

DOI: 10.7667/PSPC170754

适应安全稳定控制的双端柔性直流输电系统 故障闭锁判据研究

李祝昆¹, 朱益华², 徐海波¹, 陈汹¹, 李雪明¹

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210003;
2. 南方电网仿真重点实验室, 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080)

摘要: 大容量柔性直流故障闭锁后的功率突变将对电网的安全稳定运行造成重大影响。由于柔性直流控制保护系统一体化的工程现状, 且控制保护相关技术参数并未对外公布, 以基于鲁西柔性直流仿真系统搭配实际控制保护系统对故障下电气特征进行研究。提出适应安全稳定控制的柔性直流系统联接变阀侧单相接地、相间短路、相间接地、三相接地、直流线路正极接地、负极接地、极间短路及无故障跳闸的判据, 并在 RTDS 仿真系统中进行了验证。结果表明: 所提判据能准确识别双端柔性直流系统故障状态, 具有较好的工程实用性。

关键词: 安全稳定控制; 柔性直流输电; 故障闭锁判据; 无故障跳闸

Research on fault blocking criteria of two-terminal VSC-HVDC transmission system adapting to safety and stability control

LI Zhukun¹, ZHU Yihua², XU Haibo¹, CHEN Xiong¹, LI Xueming¹

(1. NARI Technology Development Limited Company, Nanjing 210003, China; 2. Key Laboratory of Power System Simulation, Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

Abstract: The sudden change of power after large capacity flexible DC fault blocking will have a significant impact on the safe and stable operation of power grid. Because of the integration of flexible DC control and protection system, and the related technical parameters not being disclosed, study of fault electrical characteristics is based on Luxi flexible DC simulation system collocation with actual control and protection system. And then this paper proposes the criterions of single-phase grounding, phase to phase short circuit, phase to phase grounding, three-phase grounding, the positive and negative terminal grounding of the DC circuit, pole-to-pole short circuit fault and no fault tripping of valve side in converter transformer of VSC-HVDC system adapting to the security and stability control, and validates them in the RTDS simulation system. The results show that the proposed criterions can accurately identify the fault state of the two-terminal VSC-HVDC transmission system, so it has better engineering practicability.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Operation Characteristics and Control Technologies for ± 500 kV VSC-HVDC System".

Key words: safety and stability control; VSC-HVDC; fault blocking criterion; non-fault tripping

0 引言

随着电力电子技术的进步, 柔性直流输电系统正朝高电压、大容量和远距离传输方面拓展应用^[1-4], 柔性直流故障对电力系统安全稳定的影响已不可忽

视^[5]。国内已投运大连、厦门柔性直流输电系统传输容量已达到 1 000 MW, 在建张北、渝鄂等柔性直流输电系统将达到 5 000 MW 的传输容量, 其故障闭锁后的功率突变将对电网的安全稳定运行造成重大影响。

目前有关柔性直流的研究主要集中在直流系统的结构、控制策略与保护方面。文献[6]根据柔性直流输电的电网电气特征进行了分析, 但缺少柔性直

基金项目: 国家电网公司科技项目 "±500 kV 柔性直流电网运行特性与控制技术研究"

流控制保护系统的介入影响分析；文献[7]根据柔性直流输电换流器故障特性分析提出了一种快速故障定位方法，文献[8]提出了柔性直流换流器阀组保护的配置方案，文献[9]对柔性直流双极短路的电气特性进行了分析，文献[10]对柔性直流系统故障的稳态特性进行了理论分析并验证，文献[11]提出了双极柔性直流输电系统站内接地故障的保护控制策略，文献[12-13]介绍了工程应用的柔直控制保护系统的组成及配置方案，但都未对控制保护系统的动作参数予以披露，文献[14]提出了柔性直流交流母线差动保护方法，文献[15]提出了就地检测就地保护的柔性直流故障保护策略。稳控装置作为电力系统安全稳定第二道防线设备，在特高压直流相关工程应用中，其对故障的判别受限于装置接入电气量的规模，一般只接入联接变两侧的电气量及控制保护系统少量命令信号^[16]，工程应用现状使稳控装置对柔性直流输电系统故障的判断受电气特征及控制保护系统动作逻辑两方面影响^[17-18]。本文从鲁西柔性直流输电 RTDS 仿真系统出发，使用工程应用的实际控制保护系统，以此进行故障电气特征分析，提出故障闭锁判据并通过了试验验证。

1 试验系统简述

鲁西柔性直流系统的 RTDS 仿真系统结构图如图 1。系统电压等级±320 kV，传输容量 1 000 MW，联接变为星-星接线，网侧直接接地，阀侧经 5 000 Ω 电阻接地。

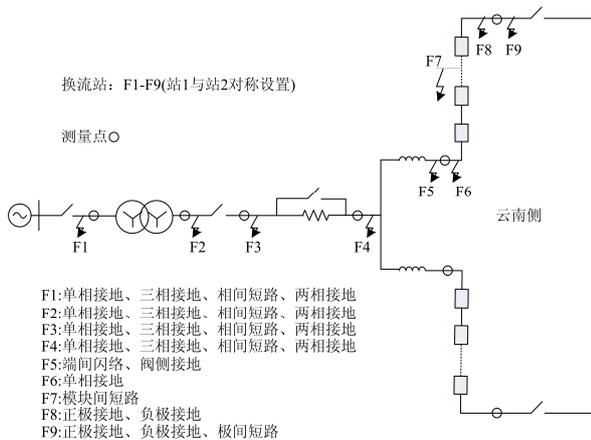


图 1 鲁西背靠背柔性直流输电系统云南侧 RTDS 系统结构图

Fig. 1 Yunnan RTDS system diagram of Luxi BTB VSC-HVDC system

2 故障特征分析

柔性直流输电系统正常运行状态为整流侧控制

直流电压和无功功率，逆变侧控制有功功率和无功功率。在该方式下，对整流侧及逆变侧区内 F2-F7 测点分别进行单相接地、相间短路、相间接地和三相接地等故障试验，F8 与 F9 进行正极接地、负极接地、极间短路等故障试验。从试验结果看整流侧与逆变侧故障下主要电气特征基本一致，以下皆以整流侧的故障电气特征进行分析。在阀侧交流场区 F2-F7 点相同故障下，联接变的网侧与阀侧的电气量特征几乎一致；在直流区 F8-F9 点相同故障下，联接变的网侧与阀侧的电气量特征几乎一致。以下交流场区故障皆以 F2 点为分析对象，直流区以 F9 点为分析对象。

2.1 阀侧单相接地故障

阀侧单相接地故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图 2、图 3。网侧电压、电流无变化，柔直闭锁后网侧电流到 0，40 ms 后交流断路器跳闸电压到 0；故障后阀侧故障相电压到 0，非故障相升高到线电压，电流无变化，闭锁后电流到 0，40 ms 后跳闸电压到 0。

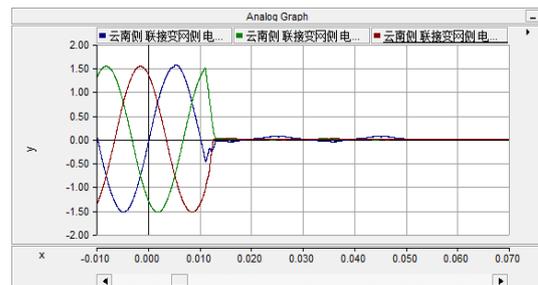
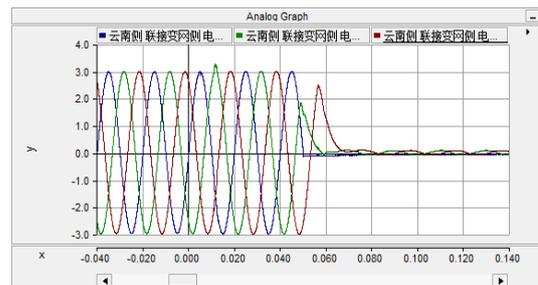
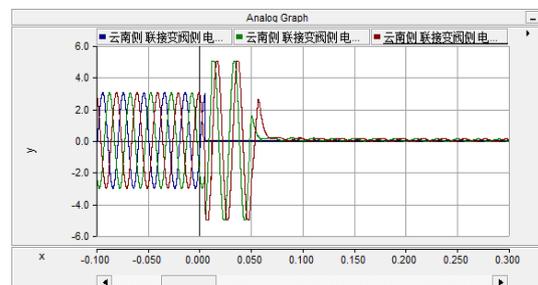


图 2 联接变网侧电压、电流

Fig. 2 Voltage and current of net-side in converter transformer



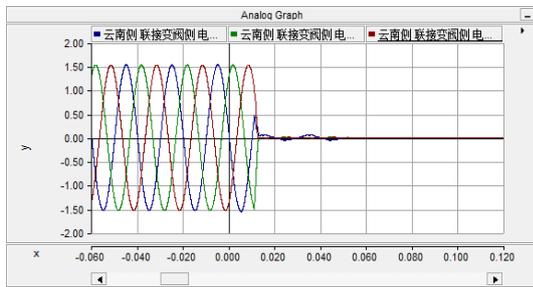


图3 联接变阀侧电压、电流

Fig. 3 Voltage and current of valve-side in converter transformer

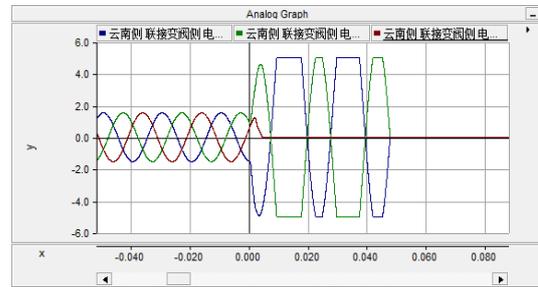


图5 联接变阀侧电压、电流

Fig. 5 Voltage and current of valve-side in converter transformer

2.2 阀侧相间短路故障

阀侧相间短路故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图4、图5, 网侧故障相电压下降到0.85 p.u., 非故障相电压不变, 故障相电流上升1倍, 柔直闭锁后非故障相电流到0, 40 ms后跳闸电压到0; 故障后阀侧故障相电压下降到0.5 p.u., 非故障相电压不变, 故障相电流上升1倍, 闭锁后非故障相电流到0, 40 ms后跳闸电压到0。

2.3 阀侧两相接地故障

阀侧两相接地故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图6、图7, 网侧电压下降0.1 p.u., 故障相电流上升1倍, 柔直闭锁后非故障相电流到0, 40 ms后跳闸电压到0; 故障后阀侧故障相电压下降到0, 非故障相电压升到线电压, 故障相电流上升1倍, 闭锁后非故障相电流到0, 40 ms后跳闸电压到0。

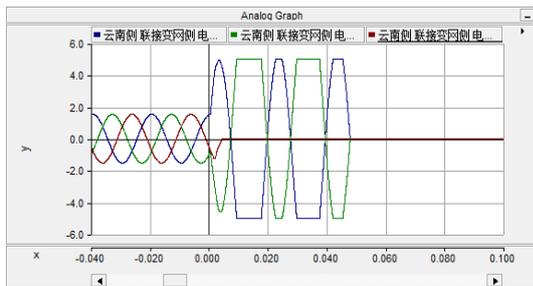
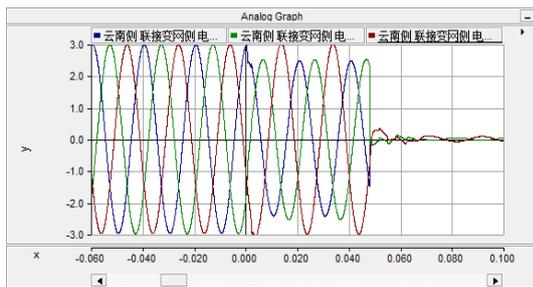


图4 联接变网侧电压、电流

Fig. 4 Voltage and current of net-side in converter transformer

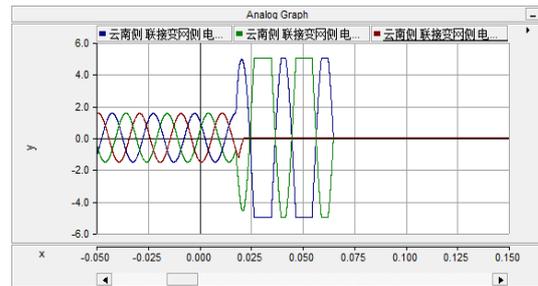
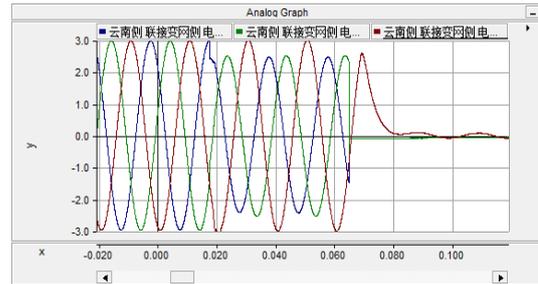
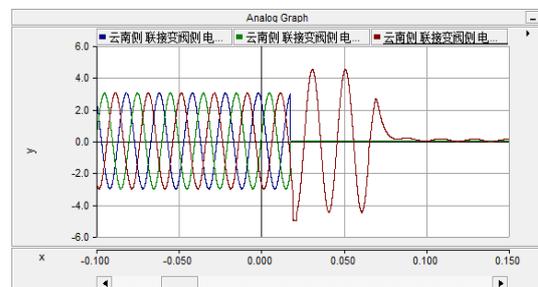
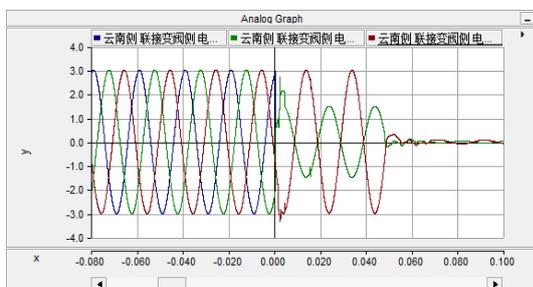


图6 联接变网侧电压、电流

Fig. 6 Voltage and current of net-side in converter transformer



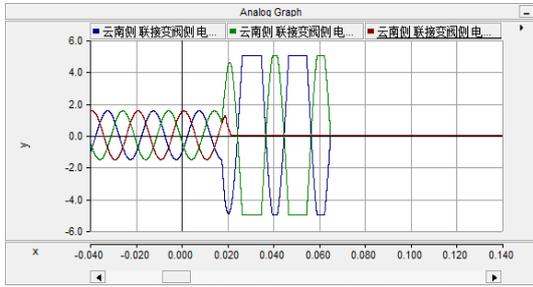


图 7 联接变阀侧电压、电流
Fig. 7 Voltage and current of valve-side in converter transformer

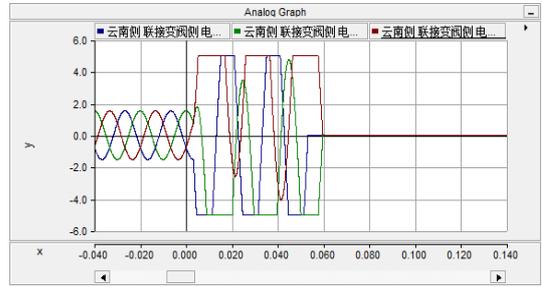


图 9 联接变阀侧电压、电流
Fig. 9 Voltage and current of valve-side in converter transformer

2.4 阀侧三相接地故障

阀侧三相接地故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图 8、图 9，网侧电压下降 0.2 p.u.，电流上升 1 倍，柔直闭锁后无变化，40 ms 后跳闸电压、电流到 0；故障后阀侧电压下降到 0，电流上升 1 倍多，闭锁后电流无变化，40 ms 后跳闸电压到 0。

2.5 正极接地故障

正极接地故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图 10、图 11，网侧电压、电流无变化，柔直闭锁后电流到 0，40 ms 后跳闸电压到 0；故障后阀侧电压波峰移到 0 以下，电流无变化，闭锁后电流到 0，40 ms 后跳闸电压到 0。

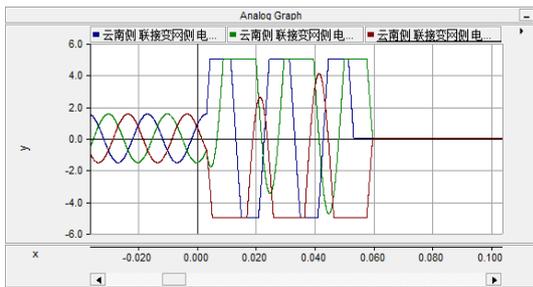
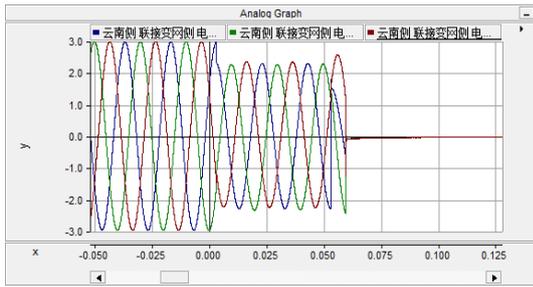


图 8 联接变网侧电压、电流
Fig. 8 Voltage and current of net-side in converter transformer

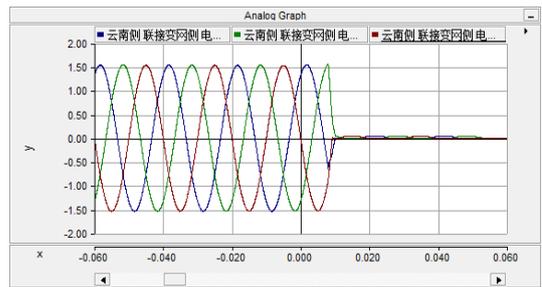
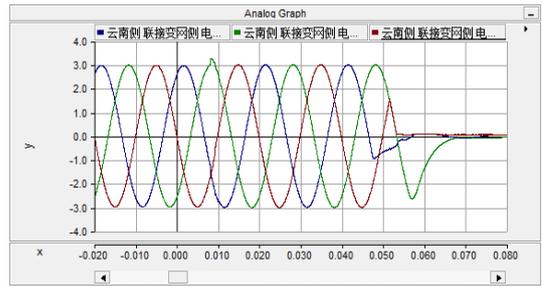
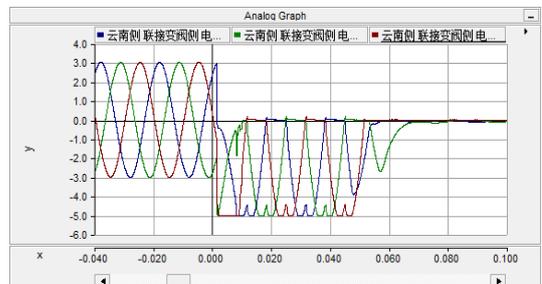
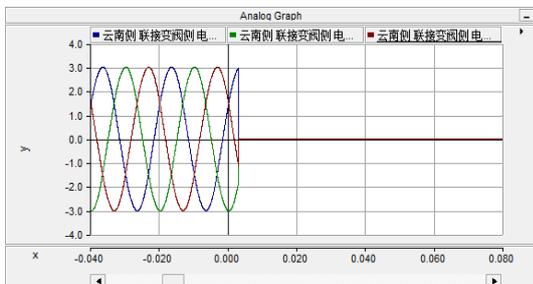


图 10 联接变网侧电压、电流
Fig. 10 Voltage and current of net-side in converter transformer



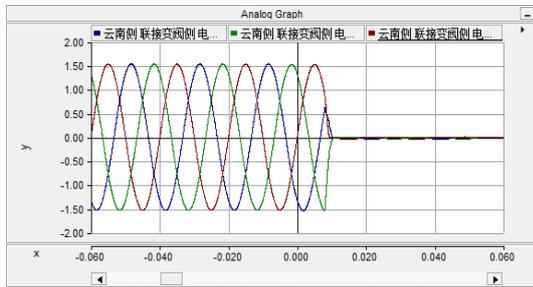


图 11 联接变阀侧电压、电流

Fig. 11 Voltage and current of valve-side in converter transformer

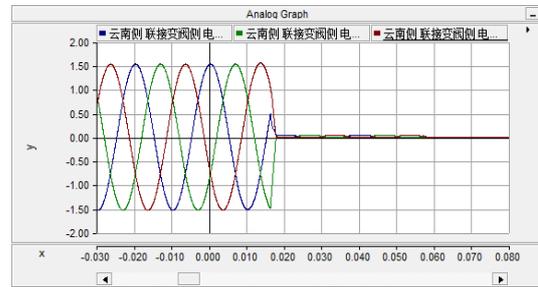


图 13 联接变阀侧电压、电流

Fig. 13 Voltage and current of valve-side in converter transformer

2.6 负极接地故障

负极接地故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图 12、图 13, 联接变网侧电压、电流无变化, 柔直闭锁后电流到 0, 40 ms 后跳闸电压到 0; 故障后阀侧电压波谷移到 0 以上, 电流无变化, 闭锁后电流到 0, 40 ms 后跳闸电压到 0。

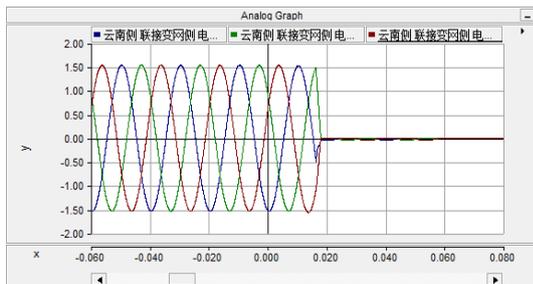
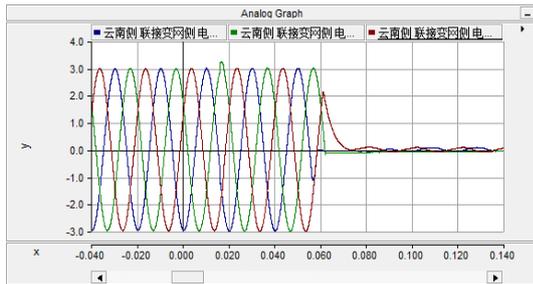


图 12 联接变网侧电压、电流

Fig. 12 Voltage and current of net-side in converter transformer

2.7 极间短路故障

极间短路与阀侧三相接地故障电气特征类似, 故障后联接变网侧与阀侧电气特征见图 14、图 15, 网侧电压下降 0.1 p.u., 电流上升 1 倍, 柔直闭锁后无变化, 40 ms 跳闸后电压、电流到 0; 故障后阀侧电压下降到 0.4 p.u. 左右, 电流上升 1 倍, 闭锁后无变化, 40 ms 跳闸后电压、电流到 0。

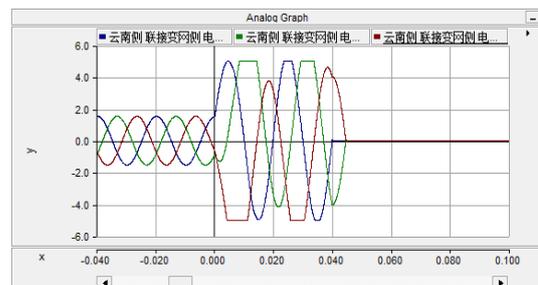
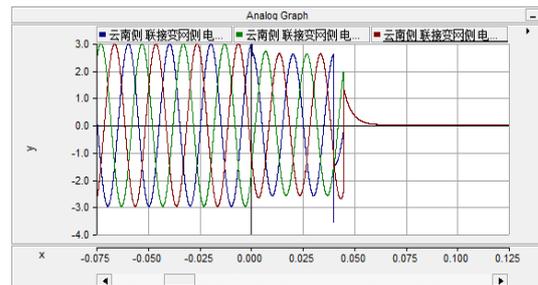
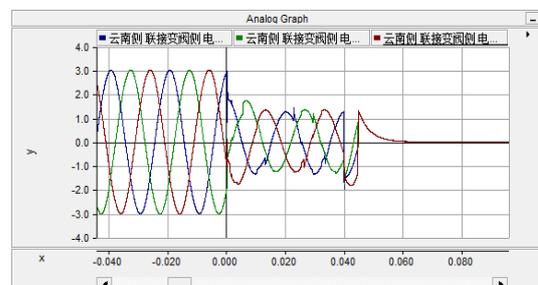
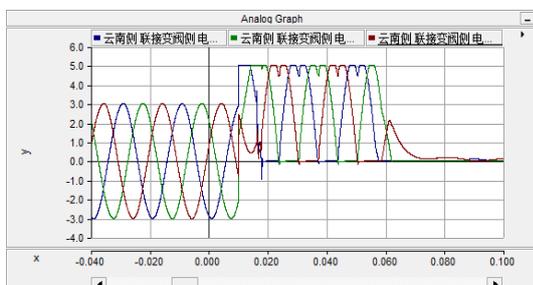


图 14 联接变网侧电压、电流

Fig. 14 Voltage and current of net-side in converter transformer



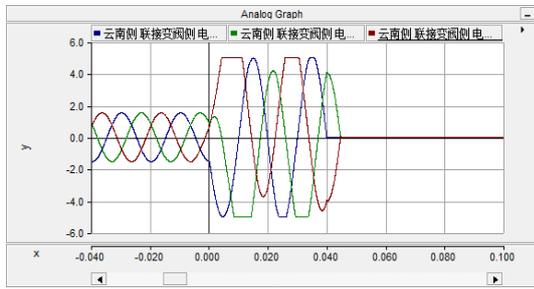


图 15 联接变阀侧电压、电流
Fig. 15 Voltage and current of valve-side in converter transformer

3 适应安全稳定控制的柔直故障闭锁判据

归纳柔性直流系统故障后的控制保护系统动作逻辑可看出，在故障发生后 5~20 ms，控制保护系统会判出直流系统发生故障并同时发出闭锁换流阀与跳交流断路器命令，命令发出后大约 20 ms 断路器完成分操作。受限于高压直流断路器的开发状况与换流器新型拓扑结构的建设成本^[2]，柔性直流系统故障后跳交流断路器仍将是一段时期内工程应用的首选方案，为了稳定控制故障判据的可靠性，使其不完全依赖于控保系统的命令，本文判据的开关量信号选择交流断路器的状态，当然也可以用控保系统的闭锁命令来代替断路器状态。根据上节故障下的电气特征结合交流断路器状态，可正确区分各种故障形态，包括：单相接地、相间短路、相间接地、三相接地、直流正极接地、负极接地、极间短路及无故障跳。

3.1 启动判据

为了使稳控装置在柔性直流输电系统各种故障情况下能可靠地启动进入故障判别状态，而在正常运行情况下装置又不会频繁启动，采用以下几种启动判据：

- 1) 联接变阀侧任意一相电压与电流满足突变量启动条件。
- 2) 联接变网侧有功功率突变量满足突变量启动条件。
- 3) 联接变阀侧任意一相电压非周期分量升高与电流满足突变量启动条件。

以上启动判据为“或”逻辑关系，其中任一判据满足都可使装置进入启动状态。

3.2 故障闭锁判据

故障闭锁判据根据柔性直流输电系统闭锁及交流断路器跳开将柔性直流系统故障闭锁的电气特征区分为前后 2 段，当电气特征符合各类型故障条件同时检测到断路器断开时，可准确判断故障同时区

分故障类型。

3.2.1 单相接地故障

突变量启动后联接变阀侧有一相电压降低、两相电压升高，阀侧三相电流均降低，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧非故障相电压降低，满足以上条件则判为单相接地故障。

3.2.2 相间短路

突变量启动后联接变阀侧有两相电压降低，阀侧两相电流升高、一相电流降低，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧非故障相电压降低，阀侧故障相电流降低，满足以上条件则判为相间短路故障。

3.2.3 相间接地

突变量启动后联接变阀侧有两相电压降低、一相电压升高，阀侧两相电流升高、一相电流降低，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧非故障相电压降低，阀侧故障相电流降低，满足以上条件则判为相间接地故障。

3.2.4 三相接地

突变量启动后阀侧有三相电压降低，阀侧三相电流升高，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧三相电流降低，满足以上条件则判为三相接地故障。

3.2.5 直流正极接地

突变量启动后阀侧三相电压的非周期分量均为负且小于固定值，阀侧三相电流降低，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧三相电压降低，满足以上条件则判为直流正极接地故障。

3.2.6 直流负极接地

突变量启动后阀侧三相电压的非周期分量均为正且大于固定值，阀侧三相电流降低，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧三相电压降低，满足以上条件则判为直流负极接地故障。

3.2.7 直流极间短路故障

突变量启动后阀侧三相电压降低，阀侧三相电流升高，网侧断路器状态从合变为分；断路器跳闸后阀侧三相电流降低，满足以上条件则判为直流极间短路故障。

3.2.8 无故障跳(闪络、直流无故障闭锁…)

突变量启动后网侧断路器状态从合变为分，故障后网侧三相电流降低，故障后网侧有功功率降低，满足以上条件可判为无故障跳，该判据对柔性直流故障闭锁的判断具有普适性。

相关故障判断详细逻辑见图 16，图中 $P_{0.2}$ 为 200 ms 前联接变网侧有功功率， i 为阀侧电流瞬时值， $i_{0.02}$ 为 20 ms 前阀侧电流瞬时值， u 为阀侧电

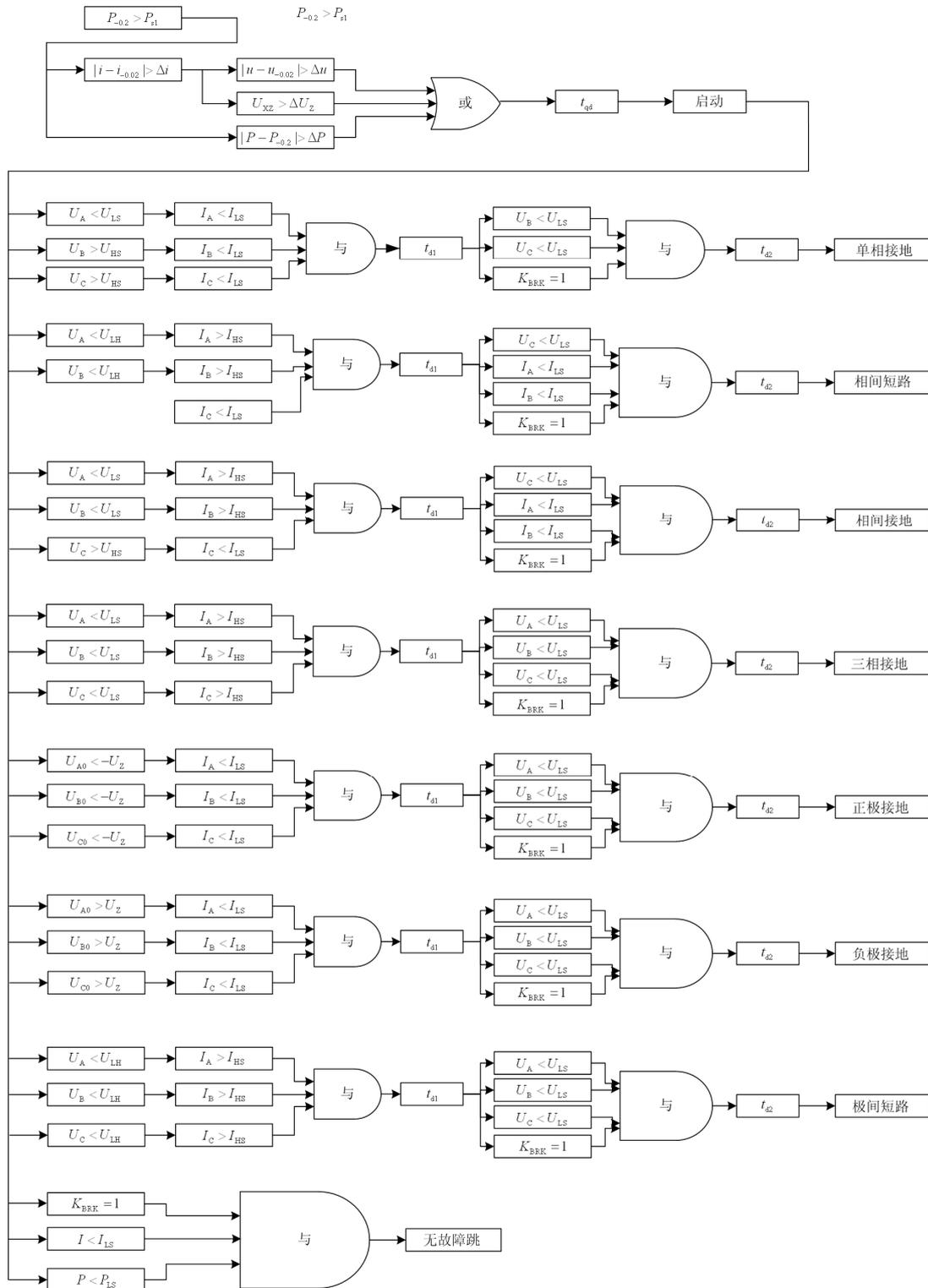


图 16 故障判据逻辑框图

Fig. 16 Logic block diagram of fault criterion

压瞬时值, $u_{-0.02}$ 为 20 ms 前阀侧电压瞬时值, U_{XZ} 为阀侧单相电压非周期分量, P 为当前网侧有功功率, U_{XZ} 为阀侧电压非周期分量, U_A 、 U_B 、 U_C 为阀

侧分相电压有效值, I_A 、 I_B 、 I_C 为阀侧分相电流有效值, I 为阀侧三相电流有效值, K_{BRK} 为网侧断路器状态。

其他逻辑定值如下：事故前功率 $P_{S1}=200$ MW，电压突变量 $\Delta u=0.2U_N$ ；电流突变量 $\Delta i=20$ A，功率突变量 $\Delta P=10$ MW；非周期分量突变量 $\Delta U_Z=0.15U_N$ ，也可根据现场设， t_{qd} 为启动延时；故障相接地 $U_{LS}=0.25U_N$ ；相间短路 $U_{LH}=0.75U_N$ ，接地故障的非故障相 $U_{HS}=1.3U_N$ ，闭锁、跳闸后电流 $I_{LS}=50$ A，短路电流 I_{HS} 根据现场实际情况设置；事故后功率 $P_{LS}=50$ MW，可根据现场情况修改；非周期分量故障定值 $U_Z=0.3U_N$ ， t_{d1} 、 t_{d2} 为动作延时。

4 试验验证

为了验证故障判据的可靠性与准确性，在南方电网电力科学研究院电网仿真重点实验室进行了稳控装置故障判据的 RTDS 测试，经测试，在阀侧单相接地、相间短路，直流正极接地、负极接地、极间短路等故障下，装置能准确判断，整组动作时间在 77~102 ms。试验结果表明，上述故障判据能准确快速判断双端柔性直流输电系统的故障状态。具体动态模拟试验结果见附录 A 图 18—图 20。

5 结论

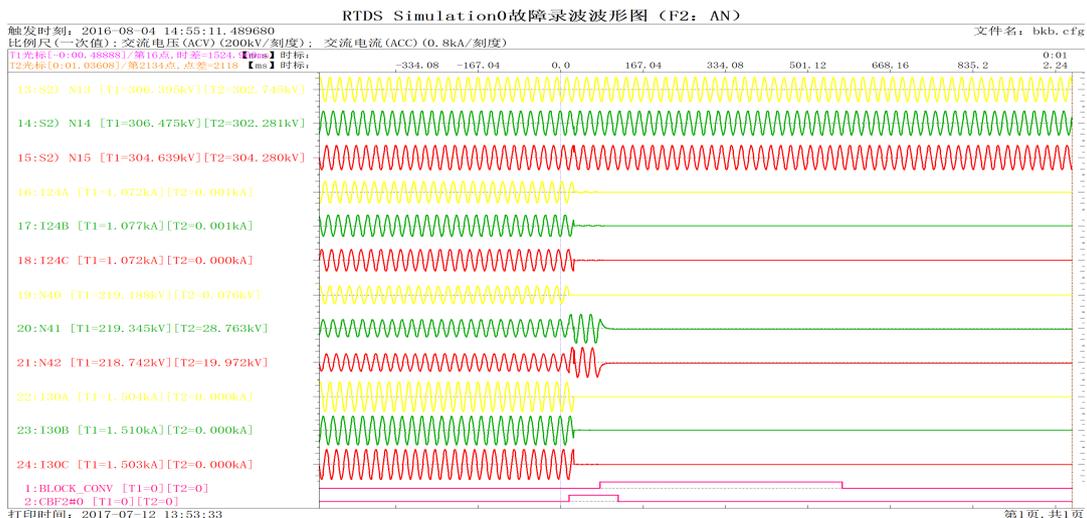
安全稳定控制装置作为电力系统安全稳定的第二道防线的主要二次设备，其故障识别受电力系统一次设备及保护的双重影响，特别是柔性直流输电系统，其保护与控制融为一体，控制保护系统的动作特性与后续稳控装置的故障识别息息相关，但在

柔性直流系统的故障判断中，抓住故障闭锁功率突变的特征，无故障跳的判据对直流闭锁的判断具有普适性。本文虽然在鲁西直流及实际控制保护系统的基础上完成了适应稳定控制的故障判据的开发，但判据中有关短路故障类型的识别随着柔性直流系统网架结构参数及控保系统的升级而面临不适应性，后续研究仍然需要紧跟柔性直流系统工程网架参数的变化与控制保护系统的优化升级而持续改进。

稳控装置由于其控制周期需要在暂态时间尺度（一般为 200 ms）内完成系统的整组动作，扣除装置动作时间及稳控系统站间通信所耗时间，在 150 ms 内完成故障判断即可，同时把握暂态时间尺度内功率突变这个核心，使稳定控制的后备直流闭锁判据可以用时间换取空间，用关键元件（不局限与联接变）的电气特征量辅以长延时的特征判据去完成闭锁故障的判断，在出现稳控与控制保护系统失联的情况下，确保稳控装置能在直流闭锁故障发生后动作，稳控后备直流判据可不追求绝对快速性，以增强稳控装置判断直流闭锁的可靠性。

稳控装置的正确动作攸关电力系统的安全稳定，不能将稳控装置的动作成败系于直流控制保护系统一身，需要加大对适应稳控的故障判据的研究力度；同时控制保护系统的研究、生产单位也应创造性地开放控制保护系统动作逻辑与相关参数，群策群力以提高相关领域的研究水平。

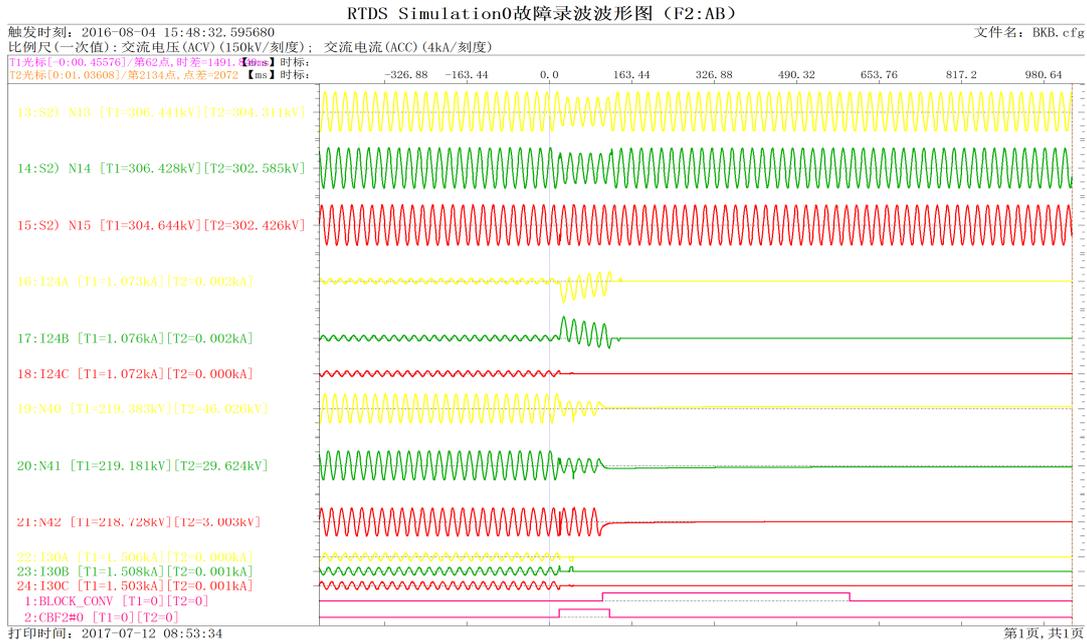
附录 A



S2)N13、S2)N14、S2)N15 是联接变网侧三相电压；I24A、I24B、I24C 是联接变网侧三相电流；S2)N40、S2)N41、S2)N42 是联接变网侧三相电压；I30A、I30B、I30C 是联接变网侧三相电流；开关量信号“BLOCK_CONV”是稳控装置应用故障判据的动作节点信号；“CBF2#0”是交流断路器跳闸信号。

图 17 F2 点 A 相接地故障录波

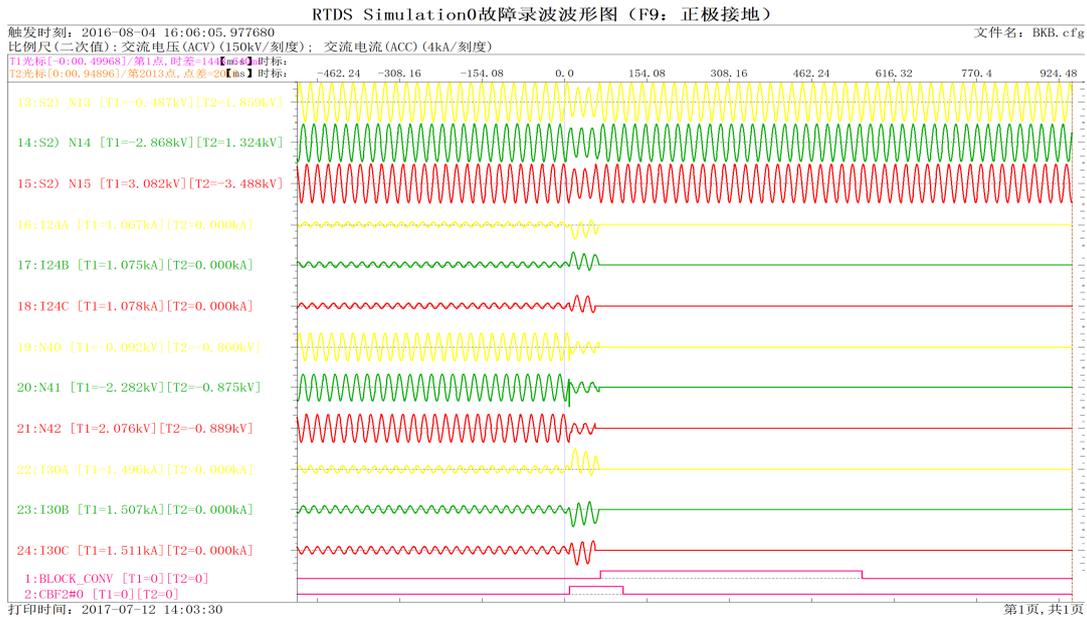
Fig. 17 Fault recording of A phase to ground on F2



S2)N13、S2)N14、S2)N15 是联接变网侧三相电压; I24A、I24B、I24C 是联接变网侧三相电流; S2)N40、S2)N41、S2)N42 是联接变阀侧三相电压; I30A、I30B、I30C 是联接变阀侧三相电流; 开关量信号“BLOCK_CONV”是稳控装置应用故障判据的动作节点信号; “CBF2#0”是交流断路器跳闸信号。

图 18 F2 点 AB 相间短路故障录波

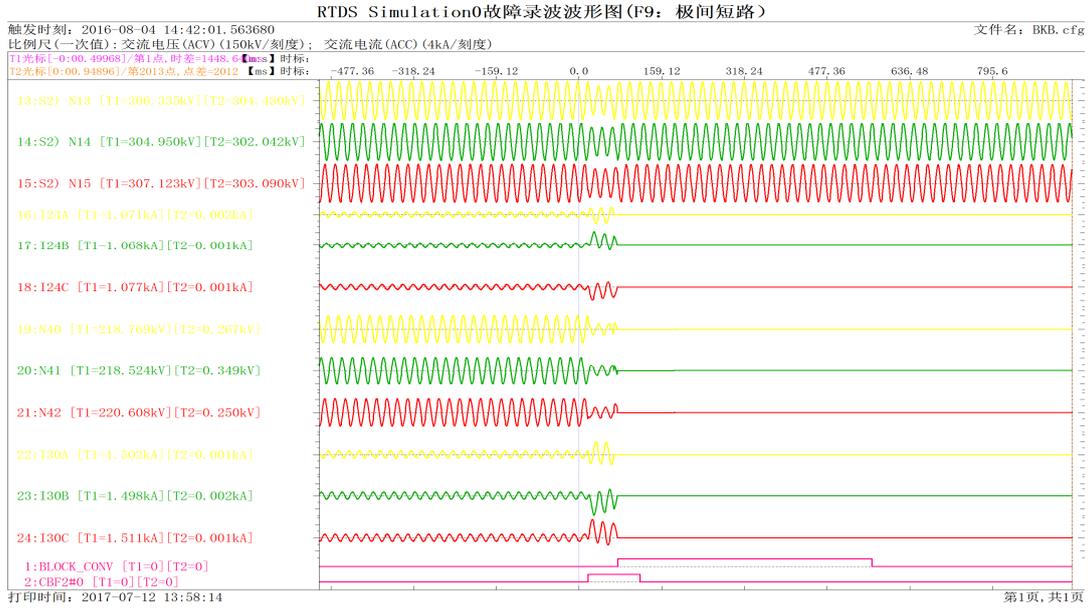
Fig. 18 Fault recording of AB interphase short circuit on F2



S2)N13、S2)N14、S2)N15 是联接变网侧三相电压; I24A、I24B、I24C 是联接变网侧三相电流; S2)N40、S2)N41、S2)N42 是联接变阀侧三相电压; I30A、I30B、I30C 是联接变阀侧三相电流; 开关量信号“BLOCK_CONV”是稳控装置应用故障判据的动作节点信号; “CBF2#0”是交流断路器跳闸信号。

图 19 F9 点正极接地故障录波

Fig. 19 Fault recording of positive grounding on F9



S2)N13、S2)N14、S2)N15 是联接变网侧三相电压；I24A、I24B、I24C 是联接变网侧三相电流；S2)N40、S2)N41、S2)N42 是联接变网侧三相电压；I30A、I30B、I30C 是联接变网侧三相电流；开关量信号“BLOCK_CONV”是稳控装置应用故障判据的动作节点信号；“CBF2#0”是交流断路器跳闸信号。

图 20 F9 点极间短路故障录波

Fig. 20 Fault recording of inter electrode short-circuit on F9

参考文献

[1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

[2] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.

[3] 付艳, 黄金海, 吴庆范, 等. 基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 133-139.
FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.

[4] 唐欣, 张凯峰, 许强, 等. 提高 VSC-HVDC 系统供电无源网络的传输容量的控制方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 44-51.
TANG Xin, ZHANG Kaifeng, XU Qiang, et al. Control

strategy for enlarging the transmission capacity of VSC-HVDC systems supplying passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 44-51.

[5] 郑超, 滕松, 宋新立, 等. 百万千瓦级柔性直流入大电网后的系统特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 15-19, 26.
ZHENG Chao, TENG Song, SONG Xinli, et al. Analysis on system characteristics after incorporation of ± 320 kV/1000 MW VSC-HVDC into Dalian Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 15-19, 26.

[6] 顾益磊, 唐庚, 黄晓明, 等. 含多端柔性直流输电系统的交直流电网动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 27-34, 58.
GU Yilei, TANG Geng, HUANG Xiaoming, et al. Dynamic characteristic analysis of hybrid AC/DC power grid with multi-terminal HVDC based on modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 27-34, 58.

[7] 孙晓云, 高鑫, 刘延华. 柔性直流输电换流器故障特性分析及诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 75-84.
SUN Xiaoyun, GAO Xin, LIU Yanhua. VSC fault characteristic analysis and diagnosis research of VSC-HVDC[J]. Power System Protection and Control,

- 2017, 45(2): 75-84.
- [8] 冯亚东, 汪涛, 卢宇, 等. 模块化多电平柔性直流换流器阀组本体保护的设计[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 64-68.
FENG Yadong, WANG Tao, LU Yu, et al. Valve protection design of modular multilevel converter for VSC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 64-68.
- [9] 张国驹, 祁新春, 陈瑶, 等. 模块化多电平换流器直流双极短路特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 151-157, 199.
ZHANG Guoju, QI Xinchun, CHEN Yao, et al. Characteristic analysis of modular multilevel converter under DC pole-to-pole short-circuit fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 151-157, 199.
- [10] 李斌, 李晔, 何佳伟, 等. 基于模块化多电平的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.
- [11] 周扬, 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.
- [12] 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.
- [13] 梁少华, 田杰, 曹东明, 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.
- [14] 吴庆范, 付艳, 张克辉, 等. 柔性直流输电系统交流母
线差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 100-104.
WU Qingfan, FU Yan, ZHANG Kehui, et al. Research on AC bus differential protection of flexible DC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 100-104.
- [15] 徐政, 刘高任, 张哲任. 柔性直流电网的故障保护原理研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 1-8.
XU Zheng, LIU Gaoren, ZHANG Zheren. Research on fault protection principle of DC grids[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 1-8.
- [16] 李德胜, 罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 151-157.
LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [17] 任祖怡, 左洪波, 吴小辰, 等. 用于安全稳定控制的高压直流极闭锁判据[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 41-44.
REN Zuyi, ZUO Hongbo, WU Xiaochen, et al. HVDC pole blocking detection for security and stability control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 41-44.
- [18] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
-
- 收稿日期: 2017-05-19; 修回日期: 2017-07-28
作者简介:
李祝昆(1982—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制; E-mail: lizhukun@sgepri.sgcc.com.cn
朱益华(1988—), 男, 工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制和直流控制保护仿真分析;
徐海波(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定控制。
- (编辑 葛艳娜)