

园区综合能源系统多目标优化调度 与合作博弈求解

孔维政¹, 吴潇雨¹, 代红才¹, 徐凯文²

(1. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209;

2. 天津大学 电气自动化与信息工程学院, 天津 300072)

摘要: 环境问题和低碳政策加剧了综合能源系统优化运营策略的碳排放压力。针对该问题, 建立了园区综合能源系统运行下的多目标优化调度模型, 该模型考虑了以总运行成本和碳排放分别描述调度策略的经济性与环保性。针对多目标权重选择易存在主观性偏差的问题, 将多目标优化问题转化为经济性与环保性的合作博弈, 并提出了基于卡罗需-库恩-塔克(KKT)条件下的多目标Parato前沿求解方法, 进而采用基于安德森加速的ADMM算法计算合作博弈解。采用合作竞争博弈思想来确定实现的经济性与环保性两个目标之间的相协调的折中方案和最佳调度运行策略。最终算例部分通过分析四个季节典型日的园区综合能源系统优化调度策略, 对所提方法进行了多场景验证, 结果表明, 所提方法可以在运行成本和碳排放之间做出合理的权衡。

关键词: 综合能源系统; 合作竞争博弈; 交替方向乘子法; 双目标问题; 安德森加速

中图分类号: TM73 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed24324

Multi-objective Optimal Scheduling of Park Integrated Energy System with Cooperative Game Solving

KONG Weizheng¹, WU Xiaoyu¹, DAI Hongcai¹, XU Kaiwen²

(1. State Grid Energy Research Institute, Beijing 102209, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Carbon emission pressure on the optimal operation strategy of integrated energy system is intensified by environmental issues and low carbon policies. To address this issue, a multi-objective optimal scheduling model under the operation of the integrated energy system in the park was established, which considered the economics and environmental friendliness of the scheduling strategy described in terms of total operating cost and carbon emission, respectively. To address the problem that the multi-objective weight selection is prone to subjective bias, the multi-objective optimization problem was transformed into a cooperative game of economy and environmental protection, and a multi-objective Pareto front solution method based on the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) condition was proposed, and then the cooperative game solution was calculated using the Anderson-acceleration-based alternating direction method of multipliers (ADMM). The cooperative game approach was used to determine the compromise between the economic and environmental objectives to achieve the optimal scheduling and operation strategy. In the final example section, the proposed method was verified in multiple scenarios by analyzing the optimal scheduling strategy of the integrated energy system in the park through four typical days of the season, and the results show that the proposed method can make a reasonable trade-off between operating costs and carbon emissions.

Key words: integrated energy system (IES); cooperative competition game; alternating direction method of multipliers (ADMM); bi-objective problem; Anderson acceleration

在全球变暖的压力下, 碳减排一直是国际社会关注的问题^[1]。中国加入了120多个国家参与

基金项目: 国家电网有限公司总部科技项目(SGSDJY00GPJS1900057); 智能电网联合基金(U2066211)

作者简介: 孔维政(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, Email: kongweizheng@sgeri.sgcc.com.cn

通讯作者: 徐凯文(1999—), 男, 硕士, Email: xukaiwen_tju@163.com

的零排放竞赛,并承诺到2060年实现零碳排放。伴随着综合能源的兴起,实现零碳已经成为了一项基本标准,因此,在碳排放承诺下,为实现电力系统能够更加安全稳定地运行,为其他行业的发展提供平稳、持续的电力资源,促进社会经济的不断发展,共同实现经济性和生态友好性成为综合能源系统(integrated energy system, IES)运营的内在需要^[2]。

多目标优化通常是 IES 运行的一种决策方法。一般以经济性、可靠性、环境友好性、安全性等为优化目标。文献[3]提出了一种协同策略:让多个 IES 共同合作运行,通过回收废热来实现能源阶梯。其优化模型实现了运营经济性、环境友好性和安全性的共赢。文献[4]提出了一个两阶段规划模型,以平衡综合能源系统的经济性和可靠性。但多目标的权重系数设置往往难以避免主观性,利益分配具有争议,且得到的最优解往往舍弃整个系统的利益,造成不必要的损失。

博弈论作为数学的一个分支,主要关注的是那些意识到自己的行为会相互影响的个体的行为。这被认为是在多个目标之间进行权衡,避免主观影响的有效方法。文献[5]建立了一种 Nash 谈判和互补的方法,用于解决直流潮流约束下的环境/经济调度问题,但未考虑综合能源系统的运行。文献[6]将能量控制的不确定性和规划作为一个典型的鲁棒优化问题。它从博弈论的工程角度代表了零和问题的本质,但求解过程中依旧包含一定的主观色彩,亦无规划的策略展示。

综上所述,为解决上述提到的主观性和规划运行问题,本文建立了多目标合作竞争博弈优化模型,以求得园区综合能源系统的最优运行策略,从而使总运行成本和二氧化碳排放达到理想最小化。利用基于安德森加速的交替方向乘子法(alternating direction method of multipliers, ADMM)算法,在多目标优化运行问题的 Pareto 前沿中准确得到一个折中解,保证求解过程中避免主观影响且所求总体利益最优。最后通过北方某一园区综合能源系统算例进行仿真分析,给出系统运行策略,并与其他相关算法进行比较,验证模型和方法的可行性和可信性。

1 园区综合能源系统多目标优化调度模型设计

1.1 园区综合能源系统基本结构

多能流能源供应系统如图1所示,IES耦合了

冷网、热网、电网和其他能源。IES使多种能源协同工作,突破了过去独立运作的封锁。为提高能源利用效率、利于可再生能源消费、降低运营成本和二氧化碳排放,综合能源系统联合调度是有必要的。

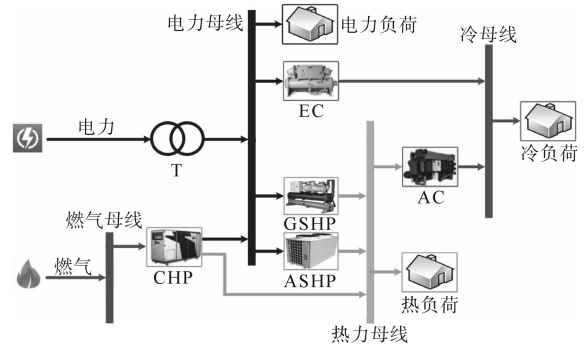


图1 综合能源系统结构

Fig.1 Structure of integrated energy system

1.2 目标函数

在本文中,经济性和环境友好性被认为是综合能源系统的运行优化目标,它们分别由系统总运行成本和二氧化碳排放量来衡量。因此,综合能源系统的运行模型可以被表述为一个双目标优化问题,具体如下。

1.2.1 经济目标

IES运行的经济优化旨在实现系统运行期间的总运行成本最低,经济目标函数如下:

$$\min(f_c) = \sum_d \sum_{t \in T} (C_{\text{grid}} P_{\text{grid}} + C_{\text{gas}} P_{\text{gas}} + \sum_{k=1}^m \omega_k P_t^k) \quad (1)$$

式中: f_c 为整个系统的年度运行成本; P_{grid} 、 P_{gas} 分别为电力和天然气的购买力; C_{grid} 、 C_{gas} 分别为电力和天然气的价格; m 为设备总数; ω_k 为设备 k 的维护成本; P_t^k 为 t 时刻的输出功率; d 为典型的季节日; T 为典型季节日的时长数,模拟步长为1h时, $T=24$ 。

1.2.2 环保目标

综合能源系统运行优化的环境友好目标是将系统运行期间的 CO_2 排放降至最低,优化目标函数如下:

$$\min(f_e) = \sum_d \sum_{t \in T} (\alpha_{\text{grid}} P_{\text{grid}} + \alpha_{\text{gas}} P_{\text{gas}}) \quad (2)$$

式中: f_e 为整个系统的 CO_2 排放量; α_{grid} 、 α_{gas} 分别为天然气燃烧和电网购电的二氧化碳排放系数。

1.3 系统主要设备约束

如图1所示,综合能源系统的组件包括变压器(transformer, T)、热电联产(combined heat and power, CHP)、地源热泵(ground source heat pump,

GSHP)、空气源热泵 (air source heat pump, ASHP)、电动制冷机 (electric chiller, EC) 和吸收式制冷机 (absorption chiller, AC)。

1) 组件约束如下:

$$P_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP}} G_{\text{CHP}} = \eta_{\text{CHP}} F_{\text{CHP}}(t) q_g \quad (3)$$

$$H_{\text{CHP}} = \mu_{\text{CHP}} \eta_{\text{CHP}} G_{\text{CHP}} \quad (4)$$

$$\begin{cases} H_{\text{ASHP}} = \eta_{\text{ASHP}} P_{\text{ASHP}} \\ H_{\text{GSHP}} = \eta_{\text{GSHP}} P_{\text{GSHP}} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} O_{\text{EC}} = \eta_{\text{EC}} P_{\text{EC}} \\ O_{\text{AC}} = \eta_{\text{AC}} P_{\text{AC}} \end{cases} \quad (6)$$

式中:下标 CHP, ASHP, GSHP, EC, AC 的含义分别为热电联产、空气源热泵、地源热泵、电动制冷机和吸收式制冷机组件; P, G, H 和 O 分别为电力、燃气输入、热力和冷输出; η 为组件的效率; $F_{\text{CHP}}(t)$ 为 t 时刻天然气流量; q_g 为天然气的热值; μ_{CHP} 为 CHP 的热转换系数。

$$\begin{cases} P_{\text{ASHP}}^{\min} \leq P_{\text{ASHP}} \leq C_{\text{ASHP}} \\ P_{\text{CHP}}^{\min} \leq P_{\text{CHP}} \leq C_{\text{CHP}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{GSHP}} \leq C_{\text{GSHP}} \\ 0 \leq P_{\text{EC}} \leq C_{\text{EC}} \end{cases} \quad (8)$$

$$0 \leq H_{\text{AC}} \leq C_{\text{AC}} \quad (9)$$

$$|P_t^{\text{CHP}} - P_{t-1}^{\text{CHP}}| \leq \Delta P_{\text{max}}^{\text{CHP}} \quad (10)$$

式中: C 为设备的容量; $P_{\text{ASHP}}^{\min}, P_{\text{CHP}}^{\min}$ 分别为 ASHP, CHP 的出力下限; $\Delta P_{\text{max}}^{\text{CHP}}$ 为 CHP 机组爬坡上限率。

2) 多能流等式约束如下:

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{CHP}} = L_{\text{E}}(t) + P_{\text{ASHP}} + P_{\text{GSHP}} + P_{\text{EC}} \quad (11)$$

$$L_{\text{H}}(t) + H_{\text{AC}} = H_{\text{GSHP}} + H_{\text{ASHP}} + H_{\text{CHP}} \quad (12)$$

$$O_{\text{EC}} + O_{\text{AC}} = L_{\text{C}}(t) \quad (13)$$

$$P_{\text{gas}} = G_{\text{CHP}} \quad (14)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{grid}} \leq P_{\text{grid,max}} \\ 0 \leq P_{\text{gas}} \leq P_{\text{gas,max}} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $L_{\text{E}}(t), L_{\text{H}}(t), L_{\text{C}}(t)$ 分别为 t 时刻的电、热、冷三类负荷; $P_{\text{grid,max}}, P_{\text{gas,max}}$ 分别为电力、天然气的购买力界限。

一般来说,式(1)~式(15)可以看做一个多目标优化问题:

$$\begin{cases} \min \{ c_1^T x, c_2^T x \} \\ \text{s.t. } Gx \leq g \quad Hx = h \end{cases} \quad (16)$$

式中: G, H 分别为整合后的等式、不等式的约束矩阵; g, h 分别为整合后满足等式、不等式的数值; c_1^T, c_2^T 分别为满足目标解 x 的矩阵。

加权线性方法是求解多目标优化问题最常用的方法,利用该方法将式(16)转换为下式:

$$\begin{cases} \min \{ \lambda c_1^T x + (1 - \lambda) c_2^T x \} \\ \text{s.t. } Gx \leq g \quad Hx = h \end{cases} \quad (17)$$

2 园区综合能源系统多目标合作博弈优化算法

2.1 多目标问题的合作博弈优化

综合能源系统的规划和运行优化涉及多个利益主体,他们之间存在的耦合关系导致运行模式尤为复杂,经典的多目标优化算法仅考虑整体的利益,不再适用于复杂的综合能源系统的规划与运行,或在多目标优化过程中考虑整体利益却无法准确涉及权重。如加权线性法,当 λ 是权重时,权重值不可避免地受到主观性的影响。本章引入博弈的思想进行多目标优化,在实现整体利益最大的同时,避免了权重主观性问题。

博弈作为研究冲突与合作的理论,能够很好地适配智能理想决策者的特征。在博弈论的主流中,合作博弈和非合作博弈为主要研究方向,非合作博弈在于两者中相互谈判,典型的方法为 Nash 均衡解,该解的重点在于两者个体利益,可以实现两个目标个体达到较为理想的结果,但整体的获益不进行考虑,而合作博弈是在保证整体利益最优的情况下进行多目标优化求解 Nash 谈判解,在园区规划方面有着更加实际的意义。本文以保留目标竞争的思想,采用合作博弈方法进行优化,合作博弈与非合作博弈的直观对比如图 2 所示,二者关系如下:

$$f_n(X_1, X_2) < f_{co}(X_1, X_2) \quad (18)$$

式中: f_{co} 为合作博弈利益结果; f_n 为非合作博弈利益结果; X_1, X_2 分别为博弈两主体变量。

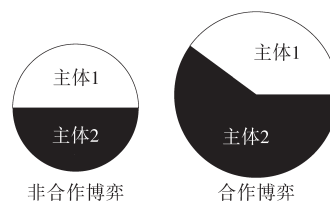


图2 博弈方法图示

Fig.2 Game method diagram

图2中,两主体面积代表所获利益,从图中可以看到,左图中两主体的利益较为均衡,右图的利益分配有一定偏差,但右图中每个主体的利益都大于左图。合作博弈要求整体利益得到最大的同时进行两者利益分配,且合作博弈前提是合作时整体的利益要大于不合作时的利益。

一般来说,总价值并不是一个固定数,其值

与博弈的方案有关。

采用上述合作博弈思想^[5],求解出式(16)的合作博弈解并进行分配,将经济性和环保性分别视为两个虚拟参与者,即参与者1和参与者2,其策略集为 $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$ 。由于为同一主体下的多目标优化,故双方清楚对方支付,即策略集 $X_1 = X_2$,可得 $x_1 = x_2 = x$ 。

求解过程中式(16)的两个虚拟参与者,就如同公平地分配组件进行协商。优化的目标是调和两个目标之间的冲突。但在园区中经济性和环保性有着关联的相互作用,简单的合作博弈不能准确表达其内部关系,因此,本文使用合作竞争博弈的思想在运营成本和碳排放之间进行合理权衡。已经证明^[7]双目标优化问题式(16)有一个合理博弈解,并且满足目标要求。

合作竞争博弈旨在实现整体利益的最优情况下,满足参与主体的个人目标。故本文在合作博弈的基础上,加入效用函数,将其作为合作联盟约束,在此基础上求解均衡解。

就优化问题的本质将式(16)转换为

$$\text{s.t.} \begin{cases} \max_{x \in S} (V) \\ V = (l_1^m - c_1^T x)(l_2^m - c_2^T x) \\ V \leq uc_i(x) \quad i = 1, 2 \end{cases} \quad (19)$$

式中:集合 S 为优化问题卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker, KKT)条件的 Pareto 前沿; l_1^m, l_2^m 为最高的单边成本^[5]; $uc_i(x)$ 为效用函数,用来表示目标双方的偏好关系,即对单一目标进行边际限定。

则该式为合作竞争博弈问题,其物理意义是保证处于限定数值下的同时,实现谈判双方的自身支付距最大支付尽可能远,其几何意义如图3所示。

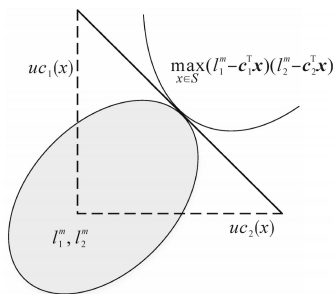


图3 合作竞争博弈几何意义

Fig.3 Cooperation competition game geometry meaning

2.2 基于KKT条件的 Pareto 前沿

前文中提到,合作博弈联盟利益要大于非合作博弈,故必须满足谈判解位于 Pareto 前沿中,为得到 Pareto 前沿,引入一种考虑参数化的 KKT 条件:

对于最优解,一般是由其 Pareto 前沿作为优化问题解集,但 Pareto 前沿上的最优解存在可行但不符合策略的情况,这时需要寻求在可行域上找到其策略解。

为得到 Pareto 前沿的数学表达式,列出优化问题的 KKT 条件:

$$\text{KKT}(\lambda) \begin{cases} (x, \eta, \xi) \left| \begin{aligned} \lambda c_1 + (1 - \lambda) c_2 + G_\eta^T + H_\xi^T &= 0 \\ 0 \leq (g - Gx) \perp \eta \geq 0 & \quad Hx = h \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (20)$$

式中: λ 为权重,是一个决策变量; η, ξ 分别为对偶变量的向量; $(g - Gx) \perp \eta$ 表示 $\eta^T(g - Gx) = 0$ 。上述互补松弛条件可以进一步线性化表示为

$$\begin{cases} 0 \leq \eta \leq M(1 - z) \\ 0 \leq g - Gx \leq Mz \quad z = \{z_i\}, z_i \in \{0, 1\}, \forall i \end{cases} \quad (21)$$

式中: M 为整合后的变量矩阵。

综上所述,式(19)~式(21)可以呈现以下问题:

$$\text{s.t.} \begin{cases} \max_{x, \eta, \xi, \lambda} (V) \\ V = (l_1^m - c_1^T x)(l_2^m - c_2^T x) \\ \lambda c_1 + (1 - \lambda) c_2 + G^T \eta + H^T \xi = 0 \\ Hx = h \quad \xi \text{ free} \\ 0 \leq \eta \leq M(1 - z) \\ V \leq uc_i(x) \quad i = 1, 2 \\ 0 \leq g - Gx \leq Mz \quad z = \{z_i\}, z_i \in \{0, 1\}, \forall i \end{cases} \quad (22)$$

式中: l_1^m, l_2^m 分别为 λ 取0和1时的最优解。

求解式(22)可以在没有主观性的情况下获得;而式(22)的最优解亦是式(16)中两个目标之间的最佳折中。

2.3 基于安德森加速的 ADMM 算法的博弈求解

ADMM 作为较为广泛使用的约束问题优化方法,融合了对偶上升法的可分解性以及乘子法较好的收敛性,核心思想是将原问题的目标函数等价分解成若干个可求解的子问题,然后并行求解每一个子问题,最后协调子问题的解得到原问题的全局解。该方法可使式(22)目标与其对偶变量共同收敛^[8],且该方法可以很好地解决多目标优化过程中出现的权重色彩。除此之外,在文献[9]、文献[10]中已证明,在多目标优化求解中,ADMM 算法具有更快的收敛速度,且能找到质量更高的解。为得到更快的求解速度,本文使用安德森加速的 ADMM 算法,安德森加速主要思想是利用当前迭代 x_k 以及前 m 步迭代去计算一个新的迭代使得残差的范数尽可能小,此方法在 ADMM 算法的快速求解的基础上进一步加速,并提高

ADMM的收敛精度。

常规 ADMM 算法标准形式如下^[11]:

$$\begin{cases} \min f(x) + g(z) \\ \text{s.t. } Ax + Bz = c \end{cases} \quad (23)$$

式中: $f(x)$, $g(z)$ 为两个凸函数; $Ax+Bz=c$ 为约束。

对式(22)进行 ADMM 求解,其本质上是一个非凸非线性化的问题,难以直接求解,采用对数转换的方法对模型进行等效转换:

$$\begin{cases} \min_{x, \eta, \xi, \lambda} -[\ln(l_1^m - c_1^T x) + \ln(l_2^m - c_2^T x)] \\ \text{s.t.} \\ \lambda c_1 + (1 - \lambda)c_2 + G^T \eta + H^T \xi = 0 \\ Hx = h \quad \xi \text{ free} \\ 0 \leq \eta \leq M(1 - z) \\ 0 \leq g - Gx \leq Mz \\ z = \{z_i\} \quad z_i \in \{0, 1\}, \forall i \end{cases} \quad (24)$$

构造拉格朗日函数:

$$L_p(x, z, \omega) = f(x) + g(z) + \omega(Ax + Bz - c) + \rho/2 \|Ax + Bz - c\|_2^2 \quad \rho > 0 \quad (25)$$

式中: $L_p(x, z, \omega)$ 为增广拉格朗日函数; ω 为对偶变量; ρ 为惩罚函数。

则第 $(k+1)$ 次更新迭代的格式为

$$\begin{cases} x^{k+1} = \underset{x}{\operatorname{argmin}} L_p(x, z^k, \omega^k) \\ z^{k+1} = \underset{z}{\operatorname{argmin}} L_p(x^{k+1}, z, \omega^k) \\ \omega^{k+1} = \omega^k + \rho(Ax^{k+1} + Bz^{k+1} - c) \end{cases} \quad (26)$$

x 的第 $(k+1)$ 次采用了 z 的第 k 次的迭代结果, z 的更新利用了 x 的第 $(k+1)$ 次结果。证明 ADMM 在经济成本和碳排放两个目标函数之间相互迭代进行求解。在式(26)的基础上,考虑 ADMM 迭代的安德森加速,将迭代表达成固定点迭代的形式:

$$(z^{k+1}, \omega^{k+1}) = G(z^k, \omega^k) \quad (27)$$

根据其原理将 $u = (1/\rho)\omega$ 带入,得到多目标系统经济调度优化迭代形式:

$$\begin{cases} X_i^{k+1} = \underset{P_i}{\operatorname{argmin}} [f_i(X_i) + \frac{\rho}{2} (X_i - \bar{X}^k + u_i^k)^2] \\ u_i^{k+1} = u_i^k + e^{k+1} \end{cases} \quad (28)$$

式中: X_i^{k+1} 为第 $(k+1)$ 次迭代后的成本值; $\bar{X}^k$ 为第 k 次迭代后输出的平均成本值。

求解式(28)得到最优成本的输出值为

$$X_i^{k+1} = \frac{\rho(\bar{X}^k - e^k) - \rho u_i^k - c_{2i}}{\rho + 2c_1} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (29)$$

ADMM 算法中,当原始残差和对偶残差同时

小于收敛精度时,迭代结束,即

$$\begin{cases} u_i^{k+1} - u_i^k = \sum_{i=1}^n X_i^{k+1} - X_n \leq \varepsilon_A \\ \rho(\bar{X}^{k+1} - \bar{X}^k) \leq \varepsilon_B \end{cases} \quad (30)$$

式中: ε_A , ε_B 分别为原始残差和对偶残差的收敛精度。

3 算例分析

设置安德森加速的 ADMM 算法收敛精度为 10^{-4} , 利用所提出的合作竞争博弈谈判模型,求解得到了综合能源系统的最优运行策略。综合能源系统的结构如图 1 所示。组件参数如表 1 所示,算例对应的电、热、冷负荷曲线如图 4 所示。

表 1 组件参数

Tab.1 Component parameters

序号	组件	容量/MW	设备效率
1	CHP	100	0.5/0.3(产电/产热)
2	ASHP	12	3.0
3	GSHP	14	4.4
4	EC	90	3.5
5	AC	60	0.7

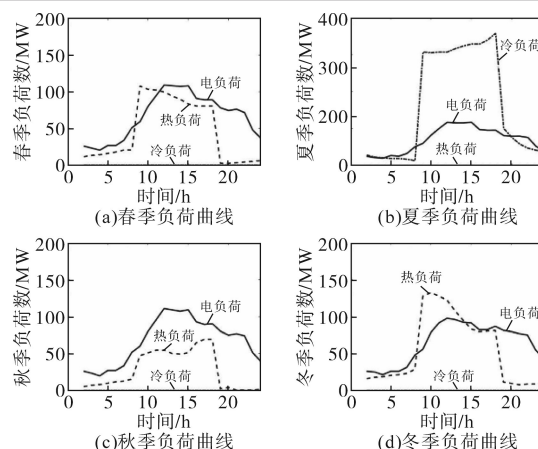


图 4 四个典型日的负荷曲线

Fig.4 Load curves of four typical days

峰值电价(12:00—14:00, 19:00—22:00)为 1.14 元/(kW·h), 谷值电价(1:00—7:00, 23:00—24:00)为 0.46 元/(kW·h), 固定电价(8:00—11:00, 15:00—18:00)为 0.84 元/(kW·h)。固定天然气价格为 0.25 元/(kW·h)。电力和天然气的购买范围为 200 MW。与使用天然气和电力消耗相对应的碳排放系数分别为 0.198 kg/(kW·h) 和 0.137 kg/(kW·h)。

3.1 典型日优化调度结果

以秋季典型日为例,对所提方法进行分析验证,利用 KKT 方法求解得到其 Pareto 前沿,如图 5 所示。

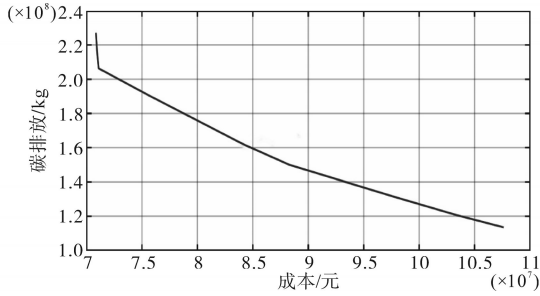
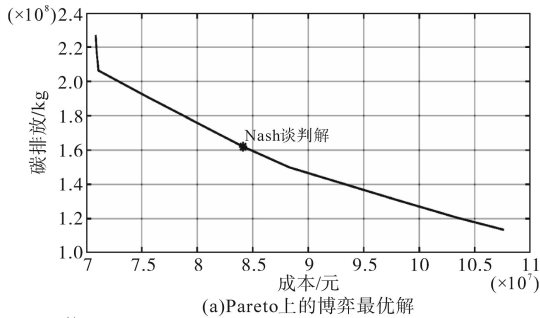


图5 优化问题的Pareto前沿

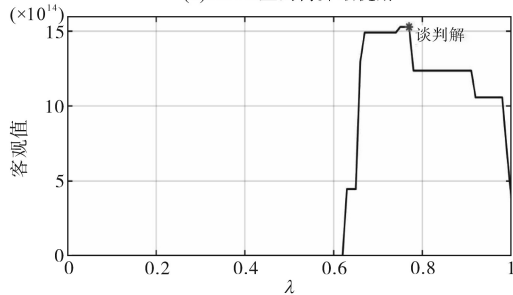
Fig.5 Pareto front of optimization problem

在图5所示线段中,所有点都为多目标优化最优解,对于最优策略的取值,即成本和碳排的权重值取舍无法直接得出。

通过式(28)~式(30)可解得综合能源系统的最佳运行解,解决取舍问题。在图6中标出谈判方案和谈判值,可以直观看出用ADMM算法可以直接获得优化目标问题式(22)的目标值。如图6所示,基于合作竞争博弈的问题式(22)可以优化问题式(1)、式(19)中的两个目标获得最佳折中。



(a) Pareto上的博弈最优解



(b) 博弈最优解的客观值

图6 博弈最优解及其客观值

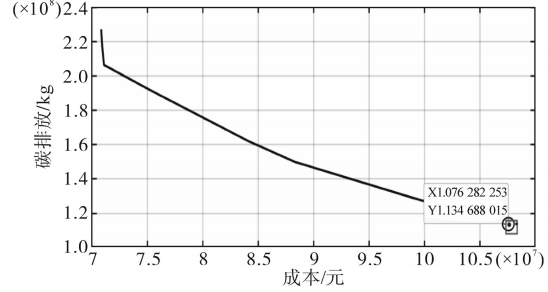
Fig.6 The optimal solution of the game and its objective value

结果表明,最佳权重 λ 为0.770 4,运行成本 f_c 为 $8.412 7 \times 10^7$ 元,碳排放 f_E 为 $1.620 2 \times 10^8$ kg。此外,我们还可以得出,成本和二氧化碳排放是相互排斥的目标,一方减少必然伴随着另一方的增加。

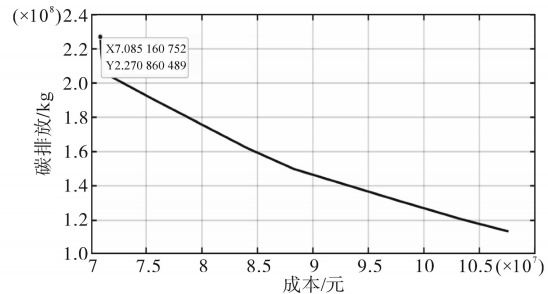
为验证博弈问题解的正确性,自主设定主观权重 λ 值以模拟真实谈判场景并进行讨论:

1) $\lambda=0/0.5$ 。当权重 λ 为0和0.5时,成本 f_c 为 $1.076 2 \times 10^8$ 元,碳排放 f_E 为 $1.134 7 \times 10^8$ kg,如图7所示。该情况下,碳排放量客观,但成本量过高,

在实际应用中可用性极低,从客观图6中可看出,当权重参数 λ 小于0.6时,目标值在21左右,相较于其他量级下可视为0,在这类情况下,解决方案接近其最坏成本,即成本最大。

图7 权重 $\lambda=0/0.5$ 图例Fig.7 Legend when weight $\lambda=0/0.5$

2) $\lambda=1$ 。当权重 λ 为1时,运行成本 f_c 为 $7.085 2 \times 10^8$ 元,碳排放 f_E 为 $2.270 9 \times 10^8$ kg,如图8所示。该情况下客观值下降趋势增加,从客观图6中可看出,当权重参数 λ 等于1时,目标值过最优客观情况并下降至最低,在这类情况下,解决方案接近其最坏碳排,即碳排量最大。

图8 权重 $\lambda=1$ 图例Fig.8 Legend when weight $\lambda=1$

3) $\lambda=0.7$ 。前面的讨论都属于极端情况,有一定的范围差,故讨论权重为0.7情况,运行成本 f_c 为 $8.829 5 \times 10^7$ 元,碳排放 f_E 为 $1.499 5 \times 10^8$ kg,如图9所示。与最优权重相比,运行成本增加,碳排减少,但运行成本差值较大,符合图中所示,故验证可得,使用权重为0.770 4下的成本与碳排结果亦最优,整体比较情况如表2所示,其中成本、碳排放量数量级为 10^8 。

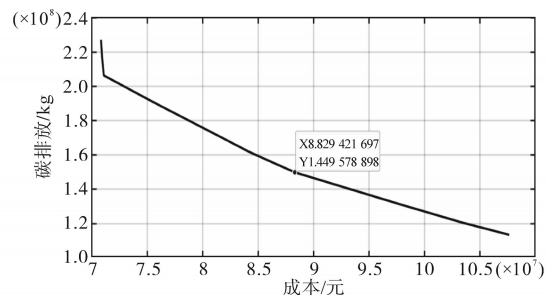
图9 权重 $\lambda=0.7$ 图例Fig.9 Legend when weight $\lambda=0.7$

表2 权重结果比较
Tab.2 Weight comparison results

	成本 $\times 10^8$ /元	碳排放量 $\times 10^8$ /kg
$\lambda=1$	0.708 5	2.270 9
$\lambda=0.770\ 4$	0.841 2	1.620 2
$\lambda=0.7$	0.882 9	1.449 5
$\lambda=0/0.5$	1.076 2	1.134 7

3.2 最佳运营策略的结果

综合能源系统在春季和冬季的最佳运行策略如图10~图13所示。

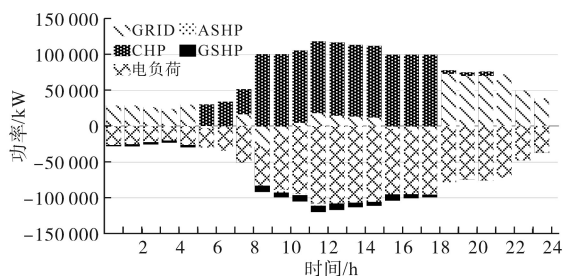


图10 春季最佳电力运行策略

Fig.10 The optimal electricity operation strategies in spring

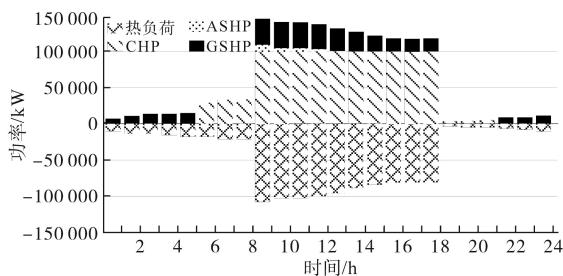


图11 春季最佳供热策略

Fig.11 The optimal heat operation strategies in spring

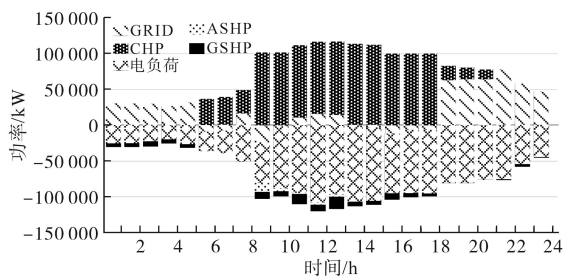


图12 冬季最佳电力运行策略

Fig.12 The optimal electricity operation strategies in winter

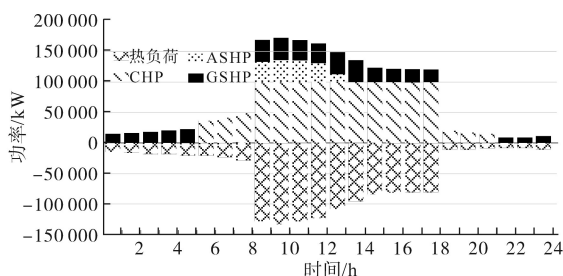


图13 冬季最佳热运行策略

Fig.13 The optimal heat operation strategies in winter

综上所述,采用所提优化运行策略,可实现

系统的电、热出力和负荷平衡。相较于燃气,由于电力的碳排放较低、价格也较便宜,所以高峰时段电力负荷大多都是由上级电网供应。而热电联产是其他时段的主要供能设备。与 ASHP 相比,GSHP 具有更好的效率表现。因此,GSHP 也是热负荷的主要热源,而 ASHP 多数是用于满足夏季冬季的峰值负荷。

3.3 可再生能源影响

加入可再生能源及改变终端电气化元件,探究在不同场景下的运行效果。

3.3.1 可再生能源出力占20%时算例分析

如图14所示,在20%光伏接入场景, f_c 为 $7.962\ 2 \times 10^7$ 元,碳排放 f_e 为 $1.192\ 7 \times 10^8$ kg时,最优成本和碳排放都有所降低。此时,供电设备为CHP机组,可再生能源产生的电能将代替部分CHP机组供电,实现节能减排。图15、图16分别为20%光伏接入下春季、冬季综合能源系统的典型运行策略。

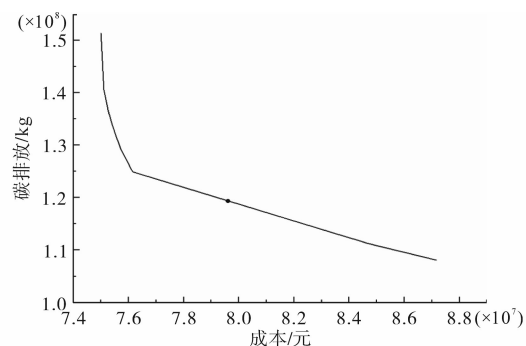


图14 20%光伏出力情景下的Pareto前沿

Fig.14 Pareto front in 20% PV output scenario

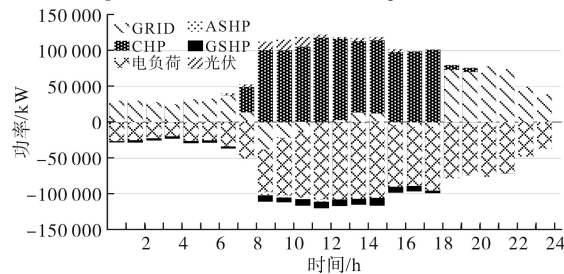


图15 春季最佳电力运行策略(20%光伏)

Fig.15 The optimal electricity operation strategies in spring (20% PV)

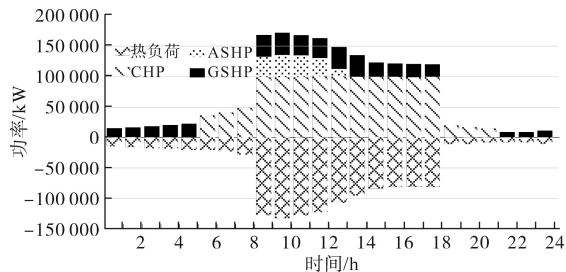


图16 冬季最佳热运行策略(20%光伏)

Fig.16 The optimal heat operation strategies in winter (20% PV)

3.3.2 算例小结

通过算例可知,光伏出力占20%时,碳排放量下降,经济性也显著提升,可以得出结论:少量光伏接入后,虽然对系统的结构改变不大;但当光伏大量出力后,系统的经济性和碳排放都有较好影响。

3.4 算法比较

为验证所提 ADMM 算法对求解本文中优化问题的有效性和先进性,将其与优化领域常用的非支配排序的遗传算法 II (on-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II) 以及多目标粒子群算法 (multiple objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法进行对比,安德森加速的 ADMM 算法具备更快的求解速度,且得到的目标值更优,可以得到更好的优化策略。三种算法的求解迭代过程如图 17 所示。

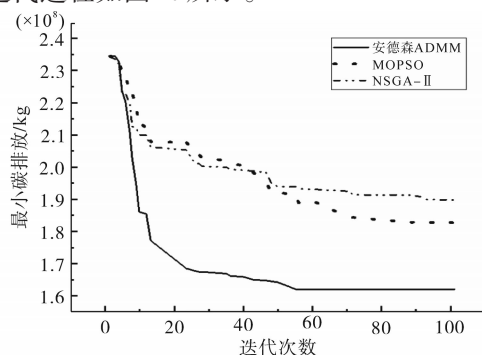


图 17 三种优化算法的迭代过程

Fig.17 Iterative process of the three optimization algorithms

4 结论

为解决当前大多数算法中存在的主观性问题,本文提出了基于竞争思想的合作博弈多目标优化模型。通过 KKT 条件列出博弈的 Pareto 条件后,采用安德森加速 ADMM 算法求解该模型,以高迭代速度求得满足系统约束和竞争约束下的高质量解。跟传统方法相比,合作竞争博弈模型,能够很好地避免主观权重的问题,实现利益最大化。且在多种场景下的仿真算例结果显示,该方法对园区综合能源系统优化调度有着较为优异的效果,仿真中对可再生能源部分的研究,亦可用于分析不同可再生能源渗透率下园区综合能源系统经济性和碳排放的变化规律,为未来园区综合能源系统中可再生能源接入提供依据。

参考文献

[1] MA X J, WANG C X, DONG B Y, et al. Carbon emissions from

energy consumption in China: its measurement and driving factors[J]. The Science of the Total Environment, 2019, 648: 1411-1420.

[2] 武志宏,杨永标,李熙,等.综合能源系统中多能源协同优化方法研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2): 67-73.

WU Zhihong, YANG Yongbiao, LI Xi, et al. Research on multi-energy collaborative optimization method in integrated energy system[J]. Electric Drive, 2022, 52(2): 67-73.

[3] LIU Z, HOU K, JIA H, et al. Balancing economy and reliability of integrated community energy system planning based on reliability marginal cost[C]//2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), IEEE, 2021: 1-5.

[4] WEI Wei, LIU Feng, MEI Shengwei. Nash bargain and complementarity approach based environmental/economic dispatch[J]. IEEE Trans. on Power System, 2015, 30(3): 1548-1549.

[5] TAN C, GENG S, TAN Z, et al. Integrated energy system-hydrogen natural gas hybrid energy storage system optimization model based on cooperative game under carbon neutrality[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 38: 102539.

[6] 袁辉红. 基于纳什议价合作博弈的社区能源交易模式与最优运行策略[D]. 南宁: 广西大学, 2021.

YUAN Huihong. Community energy trading model and optimal-operation strategy based on Nash bargaining cooperative game [D]. Nanning: Guangxi University, 2021.

[7] 兰鹏,沈晓东. 基于交替方向乘子法的输-配-天然气系统分布式优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 21-30.

LAN Peng, SHEN Xiaodong. Distributed optimal scheduling of transmission-distribution-gas system based on alternating directional multiplier method[J]. Power System Automation, 2021, 45(23): 21-30.

[8] 邝凯旋,张赞宁. 基于 ADMM 算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(8): 54-59.

KUANG Kaixuan, ZHANG Yunning. Multi-objective optimal dispatching of microgrid based on ADMM algorithm[J]. Power Science and Engineering, 2019, 35(8): 54-59.

[9] 曹诗云. 电气互联综合能源系统的分布式优化调度[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

CAO Shiyun. Distributed optimal scheduling of electrically interconnected integrated energy systems[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

[10] HUANG T, SINGHANIA P, SANJABI M, et al. Alternating direction method of multipliers for quantization[C]//International Conference on Artificial Intelligence and Statistics, PMLR, 2021: 208-216.

[11] 吴鸣,寇凌峰,张进,等. 多运营主体微电网日前经济优化调度纳什议价方法[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 19-27.

WU Ming, KOU Lingfeng, ZHANG Jin, et al. A day-ahead Nash bargaining method for economic dispatch of the multi-operator micro-grid[J]. China Electric Power, 2019, 52(11): 19-27.

收稿日期: 2022-04-20

修改稿日期: 2022-05-20