

# 可再生能源多级利用系统建模与计算机仿真

李文军<sup>1\*</sup>, 王新军<sup>1</sup>, 陈国安<sup>2</sup>

<sup>1</sup>火箭军工程大学, 陕西 西安

<sup>2</sup>中国人民解放军91412部队, 海南 三亚

收稿日期: 2024年12月22日; 录用日期: 2025年1月15日; 发布日期: 2025年1月22日

## 摘要

化石燃料的短缺以及环境问题的日益突出, 探索一种清洁无污染、燃料利用率高的能源利用方式迫在眉睫, 固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机(SOFC-MGT)联合发电系统可以有效提高能源的利用率, 本文提出了一种基于风能、太阳能、生物质能的固体氧化物燃料电池-微型燃气轮机-汽轮机联合循环发电系统, 利用Matlab/Simulink建模与计算机仿真分析了不同燃料流量对新型SOFC-MGT底层循环系统功率、效率等性能的影响, 并将新型SOFC-MGT底层循环系统输出功率等性能与传统的SOFC-MGT底层循环系统进行了对比分析, 研究结果表明, 新型SOFC-MGT底层循环系统的输出性能要优于传统的底层循环, 在涡轮尾气能量回收方面, 新型SOFC-MGT底层循环系统要优于传统的底层循环系统。

## 关键词

能量系统, 风能, 太阳能, 燃料电池, 微型燃气轮机

# Modeling and Simulation Based on Renewable Energy Sources Multi-Stage Energy Utilisation System

Wenjun Li<sup>1\*</sup>, Xingjun Wang<sup>1</sup>, Guo'an Cheng<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Rocket Force University of Engineering, Xi'an Shaanxi

<sup>2</sup>PLA 91412, Sanya Hainan

Received: Dec. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Jan. 15<sup>th</sup>, 2025; published: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2025

## Abstract

The shortage of fossil fuels and the increasingly prominent environmental problems make it urgent

\*第一作者。

文章引用: 李文军, 王新军, 陈国安. 可再生能源多级利用系统建模与计算机仿真[J]. 建模与仿真, 2025, 14(1): 823-832. DOI: 10.12677/mos.2025.141076

to explore a clean and non-polluting way of energy utilisation with high fuel utilisation, and a solid oxide fuel cell and micro gas turbine (SOFC-MGT) combined cycle power generation system can effectively improve the energy utilisation. In this paper on Matlab/Simulink, a wind, solar and bio-mass based solid oxide fuel cell-micro gas turbine- steam turbine combined cycle power generation system, the influence of different fuel flow rates on the power and efficiency of the new SOFC-MGT bottom cycle system is analyzed, and the output power and other performances of the new SOFC-MGT bottom cycle system are compared and analyzed with that of the traditional SOFC-MGT bottom cycle system, and the results of the study show that the output performance of the new SOFC-MGT bottom cycle system is better than that of the traditional bottom cycle, and the output performance is better than that of the traditional bottom cycle. The results show that the output performance of the new SOFC-MGT bottom cycle system is better than that of the traditional bottom cycle, and the new SOFC-MGT bottom cycle system is superior to the traditional bottom cycle system in terms of the energy recovery of the turbine exhaust gas.

## Keywords

Energy System, Wind Energy, Solar Energy, Fuel Cell, Micro Gas Turbine

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

能源在推动国家经济发展、保障国防安全以及提升社会福祉方面发挥着至关重要的作用。传统化石能源的过度开采，尤其是温室气体的大量排放，已引发全球气候变暖，对人类社会的可持续发展构成了重大威胁。固体氧化物燃料电池其联合系统 SOFC-GT 具有高效率、对环境友好等诸多优点，是目前最有发展潜力的发电方式之一[1]；燃料电池系统研究的前沿是 SOFC-GT 联合发电；利用系统建模与计算机仿真更进一步实现 SOFC-GT 联合动力系统应用，将会对我国现代化建设产生重大影响[2] [3]。

## 2. 基于可再生能源的能量多级利用发电系统模型

固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机(SOFC-MGT)新型底层联合循环，组成一套基于可再生能源的能量多级利用发电系统(SOFC-MGT-HRSG)。然后针对 SOFC-MGT 联合发电系统结构庞大、性能复杂以及参数繁多的特点搭建了 SOFC 发电系统各个模块模型并将各个模块依实际循环顺序连接起来，建立了完整的 SOFC-MGT 新型底层循环发电系统，其系统中仿真模型见图 1，系统参数的变化规律见图 2 所示。

### 2.1. 基于可再生能源的能量多级利用发电系统拓扑结构

基于可再生能源的固体氧化物燃料电池 - 微型燃气轮机 - 汽轮机(SOFC-MGT-HRSG)联合发电系统。该发电系统主要包括 3 个子系统：SOFC 发电系统、MGT 发电系统以及 HRSG 发电系统[4] [5]。

### 2.2. 固体氧化物燃料电池系统 SOFC-MGT 建模[6] [7]

#### 2.2.1. 模块化建模假设条件

在建立 SOFC-MGT 联合系统的动态模型时，为了简化计算过程并提高模型的可行性，本文提出了以下假设条件：

- 1) 理想气体假设：假设系统内的所有气体均为理想气体，这样可以使用理想气体状态方程简化气体

的热力学计算。

2) 忽略系统与环境的换热: 假设系统内各模块的热量不会散失到外界环境中, 即系统为绝热系统。这一假设有助于简化能量守恒方程的求解过程, 但可能会导致高温区域的温度估算偏高。

3) 化学反应达到准平衡状态: 假设甲烷重整反应和水气置换反应达到准平衡状态。这意味着化学反应速率快于系统的动态变化速率, 使得反应过程能够使用平衡常数进行计算。

4) 均匀分布假设: 假设系统中的温度、压力和气体组分在各模块内均匀分布, 即采用集中参数模型。这一假设忽略了系统内部的梯度效应, 适用于快速估算系统整体性能。

5) 稳态操作假设: 假设在短时间内系统操作处于稳态, 不考虑各模块之间的动态耦合效应。这一假设主要用于简化控制策略设计, 使得模型更适合用于能量管理策略的快速仿真与评估。

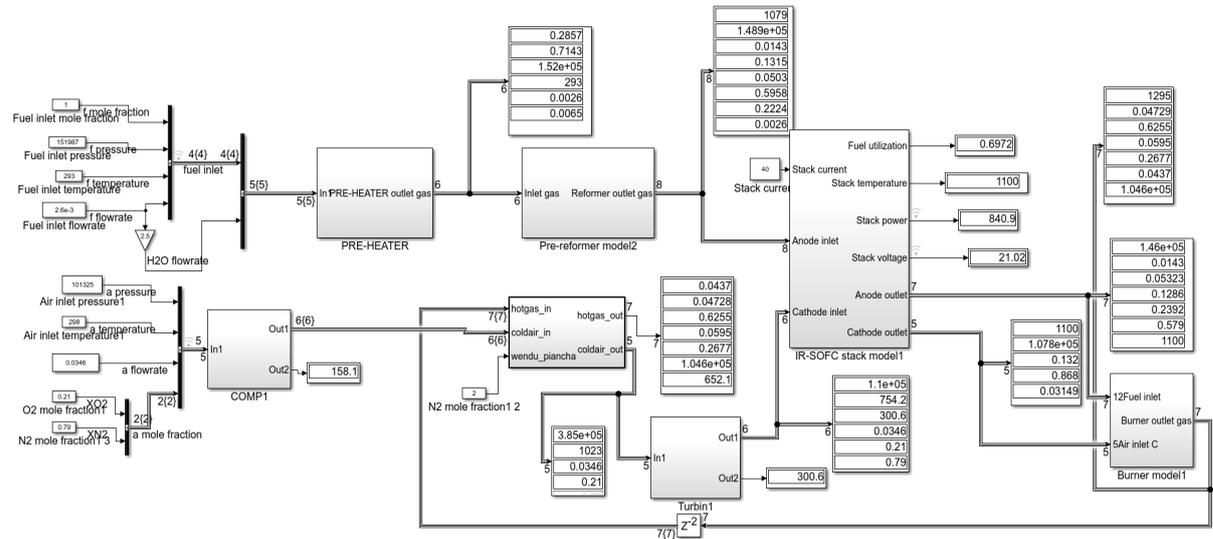


Figure 1. The model of SOFC-MGT generation system

图 1. SOFC-MGT 循环系统仿真模型

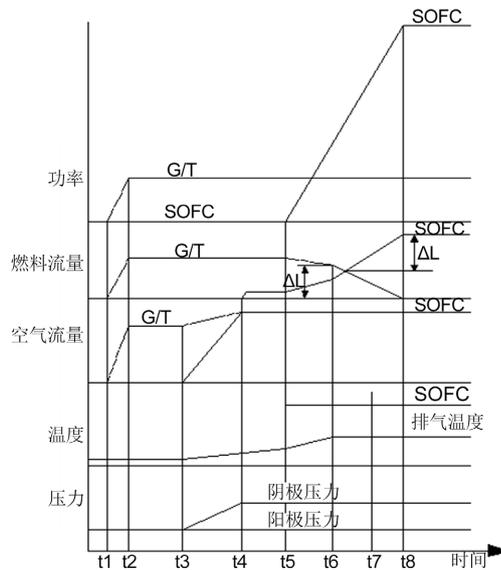


Figure 2. The parameter of SOFC-MGT system

图 2. SOFC-MGT 系统参数

### 2.2.2. 重整器模型

重整器是 SOFC-MGT 系统中的重要组成部分,其功能是在燃料进入燃料电池之前进行预处理,通过重整反应生成氢气,提高燃料电池的效率。本文对重整器模型进行了简化与合理化假设,并基于质量守恒和化学平衡建立了动态模型[8],具体如下:



根据质量守恒方程可得:

$$\frac{P_1 V_{re}}{RT_1} \frac{dx_{6,i}}{dt} = Q_{n5,i} - Q_{n6,i} + \bar{R}_{re,i} \quad (i \in [\text{CH}_4, \text{CO}, \text{CO}_2, \text{H}_2, \text{H}_2\text{O}]) \quad (2.3)$$

$$\bar{R}_{re} = [-r_{re1}, r_{re1} - r_{re2}, r_{re2}, 3r_{re1} + r_{re2}, -r_{re1} - r_{re2}] \quad (2.4)$$

式中,设定预重整器的内部平均压力为  $P_1$ 、容积为  $V_{re}$ ,平均温度为  $T_5$ 。使用气体常数  $R$  (数值为  $8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) 计算。对于气体成分  $i$ ,其出口摩尔质量分数为  $x_i$ ,流经入口和出口的摩尔流量分别表示为  $Q_{n1,i}$  和  $Q_{n2,i}$ 。此外,  $R_{re,i}$  表示气体  $i$  在水气转换过程中消耗的摩尔流量。甲烷重整反应和一氧化碳变换反应的速率分别用  $r_{e1}$  和  $r_{e2}$  表示。

在建模时,假设甲烷重整反应和水气变换反应处于平衡状态,因此可以运用平衡常数来描述这些反应的特性,具体表达式如下[9]:

$$K_r = \exp(A_1 T_5^4 + B_1 T_5^3 + C_1 T_5^2 + D_1 T_5 + E_1) \quad (2.5)$$

$$K_s = \exp(A_2 T_5^4 + B_2 T_5^3 + C_2 T_5^2 + D_2 T_5 + E_2) \quad (2.6)$$

式中,  $K_r$ 、 $K_s$  分别为重整反应与水气置换反应的平衡常数。

### 2.2.3. 电化学模型

燃料电池单片实际电压可有以下式表示:

$$v_{fc} = E - \eta_{ohmic} - \eta_{conc} - \eta_{act,a} - \eta_{act,c} \quad (2.7)$$

式中,  $E$  是电堆的理论可逆电压,  $\eta_{ohmic}$  为欧姆极化,  $\eta_{conc}$  为浓度差极化,  $\eta_{act,a}$  和  $\eta_{act,c}$  分别为阳极和阴极的活化极化。根据能斯特方程,理论可逆电压可用下式表达:

$$E = E^0 + \frac{RT_{cell}}{2F} \ln \left( \frac{p_{4,\text{H}_2} p_{5,\text{O}_2}^{0.5}}{p_{4,\text{H}_2\text{O}}} \right) \quad (2.8)$$

$$E^0 = 1.2723 - 2.7645 \times 10^{-4} T_{cell} \quad (2.9)$$

式中,  $E^0$  为标准电动势,  $p_{4,\text{H}_2}$  为阳极出口氢气的压力,  $p_{4,\text{H}_2\text{O}}$  为阳极出口水的压力,  $p_{5,\text{O}_2}$  为阴极入口氧气的压力,  $T_{cell}$  为电堆温度。

### 2.2.4. 微型燃气轮机建模

#### a. 压气机模型

微型燃气轮机系统包括离心式压气机、催化燃烧室、换热器及透平组成。以现有微型燃气轮机为基础,采用联立模块法构建各个模块的数学模型。

压气机的工作特性可以用  $\bar{n}$ 、 $\bar{G}$ 、 $\pi$  以及  $\eta$  四个参数来表示。

根据质量守恒,可得压气机出口流量为:

$$G_1 = G_2 \quad (2.10)$$

式中,  $G_1$ 、 $G_2$  分别为压气机进出口实际流量。

$$\bar{G}_1 = G_1 \frac{p_0 \sqrt{T_1}}{p_1 \sqrt{T_0}} \quad (2.11)$$

$$\bar{n}_c = n_c \frac{\sqrt{T_0}}{\sqrt{T_1}} \quad (2.12)$$

式中,  $T_1$  为压气机入口温度,  $p_1$  为压气机入口压力,  $n_c$  为实际转速,  $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,  $T_0 = 298 \text{ K}$ 。

压气机压比  $\pi$  为:

$$\pi = f_1 \left( G_1 \frac{p_0 \sqrt{T_1}}{p_1 \sqrt{T_0}}, n_c \frac{\sqrt{T_0}}{\sqrt{T_1}} \right) \quad (2.13)$$

压气机效率  $\eta_c$  为:

$$\eta_c = f_2 \left( G_1 \frac{p_0 \sqrt{T_1}}{p_1 \sqrt{T_0}}, n_c \frac{\sqrt{T_0}}{\sqrt{T_1}} \right) \quad (2.14)$$

本文采用单级离心式压气机部分工况点的稳态特性曲线, 如下图所示图 3、图 4 所示。

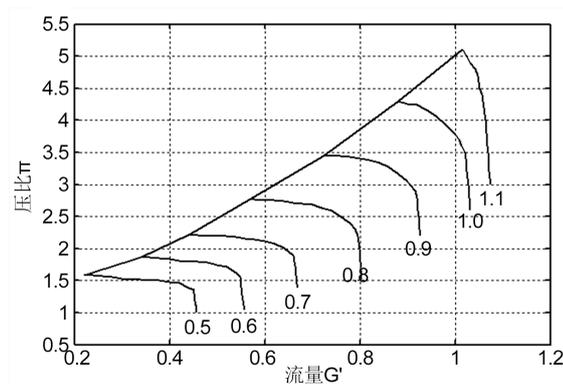


Figure 3. The curves of  $\pi - G'$  parameter

图 3.  $\pi - G'$  特性曲线

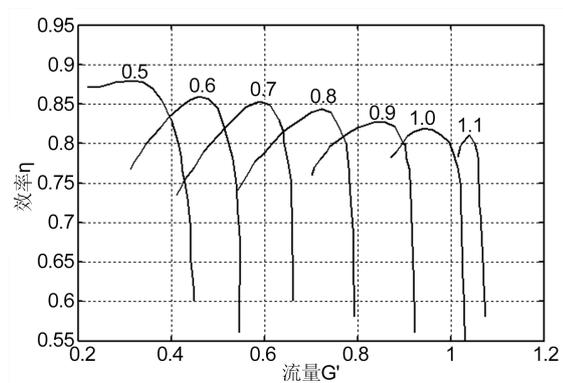


Figure 4. The curves of  $\eta - G'$  parameter

图 4.  $\eta - G'$  特性曲线

压气机消耗功率可以表示为:

$$Ne_C = c_{pa} T_1 (\pi^{m_a} - 1) / \eta \quad (2.15)$$

$$m_a = (\lambda_a - 1) / \lambda_a \quad (2.16)$$

压气机出口温度可以表示为:

$$T_2 = T_1 \left[ 1 + (\pi^{m_a} - 1) / \eta \right] \quad (2.17)$$

### b. 涡轮模型

在简化的 SOFC-MGT 系统模型中, 涡轮使用高温高压气体膨胀做功, 转化为机械能驱动发电机。假设气体为理想气体且膨胀为定熵过程, 涡轮的膨胀比定义为入口压力与出口压力的比值。涡轮输出功率计算公式为:

$$W_t = \dot{m} \cdot C_p \cdot T_{in} \left( 1 - \left( \frac{P_{out}}{P_{in}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right) \quad (2.18)$$

式中,  $\dot{m}$  为气体流量,  $C_p$  为气体比热容,  $T_{in}$  为入口温度,  $P_{in}$  为涡轮入口压力,  $P_{out}$  为涡轮出口压力, 膨胀比和气体的比热比  $\gamma$  决定了温度变化和功率输出。实际涡轮效率通过等熵效率  $\eta_t$  修正, 得到实际功率输出  $W_{actual} = \eta_t \cdot W_t$ 。简化模型能够有效评估涡轮性能, 适合快速仿真和系统设计分析。

## 3. SOFC-MGT 系统建模与计算机仿真

### 3.1. SOFC-MGT 新底层联合循环系统性能分析[10]

**Table 1.** The run parameter of SOFC-MGT system model

**表 1.** SOFC-MGT 混合发电系统模型的运行参数

参数	单位	数值
燃料进口成分 $x_{1,i}$	—	100% CH <sub>4</sub>
燃料进口流量 $Q_{n1}$	mol·s <sup>-1</sup>	$2.75 \times 10^{-3}$
空气进口成分 $x_{5,i}$	—	79% N <sub>2</sub> + 21% O <sub>2</sub>
空气进口流量	mol·s <sup>-1</sup>	$2.37 \times 10^{-2}$
燃料进口压力 $P_1$	Pa	$1.013 \times 10^5$
空气进口压力 $P_5$	Pa	$1.013 \times 10^5$
燃料进口温度 $T_1$	K	298
空气进口温度 $T_5$	K	298
SOFC 输入电流 $i$	A	43
电堆压损 $\sigma_{st}$	—	2%
电堆热容 $C_s$	J·K <sup>-1</sup>	471
燃烧室压损 $\sigma_b$	—	3%
燃烧室效率 $\eta_b$	—	98%
电池个数 $N$	—	30
压气机压比 $\varepsilon$	—	3.8

为了评估新型 SOFC-MGT 联合循环系统的性能, 本文使用了一组具体的运行参数进行仿真分析, 这些参数涵盖了燃料和空气的流量、温度、压力, 以及电堆的输入电流等关键指标, 如表 1 所示。在仿真过程中, 电堆电流设置为 43 A, 以模拟系统在额定工作条件下的性能。

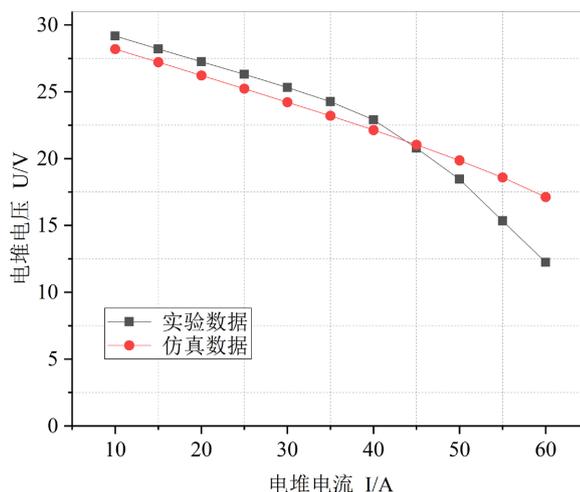


Figure 5. The curves of SOFC V-A parameter  
图 5. SOFC 伏安特性曲线

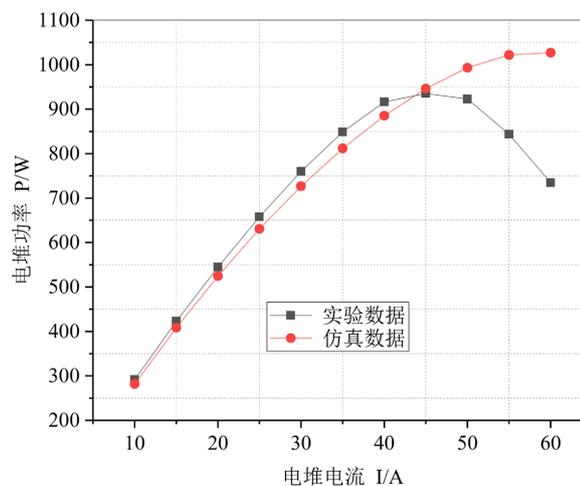


Figure 6. The curves of SOFC power  
图 6. SOFC 功率特性曲线

仿真结果显示, 本文构建的 SOFC 电堆模型与实际实验数据具有较好的一致性。根据图 5 和图 6 中的特性曲线, 可以看出在电流低于 43 A 时, 仿真结果与实验结果的最大误差不超过 4.7%。然而, 当电流超过 50 A 时, 由于电堆内部电流密度过大, 导致电堆输出电压显著下降, 此时仿真模型的误差增至 7.3%。这种现象主要归因于电堆在高电流下的极化效应增加, 影响了电压的稳定性。

### 3.2. 电堆不同放电电流系统性能分析[11] [12]

仿真模型中, 以不同放电电流来控制电堆的输出功率, 通过仿真, 得到 SOFC 电堆电压特性曲线、电堆压降特性曲线, 如图 7、图 8 所示:

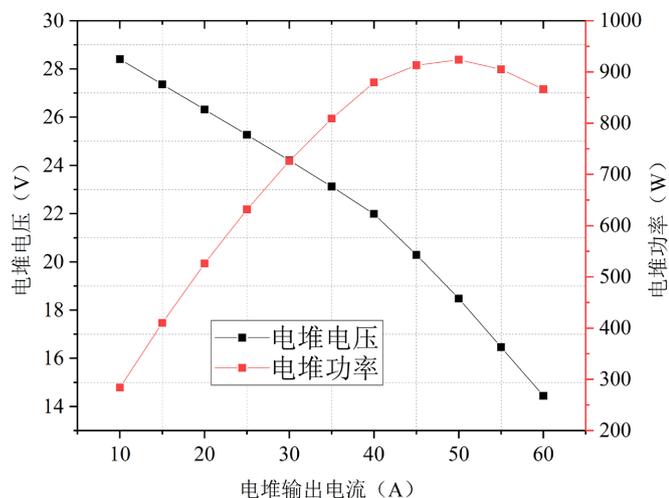


Figure 7. The curves of stacks voltage-power

图 7. 电堆电压 - 功率特性曲线

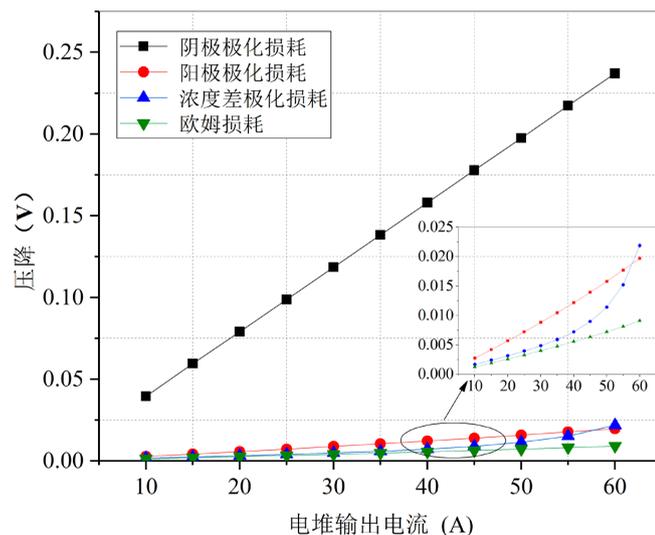


Figure 8. The curves of stacks voltage-drop

图 8. 电堆压降特性曲线图

仿真模型能够较准确地反映 SOFC 电堆在不同电流下的伏安特性和功率特性，通过系统优化和能量管理研究得到图 7/图 8 电堆的电压 - 功率特性曲线。可以看出随着电堆放电流的增大，电堆的输出电压逐渐减小，电堆的输出功率先增大后减小，在额定放电电流时电堆的功率达到最大。这是因为燃料电池的电流到 50 A 时燃料利用率下降很快，相应的燃料电池输出功率出现减小。固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机联合发电比两者单独做功要更加具有优势[13]，同时也说明了本文提出的 SOFC-MGT 新型底层循环结构的优越性。

### 3.3. 与传统结构性能对比

在传统 SOFC-MGT 底层循环中，空气首先经过压气机压缩，再与 SOFC 电堆的阴极和阳极尾气混合，通过催化燃烧生成高温气体，随后送入涡轮进行膨胀做功，形成标准的联合循环系统结构。

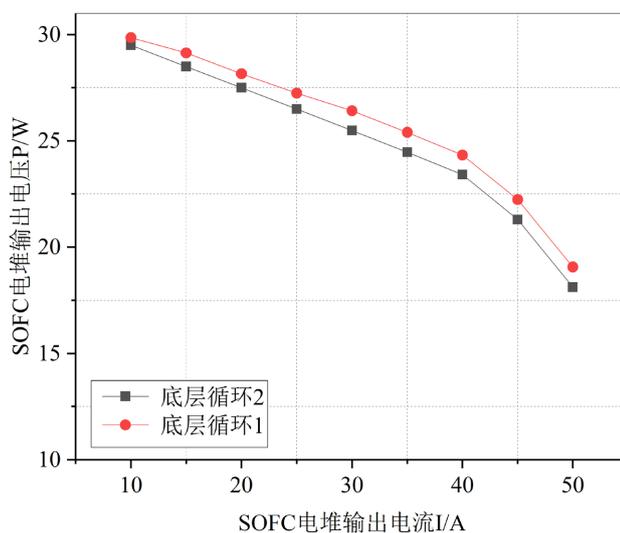


Figure 9. The voltage curves of 2 cycle system stacks

图 9. 两种循环方式的电堆输出电压曲线

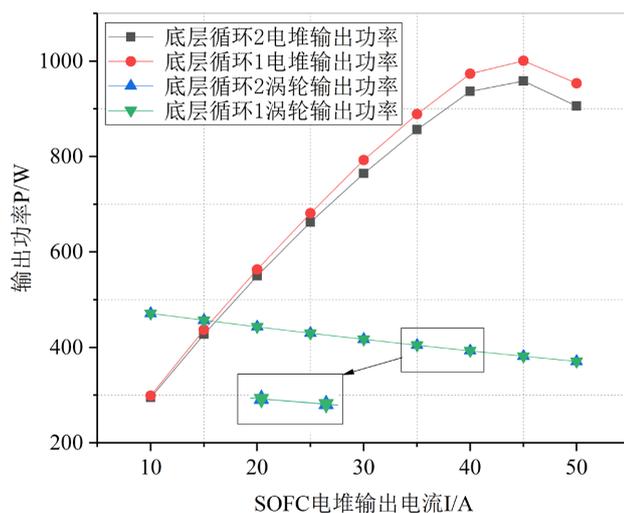


Figure 10. The power curves of 2 cycle stacks-turbine

图 10. 两种循环方式电堆和涡轮功率曲线

从图 9 和图 10 可以看出, 随着电堆放电电流的增加, 传统结构(底层循环 2)的电堆输出电压逐渐下降。然而, 新型循环结构(底层循环 1)的电堆输出电压要明显高于传统结构, 尤其在高电流区域, 电压最大提升幅度达到 3.4%。随着电流继续增大, 虽然电堆的输出功率逐渐上升, 但涡轮的输出功率呈下降趋势。这是由于高电流下电堆的极化效应增强, 导致电压下降幅度加剧。综上所述, 在相同输入条件下, 新型底层循环结构相比传统结构能够更有效地利用电堆输出, 提高了电堆的电压和功率性能, 而涡轮的功率输出差异较小, 表明新型结构在系统效率和能量利用率方面具有显著优势。

#### 4. 结论

利用 Matlab/Simulink 工具构建了一种新型 SOFC-MGT 仿真模型, 分析了其电堆在不同放电电流时新型底层循环系统性能和对电堆性能的影响, 表明新型结构在系统效率和能量利用率方面具有显著优势。

最后将本文构建的 SOFC-MGT 新型底层循环系统性能与传统的 SOFC-MGT 底层循环系统性能进行了对比分析,验证了模型正确性。表明 SOFC-MGT 新型底层循环系统相比于传统的底层循环系统具有尾气回收利用率高,能量利用率高,耗能低。得到新系统电堆的燃料利用率与电堆输出电流呈线性增长关系,即电堆输出电流越大燃料利用率越高的结论。

## 参考文献

- [1] Cinti, G., Discepoli, G., Sisani, E. and Desideri, U. (2016) SOFC Operating with Ammonia: Stack Test and System Analysis. *International Journal of Hydrogen Energy*, **41**, 13583-13590. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.070>
- [2] 朱润凯, 梁前超, 闫东, 等. 固体氧化物燃料电池与微型燃气轮机联合发电建模仿真研究[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(4): 95-99.
- [3] Meng, Q., Han, J., Kong, L., Liu, H., Zhang, T. and Yu, Z. (2017) Thermodynamic Analysis of Combined Power Generation System Based on SOFC/GT and Transcritical Carbon Dioxide Cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, **42**, 4673-4678. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.09.067>
- [4] 詹海洋, 梁前超, 朱润凯, 等. 燃料电池-燃气轮机底层循环性能研究[J]. 舰船科学技术, 2018, 40(8): 76-80.
- [5] 朱润凯, 梁前超, 詹海洋, 等. 直接内重整型固体氧化物燃料电池建模与仿真[J]. 船电技术, 2018, 38(3): 30-35.
- [6] Ud Din, Z. and Zainal, Z.A. (2016) Biomass Integrated Gasification-SOFC Systems: Technology Overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **53**, 1356-1376. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.013>
- [7] Camblong, H., Baudoin, S., Vechiu, I. and Etxeberria, A. (2016) Design of a SOFC/GT/SCS Hybrid Power System to Supply a Rural Isolated Microgrid. *Energy Conversion and Management*, **117**, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.03.006>
- [8] Ao, C.-Y., Zhang, N. and Chen, H.-Q. (2001) Research of Dynamic Simulative Model of Triaxial Gas Turbines Based on Matlab. *Nuclear Power Engineering*, **16**, 523-526.
- [9] Yu, Y.-H., Sun, F.-R., Zhang, R.-X. (2003) Research of Dynamic Simulative Model of Gas Turbines Based on Matlab. *Gas Turbine Technology*, **16**.
- [10] 安连锁, 张健, 刘树华, 等. 固体氧化物燃料电池与燃气轮机混合发电系统[J]. 可再生能源, 2008, 26(1): 62-64.
- [11] Selimovic, A. and Palsson, J. (2002) Networked Solid Oxide Fuel Cell Stacks Combined with a Gas Turbine Cycle. *Journal of Power Sources*, **106**, 76-82. [https://doi.org/10.1016/s0378-7753\(01\)01051-5](https://doi.org/10.1016/s0378-7753(01)01051-5)
- [12] Akkaya, A.V. (2006) Electrochemical Model for Performance Analysis of a Tubular SOFC. *International Journal of Energy Research*, **31**, 79-98. <https://doi.org/10.1002/er.1238>
- [13] Zhu, B. (2006) Next Generation Fuel Cell R&D. *International Journal of Energy Research*, **30**, 895-903. <https://doi.org/10.1002/er.1195>