,宁建国. 基于小波变换降噪的声发射源定位方法[J]. 振动与冲击, 2018, 37(4): 226-232.
Wang Zonglian, Ren Huilan, Ning Jianguo. Acoustic emission source location based on wavelet transform de-noising[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(4): 226-232.

[17] 张旭东,詹 毅,马永琴. 不同信号的小波变换去噪方法[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(s1): 118-123.
Zhang Xudong, Zhan Yi, Ma Yongqin. Approach of denoise by wavelet transform of different signals[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(s1): 118-123.

[18] Daubechies I. The wavelet transform, time-frequency localization and signal analysis[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1990, 36(5): 961-1005.

[19] 奉国和. SVM分类核函数及参数选择比较[J]. 计算机工程与应用, 2011, 47(3): 123-124.
Feng Guohe. Parameter optimizing for support vector machines classification[J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(3): 123-124.

[20] 黄辉敏,王飞风,苏 毅,等. 基于LMD和SVM的高压断路器弹簧操动机构状态异常检测方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 243-248.
Huang Huimin, Wang Feifeng, Su Yi, et al. Research on detection method for abnormal state of spring operating mechanism in high voltage circuit breaker based on LMD and SVM[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 243-248.

杨秋玉(1986—),男,博士(后),副教授,主要研究方向为电气设备状态监测与诊断(通信作者)(E-mail: qiuyu. yang@fjut. edu. cn)。

翟振林(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电气设备状态监测与诊断、信号处理(E-mail: 842980717@qq. com)。

(上接第7页)

[16] 秦立军,汤卓凡. 基于高速斥力机构的72. 5 kV双断口真空断路器研究综述[J]. 电气技术, 2017(8): 17-20.
Qin Lijun, Tang Zhuofan. Review of 72.5 kV double-break vacuum circuit breaker with rapid repulsion actuator[J]. Electrical Engineering, 2017(8): 17-20.

[17] 史宗谦,贾申利,朱天胜,等. 真空直流断路器高速操动机构的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(3): 18-22.
Shi Zongqian, Jia Shenli, Zhu Tiansheng, et al. Investigations on high - speed actuator of vacuum DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3): 18-22.

[18] Takeda M, Yamamoto H, Aritsuka T, et al. Development of a novel hybrid switch device and application to a solid-state transfer switch [C]//IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting(Cat. No. 99CH36233), 1999: 1151-1156.

[19] Takeda M, Yamamoto H, Hosokawa Y, et al. A low loss solid-state transfer switch using hybrid switch devices[C]//Proceedings IPEMC 2000. Third International Power Electronics and Motion Control Conference(IEEE Cat. No. 00EX435), 2000: 235-240.

[20] 艾绍贵,高 峰,黄永宁,等. 330 kV开关型零损耗故障限流装置的研制及人工短路试验[J]. 智能电网, 2015, 3(4): 354-359.
Ai Shaogui, Gao Feng, Huang Yongning, et al. Development and short - circuit experiment of 330 kV switch - type no - loss fault current limiter[J]. Smart Grid, 2015, 3(4): 354-359.

[21] Zhang Bojian, Ren Li, Ding J, 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.

[22] Shi Wen, Zhang Bojian, Guan Chen, et al. Influence of opening velocity on arcing time windows of fast vacuum circuit breaker in duties of terminal fault test T100s[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology (ICEPE-ST), 2019: 8928894.

[23] Yu Xiao, Yang Fan, Li Xing, et al. Static voltage sharing design of a sextuple - break 363 kV vacuum circuit breaker[J]. Energies, 2019, 12(13): 1-12.

[24] Ai Shaogui, Yu Xiao, Huang Yongning, et al. Study on voltage distribution characteristic of a 363 kV fast multi - break vacuum circuit breaker[J]. The Journal of Engineering, 2019, 2019(16): 2693-2697.

[25] Ma Kui, Yao Xiaofei, Ai Shaogui, et al. Development and test of a 252 kV multi-breaks bus-tie fast vacuum circuit breaker[C]//2019 5th International Conference on Electric Power Equipment - Switching Technology(ICEPE-ST), 2019: 8928926.

王卫东(1984—),男,硕士,工程师,主要从事高低压电器开发和检验检测行业(E-mail: 447277802@qq.com)。

姚晓飞(1985—),男,博士,副研究员,主要从事相控快速真空开断理论和技术研究(通信作者)(E-mail: yaoxf85@mail.xjtu.edu.cn)。