

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190893

柔性直流输电联接变三重化保护方案研究

陈海龙, 李宝伟, 邓茂军, 张红跃, 肖志刚, 郝威, 姜东东

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 针对柔性直流输电联接变三重化保护方案及提高整组动作时间的要求, 研究了联接变保护设计、三取二装置设计。为了提高三取二装置的可靠性, 装置采用双CPU“与”出口方式, 杜绝单一器件或者单一回路的损坏引起的误动。与常规保护相比, 三重化保护系统中增加了“三取二”装置, 引起了保护整组动作时间变慢。为了提高保护的整组动作时间, 采用了联接变差动保护综合优化技术、三取二装置GOOSE组播过滤、网络风暴功能与GOOSE的接收、逻辑运算并行处理技术、启动继电器与出口继电器异步启动技术。基于上述设计, 研制的联接变保护装置性能满足GB/T-14285标准和柔性直流输电的要求。

关键词: 柔性直流输电; 联接变三重化保护; 三取二; 整组动作时间

Research on triple protection scheme of VSC-HVDC connected transformer

CHEN Hailong, LI Baowei, DENG Maojun, ZHANG Hongyue, XIAO Zhigang, HAO Wei, JIANG Dongdong
(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: The designs of the connecting transformer protection and two-out-of-three devices are studied for the triple protection scheme of an SVC-HVDC connected transformer and the requirement of enhancing group action time. In order to improve the reliability of the two-out-of-three device, the device adopts the dual CPU "and" export mode to eliminate a malfunction caused by the damage of a single device or a single circuit. Compared with conventional protection, triple protection system adds this two-out-of-three device, which causes the group action time of connecting transformer protection to be slow. In order to improve group action time, the technology of integrated optimization of differential protection, GOOSE multicast filtering of two-out-of-three devices, network storm function and GOOSE reception, parallel processing of logic operation, asynchronous start-up of start-up relay and outlet relay are adopted. Based on the above design, the performance of the transformer protection device meets the requirements of the GB/T-14285 standard and SVC-HVDC.

This work is supported the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Advanced Function Support Technology for the Third Generation Intelligent Substation" (No. 52153218002L).

Key words: SVC-HVDC; connected transformer triple protection; two out of three; group action time

0 引言

采用绝缘栅双极型晶体管(IGBT)全控型器件的柔性直流输电系统, 对直流控制和保护的响应速度的要求比传统直流输电系统至少提高一个数量级, 特别是暂时性闭锁的引入使得控制和保护的联系更加紧密^[1-2]。联接变压器作为柔性直流输电工程的核

心功率器件, 其运行可靠性是柔性直流输电系统稳定、安全且高效运行的基础。联接变压器保护可配置双重化的主、后备保护一体的电气量保护, 也可按三重化三取二配置。相对于双重化配置模式而言, 三重化配置的保护跳闸需增加三取二逻辑出口装置, 在保护原理不变情况下, 保护装置整组动作时间理论上比双重化保护装置变慢。

本文针对柔性直流输电联接变压器保护三重化保护方案及提高整组动作时间的要求, 研究了联接变压器保护的配置、三重化功能三取二、三取二装置设计, 并研制了新的联接变保护装置。装置通过

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(52153218002L)“第三代智能变电站高级功能支撑技术研究”; 中原千人计划-中原科技创新领人才项目资助(204200510007)

某检测研究院第三方检测试验, 装置性能指标满足 GB/T-14285 标准和柔性直流输电的要求^[3-4]。其中比率差动保护整组动作时间小于 30 ms(2 倍定值动作量)、差动速断整组动作时间小于 20 ms(1.5 倍定值动作量)。

1 联接变保护设计

以渝鄂柔性直流背靠背工程为例, 该工程建设南、北通道 2 座容量为 2×1250 MW 的柔性直流背靠背换流站, 柔直换流单元采用对称单极接线^[5-9],

其主接线图如图 1 所示。

渝鄂柔性直流联接变压器采用 Yn-Yn-D-11 接线方式。相对于其他柔直工程, 其变压器多了三角绕组。其作用一是三角绕组侧作为换流站站用电源, 为系统提供站用电; 二是三角绕组作为平衡绕组, 为三次谐波电流提供通道, 消除三次谐波磁通, 从而消除电压中的三次谐波分量, 保证相电动势接近于正弦波形, 从而避免相电动势波形畸变的影响^[10]。

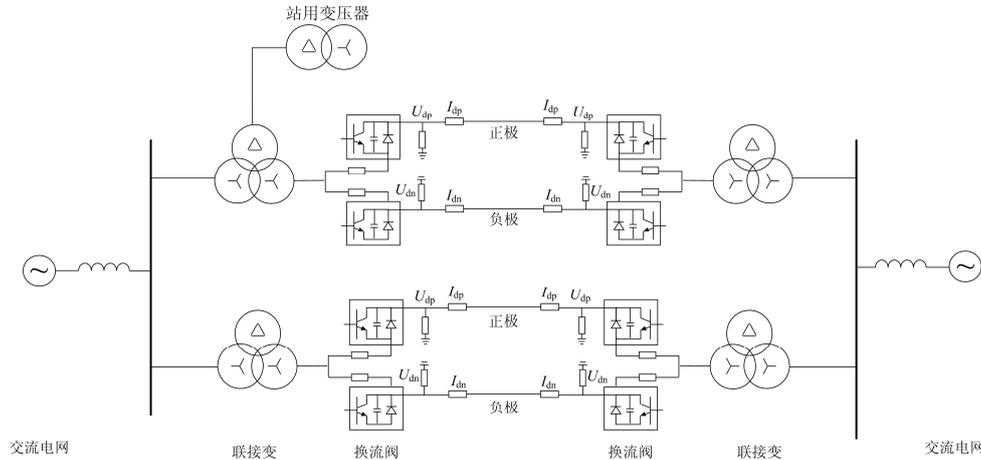


图 1 渝鄂柔性直流输电系统的主接线

Fig. 1 Main wiring of SVC-HVDC in Chongqing-Hubei Project

1.1 联接变保护配置

渝鄂联接变压器保护配置如图 2 所示。

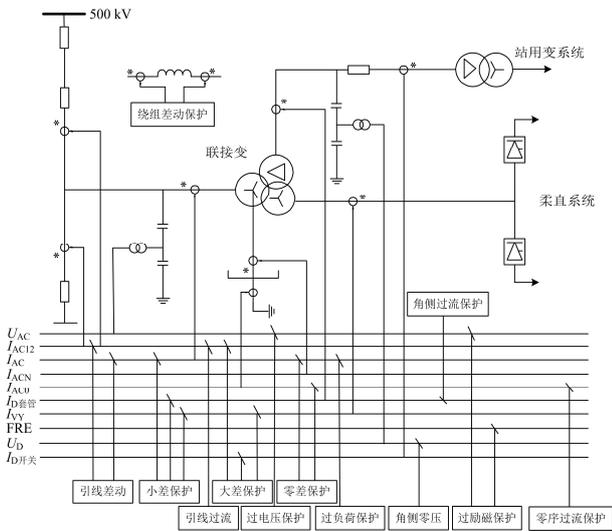


图 2 渝鄂柔性直流联接变保护配置

Fig. 2 Protection configuration of SVC-HVDC connected transformer in Chongqing-Hubei Project

渝鄂联接变压器采用 Yn-Yn-D-11 接线方式, 相应的保护配置增加了三角侧绕组差动保护、三角

侧过流保护、角侧零压保护以及联接变及引线差动保护, 其范围包含站用变开关独立 CT。

联接变压器电量保护主要包括联接变及引线差动保护、引线差动保护、联接变差动保护、网侧绕组差动保护、阀星侧绕组差动保护、角侧绕组差动保护、零序差动保护、引线过流保护、零序电流保护、过励磁保护、过电压保护、过负荷、角侧过流保护、角侧零压保护等,

柔性直流输电正常运行时接地点不会有工作电流流过, 不需要设置专门的接地极, 而当直流线路或换流器发生故障后, 整个系统将不能继续运行^[11]。因此, 联接变不配置直流饱和保护。

角侧过流保护主要作为三角绕组引出线的保护, 其电流取自三角绕组套管内绕组首端 CT, 采用相电流差。保护设置两段, 其中 I 段可以为速动段, 作为三角绕组引出线的主保护。

1.2 联接变保护功能三取二输出

在当前三重化保护系统中, 有部分保护系统采用出口三取二逻辑^[12-14]。即 A、B、C 三套保护中所有保护驱动 1 路总出口, 而不区分具体哪个保护动作, 3 套保护中有 2 套保护出口即判动作出口。

如图 3(a)所示。例如保护 A 为差动保护动作, 而保护 B 为过流保护动作, 三取二装置仍然会动作出口。

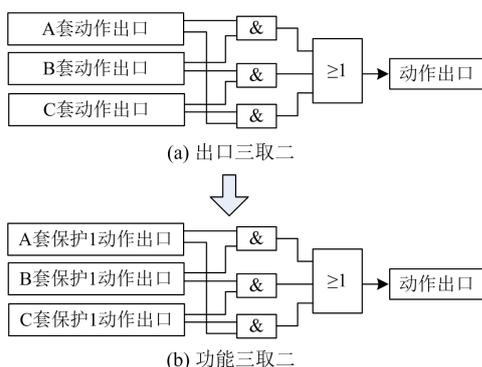


图 3 功能三取二

Fig. 3 Function of two-out-of-three

为了提高保护的可靠性, 渝鄂柔性直流联接变压器电量保护、非电量保护采用功能三取二的跳闸设计方案。即三套保护装置分别与两套“三取二”装置以功能“三取二”原理运行, 当“三取二”装置接收到三套保护系统中的至少两套保护的同一保护动作信号时, “三取二”装置动作出口, 如图 3(b)所示。

联接变压器保护装置以 GOOSE(Generic Object Oriented Substation Event)报文的方式发送所有跳闸类保护动作状态信息, 其发送的 GOOSE 信息如表 1 所示。表 1 中 GS 为 GOOSE 的简写。

表 1 保护发送的 GOOSE 信息

Table 1 GOOSE messages sent by protection device

序号	名称	序号	名称
1	大差差动速断动作 GS	11	引线过流动作 GS
2	大差比率差动动作 GS	12	零序过流动作 GS
3	变化量差动动作 GS	13	零流反时限动作 GS
4	小差差动速断动作 GS	14	过电压 I 段动作 GS
5	小差比率差动动作 GS	15	过电压 II 段动作 GS
6	零序差动动作 GS	16	反时限过励磁动作 GS
7	引线差动动作 GS	17	角侧过流 I 段动作 GS
8	网绕差动作 GS	18	角侧过流 II 段动作 GS
9	阀星绕差动作 GS	19	保护动作 GS
10	角侧绕差动作 GS	20	差动总启动 GS

2 三取二装置设计

2.1 “三取二”逻辑

三重化保护系统结构如图 4 所示。

图 4 中, 保护装置采用常规电缆采样、光纤 GOOSE 跳闸模式。三套电量保护独立采集电流、电压信号、开关量信号, 进行故障逻辑判断, 并将判断的结果以 GOOSE 方式分别发送至两套三取二装置。每套保护均采用两路光纤直连的方式与双重

化配置的“三取二”装置进行通信。每套三取二装置均以电缆连接的方式出口实现跳联接变网侧断路器。同时每套“三取二”装置以光纤方式与每套阀控系统传输阀闭锁及切换阀控系统 GOOSE 信号。

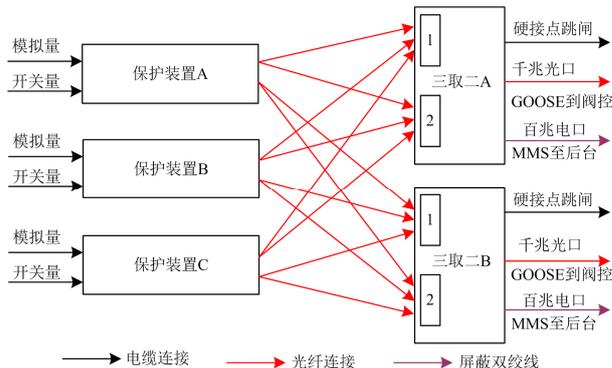


图 4 三重化保护系统图

Fig. 4 Triple protection system diagram

联接变保护装置、三取二装置都能直接与换流站综合自动化系统联接, 支持 IEC 61850 规约。

三取二逻辑如图 5 所示。

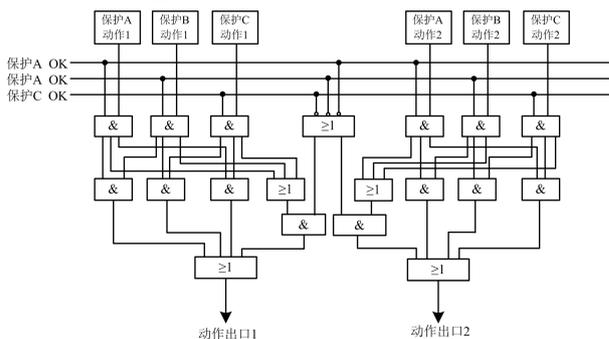


图 5 三取二逻辑

Fig. 5 Two-out-of-three logic

当无保护装置失电、装置故障、装置检修、光纤断链等信号时, 为保护 OK 状态; 当有保护装置失电、装置故障、装置检修、光纤断链等任一信号时, 为保护不 OK 状态。

联接变保护配置有 3 套保护装置 A、B 和 C, 在保护装置 OK 状态时, 3 套保护中至少有 2 套检测到同一保护动作, 保护才动作出口; 如果其中 1 套保护装置不 OK, 则其余 2 套保护装置任何一套动作都会动作出口; 如果其中 2 套保护装置不 OK, 则另 1 套保护装置动作时直接出口, 即“三取二”逻辑^[15-17]。具体逻辑如图 5 所示。

由于出口采用“三取二”逻辑, 且 3 套保护装置间无任何电气联系, 相互独立, 单套或者 2 套保护装置故障均不影响联接变保护的正常运行, 提高了保护的可靠性。如果单套保护装置由于软件故障、

硬件故障或者外回路错误导致保护误动作，保护不会误出口，可以有效地防止单一器件或者单一回路的损坏引起的误动。

三重化保护系统的检修、调试与常规保护存在很大差异，保护装置 OK 状态对保护系统的影响如表 2 所示。

2.2 三取二双重化设计

“三取二”装置作为保护系统的最后环节，为提高可靠性，装置采用双 CPU “与” 出口方式，装置采用双回路采集和跳闸设计方案，该方案将多路相同数据源接入，并进行逻辑判别，增强可靠性的基础上再次提升，将数据源和保护跳闸设计成双回路，独立采集独立出口，杜绝单一器件或者单一回路的损坏引起的误动。三取二装置双重化设计如图 6 所示。在工程应用时，第一出口模块和第二出口

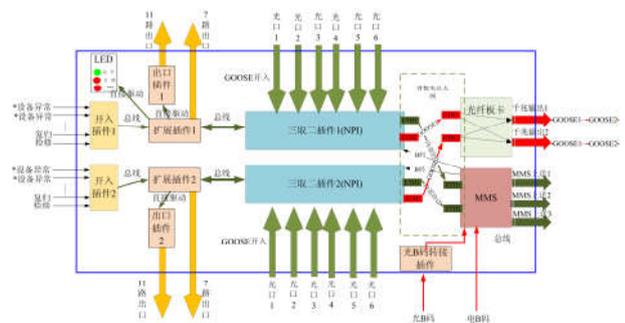


图 6 三取二装置双重化设计

Fig. 6 Dual design of two-out-of-three device

模块的开出需要串联输出，实现双 CPU “与” 出口方式。

3 整组动作时间优化设计

相对于双重化配置装置而言，三重化保护系统中增加了“三取二”装置，在保护原理不变情况下，保护整组动作时间理论上比双重化保护装置直接跳闸变慢^[18-20]。

3.1 保护时延分析

整组动作时间是指从故障发生到保护动作跳闸接点闭合的时间。常规保护整组动作时间就是保护装置自身的动作时间，三重化保护整组动作时间包括保护装置 GOOSE 动作时间、GOOSE 信号发送接收时间、三取二装置动作时间。三重化保护系统由于增加了三取二装置，从而导致三重化保护整组动作时间变长，具体如图 7 所示。

三重化保护系统和常规保护相比，动作时间一般会增加 2~3 ms，主要体现在以下几个方面：

- 1) 保护装置 GOOSE 信息发送环节：三重化保护装置在逻辑算法环节增加了 GOOSE 信息处理、发送时间。
- 2) 三取二装置 GOOSE 信息接收环节：三取二装置增加了 GOOSE 信息内部信息缓冲、接收、处理时间。
- 3) 三取二装置逻辑处理环节：三取二装置在逻辑运算环节增加了逻辑处理时间。

表 2 保护与三取二装置状态

Table 2 Protection and status of two-out-of-three device

序号	保护 A 状态	保护 B 状态	保护 C 状态	逻辑	三取二 A 状态	三取二 B 状态	与阀控 A 状态	与阀控 B 状态
1	不 OK	动作	动作	二取一	出口	出口	有效	有效
2	不 OK	不 OK	动作	二取一	出口	出口	有效	有效
3	动作	动作	不 OK	二取一	出口	出口	有效	有效
4	动作	不 OK	不 OK	二取一	出口	出口	有效	有效
5	保护 1 动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
6	保护 1 动作	OK 不动作	保护 1 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
7	保护 1 动作	保护 1 动作	OK 不动作	三取二	出口	出口	有效	有效
8	OK 不动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
9	OK 不动作	OK 不动作	保护 1 动作	三取二	不出口	不出口	无效	无效
10	OK 不动作	保护 1 动作	OK 不动作	三取二	不出口	不出口	无效	无效
11	保护 1 动作	OK 不动作	OK 不动作	三取二	不出口	不出口	无效	无效
12	保护 1 动作	保护 1 动作	保护 2 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
13	保护 1 动作	保护 2 动作	保护 1 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
14	保护 2 动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	出口	出口	有效	有效
15	保护 1 动作	保护 2 动作	保护 3 动作	三取二	不出口	不出口	无效	无效
16	保护 1 动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	检修(不出口)	出口	无效	有效
17	保护 1 动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	出口	检修(不出口)	有效	无效
18	保护 1 动作	保护 1 动作	保护 1 动作	三取二	检修(不出口)	检修(不出口)	无效	无效

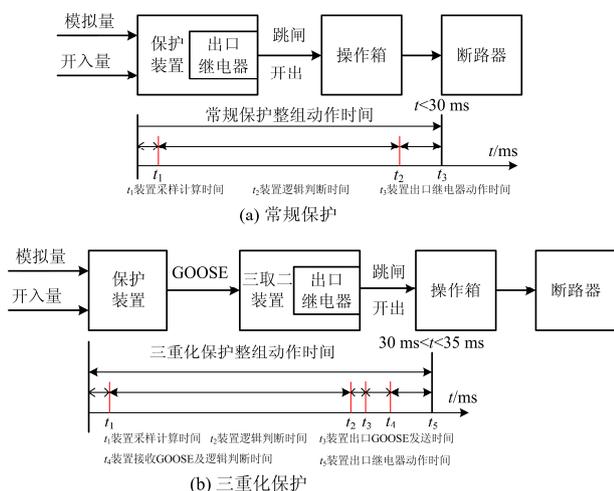


图 7 常规保护、三重化保护动作时间对比

Fig. 7 Comparison of operation time between conventional protection and triple protection

3.2 三重化保护装置优化设计

1) 差动保护优化设计

联接变保护共配置 7 套差动保护,对差动保护、CT 断线保护的模拟量数据计算、逻辑判断进行合并优化,减少了大量数据、逻辑状态重复计算;同时合并统筹 7 套差动保护的定值,联接变及引线差动保护、联接变差动保护共用定值;网侧绕组差动保护、阀侧绕组差动保护、角侧绕组差动保护、零序差动保护共用定值。通过优化各数据的综合利用,简化装置的定值,运行时间可减少 0.5 ms 左右。同时增加差动保护启动 GOOSE 信号,提前启动三取二装置启动继电器。

2) GOOSE 接收处理延时优化

三取二装置动作时间主要包括:GOOSE 接收处理延时、逻辑判断时间和继电器动作时间。GOOSE 报文接收处理延时与装置处理能力有关。三取二装置 GOOSE 报文接收与智能变电站中智能终端类似,借鉴智能终端设计经验^[21-25],三取二装置采用 FPGA 与 CPU 并行处理技术,FPGA 完成 GOOSE 组播过滤、网络风暴抑制功能,CPU 完成 GOOSE 接收、逻辑运算功能。采用该技术后,在 GOOSE 接收处理、逻辑运算环节可节省 0.3 ms 左右。

3) 出口启动继电器优化设计

为了提高装置出口的可靠性,三取二装置出口回路采用启动继电器+出口继电器模式。三取二装置收到保护跳闸命令后,需要同时触发启动继电器和出口继电器,三取二装置继电器出口时间为 2 个继电器的动作时间之和,增加了出口时间。其回路如图 8 所示。

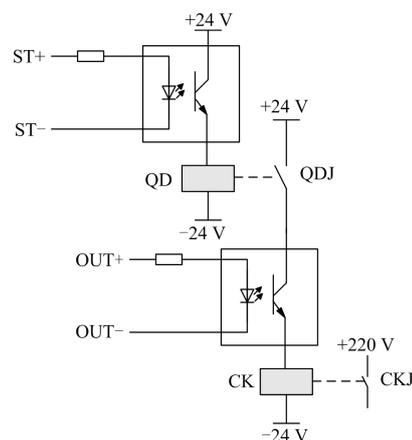


图 8 三取二装置出口回路示意图

Fig. 8 Outlet circuit diagram of two-out-of-three device

为了减少三取二装置的出口动作时间,装置的启动继电器和出口继电器采用异步启动方式,启动继电器采用差动保护的启动信号启动,出口继电器采用差动保护的启动信号启动,启动信号一般快于动作信号至少 5 ms 以上,这样能够保证启动继电器提前启动,减少动作时启动继电器的动作时间,启动继电器正常动作时间 2 ms 左右,通过异步启动方式,可以减少三取二装置动作时间 2 ms 左右。

采用上述的 3 项优化措施后,三重化保护装置整组动作时间可减少 2~3 ms。

4) 测试验证

基于上述优化设计的 PAC-886 微机换流变保护装置和 PAC-839 开关量跳闸接口装置通过某检测研究院第三方检测试验及保护装置整组动作时间专项测试,整组动作时间专项试验数据见表 3 所示。

表 3 整组动作时间

Table 3 Group action time

保护名称	三取二方式 结果/ms	二取一方式 结果/ms	一取一方式 结果/ms
大差差动速断	18.5	18.4	18.8
大差比率差动	28.1	28.6	28.1
引线差动	24.7	24.4	25.3
Y/Y 小差差动速断	18.5	19.3	18.6
Y/Y 小差比率差动	27.2	27.6	27.9
Y/Y 零序差动	27.6	28.3	28.2
Y/Y 网侧绕组差动	27.6	26.9	27.6
Y/Y 阀侧绕组差动	28	27.7	28.0
Y/D 小差差动速断	16.9	17.4	17.7
Y/D 小差比率差动	27	26.0	27.3
Y/D 零序差动	28	27.1	27.8
Y/D 网侧绕组差动	24	25.2	24.7
Y/D 阀侧绕组差动	24.7	25.1	26.1

注:表中数据来源某检测研究院 JW182798 报告。

从表 3 可以看出, 比率差动保护整组动作时间小于 30 ms(2 倍定值动作量)、差动速断整组动作时间小于 20 ms(1.5 倍定值动作量)。装置速动性能满足 GB/T-14285 标准和柔性直流输电的要求。

4 结论

本文针对柔性直流输电联接变压器保护三重化保护方案及提高整组动作时间的要求, 研究了联接变压器保护的配置、三重化功能三取二、三取二装置设计。为了提高三取二装置的可靠性, 装置采用双 CPU “与” 出口方式; 为了提高保护的整组动作时间, 采用了联接变差动保护综合优化技术、三取二装置 GOOSE 组播过滤、网络风暴功能与 GOOSE 接收、逻辑运算并行处理技术、启动继电器与出口继电器异步启动技术。基于上述设计, 研制的联接变保护装置通过某检测研究院第三方检测试验, 其中比率差动保护整组动作时间小于 30 ms(2 倍定值动作量)、差动速断整组动作时间小于 20 ms(1.5 倍定值动作量)。装置性能满足 GB/T-14285 标准和柔性直流输电的要求。

参考文献

[1] 汤广福, 贺之渊, 庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.

[2] 潘晓杰, 张顺, 文汀, 等. 渝鄂异步互联对华中电网运行特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 157-162.
PAN Xiaojie, ZHANG Shun, WEN Ting, et al. Operation characteristic analysis of Central China Power Grid in unsynchronized interconnection of Chongqing and Hubei Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 157-162.

[3] 继电保护和安全自动装置技术规程: GB/T 14285—2006[S].

[4] 柔性直流输电控制与保护设备技术要求: GB/T 35745—2017[S].

[5] 李笑倩, 刘文华, 宋强, 等. 一种具备直流清除能力的 MMC 换流器改进拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2014, 36(34): 5051-5059.
LI Xiaolian, LIU Wenhua, SONG Qiang, et al. An enhanced MMC topology with DC fault clearance capability[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 36(34): 5051-5059.

[6] 徐政, 薛英林, 张哲任. 大容量架空线柔性直流输电关键技术及前景展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5051-5062.
XU Zheng, XUE Yinglin, ZHANG Zheren. VSC-HVDC technology suitable for bulk power overhead line transmission[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5051-5062.

[7] 萧展辉, 蔡微, 黄剑文, 等. MMC 型多端柔性直流配电系统协同控制与故障电流抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 103-110.
XIAO Zhanhui, CAI Wei, HUANG Jianwen, et al. Coordinate control scheme for modular multilevel converter based multi-terminal DC distribution power systems and circuit suppression during faults[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 103-110.

[8] 刘建, 邵能灵, 范春菊, 等. 柔性直流输电线路故障处理与保护技术评述[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 158-165.
LIU Jian, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Comments on fault handling and protection technology for VSCHVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 158-165.

[9] 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 VCS-HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 59-65.

[10] 许时章. 电机学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

[11] 朱琳, 寇龙泽, 刘栋. 渝鄂柔性直流输电交直流动态特性及控制保护策略研究[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(4): 454-460.
ZHU Lin, KOU Longze, LIU Dong. Research on transient characteristics of AC-DC system and control and protection strategy for Chongqing-Hubei Project[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(4): 454-460.

[12] 杨光亮, 邵能灵, 郑晓冬, 等. ±800 kV 特高压直流输电控制保护系统分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 3277-3283.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Discussion of ±800 kV UHV DC transmission control and protection system[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 3277-3283.

[13] 张楠, 陈欢, 国建宝, 等. 贵广、天广工程直流保护系统“三取二”逻辑比较[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 37-39.
ZHANG Nan, CHEN Huan, GUO Jianbao, et al. Comparison of "two out of three" DC protection logic

- between Guizhou-Guangdong and Tianshengqiao-Guangzhou HVDC projects[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(2): 37-39.
- [14] 郝跃东, 何露芽, 沈志刚. 直流保护冗余配置的“三取二”逻辑实现方法比较[J]. 南方电网技术, 2012, 6(6): 15-18.
HAO Yuedong, HE Luya, SHEN Zhigang. The comparison of two out-of-three logic implementations in DC protection redundant configuration[J]. Southern Power System Technology, 2012, 6(6): 15-18.
- [15] 徐浩, 侍乔明, 欧阳帆, 等. 祁韶±800 kV 特高压直流输电工程两种故障重启逻辑研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 143-150.
XU Hao, SHI Qiaoming, OUYANG Fan, et al. Research on two kinds of fault restart logic of Qi-shao ±800 kV UHVDC project[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 143-150.
- [16] 杨光亮, 郇能灵, 郑晓冬, 等. 高压直流输电控制保护多重化分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(15): 85-90.
YANG Guangliang, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Modular redundancy analysis of HVDC control and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(15): 85-90.
- [17] 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.
- [18] 黄灿, 肖驰夫, 方毅, 等. 智能变电站中采样值传输延时的处理[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 5-10.
HUANG Can, XIAO Chifu, FANG Yi, et al. A method to deal with packet transfer delay of sampled value in smart substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 5-10.
- [19] 刘海涛, 黄鸣宇, 赵旭阳. 智能变电站合并单元时间性能测试问题的研究[J]. 华东电力, 2013, 41(1): 119-121.
LIU Haitao, HUANG Mingyu, ZHAO Xuyang. Time measurement for merging units of intelligent substation[J]. East China Electric Power, 2013, 41(1): 119-121.
- [20] 智能变电站合并单元技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2014.
- [21] 宋漩坤, 李敬如, 肖智宏, 等. 新一代智能变电站整体设计方案[J]. 电力建设, 2011, 33(11): 1-6.
SONG Xuankun, LI Jingru, XIAO Zhihong, et al. Overall design scheme for new generation intelligent substation[J]. Electric Power Construction, 2011, 33(11): 1-6.
- [22] 欧阳帆, 朱维钧, 陈宏, 等. 变电站合并单元测试设备校验系统及其实现[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 1-7.
OUYANG Fan, ZHU Weijun, CHEN Hong, et al. Calibration system for substation merging unit test equipment and its implementation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 1-7.
- [23] 牟涛, 任志航, 樊占峰, 等. 基于高性能 FPGA 的合并单元设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 128-132.
MU Tao, REN Zhihang, FAN Zhanfeng, et al. Realization of the critical technologies merging unit based on FPGA[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 128-132.
- [24] 王松, 裘愉涛, 侯伟红, 等. 智能变电站继电保护 GOOSE 网络跳闸探讨[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(18): 140-144.
WANG Song, QIU Yutao, HOU Weihong, et al. Discussion of GOOSE network trip mode for smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(18): 140-144.
- [25] 李旭, 倪传坤, 李宝伟, 等. 基于自适应采样算法及数据处理的过程层设备时延优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 164-170.
LI Xu, NI Chuankun, LI Baowei, et al. Optimal design of process level device delay based on self-adaption sampling algorithm and data processing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 164-170.

收稿日期: 2019-07-25; 修回日期: 2019-09-26

作者简介:

陈海龙(1975—), 男, 通信作者, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 124951470@qq.com

李宝伟(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护。

(编辑 周金梅)