

600 MW 双机热电联供系统智能优化方法研究

胡慧¹, 曹越¹, 王广龙², 司风琪¹

(1. 东南大学能源热转换及其过程测控教育部重点实验室, 江苏南京 210096;

2. 内蒙古京隆发电有限责任公司, 内蒙古丰镇 012100)

摘要:以600 MW双机热电联供系统为研究对象,引入基于灰狼捕食行为模拟的群智能优化算法,针对其繁琐更新机制导致热电负荷分配时效性差的问题,进一步提出改进的灰狼优化算法(GGWO),利用前3等级狼的位置和高斯采样进行种群进化机制更新。通过EBSILON平台开展仿真试验,揭示600 MW双机热电联供系统的热电耦合特性和系统运行特性,并将改进的灰狼优化算法应用于该系统的热电负荷优化分配。结果表明:两台机组电负荷一定时,尽可能增大抽凝机组的抽汽供热量可减小系统总热耗量;通过智能热电负荷运行优化,可有效降低系统总热耗量,提高系统经济效益。

关键词:双机热电联供系统;热电耦合特性;改进的灰狼优化算法;运行优化

中图分类号:TK47 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.mdjgc.2022.10.005

[引用本文格式]胡慧,曹越,王广龙,等.600 MW双机热电联供系统智能优化方法研究[J].热能动力工程,2022,37(10):41-50. HU Hui, CAO Yue, WANG Guang-long, et al. Research on intelligent optimization for the combined heat and power system consisting of 600 MW double units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(10): 41-50.

Research on Intelligent Optimization for the Combined Heat and Power System Consisting of 600 MW Double Units

HU Hui¹, CAO Yue¹, WANG Guang-long², SI Feng-qi¹

(1. Key Laboratory of Energy Thermal Conversion and Control of Ministry of Education, Southeast University, Nanjing, China, Post Code: 210096; 2. Inner Mongolia Jinglong Power Generation Co. Ltd., Fengzhen, China, Post Code: 012100)

Abstract: The combined heat and power (CHP) system consisting of 600 MW double units was taken as the research object. A swarm intelligence optimization algorithm based on Gray Wolf predation behavior simulation was introduced. Aiming at the problem of poor timeliness of thermoelectric load distribution caused by its tedious updating mechanism, an improved Gray Wolf optimization algorithm (GGWO) was further proposed to update the population evolutionary mechanism by using the positions of the top three wolves and Gaussian sampling. The simulation tests were carried out on EBSILON platform to reveal the thermoelectric coupling characteristics of the units and the operation characteristics of the system. And the improved Gray Wolf optimization algorithm was applied to the optimal distribution of thermoelectric load in the system. The results show that when the electric load of the double units is constant, the total heat consumption of the system can be reduced by increasing the extraction mass flow rate of the condensing unit with intermediate extraction as much as possible. In addition, through intelligent thermoelectric load operation optimization, the total heat consumption of the system can be effectively reduced, and the economic benefits of the system can be improved.

收稿日期:2021-08-27; 修订日期:2021-12-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51976031);江苏省基础研究计划(自然科学基金)青年基金项目(BK20210240)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (51976031); Youth Fund Project of Jiangsu Basic Research Program (Natural Science Foundation) (BK20210240)

作者简介:胡慧(1998-),女,湖北荆州人,东南大学硕士研究生.

Key words: a CHP system consisting of double units, thermoelectric coupling characteristic, improved Gray Wolf optimization algorithm, operation optimization

引言

随着碳达峰、碳中和国家战略的实施,清洁高效的大型火电机组参与区域供热成为新的研究热点。而大型供热机组间存在热力性能差异,因此研究热电联供系统中大型火电机组的热电运行优化方法具有重要的意义。

受我国各城市采暖需求逐年增加及风电、光伏等可再生能源并网的影响^[1],部分火力发电企业对机组进行了供热改造,热电联产机组应运而生。此项改造不仅满足我国日益严格的节能减排政策要求,还极大提升了火力发电企业的发电竞争力与盈利能力。当有多台机组并列运行、联合供热时,不同机组间热力性能存在差异。所以,在给定热电负荷指令条件下,研究各机组间热电负荷的最优分配方式,以实现系统效率最大化至关重要^[2-3]。

宫卫平等人^[4]利用 EBSILON 仿真软件对某厂 200 和 300 MW 机组的联机供热系统进行模拟分析,获得了机组最佳运行方式。盛虎等人^[5]利用线性规划数学模型建立热电分配优化模型,并利用 Matlab 软件求解,对案例电厂的实际运行工况进行分析。韩建春等人^[6]提出可用能损失率概念及其计算方法,通过对热电厂不同供热单元可用能损失率的计算,实现多元供热电厂的热负荷优化分配。吴涛等人^[7]提出一种新的、不同供热及发电负荷下的供热煤耗率和发电煤耗率的计算方法,最后基于自适应遗传算法找出在给定供热功率条件下使两台机组总利润最大化的发电负荷分配方式。李军等人^[8]针对某电厂多机型、多热源的复杂机组,提出了一种改进的遗传算法,对该机组进行负荷优化分配。王珊等人^[9]研究获得了某 330 MW 热电联产机组的可行域及可行域内工况点能量利用效率和焓效率的分布规律,进而建立了其能耗分析模型和基于粒子群算法的热电负荷优化分配模型。随着供热品质与需求的持续提升,已有电厂对 600 MW 机组进行供热改造,通过高背压乏汽与中间抽汽耦合供热的方式提升电厂的供热能力。但该种方式下的相

关研究较少,难以获得其最优的热电联供运行方法。

本文以 600 MW 双机热电联供系统为研究对象,基于 EBSILON 平台建立该系统的仿真模型,开展系统热电耦合特性及运行特性分析,提出一种改进的灰狼算法,在系统可行域内获得最优的热电联供运行方法。

1 系统概况

以某电厂的 600 MW 双机热电联供系统为研究对象,该系统包括 1 台 600 MW 的高背压抽凝供热机组和 1 台 600 MW 的抽凝供热机组以及热网首站等设备。其系统如图 1 所示,其中 HP 为高压缸,IP 为中压缸,LP1 为 1 号低压缸,LP2 为 2 号低压缸。由图可知,抽凝机组通过从汽轮机中压缸末级抽取部分蒸汽对外供热,其余蒸汽进入低压缸继续膨胀做功;高背压抽凝机组在抽凝机组的基础上增加高背压乏汽利用,通过提高低压缸排汽压力,从而提高排汽温度,用以加热热网循环水,充分利用机组排汽的汽化潜热,提高机组循环热效率^[10-11];热网首站中两台机组的中间抽汽进一步加热热网循环水,使其升至所需温度后送至热用户。

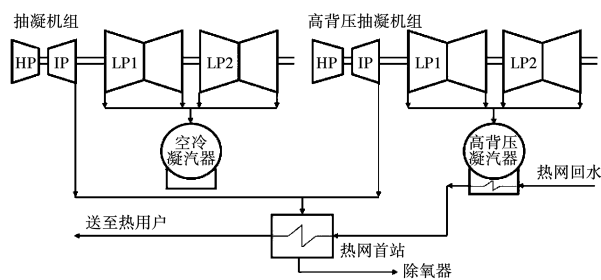


图 1 600 MW 双机热电联供系统图

Fig. 1 Diagram of the CHP system consisting of 600 MW double units

2 智能优化方法

2.1 目标函数

采用汽轮机热耗量 Q_0 作为热力学特性评价指标,其数学模型为:

$$Q_0 = \dot{m}_0 h_0 - \dot{m}_{1w} h_{1w} + \dot{m}_{2r} h_{2r} - \dot{m}_{1z} h_{1z} \quad (1)$$

式中: \dot{m}_0 —主蒸汽流量, kg/s; h_0 —主蒸汽焓, kJ/kg; \dot{m}_{fw} —给水流量, kg/s; h_{fw} —给水焓, kJ/kg; \dot{m}_{xr} —再热蒸汽流量, kg/s; h_{xr} —再热蒸汽焓, kJ/kg; \dot{m}_{lz} —冷再热蒸汽流量, kg/s; h_{lz} —冷再热蒸汽焓, kJ/kg。

本文所述热电联供系统包含高背压抽凝机组和抽凝机组, 则其目标函数可表示为:

$$\min Q_0(P_D, G_D) = \min(Q_{01}(P_1, G_1) + Q_{02}(P_2, G_2)) \quad (2)$$

式中: P_D, P_1, P_2 —总电负荷指令、高背压抽凝机组电功率、抽凝机组电功率, MW; G_D, G_1, G_2 —总热负荷指令、高背压抽凝机组热负荷、抽凝机组热负荷, MW; Q_0, Q_{01}, Q_{02} —给定热电负荷指令下系统总热耗量, 高背压抽凝机组热耗量, 抽凝机组热耗量, MW。

2.2 约束条件

上述目标函数需满足如下约束条件:

电负荷约束为:

$$\begin{cases} P_D = P_1 + P_2 \\ P_{1\min} \leq P_1 \leq P_{1\max} \\ P_{2\min} \leq P_2 \leq P_{2\max} \end{cases} \quad (3)$$

热负荷约束为:

$$\begin{cases} G_D = G_1 + G_2 \\ G_{1\min} \leq G_1 \leq G_{1\max} \\ G_{2\min} \leq G_2 \leq G_{2\max} \end{cases} \quad (4)$$

电负荷与热负荷耦合约束为:

$$\begin{cases} P_{\max} = P(G) | \dot{m}_0 = \dot{m}_{0\max} \\ P_{\min} = \max \{ P(G) | \dot{m}_0 = \dot{m}_{0\min}, P(G) | \dot{m}_c = \dot{m}_{c\min} \} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{1\min}, P_{1\max}, G_{1\min}, G_{1\max}$ —高背压抽凝机组电负荷, 热负荷的下限和上限, MW; $P_{2\min}, P_{2\max}, G_{2\min}, G_{2\max}$ —抽凝机组电负荷, 热负荷的下限和上限, MW; $P(G) | \dot{m}_0 = \dot{m}_{0\max}, P(G) | \dot{m}_0 = \dot{m}_{0\min}, P(G) | \dot{m}_c = \dot{m}_{c\min}$ —当前热负荷下, 汽轮机进汽量最大时, 汽轮机进汽量最小及低压缸凝汽量最小时的电负荷函数。

2.3 特性函数

热耗特性函数是负荷优化分配的基础, 一般可表示为与机组热负荷和电负荷相关的二元二次函数:

$$Q_0(P, G) = a + bP + cG + dP^2 + eG^2 + fPG \quad (6)$$

式中: P —机组电负荷, MW; G —机组热负荷, MW; a, b, c, d, e, f —热耗变化特性系数。

2.4 优化算法

灰狼优化算法是一种新兴高效的群体智能优化算法, 被成功应用于诸多领域^[12]。该算法通过前 3 等级的狼群位置来更新种群, 采用的更新机制收敛性和寻优效果均较好, 但在相同的迭代次数中相比其他算法所需要的时间可能更长。

考虑到热电负荷实时分配的问题, 本文提出一种改进的灰狼优化算法 (GGWO) 用于 600 MW 双机热电联供系统的运行优化。

2.4.1 算法改进

该算法直接利用前 3 等级狼的位置和高斯采样完成进化过程, 高斯采样过程如下:

$$X_{id}(t+1) \sim N(\mu_{id}, \sigma_{id}^2) \sim (\mu_{id} + N(0, 1)\sigma_{id}) \quad (7)$$

式中: $X_{id}(t+1)$ —个体 i 在第 d 维位置的随机变量, 服从高斯分布, 新位置 $x_{id}(t+1)$ 是 $X_{id}(t+1)$ 的一个采样点; $N(\mu, \sigma^2)$ —均值为 μ , 标准差为 σ 的高斯分布; μ_{id} —第 i 个灰狼第 d 维的高斯分布的均值参数; σ_{id} —第 i 个灰狼第 d 维的高斯分布的标准差参数。计算过程如下:

$$\mu_{id} = (\alpha_d + \beta_d + \delta_d)/3 \quad (8)$$

$$\sigma_{id} = (|\alpha_d| + |\beta_d| + |\delta_d|)/c \quad (9)$$

式中: $\alpha_d, \beta_d, \delta_d$ —前 3 等级狼第 d 维的位置; c —常数, 根据实际情况选取。

为了平衡改进算法的搜索性能与收敛性能, 针对标准差增加一个自适应系数 m , 进化过程表示为:

$$m = 1.5 - (\text{iter}/\text{iter}_{\max}) \quad (10)$$

$$X_{id}(t+1) = \mu_{id} + m \cdot N(0, 1)\sigma_{id} \quad (11)$$

式中: iter —当前迭代次数; iter_{\max} —最大迭代次数。

在迭代前期 m 较大, 可以增加离搜索中心较远粒子的选择概率, 增强算法的探索性能, 在迭代后期 m 较小以加强算法的收敛性能。

2.4.2 求解流程

GGWO 求解流程如图 2 所示。

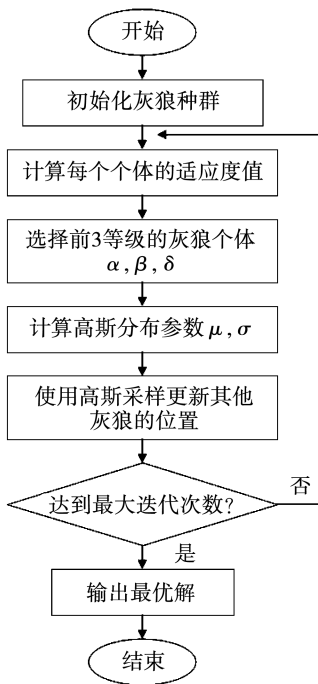


图2 GGWO的算法流程

Fig.2 Flow chart of GGWO algorithm

具体步骤如下:

第1步:设置算法最大迭代次数 T_{\max} , 随机初始化灰狼种群位置 $X_i (i = 1, 2, \dots, n)$;

第2步:根据适应度函数计算每个灰狼个体的适应度值;

第3步:根据计算得到的个体适应度值,选择前3个最好的个体,作为当前的最优解 X_α 、次优解 X_β 和第3优解 X_δ ;

第4步:根据式(8)计算高斯分布均值,根据式(9)计算高斯分布标准差;

第5步:利用高斯采样更新灰狼种群中灰狼个体的位置;

第6步:利用适应度函数重新计算每个灰狼个体的适应度值,并与上次迭代结果进行比较,更新最优解 X_α 、次优解 X_β 和第3优解 X_δ ;

第7步:判断算法是否达到结束条件,若是,则停止迭代并输出最优结果 X_α ;反之,则重复执行第4~6步。

3 系统建模

为分析此双机供热系统热电负荷特性并获得热

电负荷智能优化的特性函数,以系统中各设备物理结构为边界,采用模块化建模方法,依次建立汽轮机、回热设备、凝汽设备、热网首站等设备的模型。

3.1 汽轮机模型

3.1.1 压力级

变工况下,压力级的通流面积保持不变,因此可用弗留格尔公式表征级组流量与级组前后参数的关系:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{z1}^2}{p_0^2 - p_z^2}} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad (12)$$

式中: \dot{m} —设计工况下压力级组的流量, kg/s; p_0 —设计工况下进口压力, MPa; p_z —设计工况下出口压力, MPa; T_0 —设计工况下进口绝对温度, K; \dot{m}_1 —变工况下压力级组的流量, kg/s; p_{01} —变工况下进口压力, MPa; p_{z1} —变工况下出口压力, MPa; T_{01} —变工况下进口绝对温度, K。

3.1.2 调节级

600 MW 机组通常采用高负荷、低负荷定压运行,中间负荷滑压运行的复合滑压运行方式。调节级前主蒸汽压力可由如下关系式表征:

$$p_{zq} = f(\dot{m}_0, p_c) \quad (13)$$

式中: p_c —机组背压, kPa。

3.2 回热设备模型

3.2.1 表面式加热器

以高压加热器为例,假设各段内工质的物性参数均匀一致,其换热过程可由传热基本方程和热平衡方程表征:

$$Q = kA\Delta t_m \quad (14)$$

$$Q = \dot{m}_{lf}c_{lf}\Delta t_{lf} = \dot{m}_{rf}c_{rf}\Delta t_{rf} \quad (15)$$

式中: Q —换热量, kW; k —总传热系数, kW/(m²·°C); A —传热面积, m²; Δt_m —对数平均温差, °C; \dot{m}_{lf} —冷流体质量流量, kg/s; c_{lf} —冷流体比热容, kJ/(kg·°C); Δt_{lf} —冷流体进出口温差, °C; \dot{m}_{rf} —热流体质量流量, kg/s; c_{rf} —热流体比热容, kJ/(kg·°C); Δt_{rf} —热流体进出口温差, °C。

3.2.2 除氧器

根据能量守恒与质量守恒方程,计算除氧器相关参数:

$$\dot{m}_{out}h_{out} = \dot{m}_{4c}h_{4c} + \dot{m}_{fw}h_{fw} + \dot{m}_d h_d \quad (16)$$

$$\dot{m}_{out} = \dot{m}_{4c} + \dot{m}_{fw} + \dot{m}_d \quad (17)$$

式中: \dot{m}_{out} —除氧器出口给水流量, kg/s; h_{out} —除氧器出口给水焓, kJ/kg; \dot{m}_{4c} —除氧器抽汽量, kg/s; h_{4c} —除氧器抽汽焓, kJ/kg; \dot{m}_{fw} —给水流量, kg/s; h_{fw} —给水焓, kJ/kg; \dot{m}_d —上级疏水流量, kg/s; h_d —上级疏水焓, kJ/kg。

3.3 凝汽设备模型

变工况下, 机组背压 p_c 、低压缸排汽量 \dot{m}_c 、循环水入口温度 t_{w1} 和循环水流量 \dot{m}_w 满足如下关系:

$$p_c = f(\dot{m}_c, \dot{m}_w, t_{w1}) \quad (18)$$

在给定机组背压和循环水入口温度的情况下, 根据低压缸排汽量可计算出循环水流量及循环水出口温度。

3.4 热网首站模型

热网首站中的换热过程可由热平衡方程表征:

$$Q_{sz} = \dot{m}_w c_w \Delta t_w = \dot{m}_s c_s \Delta t_s \quad (19)$$

式中: Q_{sz} —热网首站换热量, kW; c_w —循环水比热容, kJ/(kg·°C); Δt_w —热网首站中循环水的进出口温差, °C; \dot{m}_s —热网首站进汽流量, kg/s; c_s —蒸汽比热容, kJ/(kg·°C); Δt_s —热网首站中蒸汽进出口温差, °C。

3.5 系统整体模型

该热电联供系统除上述关键设备外, 还包括锅

炉、有压损的管道及轴封等。在仿真模型中对锅炉模型进行简化, 以主蒸汽及再热蒸汽参数等作为其边界条件。针对管道特性, 采用管道的沿程阻力损失及通过阀门等装置引起的局部阻力损失表征管道压损, 并通过高中压缸间轴封漏气的计算提高系统整体模型精度。

根据热力平衡图, 在 EBSILON 仿真平台上按确定的接口规则将上述各设备模型进行连接, 获得 600 MW 双机热电联供系统的整体模型, 如图 3 所示。

3.6 仿真条件

本文所研究的热电联供系统由两台 600 MW 的亚临界汽轮机和热网首站组成。该热网的回水流量为 12 344 t/h, 回水参数为 36 °C 和 1.3 MPa, 供水参数为 100 °C 和 2.07 MPa。仿真模型中汽轮机的基准工况参数如表 1 所示。由表可知, 高背压抽凝机组的凝汽压力为 33 kPa, 抽凝机组的凝汽压力为 15 kPa。此外, 两台机组中各加热器下端差设计值均为 5.6 °C, 上端差及其抽汽相对压损设计值如表 2 及表 3 所示, 表中“高加”为高压加热器, “低加”为低压加热器。

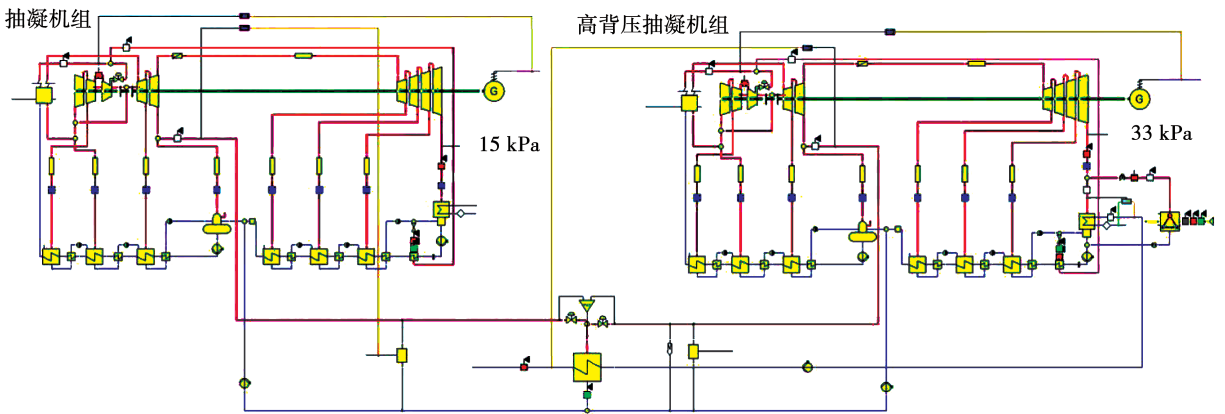


图 3 600 MW 双机热电联供系统模型

Fig.3 Model of the CHP system consisting of 600 MW double units

表 1 系统中汽轮机的基准工况参数

Tab.1 Main parameters of steam turbines in the system

机组	最大进汽量/ t·h ⁻¹	主蒸汽压 力/MPa	主蒸汽温 度/°C	再热蒸汽 压力/MPa	再热蒸汽 温度/°C	锅炉最小蒸发 量/t·h ⁻¹	低压缸最小排 汽量/t·h ⁻¹	凝汽压 力/kPa
高背压抽凝	1 999.445	16.67	538	3.707	538	748.057	500	33
抽凝	2 093.449	16.67	538	3.799	538	748.057	300	15

表 2 各加热器上端差设计值(℃)

Tab. 2 Design value of the upper end difference of each heater(℃)

机组	1号	2号	3号	5号	6号	7号
	高加	高加	高加	低加	低加	低加
高背压抽凝	-1.6	0	0	2.4	2.8	2.8
抽凝	-1.6	0	0	2.8	2.8	2.8

表 3 各加热器抽汽相对压损设计值(%)

Tab. 3 Design value of the relative pressure loss of the extraction steam of each heater(%)

机组	1号	2号	3号	5号	6号	7号
	高加	高加	高加	低加	低加	低加
高背压抽凝	3	3	3	5	5	5
抽凝机组	3	3	5	5	5	5

在仿真模型中,高背压抽凝机组和抽凝机组均采用定-滑-定的运行方式,其滑压运行曲线如图4所示。此外,考虑变工况下低压缸末级效率变化较大,本文提出了如图4所示的低压缸缸效曲线进行仿真修正。

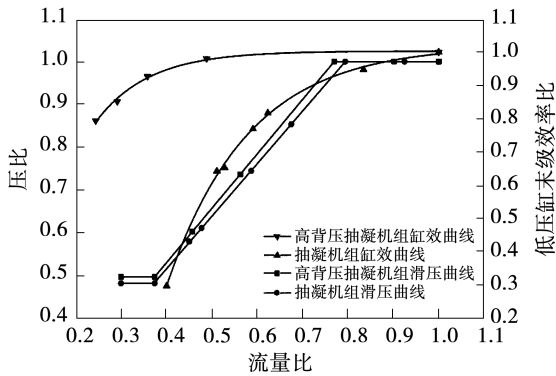


图 4 机组特性曲线修正

Fig. 4 Modification of the characteristic curve

3.7 模型验证

开展不同主蒸汽流量及供热抽汽流量条件下的仿真试验,各机组电功率的设计值与仿真值对比结果如表4及表5所示。

上述结果表明,不同主蒸汽流量及供热抽汽流量工况下,各机组电功率的仿真值与其设计值相对误差均在1%以内,满足计算精度要求,因此所建模型可较准确模拟各机组变工况特性。根据该模型各

工况下系统运行数据,拟合得到多个热负荷和电负荷点对应的热耗特性曲面,为后续特性分析与智能优化提供依据。

表 4 高背压抽凝机组仿真模型验证结果

Tab. 4 Simulation model validation results for high-back pressure condensing unit with intermediate extraction

工况	主蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	供热抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	电功率设计值/MW	电功率仿真值/MW	相对误差/%
气轮机最大连续出力	1 999.445	0	631.335	633.635	0.36
75%负荷抽汽供热	1 802.634	500	450.123	451.239	0.25
50%负荷抽汽供热	1 125.092	250	300.084	302.130	0.68
40%负荷抽汽供热	913.310	200	240.045	241.973	0.80
30%负荷抽汽供热	748.057	150	189.301	190.984	0.89

表 5 抽凝机组仿真模型验证结果

Tab. 5 Simulation model validation results for condensing unit with intermediate extraction

工况	主蒸汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	供热抽汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	电功率设计值/MW	电功率仿真值/MW	相对误差/%
阀门全开抽汽供热	2 093.449	600	520.839	523.686	0.55
75%热耗率验收抽汽供热	1 350.304	500	326.451	328.094	0.50
50%负荷抽汽供热	1 172.724	250	300.275	301.539	0.42
40%负荷抽汽供热	954.790	200	239.990	241.106	0.47
30%负荷抽汽供热	748.057	150	180.176	181.441	0.70

4 结果与分析

4.1 机组热电耦合特性分析

机组热电负荷可行域如图5所示。由图5可知,抽凝机组热电负荷安全运行区间受汽轮机最大进汽量 $A_1 B_1$ 、锅炉最小蒸发量 $C_1 D_1$ 和低压缸最小

凝汽流量 B_1C_1 限制,随着机组供热量从 206.8 MW 逐渐增大至最大值 804.4 MW,其电功率可调范围从 64.3% 减小到 0%,机组运行灵活性降低;高背压抽凝机组热电负荷安全运行区间受汽轮机最大进汽量 A_2B_2 、锅炉最小蒸发量 C_2D_2 、低压缸最小凝汽流量 B_2C_2 和汽轮机最小抽汽供热量 A_2D_2 限制,增加抽汽供热后,高背压机组的最大供热量从 838.7 MW 进一步提高至 944 MW,机组电负荷调节能力也有所提高。

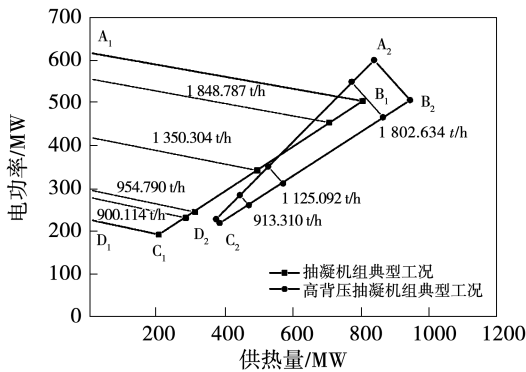


图 5 机组热电负荷可行域

Fig. 5 Feasible range of thermolectric load of units

通过对各机组的可行域进行矢量叠加,可得 600 MW 双机热电联供系统总的热电负荷可行域如图 6 所示。系统最大供热量达 1 748.4 MW。其中,AB 为抽凝机组电功率最大时高背压抽凝机组完全乏汽供热工况,BC 为高背压抽凝机组电功率最大时抽凝机组最大进汽量工况,CD 为抽凝机组供热量最大时高背压抽凝机组最大进汽量工况,DE 为高背压抽凝机组供热量最大时抽凝机组最小凝汽量工况,EF 为抽凝机组电功率最小时高背压抽凝机组最小凝汽量工况,FG 为高背压抽凝机组电功率最小时抽凝机组最小蒸发量工况,GH 为抽凝机组纯凝工况且电功率最小时高背压抽凝机组最小蒸发量工况,AH 为高背压抽凝机组完全乏汽供热且电功率最小时抽凝机组纯凝工况。

4.2 系统运行特性分析

进行变工况条件的仿真试验,分析机组热电负荷分配对系统总热耗量的影响,进而揭示热电负荷优化分配的节能机理。

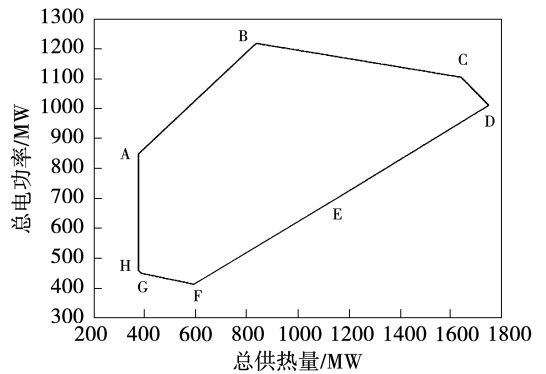


图 6 系统热电负荷可行域

Fig. 6 Feasible range of thermolectric load of system

4.2.1 电负荷分配对系统总热耗量的影响

在热电可行域范围内,保持高背压抽凝机组乏汽供热温度为其设计值 $67.8\text{ }^\circ\text{C}$,电负荷按一定步长,在两台机组间转移。图 7 给出了总电负荷指令为 620 MW 时,系统总热耗量随高背压抽凝机组电功率的变化关系。由图可知,随着抽凝机组电负荷以每 10 MW 向高背压抽凝机组转移,总热耗量呈现先增大后减小的变化趋势,在高背压抽凝机组电功率为 390 MW 时达到最大值 1 759.24 MW。因为随着高背压抽凝机组电功率增大,其主蒸汽流量增加,热耗量升高;抽凝机组电功率等量减小,导致其热耗量降低,两台机组热耗量变化方向相反,但因变化率不同,最终呈现如图所示的变化趋势。

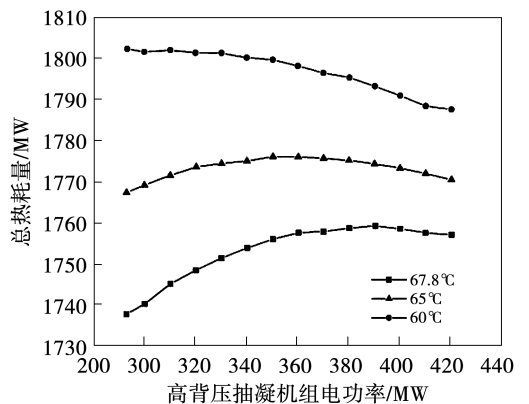


图 7 总电负荷指令为 620 MW 时系统总热耗量随高背压抽凝机组电功率的变化关系

Fig. 7 Variations of total heat consumption with electric power of high-back pressure condensing unit with intermediate extraction under the condition of 620 MW electric instruction

此外,本文还开展了乏汽供热温度为 65 和 60 °C 时的电负荷分配仿真实验,如图 7 所示。由图可知,不同乏汽供热温度条件下,可行域范围内系统总热耗量变化趋势不同,且其最大值所对应的工况随着乏汽供热温度减小而不断左移,分别出现在高背压抽凝机组电功率为 350 和 293 MW 工况。综合看来,相同电负荷分配方式下,乏汽供热温度为其设计值 67.8 °C 所对应的系统总热耗量最小。

当电负荷指令升高至 900 MW 时,系统总热耗量变化趋势如图 8 所示。该指令下最大和最小热耗量为 2 414.29,2 376.96 MW,分别对应的最小和最大高背压抽凝机组电功率为 370.22,508.99 MW。这是因为该工况下高背压抽凝机组热耗增加量始终小于抽凝机组热耗减少量,所以整体呈现热耗量不断减小的趋势。

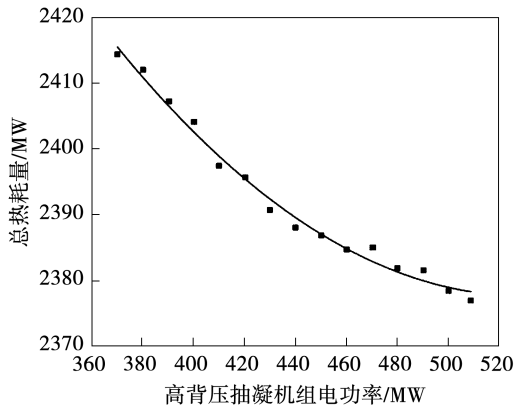


图 8 总电负荷指令为 900 MW 时系统总热耗量随高背压抽凝机组电功率的变化关系

Fig. 8 Variations of total heat consumption with electric power of high-back pressure condensing unit with intermediate extraction under the condition of 900 MW electric instruction

因此,总电负荷指令及乏汽供热温度均会影响电负荷分配时系统总热耗量的变化趋势。可通过相应优化算法进一步探究其热电负荷最优分配方式。

4.2.2 热负荷分配对系统总热耗量的影响

在热电可行域范围内,保持各机组电功率不变,热负荷按一定步长在两台机组间转移,系统总热耗量及乏汽供热量随高背压抽凝机组供热抽汽量的变

化如图 9 及图 10 所示,图中 P_1 为高背压抽凝机组电功率, P_2 为抽凝机组电功率。

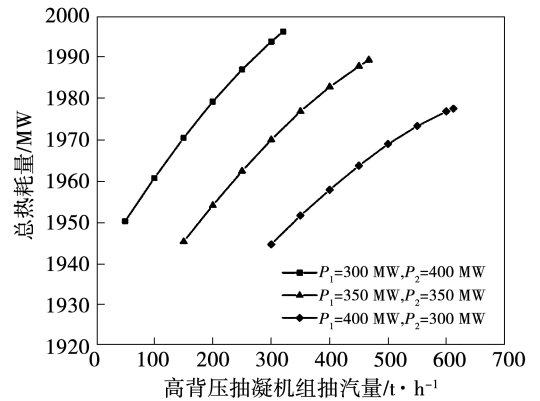


图 9 系统总热耗量随高背压抽凝机组供热抽汽量的变化关系

Fig. 9 Variations of total heat consumption with extraction mass flow rate of high-back pressure condensing unit with intermediate extraction

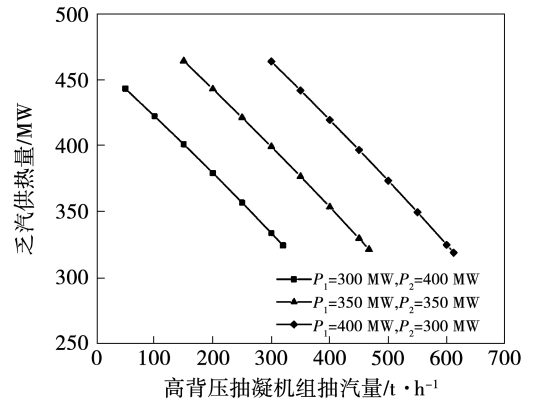


图 10 乏汽供热量随高背压抽凝机组供热抽汽量的变化关系

Fig. 10 Variations of exhaust steam heat supply with extraction mass flow rate of high-back pressure condensing unit with intermediate extraction

由图 9 和图 10 可知,当两台机组电负荷平均分配时,随着高背压抽凝机组供热抽汽量增大,乏汽供热量从 464.61 MW 不断减少至 321.85 MW,系统总热耗量则从 1 945.24 MW 增加至 1 989.27 MW。这是因为高背压抽凝机组相比于抽凝机组,乏汽被全部利用,无冷源损失。在满足热网参数条件下,当两台机组电功率一定时,高背压抽凝机组供热抽汽量越多,乏汽供热量就越少,抽凝机组供热抽汽量相应

也越少,从而导致其低压缸排汽量增多,冷源损失增大,总的热耗量增大。此外,由图 9 可知,随着高背压抽凝机组电功率比重每增加 50 MW,单位供热抽汽量引起的系统总热耗量变化量将减少约 0.031 9 MW。因此,各机组电负荷一定时,尽可能增大抽凝机组的抽汽供热量可减小系统总热耗量,提高机组经济性。

4.3 机组热电负荷优化分配结果

在各机组能耗特性及运行区间等约束条件下,系统经济性仍具有一定的优化空间。根据各工况运行数据拟合得各机组热耗量与其热电负荷关系为:

$$Q_{01}(P_1, G_1) = P_1 + G_1 \quad (20)$$

$$Q_{02}(P_2, G_2) = a + bP_2 + cG_2 + dP_2^2 + eG_2^2 + fP_2G_2 \quad (21)$$

抽凝机组热耗量拟合曲面如图 11 所示,该曲面相关系数如表 6 所示。

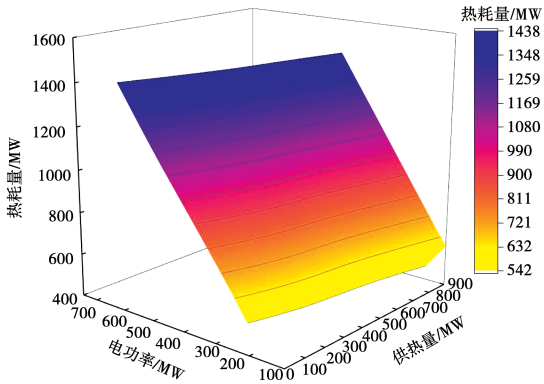


图 11 抽凝机组热耗量拟合曲面

Fig. 11 Fitting surface of heat consumption of condensing unit with intermediate extraction

将传统灰狼优化算法(GWO)与改进的灰狼优化算法(GGWO)同时应用于该 600 MW 双机热电联供系统的热电负荷分配中,迭代次数均设置为 500,种群数目为 1 000,进行 30 次独立实验。两台

机组的电负荷总指令为 700 MW,热负荷总指令为 917.4 MW。

表 6 各系数拟合值

Tab. 6 The fitting value of each coefficient

系数	拟合值
<i>a</i>	112.86
<i>b</i>	2.140 3
<i>c</i>	0.338 09
<i>d</i>	$3.952 8 \times 10^{-5}$
<i>e</i>	$-3.321 1 \times 10^{-4}$
<i>f</i>	$6.239 9 \times 10^{-4}$

两种算法的收敛曲线如图 12 所示。由图可知,两种算法在前期都收敛较快,但是 GGWO 收敛速度大于 GWO,达到最小值的迭代次数小于 GWO,最终的求解精度也略高于 GWO。

优化分配前后各机组热电负荷及系统总的热耗量如表 7 所示。采用 GWO 算法优化后,总热耗量降低 132.01 MW,采用 GGWO 算法优化后,总热耗量降低 136.95 MW。结果表明,两种优化算法均能有效降低系统总热耗量,提高系统经济性,且 GGWO 的求解精度略高于 GWO。

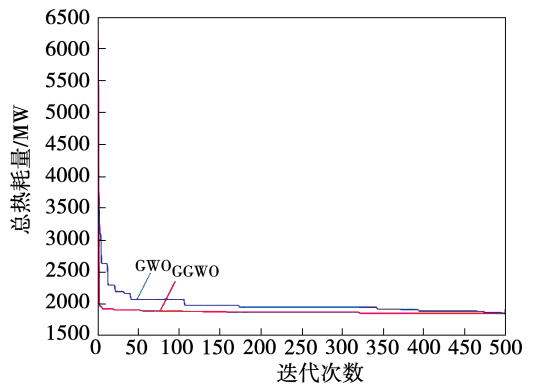


图 12 GWO 和 GGWO 的收敛曲线

Fig. 12 Convergence curves of GWO and GGWO

表 7 热电负荷优化分配前后结果对比(MW)

Tab. 7 Comparison of results before and after optimal distribution of thermoelectric load(MW)

机组	优化前				GWO 优化后				GGWO 优化后			
	电负荷	热负荷	热耗量	总热耗量	电负荷	热负荷	热耗量	总热耗量	电负荷	热负荷	热耗量	总热耗量
高背压抽凝	350	631.54	979.58	1 982.77	475.33	684.98	1 160.31	1850.76	493.63	707.00	1 200.63	1 845.82
抽凝	350	285.86	1 003.19		224.67	232.42	690.45		206.37	210.40	645.19	

5 结论

本文基于 EBSILON 仿真平台,建立了 600 MW 双机热电联供系统仿真模型,通过分析各机组热电耦合特性和系统运行特性,研究了基于改进灰狼算法的 600 MW 双机热电联供系统的智能优化方法,结论如下:

(1) 建立了 600 MW 双机热电联供系统仿真模型,且各典型工况下仿真误差均在 1% 以内,可以准确模拟各机组变工况特性。

(2) 总电负荷指令及乏汽供热温度是影响热电联供总热耗量的主要因素。各机组电负荷一定时,尽可能增大抽凝机组的抽汽供热量可减小系统总热耗量。

(3) 对比分析了基于传统灰狼优化算法(GWO)与改进灰狼优化算法(GGWO)的 600 MW 双机热电联供系统优化运行方法,两者均有效降低了系统总热耗量,但后者收敛速度更快,求解精度略高,对提高热电联供系统的经济效益具有非常重要的意义。

参考文献:

[1] 赵孟浩,沈 亭. 大容量空冷机组热电联产改造及供热能力分析[J]. 热力发电,2021,50(3):138-144.
ZHAO Meng-hao, SHEN Ting. Combined heat and power generation transformation and heating capacity analysis of air cooling units with large capacity[J]. Thermal Power Generation,2021,50(3):138-144.

[2] 刘晓乐. 多机组联合抽汽供热时热负荷分配优化研究[D]. 北京:华北电力大学,2020.
LIU Xiao-le. Study on optimization of heat load distribution in multi CHP units combined extraction heating[D]. Beijing:North China Electric Power University,2020.

[3] PAVEL R, KERTU L, ANDRES S, et al. Economic dispatch of CHP units through district heating network's demand-side management[J]. Energies,2021,14(15):4553-4553.

[4] 宫卫平,管洪军,李宏伟,等. 基于 EBSILON 仿真软件的联机供热负荷分配优化[J]. 山东大学学报(工学版),2021,51(4):1-7.
GONG Wei-ping, GUAN Hong-jun, LI Hong-wei, et al. Optimization of heating load distribution of combined unit based on EBSILON simulation software[J]. Journal of Shandong University(En-

gineering Science Edition),2021,51(4):1-7.

- [5] 盛 虎,谭延嘉,王国强. 基于配额优化的不同类型机组热电负荷分配研究[J]. 节能,2020,39(11):31-34.
SHENG Hu, TAN Yan-jia, WANG Guo-qiang. Research on thermo-electric load distribution of different types of units based on quota optimization[J]. Energy Conservation,2020,39(11):31-34.
- [6] 韩建春,孔梦婕,江建勋,等. 热电厂多元供热优化分配方法研究[J]. 内蒙古电力技术,2019,37(5):22-25.
HAN Jian-chun, KONG Meng-jie, JIANG Jian-xun, et al. Research on optimal distribution method of multi-element heating in thermal power plant[J]. Inner Mongolia Electric Power Technology,2019,37(5):22-25.
- [7] 吴 涛,赖 菲,刘 震,等. 热电联产机组在深度调峰模式下的负荷智能分配[J]. 热力发电,2021,50(9):1-10.
WU Tao, LAI Fei, LIU Zhen, et al. Intelligent load distribution of cogeneration units in deep peak regulation mode[J]. Thermal Power Generation,2021,50(9):1-10.
- [8] 李 军,陈 利,李华东,等. 基于遗传算法的多机型多热源复杂热电负荷优化分配方法[J]. 节能技术,2021,39(2):185-192.
LI Jun, CHEN Li, LI Hua-dong, et al. Optimal allocation of complex thermal and electrical loads with multiple models and multiple heat sources based on genetic algorithms[J]. Energy Conservation Technology,2021,39(2):185-192.
- [9] 王 珊,刘 明,严俊杰. 采用粒子群算法的热电厂热电负荷分配优化[J]. 西安交通大学学报,2019,53(9):159-166.
WANG Shan, LIU Ming, YAN Jun-jie. Optimizing heat-power load distribution of thermal power plants based on particle swarm algorithm[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2019,53(9):159-166.
- [10] 赵世飞. 燃煤高背压热电联产机组适用性研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
ZHAO Shi-fei. Adaption research on coal-fired combined heat and power plant with high back-pressure turbine[D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.
- [11] KANG Yan-chang, GUO Jin-rui, MAN Chang-ping, et al. Operation optimization of high back pressure series extraction steam heating unit under multivariate factors[J]. IOP Conference Series:Earth and Environmental Science,2019,227(3):032017.
- [12] 张晓凤,王秀英. 灰狼优化算法研究综述[J]. 计算机科学,2019,46(3):30-38.
ZHANG Xiao-feng, WANG Xiu-ying. Comprehensive review of grey wolf optimization algorithm[J]. Computer Science,2019,46(3):30-38.

(刘 颖 编辑)