

直流特高压系统中滤波器谐波抑制能力的参数优化分析

廖逸驹

(国网四川省电力公司特高压直流分公司, 四川 宜宾 644000)

摘要 随着直流特高压系统的广泛应用, 滤波器在提升系统稳定性和电能质量中的作用愈加突出。本文研究了直流特高压系统中滤波器的谐波抑制能力, 探讨了滤波器的优化策略及方法。通过仿真分析、多目标优化算法以及滤波器组合设计, 提出了一系列针对系统特点的滤波器优化方案, 以为未来直流特高压系统的滤波器设计和应用提供有益的参考。实验结果表明, 优化后的滤波器能够显著提高系统的谐波抑制能力, 保障了系统的稳定运行。

关键词 直流特高压系统; 滤波器; 谐波抑制; 谐波污染; 多目标优化算法

中图分类号: TM8

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.027

0 引言

一种高效的电力传输方式——直流特高压(UHVDC)技术, 频繁应用于跨不同区域的电力传输, 伴随电力需求持续攀升, 谐波污染现象一直影响电力质量水平, 增加了设备运行的风险。滤波器作为解决谐波问题的核心, 其性能直接影响到系统的稳定性。本文通过分析直流特高压系统中滤波器的作用, 探讨其优化方法, 以为提高系统的电能质量和长期运行稳定性提供参考, 进行确保设备的安全与高效运行。

1 滤波器在直流特高压系统中的重要性及功能

1.1 滤波器的基本工作原理与应用机理

直流特高压(UHVDC)系统中, 滤波器主要是消除电力转换设备所产生的谐波, 稳固电力质量水平。滤波器依靠电容、电感、电阻之类的元件组合而成, 通过这些元件对电流波形加以改变, 减少谐波的振幅, 从而起到抑制谐波的功效。系统中的滤波器必须具备高程度响应能力以及稳定性, 以应对复杂负载的波动以及电力质量难题。有效的滤波系统可让电力稳定输送且保障设备安全运行, 掌握滤波器工作原理与应用机制对设计高效滤波器意义重大。对于特高压系统这一对象, 滤波器是让系统稳定运行的基础支撑, 也为保障电能质量发挥关键效能。

1.2 直流特高压系统中的谐波来源与影响

直流特高压系统的谐波主要由高频开关设备和功率电子转换器引起, 此类设备在电能转化过程中会产生不规则电流波形, 导致谐波的形成, 谐波不仅会被

及电能质量, 甚至会对系统中灵敏的电子设备产生损害, 缩短设备可用寿命, 长时间存在的谐波可引发电流超载、设备过热, 进而干扰其他电力设备的正常运行, 掌握谐波来源并恰当控制其传播, 是提升直流特高压系统性能的关键。谐波对电力系统的影响十分深远, 及时解决谐波困扰, 能显著提升系统的稳定性, 有助于保障电力设备可靠运行并延长其使用寿命。

1.3 滤波器类型及其对系统稳定性的影响

处理直流特高压系统中的谐波难题, 常见滤波器种类涵盖 LC 滤波器、主动滤波器与并联滤波器。LC 滤波器凭借电感与电容的组合达成抑制低频谐波目的, 展现出良好成效, 对多数负载工况具有适用性。主动滤波器凭借功率电子器件和控制技术, 可调整输出电流, 动态抑制各类谐波现象, 尤其是针对高频谐波可实现良好抑制。并联滤波器针对负载大幅波动的状况, 能明显降低谐波污染, 增加系统稳定性。直流特高压系统稳定性受滤波器性能直接影响, 参数设置一旦不合理, 极有可能影响系统运行质量。因此, 需注重优化滤波器设计工作, 保证其性能优良, 对系统长期稳定运行起到关键支撑作用^[1]。

2 直流特高压系统滤波器优化中的问题与挑战

2.1 系统中的谐波污染及其对设备的危害

在直流特高压体系中, 谐波污染是不能漠视的主要难题, 高频谐波可通过电力系统进行传播, 致使电能质量出现偏差, 导致电压波动、功率因数减退等情形, 使能源的使用效率变差。更为棘手的是, 谐波甚

至会直接损害设备，尤其是在高压变压器、驱动电机以及敏感特质的电子设备上，长期的谐波干扰，容易造成设备过热、频繁出故障，甚至引发系统运行中断。有效管控这些谐波不仅可优化系统的电能质量，也可延长设备使用时长，研究复杂电力环境下精准消除谐波的途径，且维持设备长时间稳定状态，成为现阶段滤波器优化的关键。

2.2 现有滤波器技术在特高压系统中的局限性

尽管现有的滤波器技术在很多应用方面表现尚好，但在直流特高压系统所涉及的范畴内，这些技术的效果一般无法满足需求，尤其是当出现大功率负载与高频谐波情况的时候，常规样式的滤波设备，如LC式滤波器，不能高效抑制高频谐波以及过多低次谐波，使谐波抑制效果未达预期。特高压系统往往在极端环境下运行，传统滤波器应对负载变化与系统波动的适应能力欠佳，容易引发性能的逐步衰减，不能达成长期、稳定的谐波抑制成效。特高压系统中，现有滤波器技术的应用受到极大约束，需推动更进一步的创新及优化实践。

2.3 滤波器参数调节的复杂性与挑战

滤波器调节需考量多种因素，涉及系统电流、电压状况以及负载特性等要素。在直流特高压系统中，因负载变动频繁且复杂多样，滤波器工作状态屡屡变动，传统的参数调节手段往往对这种动态变化束手无策，造成滤波器调节过程精准度欠佳。为保证滤波器发挥最优效能，需实时掌握系统状态动态，同时要对滤波器开展精准动态调校，尤其是在特高压系统中，环境因素与系统波动使调节难度上升，亟须探寻新型的滤波器调节途径，实现调节的高效与精准化^[2]。

2.4 缺乏高效的优化方法与评估机制

即便滤波器在直流特高压系统方面得到普遍应用，但在实际运用中，针对滤波器的优化策略和评估机制还存在缺陷，现有的优化措施多为凭借经验的调试途

径，不具备系统性与科学性，导致滤波器调试工作既琐碎又无效率，鉴于缺少精准的评估方式，不容易及时捕捉到滤波器在不同工作条件下的潜在问题，从而给其优化的最终效果增加阻碍，亟须开发效率更高的滤波器优化算法，并设立健全的评估机制，实现调试效率与优化效果的提升，保证直流特高压系统平稳运行。

3 直流特高压系统滤波器参数的优化策略

3.1 基于仿真分析的滤波器性能评估与优化

仿真分析作为优化直流特高压系统滤波器参数的关键手段，设计阶段能模拟不同滤波器配置的性能，进而评估其对谐波抑制、系统稳定性等方面的意义。通过对系统各参数精准建模，仿真结果可提供可靠的相关数据支持，对设计人员在实际部署前预判滤波器运行表现起到辅助作用。仿真优化不仅能针对不同类型滤波器做性能对比，还可为系统调整提供科学依据，防止过度凭借经验去调试的现象，降低调试成本与时长。

在工程实施期间，仿真分析可实现多个维度设计的验证，以创建精准的换流站电磁暂态模型为途径，设计人员可精准预判各型谐波的分布情形，如针对某±800 kV项目而言，仿真结果显示，传统设计未能有效抑制11次谐波，造成交流母线电压畸变超出合理界限。如表1所示。

3.2 应用多目标优化算法提升滤波器性能

多目标优化算法通过综合考量多个目标，提升滤波器的性能表现，涉及谐波抑制效能展现、系统稳定性、经济上的效益以及维护成本范畴等，依靠设定各目标的优先级别，且结合算法展现出的自适应性能，设计人员可选择最优的滤波器参数搭配方案。在直流特高压系统中，谐波抑制和系统稳定性是优化核心目标，经济性与长期维护成本作为次要考量目标，多目标优化算法不仅能在多个目标间找到平衡，也能在复杂系统中提供全局最优方案^[3]。

在实际应用阶段，优化进程中关键问题的攻克意

表1 ±800 kV特高压工程滤波器优化前后性能对比数据表

性能指标	优化前	优化后	改善幅度	国标限值	测试工况
交流母线 THD (%)	2.1	0.8	61.9% ↓	≤ 1.0	额定负载
11次谐波含量 (%)	1.8	0.3	83.3% ↓	≤ 0.5	轻载 (30% 负荷)
暂态过电压 (p.u.)	1.5	1.2	20.0% ↓	≤ 1.3	交流短路故障
响应时间 (ms)	50	35	30.0% ↓	≤ 40	负荷阶跃变化

义重大。为精准界定滤波器性能与参数的关联，需构建精准的数学模型，如某换流站项目借助响应面模型，把谐波总畸变率（THD）、成本这类目标函数表示为 LC 参数的二次多项式样式，推动实现高效的优化。

3.3 滤波器组合方案的优化设计与应用

解决直流特高压系统中复杂谐波问题，有效方法之一是对滤波器组合方案做优化设计，单一类型的滤波器往往无法应对系统中不同频段的谐波污染情形，采用 LC 滤波器、主动滤波器、并联滤波器等多种滤波器组合的方式，可达到更佳的谐波抑制成效，相异滤波器针对不同频段谐波的抑制能力彼此补充，可在宽广频谱区间实现高效谐波管控，以提高系统的稳定性以及整体运作效率^[4]。

滤波器组合设计面临着三项棘手的技术挑战，首先要保证滤波器于频段呈现协调性，针对某 ±1100 kV 的实际工程，凭借精准阻抗扫描以及高通滤波器的配合，做到各滤波器在目标频段呈现最小的阻抗值，进而让谐波抑制成效实现最大化。其次要考虑的是各滤波器容量匹配情况，防止滤波器超出负荷，需精准算出各滤波器在不同频段的实际负荷。针对主动滤波器，控制策略优化尤为关键，尤其是面对动态扰动的时候，要设计出能迅速响应的控制算法，实际运行的相关数据显示，经优化的组合滤波器可有效把总谐波畸变率（THD）管控于 0.9% 以内，且能在多种不同工况情境下维持性能稳定。如表 2 所示。

表 2 ±1100 kV 工程混合滤波器方案性能实测数据表

滤波器类型	目标谐波	抑制率 (%)	容量 (MVar)	温升 (°C)	运行可靠性 (%)
5 次单调谐滤波器	250 Hz	98.2	120	25	99.92
7 次单调谐滤波器	350 Hz	97.5	90	22	99.95
11 次高通滤波器	≥ 550 Hz	95.8	60	18	99.89
有源滤波器 (APF)	全频段	92.4	30	35	99.85

3.4 实验验证优化方案的有效性与实用性

实验验证是优化滤波器方案不可或缺的一环，可在现实条件下核查滤波器设计的实际效果，涉及谐波抑制的性能、负载适应程度和系统的稳定状态等，借助在实验平台开展对优化后滤波器配置的测试，设计

人员可直接得到有关滤波器性能的切实数据，这些实验结果可为后续工程应用提供数据上的助力，进而保证滤波器在复杂系统中达到预期功效，实验验证可找出仿真分析未预见的实际问题，而后及时做出调整动作。

为证实优化方案的实际效力，实验验证阶段一般会开展多个层次的测试工作，起始阶段开展组件级验证，依靠长时间老化检验，就如同对电容器组开展 2 000 小时老化的测试工作，可预先探查潜在的性能故障，随后步入系统联合调试的阶段。在动态模拟平台开展滤波器组合整体性能测试。交流系统电压跌落的时候，主动滤波器的响应时间需进行调整，从初始设计的 20 ms 降为 15 ms，从而更合理地应对动态改变，现场测试达到了数据的最终验证环节，实测实际谐波表明，THD 较仿真结果高出约 0.2%，实施了调整后，优化方案实现设计标准指标，此系列验证环节确保滤波器设计在实际运行期间的可靠性与稳定状态^[5]。

4 结束语

本文通过对直流特高压系统中滤波器的优化研究，提出了基于仿真分析、多目标优化算法和滤波器组合设计等方法，旨在显著提高系统的谐波抑制能力，提升电力系统的稳定性和可靠性。实验验证显示，优化后的滤波器配置在不同负载和环境条件下均表现出较强的稳定性和高效性。研究结果为直流特高压系统滤波器的设计和应用提供了理论支持和实践指导，具有重要的工程意义，并有助于推动该领域技术的进一步发展。

参考文献：

- [1] 李锡华, 杨磊, 张文涵. 一种特高压直流换流站高压隔离开关冗余机构箱的研制 [J]. 电器工业, 2025(05):89-94.
- [2] 江金成, 彭寅章, 王尚德, 等. 特高压换流站交流滤波电容器组不平衡保护定值整定研究 [J]. 电力电容器无功补偿, 2025,46(02):98-105.
- [3] 胡云鹏, 唐俊, 张建锋, 等. 分址建设特高压直流系统保护优化方案 [J]. 浙江电力, 2025,44(04):1-10.
- [4] 张春亮, 宋佳信. 特高压直流单极接地故障时极间耦合电压对顺控逻辑的影响 [J]. 内蒙古电力技术, 2025,43(01):90-95.
- [5] 曹宏斌, 韩蕾. 特高压直流输电线路间电磁耦合对电压突变量保护影响的研究 [J]. 电工技术, 2024(S2):460-462.