±1 100 kV 直流控制保护系统冗余设备故障处理的探讨

张庆武，潘卫明，张 靖，王永平，赵森林

（南京南瑞继保电气有限公司，江苏 南京 211102）

摘要：介绍了±1 100 kV 特高压直流控制保护系统的整体结构和设计方案，重点探讨了特定冗余设备故障的系统自监视及故障处理方法。针对极层冗余控制装置故障，改进极层保护装置监视逻辑，避免极保护装置同时退出运行。对于换流器层冗余控制装置故障，由极控制装置发合旁通开关命令，退出换流器。所述方案有利于提升±1 100 kV 特高压直流输电系统的可靠性，仿真结果也表明上述方案是可行和有效的。

关键词：特高压直流输电；控制保护系统；冗余故障；自监视；RTDS 仿真

Discussion on fault handles about redundant devices of control and protection system for ±1 100 kV UHVDC

ZHANG Qingwu, PAN Weiming, ZHANG Jing, WANG Yongping, ZHAO Senlin

(Nari-relays Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: This paper introduces the overall structure and design scheme of the control and protection system for ±1 100 kV UHVDC, the self-supervision and fault handles about its special redundant device faults are especially discussed. For the faults of redundant pole control units, the supervision logic of the pole protection units are improved, so as to prevent all protection units from out of service simultaneously. For the faults of redundant converter control devices, the correlative converter will exit by the bypass switch close order from the control device for this pole. The methods will improve the reliability of the ±1 100 kV UHVDC, and the simulation results show the effects and feasibility of the methods.

This work is supported by SGCC (No. SGKJ[2012]515).

Key words: ultra high voltage direct current (UHVDC); control and protection system; redundant faults; self-supervision; real-time digital simulation (RTDS)

中图分类号： TM721 文章编号： 1674-3415(2015)21-0148-06

0 引言

从输电经济性出发，直流输电的电压等级与输电距离正相关[1]。±500 kV 常规直流输电工程的经济输电距离一般在 700 km 至 1 300 km 。近年来，我国相继投运的云广、向上、锦苏、哈郑、溪浙等多条 ±800 kV 特高压直流输电工程[2-4]，其输电距离均在 1 300 km 至 2 500 km 之间。当前，我国正在建设的西南大型水电基地、新疆大型煤电和风电基地，与东、中部负荷中心的距离有些已超过 3 000 km 。随着输电距离的进一步增加，研发更高电压等级的特高压直流输电技术势在必行[5]。

研究表明，输电距离大于 2 500 km 时，采用 ±1 100 kV 特高压直流输电更为经济[6-7]。目前，疆电外送规划中的准东—成都、准东—皖南直流输电工程，均按 ±1 100 kV 直流电压等级进行设计[8-9]。

2011 年起，国家电网公司启动了 ±1 100 kV 直流输电科研攻关，并组织相关设备厂家开展主设备研制工作[10-11]。在此基础上，南京南瑞继保电气有限公司立足自主研发的 PCS-9550 直流控制保护平台[12]，借鉴 ±800 kV 特高压直流控制保护系统的开发和工程应用经验[13]，研制了 ±1 100 kV 特高压直流控制保护系统及全功能样机。与 ±500 kV 和 ±800 kV 直流相比，±1 100 kV 直流输电容量更大，对控制保护系统可靠性和可用率要求极高，仅基于设备冗余、切换等基本原则的控制保护系统自监视设计不能完全满足 ±1 100 kV 直流的高可靠性要求，对于某些关键设备的特殊故障(例如冗余设备故障)及其影响也应重视。探讨 ±1 100 kV 直流控制保

基金项目：国家电网公司科技项目(SGKJ[2012]515)

护系统自身特殊故障的监视与处理方法，进一步强化其可靠性设计，是系统研制过程中的一个重点研究课题。

本文概述了所研制的±1 100 kV 直流控制保护系统架构，介绍了其系统自监视设计的特点，重点针对极控制装置、换流器控制装置等关键设备的冗余故障，进行了自监视处理方法的探讨，以提高系统的整体可靠性和可用率。

1　平台简介

PCS-9550 直流控制保护平台的基本组成部分包含控制保护装置、IO 单元、人机界面系统等。

控制保护装置由机箱和各种 CPU、DSP 处理器板卡组成，不同的控制保护装置可依功能需要灵活选择处理器板卡的种类和数量，多个处理器板卡通过机箱背板的 HTM(High performance Time deterministic Multiplexed synchronous serial Bus)总线交换内部数据，构成高速并行处理系统，协同实现主机的控制保护功能。

控制保护装置通过多功能处理器板实现装置间的实时数据组网或点对点通信，如图 1 所示。多个控制保护装置之间的光纤实时数据交换网，称为控制 LAN 网。直流控制保护系统基于此平台实现分层分布式运算和整体的控制保护策略。另一方面，控制保护装置通过监视与其通信的其他装置的报文信息，可实时判断其他装置的工作状态是否正常，一旦发现装置故障，将根据预设的系统自监视策略，执行相应的故障处理措施，尽可能降低装置故障的影响范围和损失。

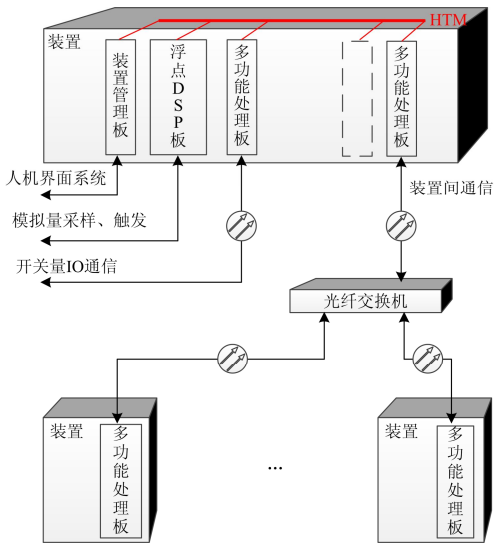

图 1　PCS-9550 系统工作原理图

Fig. 1 Working principle of PCS-9550 system

2　系统设计

±1 100 kV 特高压直流的主回路设计仍沿用±800 kV 特高压直流的架构[14]，每极由两个 12 脉动换流器串联构成，每个换流器的额定直流分压为 550 kV 。与一次系统结构相适应，±1 100 kV 直流控制保护系统采用分层设计，控制保护功能分散配置到不同层次的控制保护装置中[15]，以最大限度提高系统整体可用率[16]。其每个极的设计方案如图 2 所示。图中，PCP 为极控制装置，PPR 为极保护装置，CCP 为换流器控制装置，CPR 为换流器保护装置。

图 2 中，控制保护设备按极层、换流器层配置，双极层功能分别配置在两极的极层装置中实现，尽可能避免双极层设备故障对两个极同时造成扰动。控制装置采用双重化冗余配置；保护装置采用三取二的冗余方案，极层和换流器层分别配置独立的三取二装置进行保护动作出口的判断。

控制保护装置间实时通信的控制 LAN 网按极层、换流器层划分，双重化冗余设计。极层和换流器层控制 LAN 各自独立，PCP 装置既连接极层控制 LAN，又连接到本极的两个换流器控制 LAN，承担极层与换流器层信号交换任务，并向 CCP 装置下发电流指令，根据电流指令进行闭环调节的功能在 CCP 装置中实现。同极两个 12 脉动换流器的控制装置间采用光纤以太网直连通信，以便换流器间的协调控制。

3　系统自监视设计

通过设备冗余和系统自监视与切换，常规直流控制保护系统均满足控制保护单一元件故障不影响输电系统运行的设计要求。而对于±1 100 kV 特高压直流，其巨大的输送容量对控制保护系统的可靠性提出了更高的要求，有必要进一步研究针对某些特定冗余设备故障的监视和处理方法，充分利用特高压直流控制保护分层设计和功能分散配置的特点，通过自监视设计，判定冗余设备故障，缩小故障影响范围，尽可能维持系统全部或部分运行，以提高系统的整体可用率。

以下分别针对极控制装置和换流器控制装置这两种关键设备的冗余故障进行研究和探讨。

3.1　极层冗余控制装置故障

当极层冗余的 PCP 装置都故障时，本极换流器控制装置 CCP 接收到的电流指令被保持，CCP 装置内的闭环调节功能可以继续运行，两个换流器层的控制 LAN 仍可独立运作。因此系统具备维持当前状态继续运行的能力。

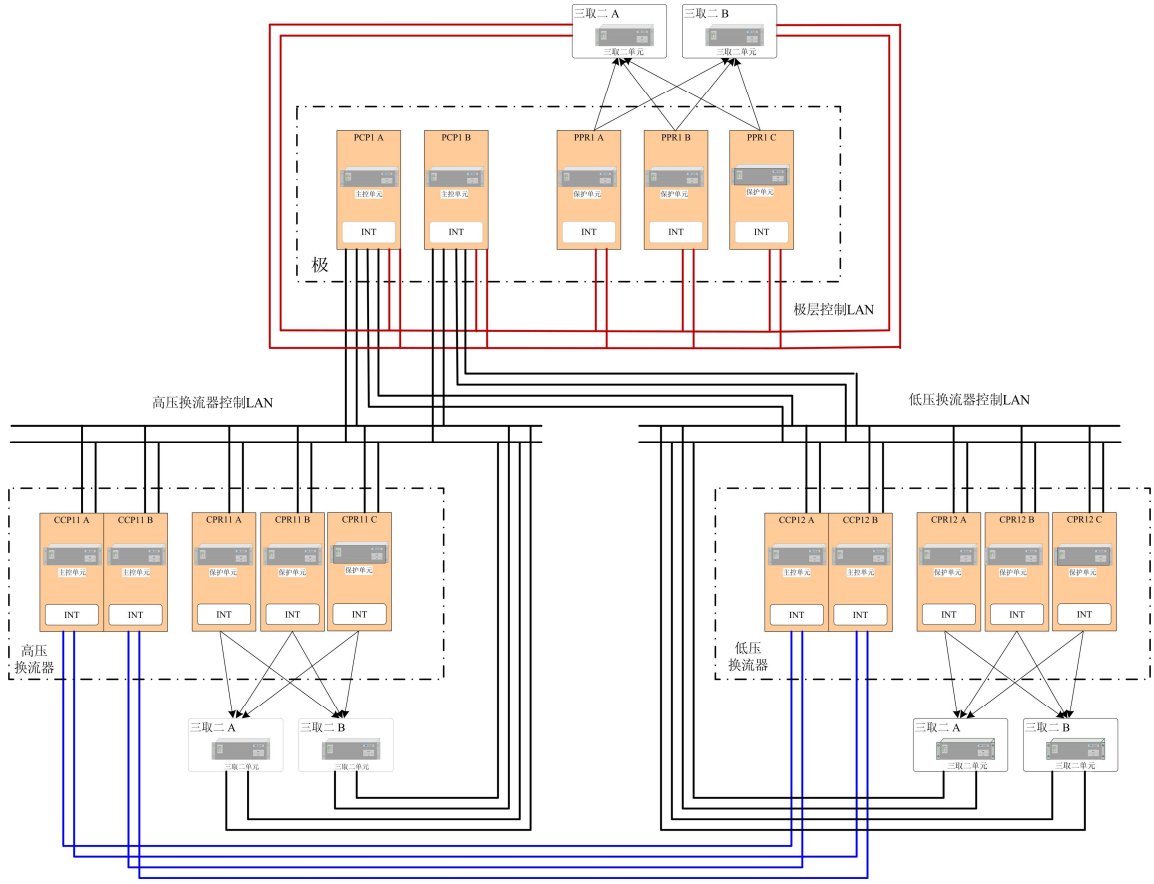

图 2　PCS-9550 特高压直流控制保护系统设计方案

Fig. 2 Scheme of PCS-9550 control and protection system for UHVDC

另一方面，极层冗余的 PCP 装置都故障时，极保护装置 PPR 将失去与值班 PCP 的通信。常规的直流控制保护系统监视方法是，保护装置失去与值班控制装置的通信时，立即闭锁本套保护，退出运行；三套保护装置全部退出运行后，三取二装置中的无保护装置运行逻辑将停运相应的直流系统，从而这种系统自监视方案降低了系统的可用率。

±1 100 kV 特高压直流控制保护样机的自监视设计中，对极层设备的监视采取了以下方案：极保护三取二装置和极保护装置双向通信，当某套极保护装置监视到两套冗余极控制装置故障时，发请求退出信号给极保护三取二装置，极保护三取二装置收到该信号，判断是否所有运行中的极保护装置同时发来该信号，若不是，则向请求退出的极保护装置发允许退出信号，极保护装置闭锁本套保护，退出运行；若是，则向请求退出的极保护装置发禁止退出信号，极保护装置继续运行。

极保护装置判断冗余极控制装置故障的逻辑如图 3 所示。

发生下列情况之一时，极保护装置判断冗余极控制装置故障或冗余通信故障发生，向两套极层三取二装置发出请求退出信号：

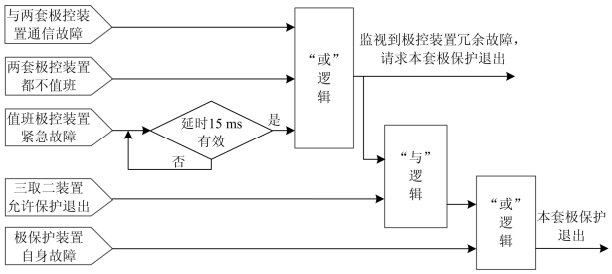

图 3　极保护监视逻辑

Fig. 3 Supervision logic in PPR

(1) 极保护装置与两套冗余极控制装置的通信均故障；

(2) 极保护装置监视到两套冗余极控制装置均不处于值班状态；

(3) 极保护装置监视到值班极控制装置发生紧急故障，且延时后未产生极控系统切换，故障条件仍成立。

极保护装置发出请求退出信号后，等待极层三取二装置返回允许信号。当两套极层三取二装置中的任何一套向极保护装置返回允许退出信号，且该

极保护装置中的请求退出信号仍为 TRUE 时，该套保护退出运行。

而对极保护装置自身的严重或紧急故障，比如本装置的处理器故障或测量故障等，不需要等待极层三取二装置返回的允许退出信号，极保护装置立即闭锁本套保护，退出运行。

图 4 是极层三取二装置判断是否允许极保护退出的逻辑图。

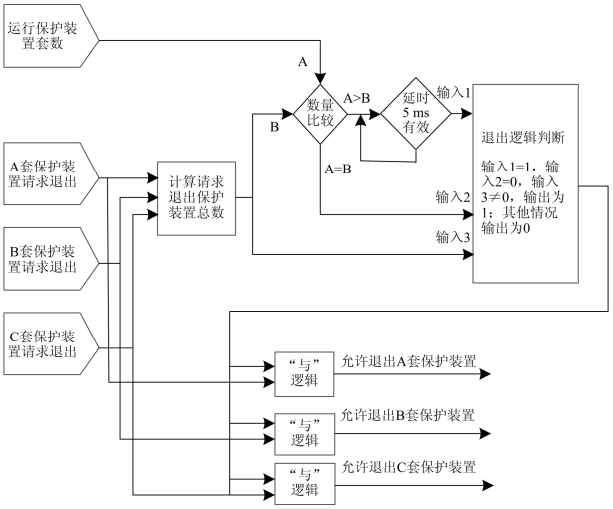

图 4 极层三取二装置监视逻辑

Fig. 4 Supervision logic in 2-out-of-3 device for pole

图 4 中输入的保护装置请求退出信号即为图 3 中极保护装置发出的请求退出信号。极层三取二装置计算运行中的极保护装置的数量和发来请求退出信号的极保护装置的数量，如果运行中的极保护装置的数量大于发来请求退出信号的极保护装置的数量，进一步检测极保护装置发来的请求退出信号的同时性。

极层三取二装置在判断允许极保护退出前设置延时，在延时窗口内，如果极层三取二装置收到了所有运行中的极保护装置发来的请求退出信号，则同时性条件成立；否则不成立，极层三取二装置向发来请求退出信号的极保护装置发送允许退出信号。

采用上述极层装置监视与处理方法，在±1 100 kV 特高压直流冗余极控制装置故障时，不会因极控制装置冗余故障引起极保护装置全部退出运行，从而可避免导致极停运；特高压直流系统可以维持极控制装置故障前的状态继续运行。

3.2 换流器层冗余控制装置故障

当某一换流器冗余配置的两套 CCP 装置均故障不可用时，该换流器将丧失所有的控制和监视功能，包括正常的阀触发和通过电流的能力。此时如无后备的处理方法，本极串联的另一正常运行的换流器也将因为没有直流电流回路而被迫停运。针对这种情况，向上、锦苏等特高压直流工程中设置了后备跳闸继电器，通过继电器机械触点监视控制装置的状态，在两套冗余 CCP 装置均故障时由后备继电器启动跳闸、合旁通开关操作，退出本换流器。

从提高可靠性角度出发，±1 100 kV 特高压直流控制保护样机设计中，对换流器层控制装置的监视采用了以下方案：

由本极的极控制装置 PCP 监视冗余 CCP 装置的故障状态；换流器旁通开关属于换流器区设备，由 CCP 装置控制分合，现增设 PCP 装置到本极换流器旁通开关的控制合指令的接线，如图 5 所示。

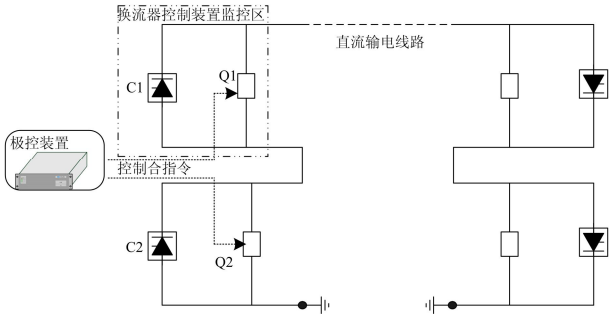

图 5 换流器控制装置冗余故障处理

Fig. 5 Fault handles for redundant CCP

PCP 装置与冗余 CCP 装置间通过控制 LAN 网实时通信，当 PCP 装置监视到冗余的 CCP 装置均故障时，向此换流器的旁通开关发控制合指令；同时向另一换流站发送本站退出换流器的信号，另一换流站收到该信号后，也退出对应的换流器。

PCP 装置向换流器旁通开关发出控制合指令后，自动使用预先设置的检修状态值代替来自故障 CCP 装置的信号状态值，检修状态值按照该换流器处于隔离状态进行设定；自动设置换流器检修状态后可人为复归，退出检修状态。

±1 100 kV 特高压直流控制保护系统的自监视功能，能准确识别 CCP 装置的冗余故障；由 PCP 装置通过控合旁通开关来退出故障换流器的方案，相比后备继电器的方案，可靠性更高。另外，通过 PCP 装置进行站间协调，也利于换流器的平稳退出，确保本极另一换流器继续正常运行。

4 仿真验证

±1 100 kV 特高压直流控制保护系统开发完成后，与 RTDS 仿真器构成闭环仿真测试系统。为验证上节所述的系统自监视及处理方案，分别进行了

冗余 PCP 装置故障试验和冗余 CCP 装置故障试验。试验工况为：极 1 功率控制，双换流器串联运行，功率指令 1 000 MW，直流电压 1 100 kV。

系统稳定运行后，关闭极 1 的两套 PCP 装置的电源，模拟冗余 PCP 装置故障。CCP 装置监测到冗余 PCP 装置故障后，维持系统原状态运行；由于极保护装置和极层三取二装置采用了改进的监视逻辑，极保护装置未退出运行，没有导致直流停运，系统维持原状态继续运行。实验波形如图 6 所示，其中 U_{DL} 为直流电压，I_{DNC} 为直流电流，*ALPHA* 为触发角，在 0.4 s 时刻 *PCP_FLT* 信号由 0 变 1 表示发生了冗余 PCP 装置故障。

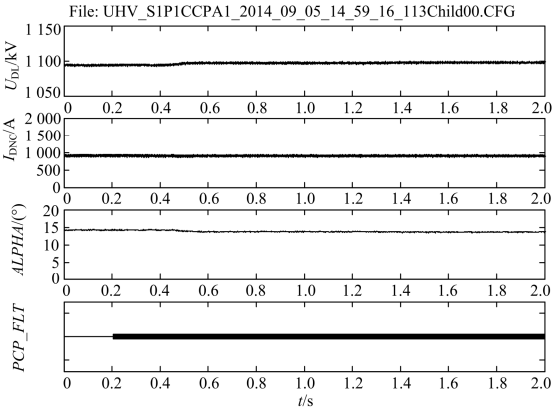

图 6 冗余 PCP 装置故障波形

Fig. 6 Wave of redundant PCP fault

恢复初始工况稳定运行后，通过关闭极 1 高压换流器的两套 CCP 装置的电源，模拟冗余 CCP 装置故障，试验波形如图 7 所示。极 1 PCP 装置监测到高压换流器冗余 CCP 装置故障(*CCP*1_*FLT* 信号由 0 变 1)后，立即发出合高压换流器旁通开关命令(*BPS*1_*CL_ORD* 信号由 0 变 1)，约 50 ms 后，旁通开关闭合(*BPS*1_*CL_IND* 信号由 0 变 1)，直流电流重新建立，低压换流器继续运行。

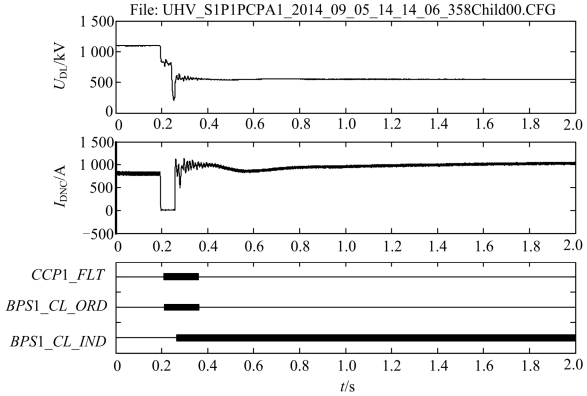

图 7 冗余 CCP 装置故障波形

Fig. 7 Wave of redundant CCP fault

5 结论

一方面，±1 100 kV 特高压直流对输电可靠性有极高的要求；另一方面，其直流控制保护系统的分层结构设计，也为进一步提高控制保护可靠性提供了实施基础。本文针对±1 100 kV 特高压直流的极控制装置、换流器层控制装置等关键设备的冗余故障，探讨了控制保护系统自监视设计和故障处理的改进方案。上述方案的实施有利于提高±1 100 kV 特高压直流输电系统的整体可用率，RTDS 仿真结果表明，上述方案是可行和有效的。

参考文献

[1] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8.
LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8.

[2] 胡艳梅, 吴俊勇, 李芳, 等. ±800 kV 哈郑特高压直流控制方式对河南电网电压稳定性影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 147-153.
HU Yanmei, WU Junyong, LI Fang, et al. Impacts of DC system control mode for 800 kV Ha-Zheng UHVDC on voltage stability of Henan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.

[3] 胡永银, 李兴源, 李宽, 等. 云广特高压直流输电工程换流阀过负荷能力分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 102-106.
HU Yongyin, LI Xingyuan, LI Kuan, et al. Analysis and calculation of converter valve overload capability in Yunnan-Guangdong UHVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 102-106.

[4] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程直流保护系统实施策略及其仿真试验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 115-121.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 115-121.

[5] 张文亮, 周孝信, 郭剑波, 等. ±1 000 kV 特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 1-5.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, et al. Feasibility of ±1 000kV ultra HVDC in the power grid

of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 1-5.

[6] 张运洲, 韩丰, 赵彪, 等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 37-41.
ZHANG Yunzhou, HAN Feng, ZHAO Biao, et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence [J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 37-41.

[7] 周浩, 王东举. ±1 100 kV 特高压直流换流站过电压保护和绝缘配合[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 1-8.
ZHOU Hao, WANG Dongju. Overvoltage protection and insulation coordination for ±1 100 kV UHVDC converter station[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 1-8.

[8] 邓旭, 王东举, 沈扬, 等. ±1 100 kV 准东—四川特高压直流输电工程主回路参数设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(4): 133-140.
DENG Xu, WANG Dongju, SHEN Yang, et al. Main circuit parameter design of Zhundong-Sichuan ±1 100 kV UHVDC power transmission project[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(4): 133-140.

[9] 郭焕, 曹均正, 汤广福, 等. ±1 100 kV 特高压直流换流系统主电路优化设计[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2383-2389.
GUO Huan, CAO Junzheng, TANG Guangfu, et al. Optimization design of main circuit of converter system for ±1 100 kV UHVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2383-2389.

[10] ZHANG Tao, NIE Dingzhen, MA Weimin. Design of ±1 100 kV UHVDC converter transformers[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(12): 3240-3243.

[11] 曹均正, 汤广福, 王高勇, 等. ±1 100 kV 特高压直流输电换流阀研制及型式试验[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 67-71.
CAO Junzheng, TANG Guangfu, WANG Gaoyong, et al. The development and type test of converter valve for ±1 100 kV UHVDC transmission[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 67-71.

[12] 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.
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.

[13] 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.

[14] 孙昕, 刘泽洪, 高理迎, 等. ±800 kV特高压直流工程创新实践[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(22): 35-45.
SUN Xin, LIU Zehong, GAO Liying, et al. Practice and innovation in the ±800 kV UHVDC demonstration project[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(22): 35-45.

[15] 胡铭, 田杰, 曹冬明, 等. 特高压直流输电控制系统结构配置分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 88-92.
HU Ming, TIAN Jie, CAO Dongming, et al. Analysis of structure and configuration for UHVDC transmission control system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24): 88-92.

[16] 田杰, 曹冬明, 李海英, 等. 提高特高压直流输电控制保护系统可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(增刊 1): 12-16.
TIAN Jie, CAO Dongming, LI Haiying, et al. The research of improving the reliability of ultra HVDC transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(S1): 12-16.

收稿日期：2015-01-28；　修回日期：2015-04-28

作者简介：

张庆武(1982-)，男，博士，高级工程师，研究方向为高压直流输电及其控制保护领域的研究和开发。E-mail：zhangqw@nrec.com

(编辑　魏小丽)