

考虑冷热电多能互补与负载时空可调特性的数据中心优化运行策略

范宏¹, 陈舒阳¹, 罗昊¹, 徐勇杰¹, 徐涛¹, 贾庆山²

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 清华大学自动化系智能与网络化系统研究中心, 北京 100084)

摘要: 在数字经济背景下, 数据中心产业飞速发展, 其能耗占据社会电力消耗的相当比例, 数据中心已经成为配电网中重要的组成部分。为了充分开发数据中心的灵活性资源, 基于数据负载的时空可调特性, 建立了数据负载调度模型, 并将其接入综合能源站, 以实现能源的高效利用。针对数据中心运行过程中数据负载处理能力与电能消耗量之间的复杂关系进行了深入分析, 采用动态电压频率调节(dynamic voltage and frequency scaling, DVFS)技术对数据中心进行建模, 并根据混合制排队论模型建立了不同类型数据负载的需求模型。为了平衡数据负载波动、提高整体效能和功耗比, 提出了共享数据负载的数据中心联盟模式, 并建立了联盟下数据负载调度模型。然后, 以综合成本最小化为目标, 建立了考虑多能互补特性与时空可调特性的多区域能源站协同调度模型。最后, 采用集成数据中心的能源站进行仿真分析, 分析考虑多能互补与时空可调特性对数据中心运行经济性与环保性的积极作用, 验证了所提出调度策略的经济性收益。

关键词: 数据中心联盟; 综合能源站; 多能互补; 时空可调特性; 配电网调度

Optimal Operation Strategy for Data Center Considering Cold-Heat-Electricity Multi-Energy Complementation and Spatiotemporal Adjustable Characteristics of Load

FAN Hong¹, CHEN Shuyang¹, LUO Hao¹, XU Yongjie¹, XU Tao¹, JIA Qingshan²

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Center for Intelligent and Networked Systems, Department of Automation, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Under the backdrop of the digital economy, the data center industry has rapidly developed, with its energy consumption accounting for a significant proportion of societal electricity usage. Data centers have become a crucial component of the power distribution network. To fully exploit the flexibility resources of data centers, a data load scheduling model is established based on the spatiotemporal adjustable characteristics of data loads, which is then integrated into integrated energy stations to achieve efficient energy utilization. An in-depth analysis is conducted on the complex relationship between data load processing capacity and electricity consumption during data center operations. Dynamic voltage and frequency scaling (DVFS) technology is employed to model the data centers, and demand models for different types of data loads are developed based on a mixed queuing theory model. To balance data load fluctuations and improve overall efficiency and power consumption ratios, a data center alliance model for shared data loads is proposed, and a data load scheduling model under the alliance is established. Subsequently, with the goal of minimizing comprehensive costs, a multi-regional energy station coordinated scheduling model is developed, considering the complementary characteristics of multiple energy sources and spatiotemporal adjustability. Finally, simulation analysis is conducted using energy stations integrated with data centers to analyze the positive effects of multi-energy complementarity and spatiotemporal adjustability on the economic and environmental performance of data center operations, validating the economic benefits of the proposed scheduling strategy.

Key words: data center alliance; integrated energy station; multi-energy complementarity; spatiotemporal adjustable characteristics; distribution network scheduling

0 引言

在数字经济背景下,数据中心拥有重要的战略地位^[1-2]。截至2023年底,我国数据中心总耗电量达到15 TWh,占全社会用电量的1.6%,预计未来10年将以5%~10%的复合年增长率增长^[3-4]。随着数字化时代的不断发展,数据中心的规模不断增加^[5-7],由此产生的海量电力需求以及数据负载的特殊性,使得传统优化调度方法难以高效挖掘其灵活性资源^[8]。因此,通过合理优化模型,利用数据中心负载的灵活性,对于提高数据中心运行效率具有重要意义^[9]。

相较于传统负载,数据负载的灵活性主要表现在其时空可调特性和综合供能特性两个方面。前者指数据负载可通过网络以低成本实现空间尺度迁移,借助云迁移无需一次性支出大额硬件成本、可降低软件授权成本与IT支持成本等优势,从而充分利用能源充足地区的富余能源,且部分负载可容忍的处理时延可达到几小时甚至几天,可充分利用低价电时段的电能进行处理^[10];综合供能特性指数据中心供能方式的多样性,数据中心以电能与冷能为核心需求,独立运行时通常采用电制冷机供冷;接入综合能源站后,则可借助能源站富余冷能满足用电需求,降低运行成本^[11]。

数据负载的时空可调特性是数据中心联盟调度策略的基础。文献[12]针对数据中心储能设备利用率较低的问题,提出了一种数据中心联盟共享储能规划方法,降低了数据中心联盟运行成本。文献[13]提出了一种基于时空可调特性的数据中心联盟调度方法,通过充分开发数据中心负载的灵活性提高了电-气能源网络的新能源消纳能力。文献[14]在考虑可再生能源不确定性影响的前提下,提出了一种数据中心集群资源调度策略,通过数据负载在集群内重新整合分配降低了经济性成本。文献[15]基于数据中心联盟中各数据中心的负载量与能量流关系,提出了一种在线算法进行负载分配,有效降低了运营成本与计算时间。文献[16]通过形成数据中心联盟,对数据负载进行跨区调度,实现了经济性成本的降低。

综合能源站的冷热电多能互补特性对数据中心

的优化运行具有重要支撑作用。在处理数据负载时服务器产生大量热量,为保持适宜的机房温度,数据中心需要接入与电能消耗量正相关的冷量,以确保正常运行^[17-18]。综合能源系统的冷热电多能互补特性,可助力数据中心实现经济运行与能源高效利用的双重目标。文献[19]通过配置多种储能设施,降低了含数据中心综合园区的运行成本。文献[20]将数据中心视为能源产消者,构建了数据中心-综合能源系统集成运行框架,提高了可再生能源消纳并降低了系统成本。文献[21]通过调度数据中心调整综合能源站运行策略,证实了数据中心对提升综合能源站运行灵活性的可行性。

目前已有的研究中,接入至不同区域综合能源站的数据中心形成联盟进行优化调度的研究较少,已有相关综述指出“对基于数据中心的综合能源系统优化运行问题鲜有研究”,同时现有研究表明数据中心计算任务具备时空灵活性,在此背景下,本文提出了一种考虑数据负载时空可调特性及综合能源站冷热电多能互补特性的优化运行策略。将多个位于不同综合能源站的数据中心形成数据中心联盟,并根据混合排队模型将各数据中心的数据负载进行归类建模。在满足负载延迟容忍需求的基础上,根据不同数据中心环境参数在联盟内再次分配数据负载,根据动态电压频率调节(dynamic voltage and frequency scaling, DVFS)技术对数据中心服务器进行建模并对服务器运行情况进行优化,将数据负载耦合至电负荷和冷负荷。最后,通过不同场景算例的对比说明所提运行策略对数据中心经济性成本的影响。

1 数据负载模型

在不考虑空间可调特性的情形下先对批处理负载进行建模。批处理负载因来源各异而需求不同,为便于建模,可将其划分为 N_d 种类别。

$$data_t = data_{int,t} + \sum_{n=1}^{N_d} data_{bat,t,n} \quad (1)$$

式中: $data_t$ 为 t 时刻的待处理负载量; $data_{int,t}$ 为 t 时刻的交互式负载处理量; $data_{bat,t,n}$ 为 t 时刻 n 类批处理负载的处理量。

在不考虑空间可调特性的情况下,批处理负载可如下描述:

$$\sum_{t=1}^{T_{bat}} data_{bat,t} = \sum_{t=1}^{T_{bat}} data_{bat,in,t} \quad (2)$$

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFA1004600)。

Foundation item: Supported by the National Key Research and Development Program (2022YFA1004600).

式中: $data_{bat, in, t}$ 为 t 时刻批处理负载输入量; T_{bat} 为批处理负载的延迟时段。

1.1 交互式数据负载模型

混合制排队模型通常记为具有 S 个服务台、系统空间容量为 K 的模型, 当 K 个位置已被顾客占用时, 新到的顾客自动离去, 当系统中有空位置时, 新到的顾客进入系统排队等待, 能够准确描述在有限系统容量下, 负载到达并进行的排队情况。通过计算平均客户数、平均等待时间等系统性能指标, 结合马尔可夫过程、排队论公式等分析方法, 可对服务系统的性能进行准确评估和优化, 比如某汽车加油站设有两个加油机, 最多只能停放 3 辆等待加油的汽车, 借助混合制排队模型可计算出有效到达率、平均逗留时间等指标, 为加油站的运营优化提供参考。

交互式负载对处理时间延迟有较高的要求, 本文通过混合制排队模型对交互式负载进行建模, 并确保其满足处理延迟要求^[22]。交互式负载须满足如下要求。

$$d_{i, n, t} - data_t \geq \frac{1}{T_{int, min}}, \quad \forall t \quad (3)$$

式中: $d_{i, n, t}$ 为 t 时刻位于数据中心 i 的 IT 设备 n 所能提供的负载处理能力; $T_{int, min}$ 为交互式负载的可延迟时间。

1.2 考虑空间可调特性的批处理数据负载模型

单个数据中心进行数据处理时, 数据负载的时间可调特性如式(3)所示, 但其空间可调特性无法体现。在数据中心联盟中批处理负载的时空可调特性如式(5)所示。

$$\sum_{n=1}^s \sum_{t=1}^{T_i} data_{bat, i, t} = \sum_{n=1}^s \sum_{t=1}^{T_i} data_{bat, i, in, t} \quad (4)$$

式中: $data_{bat, i, t}$ 为数据中心 i 在 t 时刻的批处理负载处理量; $data_{bat, i, in, t}$ 为数据中心 i 在 t 时刻的批处理负载输入量; n 为位于数据中心 i 的 IT 设备台数; T_i 为批处理负载的可容忍时延。

仅需保证在可延迟时段内, 各数据中心的批处理负载完成量总和为该时段内批处理负载到达量之和, 而对各数据中心的负载完成量分配情况无具体要求, 使得批处理负载能够集中到处理成本更低的数据中心进行集中处理, 以降低综合成本。

2 基于 DVFS 技术的数据中心模型

动态电压频率调整 (dynamic voltage and

frequency scaling, DVFS) 技术以设备的计算能力需求为依据, 通过负载感知与预测、电压-频率协同调节的方式, 对 IT 设备的运行频率和电压进行动态调节: 低负载时降低电压和频率减少能耗, 高负载时提升电压和频率保障性能, 在满足任务需求的基础上实现功耗优化。这项技术需软硬件结合实现, 硬件上有 Intel 的 SpeedStep 技术、ARM 的 AVS 技术等, 软件上 Linux 系统依靠 CpuFreq 架构支持 ondemand、performance 等多种调频调压策略, 在实际场景中应用广泛, 比如云计算百万级服务器集群里, 单机的 DVFS 优化就能产生显著经济效益, 而移动设备中的 Tegra2 处理器也能通过该技术, 根据视频播放、游戏等不同场景智能调节 GPU 和 CPU 性能, 延长设备续航。

依据 DVFS 技术, 数据中心与其内部 CPU 工作频率的关系如下^[23]。

为满足数据中心灵活性要求, 应对数据负载到达率波动, 需保留一定冗余计算量。

$$P_{data, i, t} = C_1 \sum_{n=1}^{N_i} q_{n, t} f_{data, n, t}^2 \quad (5)$$

式中: $P_{data, i, t}$ 为 t 时刻数据中心 i 的 IT 设备总能耗; N_i 为数据中心 i 的 IT 设备数量; C_1 为表征 CPU 工作频率与功耗关系的系数; $q_{n, t}$ 为与 t 时刻服务器 n 负载处理量有关的变量; $f_{data, n, t}$ 为第 n 台 CPU 在 t 时刻的工作频率。

为满足数据中心灵活性要求, 应对数据负载到达率波动, 需保留一定冗余计算量。

$$\theta_{data} R_{i, t} \leq \sum_{n=1}^{N_i} d_{i, n, t} \quad (6)$$

式中: θ_{data} 为灵活性系数; $R_{i, t}$ 为 t 时刻数据中心 i 的待处理负载量。

单个 CPU 的负载处理能力与工作频率的关系如下。

$$d_{i, n, t} = C_2 f_{i, n, t} \quad (7)$$

式中: C_2 为表征 CPU 工作频率与负载处理能力关系的系数; $f_{i, n, t}$ 为 t 时刻、位于数据中心 i 的 IT 设备 n 的工作频率。

为避免高温等因素损害设备、保障数据中心稳定运行, 需满足非 IT 设备能耗需求, 但此类需求会降低电能使用效率^[24]。电能使用效率 (power usage effectiveness, PUE) 是国际上比较通行的数据中心电力利用率的衡量指标, 其定义为:

$$P_{\text{cooling},t} = C_{\text{co}} \sum_{i=1}^n P_{\text{data},i,t} \quad (8)$$

$$\eta^{\text{PUE}} = \frac{\sum P_{\text{data},t} + \sum P_{\text{cooling},t} + \sum P_{\text{le},t}}{\sum P_{\text{data},t}} \quad (9)$$

式中: $P_{\text{cooling},t}$ 为 t 时刻的数据中心制冷能耗; $P_{\text{le},t}$ 为 t 时刻的数据中心内部其他设备能耗量; η^{PUE} 为数据中心 PUE 值; C_{co} 为 IT 设备功耗与制冷设备功耗关系的系数。

3 集成数据中心的能源站调度模型

为研究冷热电多能互补特性对数据中心经济性的影响,本文建立了包含新能源机组、热电联产(combined heat and power, CHP)机组、电制冷机、吸收式制冷机以及多种类型负荷的综合能源站,其设备结构及能流路径如图1所示。

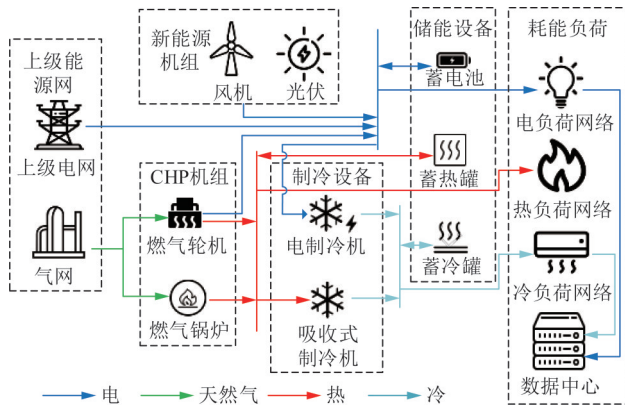


图1 能源站能流框架

Fig. 1 Energy flow framework of energy station

本文建立了集成数据中心的综合能源站模型,通过电负荷网络与冷负荷网络向数据中心输送能量。

3.1 目标函数

以实现数据中心联盟整体费用最小化为目标函数,如式(10)所示。

$$\min C = \sum_{n=1}^i (C_{\text{OM},i} + C_{\text{C},i} + C_{\text{E},i}) \quad (10)$$

式中: $C_{\text{OM},i}$ 为园区 i 设备运维成本; $C_{\text{E},i}$ 为园区 i 购能成本; $C_{\text{C},i}$ 为碳排放成本。

3.1.1 购能成本

$$C_{\text{E},i} = \sum_{t=1}^{T_d} \left[(G_{\text{GT},i,n,t} + G_{\text{GB},i,n,t}) C_{\text{G}} + P_{\text{b},t} C_{\text{Pb},i,t} - P_{\text{s},t} C_{\text{Ps},i,t} \right] \quad (11)$$

式中: $G_{\text{GT},i,n,t}$ 为燃气轮机在 t 时刻运行所消耗的燃气量; $G_{\text{GB},i,n,t}$ 为燃气锅炉在 t 时刻运行所消耗

的燃气量; 下标 i 、 n 分别为燃气轮机所在园区编号及燃气轮机编号; T_d 为调度周期总时长; C_{G} 为天然气价格, 3月下旬36个大中城市工业用天然气平均价为3.56元/ m^3 ; $C_{\text{Pb},i,t}$ 、 $C_{\text{Ps},i,t}$ 分别为 t 时刻数据中心 i 所在园区的购电、售电价格, 其中购电价格可参考2024年10月全国各省市工商业购电电价数据, 该数据按省市和电压等级划分; $P_{\text{b},t}$ 、 $P_{\text{s},t}$ 分别为 t 时刻数据中心 i 所在园区的购电、售电量。

3.1.2 设备运维成本

$$C_{\text{OM},i} = \sum_{t=1}^{T_d} \sum P_t^{e_q} C^{e_q} \quad (12)$$

式中: e_q 为园区中各设备, 包括风机、光伏、燃气轮机、燃气锅炉、吸收式制冷机、电制冷机、储能设备、IT设备; $P_t^{e_q}$ 为 t 时刻设备 e_q 的工作功率; C^{e_q} 为设备 e_q 的单位功率运维成本。

3.1.3 碳排放成本

基于阶梯式碳排放价格的碳排放模型 $C_{\text{C},i}$ 如下:

$$C_{\text{C},i} = \sum_{n=1}^5 C_{\text{CT},n} \frac{G_{\text{GT},i,n,t} + G_{\text{GB},i,n,t}}{\eta_{\text{G}}} \quad (13)$$

式中: η_{G} 为单位天然气燃烧产生的碳排放量, 例如当天然气热值为38931 KJ/ m^3 时, 每燃烧1 m^3 气排放的 CO_2 量为2.165 kg; $C_{\text{CT},n}$ 为各段碳排放价格。

3.2 约束条件

3.2.1 可再生能源机组约束

并网型风机可以实现稳定的电力输出, 并能够根据电网的需求调节风机的运行状态^[25-27]。正常工作状态下, 并网型风机约束如下。

$$P_t^{\text{WT}} = \begin{cases} 0, & v_t \leq v_{\text{ci}}, v_t > v_{\text{co}} \\ p^{\text{wo}} \frac{v_t - v_{\text{ci}}}{v_{\text{r}} - v_{\text{ci}}}, & v_{\text{ci}} < v_t \leq v_{\text{r}} \\ p^{\text{wo}}, & v_{\text{r}} < v_t \leq v_{\text{co}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: P_t^{WT} 为 t 时刻的风机输出功率; p^{wo} 为风机额定输出功率; v_{ci} 、 v_{co} 、 v_{r} 分别为切入、切出和额定风速; v_t 为 t 时刻的实际风速。

由于光伏电池的工作原理涉及复杂的光电转换过程和非线性特性, 其物理模型较为复杂, 为提高模型求解效率, 可对光伏电池模型进行简化。经相关研究验证, 简化后的光伏电池数学模型虽不能完全描述电池的所有物理特性, 但在一定范围内其结果与实际情况相差不大, 同时搭配优化的参数求解方法还可进一步减少冗余搜索, 提升计算效率。

$$P_t^{PV} = I_t^{PV} S \eta \quad (15)$$

式中： P_t^{PV} 为 t 时刻的光伏电池输出功率； I_t^{PV} 为 t 时刻光照强度； S 为光伏机组电池面积总数； η 为转化效率。

3.2.2 储能设备模型

对蓄电池、蓄热罐和蓄冷罐分别建立储能通用模型^[26-27]。

$$0 \leq E_{es,t} \leq E_{es}^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{es, ch, t} \leq P_{es, ch}^{\max} \quad (17)$$

$$0 \leq P_{es, dis, t} \leq P_{es, dis}^{\max} \quad (18)$$

$$E_{es, t+1} = E_{es, t} (1 - \sigma_{es}) + \eta_{es, ch} P_{es, ch, t} - \frac{P_{es, dis, t}}{\eta_{es, dis}} \quad (19)$$

式中： e_s 为能源类型，包含电能、热能、冷能3种蓄能装置； $E_{es, t+1}$ 、 $E_{es, t}$ 分别为设备在 $t+1$ 时刻和 t 时刻的设备能量； $P_{es, ch, t}$ 、 $P_{es, dis, t}$ 分别为 t 时刻储能设备的充能功率和放能功率； $\eta_{es, ch}$ 、 $\eta_{es, dis}$ 分别为储能设备的充能效率和放能效率； σ_{es} 为储能设备的自放能率； $E_{es}^{\max}$ 、 $P_{es, ch}^{\max}$ 、 $P_{es, dis}^{\max}$ 分别为储能设备容量、充能功率上限、放能功率上限。

3.2.3 CHP机组运行约束

CHP机组运行约束如下：

$$Q_{GB, out, t} = G_{GB, in, t} \eta_{GB} \quad (20)$$

$$0 \leq Q_{GB, out, t} \leq Q_{GB, max} \quad (21)$$

式中： $Q_{GB, out, t}$ 为燃气锅炉在 t 时刻的制热功率； η_{GB} 为燃气锅炉的制热能效比； $G_{GB, in, t}$ 为燃气锅炉在 t 时刻消耗的燃气热值； $Q_{GB, max}$ 为燃气锅炉功率上限。

燃气轮机运行约束如下：

$$P_{GT, out, t} = Q_{GT, in, t} \eta_{GT} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{GT, out, t} \leq P_{GT, max} \quad (23)$$

式中： $P_{GT, out, t}$ 为燃气轮机在 t 时刻的发电功率； $Q_{GT, in, t}$ 为燃气轮机在 t 时刻吸收的热功率； η_{GT} 为燃气轮机的发电功率能效比； $P_{GT, max}$ 为燃气轮机功率上限。

3.3 贡献值分析

Shapley值法是合作领域的一种贡献分析方法，根据成员对联盟的边际贡献对成员进行贡献分析^[28]。为求得各数据中心对数据中心联盟的贡献值，需求得所有可能组合情况下，数据中心的经济性成本，根据式(26)对各数据中心进行贡献分配。

$$v(i) = \sum_{S=1}^N \frac{[(S-1)!(N-S)!]}{N!} \times [v(S) - v(S_{i-})] \quad (24)$$

式中： $v(i)$ 为成员 i 的贡献值； N 为联盟中所有成员数量； S 为 N 的任意子集； $v(S)$ 、 $v(S_{i-})$ 为子集 S 、去除成员 i 的子集 S_{i-} 所获得的利益。

4 算例与结果

4.1 算例设置

本节基于结构如图1所示的3个含数据中心能源站对提出的优化运行策略进行检验。参考已有基于MATLAB结合CPLEX求解综合能源系统优化问题的成熟方法与实践案例，采用MATLAB 2022a平台进行建模，调用CPLEX求解器进行求解。交互式负载可延迟时间为50 ms，批处理负载可延迟时间为24 h。

本文设置了4个场景进行分析，如表1所示。数据中心运维成本高、人工运维效率低，其运营成本主要来自硬件设备采购、人力、网络运营以及能源消耗等方面，而区域能源站相比常规独立供冷供热系统具备节能特性。通过所提模型对4种场景下的系统运行策略进行优化调度，场景条件与运维成本如表1所示，其中，由于场景1、2下，区域能源站与数据中心相互独立运行，因此系统运维总成本取能源站运维成本和数据中心在分时电价下运维成本之和。不同场景下的数据中心效能功耗比如表2所示。

表1 不同场景下的成本对比

场景编号	数据中心是否接入能源站	是否考虑空间可调特性	运维成本
1	×	×	207 439
2	×	√	206 125
3	√	×	197 191
4	√	√	195 560

表2 不同场景下效能功耗比

场景	数据中心1	数据中心2	数据中心3	系统平均
1	4.143	3.501	3.734	3.795
2	4.012	3.924	3.901	3.980
3	4.109	3.383	3.732	3.619
4	4.056	3.680	3.985	3.902

在考虑能源站多能互补特性及负载时间、空间尺度调度的情况下，系统运维成本均有所降低。由

表2可见,在接入能源站后,为配合能源站将负载集中至能耗价格较低时段,数据中心效能功耗比有所降低,导致耗电量增加,但系统运行成本整体有所下降——数据中心的能源成本通常占据其总运营成本的相当大比例,这种基于能源站的负载调度正是通过优化能耗时段来控制成本的有效方式。此外,可见空间可调特性的引入使得各数据中心的效能功耗比趋向同一水平,并使整体系统效能功耗比提高,这也契合数据中心与电力系统协同优化的能耗管理思路,有助于实现数据中心能耗的更高效管控。

4.2 多能互补特性分析

根据表1数据,对比场景1、场景3可知,在不考虑数据负载空间可调特性的前提下,数据中心接入IES可使整体系统的运维成本降低5.19%;对比场景2、场景4可知,在考虑数据负载空间可调特性的前提下,数据中心接入IES可使整体系统的运维成本降低5.40%。由此可见,在充分开发数据负载空间可调特性的情况下,综合能源站多能互补特性对整体运维成本的优化效果更优。

为进一步分析IES供能特性对运维成本的影响,以数据中心1为例对IES供能特性进行分析,数据中心1在场景1、3下的运行情况如图2、图3所示。

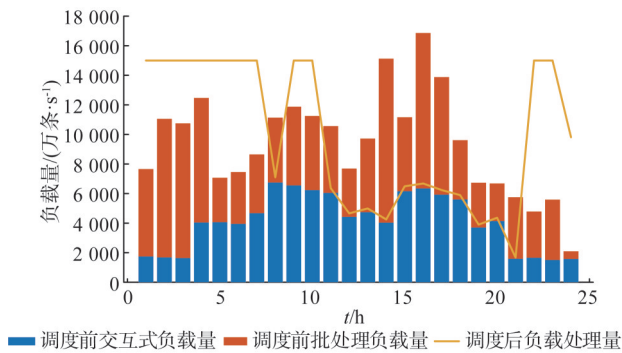
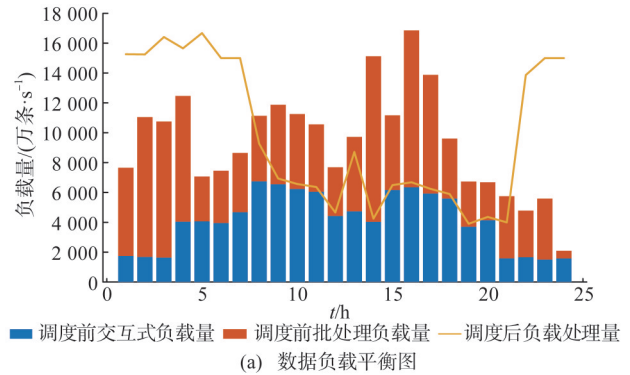


图2 场景1数据负载平衡图

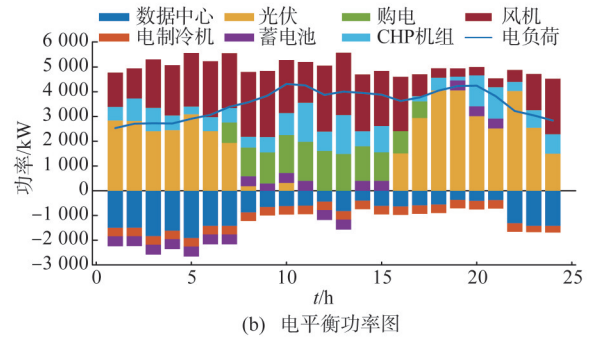
Fig. 2 Data load scheduling results of scenario 1

以柱状图表示各时段数据负载总量与各部分占比,以折线图表示各时段设备提供的负载处理能力。任意时段的负载处理能力需满足该时段交互式负载需求,且一个调度周期内负载处理量需满足该周期负载的总需求。

由图2可见,场景1下,在满足交互式负载处理需求的基础上,数据中心1主要将批处理负载集中于低电价时间段进行处理。受设备最优功效运行



(a) 数据负载平衡图



(b) 电平衡功率图

图3 场景3电功率平衡调度结果

Fig. 3 Electrical power scheduling results of scenario 3

模式下的算力上限限制,部分负载被转移至中电价时段处理。

由图3(a)、图3(b)可见,场景3下,由于能源站内供能、耗能情况与站内设备、负荷的运行情况息息相关,不同时间段的耗能成本波动较为复杂,因此批处理数据负载的处理情况与场景1存在一定差异,在主要集中于低电价时段的基础上呈现出一定的波动性。与独立运行相比,接入能源站后,数据负载的灵活性资源也得到了更好地开发,数据中心通过消纳新能源和利用富余能源类型,使得整体经济成本有所降低。

为分析不同地区的能源站供能特性对数据中心运行的影响,结合数据中心运维成本涵盖人员成本、设备成本、能源成本等多个维度,且地理位置是决定运维成本的重要因素这一特性,取场景1、3中各地区系统运维成本(包含供电、冷却等能源相关成本在内)进行分析,数据如表3所示。

结合表3数据对数据中心成本构成的分析可知,在接入IES后,数据中心1所在系统的成本降低了5.82%,数据中心2所在系统的成本降低了3.41%,数据中心3所在系统的成本降低了4.52%。从降低数据中心成本的常见方法来看,

表 3 多区域能源站调度结果

Tab. 3 Multi-regional energy station scheduling results

能源站编号	场景 1 成本/元	场景 3 成本/元	成本缩减/%
1	62 424	58 993	5.82
2	66 186	62 777	3.41
3	78 828	75 421	4.52

IES 的接入可通过优化系统设备配置、提升资源利用率实现成本管控,同时契合数据中心节能降耗的运营需求,进一步验证了成本降低的合理性。为分析数据中心对综合能源站可再生能源消纳能力的影响,以场景 1、3 能源站可再生能源利用率为例。

由表 4 可见,接入数据中心后对可再生能源利用率进行测算,能源站可再生能源利用率整体有所提高,且新能源消纳能力较差的能源站 2 消纳能力提升最为显著。

表 4 能源站可再生能源利用率

Tab. 4 Utilization of renewable energy of energy station %

能源站编号	场景 1 可再生能源利用率	场景 3 可再生能源利用率
1	96.75	99.91
2	95.41	99.75
3	98.12	99.78

批处理负载时间尺度转移成本较低的特性,与新能源出力较为集中的特性可形成互补,因此数据中心接入能源站后,能够提升整体新能源消纳能力,实现能源高效利用。

4.3 负载空间可调特性分析

为分析负载空间可调特性对系统运行的影响,选择考虑多能互补特性的场景 4 与场景 3 进行对比,以柱状图表示各时段数据负载总量与各部分负载占比,以折线图表示不同场景下各时段设备提供的负载处理能力,调度结果见图 4。

能源站 2 可再生能源充足,且设备算力存在冗余,具备良好数据负载处理潜力。场景 4 下,所提策略通过开发负载的空间可调特性,借助负载均衡技术将数据中心 3 的请求分散至数据中心 2 的冗余服务器上,同时结合服务器功率管理策略动态调整设备功耗,既降低了数据中心 3 的服务器负载,又充分利用了数据中心 2 所在能源站的可再生能源和冗余算力,使得系统整体效能功耗比得以提高,还能有效降低运营成本、提升环境可持续性。

结合能源站接入场景,使用 Shapley 值法分析

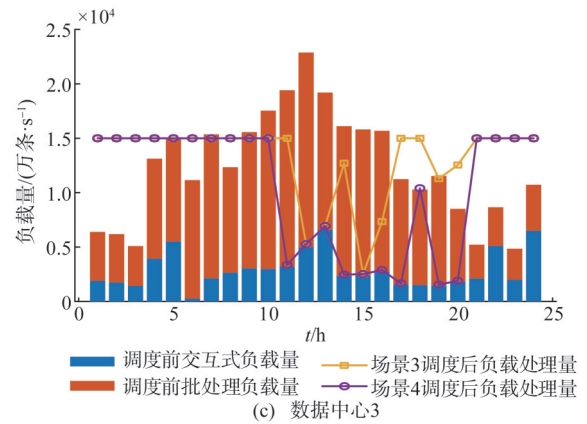
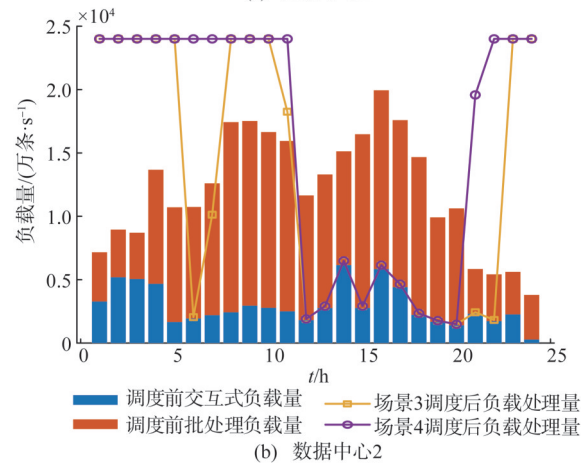
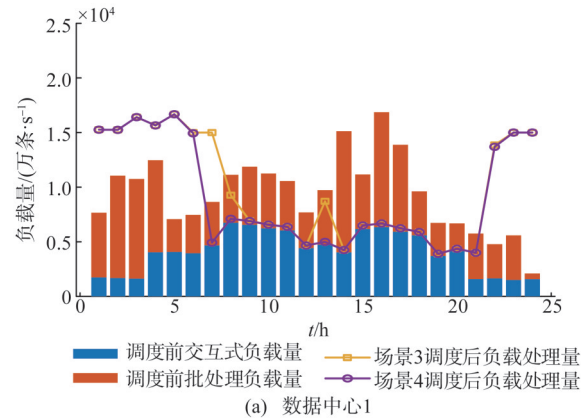


图 4 不同场景下数据负载调度结果

Fig. 4 Data load scheduling results under different scenarios

联盟内各数据中心的参与贡献。为收集分析所需的数据,使用所提出的优化调度模型对文中数据中心联盟所有子集的运维成本进行计算,并以成本缩减值作为收益,所得数据结果见表 5。

为进一步明确各数据中心对联盟的贡献值,以成本缩减值作为集群调度收益,依据表 3 结果,使用 Shapley 值法计算各数据中心的贡献值,结果见表 6。

表5 不同联盟的调度结果

Tab. 5 Scheduling results for different alliances 元

联盟成员	独立运行成本	联盟运行成本	成本缩减
1	10 201		
2	15 016		
3	19 260		
1,2	25 030	25 217	186
1,3	29 069	29 461	391
2,3	32 799	34 276	1 476
1,2,3	42 846	44 477	1 630

表6 各数据中心贡献值

Tab. 6 Contribution values of each data center

数据中心编号	贡献值
1	147.91
2	690.33
3	793.31

由表6可知,相较于数据中心1,数据中心2、3参与联盟调度的负载规模更大,对数据负载空间可调特性的挖掘利用程度更深,因此二者对联盟的贡献值更高。结合图4运行情况进行分析,可得原因如下:

1) 数据中心1的服务器容量与数据负载规模适配性良好,服务器运行于能效功耗比较高的低频率模式。

2) 数据中心3服务器规模不足,为满足算力需求,服务器维持高工作频率运行,导致整体能耗偏高、能效功耗比较低;而数据中心2的服务器算力存在冗余,联盟形成后实现了各方算力的均衡配置,有效降低了整体运行成本。

5 结论与展望

本文针对数据中心的大规模接入,考虑多能互补特性和数据负载时空可调特性,基于DVFS技术构建了集成数据中心的综合能源站多目标优化模型。主要结论如下。

1) 将数据中心接入综合能源站,利用多能互补特性对数据中心实现冷-电联供,可提高能源利用效率。

2) 在多数数据中心联盟场景下,数据负载可充分发挥其空间可调特性,提升联盟整体的运行灵活性与经济性,有效降低运维成本。

3) 所提出的优化调度模型可以提升经济性和

效能功耗比,提高可再生能源的利用率,为数据中心优化调度的进一步发展提供参考。

充分开发数据负载的灵活性资源是数据中心发展的必然趋势,是适应数字化时代需求的重要举措。通过上述模型,数据中心的基础运行成本得以有效降低,该模型也能帮助数据中心降低运营成本,同时其供能方式得以优化,还可如同智能化基础设施管理系统一样,在兼顾系统整体经济性的同时,提升运行的高效性,这类优化手段可帮助企业节省多达20%~30%的整体运营成本。

参考文献

- [1] 吕佳伟,张沈习,程浩忠,等.集成数据中心的综合能源系统能量流-数据流协同规划综述及展望[J].中国电机工程学报,2021,41(16):5500-5521.
LÜ Jiawei, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Review and prospect on coordinated planning of energy flow and workload flow in the integrated energy system containing data centers [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41 (16) : 5500 - 5521.
- [2] 可思为,董萍,马铭宇,等.考虑风光荷时空互补的多能源绿色数据中心多目标配置方法[J].电力系统保护与控制,2024,52(22):22-33.
KE Siwei, DONG Ping, MA Mingyu, et al. A multi-objective allocation method for multi-energy green data centers considering wind, solar and load spatial-temporal complementarity [J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(22): 22 - 33.
- [3] 中国信息通信研究院产业与规划所,中国绿色算力发展研究报告(2024年)[R].内蒙古和林格尔新区:中国信息通信研究院产业与规划所,2024.
- [4] CHEN Y, SHI K, CHEN M, et al. Data center power supply systems: from grid edge to point-of-load [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11 (3): 2441 - 2456.
- [5] 王继业,周碧玉,张法,等.数据中心能耗模型及能效算法综述[J].计算机研究与发展,2019,56(8):1587-1603.
WANG Jiye, ZHOU Biyu, ZHANG Fa, et al. Data center energy consumption models and energy efficient algorithms [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56 (8): 1587 - 1603.
- [6] 冯成,王毅,陈启鑫,等.能源互联网下的数据中心能量管理综述[J].电力自动化设备,2020,40(7):1-9.
FENG Cheng, WANG Yi, CHEN Qixin, et al. Review of energy management for data centers in energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 1 - 9.
- [7] JIN C, BAI X, YANG C, et al. A review of power consumption models of servers in data centers [J]. Applied Energy, 2020 (265): 114806.1 - 114806.10.
- [8] QI W, LI J, LIU Y, et al. Planning of distributed internet data center microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1): 762 - 771.
- [9] LI J, LI Z, REN K. Towards optimal electric demand management for internet data centers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 183 - 192.

- [10] CHEN M, GAO C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Incentive-compatible demand response for spatially coupled internet data centers in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3056 – 3069.
- [11] KIANI A, ANSARI N. Profit maximization for geographically dispersed green data centers [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 703 – 711.
- [12] 吴云芸, 方家琨, 艾小猛, 等. 计及需求响应的数据中心联盟共享储能规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(7): 42 – 50.
WU Yunyun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Shared energy storage planning for data center alliance considering demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 42 – 50.
- [13] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的电-气互联综合能源系统分布式光伏最大准入容量计算[J]. 电力系统及其自动化学报, 2023, 35(2): 121 – 131.
WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Calculation of maximum allowable access capacity of distributed photovoltaic in electricity-gas integrated energy system considering spatio-temporal adjustability of energy consumption by data centers [J]. Proceedings of the Chinese Society of Universities for Electric Power System and Automation, 2023, 35(2): 121 – 131.
- [14] 张镭, 王旭, 杨宏坤, 等. 数据中心集群灵活边界下电力系统分布鲁棒优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 235 – 247.
ZHANG Ke, WANG Xu, YANG Hongkun, et al. Distributionally robust optimal scheduling method for power system under flexibility boundaries of data center clusters [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 235 – 247.
- [15] HAM S, PARK D, LEE W Y, et al. Simulation to analyze operation strategy of combined cooling and power system using a high-temperature polymer electrolyte fuel cell for data centers [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(22): 8247 – 8259.
- [16] CHEN M, GAO C, SHAHIDEHPOUR M, et al. Incentive-compatible demand response for spatially coupled internet data centers in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3056 – 3069.
- [17] ZHAO J, CAI S, LUO X, et al. Multi-stack coupled energy management strategy of a PEMFC based-CCHP system applied to data centers [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(37): 16597 – 16609.
- [18] JIAN J, ZHAO J, JI H, et al. Supply restoration of data centers in flexible distribution networks with spatial-temporal regulation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2024, 15(1): 340 – 354.
- [19] 孙强, 孙志凰, 潘杭萍, 等. 考虑多种储能的数据中心综合能源系统配置优化[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 1 – 7.
SUN Qiang, SUN Zhihuang, PAN Hangping, et al. Configuration optimization of integrated energy system for data center considering multiple energy storage facilities [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 1 – 7.
- [20] YIN X, YE C, DING Y, et al. Exploiting internet data centers as energy prosumers in integrated electricity-heat system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 167 – 182.
- [21] YIN X, YE C, DING Y, et al. Combined heat and power dispatch against cold waves utilizing responsive internet data centers [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2024, 15(2): 819 – 834.
- [22] CHEN S, LI P, JI H, et al. Operational flexibility of active distribution networks with the potential from data centers [J]. Applied Energy, 2021(293): 116935.1–116935.10.
- [23] 王丽欣, 常琳. 高密度数据中心制冷空调系统设计[J]. 制冷技术, 2015, 35(1): 48 – 53.
WANG Lixin, CHANG Lin. Design of refrigeration and air conditioning system for high density data center [J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2015, 35(1): 48 – 53.
- [24] 高赐威, 曹晓峻, 闫华光, 等. 数据中心电能管理及参与需求侧资源调度的展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(23): 1 – 7.
GAO Ciwei, CAO Xiaojun, YAN Huaguang, et al. Energy management of data center and prospect for participation in demand side resource scheduling [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 1 – 7.
- [25] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616 – 3625.
XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, pv, gas and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616 – 3625.
- [26] LIU Z, ZENG M, ZHOU H, et al. A planning method of regional integrated energy system based on the energy hub zoning model [J]. IEEE Access, 2021(9): 32161 – 32170.
- [27] 郭明萱, 穆云飞, 肖迁, 等. 考虑电池寿命损耗的园区综合能源电/热混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(13): 66 – 75.
GUO Mingxuan, MU Yunfei, XIAO Qian, et al. Intergrated energy system considering battery life loss optimal configuration of electric/thermal hybrid energy storage for park-level integrated energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 66 – 75.
- [28] ZHANG P, YANG P, ZHAO Z, et al. A framework for several electricity retailers cooperatively implement demand response to distributed data center [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 277 – 289.

收稿日期: 2024-09-09; 网络首发日期: 2025-01-27

作者简介:

范宏(1978), 女, 通信作者, 副教授, 博士, 从事综合能源系统优化及实时仿真方面的研究工作, hong_fan@outlook.com;

陈舒阳(1999), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统运行策略;

罗昊(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统的优化理论与方法。