

考虑互联网数据中心综合供能的微能源网容量优化配置方法

孙岩¹, 范宏¹, 王迪威¹, 鲁尔奇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: 在当前数字化时代, 互联网数据中心(internet data center, IDC)(以下简称“数据中心”)作为大型的电力消耗者已经成为电力网络中的重要组成部分。首先采用数据中心余热回收技术建立了数据中心等值热参数模型, 并将其融入到微能源网中以实现冷热电多能互补。其次对数据中心运行过程中所需制冷量与余热之间的复杂关系进行了深入分析, 采用溴化锂吸收式制冷机和电制冷机来满足数据中心的冷负荷需求。为了更有效地应对批处理负荷在时间维度上的变化特性, 制定了高度灵活的数据负荷分配策略, 并建立了双层规划模型。使用场景削减的典型日选择方法以应对源荷不确定性, 并引入基于 Tent 映射的灰狼优化算法(Tent mapping grey wolf optimization algorithm, TMGWO)和 CPLEX 进行联合求解。最后, 通过对某含数据中心的微能源网系统进行仿真分析, 数值计算结果表明所提出的方法能够有效提高系统的经济性和环保性。

关键词: 互联网数据中心(IDC); 微能源网; 余热回收; 负荷时空分配; 热-电耦合

Capacity Optimization Allocation Method of Micro-Energy Network Considering Comprehensive Energy Supply of Data Center

SUN Yan¹, FAN Hong¹, WANG Diwei¹, LU Erqi¹, JIA Qingshan²

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

Abstract: In the current digital age, Internet data centers (Internet data center, IDCs) have become important components of power grid as large power consumers. Firstly, IDC waste heat recovery technology is adopted to establish a IDC equivalent thermal parameter model, which is integrated into the micro-energy network to achieve multi-energy complementarity of cooling, heating, and power. Secondly, the complex relationship between the required cooling capacity and waste heat during the operation of IDCs is analyzed in depth, and lithium bromide absorption refrigeration machines and electric refrigeration machines are used to meet the cooling load requirements of IDCs. In order to more effectively cope with the changing characteristics of batch processing load in the time dimension, a highly flexible data load allocation strategy has been developed, and a two-layer programming model has been established. The typical day selection method for scenario reduction is used to address source load uncertainty, and the Tent mapping grey wolf optimization algorithm (TMGWO) based on Tent mapping and CPLEX are introduced for joint solution. Finally, through simulation analysis of a micro-energy network with a IDC, numerical results show that the proposed method can effectively improve the system's economy and environmental friendliness.

Key words: Internet data center(IDC); micro-energy network; waste heat recovery; load spatiotemporal allocation; thermal-electric coupling

0 引言

中国作为全球数字化发展的重要推动者,其互联网数据中心(Internet data center, IDC)行业规模庞大且不断增长。近年来中国数据中心的数量呈指数级增长,截至 2022 年底,中国数据中心投资规模超 2 200 亿元^[1-2]。这些数据中心遍布于全国各地,特别集中在一些主要城市,如北京、上海、深圳等,构成了我国数字经济和信息化基础设施的重要组成部分。然而,与数据中心庞大规模相伴随的是其巨大的能耗需求。过去 10 年间,我国数据中心整体用电量以每年超过 10% 的速度递增,2020 年突破 200 TWh,约占全社会用电量的 2.71 %^[3]。此外,随着数字化转型的不断深化,数据中心的能耗模式也在不断演进,对能源效率和可持续性发展提出了更高要求。

微能源网的引入使大量分布式可再生能源能够整合到配电系统中^[4],为 IDC 节能减排、绿色供能和能效治理提供了解决方案。文献[5]将微能源网与分布式能源相结合,通过技术整合和优化系统设计,提高能源利用率,降低能源损耗。文献[6]利用需求响应技术优化能源使用模式,根据供需情况调整能源分配,从而提高能源利用效率。文献[7]设计了经济激励机制,鼓励企业和个人使用可再生能源,推动可再生能源的发展和应用。上述文献侧重于微能源网环境下 IDC 优化调度的问题,但缺乏对微能源网系统中设备前期容量配置的研究。

近年来许多研究人员已经验证了数据负荷转移在降低运营成本和降低碳排放量方面的潜力。文献[8-9]考虑了系统内部的可再生能源、负荷的不确定性,通过从高峰时段转移需求来实现 IDC 的需求响应能力。文献[10]提出了一种优化模型,利用批处理对负荷进行重新分配从而使能源成本最小化。在此基础上,文献[11]在考虑了系统不确定性的情况下实现了长期能源成本最小化。文献[12-13]基于数据负荷的灵活性和多区域可再生能源的时空分布互补性,提出了时-空双维度数据负荷迁移策略,缓解了多区域 IDC 的集群碳污染。文献[14]以含数据中心微能源网的投资成本和运行成本最小为目标,提出了一种数据中心微电网供能优化方法,保障了数据中心供能可靠性和运行经济性。上述文献对微能源网环境下数据中心供能优化问题进行了细

致的研究,但是少有文献研究 IDC 中的热能问题,而热能又是多能流中不可忽视的一部分。

实际上,IDC 是集成冷、热、电多种能源利用和转化为一体的。IDC 运行过程中服务器消耗的大部分电能都会转化为余热,这使得 IDC 产生的余热具有再利用的潜力。文献[15]验证了溴化锂吸收式制冷机在解决与 IDC 余热回收相关的技术和经济问题方面的可行性。文献[16]采用热电联产(combined heat and power, CHP)机组和余热回收系统以提高 IDC 的能源效率。文献[17]提出了一种专注于可再生能源即时消纳的数据中心温度控制策略。通过利用数据中心温度变化中的热惯性效应,能够有效地提高可再生能源的利用率,同时降低城市用电量。文献[18]提出了考虑电热潮流约束与电、热耦合设备出力约束的电热协同系统规划模型,优化了能源枢纽站设备容量配置。这种模型的使用有助于提高可再生能源的消纳程度,并在减少碳排放方面发挥作用。虽然上述文献探讨了与 IDC 余热回收相关的技术和经济问题,但对于 IDC 热-电耦合和冷热电多能互补问题的综合考虑仍然不足。

针对上述问题,本文的创新点和工作量主要包括:1)提出了融合 IDC 的微能源网能量流-数据流协同规划架构;2)基于热力学第一定律建立了 IDC 等值热参数模型,填补了对 IDC 热能问题和冷热电多能互补综合考虑的研究空白;3)基于数据中心余热的可回收性和数据负荷调度的灵活性对 IDC 现场冷热电资源和数据负荷进行组合优化调度;4)以降低微能源网系统供能成本和减少碳排放量为目标,建立了微能源网优化配置的双层规划模型;5)通过算例对比分析了余热回收系统和数据负荷时空分布策略对最终容量配置和成本的影响。

1 融合数据中心的微能源网模型

微能源网的基础设施主要包括能源供给设备、IDC、前端服务器、能源管理系统、终端用户、多能负荷等,总体框架如图 1 所示。在能量流方面,风机(wind turbine, WT)、光伏(photovoltaic, PV)和热电联产机组(CHP)是能源供给的主要来源,电锅炉(electrical boiler, EB)、电制冷机(electrical cooler, EC)、吸收式制冷机(absorption chiller, AC)、蓄电池(electricity storage, ES)、蓄热槽(hot

storage, HS)负责能量的转换和存储。在数据流方面,采用了“请求-辨识-分配-输出”的数据处理模式旨在有效管理微能源网内部各类数据负荷,优化系统的能量流和数据流。通过将数据请求发送到前端服务器,并对不同类型的数据负荷进行辨识和分类,能够更好地将其划分到各自的请求队列中。随后,基于最优调度策略,将不同需求的工作负荷分配到后端服务器进行计算处理。这种模式的引入有助于实现微能源网内部能源供给设备、能源管理系统以及终端用户等多个组件之间的协调运作,进而提高整体能源利用效率。

1.1 数据中心的能耗建模

作为数据流和能量流耦合的关键设施^[19], IDC的功耗包括IT服务器的电能消耗、冷却系统、照明设备、配电网络等的能耗。为了评估和展示 IDC 的能源利用情况,引入了电能利用效率(power usage

effectiveness, PUE)作为一个重要的度量标准^[20]。因此, IDC 的功耗可以通过式(1)来表示^[21]。

$$P_t^{\text{IDC}} = M \left[P_{\text{idle}} + (E_{\text{PUE}} - 1) P_{\text{peak}} + (P_{\text{peak}} - P_{\text{idle}}) L_{\text{Total},t}^{\text{IDC}} \right] \quad (1)$$

式中: P_t^{IDC} 为 t 时段 IDC 总能耗; M 为 IDC 内含有的服务器数量; E_{PUE} 为电能利用效率; P_{peak} 和 P_{idle} 分别为 IDC 服务器处于繁忙或空闲状态时的能耗; $L_{\text{Total},t}^{\text{IDC}}$ 为 t 时段 IDC 处理的总负荷量。

1.2 数据中心的余热回收特性分析

IDC 的余热回收系统架构如图 2 所示。

余热回收系统主要由溴化锂吸收式制冷机和电制冷机联合构成。为了保持较高的能源效率,空调(air-conditioner, AC)首先利用 CHP 机组产生的热量和回收的 IDC 余热来提供冷却,若仍然存在冷却需求,电制冷机将被激活。

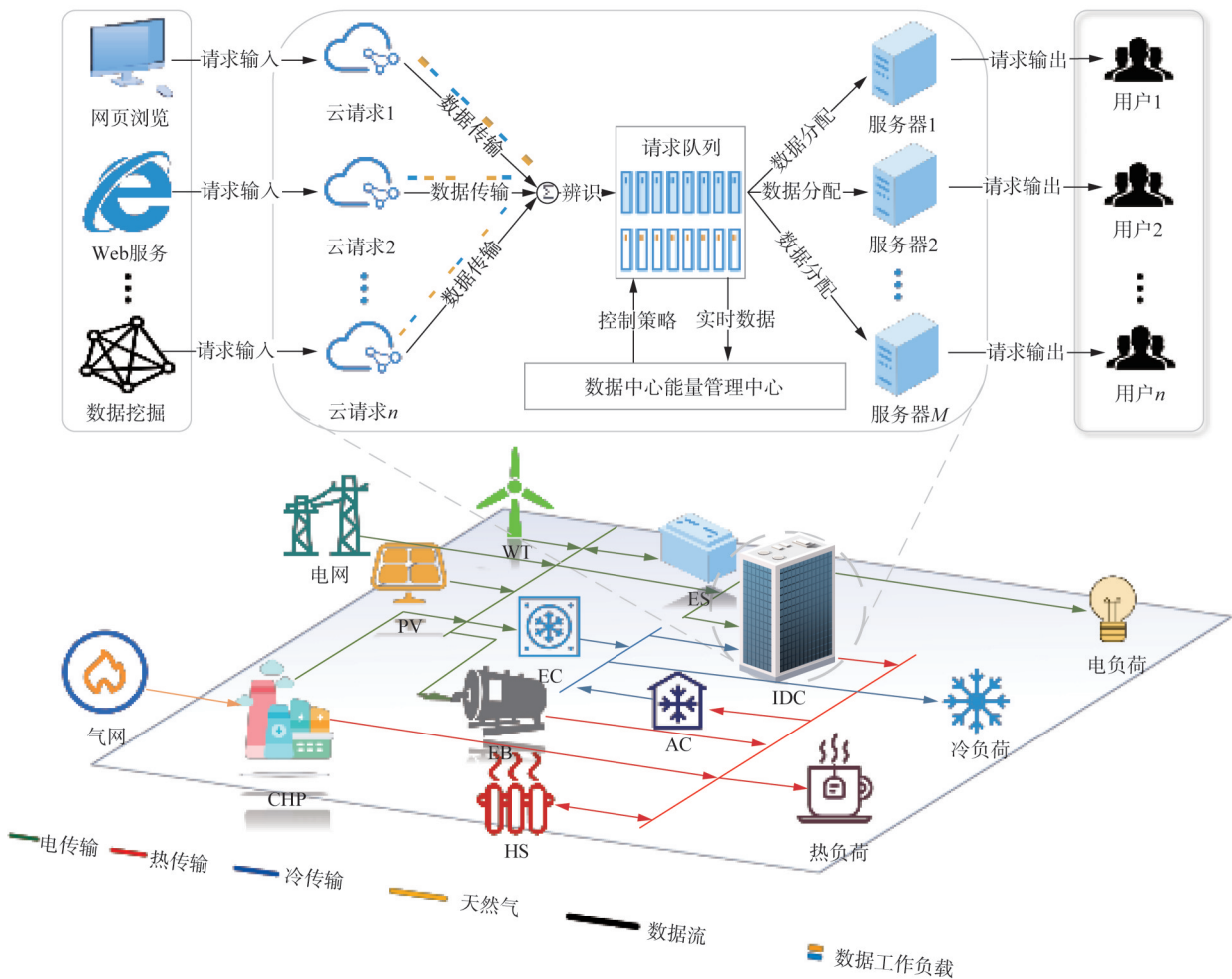


图1 微能源网总体框架

Fig. 1 Overall framework of micro-energy network

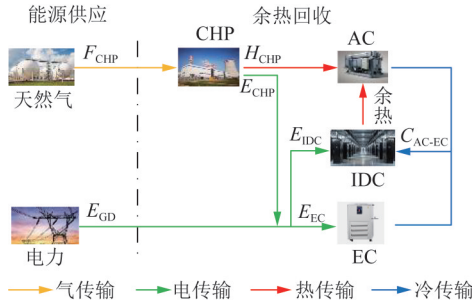


图2 余热回收系统架构

Fig. 2 Architecture of waste heat recovery system

在融合 IDC 微能源网规划中, 对 IDC 热力学过程进行建模是揭示其内部多重能量耦合的关键^[22]。为了准确捕捉 IDC 室内温度动态变化过程, 本文采用了基于热力学第一定律的等效热参数模型进行建模。因此, IDC 在运行期间所需制冷量与其产生的余热之间的关系可描述如下。

$$V_{\text{IDC}} \rho_{\text{IDC}} C_{\text{IDC}} \frac{dT_{\text{IDC}}^{\text{in}}}{dt} = H_t^{\text{IDC}} - C_t^{\text{IDC}} - \frac{T_{\text{IDC}}^{\text{in}} - T_{\text{IDC}}^{\text{out}}}{R_{\text{IDC}}} \quad (2)$$

式中: V_{IDC} 、 ρ_{IDC} 和 C_{IDC} 分别为 IDC 内部传热介质的体积、密度和比热容; $T_{\text{IDC}}^{\text{in}}$ 、 $T_{\text{IDC}}^{\text{out}}$ 分别为 t 时段 IDC 室内及室外温度; H_t^{IDC} 为 t 时段 IDC 的余热功率; C_t^{IDC} 为 t 时段 IDC 制冷功率; R_{IDC} 为 IDC 热阻。

1.3 数据中心的用能时空特性分析

IDC 的数据负荷可分为两类: 交互式负荷和批处理负荷^[23]。交互式负荷也称为延迟敏感型负荷, 要求即时服务。批处理负荷又称为延迟宽容型负荷, 其处理时间更为灵活, 可以延迟数小时。批处理负荷通常包括科学计算、图像处理等数据密集型任务。

本文采用的离散时间模型如图 3 所示, 即在每个时段 t ($1 \leq t \leq T$, T 为总时段数量) 中更新容量配置和调度策略。为简化问题, 数据负荷的数量由所需的计算资源表示, 因此 IDC 每个时段处理的数据负荷数量如式(3)所示。

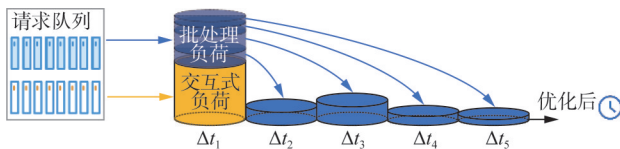


图3 数据负荷时间调度策略

Fig. 3 Strategy of data load time scheduling

$$L_{\text{Total}, t}^{\text{IDC}} = L_{\text{Total}, t}^{\text{SE}} + L_{\text{Total}, t}^{\text{TO-QU}} \quad (3)$$

式中: $L_{\text{Total}, t}^{\text{SE}}$ 为 t 时段服务器处理的交互式负荷量; $L_{\text{Total}, t}^{\text{TO-QU}}$ 为 t 时段分配给服务器的批处理负荷量。

由于 CPU 服务资源有限, IDC 在 t 时段的处理负荷数量 $L_{\text{Total}, t}^{\text{IDC}}$ 存在上限, 即:

$$0 \leq L_{\text{Total}, t}^{\text{IDC}} \leq L_{\text{Total}, t}^{\text{IDC}_{\text{max}}} \quad (4)$$

式中 $L_{\text{Total}, t}^{\text{IDC}_{\text{max}}}$ 为 IDC 处理负荷数量上限。

计算时延是 IDC 的另一个重要指标。它通常由两部分组成, 即请求到达之前发生的传输延迟和请求到达后经历的排队延迟^[24]。传输延迟反映了工作负载的分配过程, 可以视为一个常数。排队延迟 t^{QU} 基于 M/M/1 排队理论, 由到达率、服务率和活动服务器数量共同决定, 如式(5)所示。

$$t^{\text{QU}} = \frac{1}{s_t \mu - \lambda_t} \quad (5)$$

式中: s_t 为 t 时段工作的前端处理器数量; μ 为服务器的服务速率, 与 CPU 的运行频率有关; λ_t 为 IDC 在 t 时段要处理的批处理负荷量。

由于批处理负荷具有灵活的处理时间, 可以转移到另一个适当的时段进行处理, 因此所有批处理负荷都将进行排队, 如式(6)所示。

$$L_t^{\text{QU}} = L_{t-1}^{\text{QU}} + L_t^{\text{TO}} - L_t^{\text{OT-QU}} \quad (6)$$

式中: L_t^{QU} 为 t 时段队列中的批处理负荷数量; L_{t-1}^{QU} 为 $t-1$ 时段队列中的批处理负荷数量; L_t^{TO} 为 t 时段到达队列的批处理负荷数量; $L_t^{\text{OT-QU}}$ 为 t 时段给服务器分配的批处理负荷数量。

1.4 源荷不确定性处理

1.4.1 典型场景的生成

在获得了大量微能源网区域内的气象和负荷数据基础上, 本文采用蒙特卡罗模拟方法对场景进行了聚类分析, 以描述由预测误差引起的不确定性特征。为了应对随着场景数量呈指数增长所带来的计算量问题, 采用了拉丁超立方体采样技术, 并将场景的偏差限制在适当的边界内, 从而最终得到了具有代表性的典型场景。

1.4.2 不确定变量的处理

由于风电、光伏出力以及常规冷热电负荷存在着不确定性, 本文将风电、光伏的实际出力以及负荷水平视为预测值与随机波动之和, 具体表达式如式(7)所示^[25]。

$$\begin{cases} P_t^{\text{WT}} = P_t^{\text{WT}+} + \delta_t^{\text{WT}} \\ P_t^{\text{PV}} = P_t^{\text{PV}+} + \delta_t^{\text{PV}} \\ P_t^{\text{load}} = P_t^{\text{load}+} + \delta_t^{\text{load}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_t^{WT} 、 P_t^{PV} 、 P_t^{load} 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、负荷的实际值; $P_t^{\text{WT}+}$ 、 $P_t^{\text{PV}+}$ 、 $P_t^{\text{load}+}$ 分别为 t

时段风电出力、光伏出力、负荷的预测值; δ_t^{WT} 、 δ_t^{PV} 、 δ_t^{load} 分别为风电出力、光伏出力、负荷的波动。

文献[25]假设风电、光伏出力以及负荷的波动服从正态分布,其均值为0,标准差如式(8)所示。

$$\begin{cases} \gamma_t^{\text{WT}} = \frac{1}{5} P_t^{\text{WT}} + \frac{1}{50} S_{\text{WT}}^{\text{ins}} \\ \gamma_t^{\text{PV}} = \frac{1}{5} P_t^{\text{PV}} + \frac{1}{50} S_{\text{PV}}^{\text{ins}} \\ \gamma_t^{\text{load}} = \frac{3}{100} P_t^{\text{load}} + \end{cases} \quad (8)$$

式中: γ_t^{WT} 、 γ_t^{PV} 、 γ_t^{load} 分别为 t 时段风电出力、光伏出力、负荷预测误差的标准差; $S_{\text{WT}}^{\text{ins}}$ 、 $S_{\text{PV}}^{\text{ins}}$ 分别为风机与光伏的额定容量。

2 微能源网容量优化配置的双层规划模型

为了降低计算复杂度并提高各层决策者的独立性,本文建立了微能源网容量优化配置的双层规划模型,上层通过基于 Tent 映射的灰狼优化算法来解决微能源网的容量配置问题,即通过优化决策变量来降低经济成本。下层根据上层的输出结果采用 CPLEX 求解器用于解决微能源网的最优出力问题,实现系统的最大效益。通过灵活地结合这两种方法,能够更全面地考虑经济性和环保性,并找到更优的解决方案。图4为双层规划模型的示意图。

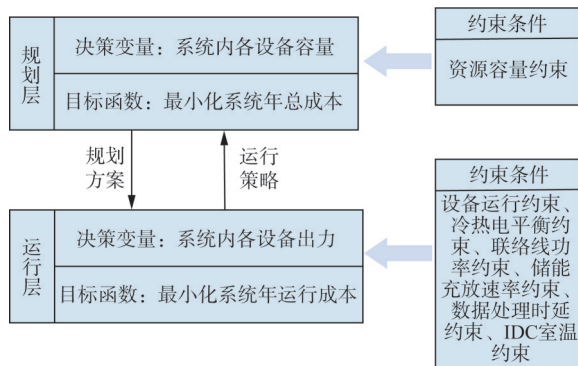


图4 双层规划模型示意图

Fig. 4 Schematic diagram of two-layer programming model

2.1 上层规划模型

2.1.1 目标函数

上层规划模型以微能源网系统年总成本 $C_{\text{all}}^{\text{sy}}$ 最低为目标,即:

$$\min C_{\text{all}}^{\text{sy}} = C_{\text{inv}}^{\text{sy}} + C_{\text{main}}^{\text{sy}} + C_{\text{ope}}^{\text{sy}} \quad (9)$$

式中 $C_{\text{inv}}^{\text{sy}}$ 、 $C_{\text{main}}^{\text{sy}}$ 、 $C_{\text{ope}}^{\text{sy}}$ 分别为年投资成本、年维护成本和年运行成本。

各部分成本计算如下。

1) 年投资成本 $C_{\text{inv}}^{\text{sy}}$

$$C_{\text{inv}}^{\text{sy}} = \sum_{j=1}^I S_j^{\text{ins}} C_j^{\text{inv}} \frac{r(1+r)^{\lambda_j}}{(1+r)^{\lambda_j} - 1} \quad (10)$$

式中: S_j^{ins} 为设备 j 的容量; C_j^{inv} 为设备 j 单位容量的成本; r 为折现率; λ_j 为设备 j 的生命周期; I 为设备数量。

2) 年维护成本 $C_{\text{main}}^{\text{sy}}$

$$C_{\text{main}}^{\text{sy}} = \sum_{j=1}^I \sum_{t=1}^T \sigma_j^{\text{main}} P_{t,j} \quad (11)$$

式中: σ_j^{main} 为设备 j 的成本维护系数; $P_{t,j}$ 为 t 时段设备 j 的出力。

3) 年运行成本 $C_{\text{ope}}^{\text{sy}}$

$C_{\text{ope}}^{\text{sy}}$ 为下层模型年运行成本,详见2.2节。

2.1.2 约束条件

考虑到场地大小、成本、数据处理需求量等因素,对微能源网各设备容量进行约束。

$$S_j^{\min} \leq S_j \leq S_j^{\max} \quad (12)$$

式中 $S_j^{\max}$ 、 $S_j^{\min}$ 分别为设备 j 的容量 S_j 的上下限。

2.2 下层规划模型

2.2.1 目标函数

下层模型以微能源网系统年运行成本 $C_{\text{ope}}^{\text{sy}}$ 最低为目标,即:

$$\min C_{\text{ope}}^{\text{sy}} = C_{\text{ope}}^{\text{IDC}} + C_{\text{ope}}^{\text{OT}} \quad (13)$$

在计算能耗方面, IDC 的年运行成本 $C_{\text{ope}}^{\text{IDC}}$ 计算公式如式(14)所示。

$$C_{\text{ope}}^{\text{IDC}} = \sum_{t=1}^T s_t P_t^{\text{IDC}} \Delta t + \sum_j u_j \cdot h_j \quad (14)$$

式中: s_t 为 t 时段的电价; Δt 为单位时长; P_t^{IDC} 为 t 时段 IDC 消耗的电功率; u_j 为数据负荷请求不能在截止时间内完成的惩罚固定成本; h_j 为二进制变量, $h_j=1$ 表示数据负荷请求不能在截止时间内完成,将被丢弃。

除 IDC 外的其他设备年运营成本 $C_{\text{ope}}^{\text{OT}}$ 为:

$$C_{\text{ope}}^{\text{OT}} = C_{\text{gas}} + C_{\text{grid}} + C_{\text{co}_2} \quad (15)$$

各部分成本计算如下。

1) 购气成本 C_{gas}

$$C_{\text{gas}} = \sum_{t=1}^T \psi_{\text{gas}} W_{t,\text{gas}} \quad (16)$$

式中: ψ_{gas} 为天然气价格; $W_{t,\text{gas}}$ 为 t 时段系统的购气量。

2) 微能源网与电网的功率交互成本 C_{grid}

$$C_{\text{grid}} = \sum_{t=1}^T (\eta_t^{\text{buy}} P_t^{\text{pur}} - \eta_t^{\text{sell}} P_t^{\text{sell}}) \quad (17)$$

式中: η_t^{buy} 、 η_t^{sell} 分别为系统 t 时段的购售电价格; P_t^{pur} 、 P_t^{sell} 分别为系统 t 时段购售电功率。

3) 碳交易成本

碳排放量是衡量环境效益的重要指标, 系统产生的碳排放 C_{CO_2} 主要源自燃料燃烧和电网电力, 具体表示为:

$$C_{\text{CO}_2} = \omega_{\text{G}}^{\text{CO}_2} \sum_{t=1}^T P_t^{\text{CHP}} + \omega_{\text{E}}^{\text{CO}_2} E_{\text{grid}}^{\text{pur}} \quad (18)$$

式中: $\omega_{\text{G}}^{\text{CO}_2}$ 、 $\omega_{\text{E}}^{\text{CO}_2}$ 分别为使用天然气、从电网购电的碳排放系数; P_t^{CHP} 为 t 时段 CHP 的出力; $E_{\text{grid}}^{\text{pur}}$ 为从电网购电的总量。

2.2.2 约束条件

1) 冷热电平衡约束

$$\begin{cases} C_{t,\text{AC}}^{\text{out}} + C_{t,\text{EC}}^{\text{out}} = C_{t,\text{IDC}}^{\text{in}} + C_{t,\text{CL}}^{\text{in}} \\ H_{t,\text{CHP}}^{\text{out}} + H_{t,\text{EB}}^{\text{out}} + H_{t,\text{IDC}}^{\text{out}} + H_{t,\text{HS}}^{\text{dis}} = H_{t,\text{AC}}^{\text{in}} + H_{t,\text{HL}}^{\text{in}} + H_{t,\text{HS}}^{\text{ch}} \\ P_t^{\text{pur}} + P_{t,\text{Gen}}^{\text{out}} + P_{t,\text{ES}}^{\text{dis}} = P_{t,\text{IDC}}^{\text{in}} + P_{t,\text{EC}}^{\text{in}} + P_{t,\text{EB}}^{\text{in}} + P_{t,\text{EL}}^{\text{in}} + P_{t,\text{ES}}^{\text{ch}} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $C_{t,\text{AC}}^{\text{out}}$ 和 $C_{t,\text{EC}}^{\text{out}}$ 分别为 t 时段 AC 和 EC 输出的冷功率; $C_{t,\text{IDC}}^{\text{in}}$ 和 $C_{t,\text{CL}}^{\text{in}}$ 分别为 t 时段 IDC 和冷负荷消耗的冷功率; $H_{t,\text{CHP}}^{\text{out}}$ 、 $H_{t,\text{EB}}^{\text{out}}$ 、 $H_{t,\text{IDC}}^{\text{out}}$ 和 $H_{t,\text{HS}}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段 CHP 机组、EB、IDC 和 HS 输出的热功率; $H_{t,\text{AC}}^{\text{in}}$ 和 $H_{t,\text{HL}}^{\text{in}}$ 分别为 t 时段 AC 吸收的热功率和热负荷消耗的热功率; $H_{t,\text{HS}}^{\text{ch}}$ 为 t 时段 HS 储热的功率; P_t^{pur} 为 t 时段系统从电网中购电功率; $P_{t,\text{Gen}}^{\text{out}}$ 和 $P_{t,\text{ES}}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段发电单元和 ES 输出的电功率; $P_{t,\text{IDC}}^{\text{in}}$ 、 $P_{t,\text{EC}}^{\text{in}}$ 、 $P_{t,\text{EB}}^{\text{in}}$ 和 $P_{t,\text{EL}}^{\text{in}}$ 分别为 t 时段 IDC、EC、EB 和电负荷消耗的电功率; $P_{t,\text{ES}}^{\text{ch}}$ 为 t 时段 ES 充电功率。

2) IDC 室内温度约束

$$T_{\text{IDC}}^{\text{in},\text{min}} \leq T_{t,\text{IDC}}^{\text{in}} \leq T_{\text{IDC}}^{\text{in},\text{max}} \quad (20)$$

式中: $T_{t,\text{IDC}}^{\text{in}}$ 为 t 时段 IDC 室内温度; $T_{\text{IDC}}^{\text{in},\text{max}}$ 和 $T_{\text{IDC}}^{\text{in},\text{min}}$ 分别为 IDC 室内温度上限和下限。

3) 数据负荷处理时延约束

考虑到数据中心运营商和用户之间存在计算服务水平协议(service level agreement, SLA), 假设 SLA 允许的最大延时为 D , 则数据负荷处理时延受到如式(21)的约束。

$$t^{\text{QUE_ave}} + d \leq D \quad (21)$$

式中: $t^{\text{QUE_ave}}$ 为数据负荷平均排队时间; d 为数据负

荷传输时延。

4) 储能设备约束

$$\begin{cases} 0 \leq L_{t,i}^{\text{ch}} \leq \omega_{t,i}^{\text{ch}} \rho_i^{\text{ch}} S_i^{\text{ins}} \\ 0 \leq L_{t,i}^{\text{dis}} \leq \omega_{t,i}^{\text{dis}} \rho_i^{\text{dis}} S_i^{\text{ins}} \\ 0 \leq \omega_{t,i}^{\text{ch}} + \omega_{t,i}^{\text{dis}} \leq 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $L_{t,i}^{\text{ch}}$ 和 $L_{t,i}^{\text{dis}}$ 分别为 t 时段储能 i 的充放能功率; $\omega_{t,i}^{\text{ch}}$ 和 $\omega_{t,i}^{\text{dis}}$ 为 0-1 状态变量; ρ_i^{ch} 和 ρ_i^{dis} 分别为储能 i 的充放能倍率; S_i^{ins} 为储能 i 的安装容量。

2.3 规划模型求解

灰狼搜索猎物的行为分为寻找猎物位置和捕猎, 其中寻找猎物位置的行为如下^[26]。

$$\begin{cases} D_{\alpha} = |C_1 X_{\alpha}(k) - X(k)| \\ D_{\beta} = |C_2 X_{\beta}(k) - X(k)| \\ D_{\delta} = |C_3 X_{\delta}(k) - X(k)| \end{cases} \quad (23)$$

$$C_i = 2r_i, i = 1, 2, 3 \quad (24)$$

式中: D_{α} 、 D_{β} 和 D_{δ} 分别为第 k 次迭代时 α 、 β 和 δ 与其他个体的距离; $X_{\alpha}(k)$ 、 $X_{\beta}(k)$ 和 $X_{\delta}(k)$ 分别为第 k 次迭代时 α 、 β 和 δ 的位置; C_1 、 C_2 和 C_3 为摇摆系数; $X(k)$ 为第 k 次迭代候选解的位置; C_i 为随机扰动狼群对猎物位置的判断; r_i 为随机权重, 它的模为 0-1 的随机数。

灰狼确定猎物位置后, 捕猎的行为描述如下。

$$\begin{cases} X_1 = X_{\alpha}(k) - A_1 D_{\alpha} \\ X_2 = X_{\beta}(k) - A_2 D_{\beta} \\ X_3 = X_{\delta}(k) - A_3 D_{\delta} \end{cases} \quad (25)$$

$$X(k+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (26)$$

$$A_i = 2ar_i - a, i = 1, 2, 3 \quad (27)$$

式中: $X(k+1)$ 为灰狼个体第 k 次迭代后更新位置; r_i 为随机权重, 它的模为 0-1 的随机数; A_1 、 A_2 、 A_3 和 a 为收敛因子; X_1 、 X_2 、 X_3 分别为 α 、 β 和 δ 第 k 次更新迭代后的位置。

2.3.1 Tent 混沌映射

混沌映射是非线性的, 在优化过程中可以提高初始种群多样性, 加快算法的寻优速度^[27]。因此本文提出一种分段 Shew Tent 混沌映射, 其具体数学表达式为:

$$c_{l+1} = \begin{cases} 2c_l, 0 \leq c_l < \frac{1}{2} \\ 2(1 - c_l), \frac{1}{2} \leq c_l \leq 1 \end{cases} \quad (28)$$

式中: l 为映射次数; c_l 为第 l 次函数的映射值。

初始种群位置变量的逆映射 X 为:

$$X = d_m + (k_m - d_m)c_l \quad (29)$$

式中 d_m 和 k_m 分别为位置变量区间的下界和上界。

2.3.2 算法求解流程

双层规划模型求解流程图如图5所示,具体求解步骤如下。

步骤1: 读取风光出力及负荷的典型场景数据,设置算法参数,包括种群规模 P 、最大迭代次数 T 、维度 dim 、收敛因子 a 等;

步骤2: 使用 Tent 映射初始化种群个体位置 $\{X_i, i = 1, 2, 3, \dots\}$;

步骤3: 计算种群适应度 $f(X_i)$, 并选择其中适应度最高的3个狼个体, 分别设定为 α 、 β 和 δ , 记录它们的位置信息 X_α 、 X_β 、 X_δ ;

步骤4: 根据式(25)计算其他个体与 α 、 β 、 δ 狼的距离, 按照式(26)更新种群个体的最新位置;

步骤5: 根据式(24)和式(27)更新随机扰动 C_i 和收敛因子 A_i 的值;

步骤6: 判断是否达到最大收敛次数 T , 若达到则结束搜索, 将上层输出解传递给 CPLEX 求解器; 若未达到, 则迭代次数加1, 返回步骤3继续执行;

步骤7: 调用 CPLEX 求解器求解下层模型, 若达到最大迭代次数, 则输出全局最优解; 否则返回步骤3继续执行。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文选取某典型含 IDC 的微能源网作为研究对象, 其中风机、光伏总装机容量分别为 700 kW 和 500 kW, 设备规划年限为 15 a。IDC 服务器的主要配置参数、其他设备参数、分时电价分别参见附表 A1—A3。

表1 不同预测区间下设备容量的配置结果

Tab. 1 Capacity configuration of devices results in different forecast intervals

kW

预测区间	CHP设备	EB设备	AC设备	EC设备	ES设备	HS设备
0	3 612. 578 4	693. 451 0	1 873. 245 1	1 312. 507 4	659. 310 5	873. 246 1
10 %	3 724. 247 3	743. 514 9	1 902. 487 9	1 463. 150 7	660. 147 8	913. 201 4
20 %	3 821. 462 5	765. 423 1	1 926. 410 2	1 482. 348 9	687. 247 8	985. 265 4
30 %	4 015. 462 1	783. 215 6	2 146. 847 9	1 499. 157 3	700. 145 7	997. 510 2

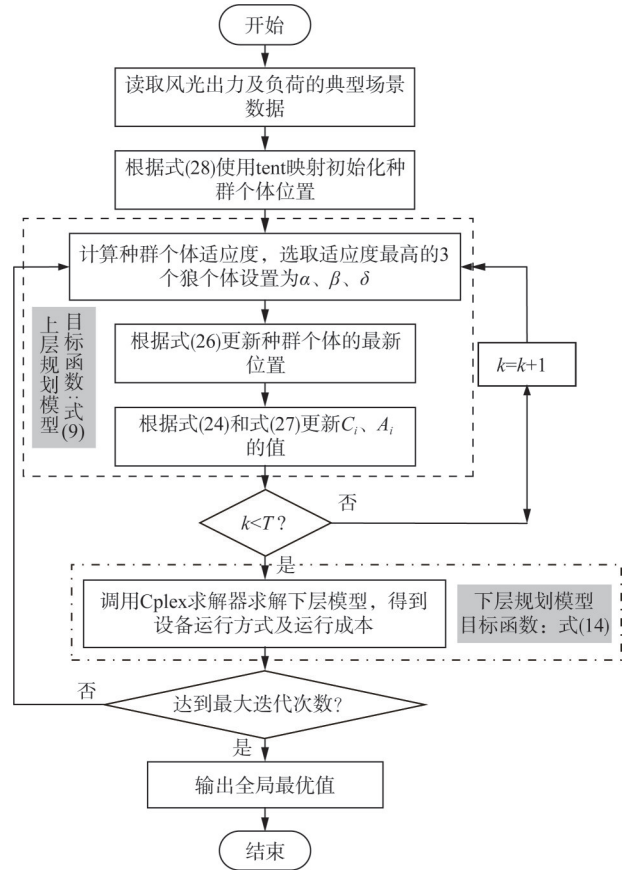


图5 双层规划模型求解流程图

Fig. 5 Flow chart of two-layer programming model solution

3.2 容量优化配置结果

3.2.1 新能源波动性分析

为了全面评估新能源的波动性对微能源网系统的影响, 本文对4组不同预测区间下的设备规划容量和优化方法进行了对比分析, 表1给出了预测区间参数设置及相应的设备规划容量, 同时表2为不同预测区间下优化方法的性能比较结果。

在表1中, 预测区间表示预测值和实际值之间的偏差程度。随着新能源波动性的增加即预测区间的增大, 各个设备的规划容量也随之增加。这是因为考虑到新能源波动性后需要额外的调节和备用容

表 2 不同预测区间下优化方法的性能比较

Tab. 2 Performance comparison of optimization methods under

different prediction intervals							万元
预测 区间	区间优化			确定性优化			
	生命周期 成本	平衡 成本	总成本	生命周期 成本	平衡成本	总成本	
0	957. 19	265. 82	1 223. 01	957. 19	265. 82	1 223. 01	
10%	1 179. 01	413. 42	1 592. 43	910. 09	914. 52	1 824. 61	
20%	1 230. 53	524. 61	1 755. 14	894. 19	1 146. 13	2 040. 32	
30%	1 555. 78	711. 43	2 267. 21	1023. 66	1 316. 49	2 340. 15	

量以及其他灵活性资源，以应对新能源供给的不确定性。

从表 2 中可以看出，当预测区间等于 0 时，区间优化方法等效于确定性优化方法。随着预测区间的增大，系统的总经济成本也相应增加，表明在考虑不确定性时微能源网的调度方案更为保守，因而成本更高。虽然确定性优化方法在表 2 中显示其生命周期成本低于区间优化方法，但由预测误差引起的计划与实际发电量之间的不平衡需要在实时市场中进行补偿，从而导致微电网最终交易成本增加。因此，区间优化方法得到的调度方案具有更强的鲁棒性和抗风险能力。

根据对选取的微能源网系统实际数据的分析，发现新能源参数值的波动通常在 20% 的范围内。因此，本文选择 20% 作为预测区间，以更好地反映实际情况。

3. 2. 2 不同规划方案对比分析

为验证本文提出的 IDC 余热回收和数据负荷分配策略在微能源网规划中的有效性，设置了 4 种不同策略下的案例进行对比分析。具体案例设置如下。

1) 案例 1：未考虑 IDC 余热回收特性和数据负荷分配策略。

2) 案例 2：仅考虑了 IDC 余热回收特性，未考

虑数据负荷分配策略。

3) 案例 3：仅考虑了数据负荷分配策略，未考虑 IDC 余热回收特性。

4) 案例 4：综合考虑了 IDC 余热回收特性和数据负荷分配策略。

表 3 展示了这 4 个案例下微能源网的设备容量配置结果，表 4 展示了这 4 个案例下微能源网规划的经济性和环保性结果。根据表 3 的数据显示，本文提出的 IDC 余热回收和数据负荷分配策略(案例 4)具有明显优势。微能源网中各个设备的规划容量普遍低于或接近案例 1—3 的水平，这将有助于降低系统规划中的投资成本。

根据表 4 显示的结果，在经济性方面，案例 4 的经济总成本最低，较案例 1—3 分别减少了 17. 87%、7. 52% 和 5. 43%。这表明了本文提出的 IDC 余热回收和数据负荷分配策略能够进一步降低微能源网的规划和运行成本。在环保性方面，案例 4 的碳排放量最低，较案例 1—3 分别减少了 17. 93%、8. 47% 和 12. 96%。综上所述，无论是从经济性还是环保性来看，案例 4 都明显优于其他案例。通过对比这些结果，可以评估和验证所提出的 IDC 余热回收和数据负荷分配策略在微能源网规划中的实际效果和影响。

3. 2. 3 算法对比分析

为了验证本文所提算法的有效性和优越性，本文针对优化问题分别采用了经典灰狼优化(gray wolf optimization, GWO)算法、权重改进的粒子群算法(weight improved particle swarm optimization, WIPSO)、遗传算法(genetic algorithm, GA)，并与本文提出的优化算法进行了对比。图 6 展示了适应度值随迭代次数的收敛过程。

通过实验获得了 4 种算法的收敛曲线。在收敛曲线图中，TMGWO 算法的曲线呈现出更快的收敛速度，并逐渐接近全局最小值，展现出更有效的全

表 3 4 种案例下微能源网设备容量配置结果

Tab. 3 Capacity configuration results of micro energy grid equipment in 4 cases

案例	能量转换容量				储能装置容量	
	CHP 设备	EB 设备	AC 设备	EC 设备	ES 设备	HS 设备
1	5 126. 134 5	1 198. 256 3		1 878. 254 7	967. 214 7	1 598. 247 8
2	4 651. 509 6	1 024. 356 9	2 413. 595 0	1 526. 398 7	892. 365 4	1 354. 248 9
3	4 156. 236 3	962. 124 5		16 248. 258 7	865. 257 9	1 124. 356 4
4	3 821. 462 5	765. 423 1	1 926. 410 2	1 482. 348 9	687. 247 8	985. 265 4

表4 微能源网的经济性、环保性结果

Tab. 4 Economic and environmental results of micro-energy

grid					环保性碳排放/t
案例	经济性				
	投资成本/ 万元	维护成本/ 万元	运行成本/ 万元	总经济成本/万元	
1	1 313.26	165.66	519.43	1 997.43	11.095 6
2	1 257.37	163.46	470.19	1 890.37	9.854 7
3	1 243.42	160.35	452.81	1 855.93	10.469 6
4	1 171.79	159.89	425.73	1 755.14	9.113 2

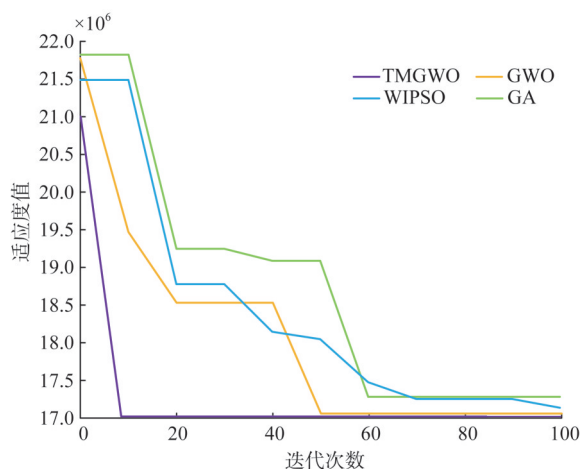


图6 算法迭代收敛过程

Fig. 6 Algorithm iterative convergence process

局搜索能力。相较于其他3种算法,尽管它们在同一迭代次数下也向全局最小值收敛,但相对于TMGWO算法,需要更多的迭代次数来达到相似的结果。综合以上试验结果,基于TMGWO算法在本实验中快速收敛和有效的全局搜索能力证明了其在解决优化问题方面的优越性。

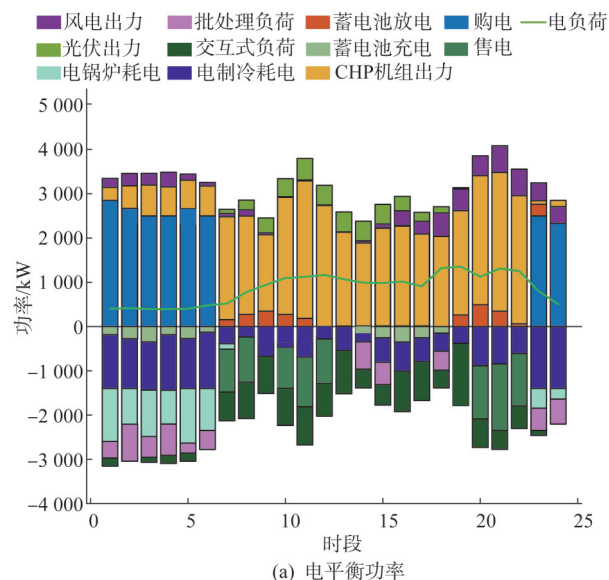
3.3 极端天气条件下的典型日结果分析

针对IDC的运行环境易受外界因素影响的情况,本文对极热和极冷天气条件下的典型日运行结果进行了分析,以评估所提出的规划方案在不同气候条件下的表现。

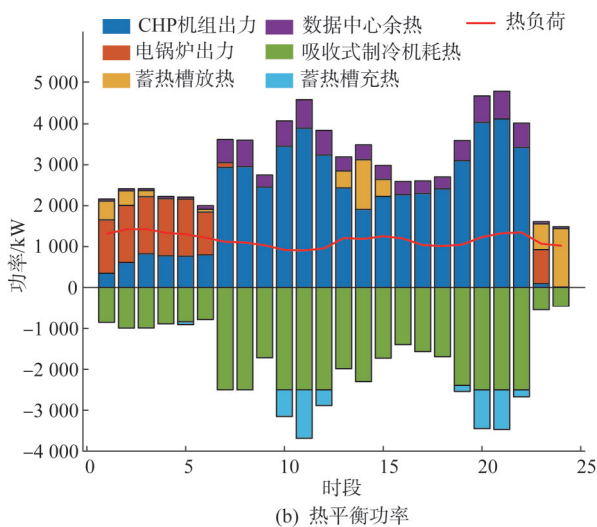
1) 极热天气条件下的典型日运行结果

极热天气条件下典型日的电、热、冷功率平衡情况分别如图7所示。

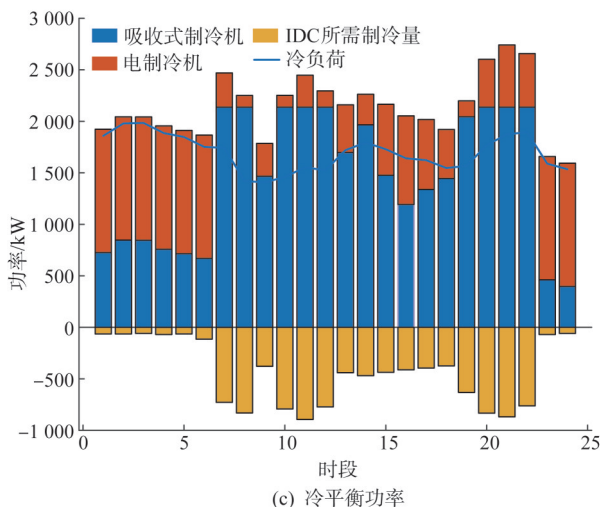
由图7(a)可知,微能源网在优先消纳新能源发电方面表现出较高的优先级。在低电价时间段(0—6, 23—0),微能源网通过从电网购电来供给各类用电设备及电负荷,同时蓄电池处于充电状态。在



(a) 电平衡功率



(b) 热平衡功率



(c) 冷平衡功率

图7 极热天气条件下的典型日功率平衡调度结果

Fig. 7 Typical daily power balance scheduling results under extremely hot weather conditions

电价较高的时间段(6—13, 19—23), 电负荷需求主要由新能源和CHP机组发电来满足, 而电功率缺额则通过蓄电池放电和数据负荷需求响应策略进行调控。

由图7(b)可知, 在极热天气条件下, 由于日温度较高, 导致热负荷需求量相对较少。因此, 在热力供应方面, 微能源网优先利用IDC产生的余热。在凌晨0—6时段和夜间23—0时段热能需求主要由电锅炉来满足, 而余热需求缺额则由CHP机组、电锅炉和蓄热槽来填补。

由图7(c)可知, 在极热天气条件下, 室外温度的影响导致需要吸收式制冷机和电制冷机联合制冷来满足IDC内IT设备的冷却需求, 同时也用于满足微能源网中传统冷负荷的需求。

2) 极冷天气条件下的典型日运行结果

极冷天气条件下典型日的电、热、冷功率平衡情况如图8所示。

由图8(a)可知, 在低电价时间段(0—6, 23—0), 微能源网通过从电网购电来满足部分电负荷需求和蓄电池充电需求。同时, IDC批处理负荷被有策略地安排到低电价时间段进行处理, 以优化能源利用。

由图8(b)可知, IDC产生的余热成为热负荷需求中不可忽视的一部分。在低电价时段, 电锅炉的输出明显增加, 以满足热能需求。而余热需求的空缺则由CHP机组和蓄热槽填补。

由图8(c)可知, 在冷能方面对于控制IDC内部温度的需求相对较低, 但仍需保证系统的正常运行。在极冷天气条件下室外温度过低导致冷负荷需求较少。吸收式制冷机作为余热回收设备提供了近一半的冷负荷需求, 而余下的冷负荷需求则由电制冷机来填补。这种策略利用了不同的冷却设备来满足极端气候条件下的冷负荷需求。

4 结论

针对IDC高耗能、运行成本高的问题, 本文采用了微能源网容量优化配置双层规划模型进行仿真实验, 并采用TMGWO算法结合CPLEX解决了微能源网优化配置问题, 得出如下结论。

1) 优化调度批处理负荷至低单价时段, 对系统冷热电资源和数据负荷进行组合优化调度, 降低了整体能源成本。

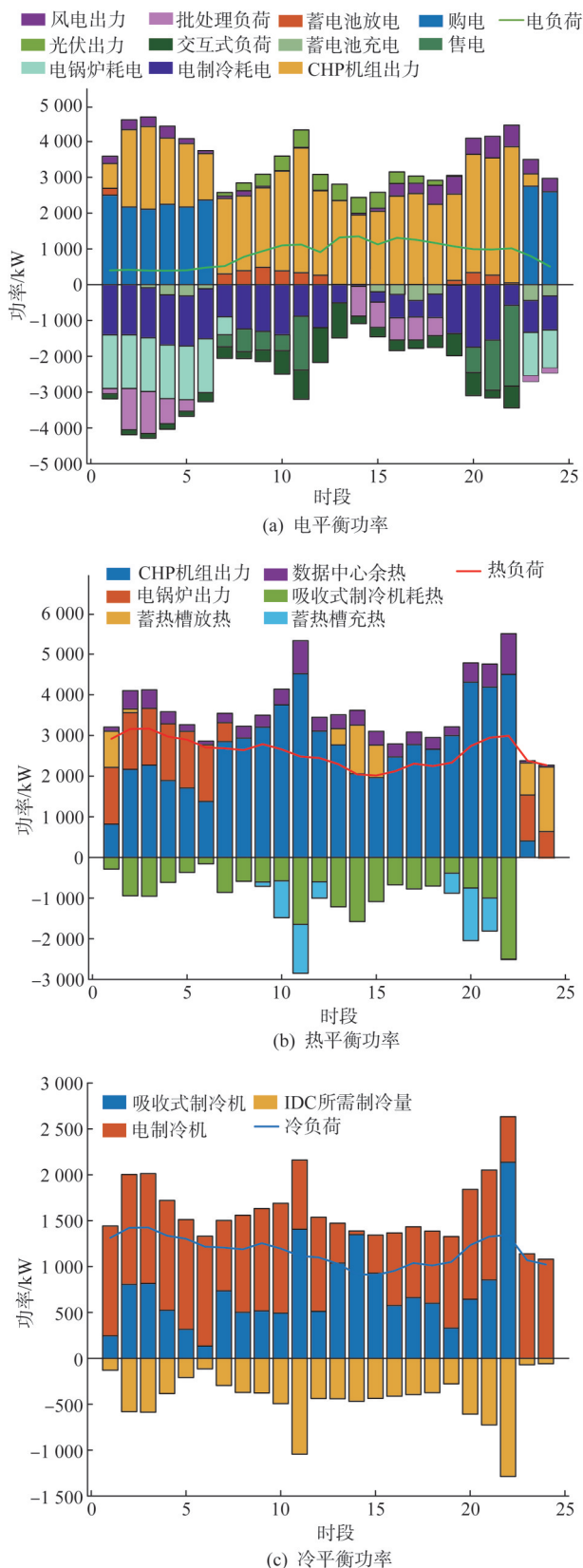


图8 极冷天气条件下的典型日功率平衡调度结果
Fig. 8 Typical daily power balance scheduling results under extremely cold weather conditions

2) 有效利用IDC余热资源,采用余热回收方案显著降低了系统运行成本,提高了能源利用效率。

3) TMGWO算法在融合IDC的微能源网容量优化方面表现出有效性和收敛性,为求解配置方案提供了有力支持。

4) 所提出的双层规划模型可以显著提升经济性和环保性,提高可再生能源的利用率,减少碳排放。该模型为能源系统的可持续发展提供了重要参考。

参考文献

- [1] 易文飞,朱卫平,郑明忠.计及数据中心和风电不确定性的微电网经济调度[J].中国电力,2024,57(2):19-26.
YI Wenfei, ZHU Weiping, ZHENG Mingzhong. Microgrid economic scheduling considering uncertainty of data center and wind power [J]. Electric Power, 2024, 57(2):19-26.
- [2] 周小光,资慧,金田,等.双碳目标下电网异址双活调控中心负载均衡控制方法[J].电测与仪表,2023,60(7):107-115.
ZHOU Xiaoguang, ZI Hui, JIN Tian, et al. Load balancing control method for remote active-active control centers of power grid with carbon peak and neutrality targets [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(7):107-115.
- [3] 卢子敬,邓艺欣,蒋霖,等.“东数西算”背景下大型数据中心建设对电网规划的影响研究[J].全球能源互联网,2022,5(6):552-562.
LU Zijiang, DENG Yixin, JIANG Lin, et al. Research on the influence of large-scale data center construction on power grid planning under the background of East Number West Calculating[J]. Global Energy Interconnection, 2022, 5(6):552-562.
- [4] 徐钰涵,季天瑶,李梦诗.基于深度强化学习的微电网日前日内协调优化调度[J].南方电网技术,2024,18(9):106-116.
XU Yuhan, JI Tianyao, LI Mengshi. Day-ahead and intra-day coordinated optimal scheduling of microgrid based on deep reinforcement learning [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9):106-116.
- [5] 温正楠,刘继春.风光水互补发电系统与需求侧数据中心联动的优化调度方法[J].电网技术,2019,43(7):2449-2460.
WEN Zhengnan, LIU Jichun. Optimal scheduling method of wind-wind-water complementary power generation system and demand-side data center [J]. Power System Technology, 2019, 43(7):2449-2460.
- [6] 李彬,杜亚彬,曹望璋,等.考虑风光储互补与工作负载分配的数据中心优化调度[J].现代电力,2022,39(3):356-363.
LI Bin, DU Yabin, CAO Wangzhang, et al. Optimal scheduling of data center considering wind-wind storage complementarities and workload distribution [J]. Modern Electric Power, 2022, 39(3):356-363.
- [7] 吴云芸,方家琨,艾小猛,等.计及多种储能协调运行的数据中心实时能量管理[J].电力自动化设备,2021,41(10):82-89.
WU Yunyun, FANG Jiakun, AI Xiaomeng, et al. Real-time energy management of data center with multiple energy storage coordinated operation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10):82-89.
- [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] 马浩天,胡俊杰,童宇轩.考虑灵活性的数据中心微网两阶段鲁棒规划方法[J].中国电机工程学报,2022,43(19):7396-7409.
MA Haotian, HU Junjie, TONG Yuxuan, et al. Two-stage robust programming method for data center microgrids considering flexibility [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 43(19):7396-7409.
- [10] 陈敏,高赐威,陈宋宋,等.考虑数据中心用电负荷调节潜力的双层经济调度模型[J].中国电机工程学报,2019,39(5):1301-1314.
CHEN Min, GAO Ciwei, CHEN Songsong, et al. Two-layer economic scheduling model considering power load regulation potential of data centers [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(5):1301-1314.
- [11] 曾博,刘一贤,张卫翔,等.综合考虑内外生不确定性的绿色数据中心多域资源协同规划方法[J].中国电机工程学报,2023,44(1):4732-4748.
ZENG Bo, LIU Yixian, ZHANG Weixiang, et al. Multi-domain re-source collaborative planning method for green data center considering internal and external uncertainties [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 44(1):4732-4748.
- [12] 杨挺,姜含,侯昱丞,等.基于计算负荷时空双维迁移的互联多数据中心碳中和调控方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(1):164-177.
YANG Ting, JIANG Han, HOU Yucheng, et al. Research on carbon neutral control method of interconnected multi-data centers based on time-space dual-dimensional migration of computing load [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1):164-177.
- [13] 林铭蓉,胡志坚,高明鑫,等.基于时空规律的电动汽车负荷建模及其自动需求响应[J].南方电网技术,2022,16(1):99-107.
LIN Mingrong, HU Zhijian, GAO Mingxin, et al. Load modeling and automatic demand response of electric vehicles based on space-time law [J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1):99-107.
- [14] 王瑒,李鹏,冀浩然,等.考虑多类型资源的数据中心园区供电协调规划[J].电力系统自动化,2022,46(14):19-28.
WANG Yang, LI Peng, JI Haoran, et al. Power supply coordination planning for data center parks considering multiple types of resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(14):19-28.
- [15] EBRAHIMI K, JONES G F, FLEISCHER A S. Thermo-economic analysis of steady state waste heat recovery in data centers using absorption refrigeration [J]. Applied Energy, 2015(139):384-397.
- [16] WAN J, ZHOU J, GUI X. Sustainability analysis of green data centers with cchp and waste heat reuse systems [J]. IEEE Transactions on Sustainable Computing, 2021, 6(1):155-167.
- [17] 朱介北,杨顺坡,俞露杰,等.数据中心制冷系统即时消纳可再生能源的建模和变温控制[J].电力系统自动化,2022,46(20):13-22.
ZHU Jiebei, YANG Shunpo, YU Lujie, et al. Modeling and

- variable temperature control for immediate consumption of renewable energy in data center cooling system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(20): 13–22.
- [18] 梁安琪, 蒋一博, 丁屹峰, 等. 园区电热协同低品位热源利用的供能规划策略[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 167–178. LIANG Anqi, JIANG Yibo, DING Yifeng, et al. Energy supply planning strategy for the utilization of low-grade heat source in park electric-heat synergy [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(4): 167–178.
- [19] 吕佳炜, 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. Overview and prospect of energy flow-data flow collaborative planning for integrated energy systems in integrated data centers [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5500–5521.
- [20] 丁肇豪, 曹雨洁, 张素芳, 等. 能源互联网背景下数据中心与电力系统协同优化(一): 数据中心能耗模型[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3161–3177. DING Zhaohao, CAO Yujie, ZHANG Sufang, et al. Collaborative optimization of data center and power system under the back-ground of Energy Internet (1): data center energy consumption model [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3161–3177.
- [21] JIANG T, YU L, CAO Y. Risk-constrained operation for internet data centers in deregulated electricity markets [J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(5): 1306–1316.
- [22] 吴福保, 刘晓峰, 孙谊嫔, 等. 基于冷热电联供的多园区博弈优化策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 68–75. WU Fubao, LIU Xiaofeng, SUN Yiqian, et al. Multi-park game optimization strategy based on combined cooling, heating and power supply [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 68–75.
- [23] 王丹阳, 张沈习, 程浩忠, 等. 考虑数据中心用能时空可调的多区域能源站协同规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(3): 77–85. WANG Danyang, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Multi-region energy station collaborative planning considering spatio-temporal energy consumption adjustment in data centers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(3): 77–85.
- [24] LÜ J, ZHANG S, CHENG H, et al. Optimal sizing of energy station in the multienergy system integrated with data center [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(2): 1222–1234.
- [25] 马燕峰, 范振亚, 刘伟东, 等. 考虑碳权交易和风荷预测误差随机性的环境经济调度[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 412–418. MA Yanfeng, FAN Zhenya, LIU Weidong, et al. Environmental economic scheduling considering the randomness of carbon trading and wind load forecasting errors [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 412–418.
- [26] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey wolf optimizer [J]. Advances in Engineering Software, 2014(69): 46–61.

- [27] 王红君, 陈智晴, 赵辉, 等. 考虑风光荷不确定性的配电网故障恢复策略[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4356–4364. WANG Hongjun, CHEN Zhiqing, ZHAO Hui, et al. Fault recovery strategy of distribution network considering wind-wind-load un-certainty [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4356–4364.

收稿日期: 2023-12-05; 网络首发日期: 2024-06-24

作者简介:

孙岩(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为综合能源系统规划及优化运行, 2268098778@qq.com;

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;

王迪威(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统优化与运行, Wangdw819@outlook.com。

附录

表 A1 服务器主要配置参数

Tab. A1 Main configuration parameters of the server

服务器参数	数值
PUE 值	1.5
每台服务器 $C_{\text{server}}^{\text{inv}}/\text{元}$	68 600
M	3
$P_{\text{idle}}/\text{kW}$	55
$P_{\text{peak}}/\text{kW}$	100
$\mu/(\text{M}\cdot\text{h}^{-1})$	5.3
d/ms	30
D/ms	100

注: PUE 为电能利用效率; μ 为服务器的服务速率; d 为数据负荷传输时延; D 为允许的最大延时。

表 A2 系统中其他设备主要参数

Tab. A2 Main parameters of other devices in the system

参数名称	数值
$S_j^{\text{max}}/\text{kW}$	4 000
$S_j^{\text{min}}/\text{kW}$	0
购气价格 $\psi_{t,\text{gas}}/(\text{元}\cdot\text{m}^{-3})$	1.3
室内温度上下限值 $T_{\text{IDC}}^{\text{in,max}}/(\text{℃})$ 、 $T_{\text{IDC}}^{\text{in,min}}/(\text{℃})$	27.22、17.78
储能设备充/放能倍率 $\rho_i^{\text{ch}}/\rho_i^{\text{dis}}$	ES: 0.2/0.2 HS: 0.2/0.2
购电功率上限 $P_{\text{Line}}^{\text{max}}/\text{kW}$	1 800

表 A3 分时电价

Tab. A3 Time-of-use electricity prices

时段	时刻	电价/(元·kWh ⁻¹)
峰	08:00—11:00, 18:00—23:00	0.804
平	06:00—07:00, 12:00—17:00	0.550
谷	00:00—06:00, 23:00—24:00	0.295