文章编号：1000-8608(2013)05-0653-06

SOFC/MGT 混合发电系统变工况控制模式及性能分析

王 巍*， 李 贺， 王晓放

（大连理工大学 能源与动力学院，辽宁 大连 116024）

摘要： 以 220 kW 的 SOFC/MGT 混合发电系统为研究对象，建立了相应的数学模型，分析了不同控制模式对混合发电系统变工况性能的影响. 结果表明：对于 220 kW 的 SOFC/MGT 混合发电系统，在单独 SOFC 燃料控制模式(Case 1)下，系统的稳定负荷必须大于 70%；在变转速控制模式(Case 2)下，系统的稳定负荷必须大于 77%；而在定转速恒定电池温度的控制模式(Case 3)下，系统最低负荷可以低到 59%. 在相同负荷条件下，Case 2 对应的系统效率最高，Case 1 对应的系统效率最低. 为保证混合发电系统的高效率，并扩大混合发电系统的运行范围，提出了一种新的控制模式，可以使得混合发电系统最低负荷达到 45%，而系统效率始终保持在 56.4%以上.

关键词： SOFC/MGT 混合发电系统；控制模式；变工况性能；运行范围；系统效率

中图分类号： TM911 **文献标志码：** A

0 引 言

固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是把化学能直接转化为电能的装置，与传统发电方式相比，其高效、可靠和良好的环境效益正受到越来越多的关注[1]. 而其与微型燃气轮机(micro gas turbine, MGT)组成的混合发电系统既可以提高 SOFC 反应压力，又可以对 SOFC 高品质排气进行余热利用. 然而，SOFC 与 MGT 在变工况情况下都是非线性很强的装置，因此，开展不同控制模式及其对系统性能影响的研究，提出最佳控制模式是非常必要的.

目前，国内外研究机构提出的 SOFC/MGT 混合发电系统变工况控制方式主要有单独 SOFC 燃料流量控制、保持燃空比不变以及变转速/可调导叶开度控制等[2-5]. Yang 等[3]的研究发现变转速调节方式效率最高，但其研究缺少了压气机喘振对运行范围的影响分析. 李杨等[5]提出固定燃空比调节方法可使系统在 82%～100%工况范围获得最高效率，但其系统的计算模型未考虑变工况下压气机与涡轮压比、流量的匹配. 本文在以上研究成果的基础上，基于管式 SOFC 的结构特征和材料特性，考虑 3 种极化损失，并结合压气机、换热器和涡轮装置的变工况特性，压气机喘振，压气机与涡轮压比、流量、转速的匹配，建立 220 kW SOFC/MGT 混合发电系统模型，分析单独 SOFC 燃料控制模式(Case 1)、变转速控制模式(Case 2)系统的性能，提出定转速恒定电池温度的控制模式(Case 3)以及 Case 2 和 Case 3 相结合的控制模式(Case 4)，意在扩大系统的运行范围，提高效率，并对系统性能进行详细分析.

1 系统介绍及数学模型

本文研究对象为西门子-西屋 220 kW SOFC/MGT 混合发电系统，其流程如图 1 所示. 天然气与阳极出口部分气体同时进入喷射器，在预重整器中完成燃料的部分重整，碳氢化合物及一氧化碳将继续在阳极完成重整和置换反应，产生的氢气与阴极的氧在电解质表面发生电化学反应. 分离器的设置保证了进行重整反应和置换反应前蒸汽与碳的比例为 2.5，未反应的燃料和空气在燃烧室完全燃烧，产生的高温燃气加热进入阴极的空气后供给燃机.

在内部重整结构的电池中，碳氢化合物的重整和置换反应为

收稿日期： 2012-02-17； **修回日期：** 2013-07-23.
基金项目： 辽宁省自然科学基金资助项目(20092155).
作者简介： 王 巍*(1967-)，女，副教授，E-mail：wangw@dlut.edu.cn.

$$C_nH_{2n+2}+nH_2O\Leftrightarrow(2n+1)H_2+nCO \quad (1)$$

$$CO+H_2O\Leftrightarrow CO_2+H_2 \quad (2)$$

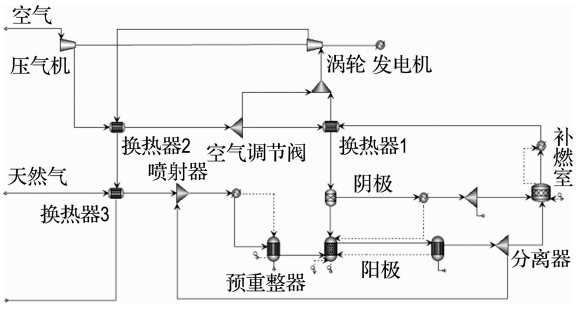

图 1 SOFC/MGT 混合发电系统流程图

Fig. 1 Flow chart of SOFC/MGT hybrid power system

碳氢化合物和一氧化碳在阳极直接氧化的驱动力远远低于 H_2 的氧化驱动力，因此，在电化学反应方面，只考虑氢氧电化学反应. 电压的计算包括能斯特电动势、欧姆极化、浓差极化、活化极化四部分.

$$V=V_{\text{Nernst}}-V_{\text{Ohm}}-V_{\text{act}}-V_{\text{conc}} \quad (3)$$

式中：V 为电压；V_{Nernst} 为平均能斯特电动势；下标 Ohm、act、conc 分别表示欧姆、活化、浓差.

平均能斯特电动势采用文献[6-7]计算方法. 而欧姆极化采取划分电网孔来计算其等效电阻. 由于与电池长度方向垂直的截面左右对称，计算时只计算半个电池的电阻，将单个截面分成如图 2 的计算区域. 最终，利用基尔霍夫定律计算电池等效电阻.

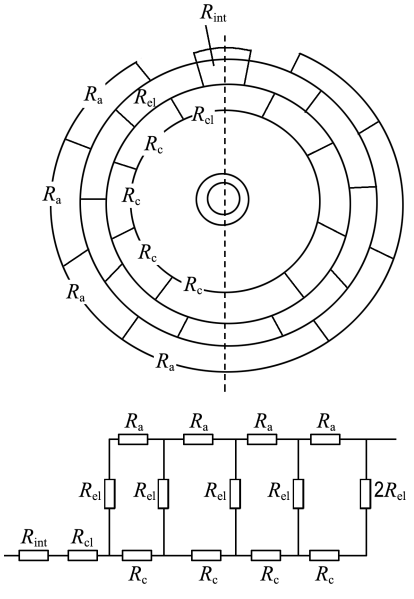

图 2 SOFC 欧姆电阻的分区及等效电路图

Fig. 2 The partition of SOFC ohmic resistance and equivalent electric circuit

图中，R_{el} 为电解质电阻，R_a 为阳极电阻，R_c、R_{cl} 为阴极电阻，R_{int} 为连接件电阻.

最终的欧姆极化用欧姆定律来计算：

$$V_{\text{Ohm}}=R_{\text{eq}}\cdot i\cdot S \quad (4)$$

式中：R_{eq} 为等效电阻，Ω；i 为电流密度，A/m^2；S 为单电池面积，m^2.

活化极化由 Butler-Volmer[8] 方程来计算：

$$i=i_0\left\{\exp\left(\frac{\alpha n_e FV_{\text{act}}}{RT}\right)-\exp\left[\frac{-(1-\alpha)n_e FV_{\text{act}}}{RT}\right]\right\} \quad (5)$$

式中：α 为传输系数；n_e 为化学反应转移电子数；F 为法拉第常数；R 为气体常数；T 为热力学温度，K；i_0 为交换电流密度，A/m^2.

在设计条件下，由于浓差极化不大而往往在电压计算中被忽略. 然而，本文针对混合发电系统变负荷特性研究，对该部分内容进行了详细的计算[8].

$$V_{\text{conc}}=V_{\text{conc,a}}+V_{\text{conc,c}} \quad (6)$$

$$V_{\text{conc,a}}=\frac{RT}{2F}\ln\left(\frac{1-i/i_{\text{l,H}_2}}{1-i/i_{\text{l,H}_2\text{O}}}\right) \quad (7)$$

$$V_{\text{conc,c}}=\frac{RT}{4F}\ln\left(\frac{1}{1-i/i_{\text{l,O}_2}}\right) \quad (8)$$

式中：下标 a、c 分别代表阳极和阴极；$i_{\text{l,H}_2}$、$i_{\text{l,H}_2\text{O}}$、$i_{\text{l,O}_2}$ 分别为氢气、水蒸气、氧气通过电极的最大极限电流密度，A/m^2.

电池系统的输出功率为

$$W_{\text{SOFC}}=V\cdot i\cdot S\cdot m\cdot\eta_{\text{dc/ac}} \quad (9)$$

式中：W_{SOFC} 为 SOFC 输出功率，kW；m 为电池个数；$\eta_{\text{dc/ac}}$ 为直流转换为交流的效率.

燃机的功率为

$$W_{\text{MGT}}=(W_{\text{t}}\cdot\eta_{\text{m}}-W_{\text{c}})\cdot\eta_{\text{e}} \quad (10)$$

式中：W_{MGT} 为微型燃机输出功率，kW；W_{t}、W_{c} 分别为涡轮输出功率和压气机消耗功率，kW；η_{m}、η_{e} 分别为燃机机械效率、发电机效率.

SOFC/MGT 混合发电系统的功率和效率分别为

$$W_{\text{HS}}=W_{\text{MGT}}+W_{\text{SOFC}} \quad (11)$$

$$\eta_{\text{HS}}=W_{\text{HS}}/(n_{\text{f}}\times Q_{\text{dw}}) \quad (12)$$

式中：W_{HS} 为混合发电系统输出功率，kW；η_{HS} 为混合发电系统效率；n_{f} 为燃料流量；Q_{dw} 为燃料低位发热量，kJ/kg.

在燃机变工况运行中，涡轮和压气机部件应达到运行的平衡，即实现压比、流量和转速的协调匹配，满足式(13) ～ (16).

对于压气机，在变工况时，压比和效率可表示如下[9]：

$$\dot{\pi}_c = c_1\,\dot{n}_c\,\dot{G}_c^2 + c_2\,\dot{n}_c\,\dot{G}_c + c_3\,\dot{n}_c \quad (13)$$

$$\dot{\eta}_c = [1 - c_4(1-\dot{n}_c)^2](\dot{n}_c/\dot{G}_c)(2-\dot{n}_c/\dot{G}_c) \quad (14)$$

对于涡轮，在变工况时，流量和效率可表示如下[9]：

$$G_t/G_{t0} = \alpha\sqrt{T_{30}/T_3}\sqrt{(\pi_t^2-1)/(\pi_{t0}^2-1)} \quad (15)$$

$$\dot{\eta}_t = [1 - t_4(1-\dot{n}_t)^2](\dot{n}_t/\dot{G}_t)(2-\dot{n}_t/\dot{G}_t) \quad (16)$$

式中：π 为压比（膨胀比）；n 为折合转速；G 为折合流量；η 为压气机（涡轮）效率；c、α 为系数；T_3 为涡轮进口温度；下标 c、t、0 分别代表压气机、涡轮、额定状态；变量上标 · 为比折合参数.

为避免压气机在变转速调节过程中出现喘振，图 3 给出了根据设计点参数估算的压气机性能曲线. 其中，最小流量限采用文献[10]的估算方法，而最大流量限的估算参考文献[11].

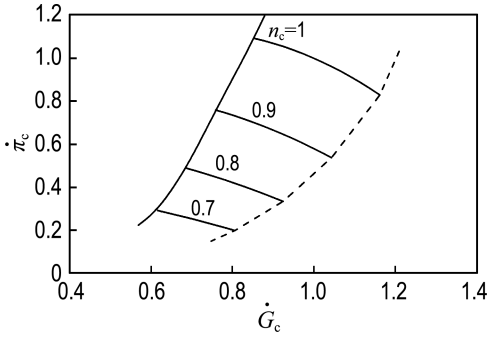

图 3　压气机性能曲线

Fig. 3　Compressor performance curves

在换热器变工况计算中，针对 SOFC 内部圆管逆流换热[12]，由于结构的特殊性，变工况计算时假定传热系数恒定. 而燃机出口换热器由于采用了紧凑型换热器，采用如下方法计算[9]：

$$\sigma = \sigma_0/[\sigma_0 + (1-\sigma_0)(G/G_0)^{0.2}] \quad (17)$$

式中：σ 为回热度.

2　控制模式及结果分析

2.1　额定工况下分析结果

表 1 为额定状态下混合发电系统初始参数[2,13]，燃料成分为 CH_4 81.3%，C_2H_6 2.9%，C_3H_8 0.4%，C_4H_{10} 0.2%，N_2 14.3%，CO 0.9%[14]，SOFC 结构参数见文献[15].

表 1　额定状态初始参数

Tab. 1　Initial parameters under design-point conditions

参数	数值
大气状态/(℃，Pa)	15，101 325
SOFC 输出功率/kW	187
SOFC 反应温度/℃	889
SOFC 数量/根	1 152
水碳比	2.5
燃料利用率	0.85
直流转交流效率/%	92
燃料温度/℃	15
SOFC 压力损失/%	2
SOFC 热量损失/%	2
补燃室效率/%	98
换热器压力损失/%	2
压气机压比	2.9
压气机等熵效率/%	78
涡轮进口温度/℃	840
涡轮等熵效率/%	82
换热器回热度	0.88
燃机机械效率/%	96
发电机效率/%	95

经过计算，设计点性能与文献[13]提供的实验数据对比分析结果见表 2，其中最大误差 1.9%.

2.2　混合发电系统控制模式及性能分析

燃机本身在设计点会表现出良好的动力学特性，变工况将带来性能的显著下降，而压气机可能出现不稳定工况. 燃料电池本身在变工况下，可能出现由于电池温度变化所带来的部件热膨胀和热应力、积碳和阳极的阻塞，补燃室内气体在工况突然变化时易引起燃烧室内气体倒流进入阳极，引起爆炸等，这些必将造成燃料电池性能的下降以及部件的损坏. 因此，对 SOFC/MGT 的变工况范围提出了一定的条件限制.

在单独对 SOFC 进行变工况分析时，计算发现：最佳燃料利用率变化范围不大. 若维持额定值时，SOFC 在 80%～100%工况范围内工作，电池效率相对最佳值仅仅下降了 0.22%. 考虑到燃料利用率的变化也会对电池本身产生热冲击，保持电池系统燃料利用率不变对电池系统是有益的.

表 2　额定状态混合发电系统分析结果

Tab. 2　The simulation results of hybrid power system under design-point conditions

数据来源	电压/V	电流/A	空气流量/(kg·s^{-1})	燃机功率/kW	系统功率/kW	系统效率/%
文献数据	0.604	267	0.590	47.0	220.0	57.00
模拟数据	0.610	268	0.586	47.9	219.9	57.75

在变工况计算过程中，设定如下约束条件：

(1)反应温度不能低于 700 ℃[16]；

(2)压气机不能喘振；

(3)入口涡轮温度不超过额定温度 840 ℃；

(4)电池系统的燃料利用率、水碳比保持不变.

在以上约束条件下，本文考虑 3 种不同的调节方案：

Case 1　控制燃料流量，燃机转速保持不变.

Case 2　控制燃料流量，采用变转速方式调节压气机进口空气流量，保证燃料电池反应温度不变.

Case 3　控制燃料流量，燃机转速保持不变，空气进入 SOFC 前采用阀门调节保证燃料电池反应温度不变，多余空气与 SOFC 排气混合进入涡轮.

计算结果显示：对于 Case 1，当输出功率降低到 70% 额定功率时，电池反应温度已降至 700 ℃. 对于 Case 2，当输出功率降低到 77% 额定功率时，压气机运行已接近喘振线. 对于 Case 3，当输出功率降低到额定功率的 59% 时，燃机的输出功率已降至 0 kW.

由图 4 可以看出，随着混合发电系统负荷的降低，Case 2 模式对应的燃料流量下降最快，其次是 Case 3、Case 1. 同时，针对不同的控制模式，空气流量随负荷的变化是不同的. Case 1 和 Case 3 对应的空气流量随负荷降低是增加的，主要是由于随着系统负荷的降低，涡轮入口温度降低，根据式(15)，相应的涡轮入口折合流量要增加. 因此，根据变工况特性，要在转速不变的前提下，使压气机和涡轮达到新的平衡，势必要增加空气流量，进而满足涡轮流量的要求，Yang 等[3]的研究也获得了相同的结论.

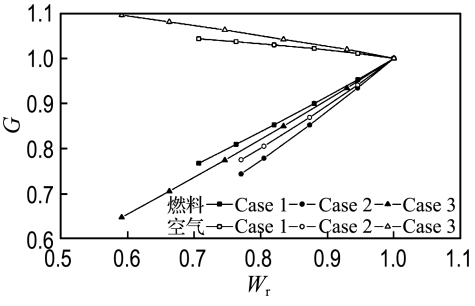

图 4　不同调节模式的燃料流量和空气流量

Fig. 4　Fuel and air flow rate in different cases

图 5 显示，在 Case 1 模式中，随着负荷减小，天然气流量降低，而空气流量增加，SOFC 的反应温度降低，直接导致涡轮进口温度降低. 在 Case 2 模式中，SOFC 的反应温度保持不变，经计算涡轮进口温度略有下降. 而对于 Case 3 模式，由于采用空气调节阀，虽然 SOFC 的反应温度保持不变，但多余的空气在涡轮前与燃料电池排出的高温气体混合，导致涡轮进口温度降低较快.

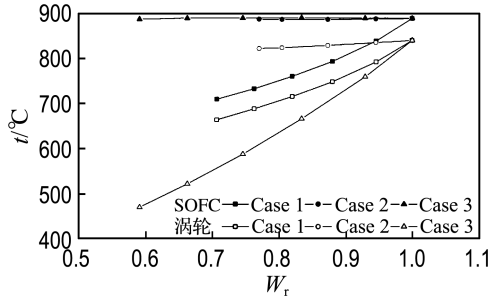

图 5　不同调节模式的 SOFC 反应温度和涡轮进口温度

Fig. 5　SOFC operating temperature and turbine inlet temperature in different cases

图 6 计算结果显示，在 Case 3 模式下，W_{MGT}/W_{SOFC} 下降最快. 主要原因是为保证 SOFC 的反应温度不变，在转速不变的情况下，多余的空气与电池高温排气掺混降低了涡轮入口温度，同时，MGT 效率降低剧烈，致使涡轮做功减少，W_{MGT}/W_{SOFC} 降低.

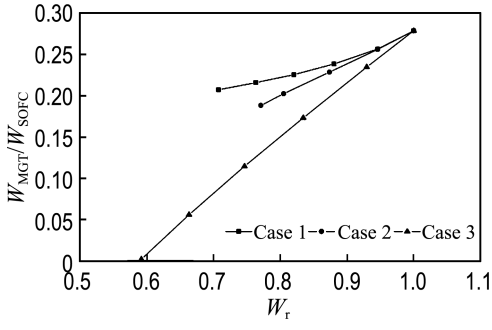

图 6　不同调节模式的 W_{MGT}/W_{SOFC}

Fig. 6　The ratio of MGT power to SOFC power in different cases

图 7 对比分析显示 Case 2 和 Case 3 的单电池电压皆随相对输出功率降低而增大，这是由于反应温度不变的情况下，相对输出功率降低导致电流降低，欧姆极化降低，电压增高. 而对于 Case 1，由于反应温度降低，能斯特电动势增大，但温度降低使电阻增大，最终电压的变化为先增大后减小.

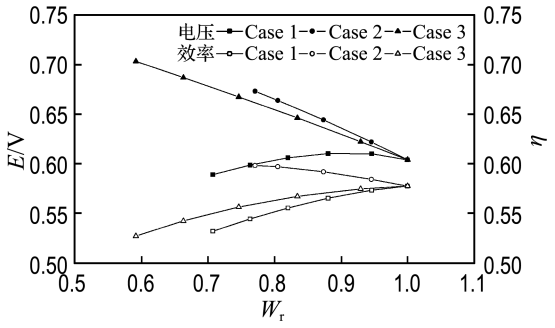

图 7　不同调节模式的单电池电压与系统效率

Fig. 7　Single cell voltage and system efficiency in different cases

在系统效率方面，Case 2 对应的混合发电系统效率最高，且随着相对输出功率的降低，系统效率呈上升趋势，这是由于燃机采用变转速调节方式使压气机与涡轮保持较高效率，且 SOFC 电压随着功率降低而升高，系统效率总体升高. Komatsu 等[4]的研究也得出了相同的结论. 然而，Case 2 的运行范围最小.

因此，为了保证混合发电系统的效率最高，同时扩大混合发电系统的变工况运行范围，提出了新的控制模式 Case 4，即当混合发电系统在 77%以上负荷运行时，采用 Case 2 模式的系统调节方法，而当继续降低负荷时，采用 Case 3 的控制模式.

采用 Case 4 控制策略调节系统负荷，分析结果（见图 8，纵坐标为归一化参数）显示：随着相对输出功率的降低，燃料量减少，空气量先减少后增加，W_{MGT}/W_{SOFC} 始终呈下降趋势，转速降低至额定转速 91%后保持不变. 混合发电系统可以扩大至相对输出功率的 45%～100%的运行范围，在额定和最小负荷运行工况下，混合发电系统的效率分别为 57.75%和 56.40%，变工况条件下系统效率仅下降了 1.35%，充分显示了混合发电系统变工况良好的运行性能.

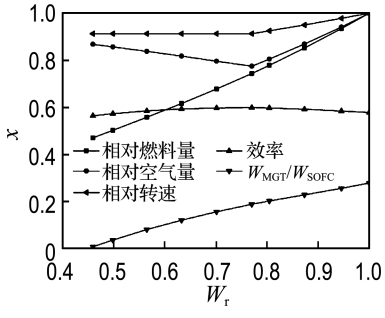

图 8　Case 4 对应的混合系统变工况性能

Fig. 8　The hybrid system part-load performance for Case 4

3　结　语

本文以 220 kW SOFC/MGT 混合发电系统为研究对象，建立了燃料电池、燃气轮机以及换热器等所组成的混合发电系统数学模型，分析了不同控制模式下系统的变工况性能，并提出了新的控制策略.

变工况运行时，采用单独 SOFC 燃料控制模式（Case 1）时，系统的负荷调节范围为 70%～100%，达到最低负荷时，SOFC 反应温度降至 700 ℃，混合发电系统效率降至 53.2%；变转速控制模式（Case 2）对应的系统的负荷调节范围为 77%～100%，达到最低负荷时，压气机运行已达到喘振点，然而，混合发电系统效率提高至 59.8%；定转速恒定电池温度的控制模式（Case 3）对应的混合发电系统的负荷调节范围为 59%～100%，最低负荷时，MGT 的输出功率已降至 0 kW，系统效率降至 52.7%. 对比 3 种控制模式，在相同的负荷输出条件下，Case 2 对应的混合发电系统效率最高，Case 1 对应的混合发电系统效率最低.

为了保证混合发电系统安全、稳定、高效运行，并提高发电系统的负荷调节范围，提出了新的控制模式 Case 4. 在该模式下，混合发电系统负荷调节范围扩大到 45%～100%，在额定和最小负荷运行工况下，对应的混合发电系统的效率分别为 56.40%和 57.75%，变工况系统效率仅下降了 1.35%，显示了混合发电系统优良的变工况性能.

参考文献：

[1] 贾俊熙，姜任秋，沈胜强，等. 管式固体氧化物燃料电池非稳态数值研究[J]. 中国电机工程学报，2007，**27**(20)：91-98.
JIA Jun-xi，JIANG Ren-qiu，SHEN Sheng-qiang，*et al*. Transient numerical simulation for a tubular solid oxide fuel cell [J]. **Proceedings of the CSEE**，2007，**27**(20)：91-98. (in Chinese)

[2] Stiller C，Thorud B，Bolland O，*et al*. Control strategy for a solid oxide fuel cell and gas turbine hybrid system [J]. **Journal of Power Sources**，2006，**158**(1)：303-315.

[3] 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 modes [J]. **Journal of Power Sources**，2007，**166**(1)：155-164.

[4] Komatsu Y, Kimijima S, Szmyd J S. Performance analysis for the part-load operation of a solid oxide fuel cell-micro gas turbine hybrid system [J]. **Energy**, 2010, **35**(2):982-988.

[5] 李 杨,翁一武. 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[J]. 中国电机工程学报, 2010, **30**(35):94-100.
LI Yang, WENG Yi-wu. Performance study and control strategies of temperature solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system [J]. **Proceedings of the CSEE**, 2010, **30**(35):94-100. (in Chinese)

[6] Campanari S, Iora P. Definition and sensitivity analysis of a finite volume SOFC model for a tubular cell geometry [J]. **Journal of Power Sources**, 2004, **132**(1-2):113-126.

[7] Milewski J, Swirski K, Santarelli M, *et al*. **Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling** [M]. London:Springer, 2011.

[8] 薛利超. 基于120 kW固体氧化物燃料电池与微型燃机复合系统性能研究[D]. 大连:大连理工大学, 2007.
XUE Li-chao. Performance researches of a hybrid system based on 120 kW solid oxide fuel cell and micro gas turbine [D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2007. (in Chinese)

[9] WANG Wei, CAI Rui-xian, ZHANG Na. General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2004, **24**(13):1851-1863.

[10] 张 娜,林汝谋,蔡睿贤. 压气机特性通用数学表达式[J]. 工程热物理学报, 1996, **17**(1):21-24.
ZHANG Na, LIN Ru-mou, CAI Rui-xian. General formulas for axial compressor performance estimation [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 1996, **17**(1):21-24. (in Chinese)

[11] 黄钟岳,王晓放. 透平式压缩机[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
HUANG Zhong-yue, WANG Xiao-fang. **Turbine Compressor** [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004. (in Chinese)

[12] Milewski J, Miller A, Salacinski J. Off-design analysis of SOFC hybrid system [J]. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2007, **32**(6):687-698.

[13] George R A. Status of tubular SOFC field unit demonstrations [J]. **Journal of Power Sources**, 2000, **86**(1-2):134-139.

[14] Zhang W, Croiset E, Douglas P L, *et al*. Simulation of a tubular solid oxide fuel cell stack using AspenPlus™ unit operation models [J]. **Energy Conversion and Management**, 2005, **46**(2):181-196.

[15] George R A, Bessette N F. Reducing the manufacturing cost of tubular SOFC technology [J]. **Journal of Power Sources**, 1998, **71**(1-2):131-137.

[16] USDE. **Fuel Cell Handbook** [M]. 7th ed. Morgantown:US Department of Energy, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Laboratory, 2004.

Analyses of part-load control modes and their performance of a SOFC/MGT hybrid power system

WANG Wei*, LI He, WANG Xiao-fang

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Based on the 220 kW solid oxide fuel cell / micro gas turbine (SOFC/MGT) hybrid power system existing, the relevant mathematical models were established and the study of control modes on part-load performance of hybrid power system was carried out. The simulation results indicate that the 220 kW SOFC/MGT hybrid power system adjustable range must be more than 70% of the design output power for the SOFC fuel only control mode (Case 1), and more than 77% of the design output power for the variable rotational speed control mode (Case 2), and more than 59% of the design output power for the constant rotational speed and SOFC temperature control mode (Case 3). There is the highest efficiency for Case 2, but the lowest one for Case 1 at the same load. To extend the hybrid power system operation range and ensure the system efficiency and safety, a new control mode is proposed in which the hybrid power system may operate at lowest load of 45% of design output power and keep efficiency at above 56.4%.

Key words: solid oxide fuel cell / micro gas turbine (SOFC/MGT) hybrid power system; control mode; part-load performance; operation range; system efficiency