

DOI: 10.7667/PSPC180505

基于快速重合闸的多端直流配电网极间故障隔离恢复策略

时伯年¹, 李岩², 孙刚¹, 赵宇明³, 李巍巍²

(1. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085; 2. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080;
3. 深圳供电局有限公司, 深圳 518048)

摘要: 为快速识别并隔离直流极间故障、实现多端直流配电网的极间故障快速恢复, 提出了一种基于直流断路器快速重合闸的故障隔离恢复策略。研究了由半桥式模块化多电平换流器组成的环形多端直流配电网极间故障暂态特性, 并结合目前典型的保护配置、故障选线及控制方法, 形成一种基于直流断路器重合闸的控制保护一体化协调配合策略。各保护区内的快速保护检测到故障后立即闭锁换流器、跳开直流断路器以快速隔离故障; 控制保护一体化装置获取故障定位信息后, 重合非故障区域内已经跳开的直流断路器、解锁已经闭锁的换流器, 在新拓扑结构下实现直流极间故障的快速恢复。最后在 PSCAD/EMTDC 软件下搭建了六端柔性直流配电网仿真模型并测试了极间故障隔离及恢复特性, 验证了所提方案的可行性。

关键词: 多端直流配电网; 极间故障; 直流断路器; 重合闸; 故障快速恢复

Fault isolation recovery strategy for multi-terminal DC distribution network based on DC breaker reclosing

SHI Bonian¹, LI Yan², SUN Gang¹, ZHAO Yuming³, LI Weiwei²

(1. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China; 2. CSG Technology Research Center, Guangzhou 510080, China; 3. Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518048, China)

Abstract: In order to quickly identify and isolate DC pole to pole fault and achieve fault fast recovery of multi-terminal DC distribution networks, a fault isolation recovery strategy based on DC breaker reclosing is proposed. The transient fault characteristics of a circular multi-terminal DC distribution network based on half bridge modular multilevel converter are studied. Then, combined with the typical protection configuration, fault line selection and control methods, a coordinated control and protection strategy based on reclosing of DC breaker is proposed. After the fast protections detect the fault, the inverters are blocked and DC breakers are tripped immediately to isolate the fault. When obtained the fault location information, the DC breakers that have been tripped in the non-faulty region are reclosed and the inverters that have been blocked are unblocked again by the control and protection system. The multi-terminal DC distribution network can recover rapidly under the new topology. Finally, a simulation model of six terminal flexible DC distribution network is built under the PSCAD/EMTDC software. The fault isolation and recovery characteristics of the poles are tested, and the feasibility of the proposed scheme is verified.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050103).

Key words: multi-terminal DC distribution network; pole to pole fault; DC breaker; reclose; fault fast recovery

0 引言

随着大量分布式新能源发电设备的并网接入、直流负载的快速扩张以及柔性直流技术的日益成

熟, 现代城市对直流配电技术提出了迫切的需求。直流配电不仅具有供电质量好、功率转换效率高、输送容量大以及受控特性更好等优点, 而且不存在相位和频率同步问题, 也没有电磁环网现象, 因此多端直流配电网逐步成为国内外的研究热点^[1-3]。

由于直流配电系统中的阻尼小、直流电流没有过零点, 导致故障电流发展迅速、故障电流开断困

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)(2015AA050103)“紧凑化多端柔性直流配电网控制保护关键技术”

难,故障隔离恢复是实现直流配网应用的关键技术之一^[4]。

目前,针对柔性直流极间故障的隔离策略主要分为利用直流断路器开断故障电流、利用新型拓扑结构的换流器实现故障自清除两大类。其中,文献[5-6]对柔性直流配电网的极间故障发生和演变机理做了详细的计算和分析介绍,探讨了限制故障电流传播速率和幅值的方法,为后续研究提供了基本方向;文献[7-8]分析了直流断路器开断故障电流的基本原理、实现方法,并探讨了其在直流电网中的应用前景;文献[9]给出了一种改进型换流器新拓扑,可以实现直流侧故障的自清除但却不能隔离故障,不利于多端直流系统的故障后快速恢复;文献[10]描述了直流配电系统接地方式设计与其控制保护之间的相互关系;文献[11-14]分析了直流配电网保护技术的研究现状,给出了典型保护配置方案,但未给出换流阀要求的保护装置速动性与保护原理可靠性之间矛盾的解决方法;文献[15-18]给出了基于不同原理的直流线路侧的故障选线及定位方法,但未给出故障消除后电网的具体恢复策略。

本文在现有直流断路器技术水平的基础上,提出了利用一次开断设备和二次控制保护协调配合的直流极间故障快速隔离恢复策略:故障发生后,保护区域内的快速保护检测到故障后立即闭锁换流器并由直流断路器隔离故障,随后依据控制保护系统提供的故障位置信息,重合非故障区域内已经跳开的直流断路器、解锁换流器,使多端直流配电网在新拓扑结构下逐步恢复稳定。

该策略在未增加现有一次设备投资的基础上,兼顾了故障隔离快速性和保护原理可靠性的需求,最后在 PSCAD/EMTDC 软件下搭建了六端直流配电网模型,仿真测试了所提故障隔离恢复策略的可行性。

1 极间故障特征及典型保护配置策略

采用半桥型模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converters, MMC)的直流配电网,在发生直流极间故障时,由于子模块中二极管的续流作用,即便换流阀闭锁直流故障电流仍将存在^[5]。因此,本文选择直流断路器开断故障电流。

1.1 半桥式 MMC 极间故障机理

极间故障发生后在换流阀闭锁前,故障电流由子模块并联电容的放电电流和交流系统馈入电流组成;闭锁后的故障电流则主要是交流侧的馈入电流。

半桥式 MMC 闭锁后故障电流流过续流二极管 D2, 流通路径如图 1 所示。

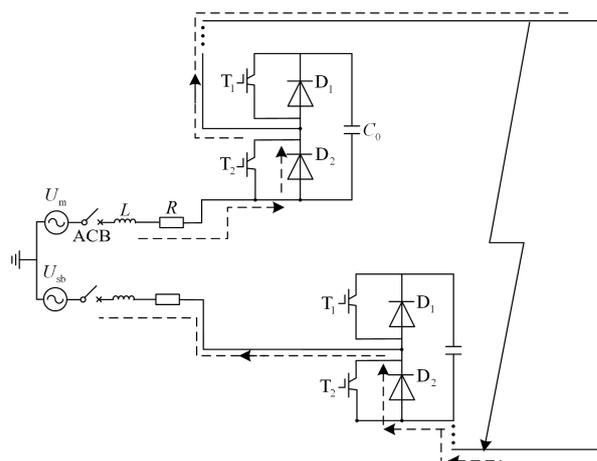


图 1 半桥式 MMC 极间故障通路示意图

Fig. 1 Diagram of half-bridge MMC inter-pole fault path

从图 1 可见,只有交流断路器 ACB 不跳开,交流侧馈入的故障电流将一直存在,其极间故障特征相当于交流系统的三相短路,交流侧的稳态故障相电流可近似表示为

$$i_s = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \phi - \phi) \quad (1)$$

式中: U_m 为交流系统相电压峰值; R 为故障通路的综合等效电阻; L 为故障通路的综合等效电抗; ϕ 为交流系统的实时相位角; ϕ 为故障时刻交流侧的相位角。

可见,半桥式 MMC 直流线路极间故障电流幅值较大且与换流器的闭锁时刻有关。通常闭锁越快故障电流幅值越小,但故障稳态电流的最小值至少应为交流侧三相不控整流电流值。

1.2 多端直流配电网极间故障特征

多端直流配电网系统阻尼小,故障电流的传播速度快、幅值大;电力电子器件及分布式电源的存在也会导致系统阻抗降低、故障电流激增,严重危害设备及系统安全。快速蔓延的故障特征,除严重损害直流设备外,还可能引起非故障侧的保护装置误动作,导致故障影响范围的进一步扩大。这就对保护装置的可靠性和速动性提出了较高要求。

换流器或直流侧发生故障时,换流器内部电容以及直流电缆的分布电容都会向故障点放电,交流电源、电动机等单元还会通过换流器内续流二极管持续向故障点提供短路电流。多样化的故障电流对保护装置的灵敏性和选择性提出了更高的要求。

综上所述,多端拓扑结构的直流配电网的保护相比于交流配电网和直流输电网而言,在保护识别、动作速度、故障定位及隔离恢复等方面提出了更高的要求。

1.3 典型保护配置策略

多端直流配电网的典型保护配置应根据不同的故障位置及类型实现不同原理的保护分层配置。根据故障对设备的危害程度，配置慢速保护和快速保护：慢速保护即常规保护方案，故障检测及出口时间为毫秒级；快速保护采用基于 FPGA 的快速处理方案，将故障检测及出口时间缩短到百微秒级，如换流器内部故障、直流极间故障等。

典型保护配置方案不仅体现在故障检测及出口速度上，也体现在差异化的出口方式中。通常慢速保护出口方式包括报警、短时闭锁换流器、延时闭锁及跳闸等；快速保护出口方式包括永久闭锁换流器、跳交流进线断路器、跳直流断路器、禁止换流器解锁等。

典型保护配置的基本原则是在保证直流配电系统中设备安全的条件下，尽可能缩小停电范围，缩短停电时间，提高多端柔性直流配电网的运行可靠性。

通常典型保护配置方案中慢速保护原理包括交流低/过电压保护、直流低/过电压保护、启动/连接回路保护、直流电压不平衡保护、电抗器差动保护、直流系统接地过电流保护等；快速保护原理包括桥臂过电流保护、阀直流过电流保护、直流线路过电流保护、直流低压过流保护、直流线路/母线快速差动保护、电压电流突变量保护等。

2 快速重合闸的故障隔离恢复策略

直流极间故障是多端直流配电网最为严重的故障，其故障电流幅值大、上升速度快，在直流断路器完全跳开前(中压混合式直流断路器动作时间约 3 ms 左右^[7])，故障电流可能已经蔓延至非故障区域导致保护动作跳闸，故障影响范围被扩大。

常规的控制保护系统结构如图 2 所示。可见，控制单元与保护单元位于两套不同的装置中，造成了通信信号量及接口插件等的重复，装置硬件结构过于复杂、系统安装占地较大，成本相对较高。

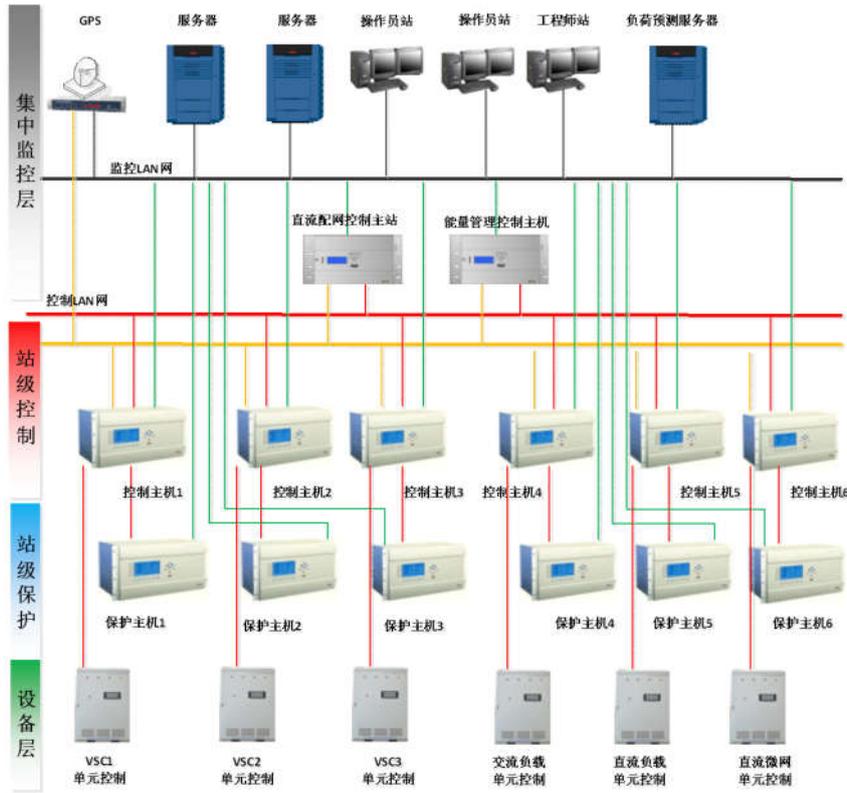


图 2 常规直流配电网控制保护系统组网图

Fig. 2 Diagram of conventional control and protection devices

控制保护一体化系统结构如图 3 所示。其在充分研究交直流混合配电应用对控制保护系统的特殊需求的基础上，对直流系统控制保护硬件结构进行优化和改进，将控制和保护装置的硬件进行全面整

合，减化控制保护独立配置情况下采样系统和接口插件重复配置问题，完成控制保护装置一体化设计，节约了硬件设计成本和工程应用成本。

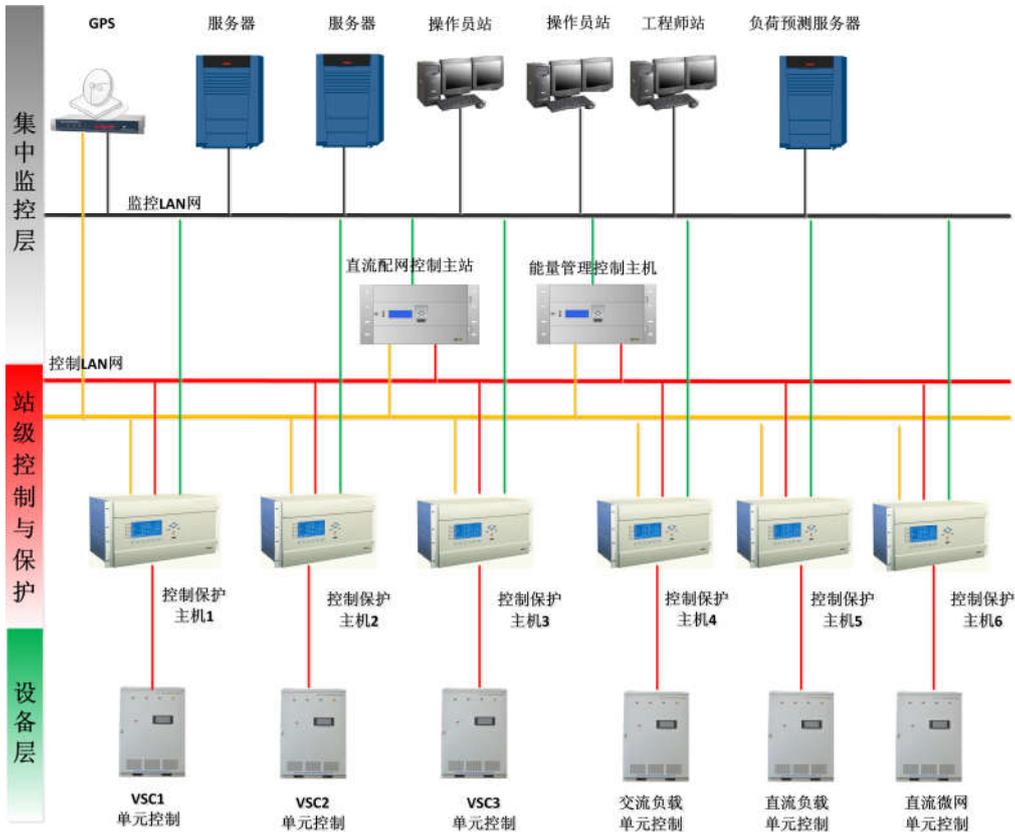


图 3 直流配电网控制保护一体化系统组网图

Fig. 3 Diagram of integrated control and protection device

改造前后的动作出口流程图分别如图 4 和图 5 所示；控制保护之间不需要外部通信通道，在缩小装置整体尺寸的基础上极大地提高了设备的可靠性和响应速度。

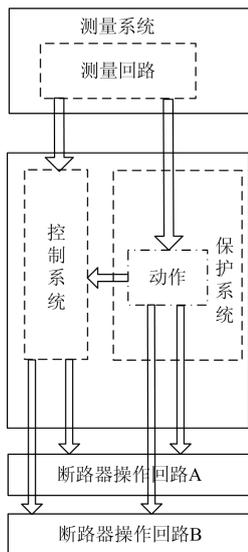


图 4 常规控制保护装置动作出口流程图
Fig. 4 Operation flow chart of conventional control and protection devices

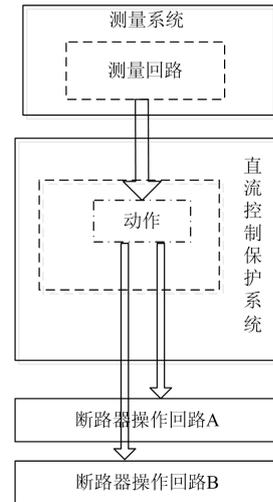


图 5 控制保护一体化装置动作出口流程图
Fig. 5 Operation flow chart of control and protection integrated device

控制保护一体化装置动作的基本原则是：快速保护动作后立即闭锁本保护区域内的换流阀、跳开直流断路器；装置获取故障位置信息后，重合非故障区内跳开的直流断路器；交流断路器动作时间应

躲过直流断路器的完全开断时间与重合时间之和，即保持热备用状态以缩短系统的恢复时间。直流断路器重合后，若故障隔离成功则解锁 VSC 并逐步恢复系统供电，否则系统停运。

直流极间故障隔离恢复的具体步骤介绍如下：

1) 故障检测及隔离。各分区内的快速保护检测到故障电压电流等特征量后，在 $300 \mu\text{s}^{[12]}$ 内出口闭锁 VSC、跳直流断路器；约 $3 \text{ ms}^{[13,19]}$ 后直流断路器跳开隔离故障。该过程可能导致非故障区域保护动作，故障影响范围扩大。

2) 故障定位。控制保护一体化装置读取基于不同原理的故障选线保护^[20]动作信号后，确定故障线路位置。控制保护主机汇集各自保护区域的故障选线信号后，上传至直流控制保护主站；由主站对比并判断故障与非故障区域，并确定需要重合的直流断路器编号。

3) 快速重合闸。控制保护一体化装置对比故障前后的直流断路器状态并结合故障位置信息，确定需要重合闸的直流断路器编号并经过一段去游离时间后解锁换流器重合直流断路器。

4) 系统恢复。若故障隔离、直流断路器重合成功，则逐步恢复负荷功率；若不成功，则根据系统解网后的拓扑结构恢复运行或停运。

如图 6 所示为极间故障隔离恢复流程图。

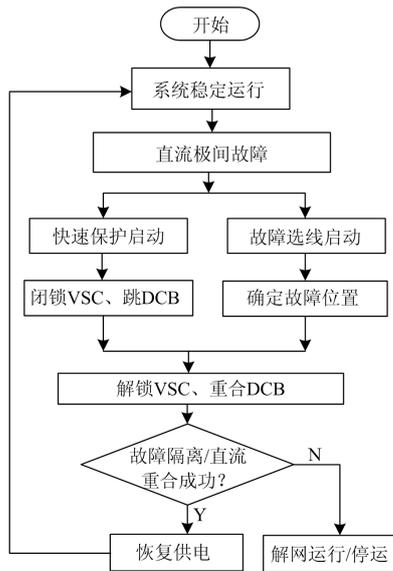


图 6 直流极间故障隔离及恢复流程图

Fig. 6 Flow chart of DC pole to pole fault isolation and recovery

3 仿真实证

3.1 六端直流配电网主接线

本文以环形拓扑结构的六端直流配电网为研究对象。选用柔性直流换流器 VSC(Voltage Sourced

Converters)连接交直流系统，交流负载经 DC/AC 换流设备接入直流配网，直流负载和直流微网经 DC/DC 换流设备接入直流配网，主接线如图 7 所示。

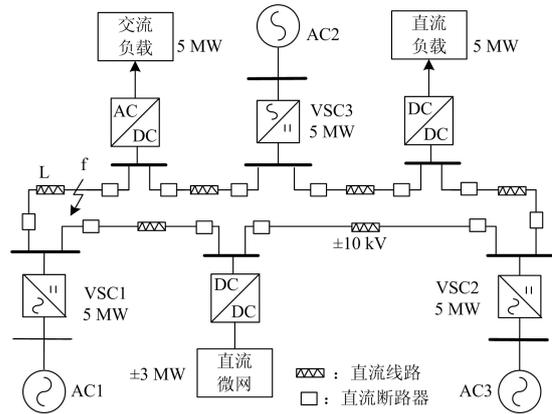


图 7 六端直流配电网主接线图

Fig. 7 Main wiring diagram of six-terminal DC distribution network

直流微网中除含有直流负载外，也可接入分布式风电、光伏及储能单元等设备。直流线路通常选用电缆线路以节省城市通道走廊且每条直流线路两端均配置一台直流断路器。

换流器 VSC1、VSC2 和 VSC3 采用半桥型模块化多电平换流器，额定容量均为 5 MW；交流负载换流器 DC/AC 与直流负载换流器 DC/DC 容量均为 5 MW；直流微网换流器 DC/DC 容量为双向 $\pm 3 \text{ MW}$ 。选取直流电压等级^[4] $\pm 10 \text{ kV}$ ，直流线路额定电流 0.5 kA。

3.2 极间故障仿真测试

利用 PSCAD/EMTDC 软件搭建六端直流配电网电磁暂态仿真模型，并进行直流线路极间故障仿真测试：设置多端直流配电网的交流负载、直流负载与直流微电网均为 4 MW，并在换流器 VSC1 与交流负载之间的直流线路 L 上 f 点设置极间金属性短路故障，故障时刻 2 s，故障持续时间 100 ms。配置快速直流过电流保护和直流线路差动保护，作为直流线路极间故障的主保护和故障选线保护。

3.2.1 故障隔离与选线

由于直流系统阻抗较小，故障电流迅速升高并蔓延，导致各保护区内的快速直流过电流保护启动并动作，导致六端换流器均闭锁、直流断路器全跳开。

故障发生后约 $200 \mu\text{s}$ ，故障线路两端电流升高至过电流保护的动作门槛值 $2I_N=1.0 \text{ kA}$ 、差动电流远大于动作门槛值 2 kA，快速直流过电流保护和直流线路差动保护均启动。

故障后约 $500 \mu\text{s}$ 换流器被闭锁，约 2.5 ms 直流

断路器跳开故障被完全隔离, 故障电流仿真波形及保护动作如图 8 所示。

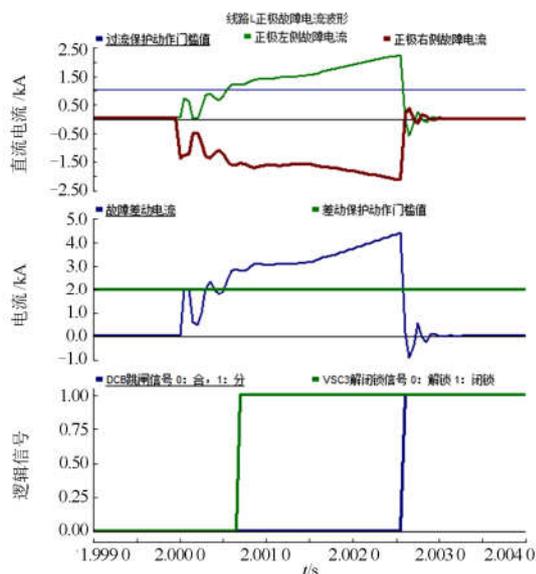


图 8 直流线路 L 故障电流及保护动作信号

Fig. 8 DC line L fault current and protection action signal

以换流器 VSC1 为例, 其端口处的故障仿真波形如图 9 所示(由于直流线路上的阻尼较小, 换流器 VSC2、VSC3 与 VSC1 端口故障波形及控制保护动作波形基本相同)。

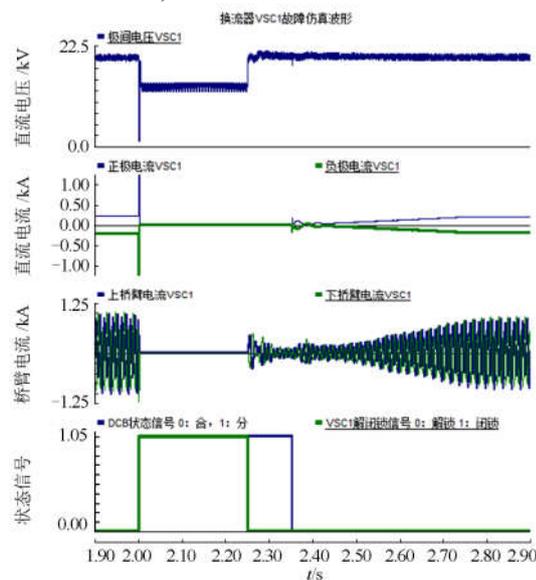


图 9 直流极间故障时 VSC1 故障仿真波形

Fig. 9 VSC1 fault simulation waveform when DC line pole to pole fault

从图 9 中可见, 故障发生后直流出口电压跌落至约零电位、直流出口电流快速升高。闭锁换流器断开直流断路器后, 直流出口电压恢复至约不控整

流充电水平、直流出口电流降至零。

非故障区域的直流线路因为感应到直流过电流而跳开直流断路器, 导致故障范围扩大。随后, 控制保护主机 1~6 将各区域内线路的差动保护动作信号以及故障前系统的运行状态上传至控制保护主站, 由主机确定需要重合闸的断路器。

经过一段去游离时间并在故障后约 250 ms 时刻, 解锁各端换流器重新建立直流电压; 故障后约 350 ms 时刻非故障区域直流断路器重合, 负荷功率逐步恢复至故障前的水平。恢复过程中换流器上下桥臂及直流出口均未出现过电压与过电流现象。

3.2.2 故障恢复

由于直流线路 L 两端直流断路器开断后系统的潮流也随之发生了变化。在故障隔离恢复期间三端换流器出口处的电流对比波形如图 10 所示。可见, 三端 VSC 流入直流侧的总电流在故障前后基本保持不变, 体现了环形拓扑结构潮流方式灵活的优势, 故障前后没有负荷功率损失, 可有效提高供电可靠性。

换流器 VSC1 故障期间交流侧电流波形及交流断路器状态信号如图 11 所示; 故障电流的局部放大图如图 12 所示。故障开始时刻交流电流显著增大,

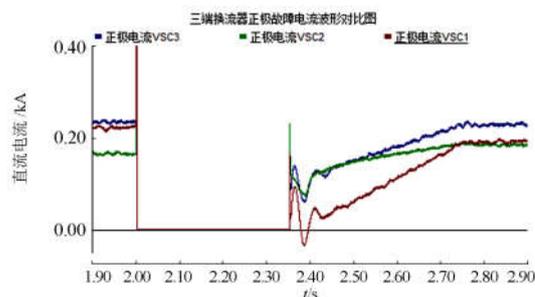


图 10 各端换流器故障电流对比波形图

Fig. 10 Fault current comparison waveforms among VSC1, VSC2 and VSC3

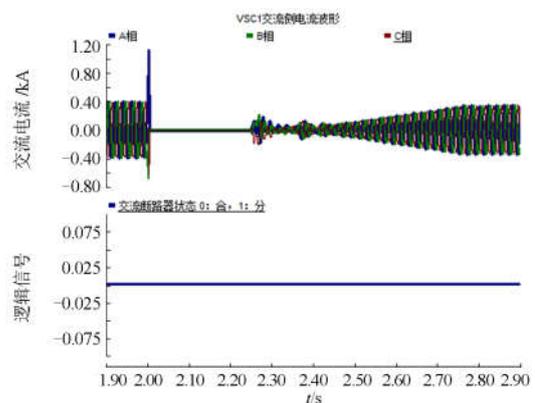


图 11 换流器 VSC1 交流侧电流波形图

Fig. 11 Fault AC current waveforms of VSC1

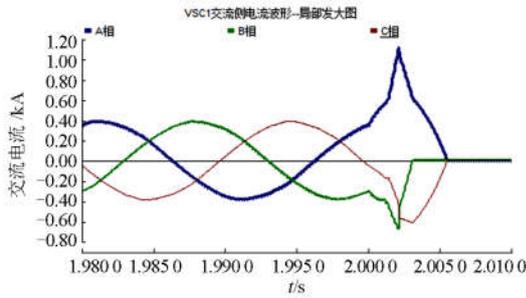


图 12 故障时刻, 换流器 VSC1 交流电流波形图
Fig. 12 AC current waveforms of VSC1 at fault time

但由于故障被直流断路器快速隔离, 过电流持续的时间很短, 交流过电流保护未启动。由于故障期间交流断路器始终处于闭合状态, 避免了交流断路器动作后直流电压的建立过程, 为直流配电网的快速恢复提高了条件。

4 结论

本文针对多端直流配电网, 提出了一种基于直流断路器的快速重合闸的故障隔离及恢复策略, 有如下结论:

1) 研究了半桥式 MMC 拓扑结构下的多端直流配电网极间故障发生机理并给出了典型保护配置策略。

2) 提出的极间故障隔离恢复策略, 前加速的保护动作方式可限制短路电流水平、保护设备及系统安全; 利用故障定位信息的非故障区域直流断路器重合闸方案, 可实现故障后系统的快速恢复。

3) 控制保护一体化的装置设计方案, 不仅可综合利用原有控制装置及保护装置的所有信息, 而且可减少信号量的重复配置、避免了不同装置间的通信, 为直流故障的快速隔离恢复奠定了基础。

4) 快速保护与直流断路器的协调配合可实现毫秒级故障隔离、秒级故障恢复, 且故障隔离及恢复过程不会发生过压过流现象。

参考文献

- [1] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] 徐琪, 曾杰, 周文鹏, 等. 中压直流配电系统故障过电压水平分析[J]. 广东电力, 2018, 31(12): 134-141.
XU Qi, ZENG Jie, ZHOU Wenpeng, et al. Analysis of fault overvoltage level of middle-voltage DC distribution

system[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(12): 134-141.

- [3] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-171.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-171.
- [4] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 1-7.
LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Study on demonstration project technical scheme of VSC DC distribution system in Shenzhen[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 1-7.
- [5] 李斌, 何佳伟. 柔性直流配电系统故障分析及限流方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(12): 3026-3036.
LI Bin, HE Jiawei. DC fault analysis and current limiting technique for VSC-based DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(12): 3026-3036.
- [6] 田鑫, 高亮, 张俊峰. 基于电压源换流器的直流配电网限流方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(9): 62-69.
TIAN Xin, GAO Liang, ZHANG Junfeng. Research on current limiting scheme of DC distribution based on voltage source converter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(9): 62-69.
- [7] 徐政, 肖晃庆, 徐雨哲. 直流断路器的基本原理和实现方法研究[J]. 高压技术, 2018, 44(2): 347-357.
XU Zheng, XIAO Huangqing, XU Yuzhe. Study on basic principle and its realization methods for DC circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 347-357.
- [8] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 全固态直流断路器在低压直流配电系统中的应用[J]. 南方电网技术, 2016, 10(4): 50-56.
ZHU Tong, YU Zhanqing, ZENG Rong, et al. Application of all-solid-state circuit breaker to low-voltage DC distribution system[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(4): 50-56.
- [9] 向往, 林卫星, 文劲宇. 一种能够阻断直流故障电流的新型子模块拓扑及混合型模块化多电平换流器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5171-5182.
XIANG Wang, LIN Weixing, WEN Jinyu. A new topology of sub-modules with DC fault current blocking capability and a new type of hybrid MMC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5171-5182.
- [10] 吴峻, 武迪, 朱金大, 等. 多端柔性直流配电网接地方式设计[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2552-2560.

- WU Jun, WU Di, ZHU Jinda, et al. Grounding method design of multi-terminal flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2552-2560.
- [11] 陈小军, 靳一林, 顾博川, 等. 基于电流微分量的多端直流配电网保护策略研究[J]. 广东电力, 2019, 32(2): 95-100.
- CHEN Xiaojun, JIN Yilin, GU Bochuan, et al. Study on protection strategy for multi-terminal DC Distribution network based on current differential[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(2): 95-100.
- [12] 戴志辉, 葛红波, CROSSLEY P, 等. 柔性直流配电网故障识别与隔离策略综述[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(4): 19-28.
- DAI Zhihui, GE Hongbo, CROSSLEY P, et al. An overview on fault detection and isolation strategies of flexible DC distribution networks[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(4): 19-28.
- [13] 许火炬, 缪希仁. 交直流混合配电方式及其故障保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 139-146.
- XU Huoju, MIAO Xiren. A review of AC/DC hybrid distribution and fault protection[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 139-146.
- [14] 吉兴全, 孙灏, 陈尔奎, 等. 基于电流差动的直流配电网保护方案[J]. 电测与仪表, 2018, 55(5): 50-56.
- JI Xingquan, SUN Hao, CHEN Erkui, et al. Protection scheme of DC distribution network based on differential current[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2018, 55(5): 50-56.
- [15] 和敬涵, 张明, 罗国敏, 等. 一种利用故障暂态过程的柔性直流配电网故障测距方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 985-992.
- HE Jinghan, ZHANG Ming, LUO Guomin, et al. A fault location method for flexible DC distribution network based on fault transient process[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 985-992.
- [16] 毕天姝, 王帅, 贾科, 等. 基于短时能量的多端柔性直流单极接地故障线路识别方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 689-695.
- BI Tianshu, WANG Shuai, JIA Ke, et al. Short-term energy based approach for monopolar grounding line identification in MMC-MTDC system[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 689-695.
- [17] ZOU Guibin, HUANG Qiang, SONG Shenglan, et al. Novel transient-energy-based directional pilot protection method for HVDC line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 159-168. DOI: 10.1186/s41601-017-0047-z.
- [18] FENG Xianyong, LI Qi, PAN Jiuping. A novel fault location method and algorithm for DC distribution protection[C] // IEEE Industry Applications Society Meeting, October 2-6, 2016, Portland, USA: 1-5.
- [19] 封磊, 苟瑞锋, 杨晓平, 等. 基于串联晶闸管强迫过零关断技术的混合式高压直流断路器[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 388-394.
- FENG Lei, GOU Ruifeng, YANG Xiaoping, et al. Hybrid HVDC circuit breaker based on series-connected thyristors with forced zero crossing technique[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2): 388-394.
- [20] 孙刚, 时伯年, 赵宇明. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-134.
- SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-134.

收稿日期: 2018-05-02; 修回日期: 2019-02-07

作者简介:

时伯年(1976—), 男, 博士, 研究方向为柔性直流输电控制保护、电力系统稳定及广域保护; E-mail: shibonian@sf-auto.com

李岩(1973—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为高压直流输电、柔性直流输电和电力系统分析; E-mail: liyan@csg.cn

孙刚(1986—), 男, 硕士, 通信作者, 研究方向为柔性直流输电控制保护技术。E-mail: sungang@sf-auto.com

(编辑 魏小丽)