

基于运行数据的 UPS 节能改造决策模型构建与应用 ——以某大型数据中心为例

陆云飞

中通服咨询设计院有限公司 江苏南京 210019

【摘要】“双碳”战略目标推进之下，数据中心能源消耗问题逐渐凸显出来，UPS系统作为数据中心的关键用电设备，其节能改造的潜力受到重视。本文选取某大型数据中心作为研究对象，依靠该数据中心的历史运行数据以及负载特性，创建起关于UPS节能改造的决策模型，全面评判工频、塔式以及模块化UPS的节能效果，剖析改造对配电架构的影响，在此基础上给出具备可操作性的节能替换方案，通过科学建模并分阶段执行，UPS更新可以切实减小系统的PUE数值，改进供电效能，做到能源和经济效益的双重改善。

【关键词】UPS节能改造；运行数据；模块化UPS；配电架构

Development and Application of a Decision-Making Model for UPS Energy Efficiency Retrofit Based on Operational Data: A Case Study of a Large Data Center

Lu Yunfei

China Communications Construction Consulting & Design Institute Nanjing, Jiangsu Province 210019

【Abstract】 With the advancement of the "Dual Carbon" strategic goals, energy consumption in data centers has become a pressing issue. As critical power infrastructure, UPS systems have drawn significant attention regarding their potential for energy-saving retrofits. This study selects a large-scale data center as the research subject. By leveraging historical operational data and load characteristics from the facility, we developed a decision-making model for UPS energy efficiency retrofit. The model comprehensively evaluates the energy-saving performance of industrial frequency, tower-type, and modular UPS systems, analyzes the impact of retrofitting on power distribution architecture, and provides actionable energy-saving replacement solutions. Through scientific modeling and phased implementation, the UPS upgrade effectively reduces the system's PUE value, improves power supply efficiency, and achieves dual improvements in energy conservation and economic benefits.

【Key words】 UPS energy efficiency retrofit; operational data; modular UPS; power distribution architecture

1 引言

近年来国家对数据中心能效水平要求越来越高，《“十四五”节能减排综合工作方案》中明确提出，到2025年新建和改扩建数据中心PUE要小于1.5。而UPS（不间断电源系统）是数据中心的支撑，其用电量一般占数据中心总能耗的10%~20%。但是部分老旧工频UPS运行效率低、能耗高，急需更换为高效能的模块化UPS。如何在实际运行数据基础上科学开展节能评估和方案优化工作，是目前节能工作的重要内容。本文以真实项目为依托，建立节能决策模型并探索其工程应用路径。

2 数据中心 UPS 系统运行现状分析

2.1 研究对象数据中心简介

本研究依托的数据中心位于华东地区，是某金融集团下属的重要节点，建筑面积约12000平方米，楼宇结构地上

三层，地下一层，共7个独立机房模块，1个主控监控室，总装机功率超5000kVA，其中UPS系统总容量约2000kVA，是基础设施配电系统的枢纽，2011年投入运行，系统设计采用传统塔式配电模式，初期配套的UPS设备均为三相工频机组，配备柴油发电机组作为备用电源。

2.2 UPS 系统现状：设备类型与运行特性

本项目原本的UPS系统是由某国际品牌所提供，共部署UPS机组34台，单台额定容量40~60kVA不等，全部是工频架构，整流/逆变均采用硅整流器件和常规IGBT元件，在内部配备有大容量变压器用以隔离与稳压处理，整体效率在71%~87%左右不等，存在较大的待机损耗与转化损耗情况，据系统监控后台记载，从2020年起很多台UPS设备运转状况就呈现出定期告警的现象，比较典型的问题包含电池充放电效能下滑、旁路过渡时间推迟、负重分摊不均衡、UPS模块间温升状况异常等。

2.3 UPS 运行数据采集方法与指标设置

UPS运行数据采集采用多种方法相结合的方式，通过现

场采样仪表法在机房部署功率计、温湿度计和电能质量检测仪，实时获取电力及环境参数。利用智能 BMS 联动法调取 UPS 监控模块输出的功率、电流、电压、温升和效率等运行数据^[1]。依托数据中心 EMS 系统进行数据集中处理，每日按

5 分钟周期统一导出有功功率、无功功率、输出谐波畸变率 (THD)、电池电压与电流以及系统切换状态等记录，为后续分析提供全面、连续的运行数据支撑。

表 1 主要分析指标设置

指标类别	关键参数	含义说明
能效指标	输入/输出效率 η	UPS 整流-逆变链路传输效率
	功率因数 PF	输出电能有效成分占比
	负载率 Load	实际负载与额定负载比值
功能指标	切换时间 T_s	电池-市电-旁路三状态切换响应时延
	冗余容差 Redundancy	UPS 模块间余量比例
安全指标	电池循环寿命 Cycle_life	电池放充电完整周期数
	谐波指标 THDi	逆变输出总谐波电流畸变率

2.4 数据处理与初步分析结果

数据处理与初步分析结果表明，该数据中心 UPS 能耗占比较高，IT 负载年用电量为 840, 684kWh，而 UPS 系统的用电损耗达 341, 101kWh，占比 17.8%，对应 PUE 因子为 0.178；系统效率偏低且波动明显，长期运行效率在 78%~83% 之间，部分机组在夜间低负载时效率骤降至 72%，空转损耗严重；负载分配不均导致容量浪费，有些 UPS 处于低负载冗余状态（20% 以下），而部分模块负载接近极限；旁路系统冗余不足，部分 UPS 静态开关响应时间超过 4ms，在突发跳电情况下存在短时掉电风险；同时，设备老化问题突出，超过 60% 的 UPS 模块电池组使用年限已超过 6 年，内部电阻增大、放电平台降低，造成维护难度和成本显著增加。

在数据中心电力系统中，UPS 是实现连续供电、屏蔽电网干扰与瞬时备用切换的核心设备。根据技术架构差异，目前主流 UPS 类型包括工频机、塔式高频机与模块化 UPS 三大类。

工频 UPS 一般采用整流器+逆变器+变压器结构，虽然具有良好的抗电网扰动能力，但其结构复杂、变压器体积大、效率低，空载损耗高，通常整机效率维持在 85% 左右。塔式高频 UPS 去除传统变压器，直接通过高频逆变实现交流输出，体积小、响应快、效率较高，是向模块化演进的过渡形态。

模块化 UPS 则采用 N+X 冗余设计，通过多个独立模块组成整机架构，具备在线热插拔、自适应负载分配、智能旁路切换等优势，可实现 95%~98% 的高运行效率，并大幅降低了系统故障率与人工维护成本，特别适合动态负载波动频繁的数据中心应用场景。

3 UPS 节能改造技术路径与策略对比

3.2 三类 UPS 系统能效对比分析

3.1 工频 UPS、塔式 UPS 与模块化 UPS 的技术原理与能效特征

表 2 三类 UPS 在不同负载条件下的综合性能比较

指标	工频 UPS	塔式 UPS	模块化 UPS
整机效率 (50% 负载)	78%~85%	88%~92%	95%~97%
空载功耗	高	中	低
功率因数 (PF)	0.7~0.8	≥ 0.9	≥ 0.99
冗余支持	静态双机冗余	有限冗余	N+1/N+X 灵活配置
热插拔能力	不支持	不支持	支持
适用场景	老旧系统	中型系统	新建/改造系统

数据表明，模块化 UPS 在运行效率、可靠性、扩展性方面具有显著优势。特别是在负载变化频繁、机房规模动态调整的数据中心环境中，其“随需而动”的供电能力可以有效避免传统 UPS 系统的空载损耗与冗余浪费。

据设备年限和故障率优先更换老旧 UPS 为模块化单元，同时保留部分运行正常的高频塔式 UPS，以混合架构实现平稳过渡；其三是智能负载调度模式，在不大幅改动硬件的前提下，通过部署负载优化算法，实现对现有 UPS 设备的动态负载重新分配及时间分段运行，从而减少单台设备低负载运行的情况，提升整体系统能效^[2]。

3.3 常见节能改造策略概述

3.4 UPS 节能改造对配电架构的影响研究

UPS 节能改造策略主要包括三种路径：其一是整机替换方案，即将原有 UPS 设备全部更换为模块化 UPS 系统，这种方式能最大程度提升能效，但改造周期较长，通常适用于新建或全面翻新项目；其二是分段替换与混合部署方案，根

据设备年限和故障率优先更换老旧 UPS 为模块化单元，同时保留部分运行正常的高频塔式 UPS，以混合架构实现平稳过渡；其三是智能负载调度模式，在不大幅改动硬件的前提下，通过部署负载优化算法，实现对现有 UPS 设备的动态负载重新分配及时间分段运行，从而减少单台设备低负载运行的情况，提升整体系统能效^[2]。

统中, 模块化 UPS 对并联输入能力要求更高, 需将原低压母线结构改为多路输入或双母线架构, 以实现各模块独立供电与快速切换, 同时配置更智能的 ATS/STS (自动/静态转换开关) 单元以确保系统冗余性。在下级配电系统中, 由于模块化 UPS 支持热插拔输出, 要求各模块输出电缆长度与接地电阻保持一致, 原集中输出的列头柜结构可能需要调整为并联输出, 并需重新校核末端机柜供电分支开关容量及电缆热容量, 以防模块数量动态调整引发短路或跳闸风险。旁路系统方面, 传统工频 UPS 多采用机械旁路, 切换延时较长, 而模块化 UPS 普遍采用响应时间小于 2ms 的静态旁路, 需要配备支持快速闭锁的电子式双转换旁路回路, 并更新旁路柜的联锁逻辑。智能监控系统方面, 模块化 UPS 的节能效益依赖于能效监控系统的实时数据采集能力, 因此在硬件更新的同时, 应对原有 BMS 与 EMS 系统进行功能拓展, 增加模块级能耗采集、负载趋势预测及冗余自动判断等功能, 从而为节能改造提供精准的数据支撑与优化决策依据。

4 UPS 节能改造决策模型构建

4.1 模型设计思路: 目标函数设定

UPS 系统节能改造不仅仅是设备替换的过程, 更应立足于运行数据, 从生命周期视角出发, 综合考虑初始投资、运维成本、节能效益与系统可靠性等多重因素, 从而实现技术可行、经济合理的优化选择。为此, 本文构建的决策模型以生命周期成本最低、节能效率最高为目标, 结合多维度评估指标, 输出最优改造路径。

其核心目标函数如下:

$$\min LCC = C_{\text{capex}} + C_{\text{opex}} - (E_{\text{saved}} \times P_{\text{elec}} \times T)$$

其中:

C_{capex} : 改造初始投资, 包括 UPS 设备购置、配电系统改造、施工安装费用;

C_{opex} : 运行维护成本, 含电耗费用、年检维护、备件更换等;

E_{saved} : 年节电量, 基于不同 UPS 设备运行效率差异与负载率推算;

P_{elec} : 平均电价, 本文取值为 0.57 元/kWh (按当地能源价格核算);

T : 设备生命周期或经济回收期 (一般为 5~8 年)。

该目标函数同时可扩展至多目标决策模型 (Multi-Objective Decision Making), 引入模糊层次分析法 (FAHP)

参考文献

- [1]严磊. UPS 自动切入保障供电技术在医院中的应用 [J]. 医用气体工程, 2025, 5 (01): 8-11.
 [2]单亚飞. 浅谈 UPS 在数据中心的应用及发展趋势 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2025, (01): 118-121.
 [3]谢静. 数据中心节能改造实施途径 [J]. 上海节能, 2023, (11): 1729-1733.

或 TOPSIS 方法进行权重判断和排序输出。

4.2 模型公式构建: 权重评估与优选算法

在多参数、多目标的改造方案评估中, 仅依赖经济指标排序容易导致结果偏差, 因此本文引入多准则决策分析法 (MCDM) 进行辅助判断, 并采用模糊层次分析法 (FAHP) 构建评价体系, 以计算 UPS 节能改造方案的综合得分。模型的指标层次结构分为三层: 目标层 A 为“UPS 节能改造最优方案”; 准则层 B 包括技术可行性 (B1)、经济合理性 (B2)、节能效益 (B3)、维护简便性 (B4) 以及系统兼容性 (B5); 方案层 C 涵盖三种技术路径, 即工频→工频更换 (C1)、工频→高频塔式 (C2) 以及工频→模块化 UPS (C3)^[3]。通过对上述指标赋权并结合 FAHP 计算, 可实现多维度综合评价, 从而优选出在技术与经济性上均具优势的节能改造方案。

最终综合得分:

$$\text{Score}_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot V_{ij}$$

其中 V_{ij} 为第 j 个方案在第 i 个指标下的归一化值。评分最高者为推荐改造方案。

4.3 模型应用流程设计

运行数据采集与建档 → 指标计算与初筛 (效率、负载率、PUE 因子) → 可选方案设计与成本预算 (3-5 种) → FAHP 综合评分与优选输出 → 推荐方案实施计划与阶段目标 (如 PUE 降至 1.5)

在实施过程中, 每一阶段均需与运维部门、设备供应商、财务预算方进行充分协商, 确保技术可落地、成本可控、收益可量化。

结论

本文把某大型数据中心当作研究对象, 依照 UPS 系统运行时的实际测量数据, 针对传统工频 UPS, 塔式 UPS 以及模块化 UPS 在能效特性方面的不同之处展开深入剖析, 创建起包含能耗, 成本, 可维护性等多方面指标的节能改造决策模型, 从而找到达成生命周期成本最低和运行效率改善之间平衡的最佳途径, 通过研究得出, 在负载率波动较大且对电能品质要求较高的情形下, 模块化 UPS 在能效, 反应速度和系统冗余能力等方面有着明显的优势, 决策模型给出的方案优选逻辑, 可以有效地引领数据中心 UPS 节能改造策略的制订和工程实施, 做到既符合技术可行性又符合经济合理性。