

基于 HCM5000 的混合级联直流输电 仿真系统实现与应用

刘晨¹, 肖鲲², 李传西¹, 吴庆范¹, 刘旭辉¹, 宋延涛¹, 滕尚甫³, 李桂举¹

(1. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031;
3. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要:文中介绍了基于许继新一代 HCM5000 控制保护平台的技术特点与特高压混合级联直流输电系统的基本结构。以特高压混合级联直流输电系统为对象, 搭建了基于 HCM5000 装置的控制保护 RTDS 仿真平台, 阐述了基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电系统仿真平台从 I/O 接口及内环逻辑实现方式两个方面进行的改进措施, 并对仿真平台的系统架构与配置方案进行了说明。最后, 通过将试验结果与国家标准进行对比, 验证了仿真结果满足标准要求。结果表明, 基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系统仿真平台可以为特高压混合级联直流输电系统的运行特性及控制保护策略研究提供参考依据。

关键词:混合级联; HCM5000; 仿真平台; RTDS

中图分类号: TM 743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2023)02-0070-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230212

Implementation and Application of Hybrid Cascaded DC Transmission Simulation System Based on HCM5000

LIU Chen¹, XIAO Kun², LI Chuanxi¹, WU Qingfan¹, LIU Xuhui¹, SONG Yantao¹, TENG Shangfu³, LI Guiju¹

(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The technical characteristics of control and protection platform based on Xuji's new generation HCM5000 and the basic structure of hybrid cascaded UHVDC transmission system are introduced. Taking hybrid cascaded UHVDC transmission system as the object, the control and protection RTDS simulation platform based on HCM5000 device is built, and the improvement measures from two aspects of I/O interface and inner loop logic implementation for simulation platform of hybrid cascaded UHVDC transmission system based on HCM5000 are described, and the system architecture and configuration scheme of simulation platform are explained. Finally, it is verified that the simulation results have met the requirements of national standards by comparing the test results with the relevant standards, which shows that the simulation platform of hybrid cascaded UHVDC transmission control and protection system based on HCM5000 can provide a reference basis for the study of operation characteristics and control and protection strategies of hybrid cascaded UHVDC transmission system.

Key words: hybrid cascaded DC transmission system; HCM5000; simulation platform; RTDS

0 引言

目前, 传统的基于线性整流换流器 (line

commutated converter, LCC) 的高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 技术 LCC-HVDC 是直流输电最主流、最成熟的技术^[1-3], 具有输电容量大、运行稳定性好、系统损耗小、建设成本低等优势, 在远距离大容量输电方面具有不可替代的作用。然而, 传统直流输电受端换相失败问题使其在交流

基金项目: 国家电网公司科技项目“白鹤滩—江苏±800 kV 特高压直流输电工程运行特性、控制保护策略研究及动模研制 (SGZB0000TGJS2200731)

系统多直流馈入场合的应用受到制约^[4-9]。近年来,基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电技术 VSC-HVDC 为直流输电技术提供了新的发展方向^[10],其具备功率控制灵活、独立,且可接入无源网络^[11]的特点。然而,柔性直流系统输送容量较小,可承受电压应力水平较低,对直流线路故障的隔离需要依赖额外设备或改进的换流器拓扑。这也使其在特高压直流输电领域缺乏成熟的应用方案。为此,将传统直流输电 LCC 与柔性直流输电 VSC 组合,同时发挥 LCC-HVDC 成本低、损耗小、容量大以及 VSC-HVDC 无换相失败、控制灵活等技术优势的混合直流输电技术逐渐成为当前直流输电领域的研究热点,也将是完善未来电网的重要途径^[12-13]。

其中,送端采用两组 LCC 换流阀串联,受端采用 LCC 与 VSC 串联结构的混合直流系统,为特高压直流系统提供了一种更为经济、灵活、快捷的输电方式^[11-15]。这种输电方式具有以下多重优势:1)送、受端混合,可实现大规模能源基地电力高效、经济外送;2)受端 LCC 和 VSC 串联,可在直流线路故障下利用 LCC 自然阻断故障电流的特征避免 VSC 阀过电流,且 VSC 无功支撑能力也有助于 LCC 换相失败抑制^[16-17];3)多个 VSC 并联,能有效应对现有 VSC 换流单元容量无法比拟的 LCC 换流单元的问题;4) LCC 与多 VSC 混联,还可形成多个落点,利于直流功率的分散消纳,降低对受端电网的冲击^[18]。

下面,基于许继新一代 HCM5000 仿真平台,搭建实时数字仿真(real time digital simulator, RTDS)硬件在环特高压混合级联直流输电系统仿真平台,对特高压混合级联直流输电系统启停、阶跃、交流故障等运行特性进行仿真验证。同时参照国家标准及文献对试验结果进行检验,为特高压混合级联直流输电控制保护系统运行特性及控制保护策略研究提供参考依据。

1 特高压混合级联直流输电系统

1.1 系统结构

特高压混合级联直流输电系统整流站单极与常规特高压整流站一致,高低端阀组均由 12 脉动换流阀构成。逆变站高端由 12 脉动 LCC 组成,低端为 3 个并联 VSC^[19-20]。对于±800 kV/8000 MW 混合级

联特高压直流工程来说,低压端由 3 个 VSC 构成是最优的方案^[14]。各个 VSC 与直流母线之间配置快速开关(high speed switch, HSS)。特高压混合级联直流输电系统单极受端系统拓扑结构如图 1 所示。

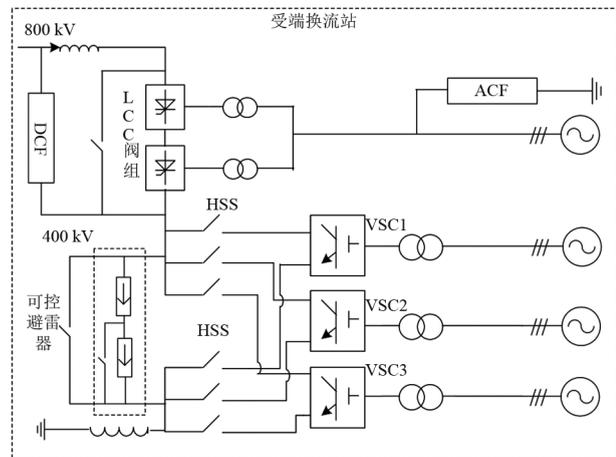


图 1 特高压混合级联输电系统受端拓扑结构

1.2 混合级联直流输电系统控制原理

特高压混合级联直流输电系统在稳态运行时,整流站采用定直流电流或者定直流功率的控制方式,控制系统通过调节触发角的方式来调节直流电流或者功率的大小^[21]。逆变站 LCC 通常采用定直流电压的控制方式^[22-23],控制逻辑如图 2 所示。

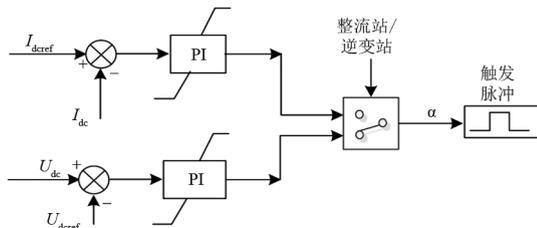


图 2 LCC 换流器控制逻辑

图 2 中: U_{dcref} 为直流电压参考值; U_{dc} 为直流电压实际值; I_{dcref} 为直流电流参考值; I_{dc} 为直流电流实际值。当 LCC 运行在定直流电流控制模式时, I_{dcref} 通过运行人员整定得到;当 LCC 运行在定直流功率控制模式时, I_{dcref} 通过直流功率参考值 P_{dcref} 除以直流电压实际值 U_{dc} 的方式得到,如式(1)所示。

$$I_{dcref} = P_{dcref} / U_{dc} \quad (1)$$

对于逆变站的 3 个并联 VSC,为保证直流电压的稳定,通常采用一个 VSC 控制直流电压,其余 VSC 控制有功功率的控制方式^[24]。其控制策略采用了阀侧电流内环与直流电压/有功功率外环、无功功率外环的双环控制策略,如图 3 所示。

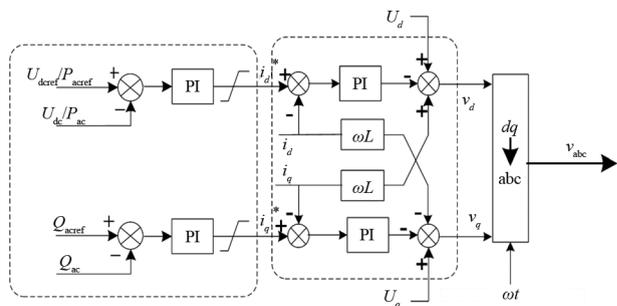


图 3 VSC 控制逻辑

图 3 中: P_{acref} 为有功功率参考值; P_{ac} 为有功功率实际值; Q_{acref} 为无功功率参考值; Q_{ac} 为无功功率实际值; ωL 为耦合相; i_d 为内环电流 d 轴实际值; i_q 为内环电流 q 轴实际值。有功外环及无功外环输入经 PI 控制器后计算得到内环电流 d 轴参考值 i_d^* 和内环电流 q 轴参考值 i_q^* , 内环电流控制器 d 轴与 q 轴输出分别叠加 d 轴前馈 U_d 与 q 轴前馈 U_q 后, 将 d 轴和 q 轴解耦, 变换得到三相调制波 v_{abc} 。

2 HCM5000 平台

2.1 机箱结构设计

相较于许继上一代 HCM3000 机箱, HCM5000 主机在尺寸、背板总线、处理器性能等方面有了显著提升。详细差异如表 1 所示。

表 1 HCM5000 主机与 HCM3000 主机主要性能对比

对比项	HCM3000	HCM5000
机箱结构	9U	4U
背板总线	标准背板总线	>1 Gbit/s 的高速背板总线
处理器板卡	单核	双核
高速控制总线	32 Mbit/s	>300 Mbit/s

新一代机箱支持高速背板总线通讯, 速率高达 1 Gbit/s, 大幅度提高了数据传输性能。同时机箱具备强大的扩展能力, 配备 16 块板卡槽位。其中控制保护主机主处理单元 (service processing unit, SPU) 采用多核异构的设计方案, 处理器性能的提升减少了机箱中处理器的数量, 进一步降低了插件的数量。

HCM5000 控制保护主机具备丰富的接口拓展功能, 可支持以太网、时分复用技术 (time-division multiplexing, TDM)、过程现场总线 (process field bus, PROFIBUS)、控制器域网 (controller area network, CAN)、高速控制总线集成闪存控制器 (integrated flash controller, IFC) 及高速串行高级技术附件 (serial advanced technology attachment, SATA)

硬盘接口等。通过这些接口, 控制保护系统配置更加灵活, 减少协议转换装置的使用, 整体结构和信息通道更加简化可靠, 能更多地满足与换流站其他设备通信的接口需求。

2.2 高速处理板卡

HCM5000 平台开发了柔性直流内环专用板卡 SAI31, 如图 4 所示。板卡采用全新的硬件设计, 主处理器首次采用基于 UltraScale MPsoCs 架构的高性能 SOC 处理器, 内嵌双核 ARM Cortex-A53 + FPGA, ARM 核主频可达 1.2 GHz, 最小运行周期可达 50 μ s, 满足柔性直流内环控制的高速性能要求。采用嵌入式实时操作系统与强运行时系统, 满足复杂多任务处理需求。板卡提供 8 通道 IEC 60044-8 总线通信接口、2 通道 2.0 Gbps 高速串行传输通信 (AURORA 协议) 接口, 满足柔性直流多通道数字量采集功能需求。



图 4 SAI31 板卡

3 仿真系统搭建

3.1 I/O 接口优化

HCM5000 特高压混合级联直流输电仿真平台主要包括监控层、设备层、仿真层 3 个部分, 结构如图 5 所示。相较于 HCM3000 直流控制保护仿真平台需配置 HSMD 高速协议转换装置来实现 AURORA 协

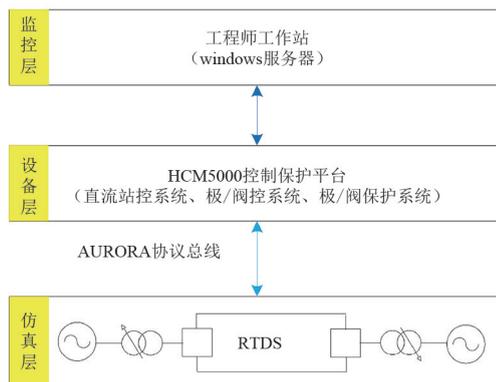


图 5 HCM500 仿真平台结构

议转换与仿真系统接口^[26],HCM5000 支持 AURORA 协议与 RTDS 直连,取消了 HSMD 高速协议转换装置。同时取消了装置与 GTDO (gigabit transceiver digital output) 板卡、GTAO (gigabit transceiver analogue output) 板卡等 RTDS 电气接口的接线,精简了仿真平台的结构,减少了设备之间铺设电缆的工作,缩短了仿真平台搭建的时间。

3.2 内环软件设计优化

柔性直流内环控制的链路延时是柔性直流控制系统的关键技术指标,也是衡量柔性直流控制系统性能优劣的重要指标^[27-29]。受限于板卡性能,HCM3000 平台柔性内环控制逻辑的设计采用双板卡的方案。单个板卡运行周期为 100 μs ,板卡间采用许继私有 IFC 协议进行通信,其结构如图 6 所示。

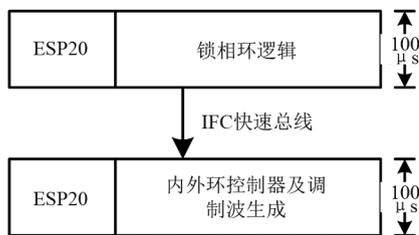


图 6 HCM3000 内环逻辑方案

得益于硬件性能的提升,新仿真平台将锁相环控制逻辑及内外环控制逻辑整合进单一板卡中实现,其软件实现结构如图 7 所示。由于取消了板卡间的数据传输,同时提高了软件的运行周期,如图 8 所示,实测内环控制逻辑运行周期压缩至 50 μs 。



图 7 HCM5000 内环逻辑方案

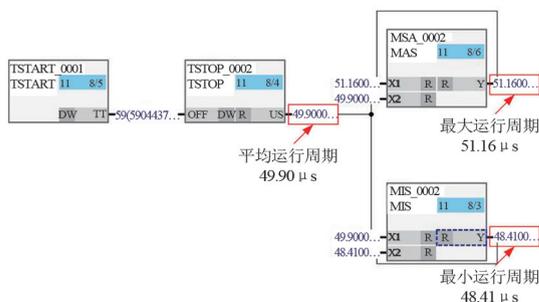


图 8 HCM5000 内环运行周期

3.3 控制保护功能配置

特高压混合级联直流输电系统受端为两种不同类型的串联换流器,因而将直流功率控制等部分极控控制功能下放至换流器控制中,详细功能配置如下。

1) 直流站控:换流站直流开关场的控制和监视

功能、直流开关联锁、顺序控制等功能。

2) 极控:极解锁/闭锁控制、站间通信、功率控制、站间通信等功能。

3) 换流器控制:换流器触发控制(常规换流器)、调制电压计算(柔直换流器)、分接头控制、换流阀运行状态监视等功能。

4) 交流站控:交流开关场的控制与监视功能、交流场联锁功能、辅助设备控制与监视功能。

5) 极保护:直流极母线差动保护、直流中性母线差动保护、阀组连接线差动保护、直流极差动保护、直流行波保护等保护功能。

6) 换流器保护:阀侧连接线差动保护、阀侧连接线过流保护、启动电阻过流保护、启动电阻过负荷保护、阀侧零序过压保护、桥臂过流保护等保护功能。

3.4 仿真平台屏柜配置

特高压直流输电控制保护系统主要设备有交直流站控系统、极控制系统、换流器控制系统、极保护系统、换流器保护系统等^[30-32]。因仿真系统主要进行系统分析和控制保护策略和性能研究,因而对于控制系统采用单套系统的配置方案。对于保护系统,取消三取二接口装置,亦采用单套配置。仿真系统采用单系统配置方案,所需屏柜配置如表 2 所示。

表 2 特高压混合级联直流输电仿真系统屏柜配置

设备名称	主设备	数量
工程师工作站	Think Station	2 台
直流站控屏	HCM5000	2 面
交流站控屏	HCM5000	5 面
极控屏	HCM5000	2 面
换流器控制屏	HCM5000	6 面
极保护屏	HCM5000	2 面
换流器保护屏	HCM5000	6 面
RTDS 仿真屏	NovaCor	1 台

由表 2 可以看出,搭建特高压混合级联直流输电系统共需配置 21 面屏柜,两站共需配置 2 台工程师工作站,用于运行人员监控和调试。

4 仿真实验验证

基于 HCM5000 RTDS 硬件在环仿真平台,对特高压混合级联直流输电系统基本运行特性进行仿真验证,并与相关标准及文献进行了对比验证。

4.1 启动停运试验

特高压混合级联直流输电系统根据受端高低端

运行换流器的数量可以分为不同的运行方式。启动停运试验验证了 1+3 运行方式,即受端高端 LCC 与低端 3 个 VSC 运行工况下的启动停运。

其启动方式为逆变侧低端控直流电压 VSC 先启动,然后启动低端控功率 VSC,最后启动逆变侧高端 LCC。待逆变站建立直流电压后,启动整流侧,开始输送直流电流。从图 9 HCM5000 平台启动波形中可以看出,以低端控制直流电压换流器 VSC1 解锁时刻为基准,1560 ms 后,控制功率换流器 VSC2、VSC3 解锁;2621 ms 后,逆变站换流器 LCC 解锁并建立直流电压;2753 ms 后直流电流产生,系统开始输送功率。

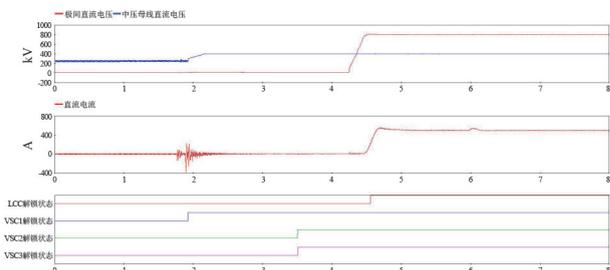


图 9 1+3 方式启动波形

特高压混合级联直流输电系统停运顺序与启动顺序相反,整流站降功率闭锁后,逆变站高端 LCC 停运,然后闭锁低端控功率 VSC,最后闭锁低端控直流电压 VSC。从图 10 HCM5000 平台停运波形中可以看出,以直流电流下降时刻为基准,445 ms 后高端 LCC 停运;734 ms 后控功率换流器 VSC2、VSC3 停运;852 ms 后控制流电压换流器 VSC1 闭锁,系统停运。

从试验结果可以看出,直流系统解锁/闭锁时序正确,直流系统平稳运行,满足 GB/T 38878—2020《柔性直流输电工程系统试验》标准^[33]要求。

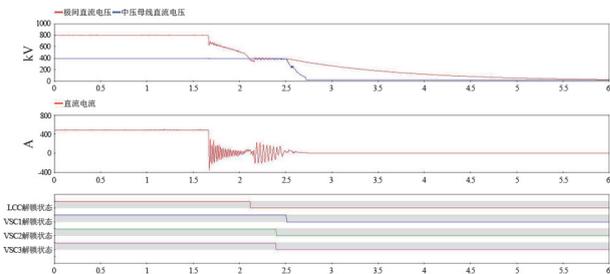


图 10 1+3 方式停运波形

4.2 阶跃试验

为验证系统阶跃性能,在 1+3 运行方式下,进行 VSC2 无功功率阶跃试验,无功功率参考值从 0 阶跃至 112.4 Mvar,持续时间 1000 ms,如图 11 所示。试验结果如表 3 所示。从试验结果可以看出,

仿真平台无功功率响应时间 ≤ 20 ms,超调量 $\leq 30\%$,满足 GB/T 38878—2020 设计要求^[33]。

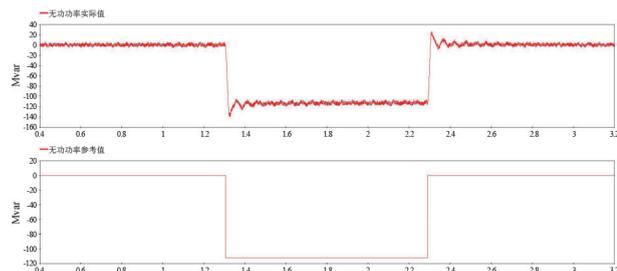


图 11 无功功率阶跃

表 3 无功功率阶跃试验结果

项目	超调量/%	响应时间/ms
无功上阶跃	23.3	13.2
无功下阶跃	24.6	13.4

4.3 交流故障试验

模拟 1+3 运行方式下,VSC1 网侧三相交流故障 100 ms。从图 12 可以看出故障发生 100 ms 后,由于能量输送受阻,受端系统暂时功率盈余,直流电压升高,最大达到 540 kV,故障期间直流电流最大值为 6 243.5 A,最小值为 4 597.1 A。故障特征与文献^[14]描述一致。

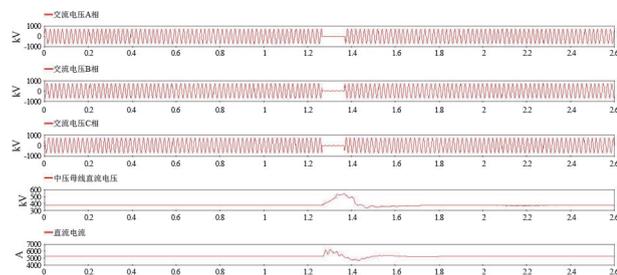


图 12 三相金属性接地故障

5 结论

上面介绍了 HCM5000 控制保护装置技术特点。从 I/O 接口与内环控制软件设计两个方面概述了基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系统仿真平台的改进措施。并从系统启动停运、无功功率阶跃、交流故障特征等方面与 GB/T 38878—2020 要求及文献描述进行了对比,验证了基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系统仿真平台仿真结果的可靠性。结果表明,基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系统仿真平台可以为系统的运行特性及控制保护策略研究提供参考依据。

参考文献

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等. 特高压直流技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [2] 杨美娟,王先为,姚为正,等. 特高压混合式 MMC 低全桥配比下单阀组投退过程中的均压控制[J].全球能源互联网,2018,1(5):603-610.
- [3] 张彦涛,张志强,张玉红,等.应用特高压直流输电技术实现亚欧洲际输电方案的设想[J].电网技术,2015,39(8):2070-2075.
- [4] 周昊,胡雪凯,周文,等.波形畸变引起换相失败的评估方法[J].河北电力技术,2022,41(4):40-45.
- [5] 张朝峰,张伟晨,饶宇飞,等.一种抑制多馈入特高压直流换相失败的投旁通控制策略[J].电力建设,2022,43(6):56-65.
- [6] 王婷,苏玉香,沈晓群,等.抑制 HVDC 换相失败送端过电压的参数优化[J].电气应用,2022,41(2):70-74.
- [7] 朱仁龙,周小平,罗安,等.基于电压时间换相面积预测的换相失败抑制方法[J].电力系统自动化,2022,46(3):156-163.
- [8] 王涛,肖繁,曹森,等.换相失败交流系统临界电压计算[J].湖北电力,2019,43(4):1-7.
- [9] 宋金钊,李永丽,曾亮,等.高压直流输电系统换相失败研究综述[J].电力系统自动化,2020,44(22):2-13.
- [10] 邹常跃,韦嵘晖,冯俊杰,等.柔性直流输电发展现状及应用前景[J].南方电网技术,2022,16(3):1-7.
- [11] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2013.
- [12] 胡宏,陈浩,丁浩寅,等.特高压混合级联多端直流输电系统的协调控制策略研究[J].电力工程技术,2021,40(4):42-51.
- [13] 刘泽洪,马为民,王绍武,等.混合级联特高压直流输电系统方案设计及动模试验验证[J].电网技术,2021,45(3):1214-1222.
- [14] 刘泽洪,王绍武,种芝艺,等.适用于混合级联特高压直流输电系统的可控自恢复消能装置[J].中国电机工程学报,2021,41(2):514-524.
- [15] 徐政,王世佳,张哲任,等. LCC-MMC 混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J].电力建设,2018,39(7):115-122.
- [16] 樊鑫,郭春义,杜夏冰,等.特高压混合级联直流输电系统抑制逆变电站后续换相失败的无功功率调控方法[J].电网技术,2021,45(9):3443-3452.
- [17] 陈倩,王国腾,徐政,等.含混合级联直流系统的多馈入直流系统换相失败恢复协调控制策略[J].南方电网技术,2022,16(2):41-49.
- [18] NIU C, YANG M J, XUE R, et al. Research on inverter side AC fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC System [C]. 2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020:800-805.
- [19] 董芷函,王国腾,徐政,等.白鹤滩—江苏特高压混合级联直流系统运行特性分析方法[J].电力自动化设备,2022,42(6):118-125.
- [20] 许冬,李探,梅念,等. VSC 与 LCC 混合级联直流输电系统暂态电流抑制方法[J].全球能源互联网,2020,3(2):166-171.
- [21] 徐政.交直流电力系统动态行为分析[M].北京:中国电力出版社,2021.
- [22] 姚为正.换流阀及控制保护[M].北京:机械工业出版社,2021.
- [23] 汤奕,郑晨一.高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J].中国电机工程学报,2019,39(2):499-513.
- [24] 杨硕,郑安然,彭意,等.混合级联型直流输电系统直流故障特性及恢复控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(9):166-172.
- [25] 范子强,许朋见,吴庆范,等. DPS-5000 直流输电控制保护系统设计方案[J].电气技术,2021,22(5):78-84.
- [26] 刘旭辉,张爱玲,曹森,等.基于 HCM3000 直流控制保护平台新型仿真系统实现与应用[J].电力系统保护与控制,2019,47(17):180-186.
- [27] 李奇南,夏勇军,张晓林,等.渝鄂柔性直流输电系统中高频振荡影响因素及抑制策略[J].中国电力,2022,55(7):11-21.
- [28] 周谷庆,张杰,仲浩,等.柔性直流控制系统链路延时测量方法研究[J].浙江电力,2021,40(2):33-37.
- [29] 田培涛,范雪峰,曹森,等.海上风电柔性直流送出紧凑型控制保护系统设计方案[J].湖北电力,2020,44(1):11-19.
- [30] 彭勇,臧春艳,张利,等.青豫直流工程中 1000 kV GIL 运行状态的检测研究[J].湖北电力,2022,46(3):23-28.
- [31] 杨建明,甘宗跃,董云龙,等.特高压柔性直流输电阀区接地故障保护策略[J].湖北电力,2021,45(2):73-83.
- [32] 张继红,兰永健,赵锐,等.独立运行直流微网协调控制策略[J].湖北电力,2021,45(2):56-63.
- [33] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会.柔性直流输电工程系统试验:GB/T 38878—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

作者简介:

刘晨(1992),男,工程师,研究方向为高压直流输电控制保护技术;

肖鲲(1983),男,高级工程师,从事特高压直流工程设计工作;

李传西(1988),男,硕士,研究方向为高压直流输电控制保护技术。

(收稿日期:2023-01-04)