

绿色建筑低压配电电气工程的能效监测与节能改造技术

向武化

中建四局建设发展有限公司 福建厦门 361006

摘要：绿色建筑的核心目标之一是实现能源的高效利用与可持续发展，低压配电电气工程作为建筑能源消耗与管理的关键环节，其能效水平直接影响绿色建筑的整体性能。本文围绕绿色建筑低压配电电气工程，首先阐述了能效监测的重要性与总体思路，随后系统分析了能效监测系统的构成要素，包括数据采集层、数据传输层、数据处理与分析层以及应用展示层的功能与技术特点。在此基础上，深入探讨了针对绿色建筑低压配电系统的节能改造技术路径，涵盖了变压器优化选择与经济运行、高效电动机与变频调速技术的应用、无功补偿与谐波治理技术、照明系统节能改造以及智能化控制与能源管理策略等多个方面。旨在为提升绿色建筑低压配电系统的能源利用效率、降低建筑能耗、推动绿色建筑可持续发展提供理论参考与技术指导。

关键词：绿色建筑；低压配电；能效监测；节能改造；能源管理

引言

随着全球能源危机与环境问题加剧，绿色建筑作为节能减排重要载体受广泛关注与推广。低压配电系统是绿色建筑电力传输、分配与控制核心网络，承担向用电设备输送电能功能，其能耗与运行效率影响建筑整体能耗与绿色建筑评价指标。传统低压配电系统在设计、运行与管理中存在能效监测不足、节能技术应用不充分、能源管理粗放等问题，难以满足绿色建筑能源精细化管理与高效利用要求。所以，深入研究绿色建筑低压配电电气工程的能效监测与节能改造技术，构建能效监测体系，应用节能改造技术，对掌握系统能耗、识别节能潜力、优化能源策略、降低建筑成本、提升绿色建筑品质有重要现实意义和应用价值。

一、绿色建筑低压配电系统能效监测技术

（一）基于物联网的分层分项能耗计量体系

绿色建筑低压配电系统的能效监测，其基础在于构建一个基于物联网技术的分层分项能耗计量体系。该体系旨在实现对建筑能源消耗的精细化、结构化感知，为后续的能效分析与节能改造提供高分辨率的底层数据支撑。分层计量是指按照建筑配电系统的物理拓扑结构，在不同层级部署计量节点，形成从总进线、各区域或楼层配电箱，直至末端主要用电回路的多级计量网络。这种架构不仅能够获取建筑总能耗，还能追溯能量在各级配电支路的流向与分配情况。分项计量则是在分层计量的基础上，根据用电设备的功能与类型，对能耗进行分

类统计，如将照明插座、空调动力、电梯、信息设备等不同系统的用电数据有效分离。物联网技术的应用，通过部署具备网络通信功能的智能电表、传感器和数据采集器，实现了计量数据的自动、远程、高频传输，避免了传统人工抄录的低效与误差。

（二）电气设备运行状态与能效参数的实时采集

在分层分项计量的基础上，对关键电气设备运行状态与能效参数的实时采集，是实现深度能效监测的关键环节。此过程超越了单纯的电量计量，深入到设备运行的动态层面。采集的参数不仅包括电压、电流、有功功率、无功功率、功率因数等基础电气量，更扩展至能够直接反映设备能效水平的特定指标。例如，对于冷水机组、水泵、风机等流体机械，需采集其进出口温差、压力、流量等热工参数，以计算其实时运行效率（COP或EER）；对于变压器，需监测其负载率与绕组温度，以评估其运行损耗是否处于经济区间；对于照明系统，可结合光照度传感器，分析其运行功率与实际照明需求的匹配度。这些数据的采集依赖于高精度的传感器与可靠的通信协议，确保数据的实时性与准确性^[1]。

（三）建筑能效数据的可视化与异常诊断方法

海量、多维的能效数据必须通过有效的处理与分析方法，才能转化为具有决策价值的洞察。建筑能效数据的可视化与异常诊断是实现这一转化的核心手段。可视化技术并非简单的图表展示，而是通过建立数字孪生模型或集成化的能源管理平台，将抽象的数据以直观、关联的方式呈现。例如，将实时能耗数据与建筑平面图、

系统图相结合，形成能耗热力图或动态流向图，使管理者能够直观地识别能耗热点与异常区域。通过设置时间轴，可以对比不同时段（如工作日与周末、白天与夜间）的能耗曲线，揭示潜在的运行管理漏洞。异常诊断方法则建立在数据挖掘与统计分析的基础上。首先，通过建立基于历史数据的基准能耗模型（Baseline Model），可以预测在特定外部条件（如室外温度、入住率）下的理论能耗值。当实际能耗持续显著偏离预测值时，系统即可触发异常警报。进一步的诊断可运用聚类分析、关联规则挖掘等算法，从海量数据中自动识别出导致能耗异常的典型模式^[2]。

二、低压配电系统的主要节能改造技术

（一）供配电系统层面的谐波治理与无功补偿

在供配电系统层面，节能改造的核心目标是提升电能质量，降低因电能质量问题导致的额外线路损耗和设备发热。谐波治理与无功补偿是实现该目标的两个关键技术手段。现代建筑中大量使用的非线性负荷，如开关电源、变频器、LED驱动器等，是电网谐波的主要来源。谐波电流在系统中流动，不仅会增加变压器、电缆的铜损和铁损，导致额外的能量消耗，还会干扰保护装置的正常动作，缩短设备寿命。谐波治理通常采用有源电力滤波器（APF）或无源LC滤波器。APF通过实时检测谐波电流，并注入一个大小相等、相位相反的补偿电流，从而主动抵消谐波，其优势是补偿精度高、响应速度快，且能同时补偿多种谐波。无功补偿则侧重于提高功率因数，减少因无功功率在电网中往返传输造成的线路损耗和电压降。传统的静态电容器组补偿方式响应较慢，可能出现过补或欠补。而现代的静止无功发生器（SVG）能够实现无功功率的连续、动态补偿，响应时间在毫秒级，能精确地将功率因数维持在设定值附近^[3]。

（二）用电设备层面的高效照明与电机系统替换

用电设备层面的节能改造是降低建筑终端能耗最直接、最有效的途径，其中高效照明与电机系统的替换占据主导地位。照明系统是商业建筑中主要的用电负荷之一。替换传统照明设备为高效光源，如将荧光灯、金卤灯替换为LED灯具，能带来显著的节能效果。LED灯具不仅光效高，通常可达传统光源的2-3倍，而且其驱动电路效率高、寿命长，减少了维护成本和废弃物。更为重要的是，LED灯具具有良好的调光性能，可以与智能控制系统无缝集成，实现按需照明，进一步挖掘节能潜力。电机系统，包括风机、水泵、电梯等，是建筑中的另一能耗大户。对于长期运行于变工况下的风机和水泵，

采用变频器进行调速改造是公认的节能措施。通过改变电机转速来调节流量或压力，替代传统的阀门或挡板节流方式，避免了节流造成的巨大能量损失。对于老旧的、效率等级低的电机，直接替换为符合IE3或IE4等更高效等级的高效或超高效电机，虽然初期投资较高，但其运行效率的提升可在较短时间内通过节省的电费收回成本。

（三）系统运行层面的智能控制与需求侧响应

系统运行层面的节能改造侧重于通过优化管理与控制策略，在现有设备基础上实现能源的精细化使用，并参与电网的互动。智能控制是这一层面的核心技术，它基于能效监测系统提供的数据，对建筑内各用能系统进行协同优化。例如，楼宇自控系统（BAS）可以根据室内外温度、湿度、光照度以及人员活动情况，自动调节空调系统的冷热源输出、风机转速和新风量，以及照明系统的开关和亮度，避免无效的能源消耗。通过建立预测控制模型，系统可以结合天气预报和预约使用信息，提前对室内环境进行预冷或预热，利用电价低谷时段储能，从而在保证舒适度的前提下实现运行成本最低。需求侧响应（DR）则是一种更高层次的运行优化策略，它使建筑从单纯的能源消费者转变为可调度的虚拟电厂资源。在电网用电高峰或电价高昂时段，建筑能源管理系统接收到电网调度指令后，可以非侵入性地、短暂地降低部分非关键负荷的功率，如适度调高空调设定温度、降低部分区域的照明亮度、延迟启动非紧急设备等。作为回报，建筑业主可以获得经济补偿。这种技术不仅为建筑自身创造了额外收益，更重要的是，它通过聚合大量建筑的柔性负荷，为电网提供了调峰填谷、促进可再生能源消纳的能力，提升了整个能源系统的运行效率和稳定性。因此，智能控制与需求侧响应的应用，标志着绿色建筑的能效管理从自我优化向与外部能源系统协同互动的演进^[4]。

三、能效监测与节能改造的协同实施路径

（一）基于监测数据的节能潜力评估与诊断

基于监测数据的评估与诊断需通过部署高精度监测设备，采集低压配电系统关键能效参数，识别能耗异常环节与节能空间，避免改造盲目性，某市绿色办公建筑项目（建筑面积2.5万平方米，涵盖办公区、会议室、地下车库，原低压配电系统未做系统监测，仅靠人工抄表统计能耗，节能潜力不明确）在低压配电系统各关键节点（变压器出线端、各楼层配电箱、主要用电设备端）部署120台智能电能表（测量精度0.5级，支持实时采集电压、电流、功率因数、有功功率等参数，数据采样间

隔15分钟),并搭建能效监测平台,连续监测6个月。通过数据分析发现两类核心节能潜力:一是1000kVA变压器负载率长期维持在35%(经济负载率应为50%-70%),存在“大马拉小车”能耗浪费;二是办公区配电箱功率因数仅0.82(绿色建筑要求 ≥ 0.9),无功损耗占比达18%。同时诊断出地下车库照明回路存在“长明灯”现象,日均无效耗电约80度,为后续改造提供精准靶向。

(二) 改造方案的优化设计与技术经济性分析

改造方案优化需针对监测诊断出的问题,结合绿色建筑标准与经济性要求,选择适配技术方案,避免过度改造或方案失效。项目围绕三类问题制定优化方案:针对变压器负载率偏低,将原1000kVA变压器更换为630kVA高效节能变压器(能效等级2级,空载损耗较原变压器降低30%);针对功率因数不足,在各楼层配电箱加装智能无功补偿装置(补偿容量20kvar/台,共15台,可根据负载变化自动调节补偿量);针对车库照明浪费,将传统荧光灯更换为LED节能灯具(功率从40W降至18W,共320盏),并加装人体感应开关(感应距离5米,延时关闭时间30秒)。技术经济性分析显示:改造总投资85万元(变压器更换42万元、无功补偿装置28万元、照明改造15万元);经测算,改造后年节电12.6万度(变压器节电5.2万度、无功补偿节电4.8万度、照明改造节电2.6万度),按当地商业电价0.85元/度计算,年节能收益10.71万元,投资回收期约6.7年,同时改造后系统满足《绿色建筑评价标准》(GB/T 50378-2019)中低压配电系统能效要求,可助力建筑获得绿色建筑二星级认证^[5]。

(三) 改造后能效效果的验证与持续优化

改造后效果验证需通过持续监测对比改造前后参数,确认节能目标达成,同时建立长效优化机制,避免能效反弹。改造完成后,项目继续通过能效监测平台跟踪6个月,验证结果显示:变压器负载率提升至60%,空载损耗从原1.2kW降至0.84kW;办公区平均功率因数提升至0.95,无功损耗占比降至8%;地下车库照明回路日均耗电量从80度降至32度,改造后整体低压配电系统年节电率达16%,与预期目标(15%)基本一致。为实现持续优化,项目建立“月度数据分析-季度参数调整”机制:每月通过监测平台分析各回路能耗变化,若发现某楼层功率因数低于0.92,及时调整该楼层无功补偿装

置投切容量;每季度检查LED灯具光衰情况(要求光衰率 $\leq 10\%$),22年第二季度发现12盏车库LED灯光衰率达15%,及时更换后恢复照明效率,额外减少能耗浪费3%。持续优化实施后,项目低压配电系统能效较改造初期再提升5%,进一步延长设备使用寿命(预计变压器使用寿命从15年延长至20年),实现短期节能与长期效益的协同。

结语

绿色建筑低压配电电气工程的能效监测与节能改造技术研究,展现了从数据采集到系统优化的全周期管理路径。通过对设备运行状态和能效参数的深度监测,不仅实现了能耗的精准量化,还为节能改造提供了科学依据。在技术层面,谐波治理、无功补偿、高效设备替换以及智能控制策略的综合应用,显著提升了能源利用率,降低了运行成本。同时,基于监测数据的评估与诊断确保了改造方案的针对性和经济性,避免了资源浪费。改造后的持续验证与优化机制则进一步巩固了节能效果,体现了精细化管理的价值。这些实践表明,能效监测与节能改造的协同实施,不仅是绿色建筑实现可持续发展目标的重要手段,也为构建智慧能源管理体系提供了有益借鉴。未来,随着物联网、大数据和人工智能技术的不断进步,能效管理将更加智能化和高效化,助力建筑领域迈向低碳发展的新阶段。

参考文献

- [1]王亮.探究建筑电气节能设计及绿色建筑电气技术[J].中文科技期刊数据库(引文版)工程技术,2021(3):2.
- [2]丛贵全.建筑电气节能技术要点分析[J].中国设备工程,2022(20).
- [3]张茂锋.关于绿色建筑电气节能设计的若干思考与建议[J].绿色环保建材,2020(4):2.DOI:CNKI:SUN:HBJC.0.2020-04-045.
- [4]赵振宁.电气自动化技术在智能建筑电气工程中的应用研究[J].2020.DOI:10.12229/j.issn.1672-5719.2020.21.039.
- [5]马长友.浅论建筑电气节能设计及绿色建筑电气技术[J].中文科技期刊数据库(全文版)工程技术,2022(4):3.