

## 基于混沌多目标粒子群算法的综合能源调度

周孟然, 汪飞

安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要:**目的 针对当前综合能源系统中资源协同优化效率不足、微网运行经济性和环保性差的问题,提出了一种计及风电储能及不稳定因素的微网优化调度方法。方法 该方法在微网负荷侧需求响应应对新能源消纳影响的基础上,以消纳新能源和削峰填谷为目的,提出了优化负荷曲线的方案;然后,考虑微网调度侧风电出力的不稳定性以及微网内部设备的耦合,进行优化调度以降低微网运行成本、减少环境惩罚费用并提高风电消纳平稳性;最后,采用混沌多目标粒子群算法对优化问题进行求解,并在风电不稳定性占比0%、5%、10%和15%时进行了算例仿真分析。结果 当风电不稳定性为10%和加入风电储能,系统运行成本和环境治理费用最少,比方案1和无风电储能少6 919.4元,风电平稳量也提高38 kWh。在电热冷网中,负荷侧加入需求响应后,系统得到稳定运行和能源合理利用,可以很好地满足负荷侧用能需求。从算法对比中,混沌多目标粒子群算法加入自适应权重和变异率后,具有较强的全局搜索能力和更好的准确性。结论 该方法通过合理设置风电不稳定性能够有效降低运行成本和环境惩罚费用,提高风电稳定性,其次,负荷侧的需求响应可以一定程度地削峰填谷和消纳新能源。

**关键词:**综合能源系统;优化调度;混沌多目标粒子群算法;削峰填谷;消纳新能源

**中图分类号:**TM73 **文献标识码:**A **doi:**10.16055/j.issn.1672-058X.2024.0002.001

### Comprehensive Energy Scheduling Based on Chaotic Multi-objective Particle Swarm Algorithm

ZHOU Mengran, WANG Fei

School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science & Technology, Anhui Huainan 232001, China

**Abstract: Objective** Aiming at the current problems of insufficient efficiency of resource synergistic optimization and poor operation economy and environmental protection of microgrid in the integrated energy system, a microgrid optimization scheduling method was proposed to take into account the wind power storage and instability factors. **Methods** Based on the influence of microgrid load-side demand response on new energy consumption, this method proposed a scheme to optimize the load curve to absorb new energy, shave peaks, and fill valleys. Then, considering the instability of the wind power output on the dispatch side of the microgrid and the coupling of the equipment inside the microgrid, the optimal scheduling was performed to reduce the microgrid operation cost, reduce the environmental penalty cost, and improve the smoothness of wind power consumption. Finally, the chaotic multi-objective particle swarm algorithm was used to solve the optimization problem, and the simulation analysis was carried out at 0%, 5%, 10%, and 15% of wind power instability. **Results** When the wind power instability was 10% and the wind power storage was added, the system operation cost and environmental management cost were the least, which was RMB 6,919.4 less than that of Option 1 and no wind power storage, and the wind power smoothing amount was also improved by 38 kWh. In the electric heating and cooling network,

**收稿日期:**2022-03-05 **修回日期:**2022-05-18 **文章编号:**1672-058X(2024)02-0001-08

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC0604503);安徽省自然科学基金能源互联网联合基金重点项(2008085UD06);安徽省科技重大专项(201903A07020013);安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2021A0470)。

**作者简介:**周孟然(1965—),男,安徽淮南人,博士,教授,从事电力系统自动化研究。

**通讯作者:**汪飞(1997—),男,安徽合肥人,硕士研究生,从事综合能源系统优化调度研究。Email:wangfei199707@163.com。

**引用格式:**周孟然,汪飞.基于混沌多目标粒子群算法的综合能源调度[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2024,41(2):1—8。

ZHOU Mengran, WANG Fei. Comprehensive energy scheduling based on chaotic multi-objective particle swarm algorithm[J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2024, 41(2): 1—8.

after the demand response was added on the load side, the system was running stably and the energy was rationally utilized, which can well meet the energy demand of the load side. From the comparison of algorithms, the chaotic multi-objective particle swarm algorithm has strong global search capability and better accuracy after adding adaptive weights and variation rate. **Conclusion** The experimental conclusion shows that the proposed method can effectively reduce the operating cost and environmental penalty cost and improve the stability of wind power by reasonably setting the wind power instability degree. Moreover, the demand response on the load side can cut the peak and fill the valley to a certain extent, and consume new energy.

**Keywords:** integrated energy systems; optimizing scheduling; chaotic multi-objective particle swarm algorithm; peak shaving and valley filling; consumption of new energy

## 1 引言

由于依赖化石能源进行发电具有安全风险大、环境污染严重等特点,新能源在近几年得到了快速开发与广泛应用。现在人们已经开始研究如何连接独立能源系统并协同优化以提高能源利用率和经济性能,同时降低环境污染。各种能源大范围接入造成能源系统不能兼顾经济性与环保性问题,缺乏优化能力。所以对综合能源系统进行优化是一个急需解决的课题,使得能源系统在运行过程中的经济性以及环保性都能够得到改善<sup>[1-2]</sup>。

当前综合能源系统优化运行研究大多基于不同调度策略,综合能源系统以运行成本为目标函数进行优化调度。文献[3-5]采用多目标灰狼算法,改进内点法及 NSGA-II 算法求解建模以达到微网经济运行的目的。文献[6-8]以储能容量为基础,开展储能、负荷及分布式电源的合理应用,以提高微网经济性为目的,提出一种以研究储能容量大小对运行成本影响的冷热电联供系统。文献[9-11]采用太阳能光热发电,太阳能和生物质沼气以及地热能相结合的发电方式,并将储能和可再生能源相结合以提高运行经济性。上述文献都从系统经济性角度出发,没有对负荷及调度设备排放的污染气体进行细致分析,忽视了对系统运行要求的环保性问题。

新能源发电的快速发展,导致出现弃风弃光现象,无法进行消纳。而文献[12-15]为了综合考虑气候条件或者建筑类型对于系统运行经济性,环保性以及节能性方面的影响,所提方法可以很好地进行削峰填谷。文献[16-17]分析了以风电消纳为目标,计及需求响应,以风电消纳量最多、系统运行费用最低为目标函数。文献[18-20]将风电消纳和储能作为切入点,利用不同算法对微网优化调度进行求解。文献[21-22]将混沌粒子与自适应算法结合起来,以新能源消纳和运行成本为目标进行综合能源系统优化调度。以上文献从新能源消纳出发,但没有考虑负荷侧的需求响应对新能源消纳的影响。

在以上背景下,提出一种计及风电不稳定性与风

电储能影响的优化调度模型。首先,将需求响应应用于负荷侧,合理调控负荷用电时间和用电量,以最大化消纳新能源并减少用电费用为目标,进行优化负荷曲线。其次,以微网调度侧风电不稳定性和设备间的出力为约束,以运行成本和环境惩罚费用最小及风电消纳平稳度最大为目标,比较分析了风电有无增加储能 2 种调度策略及 4 种风电不稳定性对微网运行经济性,环保性及风电消纳平稳性的影响。最后,利用混沌多目标粒子群算法对算例进行求解,通过对比可知,本文方法可以减小运行费用和合理消纳新能源。

## 2 网络结构与模型设计

### 2.1 综合能源微网结构

本文所研究微网为并网型综合能源微电网,包括光伏组件、风力电机、燃气轮机、电转气设备、吸收式制冷机、储能装置和负荷等,微网之间通过 3 条联络线连接,其结构如图 1 所示。微网内每一个分布式电源,调度设备,储能装置和负荷均为单个可控元件,分布式电源电量不足时电网能够弥补电量不足,相反分布式电源电量富余时则能够传输至大电网以确保微电网的稳定和安全运行。

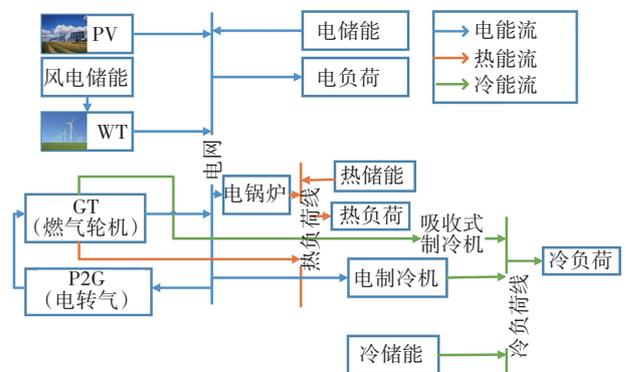


图 1 微网结构

Fig. 1 Microgrid structure

### 2.2 微网调度模型

针对综合能源微网的调度,本文提出了一个双层优化调度模型<sup>[23]</sup>,如图 2 中的模型。建立负荷侧与调度侧函数并采用优化算法对其进行求解,从而实现微

网水平上的优化调度。上层目标采用3种负荷需求曲线与风光出力曲线相结合的方式,综合考虑分时电价,负荷转移,电源出力以及负荷不确定性等因素,将消纳新能源,削峰填谷以及减少用电费用作为负荷曲线的优化目标。下层是将优化的曲线与各个设备出力的约束特性相结合,在环境治理费用与微网运行成本费用最小以及风电消纳平稳量最多的目标下,获得各个时刻的设备调度曲线。

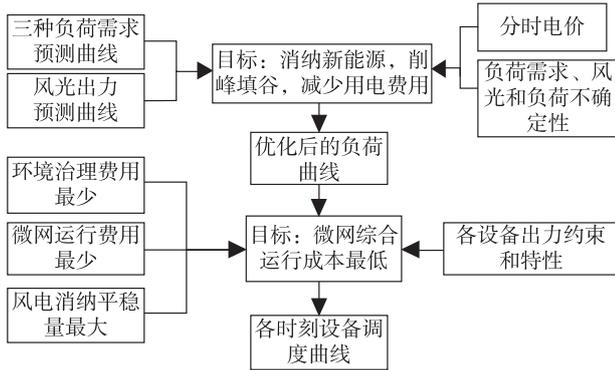


图2 微网调度结构

Fig. 2 Microgrid dispatching structure

### 2.2.1 协同优化调度目标函数

以综合能源系统运行成本最低、环保性最优和风力消纳平稳性最大为目标。系统运行成本主要分为购电费用  $C_1$ 、设备成本  $C_2$ 、设备维修费用  $C_3$ 、购气费用  $C_4$  和需求响应费  $C_5$ 。

目标函数如式(1)所示:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{t=1}^T C_{et} P_{et}(t) \quad (2)$$

式(2)中,  $T$  为系统的周期时段总数,  $C_{et}$  为系统的购电单价,  $P_{et}$  为周期内系统的购电功率。

$$C_2 = C_{mh} + C_{mc} + C_{P2G} + C_{GT} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m d(i)P(t) \quad (3)$$

式(3)中,  $C_{mh}$ 、 $C_{mc}$ 、 $C_{P2G}$  和  $C_{GT}$  为电锅炉、电制冷机、电转气设备和燃气轮机设备费用,  $m$  为不同储能种类,  $d$  为冷热和电储能(包括风电储能)单位功率价格,  $P$  为冷热电和风电储能功率。

$$C_3 = \sum_{t=1}^T [P_{wt}(t)c_{wt} + P_{pv}(t)c_{pv} + P_{GT}(t)C_{GT}] \quad (4)$$

$$C_4 = \sum_{t=1}^T C_{gas} \frac{P_{GT}(t)}{\eta_{GT} Q_{LHV}} \quad (5)$$

式(4)中,  $P_{wt}$ 、 $c_{wt}$ 、 $P_{pv}$ 、 $c_{pv}$  为风机、光伏发电量和单位功率维修价格,  $P_{GT}$  和  $C_{GT}$  为燃气轮机输出功率和维修价格。在式(5)中,  $C_{gas}$  为天然气单价,  $P_{GT}$  为燃气轮机输出功率,  $Q_{LHV}$  为单位立方米天然气的低热值, 单位为  $\text{kWh}/\text{m}^3$ ,  $\eta_{GT}$  为转换效率。

系统运行过程中,产生二氧化碳气体和其他氮化物及硫化物。因此系统运行产生的污染气体排放目标费用如式(6)所示:

$$C_{op} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^m C_{on}(i)P_e(t) \quad (6)$$

式(6)中,  $m$  代表污染气体种类,  $C_{on}$  为污染气体治理单价,  $P_e$  为设备排放污染气体的总量。

风力发电时,功率预测使用最大功率点跟踪技术(Maximum Power Point Tracking, MPPT),有风力发电功率误差问题,使用储能技术可补偿差额并能减小曲线峰谷差。

风力消纳平稳性目标函数为式(7)所示:

$$L_{wt} = \frac{1}{T} \sqrt{\sum_{t=1}^T [P_{wt}(t) + r_{wt}(t) - P_{av}(t)]^2} \quad (7)$$

式(7)中,  $r_{wt}$  为风电储能,  $P_{av}$  为风力发电平均值,  $L_{wt}$  为风电消纳平稳度。

### 2.2.2 约束条件

冷热电联供(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)是区域综合能源系统中应用最为广泛的一种, CCHP 系统既可采用燃气轮机发电又可采用这些装置以及燃气锅炉的燃烧热供暖制冷,实现发电,供暖,制冷三者结合,增强系统耦合作用,增加能源利用率。

燃气轮机的功率特性与运行约束条件为式(8)一式(10)所示:

$$P_{GT,e} = P_{GT,g} \eta_{GT,e} \quad (8)$$

$$P_{GT,h} = P_{GT,g} \eta_{GT,h} \quad (9)$$

$$P_{GT,g}^{\min} \leq P_{GT,g}(t) \leq P_{GT,g}^{\max} \quad (10)$$

式(8)一式(10)中:  $P_{GT,e}$  和  $\eta_{GT,e}$  为燃气轮机发电功率和效率,  $P_{GT,h}$  和  $\eta_{GT,h}$  为发热功率和产热效率,  $P_{GT,g}$  为耗气功率,  $P_{GT,g}^{\min}$  和  $P_{GT,g}^{\max}$  为燃气轮机功率上下限。

燃气锅炉的功率特性与约束为

$$P_{GB,h} = P_{GB,g} \eta_{GB,h} \quad (11)$$

$$P_{GB}^{\min} \leq P_{GB}(t) \leq P_{GB}^{\max} \quad (12)$$

式(11)、式(12)中,  $P_{GB,h}$  为燃气锅炉的产热功率,  $\eta_{GB,h}$  为燃气锅炉的产热效率,  $P_{GB,g}$  为耗气功率,  $P_{GB}^{\min}$  和  $P_{GB}^{\max}$  分别为燃气锅炉热功率的上下限。

电制冷机的数学模型为

$$Q_{EC} = C_{EC} P_{EC} \quad (13)$$

式(13)中,  $Q_{EC}$  为电制冷机的输出制冷功率,  $C_{EC}$  为电制冷机制冷系数,  $P_{EC}$  为输入的电功率。

溴化锂吸收式制冷机的模型为

$$Q_{AC} = C_{AC} Q_{AC}^h \quad (14)$$

式(14)中,  $Q_{AC}$  为吸收式制冷机的输出冷功率,  $C_{AC}$  为吸收式制冷机制冷系数,  $Q_{AC}^h$  为输入的热功率。

电热冷储能装置模型与约束条件分别如式(15)一式(20)所示:

$$E_{ES}(t) = E_{ES}(t-1)(1-s) + \left[ P_{in}^c(t)\eta_{in}^c - \frac{P_{out}^c(t)}{\eta_{out}^c} \right] \Delta t \quad (15)$$

$$E_{ES}^{\min} \leq E_{ES}(t) \leq E_{ES}^{\max} \quad (16)$$

式(15)、式(16)中: $s$ 为储电设备的自放电率, $E_{ES}(t-1)$ 为 $t-1$ 时的电量, $P_{in}^c$ 和 $P_{out}^c$ 为储电设备充放电功率, $\eta_{in}^c$ 和 $\eta_{out}^c$ 为充放电效率, $\Delta t$ 为计算时间间隔, $E_{ES}^{\min}$ 和 $E_{ES}^{\max}$ 为储电设备储电上下限。

$$E_{HS}(t) = E_{HS}(t-1)(1-S_h) + \left[ P_{in}^h(t)\eta_{in}^h - \frac{P_{out}^h(t)}{\eta_{out}^h} \right] \Delta t \quad (17)$$

$$E_{HS}^{\min} \leq E_{HS}(t) \leq E_{HS}^{\max} \quad (18)$$

式(17)一式(18)中: $S_h$ 为热储能的损失率, $E_{HS}(t-1)$ 为 $t-1$ 时的储热能量, $P_{in}^h$ 和 $P_{out}^h$ 为储热设备的输入、输出功率, $\eta_{in}^h$ 和 $\eta_{out}^h$ 为储热输入、输出效率, $E_{HS}^{\min}$ 和 $E_{HS}^{\max}$ 为储热设备储热上下限。

$$E_{CS}(t) = E_{CS}(t-1)(1-S_c) + \left[ P_{in}^c(t)\eta_{in}^c - \frac{P_{out}^c(t)}{\eta_{out}^c} \right] \Delta t \quad (19)$$

$$E_{CS}^{\min} \leq E_{CS}(t) \leq E_{CS}^{\max} \quad (20)$$

式(19)、式(20)中: $S_c$ 为冷储能的损失率, $E_{CS}(t-1)$ 为 $t-1$ 时的储冷能量, $P_{in}^c$ 和 $P_{out}^c$ 为储冷设备的输入、输出功率, $\eta_{in}^c$ 和 $\eta_{out}^c$ 为储冷输入、输出效率, $E_{CS}^{\min}$ 和 $E_{CS}^{\max}$ 为储冷设备储冷上下限。

电转气装置的模型与约束条件为

$$V_{P2G} = P_{P2G}^{\text{in}} \eta_{P2G} \quad (21)$$

$$P_{P2G}^{\text{down}} \leq P_{P2G}(t) - P_{P2G}(t-1) \leq P_{P2G}^{\text{up}} \quad (22)$$

式(21)、式(22)中: $V_{P2G}$ 为转化出的天然气量, $P_{P2G}^{\text{in}}$ 为输入的电量, $\eta_{P2G}$ 为P2G设备的转换效率, $P_{P2G}^{\text{down}}$ 、 $P_{P2G}^{\text{up}}$ 为上下爬坡率。

该综合能源系统的电能、热能、冷能和天然气的功率平衡关系式为(23)一式(26)所示:

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_e(t) + P_{GT}(t) + P_{ES}(t) - P_{P2G}(t) = P_{load}(t) \quad (23)$$

$$P_{GT,h}(t) + P_{GB,h}(t) + P_{EH}(t) - Q_{AC}(t) = Q_{load}(t) \quad (24)$$

$$P_{GT,c}(t) + P_{EC}(t) + P_{EC}(t) + P_{AC}(t) = C_{load}(t) \quad (25)$$

$$V_{GT}(t) - V_{P2G}(t) + V_{GB}(t) = V_g(t) \quad (26)$$

式(23)一式(26)中, $P_{WT}$ 、 $P_{PV}$ 为风机光伏发电量, $P_e$ 、 $P_{GT}$ 、 $P_{ES}$ 和 $P_{P2G}$ 分别为从电网流经的电量、燃气轮机、电储能和电转气设备的用电量, $Q_{AC}$ 和 $P_{AC}$ 为吸收式制冷机吸收的热量及产生的冷气, $V_{GT}$ 、 $V_{P2G}$ 、 $V_{GB}$ 和 $V_g$ 为燃气轮机、燃气锅炉、电转气设备和气网中的天然气, $P_{load}$ 、 $Q_{load}$ 和 $C_{load}$ 为电热冷负荷功率。

### 2.2.3 求解方法

本文所要解决的问题为多目标多约束条件下的最优化问题,其中改进的多目标粒子群算法(MOPSO)与多目标差分算法(MODO)相比较有着参数较少,收敛速度较快的优势。基于此,本论文选择了混沌MOPSO,与一般多目标粒子群算法相比较它使用了自适应惯性权重与变异率来加速收敛,如式(27)一式(29)所示:

$$w = \frac{i_{\max} - i - [w(1) - w(2)]}{i_{\max}} + w(2) \quad (27)$$

$$p = \frac{1 - (i-1)^{\frac{1}{u}}}{i_{\max} - 1} \quad (28)$$

种群初始化时,利用混沌映射能寻找较好的种群,搜索时采用tent方程,即

$$Z_{j,k+1} = \begin{cases} \frac{Z_{j,k}}{\beta}, & Z_{j,k} \in (0, \beta] \\ \frac{1 - Z_{j,k}}{1 - \beta}, & Z_{j,k} \in (\beta, 1) \end{cases} \quad (29)$$

式(27)一式(29)中: $i$ 和 $i_{\max}$ 为第 $t$ 次迭代和最大迭代次数, $w$ 、 $w(1)$ 和 $w(2)$ 为惯性权重和初始权重, $p$ 和 $u$ 为变异率和初始变异率, $Z_{j,k}$ 为第 $j$ 个混沌变量, $\beta$ ( $\beta \in (0, 1)$ )为控制变量。此算法流程图如图3所示。

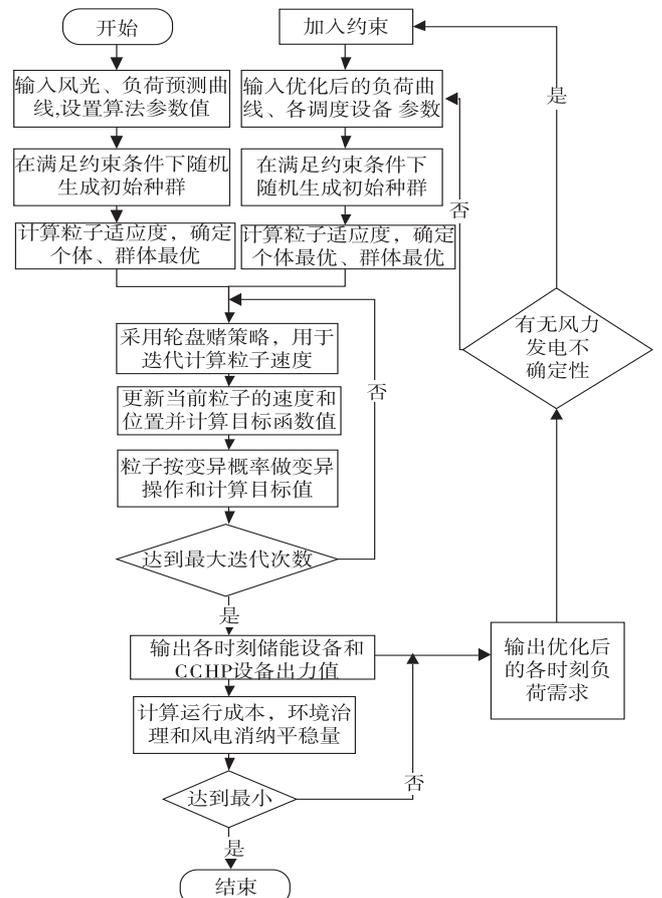


图3 混沌多目标粒子群算法流程

Fig. 3 Chaotic multi-objective particle swarm algorithm flow

该模型的解算思路是:输入预测出的光伏风机及负荷需求曲线;通过分时电价与需求响应策略,产生每个时刻的负荷转移量;将负荷转移量与负荷侧需求模型相结合算出负荷曲线;将上述求得的三种负荷代入综合能源系统,根据下层建立的微网侧调度模型,综合各指标对不同可时移负荷量参与得到的负荷曲线进行评价;增加微网设备、负荷及风力发电不确定性约束;对于微网侧系统目标函数,通过算法解算出微网侧系统的设备各时刻的出力。

### 3 实验验证与仿真分析

#### 3.1 算例基本数据

为了验证文中模型正确性及算法可靠性,选取某综合能源系统示范区作为算例,调度一个周期 24 h。优化前负荷曲线分配<sup>[24]</sup>及光伏风机预测出力见图 4,微网每一时刻购售电价见表 1 购售电价格参数,各类分布式电源及微网设备见表 2 各微电源与设备参数,微网碳排放及污染气体排放系数见表 3 污染物排放系数,用户参与需求响应负荷转移补偿 0.3 元/(kWh)<sup>[25]</sup>,储能装置 SOC 区间设置在[0.2,0.9],储能装置初始 SOC 取值 0.2,自然释放率 0.001 5,储能设备的效率为 0.95。

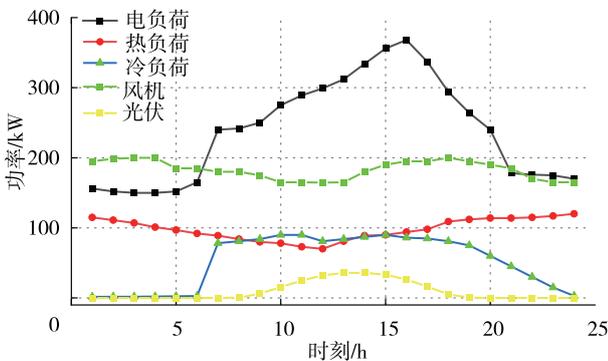


图 4 风光出力及负荷曲线

Fig. 4 Wind and solar output and load curves

表 1 购售电价格参数

Table 1 Price parameters of purchasing electricity and selling electricity

负荷类型	对应时段	价格(元·kWh <sup>-1</sup> )	
		购电	售电
低谷	00:00—06:00, 23:00—24:00	0.33	0.3
高峰	08:00—12:00, 14:00—21:00	0.92	0.3
平峰	06:00—08:00, 12:00—14:00, 21:00—23:00	0.62	0.3

表 2 各微电源与设备参数

Table 2 Parameters of micropower supply and equipment

微电源	总额定 功/kW	上下限/ kW	爬坡率/ (kW·min <sup>-1</sup> )	维护系数/ (元·kWh <sup>-1</sup> )
风机	1 600	—	—	0.010 15
光伏	1 300	—	—	0.031 22
燃气轮机	300	300/50	50	0.042 88
电锅炉	200	200/30	30	0.021 54
电制冷机	150	150/20	25	0.020 12
吸收式制冷机	150	150/20	25	0.015 29
电储能	200	200/-200	50	0.028 98
热储能	200	200/-50	50	0.027 58
冷储能	200	200/-50	50	0.025 42

表 3 污染物排放系数

Table 3 Pollutant emission factors

电 源	碳排放系数/ (kg·kWh <sup>-1</sup> )	污染气体排放系数/(kg·kWh <sup>-1</sup> )	
		SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>
大电网	889×10 <sup>-3</sup>	8.1×10 <sup>-3</sup>	3.5×10 <sup>-3</sup>
燃气轮机	724.6×10 <sup>-3</sup>	8×10 <sup>-6</sup>	4.4×10 <sup>-4</sup>
P2G 设备	489.4×10 <sup>-3</sup>	6×10 <sup>-6</sup>	3×10 <sup>-5</sup>
排放成本/ (元/kg)	0.201	14.58	62.53

#### 3.2 仿真结果分析

##### 3.2.1 不同调度方式下的结果分析

本文分别对不同风力发电不确定性(指风力发电预测值和真实值在调度周期内偏差值占真实值百分比)进行了分析,并在风电发电曲线不存在误差(0%)、存在误差 5%、存在误差 10%和存在误差 15%情况下,设置方案 1,2,3 和 4 如图 5 所示。在此基础上提出了 2 种综合能源系统调度策略,以降低微网运行总成本及环境治理费用和提高风电消纳平稳量。这 2 种策略是:策略 1 风机侧不增加风电储能和策略 2 风机发电侧增加风电储能,不同运行方案下的运行结果见表 4。

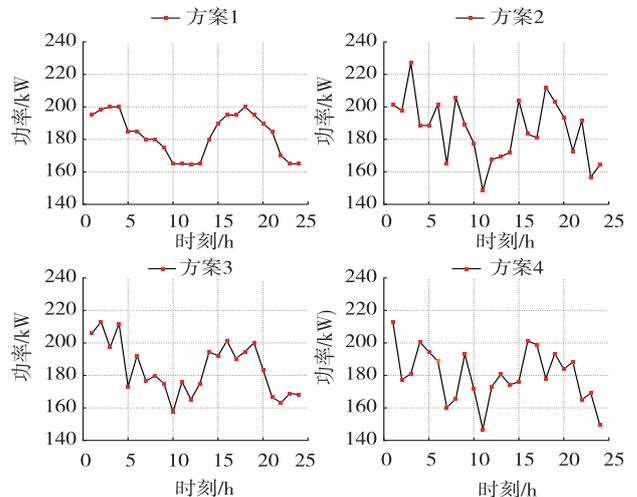


图 5 4 种方案的风力发电曲线

Fig. 5 Wind power curves for 4 schemes

表 4 不同运行方案下的运行结果

Table 4 Running results under different scenarios

方案	微网运行成本/元		环境治理费用/元		风电消纳平稳量/(kWh)	
	策略 1	策略 2	策略 1	策略 2	策略 1	策略 2
	1	25 910.6	25 645.6	500	487	109
2	20 615.4	19 948.2	212	208	140	160
3	20 284.9	19 175.2	331	316	139	147
4	24 648.6	24 075.5	223	215	176	180

从图 5 及表 4 可见,不同风力发电不确定性及运行策略具有不同微网运行的整体经济费用,环境治理费用及风力消纳平稳量,风电储能减少了微网的运行费用,同时也起到了削峰填谷的效果。因为风电储能的存在,在风量较大时能够存储多余电能,在风量较小时或者用电高峰期时发出来,能够消纳更多的风能,这说明对于极端天气具有一定的抵御效果。

策略 2 中风电消纳平稳量增加,环境治理费用减少,运行成本降低。各方案微网运行费用策略 1 大于 2,说明风电储能可以减少弃风量,增加风电收益,降低运行成本。风电消纳平稳量策略 2 大于策略 1,风电储能降低峰谷差,使风电出力更加平稳。加装风电储能有利于降低对电网和天然气的使用,减少环境污染。风电不稳定性对电网和调度设备有影响,使得运行成本和环境费用不同。综合来看,风电不稳定性为 10% 和加入风电储能,运行效益最佳。

### 3.2.2 多目标系统运行分析

图 1 所示的系统由 1 台燃气轮机,1 台电转气设备及电锅炉,1 台分布式电源(1 台光伏及 2 台风机),1 台电制冷机及 1 套冷热电储能设备组成。粒子群总数为 100,迭代次数为 100,系统中燃气价格为 3.08 元/m<sup>3</sup>。

综合考虑经济性,环保性与安全性因素,选取方案 1 中策略 2 为例,其中的电网运行情况、热网运行情况、冷网运行情况和储能运行计划如图 6—图 9 所示。

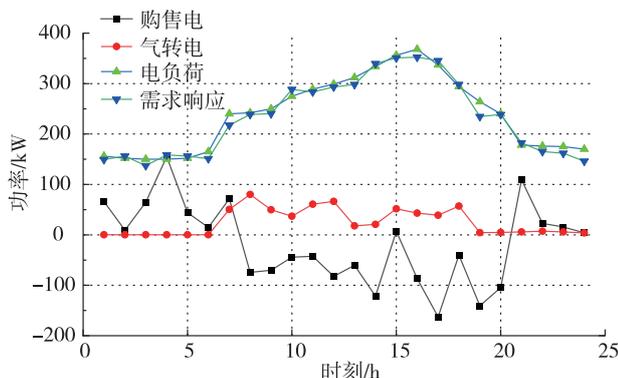


图 6 电网运行计划

Fig. 6 Grid operation plan

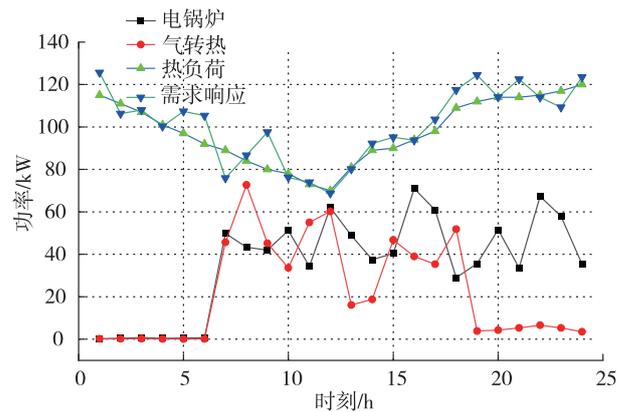


图 7 热网运行计划

Fig. 7 Heat grid operation plan

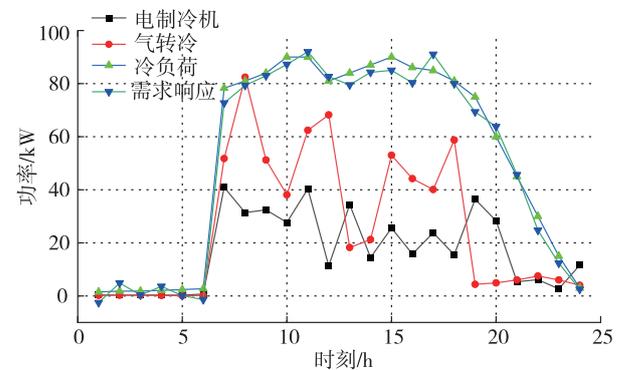


图 8 冷网运行计划

Fig. 8 Cold network operation plan

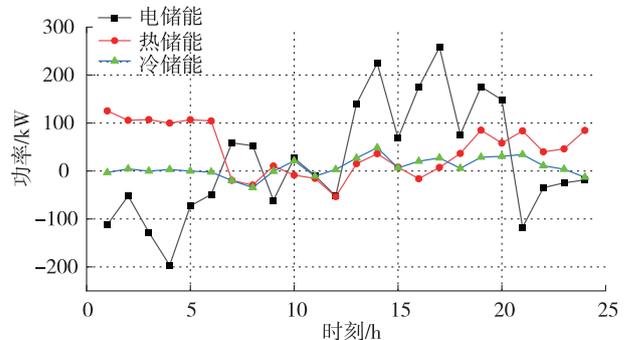


图 9 储能运行计划

Fig. 9 Energy storage operation plan

由图 6 可看出,电网运行总体规划电网在夜间(23:00 至次日 7:00)售电,而日间购电,是由于夜间风电出力充足,日间电负荷用电多于夜间,同时也存在分时电价(夜间电价多为低电价)原因。

由图 7 与图 8 可见,热负荷夜间需求量大,日间需求量小,电热锅炉昼夜运行(上午 7:00 至晚上 12:00),燃气轮机昼夜运行(上午 6:00 至晚上 7:00),是由于分布式发电量足够大,燃气轮机耗用的天然气对环境造成污染且价格昂贵。夜间冷负荷及电负荷较小,微网以电定热运行,燃气轮机无须过多的运作。

如图 9 所示,由于晚上有足够的风力,风电的日间发电量下降,所以电储能是晚上充电,白天放电。热储

能表现为夜间放热和日间储热两种方式,夜间热负荷的需要量大于日间热负荷需要量(以夜间的的生活用水为主)。冷储能能在白天进行储能或放能,由于冷负荷的需求具有不稳定性,并且和环境天气有一定的关系(天气情况下气温较高时需求较大,气温较低时需求较小)。

### 3.2.3 算法结果对比与分析

结合算例可以看出,文中所采用的混沌 MOPSO 在不同调度策略下能有效求解综合能源系统中的多目标问题。以方案1中的策略2为例,如图10所示,由此可见,改进的算法的目标函数值在最后更趋向于稳定值,目标函数值也较小。算法采用自适应权重和变异率以及添加 Tent 混沌映射方法强化粒子跳出局部最优解,具有较强的全局搜索能力和较快的收敛速度,体现了所用算法的优越性。

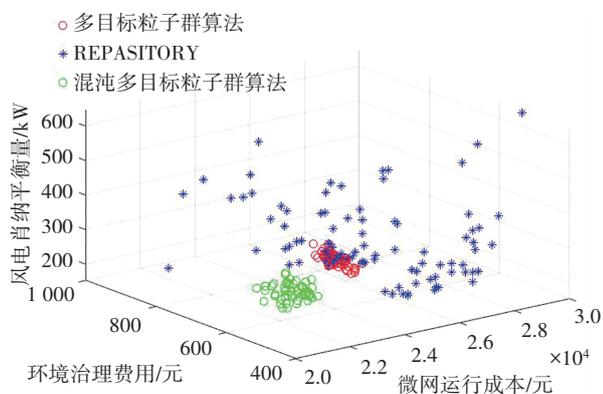


图10 算法优化三维立体图

Fig. 10 Algorithm optimization in 3D

## 4 结论

本文建立并网型综合能源系统的多目标运行双层优化模型及冷热电联供系统的调度模型,并构造以运行成本最小,环境污染最少及风电消纳性最大为目标函数及约束条件。采用混沌多目标粒子群算法,通过对模型进行求解,验证了改进算法能够在考虑算法全局搜索能力的前提下加快求解速度并使系统运行达到最优。通过采用混沌多目标粒子群算法来兼顾综合能源系统运行经济性、缓解环境污染、降低风机破坏等,从而为后续综合能源系统研究提供依据。

本文考虑的综合能源系统未涉及碳交易模型研究,在综合能源中考虑碳交易机制可以减少运行费用和降低环境污染。

### 参考文献(References):

[1] 崔明勇,王楚通,陈钰婷,等. 低碳环境下微电网供需联合优化调度[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(12): 30—38.  
CUI Ming-yong, WANG Chu-tong, GHEN Yu-ting, et al. Study on integrated supply-demand optimal scheduling of microgrid under low-carbon environment[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36

(12): 30—38.  
[2] 王守相,吴志佳,庄剑. 考虑微网间功率交互和微源出力协调的冷热电联供型区域多微网优化调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.  
WANG Shou-xiang, WU Zhi-jia, ZHUANG Jian. Optimal dispatching model of CCHP type regional multi-microgrids considering interactive power exchange among microgrids and output coordination among micro-sources [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24): 7185-7194, 7432.  
[3] ZHENG J, KOU Y, LI M, et al. Stochastic optimization of cost-risk for integrated energy system considering wind and solar power correlated [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 110—121.  
[4] 徐青山,曾艾东,王凯,等. 基于 Hessian 内点法的微型能源网日前冷热电联供经济优化调度[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1657—1665.  
XU Qing-shan, ZENG Ai-dong, WANG Kai, et al. Day-ahead optimized economic dispatching for combined cooling, heating and power in micro energy-grid based on Hessian interior point method [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1657—1665.  
[5] 戚艳,尚学军,聂靖宇,等. 基于改进多目标灰狼算法的冷热电联供型微电网运行优化[J]. 电测与仪表, 2022, 59(6): 12-19, 52.  
QI Yan, SHANG Xue-jun, NIE Jing-yu, et al. Optimization of CCHP microgrid operation based on improved multi-objective gray wolf algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(6): 12-19, 52.  
[6] 赵永杰,林仕立,涂小琳,等. 含复合储能的冷热电联供系统多目标运行优化研究[J]. 新能源进展, 2019, 7(4): 325—332.  
ZHAO Yong-jie, LIN Shi-li, TU Xiao-lin, et al. Study on multi-objective optimization of microgrid with hybrid energy storage system [J]. Advances in New and Renewable Energy, 2019, 7(4): 325—332.  
[7] 耿健,杨冬梅,高正平,等. 含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J]. 电力工程技术, 2021, 40(1): 25—32.  
GENG Jian, YANG Dong-mei, GAO Zheng-ping, et al. Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25—32.  
[8] 刘涤尘,马恒瑞,王波,等. 含冷热电联供及储能的区域综合能源系统运行优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(4): 113-120, 141.  
LIU Di-chen, MA Heng-rui, WANG Bo, et al. Operation optimization of regional integrated energy system with CCHP and energy storage system [J]. Automation of Electric Systems, 2018, 42(4): 113-120, 141.  
[9] 杨永标,于建成,李奕杰,等. 含光伏和蓄能的冷热电联供系统调峰调蓄优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 6-12, 29.  
YANG Yong-biao, YU Jian-cheng, LI Yi-jie, et al. Optimal load leveling dispatch of CCHP incorporating photovoltaic and storage [J]. Automation of Electric Systems, 2017, 41(6): 6-12, 29.  
[10] 郭宇航,胡博,万凌云,等. 含热泵的热电联产型微电网短期

- 最优经济运行[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 16—22.
- GUO Yu-hang, HU Bo, WAN Ling-yun, et al. Optimal economic short-term scheduling of CHP microgrid incorporating heat pump[J]. Automation of Electric Systems, 2015, 39(14): 16—22.
- [11] 魏大钧, 孙波, 赵峰, 等. 小型生物质沼气冷热电联供系统多目标优化设计与运行分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 7—12.
- WEI Da-jun, SUN Bo, ZHAO Feng, et al. Multi-objective optimal design and operation analysis of small biomass biogas cooling, heating and power generation system[J]. Automation of Electric Systems, 2015, 39(12): 7—12.
- [12] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305—1316.
- GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305—1316.
- [13] 蒋润花, 曾蓉, 李洪强, 等. 考虑气候条件及建筑类型等因素的分布式冷热电三联产系统的多目标优化及评估[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3206—3214.
- JIANG Run-hua, ZENG Rong, LI Hong-qiang, et al. Multi-objective optimization and evaluation of distributed CCHP system considering influence of climate condition and building type[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3206—3214.
- [14] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616—3625.
- XIONG Yan, WU Jie-kang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616—3625.
- [15] 朱伟业, 罗毅, 胡博, 等. 考虑采暖建筑用户热负荷弹性与分时电价需求侧响应协同的电热联合系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 124—135.
- ZHU Wei-ye, LUO Yi, HU Bo, et al. Optimized combined heat and power dispatch considering the coordination of heat load elasticity and time-of-use demand response [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 124—135.
- [16] 陈琦, 李红伟, 周海林. 考虑风电消纳的电-热综合能源系统经济运行研究[J]. 中国测试, 2022, 48(1): 116—121.
- CHEN Qi, LI Hong-wei, ZHOU Hai-lin. Study on economic operation of electricity-heat integrated energy system considering wind power consumption[J]. China Measurement & Test, 2022, 48(1): 116—121.
- [17] 刘中华, 牛玉刚, 贾廷纲. 基于风-光-储联合优化的最优潮流[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 221—230.
- LIU Zhong-hua, NIU Yu-gang, JIA Ting-gang. Optimal power flow based on optimization of wind-photovoltaic-storage hybrid system[J]. Journal of East China University of Science and Technology Company (Science and Technology), 2022, 48(2): 221—230.
- [18] LI Y, WANG J, ZHAO D, et al. A two-stage approach for combined heat and power economic emission dispatch: Combining multi-objective optimization with integrated decision making[J]. Energy, 2018, 162(1): 237—254.
- [19] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52—61.
- ZHANG Tao, GUO Yue-tong, LI Yi-hong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52—61.
- [20] 宋杰, 张卫国, 李树鹏, 等. 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 80—87.
- SONG Jie, ZHANG Wei-guo, LI Shu-peng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 80—87.
- [21] 曾鸣, 韩旭, 李源非, 等. 基于 Tent 映射混沌优化 NSGA-II 算法的综合能源系统多目标协同优化运行[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 220—228.
- ZENG Ming, HAN Xu, LI Yuan-fei, et al. Multi-objective cooperative optimization based on Tent mapping chaos optimization NSGA-II algorithm for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 220—228.
- [22] 负保记, 白森珂, 张国. 基于混沌自适应粒子群算法的冷热电联供系统优化[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 123—130.
- ZHAO Bao-ji, BAI Sen-ke, ZHANG Guo. Optimization of CCHP system based on a chaos adaptive particle swarm optimization algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 123—130.
- [23] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121—127.
- DAI Zhi-hui, CHEN Bing-yan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121—127.
- [24] 刘贝贝. 引入地源热泵和储能装置的综合能源系统优化调度[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2020.
- Liu Bei-bei. Optimal scheduling of integrated energy systems with ground source heat pumps and energy storage devices [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2020.
- [25] 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, 117.
- WU Ming, KOU Ling-feng, ZHANG Jin, et al. A day-ahead Nash bargaining method for economic dispatch of the multi-operator micro-grid[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 19—27, 117.