

考虑综合储能的多能源系统优化调度

蔡光旭

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2025年4月21日; 录用日期: 2025年5月14日; 发布日期: 2025年5月21日

摘要

随着风电、光伏等可再生能源的快速发展, 其装机容量持续增长。由于这类能源出力的随机性和波动性强, 对电网的安全稳定运行构成了挑战, 使得电力系统的调度难度显著增加。尽管蓄电池技术在多能源系统中具有重要作用, 但其充放电容量有限、使用寿命较短以及投资成本较高, 制约了其在能源系统中的大规模应用, 影响了系统的经济性和运行灵活性。为了解决以上问题, 文章将综合储能引入多能源系统中, 建立了基于多能量存储的多能源系统调度模型, 并采用多目标粒子群算法(MOPSO)求解。通过仿真结果验证了本文提出的储能设施的能量输入和输出以及可再生能源输出的协调优化模型具有良好的经济效益和大规模利用可再生能源的能力。

关键词

综合储能, 多能源系统, 可再生能源

Optimization Scheduling of Multi-Energy System Dispatch Considering Integrated Energy Storage

Guangxu Cai

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 21st, 2025; accepted: May 14th, 2025; published: May 21st, 2025

Abstract

With the rapid development of renewable energy sources such as wind and solar power, their installed capacity continues to grow. However, the inherent randomness and volatility of these energy outputs pose significant challenges to the safe and stable operation of the power grid, substantially increasing the difficulty of power system dispatching. Although battery storage technology plays a

crucial role in multi-energy systems, its limited charge-discharge capacity, shorter lifespan, and high investment costs restrict its large-scale application in energy systems, thereby impacting the system's economic efficiency and operational flexibility. To address these issues, this paper introduces integrated energy storage into the multi-energy system, establishing a multi-energy system dispatching model based on multi-energy storage. The model is solved using a Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) algorithm. Simulation results demonstrate that the proposed coordinated optimization model for energy input and output of storage facilities and renewable energy output exhibits good economic benefits and the capability to enable large-scale utilization of renewable energy.

Keywords

Multi-Source Energy Storage, Multi-Energy System, Renewable Energy

Copyright © 2025 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

随着化石能源的逐渐枯竭和环境污染的日益严重，为了缓解传统电网的供电压力并改变能源结构，迅速增加了可再生能源接入电网的规模[1][2]。由于可再生能源具有随机性、间歇性、波动性和反峰值特性，以及供暖季节的传统“热电”模式，可再生能源的消纳与多能源系统的协调问题变得越来越突出，迫切需要寻找新的能源利用模式来解决这一问题。

由于电池高成本和低效率的缺点，本文用热能存储和气体存储替代了电池。通过在多能源系统中引入热能和气体能量存储设施，建立了一个基于多源能量存储(MESBMSES)的多能源系统，将能量存储设施与不同能源的生产、传输、分配和消费相结合。合理调整能量流动，提高整个多能源系统的运行效率。利用气体能量存储和热能存储的特性和操作特性，可以与可再生能源供应系统协调，实现对区域多能源系统中可再生能源输出波动的抑制。

国内外对可再生能源和多能源系统领域进行了大量研究。文献[3]提出了一种两层优化方法，用于实现电力和天然气的最优调度；文献[4]提出了基于区域电网连接微电网的电热一体化调度模型，并通过电热联合调度模型解耦电热关系，实现电热协调调度；文献[5]提出了氢气-天然气混合储能系统，将P2G过程分为电解制氢和电解制天然气两个部分，与燃料电池和微型燃气轮机一起形成两阶段电-气循环网络，在一定程度上替代了传统的电池储能；文献[6]提出了基于氢燃料电池储能系统的最优调度策略，并建立了氢燃料电池的热电输出模型；文献[7]根据用户行为，为电-气-热综合能源系统建立了一个两阶段经济最优调度模型；文献[8]建立了具有P2G多源储能的经济最优调度模型，提高了微电网系统中风能的利用率。文献[9]基于蓄电池损耗特性分析，从降低损耗的角度提出了微电网优化方案。该研究构建了多目标优化模型，并设计了一种改进型粒子群算法进行求解，最终通过实验验证了模型的有效性。文献[10]则着重探讨了分布式能源与电、热、冷多网耦合的系统优化问题，建立了以经济性最优为目标的多目标优化模型，但模型复杂计算成本高。

以上文献多数只针对电-气循环系统能量利用进行研究，对含多能量存储的多能源系统研究相对较少，并且大多只以运行成本最小建立单目标函数进行分析。本文对含多能量存储的多能源系统调度进行研究，建立了含多能量存储的多能源系统调度模型，并用多目标粒子群(MOPSO)算法对所建立模型进行优化求解。以最小化运行成本和环境保护成本构建多目标函数及其约束条件，保证并网后运行成本最小，同时增加效益。

2. 含综合储能的多能源系统调度模型

2.1. 目标函数

本研究以 24 小时为优化周期, 构建了多能源系统储能优化调度模型, 旨在实现运行成本和环境成本的双重最小化。其中, 运行成本涵盖了发电设备运维费用以及系统与外部电网交互所产生的交易与惩罚成本。鉴于可再生能源具有清洁环保特性, 其运行和环境成本相对较低, 因此在优化过程中被赋予优先调度权。该模型的核心目标是在满足系统各项约束条件的基础上, 通过优化各机组出力分配, 同时实现经济性和环保性两个优化目标。

1) 目标函数 1: 运行成本最小。

$$\min F_1 = \sum_{t=1}^{N_T} (C_{OM}(t) + E_{esc,g}(t) + H_{esc,g}(t) + G_{exc,g}(t)) \quad (1)$$

其中, F_1 为多能源系统的运行成本; N_T 为调度周期; $C_{OM}(t)$ 为 t 时段各机组的运维费用; $E_{esc,g}(t)$ 、 $H_{esc,g}(t)$ 、 $G_{exc,g}(t)$ 分别为 t 时段多能源系统与电网、热网、气网的交互成本。

多能源系统与外网的交互成本模型如下:

$$\begin{cases} E_{esc,g} = \sum_{t=1}^T [(\alpha \cdot C_{E,buy} - (1-\alpha) \cdot C_{E,sell}) \cdot P_{exc,E}(t)] \\ H_{esc,g} = \sum_{t=1}^T [(\beta \cdot C_{T,buy} - (1-\beta) \cdot C_{T,sell}) \cdot Q_{exc,T}(t)] \\ G_{esc,g} = \sum_{t=1}^T [(\gamma \cdot C_{G,buy} - (1-\gamma) \cdot C_{G,sell}) \cdot Q_{exc,G}(t)] \end{cases} \quad (2)$$

其中, 购与售只能单向进行, 故 α 、 β 、 $\gamma = 0$ 或 1 ; $E_{esc,g}$ 、 $H_{esc,g}$ 、 $G_{esc,g}$ 分别为多能源系统与电网、热网、气网的交互功率成本; $C_{E,buy}$ 、 $C_{T,buy}$ 、 $C_{G,buy}$ 分别为购电、购热、购气价格; $C_{E,sell}$ 、 $C_{T,sell}$ 、 $C_{G,sell}$ 分别为售电、售热、售气价格。

2) 目标函数 2: 环境成本最低。

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^{Nr} \sum_{x=1}^3 [C_x (\gamma_{mtx} P_{GT}(t) + \gamma_{exex} P_{esc,E}(t) \alpha_1 + \gamma_{exhx} Q_{esc,T}(t) \alpha_2 + \gamma_{exgx} G_{esc,G}(t) \alpha_3)] \Delta t \quad (3)$$

其中, F_2 为环境成本; C_x 为系统排放 1 kg 第 x 类污染物的排放系数; γ_{mtx} 为燃气轮机输出单位功率时第 x 类污染物的排放系数; γ_{exex} 、 γ_{exhx} 、 γ_{exgx} 分别为电网、热网、气网向多能源系统输出单位功率时第 x 类污染物的排放系数。

当 $P_{esc,E}(t) > 0$ 时, $\alpha_1 = 1$; 当 $P_{esc,E}(t) \leq 0$ 时, $\alpha_1 = 0$; 当 $Q_{esc,T}(t) > 0$ 时, $\alpha_2 = 1$; 当 $Q_{esc,T}(t) \leq 0$ 时, $\alpha_2 = 0$; 当 $G_{esc,G}(t) > 0$ 时, $\alpha_3 = 1$; 当 $G_{esc,G}(t) \leq 0$, $\alpha_3 = 0$ 。

多能源系统中各单元机组运行维护成本如下式:

$$\begin{aligned} C_{OM}(t) = & K_{omWT} P_{WT}(t) + K_{omPV} P_{PV}(t) + K_{omGT} P_{GT}(t) + K_{omFC} P_{FC}(t) \\ & + K_{omP2G} P_{P2G}(t) + K_{omEB} P_{EB}(t) + K_{omHS} |P_h^S(t)| + K_{omH2S} |P_H^S(t)| + K_{omGS} |P_{gas}^S(t)| \end{aligned} \quad (4)$$

其中, K_{omWT} 、 K_{omPV} 为风机、光伏输出单位功率的运行维护成本; K_{omGT} 、 K_{omFC} 、 K_{omEB} 、 K_{omP2G} 为燃气轮机、燃料电池、电锅炉、P2G 的单位功率运行维护成本; K_{omHS} 、 K_{omH2S} 、 K_{omGS} 为储热装置、储氢装置和储气装置单位功率的运行维护成本; $P_{WT}(t)$ 、 $P_{PV}(t)$ 为 t 时段风机、光伏出力; $P_{GT}(t)$ 、 $P_{FC}(t)$ 、 $P_{EB}(t)$ 、 $P_{P2G}(t)$ 为 t 时段燃气轮机、电锅炉、燃料电池、P2G 的电功率。

2.2. 约束条件

1) 电功率平衡

$$P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{FC}(t) + P_{GT}(t) + P_{exc,E}(t) = P_{EB}(t) + P_{P2G}(t) + L_e^{ld}(t) \quad (5)$$

2) 热功率平衡

$$Q_{MT-h}(t) + Q_{EB}(t) + Q_{exc,T}(t) + P_{h-dis}^S(t) = P_{h-ch}^S(t) + L_h^{ld}(t) \quad (6)$$

3) 气功率平衡

$$P_{P2G,gas}(t) + G_{exc,G}(t) + P_{gas-dis}^S(t) = P_{gas-ch}^S(t) + G_{GT}(t) + L_g^{ld}(t) \quad (7)$$

4) 氢功率平衡

$$P_{P2G,H_2}(t) + P_{h-dis}^S(t) = P_{H-ch}^S(t) + P_{FC}(t) \quad (8)$$

其中, $L_e^{ld}(t)$ 、 $L_h^{ld}(t)$ 、 $L_g^{ld}(t)$ 分别为多能源系统内电负荷、热负荷、气负荷。

5) 与电网交互功率约束

$$P_{net,E,\min} \leq P_{exc,E} \leq P_{net,E,\max} \quad (9)$$

其中, $P_{net,E,\min}$ 、 $P_{net,E,\max}$ 为与电网的交互功率上下限。

6) 与热网交互功率约束

$$Q_{net,T,\min} \leq Q_{exc,T} \leq Q_{net,T,\max} \quad (10)$$

其中, $Q_{net,T,\min}$ 、 $Q_{net,T,\max}$ 为与热网的交互功率上下限。

7) 与气网交互功率约束

$$G_{net,G,\min} \leq G_{exc,G} \leq G_{net,G,\max} \quad (11)$$

其中, $G_{net,G,\min}$ 、 $G_{net,G,\max}$ 为与气网的交互功率上下限。

8) 燃气轮机运行约束

$$\begin{cases} \Delta P_{GT,\min} \leq P_{GT,t} - P_{GT,t-1} \leq \Delta P_{GT,\max} \\ 0 \leq P_{GT,t} \leq P_{GT,rate} \end{cases} \quad (12)$$

其中, $\Delta P_{GT,\min}$ 、 $\Delta P_{GT,\max}$ 为燃气轮机爬坡约束; $P_{GT,rate}$ 为燃气轮机的额定功率。

9) 电锅炉运行约束

$$\begin{cases} \Delta P_{EB,\min} \leq P_{EB,t} - P_{EB,t-1} \leq \Delta P_{EB,\max} \\ 0 \leq P_{EB,t} \leq P_{EB,rate} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\Delta P_{EB,\min}$ 、 $\Delta P_{EB,\max}$ 为电锅炉爬坡约束; $P_{EB,rate}$ 为电锅炉额定功率。

10) P2G 装置约束

$$\begin{cases} \Delta P_{P2G,\min} \leq P_{P2G,t} - P_{P2G,t-1} \leq \Delta P_{P2G,\max} \\ 0 \leq P_{P2G,t} \leq P_{P2G,rate} \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\Delta P_{P2G,\min}$ 、 $\Delta P_{P2G,\max}$ 为 P2G 装置爬坡约束; $P_{P2G,rate}$ 为 P2G 装置额定功率。

11) 燃料电池装置约束

$$\begin{cases} \Delta P_{FC,\min} \leq P_{FC,t} - P_{FC,t-1} \leq \Delta P_{FC,\max} \\ 0 \leq P_{FC,t} \leq P_{FC,rate} \end{cases} \quad (15)$$

其中, $\Delta P_{FC,min}$ 、 $\Delta P_{FC,max}$ 为燃料电池爬坡约束; $P_{FC,rated}$ 为燃料电池的额定功率。

12) 风机、光伏的有功出力约束

$$0 \leq P_{PV}(t) \leq P_{PV}^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{WT}(t) \leq P_{WT}^{\max} \quad (17)$$

其中, P_{PV}^{\max} 、 P_{WT}^{\max} 分别为光伏、风机的最大出力。

13) 储热装置运行约束

$$\begin{cases} H_{HS,min} \leq H_{HS,t} \leq H_{HS,max} \\ P_{h-ch,min}^S \leq P_{h-ch,t}^S \leq P_{h-ch,max}^S \\ P_{h-dis,min}^S \leq P_{h-dis,t}^S \leq P_{h-dis,max}^S \end{cases} \quad (18)$$

其中, $H_{HS,t}$ 为 t 时刻下的储热容量; $H_{HS,min}$ 、 $H_{HS,max}$ 为储热容量约束; $P_{h-ch,min}^S$ 、 $P_{h-ch,max}^S$ 为储热设备充热功率约束; $P_{h-dis,min}^S$ 、 $P_{h-dis,max}^S$ 为储热设备放热功率约束。

14) 储氢装置运行约束

$$\begin{cases} S_{H,min} \leq S_{H,t} \leq S_{H,max} \\ P_{H-ch,min}^S \leq P_{H-ch,t}^S \leq P_{H-ch,max}^S \\ P_{H-dis,min}^S \leq P_{H-dis,t}^S \leq P_{H-dis,max}^S \end{cases} \quad (19)$$

其中, $S_{H,t}$ 为 t 时刻下的储氢容量; $S_{H,max}$ 、 $S_{H,min}$ 为储氢容量约束; $P_{H-ch,max}^S$ 、 $P_{H-ch,min}^S$ 为储氢装置充氢速率折算的等值功率约束; $P_{H-dis,max}^S$ 、 $P_{H-dis,min}^S$ 为储氢装置放氢速率折算的等值功率约束。

15) 储气装置运行约束

$$\begin{cases} S_{gas,min} \leq S_{gas,t} \leq S_{gas,max} \\ P_{gas-ch,min}^S \leq P_{gas-ch,t}^S \leq P_{gas-ch,max}^S \\ P_{gas-dis,min}^S \leq P_{gas-dis,t}^S \leq P_{gas-dis,max}^S \end{cases} \quad (20)$$

其中, $S_{gas,t}$ 为 t 时刻下的储气容量; $S_{gas,max}$ 、 $S_{gas,min}$ 为储气容量约束; $P_{gas-ch,max}^S$ 、 $P_{gas-ch,min}^S$ 为储气装置充气速率折算的等值功率约束; $P_{gas-dis,max}^S$ 、 $P_{gas-dis,min}^S$ 为储气装置放气速率折算的等值功率约束。

3. 模型求解

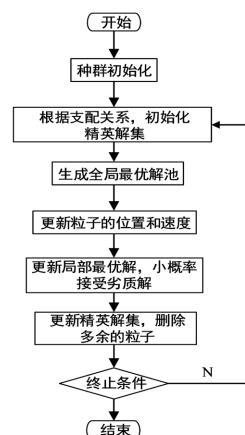


Figure 1. Flowchart of particle swarm optimization algorithm
图 1. 粒子群优化算法流程图

本文采用 MOPSO 算法求解, MOPSO 算法通过外部存档和 Pareto 支配基本原理来处理多个目标, 具有适用范围广、设置参数少、优化结构简单的特点, 在多个领域得到了广泛应用。这种算法基本思想来源于对鸟群捕食行为的观察和模拟带来的启发, 核心思想是将实际问题的解具象为多个具有记忆属性的粒子, 通过设定粒子的存在空间范围、移动速度、移动方向等一系列限制条件, 让粒子不断更新自身位置, 多次迭代寻找趋于最优的解。MOPSO 算法调度流程图如图 1 所示。

4. 算例分析

4.1. 参数设置

风机、光伏、系统设备及运行参数见表 1~3。

4.2. 仿真分析

本文用 MATLAB 软件进行仿真分析, 利用多目标粒子群算法对含综合储能的多能源系统模型求解, 算法参数设置如下: 粒子群规模为 200, 学习因子 c_1 和 c_2 均取 1.5, 惯性权重范围设定为 [0.4, 0.9], 迭代次数为 100 次。设计了两种典型场景:

情景 1: 多能源系统采用燃料电池与储氢装置组成的综合储能系统, 不含传统蓄电池。

情景 2: 多能源系统仅配置蓄电池储能单元, 不包含燃料电池和储氢系统。

Table 1. Wind power output

表 1. 风电出力

时段/h	功率/MW	时段/h	功率/MW
0	580	12	241
1	563	13	215
2	548	14	235
3	542	15	285
4	529	16	350
5	469	17	360
6	418	18	412
7	383	19	469
8	294	20	500
9	295	21	588
10	281	22	575
11	251	23	597

Table 2. Photovoltaic output

表 2. 光伏出力

时段/h	功率/MW	时段/h	功率/MW
0	0	12	170
1	0	13	175
2	0	14	184
3	0	15	151
4	0	16	121

续表

5	0	17	91
6	40	18	46
7	70	19	0
8	90	20	0
9	110	21	0
10	120	22	0
11	145	23	0

Table 3. System equipment and operating parameter table**表 3.** 系统设备与运行参数表

类型	容量(MW)	效率(%)	单位运行成本(万元/MW)
燃气轮机	130	80	3.15
电锅炉	200	90	1.53
燃料电池	60	85	4.58
P2G	100	80	2.07
蓄电池	60	70	1.96
储热装置	70	95	1.27
储氢装置	70	95	1.58
储气装置	70	95	1.64

本文在目标函数中还考虑到了环境成本，环境成本主要为 NO_x 、 SO_2 、 CO_2 三种污染物排放的惩罚成本，污染物排放数据及规定的惩罚标准如表 4 所示。

Table 4. Pollutant discharge penalty standard table**表 4.** 污染物排放惩罚标准表

类型(kg/MW)	CO_2	SO_2	NO_x
惩罚(元/MW)	32	2023	9246
燃气轮机	207	0.17	0.85
电网	265	1.88	1.678
热网	854	1.23	1.25

本文周期划分为峰、谷、平三个时段，并考虑分时电价，时段与价格具体如表 5 所示。

Table 5. Interactive price in different time periods**表 5.** 不同时段交互价格

时段	时间	$C_{E, buy}$ (元/kWh)	$C_{E, sell}$ (元/kWh)
峰时	[10, 15], [18, 21]	0.63	0.61
平时	[7, 10], [15, 18], [21, 23]	0.56	0.55
谷时	[0, 7], [23, 24]	0.54	0.53

采用 MOPSO 算法分别对两种储能配置方案进行求解，并从 Pareto 解集中选取最优折衷解，具体结果如表 6 所示。分析表明，场景 1 因采用综合储能系统，实现了各机组的优化协调运行，其运行成本较场景 2 显著降低。从经济性和环保性的双重优化目标来看，表 6 对比结果显示，通过 MOPSO 算法获得的目标函数值证实，场景 1 的综合效益优于场景 2。

Table 6. The optimal solution for the two scenarios

表 6. 两种场景的最优解

最优解	F1/万元	F2/万元
场景 1	2197.52	325.17
场景 2	2365.42	330.68

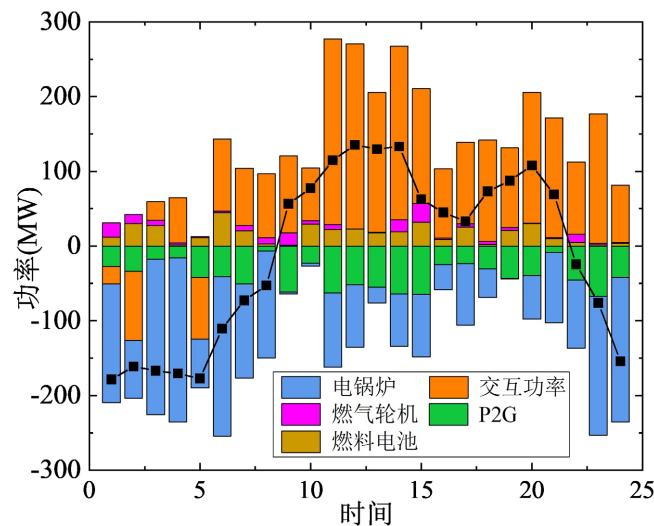


Figure 2. Electric load balance diagram

图 2. 电负荷平衡图

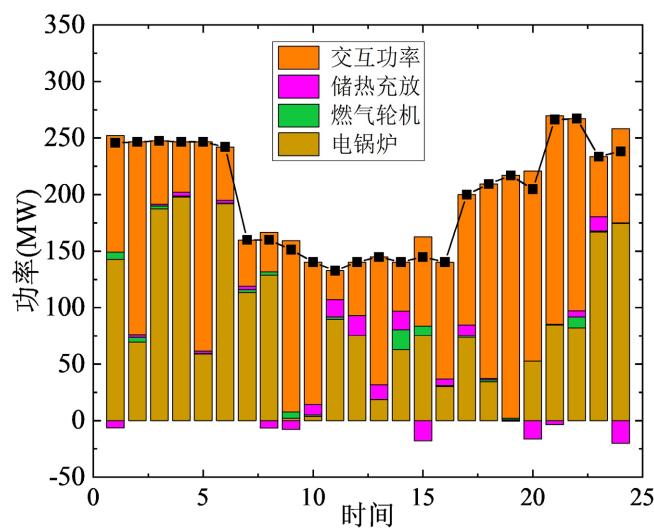


Figure 3. Heat load balance diagram

图 3. 热负荷平衡图

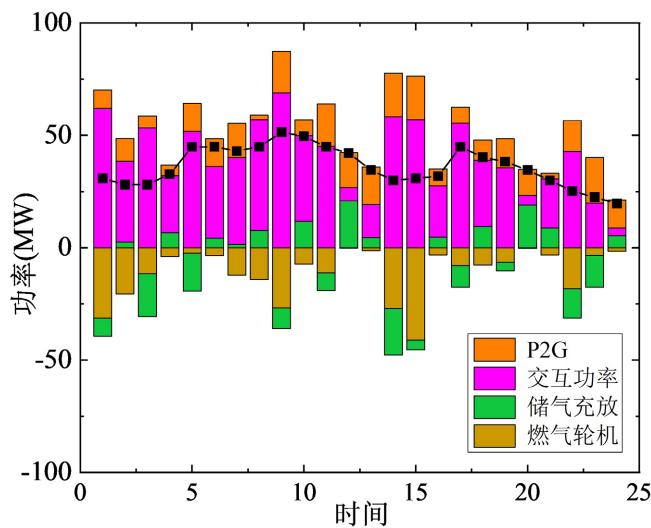
**Figure 4.** Gas load balance diagram**图 4.** 气负荷平衡图

图 2 为电平衡优化结果, 从图 2 和图 3 可知, 在 1~8 和 22~24 时段, 系统出现净电负荷为负的现象, 表明发电功率存在盈余。然而, 由于此时处于热负荷高峰期, 燃气轮机需优先满足供热需求, 这加剧了电力消纳的难度。为此, 系统通过启动电锅炉和 P2G 装置来消纳过剩电能, 这些设备在此期间基本保持满载运行状态。图 3 展示了热平衡优化结果, 其中燃气轮机采用“以热定电”的运行模式, 并与燃料电池协同工作, 有效缓解了电热负荷不匹配问题。这种配置在控制供能成本的同时, 显著提升了系统的调峰能力。图 4 呈现了气平衡优化结果, P2G 装置的运行显著降低了气网压力。这不仅减少了系统与外部气网的交互需求, 而且在电力负荷高峰时段, 燃料电池的氢电转换功能提供了可靠的电力供应, 实现了多种能源的优势互补, 从而提高了系统的运行灵活性和安全稳定性。

5. 结论

本文针对含多能量存储的多能源系统优化调度问题, 以最小化运行成本和环境保护成本为目标构建了多目标函数, 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, 建立含多能量存储的多能源系统优化调度模型, 对含蓄电池和不含蓄电池的多能源优化调度进行仿真对比。仿真结果表明: 本文提出的储能设施的能量输入和输出以及可再生能源输出的协调优化模型具有良好的经济效益和大规模利用可再生能源的能力。

参考文献

- [1] 任惠, 王希, 田磊, 等. 计及源荷不确定性的电力系统静态电压稳定极限预警方法研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(10): 249-258.
- [2] 王婧, 潘志远, 赵义术, 等. 基于可再生能源的配电网电力调度优化模型研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(10): 65-68+85.
- [3] Zhou, A., Yang, M., Wang, M. and Zhang, Y. (2020) A Linear Programming Approximation of Distributionally Robust Chance-Constrained Dispatch with Wasserstein Distance. *IEEE Transactions on Power Systems*, **35**, 3366-3377. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2978934>
- [4] Li, Y., Zou, Y., Tan, Y., Cao, Y., Liu, X., Shahidehpour, M., et al. (2018) Optimal Stochastic Operation of Integrated Low-Carbon Electric Power, Natural Gas, and Heat Delivery System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **9**, 273-283. <https://doi.org/10.1109/tste.2017.2728098>

- [5] Conejo, A.J. and Wu, X. (2021) Robust Optimization in Power Systems: A Tutorial Overview. *Optimization and Engineering*, **23**, 2051-2073. <https://doi.org/10.1007/s11081-021-09667-3>
- [6] Chen, Y., Wei, W., Liu, F. and Mei, S. (2016) Distributionally Robust Hydro-Thermal-Wind Economic Dispatch. *Applied Energy*, **173**, 511-519. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.04.060>
- [7] Zhao, C. and Jiang, R. (2018) Distributionally Robust Contingency-Constrained Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **33**, 94-102. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2017.2699121>
- [8] Yang, Y. and Wu, W. (2019) A Distributionally Robust Optimization Model for Real-Time Power Dispatch in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **10**, 3743-3752. <https://doi.org/10.1109/tsg.2018.2834564>
- [9] Zhu, R., Wei, H. and Bai, X. (2019) Wasserstein Metric Based Distributionally Robust Approximate Framework for Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **34**, 2991-3001. <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2019.2893296>
- [10] 林文智. 考虑需求响应不确定性的多园区综合能源系统分布式协同优化调度[D]: [硕士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2022.