

# 基于碳排放分析的综合能源系统低碳优化调度方法

庞清仑<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 申自裕<sup>1</sup>, 韩小齐<sup>1</sup>, 林俐<sup>1</sup>, 李亚楼<sup>2</sup>, 李芳<sup>2</sup>

<sup>1</sup>新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京

<sup>2</sup>中国电力科学研究院, 北京

收稿日期: 2022年6月6日; 录用日期: 2022年6月16日; 发布日期: 2022年6月28日

## 摘要

当今世界环境问题日益突出, 发展综合能源系统成为实现能源行业低碳化的重要手段。基于此, 本文提出以降碳为目标的综合能源碳排放优化方法。首先对综合能源系统的各类能源的碳排放量进行了分析, 其次, 以降碳为目标, 建立以碳排放量最小为目标的综合能源碳排放优化模型并采用粒子群算法对模型进行求解; 最后, 仿真验证了所提方法不仅能有效降低综合能源系统的碳排放量, 还增加了综合能源系统对风、光电的消纳水平。

## 关键词

综合能源系统, 碳排放分析, 优化模型, 粒子群算法

# Low Carbon Optimal Scheduling Method of Integrated Energy System Based on Carbon Emission Analysis

Qinglun Pang<sup>1</sup>, Wenying Liu<sup>1</sup>, Ziyu Shen<sup>1</sup>, Xiaoqi Han<sup>1</sup>, Li Lin<sup>1</sup>, Yalou Li<sup>2</sup>, Fang Li<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing

<sup>2</sup>China Institute of Electrical Science, Beijing

Received: Jun. 6<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 28<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

In today's world, the environmental problems in the world are becoming increasingly prominent,

文章引用: 庞清仑, 刘文颖, 申自裕, 韩小齐, 林俐, 李亚楼, 李芳. 基于碳排放分析的综合能源系统低碳优化调度方法[J]. 智能电网, 2022, 12(3): 82-91. DOI: 10.12677/sg.2022.123010

and the development of integrated energy system has become an important means to realize the low-carbon energy industry. Based on this, this paper proposes an integrated energy carbon emission optimization method aiming at carbon reduction. Firstly, the carbon emissions of all kinds of energy in the integrated energy system are analyzed. Secondly, aiming at reducing carbon emissions, the optimization model of carbon emissions of integrated energy is established and the particle swarm algorithm is used to solve the model. Finally, the simulation results show that the proposed method can not only effectively reduce the carbon emissions of the integrated energy system, but also increase the consumption level of wind power and photoelectric energy of the integrated energy system.

## Keywords

Integrated Energy System, Carbon Emission Analysis, Optimization Model, Particle Swarm Algorithm

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

近年来,随着社会的发展和化石燃料的不断开采利用,碳排放造成的气候变暖问题成为对世界生态系统最严重的危害之一。面对日益提高的绿色用能要求,全球 128 个国家提出了碳中和目标,电力是全球能源消耗的重点行业[1],大部分国家的碳排放强度超过 500 克/千瓦时,因此电力行业具有较大的碳减排潜力,推行低碳电力有助于全球碳中和目标的实现。

综合能源系统(IES)通过对能源的产生传输、分配转换和存储消费等环节进行协调和优化,整合冷、热、电、天然气等多种能源,实现不同能源系统之间的深度融合,推动了可再生能源的规模化利用,是实现减排目标的重要技术手段之一[2]。目前考虑节能减排的 IES 交易模型的研究已取得了一定进展。在碳排放方面,文献[3] [4]对阶梯式碳交易和传统碳交易的原理进行了分析,并将其引入电-气-热综合能源系统,证明了碳交易机制中引入综合能源系统低碳经济调度的合理性。文献[5]以储能和抽水蓄能作为复合储能元件,利用储能平滑新能源出力波动,并引入碳交易机制,降低了电力系统的碳排放量。文献[6]研究了多能源集线器之间的能流以及二氧化碳在电网及天然气网的分布。文献[7]研究了电-热-气联供的综合能源系统在阶梯碳叫价机制下的调度策略。文献[8] [9]结合电力系统的传输系统对用户侧电力的来源进行了追溯并对其碳排放强度进行了评估。

本文基于上述研究成果,首先对综合能源系统中各能源的碳排放进行量化分析,以碳排放量最低为目标,建立以降碳为目标的综合能源碳排放优化模型,并利用粒子群优化算法对模型进行求解,最后通过仿真验证,证明本文所提方法可以有效降低系统的碳排放量。

## 2. 综合能源系统各类能源碳排放量分析

本文建立的综合能源系统主要包括电、气和热,电源包括以水、煤电为主的常规电源,以风电、光伏为主的新能源。首先对各类能源的碳排放量进行建模:

### 1) 燃煤机组碳排放模型

燃煤机组碳排放量与其输出功率相关:

$$Q_{c,j} = \sum_{t=1}^T (\alpha_1 P_{c,j,t}^2 + \beta_1 P_{c,j,t} + \lambda_1) \quad (1)$$

式中  $Q_{c,j}$  为第  $j$  个燃煤机组的碳排放量,  $T$  为一日总时段数,  $P_{c,j,t}$  为第  $j$  个燃煤机组在第  $t$  个时刻的发电功率,  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$ 、 $\lambda_1$  为燃煤机组的碳排放因子。

2) 水电机组碳排放模型

$$Q_{wa,j} = \sum_{t=1}^T \lambda_{wa} P_{wa,j,t} \quad (2)$$

式中  $Q_{wa,j}$  为第  $j$  个水电机组的碳排放量,  $P_{wa,j,t}$  为第  $j$  个水电机组在第  $t$  个时刻的发电功率,  $\lambda_{wa}$  为水电机组的碳排放强度,  $\lambda_{wa} = 0$ 。

3) 风电机组碳排放模型

$$Q_{w,j} = \sum_{t=1}^T \lambda_w P_{w,j,t} \quad (3)$$

式中  $Q_{w,j}$  为第  $j$  个风电机组的碳排放量,  $P_{w,j,t}$  为第  $j$  个风电机组在第  $t$  个时刻的发电功率,  $\lambda_w$  为风电机组的碳排放强度,  $\lambda_w = 0$ 。

4) 光伏碳排放模型

$$Q_{p,j} = \sum_{t=1}^T \lambda_p P_{p,j,t} \quad (4)$$

式中  $Q_{p,j}$  为第  $j$  个光伏机组的碳排放量,  $P_{p,j,t}$  为第  $j$  个光伏机组在第  $t$  个时刻的发电功率,  $\lambda_p$  为光伏机组的碳排放强度,  $\lambda_p = 0$ 。

5) 燃气轮机碳排放模型

在燃气轮机只发电不供热的情况下碳排放量与发电功率相关:

$$Q_{g,j} = \sum_{t=1}^T \lambda_g P_{GT,j,t} \quad (5)$$

式中  $Q_{g,j}$  为第  $j$  个燃气轮机在  $t$  时段内的碳排放量,  $P_{GT,j,t}$  为第  $j$  个燃气轮机在第  $t$  个时段的发电功率,  $\lambda_g$  为燃气轮机的单位碳排放强度。

燃煤机组的碳排放强度一般在 750~900 g/kw·h 之间[10], 燃气轮机的碳排放强度一般在 390~500 g/kw·h 之间, 风光电机组的碳排放强度为 0, 即各发电机组单位出力相同时, 风光电碳排放量为 0, 燃气机组次之, 燃煤机组碳排放量最高。

### 3. 以降碳为目标的综合能源碳排放优化方法

#### 3.1. 以降碳为目标的综合能源碳排放优化模型

综合能源系统由电、热、气等多种能源及耦合设备组成, 如图 1 所示, 蓝线和红线分别代表电力、天然气和热力能量流, 电源包括风电, 光伏、水电、煤电和燃气发电; 电-气之间的耦合设备有燃气轮机和电转气设备, 电-热之间的耦合设备有电锅炉; 负荷包括电、热、气负荷。

为降低综合能源系统碳排放, 以碳排放量最低为目标建立综合能源碳排放优化模型, 目标函数如下:

$$\min Q = \sum_{j=1}^{N_C} Q_{c,j} + \sum_{j=1}^{N_G} Q_{g,j} + \sum_{j=1}^{N_W} Q_{w,j} + \sum_{j=1}^{N_P} Q_{p,j} + \sum_{j=1}^{N_{wa}} Q_{wa,j} \quad (6)$$

式中  $Q_{c,j}$  为第  $j$  个燃煤机组的碳排放量,  $Q_{g,j}$  为第  $j$  个燃气轮机的碳排放量,  $Q_{w,j}$  为第  $j$  个风电机组的碳

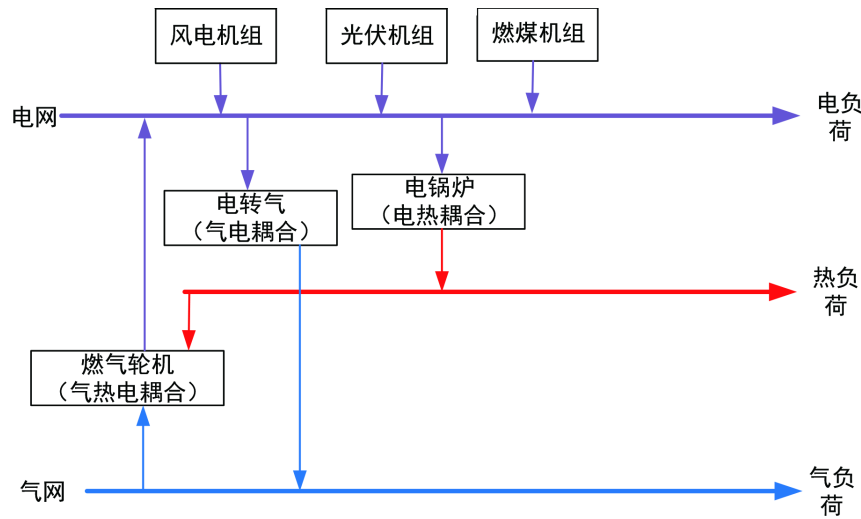


Figure 1. Energy hub model diagram  
图 1. 能源枢纽模型图

排放量,  $Q_{p,j}$  为第  $j$  个光伏机组的碳排放量,  $Q_{wa,j}$  为第  $j$  个水电机组的碳排放量,  $N_c$ 、 $N_G$ 、 $N_W$ 、 $N_p$ 、 $N_{WA}$  分别表示燃煤机组、燃气轮机、风电机组、光伏机组和水电机组数量。

由于风、光、水电的碳排放强度均为 0, 根据式(2)、(3)、(4)可以看出, 其碳排放量均等于 0。基于此, 式(6)目标函数变为:

$$\min Q = \sum_{j=1}^{N_c} Q_{c,j} + \sum_{j=1}^{N_G} Q_{g,j} \quad (7)$$

将式(1)和(5)带入(7)得:

$$\min Q = \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{t=1}^T (\alpha_1 P_{C,j,t}^2 + \beta_1 P_{C,j,t} + \lambda_1) + \sum_{j=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T \lambda_g P_{GT,j,t} \quad (8)$$

由式(6)和式(8)可以看出, 增加风电、光伏、水电发电量, 减小燃煤发电出力和燃气发电出力可以有效减少碳排放量。

### 3.2. 约束条件

#### 3.2.1. 各能源约束

##### 1) 燃煤机组约束

燃煤机组主要满足出力上下限约束和爬坡率约束:

$$\begin{cases} P_{C,j,\min} \leq P_{C,j,t} \leq P_{C,j,\max} \\ P_{C,j,\text{downmax}} \leq P_{C,j,t} - P_{C,j,t-1} \leq P_{C,j,\text{upmax}} \end{cases} \quad (9)$$

式中  $P_{C,j,\min}$ 、 $P_{C,j,\max}$  分别为第  $j$  个燃煤机组的最小和最大出力值,  $P_{C,j,\text{downmax}}$ 、 $P_{C,j,\text{upmax}}$  分别为第  $j$  个燃煤机组的最大下爬坡功率和最大上爬坡功率。

##### 2) 燃气轮机约束

燃气轮机主要满足出力上下限约束和爬坡率约束:

$$\begin{cases} P_{GT,j,\min} \leq P_{GT,j,t} \leq P_{GT,j,\max} \\ P_{GT,j,\text{downmax}} \leq P_{GT,j,t} - P_{GT,j,t-1} \leq P_{GT,j,\text{upmax}} \end{cases} \quad (10)$$

式中  $P_{GT.j.min}$ 、 $P_{GT.j.max}$  分别为第  $j$  个燃气轮机的最小和最大出力值， $P_{GT.j.downmax}$ 、 $P_{GT.j.upmax}$  分别为第  $j$  个燃气轮机的最大下坡功率和最大上坡功率。

3) 风电机组约束

风电机组主要满足其最大出力约束：

$$0 \leq P_{W.j,t} \leq P_{W.j.max} \tag{11}$$

式中  $P_{W.j.max}$  表示第  $j$  台风电机组的额定功率。

4) 光伏机组约束

光伏机组主要满足其最大出力约束：

$$0 \leq P_{P.j,t} \leq P_{P.j.max} \tag{12}$$

式中  $P_{P.j.max}$  表示第  $j$  台光伏机组的额定功率。

5) 水电机组约束

水电机组主要满足其最大出力约束：

$$0 \leq P_{WA.j,t} \leq P_{WA.j.max} \tag{13}$$

式中  $P_{WA.j.max}$  为第  $j$  个水电机组的额定功率。

**3.2.2. 综合能源电力平衡约束**

综合能源系统的安全稳定运行，需要保持各类能源独立约束条件以及系统电、热、气的实时平衡。考虑到物理量的统一性，将热负荷转为电负荷，且基于天然气特性，不需要进行实时供需平衡，为突出重点，本文忽略天然气供需平衡约束，只考虑电力平衡约束

电力平衡表示为：

$$\sum_{j=1}^{N_W} P_{W.j,t} + \sum_{j=1}^{N_{WA}} P_{WA.j,t} + \sum_{j=1}^{N_P} P_{P.j,t} + \sum_{j=1}^{N_C} P_{C.j,t} + \sum_{j=1}^{N_G} P_{G.j,t} = P_{e,t}^{load} + P_{ht}^{load} \tag{14}$$

式中  $P_{e,t}^{load}$  为  $t$  时刻的电力负荷， $P_{ht}^{load}$  为  $t$  时刻热转电负荷。

**3.3. 模型求解**

综合能源碳排放优化模型为非线性规划模型，考虑到改进粒子群算法的全局寻优能力[11]，使用粒子群优化算法对碳排放优化模型进行求解，得到各类机组的运行方案。

1) 设初始种群数为 100，各时段风电机组、光伏机组、燃煤机组、燃气轮机、水电机组的发电功率的位置变量为 X11-X1T, X21-X2T, X31-X3T……，各时段的机组变化量为 V，速度序号为 V11-V1T, V21-V2T, V31-V3T……。

2) 对每个粒子进行随机初始化。

3) 计算目标函数值并与上一代的值进行比较，更新个体最优值  $g_j$  和全局最优值  $m$ 。

4) 根据目标函数的适应度更新搜索速度和位置，具体如下：

$$V_{i,j}^{t+1} = V_{i,j}^t + c_1 r_1 (P_{i,j} - X_{i,j}^t) + c_2 r_2 (g_j - X_{i,j}^t) \tag{15}$$

式中  $X_{i,j}^t$  和  $V_{i,j}^t$  分别为低  $t$  次迭代后第  $i$  个粒子在第  $j$  维的位置和速度， $P_{i,j}$  表示  $i$  个粒子在第  $j$  维的最优值， $c_1$ 、 $c_2$  代表学习因子； $r_1$ 、 $r_2$  代表在区间 0 到 1 上服从随机分布的随机数。

5) 判断是否达到最大迭代次数，若达到则结束计算，输出全局最优值。

计算流程如下图 2 所示：

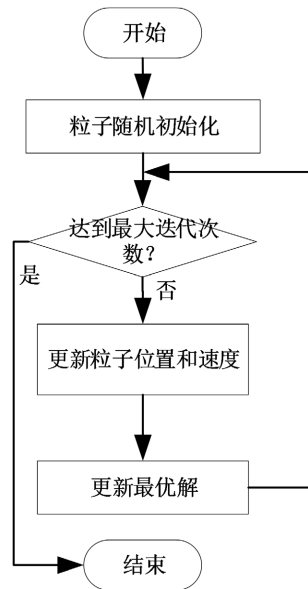


Figure 2. Calculation flow chart  
图 2. 计算流程图

## 4. 算例分析

### 4.1. 算例概述

为验证本文所提碳排放优化方法的有效性,本文基于文献[12] [13] [14]所提供的综合能源系统数据进行仿真验证。算例给定场景运行条件如下:

1) 该系统包含一座容量为 15 MW 的风电站 W1, 一座容量为 15 MW 的光伏电站 P1, 一座容量为 15 MW 的水电站 WA1, 一座容量为 40 MW 的燃煤电厂 C1 和一座容量为 40 MW 的燃气电厂 G1。其中燃气电厂的碳排放强度取 450 g/kW·h, 燃煤电厂的碳排放强度取 800 g/kW·h, 燃煤机组的最小技术出力为其额定容量的 50%, 爬坡速率为每个小时上升或下降 50%的机组额定容量; 燃气轮机的最小出力为额定容量的 30%, 爬坡速率为每个小时上升或下降 100%的机组额定容量; 水电机组的爬坡速率为每个小时上升或下降 100%的机组额定容量;

2) 系统电热负荷预测图如图 3 所示:

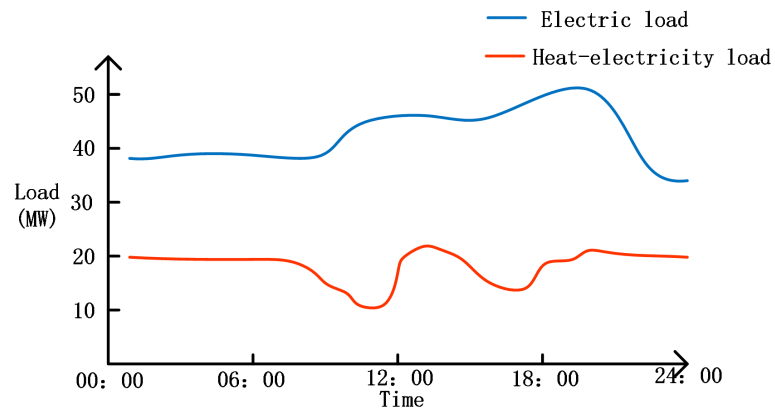


Figure 3. Electric heating load prediction curve of integrated energy system  
图 3. 综合能源系统电热负荷预测曲线

3) 风、光、水电预测出力如图 4 所示:

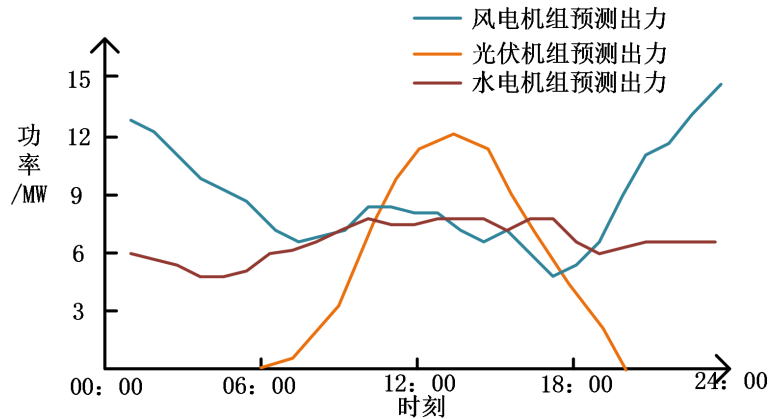


Figure 4. Forecast value of output of wind, photovoltaic and hydro-power in 24 h  
图 4. 风、光、水电 24 h 出力预测曲线

为验证所提的以降碳为目标的多元市场交易方法的有效性, 本文以 24 小时为时间周期, 1 h 为时间步长进行仿真, 对优化前后的综合能源系统各机组运行方案及运行结果进行对比分析。

#### 4.2. 仿真结果分析

基于前述场景运行条件, 采用本文所提优化方法进行仿真, 得到优化前后各时段的风电出力、光伏出力、燃气发电出力及各时刻系统碳排放量如图 5~8 所示:

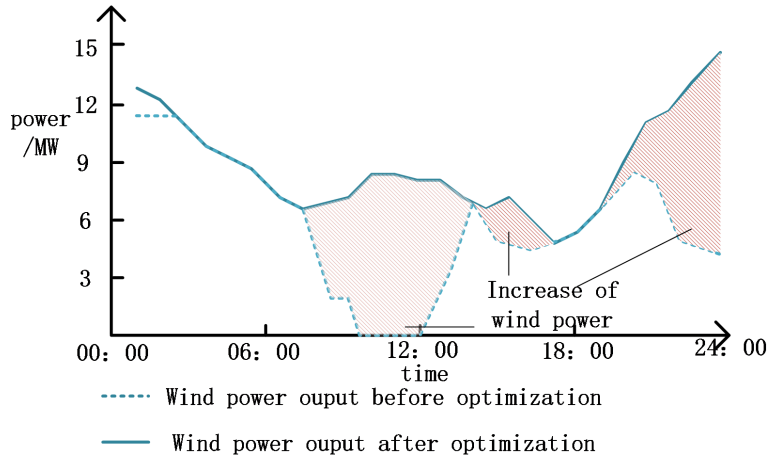


Figure 5. Wind power planned output before and after optimization  
图 5. 优化前后风电计划出力

由图 5 和图 6 可知, 优化后的综合能源系统相比优化前风电机组出力增加了 79.77 MW·h, 光伏机组出力增加了 27.32 MW·h, 综合能源碳排放方法有效增加了系统的风光电消纳量。

由图 3、图 5~8 可知, 在 11:00~19:00 时段电负荷和热负荷需求出现高峰, 相比优化前, 优化后的风、光、水电该时刻的出力大大增加, 次之是燃气发电, 且各时段的碳排放量都得到降低, 这是因为风、光、水电碳排放强度为 0, 燃气发电的碳排放强度又小于燃煤机组, 为降低碳排放量, 碳排放强度为 0 的风、光电机组保持最大出力; 由于水资源可以存储, 故由水电进行调峰, 碳排放强度较低的燃气轮机也参与调峰, 碳排放强度最大的燃煤机组维持在最小技术出力状态, 在负荷一定的情况下, 综合能源碳排放优

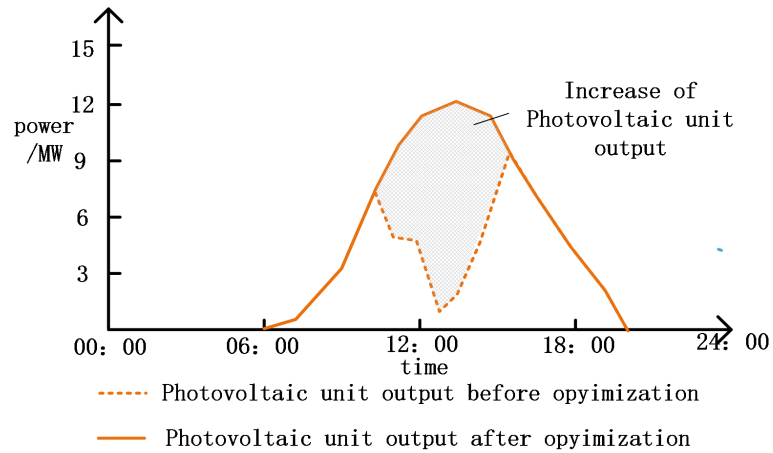


Figure 6. Photovoltaic planned output before and after optimization  
 图 6. 优化前后光伏计划出力

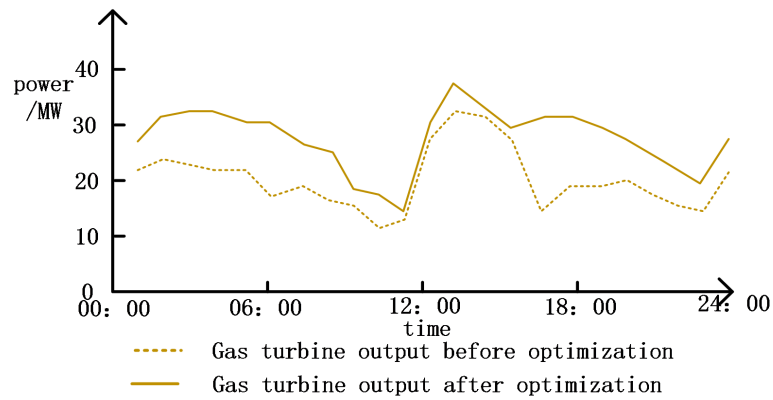


Figure 7. Gas turbine planned output before and after optimization  
 图 7. 优化前后燃气轮机计划出力

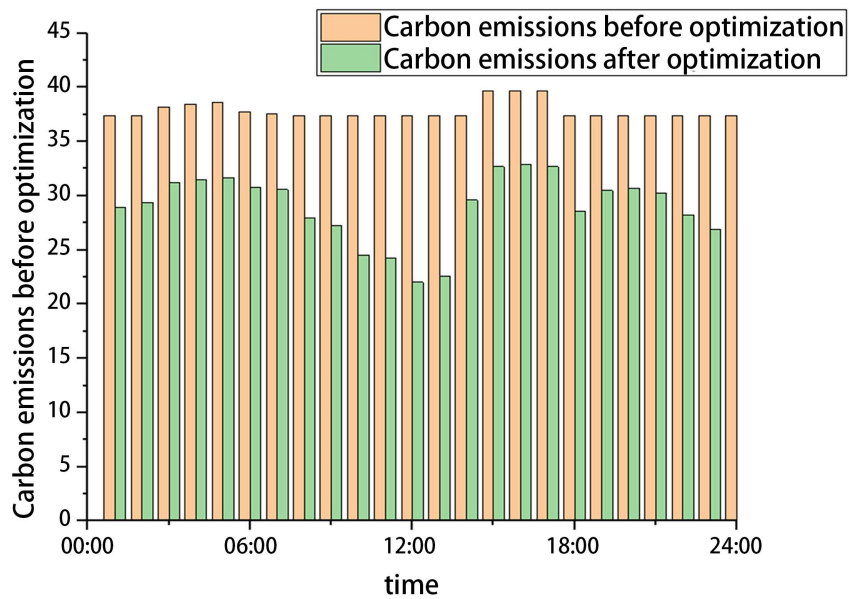


Figure 8. Carbon emissions in each period before and after optimization  
 图 8. 优化前后各时段碳排放量



化方法让碳排放量较低的风、光电优先出力，降低了各个时段的碳排放量。

优化前后的综合能源系统碳排放量及增加风光电消纳情况如下表 1 所示。

**Table 1.** Running results before and after optimization

**表 1.** 不同场景下的运行结果

	优化前	优化后	减少碳排放量	增加风光电量
碳排放量(t)	908.08	691.05	217.03	\
风光电量(MW·h)	203.91	311	\	107.09
发电成本(万元)	48.24	52.74	\	\

由表 1 可知，优化后的碳排放量相比优化前下降了 217.03 t，且弃风弃光量减少了 107.09 MW·h，但优化后的发电成本较优化前提高了 9.32%。综上所述，以降碳为目标的综合能源碳排放优化方法不仅明显降低了系统的碳排放量，还提高了系统对新能源的消纳，证明了所提碳排放优化模型的有效性，与此同时，发电成本提高，即碳排放量最小为目标进行优化调度时是以一定的经济成本换取了环境利益。目前国内的碳交易市场已经开始运行，碳排放量的降低可直接转化为经济效益，可以在碳排放和发电成本之间找到一个均衡解使得电网的碳排放量和发电成本同时降低。

## 5. 结论

本文针对能源行业的碳排放问题，提出以降碳为目标的综合能源碳排放优化方法，建立碳排放优化模型，并通过实例仿真验证所提方法对降低碳排放的有效性。得到以下结论：

- 1) 以降碳为目标的碳排放优化方法可有效降低综合能源系统碳排放量。
- 2) 该方法有效提高了综合能源系统风电光伏的消纳能力。

作者还将在考虑综合能源系统的经济成本和环境收益方面继续进行研究。

## 基金项目

资助项目：国家重点研发计划(2018YFE0208400)，国家电网有限公司总部科技项目《面向跨境互联的多能互补新型能源系统关键技术研究》。

## 参考文献

- [1] 米剑锋, 马晓芳. 中国 CCUS 技术发展趋势分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2537-2544.
- [2] 李更丰, 黄玉雄, 别朝红, 安佳坤, 孙思源, 邱起瑞, 高晓松, 彭钰茗, 雷宇骁. 综合能源系统运行可靠性评估综述及展望[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 12-21.
- [3] 崔杨, 曾鹏, 仲悟之, 崔文利, 赵钰婷. 考虑阶梯式碳交易的电-气-热综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 10-17.
- [4] 邹晨露, 崔雪, 周斌, 高健, 刘洋. 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, 2019, 56(18): 34-40+56.
- [5] 车泉辉, 吴耀武, 祝志刚, 姜素华. 基于碳交易的含大规模光伏发电系统复合储能优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 76-82+154.
- [6] 史佳琪, 胡浩, 张建华. 计及多个独立运营商的综合能源系统分布式低碳经济调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 127-136.
- [7] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 冯志强, 方伟. 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+22.
- [8] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 方晓松, 杨俊. 用户侧电力碳排放强度的评估原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 6-11.

- 
- [9] 李保卫, 胡泽春, 宋永华, 王广辉. 电力碳排放区域分摊的原则与模型[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 12-18.
- [10] 张宁, 贺姝峒, 王军锋, 陈颖, 康磊. 碳交易背景下天津市电力行业碳排放强度与基准线[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 187-193.
- [11] 陈沼宇, 王丹, 贾宏杰, 王伟亮, 郭炳庆, 屈博, 范孟华. 考虑 P2G 多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3067-3077+3362.
- [12] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 吴青华, 周孝信. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1687-1697.
- [13] 赵海彭, 苗世洪, 李超, 张迪, 涂青宇. 考虑冷热电需求耦合响应特性的园区综合能源系统优化运行策略研究[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-17. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.201942>, 2021-10-27.
- [14] 张海峰, 高峰, 吴江, 刘坤. 含风电的电力系统动态经济调度模型[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1298-1303.