

# 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度

薛开阳, 楚 瀛, 凌 梓, 李子林

(上海电力学院, 上海 200090)

**摘 要:** 随着低碳发展进程的不断推进, 综合能源系统(IES)逐渐成为实现减排目标的重要支撑技术。基于能源集线器概念, 结合需求侧柔性负荷的可平移、可转移、可削减特性, 构建了含风光储、燃气轮机、柔性负荷等在内的 IES 模型。综合考虑了系统运行成本和碳交易成本, 建立了以总成本最低为优化目标的 IES 低碳经济调度模型, 采用鲸鱼优化算法对算例进行求解。通过场景对比, 分析了碳交易因素对能源调度的影响, 以及在碳交易体系之下, 柔性负荷的合理调度对 IES 进一步减少碳排放、降低系统成本可发挥的作用。研究结果表明, 在碳交易体系下, 柔性负荷参与调度能有效地提高系统的经济环境综合效益。

**关键词:** 综合能源系统; 柔性负荷; 碳交易; 鲸鱼优化算法; 优化调度

中图分类号: TK019 文献标志码: A 文章编号: 1671-5292(2019)08-1206-08

DOI:10.13941/j.cnki.21-1469/tk.2019.08.016

## 0 引言

当前, 能源消费规模不断扩大, 环境问题日益严峻, 实现能源结构的优化问题已逐渐成为社会的重要议题。综合能源系统(Integrated Energy System, IES)在促进节能减排、推动能源体系变革方面将起到至关重要的作用<sup>[1]</sup>。

现有的 IES 优化调度主要以系统运行成本最低为调度目标, 却忽略了 IES 运行过程中的环境成本。在寻求可兼顾经济环境效益 IES 调度模型的过程中, 碳交易机制的提出为 IES 减少碳排放提供了新思路。文献[2]针对电、热、气联供的 IES 提出阶梯型碳交易成本计算方法。文献[3]基于 LCA 能源链提出一种碳排放系数计量方法, 并研究了碳交易对 IES 能效的影响。文献[4]将碳交易机制引入传统经济调度模型中, 实现了对火电机组碳排放量的削减。尽管对 IES 低碳运行的研究已陆续展开, 但柔性负荷的合理调度在其中可发挥的作用还有待进一步研究。

柔性负荷具有可灵活调度的特点, 对于缓解供需矛盾、提高可再生能源利用率等方面均起到较好的效果。文献[5],[6]将柔性负荷引入主动配电网, 实现了系统运行成本的降低和网损的减少。文献[7]建立了包含分时电价机制和柔性负荷的微网调度模型, 通过规划柔性负荷用电时段,

使配电网的用电效益和清洁能源消纳能力均有所提高。文献[8]针对电能生产的经济性和环保性问题, 构建了经济和低碳双目标的电热联合系统优化调度模型, 通过调度柔性负荷实现调峰。以上文献中, 柔性负荷参与调度均使相应调度系统的经济环境效益得到有效提升。

对于多能互补的 IES 形态, 引入碳交易可以减少碳排放, 增加清洁能源消纳; 引入柔性负荷可以提高经济性, 优化综合效益。因此, 基于以上研究, 本文提出了一种碳交易体系下含需求侧柔性负荷的 IES 低碳经济优化模型; 综合考虑了电、热、热柔性负荷, 以及柔性负荷的可平移、可转移、可削减特性; 以鲸鱼优化算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)求解仿真算例。本文还通过场景对比, 分析了碳交易对 IES 改善能源结构、减少碳排放的影响和柔性负荷对降低系统成本、提升环境效益的作用, 探索 IES 促进低碳经济的运行方式。

## 1 含柔性负荷的 IES 模型

基于能源集线器(Energy Hub, EH)概念建立了含电热柔性负荷需求的 IES 模型<sup>[9],[10]</sup>。EH 的能源供给侧包括电网电能、新能源发电(风机、光伏)和天然气; EH 的能源转化存储环节包括燃气轮机、燃气锅炉和储能装置(蓄电池、蓄热槽); 需求

收稿日期: 2019-01-21。

基金项目: 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900)。

通讯作者: 楚 瀛(1975-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为多能源系统优化运行技术。E-mail: 552413302@qq.com

侧电热负荷均由基础负荷和柔性负荷组成。IES 结构如图 1 所示。

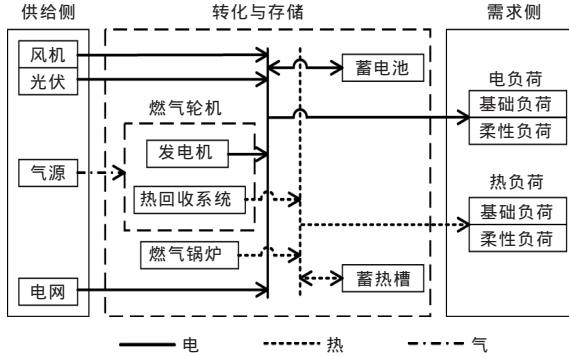


图 1 综合能源系统结构图  
Fig.1 Framework of integrated energy system

柔性负荷的调度有利于减小负荷的峰谷差。按照参与柔性调节的能力,可将柔性负荷分为 3 类:可平移负荷、可转移负荷和可削减负荷,相应的约束及补偿成本如下<sup>[11]</sup>。

#### (1) 可平移负荷

供能时间可根据计划变更,可平移负荷调度可跨越多个时段,但须要负荷整体平移。为保证负荷平移的合理性,须设置可平移时段约束。假设调度周期内可平移时段区间为 $[t_{sf-}, t_{sf+}]$ ,可平移负荷持续时间为 $t_D$ ,则可平移起始时段集合 $S_{shift}$ 为

$$S_{shift}=[t_{sf-}, t_{sf+}-t_D+1] \quad (1)$$

可平移负荷的补偿成本 $F_{shift}$ :

$$F_{shift}=F_{cost}^{shift} \sum_{\tau=1}^T P_{\tau}^{shift} \quad (2)$$

式中: $F_{cost}^{shift}$ 为负荷平移补偿系数;以 1 h 为单位调度时段, $P_{\tau}^{shift}$ 为时段 $\tau$ 平移的功率; $T$ 为一个调度周期的总时段数, $T$ 为 24 h。

#### (2) 可转移负荷

在保证整个周期内负荷总量得到满足的前提下,各时段的用能量可以灵活调节。调度周期内可转移时段区间为 $[t_{tr-}, t_{tr+}]$ 。考虑到用户侧供热需求的特殊性,本文不计及热负荷的可转移负荷特性。为防止设备在各时段出现频繁启停的问题,须要对可转移负荷设置最小连续运行时间的约束,同时还须对其转移功率进行约束。

$$(C)1994-2022 \sum_{\tau=t}^{t+T_{min}^{tran}-1} z_{\tau}^{tran} \geq T_{min}^{tran} \quad (3)$$

$$z_{\tau}^{tran} P_{min}^{tran} \leq P_{\tau}^{tran} \leq z_{\tau}^{tran} P_{max}^{tran} \quad (4)$$

式中: $T_{min}^{tran}$ 为连续运行的最少时间;0-1 为变量 $z_{\tau}^{tran}$ 标记时段 $\tau$ 的转移状态,1 为转移,0 为不转移; $P_{\tau}^{tran}$ 为时段 $\tau$ 转移的功率; $P_{max}^{tran}$ , $P_{min}^{tran}$ 分别为转移功率的上、下限值。

可转移负荷的补偿成本 $F_{tran}$ :

$$F_{tran}=F_{cost}^{tran} \sum_{\tau=1}^T P_{\tau}^{tran} \quad (5)$$

式中: $F_{cost}^{tran}$ 为负荷转移补偿系数。

#### (3) 可削减负荷

此类负荷对降功率、减时间或者中断运行具有一定的承受能力,依照调度需要可对其进行相应削减。为保证负荷削减的合理进行,须对削减时长的上下限值以及削减次数进行约束:

$$T_{min}^{cut} \leq \sum_{\tau=t}^{t+T_{kp}-1} z_{\tau}^{cut} \leq T_{max}^{cut} \quad (6)$$

$$\sum_{\tau=1}^T z_{\tau}^{cut} \leq N_{max} \quad (7)$$

式中: $T_{kp}$ 为削减时长; $T_{max}^{cut}$ , $T_{min}^{cut}$ 分别为连续削减时长的上、下限值;0-1 为变量 $z_{\tau}^{cut}$ 标记时段 $\tau$ 的削减状态,1 为削减,0 为不削减; $N_{max}$ 为最大削减次数。

可削减负荷的补偿成本 $F_{cut}$ :

$$F_{cut}=F_{cost}^{cut} \sum_{\tau=1}^T P_{\tau}^{cut} \quad (8)$$

式中: $F_{cost}^{cut}$ 为负荷削减补偿系数; $P_{\tau}^{cut}$ 为时段 $\tau$ 的负荷削减功率。

## 2 碳交易成本模型

### 2.1 碳交易机制

碳交易是允许将碳排放权在市场中买卖的一种交易机制<sup>[12]</sup>。该交易机制旨在通过碳排放权的商品化促进能源结构优化、提高能源利用效率,从而取得减少温室气体排放的效果。由政府部门向各碳排放源分发碳排放配额。若碳排放源的排放量在给定配额之内,则多余的额度可以在碳交易市场中出售;若碳排放量超出给定配额,则超额部分须从碳交易市场中购买。在碳交易体系下,为使经济效益最大化,各碳排放企业会积极主动地采取节能减排有效措施。

### 2.2 碳交易成本计算

基于碳交易机制建立的 IES 碳交易成本模型

如式(9)所示:

$$f_{\text{CO}_2} = C_t(E_{\text{out}} - E_{\text{all}}) \quad (9)$$

式中:  $f_{\text{CO}_2}$  为碳交易成本,  $f_{\text{CO}_2}$  为正表示碳排放超额, 须购买碳排放额度,  $f_{\text{CO}_2}$  为负表示售出碳排放额度获得收益;  $C_t$  为当日碳交易市场价;  $E_{\text{out}}, E_{\text{all}}$  分别为  $\text{CO}_2$  总排放量以及碳排放配额。

考虑到 IES 中的碳排放产生于各类能源的生产运输过程和使用过程, 本文提出以两阶段法计算 IES 的碳排放量:

$$E_{\text{out}} = \sum_{i \in \Omega} (c_i^{\text{pre}} + c_i^{\text{nm}}) P_i \quad (10)$$

式中:  $\Omega$  为能源设备集合, 包括供能设备和储能设备;  $c_i^{\text{pre}}$  为第  $i$  台能源设备对应能源生产运输阶段的碳排放系数,  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $c_i^{\text{nm}}$  为第  $i$  台能源设备对应能源使用阶段的碳排放系数,  $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ;  $P_i$  为第  $i$  台能源设备的运行出力。

### 3 IES 低碳经济调度模型

#### 3.1 目标函数

考虑柔性负荷的 IES 低碳经济优化运行目标: 在满足各单元约束的情况下, 通过对 IES 各可控单元出力的合理安排, 以及对柔性负荷的优化调度, 使日前运行成本  $f_{\text{IES}}$  与碳交易成本  $f_{\text{CO}_2}$  之和最小。

$$\min f = f_{\text{IES}} + f_{\text{CO}_2} \quad (11)$$

$$f_{\text{IES}} = F_{\text{NET}} + F_{\text{DG}} + F_{\text{MT}} + F_{\text{GB}} + F_{\text{BAT}} + F_{\text{HST}} + F_{\text{L}} \quad (12)$$

其中:

$$F_{\text{NET}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{NET}}(t) P_{\text{NET}}(t) \quad (13)$$

$$F_{\text{DG}} = \sum_{t=1}^T [K_{\text{W}} P_{\text{W}}(t) + K_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t)] \quad (14)$$

$$F_{\text{MT}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{MT}} P_{\text{MT}}(t) \quad (15)$$

$$F_{\text{GB}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{GB}} P_{\text{GB}}(t) \quad (16)$$

$$F_{\text{BAT}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{BAT}} |P_{\text{BAT}}(t)| \quad (17)$$

$$F_{\text{HST}} = \sum_{t=1}^T K_{\text{HST}} |P_{\text{HST}}(t)| \quad (18)$$

$$F_{\text{L}} = F_{\text{shift}} + F_{\text{tran}} + F_{\text{cut}} \quad (19)$$

式中:  $F_{\text{NET}}$  为与电网交互成本;  $F_{\text{DG}}$  为新能源发电成本;  $F_{\text{MT}}, F_{\text{GB}}$  分别为燃气轮机、燃气锅炉的运行

成本;  $F_{\text{BAT}}, F_{\text{HST}}$  分别为蓄电池、蓄热槽的折旧成本;  $F_{\text{L}}$  为调度柔性负荷的总补偿费用;  $K_{\text{NET}}(t)$  为分时电价;  $P_{\text{NET}}(t)$  为与电网交换的功率, 购电为正;  $K_{\text{W}}, K_{\text{PV}}, K_{\text{MT}}, K_{\text{GB}}, P_{\text{W}}(t), P_{\text{PV}}(t), P_{\text{MT}}(t), P_{\text{GB}}(t)$  分别为风机、光伏、燃气轮机、燃气锅炉的运行成本系数、输出功率;  $K_{\text{BAT}}, K_{\text{HST}}$  分别为蓄电池、蓄热槽的折旧系数;  $P_{\text{BAT}}(t), P_{\text{HST}}(t)$  分别为蓄电池、蓄热槽的充放能量, 吸收为正, 释放为负。

#### 3.2 约束条件

##### (1) 负荷平衡约束

电、热功率分别满足以下负荷平衡约束:

$$P_{\text{NET}} + P_{\text{W}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{MT}} - P_{\text{BAT}} = P_{\text{LOAD}} \quad (20)$$

$$Q_{\text{HT}} + Q_{\text{GB}} - Q_{\text{HST}} = Q_{\text{LOAD}} \quad (21)$$

式中:  $P_{\text{LOAD}}, Q_{\text{LOAD}}$  分别为电、热负荷需求。

##### (2) 出力上下限约束

各新能源(风机、光伏)出力和各能源转化设备(燃气轮机、燃气锅炉)出力须满足上下限约束:

$$0 \leq P_{\text{W/PV}} \leq P_{\text{pred}} \quad (22)$$

$$0 \leq P_{\text{WT/GB}} \leq P_{\text{N}} \quad (23)$$

式中:  $P_{\text{W/PV}}, P_{\text{pred}}$  分别为风机/光伏输出功率、相应新能源出力预测值;  $P_{\text{WT/GB}}, P_{\text{N}}$  分别为燃气轮机/燃气锅炉输出功率、相应设备额定功率。

##### (3) 储能装置约束

储能装置约束包括储能容量约束、充放功率约束、充放状态约束、全周期净交换功率为零的约束:

$$E_{\text{cap, min}} \leq E_{\text{cap}}(t) \leq E_{\text{cap, max}} \quad (24)$$

$$P_{\text{ex, min}} \leq P_{\text{ex}}(t) \leq P_{\text{ex, max}} \quad (25)$$

$$0 \leq S(t) + R(t) \leq 1 \quad (26)$$

$$\sum_{t=1}^T P_{\text{ex}}(t) = 0 \quad (27)$$

式中:  $E_{\text{cap}}(t), P_{\text{ex}}(t)$  分别为储能容量、充放能功率;  $E_{\text{cap, max}}, E_{\text{cap, min}}, P_{\text{ex, max}}, P_{\text{ex, min}}$  分别为储能容量、充放能功率的上、下限值;  $S(t), R(t)$  分别为充、放状态,  $S(t), R(t)$  均为 0-1 变量。

考虑到蓄电池的使用寿命, 须额外约束其日充放电次数上限各为 8 次。

#### 3.3 WOA 算法

WOA 算法是模拟座头鲸捕食策略而提出的

一种新型群体智能优化算法。该算法具有参数少、简单易实现、迭代次数少、寻优能力强等优点,其优化过程主要包括包围猎物、狩猎行为、搜索猎物3个环节<sup>[13]</sup>。WOA 算法的具体优化步骤:①初始化鲸群规模和鲸鱼个体位置等参数,并定义适应度函数(即本文目标函数);②计算各鲸鱼个体的适应值(即总成本),并记录当前最优鲸鱼;③更新鲸群位置,再次计算各鲸鱼适应值,并与最优鲸鱼比较;④重复执行直至满足终止条件。

#### 4 算例分析

##### 4.1 基础数据

选取某社区 IES 为研究对象,其中包括风机、光伏、燃气轮机、蓄电池、蓄热槽等单元,综合考虑柔性负荷、碳交易、分时电价等因素。调度周期为24 h,以1 h为单位调度时段。IES 的运行参数见表1。日负荷曲线及新能源最大出力见图2。

表1 IES 的运行参数  
Table 1 Operating parameters of IES

类型	功率下限/kW	功率上限/kW	运行成本/元/(kW·h) <sup>-1</sup>
电网	—	—	分时电价
风机	0	预测值	0.52
光伏	0	预测值	0.72
燃气轮机	0	200	天然气价
燃气锅炉	0	100	天然气价

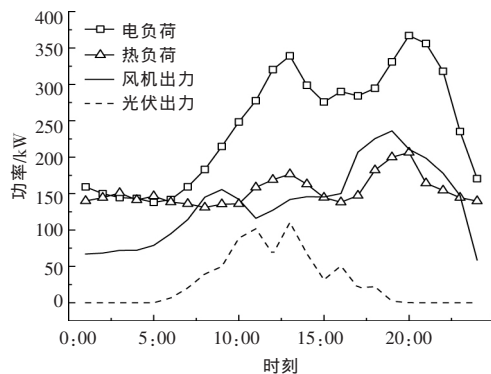


图2 日负荷及风光出力曲线

Fig.2 Curves of load and PV/wind power output

算例中的能源价格为分时电价和固定气价。电价的峰、谷、平时段分布如下:峰时段为10:00–15:00,18:00–21:00;平时段为7:00–10:00,15:00–18:00,21:00–24:00;谷时段为0:00–7:00。各时段的购电价格:峰时段0.82元/(kW·h);平时段0.53元/(kW·h);谷时段0.25元/(kW·h)。各时段的售电价格:峰时段0.65元/(kW·h);平时段0.42元/(kW·h);谷时段0.22元/(kW·h)。天然气价格

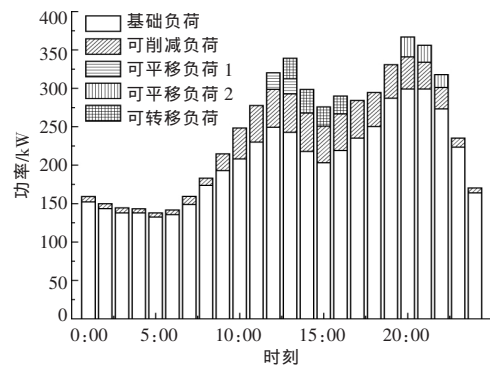
为2.5元/m<sup>3</sup>。本文储能设备均采用广义储能系统下的通用模型<sup>[14]</sup>。其中,充放能效率均取0.9,蓄电池荷电状态为30%~95%。

根据文献[3]的数据和本文提出的两阶段碳排放计量方法,列出该社区 IES 中所涉及能源的碳排放系数如表2所示。其中,总碳排放系数为两阶段排放系数之和。碳排放配额见表2,碳交易价格为150元/t。

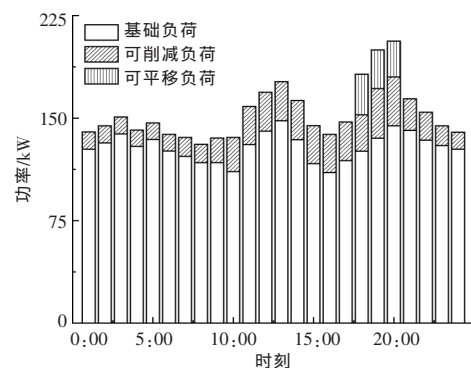
表2 碳排放系数及配额系数  
Table 2 Carbon emission coefficient and quota coefficient

能源类型	$c_i^{pe}$ g/(kW·h)	$c_i^{nm}$ g/(kW·h)	总碳排放系数 g/(kW·h)	配额 g/(kW·h)
煤电(电网)	1 303.0	0	1 303.0	798.0
天然气	116.4	448.3	564.7	424.0
风力发电	43.0	0	43.0	78.0
光伏发电	54.5	0	154.5	78.0
储能	91.3	0	91.3	0

需求侧的电负荷由基础电负荷、可平移电负荷1、可平移电负荷2、可转移电负荷和可削减电负荷组成。热负荷由基础热负荷、可平移热负荷和可削减热负荷组成。优化前各柔性电、热负荷分布情况如图3所示。柔性负荷参数见表3~5。



(a) 优化前柔性电负荷分布



(b) 优化前柔性热负荷分布

图3 优化前柔性负荷分布情况

Fig.3 Flexible load distribution without optimal dispatch



表 3 柔性负荷参数(1)

Table 3 Parameters of flexible load (1)

类型	$t_1/h$	$t_d \sim t_{d+}$	$F_{\text{cost}}^{\text{shift}}/元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
可平移电负荷 1	3	5:00~21:00	0.2
可平移电负荷 2	3	7:00~23:00	0.2
可平移热负荷	3	5:00~21:00	0.1

表 4 柔性负荷参数(2)

Table 4 Parameters of flexible load (2)

类型	$T_{\text{min}}^{\text{ran}}/h$	$P_{\text{min}}^{\text{ran}} \sim P_{\text{max}}^{\text{ran}}$	$t_{\text{tr}} \sim t_{\text{tr}+}$	$F_{\text{cost}}^{\text{ran}}/元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
可转移电负荷	2	8~26.7 kW	4:00~22:00	0.3

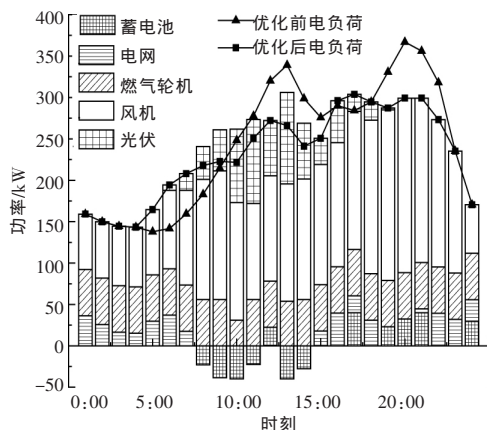
表 5 柔性负荷参数(3)

Table 5 Parameters of flexible load (3)

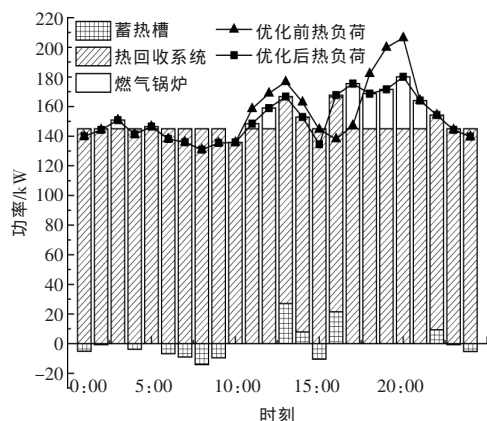
类型	$T_{\text{min}}^{\text{red}}/h$	$T_{\text{max}}^{\text{red}}/h$	$N_{\text{max}}^{\text{red}}/\text{次}$	$F_{\text{cost}}^{\text{red}}/元 \cdot (kW \cdot h)^{-1}$
可削减电负荷	2	5	8	0.4
可削减热负荷	2	5	8	0.2

## 4.2 柔性负荷参与的低碳经济调度分析

在考虑柔性负荷的情况下,对 IES 进行低碳经济优化调度,可以得到各能源出力的逐时变化情况以及优化前后电、热负荷的分布情况(图 4)。



(a) 电能调度



(b) 热能调度

图 4 各能源出力情况

Fig.4 Power output of each energy

由图 4(a)可见,电负荷主要由新能源和燃气轮机出力满足需求,少量由电网购电补充。在 8:00~15:00 时段,风光资源充沛,蓄电池在该时段充电可提高新能源的利用率。在 16:00~24:00 时段,蓄电池的放电缓解了用电高峰的供电压力。整个调度周期中,燃气轮机的电出力一方面起到减排的作用,另一方面降低了风光资源匮乏时段、用电高峰时段对电网的功率冲击。

对比优化前后电负荷曲线可知,可平移和可转移的柔性电负荷总体呈现出从用电峰时段向谷、平时段转移的趋势,有利于清洁能源的消纳,且负荷转移至谷、平时段保证了调度的经济性。此外,负荷受到不同程度的削减,削减时段多为用电高峰期。

从图 4(b)可见,由于电力调度尽量减少从电网购电,燃气轮机基本处于满发状态,故优先利用燃气轮机的热出力满足热负荷需求,由蓄热槽和燃气锅炉进行补充。在 0:00~4:00,5:00~9:00,22:00~24:00 等热负荷低谷时段,蓄热槽利用热回收系统中的多余热能进行蓄热,在热负荷高峰时段参与供热,实现热负荷的削峰填谷。

对比优化前后热负荷曲线可知,与柔性电负荷相似,可平移热负荷由热能需求的晚高峰平移至谷时段,热负荷的削减进一步缓解了高峰期的供热压力。

## 4.3 不同场景的调度分析

为研究碳交易对 IES 调度运行的影响以及柔性负荷对低碳经济调度的优化作用,设置 3 种场景进行对比分析:①场景 1,不考虑碳交易和柔性负荷的情况;②场景 2,计入碳交易因素的优化调度;③场景 3,采用本文的调度模型,综合考虑 IES 运行成本和碳交易成本,含柔性负荷参与的优化调度。

### 4.3.1 各场景调度结果

为对比分析 3 种场景下的经济环境效益,对各场景下的 IES 调度模型进行求解,调度结果如表 6 所示。

表 6 3 种场景的调度结果

Table 6 Dispatch results of three scenarios

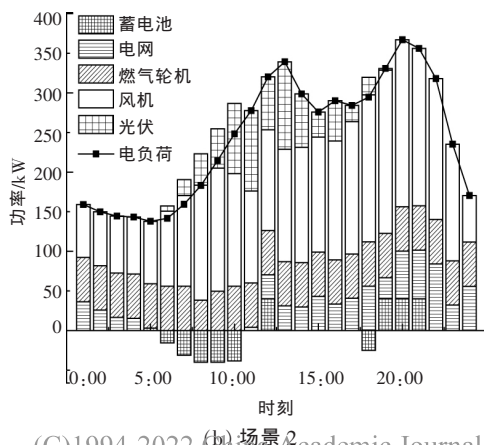
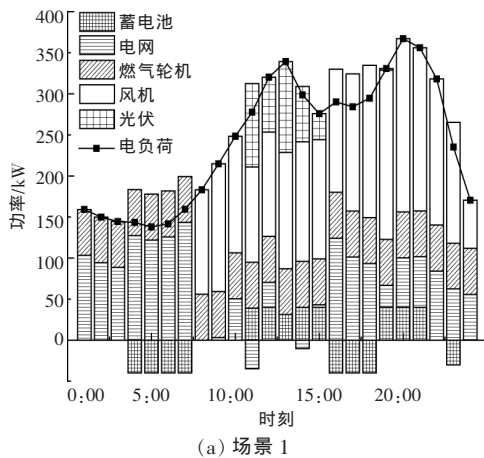
场景	运行成本 元	碳交易成本 元	总成本 元	新能源出力总量 kW·h	碳排放量 t
1	3 318.26	-	3 318.26	2 981.73	3.08
2	3 432.51	140.92	3 573.43	3 864.95	2.57
3	3 162.58	131.94	3 294.52	3 864.95	2.51

由于场景 1 未考虑碳交易因素,故不计及其碳交易成本。由表 6 可知,场景 1 碳排放量最高,新能源利用率仅为另外两个场景的 77.15%;场景 2 的碳交易成本为正,表明须要购买排放额度,碳排放量较场景 1 大幅降低,但运行成本也随之增加;场景 3 运行成本较场景 2 降低了 7.87%,且碳排放量进一步减少使碳交易成本也有所下降,场景 3 的总成本及碳排放量均为 3 种场景中最低。

综上可见,碳交易可有效减少 IES 的碳排放量。柔性负荷的合理调度,有利于在提升环境效益的同时,保证调度的经济性,使系统的经济环境综合效益更优。

#### 4.3.2 碳交易对 IES 调度的影响

为了验证引入碳交易对 IES 的影响,对场景 1 和场景 2 进行优化调度分析,可分别得到引入碳交易前后场景中各能源的出力情况(图 5)。



(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>  
图 5 场景 1、2 电能调度情况

Fig.5 Electric power dispatch in scenario 1 and scenario 2

对比图 5(a),(b)可以看出,场景 1 弃风弃光现象比较明显,主要体现在电价谷、平时段。场景 2 增加了对新能源的消纳,使其电网购电量远低于场景 1。蓄电池在这两个场景中均起到一定的削峰填谷作用,所不同的是,场景 2 更倾向于利用新能源对蓄电池充电。由此可见,碳交易使得 IES 调度向低碳化发展,对 IES 能源结构起到优化作用。

#### 4.3.3 柔性负荷对低碳经济调度的影响

从以上的数据及分析可知,对于电能调度,场景 2 和场景 3 的新能源及燃气轮机出力相近,引起二者成本及碳排放量不同的主要因素为电网出力差异。因此,为了验证柔性负荷参与调度的影响,对场景 2 和场景 3 的电网出力情况进行分析,如图 6 所示。

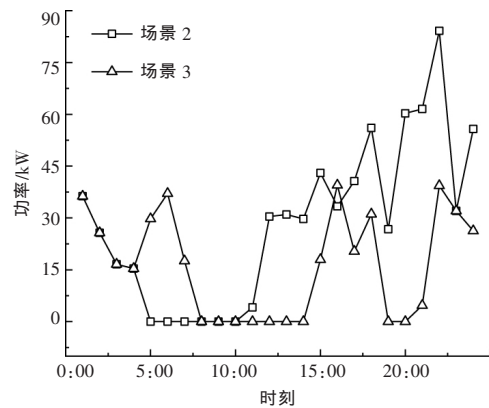


图 6 场景 2、3 电网出力情况

Fig.6 Power grid output in scenario 2 and scenario 3

由图 6 可见,仅在少数时段,由于可平移负荷和可转移负荷的移峰填谷作用,场景 3 的电网出力会高于场景 2,同时柔性电负荷的削减使场景 3 的电网出力进一步减少。从环境效益的角度来看,电网购电量的减少可使清洁能源的利用更为充分合理,有利于 IES 碳排放量的减少和碳交易成本的降低。由此可见,柔性负荷的合理调度对优化 IES 经济环境综合效益起到了推进作用。

#### 4.4 算法性能比较

为了验证用 WOA 算法进行优化调度的效果,将 WOA 算法与遗传算法(GA)和粒子群算法(PSO)对场景 3 的优化调度结果进行对比,各算法参数设置见表 7。3 种算法的性能比较如图 7 所示。

表 7 各算法参数设置  
Table 7 Parameter settings of each algorithm

算 法	参 数
GA	种群规模 $N=30$ , 最大迭代次数 $G=100$ , 交叉概率 $P_c=0.9$ , 变异概率 $P_m=0.1$
PSO	种群规模 $N=30$ , 最大迭代次数 $G=100$ , 惯性权重 $\omega=0.6$ , 学习因子 $c_1=c_2=2$
WOA	种群规模 $N=30$ , 最大迭代次数 $G=100$

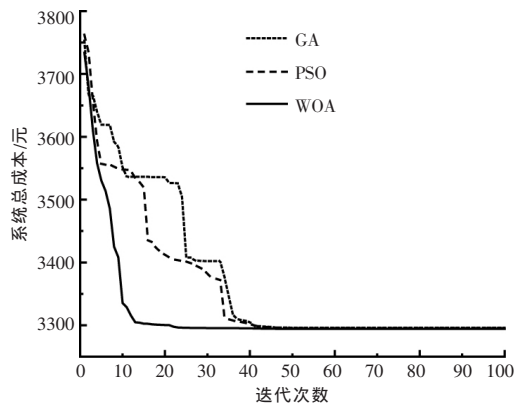


图 7 3 种算法对优化调度的性能比较  
Fig.7 Performance comparison of three algorithms for optimal dispatch

图 7 展示了 IES 调度寻优过程中系统总成本随迭代次数的变化情况。从图 7 可以看出,采用 WOA 算法迭代至 22 次左右时,系统总成本就达到 3 294.52 元,而采用 GA 算法和 PSO 算法则迭代至 63 次和 55 次左右时,系统总成本才分别达到 3 296.05 元和 3 295.38 元。故 WOA 算法比另外两种群体智能优化算法的收敛速度更快,且优化结果更佳,从而验证了 WOA 算法在解决 IES 优化调度问题上的有效性。

## 5 结束语

本文提出了一种碳交易体系下含需求侧柔性负荷的 IES 低碳经济优化模型;综合考虑了运行成本和碳交易成本,对 IES 进行了低碳经济优化调度分析。通过场景对比,验证了碳交易对 IES 能源结构的改善作用;阐述了在碳交易体系下,柔性负荷的参与可使系统的经济环境综合效益得到优化,为进一步研究 IES 低碳经济调度策略提供了参考。本文针对单区域 IES 进行了建模与分析,今后可进一步将碳交易机制和柔性负荷模型引申到多 IES 互连的低碳经济调度中。

## 参考文献:

[1] 程耀华,张宁,康重庆,等. 低碳多能源系统的研究框架及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4060-

4069.  
[2] 秦婷,刘怀东,王锦桥,等.基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J].电力系统自动化,2018,42(14):8-13.  
[3] 王泽森,石岩,唐艳梅,等.考虑 LCA 能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J].中国电机工程学报,2019,39(6):1614-1626,1858.  
[4] 卫志农,张思德,孙国强,等.基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行 [J]. 电力系统自动化,2016,40(15):9-16.  
[5] 贾先平,邹晓松,袁旭峰,等.含柔性负荷的主动配电网优化模型研究[J].电测与仪表,2018,55(13):46-52,116.  
[6] 王云,刘东,李庆生.主动配电网中柔性负荷的混合系统建模与控制 [J]. 中国电机工程学报,2016,36(8):2142-2150.  
[7] 王凌云,马奇伟,徐嘉阳.基于 MAS 微电网的需求响应互动定价优化模型 [J]. 可再生能源,2017,35(6):905-911.  
[8] 邹晨露,崔雪,周斌,等.低碳环境下计及柔性负荷和电锅炉的电热联合系统优化调度 [J]. 电测与仪表,2016(12):1-8.  
[9] 许志斌,王珏,欧阳春明.考虑 CHP 设备补贴的楼宇型综合能源系统规划 [J]. 可再生能源,2018,36(12):1806-1811.  
[10] 马腾飞,吴俊勇,郝亮亮,等.基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J].电网技术,2018,42(1):179-186.  
[11] 蒋文超,严正,曹佳,等.计及柔性负荷的能源枢纽多目标综合优化调度[J].电测与仪表,2018,55(13):31-39.  
[12] 檀勤良,毅宏.考虑碳交易的火电节能调度优化模型及应对模式[J].电力自动化设备,2018,38(7):175-181,188.  
[13] Mirjalili S,Lewis A.The whale optimization algorithm [J].Advances in Engineering Software,2016,95:51-67.  
[14] 门向阳,曹军,王泽森,等.能源互联微网型多能互补系统的构建与储能模式分析[J].中国电机工程学报,2018,38(19):5727-5737,5929.

## Low-carbon economic optimal dispatch of integrated energy system considering flexible load

Xue Kaiyang, Chu Ying, Ling Zi, Li Zilin

(Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** With the continuous advancement of low-carbon development process, integrated energy system (IES) has gradually become an important supporting technology to achieve the goal of emission reduction. This paper established an IES model based on the concept of energy hub, containing wind power, photovoltaic, energy storage, gas turbine and flexible load, etc. The model considered the load characteristics of flexible load on demand side, which can be shifted, transferred and reduced. Considering system operation cost and carbon trading cost, an IES optimal dispatch model with the goal of minimizing total cost was established, and the whale optimization algorithm was used to solve the example. Through the comparison of scenarios, the impact of carbon trading factors on energy dispatch was analyzed, and the role of flexible load in further reducing carbon emissions and system costs under carbon trading system was also discussed. The results show that dispatch of flexible load under carbon trading system can effectively improve the comprehensive benefits of economy and environment of the system.

**Key words:** integrated energy system; flexible load; carbon trading; whale optimization algorithm; optimal dispatch