

## 基于 RTDS 仿真的柔直阀控双从策略优化研究

陈小平<sup>1</sup>, 涂小刚<sup>2</sup>, 徐鸿<sup>1</sup>, 熊银武<sup>1</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司天生桥局, 贵州 兴义 562400; 2. 西安西电电力系统有限公司, 西安 710065)

**摘要:** 柔性直流输电换流阀阀控的双从故障是唯一从套系统可以出口跳闸的故障, 为了避免从套系统误出口带来的跳闸, 提出了一种优化的双从判断策略。首先, 对当前柔直阀控结构和双从判断机理进行了分析; 其次, 结合现场出现的跳闸故障分析其原因, 对双从判断策略进行了优化; 最后, 在实验室搭建 RTDS 实验系统完成了验证。所提方案已经成功应用于鲁西柔直工程, 为柔直工程安全稳定运行提供了保证, 对后续柔直阀控研发也具有一定的参考价值。

**关键词:** 柔性直流; 双从判断; RTDS 仿真

### Research on Optimization of Double Slave Strategy for VSC-HVDC Valve Control Based on RTDS Simulation

CHEN Xiaoping<sup>1</sup>, TU Xiaogang<sup>2</sup>, XU Hong<sup>1</sup>, XIONG Yinwu<sup>1</sup>

(1. Tianshengqiao Bureau of CSG EHV Transmission Company, Guizhou Xingyi 562400, China;

2. Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The double slave fault of valve control in VSC-HVDC transmission is the only fault tripping from the slave system. In order to avoid the tripping due to the incorrect output of the slave system, an optimized double slave judgment strategy is proposed. Firstly, the current valve control structure and double-standby judgment mechanism are analyzed. Then, the double slave judgment strategy is optimized in combination with analysis of the reason of tripping occurred at site. Finally, the RTDS test system is setup in the laboratory for verification. The proposed scheme has been used successfully in Luxi VSC-HVDC project, has provided guarantee for safe and stable operation of VSC-HVDC project and also has a reference value for subsequent VSC-HVDC projects.

**Keywords:** VSC-HVDC; double-slave judgment; RTDS Simulation

## 0 引言

随着柔性直流输电技术的进步, 国内柔性直流输电工程不断向更高电压等级、更大输送容量和更高可靠性发展<sup>[1-11]</sup>。换流阀是柔直工程电能转换的关键设备, 换流阀阀控则是换流阀的控制保护装置, 其可靠性直接影响柔性直流输电工程的可用率。鲁西异步联网工程是世界上首次采用大容量柔性直流与常规直流组合模式的背靠背工程<sup>[12]</sup>, 其换流单元三采用柔性直流输电背靠背设计, 分为广西侧和云南侧。额定输送容量 1 000 MW, 直流电压  $\pm 350$  kV。2021 年 1 月鲁西站单元三广西侧发生了由于单套阀控内部通讯故障导致的跳闸事

故。广西侧阀控系统 B(主套)无异常, 广西侧阀控系统 A(从套)上报阀控双从故障并请求跳闸。

目前针对柔直故障研究主要集中在换流阀故障和直流故障穿越方面<sup>[13-21]</sup>, 而对于阀控策略优化策略, 文献[22]针对鲁西换流站柔直阀控快速保护通讯异常引起的事故, 提出了一种优化策略可有效避免阀控时序配合导致的跳闸; 文献[23]针对昆柳龙直流工程柳州站双阀组充电跳闸事故, 提出了阀控故障判断时序配合优化方案消除了跳闸问题, 并应用于工程现场。该分析对于鲁西故障分析和处理具有借鉴意义, 但是无法实现柔直阀控双从故障判别策略优化。

针对此次单套阀控通讯故障导致的跳闸出口事故进行了分析, 剖析引发故障机理, 提出了一种



块故障状态信号;向极控发送阀控和阀的重要状态信号,向ACB板下发导通模块数等信号,向IO板发送故障跳闸信号。

ACB板主要负责完成模块的电压排序、均压等功能,ACB板根据来自VGCB的模块电压信息,将来自CPU板的导通模块数转换成换流阀控制命令下发给脉冲分配机箱的VGCB板。

VGCB板负责将换流阀控制命令分发给LB板,接收并汇总LB板上传的换流阀的电压和故障等状态信号。

LB板接收来自A、B两套系统的控制命令和主从信号,再选择主系统的控制命令发送给换流阀;向上发送换流阀状态和双从判断结果。

AFB板用于接收电压电流测量值,并对电流保护做出快速保护判断,发送结果给CPU板执行。IO板用于出口跳闸。

## 2 双从故障误跳闸机理

2021年1月5日,鲁西换流站广西侧A套阀控(从套)上报:“切换 阀控内部故障”、“切换 ACB1 切换综合”、“跳闸 双从故障”信号;B套阀控(主套)无异常报文,柔直系统跳转至备用状态。“ACB1 切换综合”指的是ACB1板所链接的下级板卡(VGCB板和LB板)发生软、硬件故障导致的切换。双从故障是指LB收到的两套阀控值班信号均为从信号。

正常情况下,两套阀控系统从极控收到的主从信号应该是一主一从两种信号,阀控VCMI将主从信号和触发命令通过本套的ACB板和VGCB板送到LB板中,由LB板判断两套信号的主从并选择主系统触发信号向换流阀下发。双从故障的判断逻辑为:当任意一块LB接收到两套系统值班信号均为从信号持续超过1ms时,认为两套极控均出现了故障,为了保护一次设备,该LB板向上报出双从故障,最终CPU板收到后向IO板发送跳闸命令并执行,判断流程图见图4。

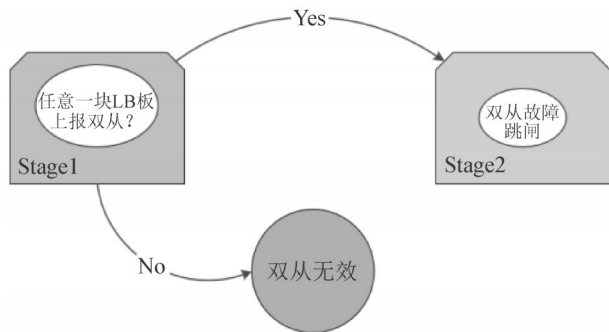


图4 双从判断流程图

Fig. 4 Double slave judgement flow chart

值班信号在阀控中的信号传输路径见图5(a),双从故障信号在阀控中的信号传输路径见图5(b)(图中X表示板卡编号)。

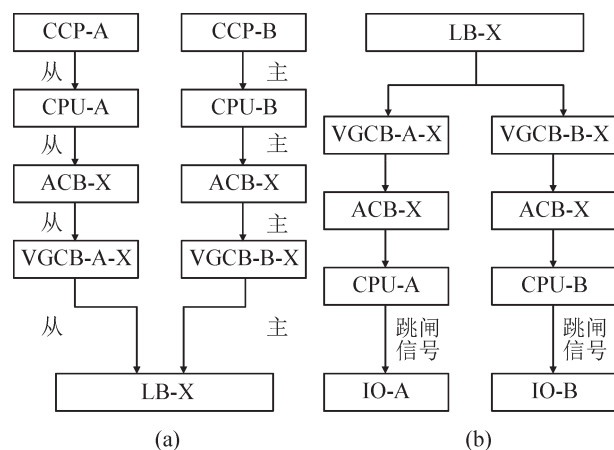


图5 信号传输路径图

Fig. 5 Signal transmission path diagram

根据现场报文、录波及硬件检测信息进行分析,发现A套阀控主机ACB1板卡链接的一块VGCB板因板卡硬件故障导致内部时钟信号异常,引发该板卡程序数据处理异常,错误的向A系统阀控主机发送了双从故障,阀控主机按照判断流程向IO板发送跳闸命令,最后IO板出口跳闸,现场波形见图6所示。可以看出,在出现A套双从故障后阀控IO执行跳闸,换流阀6个桥臂的电流跳闸后由正弦波变为0,柔直系统停止运行。

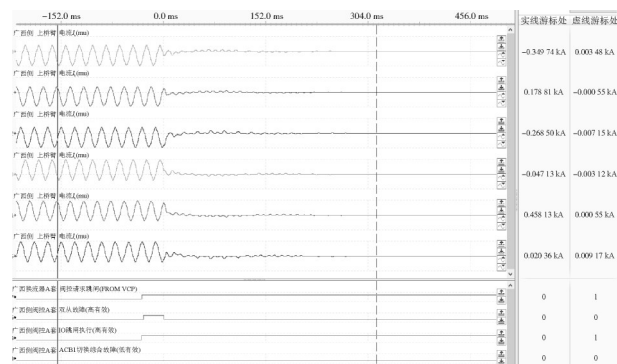


图6 现场故障跳闸波形图

Fig. 6 Field fault tripping waveform diagram

然而,在主系统正常运行的情况下,从系统发生任何故障只应该发出告警提示运行值班人员进行检查,不能直接出口跳闸导致柔直系统停运。因此,本次跳闸事故的直接原因是脉冲分配箱中备用套系统链接的一块VGCB板发生硬件故障,导致误发双从故障信号,但根本原因是阀控系统双从故障保护判断逻辑存在缺陷,在主系统正常的情况下执行了跳闸。

3 优化策略研究及实验验证

3.1 优化策略

为降低阀控跳闸风险,考虑到单一 LB 板卡双从判断出现误报的可能性和系统存在主系统时不应该出口双从故障,对双从故障保护逻辑进行如下优化:1)多于 3 块 LB 判断出双从故障才上报,避免单块 LB 板卡误报;2)在互为冗余的 VGCB 板间通讯中增加对套的值班信息,当两套 VGCB 板的值班信号存在主系统时,双从故障不出口;3)在互为冗余的 CPU 板间通讯中增加对套的值班信息,当两套 CPU 板的值班信号存在主系统时,双从故障不出口。新的双从故障判断流程见图 7。

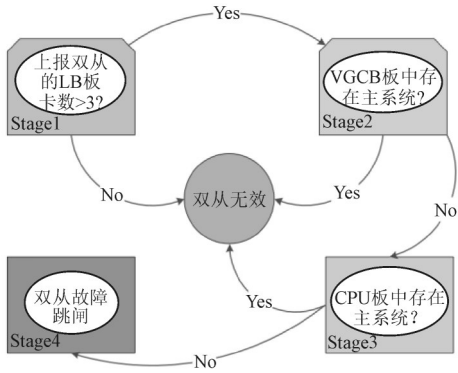


图7 优化的双从判断流程图  
Fig. 7 Optimized double slave judgement flow diagram

3.2 实验回路

为了对优化后的双从故障保护进行验证,在仿真实验室建立了基于 RTDS 的全链路仿真实验回路见图 8。该仿真回路属于柔性直流硬件在环仿真的一种<sup>[24]</sup>。

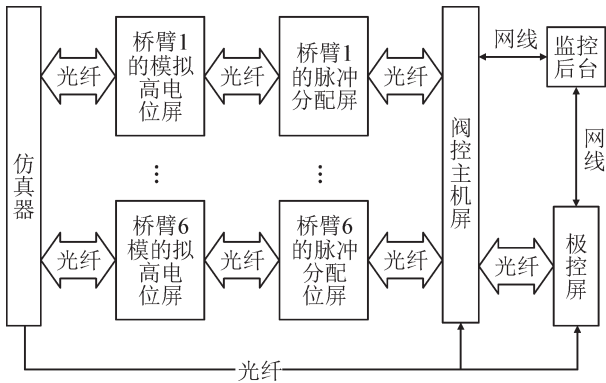


图8 阀控全链路实验系统  
Fig. 8 Full chain experimental system of valve control

全链路实验系统是指实验系统包含与工程实际一致的阀控,全链路实验系统实物见图 9,由 RTDS 仿真器、1 个桥臂的模拟高电位屏、脉冲分配

屏、阀控主机屏、极控屏和监控后台组成。

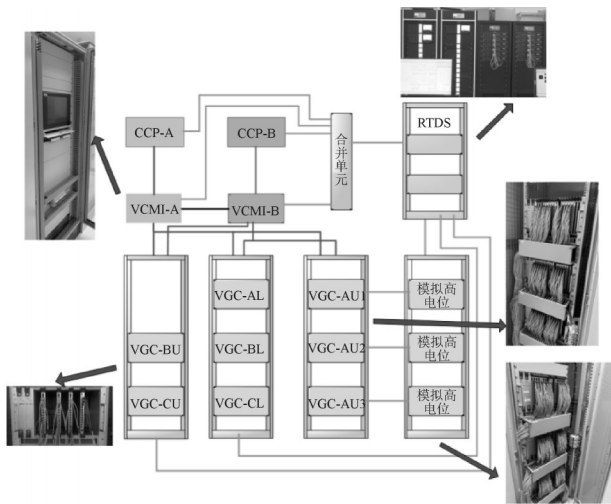


图9 仿真实验实物图  
Fig. 9 Physical diagram of simulation experiment

RTDS 仿真器用于模拟换流单元三柔直背靠背的一次回路。合并单元将 RTDS 发出的电压电流测量值转换成光信号发给极控和阀控;极控、监控后台、阀控主机和 A 相上桥臂(AU)脉冲分配屏的配置及程序与现场一致,这样的配置可以保证阀控双从故障验证环境与现场一致;AU 屏板卡通过模拟高电位机箱板卡与 RTDS 相连,模拟高电位机箱用于实现子模块高电位控制板功能,也可以在线设置模块各类故障。其他 5 个桥臂的机箱采用简化配置,直接与 RTDS 通讯。

在 RTDS 中建立如图 10 所示鲁西换流站柔直单元一次回路,回路主要参数见表 1,并开展相关实验来验证双从故障保护功能。

表1 试验回路主要参数  
Table 1 Main parameters of test circuit

| 名称         | 广西侧   | 云南侧   |
|------------|-------|-------|
| 直流电压/kV    | ±350  | ±350  |
| 直流电流/A     | 1 429 | 1 429 |
| 桥臂模块数/个    | 468   | 335   |
| 模块电容/mF    | 12    | 8     |
| 功率模块额定电压/V | 1 600 | 2 100 |
| 桥臂电抗/mH    | 105   | 105   |

3.3 实验验证

仿真实验开始时的柔直系统条件为系统输送额定 1 000 MW 有功功率,功率方向云南送广东,广西侧阀控 B 主 A 备,阀控间热备份光纤通讯正常。

实验 1:阀控双从判据优化前,通过烧写器在 A 套阀控 VGCB 板设置双从故障信号,来复现此

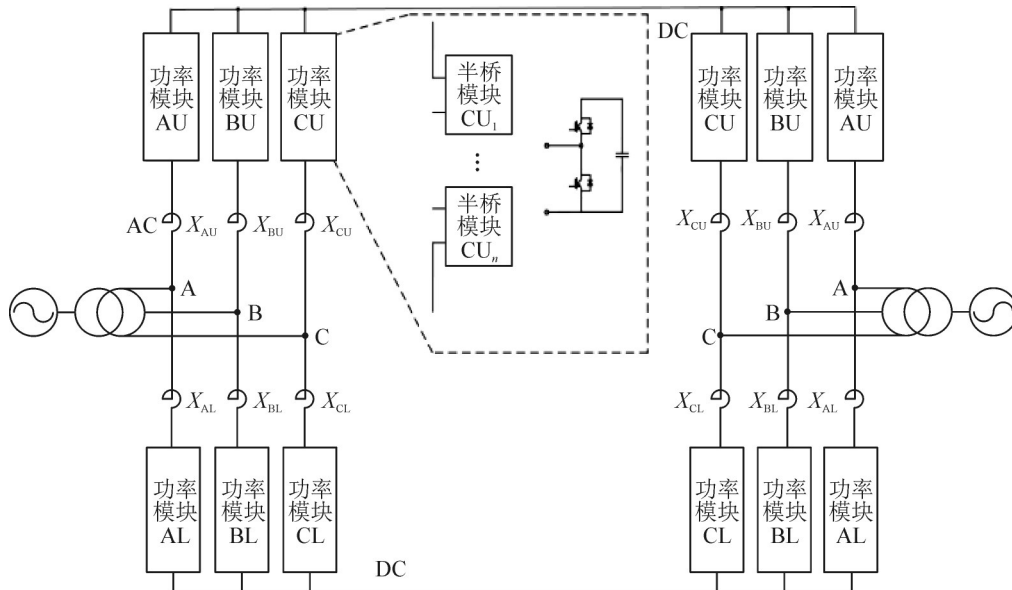


图10 仿真实验电路图

Fig. 10 Circuit diagram of simulation experiment

次跳闸事故, A 套阀控主机收到 VGC B 板发来的双从故障(ACB1 切换故障综合), 判断阀控发生了双从故障, 随即向 A 套的 IO 板发送跳闸命令, IO 板出口跳闸, 系统停运。误报且跳闸实验波形见图 11。该实验结果与现场完全一致, 验证了对现场故障跳闸的原因的分析结论。

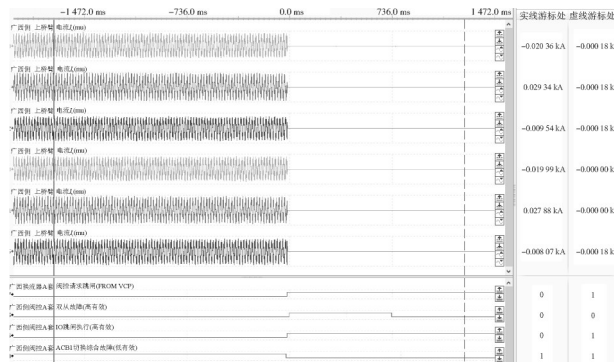


图11 误报且跳闸实验波形

Fig. 11 Experimental waveform with false and tripping

实验 2: 阀控双从判据优化后, 拔掉 B 套测量装置到阀控的光纤, 阀控发生故障切换, 状态变成 A 主 B 从。再拔掉 A 套 CCP 到阀控的值班信号, 此时两套阀控均为从系统, 阀控判断双从故障并出口跳闸, 试验波形见图 12。该实验验证了真实发生双从故障时保护的正确性。

实验 3: 阀控双从判据优化后, 通过烧写器在 A 套阀控 VGC B 板设置双从故障信号, 来模拟此次跳闸事故, A 套阀控主机收到 VGC B 板发来的双从故障(ACB1 切换故障综合), 由于 A 套阀控主机收到 B 套阀控主机发送过来的值班信号(主系统), 根据优化后的判断逻辑, A 套阀控主机判断双从跳闸故

障无效, 不会出口跳闸, 试验波形见图 13。该实验验证了优化后策略的防误性。

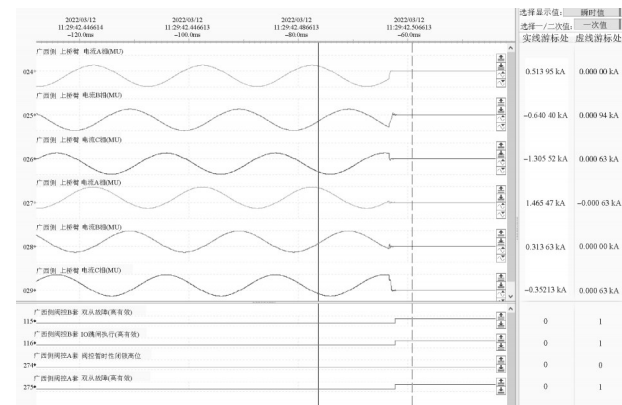


图12 双从跳闸实验波形

Fig. 12 Double valve tripping experimental waveform

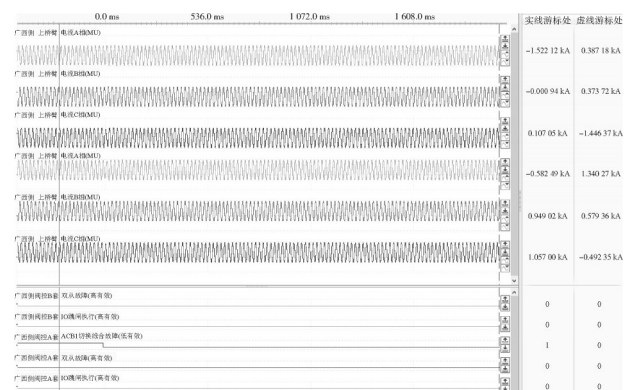


图13 ACB1故障且未跳闸实验波形

Fig. 13 Experimental waveform with with ACB1 fault and without tripping

## 4 结语

本文采用全链路仿真实验系统, 复现了柔性直

流输电阀控双从误跳闸过程,通过分析误跳闸机理,指出双从判断策略存在缺陷是导致跳闸的主要原因。本文提出一种优化的阀控系统双从判断策略,通过进行多层次双从判断,可以有效避免误跳闸的发生。仿真结果表明系统出现板卡故障导致的误报双从故障时,只要存在正常运行的阀控主系统,就不会发生误跳闸事故。优化的双从判断策略已经成功应用于鲁西柔直工程,通过鲁西换流站现场验收实验和一年多的稳定运行验证了策略的有效性,为工程后续安全可靠运行提供了保证,对以后的柔直阀控研发也具有一定的参考价值。

### 参考文献

- [1] 陈名,饶宏,李立涅,等.南澳柔性直流输电系统主接线分析[J].南方电网技术,2012,6(6):1-5.  
CHEN Ming, RAO Hong, LI Liying, et al. Analysis on the main wiring of Nan'ao VSC-HVDC transmission system[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 1-5.
- [2] 李岩,罗雨,许树楷,等.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.  
LI Yan, LUO Yu, XU Shukai, et al. VSC-HVDC transmission technology: application, advancement and expectation[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(1): 7-13.
- [3] 孙栩,曹士冬,雷霄,等. $\pm 500$  kV 柔性直流电网控制策略研究[J].高压电器,2019,55(5):154-160.  
SUN Xu, CAO Shidong, LEI Xiao, et al. Control strategy research on  $\pm 500$  kV flexible HVDC grid[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 154-160.
- [4] 饶宏,许树楷,周月宾,等.特高压柔性直流主回路方案研究[J].南方电网技术,2017,11(7):1-4.  
RAO Hong, XU Shukai, ZHOU Yuebin, et al. Research on main circuit scheme of VSC-UHVDC[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(7): 1-4.
- [5] 荣飞,徐彦,周保荣,等.柔性直流输电电压序列选择的研究[J].高压电器,2020,56(12):203-211.  
RONG Fei, XU Yan, ZHOU Baorong, et al. Research on voltage sequence selection of flexible DC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 203-211.
- [6] 涂小刚,宋志顺,常立国,等.半全桥子模块混合型柔性直流换流阀的充电策略研究与样机实验验证[J].高压电器,2019,55(10):111-115.  
TU Xiaogang, SONG Zhishun, CHANG Liguang, et al. Charging strategy for hybrid-MMC valve composed of HBSM and FBSM with experimental verification[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(10): 111-115.
- [7] 杨柳,朱喆,侯婷,等.背靠背直流输电技术及其在鲁西异步联网工程中的应用[J].南方电网技术,2018,12(4):1-6.  
YANG Liu, ZHU Zhe, HOU Ting, et al. Technology of back-to-back DC transmission system and its application in Luxi asynchronous interconnection project[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(4): 1-6.
- [8] 陈东,乐波,梅念,等. $\pm 320$  kV 厦门双极柔性直流输电工程系统设计[J].电力系统自动化,2018,42(14):180-185.  
CHEN Dong, YUE Bo, MEI Nian, et al.  $\pm 320$  kV system design of Xiamen bipolar VSC-HVDC transmission project[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 180-185.
- [9] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.  
RAO Hong, ZHOU Yuebin, LI Weiwei, et al. Engineering application and development prospect of VSC-HVDC transmission technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 1-11.
- [10] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等.柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J].高电压技术,2022,48(9):3347-3355.  
RAO Hong, HUANG Weihuang, GUO Zhifei, et al. Practical experience of VSC-HVDC transmission in large grid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3347-3355.
- [11] 辛保安,郭铭群,王绍武,等.适应大规模新能源友好送出的直流输电技术与工程实践[J].电力系统自动化,2021,45(22):1-8.  
XIN Baoan, GUO Mingqun, WANG Shaowu, et al. Friendly HVDC transmission technologies for large-scale renewable energy and their engineering practice[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(22): 1-8.
- [12] 郑志全,肖前.南网成功研制世界首个特高压柔性直流换流阀[EB/OL]. [http://www.csg.cn/xwzx/2017/gsyw/201706/t20170606\\_157399.html](http://www.csg.cn/xwzx/2017/gsyw/201706/t20170606_157399.html). 2017-06-06
- [13] 李品,黄凯宇,汪思奇.世界最高电压最大容量柔性直流输电工程建成投运[EB/OL]. [http://www.csg.cn/xwzx/2016/gsyw/201608/t20160829\\_142521.html](http://www.csg.cn/xwzx/2016/gsyw/201608/t20160829_142521.html). 2016-08-29.
- [14] 熊岩,饶宏,许树楷,等.特高压多端混合直流输电系统启动与故障穿越研究[J].全球能源互联网,2018,1(4):478-486.  
XIONG Yan, RAO Hong, XU Shukai, et al. Research on start and fault ride-through strategy for ultra-high voltage multi-terminal hybrid DC transmission system[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 478-486.
- [15] 周杨,贺之渊,庞辉,等.双极柔性直流输电系统站内接地故障保护策略[J].中国电机工程学报,2015,35(16):4062-4069.  
ZHOU Yang, HE Zhiyuan, PANG Hui, et al. Protection of converter grounding fault on MMC based bipolar HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4062-

- 4069.
- [16]朱继斌,朱秋楠,张友鹏,等. 柔性直流输电故障快速清除系统及其用直流断路器[J]. 高压电器, 2018, 54(8): 139-146.
- ZHU Jibin, ZHU Qiunan, ZHANG Youpeng, et al. Fast remove system and its DC circuit breaker for flexible DC transmission fault[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 139-146.
- [17]金晶,殷勤. 含电阻型超导限流器的南澳柔性直流系统故障特性分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 286-291.
- JIN Jing, YIN Qin. Fault characteristics analysis of Nan'ao flexible DC system with resistance superconducting current limiter[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 286-291.
- [18]郑眉,李威,常彬,等. 一种混合直流输电故障检测和处理策略[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 181-186.
- ZHENG Mei, LI Wei, CHANG Bin, et al. Method of fault detection and processing strategy for hybrid HVDC transmission[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(7): 181-186.
- [19]罗雍溢,王渝红,宋瑞华,等. 具有直流故障自清除能力的改进电容型子模块[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4510-4517.
- LUO Yongyi, WANG Yuhong, SONG Ruihua, et al. Improved capacitive sub-module with DC fault self-clearing capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4510-4517.
- [20]赖逸洋,王增平,王彤. 电流差动保护在柔直接入的交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145-154.
- LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145-154.
- [21]张隆恩,韩鸿凌,朱帅,等. 一起高压大容量柔性直流输电换流器子模块故障分析[J]. 湖北电力, 2022, 46(4): 75-81.
- ZHANG Longen, HAN Hongling, ZHU Shuai, et al. Analysis on convertor sub-module fault of flexible HVDC transmission[J]. Hubei Electric Power, 2022, 46(4): 75-81.
- [22]肖凯,王振,邹延生,等. 一起柔直阀控误跳机理及控制策略优化研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(9): 11-14.
- XIAO Kai, WANG Zhen, ZOU Yansheng, et al. Mechanism of a false trip of flexible valve control system and research on control strategy optimization[J]. Power Electronics, 2021, 55(9): 11-14.
- [23]杨雪飞,杨绍远,李桂源,等. 昆柳龙直流工程柳州站双阀组充电跳闸事件分析及对策[J]. 南方电网技术, 2022, 16(2): 82-88.
- YANG Xuefei, YANG Shaoyuan, LI Guiyuan, et al. Analysis of the Kunliulong UHVDC tripping event during charging process of high and low values in Liuzhou converter station and countermeasure[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(2): 82-88.
- [24]朱金涛,辛业春. 柔性高压直流输电仿真技术研究方法综述[J]. 智慧电力, 2021, 49(3): 1-11.
- ZHU Jintao, XIN Yechun. Review of research on simulation methods of VSC-HVDC transmission system[J]. Smart Power, 2021, 49(3): 1-11.

#### 作者简介:

陈小平(1988—),男,工程师,主要从事柔性直流输电控制保护技术研究。E-mail:2363426090@qq.com。

涂小刚(1980—),男,正高级工程师,主要从事柔性直流输电控制保护技术研究。

徐鸿(1989—),男,工程师,主要从事柔性直流输电控制保护技术研究。

熊银武(1986—),男,工程师,主要从事高压直流输电控制保护系统运行维护。