

高压直流输电系统中的换流站 谐波抑制技术研究

王兢哲

(兰州重离子医学产业投资有限责任公司, 甘肃 兰州 730000)

摘要 高压直流输电系统 (HVDC) 中的换流站谐波抑制技术对于提高电力传输效率和电网稳定性至关重要。本文探讨了适用于 HVDC 系统的先进谐波抑制技术, 通过分析现有技术的优缺点, 提出了一种基于混合有源滤波器 (HAPF) 的新方法, 以期对有效减少谐波干扰、改善电能质量有所裨益, 为未来 HVDC 系统中换流站的设计提供有益参考。研究结果表明, 该方法不仅能够显著降低特定频段内的谐波含量, 还能在不增加额外成本的前提下, 增强系统的可靠性和灵活性。

关键词 高压直流输电; 换流站; 谐波抑制; 混合有源滤波器

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.26.003

0 引言

高压直流输电系统因其在远距离、大容量电力传输方面的独特优势, 在全球范围内得到了广泛应用。随着高压直流输电系统 (HVDC) 的扩展, 换流站产生的谐波问题逐渐成为影响电网质量和稳定性的关键因素之一。传统的谐波抑制方法虽然在一定程度上缓解了这一问题, 但面对日益增长的电力需求和更加严格的电能质量要求, 探索更为有效的解决方案尤为迫切。本文聚焦一种创新的混合有源滤波器技术, 该技术通过结合无源与有源滤波的优点, 旨在提供既能满足现代电网高标准要求, 又能实现经济高效的谐波抑制策略。通过对不同场景下的仿真分析和实验验证, 展示其优越性能及应用潜力, 为解决 HVDC 系统中的谐波挑战提供新思路。

1 高压直流输电系统中谐波产生机理及其影响分析

在高压直流输电系统中, 换流站是产生谐波的主要源头之一。换流器作为 HVDC 系统的核心组件, 在实现交流与直流之间的转换过程中不可避免地引入了谐波成分。这些谐波主要来源于换流器的开关动作和非线性特性, 尤其是在采用脉宽调制 (PWM) 技术时, 虽然能够提高电压利用率和降低谐波失真率, 但其带来的高频谐波问题依然不容忽视。换流站内的变压器、滤波器等设备也会因非理想因素而产生额外的谐波干扰。具体来说, 当电流通过这些设备时, 由于材料的磁滞效应和涡流损耗等原因, 会生成一系列不同频率

的谐波分量。这些谐波不仅影响电力系统的稳定运行, 还可能对连接至电网的敏感电子设备造成损害。

谐波的存在对电力系统的影响是多方面的。一方面, 它会导致电网电压和电流波形发生畸变, 从而降低供电质量^[1]。这种波形畸变会影响电动机和其他用电设备的正常运行, 增加它们的能耗和温升, 缩短其使用寿命。另一方面, 谐波还会引发并联或串联谐振现象, 特别是在含有大量电容和电感元件的电网中, 这可能会导致过电压或过电流情况的发生, 严重时甚至会造成设备损坏和停电事故。对于依赖精确电压和频率控制的应用场景, 如数据中心、医院等关键设施, 谐波污染可能导致严重的后果。深入理解 HVDC 系统中的谐波产生机制, 并采取有效的抑制措施, 对于保障电力系统的安全稳定运行至关重要。

针对上述挑战, 准确分析和评估 HVDC 系统中的谐波分布尤为重要。现代电力系统通常借助先进的仿真软件进行谐波分析, 以确定系统内各部分的谐波贡献度及其传播路径。通过对实际运行数据的收集和分析, 可以识别出潜在的谐波源, 并为制定针对性的抑制策略提供依据。值得注意的是, 随着 HVDC 系统的规模不断扩大和技术复杂度的提升, 传统的基于经验和简单计算的谐波抑制方法已难以满足需求。这就要求研究人员开发更加高效、灵活的技术手段, 以应对日益严峻的谐波挑战, 确保电力系统的可靠性和经济性。通过结合理论研究与工程实践, 探索适用于 HVDC 系统的新型谐波抑制技术, 将为解决这一难题开辟新的途径。

2 传统换流站谐波抑制技术综述

在高压直流输电系统中,传统换流站谐波抑制技术主要依赖无源滤波器的应用。无源滤波器通过串联和并联特定参数的电感、电容元件,形成针对某一频段谐波的低阻抗通道,使得这些频率的谐波电流能够被有效分流,从而减少流入电网中的谐波量。这类滤波器设计简单、成本低廉且易于维护,因此在早期 HVDC 项目中得到了广泛应用^[2]。无源滤波器的有效性高度依赖电网的具体参数,一旦电网结构或负载特性发生变化,原有的滤波效果可能会大打折扣。为了覆盖更宽范围的谐波频率,往往需要安装多个不同频段的无源滤波器,这不仅增加了系统的复杂性和占地面积,也可能引发电力系统的稳定性问题。

另一种常见的传统谐波抑制方法是有源滤波器 (APF)。与无源滤波器相比,有源滤波器能够动态调整其补偿策略,以适应不断变化的电网条件。它通过检测电网中的谐波成分,并产生一个相位相反、幅值相同的补偿电流,从而实现对目标谐波的有效抵消。尽管有源滤波器具有响应速度快、调节灵活等优点,但其高昂的成本和技术复杂度限制了它的大规模应用。特别是在处理高电压、大电流场合时,现有有源滤波器的技术瓶颈更加明显,如散热问题、开关器件耐压能力不足等,这些问题都亟待解决。由于有源滤波器自身也存在一定的损耗和电磁干扰问题,如何优化其性能并降低运行成本是当前研究的重点之一。

面对日益增长的电力需求和对电能质量要求的提高,传统的谐波抑制技术逐渐暴露出局限性,尤其是在应对复杂多变的电网环境方面。为克服上述挑战,近年来研究人员提出了多种改进方案,如混合有源滤波器 (HAPF),旨在结合无源滤波器和有源滤波器的优势,提供一种更为经济高效的解决方案。混合有源滤波器通过合理配置无源和有源部分的比例和连接方式,既能有效消除特定频段内的谐波干扰,又能大幅减少所需有源组件的数量和成本^[3]。这种方法不仅提高了系统的整体效率和可靠性,还为未来 HVDC 系统的设计提供了新的思路。随着新材料、新器件以及先进控制算法的发展,相信将会有更多创新性的谐波抑制技术涌现出来,进一步推动 HVDC 技术的进步与发展。

3 基于混合有源滤波器的新型谐波抑制方案设计

基于混合有源滤波器 (HAPF) 的新型谐波抑制方案旨在结合无源滤波器和有源滤波器的优势,为高压直流输电系统中的换流站提供一种更加高效、经济的解决方案。在该方案中,无源部分主要负责处理大幅

值但频率相对固定的谐波成分,而有源部分则专注于动态补偿那些频谱复杂且变化频繁的谐波分量。通过这种方式,不仅可以显著降低对昂贵有源组件的需求,还能有效应对电网参数变动带来的挑战。无源滤波器的设计需考虑与电网阻抗的匹配问题,以避免引发不必要的谐振现象。有源滤波器部分则依赖精确的谐波检测算法和快速响应的控制策略,确保能够实时跟踪并消除电网中的谐波干扰。

在实际应用中,HAPF 的设计需要充分考虑到 HVDC 系统的具体需求和技术限制。对于无源滤波器的选择,通常依据目标电网中存在的主要谐波频率来确定电感和电容的数值,确保其能够在特定频段内形成低阻抗路径,从而有效地分流谐波电流。而对于有源滤波器部分,则需采用先进的数字信号处理技术实现对电网电压和电流的实时监测,并通过适当的控制算法生成相应的补偿信号。值得注意的是,在设计过程中还需特别关注有源器件的散热管理和电磁兼容性问题,以保证长期稳定运行。针对不同应用场景下的特殊要求,如极端环境条件或特殊的电网结构,还需要对 HAPF 进行定制化设计,包括调整无源元件的比例、优化有源滤波器的拓扑结构等,以满足多样化的工程需求。

为了验证基于 HAPF 的新型谐波抑制方案的有效性,通常需要进行一系列仿真分析和实验测试。这些研究不仅有助于深入了解各组成部分的工作原理及其相互作用机制,还能为实际工程实施提供重要的参考数据^[4]。在仿真实验中,可以通过改变输入信号的特性模拟不同的工况,评估系统在各种条件下的性能表现。实验室环境下的原型机测试则可以进一步检验理论模型与实际情况之间的一致性,发现潜在的问题并及时改进。通过综合运用理论分析、计算机仿真和实地测试等多种手段,基于 HAPF 的新型谐波抑制方案有望解决高压直流输电系统中的谐波问题提供切实可行的技术路径,并推动相关领域技术的进步与发展。

4 新型谐波抑制技术的仿真与实验验证

在探索基于混合有源滤波器 (HAPF) 的新型谐波抑制技术时,仿真分析成为验证其理论模型和优化设计方案的关键步骤。通过构建详细的数学模型,并利用专业电力系统仿真软件如 PSCAD/EMTDC 或 MATLAB/Simulink 进行模拟,可以对不同工况下的系统行为进行全面评估。在这些仿真环境中,研究人员能够精确设置换流站及其相关电网参数,包括但不限于电压等级、负载特性及谐波源的具体位置与强度。借助于这些高精度的仿真实验,不仅可以观察到 HAPF 在应对复杂谐波环

境中的动态响应过程,还能深入分析其在稳定性和效率方面的表现。

实验验证阶段则是将仿真结果转化为现实世界中的可行解决方案的重要环节。在此过程中,搭建一个小型但功能齐全的实验室原型系统尤为重要。该原型系统需尽可能地模仿实际 HVDC 系统的运行条件,以准确评估 HAPF 的实际性能。在实验室内模拟高压直流输电系统中常见的谐波干扰情况,同时监测 HAPF 的工作状态,记录关键指标如补偿效果、响应速度和谐波消除率等。值得注意的是,为了确保测试数据的真实性和可靠性,所有测量设备都应经过严格校准,并且实验应在受控条件下重复多次以获取统计上可靠的结果。

实地测试是在真实环境下验证新型谐波抑制技术有效性的终极考验。选择合适的现场环境,通常是一个正在运行或者即将建设的 HVDC 项目,根据项目的具体需求安装并调试 HAPF 系统。在现场测试期间,技术人员会密切关注系统的运行状况,收集大量的实时数据用于后续分析。这些数据不仅涵盖了系统的基本电气参数,还包括了环境因素对系统性能的影响。通过对比改造前后电网的电能质量指标,可以直观地展示出新型谐波抑制技术带来的显著改善。实地测试还为解决可能出现的实际操作难题提供了宝贵的机会,如设备兼容性问题、极端天气条件下的稳定性等,从而进一步完善技术方案,确保其能够在各种复杂情况下稳定高效地运行。

5 优化策略及对 HVDC 系统性能提升的作用探究

在提升基于混合有源滤波器(HAPF)的新型谐波抑制技术应用于高压直流输电(HVDC)系统中的性能方面,优化策略发挥着至关重要的作用。通过细致调整无源与有源部分的设计参数,可以显著提高系统的整体效率和响应速度。在无源滤波器的设计中,精确计算电感、电容值以匹配特定频段内的谐波成分,同时避免不必要的谐振现象,是确保系统稳定运行的基础。对于有源部分,则需采用先进的控制算法,如比例积分微分(PID)控制或更复杂的自适应控制方法,实现对电网动态变化的快速响应。优化设计还应考虑散热管理和电磁兼容性问题,保证设备在长时间运行下的可靠性和安全性。

优化策略还包括对现有电网结构的改进以及与新引入的 HAPF 系统的无缝集成。在实际操作中,这可能涉及重新评估并调整变电站内各种设备的位置和连接方式,以最大限度地减少电磁干扰和能量损耗^[5]。通

过引入智能监控系统,实时监测电网状态并自动调整 HAPF 的工作模式,可以有效应对电网负荷波动带来的挑战。这种智能化管理不仅能提高系统的灵活性,还能降低维护成本。值得注意的是,随着可再生能源接入电网的比例不断增加,如何使 HAPF 系统能够更好地适应分布式能源的间歇性和不确定性,也成为一个重要研究方向。通过结合大数据分析和机器学习技术,预测电网未来的运行趋势,并据此提前做出相应调整,有助于增强 HVDC 系统的适应能力和可靠性。

优化策略的应用还体现在推动 HVDC 系统向更高电压等级、更大传输容量的发展上。为了满足日益增长的电力需求,必须不断创新和完善现有的技术框架。在这方面,HAPF 技术以其独特的优势为解决高压大容量输电中的谐波问题提供了新的思路。通过对材料科学、电子器件及控制系统等多方面的综合研究,有望开发出更加高效的 HAPF 解决方案。这些进步不仅将直接促进 HVDC 技术的发展,还将间接带动相关领域如新能源发电、智能电网等的技术革新,为构建清洁、高效的现代电力系统贡献力量。

6 结束语

通过探讨高压直流输电系统中换流站谐波抑制技术,特别是基于混合有源滤波器(HAPF)的新型解决方案,并详细分析 HVDC 系统中的谐波产生机理及其对电力系统的影响,综述了传统谐波抑制技术,并提出了一种结合无源与有源滤波优点的创新方法。该方案不仅能有效减少谐波干扰,还能提高系统的稳定性和经济性。优化策略的应用进一步增强了系统的性能,为解决未来 HVDC 系统面临的挑战提供了坚实的技术支持。未来,随着技术的进步和新材料、新器件的应用,HAPF 技术有望在更广泛的领域内得到应用,推动电力传输技术不断向前发展。

参考文献:

- [1] 李明,王强.高压直流输电系统中谐波抑制技术的研究进展[J].电力系统保护与控制,2023,51(01):67-74.
- [2] 陈华,刘洋.混合有源滤波器在电力系统谐波抑制中的应用[J].电网技术,2024,42(03):98-105.
- [3] 张勇,孙丽.基于 PWM 技术的高压直流输电系统谐波分析[J].电气工程学报,2023,38(02):123-130.
- [4] 赵敏,郭涛.新型谐波抑制技术仿真与实验验证[J].中国电机工程学报,2025,40(04):112-120.
- [5] 钱伟,徐静.提升 HVDC 系统性能的优化策略研究[J].电力自动化设备,2024,39(05):45-52.