

文章编号:1674-7607(2025)12-2198-09

DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2025.250400

# 基于小型核反应堆的综合能源系统 容量优化与综合评价

唐特<sup>1</sup>, 姜旭东<sup>1</sup>, 杨宇辰<sup>2</sup>, 张一鸣<sup>2</sup>, 王晨晨<sup>1</sup>, 武心壮<sup>1</sup>, 韩小渠<sup>2</sup>

(1. 上海核工程研究设计院股份有限公司, 上海 200233;

2. 西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西西安 710049)

**摘要:** 为解决数据中心高能耗与碳排放问题, 创新性地提出基于小型核反应堆的核风光储综合能源系统架构, 通过耦合核能基荷特性与风光储互补性, 构建了电-冷-热多能协同优化模型。引入吸收式制冷优先策略, 结合经济性、能效、环境性、可靠性四目标优化框架, 采用多目标猫群优化算法进行求解, 并且通过优序图法和基于指标相关性权重确定 (CRITIC) 法进行主客观权重融合评价。结果表明: 相较于传统三目标优化的吸收式制冷优先方案, 四目标优化的吸收式制冷优先方案使系统净现成本增加 1.2%, 全生命周期碳排放量增加 9.9%, 系统自供电率提升 1.3%, 接近度为 0.675 7, 验证了所提出方法的有效性, 为核能耦合数据中心供能提供了技术可行路径。

**关键词:** 小型核反应堆; 核风光储综合能源系统; 容量优化; 运行策略

中图分类号: TL413.1

文献标志码: A

学科分类号: 470.30

## Capacity Optimization and Comprehensive Evaluation of Integrated Energy System Based on Small Modular Reactor

TANG Te<sup>1</sup>, JIANG Xudong<sup>1</sup>, YANG Yuchen<sup>2</sup>, ZHANG Yiming<sup>2</sup>, WANG Chenchen<sup>1</sup>,  
WU Xinzhuang<sup>1</sup>, HAN Xiaoqu<sup>2</sup>

(1. Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University,  
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**Abstract:** To address the issues of high energy consumption and carbon emissions in data centers, an innovative nuclear-wind-solar-storage integrated energy system architecture based on small modular reactors was proposed. By coupling the base load characteristics of nuclear energy with the complementarity of wind, solar, and storage, an electrical-cooling-heating multi-energy collaborative optimization model was constructed. By introducing an absorption cooling priority strategy within a four-objective optimization framework containing economy, energy efficiency, environmental impact, and reliability, solutions were conducted by a multi-objective cat swarm optimization algorithm, and combined with the preferred-sequence graph method and criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) method, an evaluation was carried out based on subjective-objective weighting. Results demonstrate that, compared with the traditional three-objective optimization electrical cooling priority scheme, for the four-objective optimization absorption cooling priority scheme, the net present cost of system is increased by 1.2%, and the

收稿日期: 2025-06-30 修订日期: 2025-07-03

作者简介: 唐特 (1986—), 男, 广东汕头人, 硕士, 研究方向为先进核能与综合利用, E-mail: tangte@snerdi.com.cn.

carbon emission during life-cycle is increased by 9.9%, the self-sufficiency rate of system is improved by 1.3%, and the approach index reaches 0.675 7. It is validated the effectiveness of the proposed method, and relevant researches can provide a technically feasible pathway for coupling nuclear energy with data centers.

**Key words:** small modular reactor; nuclear-wind-solar-storage integrated energy system; capacity optimization; operating strategy

近年来,随着信息技术产业的迅猛发展,全球数据中心规模呈现指数级扩张态势。据国际能源署(IEA)统计,2022 年全球数据中心总耗电量达 460 TW·h,占全球电力消费总量的 2%,其单位能耗强度(0.65 kg/(kW·h),以 CO<sub>2</sub> 计,下同)显著高于工业领域平均水平(0.32 kg/(kW·h))<sup>[1-2]</sup>。这与人工智能(AI)训练等新兴场景的高密度算力需求密切相关,自 2012 年以来,AI 训练任务的算力需求每 3~4 个月即翻倍增长,导致数据中心电力需求增速远超传统行业<sup>[3]</sup>。在此背景下,需要思考如何实现数据中心清洁、高效、可控的能源供给。

传统风光储综合能源系统虽具备一定低碳潜力,但其供电稳定性难以满足数据中心对连续性、高可靠性的严苛要求。而核能与可再生能源的协同互补特性为破解这一矛盾提供了新思路:小型核反应堆作为基荷电源提供稳定电力输出,同时与光伏/风电形成时空互补,有效平抑风光出力波动<sup>[4]</sup>。现有研究多致力于研究传统风光储综合能源系统在不同场景下的系统容量配置、运行策略问题,以及完善其多目标评估模型。在系统容量配置方面,文献[5]结合经济效益和环境效益,考虑云计算中心年总负荷需求,采用改进的差分进化算法解决了工业园区供能系统冷热源的选择问题并强调了在优化运行模式下可用设备的配置。文献[6]提出了基于非支配排序遗传算法(NSGA-II)的双层优化模型,以成本和烟效率为目标针对某地区传统能源系统的容量及运行策略进行优化。文献[7]利用多目标粒子群算法对 3 种可再生能源耦合的综合能源系统进行了容量配置优化。

在系统优化方法方面,文献[8]提出一种基于改进多目标正弦余弦算法的多目标优化框架对配电网中的储能系统和分布式发电机进行最优规划。文献[9]提出一种结合多目标优化与多标准评估的集成框架,针对太阳能辅助的固体氧化物燃料电池冷热电联供系统进行多目标优化和多标准评价。文

献[10]和文献[11]应用混合整数线性规划(MILP)方法分别对我国分布式能源系统和德国某城市能源系统进行优化,结果表明基于 MILP 的优化框架可以提高能源供应系统的灵活性及经济性。文献[12]针对与可再生能源耦合的冷热电联供系统建立了 MILP 模型,将该模型应用于 5 个不同的建筑,以评估在 2 种优化模式下的经济性和环境性,用于确定能源技术的最佳组合、容量和运行策略。文献[13]建立了多目标数学规划模型,对所研究天然气冷热三联供系统和混合能源分布式系统在同一场景下进行优化和比较。文献[14]采用改进的多目标粒子群优化算法求解,得到了所设计的包含太阳能和风能可再生能源的创新冷热电联供系统的最优解,同时结果表明该系统在经济性和环保性上具有显著优势。

目前,在核能耦合数据中心供能领域面临双重挑战。第一,协同控制策略尚未充分考虑数据中心特有的负荷特性,数据中心冷热电负荷呈现高密度和高可靠特征,传统风光火储系统优化模型未纳入反应堆定负荷运行约束和余热利用效率,系统可靠性评估存在偏差。第二,评估模型缺乏场景适配性,现有研究多采用单一评估目标,未能体现核能基荷供电与余热利用的经济、环境和技术的综合价值。

为此,提出一种面向数据中心场景的核风光储综合能源系统冷负荷跟随策略,综合考虑电-冷-热多能耦合特性及不同优先供冷模式的协同优化需求,以经济性、能效、环境性及可靠性为多维度优化目标,构建了数据中心综合能源系统容量配置优化模型。在 Python 软件中采用多目标猫群优化(MOCSO)算法开展模型求解,并且通过融合优序图法与基于指标相关性权重确定(CRITIC)法的主客观权重分析,对优化方案进行综合评估。算例设置不同的方案对比,以验证所提出方法在提升系统综合性能方面的有效性,为核能耦合数据中心供能提供技术可行路径的参考。

# 1 系统模型

## 1.1 系统构型

构建的核风光储综合能源系统采用“小型堆基荷支撑+可再生能源波动适配”的复合架构,如图 1 所示。该系统以小型核反应堆为核心基荷电源,其改造设计允许其长期在电热联产模式下定负荷运行,通过两级换热系统梯级利用堆芯余热为数据中心提供基础冷负荷;在此基础上,集成光伏、光热和风电能量输入单元,以及磷酸铁锂电池等储能系统,动态平衡可再生能源出力波动,当风光出力不足时由储能系统进行补偿;最后,通过燃气轮机补燃提高冷热电自供率,形成多能互补、源-储-荷三级调控和复合冷源供应体系。

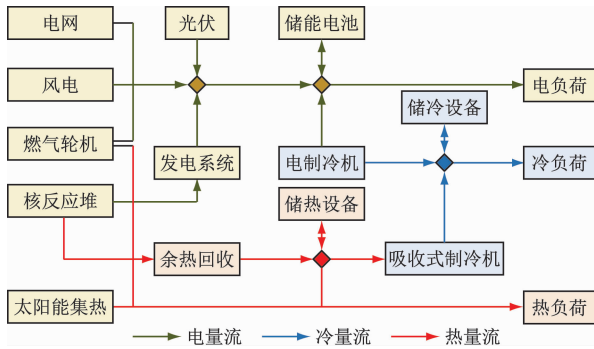


图 1 核风光储综合能源系统结构

Fig. 1 Structure of nuclear-wind-solar-storage integrated energy system

## 1.2 设备出力模型

### (1) 小型核反应堆。

小型核反应堆是一种清洁、稳定的基荷能源,即可持续稳定输出电力,稳定性类似于传统燃煤机组。其发电和供热的数学模型为

$$P_{r,h}(t) = Q_{smr}(t)\eta_h \quad (1)$$

$$P_{r,e}(t) = Q_{smr}(t)\eta_e \quad (2)$$

式中: $Q_{smr}(t)$ 为堆芯热功率; $P_{r,h}(t)$ 、 $P_{r,e}(t)$ 分别为反应堆供热功率和发电功率; $\eta_h$ 、 $\eta_e$ 分别为反应堆供热效率和发电效率; $t$ 为时刻。

### (2) 太阳能发电系统。

光伏发电组件的数学模型<sup>[15]</sup>为

$$P_{pv}(t) = A_{pv}G_{pv}(t)\beta_{pv}[1 + k_1(T_c(t) - T_r)] \quad (3)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为光伏发电功率; $A_{pv}$ 为光伏发电组件面积; $\beta_{pv}$ 为太阳能转化效率; $G_{pv}(t)$ 为太阳辐射强度; $k_1$ 为组件温度系数; $T_c(t)$ 、 $T_r$ 分别为光伏面板温度和参考温度。

### (3) 太阳能集热系统。

太阳能集热器的数学模型<sup>[16]</sup>为

$$Q_{th}(t) = S_{th}I_{th}(t)\eta_{th} \quad (4)$$

式中: $Q_{th}(t)$ 为太阳能集热器热功率; $S_{th}$ 为太阳能集热器面积; $I_{th}(t)$ 为单位面积太阳辐射强度; $\eta_{th}$ 为太阳能集热器供热效率。

### (4) 风力发电系统。

采用曲线拟合的方法得到风电机组输出功率特性方程<sup>[17]</sup>,其函数形式为

$$P_{wr}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v(t) < v_i \\ av^3(t) + bv^2(t) + cv(t) + d, & v_i \leq v(t) < v_r \\ P_{wr}(t), & v_r \leq v(t) < v_0 \\ 0, & v(t) \geq v_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 均为风力涡轮机的出力系数; $v_i$ 、 $v_r$ 、 $v_0$ 分别为风力涡轮机的切入速度、切出速度和额定速度; $P_{wr}(t)$ 、 $P_{wt}(t)$ 分别为风力机额定功率和实际功率。

### (5) 燃气轮机。

燃气轮机额定发电效率、供热效率与其设备额定容量的拟合函数关系式<sup>[18]</sup>为

$$\eta_{gt,er} = 0.2188 + 2.21 \times 10^{-5} P_{gt,r} - 1.02 \times 10^{-9} (P_{gt,r})^2 \quad (6)$$

$$\eta_{gt,hr} = -0.025 \ln(P_{gt,r}) + 0.64 \quad (7)$$

式中: $\eta_{gt,er}$ 为燃气轮机额定发电效率; $\eta_{gt,hr}$ 为燃气轮机额定供热效率; $P_{gt,r}$ 为燃气轮机额定发电功率。

### (6) 电制冷机。

电制冷机核心机制在于采纳了蒸汽压缩式制冷技术,通过电力为压缩机提供动力。其数学模型<sup>[19]</sup>为

$$Q_{ec}(t) = P_{ec}(t)\epsilon_{ec} \quad (8)$$

式中: $Q_{ec}(t)$ 为电制冷机输出冷功率; $P_{ec}(t)$ 为电制冷机输入电功率; $\epsilon_{ec}$ 为电制冷机制冷系数。

### (7) 吸收式制冷机。

吸收式制冷机是采用热驱动的制冷技术,并选择溴化锂溶液作为其工作介质,吸收式制冷机数学模型<sup>[19]</sup>为

$$Q_{ac}(t) = P_{ac}(t)\epsilon_{ac} \quad (9)$$

式中: $Q_{ac}(t)$ 为吸收式制冷机输出冷功率; $P_{ac}(t)$ 为吸收式制冷机输入热功率; $\epsilon_{ac}$ 为吸收式制冷机制冷系数。

### (8) 余热回收装置。

为了实现核反应堆余热的最大化利用,余热回收装置从反应堆中回收余热。其数学模型<sup>[18]</sup>为

$$Q_{whb}(t) = Q_H(t)\eta_{whb} \quad (10)$$

式中: $Q_{whb}(t)$ 为余热回收装置热功率; $Q_H(t)$ 为余热能量; $\eta_{whb}$ 为余热回收装置的换热效率。

(9) 补燃锅炉。

为了满足热负荷及吸收式制冷的热量需求,通过燃气补燃锅炉对热负荷进行补充。其数学模型<sup>[18]</sup>为

$$Q_{rb}(t) = F_{rb} \eta_{rb}(t) \quad (11)$$

式中: $Q_{rb}(t)$ 为补燃锅炉供热量; $F_{rb}$ 为天然气热值; $\eta_{rb}(t)$ 为补燃锅炉部分负荷率。

(10) 储能装置。

综合能源系统中包括电池、储冷罐、储热罐 3 种储能设备,能实现能量的时序转移,平抑负荷波动,提高系统运行的可靠性。储能设备的通用数学模型<sup>[20]</sup>为

$$E_s(t+1) = E_s(t)(1 - \eta_{m,s}) + \left( P_{cha,s}(t) \eta_{cha,s} - \frac{P_{dis,s}(t)}{\eta_{dis,s}} \right) \quad (12)$$

$$s \in \{ele, th, cl\}$$

式中: $E_s(t+1)$ 为  $s$  设备  $t+1$  时刻存储的能量; $E_s(t)$ 为  $s$  设备  $t$  时刻存储的能量; $P_{cha,s}(t)$ 为  $s$  设备  $t$  时刻的充能功率; $P_{dis,s}(t)$ 为  $s$  设备  $t$  时刻的释能功率; $\eta_{cha,s}$ 、 $\eta_{dis,s}$ 、 $\eta_{m,s}$  分别为  $s$  设备的充能效率、释能效率、自损率;ele、cl、th 分别表示电池、储冷罐、储热罐。

## 2 优化模型

为适应数据中心场景的能量管理需求,通过建立涵盖经济性、能效、环境性、可靠性等指标的多维评价体系对能源系统进行多目标容量优化。重点阐述模型建立,包括目标函数设定、边界条件约束及运行控制策略。

### 2.1 目标函数

生命周期包括从原料提取到生产、经营、使用、寿命结束的整个过程。将经济性、能效、环境性指标作为基础优化目标,而可靠性作为附加优化目标。

(1) 经济性指标。净现成本是评估项目时间价值总成本的关键指标,包含初始投资、税收及运维成本等。其计算公式为

$$C_{NP} = C_{cap} + C_{om} + C_{rep} + C_{refule} + C_{dec} \quad (13)$$

式中: $C_{NP}$ 为综合能源系统的净现成本(NPC); $C_{cap}$ 、 $C_{om}$ 、 $C_{rep}$ 、 $C_{refule}$ 、 $C_{dec}$  分别为系统初始投资成本、运行维护成本、更换成本、燃料成本、退役成本及设备末端价值。

(2) 能效指标。可再生能源供能量占比用于衡量综合能源系统在能效性方面的实际效益,在综合能源系统中,可再生能源供能比是能效关键指标之一。其计算公式为

$$E_{PRS} = \frac{E_{sp} + E_{st} + E_w}{E_{total}} \quad (14)$$

式中: $E_{PRS}$ 为综合能源系统的可再生能源供能比(EPRS); $E_{total}$ 为综合能源系统的总供能; $E_{sp}$ 为光伏总发电量; $E_{st}$ 为太阳能集热器总供热量; $E_w$ 为风力发电机总发电量。

(3) 环境性指标。系统生命周期碳排放量的计算通常涉及将综合能源系统在整个生命周期内的所有相关阶段碳排放量进行累加。其计算公式为

$$L_{CCE} = \sum C_t \times F_t \quad (15)$$

式中: $L_{CCE}$ 为综合能源系统的生命周期碳排放量; $C_t$ 为  $t$  时刻综合能源系统的碳排放系数; $F_t$ 为  $t$  时刻综合能源系统的碳排放量。

(4) 可靠性指标。为了减少综合能源系统对电网的依赖性,把电网购电之外的自供电量作为优化指标。相关计算公式为

$$S_S = 1 - P_{grid}/(E_l + P_{ec}) \quad (16)$$

式中: $S_S$ 为系统自供电率; $P_{grid}$ 为电网购电量; $E_l$ 为电负荷。

### 2.2 约束条件

为确保数据中心核风光储综合能源系统的稳定运行,系统能量平衡是核心约束条件,具体如下。

(1) 电量平衡需要满足:

$$E_l(t) \leq P_{pv}(t) + P_{wt}(t) + P_{gt,e}(t) + P_{r,e}(t) + P_{grid}(t) - P_{ec}(t) + P_{dis,ele}(t) - P_{cha,ele}(t) \quad (17)$$

式中: $P_{gt,e}(t)$ 为燃气轮机发电功率。

(2) 冷量平衡需要满足:

$$Q_{cl}(t) \leq Q_{ac}(t) + Q_{ec}(t) + P_{dis,cl}(t) - P_{cha,cl}(t) \quad (18)$$

式中: $Q_{cl}(t)$ 为冷负荷。

(3) 热量平衡需要满足:

$$Q_{hl}(t) \leq P_{r,h}(t) + Q_{th}(t) + P_{gt,h}(t) + Q_{rb}(t) - P_{ac}(t) + P_{dis,th}(t) - P_{cha,th}(t) \quad (19)$$

式中: $Q_{hl}(t)$ 为热负荷; $P_{gt,h}(t)$ 为燃气轮机供热功率。

## 3 运行策略

针对数据中心冷-电-热复合能源需求特征,通过双供冷方式优先保障冷负荷需求,其次保障电力供应稳定性,最终满足用户热负荷。对于供冷方式,设置 2 种优先供冷方式,分别是优先使用电制冷机(PEC)供冷和优先使用吸收式制冷机(PAC)供冷。图 2 为优先使用吸收式制冷机供冷策略。优先使用电制冷机供冷策略与之类似,即优先使用电制冷供冷,吸收式制冷作为补充。



器、16 GB 运行内存的计算机上完成。MOCSO 算法迭代次数为 50,种群数量为 100,存档数量为 60,搜索模式概率为 0.8,跟踪模式切换概率为 0.5,加速因子(用于平衡全局与局部搜索)为 0.5 和 1。其

余设备参数见表 2(吸收式制冷机和电制冷机的效率分别为各自的制冷系数),小型核反应堆的更换成本为堆芯的更换成本,设备末端价值取初投资的 3%。

表 2 其余设备参数

Tab. 2 Parameters of other equipment

设备	效率	投资成本	运维成本	运行时间/a	更换成本
核反应堆	0.23	15 850 元/kW	236 元/kW	40	143 000 000 元/次
光伏发电组件		2 489 元/kW	80 元/kW	25	2 000 元/kW
太阳能集热器	0.45	700 元/kW	20 元/kW	25	500 元/kW
风电机组		6 000 元/kW	240 元/kW	25	4 000 元/kW
燃气轮机	0.38	3 750 元/kW	150 元/kW	10	3 750 元/kW
补燃锅炉	0.80	1 600 元/kW	16 元/kW	5	1 600 元/kW
吸收式制冷机	1.20	1 500 元/kW	15 元/kW	20	900 元/kW
电制冷机	3.50	1 000 元/kW	35 元/kW	20	800 元/kW
余热锅炉	0.90	851 元/kW	17 元/kW	15	800 元/kW
储能电池	0.96	1 600 元/(kW·h)	16 元/(kW·h)	5	1 600 元/(kW·h)
储热设备	0.95	67 元/(kW·h)	0.67 元/(kW·h)	5	67 元/(kW·h)
储冷设备	0.92	90 元/(kW·h)	0.9 元/(kW·h)	5	90 元/(kW·h)

4.1 方案设计

通过提出的构型,从经济性、能效、环境性、可靠性 4 个方面对构型中各设备进行容量配置优化。根据不同的运行策略和优化目标制定了 4 种优化方案,如表 3 所示。

表 3 系统优化方案

Tab. 3 System optimization schemes

方案	优化目标函数	运行策略
S1	$C_{NP}, E_{PRS}, L_{CCE}$	PEC
S2	$C_{NP}, E_{PRS}, L_{CCE}$	PAC
S3	$C_{NP}, E_{PRS}, L_{CCE}, S_s$	PEC
S4	$C_{NP}, E_{PRS}, L_{CCE}, S_s$	PAC

4.2 结果分析

(1) 容量配置分析。根据前文提出的系统构型及 4 种优化方案进行容量配置。表 4 为不同方案容量配置结果。配置结果主要与吸收式制冷和电制冷的容量占比相关;此外,随着优化目标函数数目的增加,各项指标分布得更均匀。

表 5 为 4 种方案目标函数的优化结果。由表 5 可知,相较于三目标优化方案,四目标优化后方案可靠性指标均有所上升。对于不同供冷策略:S2 方案自供电率相较于 S1 方案提升了 10.8%,S4 方案自供电率相较于 S3 方案提升了 10.1%,其余指标均有降低。对于不同优化目标函数:S3 方案相较于 S1

表 4 不同方案容量配置结果

Tab. 4 Capacity allocation results of different schemes

设备参数	S1	S2	S3	S4
光伏发电组件面积/m <sup>2</sup>	900 026	930 723	905 848	850 723
太阳能集热面积/m <sup>2</sup>	5 000	5 000	5 000	5 000
风力发电机功率/kW	54 000	43 500	45 000	37 500
核反应堆功率/kW	667 000	667 000	667 000	667 000
燃气轮机功率/kW	0	0	2 000	2 000
储能电池容量/(kW·h)	1 500	13 600	26 450	28 570
储热设备容量/(kW·h)	5 034	6 453	7 800	7 435
储冷设备容量/(kW·h)	12 650	11 892	15 780	14 465
吸收式制冷功率/kW	10 000	120 000	26 400	141 378
电制冷设备功率/kW	62 000	24 000	58 000	15 785
余热锅炉功率/kW	11 111	137 053	33 000	157 087
补燃锅炉功率/kW	0	0	2 000	1 600

方案, $C_{NP}$ 、 $L_{CCE}$  和  $S_s$  分别提升了 0.4%、12.6% 和 1.9%,而  $E_{PRS}$  降低了 3.3%;S4 方案相较于 S2 方案, $C_{NP}$ 、 $L_{CCE}$  和  $S_s$  分别增加了 1.2%、9.9% 和 1.3%,而  $E_{PRS}$  降低了 8.9%。因此,通过多目标优化,可以有效提升综合能源系统的自供电率,进而提高系统的可靠性。

(2) 方案评价。为了从多种方案中选出最优方案,通过优序图法结合 CRITIC 法确定综合权重,计算方法详见文献[22]。通过优序图法和 CRITIC 法

表 5 不同方案目标函数值

Tab. 5 Objective function values of different schemes

方案	$C_{NP}/\text{元}$	$L_{CCE}/\text{kg}$	$E_{PRS}/\%$	$S_s/\%$
S1	2 015 101	55 730	9.10	84.30
S2	1 829 042	50 950	9.00	93.40
S3	2 023 966	62 731	8.80	85.90
S4	1 851 343	56 004	8.20	94.60

得到综合权重为 (0.213 6, 0.130 3, 0.060 7, 0.595 4)。通过综合权重对上述方案进行排序的结果见表 6。

通过表 6 可知, S4 方案的综合效果最优, S1 方案的综合效果最差。因此, 选择 S1 和 S4 方案作为分析目标, 对 2 种方案中系统购电量和吸收式制冷量占比进行分析。

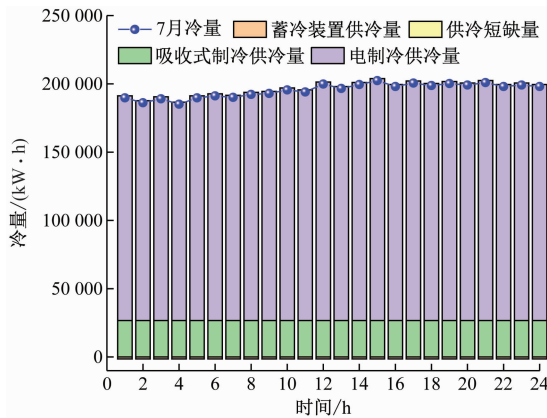
(3) 性能对比分析。图 5 展示了 S1 和 S4 方案 7 月典型日的冷量平衡调度图。由图 5(a) 可知, S1 方案的冷负荷主要由电制冷机供应, 吸收式制冷机

表 6 不同方案排序结果

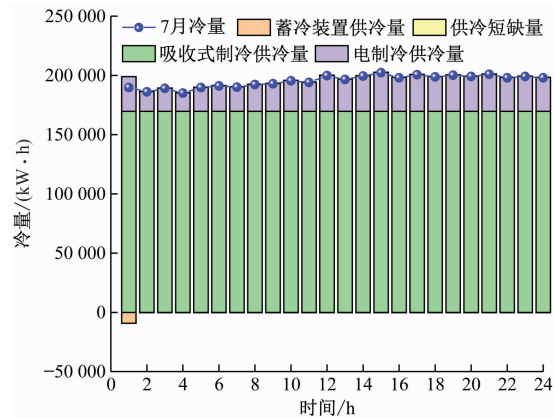
Tab. 6 Ranking results for different schemes

方案	接近度
S4	0.675 7
S2	0.580 0
S3	0.476 9
S1	0.317 5

作为补充。由图 5(b) 可知, S4 方案的冷负荷主要由吸收式制冷机供应, 在系统中, 电制冷机作为补充设备, 多余的冷量存储于蓄冷装置中。优先使用吸收式制冷机能够有效利用反应堆的余热, 降低系统的净现成本, 从而提升系统的经济性。此外, 与电制冷机相比, 吸收式制冷机避免了向电网购电所产生的高额成本, 同时减少了因购电而产生的碳排放量。因此, 优先使用吸收式制冷机不仅具有经济效益, 还有助于降低系统的碳排放量。



(a) S1 方案



(b) S4 方案

图 5 7 月典型日冷量平衡调度图

Fig. 5 Scheduling diagram of cooling load balance for a typical day in July

图 6 展示了 S1 和 S4 方案的全年发电量占比。S1 方案中, 小型核反应堆发电量占比超过 65%, 可再生能源发电量占比为 10% 左右; S4 方案中, 燃气轮机发电量占比为 2%。除 1、2、10 月外, 2 种方案可再生能源发电量占比超过 10%, 在 5—7 月发电量最高占比约为 18%, 这与夏季风光资源丰富相关。S1 方案优先使用电制冷机供冷, 其电网购电量远高于 S4 方案, 对电网的依赖程度高, 可靠性较差。因此, 优先使用吸收式制冷供冷的 S4 方案对电网的依赖程度较低, 可靠性更好。

## 5 结论

对某数据中心开展了核风光储综合能源系统容量配置研究, 建立了小型核反应堆的综合能源系统

构型, 并且对关键设备进行建模, 从经济性、能效、环境性、可靠性等方面对系统进行优化, 针对不同的供冷方式和优化目标提出了 4 种方案, 使用优序图法和 CRITIC 法对方案进行评价, 得到以下结论:

(1) 小型核反应堆作为稳定基荷电源可以提供数据中心 80% 以上的基础电力需求, 大幅度减少了对电网的峰时购电依赖。核风光储综合能源系统中的可再生能源与核电形成动态互补, 平抑新能源出力波动, 使系统整体自供电率提升至 94.6%。

(2) 所提出的 2 种运行策略均可以满足数据中心的供能需求, 在传统的三目标优化情况下, 吸收式制冷优先供冷策略更适用于数据中心场景。与电制冷优先策略 (S1 方案) 相比, 吸收式制冷优先策略 (S2 方案) 的系统净现成本降低 9.2%, 全生命周期

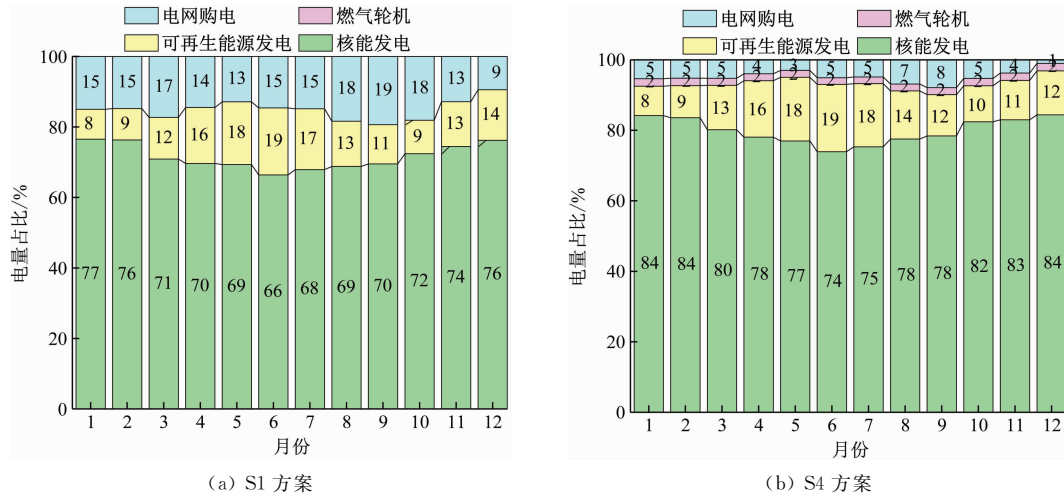


图 6 不同系统方案电网购电量分析

Fig. 6 Analysis of purchase power from power grid under different system configurations

碳排放量降低 8.6%，自供电率提升 10.8%。

(3) 随着多目标优化维度的扩展,系统综合性进一步提升。四目标优化的吸收式制冷机优先方案(S4 方案)相较于传统三目标优化的吸收式制冷优先方案(S2 方案)系统,净现成本增加 1.2%,全生命周期碳排放量增加 9.9%,系统自供电率提升 1.3%,接近度为 0.675 7,验证了 S4 方案为最优方案。

后续工作将聚焦化工园区、偏远哨站等更复杂的能级匹配场景,结合商用数学优化求解器和多目标优化算法构建多层次容量优化与运行调度架构,助力核能多维度的深层次综合利用。

参考文献:

[1] 乔卿丞. 绿色数据中心发展趋势分析[J]. 中国管理信息化, 2021, 24(10): 109-110.  
 QIAO Qingcheng. Analysis of the development trend of green data centers[J]. *China Management Informationization*, 2021, 24(10): 109-110.

[2] 李学伟, 温亮. 数据中心用电趋势及优化策略研究[J]. 电信快报, 2025(7): 45-48.  
 LI Xuewei, WEN Liang. Data center electricity usage trend and optimization strategy research[J]. *Telecommunications Information*, 2025(7): 45-48.

[3] 李瑞璐, 那什. AI 耗能困境并非无解之题[N]. 人民邮电, 2025-01-16(005).

[4] 王永真, 唐豪, 魏一鸣, 等. 中国数据中心综合能耗及其灵活性预测[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2025, 27(2): 12-18.  
 WANG Yongzhen, TANG Hao, WEI Yiming, et al. Comprehensive energy consumption and flexibility forecast of data centers in China[J]. *Journal of Bei-*

*jing Institute of Technology (Social Sciences Edition)*, 2025, 27(2): 12-18.

[5] GUAN Xuan, ZHANG Hualing, XUE Chunyang. A method of selecting cold and heat sources for enterprises in an industrial park with combined cooling, heating, and power[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 190: 608-617.

[6] RAN Jingyu, SONG Yang, ZHOU Shiyu, et al. A bi-level optimization method for regional integrated energy system considering uncertainty and load prediction under climate change[J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 84: 108527.

[7] PARVIN M, YOUSEFI H, NOOROLLAHI Y. Techno-economic optimization of a renewable micro grid using multi-objective particle swarm optimization algorithm[J]. *Energy Conversion and Management*, 2023, 277: 116639.

[8] AHMADI B, CEYLAN O, OZDEMIR A, et al. A multi-objective framework for distributed energy resources planning and storage management[J]. *Applied Energy*, 2022, 314: 118887.

[9] JING Rui, ZHU Xingyi, ZHU Zhiyi, et al. A multi-objective optimization and multi-criteria evaluation integrated framework for distributed energy system optimal planning[J]. *Energy Conversion and Management*, 2018, 166: 445-462.

[10] ZHOU Zhe, LIU Pei, LI Zheng, et al. An engineering approach to the optimal design of distributed energy systems in China[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 53(2): 387-396.

[11] MOSER A, MUSCHICK D, GÖLLES M, et al. A MILP-based modular energy management system for urban multi-energy systems: performance and sensitivity analysis [J]. *Applied Energy*, 2020, 261:

- 114342.
- [12] ZHU Xingyi, ZHAN Xiangyan, LIANG Hao, et al. The optimal design and operation strategy of renewable energy-CCHP coupled system applied in five building objects[J]. **Renewable Energy**, 2020, 146: 2700-2715.
- [13] HOU Jianmin, WANG Junjie, ZHOU Ying, et al. Distributed energy systems; multi-objective optimization and evaluation under different operational strategies [J]. **Journal of Cleaner Production**, 2021, 280: 124050.
- [14] SOHEYLI S, SHAFIEI MAYAM M H, MEHRJOO M. Modeling a novel CCHP system including solar and wind renewable energy resources and sizing by a CC-MOPSO algorithm[J]. **Applied Energy**, 2016, 184: 375-395.
- [15] 王筱, 李高青, 姬生才, 等. 计及风光不确定性的互补发电系统容量优化配置研究[J]. **动力工程学报**, 2024, 44(11): 1750-1759.
- WANG Xiao, LI Gaoqing, JI Shengcai, et al. Research on optimal capacity configuration of complementary power generation system considering wind-solar uncertainty[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2024, 44(11): 1750-1759.
- [16] 孙雯雯, 徐玉杰, 丁捷, 等. 高原高寒地区可再生能源与储能集成供能系统研究[J]. **储能科学与技术**, 2019, 8(4): 678-688.
- SUN Wenwen, XU Yujie, DING Jie, et al. An energy system for the integration of renewable energy with energy storage in a frigid plateau region[J]. **Energy Storage Science and Technology**, 2019, 8(4): 678-688.
- [17] 刘忠, 张乐, 寇攀高, 等. 并网型风电-光伏-抽水蓄能-蓄电池系统容量优化配置[J]. **动力工程学报**, 2023, 43(9): 1151-1159.
- LIU Zhong, ZHANG Le, KOU Pangao, et al. Capacity allocation optimization on grid connected system consisting of wind power, photovoltaic power, pumped storage and battery[J]. **Journal of Chinese Society of Power Engineering**, 2023, 43(9): 1151-1159.
- [18] 智筠贻, 凌浩恕, 吴昊, 等. 风光储多能互补能源系统容量配置优化[J]. **储能科学与技术**, 2024, 13(11): 3874-3888.
- ZHI Junyi, LING Haoshu, WU Hao, et al. Optimization of capacity configuration for multi-energy complementary systems using wind, solar, and energy storage[J]. **Energy Storage Science and Technology**, 2024, 13(11): 3874-3888.
- [19] 刘铠诚, 贾晓强, 何桂雄, 等. 计及虚拟储能的冷热电综合能源系统优化调度方法[J]. **浙江电力**, 2024, 43(12): 38-48.
- LIU Kaicheng, JIA Xiaoqiang, HE Guixiong, et al. An optimal scheduling method for IES considering virtual energy storage[J]. **Zhejiang Electric Power**, 2024, 43(12): 38-48.
- [20] 闫庆友, 党嘉璐, 林宏宇, 等. 考虑全生命周期碳排放的电氢耦合 VPP 调度优化[J]. **电力建设**, 2024, 45(4): 13-25.
- YAN Qingyou, DANG Jialu, LIN Hongyu, et al. The scheduling optimization model for electric-hydrogen coupled VPP considering life-cycle carbon emissions[J]. **Electric Power Construction**, 2024, 45(4): 13-25.
- [21] 聂晓华, 王薇. 混沌改进猫群算法及其在光伏 MPPT 中的应用[J]. **中国电机工程学报**, 2016, 36(22): 6103-6110.
- NIE Xiaohua, WANG Wei. Chaos improved cat swarm optimization and its application in the PV MPPT[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2016, 36(22): 6103-6110.
- [22] 李志鹏, 王建喜, 周洪伟, 等. 计及多指标间相互影响的园区综合能源系统规划评价方法[J]. **电力建设**, 2022, 43(10): 98-110.
- LI Zhipeng, WANG Jianxi, ZHOU Hongwei, et al. Evaluation method for park-level integrated energy system planning considering the interaction of multiple indices[J]. **Electric Power Construction**, 2022, 43(10): 98-110.