

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180902

基于 LCC-FHMMC 混合直流输电的控制策略研究及试验验证

董朝阳^{1,2}, 吉攀攀^{1,2}, 冯敏^{1,2}, 俎立峰^{1,2}, 王晓丽^{1,2}, 司志磊^{1,2}, 张哲^{1,2}

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 搭建了一种混合直流输电物理动模平台, 其整流站采用串联的电网换相换流器(LCC), 逆变站采用半桥和全桥子模块混合的模块化多电平换流器(FHMMC)。为提高系统容量, 逆变侧的 FHMMC 换流器采用高低阀组串联的拓扑结构。对不同全桥子模块配比下高低阀组的在线投退、直流故障穿越等关键技术进行了研究, 并在所设计的动模平台上进行了实验验证。实验结果表明所提出的控制策略能够实现混合直流输电系统的高低阀组在线投退及故障自清除, 为多种混合直流输电以及新型电压源换流器的工程应用提供了论证平台。

关键词: 混合直流输电; 电网换相换流器(LCC); 电压源换流器(VSC); 阀组投退; 故障自清除

Control strategies and experimental verification for hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC

DONG Chaoyang^{1,2}, JI Panpan^{1,2}, FENG Min^{1,2}, ZU Lifeng^{1,2}, WANG Xiaoli^{1,2}, SI Zhilei^{1,2}, ZHANG Zhe^{1,2}

(1. XJ Electric Ltd, Xuchang 461000, China; 2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: A dynamic simulation experimental platform for hybrid HVDC transmission is established, which adopts line commutated converters (LCCs) in rectifier station, and hybrid modular multilevel converters (FHMMCs) based on half bridge sub-module and full bridge sub-module in inverter station. In order to increase the system capacity, the FHMMC on the inverter side adopts a structure with valve groups in series. The key technologies such as valve groups deblocking and blocking and DC fault ride-through with different proportions of the full bridge sub-module are studied, and the experimental verification on the dynamic platform is carried out. The results show that the proposed control strategies can realize the valve groups deblocking and blocking and DC fault ride-through of the hybrid HVDC transmission system, and a demonstration platform for the application of hybrid HVDC transmission and voltage source converters is provided.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52110418001W) Key Technologies Research on Flexible DC Converter Valve Reliability Upgrade.

Key words: hybrid HVDC transmission; line commutated converter (LCC); voltage source converter (VSC); valve groups deblocking and blocking; fault self-clearing

0 引言

基于电网换相换流器(Line Commutated Converter, LCC)的传统直流输电系统具有运行可靠、成本低等优点, 但也存在无法提供无功支撑, 逆变站容易发生换相失败等问题^[1-2]。基于全控型电力电子器件的电压源型换流器(Voltage Source Converter, VSC)可独立控制有功、无功功率, 不存在换相失败, 可为无源孤岛供电等诸多优点, 但目前造价较高, 全部为半桥子模块时直流故障无法自清除。结合 LCC 和

VSC 两者优势, 将 LCC 应用于整流站, VSC 用于逆变站的混合直流输电系统, 能够降低工程总体成本、扩展应用场合、避免换相失败^[3-7], 是现阶段理论研究及工程应用的一个发展方向。

由于目前单个MMC(Modular Multilevel Converter, MMC)换流器的容量还没有达到传统直流输电换流器的水平, 且单个MMC单元的容量提升除了受制于联结变压器容量外, 还受制于控制单元硬件、均压排序时间等^[8]。因此, 技术上一个合理的做法是以单个MMC单元为基本换流器单元进行串并联组合, 从而构成在电压和容量两方面都满足要求的组合式换流器。

为了减少由于设备故障造成的功率损失, 增加

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(52110418001W)
“柔直换流阀可靠性提升关键技术研究”

系统运行灵活性和可靠性, 一次设备的每个换流器单元均增设了旁路刀闸。当一组换流器出现故障时, 只需将其旁路合上, 其他换流器仍可正常运行。发生故障的换流器故障清除后, 系统还应在其他未发生故障的换流器不停运的情况下, 将该清除了故障的换流器重新投入运行。因此, 在直流输电工程中, 单阀组的自动投/退控制成为重要的控制环节之一。

MMC换流器一般采用半桥子模块拓扑, 但是存在直流侧故障无法自清除的缺陷, 可行的解决方案是采用全桥模块或加装直流断路器。本文采用在MMC换流器中级联一定数量的全桥模块方案, 可利用全桥模块的特性, 解决直流侧短路工况下故障自清除问题^[9-17]。但是考虑到投资成本和运行损耗, 全桥子模块和半桥子模块的数目关系也是需要关注的重点之一。

本文搭建了基于LCC-FHMMC组合式混合直流输电电动模平台, 其整流站将LCC换流器串联, 逆变站将MMC换流器串联, 同时逆变站采用半桥和全桥子模块混合的结构, 分别探索不同全桥子模块配比下高低阀组的在线投退、直流故障穿越等关键控制策略。为新型电压源换流器的工程应用提供论证平台。

1 系统总体设计

1.1 拓扑结构

混合直流输电系统的拓扑形式有多种, 本文主要探求阀组投退和不同全桥比例下的故障穿越特性, 建立如图1所示接线形式的LCC-FHMMC混合直流输电系统。整流站沿用传统直流输电系统配置, 为晶闸管电网换相换流器LCC, 且采用高低阀组拓扑。逆变站为柔性直流输电换流器MMC, 同样采用高低阀组拓扑。

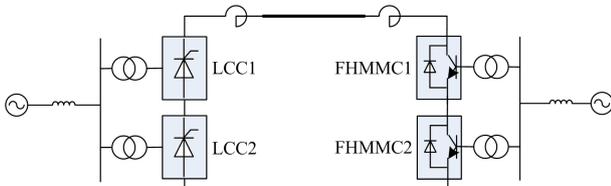


图1 混合直流拓扑结构图

Fig. 1 Topology diagram of hybrid HVDC

FHMMC的拓扑结构如图2所示, U_{dc} 为FHMMC输出的直流电压, u_a 、 u_b 、 u_c 为换流器交流出口处三相电压。换流器采用三相6桥臂结构, 每个桥臂由20个FBSM级联而成, 同时配置1个桥臂电抗器L。图中的FBSM由4个IGBT(T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4)、4个二极管(D_1 、 D_2 、 D_3 、 D_4)和1个电容

C组成。FBSM可控制为HBSM效果, 从而达到任意更改FBSM配比的目的。

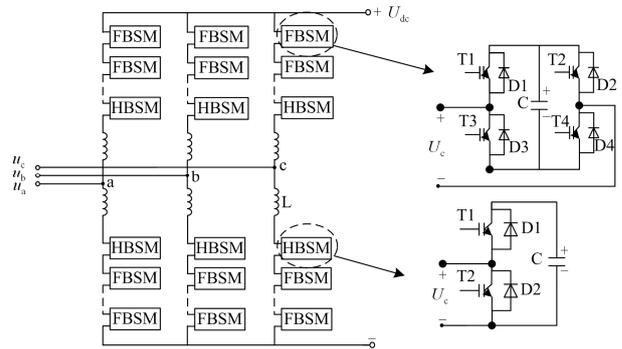


图2 FHMMC的拓扑结构图

Fig. 2 Topology diagram of FHMMC

1.2 全桥子模块配比变换

1) FBSM个数选取

将所需全桥子模块FBSM的个数记为 F , 每个子模块电压记为 U_c , 交流相电压幅值记为 U_m 。欲使换流器能够在STATCOM模式下实现故障穿越, 需要满足 $FU_c \geq U_m$, 在此条件下, 必然满足闭锁故障穿越的条件 $2FU_c \geq \sqrt{3}U_m$ 。

故全桥子模块数量应满足 $F \geq U_m / U_c$ 。FBSM越少越有利于降低系统成本和损耗, 因此 F 取值应尽可能小, 故根据上述内容, 可确定本系统全桥子模块个数最小值为10, 即最低50%全桥子模块配比。为了验证不同全桥比例下的系统运行特性, 本文对50%和70%全桥配比的运行情况进行分析。

2) HBSM个数选取

每个桥臂的子模块个数一定, 故确定全桥子模块个数后, 可知半桥子模块个数。

3) FBSM配比变换

为验证不同全桥子模块配比下的阀组投退及直流故障穿越功能, 可在线更改子模块的类型, 通过后台设置全桥子模块配比, 阀控根据配比生成不同的子模块控制指令, 当全桥子模块的 T_4 管一直导通, 即可实现半桥子模块的充电效果, 如图3所示。

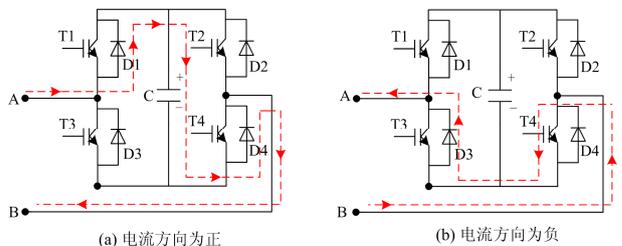


图3 全桥子模块控制为半桥子模块自然充电

Fig. 3 Natural charging of half bridge sub-module controlled with full bridge sub-module

1.3 控制系统设计

基于LCC-FHMMC混合直流输电电动模控制系统配置一套后台监控系统，同时各换流单元分别对应一套控制保护系统和阀控系统。控制系统整体架构如图4所示。

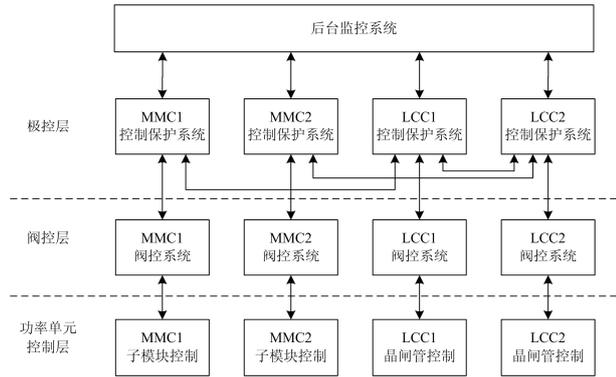


图4 控制系统总体架构

Fig. 4 Architecture of control system

后台监控系统与各换流单元的控制保护系统进行信息互传。作为人机交互平台，主要用以向各换流单元控制保护系统传递运行人员的操作命令，并对各换流单元的运行和故障状态进行统一监视，运行人员监控界面如图5所示。

MMC 的控制保护系统主要作用在于：接收监控后台下发的控制指令，对 MMC 进行顺序控制和故障保护，将形成的调制度信息和阀控命令下发给阀控系统；接收阀控系统运行状态信息，将其上传至后台监控系统。

MMC 阀控系统主要作用在于：接收 MMC 控制保护系统下发的阀控命令和调制度信息，进行桥臂环流抑制和子模块均压控制，生成各路子模块投切闭锁命令并下发给子模块控制单元；接收子模块电压及状态信息，进行阀控级故障判断和保护，将阀控和子模块信息上传至 MMC 控制保护系统。



图5 运行人员监控界面

Fig. 5 Operator worker station

MMC 子模块控制单元接收阀控下发的控制指令，上传子模块信息，实现单个子模块的故障保护。

LCC 控制系统包含控制保护系统、阀控系统以及晶闸管控制单元。每套控制保护系统分别与一个阀控系统连接，用于一个换流单元的晶闸管控制和监视。阀控与控制保护系统接口如图6所示。

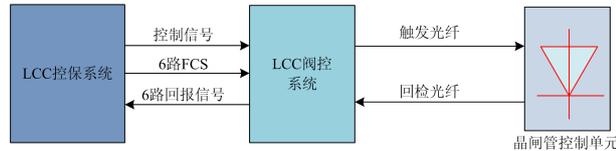


图6 LCC 阀控与控制保护系统接口框图

Fig. 6 Interface diagram of LCC valve control and system control

LCC 控制保护系统主要作用在于：接收监控后台下发的控制指令，对 LCC 进行顺序控制和故障保护，将形成的触发脉冲(Fire Control Signal, FCS)和阀控命令下发给阀控系统；接收阀控系统运行状态信息，将其上传至后台监控系统。

LCC 阀控系统主要作用在于：接收控制保护系统的触发脉冲等数据，产生 LCC 的触发控制脉冲并发送至晶闸管控制系统；监测晶闸管状态进行反向恢复期内的晶闸管保护。

晶闸管控制单元实现对单个晶闸管的控制。

2 高低阀组在线投退策略研究

2.1 LCC 阀组在线投退策略

单阀组的在线投入过程首先是将旁路刀闸 BPI 上的电流转移到旁路开关 BPS 上，如图 7(1)中的步骤(a)一(d)所示，之后通过换流器 C₁₁ 的解锁及控制，使得原本流经 BPS 上的直流电流转移到 C₁₁ 阀组上，并在 BPS 电流过零点断开 BPS，如图 7(1)步骤(e)一步骤(f)。

单阀组的在线退出过程中首先通过换流器 C₁₁ 的控制使得 BPS 零压开通，将原本流经 C₁₁ 的直流电流转移到 BPS 上，之后再 BPS 上的电流转移到旁路刀闸 BPI 上。

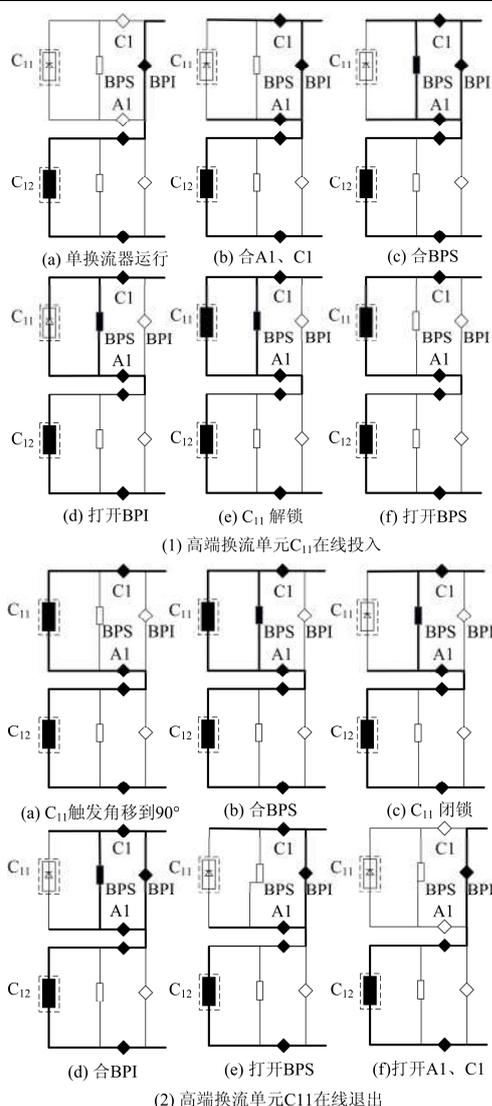


图7 单阀组在线投入、退出过程示意图

Fig. 7 Diagram of deblocking and blocking process of LCC valve group

LCC valve group

单阀组正常退出时, 需要首先使其端电压接近零, 以使其并联的旁路开关具备合闸条件, 一旦合闸后, 即可闭锁该换流单元^[18-22]。

2.2 MMC 阀组在线投退策略

单个MMC阀组及其直流场开关配置情况如图8所示。

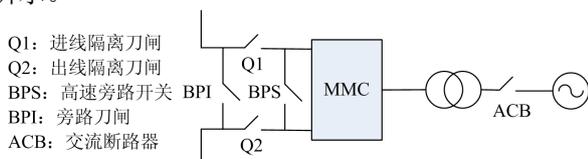


图8 MMC 单阀组直流场开关配置情况

Fig. 8 Switch configuration of MMC valve group for DC field

MMC阀组投入过程中与直流场开关的配合步骤:

1) MMC 阀组闭合交流断路器ACB并进行子模块充电, 充电完成后投入定直流电流均压控制, 零直流电压运行;

2) 依次闭合直流进出线隔离刀闸Q1、Q2, 闭合高速旁路开关BPS, 断开旁路刀闸BPI;

3) MMC将直流电流指令斜坡调整至直流极线电流;

4) 待高速旁路开关BPS上电流为零, 断开BPS;

5) MMC调整为常规定功率控制, 以用于后续直流电压/功率抬升。

图9为上述过程中MMC阀组及直流场开关配合示意图。

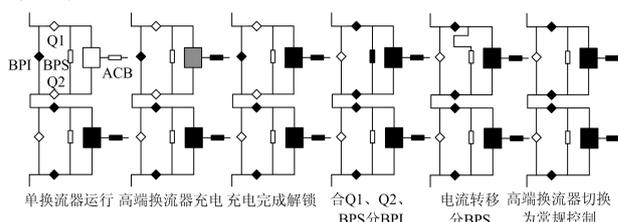


图9 高端 MMC 阀组投入过程与直流场开关配合示意图

Fig. 9 Diagram of the high MMC valve group deblocking process with DC field switch

MMC单阀组退出时, 顺序执行以下操作:

1) 将定直流电压控制的阀组直流电压斜坡降低, 定功率控制的阀组跟随该直流电压同步降低输出功率和调制用直流电压指令;

2) 直流电压为零后, 待退出的MMC阀组转为定直流电流控制模式, 直流电流指令为退出前直流线路电流;

3) 之后合闸旁路开关, MMC斜坡降低直流电流指令至零, 以使直流电流逐渐转移到旁路开关上;

4) 待电流转移完毕后, MMC闭锁停机, 闭合直流隔离刀闸, 断开旁路开关, 断开进出线隔离刀闸。至此阀组退出完毕。

由于MMC控制响应的快速性, 可以根据实际工况对直流电压的下降斜率进行调整。

图10为上述过程中MMC阀组及直流场开关配合示意图。

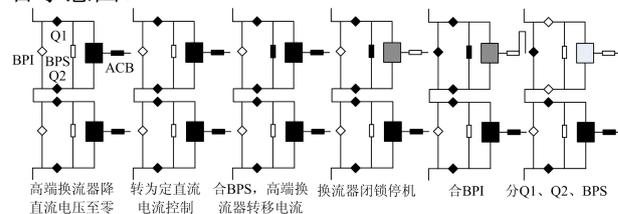


图10 高端 MMC 阀组退出过程与直流场开关配合示意图

Fig. 10 Diagram of the high MMC valve group blocking process with DC field switch

3 直流故障穿越策略研究

LCC检测到直流线路故障或者接收到其他换流单元的直流故障信号时，快速移相，MMC输出负压快速抑制故障电流，控制策略如图11所示。两个换流站的控制保护机箱一旦检测到直流短路故障，则立即将控制策略切换到子模块电压控制，即图11中的K1和K2立即切换位置。为了实现暂态时快速抑制故障电流，稳态时实现零电压控制的功能， $u_{dc_ref}^*$ 由直流电流控制器生成，控制器的指令值 i_{dc_ref} 为0。此过程中子模块电压一直维持在额定值，各换流站的无功外环仍然保持不变，在故障过程中仍然可以与电网进行无功功率交换。

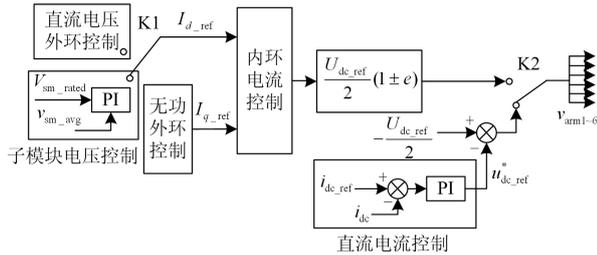


图 11 直流故障穿越控制策略框图

Fig. 11 Control strategy for DC fault ride-through

图11中，子模块电压指令 V_{sm_rated} 设为1 p.u.， v_{sm_avg} 为6个桥臂的子模块电压平均值，子模块电压控制环输出 I_{d_ref} 作为MMC阀组的有功功率指令，无功控制环输出 I_{q_ref} 作为无功指令， i_{dc} 为直流电流实际值，直流电流控制器输出调制用直流电压 $u_{dc_ref}^*$ ，最终生成各桥臂子模块的投入模块数 v_{arm1-6} 。

在直流电流被限制为0后，直流输电系统开始恢复流程，如图12所示。

4 试验验证

搭建的动模系统单阀组直流电压额定值为2 kV，直流功率额定值均为20 kW，MMC子模块额定电压为120 V。系统各参数如表1所示，图13为动模系统实物图。

分别在全桥子模块配比为50%和70%时进行直流故障穿越和阀组投退试验。

4.1 不同全桥子模块配比下直流故障穿越试验

设定LCC定直流电流控制、MMC定直流电压控制。当系统运行稳定后，设定故障时间为500 ms，故障发生时，MMC通过控制阻断短路故障电流，LCC强制移相。直流故障后双极LCC-MMC系统重新恢复故障前控制模式并恢复功率传输运行。

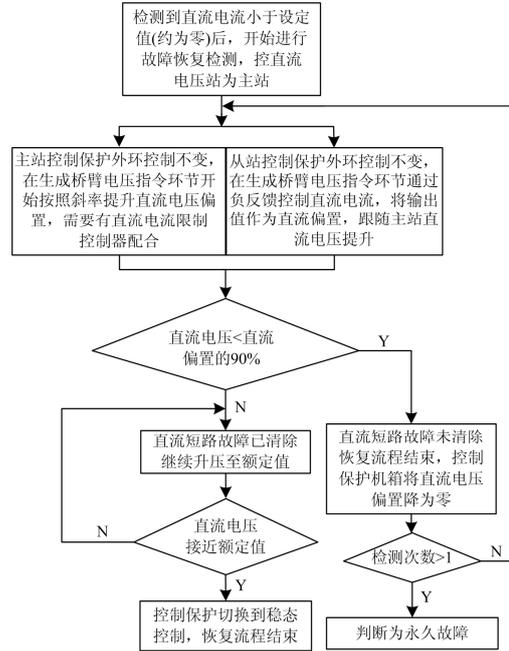


图 12 故障保护后系统恢复方案

Fig. 12 Recovery plan for fault protection

表 1 动模系统相关参数汇总表

Table 1 Parameters list of dynamic model

| 参数 | | LCC1/LCC2 | VSC1/VSC2 |
|------------|------------------|------------|---------------|
| 直流侧参数 | 额定功率/kW | 20 | 20 |
| | 额定直流电流/A | 10 | 10 |
| | 额定直流电压/kV | 2 | 2 |
| 交流侧参数 | 交流网侧额定(线)电压/V | 380 | 380 |
| | 交流网侧额定(线)电流/A | 30.38 | 30.38 |
| | 交流阀侧额定(线)电压/V | 2 000 | 1 400 |
| | 交流阀侧额定(线)电流/A | 5.78 | 8.24 |
| | 换流变容量/kVA | 28.7 | 25 |
| | 换流变漏抗/% | 8 | 6 |
| | 换流变网侧绕组额定(线)电压/V | 380 | 380 |
| | 换流变阀侧绕组额定(线)电压/V | 2 000 | 1 400 |
| | 换流变连接形式 | YY0/YD11 | YNd1(高压侧 Y 接) |
| | 换流阀参数 | 子模块数目(单桥臂) | — |
| 子模块额定电压 | | — | 120 |
| 子模块电容容值/mF | | — | 6.8 |
| 子模块放电电阻/kΩ | | — | 20 |
| 子模块上电电压/V | | — | 45 |
| | 桥臂电抗器/mH | — | 40 |

图 14、图 15 所示为各工况下的波形数据，表 2 为测试结果汇总。

试验结果表明，在满足系统直流故障穿越所需的最小全桥占比下，全桥占比增加对直流故障穿越性能影响较小。



图 13 动模系统实物图
Fig. 13 Dynamic model

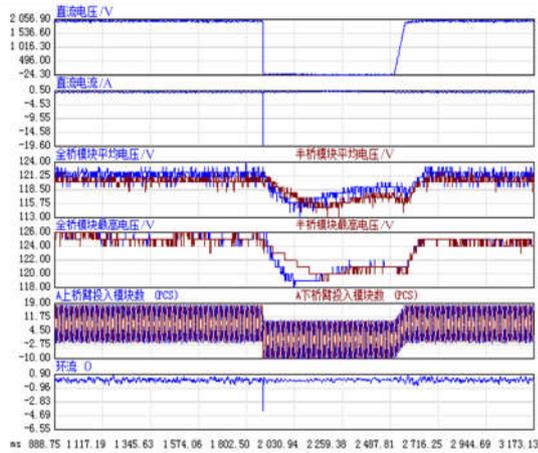


图 14 50%占比直流故障穿越相关波形

Fig. 14 Waveforms of DC fault ride-through with 50% FBSM

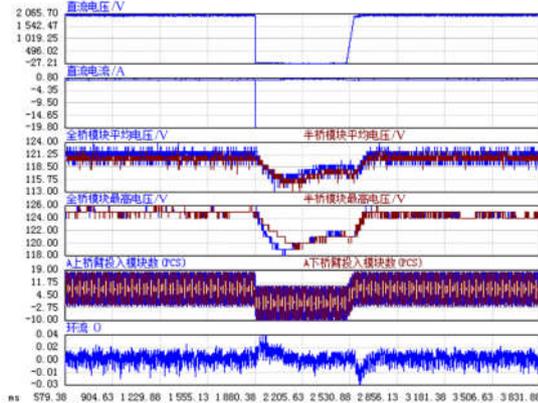


图 15 70%占比直流故障穿越相关波形

Fig. 15 Waveforms of DC fault ride-through with 70% FBSM

表 2 直流故障穿越不同占比相关参数汇总表

Table 2 Parameters list of DC fault ride-through with different proportions of FBSM

| 项目 | 直流故障 电流/p.u. | 直流负压/ V | 桥臂负投 入模块 | 子模块最低 电压/p.u. |
|-------|-----------------|------------|-------------|------------------|
| 50%占比 | 1.96 | -24.3 | 10 | 0.742 |
| 70%占比 | 1.98 | -27.2 | 10 | 0.675 |

4.2 不同全桥子模块配比下单阀组投退试验

设定LCC定直流电流控制、VSC定直流电压控制。满功率运行状态下,进行阀组退出和投入试验。图16—图19所示为各工况下的波形数据,表3为测试结果汇总。

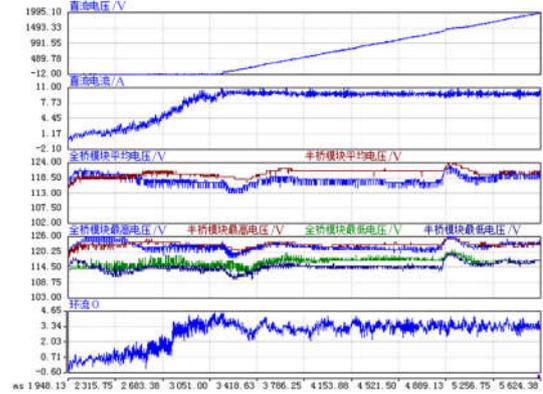


图 16 50%占比阀组投入相关波形

Fig. 16 Waveforms of valve group deblocking with 50% FBSM

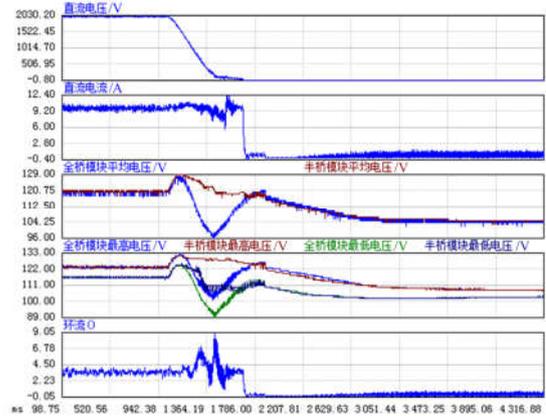


图 17 50%占比阀组退出相关波形

Fig. 17 Waveforms of valve group blocking with 50% FBSM

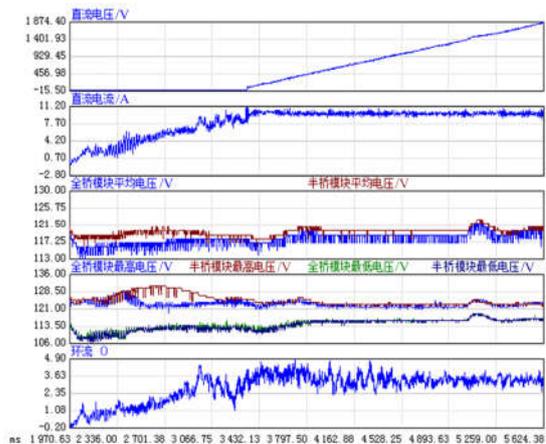


图 18 70%占比阀组投入相关波形

Fig. 18 Waveforms of valve group deblocking with 70% FBSM

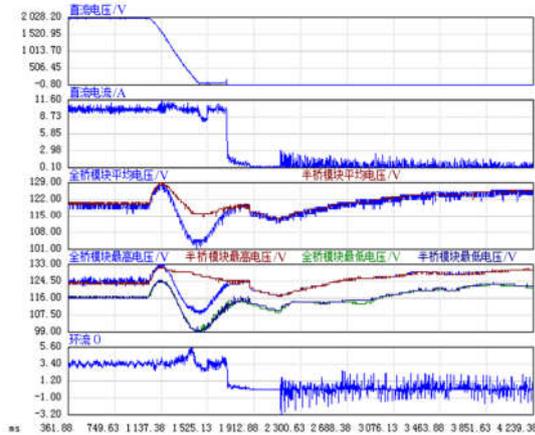


图 19 70%占比阀组退出相关波形

Fig. 19 Waveforms of valve group blocking with 70% FBSM

表 3 阀组投退不同占比相关参数汇总表

Table 3 Parameters list of valve group deblocking and blocking with different proportions of FBSM

| 项目 | | 子模块 | 子模块 |
|-------|----|-----------|-----------|
| | | 最高电压/p.u. | 最低电压/p.u. |
| 50%占比 | 投入 | 1.05 | 0.908 |
| | 退出 | 1.075 | 0.758 |
| 70%占比 | 投入 | 1.092 | 0.883 |
| | 退出 | 1.108 | 0.825 |

试验结果表明，阀组投退期间，不同全桥占比对阀组投退性能影响较小。

5 结语

本文主要研究了LCC-FHMMC混合直流输电系统的高低阀组在线投退策略和直流侧故障的穿越策略，搭建了LCC-FHMMC混合直流输电物理动模试验平台，对所提出的控制策略进行了验证，得到以下结论。

1) 本文所搭建的混合直流输电系统可实现不同全桥配比下，阀组的在线投退和直流故障的穿越功能。

2) 受限于LCC阀响应慢、有功无功不解耦、需电网换相等特性，投退期间需要严格控制阀组与其直流场开关的时序配合，以及整流侧与逆变侧的解锁配合。

3) 不同占比下，在满足系统直流故障穿越所需的最小全桥占比下，全桥占比增加对直流故障穿越性能影响较小。在故障检测后，通过直流电流的控制改变阀组端口电压，快速抑制故障电流。

LCC-MMC新型混合直流输电拓扑结构结合了两种换流器的优势，具有广泛的应用前景。该动模

实验及研究成果在提升MMC单元的容量、直流侧故障自清除方面，能为以后的实际工程应用提供参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 冯明, 李兴源, 李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力, 2015, 32(2): 1-8.
FENG Ming, LI Xingyuan, LI Kuan. A review on hybrid HVDC system[J]. Modern Electric Power, 2015, 32(2): 1-8.
- [2] 胡锦涛, 贾轩涛, 王瑶, 等. 基于 LCC-VSC 多端混合直流输电系统的启停控制策略及动模试验[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 86-94.
HU Jingen, JIA Xuanta, WANG Yao, et al. Startup-stop control strategy and dynamic simulation experiments of multi-terminal hybrid HVDC system based on LCC-VSC[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 86-94.
- [3] 郭春义, 赵成勇, 彭茂兰, 等. 一种具有直流故障穿越能力的混合直流输电系统[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4345-4352.
GUO Chunyi, ZHAO Chengyong, PENG Maolan, et al. A hybrid HVDC system with DC fault ride-through capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4345-4352.
- [4] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36. DOI: 10.1186/s41601-016-0015-z.
- [5] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平柔性直流系统故障稳态特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 1-8.
LI Bin, LI Ye, HE Jiawei, et al. Stable fault characteristic analysis of the DC system based on modular multilevel converter[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 1-8.
- [6] 薛英林, 徐政, 潘武略, 等. 电流源型混合直流输电系统建模与仿真[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 98-103.
XUE Yinglin, XU Zheng, PAN Wulue, et al. Modeling and simulation for a hybrid current source converter high voltage direct current transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 98-103.
- [7] 许烽, 徐政. 基于 LCC 和 FHMMC 的混合型直流输电系统[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2520-2530.
XU Feng, XU Zheng. Hybrid HVDC system based on LCC and FHMMC[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2520-2530.
- [8] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016: 175-187.
- [9] 范彩云, 韩坤, 甄帅, 等. 全桥型 MMC 充电特性分析

- 及软启动优化策略[J]. 电气传动, 2017, 47(1): 36-41.
- FAN Caiyun, HAN Kun, ZHEN Shuai, et al. Charging characteristics analysis and soft-start optimized strategies of MMC based on full-bridge sub-modules[J]. Electric Drive, 2017, 47(1): 36-41.
- [10] 杨洋, 王瑶, 李浩涛, 等. 子模块混合型LCC-MMC混合直流输电系统的启动控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 58-64.
- YANG Yang, WANG Yao, LI Haotao, et al. Start-up control strategies for the cell-hybrid LCC-MMC hybrid HVDC system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 58-64.
- [11] MERLIN M M C, GREEN T C, MITCHESON P D, et al. The alternate arm converter: a new hybrid multilevel converter with DC-fault blocking capability[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 310-317.
- [12] 许义佳, 罗映红, 史彤彤, 等. 具有直流故障自清除能力的新型MMC子模块及其混合拓扑[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 129-137.
- XU Yijia, LUO Yinghong, SHI Tongtong, et al. A new MMC sub-module with DC fault self-clearing ability and its hybrid topology[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 129-137.
- [13] YAO Zhiqing, ZHANG Qun, CHEN Peng, et al. Research on fault diagnosis for MMC-HVDC systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 71-77. DOI: 10.1186/s41601-016-0022-0.
- [14] 陈博怡, 李兴源, 胡永银, 等. 混合直流输电控制策略研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 118-123.
- CHEN Boyi, LI Xingyuan, HU Yongyin, et al. Research of control strategies for hybrid HVDC[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 118-123.
- [15] 胡永银, 李兴源, 周洪宇, 等. 应用于VSC-HVDC输电的谐波抑制控制器[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 583-588.
- HU Yongyin, LI Xingyuan, ZHOU Hongyu, et al. A kind of harmonic suppression controller used in VSC-HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 583-588.
- [16] 熊凌飞, 韩民晓. 基于组合方式的多端柔性直流输电系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1586-1592.
- XIONG Lingfei, HAN Minxiao. A novel combined control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1586-1592.
- [17] 蔡宜君, 文明浩, 陈玉, 等. LCC-MMC混合直流输电系统整流侧故障穿越控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 1-8.
- CAI Yijun, WEN Minghao, CHEN Yu, et al. Control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under rectifier side fault[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 1-8.
- [18] 时伯年, 洪潮, 孙刚, 等. 交流不对称故障下的LCC-MMC混合直流系统输送功率提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 73-78.
- SHI Bonian, HONG Chao, SUN Gang, et al. Research on power transmission enhancement strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system under AC symmetric fault[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 73-78.
- [19] 马玉龙, 陶瑜, 周静, 等. 基于实时数字仿真器的特高压直流换流单元投退特性分析[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 5-10.
- MA Yulong, TAO Yu, ZHOU Jing, et al. Analysis on deblocking and blocking characteristics of UHVDC commutation units based on real-time digital simulator[J]. Power System Technology, 2007, 31(21): 5-10.
- [20] 黎东祥, 王渝红, 丁理杰, 等. 基于双12脉动阀组共同控制的特高压单阀组投退策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 148-154.
- LI Dongxiang, WANG Yuhong, DING Lijie, et al. Blocking and deblocking strategy of single UHVDC converter group under joint control mode of dual 12-pulse converter groups[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 148-154.
- [21] 李岩, 黄立滨, 洪潮, 等. ± 800 kV直流输电系统双12脉动阀组投退策略分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2): 21-25.
- LI Yan, HUANG Libin, HONG Chao, et al. Analysis on the strategy of block/deblock dual 12-pulse valve groups in ± 800 kV DC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 21-25.
- [22] 薛英林, 赵峥, 葛风雷, 等. 基于投旁通对策略的组合式C-MMC单元投退控制[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 80-88.
- XUE Yinglin, ZHAO Zheng, GE Fenglei, et al. Converter unit on/off control based on bypass pairs for combined C-MMC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 80-88.

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-09-28

作者简介:

董朝阳(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压直流输电、柔性直流输电、新能源并网; E-mail: chaoyangd@163.com

冯敏(1988—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为柔性直流输电; E-mail: guoya7@163.com

吉攀攀(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流输电、STATCOM、新能源并网。E-mail: 18539009637@163.com

(编辑 许威)