

固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统的性能及控制策略分析

李杨, 翁一武

(动力与机械工程教育部重点实验室(上海交通大学), 上海市 闵行区 200240)

Performance Study and Control Strategies of Temperature Solid Oxide Fuel Cell-Gas Turbine Hybrid System

LI Yang, WENG Yiwu

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering of Ministry of Education(Shanghai Jiao Tong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: This paper analyzed the part-load performance of solid oxide fuel cell-gas turbine (SOFC-GT) hybrid system. To well predict the system operation conditions, the simulation models were updated by the experimental data and components performance maps. Considering the features of SOFC-GT hybrid system, the safe region was formulated in which three control strategies were introduced. Simulation results show that the system part-load performance varies significantly with different strategies. The most efficient part-load strategy corresponds to a constant fuel to air ratio which does not allow reducing plant net power than 82% of its nominal value while the lowest value of net electrical power (21%) can be achieved by various fuel and air flow rate at constant SOFC operating temperature.

KEY WORDS: high temperature solid oxide fuel cell; gas turbine; hybrid system; control strategies; performance

摘要: 对高温固体氧化物燃料电池-燃气轮机混合动力系统(solid oxide fuel cell-gas turbine, SOFC-GT)进行了详细的分析。利用部件实验数据和部件特性曲线对仿真模型进行了改进,使模型更能反映系统的真实运行情况。针对 SOFC-GT 运行特点,计算出了系统的安全运行区域,并在此区域内提出 3 种不同的变工况运行策略。仿真实验结果表明,不同的控制策略直接影响着系统变工况性能,固定燃空比可以使系统在 82%~100% 范围内获得最高的效率,而稳定 SOFC 的工作温度则可以使系统在 21%~100% 的工况内进行安全调节。

关键词: 高温固体氧化物燃料电池; 燃气轮机; 混合动力系

统; 控制策略; 性能

0 引言

高温固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是一种能将碳氢燃料的化学能通过电化学反应直接转化为电能的最有效的装置之一,近年来在清洁、高效分布式发电领域越来越引起研究人员的重视^[1]。在实际应用中,由于其排气温度很高,有很大的余热利用价值,通常与其他动力装置组成混合动力系统,以提高装置整体效率。

文献[2]中比较了多种高温燃料电池混合动力系统。结果表明,高温燃料电池-燃气轮机混合动力系统(solid oxide fuel cell-gas turbine, SOFC-GT)是最佳的选择。由于 SOFC-GT 混合动力系统是复杂的多变量系统,其运行的稳定性、安全性很大程度上取决于控制参数的选择。本文以开普斯通 C30 微型燃气轮机为基础设计了顶层混合动力系统,利用西门子-西屋公司 25kW SOFC 示范电站的实验数据建立了 SOFC 数学模型,对影响混合动力系统安全运行的因素进行了详细分析,对系统进行了详细的计算,得出混合系统的安全运行区域,分析了不同控制策略对系统变工况性能的影响。

1 模型建立

1.1 系统结构

SOFC-GT 混合动力系统主要由燃气轮机系统和燃料电池系统 2 个子系统组成。根据 2 个子系统布置方式的不同,通常把混合动力系统分为两大

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 计划)(2010CB227301)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2010CB227301)。

类，一类为使用直接燃烧式燃气轮机的混合发电系统(顶层系统)，一类为使用间接加热式燃气轮机的混合发电系统(底层系统)^[3]。本文采用的是顶层混合动力系统的布置方式，系统结构如图 1 所示。压缩空气经两级换热器预热后进入燃料电池阳极，与重整后的燃料发生电化学反应，产生电能和热量。阳极未完全反应的燃料与阴极的高温高压排气混合后进入燃烧室燃烧，产生的高温高压燃气经过换热器 2 预热阳极进气的同时将温度调节为合适的透平进气温度(turbine inlet temperature, TIT)后进入透平做功，透平的高温排气经换热器 1 预热高压空气后排入大气。

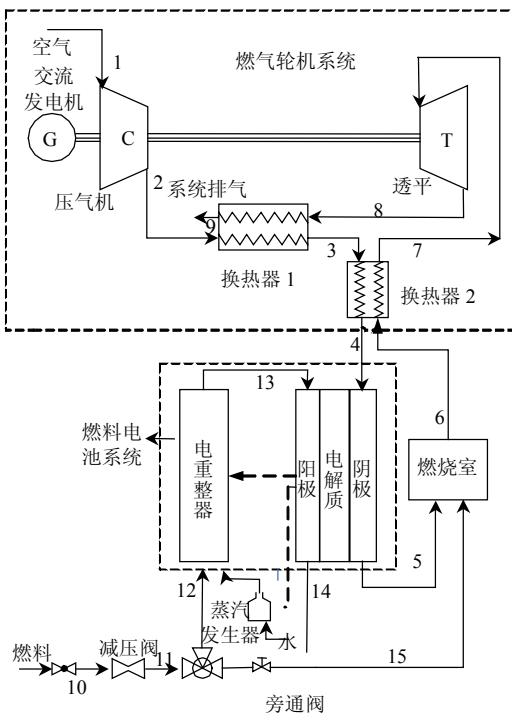


图 1 SOFC-GT 混合动力系统示意图

Fig. 1 Lay-out of SOFC-GT hybrid system

1.2 SOFC 建模分析

本文所建立的 SOFC 模型包括基于质量守恒方程和能量守恒方程的热力学模型和电化学反应模型。在数学模型的建立过程中，假设系统内部气体没有泄漏，化学反应过程处于平衡状态，燃料电池系统对环境的散热量仅为电池工作温度的函数。为了提高模型的精确度，在模型的计算过程中考虑了详细的气体特性，包括密度、比热、热传导系数和动力学黏度等，这些参数是环境温度以及气体成分的函数^[4]。

质量守恒方程

$$M_i^{\text{out}} = M_i^{\text{in}} + \sum_k V_{i,k} R_k \quad (1)$$

能量守恒方程

$$T_{\text{out}} = \frac{\sum_i M_i^{\text{in}} c_{p,i} T_i^{\text{in}} + \sum_k R_k (-\Delta H_k) - P_{\text{out}} - Q_{\text{rad}}}{\sum_i M_i^{\text{out}} c_{p,i}} \quad (2)$$

式中： M 为质量流量； R 为反应速率； V 为化学反应当量系数； c_p 为气体比热容；下标 i 为气体成分， k 为化学反应组分； Q_{rad} 为电池堆的散热量：

$$Q_{\text{rad}} = A \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{sur}}^4) \quad (3)$$

式中： A 为电池堆外表面积； T_{sur} 为环境温度； ε 为 SOFC 电池堆外表面热辐射系数； σ 为斯忒藩-玻尔兹曼常数，本文 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4})$ 。

SOFC 电化学模型描述的是电池的工作电压、各种极化损失和电流密度之间的函数关系。电池的极化损失主要包扩欧姆极化、浓差极化和活化极化。文献[5]对 SOFC 各种极化的计算方法进行了详细的描述。

$$U(i) = E_{\text{eq}} - \eta_{\text{Act}} - \eta_{\text{Ohm}} - \eta_{\text{Conc}} \quad (4)$$

$$E_{\text{eq}} = E^0 + \frac{RT}{4F} \ln \frac{p_{\text{O}_2} p_{\text{H}_2}^2}{p_{\text{H}_2\text{O}}^2} \quad (5)$$

$$P = U(i)i \quad (6)$$

$$\eta_{\text{ohm}} = (\rho_e l_e + \rho_c l_c + \rho_a l_a + R_{\text{cons}})i \quad (7)$$

$$\eta_{\text{conc}}^a = -\frac{RT}{2F} \ln(1 - \frac{i}{i_{\text{as}}}) + \frac{RT}{2F} (1 + \frac{p_{\text{H}_2}^a i}{p_{\text{H}_2\text{O}}^a i_{\text{as}}}) \quad (8)$$

$$\eta_{\text{conc}}^c = -\frac{RT}{4F} \ln(1 - \frac{i}{i_{\text{cs}}}) \quad (9)$$

式中： $U(i)$ 为输出电压； E_{eq} 为平衡电压； η_{Act} 为活化极化； η_{Ohm} 为欧姆极化； η_{Conc} 为浓差极化； E^0 为标准电池电势； P 为输出功率密度； i 为电流密度； ρ_e 、 ρ_c 和 ρ_a 分别是电解质、阴极和阳极的电阻率； l_e 、 l_c 和 l_a 分别为电解质、阴极和阳极的厚度； R_{cons} 为接触电阻。

上述 SOFC 的数学模型为燃料电池单电池的模型。实际应用中，通常使用许多单电池通过不同方式组合成燃料电池电池堆。大部分文献在建模中通常只是将单电池的数学模型简单的乘以电池堆中电池的个数用于模拟电池堆的电化学性能，而把电池堆的实际电压损失设为定值，从而会产生相对较大的误差^[6]。文献[7]中对几种模型的误差产生原因进行了分析，并认为模型的误差主要为电池堆工作电流密度的函数。为了能真实的模拟 SOFC 电池堆的性能，本文分析了西门子-西屋公司的实验数据

和仿真结果^[8-9],给出 SOFC 实际电压损失与电流密度的经验公式:

$$\Delta U = 0.0003 \times I + 0.06195 \quad (10)$$

图 2 为仿真模型与实验数据的比较,从图中可以看出,SOFC 的理论模型仿真结果与其真实性能存在较大误差,在 82%~116% 工况内,误差为 12%~15%。改进后的仿真结果与真实的实验结果吻合,在 82%~116% 工况内误差均小于 2.6%;在设计点,误差仅为 0.67%。

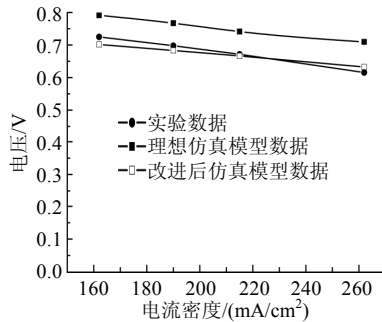


图 2 仿真模型与实验数据的比较

Fig. 2 Comparison between actual data and model results

1.3 燃气轮机建模

本文所选用的燃气轮机为 Capstone 公司的 C30 型燃气轮机,其设计点参数如表 1 所示。燃气轮机的建模以厂家提供的通用部件特性曲线为基础。图 3 为压气机的特性曲线。

表 1 C30 燃气轮机特性

Tab. 1 Specifications of C30 gas turbine

参数	数值
压比	3.20
压气机等熵效率	80%
空气流量/(kg·s ⁻¹)	0.31
燃料流量/(kg·s ⁻¹)	0.0024
透平入口温度/K	1 173
透平等熵效率/%	90.00
尾气温度/K	548
透平出口压力/kPa	103
回热器效率/%	90.00
输出功/kW	30
效率/%	26.0

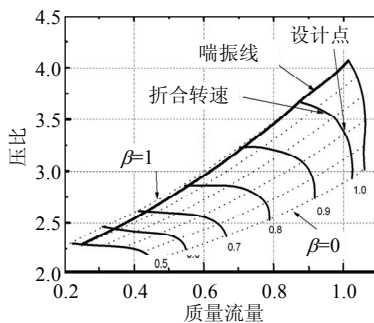


图 3 压气机特性曲线

Fig. 3 Performance of compressor

燃气轮机的输出功率为

$$P_{GT} = \eta_{gen} (\eta_T P_t - P_c) \quad (11)$$

式中: η_{gen} 为交流发电机效率; η_T 为透平效率; P_t , P_c 分别为透平理论膨胀功和压气机压缩功。透平理论膨胀功和压气机压缩功的计算方法在文献[10]中有详细叙述。设计工况下,发电机效率为 95%,根据厂家提供测试数据,燃气轮机输出功每减少 10%,发电机效率线性下降 5%。

1.4 换热器模型

本文考虑换热器的质量、动量和能量平衡,同时考虑换热器材料的热惯性和流体流动过程中的压降,以热气流出口压力 p_2 , 出口焓 h_2 , 冷气流出口压力 p_4 和出口焓 h_4 为状态量,建立数学模型如下:

$$\begin{cases} \frac{dp_2}{dt} = \frac{(m_2 h_2 - m_1 h_1 - q_h)}{V_{ht}(1 - c_{p_2}/R_2)} \\ \frac{dh_2}{dt} = \frac{(m_1 h_1 - m_2 h_2 + q_h) + (m_2 - m_1)(h_2 - h_2 R_2/c_{p_2})}{V_{ht}(\rho_2 - R_2 \rho_2/c_{p_2})} \\ \frac{dp_4}{dt} = \frac{(m_4 h_4 - m_3 h_3 - q_c)}{V_{cl}(1 - c_{p_4}/R_4)} \\ \frac{dh_4}{dt} = \frac{(m_3 h_3 - m_4 h_4 + q_c) + (m_4 - m_3)(h_4 - h_4 R_4/c_{p_4})}{V_{cl}(\rho_4 - R_4 \rho_4/c_{p_4})} \end{cases} \quad (12)$$

式中: m_1, m_2 为热气流的入口和出口流量; m_3, m_4 为冷气流的入口和出口流量; q_c, q_h 为流体与换热器换热板之间的换热量; V_{ht}, V_{cl} 为换热器热侧和冷侧的容积。具体求解过可以参考文献[11]。

2 结果及分析

2.1 设计点性能分析

在设计工况下,SOFC 的工作温度为 1 273 K,最大工作压力为 4×10^5 Pa,可以满足混合动力系统对于 SOFC 工作压力的要求。图 1 所示混合动力系统各节点的热力学参数如表 2 所示,系统的发电效率定义为

$$\eta_{HS} = \frac{P_{HS}}{m_{fuel} H_{fuel}} \quad (13)$$

式中: m_{fuel} 为燃料的质量流量; H_{fuel} 为燃料的低位热值; P_{HS} 为混合动力系统的输出功率。

表 3 为主要部件及系统的性能参数,SOFC 单独发电时,考虑各种损失,其发电效率仅为 49.4%,燃气轮机系统可以充分利用 SOFC 的尾气余热,将系统的发电效率提高到 62.3%。

表 2 SOFC-GT 混合动力系统设计点参数
Tab. 2 Parameters of SOFC-GT hybrid system at design point

节点	温度/K	压力/MPa	流量/(kg/s)
1	288	0.101	0.31
2	430	0.323	0.31
3	756.5	0.322	0.31
4	1023	0.321	0.31
5	1210	0.319	0.31
6	1430	0.316	0.32
7	1173	0.315	0.32
8	792.8	0.102	0.32
9	466.3	0.101	0.32
10	298	2.4	0.0048
11	298	0.386	0.0048
12	298	0.38	0.0048
13	1023	0.321	0.01
14	1223	0.319	0.01
15	1223	0.319	0.01

表 3 SOFC-GT 混合动力系统设计点性能
Tab. 3 Performance of SOFC-GT hybrid system at design point

部件	参数	数值
燃料电池	燃料利用率	0.85
	电流密度/(A/m ²)	2620
	工作电压/V	0.638
	工作温度/K	1 273
	输出功率/kW	114
	发电效率/%	49.4
燃气轮机	燃机转速/(r/min)	96 000
	压气机压比/	3.2
	输出功率/kW	30
其他设备	换热器 1 换热效率	0.95
	换热器 2 换热效率	0.37
	交直流转换效率/%	95
系统	输出功率/W	144k
	效率/%	62.3

2.2 混合动力系统安全运行区域分析

SOFC-GT 混合动力系统的安全运行区域与其主要部件的安全运行条件相关。主要考虑的因素有部件材料的耐高温特性、燃气轮机的转速可调节范围、压气机喘振边界、以及 SOFC 的工作温度范围等。大部分文献在进行系统变工况性能分析时只考虑了其中部分约束条件^[12-13]。本文综合考虑了系统中所有部件的安全工作条件，对系统进行了详细的变工况计算，得出燃料流量和空气流量的调节范围。主要约束条件如表 4 所示。

系统的安全运行区域如图 4 所示。当系统燃料流量相对于空气流量增加时，燃料电池、燃烧室以及透平入口温度会相应提高，直至超过部件材料的最高工作温度。同时，在实际应用中，过高的电池工作温度也会加速电池的老化^[14-15]。当燃料流量相对于空气流量减小导致 SOFC 电池堆工作温度降低时，SOFC 的性能会随之下降。当 SOFC 电池堆工作温度降至其最低工作温度以下时，燃料电池将无法正常工作。

法正常工作。

表 4 混合动力系统安全运行的约束条件

Tab. 4 Limitations for system safe operation

参数	范围
透平入口温度	<1273K
燃烧室工作温度	<1573K
换热器工作温度	<1573K
燃气轮机喘振裕度	<0.15
SOFC 工作温度 T_s	1 023 K < T_s < 1 373 K
燃气轮机相对转速 N	0.47 < N < 1.12

系统的安全运行区域如图 4 所示。当系统燃料流量相对于空气流量增加时，燃料电池、燃烧室以及透平入口温度会相应提高，直至超过部件材料的最高工作温度。同时，在实际应用中，过高的电池工作温度也会加速电池的老化^[14-15]。当燃料流量相对于空气流量减小导致 SOFC 电池堆工作温度降低时，SOFC 的性能会随之下降。当 SOFC 电池堆工作温度降至其最低工作温度以下时，燃料电池将无法正常工作。

此外系统安全运行还需要考虑燃气轮机的转速调节范围。系统的调节只可以在其安全运行区域内进行。

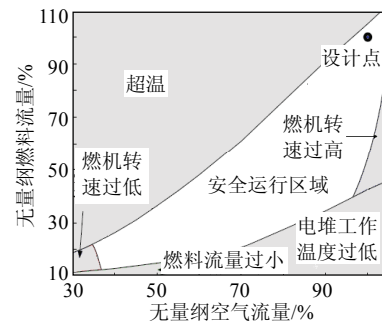


图 4 SOFC-GT 混合动力系统安全运行区域

Fig.4 Safe regimes of hybrid system

2.3 不同控制策略下系统变工况性能分析

文献[16-17]对燃料电池-燃气轮机变工况调节策略进行了分析，主要方法包括调节燃料电池燃料利用率、调节燃料电池的工作温度、调节压气机进气导向叶片调节空气流量、调节燃气轮机转速以调节空气流量、直接调节燃料流量等。

结合本文所建立的混合动力系统进行分析。当燃料利用率下降时，SOFC 尾气中燃料浓度升高会使燃烧室和透平产生过热和热冲击的问题，同时会降低 SOFC 和系统的发电效率。燃料利用率过高，则会导致燃料电池阳极的氧化。通常对于一个固体的燃料电池，燃料利用率的调节范围很窄，所以不在本文的考虑范围之内，在本文的计算中，燃料利用率固定为 85%。考虑到 SOFC 材料的特性，通常

SOFC 温度的调节速度不能超过 5K/min 以免产生较大的热应力导致电池堆损坏，所以在实际应用中，通过调节 SOFC 电池堆工作温度来调节输出功率也是不容易实现的。

在本文中，主要通过调节空气流量和燃料流量来进行系统控制。由于压气机的进气导向叶片通常应用于重型燃气轮机，而 SOFC-GT 混合动力系统通常使用的均为微型燃气轮机，并没有进气导向叶片。所以本文在进行空气流量的控制时只考虑通过调节燃气轮机的转速来实现。

综上所述，针对上文建立的混合动力系统的控制方式如图 5 所示，主要包括：

Case1 空气流量保持不变，降低燃料流量；

Case2 降低燃料流量，保持 SOFC 电池堆工作温度不变，降低燃气轮机转速减小空气流量；

Case3 保持燃空比不变的情况下调节燃料流量和空气流量。

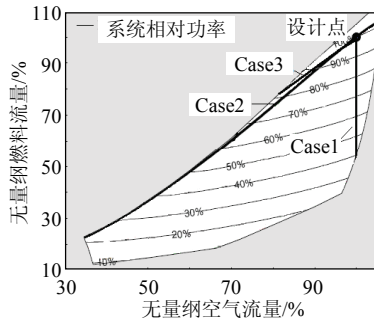


图 5 SOFC-GT 混合动力系统控制策略

Fig.5 Control methods of SOFC-GT hybrid system

图 6 为不同控制策略下，SOFC-GT 混合动力系统的燃料流量和空气流量。为了降低系统的输出功率，在所有的控制策略下，系统的燃料流量都必须有所减小，空气流量则根据不同的控制策略通过调整燃气轮机的转速自动调节。Case2 和 Case3 的燃料流量下降幅度几乎一致，而 Case1 的燃料流量则相对下降较慢。

不同控制策略下 SOFC 电池堆的工作温度如图 7 所示。在 Case1 中，由于燃料流量下降并且空气流量保持不变，电流密度跟随燃料流量下降，反应热减少，而空气流量不变，空气流动带出 SOFC 的热量相对下降有限，导致了 SOFC 的工作温度下降。与此相反，在 Case3 中，由于燃空比保持不变，SOFC 反应热减少的同时，空气传导带走的热量也同时减少，模型计算结果显示，在部分负荷情况下，SOFC 的工作温度在 80% 工况下反而快速上升近 100 K。对于 Case2，根据控制策略，SOFC 工作温度保持

不变。

SOFC 的工作温度和燃料流量直接影响其性能。图 8 为 SOFC 在非设计工况时电压和电流密度的变化。对于 Case1，虽然电流密度的下降减少了欧姆极化损失，但是由于工作温度快速下降导致活化极化损失和浓差极化损失快速增加，SOFC 的输出电压有所降低。在 Case2 中，SOFC 的工作温度保持不变，电流密度随燃料流量下降减少了欧姆极化损失，Case2 中 SOFC 的输出电压在部分负荷时反而略有增加。在 Case3 中，由于电池堆工作温度的升高和电流密度的下降，SOFC 的各种极化损失都有所降低，其输出电压相对 Case2 有明显快速的升高。

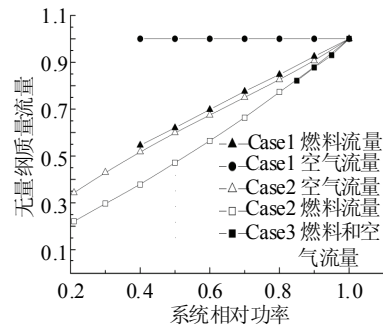


图 6 系统的燃料流量和空气流量

Fig. 6 Fuel and air flow rate of hybrid system

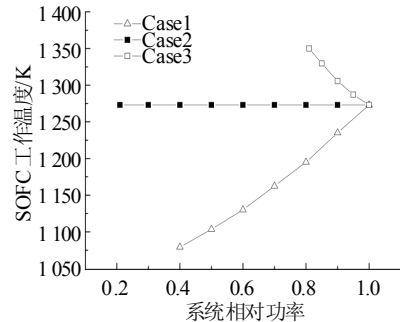


图 7 SOFC 电池堆工作温度

Fig. 7 SOFC stack operating temperature

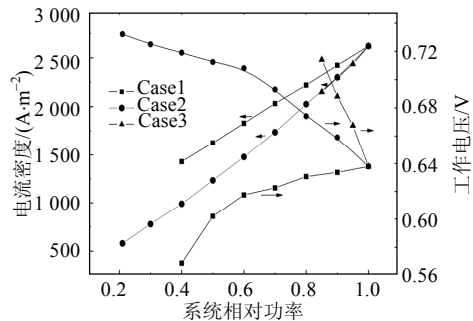


图 8 SOFC 的电流密度和工作电压

Fig. 8 Current density and cell voltage of SOFC stack

透平初温是影响燃气轮机性能的重要参数之一。图 9 为不同控制策略下，透平初温在部分负荷时的变化情况。Case1 中 TIT 下降最快，这是由于

SOFC 工作温度的降低导致了燃烧室入口温度的降低，同时燃空比的快速下降也降低了 SOFC 排气中燃料的浓度，使得燃烧室升温有所下降。与此相反，在 Case3 中，由于 SOFC 工作温度的提高，同时燃空比保持不变，TIT 在部分负荷是有明显的提高。在 Case2 中，SOFC 工作温度保持不变，但是燃料流量相对于空气流量下降较快，燃空比降低，燃烧室升温减少，TIT 也有一定程度的下降。

图 10 为部分负荷时，SOFC 和 GT 输出功在不同控制策略下的变化情况。GT 的输出功主要由空气流量和透平初温决定，SOFC 的输出功则是电流密度和输出电压的函数。在 Case1 中，空气流量不变，TIT 的下降导致了 GT 输出功的减少，而 SOFC 电流密度的下降和极化损失的增加也减少了 SOFC 输出功。对于 Case2，由于 TIT 和燃气流量的同时下降导致了燃机输出功较 Case1 更为快速的降低。虽然 SOFC 的输出电压在部分负荷时有所增加，但是由于电流密度快速下降，SOFC 的输出功在部分负荷时仍缓慢减少。在 Case3 中，TIT 在部分负荷时有明显的上升，但是由于空气流量的快速下降，计算结果显示燃机输出功比 Case1 和 Case2 减少得更为迅速。对于 SOFC，由于电流密度的急速降低，虽然 SOFC 输出电压有所升高，其输出功仍然小幅下降。

图 11 为不同工况下系统效率的变化。在 Case1 中，SOFC 工作温度的降低导致了其性能的恶化并进一步影响了系统的性能，系统效率由设计点的 62.6%快速下降至 40%工况时的 43%。在 Case2 中，系统的效率由设计点的 62.6%小幅增加至 59%工况时的 65.8%，然后在 21%工况时下降到 58.8%。当系统的负荷变化在 59%~100%时，SOFC 的性能由于其工作温度的升高略为增加，而燃气轮机的效率小幅下降，其叠加效果为系统的效率小幅上升，当系统在 59%工况以下工作时，燃气轮机性能迅速恶

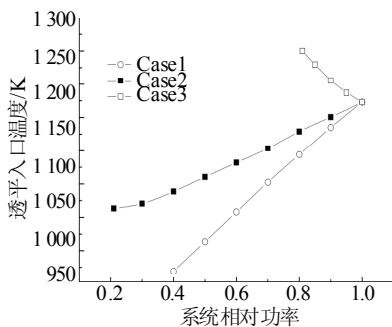


图 9 透平入口温度

Fig. 9 Turbine inlet temperature

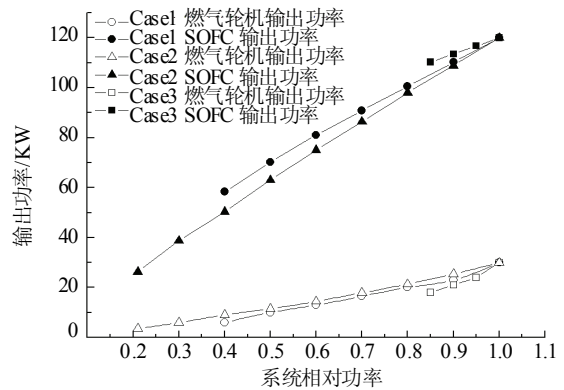


图 10 SOFC 和 GT 的输出功率

Fig. 10 Power output of SOFC stack and gas turbine

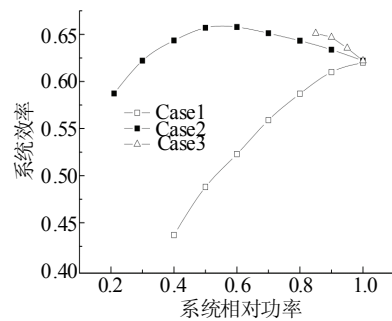


图 11 系统效率

Fig. 11 System efficiency of hybrid system

化，导致了系统效率的降低。在 Case3 中，负荷调节的范围仅为 82%~100%，在这个范围内燃气轮机的性能变化较小，而 SOFC 性能随着工作温度的快速提高有了明显的改善，所以在 82%~100%工况下，系统的效率由设计点的 62.6%随其输出功的减少上升为 85%工况时的 65.1%。

3 结论

本文对 SOFC-GT 混合动力系统的设计点性能和在不同控制策略下非设计工况性能进行了详细的分析。利用西门子-西屋公司的实验数据对 SOFC 数学模型进行了改进，使其能准确地反映 SOFC 实际运行时的性能。利用燃气轮机厂商提供的部件特性曲线进行变工况计算，结果更具有说服力。

根据仿真实验结果，与 SOFC 单独发电时的效率(49.4%)相比，SOFC-GT 混合动力系统可以较大幅度地提高发电效率(62.6%)。在进行变工况性能分析时，首先确定了 SOFC-GT 混合动力系统的安全运行区域。在此区域内，提出了 3 种不同的控制策略。只减少燃料流量(Case1)虽然可以简单地减少系统的输出功，达到控制的目的，但是系统的发电效率会随之快速下降(62.6%~43%)，从而削弱混合动

力系统优越性。同时调节燃料流量和空气流量并保持 SOFC 工作温度不变(Case2)可以使系统在 21%~100%工况内进行安全调节,系统的效率在 59%~65.8%小幅波动。Case3 在降低燃料流量的同时,按相同比例降低空气流量,这种方式在技术上很容易通过软件实现,系统效率也最高(62.6%~65.1%),但是其负荷调节的范围很窄,仅可以在 82%~100%范围内调节。

综上所述,对于本文提出的 SOFC-GT 混合动力系统,在小范围内进行工况调节可以选用 Case3 的控制策略以达到最高的系统效率。当系统需要在较宽的负荷变化范围内工作时,则需要使用 Case2 的控制策略。

参考文献

- [1] Subhash C. High-temperature solid oxide fuel cells fundamentals, design and applications[M]. New York: Elsevier Advanced Technology, 2003: 364-388.
- [2] Grillo O, Magistri L, Massardo A. F. Hybrid systems for distributed power generation based on pressurization and heat recovering of an exiting 100 kW molten carbonate fuel cell[J]. Journal of Power Sources, 2003, 115(2): 252-267.
- [3] 陈启梅,翁一武,朱新坚,等.熔融碳酸盐燃料电池—燃气轮机混合动力系统特性分析[J].中国电机工程学报,2007,27(8): 94-98.
Chen Qimei, Weng Yiwu, Zhu Xinjian, et al. Performance analysis of a hybrid system based on a fuel cell and a gas turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 94-98 (in Chinese).
- [4] Todd B, Young J B. Thermodynamic and transport properties of gases for use in solid oxide fuel cell modeling[J]. Journal of Power Sources, 2002, 110(1): 186-200.
- [5] Costamagna P, Magistri L, Massardo A F. Design and part load performance of a hybrid system based on a solid oxide fuel cell reactor and a micro gas turbine[J]. Journal of Power Sources, 2001, 96(1): 352-368.
- [6] 刘爱骥,翁一武.不同控制方式对熔融碳酸盐燃料电池/微型燃气轮机混合动力系统运行特性的影响[J].中国电机工程学报,2009,29(35): 41-47.
Liu Aiguo, Weng Yiwu. Effect of various control methods on the molten carbonate fuel cell/micro-gas turbine hybrid system performances[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(35): 41-47 (in Chinese).
- [7] Yi Yaofan. The impact of fuel peoperties on sofc-based power systems[D]. California: University of California, 2006.
- [8] Rao A D, Samuelsen G S, Analysis strategies for tubular SOFC based hybrid system[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, 2002(124): 503-509.
- [9] Yi Y. Simulation of a 220 kW Hybrid sofc Hybrid sofc gas turbine system and data comparison[C]//Eighth International Symposium on Solid Oxide Fuel Cell (SOFC-VIII), Pairs, France, 2002.
- [10] 张会生,刘永文,苏明,等.燃气轮机转速调节过程的仿真研究[J].计算机仿真,2002,19(1): 79-81.
Zhang Huisheng, Liu Yongwen, Su Ming, et al. Simulation study on the speed regulation of gas turbine[J]. Computer Simulation, 2002, 19(1): 79-81(in Chinese).
- [11] Zhang H S, Weng S L, Su M. Dynamic modeling and simulation of distributed parameter heat exchanger[C]//Processing of Me Tubro Exposition, Nevada, 2005.
- [12] Park S K, Kim T S, Comparison between pressurized design and ambient pressure design of hybrid solid oxide fuel cell-gas turbine systems[J]. Journal of Power Sources, 2006, 163(2): 490-499.
- [13] Jens Palsson, Azra Selimovic, Lars Sjunnesson. Combined solid oxide fuel cell and gas turbine systems for efficient power and heat generation[J]. Journal of Power Sources, 2000, 86(1): 442-448.
- [14] Singhal S C. Advances in solid oxide fuel cell technology[J]. Solid State Ionics, 2000, 135(1): 305-313.
- [15] Liu Hui-Chung, Chien-Hsiung Lee, Shiu Yao-Hua, et al. Performance simulation for an anode-supported SOFC using Star-CD code [J]. Journal of Power sources, 2007, 167(1): 406-412.
- [16] Lai Wei-Hsiang, Chi-An Hsiao, Chien Hsiung Lee, et al. Experimental simulation on the integration of solid oxide fuel cell and micro-turbine generation system[J]. Journal of Power Sources, 2007, 171(2): 130-139.
- [17] Yang J S, Sohn J L, Ro S T. Performance characteristics of a solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system with various part-load control models[J]. Journal of Power Sources, 2007, 166(1): 155-164.



李杨

收稿日期: 2010-04-29。

作者简介:

李杨(1982),男,博士研究生,主要研究方向为低热值燃料发电技术及燃料电池-燃气轮机混合动力系统的实验与仿真研究, liyang_w@sjtu.edu.cn;

翁一武(1962),男,博士,教授,主要研究方向为先进发电系统及分布式供能。

(责任编辑 车德竞)