

# 基于真空电弧伏安特性的大电流真空多断口并联 动态均流特性

韩翔宇<sup>1,2</sup>, 杨 飞<sup>1,2</sup>, 陈洪斌<sup>1,2</sup>, 李 刚<sup>1,2,3</sup>, 孙晋茹<sup>1,2</sup>, 荣命哲<sup>1,2</sup>

(1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049;

2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 3. 西安高压电器研究院, 西安 710049)

**摘要:** 高压、大容量发电机断路器是发电厂的关键电力开关设备, 其额定电流与故障电流均超出了单个真空灭弧室的容量极限, 需并联多个真空灭弧室。针对真空多断口并联动态燃弧过程中的均流问题, 搭建了真空燃弧实验平台, 开展了 40~80 kA 大电流燃弧实验, 并用高速摄影仪同步拍摄电弧形态。根据大电流真空电弧的伏安特性将燃弧过程划分为瞬态起弧阶段、电弧演变的非稳定阶段和电弧演变的稳定阶段, 详细分析了电弧形态、电流等级对伏安特性的影响规律。提出了基于不同燃弧阶段下伏安特性的大电流真空电弧的电路模型, 电弧电压的仿真误差最大仅为弧压极值的 4.99%。之后, 建立了大电流真空多断口并联均流的仿真拓扑, 研究了起弧延时和支路阻抗对动态均流的影响规律, 并阐明了最佳起弧延时的绝对值会随着静态均流系数的降低而提高。最后, 开展了 100 kA 真空多断口并联均流实验, 成功实现了较好的均流效果, 也验证了所提模型的预测能力。该结论将为高压、大容量发电机断路器开断性能的提升奠定基础。

**关键词:** 发电机断路器; 真空多断口; 伏安特性; 静态均流特性; 动态均流特性

## Dynamic Current-sharing Characteristics of Large-current Vacuum Multi-breakers Based on Vacuum Arc Volt-ampere Characteristics

HAN Xiangyu<sup>1,2</sup>, YANG Fei<sup>1,2</sup>, CHENG Hongbin<sup>1,2</sup>, LI Gang<sup>1,2,3</sup>, SUN Jinru<sup>1,2</sup>, RONG Mingzhe<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

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

3. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** High-voltage, large-capacity generator circuit breaker is a key power switchgear in power plants, and its rated current and fault current are beyond the capacity limit of a single vacuum interrupter, which needs to be connected in parallel with multiple vacuum interrupters. In order to deal with the dynamic current-sharing in the arcing process of vacuum multi-breakers in parallel, a vacuum arcing experimental platform was set up, high-current arcing experiments of 40 kA~80 kA were carried out, and the arc morphology was synchronously filmed by high-speed camera. According to the volt-ampere characteristics of vacuum arc with high current, the arcing process was divided into transient arc initiation stage, unstable arc evolution stage, and stable arc evolution stage. The influences of arc morphology and current level on volt-ampere characteristics were analyzed in detail. The circuit model of high-current vacuum arc based on volt-ampere characteristics at different arcing stages was proposed. The maximum simulation error of arc voltage was only 4.99% of the extreme value of arc voltage. Then, the simulation topology for parallel current-sharing of vacuum multi-breakers under high-current was established, and the influence of arcing delay and branch impedance on dynamic current sharing was studied. The absolute value of optimal arcing delay increased with the decrease of static current-sharing coefficient. Finally, the parallel current-sharing experiment of vacuum multi-breakers under 100 kA was carried out, a better current-sharing effect was achieved successfully, and the prediction ability of the proposed model was also verified. The conclusion of this paper will lay a foundation for improving the breaking performance of high-voltage and large-capacity GCB.

**基金资助项目:** 国家重点研发计划(2022YFB2403600); 国家自然科学基金(U22B20121); 陕西省“三秦学者”创新团队项目(西安交通大学先进直流电力装备关键技术及其产业化示范创新团队); 陕西省资助项目(2022KXJ-142)。

Project supported by National Key R&D Program of China(2022YFB2403600), National Natural Science Foundation of China (U22B20121), Shaanxi Province “Sanqin Scholars” Innovation Team Project (Demonstration Innovation Team of XJTU for the Key Technology of Advanced DC Power Equipment and Its Industrialization), Shaanxi Province Project(2022KXJ-142).

**Key words:** generator circuit breaker; vacuum multi-breakers in parallel; volt-ampere characteristics; static current-sharing characteristics; dynamic current-sharing characteristics

## 0 引言

随着新能源和电力系统的稳步发展, 火电厂、抽水蓄能电站和核电站的发电机组容量越来越大, 对安全性的要求也越来越高<sup>[1]</sup>。发电机断路器(generator circuit breaker, GCB)作为安装在发电机和升压变压器之间的电力开关设备, 可实现对发电机和变压器的保护、控制和监测, 对维护电力系统的安全、稳定具有重要意义<sup>[2-3]</sup>。与常规的高压断路器<sup>[4-7]</sup>不同, GCB 的应用工况具有额定通流大、故障电流直流分量高、瞬态恢复电压(transient recovery voltage, TRV)上升速率高<sup>[8]</sup>等显著特征, 给电流开断带来巨大挑战。根据灭弧介质的不同, GCB 主要分为 SF<sub>6</sub> 断路器和真空断路器。SF<sub>6</sub> 具有严重的温室效应, 且分解产物具有强烈毒性<sup>[9]</sup>, 不符合我国电力设备环保化的发展需求。相比之下, 真空断路器(vacuum circuit breaker, VCB)采用真空灭弧原理, 其核心部件是真空灭弧室(vacuum interrupter, VI), 具有环保无污染、动作速度快、寿命长等优点<sup>[10-12]</sup>, 得到了广泛关注。

单个商用 VI 无法满足大容量 GCB 在额定通流和短路开断方面的需求。将多个分立元件并联是提高整体通流能力的一种有效方案<sup>[13-17]</sup>, 但由于各个并联支路的阻抗难以做到完全一致, 导致该方案存在并联均流问题。目前, 针对真空多断口并联均流问题的少量研究是通过在支路中增加耦合式电抗器<sup>[18]</sup>来改善均流效果, 但该方法需要较大空间来放置电抗器, 且在使用过程中易造成过电压, 难以应用于 GCB 工况。实际上, 根据 VI 是否动作产生电弧, 均流问题可分为“静态均流”和“动态均流”。文献<sup>[19]</sup>着重研究了线路参数对多个 VI 并联静态均流特性的影响规律, 揭示了三相 GCB 工况中相间电磁场对静态均流的作用机制, 并创新提出一种新型电磁屏蔽方法, 能够有效改善复杂磁场环境下的静态均流效果。然而, 该文献并没有详细分析多个 VI 并联的动态均流。当 VI 动作时, 随着动触头和静触头的分离, 电流在触头间隙产生了真空电弧, 电弧电压的数值随着电弧的演变过程而变化。不同支路的电弧电压存在差异, 在电弧电压的驱动下将发生电流转移现象, 使动态均流情况变得复杂且不

同, 因此须重点研究真空电弧的电压-电流特性(或称伏安特性)。

近年来, 针对真空电弧伏安特性和电弧等离子体形态特征的演变规律, 学者们开展了广泛研究。文献<sup>[20-22]</sup>通过燃弧开断实验和高速摄影机拍摄电弧形态等方法, 分别研究了电流大小、电流频率、机构打开速度对真空电弧形态演变及伏安特性的影响规律, 对真空断路器的研发产生了较高的指导意义。此外, 由于纵向磁场能够显著提高电流开断能力<sup>[23]</sup>, 国内外的学者也着重研究了不同的纵磁触头对电弧电压和电弧形态的影响规律<sup>[24-26]</sup>, 如文献<sup>[25]</sup>针对杯状纵磁触头和线圈型纵磁触头, 对比分析了触头开距、电流等级、纵磁分布状况对电弧电压、电弧形态扩散速度的影响规律。文献<sup>[26]</sup>则研究了触头材料、触头直径对电弧电压和电弧阳极活动特性的影响。上述研究都提出了很多有效的电弧调控方法, 对 VI 触头设计起到了重要的指导作用。然而, 研究所涉及的电流范围仍然较小, 主要集中在 30 kA 以下, 缺乏对 GCB 大电流工况下真空电弧伏安特性及电弧演变过程的深入研究, 同时, 关于真空电弧伏安特性在并联均流中的应用研究仍鲜有报道。

本文针对多个 VI 并联动态均流问题, 首先在基于可拆卸真空腔体的燃弧实验平台中开展了大电流燃弧实验, 并采用高速摄影机同步拍摄电弧形态。结合伏安特性曲线, 对比分析了大电流真空电弧在不同电弧演变阶段中的特征, 并进一步研究了电流等级对真空电弧伏安特性的影响规律, 建立了适用于大电流真空电弧的等效电路模型。之后, 基于真空多断口并联的仿真拓扑, 重点研究并揭示了起弧延时和支路阻抗对动态均流的影响机制, 指出了最佳起弧延时受静态均流的影响规律。最后, 开展了 100 kA 真空多断口并联的动态均流实验, 成功实现了较好的均流效果。

## 1 大电流真空电弧的伏安特性

### 1.1 实验设置

实验电路如图 1 所示。电流源部分由回路开关 S、电感器 L 和预充电电容塔 C 组成, 如式(1)所示, 调节电容值、电感值和电容充电电压可产生预期的实验电流。实验部分由可拆卸真空腔体和测量系统

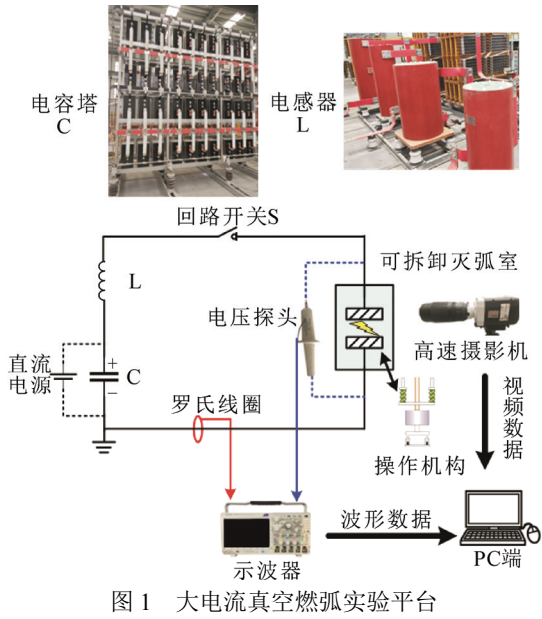


Fig.1 Experimental platform of high-current vacuum arcing

组成, 其中, 可拆卸真空腔体的真空度可长期保持在  $4 \times 10^{-4}$  Pa 以下, 搭载了杯状纵磁触头, 采用电磁斥力机构来驱动触头运动。实验中采用罗氏线圈 (PEM CWT600) 和高压探头 (Tektronix P6015A) 分别监测回路电流和可拆卸真空腔体的端电压, 并用示波器 (Tektronix MDO3024) 存储数据。此外, 实验过程中采用高速摄影仪 (MIRO-M310) 同步拍摄触头间隙的真空电弧形态, 拍摄帧率为 18 000 帧/s, 曝光时间为  $1 \mu\text{s}$ , 所有数据均存储于 PC 端。

可拆卸真空腔体存在杂散电感和杂散电阻, 为分析电弧电压, 电压信号需要剔除杂散干扰。经实验测算, 可拆卸真空腔体的杂散电感约为 400 nH, 杂散电阻约为  $30 \mu\Omega$ , 根据式(2)对电压波形进行预处理可获得真空电弧的电弧电压。

$$\begin{cases} i_e = U_{c0} \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \omega_0 t \\ \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $i_e$  为实验电流;  $U_{c0}$  为电容的预充电电压;  $\omega_0$  为角频率。

$$u_{\text{arc}} = u_e - i_e R_z - \frac{di_e}{dt} L_z \quad (2)$$

式中:  $u_{\text{arc}}$  为真空电弧的电弧电压;  $u_e$  为高压探头监测的电压信号;  $R_z$  和  $L_z$  分别为可拆卸真空腔体的杂散电阻和杂散电感。

### 1.2 电弧形态对伏安特性的影响规律

以电流峰值为 84 kA 的燃弧实验为例进行分析。图 2(a)—图 2(c)分别是真空电弧的电流-电压-

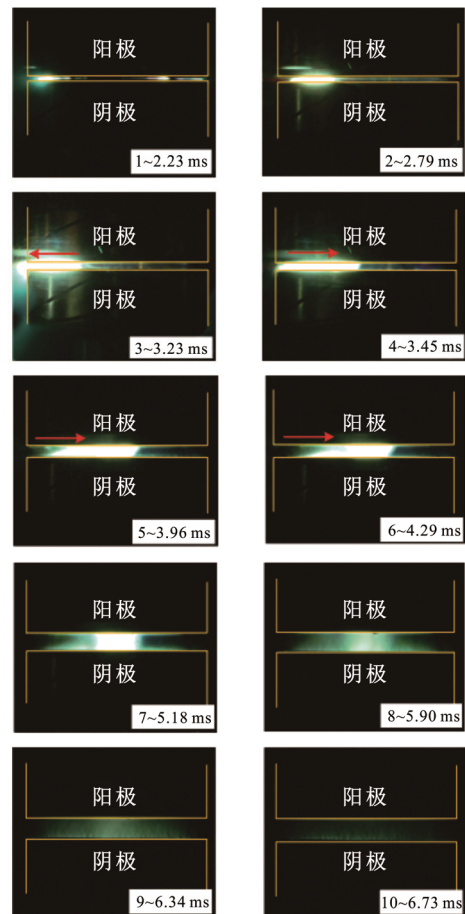
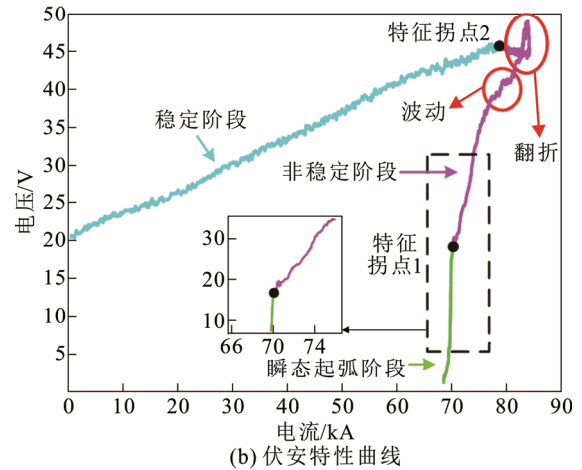
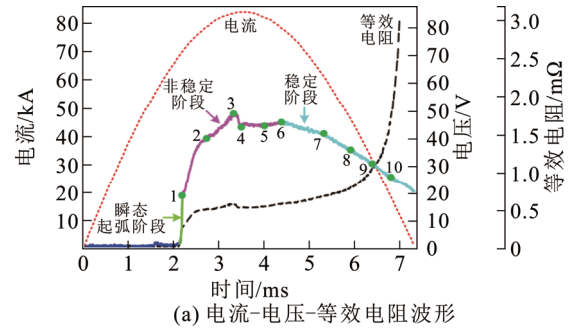


图2 84 kA 电流的燃弧实验结果

Fig.2 Results of the 84 kA arcing experiment

等效电阻波形、伏安特性曲线以及同步拍摄的电弧形态照片, 其中, 等效电阻的计算如式(3)所示。

$$r_{\text{arc}}(t) = \frac{u_{\text{arc}}(t)}{i_{\text{arc}}(t)} \quad (3)$$

式中:  $i_{\text{arc}}(t)$  和  $r_{\text{arc}}(t)$  分别是真空电弧在  $t$  时刻的电流和等效电阻。

从图 2(b)可看出, 大电流真空电弧的伏安特性曲线呈现“7”字形, 存在明显的阶段性变化。根据伏安特性曲线的特征能够将真空电弧的燃弧演变过程划分为 3 个燃弧阶段。如表 1 所示, 不同燃弧阶段下真空电弧的伏安特性和电弧形态存在显著差异, 相邻燃弧阶段的伏安特性曲线之间存在特征拐点, 表 1 可作为选取特征拐点、划分燃弧阶段的重要依据。

### 1.2.1 瞬态起弧阶段(2.15~2.23 ms)

动触头开始运动时, 触头间的接触面积快速减少, 等效电阻和电压快速增大, 电极材料融化产生熔融金属桥。随着触头运动, 熔融金属桥断裂, 2.23 ms 时触头表面多点同步产生真空电弧, 电弧电压瞬间增大至阴极鞘层压降。该阶段时间较短, 仅 80  $\mu\text{s}$  左右, 伏安特性表现为电流几乎不变和弧压突增。之后, 由于真空间隙存在大量金属蒸气和等离子体, 真空电弧的等效电阻将维持较低水平。

### 1.2.2 电弧演变的非稳定阶段(2.23~4.29 ms)

随着电流增加和开距拉大, 多点产生的电弧逐渐合并为 1 个聚集型电弧, 并向着触头边缘移动。运动过程中的弧柱亮度提高, 电弧电压逐渐增加。3.23 ms 弧柱到达触头边缘并向触头外侧拉伸和喷溅, 能量耗散增加, 为维持电弧形态, 电弧电压增加并在此刻达到峰值。3.45 ms 时伴随着电弧缩回触头表面, 电弧电压跌落。之后随着开距进一步拉大, 3.96 ms 时电弧逐渐向触头中央移动。本阶段中, 真空电弧的形态始终处于非稳定状态, 易出现弧柱拉伸、弧柱回弹、弧根移动等现象, 与触头表面工况有关, 存在随机性, 因此伏安特性曲线的局部可能会产生波动、翻转等异常变化, 但整体仍呈现单调趋势。

### 1.2.3 电弧演变的稳定阶段(4.29~7.31 ms)

4.29 ms 时聚集型真空电弧移动至触头中央, 随着电流和开距变化, 电弧形态没有发生明显改变。5.90 ms 时电流降低至 46 kA, 电弧形态从聚集型开始向扩散型转变, 中心弧柱的亮度逐渐变暗。之后, 电弧保持扩散状直至 7.31 ms 时电弧过零熄灭。本阶段中, 电弧弧柱较为稳定, 弧根不发生明显移动,

表 1 不同燃弧阶段下伏安特性和电弧形态的显著特征

Table 1 Significant characteristics of volt-ampere characteristics and arc morphology at different arc stages

| 燃弧阶段   |     | 伏安特性                          | 电弧形态    |
|--------|-----|-------------------------------|---------|
| 瞬态起弧阶段 |     | 电流几乎不变、弧压突增                   | 多点起弧    |
| 电弧演变   | 非稳定 | 弧压基本随电流增加而增加; 伏安特性易出现波动、翻转等现象 | 弧柱运动、喷溅 |
|        | 稳定  | 伏安特性近似线性                      | 弧柱位置固定  |

弧柱从聚集态转变为扩散态的过程很顺畅, 物理性质较为稳定, 因此伏安特性呈现近似线性的趋势。同时, 随着电流逐渐降低, 弧压也逐渐降低, 电弧等离子体开始消散, 等效电阻快速增大。

基于上述分析可发现, 大电流真空电弧的电弧电压由电流和电弧形态共同决定。在非稳定阶段, 电弧形态多变, 电弧电压须及时变化才能维持电弧存在, 电弧形态主导了该阶段的电弧电压。然而在稳定阶段, 电弧形态较为稳定, 此时电流变化将主导电弧电压。从伏安特性曲线的全程来看, 电弧电压与电流基本呈现同步、同方向的变化趋势, 属于正伏安特性。

## 1.3 电流等级对伏安特性的影响规律

开展电流峰值(电流等级)为 40~80 kA 的大电流燃弧实验, 起弧时刻为 2.5 ms, 燃弧时长在 5 ms 左右。不同电流等级的电流-电压波形和等效电阻波形分别如图 3(a)、图 3(b)所示, 随着电流等级的增加, 电弧电压呈现增大趋势, 等效电阻呈现下降趋势。为量化分析, 统计 5 ms 的电弧电压和等效电阻如图 3(c)所示, 随着电流从 32.68 kA 增大至 65.78 kA, 电弧电压从 33.42 V 升高至 44.80 V, 呈现出显著的正伏安特性。同时, 随着电流增加, 电弧等效电阻从 1.02 m $\Omega$  降至 0.68 m $\Omega$ , 这是由于随着电流增大, 电极向真空间隙注入的等离子体数量增多, 提高了真空间隙的电导率。

此外, 伏安特性曲线如图 4(a)所示。从图 4(a)可看出, 不同电流等级下伏安特性曲线均呈现“7”字形, 随着电流等级从 41 kA 增大至 82 kA, 起弧电流从 36 kA 增加至 72 kA, 且伏安特性曲线与坐标轴所围面积也越来越大, 呈现逐层嵌套的现象。进一步, 根据伏安特性曲线的特征拐点将其划分为前文所讨论的 3 个燃弧阶段, 统计各燃弧阶段的时长如图 4(b)所示。随着电流等级增加, 各燃弧阶段的时长基本保持不变, 平均值分别为 103  $\mu\text{s}$ 、1.58 ms

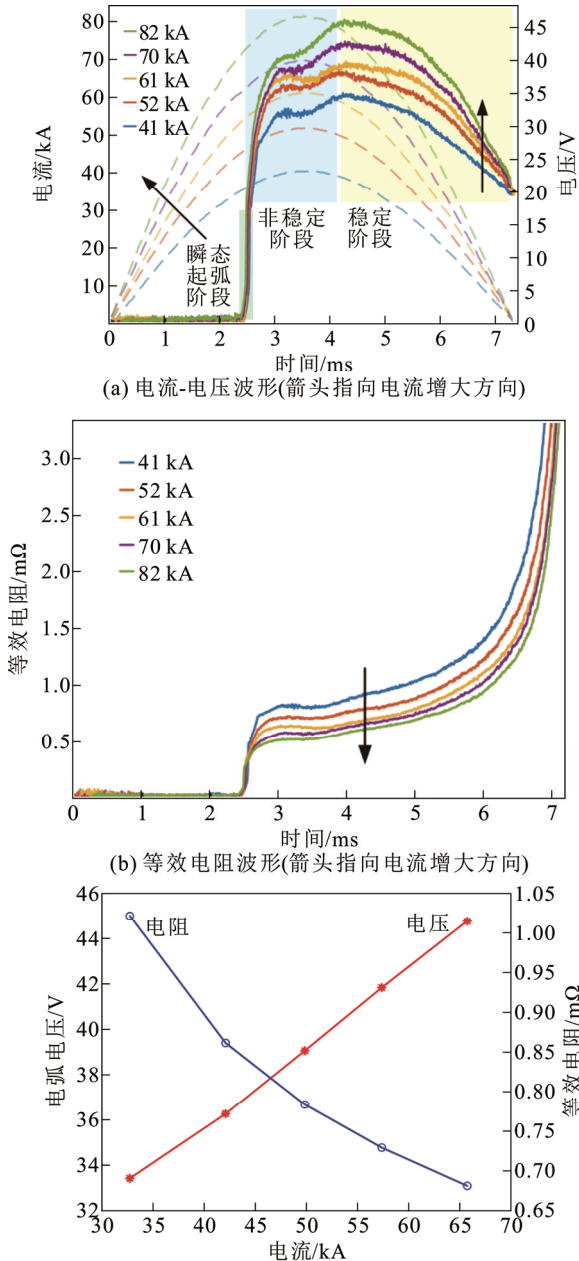


图3 不同电流等级的燃弧实验结果

和 3.20 ms, 这说明同一时刻起弧时, 大电流真空电弧各个燃弧阶段的时长占比几乎不受电流等级的影响。

### 1.4 大电流真空电弧的等效电路模型

通过优化触头结构和磁控技术<sup>[27]</sup>可将真空电弧的电压控制在 100 V 以内的较低水平, 因此真空电弧常被建模为恒压源, 如在文献<sup>[28]</sup>中用于模拟真空断口与电力电子器件并联的电流转移过程。在该仿真工况中, 驱动电流转移的是真空电弧的电压整体。但在真空多断口并联起弧的仿真工况中, 是

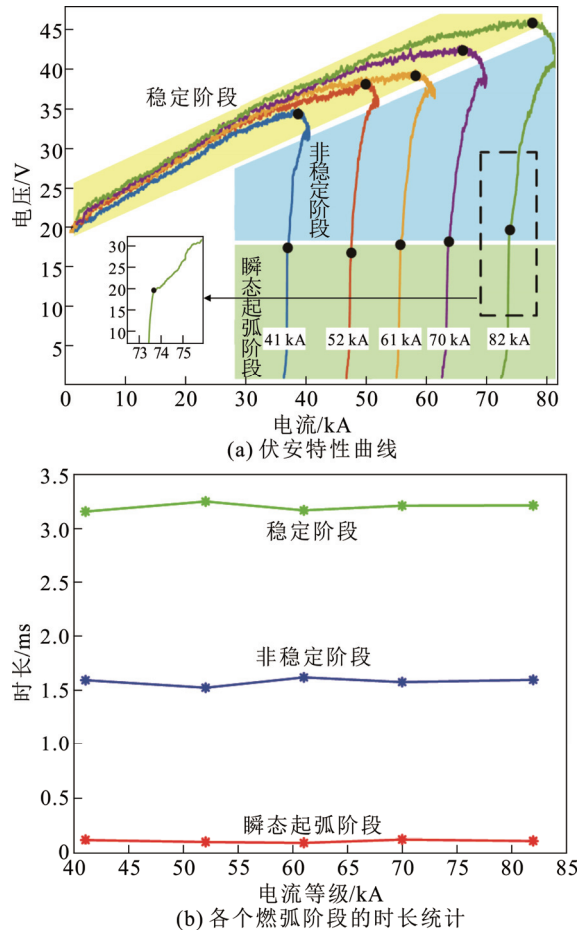


图4 电流等级对真空电弧伏安特性的影响

Fig.4 Effects of current level on the volt-ampere characteristics of vacuum arc

各支路电弧电压的差值驱动电流转移, 此时无法忽略电弧电压的细节, 所以恒压源模型并不适于真空多断口并联的动态均流仿真。

#### 1.4.1 建模分析

结合文献<sup>[27-29]</sup>经典理论可分析燃弧过程的物理机制。在瞬态起弧阶段时, 开距较小, 电弧电压突增至阴极电压降, 该电压降仅与材料的共振能级和电离势有关<sup>[29]</sup>; 在非稳定阶段初期, 多个真空电弧弧柱快速移动直至弧柱合并, 电弧运动使能量趋于均匀分布, 避免了阳极局部过热<sup>[30]</sup>, 阳极温度相对较低, 但由于电流等级较大, 阳极表面电流密度较高, 阳极鞘层压降会从负压降转为正压降并迅速升高<sup>[29]</sup>, 因此电弧电压整体也快速升高; 随着电弧移动速度变慢, 阳极被加热, 局部温度持续升高致使出现块熔斑点, 阳极鞘层压降迅速下降<sup>[31]</sup>, 但阳极开始向弧柱喷发金属蒸汽, 一方面增加了弧柱气压, 导致弧柱电压有所升高, 另一方面阳极表面

的蒸发粒子密度最高, 加之电流密度较大, 中性粒子不断激发和电离, 形成阳极压降区<sup>[32]</sup>, 上述因素综合导致电弧电压整体上升速度变慢; 进入稳定阶段后, 随着电流下降, 阳极活动减弱, 电弧逐渐从聚集态转为扩散态, 电弧电压也随之下降。

结合上述分析和伏安特性开展电路建模。电弧演变的稳定阶段的伏安特性近似线性为电路建模提供了便利。用式(4)对伏安特性曲线进行拟合逼近, 式(4)转写为式(5), 分析式(5)易发现本阶段可建模为电压源  $u_c$  和可变电阻  $r_s$  的串联。不同电流等级下的多项式参数如表 2 所示, 其中, 系数  $a < 0$ 、系数  $b > 0$ , 说明随着电流等级增大, 电阻会小幅降低, 这是因为电流增大导致真空间隙等离子体数量增加, 电导率提高, 但  $r_s$  数值上仍由  $b$  主导,  $r_s$  基本不变。 $c$  对应  $u_c$ , 取值 19 V 左右, 受电流的影响很小, 代表电弧的阴极电压降。此外, 从表 2 还可发现各参数基本与电流等级无关, 说明大电流下不同电流等级真空电弧的物理性质趋于一致。实际模型使用中, 各参数亦可通过表 2 插值获得。

$$u_{\text{arc}} = ai_{\text{arc}}^2 + bi_{\text{arc}} + c \quad (4)$$

$$u_{\text{arc}} = (ai_{\text{arc}} + b)i_{\text{arc}} + c = r_s i_{\text{arc}} + u_c \quad (5)$$

式中:  $a$ 、 $b$ 、 $c$  为多项式拟合系数。

对于电弧演变的非稳定阶段, 伏安特性较为复杂, 暂不考虑翻折、波动等现象。从趋势上观察, 本阶段中电流仅在峰值附近变动, 电弧电压呈现初期上升很快但上升速度逐渐变慢的特征, 电压峰值滞后于电流峰值, 说明该阶段断口表现为明显的容性, 因此在电阻支路基础上并联电容作为本阶段的电路模型。

#### 1.4.2 电路模型

本文提出如图 5(a)所示的大电流真空电弧电路模型。其中,  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$  是可控开关,  $r_c$  是触头闭合时的导通电阻,  $u_c$  是电压源(即阴极电压降),  $r_s$  和  $C_e$  是燃弧过程的等效电阻和电容, 默认状态下  $C_e$  被  $u_c$  充电至阴极电压降。

##### 1) 正常通流阶段

如图 5(b)所示,  $S_2$  断开,  $S_1$  闭合。电路中只有动静触头的接触电阻, 大约为 10~20  $\mu\Omega$ 。

##### 2) 瞬态起弧阶段

如图 5(c)所示, 当收到分闸信号时,  $S_1$  断开,  $S_2$  闭合。由于  $C_e$  初始电压与  $u_c$  均为阴极电压降, 电压将突增至阴极电压降, 模拟弧压突增的伏安特性。

表 2 不同电流等级伏安特性的拟合系数

Table 2 Fitting parameters of volt-ampere characteristics of different current levels

| 电流等级/kA | $a/(\text{m}\Omega \cdot \text{kA}^{-1})$ | $b/\text{m}\Omega$ | $c/\text{V}$ |
|---------|---|--------------------|--------------|
| 41      | -0.003 8                                  | 0.57               | 18.79        |
| 52      | -0.004 7                                  | 0.61               | 19.34        |
| 61      | -0.005 0                                  | 0.64               | 19.12        |
| 70      | -0.004 0                                  | 0.62               | 19.48        |
| 82      | -0.003 2                                  | 0.59               | 20.05        |

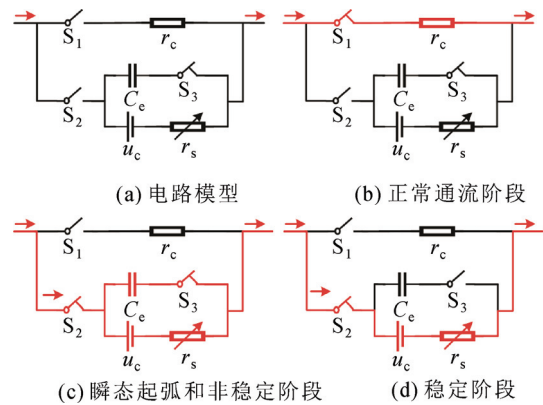


图 5 大电流真空电弧的电路模型

Fig.5 Circuit model of high-current vacuum arc

#### 3) 电弧演变的非稳定阶段

进入本阶段后, 总电流给  $C_e$  充电,  $C_e$  电压升高, 模拟非稳定阶段初期弧压快速上升的过程。随着  $C_e$  电压的提高,  $r_s$  分流增大, 导致  $C_e$  电流下降,  $C_e$  电压的上升速率逐渐放缓, 这与非稳定阶段后期弧压上升速度变慢的特点保持一致。 $C_e$  通过实验数据调试设为 0.9 F。

#### 4) 电弧演变的稳定阶段

进入本阶段后, 如图 5(d)所示,  $S_3$  断开, 等效电路变为电压源  $u_c$  和可变电阻  $r_s$  的串联, 模拟本阶段近似线性的伏安特性。

设置电流等级为 40~80 kA, 起弧时刻为 2.5 ms, 根据图 4(b)的分析结果, 控制 1.59 ms 后进入稳定阶段, 运行仿真模型。不同电流等级电弧电压的仿真波形与实验波形的对比如图 6(a)~图 6(e)所示, 仿真误差的均方根值(root mean square, RMS)最大为 2.73 V, 仅为弧压极值的 4.99%。结合图 4(a)和图 6(f)可看出, 不同电流等级下伏安特性曲线的仿真结果能够与实验结果保持一致, 具备前文所讨论的特征趋势, 证明仿真模型的精度较高。

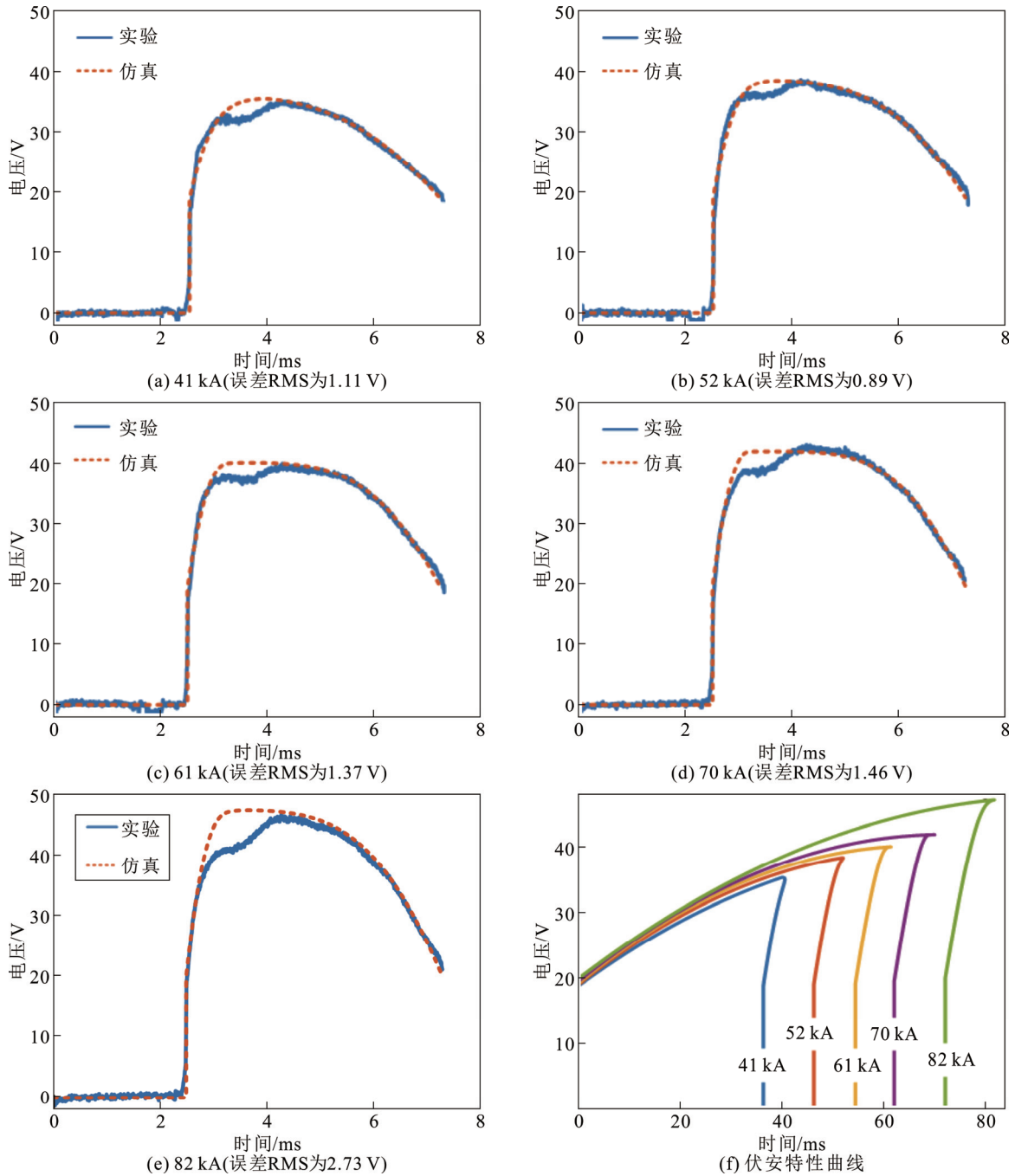


图6 仿真结果

Fig.6 Simulation results

## 2 大电流真空多断口并联均流的影响规律

### 2.1 真空多断口并联拓扑

以 2 个 VI 并联为例，搭建真空多断口并联的仿真拓扑如图 7 所示， $L_1$  和  $L_2$  分别是 2 个 VI 的电感， $R_1$  和  $R_2$  分别是 2 个 VI 的电阻。各个 VI 动作起弧后，如图 7(b)所示，在电弧电压的驱动下，回路将产生式(6)所示的环流，这有利于电流均衡分布。

$$i_c = \frac{u_{arc2} - u_{arc1}}{R_{z1} + R_{z2}} \left( 1 - e^{-\frac{(R_{z1} + R_{z2})t}{L_{z1} + L_{z2}}} \right) \quad (6)$$

式中： $L_{z1}$  和  $L_{z2}$  为两支路的杂散电感； $R_{z1}$  和  $R_{z2}$  为两支路的杂散电阻； $i_c$  为 VI 起弧后的环流。

### 2.2 动态均流的影响因素

#### 2.2.1 评价指标

式(7)定义了静态均流系数  $\alpha$  用于衡量未起弧时

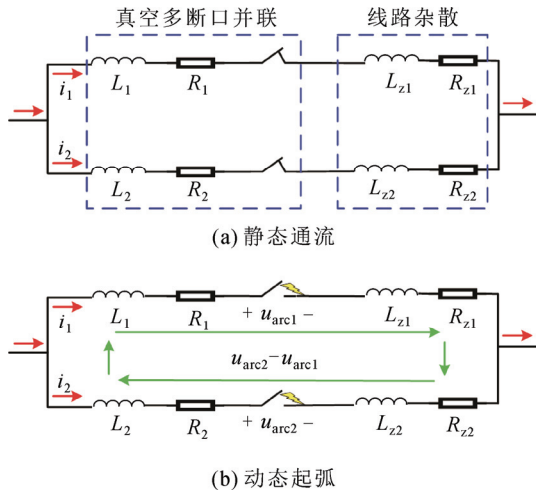


图 7 大电流真空多断口并联拓扑

Fig.7 Parallel topology of high-current vacuum multi-breakers

静态均流的优劣, 属于极大型指标。式(8)、式(9)定义了均流最大值  $C_M$  和均流面积差  $S_d$ , 用于衡量动态均流的优劣, 属于极小型指标。

$$\alpha = \frac{\text{avg}(i_1(t_d), i_2(t_d))}{\max(i_1(t_d), i_2(t_d))} \times 100\% \quad (7)$$

$$C_m = \max(i_1, i_2) \quad (8)$$

$$S_d = \int_0^{t_z} |i_1 - i_2| dt \quad (9)$$

式中:  $t_d$  对应支路电流最大值的时刻; avg 是取平均值运算; max 是取最大值运算;  $t_z$  为总电流过零熄弧的时刻。

### 2.2.2 起弧延迟与支路阻抗的影响

设总电流峰值为 100 kA, 每个 VI 的电阻和电感分别为  $20 \mu\Omega$  和 200 nH, 线路杂散电阻和杂散电感分别为  $50 \mu\Omega$  和 200 nH。两支路阻抗参数完全一致, 静态仿真波形如图 8(a)所示,  $\alpha=100\%$ 。设置 VI-2 在 2.5 ms 起弧, VI-1 延迟  $\Delta t$  起弧, 设置起弧延迟  $\Delta t$  从  $-400 \mu\text{s}$  逐渐增大至  $400 \mu\text{s}$ 。并在两支路中同步增加相同数值的电感, 从 200 nH 增至 600 nH, 仿真结果如图 8(b)、(c)所示。

根据 VI-1 是否起弧将动态均流分为前后 2 个均流阶段。分析式(6)和图 8(b)、(c)发现, 当 VI-2 起弧后, 进入第 1 个均流阶段, 在 VI-2 弧压作用下, 电流转移已经开始, 电流差异逐渐增大。当 VI-1 起弧后, 进入第 2 个均流阶段, 此时电流转移是在两支路电弧电压的差值作用下发生。显然第 1 个阶段的电流转移速度要大幅快于第 2 个阶段, 前一阶段的持续时间( $|\Delta t|$ )越长, 电流差异就越大, 对均流的不利影响也越大, 因此如图 8(b)、(c)所示, 随  $|\Delta t|$

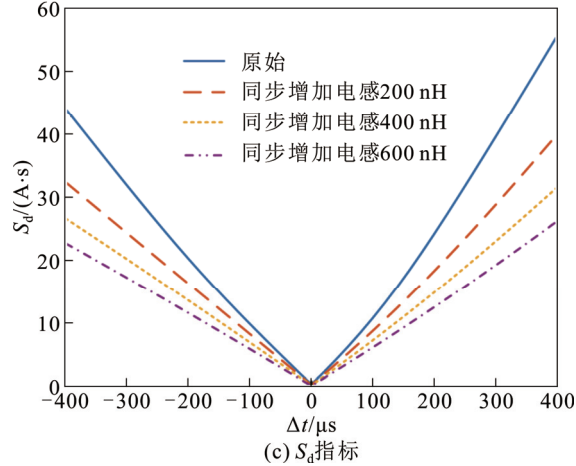
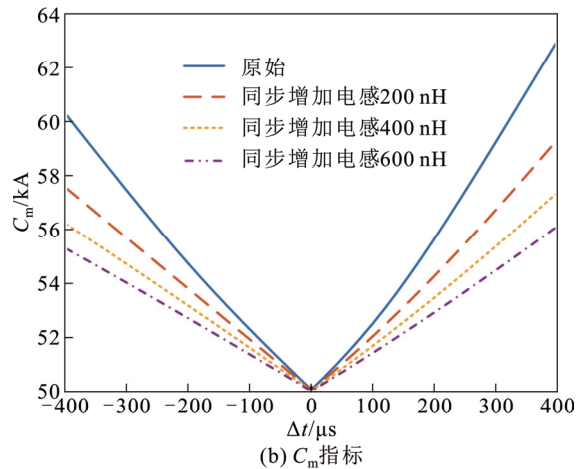
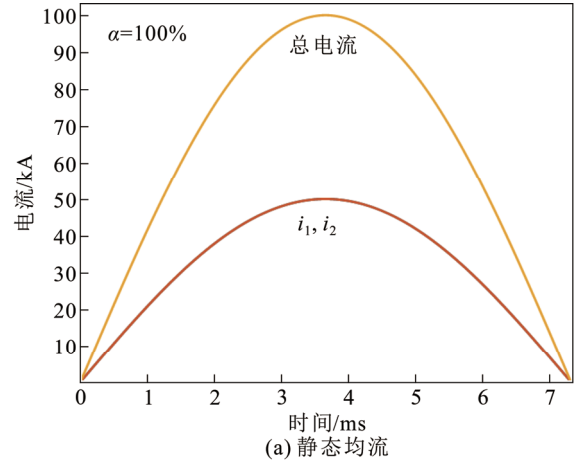


图 8 起弧延时与支路阻抗对动态均流的影响

Fig.8 Influences of arc delay and branch impedance on dynamic current-sharing

增大,  $C_m$  和  $S_d$  逐渐增大。而对于同样的起弧延时, 根据式(6), 同步增加各支路的电感会减弱整个动态均流过程的转移环流, 因此能降低  $C_m$  和  $S_d$ , 有助于改善动态均流。此外, 对于相同  $|\Delta t|$ ,  $\Delta t > 0$  和  $\Delta t < 0$  对  $C_m$  的影响并不对称, 这是因为电流转移过程是叠加在总电流波形上, 而相同  $|\Delta t|$  内转移的电流基本固定, 当  $\Delta t > 0$  时, 第一均流阶段中的总电流数值上

更靠近电流峰值，因此该阶段中产生的电流极值更大，导致  $C_m$  显著增大；当  $\Delta t < 0$  时反之。第一均流阶段中电流相对起弧时刻的电流变化量没有明显改变，因此  $\Delta t$  正负对  $S_d$  影响不大。

### 2.2.3 最佳起弧延时

当  $\alpha=100\%$  时，最佳起弧延时为  $0 \mu s$ ，即两支路同步起弧时，两支路电流完全一致，不存在电流转移过程，是最理想的均流状况。但实际上由于加工工艺、外界磁场干扰等因素，各支路的阻抗难以完全对称，须研究静态均流稍差时的动态均流特性。将 2 个 VI 的电感改为  $200 \text{ nH}$  和  $400 \text{ nH}$ ，其余条件不变，此时  $\alpha=87.15\%$ ，仿真结果见图 9。

分析图 9 发现，随着  $\Delta t$  由正转负， $C_m$  和  $S_d$  会降低，这是因为 VI 起弧前， $i_1$  大于  $i_2$ 。只有当 VI-1 率先起弧( $\Delta t < 0$ )时，在弧压作用下， $i_1$  减小、 $i_2$  增大，两支路电流才存在交叉汇聚的均流趋势，降低均流过程的电流极值。但如果  $\Delta t < 0$  且  $|\Delta t|$  太大，由于转移环流的方向不变，电流达到平衡后会继续转移，支路电流差异增大，导致  $C_m$  和  $S_d$  增大。因此仍存在最佳起弧延时，此工况的最佳  $\Delta t$  为  $-200 \mu s$  左右。此外，从图 9(b)、(c) 可看出，同步增加支路电感能改善  $C_m$  和  $S_d$ ，但会使最佳  $|\Delta t|$  略微增加。这是因为随着电感同步增加，一方面，原先支路阻抗不平衡的影响被弱化，两支路阻抗趋于一致，起弧前的静态电流差异被缩小， $\alpha$  提高，有利于减小最佳  $|\Delta t|$ ，也使  $S_d$  整体减小；但另一方面，同步增加电感增加了转移阻抗，转移环流被减弱，使最佳  $|\Delta t|$  增大。两方面存在竞争关系，这里表现为最佳  $|\Delta t|$  略微增加。

进一步，统计不同静态均流工况下对应的最佳起弧延时如图 10 所示，当  $\alpha$  降低时，两支路静态时的电流差异增大，进入第一均流阶段后，需要较长的转移时长，两支路电流才能接近电流平衡点，因此最佳  $|\Delta t|$  会随  $\alpha$  的降低而增大。

需要指出的是，实际中 VI 的操作机构多采用弹簧操作机构、电磁斥力机构等机械设备，分闸延时存在分散性，给 VI 起弧时刻的精准控制带来困难。因此，研发高速、高寿命、低分散性的操作机构将有助于实现最佳起弧延时的灵活控制，大幅改善并联均流效果。

### 2.3 大电流真空多断口并联均流实验

在图 1 实验回路中将 2 个 VI 并联，开展总电流峰值为  $100 \text{ kA}$  的双断口并联动态均流实验，其

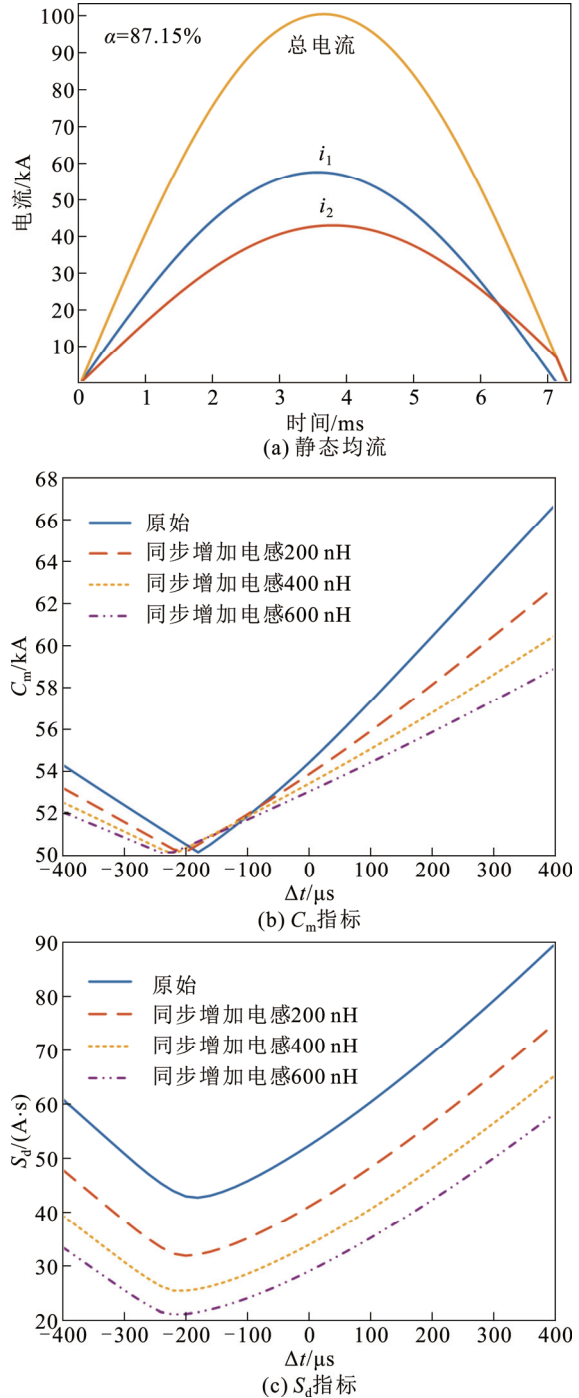


图 9 静态均流稍差时的动态均流特性

Fig.9 Dynamic current-sharing when static current-sharing is slightly worse

中，2 个 VI 的操作机构虽在同一时刻收到分闸指令，但由于机构动作延时有分散性，VI-1 和 VI-2 的实际起弧时刻分别为  $2.551 \text{ ms}$  和  $2.506 \text{ ms}$ ，相差  $45 \mu s$ 。测算两支路的杂散参数分别为  $500 \text{ nH}+60 \mu\Omega$  和  $615 \text{ nH}+70 \mu\Omega$ 。运行仿真模型，实验与仿真的结果对比如图 11 所示， $\alpha$  均达到  $91\%$  以上。

对比图 11(a)和图 11(b)可看出，实验与仿真的

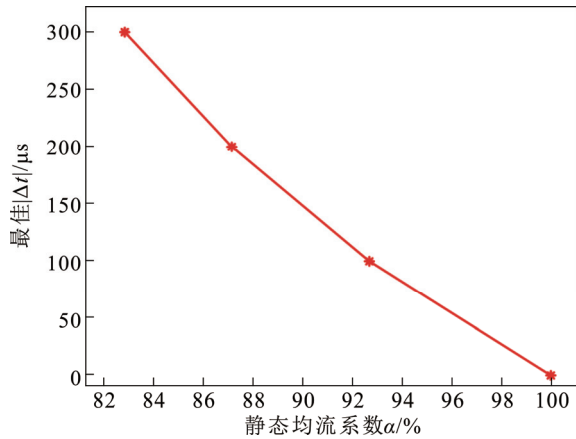


图 10 不同静态均流效果下的最佳起弧延时

Fig.10 Optimal arcing delay under different static current-sharing effects

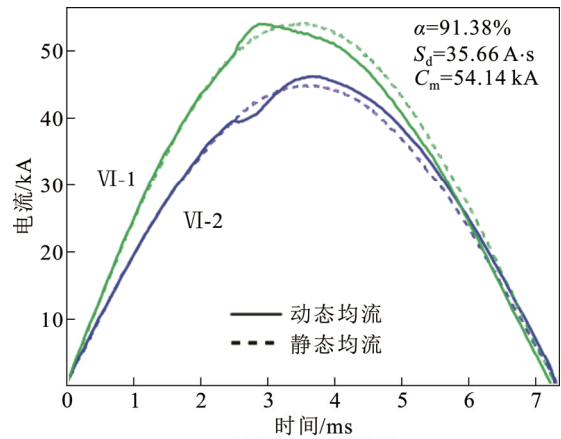
电流波形整体较相符, 提取实验电流与仿真电流的  $S_d$  分别为 35.66 A·s 和 34.76 A·s, 差异不到 3%,  $C_m$  分别为 54.14 kA 和 53.97 kA, 差异不到 1%。从图 11(c)可看出, 实验与仿真的电压波形趋势也保持一致, 两支路弧压的仿真误差的均方根值仅为 2.84 V 和 1.99 V。实验验证了真空多断口并联均流的可行性, 也证明了本文所提建模方法能够较为准确地预测大电流真空多断口并联均流的实际状况。

### 3 结论

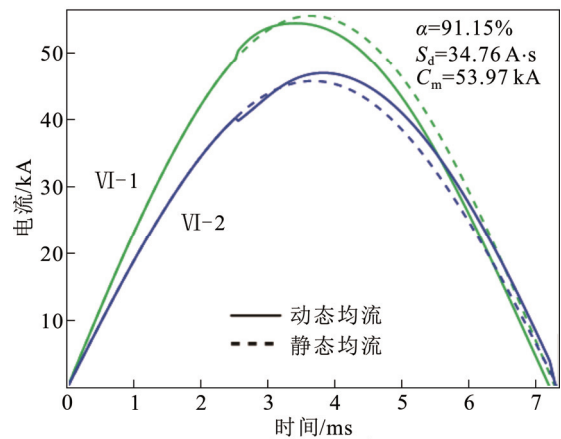
1) 不同的燃弧阶段具有不同特征的伏安特性。根据伏安特性可划分燃弧阶段。瞬态起弧阶段中, 弧压会突增至阴极电压降。非稳定阶段中, 电弧形态和弧根位置不固定, 电弧形态多变导致伏安特性易出现波动。稳定阶段中, 电弧形态是稳定的聚集态或扩散态, 弧根位置不发生明显移动, 伏安特性近似线性。

2) 随着电流等级提高, 同一时刻的电弧电压逐渐提高, 等效电阻逐渐降低, 呈现正伏安特性。不同电流等级下伏安特性曲线逐层嵌套, 电流等级越大, 伏安特性与坐标轴所包围的面积越大。同一时刻起弧时, 大电流真空电弧各个燃弧阶段的时长占比几乎不受电流等级的影响。

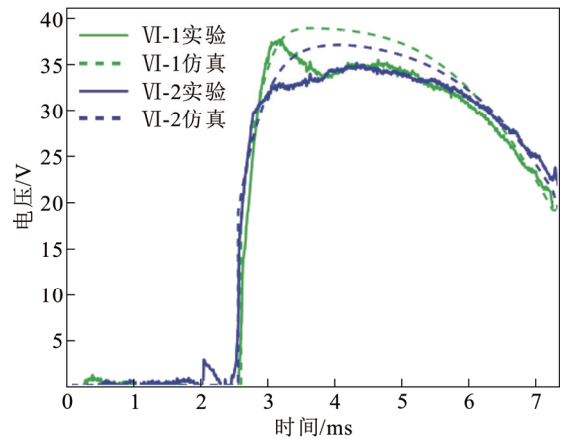
3) 建立了大电流真空电弧的电路模型, 仿真研究大电流真空多断口并联均流特性发现, 起弧延时的绝对值越大, 电流转移过程越明显, 电流差异越大, 导致动态均流效果变差, 但同步增加各个支路的电感有助于改善动态均流。存在最佳起弧延时, 随着静态均流系数下降, 最佳起弧延时的绝对值会增大。



(a) 实验电流波形



(b) 仿真电流波形



(c) 实验与仿真的电流波形

图 11 大电流动态均流的实验与仿真对比

Fig.11 Comparison between experiment and simulation of high-current dynamic current-sharing

4) 100 kA 真空多断口并联均流实验实现了较好的静态、动态均流效果, 也证明本文所提模型具有较强的预测能力。

此外, 本文所提真空电弧的电路模型存在改进空间, 如电弧演变非稳定阶段的预测误差仍相对较大。下一步, 将针对不同燃弧阶段下真空电弧演变的微观物理机制做更加深入的实验研究和理论分

析, 尝试考虑更多因素来完善真空电弧电路模型的建模方法, 提高其在真空多断口并联均流工况中的仿真预测能力。

## 参考文献 References

- [1] HE R F, WANG F, ZHANG H. Analysis and improvement of electrical lifetime of generator circuit breaker of pumped storage unit[C]// Proceedings of 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Wuhan, China: IEEE, 2020: 4102-4106.
- [2] FENG X S, TAN L M, WANG Y K, et al. Improved generator circuit breaker failure protection method combined with voltage quantities[J]. Energy Reports, 2022, 8(S5): 419-427.
- [3] 朱琦琦, 王海燕, 张洋, 等. 大容量抽水蓄能发电机断路器发热特性仿真与散热优化方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2623-2634. ZHU Qiqi, WANG Haiyan, ZHANG Yang, et al. Heating characteristic simulation and heat dissipation optimization design of pumped storage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2623-2634.
- [4] YI Q, WU Y F, ZHANG Z H, et al. Low-cost HVDC circuit breaker with high current breaking capability based on IGCTs[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 4948-4953.
- [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] 吴益飞, 吴翊, 庄伟斌, 等. 直流快速开断技术研究进展和展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 467-477. WU Yifei, WU Yi, ZHUANG Weibin, et al. Research progress and prospect of fast DC current interruption technology[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 467-477.
- [7] 范兴明, 李涛, 张鑫. 中高压直流断路器的研究与应用[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2537-2553. FAN Xingming, LI Tao, ZHANG Xin. Research and application of medium voltage and high voltage DC circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2537-2553.
- [8] 费翔, 张国跃, 马明乐, 等. 大容量发电机出口真空灭弧室研制[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4488-4496. FEI Xiang, ZHANG Guoyue, MA Mingle, et al. Development of vacuum interrupter at the outlet of large capacity generator[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4488-4496.
- [9] XIAO S, ZHANG X X, TANG J, et al. A review on SF<sub>6</sub> substitute gases and research status of CF<sub>3</sub>I gases[J]. Energy Reports, 2018, 4: 486-496.
- [10] CHEN H, LIU X M, LI L N, et al. Analysis of dynamic arc parameters for vacuum circuit breaker under short-circuit current breaking[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 0601905.
- [11] YAO X F, WANG J H, GENG Y S, et al. Development and type test of a single-break 126-kV/40 kA-2 500-A vacuum circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 182-190.
- [12] REDDYVENNA K, LAWALL A, GENTSCH D. Suitability of vacuum circuit breakers for generator switching applications according to dual logo standard IEC/IEEE 62271-37-013[C]//Proceedings of 2019 5th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology. Kitakyushu, Japan: IEEE, 2019: 130-135.
- [13] YI Q, YANG F, ZHUANG W B, et al. Transient current balancing of parallel IGCTs in 10-kV/10-kA hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(10): 10055-10065.
- [14] ZHAO C, WANG L L, ZHANG F. Effect of asymmetric layout and unequal junction temperature on current sharing of paralleled SiC MOSFETs with kelvin-source connection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(7): 7392-7404.
- [15] ZENG Z, ZHANG X, ZHANG Z. Imbalance current analysis and its suppression methodology for parallel SiC MOSFETs with aid of a differential mode choke[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1508-1519.
- [16] RODRIGUES R, RAHEJA U, ZHANG Y Z, et al. Power loop busbars design and experimental validation of 1 kV, 5 kA solid-state circuit breaker using parallel connected RB-IGCTs[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(3): 1920-1927.
- [17] PENG C, LI X B, FAN J Y, et al. Experimental investigations on current sharing characteristics of parallel chips inside press-pack IGBT devices[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(9): 10672-10680.
- [18] SU X M, LUO J H, XU B, et al. Research on parallel mean flow technology of high-voltage vacuum circuit breaker[C]//Proceedings of 2022 IEEE International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms. Changchun, China: IEEE, 2022: 146-149.
- [19] HAN X Y, YANG F, CHEN H B, et al. Parallel current-sharing characteristics of vacuum multi-breakers for large-capacity generator circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(2): 1162-1173.
- [20] XIA S W, WU J W, TONG Z A, et al. Characteristics of intermediate frequency vacuum arc under different breaking speeds[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, 52(9): 4498-4505.
- [21] ZHU L Y, WU J W, LIU B, et al. The dynamic volt-ampere characteristics of a vacuum arc at intermediate-frequency under a transverse magnetic field[J]. Plasma Science and Technology, 2013, 15(1): 30-36.
- [22] 蒋原, 武建文, 李擎, 等. 平板触头小开距中频真空电弧特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(16): 6517-6524. JIANG Yuan, WU Jianwen, LI Qing, et al. Characteristics of intermediate frequency vacuum arc in butt contact with short gap[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(16): 6517-6524.
- [23] MILLER H C. Vacuum arcs[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2023, 51(7): 1585-1594.
- [24] LOGACHEV A A, POLUYANOVA I N, KLOCHKO S V. Arc voltage as a source of information about arc burning on AMF contacts[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(8): 3572-3578.
- [25] WANG L J, HU L L, DENG J, et al. Experimental investigation on vacuum arc behaviors subjected to larger diameter cup-shaped and coil-shaped axial magnetic field electrode[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(3): 884-891.
- [26] 马强, 王立军, 阙继磊, 等. 平板触头小开距高电流密度下真空电弧特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6229-6237. MA Qiang, WANG Lijun, QUE Jilei, et al. Experimental study on vacuum arc characteristics of butt contacts with short gap and high current density[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6229-6237.
- [27] LIU Z Y, WANG J H, GENG Y S, et al. Switching arc phenomena in transmission voltage level vacuum circuit breakers[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2021: 62-69.

- [28] SMIRNOV V S, EVDOKUNIN G A, PETROVA A D, et al. Computer simulation of transient processes in hybrid generator circuit breaker during interruption of short circuit current[C]//Proceedings of 2010 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). St. Petersburg and Moscow, Russia: IEEE, 2020: 1320-5.
- [29] MUSA G, EHRICH H, MAUSBACH M. Studies on thermionic cathode anodic vacuum arcs[J]. Journal of Vacuum Science & Technology A, 1994, 12(5): 2887-2895.
- [30] PANG X H, WANG T, XIU S X, et al. Study on arc mode and shape transformation in the arc motion stage between transverse magnetic field contacts[J]. Contributions to Plasma Physics, 2019, 59(3): 358-366.
- [31] 王建华. 真空电弧阳极斑点的形成过程及纵向磁场的影响[J]. 西安交通大学学报, 1985(5): 81-88.  
WANG Jianhua. The process of anode spot formation in vacuum arcs and the effects of axial magnetic field[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1985(5): 81-88.
- [32] 王季梅, 苑 舜. 大容量真空开关理论及其产品研发[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 14-15.  
WANG Jimei, YUAN Shun. Theory and product development of large capacity vacuum switch[M]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 14-15.



HAN Xiangyu  
Ph.D. candidate



YANG Fei  
Ph.D., Professor  
Corresponding author

#### 韩翔宇

1999—, 男, 博士生

主要从事大容量真空多断口并联均流与电弧调控方面的研究工作

E-mail: hanxiangyu@stu.xjtu.edu.cn

#### 杨 飞(通信作者)

1982—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事大容量交直流开断理论与技术、电力装备数字化设计与智能制造等方面的研究工作

E-mail: yfei2007@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期 2024-05-15 修回日期 2025-01-19 编辑 曾文君