

低压配电系统在民用建筑中的优化配置原则与方法

冯晓晓

河南中核五院研究设计有限公司 河南 郑州 450000

摘要: 随着我国城镇化进程的加速和人民生活水平的不断提高,民用建筑的功能日益复杂化、智能化,对电力供应的安全性、可靠性、经济性和可持续性提出了更高要求。作为建筑电气系统的核心组成部分,低压配电系统的优化配置直接关系到建筑的整体能效、运行成本及用户体验。本文旨在系统阐述低压配电系统在民用建筑中进行优化配置所应遵循的核心原则,并深入探讨负荷精准预测、主接线方案比选、设备选型与保护整定、电能质量治理、智能化集成以及绿色低碳设计等关键方法。通过理论分析与实践案例相结合,论证了优化配置策略在提升系统性能、降低全生命周期成本、保障用电安全方面的显著价值,为民用建筑电气设计提供了一套系统化、可操作的技术路径。

关键词: 低压配电系统;民用建筑;优化配置;负荷预测;智能配电

引言

民用建筑是现代人类社会生活、工作和社交的主要载体,其内部的低压配电系统(通常指1kV及以下电压等级)承担着将电能从变电所或上级电源安全、可靠、高效地分配至各类用电终端的关键任务。该系统不仅为照明、空调、电梯、给排水等基础设备提供动力,更是支撑建筑智能化、信息化系统运行的能源基石。然而,在传统设计理念下,低压配电系统往往被视为一种“后台”基础设施,其设计多侧重于满足规范的最低安全要求,而对其运行效率、经济性、灵活性及未来适应性的考量相对不足。进入“双碳”目标时代,建筑领域的节能减排已成为国家战略的重要组成部分。因此,对低压配电系统进行科学、前瞻性的优化配置,已不再是单纯的技术问题,而是关乎建筑全生命周期成本、环境影响和社会效益的重大课题。一个经过精心优化的低压配电系统,能够有效降低线路损耗、减少设备投资、提升供电可靠性、改善电能质量,并为建筑能源管理提供数据基础,最终实现安全、经济、绿色、智能的综合目标。

1 低压配电系统优化配置的核心原则

优化配置并非无的放矢,而是在一系列相互关联、有时甚至需要权衡的原则指导下进行的系统性工程。这些原则构成了优化工作的价值导向和决策依据。

1.1 安全性与可靠性原则

这是所有电气系统设计的首要前提和不可逾越的底线。安全性主要指防止人身触电、电气火灾等事故的发生,确保在正常及故障状态下人员和财产的安全。这要求系统设计必须严格遵守国家及行业相关规范(如《民用建筑电气设计标准》GB51348),合理设置接地、等电位联结、剩余电流保护(RCD)等安全措施。可靠性则

指系统在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力,即持续、不间断供电的能力。对于民用建筑而言,不同负荷的重要性等级不同。例如,一类高层民用建筑的消防泵、应急照明、安防系统等属于一级或特别重要负荷,必须采用双重电源或设置备用电源(如柴油发电机、UPS),并采用末端切换(ATSE)方式,确保在任何单一故障情况下都能维持供电。而普通照明、插座等三级负荷,则可以接受一定程度的短时中断。优化配置需在满足各负荷等级可靠性要求的基础上,寻求最经济的方案,避免过度设计,从而在安全与成本之间取得最佳平衡。

1.2 经济性与全生命周期成本(LCC)原则

经济性原则要求在满足安全可靠的前提下,追求投资省、运行费用低。传统的经济性分析往往只关注初期建设成本(CAPEX),容易导致“低价中标、高价运行”的困境。现代优化理念强调全生命周期成本(Life Cycle Cost, LCC)最小化,即将系统在其整个使用年限内(通常为20-30年)的所有成本进行折现计算。这些成本涵盖了初始投资、运行维护、能耗、故障损失以及报废处置等多个方面。优化的目标是使这些成本的总和最小。例如,选用高能效变压器虽然初期投资较高,但其在整个生命周期内节省的电费可能远超差价,从而实现LCC最优。这种全局性的成本观,促使设计者从长远角度审视每一个技术决策,确保系统在漫长的服役期内展现出最佳的经济效益。

1.3 灵活性与可扩展性原则

现代民用建筑的功能需求并非一成不变。商业业态调整、办公格局重组、智能家居普及等因素都可能带来用电负荷的显著变化。一个僵化的配电系统将难以适应这种动态发展,导致后期改造困难、成本高昂。因此,优化

配置必须具备前瞻性,预留足够的容量裕度和物理空间。例如,在竖井和桥架设计时,应考虑未来增容的可能性;在配电干线设计上,可采用模块化、插接式母线槽,便于在任意点引出分支,灵活调整供电范围^[1]。这种“面向未来”的设计理念,能够有效延长系统的使用寿命,降低未来的改造成本,使得建筑电气系统能够伴随建筑功能的演进而同步进化,而非成为制约发展的瓶颈。

1.4 节能环保与绿色低碳原则

响应国家“双碳”战略,低压配电系统的优化必须将节能降耗和减少碳排放作为核心目标。这体现在两个层面:一是系统自身的高效运行,通过选用低损耗设备、优化线路路径、减少谐波污染等方式,最大限度地降低输电过程中的能量损失;二是作为建筑能源管理系统(BEMS)的感知与执行单元,为精细化用能管理提供数据支撑,从而引导用户侧节能行为,实现建筑整体能效的提升。此外,设备选型还应考虑其材料的可回收性及生产过程中的环境影响,践行绿色供应链理念。将配电系统视为建筑实现碳中和目标的关键环节,其优化不仅是技术升级,更是履行社会责任的具体体现。

1.5 智能化与数字化原则

信息技术的飞速发展,为配电系统的优化提供了前所未有的工具。通过集成智能断路器、多功能电力仪表、环境传感器等物联网(IoT)设备,并依托边缘计算和云平台,可以构建一个可观、可测、可控、可调的智能配电系统。该系统不仅能实时监测电能质量、设备状态和能耗数据,还能基于大数据分析进行故障预警、能效诊断和优化调度,将传统的“被动运维”转变为“主动运维”,极大地提升了系统的管理水平和运行效率^[2]。智能化是实现前述各项原则(尤其是经济性和可靠性)的重要技术手段,它赋予了冰冷的电气设备以“思考”和“沟通”的能力,使其从一个单纯的能源输送网络,进化为一个具有自我感知、自我调节和自我优化能力的智慧生命体。

2 低压配电系统优化配置的关键技术方法

在上述原则的指引下,具体的优化工作可分解为一系列相互衔接的技术环节。

2.1 基于大数据与AI的负荷精准预测

负荷计算是配电系统设计的起点,其准确性直接决定了后续所有配置的合理性。传统的负荷计算方法(如单位指标法、需要系数法)过于粗略,依赖经验系数,难以反映实际用电的时空分布特性。优化配置要求采用更精细化的负荷预测模型。具体而言,可以通过收集同类建筑或本建筑的历史运行数据,深入分析日、周、月、年

的负荷曲线规律,并将建筑划分为不同的功能区,针对每个区域建立独立的负荷模型,充分考虑其特有的设备类型、使用习惯和作息规律。在此基础上,引入机器学习等先进的人工智能算法,综合考虑天气、节假日、特殊事件等多种外部因素,对未来负荷进行滚动预测。这种精准的负荷预测不仅可以避免变压器和电缆的过度选型,节约初期投资,更能为削峰填谷、需求侧响应等高级应用奠定坚实的数据基础,是实现系统经济高效运行的前提。

2.2 主接线方案的多维度比选与优化

主接线形式决定了系统的整体架构和运行方式,是优化的核心环节。常见的方案有单母线、单母线分段、双电源互为备用等。为了选出最优方案,需要进行多维度的综合评估。首先,运用可靠性框图(RBD)或故障树分析(FTA)等方法,量化评估不同接线方案在各种故障场景下的供电连续性指标(如平均供电可用率ASAI)。其次,详细核算不同方案的全生命周期成本(LCC),不仅要比较设备成本,还要估算因可靠性差异带来的潜在故障损失成本。最后,还需评估方案在检修、增容、负荷转移等方面的运行灵活性^[3]。例如,单母线分段带母联的方案,在一路电源失电时,可通过合母联开关由另一路电源带全部或重要负荷,且检修时可分段隔离,其灵活性和可靠性均优于简单的单母线不分段方案。优化的目标正是要在满足既定可靠性等级要求的前提下,选择那个LCC最低且运行最灵活的方案。

2.3 设备选型、保护配合与整定优化

设备是系统的物理载体,其选型与保护配置直接关系到系统的性能。在变压器选型方面,应根据精准负荷预测结果,结合负荷的同时率和季节性变化,确定合理的变压器容量,避免“大马拉小车”造成的空载损耗过大,也防止过载运行影响寿命。同时,应优先选用符合国家一级能效标准的产品,并考虑采用“多台小容量”变压器并列运行的方式,根据实时负荷自动投切,使变压器始终运行在高效区间。在导体(电缆/母线槽)选型上,应突破仅按发热条件(载流量)选型的传统做法,引入经济电流密度法。该方法综合考虑了线路的初始投资和年运行损耗费用,通过技术经济比较,确定一个使LCC最小的导体截面,尤其适用于年最大负荷利用小时数较高的主干线。在保护电器(断路器)方面,核心在于实现选择性保护,即确保在发生故障时,只有距离故障点最近的保护电器动作,上游保护电器不动作,从而将停电范围限制在最小。这需要对各级断路器的瞬时、短延时、长延时脱扣参数进行精确整定,形成严密的级

差配合。现代智能断路器的强大通信和可编程功能，为此类复杂的保护配合整定提供了极大的便利和可靠性。

2.4 电能质量综合治理

非线性负荷（如变频器、LED驱动电源、IT设备）的大量接入，导致民用建筑中谐波、电压闪变等问题日益突出，不仅增加系统损耗，还可能干扰敏感设备运行。对此，优化配置应采取综合治理策略。首先，在设备选型阶段就应注重源头治理，要求关键设备（如UPS、变频空调）满足电磁兼容（EMC）标准，并自带谐波抑制功能（如12脉波整流、有源PFC）^[4]。其次，对于已存在的或难以从源头解决的谐波问题，可采用有源电力滤波器（APF）进行动态、精准的谐波治理，或采用无源滤波器（PF）进行特定次谐波的滤除。同时，配置动态无功补偿装置（SVG）以快速调节无功功率，稳定系统电压，提高功率因数，从而有效减少线路损耗，全面提升电能质量。

2.5 智能化与数字化深度集成

将智能配电的理念贯穿于系统设计的始终，意味着要构建一个分层分布式架构，通常包括现场层、控制层和管理层。现场层部署智能终端设备，负责数据采集和本地控制；控制层（通常位于变电所）通过智能网关或PLC实现本地监控与联动；管理层（BEMS平台）则实现全局可视化、数据分析和远程管理。为了发挥最大效能，必须打破信息孤岛，将配电系统数据与楼宇自控（BA）、消防、安防等系统数据深度融合，构建统一的数字孪生模型。例如，当BA系统检测到某区域长时间无人时，可联动配电系统对该区域非必要回路进行远程分闸，实现精准节能。此外，通过对断路器操作次数、触头温升、绝缘状态等参数的长期监测与分析，系统能够预测设备潜在故障，提前安排维护，将传统的“被动运维”彻底转变为高效的“预测性维护”。

2.6 绿色低碳协同设计

将配电系统置于建筑整体绿色设计框架中考量，是

实现“双碳”目标的必然要求。这要求在设计之初就为可再生能源的接入做好准备，例如为屋顶光伏、小型风电等分布式能源预留并网点和计量点，并设计合理的防逆流或余电上网方案。同时，积极探索储能系统的集成应用，配置电化学储能系统，利用峰谷电价差进行削峰填谷，有效降低需量电费，同时可作为后备电源，进一步提升供电可靠性。此外，针对数据中心、LED照明等大量直流负荷的特点，可以审慎探索局部采用直流（如DC375V）配电的可行性，此举能够省去中间AC/DC转换环节，理论上可提升整体能效3%-8%，代表着未来配电技术的一个重要发展方向。

3 结语

低压配电系统在民用建筑中的优化配置，是电气工程、经济学、信息技术与可持续发展理念融合的综合工程。本文围绕安全性、可靠性、经济性（LCC）、灵活性、绿色低碳、智能化六大原则，探讨了负荷精准预测、主接线方案比选、设备选型、电能质量治理、智能集成等关键技术。摒弃传统“经验主义”和“唯初投成本论”，采用数据驱动、全生命周期、多目标协同策略，可显著提升系统综合性能。展望未来，新型电力系统建设、电力市场改革及人工智能发展，为低压配电系统优化带来机遇与挑战，如融入虚拟电厂参与需求响应、利用数字孪生技术仿真决策等。电气工程师需紧跟时代，更新知识，拥抱新技术，推动民用建筑电气系统持续优化升级。

参考文献

- [1] 韦强,毛圃.民用建筑低压直流配电系统设计实践[J].建筑电气,2023,42(09):36-40.
- [2] 魏山力,马聪,张曦,等.民用建筑低压直流配电系统的项目应用[J].现代建筑电气,2021,12(07):1-6+51.
- [3] 辛志超.建筑电气设计中低压配电系统可靠性分析[J].城市建设理论研究(电子版),2026,(04):1-3.
- [4] 彭薇嘉.“双碳”目标下低压配电系统改造及应用[J].电力设备管理,2026,(02):47-49.