

电阻型故障限流器电流转移特性研究

包宇喆¹, 陶春蓉², 梅志强², 葛国伟³

(1. 国网郑州供电公司, 河南 郑州 450000; 2. 河南博慧方舟咨询发展有限公司, 河南 郑州 450000;
3. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 电流转移过程是电阻型故障限流器中的关键问题。针对基于真空开关与电阻并联的限流器中电流由真空电弧电流向并联限流电阻的转移特性进行研究。搭建了基于真空开关与限流电阻并联的试验研究平台, 采用高速CMOS相机拍摄电弧, 观测真空电弧转移过程中电弧发展变化。通过研究电流大小(5~15 kA)、限流电阻大小(10~4500 mΩ)、燃弧时间、电流频率等对电流转移时间、转移完成时刻电流等的影响, 获得了电流转移特性的数学描述。讨论了横向磁场对电流转移特性的影响, 为电阻型故障限流器的结构及优化奠定了基础。

关键词: 故障限流器; 电流转移; 真空电弧; 电弧电压

Research on the vacuum arc current commutation characteristic of the resistive fault current limiter

BAO Yuzhe¹, TAO Chunrong², MEI Zhiqiang², GE Guowei³

(1. State Grid Zhengzhou Power Supply Company, Zhengzhou 450000, China; 2. Henan Bohui Ark Consulting Development Co., Ltd., Zhengzhou 450000, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The current commutation process is a key performance factor in a resistive fault current limiter. The main aspect of the research is associated with the fact that the current commutating characteristic of the current can be diverted into the Current Limiting Resistor (CLR) from the Vacuum Circuit Breaker (VCB). The test platform based on the VCB and the CLR in parallel connection is established. A high-speed CMOS camera is used to investigate the development of the vacuum arc in the current commutating process. The influence of the current amplitude (5~15 kA), the CLR resistance (10~4500 mΩ), the arcing time, the Transverse Magnetic Field (TMF) and the current frequency on the time of the current commutation and the current at the moment of the completion transition is analyzed. The mathematical description of the vacuum arc commutating characteristic is obtained. The interaction between the vacuum arc and the TMF is discussed. This paper provides the foundation for the structure and parameter optimization of the resistive fault current limiter.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51977195 and No. 51777025).

Key words: fault current limiter; current commutation; vacuum arc; arc voltage

0 引言

近年来随着电网容量的增加, 故障电流随之增加, 目前的断路器无法满足开断短路故障大电流的需求, 故障限流技术可以有效地限制故障电流的发展, 是未来发展的趋势, 特别是超导故障限流器、快速故障限流器的发展, 为电力系统安全可靠运行提供了保障, 受到越来越多的关注^[1-7]。

目前主要的限流器的类型包括: 限流电抗器、

超导限流器、正温度系数电阻限流器、磁元件限流器、固态限流器, 混合型超导限流器、液态金属限流器, 电弧电流转移型故障限流器等^[8]。按照故障限流器的设计思路分为电流转移型故障限流和状态转换型限流器。状态转换型限流器如超导限流器、PTC限流器、液态金属限流器等, 在正常运行时限流器处于正常态, 阻抗较小, 而在故障发生时, 通过外部触发或者自触发方式限流器处于非正常状态, 阻抗较大, 进而起到限制故障电流的作用。电流转移型故障限流器如混合超导限流器, 电弧电流转移型限流器等, 是利用正常运行时电流通过较小阻抗的支路, 而在故障时, 通过各种措施使得电流

转移到较大阻抗支路, 进而实现故障限流。真空电弧电流转移型故障限流器在低压小电流领域得到应用^[9], Pedrow 研究了电阻型故障限流器中磁场参数、分流电容参数等对电流转移特性的影响规律^[10-11]。Emtage 引入了横向磁场加速电流转移^[12]。Kim 对 22.9 kV 配网故障限流器进行了研究, 其故障电流可以限制在 12.5 kA 以下^[13]。大连理工大学邹积岩等采用强迫过零方式加速真空开关熄灭电弧, 从而实现电流向限流支路快速转移^[14]。日本专家提出了混合型超导限流器, 采用超导线圈与真空开关串联, 超导线圈达到动作电流后产生斥力驱动真空开关分闸^[15]。在电流转移型故障限流器中, 电流由真空电弧向限流阻抗的转移成败决定了限流器的可靠性, 对电弧电流转移特性的深入研究至关重要^[16-22]。综上所述, 前人在电弧电流转移故障限流器已按照一定的研究, 但对电阻型故障电流器的电流转移特性, 尤其是燃弧参数、电阻大小、电流大小等对转移时间的影响规律缺乏细致、深入的研究。

本文首先分析了电阻型故障限流器中的真空电弧电流转移过程原理, 得到了其简化电路模型。搭建了真空开关与限流电阻并联的真空电弧电流转移特性试验研究平台, 研究了限流电阻、电流大小等对真空电弧电流转移过程的影响规律, 得到其数学描述并进行了验证, 讨论了真空电弧电流转移特性在电阻性故障限流器中的应用。

1 真空电弧电流转移过程原理

真空电弧电流转移型限流器的常见结构见图 1 所示, 其中图 1(a)为两次电流转移型限流器, 正常情况下, 电流主要由真空开关承担, 故障发生时, 电流由真空开关先转移到 GTO 上, 待转移完成, 关断 GTO, 电流由 GTO 支路转移到限流电阻上。图 1(b)为混合型超导故障限流器, 正常情况下, 电流由超导体和真空开关串联支路承担, 故障发生时, 超导体触发为非超导态, 电流开始由正常支路向限流支路转移, 随着电流的转移, 限流支路的驱动线圈驱动真空开关动作, 另一方面合闸线路支路开关, 正常支路真空开关熄灭电弧, 故障电流通过限流支路。图 1(c)为通过外加磁场调控使得电弧电压提高, 电流由真空开关转移到限流电阻支路。图 1(d)为强迫过零熄弧方式使得电流由真空开关完全转移到限流电阻支路。

通过分析上述基于真空电弧电流转移的限流器的工作过程, 其本质上是真空电弧与并联限流电阻之间的电流转移过程, 故图 1 中的四种真空电弧电流转移型限流器的电流转移过程可以等效为真空开

关与限流电阻并联的模型, 如图 2 所示, 图 2 中 VI 表示快速真空开关, R_{sh} 表示等效限流电阻, I 、 I_1 和 I_{sh} 分别为主电路电流、真空开关支路电流和限流支路电路。图 1(a)中的电流由真空开关向电力电子开关的转移过程, 电力电子开关导通阻抗可以等效为 $m\Omega$ 级电阻, 图 1(b)和图 1(c)主要通过其他方式改变电弧电阻。图 1(d)通过高频反向电流制造电流零点, 在过零前, 电流将会转移到限流电阻支路, 主要区别是高频电流的转移特性。

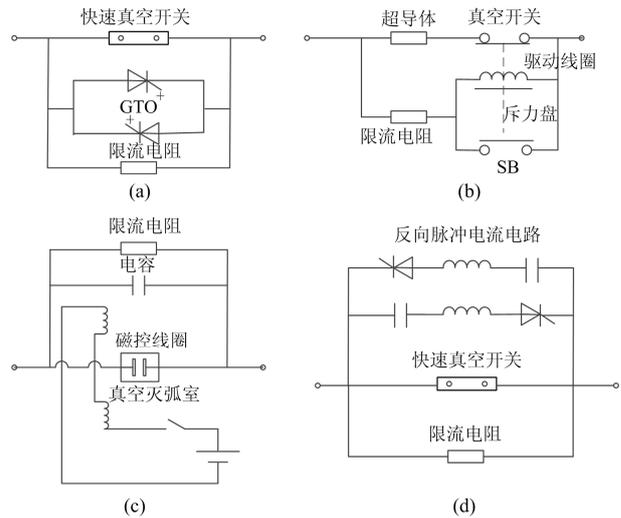


图 1 电流转移型限流器结构

Fig. 1 Structure of the current commutation type FCL

基于图 2 的简化电弧电流转移模型得到电流转移过程的原理图如图 3 所示, 其中真空开关分闸时刻为 t_0 , 真空电弧熄灭时刻为 t_e , Δt_1 和 Δt_2 分别表示真空电弧完全承受电流时间和限流电阻完全承受电流时间。 I_{shm} 表示在电流转移过程中转移电流完成时刻电流值。正常状态时, 真空开关处于导通状态, 电流主要由真空开关承担, 当真空开关触头在 t_0 时刻开始分离, 真空电弧产生, 电流开始向由真

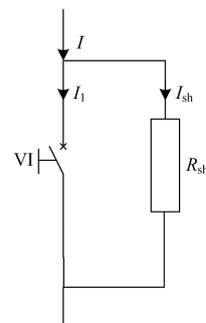


图 2 真空电弧电流转移型故障限流器等效电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of vacuum arc commutation type FCL

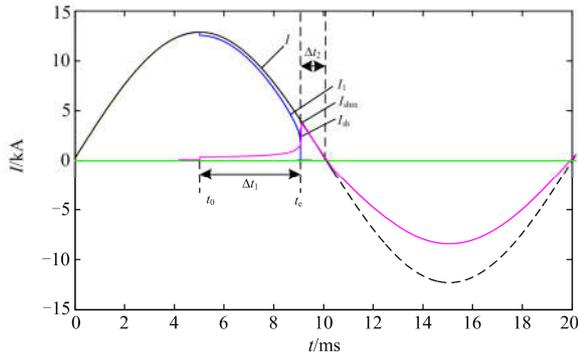


图3 电流转移过程

Fig. 3 Process of the vacuum arc current commutation

空开关向限流电阻支路转移。随着电流转移过程进行,真空开关电弧电流越来越小,直至 t_c 时刻,真空开关电弧完全熄灭,主电流完全由限流电阻支路承担,在第二个周期由于限流电阻支路的作用,故障电流被限制。本文重点研究第一周期内的电弧电流转移特性。

2 电流转移特性试验研究

2.1 试验研究平台

试验研究平台如图4所示,电流源由电容器组 C_i 和电抗器 L_i 构成,电流源频率为50 Hz,最大电流为20 kA。试验真空灭弧室为透明真空灭弧室,便于采用高速相机拍摄电弧发展过程,CT₁、CT₂和CT₃分别用于测量真空开关支路、限流支路和主电路的电流。真空开关由永磁操动机构驱动,平均分闸速度为1 m/s。

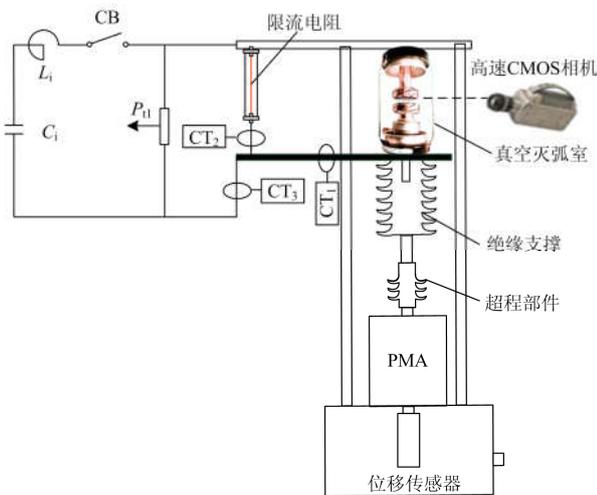


图4 试验研究平台

Fig. 4 Test platform

实验过程中限流电阻选取的范围为10~4500 mΩ,故障电流为工频电流,故障电流峰值在5~15 kA之

间,燃弧时间范围为1~6 ms。分别改变上述条件,研究限流电阻、故障电流和燃弧时间对真空电弧电流转移时间、转移完成时刻电流峰值等参数的影响规律。

2.2 电流转移特性试验结果

1) 燃弧时间对电弧电流转移的影响

在主电流峰值为6.5 kA和限流电阻为10 mΩ保持不变的条件下,改变燃弧时间由1 ms到6 ms,观测电流转移过程的规律。得到的燃弧时间对电流转移过程的影响规律如图5所示,真空电弧电压在20 V左右,随着主电流减小,真空电弧电压缓慢下降。改变燃弧时间,真空电弧电流转移完成时刻基本不变,转移完成时刻限流电阻承担的最大电流为1.22 kA,完成承受电流的时间为1.5 ms。

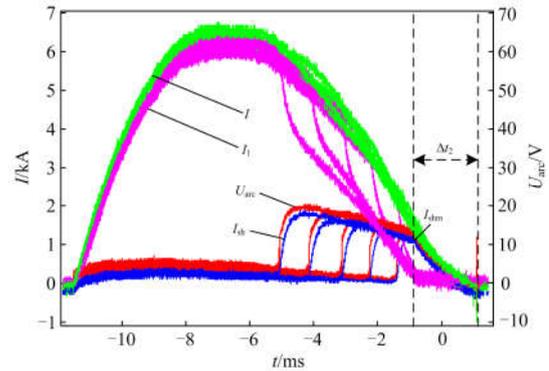


图5 燃弧时间对真空电弧电流转移的影响

Fig. 5 Influence of arcing time on the current commutation

在电流小于10 kA时,真空电弧属于扩散电弧模式,纵向磁场作用下的真空电弧电压与电流基本成线性关系,拟合得到的结果如式(1)所示。

$$U_{\text{arc}} = aI_1 + b \quad (1)$$

式中: U_{arc} 表示电弧电压; I_1 表示电弧电流; a 为弧阻比例系数; b 为常数。

根据图2简化电弧电流转移模型进行电路分析可以得到限流电阻两端的电压 U_{sh} 见式(2),支路电流和总电流满足式(3)。由式(1)一式(3)计算得到开关支路电弧电流和限流支路电阻电流分别见式(4)和式(5)。根据实验结果拟合得到 a 和 b 分别为 -0.0004Ω 和18 V,在转移过程中电弧电压基本保持不变,随着电流转移过程的进行,真空开关支路电流逐渐减小,其等效弧阻增大,进一步加速电流先限流电阻支路转移,转移完成时刻限流电阻承受的电流为1800 A。转移完成时刻的电流主要由电弧电压和限流电阻决定,与燃弧时间关系不大。

$$U_{\text{sh}} = I_{\text{sh}} R_{\text{sh}} \quad (2)$$

$$I_1 + I_{\text{sh}} = I \quad (3)$$

$$I_1 = \frac{IR_{sh} - b}{a + R_{sh}} = I - \frac{b}{R_{sh}} \quad (4)$$

$$I_{sh} = \frac{b}{R_{sh}} \approx 1800 \text{ A} \quad (5)$$

2) 电流对真空电弧电流转移过程的影响

改变电流大小由 5 kA 到 15 kA，限流电阻和燃弧时间保持不变，研究电流大小对转移过程的影响如图 6 所示，其中图 6(a)为转移完成时刻限流电阻承担的电流 I_{shm} 随电流大小变化规律。图 6(b)为限流电阻完全承受主电流阶段时间 Δt_2 受电流大小影响规律。随着电流的增加，转移完成时刻限流电阻承担的电流线性减小，而限流电阻完全承受电流阶段时间非线性减小，具体拟合结果见图 6。

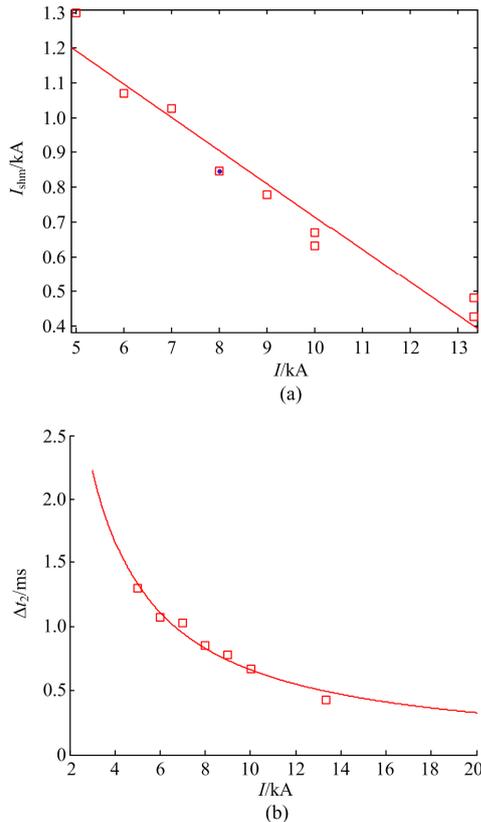


图 6 电流大小对转移过程的影响规律

Fig. 6 Influence of current on vacuum arc commutation process

3) 转移电阻对真空电弧电流转移的影响

在保持燃弧时间不变，主电流选取范围为 5~15 kA，分别选取限流电阻阻值从 10~4500 mΩ，得到转移完成时刻电流和限流电阻完成承受电流时间等参数受电阻大小的影响规律。

(1) I_{shm} - R_{sh} 关系

转移完成时刻电流 I_{shm} 与限流电阻之间的关系如图 7 所示，随着电流的增加，转移完成时刻电流

基本线性变化。限流电阻对转移完成时刻电流的影响远大于电流大小的影响。随着限流电阻的增加，电流大小对转移过程的影响逐渐减小，但电阻大于 88 mΩ时，基本可以忽略电流大小的影响。通过计算电流为 5~15 kA 变化时不同限流电阻的转移完成时刻电流的平均值获得不同限流电阻对应的转移完成时刻电流值得到限流电阻大小对转移完成时刻电流值的影响规律如图 8 所示，随着限流电阻的增加，转移完成时刻电流值迅速下降，当限流电阻大于 100 mΩ 时，转移完成时刻电流值已小于 100 A。拟合上述结果可以得到转移完成时刻电流值与限流电阻大小的关系见式(6)。

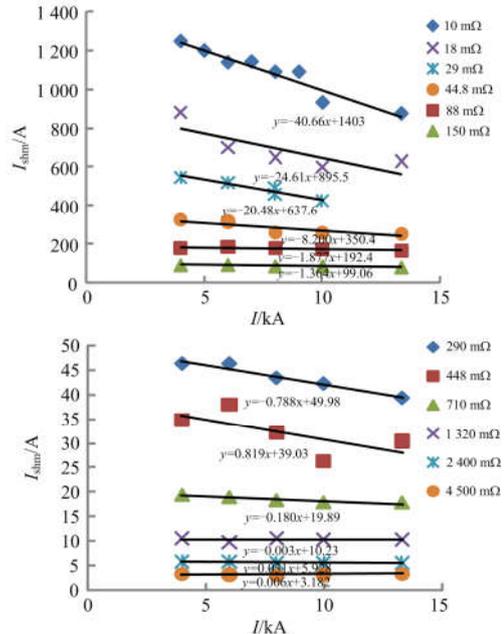


图 7 转移完成时刻电流值受电阻及电流大小影响

Fig. 7 Influence of current limiting resistor and main current on I_{shm}

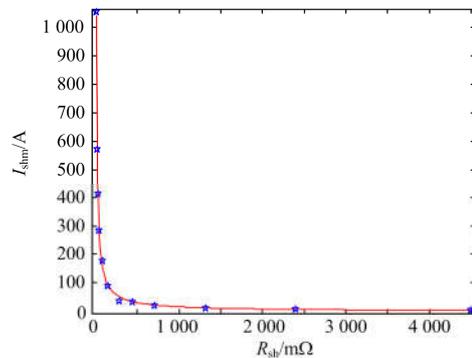


图 8 转移完成时刻电流与限流电阻大小的关系

Fig. 8 Relationship between I_{shm} and R_{sh}

$$I_{shm} = 8167 \cdot R_{sh}^{-0.8943} + (-1.223) \quad (6)$$

(2) Δt_2 - R_{sh} 关系

根据上述同样的实验方法得到的限流电阻完全承受电流时间 Δt_2 与限流电阻大小、电流大小的关系如图 9 所示, 随着限流电阻的增加, Δt_2 减小。

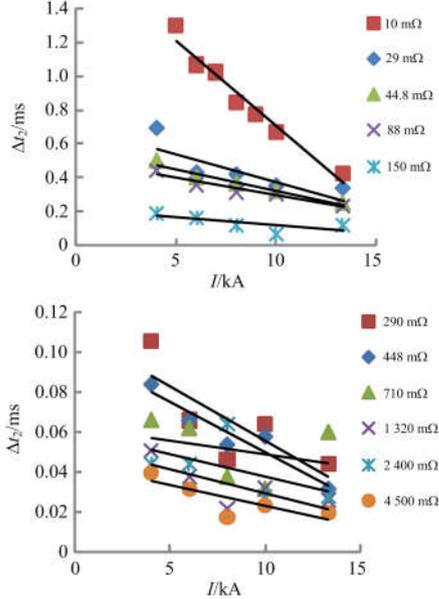


图 9 限流电阻完全承受电流时间受电阻大小的影响

Fig. 9 Influence of current limiting resistor and main current on Δt_2

通过求取在电流 5~15 kA 时不同限流电阻的 Δt_2 平均值, 通过数据拟合得到限流电阻完全承受电流时间 Δt_2 和限流电阻大小 R_{sh} 的关系见式(7)。

$$\Delta t_2 = a1 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b1}{c1}\right)^2} + a2 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b2}{c2}\right)^2} \quad (7)$$

式中: Δt_2 单位为 ms; R_{sh} 单位为 $m\Omega$; 拟合得到的相关系数 $a1$ 、 $b1$ 和 $c1$ 分别为 2.116×10^{15} 、 -1930 和 324.3 ; 而 $a2$ 、 $b2$ 和 $c2$ 分别为 3.283 、 -1.726×10^{-4} 和 9605 。

2.3 电流转移特性数学描述

在限流电阻范围为 10~4500 $m\Omega$ 时, 限流电阻完成承受电流的时间远小于 1.5 ms, 可以满足式(8)的简化处理, 进而得到限流电阻完成承受电流时间与电流频率成反比关系, 式(7)加入频率的影响可以得到式(9), 其中 ω_0 表示工频频率 50 Hz。

$$I_{shm} = I_m \sin(\omega \Delta t_2) \approx I_m \omega \Delta t_2 \quad (8)$$

$$\Delta t_2 = \frac{w_0}{w} \left(a1 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b1}{c1}\right)^2} + a2 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b2}{c2}\right)^2} \right) \quad (9)$$

前面已得到电流大小对转移过程的影响基本成线性关系, 式(9)中得到的结果是在电流为 5~15 kA 求取平均值得到的电流转移特性, 即在此对应的电

流为 10 kA 时的电流转移特性, 引入电流大小的影响因素可以得到式(10), 其中 I_{m0} 为 10 kA。

$$\Delta t_2 = \frac{I_{m0}}{I_m} \frac{w_0}{w} \left(a1 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b1}{c1}\right)^2} + a2 \cdot e^{-\left(\frac{R_{sh}-b2}{c2}\right)^2} \right) \quad (10)$$

3 讨论

3.1 横向磁场对真空电弧电流转移特性影响

横向磁场可以增加电弧电压使得小电流下电弧的不稳定, 有利于电弧电流转移过程, 前人在低压直流开断中已研究了横向磁场对直流小电流开断的影响, 并通过磁流体模型分析了磁场对电弧等离子体的作用机理, 描述了离子运动轨迹, 等离子体损失等影响。Klajn A 通过高速相机拍摄电弧研究扩散电弧(100~600 A)在横向磁场下的电弧运动及形态。电弧等离子体不仅仅受横磁强度影响, 也受电流大小, 触头距离的影响。电弧电压与横向磁场强度并不成正比。前人的研究主要在直流小电流, 针对真空电弧先承受较大电流后变为扩散电弧的过程并没有考虑。

在电流为 10 kA, 并联限流电阻为 29 $m\Omega$, 真空开关在 5.5 ms 分闸, 加入横向恒定磁场 50 mT 时, 利用高速 CMOS 相机得到电弧发展过程如图 10 所示, 由电弧形态可以看出, 电弧在横向磁场的作用下向右侧偏移, 特别是电弧熄灭阶段, 阴极斑点最后在偏离中心位置右侧熄灭。而随着电弧电流的减小, 电弧熄灭过程比工频电弧熄灭过程加快, 这是由于注入电流随着限流电阻分流的增加, 电流下降率加快。通过横向磁场可以加速电流转移, 电弧的稳定性受到恒定横磁场的作用而失去稳定性的阈值电流与磁场、真空间隙的关系可以描述为式(11), 由此可知, 电弧不稳定性电流阈值与真空间隙 d , 横向磁场强度 Br , 电弧面积 S 有关, 增加磁场可以提高电流不稳定性阈值, 进而加速电流转移。

$$I_{cr} = 6.0 \cdot 10^{-2} dB_r^2 S \quad (11)$$

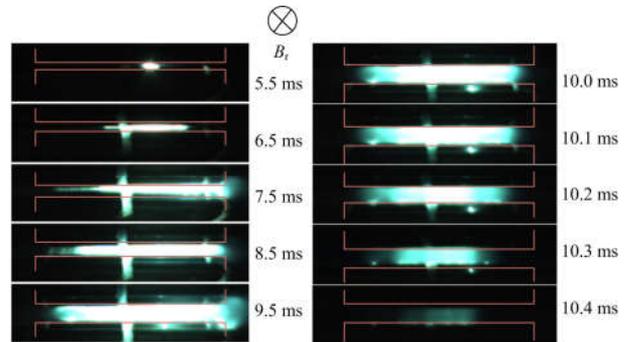


图 10 横向磁场作用下电弧图像

Fig.10 Arc photos with TMF

3.2 电流转移特性应用

本文研究得到的真空开关与并联电阻之间的电流转移特性是直流小电流开关、故障限流器参数优化设计和混合式开关技术的共性问题^[23-26]，或者通过简化分析可以等效为本文的电流转移模型。针对不同的应用背景应该引入不同的变量以便适用于不同的领域，在直流小电流开断中应该引入分流电容替代限流电阻，进而分析在分流电容情况下的电流转移特性，在混合式开关技术中，需要根据电力电子开关的导通阻抗特性进行相应的修正分析，在基于电弧电流转移的故障限流器中采用本文得到的特性进行分析是可行的。

4 结论

本文分析了电阻型故障限流器的工作原理和过程，得到了其共性的基础模型—简化的电弧电流转移等效模型。

通过试验研究了电流幅值与频率、燃弧时间、限流电阻参数对电流转移特性的影响规律，通过得到的规律，得到电弧电流转移特性的数学描述。

讨论了电流转移特性在横向磁场作用下的特性，通过引入电流不稳定性阈值描述横向磁场对电流转移特性的影响。最后对电流转移特性为直流开关和混合式开关技术的发展提供了可参考的依据。

参考文献

- [1] ZHANG Fan, MU Longhua. New protection scheme for internal fault of multi-microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(2): 159-170. DOI: 10.1186/s41601-019-0127-3.
- [2] 张涛, 张东方, 王凌云, 等. 基于改进小生境粒子群算法的主动配电网优化重构[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2018, 31(3):135-140.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun, et al. Optimal reconfiguration of active distribution network based on improved niche particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2018, 31(3): 135-140.
- [3] 姚钢, 茆中栋, 殷志柱, 等. 楼宇直流配电系统关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 156-170.
YAO Gang, MAO Zhongdong, YIN Zhizhu, et al. Research review on key technologies of building DC power distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 156-170.
- [4] 黄静, 刘江峰, 赵志强, 等. 组串式并网逆变器运行性能研究[J]. 信阳师范学院学报: 自然科学版, 2018, 31(4): 140-146.
HUANG Jing, LIU Jiangfeng, ZHAO Zhiqiang, et al. Research on operation performance of series grid connected inverter[J]. Journal of Xinyang Normal University: Natural Science Edition, 2018, 31(4): 140-146.
- [5] 何常红, 方怡. 含冗余保护的超高速故障限流器设计与试验研究[J]. 电气应用, 2019, 38(3): 77-83.
HE Changhong, FANG Yi. Design and experimental study of ultra-high speed fault current limiter with redundant protection[J]. Electrical Application, 2019, 38(3): 77-83.
- [6] 田鑫, 高亮, 张俊峰. 基于电压源换流器的直流配电限流方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 62-68.
TIAN Xin, GAO Liang, ZHANG Junfeng. Study on DC power distribution current limit scheme based on voltage source converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 62-68.
- [7] STRÜMLER R, SKINDH J, GLATZ-REICHENBACH J, et al. Novel medium voltage fault current limiter based on polymer PTC resistors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 425-430.
- [8] 张宝群, 王邦柱. 电阻型高温超导限流器研究进展[J]. 电气应用, 2013, 32(增刊 1): 608-611.
ZHANG Baoqun, WANG Bangzhu. Research progress of resistive high-temperature superconductor current limiter[J]. Electrical Application, 2013, 32(S1): 608-611.
- [9] 张谢天, 庄劲武, 高海林, 等. 直流混合型超导限流器强迫换流方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 63-67.
ZHANG Xietian, ZHUANG Jinwu, GAO Hailin, et al. Study on forced current conversion method of dc hybrid superconducting current limiter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 63-67.
- [10] PEDROW P D, BURRAGE L M, SHOHET J L. Performance of a vacuum arc commutating switch for a fault-current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983 (5): 1269-1277.
- [11] PEDROW P D, BURRAGE L M, SHOHET J L. Plasma density measurements using a double Langmuir probe in a prototype vacuum ARC fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981(6): 2740-2745.
- [12] EMTAGE P R, KIMBLIN C W, GORMAN J G, et al. Interaction between vacuum arcs and transverse magnetic fields with application to current limitation[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1981, 4(4): 314-319.
- [13] KIM M J, CHOE W, BANG S H, et al. Development of a

- fault current limiter for 22.9 kV distribution power line[C] // 2013 2nd International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST), October 20-23, 2013, Matsue, Japan: 1-4.
- [14] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51.
CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyan. Study on a new fault limiter (FCL) with series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [15] FISHER L M, ALFEROV D F, AKHMETGAREEV M R, et al. Superconducting fault current limiter for railway transport[J]. Physics of Atomic Nuclei, 2015, 78(14): 1654-1657.
- [16] 袁召, 尹小根, 潘垣, 等. 采用高耦合度分裂电抗器的并联型断路器均流过程研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 2008-2014.
YUAN Zhao, YIN Xiaogen, PAN Yuan, et al. Study on current sharing process of shunt circuit breaker using high coupling split reactor[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 2008-2014.
- [17] 龚珺, 诸嘉慧, 方进, 等. 电阻型高温超导限流器暂态电阻特性分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(9): 2130-2138.
GONG Jun, ZHU Jiahui, FANG Jin, et al. Analysis of transient resistance characteristics of resistance-type high-temperature superconductor current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(9): 2130-2138.
- [18] 陆海强, 王金跃, 钱进. 模块化限流式统一潮流控制器的改进调制与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 136-142.
LU Haiqiang, WANG Jinyue, QIAN Jin. Study on improved modulation and control strategy of modular limited current unified power flow controller[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 136-142.
- [19] LIAO Minfu, GE Guowei, DUAN Xiongying, et al. Investigating influence of the magnetic arc blow in multi-break vacuum circuit breakers[J]. Physics of Plasmas, 23(12).
- [20] 黄金强, 廖敏夫, 葛国伟, 等. 直流微网混合式零电压开关直流断路器[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3148-3155.
HUANG Jinqiang, LIAO Minfu, GE Guowei, et al. DC micro-grid hybrid zero-voltage switch dc circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3148-3155.
- [21] 葛国伟, 程显, 廖敏夫, 等. 基于电流转移特性和磁吹的新型弧后电流测量装置研制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4288-4297.
GE Guowei, CHENG Xian, LIAO Minfu, et al. Development of a new back-arc current measurement device based on current transfer characteristics and magnetic blowing[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4288-4297.
- [22] 黄金强, 廖敏夫, 葛国伟, 等. 直流微网混合式直流断路器电流转移特性研究[J]. 高压电器, 2017, 53(3): 119-125.
HUANG Jinqiang, LIAO Minfu, GE Guowei, et al. Study on current transfer characteristics of dc micro-grid hybrid dc circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 119-125.
- [23] AMIR K U, LEE J G, AMIR F, et al. A novel model of HVDC hybrid-type superconducting circuit breaker and its performance analysis for limiting and breaking DC fault currents[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2015, 25(6): 1-9.
- [24] 田宇, 王利, 田阳, 等. 直流断路器用快速开关多场联合仿真优化方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 55-62.
TIAN Yu, WANG Li, TIAN Yang, et al. Multi-field simulation optimization method for rapid switching for dc circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 55-62.
- [25] 葛国伟, 廖敏夫, 程显, 等. 基于电流转移的断路器弧后电流测量方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3156-3163.
GE Guowei, LIAO Minfu, CHENG Xian, et al. Measurement method of back-arc current of circuit breakers based on current transfer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3156-3163.
- [26] KESHAVARZI D, FARJAH E, GHANBARI T. A hybrid DC circuit breaker and fault current limiter with optional interruption capability[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2330-2338.

收稿日期: 2019-09-18; 修回日期: 2019-04-23

作者简介:

包宇喆(1989—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事变电一次检修工作;

陶春蓉(1978—), 女, 本科, 高级工程师, 主要从事输变电工程设计及技术研究工作;

梅志强(1976—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事输变电工程设计及施工技术研究工作。

(编辑 周金梅)