

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200973

高压直流监视与故障诊断主站系统的研发与应用

王立鼎¹, 詹庆才¹, 张道农², 陈红雨¹, 杨常府¹, 彭世宽¹, 赵纪元¹, 王均慧¹

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 华北电力设计院有限公司, 北京 100120)

摘要: 目前国内现有的故障信息管理主站或二次设备在线监视与分析应用系统, 都只是具备交流二次设备(保护和录波装置)的运行情况监视和分析, 还不具备对高压直流的二次设备监视和故障诊断分析的能力。为此, 设计和研发了一套高压直流二次设备监视与故障诊断主站系统, 详细介绍了该系统的软硬件结构、直流二次设备建模以及各主要功能模块的实现方案。经现场运行情况表明, 该主站系统可以在直流输电系统运行过程中发生故障和不正常运行情况下, 快速准确获知直流保护动作情况和直流故障情况, 并及时把相关故障信息推送给上级调度中心。

关键词: 高压直流; 故障诊断主站; 直流监视; 直流故障分析

Research and application of HVDC monitoring and a fault diagnosis master station system

WANG Liding¹, ZHAN Qingcai¹, ZHANG Daonong², CHEN Hongyu¹, YANG Changfu¹,
PENG Shikuan¹, ZHAO Jiyuan¹, WANG Junhui¹

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China;
2. North China Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: At present, the existing fault information management master station or secondary equipment for on-line monitoring and analysis in China only has the ability to monitor and analyze the operation of AC secondary equipment (protection and wave recording device). It does not have the ability to monitor and diagnose the secondary equipment of HVDC. Therefore, a set of monitoring and fault diagnosis master station systems for HVDC secondary equipment is designed and developed. The software and hardware structure of the system, modeling of HVDC secondary equipment and implementation scheme of the main function modules are introduced in detail. Field operation shows that the master station system can quickly and accurately determine the DC protection action and DC fault in the case of faults and abnormal operation in the operation of a DC transmission system, and timely push the relevant fault information to the superior dispatching center.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 521104170012) and the Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd. (No. 5211JX1400LB and No. 5211WZ15013Q).

Key words: high voltage; fault diagnosis master station; DC monitoring; DC fault analysis

0 引言

近年来, 高压直流输电技术发展迅速, 它不仅具备原距离、大容量、低损耗的送电能力, 且线路造价低、控制好^[1-3]。高压直流输电技术以其显著的经济效益和社会效益逐渐成为各个电力大国解

决高电压、大容量、远距离送电和电网互联的重要手段。随着高压直流输电技术在电网中发挥的作用越来越重要, 如何提高系统运行的安全性和可靠性也成为亟待解决的问题, 由于直流系统比较复杂, 分布范围广, 交直流系统之间的相互作用更为复杂, 复杂的系统发生故障的几率较大, 极易使继电保护装置和控制回路误动作, 导致直流功率传输的中断, 影响整个交直流系统的稳定运行, 给电力系统造成大的故障隐患, 进而引发更为严重的电力事故^[4-13]。

目前, 国内各调度中心部属在运行的故障信息

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(521104170012); 国网浙江省电力有限公司科技项目资助(5211JX1400LB, 5211WZ15013Q)

管理主站或二次设备在线监视与分析系统，只具备对交流二次设备(保护和录波装置)的运行情况监视和故障分析^[14-23]，都还不具备对高压直流的二次设备监视和故障诊断分析的能力。而一旦直流输电系统运行过程中发生故障和不正常运行情况，在调度中心需要快速准确获知直流保护动作情况、直流故障情况并及时把故障信息推送给上级调度中心。因此，有必要研发一套高压直流监视和故障诊断主站软件系统。

1 系统总体架构

1.1 硬件结构

本文所设计的高压直流监视和故障诊断软件系统，是作为对二次设备在线监视与分析应用功能(交流系统)的扩展与提升，一般来说不需要增加硬件设备，基本可以复用现场的前置服务器、应用服务器和历史服务器以及工作站等硬件设备，这样可以大大降低投资建设成本。系统主要部署在所辖电网内有直流输电厂站的网省级调度中心，典型的硬件结构如图 1 所示。

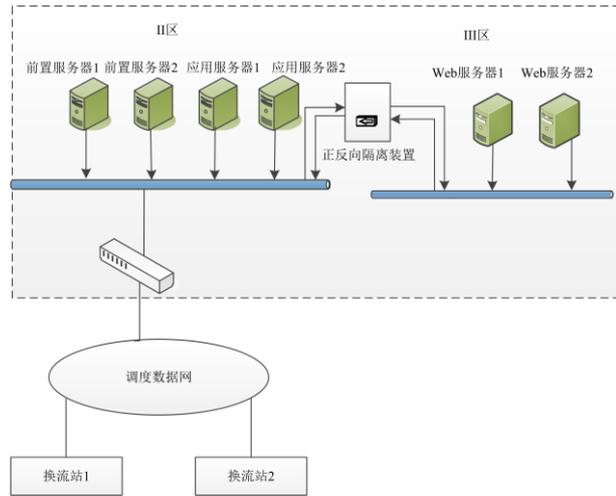


图 1 硬件结构

Fig. 1 Hardware structure diagram

1.2 软件结构

图 2 所示为本文系统设计的软件结构图。主要分为软件平台、规约通信、数据处理和人机界面展示。其中软件平台包含数据库、实时库和消息总线等。规约通信负责各类规约的数据接入，如：61850 规约、476 规约和 104 规约。数据处理环节是核心的后台模块，主要负责完成直流运行方式计算、SER 信号模式匹配、历史数据存储、直流故障诊断、直流录波文件分析和直流故障报告归档整理。加工分析处理后的各类数据和分析结果，如：实时告警信

息、直流二次设备在线监视和直流二次设备故障报告等，都会上送到人机界面展示给用户。需要特别说明的是，本文所设计的直流监视与故障诊断高级应用分析主站系统是基于北京四 CSGC3000-FIS(交流系统)主站产品扩展的，相比交流保护故障分析主站，主要的技术差异点在于二次设备建模、数据来源和故障智能分析算法等方面。



图 2 软件结构

Fig. 2 Software structure diagram

2 主要功能模块及实现方案

2.1 直流二次设备映射

高压直流输电系统有多个环节组成，包括交流区、换流变、换流器、滤波器、直流线路、接地线路、旁路以及多个换流器间连接线路等。

(1) 划分故障区域

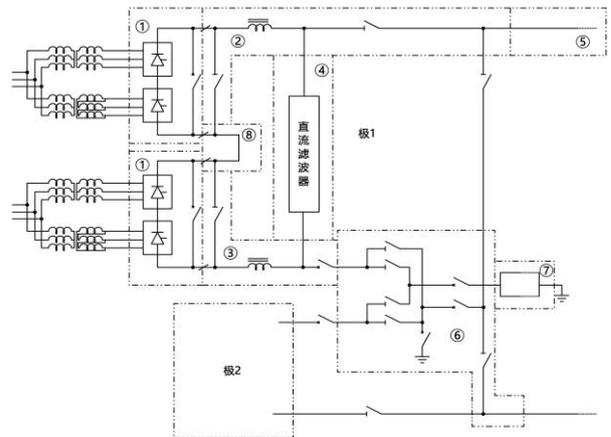


图 3 直流保护分区图

Fig. 3 DC protection partition diagram

参照《GB/T 25843-2017 ±800 kV 特高压直流输电控制与保护设备技术要求》，高压直流输电系统故

障区域划分为如下保护区,其中①是换流器保护区,②是直流极母线保护区,③是直流中性母线保护区,④是直流滤波器保护区,⑤是直流线路保护区,⑥是直流双极中性母线保护区,⑦是接地极引线保护区,⑧是换流器连接母线保护区。

(2) 建立映射关系

这里说的建立映射关系,主要包括建立高压直流输电系统故障区域和继电保护动作元件间的映射关系(如表 1 所示,以换流器故障区中各类故障举例说明,其中 M 表示强映射关系, O 表示可选映射关系, X 表示无映射关系。其中 M、O 和 X 的映射原则参照国家电网公司企业标准《Q/GDW 11355—2019 高压直流系统保护装置技术规范》)、建立高压直流输电系统运行方式和各开关位置的映射关系(如表 2 所示)以及建立继电保护动作元件和控制及保护信号的映射关系(如表 3 所示)。

2.2 直流二次设备数据来源

本系统主要的数据来源有直流控保录波文件、直流录波器的录波文件、直流控保 SER 信号、直流运行方式、行波测距结果和录波文件等。其中直流控保录波文件和直流录波器的录波文件均使用 61850 规约的目录和文件服务,不支持主动推送 RcdMade。

表 1 换流器故障区中各类故障和继电保护动作元件的映射关系

Table 1 Mapping relation of various faults and relay protection operation component in converter fault area

设备类型	保护类型	短路/阀侧 相间故障	接地 故障	阀丢失脉 冲故障	换流器开 路/不平衡
保护	阀短路保护	M	X	X	X
	换流器过流保护	O	O	X	X
	换相失败保护	O	O	O	O
	换流器差动保护	X	M	X	X
	换流器桥差保护	X	M	X	X
	换流器过压保护	X	X	X	M
	50 Hz 直流谐波保护	X	X	M	X
控制	阀闭锁	M	M	M	M
	极隔离	X	M	O	X
	跳交流断路器	M	M	M	M
	锁定交流断路器	M	M	O	X
	换流器隔离	M	M	O	X

表 2 高压直流输电系统运行方式和各开关位置的映射关系

Table 2 Mapping relation of operation mode and each switch location of HVDC transmission system

运行方式	接线方式	开关编号
双极	完整双极	
	1/2 双极	C01-C17
单极大地	3/4 双极	C18-C25
	完整单极	
单极金属	1/2 单极	C26-C35
	完整单极	
	1/2 单极	C36-C45

表 3 继电保护动作元件和继电控制及保护信号的映射关系

Table 3 Mapping relation of relay protection operation element/relay control and protection signals

继电保护信号描述	继电保护动作元件
阀短路保护 X 闭锁	阀短路保护
阀短路保护 S 闭锁	阀短路保护
阀短路保护跳闸	阀短路保护
阀短路保护隔离阀组	阀短路保护
阀组差动保护告警	换流器差动保护
阀组差动保护 S 闭锁	换流器差动保护
阀组差动保护跳闸	换流器差动保护
阀组差动保护闭锁极	换流器差动保护

直流控保 SER 信号主要通过 476 规约传输,信号为带固定格式的纯文本描述。直流运行方式信息通过 104 规约传输直流场刀闸、运行方式、极阀解闭锁状态,直流极的功率、电压、电流。行波测距结果和录波文件是通过保信子站以 61850 规约传输测距结果和录波文件。主站与子站间的数据流如图 4 所示。

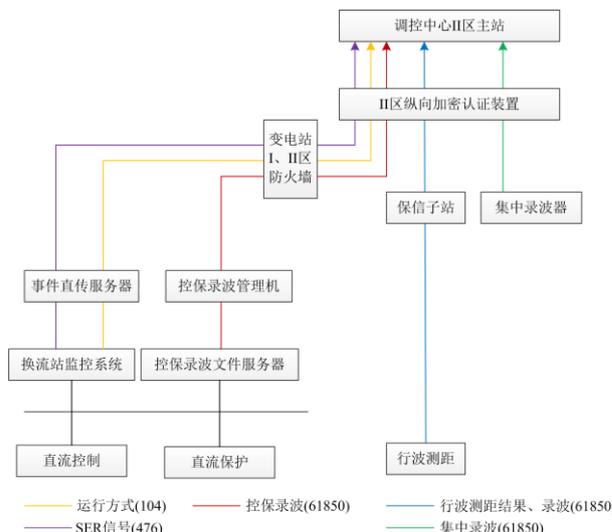


图 4 主站与子站间的数据流

Fig. 4 Data flow between master and substation

2.3 各主要功能模块的实现方案

1) 直流二次设备监视模块

如图 5 所示, 直流二次设备监视模块主要通过消息总线获取 SER 信号, 由后台程序对直流故障进行诊断分析(具体流程如图 8 所示), 在人机界面上展示运行状态、模拟量数据(包括双极的功率、电压、电流等)、运行方式和实时故障等信息。直流二次设备监视人机展示画面设计效果如图 6 和图 7 所示。

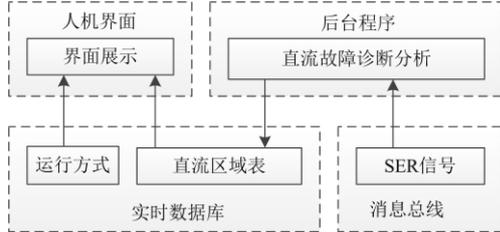


图 5 直流二次设备监视逻辑框图

Fig. 5 Logic block diagram of DC secondary equipment monitoring

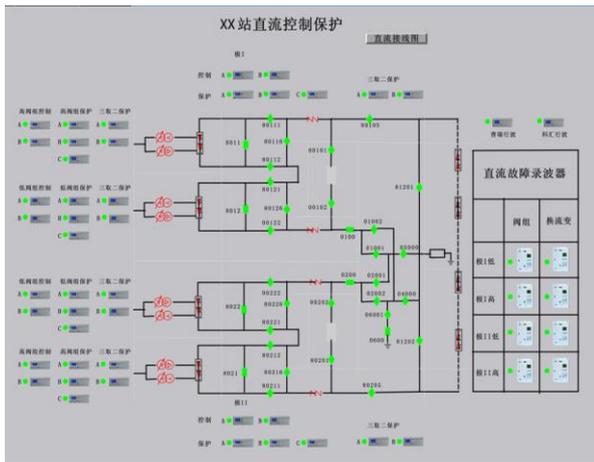


图 6 直流二次设备监视-实时数据

Fig. 6 DC secondary equipment monitoring-real time data

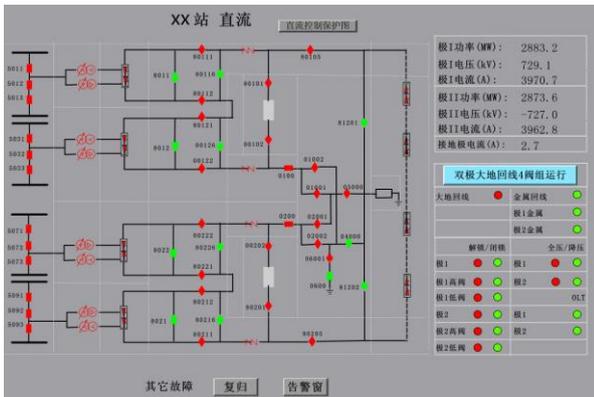


图 7 直流二次设备监视-实时运行状态

Fig. 7 DC secondary equipment monitoring-real time operation status

2) 直流故障诊断分析模块

利用 SER 信号, 进行直流故障分析的流程如下。

图 8 所示为直流故障诊断分析逻辑框图, 主要的分析步骤如下。

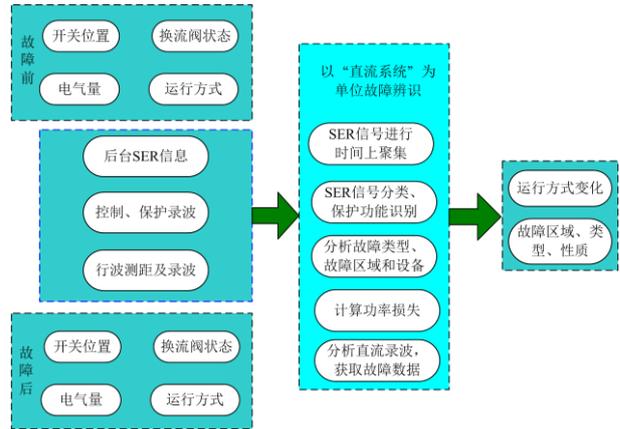


图 8 直流故障诊断分析逻辑框图

Fig. 8 Logic diagram of DC fault diagnosis and analysis

步骤 1: 直流故障分析是以“直流系统”为单位进行。

步骤 2: 对直流控保 SER 信号进行信息分类, 识别出保护功能。

步骤 3: 对 SER 信号进行时间上的聚集。

步骤 4: 依据运行方式和运行规则, 分析保护出口, 得到故障类型、故障区域和设备等。

步骤 5: 综合、提取动作结果。

步骤 6: 比对故障前后的功率, 计算功率损失。

步骤 7: 分析直流录波文件, 获取故障数据, 形成直流故障性质的结论, 记录到商用库中。

特别地, 对于上述步骤 3 所提的聚集, 举例说明其实际含义: 即在以下 SER 文本信息片段中, 从“中性母线差动保护 I 段动作”保护出口开始, 到直流控制系统的动作结果“极隔离”为止, 完成了一段 SER 信号的聚集分析。

具体信息如下:

“时间 主机 系统 等级 报警组 事件
2019-05-16 14:54:31.197 S1P1PPR1 A 报警 极中性母线差动保护 I 段动作

2019-05-16 14:54:31.200 S1P1PCP1 B 紧急 极中性母线差动保护 I 段 动作

2019-05-16 14:54:31.200 S1P1PCP1 B 紧急 三取二逻辑保护 Z 闭锁 On

2019-05-16 14:54:31.200 S1P1PCP1 B 紧急 三取二逻辑保护发出启动失灵跳交流断路器命令 On

2019-05-16 14:54:31.200 S1P1PCP1 B 紧急 三取二逻辑

断开。根据表 2 对应关系，故障前高压直流输电系统运行方式为双极中完整双极；故障后运行方式为双极中 1/2 双极；则故障报告的内容包括：故障区域为换流器故障区域；故障前运行方式为双极中完整双极；故障后运行方式为双极中 1/2 双极。

4) 直流录波分析模块

本文在原来能解析展示交流录波文件的 fiswave 软件基础上进行改造升级，使之能兼容支持直流录波文件的解析展示功能，主要涉及到的数据处理方法如下。

(1) 配置保护功能和录波通道的映射关系、数据处理模式和数据处理时间窗等参数。

(2) 依据开关信号，确定故障时刻。

(3) 依据配置参数，分析与某保护功能相关的故障模拟量和开关变位序列等信息。

3 案例测试及运行分析

本系统完成开发后，在厂内实验室环境中对各种类型故障案例进行了多轮次的模拟测试，重点验证了 14 个直流线路故障案例、8 个交流线路故障案例、16 个阀区故障案例、9 个极区故障案例、6 个双极区故障案例和 7 个直流滤波器故障案例。通过以上 6 大类案例综合对比分析认为，本文设计和开发的直流故障诊断模块所测试的故障案例覆盖面广，可以准确检测和识别出大多数实际可能会发生的直流故障。通过模拟测试结果表明，所设计的直流二次设备故障诊断和故障报告归档准确性符合预期。

浙江电网目前已建成四川溪洛渡左岸-浙江金华、宁夏灵州-浙江绍兴 2 条 ±800 kV 特高压直流输电工程，担负“西电东送”及新能源输送的任务，是西部电网与浙江电网互联的关键通道。2019 年上半年开始把该系统部署到浙江省现场实际上线试运行，经过对近半年运行情况的分析，认为该系统已经可以在直流输电系统运行过程中发生故障和正常运行情况下，快速准确获知直流保护动作情况和直流故障信息。

以某次直流系统故障为例，系统自动整理出直流故障报告，详细说明如下：如图 11 所示，主要展示内容包括故障时间、故障描述、故障前后的运行方式、行波测距距离值以及装置关键动作信号等。选择查看极 I 保护装置的录波文件，直流录波展示效果如图 12 所示。通过点击直流故障的“详情”，可以快速查阅到这次故障的运行方式、动作信号、故障区域和故障类型，同时还可以调阅到故障逻辑图，图 13 所示为直流保护原理和策略以及保护判据。图 14 所示为直流线路电压突变量保护定值、直流线路纵差保护定值和直流线路低电压保护定值等。

辑图，图 13 所示为直流保护原理和策略以及保护判据。图 14 所示为直流线路电压突变量保护定值、直流线路纵差保护定值和直流线路低电压保护定值等。



图 11 直流故障报告运行效果

Fig. 11 Operation effect of DC fault report

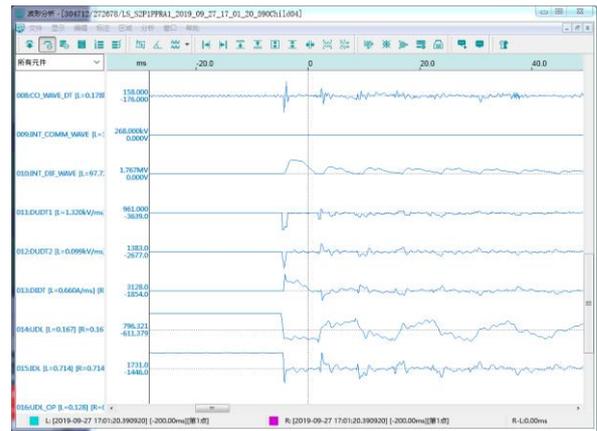


图 12 直流录波文件展示效果

Fig. 12 Display effect of DC recording files

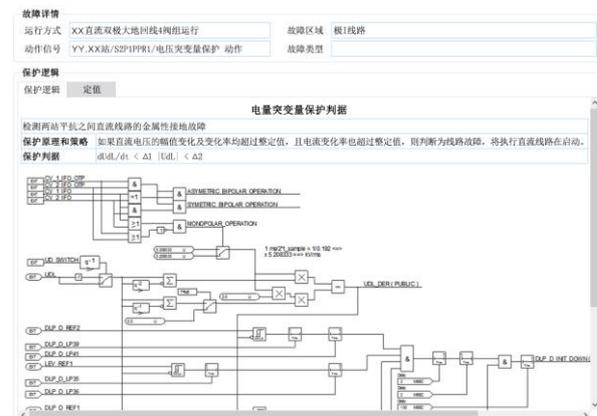


图 13 直流保护逻辑图

Fig. 13 DC protection logic diagram

故障详情					
运行方式	XX直流双极大地线+网组运行			故障区域	极1线路
动作信号	YY.XX基/S2P1PR1/电压突变量保护_动作			故障类型	
保护逻辑					
保护逻辑	定值				
保护定值 全部定值					
保护定值					
直流线路电压突变量保护					
序号	名称	值	单位	描述	
1	低电压定值	0.4	pu		
2	电压突变量定值	-1.56	pu		
直流线路纵差保护					
序号	名称	值	单位	描述	
1	报警启动定值	100	A		
2	报警比率系数	0.07			
3	报警时间定值	1000	ms		
4	动作启动定值	200	A		
5	动作比率系数	0.1			
6	动作时间定值	3000	ms		
直流线路低电压保护					
序号	名称	值	单位	描述	
1	低电压定值(全压运行)	0.35	pu		
2	低电压定值(降压运行)	0.25	pu		
3	动作时间(站网通信正常)	80	ms		

图 14 直流故障时刻保护定值

Fig. 14 Setting value of DC fault time protection

4 结语

本文详细介绍了高压直流监视与故障诊断主站系统的软硬件结构、直流二次设备建模方法和数据来源,给出了直流二次设备监视、直流故障诊断、直流故障报告归档整理以及直流录波分析展示等主要功能模块的实现思路。通过故障案例模拟测试以及浙江现场的试运行情况表明,该系统已经可以在直流输电系统运行过程中发生故障和异常运行情况下,做到快速准确获知直流保护动作情况和直流故障情况,并及时把相关故障信息推送给上级调度中心,有效解决了调度端现有二次设备监视与分析系统不具备对高压直流监视和故障诊断功能的问题。当然,本系统还存在一些不足之处,如:没有深入研究直流保护缺陷智能诊断技术和特高压直流线路故障原因辨识技术,考虑把这些技术内容研究作为后续重点工作予以推进,并通过梳理直流信息逐步完善直流保护信息输出标准化工作。

参考文献

- [1] 郑睿娜, 胡忠山, 文兆新, 等. 高压直流输电系统交流侧故障检测方法[J]. 广东电力, 2020, 33(5): 97-104.
ZHENG Ruina, HU Zhongshan, WEN Zhaoxin, et al. AC fault detection method for HVDC system[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(5): 97-104.
- [2] 杨林超, 应超楠, 徐政, 等. 大规模交直流互联网RTDS快速建模方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 192-198.
YANG Linchao, YING Chaonan, XU Zheng, et al. Rapid RTDS modeling method of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 192-198.
- [3] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力

出版社, 2004: 11-19.

- [4] 李晓栋, 徐政, 胡四全, 等. 3种混合直流输电系统的交流故障特性对比[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 228-234.
LI Xiaodong, XU Zheng, HU Siqian, et al. Comparison of AC fault characteristics among three types of hybrid HVDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 228-234.
- [5] 徐政, 肖晃天, 张哲任, 等. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [6] 马燕君, 李海锋, 王钢, 等. 同塔双回高压直流输电线路单极接地故障引发换相失败研究[J]. 广东电力, 2019, 31(11): 86-95.
MA Yanjun, LI Haifeng, WANG Gang, et al. Study on commutation failure caused by single-pole-to-ground fault on double-circuit HVDC transmission lines of the same tower[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 31(11): 86-95.
- [7] 徐政, 王世佳, 张哲任, 等. LCC-MMC混合级联型直流输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设, 2018, 39(7): 115-122.
XU Zheng, WANG Shijia, ZHANG Zheren, et al. Inverter station connection modes and control strategies of LCC-MMC hybrid HVDC systems[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(7): 115-122.
- [8] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.
- [9] 褚旭, 孙锦琛. 直流输电线路单极故障不平衡电流分析及差动保护改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 49(2): 47-56.
CHU Xu, SUN Jinchun. Analysis of single-pole fault unbalanced current and improvement of a differential protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2020, 49(2): 47-56.
- [10] 张国辉, 景柳铭, 王宾, 等. 谐波引起的高压直流输电连续换相失败抑制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 33-41.
ZHANG Guohui, JING Liuming, WANG Bin, et al. Study on HVDC consecutive commutation failures mitigation method caused by harmonics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 33-41.
- [11] 张伟晨, 熊永新, 等. 基于改进VDCOL的多馈入直流系统连续换相失败抑制剂协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery

of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.

[12] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.

[13] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.
CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[14] 祁忠, 笃竣, 张海宁, 等. 新一代继电保护及故障信息管理主站的设计与实现[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(4): 8-12.
QI Zhong, DU Jun, ZHANG Haining, et al. Design and implementation of the new generation of relay protection and fault information management station[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(4): 8-12.

[15] 王宁, 李岩军, 刘蔚, 等. 适应智能调度的继电保护故障信息系统改造[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 12-17.
WANG Ning, LI Yanjun, LIU Wei, et al. Renovation of protective relaying fault information system adaptable to smart dispatch[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 12-17.

[16] 张炜, 南东亮, 常喜强, 等. 适应智能调度的继电保护故障信息系统应用研发[J]. 电气技术, 2016, 17(5): 91-95.
ZHANG Yi, NAN Dongliang, CHANG Xiqiang, et al. Development of realization of advanced application function for protective relaying fault information system adaptable to smart dispatch[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(5): 91-95.

[17] 张华年, 郑少明, 王帆, 等. 继电保护在线监视与分析系统的功能提升与实践[J]. 电气应用, 2015, 34(增刊 2): 469-474.
ZHANG Huanian, ZHENG Shaoming, WANG Fan, et al. Improvement and application of online monitoring and analysis system for relay protection[J]. Electrotechnical Application, 2015, 34(S2): 469-474.

[18] 韩晓萍, 李佰国, 王肃, 等. 继电保护及故障监视与分析系统的设计与实现[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 16-19.
HAN Xiaoping, LI Baiguo, WANG Su, et al. Design and realization of relay protection and fault information system[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 16-19.

[19] 王跃强, 廖华兴, 袁晓青, 等. 基于保信系统的继电保护状态评价系统的开发与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 134-139.
WANG Yueqiang, LIAO Huaxing, YUAN Xiaoqing, et al. Development and application of relay protection condition evaluation system based of fault information processing system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 134-139.

[20] 陈春, 王业平, 崔毅敏, 等. 电网故障信息系统中的故障分析与判断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 97-100.
CHEN Chun, WANG Yeping, CUI Yimin, et al. Fault information analysis and judgement of power grid fault information system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(19): 97-100.

[21] 高翔, 张沛超, 章坚民. 电网故障信息系统应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[22] 王瑞雪, 林其友. 以太网 103 规约在黑龙江省保信主站和齐齐哈尔热电厂子站之间通信的工程应用[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 195-198.
WANG Ruixue, LIN Qiyu. Engineering application of Ethernet 103 protocol in Heilongjiang PRFIS main system and Qiqihaer power plant subsystem[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 195-198.

[23] MUNIAPPAN M. A comprehensive review of DC fault protection methods in HVDC transmission systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-20. DOI: 1186/s41601-020-0173-9.

收稿日期: 2020-08-11; 修回日期: 2021-03-09

作者简介:

王立鼎(1974—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力自动化; E-mail: liding.wang@sf-auto.com

詹庆才(1982—), 男, 通信作者, 高级工程师, 研究方向为电力自动化软件开发与项目管理; E-mail: zhanqingcai@sf-auto.com

张道农(1961—), 男, 教授级高级工程师/设计总工程师, 从事继电保护及安全自动装置的设计与研究以及大型工程项目的管理。E-mail: zhangdn@ncpe.com.cn

(编辑 许威)