

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.014

一种混合式高压直流断路器的换流特性研究

李 莉, 张彼德, 方春恩, 唐小雨, 李 伟

(西华大学电气与电子信息学院, 成都 610039)

摘要: 高压直流电网发生短路故障时,为了系统安全稳定运行,直流断路器应在很短的时间内切除故障线路,而电流转移过程是断路器成功切断故障电流的关键。文中对级联全桥混合式高压直流断路器换流过程进行分析,着重研究了故障电流分断过程中断路器的3次换流过程,并建立换流过程的等效模型。在PSCAD/EMTDC中仿真分析了3次换流过程的主要影响因素及其影响规律,得到混合式断路器的换流特性结论,为研制开断时间更短、开断容量更高的直流混合式断路器提供参考。

关键词: 混合式直流断路器; 电流换流特性; 换流模型; 开断时间; 故障切除

Analysis on Current Commutation Characteristics of a Hybrid HVDC Circuit Breaker

LI Li, ZHANG Bide, FANG Chun'en, TANG Xiaoyu, LI Wei

(School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: Current commutation is extremely important for a DC circuit breaker to successfully interrupt fault current. In this paper, the transient characteristics of the cascaded full-bridge DC breaker are analyzed with emphasis on three current commutations during the interruption process, and an equivalent model of the commutation process is established. The main influencing parameters of the current commutations and the influencing rule are investigated via PSCAD/EMTDC, and the commutation characteristics of the hybrid circuit breaker are obtained. This study may offer a reference for the development of hybrid HVDC circuit breakers with shorter switching time and higher breaking capacity.

Key words: hybrid DC circuit breaker; current commutation characteristics; commutation model; interrupt time; fault isolating

0 引言

高压直流电网电压等级高、线路阻抗较小,当发生短路故障时,线路的故障电流上升很快,会迅速反馈到整个输电系统,导致电压跌落在安全电压以下,故须利用开断时间短、开断容量高的断路器快速切除故障电流^[1]。混合式直流断路器通态损耗小、关断速度快,能够有效地减小故障对直流输电系统的影响,提高直流电网的稳定性^[2-9]。

断路器能否成功地迅速切除故障的关键是电流换流,迅速换流可以减小断路器切除故障的时

间,降低断路器所需分断的故障电流,从而减小断路器的电流应力。目前,直流断路器的研究主要集中在断路器结构的设计和优化上^[10-14]。

文中研究了级联型全桥断路器在切除故障过程中故障电流的换流过程及其影响因素,并根据换流机理等效出换流模型,得到电流转移特性结论,为实现断路器的快速开断提供参考。

1 开断原理

级联全桥型断路器结构见图1,主要包含了主支路、转移支路和耗能支路。断路器切除故障电流

收稿日期:2019-02-03; 修回日期:2019-03-28

基金项目:四川省电力电子节能技术与装备重点实验室项目(SZJJ2015-064)。

Project Supported by Sichuan Province Key Laboratory of Power Electronics Energy-saving Technologies & Equipment(SZJJ2015-064).

的换流过程见图2,其中, I_{main} 、 I_{T} 、 I_{C} 、 I_{MOV} 、 I_{f} 分别为主支路、转移支路模块IGBT、转移支路模块电容、耗能支路和断路器的电流。

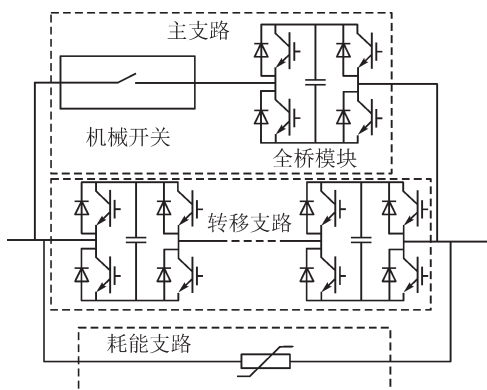


图1 级联全桥型断路器结构

Fig. 1 Structure of full-bridge based circuit breaker

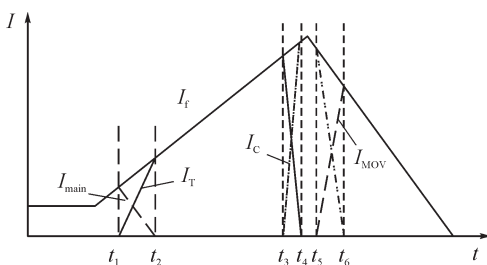


图2 断路器换流过程

Fig. 2 Waveforms of the circuit breaker during the interruption process

级联全桥混合式高压直流断路器完全切除故障包括3次电流转移过程^[15-16],在分闸过程中,①故障电流首先由主支路换流至转移支路模块IGBT;②故障电流换流至转移支路模块电容;③故障电流换流至耗能支路且被避雷器吸收并衰减至零,至此故障完全切除。

2 断路器电流换流理论分析

为了方便分析断路器3次换流过程将直流电网等效为图3的直流网络简化模型。图3中: U_{dc} 为直流电源电压; L_{dc} 、 R_{dc} 分别为直流线路电感、电阻; R_{load} 为等值负荷。而电流转移时间与电流转移速度成反比,在此用电流转移速度表示电流换流时间。

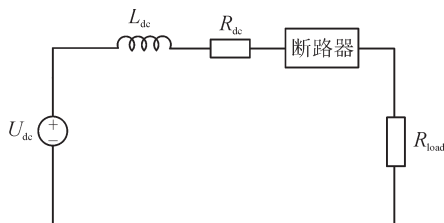


图3 直流网络简化模型

Fig. 3 Simplified model of HVDC grids

第1次换流过程中,当系统检测到故障,主支路

模块IGBT闭锁,故障电流由转移支路模块IGBT导通,当其两端电压达到转移支路IGBT导通压降时,故障电流换流至转移支路。因此全桥模块电容值越大,电容电压上升越慢,第1次换流速度越慢,从而导致第1次换流时间增加。而电感具有抑制电流突变的特性,转移回路中连接线和器件包含的杂散电感会抑制故障电流向转移支路模块IGBT转移^[16-18]。因此,第1次换流过程的主要影响因素是连接线和器件中的杂散电感和模块电容。

第1次电流换流模型见图4,图4中: i_1 为主支路电流; i_2 为转移支路模块IGBT电流; U_{eq} 、 R_{eq} 分别为转移支路模块IGBT的等效压降、等效电阻; L_{stray} 为转移回路的杂散电感; C_1 为主支路模块电容值; i_{f} 为故障电流,在此采用电流源表示。回路方程式见式(1)

$$\begin{cases} i_{\text{f}} = i_1 + i_2 \\ i_1 = C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} \\ U_{L_{\text{stray}}} = L_{\text{stray}} \frac{di_2}{dt} \\ U_{C_1} = U_{L_{\text{stray}}} + U_{R_{\text{eq}}} + U_{U_{\text{eq}}} \end{cases} \quad (1)$$

该阶段转移支路模块IGBT电流 i_2 转移速度满足

$$\frac{di_2}{dt} = \frac{i_{\text{f}} - i_2 - C_1 L_{\text{stray}} \frac{d^2 i_2}{dt^2}}{C_1 R_{\text{eq}}} \quad (2)$$

忽略回路中杂散电感 L_{stray} ,理论上第1次电流转移的速度基本与模块电容值成反比;假定 C_1 不变,第1次电流转移速度与 L_{stray} 成反比。

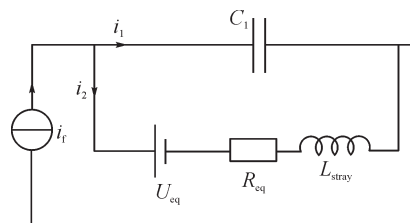


图4 第1次换流等效模型

Fig. 4 The equivalent model of the first commutation

第2次换流过程中,故障电流由转移支路模块IGBT换流至转移支路模块电容;第2次换流的主要目的是完成故障电流的开断,且故障电流在第2次换流时可以达到几十kA。当转移支路模块IGBT闭锁,电荷载体子被移除,IGBT中的故障电流被迫至零。第2次换流由转移支路模块IGBT中减小的故障电流驱动,故障电流强迫换流至模块电容并对电容充电,转移支路的模块电容通过与IGBT反向并联的二极管串联,且其等效电容值为 μF 级,故障电流迅速将串联的模块电容充满,此时完成换流,大致为几十纳秒。

第2次电流换流模型见图5,图5中: i_c 为转移支路全桥模块电容电流; C_{EQ} 为转移支路全桥模块电容串联后的等效值; S 表示转移支路模块IGBT闭锁。当IGBT闭锁时,转移支路模块IGBT减小的故障电流会迅速将模块电容充满,快速完成第2次换流过程。

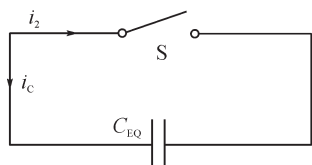


图5 第2次换流等效模型

Fig. 5 The equivalent model of the second commutation

第3次换流过程中,当串联连接的模块电容两端电压达到避雷器参考电压时,避雷器动作,故障电流换流至耗能支路,逐渐衰减至零。因此避雷器参考电压和电容值会影响第3次换流速度,转移回路中连接线和器件的杂散电感也会抑制故障电流从转移支路模块电容换流至耗能支路。

第3次电流转移模型见图6,图6中: C_{EQ} 为转移支路全桥模块电容的等效值; i_{MOV} 为耗能支路电流; U_{diode} 为转移回路全桥模块二极管的等效压降。避雷器动作时阻抗非线性变化,在此用电阻 R_{MOV} 近似模拟此过程^[19]。回路方程式见式(3)

$$\begin{cases} i_f = i_c + i_{MOV} \\ i_c = C_{EQ} \frac{du_{C_{EQ}}}{dt} \\ U_{L_{stray}} = L_{stray} \frac{di_{MOV}}{dt} \\ U_{C_{EQ}} + U_{diode} = U_{L_{stray}} + R_{MOV} i_{MOV} \end{cases} \quad (3)$$

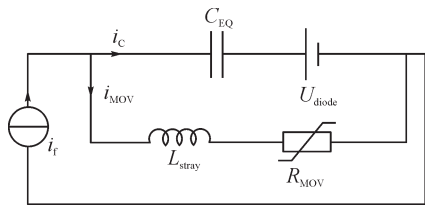


图6 第3次换流等效模型

Fig. 6 The equivalent model of the third commutation

该阶段耗能支路电流 i_{MOV} 转移速度满足

$$\frac{di_{MOV}}{dt} = \frac{i_f - i_{MOV} - C_{EQ} L_{stray} \frac{d^2 i_{MOV}}{dt^2}}{R_{MOV} C_{EQ}} \quad (4)$$

由式(4)可知,理论上第3次换流速度与全桥模块电容串联连接等效值 C_{EQ} 成反比,故第3次换流时间与全桥模块电容值成正比。同时,第3次换流速度与 L_{stray} 成反比。随着避雷器参考电压的升高,耗能支路电压与转移支路电压的差值减小,转移支路全桥模块向耗能支路换流速度减缓。在系统参数不变情况下,增加机械开关动作时间^[20-22],换流起始

时刻不断推延,换流时的故障电流峰值将逐渐上升。由式(3)、(4)可知,当故障电流峰值逐渐升高时,断路器所需开断电流增加,故障电流换流至耗能支路越迅速。

3 仿真结果分析

基于上述换流模型研究混合式断路器的换流特性,对级联全桥断路器的换流过程在PSCAD/EMTDC中进行仿真,仿真步长设置为0.005,系统仿真参数见表1。

表1 系统仿真参数

Table 1 System simulation parameters

电源电压 U_{dc}/kV	线路电感 L_{dc}/mH	负载 R_{load}/Ω	模块电 容/ μF	避雷器 残压/ kV	全桥模 块数量
500	100	333.34	100	800	320

混合式断路器的换流仿真模型,其中,短路故障用PSCAD/EMTDC中故障模块(fault)模拟见图7。由于此种断路器机械开关部分在分闸过程中不需要灭弧,故不考虑机械开关的灭弧能力。

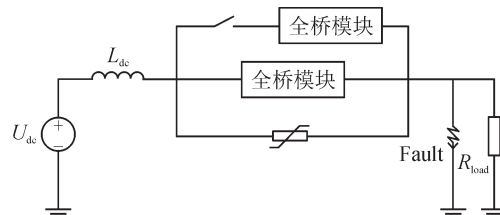


图7 仿真电路图

Fig. 7 Simulation circuit diagram

3.1 第1次换流过程

第2节中分析,断路器第1次换流过程主要影响因素是全桥模块电容值和转移回路杂散电感,保持系统参数不变,分别改变模块电容值和杂散电感,换流结果见图8、9。

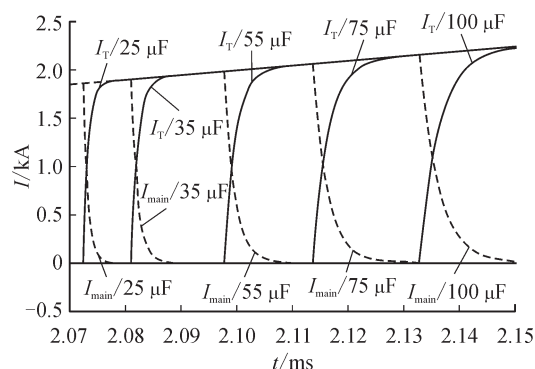


图8 转移支路模块电容与第1次换流的关系

Fig. 8 Relationship between module capacitor and the first commutation

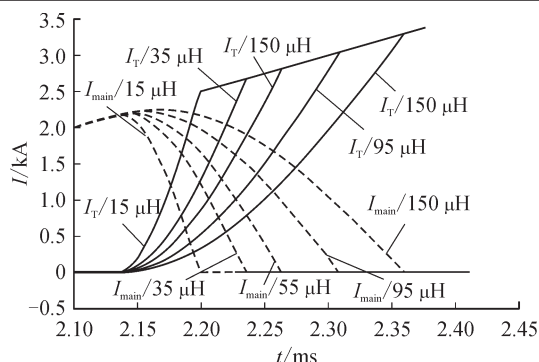


图9 杂散电感与第1次换流的关系

Fig. 9 Relationship between stray inductance and the first commutation

图8中,全桥模块电容值由25 μF 增大至100 μF 时,电容电压上升减缓,电流换流速度减小,故障电流换流至转移支路模块IGBT的转移时间增加。模块电容在不同情况下的换流时间和换流起始时刻见图10,从图10可以看出,换流时间与模块电容值成正比。此外,电容值增加时,电容电压达到转移支路全桥模块IGBT的导通压降的时刻延迟,导致故障电流换流至转移支路模块IGBT的起始时刻相应延迟。因此,随着模块电容值的增加,电流转移速度将上升且换流起始时刻将推迟。

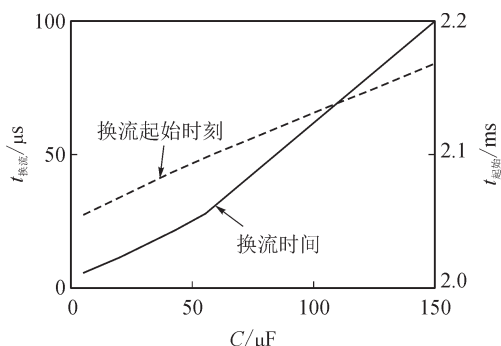


图10 转移支路模块电容对第1次换流影响

Fig. 10 Influence of module capacitor on the first commutation

图9中,随着转移回路杂散电感由15 μH 增大至150 μH ,电感对换流的阻碍增强,换流时间明显上升。杂散电感在不同情况下的换流时间和换流起始时刻,换流时间与杂散电感接近线性关系见图11。此外,随着杂散电感增加,主支路的故障电流上升减缓,电容电压达到转移支路全桥模块IGBT的导通压降的时刻延迟,从而换流起始时刻不断延迟。

3.2 第2次换流过程

在故障开断时刻确定的情况下,第2次换流过程仿真结果见图12。仿真结果表明,第2次换流时间大致为50 ns,接近线性化,与理论分析相符。当机械开关动作时间增加时,第2次换流时间不变,但

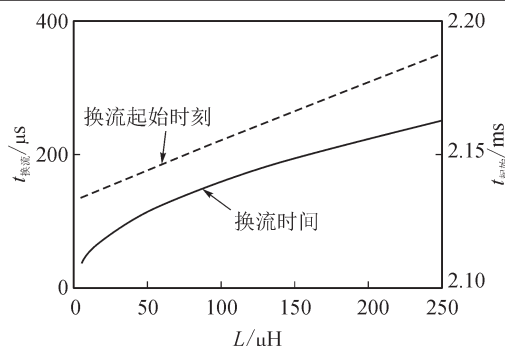


图11 杂散电感对第1次换流影响

Fig. 11 Influence of stray inductance on the first commutation

转移支路全桥模块IGBT闭锁时刻不断延迟,导致第2次换流起始时刻不断延迟。机械开关动作时间与第2次换流起始时刻的关系见表2,第2次换流起始时刻与机械开关动作时间成正比,且当机械开关动作时间增加到一定程度后,第2次换流起始时刻的增加速率将减缓。

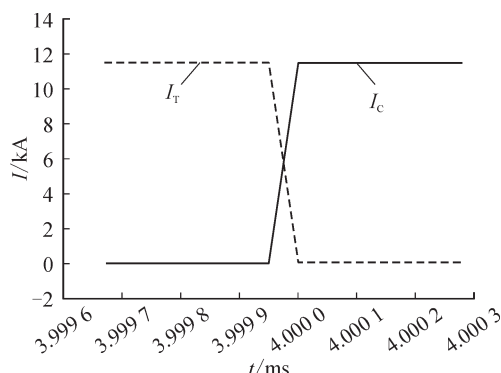


图12 第2次换流仿真波形

Fig. 12 Simulation waveform of the second commutation

表2 机械开关动作时间与第2次换流起始时刻的关系

Table 2 Relationship between mechanical switch actuation time and the starting time of the second commutation

机械开关动作时间/ms	换流起始时刻/ms
1.2	3.199 9
1.4	3.400 0
1.6	3.599 9
1.8	3.800 0
2.4	4.286 0

3.3 第3次换流过程

第2节中分析,断路器第3次换流过程主要影响因素是避雷器参考电压、电容值、转移支路杂散电感和机械开关动作时间。保持系统参数不变,分别改变模块电容值、杂散电感和避雷器起始动作电压,换流结果见图13-15。

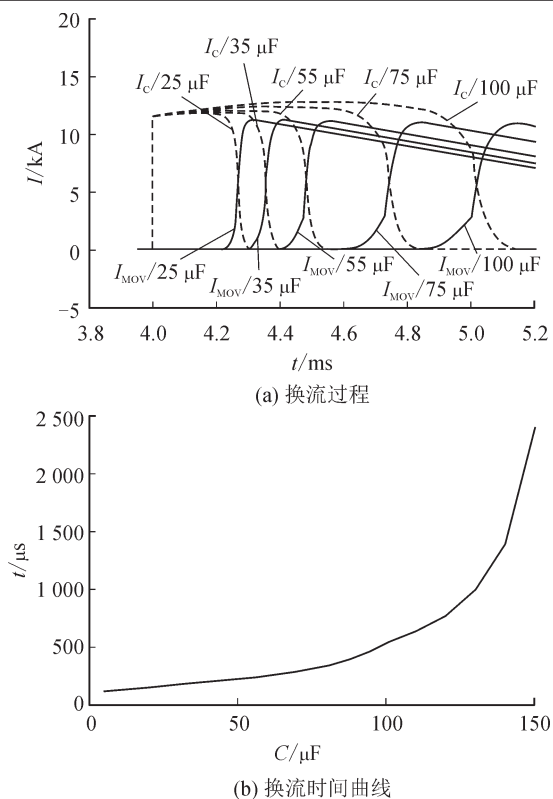


图 13 模块电容对第3次换流影响

Fig. 13 Influence of capacitor on the third commutation

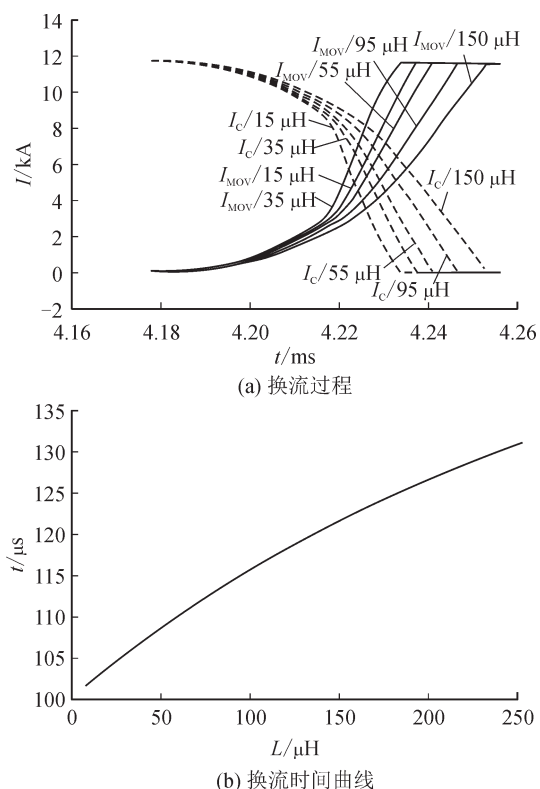


图 14 杂散电感对第3次换流影响

Fig. 14 Influence of stray inductance on the third commutation

图 13(a)为电容值对第3次换流时间的影响,电容值从 $25\ \mu\text{F}$ 增大至 $100\ \mu\text{F}$ 时,故障电流换流至耗

能支路的转移时间显著增加,且电容充电时间明显增加;图 13(b)为换流时间曲线,随着电容值的增加,第3次换流时间呈指数上升,与理论分析相符。图 14(a)为转移回路杂散电感在不同情况下的换流过程,杂散电感由 $15\ \mu\text{H}$ 增大至 $150\ \mu\text{H}$ 时,故障电流转移至耗能支路的转移时间增加,图 14(b)为换流时间曲线,随着杂散电感的增加,第3次换流时间相应上升,且换流时间上升的速率逐渐减小。图 15(a)为避雷器参考电压对换流的影响,避雷器参考电压升高时,故障电流转移至耗能支路换流时间增加,图 15(b)为换流时间曲线,避雷器参考电压与第3次换流时间成正比,且接近线性关系。

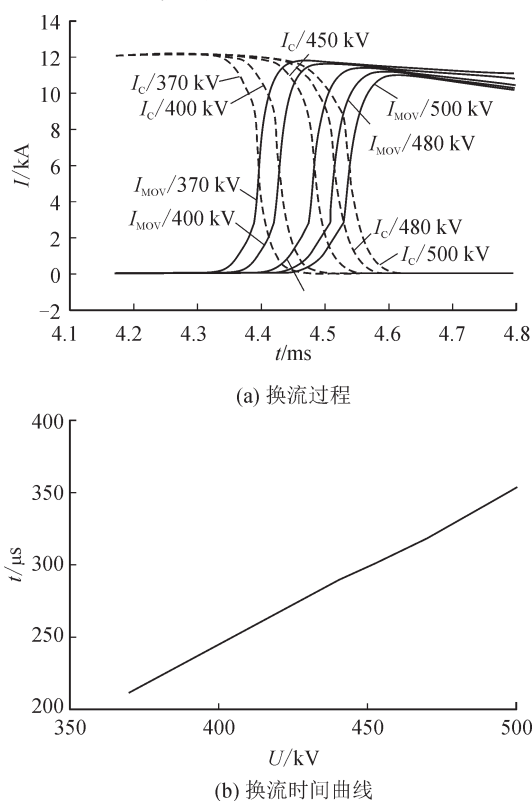
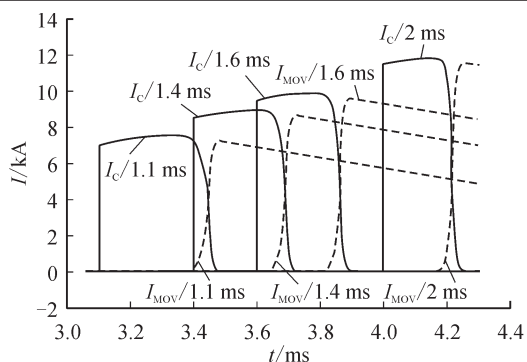


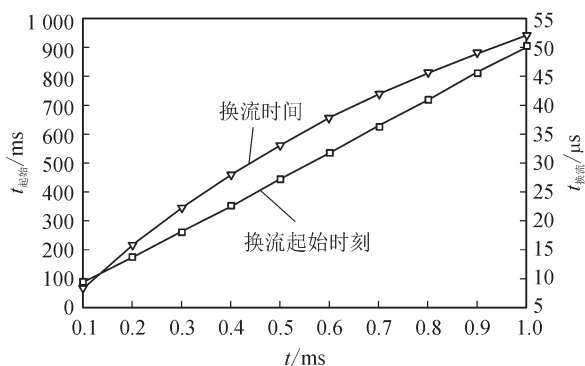
图 15 避雷器参考电压对第3次换流时间影响

Fig. 15 Influence of MOV reference voltage on the third commutation

在系统参数不变情况下,改变机械开关动作时间,换流过程仿真结果见图 16(a)。仿真结果表明,随着机械开关动作时间增加,换流起始时刻明显推延,电容充电时间显著减小、充电电流增加,且耗能支路电流转移速度将上升,故障电流换流至转移支路越迅速,换流时间相应减小。图 16(b)进一步分析了改变机械开关动作时间对分断故障电流的影响。从图 16(b)可以看出,每增加 1ms 机械开关动作时间,对换流起始时刻的影响显著大于对换流时间的影响。因此,提高机械开关的分闸速度可以明显提高断路器切除故障的时间。



(a) 换流过程



(b) 换流时间曲线

图 16 机械开关动作时间对第3次换流影响

Fig. 16 Influence of mechanical switch actuation time on the third commutation

4 结论

文中通过对级联全桥断路器换流过程的研究,分析了影响电流换流的主要因素。仿真结果表明:

1)杂散电感与第1次换流时间、第3次换流时间成正比,因此在实际设计断路器时要尽量减小回路中的杂散电感,选用低杂散电感的母排,布线尽量紧凑,合理的母排布线方式能显著降低回路中的杂散电感;在断路器设计时选择杂散电感较低的连接线和器件。

2)机械开关动作时间与第3次换流时间成反比,与第3次换流起始时刻成正比,但对换流起始时刻的影响明显大于对换流时间的影响,故为了迅速切除故障,要尽量提高机械开关的分闸速度,减小故障对直流电网的影响。

3)模块电容值与第1次换流时间、第3次换流时间成正比,因此在设计断路器全桥模块参数时,既不能将模块电容取值过大影响换流时间,导致断路器切除故障的时间,也不能将模块电容取值过小,导致电容电压过高,对电力电子器件的损伤增大。

参考文献:

[1] 彭发喜,汪震,邓银秋,等.混合式直流断路器在柔性直流电网中应用初探[J].电网技术,2017,41(7):2092-2098.
PENG Faxi, WANG Zhen, DENG Yinqiu, et al. Potentials of hybrid HVDC circuit breakers' application to MMC-HVDC

grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2092 - 2098.

[2] 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.

[3] 卫思明.高压直流断路器关键技术研究[D].北京:华北电力大学:北京 华北电力大学,2015.

WEI Siming. Research on key technologies of high voltage DC circuit breaker[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.

[4] 杜冀,江道灼,郑欢,等.基于电力电子复合开关的限流式混合直流断路器参数设计[J].电力系统自动化,2015,39(11):88-95.

DU Ji, JIANG Daozhuo, ZHENG Huan, et al. Parameter designing of current limiting DC hybrid circuit breaker based on combination electronic switch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 88-95.

[5] 廖敏夫,黄金强,葛国伟,等.国内外混合式断路器发展与研究现状[J].高电压技术,2016,42(6):1688-1694.

LIAO Minfu, HUANG Jinqiang, GE Guowei, et al. Development and research of native and foreign hybrid circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1688-1694.

[6] 高阳,贺之渊,王成昊,等.一种新型混合式直流断路器[J].电网技术,2016,40(5):1320-1325.

GAO Yang, HE Zhiyuan, WANG Chenchao, et al. A new hybrid circuit breaker for DC-application[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1320-1325.

[7] LEE D S, LITHGOW B J, MORRISON E. New fault diagnosis of circuit breakers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2003, 18(2): 454-459.

[8] GRIESHABER W, VIOLLEAU L. Development and test of a 120 kV direct current circuit breaker[C]//CIGRE Session. Paris, France: CIGRE, 2014: B4-301.

[9] 汤广福,庞辉,贺之渊.先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.

[10] 陈名,黎小林,许树楷,等.基于零电压零电流的混合式直流断路器[J].南方电网技术,2015,9(3):10-14.

CHEN Ming, LI Xiaolin, XU Shukai, et al. Zero voltage and zero current hybrid DC circuit breaker[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(3): 10-14.

[11] MEYER C, DE DONCKER R W. Solid-state circuit breaker based on active thyristor topologies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(2): 450-458.

[12] 药韬.高压直流断路器方案设计与原理验证[D].北京:中国电力科学院,2015.

YAO Tao. Design of high voltage DC breaker and validation of principles[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2015.

[13] SHUKLA A, DEMETRIADES G D. A survey on hybrid circuit-breaker topologies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(2): 627-641.

- [14] HÄFNER J, JACOBSON B. Proactive hybrid HVDC breakers-a key innovation for reliable HVDC grids[C]//CI-GRE. Bologna: CIGRE, 2011: 264.
- [15] 魏晓光, 杨兵建, 贺之渊, 等. 级联全桥直流断路器控制策略及其动态模拟试验[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 129-135.
WEI Xiaoguang, YANG Bingjian, HE Zhiyuan, et al. Control strategy and physical dynamic simulation of cascaded full-bridge DC circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 129-135.
- [16] 王善军. 直流微网混合断路器电流转移特性的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
WANG Shanjun. Current transfer characteristics study of DC micro-grid hybrid circuit breaker[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015.
- [17] 张国军, 宋飞凡, 李绍明, 等. 三阶段电流转移混合型无弧直流断路器[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 87-95.
ZHANG Guojun, SONG Feifan, LI Shaoming, et al. Hybrid arc-less DC current breaker based on three stage current commutation[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 32(11): 87-95.
- [18] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 18-30.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.
- [19] 周万迪, 魏晓光, 高冲, 等. 基于晶闸管的混合型无弧高压直流断路器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(18): 2990-2996.
ZHOU Wandi, WEI Xiaoguang, GAO Chong, et al. Thyristor based hybrid arc-less high voltage direct current circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 201434(18): 2990-2996.
- [20] 张祖安, 黎小林, 陈名, 等. 混合式高压直流断路器中的快速机械开关研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 57-62.
ZHANG Zu'an, LI Xiaolin, CHEN Ming, et al. Research on fast mechanical switch in hybrid HVDC circuit breaker[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 57-62.
- [21] SKARBY P, STEIGER U. An ultra-fast disconnecting switch for a hybrid HVDC breaker-A technical breakthrough[C]//CIGRE. Canada: IEEE, 2013: 9-11.
- [22] YANG J, FLETCHER J, O'REILLY J. Short-circuit and ground fault analysis and location in VSC-based DC network cables[C]//IEEE Trans. Ind. Electron. [S.l.]: IEEE, 2012: 3827-3837.

李莉(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能化高压电器。

张彼德(1975—), 男, 教授, 研究方向为智能化高压电器。

方春恩(1975—), 男, 教授, 研究方向为智能化高压电器。

(上接第 100 页)

- ysis of electromagnetic field and fluid field on the loss and heat of high voltage circuit breaker[J]. High Voltage Engineering, 2017, 53(8): 61-66.
- [11] JOONG K K, SUNG C H, KYONG Y P, et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magneto-thermal finite element method[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5): 1636-1639.
- [12] 段慧青, 何为, 肖冬萍, 等. 基于解析数值法的配电房母排磁场屏蔽[J]. 电工技术学报, 2008, 23(8): 13-17.
DUAN Huiqing, HE Wei, XIAO Dongping, et al. Magnetic field shielding for indoor distributing substation busbars based on analytical-numerical method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(8): 13-17.
- [13] 高杨, 周岩, 刘婷婷, 等. 高压开关柜的三维电磁场数值仿真[J]. 信息与电子工程, 2009, 7(6): 540-544.
GAO Yang, ZHOU Yan, LIU Tingting, et al. 3-D numerical simulation of electromagnetic field in HV switchgear cabinet[J]. Information and Electronic Engineering, 2009, 7(6): 540-544.
- [14] 熊兰, 徐敏捷, 杨子康, 等. 高压开关柜电缆室温度场分析及在线监测系统构建[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 153-157.
XIONG Lan, XU Minjie, YANG Zikang, et al. Thermal field analysis for cable room of high-voltage switchgear and design of online monitoring system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6): 153-157.
- [15] HO S L, LI Y, LIN X, et al. Calculations of eddy current, fluid, and thermal fields in an air insulated bus duct system[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(4): 1433-1436.
- [16] LI L, ERZHI W. Application of the multiple grid method in electric field calculation of high-voltage interrupter[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(2): 699-702.
- [17] WACTOR M. Strategies for mitigation the effects of internal arcing faults in medium-voltage metal-enclosed switchgear[J]. Revision of IEEE C37.20.7-2001, 2001, 9(1): 323-328.
- [18] PAWAR S, JOSHI K, ANDREWS L, et al. Application of computational fluid dynamics to reduce the new product development cycle time of the SF₆ gas circuit breaker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 156-163.
- [19] 陈德桂. 低压开关电器热分析方法的进展[J]. 低压电器, 2008, 44(17): 1-4.
CHEN Degui. Progress in the thermal analysis of low voltage apparatus[J]. Low Voltage Apparatus, 2008, 44(17): 1-4.
- [20] 孙国霞, 舒乃秋, 吴晓文, 等. 基于多物理场耦合的气体绝缘母线触头接触温升有限元计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(s): 408-413.
SUN Guoxia, SHU Naiqiu, WU Xiaowen, et al. Finiteelement analysis of contact temperature rise in gas insulated busbars based on coupled multi-physics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(s): 408-413.

刘旭光(1986—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力电子技术及电磁仿真技术。