

电气工程中的电能质量控制与节能降耗策略

刘英杰

河北冀科工程项目管理有限公司 河北 石家庄 050000

摘要: 本文聚焦电气工程中的电能质量控制与节能降耗策略。分析了电能质量扰动对能耗的影响机理,构建定量关系模型;从谐波治理、无功补偿、三相不平衡治理等方面阐述供配电系统优化设计;再探讨变压器、配电线路、动力系统等电气设备能效提升与运行策略优化;最后介绍基于智能监测的电能质量与能耗综合管理系统。旨在为电气工程领域的电能质量改善与节能降耗提供理论支撑与实践指导。

关键词: 电能质量;节能降耗;谐波抑制;无功补偿

引言: 在电气工程领域,电能质量与能耗问题至关重要。电能质量扰动会引发设备附加损耗、降低运行稳定性,进而导致能耗增加。随着能源需求增长与节能要求提高,如何有效控制电能质量、实现节能降耗成为关键。本文深入剖析电能质量扰动对能耗的影响机理,构建定量关系模型,并从系统优化、设备能效提升、智能监测管理等多方面提出策略,以推动电气工程向高效、节能方向发展。

1 电气工程中的电能质量扰动对能耗的影响机理分析

1.1 主要电能质量指标及其危害

电气工程供配电系统中,电能质量扰动含谐波、电压波动与闪变、三相不平衡、无功功率偏差、电压凹陷/骤升等指标,危害各有不同。谐波源于非线性负载,会使电气设备附加损耗大增,如变压器绕组涡流损耗提升超30%,电缆集肤效应损耗指数级增长,还会引发电容器击穿、电机转矩波动等问题,缩短设备寿命。电压波动与闪变多因冲击性负载投切,导致电机转速波动,增加机械与铜耗,易触发保护装置误动作。三相不平衡在三相配电系统常见,使变压器中性点电位偏移,产生零序电流损耗,降低出力效率,单相设备运行异常^[1]。无功功率偏差降低输电线路效率,电压凹陷/骤升致设备启停异常,增加能耗。解析危害机理是治理与优化的基础。

1.2 电能质量与能耗的定量关系模型

构建电能质量与能耗定量关系模型,要结合电气系统运行参数、设备特性及负载类型,用机理建模与数据驱动结合实现精准量化。机理上,基于电磁学与热力学原理推导关联:谐波以THD为核心变量建变压器损耗模型,谐波附加损耗与THD平方正相关;无功功率层面,依其与功率因数关系推导线路损耗公式,功率因数每降0.1,线路损耗约增20%;三相不平衡用对称分量法分解电流,建变压器不平衡损耗模型。数据驱动上,采集监

测与统计数据,用多元线性回归等算法拟合能耗预测模型,明确指标影响权重。最终模型要实现从指标到能耗值的精准映射,为治理方案效果评估提供量化依据。

2 基于电能质量治理的供配电系统优化设计

2.1 谐波治理与降耗协同技术

谐波治理与降耗协同技术的核心在于通过针对性滤波方案设计,实现谐波抑制与能耗降低的双重目标,需结合系统谐波源特性、负载类型及运行工况制定差异化策略。无源滤波技术是基础手段,通过设计由电容器、电抗器组成的单调谐滤波器与双调谐滤波器,针对5、7、11次等主要谐波频率进行滤波,其原理是利用滤波器与谐波源形成并联谐振,吸收谐波电流,减少谐波注入电网,同时电容器可提供部分无功功率,实现降耗协同。针对大功率、高谐波含量的复杂负载,需采用有源电力滤波器,通过检测谐波电流,生成反向补偿电流,实现动态谐波抑制,其响应时间可控制在1ms内,谐波消除率达95%以上,且能适应谐波频率的动态变化。在系统优化设计中,需结合谐波源分布,合理布置滤波器安装位置,靠近谐波源侧安装可减少谐波传播损耗,降低整体系统能耗。同时,建立谐波治理效果与能耗降低率的关联模型,通过仿真分析优化滤波器参数,确保在满足电网谐波标准的前提下,实现变压器、电机等设备损耗的最小化。另外,结合智能监测技术,实时调整滤波器运行参数,形成“监测-治理-降耗”的闭环协同机制,提升供配电系统的整体运行效率。

2.2 无功补偿与电压质量优化

无功补偿与电压质量优化是供配电系统优化的核心环节,旨在通过合理配置无功补偿装置,提升功率因数、稳定母线电压,降低线路与设备无功损耗。无功补偿装置的选型与布置需遵循“分级补偿、就地平衡”原则,针对低压配电系统的分散性负载,采用并联电容器组进

行就地补偿,减少线路无功传输距离,降低线路铜耗,其补偿容量可根据负载无功功率动态调整。针对高压侧的大容量冲击性负载,采用静止无功补偿器(SVC)或静止同步补偿器(STATCOM),实现动态无功补偿,SVC通过调节电抗器电抗值,响应时间可达20ms,STATCOM则基于电压源逆变器,补偿精度更高、响应速度更快,且能同时支撑母线电压稳定^[2]。在电压质量优化方面,结合电压等级与负荷特性,设计电压调节策略,对于电压波动较大的区域,配置有载调压变压器(OLTC),通过实时监测母线电压,自动调整分接头位置,将电压偏差控制在±5%的允许范围内。建立无功补偿与电压质量的协同优化模型,以系统总损耗最小、电压合格率最高为目标,通过遗传算法等智能优化算法,求解无功补偿装置的最优容量与安装位置。结合能效管理平台,实现无功补偿装置的远程监控与智能调控,确保在不同运行工况下,无功补偿与电压质量优化策略的精准执行。

2.3 三相不平衡治理技术

三相不平衡治理技术旨在通过电流平衡调节与系统拓扑优化,消除三相电流差值,降低零序损耗与设备额外能耗,保障供电系统安全高效运行。针对低压配电系统的单相负载不均衡问题,采用三相不平衡治理装置(TPF),通过检测各相电流,利用电力电子器件实现相电流的动态重构与平衡,其平衡响应时间可控制在50ms内,能有效解决居民用电、商业照明等单相负载随机投切导致的三相不平衡问题。针对高压配电系统的三相不平衡,结合变压器接线方式优化,采用星形联结变压器并配置中性线电流互感器,实时监测中性线电流,通过并联中性线补偿装置吸收零序电流,减少变压器零序损耗。同时优化负载分配策略,在系统规划阶段,通过负荷预测与负载均衡分配算法,将单相负载均匀分布在三相线路上,从源头减少三相不平衡的产生。在治理方案设计中,需结合系统负荷特性、变压器容量及线路阻抗,建立三相不平衡损耗模型,量化治理效果,通过仿真分析优化治理装置参数。构建三相不平衡在线监测网络,实时采集各相电流、电压数据,传输至能效管理平台进行分析研判,及时调整治理策略,形成“监测-分析-治理-评估”的闭环管理体系,实现三相不平衡的长效治理。

3 电气设备能效提升与运行策略优化

3.1 变压器系统节能

变压器作为供电系统的核心设备,其能效提升需从选型优化、运行调控与损耗降低三方面协同推进。选型阶段,依据负载特性与运行工况,优先选用非晶合金变压器或高效硅钢片变压器,非晶合金变压器的空载损

耗较传统硅钢片变压器降低70%-80%,负载损耗降低15%-20%,且需匹配变压器容量与负载率,使变压器长期运行在30%-70%的最佳负载率区间,避免“大马拉小车”或过载运行造成的能耗浪费。运行调控方面,采用智能负载分配策略,通过监测各变压器负载情况,动态调整运行方式,多台变压器并联运行时,实现负载均衡分配,降低总损耗;针对季节性负荷变化,实施变压器投切策略,低谷负荷时停运部分变压器,减少空载损耗^[3]。同时,优化变压器冷却方式,对于油浸式变压器,根据负荷温度自动调整冷却风扇投入数量,降低风机能耗;对于干式变压器,采用高效散热结构,提升散热效率,减少设备温升导致的附加损耗。建立变压器能效评估模型,实时监测负载率、温升、损耗等参数,通过大数据分析优化运行参数,定期开展变压器检修与维护,及时处理绕组绝缘老化、漏油等问题,确保变压器始终处于高效运行状态,实现能效最大化。

3.2 配电线路与电缆优化

配电线路与电缆的能效优化核心在于降低线路传输损耗、提升电能输送效率,需从线路选型、路径规划、运行维护三方面制定优化方案。线路选型阶段,依据输送功率、距离及电压等级,优先选用高导电率、低损耗的导线材料,如采用稀土高铁铝合金导线替代传统铜导线,其导电率达标硬铜导线的60%以上,且成本更低,同时结合经济电流密度计算导线截面,避免导线过细导致的大电流损耗与过细造成的绝缘老化。路径规划方面,优化线路敷设路径,缩短线路长度,减少线路转角与迂回敷设,降低线路电阻与电抗,对于电缆线路,采用合理的敷设方式(如直埋、桥架、隧道),减少电缆周围环境对散热的影响,提升载流能力。运行优化方面,结合无功补偿装置的配置,降低线路无功电流,依据线路损耗公式 $\Delta P = 3PR$,通过提升功率因数、降低线路电流,实现损耗降低,功率因数从0.7提升至0.95,线路损耗可降低约50%。同时,采用智能监测技术,实时监测线路电流、电压、温度等参数,及时发现线路过载、接触不良等问题,避免局部过热造成的能耗增加与安全隐患。

3.3 动力系统节能

动力系统(主要为电动机)是工业企业的核心能耗设备,其能效提升需聚焦于选型匹配、运行调控与节能改造。选型阶段,依据负载转速、转矩特性,优先选用高效节能电动机,如YE3、YE4系列超高效电动机,其效率较传统电动机提升5%-8%,且需匹配负载工况,避免“大马拉小车”,对于长期低速运行的负载,选用变频电机,提升负载适配性。运行调控方面,采用变频调速技

术,针对风机、水泵类变转矩负载,通过变频器调节电机转速,实现转速与负载需求的精准匹配,其节能率可达20%~60%;对于恒转矩负载,采用软启动技术,减少启动电流冲击,降低启动能耗与机械损耗。优化电机运行方式,实现多台电机的联动控制,根据生产需求动态调整电机运行数量,避免空载、轻载运行。开展电机节能改造,对于老旧低效电机,进行绕组重绕、转子优化等改造,提升电机效率;为电机配置无功补偿装置,减少电机定子侧无功电流,降低线路损耗。通过建立动力系统能效监测平台,实时采集电机电流、转速、功率等参数,分析运行效率,制定个性化的节能运行策略,定期对电机进行维护保养,确保动力系统始终处于高效节能运行状态。

4 基于智能监测的电能质量与能耗综合管理系统

4.1 电能质量在线监测网络构建

电能质量在线监测网络构建是精准管控与能耗精细化管理的基础,要遵循“分层部署、全域覆盖、数据互通”原则,搭建覆盖供配电全环节的监测体系。其网络架构为“现场监测层-数据传输层-平台管理层”三级。现场监测层以电能质量监测装置(PQM)为核心,在变压器高低压侧、关键负载端等关键位置分层部署,监测谐波、电压等全维度参数及能耗数据,装置需符合IEC 61000-4-30标准。数据传输层采用多种通信方式,分散区域用LoRa降成本,核心节点用工业以太网与5G保障传输,并构建加密机制确保安全。平台管理层负责接收、存储与预处理数据,搭建标准化接口实现互联互通。构建时结合拓扑优化监测点布局,通过冗余设计提升可靠性,定期校准维护装置,为治理与分析提供数据支撑。

4.2 能效管理平台功能设计

能效管理平台是电能质量与能耗综合管理的核心,以

“数据整合、智能分析、精准管控、高效决策”为核心设计一体化平台。数据整合模块与多系统对接,用ETL工具采集、清洗、整合多源异构数据,建立涵盖多种信息的统一数据仓库。智能分析模块是核心,通过大数据与机器学习算法,对电能质量指标趋势预测、异常预警,识别扰动源;多维度分析能耗,定位高能耗环节;量化能耗影响因素占比,识别优化空间。精准管控模块远程调控治理装置,智能优化运行策略,实现电能质量治理与能耗降低协同^[4]。决策支持模块生成治理方案与优化建议,提供对标与评估报告,辅助制定节能规划。平台还配备可视化大屏,实时展示数据与治理效果,提升管理直观性与高效性。

结束语

电气工程中的电能质量控制与节能降耗意义重大。通过对电能质量扰动影响机理的分析、定量关系模型的构建,以及供配电系统优化、电气设备能效提升和智能监测管理系统应用等多维度策略的实施,可有效改善电能质量、降低能耗。未来,随着技术不断进步,需持续优化相关策略,加强智能监测与管理,以更好地满足电气工程发展需求,实现能源的高效利用与可持续发展。

参考文献

- [1]王飞.基于储能技术的电气工程电能质量改善策略研究[J].通信电源技术,2025,42(10):115-117.
- [2]黄涛.浅析电气工程配电网线路施工质量的管理[J].电气技术与经济,2024(3):236-238.
- [3]代伟,胡忠红,秦玉忠.基于电气工程自动化的电能数据采集方案研究[J].中国高新科技,2024(5):95-97.
- [4]芦焱.电气工程自动化中的节能技术及其应用效果分析[J].品牌与标准化,2025(2):130-132.