

算力与电力协同视角下 IDC 供电系统优化措施

胡铁峰

(北京万国长安科技有限公司, 北京 100026)

摘要 面对数据中心算力规模不断扩大与电力供给短缺、能效管控日益严格之间的突出矛盾, 本文从算力与电力深度协同的视角出发, 构建以“负荷可预测、绿电可匹配、储能可调度”为核心的供电系统优化方案。实践研究证实, 算力与电力的协同管控, 可推动供电系统打破“被动适配”的传统运行模式, 转向“主动耦合”的新型运行逻辑, 有效提升供电效率、降低数据中心 PUE 值、提高绿电消纳水平与供电可靠性。

关键词 算力电力协同; IDC; 供电系统; 源网荷储; 绿电消纳

中图分类号: TM727; TP308

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.21.002

0 引言

当下, 数字经济与算力网络快速推进, 数据中心 (IDC) 作为承载云计算服务的关键基础设施, 呈现高密度、高功率、高能耗发展特征^[1], 用电规模持续攀升, 已成为全社会电力消耗增长最快的领域之一。传统供电模式采用固定冗余配置, 负荷匹配度低、绿电利用率不足、运行损耗高、可靠性管控薄弱, 难以适配新一代 IDC 发展需求。算力负荷的动态波动、时空分布、峰值特性与电力供给的时序特性、网架约束、电价机制存在强耦合关系^[2], 算力与电力协同调控成为破解 IDC 供电瓶颈的核心路径。

1 IDC 算力负荷与电力供给的耦合特性

IDC 供电系统优化的前提是精准解析算力负荷与电力供给的动态耦合关系。传统供电设计依赖经验冗余, 易造成容量过剩、轻载损耗、峰谷差过大等问题。准确预测高计算负荷区段进行算力供需动态均衡调整, 对于配用电终端的柔性配置具有重要意义^[3]。算力电力协同模式以多维度数据采集、负荷特征挖掘、时序规律分析为基础, 实现负荷与供给的精准匹配。算力负荷具备典型时空分布与动态波动特征, 云计算中心负荷昼夜波动明显, AI 训练集群长期高负载, 边缘 IDC 呈间歇性分散负荷, 负荷大小直接由服务器负载率、算力任务调度、业务峰值时段决定, 与用电功率呈强相关。电力供给侧受电源结构、电网容量、分时电价、绿电间歇性、需求响应机制约束^[4], 光伏、风电等清洁能源出力随机, 与 IDC 负荷存在时序错配, 市电存在峰谷价差与容量限制, 需依托储能、需求响应实现削峰填谷。算力与电力协同的本质是实现算力可调度、

负荷可调节、电力可优化、储能可充放的闭环运行, 推动供电系统从被动支撑转向主动适配、从固定配置转向动态优化、从单一市电转向多能互补^[5]。负荷分析的科学性直接决定供电架构选型、容量配置、设备选型与运行策略, 是算力电力协同优化的基础环节。

2 算力电力协同在 IDC 供电系统中的应用场景

2.1 算力负荷动态预测与供电容量优化

算力负荷动态预测是供电容量精准配置的核心场景, 依托时序分析与机器学习算法, 可实现短期、中期、长期高精度预测。采用 LSTM、GRU 神经网络对负荷时序数据建模, 融合 XGBoost 外部因素校正, 实现分钟级至日级负荷预测。依据预测结果动态调整 UPS 投入数量、变压器负载率、配电回路负载, 避免冗余供电损耗, 提升核心设备运行效率。

2.2 绿电深度消纳与多能互补供电

双碳目标下, 绿电成为 IDC 核心电力来源。算力电力协同实现绿电出力与算力负荷实时匹配, 在绿电充足时段提升算力负荷, 在出力不足时段降低非核心负荷, 最大化就地消纳。构建市电 + 光伏 + 风电 + 储能多能互补结构, 提升绿色化水平, 降低碳排放与用电成本。

2.3 源网荷储一体化协同调控

源网荷储协同是 IDC 供电高效运行的关键场景。“源”为市电与分布式绿电, “网”为内外供配电网络, “荷”为 IT 算力负荷与辅助负荷, “储”为电化学/飞轮储能装置。通过协同调控实现低谷电价储能充电、高峰放电, 电网紧张时参与需求响应, 电网故障时储能孤岛保核心算力, 可提升供电可靠性、降低用电成本、增强电网适应性。

作者简介: 胡铁峰 (1987-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: IDC 电气工程技术。

2.4 供电系统智能监测与故障预警

算力业务的持续稳定运行，高度依赖供电系统的安全可靠运行。依托多维度数据采集与智能分析算法搭建监测预警平台，对电压、电流、功率、温度、谐波及绝缘状态等关键参数进行全程在线监测。借助异常识别算法排查潜在隐患，利用故障诊断模型精准定位问题位置，达成事前预警、快速处理、预防性维护的目标，最大限度降低供电中断对业务运行造成的不利影响。

表 1 负荷数据处理关键技术

处理阶段	核心技术	输出形式	辅助工具	处理目标
数据采集	多源感知聚合	标准化数据流	MQTT/Modbus/IEC61850	全要素数据汇聚
数据清洗	异常值剔除 / 插值	规整数据集	Z-Score/SparkStreaming	提升数据质量
特征提取	特征向量化 / 频域分析	负荷特征矩阵	TF-IDF/ 时序特征提取	挖掘负荷规律
数据存储	分布式时序存储	高可靠数据块	InfluxDB/HDFS	支撑预测与决策

3.2 机器学习算法在负荷预测与协同调控中的应用

机器学习是算力电力协同的核心工具，在负荷预测、优化调度、故障诊断中发挥关键作用。LSTM 通过门控机制处理时序依赖关系，数学表达如下：

$$\begin{cases} i_t = \sigma(W_i x_t + U_i h_{t-1} + b_i) \\ f_t = \sigma(W_f x_t + U_f h_{t-1} + b_f) \\ o_t = \sigma(W_o x_t + U_o h_{t-1} + b_o) \\ \tilde{c}_t = \tanh(W_c x_t + U_c h_{t-1} + b_c) \\ c_t = f_t \odot c_{t-1} + i_t \odot \tilde{c}_t \\ h_t = o_t \odot \tanh(c_t) \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中： i_t 、 f_t 、 o_t 分别为输入门、遗忘门、输出门； $\tilde{c}_t$ 为候选细胞状态； c_t 为细胞状态； h_t 为隐藏状态； σ 为 sigmoid 函数； $\odot$ 为哈达玛积。

采用深度 Q 网络 (DQN) 实现储能充放电最优决策，回报函数如下：

$$R_t = -\lambda_1 C_{cost} - \lambda_2 P_{loss} + \lambda_3 \eta_{green} \quad (2)$$

式 (2) 中： C_{cost} 为用电成本； P_{loss} 为配电损耗； η_{green} 为绿电消纳率； λ_1 、 λ_2 、 λ_3 为权重系数。

融合 LSTM-XGBoost 模型在工程现场实测精度最高，可满足实时调度与负荷匹配的现场要求。

3.3 源网荷储一体化协同控制框架

源网荷储一体化框架采用分层分布式架构，由感知层、控制层、配电层、应用层组成。感知层负责采集源网荷储全要素运行数据，控制层通过中央控制器与边缘控制器完成功率平衡、能量管理、负荷响应等核心逻辑运算，配电层包含高压配电、UPS 系统、智能母线、低压配电等执行单元，应用层面向运维人员提供调度决策、能效分析、碳排放统计、报表管理等功能^[6]。整套框架支持并网运行、孤岛运行、需求响应

3 算力电力协同下 IDC 供电系统优化关键技术

3.1 负荷数据采集与特征提取技术

负荷数据采集与预处理是协同优化的基础，分为数据采集、数据清洗、特征提取、数据存储四个阶段，关键技术如表 1 所示。

通过时序特征提取获得负荷峰值、谷值、波动率、周期特性，采用 InfluxDB 存储海量历史数据，为负荷预测、协同调控奠定高质量数据基础。

等多种工作模式，可实现毫秒级功率响应与秒级调度决策，保障供电系统稳定、高效、连续运行。

3.4 高效供配电架构与节能降耗技术

在供配电架构优化方面，结合 IDC 算力负荷特性与电力供给条件，采用高压直入供电方式减少降压层级，搭配模块化 UPS 与智能母线简化配电结构，降低多级变换带来的电能损耗，推广高压直流 HVDC 供电技术，减少整流逆变环节损耗。同时配置动态无功补偿装置 SVG 与有源滤波器 APF，改善供电电能质量，提升系统功率因数并抑制谐波分量，配合智能母线与智能断路器实现各配电回路负载状态实时监测与均衡分配，避免局部过载或轻载低效运行。

配电系统总损耗计算公式：

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_{UPS} + \Delta P_L + \Delta P_H \quad (3)$$

式 (3) 中： ΔP_T 为变压器损耗； ΔP_{UPS} 为 UPS 损耗； ΔP_L 为线路损耗； ΔP_H 为谐波损耗。

功率因数计算公式：

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (4)$$

式 (4) 中： P 为有功功率； Q 为无功功率。

3.5 供电系统安全防护与可靠性保障

算力电力协同模式下 IDC 供电系统设备与控制节点增多，运行逻辑更复杂，需建立覆盖电气安全、设备安全、系统安全、网络安全的全方位防护体系，通过绝缘监测、接地监测、电弧故障检测以及温度在线监测装置防范电气安全隐患，基于状态监测数据建立 UPS、蓄电池、变压器、储能系统等关键设备的健康状态评估模型，实现寿命预测与预防性维护。系统层面采用

双回路供电、快速切换、备用电源自投以及储能不间断供电方案,确保市电中断时核心算力负载不中断。网络安全层面对智能配电系统与协同调控平台采取加密认证、分级权限管理、入侵检测等措施,抵御非法访问与网络攻击,关键场景可通过多重冗余配置与故障区段隔离技术,将供电系统可用性提升至99.999%以上,满足高等级算力业务连续运行要求。

4 IDC供电系统优化实施路径

4.1 规划设计阶段优化

在项目前期规划阶段,应基于算力负荷预测、电网接入条件、绿电资源禀赋及分时电价机制开展多方案技术经济比选,合理确定供电电压等级、配电拓扑结构、储能配置容量及充放电策略。将算力调度需求、负荷弹性调节能力、绿电消纳目标纳入整体设计,同步完成源网荷储协同控制系统架构、数据接口、调控逻辑与功能模块规划,实现供电系统与算力负荷、电力系统、储能装置的一体化设计,避免后期重复改造与资源浪费,为长期高效稳定运行奠定基础。

4.2 设备选型与技术改造

设备选型严格遵循高效率、高可靠、智能化、模块化原则,优先选用满足国家一级能效标准的变压器、UPS、智能配电柜及储能变流设备,全面提升硬件基础能效水平。对存量IDC实施分区分级、分步推进的节能改造,重点替换高损耗配电设备,完善谐波治理、无功补偿、绝缘监测与消防联动功能,同步加装智能传感、数据采集与远程控制单元,实现供电系统可测、可控、可调节。改造过程制定专项保障方案,确保业务不中断、运行风险可控。

4.3 运行调控与智能运维

建立算力-电力协同运行机制,按照负荷预测结果动态调整供电回路、储能充放电及绿电使用比例,实现削峰填谷、降低损耗、提升绿电消纳率。依托智能管控平台实现电压、电流、功率、温度、能耗、设备状态等参数实时监测与异常预警,推行状态检修与预防性运维,减少故障停机时间。定期开展能效核算、损耗分析与策略优化,持续提升配电系统负载率与运行效率,推动运维由被动处置向主动预判转变。

4.4 管理保障与制度建设

IDC供电系统的稳定高效运行,需要健全的管理体系与制度作为支撑。协同调控作业流程、能耗考核标准、安全操作规范以及应急处理预案均应逐一完善,岗位责任与管理要求也需清晰界定。针对绿电消纳比例、用电成本、供电可靠率、PUE等核心指标,应建立专项

统计与闭环考核机制,实现全流程闭环管控。运维团队的专业能力培训需常态化开展,强化智能配电操作、协同调度执行、故障快速排查等实战技能,保障各项优化方案真正落地见效。

5 实践应用效果分析

将上述优化措施应用于某省级算力枢纽IDC项目,该IDC总装机规模2000架,以AI计算与云计算为核心业务,采用市电+光伏+储能的多能互补供电模式,同步部署源网荷储协同控制系统与智能配电监测平台,项目投运后经连续6个月实测运行数据统计,供电系统平均负载率提升22%,供配电综合损耗降低15.3%,PUE值由改造前的1.48降至1.27,绿电本地消纳比例提升至36.4%,年减少碳排放约3120吨,通过储能峰谷套利与需求响应政策补贴,年均降低用电成本约186万元,供电系统故障预警准确率达到96.2%,非计划停电时间压缩至分钟级,供电可靠性与算力保障能力均达到设计指标。

6 结束语

算力电力协同打破传统供电被动适配模式,实现负荷可预测、绿电可消纳、储能可调度、能效可提升、安全可保障,是新型数据中心供电系统发展的必然方向。在实际工程应用中,应结合IDC业务类型、区域电力条件、绿电资源、政策要求开展差异化设计,持续优化算法模型与调控策略,提升系统适应性与鲁棒性。未来,随着算力网络、虚拟电厂、智能电网、新型储能技术快速发展,算力与电力协同将向更智能、更高效、更低碳、更安全的方向发展,为数字经济高质量发展与双碳目标实现提供坚实支撑。

参考文献:

- [1] 庞彬,王瑞东.基于云计算的通信IDC机房供电电源系统设计[J].通信电源技术,2025(01):117-119.
- [2] 孙晓伟.数字经济背景下算力协同理论机理与实践路径[J].合作经济与科技,2026(07):95-99.
- [3] 胡明,李晓华,蔡泽祥,等.基于计算负荷预测的配用电终端算力供需动态均衡方法[J].电力自动化设备,2024,44(12):52-60.
- [4] 周旭晖,赵以爽,裴培,等.面向智算的“算网电一体化协同”关键技术研究[J].通信世界,2026(03):52-55.
- [5] 林伯强,徐冲冲.支撑人工智能发展:算力与电力协同发展研究[J].世界社会科学,2026(01):127-141,238.
- [6] 谢人超,张嘉林,唐琴琴,等.电力算力协同系统及其关键技术[J].信息通信技术,2025,19(05):41-47.