

# 数据中心PUE优化目标下的供配电系统能效提升路径

金俊冉

机械工业第六设计研究院有限公司 河南郑州 450007

**摘要:** 随着数据中心规模的不断扩大和能耗的持续增加,降低数据中心的能源消耗成为业界关注的焦点。PUE (Power Usage Effectiveness) 作为衡量数据中心能源利用效率的重要指标,对数据中心的运营成本和可持续发展具有关键影响。本文围绕数据中心PUE优化目标,深入分析了供配电系统的组成、特点以及能耗现状与问题,提出了一系列供配电系统能效提升的策略,旨在为数据中心实现节能减排、提高能源利用效率提供理论支持和实践指导。

**关键词:** 数据中心; PUE; 供配电系统; 能效提升

## 引言

数字化时代下,以数据中心为核心基础设施的信息存储、处理与传输,无论从规模上还是从数量上都呈现迅猛增长态势。但数据中心高能耗问题也越来越突出,在提高运营成本的同时给环境带来更大压力。以PUE为核心指标的数据中心能源利用效率值越趋近于1,说明数据中心能源利用效率越高。因此,降低PUE成为数据中心节能减排工作的重点目标。作为数据中心不可或缺的一部分,供配电系统的能效状况对数据中心的总体PUE有着直接的影响。深入研究以数据中心PUE为优化目标的供配电系统能效提升路径,对促进数据中心绿色可持续发展至关重要。

## 一、数据中心供配电系统与PUE概述

### (一) 数据中心供配电系统组成与特点

数据中心供配电系统主要由市电引入、变压器、UPS (Uninterruptible Power Supply)、配电柜、电缆等部分组成。市电通过变压器进行电压转换后,为数据中心的各类设备提供电力。UPS作为备用电源,在市电中断时能够保证数据中心的關鍵设备继续运行,避免数据丢失和业务中断。配电柜则负责将电力分配到各个设备,电缆用于连接各供配电设备,实现电力传输。

数据中心供配电系统具有以下特点:一是可靠性要求高,数据中心业务通常需要24小时不间断运行,因此供配电系统必须具备高度可靠性,以确保数据中心稳定运行;二是负载密度大,数据中心内集中了大量服务器、存储设备等,这些设备功率密度较高,对供配电系统的容量和供电质量提出了更高要求;三是能耗大,数据中心供配电系统在运行过程中会产生大量能耗,包括变压

器损耗、UPS损耗等,因此降低供配电系统能耗是数据中心节能减排的重要环节。

### (二) PUE的定义与计算方法

PUE (Power Usage Effectiveness) 由绿色网格组织 (The Green Grid) 于2007年提出,其计算公式简洁而深刻:  $PUE = \text{数据中心总耗电量} / \text{IT设备耗电量}$ 。这一比值是一个大于等于1的数值,越接近1,代表数据中心的能效越高,绿色化程度越深。

在此公式中,分子(总耗电量)涵盖IT设备、制冷系统、供配电系统及照明等所有能耗;分母(IT设备耗电量)则是真正用于计算的有效能耗。因此,PUE的倒数——数据中心基础设施效率(DCIE),更直观地反映了基础设施对电能的利用效率。在当前技术水平下,国外先进数据中心的PUE已普遍低于1.2,而我国大多数数据中心仍徘徊在1.5~2.0之间,这其中的差距,很大程度上源于供配电系统能效的悬殊。

### (三) PUE对数据中心运营的影响

从经济角度看,电费在数据中心的运营成本(OPEX)中通常占据60%~70%的比例。对于一个容量为10 MW的数据中心而言,PUE每降低0.1,每年可为企业节约数百万元电费。在微利时代背景下,这已成为决定企业生存与否的关键因素。

在合规维度上,伴随“东数西算”工程的推进及国家能评政策日趋严格,PUE已成为数据中心能否通过审批的“硬门槛”。各地方政府相继出台针对PUE不高于1.25或1.2的数据中心给予电价优惠和土地支持的政策,同时对PUE偏高的项目实施限制。

在社会责任维度上,PUE下降意味着碳排放减少。在AI大模型训练引发算力需求呈指数级增长的今天,若

无法通过降低PUE抵消算力提升带来的能耗增量，数据中心将难以为继，成为环境难以承受之重。因此，对极致PUE的追求，实质上是生存权与发展权的博弈。

## 二、数据中心供配电系统能耗现状与问题分析

### （一）供配电系统能耗构成

数据中心供配电系统的能耗组成较为复杂。输电线路及电缆在输送电能过程中，因电流热效应及电磁效应造成线损；变压器存在固有损耗，电流流经变压器后铁芯及绕组发热耗能；UPS设备工作时，即使数据中心设备未满载，仍存在空载能耗，其逆变器、电池充电等环节均导致电能损耗；配电柜中开关、接触器及其他部件的电阻也可能造成能量损失；为保障数据中心设备正常运行，冷却系统（如空调和通风设备）需持续运行，由此产生额外能耗；此外，电源及其他辅助设备运行亦需耗电。上述多方面能量消耗共同构成数据中心供配电系统总能耗，每一部分能耗的削减，对提升供配电系统能效、降低数据中心总体PUE均具有重要意义。

### （二）影响供配电系统能效的因素

影响数据中心供配电系统能效的因素多样。设备选型不合理会导致能耗增加，例如选用低效变压器、UPS等设备，其自身损耗大，将降低系统整体能效；负载率对能效影响显著，负载过低时设备运行不经济、效率低下，负载过高则易致设备过载，影响寿命与安全性；供电方式亦至关重要，传统供电方式可能存在传输损耗大、转换效率低等问题，而分布式供电可缩短电缆长度、降低损耗，高压直流供电则有助于提升供电效率、减少UPS损耗；能源管理与监控手段缺失同样制约能效提升，许多数据中心缺乏有效监测，难以准确掌握能耗状况，无法制定针对性节能措施，导致能源浪费；此外，系统规划与设计不合理，易引发过载运行等情况，不仅影响设备寿命，还可能诱发安全事故，进而降低供配电系统能效。

### （三）现有供配电系统存在的问题

现有供配电系统存在诸多问题。设计方面存在不足：线路规划复杂且不合理，增加了供配电设备更换与维护成本，降低了电网稳定性，并增大设备故障风险；未充分考虑不同电气设备间的相互关联性，易引发单点故障，削弱系统可靠性；对新能源接入考虑不足，难以适应能源结构转型需求。设备选型亦存不当之处：选用质量不合格或与实际需求不匹配的设备，易导致过载、短路等问题，埋下安全隐患，降低系统效率。维护管理不到位同样突出：缺乏健全的维护管理制度，设备故障难以及

时发现与处置，影响系统正常运行。此外，安全措施不完善，配电装置易发生短路、漏电等问题，增加电气故障与火灾风险；电力负荷管理低效，导致负荷不均衡与过载，不利于节能与优化管理。

## 三、数据中心PUE优化目标下供配电系统能效提升策略

### （一）优化供配电系统设计

优化供配电系统设计需从多方面着手，以提升能效。设备选型至关重要：选择变压器应综合考量负载率、过载能力及效率。例如，SF<sub>6</sub>气体绝缘变压器较油浸式变压器效率更高，但其维护成本相对较高；高效变压器（如IE3级）相较于传统变压器（如IE2级），效率提升至少30%。在电缆选型方面，交联聚乙烯电缆（XLPE）较传统电缆具有更低损耗和更长使用寿命，某化工厂更换后每年可节省高达80万元的铝材成本；动力设备如高效电机（如IE5级）效率提升显著，但初始投资较高。

在电网设计中，可通过微电网的经济技术分析，合理确定其规模与运行模式，实现与大电网的双向交互；采用能量路由器技术开展多微电网间能量交换与协调控制；并依托面向分布式能源的智能调度与控制策略，提升分布式能源利用效率。还可结合负荷曲线分析与增长预测，确定最优变压器容量与安装数量，合理配置无功补偿装置以提升电压质量、降低线路损耗，并科学协调开关与保护装置配置，确保系统安全、可靠运行。

此外，在智能算法与控制策略支撑下，可对电源输出及设备运行状态实施动态调节，实现负载均衡分配；借助数据分析与预测模型对未来负载需求进行预判，提前调整供电策略，规避负载过载或偏低现象，保障系统平稳运行。

### （二）加强能源管理与监控

强化能源管理与监测，是提升供配电系统能效的根本途径。构建完善的能源管理体系是基础：企业需从战略高度明确能源管理目标、职责、流程与机制，设立专业能源管理部门或岗位，统筹能源统计、分析、监测与管理工作，确保能源管理有序开展。

加强能源消耗数据的采集与分析尤为关键。各类传感器广泛应用于能源生产、输送及使用环节，对能源系统运行状态实施实时监控，获取精准的能耗数据。通过对该类数据进行深度挖掘，可及时识别能源浪费环节与潜在节能空间，为制定节能措施提供坚实依据。

实施智能控制同样至关重要。在智能算法与控制策略支持下，可动态调节电源输出与设备运行状态，实现

负载均衡分配；结合数据分析与预测模型，可预判未来负载需求，提前优化供电策略，避免负载过载或低负载现象，保障系统平稳运行、提升能源利用效率。

此外，还需持续推进能源管理体系优化。我国能源管理体系已逐步建立并不断完善，涵盖能源规划、政策制定、监管、统计与评估等多个方面。持续优化该体系，有利于更好推进能源管理与监测，助力实现节能减排与能源行业绿色发展目标。

### （三）推广应用节能技术

节能技术的推广应用，是提升数据中心供配电系统运行效率的重要手段。在工业应用中，可大力推广高效电机与变频调速技术，通过采用高效及超高效电机，以及基于智能控制的变频调速系统，替代高能耗、老旧电机，从而提升电机系统整体运行效率。类似设备级智能监控，在工业领域部署“5G+传感器”网络，对电机、泵阀及其他设备开展电流、温度、振动等实时数据采集，并借助边缘计算技术识别异常能耗——某化工厂应用该技术后，非计划停机时间减少37%，年度节电量达280万度。

在能源应用领域，分布式能源技术是值得推崇的发展方向，可推动太阳能光伏发电、小型风能、地热能及生物质能等多种分布式能源系统建设，增强能源供应灵活性与环境友好性。例如，某地区建成太阳能光伏电站与风能发电场后，可再生能源占比提升至30%，有效替代传统化石能源。政府补贴、科研机构研发支持及电网改造等举措，共同保障了该项目顺利落地。

金融工具创新亦有助于节能技术普及。节能技术融资租赁模式的推广，可使企业通过分期付款获取设备，并将租金与节能收益挂钩；作为“节能贷”专项金融产品试点项目，已为A级信用企业提供基准利率下调10%的优惠贷款方案。同时，搭建技术验证平台、国家级经开区节能技术实证基地，开展新型技术6-12个月真实工况测试，并出具权威能效比对报告。

### （四）加强运维管理

强化运维管理，可在多个层面提升数据中心供配电系统运行稳定性与能效。明确运维分工与责任是根本：须建立覆盖运维分工、职责、关键质量指标（KQI）及流程制度的完整体系，统一组件接口标准，避免职责交叉或疏漏，提升协同效率。

优化监控与告警处理极为关键：布设全覆盖综合监控点，及时确认与处置告警，持续优化告警阈值与规则配置，强化运维人员接警后的全流程闭环管控；设定响

应时限，全程记录处置过程，确保问题及时闭环。

加强数据备份与应急能力不可忽视：扎实做好系统数据备份、恢复及应急演练工作，着力消除核心IT系统单点故障隐患；通过常态化演练，提升故障快速恢复能力与业务连续性保障水平，例如科学制定数据备份策略、合理确定备份频率、优选存储位置、规范恢复流程等。

规范版本发布管理同样至关重要：坚持“升版不停服”，保障业务连续性；强化发布流程管理与质量检测，发布前须向相关人员发布公告；发布后宜采用灰度发布策略，逐步扩大新版本覆盖范围，以降低上线风险。

此外，加强团队建设与培训必不可少。运维管理涵盖多领域、多技能，需持续强化团队能力建设，制定涵盖技术、流程及软技能的常态化培训计划；鼓励团队成员参与行业会议与专业认证考试，不断提升专业素养与实战能力。

### 结论

总之，以数据中心PUE为优化目标的供配电系统能效提升，具有重要现实意义。通过优化供配电系统设计、合理选型设备、科学规划布局与供电方式，可为节能奠定坚实基础；加强能源管理与监测，在体系建设支撑下，依托数据采集分析与智能控制，可精准把握能耗状况；推广节能技术，借助高效设备、分布式能源及创新金融工具等，可充分挖掘节能潜力；强化运维管理，明晰职责分工、优化监控机制，可保障系统长期平稳高效运行。多措并举、协同发力，方能切实推动数据中心节能减排与可持续发展。

### 参考文献

- [1]黄翔, 田金星, 褚俊杰, 等. 基于清洁供热与IDC排热的能源综合利用系统应用探讨[J]. 暖通空调, 2024, 54(11): 140-145.
- [2]李宏鹏. 基于PUE指标的数据中心能效评估体系构建与优化路径研究[J]. Electronic Communication & Computer Science, 2025, 7(7).
- [3]关通, 何宁, 吴福永. 数据中心供电系统技术研究[C]// 第二十届计算机工程与工艺年会暨第六届微处理器技术论坛论文集. 中国计算机学会, 2016.
- [4]李宇轩. 老旧工业厂区10KV供配电系统改造关键技术[J]. 美食, 2025(20): 53-54.
- [5]石元元. 电气工程供配电系统设计分析[J]. 中文科技期刊数据库(引文版)工程技术, 2021(10): 3.