

考虑热供需波动同源特性的数据中心微网 灵活供能仿射优化调度

张虹¹,刘利军¹,张泽熙²,董海云¹,朱宏博³,邢大成¹

(1. 东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012;

2. 国网河北电力有限公司定州供电公司,河北 定州 073000;

3. 国网吉林电力有限公司吉林供电公司,吉林 吉林 132013)

摘要:在数据中心微网中,风光出力的波动特性会同时影响余热供应与住宅热需求,构成热供需波动同源特性。为了提升系统应对不确定性的能力,提出一种考虑热供需波动同源特性的数据中心微网仿射优化调度模型。通过建立新能源出力影响下的余热与热需求仿射模型,突破传统区间优化模型将两者视为独立不确定的局限,揭示其波动同源特性。在此基础上,提出热供需指数,据此动态调节燃气锅炉的出力,克服被动响应策略的调节滞后问题。算例分析结果表明,所提模型可有效提高余热与热负荷的匹配效果,在提升燃气锅炉运行灵活性的同时,改善微网的经济性。

关键词:数据中心微网;余热供暖;供需相关性;仿射优化;灵活供能

中图分类号:TM732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202602009

0 引言

2024年7月,国家发展改革委等四部委联合印发了《数据中心绿色低碳发展专项行动计划》,明确提出:到2030年底,北方采暖地区新建大型数据中心的余热利用率需显著提升,并要求通过可再生能源协同布局增强负荷调节能力^[1]。目前,我国北方采暖地区大型数据中心的余热利用率不足35%^[2],且供暖场景下的能源匹配问题因时空错配等矛盾更趋复杂。因此,如何在保证数据中心负荷与可再生能源协同的同时,应对数据中心余热集中供暖所带来的能源匹配问题成为研究热点。

能源供需匹配是多能源微网研究的核心内容,贯穿于微网的运行、优化、评价等各个环节^[3]。其中,热能的供需匹配作为多能耦合微网的关键环节,其动态协调能力直接影响微网系统的能效与经济性^[4-5]。文献[6]利用燃气锅炉的分钟级动态调节能力来响应热需求的短时波动,并利用储热罐平抑长周期热惯性,通过二者的协同运行优化降低了系统运行成本,提升了系统运行可靠性。文献[7]建立了

热需求预测误差模型,通过滚动优化协同调控燃气锅炉的分钟级出力与储热罐的长周期充放能策略,降低了预测偏差所导致的补偿成本,实现了系统经济性与可靠性的均衡优化。文献[8]针对燃气轮机余热回收热量的动态波动,设计了燃气锅炉、热泵及有机朗肯循环机组的协同机制,实现了冗余能量与缺额热能的灵活匹配。文献[9]针对余热回收装置热量波动产生的供热缺口,借助燃气锅炉和储热装置的灵活调节特性,通过实时监测-动态响应的调控机制,动态实现了热供需匹配。文献[10]提出了混合整数线性规划模型,搭建了短期储热与数据中心余热的协同优化框架,通过储热装置实现余热的削峰填谷,缓解了数据中心算力波动与住宅供暖负荷变化的时间错配问题。上述研究基于燃气锅炉等辅助供热设备的灵活供给能力以及储热装置补充供热缺额的策略应对热源或热需求单侧的不确定性。但是,多能源微网中的热供需双侧都会受到各种不确定因素的影响。文献[11]采用区间随机规划方法应对热负荷的不确定性,基于区间量化热需求波动范围,协同调度多热源设备,实现了供需匹配,降低了运行成本,并提升了系统的鲁棒性。文献[12]依托热储扩展碳排放流模型,供应侧基于有机朗肯循环实现热电联产的热电灵活输出,需求侧挖掘负荷的可转移性,通过双层调度协同应对热供需的不确定性。文献[13]基于固体氧化物燃料电池的电化学-热力耦合精细化建模,采用分层调度与滚动优化调控燃料流量及温度参数,以应对热供需波动。文献[14]在供应侧协调分布式热源的出力与热储能的可放热调控策略,结合动态定价激励需求响应,协同

收稿日期:2025-06-22;修回日期:2025-11-19

在线出版日期:2026-02-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB2407300);吉林省科技厅科技发展计划重点科技研发项目(20240302094GX)
Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2023YFB2407300) and the Key Science and Technology Research and Development Funding Project of Jilin Provincial Science and Technology Department's Science and Technology Development Plan(20240302094GX)

应对热供需的不确定性。文献[15]构建了热泵中心网络系统,以矩阵代数匹配废热-热泵-用户形成供热路径,并基于线性整数规划方法优化系统配置与运行。文献[16]针对数据中心热供需的不确定性,整合电-热-储多能源与余热回收系统,通过多设备协同调度,构建了含不确定性约束的多目标优化模型,并采用混合整数规划等方法实现了热供需的精准匹配。但上述研究的本质是基于热源或储能设备的被动响应策略实现热供需匹配,可能存在调节滞后与经济性损失问题,其关键在于未充分挖掘燃气锅炉等快速调节资源的灵活性潜力,使供需双侧不确定性的协同匹配能力不足。

可再生能源出力、数据中心余热、住宅热需求量等数据中心微网的运行参数会受到外界天气、政策补贴、人类活动等因素的影响,而产生关联特性^[17]。文献[18]指出住宅总热需求受到外界天气以及人类活动的影响,其中供暖需求受到风速、光照强度以及室外温度的直接影响。文献[19]通过构建考虑季节性出力波动与分时电价引导的主从博弈模型,揭示了配电网中新能源出力、用户负荷等运行参数与外界天气及政策信号之间的关联机制。然而,上述研究在优化调度分析过程中仅考虑了协变量因素对各运行参数的影响,未深入研究协变量与不确定量之间以及不确定量彼此之间的相互作用机制。文献[20]采用多元决策树回归方法捕捉历史样本数据中协变量因素与不确定量之间、不确定量彼此之间的内在联系。文献[21]分析了灰水参数对热供应的影响,基于用户活动、舒适度对热需求的驱动,通过动态模型解析了热供需关系,进而优化了储热策略,实现了经济性与环保性的平衡。文献[22]在源侧基于分时电价调控蓄热电采暖的储热容量,在负荷侧解析了用户热负荷受温度约束的逻辑,并联合需求响应资源转移峰谷负荷,最终通过经混合模型优化的策略提升了系统的经济性。文献[23]基于储能调度参数、碳价机制调控热供应侧的出力,并提出用热行为引导策略以调节热需求侧的响应行为,同时考虑了可再生能源波动、负荷变化等不确定量之间的耦合关系。文献[24]基于在线模型预测控制框架,将电价、储热状态等协变量与用户偏好、热舒适度约束相耦合,动态调节热出力与热需求,通过滚动优化实现了热供需多时间尺度匹配及系统经济-稳定性的协同优化。上述关于协变量对热供需影响的研究,主要考虑的是热供应与热需求在不同协变量作用下的关联特性,但未研究由共同协变量所引发的热供应与热需求的同源特性,易造成热供需失衡和系统经济性降低的风险。

为此,本文首先建立了基于数据中心余热供暖

的住宅热供需模型,结合仿射算法揭示了风速、光照强度影响下数据中心余热供暖与住宅热需求之间的波动同源特性,突破了传统区间优化方法将热源、热负荷视为独立不确定量的局限,能够更有效地捕捉供需的变化趋势;然后,建立了考虑热供需指数与燃气锅炉动态出力的仿射优化调度模型,有效应对被动响应策略存在的调节滞后性与经济性损失问题;最后,通过算例仿真验证了本文所提方法能在提升燃气锅炉灵活性的同时,提高数据中心微网的经济性。

1 数据中心微网的热供需运行框架

本文聚焦于一个整合数据中心余热用于住宅供暖的多能源微网系统,系统架构如图1所示。

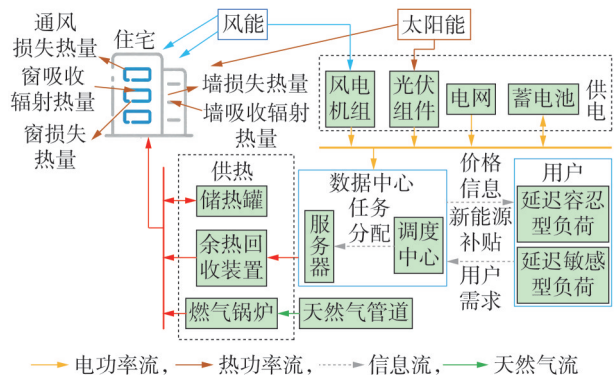


图1 多能源微网系统架构

Fig.1 Architecture of multi-energy microgrid system

风电机组与光伏组件为数据中心供电,当供电量不足时,由蓄电池放电和从电网购电进行补充,以确保电力平衡。数据中心产生的余热作为主要供热源,经热泵提升品质后,通过余热回收装置输送至住宅,多余热量由储热罐储存,并在余热不足时释放热量,与燃气锅炉协同供热,以满足住宅的采暖需求。

在微网运行过程中,一方面,风光发电通过新能源峰值补贴,会间接造成数据中心余热供应的不确定性;另一方面,通风散热、围护结构热损失2个途径会使住宅的热需求具有不确定性。为了灵活应对这种热供需双重不确定下的热缺额问题,本文通过灵活调整燃气锅炉出力,与储热罐协同配合,灵活填补供热缺口。

2 基于数据中心余热供暖的住宅热供需模型

为了揭示余热供暖与住宅热需求之间的内在关联,本章构建了考虑新能源补贴机制的数据中心余热供暖模型和基于建筑热力学刻画风光影响的住宅热需求模型。

2.1 考虑新能源峰值补贴的燃气锅炉灵活供暖模型

数据中心用户负荷可分为延迟敏感型负荷与延

迟容忍型负荷2类^[25],其中延迟容忍型负荷具有可时段转移特征^[26],成为负荷调控的核心对象。

为了促进新能源消纳,从而实现数据中心的绿色低碳发展,本文提出新能源峰值补贴机制:通过对新能源出力的高峰时段提供服务补贴价格,促使补贴价格区间内负荷不转移,而在补贴价格区间外,延迟容忍型负荷用户会根据所给的补贴力度以及转移时长确定转移意愿。根据用户各时段的初始负荷数量以及转移概率计算负荷转移数量,其中转移概率可建模为关于补贴价格和转移时长的线性关系式,如式(1)所示。

$$P_{\text{tran, norm}}^k = \alpha^{\text{time}} \Delta k_{\text{tran, norm}} + \alpha^{\text{price}} C_{\text{sub, norm}}^k \quad (1)$$

式中: $k \in \{1, 2, \dots, N_k\}$, N_k 为1个完整调控周期的时段总数; $P_{\text{tran, norm}}^k$ 为时段 k 延迟容忍型负荷的转移概率; α^{time} 、 α^{price} 分别为转移时长、可再生能源补贴的概率系数; $\Delta k_{\text{tran, norm}}$ 为延迟容忍型负荷转移时段的归一化值; $C_{\text{sub, norm}}^k$ 为时段 k 延迟容忍型负荷服务补贴价格的归一化值。

服务补贴价格与转移概率呈正相关关系,将其表示为上半梯形隶属度函数,其中补贴价格与风电机组、光伏的出力有关,时段 k 的补贴价格 C_{sub}^k 可表示为:

$$C_{\text{sub}}^k = \begin{cases} 0 & k \in [1, k_{\text{begin}}) \cup (k_{\text{end}}, N_k] \\ f(\Delta E_k) & k \in [k_{\text{begin}}, k_{\text{end}}] \end{cases} \quad (2)$$

$$f(\Delta E_k) = \begin{cases} C_{\text{sub}}^{\min} & \Delta E_k \leq 0 \\ \lambda_{\text{bt}} \frac{\Delta E_k}{E_{\text{lim}}} & 0 < \Delta E_k < E_{\text{lim}} \\ C_{\text{sub}}^{\max} & \Delta E_k \geq E_{\text{lim}} \end{cases} \quad (3)$$

$$\Delta E_k = P_{\text{wt}}^k + P_{\text{pv}}^k - P_{\text{DC}}^k - P_{\text{HP}}^k \quad (4)$$

式中: k_{begin} 、 k_{end} 分别为可再生能源补贴的起始、终止时段; P_{wt}^k 、 P_{pv}^k 分别为时段 k 风电机组、光伏的出力; P_{DC}^k 为时段 k 数据中心的功耗; P_{HP}^k 为时段 k 热泵的用电功率; ΔE_k 为时段 k 可再生能源出力与用电负荷的差值; E_{lim} 为可补贴的可再生能源出力与用电负荷的最大差值; λ_{bt} 为补贴价格参数; C_{sub}^{\max} 、 C_{sub}^{\min} 分别为补贴价格的最高值、最低值。

对补贴价格进行归一化处理可得:

$$C_{\text{sub, norm}}^k = \begin{cases} 0 & 0 \leq C_{\text{sub}}^k < C_{\text{sub}}^{\min} \\ \frac{C_{\text{sub}}^k - C_{\text{sub}}^{\min}}{C_{\text{sub}}^{\max} - C_{\text{sub}}^{\min}} & C_{\text{sub}}^{\min} \leq C_{\text{sub}}^k < C_{\text{sub}}^{\max} \\ 1 & C_{\text{sub}}^k = C_{\text{sub}}^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

转移时长 Δk_{tran} 与转移概率成负相关关系,将其表示为下半梯形隶属度函数,如式(6)所示。

$$\Delta k_{\text{tran}} = \begin{cases} k_{\text{begin}} - k_{\text{tol, arrive}} & 0 \leq k_{\text{tol, arrive}} \leq k_{\text{begin}} \\ 0 & k_{\text{begin}} < k_{\text{tol, arrive}} < k_{\text{end}} \\ k_{\text{tol, arrive}} - k_{\text{end}} & k_{\text{end}} \leq k_{\text{tol, arrive}} \leq N_k \end{cases} \quad (6)$$

$$\Delta k_{\text{tran, norm}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq \Delta k_{\text{tran}} < \Delta k_{\text{min}} \\ \frac{\Delta k_{\text{max}} - \Delta k_{\text{tran}}}{\Delta k_{\text{max}} - \Delta k_{\text{min}}} & \Delta k_{\text{min}} \leq \Delta k_{\text{tran}} \leq \Delta k_{\text{max}} \\ 0 & \Delta k_{\text{max}} < \Delta k_{\text{tran}} \leq N_k \end{cases} \quad (7)$$

式中: $k_{\text{tol, arrive}}$ 为用户需求到达的时段; Δk_{max} 、 Δk_{min} 分别为用户需求转移时段的上、下限。

在新能源峰值补贴机制的激励下,各时段基于转移概率的延迟容忍型负荷转移后的数量 n_{dy}^k 可表示为:

$$n_{\text{dy}}^k = \begin{cases} (1 - P_{\text{tran, norm}}^k) n_{\text{dy, initial}}^k & k \in [1, k_{\text{begin}}) \cup (k_{\text{end}}, N_k] \\ n_{\text{dy, initial}}^k + \frac{\sum_{k \in [k_{\text{begin}}, k_{\text{end}}]} P_{\text{tran, norm}}^k n_{\text{dy, initial}}^k}{k_{\text{end}} - k_{\text{begin}}} & k \in [k_{\text{begin}}, k_{\text{end}}] \end{cases} \quad (8)$$

式中: $n_{\text{dy, initial}}^k$ 为时段 k 不考虑新能源峰值补贴时的延迟容忍型负荷数量。

转移后各时段数据中心的数据服务需求数量 D_{total}^k 可表示为:

$$\begin{cases} D_{\text{total}}^k = D_{\text{dy, total}}^k + D_{\text{st, total}}^k \\ D_{\text{dy, total}}^k = n_{\text{dy}}^k D_{\text{dy}} \\ D_{\text{st, total}}^k = n_{\text{st}}^k D_{\text{st}} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $D_{\text{dy, total}}^k$ 、 $D_{\text{st, total}}^k$ 分别为时段 k 数据中心处理延迟容忍型负荷、延迟敏感型负荷的数据服务需求数量; n_{st}^k 为时段 k 需要处理的延迟敏感型负荷数量; D_{dy} 、 D_{st} 分别为处理单个延迟容忍型负荷、延迟敏感型负荷的数据服务需求数量。

考虑数据服务数量对数据中心功耗的影响,时段 k 数据中心的功耗 P_{DC}^k 可表示为:

$$P_{\text{DC}}^k = L_k \left[P_{\text{idle}} + (\eta_{\text{PUE}} - 1) P_{\text{peak}} + (P_{\text{peak}} - P_{\text{idle}}) \frac{D_{\text{total}}^k}{\mu L_k} \right] \quad (10)$$

式中: η_{PUE} 为电源使用效率,用数据中心的总功耗与IT服务器的功耗之比表示; L_k 为时段 k 数据中心运行的服务器数量; μ 为数据中心服务器的用户需求处理速率; P_{idle} 为服务器的静默功率; P_{peak} 为服务器的峰值功率。

各时段数据中心回收的余热 Q_{dc}^k 取决于数据中心的功耗,如式(11)所示。

$$Q_{\text{dc}}^k = \eta_{\text{DC}} P_{\text{DC}}^k \quad (11)$$

式中: η_{DC} 为数据中心的余热回收效率。

数据中心的余热通常为低品位余热,不能直接用于供暖系统,而是需要通过热泵升级为低温余热,则时段 k 数据中心的余热经热泵升级后的供热量 $Q_{\text{HP, dc}}^k$ 可表示为:

$$Q_{\text{HP, dc}}^k = Q_{\text{dc}}^k + P_{\text{HP}}^k \quad (12)$$

$$Q_{\text{HP, dc}}^k = \Omega_{\text{COP, HP}} P_{\text{HP}}^k \quad (13)$$

式中: $\Omega_{\text{COP, HP}}$ 为热泵的性能系数。

考虑供暖过程中存在15%的热量损耗,则数据中心回收余热的供热量 Q_{DC}^k 可表示为:

$$Q_{DC}^k = 0.85Q_{HP,dc}^k \quad (14)$$

住宅的总供热量 Q_p^k 可表示为:

$$Q_p^k = Q_{DC}^k + 0.85(Q_{gb}^k + Q_{dch}^k - Q_{ch}^k) \quad (15)$$

式中: Q_{gb}^k 为时段 k 燃气锅炉的供热量; Q_{ch}^k 、 Q_{dch}^k 分别为时段 k 储热罐的充、放热量。数据中心回收余热的供热量在风电机组、光伏出力波动的影响下也是波动变化的,可以通过灵活地调整燃气锅炉出力,并与储热罐协同配合,以满足住宅的供暖需求。

2.2 风光因素驱动的住宅热需求模型

住宅的热需求主要由围护结构热损失以及建筑通风热损失构成,其动态特性受室外温度、风速、太阳辐射的影响。因此,本节建立考虑室外温度、太阳辐射、风速影响的住宅热需求模型。

1) 围护结构的热损失。

围护结构包括墙体与窗户两部分,由于相较于窗户类围护结构,建筑墙体类围护结构的厚度较大,2类围护结构的热辐射吸收率、传热系数不同。

住宅通过围护结构吸收的太阳辐射热量 q_{pv}^k 可表示为:

$$q_{pv}^k = I_{pv}^k (r_{wall}^k A_{wall} + r_{win}^k A_{win}) \quad (16)$$

式中: I_{pv}^k 为时段 k 的太阳辐射强度; r_{wall}^k 为时段 k 墙体围护结构的太阳辐射吸收率; r_{win}^k 为时段 k 窗户的太阳辐射吸收率; A_{wall} 为墙体围护结构的面积; A_{win} 为窗户的面积。

住宅内部通过围护结构向外散失的热量 q_{conv}^k 可表示为:

$$q_{conv}^k = (T_{in}^k - T_{out}^k) (\alpha_{wall} A_{wall} + \alpha_{win} A_{win}) \quad (17)$$

式中: α_{wall} 为墙体的热散失系数; α_{win} 为窗户的热散失系数; T_{in}^k 为时段 k 的室内温度; T_{out}^k 为时段 k 的室外温度。

围护结构的热损失 Q_{env}^k 可表示为:

$$Q_{env}^k = q_{conv}^k - q_{pv}^k \quad (18)$$

2) 建筑通风散热的热损失。

由于墙体和窗户之间有缝隙,通风散热不可避免。住宅因通风散热而产生的热损失 Q_{ven}^k 可表示为:

$$Q_{ven}^k = v_{wind}^k A_{cf} C_o \rho (T_{in}^k - T_{out}^k) \quad (19)$$

式中: v_{wind}^k 为时段 k 的风速; A_{cf} 为窗缝的面积; C_o 为室外空气的热质量比热容; ρ 为室外空气密度。

3) 住宅热需求。

为了方便建模,设定如下假设条件:①忽略住宅内部的传热过程;②将终端用户群体等效为具有集中式热交换特性的统一热节点。则时段 k 住宅的热需求 Q_d^k 可表示为:

$$Q_d^k = Q_{env}^k + Q_{ven}^k + C_{in} m (T_{in}^{k+1} - T_{in}^k) \quad (20)$$

式中: C_{in} 为室内空气的热质量比热容; m 为住宅室内空气的质量。

在风能、太阳能的影响下,住宅的热需求具有不

确定性,而且数据中心回收的余热与住宅的热需求同时受到风能、太阳能的影响,因此需要进一步分析两者之间的关联特性,同时基于燃气锅炉的灵活出力特性以及储热罐的充放能策略来应对热供需双重不确定性匹配问题。

3 考虑热供需波动同源特性的微网仿射优化调度模型

为了研究风光所引起的数据中心回收余热供暖与住宅热需求的波动同源特性,本章首先解释热供需的内在关联;然后,利用仿射算法表征数据中心回收余热与住宅热需求之间的波动特性,提出热供需指数;最后,建立仿射优化调度模型,以获得微网运行成本最低的调度方案。

3.1 热供需波动同源特性

由数据中心回收余热供暖模型可知,新能源峰值补贴机制的引入建立了热供应与风光出力波动之间的间接关联;而住宅热需求模型表明,热需求的变化同样由风速和光照强度直接驱动。这种风光因素同步驱动余热供应与热需求波动的特性即为热供需波动同源特性。

数据中心余热供应与住宅热需求之间的相关关系如图2所示,外生扰动源风速与光照强度,通过2条异构路径影响内生变量,即数据中心余热供应与住宅热需求。

1) 数据中心余热供应链: 风速、光照强度直接影响新能源出力,然后触发新能源峰值补贴机制,从而影响数据中心IT负荷的转移,使得负荷数量分布发生变化,进而影响数据中心的用电量以及余热供应变化。

2) 热需求链: 风速通过通风散热以及围护结构产生热损失,光照强度通过围护结构产生热损失,从而直接改变住宅的热需求。

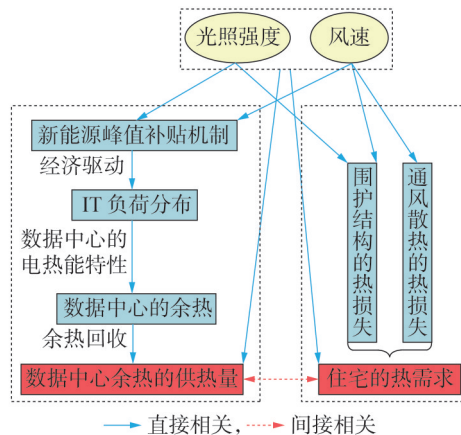


图2 数据中心余热供应与住宅热需求的相关关系
Fig.2 Correlation between waste heat supply of data center and heating demand of residential building

3.2 基于仿射算法的燃气锅炉灵活出力策略

基于上述分析,本文考虑的不确定输入量为风速、光照强度。数据中心余热及住宅热需求的波动均源于风光扰动,二者因此具有相关性。为了解析热供需特性,并刻画风光不确定因素的传递轨迹及其对微网其他决策变量的影响,引入仿射算法^[27]。仿射算法通过中心值和噪声元的线性组合,不仅可以表征不确定因素以及不确定因素之间的内在联系,还能追踪各因素对系统其他变量的动态影响。时段 k 微网中决策变量 x^k 的仿射形式可表示为:

$$\hat{x}^k = x_0^k + x_{wt}^k \varepsilon_{wt}^k + x_{pv}^k \varepsilon_{pv}^k \quad (21)$$

式中:变量上方的“ $\hat{\cdot}$ ”表示相应变量的仿射形式; x_0^k 为时段 k 决策变量 x^k 的中心值,表示不考虑不确定因素影响时 x^k 的取值; ε_{wt}^k 为时段 k 风速的噪声元, $\varepsilon_{wt}^k \in [-1, 1]$; ε_{pv}^k 为时段 k 光照强度的噪声元, $\varepsilon_{pv}^k \in [-1, 1]$; x_{wt}^k 为时段 k 风速的噪声元系数,表示风速不确定因素对 x^k 的影响程度; x_{pv}^k 为时段 k 光照强度的噪声元系数,表示光照强度不确定因素对 x^k 的影响程度。

数据中心余热供热量与住宅热需求可表征为风光不确定参数的仿射函数,分别如式(22)和式(23)所示。

$$\hat{Q}_{DC}^k = Q_{DC,0}^k + Q_{DC,wt}^k \varepsilon_{wt}^k + Q_{DC,pv}^k \varepsilon_{pv}^k \quad (22)$$

$$\hat{Q}_d^k = Q_{d,0}^k + Q_{d,wt}^k \varepsilon_{wt}^k + Q_{d,pv}^k \varepsilon_{pv}^k \quad (23)$$

式中: $Q_{DC,0}^k$ 、 $Q_{d,0}^k$ 分别为时段 k 数据中心余热供热量、住宅热需求的中心值,即预测值; $Q_{DC,wt}^k$ 、 $Q_{DC,pv}^k$ 分别为时段 k 风、光不确定性对数据中心供热量的影响程度; $Q_{d,wt}^k$ 、 $Q_{d,pv}^k$ 分别为时段 k 风、光不确定性对住宅热需求的影响程度。

为了表征数据中心余热供应与住宅热需求的波动同源特性,本文基于仿射算法计算热供需波动相关系数 $\rho_{\hat{Q}_d^k, \hat{Q}_{DC}^k}$,如式(24)所示。

$$\rho_{\hat{Q}_d^k, \hat{Q}_{DC}^k} = \frac{\text{cov}(\hat{Q}_{DC}^k, \hat{Q}_d^k)}{\sqrt{V_{\text{var}}(\hat{Q}_{DC}^k)} \sqrt{V_{\text{var}}(\hat{Q}_d^k)}} = \frac{\sum_{i \in \{wt, pv\}} Q_{DC,i}^k Q_{d,i}^k}{\sqrt{\sum_{i \in \{wt, pv\}} (Q_{DC,i}^k)^2} \sqrt{\sum_{i \in \{wt, pv\}} (Q_{d,i}^k)^2}} \quad (24)$$

式中: $\text{cov}(\hat{Q}_{DC}^k, \hat{Q}_d^k)$ 为余热供热量与住宅热需求的协方差; $V_{\text{var}}(\hat{Q}_{DC}^k)$ 、 $V_{\text{var}}(\hat{Q}_d^k)$ 分别为余热供热量、住宅热需求的方差。当 $\rho_{\hat{Q}_d^k, \hat{Q}_{DC}^k} > 0$ 时,表示余热供热量与住宅热需求的波动趋势一致;当 $\rho_{\hat{Q}_d^k, \hat{Q}_{DC}^k} < 0$ 时,表示余热供热量与住宅热需求呈现相反的波动特征。

根据式(24)判断数据中心余热供热量与住宅热需求之间的变化趋势后,在此基础上,进一步引入热

供需指数,对两者的匹配程度进行量化。时段 k 的热供需指数 M_k 可表示为:

$$M_k = 1 - \frac{|Q_{d,0}^k - Q_{DC,0}^k|}{\max\{Q_{d,0}^k, Q_{DC,0}^k\}} \quad (25)$$

$M_k \in [0, 1]$,当 $M_k = 1$ 时,表示数据中心余热供热量能够与住宅热需求完全匹配;当 $M_k < 1$ 时,表示数据中心余热供热量只能补偿部分住宅热需求,剩余住宅热需求则需要联动燃气锅炉和储热装置来保证供热。因为数据中心余热供热量与住宅热需求均受风光不确定因素的影响,此时燃气锅炉需要灵活出力,其出力表达式为:

$$Q_{gb}^{k+1} = \begin{cases} Q_{gb}^{\min} + Q_{gb}^{\max} (1 - M_k) & Q_{d,0}^k > Q_{DC,0}^k \\ 0 & Q_{d,0}^k \leq Q_{DC,0}^k \end{cases} \quad (26)$$

式中: Q_{gb}^{k+1} 为时段 $k+1$ 燃气锅炉的出力; Q_{gb}^{\max} 、 Q_{gb}^{\min} 分别为燃气锅炉出力的上、下限。

3.3 仿射优化调度模型

3.3.1 目标函数

本文的优化目标为:在每次滚动优化过程中,使整个数据中心微网在时段 $\kappa \sim \kappa + N - 1$ (N 为滚动优化时间窗内的时段总数)内的运行成本最低。目标函数可表示为:

$$\min \hat{F} = \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} (\hat{f}_{\text{grid}}^k + \hat{f}_{\text{res}}^k + \hat{f}_{\text{gas}}^k + \hat{f}_{\text{sub}}^k + \hat{f}_w^k + \hat{f}_t^k) \quad (27)$$

式中: F 为 N 个滚动优化时段内微网的运行成本; f_{grid}^k 为时段 k 从电网购电的成本; f_{res}^k 为时段 k 新能源购电成本; f_{gas}^k 为时段 k 的天然气的购买成本; f_w^k 为时段 k 设备的运行维护成本; f_{sub}^k 为时段 k 新能源峰值补贴成本; f_t^k 为时段 k 对未服务热需求的惩罚成本。

1) 能源购买成本。

$$\hat{f}_{\text{grid}}^k + \hat{f}_{\text{res}}^k + \hat{f}_{\text{gas}}^k = C_{\text{grid}}^k \hat{P}_{\text{grid}}^k + C_{\text{res}} (\hat{P}_{\text{pv}}^k + \hat{P}_{\text{wt}}^k) + \frac{C_{\text{gas}} Q_{\text{gb}}^k}{\eta_{\text{gb}} H_{\text{gas}}} \quad (28)$$

式中: C_{grid}^k 为时段 k 从电网购电的电价; C_{res} 为新能源的购电电价; C_{gas} 为单位天然气的价格; P_{grid}^k 为时段 k 从电网的购电量; η_{gb} 为燃气锅炉的产热效率; H_{gas} 为天然气的高热值。

2) 设备的运行维护成本。

$$\hat{f}_w^k = C_{\text{gb}} \hat{Q}_{\text{gb}}^k + C_{\text{cn,e}} \hat{E}_{\text{es,e}}^k + C_{\text{cn,h}} \hat{Q}_{\text{es,h}}^k \quad (29)$$

式中: C_{gb} 为燃气锅炉单位功率的运行维护成本; $C_{\text{cn,e}}$ 、 $C_{\text{cn,h}}$ 分别为储电装置、储热罐的单位容量运行维护成本; $Q_{\text{es,h}}^k$ 、 $E_{\text{es,e}}^k$ 分别为时段 k 储热罐、储电装置的储能容量。

3) 新能源峰值补贴成本。

$$\hat{f}_{\text{sub}}^k = C_{\text{sub}}^k n_{\text{dy, initial}}^k P_{\text{tran, norm}}^k \quad (30)$$

4) 未服务热需求的惩罚成本。

$$\begin{cases} f_t^k = \rho^t \Delta H_k \\ \Delta H_k = Q_d^k - Q_p^k \quad \Delta H_k > 0 \end{cases} \quad (31)$$

式中： ρ^r 为对供热缺额的惩罚因子； ΔH_k 为时段 k 的缺额供热量。

微网中的不确定性来自风光波动，基于仿射算法理论，微网中的其他决策变量可表示为风速、光照强度的噪声元($\varepsilon_{wt}^k, \varepsilon_{pv}^k$)的仿射形式，如式(21)所示。

在仿射优化理论中，目标函数可表示为：

$$\min \left\{ \gamma \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_0^k + (1-\gamma) \sum_{i \in \{pv, wt\}} \left| \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_i^k \right| \right\} \quad (32)$$

式中：下标中的0表示相应变量的中心值；下标中的 i 表示不确定因素对变量的影响程度，即噪声元系数； $\sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_0^k$ 为运行成本的中心值，表示不受任何不确定因素影响时数据中心微网的运行成本，中心值越小，表明所得仿射优化方案的经济性越好；

$\sum_{i \in \{pv, wt\}} \left| \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_i^k \right|$ 为运行成本的仿射半径，仿射半径越小，表明不确定因素对仿射优化方案的变化范围影响越小； $\gamma \in [0, 1]$ 为引入的优化权重系数，当其取值趋向于1时，优化目标侧重于运行成本的中心值，当其取值趋向于0时，优化目标侧重于运行成本的仿射半径。通过最小化运行成本中心值与仿射半径，可以同时实现微网经济性和保守性的优化。

3.3.2 约束条件

在仿射优化调度模型中，需要将决策变量用不确定变量线性表示，即改写为以不确定变量作为噪声元的仿射形式。数据中心微网需要满足的约束条件包括数据中心负荷约束、电功率平衡约束、设备出力约束以及燃气锅炉爬坡约束，具体见附录A式(A1)–(A6)。这些约束条件主要可分为等式约束、不等式约束和跨时间约束3类，可将这3类约束条件处理扩展为相应的仿射形式^[28]。

1) 等式约束。

可将等式约束的仿射形式定义为等号两端仿射变量的中心值、噪声元系数分别对应相等。以电功率平衡约束为例，其仿射形式可表示为：

$$\begin{cases} P_{pv,0}^k + P_{wt,0}^k + P_{dch,0}^k + P_{grid,0}^k = P_{DC,0}^k + P_{HP,0}^k + P_{ch,0}^k \\ P_{pv,i}^k + P_{wt,i}^k + P_{grid,i}^k + P_{dch,i}^k = P_{DC,i}^k + P_{HP,i}^k + P_{ch,i}^k \quad i \in \{pv, wt\} \end{cases} \quad (33)$$

式中： P_{ch}^k, P_{dch}^k 分别为时段 k 蓄电池的充、放电功率。

2) 不等式约束。

微网的不等式约束形如式(34)所示，可以将其仿射形式表示为式(35)所示形式。

$$G^{\min} \leq \hat{G}^k \leq G^{\max} \quad (34)$$

$$\begin{cases} G^{\min} \leq G_0^k - \sum_{i \in \{pv, wt\}} |G_i^k| \\ G_0^k + \sum_{i \in \{pv, wt\}} |G_i^k| \leq G^{\max} \end{cases} \quad (35)$$

式中： \hat{G}^k 为微网不等式约束涉及的仿射决策变量，如 $\hat{P}_{pv}^k, \hat{P}_{wt}^k, \hat{Q}_{gb}^k, \hat{Q}_{es,h}^k, \hat{E}_{es,e}^k$ 等； G^{\min}, G^{\max} 分别为仿射变量 \hat{G}^k 的最小值、最大值。

3) 跨时间约束。

跨时间约束包括跨时间等式约束与跨时间不等式约束。其中跨时间等式约束以蓄电池容量约束(见式(A5))为例，其仿射形式可表示为：

$$\begin{cases} E_{es,e0}^k = E_{es,e0}^{k-1} (1 - \sigma_{es,e}) + \left(P_{ch,0}^k \eta_{es,c,e} - \frac{P_{dch,0}^k}{\eta_{es,d,e}} \right) \Delta t \\ E_{es,ei}^k = E_{es,ei}^{k-1} (1 - \sigma_{es,e}) + \left(P_{ch,i}^k \eta_{es,c,e} - \frac{P_{dch,i}^k}{\eta_{es,d,e}} \right) \Delta t \\ E^0 = E_{es,e0}^k \end{cases} \quad i \in \{pv, wt\} \quad (36)$$

式中： $\sigma_{es,e}$ 为蓄电池的损失系数； $\eta_{es,c,e}, \eta_{es,d,e}$ 分别为蓄电池的充、放电效率； E^0 为调度周期开始时蓄电池的容量； Δt 为单位时段的时间间隔。

跨时间不等式约束以燃气锅炉的爬坡约束(见式(A6))为例，其仿射形式为：

$$\begin{cases} Q_{gb}^{\text{down}} \Delta t \leq \left(Q_{gb,0}^k - \sum_{i \in \{pv, wt\}} |Q_{gb,i}^k| \right) - \left(Q_{gb,0}^{k-1} + \sum_{i \in \{pv, wt\}} |Q_{gb,i}^{k-1}| \right) \\ \left(Q_{gb,0}^k + \sum_{i \in \{pv, wt\}} |Q_{gb,i}^k| \right) - \left(Q_{gb,0}^{k-1} - \sum_{i \in \{pv, wt\}} |Q_{gb,i}^{k-1}| \right) \leq Q_{gb}^{\text{up}} \Delta t \end{cases} \quad (37)$$

式中： $Q_{gb}^{\text{up}}, Q_{gb}^{\text{down}}$ 分别为燃气锅炉爬坡功率的上、下限。

综上可得每次滚动优化过程中数据中心微网的仿射优化模型为：

$$\begin{cases} \min \left\{ \gamma \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_0^k + (1-\gamma) \sum_{i \in \{pv, wt\}} \left| \sum_{k=\kappa}^{\kappa+N-1} F_i^k \right| \right\} \\ \text{s.t. 式(33)—(37)} \end{cases} \quad (38)$$

在每次滚动优化过程中，首先对前一时段的系统状态信息进行采样，并对优化时段内的预测信息进行更新；其次，考虑预测信息可能存在的误差，将带有不确定性的预测信息表示为仿射形式，并计算本时段的热供需指数，据此确定下一时段燃气锅炉的动态出力；然后，构建并求解仿射形式的优化调度模型，从而得到 N 个优化时段内的仿射优化调度方案；最后，下发执行本时段的优化调度方案，并将优化时段向后推移，开启新一轮滚动优化。仿射优化调度流程图如附录A图A1所示。

4 算例分析

4.1 算例介绍

为了验证本文所提方法的有效性，对基于数据中心余热供暖的多能微网进行验证分析。数据中心的数据负荷来自Google发布的数据^[29]，数据中心的

相关参数设置如附录B表B1所示;微网的运行参数以及设备参数分别如附录B表B2和表B3所示;微网与电网之间的电能交互采用分时电价,如附录B表B4所示;微网向气网购气的价格为0.26元/(kW·h)。

室外温度选取中国北方冬季某一典型日的温度,如附录B图B1所示。数据中心微网中住宅的面积为8000 m²,住宅热需求的相关参数如附录B表B5所示。数据中心微网在24 h内的风光出力以及电、热负荷的预测结果如附录B图B2所示,其中电负荷包含数据中心和热泵用电功耗,热负荷为住宅热需求。本文主要考虑风速、光照强度不确定性的影响,设定风速和光照强度的波动范围为其预测值的±10%。

为了验证本文所提方法的有效性,设定优化调度周期为09:00至次日09:00,并将其以时间间隔 $\Delta t=1$ h分为24个调度时段,仿射优化调度模型中的优化权重系数 γ 的取值为0.6。选定新能源出力较多的时段12:00—17:00为新能源峰值补贴时段。新能源峰值补贴机制与风电机组、光伏出力情况相关,参数设置如附录B表B6所示。不考虑数据中心负荷的不确定性,数据中心的延迟敏感型负荷的分布情况如附录B图B3所示。

为了验证本文所提模型的有效性,设置如下3种优化调度模型进行对比分析:①模型1,采用传统区间优化模型,将风光出力、余热供热量及热需求视为互不关联的区间变量;②模型2,构建热源侧仿射优化模型,对余热供热量建立风光噪声元驱动的仿射形式,但将热需求简化为确定性参数;③模型3,建立余热供热量与热需求的仿射模型,利用热供需指数动态调控燃气锅炉出力,实现热供需双侧不确定性的协同调控(即本文所提模型)。

采用MATLAB R2024a结合Gurobi求解器对优化调度模型进行求解。在Intel Core i9-13900HX CPU @2.20 GHz, 16 GB的计算机上进行算例分析计算。

4.2 热供需波动同源特性分析

引入新能源峰值补贴前、后延迟容忍型负荷的分布如图3所示。结合图B2和图3可知,在12:00—17:00时段内,风电机组、光伏出力达到峰值,新能源峰值补贴机制触发数据中心延迟容忍型负荷向该时段集中,使该时段的延迟容忍型负荷增加了50%左右,余热供应量同步增加了15%。数据中心负荷呈现出在新能源出力多的时段内分布数量多、而在新能源出力少的时段内分布数量少的特点。而数据中心余热的分布与数据中心负荷的分布一致,因此新能源峰值补贴机制的引入使得数据中心余热供热量与新能源出力的变化趋势更加契合,即风电机组、光伏出力与数据中心余热供热量均呈强正相关性。

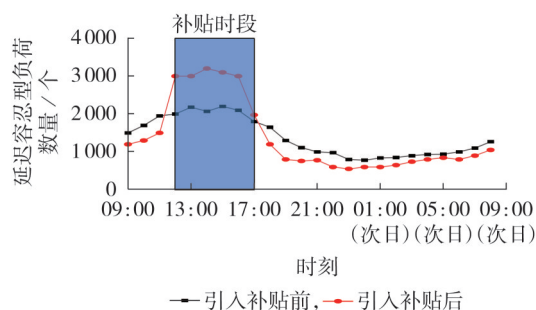


图3 引入新能源峰值补贴前、后延迟容忍型负荷的分布
Fig.3 Distribution of delay-tolerant load before and after introduction of peak subsidies for new energy

风电机组、光伏出力本身分别由风速和光照强度直接决定,而这两者同时作用于住宅热需求。当不考虑温度波动时,风速与光照强度波动成为影响住宅热需求变化波动的主要因素。但风速与光照强度对热需求的影响不同,结合热需求模型和图B2可知:在09:00—12:00时段内,当风速不变时,住宅热需求随着光照强度的增大而减少;在次日02:00—07:00时段内没有光照强度的影响,住宅热需求随着风速的增大而增大。

风光波动对数据中心余热供热量与住宅热需求的作用机制存在主导因子差异性。本文利用热供需波动相关系数 $\rho_{\dot{Q}_s, \dot{Q}_{bc}}$ 描述这种关系:当 $\rho_{\dot{Q}_s, \dot{Q}_{bc}} > 0$ 时,表明风速波动占主导,余热供热量与热需求呈现同向变化趋势;当 $\rho_{\dot{Q}_s, \dot{Q}_{bc}} < 0$ 时,表明光照强度波动占主导,余热供热量与热需求呈现相反的波动特性,此时存在热供需错配问题。可见,基于热供需波动相关系数能捕捉数据中心余热供热量与住宅热需求的波动同源特性和余热供暖缺额的变化趋势,为微网优化调度提供指导依据。

4.3 仿射优化调度结果分析

为了验证仿射优化调度模型的合理性以及考虑热供需波动同源特性和动态调整燃气锅炉出力对热供需匹配的优势,对模型2和模型3中各时段的设备出力以及波动情况用中心值、仿射半径进行表示。在求解效率方面,模型1—3的滚动优化求解时间分别为2.1、3.5、4.8 s,远小于1 h的优化调度时段间隔,能够满足滚动调度的实时性要求。在调度结果层面,数据中心微网的热功率仿射优化调度结果如图4和图5所示,电功率的仿射优化调度结果如附录B图B4所示。

由图4可知:在20:00至次日02:00时段内,数据中心余热供热量不足以满足住宅热需求,由于储热罐存储的余热充足,模型2仅通过储热罐补充供热,储热罐的荷能状态由90%降低为20%,失去后续调节裕度,而模型3采用基于热供需指数的燃气锅炉动态出力策略,在该时段内触发燃气锅炉动作

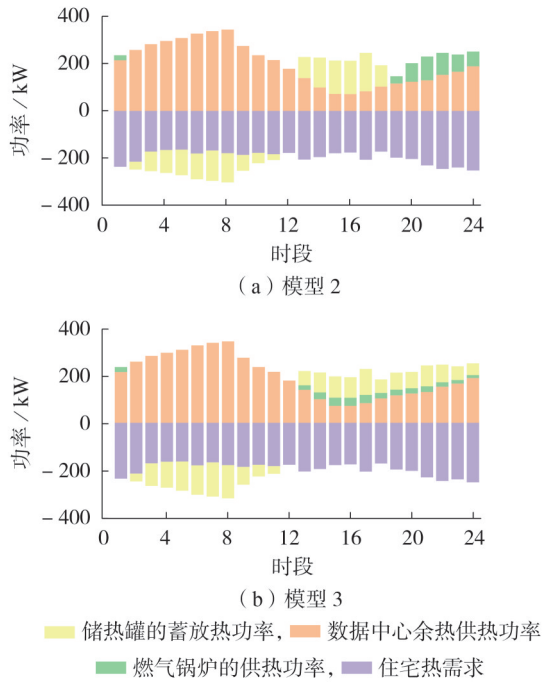


图4 模型2和模型3中热功率的中心值
Fig.4 Central values of thermal power in Model 2 and Model 3

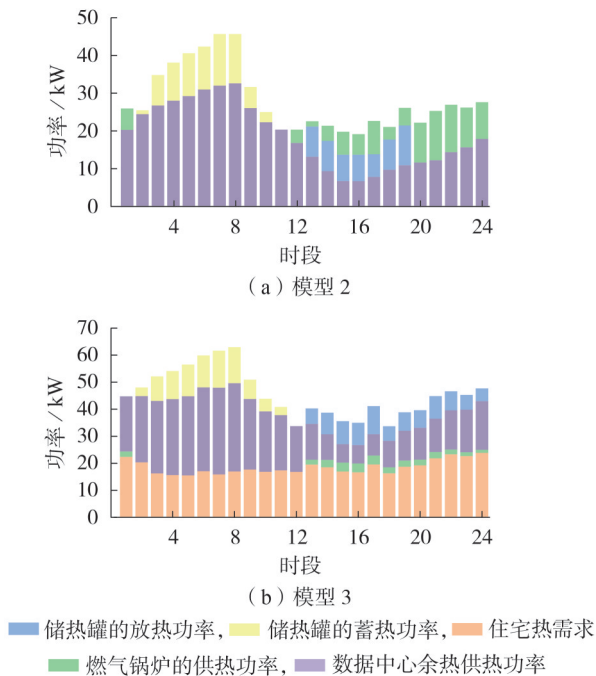


图5 模型2和模型3中热功率的仿射半径
Fig.5 Affine radius of thermal power in Model 2 and Model 3

与储热罐协同补充供热,减少了储热罐的出力;在02:00—09:00时段内,模型2下储热罐储存的余热耗尽,需要完全依赖燃气锅炉承担住宅供暖需求缺口,而模型3下可继续利用燃气锅炉与储热罐协同为住宅供暖。可见,模型3所采用的方法通过热供需指数动态确定燃气锅炉出力,将部分热功率缺额波动转化为燃气锅炉出力的动态调节量,有效平抑了热供需波动对系统运行的影响。

由图5可知,模型2与模型3下数据中心余热供热量的仿射半径一样。在10:00—20:00时段内,模型2与模型3都通过储热罐蓄热来应对风光波动带来的热供需变化,但是模型2没有考虑住宅热需求的不确定性,所以模型2下储热罐蓄热功率的仿射半径明显比模型3下的大。在20:00至次日04:00时段内,模型2采用燃气锅炉与储热罐放热2种方式应对热供需的不确定性,这是因为储热罐出力受最大出力约束,其所能提供的调节能力有限,为此启动燃气锅炉。而在04:00—09:00时段内,模型2由于储热罐收集的余热用尽,只能依赖燃气锅炉弥补热供需的不确定缺额。模型3在20:00至次日09:00时段内一直利用燃气锅炉与储热罐放热应对热供需的不确定缺额,但是模型3下燃气锅炉与储热罐出力的仿射半径比模型2下的小,这主要得益于模型3下的燃气锅炉根据热供需指数动态调整出力,在减少储热罐出力波动的同时,减少了供需波动状态下燃气锅炉出力对噪声元的依赖。

4.4 成本分析

通过对各模型进行求解计算,得到3种模型的运行总成本区间以及各项成本,结果分别如表1和表2所示。

表1所示结果表明,模型2通过引入仿射优化模型,克服了区间优化模型忽略各变量间联系的区间扩张问题,使得运行总成本的区间宽度相比模型1缩减了38.4%。模型3在模型2的基础上同时考虑

表1 不同模型的运行总成本区间及求解效率

Table 1 Total operation cost range and solution efficiency of different models

模型	运行总成本区间 / 元	区间宽度 / 元	单次滚动优化的求解时间 / s
1	[3229,4744]	1515	2.1
2	[3235,4168]	933	3.5
3	[3261,3868]	607	4.8

表2 不同模型的各项成本

Table 2 Component costs of different models

模型	新能源购电成本 / 元	电网购电成本 / 元	天然气购买成本 / 元	未服务热需求的惩罚成本 / 元	设备运行维护成本 / 元	新能源峰值补贴成本 / 元	运行总成本 / 元
1	2179	1275	170	132	117	128	4001
2	2179	1036	146	99	111	125	3696
3	2179	1036	89.2	18	120	123.6	3565.8

了数据中心余热供热量与住宅热需求的不确定性,并利用两者的波动同源特性,使得运行总成本的区间宽度相比模型2缩减了34.9%。由表2可知,相较于模型2,模型3的设备运行维护成本增加了8%,但天然气购买成本、未服务热需求的惩罚成本分别减少了39%、82%,这表明模型3能高效应对余热供热量缺口,在提升系统鲁棒性的同时,提高经济性。

为了分析本文所提基于热供需指数的燃气锅炉动态出力策略在处理热供需匹配问题时的优势,通过仿真计算得到不同热供需指数下微网供热成本的组成情况,结果如附录B图B5所示。由图可知,随着热供需指数从0.85减小为0.55,设备运行维护成本增加了7%,但未服务热需求的惩罚成本的占比从5.2%显著攀升至39.8%,天然气购买成本的占比同步从28.9%增加至39.1%,热供需指数减小,表明余热供暖缺口扩大。从图中还可看出,随着热供需指数减小,未服务热需求的惩罚成本的增速加快,这表明余热供暖缺口的填补效率急剧衰减,反映了传统调节策略下燃气锅炉与储热罐在低热供需指数下的协同填补能力不足。相较而言,本文所提基于热供需指数的燃气锅炉动态出力策略,在指数较低时增大燃气锅炉出力,既缓解了储热罐应对供需波动的压力,也利用燃气锅炉的快速响应特性有效平抑了余热供热波动,体现了将热供需指数与燃气锅炉出力相结合的策略优势。

5 结论

本文根据仿射优化理论,建立了基于热供需指数灵活调整燃气锅炉出力的仿射优化调度框架,为数据中心微网的经济性与鲁棒性协同优化提供了新方法。通过算例分析可得如下结论:

1) 本文借助仿射算法,刻画了微网中的不确定因素,在降低调度方案保守性的同时,通过追踪风光不确定因素对数据中心余热供热量以及住宅热需求的动态影响,清晰揭示了风速、光照强度因素对系统调度方案的影响过程;

2) 通过引入新能源峰值补贴机制、建立住宅热需求的数学模型,揭示了风速、光照强度噪声元通过间接路径与直接路径同步驱动数据中心余热供热量与住宅热需求的波动同源特性,并基于该特性掌握了余热供热量与热需求的趋势变化,同时在此基础上引入热供需指数,量化了数据中心余热供热量与住宅热需求之间的匹配状况;

3) 针对风速、光照强度波动引发的数据中心余热供热量与住宅热需求的耦合扰动,本文基于热供需指数动态调整燃气锅炉出力,充分发挥了燃气锅炉的灵活供能潜力,使得系统运行总成本的区间宽

度缩减了34.9%,天然气购买成本、未服务热需求的惩罚成本分别减少了39%、82%。

需要说明的是,本文所提方法存在局限性,即未考虑温度波动对住宅热需求的不确定影响。未来研究需要进一步融入基于气象预测的非线性修正模型,并探索高维不确定性下的分布式优化算法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] WANG P T, KOWALSKI S, GAO Z M, et al. District heating utilizing waste heat of a data center: high-temperature heat pumps[J]. *Energy and Buildings*, 2024, 315: 114327.
- [2] 李国柱, 崔美华, 黄凯良, 等. 数据中心余热利用现状及在建筑供暖中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(26): 11287-11295.
LI Guozhu, CUI Meihua, HUANG Kaijiang, et al. Current situation of data center waste heat utilization and its application in building heating[J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(26): 11287-11295.
- [3] 王强钢, 吴雪琴, 杨龙杰, 等. 考虑设备变工况特性和灵活性供需匹配的园区综合能源系统优化配置模型[J]. *电力自动化设备*, 2023, 43(3): 20-28, 37.
WANG Qianggang, WU Xuehui, YANG Longjie, et al. Optimal allocation of community integrated energy system considering off-design performance of device and flexible supply-demand matching[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(3): 20-28, 37.
- [4] 王杰, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 基于电-氢-热P2P交易的分布式智能电网低碳优化运行方法[J]. *电力系统自动化*, 2025, 49(9): 40-51.
WANG Jie, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Low-carbon operation optimization method for distributed smart grid based on electricity-hydrogen-heat peer-to-peer trading[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2025, 49(9): 40-51.
- [5] 孙健, 柯德平, 徐箭, 等. 基于高精度热泵模型的电热协同独立微网设备优化配置[J]. *电力自动化设备*, 2024, 44(7): 198-204, 213.
SUN Jian, KE Deping, XU Jian, et al. Optimal configuration of electric-heat cooperative independent micro-grid equipment based on accurate heat pump model[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2024, 44(7): 198-204, 213.
- [6] STIENECKER M. Impact of forecasted heat demand on day-ahead optimal scheduling and real time control of multi-energy systems[J]. *Energy*, 2024, 297: 131156.
- [7] ROMERO-QUETE D, GARCIA J R. An affine arithmetic-model predictive control approach for optimal economic dispatch of combined heat and power microgrids[J]. *Applied Energy*, 2019, 242: 1436-1447.
- [8] 李亚红, 王鹏翔, 彭斌, 等. 考虑供需匹配特性的冷热电联供系统运行策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(11): 52-62.
LI Yaohong, WANG Pengxiang, PENG Bin, et al. Operational strategy of a combined cooling, heating and power system considering the matching characteristics of supply and demand[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(11): 52-62.
- [9] 林冠吾. 改善供需匹配性的冷热电联供系统优化配置与主动调控策略研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.
LIN Guanwu. Study on the optimal allocation and active regulation strategy of CCHP system to improve the matching of

- supply and demand[D]. Lanzhou:Lanzhou University of Technology, 2022.
- [10] DU H, ZHOU X L, NORD N, et al. A new framework for evaluating and enhancing the performance of district heating systems integrated with data centres using short-term thermal energy storage[J]. Energy, 2025, 319: 134934.
- [11] 周星球, 郑凌蔚, 杨兰, 等. 考虑多重不确定性的综合能源系统日前优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2466-2473. ZHOU Xingqiu, ZHENG Lingwei, YANG Lan, et al. Day-ahead optimal dispatch of an integrated energy system considering multiple uncertainty[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2466-2473.
- [12] 张姝, 江洪辉, 臧天磊, 等. 考虑热储扩展碳排放流的多园区综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(19): 13-24. ZHANG Shu, JIANG Honghui, ZANG Tianlei, et al. Low-carbon economic dispatch of multi-park integrated energy systems considering augmented carbon emission flow of thermal storage[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(19): 13-24.
- [13] 尹博艺, 王灿, 翟昕. 考虑SOFC精细化建模的综合能源系统不确定性调度[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(21): 149-159. YIN Boyi, WANG Can, ZHAI Xin. Uncertainty-aware scheduling of integrated energy system considering refined modeling for solid oxide fuel cell[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(21): 149-159.
- [14] 李振坤, 游胜苒, 李景岳, 等. 计及动态定价机制和需求响应的社区综合能源系统优化运行[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 56-63. LI Zhenkun, YOU Shengran, LI Jingyue, et al. Optimized operation of community integrated energy systems considering dynamic pricing mechanism and demand response[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 56-63.
- [15] WU W C, DU Y J, QIAN H J, et al. Enhancing the waste heat utilization of industrial park: a heat pump-centric network integration approach for multiple heat sources and users[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 306: 118306.
- [16] LIU X H, HOU G S, YANG L. Optimizing data center energy consumption via energy complementarity scheduling[J]. Energy Reports, 2024, 12: 5990-5997.
- [17] 黄悦华, 陈庆, 张磊, 等. 考虑园区自备热电联产机组运行约束的电热耦合系统动态优化调度[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4433-4447. HUANG Yuehua, CHEN Qing, ZHANG Lei, et al. Dynamic optimal scheduling of combined electrical and heat system considering state operation constraints of CHP units in the park[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4433-4447.
- [18] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7905-7924. ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7905-7924.
- [19] 陈晓龙, 孙嘉, 张俊林, 等. 新能源消纳与用户侧响应主从博弈的配电网智能软开关选址策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(2): 57-63. CHEN Xiaolong, SUN Jia, ZHANG Junlin, et al. Soft open point siting scheme for distribution network with Stackelberg game between new energy accommodation and user-side response[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 57-63.
- [20] 李鸿, 朱继忠, 董瀚江. 考虑协变量因素的多能微电网两阶段分布鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(3): 822-834. LI Hong, ZHU Jizhong, DONG Hanjiang. Two-stage distributionally robust optimization scheduling for multi-energy microgrid considering covariate factors[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(3): 822-834.
- [21] 张虹, 王辛玮, 王明晨, 等. 计及灰水负荷预测的区域型热补偿系统调控策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(11): 18-25. ZHANG Hong, WANG Xinwei, WANG Mingchen, et al. Regulation strategy of regional thermal compensation system considering grey water load forecasting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(11): 18-25.
- [22] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同促进碳减排的电热优化调度[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3803-3813. ZHU Weiye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering decreasing carbon emission by coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3803-3813.
- [23] MA Y Z, DENG L, QI C Y, et al. Research on integrated energy system planning optimization considering carbon trading and electricity-thermal energy storage synergy[J]. Journal of Energy Engineering, 2025, 151(6): 04025081.
- [24] LIN X R, LI J, ZHONG W, et al. Economic and stable scheduling strategy for electricity-thermal-hydrogen-gas integrated energy systems based on online MPC under dynamic supply-demand interaction[J]. Renewable Energy, 2025, 248: 123111.
- [25] 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. Coordinated operation for data center and power system in the context of energy Internet(I): energy demand management model of data center[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3161-3177.
- [26] 崔杨, 程禹烽, 赵钰婷, 等. 考虑特性分类批处理负荷可调节能力的数据中心微网灵活性设备分布鲁棒容量配置方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 180-188. CUI Yang, CHENG Yufeng, ZHAO Yuting, et al. Distributionally robust capacity allocation method for flexibility device of data center microgrid considering adjustable capability of characteristic classification batch processing loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 180-188.
- [27] TANG K J, DONG S F, ZHU C Z, et al. Affine arithmetic-based coordinated interval power flow of integrated transmission and distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4116-4132.
- [28] 陈飞雄, 郭奕鑫, 邵振国, 等. 基于模型预测控制的多能源微网仿射优化调度[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(9): 24-31, 48. CHEN Feixiong, GUO Yixin, SHAO Zhenguo, et al. Affine optimal dispatch of multi-energy microgrid based on model predictive control[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(9): 24-31, 48.
- [29] Google. Borg cluster traces from Google[EB/OL]. (2015-07-30)[2025-03-20]. <https://github.com/google/cluster-data>.

作者简介:

张虹(1973—),女,教授,博士,通信作者,主要研究方向为新能源并网发电技术、电力系统稳定与控制(E-mail: jdlzh2000@126.com);

刘利军(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统优化调度(E-mail: 2268674245@qq.com)。

(编辑 陆丹)

Affine optimal scheduling for flexible energy supply in data center microgrid considering homologous characteristics of thermal supply and demand fluctuations

ZHANG Hong¹, LIU Lijun¹, ZHANG Zexi², DONG Haiyun¹, ZHU Hongbo³, XING Dacheng¹

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Dingzhou Power Supply Company of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Dingzhou 073000, China;

3. Jilin Power Supply Company of State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Jilin 132013, China)

Abstract: In the data center microgrid, the fluctuating nature of wind and photovoltaic power generation simultaneously affects the waste heat supply and the heating demand of residential buildings, forming the homologous characteristics of thermal supply and demand fluctuations. In order to enhance the system's ability to cope with uncertainties, an affine optimal scheduling model for data center microgrid is proposed, which takes the homologous characteristics of thermal supply and demand fluctuations into account. By establishing the affine models of waste heat and heating demand under the influence of renewable energy output, the limitation of traditional interval optimization model that treat the two as independent uncertain quantities is overcome, revealing their homologous characteristics of fluctuations. Based on this, a heat supply-demand index is proposed, based on which, the output of gas boiler is dynamically adjusted to overcome the regulation lag problem of passive response strategy. The analysis results of case study show that the proposed model can effectively enhance the matching effect between waste heat and thermal load, improving the operational flexibility of gas boiler while enhancing the economy of microgrid.

Key words: data center microgrid; waste heat heating; supply-demand correlation; affine optimization; flexible energy supply