

基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析

李峻, 祝培旺, 王辉, 仇晓龙

引用本文:

李峻, 祝培旺, 王辉, 等. 基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析[J]. 南方能源建设, 2021, 8(3): 63–70.

LI Jun, ZHU Peiwang, WANG Hui, et al. Flexible Modification Technology and Application Prospect of Thermal Power Unit Based on High Temperature Molten Salt Heat Storage[J]. *Southern Energy Construction*, 2021, 8(3): 63–70.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

热电联产机组的电力调峰运行模式研究

Research of Cogeneration Units Acting on Electric Peak-shaving Operating Mode

南方能源建设. 2015(3): 51–56 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.03.010>

燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行研究

Research on Safe and Stable Operation Under Lower Load Condition for Coal-fired Power Plant

南方能源建设. 2018, 5(z1): 19–24 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.004>

基于调峰能力分析的电网弃风评估方法及风电弃风影响因素研究

Research on the Evaluation Method and Influencing Factors of Wind Power Curtailment Based on System Regulation Capability Analysis

南方能源建设. 2018, 5(2): 71–76 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.02.010>

燃气热电联产机组选型、调峰能力及电价机制分析

Research on Unit Selection, Peak Regulation Capability and Electricity Pricing Mechanism of Gas-fired Cogeneration

南方能源建设. 2015, 2(1): 66–70 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.01.012>

新一轮电改下电力辅助服务市场机制及储能参与辅助服务的经济性研究

China's Power Auxiliary Service Market Mechanism and the Economics of Energy Storage Systems Participating in Auxiliary Services

南方能源建设. 2019, 6(3): 132–138 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.03.022>

基于高温熔盐储热的火电机组灵活性改造技术及其应用前景分析

李峻[✉], 祝培旺, 王辉, 仇晓龙

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 武汉 430071)

摘要: [目的] 在分析常规火电机组灵活性改造方案存在问题的基础上, 提出了一种新型的灵活性改造技术方案, 即在传统的“锅炉-汽机”热力系统中嵌入大容量高温熔盐储热系统, 削弱原本刚性联系的“炉机耦合”, 实现火电机组深度调峰和灵活运行。[方法] 根据汽、水和熔盐的不同热力特性, 利用热力平衡原理, 建立了“锅炉-高温储热-汽机”一体化热力系统。[结果] 研究表明: 火电机组进行高温熔盐储热改造, 将极大地提高其深度调峰能力, 且能解决常规改造方案存在的问题; 同时, 机组改造后对外提供高参数工业供汽的能力将得到大幅度提高, 这将有效提高电厂经济效益, 弥补调峰补偿机制的不足; 高温熔盐储热技术也可以应用于火电机组延寿改造, 不仅增加系统灵活调峰电源, 还可以使老旧电厂企业资产继续发挥效益。[结论] 在系统中选择一批火电机组进行大规模高温储热技术改造, 可以在不增加煤炭总消费量的基础上, 为系统提供大量灵活调峰电源, 有效缓解新能源电力消纳问题; 同时汽轮发电机组的容量被保留, 可为电力系统提供备用容量和转动惯量, 保障电力供应和系统安全稳定。该技术的推广, 将有力促进火电厂转型升级, 助力实现“碳达峰、碳中和”目标。

关键词: 储能; 高温储热; 热电解耦; 深度调峰; 供热

中图分类号: TK11; TM611

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2021)03-0063-08

开放科学(资源服务)二维码:



Flexible Modification Technology and Application Prospect of Thermal Power Unit Based on High Temperature Molten Salt Heat Storage

LI Jun[✉], ZHU Peiwang, WANG Hui, QIU Xiaolong

(China Power Engineering Consulting Group Central Southern Electric Power Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430071, China)

Abstract: [Introduction] Through the analysis of the existing problems in conventional flexibility modification technology of thermal power units, a new type of flexibility modification technology is proposed, which is to embed a large-capacity high-temperature molten salt heat storage system in the traditional "boiler-turbine" thermal system. It weakens the original rigid connection of boiler-turbine coupling to achieve deep peak regulation and flexible operation of thermal power units. [Method] According to the different thermal characteristics of steam, water and molten salt, an integrated thermal system of "boiler-high temperature heat storage-steam engine" was established by thermal balance calculation. [Result] The results show that the deep peak regulation capability of thermal power unit is greatly improved after configuring high-temperature molten salt heat storage system, and the problems of conventional modification methods can be solved. At the same time, the ability of the units to provide high-parameter industrial steam will be greatly improved. This will effectively improve the economic efficiency of power plants and make up for the lack of peak regulation compensation mechanism. High-temperature molten salt heat storage technology can also be applied to the life extension of thermal power plants, not only increasing the grid's flexible peak regulation power supply, but also enabling old power plant enterprise assets continue to create benefits. [Conclusion] After a batch of thermal power units in the grid are modified by large-scale high-temperature molten salt heat storage technology, a large number of flexible peak regulation power sources are provided for the grid, without increasing the total coal consumption and effectively alleviating the problem of new energy power

收稿日期: 2021-02-10 修回日期: 2021-05-26

基金项目: 中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司科技项目“火力发电厂高温熔盐储热调峰技术研究”(40-1A-KY202018-J201)

consumption. Meanwhile, steam turbines and generators are reserved, which can provide backup capacity and moment of inertia for the power system, to ensure the safety and stability of the power supply and the grid. The promotion of this technology will effectively promote the upgrading of thermal power plants and help achieve the goal of "carbon neutrality and carbon peak".

Key words: energy storage; high temperature heat storage; thermoelectric decoupling; deep peak regulation; heat supply

2095-8676 © 2021 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

十三五期间, 新能源发电在国家政策扶持下迅猛发展, 同时电力负荷中居民用电和第三产业用电比重持续快速增长^[1]。不论是新能源发电出力, 还是居民和第三产业的用电负荷, 都具有很强的日内波动性, 这些都对电力系统的灵活性运行造成很大挑战^[2-3], 系统急需大比例灵活电源改善电源结构, 缓解系统调峰压力, 解决新能源电力消纳问题。

据分析, 电力系统中理想的灵活调峰电源占比应达到总装机的10%~15%, 目前系统中灵活调峰电源主要是抽水蓄能和燃气发电电站, 装机占比不到6%^[4], 并且受建设条件和运行成本限制, 这类电源发展较慢。由于富煤贫油缺气, 在过去四十年的快速发展过程中, 我国为了保障电量供应发展了大量火电机组, 截至2019年底, 我国煤电装机容量高达1.04 TW, 装机占比51.8%, 发电量占比62.2%^[5]。煤电是非常重要的灵活性调峰电源, 已经从过去的电量保障变为电力、电量双保障, 有力促进新能源消纳和保证电网安全。因此, 对现有装机中比重最大的燃煤机组实施灵活性改造, 以及推动新型大容量储能技术应用成为解决上述问题的重要途径。

《电力发展“十三五”规划》中提出: 加强调峰能力建设, 提升系统灵活性。全面推动煤电机组灵活性改造, 实施煤电机组调峰能力提升工程。2018年3月, 《国家发展改革委 国家能源局关于提升电力系统调节能力的指导意见》(发改能源〔2018〕364号)在关于加快推进电源侧调节能力提升的要求中, 明确提出实施火电灵活性提升工程和推动新型储能技术发展及应用。

本文在分析了常规燃煤机组灵活性改造方案存在问题的基础上, 提出了一种新型的灵活性改造方案, 将光热电站中的大容量高温熔盐储热系统, 嵌入传统的“锅炉-汽机”热力系统中, 削弱原本刚性联系的“炉机耦合”。这一方案大幅度增加火电机组的调峰能力, 并能解决传统灵活性改造

方案存在的问题。本文根据汽、水和熔盐的不同热力特性, 利用热力平衡原理, 建立了“锅炉-高温储热-汽机”一体化热力系统, 并提供了系统设计方法, 最后还对大容量高参数储热系统在电力系统中的应用进行了展望。

1 常规的火电机组灵活性改造方案及存在问题

本文讨论的火电灵活性指的是运行灵活性, 主要包括深度调峰、快速启停、爬坡能力, 对于火电机组重点是提高机组的深度调峰能力。

1.1 锅炉系统改造方案

火电机组深度调峰在技术方面存在的困难主要是低负荷工况下锅炉不能稳定燃烧以及脱硝系统不能正常运行导致大气污染物排放超标的问题^[6-7]。锅炉侧深度调峰改造一般都是围绕这两个问题进行, 常用的改造方案包括制粉系统优化、燃烧器改造、锅炉受热面优化、低负荷脱硝改造等。

1.2 汽机侧“热电解耦”改造方案

汽机低负荷运行能力要远高于锅炉, 因此并无必要单独对汽机进行改造以提高整个燃煤机组的深度调峰能力。围绕汽机系统的改造均是针对热电联产机组, 在供热季采用解耦或削弱“以热定电”的运行方式, 满足机组供热要求的同时减少其发电出力。

“热电解耦”通常有两类技术路线, 一类是汽机系统改造减少进入汽轮机做功的蒸汽, 常用的方案包括汽机旁路供热、低压缸切除等^[8]; 一类是热网侧设置储热装置, 在机组高负荷工况下蓄热而在低负荷工况下放热^[9], 削弱热电负荷时间耦合程度来实现机组深度调峰, 常用的储热方案包括热水罐、相变蓄热装置等, 实际改造工程中大量采用了“电锅炉+储热”的组合方案, 利用电锅炉作为热源达到消耗电出力加大调峰深度的作用。

1.3 常规灵活性改造方案存在的问题

通过采用上述改造方案,火电机组深度调峰能力大幅提升,但存在的问题也不容忽视。

1) 机组在低负荷工况下运行会产生经济性下降问题。机组深度调峰时大幅偏离设计工况,主机效率降低,热损失增加,同时辅机空转率增加,厂用电率增加^[10]。

2) 机组在低负荷工况下运行存在影响设备寿命甚至影响设备安全的问题。例如,锅炉进行深度调峰容易造成热应力和材料疲劳,影响元器件寿命^[11-12];锅炉超低负荷时,空气动力场、烟气流场、炉内壁面温度场偏差大,水动力偏差加剧,安全隐患增加^[13-14];汽机切除低压缸运行时,易出现末级叶片颤振和水蚀,轴系振动风险增大^[15];辅机在过低负荷下运行也可能会出现振动和影响寿命的问题;另外低负荷工况下,烟风系统流速低、尾部烟气温度低会造成堵煤堵灰、设备腐蚀等一系列问题。

3) 锅炉低负荷工况会造成运行难度和工作量增加。例如,对煤质稳定性要求高,这必然增加电厂的燃料成本和管理难度;制粉系统和烟风系统的运行复杂性增加,协调控制难度加大。

4) 热电联产机组的改造方案只能适用于采暖期,无法在非采暖期实现深度调峰。而且采用“电锅炉+热水罐”的供热方案将高品质的二次能源用

于民用采暖,效率低、供热经济性差,综合效益低下。

2 基于高温熔盐储热系统的火电机组深度调峰技术

2.1 工艺系统方案及原理

锅炉的低负荷运行工况是火电机组灵活性运行的最大瓶颈,因此可以在电厂内设置大规模高参数的储热系统将锅炉产生的高温蒸汽热量储存起来,从根本上削弱原本刚性联系的“炉机耦合”。存储的热量根据需要再返送汽轮机组发电,这样就能在保证锅炉安全运行的同时,灵活性调节汽轮机运行出力,实现机组的灵活运行。

大规模储热技术按储热方式不同,可以分为显热储热、潜热储热和热化学储热。电力系统中大部分火电机组锅炉出口蒸汽温度在540~560℃,高温熔盐储热技术既能很好匹配这一温度参数^[16],又能实现大规模储热,非常适合应用于火电机组储热。采用这种系统的多个光热电站项目已经投入商业示范运行^[17],其技术可靠性、安全性和经济性已得到验证,可以直接引入应用。

按上述原理进行设计,相当于在火电机组常规的“锅炉-汽机”热力系统中嵌入一套外置的高温熔盐储热系统,其工艺系统见图1。

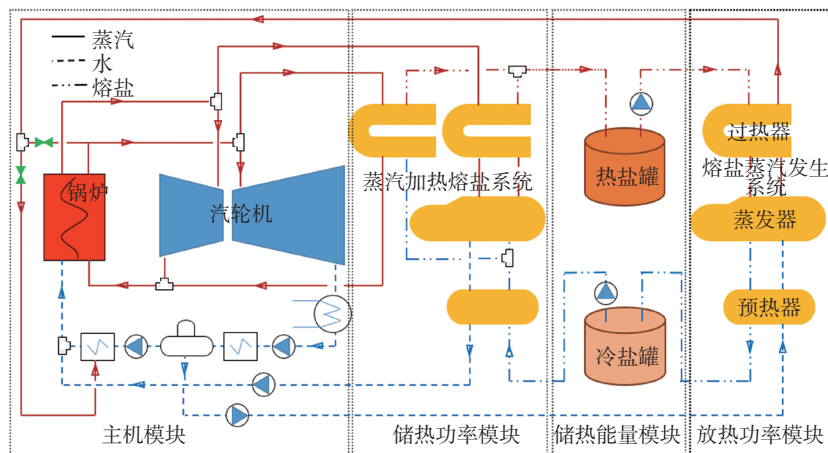


图1 嵌入高温熔盐储热系统的火电机组工艺图

Fig. 1 Process diagram of thermal power unit embedded in high temperature molten salt heat storage system

由图1可知,上述方案中储热系统相对独立,整个储热系统由储热功率模块、储热容量模块和放热功率模块组成;其中储热容量模块为双罐系统,

由一个高温罐和一个低温罐组成。当机组向下调节出力时,启动储热功率模块,锅炉产生的部分过热蒸汽和再热蒸汽通过储热功率模块对熔盐进行放

热, 低温罐中的冷熔盐获得热量温度升高, 并储存在高温罐中; 当机组需要增加出力时, 高温罐中的高温熔盐通过放热功率模块进行放热, 放热模块产生的蒸汽回到汽轮机做功发电, 释热后的熔盐温度降低回到低温罐中储存。

参与储热的锅炉主蒸汽在放热后形成高压凝结水, 最终回到锅炉给水系统; 锅炉再热蒸汽在放热后仍为蒸汽状态, 但参数降低, 通过增压措施与汽机高压缸排汽混合后回到锅炉再热系统循环加热。上述工艺系统中, 各个工艺模块均为闭式循环并各自独立运行, 在整个储放热过程中, 锅炉和汽机的工质没有减少, 系统灵活性高。

2.2 熔盐储热系统综合效率分析

整个储热系统的综合效率取决于上述图1中各模块的效率。

其中, 储热功率模块涉及管道和设备热损失率 η_1 , 根据《大中型火力发电厂设计规范》(GB 50660—2011)的规定, 管道效率宜取99%^[18], 即通过合理保温设计可保证储能系统的储热效率为99%, 因此可以取热损失率 $\eta_1=1\%$ 。

储热和放热过程有熔盐泵的运行电耗 η_2 , 按照熔盐储热密度300 kJ/kg、阻力1 MPa、热电效率40%估算的泵类厂用电率为0.83%; 维持主机系统安全涉及再热蒸汽增压泵的运行电耗, 按照再热蒸汽压缩功130 kJ/kg、再热蒸汽热密度470 kJ/kg、再热蒸汽热量占总热量比例20%, 热电效率40%估算的再热蒸汽增压泵厂用电率13.83%; 因此运行电耗 $\eta_2=14.66\%$ 。

储热容量模块涉及管道和设备热损失率 η_3 , 放热功率模块涉及管道和设备热损失率 η_4 , 参照上述 η_1 的取值原则, 取热损失率 $\eta_3=\eta_4=1\%$ 。

因为熔盐的温度限制导致放热蒸汽温度为450℃, 低于主蒸汽温度540℃, 理论做功焓损失率 $\eta_5=8.03\%$ 。

系统综合效率 η 可以按如下方式进行计算:

$$\eta = (1 - \eta_1) \times (1 - \eta_2) \times (1 - \eta_3) \times (1 - \eta_4) \times (1 - \eta_5)$$

故储能系统估算的理论综合效率为76.2%, 已经接近抽水蓄能机组, 能源利用效率远高于热电联产机组电锅炉调峰供热方案。

2.3 系统技术特点

上述系统可以大幅度增加火电厂深度调峰能

力, 使汽机在15%额定负荷下运行, 如果进一步将所发电量用于电加热器加热熔盐, 甚至可以实现机组零功率上网。系统的主要技术特点如下:

1) 原锅炉及其辅机系统运行在较高出力, 煤耗低, 经济性和安全性高, 也不存在脱硝系统运行问题。

2) 调峰幅度深, 只需根据需要设置相应功率的换热装置即可。

3) 调峰时间长, 按需设置储热罐即可, 可以实现单日10 h以上的储热能力。

4) 调峰速度快, 能够满足电力系统负荷大幅度波动的调节要求。

5) 储热参数高, 系统综合效率高, 熔盐储热温度可以达到500℃以上, 放热蒸汽参数可以达到亚临界参数。

6) 储能系统功率模块和容量模块相互独立, 储热过程和放热过程相互独立, 系统运行灵活高, 可以根据各个电厂不同的调峰需求定制储热系统方案。

7) 改善了整个机组的启停速度和变负荷能力, 提高机组运行灵活性。

8) 系统综合效率高, 能耗损失小, 经济效益好。

9) 储热系统使用寿命长达30年、维护成本低, 平准化发电成本低。

10) 对原“锅炉-汽机”工艺系统改造小, 除占地面积稍大以外, 对建设条件要求不高, 实施便利。

以上技术特点很好地解决了常规的火电机组灵活性改造方案存在的问题, 表1为各种灵活性改造技术方案的对比。

3 火电机组采用高温熔盐储热技术的应用前景展望

综上所述, 高温熔盐储热技术在火电机组灵活性改造中具有更广的机组适应性, 改造后的机组具有更好的运行灵活性, 更强的系统安全性, 更高的运营经济性。考虑到该技术的特点, 有以下三个方面的应用前景:

3.1 改造后的火电机组可以更好地适应电力市场改革

根据上文对系统的介绍和对系统功能的分析,

表1 火电机组灵活性改造技术方案对比表
Tab.1 Comparison table of technical schemes for flexible modification of thermal power units

方案	熔盐储热调峰	锅炉侧宽负荷调峰	汽机侧热电解耦调峰
调峰方式	全年每天数小时调峰	全年每天长期调峰	全年仅供热期调峰
调峰容量	0~100% 负荷	国际先进最低 20% 负荷	0~100% 负荷
调峰时长	0~12 h	7×24 h	受限于供热负荷
改造效果	调峰幅度深,调峰时间长,负荷调节快,启停速度快	调峰幅度较深,调峰时间长,调节速度较慢	调峰幅度较深,调峰时间长,调节速度较快
改造影响	对原系统影响较小,运行安全性高,使用寿命长	对原系统影响较大,机组运行安全性较差,影响机组寿命	对原系统影响小,除了切除低压缸方案之外,其他方案运行安全性高
改造条件	适用于各种类型的火电机组,实施便利,需要较大的熔盐储罐场地	适用于大部分火电机组,受限于锅炉设计和煤种特性,初投资较低	主要适用于热电联产机组,储热装置和电蓄热锅炉需要较大的储热场地,初投资较高
社会效益	主机煤耗指标较好,储能效率>75%	煤耗指标增加	主机煤耗指标较好,加热供热效率低

特别是上述系统的各个模块相互独立,可以通过配置大功率的储热、放热功率模块和大容量的熔盐储罐,实现机组深度和长时间的调峰运行,从而使得采用高温熔盐储热技术改造的火电机组运行灵活性大幅度提高。

在国家政策引导下,各地完善电力辅助服务市场机制的步伐不断加快,地方电力辅助服务市场相关政策加快出台。采用高温熔盐储热技术改造的火电机组运行灵活性高,经济性好,调节速度快,除可以参与机组的深度调峰运行外,还可以适应各种其他类型的电力辅助服务,如启停调峰交易、旋转备用交易和紧急短时调峰交易等,获得可观的经济效益。

在电力现货交易市场形成之后,改造后的电厂还可以通过参与电力现货交易实现收益。电力现货交易旨在解决中长期交易与实际运行之间的偏差形成的时序价格,还原电力交易的商品特征。火电机组大容量高参数储热系统可以在电价低的时候大规模储热,在电价高的时候,释放所储存高品位热量,推动汽轮机做功发电,获取分时电价的高收益。

3.2 实现大容量高参数供热,打造综合能源供应基地

当前,国家环保要求强制关停分散式小锅炉供暖和小锅炉工业供汽,火电机组抓住机会,不断增加外供热量,拓展除卖电以外的卖热收益。相比天然气供热的高成本且燃料紧张,大型火电机组可以作为经济和稳定的热源进行供热。但是,未改造的火电机组均为热电耦合状态,不论是北方的热电联产机组还是南方的纯凝机组,要增加供热量,必须增加发电出力,这必然对新能源消纳带来不利影响。

另一方面,在源网荷协调互动发展充分建立之前,绝大部分电力辅助服务成本均在发电侧内部消化,灵活性改造的高投资和日益激烈的竞争也给发电小时数逐年下降、经济效益下滑的煤电企业带来巨大压力。而高温熔盐储热技术能够横向拓展火电机组进行灵活性改造后的供热应用场景,在电力辅助服务市场的机制外为电厂创造收益,激发火电机组灵活性改造的积极性。

采用高温熔盐储能技术改造后的火电机组进行工业供汽的工艺系统见图2。由图知,该系统储热参数高、容量大,可实现大规模高参数对外工业供汽,有效解决常规火电机组进行抽汽改造后,供热能力受机组发电出力限制的问题。系统功率模块和容量模块相互独立,储热过程和放热过程相互独立,运行灵活高,可实现机组在任何工况下连续对外供汽供汽,特别是可以实现机组低负荷工况下的工业供汽,而且独立的放热功率模块可按需提供各种参数的蒸汽和热水。

改造之后,火电机组可以同时参与电力辅助服务市场和进行供热,大幅改善火电厂经济效益,解决机组灵活性改造后的后顾之忧;同时也将火电机组由原来的电力电量供应商打造成为综合能源供应商和服务商。

3.3 高温熔盐储热技术可以参与火电机组延寿改造

在控煤和环保的背景下,大量现役300 MW机组及其他小机组即将进入关停淘汰期限,而在国家“碳达峰碳中和”目标的背景下,新增煤电装机受到严控,新能源装机容量却迅猛增长,由于缺乏足够的灵活运行机组,电力系统稳定性出现较大风险

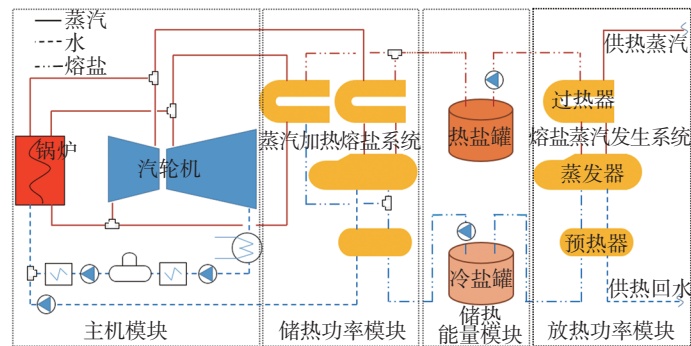


图2 基于高温熔盐储能技术的火电机组工业供汽工艺图

Fig. 2 Industrial steam supply process diagram of thermal power unit based on high temperature molten salt energy storage technology

敞口，退役机组企业的职工也面临再就业问题。火电机组大容量高参数储热技术可以用于即将退役300 MW机组及其他小机组延寿改造，可将机组的锅炉及其他煤炭燃料系统拆除，保留汽轮发电机组等其他主要设备。

图3为高温熔盐储热技术参与火电机组延寿改造的示意图，延寿老机组的储热系统的热量可以来自同一电厂的600 MW或1000 MW等新机组，即延寿老机组的储热系统作为该电厂600 MW或1000 MW

新机组的深度调峰工具，提高600 MW或1000 MW新机组深度调峰能力的同时，给储热系统充热，该过程可以减少新机组上网发电量，并由此促进新能源机组的发电量消纳。在电力调度需要延寿老机组汽轮发电机组增大出力时，储热系统放热即可；并且熔盐储能系统具有快速的负荷调节功能，可充分利用老汽轮发电机组的调频能力。这一改造方案在没有增加总的煤炭消耗量的情况下，增加了电力系统调峰能力和新能源发电的消纳能力。

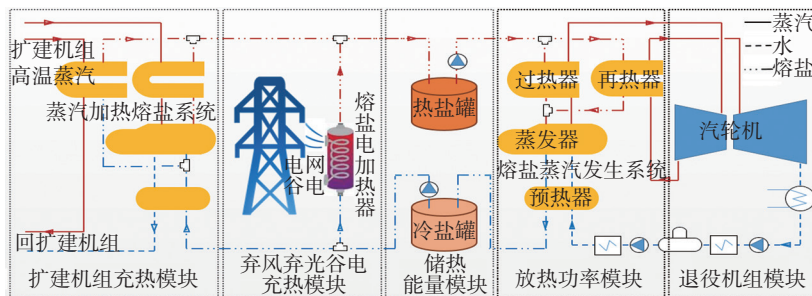


图3 火电机组高温熔盐储热技术延寿改造示意图

Fig. 3 Schematic diagram of high-temperature molten salt heat storage technology modification of life extension on thermal power units

延寿老机组储能系统的热量也可以来自富余的新能源弃电出力或电网低谷电，这样同样可以促进新能源消纳和保障电网安全。只要储热系统有足够的热量，就能保留原机组的发电容量和在电力系统中的旋转备用，同时可以在避免新增煤炭燃料的情况，保证电力系统尖峰发电出力。上述改造方案在为电力系统提供灵活调峰电源的同时，也能同时为现有老旧机组延寿，增加企业和社会财富。

由于系统的灵活性，以上三方面的应用场景，每一种都可以独立运行，也可以同时存在，为企业和社会带来巨大的经济效益，这一点尤为难得。

另外，高温熔盐储热技术作为新型的储能技

术，已经成功应用在国家太阳能热发电示范项目上，如果能够大规模应用于燃煤机组，可以带动相关化工企业和制造企业的发展，产生全新的熔盐相关产业链，创造可观的经济效益和社会效益。同时规模化应用也可以降低整个储能系统的投资，使得火电机组改造的经济效益更好。

4 火电机组高温熔盐储热系统的经济性分析

以35万机组从50%基准负荷深度调峰至20%负荷为例，配置高温熔盐储热系统功率105 MWe，储热时长为8 h。按年调峰小时数800 h计算，储热

系统年调峰电量 84 GWh。根据 2020 年 6 月 4 日《湖北电力调峰辅助服务市场运营规则(试行)》,机组调峰至 20% 的辅助服务加权平均单价可达 0.433 元/kWh,按此计算的年调峰收入为 3 640 万元。调峰过程中的煤耗指标取 300 g/kWh,标煤价 750 元/t,则年调峰成本为 1 890 万元,故调峰净收益为 1 750 万元。高温熔盐储热系统放热时,可发电或者供热产生收益,当储能效率取 76.2%,上网电价取 0.4 元/kWh 时,其年储能发电收益 2 560 万元,预计今后电力现货交易可以产生更高发电收益;若储存的热量不返回汽轮机做功发电,而是如图 2 中所示用于工业供汽,则可以获得远高于发电的供热收益。由此可知,上述条件下高温熔盐储热改造后的年总收益至少高达 4 310 万元,具有较好的创利能力和应用前景,能承受较高的初投资。

同样以上述 35 万机组调峰为例,高温熔盐储热改造后,每年可促进新能源消纳电量 84 GWh。此外,当采用新能源弃电加热延寿老机组储能系统,按照热电效率 40% 估算,则每年可促进新能源消纳电量 33.6 GWh。根据《2006 IPCC 指南》方法估算,假设 35 万机组使用烟煤,取其二氧化碳排放强度 94.6 t CO₂/TJ,则分别减少二氧化碳排放量 7.15 万 t 和 2.86 万 t。

5 结论

火电机组进行高温熔盐储热改造,将极大地提高其深度调峰能力,尤其是能解决常规改造方案存在锅炉系统效率降低和辅机空转率增加的问题;同时,机组改造后对外提供高参数工业供汽的能力将得到大幅度提高,这将有效提高电厂经济效益,弥补调峰补偿机制的不足;高温熔盐储热技术也可以应用于火电老机组延寿改造,不仅增加系统灵活调峰电源,还可以使老旧电厂企业资产继续发挥效益。

在系统中选择一批火电机组进行大规模高温储热技术改造,可以在不增加煤炭消费总量的基础上,为系统提供大量灵活调峰电源,有效缓解新能源电力消纳问题;同时汽轮发电机组的容量被保留,可为电力系统提供了备用容量和转动惯量,有力保障电力供应和电力系统安全稳定。

火电机组高温熔盐储热技术适合中国富煤贫油

少气的资源特点和中国煤电比例高的国情,既能解决燃煤电厂的生存问题,又能促进新能源发电消纳,还能使火电机组长期更适应电力市场改革的方向,且储能系统综合效率高,改造实施便利,可以作为抽蓄电站的有力补充。

2021 年 2 月,国家发展改革委和国家能源局《关于推进电力源网荷储一体化和多能互补发展的指导意见》指出:“对于存量煤电项目,优先通过灵活性改造提升调节能力,结合送端近区新能源开发条件和出力特性、受端系统消纳空间,努力扩大就近打捆新能源电力规模。”对现役火电机组进行高温熔盐储热技术改造,开发不同的应用场景,把火电机组从传统的电力供应商打造成为电热综合能源供应商和服务商,将很好地契合上述文件提升能源清洁利用水平和电力系统运行效率的目标。该技术的推广,将有力促进火电厂转型升级,助力实现“碳达峰、碳中和”目标。

参考文献:

- [1] 单葆国,孙祥栋,李江涛,等. 经济新常态下中国电力需求增长研判[J]. 中国电力,2017,50(1):19-24.
SHAN B G, SUN X D, LI J T, et al. Analysis on the China's electricity demand growth under the new economic norm [J]. Electric Power, 2017, 50(1): 19-24.
- [2] 耿然. 考虑可再生能源消纳的高载能负荷的有功控制[D]. 北京:华北电力大学(北京),2017.
GENG R. An active power control strategy of high-energy load considering wind power consumptive [D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2017.
- [3] 林琳,鞠森,于立杰. 居民用电负荷超短期预测研究[J]. 电子测量技术,2019,42(9):98-101.
LIN L, JU S, YU L J. Research on ultra-short-term prediction of residential electricity consumption [J]. Electronic Measurement Technology, 2019, 42(9): 98-101.
- [4] 中国电力企业联合会. 煤电机组灵活性运行政策研究[R]. 北京:中电联理事会办公厅,2019.
China Electricity Council. Study on flexible operation policy of coal-fired power units [R]. Beijing: General Office of China Electricity Council, 2019.
- [5] 文雯. 电力新基建要避免新一轮跑马圈地[N]. 中国环境报,2020-11-24.
WEN W. New power infrastructure should avoid a new round of staking [N]. China Environment News, 2020-11-24.
- [6] 裴顺,杨桂. 燃煤机组低负荷工况下安全稳定运行研究[J]. 南方能源建设,2018,5(增刊1):19-24.
PEI S, YANG G. Research on safe and stable operation under

- lower load condition for coal-fired power plant [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(Supp. 1):19-24.
- [7] 李沙. 600 MW 机组锅炉低负荷脱硝投运改造工程实践 [J]. 锅炉技术, 2019, 50(1):64-69.
- LI S. The reformation project practice for low-load denitration put into operation in 600 MW unit boiler technology [J]. Boiler Technology, 2019, 50(1):64-69.
- [8] 柳磊, 杨建刚, 王东, 等. 火电汽轮机组热电解耦技术研究 [J]. 宁夏电力, 2017, 0(6):62-66.
- LIU L, YANG J G, WANG D, et al. Thermal decoupling technology of thermal power steam turbine unit [J]. Ningxia Electric Power, 2017, 0(6):62-66.
- [9] 郭立立, 邢作霞, 王亮. 一种基于储热的热电联产系统热电解耦运行的方法 [C]//沈阳市科学技术协会. 第十四届沈阳科学学术年会论文集(理工农医), 沈阳, 2017-08-11. 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2017:906-911.
- GUO L L, XING Z X, WANG L. Heat-electrolytic coupling operation method of cogeneration system based on heat storage [C]// Shenyang Association of Science and Technology. Proceedings of the 14th Shenyang Scientific Academic Annual Meeting (Science, Technology, Agriculture and Medicine), Shenyang, August 11, 2017. Shenyang: Shenyang Association of Science and Technology, 2017: 906-911.
- [10] 李伟, 蔡勇, 张晓磊, 等. 深度调峰工况锅炉主要辅机运行安全性分析 [J]. 广东电力, 2019, 32(11):63-69.
- LI W, CAI Y, ZHANG X L, et al. Analysis of operation safety of main auxiliaries of boilers under deep peak shaving [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11):63-69.
- [11] 罗聪, 刘鑫屏. 深度调峰工况下锅炉过量空气系数对炉内温度影响的分析 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(3):81-86.
- LUO C, LIU X P. Analysis of optimal excess air ratio under ultra low load conditions [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(3):81-86.
- [12] 王伟, 徐婧, 赵翔, 等. 中国煤电机组调峰运行现状分析 [J]. 南方能源建设, 2017, 4(1):18-24.
- WANG W, XU J, ZHAO X, et al. Analysis on peak load regulation status quo for coal-fired power plants in China [J]. Southern Energy Construction, 2017, 4(1):18-24.
- [13] 吴寿贵, 王红雨, 党小建, 等. 某350 MW超临界直流锅炉分离器汽温偏差和汽温偏低原因分析及调整方法 [J]. 锅炉技术, 2018, 49(1):22-27.
- WU S G, WANG H Y, DANG X J, et al. Analysis and adjustment on low separator steam temperature and steam temperature deviation in a 350 MW supercritical once-through boiler [J]. Boiler Technology, 2018, 49(1):22-27.
- [14] 刘暑辉, 田亮. 深调峰工况下锅炉虚假水位预测 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(1):70-75.
- LIU S H, TIAN L. Prediction of boiler false water level under deep peak load regulation conditions [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(1):70-75.
- [15] 杨阳. 切除低压缸运行风险分析及应对策略探索 [J]. 热力透平, 2020, 49(2):93-98.
- YANG Y. Risk analysis and treatment of operation with low-pressure cylinder cutting out in steam turbine [J]. Thermal Turbine, 2020, 49(2):93-98.
- [16] 张开军. 太阳能光热电站有关消防设计问题的探讨 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2):75-80.
- ZHANG K J. Design discussion on the fire fighting for solar power plant [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2):75-80.
- [17] 王志峰, 杜凤丽. 2015~2022年中国太阳能热发电发展情景分析及预测 [J]. 太阳能, 2019, 307(11):7-12+71.
- WANG Z F, DU F L. Scenario analysis and forecast of solar thermal power generation development in China from 2015 to 2022 [J]. Solar Energy, 2019, 307(11):7-12+71.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 大中型火力发电厂设计规范:GB 50660—2011 [S]. 北京:中国计划出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Code for design of fossil fired power plant: GB 50660—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.

作者简介:

李峻 (通信作者)

1971-, 男, 湖北蕲春人, 教授级高级工程师, 浙江大学电力系统及其自动化专业学士, 主要从事火电厂及可再生能源发电设计咨询工作和储能技术研究 (e-mail) lijun@csepedi.com。



李峻

祝培旺

1987-, 男, 湖北随州人, 高级工程师, 注册公用设备师, 浙江大学热能工程博士, 主要从事热力发电及可再生能源发电设计工作 (e-mail) zpw5776@csepedi.com。

王辉

1970-, 男, 江苏扬州人, 总工程师, 教授级高级工程师, 上海交通大学电厂热能动力专业学士, 主要从事电力工程设计咨询工作和热能动力技术研究 (e-mail) wanghui@csepedi.com。

(责任编辑 李辉)