

数据中心多能互补分布式能源系统设计与运行优化研究

任效效¹, 李小龙², 薛凯¹, 吴炫¹, 韩小渠¹, 王进仕¹, 严俊杰¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安;

2. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 710075, 西安)

摘要: 为实现数据中心的低碳转型和能效提升,提出了一种集成多种可再生能源和储能设备的多能互补分布式能源系统作为其供能系统。建立了包含生命周期成本、碳排放、能耗、电网购电率和热量浪费率等指标的优化目标体系。制定了两种考虑负荷特征的运行策略,采用改进的多目标蝗虫优化算法对系统容量配置进行求解。为了分析优化目标和运行策略对系统优化的影响,通过组合不同优化目标和运行策略形成了多种优化设计方案,采用层次分析法和熵权法确定评价指标的权重,并利用多准则妥协解排序法进行评价排序。针对青海省某数据中心的案例,获得其能源系统的优化设计与运行方案。研究表明:运行策略主要影响吸收式制冷机和地源热泵的容量,而优化目标主要影响储能设备的容量;在相同的运行策略下,增加优化目标可提升系统的综合性能;对于不同的方案,生命周期成本、碳排放、能耗等基础优化目标值变化较小,而电网购电率和热量浪费率变化较大;通过实施五目标优化,即在基础优化目标的基础上增加热量浪费率、电网购电率,系统的综合性能得到了显著提升,其中热量浪费率和电网购电率分别降低了62.30%和25.92%,可再生能源发电占比增加了2%。

关键词: 数据中心;多能互补分布式能源系统;优化设计;运行策略;多目标蝗虫优化算法

中图分类号: TK9 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202501009 **文章编号:** 0253-987X(2025)01-0093-12

Research on the Design and Operation Optimization of Distributed Multi-Energy Systems for Data Centers

REN Xiaoxiao¹, LI Xiaolong², XUE Kai¹, WU Xuan¹, HAN Xiaoqu¹,

WANG Jinshi¹, YAN Junjie¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: To achieve low-carbon transformation and energy efficiency improvement of data centers, a distributed multi-energy system that incorporates various renewable energy sources and energy storage devices is introduced as their energy supply system. Firstly, an optimization objective system comprising life cycle costs, carbon emissions, energy consumption, grid electricity purchase rate, and heat waste rate is established. Subsequently, two operation strategies considering load characteristics are developed, and an improved multi-objective grasshopper optimization algorithm is employed to determine the system capacity configuration. To analyze the impact of optimization objectives and operation strategies on system optimization, various

收稿日期: 2024-04-16。 作者简介: 任效效(1995—),男,博士生;王进仕(通信作者),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家自然科学基金“能源有序转化”基础科学中心资助项目(51888103)。

网络出版时间: 2024-09-12

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20240912.1055.002>

optimized design schemes are formulated by combining different optimization objectives and operation strategies. The analytic hierarchy process and entropy weight method are used to assign weights to evaluation criteria, and the vlseKriterijumska optimizacija I kompromisno resenje (VIKOR) method is applied for evaluation ranking. A case study on a data center in Qinghai province is conducted to obtain its energy system optimal design and operation scheme. The results indicate that the capacities of the absorption chiller and the ground source heat pump are influenced by the operation strategy, while the capacity of the energy storage device is affected by the optimization objective. Under the same operation strategy, increasing the number of optimization objectives can enhance the overall performance of the system. The values of the fundamental optimization objectives such as life cycle costs, carbon emissions, and energy consumption show minor variations across different schemes, whereas the grid electricity purchase rate and heat waste rate exhibit significant changes. Through the implementation of five-objective optimization, which integrates heat waste rate and grid electricity purchase rate with the basic optimization objectives, the system's overall performance is notably enhanced. Specifically, the heat waste rate and grid electricity purchase rate are reduced by 62.30% and 25.92%, respectively, while renewable energy generation sees a 2% increase.

Keywords: data center; distributed multi-energy system; optimal design; operation strategy; improved multi-objective grasshopper optimization algorithm

数据中心是推动数字社会快速发展的战略性基础设施,其日益扩大的规模消耗了大量能源并产生了大量的碳排放。当前,我国数据中心机架规模的年增长率超过了 30%^[1]。据估计:2035 年我国数据中心的耗电量将达到 7 820 亿 kW·h,占全社会用电量的 7%;碳排放量将达 3.1 亿 t,占全社会碳排放量的 4%^[2]。

传统数据中心通常依赖于当地电网或专门的化石发电设施来供应电能^[3]。在“碳达峰、碳中和”目标和能源转型的背景下,寻找低成本、可持续的数据中心能源供应方案成为研究焦点^[4]。多能互补分布式能源系统(DMES)引入了可再生能源和储能技术,能以较高的能源利用率满足数据中心冷、热、电负荷需求,是数据中心能源供应系统低碳转型的重要解决方案^[5-6]。合理的系统配置和运行策略直接影响着 DMES 在经济、环境、能效方面的表现。然而,DMES 涉及多种能源、多个设备和多个能源转换过程,其设计与运行优化问题是相关研究的难点。

DMES 优化是一个多维度问题,其模型主要包括目标函数、限制条件、寻优方法、决策方法等。通常,可从能效性、经济性和环保性的某一方面出发进行系统优化^[7-8],也可综合多方面来建立优化模型^[9-10],但单一指标优化相对片面,致使系统的综合性能并不理想。Luo 等^[11]针对长沙市某室内游泳池构建了 DMES,使用 NSGA-II 算法进行了优化,使系统在经济、环境和能效方面的综合性能达到最优。荆有印等^[12]基于生命周期分析法,建立了考虑能源、环境和经济的多目标优化模型,用于能源供应

系统的优化设计与运行。对于 DMES,最常见的两种运行策略为以电定热和以热定电。Wang 等^[13]以一次能源消耗最小为目标,采用遗传算法对以电定热和以热定电两种运行策略下的热电联产方案进行了优化。Wang 等^[14]研究了电-热-天然气耦合系统在以电定热、以热定电和综合最优运行策略下的适用性,结果表明系统在综合最优模式下的运行成本最小、碳排放最低。优化算法是 DMES 优化模型的求解工具,目前用于该领域优化的算法很多,包括传统数学算法和智能算法。其中,遗传算法、粒子群算法等智能优化算法应用广泛,但容易陷入局部最优^[15],对此,更多的智能优化算法相继被提出。针对 NSGA-III 算法搜索效率低的问题,曾依浦等^[16]提出了一种基于混合交叉算子 NDX-SBX 改进的 NSGA-III 算法用于能源系统的优化,结果表明该算法可以获得更优的非支配解集。Li 等^[17]提出了一种多目标海鸥优化算法用于求解考虑经济、能源和环境的多目标优化模型,并取得了较好的结果。李锐等^[18]采用改进的人工鱼群算法对能源系统进行了优化,结果表明系统的效率和碳排放性能得到了提升。

目前,针对数据中心 DMES 优化的研究已经取得了一定的进展,但仍存在一些问题需要解决。一方面,现有的 DMES 优化模型旨在实现系统在经济性、环保性和能效性之间的平衡^[19]。然而,在考虑可再生能源耦合的 DMES 中,系统优化模型需要进一步考虑可再生能源的比重、数据中心供能可靠性等关键因素。另一方面,对于如何有效应对数据中

心冷负荷和电负荷需求量大,相关研究还相对匮乏。为填补这一研究空白,本文从能源利用、环境保护、经济效益、减少对电网的依赖、降低能源浪费等多个维度出发,构建了综合性的目标函数,并制定了两种数据中心 DMES 运行策略。根据目标函数与运行策略,设定多种方案,采用改进的多目标蝗虫优化算法(IMOGOA)对系统容量配置进行求解,并通过优劣解距离法获得每种方案的优化结果。在此基础上,基于层次分析法、熵权法和多准则妥协解排序法对各个方案进行综合评价和排序,确定最佳的 DMES 设计和运行方案。

1 系统模型

1.1 系统构型

相对于传统建筑,数据中心需要 24 h 不间断运行,其能量密度较大、供能要求较高。通常,数据中心包括数据机房和办公区,数据机房主要有供电和制冷需求,并且全年电负荷和冷负荷相对持续且稳定。热负荷主要来自办公区,与气象条件和地理位置有关^[20]。为了实现数据中心绿色可持续发展目标,数据中心一般在风、光、水力、地热丰富的地区规划布局^[21]。基于数据中心负荷特征和可持续发展目标,本文构建了一种适用于数据中心的典型 DMES 系统构型,如图 1 所示。

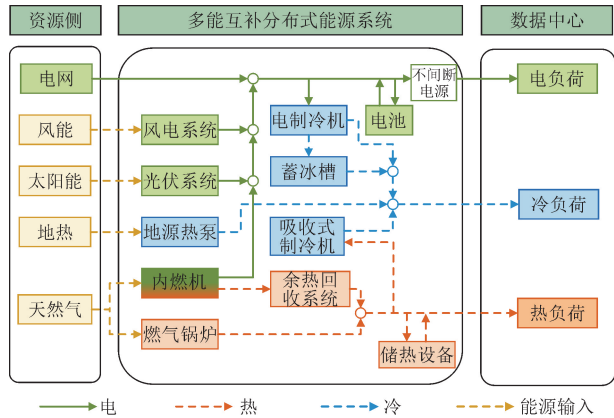


图 1 DMES 的系统构型

Fig. 1 The system configuration of DMES

该系统在传统的冷热电联供系统的基础上,引入了太阳能、风能、地热能等可再生能源,以减少化石能源的消耗并降低碳排放。电负荷主要由风电系统、光伏系统和内燃机发电满足,电网作为补充能源以提高电力供应的可靠性;冷负荷主要由吸收式制冷机和地源热泵满足;热负荷主要由余热回收系统满足,燃气锅炉用于补充不足的热量。为了提高系统运行的灵活性和在极端天气情况下的供能可靠性,系统配置了冷、热、电储能系统。其中,储冷系统包括蓄冰槽和电

制冷机,电制冷机既可在电力富余时制冰,也可在供冷不足时为用户供冷。在 DMES 中,电力通过输电线路传输,冷量和热量通过管道传输。

1.2 设备出力模型

(1)内燃机。考虑到数据中心的电负荷需求远大于热负荷需求,故选择燃气内燃机作为平衡风光发电的设备。内燃机通过燃烧天然气进行发电,具有发电效率高、污染少、集成度高的优点,其热电转换效率以及出力模型^[22]如下

$$\begin{cases} E_{ice}(t) = P_{ice}^r R_{ice}(t) \\ Q_{ice}(t) = E_{ice}(t) R_{h2e} \\ \eta_{ice}^e(t) = (a_{ice} R_{ice}(t)^2 + b_{ice} R_{ice}(t) + c_{ice}) \eta_{ice}^E \\ \eta_{ice}^h(t) = \eta_{ice}^e(t) R_{h2e} \\ P_{ice}^r R_{ice}^{min} \leq E_{ice}(t) \leq P_{ice}^r R_{ice}^{max} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $E_{ice}(t)$ 和 $Q_{ice}(t)$ 为实际发电量和产生的余热; $\eta_{ice}^e(t)$ 和 $\eta_{ice}^h(t)$ 为实际发电和产热效率; η_{ice}^E 为额定发电效率; P_{ice}^r 为额定发电功率; $R_{ice}(t)$ 为部分负荷率; R_{h2e} 为热电比; a_{ice} 、 b_{ice} 、 c_{ice} 为效率系数,可通过实验数据确定。

(2)余热回收系统。余热回收系统的出力模型为

$$Q_{re}(t) = Q_{ice}(t) \eta_{re} \quad (2)$$

式中: $Q_{ice}(t)$ 表示 t 时刻内燃机的余热功率; η_{re} 为余热回收效率。

(3)光伏发电系统。光伏系统的数学模型为

$$\begin{cases} E_{pv}(t) = S_{pv} I_{pv}(t) \eta_{pv}(t) \\ \eta_{pv}(t) = 0.15 [1 - 0.0045 (T_{pv}(t) - 25)] \\ T_{pv}(t) = T_0(t) + 0.0138 (1 + 0.031 T_0(t) \cdot (1 - 0.042v(t))) I_{pv}(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E_{pv}(t)$ 为光伏系统发电功率; $I_{pv}(t)$ 为单位面积的光伏板接收的太阳辐射量; $T_{pv}(t)$ 为光伏板的工作温度; S_{pv} 为光伏板的面积; $\eta_{pv}(t)$ 为发电效率; T_0 为干球温度; v 为近地面风速。

(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,其函数形式为

$$E_{wt}(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_{wind} \leq v_{ci} \\ av_{wind}^3(t) - bE_{wt}^r, & v_{ci} < v_{wind} \leq v_r \\ E_{wt}^r, & v_r < v_{wind} \leq v_{co} \\ 0, & v_{co} < v_{wind} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{wt}(t)$ 为风电机组在 t 时刻的电功率; E_{wt}^r 为额定功率; a 和 b 为模型系数; v_{ci} 为切入风速,取 $3.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_r 为额定风速,取 $10.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_{co} 为切出风速,取 $22.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; v_{wind} 为实际风速。

(5)燃气锅炉。当余热回收系统无法满足热需求时,开启燃气锅炉以补充热量,其输出功率 Q_{gb} 表示为

$$\begin{cases} Q_{gb}(t) = Q_{gb}^r R_{gb}(t) \\ F_{gb}(t) = \frac{Q_{gb}(t)}{\eta_{gb} H_{ng}} \Delta t \\ \eta_{gb} = \eta_{gb}^r \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q_{gb}^r 是燃气锅炉的额定功率; $R_{gb}(t)$ 为部分负荷率; $F_{gb}(t)$ 为天然气消耗量; η_{gb} 、 η_{gb}^r 分别表示锅炉实际效率和额定效率。

(6) 地源热泵。地源热泵是一种成熟的地热能利用设备,既可制冷也可制热,其制冷功率为

$$C_{gshp}(t) = \eta_{gshp,c} E_{gshp}(t) \quad (6)$$

式中: $\eta_{gshp,c}$ 为地源热泵的制冷性能系数; E_{gshp} 为耗电功率。

(7) 吸收式制冷机。吸收式制冷机通过利用余热回收系统回收的热量进行制冷,以减少系统热量的浪费,其数学模型可表示为

$$C_{abs}(t) = \eta_{abs} Q_{abs}(t) \quad (7)$$

式中: $Q_{abs}(t)$ 为制冷机的耗热功率; η_{abs} 为制冷机的制冷性能系数。

(8) 冰蓄冷系统。冰蓄冷系统由电制冷机和蓄冰槽组成。当系统生产的冷量大于需求时,电制冷机制冰;当系统制冷量小于需求时,蓄冰槽融冰。电制冷机的制冷功率 C_{ec} 和蓄冰槽的数学模型分别为

$$C_{ec}(t) = \eta_{ec} E_{ec}(t) \quad (8)$$

$$\begin{cases} V_{cs}(t) = V_{cs}(t-1)(1-\sigma_{cs}) + \left(C_{cs}^c(t) \eta_{cs}^c - \frac{C_{cs}^d(t)}{\eta_{cs}^d} \right) \Delta t \\ 0 \leq \alpha_{cs}^c C_{cs}^c(t) \leq C_{cs,max}^c \\ 0 \leq \alpha_{cs}^d C_{cs}^d(t) \leq C_{cs,max}^d \\ S_{cs}(t) = \frac{V_{cs}(t)}{V_{cs,max}} \\ S_{cs,min} \leq S_{cs}(t) \leq S_{cs,max} \\ \alpha_{cs}^c \alpha_{cs}^d = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: σ_{cs} 为能量损失率; η_{cs}^c 为储能效率; η_{cs}^d 为释能效率; $C_{cs,max}^c$ 和 $C_{cs,max}^d$ 分别为最大储能、释能功率; η_{ec} 为电制冷机的制冷性能系数; $E_{ec}(t)$ 为制冷机的电功率; $V_{cs}(t)$ 和 $V_{cs}(t-1)$ 分别为 t 时刻和 $t-1$ 时刻的储冰量; $C_{cs}^c(t)$ 和 $C_{cs}^d(t)$ 分别为 t 时刻制冰和融冰功率; $S_{cs}(t)$ 表示蓄冰槽的状态; $V_{cs,max}$ 为最大容量; α_{cs}^c 和 α_{cs}^d 为蓄冰槽运行的状态变量; $S_{cs,min}$ 和 $S_{cs,max}$ 为储能状态上、下限。电池与储热装置的数学模型与蓄冰槽模型的相似。

2 优化模型

为提高数据中心 DMES 的综合性能,提出了一种基于生命周期的多目标优化设计模型,包括目标函数、约束条件和运行策略。目标函数考虑了 DMES 的生命周期成本、碳排放、能耗、电网购电率和热量浪费率。

2.1 目标函数

为了方便优化方案的制定,将生命周期成本、碳排放、能耗作为基础优化目标,而电网购电率和热量浪费率作为附加优化目标。

(1) 生命周期成本。DMES 的生命周期成本 (LCC) 包括初始成本、运行成本、维护成本和碳税,其计算模型^[23-24]为

$$\begin{cases} C_{LCC} = C_{ini} R + C_{main} + C_{run} + C_{tax} \\ C_{ini} = (1 - (1 - r_{sal})^n) \sum_{i=1}^m C_i U_i \\ C_{main} = \sum_{i=1}^m \epsilon_i C_i U_i \\ C_{run} = \sum_{t=1}^{8760} (E_{grid}(t) U_{grid}(t) + V_{ng}(t) U_{ng}(t)) \\ C_{tax} = A_{ACE} U_{tax} \\ R = \frac{i_0 (1 + i_0)^n}{(1 + i_0)^n - 1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: C_{LCC} 为系统的生命周期成本; R 为投资回收系数; E_{grid} 为电网购电量; C_{ini} 是初投资; C_{main} 是维护成本; C_{run} 是运行成本; C_{tax} 是碳税; C_i 是设备 i 的容量; U_i 是单位容量成本; ϵ_i 是维护成本占容量成本的百分比; U_{grid} 为电价; V_{ng} 为天然气的消耗量; U_{ng} 为天然气的价格; A_{ACE} 为系统每年的碳排放量; U_{tax} 是碳税; i_0 是贴现率; n 为设备的使用寿命; r_{sal} 为经济循环率。

(2) 生命周期能耗。生命周期能耗 (LCEC) 考虑天然气和电网以及设备在生产、运输、安装过程中的一次消费^[23], 公式为

$$\begin{cases} L_{LCEC} = L_{run} + L_{ptir} \\ L_{run} = \sum_{t=1}^{8760} [3600 V_{ng}(t) / H_{ng} + E_{grid}(t) / (\xi_{prd} \xi_{trd})] \\ L_{ptir} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (1 - \lambda_{rec}) C_i L_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: λ 为设备回收系数; L_{run} 为系统在运行中的一次能耗; L_{ptir} 为系统设备制造、安装、运输中产生的一次能耗; H_{ng} 为天然气的低位热值; ξ_{prd} 为电网发电效率; ξ_{trd} 为电网传输效率; L_i 为设备在生产、运输安装工程的一次能源消耗。

(3) 生命周期碳排放。生命周期碳排放 (LCCE) 包括天然气的消耗、电网发电和设备在生产、运输、安装过程中的碳排放^[23], 计算公式如下

$$\begin{cases} A_{LCCE} = A_{run} + A_{ptir} \\ A_{run} = \sum_{t=1}^{8760} (V_{ng}(t) \mu_{ng} + E_{grid}(t) \mu_{grid}) \\ A_{ptir} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^m (1 - \lambda_{rec}) C_i A_i \end{cases} \quad (12)$$

对于第一种运行策略(ST1),系统优先使用地源热泵,当供冷不足时开启吸收式制冷机和冰蓄冷系统;对于第二种运行策略(ST2),系统优先开启吸收式制冷设备,当供冷不足时开启地源热泵和冰蓄冷系统。

3 求解算法与方案排序方法

3.1 求解算法

蝗虫优化算法(GOA)是由 Saremi 团队在 2017 年提出的一种启发式全局优化算法,该算法的设计灵感来自于蝗虫种群集体觅食行为^[25]。在 GOA 中,蝗虫在种群中的位置为一个可能的解,主要受种群作用力 S_i 、重力 G_i 和风力 W_i 的影响,其数学模型如下

$$P_i = r_1 S_i + r_2 G_i + r_3 W_i \quad (19)$$

式中: P_i 为蝗虫位置; r_1 、 r_2 和 r_3 为系数。

对于实际问题的求解,优化结果必须尽可能接近全局最优解。数学模型应具备求解优化问题的条件,核心算子可表示为

$$P_i^d = c \left(\sum_{j=1, j \neq i}^N c \frac{\bar{u}_d - u_d}{2} s |P_j^d - P_i^d| \frac{P_j - P_i}{d_{ij}} \right) + \hat{T}_d \quad (20)$$

式中: P_i^d 为第 i 个蝗虫在 d 维度的位置; N 为种群规模; $\bar{u}_d$ 和 u_d 为蝗虫在 d 维的上边界和下边界; d_{ij} 为第 i 个蝗虫和第 j 个蝗虫之间的距离; c 为线性减小参数; $\hat{T}_d$ 为 d 维的最优位置。

对于多目标优化问题的求解,诞生了多目标蝗虫优化算法(MOGOA)。由于 MOGOA 是通过选取合适的值进行求解优化,缺乏随机趋优的性能。因此,本文引入种群变异机制对其进行了改进。改进后的算法求解流程如图 3 所示。

3.2 优劣解距离法

选择优劣解距离法(TOPSIS)从帕累托前沿解中找出最优解。TOPSIS 通过计算帕累托前沿与最优解、最劣解的欧氏距离(D_{i+} 、 D_{i-})来进行排序,若某个解靠近最优解同时又最远离最劣解,则为最优解^[26]。TOPSIS 数学模型为

$$\begin{cases} D_{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij}^{\text{norm}} - f_j^{\text{ideal}})^2} \\ D_{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (f_{ij}^{\text{norm}} - f_j^{\text{nideal}})^2} \\ Y_i = \frac{D_{i-}}{D_{i+} + D_{i-}} \end{cases} \quad (21)$$

式中: f_j^{ideal} 和 f_j^{nideal} 分别为正理想点和负理想点; f_{ij}^{norm} 为标准化后的帕累托前沿解; Y_i 为帕累托解与最优解的接近程度, Y_i 越大,帕累托解越优。

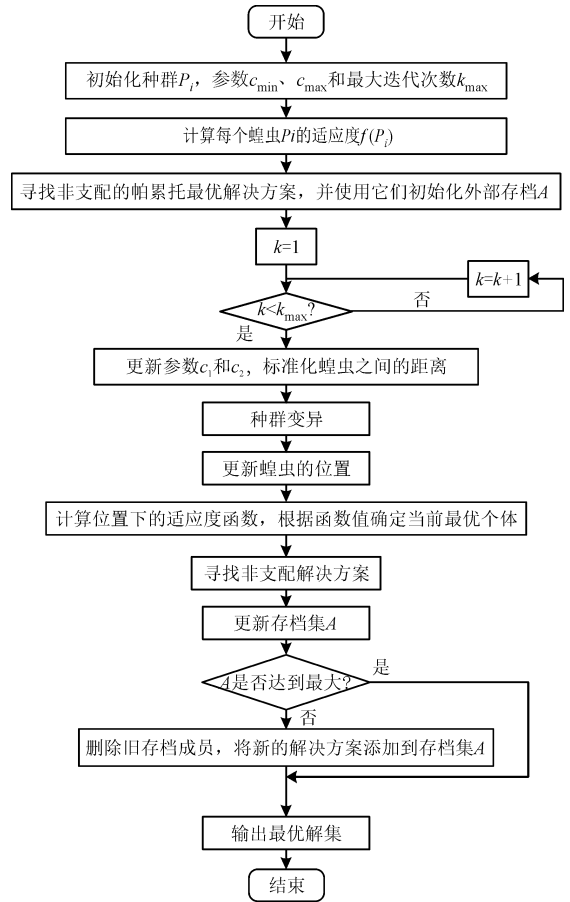


图 3 IMOGOA 算法求解流程

Fig. 3 The solving process of IMOGOA algorithm

3.3 多准则妥协解排序法

在进行系统优化时,需要构建多种系统设计和运行方案,并通过方案排序确定最优方案。本文使用层次分析法结合熵权法确定评价指标的权重,然后使用多准则妥协解排序法(VIKOR)对方案进行排序。层次分析法与熵权法的计算流程详见文献[27]。

VIKOR 法是由 Opricovic 于 1998 年提出的一种多属性决策方法。VIKOR 法通过最大化群体效用和最小化个体偏差对有限评价方案进行折衷排序^[28],其主要计算步骤如下。

(1) 标准化矩阵。由 m 个方案和 n 个评价指标构建评价矩阵 $P_{n \times m}$,然后对其进行标准化,得到矩阵 $X_{n \times m}$, $X_{n \times m}$ 的元素 x_{ij} 的计算公式为

$$\begin{cases} x_{ij} = \frac{p_{ij, \max} - p_{ij}}{p_{ij, \max} - p_{ij, \min}}, \text{成本型指标} \\ x_{ij} = \frac{p_{ij} - p_{ij, \min}}{p_{ij, \max} - p_{ij, \min}}, \text{效益型指标} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $p_{ij, \max}$ 和 $p_{ij, \min}$ 为评价指标 p_{ij} 的最大值和最小值。

(2) 最理想解和最不理想解的确定。根据标准

化矩阵, 确定最理想解 x_i^+ 和最不理想解 x_i^-

$$\begin{cases} x_i^+ = \max_{1 \leq j < n} x_{ij} \\ x_i^- = \min_{1 \leq j < n} x_{ij} \end{cases} \quad (23)$$

(3) 计算方案的折衷收益。根据层次分析与熵权法确定的综合权重 ω_i , 计算方案 j 的群体效用值 S_j 、个体偏差 R_j 和折衷收益 Q_j , 公式为

$$\begin{cases} S_j = \sum_{i=1}^m \omega_i \frac{x_i^+ - x_{ij}}{x_i^+ - x_i^-} \\ R_j = \max_{1 \leq i \leq m} \omega_i \frac{x_i^+ - x_{ij}}{x_i^+ - x_i^-} \\ Q_j = \nu \frac{S_j - \min_{1 \leq j \leq n} S_j}{\max_{1 \leq j \leq n} S_j - \min_{1 \leq j \leq n} S_j} + (1 - \nu) \frac{R_j - \min_{1 \leq j \leq n} R_j}{\max_{1 \leq j \leq n} R_j - \min_{1 \leq j \leq n} R_j} \end{cases} \quad (24)$$

式中: ν 为决策机制系数。

(4) 方案排序。对 S_j 、 R_j 和 Q_j 进行降序排列, 并根据以下条件判断是否选择 Q_j 最小的方案作为最优方案。① 可接受的有利性条件: $Q_{j,a} - Q_{j,b} \geq \frac{1}{n-1}$, $Q_{j,a}$ 和 $Q_{j,b}$ 是排序第一和第二的方案; ② 可接受的稳定性条件: $Q_{j,a}$ 的 $S_{j,a}$ 或 $R_{j,a}$ 同时比 $Q_{j,b}$ 的靠前。若满足两个条件, 则 Q_j 最小的方案为最优方案; 若只满足条件 ①, 则 $Q_{j,a}$ 和 $Q_{j,b}$ 均为最优方案; 若只满足条件 ②, 则方案中 $a, b, \dots, M$ 满足 $Q_{j,M} - Q_{j,1} \leq \frac{1}{n-1}$ 均可作为最优方案。

4 案例分析

为了验证所提系统及优化方法的可行性, 选取位于青海省的一个数据中心作为案例进行研究, 获得其能源系统的优化设计与运行方案。该数据中心由 4 000 m² 的数据机房和 5 000 m² 办公生活区组成, 其中数据机房的机柜为 450 个。该地区属于高原大陆性气候, 日照时间长、辐射强、风力充足, 适合风能和太阳能开发。此外, 该地区全年气温较低, 办公生活区没有供冷需求, 只有供暖需求, 并且供暖季从当年 10 月持续至次年 4 月。数据机房和办公生活区的功能不同, 数据机房的负荷包含电负荷和冷负荷, 办公生活区的负荷包括电负荷和热负荷。综合两个区域的负荷, 可以得到数据中心全年 8 760 h 的负荷, 如图 4 所示。这些负荷数据来自现场采集。可以看出, 该数据中心的电负荷和冷负荷远大于热负荷。电负荷分布相对稳定, 基本维持在 2 500 kW 左右; 热负荷和冷负荷呈现出季节性分布特征, 冬季热负荷大于过渡季, 夏季没有热负荷, 夏季冷负荷大于冬季和过渡季。

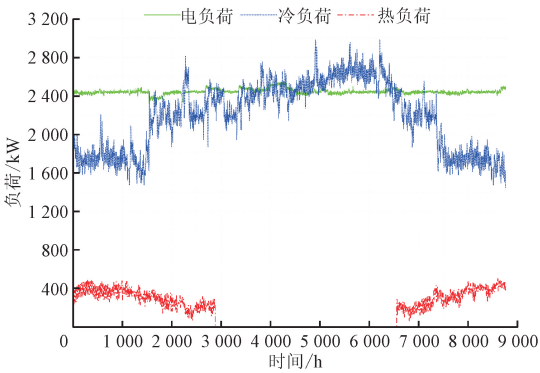


图 4 数据中心全年 8 760 h 的负荷分布

Fig. 4 Data center load distribution for 8 760 h throughout the year

图 5 为该地区全年 8 760 h 的风速和太阳辐射强度, 经计算, 全年平均风速超过了 $6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, 白天平均太阳辐射强度超过了 $500 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可见, 该地区风、光等可再生资源比较丰富, 适合风电系统、光伏系统的运行。此外, 该地区采用了一种新的分时定价机制, 如图 6 所示, 4—9 月采用峰-谷-平电价, 其他月份

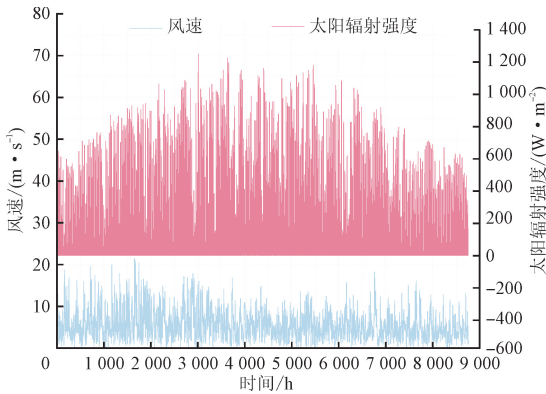


图 5 全年 8 760 h 的主要气象参数

Fig. 5 Meteorological parameters for 8 760 h throughout the year

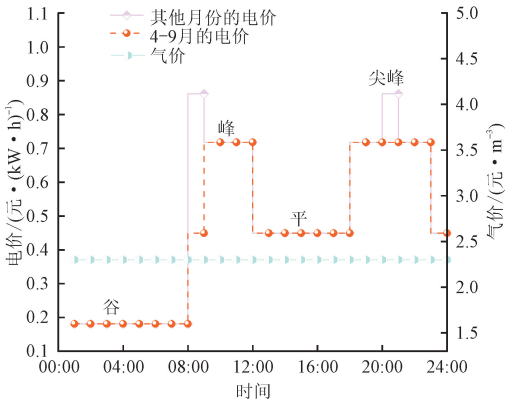


图 6 典型日的分时电价和天然气价格分布

Fig. 6 Distribution of time-of-use tariff and natural gas prices on the typical day

引入了尖峰电价。天然气价格和低位热值分别为 $2.3\text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $38\,931\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。电网的发电效率和输电效率分别为 0.35 和 0.95。光伏板安装面积不超过 $2\,000\text{m}^2$,单位容量成本为 $2\,489\text{元}\cdot\text{m}^{-2}$,碳排放为

$157.8\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$,一次能耗为 $907.46\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-2}$,其他设备的模型参数详见表 1。IMOGOA 的种群规模为 200,迭代次数为 200,突变率为 0.1,存档成员为 30。

表 1 设备全寿命周期信息^[23-24]

Table 1 Information on the whole life cycle of the equipment^[23-24]

设备	$U_i/(\text{元}\cdot\text{kW}^{-1})$	$A_i/(\text{kg}\cdot\text{kW}^{-1})$	$L_i/(\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kW}^{-1})$	$\epsilon_i/\%$	效率
内燃机	3 750.00	80.934	155.460	4	
余热回收系统	851.00	15.580	29.927	2	0.80
燃气锅炉	851.00	15.580	29.927	2	0.80
风机	6 000.00	0.900	492.630	4	
吸收式制冷机	1 500.00	150.634	289.356	4	0.70
地源热泵	2 083.00	111.175	244.547	3	4.18
电制冷机	898.72	33.456	64.265	4	3.50
换热器	200.00	0.500	1.200	1	0.90
电池	1 600.00	0.112	0.500	1	0.96
储热设备	67.26	0.100	0.200	1	0.95
蓄冰槽	67.07	2.200	5.000	2	0.97

4.1 方案设计

本文旨在提出可靠的 DMES 优化设计和运行方案,以实现系统在能源、环境、经济等综合性能方面处于较高水平,并减少电网购电和能源浪费。对此,根据不同的目标函数和运行策略制定了 8 种系统优化方案,如表 2 所示。其中, R_{grid} 和 R_{rest} 分别为电网购电率和热量排放率。在这些方案中, $S1\sim S2$ 为三目标优化方案, $S3\sim S6$ 为四目标优化方案, $S7\sim S8$ 为五目标优化方案。

表 2 DMES 优化设计与运行方案

Table 2 Optimization design and operation scheme for DMES

方案	目标函数	运行策略
S1	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}$	ST1
S2	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}$	ST2
S3	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{grid}}$	ST1
S4	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{grid}}$	ST2
S5	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{rest}}$	ST1
S6	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{rest}}$	ST2
S7	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{grid}}, R_{\text{rest}}$	ST1
S8	$C_{\text{LCC}}, A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{grid}}, R_{\text{rest}}$	ST2

4.2 结果分析

4.2.1 配置结果分析

根据建立的优化模型和系统方案进行 DMES 优化设计。表 3 为 8 种方案的配置结果。由表可知,运行策略主要影响吸收式制冷机和地源热泵的容量,而优化目标主要影响储能系统的容量;随着优化目标数的增加,蓄冰槽的容量也逐渐增加。图 7 和图 8 为指标的优化结果。随着优化目标和运行策略的改变,基础优化目标变化较小,而附加优化目标值变化较大。相较于 $S1, S2$ 的 C_{LCC} 减小了 0.71%,而其余优化目标都有所增加。当运行策略相同时,随着优化目标的增加,附加优化目标值逐渐减小($S5$ 除外)。当运行策略为 $S1$ 时,相较于三目标优化,五目标优化的指标变化情况为: C_{LCC} 和 A_{LCCE} 分别增加了 1.75% 和 0.45%, $L_{\text{LCEC}}, R_{\text{rest}}, R_{\text{grid}}$ 分别降低了 0.13%、29.39%、11.30%。当系统运行策略为 $S2$ 时,五目标优化相较于三目标优化, C_{LCC} 增加了 3.9%,而 $A_{\text{LCCE}}, L_{\text{LCEC}}, R_{\text{rest}}, R_{\text{grid}}$ 分别降低了 1.69%、0.22%、62.30% 和 25.92%。可见,五目标优化对减少能量浪费和减少电网依赖性方面具有很大贡献。

表 3 系统容量配置结果

Table 3 The results of system capacity configuration

参数	数值							
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
内燃机容量/kW	1 931	1 931	2 528	2 129	1 394	1 856	1 881	2 040
余热回收系统容量/kW	1 877	1 878	2 457	2 069	1 355	1 804	1 829	1 983
燃气锅炉容量/kW	1 294	1 490	1 887	1 636	1 397	1 517	1 418	1 941
风机容量/kW	2 600	2 600	2 600	2 600	2 600	2 153	2 521	2 600
光伏面积/m ²	1 101	472	262	1 692	1 222	1 561	2 000	1 795
吸收式制冷机容量/kW	677	1 101	1 046	1 966	743	1 089	759	1 130
地源热泵容量/kW	1 951	1 551	2 587	1 580	1 830	1 180	1 820	1 206
电制冷机容量/kW	356	332	0	6	412	716	707	649
换热器容量/kW	501	501	501	501	501	501	501	501
电池容量/(kW·h)	0	0	351	131	394	15	90	572
储热设备容量/(kW·h)	430	501	281	136	64	326	136	283
蓄冰槽容量/(kW·h)	0	0	0	6	0	1 953	1 368	2 466

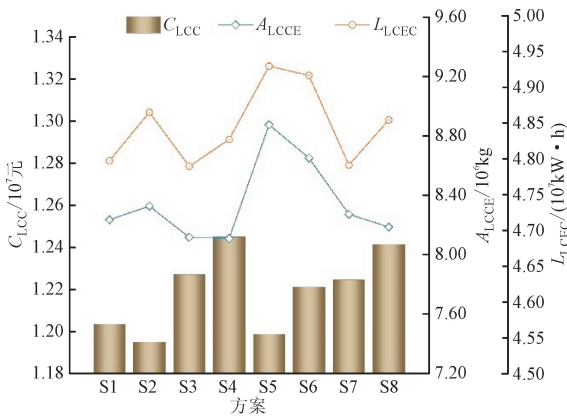


图 7 基础优化目标值

Fig. 7 The values of the base optimization objectives

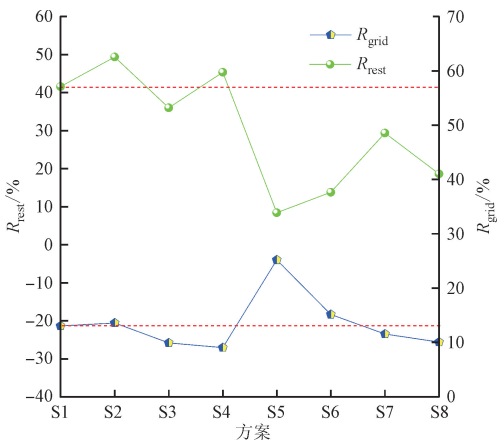


图 8 附加优化目标值

Fig. 8 The values of the additional optimization objectives

的指标权重 w_1 为[0.12 0.16 0.14 0.29 0.29],使用熵权法得到的指标权重 w_2 为[0.25 0.15 0.22 0.26 0.12],然后通过乘法相乘得到综合权重 w 为[0.15 0.13 0.15 0.40 0.17]。基于综合权重,使用 VIKOR 法计算得到每个方案的群体效用值 S 、个体偏差值 R 以及折衷收益 Q ,取群体效用权重系数 $v = 0.5$,结果见表 4。可以看出,S8 的折衷收益 Q 最小,S6 折衷收益次之,且 $Q_{S8} - Q_{S6} > 1/7$,方案 S8 满足有利性条件。此外,S8 的 S 和 R 均为最小值,满足稳定性条件。因此,S8 的综合性能最优,即运行策略为 ST2、优化指标的数为 5 时,系统的综合性能最优。在相同的运行策略下,随着优化目标数的增加, Q 减小,方案的综合性能增加。不同优化目标下的系统最优运行策略会不同,三目标优化的最优运行策略为 ST1,而五目标优化的最优运行策略为 ST2。

表 4 方案的 VIKOR 指标

Table 4 The values of VIKOR indicators for the schemes

方案	S	R	Q
S1	0.42	0.33	0.55
S2	0.57	0.40	1.00
S3	0.38	0.27	0.35
S4	0.55	0.36	0.89
S5	0.46	0.18	0.35
S6	0.42	0.14	0.19
S7	0.37	0.24	0.22
S8	0.33	0.13	0

4.2.2 方案排序

以优化目标作为评价指标,使用层次分析法得到

4.2.3 性能对比分析

由评价结果可知,S2 综合性能最差,S8 的综合

性能最优。选择对 S2 和 S8 的典型日热量供需匹配和全年发电占比进行分析。

图 9 展示了 S2 和 S8 的典型日热量供需匹配情况,可以看出大部分热负荷由余热回收系统满足,并且 S8 剩余的热量远低于 S2 的。相对于 S2(热量浪费率为 77.7%),S8 的浪费率降低了 67.8%。其原因是 S8 增加了吸收式制冷机的容量,从而增加了系统的热量需求,在余热回收相差不大的情况下,S8 浪费的热量明显小于 S2 方案。因此,当优化目标考虑热量浪费率时,系统的热量浪费现象得到了很大改善。

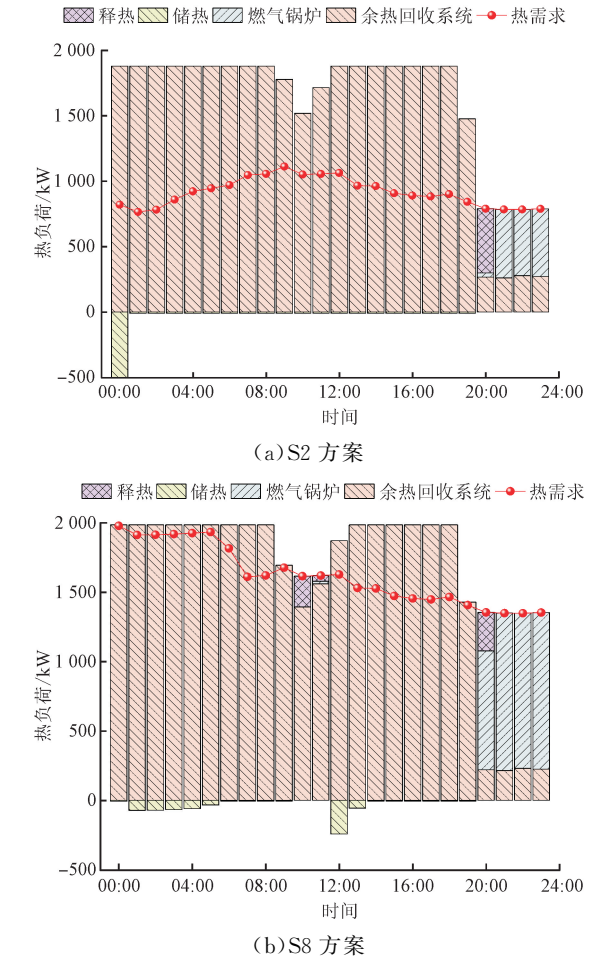


图 9 典型日热量供需匹配

Fig. 9 Supply and demand matching of heat on a typical day

图 10 为 S2 和 S8 两种方案的全年发电占比。由图可知,两种方案在 2—5 月的可再生能源发电均超过了 40%,导致电网购电占比其他月份小,因此 DMES 在这 4 个月对电网依赖性较弱。S2 方案的全年可再生能源发电占比为 32%,而 S8 方案则为 33.9%。与 S2 相比,S8 方案的可再生能源发电量提高了 5.94%。此外,S2 方案的全年电网购电占比

为 13.5%,而 S8 方案则为 10.1%,S8 方案的电网购电量比 S2 方案减少了 25.1%。因此,S8 方案在可再生能源发电和系统运行的可靠性方面更具有优势。

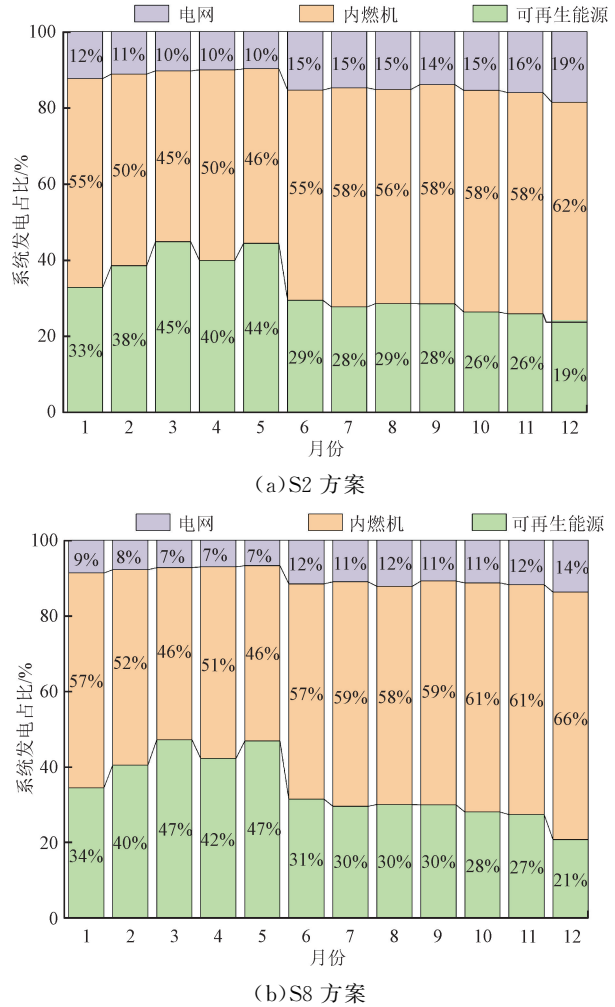


图 10 全年发电占比

Fig. 10 Power generation share throughout the year

5 结 论

本文以青海省某数据中心为研究对象,构建了 DMES 系统构型。基于全生命周期分析,建立了包含生命周期成本、碳排放、能耗、电网购电率和热量浪费率等指标的优化目标体系。针对数据中心负荷特征,建立了两种运行策略。根据优化目标和运行策略设定了 8 种优化方案,采用改进的多目标蝗虫优化算法进行求解。在此基础上,使用层次分析法和熵权法对评价指标进行赋权重,并利用 VIKOR 法对方案进行排序,得到的主要结论如下。

(1)对于不同的优化目标和运行策略,系统配置结果有所不同。系统的运行策略主要影响吸收式制冷机和地源热泵的容量,而优化目标主要影响储能

设备的容量。

(2)随着优化目标和运行策略的改变,基础优化目标值变化较小,而附加优化目标值变化较大。由评价结果可知:S8 最优,S2 最差。在相同的运行策略下,随着优化目标数的增加,方案的综合性能会增加。对于不同的优化目标,系统最优运行策略会不同,三目标优化的最优运行策略为 ST1,而五目标优化的最优运行策略为 ST2。

(3)在相同的运行策略下,五目标相较于三目标优化,系统的热量浪费和电网购电减少了 62.30%和 25.92%,而可再生能源发电占比增加了 2%。

参考文献:

[1] 李远征,龙信鑫,周纯杰,等. 高比例新能源电网-分布式数据中心集群协同优化运行研究 [J]. 中国科学:技术科学, 2024, 54(1): 119-135.
LI Yuanzheng, LONG Xinxin, ZHOU Chunjie, et al. Coordinated operations of highly renewable power systems and distributed data centers [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2024, 54(1): 119-135.

[2] 朱子恒,张策,丁肇豪,等. 数据中心纳入全国碳排放权交易市场机制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5562-5573.
ZHU Ziheng, ZHANG Ce, DING Zhao hao, et al. Incorporating data centers into China's national carbon emissions trading system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(14): 5562-5573.

[3] REN Xiaoxiao, HAN Zijun, MA Jinpeng, et al. Life-cycle-based multi-objective optimal design and analysis of distributed multi-energy systems for data centers [J]. Energy, 2024, 288: 129679.

[4] WANG Jinshi, REN Xiaoxiao, ZHANG Shuo, et al. Co-optimization of configuration and operation for distributed multi-energy system considering different optimization objectives and operation strategies [J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230 (Part A): 120655.

[5] 徐聪,刘泰秀,隋军,等. 多能源热互补分布式能源系统的节能率评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 151-157.
XU Cong, LIU Taixiu, SUI Jun, et al. Evaluation method for energy saving ratio of distributed energy system with multi-energy thermal complementarity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 151-157.

[6] 卢胤龙,韩明新,任洪波,等. 多能互补分布式能源系统优化设计研究进展 [J]. 上海电力学院学报,

2018, 34(3): 229-235.

LU Yinlong, HAN Mingxin, REN Hongbo, et al. Progress on the design optimization of hybrid distributed energy systems [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2018, 34(3): 229-235.

[7] GIMELLI A, MOTTOLA F, MUCCILLO M, et al. Optimal configuration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service [J]. Applied Energy, 2019, 242: 974-993.

[8] REN Hongbo, GAO Weijun. A MILP model for integrated plan and evaluation of distributed energy systems [J]. Applied Energy, 2010, 87(3): 1001-1014.

[9] WANG Yongli, MA Yuze, SONG Fuhao, et al. Economic and efficient multi-objective operation optimization of integrated energy system considering electro-thermal demand response [J]. Energy, 2020, 205: 118022.

[10] 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.

[11] LUO Zhengyi, YANG Sheng, XIE Nan, et al. Multi-objective capacity optimization of a distributed energy system considering economy, environment and energy [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 200: 112081.

[12] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87, 143.
JING Youyin, BAI He, ZHANG Jianliang. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of a solar combined cooling heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(20): 82-87, 143.

[13] WANG Jiangjiang, MAO Tianzhi, DOU Chao. Configuration optimization with operation strategy of solar-assisted building cooling heating and power system to minimize energy consumption [J]. Energy Procedia, 2016, 88: 742-747.

[14] WANG Yongli, WANG Yudong, HUANG Yujing, et al. Operation optimization of regional integrated energy system based on the modeling of electricity-thermal-natural gas network [J]. Applied Energy, 2019, 251: 113410.

[15] WANG Huaizhi, ZHANG Rongquan, PENG Jianchun, et al. GPNBI-inspired MOSFA for Pareto operation

- optimization of integrated energy system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 151: 524-537.
- [16] 曾依浦, 戴毅茹, 王坚. 基于改进 NSGA-III 的面向碳目标的区域综合能源系统容量优化 [J]. *制造业自动化*, 2022, 44(5): 134-139.
- ZENG Yipu, DAI Yiru, WANG Jian. Capacity optimization of regional integrated energy system for carbon target based on improved NSGA-III [J]. *Manufacturing Automation*, 2022, 44(5): 134-139.
- [17] LI Lingling, ZHENG Shengjie, TSENG M L, et al. Performance assessment of combined cooling, heating and power system operation strategy based on multi-objective seagull optimization algorithm [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 244: 114443.
- [18] 李锐, 李鹏. 基于改进人工鱼群算法的冷热电联产微网经济优化运行 [J]. *电气技术*, 2014(6): 63-68.
- LI Rui, LI Peng. Economical optimal operation of CCHP micro-grid system based on improved artificial fish swarm algorithm [J]. *Electrical Engineering*, 2014(6): 63-68.
- [19] ZENG Chao, LUO Jianing, YUAN Yanping, et al. Energy, economic, and environmental (3E) performance assessment, comparison, and analysis of airport cargo terminal microgrid system under the islanded and grid-connected modes [J]. *Journal of Building Engineering*, 2024, 82: 108270.
- [20] 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.
- [21] 姚云龙, 陆隼, 孙悦, 等. “双碳”目标下新型数据中心发展路径探讨 [J]. *中国工程咨询*, 2024(2): 100-105.
- YAO Yunlong, LU Hao, SUN Yue, et al. Discussion on the development path of new data centers under the “dual-carbon” goal [J]. *China Engineering Consultants*, 2024(2): 100-105.
- [22] REN Xiaoxiao, WANG Jinshi, HU Xiaoyang, et al. A novel demand response-based distributed multi-energy system optimal operation framework for data centers [J]. *Energy and Buildings*, 2024, 305: 113886.
- [23] LUO X J, OYEDELE L O, OWOLABI H A, et al. Life cycle assessment approach for renewable multi-energy system: a comprehensive analysis [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 224: 113354.
- [24] WU Weidong, GUO Juanli, LI Jiwei, et al. A multi-objective optimization design method in zero energy building study: a case study concerning small mass buildings in cold district of China [J]. *Energy and Buildings*, 2018, 158: 1613-1624.
- [25] MIRJALILI S Z, MIRJALILI S, SAREMI S, et al. Grasshopper optimization algorithm for multi-objective optimization problems [J]. *Applied Intelligence*, 2018, 48(4): 805-820.
- [26] CAO Yan, NIKAFSHAN RAD H, HAMED JAMA-LI D, et al. A novel multi-objective spiral optimization algorithm for an innovative solar/biomass-based multi-generation energy system: 3E analyses, and optimization algorithms comparison [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 219: 112961.
- [27] 张指辉, 张毅, 李健宁. 基于改进层次分析法与熵权法的目标选择模型 [J]. *探测与控制学报*, 2022, 44(6): 117-121.
- ZHANG Zhihui, ZHANG Yi, LI Jianning. Target selection model based on improved AHP and entropy weight method [J]. *Journal of Detection & Control*, 2022, 44(6): 117-121.
- [28] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法 [J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2431-2448.
- ZHANG Shixiang, LÜ Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2431-2448.

(编辑 亢列梅)