

龙泉换流站直流控制保护系统运行分析

姚其新¹, 张侃君², 韩情涛¹, 文博²

(1. 国网湖北省电力公司检修公司, 湖北 武汉 430050; 2. 国网湖北省电力公司
电力科学研究院, 湖北 武汉 430077)

摘要: 由于运行时间较长以及性能存在一些缺陷, 龙泉换流站直流控制保护系统近年来多次发生故障, 对电网的运行带来了不利影响。对龙泉换流站直流控制保护系统近年来的故障情况进行统计, 对故障原因进行分析, 并指出当前龙泉换流站直流控制保护系统运行维护工作存在的难题。根据分析结果, 提出相应的技术改造方案。该技术改造方案不仅可以有效解决龙泉换流站直流控制保护系统存在的缺陷及问题, 而且对其他高压直流输电工程的建设和运行维护工作也有较好的参考作用。

关键词: 龙泉换流站; 直流控制保护系统; 故障分析; 运行维护; 技术改造

Operation analysis of Longquan converter station HVDC control and protection system

YAO Qixin¹, ZHANG Kanjun², HAN Qingtao¹, WEN Bo²

(1. State Grid Hubei Electric Power Maintenance Company, Wuhan 430050, China; 2. State Grid Hubei Electric
Power Research Institute, Wuhan 430077, China)

Abstract: Because of longer operating time and performance defects, HVDC control and protection system of Longquan converter station malfunctioned frequently in recent years, then it has adverse effect on power grid operating security. The faults that occurred in recent years of Longquan converter station is summarized, the fault reason is analyzed, and the problem in operation and maintenance of HVDC control and protection system is pointed out. Based on above analysis results, the technical transformation scheme is proposed. The scheme can not only solve the defects and problems of Longquan converter station HVDC control and protection system effectively, but also play a certain reference role for guiding construction, operation and maintenance of others HVDC project.

Key words: Longquan converter station; HVDC control and protection system; fault analysis; operation and maintenance; technical transformation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)11-0142-06

0 引言

相对于交流输电方式, 直流输电在远距离电力传输方面有着独特的优势。近十年来, 我国投运的高压、特高压直流输电工程数量迅速增长, 在“西电东送”、“南北互供”、“全国联网”等工程中起到了关键作用。

在直流输电系统中, 直流控制保护系统(简称为直流控保系统)是核心设备之一, 直接关系到整个直流输电系统以及相关交流系统的安全、可靠运行。根据统计结果, 直流控保系统故障是引起直流输电系统单、双极强迫停运的主要原因之一^[1-11]。尤其是对于龙泉-政平、江陵-鹅城等直流输电工程, 投入运行的时间已超过了十年; 近年来已发生多起因直流控保系统故障而导致的单、双极强迫停运事件,

对直流输电系统两侧交流电网的安全稳定运行造成了严重影响^[12-13]。此外, 其直流控保系统的缺陷和隐患也会降低直流输电系统的运行可靠性, 对电网安全运行带来不利影响。

针对以上问题, 本文对龙泉换流站(简称为龙泉站)直流控保系统运行情况进行分析, 并对暴露的问题进行研究, 研究结果可对促进这类运行时间较长的直流输电工程运行维护工作起到积极作用。

1 龙泉站直流控保系统简介

龙泉站于2003年6月投入运行, 其直流控保系统采用瑞典ABB公司的MACH2 (Modular Advanced Control System for HVDC and SVC 2nd Edition)系统, 是该系统首次应用在直流输电工程中。

MACH2是一种分层、分布的开放式系统。根

据控制区域不同, 系统由 PCP(极控制保护系统)、ACP(交流场控制保护系统)、AFP(交流滤波器控制保护系统)等相对独立又相互关联的双重化子系统组成。系统运行时, 与一次设备接口由就地设置的各种不同功能和精度的 I/O 板卡完成, 现场模拟量信号通过双重化的 TDM 总线传送, 开关量信号通过双重化的 CAN 总线传送, 一次设备状态和系统各种运行参数通过现场总线送入就地设置的工控机, 控制保护功能由相应工控机实现, 各工控机通过双重化的 LAN 网相互连接。MACH2 系统软件采用 Hidraw 图形化编程工具实现。

龙泉站直流控保系统共配置 MACH2 主机 32 台, 包括: PCP、AFP、ACP、AFT(35 kV 站用电控制保护)、LFL(线路故障定位)以及 ASI(辅助系统)6 类主机; IO 板卡 5 390 块, 包括 PS、RS 系列两类板卡, 主要包括总线扩展、电源供给、信号采集、信号处理、通信以及时钟同步等功能。

2 龙泉站直流控保系统故障统计

2.1 因直流控保系统故障导致的单、双极闭锁

自投运以来, 龙泉站共发生单、双极闭锁事件 12 次, 其中因直流控保系统故障导致的闭锁 8 次, 占总数的 67%, 其详细情况见表 1。

表 1 因直流控保系统故障导致的极闭锁事件

Table 1 Forced outage events caused by HVDC control and protection system fault

序号	时间	闭锁原因	采取措施
1	2003 年 7 月 2 日	极 I PCPB 与 ACP32 光纤通信故障导致极闭锁。	完善 PCP 与 ACP 系统之间通信监视软件。
2	2004 年 8 月 8 日	极 II MC1 在重启期间分接头位置信号不稳定, 造成 MC2 计算交流电压错误, 极 II 换流变过励磁保护误动导致极闭锁。	控保主机重启后如果有保护出口, 软件不许该主机进入运行状态。
3	2004 年 11 月 23 日	极 II PCPA 的 PCIA 板卡故障, 造成换流变饱和和保护误动导致极闭锁。	更换板卡。
4	2005 年 1 月 5 日	极 I PCP 与 TFTA 通信故障导致极闭锁。	完善软件, 当 PCP 无法检测到 ETCS 状态时, 发指令切换 ETCS 系统。
5	2008 年 7 月 9 日	极 I PCPB 系统 PCIC 板卡故障导致换流变交流母线及换流变差动保护动作。	完善直流控保系统自检功能, 将换流变保护从 PCP 系统中独立出来。
6	2010 年 7 月 3 日	极 I 直流滤波器电容器不平衡保护频繁切换控制系统导致极 I 闭锁。	将直流滤波器电容器不平衡保护动作出口由跳闸改为告警。
7	2012 年 5 月 12 日	龙泉站极 II PCPB1 主机误发 Z 闭锁命令。	完善 PCI 板卡与主机之间 DPM 校验。
8	2013 年 3 月 5 日	因极 II PCPB 系统 PS862XP 板卡故障, 相继引发极 II、极 I 双极中性母线差动保护动作, 导致双极闭锁。	完善双极保护软件, 去除控制极对保护告警和切换系统的影响。

2.2 直流控保系统硬件故障

2.2.1 主机故障

主机故障主要包括: 主机死机、主机内 PCI 板卡故障、光纤接口板故障以及风扇故障四类故障, 其故障统计数据见表 2。

表 2 龙泉站直流控保系统主机故障统计

Table 2 Fault statistic of Longquan converter station HVDC control and protection host computer

年份	主机故障类型				合计
	主机死机	PCI 板卡故障	光纤板卡故障	风扇故障	
2011 年	2	4	1	1	8
2012 年	8	8	2	5	23
2013 年	12	4	4	2	22
2014 年 1~4 月	3	6	3	2	14

由表 2 数据可知, 除主机风扇故障(不影响设备正常运行)外, 主机故障率自 2011 年以来均较高, 且呈逐年上升的趋势, 设备老化迹象较为明显。

2.2.2 板卡故障

包括 IO 板卡、PCI 板卡故障, 见表 3、表 4。

表 3 龙泉站直流控保系统 IO 板卡故障统计

Table 3 Fault statistic of Longquan converter station HVDC control and protection IO integrated circuit board

年份	故障板卡											合计
	PS 831	PS 832	PS 850	PS 851	PS 860	PS 868	PS 891	PS 876	PS 862	PS 853	PS 900	
2011 年	1	1	5	3	3	5	3	0	0	0	0	21
2012 年	1	0	4	2	1	4	12	1	0	0	0	25
2013 年	1	0	6	0	0	7	8	0	1	1	1	25
2014 年 1~4 月	0	0	1	1	0	2	5	0	2	1	0	12

表 4 龙泉站直流控保系统主机 PCI 板卡故障统计

Table 4 Fault statistic of Longquan converter station HVDC control and protection PCI integrated circuit board

年份	主机内 PCI 板卡故障				合计
	PS801	PS820	SG101	SG102	
2011 年	2	2	1	0	5
2012 年	5	3	2	0	10
2013 年	4	0	2	2	8
2014 年 1~4 月	4	2	3	0	9

注: 表 4 中 PS801、PS820 为高速数据处理板卡, SG101、SG102 为光纤接口板卡。

由表 3 数据可知, IO 板卡中故障率较高的为 PS850(开关控制板)、PS868(4~20 mA 电流采集板)和 PS891(电源板)。其中 PS891 故障率最高, 在 2012 年底将板卡内部风扇改为散热片后, 故障率有所下降。PS868 板卡故障率逐年升高, 主要为测量结果与实际存在较大偏差, 会对运行带来较大影响, 尤其是对于内水冷系统, 测量偏差大可能导致冷却塔全

停,从而引起换流阀温度升高。此外,近几年 PS862(直流电流/电压采集板卡)、PS853(开关量输出板卡)和 PS900(阀控板卡)也开始出现故障,这三类板卡故障会对直流系统运行造成直接影响,需要高度重视。

由表 4 数据可知,主机 PCI 板卡中 PS801 和 SG101 故障率相对较高,且呈现逐年增长态势。

2.3 龙泉站与宜都换流站直流控保系统故障对比

表 5 为龙泉站与宜都换流站(简称为宜都站,2007 年投运)直流控保系统硬件故障情况对比。

表 5 龙泉站(龙)、宜都站(宜)直流控保硬件故障对比

Table 5 Fault comparison of HVDC control and protection system in Longquan and Yidu converter station

年份	主机		PS801		PS820		SG101		IO板		合计	
	龙	宜	龙	宜	龙	宜	龙	宜	龙	宜	龙	宜
2011年	2	2	2	0	2	0	1	1	21	2	28	5
2012年	8	2	5	0	3	0	2	1	25	0	43	3
2013年	12	3	4	0	0	0	2	0	25	1	43	4
2014年 1-4月	3	1	4	0	2	0	3	0	12	0	24	1

由表 5 中数据对比可知,龙泉站直流控保系统的硬件故障率远高于宜都站。自 2011 年以来龙泉站发生故障的板卡累计共计 111 块(主要为 I/O 板卡、PCI 板卡),其中更换 95 块;而宜都站累计更换板卡仅 5 块(PCI 板卡未更换过)。

3 龙泉站直流控保系统故障分析

根据故障统计结果,龙泉站直流控保系统故障可分为两类:1)直流控保系统设计存在缺陷;龙泉政平直流输电工程投运较早,投运时工程经验不足,以及部分设计沿用了国外同类产品不成熟的方法或理念,使得龙泉站直流控保系统的部分硬件、软件设计存在一些缺陷。2)长期运行过程中元器件损坏或故障;由于龙泉站投运时间较长,部分硬件板卡存在故障率较高的情况。以下将分别进行分析。

3.1 龙泉站直流控保系统功能及逻辑设计存在缺陷

3.1.1 控制功能与保护功能未相互独立

由于龙泉站投运时间较早,其直流控保系统未实现控制功能和保护功能完全独立,例如:其极控制保护系统 PCP MC1 主机实现极控制功能和主保护功能,PCP MC2 主机实现直流后备保护功能。后续直流工程(例如:宜都站)极控制保护系统的极控制功能和保护功能分开,由 PCP MC1 实现控制功能,PCP MC2 实现直流保护功能。控制、保护功能未独立会降低直流输电系统的运行可靠性。

3.1.2 直流保护动作模式的可靠性不足

龙泉站直流保护采用切换动作模式,其原理为:当处于 active(运行)状态的子系统保护动作后,先将

处于 standby(备用)状态的子系统切换为 active 状态,然后将原先处于 active 状态的子系统切换到 service(退出运行)状态;如果原处于 standby 状态的子系统保护也动作,则直流保护出口。

相比于“三取二”或“启动+动作”的动作模式^[14-15],切换动作模式易受到其他软件功能的影响,可能导致保护系统无法正常切换,使保护误动作。例如:龙泉站 2010 年 7 月 3 日故障就是由于极 I 直流滤波器电容器的不平衡保护频繁切换,造成了两套控制系统都退出运行,最终导致直流输电系统极 I 闭锁。此外,控制系统和保护系统未独立,也会对运行造成影响,即当直流保护进行切换时可能对直流控制系统的正常运行造成影响,反之亦然。

3.1.3 部分保护逻辑存在缺陷

龙泉站的部分保护逻辑存在一些缺陷,导致了保护的不正确动作。例如:2013 年 3 月 5 日因极 I、极 II 双极中性母线差动保护动作导致的双极闭锁事件,就与保护逻辑缺陷有关。龙泉站双极运行工况下的双极中性母线差动保护逻辑见图 1。

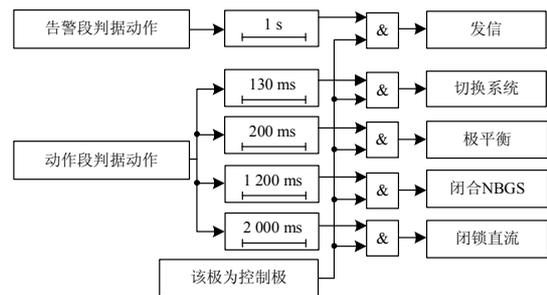


图 1 双极运行工况下的双极中性母线差动保护逻辑
Fig. 1 Bipolar neutral bus differential protection logic on bipolar operation condition

由图 1 可知,双极工况下保护动作出口经控制极判据开放。当时极 II PCP B 系统测量板卡存在故障,造成差动电流大于保护电流定值;但是由于此时极 II 为非控制极,因此直流控保系统无法发出告警信号以及动作出口,造成现场运行人员无法及时发现及处理故障。当极 II 切换为控制极后,由于保护各段动作条件均已满足,各段同时动作,不再遵循原有动作次序,从而导致了极 II 的直接闭锁;与此同时闭合了 NBGS(双极中性母线接地开关),使得极 I 通过接地极线路和 NBGS 与大地相连,造成了极 I 双极中性母线差动保护动作,闭锁极 I。

在该事件中,保护经控制极判据开放的逻辑以及动作于闭合 NBGS 的策略造成了双极相继发生误闭锁,导致了由于单一元件故障(极 II PCP B 系统测量板卡故障)引起的直流双极强迫停运,降低了直流

输电系统的运行可靠性。

3.2 龙泉站直流控保系统硬件设计存在缺陷

3.2.1 直流控保系统硬件板卡负载率过高

表 6 为龙泉站控保系统(PCP)MC1 主机硬件板卡负载率统计。

表 6 龙泉站 PCP MC1 主机板卡负载率

Table 6 Load ratio statistic of Longquan converter station

PCP MC1 integrated circuit board				
	P1PCPA1	P1PCPB1	P2PCPA1	P2PCPB1
MAIN CPU	68.0%	66.0%	69.0%	68.0%
PCIA	72.3%	72.1%	72.0%	72.3%
PCIB	65.0%	65.1%	65.2%	65.3%
PCIF	85.6%	85.4%	85.6%	85.7%

表 6 中, 龙泉站 PCP MC1 主机 CPU 负载率接近 70%(宜都站为 47%), 大大超过了《高压直流输电控制保护技术规范》中规定的换流站站控、极控主机负载率不得高于 50%的要求, 易造成主机死机。此外, PCI 板卡负载率也较高, 这也是造成板卡故障的又一原因; 其中 PCIF 板卡(通信处理板卡)负载超过 85%, 当直流输电系统在启动/停运过程中, PCIF 传输信息量会变大, 负载率较高可能会导致 PCIF 板卡出现故障, 该情况在运行中已经多次出现。

3.2.2 直流控保系统硬件板卡数量较多

龙泉站直流控保系统的硬件板卡数量较多, 龙泉站 PCP MC1 主机内共有 6 块板卡, 包括 3 块 PS801、1 块 PS820、1 块 SG101 以及 1 块 SG102。而宜都站 PCP MC1 主机仅有 4 块板卡, 3 块 PS801 和 1 块 PS820。板卡数量较多不仅使板卡发生故障的几率增加, 还加大了主机的负载率, 降低了主机运行的可靠性。

3.3 龙泉站直流控保系统硬件板卡老化

规程中对于直流输电系统二次设备运行年限没有明确的规定, 因此对直流控保系统设备以及硬件板卡更换的年限没有指导依据; 但是对于龙泉站这种运行时间较长的换流站, 其直流控保系统的部分板卡已出现老化迹象, 故障率明显上升, 已严重影响了直流输电系统的运行可靠性。

4 龙泉站直流控保系统运行维护分析与建议

4.1 龙泉站直流控保系统运行维护分析

针对龙泉站直流控保系统存在的缺陷及问题, 需要开展相应的运行维护工作, 包括: 1) 对硬件、软件存在的缺陷实施技术改造; 2) 对故障或老化的硬件板卡进行更换。但是, 由于龙泉站运行时间较长, 实施运行维护工作存在以下问题:

4.1.1 部分控保系统的技术支持工作难以实施

对于龙泉-政平、江陵-鹅城等投运时间较长的直流输电工程, 其主要设备采用国外厂家产品。以龙泉站为例, 其直流控保系统主机操作系统(RTX+XP 系统)、光电式电流互感器(简称为光 CT)等设备均由 ABB 公司开发并现场安装, 仍需 ABB 公司提供技术支持, 导致部分故障无法有效及快速解决。

4.1.2 部分设备的备品备件缺乏

龙泉站直流控保系统设备的硬件板卡中, PS 系列板卡已实现国产化, 购置较方便。但光纤接口板卡 SG101、SG102 以及光 CT 远端模块国内不生产, 备品采购周期较长, 且部分备品备件已停产, 还受涨价因素的影响。这些板卡年平均故障 2 块左右, 故障率呈上升趋势, 目前备品储备不足。备品缺乏问题已对直流控保系统可靠运行造成了严重影响。

4.2 龙泉站直流控保系统运行维护建议

4.2.1 运行维护改造方案

针对龙泉站直流控保系统存在的问题, 需要实施技术整改, 可采取的改造方案如下:

(1) 方案 1: 仅对直流极控保系统主机进行改造。包括: 1) 升级主机硬件系统, 提高主机硬件运算速度, 降低主机负载率; 2) 改造主机软件系统, 对软件做局部优化; 3) 增加一套 SCADA 服务器, 新、旧两套 SCADA 服务器间要进行实时通信。

(2) 方案 2: 对所有直流控保系统主机进行改造, 并改造原 SCADA 系统。其中, 各控保系统主机的改造内容与方案 1 中相同。

(3) 方案 3: 对直流控保系统进行整体改造。包括: 1) 将直流控保系统中的控制功能和保护功能分别配置在不同主机中; 2) 直流保护按照“三取二”或“启动+动作”的动作原则重新配置, 对不满足以上两种保护配置原则的直流测量设备全部更换; 3) 将原直流控保系统屏柜进行重新设计及安装, 原有二次电缆重新敷设; 4) 改造直流控保系统主机硬件系统, 更改硬件板卡设计、更换硬件板卡; 5) 重新设计直流控保软件系统; 6) 改造原 SCADA 系统。

4.2.2 改造方案分析

(1) 方案 1

在以上三种方案中, 方案 1 保留了直流极控保系统的原有 I/O 板卡, 且不改变直流控保系统屏柜的外部电缆和屏柜布局, 实施的工作量和费用最少, 但是存在以下缺陷:

1) 改造后龙泉站直流控保系统主机将采用国内厂家开发的操作系统, 且需要增加一套 SCADA 服务器, 新、旧 SCADA 服务器联合运行会对整个

SCADA 系统的稳定运行造成影响。

2) 如果要在改造后有效提高直流控保系统的可靠性, 需要将控制系统和保护系统独立, 且保护采用“启动+动作”动作模式。但是由于龙泉站直流场电流互感器副方绕组数量不足, 无法做到启动与动作回路相互独立。

3) 龙泉站直流控保系统采用 Hidraw 软件, 改造后将采用国产系统(Accel 软件), 且两套软件要同时使用, 两者之间的兼容性还存在一些问题。

4) 交、直流滤波器光 CT 和直流光 CT 仍然采用 ABB 公司产品, 改造后采用的国产硬件板卡与以上光 CT 无法兼容。

5) 方案 1 仅对直流极控保系统主机进行改造, 保留了直流极控保系统原有的 I/O 板卡, 几年以后这些板卡将达到其寿命期, 又需要实施改造工作。

(2) 方案 2

方案 2 的实施效果要优于方案 1, 但是缺陷 2)、4)、5) 仍然无法解决。

(3) 方案 3

方案 3 实施费用较高, 但是可以有效解决龙泉站直流控保系统存在的问题; 尤其是可根据运行中暴露的问题及运行经验对直流控保系统硬件、软件设计进行优化, 解决其原有控制保护功能及逻辑设计中存在的缺陷。此外, 虽然规程中对直流输电二次设备运行年限尚未做明确规定, 但可借鉴交流输电系统二次设备相关规定(运行年限为 12 年)^[16]。从投运至今, 龙泉站直流控保系统运行已达到 12 年, 需要对整套系统设备进行更换。

方案 3 在实施过程中要注意两个问题:

1) 采用国产化设备对直流控保系统设备进行整体改造过程中, 需涉及龙泉站交、直流系统停电方式的安排。

2) 在完成整体改造工作后, 直流控保系统要开展分系统调试和系统调试后才能重新投入运行。

5 结论

本文对龙泉站直流控保系统的运行情况、运行维护工作进行分析, 结论如下:

(1) 由于投运时间较早, 限于当时的设计制造水平以及工程经验, 使得龙泉站直流控保系统的部分功能、软件逻辑以及硬件设计存在一些缺陷, 不完全满足电网的运行要求; 此外, 由于运行时间较长, 部分设备已出现明显的老化现象, 以上因素已对龙泉-政平直流输电工程的安全运行产生了不利影响。

(2) 为解决龙泉站直流控保系统的缺陷及问题, 需要对直流控保系统设备进行整体改造。一方面采

用国产化设备替代原有国外厂家设备; 另一方面, 根据运行中暴露的问题以及工程经验, 对直流控保系统整体性能进行优化, 以有效提升龙泉站直流控保系统运行的安全性和可靠性。

随着运行时间的增加, 国内部分直流输电工程(例如: 政平换流站、江陵-鹅城直流输电工程)也将面临类似的问题, 本文中的分析结果以及对运行维护工作的建议将会对这些工程的改造工作有着直接的指导意义, 对其他直流输电工程的运行维护工作也会起到一定的参考作用。此外, 通过对龙泉站直流控保系统运行中暴露的问题进行总结, 例如: 直流控制、保护功能应尽量分布在不同主机或屏柜中, 针对直流测量设备配置、控制保护设备室空间及布置、直流电源系统等方面的设计应留有裕度, 换流站设计时要充分考虑到后期的技术改造, 核心备品备件的储备要考虑相应设备后期停产的问题等, 以上经验均会对后续直流输电工程的设计、建设以及运行维护工作起到良好的借鉴作用。

参考文献

[1] 国家电网公司运行分公司. 换流站单双极闭锁报告汇编[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[2] 中国南方电网超高压输电公司. 高压直流输电系统设备典型故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

[3] 国家电网公司运维检修部. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)及编制说明[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[4] 国家电网公司. 防止直流换流站单、双极强迫停运二十一项反事故措施[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.

[5] 朱韬析, 毛海鹏, 欧开健. 天广直流输电系统直流站控设计缺陷分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 86-89.

ZHU Taoxi, MAO Haipeng, OU Kaijian. Analysis of design defect in reactive power control strategy used in Tian-Guang HVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 86-89.

[6] 朱韬析. 提高南方电网直流保护动作可靠性的建议[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 64-67.

ZHU Taoxi. Suggestions to improve the reliability of HVDC protection in CSG[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(5): 64-67.

[7] 谢开贵, 吴韬, 黄莹, 等. 基于二分法的高压直流输电系统可靠性最优分解[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5): 149-154.

XIE Kaigui, WU Tao, HUANG Ying, et al. Reliability optimal distribution for HVDC systems using bisection method[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2010, 25(5): 149-154.
- [8] 张爱玲, 姚致清, 涂仁川, 等. 云广特高压直流输电工程站控系统的设计缺陷及改进分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 118-123.
ZHANG Ailing, YAO Zhiqing, TU Renchuan, et al. Design limitation and improvement of station control system in Yunguang UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(4): 118-123.
- [9] 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.
- [10] 束洪春, 田鑫萃, 董俊, 等. ± 800 kV 直流输电线路边界保护的模型匹配时域算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 321-327.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, DONG Jun, et al. ± 800 kV DC transmission line boundary protection using model matching algorithms in time-domain[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 321-327.
- [11] 康建爽, 曹森, 张民, 等. 高压直流输电系统双极功率调制异常分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 147-153.
KANG Jianshuang, CAO Sen, ZHANG Min, et al. Analysis of the bipolar power abnormal modulation for HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 147-153.
- [12] 庄侃沁, 武寒, 黄志龙, 等. 龙政直流双极闭锁事故华东电网频率特性分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(22): 101-104.
ZHUANG Kanqin, WU Han, HUANG Zhilong, et al. Analysis of frequency characteristics in East China due to Long-Zheng DC bi-polar block fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(22): 101-104.
- [13] 曾丽, 郑伟, 邬乾晋. 兴安直流 2012 年度运行情况分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 131-136.
ZENG Li, ZHENG Wei, WU Qianjin. Operation condition analysis of Xing-An HVDC Project in 2012[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 131-136.
- [14] 张望, 黄利军, 郝俊芳, 等. 高压直流输电控制保护系统的冗余设计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(13): 88-91.
ZHANG Wang, HUANG Lijun, HAO Junfang, et al. Redundant design of control and protection system for HVDC transmission[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(13): 88-91.
- [15] 李延龙, 杨亚璞, 李楠. 高压直流输电控制保护系统的冗余可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 59-62.
LI Yanlong, YANG Yapu, LI Nan. Reliability research for HVDC transmission control and protection system redundancy[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 59-62.
- [16] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 587-2007 微机继电保护运行管理规程[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
The People's Republic of China Development and Reform Commission. DL/T 587-2007 code for operating management of microprocessor-based relaying protection equipment[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.

收稿日期: 2014-08-21; 修回日期: 2014-11-17

作者简介:

姚其新(1980-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事高压直流输电控制保护研究和运行维护工作;

张侃君(1977-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护与自动控制的研究和运行维护工作;

E-mail: zhangzkj_7779@sina.com

韩情涛(1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事直流输电控制保护研究和运行维护工作。

(编辑 周金梅)