

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.02.026

含储热的热电联产机组经济性与灵活性多目标优化算法

王安¹, 杨绮¹, 王菁¹, 陆军¹, 刘宏文¹, 王培红²

(1. 国能常州发电有限公司, 江苏 常州 213033;

2. 东南大学能源与环境学院, 江苏 南京 210096)

摘要:随着可再生能源产能的不断增长, 电力系统的灵活性已成为频繁高峰调控影响下必须考虑的一个指标。然而, 灵活性与经济效益之间往往相互矛盾, 多目标优化可作为协调矛盾的一种手段。因此, 文中以带熔融盐储热的抽凝式热电联产机组为研究对象, 以灵活性和经济性为优化目标建立日前调度的优化模型。考虑储热系统的爬坡能力、机组出力和热电耦合等约束条件, 文中采用改进的二代非支配排序遗传算法(non-dominated sorted genetic algorithm-II, NSGA-II)对熔融盐储热系统进行优化求解。文中分别以灵活性和经济性2种指标对求解获得的非支配解集合即帕累托(Pareto)前沿进行比较分析, 同时对熔融盐储热系统的储、放热特性进行分析。分析结果表明, 侧重灵活性时, 熔融盐储热须维持较高的储热量, 以应对低负荷阶段的供热不足; 侧重经济性时, 熔融盐储热调节较为频繁, 使得机组在较高效率区间运行。

关键词: 日前调度; 多目标优化; 灵活性; 经济性; 熔融盐; 二代非支配排序遗传算法(NSGA-II)

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)02-0248-12

0 引言

在全球“碳达峰、碳中和”的背景下, 我国积极推动能源结构转型, 国内新能源高速发展, 风、光等新能源发电不确定性的特点与电网稳定性之间的矛盾逐步成为限制新能源进一步发展的桎梏, 燃煤火电机组的深度调峰是目前解决这一矛盾的重要立足点^[1-5]。对于同时有供电、供热需求的地区, 热电联产机组在居民采暖季是主要供暖途径^[6-7], 在目前的发展条件下, 热电联产不仅要满足供热需求, 还承担着灵活调节负荷的重任^[8], 以满足更多的实际情况(如深度调峰等)需要。

热电联产机组的经济性分配在电厂经济运行中是极为重要的, 同时也是一种经典的带约束优化问题, 热电联产机组经济性分配的目的在于找到满足电、热负荷和各类约束条件下最经济的各机组发电负荷^[9]。通常而言, 热电联产机组的经济性分配问题有2种计算方式: 静态经济性分配(static economic dispatch, SED)和动态经济性分配(dynamic economic dispatch, DED)。对于 SED 而言, 单一时间点的最优结果可能会影响后续情况或整体最优情况的实现^[10]; 而采用 DED 对一天时间进行整体优化, 在必要时, 为达成全局最优而舍弃局部最优的工况点, 且能确保优化出的每一个时间点对应的工况均在实际情况可以达到^[11], 但在这种情况下,

会引入更多的约束条件。

热电联产机组存在热电耦合严重的问题, 在经济性最优目标下, 以“以热定电”运行模式运行时, 机组电、热负荷的调节灵活性不高^[12], 当供热负荷确定时, 电负荷只能在有限的范围内变动, 严重依赖电网调度^[13]。针对这样的问题, 目前采用储能的方式对热电联产机组进行热电解耦的方法已经得到广泛应用^[14-17], 这就使得热电联产机组在经济运行的同时, 具备灵活性调节的能力。

针对包含储热的热电联产机组, 其成本函数通常具有二次、非凸和多模态的特征^[18], 且其变量间存在大量耦合, 线性规划^[19]、Lambda 迭代^[20]等常规的优化方法难以达到最优或近最优解。因此, 采用基于元启发式的优化算法处理这种类型的目标函数, 包括遗传算法(genetic algorithm, GA)^[21]、差分进化(differential evolution, DE)^[22]、进化规划(evolution programming, EP)^[23]等。在元启发优化的各类算法中, GA 具备高度并行、随机性、全局搜索、着眼于个体的集合进行运算等优势, 且研究理论较为成熟。

在目前的研究中, 针对包含储热的综合能源系统的前日调度优化, 通常只考虑运行经济性或者将多个优化目标进行加权处理获得单目标优化结果^[24-27], 采用罚函数的方式对机组存在的约束进行处理, 实现简便, 但是加权系数和罚函数的选择较为困难, 且对于复杂约束状况需要极大的计算量, 大大增加了获得最优解的时间。

收稿日期: 2023-11-09; 修回日期: 2023-12-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51976032)

在多目标问题求解过程中,人为地对多个相矛盾的目标设置权重并求和,无法获取较为全面的解集。采用多目标优化算法可以有效避免上述问题,通过求解得出帕累托(Pareto)前沿,使得所有协调2个目标的方案的最优解全部显示在前沿上,进而能够选择出全局角度更优的策略,这一优势让多目标优化算法在综合能源等领域得到广泛应用^[28-29]。在GA中,应用于多目标优化的研究方法主要包括向量估计遗传算法(vector evaluated genetic algorithm, VEGA)^[28]、多目标遗传算法(multi-objective genetic algorithm, MOGA)^[29]、强度帕累托进化算法(strength Pareto evolutionary algorithm, SPEA)^[30]、非支配排序遗传算法(non-dominated sorted genetic algorithm, NSGA)^[31]等。针对NSGA存在的问题,Deb等人^[32]通过引进计算复杂度更低的快速非劣性排序、精英保留策略、拥挤度比较以及随机锦标赛选择算子等新的多样性保护方法,改进得到了二代NSGA,即NSGA-II,提高了算法运算速度的鲁棒性。

对于约束条件复杂、计算时间长的问题,优化算法可进行针对性的改进,将约束条件代入到变量的生成和变化过程中,能够确保计算过程中所有产生的解均能满足各类约束条件,进而有效减少计算量,更快找到最优解。

在此背景下,文中以2台抽凝式热电联产机组与熔融盐储热组合系统为研究对象。首先,建立以灵活性和经济性为目标的优化模型,并在建模过程中考虑机组出力、爬坡能力、热电耦合等约束条件;

其次,采用改进NSGA-II对优化模型进行求解,从而获得机组和储热装置的最佳运行参数集合,即Pareto前沿;最后,根据获得的Pareto前沿,对典型解在各时段的机组热、电功率及储热系统变化特性进行分析。

1 系统热电特性模型

1.1 系统组成

文中研究的系统包括A、B 2台抽凝式热电联产机组(默认A为第1台机组,B为第2台机组)和1套熔融盐储热系统,系统结构简图如图1所示。当A、B机组总的供热量大于用户需求量时,部分蒸汽进入熔融盐储热系统加热冷盐罐,并储存在热盐罐中,这个过程为储热过程;当A、B机组总的供热量小于用户需求量时,减温水母管来水被热盐罐加热为蒸汽,从而补充供热缺口,这个过程为放热过程。

1.2 热网及储热罐供热量关系

储热罐在 t 时刻对热网的供热量为 $Q_{M,L,t}$,当储热罐向外提供热量时,该值为正,表示储热罐内热量减少;当储热罐从外部获得热量时,该值为负,表示储热罐内热量增加。不同时刻储热罐热量表达式为:

$$S_t = S_0 + \sum_{i=0}^T Q_{M,L,i} \Delta t \quad (1)$$

式中: S_t 为储热罐在 t 时刻的储热量; S_0 为初始时刻储热罐内的储热量; Δt 为时间间隔; T 为总时间,取24 h。

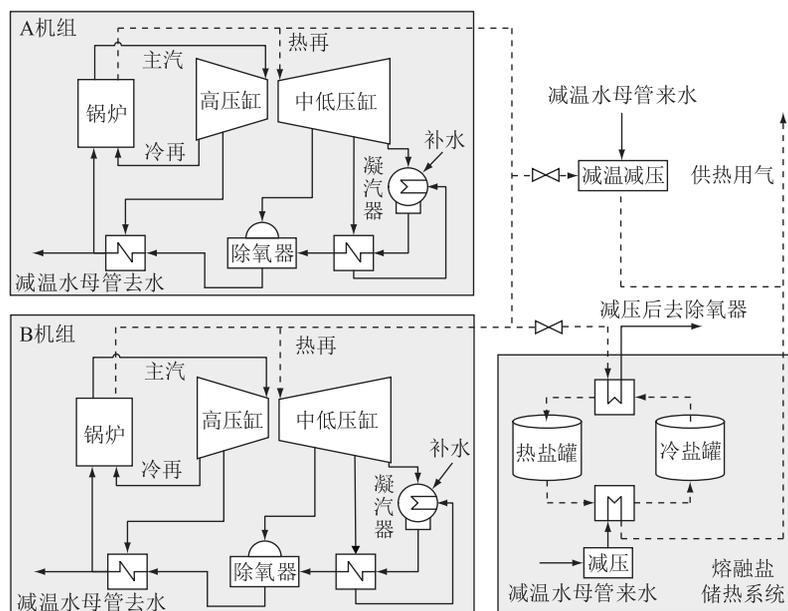


图1 研究系统架构

Fig.1 Research system architecture

1.3 机组煤耗量

对于文中研究的抽凝式热电联产机组,其各级抽汽量、主汽量和发电功率之间存在拟合关系,如式(2)所示。

$$P_i = k_{0,i}D_{0,i} + \sum_{j=1}^n k_{j,i}D_{j,i} + k_{n+1,i} \quad (2)$$

式中: P_i 为第 i 台机组的发电功率(文中研究对象是 2 台机组, $i=1,2$); $D_{0,i}$ 、 $D_{j,i}$ 分别为第 i 台机组的主汽量和第 j 级抽汽量; n 为机组抽汽级数; $k_{0,i}$ 、 $k_{j,i}$ 、 $k_{n+1,i}$ 均为与机组参数相关的拟合量。

在此情况下,对于任何一台机组,当在知晓其拟合关系的情况下,对于任意时刻 t ,只要知道此时的发电功率 P_i 和各级抽汽量 $D_{j,i}$,就可计算获得其在当前运行状况下的主汽量,其中,抽汽量可以通过式(3)计算。

$$D_{j,i,t} = \frac{Q_{j,i,t}}{(h_{j,i} - h_{w,e,i})\eta_h \Delta t} \quad (3)$$

式中: $D_{j,i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻第 j 级的抽汽量; $Q_{j,i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻第 j 级的供热量; $h_{j,i}$ 为第 i 台机组第 j 级的抽汽焓; $h_{w,e,i}$ 为第 i 台机组的热网回水焓; η_h 为热网换热效率。

文中抽凝式热电联产机组在变工况时,给水温度可近似为不变,当知道机组主汽量、主汽焓、给水焓、锅炉效率等参数时,可以计算出其煤耗量:

$$G_{c,i,t} = \frac{D_{0,i,t}(h_{0,i} - h_{wf,i})}{Q_{net,coal}\eta_{b,i}} \Delta t \quad (4)$$

式中: $G_{c,i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的煤耗量; $D_{0,i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的主汽量; $h_{0,i}$ 、 $h_{wf,i}$ 分别为第 i 台机组的主汽焓和给水焓; $Q_{net,coal}$ 为标煤低位热值; $\eta_{b,i}$ 为第 i 台机组的锅炉效率。

2 日前调度优化模型

2.1 约束条件

2.1.1 机组出力约束

$$\begin{cases} P_{1,t} + P_{2,t} = P_{L,t} \\ Q_{1,t} + Q_{2,t} + Q_{M,L,t} = Q_{L,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{1,t}$ 为 A 机组在 t 时刻的发电功率; $P_{2,t}$ 为 B 机组在 t 时刻的发电功率; $P_{L,t}$ 为 t 时刻电网负荷需求; $Q_{1,t}$ 为 A 机组在 t 时刻对热网的供热量; $Q_{2,t}$ 为 B 机组在 t 时刻对热网的供热量; $Q_{L,t}$ 为 t 时刻的热网负荷需求。

$$\begin{cases} P_{i,t,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,\max} \\ 0 \leq Q_{i,t} \leq Q_{i,t,\max} \\ 0 \leq Q_{M,L,t} \leq Q_{M,L,t}^{\max} \\ 0 \leq S_t \leq S_{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 分别为第 i 台机组在 t 时刻纯凝工况下的发电功率及供热功率; $P_{i,t,\min}$ 、 $P_{i,t,\max}$ 分别为第 i 台机组在 t 时刻纯凝工况下最小和最大发电功率; $Q_{i,t,\max}$ 为第 i 台机组在 t 时刻纯背压工况下对热网的最大供热功率; $Q_{M,L,t}^{\max}$ 为在 t 时刻储热罐对热网的最大供热量; S_{\max} 为储热罐的最大储热量。

由于文中研究系统配置储热,满足以电定热的运行方式,因此电功率是一个时间节点中最先获得的参数,由于存在电热耦合的约束,在计算机组功率的过程中,必须考虑当前时间点选择的电功率所对应的供热能力是否能够满足供热所需,其存在的约束如下:

$$\begin{cases} Q_{1,t} + Q_{2,t} + S_{t-1} \geq Q_{L,t} \\ P_{1,t,\min} + P_{2,t,\min} \leq P_{L,t} \leq P_{1,t,\max} + P_{2,t,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $P_{1,t,\max}$ 、 $P_{1,t,\min}$ 分别为 A 机组对应于 $Q_{1,t}$ 供热量时的电功率上、下限; $P_{2,t,\max}$ 、 $P_{2,t,\min}$ 分别为 B 机组对应于 $Q_{2,t}$ 供热量时的电功率上、下限。

同时,对于抽凝式热电联产机组,根据机组的电热特性,在供热允许的范围内,电功率的下限是分段函数:

$$P_{i,t,\min} = \begin{cases} c_{v,i}Q_{i,t} + P_{N,i,\min} & 0 \leq Q_{i,t} \leq Q_{B,i,\min} \\ c_{m,i}(Q_{i,t} - Q_{B,i,\min}) + P_{B,i,\min} & Q_{B,i,\min} < Q_{i,t} \leq Q_{B,i,\max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{i,t,\min}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的发电功率最小值; $P_{N,i,\min}$ 、 $P_{B,i,\min}$ 分别为第 i 台机组纯凝工况和纯背工况下的最小发电功率; $Q_{B,i,\min}$ 、 $Q_{B,i,\max}$ 分别为第 i 台机组纯背工况下的最小和最大供热功率; $c_{m,i}$ 为第 i 台机组背压运行时的电功率和热功率的比值,也被称为弹性系数; $c_{v,i}$ 为第 i 台机组主汽量不变,机组增加单位供热量时,机组发电功率的减少量。

而电功率上限可以表示为:

$$P_{i,t,\max} = P_{N,i,\max} + c_{v,i}Q_{i,t} \quad (9)$$

式中: $P_{i,t,\max}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的发电功率最大值。

2.1.2 机组爬坡约束

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t} = |P_{i,t} - P_{i,t-1}| \leq \Delta P_{i,\max} \\ \Delta Q_{i,t} = |Q_{i,t} - Q_{i,t-1}| \leq \Delta Q_{i,\max} \\ \Delta Q_{M,L,t} = |Q_{M,L,t} - Q_{M,L,t-1}| \leq \Delta Q_{M,L,\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\Delta P_{i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的发电功率变化量; $\Delta P_{i,\max}$ 为第 i 台机组电功率爬坡速率上限; $\Delta Q_{i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的供热变化量; $\Delta Q_{i,\max}$ 为第 i 台机组供热功率爬坡速率上限; $\Delta Q_{M,L,t}$ 为储热罐在 t 时刻的供热功率变化; $\Delta Q_{M,L,\max}$ 为储热罐对热网供热功率变化上限。

$Q_{M,L,t}$ 的生成过程受到 $t-1$ 时刻储热罐储热量 S_{t-1} 、 t 时刻储热罐储热量 S_t 、 $t+1$ 时刻储热罐剩余储热量 S_{t+1} 以及爬坡约束和上、下限约束的影响,例如在文中所设情况下,假设 $\Delta Q_{M,L,\max}$ 为 50 MW,即相邻时刻储热罐对热网供热的差值不能超过这一数值,若 $t-1$ 时刻储热罐的储热量 S_{t-1} 为 80 MW,供热需求 $Q_{M,L,t}$ 为 70 MW,那么下一个时刻只能提供 10 MW 的供热量,此时相邻 2 个时刻的供热差值为 60 MW, S_t 将无法满足 $\Delta Q_{M,L,\max}$ 的约束要求。

由于多变量优化算法在初始化和交叉中变量生成的过程是随机的,因此可能会出现由于爬坡约束导致机组在下一个时间点无法满足约束条件的情况。通常而言,对于这样的值会采取弃用重取的方式,重新生成新的 1 组数据,但是这会影程序运行的速度。文中将 S_{t+1} 作为约束条件放入 $Q_{M,L,t}$ 的计算过程中,以确保 $t+1$ 结束时刻的储热量也能满足上、下限约束。

$$\begin{cases} S_{t+1} = S_{t-1} - Q_{M,L,t} - Q_{M,L,t+1} = S_{t-1} - Q_{M,L,t} - \\ \quad (Q_{M,L,t} + \Delta Q_{M,L}) \\ S_{t+1} \in (S_{\min}, S_{\max}) \\ Q_{M,L,t} \in \left(\frac{S_{t-1} - S_{\max} - \Delta Q_{M,L}}{2}, \frac{S_{t-1} - S_{\min} - \Delta Q_{M,L}}{2} \right) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\Delta Q_{M,L}$ 为正值代表储热罐对外输出热量,反之则为储热罐存入热量; S_{\min} 为储热罐的最小储热量。

由于存在 $\Delta Q_{M,L} \in (\Delta Q_{M,L,\min}, \Delta Q_{M,L,\max})$ 的约束, $Q_{M,L,t}$ 的变化范围为 $\left(\frac{S_{t-1} - S_{\max} - \Delta Q_{M,L,\max}}{2}, \frac{S_{t-1} - S_{\min} - \Delta Q_{M,L,\min}}{2} \right)$, 其中, $\Delta Q_{M,L,\min}$ 为储热罐对热网供热功率变化下限。

2.1.3 热电耦合约束

对于抽凝式热电联产机组,其抽汽供热功率 Q 和发电功率 P 之间存在一定的耦合关系,即电热特性,文中以 A 机组为例进行说明,如图 2 所示^[18]。

图 2 中 $c_{m,1} = \Delta P_{B,1} / \Delta Q_{B,1}$ 为背压工况下的电功率和热功率的比值,通常情况认为是常数, $\Delta P_{B,1}$ 为机组背压工况下(BC 段)时电功率变化量; $\Delta Q_{B,1}$ 为机组背压工况下(BC 段)时热功率变化量; $c_{v,1}$ 为主汽量不变,每增加单位供热量时,发电功率的减少量,也即 AB 段的斜率; $Q_{B,1,\min}$ 为背压工况下最小发电功率时对应的供热功率; $P_{B,1,\min}$ 为背压工况下最小电功率; $Q_{B,1,\max}$ 为背压工况下机组最大供热出力; $P_{N,1,\min}$ 、 $P_{N,1,\max}$ 分别为机组在纯凝工况下的最

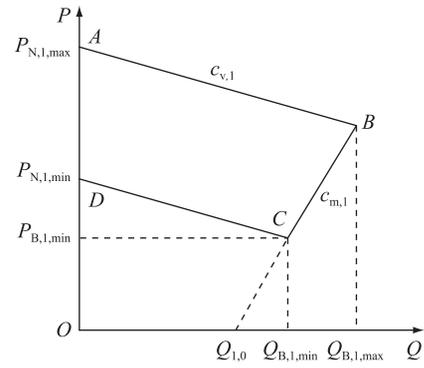


图 2 机组电热特性

Fig.2 Electrothermal characteristics of the unit

小和最大电功率(有功出力); $Q_{1,0}$ 为发电功率为 0 时的供热量(理想情况)。

2.2 目标函数

目前针对抽凝式热电联产机组的日前负荷优化调度问题的研究,最主要目的为搜索不同分配方式下的最优经济性,因为针对配置储热的热电联产机组,经济性指标必须考虑。然而,对于进行灵活性改造的热电联产机组,仅依靠经济性单一指标无法很好描述机组在应对峰谷电、在满足热负荷需求时的电负荷调峰能力,因此文中定义了调峰能力目标函数,并对研究对象进行运行成本和调峰能力多目标日前负荷优化调度的研究。

2.2.1 综合运行成本目标函数

经济性指标有很多,文中以综合运行成本作为经济性指标。因此,系统的综合运行成本为目标函数 F_1 ,其中包含热电联产机组运行成本和参与调峰经济补偿,目标函数具体如下:

$$F_1 = \min(f_{1,1} - f_{2,1}) \quad (12)$$

式中: $f_{1,1}$ 为热电联产机组运行成本; $f_{2,1}$ 参与调峰的经济补偿。

(1) 热电联产机组运行成本。

在文中情况下,认为热电联产机组持续不间断运行,其运行成本计算为:

$$f_{1,1} = \sum_{i=1}^2 \left(a_i \sum_{t=1}^{24} G_{C,i,t} \right) / 10\,000 \quad (13)$$

式中: a_i 为第 i 台机组的综合煤价; $G_{C,i,t}$ 为第 i 台机组在 t 时刻的耗煤量。

(2) 参与调峰经济补偿。

$$f_{2,1} = (g_1 + g_2) / 10\,000 \quad (14)$$

机组在 40% 负荷 ~ 50% 负荷之间的电网调峰补偿 g_1 为:

$$g_1 = \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{t \in T_{1,i}} (P_{i,50\%} - P_{i,t}) \Delta t \right] \times 1\,000 \mu_1 \quad (15)$$

式中: $P_{i,50\%}$ 为第 i 台机组 50% 负荷对应的电负荷; $T_{1,i}$ 为第 i 台机组在 40%~50% 负荷之间的所有时间节点的集合; μ_1 为 40% 负荷档的电力报价。

机组在 40% 负荷以下的电网调峰补偿 g_2 为:

$$g_2 = \sum_{i=1}^2 \left[\sum_{t \in T_{2,i}} (P_{i,40\%} - P_{i,t}) \Delta t \right] \times 1000 \mu_2 \quad (16)$$

式中: $P_{i,40\%}$ 为第 i 台机组 40% 负荷对应的电负荷; $T_{2,i}$ 为第 i 台机组在 40% 负荷以下的所有时间节点的集合; μ_2 为 40% 负荷以下档的电力报价。

2.2.2 调峰能力目标函数

电力系统的灵活性主要是指电力系统本身对风电等可再生能源出力的突然变化做出反应的能力。具体来说,在用电负荷高峰时段热电联产机组接近其出力上限,缺乏向上的灵活性,难以应对风电的突然下降,而在电力负荷低谷期,热电联产机组面临风力发电量突增产生的向下的灵活性挑战。而对于储热设备而言,用电高峰时段机组接近出力上限时,风电突然下降则需要热电联产机组减少供热量进一步提高发电量,此时应当存储更多的热量用于机组电负荷向上调峰,反之当用电低谷期时,机组发电功率较小,此时应该存储较小的热量,预留更多的储热空间,应对外界风力发电量突然增加而导致的热电联产机组电负荷下降(机组供热量增加)情况。因此,热电联产机组和储热设备的灵活性可分为负荷低谷期的向下灵活性和负荷峰值期的向上灵活性。文中考虑机组自身负荷变化和储热罐内储热量,定义综合调峰能力目标函数 F_2 为:

$$F_2 = \min(f_{1,2} + f_{2,2}) \quad (17)$$

式中: $f_{1,2}$ 为机组运行负荷波动影响因子; $f_{2,2}$ 为储热罐储热量波动影响因子。

(1) 机组运行负荷波动影响因子。

$$f_{1,2} = \sum_{t \in T_2} \sum_{i=1}^2 \min(P_{i,t} - P_{i,t,\min}, \Delta P_{i,\max}) + \sum_{t \in T_1} \sum_{i=1}^2 \min(P_{i,t,\max} - P_{i,t}, \Delta P_{i,\max}) \quad (18)$$

式中: T_1 、 T_2 分别为处于用电低谷和用电高峰期的所有时间节点的集合。

(2) 储热罐储热量波动影响因子。

$$f_{2,2} = \sum_{t \in T_2} \sum_{i=1}^2 \min\left(\frac{S_{i,t} - S_{\min}}{\Delta t}, \Delta Q_{M,L,\max}\right) + \sum_{t \in T_1} \sum_{i=1}^2 \min\left(\frac{S_{\max} - S_{i,t}}{\Delta t}, \Delta Q_{M,L,\max}\right) \quad (19)$$

式中: $S_{i,t}$ 为第 i 台机组 t 时刻储热罐的剩余储热量。

2.3 改进的 NSGA-II

NSGA-II 是在 NSGA 上改进的,增加快速非支配排序、个体拥挤距离算子以及精英策略选择算子,然而 NSGA-II 在面对非线性、非凸的复杂约束问题时,常规的罚函数约束方式迭代会产生大量不可行解,计算效率低且难以得到优化问题的最优解。为解决这个问题,对 NSGA-II 的初始化和交叉变异过程进行改进。其基本原理为:在迭代过程中若 t 时刻某一变量经过交叉或变异发生改变时,对 $t+1$ 时刻的该变量同步进行变化以抵消 t 时刻变量的变化,从而在 $t+1$ 时刻结束后输入 $t+2$ 时刻的参数能够满足约束条件。依次对之后的每个时刻都进行该操作,在此过程兼顾父代对子代的影响,同时确保生成的新子代满足全部约束条件。

2.3.1 初始化种群

(1) 为确保生成的各时刻的机组状态均为能够实现,在考虑爬坡约束的情况下,按照时间顺序依次生成每一个时刻的变量,从 $t=0$ 时刻开始。由于前一天结束时机组的状态确定,因此,第 2 天日前调度优化的初始状态确定,即 $t=0$ 时刻 A 机组电功率为 $P_{1,0}$; $t=0$ 时刻 B 机组电功率为 $P_{2,0}$; $t=0$ 时刻 A 机组供热功率为 $Q_{1,0}$; $t=0$ 时刻 B 机组供热功率为 $Q_{2,0}$; $t=0$ 时刻储热罐供热量为 $Q_{M,L,0}$ 以及 $t=0$ 时刻储热罐储热量为 S_0 。

(2) 根据式(10)爬坡约束 $\Delta P_{1,\max}$ 、 $\Delta P_{2,\max}$ 可以计算得出 $t=1$ 时刻的 2 台机组功率变化范围,即 $P_{1,1} \in [P_{1,0} - \Delta P_{1,\max}, P_{1,0} + \Delta P_{1,\max}]$, $P_{2,1} \in [P_{2,0} - \Delta P_{2,\max}, P_{2,0} + \Delta P_{2,\max}]$,在此约束条件下,结合 A 机组电功率 P_1 自身的上、下限约束(机组最大和最小发电功率),随机取 $P_{1,1}$ 的值。

(3) 根据式(5),由 $P_{1,1}$ 和 $P_{L,1}$ 求得 $P_{2,1} = P_{L,1} - P_{1,1}$,判断得到的 $P_{2,1}$ 是否符合步骤(2)中所述约束及其自身上、下限约束(机组最大和最小发电功率),若不满足,则返回步骤(2)重新取值。

(4) 根据 $P_{1,1}$ 、 $P_{2,1}$ 和热电耦合约束,给出对应时刻机组供热量 $Q_{1,1}$ 、 $Q_{2,1}$ 的范围,此时不规定 A 机组供热量 Q_1 和 B 机组供热量 Q_2 的爬坡约束,其爬坡约束已在热电耦合约束及电功率爬坡约束中得到体现。

(5) $Q_{M,L,1}$ 的约束范围需要考虑储热罐剩余储热量及其自身的爬坡约束,见式(11),根据当前 S_0 、 $\Delta Q_{M,L,\max}$ 、 $Q_{M,L,1}$ 上、下限约束和储热罐储量的上、下限约束,即可计算获得 $Q_{M,L,1}$ 对应的范围约束。

(6) 根据步骤(4)和步骤(5)中所述的范围,随机生成 A 机组的供热量 $Q_{1,1}$ 、储热罐的供热量

$Q_{M,L,1}$, 根据式(5)可得 $Q_{2,1} = Q_{L,1} - Q_{1,1} - Q_{M,L,1}$, 计算获得 B 机组的供热量 $Q_{2,1}$, 判断其是否能满足步骤(4)中所给范围, 若不在该范围内, 则返回步骤(2)。

(7) 计算 $t=1$ 时刻的储热量 S_1 , 获得全部 $t=1$ 时刻相关的参数之后, 令 $t=t+1$, 重新从步骤(1)中开始迭代计算, 进行完整的 24 个时间点的运算, 直到 $t=24$ 为止。

2.3.2 交叉操作

在交叉过程中, 由于优化变量在时间序列中受到的约束较大, 采用传统的对个体中全部变量进行交叉的操作极难取得全部负荷约束的个体。因此交叉过程参照初始化的过程, 从 $t=1$ 时刻开始逐步向后进行, 此时既要保证父代个体对子代个体的影响, 又要保证子代个体下一时刻生成的机组状态能够满足本时刻的爬坡约束。为解决这一问题, 文中对 GA 中的交叉过程进行改进。

以 t 时刻为例, 在对该时刻变量进行交叉时, 对 $t+1$ 时刻同步进行变化, 以确保其能抵消 t 时刻变量的变化, 从而使得 $t+1$ 时刻结束时输入 $t+2$ 时刻的各类约束保持恒定, 进而保障后续的优化变量维持原状并符合各类约束条件。将生成的 t 时刻全部变量和部分补偿的 $t+1$ 时刻变量迭代到父代的对应时刻中。当 t 时刻参数生成完毕后再对 $t+1$ 时刻变量进行相似操作, 采用 $t+2$ 时刻的变量对 $t+1$ 时刻的变量进行补偿, 从而保证输入 $t+3$ 时刻的各类约束维持恒定。重复直到 $t=24$ 为止, 在此过程兼顾父代对子代的影响, 同时确保生成的新子代满足全部约束条件。

文中对电功率和供热量采用不同的处理方式。由于电功率受到严格的爬坡约束, 上、下限约束和电功率等式约束, 在对 t 时刻的父代电功率 $P_{i,t}$ 进行变化得到子代 $P'_{i,t}$ 后, 只有 $t+1$ 时刻的 $P'_{i,t+1}$ 相较于父代 $P_{i,t+1}$ 不发生变化才能使 $t+1$ 时刻结束后输出的各类约束条件不变, 此时子代 $P'_{i,t}$ 的生成就必须同时考虑前、后时刻 ($t-1$ 和 $t+1$ 时刻) 机组电功率的爬坡约束; 而供热量自身没有爬坡约束, 但必须确保储热罐的储热量在 $t+1$ 时刻维持不变, 以避免与其相关的变量无法取到原定值。当 t 时刻变量确定时, $t+1$ 时刻的 $Q_{M,L,t+1} = S_t - S_{t+1}$ 为确定值, 由于 $Q_{i,t+1}$ 的爬坡约束体现在电功率当中, 其自身对下一时刻的供热量不产生任何影响, 因此变化相对自由。交叉过程的示意流程如图 3 所示。

交叉操作的具体过程如下:

(1) 在父代个体中随机选择 2 个不相同的个体作为父代, 根据父代 2 个个体点 t 时刻的机组电功

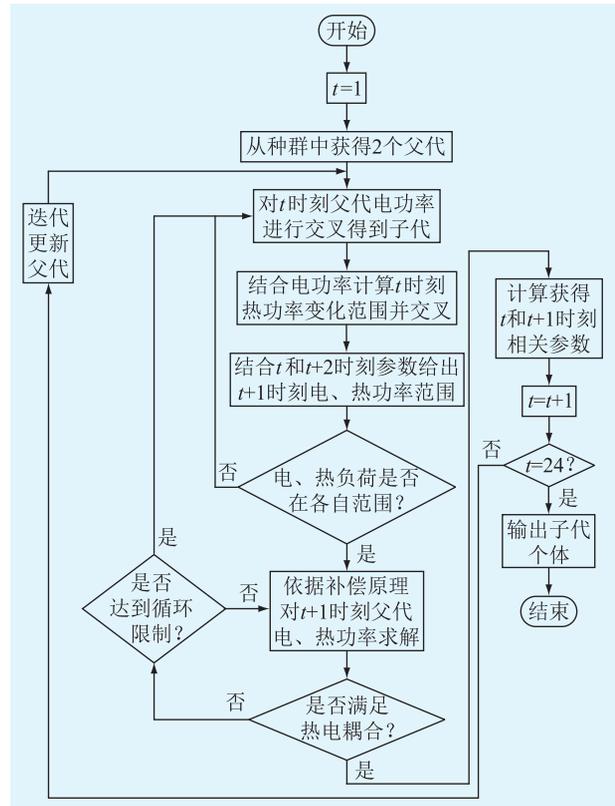


图 3 改进的交叉过程

Fig.3 Improved crossover process

率 $P_{i,t}$, 采用交叉的方式生成子代个体 t 时刻的电功率 $P'_{i,t}$ 。考虑 2 类约束, 热电联产机组热电耦合约束和前、后时刻 ($t-1$ 和 $t+1$ 时刻) 电功率的爬坡约束。当取值超过限制时, 取用极限值, 如 $P_{1,t} > P_{1,t,\max}$, 则令 $P_{1,t} = P_{1,t,\max}$ 。

在交叉的过程中, 交叉产生的子代相较于父代在数值上的变化是完全随机的, 且电功率仍需要满足电功率等式约束, 因此会出现 2 台机组中 A 机组交叉后的功率变化幅度超过 B 机组所能变化的上限, 此时应当要求变化限制更多的 B 机组先确定范围, 再反算 A 机组电功率。针对 B 机组的负荷约束, 若 B 机组子代的电功率 $P'_{2,t}$ 不符合约束条件, 则令其取极限值, 反算 A 机组子代的电功率 $P'_{1,t}$, 若后者无法满足其自身约束, 则证明两者在生成子代过程中的变化幅度约束相近, 应当重新执行步骤(1)。

(2) 得到 2 个子代个体的电功率后, 根据热电耦合约束, 可以计算获得 2 个个体中 A 机组对应于其电功率的供热量变化范围。考虑 t 时刻和 $t+1$ 时刻储热罐剩余储热量 $S_{i,t}$ 和 $S_{i,t+1}$ 以及 $Q_{M,L,t}$ 自身的爬坡约束, 给出储热罐子代 $Q'_{M,L,t}$ 的上、下限约束。对父代的 $S_{i,t}$ 以及 $Q_{M,L,t}$ 进行交叉, 得到子代, 对于超过上、下限的取值, 直接取其极限值。

根据热负荷约束式(5)计算 $Q_{2,t} = Q_{L,t} - Q_{1,t} -$

$Q_{M,L,t}$ 并依此计算获得 t 时刻的热罐储热量 $S_{i,t}$ 。根据 $t+1$ 时刻的补偿逻辑,此时 $Q_{M,L,t+1} = S_{i,t} - S_{i,t+1}$ 和 A、B 机组子代的电功率 $P'_{1,t+1}$ 、 $P'_{2,t+1}$ 为已知量。考虑 2 个约束:① t 时刻和 $t+2$ 时刻储热罐的供热量 $Q_{M,L,t}$ 和 $Q_{M,L,t+2}$ 产生的爬坡约束;② $t+1$ 时刻储热罐子代的供热量 $Q'_{M,L,t+1}$ 以及 A、B 机组子代的电功率 $P'_{1,t+1}$ 、 $P'_{2,t+1}$ 确定后,2 台机组子代供热量 $Q'_{1,t+1}$ 和 $Q'_{2,t+1}$ 的上、下限约束能否满足 $Q'_{M,L,t+1} + Q'_{1,t+1} + Q'_{2,t+1} = Q_{L,t+1}$ 的热负荷等式约束,即总电功率数值是否在 2 台机组功率变化范围的最大值之和和最小值之和之间。

对步骤(2)中的数据进行检查,判断子代 $Q'_{2,t}$ 、 $Q'_{M,L,t}$ 和 $Q'_{M,L,t+1}$ 能否同时满足其约束条件,若不能则代表此情况下 t 时刻生成的值无法满足其自身和下一时刻的约束,应当重新执行步骤(1)。

(3) 根据父代 $Q_{1,t+1}$ 交叉获得 $Q'_{1,t+1}$,若 $Q'_{1,t+1}$ 超出上、下限,则直接取其极限值,用热负荷等式约束计算 B 机组子代的供热量 $Q'_{2,t+1} = Q_{L,t+1} - Q'_{1,t+1} - Q'_{M,L,t+1}$ 。此时 t 时刻子代所有变量生成完毕, $t+1$ 时刻对应的补偿变量也对应生成,将 2 个时刻的对应值迭代到父代中,并根据 t 时刻的实际取值和爬坡约束,给出 $t+1$ 时刻各变量的上、下限,令 $t=t+1$,继续下一个循环,即重复步骤(1)一步骤(3)直到 $t=24$ 。

3 算例分析

为验证模型的有效性,将内蒙古某电厂配置熔盐储热的 2 台抽凝式热电联产机组作为研究对象,具体参数见表 1。

3.1 多目标优化 Pareto 前沿

文中使用改进 NSGA-II 进行计算,其多目标优化结束后的 Pareto 前沿如图 4 所示。

图 4 中横轴为优化目标一 F_1 (经济性)的数值,纵轴为优化目标二 F_2 (灵活性)的数值,前沿上的所有点相互之间不产生支配,均为当前条件下的最优点。Pareto 前沿上最左上的点代表 F_1 值最小的解,最右下的点代表 F_2 值最小的解,中间的点则代表对于 2 个目标函数不同的折衷方案所产生的最优解。

为验证改进的 NSGA-II 在计算中的优势,分别设置最大迭代次数 5 000 和 500、种群数目 100、交叉概率 0.8、变异概率 0.2,对原始算法和改进的 NSGA-II 进行验证。测试平台配置:中央处理器为 Intel Core i7-10875H 2 300 MHz;图形处理器为 NVIDIA GeForce RTX 2070 Super with Max-Q Design (930 MHz);编程环境为 MATLAB R2021a。每组均运行 10 次求得运行时长平均值,结果见表 2。

表 1 算例系统配置参数

Table 1 Example system configuration parameters

名称	A 机组	B 机组	储热装置
纯凝工况最大电功率/MW	250	350	
纯凝工况最小电功率/MW	80	160	
纯背工况最大供热量/MW	280	320	
主汽焓/(kJ·kg ⁻¹)	3 500	3 600	
抽汽焓/(kJ·kg ⁻¹)	2 800	3 000	
给水焓/(kJ·kg ⁻¹)	1 300	1 500	
锅炉效率	0.96	0.98	
燃料低位热值/(kJ·kg ⁻¹)	29 307	29 307	
图 2 直线 AB 斜率 c_{v1}	-0.13	-0.15	
弹性系数 c_m	0.76	0.85	
机组拟合系数 k_0	0.329 2	0.374 2	
机组拟合系数 k_{n+1}	-0.165 5	-0.143 7	
机组拟合系数 k_j	9.368 1	11.425 8	
煤价/(元·t ⁻¹)	1 200	1 200	
调峰 40%以下档补偿报价/[元·(MW·h) ⁻¹]	500	500	
调峰 40%负荷~50%负荷档补偿报价/[元·(MW·h) ⁻¹]	400	400	
存储量极限/(MW·h)			100
最大存储热速率/MW			80

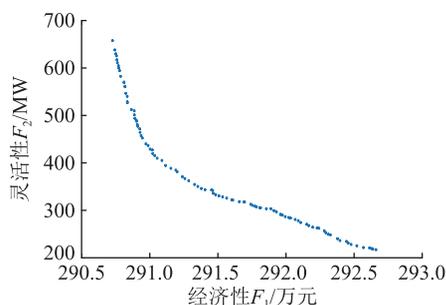


图 4 多目标优化的 Pareto 前沿

Fig.4 Pareto frontier of multi-objective optimization

表 2 2 种算法不同迭代次数下运算时间对比

Table 2 Comparison of operation time between two algorithms with different iteration times

次数	5 000 次迭代		500 次迭代	
	原始算法	改进算法	原始算法	改进算法
1	145.55	295.44	14.80	30.67
2	156.16	651.34	15.14	22.89
3	137.28	560.38	20.42	30.66
4	166.72	246.53	15.59	24.30
5	128.00	319.09	18.23	36.89
6	151.23	537.97	15.22	31.94
7	125.66	208.75	14.34	28.41
8	132.52	671.03	13.91	28.69
9	146.95	605.33	24.36	14.47
10	155.69	609.23	19.16	37.14
平均值	144.58	470.51	17.12	28.60

从时间角度考虑,当迭代次数为 5 000 次时,2 种算法中央处理器的平均运行时间分别为 144.58 s 和 470.51 s,改进算法在运行速度上并不占优势,当迭代次数为 500 次时,2 种算法之间的时间差异明显下降,分别为 17.12 s 和 28.60 s,不难看出,在较少的迭代次数中,改进算法在运行时间上的劣势不明显,但是这一劣势会随着迭代次数的增加而增加。

然而,从最终得到的 Pareto 前沿的结果考虑,无论是 5 000 次迭代还是 500 次迭代,改进的优化算法均能得到可行的近优解集,而原始算法在 2 种迭代条件下均未收敛,所有个体都不满足约束条件,目标函数会被赋予较大的常数作为次惩罚系数,此时目标值会被舍弃。

3.2 多目标优化结果分析

对经济型最佳和灵活性最佳的解进行分析,以说明侧重不同目标函数进行优化时所产生的区别,其中经济性最佳对应目标函数 F_1 值最小的解,灵活性最佳对应目标函数 F_2 值最小的解。

3.2.1 经济性最佳

以机组经济性最佳为目标,当满足电负荷平衡时 A 机组、B 机组的供电功率组成如图 5 所示,当满足热负荷平衡时 A 机组、B 机组和储热罐的供热组成如图 6 所示。

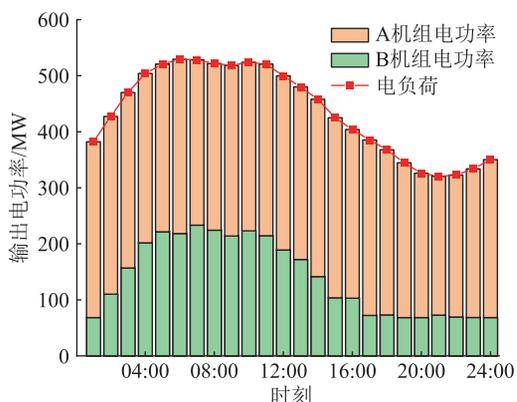


图 5 电功率平衡(经济性)

Fig.5 Electrical power balance (economy)

在文中研究对象中,2 台机组的电功率满足电负荷约束,2 台机组以及储热罐的热功率满足热负荷约束。以机组经济性最佳为目标点进行优化,从图 5 中可以看到,00:00—07:00 时段,电热负荷明显上升达到峰值,06:00—11:00 时段会有轻微浮动,11:00—14:00 时段会有明显下降,在 21:00 左右达到最低值,此后输出电功率值开始稳步上升,最后回升到 06:00 的状态。由图 6 可知,储热系统调节较为频繁(全天充、放热 10 MW 及以上的有 14 次),使得机组在较高效率区间运行。

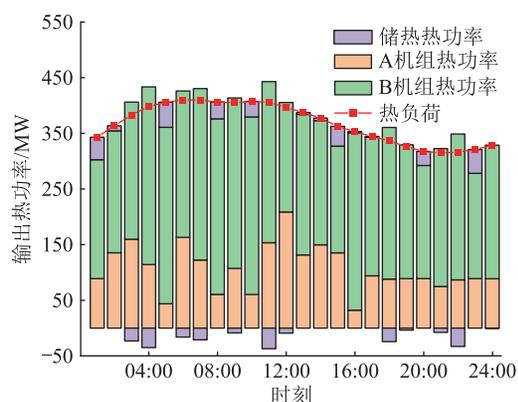


图 6 热功率平衡(经济性)

Fig.6 Thermal power balance (economy)

储热罐的储热量如图 7 所示,不同时刻储热罐可持续充、放热时间变化如图 8 所示,2 台机组各自的主汽量如图 9 所示。

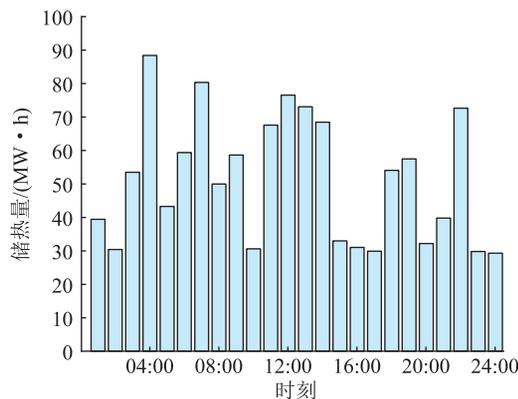


图 7 储热罐储热变化(经济性)

Fig.7 Heat change in heat storage (economy)

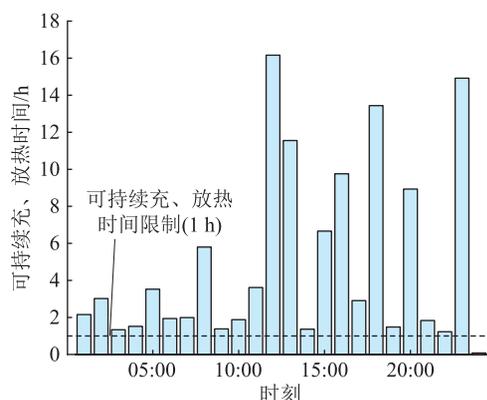


图 8 储热罐可持续充、放热时间变化(经济性)

Fig.8 Sustainable charging and discharging time variation of heat storage (economy)

在文中设定情况下,B 机组热经济性更好,因此在优化结果中,00:00—16:00 时段,B 机组的电功率基本稳定维持在最高水平,此后随着电热负荷需求的下降,B 机组达到最低可调电负荷,17:00—24:00 时段,随着电负荷的进一步下降,B 机组维持

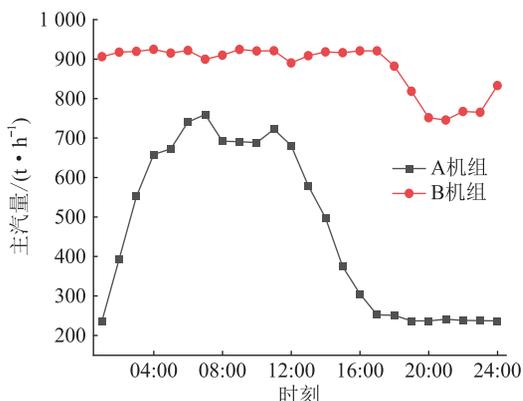


图9 主汽量变化(经济性)

Fig.9 Main steam volume changes (economy)

最低电负荷,由 A 机组负责跟随电负荷。相对应的,2 台机组对于热负荷的分配也符合机组的热经济性,即 B 机组更多承担供热需求,而 A 机组主要在储热系统进行充、放热时对热负荷的盈亏进行补充。

2 台机组的主汽量能够反映机组的整体出力,即发电和供热的总功率。根据文中的分析,B 机组的主汽量在 17:00 前基本维持最大值,此后受限于电热符合需求和热电约束发电功率逐渐下降。分析储热变化可以看出,由于 11:00 后 A 机组主汽量会有较大下降,因此储热系统提前储备一定热量,用来确保在外界电负荷降低时,A 机组功率随之下降低时的热负荷供应,此时机组的经济性能够得到保障。在文中,2 台机组的电功率输出严格满足电负荷需求,而 2 台机组和储热罐的热功率输出则严格满足热负荷需求。

3.2.2 灵活性最佳

以机组灵活性最佳为目标,当满足电负荷时 A 机组、B 机组的供电功率组成如图 10 所示,当满足热负荷时 A 机组、B 机组和储热罐的热负荷分配如图 11 所示。

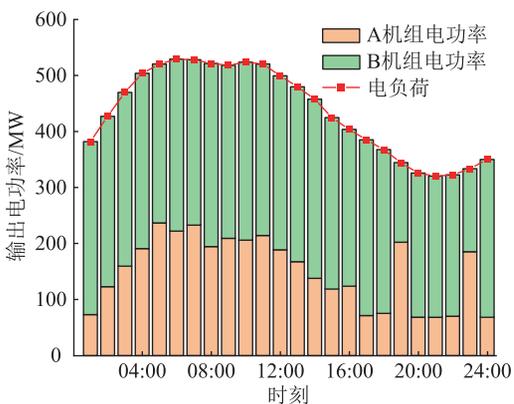


图 10 电功率平衡(灵活性)

Fig.10 Electrical power balance (flexibility)

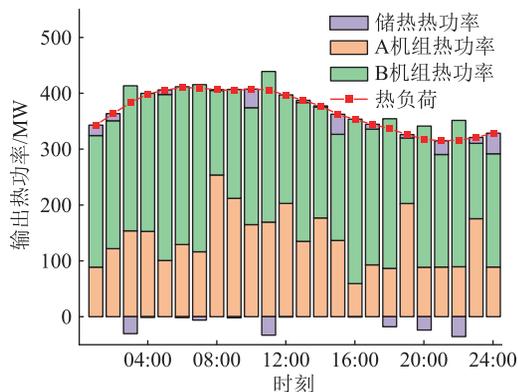


图 11 热功率平衡(灵活性)

Fig.11 Thermal power balance (flexibility)

当注重灵活性时,以灵活性最优为目标的优化结果相较于注重经济性时发生明显变化。相较于侧重经济性的结果,A 机组在部分时间节点承担更少的电力负荷,此时 B 机组增加电功率输出进行配合;同时,2 台机组在热负荷的分配上更为平均,以便于减小热电耦合导致的因过低或过高热负荷而影响的电功率爬坡能力。

储热罐的储热量如图 12 所示,不同时刻储热罐可持续充、放热时间变化如图 13 所示,2 台机组各自的主汽量如图 14 所示。

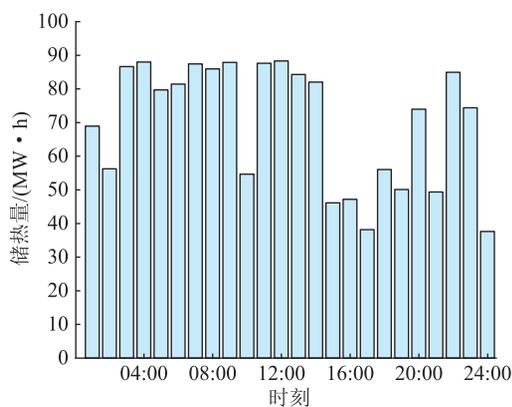


图 12 储热罐储热变化(灵活性)

Fig.12 Heat change in heat storage (flexibility)

侧重灵活性方案下,由图 12 可知,储热系统须维持较高的储热量(全天一半以上时间储热量维持在 70 MW·h 以上),以应对低负荷阶段的供热不足。B 机组主汽量在 17:00 前的波动更大,相对应的 A 机组主汽量在 05:00—12:00 有一定的提高,此后在 19:00 和 23:00,A 机组的主汽量超过 B 机组。在该方案下,储热量相较于注重经济性的方案有明显提高,从而确保系统在供热能力不足时可以有足够的储热量供应。侧重灵活性的优化结果相较于侧重经济性的结果具有更好的灵活性,在用电高峰期和低谷期具有更大的可调电负荷范围,具有更多的热

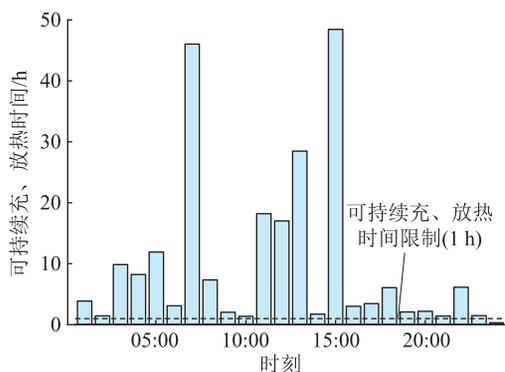


图 13 储热罐可持续充、放热时间变化(灵活性)

Fig.13 Sustainable charging and discharging time variation of heat storage (flexibility)

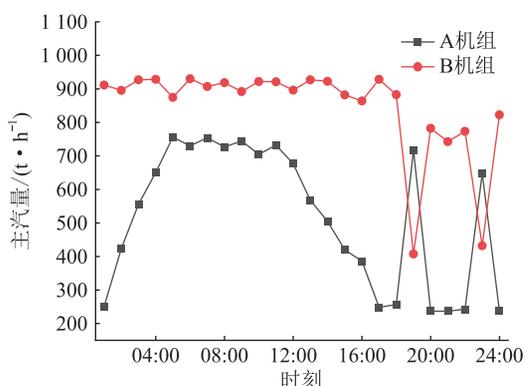


图 14 主汽量变化(灵活性)

Fig.14 Main steam volume changes (flexibility)

量储备,但也因此导致热经济性较好的 B 机组不能满负荷运行,从而导致更差的经济性。针对 2 种方案,应当在实际运行中有针对性地选择,当负荷需求的波动较大且难以预测或调峰限制严格时,应多考虑灵活性来保证机组更好适应极端负荷;相反,如果需求波动较小且调峰需求量不大时,则以经济性最佳为优化目标以降低运行成本获得更大经济效益。

4 结论

文中针对目前热电联产机组的实际运行需求,提出机组经济性和灵活性的多目标优化函数并采用改进的 NSGA-II 进行求解,得到如下结论:

(1) 相比于原 NSGA 出现不收敛的情况,改进的 NSGA-II 可以成功搜索到 Pareto 前沿。

(2) 选择 Pareto 前沿端点处的解进行对比分析,结果表明侧重经济性时,热经济性较好的 B 机组多承担供热需求,而 A 机组主要在储热系统进行充、放热时对热负荷的盈亏进行补充;侧重灵活性时,A、B 机组较为均匀地承担热负荷,从而更好地满足机组对灵活的要求。

(3) 对于熔融盐储热系统,侧重灵活性时,储热系统需维持较高的储热量(全天一半以上时间储热量维持在 70 MW·h 以上),以应对低负荷阶段的供热不足;侧重经济性时,储热系统调节较为频繁(全天充、放热 10 MW 及以上的有 14 次),使得机组在较高效率区间运行。

参考文献:

- [1] 于国强,刘克天,胡尊民,等. 大规模新能源并网下火电机组深度调峰优化调度[J]. 电力工程技术,2023,42(1):243-250.
- [2] 安吉振,郑福豪,刘一帆,等. 基于大数据分析的火电机组引风机故障预警研究[J]. 发电技术,2023,44(4):557-564.
- [3] 王岗,范旖晖,周文俊,等. 考虑备用权责关系的用户侧资源参与深度调峰运行优化分析[J]. 供用电,2022,39(3):75-81,91.
- [4] 闫修峰,宗珂,何修年,等. 1 000 MW 煤电机组调峰中汽温控制策略研究[J]. 发电技术,2022,43(3):518-522.
- [5] 董中豪,卢啸风,史丽超,等. 炉膛耐火材料热惯性对循环流化床锅炉调峰速率的影响[J]. 发电技术,2023,44(4):514-524.
- [6] ZHANG N, LU X, MCELROY M B, et al. Reducing curtailment of wind electricity in China by employing electric boilers for heat and pumped hydro for energy storage [J]. Applied Energy, 2016, 184: 987-994.
- [7] GUO F, ZHU X Y, ZHANG J Y, et al. Large-scale living laboratory of seasonal borehole thermal energy storage system for urban district heating [J]. Applied Energy, 2020, 264: 114763.
- [8] MAHARANA P, DIMRI A P, CHOUDHARY A. Future changes in Indian summer monsoon characteristics under 1.5 and 2 °C specific warming levels [J]. Climate Dynamics, 2020, 54(1/2): 507-523.

- [9] 陈玉敏,赵冬梅. 含风电的多种形式储能协调调度多目标优化模型[J]. 电测与仪表,2020,57(23):71-78.
CHEN Yumin, ZHAO Dongmei. Multi-objective optimization model for multi-form energy storage coordinated scheduling with wind power [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020,57(23):71-78.
- [10] 李家珏,李平,王刚,等. 计及弃风消纳的热电联产系统的日前调度模型[J]. 太阳能学报,2021,42(9):295-301.
LI Jiajue, LI Ping, WANG Gang, et al. Day-to-day scheduling model for cogeneration system accounting for wind power accommodation[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2021,42(9):295-301.
- [11] 杨志鹏,张峰,梁军,等. 含热泵和储能的冷热电联供型微网经济运行[J]. 电网技术,2018,42(6):1735-1743.
YANG Zhipeng, ZHANG Feng, LIANG Jun, et al. Economic generation scheduling of CCHP microgrid with heat pump and energy storage[J]. Power System Technology, 2018,42(6):1735-1743.
- [12] RADULOVIC D, SKOK S, KIRINCIC V. Cogeneration investment dilemma[J]. Energy, 2012,48(1):177-187.
- [13] JIMÉNEZ NAVARRO J P, KAVVADIAS K C, QUOILIN S, et al. The joint effect of centralised cogeneration plants and thermal storage on the efficiency and cost of the power system[J]. Energy, 2018,149:535-549.
- [14] 夏云飞,陈乃娟,陈逸伦. 基于蓄热储能系统的热电机组灵活性改造技术应用[J]. 电站系统工程,2023,39(3):69-71,74.
XIA Yunfei, CHEN Naijuan, CHEN Yilun. Application of flexibility transformation technology for thermal power unit based on heat and energy storage system [J]. Power System Engineering, 2023,39(3):69-71,74.
- [15] 张显荣,徐玉杰,杨立军,等. 多类型火电-储热耦合系统性能分析与比较[J]. 储能科学与技术,2021,10(5):1565-1578.
ZHANG Xianrong, XU Yujie, YANG Lijun, et al. Performance analysis and comparison of multi-type thermal power-heat storage coupling systems[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021,10(5):1565-1578.
- [16] 董学会. 配置蓄热装置的供热机组灵活性分析[D]. 北京:华北电力大学,2019.
DONG Xuehui. Analysis of the flexibility of the heating unit with the heat storage device [D]. Beijing:North China Electric Power University, 2019.
- [17] 黄敏. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化运行研究[D]. 重庆:重庆大学,2014.
HUANG Min. Research of multi-objective optimal operation for a micro-grid based on improved particle swarm optimization [D]. Chongqing:Chongqing University, 2014.
- [18] LIN C E, VIVIANI G L. Hierarchical economic dispatch for piecewise quadratic cost functions[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984,PAS-103(6):1170-1175.
- [19] CHIANG C L. Improved genetic algorithm for power economic dispatch of units with valve-point effects and multiple fuels[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005,20(4):1690-1699.
- [20] SINGH N J, DHILLON J S, KOTHARI D P. Multi-objective thermal power load dispatch using chaotic differential evolutionary algorithm and Powell's method[J]. Soft Computing, 2018,22(7):2159-2174.
- [21] GACHHAYAT S K, DASH S K. Modified sub-gradient based combined objective technique and evolutionary programming approach for economic dispatch involving valve-point loading, enhanced prohibited zones and ramp rate constraints[J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020,10(5):5048.
- [22] KOU G, XIAO H, CAO M H, et al. Optimal computing budget allocation for the vector evaluated genetic algorithm in multi-objective simulation optimization [J]. Automatica, 2021,129:109599.
- [23] MAGHAWRY A, HODHOD R, OMAR Y, et al. An approach for optimizing multi-objective problems using hybrid genetic algorithms[J]. Soft Computing, 2021,25(1):389-405.
- [24] 王森,张照彦,袁玉宝,等. 提高新能源消纳的电-热综合能源系统日前优化调度策略[J]. 热力发电,2022,51(7):36-45.
WANG Sen, ZHANG Zhaoyan, YUAN Yubao, et al. Day-ahead scheduling strategy optimization of electric-thermal integrated energy system for improvement of new energy consumption[J]. Thermal Power Generation, 2022,51(7):36-45.
- [25] 王宁玲,窦潇潇,李承周,等. 含 P2G 和复合储能的高速公路服务区综合能源系统日前优化调度[J/OL]. 华北电力大学学报(自然科学版):1-10[2023-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220810.1622.002.html>.
WANG Ningling, DOU Xiaoxiao, LI Chengzhou, et al. Optimized dispatch of integrated energy system in expressway service area with P2G and composite energy storage [J/OL]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition): 1-10 [2023-12-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20220810.1622.002.html>.
- [26] BI J, YUAN H T, ZHAI J H, et al. Self-adaptive bat algorithm with genetic operations[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2022,9(7):1284-1294.
- [27] PONCIROLI R, STAUFF N E, RAMSEY J, et al. An improved genetic algorithm approach to the unit commitment/economic dispatch problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020,35(5):4005-4013.
- [28] 郑瑜. 生物质驱动的多能互补热电气联供系统多目标优化理论与应用[D]. 兰州:兰州理工大学,2021.
ZHENG Yu. Multi-objective optimization theory and application of biomass-driven multi-energy complementary combined heat, power and biogas (BCHP) system [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2021.
- [29] 霍慧娟. 考虑虚拟电厂的电力系统多目标优化及政策模拟[D]. 北京:华北电力大学,2018.

- HUO Huijuan. Multi-objective optimization and policy simulation of the power system scheduling considering virtual power plants [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [30] ZITZLER E, THIELE L. Multiobjective evolutionary algorithms; a comparative case study and the strength Pareto approach [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1999, 3(4): 257-271.
- [31] WU C P, LI K W. Multi-objective optimization of functionally graded beams using a genetic algorithm with non-dominated sorting [J]. Journal of Composites Science, 2021, 5(4): 92.
- [32] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist mul-

tiobjective genetic algorithm; NSGA- II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.

作者简介:



王安

王安(1981),男,学士,高级工程师,从事热能动力工程、燃煤电厂智能化、综合能源开发与管理等工作(E-mail: 12010522@chnenergy.com.cn);

杨绮(1982),女,学士,工程师,从事电气自动化、继电保护工作;

王菁(1984),男,学士,工程师,从事热控自动化、程控保护工作。

Multi-objective optimization algorithm for economy and flexibility of cogeneration unit with heat storage

WANG An¹, YANG Qi¹, WANG Jing¹, LU Jun¹, LIU Hongwen¹, WANG Peihong²

(1. Guoneng Changzhou Power Generation Co., Ltd., Changzhou 213033, China;

2. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: With the sustained growth of renewable energy, the flexibility of the power system has emerged as a critical indicator, influenced by frequent peak regulation. However, a dilemma exists between maximizing flexibility and optimizing economy, and a multi-objective optimization can serve as means of coordinating conflicts. In this study, condensing cogeneration units equipped with a molten salt heat storage system is research object, an optimization model for day-ahead scheduling is established, with flexibility and economy as the primary optimization objectives. To account for various constraint condition such as unit ramp rate, unit output and thermoelectric coupling properties, an enhanced version of the non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II) is proposed to efficiently solve the optimization problem of a molten salt heat storage system. Flexibility and economy are used to compare and analyze the non dominated solution set obtained from the Pareto front. At the same time, the heat storage and release characteristics of a molten salt heat storage system are analyzed. The findings reveal that a focus on flexibility necessitates great molten salt heat storage to manage insufficient heating during low-load operations. Conversely, an emphasis on economy leads to frequent adjustments in heat storage to maintain optimal unit performance.

Keywords: day-ahead scheduling; multi-objective optimization; flexibility; economy; molten salt; non-dominated sorting genetic algorithm- II (NSGA- II)

(编辑 吴昊)