

DOI: 10.7667/PSPC171357

## 计及柔性直流装置的交直流配电网保护控制研究

郑舒<sup>1,2</sup>, 赵景涛<sup>1,2</sup>, 谭阔<sup>2</sup>, 蔡月明<sup>1</sup>, 刘明祥<sup>1</sup>, 常乾坤<sup>3</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 210000; 3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

**摘要:** 交直流混合配电网可更好地接纳分布式电源和直流负荷, 缓解城市电网站点走廊有限与负荷密度高的矛盾, 已成为现代城市配电网的一个重要发展趋势。接入柔性环网控制装置后, 配电网由单端电源供电网络变为多端电源供电网络, 其可靠性面临新的挑战。通过对交直流混合配电系统的故障特点进行总结, 分析接入柔性直流控制装置后柔直侧及系统侧的保护影响, 提出基于时序配合的智能装置协同控制架构。利用柔性电力电子器件的快速响应特性, 设计柔性直流控制装置与交流保护控制装置配合的保护控制策略。在 GOOSE 有向节点及快速通信机制的作用下, 运用保护控制协同策略进行故障定位及隔离, 有效地增强了含柔性互联装置的交直流混合配电网可靠性, 具有工程实用价值。

**关键词:** 交直流混合配电网; 柔性直流装置; 保护; 故障; 可靠性

### Research on protection and control of AC/DC distribution network considering DC flexible device

ZHENG Shu<sup>1,2</sup>, ZHAO Jingtao<sup>1,2</sup>, TAN Kuo<sup>2</sup>, CAI Yueming<sup>1</sup>, LIU Mingxiang<sup>1</sup>, CHANG Qiankun<sup>3</sup>

(1. NARI Technology Co., Ltd, Nanjing 210000, China; 2. NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210000, China; 3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

**Abstract:** AC/DC hybrid distribution can accept distributed power supply and DC load more easily and can alleviate the contradiction between the restricted space of city grid site and the high density of load. Thus it has become an important development trend of modern city distribution network. After access to the flexible AC and DC devices, distribution network has changed to a multi terminal power network from a single terminal power network, thereby its reliability will face to new challenges. This paper summarizes the fault characteristics of AC/DC hybrid power distribution system, analyzes the influence of the flexible DC control device on the flexible side and the system side, and then proposes a cooperative control architecture of the time sequence cooperative smart device. It combines fault characteristics of AC/DC hybrid power system, uses the fast response characteristics of flexible power electronic devices, and designs the protection and control strategy of flexible DC control device and AC protective control device. By using GOOSE directed node and fast communication mechanism and applying protection and control coordination strategy for fault location and isolation, it effectively enhances the reliability of AC/DC hybrid distribution with flexible interconnection device, thus it has practical value in engineering.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050102).

**Key words:** AC/DC hybrid distribution; DC flexible devices; protection; fault; reliability

## 0 引言

近年来的研究成果表明, 交直流混合配电网可更好地接纳分布式电源和直流负荷, 缓解城市电网站点走廊有限与负荷密度高的矛盾, 同时在负荷中

心提供动态无功支持, 提高系统安全稳定水平并降低损耗, 因此, 基于柔性直流技术的交直流混合配电网更适合现代城市配电网的发展, 交直流混合配电网成为配电网的一个重要发展趋势网<sup>[1-2]</sup>。

国内外的电力公司建设中压交直流配电网的工程时, 对交流侧的建设仍是运用原有的交流系统的配电自动化、配电终端建设方案, 针对柔性互联装置接入的交直流系统特征所制定的保护实现方法涉

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划) 项目资助 (2015AA050102)

及较少<sup>[3-7]</sup>。如果采用传统分散式保护测控装置, 每一台保护测控装置能够得到的系统信息有限, 无法与柔性互联装置配合做出快速判断, 也就无法对整个交直流系统的故障做出准确快速的判断<sup>[8-9]</sup>。目前, 针对柔性互联装置接入配电网的故障特征和保护与控制技术, 侧重于直流侧保护, 包括直流输电线路保护, 换流站内部设备保护等研究<sup>[10-15]</sup>。

柔性直流技术在配网的应用将显著改变配电网的运行特性和故障特征, 针对这一问题, 本文主要根据交直流混合配电网中柔性直流控制装置的快速调节特性引起的交流系统故障特征的变化, 研究与直流装置控制特性相协调的交流系统保护控制技术, 根据保护控制的改进方案提高接入柔性直流装置的交直流混合配电网的可靠性。

## 1 柔直装置接入的影响分析

传统配电网多为单端电源供电的辐射状网络, 接入柔性环网控制装置后, 变为多端电源网络。考虑到柔性环网控制装置既可工作在整流状态又可工作在逆变状态, 配电线路上功率流动方向不再单一, 而当交流系统发生故障时, 柔性环网控制装置也会提供一定的故障电流。

如图 1 的网络架构中, AD 母线间的分段线路为双向潮流运行, 原有的保护将不再适用。而 B 母线及 C 母线的出线侧则仍是单一潮流流向, 柔性直流控制装置的接入不会改变其功率流动方向, 但考虑到柔性直流控制装置既可工作在整流状态又可工作在逆变状态, 所以柔性直流控制装置接入会影响这部分出线上电流保护的的保护范围。通过对图 1 的交直流配电网的建模仿真, 分析了主网侧及柔直侧的故障特性, 由于柔性直流控制装置抑制负序电流的控制策略, 仅对两相相间及三相相间故障产生影响, 其余故障特点与原交流系统一致, 故得到分析结论。

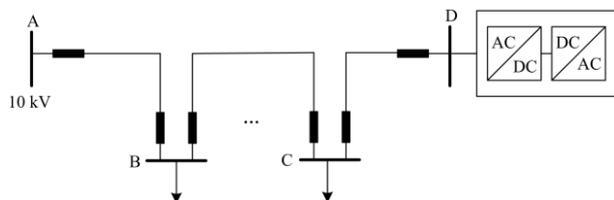


图 1 典型柔性直流控制装置接入配网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of a typical flexible DC control device connected to a distribution network

### 1) 主网侧特性

两相相间故障: 故障相电流变大, 同时故障线

电压降低, 电流方向由系统侧指向故障点, 会产生负序电压、零序电流和负序电压、负序电流, 其中短路电流、负序电流大小与短路阻抗相关。

三相相间故障: 三相电流变大, 同时三个线电压降低, 电流方向由系统侧指向故障点, 不会产生负序电压和负序电流, 会产生零序电压和零序电流。其中短路电流与短路阻抗相关。

### 2) 柔直侧特性

两相相间故障: 故障相电流被限定在一定的值, 同时故障线电压降低, 电流方向由柔直侧指向故障点, 会产生正序电压、负序电压, 但未知电流相位是否发生变化, 如不变将不会产生零序电流和负序电流。

三相相间故障: 三相电流被限定在一定的值, 同时三个线电压降低, 电流方向由柔直侧指向故障点, 不会产生负序电压和负序电流, 会产生零序电压, 但未知电流相位是否发生变化, 如不变将不会产生零序电流。

同时, 由于限流作用, 故障后柔性直流控制装置电流幅值不会明显上升。因此对于 AD 母线间的主线路靠近柔性直流控制装置的保护, 普通过电流保护并不适用。对于柔性直流装置的交流出线, 换流器采用抑制负序电流的控制策略, 考虑到柔性直流控制装置快速动作特性, 交流系统发生不对称故障后柔性直流控制装置快速调节使得输出的三相电流仍对称, 不含负序成分。而柔性直流控制装置采用了抑制负序电流的控制策略后, 逆变器出口处交流电压会包含负序分量, 而其输出有功也会受到负序分量影响, 呈现二倍频波动。

## 2 基于时序配合的柔直装置与配电保护控制装置协同控制架构

交直流混合配电网具有节点数量大且分散、通信距离短、可靠性要求高等特点, 在设计其整体架构时首先需要考虑通信延时对故障定位与隔离功能的故障处理时间的影响。基于 IEC61850 的 GOOSE 通信机制提供了快速、可靠的数据传输机制, 可直接映射到数据链路层, 减少了传输延时。

利用 GOOSE 快速通信机制实现相邻节点间方向过流信息的实时交互, 将交直流混合配电网区域化, 在各保护、测控、安自装置上分别实现区域保护算法, 利用 GOOSE 跳闸机制, 可以快速切除处于故障区域内的节点。GOOSE 传输信息通过各节点的 GOOSE 文本文件进行配置, 每个交直流系统的装置节点利用各自的 GOOSE 文本文件来配置该

节点的发送、接收信号(过流信号、方向信号、跳闸信号、柔直信号)。当交直流混合配电网系统新增分支节点时,可通过修改相邻设备的 GOOSE 配置文件来适应此网络拓扑变化。

交直流系统协同控制架构是在基于 GOOSE 快

速通信机制的基础上构建基于配电柔性直流控制装置和交流保护控制装置有时序配合的协同控制架构。架构中包括与断路器一一对应的保护测控装置、柔性直流控制装置、交换机及中央控制单元,如图 2 所示。

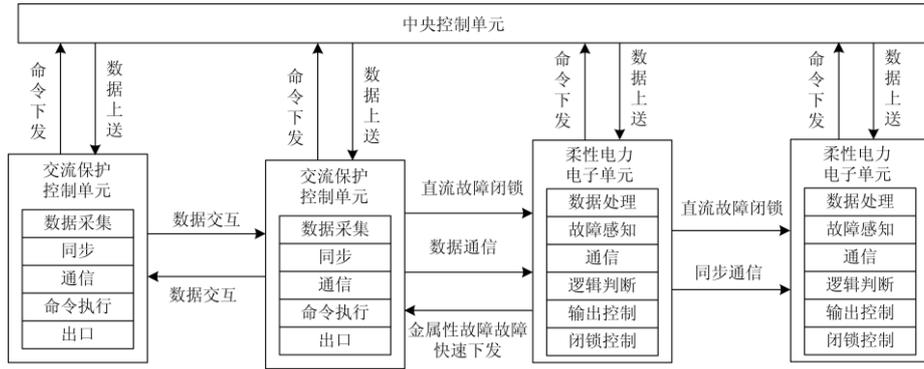


图 2 柔直装置与配电保护控制装置协同控制架构

Fig. 2 Cooperative control architecture of flexible equipment and distribution protection control device

为了交直流混合系统网络的可靠性,采用双网络通信结构,每台智能装置都包括两个网口,分别记为 A 网口和 B 网口,其中 A 网口接交换机、与监控相连, B 网口接相邻智能装置的 B 网口、实现网络握手,各智能装置之间采用 61850 通信标准,利用快速光纤网络,通过 GOOSE 机制实现各单元之间高速的数据交换和相互闭锁。对该配网中的非馈线末梢部分以相邻两个或三个以上断路器所确定区域为单元,网络末梢部分以末梢馈线断路器所分割的下游区域为单元,将整个交直流混合配电网划分为若干最小区域,以每一个最小区域作为一个智能装置关联区域;将一个保护装置关联区域内的智能装置设为一组,与中央单元之间利用组播广播方式传输信号,并设置遥信变位信号为最高优先传送等级;监控对接收信号进行逻辑判断,诊断故障并隔离故障区域。

### 3 保护控制策略

本文所提的交直流保护控制策略是在保证系统安全稳定的前提下,采用基于时序配合的柔性互联装置与配电保护控制装置协同控制架构,根据交直流系统中直流电力电子器件微秒级的快速感知及响应能力,与交流系统智能装置 GOOSE 快速通信配合。如图 3 所示,在柔直控制装置与交流系统相连区域发生金属性三相故障时,交流区域智能装置接收柔性直流控制装置的快速感知信号,实现快速故障隔离。在直流区域发生故障时,电力电子装置迅速闭锁直流区域,保证交流区域故障不穿越。同时,交流区域的智能保护测控装置配有智能分布式 FA 的故障判断和隔离功能,在交流系统与柔直装置不相连的区域,使用分布式 FA 的判据保证交流区域的安全稳定。

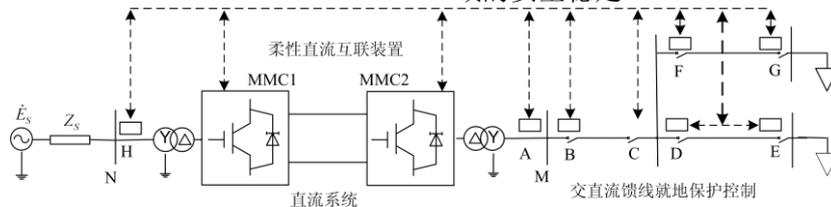


图 3 交直流系统装置配合示意图

Fig. 3 Schematic diagram of AC and DC system installation

在正常状态下,中央控制单元处于数据采集及全系统监控模式,直流互联电力电子智能单元及交流保护控制单元正常通信,进行信息交互,并将数据上送。中央控制单元在系统稳态时掌控全交直流

系统信息,在复杂的网架环境下提供系统稳定优化控制,提高设备利用率,提高直流电力电子装置供电能力。此外,中央控制单元可提前与配网主站通信,根据主站的高级应用分析功能,提前做好调度

计划, 根据潮流计算、网络分析等结果, 提前做好调度控制策略, 确保全交直流配网系统的稳定、经济运行。

在故障状态下, 交直流混合系统内的各智能装置依靠高速的通信网络进行信息交互和逻辑判断, 快速做出故障定位和隔离的就地控制, 避免了中央控制单元上层数据分析及指令下达的延时。柔性直流互联装置两端的 MMC 换流器模块在交流出口发生金属性三相短路时可在微秒级别的时间内感受到电压的骤降, 通过柔性互联装置内置的逻辑判断, 给相邻的智能装置快速发信, 相邻的直流出口处的保护控制装置收到柔性互联装置的故障信号, 发信给下一级的交流保护控制装置, 做出故障隔离判断及动作。同时, 直流侧发生直流故障时, 柔性直流互联装置先于交流侧保护装置识别到故障, 闭锁直流系统两侧的 MMC 换流器, 隔离直流故障, 防止故障穿越, 并用高速光纤通道发信给交流侧的智能保护测控装置及上游的中央控制单元, 确保交流侧保护不误动。

其次, 在非换流器出口处的交流侧发生故障时, 柔性直流互联装置不受影响, 交流侧的保护控制装置使用配置的分布式 FA 功能判别和隔离故障, 中央控制单元可为交流侧保护控制装置做出辅助决策, 对通信异常、开关拒动、开关越级跳等异常情况进行处理。

#### 4 时序验证

以图 1 的典型交直流配电网网络模型为例, 发生故障后, 交直流配电网保护控制装置首先检测到故障发生, 依靠相互通信或本地信息判断故障方向, 并发出信号断开故障点两侧最近的断路器, 然后跳开故障点两侧的开关, 实现故障隔离并恢复供电, 对应的流程图如图 4 所示。

交直流混合配电网故障处理步骤为:

- 1) 若保护控制装置采集到故障信息(来自柔性直流装置、自身或相邻装置), 则在保护启动后的短暂延时时限内继续收集相邻装置的故障信息。
- 2) 根据收集到的故障信息判断以该保护控制装置控制的开关为端点的配电区域内是否发生故障。若是, 则根据事先设置, 令所控制的断路器或开关跳闸, 或发信号使最靠近故障点的短路器跳闸; 否则不发出信号, 保持原状态不变。
- 3) 考虑柔性直流控制装置的快速动作和限流特性, 装置侧可根据实际情况直接断开最靠近故障点的负荷开关, 并控制柔性直流控制装置转为离网运行模式。

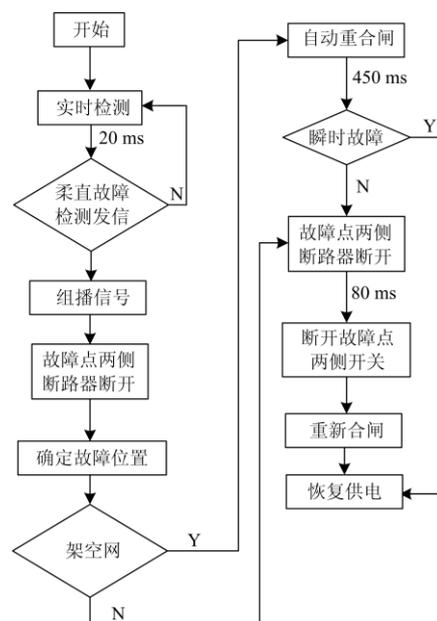


图 4 交直流配电网保护控制装置故障处理流程图

Fig. 4 Flow chart of fault treatment for AC and DC distribution network protection control device

图 1 的配网系统若配电路 AB 上发生故障, 若以该保护控制方案部署, 则其时序图如图 5 所示。其中, 40 ms 为保护控制装置从接受故障信号到故障判别出口时间, 120 ms 为断路器切除故障时间。

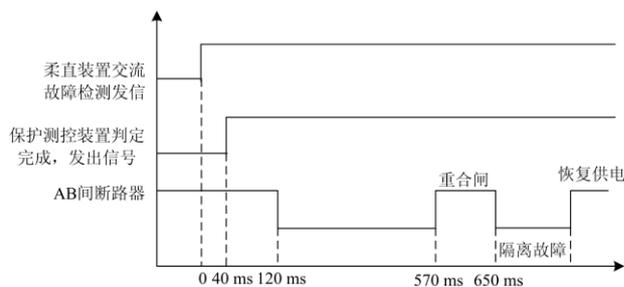


图 5 AB 上发生故障时的保护控制时序图

Fig. 5 Time sequence diagram of protection and control when the fault happened in AB

#### 5 结论

本文构建了一种柔性直流控制装置与交流侧保护控制装置基于时序配合的协同控制架构, 充分利用交直流柔性互联装置的电力电子器件的快速状态感知和交流侧保护控制装置实现故障的快速定位和故障切除特点, 实现同一交直流系统中包括柔性直流互联装置在内的智能装置的全局信息高速通信, 根据预设条件自动实现保护装置的快速故障定位、隔离。相对于传统的保护配置方式, 更适用于含柔

性直流装置的交直流配电网, 从而具有很高的应用价值。

参考文献

[1] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 13-18.  
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. One novel control strategy of the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.

[2] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.  
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.

[3] 夏成军, 杨仲超, 周保荣, 等. 考虑负荷模型的多回直流同时换相失败分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 76-81.  
XIA Chengjun, YANG Zhongchao, ZHOU Baorong, et al. Analysis of commutation failure in multi-infeed HVDC system under different load models[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 76-81.

[4] 杨冬, 刘玉田. 未来输电网架结构[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(4): 37-42.  
YANG Dong, LIU Yutian. Research on future structure of power transmission backbone[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2011, 26(4): 37-42.

[5] 江道灼, 郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 98-104.  
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 98-104.

[6] 陈艳霞, 常晓旗, 刘磊. 配电网故障及继电保护系统动态闭环数字仿真[J]. 电力科学与技术学报, 2007, 22(3): 64-67.  
CHEN Yanxia, CHANG Xiaoqi, LIU Lei. Closed loop and dynamic simulation of faults and protective relaying performances for distribution networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2007, 22(3): 64-67.

[7] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.  
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.

[8] 郑欢. 柔性直流配电网的若干问题研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014: 34-41.  
ZHENG Huan. Research on some problems of DC distribution network[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014: 34-41.

[9] 何奔腾, 金华烽, 李菊. 能量方向保护原理和特性

研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 166-170.  
HE Benteng, JIN Huafeng, LI Ju. Principle and property research of the energy directional protection[D]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 166-170.

[10] 何湘宁, 宗升, 吴建德, 等. 配电网电力电子装备的互联与网络化技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5162-5170.  
HE Xiangning, ZONG Sheng, WU Jiande, et al. Technologies of power electronic equipment interconnecting and networking in distribution grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5162-5170.

[11] 曾正, 杨欢, 赵荣祥, 等. 多功能并网逆变器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(8): 5-15.  
ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang, et al. Overview of multi-functional grid-connected inverters[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8): 5-15.

[12] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161.  
QIAN Zhaoming, ZHANG Junming, SHENG Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161.

[13] 陈树恒, 党晓强, 李兴源. 基于广义注入电流节点模型的配电网潮流计算[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 19-24.  
CHEN Shuheng, DANG Xiaoqiang, LI Xingyuan. Power flow method for distribution network based on generalized injecting current node model[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 19-24.

[14] 姚其新, 张侃君, 韩情涛, 等. 龙泉换流站直流控制保护系统运行分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 142-147.  
YAO Qixin, ZHANG Kanjun, HAN Qingtao, et al. Operation analysis of Longquan converter station HVDC control and protection system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 142-147.

[15] 龙智, 杨柳, 姚文峰. 广东电网远景直流落点优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 145-150.  
LONG Zhi, YANG Liu, YAO Wenfeng. Guangdong power grid DC placement optimization[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 145-150.

收稿日期: 2017-09-12; 修回日期: 2017-12-06

作者简介:

郑舒(1989—), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为交直流混合配电网运行控制关键技术; E-mail: carmeng89@126.com

赵景涛(1978—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为交直流混合配电网运行控制及配电网电能质量;

谭阔(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为智能配电网关键技术。

(编辑 葛艳娜)