

交直流混联电网短路电流限制与继电保护配合策略研究

魏 娟

江西诚达工程咨询监理有限公司 江西南昌 330000

摘 要: 随着电力系统向高比例可再生能源接入和远距离大容量输电发展, 交直流混联电网成现代电网重要形态。但交直流系统紧密耦合带来短路电流升高、故障特性复杂等挑战, 威胁电网安全稳定运行。传统短路电流限制技术和继电保护配置在混联电网适应性不足、配合困难。本文围绕交直流混联电网短路电流限制与继电保护配合策略研究。先分析交直流混联电网结构特征、短路电流产生机理与传播路径及对系统稳定性的影响; 接着梳理短路电流限制技术原理、常用装置类型及在混联电网的适用性, 评估不同限制策略对系统运行的综合影响; 再研究继电保护在混联电网的功能定位、保护配合原则与难点, 探讨保护装置协调机制, 提出限制措施与保护配合的协同策略。研究成果为交直流混联电网规划、设计和运行提供理论与技术支持, 提升电网抵御短路故障能力, 保障大电网安全稳定。
关键词: 交直流混联电网; 短路电流; 电流限制; 继电保护; 配合策略

引言

电力系统是支撑现代社会经济发展的关键基础设施。近年来, 为应对能源转型和资源配置需求, 以特高压直流输电为代表的直流输电技术快速发展, 形成交直流混联电网。该电网结构发挥输送容量大、控制灵活等优势的同时, 改变了传统纯交流电网故障特性。故障期间, 直流系统向交流系统注入大量故障电流, 使交流侧短路电流水平急剧上升, 部分区域超现有断路器开断能力, 威胁电网物理安全。而且, 交直流系统动态相互作用让故障电流特性复杂, 给继电保护判别带来困难。若短路电流未有效限制或继电保护动作错误, 可能引发连锁反应和大面积停电事故。因此, 研究交直流混联电网短路电流特性、开发限制技术、构建继电保护配合策略, 是当前电网运行与控制领域亟待解决的重大课题, 有重要理论和工程实践意义。

一、交直流混联电网短路电流特性分析

(一) 交直流混联电网的结构特征

交直流混联电网的结构核心在于交流系统与直流系统通过换流站实现互联。换流站内包含换流变压器、换流阀、平波电抗器、滤波器等关键设备, 是交直流能量转换和电气隔离的节点。根据直流系统与交流系统的连接方式, 可分为背靠背直流联网、两端直流输电和多端直流输电等不同形式。混联电网中, 交流系统通常呈网状结构, 而直流系统则以点对点或网络形式嵌入其中。这种结构使得电网在正常运行时功率流向灵活可控, 但

在发生短路故障时, 故障电流的来源和传播路径也呈现出多样性和复杂性, 既有交流系统内部电源提供的短路电流, 也有直流系统通过换流阀馈入的故障电流。

(二) 短路电流的产生机理与传播路径

在交直流混联电网中, 短路电流的产生机理因故障位置不同而异。当交流系统发生短路时, 交流侧的同步发电机和异步电动机等旋转设备将依据其电磁特性向故障点提供短路电流。与此同时, 与该交流系统相连的直流系统, 其换流阀在控制系统的作用下会做出响应。对于整流侧, 故障可能导致换相失败, 使得直流系统瞬间向交流系统释放大能量, 形成一股幅值高、上升快的冲击电流。对于逆变侧, 交流故障可能引起直流电压升高, 触发保护动作, 但在动作前也会对交流系统产生影响。短路电流的传播路径沿着电网的电气拓扑展开, 从故障点向四周扩散, 流经各级母线、线路和变压器, 最终到达各个电源点。直流系统提供的故障电流则通过换流变压器注入交流电网, 成为交流短路电流的重要组成部分, 其传播路径受限于直流系统的拓扑结构和控制策略^[1]。

(三) 短路电流的主要影响因素

交直流混联电网短路电流的幅值和波形特征受多种因素共同影响。首先是电网的运行方式, 包括开机数量、负荷水平、网架结构以及直流系统的输送功率。运行方式决定了系统等效阻抗的大小和电源的强弱, 直接影响短路电流水平。其次是直流系统的控制策略, 换流阀的触发角控制、低压限流环节等保护功能, 在故障发生时

其动作特性和响应速度，对直流馈入电流的峰值和持续时间具有决定性作用。再次是故障类型和位置，三相短路、两相短路等不同故障类型产生的短路电流大小不同，故障点距离电源或换流站的远近，也决定了电流传播路径上的阻抗压降。此外，系统中的无功补偿装置、同步调相机等设备的配置，也会对短路电流的动态过程产生影响。

（四）短路电流对系统稳定性的影响

过高的短路电流水平对交直流混联电网的稳定性构成多方面威胁。最直接的影响是对电气设备的物理破坏，巨大的电动力和热效应可能超出断路器、母线、变压器等设备的耐受极限，导致设备损坏。其次，短路电流引起的电压骤降，会影响周边用户的正常用电，并可能引发电动机失速、低压保护动作等问题。对于直流系统而言，交流侧的严重故障导致的电压跌落和波形畸变，极易引发换相失败，造成直流功率传输中断，并对两端交流系统产生功率冲击。如果继电保护不能快速切除故障，或切除不当，可能引发相邻线路的保护误动或拒动，导致故障范围扩大，甚至诱发系统振荡，破坏功角稳定和电压稳定，最终导致系统崩溃。

二、短路电流限制技术

（一）短路电流限制的基本原理

短路电流限制技术的核心目标是在电网发生短路故障时，通过某种方式快速增大故障回路的阻抗，从而将短路电流的峰值和稳态值限制在设备允许的范围之内。其基本原理是在故障发生瞬间，检测到故障电流的特征量（如电流变化率 di/dt 、电流幅值等）超过设定阈值后，迅速在故障回路中串入一个高阻抗。这个高阻抗可以是纯电阻、纯电抗，或者是它们的组合。理想的限流器应在正常运行时呈现极低的阻抗，以减少有功和无功损耗，对系统运行影响甚微；而在故障发生时，应在毫秒级时间内从低阻抗状态切换到高阻抗状态，有效抑制短路电流^[2]。

（二）常用限制装置的类型与特性

目前工程中应用和研究较多的短路电流限制装置主要包括基于电力电子器件的固态限流器、基于超导材料的超导限流器、以及具有串联电抗或串联谐振特性的传统限流装置。固态限流器利用大功率电力电子开关（如IGCT、IGBT等）的快速通断能力，结合电抗、电容等无源元件，实现阻抗的快速变换。其响应速度快，控制灵活，但存在通态损耗较高、成本昂贵等问题。超导限流器利用超导材料在超导态下的零电阻特性，以及在失超

后迅速转变为高电阻的特性来实现限流。它具有自触发、无损耗的优点，但依赖于复杂的低温制冷系统，技术成熟度和经济性有待提高。传统的串联电抗器结构简单、成本低廉、运行可靠，但其在正常运行时会产生持续的电压降和无功损耗，影响系统的电压质量和稳定性。串联谐振型限流器则通过在正常工况下构成谐振回路呈现低阻抗，故障时破坏谐振呈现高阻抗，兼顾了正常运行性能和限流效果，但参数设计复杂，体积较大。

（三）限制装置在交直流混联电网中的适用性分析

在交直流混联电网中应用短路电流限制装置，需充分考虑其特殊性和复杂性。对于交流系统，限流器的安装位置选择至关重要，通常安装在母线分段处、发电机出口或联络线走廊，以有效分割电网、阻断故障电流的汇集。对于直流系统，由于其故障电流上升速度极快，对限流器的响应速度要求极高，固态限流器因其快速性而更具潜力。此外，交直流之间的相互作用要求限流器的动作不能对直流系统的控制产生负面影响，例如，交流侧限流器投入后引起的电压波动不应诱发直流系统换相失败。因此，在选型和配置时，必须进行详细的电磁暂态仿真分析，评估不同限流方案对交直流系统动态性能的综合影响，选择既能有效限制短路电流，又对系统正常运行和稳定性影响最小的方案。

（四）限制策略对系统运行的影响评估

实施短路电流限制策略，在解决短路电流超标问题的同时，也会对电网的运行产生多方面的影响。首要影响是改变了系统的阻抗分布，这必然会改变系统的潮流分布和电压水平。限流器在正常运行时的小阻抗和故障时的大阻抗，使得电网的运行方式在故障前后发生突变，需要对继电保护的定值和配合关系进行重新校核和整定。其次，限流器的投入可能会降低系统的短路容量，影响系统的电压支撑能力和暂态稳定性。在某些情况下，过度的限流可能导致保护灵敏度下降，甚至造成保护拒动。因此，对限制策略的评估必须是全面的，不仅要看其限流效果，还要分析其对系统潮流、电压、稳定、保护配合等多个方面的综合影响，通过量化指标进行权衡，确保所采取的限制策略在技术上是先进、可靠且经济的^[3]。

三、继电保护配合策略

（一）继电保护在交直流混联电网中的功能定位

在交直流混联电网中，继电保护系统的基本功能仍然是快速、准确地识别故障元件，并将其从电网中隔离，以最小化故障影响范围，保障无故障部分的持续运行。然而，由于直流系统的引入，其功能定位有了新的

内涵。保护系统不仅要能应对传统交流系统故障，还必须能够正确识别和响应由直流系统故障或交直流相互作用引发的复杂故障形态。它需要具备更高的选择性和速动性，以防止因直流系统馈入的故障电流导致保护误动或延时动作。同时，保护系统还应为直流系统的控制提供必要的故障信息，协助直流控制系统采取正确的应对措施，如启动故障穿越功能或执行紧急停运。因此，继电保护在混联电网中扮演着电网安全第一道防线的核心角色，其性能直接决定了整个电网的安全水平^[4]。

（二）保护配合的基本原则与难点

继电保护配合的基本原则是选择性、速动性、灵敏性和可靠性。在交直流混联电网中，这些原则的实现面临新的难点。选择性方面，由于故障电流来源多、路径复杂，传统的基于电流幅值和时限阶梯的配合原则可能失效，难以保证仅由最靠近故障点的保护动作。速动性方面，直流系统故障电流上升极快，要求保护必须在数毫秒内做出判断，对保护算法的运算速度和采样率提出了极高要求。灵敏性方面，直流系统提供的故障电流可能改变故障电流的分布，使得某些保护装置的测量电流变小，导致灵敏度不足。可靠性方面，复杂的电磁环境和直流系统产生的谐波、非周期分量，容易对保护装置的测量和判断产生干扰，增加误动和拒动的风险。这些难点相互交织，使得交直流混联电网的保护配合成为一个复杂的技术难题。

（三）保护装置之间的协调机制

为了实现保护装置之间的有效配合，需要建立一套科学的协调机制。这包括不同电压等级、不同位置、不同原理的保护装置之间的协同工作。对于交流系统内部的保护，需要重新审视和优化其配合关系，可能需要采用基于通信的纵联保护（如光纤纵差保护）来替代或补充传统的距离保护和过流保护，以克服短路电流变化带来的影响。对于交直流接口处的保护，要实现交流保护与直流保护之间的信息交互和逻辑配合。例如，当交流系统发生故障时，交流保护应迅速动作并向直流系统发送闭锁信号，防止直流系统持续向故障点馈入电流。反之，直流系统的保护动作也应通知交流侧的保护，以便其采取相应的配合措施。这种协调机制的建立依赖于高速、可靠的通信网络和标准化的信息交互协议^[5]。

（四）限制措施与保护配合的协同策略

短路电流限制措施与继电保护配合并非相互独立，而是紧密关联、相互影响的。限流器的投入会改变故障

电流的大小和波形，直接影响继电保护的测量和判断。因此，必须将限制措施与保护配合进行协同设计。协同策略的核心思想是，将限流器的动作状态作为继电保护整定计算和逻辑判断的一个输入条件。在制定保护定值时，需要考虑限流器投入前后的系统阻抗变化，确保保护在两种状态下都具有足够的灵敏度和选择性。在保护逻辑设计中，可以利用限流器的动作信号作为辅助判据，例如，当检测到限流器已成功投入并限制了电流后，可以适当放宽某些保护的闭锁条件，或加速后备保护的動作。这种协同策略能够实现限制技术与保护技术的优势互补，形成一个有机的整体，共同提升交直流混联电网抵御短路故障的综合能力。

结语

交直流混联电网的短路电流限制与继电保护配合策略研究，是一项极具挑战性的任务。通过对短路电流特性的深入分析，可以更清晰地认识其产生机理、传播路径及影响因素，为后续技术开发提供理论依据。在实际应用中，限制技术的选择需结合电网的具体结构和运行条件，以实现最优的限流效果。与此同时，继电保护的配合策略必须充分考虑交直流系统的相互作用，通过科学的协调机制和协同设计，确保保护系统在复杂故障场景下的可靠性和速动性。未来的研究应进一步探索新技术的应用潜力，优化现有方案，并加强工程实践中的验证与改进，从而为交直流混联电网的安全稳定运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 林燕青. 柴油发电机组自动化控制系统的设计 [J]. 光源与照明, 2022, (11): 113-115.
- [2] 李建武, 姜焱. 核电站应急柴油发电机组调速系统对电气指标的影响 [J]. 柴油机, 2021, 43 (02): 38-41.
- [3] 陈志勇. 柴油发电机工作原理及电气典型故障分析 [J]. 农村电工, 2021, 29 (03): 45-46. DOI: 10.16642/j.cnki.ncdg.2021.03.053.
- [4] 王阳. 建筑电气柴油发电机组的安装与调试研究 [J]. 工程建设与设计, 2020, (09): 152-154. DOI: 10.13616/j.cnki.gcjsysj.2020.05.055.
- [5] 黄祯岚. 电气自动化技术在自来水厂机械设备中的应用 [J]. 数码设计, 2017, 6 (10): 75. DOI: 10.19551/j.cnki.issn1672-9129.2017.10.086.