

DOI: 10.7667/PSPC151246

特高压直流双极区直流保护系统可靠性研究

李俊霞, 严兵, 张爱玲, 吴庆范, 郝俊芳

(许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 双极区直流保护系统误动将导致双极强迫停运的严重后果, 提高双极直流保护系统的可靠性是重要的研究内容。分析了特高压直流双极区直流保护系统的两种配置策略, 建立了各配置策略的可靠性分析模型, 推导出其可靠性公式和可靠性曲线图, 结果表明集成到极保护系统的三重化配置策略具有更高的可靠性。阐述了双极区直流保护功能和动作策略, 分析了双极中性母线差动保护、NBSF 顺控逻辑和金属回线使能信号等关键技术问题并提出了优化方案。目前, 部分优化方案已在多个特高压直流输电系统中实施, 效果良好。最新的优化方案将在新建工程中实施。

关键词: 特高压直流; 双极区; 直流保护; 三重化; 可靠性; 策略

Reliability research for UHVDC bipolar area DC protection system

LI Junxia, YAN Bing, ZHANG Ailing, WU Qingfan, HAO Junfang
(XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: Bipolar area DC protection system malfunction will lead to serious consequences bipolar forced block, so it is important to improve bipolar DC protection system reliability. This paper analyzes two configuration strategies of UHVDC bipolar area DC protection system, establishes a reliability model of the configuration strategy, and derives its reliability formula and reliability graphs. The results show that the protection system integrated into a triple of configuring cubicles has greater reliability. It describes the bipolar protection functions and action strategies, analyzes bipolar neutral bus differential protection, NBSF sequence logic and metal loops enable signal and other key technical problems and then proposes the optimization strategy. At present, part of the optimization program is implemented in multiple UHVDC power transmission system, and then system operates well after adopting the measure. The latest optimization program will be implemented in the new project.

Key words: UHVDC; bipolar area; DC protection; triplicate; reliability; strategy

0 引言

特高压直流双极区是单极大地回线运行方式、单极金属回线运行方式和双极大地回线运行方式均需要运行的公共区域, 即为各种运行方式必用的区域。双极区发生严重故障或保护系统发生误动, 将导致双极强迫停运的严重后果。现有我国在运特高压直流输电工程已达 6 个, 在建 1 个, 按照国家电网规划未来还将建设 20 多个。目前在运特高压直流输电工程传输功率最高达 8 400 MW, 如发生双极强迫闭锁造成大功率损失时, 对电网的安全稳定运行将产生重大隐患。

本文首先分析了特高压直流双极区直流保护系统的配置策略^[1-7], 即工程中常用的三重化独立双极

保护屏和集成到极保护屏中的配置方案, 对该两种方案进行了可靠性模型的推导及分析, 其可靠性公式结果表明第二种方案具有更高的可靠性。

阐述了特高压双极区直流保护功能配置和动作策略, 对工程中出现的多个关键问题提出了优化方案, 主要包含: 双极中性母线差动保护、NBSF 顺控逻辑、运行方式及金属回线使能信号等关键问题。部分优化方案已对在运工程进行整改, 部分方案将在后续新建工程中实施。

1 特高压直流双极区直流保护系统配置策略及可靠性分析

1.1 双极区直流保护系统配置策略

特高压直流保护分区如图 1 所示, 特高压直流

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, 换流器间连接线保护区, 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。

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、直流线路保护区内故障的保护功能。

双极保护区内故障目前一般有两种配置方案, 三重化的独立双极保护屏配置方案和集成到各极保护屏中的配置方案, 各方案详见内容如下。

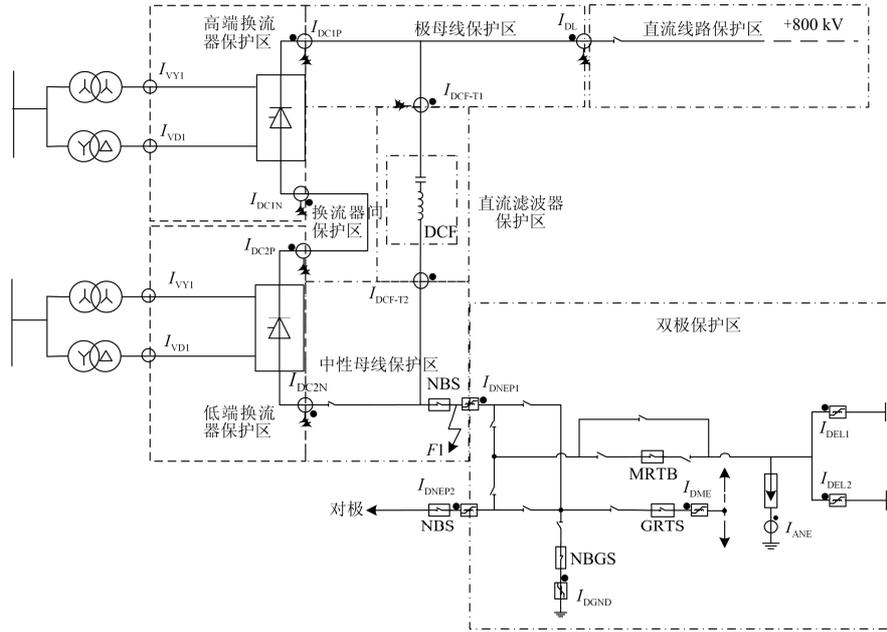


图 1 特高压直流保护区域示意图

Fig. 1 Diagram of UHVDC protection area

1.1.1 三重化的双极保护屏配置方案

三重化的双极保护屏配置方案如图 2 所示, 双极区保护功能配置到独立的三重化双极保护屏。各保护功能首先经过 CPU 板卡进行逻辑判断, 得到保护功能信号, 再将保护功能信号传至三取二逻辑装置, 三取二逻辑判断后最终输出有效的保护动作信号, 闭锁系统。

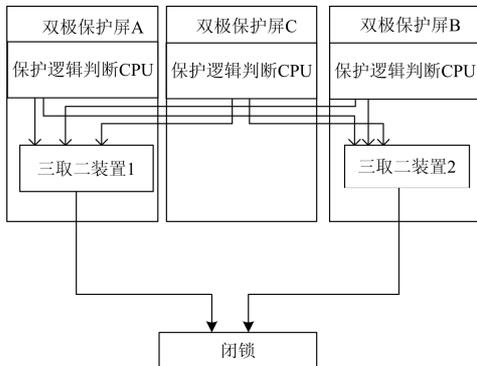


图 2 三重化的双极保护屏配置方案

Fig. 2 Triplicate configuration for bipolar protection cubicles

1.1.2 集成到各极保护屏中的配置方案

集成到各极保护屏中配置方案如图 3 所示, 双极区保护功能分别集成到三重化各极保护屏。各保护功能首先经过 CPU 板卡进行逻辑判断, 得到保护功能信号, 再将保护功能信号传至三取二逻辑装置, 三取二逻辑判断后最终输出有效的保护动作信号, 闭锁系统。

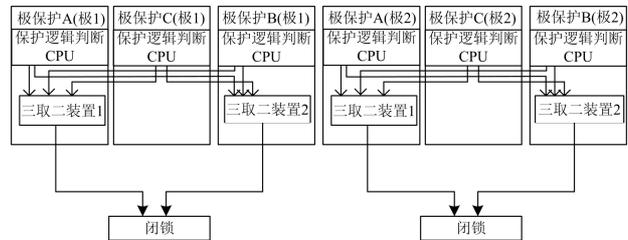


图 3 集成到各极保护屏中配置方案

Fig. 3 Integrated into pole protection cubicles configuration

1.2 可靠性模型推导及分析

为了深入分析双极区直流保护系统各配置方案的可靠性, 首先建立各配置方案的逻辑示意图, 并

根据逻辑示意图建立其可靠性分析模型，推导出各配置方案的可靠性公式及其计算结果。详细内容如下。

三重化的双极保护屏配置方案和集成到各极保护屏中的配置方案的逻辑示意图如图4和图5所示。

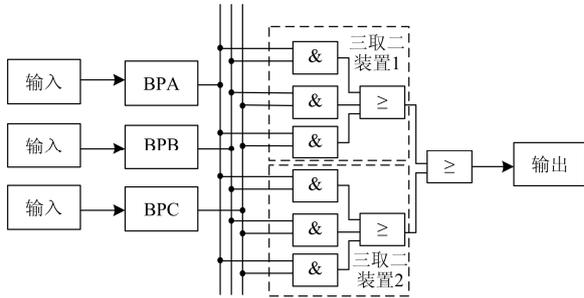


图4 三重化的双极保护屏配置方案逻辑图

Fig. 4 Logic diagram of triplicate configuration for bipolar protection cubicles

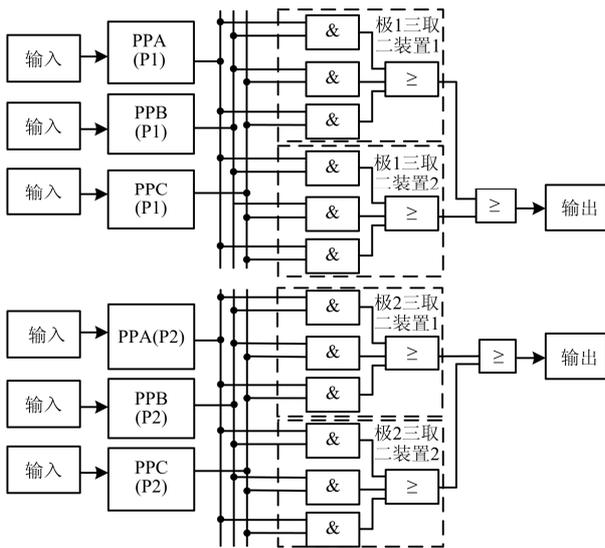


图5 集成到各极保护屏中配置方案逻辑图

Fig. 5 Logic diagram of integrated into pole protection cubicles configuration

如图4、和图5所示，BPA、BPB、BPC分别为三重化双极保护屏，假设其可靠性分别为：BR1、BR2、BR3；PPA、PPB、PPC分别为三重化的极保护屏，假设其可靠性分别为：PR1、PR2、PR3；三取二装置1、2可靠性分别为Rm1、Rm2，根据可靠性原理可得各配置策略下可靠性分析模型，如图6、和图7所示。

根据图6可靠性分析模型及串、并联系统可靠性计算公式，三重化的双极保护屏配置方案的可靠性 R_T 如式(1)。

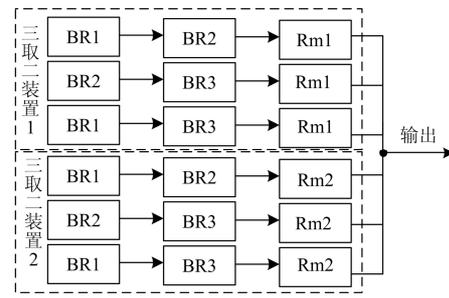


图6 三重化的双极保护屏配置可靠性分析模型

Fig. 6 Reliability analysis model of triplicate configuration for bipolar protection cubicles

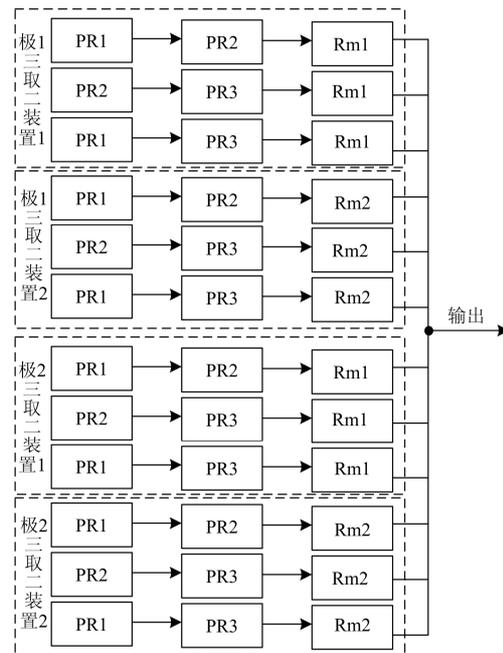


图7 集成到各极保护屏配置可靠性分析模型

Fig. 7 Reliability analysis model of integrated into pole protection cubicles configuration

$$R_T = 1 - [(1 - BR1 \times BR2 \times Rm1) \times (1 - BR2 \times BR3 \times Rm1) \times (1 - BR1 \times BR3 \times Rm1) \times (1 - BR1 \times BR2 \times Rm2) \times (1 - BR2 \times BR3 \times Rm2) \times (1 - BR1 \times BR3 \times Rm2)] \quad (1)$$

假设 $BR1=BR2=BR3=Rm1=Rm2=R$ ，则式(1)可简化为

$$R_T = 1 - (1 - R^3)^6 \quad (2)$$

根据图7可靠性分析模型及串、并联系统可靠性计算公式，集成到各极保护屏中配置方案系统的可靠性 R_{BP} ，经过类似简化后为

$$R_{BP} = 1 - (1 - R^3)^{12} \quad (3)$$

根据式(2)和式(3)得到的可靠性曲线图，如图8所

示。

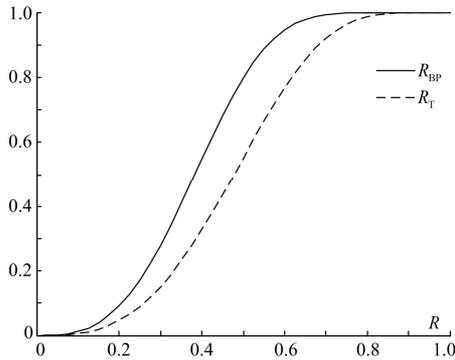


图 8 两种配置方案的可靠性曲线图

Fig. 8 Reliability graph of two configurations

通过图 8, 可明显看出, 将双极区直流保护集成到各极保护屏中配置方案的可靠性远高于其他两种方案。

经过以上深入分析可知, 将特高压直流双极区直流保护集成到各极保护屏中的方案具有更高的可靠性, 现该方案已写入《高压直流系统保护装置标准化技术规范》。

2 双极区直流保护功能优化

2.1 双极区直流保护功能配置及动作策略

特高压直流双极区配置的直流保护功能分别为: 双极中性母线差动保护、站接地过流保护、站接地过流后备保护、接地极引线过负荷保护、接地极引线不平衡监视、中性母线接地开关保护、大地回线转换开关保护、金属回线转换开关保护、金属回线接地保护、金属回线横差保护、金属回线纵差保护。

双极区直流保护功能动作策略主要有: 移相重启、极平衡运行、闭锁系统、功率回降、重合相关开关等。

其中极平衡运行动作策略为双极区直流保护功能在双极运行方式下特有的动作策略; 功率回降为接地极引线过负荷保护独有的动作策略。

2.2 关键技术问题及优化方案

双极区直流保护功能经过工程的多年运行检验, 不断优化和完善, 对双极区直流保护关键功能和近期工程中出现的问题进行了分析, 提出了相关问题的解决方案, 部分优化方案已在工程中得到成功应用。

2.2.1 双极中性母线差动保护优化

双极中性母线差动保护^[8-12]主要保护双极中性

母线区域设备, 差动电流计算公司如式(4)。

$$DIF = I_{DNEP1} - I_{DNEP2} - (I_{DEL1} + I_{DEL2} + I_{DGND} + I_{DME} + I_{ANE}) \quad (4)$$

该保护最新的动作定值、延时和动作策略如下。

单极运行: $DIF > \Delta$, 延时 150 ms, 移相重启; 延时 600 ms, 闭锁系统。

双极运行: $DIF > \Delta$, 延时 200 ms, 平衡双极运行; 延时 2 s, 闭锁系统。

双极中性母线差动保护作为双极区的主保护功能, 在现场运行过程中出现过多次问题, 对该保护的进行了多方面的优化, 详细措施如下。

(a) “三取二逻辑”出口策略优化

特高压直流保护装置采用三重化配置, 通过三取二逻辑装置出口, 三取二逻辑装置采用双重化配置; 三取二逻辑按保护功能进行运算; 三重化保护配置中的一套保护退出时采用二取一逻辑出口, 两套保护退出时采用一取一出口。

以上策略使直流保护系统具有良好的可靠性, 为了进一步提高双极中性母线差动保护的出口可靠性, 对该保护进行了特殊处理, 当三重化配置的直流保护装置, 一套系统退出后, 双极中性线差动保护按“二取二”出口。该优化策略进一步提高了双极中性母线差动保护的可靠性。

该优化方案已在所有在运特高压直流输电工程中整改, 并在在建工程中实施。

(b) 取消合 NBGS 动作策略

双极中性线差动保护的目的是检测从极中性母线到接地极引线之间的接地故障。双极运行时检测到接地故障后, 双极中性线差动保护延时 130 ms 先请求控制系统切换(只在龙政和江陵工程中有), 延时 200 ms 再发极平衡指令。如果在 1 s 之内极平衡成功, 即使该区域有接地点, 也不会有故障电流通过。在这种情况下, 程序不会再执行合 NBGS 的指令。

如果极平衡不成功或极平衡速度较慢, 双极中性线差动保护出口的条件仍一直满足, 1.2 s 之后保护发出合 NBGS 指令。合 NBGS 的主要作用是接地极线并联运行起到分流的作用, 以减小流入接地点的故障电流, 如果此时的差流(也即流入接地点的故障电流)低于双极中性母线差动保护动作定值, 可以避免双极停运。但正常情况下, 站内接地网不允许流过较大的电流, 双极运行时站接地过流定值为 100 A, 延时 3 s 跳双极, 所以合上 NBGS 分流的作用是有限的。经过计算, 不平衡运行工况下, 是否合 NBGS 的结果如表 1 所示, 结果表明: 在两极不

平衡电流 DIF 小于 250 A, 且极平衡不成功的情况下, NBGS 的分流作用有助于避免双极闭锁。

表 1 各种不平衡运行工况下故障结果

Table 1 Fault results of unbalance operation modes

不平衡运行工况	结果
DIF<125 A	合或不合 NBGS 均不会引起 双极闭锁
125 A<DIF<250 A	合 NBGS 能避免双极闭锁
DIF>250 A	合或不合 NBGS 均会引起 双极闭锁

如果一极双极中性线差动保护误动而导致 NBGS 闭合且该极闭锁后, 将导致健全极双极中性线差动保护或站接地过流保护动作, 闭锁健全极, 扩大了故障范围。从这个角度讲双极中性线差动保护动作后取消合 NBGS 有助于避免双极闭锁的严重事故。

该优化方案已在所有在运特高压直流输电工程中整改, 并将在新建工程中实施。

(c) 判断逻辑问题及优化建议

差动电流计算时共涉及到 7 个 CT, 若某一 CT 测量故障, 较易造成双极中性母线差动保护误动作。

在正常运行时避雷器电流 IANE 很小, 如果中性母线有过电压时, 引起避雷器放电, 会有直流电流流过该交流 CT, 引起交流 CT 直流偏磁, 可能引起造成保护动作。所以建议 IANE 可以不作为双极中性母线差动保护的判断量。

另一方面, 为了解决这个问题, 可从一次主接线设计上进行优化。可将双极中性线区域的避雷器配置于接地极线路 CT 外侧, 在两条接地极线路各配置一个避雷器。采用这种方式后避雷器支路的 CT 电流将不再计入双极差动保护中, 减少了避雷器故障和 CT 测量故障引起的保护误动的可能性, 提高了保护功能的可靠性。

2.2.2 NBSF 顺控逻辑

NBSF 顺控逻辑在一极运行, 另一极停运过程中且发生中性母线开关(NBS)失灵或图 1 中 F1 点发生接地故障时起作用: 首先通过合上 NBGS 开关分流; 再利用拉开停运极中性母线刀闸切除短路电流且隔离故障点, 确保另一极的正常运行不受影响; 最后再拉开 NBGS 开关。

在部分特高压直流工程中, NBGS 开关不具备大电流转移能力, 因此, 若采用现有 NBSF 顺控逻辑, NBGS 将无法打开, 最终引起站接地过流保护

动作, 引起直流运行极的停运。

为避免上述双极闭锁现象的发生, 对 NBSF 顺控逻辑进行如下改进。

当 NBS 失灵后, 启动 NBSF 顺控逻辑: 重合 NBS 开关, 合上 NBGS 开关, 拉开大地回线连接隔离刀闸和金属回线连接隔离刀闸, 运行极移相, 打开 NBGS 开关, 运行极系统恢复正常大地回线运行。

NBSF 顺控执行过程中, 为满足大地回线连接隔离刀闸和金属回线连接隔离刀闸拉开时间长度的要求, 当 NBSF 启动后, 直流保护将站内接地过流保护时间定值自动调整为 12 s, 以避免隔离刀闸拉开期间该保护动作闭锁双极。

通过采用运行极移相的方法降低直流电流, 从而克服了 NBGS 电流转移能力低的问题, 最终实现故障点的安全隔离, 提高了系统运行的可靠性。

2.2.3 运行方式及金属回线使能信号逻辑优化

双极区直流保护功能的判断逻辑、投退和动作策略等与系统的运行方式有直接关联, 特高压直流输电系统一般有单极大地回线运行方式、单极金属回线运行方式和双极大地回线运行方式, 当运行方式转换时, 需要重点考虑保护功能的防误动, 提高其可靠性, 主要措施如下。

(a) 状态量增加 RS 触发器及自检逻辑

特高压直流输电工程一般采用隔刀、开关的分、合状态实现运行方式的判别, 部分工程采用单一状态进行判断, 存在单一元件故障造成运行方式误判的可能, 经过分析提出了分、合状态均采集, 并经过图 9 逻辑判断后最终输出。

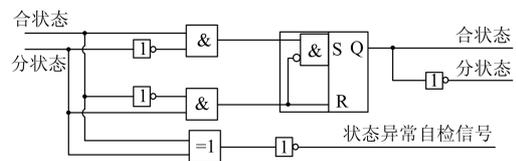


图 9 RS 触发器逻辑图

Fig. 9 Logic diagram of RS flip-flop

增加以上逻辑并且三重化的直流保护系统采集的状态量为独立的辅助触点信号后, 极大提高了系统的可靠性。通过提出增加的状态异常自检信号, 方便运检人员及时发现问题。

(b) 金属回线使能信号优化

金属回线保护功能仅在金属回线运行方式下有效, 且根据金属回线的一次接线方式特点, 金属回线接地保护和金属回线横差保护仅在站 B 有效, 通过金属回线保护功能的使能信号实现以上两个保护

的自动投入, 其信号逻辑如图 10 所示。

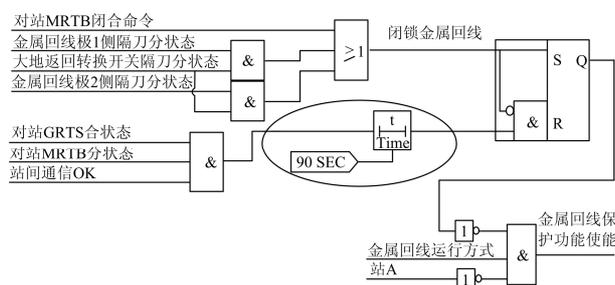


图 10 金属回线使能信号逻辑图

Fig. 10 Logic diagram of metal return enable signal

图中“对站 MRTB 闭合命令”包含了站控顺控命令和运行人员控制界面手动闭合命令, 通过该命令实现在金属转大地转回线方式时, 提前 60 ms 退出金属回线保护功能使能信号, 防止保护误动。图中圈出的延时 90 s 使能金属回线保护功能逻辑, 实现了防止大地转金属回线运行方式时发生转换失败导致金属回线保护误动的可能。根据现场运行经验, 存在打开 MRTB 后, MRTB 开关保护动作重合的情况, 通过延时开放金属回线使能信号能够有效避免这种特殊情况。

通过分析可知, 延时 90 s 逻辑虽然能够有效地避免转换失败特殊情况下金属回线保护误动的情况, 但在绝大多数情况下, 运行方式转换均能成功转换, 如每次正确转换时, 金属回线接地保护和金属回线横差保护均退出 90 s, 增加了保护拒动的风险。

提出了将“对站 MRTB 闭合命令”中增加 MRTB 开关保护发出的闭合命令信号, 删除原 90 s 延时逻辑。既可实现正常转换时的金属回线保护功能的快速投入, 也能避免转换失败 MRTB 开关保护重合 MRTB 特殊情况下, 金属回线保护误动的情况。

3 总结

本文详细分析了特高压直流输电工程中双极区直流保护系统的配置策略和可靠性分析, 主要分析了独立的三重化双极保护屏配置和集成到极保护屏配置策略, 建立了可靠性模型及其公式推导, 结果表明集成到极保护屏中配置策略其可靠性更高, 后续新建工程建议采用该策略。对双极区直流保护功能配置及动作策略进行了分析, 对关键问题提出了优化方案, 主要包含双极中性母线差动保护、NBSF 顺控逻辑、运行方式及金属回线使能信号逻辑。与现场实际应用紧密有关的关键问题优化策略, 对后续特高压直流输电工程相关设计提供了有益参考, 及提高了系统的安全稳定运行又能方便运检人员及

时发现处理问题。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [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] 文博, 张侃君, 夏勇军, 等. 高压直流输电系统双极中性母线差动保护改进方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 98-103.
- WEN Bo, ZHANG Kanjun, XIA Yongjun, et al. Research on bipolar neutral bus differential protection improvement scheme in HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 98-103.
- [9] 吴庆范, 黄金海, 吴彦维. 特高压直流输电系统并联融冰运行方式的控制保护策略研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 69-75.
- WU Qingfan, HUANG Jinhai, WU Yanwei. Control and protection strategies of parallel de-icing operating mode for UHVDC power transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 69-75.
- [10] 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.
- [11] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [12] 戴熙杰. 直流输电基础[M]. 北京: 水利电力出版社, 1990.

收稿日期: 2015-07-20

作者简介:

李俊霞(1973-), 女, 本科, 工程师, 从事继电保护、高压直流输电设备开发设计、应用及科技管理; E-mail: junxial1988@126.com

严兵(1972-), 男, 工程硕士, 高级工程师, 长期从事高压直流输电控制保护设计及理论研究; E-mail: 18637497186@163.com

张爱玲(1968-), 女, 工程硕士, 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。E-mail: alz6006@163.com

(编辑 姜新丽)