

EBSILON 软件在热电联产系统优化中的应用综述

师进文¹, 杜宪南¹, 王浩², 王天晓³, 范焱¹, 黄汉成¹, 贾大为¹, 邹洋², 李娇²

(1. 西安交通大学绿色氢电全国重点实验室, 710049, 西安;

2. 西安热工研究院有限公司, 710054, 西安; 3. 国家能源集团国源电力有限公司, 100033, 北京)

摘要: 随着我国“双碳”目标的不断推进,传统热电联产“以热定电”的运行模式已难以满足新型电力系统对机组灵活性和深度调峰能力的要求,亟需依托热电解耦技术提升系统的高效供热与负荷调节能力。近年来,围绕热电解耦的研究,大多以单一案例或局部技术为主,系统边界、参数设定与评价体系不尽一致,难以形成具有可比性和可推广性的研究框架。本文依托EBSILON软件的统一热力建模体系,对低温热源提取、低压缸零出力、高背压供热以及光煤互补供热等典型灵活性改造技术的系统构型、蒸汽抽引方式及电热耦合机制进行系统梳理;并在统一的建模逻辑与评价指标下,对各方案的热效率、供热能力、煤耗水平及变工况性能开展量化对比分析,总结不同技术路径的共性规律与差异化特征。在此基础上,进一步归纳了当前研究在模型一致性、工况覆盖性及工程适用性方面的不足,并明确未来热电解耦技术研究三大方向:强化动态行为模拟与闭环控制验证、拓展极端及不确定性场景多边界分析、发展多技术耦合与全生命周期优化。研究可为热电联产机组灵活性改造的定量评估、工程选型和运行优化提供结构化的理论依据与方法保障。

关键词: EBSILON; 热电联产; 高背压供热; 低压缸零出力; 光煤互补供热

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202607012 **文章编号:** 0253-987X(2026)07-0120-15

Review of the Application of EBSILON Software in Combined Heat and Power System Optimization

SHI Jinwen¹, DU Xiannan¹, WANG Hao², WANG Tianxiao³, FAN Ye¹,

HUANG Hancheng¹, JIA Dawei¹, ZOU Yang², LI Jiao²

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xi'an Thermal Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. State Energy Group Guoyuan Electric Power Co., Ltd., Beijing 100033, China)

Abstract: As China's "Carbon Peaking and Carbon Neutrality" goals progress, the traditional "heat-led" operation mode of combined heat and power systems has been found insufficient to meet the requirements of new power systems for unit flexibility and deep peak-shaving capacity. There is an urgent need to rely on thermoelectric decoupling technologies to enhance high-efficiency heating and load regulation capabilities of the systems. Although research on thermoelectric decoupling has intensified in recent years, most studies focus on single cases or localized technologies with

收稿日期: 2025-09-26。

作者简介: 师进文(1981—),男,教授,博士生导师。

基金项目: 国家重点研发计划资助

项目(2024YFB4105000)。

网络出版时间: 2026-01-16

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260116.1510.004>

inconsistent system boundaries, parameter settings, and evaluation systems, making it difficult to establish a comparable and generalizable research framework. In this paper, based on the unified thermal modeling framework of EBSILON software, the system configurations, steam extraction methods, and electrothermal coupling mechanisms of typical flexibility retrofitting technologies—including low-temperature heat source extraction, low pressure cylinder near zero output, high back pressure heating, and solar-assisted thermopower—are systematically reviewed. Under a unified modeling logic and evaluation index system, quantitative comparative analyses of thermal efficiency, heating capacity, coal consumption, and off-design performance are conducted for various schemes, and the common laws and differentiated characteristics of different technical pathways are summarized. Furthermore, shortcomings in current research regarding model consistency, working condition coverage, and engineering applicability are identified. Three major directions for future thermoelectric decoupling research are proposed: strengthening dynamic behavior simulation and closed-loop control verification; expanding analysis across multiple boundaries for extreme and uncertain scenarios; and developing multi-technology coupling and life-cycle optimization. The findings are intended to provide a structured theoretical basis and methodological support for the quantitative evaluation, engineering selection, and operational optimization of flexibility retrofits of CHP units.

Keywords: EBSILON; combined heat and power; high back pressure heating; low pressure cylinder near zero output; complementary heating using coal and solar energy

随着我国“双碳”目标的深入推进以及新能源发电并网量的迅速增长,火电机组的有效利用小时数逐年降低,其调峰任务愈加艰巨。燃煤热电联产(CHP)机组是电网的重要组成部分,但其长期实行“以热定电”调度模式,导致调峰能力受限,这一情况在北方采暖季节尤为严峻^[1-2]。因此,亟需对 CHP 机组进行灵活性改造^[3-5]。热电解耦是燃煤机组灵活性改造的核心技术路径之一,旨在保证供热的条件下,通过重新分配汽轮机内主蒸汽的供热份额和做功份额,尽可能地减少蒸汽做功。常见的热电解耦方法包括电厂耦合吸收式热泵供热、高背压供热、低压缸光轴供热、切除低压缸供热、低温热源提取供热、太阳能辅助等^[6-11]。为准确评估与优化热电联产机组的热电解耦改造方案,基于 EBSILON 等专业热力仿真软件的建模与性能模拟已成为主流方式^[12-15]。EBSILON 软件是由德国 STEAG 电力集团开发的电站工程仿真平台,其面向电厂整体热力过程与能源系统提供一体化建模与仿真解决方案。软件内置“设计(design)”与“变工况(off-design)”两种核心计算模式:设计模式用于基准状态的热平衡求解,变工况模式依托设计态参考值与部件特性曲线自动计算不同负荷、环境与运行策略下的性能变化,从而可对机组部分负荷、供热调节及灵活性运行进行精确模拟^[16-19]。与 Aspen Plus、TRNSYS、EES

等通用平台相比,EBSILON 软件具有更突出的电站工程导向。EBSILON 软件的建模对象直接对应电厂实际设备,其模块化结构不仅覆盖锅炉、汽轮机、换热器、吸收式热泵、烟气余热系统及冷端设备,还允许用户定义多抽点、多回热段、多旁路等复杂耦合路径,实现电站系统的真实再现。此外,针对评估和优化电厂热电解耦方案,EBSILON 软件的计算逻辑与模块体系与 CHP 系统的物理耦合特征高度契合。CHP 系统的核心在于电-热双输出的能量分配与流动约束,往往涉及吸收式热泵、蓄热罐、低压缸零出力、旁路供热等多种技术路径,这些改造均可在 EBSILON 软件的模块层面直接实现配置与切换,因而更适合研究耦合程度、热耗率变化与节能潜力。目前,已有许多基于 EBSILON 软件进行 CHP 系统热电解耦研究。肖彤彤^[20]聚焦 330 MW 供热机组耦合吸收式热泵技术改进的性能,改进方案较基准方案减少发电标煤量 3.40 kg/(kW·h)。郭建^[21]基于 EBSILON 软件建立了机组仿真模型分析单级/两级供热模式下的热电耦合关系,明确供热可降低冷源损失,但供热调节的节流损失会降低中压缸效率;电负荷越低、供热量越大,中压缸效率受影响越显著。卫治廷^[22]基于 EBSILON 软件对比研究了蓄热罐、电锅炉、双背压改造对机组的影响,并进行负荷分配优化,发现 50% 及以上电负荷工况热耗率降低 1.52%

~1.93%,50%以下电负荷时热耗率降低约0.5%。庞春风等^[23]基于EBSILON软件对抽凝供热、低压缸零出力供热、高低压旁路供热综合供热方式进行了多方面分析,发现低压缸零出力和高低压旁路供热较抽凝供热,其供热能力分别提升18.7%、54.8%,低压缸零出力模式下供热热耗率较抽凝工况降低14%~24%,高低压旁路供热热耗率升高35%~71%。

上述研究较好地展示了各灵活性改造技术的应用,但总体上仍存在不足:多数研究侧重于局部单元或某一改造技术的研究,难以全面揭示不同改造措施与经济效益之间的内在联系;关于部分负荷与变工况下的灵活性运行特征描述不足,导致仿真结论与实际工程运行存在一定脱节,降低了研究成果的工程适用性与推广价值。针对上述问题,本文以EBSILON为统一仿真平台,系统梳理了若干典型的热电联产灵活性改造方案,包括耦合吸收式热泵的低温热源提取、高背压排汽供热、低压缸近零出力切缸及太阳能辅助供热等。从能量转化机理、蒸汽分配与回热结构、典型工况下的仿真表现等角度对各方案的供热能力、发电热耗与调峰潜力进行了横向比较,并在此基础上总结了不同技术的共性规律与差异化特征。与传统热电联产综述相比,本研究的独特贡献在于:利用EBSILON软件的模块化部件建模、回热系统一致性求解与非设计工况自动修正功能,提供了可操作的量化分析方法;依托该统一模型体系,能够归纳出适用于多种技术路径的热力机理与参数敏感性规律,并据此提出工程适用性的判断标准。总体而言,本文不仅为灵活性改造方案的评估与优化提供了可复现、可扩展的方法论框架,也为其工程化推广指明了不足与改进方向。

1 耦合吸收式热泵

低温热源提取供热技术是指利用热泵从发电机组冷端散发的循环水余热、地热、空气热能等低品位热源中提取热量,从而为热网提供加热能力的技术。在实际应用中,机组多采用吸收式热泵,以中压缸抽汽为驱动,提取循环水中的余热是该技术最常见的实现方式。该技术对于机组自身供热能力,机组灵活性都有显著提升^[24-28]。而在EBSILON软件中,可以使用7号蒸汽轮机冷凝器组件、103号组件吸收器组件、104号耦合精馏塔等组件来完成耦合吸收式热泵系统的仿真。耦合式热泵技术的优化需兼顾内外部参数:内部需通过控制溶液浓度、传热性能

和部件温度实现高效循环;外部需匹配热网负荷、循环水参数和驱动热源条件,最终在提升性能系数(COP)的同时,降低机组煤耗率和供热耗汽量,实现热经济性与调峰能力的平衡。

郭中旭等^[29]利用EBSILON软件研究热负荷等外部参数变化对耦合吸收式热泵供热系统热经济性影响,其耦合吸收式热泵如图1所示,M表示电动机。研究结果表明:机组的出水温度随热负荷增大而升高,COP随热负荷增大而降低,机组抽汽量随热负荷的增大而增加,且在相同热负荷下,与常规供热机组相比其总发电量提高2.9%左右,平均发电标准煤耗率降低2.7%左右,节能与调峰协同效果显著。然而郭中旭等^[29]的研究仅将环境温度作为变工况的驱动因素,未考虑湿度、风速等气象参数对空冷系统散热效率的影响,而这些因素会间接改变循环水温度,从而影响热泵低温热源的品质。

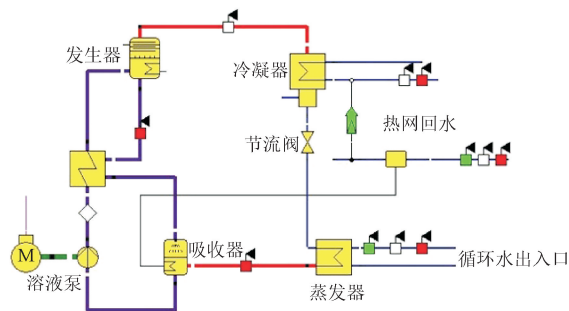


图1 耦合吸收式热泵系统图^[29]

Fig. 1 Diagram of coupled absorption heat pump system^[29]

针对热泵内部参数对热力系统经济性的影响,李蔚等^[30]基于EBSILON软件构建耦合吸收式热泵的某超临界、一次再热350 MW热电联产机组热力模型,并分析发生器温度、吸收器温度、溶液浓度等热泵内部参数以及供热负荷、环境温度等外部参数对热泵效率和机组发电标准煤耗率、热电比等的影响规律。发现热网回水温度每升高10 K,热泵性能系数下降约0.1%,机组的热经济性下降约4%,可通过提高热泵供热负荷,减小机组热经济性下降的幅度;提高低温循环水温度,热泵COP和机组热经济性均增大,当热网回水温度与其温差小于10 K时,供热性能提高效果不明显。该工作借助EBSILON软件在模型中嵌入热泵各部件的控制规则(如发生器通过调节抽汽量维持凝结水温度、蒸发器通过压力调节工质温度、冷凝器通过换热端差控制出口水温),实现与实际热泵运行逻辑一致的动态仿真,从而揭示了吸收式热泵耦合条件下机组性能

的动态变化规律。

上述研究均以间接空冷发电机组为基础展开,但普遍假定循环水温度处于正常运行区间,忽略了我国北方地区在冬季常出现的低于 0°C 的低温情形。在此条件下,空冷管束出口的循环水在部分运行工况下可能直接进入吸收式热泵系统,从而带来结霜、冻结甚至管束损伤等潜在安全风险,这使得常规模型难以准确反映严寒条件下系统的真实性能与运行边界。因此,有必要进一步讨论冬季低温条件下的特殊运行特征与防冻策略,以完善热泵耦合空冷系统在严寒地区的可行性分析。杨存辉^[31]使用 EBSILON 软件建立了两台 350 MW 耦合吸收式热泵的间接空冷热电联产机组模型进行研究。为了提高模型自动化水平,研究使用多种控制器实现双机组模型热量流量温度和压力平衡,如图 2、3 所示。

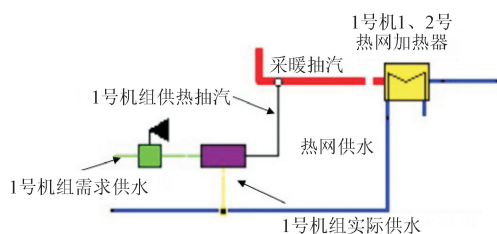


图2 12号控制器调节热网加热器工况^[31]

Fig. 2 Controller No. 12 adjusts the working conditions of the heat network heater^[31]

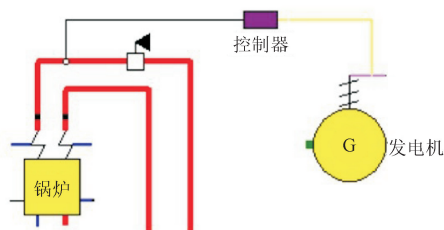


图3 具有外部默认值的39号控制器^[31]

Fig. 3 Controller No. 39 with external defaults^[31]

EBSILON 软件内置的多类型控制器不仅可以实时耦合自动调节热量、流量、温度及压力,而且可以在复杂工况下保持模型稳定性,使仿真精度和效率大大提高,同时还可以通过逻辑线实现对温度的实时耦合和自动调节。然而,研究中搭建的 EBSILON 模型只涵盖了汽轮机侧核心设备,没有对供热侧关键进行严格区分,对设备关键并列设备进行区分:如1号机组配置的8台20 MW 耦合溴化锂热机,其差异化运行特性在模型中并没有得到体现;热网侧并列的热网加热器也没有单独建模,忽略了设备个体差异对

整体热经济性的影响。

随着机组容量的提升,单耦合吸收式热泵热电联产机组在变工况时的灵活性受限,同时系统能量利用下降。对于这一问题,陆树银等^[32]提出耦合吸收式热泵和螺杆膨胀机的热电联产的运行新模式,发现耦合吸收式热泵方式提高了机组 106 MW 的最大供热负荷,降低了额定供热负荷下 6.6% 的最小功率负荷系数,提高了机组的错峰能力;机组总标准煤耗率最高降幅达 9.5%;在热耗率验收工况 (THA) 下,额定供热负荷下,可回收电厂 13.56 MW 循环水的能量,使效率提高 5.2%,如图 4、5 所示。当热用户负荷需求超过吸收式热泵额定功率时,该方案通过 EBSILON 软件实现中压缸抽汽驱动吸收式热泵,并将部分中压缸排汽引入螺杆膨胀机发电的复杂设计,以计算节流过程减少的损耗^[33]。

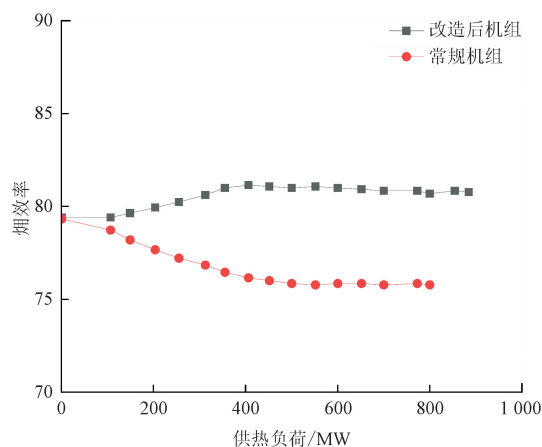


图4 THA 工况下汽水系统烟效率变化^[32]

Fig. 4 Changes in the efficiency of the soda system under THA conditions^[32]

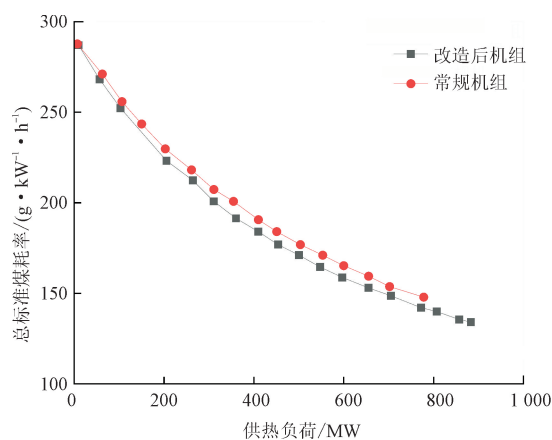


图5 THA 工况机组总标准煤消耗量变动情况^[32]

Fig. 5 Changes in total standard coal consumption of the unit under THA conditions^[32]

吸收式热泵供热技术以中压缸抽汽为驱动源,将汽轮机冷端低品位余热提升品位后并入热网,实现热电联产机组的有效热电解耦^[34-35]。该技术可显著回收冷源损失、提高系统焓效率并增加灵活出力,在相同煤耗条件下大幅提升供热能力和深度调峰幅度。与低压缸零出力、高背压供热等技术相比,其对发电功率的影响最小、调节范围更宽,且通过多级串并联或耦合螺杆膨胀机等措施可进一步改善能量利用率。然而,该技术性能对环境温度、热网回水温度等外部条件较为敏感,COP与供热经济性随工况波动较大。此外,现有研究仍存在一定局限:仿真层面,多台并列热泵不同型号、容量等个体特性未得到严格区分,导致模型对设备差异敏感性分析不足;研究边界多局限于机组本体,未考虑热网侧动态水力-热力特性对热泵性能的反作用;极端气象条件与长期运行衰退的动态评估亦较少。未来研究应拓展至并列热泵个体化精细建模、机组-热网联合变工况仿真以及极端气象与长期运行条件下的系统动态评估,结合EBSILON软件瞬态组件揭示外部扰动下的耦合规律与安全边界,从而为该技术的应用提供更为可靠的工程指导。

2 低压缸零出力改造

热电联产机组因低压缸设计需满足末级叶片的最低冷却流量要求,导致传统抽凝供热模式下最小电出力较高,调峰深度受限。低压缸零出力改造技术通过在低压缸进汽管道上设置全密封液压蝶阀并辅以旁路冷却蒸汽系统,在高真空条件下完全或近完全切断低压缸进汽,使低压缸停止做功或仅维持极低出力,主蒸汽几乎全部用于对外供热,从而实现热电的高度解耦^[36-41]。

2.1 低压缸零出力改造技术路径

低压缸零出力改造能够有效降低机组最小出力,但在应用中需重点关注热力与机械安全风险,包括末级叶片冷却不足、轴系热不均衡、冷端换热效率下降以及阀门切换冲击等安全问题。基于此,陈建国等^[42]以某发电公司300 MW机组为例,通过EBSILON软件精准模拟低压缸零出力时小容积流量工况,复现叶片脱流、鼓风放热等现象,为安全措施设计提供仿真支撑;同时嵌入高真空维持系统,模拟背压变化对叶片强度的影响,辅助安全校核。

热网疏水系统的布置方案对供热机组的安全性与经济性具有重要影响。刘军等^[43]以某300 MW纯凝机组为对象,在考察低压缸零出力技术应用的

基础上,对比分析了多种热网疏水系统布置方案的性能,最终推荐在轴封冷却器与5号低压加热器之间增设疏水降温器,如图6所示。研究表明,低压缸零出力改造后,各方案的最小供电标准煤耗可降低31.63 g/(kW·h),凝结水泵出口工况下尤为显著,充分体现了该技术在节能降耗方面的潜力以及合理疏水系统布置的重要性。然而,该研究在EBSILON软件的应用深度上仍存在一定局限:模型验证环节较为薄弱,仅采用部分热平衡参数与设计值对比,未对回热系统、疏水系统及冷却蒸汽系统等关键子系统进行全面校核,也未引入实际运行数据进行参数辨识与模型精调;未充分利用EBSILON软件的变工况与控制逻辑功能,对不同疏水方案下可能引发的安全风险进行定量评估,限制了研究结论的工程指导意义。

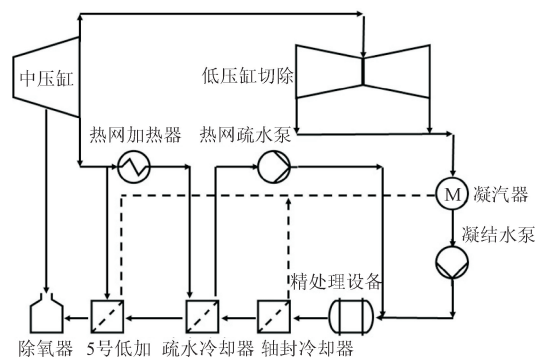


图6 轴封冷却器和加热器之间布置方案^[43]

Fig. 6 Layout between shaft seal cooler and heater^[43]

2.2 低压缸零出力改造热力性能分析

虽然现有研究在技术层面对低压缸零出力的安全性、机组结构改造等方面已有较多论述^[44-46],但针对切缸后机组热工性能的系统分析还很有限。本节将重点介绍近年来对低压缸近零出力改造后机组热工性能的研究进展。戈志华等^[47]通过EBSILON软件构建模型,对某330 MW空冷供热机组改造前的差异以及低压缸近零出力改造在能耗分布、最大供热负荷提升和调峰能力等方面进行对比分析,得到的能流图如图7、8所示。在相同的供热量下,切缸工况机组比抽汽供热工况供热抽汽增多,低压气缸近零出力,降低了机组发电功率,增加了调峰深度,为热电联产机组提供了实现深度调峰的可能。同时,EBSILON软件支持自定义组件,可在同一机组模型基础上快速切换5种疏水方案,无需重复建模,大幅提升了研究效率;并能精准模拟疏水温度、流量对回热系统的影响。例如,在方案D中,疏水进入

除氧器显著降低了 5 号低加的热负荷。然而,该研究构建的模型主要针对静态工况分析,尚未涉及切缸运行及模式切换过程中机组的过渡状态,对稳定性与能耗的动态响应特性仍缺乏深入探讨。

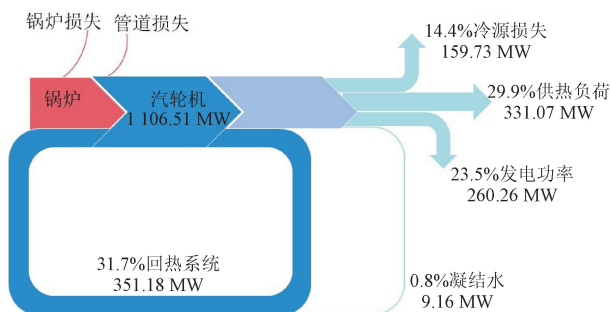


图 7 抽汽供热工况能流图^[47]

Fig. 7 Energy flow diagram of steam heating conditions^[47]

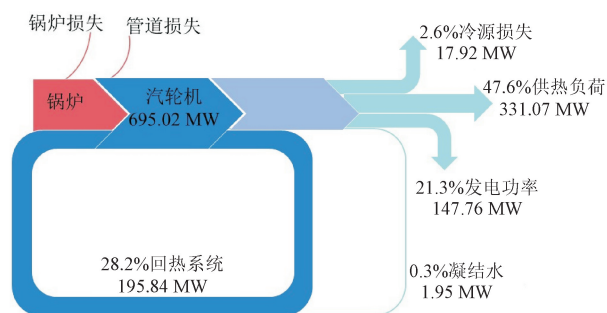


图 8 切缸工况能流图^[47]

Fig. 8 Energy flow diagram of cylinder cutting conditions^[47]

范志强等^[48]从供热机组抽凝工况和低压缸零出力工况的热力性能、调峰性能进行对比,发现零出力模式下,供热抽汽量较抽凝模式提升 16.25%;当主蒸汽流量为最小值时,供热抽汽量仍达 217.9 t/h,较抽凝模式提升 72.9%,且相同供热负荷下发电标准煤耗率降低 27.2~57.8 g/(kW·h),节煤效果显著。此外,该研究对经济性能开展了更细致的分析。如图 9 所示,当热负荷在 162~310 MW 时,零出力模式因深度调峰补偿收益显著,净收益高于抽凝模式;当热负荷在 310~375 MW 时,抽凝模式无需牺牲发电收益即可满足供热需求,净收益更优,为实际运行中的模式选择提供了明确依据。然而,研究仅指出低压缸零出力模式下电负荷无调节能力,未详细分析该模式对电网调频、爬坡速率等动态调峰指标的影响,也未对比不同电网负荷波动下两种模式的适应性。同时,在经济分析中,上网电价、热价、煤价等参数采用固定值,未考虑市场价格波动对净收益

的影响,缺乏敏感性分析。

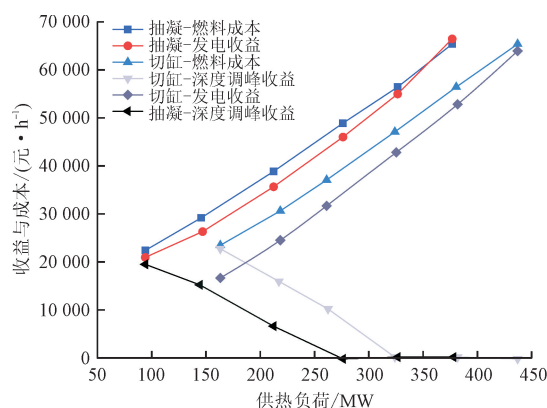


图 9 各项收益和成本对比^[48]

Fig. 9 Comparison of benefits and costs^[48]

低压缸零出力改造技术通过完全或近完全切断低压缸进汽,使主蒸汽除少量冷却蒸汽外几乎全部用于对外供热,从而实现热电的高度解耦。该技术可显著降低最小技术出力、大幅提升最大热电比与供热能力,在高热负荷工况下发电标准煤耗率较传统抽凝模式降低 20~50 g/(kW·h)。与吸收式热泵方案相比,其供热能力提升更显著、热电解耦程度更彻底;与高背压供热相比,其调峰下限更低。然而,该技术也存在电力侧调节余地丧失、机械改造复杂、投资较高以及低压缸冷却与安全运行风险等固有局限。现有研究多借助 EBSILON 软件量化该技术对最低出力、供热能力及热耗率的影响,但主要集中在稳态或准稳态性能评估,较少涉及切缸切换过程的动态特性,也未充分考察热网侧扰动对机组运行的反作用;经济性分析多采用固定能源价格,忽略改造停机损失、维护成本及全生命周期费用,导致非供热期综合经济性与发电适应性评价不足。随着 EBSILON 软件的迭代升级,其动态仿真精度、多系统耦合能力及外部接口开放性已大幅提升,能够有效弥补上述研究空白;通过 COM/Python 接口,可将仿真结果无缝导出至外部经济模型,实现敏感性与全生命周期分析。随着未来 EBSILON 软件版本数值稳定性与控制逻辑的进一步优化,其将为动态性能与经济性能耦合研究提供更强支撑,从而推动该技术向更安全、更经济的工程应用演进。

3 高背压供热改造

高背压运行供热,是指通过技术改造,提高汽轮机排汽压力和温度的一种供热方式。其不仅使机组循环热效率上升,而且使机组供暖能力得到大幅度

提高,供电用煤量得到降低^[49-53]。

3.1 空冷机组高背压供热改造

空冷机组因具有较高的设计背压,可在冬季适当提高背压加热循环水,以达到对外供热的目的。冯澎湃等^[54]以 EES 和 EBSILON 平台为基础建立了传热和供暖特性模型,对系统冷端的变工况运行特点进行了分析,分别得到空冷岛不同列风机在机组不同工况下的冷端传热特性、空冷岛的耗电量、机组净功率,精准匹配不同环境温度下的风机运行方式——低温时少列风机运行防冻,高温时多列风机运行节能,确定了冷端与供热系统的协同优化方式。结果表明,其供电煤耗最低可达 $178.34 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,远低于 300 MW 级亚临界纯凝空冷机组,大幅降低了污染物排放。杨海生等^[55]使用 EBSILON 软件搭建了配置高背压供热和抽凝供热耦合系统的 660 MW 超临界直接空冷供热机组,抽凝供热模式最小调峰出力达 207.91 MW ,高背压模式达 270.25 MW ,耦合模式可通过调整背压进一步降低最小出力,在 20 kPa 背压时降至 240 MW ,大幅提升电网对可再生能源的消纳能力。在上述研究中,EBSILON 软件的应用优势具有共性且适配不同研究场景:不同工况下主蒸汽流量模拟值与设计热平衡数据的误差不高于 0.7% ,能准确输出低压缸排汽容积流量、供热量耗煤量、机组调峰出力等关键参数。此外,研究需覆盖纯高背压-抽凝-耦合等多种供热模式,以及 $20 \sim 33 \text{ kPa}$ 背压、 $0 \sim 400 \text{ t/h}$ 抽汽流量的宽工况范围,EBSILON 软件可高效完成多变量组合仿真,同时将低压缸末级叶片最小容积流量作为硬约束集成至模型,确保仿真过程中不突破安全边界。

3.2 湿冷机组高背压供热改造

章艳等^[56]利用 EBSILON 软件模拟建模亚临界高背压供热改造机组,分析纯背压、抽背 2 种典型工况下主蒸汽质量流量、抽汽质量流量对电热关系的影响。同时,建立了动态可行的域模型与传统线性模型进行对比,以达到热电厂的精细化运行。2 种分配方案都优先采用高背压机组发电供热。该方案 2 中, 350 MW 机组在相同供热功率下发电功率变化范围扩大 $2.37 \sim 4.24 \text{ MW}$,厂级日节煤量达 29.62 t ;尤其在高热负荷与高发电负荷场景,节煤效果更突出,充分挖掘了高背压机组的节能潜力。

3.3 高背压改造非供热期经济性影响

万燕等^[57]运用 EBSILON 仿真软件建立高背压供热汽轮机变工况计算模型,如图 10 所示。结合单耗理论,详细对比分析单转子和双转子互换这两

种高背压供热改造方式在供热季、与非供热季的经济性及能耗情况,结果表明双转子互换方式在供热季平均发电煤耗低了 $0.24 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$,最大供热量少了 6.48 MW ,非供热季其效率高于单转子方式。但考虑到双转子互换方式供热季优势并不明显,且每年需要更换 2 次转子,因此对于大型热电联产机组高背压供热改造首选单转子方式以降低成本。研究为大型热电联产机组高背压供热改造方式的合理选择提供了理论依据。但该研究基于稳态工况分析,未考虑机组在供热季与非供热季切换过程中的动态响应,如背压突变对汽轮机振动、排汽温度波动的影响,难以反映实际运行中的瞬态安全性和能耗波动。虽提及双转子互换方式需每年更换 2 次转子,成本较高,但未具体量化更换过程中的停机损失、设备损耗,对机组全生命周期经济性评估不够精确。

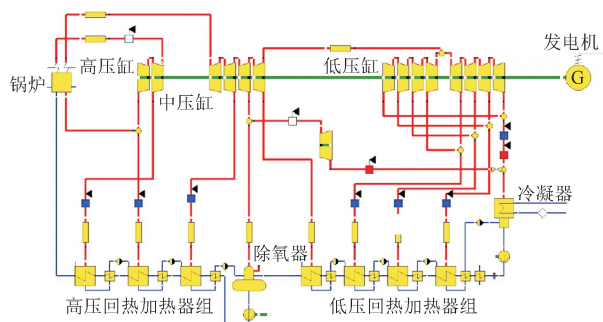


图 10 使用 EBSILON 软件搭建 350 MW 模型^[57]

Fig. 10 A 350 MW model was built using EBSILON software^[57]

高背压供热技术通过提高汽轮机排汽压力与温度,实现排汽余热的高效回收并入热网。该技术对汽轮机本体改动小、投资适中、供热可持续性強且无需附加设备,改造后循环热效率显著提升,供热能力大幅增加,发电煤耗明显降低。在实际工程应用中,空冷机组可将背压提升至冬季防冻阈值以上,湿冷机组则多采用纯背压或抽背并行模式。与低压缸切缸技术相比,高背压改造供热能力增幅虽属中等,但施工难度与投资成本更低;在改造方案选取方面,双转子互换方式在供热季煤耗略优,但需每年两次转子更换,维护成本较高;单转子方案供热量略低,却具有更高的运行稳定性。尽管具备上述优势,该技术仍存在固有局限与研究空白:背压适度提升可增加余热回收比例,但过高则导致可用能损失与发电功率下降;同时对冷端流道变化敏感,需严格保证最低冷却蒸汽流量以避免末级叶片失冷。目前,低流量工况下叶片冷却机理及安全边界研究不足,尤其

缺少背压快速切换时的动态仿真案例;背压改造改变了汽轮机热力运行点、抽汽结构及泵阀控制方式,可能加速叶片疲劳、轴承磨损及轴系寿命折减,但相关寿命预测与长期可靠性量化分析仍较少。未来研究应重点强化低流量工况叶片冷却的动态仿真、全厂全生命周期经济评估以及设备长期可靠性分析,为高背压供热技术的优化迭代提供更加全面、系统化的理论与数据支撑。

4 太阳能辅助热电系统

太阳能热发电系统(CSP)具有可储热、可调峰、可连续发电的特点,可在发电量过剩时将能量存储、在需求高峰时释放,显著增强系统的调峰能力^[58],但仍有调峰不稳、效率低的问题。而光煤互补式的供热技术在保证电厂的深度调峰能力的前提下,解决了太阳能热发电系统存在转换效率低、输出功率受天气因素影响等稳定性低的问题,现阶段电站的光热发电效率约为 14%~17%,在光热互补新型供热技术的设计与仿真领域,EBSILON 软件的优势同样突出。其模块库内置了多种太阳能集热器(槽式、塔式等)、储热罐(熔盐单罐/双罐)、导热油-蒸汽换热器以及光热场边界条件组件,能够完整再现光热场、储热系统与汽轮机回热回路的能量协同结构^[59-62]。

4.1 太阳能辅助热电系统基础研究

在基础研究阶段,许多工作在设计负荷和典型气象条件下基于 EBSILON 软件构建系统模型,用于验证太阳能辅助方案的可行性,以评估各方案的循环热效率、排烟温度等性能差异。肖卓楠等^[63]利用 EBSILON 软件搭建如图 11 所示的发电、供热可灵活调节的 300 MW 太阳能辅助热电联产系统,精准捕捉到不同方案下调峰最优的主蒸汽参数组合,且仿真值与机组实际运行数据的最大相对误差不高

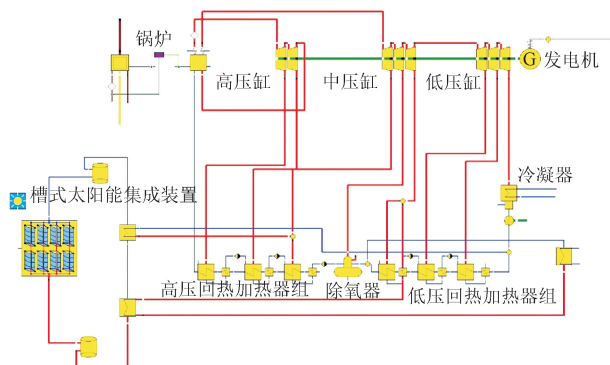


图 11 300 MW 太阳能辅助热电联产系统^[63]

Fig. 11 300 MW solar-assisted cogeneration system^[63]

于 1.76%。此外,EBSILON 软件的多系统耦合分析能力适配太阳能集热-热电联产-热网的复杂耦合需求,原始单机调峰容量 43.65 MW,太阳能辅助后提升至 57.56 MW;原始双机调峰容量 86.19 MW,辅助后提升至 157.19 MW,清晰呈现了太阳能与热电系统的耦合效果,避免了单一系统分析的局限性。

在太阳能与燃气联合循环热电联产系统耦合方面,李航行等^[64]基于 EBSILON 软件构建集成太阳能燃气-蒸汽联合循环(ISCC)热电联产系统研究结果表明,太阳能热输入显著扩展了系统的热电可行域,在相同供热负荷下,电负荷调节范围较传统燃气-蒸汽联合循环大幅拓宽,深度调峰能力得到明显提升。同时,配置储热罐可有效平抑太阳能辐射的间歇性和波动性,降低燃气轮机负荷波动幅度,从而提高机组运行稳定性并减轻频繁变负荷对设备的冲击。在太阳能与燃煤机组直接耦合领域,庞力平等^[65]通过在锅炉过热装置上抽汽加热和烟气再循环,提出了将太阳能与锅炉受热面能量匹配的塔式太阳能接入 1 000 MW 燃煤锅炉的新方案。模拟结果显示,该方案能够减少约 7.2 g/(kW·h)的燃煤消耗,同时提升锅炉效率。此类研究量化了高温 CSP 与燃煤机组耦合的热力学特性,提供了实际工程应用的资料参考。高佳圣等^[66]采用 EBSILON 软件分析比较了机组 3 种方案改造前后的效率和经济性差异,结果表明太阳能辅助抽气采暖机组,在太阳能输入功率不变的情况下表现最好。改造后系统如图 12 所示。改造后的机组回收了集成太阳能产生的余热后供热能力增强;在低发电功率、较高背压和较低热网供回水温度时节煤更多;在低发电功率、较低背压及较高热网供回水温度时机组的供热能力进一步提升。该研究展示了通过 EBSILON 软件设置低压缸进汽切断、背压调节等边界条件,可以模拟高背压工况下乏汽的流动与换热过程,精确计算热网凝汽器的余热回收量。此外,在同一模型框架下能够快速切换传统抽汽、太阳能辅助抽汽和高背压

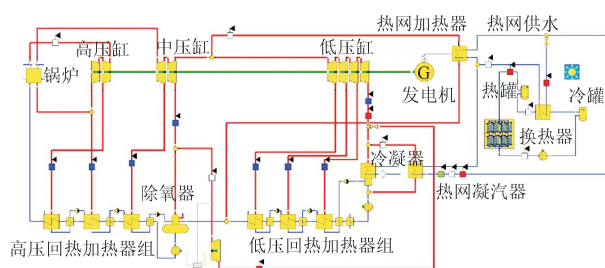


图 12 基于 EBSILON 的太阳能辅助抽气采暖改造机组^[66]

Fig. 12 Solar-assisted pumped heating retrofit unit based on EBSILON^[66]

等多种方案,便于对比节煤率、供热量等指标,无需重复建模,大幅提升了研究效率。

4.2 太阳能辅助热电系统关键参数影响机制

在对太阳能辅助热电系统性能进行了初步验证后,研究重心转向在实际运行条件下的动态响应和关键参数影响机制。此类研究引入了太阳辐射、环境温度、机组负荷波动等变量,分析系统在变化工况下的特性,以识别设计和运行中的瓶颈与敏感环节。对于槽式光热系统,耿直等^[67]建立了一个中低温槽式光热发电系统模型,如图13所示。研究模拟了春分、夏至等典型日的运行特性,同时EBSILON软件内置的有机工质物性库,可准确计算膨胀机功率、蒸发器换热量等参数,模拟中低温工况下的热功转换过程。这些结果揭示了季节变化对发电效率和光学性能的影响,为后续与热力机组时序匹配和并网策略提供了基础。此外,耿直等^[68]使用EBSILON软件设计3类耦合方案,对比系统发电量、热效率与排烟温度,并重点考察了法向直接辐照度和环境温度等参数对发电效率和燃料节约的影响。结果表明:太阳能燃气联合循环系统的循环热效率达到44.1%,显著高于传统系统的39.8%;在相同总出力下,该系统可节省天然气2.638 kg/s。此外研究发现,系统效率随着法向直接辐照度增高而上升,当法向直接辐照度约为1000 W/m²时效率最优;环境温度为20~30℃时机组性能最佳。这些分析深化了太阳能与联合循环之间的能量耦合机理,表明精确的气象数据和动态控制策略对优化系统性能至关重要。总体而言,基础模型构建阶段主要通过静态仿真验证系统可行性,常以循环热效率、热负荷和燃料消耗率作为主要指标,并为后续的动态性能分析和优化研究提供基准数据。

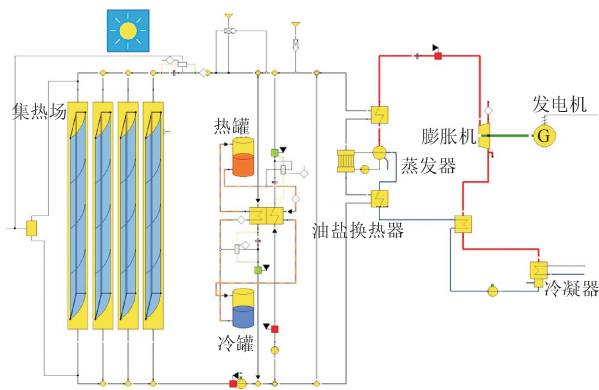


图13 槽式太阳能热发电回热循环系统模型^[67]

Fig.13 Model of trough solar thermal power generation heat recovery circulation system^[67]

目前关于分析机组动态特点的研究已形成大量成果,在此基础上许多研究者对能效通过系统结构改进、运行策略改善的方法作了进一步的探讨。徐文韬^[69]通过EBSILON软件,构建了带储热装置的太阳能辅助350 MW煤电发电系统模型,对比3种给水集成方案的热经济性。最终发现并联于1、2、3高加,加热3号高加进口的给水方案的热耗率、汽耗率及标准煤耗率最低;运用遗传算法优化储热罐参数,得出径高比5/8.5时储热量最大,并通过MATLAB软件模拟温度场确定储热约300 min时换热停止。技术经济性分析显示,该系统比不带储热装置的系统日节煤至少7.62 t,发电成本低0.0006元/(kW·h),提升了可再生能源竞争力。

综上,太阳能辅助热电系统该技术将集中式CSP与火电机组耦合,在高需求时段提供辅助蒸汽,实现热电解耦并减少煤耗。以上典型研究构建了槽式或塔式太阳能集热系统与燃煤/燃气机组耦合的EBSILON模型,验证了方案可行性。结果表明,在太阳能场固定输入功率下,集成太阳能装置的供热系统总体节煤效果最佳,机组供热能力显著增强。与其他改造技术不同,光热互补最大特点是无需牺牲机组发电装置,可在白天利用可再生热源,进一步解耦热负荷。其供热能力提升受太阳辐照条件限制,通常在晴天正午可获得最大输出;循环热效率一般在40%以上,较传统燃机循环高出个百分点。但由于CSP效率较低,对发电效率的直接提升有限,更侧重于节约燃料。该技术对环境依赖性强,动态特征突出,需要构建动态气象模型和控制策略以平滑出力波动。目前研究多聚焦静态效能和优化方案选择,动态工况下光热-热电协同调度及储热系统集成仍有待深入。

5 结 论

EBSILON软件作为电站热力系统仿真领域的主流专业平台,在高参数热电联产系统灵活性改造、热电解耦技术优化及多能源互补系统集成等相关研究与工程实践中,已展现出重要应用价值与技术优势。本文系统梳理了基于EBSILON软件的耦合吸收式热泵、低压缸零出力、高背压供热、太阳能辅助供热4类典型灵活性改造技术的物理机理、建模方法、关键参数影响规律及工程适用性,如表1所示。

当前研究不足主要体现在3方面。①动态特性分析滞后:如低压缸切缸切换过程的瞬态冲击、高背

压快速升降的振动波动、吸收式热泵启停下的溶液浓度变化、光热场法向直接辐照度突变时的储热响应等,均未结合实测数据进行分钟级仿真,导致安全边界评估不准;②系统边界狭窄:多止步于机组本

体,未纳入热网侧动态水力-热力特性、极端气象或长期运行衰退;③经济性评估单一:多采用固定电热价/煤价,忽略调峰补贴、碳交易收益、改造停机损失与维护成本,导致非供热期综合经济性低估。

表 1 热电联产系统改造方法

Table 1 Transformation methods of cogeneration systems

改造路径	适用场景	供热能力 提升幅度	发电效率变化	调峰性能	改造复杂度	经济性
耦合吸收式 热泵	需增补热量的 冬季供热场景, 有循环水余热 资源时	可额外回收 余热	小幅提升:回收 余热增加输出, 降低煤耗	显著提升:热泵 增加供热量,可 提升机组最低负 荷能力	需增设热泵、 换热器与控制 系统	设备投资大, 运行需电或汽 驱动
低压缸零出力 改造	热负荷极高、 需深度调峰的 采暖季	供热抽汽量 可增长近 100%	发电功率较大 幅降低	最低出力显著 降低,实现深度 错峰	需改造转子、 增设抽风/真空 系统	设备改造成本 高,回收收益 期长
高背压供热 改造	有持续供热需求 的冬季,机组 设计背压允许时	增加冷凝 压力,提高 抽汽量	适度背压可 提高循环效率	在保证冷却要求 下,性能提升	只需更换背压 凝汽器或改造 蒸汽管路	投资适中,节煤 收益一般
太阳能辅助 供热	晴天负荷高峰期, 具有大面积光热 资源	受场区规模 限制	小幅提升:燃煤 替代减少微量 煤耗	提升幅度一般: 需储热平滑输出	增设集热场、 储热系统、并网 设施	初投资大,但 长期可减碳 降费

针对热电联产灵活性改造研究应结合上述不足,未来应聚焦以下方向发展。

(1)强化动态行为模拟与闭环控制验证:在现有稳态模型基础上亟需构建瞬态部件模型,实现低压缸切缸切换、高背压快速升降、吸收式热泵启停及光热法向直接辐照度扰动的分钟级动态仿真。EBSILON 软件的模块化结构和非设计工况自动修正能力可作为动态扩展的基础逻辑,并通过与 MATLAB/Simulink 等控制系统平台的接口联动,开展预测控制与最优调度的闭环验证,为深度调峰策略提供高保真支撑。

(2)拓展极端条件与不确定性场景的多边界分析。未来研究需构建“机组-热网-气象”一体化模型,将热网动态水力、热力特性、极端气象冲击及设备性能随时间衰减纳入统一框架。依托 EBSILON 软件的系统级能量平衡求解与部件耦合能力,可进一步与蒙特卡罗等不确定性分析方法结合,形成可对严寒防冻、大幅流量扰动及低法向直接辐照度衰退等最劣工况进行鲁棒性评估的综合模型体系。

(3)发展多技术耦合与全生命周期优化:基于遗

传算法等工具,整合吸收式热泵+高背压+光热等组合,综合评估碳排放、度电成本、设备寿命折减、调峰补偿收益,实现从设计到退役的全链条决策;同时,探索电-热-氢-碳多能流集成,助力“三改联动”与新型电力系统建设。

参考文献:

- [1] 王金星. 大型燃煤热电联产系统研究现状和展望 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2019, 46(6): 90-98.
Wang Jinxing. Research status and prospect for large coal-fired combined heat and power generation system [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2019, 46(6): 90-98.
- [2] 杨坤, 耿杰, 刘迪, 等. 深度调峰下多种供热改造耦合的容量配置优化研究 [J]. 热能动力工程, 2024, 39(9): 123-133.
Yang Kun, Geng Jie, Liu Di, et al. Optimization of capacity allocation for coupling of various heat supply transformations under deep peak regulation [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,

- 2024, 39(9): 123-133.
- [3] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
Zhang Liying, Ye Tinglu, Xin Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [4] 吕泉, 胡炳廷, 王海霞, 等. 风热冲突下热电厂供热问题研究 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 236-244.
Lü Quan, Hu Bingting, Wang Haixia, et al. Heat-supply of thermal power plant in wind-heat conflict [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 236-244.
- [5] 丁明, 刘新宇, 解蛟龙, 等. 面向提高风电接纳能力的多区域热-电联合调度模型 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4079-4088.
Ding Ming, Liu Xinyu, Xie Jiaolong, et al. Research on heat and electricity coordinated dispatch model of multi-area for improving wind power accommodation ability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4079-4088.
- [6] 张学镭, 陈海平. 回收循环水余热热泵供热系统热力性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(8): 1-8.
Zhang Xuelei, Chen Haiping. Thermodynamic analysis of heat pump heating supply systems with circulating water heat recovery [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(8): 1-8.
- [7] 宋浩, 陈晓利, 高继录, 等. 多供热机组多模式深度调峰协同运行技术路线研究 [J]. 汽轮机技术, 2021, 63(6): 448-450.
Song Hao, Chen Xiaoli, Gao Jilu, et al. Study on the technical route of multi-mode deep peak-shaving cooperative operation of multi-heating units [J]. Turbine Technology, 2021, 63(6): 448-450.
- [8] 郭良丹, 谭锐, 林宝森, 等. 提高供热机组的调峰灵活性研究 [J]. 中国测试, 2022, 48(7): 16-22.
Guo Liangdan, Tan Rui, Lin Baosen, et al. Study on improving peak-shaving flexibility of cogeneration units by using heat storage [J]. China Measurement & Test, 2022, 48(7): 16-22.
- [9] Li Yan, Fu Lin, Zhang Shigang, et al. A new type of district heating system based on distributed absorption heat pumps [J]. Energy, 2011, 36(7): 4570-4576.
- [10] 王明军. 利用汽轮机进行供热的方法探究 [J]. 热力透平, 2014, 43(2): 124-126.
Wang Mingjun. Investigation of heating supply by using steam turbine [J]. Thermal Turbine, 2014, 43(2): 124-126.
- [11] 何坚忍, 徐大懋. 节能增效的 NCB 新型专用供热机 [J]. 热电技术, 2009(3): 1-4.
He Jianren, Xu Damao. NCB model for energy efficiency of heating machine [J]. Cogeneration Power Technology, 2009(3): 1-4.
- [12] 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): 77-83.
Gong Weiping, Guan Hongjun, Li Hongwei, et al. Optimization of heating load distribution of combined unit based on EBSILON simulation software [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 77-83.
- [13] 张红昌, 薛小军, 徐钢, 等. 热电联产机组热电解耦改造方案的调峰特性及能耗分析 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(10): 1382-1390.
Zhang Hongchang, Xue Xiaojun, Xu Gang, et al. Peak shaving characteristics and energy consumption analysis of the thermoelectric-decoupling retrofit scheme for cogeneration units [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(10): 1382-1390.
- [14] 王子杰, 顾煜炯, 刘浩晨, 等. 热电联产机组热电解耦技术对比分析 [J]. 化工进展, 2022, 41(7): 3564-3572.
Wang Zijie, Gu Yujiong, Liu Haochen, et al. Comparison and analysis of heat-power decoupling technologies for CHP units [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2022, 41(7): 3564-3572.
- [15] 朱旭东, 马红和, 韩洋. 300 MW 亚临界机组的热电解耦模式对比 [J]. 洁净煤技术, 2022, 28(7): 141-148.
Zhu Xudong, Ma Honghe, Han Yang. Comparison of thermo-electric decoupling modes of 300 MW subcritical unit [J]. Clean Coal Technology, 2022, 28(7): 141-148.
- [16] 朱泓逖. 基于 Ebsilon 的火电厂热力系统建模、监测及优化研究 [D]. 北京: 清华大学, 2015.
- [17] Dahash A, Mieck S, Ochs F, et al. A comparative study of two simulation tools for the technical feasibility in terms of modeling district heating systems: an optimization case study [J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2019, 91: 48-68.
- [18] Jiang Chao, Jia Chenhui, Liu Pei, et al. Analysis of the effect of the ceramic membrane module based on ebsilon software on water recovery of flue gas from coal-fired power plants [J]. Computer Aided Chemical

- Engineering, 2020, 48: 421-426.
- [19] 麻国情. 基于 EBSILON 二次再热百万机组机炉耦合建模仿真及热经济性研究 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [20] 肖彤彤. 供热机组低温余热热泵回收系统建模及经济性分析 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [21] 郭建. 供热机组热电耦合特性与运行优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2020.
- [22] 卫治廷. 供热机组灵活性改造及机组负荷优化分配研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
- [23] 庞春风, 张德利, 李祥勇, 等. 基于 Ebsilon 的供热机组灵活性改造研究 [J]. 汽轮机技术, 2023, 65(2): 127-130.
Pang Chunfeng, Zhang Deli, Li Xiangyong, et al. Research on flexibility modification of heating unit based on ebsilon [J]. Turbine Technology, 2023, 65(2): 127-130.
- [24] 薛小军, 侯智华, 张红昌, 等. 碳中和背景下燃气热电联产与地源热泵耦合替代燃气锅炉供热研究 [J]. 动力工程学报, 2022, 42(4): 359-364.
Xue Xiaojun, Hou Zhihua, Zhang Hongchang, et al. Study on replacing gas-fired boiler by gas-fired cogeneration coupled with ground source heat pump for heating under carbon neutral background [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(4): 359-364.
- [25] Wu Jinxing, Sun Shoujun, Song Qinglu, et al. Energy, exergy, exergoeconomic and environmental (4E) analysis of cascade heat pump, recuperative heat pump and carbon dioxide heat pump with different temperature lifts [J]. Renewable Energy, 2023, 207: 407-421.
- [26] 王晋达. 区域能源系统的热电协同调度与清洁热源优化配置研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [27] Zhao Shifei, Ge Zhihua, Sun Jian, et al. Comparative study of flexibility enhancement technologies for the coal-fired combined heat and power plant [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 184: 15-23.
- [28] 周振起, 崔春晖, 袁猛, 等. 吸收式热泵回收火电厂冷凝热供暖的技术经济性 [J]. 制冷与空调(四川), 2017, 31(1): 77-80.
Zhou Zhenqi, Cui Chunhui, Yuan Meng, et al. Technology and economy of condensing heat supply in thermal power plant by absorption heat pump [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2017, 31(1): 77-80.
- [29] 郭中旭, 戈志华, 赵世飞, 等. 耦合吸收式热泵机组变工况分析 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(2): 25-32.
Guo Zhongxu, Ge Zhihua, Zhao Shifei, et al. Analysis of the off-design operation conditions of a coupled absorption type heat pump unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2): 25-32.
- [30] 李蔚, 杨存辉, 吴国林, 等. 热电联产机组耦合吸收式热泵运行特性的研究 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(7): 951-958.
Li Wei, Yang Cunhui, Wu Guolin, et al. Research on operating characteristics of coupled absorption heat pump for cogeneration units [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(7): 951-958.
- [31] 杨存辉. 耦合热泵的热电联产空冷机组负荷优化分配研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2023.
- [32] 陆树银, 刘浩晨, 顾煜炯, 等. 大型热电联产机组供热改造分析 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1182-1189.
Lu Shuyin, Liu Haochen, Gu Yujiong, et al. Thermodynamic analysis of heating reformation of large-scale CHP [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(5): 1182-1189.
- [33] Panesar A S. A study of organic Rankine cycle systems with the expansion process performed by twin screw machines [D]. London, UK: City University of London, 2012.
- [34] 刘媛媛, 隋军, 刘浩. 燃煤热电厂串并联耦合吸收式热泵供热系统研究 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6148-6155.
Liu Yuanyuan, Sui Jun, Liu Hao. Research on heating system of serial-parallel coupling absorption heat pump for coal fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6148-6155.
- [35] 李岩, 米培源, 李文涛, 等. 大型机组乏汽余热利用的热电联产供热系统全工况优化 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4815-4822.
Li Yan, Mi Peiyuan, Li Wentao, et al. Full operating conditions optimization of cogeneration heating system based on waste heat utilization of exhausted steam of large turbine units [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(16): 4815-4822.
- [36] 陈建国, 谢争先, 付怀仁, 等. 300 MW 机组汽轮机低压缸零出力技术 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 106-110.
Chen Jianguo, Xie Zhengxian, Fu Huairan, et al. Zero output technology of the low-pressure cylinder of 300 MW unit turbine [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 106-110.
- [37] Zhao Xiaodong, Li Ang, Zhang Youjun, et al. Performance improvement of low-pressure cylinder in high back pressure steam turbine for direct heating [J].

- Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 116170.
- [38] 鄂志君, 张利, 杨帮宇, 等. 低压缸零出力实现热电联产机组热电解耦与节能的理论研究 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(5): 383-386.
- E Zhijun, Zhang Li, Yang Bangyu, et al. Theoretical study on heat-electricity decoupling and energy saving of low-pressure cylinder zero output renovation of heat and power cogeneration units [J]. Turbine Technology, 2019, 61(5): 383-386.
- [39] 梁天赋, 谢尉扬, 王飞, 等. 汽轮机低压缸切缸运行关键技术研究 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(6): 471-472.
- Liang Tianfu, Xie Weiyang, Wang Fei, et al. The key technique research of removing the low pressure cylinder of steam turbine [J]. Turbine Technology, 2019, 61(6): 471-472.
- [40] 王建勋. 运行背压变化对低压缸零出力技术安全性及经济性的影响分析 [J]. 化工进展, 2020, 39(S1): 85-89.
- Wang Jianxun. Analysis on influence of variation of operating back pressure on safety and economy of zero output technology of low-pressure cylinder [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S1): 85-89.
- [41] 天罡, 刘立华, 黄智, 等. 350 MW 机组低压缸切除供热改造方案及调峰性能分析 [J]. 汽轮机技术, 2019, 61(6): 457-460.
- Tian Gang, Liu Lihua, Huang Zhi, et al. Reconstruction scheme of removing low pressure cylinder and heating for 350 MW unit analysis of peak regulation performance [J]. Turbine Technology, 2019, 61(6): 457-460.
- [42] 陈建国, 谢争先, 付怀仁, 等. 300 MW 机组汽轮机低压缸零出力技术 [J]. 热力发电, 2018, 47(5): 106-110.
- Chen Jianguo, Xie Zhengxian, Fu Huaren, et al. Zero output technology of the low-pressure cylinder of 300 MW unit turbine [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 106-110.
- [43] 刘军, 李洪波, 管洪军, 等. 低压缸零出力改造后热网疏水系统对热经济性影响的 Ebsilon 模拟 [J]. 东北电力大学学报, 2023, 43(6): 87-93.
- Liu Jun, Li Hongbo, Guan Hongjun, et al. Influence of the draining system of heat network on the thermal economy after the low-pressure cylinder zero output reconstruction based on ebsilon [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2023, 43(6): 87-93.
- [44] 谢天, 孙永春, 付青山, 等. 200 MW 机组热电解耦方案研究 [J]. 节能技术, 2018, 36(6): 566-569.
- Xie Tian, Sun Yongchun, Fu Qingshan, et al. Study on thermo-electricity decoupling scheme for 200 MW unit [J]. Energy Conservation Technology, 2018, 36(6): 566-569.
- [45] 李树明, 刘青松, 朱小东, 等. 350 MW 超临界热电联产机组灵活性改造分析 [J]. 发电技术, 2018, 39(5): 449-454.
- Li Shuming, Liu Qingsong, Zhu Xiaodong, et al. Flexibility transformation analysis of 350 MW super-critical cogeneration unit [J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 449-454.
- [46] 姚居鹏. 135 MW 机组低压缸切缸运行方式机组振动的分析调整 [J]. 技术与市场, 2020, 27(4): 79-80.
- Yao Jupeng. Vibration analysis and adjustment of 135 MW low pressure cylinder cutting operation mode unit [J]. Technology and Market, 2020, 27(4): 79-80.
- [47] 戈志华, 张倩, 熊念, 等. 330 MW 供热机组低压缸近零出力热力性能分析 [J]. 化工进展, 2020, 39(9): 3650-3657.
- Ge Zhihua, Zhang Qian, Xiong Nian, et al. Thermal performance analysis of 330 MW heating unit with low pressure cylinder near zero output [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(9): 3650-3657.
- [48] 范志强, 焦晓峰, 魏超, 等. 300 MW 供热机组低压缸零出力热力性能、调峰性能和经济性能分析 [J]. 中国测试, 2024, 50(4): 166-172.
- Fan Zhiqiang, Jiao Xiaofeng, Wei Chao, et al. Thermodynamic and economic performance and peak load regulation capacity analysis of 300 MW cogeneration unit with low pressure cylinder near zero output mode [J]. China Measurement & Test, 2024, 50(4): 166-172.
- [49] 邵建明, 陈鹏帅, 周勇. 300 MW 湿冷汽轮机双转子互换高背压供热改造应用 [J]. 能源研究与信息, 2014, 30(2): 100-103.
- Shao Jianming, Chen Pengshuai, Zhou Yong. An application of double-rotor interchange technology in the retrofit for a high back pressure heat supply system with 300 MW condensing turbine [J]. Energy Research and Information, 2014, 30(2): 100-103.
- [50] 石德静, 姜维军. 300 MW 汽轮机高背压循环水供热技术研究及应用 [J]. 山东电力技术, 2015, 42(4): 8-11.
- Shi Dejing, Jiang Weijun. Circulating water heating technology for 300 MW steam turbine with high back-pressure [J]. Shandong Electric Power, 2015, 42(4): 8-11.
- [51] 张攀, 杨涛, 杜旭, 等. 直接空冷机组高背压供热技

- 术经济性分析[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(3): 209-212.
- Zhang Pan, Yang Tao, Du Xu, et al. The economy analysis of the high back pressure heating technology on direct air-cooled unit [J]. Turbine Technology, 2014, 56(3):209-212.
- [52] 朱斌帅, 张赟. 电厂供热节能改造方案探讨[J]. 发电与空调, 2014, 35(1): 12-15.
- Zhu Binshuai, Zhang Yun. Study on heat supply reconstruction in power plant [J]. Power Generation & Air Condition, 2014, 35(1): 12-15.
- [53] 王学栋, 姚飞, 郑威, 等. 两种汽轮机高背压供热改造技术的分析[J]. 电站系统工程, 2013, 29(2): 47-50.
- Wang Xuedong, Yao Fei, Zheng Wei, et al. Technical analysis of turbine with two modes of high BP reconstruction for heat supply [J]. Power System Engineering, 2013, 29(2): 47-50.
- [54] 冯澎湃, 王宁玲, 杨志平, 等. 直接空冷高背压供热机组的梯级供热特性与冷端变工况协同优化[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5546-5554.
- Feng Pengpai, Wang Ningling, Yang Zhiping, et al. Cascade heating characteristics and off-design collaborative optimization of direct air-cooled high pressure heat supply power units [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5546-5554.
- [55] 杨海生, 唐广通, 王文营, 等. 直接空冷机组高背压-抽凝耦合供热的调峰特性及供热经济性分析[J]. 汽轮机技术, 2025, 67(1): 52-56.
- Yang Haisheng, Tang Guangtong, Wang Wenying, et al. Heat-peaking power characteristic analysis of high back pressure-steam extraction coupling heating technology for cogeneration unit with ACC [J]. Turbine Technology, 2025, 67(1): 52-56.
- [56] 章艳, 李佳丽, 张莹, 等. 计及高背压改造机组动态特性的厂级负荷分配[J]. 浙江大学学报(工学版), 2025, 59(3): 643-652.
- Zhang Yan, Li Jiali, Zhang Ying, et al. Plant-level load distribution considering dynamic characteristics of high back-pressure retrofit unit [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2025, 59(3): 643-652.
- [57] 万燕, 孙诗梦, 戈志华, 等. 大型热电联产机组高背压供热改造全工况热经济分析[J]. 电力建设, 2016, 37(4): 131-137.
- Wan Yan, Sun Shimeng, Ge Zhihua, et al. Thermo-economic analysis of high back pressure heating retrofit for large-scale cogeneration unit under full condition [J]. Electric Power Construction, 2016, 37(4): 131-137.
- [58] 詹晶, 王志峰. 太阳能热发电技术在新一代能源系统中定位的思考[J]. 电力与能源进展, 2018, 6(1): 1-9.
- Zhan Jing, Wang Zhifeng. Solar thermal power generation technology in a new generation of energy system positioning [J]. Advances in Energy and Power Engineering, 2018, 6(1): 1-9.
- [59] 彭兴波. 浅析国内太阳能光热发电项目发展前景及存在的问题[J]. 中小企业管理与科技(中旬刊), 2018(6): 181-182.
- Peng Xingbo. Discussion on the development prospect and existing problems of domestic solar thermal power generation project [J]. Management & Technology of SME, 2018(6): 181-182.
- [60] 曲万军. 基于燃气-蒸汽联合循环系统的太阳能热互补发电(ISCC)集成特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [61] Behar O, Khellaf A, Mohammedi K, et al. A review of integrated solar combined cycle system (ISCCS) with a parabolic trough technology [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 39:223-250.
- [62] Alqahtani B J, PATino-Echeverri D. Integrated solar combined cycle power plants: paving the way for thermal solar [J]. Applied Energy, 2016, 169: 927-936.
- [63] 肖卓楠, 张荣, 刘英琦, 等. 太阳能辅助热电联产机组供热、发电及调峰性能分析[J]. 热力发电, 2024, 53(5): 67-74.
- Xiao Zhuonan, Zhang Rong, Liu Yingqi, et al. Analysis of heating, power generation and peak shaving performance of solar assisted cogeneration units [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(5): 67-74.
- [64] 李航行, 陈亮, 王春波, 等. 太阳能燃气联合循环机组热电联产性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(14): 4931-4940.
- Li Hangxing, Chen Liang, Wang Chunbo, et al. Performance analysis of integrated solar combined cycle cogeneration system [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(14): 4931-4940.
- [65] 庞力平, 李瑞华, 孙诗梦, 等. 塔式太阳能辅助 1 000 MW 燃煤发电机组锅炉的热力性能分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1417-1425.
- Pang Liping, Li Ruihua, Sun Shimeng, et al. Thermal analysis on the boiler performance of 1 000 MW tower solar aided power generation unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1417-1425.
- [66] 高佳圣, 徐浩东, 王万权, 等. 集成太阳能辅助供热的 600 MW 高背压热电联产机组的运行及优化[J].

- 热能动力工程, 2023, 38(9): 158-165.
- Gao Jiasheng, Xu Haodong, Wang Wanquan, et al. Operation and optimization of 600 MW high back pressure cogeneration unit with integrated solar assisted heating [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(9): 158-165.
- [67] 耿直, 刘浩晨, 莫子渊, 等. 基于 EBSILON 的中低温槽式光热发电系统运行仿真与性能分析 [J]. 热力发电, 2020, 49(6): 61-68.
- Geng Zhi, Liu Haochen, Mo Ziyuan, et al. EBSILON-based operation simulation and performance analysis for medium-low temperature trough photothermal power generation system [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(6): 61-68.
- [68] 耿直, 江雨晨, 陈柯宇, 等. 不同耦合方式下太阳能燃气-蒸汽联合循环热互补系统特性分析 [J]. 综合智慧能源, 2025, 47(8): 77-88.
- Geng Zhi, Jiang Yuchen, Chen Keyu, et al. Analysis of the characteristics of integrated solar combined cycle under different coupling methods [J]. Integrated Intelligent Energy, 2025, 47(8): 77-88.
- [69] 徐文韬. 带储热装置的太阳能辅助燃煤发电系统研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2020.
- (编辑 亢列梅)