

Harmonic Detection Analysis and Comprehensive Management Scheme Design for Power Systems in Chemical Enterprises

Yan Li

Inner Mongolia Huaheng Energy Technology Co., Ltd., Wuhai, Inner Mongolia, 016061, China

Abstract

With the continuous advancement of production automation and equipment electrification in chemical enterprises, the extensive use of nonlinear loads in power systems has led to increasingly prominent harmonic issues. Based on the complex operational characteristics of chemical enterprises, this paper systematically analyzes the generation mechanisms, spectral features, and influencing factors of power system harmonics. A harmonic detection method based on multi-point monitoring and frequency-domain decomposition is proposed, along with a comprehensive management scheme integrating active power filtering (APF) and passive power filtering (PF). Through analysis of real-measured data from typical chemical plant power supply systems, the scheme demonstrates significant effectiveness in harmonic suppression, power factor improvement, and system safety enhancement. The study indicates that adopting a composite management strategy combining hierarchical detection, collaborative filtering, and intelligent control can achieve high-quality operation of power systems in chemical enterprises, providing technical references for industrial power management.

Keywords

Chemical enterprise; Power system; Harmonic detection

化工企业电力系统谐波检测分析与综合治理方案设计

李岩

内蒙古华恒能源科技有限公司, 中国·内蒙古 乌海 016061

摘要

随着化工企业生产自动化和设备电气化程度的不断提高, 电力系统中非线性负载的大量使用导致谐波问题日益突出。本文基于化工企业复杂工况特点, 对电力系统谐波的产生机理、频谱特征与影响因素进行了系统分析, 提出了基于多点监测与频域分解的谐波检测方法, 并构建了结合有源滤波(APF)与无源滤波(PF)的综合治理方案。通过对典型化工厂供配电系统的实测数据分析, 验证了该方案在谐波抑制、功率因数改善与系统安全性提升方面的显著效果。研究表明, 采用分层检测、协同滤波与智能控制的复合治理策略, 可实现化工企业电力系统的高质量运行, 为工业电能治理提供技术参考。

关键词

化工企业; 电力系统; 谐波检测

1 引言

化工企业电力系统负载类型复杂、连续性强且安全要求高, 电能质量直接影响工艺稳定与设备寿命。谐波电流会导致变压器过热、电容器损坏、保护误动作及能耗增加, 干扰自动化系统运行甚至引发电气事故。传统单一滤波或结构优化方法难以适应多工况与周期性波动特征。本文在分析谐波特征与危害的基础上, 提出以实时检测、源网协调与智能滤波为核心的综合治理方案, 以提升系统稳定性、改善功率因数并降低能耗, 为化工企业电能质量管理提供技术支撑。

【作者简介】李岩(1985—), 男, 中国宁夏人, 本科, 从事电力工程研究。

2 化工企业电力系统谐波特性分析

2.1 谐波的产生机理与分类

谐波的根源在于电力系统中存在大量非线性负载。化工企业广泛使用的变频调速装置、整流设备、电弧炉、电解电源等均在运行过程中引入电流波形畸变, 形成以基波频率整数倍为特征的谐波分量^[1]。根据谐波源的性质, 可将其分为电力电子类谐波、磁饱和类谐波与电弧类谐波三类。电力电子设备在能量转换时会因开关动作频繁产生大量奇次谐波, 其中5次、7次、11次等为主要成分; 磁饱和类谐波则源于变压器铁芯磁化特性非线性, 在低负载或过励磁状态下尤为显著; 电弧类谐波具有间歇性与随机性, 常见于电弧炉、焊接设备等工艺装置。化工企业负载运行连续、设备集中且功率大, 使谐波源长期叠加、传播范围广, 呈现出显著的持久性与耦合性。这种复杂的谐波环境不仅增加了治理难

度,也对系统设计与运行维护提出更高要求。

2.2 谐波的频谱特征与空间分布

化工企业供配电系统多采用分层分级的供电结构,不同电压等级下谐波的特征表现出显著差异。低压侧谐波含量最高,主要集中在5次与7次频率段,幅值较大;中压系统由于含有大量感性负载,其谐波频谱较宽,且波形畸变率(THD)呈周期性波动特征;高压系统虽谐波幅值相对较低,但因长距离输电会引发谐波传播与叠加效应^[2]。频谱分析结果表明,变频器、整流器和大型电化设备集中区域的电流谐波幅值远高于厂区平均水平,而配电母线和变压器二次侧的电压谐波比例相对较小。谐波的空间分布呈现出“源头集中、传导扩散、局部叠加”的规律,导致不同区域的谐波失真特征差异明显。由此可见,谐波治理应采取“分区检测、分层治理”的综合策略,在实现局部补偿的同时兼顾系统整体协调性,以保证供电系统的稳定运行与电能质量优化。

2.3 谐波对系统运行的影响机理

谐波电流在电力系统中会引发一系列复杂的电气与热效应,对化工企业的安全生产和设备运行产生深远影响。高次谐波的存在导致线路及变压器铜耗与铁耗显著增加,引起设备温升过高,加速绝缘老化并缩短运行寿命。电容补偿装置易与谐波频率发生谐振,可能导致电容器过载、过热甚至爆炸,严重威胁系统安全。与此同时,谐波干扰还会导致测量仪表读数失真、控制系统信号漂移,从而影响化工生产工艺的精度与稳定性。继电保护装置在谐波影响下可能误动作或拒动,破坏系统的保护协调关系。长期运行在高谐波环境下,不仅增加运维成本,还可能引发系统性电气事故^[3]。因此,开展系统化的谐波监测、分析与治理已成为化工企业保障电力安全和实现节能降耗的关键举措。通过科学检测与综合治理,可有效降低谐波危害,提升供电系统的可靠性与经济性。

3 谐波检测与数据分析方法

3.1 谐波检测技术体系构建

为了全面掌握化工企业电力系统的谐波分布规律,应建立多层次、分区化的检测体系。系统结构包括高压母线主监测点、关键工段分监测点及末端负载移动检测点,实现从系统级到设备级的全覆盖监测。数据采集采用高精度同步采样技术,通过快速傅里叶变换(FFT)算法对电压与电流信号进行频域分解,提取各次谐波幅值与相位信息。为增强实时性与动态响应能力,结合滑动窗分析技术,实现对谐波瞬时变化的连续跟踪。针对短时高频谐波或暂态畸变,可引入小波包分解算法,提升高频检测精度与时频分辨率。监测系统应具备多通道同步测量、时序对齐与数据冗余校验功能,以保证数据的精确性与稳定性,为谐波源定位与后续治理提供可靠数据支撑。

3.2 基于数据特征的谐波评估指标体系

传统总谐波畸变率(THD)指标虽然能反映总体波形

失真程度,但无法揭示局部过载及非线性影响的空间特征。针对这一不足,本文提出基于电压畸变率(THDu)、电流畸变率(THDi)与谐波能量分布系数(Eh)的三维综合评估体系。该体系通过对多点测量数据的频域加权与时域融合,实现谐波能量分布的可视化评估。实验数据显示,典型化工企业中低压配电区的THDi平均值约为12%,显著高于国家标准限值(5%),表明局部区域存在较严重的电流畸变问题。通过构建谐波热力图与能量矩阵,可直观反映谐波源的空间集中趋势与能量占比,为制定差异化治理方案提供技术依据。

3.3 监测数据的统计与趋势分析

长周期监测数据是识别谐波特征与分析变化规律的基础。通过时间序列建模与相关性分析,可以发现谐波幅值与负载波动、气候条件及生产周期呈显著相关关系。在大型电机启动或整流装置集中运行期间,谐波电流幅值常出现峰值突升现象,对系统稳定性产生冲击。利用主成分分析(PCA)方法对多维监测数据进行降维处理,可有效提取主要谐波源特征并识别关键影响因子。数据统计结果显示,5次和7次谐波占总能量比例超过60%,为主要谐波成分,而11次及以上高次谐波虽幅值较低,但在长期运行中对电能质量影响不可忽视。通过趋势建模与周期性分析,可为谐波治理方案的动态优化提供科学依据,实现电能质量从被动监测向主动控制的转变。

4 化工企业谐波治理方案设计

4.1 无源滤波器(PF)设计原则

无源滤波装置以电感(L)与电容(C)构成谐振回路,通过调谐至特定频率吸收对应次谐波,是目前工业企业中最常用的谐波抑制方式。化工企业电力系统中谐波源以整流设备和变频装置为主,谐波频率集中在5次、7次及11次,因此设计时应依据系统谐波频谱特征与阻抗分布进行针对性配置。滤波器的谐振频率应满足公式,并综合考虑电网波动、元件容差与运行温度变化的影响。为避免滤波器与系统之间发生谐振,可采用并联阻尼网络降低Q值,确保稳定吸收目标频率的谐波分量。针对典型化工厂供电系统,可在5次与7次频率点分别布置单调谐支路,在11次及以上高频谐波区域配置高通滤波器,实现宽频带滤波效果,既控制主要谐波源,又兼顾经济性与运行可靠性。

4.2 有源滤波器(APF)的动态补偿

有源滤波装置通过实时检测系统谐波电流并注入反向补偿电流,实现动态谐波抑制。其核心在于基于瞬时无功功率理论的电流控制策略,能够在不同负载条件下快速跟踪谐波变化。化工企业负载频繁波动,对补偿装置响应速度要求较高,采用滞环电流控制结合空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法,可有效提高动态响应性能与控制精度。多点分布式APF并联运行结构,可在多个配电节点同时进行补偿,优化母线电压稳定性并改善系统功率因数。实测结果表明,

APF投入运行后,系统电流总谐波畸变率(THDi)由12%降低至3%以下,设备发热与能量损耗显著减少,电能质量得到大幅改善。

4.3 混合型谐波治理系统的集成优化

为兼顾治理效果与经济成本,化工企业普遍采用无源与有源滤波装置相结合的混合治理方案。无源滤波器负责吸收低频主次谐波,有源滤波装置则动态补偿高频及非特征谐波,两者通过集中控制器实现智能协同运行。控制系统依据实时监测数据自动调整各滤波支路的投切状态与输出比例,使总补偿电流动态匹配负载谐波变化,从而实现高效抑制与功率因数优化。为保证系统运行安全,治理装置需配置过流、过压、过温与谐振保护模块。工程应用表明,混合型系统可在保障设备稳定性的同时将综合谐波畸变率控制在国家标准范围内,实现节能降耗与供电可靠性的双提升,体现出良好的经济与技术综合效益。

5 谐波治理系统的运行优化与安全控制

5.1 基于智能监控的系统运行管理

谐波治理的智能化运行管理是提升系统稳定性与治理效率的重要环节。通过建设集数据采集、状态监测、运行分析与自动控制为一体的智能监控平台,可实现电能质量的实时可视化与全周期管理。平台依托多点采集终端与高速通信网络,实时监测电压、电流、功率因数及谐波畸变率(THD)等关键参数,并自动识别异常波动与谐波超标事件。结合模糊控制算法与专家决策模型,对有源与无源滤波装置的投切顺序、补偿容量和运行模式进行自适应调整,避免过补偿或响应滞后现象。通过智能算法的动态修正,系统能根据负载变化自动优化运行状态,实现谐波治理与无功补偿的协同控制。与此同时,监控平台与企业能源管理系统(EMS)实现数据互联,在维持电能质量稳定的同时兼顾能耗优化与经济性控制,形成“监测—分析—优化—反馈”的闭环管理体系,为化工企业提供安全、高效、节能的运行保障。

5.2 安全防护与系统稳定措施

谐波治理系统运行过程中存在谐振耦合、装置发热、控制失稳等潜在风险,需通过系统性防护设计加以控制。设计阶段应利用阻抗扫描分析法,对系统谐振频率与滤波器参数进行预评估,防止谐波放大与系统振荡。运行环节应配备快速隔离与故障切除装置,当出现过流、过压或控制失步时,系统能在毫秒级响应下实现安全退出,保障主系统运行稳定。保护继电器的动作阈值应结合谐波电流频谱特征重新设

定,防止因波形畸变导致的误动或拒动。为提高设备运行可靠性,维护周期应不低于半年,重点检测滤波电容、电抗线圈及功率模块的温升与绝缘性能。对于有源滤波器(APF),需定期校验其控制算法响应时间及电流采样精度,确保动态补偿的准确性。通过构建“预防—监测—响应—修复”的安全体系,可有效保障系统在复杂工况下的长期稳定运行。

5.3 综合治理效果的评估与优化策略

谐波治理系统的运行效果需通过科学的评估体系加以验证与优化。应建立涵盖电能质量、能效指标与设备安全性的综合评价模型,将谐波畸变率(THDu、THDi)、无功补偿率、温升水平及系统能耗等指标作为核心参量。通过治理前后的对比分析发现,系统THDu平均降低约65%,功率因数从0.86提升至0.97,电气设备发热显著减轻,年节能率达到3.8%左右。为保持长期高效运行,可引入智能优化算法,如遗传算法(GA)与粒子群优化(PSO),对滤波参数、补偿容量与控制策略进行迭代修正,实现治理装置的自学习与自优化功能。优化过程中,算法根据实时运行数据动态调整控制目标,使系统在多工况下保持最优能效状态。通过数据驱动的持续优化与性能反馈,谐波治理系统可实现由静态补偿向动态智能调控的演进,为化工企业建立可持续、高韧性的电能质量保障体系。

6 结语

化工企业电力系统的谐波问题具有多源性、耦合性与动态性特点,其治理不仅关系到设备安全运行,也直接影响生产效率与能耗水平。本文通过分析谐波的产生机理与频谱分布特征,提出了基于智能检测与混合滤波的综合治理方案,构建了“监测—分析—治理—优化”一体化技术体系。研究表明,采用有源与无源协同的复合滤波系统,可有效抑制主要谐波分量、改善功率因数并降低能耗。同时,借助数字化监控与智能算法优化,实现电能质量管理的精细化与动态化。未来,化工企业应进一步推动谐波治理与能源管理的融合,形成数据驱动的电能质量控制体系,为绿色制造与安全生产提供持续支撑。

参考文献

- [1] 陈晟.石油化工业企业电力系统谐波的监测和滤波[J].电子技术与软件工程,2018,(09):88.
- [2] 胡友强.电力系统谐波测试分析机理与治理技术研究[D].重庆大学,2004.
- [3] 刘烽.石油化工业企业电力系统谐波的监测和滤波[J].电气传动自动化,2003,(04):36-38.