

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.05.016

一起复杂交流故障导致的锦苏直流换相失败的研究

卫 鹏¹, 刘建坤¹, 周 前¹, 汪成根¹, 张庆武²

(1. 江苏省电力公司电力科学研究院, 南京 211103; 2. 南京南瑞继电电气有限公司, 南京 211102)

摘要: 换相失败是影响特高压直流工程受端电网安全稳定运行的重要因素。以一起复杂交流故障导致的锦苏直流换相失败事件为背景,介绍了故障过程和保护动作时序,并且从原理上分析了此次换相失败发生的原因以及换相失败保护动作情况。采用RTDS和特高压直流控制保护真型装置连接构成闭环仿真平台,对此次换相失败事件进行了反演,将仿真结果与实际录波进行了对比。结果表明:交流电压异常导致了换相失败。
关键词: 换相失败; 特高压直流; 锦苏直流; 控制保护系统; RTDS

Research on Commutation Failure of Jin-Su DC Transmission Project Caused by a Complex AC Fault

WEI Peng¹, LIU Jiankun¹, ZHOU Qian¹, WANG Chenggen¹, ZHANG Qingwu²

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China;
2. NARI Relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Commutation failure is an important factor on safe and stable operation of the receiving end power grid for HVDC project. A commutation failure event in Jin-Su DC transmission project caused by a complex AC failure is taken as background, the process of fault and action sequences of protection are introduced. And the reason of the commutation failure and protection action is analyzed from principle. RTDS is connected to the true-type device of UHVDC control and protection to form a closed-loop simulation platform. The commutation failure event is inversed and the simulation result is compared with the actual recorded waveform. The results show that abnormal AC voltage leads to the commutation failure.

Key words: commutation failure; UHVDC; Jin-Su DC transmission project; control and protection systems; RTDS

0 引言

根据规划将在 2016 年底左右建成 ± 800 kV 锡盟—泰州特高压直流输电工程。未来江苏电网将成为包括锦苏、锡泰和龙政等多馈入直流的特高压交流直流混联电网。特高压直流的调控运行成为保障地区电网安全稳定的重要因素^[1-3]。江苏电网作为典型的直流受端电网,特高压直流调控运行面临的主要问题就是换相失败引起的功率和电压波动^[4]。根据国内外相关文献的研究,特高压直流换相失败往往是由交流电网故障引起的^[5-7]。因此,研究交流故障对于特高压直流的影响及换相失败的原因和过程

显得十分必要和有意义。

2014 年 8 月苏州换流站附近 220 kV 长阳变开关 CT 爆炸,并引发连锁故障,故障期间锦苏直流出现换相失败。故障虽未引起直流闭锁,但也对迎峰渡夏期间紧张的供电缺口造成了一定威胁。为此需要对此次事件原因进行分析,避免此类事件发生。

传统对锦苏直流的研究仅停留在机电—电磁混合的纯数字仿真,直流模型和控制策略都较为粗略,难以模拟换相失败的过程^[8-10]。笔者采用了和实际工程在控制保护功能、稳态工况和交直流故障下的行为及趋势等方面特性基本一致的特高压直流控制保护真型装置,并与实时数字仿真装置 RTDS 形成闭环仿真平台,对此次故障进行了反演,分析了换相失败原因以及保护动作情况。为研究多馈入

收稿日期:2015-11-11; 修回日期:2015-12-26

基金项目:国家电网公司科技项目。

Project Supported by Science and Technology Fund of SGCC.

直流的特高压交直流混联江苏电网的调控运行奠定了基础。

1 换相失败案例

1.1 故障前运行方式

故障由长阳—南麻 I 线长阳侧开关 B 相 CT 爆炸引起,并导致了开关 C 相 CT 出现闪络,故障所在的吴江分区电网网架见图 1。

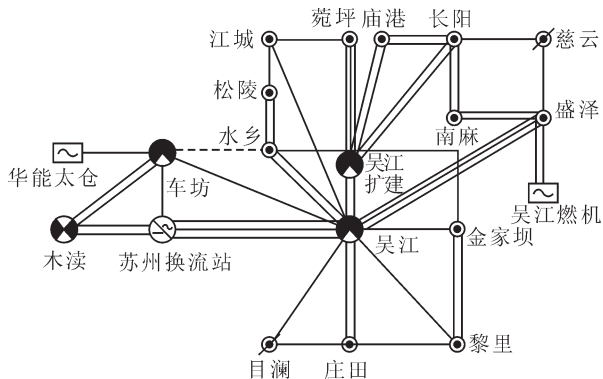


图 1 吴江分区电网网架

Fig. 1 Grid of Wujiang partition

故障前,锦苏直流双极全阀组正常运行,锦屏送端满出力 7 200 MW 运行,苏州落地功率 6 670 MW。江苏电网负荷 53 435 MW,发生故障的长阳变所在的吴江分区负荷为 2 961 MW。华能太仓电厂 2 台机组全开 1 120 MW,吴江燃机 4 台机组全停。苏州站交流侧 500 kV 线路苏州—吴江 3 回、苏州—木渎 2 回、苏州—车坊 1 回都正常运行,直流控制保护系统正常。

1.2 故障时序

以长麻 I 线开关 B 相 CT 故障为零点,6 ms 长阳变线路差动和距离保护 I 段保护动作;8 ms 长阳变 220 kV 母差保护启动,20 ms 长阳变 220 kV 母差保护动作;45 ms 长麻 I 线 B 相开关跳开,B 相故障电流消失;55 ms 南麻变长麻 I 线保护收到对侧远跳命令跳本侧三相开关;65 ms 长阳变 220 kV I、III 段母线上所有开关跳开,同时长阳变长麻 I 线 C 相 CT 出现闪络故障;95 ms 南麻变长麻 I 线开关三相跳开,C 相故障电流消失。故障持续过程中,锦苏直流双极均发生换相失败但是没有闭锁。

2 换相失败分析

2.1 换相失败过程

换相失败是换流阀熄弧时间小于关断时间的一种物理现象^[1]。换相失败的过程见图 2,以逆变器阀 1 对阀 3 换相过程为例,如果阀 1 熄弧角 γ 小于

关断所需时间,在阀 1 向阀 3 换相完成后,由于阀 1 还有剩余截流子,将在正向电压作用下重新开通,阀 3 已取得的电流又倒换相到阀 1,即换相失败。接下来阀 2 与阀 4 开始换相,这时阀 1 和阀 4 同时导通,造成阀短路,交流侧被旁路,三相电流为 0,直流电流完全从同一桥臂阀 1 和阀 4 流过,直流电流增大,直流电压下降。

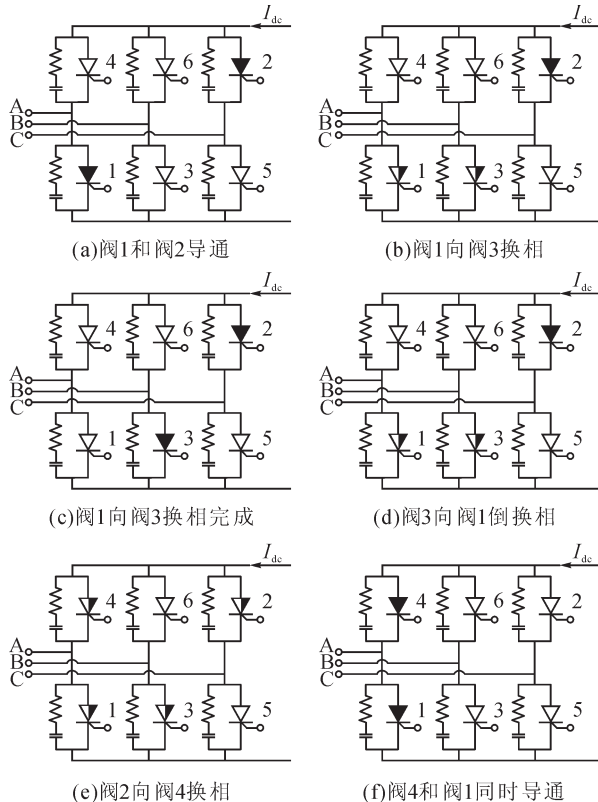


图 2 换相失败过程

Fig. 2 Process of commutation failure

2.2 换相失败原理

换相阀熄弧角过小是导致直流换相失败的直接原因,直流逆变侧熄弧角的表达式为^[12]。

$$\gamma = \arccos(\sqrt{2} k_2 I_d X_{\gamma_2} / U_2 + \cos \beta) \quad (1)$$

式(1)中: γ 为熄弧角; β 为超前触发角; k_2 为换流变变比; I_d 为直流电流; U_2 为交流母线电压; X_{γ_2} 为换相电抗。

由式(1)可见,熄弧角过小由以下几方面因素引起:直流控制系统紊乱,或触发回路异常造成点火角提前;交流电压波形畸变、不对称、幅值降低,或直流电流过大;分接头控制受干扰变比突增;谐波畸变等造成的换相电抗增大。

该次事件中换流变分接头未调整,换相电抗和超前触发角均一定,因此熄弧角过小与直流电流和交流电压相关。交流电压异常:波形畸变、不对称、幅值降低,直流电流过大,是该次事件中换相失败

的主要原因。

2.3 换相失败保护

逆变侧高压阀组换相失败保护的判据是

$$\begin{cases} IDH = \max(IDC1P, IDC1N) \\ IDH - IVYH > \max(Ic_{fp_set}, K_{set} * IDH) \& IDH > K_R * IVYH \\ IDH - IVDH > \max(Ic_{fp_set}, K_{set} * IDH) \& IDH > K_R * IVDH \end{cases} \quad (2)$$

逆变侧低压阀组换相失败保护的判据是

$$\begin{cases} IDL = \max(IDC2P, IDC2N) \\ IDL - IVYL > \max(Ic_{fp_set}, K_{set} * IDL) \& IDL > K_R * IVYL \\ IDL - IVDL > \max(Ic_{fp_set}, K_{set} * IDL) \& IDL > K_R * IVDL \end{cases} \quad (3)$$

式(2)、(3)中: $IDC1P$ 、 $IDC2P$ 分别为高、低压阀组低压侧正极电流; $IDC1N$ 、 $IDC2N$ 分别为高、低压阀组低压侧负极电流; $IVYH$ 、 $IVYL$ 分别为换流变压器侧高、低压阀组电流; $IVDH$ 、 $IVDL$ 分别为换流变压器侧高压阀组电流; Ic_{fp_set} 为换相失败电流定值;

K_{set} 、 K_R 分别为可靠系数^[13]。

换相失败保护 I 段动作后,首先保护系统发报警信号,并请求控制系统切换到备用控制系统,短暂增大熄弧角以避免连续换相失败,同时触发暂态故障录波。

换相失败保护 II 段动作后,阀组退出并隔离,如果单桥退出对应的为 U 闭锁,双桥故障则对应的为 V 闭锁,并按照相应闭锁逻辑执行顺序控制和开关控制。交流断路器被断开,启动失灵并锁定交流断路器,同时触发暂态故障录波。

该次事件中只发生了换相失败没有发生闭锁,换相失败保护 I 段动作。

3 特高压直流控制保护仿真平台

为了对此次交流故障引起的换相失败事件进行反演,笔者搭建了基于 RTDS 的特高压直流控制保护仿真平台见图 3,包括:实时数字仿真装置 RTDS、特高压直流控制保护真型装置和各自的后台工作站。

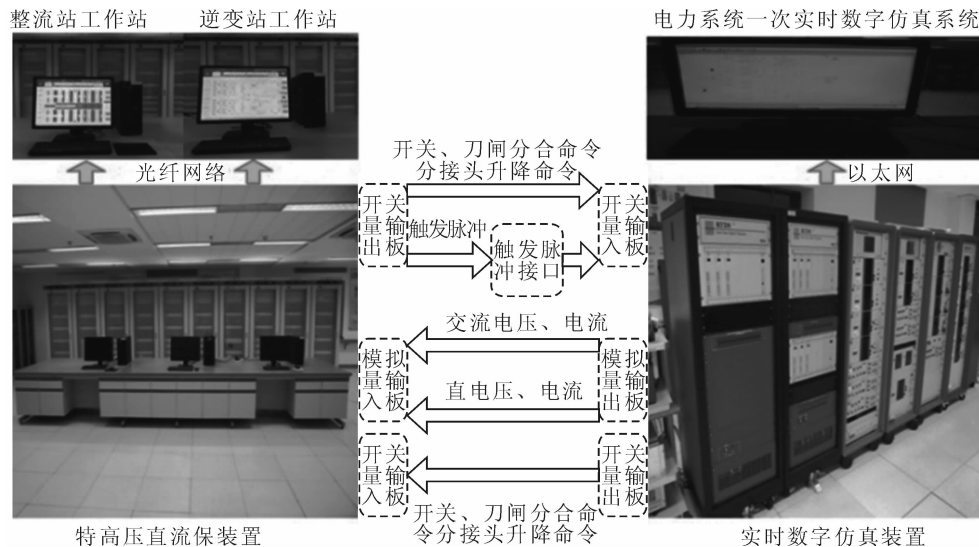


图3 特高压控制保护仿真平台

Fig. 3 Simulation platform of UHVDC control and protection

3.1 特高压直流控制保护真型装置

特高压直流控制保护真型装置由 10 面屏柜组成,整流站和逆变站对称布置,每站由 2 面控制屏柜、2 面保护屏柜和 1 面接口屏柜组成。控制屏柜主要包括极控制主机 PCP 和阀控制主机 CCP,保护屏柜主要包括极保护主机 PPR 和阀保护主机 CPR。接口屏柜内的模拟量和开关量输入输出板卡与光纤以太网组成了实时控制网络,并与 RTDS 实时数字仿真装置连接形成闭环系统^[14-15]。

另外,通过控制运行人员分析系统可以实现直流控制系统参数的调整、接收运行监视和操作指令、故障或异常工况的监视和处理、完成全站事件顺序记录和事件报警等。

3.2 锦苏特高压直流仿真模型

笔者根据实际电网参数在 RTDS 中搭建了图 1 所示的吴江分区电网,受限于硬件仿真规模采用内电势恒定的等值电压源模拟吴江分区以外江苏电网其余部分以及锦苏直流送端四川电网交流系统。根据两侧交流电网的运行电压情况和短路电流情况最终计算得到:四川送端交流系统内阻抗为 8.968Ω ,等值系统电势幅值为 535 kV;江苏电网其余部分等值交流系统内阻抗为 6.908Ω ,等值系统电势幅值为 505 kV。

锦屏站和苏州站的换流变压器类型为单相双绕组,换流变的基本参数见表 1^[16]。

锦屏换流站至同里换流站直流线路总长度约

表 1 换流变压器参数

Table 1 Parameters of converter transformer

参数	锦屏	苏州
容量/(MVA)	363.4	340.8
网侧电压/kV	$535/\sqrt{3}$	$505/\sqrt{3}$
阀侧电压(YY 侧)/kV	$171.3/\sqrt{3}$	$160.7/\sqrt{3}$
阀侧电压(YD 侧)/kV	171.3	160.7
换流变短路阻抗/%	19	19
分接头档位数	+22/-6	+25/-3

2 095 km, 每极导线分裂数 6, 子导线分裂间距为 450 mm, 直流子导线电阻为 $0.032\ 07\ \Omega/\text{km}$ 。直流输电线路使用两根地线, 均为铝包钢绞线。两极的接地极引线上都使用一根地线, 接地极线参数见表 2。

表 2 接地极参数

Table 2 Parameters of the grounding pole

参数	裕隆	同里
接地极引线长度/km	63.0	18.9
每极导线分裂根数	2	2
子导线电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.073 89	0.073 89

锦屏换流站和同里换流站交流滤波器参数、直流滤波器参数见文[16], 笔者采用的锦苏特高压直流输电系统模型参照以上锦苏直流工程实际参数搭建。

4 换相失败反演

采用上节搭建的基于 RTDS 的特高压直流控制保护仿真平台对此次交流故障引起的换相失败事件进行了反演, 故障设置为: 长阳—南麻 I 线 B 相单相接地后 45 ms 长阳侧 B 相开关跳开, 65 ms 时 220 kV I、III 段母线上所有开关跳开, 同时 C 相单相接地, 95 ms 南麻侧 A、C 相开关跳开。仿真得到的苏州站交流母线电压、直流功率、直流电压和电流仿真结果与实际录波的对比见图 4, 另外, 仿真得到的 Y/Y 和 Y/D 换流器阀侧电流也在图 4 中给出, 由图 4 仿真结果可见, Y/Y 换流器发生了 4 次换相失败, Y/D 换流器发生了 1 次换相失败, 换相失败的持续时间约为 140 ms。换相失败期间直流电压和电流都跌到了 0 左右, 此次换相失败的原因主要是交流系统电压幅值降低引起换流阀触发系统紊乱, 换流阀出现非正常关断和断续导通。

另外, 从图 4 对比结果来看, 由于 RTDS 直流控制保护仿真平台采用了真实的直流控制保护装置, 能够更精准地反映换流阀的暂态响应过程, 仿真结果与实际录波基本一致。验证了该套仿真平

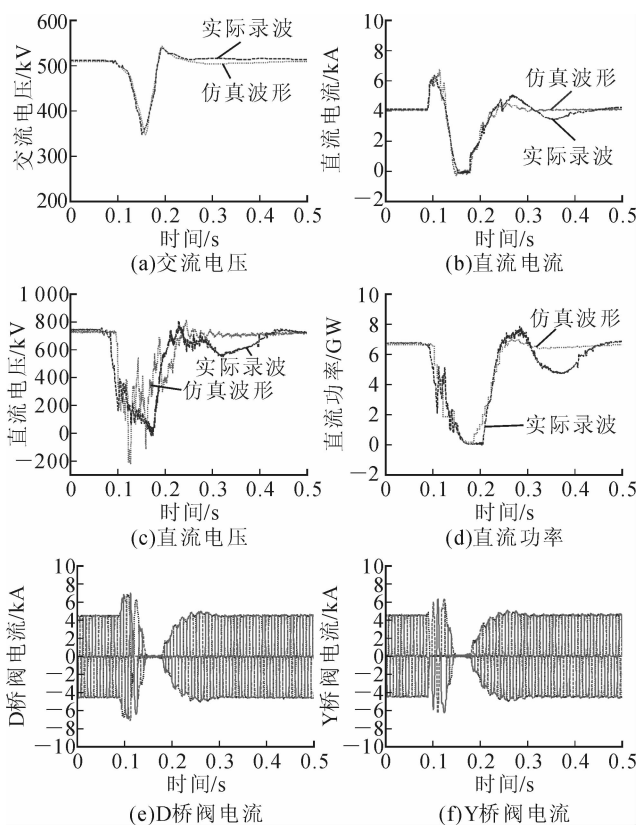


图 4 实际录波和仿真波形对比

Fig. 4 Comparison of simulation results with the actual recorded wave

台与实际直流输电工程在控制保护功能、稳态工况和交流故障下的行为及趋势等方面特性保持高度一致。

5 结论

笔者参照江苏电网和锦苏工程的实际参数, 利用实时数字仿真装置 RTDS 搭建了直流系统及两侧交流电网的模型, 并与特高压直流控制保护真型装置构成闭环仿真平台。以此平台为基础, 对交流故障引起的换相失败进行了故障反演, 同时对换相失败事件原因及过程进行了分析。结果表明:

1) 交流电压异常。波形畸变、不对称、幅值降低, 直流电流过大, 是该次事件中换相失败的主要原因; 该次换相失败期间, 换相失败保护 I 段工作;

2) 仿真结果与实际录波基本一致, 验证了该套仿真平台与实际直流输电工程在控制保护功能、稳态工况和交流故障下的行为及趋势等方面特性保持高度一致。

笔者的研究成果可用于特高压交直流混联电网调控运行研究及故障分析等诸多领域。下一步工作拟开展交流故障期间动态无功补偿协调控制减小换相失败发生几率的研究。

参考文献:

- [1] 李兴源,赵睿,刘天琪,等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
LI Xingyuan, ZHAO Rui, LIU Tianqi, et al. Research of conventional high voltage direct current transmission system stability analysis and control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 288-300.
- [2] 索南加乐,张健康,焦在滨,等. 交直流混联电网交流系统故障特征分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1461-1467.
SUONAN Jiale, ZHANG Jiankang, JIAO Zaibin, et al. AC fault characteristic analysis of AC-DC hybrid transmission grid[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1461-1467.
- [3] 郑超,盛灿辉,林俊杰,等. 特高压直流输电系统动态响应对受端交流电网故障恢复特性的影响[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 555-561.
ZHENG Chao, SHENG Canhui, LIN Junjie, et al. Influence of UHVDC transmission system dynamic response on AC receiving end's failure recovery characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 555-561.
- [4] 袁阳,卫志农,雷霄,等. 直流输电系统换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 140-147.
YUAN Yang, WEI Zhinong, LEI Xiao, et al. Survey of commutation failures in DC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 140-147.
- [5] 吴萍,林伟芳,孙华东,等. 多馈入直流输电系统换相失败机制及特性[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 269-274.
WU Ping, LIN Weifang, SUN Huadong, et al. Research and electromechanical transient simulation on mechanism of commutation failure in multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 269-274.
- [6] 郑传材,黄立滨,管霖,等. ± 800 kV 特高压直流换相失败的 RTDS 仿真及后续控制保护特性研究[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 14-20.
ZHENG Chuancai, HUANG Libin, GUAN Lin, et al. RTDS-based simulation of commutation failure in ± 800 kV DC power transmission and research on characteristics of subsequent control and protection[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 14-20.
- [7] 雷霄,许自强,王华伟,等. ± 800 kV 特高压直流输电工程实际控制保护系统仿真建模方法与应用[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1359-1364.
LEI Xiao, XU Ziqiang, WANG Huawei, et al. A modeling method for actual control and protection system of ± 800 kV UHVDC transmission project and its application[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1359-1364.
- [8] 卫鹏,汪成根,周前,等. 基于 ADPSS 的锦苏特高压直流对江苏电网运行特性影响研究[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 69-75.
WEI Peng, WANG Chenggen, ZHOU Qian, et al. Study on impacts of Jin-Su UHVDC transmission on operating characteristics of Jiangsu power grid based on ADPSS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 69-75.
- [9] 王建明,孙华东,张健,等. 锦屏—苏南特高压直流投运后电网的稳定特性及协调控制策略[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 66-70.
WANG Jianming, SUN Huadong, ZHANG Jian, et al. Stability characteristics and coordinated control strategy of interconnected grid integrated with UHVDC transmission line from Jinping to sunan[J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 66-70.
- [10] 薛明军,陈福锋,姚亮,等. 一种超高压输电线路恢复电压的精确计算方法[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(5): 59-61.
XUE Mingjun, CHEN Fufeng, YAO Liang, et al. An accurate method for recovery voltage calculation on extra high voltage transmission lines[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(5): 59-61.
- [11] 鲁俊荣,宋念达,宋丹,等. 特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 60-62.
LU Junrong, SONG Nianda, SONG Dan, et al. Application of new constructive technology in the ultra-high voltage Huainan-Shanghai power transmission and transformation project[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1): 60-62.
- [12] 胡宇洋,余珊珊. 宝鸡换流站直流功率反向保护动作原因分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(11): 103-107.
HU Yuyang, YU Shanshan. Fault analysis of DC power reverse protections of Baoji HVDC converter station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(11): 103-107.
- [13] 刘俊磊,王钢,李海锋,等. HVDC 系统换相失败对交流电网继电保护影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 111-118.
LIU Junlei, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Mechanism analysis of HVDC commutation failure influence on AC power network relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 111-118.
- [14] 张庆武,王永平,陈小军,等. 特高压直流控制保护系统设计与开发[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 88-93.
ZHANG Qingwu, WANG Yongping, CHEN Xiaojun, et al. Design and development of control and protection system for UHVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 88-93.
- [15] 李响,刘国伟,冯亚东,等. 新一代控制保护系统通用硬件平台设计与应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 52-55.

(下转第 108 页)

- and Drive Systems. Singapore: [s.n.], 2003: 16-23.
- [6] 周浩, 沈扬, 李敏, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 879-892.
ZHOU Hao, SHEN Yang, LI Min, et al. Research on insulation coordination for converter stations of Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC transmission project[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 879-890.
- [7] MARQUARD R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C]//Proceedings of the 34th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2003: 20-25.
- [8] 谭玉茹, 苏建徽. 基于移相载波的模块化多电平换流器控制方法研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 56-60.
TAN Yuru, SU Jianhui. CPS-SPWM based control strategy for modular multilevel converter[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 56-60.
- [9] 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.
- [10] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [11] CANDELARIA J, JAE-DO P. VSC-HVDC system protection: A review of current methods[C]//IEEE Power Systems Conference and Exposition. AZ: IEEE, 2011: 1-7.
- [12] 王帮田. 高压直流断路器技术[J]. 高压电器, 2010, 46(9): 61-64.
WANG Bangtian. Technology of HVDC circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 61-64.
- [13] 薛英林, 徐政. C-MMC 直流故障穿越机理及改进拓扑方案[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 63-70.
XUE Yinglin, XU Zheng. DC fault ride-through mechanism and improved topology scheme of C-MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(21): 63-70.
- [14] FRANQUELO L G, RODRIGUEZ J, LEON J I, et al. The age of multilevel converters arrives[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2008, 2(2): 28-39.
- [15] 管敏渊, 徐政, 屠卿瑞, 等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [16] 管敏渊, 徐政. MMC 型 VSC-HVDC 系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Optimized capacitor voltage balancing control for modular multilevel converter based VSC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(12): 9-14.
- 刘欣和(1985—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事柔性直流输电换流阀控制系统的研发工作。
- 吴金龙(1981—), 男, 工学硕士, 高级工程师, 主要研究方向为柔性直流输电系统分析与设计、控制策略设计。
- 郭宁宁(1985—), 女, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统与计量技术。
- 童瞳(1987—), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统及智能电网。
- 姚为正(1967—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事直流输电技术与大功率电力电子技术方面的研究。

(上接第 100 页)

- LI Xiang, LIU Guowei, FENG Yadong, et al. Design and application of general hardware platform for new generation control and protection system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 52-55.
- [16] 卫鹏, 汪成根, 周前. 基于 ADPSS 的锦苏特高压直流接入的江苏电网机电—电磁混合建模与仿真[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 20-25.
WEI Peng, WANG Chenggen, ZHOU Qian. Electromechanical-electromagnetic hybrid modelling and simulation of Jiangsu power grid with UHVDC transmission from Jinping to southern Jiangsu accessing based on ADPSS[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 20-25.
- 卫鹏(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行仿真分析和稳定研究。
- 刘建坤(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行分析和规划研究。
- 周前(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行分析和规划研究。
- 汪成根(1981—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统运行分析和规划研究。
- 张庆武(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事高压直流输电及其控制保护研究。