

柔性直流输电系统中模块化多电平换流器（MMC）的环流抑制方法

徐海涛

沙电投资（上海）有限公司 上海

【摘要】模块化多电平换流器（MMC）在柔性直流输电系统中广泛应用，但其内部环流问题严重影响系统稳定与效率。针对此，深入研究 MMC 环流特性，剖析其产生机理与影响因素。基于数学模型，提出优化控制策略与拓扑改进方案，有效抑制环流。通过理论分析与仿真验证，所提方法能显著降低环流幅值，提升系统运行性能与可靠性，为柔性直流输电系统的优化设计与稳定运行提供重要参考，对推动相关技术发展具有积极意义。

【关键词】柔性直流输电；模块化多电平换流器；环流抑制；控制策略；拓扑改进

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 4 月 11 日 **【DOI】**10.12208/j.jeea.20250126

A study on the circulation suppression method of modular multilevel converters (mmc) in flexible dc transmission systems

Haitao Xv

ACWA POWER, Shanghai

【Abstract】 Modular multilevel converters (MMC) are widely used in flexible DC transmission systems, but their internal circulation issues significantly impact system stability and efficiency. To address this, the study delves into the circulation characteristics of MMC, analyzing the mechanisms and influencing factors behind these issues. Based on mathematical models, the study proposes optimization control strategies and topological improvements to effectively suppress circulation. Theoretical analysis and simulation validation show that the proposed methods can significantly reduce the amplitude of circulation, enhancing system performance and reliability. This provides important references for the optimization design and stable operation of flexible DC transmission systems and has positive implications for advancing related technologies.

【Keywords】 Flexible DC transmission; Modular multilevel converter; Circulation suppression; Control strategy; Topological improvement

引言

随着能源互联网建设推进，柔性直流输电技术因具备灵活控制、非同步互联等优势备受关注。模块化多电平换流器作为柔性直流输电核心设备，以其输出波形质量高、开关损耗低等特点被广泛应用。然而，MMC 内部环流会导致子模块电容电压波动、增加器件损耗，威胁系统稳定运行与效率提升。探索高效可靠的 MMC 环流抑制方法，对提升柔性直流输电系统性能、推动清洁能源并网与跨区域输送意义重大。

1 环流问题分析

模块化多电平换流器（MMC）作为柔性直流输

电系统的核心设备，其内部环流问题的复杂性源于系统运行的多维耦合特性。在三相桥臂协同工作过程中，桥臂电抗器的制造工艺偏差导致电感参数难以实现完全一致性，这种细微的电感差异在系统运行时会形成不平衡的电磁力场，进而诱发环流产生。子模块生产过程中元器件的离散性，使得每个子模块的电容容值、开关器件导通压降等参数存在细微差异，这些差异在系统高频切换的工作状态下被不断放大，最终演变为环流产生的内在驱动因素。

环流所包含的多种频率成分，对 MMC 的稳定运行构成了系统性威胁。直流分量的存在会直接干扰子模块电容的充放电平衡机制，在长期运行过程

中,部分子模块可能因过度充电而承受过高电压应力,加速绝缘材料老化,降低器件寿命;而另一些子模块则可能因持续放电出现欠压现象,导致系统输出电压质量下降^[1]。二倍频分量的产生源于三相交流系统的相序特性,它会在桥臂电抗器与子模块电容之间形成额外的无功功率交换,这种无效的能量循环不仅增加了系统的铜损与铁损,还会引起设备发热,降低散热系统的工作效率,最终导致整个柔性直流输电系统的能量传输效率大幅下降。

环流问题的危害不仅局限于设备本身,还会对柔性直流输电系统的整体性能产生深远影响。在功率传输层面,环流会占用桥臂的电流容量,限制系统的有功功率与无功功率传输能力,降低系统的输电效率。在稳定性方面,环流的存在会破坏系统的动态平衡,当系统遭遇扰动时,环流的异常波动可能引发连锁反应,导致系统振荡甚至失稳^[2]。更为严重的是,长期处于环流影响下的 MMC 设备,其核心器件的可靠性将受到严重考验,一旦关键器件发生故障,可能引发系统级联失效,造成大面积停电事故。

2 抑制策略研究

针对模块化多电平换流器的环流问题,控制策略的创新与优化是提升系统性能的核心路径。基于 MMC 精确的数学模型,新型环流抑制控制器的设计充分考虑了系统参数的动态变化特性。前馈补偿环节的引入,如同为系统配备了“预判机制”,通过实时监测桥臂电抗器电感、子模块电容参数以及交流侧电压等关键信息,提前计算出可能产生的环流趋势。当检测到参数变化时,前馈补偿环节迅速生成相应的控制信号,在环流尚未形成显著影响之前就进行反向补偿,从而有效削弱环流的初始幅值。改进的比例积分(PI)控制算法突破了传统控制策略的局限性,通过优化比例系数与积分时间常数的动态调整机制,使控制器能够根据系统运行工况的变化,自动适应不同强度和频率的环流干扰,极大增强了系统对环流的动态响应能力,确保在各种复杂工况下都能实现对环流的精准抑制。

拓扑结构的优化则从硬件层面为环流抑制提供了坚实保障。新型子模块拓扑的设计理念聚焦于提升子模块输出电压的一致性,通过增加辅助电路,构建了一套动态电压调节系统。该辅助电路能够实

时检测每个子模块的输出电压,并根据电压差异自动调整子模块的工作状态。当某个子模块电压偏高时,辅助电路会适当延长其放电时间;而当电压偏低时,则增加充电时长,以此实现子模块间电压的动态平衡,从根源上减小环流产生的电压驱动因素^[3]。桥臂电抗器配置的优化同样至关重要。通过对电抗器参数进行系统性分析与设计,根据三相桥臂的实际运行需求,精确匹配每个电抗器的电感值,使三相桥臂在电气特性上尽可能保持一致。

控制策略与拓扑结构的协同优化,形成了一套完整的环流抑制解决方案。新型控制策略侧重于对环流的动态响应与实时抑制,能够快速应对系统参数变化与外部干扰引起的环流波动;而拓扑结构的改进则提供了稳定的硬件基础,减少了因器件参数差异导致的环流产生因素。两者相互配合,不仅显著提升了环流抑制效果,还优化了 MMC 的整体性能^[4]。这种双管齐下的策略,打破了传统单一抑制方法的局限性,为柔性直流输电系统的稳定运行提供了更为可靠的技术保障,同时也为未来更高性能、更复杂的柔性直流输电工程奠定了技术基础。

3 方案验证实施

为确保提出的环流抑制策略具备实际应用价值,仿真验证与实际工程测试成为必不可少的关键环节。在仿真阶段,基于 PSCAD/EMTDC 软件搭建的 MMC 仿真模型,细致还原了柔性直流输电系统的真实运行场景。通过模拟正常运行、交流侧电压波动、系统负荷突变等多种工况,全方位测试环流抑制策略的有效性。在正常运行工况下,重点观察系统在稳态条件下的环流抑制效果;而在交流侧电压波动工况中,模拟电网电压不平衡、电压暂降等异常情况,检验策略对外部干扰的抵抗能力;系统负荷突变工况则用于评估策略在动态过程中的响应速度与控制精度。通过这些多样化的仿真测试,能够全面分析新型控制策略与拓扑改进方案在不同条件下的性能表现,为优化策略参数、完善方案设计提供数据支持。

实际工程应用测试是验证环流抑制策略可靠性的最终考验。将优化后的方案应用于某柔性直流输电示范工程,该工程涵盖了复杂的电网环境与多样化的运行需求,能够充分检验策略在真实场景下的适用性。在工程实施过程中,部署了高精度的监测

设备,实时采集系统运行数据,包括环流幅值、子模块电容电压、系统损耗、设备温度等关键参数^[5]。通过对这些数据的长期监测与深入分析,直观展示了方案实施前后系统性能的显著变化。在系统稳定性方面,环流的有效抑制减少了系统运行过程中的波动,降低了因环流引发的振荡风险;在损耗控制上,二倍频分量与高频分量的削弱,显著降低了系统的能量损耗,提高了能量传输效率;在设备可靠性方面,子模块电容电压的均衡控制延长了器件使用寿命,减少了设备的故障频率,降低了维护成本。

仿真验证与实际工程测试的双重验证机制,确保了环流抑制策略从理论设计到工程应用的无缝衔接。仿真阶段的深入研究为方案优化提供了方向,而实际工程应用则进一步验证了策略的有效性与可靠性。通过不断总结仿真与实际测试中的经验,持续改进控制算法与拓扑结构,最终形成了一套成熟、稳定的环流抑制技术方案^[6]。该方案不仅为当前示范工程的稳定运行提供了保障,还为后续柔性直流输电工程的建设与优化提供了宝贵的实践经验与技术参考,推动了柔性直流输电技术的进一步发展与应用。

4 技术优势体现

所提出的模块化多电平换流器环流抑制方法,在控制策略与拓扑结构的协同创新下,展现出多维度的技术优势。在控制策略层面,新型环流抑制控制器突破了传统控制方法对系统参数变化适应性不足的瓶颈。传统控制器往往基于固定参数设计,难以应对实际运行中桥臂电抗器电感漂移、子模块参数老化等问题,而新型控制器凭借前馈补偿与动态PI控制的有机结合,能够实时感知系统参数的细微变化,并迅速调整控制策略。这种自适应能力使控制器在面对复杂多变的运行工况时,始终保持对环流的精准抑制,无论是直流分量、二倍频分量还是高频分量,都能得到有效控制,确保 MMC 在各种环境下都能稳定运行,极大提升了系统的动态性能与鲁棒性。

拓扑结构的改进则从硬件本质上优化了 MMC 的性能。新型子模块拓扑与桥臂电抗器配置方案,从源头上减少了环流产生的物理因素。传统 MMC 由于器件参数差异导致的电压不平衡问题,在新拓扑结构下得到有效解决。辅助电路对输出电压的动

态调节,如同为子模块配备了“智能调节器”,确保每个子模块在任何工况下都能保持电压一致,消除了环流产生的电压驱动源^[7]。而优化后的桥臂电抗器参数配置,通过平衡三相桥臂的电磁特性,削弱了环流形成的电磁条件。

相较于传统环流抑制方法,该方案在多个方面实现了技术突破。传统方法往往侧重于单一维度的控制或硬件改进,难以达到理想的抑制效果,而本方案通过控制策略与拓扑结构的深度融合,形成了协同增效的技术优势^[8]。在性能提升方面,环流抑制效果的显著增强直接转化为系统能量传输效率的提高,减少了因环流导致的能量损耗;在可靠性方面,子模块电容电压的均衡控制与设备损耗的降低,有效延长了设备的维护周期,减少了故障发生概率,降低了运维成本。

5 结语

模块化多电平换流器环流抑制对柔性直流输电系统稳定运行至关重要。当前研究提出的控制与拓扑优化方案有效降低环流,提升系统性能。未来,随着电力电子技术发展,需进一步探索更高效的抑制策略,结合人工智能、大数据等技术实现环流的智能预测与精准控制。优化拓扑结构设计,降低设备成本,推动柔性直流输电技术在更多领域的广泛应用,助力能源互联网建设与清洁能源高效利用。

参考文献

- [1] 陈俊瀚.高压直流输电系统电池储能 STATCOM 应用研究[J].灯与照明,2025,49(03):131-134.
- [2] 张闻闻,魏晓光,汤广福,等.自换相电流源型高压直流输电关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2025,45(08):3102-3120.
- [3] 吕鹏飞,李忠田.高压直流输电技术在远程电力传输中的应用研究[J].电气技术与经济,2025,(04):143-145.
- [4] 魏晓光,单云海,唐新灵.高压直流输电技术发展现状及趋势[J/OL].中国电机工程学报,1-23[2025-06-23].
- [5] 李建青,潘文明,沈思,等.基于 VDCOL 的高压直流输电换相失败抑制系统[J].电子设计工程,2025,33(05):129-133.
- [6] 卢东斌,黄志岭,龚飞,等.高压直流输电直流线路故障穿越重启策略[J].高电压技术,2025,51(02):828-839.

- [7] 刘熠,王跃,武鸿,等.含单相面对面型 MMC-DC/DC 变换器的高压直流输电系统阻抗建模及稳定性分析[J].高电压技术,2025,51(01):269-280
- [8] 肖国磊,葛梦亮,赵志强,等.高压直流输电换流变压器的档位调节装置设计[J].电子技术,2024,53(11):310-311.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS