

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2024.09.006

# 300 MW 燃煤供热机组熔盐储热系统设计及经济性分析

Design and economic analysis of the molten salt heat storage system for a 300 MW coal-fired heating unit

赵大周, 谢玉荣, 张钟平, 邓睿锋, 刘丽丽

ZHAO Dazhou, XIE Yurong, ZHANG Zhongping, DENG Ruifeng, LIU Lili

(华电电力科学研究院有限公司, 杭州 310030)

(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

**摘要:** 火电机组深度调峰是保障电网稳定运行的重要措施。采用 EBSILON 软件建立国内某 300 MW 燃煤供热机组的热力学仿真模型, 并通过对比仿真值与设计值验证了模型的准确性。为进一步提升机组负荷调节能力, 选取并对比了抽主蒸汽及再热热段蒸汽加热熔盐的 2 种改造方案。以满足供热需求为基础, 得到系统储/放热功率以及熔盐储热容量, 并将熔盐储热系统耦合到原热力学模型中。通过模型计算得到了调峰时段的调峰深度以及非调峰时段的顶峰发电量, 抽主蒸汽方案及抽再热蒸汽方案可分别提升 34.26, 19.30 MW 的调峰深度以及 14.77, 12.33 MW 的顶峰发电量。同时, 对电力辅助服务市场及电力现货市场下系统的经济性进行分析。分析结果显示, 在满足一定的调峰补贴或者峰谷电价差的情况下, 改造项目资本金内部收益率能够达到 10%。

**关键词:** 燃煤供热机组; 熔盐储热; 仿真模型; 经济性分析; “双碳”目标; 灵活性改造; 深度调峰

**中图分类号:** TK 01 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0706(2024)09-0045-08

**Abstract:** Deep peak shaving for thermal power units is an important measure to ensure the stable operation of the power grid. A thermodynamic model of a 300 MW coal-fired heating unit in China is established by software EBSILON. The accuracy of the model is verified by comparing the simulation parameters with the design values. To further enhance the deep peak shaving capability of the unit, two molten salt heating schemes powered by extracted main steam and reheat steam are proposed. To meet heating demands, the molten salt heat storage system is coupled to the original thermodynamic model, considering the stored/released heating power of the system and molten salt heat storage capacity. Based on the model, the peak shaving depth and the power generation during non-peak shaving period are obtained. The main steam extraction scheme and the reheat steam extraction scheme can increase the peak shaving depth by 34.26 MW and 19.30 MW, respectively, and raise the peak power generation by 14.77 MW and 12.33 MW. At the same time, the economic performance analyses of the system in the electricity auxiliary service market and the electricity spot market are carried out. The results show that under certain peak shaving subsidies or peak-valley electricity price differences, the capital internal return rate of the project can reach 10%.

**Keywords:** coal-fired heating unit; molten salt thermal storage; simulation model; economic analysis; "dual carbon" target; flexibility modification; deep peak shaving

## 0 引言

2020 年 9 月我国明确提出“力争 2030 年前实现碳达峰, 2060 年前实现碳中和”的宏伟目标<sup>[1]</sup>。构建

以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标的主要路径之一。新能源的快速发展给电力系统安全稳定运行带来挑战。为适应电源结构的变化, 传统火电机组的灵活性改造成为必然。火电灵活性改造的目标是提高机组的深度调峰、快速爬坡和快速启停能力, 其中提高深度调峰能力是改造重点。纯凝机组深度调峰的难点在于低负荷稳燃和宽负荷脱硝, 供热机组深度调峰的关键在于实现

**基金项目:** 国家重点研发计划项目(2023YFB2406400); 中国华电集团科技项目(CHDKJ23-04-02-342)

National Key Research and Development Program(2023YFB2406400); China Huadian Group Technology Project(CHDKJ23-04-02-342)

“热电解耦”。相较于纯凝机组,供热机组深度调峰难度更大。目前,供热机组灵活性改造的技术路线主要分为2类:第1类是机组本体改造,包括汽轮机旁路供热改造、低压缸零出力供热技术、高背压改造等;第2类是新增热储能设备,包括固体蓄热、热水蓄热、高温熔盐蓄热等设备。

高温熔盐储热作为一种新型储能方式,因具有技术成熟、安全高效且不受地理条件限制等优点,得到了快速发展,目前主要应用在太阳能光热发电领域<sup>[1]</sup>,近年来随着火电机组调峰改造的深入推进,熔盐储热技术越来越多地被应用于耦合火电机组深度调峰及“热电解耦”中<sup>[2-3]</sup>,成为研究的热点。部分学者开展了对熔盐储热材料、电加热器、换热器等关键材料设备的研究<sup>[4-7]</sup>,并针对系统集成设计开展了重点研究。邹小刚等<sup>[8]</sup>分析了某350 MW机组在不同熔盐储热耦合系统中的热力性能、调峰能力和熔盐用量,提出了最优的火电机组耦合熔盐储热深度调峰工艺系统。马汀山等<sup>[9]</sup>提出了一种基于熔盐储热辅助煤电机组深度调峰的系统,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,最后以某660 MW燃煤机组为例,计算得到了电加热功率以及系统主要参数。宋晓辉等<sup>[10]</sup>以某670 MW机组为研究对象,从热力性能、调峰性能、环保性能及改造难度方面对比分析了4种熔盐-火电耦合系统改造方案。庞力平等<sup>[11]</sup>以某660 MW超超临界二次再热机组为研究对象,提出通过再热热段及冷段抽汽蓄热放热替代高压加热器(以下简称高加)的技术方案,得到了储热及释热过程中的调峰电量。刘金恺等<sup>[12]</sup>以600 MW燃煤机组为研究对象,提出了8种熔盐储热辅助调峰系统设计方案,并通过模拟计算对比分析了各方案的调峰能力和热力性能。苗林等<sup>[13]</sup>结合600 MW亚临界机组,构建了3种集成电制热熔盐储热的燃煤发电系统,研究了耦合系统储放热过程中不同部位的焓损失。WANG等<sup>[14]</sup>提出了抽取主蒸汽或再热蒸汽等4种熔盐储热集成模式,换热后的蒸汽回到低压缸或冷凝器,采用热力学第一定律和热力学第二定律对不同情况下系统的调峰性能进行了评估。魏海姣等<sup>[15]</sup>采用焓分析理论对600 MW亚临界燃煤机组在50%热耗率验收工况(THA)、35%THA和利用储热技术实现35%THA等3种工况进行了分析,得到了系统不同部位的焓损失。

然而,上述文献重点研究耦合熔盐储热对火电机组自身热力性能的影响,缺少具体应用场景的经济性分析,项目经济性是能否大规模推广应用的重点。为此,本文以某300 MW燃煤供热机组为研究

对象,采用EBSILON软件建立耦合熔盐储热的热力学仿真模型,开展技术方案研究,最后以电力辅助服务市场及电力现货市场为应用场景开展经济性分析,得出项目可行的边界条件,为同类型项目改造提供参考。

## 1 系统概况

国内某燃煤供热电厂配备2×1 025 t/h亚临界锅炉+2×300 MW汽轮发电机组,锅炉为东方锅炉厂生产的DG1025-17.4-II 18型单炉膛、自然循环、一次中间再热式亚临界国产循环流化床汽包炉。汽轮机为东方汽轮机厂生产的C300/256.6-16.7/1.0/537/537型亚临界、一次中间再热、高中压合缸、双缸双排汽、单轴抽汽凝汽式汽轮机。该电厂的热力系统如图1所示(低压加热器简称为低加;小汽轮机简称为小机)。

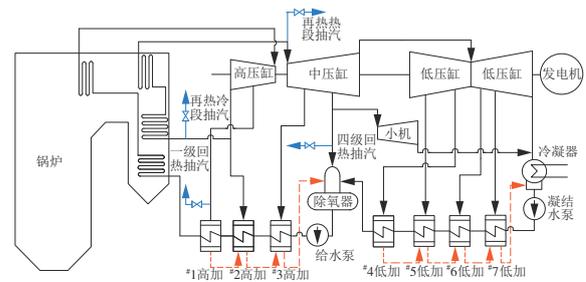


图1 热力系统

Fig. 1 Thermal system

该燃煤供热电厂为工业片区唯一的热源点,现有4路蒸汽对外供热,分别为次高压供热管线、中压供热管线1、中压供热管线2、低压供热管线,4路管线热负荷具体情况见表1。

表1 供热情况

Table 1 Heat supply conditions

管线	平均/最大热负荷/(t·h <sup>-1</sup> )	温度/°C	压力/MPa	抽汽位置
次高压供热管线	16.52/23.04	320	3.05	汽轮机一段抽汽 减温减压
中压供热管线1	33.75/58.75	265	2.25	机组再热冷段减 温减压
中压供热管线2	59.15/77.06	280	1.50	机组再热热段减 温减压
低压供热管线	106.92/51.77	270	1.00	汽轮机四段抽汽 经减温器减温

目前,该电厂单机运行,仅在每年6月至9月“迎峰度夏”期间为保障用电量采用双机运行。单机运行时为满足供热参数的需求,机组最低负荷维持在160 MW以上,因此机组夜间调峰时段(00:00—06:00)的深度调峰(以下简称深调)能力有限,随着电力系统对火电机组调节能力要求不断提高,需开

展低负荷下提升深调能力的技术研究。

### 2 熔盐储热技术方案

熔盐储热在火电机组灵活性改造中有电加热、蒸汽加热等技术路线。电加热方案利用机组发电直接加热熔盐,可同时满足机组调峰、调频需求,改造方案较简单,但利用高品位的发电进行储热,降低了能源利用率,同时电加热系统的造价也较高。蒸汽加热方案利用机组高温抽汽加热熔盐,加热后的蒸汽根据供热需求直接外供或返回热力系统,能量利用率高,系统造价低于电加热方案,但系统相对较复杂<sup>[16-18]</sup>。

熔盐储热的热能利用有多种方式,包括加热给水、加热选择性催化还原(SCR)入口烟气温度、直接供热等<sup>[19-20]</sup>,其中,直接供热因没有冷源损失,能源利用效率最高,适合有供热的场景。本文采用抽取再热热段蒸汽加热熔盐进行储热,换热后的蒸汽经减温减压供应中压供热管线2及低压供热管线的改造方式。

本文研究对象有四级抽汽,且工业热负荷较稳定,每级抽汽均采用喷水减温减压的方式。考虑到抽出蒸汽及外供蒸汽的品位差,本文采用2种抽蒸汽供热技术方案,见表2。

表 2 抽蒸汽供热技术路线

Table 2 Technology roadmaps of extracted steam heating

技术路线	具体储/放热过程
1	储热:抽主蒸汽加热熔盐,换热后的蒸汽供应次高压供热管线、中压供热管线 1,2; 释热:熔盐放热产生3种不同品级的蒸汽,分别供应次高压供热管线、中压供热管线 1,2
2	储热:抽再热热段蒸汽加热熔盐,换热后的蒸汽供应中压供热管线 1,2以及低压供热管线; 释热:熔盐放热产生3种不同品级的蒸汽,分别供应中压供热管线 1,2以及低压供热管线

熔盐材料的选择是系统设计的关键之一,目前成熟的熔盐材料有二元熔盐、三元熔盐等。由于本文研究对象抽参数较高,因此选用使用温度更高的二元熔盐,二元熔盐、三元熔盐的物性参数见表3。

#### 2.1 原始系统仿真建模及验证

以电站设计热平衡图为基础,采用EBSILON软件建立了机组热力系统仿真模型,同时做出如下假设:(1)忽略主蒸汽、再热蒸汽等管道的压力损失;(2)不考虑汽水管道的温降;(3)不考虑水泵的功耗。建立的模型如图3所示。以闸门全开(VWO)工况及100%THA工况为对照,对比机组的仿真结果与原设计值,结果见表4。

由表4可看出,主要参数的仿真值与设计值吻

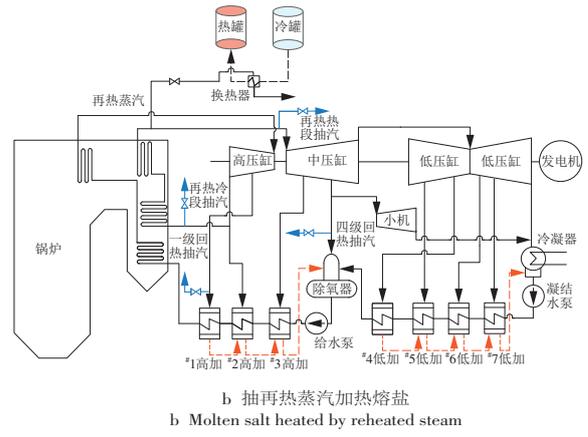
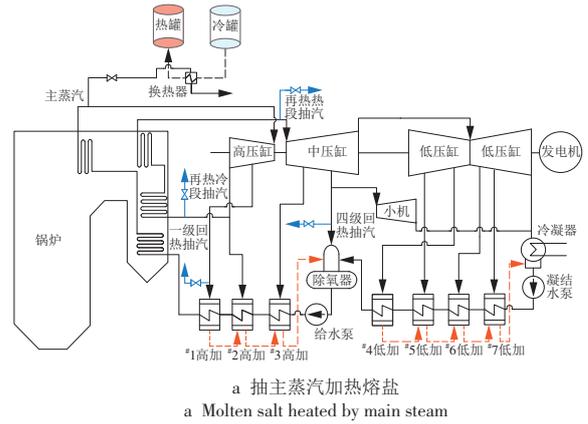


图 2 熔盐储热方案示意

Fig. 2 Designs of molten salt heat storage systems

表 3 熔盐物性参数

Table 3 Physical properties of molten salts

项目	二元熔盐	三元熔盐
组分	60%NaNO <sub>3</sub> +40%KNO <sub>3</sub>	53%KNO <sub>3</sub> +40%NaNO <sub>2</sub> +7%NaNO <sub>3</sub>
使用温度/°C	290~560	190~425

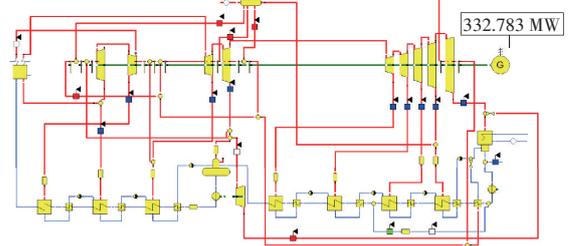


图 3 热力系统仿真模型(截图)

Fig. 3 Simulation model of the thermodynamic system (screenshot)

合度较高,最大相对误差不超过5.0%,平均相对误差为0.3%,验证了模型的准确性。

#### 2.2 耦合熔盐储热系统仿真建模

##### 2.2.1 耦合熔盐储热系统的模型

在原热力平衡的基础上,分别开展技术路线1及技术路线2系统建模仿真研究,模型在章节2.1

表 4 仿真值与设计值对比

Table 4 Comparison between simulation values and design values

项目	VWO 工况	100%THA 工况	
发电功率	仿真值/MW	332.74	300.87
	设计值/MW	331.74	300.00
	相对误差/%	-0.30	-0.29
一级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	79.32	65.87
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	78.95	65.51
	相对误差/%	3.61	-0.55
二级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	81.89	69.86
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	83.13	70.96
	相对误差/%	-2.59	1.55
三级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	26.71	21.18
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	26.4	22.14
	相对误差/%	1.36	4.30
四级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	88.05	77.61
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	87.61	76.76
	相对误差/%	-0.49	-1.10
五级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	26.21	22.68
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	27.01	23.44
	相对误差/%	2.97	3.25
六级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	39.96	35.68
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	39.16	34.88
	相对误差/%	-2.06	-2.30
七级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	18.98	15.60
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	19.00	15.73
	相对误差/%	0.13	0.83
八级抽汽回热量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	35.28	28.57
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	35.76	28.55
	相对误差/%	1.35	-0.08
低压缸排气量	仿真值/(t·h <sup>-1</sup> )	619.37	558.44
	设计值/(t·h <sup>-1</sup> )	618.73	558.1
	相对误差/%	-0.10	-0.06
除氧器给水温度	仿真值/°C	141.59	137.59
	设计值/°C	141.3	137.3
	相对误差/%	-0.20	-0.21

假设条件的基础上,增加如下的假设条件:(1)忽略熔盐储热管道的温降及压降;(2)换热器端差 20 K。建立的模型如图 4 所示。

火电机组耦合熔盐储热主要目的为提升机组低负荷的深调能力及非调峰时段的顶峰能力。为有效对比 2 种技术路线的改造效果,本文采用调峰深度及顶峰发电量作为指标。

调峰深度定义为在最低负荷 160 MW 下耦合系统可继续下调的发电量,即

$$\Delta P_L = 160 - P_{\min}, \quad (1)$$

式中: $\Delta P_L$ 为调峰深度, MW; $P_{\min}$ 为耦合熔盐储热系统的最低发电量, MW。

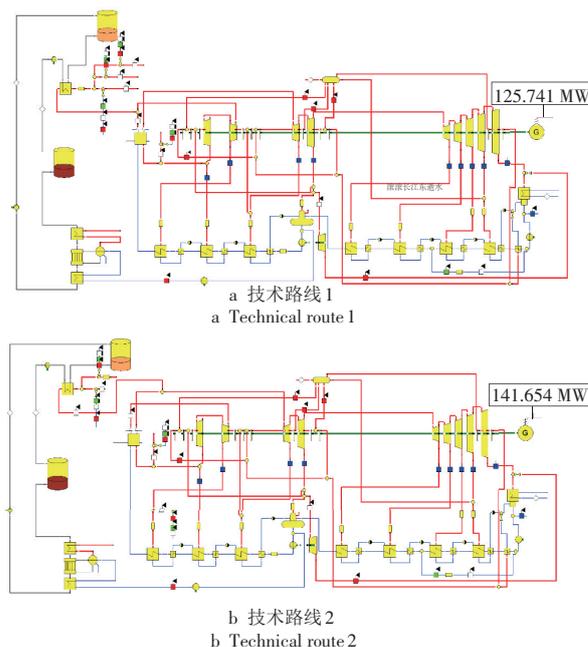


图 4 耦合熔盐储热的热力系统(截图)

Fig. 4 Thermal system coupled molten salt thermal storage devices (screenshot)

原始工况中,系统在额定供热情况下的最大发电量为 280.30 MW。顶峰发电量定义为机组额定供热工况下,熔盐储热/释热替代部分工业供汽后,耦合系统提升的发电量,即

$$\Delta P_U = P_{\max} - 280.30, \quad (2)$$

式中: $\Delta P_U$ 为提升的调峰深度, MW; $P_{\max}$ 为耦合熔盐储热系统的最大发电量, MW。

### 2.2.2 技术方案对比分析

根据耦合熔盐储热系统的仿真模型,对比分析了 2 种技术方案的主要技术指标,见表 5。

表 5 技术指标模拟值与设计值对比

Table 5 Comparison between simulation parameters and design parameters

项目	技术路线 1	技术路线 2
抽汽量/(t·h <sup>-1</sup> )	163.79	157.15
熔盐量/t	1 500	1 200
换热器储/释热功率/MW	21.22/31.03	17.29/25.54
高温熔盐温度/°C	493.44	493.23
低负荷时发电量/MW	125.74	141.65
调峰深度/MW	34.26	19.30
顶峰发电量/MW	14.77	12.33

由表 5 可以看出,技术方案 1(抽取主蒸汽)的参数较高,因此可使系统获得更高的调峰深度及顶峰发电量。

为进一步对比分析 2 种技术方案的技术改造效果,本文采用热效率作为评价指标。热效率是火电

厂的重要技术指标,表征能源的整体利用程度,耦合熔盐储热的系统储热/释热全过程热效率被定义为

$$\eta = \frac{\left( \int_{t_1}^{t_2} P_c dt + \int_{t_3}^{t_4} P_d dt \right) + \left( \int_{t_1}^{t_2} q_c dt + \int_{t_3}^{t_4} q_d dt \right)}{\int_{t_1}^{t_2} Q_c / \eta_c + \int_{t_3}^{t_4} Q_d / \eta_d} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: $\eta$ 为系统热效率,%; $P_c$ 为熔盐储热时机组的发电功率,MW; $P_d$ 为熔盐释热时机组的发电功率,MW; $q_c$ 为储热时的系统热负荷,MW; $q_d$ 为释热时的系统热负荷,MW;为 $t_1, t_2$ 分别为储热开始和结束的时间; $t_3, t_4$ 分别为释热开始和结束的时间; $Q_c$ 为储热时锅炉负荷,MW; $Q_d$ 为释热时锅炉负荷,MW; $\eta_c$ 为储热时锅炉效率,%; $\eta_d$ 为释热时锅炉效率,%。

同时,为了反映能量利用的程度及不可逆损失的位置,选用基于热力学第二定律的焓作为评价指标。热力系统中任意一点的比焓可表示为

$$e_1 = h - h_0 - T_0(s - s_0), \quad (4)$$

式中: $e_1$ 为任意点的比焓,kJ/kg; $h$ 为任意点的比焓,kJ/kg; $h_0$ 为工质在压力 $p_0=0.10$  MPa、温度 $T_0=293.15$  K状态下的比焓,kJ/kg; $s$ 为任意状态点的熵,kJ/(kg·K); $s_0$ 为冷凝水的熵,kJ/(kg·K)。

储热过程中,蒸汽/熔盐换热器、减温减压器中的焓损失可表示为

$$E_{c, loss} = \frac{\sum q_m \Delta e_i}{3600}, \quad (5)$$

式中: $E_{c, loss}$ 为蒸汽/熔盐换热器、减温减压器中的焓损失,kW; $q_m$ 为进行换热的抽出蒸汽质量流量,kg/h; $\Delta e_i$ 为蒸汽焓降,kJ/kg。

熔盐热能焓为

$$e_{ms} = \int_{T_1}^{T_2} \left( 1 - \frac{T_0}{T} \right) c_p dT, \quad (6)$$

式中: $e_{ms}$ 为熔盐热能焓,kJ/kg; $c_p$ 为熔盐的定压比热容,kJ/(kg·K); $T_1, T_2$ 分别为低温、高温熔盐的温度,K; $T$ 为高温熔盐的温度,K。

储热工况下,熔盐获得的焓收益可表示为

$$E_y = \frac{\sum q_{m, ms} e_{ms}}{3600}, \quad (7)$$

式中: $E_y$ 为熔盐储的焓收益,kW; $q_{m, ms}$ 为通过各换热器的熔盐质量流量,kg/h。

储热过程中,系统的焓损失可表示为

$$E_{cq} = E_{c, loss} - E_y. \quad (8)$$

与原系统相比,耦合熔盐储热系统多了储/放热过程。本文重点对比机组低负荷储热、顶峰时刻放热过程焓损失的大小。仿真计算得到热效率、焓损见表6。

由表6可看出,技术路线1和技术路线2热效率

表6 熔盐储热改造方案效果

Table 6 Results of molten salt heat storage projects

名称	技术路线1	技术路线2
热效率/%	60.17	60.42
系统焓损/kW	13 246.67	7 330.90

相当,但技术路线2的焓损失远低于技术路线1。2条技术路线均采用抽蒸汽加热的储热方式,换热后的蒸汽直接外供;在释热过程中均为熔盐释热产生蒸汽外供,由于储换热过程换热效率相当,因此从热能“量”的利用角度而言,2条技术路线的热效率相近。从能量利用“质”的角度看,技术路线1为抽主蒸汽加热,系统减温减压造成大量焓损。

### 3 典型应用场景经济性分析

除技术指标对比外,系统经济性仍是项目得以推广应用的关键,项目收益方式包括电力辅助服务市场的调峰收益以及电力现货市场下的“峰谷”上网电价套利。本文分别针对这2种应用场景建立经济性模型,选取资本金内部收益率(以下简称收益率)作为指标进行对比分析。

#### 3.1 调峰辅助服务市场

燃煤机组调峰辅助服务市场为机组参与特定时刻调峰,机组降低负荷运行,牺牲发电收益以满足电网需求,电网公司根据调峰深度不同给予一定的补贴,未能达到要求的机组进行考核。机组相关参数见表7。

表7 机组指标参数

Table 7 Indicator parameters of the unit

名称	数值
标准煤价/(元·t <sup>-1</sup> )	1 310.09
供电标准煤耗/[g·(kW·h) <sup>-1</sup> ]	317.8
上网电价/[元·(MW·h) <sup>-1</sup> ]	537.4
综合热价/(元·t <sup>-1</sup> )	259
年发电时长/h	3 780
年供热时长/h	8 500
日深度调峰时长/h	6
日顶峰时长/h	4
年调峰天数	175

该地区电力调峰辅助服务市场规定,机组调峰时段机组负荷率应低于60%,负荷率越低给予的补贴越高。根据第2章内容,耦合熔盐储热后的机组调峰时段抽出再热热段蒸汽加热熔盐;非调峰时段熔盐储热释放热量产生蒸汽外供,替代了机组部分抽汽,机组能够多发电。本文按照收益率10%反推,技术路线1和技术路线2调峰收益需达到582.49、564.81元/(MW·h),相关边界参数见表8。

表 8 计算边界条件

Table 8 Calculate boundary conditions

项目	数值/内容	项目	数值/内容
方案 1 静态总投资/万元	4 110	法定公积金提取比例/%	10
方案 2 静态总投资/万元	3 360	残值率/%	5
资本金比例/%	30	销项税率/%	13
建设期/月	10	所得税/%	25
长期贷款利率/%	4.2	城市建设及教育附加/%	10
还款方式	等额本金	修理费率/%	1.5
折旧年限/年	15	保险费率/%	0.25
运营期/年	20		

### 3.2 电力现货市场

随着现货交易市场逐渐成熟,考虑未来按照现货交易参与电力市场,为电力现货市场进行经济性计算。项目的收益方式为当上网电价低时,熔盐储热;当上网电价高时,熔盐放热产生蒸汽外供,汽轮机少抽汽从而能够多发电。低谷、高峰上网电价以及参与电力现货交易的时长是影响项目经济性的主要外部因素,假设外部条件见表 9。

表 9 外部条件

Table 9 Calculation boundary conditions

项目名称	数值
参与电力现货交易天数	300
每天消纳低谷电时长/h	6
每天顶峰时长/h	4

为研究电力现货市场“峰谷”电价差对项目收益的影响。计算在低谷上网电价分别为 0, 0.1, 0.2 元/(kW·h) 时,为达到 10% 收益率的要求,需满足的高峰上网电价如图 5 所示。

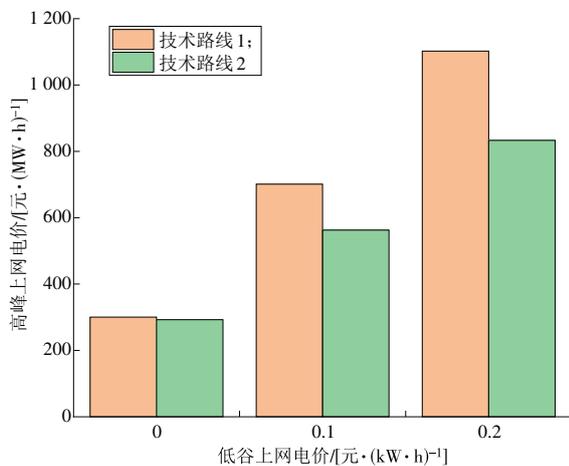


图 5 不同低谷上网电价需满足的上网电价

Fig. 5 Variation of grid-connected electricity price under different off-peak electricity tariffs

由图 5 可看出,当电力现货市场低谷上网电价为 0 时,2 种技术路线的上网电价满足 300 元/(MW·h) 即能满足 10% 的收益率要求;随着低谷上网电价的升高,高峰电价随之升高,技术路线 2 的升高幅度小于技术路线 1。

## 4 结论

以国内某 300 MW 燃煤供热机组为研究对象,采用 EBSILON 软件建立了耦合熔盐储热系统的热力系统仿真模型。对比分析了抽主蒸汽加热(技术路线 1)及再热热段蒸汽(技术路线 2)2 种路线的技术经济性,得出如下结论。

(1) 技术路线 1 能够增加机组深调量 34.26 MW、提升顶峰量 14.77 MW;技术路线 2 能够增加机组深调量 19.30 MW、提升顶峰能力 12.33 MW。两种技术路线整个循环热效率基本相当,技术路线 1 系统效率 60.17%、技术路线 2 的系统效率 60.42%。技术路线 1 烟损失 13 246.67 kW 大于技术路线 2 烟损失 7 330.90 kW。

(2) 经济性分析结果表明:在电力辅助服务市场的应用场景下,当系统在深调时段通过继续深调的方式技术路线 1 和技术路线 2 需满足不低 521.53, 475.33 元/(MW·h) 的调峰补贴以满足收益率为 10% 的要求。在电力现货市场的应用场景下,低谷电价为 0 时,300 元/(MW·h) 的上网电价即能满足 10% 的收益率要求,但随着低谷电价的升高,需满足的高峰上网电价陡增,技术路线 2 升高的幅度小于技术路线 1。

(3) 由于供热对象的参数不高,采用抽主蒸汽加热的路线会造成一定可用能的损失,因此技术路线 2 表现出了较好的技术经济性。

## 参考文献:

- [1] 李建林, 邸文峰, 李雅欣, 等. 长时储能技术及典型案例分  
析[J]. 热力发电, 2023, 52(11): 85-94.  
LI Jianlin, DI Wenfeng, LI Yaxin, et al. Analysis of long-  
term energy storage technologies and typical case studies[J].  
Thermal Power Generation, 2023, 52(11): 85-94.
- [2] 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.
- [3] 左芳菲, 韩伟, 姚明宇. 熔盐储能在新型电力系统中应用

- 现状与发展趋势[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 1-9.
- ZUO Fangfei, HAN Wei, YAO Mingyu, et al. Application status and development trend of molten salt energy storage in novel power systems [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 1-9.
- [4] 张国龙, 居文平, 常东锋, 等. 电阻式熔盐加热器动态建模与参数化分析[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 155-161.
- ZHANG Guolong, JU Wenping, CHANG Dongfeng, et al. Dynamic modeling and parametric analysis of resistance molten salt heater [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 155-161.
- [5] 沈强, 顾晓鸥, 翁建明, 等. 蒸汽加热熔盐换热试验研究[J]. 锅炉技术, 2023, 54(1): 27-33.
- SHEN Qiang, GU Xiaou, WENG Jianming, et al. Experimental study on heat transfer characteristics of steam heated molten salt system [J]. Boiler Technology, 2023, 54(1): 27-33.
- [6] 罗晓乐, 宋洋, 徐翔, 等. 计及风电不确定性的综合能源系统储能优化配置研究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(12): 18-25, 46.
- LUO Xiaole, SONG Yang, XU Xiang, et al. Research on optimal allocation of energy storage of integrated energy system considering wind power uncertainty [J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(12): 18-25, 46.
- [7] 孟强, 杨洋, 熊亚选. 添加纳米  $\text{SiO}_2$  熔盐传热储热稳定性研究[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(9): 32-39.
- MENG Qiang, YANG yang, XIONG Yaxuan. Study on thermal stability of molten salt composites added with  $\text{SiO}_2$  nanoparticles [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 32-39.
- [8] 邹小刚, 刘明, 肖海丰, 等. 火电机组耦合熔盐储热深度调峰系统设计及性能分析[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 146-153.
- ZOU Xiaogang, LIU Ming, XIAO Haifeng, et al. Design and performance analysis of deep peak shaving system of thermal power units coupled with molten salt heat storage [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 146-153.
- [9] 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.
- [10] 宋晓辉, 韩伟, 王兴, 等. 基于高温熔盐储热系统的火电机组深度调峰方案对比及分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(11): 64-74.
- SONG Xiaohui, HAN Wei, WANG Xing, et al. Comparison and analysis of deep peak shaving schemes for thermal power units based on high-temperature molten salt heat storage system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(11): 64-74.
- [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): 2682-2690.
- 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): 2682-2690.
- [12] 刘金恺, 鹿院卫, 魏海蛟, 等. 熔盐储热辅助燃煤机组调峰系统设计及性能对比[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 111-118.
- LIU Jinkai, LU Yuanwei, WEI Haijiao, et al. Design and performance comparison of peak shaving system of coal-fired unit aided by molten salt heat storage [J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 111-118.
- [13] 苗林, 刘明, 张可臻, 等. 集成电制热熔盐储热的燃煤发电系统热力性能研究[J]. 工程热物理学报, 44(11): 2999-3007.
- MIAO Lin, LIU Ming, ZHANG Kezhen, et al. Thermodynamic analysis on the coal-fired power plant integrated with power-to-heat molten salt thermal energy storage system [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 44(11): 2999-3007.
- [14] WANG B G, MA H, REN S J, et al. Effects of integration mode of the molten salt heat storage system and its hot storage temperature on the flexibility of a subcritical coal-fired power plant [J]. Journal of Energy Storage, 2023(58): 1307-1318.
- [15] 魏海蛟, 鹿院卫, 吴玉庭, 等. 燃煤机组灵活性运行系统焓分析[J]. 北京工业大学学报, 2022, 48(12): 1307-1318.
- WEI Haijiao, LU Yuanwei, WU Yuting, et al. Exergy analysis of flexible operation of coal-fired power plant [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2022, 48(12): 1307-1318.
- [16] 魏海蛟, 鹿院卫, 张灿灿, 等. 燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望[J]. 华电技术, 2020, 42(4): 57-63.
- WEI Haijiao, LU Yuanwei, WU Yuting, et al. Exergy analysis of flexible operation of coal-fired power plant [J]. Huadian Technology, 2020, 42(4): 57-63.
- [17] 王永旭, 周天羽, 邓庚庚, 等. 配置吸收式热泵的热电联产机组厂级智能运行优化[J]. 综合智慧能源, 2024, 46(3): 20-28.
- WANG Yongxu, ZHOU Tianyu, DENG Gengeng, et al. Plant-level intelligent operation optimization for cogeneration units equipped with absorption heat pumps [J]. Integrated Intelligent Energy, 2024, 46(3): 20-28.

[18]王芳.热储能技术在新型电力系统中的应用综述[J].东北电力技术,2024,45(3):13-15.

WANG Fang. Review on application of thermal energy storage technology in new power systems [J]. Northeast Electric Power Technology, 2024, 45(3): 13-15.

[19]张钟平,刘亨,谢玉荣,等.熔盐储热技术的应用现状与研究进展[J].综合智慧能源,2023,45(9):40-47.

ZHANG Zhongping, LIU Heng, XIE Yurong, et al. Application and research progress of molten salt heat storage technology [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(9): 40-47.

[20]陈睿哲,熊亚选,张慧,等.储能供热熔盐换热器设计及运行特性分析[J].华电技术,2020,42(12):54-59.

CHEN Ruizhe, XIONG Yaxuan, ZHANG Hui, et al. Design and dynamic performance analysis on a molten salt heat exchanger for energy storage and heating [J]. Huadian

Technology, 2020, 42(12): 54-59.

(本文责编:陆华)

收稿日期:2024-05-11;修回日期:2024-06-08  
 上网日期:2024-08-06;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

赵大周(1990),男,高级工程师,硕士,从事综合能源系统优化、储能技术方面的研究,seuddz@126.com;

谢玉荣(1982),男,正高级工程师,博士,从事综合能源系统优化、储能技术方面的研究,yurong-xie@chder.com;

张钟平(1984),男,正高级工程师,硕士,从事电力系统、储能技术方面的研究,zhongping-zhang@chder.com;

邓睿锋(1997),男,助理工程师,硕士,从事储能技术方面的研究,ruiheng-deng@chder.com;

刘丽丽(1979),女,正高级工程师,硕士,从事电化学储能方面的研究,lili-liu@chder.com.

\*\*\*\*\*

“配用电侧光储充换电站规划、运行与控制关键技术”专刊征稿启事

随着能源结构的转型和新能源汽车的普及,光伏发电与储能技术的结合成为推动清洁能源发展的重要路径之一。光储充换电站将光伏发电、储存与电动汽车的充电需求结合起来,通过先进的储能系统,实现太阳能的有效储存。当电力需求上升时,储存的能量可及时转化为电能,不仅满足用户的日常用电需求,还能为新能源汽车提供便捷的充电服务;新能源汽车通过充换电设施与电网紧密相连,构建一个双向互动的能源网络,使得动力电池不仅能作为稳定可控的电力负荷,还能充当灵活的移动储能设备。这种双向的能量流动机制极大提升了电池的调节能力,显著增强了光伏发电的利用效率,大幅提高了电力系统的稳定性和可靠性,为新型电力系统的高效、经济运行提供了坚实的基础。因此,对光储充换电站的规划、运行与控制等核心技术进行探索,对于清洁能源产业的长远发展意义重大。

基于此,《综合智慧能源》策划了“配用电侧光储充换电站规划、运行与控制关键技术”专刊,邀请山东理工大学陈佳佳副教授、尹文良副教授,香港理工大学林镇佳助理教授,山东时风(集团)有限责任公司徐海港研究员担任特约主编,共同探讨配用电侧分布式光伏高度渗透、用户侧新能源汽车大规模无序接入、新能源汽车快充电池老化、源网荷储多元且不确定等背景下的光储充换电站的规划、运行与控制等关键技术,旨在提高新型配用电系统的稳定性、可靠性和经济效益,为清洁能源领域的创新和发展贡献力量。诚挚欢迎业界专家和同仁积极投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)光储充换电站的基本原理与技术特点。
- (2)光储充换电站的规划与设计方法。
- (3)光储充换电站的运行管理与优化控制技术。
- (4)光储充换电站与配电网的协调与互动策略。
- (5)光储充换电站在微电网和智能能源系统中的应用。
- (6)基于人工智能和大数据的光储充换电站运行优化技术。
- (7)光储充换电站的经济性分析和环境效益评估。
- (8)该方向综述性论文。

二、时间进度

专刊拟于2024年12月31日截稿,择期优先出版。

三、征稿要求

(1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。(2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用Word软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net或www.ienergy.cn)下载中心下载论文模板。(3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。(4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

(1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net或www.ienergy.cn),完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。(2)邮箱投稿:jjchen@sdut.edu.cn(陈老师);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。(3)咨询联系:刘芳 0371-58501060 13838002988;杨满成 010-63918755,13801175292。