

工厂供配电系统谐波治理与电能质量改善技术研究与应用

金成昆

国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司

DOI:10.32629/btr.v8i6.4855

[摘要] 工厂供配电系统因非线性负载产生谐波,影响电能质量,引发设备故障、增加损耗等问题。本文分析谐波产生机理与影响,阐述无源、有源、混合滤波及谐波抑制优化等核心技术,探讨电能质量综合改善技术应用、滤波装置配置、控制策略改进、监测评估体系构建及运维管理措施,为工厂谐波治理与电能质量改善提供参考。

[关键词] 工厂供配电系统; 谐波治理; 电能质量改善; 技术; 应用

中图分类号: TM761 **文献标识码:** A

Research and Application of Harmonic Control and Power Quality Improvement Technologies in Factory Power Supply and Distribution Systems

Chengkun Jin

Ningxia Coal Industry Co., Ltd., National Energy Group, Olefins First Branch

[Abstract] Harmonic currents generated by nonlinear loads in factory power supply and distribution systems affect power quality, leading to equipment failures and increased losses. This paper analyzes the mechanisms and impacts of harmonic generation, elaborates on core technologies including passive, active, hybrid filtering, and harmonic suppression optimization. It discusses the application of comprehensive power quality improvement technologies, filter device configuration, control strategy enhancements, construction of monitoring and evaluation systems, and operation and maintenance management measures, providing references for harmonic control and power quality improvement in factories.

[Key words] Factory power supply and distribution system; Harmonic control; Power quality improvement; Technology; Application

引言

工业生产进程中,工厂供配电系统的稳定运行犹如大厦之基,支撑着生产的各个环节。但近年来,各类非线性负载设备的大量普及,使得谐波污染问题愈发尖锐,电能质量被严重劣化。谐波干扰易引发设备故障、降低产品精度,给工厂生产带来安全隐患与效率损失,还推高了运营成本。基于此,深入探究工厂供配电系统谐波治理与电能质量改善技术迫在眉睫,下文将对此展开详细探讨。

1 工厂供配电系统谐波产生机理与电能质量影响

工厂供配电系统的谐波核心源于非线性负载的电气特性,这类负载的电压与电流不遵循线性对应关系,在汲取基波电能满足生产需求的同时,会通过内部电力电子变换过程产生频率为基波整数倍的谐波分量,形成电网谐波污染。工业场景中,谐波源分布广泛且类型多样,其中变频器作为风机、水泵、反应器搅拌器等通用机械的核心驱动设备,因应用规模大、运行时间长,已成为最主要的谐波排放源;此外,整流器、加热器可控硅、电焊机、高

频加热设备等也会持续向系统注入谐波,不同设备的谐波频率、幅值特性存在显著差异,叠加后进一步加剧了污染复杂性。

谐波在系统中传播时,会从多维度劣化电能质量:其一,导致电压波形畸变率超标,对精密电子仪器、自动化控制系统、高低压保护器等敏感负载造成干扰,引发信号失真、测量误差增大、控制响应延迟,甚至设备误动作,影响生产连续性;其二,增加电力设备附加损耗,变压器、电动机等感性设备在谐波磁场作用下,铁损与铜损显著上升,温升超标既降低运行效率,又加速绝缘老化,缩短使用寿命,提升故障停机风险;其三,破坏功率因数平衡,谐波与基波电流叠加后有效功率占比下降,无功传输压力增大,导致线路损耗增加、电压降落加剧,供电容量利用率降低,间接推高用电成本;其四,存在谐振风险,当谐波频率接近系统固有频率时,会引发串并联谐振,产生局部过电压、过电流,严重时损坏断路器、互感器等关键设备,威胁系统安全稳定运行。因此,精准识别谐波源类型、明确谐波分布特征,是制定科学治理方案、实现电能质量有效改善的基础前提^[1]。

2 工厂供配电系统谐波治理核心技术分析

2.1 无源滤波技术

无源滤波技术是最早应用于谐波治理的传统技术,主要由电容器、电抗器和电阻器按特定方式组合构成,通过利用LC串联或并联谐振原理,在特定谐波频率下形成低阻抗通道,使谐波电流被滤波支路吸收,从而减少谐波向电网侧的传输。该技术具有结构简单、成本低廉、运行可靠性高、维护工作量小等优势,适用于谐波频率相对固定、负荷变化平缓的工厂场景,如整流装置等负载的谐波治理。但无源滤波技术也存在明显局限性:滤波特性受电网参数与负载变化影响较大,易产生串联或并联谐振风险;对不同频率谐波的滤波效果差异较大,难以实现宽频带谐波的高效治理;且在治理谐波的同时,可能会对系统功率因数产生一定影响,需配合无功补偿装置协同使用。

2.2 有源滤波技术

有源滤波技术基于电力电子变换原理,通过检测电网中的谐波电流,利用可控的功率半导体器件产生与谐波电流大小相等、方向相反的补偿电流,实现对谐波的实时抵消。该技术采用动态补偿方式,具有响应速度快、滤波精度高、适应负载变化能力强等特点,可有效治理2-50次的宽频带谐波,尤其适用于负载波动频繁、谐波成分复杂的工厂场景,如焊接厂房配电室使用焊机负载场所等。有源滤波装置还具备抑制电压闪变、补偿无功功率、平衡三相电流等多功能集成优势,能够全面改善电能质量。但该技术也存在成本较高、运行损耗相对较大、控制算法复杂等问题,其可靠性与使用寿命与电力电子器件的性能密切相关,在高电压、大容量场景下的应用仍需进一步优化。

2.3 混合滤波技术

混合滤波技术结合了无源滤波与有源滤波的技术优势,通常由无源滤波支路与有源滤波装置并联组成。其中,无源滤波支路主要用于吸收含量较大的特征次谐波,降低有源滤波装置的容量需求与运行损耗;有源滤波装置则用于补偿无源滤波支路未滤除的残余谐波,以及应对负载变化产生的动态谐波,同时抑制无源滤波可能引发的谐振风险。该技术既保留了无源滤波技术的经济性与大容量滤波能力,又兼具有源滤波技术的高精度与动态响应特性,适用于谐波污染严重、负载类型复杂的大型工厂供配电系统,如大功率加热器使用可控硅控制较多的配电室。混合滤波技术的关键在于合理设计无源滤波支路的参数与有源滤波装置的控制策略,实现两者的协同工作,以达到最优的谐波治理效果^[2]。

2.4 谐波抑制优化技术

除了上述滤波技术外,谐波抑制优化技术通过从源头减少谐波产生或优化系统运行方式,实现谐波治理的目的。源头抑制方面,可通过选用低谐波含量的电力电子设备,如采用PWM控制技术的变频器、高功率因数整流器等,从根本上降低谐波的产生量;同时,合理规划负载接入方式,避免多台非线性负载集中接入同一母线,减少谐波叠加效应。系统优化方面,可通过调整变压器接线方式、增加系统短路容量、优化无功补偿装置配置等

措施,改善系统阻抗特性,降低谐波放大风险;此外,采用谐波隔离变压器、滤波电抗器等设备,也能在一定程度上抑制谐波的传播与扩散。谐波抑制优化技术作为谐波治理的辅助手段,与滤波技术配合使用,可进一步提升工厂供配电系统的电能质量改善效果。

3 工厂供配电系统电能质量改善技术应用与优化

3.1 电能质量综合改善技术应用

工厂供配电系统的电能质量问题往往是多维度并存的,谐波污染通常伴随着电压偏差、无功功率过剩、三相不平衡等问题,因此需要采用综合改善技术实现协同治理。电压偏差治理方面,可通过调整变压器分接头、配置有载调压变压器或静止无功补偿装置(SVC),实时调节系统电压,使电压维持在允许范围内,满足不同负载对电压精度的要求。无功功率补偿技术与谐波治理技术密切相关,合理配置无功补偿装置不仅能提高功率因数,降低线路损耗,还能减少谐波放大的可能性。常用的无功补偿装置包括并联电容器组、静止无功发生器(SVG)等,其中SVG兼具动态无功补偿与谐波治理功能,能够快速响应负载变化,有效改善电压稳定性与三相不平衡状况。三相不平衡治理方面,可通过优化负载分配、采用不平衡补偿装置等方式,减少三相电流的不平衡度,降低中性线电流与线路损耗,避免因三相不平衡引发的设备过热与电压畸变问题。综合运用上述技术,能够实现谐波治理、电压调节、无功补偿与三相平衡的协同优化,全面提升工厂供配电系统的电能质量^[3]。

3.2 滤波装置优化配置策略

滤波装置的配置合理性直接影响谐波治理效果与投资经济性,需根据工厂供配电系统的谐波检测数据、负载特性、电网参数等因素进行科学规划。在配置原则上,应遵循“分区治理、就近补偿”的思路,将滤波装置安装在谐波源附近,减少谐波在系统中的传输路径,降低谐波对其他负载的影响。对于单台大容量谐波源,如大型变频器、加热器可控硅等,可采用就地补偿方式,配置专用的滤波装置;对于多台分散的中小容量谐波源,可在供电母线或配电变压器低压侧集中配置滤波装置,实现集中治理。在装置选型方面,需根据谐波频率分布、谐波电流大小、负载波动情况等参数,选择合适的滤波技术类型:谐波成分单一、负载稳定的场景可优先选用无源滤波装置;谐波成分复杂、负载波动频繁的场景则应选用有源滤波装置或混合滤波装置。此外,还需合理确定滤波装置的容量与参数,避免滤波装置与系统发生谐振,同时预留一定的扩容空间,以适应工厂未来生产规模扩大或负载增加带来的谐波变化需求。

3.3 谐波治理控制策略改进

控制策略是决定谐波治理技术效果的核心因素,尤其是对于有源滤波装置与混合滤波装置,先进的控制算法能够显著提升谐波检测精度与补偿响应速度。传统的谐波检测方法如傅里叶变换,在处理动态变化的谐波信号时存在检测延迟,难以满足实时补偿需求。为此,可采用改进型检测算法,如基于瞬时无功功率理论的ip-iq算法、dq变换法等,这些算法能够快速分离基

波分量与谐波分量,实现谐波电流的实时检测,提高补偿装置的动态响应性能。在控制策略方面,采用模糊控制、自适应控制、模型预测控制等智能控制技术,能够有效应对电网参数变化与负载波动带来的影响,优化补偿电流的跟踪精度,减少补偿误差。对于混合滤波系统,可设计协同控制策略,通过合理分配无源滤波与有源滤波的治理职责,使无源滤波装置承担主要谐波的滤波任务,有源滤波装置负责动态补偿残余谐波与抑制谐振,实现两者的优势互补,提升整体治理效果与运行经济性。此外,还可引入分布式控制理念,对于多台滤波装置并联运行的场景,通过协调各装置的工作状态,避免装置间的相互干扰,确保系统的稳定运行^[4]。

3.4 电能质量监测与评估体系构建

建立完善的电能质量监测与评估体系,是实现谐波治理与电能质量改善闭环控制的关键。工厂应根据供配电系统的结构特点,在关键节点如配电变压器高低压侧、重要供电母线、大型谐波源负载端等位置,安装电能质量监测装置,实时采集电压、电流、谐波含量、电压畸变率、功率因数等关键指标数据。监测装置应具备数据存储、远程传输与异常报警功能,能够及时发现电能质量超标问题,并为治理方案的优化提供数据支撑。在评估体系构建方面,需依据相关国家标准与行业规范,结合工厂生产实际需求,制定科学的电能质量评估指标体系,包括谐波电压限值、谐波电流允许值、电压偏差范围、功率因数标准等。通过定期对监测数据进行分析评估,掌握系统谐波污染的变化趋势、电能质量改善效果,识别潜在的电能质量风险点。基于评估结果,可及时调整滤波装置参数、优化控制策略,或对治理方案进行升级改造,确保电能质量始终维持在合格水平,为工厂生产的稳定运行提供保障。

3.5 运维管理与技术保障措施

有效的运维管理是确保谐波治理设备与电能质量改善系统长期稳定运行的重要保障。工厂应建立健全供配电系统运维管理制度,明确运维职责,定期对滤波装置、监测设备、无功补偿装置等进行巡检与维护,检查设备运行状态、接线紧固情况、绝

缘性能等,及时发现并排除设备故障隐患。加强对运维人员的专业培训,提高其对谐波治理技术、电能质量监测设备的操作能力与故障处理能力,确保能够快速响应并解决运行过程中出现的问题。此外,还应建立技术档案管理制度,详细记录供配电系统的参数配置、谐波治理方案、设备运行数据、维护记录等信息,为系统的长期优化与升级提供依据。在技术保障方面,可与科研机构、设备供应商开展合作,跟踪谐波治理与电能质量改善领域的最新技术进展,及时引入先进的技术与设备,持续提升工厂供配电系统的电能质量水平。同时,加强系统的应急管理,制定电能质量异常情况下的应急预案,如谐波超标导致设备停机的应急处理流程,最大限度降低电能质量问题对生产造成的损失^[5]。

4 结语

工厂供配电系统谐波治理与电能质量改善是一项系统工程,涉及多种技术与策略。通过合理应用无源、有源、混合滤波等技术,优化滤波装置配置与控制策略,构建完善的监测评估体系,并加强运维管理,可有效治理谐波,提升电能质量。未来,需持续关注技术发展,不断优化治理方案,以适应工厂生产变化,保障供配电系统稳定运行。

[参考文献]

- [1]向明辉.配电网无功补偿及谐波治理技术研究[J].电气开关,2025,63(1):59-62.
- [2]曾日桓.供配电系统中电能质量问题的成因与解决对策分析[J].科技与创新,2025(20):168-170.
- [3]王涛.基于谐波抑制技术的电能质量改善方法[J].电气技术与经济,2025(4):270-272.
- [4]熊明国,娄金文.轧钢电气系统谐波治理策略及其对电能质量的影响[J].中文科技期刊数据库(文摘版)工程技术,2025(3):136-139.
- [5]陈齐峰.基于谐波抑制技术的变压器电能质量优化方法研究[J].电气技术与经济,2025(9):398-401.