

模块化多电平柔性直流换流器阀组本体保护的设计

冯亚东^{1,2}, 汪涛², 卢宇², 汪楠楠², 袁涛², 陈勇²

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京市 100086; 2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏省南京市 211102)

摘要: 换流器阀组是柔性直流输电系统的关键设备。文中介绍了模块化多电平换流器阀组的基本原理和组成结构, 基于舟山五端柔性直流输电工程对阀组过电流和过电压故障进行了仿真、分析研究, 提出了阀组保护的关键需求, 以此为基础构建了由子模块控制电路、阀控系统及柔性直流控制保护系统组成的多层次的完整的阀组本体保护系统及保护策略, 提出了系统性的过流保护策略和系统性过电压判据, 有效提高了阀组的过电流、过电压穿越能力。阀组保护系统及保护策略经过了±6 kV 两端柔性直流输电系统的试验验证和舟山、南澳工程现场试验的验证。

关键词: 柔性直流输电; 模块化多电平换流器; 阀组本体保护

0 引言

柔性直流输电(VSC-HVDC)技术是当前电网技术发展的热点。模块化多电平换流器(MMC)的阀臂由多个子模块(SM)组成, 通过多个子模块输出电平的叠加输出正弦波信号, 具有开关频率降低、损耗低、谐波小等优点, 易于拓展至更高电压等级, 是目前柔性直流输电研究应用的主要方向^[1-2]。MMC 阀组占据了柔性直流换流站投资的主要部分, 其中的主要元器件, 如绝缘栅双极型晶体管(IGBT)和电容器, 相对于变压器、电抗器、线路等设备对过电流、过电压异常敏感, 因此, MMC 阀组的保护技术研究在柔性直流输电设备研制中非常关键。

文献[3-5]介绍了柔性直流输电系统保护的概念和保护配置方案, 提出了较为全面的保护方案, 保护方案和方法继承了传统直流输电和交流元件保护的成熟方法, 如直流线路故障的判断、阀区保护、电抗器保护、换流变保护等。针对基于 MMC 的柔性直流输电系统, 文献[6-7]对子模块故障特点进行了研究, 提出了子模块冗余的应对策略; 文献[8-9]对直流侧短路故障进行了研究和分析, 并提出了基本的保护策略。但上述方法和策略, 还存在诸多不够深入、不够完善或不完备的地方。

柔性直流输电作为新的技术, 相关技术的成熟度还需要经过时间的考验。文献[10]指出, Cross

Sound Cable 柔性直流输电工程强迫停运的最大原因是阀组保护的误动作。国内上海南汇、南澳、舟山等柔性直流输电试验工程实施过程中, 阀组控制保护也是影响系统稳定和可靠运行的重要因素。因此, 如何在过电压、过电流的情况下, 确保阀组的安全, 同时又防止不必要的旁路和跳闸停运, 是需要持续深入进行研究的问题。

本文以舟山五端柔性直流输电工程为实例, 在 MMC 工作原理介绍的基础上, 研究分析了影响阀组本体安全的各种故障及其检测方法, 提出了局部与整体相配合的电流保护策略和系统性过电压保护策略, 建立了从子模块、阀控系统到直流控制保护的多层次换流阀保护系统。

1 MMC 阀组

在对 MMC 阀组本体保护进行研究之前, 先介绍一下 MMC 及其控制保护系统的工作原理。

1.1 MMC 的工作原理

MMC 及子模块的结构如图 1 所示, 每个桥臂由 n 个子模块和换流电抗器组成。图中, SMC 表示子模块控制电路。通过控制 IGBT T1 和 T2, 子模块可以分别输出电容电压和 0 两种电平, 即处于投入和退出状态。通过控制处于投入状态子模块的个数, 可以叠加形成所需要的交流电压。

1.2 子模块的工作原理

如图 1 中子模块部分所示, 子模块实际由两电平变换电路、保护电路和控制电路组成。两电平变换电路由 T1, T2 和电容组成; 保护电路由并联在输入端的晶闸管和机械开关组成; 控制电路包含电源、

控制和状态采集电路、驱动电路等。

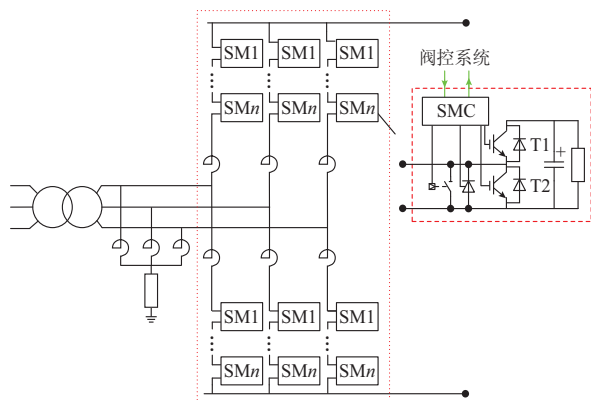


图1 MMC示意图
Fig.1 Schematic diagram of MMC

当控制电路或系统检测到子模块出现无法恢复的故障时,通过控制机械开关闭合,将子模块旁路,从而不影响其他子模块的运行。当系统检测到直流侧短路故障的时候,控制电路触发晶闸管导通,短路电流主要从晶闸管中流过,保护 IGBT 中反向并联的二极管免于损坏。

1.3 二次控制保护系统

柔性直流输电控制保护系统结构见图 2,其中二次控制保护系统包括运行人员控制系统、柔性直流控制保护系统、量测系统、阀控系统和 SMC^[11]。

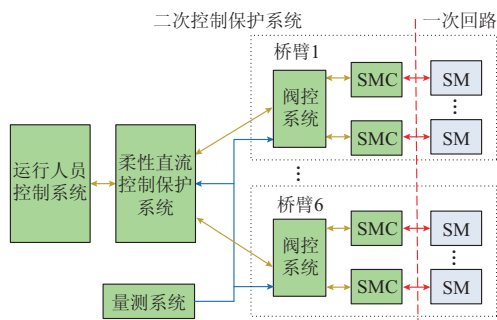


图2 柔性直流输电控制保护系统结构
Fig.2 Structure of VSC-HVDC control and protection system

运行人员控制系统监视直流输电系统的运行状态,发出系统的运行控制命令。柔性直流控制保护系统执行运行人员控制系统的控制指令,实时控制阀组每个桥臂的输出电压或投入子模块的个数,同时检测交直流电网、阀组、变压器等设备故障,给出保护指令。量测系统实时采集交流侧、直流侧各点电压和电流、阀组各桥臂的电流提供给阀控系统、柔性直流控制保护系统使用。阀控系统通常承担一个桥臂子模块的监视、控制和保护功能,实时采集各子模块状态,结合柔性直流控制保护系统指令控制各

子模块状态。SMC 负责采集其所在子模块的状态,执行阀控系统发给该子模块的命令。SMC 与子模块处于高电位,通过高压光纤与阀控系统通信。

2 阀组故障分析

相对于常规电力系统设备,MMC 阀组对过电压、过电流非常敏感。因此,有必要对各种故障进行分析,确定电压和电流的特点,从而制定合理的保护策略^[12]。

2.1 过电流分析

以图 3 所示的柔性直流输电系统为例,阀组内多种短路故障、交流区外短路故障、直流区外短路故障均可能对阀组造成威胁。现以舟山五端柔性直流输电工程某换流站为例,不同故障点仿真的电流波形如图 4 所示。图中: i_{pa}, i_{pb}, i_{pc} 为上桥臂三相电流; i_{na}, i_{nb}, i_{nc} 为下桥臂三相电流; i_{dp} 和 i_{dn} 分别为上、下桥臂总输出电流; $i_{p,diff}$ 为阀区上部差动电流。

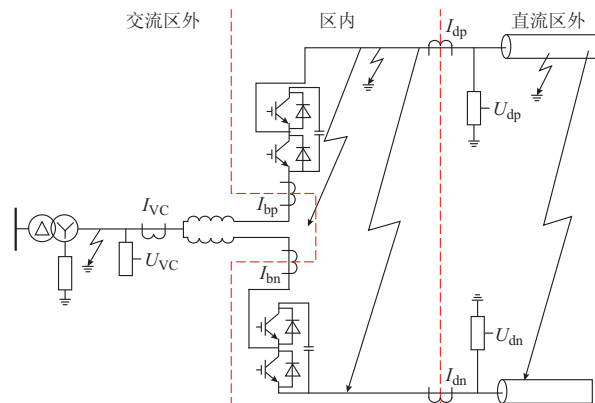


图3 故障范围和保护测点分布
Fig.3 Fault areas and measuring points

从图 4 可以看到,由于故障位置的不同,故障电流及对阀组安全性的威胁差别很大。由图 4(a)可知,由于阀臂多个子模块的电容经过短路回路放电,回路中的电感和电阻非常小,仿真的短路电流上升极为迅速,大小超过 50 kA,对阀组威胁极大,并且该故障电流可能不流经电流测点。

由图 4(b)可知,由于桥臂中二极管回路的存在,该故障相当于交流侧通过桥臂电抗器三相短路。由于短路回路经过了桥臂电抗器,短路电流上升率受到一定限制^[13-14],在短时间内电流即超过了 IGBT 运行允许的范围,阀臂最大故障电流可达到 10 kA,对阀组造成了很大威胁。

由图 4(c)可知,阀臂短时电流达到了 2 kA。由于交流侧零序阻抗的限制,稳态电流与正常运行比较接近,故障对阀组威胁不大。分析阀区上部的差动电流,正常运行时基本为 0,故障时跃变到一个很

大的电流,然后快速衰减到 1 kA 左右。相对于桥臂电流,该差动电流可以更为有效地识别出本故障。

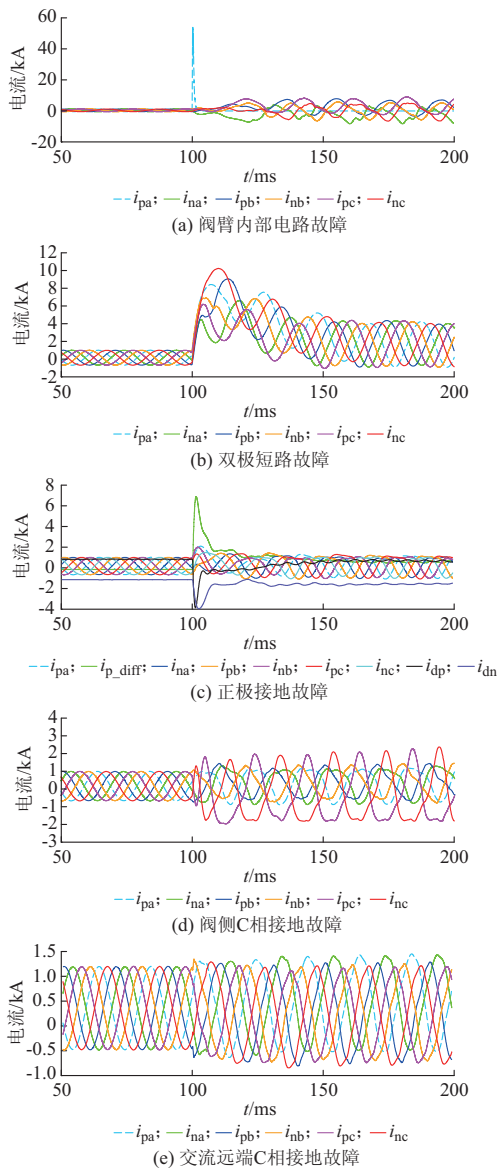


图 4 故障仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of faults

由图 4(d)和(e)可知,对于阀侧单相接地故障,阀组故障电流较大,上升时间达到数毫秒;而对于交流远端单相接地故障,阀组故障电流基本在器件可短时承受的范围,加上控制系统的限流控制,交流区外故障对阀组威胁较小。

从上面的波形可以看到阀组主要故障电流暂态过程的特点。一部分故障电流上升快、幅值大,关键在于如何快速地进行保护;还有一部分故障,电流幅值不大,关键在于如何灵敏有效地检测和控制。

2.2 阀组过电压分析

过电压是阀组的另一大威胁,阀组关键元器件(IGBT、电容器)过电压能力都有限。IGBT 对过

电压尤其敏感,微秒级的过电压就可能导致 IGBT 损坏。时间极短、幅值高的交直流电网过电压,如操作过电压、雷电过电压,一般无法通过保护系统来防护,需要通过合理的耐压设计、避雷器配置和电抗器等元件的衰减来预防^[15]。

SMC 或者 IGBT 故障,可能导致子模块处于充电状态,子模块电容电压不断上升,最终造成子模块过电压损坏。为保护模块,减少对整个阀组的影响,需要及时旁路故障的子模块。当交流或者直流系统处于异常运行工况下,如发生大的扰动,控制系统无法有效控制系统的电压时,则可能造成电压超过正常允许的范围。对舟山工程各种运行工况下的故障进行仿真,扰动过程中最大子模块电容电压远远超过了额定工况的 1.2 倍。这类过电压往往能量大持续时间长,但又低于避雷器的动作电压,因此需要依靠控制保护系统对阀组进行保护。

3 阀组本体保护解决方案

IGBT 的安全工作区限定了超过额定 2 倍的故障电流,持续超过 10 μs ,器件就不能保证可靠关断;2 倍的故障电流,持续 1 ms 就可能造成器件损坏;微秒级的过电压脉冲就可能造成器件的彻底损坏。

与传统直流输电系统依靠直流控制保护系统相比,上述因素导致直流控制保护系统在阀组本体保护中的作用受到了限制。需要针对 MMC 阀组的特点,制定更为快速有效的保护策略。

3.1 阀组电流保护

经过 2.1 节的分析,电流保护的要求可以分为如下几类:①不经电抗器的直接短路故障,故障电流大,上升速度快,必须立即切断故障电流;②经过电抗器的内部或近端区外电流型故障,必须在电流上升超过器件运行范围的时间内采取保护措施;③对电流型故障要有足够的灵敏度;④对临时性的交流区外故障,需要维持换流器的持续运行。

为了达到上述过电流保护的要求,本文设计了由子模块、阀控系统、柔性直流控制保护系统有机配合的电流保护功能,以有效地保护阀组本体的安全。

1)第 1 级瞬时过电流保护:应对直接短路的威胁,实时性要求极高,瞬时闭锁阀组关断故障电流。

2)第 2 级快速过电流保护:应对流经电抗器的短路电流的威胁,通过短延时的过电流检测信号迅速闭锁阀组。

3)直流侧短路保护:对于直流侧短路的情况,第 2 级快速过电流保护只能阻断电容放电电流,无法切断交流系统注入的故障电流。因此设计专门的直流侧短路保护功能,当检测到直流侧短路时,发出触发保护晶闸管命令,在故障电流存续期间让晶闸管承担主要的故障电流,保护 IGBT 模块^[7];同时通过

跳开交流开关来彻底切除故障电流。

4) 常规电流保护: 通过差动和延时过电流保护更灵敏地检测阀组区内故障或过电流、过负荷故障。

5) 过温保护: 作为过负荷或延时过流保护的后备保护, 由阀控系统检测子模块内部温度信号更为直接地对阀组进行保护。

3.2 阀组过电压保护

如 2.2 节分析, MMC 过电压保护需考虑子模块过电压保护和阀组过电压保护。子模块过电压保护功能, 希望在尽可能低的电压下启动模块旁路功能, 避免对系统运行造成影响。阀组过电压保护功能则重点提高阀组在过电压情况下的承受能力。

为此本文提出了系统性过电压判据, 避免在系统过电压的情况下误旁路子模块。判据将电容电压异常检测和处理分为以下几个门限: ① 额定电容电压 V_{norm} ; ② 过电压报警门限 V_a ; ③ 过电压旁路门限 V_p 。其中, $V_{norm} < V_a < V_p$ 。当系统出现过电压影响到子模块电容电压时, 由于阀控系统的电容电压平衡功能, 子模块间电容电压相差并不大, 当子模块的电容电压接近 V_a 时, 将有多个子模块出现过电压报警。通过阀控系统的综合判断, 可以防止各个子模块旁路, 使阀组整体在合理的过电压范围内运行。当个别子模块电容电压超过 V_p , 而其他子模块低于 V_a 时, 则判定为该子模块过电压, 从而及时旁路。

4 阀组本体保护的功能验证

为了验证阀组本体保护的策略及控制保护系统功能的正确性, 搭建了数字模拟仿真系统和两端 MMC 直流输电试验系统^[16-17]。两端 MMC 直流输电试验系统模拟了网侧变压器、换流电抗器、背靠背阀组、直流线路等设备, 直流电压为 ± 6 kV, 交流网侧电压为 5 kV, 每个桥臂包含 6 个子模块。试验系统中子模块工况与其额定参数一致。

模拟的网侧交流相间短路故障及阀组直流双极短路故障的故障波形见附录 A 图 A1 和图 A2。从附录 A 图 A1 可以看到, 在发生交流侧 AB 相间短路故障后, 阀侧 A、B 相电流和桥臂电流急剧上升, 当超过设定的电流阈值后, 控制保护系统发出阀组闭锁信号, 桥臂电流被限制在 2 000 A 以内。切除闭锁命令与采样数据间的同步时间差, 保护动作时间小于 200 μ s, 整个故障期间电流超过额定值的时间小于 1.5 ms, 有效保护了阀组的安全。

附录 A 图 A2 中, 495 ms 发生直流双极短路故障后, 直流短路电流迅速上升, 电流越限后控制保护系统发出闭锁阀组命令和投晶闸管命令, 5 ms 后控制保护系统发出系统停运命令, 交流故障电流持续 36 ms 后被切除, 直流故障电流持续 650 ms 衰减到 0, 由于故障电流主要由大容量的晶闸管承担, 有效

保护了 IGBT 的安全。

阀组的过电压保护通过了交流和直流耐压试验的检验。整个阀组本体保护策略通过了 KEMA 实验室的见证试验和舟山、南澳多端柔性直流输电工程的各项工程试验, 已投入实际运行。

5 结语

换流器阀组是柔性直流输电系统的重要组成部分, 由于 IGBT 过电流、过电压能力的限制, 对阀组本体的保护提出了苛刻的要求。

本文以舟山、南澳工程为基础, 对不同位置和类型的电流型故障进行了仿真分析, 提出了故障的特点和保护需求, 构建了子模块、阀控系统和柔性直流控制保护系统组成的多层次和不同实时等级的完整的保护系统及保护策略; 提出了系统性过电压判据, 避免子模块误旁路, 有效提高了阀组过电压穿越的能力。阀组故障的检测方法和主要保护策略经过了两端柔性直流输电试验系统的验证, 可以有效保护阀组的安全, 已应用于舟山、南澳多端柔性直流输电工程。由于柔性直流输电还处于应用的初期阶段, 其控制保护技术还需经受实际故障的检验, 并随着应用的发展而进一步完善。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]// Proceedings of IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy; 6p.
- [2] DORN J, ETTRICH D, LANG J, et al. Benefits of multilevel VSC technologies for power transmission and system enhancement [EB/OL]. [2007-12-04]. http://www.ptd.siemens.de/Paper_EN_Benefits_of_Multilevel_VSC_ENR_07-12_V_1a.pdf.
- [3] 刘高原, 季子孟, 林思海. 柔性直流换流站保护系统的研究与分析[J]. 华东电力, 2011, 39(7): 1141-1144.
LIU Gaoyuan, JI Zimeng, LIN Sihai. Research on protection system of flexible HVDC converter station [J]. East China Electric Power, 2011, 39(7): 1141-1144.
- [4] 董云龙, 包海龙, 田杰, 等. 柔性直流输电控制及保护系统[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 89-92.
DONG Yunlong, BAO Hailong, TIAN Jie, et al. Control and protection system for VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 89-92.
- [5] 梁少华, 田杰, 曹冬明, 等. 柔性直流输电系统控制保护方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 59-65.
LIANG Shaohua, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. A control and protection scheme for VSC-HVDC system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65.
- [6] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 94-98.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Redundancy protection for sub-

- module faults in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98.
- [7] 敬华兵, 年晓红. 新型的模块化多电平换流器子模块保护策略[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1954-1958.
JING Huabing, NIAN Xiaohong. A novel protection strategy for sub-modules of modularized multi-level converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1954-1958.
- [8] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [9] 许烽, 徐政, 傅闯. 多端直流输电系统直流侧故障的控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 74-78.
XU Feng, XU Zheng, FU Chuang. A control and protection scheme of multi-terminal DC power system for DC line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 74-78.
- [10] DODDS S, RAILING B, AKMAN K, et al. HVDC VSC (HVDC light) transmission—operating experiences [C]// Proceeding of CIGRE 2010, August 23-27, 2010, Paris, France: 7p.
- [11] 刘栋, 杨兵建, 杨岳峰, 等. 基于 MMC 的柔性直流输电阀基控制器及其动模试验. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 53-57.
LIU Dong, YANG Bingjian, YANG Yuefeng, et al. MMC based valve base controllers of HVDC flexible and their dynamic simulation experiment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 53-57.
- [12] 罗湘, 汤广福, 温家良, 等. 电压源换流器高压直流输电装置中 IGBT 的过电流失效机制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 1-7.
LUO Xiang, TANG Guangfu, WEN Jialiang, et al. Over-current failure mechanism of IGBT within voltage source converter based high voltage direct current[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 1-7.
- [13] 谢妍, 陈柏超, 陈耀军, 等. 新型模块化多电平换流器串联电抗器的功能与取值分析[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 55-59.
XIE Yan, CHEN Baichao, CHEN Yaojun, et al. Function
- analysis and parameter selection for series reactor of modular multilevel converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 55-59.
- [14] 赵成勇, 胡静, 翟晓萌, 等. 模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 89-94.
ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 89-94.
- [15] 张哲任, 徐政, 薛英林. MMC-HVDC 系统过电压保护和绝缘配合的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 58-64.
ZHANG Zheren, XU Zheng, XUE Yinglin. Study of overvoltage protection and insulation coordination for MMC based HVDC[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 58-64.
- [16] 胡兆庆, 田杰, 董云龙. 模块化多电平柔性直流输电系统网侧故障控制策略及验证[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 71-75.
HU Zhaoqing, TIAN Jie, DONG Yunlong. A control strategy for modular multilevel converter based HVDC flexible systems under system faults and its verification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 71-75.
- [17] 董云龙, 杨勇, 田杰. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电动态模拟系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 74-78.
DONG Yunlong, YANG Yong, TIAN Jie. Dynamic simulation system for modular multilevel converter based VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 74-78.

冯亚东(1972—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 交直流控制保护技术、变电站一次设备智能化、柔性直流输电技术研究与开发。E-mail: fengyd@nrec.com

汪涛(1981—), 男, 工程师, 主要研究方向: 直流控制保护平台技术、柔性输电技术研究与开发。

卢宇(1979—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 直流控制保护技术研究与开发。

(编辑 万志超)

Valve Protection Design of Modular Multilevel Converter for VSC-HVDC

FENG Yadong^{1,2}, WANG Tao², LU Yu², WANG Nanman², YUAN Tao², CHEN Yong²

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100086, China;

2. NR Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: The converter valve is the key equipment in a voltage source converter based high-voltage direct current (VSC-HVDC) system. This paper is concerned with the structure and principles of the modular multilevel converter (MMC) valve, an analysis of the characteristics and effects of the internal and external faults, and a complete multi-level protection strategy and protection system for the valve with sub-module control circuits, the valve control system and high-voltage direct current (HVDC) control and protection system. A criterion for systemic over-voltage is proposed, effectively improving the over voltage ride through capability of the valve. The strategy as well as function of the valve protection system has been validated through an experimental ± 6 kV point-to-point VSC-HVDC system, and used in Zhoushan and Nan'ao multi-terminal VSC-HVDC projects.

This work is supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (No. 2013AA050106).

Key words: voltage source converter based high-voltage direct current (VSC-HVDC); modular multilevel converter (MMC); valve protection