

A Robust Multi-Objective Optimal Economic Dispatching Model with CHP and Wind Power Output

Dongsheng Huo, Yalin Zhu, Yichao Cao, Zhichao Jiang

North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang Hebei
Email: problems@sohu.com

Received: Oct. 9th, 2019; accepted: Oct. 24th, 2019; published: Oct. 31st, 2019

Abstract

In order to improve the wind power integration, we install the thermal storage equipment in the electric-thermal system, improving the regulation of CHP units to enhance the flexibility of the power system. The randomness of the wind power prediction leads to the uncertainty of economic dispatch. The strategy requires to not only meet the optimal cost functions, but also hope that the cost is affected by the uncertainty within the acceptable range. In this paper, we give a robust multi-objective optimal economic dispatching model with CHP and wind power system based on the parameters sensitive region method. The model includes two objectives minimizing the cost of coal consumption and the cost of wind energy curtailment. The bacterial colony chemotaxis and the robust condition testing method algorithm were used to solve our model. By simulation, the robustness, economy of the proposed model and validity of algorithm are verified. In the last comparison of three models, it shows that the RMOO model is optimal and robust, and the capacity of wind power integration is greatly improved.

Keywords

Robust Multi-Objective Optimization, Robust Constrain, Thermal Storage, Combined Heat and Power, Wind Curtailment

热电联产与风电机组联合运行鲁棒多目标优化调度模型

霍东升, 朱雅林, 曹艺超, 江志超

北华航天工业学院, 河北 廊坊
Email: problems@sohu.com

摘要

提高风电消纳能力，需在电-热联合系统中加装储热设备，提高热电联产机组的调节能力，增强电力系统的灵活性，解决风电消纳问题。风电预测功率的随机性导致调度问题的不确定性，要求调度方案不仅能满足目标费用最优，而且希望目标费用受不确定性的影响在可接受范围之内。本文基于参数的敏感区域方法，建立含储热的热电联产与风电机组联合运行鲁棒多目标优化经济调度模型。模型包含极小化机组运行的煤耗成本，弃风惩罚费用两个目标，约束条件包括联合调度系统的常规约束、鲁棒约束。利用细菌群体趋药性算法和鲁棒条件检验方法求解模型。通过仿真计算，验证了所提模型和算法的鲁棒性，经济性和有效性，并通过三种模型对比说明本文模型费用最优，鲁棒性最好，风电消纳能力得到了提升。

关键词

鲁棒多目标优化，鲁棒约束，储热，热电联产，风电消纳

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

近十多年来，我国的风电装机规模得到了跨越式的发展。截至2016年底，全国的风电装机容量达到了1.49亿千瓦，占全部发电装机容量的9%，风电发电量2410亿千瓦时，占全部发电量的4%，平均利用小时数1742小时[1]。但在风电迅速发展的同时，也面临着严重的风电消纳问题。根据国家能源局的统计数据，2016年全年弃风电量达497亿千瓦时，弃风较为严重的地区是弃风率都在20%以上。2017年上半年，弃风限电形势明显好转，风电弃风电量235亿千瓦时，平均弃风率达15.3% [2]。

弃风的主要原因是风电出力本身具有随机性、扰动性和不确定性，消纳风电需要系统提供更多的灵活性，而在风电大规模集中开发的“三北”地区，燃煤火电机组为主的调节能力有限。此外，在供热期间，热电联产(combined heat and power, CHP)机组“以热定电”，出力受到很大限制，调节能力进一步下降，加剧弃风现象。

很多研究工作将风电消纳问题的解决范围拓展到了电-热综合能源系统，提升热电联产机组的调节能力，促进风电消纳，减少弃风。文献[3] [4] [5]在传统模型基础上增加了热平衡约束、热电机组的热电耦合约束、储热装置运行约束等，建立了含储热的电力系统电热综合调度模型，讨论了利用储热消纳弃风的基本运行机理，分析了热电机组配置储热前后运行特性与调峰能力的变化情况。文献[6]研究了包含大容量储热的电-热联合系统电力、热力系统的差异性与互补性，以及包含电、热2种能量形式的优化控制、能量管理、储热装置的设计。文献[7] [8]重点讨论了热电厂配置电锅炉联合系统优化调度模型，进行日调峰的消纳弃风方案，并分析了方案的经济性。文献[9]提出应该在电热联合调度模型中考虑热力管网的约束，建立了适用于电热能源集成系统分析的热力网络模型，考虑热力网络约束及火电机组启停运行优化模型。研究了电热协调运行方式对风电消纳的促进作用。文献[10] [11] [12] [13]通过对储热环节的控制，打破以热定电的电-热刚性耦合关系，提高系统调节能力。构建了包含储热的热电联产机组、电

供热系统的调度模型,将储热纳入包含风电的电力系统有功调度体系。文献[14][15]在热电厂中配置蓄热罐有助于改善其调峰能力和提高风电接纳水平。考虑风电不确定性提出热电机组与蓄热罐的协调运行来优化确定蓄热罐运行策略。通过调整电出力以减小弃风,控制热出力以降低运行成本。文献[16]基于该调度模式提出了考虑风电出力不确定性的联合系统优化调度模型。该模型充分利用储热带来的灵活性实现联合运行系统在上网收益和惩罚费用之间的协调,获得收益最高的风电场和热电联产联合优化运行的调度策略。文献[17]以虚拟电厂形式聚合热电联产机组,并参与能量市场和旋转备用市场,提高决策灵活性,获得更大收益。采用鲁棒优化处理不确定性,建立日前热电联合调度优化模型。文献[17][18]提出了基于灵敏度区域的多目标优化问题的鲁棒性。文献[19][20][21]提出的一种鲁棒的多目标优化方法,能同时考虑决策者和市场的因素对决策的影响。所求的解既要具有较高的质量,又要满足指定的鲁棒性要求。文献[22]对多目标优化的鲁棒性度量方法进行了分析,基于用户提出的严格鲁棒性要求,给出了一种严格鲁棒性度量方法并建立求多目标鲁棒 Pareto 最优解的数学模型,以进化计算去求解双层优化。

文献[23]首次把灵敏度区域的方法引入到求解电力系统问题中来,建立双层逆鲁棒优化模型,内层优化意在求取可行域中较优决策向量和可行解,外层针对理想扰动约束来求取内层结果中鲁棒性较强的解及决策向量的最大扰动范围。本文引入多目标的灵敏度区域,解的鲁棒性约束条件,建立机组煤耗成本,风电惩罚费用为双目标函数,并考虑风电预测波动的 RMOO 经济调度模型[24]。求解利用细菌群体趋药性 BCC (bacterial colony chemotaxis)算法求解,并通过解的鲁棒性约束条件选择鲁棒的 Pareto 解。

上述文献的研究工作侧重于单一目标的优化模型,或者以机组煤耗成本最低为目标,风电出力的不确定性带来扰动成本由其他机组无偿承担,或者以风电惩罚费用最小为目标函数,两个目标之间的费用相互影响分析的少。其次忽略了风电预测误差的影响,多数考虑单一的风电出力曲线。再次文献中都没有考虑目标函数主观上可以承受一定程度的扰动。

在上述文献的研究基础上,结合鲁棒多目标优化理论,本文提出了热电联产机组和风电场联合运行的鲁棒多目标优化 RMOO (robust multi-objective optimization)问题,同时顾及风电预测不确定性,调度目标费用可承受一定程度的扰动的鲁棒优化问题。

2. 鲁棒多目标优化数学模型

2.1. 多目标优化数学描述

多目标优化指满足一定约束条件的 n 个决策变量,使得 m 个目标函数组成的向量函数最优化的问题。目标函数组成了不同性能标准的数学描述,由于性能标准之间通常是互相冲突的,多目标优化目的是找到使得所有目标函数值都可接受的解。

多目标优化数学模型

$$\begin{aligned} \min \quad & F(x) \\ \text{s.t.} \quad & g_j(x) \leq 0, \quad j=1, \dots, J \\ & h_k(x) = 0, \quad k=1, \dots, K \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 $F(x) = (f_1, f_2, \dots, f_m)$ 为目标函数向量 $g_j(x) \leq 0, h_k(x) = 0$ 分别为不等式约束,等式约束, $x \in R^n$ 为决策向量。

满足约束条件的决策变量的集合

$$X = \{x \mid g_j(x) \leq 0, j=1, \dots, J; h_k(x) = 0, k=1, \dots, K, x \in R^n\} \quad (1-2)$$

称为可行解集。

对于 $x_1, x_2 \in X$, 若 $\forall i, f_i(x_1) \leq f_i(x_2)$ 且存在 $j \in \{1, \dots, I\}, f_j(x_1) < f_j(x_2)$, 称 x_2 比 x_1 Pareto 占优, 或称 x_1 支配 x_2 , 可记作 $x_1 \succ x_2$ 。不能被可行解中任何解支配的解称为 Pareto 最优解。

多目标优化问题的主要任务就是在满足约束条件的可行解中搜索 Pareto 最优解集(非支配解集合), 即

$$P = \{x^* \mid \neg \exists x: x \succ x^*, x, x^* \in X\} \tag{1-3}$$

2.2. 参数的敏感区域与解的鲁棒性

多目标优化问题过程中, 最优解易受设计参数或环境参数扰动的影响。参数的随机性导致工程问题不确定性。决策者希望决策方案不仅能满足目标性能最优, 而且希望目标性能受不确定性的影响在可接受范围之内。基于灵敏度区域的鲁棒多目标性优化方法可以用来解决设计变量存在不确定性时目标鲁棒性优化设计问题。

含不确定参数 $p = (p_1, \dots, p_m)$ 的多目标优化模型如下

$$\begin{aligned} \min \quad & F(x, p) \\ \text{s.t} \quad & g_j(x, p) \leq 0, j = 1, \dots, J \\ & h_k(x) = 0, k = 1, \dots, K \\ & x \in R^n, p \in R^m. \end{aligned} \tag{1-4}$$

设参数 p 的初始值为 p_0 , 其变化量 Δp , $\Delta p = (\Delta p_1, \dots, \Delta p_m)$ 。由参数的变化引起的目标函数变化

$$\Delta f_i = f_i(x, p_0 + \Delta p) - f_i(x, p_0) \tag{1-5}$$

如果对于 $x \in X$, 给定目标函数值可接受的变化范围 $\Delta f = (\Delta f_1, \dots, \Delta f_m)$, 由目标函数可接受区域反射到参数 p 的取值范围称为参数的敏感性区域。

$$S(x) = \{\Delta p \mid f_i(x, p_0 + \Delta p) - f_i(x, p_0) \leq \Delta f_i, i = 1, \dots, m\} \tag{1-6}$$

定义 (最优的可行敏感区域)

$$\begin{aligned} R(x) = \min_{\Delta p} \quad & \|\Delta p\| \\ \text{s.t} \quad & \max_{1 \leq i \leq m} |f_i(x, p_0 + \Delta p) - f_i(x, p_0)| = \Delta f \\ & g_j(x, p_0 + \Delta p) \leq 0 \\ & h_k(x) = 0, k = 1, \dots, K \\ & \Delta p \in R^m. \end{aligned} \tag{1-7}$$

$R(x)$ 称为为最优的可行敏感区域, 其满足目标函数可接受扰动范围, 且满足决策变量的可行性。设 R_0 为初始的敏感系数, 满足 $\{x \mid R(x) \leq R_0, x \in X\}$ 的解称为是鲁棒的。将其加入到多目标的模型中, 基于敏感区域的 (RMOO)数学模型为

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x, p) \\ \text{s.t} \quad & g_j(x, p) \leq 0, j = 1, \dots, J \\ & h_k(x, p) = 0, k = 1, \dots, K \\ & R(x) \leq R_0 \\ & x \in R^n. \end{aligned} \tag{1-8}$$

其中 $R(x) \leq R_0$ 称为鲁棒约束。

3. 热电联产与风电联合调度 RMOO 模型

3.1. 基本约束

热电联产机组同时输出热功率和电功率。输出的电功率和热功率之间的耦合关系称为热电联产机组的“电热特性”，其比值称为“电热比”。

热电联产机组主要有背压式和抽汽式两种类型。背压式机组，汽轮机背压排汽通过热网对外供热。供热期实时满足热负荷需求，电出力 P_{chp} 完全由其热出力 H_{chp} 决定，热电比是固定，该类型机组将不具有调节能力。

$$P_{chp} = H_{chp} / k_{hp} \quad (2-1)$$

抽汽式机组从汽轮机抽取一部分蒸汽作为热源对外供热，在满足运行要求的条件下可以通过调节抽汽量的大小来调整热电比，其电热特性可描述为

$$C_v H_{chp} \leq P_{chp} \leq P - C_k H_{chp} \quad (2-2)$$

C_v, C_k 分别为热电比的下限，上限， P 为抽气式机组电出力上限。
两种类型机组的热电出力都受到机组出力能力的限制

$$\begin{aligned} P_{chp}^{\min} &\leq P_{chp,t} \leq P_{chp}^{\max} \\ H_{chp}^{\min} &\leq H_{chp,t} \leq H_{chp}^{\max} \end{aligned} \quad (2-3)$$

热电联合机组的爬坡能力约束

$$-D_R^{\max} \leq P_{chp,t+1} - P_{chp,t} \leq U_R^{\max} \quad (2-4)$$

联产机组的热出力一部分直接供热 $H_{d,t}$ ，如果有剩余 $H_{in,t}$ 则输入储热装置中

$$H_{chp,t} = H_{in,t} + H_{d,t} \quad (2-5)$$

大容量储热加入能使能源优化配置的调控水平达到电力系统的要求，解决可风电接入、电力系统调峰等问题。储热装置受到其储热容量，储放热速度等因素的制约。设 Cr^{\max} 为储热罐的容量上限，因此有

$$0 \leq Cr_t \leq Cr^{\max}, t = 1, \dots, T \quad (2-6)$$

单位时间能储放热量的多少由储热装置的储放热速率决定

$$\begin{cases} 0 \leq H_{in,t} \leq H_{in}^{\max} \\ 0 \leq H_{out,t} \leq H_{out}^{\max} \end{cases} \quad (2-7)$$

某时刻储热装置存储热量状态

$$\Delta t (H_{in,t} - H_{out,t}) = Cr_{t+1} - Cr_t \quad (2-8)$$

电功率平衡约束

$$\sum_i^{N_G} P_{G,i,t} + \sum_i^{N_W} P_{W,i,t} + \sum_i^{N_C} P_{chp,i,t} = P_{D,t}, t = 1, \dots, T \quad (2-9)$$

$P_{i,t}$ 为机组电出力， T, N_G, N_W 分别为时段数，常规机组数，风电场数。
联产机组的热出力要满足供热的热力需求热平衡约束

$$H_{out,t} + H_{d,t} = H_{load,t} \quad (2-10)$$

常规火电机组的出力约束，爬坡能力约束

$$\begin{cases} P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i,t} \leq P_{G,i}^{\max} \\ -D_{R,i}^{\max} \Delta t \leq P_{G,i,t+1} - P_{G,i,t} \leq U_{R,i}^{\max} \Delta t \end{cases} \quad (2-11)$$

设实际系统调度的风电出力 $P_{W,i,t}$ ，风电功率预测值为 $P_{W,i,t}^f$ ， $P_{W,i,t}^f$ 是不确定量。

$$0 \leq P_{W,i,t} \leq P_{W,i,t}^f \quad (2-12)$$

3.2. 煤耗费用成本和弃风惩罚费用的双目标函数

本文考虑系统中电出力机组包含常规火电机组，热电联产机组的煤耗费用。常规火电机组煤耗费用

$$f_h = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (\alpha_i P_{G,i,t}^2 + \beta_i P_{G,i,t} + \gamma_i) \quad (2-13)$$

$\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为机组的煤耗系数。热电联产机组的煤耗费用为

$$f_{chp} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{chp,i,t}^2 + b_i P_{chp,i,t} + c_i) \quad (2-14)$$

因此系统总的煤耗费用为

$$f_1 = f_h + f_{chp} \quad (2-15)$$

实际调度中系统调度的风电出力低于风电的预测出力，导致弃风。设 $C_{w,t}$ 为 t 时刻的弃风惩罚费用，则总的弃风惩罚费为

$$f_w = \sum_{i=1}^{N_w} \sum_{t=1}^T C_{w,t} (P_{W,i,t}^f - P_{W,i,t}) \quad (2-16)$$

系统总的费用最小化多目标函数表示为

$$\min F(P_{G,i,t}, P_{chp,i,t}, P_{W,i,t}) = \{f_1, f_2\} \quad (2-17)$$

3.3. 鲁棒性约束

风电出力具有随机性、间歇性等特点，同时受风电功率预测方法的限制，风电预测出力 $P_{W,i,t}^f$ 是一个不确定量，设其扰动幅度为 $\Delta P_{i,t}$ 。增强调度系统的应对风电扰动的鲁棒性，可以提高消纳风电能力。

实际调度过程中，调度中心可承受适当程度煤耗费用，弃风惩罚费用扰动。目标函数可承受一定程度的扰动，增强了调度系统的鲁棒性，降低风电扰动带来的影响，能增强系统调度风电的能力。设调度中心可承受的煤耗费用扰动为 Δf_1 ，弃风惩罚费用扰动为 Δf_2 。即目标函数的可承受的扰动为 $\Delta f = (\Delta f_1, \Delta f_2)$ 。

根据定义 1，联合调度模型的鲁棒性约束为：

$$\begin{aligned} & R(P_{G,i,t}, P_{chp,i,t}, P_{W,i,t}) \\ & = \{ \Delta f_i \leq \Delta f; P_{W,i,t} \leq P_{W,i,t}^f + \Delta P_{i,t}; (2-1), \dots, (2-12) \} \\ & \leq R_0 \end{aligned} \quad (2-18)$$

公式(2-1)~(2-18)联立构成一个目标函数为二次函数，约束均为线性的基于敏感区域的鲁棒多目标优化经济调度(RMOO-ED)模型。

4. 模型求解

RMOO-ED模型的求解分为MOO-ED模型求解和鲁棒约束检验两部分，第一部分利用BCC算法求解确定型的MOO-ED模型，第二部分从Pareto解集中寻找满足鲁棒约束的鲁棒Pareto解集。

4.1. 算法基本步骤

步骤 1: 参数初始化。

- 1) 机组参数, 储热设备参数初始化, 系统电负荷, 热负荷。
- 2) 风电预测出力 P_w^f
- 3) 鲁棒性参数: 目标函数可接受扰动参数 Δf_0 , 风电预测出力扰动 ΔP_w^f , 鲁棒性约束条件数 R_0

步骤 2: 求解 MOO-ED 模型

- 1) BCC 算法参数设置: 细菌个数为 N , 精度 ε , 最大迭代次数为 M 。
- 2) 运行带可行性验证 BCC 算法, 得 Pareto 解集。

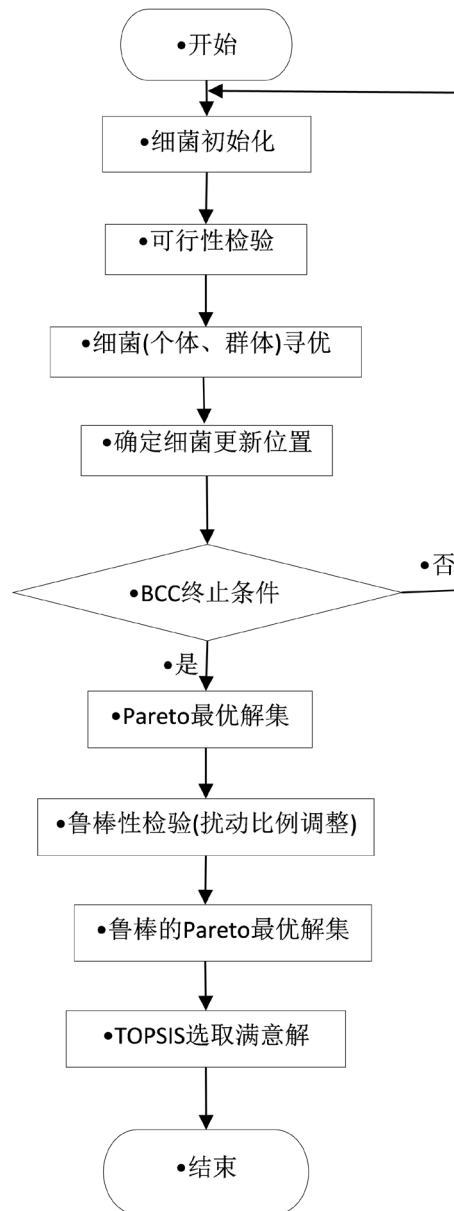


Figure 1. The flow chat of solving RMOO-ED model

图 1. 求解 RMOO-ED 模型算法流程图

步骤 3: 解的鲁棒性判断

- 1) 风电预测出力扰动 ΔP_w^f 。
- 2) 在风电出力为 $P_w^f + \Delta P_w^f$ ，进行可行性判断，可行解的调整。
- 3) 鲁棒约束条件判断 $R(P_{G,i,t}, P_{chp,i,t}, P_{W,i,t}) \leq R_0$
满足则保留步骤 2 的 Pareto 解，否则替换为扰动后的可行解。

步骤 4: 在鲁棒 Pareto 解集中选择理想解

- 1) 设置两个目标函数的权重。
- 2) 利用 TOPSIS (Technique for Order Preference Similar to an Ideal Solution)方法选择理想解。

4.2. 算法框图

算法框图见下图 1。

5. 算例仿真

5.1. 算例数据

本文采用六机组系统进行仿真，系统由两台背压式热发电机组、两台抽汽式热发电机组和两台常规火电机组，一个风电场，一个储热设备构成，各类电源的装机比例以某地区实际装机比例为准。算例为日前调度，调度周期为 24 h，以 1 h 为调度时段。系统电负荷、热负荷和风电预测功率选取某日 0 点至 24:00 的数据见附图 A2~A4。机组煤耗特性参数、电热输出运行参数参照文[12]。BCC 算法参数设置如下：细菌个数为 50，初始精度 $\varepsilon_{begin} = 2$ ，最终精度 $\varepsilon_{end} = 10^{-6}$ ，精度更新常数 $\alpha = 1.25$ ，最大迭代次数为 500，单个细菌移动速度 $v = 1$ 。

5.2. RMOO-ED 模型结果分析

设定 RMOO-ED 模型目标函数扰动范围 $\Delta f = 10\%$ ，风电预测扰动 $\Delta P_w = 10\%$ 通过算法求解得到的结果如下图 2。

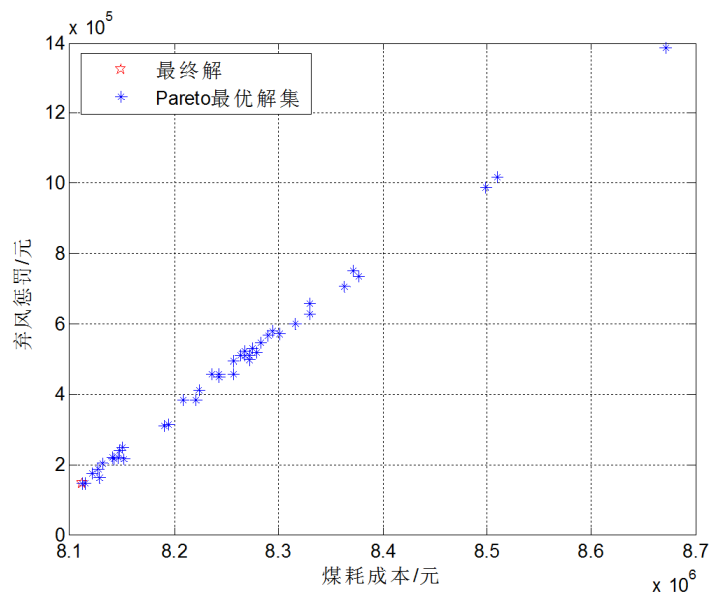


Figure 2. Pareto solutions
图 2. Pareto 解集

在设定目标函数机组煤耗成本和弃风惩罚费用的权重均为 0.5 时，在 Pareto 解集，选取满意解，得到煤耗成本 812.01 万元，弃风惩罚费用为 17.10 万元，计算时间为 262 s，验证了本文所提基于敏感区域的 RMOO-ED 模型的合理性，和算法有效性。满意解所对应的风电出力如图 3。

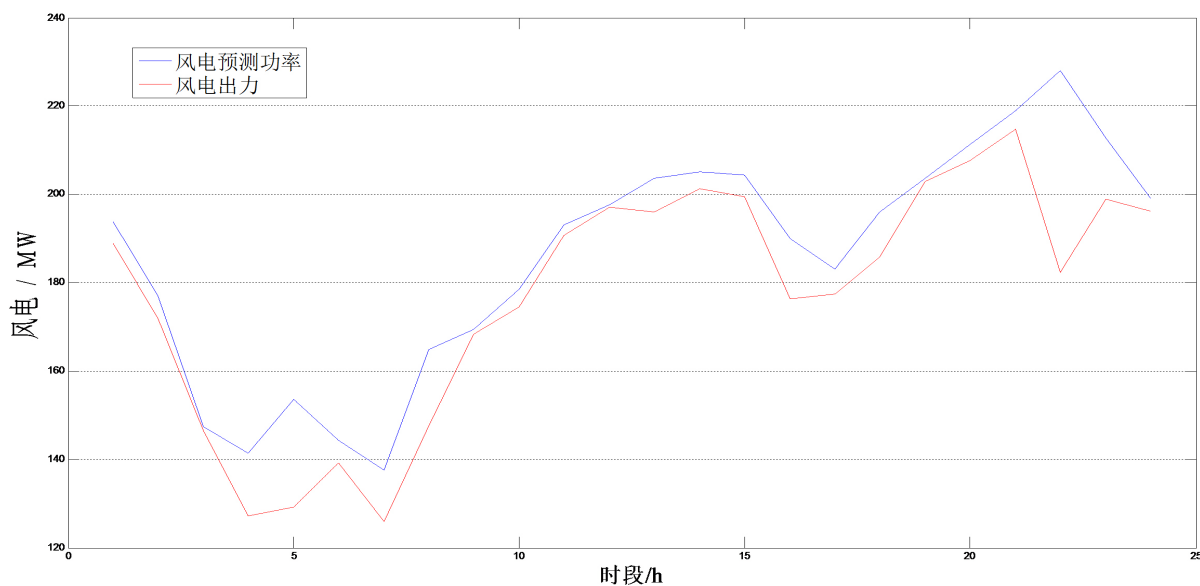


Figure 3. Wind power

图 3. 风电预测功率，风电出力

在保证风电合理消纳的情形下，储热设备在热负荷低的时候，能储存多余热量；在热负荷高且风电出力相对大的时候，储热设备放热以降低机组出力，从而增大风电出力，增加风电消纳。供热期上午时段热负荷最低，供热充足，中午时段储热量达到高峰，下午随着热负荷增大，储热设备处于放热状态，在夜间储热设备处于低储存或者零存储时段。如图 4。

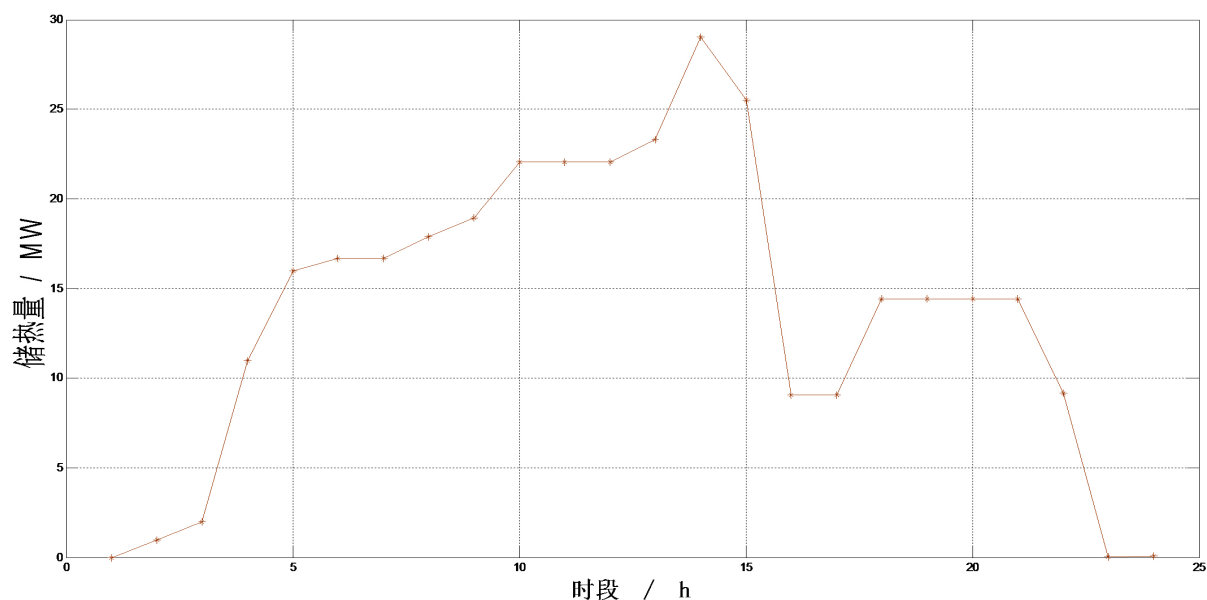


Figure 4. Thermal storage

图 4. 储热量

5.3. 确定性 MOO-ED 模型与两类 RMOO-ED 模型对比分析

5.3.1. 三种模型结果比较

本节考虑确定性 MOO-ED 模型，两类 RMOO-ED 型。不包含鲁棒约束的调度模型称为确定性的 MOO-ED 模型；单独考虑风电预测功率扰动，目标函数不接受任何扰动的 RMOO-ED 称为一般鲁棒模型；目标函数和风电预测同时扰动的模型称为基于敏感区域的鲁棒 RMOO-ED 模型。目标函数值对比结果如下表 1。

Table 1. Objective functions of three MOO-ED models
表 1. 三种经济调度模型目标函数结果对比

ΔP_w	煤耗费用/风电惩罚费用					
	确定型		一般鲁棒		敏感区域鲁棒 $\Delta f = 10\%$	
10%	8.1522	0.2362	8.1344	0.1885	8.1201	0.1710
15%	8.1424	0.1864	8.1247	0.1880	8.1099	0.1697
20%	8.1365	0.1609	8.1206	0.1784	8.1095	0.1550
25%	8.1109	0.1555	8.1169	0.1555	8.0979	0.1328
30%	8.1098	0.1550	8.1095	0.1418	8.0964	0.1020

确定性模型在风电预测扰动时，直接修正风电出力约束上限，一般的鲁棒模型鲁棒约束中设定 $\Delta f = 0$ ，基于敏感区域的鲁棒模型设定 $\Delta f = 10\%$ 。计算结果表明本文的鲁棒模型费用最优。三种模型风电出力的对比结果如下图 5。

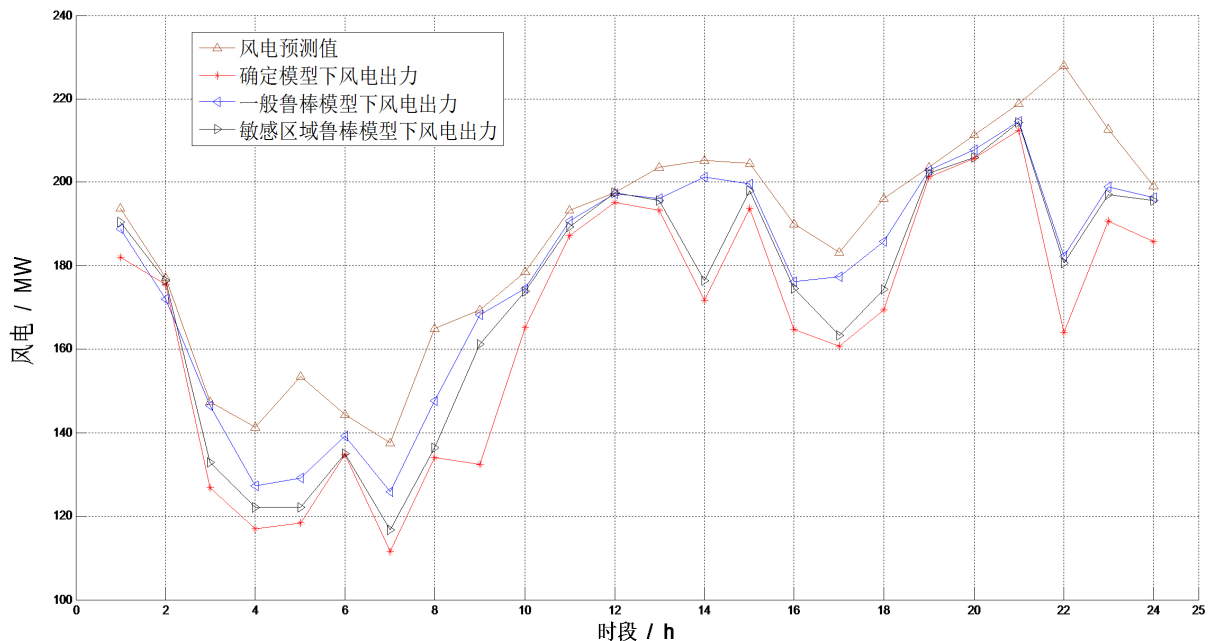


Figure 5. Wind power of three MOO-ED models
图 5. 三种经济调度模型的风电出力

敏感区域 RMOO-ED 模型下，系统的鲁棒性最好，风电出力最多，风电消纳情况最优。储热装置见图 6，储热促进了风电消纳。

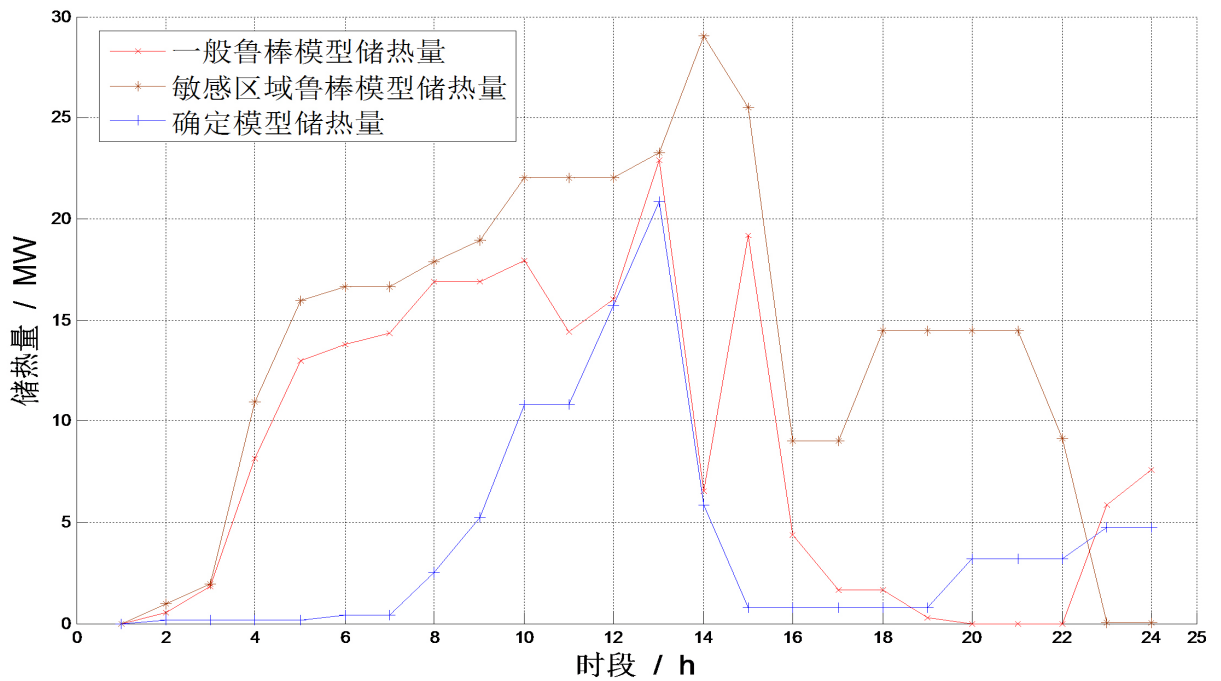


Figure 6. Thermal storage of three MOO-ED models
图 6. 三种经济调度模型的储热量

5.3.2. 目标函数扰动范围的分析

基于敏感区域的 RMOO-ED 模型，目标函数可接受扰动程度不同，目标函数最优费用不同。本节选取两个目标函数可接受扰动分别为 $\Delta f = 10\%$ ， $\Delta f = 5\%$ 做比较。分别做 50 次计算结果相比较，结果如图 7~图 8。

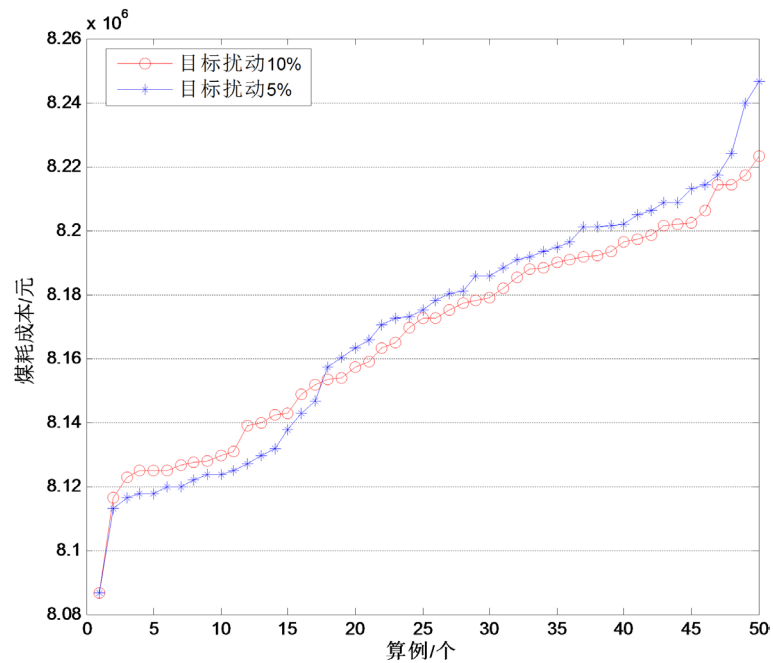


Figure 7. Objective function f_1 (coal consumption)
图 7. 目标函数 f_1 (机组煤耗成本函数)

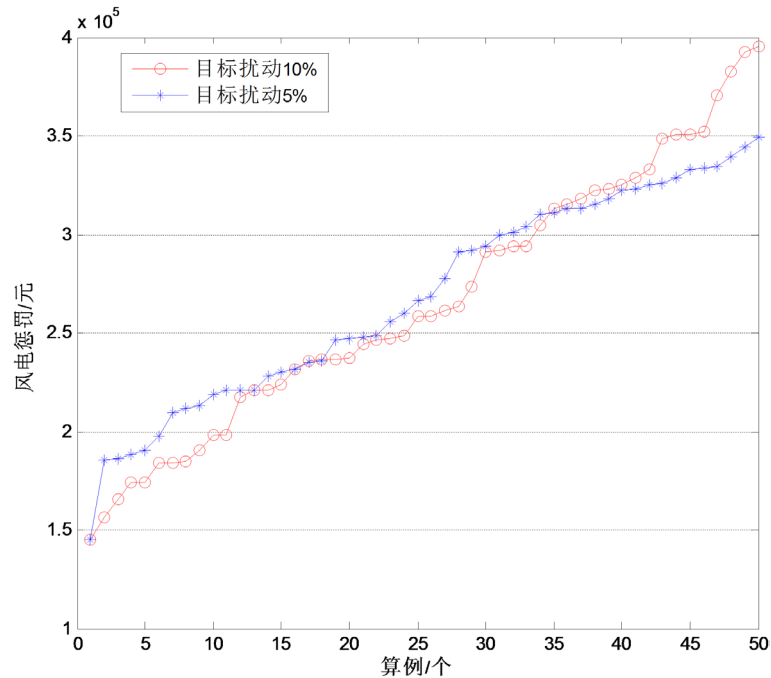


Figure 8. Objective function f_2 (wind curtailment)
图 8. 目标函数 f_2 (弃风惩罚费用)

在扰动比例 10%情形下, 目标函数的平均费用低于扰动比例为 5%的平均费用。将近 70%的算例可接受高比例的扰动的目标函数值更优。更多的计算表明, 在一定范围内, 目标函数可接受的扰动比例越大, 系统的鲁棒性和灵活性越大, 系统的煤耗费用越小, 由风电预测扰动产生的弃风惩罚费用越小。

6. 结论

在电-热联合系统中, 加装大容量的储热装置, 利用弃风电量实现清洁供热, 能提高电力系统的鲁棒性和灵活性, 增加系统的调节能力, 促进可再生能源的就地消纳。风电出力具有随机性、间隙性等特点, 增大系统调度的难度。调度方案要求目标函数费用在可接受范围之内目标函数费用最优。本文基于参数的敏感区域方法, 设定了双目标函数可接受一定比例的扰动, 建立含储热的鲁棒多目标优化经济调度模型。通过仿真计算, 所提模型和算法具有很好的鲁棒性, 经济性和有效性, 系统的风电消纳能力得到了提升。该方法可用于电力系统其他随机调度问题的研究。

基金项目

本文由河北省高校学科拔尖人才选拔与培养计划(SLRC2019020), 北华航天工业学院大学生创新创业训练项目(CX2019157)支持。

参考文献

- [1] 国家能源局. 2015 年风电产业发展情况[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2016-02/02/c_135066586.htm, 2016-02-02.
- [2] 国家能源局. 2017 年上半年风电并网运行情况[EB/OL]. http://www.nea.gov.cn/2017-07/24/c_136468307.htm, 2016-07-27.
- [3] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 含储热的电力系统电热综合调度模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(5): 79-85.
- [4] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41.

- [5] 陈天佑. 基于储热的热电厂消纳风电方案研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [6] 徐飞, 闵勇, 陈磊, 等. 包含大容量储热的电-热联合系统[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5063-5072.
- [7] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.
- [8] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4080.
- [9] 顾泽鹏, 康重庆, 陈新宇, 等. 考虑热网约束的电热能源集成系统运行优化及其风电消纳效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3596-3604.
- [10] 陈磊, 徐飞, 王晓, 等. 储热提升风电消纳能力的实施方式及效果分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4283-4290.
- [11] 于婧, 孙宏斌, 沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 139-145.
- [12] 卢志刚, 隋玉珊, 冯涛, 李学平, 赵号. 考虑储热装置与碳捕集设备的风电消纳低碳经济调度[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 41-51.
- [13] Lu, Z., Feng, T. and Li, X.P. (2013) Low-Carbon Emission/Economic Power Dispatch Using the Multi-Objective Bacterial Colony Chemotaxis Optimization Algorithm Considering Carbon Capture Power Plant. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **53**, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.03.040>
- [14] 吕泉, 王海霞, 陈天佑, 李纯, 朱全胜, 李卫东. 考虑风电不确定性的热电厂蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(14): 24-29.
- [15] 于炎娟, 陈红坤, 姜欣, 陶玉波, 于仁炎. 促进风电消纳的蓄热罐运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(7): 37-43.
- [16] 戴远航, 陈磊, 闵勇, 徐飞, 侯凯元, 周莹. 风电场与含储热的热电联产联合运行的优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3470-3479.
- [17] 孙国强, 周亦洲, 卫志农, 臧海祥, 许晓慧, 李逸驰, 陈胜. 能量和旋转备用市场下虚拟电厂热电联合调度鲁棒优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2017(11): 64-74+313.
- [18] Gunawan, S. and Azarm, S. (2005) A Feasibility Robust Optimization Method Using Sensitivity Region Concept. *Journal of Mechanical Design*, **127**, 858-865. <https://doi.org/10.1115/1.1903000>
- [19] Gunawan, S. and Azarm, S. (2005) Multi-Objective Robust Optimization Using a Sensitivity Region Concept. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, **29**, 50-60. <https://doi.org/10.1007/s00158-004-0450-8>
- [20] Besharati, B., Luo, L. and Azarm, S. (2006) Multi-Objective Single Product Robust Optimization: An Integrated Design and Marketing Approach. *Journal of Mechanical Design*, **128**, 884-892. <https://doi.org/10.1115/1.2202889>
- [21] 徐鸣, 马龙华, 顾江萍, 黄跃进, 沈希. 一种改进的鲁棒多目标优化方法[J]. 控制与决策, 2013, 28(8): 1178-1182.
- [22] 杨爱民, 李杰, 刘卫星, 张良进, 闫龙格. 考虑灵敏度区域的多目标鲁棒性优化算法[J]. 控制理论与应用, 2016, 33(2): 205-211.
- [23] 蒲保兴, 杨路明, 肖潇. 基于进化计算的多目标鲁棒优化方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(5): 1223-1226.
- [24] 王荟敬, 卢志刚, 赵号, 杨晓东, 冯慧波. 计及风电最优逆鲁棒指标的双层优化调度策略[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 86-92.