

采用LCC技术的特高压直流输电

田兰芳

许继电气股份有限公司柔性输电系统分公司 河南 许昌 461000

摘要：LCC技术作为特高压直流输电的重要技术支撑，其原理基于电网换相换流器运行机制。特高压直流输电系统借助LCC技术实现长距离、大容量电能传输，大容量换流阀设计、直流系统控制保护等关键技术保障其稳定运行。然而，该技术面临换相失败风险高、对交流系统依赖性强等挑战。通过改进抑制技术、加强协调控制与优化补偿方案，可提升系统可靠性与经济性，对推动特高压直流输电技术发展具有重要意义。

关键词：LCC技术；特高压；直流输电

引言

随着能源跨区域调配需求激增，特高压直流输电技术成为保障电力高效输送的关键。LCC技术以其成熟的电网换相原理，在特高压直流输电工程中广泛应用。在实际运行中，换相失败、谐波污染等问题制约其性能发挥。深入研究LCC技术原理、关键技术及应对策略，对突破技术瓶颈、提升输电效率至关重要。本文将围绕LCC技术在特高压直流输电中的应用展开分析，探讨其挑战与优化路径。

1 LCC技术原理与特高压直流输电系统构成

1.1 LCC技术原理

LCC (Line Commutated Converter, 电网换相换流器) 技术基于晶闸管的单向导电性与电网电压自然换相特性实现交直流转换。晶闸管作为半控型器件，需在阳极电压为正且门极施加触发脉冲时导通，其关断依赖交流系统电压过零变负的自然换相过程。在整流侧，晶闸管桥在交流电压正半周按特定触发角顺序导通，将三相交流电转换为脉动直流电，通过平波电抗器抑制电流纹波；逆变侧则利用交流系统电压相位关系，在合适时刻使晶闸管电流过零关断，完成直流到交流的逆变换。LCC技术的核心在于精确控制触发角与熄弧角，前者直接影响直流电压与功率传输，后者确保换相过程顺利完成，避免换相失败。由于换相依赖交流系统提供换相电压，LCC对交流系统强度要求较高，需维持足够短路比以保证换相裕度，这使得其在弱交流系统场景应用存在局限性，但凭借高电压等级、大容量传输能力，在特高压直流输电领域占据重要地位。

1.2 特高压直流输电系统构成

特高压直流输电系统以 bipolar 结构为主，由两端换流站、直流输电线路及接地极系统构成。换流站作为能量转换核心，包含换流变压器、换流阀、平波电抗器、交

流滤波器等关键设备。换流变压器实现交流系统与换流阀的电气隔离和电压匹配，其漏抗特性影响换相过程；换流阀采用LCC技术时由晶闸管阀组串联组成，通过控制触发脉冲实现交直流转换；平波电抗器串联于直流线路，抑制直流电流波动并降低故障时电流上升率；交流滤波器则用于滤除换相过程产生的特征谐波，维持交流侧电能质量。直流输电线路采用多分裂导线，以降低电晕损耗与线路电阻，提高输电效率。接地极系统由接地极线路和接地极构成，为 bipolar 不平衡电流及单极大地回线运行方式提供通路，其设计需考虑土壤电阻率、热稳定性及跨步电压等因素。各子系统通过严密的控制保护策略协同工作，控制层实现直流电压、电流及功率的精确调节，保护系统则针对直流线路短路、换相失败等故障快速响应，确保系统安全稳定运行。

2 采用LCC技术的特高压直流输电关键技术

2.1 大容量换流阀设计技术

(1) 大容量换流阀作为特高压直流输电系统的核心功率转换设备，需在高电压、大电流工况下实现稳定可靠的电能交直流转换。其设计需突破传统阀组件的容量限制，采用模块化多电平换流器 (MMC) 拓扑与晶闸管串联技术相结合的方案，通过优化晶闸管参数选型，提高单个阀组件的通流能力与耐压水平，以满足特高压工程GW级功率传输需求。(2) 散热系统设计是大容量换流阀的关键环节，因功率损耗产生的热量若无法及时散发，将导致器件性能下降甚至损坏。采用相变冷却与强迫风冷复合散热技术，在阀塔内部构建高效热传导通道，配合智能化温控系统，可将晶闸管结温控制在安全阈值内，保障换流阀长期连续运行的可靠性。(3) 机械结构设计需兼顾电气绝缘与力学稳定性，这要求在方案制定时就综合考量多方面因素。通过有限元分析优化阀塔支撑结构，能精准定位结构薄弱点并加以改进。采

用高强度绝缘复合材料降低整体重量,同时增强抗震性能与抗电磁干扰能力,确保换流阀在复杂环境下仍能维持高精度的电气性能与机械强度^[1]。

2.2 直流系统控制保护技术

(1) 直流系统控制保护技术旨在实现电能的精准传输与系统故障的快速隔离。基于分层分布式控制架构,将控制功能分解为极控、站控与系统级协调控制,通过高性能数字信号处理器(DSP)与现场可编程门阵列(FPGA)协同运算,实现对换流器触发角、直流电压/电流的实时调节,保障系统运行于最优工况。(2) 保护策略需针对直流系统特有的故障特性设计,如直流线路单极接地故障、换相失败等。采用行波保护与差动保护相结合的快速保护方案,利用故障暂态行波的高频特征实现故障的毫秒级定位与切除;建立换相失败预测模型,通过提前调整触发角参数,降低换相失败的发生概率及对系统稳定性的影响。(3) 控制保护系统的可靠性直接关系到电网安全,需通过冗余设计与故障自诊断技术提升容错能力。采用三重化冗余配置,确保关键控制单元在单点故障时仍能正常运行;结合故障录波与在线监测技术,实现对系统运行状态的实时评估与隐患预警,提升直流系统的整体可用率。

2.3 交直流系统协调运行技术

(1) 交直流系统协调运行技术聚焦于解决交直流电网交互作用带来的稳定性问题。在特高压直流输电工程中,直流系统的功率快速调节特性可用于支撑交流系统频率与电压稳定,需建立交直流系统联合动态模型,分析直流调制对交流系统振荡模式的影响,优化直流附加控制器参数,实现交直流系统间的阻尼特性互补。(2) 多直流馈入受端电网的协调控制是技术难点,当多个直流系统同时向同一区域馈电时,需解决直流故障导致的功率转移引发的交流电网电压崩溃风险。通过构建多直流协调控制策略,基于电压稳定裕度评估模型,实时调整各直流系统的功率分配,避免受端电网电压失稳;设计直流系统间的功率调制协同机制,增强受端电网的抗扰动能力。(3) 新能源高占比场景下的交直流协同运行对传统控制策略提出新挑战,需将风电、光伏等间歇性电源的波动性纳入交直流系统运行优化框架。利用直流系统快速功率调节能力平抑新能源功率波动,通过交直流协调控制实现新能源的高效消纳与电网稳定运行的平衡^[2]。

2.4 电磁环境与绝缘配合技术

(1) 特高压直流输电系统产生的电磁环境问题包括直流合成电场、离子流场、无线电干扰等,需通过精细化建模与仿真技术预测其分布特性。基于有限元法建立

输电线路与大地耦合的三维电磁模型,分析导线参数、气象条件对电磁环境的影响规律,优化导线选型与杆塔结构设计,降低地面合成电场强度与无线电干扰水平,确保电磁环境指标满足环境安全要求。(2) 绝缘配合技术需综合考虑系统过电压特性与设备绝缘耐受能力,针对特高压直流系统操作过电压、雷电过电压等不同过电压类型,采用统计法与确定性法相结合的绝缘设计方法。通过优化避雷器配置与参数,限制过电压幅值;对换流变压器、直流电缆等关键设备进行绝缘裕度校核,确保设备在全寿命周期内能够承受各类过电压冲击。(3) 绝缘材料的性能直接影响设备可靠性,需研发适用于特高压直流环境的新型绝缘材料。采用纳米复合绝缘材料提升绝缘介质的电气强度与耐老化性能,优化绝缘结构设计以降低局部放电风险;建立绝缘状态在线监测系统,利用局部放电检测、介质损耗测量等技术,实现对绝缘设备状态的实时评估与寿命预测,保障特高压直流系统长期安全运行。

3 采用 LCC 技术的特高压直流输电系统面临的挑战与优化策略

3.1 面临的挑战

3.1.1 换相失败风险高

在基于LCC(电网换相换流器)技术的特高压直流输电系统中,换相失败是制约系统稳定运行的关键因素。LCC依靠交流系统提供换相电压实现电流换向,当受端交流系统发生故障导致电压大幅跌落,或交流系统强度不足、短路比下降时,换流器无法获取足够的换相电压,使得换相过程无法正常完成,进而引发换相失败。换相失败不仅会造成直流系统功率大幅波动,影响电能可靠输送,还可能导致连续多次换相失败,甚至引发直流系统闭锁,对整个交直流混合电网的安全稳定运行构成严重威胁。这种风险在多馈入直流输电系统中更为突出,系统间相互影响会进一步加剧换相失败的概率和危害程度。

3.1.2 对交流系统依赖性强

LCC型特高压直流输电系统对交流系统存在较强的依赖性。换流器的正常换相过程依赖交流系统提供稳定的电压和相位参考,换流站的无功功率需求也需要交流系统予以支撑。当交流系统发生故障或扰动时,其电压幅值和频率的变化会直接影响直流系统的运行性能,导致直流功率传输受阻、系统稳定性下降。在弱交流系统中,这种依赖性带来的问题更为显著,直流系统的运行控制受到极大限制,甚至可能引发系统电压崩溃。直流系统的故障也会对交流系统产生反作用,交直流系统间

复杂的相互作用关系增加了系统运行控制的难度和不确定性^[3]。

3.1.3 谐波与无功补偿问题突出

LCC型换流器在运行过程中会产生大量特征谐波和非特征谐波。由于其工作原理基于晶闸管的周期性触发和换相，会在交流侧和直流侧产生特定频率的谐波电流和电压。这些谐波不仅会导致电网电能质量下降，增加设备的损耗和发热，缩短设备使用寿命，还可能引发系统谐振，危及系统安全。LCC换流器在运行时需要消耗大量无功功率，其无功需求随直流输送功率的变化而变化。若无功补偿不足，会造成系统电压下降，影响设备正常运行；补偿过度又可能导致系统电压升高，增加设备绝缘负担，因此实现精确、灵活的无功补偿是LCC型特高压直流输电系统面临的重要难题。

3.2 优化策略

3.2.1 改进换相失败抑制技术

针对LCC技术特高压直流输电系统换相失败风险高的问题，可通过改进换相失败抑制技术提升系统稳定性。第一，采用先进的控制算法，如基于快速电压检测的提前触发控制策略，在交流系统电压下降初期迅速调整换流器触发角，提前进行换相，为换相过程争取更多时间，降低换相失败发生的概率。第二，研发新型换相失败抑制装置，如基于电力电子技术的动态无功补偿装置，在交流系统故障时快速提供无功支撑，维持换相电压稳定，增强系统抵御换相失败的能力。第三，优化换流器拓扑结构，引入混合多电平换流器等新型拓扑，改善换流器的换相特性，从根本上降低换相失败的风险。

3.2.2 加强交直流系统协调控制

为降低LCC型特高压直流输电系统对交流系统的依赖性，需加强交直流系统的协调控制。构建先进的交直流协调控制系统，通过实时监测交直流系统运行状态，建立精确的系统模型和协调控制策略。在交流系统发生故障时，快速调整直流系统的输送功率、触发角等控制参数，实现交直流系统间的功率快速平衡和相互支撑，减轻交流系统的负担，维持系统稳定运行。优化直流系统的控制逻辑，使其能更好地适应交流系统的变化，提

高交直流系统的整体动态性能和稳定性。利用智能控制技术和广域测量系统，实现交直流系统的全局优化控制，提升系统的运行可靠性和灵活性。

3.2.3 优化谐波治理与无功补偿方案

解决LCC型特高压直流输电系统谐波与无功补偿问题，需优化相应治理和补偿方案。在谐波治理方面，采用混合滤波技术，结合无源滤波器和有源滤波器的优势，针对不同频率和幅值的谐波进行精准抑制。无源滤波器可有效滤除主要特征谐波，降低设备成本；有源滤波器则能快速补偿非特征谐波和动态变化的谐波电流，提高滤波效果。在无功补偿方面，应用新型无功补偿设备，如静止同步补偿器（STATCOM）和统一潮流控制器（UPFC），这些设备具有响应速度快、调节范围广的特点，能够根据系统无功需求实时、精确地进行无功补偿，维持系统电压稳定。建立谐波与无功补偿的联合优化控制策略，实现二者的协同运行，进一步提升系统电能质量和运行性能^[4]。

结语

综上所述，LCC技术凭借独特原理及关键技术，在特高压直流输电领域占据重要地位。尽管面临换相失败、谐波治理等诸多挑战，通过针对性优化策略，可有效提升系统运行性能。研究成果为LCC技术在特高压直流输电中的持续应用与创新提供了理论与实践支撑。未来，随着技术不断革新，LCC技术有望在能源互联与清洁电力输送中发挥更大价值。

参考文献

- [1]徐鑫.特高压直流输电SLCC换流技术分析[J].电子技术,2024,53(11):308-309.
- [2]郭贤珊,厉璇,王庆,等.特高压直流输电技术发展现状与思考[J].新型电力系统,2024,2(3):237-250.
- [3]金楚,杨燕,卢洵,等.特高压多端直流输电技术应用研究[J].电力系统装备,2021(22):47-48.
- [4]黄剑湘,韩建伟,杨涛,等.特高压混合直流输电系统中串联换流器的电压分配策略[J].南方电网技术,2021,15(8):71-79.