

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.03.015

混合式直流断路器控制策略及实验验证

谢 峰,江道灼*,吴振梁,陈 可
(浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027)

摘要:针对现有的限流式混合直流断路器存在的损耗较高、控制难度较大的问题,对一种机械开关串小电感结构的直流断路器拓扑模型的工作原理、短路故障开断、控制保护策略等方面进行了研究。对该新型限流式混合直流断路器的拓扑结构进行了低电压等级的单元样机研发,并完成了样机平台的搭建。对样机中不同控制模块的处理流程进行了详细的分析和介绍。最终,通过一整套合理的控制策略,在样机上进行了断路器的正常分合闸及短路故障开断等相关验证性试验。研究表明,该新型限流式混合直流断路器能够凭借自身的优良特性,在短路换流过程中加速固态开关的导通,完成短路故障的快速有效切断,同时降低了断路器的设备复杂度和控制难度,具备明显的技术优势和成本优势。

关键词:混合式直流断路器;样机试验;短路故障判断;控制策略

中图分类号:TM561

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)03-0287-06

Control strategy and experimental verification of hybrid DC circuit breaker

XIE Feng, JIANG Dao-zhuo, WU Zhen-liang, CHEN Ke

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Aiming at the problems of high loss and difficulty in control of existing current-limit hybrid DC circuit breaker, the working principle, short-circuit fault breaking and control protection strategy of a DC circuit breaker topology with small inductance structure in series with mechanical switch was studied. The topology of the new type current-limit hybrid DC circuit breaker was developed, and its prototype platform was built. The processing of different modules in the prototype was analyzed and introduced in detail. Finally, through a reasonable control strategy, some verification tests such as normal switch breaking and short-circuit breaking was done on the prototype. The results indicate that the new current-limit hybrid DC circuit breaker has excellent characteristics of accelerating the conduction of solid state switch in short-circuit commutation and cutting of the short-circuit fault quickly and effectively, at the same time, it also reduces the complexity and difficulty in control of the circuit breaker, and has obvious technical and cost advantages.

Key words: hybrid DC circuit breaker; prototype experiment; short-circuit fault judgement; control strategy

0 引 言

近些年来,多端柔性直流输电的研究在我国得到了快速的进步与发展,研究兼具经济性和灵活性的柔性直流输电技术具有巨大的经济价值和社会效益^[1-3]。由于多端柔性直流输电系统对短路侧故障反应迅速,为防止短路电流的快速上升,对直流断路器的可靠性

和稳定性提出了较高要求。高压直流断路器作为保证多端柔性直流输电稳定可靠运行的关键设备之一,其研制状况一直是业内关注的焦点^[4-6]。当前,直流断路器主要可分为机械式、固态式和混合式断路器。其中,混合式直流断路器由于综合了机械式和固态式断路器的优良特性,具备运行稳定、开断速度快、功率损耗小等优点,是目前直流断路器一个重要的研究和应用

收稿日期:2016-10-14

作者简介:谢峰(1989-),男,浙江绍兴人,硕士研究生,主要从事柔性交流输电技术方面的研究。E-mail: 1007504844@qq.com

通信联系人:江道灼,男,教授,博士生导师。E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

方向^[7-13]。

文献[14]提出了一种在机械开关支路中串联小电感的限流式混合直流断路器拓扑模型,介绍了其工作原理并进行了仿真分析,但对于断路器短路故障的研究仍停留在理论分析阶段,并没有相应的实验数据进行理论支持,同时,对于具体的故障控制策略也并未涉及。由于带小电感结构的混合式直流断路器能够利用自身的优良特性加快固态开关的导通速度并且降低了对机械开关的技术要求,有其独特的技术优势和成本优势。

本研究将基于该新型限流式混合直流断路器的拓扑结构,在其低电压等级上研制相应的单元样机,并开展相关的研究验证性实验。通过一套合理的控制策略,以准确判断故障并迅速有效地开断短路故障电流。实验将通过样机的正常分合闸及短路故障切除的验证,来确定该拓扑方案的可行性和有效性。

1 断路器拓扑特点及工作原理

ABB公司于2012年设计了比较有代表性的320 kV/2.6 kA混合式高压直流断路器,该拓扑主要通过机械开关与IGBT串联,利用此IGBT的快速动作从而协助短路电流的转移,最终实现无弧分闸。然而,该拓扑中机械开关支路所串联的IGBT在断路器正常运行时会发热,增加了损耗,因此需要提供额外的冷却系统,提升了设备的复杂度。同时,由于与机械开关串联的IGBT数量较少,承压能力不强,如果在机械开关和固态开关均断开之后IGBT仍保持断开状态,则该IGBT由于和机械开关的分压关系容易造成过压损坏,需要采用相应的控制策略保护该IGBT,在一定程度上增加了对IGBT选型和控制上的难度。

本研究使用的拓扑结构,采用了在机械开关支路中串联一个小数值电感的形式,拓扑结构如图1所示。

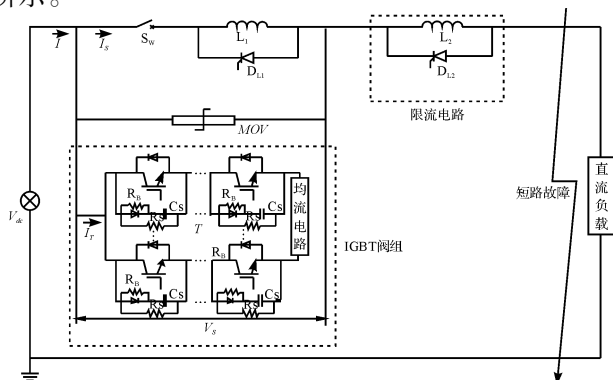


图1 限流式混合直流断路器拓扑结构

图1中,机械开关选用高速斥力开关以缩短断路器的开关时间。根据实际工程需要,固态开关采用全IGBT结构以减小断路器体积并减少电路正常工作时的损耗;小电感 L_1 数值远小于限流电感 L_2 ,当短路故障发生时,能够利用其在短路时因电流上升而产生的正向压降为固态开关提供足够的正向导通压降,保证短路电流实现快速换流;限流电感 L_2 在短路故障发生时起到限制短路电流上升的作用;均流电路拟采用变压器耦合的方式,防止分压不均或者过流原因而造成IGBT损坏;晶闸管 D_{11} 能在短路环流过程中迅速释放储存于 L_1 中的能量,避免 L_1 产生的反向电压阻碍换流过程的进行;晶闸管 D_{12} 用以快速释放故障切除后电感 L_2 储存的能量。限压阀并联在固态开关两端,用以吸收操作过电压以及雷击过电压,达到保护开关元器件的目的。

该拓扑利用小电感 L_1 在短路发生时因电流上升而产生的正向压降加速固态开关支路导通,从而避免了短路时单纯依靠机械开关起弧电压作为固态开关导通压降而存在可靠性低的问题,降低对机械开关的技术要求;同时,与机械开关串联IGBT的拓扑结构相比,串联小电感的拓扑结构可以省去冷却系统,减小断路器正常运行时的损耗,此外,也不会增加器件控制的难度。但是,该拓扑结构并未实现机械开关的无弧分断,因此要求所选用的机械开关仍需具备一定的灭弧能力。

2 混合式直流断路器样机研制

2.1 样机控制平台

低压样机的控制平台如图2所示。

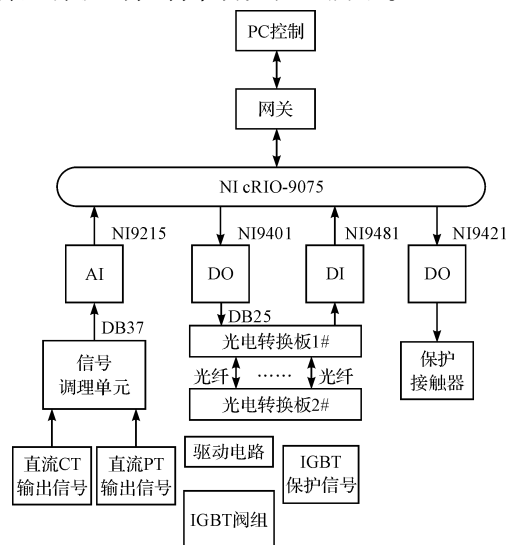


图2 断路器控制系统硬件构成

由图2可知,平台主要由PC、控制器NIcRIO-9075、输入/输出模块、信号调理单元、光电转换单元等部分组成。具体工作原理如下:一次侧的CT和PT测量信号经采样和预处理,通过模块NI-9215进行模数转化,经过控制器NIcRIO-9075运算后发出IGBT阀组的触发信号,该触发信号通过模块NI9401后,经光电转化板1#、2#传输之后最终将触发信号加在各个IGBT之上从而控制IGBT阀组导通。IGBT保护信号经光电板1#、2#传输之后通过模块NI-9421输入到控制器,以便实时监测断路器的运行状况,在故障发生时控制断路器做出及时有效的动作。断路器保护回路包括接地开关和旁路开关,通过NI-9481进行控制。

2.2 断路器控制保护主循环流程

控制保护主循环程序如图3所示。

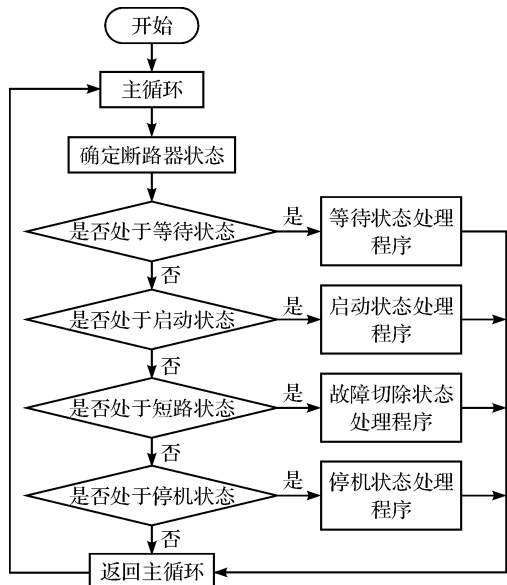


图3 断路器控制保护主程序流程图

由图3可知,主程序通过执行各种参数变量,长期保持循环运行,在每个循环周期内对断路器进行状态监测与处理。各个状态处理程序通过接受上位机指令来确定断路器的运行状态,从而进入不同的中断响应。断路器的状态处理分为等待状态处理、启动状态处理、故障状态处理、正常停机状态处理等4个状态处理模块。

2.3 各状态处理程序模块流程

系统的启动处理过程如下:将固态开关导通之后,断路器再进行闭合机械开关的操作,从而保证机械开关在零电压的状态下导通,达到保护机械开关的目的。等机械开关确认顺利合闸之后,再进行固态开关分闸操作,此时便完成了断路器的正常启动过程。其中,断

路器的限流回路在合闸初期起了减小电流上升率的作用,相当于对合闸过程起到了缓冲作用。合闸结束限流回路则对直流纹波具有抑制作用,因此整个装置的通态压降与损耗均很小。

断路器停机状态处理过程如下:收到上位机的关断信号后,机械开关分闸起弧,固态开关在电弧电压达到其临界导通值时进入导通状态,系统电流从机械开关支路转移到固态开关支路中,机械开关可以在低电压小电流下顺利分断。确认机械开关分断后,再关断固态开关,完成停机操作。

断路器故障判断处理策略作为控制策略的核心部分,其操作过程如图4所示。

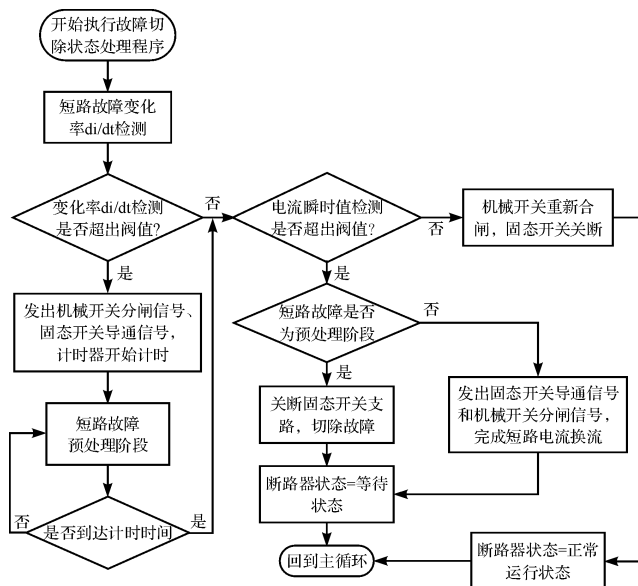


图4 直流断路器故障判断处理程序

本研究首先判断线路电流变化率 di/dt 是否超出所设定阈值,如果超出阈值(电流瞬时值尚未超出阈值)时,认为故障即将发生,断路器发出机械开关关断信号与固态开关导通信号,将电流先换流至固态开关支路,进入故障预处理阶段,计时器开始计时。如果在预定的计时时间内,系统检测到电流瞬时值超过阈值,则判断为故障发生,同时向固态开关发出关断信号,完成短路故障的迅速有效切除。如果在预定的时间内电流瞬时值仍未超出阈值,则将机械开关重新合闸,确认机械开关合闸成功后,再关断固态开关支路,重新将线路电流换流至机械开关支路,保持直流断路器的正常运行状态。

2.4 样机主电路搭建及参数选择

实验所搭建的新型限流式混合直流断路器样机电气主接线形式如图5所示。

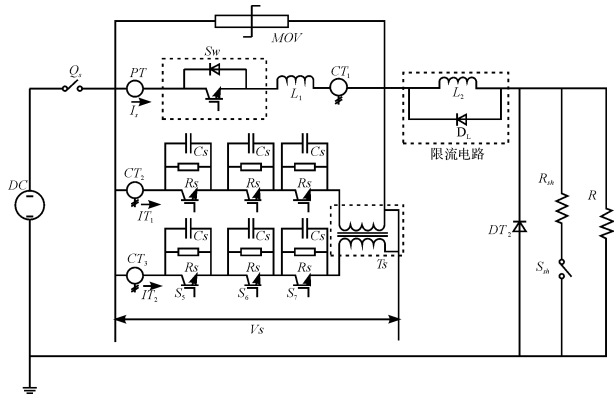


图 5 限流式混合直流断路器样机拓扑图

样机额定电压 200 V, 额定电流 5 A, 通过限流电路限制短路电流后, 预计最大短路电流 40 A, 开断时间 5 ms。Q_s 为隔离开关; 由于目前未找到合适的高速机械开关, 用 IGBT 对机械开关 S_w 进行模拟代替, 通过计算机控制开断时间来模拟机械开关的动作; CT₁、CT₂、CT₃ 为直流电流互感器, 分别用于测量机械开关支路, 以及两条固态开关支路的电流; PT 为直流电压互感器, 用于测量电源侧电压; 为了保证能够开断足够容量的短路电流, 固态开关支路 IGBT 阀组如图所示, 采用 IGBT 三串两并的结构。均压电路通过在 IGBT 两侧并联阻容回路实现, 均流电路则通过固态开关支路接入耦合变压器 T_s 实现^[15]; 在直线路出口处, 分别接有负载 R 和模拟短路电阻 R_{sh}, 短路故障通过继电器 S_{sh} 分合闸来实现有效的控制; 续流二极管 D_{T2} 用于断路器关断时释放线路中储存的能量。固态开关支路连接氧化锌避雷器进行保护, 避雷器型号 HY1.5W-0.28/1.3, 额定电压 280 V。

样机的电源由不控整流桥提供整流电源。限流回路参数和小电感数值采用以下公式计算^[16]：

$$L_2 \geq \frac{U_{dc} \cdot t_p}{i_{smax} - i_n} = (200 \times 0.005) / 35 = 28 \text{ mH} \quad (1)$$

$$L_1 \geq L_2 \frac{nU_{ce}}{U_{dc} - nU_{ce}} = 30 \times 3 \times 3.5 / (200 - 3 \times 3.5) = 1.7 \text{ mH} \quad (2)$$

式(2)中 IGBT 选取的型号为 BSM75GB120DN2, U_{ce} = 3.5 V, n = 3, 限流电感取值为 30 mH, 小电感取值为 2 mH。

均压支路电容选取依如下式所示：

$$C_s > \frac{t_{off} i_{LS}}{0.1 U_{dc}} = 50 \times 10^{-6} \times 40 / 20 = 100 \text{ uf} \quad (3)$$

最终, 样机各元器件具体选型参数如表 1 所示。

表 1 直流断路器样机参数

表目	型号或参数	数量
IGBT 型号	BSM75GB120DN2 (V _{ce} = 1 200 V, I _c = 105 A)	6
接触器	CRHX-1000W-6R (60A)	3
均压电阻电容	R = 10 kΩ, C = 200 μf	6
单相调压器	JDGC2G-10 kV · A (0 ~ 380 V)	1
隔离变压器	JBK5-2500V · A (220; 220)	1
整流桥	60 A	1
滤波电容	350 V 10 000 μf	2
负载电阻	40 Ω 1 kW	1
短路电阻	5 Ω 1 kW	1
小电感 L ₁	2 mH, 10 A, 线径 2.5 mm ²	1
限流电感 L ₂	30 mH, 10 A, 线径 2.5 mm ²	1
反向二极管	200 A	2

所搭建的实物样机控制柜接线如图 6 所示。

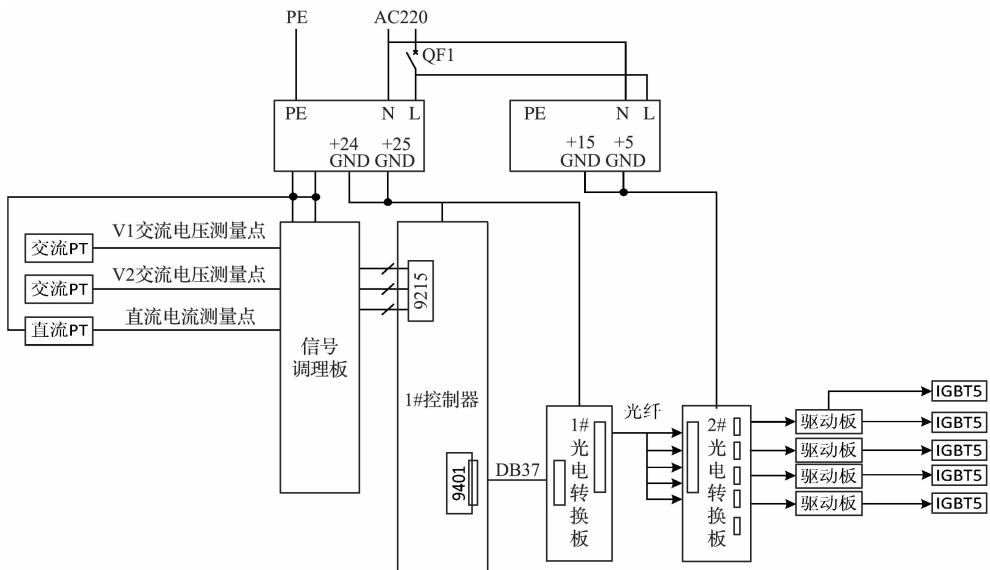


图 6 断路器样机控制柜接线图

样机的实物接线图如图7所示,样机实物图如图7(a)所示,其中的驱动模块及控制模块如图7(b)所示。

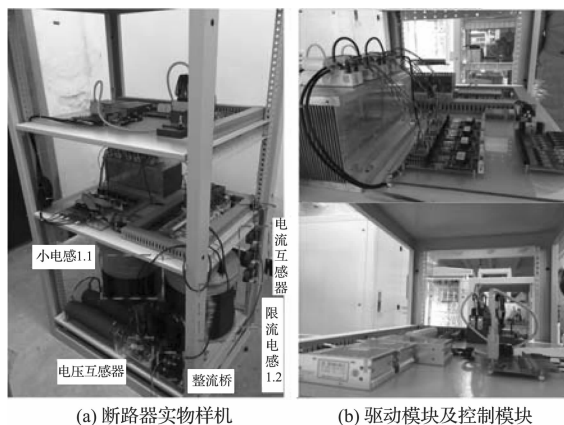


图7 混合式直流断路器样机

3 混合式直流断路器样机实验验证

3.1 直流断路器样机正常分闸实验

在该实验中,示波器选用横河(YOKOGAWA) DL750 数字式示波器,该示波器支持最多 16 个模拟通道输入和 16 位逻辑输入,具有 G 级缩放功能(GIGAZoom)和双捕捉功能(DualCapture),测量数据可以通过 USB 外接设备和 PC 卡传输到电脑。

正常分闸实验操作过程如下:将直流侧电压用调压器调到 200 V,闭合隔离开关 Q_s 。在人机交互系统上通过控制系统合上模拟开关 S_w 以完成正常导通,此时机械开关支路电流 $I_s = 4.865$ A,固态开关支路电流为 0。之后按下停机按钮发出切除指令,系统即完成正常分闸。

正常分闸实验波形如图8所示。从波形中可以看到,停机指令发出后,短路电流从机械开关支路转移至固态开关支路,并于 4 ms 后完成正常分闸。从实验波形中可以看到,固态开关上下两路的电流值存在些许偏差,并不完全相同,这主要是由于两条支路各自的元器件参数存在偏差造成的。分闸后机械开关支路产生了短时过电压,实验中测量为 25 V,这主要是由于电力电子器件与电路电感的电磁振荡引起,均符合预期。该实验结果与理论分析保持一致。

3.2 直流断路器样机短路故障实验

断路器短路故障实验如下:首先闭合短路开关 S_{sh} ,使系统发生短路故障。控制系统根据电流瞬时值以及电流变化率是否越限判断短路故障是否发生。同时,为了模拟机械开关在分闸时存在延时效应,对用

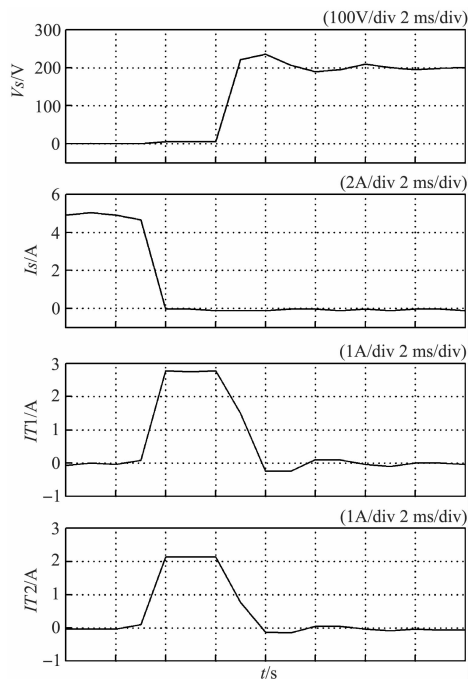


图8 直流断路器正常分闸波形

V_s —机械开关支路电压; I_{T1} , I_{T2} —固态开关支路上下两路电流。

IGBT 代替的 S_w 分别设置 3 ms, 5 ms 两组延时分闸,用来研究机械开关在不同动作时间下对短路故障切除的影响。为便于波形之间的分析比较,在短路实验中,将电流波形置于同一个测量环境下进行测量显示,导出后的实验波形如图9(a~b)所示。

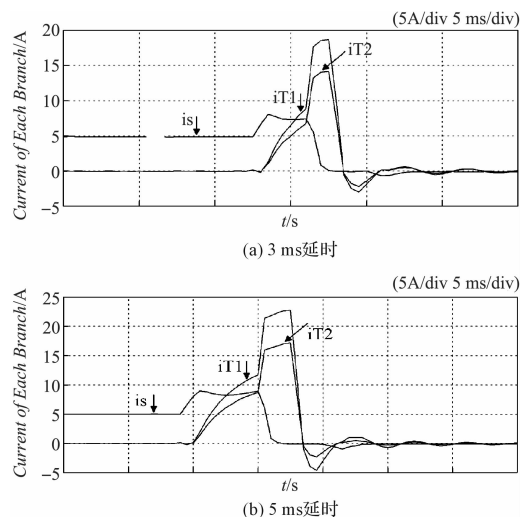


图9 S_w 在不同延时下短路分闸波形

i_s —流经机械开关支路的电流波形; i_{T1} , i_{T2} —流经固态开关上下两路支路的电流波形。

机械开关 S_w 延时 3 ms 断开的实验波形如图9(a)所示。在延时过程中,机械开关支路的电流基本保持不变。同时固态开关支路导通,两条支路电流 i_{T1} 、 i_{T2} 分别上升。3 ms 后,当机械开关断开,固态开关支路电流

上升趋势加快,短路电流全部换流至固态开关支路。当控制系统检测到机械开关支路电流为零后,立刻发出固态开关支路关断的信号,完成短路分闸过程。

机械开关 Sw 延时 5 ms 的实验波形如图 9(a) 所示,考虑到实际机械开关分闸后需要一定时间恢复绝缘强度,在试验中为防止二次击穿,当系统检测到机械开关电流为零之后,延时 1 ms 之后再断开固态开关。与 3 ms 延时的波形对比中可以看到,机械开关增加延时并不会对机械开关支路电流产生影响,但会导致固态开关支路的分闸电流明显上升,同时系统的振荡也更为剧烈。上述波形图中,当电流降为 0 后,均有负向电流产生,这是由于并联的均压电容跟线路中的电感发生振荡而造成的。在实际的工程应用中,可以通过选择更为合适的参数和器件来降低振荡幅值,以减小震荡带来的损害。

短路实验表明:该拓扑能够在短路故障发生后迅速将短路电流换流至固态开关,迅速地切除短路故障。但是,随着模拟机械开关 Sw 动作延时的增加,将导致短路电流上升到更高值,不利于短路故障的切除,同时延长了短路故障的切除时间。因此,该拓扑要求机械开关具有快速开断时间,以便在短路故障发生时能够及时有效的切除短路故障。

4 结束语

新型限流式混合直流断路器拓扑的优点在于:机械开关支路串入小电感结构可以在故障切除时,加速固态开关支路的导通,同时可以避免机械开关串联 IGBT 结构存在能量损耗的问题,简化了设备结构和控制策略,因而具备一定可行性。本研究通过对该拓扑的样机设计及实验验证,很好地完成了相关理论性验证。

从实验中可以看到,该拓扑结构通过合理的控制策略,能够完成正常的分合闸以及短路故障分闸操作,但是对于机械开关的速动性依然有一定要求。同时,由于对样机的机械开关采用了 IGBT 进行模拟,而实际情况则要求机械开关必须具备相应的灭弧能力。因此,今后需要选用更加合适的机械开关来设计制作电压等级更高的样机,以便验证机械开关的燃弧和换流过程的有效性。

参考文献(References):

- [1] 李 岩,罗 雨,许树楷. 柔性直流输电技术:应用、进步与期望[J]. 南方电网技术,2015,9(1):7-13.
- [2] CIGRE B4-52 Working Group. HVDC grid feasibility study [R]. Melbourne: International Council on Large Electric Systems,2011.
- [3] 汤广福,罗 湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.
- [4] 温家良,吴 锐,彭 畅,等. 直流电网在中国的应用前景分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(13):7-12.
- [5] 张文亮,汤 涌,曾南超. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
- [6] 马 钊,直流断路器的研发现状及展望[J]. 智能电网,2013,1(1):12-16.
- [7] 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.
- [8] LUCA N, ELENA G, ROBERTO P. Feasibility study of a hybrid mechanical-static DC circuit breaker for superconducting magnet protection[J]. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**,2009,19(2):76-83.
- [9] PIOVAN E, GAIO N. Performance analysis of a hybrid IGCTs-mechanical DC circuit breaker for quench protection of superconducting magnets[C] //Proceedings of 22nd Symposium on Fusion Engineering(SOFE), New Mexico: IEEE,2007.
- [10] 查申森,郑建勇. 混合式断路器的 IGBT 串联均压技术[J]. 电网技术,2010,34(4):177-182.
- [11] 药 韬,温家良,李金元,等. 基于 IGBT 串联技术的混合式高压直流断路器方案[J]. 电网技术,2015,39(9):2484-2489.
- [12] 江道灼,张 弛,郑 欢,等. 一种限流式混合直流断路器方案[J]. 电力系统自动化,2014,38(4):65-71.
- [13] 魏晓光,高 冲,罗 湘,等. 柔性直流电网用新型高压直流断路器设计方案[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):95-102.
- [14] 陈 可,江道灼,谢 峰,等. 一种含有均压均流电路的限流式高压直流断路器[J]. 电力建设,2015,36(11):108-114.
- [15] 张 弛. 高压直流断路器及其关键技术[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2014.
- [16] 杜 翼,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.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

谢 峰,江道灼,吴振梁,等. 混合式直流断路器控制策略及实验验证[J]. 机电工程,2017,34(3):287-292.

XIE Feng, JIANG Daozhuo, WU Zhenliang, et al. Control strategy and experimental verification of hybrid DC circuit breaker[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(3):287-292.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>