舟山多端柔性直流输电控制保护系统

董云龙[1],凌卫家[2],田　杰[1],胡兆庆[1],李　钢[1],卢　宇[1]
(1. 南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102;2. 国网浙江省电力公司,浙江 杭州 310007)

摘要:对多端柔性直流输电控制及保护系统的分层设计及其功能配置进行了描述。介绍了多端柔性直流输电系统中多站之间的协调控制功能,即当直流电压控制站失去直流电压控制功能后,通过设计的基于站间通信和直流电压偏差检测的自适应策略,可以实现其余功率站的直流电压无偏差接管。介绍了工程采用的快速负序控制、直流侧主动充电以及在线联网转孤岛运行等控制功能设计。最后给出的部分现场试验结果证明了多端柔性直流输电控制保护系统可以很好地满足舟山五端柔性直流输电工程的需求。

关键词:多端柔性直流输电;控制;电力系统保护;无源孤岛模式;模块化多电平换流器
中图分类号:TM 721.1　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.026

0　引言

柔性直流输电技术是当今电力电子技术应用的制高点,它是一种新型的直流输电技术,其特点是采用基于全控型器件的电压源型换流器进行直流输电[1-2]。柔性直流换流器的工作特性类似于无转动惯量的发电机,可以瞬时实现有功功率和无功功率的解耦控制,因此,其具有传统直流输电所无法比拟的诸多优点[1-4]。

1997 年 ABB 公司成功将全控型器件引入直流输电领域,首次实现了柔性直流输电技术的工程应用[3];2010 年 11 月,世界首个基于模块化多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter)拓扑的柔性直流输电工程——美国 TRANSBAY 工程投运;2011 年 5 月,国内首个柔性直流输电示范工程——上海南汇柔性直流输电工程成功试运行[5];2013 年 12 月,世界第一个三端柔性直流输电工程——南澳工程正式投运;2014 年 7 月,世界第一个五端柔性直流输电工程——舟山工程正式投运。

随着模块化多电平换流器型高压直流输电(MMC-HVDC)的成功应用,原有的高损耗及动态均压等制约柔性直流输电技术发展的瓶颈不再存在。而柔性直流输电因其固有的技术特点,特别适用于风电等新能源接入及构筑多端直流输电系统[6-7]。因此,越来越多的国家对多端柔性直流输电技术表现出浓厚的兴趣并付诸工程实施。欧洲正在规划中的北海超级电网正是通过多端柔性直流输电系统将北海周边国家丰富的海上风电送往欧洲各国。

目前,国内外针对多端柔性直流输电系统的研究主要集中在控制保护策略上[4],而针对控制及保护系统的架构研究及工程实施则鲜见报道。文献[5]描述了南汇两端柔性直流工程控制及保护系统的组成、软件配置和运行方式的实现;文献[8]描述了柔性直流输电系统的基本控制策略、上层控制策略和保护策略。上述文献均未对多端柔性直流输电系统的功能及工程应用情况进行描述。

本文以舟山五端柔性直流输电工程为例,对多端柔性直流输电控制及保护系统的分层设计、功能配置进行了论述。最后通过现场试验对多端柔性直流控制保护系统的性能和功能进行了全面验证。

1　工程简介

舟山电网是浙江省 11 个地市电网中唯一的海岛电网。由于受海岛地理条件限制,各岛屿成链式分布,与舟山本岛电网联系较弱且岛内无大的电源支持,运行灵活性和可靠性较低。舟山五端柔性直流输电工程的建设显著加强了舟山诸岛间的电气联系,提高了供电可靠性。

舟山五端柔性直流输电工程分别在舟山本岛(定海岛)、岱山岛、衢山岛、洋山岛和泗礁岛建设 5 个柔性直流换流站,设计容量分别为 400 MW、300 MW、100 MW、100 MW 和 100 MW,直流电压等级为±200 kV,是目前世界上已投运的端数最多、电压等级最高、容量最大的柔性直流输电系统。各岛的换流站设计参数如表 1 所示。

图 1 所示为目前舟山电网的拓扑图。图中,舟山本岛和岱山岛分别接入 220 kV 交流系统;衢山岛、洋山岛和泗礁岛分别接入 110 kV 交流系统。舟山本岛、衢山岛以及泗礁岛都有风电场。另外,泗礁岛还通过±50 kV 传统直流输电线路与上海电网相连。因此,

收稿日期:2015-03-24;**修回日期**:2016-06-06
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA050106,2015AA050101);国家电网公司科技项目(±500 kV 柔性直流电网换流站级和系统级控制保护设备研制)
Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2013AA050106,2015AA050101) and Science and Technology Program of State Grid Corporation of China(Development of Control and Protection System for ±500 kV VSC-HVDC Grid)

表1 交流系统参数

Table 1 Parameters of AC system

岛屿	容量/MW	直流电压/kV	接入交流电压/kV
舟山本岛	400	±200	220
岱山岛	300	±200	220
衢山岛	100	±200	110
洋山岛	100	±200	110
泗礁岛	100	±200	110

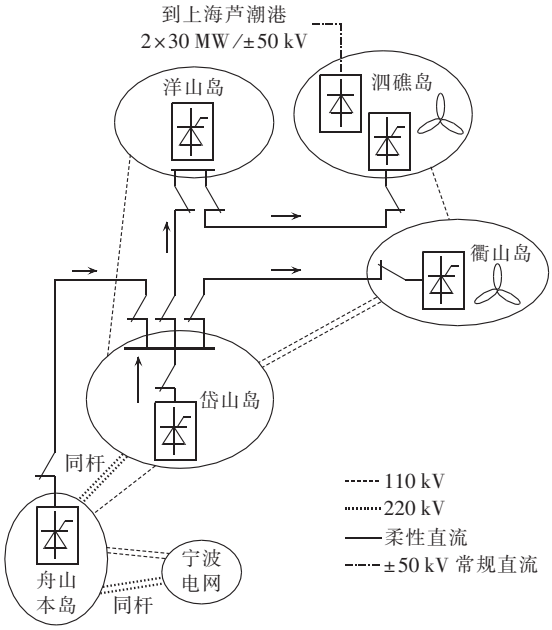


图1 舟山电网拓扑

Fig.1 Topology of Zhoushan power grid

舟山电网是一个同时含有多端柔性直流输电系统、交流电网、传统直流以及风电场的复杂的弱系统,且其交流、直流系统相互耦合,这对多端柔性直流输电的控制保护系统提出了更加苛刻的要求,即必须在各种运行方式下都能够稳定运行并且具有优越的暂态性能。

2 系统设计

舟山多端柔性直流控制保护系统如图2所示,其采用嵌入式软硬件技术,使用分层、分布式结构,采用面向对象的方法对应用进行更为合理的划分,使系统结构清晰、功能强大、性能优越且运行更加稳定可靠。

整个换流站控制保护系统分层设计如下。

(1)运行人员控制层。

运行人员控制层由远方调度中心通信层、集控中心层和站内运行人员控制系统组成。其中,远方调度中心通信层是将交直流系统的运行参数和换流站控制保护系统的相关信息通过通信通道上送至远方调度中心,同时将监控中心的控制保护参数和操作指令传送到换流站控制保护系统。集控中心通过远动通信或站局域网(LAN)延伸模式实现对站内设备的完整监视和控制。站内运行人员控制系统包括系统服务器、运行人员工作站、工程师工作站、站局域网设备、网络打印机等,其功能是为换流站运行人员提供运行监视和控制操作的界面。通过运行人员控制层设备,运行人员完成包括运行监视、控制操作、故障或异常工况处理、控制保护参数调整等在内的全部运行人员控制任务。

舟山五端柔性直流输电工程按照无人值守进行设计,其集控中心设置在岱山站。

(2)控制保护设备层。

控制保护设备层实现整个多端柔性直流输电系统的控制和保护功能。其中直流控制和保护采用了整体设计,包含了多端系统级、换流站级和换流器级控制保护功能,并集成在一台直流控制保护(PCP)主机

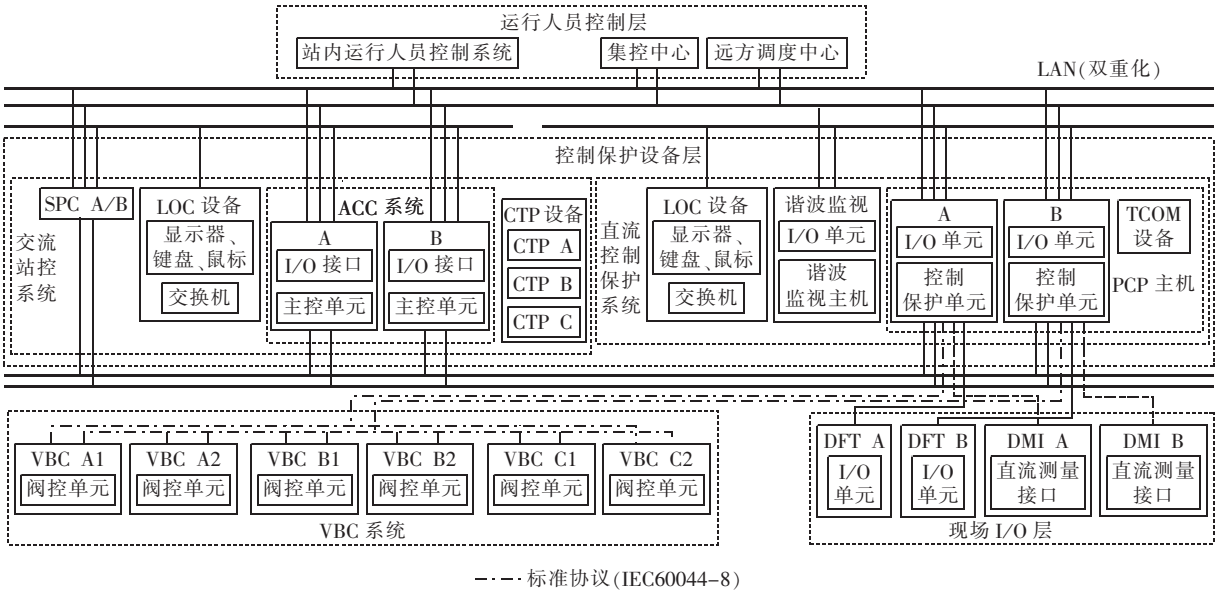


图2 多端柔性直流控制保护系统设计

Fig.2 Design of control & protection system for multi-terminal VSC-HVDC

之内。另外，控制保护层设备还包括交流站控(ACC)系统、站用电控制(SPC)设备、就地控制(LOC)设备、站间通信(TCOM)设备以及联接变压器保护(CTP)设备(三取二配置)等。

(3)现场 I/O 层。

现场 I/O 层设备主要由分布式 I/O 单元(DFT)以及直流测量接口(DMI)构成，其作为控制保护层设备与交直流一次系统、换流站辅助系统、站用电设备以及阀冷控制保护的接口，完成对一次开关刀闸设备状态和系统运行信息的采集处理、顺序事件记录、信息上传、控制命令的输出以及就地连锁控制等功能。

原则上，阀控(VBC)系统也属于现场 I/O 层设备范畴，实现直流控制保护系统与换流阀的接口。实际工程中，阀控系统一般由换流阀厂家供货。

整个换流站的控制保护系统都采用完全冗余的双重化设计，这样可确保直流输电系统不会因为任一系统的单重故障而发生停运，也不会因为单重故障而失去对换流站的监视。

3　功能设计

文献[5,8]中对两端柔性直流控制保护系统的基本功能设计进行了详细的描述，这些功能同样适用于多端柔性直流输电系统，本文不再赘述。本文基于舟山工程，对多端柔性直流控制保护系统所特有的功能进行深入描述，这些功能大幅提高了多端柔性直流输电系统的可靠性和灵活性。

3.1　多端协调控制

舟山多端柔性直流系统具备多个站之间协调控制的能力。当系统中直流电压控制站因故障退出或因过负荷失去直流电压控制能力时，控制保护系统通过站间通信或者直流电压偏差检测自适应选取接管策略，在多端系统内实现自动直流电压控制权转移以及自动功率平衡[6-7,9]。

多端协调控制的具体实现步骤为：站间通信有效时，直流电压主控站将故障信息发送至第一顺序接管站，由其接管直流电压控制权；站间通信失效时，所有功率控制站实时监测直流电压，当直流电压实时值与额定值的差值超过一定阈值后，经过适当延时，所有功率站根据容量按照优先级依次实现直流电压接管控制。功率站接管直流电压控制后，其指令值维持额定电压或者当前运行值不变，实现直流电压的无偏差接管，提高多端直流系统的可靠性和可用率。

多端柔性直流系统的协调控制策略也大幅提高了舟山工程运行方式的灵活性，可以实现从五端到单端共 26 种运行方式的自动转换。

3.2　直流侧主动充电

柔性直流工程中，无源端的换流阀通过有源端进行预充电，子模块电压最多只能充到额定电压的 1/2。如果按照正常解锁逻辑，解锁瞬间会产生非常大的直流过电流。舟山工程中采用了直流侧主动充电策略，解锁瞬间所有子模块处于投入状态，此时上下桥臂的模块电压之和等于直流侧电压，不会产生解锁冲击电流。随后逐渐减少桥臂中的导通子模块个数，最终每个桥臂中的导通子模块个数为 $n/2$(其中 n 为每个桥臂的工作子模块总个数)，自然过渡至正常运行时参考电压为 0 的状态。通过每次仅减少数个导通子模块并等待子模块电压稳定后再继续减少导通数量，可将桥臂中的电流控制在很小的状态[2]。

直流侧主动充电步骤如下：

a. 换流器直流侧不控充电稳定后，以导通所有子模块的方式解锁换流器；

b. 按照一定运行周期，将各桥臂的导通子模块数量逐步减少至 $n/2$，逐步减少数量 Δn 使其满足 $\Delta n = \min(\Delta n_{set}, N-n/2)$[2]，其中 Δn_{set} 为每个运行周期内导通子模块的增加数量整定值，N 为每个桥臂总的模块数量；

c. 保持各桥臂导通子模块个数恒定。

3.3　快速负序控制

快速负序控制是一种基于故障负序电压叠加的控制方法，本方法是通过检测网侧电压中负序成分，将负序成分作为控制器输出前馈环节，直接叠加到控制输出最终参考电压，达到减少故障负序电流目的[9-12]。

设定原始输出参考电压为 u_r^+，下标 r 表示参考电压，上标 +、− 分别表示正序和负序，原始输出参考电压一般按照矢量控制设计，详细设计过程参见文献[12]，本文不再赘述，则快速负序控制原理图见图 3，图中参数定义见文献[12]。

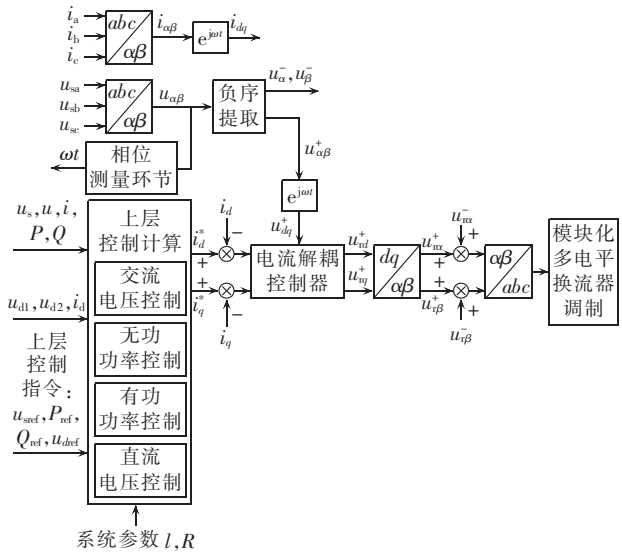


图 3　快速负序控制框图

Fig.3　Block diagram of fast negative-sequence control

输出参考电压最终变换到 abc 三相坐标，变换之前采用 $\alpha\beta$ 静止坐标系可表示为 $u^{+}_{r\alpha\beta}$，网侧电压负序成分转化到相同的 $\alpha\beta$ 静止坐标系下表示为 $u^{-}_{r\alpha\beta}$。

最终输出电压可以表示为：

$$u_{r\alpha\beta}=u^{+}_{r\alpha\beta}+u^{-}_{r\alpha\beta}$$

其中，$u^{+}_{r\alpha\beta}$ 为控制器原始输出；$u^{-}_{r\alpha\beta}$ 为负序电压叠加成分。

将得到的控制输出电压 $u_{r\alpha\beta}$，经过 $\alpha\beta/abc$ 坐标转换至三相坐标下，得到最终的输出参考电压 u_{rabc}，经过调制环节[12]后得到换流器触发脉冲。

使用上述方法不仅可以消除故障电流中的负序分量，而且又避免了负序电流分解环节[12]，以及负序电流分解和在线计算延时给控制系统的动态响应带来的不利影响，省去了负序电流控制环参数设计过程[13-17]。

3.4 在线联网转孤岛运行

舟山多端柔性直流和交流系统并联运行后，舟山电网存在单站进入孤岛运行以及多站同时进入孤岛运行的可能性。某一个换流站从联网运行转为孤岛运行时，需要在线判断转为孤岛运行的时刻，然后从正常运行时的有源控制方式平滑切换到孤岛运行控制方式[18]，转换判据是通过检测柔性直流换流站的交流侧电压的频率变化情况实现的，即检测到频率变化量 $\Delta f>F_{_set}$（$F_{_set}$ 为整定值）时，判断进入孤岛状态。一般情况下，交流系统扰动的频率变化量不会超过 0.2 Hz。通过对舟山电网的仿真及故障扫描，在保留一定裕度的情况下，确定 $F_{_set}$ 为 0.5 Hz。

除了检测频率变化量之外，为避免系统误进入孤岛运行状态，要求上述检测判据还需躲开网侧交流三相接地瞬时性故障及其恢复的过程。因此，在上述判据的基础上，增加了辅助性判据，即网侧交流电压低于一定阈值时，屏蔽孤岛检测功能。

4 现场试验

4.1 多端协调控制

本试验在容量最大的定海站进行，模拟定海站运行期间由于水冷限负荷启动，失去直流电压控制能力后，岱山站接管直流电压控制权。

图 4 为定海站失去直流电压控制瞬间波形，图 5 为岱山站接管直流电压控制权瞬间的波形，可以看出整个多端直流系统在直流电压控制权转移过程中运行平稳。

4.2 直流侧主动充电

岱山站模拟无源端，定海站通过直流线路对岱山站的换流阀进行直流侧主动充电，每 50 ms 上、下桥臂分别减少 1 个导通子模块，直至上、下桥臂导通子模块个数均为 125 个，得到的现场试验波形见图 6，

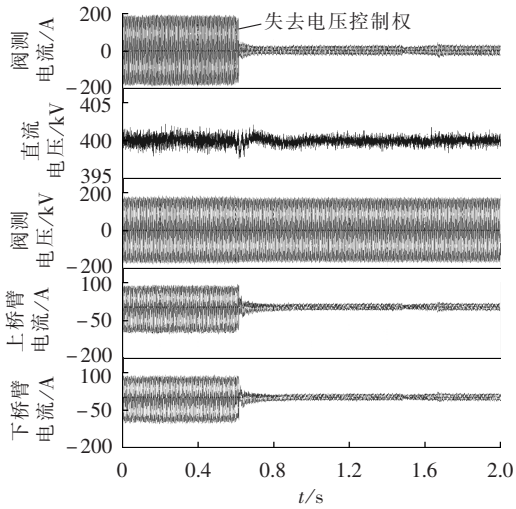


图 4 定海站失去直流电压控制瞬间的波形

Fig.4 Waveforms when Dinghai station loses DC voltage control

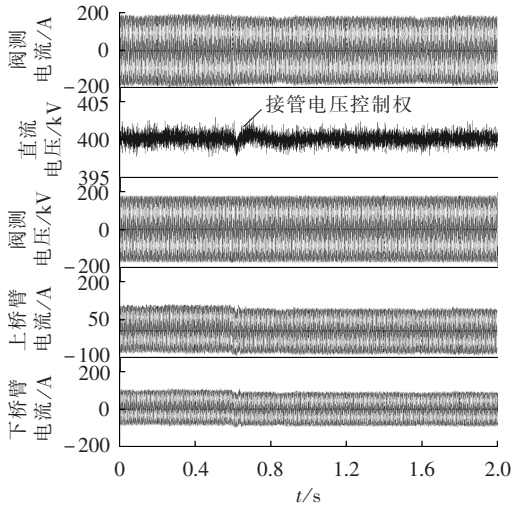


图 5 岱山站接管直流电压控制后的波形

Fig.5 Waveforms after Daishan station takes over DC voltage control

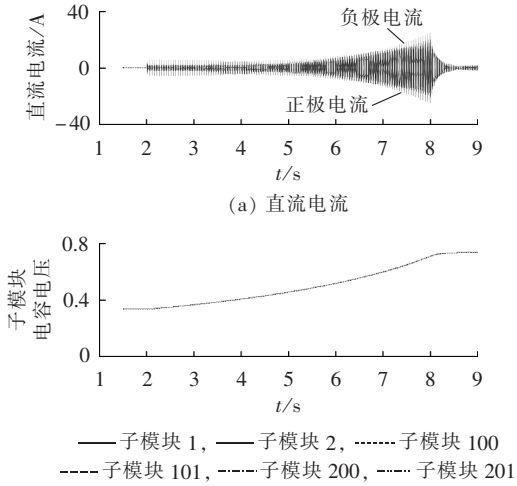


图 6 主动充电试验结果

Fig.6 Results of active charging test

其中子模块电容电压为标幺值。

图 4—6 所示结果表明,在主动充电过程中,6 个桥臂的子模块电容电压逐渐升高至稳态,该过程对换流器以及直流网络的扰动均较小,不会出现过电流现象[19]。

4.3　快速负序控制

在定海站模拟单相接地故障以验证 3.3 节所述快速负序控制的有效性。快速负序控制试验模拟交流侧 c 相发生 100 ms 单相接地故障,c 相开关跳开后 1 s 重合,试验前定海站向直流侧输送有功功率 52 MW,图 7 为故障期间 c 相开关跳开后的波形。

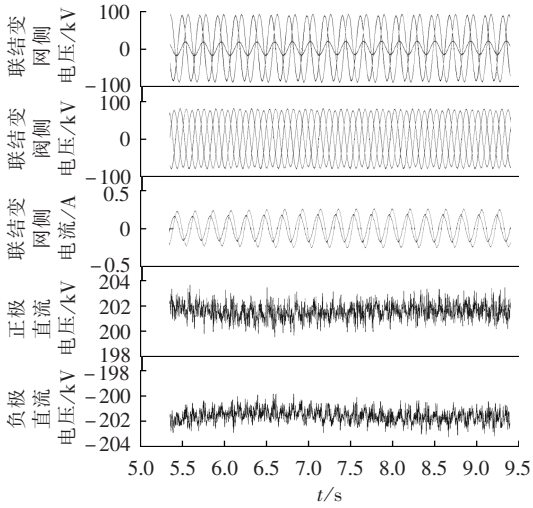


图 7　定海站单相接地故障试验结果

Fig.7 Results of single-phase grounding fault test in Dinghai station

从以上结果可以看出,故障期间,网侧 c 相开关跳开后,网侧 c 相电流为 0,直流正、负极电压无扰动,多端柔性直流系统维持运行,不受影响。故障 1 s后 c 相开关重合成功,多端柔性直流系统继续稳定运行。

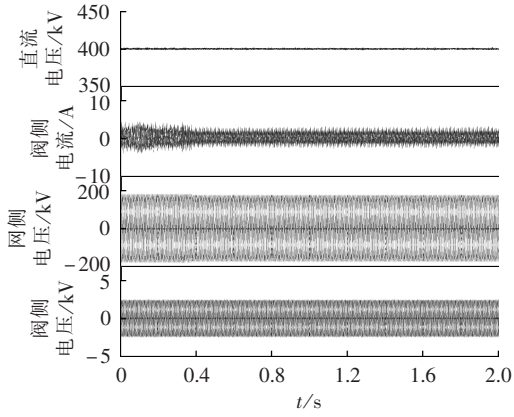
4.4　在线联网转孤岛运行

在线联网转孤岛运行试验在衢山站进行,通过分开换流站交流侧进线开关模拟衢山站和交流系统失去联系后的异常状态(带少量负荷),检验衢山站以及整个多端直流系统是否能正常运行。

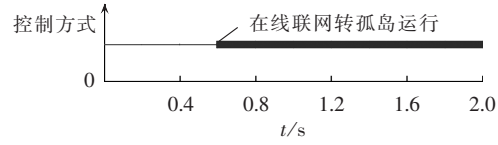
试验前定海站控制直流电压,衢山站处于交流联网运行状态,控制方式为定功率控制。交流侧开关断开后,衢山站通过检测交流系统频率变化情况,自动转换为孤岛运行状态,控制模式从定功率控制状态平滑切换到孤岛控制(定交流电压和定频率控制),作为唯一电源对负荷进行供电[20]。

图 8 为衢山站检测到孤岛运行状态后从有源控制方式转换到孤岛控制瞬间的波形。

从图 8 可以看出,衢山站直流电压和输出阀侧交



(a) 联网运行转为孤岛运行瞬间波形



(b) 控制方式改变

图 8　衢山站联网运行转为孤岛运行瞬间波形

Fig.8 Waveforms when Qushan station switches over from grid-connecting mode to islanding mode

流电压在转换前后无变化,实现了从有源控制方式平滑切换至孤岛控制方式。

5　结语

本文介绍了多端柔性直流输电控制保护系统的系统组成、硬件配置以及功能设计。详细描述了多端柔性直流输电系统协调控制、快速负序控制、直流侧主动充电以及在线联网转孤岛运行等策略。现场试验结果表明,多端柔性直流控制保护系统能实现工程所需的各项控制功能,提高多端柔性直流输电系统的可靠性和灵活性。控制器在稳态和暂态过程中都具有优良的调节特性,适合多端柔性直流输电工程的应用。舟山多端柔性直流输电工程的投运,极大提高了舟山电网的运行灵活性和可靠性。但是由于 MMC 拓扑不具备直流故障自清除能力,因此有必要继续开展直流故障快速恢复的功能研究。

参考文献:

[1] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-9.
XU Zheng,CHEN Hairong. Review and application of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering,2007,33(1):1-9.

[2] 董云龙,田杰,黄晓明,等. 模块化多电平换流器的直流侧主动充电策略[J]. 电力系统自动化,2014,38(24):68-72.
DONG Yunlong,TIAN Jie,HUANG Xiaoming,et al. A DC-side active charging strategy for modular multilevel converters[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(24):68-72.

[3] 喻锋,王西田,解大. 多端柔性直流下垂的功率参考值修正方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):117-122.

YU Feng,WANG Xitian,XIE Da. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(11):117-122.

[4] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 适用于电压源型高压直流输电的控制策略[J]. 电力系统自动化,2005,29(1):39-44.
HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming. A novel control strategy for voltage sourced converters based HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(1):39-44.

[5] 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.

[6] 胡兆庆,毛承雄,陆继明. 新型多端高压直流传输系统应用及其控制[J]. 高电压技术,2004,30(11):31-33.
HU Zhaoqing,MAO Chengxiong,LU Jiming. Application and control strategy of new multi-terminal HVDC system [J]. High Vol-tage Engineering,2004,30(11):31-33.

[7] 陈海荣,徐政. 适用于VSC-MTDC系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2006,30(19):28-33.
CHEN Hairong,XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(19):28-33.

[8] 梁少华,田杰,曹冬明,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.

[9] 周国梁,石新春,魏晓光,等. 电压源换流器高压直流输电不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):137-143.
ZHOU Guoliang,SHI Xinchun,WEI Xiaoguang,et al. Sliding-mode control based VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):137-143.

[10] 皇甫成,贺之渊,汤广福,等. 交流电网不平衡情况下电压源换相直流输电系统的控制策略 [J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):144-151.
HUANGFU Cheng,HE Zhiyuan,TANG Guangfu,et al. Control strategy for the voltage source converter based HVDC transmission system under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):144-151.

[11] 唐庚,徐政,刘昇,等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):125-132.
TANG Geng,XU Zheng,LIU Sheng,et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):125-132.

[12] 胡兆庆,田杰,董云龙,等. 模块化多电平柔性直流输电系统网侧故障控制策略及验证[J]. 电力系统自动化,2013,37(15):71-75.
HU Zhaoqing,TIAN Jie,DONG Yunlong,et al. Control strategy verification of modular multilevel converter transmission system under unbalanced network conditions[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(15):71-75.

[13] 刘钟淇,宋强,刘文华. 采用MMC变流器的VSC-HVDC系统故障态研究[J]. 电力电子技术,2010,44(9):69-71.
LIU Zhongqi,SONG Qiang,LIU Wenhua. Research on the VSC-HVDC system using modular multilevel converters under fault condition[J]. Power Electronics,2010,44(9):69-71.

[14] 陈海荣,张静,屠卿瑞. 电网电压不平衡时电压源换流器形直流输电的负序电压补偿控制[J]. 高电压技术,2011,37(10):2363-2369.
CHEN Hairong,ZHANG Jing,TU Qingrui. Negative voltage compensating control of voltage source converter based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. High Voltage Engineering,2011,37(10):2363-2369.

[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] 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.

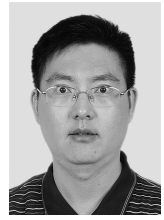
[17] 刘昇,徐政,唐庚,等. MMC-HVDC联网及孤岛运行状态转换策略研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(9):2152-2161.
LIU Sheng,XU Zheng,TANG Geng,et al. Study on MMC-HVDC switching scheme between grid-connected and passive islanding mode[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(9):2152-2161.

[18] 文安,邓旭,魏承志,等. 柔性直流输电系统交直流并列运行与孤岛运行方式间的切换控制[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):99-106.
WEN An,DENG Xu,WEI Chengzhi,et al. Switching control between AC-DC parallel and islanded operations of VSC-HVDC transmission system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):99-106.

[19] 董云龙,杨勇,田杰,等. 基于模块化多电平换流器的柔性直流输电动态模拟系统[J]. 电力系统自动化,2014,38(11):74-78.
DONG Yunlong,YANG Yong,TIAN Jie,et al. Dynamic simulation system for modular multilevel converters based VSC-HVDC [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(11):74-78.

[20] SHAO Zhenxia,DONG Yunlong,TIAN Jie,et al. Practice of the first five-terminal VSC-HVDC project[C]//CIGRE SC B4 International Colloquium on HVDC and STATCOM. Agra,India:CIGRE,2015:205-214.

作者简介:



董云龙

董云龙(1977—),男,安徽安庆人,高级工程师,硕士,主要研究方向为特高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术(**E-mail**:dongyl@nrec.com);

凌卫家(1962—),男,江苏南通人,高级工程师,主要从事大电网运行与控制等方面的研究工作;

田 杰(1969—),男,四川重庆人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为特高压直流输电、柔性直流输电及柔性交流输电技术;

胡兆庆(1976—),男,湖北荆门人,工程师,博士,主要研究方向为特高压直流输电及柔性直流输电技术。

Control & protection system for Zhoushan multi-terminal VSC-HVDC

DONG Yunlong[1],LING Weijia[2],TIAN Jie[1],HU Zhaoqing[1],LI Gang[1],LU Yu[1]
(1. NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211102,China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Company,Hangzhou 310007,China)

Abstract: The hierarchical design of the control & protection system for multi-terminal VSC-HVDC transmission and its function configuration are described. Its coordinated control function among multiple stations is introduced,i.e. when the DC voltage control station loses the DC voltage control function,one of the other power stations will bumplessly take over the DC voltage control according to the adaptive strategy based on inter-station communication or DC voltage deviation detection. The design of some control functions applied in the project is introduced,such as fast negative-sequence control,active DC-side charging,operating mode switchover,etc. Partial site-test results are given to prove the designed control & protection system satisfying the requirements of Zhoushan five-terminal VSC-HVDC project.

Key words: multi-terminal VSC-HVDC power transmission; control; electric power system protection; passive islanding mode; modular multilevel converter

(上接第 168 页 continued from page 168)

HUANG Huayong,YOU Buxin,QUAN Zhi,et al. Application of real-time monitoring and analyzing system in smart substation [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(4):124-127.

[10] 许伟国,张亮. 数字化变电站网络通信在线故障诊断系统的设计与应用[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):121-124.
XU Weiguo,ZHANG Liang. Design and application of online fault diagnosis system for network communication of digital substation [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):121-124.

[11] 于伟城,白瑞,郝伟. 智能变电站二次设备检修处理机制分析探讨[J]. 山西电力,2012(5):21-23.
YU Weicheng,BAI Rui,HAO Wei. Analysis on maintenance mechanism of secondary equipments in smart substation [J]. Shanxi Electric Power,2012(5):21-23.

[12] 国家电网公司. 智能变电站一体化监控系统功能规范:Q/GDW-678—2011[S]. 北京:中国电力出版社,2011.

作者简介:

笃　峻

笃　峻(1975—),男,江苏南京人,高级工程师,硕士,通信作者,主要从事变电站自动化系统研究及相关产品开发工作(**E-mail**:dujun@nrec.com);

叶　翔(1978—),男,浙江临安人,工程师,硕士,主要从事电力系统相关软件的研究及开发工作;

葛立青(1975—),男,安徽安庆人,工程师,硕士,主要从事电力系统相关软件的研究及开发工作;

杨　贵(1976—),男,吉林通化人,工程师,硕士,主要从事电力系统通信设备的研究及开发工作;

周奕帆(1984—),男,安徽芜湖人,工程师,硕士,主要从事电力系统相关软件的研究及开发工作。

Key technologies of online maintenance system for relay protections in smart substation and its implementation

DU Jun,YE Xiang,GE Liqing,YANG Gui,ZHOU Yifan
(NR Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China)

Abstract: Along with the rapid development of smart substations,the maintenance requirements of in-substation relay protections become more rigorous,which could not be satisfied by the traditional periodic maintenance. The key to improve the maintenance level is to realize the status monitoring and conditional maintenance by the online maintenance system. The design and implementation of online maintenance system in the technical conditions of smart substation for its relay protections are emphatically introduced and the key technologies are deeply discussed,such as the status monitoring of protection devices and secondary circuits,the operations of auxiliary maintenance,etc.. The results of an engineering application show the feasibility of the introduced implementation of online maintenance system.

Key words: smart substation; conditional maintenance; status monitoring; secondary circuit; auxiliary maintenance; relay protection