

基于模式搜索算法的热电联产经济调度研究

范彩兄, 徐嘉伟, 马润生, 周 军, 石生超, 罗仲全

(国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810000)

摘要: 热电联产能够提高燃料利用效率, 减少污染, 对节能减排有重要意义。而热电联产经济调度是非线性、多约束的非凸优化, 求解较为困难。提出了一种基于模式搜索算法的热电联产经济调度优化方法。首先分析了热电联产的运行特点, 建立了热电联产经济调度模型, 目标函数包括纯热力机组、纯火力机组和热电联合机组, 考虑多机组约束, 并在目标函数中考虑了火力机组的阀点效应。接着对模式搜索算法求解原理进行分析, 并进行全局搜索避免陷入局部最优。最后在含有 24 台机组的系统中进行仿真, 与其他算法对比说明了该模型和算法的有效性。

关键词: 模式搜索算法; 热电联产; 经济调度; 阀点效应

Research on the combined heat and power economic dispatch based on pattern search algorithm

FAN Caixiong, XU Jiawei, MA Runsheng, ZHOU Jun, SHI Shengchao, LUO Zhongquan

(Electric Power Research Institute Of State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China)

Abstract: Combined heat and power(CHP) generation can improve fuel efficiency and reduce pollution, which is of great significance for energy conservation and emission reduction. The economic dispatching of CHP is a non-convex optimization with nonlinear and multi-constraint, and it is difficult to solve. This paper proposes a method based on pattern search algorithm for economic dispatch optimization of combined heat and power. Firstly, the operation characteristics of cogeneration are analyzed, and the economic dispatch model of CHP is established. The objective function includes parts of thermal unit, thermal unit and combined heat and power unit, considering multi-unit constraints and the valve point effect. Then the principle of the pattern search algorithm is analyzed, and the global search is performed to avoid falling into local optimum. Finally, the simulation is carried out in a system with 24 units, and the effectiveness of the model and algorithm is illustrated by comparison with other algorithms.

Key words: pattern search algorithm; combined heat and power; economic dispatch; valve point effect

0 引言

电力是重要的二次能源之一, 电力与热力联合运行可以提高能源效率, 方便用户侧的需求侧管理。在热电联产中, 电力系统承担着多能源耦合、交互调节的关键作用。热电联产系统由多种能源耦合形成, 它能够在系统内部进行多能源规划与综合利用, 打破能源发展形势单一的局面。

但是热电联产经济调度是一个多约束、非线性和非凸的优化问题, 其实质是在约束条件内优化机组的热电出力, 达到最佳的经济性^[1]。

目前针对热电联产经济调度建模和求解的研究较多。文献[2]利用改进粒子群算法求解热电联产经济调度问题。文献[3]采用分段线性化和二阶锥松弛方法, 将热电联产经济调度模型线

性化处理后进行求解。文献[4]提出了基于灰狼算法的热电联产经济调度求解。文献[5]研究了含冷热电联产的微电网经济运行控制策略问题。文献[6]采用遗传算法求解热电联产经济调度问题。但是这些算法大多不能够求解多区域互联的多维度、非凸问题，极易陷入局部最优解。

本文提出了一种基于模式搜索算法的热电联产经济调度优化方法。首先分析了热电联产的运行特点，建立了热电联产经济调度模型，目标函数包括纯热力机组、纯火力机组和热电联合机组，考虑多机组约束，并在目标函数中考虑了火力机组的阀点效应。接着对模式搜索算法求解原理进行分析，并进行全局搜索避免陷入局部最优。最后本文在含有24台机组的系统中进行仿真，与其他算法对比说明了本文模型和算法的有效性。

1 热电联产经济调度模型

1.1 热电联产机组运行

热电联产运行会给电网带来一定经济效益，但热电联产机组的调度问题与成本联系密切。而火电机组与热电机组的出力存在耦合联系，其出力之间的相互影响如图1所示。

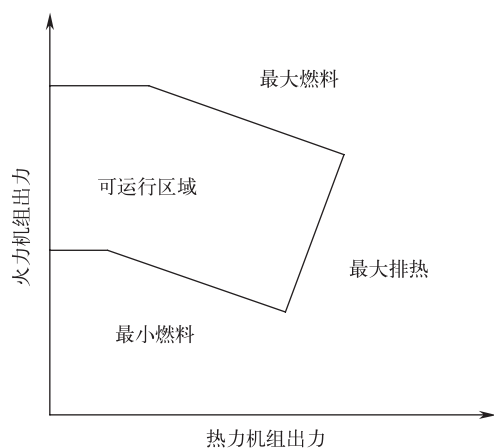


图1 热电联产机组可行域

Fig. 1 Feasible area of operation for a CHP unit

1.2 热电联产经济调度模型

热电联产经济调度的目标为热电联产系统运行成本最小。目标函数包括纯热力机组、纯火力

机组和热电联合机组。具体的表达式为

$$\min f = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i^p) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(P_j^c, H_j^c) + \sum_{k=1}^{N_H} C_k(H_k^H) \quad (1)$$

式中， C_i 为纯火力机组 i 的发电成本； C_j 为热电联产机组 j 的发电成本； C_k 为纯热力机组 k 的发电成本； N_p 为纯火力机组数量； N_c 为热电联产机组数量； N_H 为纯热力机组数量； P 和 H 均为相应的机组出力。

本文成本函数定义为

$$C_i(P_i^p) = a_i(P_i^p)^2 + b_i P_i^p + c_i \quad (2)$$

$$C_j(P_j^c, H_j^c) = a_j(P_j^c)^2 + b_j P_j^c + c_j + d_j(H_j^c)^2 + e_j H_j^c + f_j H_j^c P_j^c \quad (3)$$

$$C_k(H_k^H) = a_k(H_k^H)^2 + b_k H_k^H + c_k \quad (4)$$

式中， a_i 、 b_i 、 c_i 、 a_j 、 b_j 、 c_j 、 e_j 、 f_j 、 a_k 、 b_k 和 c_k 均为纯火电机组 i 、热电联产机组 j 和纯热力发电机组 k 的成本系数。

同时需要考虑下面的约束条件。

1) 火力机组功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^{N_p} P_i^p + \sum_{j=1}^{N_c} P_j^c = P_D \quad (5)$$

式中， P_D 为负荷需求。

2) 热力机组功率平衡约束

$$\sum_{k=1}^{N_H} H_k^H + \sum_{j=1}^{N_c} H_j^c = H_D \quad (6)$$

式中， H_D 为系统热力负荷。

3) 机组出力约束

$$P_{i\min}^p \leq P_i^p \leq P_{i\max}^p \quad (7)$$

式中， P_i^p 为第 i 个发电机有功出力，kW； $P_{i\min}^p$ 、 $P_{i\max}^p$ 分别为发电机 i 有功出力下限和上限，kW。

4) 热电联产机组约束

$$P_{j\min}^c(H_j^c) \leq P_j^c \leq P_{j\max}^c(H_j^c) \quad (8)$$

$$H_{j\min}^c(P_j^c) \leq H_j^c \leq H_{j\max}^c(P_j^c) \quad (9)$$

式中， $P_{j\min}^c(H_j^c)$ 和 $P_{j\max}^c(H_j^c)$ 为热电联产机组中火力机组的出力下限和上限； $H_{j\min}^c(P_j^c)$ 和 $H_{j\max}^c(P_j^c)$ 为热电联产机组中热力机组的出力下限和上限。这样的约束条件考虑了热电联产机组的相互影响。

5) 热力机组约束

$$H_{k \min}^H \leq H_k^H \leq H_{k \max}^H \quad (10)$$

式中, $H_{k \min}^H$ 和 $H_{k \max}^H$ 为热力机组的出力下限和上限。

6) 机端电压约束

$$V_{i \min}^P \leq V_i^P \leq V_{i \max}^P \quad (11)$$

式中, V_i^P 为机组 i 的机端电压 (pu); $V_{i \max}^P$ 、 $V_{i \min}^P$ 分别为机端电压上限和下限 (pu)。

1.3 阀点效应

考虑到大型火力发电机组进气阀的影响, 机组出力会出现阀点效应。在计及这种效应之后, 成本曲线不再平滑, 出现波纹效应^[7], 如图2所示。考虑了该效应之后, 热电联产经济调度成为了非凸、不可微的问题, 这主要是由于计及了一个正弦量。

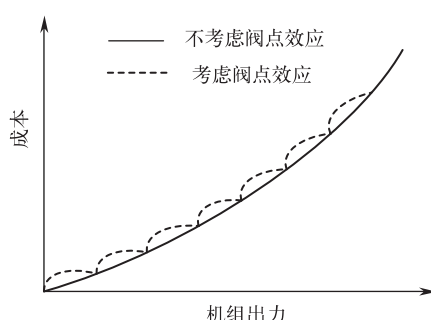


图2 阀点效应对成本出力曲线影响
Fig. 2 Valve point and generation curves

因此, 本文的目标函数中火力机组的成本函数为

$$C_i(P_i^P) = a_i(P_i^P)^2 + b_i P_i^P + c_i + \left| \lambda_i \sin \left[\mu_i (P_{i \min}^P - P_i^P) \right] \right| \quad (12)$$

2 模式搜索算法求解

本文考虑了阀点效应, 增加了经济调度模型的求解难度, 传统算法可能会导致解陷入局部最优, 不能够得到全局最优解。而模式搜索法 (Pattern Search, PS) 是一种适用于求解不可导目标函数或者求导十分复杂的优化问题的进化算法。与最简梯度法不同的是, 模式搜索算法不是按照最速下降方向搜索的, 而是按照可行下降

方向交替实施的轴向搜索和模式搜索。该算法求解速度更快, 计算可靠性更高。

具体的算法原理为: 首先, 根据给定初始点 X_0 , 在第一次迭代中, 标量为1的称为网格尺寸; 模式向量为 $[1 \ 0]$ 、 $[0 \ 1]$ 、 $[-1 \ 0]$ 和 $[0 \ -1]$, 称为方向向量。然后, 算法将方向向量加到初始点 X_0 , 并计算接下来的网格点 $X_0 + [1 \ 0]$ 、 $X_0 + [0 \ 1]$ 、 $X_0 + [-1 \ 0]$ 和 $X_0 + [0 \ -1]$, 直到找到某点的目标函数值小于 X_0 处的目标函数值。若存在该点, 则算法求解成功, 将该点设为 X_1 。

算法继续进行第二次迭代, 将现有网格尺寸扩大一倍。网格在第二次迭代中计算如下点: $X_1 + 2 \times [1 \ 0]$ 、 $X_1 + 2 \times [0 \ 1]$ 、 $X_1 + 2 \times [-1 \ 0]$ 、 $X_1 + 2 \times [0 \ -1]$ 。算法搜寻到某一点, 使得该点的目标函数值小于 X_1 的目标函数值, 将该点设为 X_2 。算法继续将网格尺寸扩大一倍, 进行第三次迭代, 以此类推。流程图如图3所示^[8]。

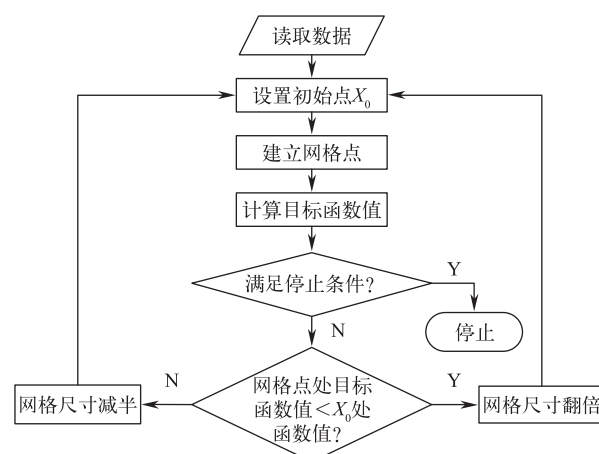


图3 模式搜索算法求解流程
Fig. 3 Solution flow chart of pattern search

3 算例分析

3.1 系统说明

本文仿真系统包括13台传统火力机组、6台热电联产机组和5台热力机组。各类型机组数据见表1~表3。电力负荷和热力负荷分别为200 MW和115 MW·th。模式搜索算法中, 罚因子设为100, 迭代次数最大为1 500。仿真环境为MATLAB 2012b。

表1 火力机组成本参数

Tab. 1 Parameters of power units

机组	a	b	c	d	e	$P_{\min}$	$P_{\max}$
1	0.000 28	8.1	550	300	0.035	0	680
2	0.000 56	8.1	309	200	0.042	0	360
3	0.000 56	8.1	309	200	0.042	0	360
4	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
5	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
6	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
7	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
8	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
9	0.003 24	7.74	240	150	0.063	60	180
10	0.002 84	8.6	126	100	0.084	40	120
11	0.002 84	8.6	126	100	0.084	40	120
12	0.002 84	8.6	126	100	0.084	55	120
13	0.002 84	8.6	126	100	0.084	55	120

表2 热电联产机组成本参数

Tab. 2 Parameters of CHP units

a	b	c	d	e	f	可运行区间
14	0.034 5	14.5	2 650	0.030	4.200	0.031 [98.8, 0], [81, 104.8], [215, 180], [247, 0]
15	0.043 5	36.0	1 250	0.027	0.600	0.011 [44, 0], [44, 15.9], [40, 75], [110.2, 135.6], [125.8, 32.4], [125.8, 0]
16	0.034 5	14.5	2 650	0.030	4.200	0.031 [98.8, 0], [81, 104.8], [215, 180], [247, 0]
17	0.043 5	36.0	1 250	0.027	0.600	0.011 [44, 0], [44, 15.9], [40, 75], [110.2, 135.6], [125.8, 32.4], [125.8, 0]
18	0.103 5	34.5	2 650	0.025	2.203	0.051 [20, 0], [10, 40], [45, 55], [60, 0]
19	0.072	20.0	1 565	0.020	2.340	0.040 [35, 0], [35, 20], [90, 45], [90, 25], [105, 0]

表3 热力机组成本参数

Tab. 3 Parameters of heat units

机组	a	b	c	$H_{\min}$	$H_{\max}$
20	0.038	2.010 9	950	0	2 695.20
21	0.038	2.010 9	950	0	60
22	0.038	2.010 9	950	0	60
23	0.052	3.065 1	480	0	120
24	0.052	3.065 1	480	0	120

3.2 算例分析

表4给出了本文的仿真结果。本文通过与TLBO算法、灰狼算法(GWO)和粒子群算法(PSO)的对比说明本文算法的优势。可以看出,最低的成本费用由目前算法的\$57 846降为了本文算法的\$57 825。本文的算法在求解时间、求解准确度上都能够较好地满足经济调度的要求。

表4 不同算法求解结果

Tab. 4 Results of different algorithms

机组出力	GWO	TLBO	PSO	PS
P1	538.844 0	628.324 0	680	627.318 5
P2	299.342 3	227.358 8	0	299.194 4
P3	299.342 3	225.934 7	0	299.194 4
P4	109.965 3	110.372 1	180	109.865 4
P5	109.965 3	110.246 1	180	109.865 4
P6	109.965 3	160.176 1	180	109.865 4
P7	109.965 3	108.355 2	180	109.865 4
P8	109.965 3	110.537 9	180	60.003 0
P9	109.965 3	110.567 2	180	109.861 5
P10	77.622 3	75.756 2	50.430 4	40.004 0
P11	77.622 3	41.869 8	50.530 4	76.968 5
P12	55.000 0	92.478 9	55	55.056 0
P13	55.000 0	57.514 0	55	55.056 0
P14	83.465 0	82.562 8	117.485 4	81.081 0
P15	40.000 0	41.489 1	45.928 1	40.071 6
P16	82.773 2	84.771 0	117.485 4	81.081 0
P17	40.000 0	40.587 4	45.928 1	40.082 0
P18	10.000 0	10.001 0	10.001 3	10.030 1
P19	31.456 8	31.097 8	42.110 9	35.030 0
H14	106.099 1	105.671 7	125.275 4	104.850 0
H15	75.000 0	76.284 3	80.117 4	75.051 4
H16	105.789 0	106.912 5	125.275 4	104.805 0
H17	75.000 0	75.506 1	80.117 4	75.009 4
H18	40.000 0	39.998 6	40.000 5	40.001 4
H19	18.378 2	18.220 5	23.232 2	20.044 0
H20	469.733 7	468.227 8	415.951 5	470.393 6
H21	60.000 0	59.986 7	60	59.995 3
H22	60.000 0	59.981 4	60	59.995 3
H23	120.000 0	119.607 4	120	119.991 1
H24	120.000 0	119.603 0	120	119.991 1
平均成本	—	—	59 853.478	57 830.522 3
最大成本	—	—	60 076.690 3	57 848.361 9
最小成本	57 846.8 4	58 006.999 2	59 736.263 5	57 825.466 5

表5给出了不同迭代次数下的求解结果对比。可以看出最佳的求解种群数量为300, 迭代次数为1 000。

表5 不同算法参数下求解结果
Tab. 5 Results of different parameters

迭代次数	罚因子	最低成本 /\$	耗时 /s
500	100	58 893.95	17.35
500	200	58 743.59	21.05
500	300	58 303.92	30.77
500	400	58 025.38	49.74
500	500	57 986.37	61.55
1 000	100	57 898.13	70.03
1 000	200	57 878.13	80.42
1 000	300	57 825.96	92.82
1 000	400	57 825.93	119.62
1 000	500	57 825.85	140.40
1 500	100	57 825.77	157.38
1 500	200	57 825.71	176.19
1 500	300	57 825.72	187.74
1 500	400	57 825.66	200.50
1 500	500	57 825.38	220.30

图4给出了本文模式搜索算法的收敛曲线。可以看出本文算法的收敛速度较快, 并且得到的结果更优。

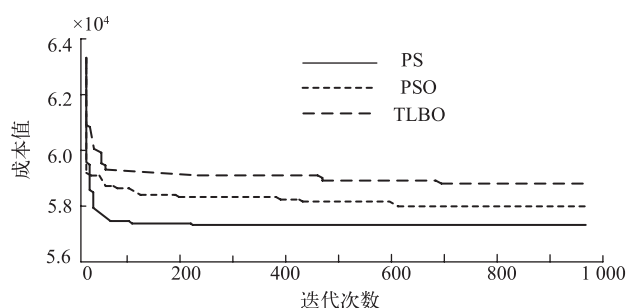


图4 不同算法收敛曲线

Fig. 4 Convergence curves of different algorithms

综上, 本文所提的模型和算法适合这类非凸的多区域经济调度问题, 能够得到较优的结果。

4 结束语

本文提出了一种基于模式搜索算法的热电联产经济调度优化方法。首先分析了热电联产的运行特点, 建立了热电联产经济调度模型。接着对

模式搜索算法求解原理进行分析, 并进行全局搜索避免陷入局部最优。最后在含有24台机组的系统中进行仿真, 与其他算法对比说明了本文模型和算法的有效性。仿真结果表明, 模式搜索算法适用于求解这类非线性、非凸的经济调度问题, 存在多个局部最优解的情况下更易找到全局最优解; 本文的模型还可进一步扩展为结合分布式发电机组的调度问题。

参考文献

- [1] 孟安波, 梅鹏, 卢海明. 基于纵横交叉算法的热电联产经济调度[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 90-97.
- [2] 李磊, 吴亚丽. 一种求解热电联产经济调度问题的改进粒子群算法[J]. 西安理工大学学报, 2018, 34(2): 106-112.
- [3] 魏震波, 黄宇涵, 高红均. 含电转气和热电解耦热电联产机组的区域能源互联网联合经济调度[J]. 电网技术, 2018(11): 3512-3519.
- [4] 林艺城, 孟安波. 热电联产经济环保调度优化[J]. 电力建设, 2017, 38(6): 149-158.
- [5] 芦思为, 黄彦全, 沈金锁, 等. 含冷热电联产的微电网经济运行控制策略的研究[J]. 电气应用, 2017(6): 26-31.
- [6] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 等. 基于遗传算法的热电联产型微网经济运行优化[J]. 电力系统保护与控制, 2013(8): 7-15.
- [7] 麻秀范, 王超, 洪潇, 等. 基于实时电价的电动汽车充放电优化策略和经济调度模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 190-202.
- [8] 王超. 考虑电动汽车充放电策略的动态经济调度研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.

作者简介

范彩兄(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 热工计量, 计量器具性能检测技术, 带电检测设备检测。

(收稿日期: 2022-03-15)