

DOI: 10.7667/PSPC180561

交直流混合配电网继电保护研究综述

张兆云¹, 林璞^{1,2}, 王星华²

(1. 东莞理工学院, 广东 东莞 523808; 2. 广东工业大学, 广东 广州 510000)

摘要: 直流配电网友好兼容各类分布式电源和直流负载, 与现有的交流配电网构成交直流混合配电网是应对能源危机、环境污染的有效手段, 但缺少可靠、稳定的继电保护技术是制约交直流混合配电网发展的重要因素。概述了国内外交直流混合配电网继电保护的研究现状。总结了直流配电网的结构、故障特性、保护原理等方面的研究, 进而对交直流混合配电网的故障特性以及交直流相互作用对保护配置的影响进行分析。同时总结国内外对交直流换流器继电保护的研究。最后对交直流混合配电网继电保护技术的研究方向进行展望。

关键词: 交直流混合配电网; 直流配电; 继电保护; 故障特征

Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids

ZHANG Zhaoyun¹, LIN Pu^{1,2}, WANG Xinghua²

(1. Dongguan University of Technology, Dongguan 523808, China;

2. Guangdong University of Technology, Guangzhou 510000, China)

Abstract: The DC distribution grid can access friendly various types of distributed power supplies and DC loads. It is an effective means to deal with energy crisis and environmental pollution by forming AC-DC hybrid distribution grids with existing AC distribution grids. However, the lack of reliable and stable relay protection technology is an important factor that restricts the development of hybrid AC/DC distribution grids. The purpose of this paper is to outline the research status of relay protection for domestic and foreign DC hybrid power distribution grids. It summarizes the research on the structure, fault characteristics and protection principles of DC distribution grids, and then analyzes the fault characteristics of AC/DC hybrid distribution grids and the influence of AC-DC interactions on the protection configuration. At the same time, the research on the relay protection of AC/DC converters is summarized. Finally, the research direction of relay protection technology for AC/DC hybrid power distribution grid is prospected.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903205) and Science and Technology Plan of Guangdong Province (No. 2017A010104023).

Key words: AC/DC hybrid distribution grids; DC distribution; relay protection; fault features

0 引言

面对愈来愈严重的能源危机和环境污染, 世界各国在大力发展以风能和太阳能为主的清洁能源的同时, 大力推广电动汽车、变频家电等节能减排设备。这些分布式电源和直流负载都需要经过复杂的换流环节才能接入到交流配电网中。与交流配电网相比, 直流配电网的线路损耗小、供电质量好、供电可靠性高^[1]; 随着电力电子技术的飞速发展, 直

流配电网在接纳分布式电源、兼容直流负载上的优势也愈发明显。

但现阶段直流配电网的推广还受到新型直流断路器、DC/DC变换器、最优电压等级等问题的制约, 一段时间内无法大规模应用到实际电网中。同时之前的电网建设中, 交流配电方式技术成熟, 市场广泛, 不可能完全被直流配电网所取代。因此, 以交直流混合作为新型的配电方式, 能在保留现有交流配电方式优势的基础上, 充分发挥直流配电网的优势。

目前国内外对于交直流混合配电系统的研究还处于仿真实验阶段, 尚未投入实际运行的工程。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903205); 广东省科技计划项目资助(2017A010104023)

2017年,国家科技部启动了国家重点研发计划“智能电网技术与装备”重点专项开展交直流混合配电网的研究与试点工作,国家电网公司和南方电网公司两大电力公司以及清华大学、上海交通大学等国内高校都参与了研究,这是交直流混合配电网研究的最关键一步。与交直流混合配电系统刚刚起步相对的是,交直流混合输电系统的研究已较成熟,从1954年瑞典建成世界上第一条高压直流输电线路至今,国内外已有多个交直流混合输电系统投入运行。欧盟在综合各国实情的基础上,提出了“超级电网”的构想^[2];美国在总结其电力系统运行中出现的几次事故后,提出“Grid 2030”计划;我国目前已经建成天生桥—广州、准东—成都、哈密—郑州^[3]等多条直流输电线路,并逐步形成以交流输电网为骨架、以直流输电整合全国清洁能源、以广域中压交直流混合配电网分配电源,最后与地方低压配电网连接的交直流混合电网。交直流混合输电系统的成功实

践对于交直流混合配电网的研究具有很大的借鉴作用。

交直流混合配电网的运用前景良好,但缺少可靠的继电保护技术制约了发展。本文首先对直流配电网的结构、故障特征、保护原理进行详细的综述;进而对交直流混合配电网的结构,以及由于交直流相互作用对保护原理的影响进行综述;最后对模块化多电平换流器(MMC)的保护研究进行总结。

1 直流配电网保护

目前国内外学者已对直流配电网展开了研究,主要集中在拓扑结构、接地方式、换流器的控制策略等方面^[4-7],对于直流配电网继电保护技术的研究尚处于起步阶段。

1.1 直流配电网拓扑结构

直流配电网可以分为环形^[4]、放射型^[5]两种结构,如图1所示。

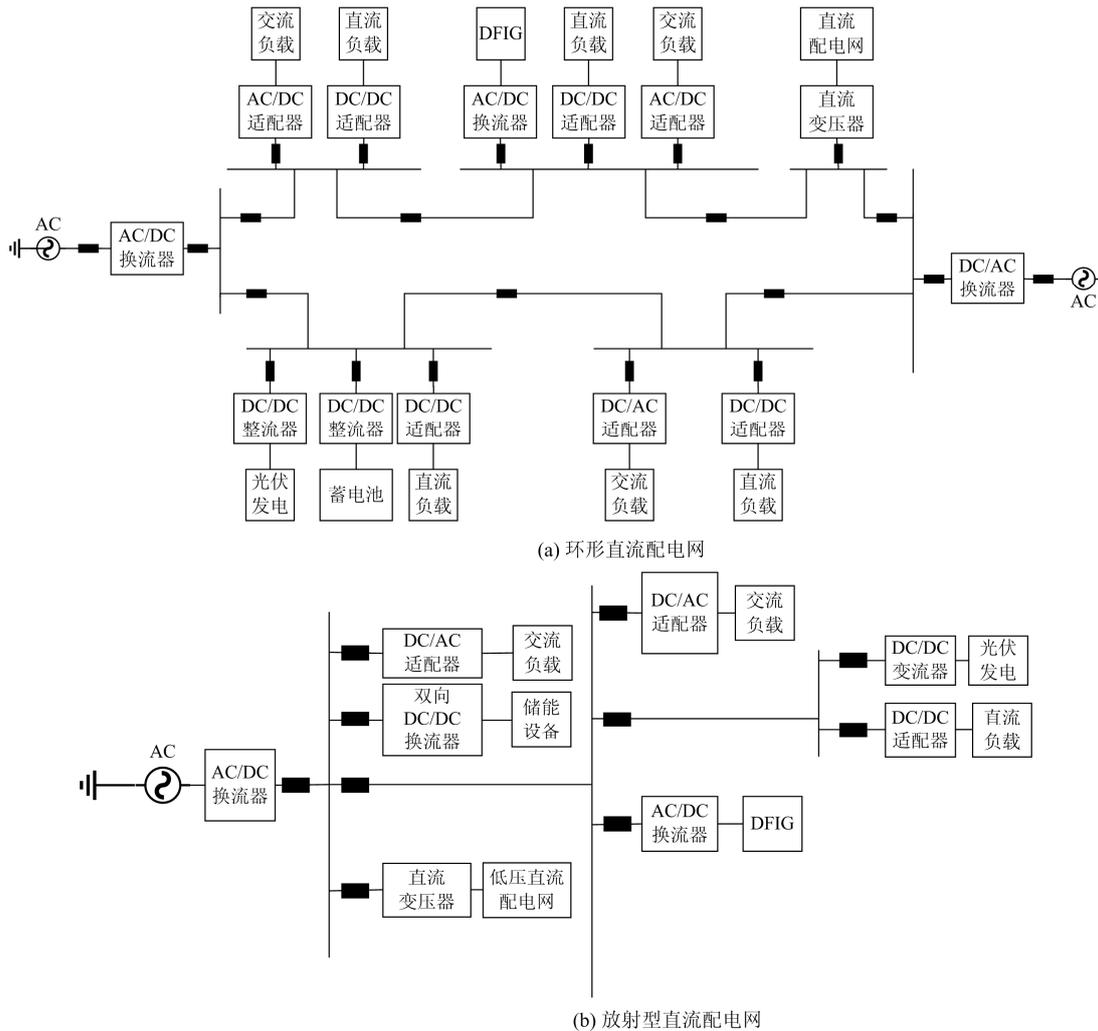


图1 直流配电网结构

Fig. 1 DC distribution grid structure

直流配电网通过换流器和交流配网连接, 各类分布式电源通过合适的换流器或整流器接入到直流系统中, 直流配电网通过各类适配器为负载提供多等级、多形式的电能。放射型配电网的结构简单, 易于设计, 保护配置相对容易, 但供电可靠性差; 环形配电网的供电可靠性高, 但在故障检测和保护原理上相对困难, 因此在实际运用中要综合考虑各方因素后, 再进行设计与建设。

1.2 故障特征及保护原理

1.2.1 故障特征

直流配电网的故障特性相较于交流配电网有如下的特殊之处:

(1) 与交流线路相比, 直流线路中只有电阻没有电抗, 因此直流线路的阻抗远小于交流线路的阻抗, 特别是在城市配电网中, 由于供电半径小, 相邻两个直流断路器保护范围内的短路电流差别小。导致传统的基于动作时间和整定值相互配合的三段式保护的选择性难以得到保证, 故障定位困难。

(2) 由于直流配电网接纳分布式电源的能力更强, 未来将有更多的分布式电源接入到直流配网中。当故障发生时, 这些分布式电源都会向故障点注入功率, 导致故障电流的峰值升高, 使短路电流上升率增大。对直流配电网的继电保护装置的快速性有更高的要求。

(3) 直流配电网按接地方式可分为不接地系统、高阻接地系统和低阻接地系统^[6-7]。不同的接地方式对于保护配置的要求不同, 接地系统在发生接地故障时会产生幅值很高的接地电压, 可能超过允许值, 导致设备受损; 不接地系统中, 当交流系统故障时, 换流器交流侧产生高电压, 可能损坏换流器。

(4) 直流线路中, 电流没有自然过零点, 造成灭弧困难。由于这一特征, 交流系统中成熟的灭弧技术无法直接运用到直流配电网中。文献[8]提出一种直流短路保护装置, 能有效灭弧。

1.2.2 保护配置

直流输电系统和直流配电系统都是基于电力电子技术发展起来的。研究前者的继电保护技术, 对于研究直流配电网的保护技术有一定的指导作用。

目前, 我国的高压直流输电线路中, 普遍以行波保护作为主保护, 以低电压和过电流保护为后备保护^[9]。同时, 学者们对新的保护原理开展一系列研究, 主要有边界保护、基于参数识别的保护、基于小波分析的保护、基于行波固有频率的保护^[10-13], 另外基于暂态能量、傅里叶分解、小波分解、差动、电流上升率等原理^[14-19]的保护技术也是学者研究的重点。

与直流输电系统相比, 直流配电系统的频变参数很小, 故障电流上升率更快, 且没有额外的限流器, 这对直流配电系统保护技术的选择性和快速性有更高的要求。在直流输电线路中广泛采用的行波保护是以电气突变量为基础的保护, 当系统发生高阻接地故障时, 其灵敏性受到影响; 而低电压和过电流保护的動作时间长, 通常达到 200 ms, 无法满足直流配电网快速动作的要求。文献[10]采用边界保护原理, 利用极波信息对故障特征进行定性分析, 该保护动作时间非常短, 但无法保护线路全长, 需要配置额外的保护; 文献[12]提出了基于小波算法的保护方案, 因小波算法具有优秀的奇异性信号检测功能, 能快速检测到故障, 在直流配电网的保护配置中有很好的应用前景; 文献[13]提出了基于行波固有频率的保护方案, 在送电距离较短、结构复杂的城市配电网中, 该方案因其不受电网结构影响的特点, 有良好的使用前景; 文献[17]提出基于局域均值分解与 Teager 能量算子结合的高压直流输电故障定位方法, 仿真结果表明该方法具有优越的选择性; 文献[18]提出利用线路两端电压电流的直流分量计算线路的电阻, 区内故障时, 计算电阻小, 区外故障时, 计算电阻大, 该方法有优秀的选择性。此外, 电流上升率及电流增量(DDL)保护在直流地铁牵引系统中已有较成熟的应用^[19], 其选择性优秀, 为未来直流配电网的保护原理研究提供了一个方向。

1.2.3 故障隔离

当直流系统发生故障时, 保护系统要快速检测并隔离故障。由于缺少经济、可靠的直流断路器, 有学者提出采用不基于直流断路器的保护配置方案, 直接利用交流侧断路器和直流侧快速开关配合来消除直流侧故障。这种方法具有配置简单、经济性高的优点; 但其缺点同样明显, 在放射状的配电网中采用该方法, 将导致整个直流系统停电, 无法满足选择性。在环状配电网中, 文献[20]采用熔断器和交流断路器配合的方式, 利用基于电流突变量的方法进行故障检测, 当检测到直流故障时, 使用握手法, 实现故障定位和清除。采用握手法虽能满足选择性的要求, 但熔断器和交流断路器的动作时间通常为 40~120 ms, 难以满足直流配电系统保护的快速性要求。

2 交直流混合配电网继电保护

现阶段直流配电方式完全取代交流配电方式是不切实际的, 交直流混合配电方式是未来配电方式的主流。交直流混合输电系统的实际运行经验表明,

交直流混合后二者的相互作用将导致故障后电气特征更加复杂,甚至可能导致传统的交流继电器和直流继电器误动或者拒动。

目前国内外对交直流混合配电网相互作用的研究较少,由于交直流混合输电系统与交直流混合配电系统都是基于电力电子技术发展的,研究交直流输电系统中的相互作用对研究交直流配电网的相互作用有巨大参考价值。交直流混合系统的相互作用分为直流暂态侵入、交流暂态侵入两个部分,国内外对于这两部分的研究都已取得一定进展。

2.1 直流侧故障对交流侧的影响

在交直流混合配电系统中,直流侧故障分为:单极接地故障、极间短路故障^[4]、换相失败,如图2所示。单极接地故障对系统的稳定性影响较小;极间短路故障将严重影响系统的稳定性,需要切除电源保持系统稳定。

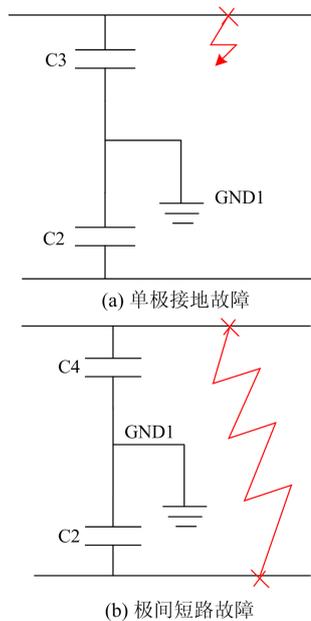


图2 直流侧故障

Fig. 2 DC distribution grid fault

换相失败是交直流混合系统中最常见的故障,现有研究表明任一侧的故障都有可能引起换相失败。由于交直流的相互作用,任一故障侧的暂态会侵入到对侧系统中,引起系统电气量的突变。文献[21-22]的电磁暂态仿真结果显示,在发生换相失败故障时,非特征谐波和非周期分量的含量将大大提高,以2、3次谐波为主的低次非特征谐波幅值大。非特征谐波会导致互感器饱和,造成交流侧保护配置的不正确动作。

我国的高压交流输电系统主要以纵联方向保

护为主保护,以过电流和低电压保护为后备保护,一些线路中也会采用距离保护和差动保护。交直流混合输电系统中,在直流暂态侵入工况下,交流侧不同的保护原理受到的影响也不同。华南理工大学的王钢教授团队,就直流暂态侵入对交流保护原理的影响做了详尽的研究,在文献[23]中,建立了直流系统等值工频变化量模型,并采用传统的全周傅里叶算法提取工频变化量,进而对换相失败时直流系统的等值工频电阻进行分析;文献[24]在文献[23]的基础上,对直流暂态侵入对故障线路的纵联方向保护的影响进行分析。直流暂态侵入会导致交流系统中的功率倒向,导致纵联方向保护的误动,通常加入一个40 ms的延时来躲过暂态功率倒向。文献[25]对直流暂态侵入对交流侧差动保护的影响进行分析,指出直流暂态侵入会降低电流差动保护的灵敏性,故障分量判据受到的影响大。并提出通过已有测点计算出虚拟测点的电流值以实现差动保护,在一定程度上提高了灵敏性。

距离保护的動作速度快、方向性明确、没有死区,在实际工程中被广泛采用。在直流侧故障工况下,由于交直流相互作用,传统交流侧的距离保护也将受到直流暂态侵入的影响。当交流侧发生故障时,直流侧表现为一个弱电源,导致系统等值阻抗与整定阻抗之比变大,使距离保护的保護范围缩小^[26-27]。

交直流输电系统和交直流配电系统在电压等级上有明显的不同,但两者在直流暂态侵入时,交流侧保护原理受到的影响是相似的。对于目前在交流配电网中广泛采用的三段式保护,由于直流换相失败时,大量低次谐波侵入到交流侧中,会导致电流互感器饱和,引起三段式保护的不正确动作。针对这一问题,应该对交流侧保护重新设计整定值,确保相互配合的正确性。

2.2 交流侧故障对直流侧的影响

在交直流混合系统中,由于交直流相互作用,当交流侧故障时,交流暂态侵入到直流侧中,会导致直流继电保护的不正确动作。文献[28]中提出由于交流暂态侵入的影响,导致换流器区保护和换流变压器区保护权责不清,影响直流保护配置的性能。文献[29]分析了交流暂态侵入对直流电压突变量保护的影响,直流系统中出现大量的谐波,会导致直流线路的谐波电压放大,导致电压突变量保护动作。文献[30]中分析国内多起交直流混合系统的事故,指出交流故障将引起直流换相失败,同时交直流两侧保护配合不足,导致直流系统未避开区外故障。

国内外的研究一致认为,交流暂态侵入是导致直流换相失败的主要原因之一^[31-32]。逆变器关断角

小于固有极限关断角是换相失败的根本原因。在交直流混合系统中, 交流侧故障位置、故障类型、故障时刻对换相失败都存在影响^[33]。交流暂态易引起直流换相失败, 而直流换相失败又会导致交流侧保护的不正确动作, 可见交直流混合配电网的暂态过程复杂, 对保护的要求更高。

现如今直流保护原理尚未取得重大突破, 且故障暂态过程复杂, 目前尚未有通用的直流暂态量的求解和分析方法, 面对交直流相互作用引起的保护配置的不正确动作, 目前主要采用故障反措思路。当保护不正确动作事故发生后, 技术人员展开研究, 改进保护逻辑, 避免相同故障再一次发生。

3 换流器保护

换流器作为交直流混合系统的核心, 其稳定、可靠的运行是保证系统可靠性的关键, 研究换流器的故障特性及其保护技术有重大意义。与传统的两电平或三电平换流器相比, 模块化多电平换流器(MMC)采用大规模子模块级联的结构, 其不需要将功率器件串联, 能有效提高电能质量, 提高故障处理能力。目前 MMC 拓扑结构、故障清除技术及保护技术的研究已较成熟, 国内外已有多条直流输电线路采用 MMC 结构的换流器。由于其特有的结构, MMC 换流器同样适用于交直流混合配电网中, 与在输电系统中的应用相比, 在配电网中使用的 MMC 换流器所需要的子模块数量更少, 结构更为简单, 经济性高。分析 MMC 换流器的结构以及故障特征对于分析交直流混合配电网的继电保护具有代表意义。

3.1 模块化多电平换流器(MMC)拓扑结构

图 3 所示为典型的 MMC 拓扑结构, 由德国的 Rainer Marquardt 教授于 2002 年提出^[34]。其中每一相由上下两个桥臂构成, 每一个桥臂由 n 个结构相

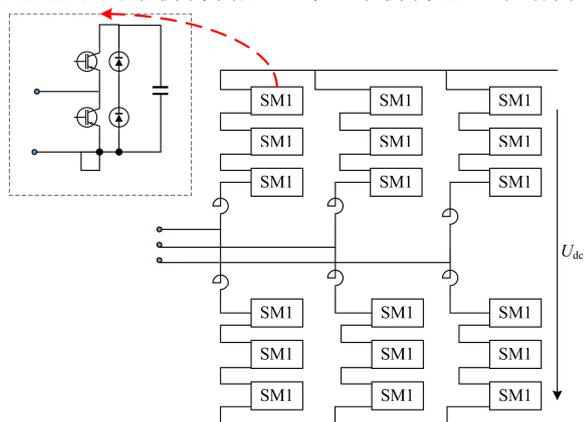


图 3 MMC 典型拓扑结构

Fig. 3 MMC typical topology

同的子模块(SM)与一个桥臂电抗器组成。电抗器的作用是抑制环流、降低桥臂电流的谐波畸变率。

子模块采用半桥结构, 由两个 IGBT 和两个反向并联的二极管构成。正常运行时, T1、T2 交替导通; 当 T1 导通、T2 关断时, 输出电压等于电容电压; 当 T1 关断、T2 导通时, 输出电压为 0。在不断的研究中, 也有学者提出全桥子模块和双钳位子模块的结构, 使换流器本身具备了一定的故障切除能力。

3.2 模块化多电平换流器(MMC)故障检测

MMC 内部故障主要是子模块故障, 可分为电力电子器件开路或短路故障、触发系统故障、储能电容器故障以及子模块过电压或欠电压故障。在内部故障检测方面, 文献[35]通过分析当前故障检测技术在快速性方面的问题, 提出一种改进预测模型的方法, 通过比较桥臂电流预测值和测量值的差值是否大于阈值来判断故障; 在文献[36]中提出基于状态观测器的模块化多电平换流器中绝缘栅双极晶体管(IGBT)开路故障检测方法; 在文献[37]提出一种基于卡尔曼滤波器的子模块故障检测方法, 通过由卡尔曼滤波器估计的状态变量和测量的状态变量进行比较从而检测故障; 文献[38]提出通过硬件电路实现检测, 与通过软件检测相比, 硬件检测的实时性更好, 但硬件检测电路复杂, 且需要加入相应的软件延时, 结构复杂使得可靠性降低; 文献[39]在分析子模块故障特性的基础上, 提出一种排除法以实现内部故障的检测和定位, 该方法不需要额外的硬件电路, 降低了复杂性, 但其检测故障的判据为每个控制周期中电容电压的变化量, 其对子模块的均压能力要求高; 文献[40]提出利用半桥子模块的电容电压、桥臂电流和即时的触发信号, 实现子模块的故障诊断, 能实现就地快速诊断。另一方面, 当 MMC 的直流侧发生故障时, 子模块中并联的二极管可能因为流过过电流而被击穿, 文献[41]提出一种新的自阻型子模块, 将一个电阻与二极管并联, 起到限制过电流的作用, 防止二极管被击穿。

上述的故障检测方法尚处于仿真实验阶段, 未在实际运行中证明其可靠性。在文献[42]中, 详细介绍了我国舟山多端柔性直流输电系统的换流站保护配置, 如图 4 所示。

换流站交流侧的换流变配置的主保护为变压器差动保护和交流短引线差动保护, 后备保护为变压器过流保护、交流短引线过流保护和异常交流电压保护。在换流区以桥臂电流差动保护为主保护, 过流保护为后备保护。在换流器直流侧以差动保护为主保护, 直流过压和欠压保护、直流过流保护以及直流电压不平衡保护为后备保护。

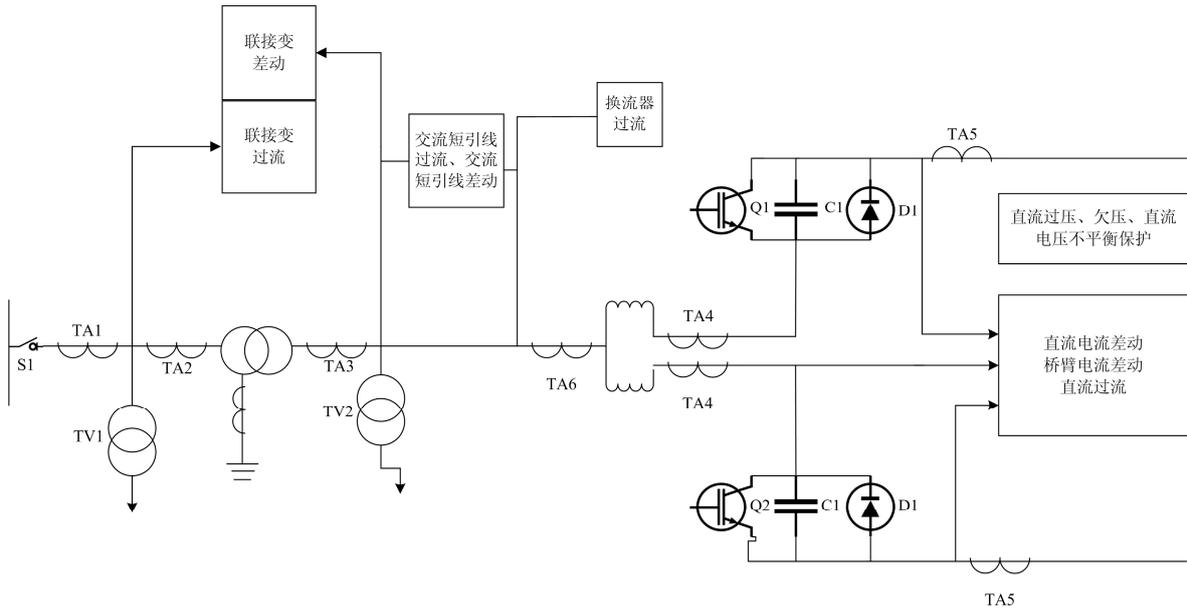


图 4 舟山换流站保护配置

Fig. 4 Zhoushan converter station protection configuration

3.3 模块化多电平换流器(MMC)故障恢复

检测出子模块的故障后，需要将故障子模块闭锁，而子模块的退出会造成桥臂不对称，影响系统的稳定性。为维持系统的稳定运行，实际工程中常采用子模块冗余设计。冗余设计分为冷备用和热备用两种^[43-44]。冷备用子模块在正常工作是闭锁的，该方法需要增加切换与充电电路，在故障发生后，无法快速投入到使用中^[43]。在文献[44]中提出将少量冗余子模块置于热备用状态，这些热备用冗余子模块能够以最快的速度接入桥臂来替换故障子模块。其余冗余子模块被置于冷备用的闭锁状态，能够保证 IGBT 中没有电流流过。工程中往往采用全热备用的设计，保证故障发生后，冗余子模块能在第一时间投入使用，这也要求系统中配置更多的充电装置或利用充电控制电路维持热备用子模块的电压。

交直流混合输电网中，换流器故障的检测原理在交直流混合配电网的换流器中同样适用。且配电网电压等级低，MMC 桥臂上的子模块也相对较少，所以备用子模块数量也相应地减少，采用全热备用子模块冗余设计，在保证可靠性的同时也不失经济性。

4 结论与研究展望

综上所述，交直流混合配电网在消纳分布式电源、提高能源利用率方面有巨大优势。交直流混合配电网继电保护是制约其发展的重要因素之一，国内外对于这一方面的研究还处于起步阶段。在未来

一段时间内，交直流混合配电网及其相应继电保护研究方向和热点主要集中在以下几个方面。

(1) 直流断路器研究

由于直流线路中电流没有自然过零点，直流断路器中需要额外的控制电路进行灭弧。机械式直流断路器的动作时间长、全固态直流断路器的通道损耗大，而混合式直流断路器集两者的优势，具有良好的应用前景，是未来直流断路器的发展方向。在文献[45]中，Kontos 等人对交直流混合系统直流侧故障对交流侧的影响做了详尽分析，由分析结果提出了新的直流断路器的设计要求。

(2) 故障检测技术研究

交直流混合配电系统中，由于交直流相互作用，暂态侵入将引起系统两侧电气量的异变，现有的故障检测手段难以保证选择性；在直流侧，其故障电流上升率大、峰值高，对继电保护的快速性有更高的要求。因此探索新的具有快速检测性能和选择性良好的保护原理对于交直流混合配电网的继电保护有重大意义。在这一方面，小波算法由于其敏感的奇异性检测性能，是研究交直流混合配电网故障检测的热点之一。

(3) 分布式电源接入直流配电网技术研究

含分布式电源的配网，当电网发生故障时，分布式电源注入电网的短路电流的大小与分布式电源的并网控制策略有密切关系，研究分布式电源的并网技术有助于分析含分布式电源的配电网的故障特性。目前分布式电源接入交流系统的研究已较成熟，

而分布式电源接入直流配电网的研究尚处于起步阶段。探索符合直流配电网特点的分布式电源并网技术, 为分析含分布式电源的直流配电网的故障特性及制定其继电保护方案奠定基础。

(4) 广域保护技术研究

交直流混合配电网中, 由于交直流相互作用, 其故障暂态极为复杂, 单独一种保护原理难以实现保护的快速性、选择性。在智能电网快速发展的大背景下, 在交直流配电系统中建立高效的通信系统, 实时获取系统中各部分的信息, 通过实时监控, 对系统运行中的故障做出快速反应, 能有效降低保护系统的复杂性。在未来越来越复杂的配电系统中, 广域协调保护有十分重要的作用。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姚美齐, 李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 549-555.
YAO Meiqi, LI Naihu. Development and solution of European supergrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 549-555.
- [3] 汤广福, 庞辉, 贺之渊. 先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1760-1771.
TANG Guangfu, PANG Hui, HE Zhiyuan. Development and application of advanced AC/DC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1760-1771.
- [4] PARK J D, CANDELARIA J. Fault detection and isolation in low-voltage DC-bus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 779-787.
- [5] KAKIGANO H, MIURA Y, ISE T. Low-voltage bipolar-type DC microgrid for super high quality distribution[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 3066-3075.
- [6] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 75-80.
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 75-80.
- [7] 戴志辉, 葛红波, 严思齐, 等. 柔性直流配电网接地方式对故障特性的影响分析[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2353-2362.
DAI Zhihui, GE Hongbo, YAN Siqi, et al. Analysis of the influence of the grounding mode of flexible DC distribution network on the fault characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2353-2362.
- [8] LUO F, CHEN J, LIN X, et al. A novel solid state fault current limiter for DC power distribution network[C] // 2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, February 24-28, 2008, Austin, TX, USA: 1284-1289.
- [9] 宋国兵, 高淑萍, 蔡新雷, 等. 高压直流输电线路继电保护技术综述[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(22): 123-129.
SONG Guobing, GAO Shuping, CAI Xinlei, et al. Survey of relay protection technology for HVDC transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(22): 123-129.
- [10] 束洪春, 田鑫萃, 张广斌, 等. ± 800 kV 直流输电线路的极波暂态量保护[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 96-104.
SHU Hongchun, TIAN Xincui, ZHANG Guangbin, et al. Protection for ± 800 kV HVDC transmission lines using pole wave transients[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 96-104.
- [11] 宋国兵, 靳幸福, 冉孟兵, 等. 基于并联电容参数识别的 VSC-HVDC 输电线路纵联保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 76-82.
SONG Guobing, JIN Xingfu, RAN Mengbing, et al. Pilot protection for VSC-HVDC transmission lines based on shunt capacitance parameter identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 76-82.
- [12] 肖文龙, 王维博, 刘勇, 等. 基于小波分析理论的特高压输电线路故障选相研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 90-96.
XIAO Wenlong, WANG Weibo, LIU Yong, et al. Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 90-96.
- [13] 武晓, 何正友, 彭少博, 等. 基于行波固有频率的特高压直流输电线路纵联保护方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(11): 67-73.
WU Xiao, HE Zhengyou, PENG Shaobo, et al. A UHVDC transmission line pilot protection method based on natural frequencies of traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(11): 67-73.
- [14] 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.
- [15] 李学鹏, 全玉生. 基于数学形态学暂态特征提取的高压直流输电线路精确故障定位[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 20-25.
LI Xuepeng, QUAN Yusheng. Accurate fault location for

- HVDC transmission line based on transient extraction of mathematical morphology[J]. *Modern Electric Power*, 2007, 24(2): 20-25.
- [16] BUIGUES G, VALVERDE V, ZAMORA I, et al. DC fault detection in VSC-based HVDC grids used for the integration of renewable energies[C] // 2015 International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), June 16-18, 2015, Taormina, Italy: 666-673.
- [17] 郝勇奇, 王倩, 周士琼, 等. 基于 LMD 与 Teager 能量算子的 VSC-HVDC 输电线路故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(1): 81-88.
HAO Yongqi, WANG Qian, ZHOU Shiqiong, et al. Fault location for VSC-HVDC transmission lines based on LMD and Teager energy operator[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(1): 81-88.
- [18] 杨亚宇, 郇能灵, 范春菊, 等. 基于计算电阻的高压直流输电线路纵联保护[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(7): 84-94.
YANG Yayu, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Longitudinal protection of HVDC transmission lines based on computational resistance[J]. *Acta Electrotechnical Sinica*, 2017, 32(7): 84-94.
- [19] 刘建华, 沈松伟, 周明平, 等. 一种新型城市轨道交通馈线电流保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(22): 84-89.
LIU Jianhua, SHEN Songwei, ZHOU Mingping, et al. A new protection method of feeder current in urban rail transit[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(22): 84-89.
- [20] PANG L, OOI B T. Locating and isolating DC faults in multi-terminal DC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(3): 1877-1884.
- [21] 邵震, 王炳炎. 直流输电换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. *高电压技术*, 2006, 32(9): 42-45.
SHAO Zhen, WANG Bingyan. Analysis on influence of HVDC commutation failure on AC relay protection[J]. *High Voltage Engineering*, 2006, 32(9): 42-45.
- [22] 张璞, 王钢, 李海锋, 等. 直流馈入下的输电线路电流差动保护动作特性分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(10): 1-5.
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Performance of current differential protection for transmission lines in HVDC/AC interconnected system[J]. *Power System Protection and Control*, 2010, 38(10): 1-5.
- [23] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(一)直流系统等值工频变化量阻抗模型[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(9): 41-46.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part one DC-system equivalent impedance of power-frequency component variation[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(9): 41-46.
- [24] 李海锋, 张璞, 王钢, 等. 直流馈入下的工频变化量方向纵联保护动作特性分析(二)故障线路的方向保护[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(10): 47-53.
LI Haifeng, ZHANG Pu, WANG Gang, et al. Performance of directional protection based on variation of power-frequency components in HVDC/AC interconnected system part two response of the directional protection for faulted line[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(10): 47-53.
- [25] 吴庆范, 付艳, 张克辉, 等. 柔性直流输电系统交流母线差动保护研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 100-104.
WU Qingfan, FU Yan, ZHANG Kehui, et al. Research on AC bus differential protection of flexible DC transmission system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 100-104.
- [26] 张璞, 王钢, 李海锋. 直流馈入下的输电线路距离保护动作特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(6): 56-62.
ZHANG Pu, WANG Gang, LI Haifeng. Performance of distance protection for transmission lines in an HVDC/AC interconnected power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(6): 56-62.
- [27] 张健康, 索南加乐, 何方明, 等. 交直流混联电网工频变化量距离保护动作特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(4): 98-103.
ZHANG Jiankang, SUONAN Jiale, HE Fangming, et al. Performance analysis of distance protection based on industrial frequency variation applied to AC-DC hybrid power grid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(4): 98-103.
- [28] 徐敏, 蔡泽祥, 韩昆仑, 等. 交直流混联电网中交流暂态侵入对直流继电保护的影响分析[J]. *高电压技术*, 2014, 40(11): 3618-3625.
XU Min, CAI Zexiang, HAN Kunlun, et al. Influence analysis of AC system transient invasion on DC protective relaying in AC/DC hybrid power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(11): 3618-3625.
- [29] 余江, 周红阳, 黄佳胤, 等. 交流系统故障导致直流线路保护动作的分析[J]. *南方电网技术*, 2009, 3(3): 20-23.
YU Jiang, ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, et al. Analysis on HVDC line protection action due to AC system fault[J]. *Southern Power System Technology*, 2009, 3(3): 20-23.
- [30] 朱韬析, 武诚, 王超. 交流系统故障对直流输电系统的影响及改进建议[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(1): 93-98.
ZHU Taoxi, WU Cheng, WANG Chao. Influence of AC system fault on HVDC system and improvement suggestions[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2009, 33(1): 93-98.

- [31] 李世龙, 陈卫, 李晓华. 交流故障引发直流换相失败响应的仿真研究[C] // 中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会, 2014年8月21-22, 中国, 北京.
LI Shilong, CHEN Wei, LI Xiaohua. Simulation study on DC commutation failure response caused by AC faults[C] // Academic Conference on Power Systems and Automation in Chinese Universities, August 21-22, 2014, Beijing, China.
- [32] 王玲, 文俊, 李亚男, 等. 谐波对多馈入直流输电系统换相失败的影响[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 27-34.
WANG Ling, WEN Jun, LI Yanan, et al. Influence of harmonics on commutation failure of multi-infeed HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 27-34.
- [33] 王钢, 李志铿, 黄敏, 等. HVDC 输电系统换相失败的故障合闸角影响机理[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 49-54.
WANG Gang, LI Zhikeng, HUANG Min, et al. Influence of initial fault voltage angle on commutation failure identification in a HVDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 49-54.
- [34] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range[C] // 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy.
- [35] 徐坤山, 谢少军, 袁小峰, 等. 模块化多电平换流器子模块故障快速诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 103-110.
XU Kunshan, XIE Shaojun, YUAN Xiaofeng, et al. Rapid diagnostic method for submodule failure in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 103-110.
- [36] 徐殿国, 李彬彬, 张一博, 等. 基于状态观测器的模块化多电平换流器 IGBT 开路故障的检测方法, 中国: CN104597370A[P]. 2015.
XU Dianguo, LI Binbin, ZHANG Yibo, et al. Detection method of IGBT open-circuit fault of modular multilevel converter based on state observer, China: CN104597370A[P]. 2015.
- [37] DENG F, CHEN Z, KHAN M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2721-2732.
- [38] 罗程, 赵成勇, 张宝顺, 等. MMC 控制系统时序逻辑与子模块故障监测[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 83-88.
LUO Cheng, ZHAO Chengyong, ZHANG Baoshun, et al. Sequential logic and sub-module fault detection of MMC control system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 83-88.
- [39] 李探, 赵成勇, 李路遥, 等. MMC-HVDC 子模块故障诊断与就地保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1641-1649.
LI Tan, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Fault diagnosis and local protection strategy of MMC-HVDC submodule[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1641-1649.
- [40] 郑涛, 张滋行. 基于半桥子模块的模块化多电平换流器内部故障诊断及对策[J]. 电力建设, 2018, 39(6): 42-48.
ZHENG Tao, ZHANG Zihang. Research on internal fault diagnosis and countermeasure of modular multilevel converter based on half bridge sub-modules[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(6): 42-48.
- [41] 薛士敏, 张超, 高博, 等. 基于模块化多电平换流器的直流电网保护方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(3): 8-16.
XUE Shimin, ZHANG Chao, GAO Bo, et al. DC power grid protection scheme based on modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(3): 8-16.
- [42] 马玉龙, 马为民, 陈东, 等. 舟山多端柔性直流工程系统方案[J]. 电力建设, 2014, 35(3): 1-6.
MA Yulong, MA Weimin, CHEN Dong, et al. System scheme of Zhoushan multi-terminals VSC-HVDC project[J]. Electric Power Construction, 2014, 35(3): 1-6.
- [43] 林周宏, 刘崇茹, 林雪华, 等. 基于载波移相调制的模块化多电平换流器冗余保护策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(20): 109-115.
LIN Zhouhong, LIU Chongru, LIN Xuehua, et al. Redundant protection strategy based on CPS SPWM for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(20): 109-115.
- [44] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 94-98.
GUAN Minyuan, XU Zheng. Redundancy protection for sub-module faults in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98.
- [45] DONTOS E, TSOLARIDIS G, TEODORESCU R, et al. On DC fault dynamics of MMC-based HVDC connections[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 497-507.

收稿日期: 2018-05-14; 修回日期: 2018-07-15

作者简介:

张兆云(1977—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 硕士生导师, 研究方向为新能源、智能微电网、智能配电网以及电力系统继电保护; E-mail: zhangzhaoyun@sina.com

林璞(1994—), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护和新能源;

王星华(1973—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和新能源。

(编辑 魏小丽)