

基于 AspenPlus 的兆瓦级燃料电池分布式发电系统建模及仿真分析

李卓言^{1,2}, 段丽平^{1,✉}, 李少华¹, 冯静¹

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 2. 华北电力大学 新能源学院, 北京 102206)

摘要: [目的] 燃料电池分布式发电技术是适应未来能源低碳化、清洁化、高效化发展趋势的重要应用方向。国内燃料电池电站项目较少, 缺乏实际项目经验积累。为了推进燃料电池分布式电站技术的应用, 文章概述了国内外应用现状, 总结了高温燃料电池的优势与不足, 调研了国内燃料电池建设应用案例, 并建立了固体氧化物燃料电池与熔融碳酸盐燃料电池发电系统流程。[方法] 经过文献调研与实地调研, 确定了两种适合建设大型电站的燃料电池分布式发电技术, 并利用 AspenPlus 化工模拟软件建立燃料电池系统流程模型、电化学模型和能量分析模型, 并开展系统的性能仿真分析。[结果] 分析结果与实际运行结果相吻合, 分析预测的系统性能趋势与已有研究相一致。[结论] 该仿真方法可用于兆瓦级高温燃料电池分布式发电系统的研究, 可为扩大燃料电池应用规模提供数据支持。

关键词: 分布式发电; 燃料电池; 仿真模型; 固体氧化物燃料电池; 熔融碳酸盐燃料电池

中图分类号: TM73; TM911.4 文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)04-0078-09

开放科学(资源服务)二维码:



Modeling and Simulation Analysis of MW-Level Fuel Cell Distributed Generation System Based on AspenPlus

LI Zhuoyan^{1,2}, DUAN Liping^{1,✉}, LI Shaohua¹, FENG Jing¹

(1. North China Power Engineering Co., Ltd. of China Electric Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: [Introduction] The fuel cell distributed generation technology is an important application direction to adapt to the future development trend of low-carbon, clean and high-efficiency energy. There are few domestic fuel cell power station projects, and there is a lack of actual project experience accumulation. In order to promote the application of fuel cell distributed power station technology, the research outlined the current application status at home and abroad, summarized the advantages and disadvantages of high temperature fuel cells, investigated domestic fuel cell construction and application cases, and established solid oxide fuel cell (SOFC) and molten carbonate fuel cell (MCFC) power generation system processes. [Method] After literature research and field research, two fuel cell distributed generation technologies suitable for the construction of large-scale power stations were identified. Chemical simulation software AspenPlus was used to establish the process model, electrochemical model and energy analysis model for the fuel cell system, and the performance simulation analysis of the system was carried out. [Result] The analysis results show that they are consistent with the actual operation results and the system performance trend predicted by the analysis is consistent with the existing research. [Conclusion] The simulation method can be used in the research of MW-level high-temperature fuel cell distributed generation system, and can provide data support for expanding the application scale of fuel cells.

Key words: distributed generation; fuel cell; simulation model; solid oxide fuel cell (SOFC); molten carbonate fuel cell (MCFC)

2095-8676 © 2022 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/>).

0 引言

近年来,世界各国的能源利用呈现低碳化、清洁化、高效化的发展趋势。分布式能源应用直接针对终端用户,相比传统的能源集中式生产、运输、终端消费的模式,可最大程度减少能源的输送损耗,有效利用发电产生的余热,提供不同的能源品类并且提高能源的综合利用效率^[1],将成为未来重要的能源利用模式。

目前国外分布式能源已实现技术上的突破并逐渐拓展应用,其中日本、美国、欧盟的技术和应用处于领先水平,图1表明分布式能源在其国内的应用占比超过10%^[2]。

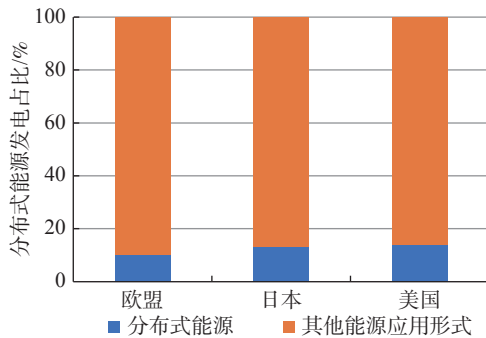


图1 各国分布式能源发电占比

Fig. 1 Proportion of distributed energy generation by country

日本占有最大的微型燃料电池市场,由 Ene-Farm/项目支持的 PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell, 质子交换膜燃料电池)/SOFC(Solid Oxide Fuel Cell, 固体氧化物燃料电池)系统平均价格低于 100 万日元,目前有 32 万日本用户购买;美国 Bloom Energy 公司在全球部署运行了近 500 MW 的发电系统,在过去十年中发电量超过 16 TWh,包括苹果谷歌 eBay 等数据中心,沃尔玛、宜家、美国国防部等商场及办公楼,以及移动基站和集散中心等;Fuel Cell Energy 公司安装超过 300 MW 的分布式电站设备,包括百千瓦级的 SOFC 和兆瓦级的 MCFC(Molten Carbonate Fuel Cell, 熔融碳酸盐燃料电池)分布式热电联供;韩国浦项制铁入股 Fuel Cell Energy 后,共建立 18 个燃料电池电站,累计发电 170 MW,斗山集团生产包括 600 W、1 kW、5 kW、10 kW 的 PEMFC 以及 400 kW 的 PAFC(Phosphoric Acid Fuel Cell, 磷酸燃料电池),全球累计销售上百套产品,累

表 1 国外部分应用产品的发电效率

Tab. 1 Power generation efficiency of some foreign application products

国家	企业-技术	规模	发电效率/%
日本	松下-PEMFC	700 W	39
	爱信精机-SOFC	700 W	46.5
	松下-PEMFC	5 kW	57
	三浦-SOFC	4.2 kW	50
美国	IHI公司-MCFC	1 MW	46.7
	Bloom Energy-SOFC	200 kW ~ 1 MW	53 ~ 65
韩国	LG-SOFC	200 kW	60
	Fuel Cell Energy-MCFC	2.4 MW	47

计发电量 2 TWh。全球累计销售上百套产品,累计发电量 2 TWh。表 1^[1]列出了国外部分应用产品的发电效率。

国外在燃料电池分布式发电领域已有较多的示范应用。廖文俊等^[3]总结了已有的 MW 级燃料电池电站案例;宋鹏飞等^[4]给出了日本 ENE-FARM 系统运行参数,孙兴进等^[5]详细分析了国外 MCFC 技术厂商并给出了 IHI 1 MW MCFC 实验电厂数据,曹静等^[6]分析了国外 SOFC 的分布式发电技术应用现状。总体来看,无论是中小型燃料电池热电联产系统,还是大型燃料电池电站,国外已有相对成熟的技术,并且逐渐具备市场竞争力和规模化的市场推广条件。

我国分布式能源产业发展尚处于初期,已经开展了多个示范性项目建设。据统计,截至 2018 年底,我国分布式电源装机量 6 机 10 GW, 占总电源装机量的 3%,以分布式天然气、光伏、风电为主^[7]。随着国家政策推进和技术发展,分布式能源产业将有更广阔的发展空间。

分布式发电装置主要有微型燃气轮机、内燃机、燃料电池等。其中,燃料电池具有高效、环保、噪声低等优点,尤其适用于靠近用户的千瓦级至兆瓦级的分布式发电系统,典型的应用场景包括家庭、学校、医院、办公楼等。近年来随着燃料电池技术的日趋成熟和成本的下降,随着全球范围内对于碳排放控制的重视,燃料电池分布式发电已经成为全球分布式能源发展的热点之一^[4]。

近年来,国内的燃料电池技术快速发展,氢燃料电池系统的国产化程度已达到 60%,关键材料如膜电极、氢气循环泵、空气压缩机等可实现小规模自

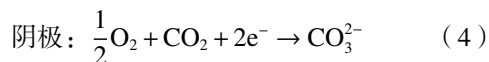
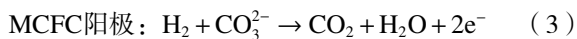
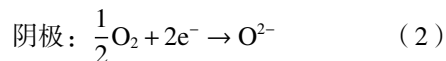
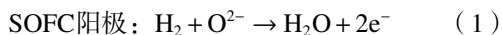
主化生产^[8],但在系统集成、示范应用等方面仍缺少经验,整体产业还处于研发和小规模示范运行阶段。

文章以 MCFC 与 SOFC 为对象,建立燃料电池发电系统的仿真模型,在此基础上开展系统的仿真模拟,并与实际运行系统参数相对比,验证仿真结果,从而为后续的工程应用分析建立基础。

1 高温燃料电池技术特点及其在国内的示范应用

燃料电池是一种直接将燃料中的化学能转化为电能的发电装置,通常指氢气、甲烷等气体燃料,其能量转换通过电极上的电化学反应进行^[9],因此燃料电池的发电效率不像传统的热机那样受到卡诺循环效率的限制,与传统热机相比能量利用效率可提高 10%~20%,高温燃料电池分布式发电的综合利用效率甚至可到达 85%~95%,且其污染物排放水平也明显低于传统的火力发电。

高温燃料电池主要包括 SOFC 与 MCFC 两种模式,其工作原理如式(1)~(4)所示。



高温燃料电池的工作温度较高,决定了其燃料适应性较广泛,可利用天然气、沼气、煤制合成气等(见表2)。除了外部重整制氢,在高温下电池内部也会发生重整反应,且不需要贵金属催化剂。同时燃料电池的能量转化效率高,排气温度高,具有更大的余热利用价值。但高温工作环境对燃料电池材料提出了更高要求,随着反应温度提高,其成本也随之上升。

1.1 SOFC 示范应用样例

表3为国内某 25 kW 规模 SOFC 发电系统的主要运行参数,整套设备包括电堆系统、换热系统、燃料除硫系统、软化水系统及控制系统。其中最关键的燃料电池设备由 32 个电堆串联而成,每个电堆含有 25 片单电池。设备启动前需要由附加的燃烧器提供热量,使电池达到反应温度(720 ℃左右),实际运行效率在 50%~60% 之间,排气温度约为 120 ℃,整套系统的综合利用率>80%。其中电池的发电效

表2 SOFC 与 MCFC 的技术特点对比^[10]

Tab. 2 Comparison of technical characteristics between SOFC and MCFC^[10]

项目	SOFC 固体氧化物 燃料电池	MCFC 熔融碳酸盐 燃料电池
燃料	天然气、煤制气、沼气等	
电解质	YSZ	碳酸钾/锂
电解质形态	固态	熔融态
阳极	Ni-YSZ	Ni/AL、Ni/Cr
阴极	LSCF	Li/Ni
反应温度/℃	800~1000	650~700
发电规模/W	1~10 ⁶	1~10 ⁶
发电效率/%	50~60	45~60
比功率 /[W·(kg) ⁻¹]	15~20	30~40
优点	燃料适用性广,余热价值高	
缺点	启动时间长,需要耐高温材料电解质具有腐蚀性,寿命短	

注: YSZ——氧化钇稳定氧化锆; LSCF——镧锶锰。

率会受到其他辅机系统效率和环境因素的影响。

这套设备运行时间较短,发电过程存在的以下问题值得关注:(1)设备自动化程度较低,运行中依赖人工调整气流速等参数;(2)设备的启停时间长,因系统中的电池片较多,逐层加热到工作温度需要的总时间较长;(3)无法监测设备内部电池片状态,当内部电池片损坏时无法根据其他参数判断。

1.2 MCFC 示范应用样例

MCFC 熔融碳酸盐燃料电池在国内的应用相比 SOFC 更加小众,但优势比较突出。首先 MCFC 的制造工艺相对简单,核心技术已有较大突破,可实现自主生产且运行效果良好,同时与微型燃气轮机组成底层循环发电系统可实现 CO₂ 捕集,且电池发电规模易于放大,适于工程应用,可作为固定电站或分布式电站的重要选择。目前国内以华能清洁研究院的研究成果为领先技术^[11]。

表4为中国华能集团清洁能源技术研究院研发的 MCFC 设备参数,目前从电极、双极板、隔膜材料到集成技术均已实现自主化生产,其中隔膜生产技术经过十几年的迭代更新,日趋成熟,能够保证隔膜的厚度与性能稳定;MCFC 电堆的寿命约为 2×10⁴ h,中间不可停运;为使电解质呈熔融态,电池工作温度不得低于 600 ℃,通常为 650 ℃。

表3 某 25 kW SOFC 系统运行参数

Tab. 3 Operating parameters of a 25 kW SOFC system

项目	参数				
额定电功率	25 kW				
额定电压电流	660 V, 38 A				
电池片	平板式, 140 mm×140 mm, 共800片				
电解质材料	氧化钇稳定的氧化锆金属陶瓷YSZ				
阳极材料	镍-氧化钇稳定氧化锆金属陶瓷Ni-YSZ				
阴极材料	镧锶钴铁的氧化物LSCF				
燃料	管道天然气, 加水重整				
设定功率/kW	11	17	18	23	25
重整甲烷流量/SLM	59.9	64.9	69.9	69.9	72.4
输出功率/kW	11.5	17.1	18.8	23.5	25.3
发电效率/%	32	44	45	48	61

注: SLM——标况下(0 °C, 1 atm)升每分钟(Standard litre per minute)。

表4 中国华能集团清洁能源技术研究院 5 kW、10 kW MCFC 系统运行参数

Tab. 4 Operating parameters of 5 kW and 10 kW MCFC systems of China Huaneng Group Clean Energy Research Institute

	5 kW MCFC	10 kW MCFC
电堆组成	100节单电池串联, 有效面积1000 cm ²	200节单电池串联, 有效面积1000 cm ²
电堆性能参数	电压70 V, 电流85 A 燃料利用率77% 电流密度85 mA/cm ²	电压70 V, 电流160 A 燃料利用率70% 电流密度80 mA/cm ²
输出功率	5.88 kW	11.2 kW

2 高温燃料电池模拟系统

目前在高温燃料电池领域我国已有自主生产的设备产品,但只是少量的示范性应用,还缺少广泛的实际应用基础,无法为规模化、高效益的工程设计提供更多的数据,尤其是当前的示范应用系统发电功率较小,与兆瓦级分布式发电应用的要求还有较大差距,亟需开展兆瓦级分布式燃料电池系统的应用研究探索。文章分别建立 1 MW 级 SOFC 和 MCFC 发电系统模型,并以此为基础开展系统的仿真分析,为我国今后分布式高温燃料电池系统的工程应用提供数据支撑和理论分析基础。

2.1 SOFC 系统建模

2.1.1 系统流程建模

文章基于化工流程模拟软件 AspenPlus 建立 SOFC

发电系统模型,如图 2 所示,系统主要包括燃料与空气供应系统、重整制氢系统、燃料电池发电系统、后燃室及余热利用系统。燃料经过加压进入重整器,通过绝热重整生成 H₂、CO 等合成气,随后该合成气进入阳极发生电化学反应进行发电,发电后一部分阳极尾气回流,为重整反应提供水蒸气,剩余阳极尾气进入后燃室燃烧;空气经过加压和预热进入阴极,阴极分离一部分氧气用于模拟氧离子的迁移,剩下的空气与阳极尾气进一步燃烧,最后利用燃烧后的高温烟气加热进气流股,同时加热居民用水。各个模块选型与工作原理如表 5 所示。

2.1.2 SOFC 电化学建模

电化学模型用于计算燃料电池的输出电压及功率,决定了模型的准确性。常用的计算模型有直接计算法与间接计算法。其中间接计算法依赖经验数据,计算简单但精确度低,故文章采用直接计算法,该模型已有较多应用案例。文章采用 W.Doherty 的电化学模型^[12],在理想能斯特电压基础上,考虑因电化学反应进程的延缓产生的活化损失,因电极、电解质的电阻产生的欧姆损失,在多孔电极中因介质传输受限产生的浓差极化损失,最后得到电池实际输出电压。

2.1.3 能量分析模型

模型假设重整过程与后燃室无散热损失,燃料电池系统中的主要能量转换包括压缩机耗功、电池

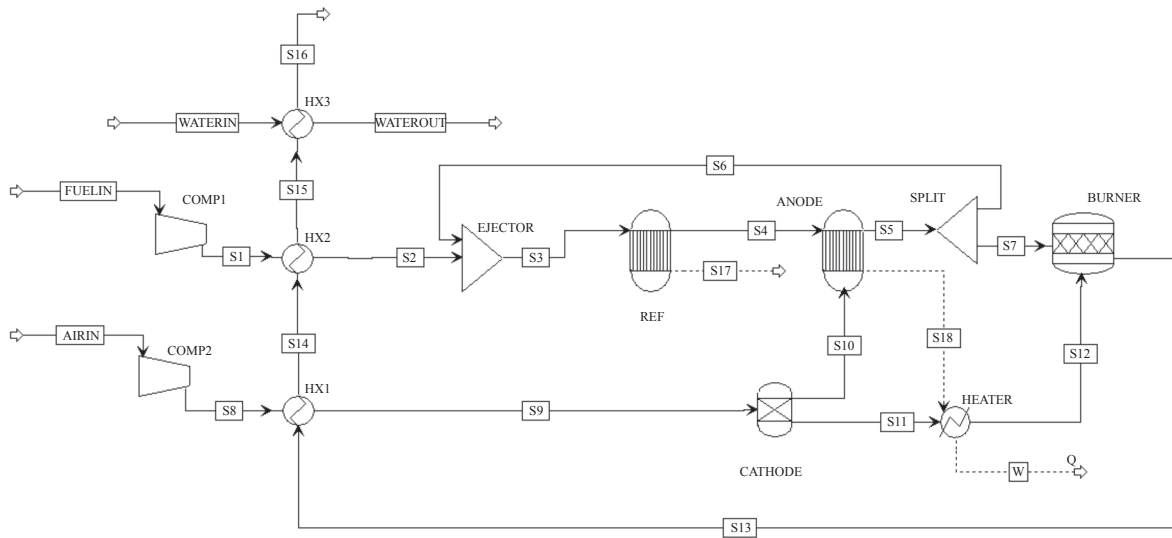


图2 SOFC发电系统流程模型

Fig. 2 SOFC power generation system process model

表5 SOFC建模设备选型

Tab. 5 SOFC model equipment type selection

设备模块	AspenPlus模型	功能
COMP1	Compr	增加入口燃料压力以运行喷射器 (如来气压力高可不设置)
COMP2		将氧化剂也即空气压力增加到高于大气压,克服系统阻力
EJECTOR	Mixer	在喷射器中将来自阳极的返回气体与入口燃料混合
SPLIT	FSplit	根据蒸汽碳比(STCR)分配从阳极到喷射器和燃烧室的出口流量
REF	RGibbs	模拟甲烷重整过程
ANODE		模拟电化学反应
CATHODE	Sep	模拟阳极电化学反应氧离子传递的过程
BURNER	RStoic	模拟阴阳极尾气燃烧过程
HEATER	Heater	将阴极出气温度提高到电池工作温度
HX1/2/3	HeatX	预热燃料、空气,利用尾气余热供热水

发电、换热器加热工质等,综合考虑反应焓变、发电量、热交换量,各模块的能量平衡如式(5)~(10)所示^[13]。

压缩机功耗:

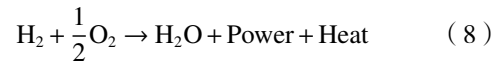
$$W_{\text{COMP}} = n_{\text{heater}} \cdot (h_2 - h_1) \quad (5)$$

换热器热量平衡:

$$Q_{\text{heater}} = n \cdot (h_2 - h_1) \quad (6)$$

$$Q_{\text{water}} = n_{\text{water}} \cdot C_p \cdot (T_2 - T_1) \quad (7)$$

燃料电池能量平衡:



系统能量平衡:

$$\sum n_{\text{in}} h_{\text{in}} = \sum n_{\text{out}} h_{\text{out}} + W_{\text{net}} + Q \quad (9)$$

$$\sum m_{\text{in}} = \sum m_{\text{out}} \quad (10)$$

式中:

n ——流股的摩尔流量(mol/s);

h ——物料流股的焓值(kJ/mol), h_1 、 h_2 分别

代表相应模块进出口流股的焓值;

Q ——换热功率(kW);

water ——换热介质水;

heater ——换热器模块;

C_p ——工质的摩尔定压热容(kJ/mol·K);

T ——工质的温度(K), T_1 、 T_2 分别代表进

出口流股的温度;

Power ——燃料电池发电量(kW);

Heat ——燃料电池放热量(kW);

in, out ——进入、流出系统;

W_{net} ——系统净发电量(kW);

m ——流股的质量流量(kg/s)。

2.1.4 系统性能分析模型

发电效率:

$$\eta_e = \frac{W_{DC}}{\text{fuel} \cdot \text{LHV}} \quad (11)$$

式中:

W_{DC} ——系统直流发电量(kW);

fuel ——燃料流量(mol/s);

LHV ——燃料的低位发热量(kJ/mol)。

热利用效率:

$$\eta_Q = \frac{Q}{\text{fuel} \cdot \text{LHV}} \quad (12)$$

2.1.5 结果与讨论

使用 AspenPlus 模拟 SOFC 发电过程, 使用天然气为燃料, 进入系统的空气为 79% 的 N_2 和 21% 的 O_2 , 表 6 给出了 SOFC 系统的具体工艺参数。

表 6 SOFC 建模条件

Tab. 6 SOFC modeling conditions

参数	设置
燃料组分	CH_4 96.12%, C_2H_6 0.501%, C_3H_8 0.118%, C_4H_{10} 0.033%, C_5H_{12} 0.012%, CO_2 2.6%, N_2 0.147%
SOFC 运行温度	910 °C
SOFC 运行压力	1.08 atm
输出功率	1 MW
面积	140 mm×140 mm
进气燃料温度/压力	15 °C/1 atm
进入空气温度/压力	15 °C/1 atm
燃料利用率	0.85
汽碳比	2.5
压缩机压力比	3
DC/AC 转换效率	92%

以前述电化学反应模型为基础, 参考某 25 kW 规模 SOFC 项目系统参数(包括电池板尺寸、电流密度、进料流量等), 构建了 1 MW 的分布式燃料电池模拟系统, 并对该发电系统进行了仿真模拟。仿真计算主要结果如表 7 所示, 在能斯特电压 V_N 基础上, 减去欧姆损失 V_{ohm} 、活化损失 V_{act} 、浓差极化损失 V_{con} , 得到电池输出电压 V_{SOFC} ; 采用华电电科院电池的电流密度参数, 计算得到总电流和输出功率, 系统的发电效率和热利用效率分别为 55.4% 和 30.15%。

表 7 SOFC 模型计算结果

Tab. 7 SOFC model calculation results

电池参数	数值	电池参数	数值
V_N/V	0.912	I/A	1728149.2
V_{ohm}/V	0.168	$J/(A \cdot m^{-2})$	1938.77
V_{act}/V	0.112	W_{SOFC}/kW	1015
V_{con}/V	0.043	$\eta_e/\%$	55.4
V_{SOFC}/V	0.588	$\eta_Q/\%$	30.15

表 3 表明实际运行中发电效率 50% ~ 60% 之间, 综合效率超过 80%; 根据表 7 仿真计算获得的结果, 运行效率符合实际运行情况。图 3 进一步给出了该燃料电池的性能, 随着电流密度 J 增加, 输出电压 V_{SOFC} 逐渐下降, 该规律与此前相关研究结果相一致^[14-15]。

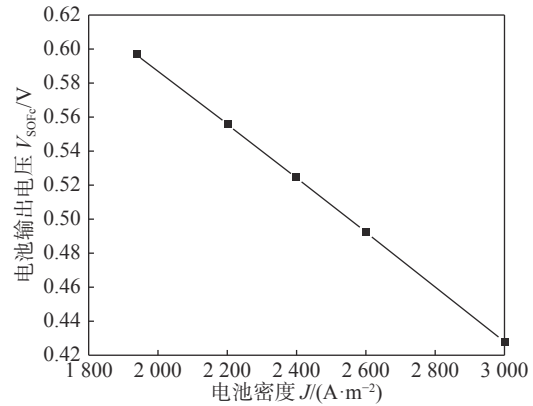


图 3 SOFC 模型性能

Fig. 3 SOFC model performance

2.2 MCFC 系统

2.2.1 MCFC 系统建模

基于 AspenPlus 软件建立如图 4 所示 1 MW MCFC 系统流程。与 SOFC 系统不同之处在于, 此时阳极设置燃烧烟气回流, 在阴极与氧气一同进入阳极发生电化学反应, 该过程模拟实际运行中 CO_3^{2-} 的迁移。关键模块选型与 SOFC 相似。

2.2.2 MCFC 电化学反应模型

MCFC 的电化学反应模型相比 SOFC 简单, 主要考虑三部分电阻的影响(见表 8), 该模型已有文献使用验证^[16]。能量分析模型与系统性能模型与 SOFC 系统类似, 可参考表 5。

2.2.3 结果与讨论

MCFC 模拟系统采用天然气为燃料, 参考前述 MCFC 电堆参数, 设置燃料利用率为 85%, 电流密度

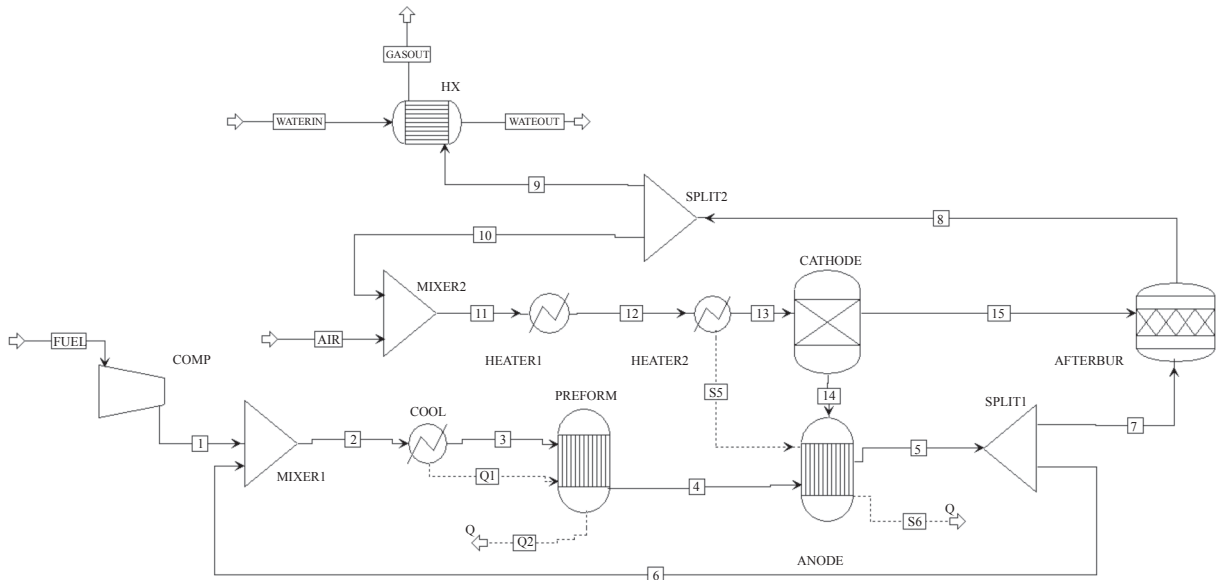


图 4 MCFC 电系统流程模型

Fig. 4 MCFC power generation system process model

表 8 MCFC 电化学模型

Tab. 8 MCFC electrochemical model

能斯特电压计算	$E_N = E_0 + \frac{RT}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2,a} \sqrt{P_{O_2,c}}}{P_{H_2O,a}} \cdot \frac{P_{CO_2,c}}{P_{CO_2,a}} \right)$ <p>其中, $E_0 = 1.2723 - 2.7654 \times 10^{-4} T$</p>
阳极电阻	$R_{anode} = 2.27 \times 10^{-9} \exp \left(\frac{E_{act,an}}{RT} \right) P_{H_2}^{-0.42} P_{CO_2}^{-0.17} P_{H_2O}^{-1}$
阴极电阻	$R_{cathode} = 7.505 \times 10^{-10} \exp \left(\frac{E_{act,cat}}{RT} \right) P_{O_2}^{-0.43} P_{CO_2}^{-0.09}$
欧姆电阻	$R_{ohm} = 0.5 \times 10^{-4} \exp \left[3.016 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{923} \right) \right]$
输出电压	$V_{cell} = E_N - j(R_{anode} + R_{cathode} + R_{ohm})$

注: P_{H_2} ——氢气分压; P_{O_2} ——氧气分压; P_{CO_2} ——二氧化碳分压; P_{H_2O} ——水蒸气分压; a, an, anode——阳极, 对应的物理量为阳极的物理量; c, cat, cathode——阴极, 对应的物理量为阴极的物理量; R——理想气体常数, 取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; F——法拉第常数, 取 $96485 \text{ C}/\text{mol}$; T——电堆工作温度 (K); E_0 ——可逆电压 (V); E_{act} ——活化能 (kJ/mol)。

为 $800 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 。以前述模型为基础, 对 MCFC 系统进行仿真模拟。该 MCFC 系统仿真计算结果如表 9 所示, 计算能斯特电压 V_N , 欧姆损失 V_{ohm} 、阳极损失 V_{an} 、阴极损失 V_{cat} , 得到电池输出电压 V_{MCFC} , 及输出功率 W_{MCFC} , 发电效率及热利用效率分别为 49.7% 和 26.5%, 根据表 4 中 10 kW 案例, 其单电池电压为 0.7 V, 系统发电效率约为 51%; 对比发现仿真结果与实际运行数据相近; 同时基于该仿真模型, 研究了该电池的性能状态, 如图 5 所示, 其性能变化规律与已有研究文献中的趋势相符^[17]。

表 9 MCFC 模型计算结果

Tab. 9 MCFC model calculation results

电池参数	数值	电池参数	数值
V_N/V	0.82	V_{MCFC}/V	0.68
V_{an}/V	0.02	W_{MCFC}/kW	1094
V_{cat}/V	0.068	$\eta_e/\%$	49.7
V_{ohm}/V	0.052	$\eta_Q/\%$	26.5

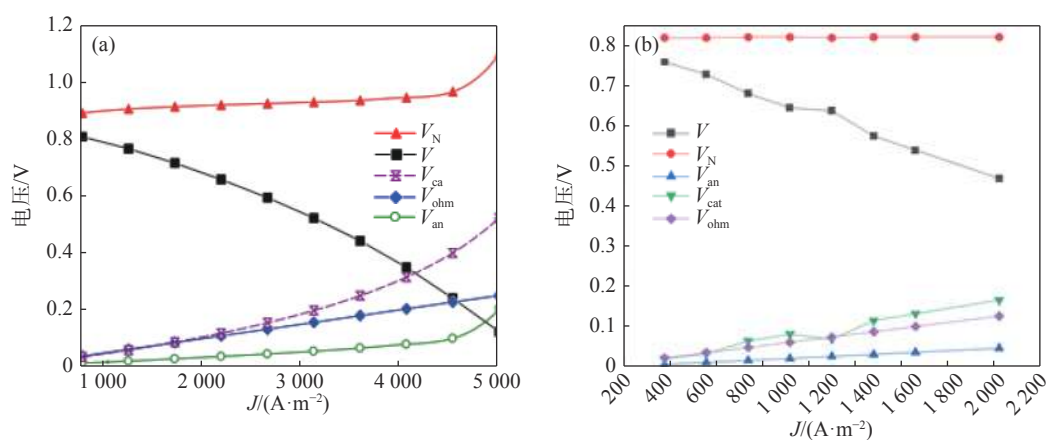


图5 MCFC 电池性能:(a)文献数据;(b)模拟数据

Fig. 5 MCFC cell performance: (a) literature data; (b) simulated data

3 结论

文章概述了燃料电池分布式发电技术的特点及其国内外应用情况,介绍了高温燃料电池的相对优势和不足,并对 SOFC 和 MCFC 的技术特点进行了对比分析。在此基础上,进一步介绍了国内某 25 kW 的 SOFC 发电系统,和中国华能集团清洁能源技术研究院 5 kW、10 kW MCFC 发电系统的主要特征。结合这两个示范应用样例,基于 AspenPlus 分别建立对应的 1 MW 级 SOFC 发电系统模型和 MCFC 系统模型,对系统的运行进行仿真分析。仿真结果与实际系统参数吻合较好,且仿真获得的系统性能变化趋势也与已有研究相一致,验证了仿真模型和方法的正确性。该方法为后续开展兆瓦级分布式燃料电池技术的工程应用提供了有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 钟财富. 国内外分布式燃料电池发电应用现状及前景分析 [J]. 中国能源, 2021, 43(2): 34-37,73. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.02.006.
ZHONG C F. Application status and prospect analysis of distributed fuel cell power generation at home and abroad [J]. China Energy, 2021, 43(2): 34-37,73. DOI: 10.3969/j.issn.1003-2355.2021.02.006.
- [2] 向楠, 李鹏, 张雪芹, 等. 国内分布式能源发展现状与应用前景 [J]. 科技资讯, 2019, 17(18): 38-44. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2019.18.038.
XIANG N, LI P, ZHANG X Q, et al. Development status and application prospects of distributed energy in China [J]. Science & Technology Information, 2019, 17(18): 38-44. DOI: 10.16661/j.cnki.1672-3791.2019.18.038.
- [3] 廖文俊, 倪蕾蕾, 季文姣, 等. 分布式能源用燃料电池的应用及发展前景 [J]. 装备机械, 2017(3): 58-64.
LIAO W J, NI L L, JI W J, et al. Application and development prospect of fuel cells for distributed energy [J]. Equipment Machinery, 2017(3): 58-64.
- [4] 宋鹏飞, 单彤文, 李又武, 等. 以天然气为原料的燃料电池分布式供能技术路径研究 [J]. 现代化工, 2020, 40(9): 14-19. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2020.09.004.
SONG P F, SHAN T W, LI Y W, et al. Founding paths to supply energy in a distributed way by fuel cell with natural gas as raw materials [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(9): 14-19. DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2020.09.004.
- [5] 孙兴进, 朱新坚, 曹广益. 熔融碳酸盐燃料电池(MCFC)发电系统进展 [J]. 电源技术, 2001, 25(4): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2001.04.015.
SUN X J, ZHU X J, CAO G Y. Development of molten-carbonate fuel-cell power system [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2001, 25(4): 303-307. DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2001.04.015.
- [6] 曹静, 王小博, 孙翔, 等. 基于固体氧化物燃料电池的高效清洁发电系统 [J]. 南方能源建设, 2020, 7(2): 28-34. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004.
CAO J, WANG X B, SUN X, et al. High-efficiency clean power generation system based on solid oxide fuel cell [J]. Southern Energy Construction, 2020, 7(2): 28-34. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.004.
- [7] 李琼慧, 叶小宁, 胡静, 等. 分布式能源规模化发展前景及关键问题 [J]. 分布式能源, 2020, 5(2): 1-7. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2003005.
LI Q H, YE X N, HU J, et al. Outlook and critical issues of large-scale development on distributed energy resources [J]. Distributed Energy, 2020, 5(2): 1-7. DOI: 10.16513/j.2096-2185.DE.2003005.

- [8] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望 [J]. *中国工程科学*, 2021, 23(4): 162-171. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.04.019](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2021.04.019).
LIU Y D, GUO H X, OUYANG X P. Development status and future prospects of hydrogen fuel cell technology [J]. *Strategic Study of Chinese Academy of Engineering*, 2021, 23(4): 162-171. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2021.04.019](https://doi.org/10.15302/J-SSCAE-2021.04.019).
- [9] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
YI B L. Fuel cell: principle·technology·application [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- [10] M. 哈希姆·内里, 王才胜. 燃料电池的建模与控制及其在分布式发电中的应用 [M]. 赵仁德, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019.
NEHRIR M H, WANG C S. Modeling and control of fuel cells: distributed generation applications [M]. ZHAO R D, trans. Beijing: Machinery Industry Press, 2019.
- [11] 王洪建, 许世森, 程建, 等. 熔融碳酸盐燃料电池发电系统研究进展与展望 [J]. *热力发电*, 2017, 46(5): 8-13. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2017.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2017.05.008).
WANG H J, XU S S, CHENG J, et al. Progress and prospects of molten carbonate fuel cell system [J]. *Thermal Power Generation*, 2017, 46(5): 8-13. DOI: [10.3969/j.issn.1002-3364.2017.05.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1002-3364.2017.05.008).
- [12] DOHERTY W, REYNOLDS A, KENNEDY D. Computer simulation of a biomass gasification-solid oxide fuel cell power system using aspen plus [J]. *Energy*, 2010, 35(12): 4545-4555. DOI: [10.1016/j.energy.2010.04.051](https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.051).
- [13] PIRKANDI J, GHASSEMI M, HAMEDI M H, et al. Electrochemical and thermodynamic modeling of a CHP system using tubular solid oxide fuel cell (SOFC-CHP) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29-30: 151-162. DOI: [10.1016/j.jclepro.2012.01.038](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.038).
- [14] GALVAGNO A, PRESTIPINO M, ZAFARANA G, et al. Analysis of an integrated agro-waste gasification and 120 kW SOFC CHP system: modeling and experimental investigation [J]. *Energy Procedia*, 2016, 101: 528-535. DOI: [10.1016/j.egypro.2016.11.067](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.11.067).
- [15] MEHRPOOYA M, SADEGHZADEH M, RAHIMI A, et al. Technical performance analysis of a combined cooling heating and power (CCHP) system based on solid oxide fuel cell (SOFC) technology-A building application [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 198: 111767. DOI: [10.1016/j.enconman.2019.06.078](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.06.078).
- [16] MEHRPOOYA M, KHODAYARI R, ALI MOOSAVIAN S M, et al. Optimal design of molten carbonate fuel cell combined cycle power plant and thermophotovoltaic system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2020, 221: 113177. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.113177](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113177).
- [17] JARCHLOUEI M A, CHITSAZ A, MAHMOUDI S M S, et al. Gibbs energy minimization using Lagrange method of undetermined multipliers for electrochemical and thermodynamic modeling of a MCFC with internal steam reforming [J]. *Energy Conversion and Management*, 2021, 228: 113594. DOI: [10.1016/j.enconman.2020.113594](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113594).

作者简介:



李卓言

李卓言 (第一作者)

1996-, 女, 黑龙江省大庆人, 硕士研究生, 主要从事燃料电池分布式发电工作 (e-mail) 15210225767@163.com。



段丽平

段丽平 (通信作者)

1977-, 女, 河南临颖县人, 正高级工程师, 主任工程师, 硕士, 主要从事火力发电厂及能源综合利用相关设计工作 (email) duanlp@ncep.com.cn。

(编辑 叶筠英)