

# 含光热的多源联合系统优化调度

罗童, 张兴平, 庞环

国网定西供电公司, 甘肃 定西

收稿日期: 2023年1月31日; 录用日期: 2023年2月8日; 发布日期: 2023年2月27日

## 摘要

近几年, 我国风电、光伏发展规模不断增大, 对风电、光伏发展较集中的西北地区而言, 由于风电、光伏的容量急速增加及随机性给电网安全运行带来影响, 使电网调度问题日益突出。本文在火电、风电、光伏联合发电系统中, 加入光热发电, 对含光热的多源联合发电系统建立优化调度模型。并采用基于精英策略的快速非支配排序遗传(The Elitist Non-dominated Sorting Genetic, NSGA-II)算法和鲸鱼算法(Whale Optimization Algorithm, WOA)的混合多目标优化算法对调度模型进行求解。通过仿真验证了加入光热合理调度, 有效平抑了风电、光伏随机性引起的功率波动, 并提高并网效益, 增加新能源并网渗透率。

## 关键词

光热, 多源联合, 优化调度

# Optimal Scheduling of Multi-Source Joint System with CSP

Tong Luo, Xingping Zhang, Huan Pang

State Dingxi Power Supply Company, Dingxi Gansu

Received: Jan. 31<sup>st</sup>, 2023; accepted: Feb. 8<sup>th</sup>, 2023; published: Feb. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

In recent years, the scale of wind power and photovoltaic development in China has been increasing. For the northwest region where the development of wind power and photovoltaic is concentrated, the rapid increase in the capacity of wind power and photovoltaic and its randomness have an impact on the safe operation of the power grid, which makes the power grid dispatching problem increasingly prominent. In this paper, concentrating solar power (CSP) generation is added to the combined power generation system of thermal power, wind power and photovoltaic, and an

optimal scheduling model is established for the combined power generation system with CSP. The elite strategy-based fast non-dominated sorting genetic (NSGA-II) algorithm and Whale Optimization Algorithm (WOA) are used to solve the scheduling model. Through simulation, it is verified that adding photothermal reasonable scheduling can effectively stabilize the power fluctuation caused by randomness of wind power and photovoltaic, improve the grid-connected benefits and increase the grid-connected penetration rate of new energy.

## Keywords

Concentrating Solar Power, Multi-Energy Combination, Optimize Scheduling

Copyright © 2023 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,随着光伏、风电的快速发展,部分地区新能源渗透率的迅速增长给电力系统带来了很多的不确定性[1][2]。由于风力发电和光伏发电存在波动性和间歇性,风电机组和光伏电池运行需要配备储能装置,增加了额外运行费用,并且对环境污染有一定的影响,因此将风电、光伏发电与其他经济可控能源联合运行发电逐渐成为热点[3][4]。而光热发电是近年来一种新兴的发电技术,引起了人们高度关注[5][6]。光热发电的深入研究与开发是从2006年左右开始的,自2008年起全球光热产业进入快速增长阶段,光热装机容量迅速上升,预计到2025年全球光热发电装机规模有望达到22GW。美国和西班牙光热装机容量遥遥领先,而中国正处于光热发电的起步阶段,距离商业化并网还有一段距离[7]。考虑到未来光热电站的大规模建设及其可调节能力,将光热电站和其他新能源发电联合运行已成为一种趋势,而如何将光热发电与其他新能源发电进行协调控制与优化调度是学者们研究的重点。文献[8]提出了风电与光热联合发电,并采用多法线边界交叉算法进行多目标优化协调控制。文献[9]考虑火电机组发电、风电、光伏发电与光热发电并网消纳的环境效益和运行维护成本、系统旋转备用成本、调峰容量购买成本构建单目标函数和电网安全运行约束条件,并采用改进的NSGA-II算法对模型进行求解。文献[10]研究以风电、光伏等新能源发电机组和储能装置为电源的独立微电网日前优化调度,提出了自适应加权和近似动态规划算法求解该优化问题。文献[11]在考虑风光负荷预测误差的条件下,建立基于风电、光伏发电、柴油发电及储能系统运行成本的优化调度模型,采用改进粒子群算法进行算例求解。文献[12]通过分析风、光、火打捆发电系统,引入弃风、弃光分段惩罚因子,在不影响电网稳定的情况下,尽可能多地消纳新能源,并提出了以发电成本作为目标函数,使其经济最大化,并且用模拟退火人工蜂群算法(SA-ABC)算法对风、光、火打捆系统的经济调度优化做出深层研究。文献[13]针对含有风力发电、光伏发电的分布式电源、储能系统蓄电池新型能源元件的微电网,基于分时电价构建了微电网经济运行模型,采用改进帝国竞争算法对模型进行求解,算例结果表明所建模型的正确性和有效性。文献[14]研究了多能源系统中,为了解除储能与其他设备的耦合约束,使其更好地参与经济调度,充分考虑到不同时段的售、购电价差及热负荷水平,建立了计及电储能机会收益和热储能惩罚成本的多能源系统冷热电联合优化调度模型,提出了一种基于Tent映射的混沌爆炸改进增强烟花算法求解模型。

以上文献多数只针对新能源风电、光伏与其他储能等联合发电进行研究,对含光热的多源联合系统研究相对较少,并且大多都是只以成本最小建立单目标函数进行研究。本文对含光热的多源联合优化调

度进行研究,建立了含光热的多源联合发电的调度模型,并用 NSGA-II和 WOA 的混合算法对所建立模型进行优化求解。从联合发电系统并网效益最大和并网输出总功率波动性最小构建多目标函数及其约束条件,从而保证并网后总功率波动性最小,同时增加效益。

## 2. 含光热的多源联合系统的调度模型

### 2.1. 联合发电系统的目标函数

目前多数学者研究了风电、光伏、火电以及储能联合发电优化调度,以储能电池来平抑风电、光伏引起的波动。考虑到火电机组需要耗费不可再生能源及对环境造成极大的污染和储能电池储存容量较小、成本高等缺点,本文利用光热电站的储热容量大以及可控、灵活等优势,与光伏、风力发电和火电联合发电,通过光热合理地调度,最大消纳风电和光伏,尽量减少火电机组发电。本文对含光热的多源联合发电系统并网效益最大和总功率波动性最小进行评估,两者结合为含光热的多源联合发电系统的多目标函数。

1) 含光热的多源联合系统并网经济效益最大

$$\max f_1 = \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^n (C_W P_{Wt}^* + C_S P_{St}^* + C_C P_{Ct}^* + C_F P_{Ft}^*) \quad (1)$$

2) 含光热的多源联合系统总功率波动最小

$$\min f_2 = \sum_{t=0}^T \left( \sum_{i=1}^n P_{Ft,i}^* + P_{Wt}^* + P_{St}^* + P_{Ct}^* - P_{Avg} \right)^2 \quad (2)$$

式中:  $P_{Wt}^*$ 、 $P_{St}^*$ 、 $P_{Ct}^*$ 、 $P_{Ft,i}^*$  分别为风电、光伏、光热和火电机组  $i$  在  $t$  时刻传输至电网的功率;  $C_W$ 、 $C_S$ 、 $C_C$ 、 $C_F$  为风电、光伏、光热和火电上网电价;  $P_{Avg}$  为该时段内的平均值;  $T$  为日调度时段数,  $T = 24$ ;  $n$  为火电机组数,  $n = 8$ 。

### 2.2. 联合发电系统的目标函数的约束条件

为了满足电网安全运行,所建模型的约束条件有功率平衡约束;风电场和光伏电站的约束;正、负旋转备用容量约束;常规机组的约束有出力约束、爬坡率约束、启动和停运时的出力约束;储热系统约束条件;光热电场出力约束及爬坡约束。

1) 系统功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^8 P_{Ft,i}^* + P_{Wt}^* + P_{St}^* + P_{Ct}^* = P_{Lt} \quad (3)$$

式中:  $P_{Lt}$  为时  $t$  时刻的负荷预测值。

2) 风电场和光伏电站的约束条件

$$\text{s.t.} \begin{cases} 0 \leq P_{Wt}^* \leq P_{Wt}^F \\ 0 \leq P_{St}^* \leq P_{St}^F \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_{Wt}^F$  为风电场  $t$  时刻预测出力;  $P_{St}^F$  为光伏电站  $t$  时刻预测出力。

(3) 正、负旋转备用容量约束

$$\begin{cases} P_{u,it} = \sum_{i=1}^n \min(P_{i,\max} - P_{Fi,t} R_{ui}) \geq P_F \\ P_{d,it} = \sum_{i=1}^n \min(P_{Fi,t} - P_{i,\min} R_{di}) \geq P_F \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_{u,it}$  为火电机组  $i$  在  $t$  时段的正旋转备用(MW);  $P_{d,it}$  为火电机组  $i$  在  $t$  时段的负旋转备用(MW);  $P_{i,\max}$  为火电机组  $i$  最大出力(MW);  $P_{i,\min}$  为火电机组  $i$  最小出力(MW);  $R_{ui}$  为火电机组  $i$  的最大向上爬坡率;  $R_{di}$  为火电机组  $i$  的最大向下爬坡率;  $P_F$  负荷预测误差率(%)。

4) 常规机组的约束有出力约束、爬坡率约束、启动和停运时出力约束

$$P_{i,\min} \leq P_{Fi,t} \leq P_{i,\max} \quad (6)$$

$$-R_{di} \leq P_{Fi,t} \leq R_{ui} \quad (7)$$

$$\left. \begin{matrix} U_{i(t-1)} = 0, U_{it} = 1 \\ U_{it} = 1, U_{i(t+1)} = 0 \end{matrix} \right\} P_{Fi,t} = P_{i,\min} \quad (8)$$

式中： $U_{i(t-1)} = 0$  为机组停运状态； $U_{i(t-1)} = 1$  时为机组运行状态。

5) 储热系统约束条件

$$\text{s.t.} \begin{cases} -P_{\text{MAX}} \leq P_{B,i} \leq P_{\text{MAX}} \\ E_{\text{MIN}} \leq E_B \leq E_{\text{MAX}} \end{cases} \quad (9)$$

$$A_b \cdot B_b = 0 \quad (10)$$

式中： $P_{B,i}$  为储热装置  $t$  时刻蓄热放热量，其中放热表示为负数，蓄热为正数； $P_{\text{MAX}}$  是一个周期内储热装置可蓄热的最大容量； $E_{\text{MIN}}$  是储热装置能量的最小值； $E_{\text{MAX}}$  表示储热装置能量的最大值； $A_b$  储热系统充热状态； $B_b$  储热系统放热状态数值； $A_b$ 、 $B_b$  为 0 或 1。

### 3. 模型求解

本文采用 NSGA-II 和 WOA 的混合优化算法对模型求解，NSGA-II 是一种带精英策略的非支配排序的 GA 算法，具备了遗传算法的鲁棒性、适应性、编码灵活性、收敛性等优点，存在计算复杂度太高，容易陷入局部最优等缺点。目前不少学者已对 NSGA-II 的算子进行了改进，对计算复杂程度也有所降低，计算速度也明显有所提高，但仍存在复杂度高问题。WOA 的优势在于操作简单、调节参数较少，只有两个主要调整参数(收敛因子和摆动因子)，由于对收敛因子的设定，该算法能够很好地平衡开发和勘探能力，增大了跳出局部最优的可能性。但 WOA 中的搜索完全依赖随机性，导致算法收敛精度低，极早收敛等缺陷。针对 WOA 存在极早收敛、收敛精度低的问题，在 NSGA-II 和 WOA 的混合算法的基础上保留 WOA 的简单性；而对 NSGA-II 的收敛性好，在 NSGA-II 和 WOA 的混合算法的基础上保留 NSGA-II 好的收敛性能。在并行运算优化时，将 WOA 适应度值高的个体和 NSGA-II 适应度值高的个体进行交叉和信息重新组合，从而达到提高搜索深度、收敛性好、计算简单等优势。基于 NSGA-II 和 WOA 的混合优化算法的调度流程图如图 1。

NSGA-II 和 WOA 的混合算法对含光热的多源联合发电系统调度模型求解流程如图 1 所示。

## 4. 算例分析

### 4.1. 参数设置

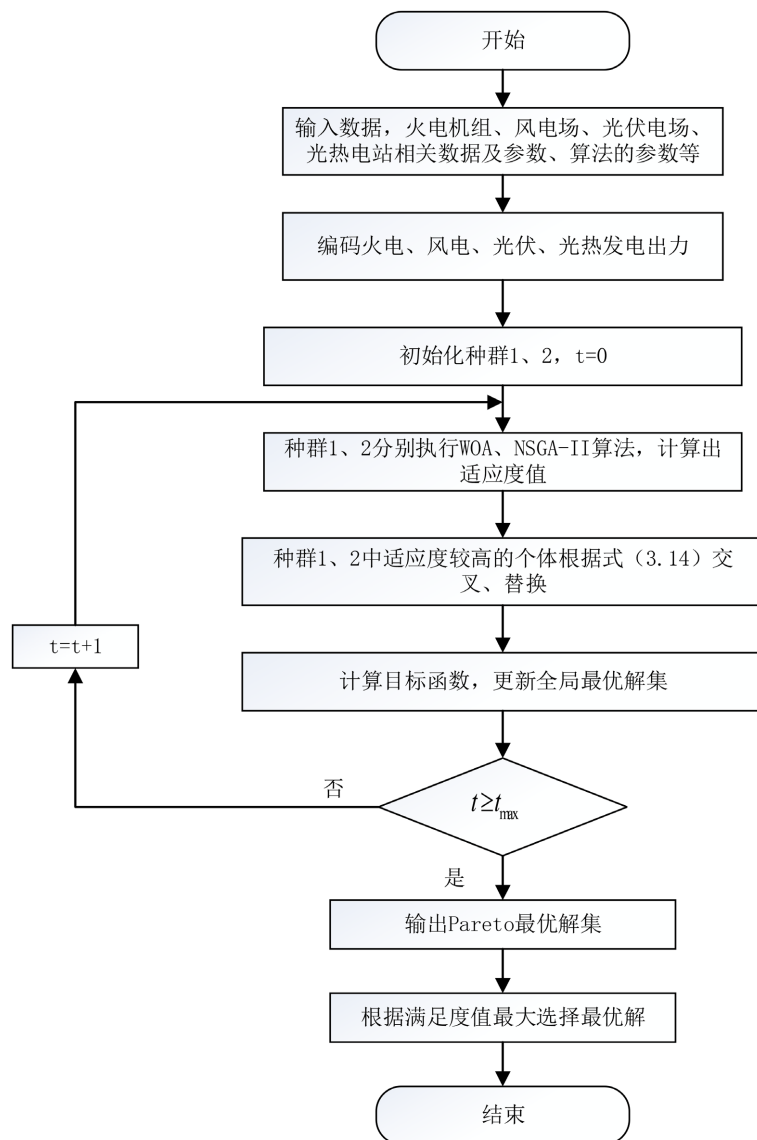
光热电站参数、典型出力及火电机组的参数见表 1、表 2、表 3。

### 4.2. 仿真分析

本文用 MATLAB 软件进行仿真分析，用 NSGA-II 和 WOA 的混合算法对含光热的多源联合系统模型求解，NSGA-II 和 WOA 的混合算法的参数设置为：种群规模  $P = 200$ ，最大迭代次数  $t_{\text{max}} = 1000$ ，变异率  $P_M = 0.1$ ，交叉率  $P_C = 0.7$ ，收敛因子  $A$  取  $[-1, 1]$ ，摆动因子  $C = 2a$ ， $a$  取  $[0, 1]$ 。

情景 1：风电 - 光伏 - 火电联合系统优化调度(9 个火电机组都参与)；

情景 2：光热 - 风电 - 光伏 - 火电联合系统优化调度(用光热代替 9 号火电机组)。



**Figure 1.** Flow chart of optimal scheduling of multi-source joint system with light and heat  
**图 1.** 含光热的多源联合系统优化调度流程图

**Table 1.** Parameters of photothermal power plant

**表 1.** 光热电站参数

参数	数值
CSP 额定输出功率/MW	50
CSP 最小输出功率/MW	10
CSP 出力最大爬坡率/(MW·h)	40
TES 的放热损失效率/%	3
TES 的储热、放热效率/%	97
CSP 热电转换效率/%	45
TES 储热下限/MWh	100

**Table 2.** Solar power prediction of typical photothermal power plant  
**表 2.** 典型光热电站日光功率预测

时段/h	功率/MW	时段/h	功率/MW
0	0	12	236
1	0	13	239
2	0	14	227
3	0	15	173
4	0	16	116
5	0	17	53
6	6	18	7
7	42	19	0
8	95	20	0
9	143	21	0
10	171	22	0
11	217	23	0

**Table 3.** Parameters of thermal power unit  
**表 3.** 火电机组参数

机组	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_i^{\text{MAX}}$	155	100	76	76	100	50	20	20	50
$P_i^{\text{MIN}}$	54	25	15	15	25	10	4	4	10
$R_{ui}$	78	50	38	38	50	25	20	20	25
$R_{di}$	78	50	38	38	50	25	20	20	25

采用 NSGA-II 和 WOA 的混合算法对不含光热和含光热的多源联合系统调度模型进行求解, 并对所求的 Pareto 解集中选出最优折衷解, 其最优折衷解见表 4。由表可知: 光热有较高的发电效率, 含光热的多源联合发电系统并网后所获效益可达 423.7388 万元, 联合系统总的功率波动性为 2243 MW<sup>2</sup>。含光热的多源联合系统比不含光热的多源联合系统所获效益明显提高, 总的功率波动性也降低了。充分证明了加入光热电站充分消纳了风电和光伏, 有效平抑风力发电和光伏发电的随机性引起的波动, 实现了联合系统发电系统的平滑输出, 增大联合发电并网的效益, 并提高新能源并网渗透率。

**Table 4.** Benefits and volatility of multi-source combined power generation system without CSP and with CSP  
**表 4.** 无 CSP 和含 CSP 的多源联合发电系统所获效益及波动性

能源	获益(万元)	总功率输出波动性(MW <sup>2</sup> )
多源联合系统	323.0780	3596
含光热的多源联合系统	423.7388	2243

风电 - 光伏 - 光热 - 火电最优调度结果如图 2 所示, 从图中看出风电一天 24 时段出力随机变化; 7:00~17:00, 光热、风电、光伏、火电都有出力, 在满足负荷需求时, 光热电站把多余的热储存在储热系

统中；0:00~6:00 和 18:00~23:00 无光照时，光伏电站无光不再出力，而光热电站的储热系统在无光照时或者负荷高峰期放热补偿风电、光伏的输出，平抑风电和光伏随机性引起地波动。图 3 是各火电机组的最优出力，火电机组出力明显减小。每个时段内不含光热和含光热的多源联合系统发电输出与负荷分别为图 4 和图 5 所示，各个时段中含光热的多源联合发电系统的出力波动明显减小，风电和光伏随机性、间歇性等引起的波动得到了很好的改善。光热参与多源联合发电合理的调度，有效平抑了风电和光伏出力地随机性引起的波动，提高了电网运行地安全性。

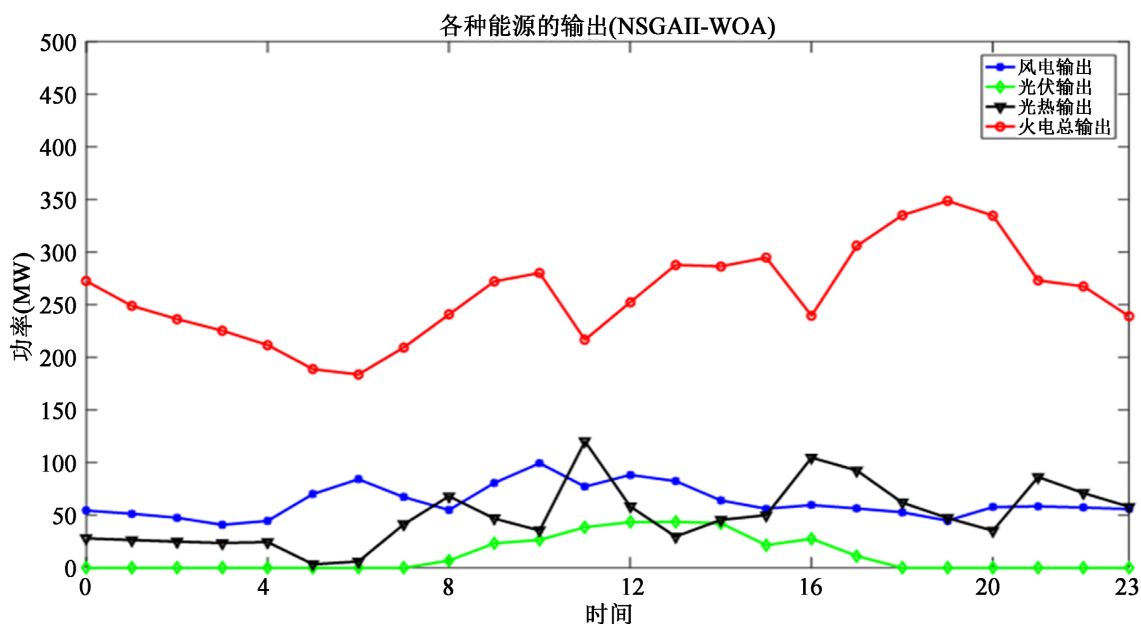


Figure 2. Optimal output of wind power, photovoltaic, photothermal, thermal power

图 2. 风电 - 光伏 - 光热 - 火电最优出力

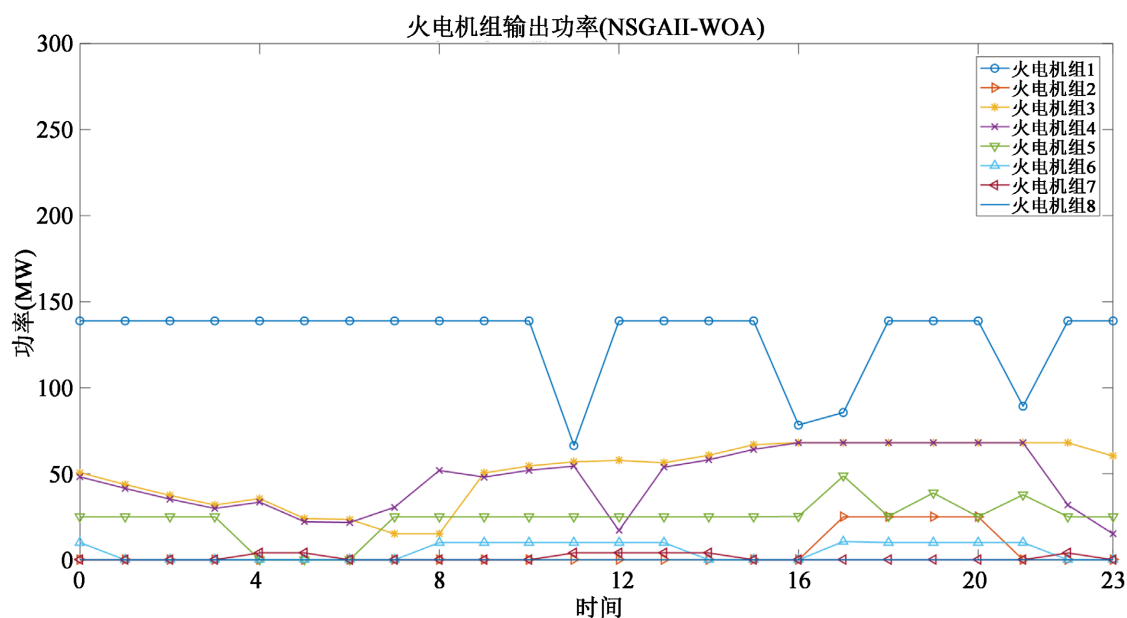


Figure 3. Output results of thermal power units

图 3. 各火电机组出力结果

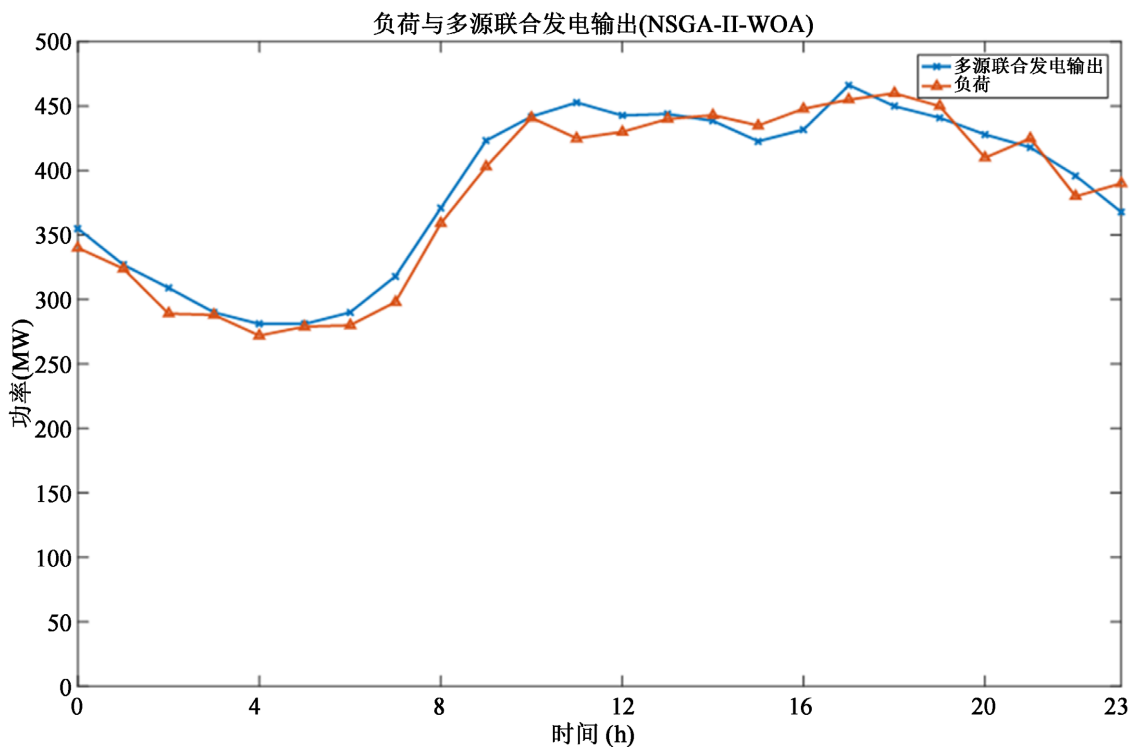


Figure 4. Output and load of multi-source joint system  
图 4. 多源联合系统出力与负荷

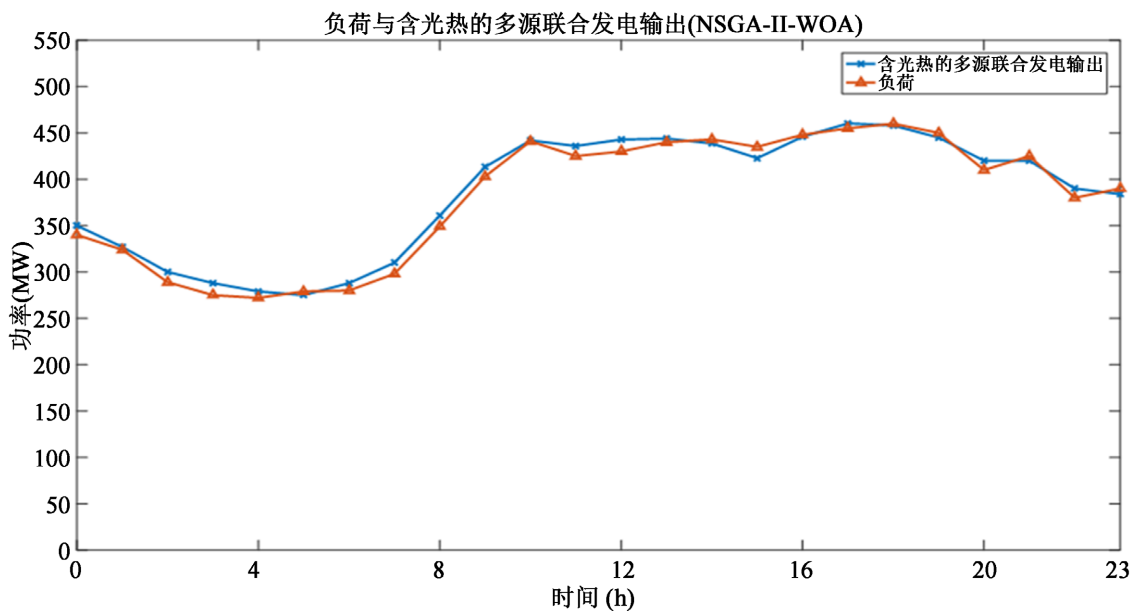


Figure 5. Output and load of multi-source combined system with light and heat  
图 5. 含光热的多源联合系统出力与负荷

## 5. 总结

本文对含光热的多源优化调度进行研究，以联合系统并网总输出功率波动最小和并网效益最大为目标构建多目标函数，以功率平衡约束、出力限制、爬坡约束、旋转备用约束等为约束条件，建立了含光



热的多源联合发电系统优化调度的模型, 对无光热和含光热的多源优化调度进行仿真对比。仿真结果表明: 光热电站的储热及可控特性可以实现联合发电系统的平滑输出, 有效平抑了风电和光伏不确定性、随机性引起的波动, 并增大了联合系统发电的效益, 提高新能源并网渗透率。

## 参考文献

- [1] 王彬, 孙勇, 吴文传, 等. 应用于高风电渗透率电网的风电调度实时控制方法与实现[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 23-29.
- [2] 高峰, 马烁, 张爽, 等. 含高渗透率风电的电力系统备用影响及配置研究[J]. 中国电力, 2014, 47(8): 72-78.
- [3] Chen, R., et al. (2015) Reducing Generation Uncertainty by Integrating CSP with Wind Power: An Adaptive Robust Optimization-Based Analysis. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 6, 583-594. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2015.2396971>
- [4] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 8.
- [5] 刘逸群. 太阳能光热发电技术发展现状研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2015, 5(7): 70-71+95.
- [6] 苏娟. 太阳能光热发电产业经济性分析及发展政策研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2017.
- [7] 肖强, 王红艳, 王金平. 太阳能光热发电现状及发展策略分析[J]. 中外能源, 2016, 21(10): 26-30.
- [8] 戴剑丰, 汤奕, 曲立楠, 等. 太阳能光热与风力发电协调优化控制研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(10): 73-77.
- [9] 崔杨, 杨志文, 张节潭, 等. 计及综合成本的风电-光伏-光热联合出力调度策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 269-275.
- [10] 陈恒安, 管霖, 卢操, 等. 新能源发电为主电源的独立微网多目标优化调度模型和算法[J/OL]. 电网技术: 1-11. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.Pst.2019.0298>, 2019-09-02.
- [11] 田德, 陈忠雷, 邓英. 考虑预测误差的综合能源系统优化调度模型[J]. 太阳能学报, 2019, 4(7): 1890-1896.
- [12] 孙凯, 张新燕, 周登钰, 等. 含大规模新能源的现代电力系统动态经济调度研究[J]. 可再生能源, 2018, 36(5): 771-777.
- [13] 聂小鹏. 微电网日前优化调度研究[J]. 电气开关, 2018, 56(3): 48-51+56.
- [14] 雍静, 赵瑾, 郇嘉嘉, 等. 基于混沌增强烟花算法的多能源系统并网优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(10): 3725-3733.