

DOI: 10.19666/j.rlfed.202312173

基于 SOEC-OEC 双工艺耦合的火电机组 全容量长寿命调峰技术研究

王林¹, 高景辉¹, 何信林¹, 刘晓莎², 胡平³, 邓春⁴

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.陕西工业职业技术学院, 陕西 咸阳 712000;
3.咸阳市新能源及微电网重点实验室, 陕西 咸阳 712000; 4.中国石油大学(北京), 北京 102249)

[摘要] 现有火电灵活性改造方案难以消除频繁快速变负荷所带来的热力系统寿命折损与机组安全运行风险, 为保障火电机组参与电网调峰的安全性、经济性与健康性, 提出并构建了基于固体氧化物电解槽(SOEC)制氢技术与燃烧器局部富氧燃烧(OEC)技术相耦合的火电机组全容量长寿命调峰技术方案。以某超超临界 1 000 MW 二次再热机组为计算示例, 对 SOEC-OEC 系统参与 70%~100% 的电网深度调峰进行了能效计算, 并与常规碱性水电解制氢(ALK)系统进行了比较。计算结果表明, SOEC-OEC 技术方案中抽汽电解制氢系统的能效高达 49.86%, 相比 ALK 系统提高约 26.40%; 富氧助燃系统最大可减少锅炉排烟量达 23.7%, 降低机组供电煤耗 2.83 g/(kW·h), 减少碳排放约 2.82 t/h。此外, SOEC-OEC 系统还可为机组带来超额的调峰补贴收益、氢气售卖收益、富氧节煤降碳收益以及设备延寿延保收益等, 充分保障了火电调峰过程的经济高效、安全环保。

[关键词] 火电调峰; SOEC; OEC; 经济性; 健康性

[引用本文格式] 王林, 高景辉, 何信林, 等. 基于 SOEC-OEC 双工艺耦合的火电机组全容量长寿命调峰技术研究[J]. 热力发电, 2024, 53(4): 125-132. WANG Lin, GAO Jinghui, HE Xinlin, et al. Full capacity long life peak shaving technology for thermal power units based on SOEC-OEC dual-process coupling[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(4): 125-132.

Full capacity long life peak shaving technology for thermal power units based on SOEC-OEC dual-process coupling

WANG Lin¹, GAO Jinghui¹, HE Xinlin¹, LIU Xiaosha², HU Ping³, DENG Chun⁴

(1.Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2.Shaanxi Polytechnic Institute, Xianyang 712000, China;
3.Xianyang Key Laboratory of New Energy and Microgrid System, Xianyang 712000, China;
4.China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China)

Abstract: The existing thermal power flexibility renovation plan is difficult to eliminate the thermal system life loss and unit safety operation risks caused by frequent and rapid load changes. In order to effectively ensure the safety, economy, and health of thermal power units participating in grid peak shaving, a full capacity and long life peak shaving technology scheme for thermal power units based on the coupling of solid oxide electrolysis cell hydrogen production technology (SOEC) and burner local oxygen enriched combustion technology (OEC) is proposed and constructed. Taking an ultra supercritical 1 000 MW secondary reheat unit as an example, energy efficiency calculation is conducted on the SOEC-OEC system participating in power grid peak shaving at a depth of 70%~100%, and the results are compared with that of the conventional alkaline water electrolysis hydrogen production (ALK) system. The results show that, the energy efficiency of the extraction electrolysis hydrogen production system in SOEC-OEC is as high as 49.86%, which is about 26.40% higher than that of the ALK system. The oxygen enriched combustion system can reduce the boiler exhaust gas by up to 23.7%, reduce the unit coal consumption by 2.83 g/(kW·h), and reduce the carbon emissions by about 2.82 t/h. In addition, the SOEC-OEC system can also bring excess peak shaving subsidy benefits, hydrogen sales revenue, oxygen enrichment and coal saving and carbon reduction revenue, as well as equipment life extension benefits to the unit,

收稿日期: 2023-12-05

基金项目: 西安热工研究院研发基金项目 (TR-23-TYK05)

Supported by: Research and Development Fund of Xi'an Thermal Power Research Institute (TR-23-TYK05)

第一作者简介: 王林 (1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为氢储能辅助煤电调峰技术, 335390839@qq.com。

fully ensuring the economic efficiency, safety, and environmental protection of the thermal power peak shaving process.

Key words: thermal power peak shaving; SOEC; OEC; economy; health

国家能源局数据显示,截至2022年12月底,全国累计发电装机容量约25.6亿kW,其中新能源发电占比约29.7%,同比增长19.3%。具有清洁环保优势的风电、太阳能发电在快速发展的同时,其存在的不稳定、不可靠、不可控等先天缺陷也得到进一步暴露。《中国电力发展报告2023》指出:我国新能源大规模发展,但实际运行中能够提供的可靠容量不超过5%。新能源电力在日常应用中的巨大波动性^[1-3],必然导致常规火电机组承担更加频繁艰巨的深度调峰任务。

大容量、高参数的超(超)临界机组在最小技术出力工况下的煤耗、汽耗、厂用电率、碳排放等指标均处于较差水平^[4],其高效环保优势在深度调峰期间难以发挥。此外,频繁升降负荷也会给热力系统带来潜在的寿命折损,并增加机组的安全运行风险^[5]。因此,现阶段火电机组承担电网深度调峰难以实现经济性、安全性、健康性的统一。

此外,近年来煤电行业亏损态势持续。《2023年上半年全国电力供需形势分析预测报告》指出,1—5月,四大发电集团煤电板块利润总额合计亏损89亿元,煤电企业亏损面为56.5%。火电企业对于丰富业务板块、增加收入来源有迫切的现实需求。

综上所述,提出并构建一套既能保障火电机组

在深度调峰期间的安全性、经济性,又能增加营业收入、降低运营成本的综合技术方案,对增强电力保供能力、促进火电行业健康发展具有重要意义。

1 电解制氢储能

利用容量可调的储能系统消纳火电机组发出的超过电网需求的多余电量,从而保证锅炉、汽轮机实际运行于高效率区间(40%~100%额定出力),就能彻底解决大型火电机组深度调峰时经济性变差、安全运行风险升高的问题。

考虑到机组深度调峰容量达到百兆瓦级,同时满足“大规模、可推广、易结合”要求的储能装置中,电解制氢储能系统更具实际应用优势^[6]。

2022年3月23日,国家发改委发布《氢能产业发展中长期规划(2021—2035年)》,将氢能定位为国家未来能源体系的重要组成部分,用能终端实现绿色低碳转型的重要载体。现有的电解制氢技术主要包括碱水(ALK)制氢、质子交换膜纯水电解(AEM)制氢、固体聚合物阴离子交换膜水电解(PEM)制氢、固体氧化物电解槽(solid oxide electrolytic cell, SOEC)制氢。其中,SOEC制氢具有显著的高效节能优势^[7-9]。图1为不同方案的制氢能耗对比。

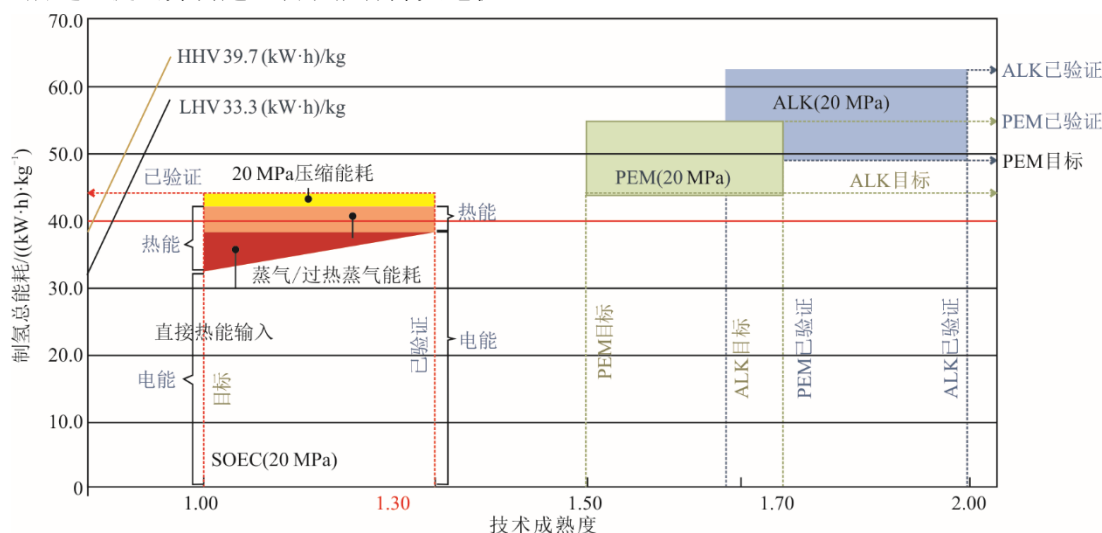


图1 制氢能耗对比

Fig.1 Comparison of hydrogen production energy consumption

SOEC装置工作温度区间为800~1 000℃,通过电解高温水蒸气生产氢气与氧气,其需要的高温条件与水蒸气原料与电站锅炉的结合性强,所得

氢气对外出售增加收入,氧气则可通过燃烧器开展富氧燃烧(oxygen enrich combustion, OEC),用于提高锅炉效率,改善调峰经济性。雷云红等^[10]

对 200 MW 燃煤锅炉实施了局部富氧燃烧改造,发现富氧燃烧工况下锅炉效率提高了 0.65%~0.72%,每年可减少碳排放 1 506~2 515 t。

基于此,本文将蒸汽电解制氢与锅炉富氧燃烧技术相耦合,提出并构建了 SOEC-OEC 的双工艺耦合系统。一方面利用氢储能装置实现全容量的极限深度调峰,赚取超额补贴;另一方面利用富氧增效技术,助力机组节煤降碳,此外,SOEC-OEC 系统还能增加火电企业的氢气售卖收益、设备延寿延保收益等,综合技术优势显著。

2 SOEC+OEC 技术方案的构建

2.1 装置启停规则

根据锅炉热力计算书,某超超临界 1 000 MW 二次再热锅炉(型号 SG-2983/32.14-M7054)在 40% 额定出力下的设计效率为 94.97%,与满负荷工况仅相差约 0.3 百分点,这表明该型号锅炉在 40% 额定出力下,依然具有优秀的性能指标。因此,设计该机组启动 SOEC-OEC 系统的负荷点为 40% 额定出力。

电网调度的负荷需求记为 L_{demand} , 机组的额定出力记为 L_{rated} , SOEC-OEC 系统的功率记为 L_{device} 。制定如下规则。

$$1) L_{demand} \geq 40\% \times L_{rated}$$

此时火电机组以常规方式运行,SOEC-OEC 调峰系统不启动,即 $L_{device}=0$ 。

$$2) L_{demand} < 40\% \times L_{rated}$$

此时 SOEC-OEC 系统启动,锅炉实际出力降低到其 40% 额定蒸发量后维持不变,超出 L_{demand} 以外的发电量,由 SOEC-OEC 系统消纳利用,此时有 $L_{device}=40\% \times L_{rated}-L_{demand}$ 。

2.2 方案设计

SOEC-OEC 双工艺耦合调峰系统原理性设计如图 2 所示。

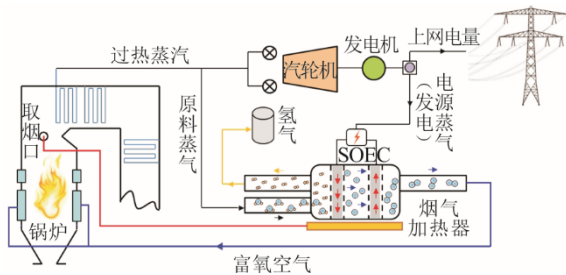


图 2 SOEC-OEC 耦合调峰系统
Fig.2 The SOEC-OEC coupled peak shaving system

其工艺为:调峰期间,SOEC-OEC 装置抽取一

部分电站锅炉所产出高温蒸汽作为制氢原料,吸收一部分汽轮发电机组发出的电能作为电解电力,制取的氢气用于售卖,制取的氧气则进入炉膛完成富氧燃烧过程。

3 SOEC-OEC 调峰系统的性能评估

选择某火电机组作为 SOEC-OEC 系统的落地示范工程,对双工艺耦合调峰系统的效能进行分析评价。

3.1 示例机组的选择

机组容量越大,效率越高,参与深度调峰所带来的经济指标、能效指标损失越大。本文选择某地区近期投产的超超临界 1 000 MW 二次再热高效燃煤发电机组为工程示范机组。该机组选用的锅炉型号 SG-2983/32.14-M7054,为超超临界直流塔式炉,根据其设计参数计算 SOEC-OEC 系统的能效指标。锅炉的设计参数见表 1。

表 1 锅炉设计参数
Tab.1 Design parameters of the boiler

项目	BRL	75%THA	50%THA	40%THA
过热蒸汽流量/(t·h ⁻¹)	2 753	1 985	1 285	1 023
过热蒸汽温度/°C	610	610	610	610
屏过底部烟温/°C	1 250	1 194	1 101	1 035
低温过热器出口烟温/°C	1 164	1 067	973	904
燃料消耗量/(t·h ⁻¹)	371.6	275.3	191.0	152.2
锅炉计算热效率(低位发热量)/%	95.30	95.19	94.98	94.97

注:THA 表示汽轮机热耗率验收工况,BRL 为锅炉额定蒸发量工况。

3.2 SOEC-OEC 性能参数选择

SOEC-OEC 系统主要性能参数包括:

1) 制氢电耗 指 SOEC 装置制取 1 m³ (标准状态下,下同)氢气所消耗的电能。目前已经商用的 SOEC 装置实际能耗见表 2。

表 2 商用 SOEC 装置能耗
Tab.2 Energy consumption of commercial SOEC devices

生产厂商	装置容量/kW	制氢能耗/(kW·h·m ⁻³)
上海羿晶能源	3 600	3.60
美国 Bloom Energy	100	3.37
北京质子动力	25	4.20~4.50
德国 SunFire	2 600	3.60
美国能源部		3.48
北京思伟特		<3.80
上海氢程科技	202	3.60
武汉华科福赛	>600	3.35
浙江氢邦科技		3.50

根据表 2，选取本方案中 SOEC 装置的制氢能耗为 3.6 (kW·h)/m³。

2) SOEC 电料比 SOEC 装置工作时，其需要的电源蒸汽流量与原料蒸汽流量的比例。根据 SOEC 制氢能耗展开计算。

1 m³ 氢气标准状态下分子数为 44.643 mol，对应于需要 44.643 mol 的原料水蒸气来生成。假设电解过程中水蒸气的转化率为 85%，那么本系统的 SOEC 装置消耗 3.6 kW·h 的电能，需要原料水蒸气为 0.945 kg。

根据表 1 数据，40% 额定出力下机组的汽耗为 2.557 5 kg/(kW·h)，汽轮发电机组每发 3.6 kW·h 的电能，就需要消耗 9.207 kg 水蒸气，这部分用于发电的水蒸气即为 SOEC 的电源蒸汽。

综上，SOEC 装置的电料比取为 9.743。

3) 装置容量 为实现火电机组的全容量调峰，SOEC-OEC 系统需要能消纳机组 40% 额定出力下发出电能，即为 400 MW，对应的蒸汽量为 1 023 t/h，根据电料比计算的电源蒸汽量为 927.78 t/h，对应的功率为 362.77 MW。因此，SOEC-OEC 系统的功率为 362.77 MW。

3.3 方案的细化

为进一步提高系统能效，设计了余热回收利用环节，SOEC-OEC 系统的工质流程如图 3 所示。在工艺参数设计中，SOEC 装置的工作温度定为 950 °C，因此生产的氢气和氧气也具有很高的温度，设计了 2 级“产物气余热加热器”对其进行冷却，回收热量用于预热 SOEC 蒸汽、加热锅炉给水。

为满足 SOEC 装置的工作温度，设计了 1 级烟气加热器（热源来自屏式过热器底部烟气）用于进一步提升原料水蒸气的温度至 950 °C，低温烟气则重新回到锅炉烟道。

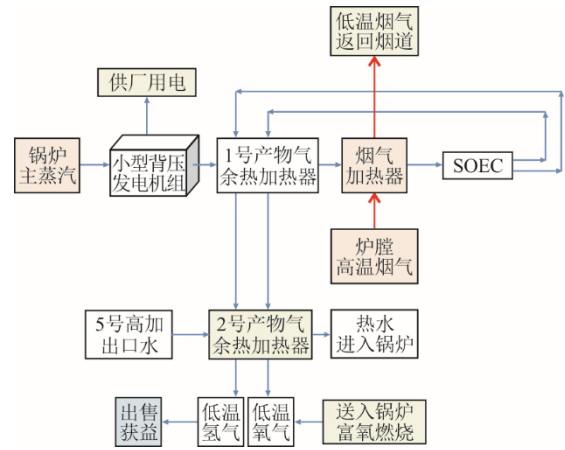


图 3 SOEC-OEC 系统工艺流程
Fig.3 Technological process of the SOEC-OEC system

SOEC 原料蒸汽来自高压旁路管道抽汽，蒸汽参数 605 °C/12.3 MPa，为满足 SOEC 装置的正常工作压力 (<1.0 MPa)，设计了小背压机组对主蒸汽进行降压。系统的参数设计见表 3。

表 3 SOEC-OEC 系统的设计参数
Tab.3 Design parameters of the SOEC-OEC system

项目	数值
SOEC 工作温度/°C	950
SOEC 工作压力/MPa	0.6
SOEC 制氢能耗/(kW·h)·m ⁻³	3.6
SOEC 额定功率/MW	362.77
SOEC 额定产氢量/(m ³ ·h ⁻¹)	100 719.4
SOEC 蒸汽电料比	9.743
SOEC 蒸汽转换率/%	85

利用 Aspen HYSYS V11 软件对上述工艺进行建模。为避免混合后高温的氢气与氧气发生爆炸，SOEC 装置出口的产物分成了 2 支分别进入 2 个余热加热器，彼此独立地与水、水蒸气等进行换热^[1]。该流程软件模拟如图 4 所示。

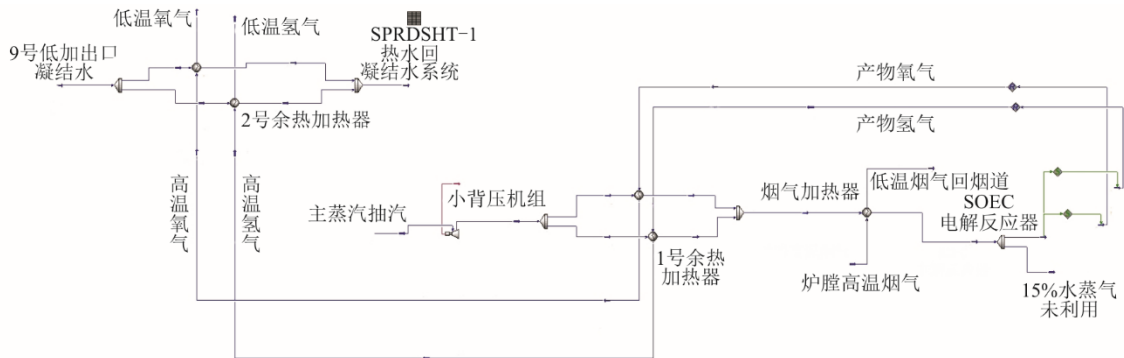


图 4 SOEC-OEC 系统流程软件模拟示意
Fig.4 Process simulation diagram of the SOEC-OEC system

3.4 能效的计算

首先定义SOEC-OEC系统的能效指标。系统从火电机组吸收的能量包括烟气加热器的加热 Q_0 和消耗的电能 Q_e 。返回给火电机组的能量包括小背压机组消耗的能量 Q_1 和2号余热加热器加热锅炉给水 Q_2 。制取的氢气的总高位发热量为 Q_{H_2} 。定义系统制氢能效 α ，则有：

$$\alpha = \frac{Q_{H_2}}{Q_0 + Q_e - (Q_1 + Q_2)} \quad (1)$$

式中：氢气的高位发热量为285.8 kJ/mol^[12]。

对机组参与深度为60%~100%容量的电网调峰分别计算其原料蒸汽流量，作为工艺模拟的输入参数。计算结果见表4。

Aspen HYSYS 是一款广泛应用于化工过程仿真和优化的软件，由美国AspenTech公司开发，可用于建立各种化工流程模型，并进行流程仿真、优化、设计和分析。Aspen HYSYS 软件支持多种物理

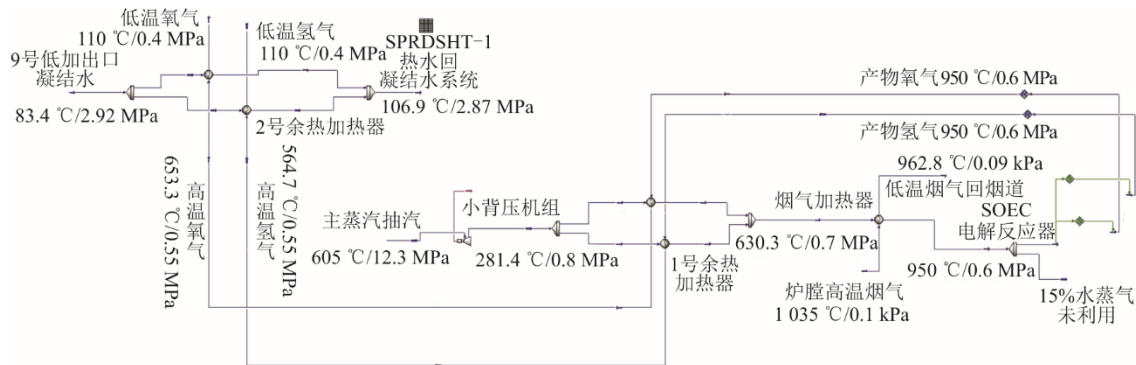
性质计算和多阶段化学反应仿真，并提供了热力学、传质、分离、管道、仪表和控制等方面的建模功能。通过使用该软件，用户可以优化工艺方案、节约成本、提高生产效率和产品质量。

表4 不同调峰深度下SOEC装置蒸汽用量
Tab.4 Steam consumption of the SOEC device at different peak shaving depths

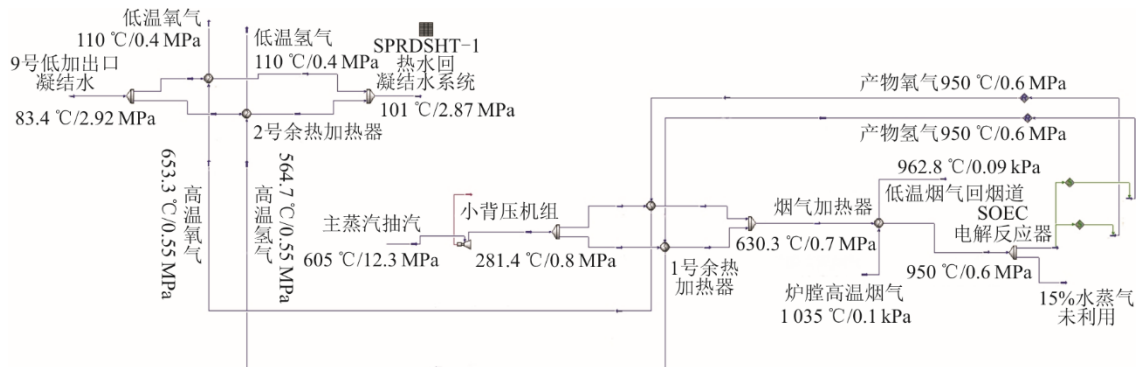
网需求负荷/MW	调峰深度/%	SOEC 原料蒸汽/(t·h ⁻¹)	SOEC 电源蒸汽/(t·h ⁻¹)
0	100	95.22	927.78
100	90	71.42	695.84
200	80	47.61	463.90
300	70	23.81	231.95
400	60	0	0

利用 Aspen HYSYS V11 对上述4种调峰工况进行模拟，计算结果如图5所示。

结合式(1)，分别计算示例机组的能效。机组发电效率取为设计值48.95%。最终结果见表5。



a) 100%容量调峰工况



b) 90%容量调峰工况

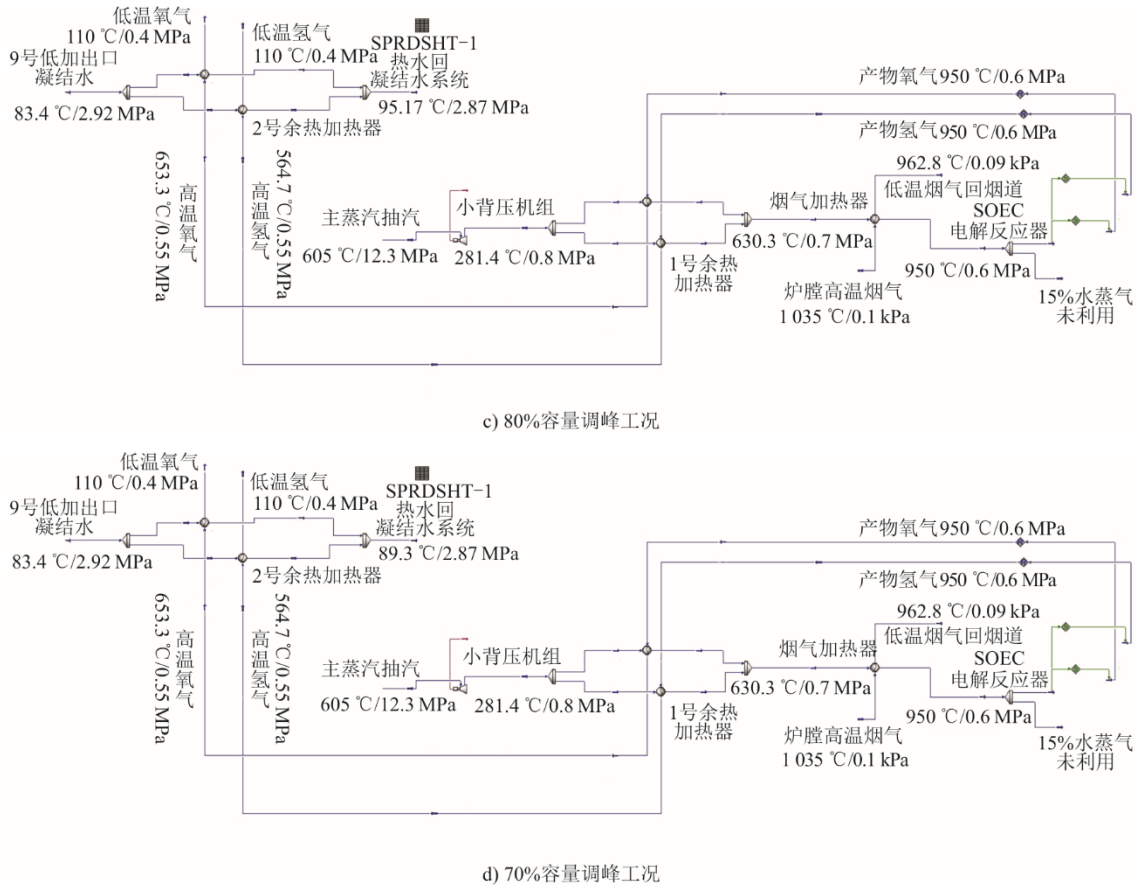


图 5 SOEC-OEC 系统工艺流程

Fig.5 Technological process of the SOEC-OEC system

表 5 不同调峰深度下 SOEC-OEC 系统制氢能效
Tab.5 Hydrogen production efficiency of the SOEC-OEC system at different peak shaving depths

项目	100%容量调峰	90%容量调峰	80%容量调峰	70%容量调峰
产氢量/(mol·h ⁻¹)	4 517 270.97	3 387 953.23	2 258 635.49	1 124 764.35
Q ₀ /(kJ·h ⁻¹)	71 509 442.55	53 632 081.91	35 754 721.27	17 877 360.64
Q _e /(kJ·h ⁻¹)	1 311 377 635.0	983 533 226.4	655 688 817.6	327 844 408.8
Q ₁ /(kJ·h ⁻¹)	55 379 206.31	41 534 404.73	27 689 603.16	13 844 801.58
Q ₂ /(kJ·h ⁻¹)	105 105 635.30	78 829 226.50	52 552 817.67	26 276 408.83
制氢能效/%	49.846	49.857	49.846	49.645

由表 5 可知, SOEC-OEC 系统应用期间的最高能效为 49.857%, 表明其具有较高的能量利用/转换效率。

电解生产的氧气, 用于供应锅炉开展燃烧器内的局部富氧燃烧(富氧体积分数设计为 30%)。一方面高氧量下火焰温度升高, 煤粉燃烧更充分, 另一方面, 高氧量下风量需求减少, 产生的烟气量减少, 因此排烟的热损失也显著降低。

示例锅炉 40% THA 下总风量 1 312 779 kg/h。

空气中氧气的质量分数为 23.22%, 据此计算 SOEC-OEC 系统降低的风量及烟气量, 结果见表 6。

表 6 SOEC-OEC 系统降低风量与烟气量
Tab.6 The reduced air volume and flue gas volume in the SOEC-OEC system

项目	100%容量调峰	90%容量调峰	80%容量调峰	70%容量调峰
产氧量/(kg·h ⁻¹)	72 276.3	54 207.3	36 138.2	17 996.2
减少风量/(kg·h ⁻¹)	311 267.6	233 450.7	155 633.8	77 503.1
风量降比/%	23.71	17.78	11.86	5.90
减少烟气量/(kg·h ⁻¹)	629 778.1	561 853.7	493 929.3	425 731.0
烟气量降比/%	23.7	17.8	11.9	5.9

由表 6 可知, SOEC-OEC 系统在机组深度调峰(0~30%负荷)期间, 可降低排烟量 5.9%~23.7%, 而排烟热损失是影响锅炉效率的各项损失中占比最大的部分, 烟气量的大幅降低, 必然带来锅炉效率的提升。此外, 风量需求的降低, 也会带来风机组电耗的减少, 有利于改善厂用电率指标。

张智羽等^[13]利用锅炉热力计算对某 600 MW 燃煤锅炉在不同氧量下的效率进行了计算, 结果表明, 30%氧气体积分数条件下, 锅炉排烟损失相比

21%氧气体积分数（空气气氛）降低 0.15%，锅炉热效率提高 0.15%。

肖卓楠等^[14]研究计算了 480 t/h 循环流化床锅炉富氧燃烧工况下的热效率，发现 30%氧气体积分数相比空气气氛燃烧，锅炉排烟损失降低 1.0%，效率提升 1.08%。

黄贺星^[15]利用现场试验结合仿真计算，得出 350 MW 机组锅炉在体积分数 30%富氧情况下相比空气燃烧效率提高约 1.8%。

综合上述结论，考虑富氧燃烧及风机电耗降低的双重影响，保守估计 SOEC-OEC 系统投用后可提高锅炉效率约 1.0%，由此得出机组供电煤耗由 271.62 g/(kW·h)降低至 268.79 g/(kW·h)，每小时可节省标煤 1.13 t，减少碳排放约 2.82 t。SOEC-OEC 系统的节能降碳效果显著。

3.5 方案的对比评价

选择某公司生产的 G2000 型碱水电解制氢（ALK）设备构建辅助火电调峰系统。G2000 设备的基本参数见表 7。

依托 1 000 MW 示例机组，计算 ALK 系统的制氢能效。G2000 设备制氢电耗取为 4.4 (kW·h)/m³，从机组吸收的能量为电能，无返回机组的能量，因此有：

$$\alpha = \frac{Q_{H_2}}{Q_e} \quad (2)$$

式中： α 为制氢能效，%； Q_{H_2} 为氢气的总高位发热量，kJ/h； Q_e 为消耗的电能，kJ/h；机组效率取设计值 48.95%。计算得到 $\alpha=39.437\%$ 。

比较可知，SOEC-OEC 系统相比 ALK 调峰系统，能效提高约 26.40%，高效优势显著。

表 7 G2000 设备参数

Tab.7 The G2000 equipment parameters

项目	数据
产氢量/(m ³ ·h ⁻¹)	2 000
操作压力/MPa	1.6
直流电耗/((kW·h)·m ⁻³)	4.3~4.5
工作温度/℃	90±5
电解液 KOH 质量分数/%	30

3.6 方案的收益

SOEC-OEC 耦合调峰系统能够为机组提供：

1) 超额的电力市场辅助服务收益 目前电网对于调峰的补贴按照机组容量高低实行梯度定价，深度越深，价格越高。相比常规机组 20%~30%的

最小技术出力，SOEC-OEC 系统可提供 100%容量的极限调峰服务，对电网输出功率降低为零（称为“假停机”模式），因而可为火电企业赚取超额的补贴收益。

2) 氢气售卖收益 氢气作为绿色清洁能源及重要化工原料，其用途十分广泛。电厂调峰期间制取的氢气（价格 60~70 元/kg，部分地区政府补贴后达到 30~50 元/kg），对外出售可获得较高经济收益。

3) 富氧助燃收益 燃烧器区域局部富氧燃烧有效减少了风量，降低了风机电耗；降低了烟气的量，提高了燃尽率，锅炉效率、供电煤耗、碳排放等指标得到显著改善。

4) 设备延寿延保的收益 SOEC-OEC 系统投用后，机组主辅机均长期稳定运行在高效率区间（40%额定出力），热力系统及其附属设备避免了频繁变负荷引发的疲劳失效与机械冲击，设备降低了故障率。

4 结 语

本文提出并构建的 SOEC-OEC 新型火电调峰系统，将 SOEC 与 OEC 工艺两相耦合，与传统火电机组实施有机集成，该系统具有以下技术优势：

1) SOEC-OEC 系统能效高达 49.86%，相比常规 ALK 构建的调峰系统，提高约 26.40%；

2) SOEC-OEC 系统在机组调峰期间，可降低烟气的量最大 23.7%，提高锅炉效率约 1.0%，降低供电煤耗 2.83 g/(kW·h)；

3) SOEC-OEC 系统还具有提供超额调峰补贴收益、氢气售卖收益、富氧节煤降碳收益、设备延寿延保收益等，保证了机组参与深度调峰期间的经济性、安全性与健康性。

[参 考 文 献]

- [1] 马伟, 谢丽蓉, 马兰, 等. 短期风电功率预测误差及出力波动的概率建模[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 361-366.
MA Wei, XIE Lirong, MA Lan, et al. Probabilistic modeling of short-term wind power prediction errors and output fluctuations[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(11): 361-366.
- [2] 汤建方, 董军, 梁璐, 等. 基于阶梯式预测控制的槽式太阳能集热场温度控制研究[J]. 热力发电, 2023, 52(9): 181-189.
TANG Jianfang, DONG Jun, LIANG Lu, et al. Research on temperature control of trough solar collector field based on step predictive control[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(9): 181-189.
- [3] 赵欣雨, 张云晓, 万乐, 等. 平抑百兆瓦级风电场功率

- 波动的混合储能充放电协同控制策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 23-29.
ZHAO Xinyu, ZHANG Yunxiao, WAN Le, et al. Charge-discharge cooperative control strategy for hybrid energy storage system for suppressing power fluctuation of hundred megawatt level wind farm[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 23-29.
- [4] 李泓泽, 潘嘉琪, 李栩萌. 三改联动背景下煤电机组经济效益评估模型[J]. 电力科学与工程, 2023, 39(11): 53-62.
LI Hongze, PAN Jiaqi, LI Xumeng, et al. Economic benefit evaluation model for coal-fired power units under the background of three-renovation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(11): 53-62.
- [5] 代景旭. “双碳”目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J]. 电气时代, 2023(10): 43-45.
DAI Jingxu. Research progress on deep peak shaving and frequency modulation technology of coal-fired power under the “dual carbon” target[J]. Electric Age, 2023(10): 43-45.
- [6] 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.
- [7] 舒展宏, 陈蕊, 宋浩, 等. 质子交换膜电解池二维两相流综合模拟研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(11): 450-458.
SHU Zhanhong, CHEN Rui, SONG Hao, et al. Two-dimensional comprehensive simulation study of two-phase flow in proton exchange membrane electrolyzer cell[J]. Acta Energetica Sinica, 2023, 44(11): 450-458.
- [8] 俞江南, 王雨依, 付俊杰, 等. 电解水制氢技术及隔膜材料研究进展[J]. 当代化工研究, 2023(20): 5-7.
YU Jiangnan, WANG Yunong, FU Junjie, et al. Research progress in hydrogen production technology by electrolysis of water and membrane materials[J]. Contemporary Chemical Research Protection, 2023(20): 5-7.
- [9] 刘洋, 邱殿凯, 彭林法, 等. 电解制氢设备性能优化及流道设计[J]. 机械设计与研究, 2023, 39(5): 142-146.
LIU Yang, QIU Diankai, PENG Linfa, et al. Study on performance enhancement and flow channel design of electrolytic hydrogen production equipment[J]. Mechanical Design and Research, 2023, 39(5): 142-146.
- [10] 雷云红, 向昕. 利用富氧燃烧技术提高炉效进而降低碳排放的创新实践[C]//中国动力工程学会(环保技术与装备专委会). 2016: 114-118.
LEI Yunhong, XIANG Xin. Innovative practice of utilizing oxygen rich combustion technology to improve furnace efficiency and reduce carbon emissions[C]//China Society of Power Engineering (Environmental Protection Technology and Equipment Special Committee). 2016: 114-118.
- [11] 李贵贤, 曹阿波, 孟文亮, 等. 耦合固体氧化物电解槽的CO₂制甲醇过程设计与评价研究[J]. 化工学报, 2023, 74(7): 2999-3009.
LI Guixian, CAO Abo, MENG Wenliang, et al. Process design and evaluation of CO₂ to methanol coupled with SOEC[J]. CIESC Journal, 2023, 74(7): 2999-3009.
- [12] 张玉魁, 陈焕军, 孙振新, 等. 高温固体氧化物电解水制氢效率与经济性[J]. 广东化工, 2021, 48(18): 3-6.
ZHANG Yukui, CHEN Huanjun, SUN Zhenxin, et al. Efficiency and economy of hydrogen production from high temperature solid oxide electrolysis of water[J]. Guangdong Chemical Industry, 2021, 48(18): 3-6.
- [13] 张智羽, 杨勇平, 汪欣巍, 等. 600 MW亚临界锅炉富氧改造热力学性能及烟分析[J]. 锅炉技术, 2020, 51(2): 46-52.
ZHANG Zhiyu, YANG Yongping, WANG Xinwei, et al. Thermodynamic performance and analysis of oxygen enrichment transformation for 600 MW subcritical boiler[J]. Boiler Technology, 2020, 51(2): 46-52.
- [14] 肖卓楠, 霍立伟, 高文彬, 等. 基于熵分析的不同煤种对富氧燃烧锅炉的影响[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 76-84.
XIAO Zhuonan, HUO Liwei, GAO Wenbin, et al. Effect of coal type on oxygen-enriched combustion boiler based on entropy analysis[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 76-84.
- [15] 黄贺星. 富氧燃烧对350 MW机组热经济性影响的研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2018: 34-36.
HUANG Hexing. Research on the influence of oxygen-enriched combustion on the thermal economy of 350 MW units[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2018: 34-36.

(责任编辑 杜亚勤)