

混合式直流断路器内部关键参数对电弧电流转移特性的影响研究

王德全, 王汝凡, 邱 军, 冯泽铭, 段雄英, 廖敏夫

(大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 真空电弧电流转移是自然换流型混合式直流断路器开断过程中的一个重要组成部分。文中通过建立真空电弧电流转移的理论分析模型,得出影响真空电弧电流转移的主要因素为真空电弧电压、内部杂散电阻电感参数和电力电子器件的串并联结构。实验方面,通过改变电力电子开关中电力电子器件的串联或并联个数研究了电力电子器件的串并联结构对真空电弧电流转移特性的影响,通过改变电力电子开关中杂散电感或电阻的数值和所处位置研究了内部杂散电阻电感参数对真空电弧电流转移特性的影响。最后,探究了促进电弧电流转移的方法。本研究将为混合式直流断路器的结构设计和参数优化提供理论依据。

关键词: 混合式直流断路器; 电弧电流转移; 真空电弧电压; 杂散参数

Research on Influence of Key Parameters in Hybrid DC Circuit Breakers on Arc Current Commutation Characteristics

WANG Dequan, WANG Rufan, QIU Jun, FENG Zeming, DUAN Xiongying, LIAO Minfu

(School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: Vacuum arc current commutation is an important part in the interruption process in natural commutated hybrid DC circuit breaker(NHCB). In this paper, it is concluded through setting up the vacuum arc current commutation model of NHCB that the main factors influencing vacuum arc current commutation are vacuum arc voltage, internal stray resistance and inductance parameters and the series-parallel structure of power electronic devices. From the point of view of experiment, the influence of series-parallel structure of power electronic devices on the characteristics of arc current commutation is studied by changing the number of power electronic devices in series or parallel in the power electronic switch, and the influence influence of internal stray resistance and inductance parameters on the characteristics of arc current commutation is studied by changing the value and position of stray inductance or resistance in power electronic switches. Finally, the method to promote arc current commutation is explored. This research can provide theoretical foundation for the structure and parameter optimization of NHCB.

Key words: hybrid DC circuit breaker; arc current commutation; vacuum arc voltage; stray parameters

0 引言

随着 GTO、IGBT、IGCT 和 IEGT 等全控性电力电子器件的发展,采用电力电子技术的混合式直流断路器已经成为直流开断的主要技术方案和研究

热点^[1-9]。混合式直流断路器主要由电力电子开关和机械开关并联而成,其结合了电力电子开关和机械开关的优点,具有载流量大、导通损耗低、开断速度快和无需冷却设备的特点^[10-13]。

自然换流型混合式断路器在 1993 年日本召开

收稿日期:2023-11-15; 修回日期:2024-01-02

基金项目:国家自然科学基金(51777025);中央高校基本科研业务费基金(DUT19ZD219)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51777025), Fundamental Research Funds for the Central Universities(DUT19ZD219).

的电力能源会议上首次被提出。1994年,GENJI等人率先研制了应用于400 V直流电网的混合式限流开关^[14]。2001年,荷兰代尔夫特理工大学开发了基于IGBT的600 V/6 kA混合式直流断路器^[15]。2011年, Luca NOVELLO, Fabio BALDO 等人在前人的基础上,利用快速机械开关和IGCT串并联技术,开发了1 kV/10 kA混合式直流断路器^[16]。2016年,清华大学陈政宇等人通过搭建4个IGCT串联的电力电子开关支路,设计并实现了10 kV自然换流型直流混合断路器^[17]。

真空电弧电流转移作为自然换流型混合式直流断路器开断过程中的重要一环,其持续时间将直接影响到混合式直流断路器的开断时间和燃弧时间^[18-19]。目前已有较多文献对电弧电流转移特性进行了研究^[20-22],但缺少关于内部关键参数对电弧电流转移时间影响规律的研究,同时对促进电弧电流转移的研究也较少。针对已有研究的不足,文中搭建了电弧电流转移实验平台,通过实验探究了电力电子开关中电力电子器件的串并联结构和内部杂散电阻电感参数对电弧电流转移时间的影响规律;通过改变电力电子器件并联个数的方法改变电力电子开关导通压降,探究了降低电力电子开关导通压降对电弧电流转移的促进作用。

1 混合式直流断路器电弧电流转移原理

自然换流型混合式直流断路器主要由电力电子开关、机械开关和ZnO避雷器并联而成。其中电力电子开关主要由全控性电力电子器件经过串并联组成,常用的全控型电力电子器件主要有GTO、IGCT、IGBT和IEGT等^[23-24]。

根据文[25-26]可知,自然换流型混合式直流断路器的电弧电流转移模型见图1。图1中: U_{arc} 为真空电弧电压; U_s 为电力电子开关导通压降; L_s 、 L_m 分别为电力电子开关和机械开关的等效电感; I_n 、 I_s 、 I_m 分别为流过混合式直流断路器、电力电子开关和机械开关的电流。根据图1所示模型,可得到式(1)

$$U_{arc} = (L_s + L_m) \frac{dI_s}{dt} + U_s \quad (1)$$

对于GTO、IGCT、IGBT和IEGT等全控型电力电子器件,其导通压降 U_{ce} 与集电极电流 I_c 的关系式见式(2)^[27-28]

$$U_{ce} = U_{ce0} + R_e I_c \quad (2)$$

式(2)中: U_{ce0} 为电力电子器件的导通阈值电压; R_e 为电力电子器件的导通电阻。由于电力电子开关是电力电子器件经过串并联组成的,忽略各电力电

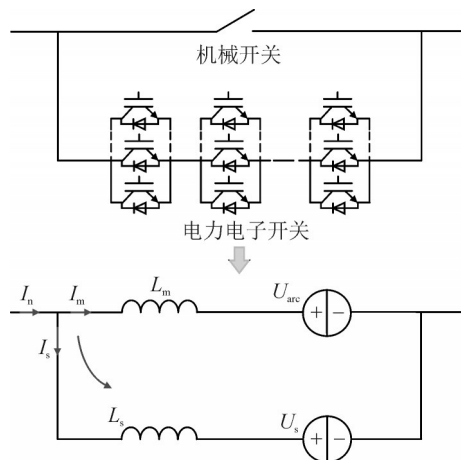


图1 混合式直流断路器电弧电流转移模型

Fig. 1 The arc current commutation model of NHCB

子器件流过电流的差异,则电力电子开关的导通压降和等效电感见式(3)

$$\begin{cases} U_s = MU_{ce0} + \left(\frac{M}{N}R_e + R_l\right)I_s \\ L_s = L_l + \frac{M}{N}L_e \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: M 和 N 分别为电力电子器件串联和并联个数; R_l 为电力电子开关线路电阻; L_l 为电力电子开关线路电感; L_e 为电力电子器件寄生电感。

求解式(1)和式(3),可进一步得到关于电弧电流转移速度的关系表达式,见式(4)。由式(4)可知,电弧电压、转移回路内部杂散电阻电感参数、电力电子器件串并联结构、电力电子器件的阈值电压和电力电子器件的导通电阻是影响电弧电流转移速度的主要参数。同时,为了保证电弧电流转移成功,需保证 $dI/dt > 0$ 。求解 $dI/dt > 0$ 得到电弧电流转移的制约公式见式(5)。

$$\frac{dI_s}{dt} = \frac{U_{arc} - \left[MU_{ce0} + \left(\frac{M}{N}R_e + R_l\right)I_s\right]}{L_s + L_l + \frac{M}{N}L_e} \quad (4)$$

$$U_{arc} - \left[MU_{ce0} + \left(\frac{M}{N}R_e + R_l\right)I_s\right] > 0 \quad (5)$$

2 实验平台

电弧电流转移实验平台主要由LC振荡回路、实验控制开关 K_m 和混合式直流断路器组成,见图2。LC振荡回路由电容 C_i 和电感 L_i 组成,主要用于产生实验所需的大电流。实验控制开关 K_m 主要负责将电流引入混合式直流断路器。 K_m 为混合式直流断路器的机械开关。混合式直流断路器的电力电子开关主要由IGBT串并联模块组成,其中 M 和 N 分别为IGBT串并联模块的串联和并联个数。本实验选

用的IGBT型号为CM1000HA-24H,其额定电流和额定电压分别为1 kA和1.2 kV。本实验通过在电力电子开关中添加阻抗来改变其杂散电阻电感参数。在电力电子开关主回路添加大小为 Z_a 的阻抗,其电阻分量和电感分量大小分别为 R_a 和 L_a 。在每个IGBT并联支路添加大小均为 Z_p 的阻抗,其电阻分量和电感分量分别为 R_p 和 L_p 。 C_{t1} 和 C_{t2} 为电流传感器,分别用于采集流过机械开关和电力电子开关的电流。 P_1 为电压传感器,用于采集真空电弧电压。

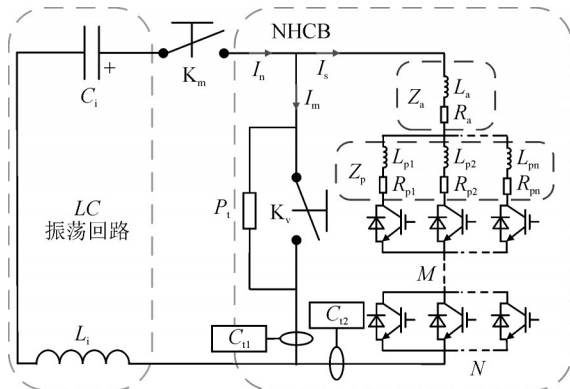


图2 电弧电流转移实验平台

Fig. 2 Arc current commutation test platform

3 实验结果

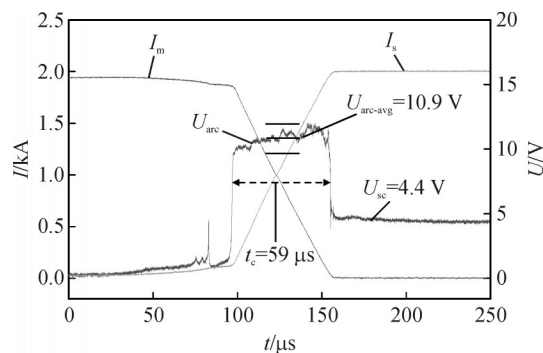
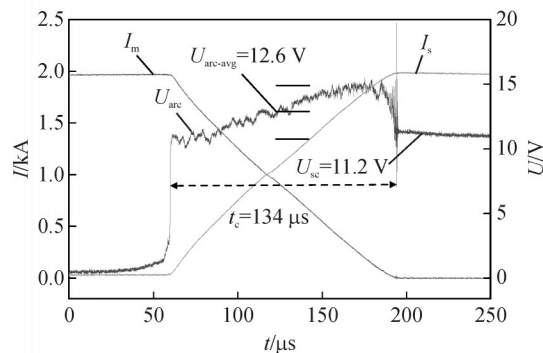
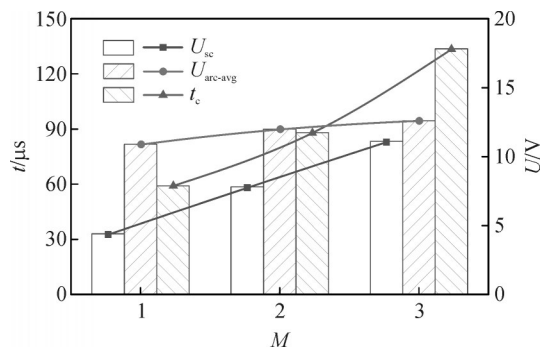
3.1 电力电子器件串并联对电弧电流转移特性影响

3.1.1 电力电子器件串联对电弧电流转移特性影响

由于单个电力电子器件的电压等级有限,通常采用电力电子器件串联的方式来提升电力电子开关的电压等级。为探究电力电子器件串联个数对电弧电流转移时间的影响规律,进行如下实验。

对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $Z_a=0$, $Z_p=0$, $N=1$,电弧电流转移过程中 I_n 约为2 kA。在以上实验配置条件下,当IGBT的串联个数 M 分别为1和3时,实验得到的电弧电流转移波形分别见图3(a)、(b)。图3中: $U_{arc-avg}$ 为电弧电流转移过程中电弧电压最大值和最小值的平均值; U_{sc} 为电弧电流转移完成时电力电子开关的导通压降。 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随串联个数的变化规律见图4。由图4可知,IGBT串联个数 M 由1增加到3时,电弧电流转移时间 t_c 由59 μs 增加到134 μs ,平均电弧电压 $U_{arc-avg}$ 由10.9 V变化为12.6 V,电弧电流转移完成时电力电子开关的导通压降 U_{sc} 由4.4 V增加到11.2 V。参数 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随 M 的变化情况见图4。由图4可知, t_c 随 M 的增加而增加,且增加速度越来越快; $U_{arc-avg}$ 和 U_{sc} 均随 M 的增加而增加,但后者的增加速度明显要快。

在以上实验配置条件下,当IGBT的串联个数 M

(a) M 取值为1(b) M 取值为3图3 M 取值为1和3时的电弧电流转移波形Fig. 3 Waveforms of arc current commutation when the M is 1 and 3图4 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随串联个数的变化曲线Fig. 4 Curve of t_c , U_{sc} and $U_{arc-avg}$ with different series numbers

为4时,实验得到的电弧电流转移波形见图5。由图5可知,在 t_0 时刻电力电子开关导通压降 U_s 和电弧电压 U_{arc} 相等,电弧电压出现高频振荡,电弧电流转移停止,导致电弧电流转移过程无法完成,这与式(5)所示电弧电流转移条件相符合。故在电弧电流转移过程中,必须确保电弧电压大于电力电子开关导通压降,否则会导致电弧电流转移失败。

对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $Z_a=0$, $Z_p=0$, $N=1$ 。在以上实验配置条件下,当IGBT的串联个数 M 分别为1、2、3时, t_c 随 I_n 的变化曲线见图6。由图6可知, M 分别为1、2、3时, t_c 均随 I_n 的增加而增

加,但随着 I_n 的增加,三者电弧电流转移时间的差距越来越大。

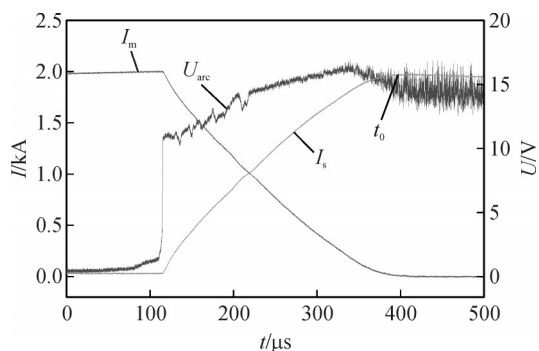


图5 M 取值为4时的电弧电流转移波形

Fig. 5 Waveforms of arc current commutation when the M is 4

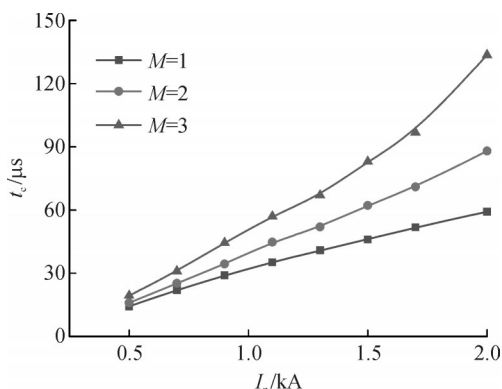


图6 不同IGBT串联个数下 t_c 随 I_n 的变化曲线

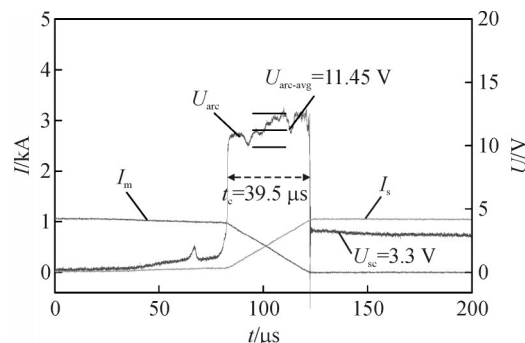
Fig. 6 The curve of t_c with I_n under different IGBTs in series

3.1.2 电力电子器件并联对电弧电流转移特性影响

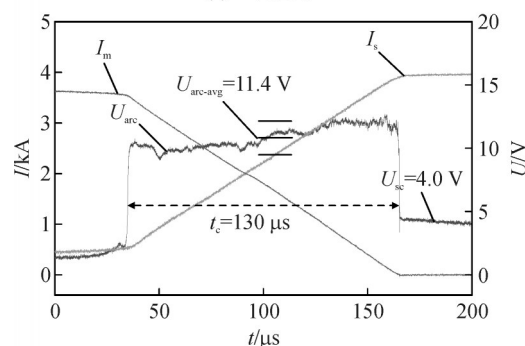
由于单个电力电子器件的电流容量有限,通常采用电力电子器件并联的方式来提升电力电子开关的电流容量。文中选用IGBT的额定容量为1 kA,那么 N 个此类型IGBT并联后的额定容量为 N kA。为探究采用电力电子器件并联来提升电流容量情况下,电力电子器件并联个数对电弧电流转移时间的影响规律,进行如下实验。

对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $Z_a=0$, $Z_p=0$, $M=1$,电弧电流转移过程中 I_n 的取值与IGBT的并联个数 N 相关,约为 N kA。在以上实验配置条件下,当IGBT的并联个数 N 分别为1和4时,实验得到的电弧电流转移波形分别见图7(a)、(b)。由图7可知,IGBT并联个数 N 由1增加到4时,电弧电流转移时间 t_c 由39.5 μ s增加到130 μ s,平均电弧电压 $U_{arc-avg}$ 由11.45 V变化为11.4 V;电弧电流转移完成时电力电子开关的导通压降 U_{sc} 由3.3 V增加到4.0 V。参数 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随 N 的变化曲线见图8。由图8可知, t_c 随 N 的增加而近似线性增长, $U_{arc-avg}$ 随 N 的增加

而基本不变; U_{sc} 也随 N 的增加而近似线性增长,但增长较为缓慢。其中 U_{sc} 的增长主要由电力电子开关主回路导通压降增加造成的,理想状态下,若电力电子开关主回路杂散电阻参数为零,则 U_{sc} 将基本保持不变。



(a) N 取值为1



(b) N 取值为4

图7 N 取值为1和4时的电弧电流转移波形

Fig. 7 Waveforms of arc current commutation when the N is 1 and 4

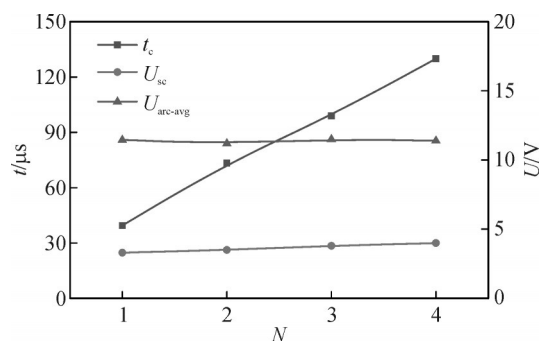


图8 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随并联个数的变化曲线

Fig. 8 Curve of t_c , U_{sc} and $U_{arc-avg}$ with different parallel numbers

3.2 内部杂散参数对电弧电流转移特性影响

由于电力电子开关内部电力电子器件通常采用串并联的方式,其内部连接较为复杂,不可避免的带来一定的杂散电阻和电感。为探究电力电子开关内部杂散电阻电感参数对电弧电流转移时间的影响规律,对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $Z_p=0$, $M=1$, $N=1$,电弧电流转移过程中 I_n 约为2 kA。在以上实验配置条件下,当 $L_a=0$ μ H时,通过

实验得到参数 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随 R_a 的变化曲线分别见图9。由图9可知, t_c 随 R_a 的增加而增加,且增加速度越来越快; $U_{arc-avg}$ 和 U_{sc} 均随 R_a 的增加而增加,但后者的增加速度明显要快。同时,由式(5)和图5可知,电弧电流过程中 U_s 应始终小于 U_{arc} ,故 R_a 不易过大,否则会导致电弧电流转移无法完成。

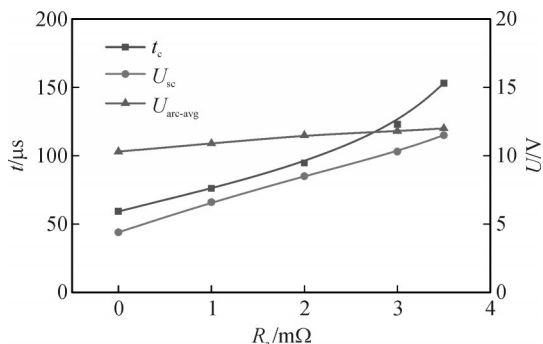


图9 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随杂散电阻的变化曲线

Fig. 9 Curve of t_c , U_{sc} and $U_{arc-avg}$ with different stray resistances

在以上实验配置条件下,当 $R_a=2\text{ m}\Omega$ 时,通过实验得到参数 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随 L_a 的变化曲线分别见图10。由图10可知, t_c 随 L_a 的增加而近似线性增长, U_{sc} 随 L_a 的增加而基本保持不变; $U_{arc-avg}$ 随 L_a 的增加而增加,但增加速度越来越小。故添加电感会导致电弧电流转移速度的下降,但不会导致电弧电流的失败。

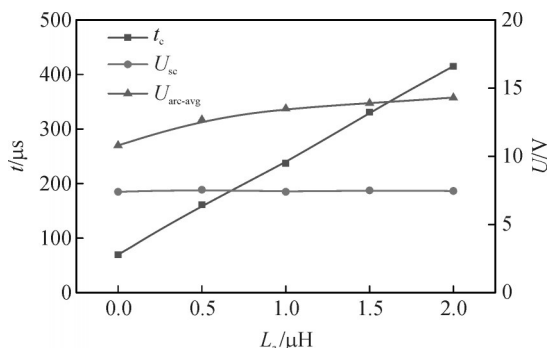


图10 t_c 、 U_{sc} 和 $U_{arc-avg}$ 随杂散电感的变化曲线

Fig. 10 Curve of t_c , U_{sc} and $U_{arc-avg}$ with different stray inductances

对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $M=1$,电弧电流转移过程中 I_n 的取值与IGBT的并联个数 N 相关,约为 $N\text{ kA}$ 。在以上实验配置条件下,分别只在主回路或每个并联支路添加 $1\text{ m}\Omega$ 和 $1\text{ }\mu\text{H}$ 的阻抗时,通过实验得到参数 t_c 随IGBT并联个数的变化曲线见图11。由图11可知,分别只在主回路或每个并联支路添加 $1\text{ m}\Omega$ 和 $1\text{ }\mu\text{H}$ 的阻抗时,两者的 t_c 均随 N 的增加而近似线性增长,但前者的增加速度明显要快。故在数值相等的情况下,当杂散电阻电感参数位于转移主回路时,要比位于每个并联支路时对电弧电流转移时间的影响大,且并联支路个数越

多越明显。

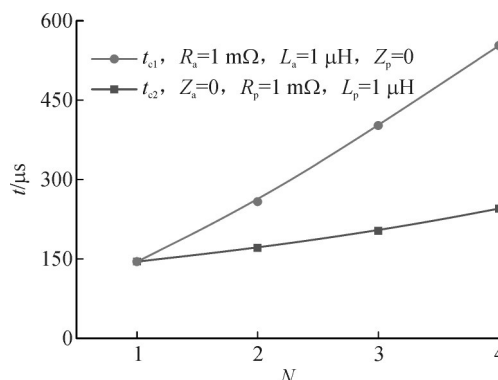


图11 杂散参数处于不同位置时 t_c 随并联个数的变化曲线

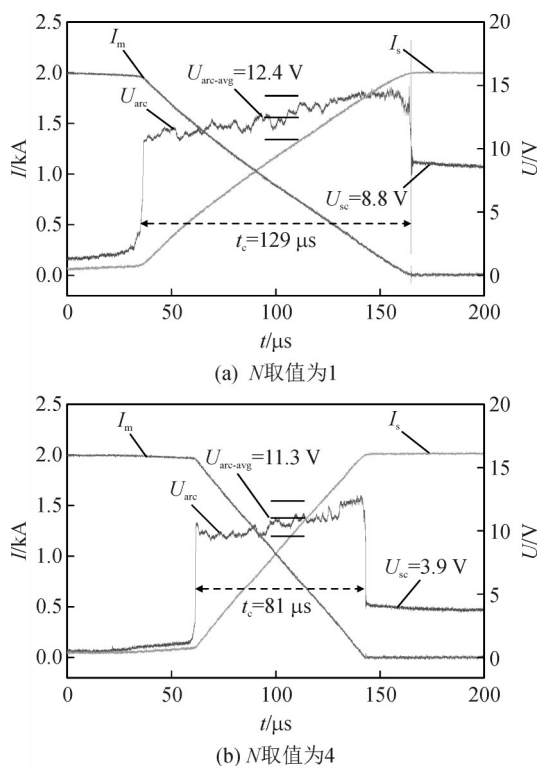
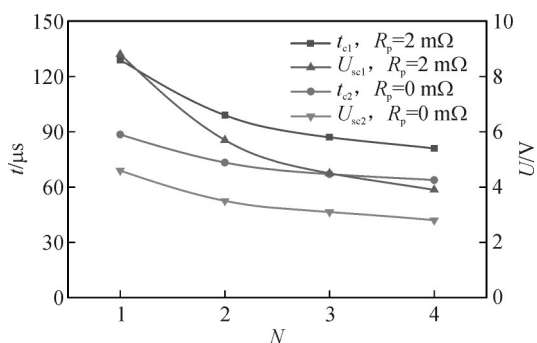
Fig. 11 The curve of t_c with different parallel numbers when the stray parameters are located at different positions

3.3 电弧电流转移的促进方法

由式(4)和以上实验研究可知,提升电弧电压、降低内部杂散电阻电感参数和降低电力电子开关导通压降是促进电弧电流转移的主要方法。3.2节已对内部杂散电阻电感参数对电弧电流转移特性的影响进行了研究,本节主要研究降低电力电子开关导通压降对电弧电流转移的促进作用,且通过改变电力电子器件并联个数的方法来改变电力电子开关导通压降。由式(3)可知,在 I_n 保持不变的情况下, N 越大,电力电子开关的导通压降 U_s 越小。为探究转移电流不变情况下,电力电子器件并联个数对电弧电流转移时间的影响规律,进行如下实验。

对电弧电流转移实验平台进行如下配置: $Z_a=0$, $L_p=0$, $M=1$,电弧电流转移过程中 I_n 约为 2 kA 。在以上实验配置条件下,且 $R_p=2\text{ m}\Omega$,当IGBT的并联个数 N 分别为1和4时,实验得到的电弧电流转移波形分别见图12(a)、(b)。由图12可知,IGBT并联个数 N 由1增加到4时,电弧电流转移时间 t_c 由 $129\text{ }\mu\text{s}$ 减小到 $81\text{ }\mu\text{s}$,平均电弧电压 $U_{arc-avg}$ 由 12.4 V 变化为 11.3 V ,电弧电流转移完成时电力电子开关的导通压降 U_{sc} 由 8.8 V 减小到 3.9 V 。 U_{sc} 和 t_c 均有明显下降,故增加电力电子器件并联个数可有效降低电力电子开关导通压降和促进电弧电流转移。

在以上实验配置条件下,当 $R_p=2\text{ m}\Omega$ 或 $R_p=0\text{ m}\Omega$ 时,参数 t_c 和 U_{sc} 随IGBT并联个数 N 的变化曲线见图13。由图13可知,不管每个并联支路添加或不添加 $2\text{ m}\Omega$ 电阻,两者的参数 t_c 和 U_{sc} 均随 N 的增加而减小,且减小速度均越来越缓慢;但添加 $2\text{ m}\Omega$ 阻抗后, t_c 和 U_{sc} 随 N 的变化趋势更加明显。结合式(5)和图13可知,电弧电流转移时间随电力电子开关导通压降的减小而减小,但由于电力电子开关导通压降随电力电子器件并联个数的增加而减小的越来

图12 N 取值为1和4时的电弧电流转移波形Fig. 12 Waveforms of arc current commutation when the N is 1 and 4图13 t_c 和 U_{sc} 随并联个数的变化曲线Fig. 13 Curve of t_c and U_{sc} with different parallel numbers

越缓慢,所以电弧电流转移时间也随电力电子器件并联个数的增加而减小的越来越缓慢。同时,当电力电子器件导通电阻越大时,电力电子开关导通电压降随电力电子器件并联个数的变化趋势就越明显,相应地电弧电流转移时间随电力电子器件并联个数的变化趋势也就越明显。

4 结论

文中研究了分断速度对双断口真空开关动态电压分布的影响,采取作用机理、建模仿真、试验结果分析相结合的方法。得到同步分断、异步匀速分断、变速分断3种情况下,双断口真空开关分断速度对动态电压分布的影响规律。在本实验条件下,得

到了以下4点结论:

1)在同步分断实验中,分别进行了5组同步分断试验,动态电压分布改变量小于2%,对由杂散电容引起的电压不平衡现象影响较小,恢复电压的60.03%由高压侧断口承担。

2)在异步分断实验中,固定低压侧开关分断速度0.7 m/s不变,减小高压侧开关的分断速度由1.1 m/s至0.7 m/s,低压侧承担恢复电压由31.57%增加至39.97%,动态电压不均匀系数从36.87%降低至20.06%。

3)变速分断试验中,调控低压侧触头分断速度时,低压侧承担恢复电压由37.93%减少至31%,动态电压不均匀系数从24.14%增加到38%。调控高压侧触头分断速度,低压侧电压分布百分比从41.5%增加至49.1%,动态电压不均匀系数从17%降低至1.8%。

4)相较于同步分断来看,速度的改变能够对双断口真空开关动态电压分布产生影响,并可以利用该特性改善动态电压分布。实验结果表明,双断口真空开关的动态电压不均匀系数最多可降低15%。

参考文献:

- [1] CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, ZHANG Xiangyu, et al. Analysis and experiments for IGBT, IEGT, and IGCT in hybrid DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 2883-2892.
- [2] 张成明,陈德志,赵文良. 基于IGBT选型的整流器、逆变器损耗计算新方法研究[J]. 智慧电力, 2022, 50(4): 81-88. ZHANG Chengming, CHEN Dezhi, ZHAO Wenliang. New loss calculation method of rectifier and inverter based on IGBT selection[J]. Smart Power, 2022, 50(4): 81-88.
- [3] 杨 兵,王胜利,王文杰,等. 混合式直流断路器IGBT关断能力提升技术研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 24-32. YANG Bing, WANG Shengli, WANG Wenjie, et al. Research on IGBT turning off capacity enhancement technology of hybrid DC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 24-32.
- [4] 孙广涛,李树昆,纪江辉,等. 一种半控型直流断路器控制器的设计与研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(1): 35-39. SUN Guangtao, LI Shukun, JI Jianghui, et al. Design and research on semi controller of DC circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(1): 35-39.
- [5] 王秀环,周军川,靳祖磊,等. 直流电网用直流断路器短时电流试验方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(3): 8-15. WANG Xiuhuan, ZHOU Junchuan, JIN Zulei, et al.

- Research on the short-time current test method of dc circuit breaker used in DC grids[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(3): 8-15.
- [6] 丁久东, 冯亚东, 朱继红, 等. 高压直流断路器控制保护系统设计与开发[J]. 浙江电力, 2021, 40(3): 21-28.
DING Jiudong, FENG Yadong, ZHU Jihong, et al. Design and development of control and protection system for high-voltage DC circuit breaker [J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(3): 21-28.
- [7] 刘骁暘, 周柳. 直流断路器并联IGCT的仿真与试验研究[J]. 电器与能效管理技术, 2022(10): 56-61.
LIU Xiaoyang, ZHOU Liu. Simulation and experimental research on parallel IGCT of DC circuit breaker[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2022(10): 56-61.
- [8] 丁超, 郭心铭, 许烽, 等. 集成潮流调节功能的多端口直流断路器及其控制研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(7): 8-17.
DING Chao, GUO Xinming, XU Feng, et al. Research on multi-port DC circuit breaker with power flow regulation function and its control[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7): 8-17.
- [9] ZHANG X, YU Z, ZHAO B, et al. Novel mixture solid-state switch based on IGCT with high capacity and IGBT with high turn-off ability for hybrid DC breakers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 4485-4495.
- [10] 沙彦超, 蔡巍, 胡应宏, 等. 混合式高压直流断路器研究现状综述[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 64-70.
SHA Yanchao, CAI Wei, HU Yinghong, et al. Review of research status of hybrid HVDC circuit breakers[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 64-70.
- [11] 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): 2139-2149.
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): 2139-2149.
- [12] 程显, 王华清, 葛国伟, 等. 城市轨道交通1800V高速混合式直流断路器研制[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 212-218.
CHENG Xian, WANG Huaqing, GE Guowei, et al. Research and design of 1800V high-speed hybrid DC circuit breaker for urban rail Transit system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 212-218.
- [13] 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. Zero-voltage-switch Hybrid DC switch for DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3148-3155.
- [14] GENJI T, NAKAMURA O, ISOZAKI M, et al. 400 V class high-speed current limiting circuit breaker for electric power system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1428-1435.
- [15] POLMAN H, FERREIRA J A, KAANDERS M, et al. Design of a bi-directional 600 V/6 kA ZVS hybrid DC switch using IGBTs[C]//2001 IEEE Industry Applications Conference. 36th IAS Annual Meeting (Cat. No. 01CH37248). [S.l.]: IEEE, 2001: 1052-1059.
- [16] NOVELLO L, BALDO F, FERRO A, et al. Development and testing of a 10 kA hybrid mechanical-static DC circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2011, 21(6): 3621-3627.
- [17] 陈政宇, 余占清, 吕纲, 等. 基于IGCT串联的10kV直流混合断路器研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 317-326.
CHEN Zhengyu, YU Zhanqing, LYU Gang, et al. Researches on 10 kV DC hybrid circuit breaker based on IGCT series[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 317-326.
- [18] 李莉, 张彼德, 方春恩, 等. 一种混合式高压直流断路器的换流特性研究[J]. 高压电器, 2019, 55(8): 101-107.
LI Li, ZHANG Bide, FANG Chun'en, et al. Analysis on current commutation characteristics of a hybrid HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(8): 101-107.
- [19] WANG Shuo, ZHANG Liyan, YU Guanghui, et al. Hybrid phase-controlled circuit breaker with Switch system used in the railway auto-passing neutral section with an electric load[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(4): 545-552.
- [20] 吕纲, 曾嵘, 黄瑜琰, 等. 10kV自然换流型混合式直流断路器中真空电弧电流转移特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1012-1020.
LYU Gang, ZENG Rong, HUANG Yulong, et al. Researches on commutating characteristics of mechanical vacuum switch in 10 kV natural-commutate hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1012-1020.
- [21] WANG D, LIAO M, WANG R, et al. Research on vacuum arc commutation characteristics of a natural-commutate hybrid DC circuit breaker[J]. Energies, 2020, 13(18): 4823.
- [22] 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.
- [23] 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. Current transfer characteristics of the hybrid DC circuit breaker in

- DC micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(3): 119-125.
- [24] 张耘溢, 马磊, 刘焱, 等. 基于IGBT串联脉冲功率法的氧化锌避雷器电流均衡性现场测试技术[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 79-85.
- ZHANG Yunyi, MA Lei, LIU Yan, et al. Field test technique of zinc oxide arrester current balance based on IGBT series pulse power method[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 79-85.
- [25] 吕玮, 方太勋, 杨浩, 等. 基于电弧电压的混合型直流断路器[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 83-87.
- LYU Wei, FANG Taixun, YANG Hao, et al. Hybrid DC breaker based on arc voltage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 83-87.
- [26] ROODENBURG B, TAFFONE A, GILARDI E, et al. Combined ZVS-ZCS topology for high-current direct current hybrid switches: Design aspects and first measurements[J]. IET Electric Power Applications, 2007, 1(2): 183-192.
- [27] SHIRMOHAMMADI S, SUH Y. Multiwinding flyback clamp snubber for 10 kV IGCT with reduced voltage stress on clamp recovery diodes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2020, 56(3): 2729-2740.
- [28] CHEN Hai, LIU Xiaoming, LI Longnv, 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): 1-5.
- 王德全(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为混合式直流断路器、真空电弧电流转移理论(E-mail: wdq@mail.dlut.edu.cn)。
- 廖敏夫(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能化高压电器及高电压新技术, 着重研究多断口真空开关技术和真空触发开关技术(通信作者)(E-mail: LMF@dlut.edu.cn)。

《高压电器》2024年3期广告单位

彩色广告

封一: 上海乐研电气有限公司

封二: 莱茵技术(上海)有限公司

封三: 史陶比尔(杭州)精密机械电子有限公司

封四: 西安高压电器研究院股份有限公司(业务室)

前插1: 北京四方继保工程技术有限公司

前插2: 景德镇景光精盛电器有限公司

前插3: 温州锐亚科技有限公司

前插4: 西安华伟电力电子技术有限责任公司

前插5: 陕西龙翔电器有限公司

前插6: 陕西泰普瑞电工技术有限公司

前插7: 征稿通知

前插8: 山东哈大电气有限公司