

电气工程中的电能质量控制与节能降耗策略

梁继涵 夏 顺

国网武汉供电公司 湖北 武汉 430000

摘要：本文聚焦电气工程中的电能质量控制与节能降耗。阐述了电能质量基础理论，分析问题来源与影响；介绍了无功功率补偿、谐波抑制等关键控制技术；再探讨设备级、系统级等节能降耗策略与优化方法；展望数字孪生、区块链等技术在电能领域的应用。旨在为提升电能质量、实现节能降耗提供理论支撑与实践参考，推动电气工程向高效、绿色方向发展。

关键词：电能质量；节能降耗；能源管理

引言：在能源需求持续增长与环保要求日益严格的当下，电气工程中电能质量控制与节能降耗意义重大。电能质量关乎电力系统稳定运行与用电设备正常工作，而节能降耗是应对能源危机、实现可持续发展的关键。本文深入剖析电能质量基础理论，详细介绍相关控制技术，探讨多种节能降耗策略，并展望未来发展方向，期望为电气工程领域提供有益的思路与方法。

1 电气工程中的电能质量基础理论与分析

1.1 电能质量定义与评价指标

电能质量是指电力系统提供的电能满足用户用电需求的程度，其核心内涵涵盖电压、电流、频率等电力参数的稳定性与合理性。在实际工程应用中，电能质量的评价需依托科学完善的指标体系，主要包括电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、谐波畸变率、三相不平衡度等关键指标。电压偏差反映实际电压与额定电压的偏离程度，通常要求偏差范围控制在 $\pm 7\%$ 以内；频率偏差则关乎电力系统的有功功率平衡，我国电力系统额定频率为50Hz，允许偏差 $\pm 0.2\text{Hz}$ （大型电力系统）或 $\pm 0.5\text{Hz}$ （小型电力系统）。谐波畸变率用于衡量电压或电流波形偏离正弦波的程度，其中总谐波畸变率（THD）是核心评价参数，低压系统通常要求 $\text{THD} \leq 5\%$ 。三相不平衡度则针对三相电力系统，反映三相电压或电流的对称程度，其超标会导致设备效率下降。

1.2 电能质量问题的来源与影响

电能质量问题的来源可分为内部源性和外部源性两类，内部源性主要源于电力系统自身元件的特性与运行状态，如发电机输出电压波动、变压器励磁涌流、输电线路参数不平衡等；外部源性则以用户侧非线性负荷、冲击性负荷的大量接入为主，典型负荷包括变频器、电弧炉、电气化铁路、新能源发电设备等。非线性负荷运行时会产生大量谐波电流，注入电网后导致电压波形畸

变；冲击性负荷则会引发电压剧烈波动与闪变，影响电网电压稳定性^[1]。电能质量问题会对电力系统和用电设备产生多方面负面影响：对电力系统而言，谐波会增加线路损耗、加剧变压器过热老化，三相不平衡会导致中性线过载烧毁；对用电设备而言，电压偏差会降低电动机输出效率、影响精密电子设备正常工作，谐波会缩短电容器、继电器等元件使用寿命，严重时甚至引发设备故障停机。另外，电能质量超标还可能导致产品质量下降（如精密制造行业）、能源消耗增加，给工业生产和居民生活带来巨大经济损失。

2 电气工程中的电能质量控制关键技术

2.1 无功功率补偿技术

无功功率补偿技术是提升电能质量、降低电网损耗的关键技术，其原理是接入补偿装置向电网注入或吸收无功功率，实现平衡，提高功率因数、稳定电压。工程常用补偿装置分传统和新型两类。传统以并联电容器组、同步调相机为代表，并联电容器组投资少、结构简单，通过分组投切分级补偿，适用于负荷稳定场景；同步调相机能动态调节，可快速响应电压波动，但占地大、维护成本高。新型以静止无功发生器（SVG）、静止无功补偿器（SVC）为核心，SVG基于电压源型变换器，能连续平滑调节，响应快，适用于冲击性负荷集中场景；SVC结合晶闸管控制电抗器与固定电容器，动态调节性能好。实际应用中，要根据负荷和电网参数选装置与容量，优化补偿策略，实现精准补偿，提升电压稳定性。

2.2 谐波抑制技术

谐波抑制技术用于阻断谐波电流产生与传播，降低其对电网和设备的影响，分无源和有源滤波技术。无源滤波技术用电感、电容、电阻构成滤波回路，利用谐振特性对特定频率谐波分流或抑制，结构简单、成本低、

运行可靠,广泛应用于工业谐波治理。无源滤波器有单调谐、双调谐和高通滤波器,分别针对不同频率谐波^[2]。有源滤波技术(APF)基于电力电子变换,检测电网谐波电流,实时生成反向补偿电流动态抵消谐波,滤波精度高、响应快、可抑制多种频率谐波,适用于非线性负荷复杂场景。还可通过优化负荷运行、选低谐波设备等源头控制。实际工程常结合无源与有源滤波,构建多层次防护体系,确保电网谐波达标。

2.3 电压调节与平衡技术

电压调节与平衡技术是保障电能质量的关键,目标是维持电压在额定范围,消除三相电压不平衡。电压调节通过调节无功功率分布、改变变压器分接头位置实现。变压器分接头调节是传统手段,手动或自动切换分接头改变变比,调整输出电压,适用于电压偏差稳定场景。静止同步补偿器(STATCOM)、有载调压变压器(OLTC)等新型设备可动态调节电压,快速响应波动。针对三相电压不平衡,用三相不平衡调节装置、无功功率补偿装置等实现平衡,前者检测不平衡度注入平衡电流调整三相电流。此外,合理规划电网、优化负荷分配也有助于提升平衡度。新能源集中接入区域,要结合出力波动性,采用动态调节装置,保障电压稳定平衡与电网安全。

2.4 智能监测与诊断技术

智能监测与诊断技术是实现电能质量精细化管理的基础,依托物联网、大数据、传感技术等现代信息技术,构建覆盖全网的电能质量监测网络。该技术通过在电网关键节点安装智能监测终端,实时采集电压、电流、频率、谐波等电能质量参数,经通信网络传输至后台监测中心。监测终端具备高精度数据采集能力,采样频率可达千赫兹级,能够精准捕捉电能质量暂态问题(如电压暂升、暂降、中断等)。后台监测中心采用大数据分析技术,对采集到的海量数据进行筛选、分析与挖掘,实现电能质量问题的实时诊断与预警。通过建立电能质量问题诊断模型,可快速定位问题来源,评估问题严重程度,并生成针对性的治理方案。智能监测与诊断技术还具备趋势预测功能,通过分析历史数据,预测未来电能质量变化趋势,为电网运维决策提供科学依据。在智能电网建设背景下,该技术与云计算、人工智能技术深度融合,实现电能质量监测、诊断、治理的全流程智能化,大幅提升电网运维效率与电能质量管控水平。

3 电气工程中的电能节能降耗策略与优化方法

3.1 设备级节能技术

设备级节能技术是电能节能降耗的基础层面,通过优化电力设备的设计、选型与运行方式,降低设备自身的能源损耗。在电动机节能方面,推广使用高效节能电动机(如IE3、IE4级电动机),替代传统低效电动机,可降低电动机的铁损、铜损;同时,采用变频调速技术,根据负荷需求实时调节电动机转速,避免电动机在额定转速下空转或轻载运行,大幅提升电动机运行效率。在变压器节能方面,选用非晶合金变压器、立体卷铁芯变压器等高效节能变压器,这类变压器具有低损耗、高效率的特点,相较于传统硅钢片变压器,空载损耗可降低50%以上;合理选择变压器容量,避免变压器长期轻载或过载运行,也是降低变压器损耗的关键。在照明设备节能方面,推广使用LED节能灯具,替代传统白炽灯、荧光灯,LED灯具具有发光效率高、使用寿命长、能耗低等优点,能耗仅为白炽灯的1/10。另外,对老旧电力设备进行节能改造,如加装节能附件、优化设备控制逻辑等,也能有效降低设备能耗,提升能源利用效率。

3.2 系统级节能优化

系统级节能优化以整个电力系统为研究对象,通过优化电网结构、改善运行方式、实现资源合理配置,降低系统整体能耗。在电网结构优化方面,合理规划输电线路路径,缩短输电距离,采用高电压、大容量输电技术,降低线路损耗;加强电网互联,实现区域间电力资源的互补互济,提高电网运行的经济性。在运行方式优化方面,通过负荷预测技术,合理安排发电机组的启停与出力,实现电力系统的经济调度;采用无功功率优化配置技术,降低电网的线损和变压器损耗,提升电网电压质量^[3]。构建微电网系统,实现分布式能源的本地消纳,减少分布式能源接入大电网带来的传输损耗;通过电网负荷削峰填谷,平衡电网负荷分布,避免电网在高峰负荷时段因过载运行导致的能耗增加。系统级节能优化还需依托先进的电网调度管理系统,实现对电网运行状态的实时监控与精准调控,确保电网始终运行在最优节能状态,提升整个电力系统的能源利用效率。

3.3 基于人工智能的节能优化算法

基于人工智能的节能优化算法为电能节能降耗提供了全新的技术路径,通过模拟人类智能的学习、推理与决策能力,实现节能优化方案的精准生成与动态调整。常用的人工智能算法包括神经网络、遗传算法、粒子群优化算法、强化学习等。神经网络算法具备强大的非线性拟合能力,可通过学习历史能耗数据与影响因素之间的映射关系,构建高精度的能耗预测模型,为节能优化决策提供数据支撑;遗传算法基于生物进化理论,通过

选择、交叉、变异等操作，在复杂的解空间中寻找最优节能方案，适用于电网无功优化、负荷分配等多目标优化问题。粒子群优化算法具有收敛速度快、计算效率高的优点，可用于分布式能源的出力优化调度；强化学习算法则通过智能体与环境的交互学习，实时调整节能策略，适用于动态变化的电网运行场景。在实际应用中，将这些算法与电力系统运行数据相结合，可实现节能优化的智能化、精准化，大幅提升节能降耗效果，降低人工干预成本。

3.4 新能源接入下的节能降耗

新能源（如太阳能、风能、水能等）的大规模接入为电能节能降耗提供了重要契机，同时也对电网的节能优化提出了新的要求。新能源具有清洁、可再生的特点，替代传统化石能源发电，可大幅降低电力生产过程中的碳排放与能源消耗。为充分发挥新能源的节能潜力，需优化新能源接入方式与运行调度策略。在接入方式上，采用分布式新能源接入模式，实现新能源电力的本地消纳，减少远距离传输损耗；通过微电网技术，将分布式新能源、储能设备与负荷有机整合，提升新能源的消纳能力。在运行调度上，利用新能源预测技术，精准预测太阳能辐照量、风速等气象参数，合理安排新能源发电机组的出力；结合储能设备的充放电控制，平抑新能源出力的波动性，保障电网稳定运行。通过新能源与传统能源的协同调度，优化电源结构，实现电力系统的经济运行与节能降耗。

4 未来发展方向

4.1 数字孪生技术在电能质量预测中的应用

数字孪生技术构建物理电网虚拟映射模型，实现实时模拟、监测与预测，为电能质量预测提供新范式。该技术融合电网物理实体、传感器数据等信息，通过虚实联动同步交互数据。在电能质量预测中，数字孪生模型整合多源信息，利用大数据与人工智能算法，模拟不同场景下电能质量变化，精准预测电压波动等问题的时间、位置与程度。提前预测可制定预防治理措施，避免问题扩大。另外，还能仿真验证治理方案，优化策略、降低成本。未来，数字孪生技术与物联网等深度融合，将实现电能质量预测精准、实时、智能化，保障智能电网安全稳定运行。

4.2 区块链赋能的分布式能源交易与节能激励

区块链技术特性为分布式能源交易与节能激励提供可靠支撑，有望解决消纳难、交易机制不健全问题。在交易中，区块链构建去中心化市场，实现发电与用电方直接对接，简化流程、降低成本，智能合约保障交易公平安全。节能激励方面，建立基于能耗数据的信用体系，对节能显著者给予代币奖励，能耗数据经物联网采集上传区块链，确保真实不可篡改^[4]。可实现全流程信息追溯，提升管理透明度与效率。未来，该机制将推动能源市场多元化，激发用户节能积极性，促进能源资源优化配置。

4.3 人工智能驱动的电能量-节能一体化优化平台

该平台融合电能质量管控与节能降耗，通过人工智能算法协同优化，提升电力系统综合效益。平台整合多源数据，构建共享分析中心，利用深度学习等算法挖掘内在关联，建立多目标优化模型，保障电能质量同时实现能耗最低。平台具备实时监测等多种功能，可自动调整设备参数，实现实时协同优化。还能通过数字孪生技术仿真模拟，为运维决策提供依据。未来，随着人工智能发展，该平台将实现更精准决策、高效资源配置，推动电力系统清洁、高效、智能发展，助力“双碳”目标实现。

结束语

电气工程中的电能质量控制与节能降耗是长期且重要的课题。本文围绕这一主题，从基础理论到关键技术，再到节能策略与未来方向进行了全面探讨。随着科技不断进步，数字孪生、区块链、人工智能等新技术将为电能质量提升与节能降耗带来新机遇。未来，需持续深入研究，推动技术创新与应用，实现电气工程的高效、绿色、可持续发展，助力能源领域“双碳”目标达成。

参考文献

- [1]房晶.电气自动化工程中的节能设计研究[J].光源与照明,2024(04):216-218.
- [2]李正廷.电气自动化节能技术探析[J].内江科技,2024,45(03):36-37.
- [3]贾晓思,伍志刚,沈涛.市政工程电气系统节能降耗技术措施分析[J].中国高新科技,2024,(04):30-31+59.
- [4]张东辉.绿色建筑中电气工程的节能设计与应用[J].建筑结构,2023,53(07):173.