文章编号:1674-7607(2026)10-0207-10 DOI:10.19805/j.cnki.jcspe.2026.250825

基于 CAES 的火储机组热力学分析及优化运行策略研究

陆树银[1], 吴清哲[1], 杨凯程[1], 顾煜炯[1,2]
(1.华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206;
2.华北电力大学 国家火力发电工程技术研究中心,北京 102206)

摘 要:为了实现机组的热电解耦,提出了一种热电联产机组耦合压缩空气储能的方法。基于 Ebsilon 软件搭建了 300 MW 热电联产机组的热力学模型,分析了机组热电可行域、能量利用效率以及㶲效率的变化;采用基于位置约束的粒子群算法,以典型日内煤耗最低为最优目标进行系统运行策略优化。结果表明:耦合压缩空气储能可以大幅增加机组热电可行域,提高机组的深度调峰能力,最多可增加 35.0 MW 的深度调峰功率;当锅炉出力与压缩空气储能模块的功率固定时,机组的供热负荷越低,其能量利用率变化越明显;机组的能量利用效率和㶲效率与储能功率呈负相关,与放能功率呈正相关;在典型日周期内,通过储放电功率调节可以使机组的能量利用效率最多提高 2.54%,㶲效率提高 1.41%;机组可节约标准煤炭 52.5 t/d,减少二氧化碳排放量 136.5 t/d。

关键词:热电联产;压缩空气储能;热电解耦;热电可行域
中图分类号:TK123 **文献标志码**:A **学科分类号**:470.30

Thermodynamic Analysis and Optimization Operation Strategy of a Thermal-storage Unit Based on CAES

LU Shuyin[1], *WU Qingzhe*[1], *YANG Kaicheng*[1], *GU Yujiong*[1,2]
(1. School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. National Thermal Power Engineering & Technology Research Center, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: To achieve the thermal-electric decoupling, a method of integrating a combined heat and power (CHP) unit with compressed air energy storage (CAES) was proposed. A thermodynamic model of a 300 MW CHP unit was developed based on Ebsilon software to analyze the variations in the unit's heat-power feasible region, energy utilization efficiency, and exergy efficiency. Additionally, a particle swarm optimization (PSO) algorithm based on position constraints was adopted to optimize the system's operation strategy with the objective of minimizing overall coal consumption. Results show that coupling with CAES can significantly expand the heat-power feasible region and enhance the deep peak shaving capability of the unit, providing a maximum increase of 35.0 MW in deep peak shaving power. When the boiler output and the power of the CAES module are fixed, the lower the heating load of the unit, the more significant the

收稿日期:2025-12-12 **修订日期**:2025-12-21
基金项目:北京市自然科学基金资助项目(3172031);中国华电集团公司科技资助项目(CHDKJ21-02-163)
作者简介:陆树银(1996—),男,浙江绍兴人,博士研究生,研究方向为火电厂机组灵活性改造。
顾煜炯(通信作者),教授,博士生导师,博士,E-mail:gyjncepur@163.com。

change in its energy utilization rate. Both the energy utilization efficiency and exergy efficiency of the unit are negatively correlated with charging power and positively correlated with discharging power. Within a typical daily cycle, the adjustment of charging and discharging power can increase the unit's energy utilization efficiency by up to 2.54% and the exergy efficiency by 1.41%. Furthermore, the unit can save 52.5 t/d of standard coal and reduce CO_2 emissions by 136.5 t/d.

Key words: combined heat and power; compressed air energy storage; heat-power decoupling; heat-power feasible region

全球能源朝着绿色、低碳、可持续方向发展[1-2]。我国为了推动“碳达峰”、“碳中和”进程,逐年增加可再生能源的装机容量,截至 2024 年 12 月我国可再生能源装机规模已达到 18.89 亿 kW,占全国总装机容量的 56%[3]。大量间歇性、波动性的可再生能源给电网调峰带来了巨大的挑战,尤其是在我国东北、华北等集中供热地区,热电联产机组需具有更高的灵活性,以实现热电解耦[4-5]。

目前,热电解耦技术主要有以下改造方案:热电联产机组的本体改造[6-7]、耦合电热转化设备[8-9]以及配置储能设备[10-11]等。在本体改造方面,栾睎麟等[12]建立高背压机组余热梯级利用运行方案,分析了热网供回水温度、高背压运行对机组负荷分配的影响。梁占伟等[13]建立了高背压供热机组的变工况模型,分析了主蒸汽流量对供热㶲效率、热耗率的影响。Han 等[14]对低压缸零出力运行的安全性进行研究,分析了低压缸在小流量下的流场特性。

在耦合电热转化设备方面,Liu 等[15]对热电联产机组耦合电锅炉和电热泵的运行策略进行研究,基于粒子集群算法进行策略分析。Zhang 等[16]提出了基于电热泵辅助的热电联产系统,该系统可以使供热能力提高 6.0%,新能源上网功率增加 59.0 MW。

热电联产机组本体改造需要对汽轮机低压缸通流部分进行改造,容易出现叶片振动、热应力过大的情况,不利于运行的安全性[17]。耦合电热转化设备的本质是将高品位的电能转化为低品位的热能,不符合能量利用的原则[18]。随着新型储能技术的出现以及储能效率的提高,热电联产机组耦合储能设备是较为便捷、安全、高效的方案,尤其是响应快速、储能容量大、零污染的压缩空气储能系统(CAES)[19]。Xiao 等[20]建立了压缩空气储能的热力学模型,并对膨胀机的进口压力、膨胀比等关键参数进行敏感性分析。Hao 等[21]对热电联产机组耦合压缩空气储能的运行特性进行研究,结果表明压缩空气储能可以增加机组的灵活性,系统的能量利用效率最高可达 88.1%。贺新等[22]提出一种新型双罐式压缩空气储能系统,研究了进汽温度、进/出汽压力对系统性能的影响,能量效率相比传统系统有所提升。卢绪祥等[23]基于 MATLAB/Simulink 平台建立了压缩空气储能变工况运行的动态模型,分析了储罐内温度场和压力场的变化特性,并研究外界扰动对耦合系统的影响。肖焕秀[24]针对 660 MW 燃煤机组耦合压缩空气储能系统的模型开展参数敏感性研究,验证了热电联产机组与压缩空气储能系统耦合可以显著提高机组灵活性。Li 等[25]对压缩空气储能的热力学特性和经济性进行了分析。何青等[26]建立了基于全寿命周期成本的压缩空气储能系统储气装置成本模型,对项目前期和运行后期进行全流程的成本核算。

目前的研究更多侧重于压缩空气储能本体循环效率的提高以及典型工况下的能效特性,缺少针对耦合系统在变工况下的热力学特性的研究,且对典型日内耦合系统的运行调整策略研究较少。为了更好地分析耦合压缩空气储能系统的能效机理以及运行策略优化,基于 Ebsilon 软件搭建了耦合系统的热力学模型,分析系统在约束边界条件下的热电解耦能力以及能耗特性;并且以典型日内运行总煤耗最低为优化目标,采用基于位置约束的粒子群算法进行调节策略优化,指导耦合系统的运行模式。

1 案例建模及边界条件

常规热电联产机组的运行模式为“以热定电”,机组的上网功率 W_u 受到供热负荷 Q_u 的限制,导致热电耦合过强。为了提高机组的灵活性,增大可再生能源的上网电量,提出了耦合压缩空气储能的热电联产系统。工艺流程如图 1 所示,汽轮机中压缸抽汽的热能 Q_t 经过热网加热器加热采暖回水。在深度调峰期间,单靠机组自身的调节特性不能满足电网调度要求时,系统进入储电模式,机组的上网功率 W_u 为主机发电机功率 W_g 减去压缩空气储能功率 P_c,将多余的电能转化为压力能和热能进行储

存；发电高峰期系统进入放电模式，机组的上网功率 W_u 为 W_g 与压缩空气放电功率 P_t 之和，此时储存的压力能、热能转化为电能。系统通过压缩空气储能模块实现电能在时间上的迁移，以增加热电联产机组的运行范围，提高机组的灵活性。

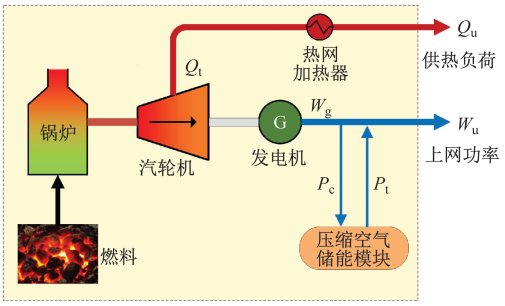


图 1　热电联产机组耦合压缩空气储能流程图

Fig. 1　Flow diagram of CHP-CAES

1.1　系统建模

案例机组型号为 N300-16.67/538/538 的亚临界中间再热机组，额定主蒸汽质量流量为 890.53 t/h，设计背压为 4.9 kPa，采暖蒸汽取自汽轮机的中压缸排汽，热网供、回水温度分别为 90、50 ℃。基于 Ebsilon 软件构建了 300 MW 热电联产机组的变工况模型，根据汽轮机热平衡图，通过修正模型中锅炉的滑压曲线和汽轮机各级的缸效率曲线保证变工况模拟的正确性，改造前系统的工艺流程如图 2 所示。

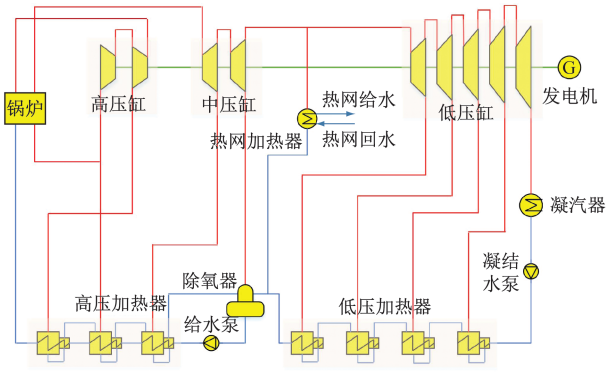


图 2　改造前系统的工艺流程

Fig. 2　Process flow of the system before retrofit

汽轮机级组变工况运行的参数满足弗留格尔公式。

$$\frac{q_{m,1}}{q_m}=\sqrt{\frac{p_{01}^2-p_{g1}^2}{p_0^2-p_g^2}}\cdot\sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \tag{1}$$

式中：q_m、$q_{m,1}$ 分别为级组变工况前后的质量流量，kg/s；p_0 和 p_{01} 分别为级组变工况前后的入口压力，Pa；p_g 和 p_{g1} 分别为级组变工况前后的出口压力，Pa；T_0 和 T_{01} 分别为级组变工况前后的入口温度，K。

锅炉输入汽轮机的热功率 Q_c 为

$$Q_c=q_{m,z}(h_{lh}-h_{lc})+q_{m,r}(h_{rh}-h_{rc}) \tag{2}$$

式中：$q_{m,z}$ 和 $q_{m,r}$ 分别为主蒸汽、再热蒸汽质量流量，kg/s；h_{lh} 和 h_{rh} 分别为主蒸汽、再热蒸汽焓，kJ/kg；h_{lc} 和 h_{rc} 分别为锅炉给水、高压缸排汽焓，kJ/kg。

锅炉的煤耗 B_b 为

$$B_b=\frac{Q_c}{\eta_p\cdot\eta_b\cdot L_{HV}} \tag{3}$$

式中：η_p 和 η_b 分别为管道效率和锅炉效率，%；L_{HV} 为煤的低位发热量，kJ/kg。

为了验证 Ebsilon 软件建模的准确性，对机组的 5 个基础工况进行验证，其中 VWO 为阀门全开工况，THA 为热耗率保证工况。模拟结果如表 1 所示，模拟数据的最大误差小于 1%，验证了参考机组模型的正确性。

表 1　模型验证

Tab. 1　Model validation

工况	实际功率/MW	模拟功率/MW	相对误差/%
VWO	340.00	339.60	0.12
100%THA	300.00	299.53	0.16
75%THA	225.00	223.82	0.52
50%THA	150.00	150.01	0.01
30%THA	90.00	89.15	0.94

图 3 为压缩空气储能模块内部的流程图，该模块由两级压缩、两级膨胀、级间换热组成[27]。储能时常温常压的空气依次通过低压压缩机(LPC)和高压压缩机(HPC)进行压缩。冷罐中的冷水进入级间冷却器(IC)回收压缩机出口高温空气的热量，减温后的高压空气储存在空气罐中，高温热水储存在热罐中。放能时储气罐内高压空气先经过出口节流阀调压至额定参数，然后依次进入高压膨胀机(HPT)和低压膨胀机(LPT)进行做功发电。热罐

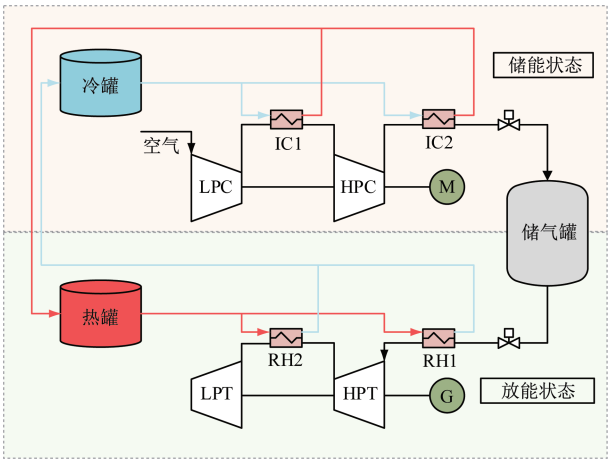


图 3　压缩空气储能模块流程图

Fig. 3　Flow diagram of CHP unit

中的热水进入再热器(RH)加热膨胀机入口的高压空气。表 2 为压缩空气储能模块的设计参数。

表 2 压缩空气储能参数

Tab. 2 CAES parameters

参数	数值
压缩机最大总耗功/MW	35.0
膨胀机最大总功率/MW	35.0
最大储能容量/(MW·h)	320.0
压缩机、膨胀机等熵效率/%	85.0
储气罐最大储气压力/MPa	7.2
节流阀后压力/MPa	4.2
换热器端差/K	10.0
空气入口压力/MPa	0.1
空气入口温度/K	298.2

第 i 级压缩机出口空气温度 $T_{\mathrm{cout},i}$ 为

$$T_{\mathrm{cout},i}=T_{\mathrm{cin},i}\times\left[1+\frac{1}{\eta_{\mathrm{c},i}}(\varepsilon_i^{\frac{k-1}{k}}-1)\right] \tag{4}$$

式中:$T_{\mathrm{cin},i}$ 为第 i 级压缩机进口空气温度,K;$\eta_{\mathrm{c},i}$ 为第 i 级压缩机的等熵效率,%;ε_i 为第 i 级压缩机的压比;k 为空气的绝热指数。

压缩机的总耗电功率 P_{c} 为

$$P_{\mathrm{c}}=\eta_{\mathrm{c}}q_{m,\mathrm{c}}\sum_{i=1}^{2}(h_{\mathrm{cout},i}-h_{\mathrm{cin},i}) \tag{5}$$

式中:η_{c} 为电动机的效率,%;$q_{m,\mathrm{c}}$ 为压缩机进口空气质量流量,kg/s;$h_{\mathrm{cin},i}$ 和 $h_{\mathrm{cout},i}$ 分别为第 i 级压缩机的进出口空气焓,kJ/kg。

第 i 级膨胀机出口空气温度 $T_{\mathrm{tout},i}$ 为

$$T_{\mathrm{tout},i}=T_{\mathrm{tin},i}\times[1-\eta_{\mathrm{t},i}(1-\beta_i^{\frac{1-k}{k}})] \tag{6}$$

式中:$T_{\mathrm{tin},i}$ 为第 i 级膨胀机进口空气温度,K;$\eta_{\mathrm{t},i}$ 为第 i 级膨胀机的等熵效率,%;β_i 为第 i 级膨胀机的膨胀比。

膨胀机的总发电功率 P_{t} 为

$$P_{\mathrm{t}}=\eta_{\mathrm{g}}q_{m,\mathrm{t}}\sum_{i=1}^{2}(h_{\mathrm{tout},i}-h_{\mathrm{tin},i}) \tag{7}$$

式中:η_{g} 为发电机的发电效率,%;$q_{m,\mathrm{t}}$ 为膨胀机进口空气质量流量,kg/s;$h_{\mathrm{tin},i}$ 和 $h_{\mathrm{tout},i}$ 分别为第 i 级膨胀机的进出口空气焓,kJ/kg。

1.2 边界条件

图 4 为热电联产机组的热电可行域,机组的发电功率 W_{g} 和供热功率 Q_{t} 受到以下条件的限制:线段 AB 所代表的 VWO 工况对应的锅炉出力;线段 BC 所代表的低压缸最小冷却流量;线段 DC 所代表的 30%THA 工况对应的锅炉出力。

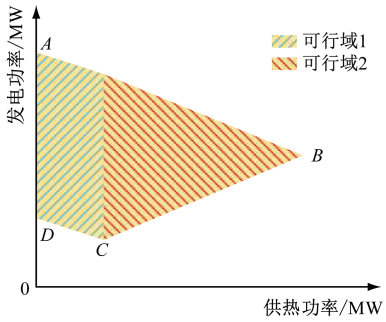


图 4 热电联产机组的边界条件

Fig. 4 Boundary conditions of the CHP unit

当机组的供热功率与发电功率位于可行域 1 时($0\leqslant Q_{\mathrm{t}}\leqslant Q_{\mathrm{t},C}$,$Q_{\mathrm{t},C}$ 为点 C 处的供热功率),供热负荷与发电功率的关系为

$$k_{DC}\cdot Q_{\mathrm{t}}+W_{\mathrm{g},D}\leqslant W_{\mathrm{g}}\leqslant k_{AB}\cdot Q_{\mathrm{t}}+W_{\mathrm{g},A} \tag{8}$$

式中:k_{AB}、k_{DC} 分别为线段 AB、DC 的斜率;$W_{\mathrm{g},A}$、$W_{\mathrm{g},D}$ 分别为点 A、D 处的发电功率,kW。

当机组的供热功率与发电功率位于可行域 2 时($Q_{\mathrm{t},C}<Q_{\mathrm{t}}\leqslant Q_{\mathrm{t},B}$,$Q_{\mathrm{t},B}$ 为点 B 处的供热功率),供热负荷与发电功率的关系为

$$k_{BC}\cdot(Q_{\mathrm{t}}-Q_{\mathrm{t},C})+W_{\mathrm{g},C}\leqslant W_{\mathrm{g}}\leqslant k_{AB}\cdot Q_{\mathrm{t}}+W_{\mathrm{g},A} \tag{9}$$

式中:k_{BC} 为线段 BC 的斜率;$W_{\mathrm{g},C}$ 为点 C 处的发电功率,kW。

压缩空气储能模块的功率需满足以下边界条件:

$$\begin{cases}0\leqslant P_{\mathrm{c}}\leqslant P_{\mathrm{c,max}}\\0\leqslant P_{\mathrm{t}}\leqslant P_{\mathrm{t,max}}\end{cases} \tag{10}$$

式中:$P_{\mathrm{c,max}}$ 为压缩空气储能模块的最大压缩功率,kW;$P_{\mathrm{t,max}}$ 为压缩空气储能模块的最大发电功率,kW。

在完整储放电周期 T 内,压缩空气储能模块需满足总的能量守恒。

$$\begin{cases}T=T_1+T_2\\\int_0^{T_2}P_{\mathrm{t}}\cdot\mathrm{d}t=\eta_{\mathrm{caes}}\cdot\int_0^{T_1}P_{\mathrm{c}}\cdot\mathrm{d}t\end{cases} \tag{11}$$

式中:T_1 为完整周期内储电时间段,s;T_2 为完整周期内放电时间段,s;η_{caes} 为压缩空气储能的效率,%;t 为时间,s。

2 变工况能耗特性

2.1 热电可行域

图 5 为 300 MW 热电联产机组耦合压缩空气储能的热电可行域。当机组需要深度调峰使得更多新能源上网时,常规热电联产机组的灵活性不高。当基础供热负荷为 250 MW 时,机组发电功率只能

在 P_1(281.7 MW)与 P_2(152.5 MW)之间调节。而压缩空气储能可以使机组发电量在时间上进行迁移，扩宽热电可行域范围，在满足 250 MW 供热负荷的前提下，机组的上网电量可降低至 P_4(117.5 MW)，不仅可以增加 35 MW 的新能源上网功率，还可以获得调峰补偿收益。在放电状态下的热电可行域，在供电尖峰期可通过释放压缩空气储能模块内部的能量，增加机组的上网功率。在满足基础 250 MW 供热负荷的前提下，机组的上网功率可增加到 P_3(316.7 MW)。

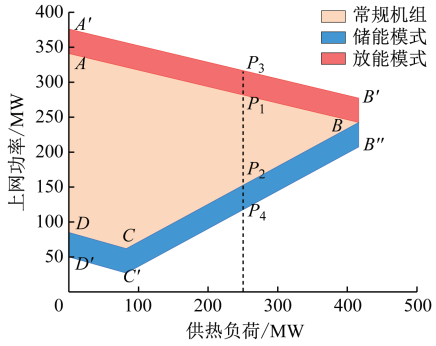


图 5　热电联产机组耦合压缩空气储能的热电可行域

Fig. 5　Heat-power feasible region of CHP-CAES

为了更好地分析压缩空气储能对热电联产机组灵活性的提升，引入无纲量数最大热电比 v，该比值越大，表明机组的深度调峰性能越好。图 6 为改造前后机组最大热电比随供热负荷的变化情况，耦合压缩空气储能使机组的最大热电比明显提高，且供热负荷越小，机组的最大热电比增幅越大。与常规机组相比，当机组供热负荷为 100 MW 时耦合压缩空气储能后机组的最大热电比从 1.4 提升到 2.7，深度调峰能力提高了 92.9%；当机组供热负荷为 400 MW 时耦合压缩空气储能后机组的最大热电比仅从 1.7 提升到 2.0，深度调峰能力只提高 17.6%。

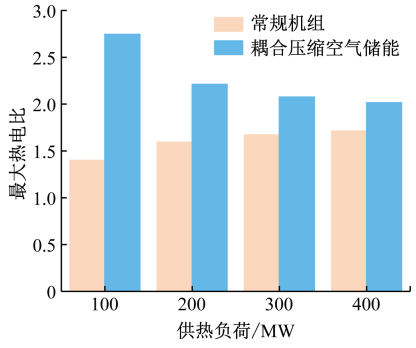


图 6　最大热电比的变化特性

Fig. 6　Variation characteristics of maximum heat-to-power ratio

2.2　能量利用效率特性

图 7 为热电联产机组耦合压缩空气储能在变工况运行下的能量利用率特性。区域 *A-B-C-D* 为不投入压缩空气储能时机组能量利用率的变化情况，当锅炉出力固定时机组的能量利用率随着供热负荷的增加而增加，VWO 工况下机组的供热负荷从点 A(0,339.6)变化到点 B(416.3,242.4)时，机组的能量利用效率从 41.8%上升到 80.7%。

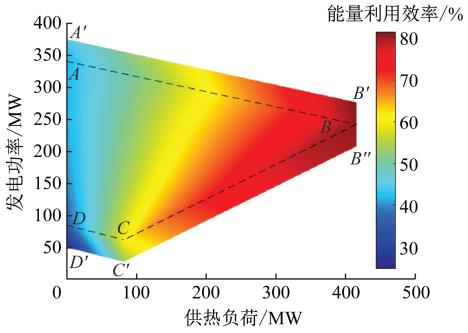


图 7　变工况能量利用效率特性

Fig. 7　Energy utilization efficiency characteristics under variable operating conditions

从整体上看，当供热负荷固定时机组的能量利用率随着放电功率的增加而增加，随着储能功率的增加而减少。区域 *A-B-B′-A′* 为放能模式下机组的能量利用率变化情况，当锅炉出力与放电功率固定时，机组的供热负荷越低，其能量利用效率增加更明显。VWO 工况下放电功率从点 A(0,339.6)变化到点 A'(0,374.6)时，机组的能量利用效率从 41.8%上升到 44.2%，增加了 2.4%；而从点 B(416.3,242.4)变化到点 B'(416.3,277.4)时，机组的能量利用效率仅从 80.7%上升到 81.5%，只增加了 0.8%。区域 *B-C-D-D′-C′-B″* 为储能模式下机组的能量利用率变化情况，当锅炉出力与储电功率固定时，机组的供热负荷越低，其能量利用率减少更明显。30%THA 工况下储电功率从点 D(0,89.2)变化到点 D'(0,54.2)时，机组的能量利用效率从 35.7%下降到 24.8%，下降了 10.9%；而从点 C(82.6,62.0)变化到点 C'(82.6,27.0)时，机组的能量利用效率仅从 60.0%下降到 53.4%，只下降了 6.6%。

2.3　㶲效率特性

图 8 为热电联产机组耦合压缩空气储能在变工况运行下的㶲效率特性。机组不投入压缩空气储能模块，在锅炉负荷固定的情况下，机组的㶲效率随着供热功率的增加而减少。从点 A(0,339.6)变化到点 B(416.3,242.4)时，机组的㶲效率从 41.0%下降到 35.2%，虽然随着供热功率的增加，机组对外输出的总能量变大，但其总的能量品位大幅降低。当机组运行在放能模式时，机组的㶲效率随着放电功率的增加而增加，从点 B(416.3,242.4)变化到点

B'时(416.3,277.4),机组的㶲效率从 35.2%上升到 37.7%。当机组运行在储能模式时,机组的㶲效率随着储能功率的增加而减少,从点 B(416.3,242.4)变化到点 B''时(416.3,207.4),机组的㶲效率从 35.2%下降到 32.4%。

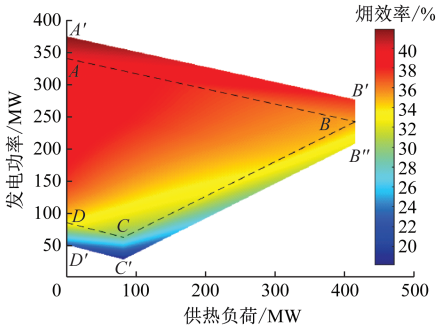


图 8 变工况下㶲效率特性

Fig. 8 Exergy efficiency characteristics under variable operating conditions

3 典型日优化分析

3.1 优化策略

图 9 为典型日下的供热负荷和发电功率,假定深度调峰期间电网需求的目标发电功率仅为 120 MW,此时单靠机组自身的调节能力不能将发电功率压低到目标值,这不仅减少了新能源的上网电量,还会面临调峰考核,降低机组的经济性。图 10 为简化后的供热负荷和发电功率。以典型日内整体煤耗最优为目标参数,用平均值简化时间段内的负荷值,通过调节压缩空气储能的储/放电功率,使机组在满足调峰需求和供热负荷的前提下获得最优的煤耗。

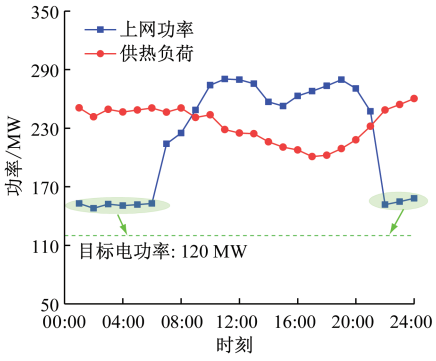


图 9 典型日的负荷数据

Fig. 9 Load data of a typical day

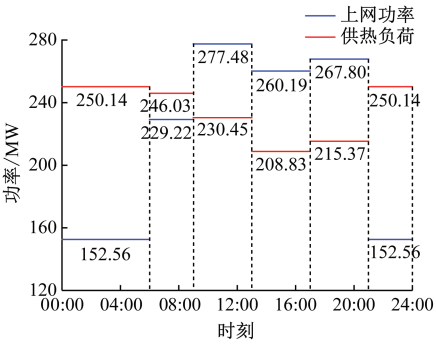


图 10 简化后典型日数据

Fig. 10 Simplified typical day data

表 3 为典型日下热电联产机组耦合压缩空气储能的参数情况,其中 $P_{t,i}$($i=1,2,3,4$)为系统在对应时间段内压缩空气储能模块的放能功率。由于机组目标的上网电量和供热功率为确定值,当压缩空气储能模块的储/放电功率确定时,机组的供热抽汽量以及主机发电功率也确定,机组的煤耗也确定。

表 3 典型日下热电联产机组耦合压缩空气储能参数

Tab. 3 Parameters of CHP-CAES for a typical day 单位:MW

参数	00:00—06:00	06:00—09:00	09:00—13:00	13:00—17:00	17:00—21:00	21:00—24:00
W_u	120.00	229.22	277.48	260.19	267.80	120.00
W_g	152.56	229.22−$P_{t,1}$	277.48−$P_{t,2}$	260.19−$P_{t,3}$	267.80−$P_{t,4}$	152.56
P_c	32.56	0	0	0	0	32.56
P_t	0	$P_{t,1}$	$P_{t,2}$	$P_{t,3}$	$P_{t,4}$	0
Q_u	250.14	246.03	230.45	208.83	215.37	250.14

采用基于位置约束的粒子群算法进行优化分析,位置约束是指在循环周期内压缩空气储能模块的进出口能量流须守恒,图 11 为确定最优运行策略的逻辑框图。

为了防止陷入局部最优解,设置粒子群的规模 $N=100$;最大迭代次数 $u=800$;$\boldsymbol{v}$ 为粒子群的速度向量;放能状态存在 4 个未知的放能功率,但是受到能量流守恒的约束,实际粒子维度 $D=3$。

通过调节 $P_{t,1}$、$P_{t,2}$、$P_{t,3}$、$P_{t,4}$ 的功率,使机组在典型日内煤耗最低,该优化目标可描述为

$$\min(m_{\text{total}})=\min\left(\sum_{i=1}^{n}q_{m,\text{b},i}\cdot\Delta t_i+\sum_{j=1}^{m}q_{m,\text{b},j}\cdot\Delta t_j\right) \tag{12}$$

$$\text{s.t.}\begin{cases}P_{t,i},P_{c,j}\in[0,35]\\ \sum_{i=1}^{n}P_{t,i}\cdot\Delta t_i=\eta_{\text{caes}}\sum_{j=1}^{m}P_{t,j}\cdot\Delta t_j\end{cases}$$

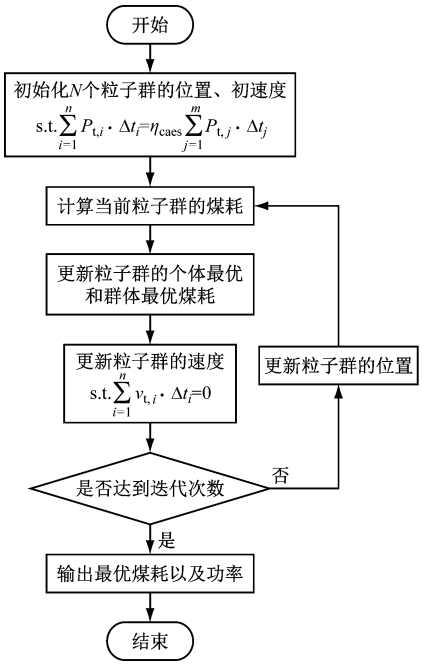


图 11　Matlab 中最优运行策略的逻辑流程

Fig. 11　Logic flowchart of optimal operating strategy in Matlab

式中：m_{total} 为机组在典型日内燃煤的消耗量，kg；$q_{m,b,i}$ 为机组在放能状态下第 i 个时刻燃煤的消耗量，kg/s；Δt_i 为机组在放能状态下第 i 时刻的持续时间，s；$q_{m,b,j}$ 为机组在储能状态下第 j 时刻燃煤的消耗量，kg/s；Δt_j 为机组在储能状态下第 j 时刻的持续时间，s；$P_{c,j}$ 为机组压缩空气储能模块第 j 时刻的储能功率，MW；m、n 分别为储能、放能状态对应的时间段序列。

3.2　优化结果

图 12 为热电联产机组耦合压缩空气储能在典型日下的煤耗最优控制策略。00:00－06:00 以及 21:00－24:00 为储电工况，压缩空气储能模块的储能功率为 32.56 MW，通过储能将改造前机组的最低 152.56 MW 上网功率降低成电网所需的 120 MW 深调功率。在完整典型日周期内共储电 293.04 MW·h，不仅可增加深调期间新能源的上网电量，还能获得调峰补贴。

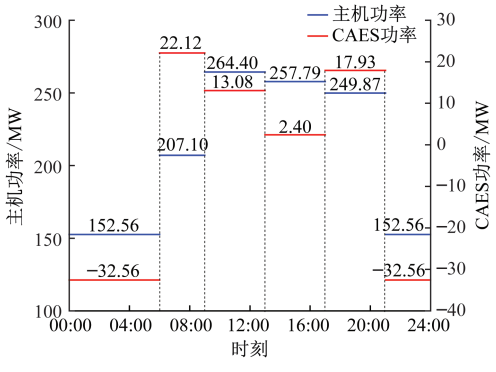


图 12　耦合压缩空气储能的机组优化策略

Fig. 12　Optimization strategy of the unit coupled with CAES

06:00－21:00 为放电工况，通过调节放电功率使机组在典型日周期内整体煤耗最低，06:00－09:00 机组的放电功率较高，为 22.12 MW，13:00－17:00 放电功率较低，仅为 2.40 MW，在非调峰期共释放 200.00 MW·h 的电能。当机组需要及时响应电网顶峰需求时，可通过调整运行模式获得额外的容量电价收益。

图 13 为典型日内储气罐的流量和压力特性变化情况。储电期间储气罐内进入质量流量为 54.23 kg/s 的高压空气，随着储电的进行，罐内压力逐渐上升，在 06:00 时储气罐内部压强达到最大值 6.95 MPa。放电期间通过调节阀控制储气罐出口高压空气的流量，在满足供热负荷的前提下可以减小锅炉出力，获得更高的经济效益。

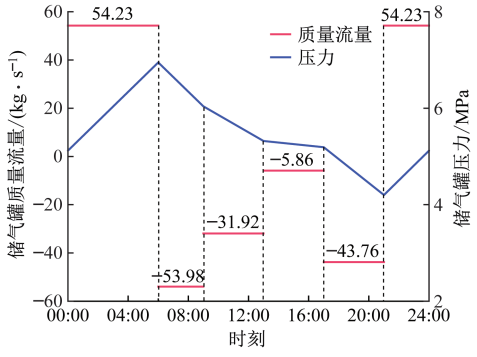


图 13　典型日内储气罐变工况特性

Fig. 13　Characteristics of air storage tank in a typical day under variable operating conditions

图 14 和图 15 为改造前后机组的能量利用效率和㶲效率变化情况，在调峰期由于机组向压缩空气储能模块储能 32.56 MW，导致机组的能量利用效率降低了 1.61%，㶲效率下降了 4.07%。但是，机组的上网电量从 152.56 MW 降低到 120.00 MW，增加了新能源的上网电量，获得了调峰收益。在非调峰期压缩空气储能模块释放电能，可以降低主机

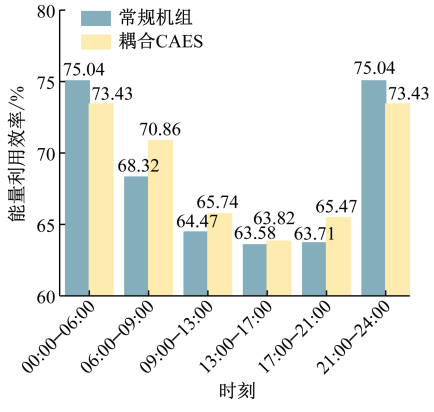


图 14　机组的能量利用效率变化

Fig. 14　Variation of energy utilization efficiency of the unit

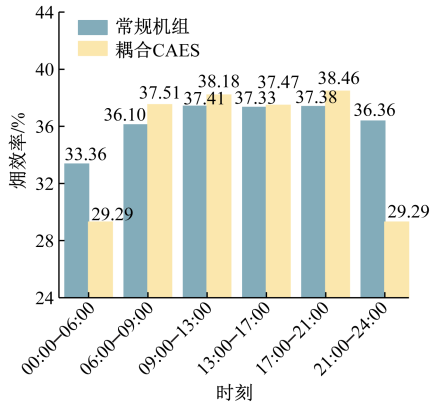


图 15 机组的㶲效率变化

Fig. 15 Variation of exergy efficiency of the unit

侧的发电功率,减少非调峰期机组的煤耗。机组的能量利用效率和㶲效率大幅提升,能量利用效率最多提高了 2.54%,㶲效率最多提高了 1.41%。典型日内耦合压缩空气储能不仅可以减少 52.5 t 的标准煤炭燃烧,减少 136.5 t 的二氧化碳排放量,还能提高机组的深调能力,增加 293.04 MW·h 的新能源上网电量。

4 结论

(1) 热电联产机组耦合压缩空气储能可以大幅度扩宽机组的热电可行域。当基础供热负荷为 250 MW 时,机组的上网电量从 152.5 MW 降低到 117.5 MW,增加了机组深度调峰的能力。机组供热负荷越小,压缩空气储能对机组深度调峰的影响越大。

(2) 热电联产机组的能量利用效率随着供热功率的增大而提高,㶲效率随着供热负荷的增大而降低。当供热负荷固定时机组的能量利用率和㶲效率随着放电功率的增大而提高,随着储电功率的增大而降低;且当锅炉出力与压缩空气储能模块的功率固定时,机组的供热负荷越低,其能量利用率变化越明显。

(3) 在典型日参数下,基于位置约束的粒子群算法搭建了机组最优煤耗的数学模型,通过调节压缩空气储能模块的功率不仅可以获得调峰补贴,还可以减少整体的煤耗,在非调峰期机组的能量利用效率最多可提高 2.54%,㶲效率最多可提高 1.41%。每天可以减少 52.5 t 的标准煤炭的燃烧,减少 136.5 t 的二氧化碳排放量。

参考文献:

[1] 范高峰,叶茂菁,孙浩家,等. 新型光煤互补发电系统动态特性与调峰性能研究[J]. 动力工程学报,2024,44(12):1835-1844.
FAN Gaofeng, YE Maojing, SUN Haojia, et al. Study on dynamic characteristics and peak regulation performance of the new solar-coal complementary power generation system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(12): 1835-1844.

[2] 肖智睿,陈耀文,王登甲,等. 太阳能富集区光伏余电蓄热系统优化配置研究[J]. 太阳能学报,2025,46(9):474-483.
XIAO Zhirui, CHEN Yaowen, WANG Dengjia, et al. Optimal configuration of photovoltaic residual electricity thermal conversion and heat storage system in solar energy enrichment areas[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(9): 474-483.

[3] 国家能源局. 2024 年可再生能源并网运行情况[R]. 北京:国家能源局,2025.
National Energy Administration. Grid-connected operation of renewable energy in 2024[R]. Beijing: National Energy Administration, 2025.

[4] 米阳,何进,卢长坤,等. 计及新能源并网的火储联合调峰运行优化研究[J]. 中国电机工程学报,2025,45(5):1704-1715.
MI Yang, HE Jin, LU Changkun, et al. Research on optimized operation of combined heat and power with energy storage for peak shaving considering renewable energy integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(5): 1704-1715.

[5] 孙健,吴宝钢,王国顺,等. 热电联产机组灵活性提升方法研究综述[J]. 动力工程学报,2025,45(4):626-634,644.
SUN Jian, WU Baogang, WANG Guoshun, et al. Review of research on enhance flexibility methods of combined heat and power units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(4): 626-634, 644.

[6] 张婉滢,金晶,解小军,等. 熔盐储热辅助低压缸零出力机组深度调峰的应用分析[J]. 太阳能学报,2025,46(1):279-287.
ZHANG Wanying, JIN Jing, XIE Xiaojun, et al. Application analysis of deep peak shaving of low-pressure cylinder zero-output unit assisted by molten salt heat storage[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2025, 46(1): 279-287.

[7] 胡建东,穆祺伟,王耀文,等. 低压缸切缸工况下流动与鼓风特性数值研究[J]. 热能动力工程,2024,39(3):132-141.
HU Jiandong, MU Qiwei, WANG Yaowen, et al.

Numerical study on flow and windage characteristics in low pressure cylinder under cylinder cut-off conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(3): 132-141.

[8] 刁涵彬，李培强，王继飞，等. 考虑电/热储能互补协调的综合能源系统优化调度[J]. 电工技术学报，2020，35(21)：4532-4543.
DIAO Hanbin, LI Peiqiang, WANG Jifei, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering complementary coordination of electric/thermal energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4532-4543.

[9] 杨德友，西禹霏，蔡国伟，等. 电热泵与燃气锅炉辅助方式下电-热-风耦合调度策略研究[J]. 太阳能学报，2019，40(10)：2986-2993.
YANG Deyou, XI Yufei, CAI Guowei, et al. Study on coupling dispatch of combined power-heat-wind system with electric heat pump and gas-fired boiler [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2019, 40(10): 2986-2993.

[10] 周霞，李建锋，周宏，等. 耦合蒸汽压缩与储热的燃煤热电联产机组调峰性能研究[J]. 中国电机工程学报，2025，45(1)：194-205.
ZHOU Xia, LI Jianfeng, ZHOU Hong, et al. Research on peak shaving performance of coal-fired cogeneration unit coupled with vapor compression and heat storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(1): 194-205.

[11] 李思佳，王嘉璐，郑立星，等. 火电机组耦合液态 CO_2 储能系统性能分析[J]. 动力工程学报，2025，45(8)：1269-1277.
LI Sijia, WANG Jialu, ZHENG Lixing, et al. Performance analysis of a coal-fired power plant coupled with liquid carbon dioxide energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2025, 45(8): 1269-1277.

[12] 栾睎麟，马剑龙，聂深强，等. 大型高背压热电联产机组供热季运行分析[J]. 热能动力工程，2024，39(9)：96-103.
LUAN Xilin, MA Jianlong, NIE Shenqiang, et al. Operation analysis of large high back pressure cogeneration unit in heating season[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 96-103.

[13] 梁占伟，张磊，徐亚涛，等. 双机联调抽汽-高背压联合供热分析与优化[J]. 动力工程学报，2020，40(3)：247-255.
LIANG Zhanwei, ZHANG Lei, XU Yatao, et al. Exergy analysis and optimization of steam extraction-high back pressure combined heating for dual cogeneration units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(3): 247-255.

[14] HAN Xu, ZHU Qiuliang, GUAN Jiandong, et al. Research on wet steam condensation flow characteristics of steam turbine last stage under zero output condition[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022, 179: 107691.

[15] LIU Ming, WANG Shan, YAN Junjie. Operation scheduling of a coal-fired CHP station integrated with power-to-heat devices with detail CHP unit models by particle swarm optimization algorithm[J]. Energy, 2021, 214: 119022.

[16] ZHANG Youjun, GE Zhihua, YAN Yunxi, et al. Carbon reduction and flexibility enhancement of the CHP-based cascade heating system with integrated electric heat pump[J]. Energy Conversion and Management, 2023, 280: 116801.

[17] 宫啸宇，蒋楠，戴义平. 深度调峰运行时汽轮机低压叶片的安全性分析[J]. 热能动力工程，2023，38(9)：21-29.
GONG Xiaoyu, JIANG Nan, DAI Yiping. Safety analysis of low-pressure turbine blades during deep peak shaving[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 21-29.

[18] 陆树银. 热电联产机组耦合螺杆机和储热系统研究[D]. 北京：华北电力大学，2022.
LU Shuyin. Research on coupling of screw expander and heat storage system in combined heat and power units[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022.

[19] 侯磊，王子驰，李营超，等. 压缩空气储能系统分析及多目标优化[J]. 储能科学与技术，2021，10(1)：379-384.
HOU Lei, WANG Zichi, LI Yinchao, et al. Analysis and multi-objective optimization of CAES system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 379-384.

[20] XIAO Feng, CHEN Wei, ZHANG Bin, et al. A novel constant power operation mode of constant volume expansion process for AA-CAES: regulation strategy, dynamic simulation, and comparison[J]. Energy, 2023, 284: 128594.

[21] HAO Jiahao, ZHENG Pingyang, LI Yanan, et al. Study on the operational feasibility domain of combined heat and power generation system based on compressed carbon dioxide energy storage[J]. Energy, 2024, 291: 130122.

[22] 贺新，李丞宸，陶飞跃，等. 双罐式压缩空气储能系

统及其热力学分析[J]. 流体机械，2022，50(4)：36-42.
HE Xin，LI Chengchen，TAO Feiyue，et al. Double-tank compressed air energy storage system and its thermodynamic analysis[J]. Fluid Machinery，2022，50(4)：36-42.

[23] 卢绪祥，刘雨菲，徐航，等. 压缩空气储能系统动态特性仿真分析[J]. 动力工程学报，2025，45(7)：1045-1051，1062.
LU Xuxiang，LIU Yufei，XU Hang，et al. Simulation analysis of dynamic characteristics of compressed air energy storage system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering，2025，45(7)：1045-1051，1062.

[24] 肖焕秀. 660 MW 燃煤机组与压缩空气储能耦合特性评价[D]. 武汉：华中科技大学，2022.
XIAO Huanxiu. Evaluation of coupling characteristics between a 660 MW coal-fired unit and compressed air energy storage[D]. Wuhan：Huazhong University of Science and Technology，2022.

[25] LI Jiajia，LI Xingshuo，YAN Peigang，et al. Thermodynamics，flexibility and techno-economics assessment of a novel integration of coal-fired combined heating and power generation unit and compressed air energy storage[J]. Applied Energy，2023，339：120924.

[26] 何青，罗宁，刘文毅. 基于全寿命周期成本的压缩空气储能系统储气装置经济性分析[J]. 化工进展，2018，37(增刊 1)：67-74.
HE Qing，LUO Ning，LIU Wenyi. Economic analysis of gas storage devices for compressed air energy storage system based on life cycle cost[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2018，37(Sup1)：67-74.

[27] 韩中合，马帆帆，吴迪，等. 基于 AA-CAES 的综合能源系统协同优化与性能分析[J]. 太阳能学报，2022，43(12)：550-558.
HAN Zhonghe，MA Fanfan，WU Di，et al. Collaborative optimization and performance analysis of integrated energy system based on AA-CAES[J]. Acta Energiae Solaris Sinica，2022，43(12)：550-558.

(上接第 153 页)

LONG Yujiang，WEI Wei，SHU Yu，et al. Detection method for damaged rotating insulator based on adaptive key points[J]. Computer Engineering，2023，49(9)：272-278.

[22] TAO Xian，ZHANG Dapeng，WANG Zihao，et al. Detection of power line insulator defects using aerial images analyzed with convolutional neural networks[J]. IEEE Transactions on Systems，Man，and Cybernetics：Systems，2020，50(4)：1486-1498.