

DOI: 10.19666/j.rlfed.202305055

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

马汀山^{1,2}, 王伟^{2,3}, 王东晔^{2,3}, 雒青^{1,2}, 耿如意^{2,3},
张建元^{2,3}, 居文平^{1,2}, 常东锋^{1,2}, 张国龙^{2,3}

(1. 高效灵活煤电及碳捕集利用封存全国重点实验室, 北京 102209;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 西安西热节能技术有限公司, 陕西 西安 710054)

[摘要] 构建以新能源为主体的新型电力系统对于煤电机组深度调峰提出了更高的要求, 通过对电网需求的分析以及各种储能技术的对比, 以燃煤发电机组的系统特征为出发点, 提出了一种基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统, 并给出了其运行方式。通过理论分析, 给出了熔盐系统加热、储热、换热3个子系统的主要参数计算方法; 以某660 MW燃煤机组为例, 在分析其热力边界和调峰需求的基础上, 依照提出的计算方法, 计算得到了熔盐系统电加热模块的功率以及连接方式; 选定了熔盐的种类以及换热系统的进出口参数; 确定了熔盐储热的容量、用盐量和储罐容积, 为准确核算项目投资和项目占地提供了可靠的数据支撑。该系统以及计算方法可为同类型工程项目的初期设计提供参考。

[关键词] 煤电机组; 深度调峰; 熔盐储热; 容量计算

[引用本文格式] 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.

Research on system design and capacity calculation method for deep peak shaving of coal-fire unit based on molten salt heat storage assistance

MA Tingshan^{1,2}, WANG Wei^{2,3}, WANG Dongye^{2,3}, LUO Qing^{1,2}, GENG Ruyi^{2,3},
ZHANG Jianyuan^{2,3}, JU Wenping^{1,2}, CHANG Dongfeng^{1,2}, ZHANG Guolong^{2,3}

(1. State Key Laboratory of High-Efficiency Flexible Coal Power Generation and Carbon Capture Utilization and Storage, Beijing 102209, China;

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

3. Xi'an TPRI Energy Conservation Technology Co., Ltd., Xi'an 710054, China)

Abstract: Building a new power system focusing on new energy resources puts forward higher requirements for deep peak shaving of coal power unit. Through the requirement analysis of power grid and the comparison of various energy storage technologies, taking the system characteristics analysis of coal power unit as the starting point, a system and a operation mode were given which were based on molten salt thermal storage to assist deep peak shaving of coal power unit. Through theoretical analysis, the calculation methods of the main parameters of subsystems including the heating, heat storage and heat exchange of the molten salt system have been put forward. Taking a 660 MW coal-fired unit as an example, based on the analysis of the thermal boundary and peak shaving demand, the power and connection mode of the electric heating module of the molten salt system are calculated using the calculation method proposed in this article. The types of molten salt and the inlet and outlet parameters of the heat exchange system are selected. The capacity, salt consumption and tank volume of molten salt

收稿日期: 2023-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2405205)

Supported by: National Key Research and Development Program (2022YFB2405205)

第一作者简介: 马汀山(1982), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为汽轮机、供热、储热技术研发与应用, matingshan@tpri.com.cn.

heat storage are determined. All the results provide reliable data support for accurate accounting of project investment and land occupation. This system and calculation method can provide reference for the preliminary design of similar projects.

Key words: coal-fire unit; deep peak shaving; molten salt heat storage; capacity calculation

我国当前实现“碳达峰、碳中和”的基本思路和主要举措是深化电力体制改革,构建以新能源为主体的绿色低碳新型电力系统^[1-2]。以风电、光伏为代表的大规模间歇性可再生能源正在加速能源结构的低碳化转变,但大规模可再生能源并网发电,需要电力系统中有足够的灵活性资源来保证电网安全运行。长期以来,煤电在我国能源供应中占据主力地位,起着保供托底的“压舱石”作用^[3]。为解决高比例可再生能源的并网难题,不具备发电成本优势的煤电机组需要依靠提供灵活性辅助服务和供热来获得较大的收益。

2021年12月,国家能源局发布了《电力并网运行管理规定》和《电力辅助服务管理办法》。鼓励新型储能、可调节负荷等并网主体参与电力辅助服务,新增“爬坡”“转动惯量”等辅助服务,火电补偿途径更加多元化。不同储能技术的对比如图1所示。

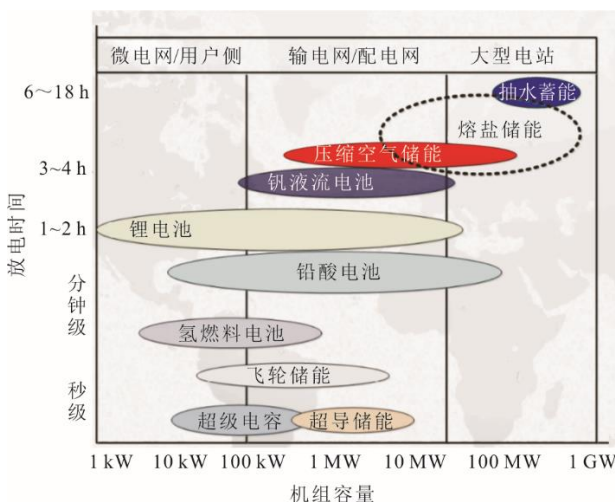


图1 不同储能技术对比

Fig.1 Comparison of energy storage technologies

国内商业运行的大型燃煤机组容量基本在300 MW等级以上,不同区域电网的深度调峰要求从15%~50%额定负荷不等,深度调峰时长一般为数小时。可以应用于火电机组深度调峰的储能技术必须同时满足大功率(百兆瓦级)、长时间(数小时)2个要求。从图1中各种储能技术的特点可以看出,能满足火电机组深度调峰的储能技术为压缩空气储能、熔盐储能、抽水蓄能,而压缩空气储能和抽

水蓄能的建设受地理特征限制较为明显。熔盐储能技术具有安全性高、寿命长、占地面积小、单位容量成本低的特点,应用于提高现役煤电机组深度调峰能力方面有独特的优势。

目前应用范围最广的熔盐是太阳盐(质量分数60%NaNO₃+40%KNO₃),世界范围内已商业化运行的太阳能热发电站基本全部使用其作为储热介质,其熔点约为220℃,最高使用温度约为585℃^[4],在长期使用过程中表现出了优异的稳定性;另一种常用盐是希特斯盐 Hitec(质量分数7%NaNO₃+53%KNO₃+40%NaNO₂),其熔点相对较低,约为142℃,部分研究者认为最高使用温度可以达到450℃^[5]。

国内研究熔盐的团队主要为北京工业大学、中山大学和中国科学院上海应用物理研究所。目前针对混合熔盐配方的研究已经相对成熟,提出了适应不同工作温度的多种熔盐配方,最低熔点可以降低至80℃,最高使用温度能超过800℃,此外熔盐密度、比热容和黏度等相关物性的数据库也比较完善。硝酸盐、碳酸盐、氯化盐和氟化盐的熔点逐渐升高,后3种盐的熔点过高,一般不适用于常规储热系统。

北京工业大学吴玉庭团队^[6]提出了130多种混合熔盐配方,特别配制出了熔点在100℃左右的低熔点熔盐。Kenisarin^[7]提供了17种混合硝酸盐的配方和熔点数据,熔点温度范围为105~287℃。在工程应用中,熔盐的最低使用温度一般要比熔点温度高50~60℃以上,以保证熔盐完全熔化。Garbrecht等人^[8]探寻了熔盐储能在火电厂内应用的可行性,研究结果表明利用熔盐升降负荷时焓损失较低,但需额外增加换热器并对火电机组的热平衡进行重大修改。Cao等人^[9]提出利用熔盐储热吸收多余电能再转化为高品质蒸汽的技术路线,结果表明机组负荷最高可增加6.23%,极端情况下可以实现电厂零上网,往返率达到44.18%。Fu等人^[10]使用Ebsilon建模软件研究分析将熔盐系统与煤电机组耦合的技术可行性和经济性。庞力平等^[11]利用THERMOFLEX软件探讨了二次再热机组结合熔盐储热的可行性,研究成果表明熔盐储能系统在储热阶段最大调峰功率可

达 45 MW、放热阶段机组电功率提升 12.74 MW。

目前国内针对熔盐储热辅助火电机组调峰技术的研究局限于数值模拟,熔盐储热与燃煤机组耦合具体连接方式以及储热容量计算方法相关研究较少。本文旨在提供一种熔盐储热辅助机组调峰方案,并形成较为完整的技术方案,以期为同类型工程问题提供参考。

1 熔盐储热系统分析

1.1 燃煤机组调峰需求分析

目前国内的大型燃煤发电机组普遍存在深度调峰的需求。纯凝机组的深度调峰一般限制在低负荷稳燃和宽负荷脱硝,而供热机组则还有热电耦合的限制。因此纯凝机组和热电联产机组均存在利用熔盐储热进一步挖掘调峰深度的需求,而热电联产机组的需求更为迫切。

1.2 耦合系统连接方式研究

针对燃煤机组普遍存在的需求,提出熔盐储热与燃煤机组耦合系统,利用燃煤机组的蒸汽或者电进行熔盐加热,再从燃煤机组引出水源进行吸热产生蒸汽之后外供或者发电。

1) 储热过程 系统使用机组发电或者机组蒸汽作为能量输入来源,将来自低温罐的熔盐加热之后存储到高温罐当中。需要说明的是,2种加热方式各有优缺点,采用电加热的热经济性不如蒸汽加热,但是系统简单、灵活性高;采用蒸汽加热,机组热力系统大量抽取蒸汽受制于锅炉和汽轮机的安全稳定运行要求,且相比电加热系统,蒸汽加热系统庞大、运行复杂。

2) 放热过程 利用热熔盐泵将高温罐中的热盐驱动进入盐-水换热器系统,释放热量之后返回到低温罐;利用升压泵提高除氧器出口水(或者除盐水)压力到需求压力,进入盐-水换热器系统吸热达到需求温度之后,根据电厂的需求接入工业供汽母管、采暖供汽母管、背压机入口或者机组汽轮机的某一级回热抽汽。具体的热力系统连接如图2所示。由图2可以看出,熔盐储热辅助燃煤机组深度调峰流程共分为熔盐加热、熔盐储热、熔盐-汽水换热3个子系统。其中熔盐加热系统的功率对应可以辅助燃煤机组挖掘调峰深度的能力;熔盐储热系统的容量对应辅助燃煤机组维持深度调峰的时长;熔盐-汽水换热系统的供汽能力对应辅助燃煤发电机组带高负荷的能力。

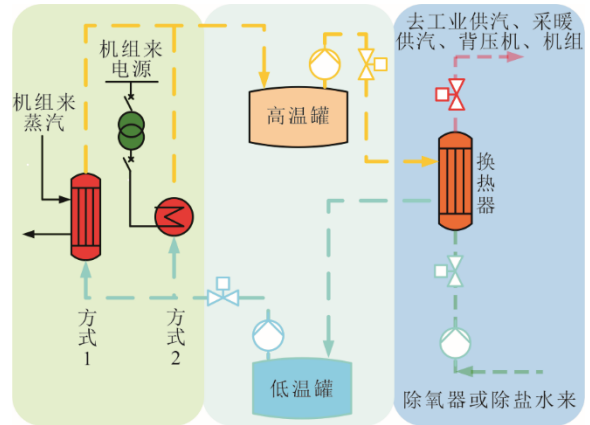


图2 耦合系统热力连接示意

Fig.2 Thermal connection diagram of coupling system

1.3 耦合系统运行方式

熔盐储热系统长期维持最低负荷热备用。当电网需要机组深度调峰时,燃煤机组首先降至最低负荷运行,熔盐储热系统的电加热器或蒸汽加热器满功率投入使用,进一步降低机组上网功率;盐水换热系统可以产生高参数的蒸汽解决机组低负荷下辅汽压力不足影响部分辅机运行的问题。对于热电联产机组,盐水换热系统大流量运行可解决深度调峰下机组供汽能力不足的问题,提高深度调峰工况下工业供汽的可靠性。

此时,低温熔盐泵高功率运行,提供较大流量的低温熔盐带走熔盐加热器中的热量,且该泵及其下游的流量控制系统可以快速、精确控制低温熔盐流量,以保证加热器出口的高温熔盐温度达到设计值,以维持高温罐处于恒定温度。

部分区域电网对机组的高负荷运行能力要求较高,当电网需要机组提供较高电负荷时,熔盐加热系统以最低负荷运行,可减少机组电量或者热量的消耗;当盐水换热器系统以最高负荷运行时,可为机组或者供汽系统提供大量高参数蒸汽,提高机组的高负荷运行能力,避免机组调差考核。

2 熔盐储热系统容量计算方法

计算思路为通过调峰深度确定需要的熔盐加热器功率,再通过引入调峰时长确定储热容量;然后通过机组热力系统及供热参数确定熔盐的运行温度,继而确定需要选择的熔盐种类,根据熔盐种类确定熔盐的物性;最后确定熔盐的用量及储热罐的容积,分别计算出利用电加热熔盐或者蒸汽加热熔盐进行工业供汽和深度调峰系统中熔盐的用量及储热罐的容积。

2.1 调峰深度和调峰时长分析

不同区域电网对于燃煤机组的调峰深度要求不同,不同调峰深度下机组得到的补贴也不同。一般情况下,深度调峰的补贴都是分档执行,深度越深单位电量的调峰补贴越多^[12]。区域电网的调峰深度需求可根据机组接收到的调峰指令进行推断,当电网的调峰指令为机组报备的最低指令时,即可认为电网存在更深度调峰的需求。

调峰时长具有一定的季节性特征,且存在一定的不确定性,可根据区域电网的长周期统计数值进行预测。

2.2 熔盐储热系统的加热功率以及连接方式分析

考虑采用电加热及蒸汽加热熔盐2种方式进行储热,分别计算机组在深度调峰需求为 P_{df} 时,2种不同加热方式对应的功率为:

$$P_d = P_{df} \quad (1)$$

$$P_q = \frac{P_{df}}{\eta_{cq}} \quad (2)$$

式中: P_d 为采用电加热熔盐加热方式下,熔盐电加热器的功率, MW; P_q 为采用蒸汽加热熔盐方式下,熔盐蒸汽加热器的热负荷, MW; η_{cq} 为所选取的储热抽汽的抽汽效率, %, η_{cq} 可通过等效焓降计算方法^[13]计算得到。

P_d 可根据此功率选择合适的电源点,如果 P_d 小于高压厂用变压器(高厂变)的裕量(高厂变设计功率减去机组在深度调峰工况下的厂用电负荷),则可以选择从高厂变取电;如果 P_d 大于高厂变的裕量小于启备变的容量(一般与高厂变容量相当),则可以选择从启动/备用变压器(启备变)取电;如果 P_d 大于启备变的容量,则可以选择从升压站备用间隔取电。不同的取电方式控制方式不同,系统配置和连接方式也有所不同。

熔盐蒸汽加热器的抽汽流量为:

$$Q_{cq} = \frac{P_q}{h_{cq} - h_{hqs}} \quad (3)$$

式中: Q_{cq} 为抽汽流量, 10^3 kg/s; h_{cq} 为储热抽汽焓值, kJ/kg, h_{cq} 可根据抽汽压力 p_{cq} 及抽汽温度 t_{cq} 查水蒸汽参数表获得; h_{hqs} 为回汽或者回水焓值, kJ/kg, h_{hqs} 可根据回汽或者回水压力 p_{hqs} 及温度 t_{hqs} 查水蒸汽参数表得到。根据抽汽流量 Q_{cq} 的数值大小可设计抽汽管道的尺寸。

2.3 熔盐选择与盐水换热系统的容量计算

为保证熔盐系统的运行稳定,设计最大工况下

盐水换热系统热负荷与熔盐加热系统的热负荷一致,即做到充放平衡,避免2个能力不平衡导致的系统运行不收敛问题。

根据选择的熔盐系统供水参数(根据取水位置而确定)和熔盐系统产生的蒸汽参数(根据蒸汽用途而确定),盐水换热系统的汽水侧流量计算为:

$$Q_{gs} = \frac{P}{h_{gg} - h_{gs}} \quad (4)$$

式中: P 为采用电或者蒸汽加热熔盐加热的功率, MW; Q_{gs} 为盐水换热系统的进口给水流量, 10^3 kg/s; h_{gs} 为盐水换热系统的进口给水焓值, kJ/kg, h_{gs} 可根据供水压力 p_{gs} 及温度 t_{gs} 查水蒸汽参数表获得; h_{gq} 为盐水换热系统的出口蒸汽焓值, kJ/kg, h_{gq} 可根据供汽压力 p_{gq} 及温度 t_{gq} 查水蒸汽参数表获得。

根据确定的熔盐系统供水参数和产生蒸汽参数,可以进一步选定系统中高、低温熔盐温度为:

$$t_{ri} = t_{gq} + \theta \quad (5)$$

$$t_{ro} = t_{gs} + \vartheta \quad (6)$$

式中: t_{ri} 为进入盐水换热器的熔盐温度,也即高温熔盐罐中的熔盐温度, °C; θ 为加热器的出口端差,即熔盐进口温度与蒸汽出口温度的差值, °C; t_{ro} 为离开盐水换热器的熔盐温度,也即低温熔盐罐中的熔盐温度, °C; ϑ 为加热器的入口端差,即熔盐出口温度与给水入口温度的差值, °C。

换热器端差越小,能量的利用越合理,但是设计端差的减小是以增加换热面积和投资为代价的,因此有一个技术经济的合理值,通过换热器设计可以选定。

根据熔盐系统的工作温度可以确定拟选用熔盐的凝固点温度和分解温度为:

$$t_{fd} = t_{ri} + t_{fy} \quad (7)$$

$$t_{rd} = t_{ro} - t_{ry} \quad (8)$$

式中: t_{fd} 为熔盐的分解点最低温度, °C; t_{fy} 为保证熔盐运行安全稳定性而考虑的分解裕量, °C, 一般选择10~50 °C; t_{rd} 为熔盐的熔点, °C; t_{ry} 为保证熔盐低黏度运行而考虑的防凝固裕量, °C, 一般选择50 °C以上。

根据系统需求熔盐的熔点和分解温度选定对应形式的熔盐。根据上述已经确定的熔盐进出口温度、汽水侧进出口温度、汽水侧流量进而设计盐水换热系统及相关的汽水熔盐管道系统。

2.4 熔盐储热系统的容量计算

当电网需求的调峰时长为 t 时,采用电加热熔

盐和采用蒸汽加热熔盐所需熔盐的储热量分别为:

$$Q_d = P_d \cdot t \quad (9)$$

$$Q_q = P_q \cdot t \quad (10)$$

式中: Q_d 为采用电加热熔盐方式下系统需要的储热量, MW·h; Q_q 为采用蒸汽加热熔盐方式下系统需要的储热量, MW·h; t 为调峰时常, h。

值得注意的是, 蒸汽加热熔盐的转化效率远远不如电加热熔盐的转化效率。考虑机组的深度调峰需求为 P_{tf} 、连续调峰时间为 t 时, 采用电加热熔盐和采用蒸汽加热熔盐所需系统的熔盐量为:

$$m_d = \frac{Q_d}{\int_{t_{ro}}^{t_{ri}} Cd(t_{ry})} \quad (11)$$

$$m_q = \frac{Q_q}{\int_{t_{ro}}^{t_{ri}} Cd(t_{ry})} \quad (12)$$

$$C = w(t_{ry}) \quad (13)$$

式中: m_d 和 m_q 分别为采用电加热熔盐和采用蒸汽加热熔盐所需系统的熔盐量, 3.6×10^6 kg; C 为选定熔盐的比热容, 属于熔盐的基本物性, 是熔盐温度的函数, J/(kg·°C); t_{ry} 为熔盐温度, °C。

根据如上计算结果, 进一步确定采用电加热熔盐和采用蒸汽加热熔盐所需系统的高温储罐及低温罐的有效容积为:

$$V_d = \frac{m_d}{\int_{t_{ro}}^{t_{ri}} u(t_{ry})d(t_{ry})} \quad (14)$$

$$V_q = \frac{m_q}{\int_{t_{ro}}^{t_{ri}} u(t_{ry})d(t_{ry})} \quad (15)$$

$$\rho = u(t_{ry}) \quad (16)$$

式中: V_d 及 V_q 分别为采用电加热熔盐和采用蒸汽加热熔盐系统所需高温储罐及低温罐的有效容积, m^3 ; ρ 为选定熔盐的密度, 属于熔盐的基本物性, 是熔盐温度的函数, kg/m^3 。

根据如上计算分析可得到调峰需求确定边界下系统的储热容量、需要的熔盐量以及储热罐的有效容积。

3 计算案例分析

本文以某超(超)临界 660 MW 机组为例, 进行系统设计及容量计算, 该机组相关边界条件见表 1。

根据第 2 节的系统连接及计算方法分析, 考虑到该机组既存在深度调峰与工业供汽的矛盾, 既需要大幅提高机组调频能力, 同时需要解决双机停运

工况下工业供汽备用和启动锅炉功能的问题, 因此技术路线上选择使用电加热熔盐, 从除氧器出口取水、生产蒸汽并入工业供汽母管作为系统连接方案。同时, 对系统中的加热、储热、换热部分进行核算, 结果见表 2。

表 1 燃煤机组调峰需求及热力参数
Tab.1 The peak shaving demand and thermal parameter of the coal-fire unit

项目	数值	备注
机组容量/MW	660	目前调峰深度 35%
调峰深度需求/%	5	电网要求调峰深度 30%
深度调峰时长/h	2	30%调峰深度
工业供汽压力/MPa	1.3	
工业供汽温度/°C	260	
除氧器出口压力/MPa	0.5	35%额定负荷
除氧器出口温度/°C	150	35%额定负荷

表 2 熔盐储热系统主要参数计算结果
Tab.2 The calculation results of main parameters of molten salt heat storage system

项目	数值	备注
调峰深度需求/MW	33.00	高厂变取电即可
电加热功率/MW	33.00	换热系统热负荷与此相同
电热转化效率/%	99	
换热系统进水焓值/(kJ·kg ⁻¹)	632.74	30%调峰深度
换热系统出汽焓值/(kJ·kg ⁻¹)	2 954.66	
换热系统汽水流量/(t·h ⁻¹)	50.00	系统散热损失 3%
低温熔盐工作温度/°C	200.00	大端差降低换热面积
高温熔盐工作温度/°C	360.00	大端差降低换热面积
拟选熔盐凝固点/°C	150.00	考虑防凝裕量
拟选熔盐分解点/°C	410.00	考虑防分解裕量
储热容量/(MW·h)	66	
熔盐容量/t	1 313.65	考虑 15%的不可流量熔盐
储热罐容积/m ³	887.60	考虑 0.8 的可用系数

可根据表 2 计算结果选定熔盐电加热模块的功率以及连接方式, 选定熔盐的种类以及换热系统的进出口参数, 确定熔盐储热的容量以及用盐量和储热罐容积。如上结论基本可以确定熔盐储热系统的主要参数, 为进一步的系统详细设计提供参考依据。

4 结论

根据目前电网对于燃煤机组的深度调峰要求和不同储能技术的特点分析, 熔盐储热可以有效利用于火电机组的深度调峰, 解决火电机组调峰能力不足的问题。

1) 提出了基于熔盐储热辅助火电机组深度调峰的系统连接方式。

2) 给出了熔盐系统加热、储热、换热 3 个子系

统的主要参数计算方法以及熔盐种类选择依据。

3) 以某 660 MW 燃煤机组为例, 计算得到了系统熔盐电加热模块的功率以及连接方式; 选定熔盐的种类以及换热系统的进出口参数; 确定熔盐储热的容量以及用盐量和储罐容积, 为准确核算项目投资和项目占地提供可靠依据。

[参考文献]

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2020(28): 5-7.
XI Jinping. Speech at the general debate of the 75th united nations general assembly[J]. The Bulletin of the State Council of the People's Republic of China, 2020(28): 5-7.
- [2] 习近平. 习近平主持召开中央财经委员会第九次会议[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-04-30]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
XI Jinping. XI Jinping hosted the 9th Meeting of the Central Committee on Finance and Economics[EB/OL]. (2021-03-15)[2023-04-30]. <https://news.cctv.com/2021/03/15/ARTIFUhtqyI0GxogiEDWyY28210315.shtml>.
- [3] 中国电力企业联合会. 中电联发布 2023 年度全国电力供需形势分析预测报告[R/OL]. (2023-01-19)[2023-03-20]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-317477>.
China Electricity Council. China electricity union releases 2023 national power supply and demand situation analysis and prediction report[R/OL]. (2023-01-19)[2023-03-20]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-317477>.
- [4] GONZÁLEZ-ROUBAUD E, PÉREZ-OSORIO D, PRIETO C. Review of commercial thermal energy storage in concentrated solar power plants: steam vs. molten salts[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 80: 133-148.
- [5] FERNÁNDEZ A G, GALLEGUILLOS H, FUENTEALBA E, et al. Thermal characterization of HITEC molten salt for energy storage in solar linear concentrated technology[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2015, 122(1): 3-9.
- [6] 吴玉庭, 任楠, 马重芳. 熔融盐显热蓄热技术的研究与应用进展[J]. 储能科学与技术, 2013, 2(6): 586-592.
- WU Yuting, REN Nan, Ma Chongfang. Research and application of molten salts for sensible heat storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(6): 586-592.
- [7] KENISARIN M M. High-temperature phase change materials for thermal energy storage[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14: 955-970.
- [8] GARBRECHT O, BIEBER M, KNEER R. Increasing fossil power plant flexibility by integrating molten-salt thermal storage[J]. Energy, 2017, 118: 876-883.
- [9] CAO R, LU Y, YU D, et al. A novel approach to improving load flexibility of coal-fired power plant by integrating high temperature thermal energy storage through additional thermodynamic cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 173: 115225.
- [10] FU Y, NING Z, GE W, et al. Using molten-salt energy storage to decrease the minimum operation load of the coal-fired power plant[J]. Thermal Science, 2020, 24: 2757-2771.
- [11] 庞力平, 张世刚, 段立强. 高温熔盐储能提高二次再热机组灵活性研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(8): 2682-2691.
PANG Liping, ZHANG Shigang, DUAN Liqiang. Flexibility improvement study on the double reheat power generation unit with a high temperature molten salt thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(8): 2682-2691.
- [12] 刘学, 刘硕, 于松泰, 等. 面向新型电力系统灵活性提升的调峰容量补偿机制设计[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 155-163.
LIU Xue, LIU Shuo, YU Songtai, et al. Peak load regulation capacity compensation mechanism for new power system flexibility enhancement[J]. Power Grid Technology, 2023, 47(1): 155-163.
- [13] 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.

(责任编辑 邓玲惠)