

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.009

燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望

Status and prospect of flexibility regulation technology for coal-fired power plants

魏海姣¹, 鹿院卫^{1*}, 张灿灿¹, 吴玉庭¹, 李卫东², 赵东明³

WEI Haijiao¹, LU Yuanwei^{1*}, ZHANG Cancan¹, WU Yuting¹, LI Weidong², ZHAO Dongming³

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124; 2. 华能国际电力股份有限公司, 北京 100031;

3. 中国华能集团有限公司, 北京 100031)

(1. College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. Huaneng Power International Incorporated, Beijing 100031, China; 3. China Huaneng

Group Company Limited, Beijing 100031, China)

摘 要: 开发可再生能源是我国一项基本国策, 由于可再生能源的间歇性造成其发电功率输出的波动, 会对电网运行安全性造成一定的影响, 导致部分可再生能源发电不能进网。为了加大可再生能源发电的并网率, 需要增加传统燃煤机组输出负荷的灵活性。从燃煤机组负荷调节范围开展相关研究, 通过调研分析发现: 储热水技术、电锅炉储热技术和高背压改造技术可以应用于热电联产机组的灵活性调节; 燃煤机组与太阳能系统耦合技术可提高耦合系统运行的灵活性; 高温储热技术利用纯凝机组发电低谷期锅炉产生过量的蒸汽加热储热介质, 在高负荷时进行热量释放, 可实现机组宽负荷灵活性调节。通过对比分析 5 种灵活性调节技术的特点, 认为燃煤机组利用高温熔盐储热技术是未来灵活性调峰发展的方向之一。

关键词: 燃煤机组; 可再生能源; 太阳能; 调峰; 储热; 高温熔盐; 热电联产; 热电解耦; 高背压改造

中图分类号: TM 621

文献标志码: A

文章编号: 1674-1951(2020)04-0057-07

Abstract: Exploration of renewable energy is a basic state policy in China. The intermittency of renewable energy leads to its power output fluctuation, which would bring a certain impact on the safety of power grid operation and hinder the grid connection of partial renewable energy. In order to increase the to-grid rate of power generated by renewable energy, it is necessary to advance the flexibility of load outputted from traditional coal-fired power plants. Studying the load regulation range of coal-fired units, it was found that hot water storage technology, electric boiler heat storage technology and high back pressure transformation technology could be applied in flexible regulation of combined heat and power plant. The coupling technology for coal-fired units and solar system could improve the operation flexibility of the coupling system. Taking high-temperature thermal energy storage technology, storage medium can be heated by excessive steam from condensing units during bottom load periods and release the heat during peak load periods, which realizes the wide-range flexibility regulation of units. Comparing the features of five flexibility regulation technologies, it is considered that high-temperature molten salt heat storage technology is one of the development directions of flexibility regulation for coal-fired power plants.

Keywords: coal-fired power plant; renewable energy; solar power; peak regulation; heat storage; high-temperature molten salt; CCHP; thermo-electric decoupling; high back-pressure transformation

0 引言

近年来, 人类对能源的需求日趋增加, 以太阳能和风电为代表的可再生能源利用迅速发展。截至 2019 年 6 月, 我国可再生能源发电装机达到 750 GW, 其中, 风电装机 193 GW, 光伏发电装机 186 GW。但随着新建风力发

电厂、光伏电站和光热电站数量和装机总容量的不断增加, 引起的弃风弃光现象愈加严重。2019 年上半年, 风力发电弃风电量达 10.5 TW·h, 弃光电量达 2.6 TW·h, 如何实现弃风弃光电量的有效消纳, 是当前亟须解决的问题。

我国提出提高燃煤机组运行的灵活性以充分消纳可再生能源的发电量。早在 2016 年 11 月, 国家发改委、国家能源局发布《电力发展“十三五”规划》中指出, 需提升我国火电运行灵活性, 改造预期使热电联产机

收稿日期: 2020-03-20; 修回日期: 2020-04-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(51576006); 企事业单位委托项目(40005014201902)

组增加 20% 额定容量的调峰能力,最小技术出力达到 40%~50% 额定容量。纯凝机组增加 15%~20% 额定容量的调峰能力,最小技术出力达到 30%~35% 额定容量。通过引进国外技术使部分具备改造条件的电厂预期达到国际先进水平,机组不投油稳燃时,纯凝机组最小技术出力达到 20%~25% 额定容量^[1]。

目前,我国燃煤机组占比为 59.22%。现役燃煤机组在电力设计初期采用基本负荷设计,后期很难参与大幅度热力调节,又因南北地理因素导致北方燃煤机组中设置了部分热电联产机组在供暖季为用户提供热源。热电联产机组常以“以热定电”模式运行^[2-3],受采暖季供热负荷的影响,在低负荷区间无法参与电网降负荷调峰,很难实现电网调度和变负荷运行的灵活性;纯凝机组受排汽背压和汽轮机最小排汽流量的影响,机组设计运行区间一般为 40%~100% 额定负荷,但是实际运行过程中,由于实际燃烧煤种偏离设计煤种,机组运行负荷不得不高于 40% 额定负荷,在一定程度上无法参与大幅降负荷调峰。

为了解决上述问题,国内外学者对机组运行负荷灵活性调节开展了相关研究。通过调研发现,提高燃煤机组灵活性调节技术主要有:燃煤机组(包括纯凝机组和热电联产机组)配储热系统调峰、热电联产机组配电锅炉储热调峰及热电联产机组高背压改造调峰等;同时,太阳能辅助燃煤机组耦合运行系统,在一定程度增加了太阳能发电和燃煤机组运行负荷的灵活性,有效降低了弃光现象的发生,提高了太阳能发电并网电量,也是一种有效的调峰方式。以下对几种典型的灵活性调节技术进行分析。

1 燃煤机组负荷灵活性调节技术方案研究现状

1.1 热电联产机组配储热水系统灵活性调峰

以供热式抽凝机组为例,由于实行“以热定电”的运行模式,若在热网和热源中间设置储热水罐,在满足供热需求的条件下,利用机组高负荷运行时的抽汽进行储热,在用电低谷期释热为热用户提供热源,既降低了热电联产机组发电负荷,又满足了用户的供热需求,实现热电解耦,提升了供热机组负荷的灵活性。

储热设备主要采用储热水罐,热水温度低于 98℃ 时,采用常压储热水罐,热水温度在 110~125℃ 时,采用承压储热水罐^[4]。储热容积一般为 8 000~20 000 m³^[5],随着储热容量的增加,储热水罐的体积相应增加。例如,苏鹏等人^[4]以东北地区某 2×300 MW 亚临界热电联产机组(最大供热负荷为 562

MW)储热水参与电网调峰为例,设计深度调峰热电解耦时间为 6 h,热水储热 24 h 总供热能力为 13 842 MW·h,需配备常压储热水罐有效容积为 22 000 m³,该机组实际运行折算平均供热功率为 576 MW,高于热网实际最大热负荷 562 MW,证实了电厂在现有供热需求情况下可以满足 6 h 深度调峰热电解耦的要求,可以通过设置储热水系统来实现热电解耦。

陈天佑等人^[6-7]以北方 300 MW 和 200 MW 热电联产机组为例,通过分析添加储热水装置可分别使机组调峰容量由 16% 提高到 37%、由 13% 提高到 27%;王耀函等人^[8]为了解决热电联产机组“以热定电”运行模式导致的火电机组调峰能力不足,以 300 MW 机组为例,在热电联产机组和热网之间设置储热水罐,利用热电联产机组高负荷运行期间抽汽储热和在机组低负荷运行时释热,将机组调峰能力下限扩展了 57 MW,提高了机组负荷运行范围。

综上所述,在热电联产机组中设置储热水系统,可实现热电联产机组供热时的热电解耦,增大热电比。大型储热单元可为太阳能发电和风能发电提供并网空间,实现了可再生能源发电与燃煤机组发电进网的重新整合,提高了热电联产机组和电网运行的稳定性和灵活性。

1.2 热电联产机组配电锅炉储热装置灵活性调峰

采用电锅炉进行调峰是将热电联产机组产生的过剩电量,通过电加热方式加热采暖热水,在不改变锅炉负荷情况下,保证锅炉最佳燃烧效率,消纳过剩电量。电锅炉蓄热可使热水温度保持在 40~125℃,甚至可以更高^[9]。相关文献表明,结合风力发电出力情况在热电联产机组中建设储热电锅炉,将热电联产机组运行低负荷期间的电量转化为热量进行储存,减少热电联产机组进网电量,为风电上网提供了并网空间。热电联产机组高负荷运行时,利用储热水为用户供热,实现热电联产机组负荷调节的灵活性。

郭丰慧等人^[10]研究了二级热网配置储热式电锅炉消纳弃风调度方案,相比于设置普通电锅炉的消纳弃风方案,由于电锅炉储热消耗热电联产机组过剩发电量,风电消纳率由原来 98.72% 增加到 99.12%,进一步提高了热电联产机组负荷调节的灵活性。李军徽^[11]针对“三北地区”资源分布情况,确定了热电联产机组配置电锅炉和储热装置的最佳容量,当电锅炉负荷为 13.4 MW,储热装置储热量为 158.07 MW·h 时,可有效减少 54.8% 的弃风电量;不仅仅针对消纳弃风问题,YU Juan 等人^[12]针对太阳能和风能的随机性,综合考虑了电力负荷和区

域供热的负荷特性,通过设置电锅炉建立了太阳能、风能和热电联产机组耦合转换模型,并对该模型进行相关优化,降低了热电联产机组进网电量,可有效减少弃风弃光现象的发生,综合能效得到较大的提升。

以上研究表明,在热网和用户之间利用结构简单、价格低廉、能量转换效率较高的电锅炉进行储热,可以在一定程度上消耗热电联产机组发电量,减少了热电联产机组进网电量,使风力发电和太阳能发电进网电量增加,实现了热电联产机组负荷的灵活性调节。

1.3 纯凝机组配高温储热系统灵活性调峰

对于不涉及供暖的纯凝机组而言,可利用储热技术改变机组自身热力过程,在储热和释热过程中拓宽机组的负荷调节范围,增加机组运行负荷的灵活性。

WANG Jihong 等人^[13-14]先后研究了在 375 MW 燃油机组和 600 MW 超临界燃煤机组中设置储热装置,利用谷期储热在峰期释热达到机组负荷灵活性调节目标。375 MW 燃油机组通过设置储热系统可使定压运行时机组运行下限由 150 MW 降至 100 MW,使滑压运行时机组运行下限由 110 MW 降至 100 MW,实现了机组降负荷灵活性调节;600 MW 超临界燃煤机组设置了不同储热和释热接入点,可实现机组负荷的灵活性调节,且接入储热系统后机组运行动态响应较未接入储热系统平缓,系统运行安全性增加,机组爬坡速率相应增加。

为了更加清晰研究各种储能技术在纯凝机组中的灵活性调节作用,MARCIN Trojan 等人^[15]提出了采用压力水储罐调节火电厂电力输出负荷的灵活性,在机组低负荷期间,将除氧器压力水储存在热水储罐中,此时机组负荷可继续下调 21.96 MW,在机组高负荷期间,压力水由热水储罐进入锅炉给水系统中,此时机组负荷增加了 15.00 MW,通过该种方式拓宽了机组负荷运行区间。

魏超等人^[16]对利用汽轮机第一级抽汽和第二级抽汽储热的经济性进行分析,虽然两个位置的抽汽储热均可以降低机组运行下限,但当第一级和第二级同时抽汽且比例为 1:1 时,汽轮机热经济性要高于第一级抽汽储热,储热过程抽汽点不同,储热功率不同,导致机组降负荷能力不同。

对于纯凝机组热力系统而言,在汽轮机不同抽汽口位置采用抽汽储热的方法可使机组在一定程度上实现降负荷调节,在释热过程将储存的热量释放,替代回热加热系统抽汽,使机组输出功率增加,实现了纯凝机组宽负荷调节。

以上结果表明,纯凝机组设置高温储热系统,利用谷电期储热,用电高峰期释热,实现了机组负荷灵活性调节。

1.4 汽轮机高背压改造调节技术

相比于前面的应用场景,热电联产机组的汽轮机高背压改造技术具有改造成本低、周期短、运行经济性好和易操作等优点,也是近几年热电联产机组改造的主要技术,通过提高机组运行背压增加供热面积,降低机组发电负荷,扩大热电比,达到机组负荷灵活性调节的目的。

ZHAO Shifei 等人^[17-18]建立了高背压热电联产机组预热空气系统模型,该模型将机组背压升高至 30~45 kPa,用于加热热网回水,供用户使用,在极端天气利用汽轮机第四级抽汽进一步加热热网给水,基于以上模型建立了 300 MW 热电联产机组辅助热源加热供水模型,机组负荷调节范围由 78.72% ~ 54.87% 扩大至 100.00% ~ 25.20%,增加了机组负荷调节的灵活性。CHEN Heng 等人^[19]研究了 300 MW 亚临界热电联产机组高背压供热特性,该方案将机组背压由 5~14 kPa 提升至 34~54 kPa,可将热网循环水加热至 80℃左右,基本满足居民采暖需求,在极端天气情况下,热网供水再由汽轮机第四级抽汽加热,以满足供热需求,研究结果表明,该机组最大供热能力为 460 MW,较常规机组提升了 80 MW,扩大了热电比,达到了机组负荷灵活性调节的目的。

以上文献是以单台机组为研究模型开展了相关研究。而我国现有机组均为双机或多机运行,为了研究多机梯级能源利用,GE Zhihua 等人^[20]建立了 2 台机组高背压串联供热技术方案,将#1 机组背压由 10 kPa 提升至 34 kPa,满足供暖前期和供暖后期居民采暖需求,在极端寒冷天气下,采用#2 机组第四级抽汽加热热网供水,以满足供暖需求,并以 2×350 MW 机组为例进行了热力性能分析,得到采用该种方案后供热面积由 900 万 m² 增加至 1 190 万 m²,实现了供热负荷的增大。若该机组供热负荷不变,利用 2 台机组高背压串联供热技术可使机组运行负荷下降,采用高背压技术增加供热面积(即供热负荷)实现了机组负荷灵活性调节的目的。

以上结果表明,采用高背压改造技术在一定程度上增加了供热负荷,提升了热电比,达到了机组负荷灵活性调节的目的。

1.5 燃煤机组与太阳能系统耦合调节技术

为了降低气候对太阳能热发电的影响,保证太阳能光热发电系统功率输出的稳定性,系统中设置熔盐储热系统,熔盐储热系统与 1.3 节中所述的纯

凝机组储热系统类似,将日光充足时加热工质过余热量利用熔盐进行储存,在夜间或太阳能不充足时,利用储热熔盐释热加热工质,实现机组输出功率稳定,此处不做过多介绍。

如果将太阳能集热系统与燃煤机组耦合运行,可实现机组灵活性运行,以达到太阳能利用最大化,减少弃光现象,实现燃煤机组灵活性运行。2011 年 DIMITYR P^[21]提出了太阳能与燃煤机组耦合发电技术,利用太阳能集热系统取代汽轮回热加热系统抽汽,在太阳能充足时,太阳能发电效率高于 39%,起到了机组燃料调节杠杆作用,可使吸收的太阳能全部被利用,减少了弃光现象的发生。

於震跃等人^[22-23]将太阳能与燃煤机组耦合发电技术分为“功率增大型”和“燃煤节省型”2 种耦合模型,结构示意图详见文献[22]。所谓的“功率增大型”太阳能与燃煤机组耦合技术是指在锅炉给水量不变的情况下,太阳能集热系统替代部分回热加热器抽汽,这样会使汽轮机内蒸汽做功增加,实现了燃煤机组功率增大;所谓“燃煤节省型”是指汽轮发电机组在输出功率恒定时,减少主给水量并利用太阳能集热系统替代部分回热加热器抽汽,这样入炉燃料减少,实现了燃煤节省。以 300 MW 燃煤机组为研究模型,采用槽式太阳能代替汽轮机 3 级高压抽汽的耦合方案,计算得到:“燃煤节煤型”方案可将机组煤耗由 287.53 g/(kW·h)下降至 254.29 g/(kW·h),所减少的煤耗即为太阳能输入的能量,实现了燃煤机组发电负荷下降,达到了燃煤机组负荷灵活性调节的目的,增加了太阳能发电进网电量;在后续的研究中,华北电力大学杨勇平教授团队^[24-27]分别建立了 1 000 MW 超临界燃煤机组和太阳能耦合系统,替代汽轮机回热加热器抽汽,实现了燃煤机组负荷调节的灵活性,集热器吸收的太阳能全部被利用,该方案为太阳能与燃煤机组耦合运行提供相关理论依据。

在电网功率不变的情况下,上述文献研究建立的太阳能与燃煤机组耦合发电系统模型,利用太阳能集热取代汽轮机回热加热系统抽汽,达到燃煤机组降负荷运行的目的。当系统无太阳能输入时,机组发电负荷以电网调度负荷为准;随着太阳能资源的逐渐增加,太阳能所取代的抽汽量增大,燃煤机组给煤量逐渐减少,即燃煤机组与太阳能耦合系统运行时,燃煤机组发电占比逐渐减少,太阳能发电占比逐渐增加。该方案既能实现燃煤机组负荷运行的灵活性,又避免了因太阳能随天气变化引起的电网不安全运行事件的发生,还能增加太阳能进网电量,有效减少了弃光现象的发生。

以上结果表明,在太阳能资源丰富地区,将太阳能集热系统与燃煤机组回热加热系统耦合运行,可实现燃煤机组负荷灵活性运行,减少了弃光现象的发生,达到了燃煤机组负荷灵活性调节的目的。

上述 5 种燃煤机组负荷灵活性调节方案,均可在一定程度上降低燃煤机组功率输出,实现燃煤机组宽负荷灵活性运行。但由于各技术方案对应着特定类型的机组,其技术特点也不同,以下对燃煤机组灵活性调节技术方案进行简要介绍。

2 燃煤机组灵活性调节技术对比及发展方向

2.1 燃煤机组灵活性调节技术对比

前面所述 5 种不同形式的燃煤机组灵活性调节方案,均可以增加机组运行的灵活性,但不同系统的改造方案和程度不尽相同,改造过程中存在诸多问题,不同灵活性改造方案的技术特点见表 1。

上述分析发现,燃煤机组灵活性改造已有多种方案,每种方案对应着特定机组,各自的缺点导致了燃煤机组灵活性调节普适性不强。例如,在热电联产机组中设置热水储热和电锅炉储热作为居民采暖峰期热源,但是对于纯凝机组而言,采用热水储热或电锅炉储热水仅可作为锅炉给水,能源利用效率低,调峰能力不大,推广性不强;同样采用高背压机组在采暖期供热,可增加热电比,加大了热电联产机组负荷调节能力,但该技术无法应用于偏远地区的纯凝机组,使用局限性大;相对于我国太阳能丰富地区,可将太阳能与燃煤机组耦合代替汽轮机回热系统抽汽,既能实现太阳能与燃煤机组的灵活性运行、又能减少弃光的发生,即增加了太阳能进网电量,但是该方案受地理条件和气候因素限制,不能大范围推广使用。而纯凝机组配高温储热系统灵活性调峰技术,充分利用机组自身热力性能特点,谷电期将过余热量储存,用电高峰期再对本机组释热,实现了纯凝机组负荷的灵活性调节,不受机组类型、地理位置、气候条件和机组负荷限制,推广性相对较强。

2.2 燃煤机组配高温储热系统灵活性调峰技术存在的问题及发展方向

燃煤机组配高温储热系统灵活性调峰技术,以锅炉、汽轮机、高温储热介质(如熔盐)和机组负荷为研究对象,保证锅炉最优燃烧效率,将多余蒸汽的热量储存在高温储热罐中,调峰过程结束,高温储热罐储存热量以供其他用户使用,减少汽轮机抽汽量。本研究选用熔盐作为高温储热介质,由表 1 可知,相比于热水储热,高温熔盐储热的优点更加突出,液态熔盐在使用中传热无相变,传热均匀稳

表 1 5 种灵活性改造技术特点

Tab. 1 Features of five flexibility transformation technologies

改造方案	初期投资/ (万元·MW ⁻¹)	运行维护 成本	优点	缺点	技术特点
热电联产机组配储 热水灵活性调峰 ^[2]	57.14	厂用电率 增加	技术相对成熟;系统改造小;热电 耦合良好	占地面积大;白天蓄热时影 响高负荷运行;夜间或极端 天气需启动伴热或补充热量	适用于短期调峰,机组 改动较小的情况
热电联产机组配电锅 炉储热灵活性调峰 ^[2]	35.00	厂用电率、 煤耗均有 大幅增加	主机几乎不做改造;技术成熟,调 峰迅速、灵活;电热转化效率高	适用于谷电时段价格补偿机 制的地区;阻性电器元件增 加较多,维护困难	高品位能源低用,适用 于峰谷电价差较大及电 价补偿机制完善的地区
纯凝机组配高温储 热系统灵活性调峰 (储热介质以熔盐 为例)	—	—	蒸汽显热和潜热分别利用熔盐显 热和相变材料进行储热;显热传热 性能良好、系统运行压力小、使用 温度范围较宽、储热量大、价格低、 安全可靠;潜热储热密度大,材料 消耗少,初投资经济性好	熔盐管路容易发生凝固或冻 堵;熔盐对管道和储罐腐蚀 性强	系统调节性好,可应用 与各类型燃煤机组
汽轮机高背压改造 调节技术	—	—	技术成熟;系统改造范围小	受机组类型限制;湿冷机组 高背压运行需换转子	利用低压缸排汽直接供 热,排汽流量和机组运 行背压随供热负荷随变 化,系统热电比增加
燃煤机组与太阳能系 统耦合调节技术 ^[28]	—	—	太阳能热利用率高;燃煤机组和太 阳能耦合调节灵活性强;太阳能与 燃煤机组热力系统接入点灵活	受地理位置和气候条件限制 严重;太阳能系统维护困难; 发电成本较高	适用于太阳能资源较丰 富区,需要机组有良好的 耦合特性

定,传热性能良好、系统运行压力小、使用温度范围较宽,储热量大、价格低、安全可靠。但是燃煤机组配高温储热系统灵活性调峰技术存在如下亟须解决的问题。

(1)就纯凝机组而言,热力系统相对复杂,在不同抽汽点进行抽汽储热,对机组热经济性的影响不同,释热过程亦如此,在储热和释热过程中机组热经济性评价指标未知,如何选择储热抽汽点及释热接入点是解决纯凝机组配高温储热系统灵活性调峰技术的关键性问题之一。

(2)对于高温储热系统,使用较为普遍的储热介质为熔盐,但应用比较成熟的 Solar 盐和 Hitec 盐最低使用温度均高于 142 ℃^[29],对于供热而言,熔点越高需要的防冻堵措施就越加严格,制造成本相对增加,故低熔点熔盐的开发也尤为重要。文献[29-31]分别获得了熔点为 86.5、116.9 和 109.3℃的低熔点混合熔盐,这些低熔点熔盐为中低温储热介质选择供了选择依据依据。但对燃煤机组储热而言,为实现机组灵活性调节,需要实现对抽出的蒸汽全热量进行储存,这就需要研究适用于不同温度热量储存的低熔点熔盐,以满足不同需求的机组灵活性改造的需求。

(3)在储热和释热过程中涉及蒸汽/熔盐储热过程和熔盐/给水释热两个换热过程,相对应的 2 种不同类型的换热器,虽然已有文献介绍了一些熔盐/蒸汽(熔盐为高温介质)换热器^[32-33]的换热特性并得到一定的结论,也拟合了相应的传热关联式,但蒸汽/熔盐(蒸汽为高温介质)换热器未见相关报道,由于

上述 2 种换热器传热机理不同,换热器设计思路及强化传热手段均不同,因此,在后续的研究中需对以上 2 种换热器的传热机理进行相关研究。

(4)除了熔点和导热系数的问题,使用显热高温熔盐另一个重点考虑的问题就是腐蚀问题。在燃煤发电厂或太阳能热发电厂使用材料大多为碳钢和低合金钢,采用不同成分的熔盐作为储热介质,对金属的腐蚀性不同,同一种熔盐对不同金属的腐蚀性也不同^[34]。相关研究表明,相比于普通碳钢,低合金钢中因 Cr 元素的存在,在硝酸盐中会在其表面形成具有保护作用的 FeCr₂O₄,降低对合金钢的腐蚀速率^[35-36],同时不同温度熔盐对金属的腐蚀性不同,温度越高腐蚀性越大^[36]。因此,在换热器和熔盐设备选择过程中要考虑对应的防腐蚀措施。

3 结束语

现阶段燃煤机组负荷灵活性调节能力不强,导致以风能和太阳能为代表的可再生能源进网电量相对较少。虽然电网采取了调度优化等手段,降低燃煤机组发电比例,仅能消纳部分可再生能源发电量。为进一步消纳可再生能源发电量,还需从电厂侧进行调节,电厂侧依据机组自身特点分别利用热水储热、电锅炉储热和熔盐储热,对热电联产机组进行高背压改造,或采用燃煤机组与太阳能耦合运行等方案来实现机组运行负荷的灵活性调节。但是受到机组设计参数、地理条件和气候因素限制,以上方案仅熔盐储热技术具有较强的普适性和推广性,并能广泛应用于各类型机组,这也是将来燃

煤机组灵活性调节发展的一个重要方向。

虽然已有纯凝机组利用高温储热介质进行抽汽储热的研究,在研究中存在诸如储热抽汽点和释热接入点对机组热效率的影响不明确,储热介质熔点和使用温度低不能满足蒸汽全热量储存的要求,储热和释热换热器传热机理不明确及高温熔盐对设备的腐蚀性等问题,这些问题均是制约燃煤机组利用高温储热介质进行负荷灵活性调节的关键因素,也是将来主要研究的内容。

参考文献:

- [1] 贾科华. 火电灵活性改造势在必行——专访国家能源局总工程师、电力司司长韩水[N]. 中国能源报, 2016-07-11(3).
- [2] 张婷. 分布式蓄热在集中供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [3] 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): 499-504. LI Shuming, LIU Qingsong, ZHU Xiaodong, et al. Flexibility transformation analysis of 350 MW supercritical cogeneration unit[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(5): 499-504.
- [4] 苏鹏, 王文君, 杨光, 等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 87-94. SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang et al. Research on the technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 87-94.
- [5] 柳文洁. 热水蓄热罐在热电联产供热系统中的应用研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [6] 陈天佑. 基于储热的热电厂消纳风电方案研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- [7] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电机组调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014(11): 34-41. LU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014(11): 34-41.
- [8] 王耀函, 刘吉臻, 曾德良. 配置储热罐的供热机组运行定值计算[J]. 华北电力大学学报, 2017, 44(6): 69-74. WANG Yaohan, LIU Jizheng, ZENG Deliang. Operation setting calculation of CHP unit equipped with heat accumulator[J]. Journal of North China Electric Power University, 2017, 44(6): 69-74.
- [9] 刘月琴, 叶水泉. 电锅炉蓄热技术及其在高寒地区的应用分析[J]. 制冷空调与电力机械, 2002, 23(3): 36-40. LIU Yueqin, YE Shuiquan. Thermal storage technology of electric boiler and its analysis in use for frigid zone[J]. Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery, 2002, 23(3): 36-40.
- [10] 郭丰慧, 胡林献, 周升彧. 基于二级热网储热式电锅炉调峰的弃风消纳调度模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(19): 50-59. GUO Fenghui, HU Linxian, ZHOU Shengyu. Dispatching model of wind power accommodation based on heat storage electric boiler for peak-load regulation in secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 50-59.
- [11] 李军徽, 邢志同, 邢金, 等. 提升风电消纳的储热式电锅炉优化规划平台设计[J]. 太阳能学报, 2018, 39(11): 3270-3276. LI Junhui, XING Zhitong, XING Jin, et al. Design of optimized planning platform of electric boiler with heat storage to enhance wind power consumption[J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(11): 3270-3276.
- [12] YU Juan, GUO Lin, MA Mengnan, et al. Risk assessment of integrated electrical, natural gas and district heating systems considering solar thermal CHP plants and electric boilers[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2018, 103: 277-287.
- [13] WOJCIK J, WANG J. Technical feasibility study of thermal energy storage integration into the conventional power plant cycle[J]. Energies, 2017, 10(2): 205.
- [14] LI Decai, WANG Jihong. Study of supercritical power plant integration with high temperature thermal energy storage for flexible operation[J]. Journal of Energy Storage, 2018(20): 140-152.
- [15] MARCIN T, DAWID T, PIOTR D, et al. The use of pressure hot water storage tanks to improve the energy flexibility of the steam power unit[J]. Energy, 2019, (173): 926-936.
- [16] 魏超, 朱生华, 俎海东. 抽汽蓄热方式对供热机组耦合系统性能影响分析[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(4): 7-11. WEI Chao, ZHU Shenghua, ZU Haidong. Influence of extraction steam storage mode on performance of coupling system of heating unit[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2019, 37(4): 7-11.
- [17] ZHAO Shifei, DU Xiaoze, GE Zhihua, et al. Cascade utilization of flue gas waste heat in combined heat and power system with high back-pressure (CHP-HBP)[J]. Energy Procedia, 2016, 104: 27-31.
- [18] ZHAO Shifei, SUN Jian, GE Zhihua, 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.
- [19] CHEN Heng, XIAO Yao, XU Gang, et al. Energy-saving mechanism and parametric analysis of the high back-pressure heating process in a 300 MW coal-fired combined

- heat and power unit[J]. Applied Thermal Engineering, 2019,149:829-840.
- [20] GE Zhihua, ZHANG Fuxiang, SUN Shimeng, et al. Energy analysis of cascade heating with high back-pressure large-scale steam turbine[J]. Energies, 2018, 11(1): 119.
- [21] DIMITYR P. An option for solar thermal repowering of fossil fuel fired power plants[J]. Solar Energy, 2011, (85): 344-349.
- [22] 於震跃. 槽式太阳能集热场辅助燃煤发电系统的性能分析[D]. 北京:华北电力大学, 2012.
- [23] HOU Hongjuan, YU Zhenyue, YANG Yongping, et al. Performance evaluation of solar aided feedwater heating of coal-fired power generation (SAFHCPG) system under different operating conditions[J]. Applied Energy, 2013, 112: 710-718.
- [24] ZHAI Rongrong, LIU Hongtao, LI Chao, et al. Analysis of a solar-aided coal-fired power generation system based on thermo-economic structural theory[J]. Energy, 2016, 102: 375-387.
- [25] ZHU Yong, ZHAI Rongrong, QI Jiawei, et al. Annual performance of solar tower aided coal-fired power generation system[J]. Energy, 2017, 119: 662-674.
- [26] ZHU Yong, PEI Jie, CAO Chuanshao, et al. Optimization of solar aided coal-fired power plant layouts using multicriteria assessment[J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 137: 406-418.
- [27] 朱勇. 塔式太阳能与燃煤互补发电系统耦合机理及热力特性研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.
- [28] 胡永生. 太阳能与燃煤机组互补电站热力特性与集成机理研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.
- [29] 张灿灿, 吴玉庭, 鹿院卫. 低熔点混合硝酸熔盐的制备及性能分析[J]. 储能科学与技术, 2020, 9(2): 435-439.
- ZHANG Cancan, WU Yuting, LU Yuanwei. Preparation and comparative analysis of thermophysical properties on low melting point mixed nitrate molten salts[J]. Energy Storage Science and Technology, 2020, 9(2): 435-439.
- [30] 杜志强, 姚光源. 用于储热新型低熔点二元无机盐特性研究[J]. 无机盐工业, 2020, 52(1): 63-67.
- DU Zhiqiang, YAO Guangyuan. Study on characteristics of novel low-melting binary inorganic salts for heat storage[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2020, 52(1): 63-67.
- [31] 徐芳, 陈秋燕, 王军涛. 低熔点多元混合熔盐的制备及其性能研究[J]. 可再生能源, 2017, 35(11): 1605-1610.
- XU Fang, CHEN Qiuyan, WANG Juntao. Preparation and properties on multicomponent molten salts with low melting point[J]. Renewable Energy Resources, 2017, 35(11): 1605-1610.
- [32] 何石泉, 丁静, 陆建峰, 等. 管外高温熔盐的流动换热特性[J]. 工程热物理学报, 2013, 34(1): 103-105.
- HE Shiquan, DING Jing, LU Jianfeng, et al. Convective heat transfer characteristics of high temperature molten salt outside tube[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(1): 103-105.
- [33] 焦睿. 高温熔盐加热高压蒸汽传热特性实验研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2018.
- [34] 任婷婷, 唐建群, 巩建鸣. 碳钢和低合金钢在熔盐中的腐蚀研究现状[J]. 热加工工艺, 2019, 48(18): 12-17.
- REN Tingting, TANG Jianqun, GONG Jianming. Research status on corrosion of carbon steel and low-alloyed steel in molten salt[J]. Hot Working Technology, 2019, 48(18): 12-17.
- [35] FERNANDEZ A, CORTES M, FUENTEALBA E, et al. Corrosion properties of a ternary nitrate/nitrite molten salt in concentrated solar technology[J]. Renewable Energy, 2015, 80: 177-183.
- [36] 孙华, 张鹏, 王建强. 传热储热用熔融硝酸盐及其腐蚀问题[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2017, 29(5): 567-574.
- SUN Hua, ZHANG Peng, WANG Jianqiang. Corrosion problems related with molten nitrate salts for heat transfer and thermal storage[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2017, 29(5): 567-574.

(本文责编:齐琳)

作者简介:

魏海蛟(1987—),男,内蒙古赤峰人,工学硕士,从事燃煤机组灵活性调节及储热技术方面的研究工作(E-mail: weihaijiao1@126.com)。

鹿院卫*(1971—),女,陕西蓝田人,教授,博士生导师,工学博士,从事可再生能源利用及中高温传热储热储能技术研究方面的工作(E-mail: luyuanwei@bjut.edu.cn)。