

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

吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 严兵, 贾轩涛, 田培涛, 范子强,
许朋见, 付艳, 许静静

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 介绍了首次应用于特高压直流输电工程的 DPS-3000 平台, 分析了基于此平台的直流保护系统的整体设计方案、测量系统设计方案、保护功能配置方案和辅助功能设计方案。介绍了国内首个以厂家为主的二次系统仿真试验情况, 对试验中发现的关键技术问题进行分析并提出解决策略。二次系统仿真试验验证了直流保护系统实施方案及其性能满足设计规范书要求, 为溪浙特高压直流输电工程的现场调试工作和顺利投产奠定了坚实的基础。

关键词: 特高压直流; DPS-3000; 直流保护; 设计方案; 策略; 仿真试验

DC protection system implementation strategy and simulation test study of ±800 kV UHVDC power transmission project from Xiluodu to Zhejiang

WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, YAN Bing, JIA Xuanta, TIAN Peitao, FAN Ziqiang,
XU Pengjian, FU Yan, XU Jingjing
(XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper introduces the DPS-3000 platform which is first used in UHVDC power transmission project, analyzes the overall design scheme, measurement system design scheme, protection function configuration scheme and auxiliary function design scheme of the DC protection system based on this platform. This paper introduces the simulation test for secondary system which is in charge by manufacturer for the first time in China, analyzes the key technical problems found in the experiment and then proposes the solution strategy. The simulation tests for secondary system verify that DC protection system implementation scheme and its performance meet the design specification's requirements, and lay down solid foundation for on-site commissioning and favoring putting into operation of the UHVDC power transmission project.

Key words: UHVDC; DPS-3000; DC protection; design scheme; strategy; simulation test

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0115-07

0 引言

溪洛渡-浙江±800 kV 特高压直流输电工程西起四川省宜宾市双龙换流站, 东至浙江省金华市金华换流站, 直流线路长度约 1 670 km, 双极直流线路 1 回, 每极 2 个 12 脉动换流器串联。额定电压±800 kV, 直流输电容量 8 000 MW, 直流额定电流 5 000 A, 计划于 2014 年 3 月份双极低端投运, 2014 年 6 月份投产双极。华中电网的双龙换流站通常为整流站运行, 华东电网的金华换流站通常为逆变站运行。

溪浙特高压直流输电工程的控制保护系统首次

采用 DPS-3000 平台。该平台是许继集团基于高压直流输电领域长期的技术积累和工程经验, 融合国内外先进技术, 自主开发的新一代成套直流控制保护系统。系统针对±1 100 kV 特高压直流、多端直流以及柔性直流等工程应用的更高技术要求开发, 与原有技术相比具有更为强大的运算能力和整体性能, 可以用于构建各种类型的直流输电工程的控制保护系统, 并具备向其他高端工业控制领域应用扩展的能力。本文详细分析了基于此平台特点的直流保护系统实施策略^[1-7], 重点阐述了系统的整体设计方案、测量系统设计方案、保护功能配置方案和辅助功能设计方案。

溪浙特高压直流输电工程的二次仿真试验首次以厂家为主，本文介绍了试验的 RTDS 建模及整体试验情况，并对试验中出现的的关键技术问题进行分析研究，然后提出解决策略并进行验证试验。

1 直流保护系统实施策略

1.1 直流保护系统整体设计方案

直流保护系统的保护区域包含高、低端换流器保护区，极母线保护区，中性母线保护区，换流器间连接保护区，直流滤波器保护区，线路保护区，

双极保护区和高、低端换流变保护区。直流保护区及主要测点如图 1 所示。

根据特高压直流保护系统设计原则和以往的经验^[8]，溪浙特高压直流保护系统配置了独立的阀组保护屏和极保护屏。高、低端阀组保护屏分别实现对高、低端换流器区内故障的保护功能；极保护屏实现对极母线保护区、中性母线保护区、换流器间连接保护区、直流滤波器保护区、线路保护区和双极保护区内故障的保护功能。

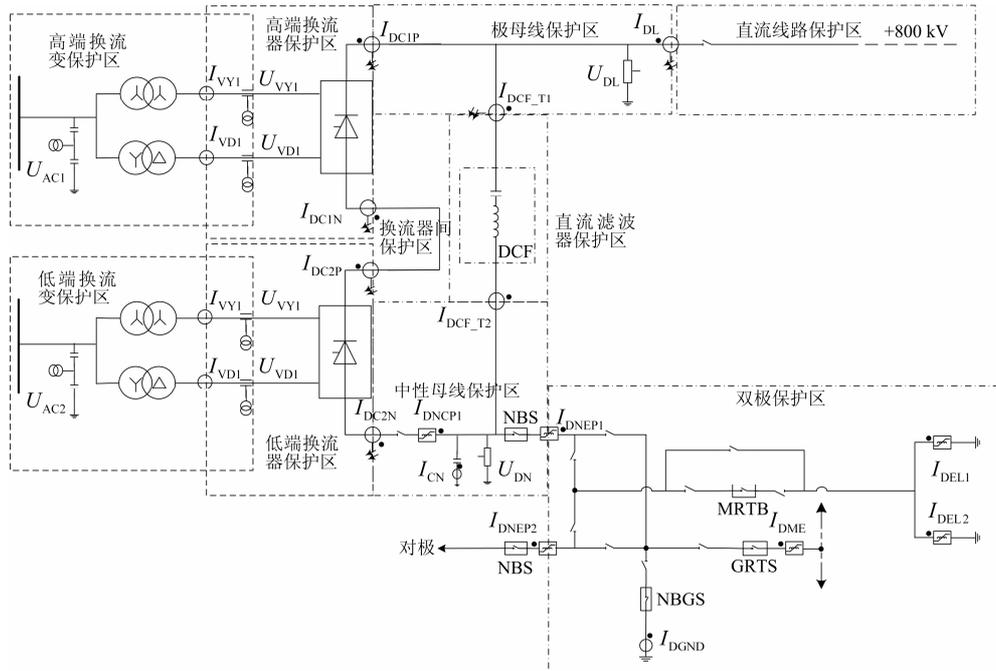


图 1 直流保护区及主要测点

Fig. 1 DC protection area and the main measuring points

高、低端换流变保护区由 SBH-100A 系列微型换流变压器成套保护装置实现保护功能，由于篇幅限制本文不作详细介绍。

阀组保护屏和极保护屏均采用三重化的冗余结构，每重保护屏对应的测量系统完全独立。测量屏将采集的信号通过 TDM 总线送至保护屏的 CPU 板卡进行逻辑判断，得到保护功能信号，再通过控制总线传至三取二逻辑装置，三取二逻辑判断后将保护动作信号通过冗余的控制总线光纤传输至控制系统，并由硬接线冗余输出开关动作信号至直流场设备，快速清除区域内的故障或不正常工况，保证直流系统的安全运行。

保护屏具有完善的自监测能力，自监测功能区分不同的故障程度和发展趋势，对于不严重的、不影响自身和其他系统正确执行功能的故障给出报

警，对严重故障或紧急故障则闭锁该系统的输出，系统发出报警并自动转为测试状态，所有的事件通过冗余的控制 LAN 上传至运行人员控制系统，保护系统的硬件自检事件通过 SER 接口屏上传。在保护功能动作出口后输出信号至故障录波屏启动录波功能。直流保护系统整体结构示意图如图 2 所示(以极保护屏为例)。

1.2 测量系统设计方案

根据溪浙工程的主接线设计图，直流场一次测量装置包含采集零磁通 CT、分压器及直流场光测量模块、交流电流电压测量等众多设备。由各种测量设备的接口要求和直流保护系统的分层结构需求，本工程的测量系统分为双极层、极层、阀组层测量，每层测量系统配置完全独立的三套屏柜，以满足保护系统三重化的设计要求。

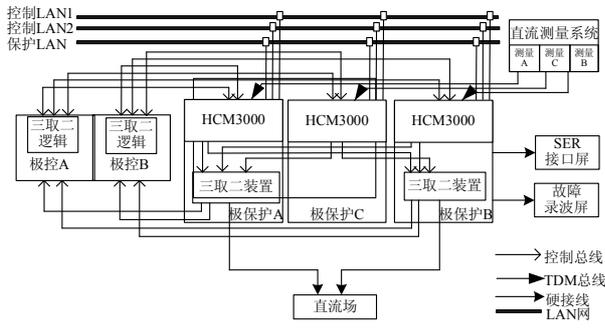


图 2 直流保护系统整体结构示意图

Fig. 2 DC protection system configuration overview

双极层测量系统主要实现对零磁通 CT 信号的采集, 由于零磁通 CT 信号输出为弱电压信号, 不能进行长距离传输, 而两个极的保护功能都需要相关信号, 且两个极的保护屏所在的控制室距离较远, 故在双极测量屏内配置两个完全独立的机箱, 将电压信号转换成数字信号, 通过 TDM 总线实现长距离传输。

极层测量系统主要实现对极区分压器、交流电流电压及直流场光测量模块的信号采集及其接口。同时通过 EOT11B 板卡接收双极区传送的零磁通信号, 与极测量信号一起打包后传送极保护屏。

阀组层测量系统主要实现对阀区交流电流电压及直流场光测量模块的信号采集及其接口。通过 EOT11B 板卡接收双极区传送的零磁通信号, 与阀组测量信号一起打包后传送阀组保护屏。

以单套测量系统为例, 其测量方案如图 3 所示。

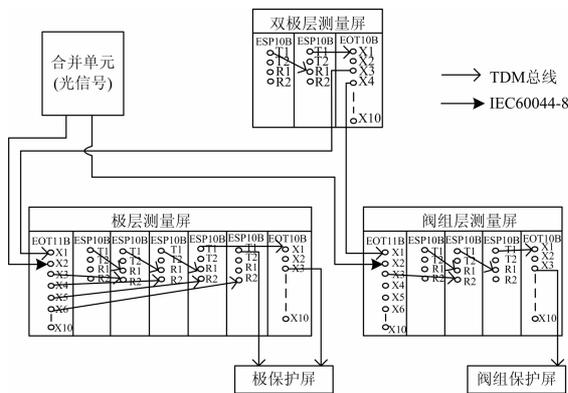


图 3 直流保护系统的测量方案示意图

Fig. 3 Measurement overview of DC protection system

溪浙工程测量系统的设计方案有以下优点:

(1) 分层式测量系统设计结构清晰、框架灵活, 符合特高压保护系统分层设计的要求。

(2) 极层测量系统和阀组层测量系统分别通过 EOT11B 板卡读取合并单元传输的信号, 能够精减

合并单元传输协议中的数据量, 明显降低保护屏中 CPU 的负荷。

1.3 保护功能配置方案

根据溪浙工程招标规范书和设计规范书的相关内容, 溪浙工程直流保护系统配置了完善的保护功能, 能够保证换流站中所有直流换流设备、区域或与直流相关的设备都能得到功能全面的保护。

由 1.1 节直流保护系统整体设计方案中的介绍而知, 直流保护配置了独立的阀组保护屏和极保护屏, 其中阀组保护屏中配置了两个 CPU 以实现阀区内故障的保护功能, 具体的功能分配如表 1 所示。

表 1 阀组保护功能分布

Table 1 Function distribution of group protection

CPU0	CPU1
对时功能	阀短路保护
内置故障录波	换相失败保护
与 HMI 通信	过流保护
与信息子站通信	阀直流差动保护
	换流变阀侧中性点偏移保护
	旁通断路器保护
	旁通对过负荷保护

极保护屏配置了 5 个 CPU 以实现极区、双极区和直流滤波器区内故障的保护功能, 具体的功能分配如表 2 所示。

表 2 极保护功能分布

Table 2 Function distribution of pole protection

CPU0	CPU1	CPU2	CPU3	CPU4
对时功能	谐波保护	双极中性母线差动保护	高压电容器不平衡保护	行波保护
内置故障录波	极母线差动保护	站接地过流保护	直流滤波器差动保护	电压突变量保护
与 HMI 通信	中性母线差动保护	站接地过流后备保护	电阻过负荷保护	线路低电压保护
与信息子站通信	极差动保护	接地极引线过负荷保护	电抗器过负荷保护	直流线路纵差保护
	接地极引线开路保护	接地极引线不平衡监视	失谐保护	
	交直流碰线保护	中性母线接地开关保护		
	中性母线转换开关保护	大地回线转换开关保护		
	直流低电压保护	金属回线转换开关保护		
	直流过电压保护	金属回线接地保护		
	阀组连接线差动保护	金属回线横差保护		
		金属回线纵差保护		

所有的保护功能均采用了成熟的保护判据，并对以往工程中出现的问题进行了修正，由于篇幅限制，对每个保护功能原理、判据和动作策略等，本文不作详细介绍，仅对本工程中遇到的特殊问题及其解决策略进行分析，详细内容见第2节。

1.4 辅助功能设计方案

溪浙工程直流保护系统主要的辅助功能有：与保护及故障录波信息管理子站的通信功能、顺序事件记录功能和内置故障录波功能等。

基于 HCM3000 平台的直流保护系统首次通过保护 LAN 网直接接入到保护及故障录波信息管理子站，通信规约为 103 规约。保护主机将直流系统保护产生的所有报警、跳闸信号通过保护子网上传至保护故障录波信息管理子站，并通过该子站向远方调度中心传送信息。

直流保护系统的顺序事件记录功能首次采用通过冗余的控制 LAN 网直接上传至运行人员控制系统的方案，不再由控制系统转发，提高了直流保护系统的独立性和可靠性。

直流系统保护配置了内置故障录波功能，录波的范围包括输入模拟量、开关量和保护处理信号，录波频率最高可达 10 kHz。内置故障录波数据采用就地存储方式，在保护主机中，配置有大容量的 SATA 硬盘，保护动作时自动触发录波，将录波数据转换成标准的 Comtrade 数据格式，可通过专用软件或 FTP 实现读取和管理。

2 二次系统仿真试验

溪浙特高压直流输电工程二次系统仿真试验首次采用以厂家为主，中国电科院监造的方式。仿真试验从 7 月 29 日正式开始至 11 月 11 日结束，共完成试验项目 1 302 项，其中直流保护试验完成 720 项。本次仿真试验仅耗时 3 个半月，以往的相关试验至少也要半年的时间，能够在工期紧张，试验项目繁多的情况下顺利完成仿真试验，得益于丰富的工程经验、科学的试验规划和所有参与人员夜以继日的努力工作。

2.1 RTDS 建模及试验方案

RTDS为实时数字仿真仪，是一种专门设计用于研究电力系统中电磁暂态现象的装置。RTDS仿真装置通过功率放大器等接口设备与直流控制保护系统的主要设备连接，构成闭环的测试系统，可以全面测试直流控制保护系统的整体功能和性能。

通过RTDS搭建的仿真试验模型^[9-11]包括交流系统等值系统、换流变压器、双12脉动阀组、交流滤波器、直流滤波器、平波电抗器、阻波器、中性

母线电容器、直流线路、接地极等元件。仿真试验中，交流场开关和直流场开关通过Profisim来模拟，其状态在RTDS、Profisim和控制保护系统间相互传输；RTDS模型的输出信号经D/A转换后，弱信号直接输出至控制保护设备，部分信号通过功率放大器实时地输出模拟量并连接至控制保护设备；控制保护系统输出控制信号或保护动作信号至RTDS，构成一个闭环系统，能够真实地反映直流输电系统的特性，图4为RTDS仿真模型的结构示意图。

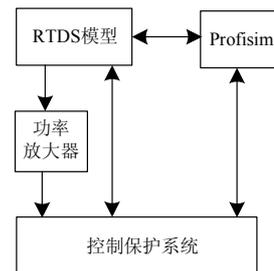


图 4 RTDS 仿真模型结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of RTDS simulation model

参加本次仿真试验的设备有双龙站、金华站直流控制设备、直流保护设备、运行人员工作站、服务器、远动设备、通信设备、事件记录设备、站GPS、保护及故障录波信息管理子站等。仿真试验共分11个大项，涉及系统自监视与切换、顺序控制与联锁、控制系统动态响应、无功控制、各种故障与保护、以往工程问题验证等内容。其中直流保护相关试验主要模拟的故障区包括：换流器区故障、极区故障、双极区故障、交流区故障、直流滤波器区故障和空载加压故障。

2.2 关键技术问题及解决策略

直流保护系统经过前期的精心设计和多次排查，在二次仿真试验过程中整体进展顺利，但也遇到几个关键的新问题，通过深入分析后提出了相应的解决策略，并经过试验验证了解决策略的正确性。

2.2.1 阀组差动保护动作策略修改

阀组差动保护检测阀区内的接地故障，为接地故障的主保护。以往工程中该保护动作后发出 S 闭锁和阀组隔离至阀控系统以闭锁故障阀组，并跳开故障阀组的交流断路器。

试验中发现在双阀组运行时，若整流侧发生阀组差动保护动作后，则故障阀组会快速移相闭锁，其后备保护极差保护无法立刻动作，非故障阀组则会移相后重启，然后继续运行。如果故障为瞬时故障，这种动作策略有利于最大限度地减小危害，维护输送功率，但如果故障为永久故障，则会在故障

点产生二次故障电流, 不符合快速切除故障的保护要求。

根据试验分析, 以快速切除故障为首要任务, 故将阀组差动保护动作策略修改为: 保护动作后闭锁故障阀组策略不变, 同时故障阀组的阀组控系统收到闭锁信号后, 通过快速控制总线将闭锁信号传至极控系统, 极控系统再通过快速控制总线将闭锁信号传给非故障阀组的阀组控系统, 快速闭锁两个阀组。

2.2.2 线路保护辅助判据逻辑优化

行波保护和电压突变量保护均为线路保护的主保护, 其中行波保护仅配置在整流侧, 电压突变量保护在两站均有效, 保护范围是本站的 I_{DL} 测点至对站的平波电抗器。两个保护的判据中用到了同一个辅助判据, 如式(1)。

$$(I_{DL} + I_Z) - (I_{DL} + I_Z)_{\text{延时}T_1} > \Delta \quad (1)$$

式中: I_{DL} 为直流线路电流; I_Z 为直流滤波器高压侧电流。

线路保护通过此辅助判据实现线路故障区内和区外的判断(以站A极1为例), 图5为直流线路故障点示意图。如在F1发生接地故障时, 故障点与站A接地极构成回路, 产生很大的故障电流, I_{DL} 将变大, 满足辅助判据, 如在F2发生接地故障时, 电流流过故障点, I_{DL} 将变小, 不满足辅助判据, 实现区内和区外故障的判断。

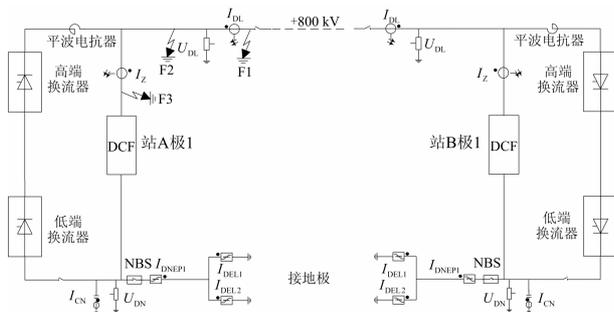


图5 直流线路故障点示意图

Fig. 5 Schematic diagram of DC line fault

但是, 原判据存在一个问题, 如在F3发生故障时, 故障点与站A接地极构成回路, 产生很大的故障电流, 虽然 I_{DL} 变小, 但 I_Z 将变大, 也会满足辅助判据, 但F3的接地故障属于直流滤波器保护范围, 线路保护不应动作, 故经过研究后将辅助判据修改为

$$I_{DL} - I_{DL_{\text{延时}T_1}} > \Delta \quad (2)$$

试验过程中发现在 F1 发生故障时, 直流滤波器形成放电回路, 在故障电流中叠加了很大的谐波

电流, 谐波周期约为 0.56 ms, 谐振幅值很大, 如图6中优化前的波形。由于 I_{DL} 中叠加了谐波电流, 造成满足式(2)的持续时间较短, 故对 I_{DL} 进行了优化处理。优化后的电流及其判据能够准确有效地实现区内和区外故障判断。

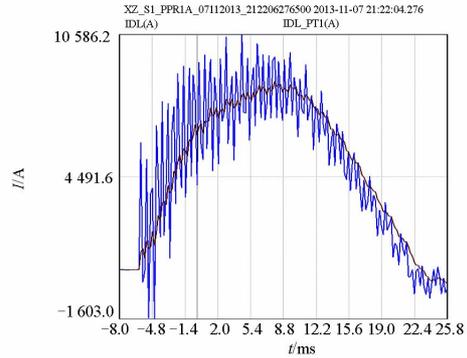


图6 优化前后的电流波形

Fig. 6 Current waveforms before and after optimization

2.2.3 NBS 开关保护优化

NBS 开关保护动作后启动 NBSF 顺控逻辑: 即合上 NBGS, 拉开故障极连接双极区的隔刀, 然后非故障极进行移相重启, 同时拉开 NBGS 开关, 实现非故障极正常运行, 故障极拉开隔刀, 隔离故障点。NBSF 顺控逻辑主要是针对双极运行, 其中一个极的 NBS 开关与 NBS 电流测点间的区域发生接地故障时, 极闭锁后, 无法完成极隔离的情况。

试验过程中发现, 在双极额定运行时, 若一个极发生 Z 闭锁后, 投旁通对和合旁路开关后会构成电流回路, 与接地极形成分流约 1 000 A, 此时执行极隔离拉开 NBS 开关时, NBS 开关将流过振荡电流, NBS 开关保护误动作, 然后误启动 NBSF 顺控逻辑。误动的原因主要是: 溪浙工程额定运行电流目前为世界之最, 且其接地极电阻比以往的工程明显偏大, 而线路电阻又较小, 导致故障极分流较大, 振荡电流较大。原保护逻辑如图7所示。

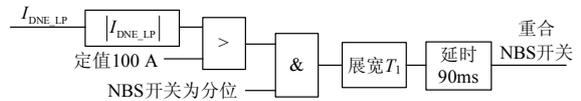


图7 NBS 开关保护逻辑图

Fig. 7 Logic diagram of NBS switch protection

图8为极隔离时NBS开关相关电流。可以看出, 极隔离拉开 NBS 开关时, NBS 开关电流 I_{DNE} 的振荡频率约为 11 Hz, 第一个振荡幅值为 500 A, 对其进行绝对值处理后, 频率翻倍, 振荡周期约为 45 ms, 由于原逻辑中展宽时间 T_1 为 10 ms, 使振荡电

流满足了持续延时 90 ms。根据波形进行分析,认为原展宽时间 10 ms 不适应新工程的相关参数,最终将其优化为 1 ms,解决了极闭锁隔离时,NBS 开关保护误动的情况;而模拟 NBS 开关与 NBS 电流测点间的区域接地故障,NBS 开关保护也能够正确动作,启动 NBSF 顺控逻辑。

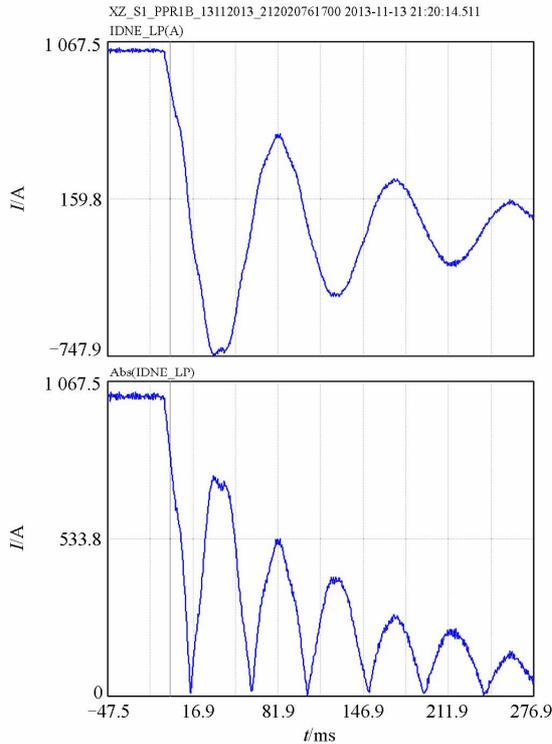


图 8 极隔离时 NBS 开关电流
Fig. 8 NBS switch current when isolation pole

2.2.4 并联融冰模式下保护逻辑修改

并联融冰模式是冬季直流线路覆冰时为了保护线路的一种特殊运行方式,采用两个极的高端阀组并联运行的方式,以实现线路流过大电流,利用电流的焦耳热效应使附着在线路上的冰融化脱落。

并联融冰模式下直流场的一次接线发生改变,部分保护功能采集的电流方向发生改变,需要特别处理,由于篇幅限制不作详细分析。金属回线纵差保护原逻辑在融冰模式下不合理,存在误动的风险,原金属回线纵差保护逻辑为

$$\|I_{DME} - I_{DME_{os}}\| > \Delta + K \cdot |I_{DME}| \quad (3)$$

式中: I_{DME} 为本站的金属回线电流; $I_{DME_{os}}$ 为对站的金属回线电流; Δ 为定值; K 为比率制动系数。

由式(3)可知,如果在金属回线运行方式下,采集的金属回线电流即为整个线路电流,公式能够实现线路接地故障的保护,但在并联融冰模式下,金属回线电流仅为极 1 的电流,而线路电流是极 1

与极 2 电流的和,故原判据不适应并联融冰方式下的线路接地保护功能,存在误动的风险。经过研究将原判据修改为

$$\|I_{DME} + I_{DNEP2} - I_{DME_{os}} + I_{DNEP2_{os}}\| > \Delta + K \cdot |I_{DME} + I_{DNEP2}| \quad (4)$$

式中: I_{DNEP2} 为极 2 NBS 开关电流; $I_{DNEP2_{os}}$ 为对站极 2 NBS 开关电流。

修改后的式(4)判据能够实现在融冰模式下对线路接地故障的有效保护,同时避免如分接头不一致造成极 1 极 2 电流不等时保护误动的情况。

2.3 相关接口试验

仿真试验在完成控保功能试验的同时,在厂内对保护及故障录波信息管理子站和合并单元相关接口进行了试验。基于 HCM3000 平台的直流保护系统首次通过保护 LAN 网直接接入到保护及故障录波信息管理子站,对通信规约及传输的内容进行了详细测试。合并单元与 HCM3000 平台测量系统的接口试验内容包括:通信协议的测试、各采集单元的通道测试、采集单元的状态监测和各通道有效位的测试等。

3 总结

本文详细分析了溪浙特高压直流输电工程中直流保护系统的实施策略,主要包括保护系统整体设计方案、测量系统的设计方案、保护功能配置方案和辅助功能设计方案。对二次仿真试验情况进行了介绍,并对试验过程中出现的关键问题进行了试验分析,提出了有效的解决方案,这些关键问题的解决保证了溪浙特高压直流输电工程保护系统现场的顺利调试和安全稳定运行。

参考文献

[1] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
ZHANG Ailing. Study of control and protection strategies for Xiluodu-Guangdong double HVDC systems erected on the same tower[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 72-76.

[2] 黄金海, 冯雷, 李曼丽, 等. 糯扎渡送电广东特高压直流输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 46-51.
HUANG Jinhai, FENG Lei, LI Manli, et al. Study of DC Filter C1 unbalance protection for Nuozhadu-Guangdong ultra high voltage direct current transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 46-51.

- [3] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 一种新型三取二逻辑装置及配置策略在高岭背靠背扩建工程中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 121-126.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. A new device with “selecting 2 from 3” logic and its configuration strategy applied in Gaoling back-to-back II project[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 121-126.
- [4] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [5] 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. High-frequency modeling of valve components in high voltage direct current converter stations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 149-154.
- [6] 范心明, 管霖, 何建明, 等. 风电接入下柔性直流输电的无源解耦控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 311-319.
FAN Xinming, GUAN Lin, HE Jianming, et al. Decoupling passivity control of VSC-HVDC connected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 311-319.
- [7] 张保会, 孔飞, 张嵩, 等. 高压直流输电线路单端暂态量保护装置的技术开发[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 179-185.
ZHANG Baohui, KONG Fei, ZHANG Song, et al. Technical development of non-unit protection devices based on transient signals for HVDC transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 179-185.
- [8] 吴庆范, 黄金海, 张爱玲, 等. 基于 HCM3000 平台的高岭扩建工程直流极保护系统实施策略[J]. 东北电力技术, 2012, 33(10): 35-40.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, ZHANG Ailing, et al. DC protection system implementation strategy of Gaoling II project based on HCM3000 platform[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(10): 35-40.
- [9] 蒲莹, 舒畅, 蒋维勇, 等. 宁东—山东±660 kV 直流输电示范工程二次系统实时仿真试验及关键问题对策[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 76-83.
PU Ying, SHU Chang, JIANG Weiyong, et al. Real-time simulation test for secondary system of ± 660 kV HVDC power transmission demonstration project from Ningdong to Shandong and countermeasures to key problems[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 76-83.
- [10] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

收稿日期: 2014-04-08; 修回日期: 2014-07-04

作者简介:

吴庆范(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高压直流输电保护软件设计及研究工作; E-mail: wuqingfan@xjgc.com

黄金海(1975-), 男, 高级工程师, 长期从事高压直流输电保护软件设计及研究工作;

张爱玲(1968-), 女, 教授级高工, 长期从事高压直流输电控制保护系统的设备开发和工程管理工作。