

并联电感-电容支路对空气电弧电流转移特性的影响

张雨石, 吴翊, 孙昊, 吴益飞, 荣命哲, 刘天晓, 孔子扬

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对直流电力系统中故障电流开断的技术难题,提出了一种基于空气电弧磁控振荡特性的直流开断方案。通过对狭缝内空气电弧施加外加横向磁场,使电弧电压周期性振荡,从而在电弧与电感-电容(LC)支路间形成负阻尼振荡电流,促进故障电流转移并最终实现电流开断。实验研究了4种并联LC支路谐振频率下的电流转移过程,并分析了5~13 kA主回路电流下转移支路电容对转移电流峰值的影响。结果表明:5 kA主回路电流下提高LC支路谐振频率可缩短电流转移时间至0.84 ms,但当主回路电流增大时,需将LC支路的谐振频率调节至与电弧振荡频率一致,方可制造电弧电流过零点;增大转移支路电容可有效提升初始转移峰值电流,从而增强电流转移能力;电流转移过程中磁场衰减会导致电弧电压上升速率降低,影响谐振电流负阻尼振荡的持续性。研究验证了空气电弧磁控振荡式直流开断方案的可行性,为经济型直流断路器设计提供了新思路。

关键词: 直流开断;空气电弧;外加横向磁场;电流转移;磁控振荡

中图分类号: TM561 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202508016 **文章编号:** 0253-987X(2025)08-0168-09

Influence of Parallel Inductance-Capacitance Branches on Current Commutation Characteristics of Air Arcs

ZHANG Yushi, WU Yi, SUN Hao, WU Yifei, RONG Mingzhe,

LIU Tianxiao, KONG Ziyang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the technical challenge of interrupting fault currents in direct current (DC) power systems, a DC interruption scheme based on the magnetic control oscillation characteristics of air arcs is proposed. Applying an external transverse magnetic field to the air arc within a narrow gap enables the arc voltage to oscillate periodically, thereby creating a negative damping oscillating current between the arc and the inductor-capacitor (LC) branch. This facilitates fault current transfer, ultimately achieving current interruption. Experimental studies are conducted on the current transfer process at the resonant frequencies of four parallel LC branches, and the effect of the transfer branch capacitance on the peak transfer current is analyzed for main circuit currents ranging from 5 kA to 13 kA. The results indicate that increasing the resonant frequency of the LC branch at a 5 kA main circuit current can shorten the current transfer time to 0.84 ms. However, as the main circuit current increases, the resonant frequency of the LC branch needs to

be adjusted to match the oscillation frequency of the arc to create a zero-crossing of the arc current. Increasing the capacitance of the transfer branch effectively enhances the initial peak transfer current, thereby boosting the current transfer capability. Additionally, the attenuation of the magnetic field during the current transfer process leads to a decreased rate of rise in arc voltage, affecting the continuity of the resonant current's negative damping oscillation. This study validates the feasibility of the air arc magnetic control oscillation-based DC interruption scheme, providing a new approach for the design of economical DC circuit breakers.

Keywords: direct current interruption; air arc; external transverse magnetic field; current commutation; magnetically controlled oscillation

直流断路器是直流电力系统中保障供电灵活性与可靠性的关键设备,当系统发生故障时,断路器需快速、可靠地实现故障电流的开断,以确保系统安全稳定运行^[1-2]。与交流系统不同,直流系统因电流不存在自然过零点,使得故障电流的开断过程更为复杂^[3-4]。基于电流振荡转移原理的直流开断方案提供了一种有效的技术途径^[5],该类型断路器主要由 3 个核心功能模块构成:主电流支路承载正常运行电流,电感-电容(LC)振荡支路实现故障电流的转移,避雷器保护单元承担能量吸收功能^[6]。当系统发生故障时,通过 LC 振荡支路与主电流支路之间的电流转移过程制造电流过零点,并释放系统剩余能量,从而实现故障电流的有效开断^[7]。相较于混合式^[8-10]和全固态直流断路器^[11-12],振荡式开断方案通过大幅减少电力电子器件的使用数量,显著降低了设备制造成本。

自激振荡式开断方案利用气体电弧负阻特性,在气吹冷却和足够触头开距条件下,通过气体电弧与并联 LC 振荡支路之间的电流振荡过程产生电弧电流零点^[13-14]。李阳等^[15]基于磁流体动力学理论,对 SF₆ 开关电弧电流转移过程进行仿真,发现可以通过调节外部 LC 振荡支路参数在 16.5 ms 至 24 ms 范围内实现 5 kA 电流转移。Xiang 等^[16]提出了一种超导限流与自激振荡结合的开断方案,对比了 CO₂ 和 SF₆ 两种气体电弧的电流转移效果。李兴文等^[17]则通过实验与仿真结合的手段,研究了不同 LC 支路参数下电弧特性对电流振荡过程的影响。然而,该方案存在电流转移时间长的缺陷。

文献^[18-19]提出可在 LC 振荡支路中使用全控型电力电子器件构成电压源逆变器,产生频率可控的振荡电压,从而激发主电流支路与 LC 支路间的电流谐振过程。Zhang 等^[20]基于此开断方案搭

建了 10 kV/3 kA 样机,故障电流可在 3 ms 内实现全部转移。Qi 等^[21]则在主电流支路中加入辅助振荡电力电子开关,进一步减少了电力电子器件的使用数,Zhang 等^[22-23]验证了此开断结构的小电流开断能力。上述开断方案与气体电弧自激振荡式开断方案相比,显著缩短电流转移时间,但在主电流支路或 LC 振荡支路中使用了全控型电力电子器件,增加了经济成本,并且电力电子器件在电流过零后将承受系统恢复电压,对其电压耐受能力带来挑战。

本研究提出了一种外加交流横向磁场调控下的空气电弧振荡式直流开断方案,其特点在于主电流支路和并联 LC 支路均不使用电力电子器件,通过外加交流横向磁场调控空气电弧,使其电弧长度产生周期性变化,进而形成振荡的电弧电压,最终在并联 LC 支路中建立幅值递增的电流谐振过程,实现电流转移并制造电流过零点。

1 空气电弧磁控振荡式直流开断的基本原理

自激振荡式开断方案基于气体电弧负阻特性,在电弧两端并联 LC 支路,其谐振过程如下

$$L \frac{di(t)}{dt} + u_{\text{arc}}(t) + \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(t) dt = 0 \quad (1)$$

$$\delta = \frac{du_{\text{arc}}(i(t))}{di} \frac{1}{2L} \quad (2)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \delta^2} \quad (3)$$

$$i(t) = I e^{-\delta t} \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: L 为支路电感; C 为支路电容; i 为谐振电流; I 为谐振电流初始幅值; t 为时间; u_{arc} 为电弧电压; ω 为角频率; δ 为衰减系数。由于气体电弧具有负阻特性,衰减系数 δ 为负值^[24-25]。基于气体电弧负阻特性的振荡电路如图 1 所示。

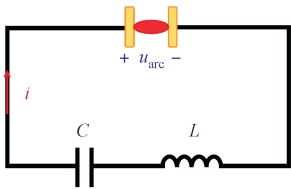


图 1 基于气体电弧负阻特性的振荡电路
Fig. 1 Oscillation circuit based on negative resistance characteristics of gas arc

磁控振荡式开断方案使用交流横向磁场对空气电弧进行调控,其电流谐振过程如图 2 所示。施加外加磁场后,电弧在洛伦兹力作用下拉伸,导致弧柱长度增加,并引起电弧电压上升(阶段 1);当磁场方向反转时,弧柱长度缩短后向相反方向拉伸(阶段 2)。此调控方式可使电弧电压呈现振荡变化,电弧电压的变化频率为外加磁场频率的两倍,在 LC 支路中产生感应负阻尼谐振电流,制造电弧电流过零点。

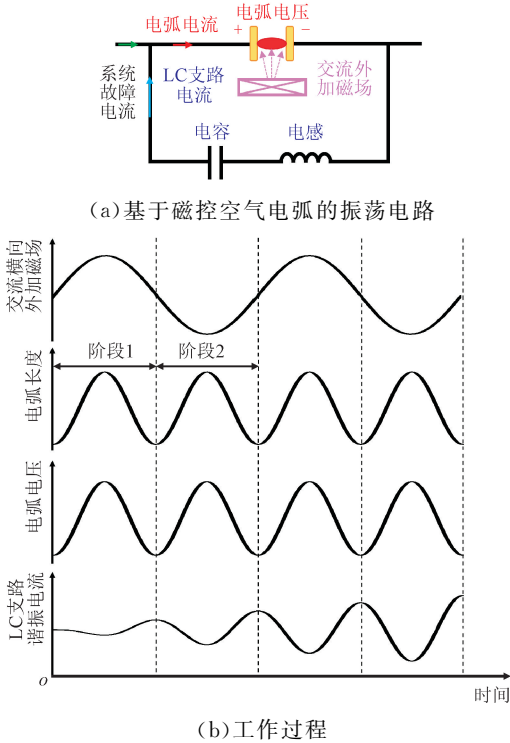
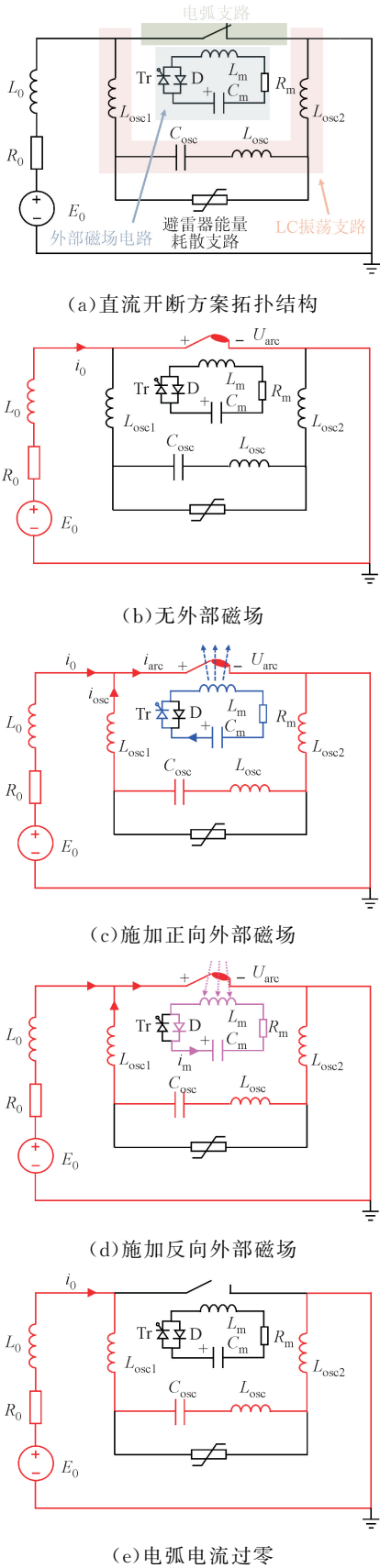
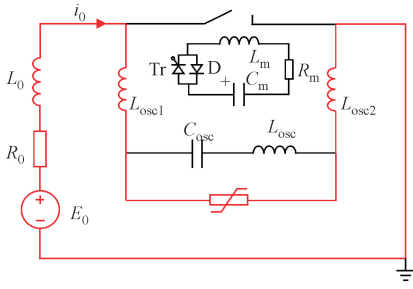


图 2 基于空气电弧磁控振荡的电流谐振过程
Fig. 2 Current oscillation process based on air arc magnetically controlled oscillation

空气电弧磁控振荡式直流开断方案如图 3 所示,由电弧支路、外部磁场电路、LC 振荡支路以及避雷器能量耗散支路组成。图中 E_0 、 i_0 、 R_0 、 L_0 分别为直流系统电压、电流、电阻以及电感, U_{arc} 为磁控空气电弧电压, L_{osc} 、 C_{osc} 为谐振电感、谐振电容,

L_{osc1} 、 L_{osc2} 为电弧支路与 LC 振荡支路间杂散电感, L_m 、 C_m 、 R_m 为外部磁场电路电感、电容、电阻, Tr、D 为晶闸管、二极管。





(f) 系统能量释放

图 3 空气电弧磁控振荡式直流开断方案

Fig. 3 Air arc magnetically controlled oscillation DC interruption scheme

当故障电流产生后,空气电弧燃烧,尚未施加磁场时电路状态满足

$$E_0 = i_0 R_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + U_{\text{arc}} \quad (5)$$

触发晶闸管即可向空气电弧施加外部交流磁场,使电弧电压随磁场振荡,从而激发 LC 振荡支路产生振荡电流,开启电流转移过程。LC 支路谐振电流幅值持续增长,并与系统故障电流叠加,促使电弧电流过零,此换流过程可表示为

$$U_{\text{arc}} + (L_{\text{osc}} + L_{\text{osc1}} + L_{\text{osc2}}) \frac{di_{\text{osc}}}{dt} + U_{\text{osc}} = 0 \quad (6)$$

$$i_{\text{arc}} = i_0 + i_{\text{osc}} \quad (7)$$

$$f_{\text{arc}} = 2f_m \quad (8)$$

$$f_{\text{osc}} = 1/(2\pi \sqrt{(L_{\text{osc}} + L_{\text{osc1}} + L_{\text{osc2}})C_{\text{osc}}}) \quad (9)$$

式中: i_{osc} 为谐振电流; U_{osc} 为谐振电容两端电压; i_{arc} 为电弧电流; f_{arc} 为电弧电压振荡频率; f_{osc} 为 LC 振荡支路谐振频率; f_m 为外部吹弧磁场振荡频率。

外部磁场电路由晶闸管、二极管、预充电容以及磁场线圈组成,线圈产生的交流横向磁场施加在电弧上,其谐振过程表达式如下

$$C_m \frac{du_m}{dt} = i_m \quad (10)$$

$$L_m \frac{di_m}{dt} + i_m R_m + u_m = 0 \quad (11)$$

$$f_m = 1/(2\pi \sqrt{L_m C_m}) \quad (12)$$

$$i_m(0) = 0 \quad (13)$$

$$u_m(0) = U_0 \quad (14)$$

式中: u_m 为外部磁场电路电容两端电压; i_m 为磁场吹弧线圈电流; U_0 为电容预充电电压。

电弧熄灭后,系统故障电流将转移至振荡支路,使振荡电容电压升高,直至触发避雷器动作,释放系统剩余能量,最终完成电流开断过程。

2 空气电弧磁控振荡特性

空气电弧振荡特性测试平台如图 4 所示。电弧电流由预充电的 20 mF 电容、0.5 mH 电感以及真空触发间隙组成的主回路提供,输出电流半波持续时间约为 10 ms。在主回路电流触发后 3 ms,对空气电弧施加外加交流磁场,以激发空气电弧磁控振荡过程,并通过高速摄影仪记录电弧的运动特性。

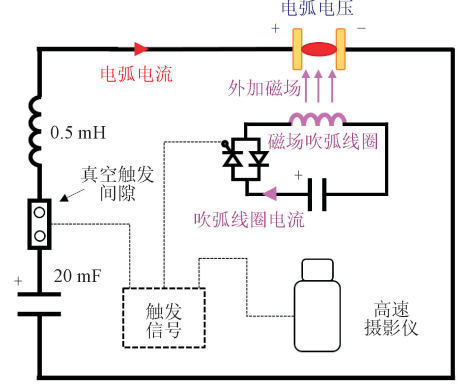


图 4 空气电弧振荡特性测试平台

Fig. 4 Air arc oscillation characteristic test platform

空气电弧可在燃弧腔体内产生,空气电弧采用铜丝引弧的方式产生,电极为扁平条状结构,长度 50 mm,阴阳极间距 25 mm,电弧在两块绝缘挡板之间 10 mm 宽的狭缝内燃烧,如图 5 所示。外加交流磁场频率为 1.1 kHz,磁场吹弧线圈每通流 1 kA,可在狭缝内两电极间隙中心处产生约 55 mT 的横向外加磁场,磁场幅值可通过外部磁场电路中电容预充电电压 U_0 进行调节。

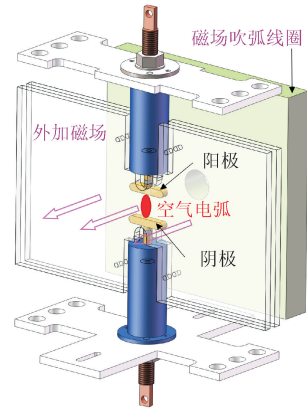


图 5 空气电弧燃弧腔体

Fig. 5 Air arc chamber

空气电弧磁控振荡过程中吹弧线圈电流、电弧电流和电弧电压的波形,磁场施加时刻记录为 0,空

气电弧磁控振荡过程典型波形如图 6 所示。在电弧振荡的前 6 个周期内,电弧电流的平均值为 5 kA,电弧电压的振荡频率为 2.2 kHz,为外加磁场频率的两倍。

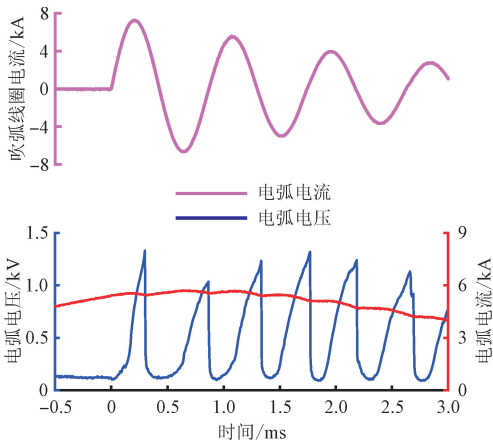


图 6 空气电弧磁控振荡过程典型波形
Fig. 6 Typical waveform of air arc magnetically controlled oscillation process

图 7 展示了图 6 中第 3、4 弧压振荡周期对应的电弧图像。在外加磁场的作用下电弧首先向一侧偏移并伸长,导致电弧电压随之上升;当磁场方向反转时,电弧向另一侧运动,电弧电压呈现稳定且可控的振荡状态。

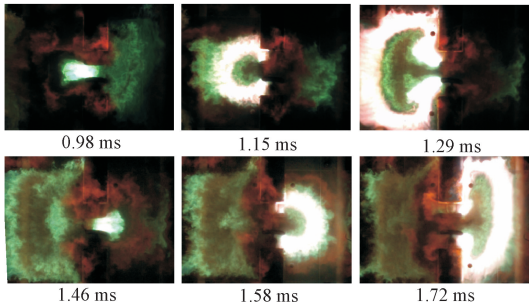


图 7 空气电弧图像
Fig. 7 Air arc images

3 空气电弧电流转移特性

3.1 方案可行性验证

基于空气电弧磁控振荡特性以及所提出的直流开断方案,搭建实验平台进行电流转移特性测试,以验证该方案的可行性,如图 8 所示。

主回路电流为 5 kA 下实验波形如图 9 所示,触发主回路产生电流 3 ms 后,向空气电弧施加交流磁场,电流转移过程开始,波形中此时刻记录为 0。电

弧电压呈现随外加磁场振荡,外加磁场的频率为 1.1 kHz,电弧电压的振荡频率为 2.2 kHz。在振荡支路中电容 C_{osc} 为 200 μ F,支路电感为 23 μ H,谐振频率为 2.2 kHz,振荡支路电感为谐振电感 L_{osc} 与杂散电感 L_{osc1} 、 L_{osc2} 之和。在 LC 振荡支路谐振电流的叠加下,电弧电流在过零前峰值可达 11.7 kA,最终经过两个振荡周期后,电弧电流在 1.05 ms 处过零,完成电流转移过程,验证了磁控振荡式空气电弧电流转移方案的可行性。

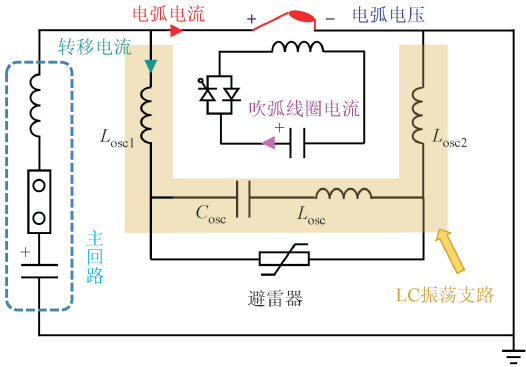


图 8 空气电弧电流转移特性测试平台
Fig. 8 Air arc current transfer characteristic test platform

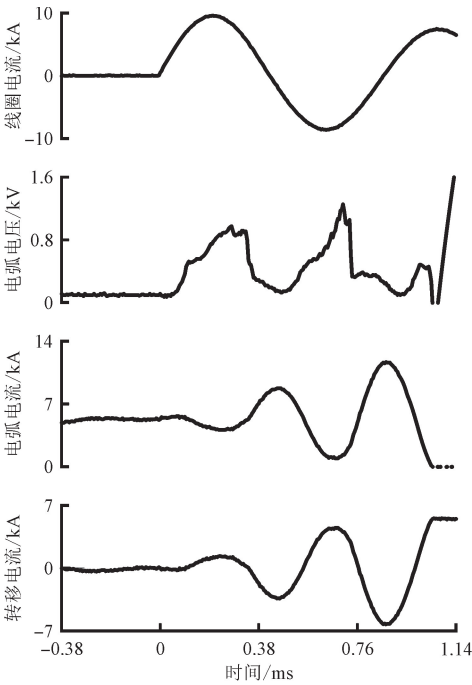
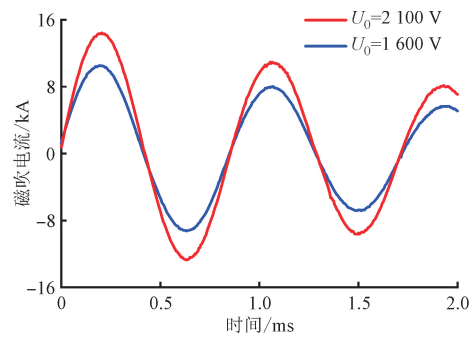


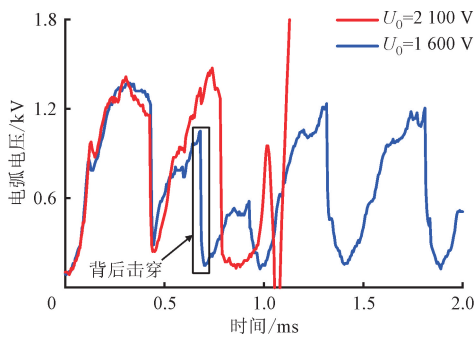
图 9 电流转移过程实验波形
Fig. 9 Experimental waveform of the current commutation process

图 10 展示了 8 kA 主回路电流下不同预充电电压 U_0 的电流转移特性。 U_0 直接决定外加磁场幅值,进而影响电弧调控效果。在首个振荡周期内,当

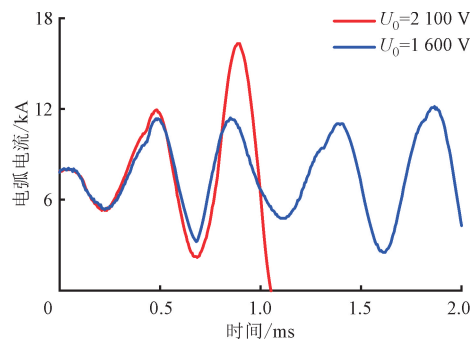
U_0 为 2 100、1 600 V 时,可获得相近的电弧峰值电压;在第 2 个振荡周期中,随着磁场衰减,1 600 V 时弧压上升,速率降低,电弧无法在外加磁场的驱动下快速运动、拉伸,并造成狭缝内局部热量集中,导致背后击穿现象,弧压快速跌落,影响电流转移过程的正常进行。因此,后续研究统一设置 U_0 为 2 100 V,以提供足够的磁场强度。



(a) 磁场线圈电流



(b) 电弧电压



(c) 电弧电流

图 10 外部磁场电路预充电电压对电流转移特性的影响
Fig. 10 The influence of the external magnetic field circuit pre-charging voltage on the current transfer characteristics commutation characteristics

3.2 LC 振荡支路谐振频率的影响

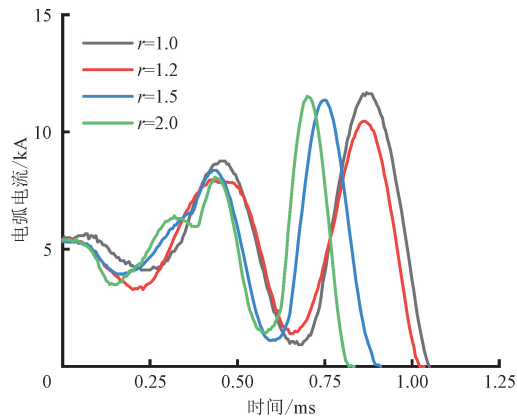
并联 LC 支路的谐振频率由电感和电容参数决定,当外加磁场频率与电弧电压振荡频率恒定时,提高支路谐振频率可加快电流转移速度。定义 r 为并

联 LC 支路谐振频率与电弧电压振荡频率的比值,实验参数如表 1 所示。

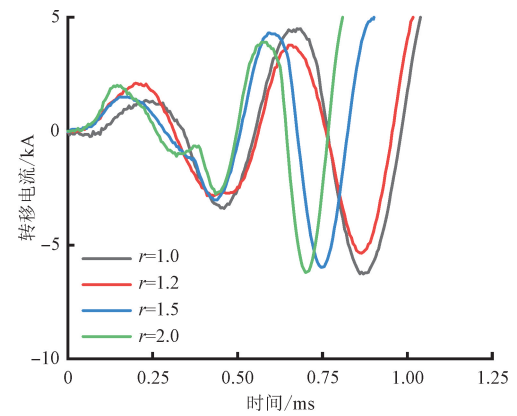
表 1 不同 LC 振荡支路谐振频率下的实验参数
Table 1 Experimental parameters under different LC oscillation branch resonant frequencies

支路电容/ μF	支路电感/ μH	r
200	23	1.0
200	16	1.2
200	10	1.5
200	5.8	2.0

主回路电流为 5 kA 时电弧电流与转移电流波形如图 11 所示。4 种不同 LC 支路频率下均成功实现电流转移,使电弧电流过零,同时转移电流幅值呈递增趋势。随着支路谐振频率升高,电流过零时间由 1.05 ms 缩短至 0.84 ms。



(a) 电弧电流

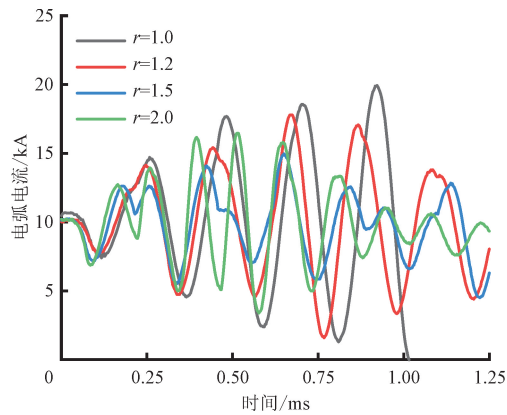


(b) 转移电流

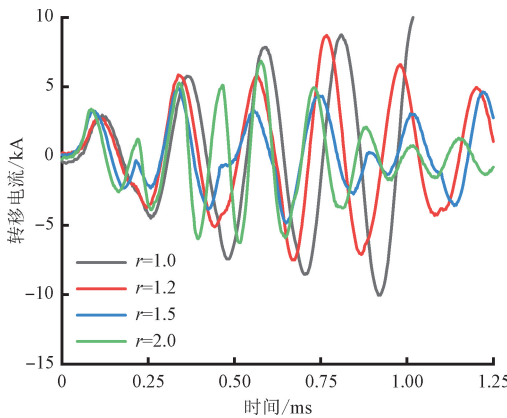
图 11 主回路电流为 5 kA 时空气电弧电流转移实验波形
Fig. 11 Air arc current commutation test waveform under 5 kA system current

主回路电流为 10 kA 时的实验测试结果如图 12 所示,仅当 LC 振荡支路频率与电弧电压频率匹配时,才能成功产生电流过零点,并需要更多振荡

周期,电流转移过程持续 2.05 ms。而当支路谐振频率为弧压频率的 1.2、1.5 和 2.0 倍时,最大转移电流仅达 8.7、5.0、6.84 kA,其 LC 支路振荡过程无法维持转移电流幅值呈递增状态。



(a) 电弧电流



(b) 转移电流

图 12 主回路电流为 10 kA 时空气电弧电流转移实验波形
Fig. 12 Air arc current commutation test waveform under 10 kA system current

3.3 LC 振荡支路电容的影响

在保持振荡支路谐振频率等于电弧电压振荡频率的情况下,通过实验研究了转移支路电容对电流转移效果的影响,实验采用两组支路参数配置进行比较:200 μF 电容配合 23 μH 电感,以及 300 μF 电容配合 16 μH 电感。在每种工况下,分别进行了 5、8、10、13 kA 主回路电流下的空气电弧电流转移特性测试,并对电流转移过程中的各个振荡周期内转移电流峰值的绝对值进行了统计。

主回路电流为 5、8 kA 时转移电流峰值随时间的变化情况如图 13 所示,1 ms 内均可完成电流转移,期间振荡电流峰值随时间递增。与 200 μF 振荡电容工况相比,300 μF 振荡电容下的初始电流转移

幅值更大,从而导致更为剧烈的电流谐振过程。在主回路电流为 10 kA 时电流转移特性如图 14 所示。主回路电流为 10 kA 时的电弧电压如图 15 所示。

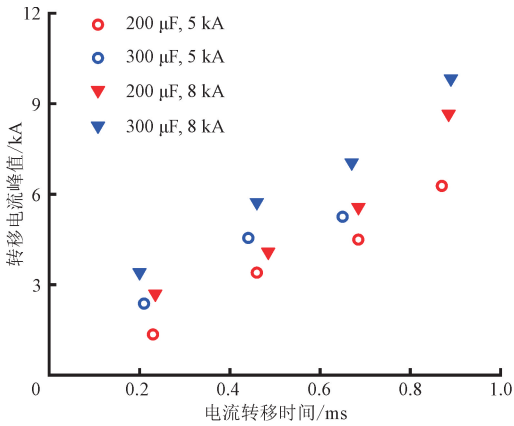


图 13 主回路电流为 5、8 kA 的转移电流峰值

Fig. 13 Peak commutation current of 5 kA and 8 kA system currents

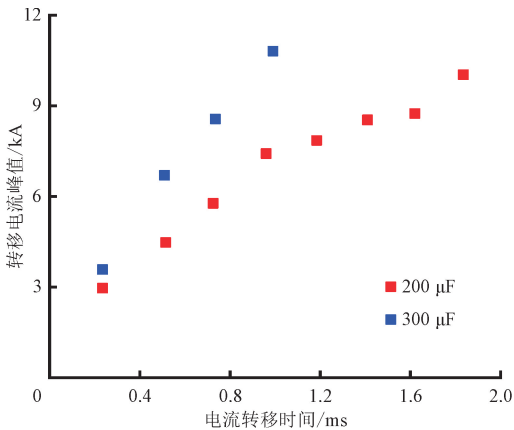


图 14 主回路电流为 10 kA 的转移电流峰值

Fig. 14 Peak commutation current of 10 kA system current

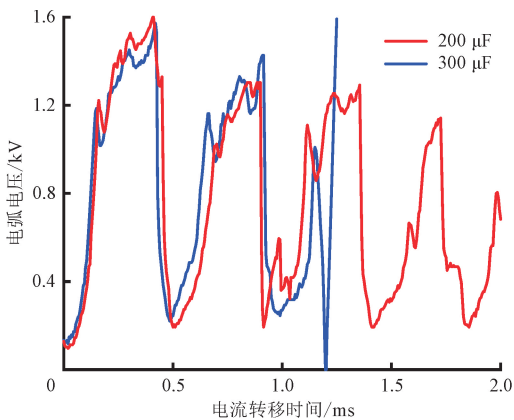


图 15 主回路电流为 10 kA 的电弧电压

Fig. 15 Arc voltage at 10 kA system current

在施加磁场后的初始 1 ms 内,300 μF 电容下转移电流幅值明显高于 200 μF 工况,并率先实现电弧电流过零。200 μF 电容对应的转移电流峰值增长率在 1 ms 后显著降低,需 1.84 ms 才能达到 10 kA 量级。结合图 15 中的电弧电压波形,可发现电流转移开始后 1 ms 内,电弧电压呈现相似的变化规律,而 200 μF 电容工况随着电流转移过程的进行,弧压峰值显著减低,从而导致转移电流峰值上升速率下降。

对于主回路电流为 13 kA 工况,两种支路参数配置下均未能实现电弧电流的完全转移,如图 16 所示。与主回路电流为 10 kA 工况相似,在转移过程的前 1 ms 内,转移峰值电流持续增加,并在 1 ms 时出现拐点,增长速度下降。在 2 ms 时,使用 300 μF 电容时峰值电流达到 12.7 kA,而使用 200 μF 电容时峰值电流仅为 11.4 kA,转移电流峰值随时间逐渐下降。由于本开断方案基于交流磁场对电弧的动态调控,磁场是维持电流振荡转移的核心因素,电流转移初始 1 ms 内可提供足够磁场强度,确保电弧电压快速上升。然而,外部磁场电路中预充电电容对吹弧线圈的放电过程存在电流衰减,磁场衰减导致电弧电压下降,显著减缓空气电弧与 LC 振荡支路间电流转移速率,最终无法维持电流负阻尼振荡状态,表现为转移电流峰值持续递减。

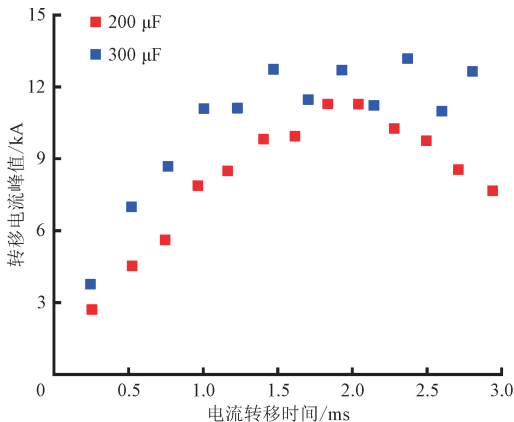


图 16 主回路电流为 13 kA 的转移电流峰值

Fig. 16 Peak commutation current of 13 kA system current

4 结 论

本文提出了一种基于空气电弧磁控振荡特性的直流开断方案,实验研究了并联 LC 振荡支路参数对空气电弧电流转移特性的影响,得出如下结论。

(1)对狭缝内空气电弧施加交流横向磁场可使其长度呈现周期性变化,电弧电压以二倍磁场频率

振荡,通过设计并联 LC 支路参数,可在电弧与振荡支路间激发负阻尼振荡电流,最终促使电弧电流过零,实验验证了该开断方案的可行性。

(2)当外加磁场频率与振荡支路电容恒定时,通过调节支路电感可改变 LC 支路谐振频率。5 kA 电流转移实验表明,提高转移支路频率可使电流转移时间缩短至 0.84 ms。然而,当故障电流增至 10 kA 时,仅当 LC 支路频率与电弧振荡频率相同时,才能产生负阻尼谐振振荡电流并最终强制电弧电流过零。

(3)当 LC 支路谐振频率等于弧压振荡频率时,增大支路电容可显著提高电流转移初始值。在不同主回路电流下,300 μF 电容工况的电流峰值始终高于 200 μF 工况。主回路电流增大时,所需电弧振荡周期数相应增加,而外加磁场衰减会降低弧压上升速率,从而影响电流转移效果。

参考文献:

- [1] BARNES M, VILCHIS-RODRIGUEZ D S, PEI Xiaozhe, et al. HVDC circuit breakers-a review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 211829-211848.
- [2] 吴翔, 荣命哲, 钟建英, 等. 中高压直流开断技术 [J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 337-346.
WU Yi, RONG Mingzhe, ZHONG Jianying, et al. Medium and high voltage DC breaking technology [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 337-346.
- [3] SCHULTZ T, HERZOG P, FRANCK C M. Interruption limits of mechanical circuit breakers and circuit upgrades for current injection in HVDC circuit breakers [J]. High Voltage, 2020, 5(3): 334-342.
- [4] WEN Weijie, LIU Haijin, LI Bin, et al. Novel reclosing strategy based on transient operating voltage in pseudobipolar DC system with mechanical DCCB [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4125-4133.
- [5] 李斌, 李鹏宇, 温伟杰, 等. 机械式直流断路器性能分析及谐振换流方法 [J]. 电工技术学报, 2022, 37(9): 2137-2149.
LI Bin, LI Pengyu, WEN Weijie, et al. Performance analysis and resonant commutation method of mechanical DC circuit breaker [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(9): 2137-2149.
- [6] ZHUANG Weibin, WU Yifei, WU Yi, et al. An integrated multichips package module with 30 kA turn-off capability based on pulse oscillation for hybrid circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Industrial Elec-

- tronics, 2024, 71(6): 6427-6437.
- [7] 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.
- [8] ZHANG Xiangyu, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. A state-of-the-art 500 kV hybrid circuit breaker for a dc grid: the world's largest capacity high-voltage dc circuit breaker [J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2020, 14(2): 15-27.
- [9] YI Qiang, WU Yifei, ZHANG Zhihui, et al. Low-cost HVdc circuit breaker with high current breaking capability based on IGBTs [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 4948-4953.
- [10] LIAO Minfu, HUANG Jinqiang, GE Guowei, et al. Vacuum arc commutation characteristics of the DC microgrid hybrid circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(8): 2172-2178.
- [11] RODRIGUES R, DU Yu, ANTONIAZZI A, et al. A review of solid-state circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(1): 364-377.
- [12] WU Xin, WU Yifei, WU Yi, et al. Low voltage DC solid-state circuit breaker with soft turn-off and self-charging operation [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10): 13071-13080.
- [13] SAKAI M, KATO Y, TOKUYAMA S, et al. Development and field application of metallic return protecting breaker for HVDC transmission [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(12): 4860-4868.
- [14] ITO H, HAMANO S, IBUKI K, et al. Instability of DC arc in SF₆/sub 6/ circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(4): 1508-1513.
- [15] 李阳, 杨飞, 荣命哲, 等. 高压直流金属回路转换开关中自激振荡开断电流的数值仿真分析 [J]. 高电压技术, 2013, 39(10): 2547-2552. LI Yang, YANG Fei, RONG Mingzhe, et al. Numerical simulation of self-excited oscillation switching current in HVDC MRTB [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(10): 2547-2552.
- [16] XIANG Bin, LIU Zhiyuan, WANG Chuanchuan, et al. DC interrupting with self-excited oscillation based on the superconducting current-limiting technology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 529-536.
- [17] 李兴文, 郭泽, 傅明利, 等. 高压直流转换开关电流转换特性及其影响因素 [J]. 高电压技术, 2018, 44(9): 2856-2864. LI Xingwen, GUO Ze, FU Mingli, et al. Current commutation characteristics and its influential factors for high-voltage direct current transfer switches [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(9): 2856-2864.
- [18] LIU Siyuan, POPOV M, MIRHOSSEINI S S, et al. Modeling, experimental validation, and application of VARC HVDC circuit breakers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(3): 1515-1526.
- [19] CHEN Jinchao, LIU Siyuan, JIN Jingyong, et al. A novel direct current circuit breaker with a gradually increasing counter-current [J]. Electronics, 2024, 13(10): 1883.
- [20] ZHANG Xiangyu, YANG Jin, WU Zhiwei, et al. A novel thyristor-controlled voltage-source-based forced resonant mechanical DC circuit breaker [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14563-14572.
- [21] QI Lei, CHEN Xilin, QU Xinyuan, et al. A novel forced resonant mechanical DC circuit breaker by using auxiliary oscillation switch for zero-crossing [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(11): 12202-12206.
- [22] ZHANG Bei, ZHANG Xiangyu, SHAN Tianpei, et al. A high-performance low-cost resonant DC load switch exclusively utilizing semi-controlled devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(5): 2880-2893.
- [23] ZHANG Bei, ZHANG Xiangyu, WU Sihang, et al. A novel dual-LC resonant DC circuit breaker employing soft-switching technique for enhanced performance [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(8): 9023-9033.
- [24] ZHU Kai, LI Xingwen, JIA Shenli, et al. Study of the switching arc characteristics of a 500 kV HVDC self-excited oscillatory metallic return transfer breaker [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 128-134.
- [25] BORT L S J, FRANCK C M. Determination of axial electric field distribution in blown arcs with differential method [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 714-720.

(编辑 赵炜)