

DOI: 10.19666/j.rlfed.202308121

“双碳”目标下清洁高效灵活煤电技术 现状及煤电前景展望

牟春华¹, 居文平¹, 王洋², 黄嘉驷¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.中国华能集团有限公司, 北京 100031)

[摘要] 阐述了“双碳”战略对煤电目前总体影响以及面临的发展问题; 对煤电机组清洁排放、节能减碳、供热提效、灵活运行的现状和关键技术进行了梳理分析, 展望了煤电发展前景, 得出了基于我国资源禀赋及能源战略安全来积极看待煤电发展的结论, 应重视清洁高效灵活煤电技术的研发与应用, 与各种新能源的优势互补, 动态协同发展, 以推动新型电力系统稳健发展。

[关键词] “双碳”; 清洁; 高效; 灵活; 煤电技术

[引用本文格式] 牟春华, 居文平, 王洋, 等. “双碳”目标下清洁高效灵活煤电技术现状及煤电前景展望[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 1-10. MU Chunhua, JU Wenping, WANG Yang, et al. Techniques status and perspective of efficient-flexible coal fired power generation under carbon peak and neutrality targets[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 1-10.

Techniques status and perspective of efficient-flexible coal fired power generation under carbon peak and neutrality targets

MU Chunhua¹, JU Wenping¹, WANG Yang², HUANG Jiasi¹

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2.China Huaneng Group Co., Ltd., Beijing 100031, China)

Abstract: This paper explains the overall impact of the dual carbon strategy on coal power and the development problems it faces. The status quo and key technologies of clean emissions, energy conservation and carbon reduction, heat supply and efficiency improvement, and flexible operation of coal-fired power units are sorted out and analyzed, and the development prospects of coal power are prospected, and the conclusion is drawn that the development of coal power is positively viewed based on China's resource endowment and energy strategic security, and attention should be paid to the research and development and application of clean, efficient and flexible coal power technology, and the advantages of various new energy sources are complemented and dynamically coordinated to promote the steady development of new power systems.

Key words: double carbon; clean; highly efficient; flexible; coal power technology

1 “双碳”战略与煤电发展

1.1 “双碳”战略对煤电的总体影响

目前及今后一段时期, 顶层设计的“双碳”战略是贯彻新发展理念、构建新发展格局、推动高质量发展的内在要求, 决定了新能源为主体的新型电力系统的发展方向。虽然煤电已不再具备大规模发展的条件, 但也尚不具备煤电完全退出条件, 现有

的电网无法支撑具有间歇性和波动性的新能源长时间高比例运行, 还离不开煤电托底保供、灵活可靠等重要功能支撑^[1-4]。

1.2 欧洲退煤呈现反复化

国际上众多发达国家业已提出零碳电力系统目标, 但对零碳电力系统是否保留化石能源发电尚无定论^[5]。受俄乌冲突、能源供求波动等多因素叠

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目: 基于低品位热能的低碳集中供热关键技术(2022YFC3802402)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFC3802402)

第一作者简介: 牟春华(1966), 男, 正高级工程师, 西安热工研究院有限公司副总经理, 主要从事清洁高效灵活煤电技术研究及应用推广, muchunhua@tpri.com.cn.

加影响,德、法、英、荷等多国已调整前期制定的退煤进程,重启或计划重启煤电以弱化对天然气的依赖。煤电作为当前最为成熟、可靠、经济的能源供给,其重要的战略安全性决定了煤电的退出没有那么容易^[6-10]。

1.3 煤电发展的具体问题

1) 发展政策趋于收紧 《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》是我国“双碳”发展战略的纲领性文件,明确要求“统筹煤电发展和保供调峰,严控煤电装机规模,加快现役煤电机组节能升级和灵活性改造”。总体趋势是:淘汰落后产能,整体转向优化煤电结构,发挥容量价值和灵活调节功能,具体政策将随电力供需关系的变化动态调整,甚至可能有所反复。

2) 支持政策不完善束缚了煤电转型发展 受负荷率和发电量下降、供热锅炉房及小热电厂的关停替代推进慢、辅助服务补偿不到位等因素影响,煤电机组实施“三改联动”还存在投资收益难以保障的问题。煤电机组灵活性调节在促进新能源消纳的同时,也带来煤耗水平上升^[11-13]、安全风险增大、设备寿命下降等问题,经营和管理难度空前。

3) 深度调峰和频繁启停对设备安全运行影响明显 煤炭价格持续震荡,经济煤种掺烧比例不断提升、深度调峰对机组安全稳定运行提出了更高要求。煤质不断恶化,锅炉结焦严重,设备损坏风险加剧,非计划停运情况屡有发生。宽幅快速升降负荷以及频繁启停,造成金属部件低周疲劳损伤^[14],汽轮机轴系振动增大^[15-16]、进汽阀门杆断裂、通流部件损伤^[17-19]、通流部分紧固件失效等时有发生,同时面临检修资金偏紧的难题。

4) 部分机组能耗难以达标 为落实煤电机组改造升级的工作部署,2022年7月,国家发展改革委办公厅、国家能源局综合司印发《关于做好2022年煤电机组改造升级工作的通知》(发改运行〔2022〕662号),规定了煤电机组节能降碳改造、灵活性改造、供热改造的达标量化要求。300 MW和600 MW等级亚临界非供热(或供热比较小)机组,现有改造技术难以让供电煤耗率达到要求,而升参数改造方案存在投资大、投资回收期长的问题,近期不适宜大范围推广。

尽管形势严峻,煤电仍需加大技术开发力度,在清洁、高效、灵活方面进一步提高,增强自身竞

争能力,以适应和促进新型电力系统的构建和发展。以市场为导向,按需定电建设优质煤电,技术创新方向由大容量、高参数、高效率相宜转向灵活调节、安全备用。按照先立后破的原则分批分类推动煤电改造升级、延寿、关停、备用和替代。“一厂一案、一机一策”统筹实施“三改联动”。

2 清洁排放技术

截至2022年底,全国达到超低排放限值的煤电机组约10.5亿kW,占煤电总装机容量比重约94%,已是世界最大的清洁高效煤电体系^[20]。中国华能集团有限公司(华能集团)已研发出世界首创的烟气污染物综合治理技术(COAP),基本实现污染物近零排放,目前正在临沂电厂开展首台套工程验证。碳捕集、利用与封存(CCUS)技术是减碳的重要途径,国内已投产工程年捕集能力为1万~15万t^[21];此外,燃烧前和燃烧中捕集技术也有或规划示范应用。碳市场全面放开增加了煤电发电成本,政府发放配额量决定市场供需,进而影响碳交易价格。近期看,碳排放配额较为充足,碳价维持较低水平;中远期看,随着配额趋紧,碳价可能逐步上升,发电成本将较大程度增加,需通过电力市场疏导。

我国经济快速发展和城镇化进程加快,垃圾、工业固体废物(固废)、污泥、生物质等产量不断累积,资源化回收利用需求日益迫切。煤电锅炉炉膛燃烧温度高、环保排放达标,地域分布均匀且体量规模大。耦合生物质、垃圾、污泥、固废发电技术具有利用率高、减碳效果显著等优势,目前已形成以前置碳化一体机为核心的多源固废处理体系。其中污泥、垃圾及生物质方面通常可采用直燃耦合或气化耦合等方式^[22-27]。受耦合发电量计量标准缺乏、消纳价值未合理体现等因素制约,以上方式未能实现大规模应用;而工业固废耦合发电仍处于初步发展阶段。

3 节能降碳技术

结构优化、节能改造、供热提效、管理提升等多因素助力我国煤电供电煤耗率逐年下降。“十一五”“十二五”“十三五”期间平均供电煤耗率分别下降27、17.6、11.8 g/(kW·h),下降绝对值逐步收窄^[28]。目前,我国煤电热效率已经达到世界先进水平^[29]。鉴于300 MW等级亚临界机组达标难度大,

建议其以扩大供热、灵活调节、运行节能、管理提效为主。

600 MW 等级及以上大容量煤电机组节能降碳技术主要有设备提效、余热深度利用、能量梯级利用、转机调速改造、热力系统构型优化、跨代升级等。

采用“小焓降、多级次”通流匹配理念,优化设计汽轮机通流部分,应用宽负荷叶型和先进密封结构,兼顾变负荷经济性。300 MW 等级亚临界、600 MW 等级亚临界和超临界、1 000 MW 等级超超临界一次再热汽轮机通流提效改造后,热耗率一般可达 7 850~7 900^[30]、7 800~7 850^[31]、7 550~7 580^[32-33]、7 300~7 400^[34] kJ/(kW·h),热力性能接近同参数新机组。对汽轮机叶顶、隔板、轴端等针对性汽封升级,供电煤耗率可下降 2~4 g/(kW·h)。锅炉空气预热器、磨煤机、泵与风机、凝汽器与冷却塔^[35-37]等辅机设备提效改造,供电煤耗率可下降 0.5~1.5 g/(kW·h)。

余热梯级利用方面,有回收锅炉烟气余热用于加热入炉空气和低压加热器凝结水^[38-39]的低温省煤器联合暖风器技术,可降低机组供电煤耗率 2~3 g/(kW·h);有增设外置式蒸冷器^[40]、附加高压加热器^[41]的回热系统提效技术,提升宽负荷热力循环效率,提高给水温度,兼顾锅炉脱硝系统宽负荷运行;有在供热汽源和用户之间设置背压汽轮机梯级利用供热蒸汽压差的能量梯级技术,保证供热质量的前提下降低供电煤耗率^[42];启停过程中的临机加热^[43]、停备机组闲置系统互联^[44]、亚临界机组吹灰^[45]/减温水源优化改造,锅炉定、连排余热回收改造,均可取得一定程度的节能挖潜效果。

针对变电热负荷运行边界约束,部分泵与风机采用调速运行方式辅助以运行优化调节可产生比较好节能效果。主要有:1)动力源侧调速,电动机驱动改为小汽轮机驱动^[46]、电动机双速改造^[47]以及加装变频器等^[48];2)能量传动侧调速,如液力耦合器调速、行星齿轮调速^[49]、永磁调速^[50]等。

针对设备布置及系统重构,近年来提出了汽轮机全高位、汽轮机高低位布置理念,可降低高温材料耗用及主再热蒸汽压损,工程应用表明四大管道节省约 30%。全高位布置汽轮发电机组热经济性总体上优于同参数的常规布置机组^[51-53],但未有述及土建工程量增大等影响。相同主再热参数的二次再热机组比一次再热机组的热效率可提高 1.5%~

2.0%^[54-55]。其中,莱芜电厂发电效率 47.95%,供电煤耗率 266.2 g/(kW·h),能效指标领先,但增加了设备、系统及调控的复杂性。然而,受到近年来煤电利用小时和平均负荷率逐年下降等多因素影响,其技术优势对应的经济收益没有得到合理保障,规模化推广受到一定影响。

提高初参数并降低末端参数,一直是高效燃煤发电技术的主要发展方向。存量机组提升初温技术路线主要有小幅提升(通常不超 10 °C)、“亚改超”和“亚改超超”3种。研究结果^[56]表明,提温幅度与改造范围和投资规模呈正比关联,节能效果分别为 0.3~0.5、3.5~4.5、7.5~8.5 g/(kW·h),但投资收益率整体偏低。增量方面,我国 25~31 MPa/600 °C 等级超超临界发电技术已经逐步成熟,同时具备了 630 °C 超超临界机组的研发能力^[57]。大唐东营电厂 1 000 MW 机组,充分利用当地优良低温海水条件,采用“单轴六缸六排汽设计”,背压降至 2.9 kPa,为常规机组设计值的 59%,处于同类型机组世界最低水平,可降低供电煤耗率 5.2 g/(kW·h)。华能集团正在研发 650 °C 高效燃煤发电技术^[58-59],拟利用自主研发的 HT700 系列高温材料建设全球首台 650 °C 高参数燃煤发电机组,供电煤耗率不高于 254 g/(kW·h),能耗指标全球领先。材料和加工制造技术是发展先进机组的技术核心,初参数不是越高越好,背压也不是越低越好,应结合地理气候条件,兼顾投资回收,综合比选确定最优值。

4 供热提效技术

煤电供热技术可回收排入大气中的部分热量用于供热以提高能源综合利用效率,实现热电联产,推动全社会节能降碳。我国富煤缺油少气的资源禀赋,决定了煤炭清洁高效利用仍是我国采暖和工业集中用热的主要途径。长距离供热可大幅拓展传统供热半径 25 km 至 100 km,叠加长时大容量储热,集中热源和用热中心在空间和时间维度上的不匹配得以解决。集中供热面积、热电联产装机和供热量占比逐年攀升,近十年分别增长 73 亿 m²、20.4%和 17.8%,达 130 亿 m²、47.8%和 61.8%^[60]。

按用热性质不同,集中供热主要分为生活采暖和工业用热两大类。存量煤电机组供热改造,以“压力梯级、温度对口”为导向,在蒸汽系统某处选取参数和量符合要求的汽源,改造技术成熟,投资与技术经济性是重要的考量。受供需关系匹配导向,

热电联产以 135~600 MW 等级机组为主,近年来 1 000 MW 级机组逐步实施供热改造。随着新能源电力规模化发展和高比例消纳,供热改造方案比选需重点兼顾发电和供热负荷的调节灵活性。

生活采暖的目标是维持约 20 °C 室内温度。从中压缸排汽处抽汽至供热首站表面换热器加热供热循环水,是供热改造的基本方案^[61],适用于低压缸双分流对称布置的 100 MW 级以上机组,高背压^[62-63]、低压缸光轴^[64]技术大幅降低冷源损失,缺点有受热网参数影响明显、热电负荷强耦合等,运行灵活性差;低压缸零出力技术^[65-66]突破低压缸最小进汽流量限制,取得供热能力、电热调节能力、能效水平的协同提升。

工业供热的目标是满足用户生产需求,诸如化工、材料、印染、食品等行业的驱动、加热等。与以水为热载体的采暖不同,应以“一厂一案、一汽一策”为原则,需求端参数(压力、温度、流量)叠加管网损失(压降、温降、质损失),通过技术经济比选确定汽源及调节方案。据统计,热电联产供汽压力多在 0.8~4.0 MPa,温度多在 180~450 °C。按照汽源抽汽压力在变电负荷范围内是否可调,供汽可分为非调节和可调节 2 种:前者是在回热抽汽口、高压缸进/排汽、中压缸进/排等处抽汽,适用于少量用汽场景;后者是在汽轮机及热力循环的内部设置调节系统以实现变电负荷范围内供汽参数稳定,适用于大流量用汽场景。存量机组供汽改造,需统筹考虑抽汽外供对现系统和设备安全性的影响。非调节抽汽应进行抽汽点前汽轮机三级动、静叶片蒸汽弯应力及推力安全的热力校核,其汽源点在锅炉再热器之前,抽汽量还受再热器受热面超温限制。调节抽汽应进行最大抽汽量和最低抽汽压力工况下抽汽点前的叶片和隔板强度及轴向推力安全的热力校核。具体而言,以蒸汽压力和流量为供汽方案选择依据,1 MPa 及以下参数宜选连通管抽汽^[67-68],必要时增设调节阀;1~2 MPa 小流量场景可选再热冷端/再热热端处抽汽^[69]、匹配抽汽^[70],大流量场景可选再热热端可调抽汽^[71-72]、旋转隔板抽汽^[73];2~3.5 MPa 小流量场景可选匹配抽汽,大流量场景可选再热热端可调抽汽;3.5~4 MPa 小流量场景可选高压缸回热抽汽^[74],必要时辅之以高参数蒸汽掺混或增设熔融盐储热系统。

5 灵活运行提升技术

新型电力系统对煤电机组灵活运行性能指标

要求主要有最小发电出力、最大发电出力、变电负荷速率、快速启停时间等。灵活性改造认定标准要求纯凝工况下最小发电出力不高于 35% 额定负荷,或是供热运行时单日 6 h 最小发电出力不高于 40% 额定负荷。灵活性能力提升主要从机组自身潜力挖掘和增设储能系统 2 方面开展。

深度调峰相关技术有锅炉低负荷稳燃^[75-76]、脱硝等环保系统宽负荷运行^[77]、超低负荷关键设备及部件安全监控和超宽负荷优化控制等。现役纯凝煤电调峰负荷可下探至 35% 以下,新建超超临界机组调峰负荷可以达到 30%。近年来,部分投运机组进行了最低发电负荷 20% 深度调峰的试验或尝试,但未常态化运行。供热机组实施低压缸零出力、旁路供热等热电解耦改造^[78-79],深度调峰能力仍不及纯凝运行工况,还因顶峰能力不足频繁受电网考核。耦合储能系统,是进一步提升煤电机组电出力调节能力的有效途径。供热机组利用热力管网蓄能、增设电锅炉/热水罐等储热系统^[80-81],通过热负荷时间维度上的迁移拓宽电负荷调节范围。压缩气体、熔盐储热系统等容量型储能系统,与煤电机组热力系统深度耦合^[82-84],节省蓄热设备,还可提升储能效率约 5 百分点~10 百分点,应用前景广阔。2022 年 12 月,全球首套与煤电耦合的熔盐储热项目在江苏靖江电厂成功投运,应用机组的调频性能、调峰能力及供汽可靠性均得到了显著提升^[85]。

变负荷能力直接反映了机组运行灵活性。锅炉系统响应速率是制约煤电机组负荷响应的主要因素,通过热力系统、制粉及燃烧系统的优化设计缩短锅炉对负荷的响应时间,通过制粉系统、给水系统的协调优化控制提升锅炉响应过程的快速性,通过调节凝结水、给水、供热抽汽等多变量协同调节^[86],常规纯凝工况变负荷速率达 1.2%~1.8%Pe/min,供热工况可达 1%~1.2%Pe/min。在机组挖潜基础上,增设熔盐、电化学^[87]、飞轮^[88]、超级电容^[89]等储能装置及其组合,可进一步提升变负荷能力。

6 前景展望

能源安全是能源转型的基础,也是构建新型电力系统的底线。近年来迎峰度夏(冬)期间,燃料价格持续震荡、新能源电力区域性时段性短缺等多因素综合叠加引起用电紧张,煤电兜底保供作用再次凸显,煤电政策导向有所改善,但“分类分企优化存量、按需严控增量”的总体方针仍不会改变。

6.1 统筹优化升级存量

1) 针对性加大煤电低碳转型科技创新, 重点攻克应急机组长期停备模式下设备安全评估及维保、高频宽幅灵活调节下设备及关键部件安全监控与低负荷工况保效、热电联供系统大热电比高灵活性、多源大比例掺烧下锅炉安全经济运行、智能控制、耦合煤电的新型储能等系列关键技术。

2) 分类分企, 多元发展。以替代升级、转应急备用、关停等方式坚决淘汰落后产能。推进性能优良、环境友好、经营稳定的机组延寿运行, 发挥存量价值。锚定新定位新功能, 与集中用热(能)、固废处置、储能深度捆绑, 拓展综合能源服务形式和种类。

3) 因地制宜、一厂一策、一机一案, 统筹有序推动“三改联动”。以实际需求为导向, 以热力试验和节能诊断为依据, 以长期效益合理保障为前提, 重点推进 600 MW 等级及以上大机组提效改造、稳步推进煤电扩大供热、择优发展长输供热、有序推动灵活性改造。

4) 优化调度, 助力大范围系统性节能降碳。多变量约束下实施煤电企业内部稳态和瞬态优化运行外, 还要加强电力热力能流链、区域链的“源、网、荷、储”联动协同, 优化负荷、启停、旋转备用等调度方式, 提高单机出力系数, 优先发挥大容量、高参数、低能耗煤电机组基本负荷作用。

6.2 按需发展优质增量

立足国情和世界能源形势, 以满足电力缺口和服务新能源为导向, “以需定电”建设优质增量。

1) 稳步推进 650 °C 超超临界燃煤发电、大容量超临界 CO₂ 发电、智能电厂、大规模 CO₂ 捕集利用与封存、综合能源基地一体化集成、大容量低成本新型储能、煤电机组耦合超临界 CO₂ 布雷顿循环和太阳能热发电、退役机组卡诺电池转型改造等系列关键技术集中攻关和试点示范。

2) 研发新一代清洁高效灵活燃煤发电机组并示范应用。在满足高参数(超超临界)、大容量(600 MW 级及以上)、高效率(不低于 46%)基本要求之外, 应重点关注全生命周期的灵活调节和安全备用性能, 应等同气电和抽蓄电站, 目标是零碳燃料掺烧比例不低于 30%, 负荷变化范围 0~120%Pe, 变化速率 5%~6%Pe/min, 快速启停时间不超 2 h, 20% 额定负荷能耗较额定负荷增加不超 35%, 全工况烟尘、SO₂、NO_x 近零排放和重金属、CO₂ 深度脱除。

3) 经过多年发展, 我国能源供应保障能力不断增强, 基本形成了煤、油、气、电、核、新能源和可再生能源多轮驱动的能源生产体系, 能源供给的多样性在应对极端天气以及突发国际变局方面让中国更加从容, 多措并举保障能源安全, 所以煤电的保障能源安全功能会越来越突出, 将会导致煤电短期的救急功能和长期的平衡器功能获得的收益大大增加。

6.3 管理提升

1) 数字经济是继农业经济、工业经济之后的主要经济形态。“十四五”时期, 我国数字经济转向深化应用、规范发展、普惠共享的新阶段。在这种大背景下, 数字技术与煤电行业加速融合, 煤电智慧化转型已是大势所趋, 把煤电行业变革推到了一个新高度, 在建设、生产、检修、燃料传输、电量上网各个环节智能化升级, 减少消耗提高效率, 促进煤电高质量发展。

2) 煤电将更多地承担系统调峰、调频、调压和备用等特殊服务功能。煤电“三改联动”涉及纵深程度是前所未有的, 不可避免存在标准缺失的情况, 应依托示范项目总结相关标准, 持续完善或立项燃煤发电机组节能改造、供热改造、灵活性改造、燃煤掺烧优化、改造延寿、应急备用等相关标准, 以标准支撑和规范煤电机组清洁高效灵活性水平提升, 促进煤电行业健康有序发展。

3) 煤电的清洁排放与灵活运行都将抬升能耗水平, 和煤电自身高效目标似有相违。“双碳”目标下, 要辩证看待以及综合平衡煤电清洁排放-煤电灵活运行-电力系统整体低强度碳排放的关系, 以取得综合效果最佳, 但也增加了煤电企业管理提效的难度和复杂性。

7 结 语

新型电力系统构建对煤电行业是挑战, 更是机遇。要从时间维度科学看待煤电短期和中长期发展。新型电力系统建设不是一挥而就, 在安全高效低成本方面, 新型储能及氢能、核能等前沿性、颠覆性技术突破尚需时日, 重点是准确定位不同时期的煤电功能, 并随政策、市场、技术等约束动态调整。还要从我国的资源禀赋及能源战略安全方面考虑, 来积极看待煤电发展, 重点要将内外部条件及可利用条件充分结合, 积极开展清洁高效灵活煤电技术的研发与应用, 与各种新能源的优势互补动态

协同, 推动新型电力系统稳健发展。

【参考文献】

- [1] 吴智泉, 贾纯超, 陈磊, 等. 新型电力系统中储能创新方向研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(10): 444-451.
WU Zhiquan, JIA Chunchao, CHEN Lei, et al. Research on innovative direction of energy storage in new power system construction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(10): 444-451.
- [2] 李相俊, 赵珊珊, 惠东. 面向新型电力系统的大型储能电站关键技术发展趋势分析与展望[J]. 供用电, 2022, 39(7): 2-8.
LI Xiangjun, ZHAO Shanshan, HUI Dong. Development trend analysis and prospect of key technologies of large energy storage station in new type power system[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(7): 2-8.
- [3] 夏晨阳, 杨子健, 周娟, 等. 基于新型电力系统的储能技术研究[J]. 内蒙古电力技术, 2022, 40(4): 3-12.
XIA Chenyang, YANG Zijian, ZHOU Juan, et al. Research on energy storage technology based on new power system[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2022, 40(4): 3-12.
- [4] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报: 2023, 43(1): 158-169.
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE: 2023, 43(1): 158-169.
- [5] 景锐, 周越, 吴建中. 赋能零碳未来——英国电力系统转型历程与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(16): 87-98.
JING Rui, ZHOU Yue, WU Jianzhong. Empowering zero-carbon future—experience and development trends of electric power system transition in the UK[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 87-98.
- [6] 舒印彪, 赵勇, 赵良, 等. “双碳”目标下我国能源电力低碳转型路径[J]. 中国电机工程学报: 2023, 43(5): 1663-1672.
SHU Yinbiao, ZHAO Yong, ZHAO Liang, et al. Study on low carbon energy transition path toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE 2023, 43(5): 1663-1672.
- [7] 岳昊, 郑雅楠. 从国际经验教训看我国构建新型电力系统的问题和风险[J]. 中国能源, 2022, 44(2): 38-44.
YUE Hao, ZHENG Yanan. Analyzing the problems and risks of building a new type of power system in china from international experience and lessons learned[J]. Energy of China, 2022, 44(2): 38-44.
- [8] 杨若朴. “双碳”目标下构建新型电力系统的挑战与对策[J]. 中外能源, 2022, 27(7): 17-22.
Yang Ruopu. Challenges and countermeasures for building a new power system under the goal of achieving carbon peaking and carbon neutrality[J]. Sino-global Energy, 2022, 27(7): 17-22.
- [9] 田江南, 安源, 常德生, 等. 碳中和背景下我国新型电力系统构建过程中的问题与建议[J]. 电力勘测设计, 2022(7): 67-70.
TIAN Jiangnan, AN Yuan, CHANG Desheng, et al. Problems and suggestions in the construction of china's new power system under the background of carbon neutrality[J]. Electric Power Survey & Design, 2022(7): 67-70.
- [10] 郭创新, 刘祝平, 冯斌, 等. 新型电力系统风险评估研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2022, 48(9): 3394-3404.
GUO Chuangxin, LIU Zhuping, FENG Bin, et al. Research status and prospect of new-type power system risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3394-3404.
- [11] 王树东, 吕为智. 深度调峰形势下燃煤机组的价值量化评估[J]. 动力工程学报, 2020, 40(9): 701-706.
WANG Shudong, LYU Weizhi. Quantitative valuation of coal-fired units under deep peak regulation conditions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(9): 701-706.
- [12] 赵斌, 王喆, 闫晨帅, 等. 超临界 600 MW 燃煤机组深度调峰运行热经济性分析[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 109-114.
ZHAO Bin, WANG Zhe, YAN Chenshuai, et al. Thermal economy analysis on deep peak regulation operation of Supercritical 600 MW coal-fired unit[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 109-114.
- [13] 张绪辉, 赵中华, 崔福兴, 等. 1 030 MW 超超临界机组深度调峰特性试验研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(2): 58-62.
ZHANG Xuhui, ZHAO Zhonghua, CUI Fuxing, et al. Experimental research on deep peak regulation characteristics of 1 030 MW ultra-super critical unit[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(2): 58-62.
- [14] 赵乃龙, 吴穹, 王炜哲, 等. 超超临界汽轮机高压转子低周疲劳及损伤分析[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(5): 590-594.
ZHAO Nailong, WONG Qiong, WANG Weizhe, et al. Numerical analysis of low-cycle fatigue and damage of a ultra-supercritical steam turbine high-pressure rotors[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2015, 49(5): 590-594.
- [15] 张学延, 屈杰, 何国安, 等. 大型汽轮发电机组非典型故障分析[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 284-292.
ZHANG Xueyan, QU Jie, HE Guoan, et al. Case analysis of several atypical faults of large turbo-generator set[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 284-292.
- [16] 张学延, 杨会斌, 李立波. 伯德曲线在某 300 MW 汽轮机高中压转子裂纹故障诊断中的应用[J]. 热力发电, 2020, 49(2): 115-120.
ZHANG Xueyan, YANG Huibin, LI Libo. Application of abnormal Bode curve in crack diagnosis of HP-IP rotor of a 300 MW steam turbine[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(2): 115-120.
- [17] 薛育龙, 张文奇, 李改娣, 等. 超临界 350 MW 机组给水泵汽轮机第 5 级动叶片断裂原因调查分析[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(2): 136-140.
XUE Yulong, ZHANG Wenqi, LI Gaidi, et al. Fracture analysis on the fifth stage moving blade of feed water pump turbines of a supercritical 350 MW unit[J]. Turbine Technology, 2022, 64(2): 136-140.
- [18] 宋文希, 谷伟伟, 张永海, 等. 某 600 MW 汽轮机低压第 6 级动叶片断裂原因分析[J]. 汽轮机技术, 2018, 60(1): 66-68.
SONG Wenxi, GU Weiwei, ZHANG Yonghai, et al. Fracture reason analysis for the low pressure 6th stage blade of a 600 MW unit steam turbine[J]. Turbine Technology, 2018, 60(1): 66-68.
- [19] 薛永锋, 张吉荣, 常强. 国产 330 MW 机组中压缸次末级

- 动叶断裂原因分析[J]. 东北电力技术, 2021, 42(7): 31-33.
XUE Yongfeng, ZHANG Jirong, CHANG Qiang. Analysis of secondary last stage rotor blade of IP cylinder fracture in domestic 330 MW unit[J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(7): 31-33.
- [20] 中国电力行业年度发展报告 2023[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2023: 1.
Annual development report of China's power industry 2023[R]. Beijing: China Electricity Council, 2023: 1.
- [21] 刘牧心, 梁希, 林千果. 碳中和背景下中国碳捕集、利用与封存项目经济效益和风险评估研究[J]. 热力发电, 2021, 50(9): 18-26.
LIU Muxin, LIANG Xi, LIN Qianguo. Economic analysis and risk assessment for carbon capture, utilization and storage project under the background of carbon neutrality in China[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(9): 18-26.
- [22] 陈大元, 王志超, 李宇航, 等. 燃煤机组耦合污泥发电技术[J]. 热力发电, 2019, 48(4): 15-20.
CHEN Dayuan, WANG Zhichao, LI Yuhang, et al. Sludge-coupled power generation technology in coal-fired power plant[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(4): 15-20.
- [23] 王一坤, 贾兆鹏, 魏星, 等. 燃煤电站耦合生活垃圾发电技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 83-92.
WANG Yikun, JIA Zhaopeng, WEI Xing, et al. Study on power generation technology of coal-fired power station coupled with domestic waste[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 83-92.
- [24] 王一坤, 徐晓光, 王栩, 等. 燃煤机组多源耦合发电技术及应用现状[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 60-68.
WANG Yikun, XU Xiaoguang, WANG Xu, et al. Multi-source coupling coal-fired power generating technology and its application status[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 60-68.
- [25] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组直接耦合生物质发电技术经济性分析[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 32-40.
WANG Yikun, DENG Lei, JIA Zhaopeng, et al. Technical and economic analyses on directly coupled biomass power generation for coal-fired units[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 32-40.
- [26] 王一坤, 邓磊, 贾兆鹏, 等. 燃煤机组大比例直接耦合生物质发电对机组影响研究[J]. 热力发电, 2021, 50(12): 80-91.
WANG Yikun, DENG Lei, JIA Zhaopeng, et al. Influence of large-scale direct coupled biomass power generation on coal-fired units[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 80-91.
- [27] 李帅英, 周虹光, 严万军, 等. 城市废弃物前置干燥炭化技术在污泥耦合发电中的大型化工业实施[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 57-63.
LI Shuaiying, ZHOU Hongguang, YAN Wanjun, et al. Large-scale industrial implementation of municipal waste pre-drying carbonization technology in sludge coupled power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 57-63.
- [28] 刘志强, 潘荔, 赵毅, 等. “十四五”时期我国火电行业节能潜力分析与建议[J]. 中国能源, 2021, 43(4): 12-18.
LIU Zhiqiang, Pan Li, ZHAO Yi, et al. Analysis and suggestions of “14th Five-Year Plan” thermal power industry energy conservation potential in China[J]. Energy of China, 2021, 43(4): 12-18.
- [29] 刘志强, 赵毅, 潘荔. 中外火电节能减排效率分析与比较[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 9-18.
LIU Zhiqiang, ZHAO Yi, PAN Li. Analysis and comparison of energy saving efficiency and emission reduction efficiency of thermal power between China and foreign countries[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 9-18.
- [30] 谭锐, 徐星, 邵峰, 等. 300 MW 等级亚临界汽轮机通流改造综述[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(4): 291-294.
TAN Rui, XU Xing, SHAO Feng, et al. Review of the flow path retrofit of 300 MW class subcritical steam turbine[J]. Turbine Technology, 2017, 59(4): 291-294.
- [31] 徐星, 谭锐. 600 MW 亚临界汽轮机通流改造综述[J]. 电站系统工程, 2018, 34(6): 45-48.
XU Xing, TAN Rui. Review of the flow path retrofit of 600 MW subcritical steam turbine[J]. Power System Engineering, 2018, 34(6): 45-48.
- [32] 徐星, 谭锐. 600 MW 级超临界机组通流改造方案比较[J]. 热能动力工程, 2018, 33(2): 148-152.
XU Xing, TAN Rui. Comparison of versions for modifying the flow path of a 600 MW class supercritical unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2018, 33(2): 148-152.
- [33] 张继红, 杜文斌, 赵杰, 等. 600 MW 等级超临界汽轮机通流改造综述[J]. 热力发电, 2019, 48(2): 1-8.
ZHANG Jihong, DU Wenbin, ZHAO Jie, et al. Review of flow path retrofit of 600 MW class supercritical steam turbines[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(2): 1-8.
- [34] 张昊, 雷少博, 付康民, 等. 1 000 MW 超超临界汽轮机通流部分改造效果分析及研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(4): 315-317.
ZHANG Hao, LEI Shaobo, FU Kangmin, et al. Analysis and research on the retrofit of 1 000 MW ultra-supercritical steam turbine[J]. Turbine Technology, 2021, 63(4): 315-317.
- [35] 谷巍, 程东涛, 居文平. 大型汽轮机凝汽器冷却面积增容问题研究[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(1): 47-49.
GU Wei, CHENG Dongtao, JU Wenping. Study on compatibilization of large steam turbine condenser cooling area[J]. Turbine Technology, 2017, 59(1): 47-49.
- [36] 王明勇, 栾俊, 刘江. 冷却塔填料布置方式对热力学性能的影响[J]. 热力发电, 2018, 47(3): 82-87.
WANG Mingyong, LUAN Jun, LIU Jiang. Impact of non-uniform fill layouts of the cooling tower on thermal performance[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(3): 82-87.
- [37] 吕凯, 陈胜利, 荆涛, 等. 提高直接空冷机组夏季冷却性能技术分析[J]. 热力发电, 2016, 45(5): 107-111.
LYU Kai, CHEN Shengli, JING Tao, et al. Technical schemes of improving operation performance of direct air-cooling units in summer: a review[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(5): 107-111.
- [38] 张华东, 张知翔, 贾兆鹏, 等. 低温省煤器与暖风器联合系统应用[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 127-132.
ZHANG Huadong, ZHANG Zhixiang, JIA Zhaopeng, et al. Application of combined system of low pressure economizer and air heater[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 127-132.
- [39] 李楠, 张知翔, 邹小刚, 等. 低低温省煤器优化改造关键技术研究[J]. 热力发电, 2021, 50(6): 151-156.
LI Nan, ZHANG Zhixiang, ZOU Xiaogang, et al. Key technology of optimization reform of ultra low pressure economizer[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(6): 151-156.

- [40] 周璐瑶, 王梦娇. 1 000 MW 机组外置式蒸汽冷却器系统焓分析[J]. 热能动力工程, 2021, 36(2): 24-30.
ZHOU Luyao, WANG Mengjiao. Exergy analysis of 1 000 MW power plant with outer steam cooler[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(2): 24-30.
- [41] 谢天, 吕凯, 黄嘉骐, 等. 适应深度调峰的广义回热系统热力特性研究[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 71-76.
XIE Tian, LYU Kai, HUANG Jiasi, et al. Study on the thermodynamic characteristics of generalized regenerative system used for deep peak load regulating operation[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 71-76.
- [42] 程东涛, 王生鹏, 谢天, 等. 抽汽供热机组增设背压机节能效果评价[J]. 热能动力工程, 2021, 36(7): 7-11.
CHENG Dongtao, WANG Shengpeng, XIE Tian, et al. Energy-saving effect evaluation of adding back pressure turbine to steam extraction heat supply unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(7): 7-11.
- [43] 许朋江, 王煜伟, 任丽君. 基于临机加热系统的锅炉变温冲洗方式[J]. 热力发电, 2019, 48(5): 121-125.
XU Pengjiang, WANG Yuwei, REN Lijun. Variable temperature flushing method for boilers based on adjacent heating system[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(5): 121-125.
- [44] 吕凯, 孙鹏, 任丽君, 等. 火电机组冷端系统邻机互联改造[J]. 热力发电, 2017, (10): 88-93.
LYU Kai, SUN Peng, REN Lijun, et al. Research of neighbor inter-connection on cold end system of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2017, (10): 88-93.
- [45] 陈开峰, 阮圣奇, 吴仲. 1 000 MW 机组锅炉吹灰汽源改造节能分析[J]. 电力科学与工程, 2018, 34(4): 74-78.
CHEN Kaifeng, RUAN Shengqi, WU Zhong. Energy conservation analysis of steam source transformation of boiler soot blowing of 1 000 MW unit[J]. Electric Power Science and Engineering, 2018, 34(4): 74-78.
- [46] 王勇. 330 MW 机组电动给水泵改汽动给水泵的研究与实践[D]. 北京: 华北电力大学, 2014: 11-16.
WANG Yong. Study and practice of the driving mode of feed water pumps for 330 MW units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014: 11-16.
- [47] 刘桂生, 马骏驰, 丁平, 等. 循环水泵电动机双速改造[J]. 热力发电, 2008, 37(2): 66-67.
LIU Guisheng, MA Junchi, DING Ping, et al. Retrofitting electric motor of circulating water pump into a double-speed one[J]. Thermal Power Generation, 2008, 37(2): 66-67.
- [48] 毛刚, 汤载阳. 动叶可调引风机变频改造的经济性论证[J]. 电力勘测设计, 2015(2): 44-46.
MAO Gang, TANG Zaiyang. Economic argumentation of variable frequency reconstruction for axial fan with adjustable blades[J]. Electric Power Survey & Design, 2015(2): 44-46.
- [49] 徐光涛. 行星齿轮调速器在 660 MWe 超临界空冷机组电动给水泵上的应用[J]. 电力技术, 2010, 19(8): 43-46.
XU Guangtao. Application of planetary gear governor in motor-driven feed pump of 600 MWe supercritical air-cooled unit[J]. Electric Power Technology, 2010, 19(8): 43-46.
- [50] 章世斌, 蒋庆群, 张贵良, 等. 永磁驱动调速技术在引风机改造中的应用[J]. 热力发电, 2014, 43(5): 135-138.
ZHANG Shibin, JIANG Qingqun, ZHANG Guiliang, et al. Application of permanent magnetic speed control technology in ID fan retrofitting[J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(5): 135-138.
- [51] 杜威, 唐广通, 汪潮洋, 等. 汽轮发电机组全高位布置对机组热经济性的影响分析[J]. 汽轮机技术, 2022, 64(2): 108-110.
DU Wei, TANG Guangtong, WANG Chaoyang, et al. Thermal economy analysis for the influence of unit with high position arrangement[J]. Turbine Technology, 2022, 64(2): 108-110.
- [52] 何文, 李红星, 温长宏, 等. 高位布置汽轮发电机组施工技术研究与应用[J]. 安装, 2022(增刊 1): 11-13.
HE Wen, LI Hongxing, WEN Changhong, et al. Research and application of construction technology for high position steam turbine generator units[J]. Installation, 2022(Suppl.1): 11-13.
- [53] 王树民, 吕智强, 宋畅, 等. 汽轮发电机组高位布置基础振动试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4217-4226.
WANG Shumin, LYU Zhiqiang, SONG Chang, et al. Vibration test research of steam turbine generator foundation jointly configured on higher floor[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(12): 4217-4226.
- [54] 付亦藏, 谢天, 屈杰. 一次、二次再热机组汽轮机高低位布置方案热经济性分析[J]. 热力发电, 2017, 46(7): 1-4.
FU Yizang, XIE Tian, QU Jie. Thermal-economic analysis for scheme of steam turbine generator placement in high and low platform separately[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(7): 1-4.
- [55] 陈正浩, 陆正裕. 百万千瓦等级燃煤机组二次再热与一次再热技术选型经济性对比分析[J]. 上海电力大学学报, 2022, 38(4): 375-378.
CHEN Zhenghao, LU Zhengyu. Comparative economic analysis of double-reheat and single-reheat technology selection for million-kilowatt grade coal-fired units[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2022, 38(4): 375-378.
- [56] 范庆伟, 管洪军, 陈显辉, 等. 现役燃煤火电机组提升参数改造技术现状及关键问题分析[J]. 热能动力工程, 2022, 37(6): 12-18.
FAN Qingwei, GUAN Hongjun, CHEN Xianhui, et al. Present situation and key problem analysis in parameters increasing reformation technology for active coal-fired thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6): 12-18.
- [57] 王倩, 王卫良, 刘敏, 等. 超(超)临界燃煤发电技术发展及展望[J]. 热力发电, 2021, 50(2): 1-9.
WANG Qian, WANG Weiliang, LIU Min, et al. Development and prospect of (ultra) supercritical coal-fired power generation technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(2): 1-9.
- [58] 税杨浩, 刘强, 张磊, 等. 650 °C 超超临界 1 000 MW 机组回热系统的参数优化[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(1): 89-94.
SHUI Yanghao, LIU Qiang, ZHANG Lei, et al. Parametric optimization of a regenerative system for a 650 °C ultra-supercritical steam turbine[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2020, 41(1): 89-94.
- [59] 许朋江, 薛朝囡, 居文平, 等. 一种二次再热 650 °C 超超临界机组系统: ZL 202110606433[P]. 2021-08-10 [2022-12-09].
XU Pengjiang, XUE Zhaonan, JU Wenping, et al. A

- secondary reheat 650 °C ultra supercritical unit system: ZL 202110606433[P]. 2021-08-10 [2022-12-09].
- [60] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城乡建设统计年鉴(2011-2021年)[EB/OL]. [2022-12-09]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzd-gknr/sjfb/tjxx/index.html>. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Statistical Yearbook of Urban and Rural Construction (2011-2021) [EB/OL]. [2022-12-09]. <https://www.mohurd.gov.cn/gongkai/fdzd-gknr/sjfb/tjxx/index.html>.
- [61] 王子杰, 陆树银, 赵梓良, 等. 供热改造对火电机组性能的影响分析[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2325-2331. WANG Ziiie, LU Shuyin, ZHAO Ziliang, et al. Analysis of the influence of heating transformation on the performance of thermal power unit[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, 42(5): 2325-2331.
- [62] 吕凯, 李杰, 安江涛, 等. 330 MW 高背压供热机组热力特性研究[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(1): 59-62. LYU Kai, LI Jie, AN Jiangtao, et al. Thermodynamic characteristics of a 330 MW unit with high back-pressure circulating water heating[J]. Turbine Technology, 2019, 61(1): 59-62.
- [63] 弓学敏, 崔后品, 徐承美, 等. 大型空冷机组高背压供热运行特性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(8): 103-109. GONG Xuemin, CUI Houpin, XU Chengmei, et al. Analysis on operation characteristics of high back-pressure heating for large air-cooling units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(8): 103-109.
- [64] 王建勋. 200 MW 机组低压光轴供热技术调峰能力及经济性分析[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(3): 219-222. WANG Jianxun. Analysis of peak-load regulation capability and economy on heating technology of low-pressure optical axis for 200 MW unit[J]. Turbine Technology, 2021, 63(3): 219-222.
- [65] 杨海生, 张拓, 唐广通, 等. 低压缸零出力技术对供热机组深度调峰性能影响及调峰补偿标准探讨[J]. 热能动力工程, 2020, 35(6): 268-273. YANG Haisheng, ZHANG Tuo, TANG Guangtong, et al. Influence of zero-output technology of low-pressure cylinder on deep peak regulation performance of heating unit and compensation standard for peak regulation[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 268-273.
- [66] 谢天, 杨荣祖, 程东涛, 等. 低压缸零出力供热工况中低压缸连通管内部流动数值模拟[J]. 热力发电, 2021, 50(11): 99-106. XIE Tian, YANG Rongzu, CHENG Dongtao, et al. Numerical simulation of internal flow in connecting pipe of IP and LP cylinder under zero-output heating conditions of LP cylinder[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(11): 99-106.
- [67] 唐涛, 张良平, 周永东, 等. 东方1 000 MW 级火电机组供热改造方案探讨[J]. 东方汽轮机, 2018, (3): 8-11. TANG Tao, ZHANG Liangping, ZHOU Yongdong, et al. Discussion on heat reform scheme of DTC 1 000 MW unit[J]. Dongfang Turbine, 2018, (3): 8-11.
- [68] 任林, 徐文彭, 文祥. 1 000 MW 超超临界机组供热改造[J]. 能源与节能, 2021(12): 94-99. REN Lin, XU Wen, PENG Wenxiang. Heating retrofitting for 1 000 MW ultra super-critical unit[J]. Energy and Energy Conservation, 2021(12): 94-99.
- [69] 康海涛, 冯知正, 武闻利. 亚临界300 MW 机组热再抽汽的改造关键问题分析[J]. 电站系统工程, 2021, 37(2): 51-52. KANG Haitao, FENG Zhizheng, WU Wenli. Analysis of key problems in re-extraction steam of subcritical 300 MW unit[J]. Power System Engineering, 2021, 37(2): 51-52.
- [70] 孙博昭, 王春波, 李松, 等. 350 MW 超临界机组可调式蒸汽喷射器工业供热系统热电联产性能分析[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(6): 36-44. SUN Bozhao, WANG Chunbo, LI Song, et al. Performance analysis of cogeneration of industrial heating system with adjustable steam ejector for 350 MW supercritical unit[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(6): 36-44.
- [71] 卢洲杰, 金光勋. 利用汽轮机中压调门调整抽汽的技术分析研究[J]. 热力透平, 2018, 47(1): 34-37. LU Zhoujie, JIN Guangxun. Study of steam turbine adjustable extraction using IP control valve[J]. Thermal Turbine, 2018, 47(1): 34-37.
- [72] 刘晓燕, 王文中, 欧阳杰, 等. 大型汽轮机中压调节阀参调供热研究[J]. 华电技术, 2018, 40(3): 9-12. LIU Xiaoyan, WANG Wenzhong, OUYANG Jie, et al. Study on IP control valve of large-scale steam turbine engaged in heat supply regulation[J]. Huadian Technology, 2018, 40(3): 9-12.
- [73] 何干祥, 林琳, 王勇. 汽轮机旋转隔板变工况供热经济性分析[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 120-124. HE Ganxiang, LIN Lin, WANG Yong. Economic analysis of heating unit with rotating board for steam turbine under off-design conditions[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(7): 120-124.
- [74] 张志业, 邹晓昕, 李志龙, 等. 基于能级匹配的供热系统集成与典型机组工程示范研究[J]. 能源科技, 2022, 20(5): 49-53. ZHANG Zhiye, ZOU Xiaoxin, LI Zhilong, et al. Study on heat supply system integration based on energy level matching and typical unit project demonstration[J]. Energy Science and Technology, 2022, 20(5): 49-53.
- [75] 马达夫, 何翔, 吕为智, 等. 660 MW 超临界 W 火焰锅炉低负荷稳燃特性研究[J]. 工程热物理学报, 2022, 43(1): 259-266. MA Dafu, HE Xiang, LYU Weizhi, et al. Investigations of combustion stability in a 660 MW supercritical W-flame boiler under low load[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2022, 43(1): 259-266.
- [76] 鲁鹏飞, 薛宁. 超临界锅炉超低负荷调峰运行稳燃改造方案研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 87-92. LU Pengfei, XUE Ning. Flame stability upgrading scheme of supercritical boilers for ultra low load peak regulation operation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 87-92.
- [77] 马子然, 周佳丽, 马静, 等. 燃煤电厂脱硝催化剂宽负荷运行的现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8415-8431. MA Ziran, ZHOU Jiali, MA Jing, et al. Current status and development of wide-load operation of SCR catalysts in coal-fired power plants[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(23): 8415-8431.
- [78] 高远, 田亮. 供热机组热电负荷解耦控制[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2020, 47(1): 87-95. GAO Yuan, TIAN Liang. Thermal and electric load decoupling control of heat supply units[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2020, 47(1): 87-95.
- [79] 居文平, 吕凯, 马汀山, 等. 供热机组热电解耦技术对

- 比[J].热力发电, 2018, 47(9): 115-121.
JU Wenping, LYU Kai, MA Tingshan, et al. Comparison of thermo-electric decoupling techniques for heating units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 115-121.
- [80] 范庆伟, 兰凤春, 李文杰, 等. 热电联产机组增设储热水罐容量配置研究[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 98-105.
FAN Qingwei, LAN Fengchun, LI Wenjie, et al. Capacity designing for a combined heat and power plant assisted by water storage tank[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 98-105.
- [81] 张慧帅. 600 MW 热电联产机组利用热网蓄能特性的灵活性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020: 45-56.
ZHANG Huishuai. Research on flexibility of 600 MW cogeneration units using thermal network energy storage characteristics[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020: 45-56.
- [82] 薛小军, 李云飞, 田煜昆, 等. 与燃煤电站耦合的压缩空气储能系统性能分析[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9): 835-842.
XUE Xiaojun, LI Yunfei, TIAN Yukun, et al. Performance analysis of compressed air energy storage system coupled with coal-fired power plant[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9): 835-842.
- [83] 王妍, 吕凯, 马汀山, 等. 与煤电机组耦合的压缩空气储能系统分析[J]. 热力发电, 2021, 50(8):54-63.
WANG Yan, LYU Kai, MA Tingshan, et al. Analysis of compressed air energy storage system coupled with coal-fired power unit[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 54-63.
- [84] 王辉, 李峻, 祝培旺, 等. 应用于火电机组深度调峰的百兆瓦级熔盐储能技术[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(5): 1760-1767.
WANG Hui, LI Jun, ZHU Peiwang, et al. Hundred-megawatt molten salt heat storage system for deep peak shaving of thermal power plant[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(5): 1760-1767.
- [85] 马汀山, 王伟, 王东晔, 等. 基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统设计及容量计算方法研究[J]. 热力发电, 2023, 52(7): 113-118.
MA Tingshan, WANG Wei, WANG Dongye, et al. Research on system design and capacity calculation method for deep peak shaving of coal-fire unit based on molten salt heat storage assistance[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(7): 113-118.
- [86] 常东锋, 王伟, 江浩, 等. 1 000 MW 机组多变量协同优化一次调频[J]. 热力发电, 2018, 47(11): 123-128.
CHANG Dongfeng, WANG Wei, JIANG Hao, et al. Primary frequency modulation of multi-variable co-optimization for 1 000 MW units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 123-128.
- [87] 袁春峰, 刘锴慧, 张帆, 等. 火电机组一次调频技术研究进展综述[J]. 南方能源建设, 2022, 9(3): 1-8.
YUAN Chunfeng, LIU Kaihui, ZHANG Fan, et al. Review on the research progress of primary frequency modulation technology for thermal power units[J]. Southern Energy Construction, 2022, 9(3): 1-8.
- [88] 潘俊良. 利用电池储能辅助传统机组二次调频优化[J]. 电气应用, 2022, 41(3): 8-14.
PAN Junliang. Combined frequency modulation optimization of conventional units assisted by battery energy storage[J]. Electrotechnical Application, 2022, 41(3): 8-14.
- [89] 黄策, 燕云飞, 沈迎, 等. 超容储能辅助火电机组调频的电气问题研究[J]. 电气技术, 2022, 23(8): 103-108.
HUANG Ce, YAN Yunfei, SHEN Ying, et al. Research on electrical problems of frequency modulation of thermal power unit assisted by super capacitor energy storage[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(8): 103-108.

(责任编辑 刘永强)