

Calculating Variable Condition Performance of Micro-Gas Turbine-Fuel Cell System by PNVMECA Software

Baihui Xu¹, Guowei Yang^{2*}, Qianchao Liang², Qianlong Huang²

¹Naval Base of Shanghai, Shanghai

²Naval University of Engineering, Wuhan Hubei

Email: *13387508398@163.com

Received: Jan. 26th, 2019; accepted: Feb. 6th, 2019; published: Feb. 20th, 2019

Abstract

In this paper, a special software PNVMECA developed by the author is used to study the steady-state performance and dynamic response process of the system when the current and fuel flow change, and a suitable off-design control strategy is designed. The results show that the matching operation between fuel cell and gas turbine is realized by parameter design. The results show that the matching operation between fuel cell and gas turbine is realized by parameter design. In the vicinity of the rated operating conditions of the system, the fuel flow and current can be adjusted separately, and the power regulation range of the system is limited. When the current increases, the fuel cell power and system efficiency increase, but the gas turbine power decreases. With the increase of fuel flow rate, the power of fuel cell and gas engine increases, but the system efficiency decreases. The feasibility of the control strategy is proved under the designed off-design control strategy.

Keywords

SOFC-GT System, Gas Engine, Combined Power System, Simulation

PNVMECA软件计算微型燃机 - 燃料电池系统变工况性能

徐百汇¹, 杨国威^{2*}, 梁前超², 黄潜龙²

¹海军上海基地, 上海

²海军工程大学, 湖北 武汉

*通讯作者。

Email: 13387508398@163.com

收稿日期: 2019年1月26日; 录用日期: 2019年2月6日; 发布日期: 2019年2月20日

摘要

本文采用作者制作的专门软件PNVMECA对系统在电流和燃料流量改变时的稳态性能和动态响应过程进行研究,并设计了合适的变工况控制策略。结果表明通过参数设计实现了燃料电池与燃气轮机的良好匹配运行。在系统额定工况附近,单独调节燃料流量和电流大小,对系统功率调节范围有限。电流增大时,燃料电池功率和系统效率都增加,但燃机功率下降。燃料流量增大时,电池和燃机功率都增大,但系统效率减小。在设计的变工况控制策略下,证明了控制策略的可行性。

关键词

SOFC-GT系统, 燃气轮机, 联合动力系统, 仿真

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 前言

船舶在航行过程中,SOFC-GT 联合发电系统受到周围条件变化的影响(如环境温度、负载、燃料流量等的变化),不可能一直处于额定工况下工作。而且船舶电网是一个容量较小独立运行的电力系统,负荷的改变也会对电网产生冲击[1],这就要求发电设备具有良好的变工况调节能力。因此,研究系统的变工况性能具有十分重要的理论意义。电流和燃料流量突减时,由于燃料电池热惯性以及电压不能突变,系统动态响应具有一定的滞后性[2]。由于受到系统中催化燃烧室和换热器等部件容积惯性和热惯性的影响,燃机动态响应相对燃料电池较慢[3]。在设计的变工况控制策略下,系统工况调节范围为 51.28%~100%。系统效率随工况降低先增加后减小,在 60%~100%工况区间时,系统效率在 60%以上[4],证明了控制策略的可行性。低工况下燃机效率将急剧下降,无法保证正常运行,系统效率也降低[5]。

2. 联合发电系统控制策略

SOFC-GT 联合发电系统是一个多变量耦合的复杂系统,由前分析可知,单独改变电流、燃料流量等参数对系统工况的调节范围很小。本文采用作者制作的专门软件 PNVMECA 对系统在电流和燃料流量改变时的稳态性能和动态响应过程进行研究,构建了 150 kW 级船用 SOFC-GT 联合发电系统模型[6],对系统参数进行了设计,通过仿真得到了系统额定工况的性能参数。燃料利用率、水碳比、SOFC 工作温度、涡轮前温等都是系统运行时的重要控制参数[7],系统变工况条件下必须保持以上参数稳定在一定范围内。为实现联合发电系统变工况下的安全稳定运行,需制定合适的变工况控制策略。系统中 SOFC 的功率占比达到 80%,GT 的功率占比较小,而且 GT 的功率调节范围相对较小,所以系统的变工况调节应主要调节 SOFC 的功率。

根据 SOFC 变工况性能研究,改变 SOFC 功率可以通过调节燃料流量和电流的大小,对于 GT 功率

则主要是通过调节流量、转速和涡轮前温等参数来进行调节。本文采取如下控制策略：通过调节燃料流量改变系统输出功率，同时调节电流保证燃料利用率的稳定，并调节 GT 流量保证 SOFC 工作温度的稳定。随着燃料流量的减小，进入催化燃烧室的燃料流量降低，燃烧后的尾气温度降低，涡轮前温不断下降，涡轮前温变化，51.28%工况下涡轮前温为 1075 K，相对于额定工况时下降超过 100 K。温度过低将会导致涡轮输出功率急剧下降，此时可以向催化燃烧室内补充燃料提高涡轮前温，但这会造成系统热效率降低。所以在采本文用的调节策略下，SOFC-GT 系统的工况调节范围为 51.28%~100%。

3. 系统变工况性能分析

采用作者制作的专门软件 PNVMECA 对系统在电流和燃料流量改变时的稳态性能和动态响应过程进行研究，并设计合适的变工况控制策略。通过参数设计实现了燃料电池与燃气轮机的良好匹配运行燃料电池功率和系统效率都增加，但燃机功率下降。燃料流量增大时，电池和燃机功率都增大，但系统效率减小。

图 1 和图 2 显示了变工况下燃料流量和空气流量变化情况。燃料流量随工况降低而减小，为了保证电堆温度不变，空气流量也随之减小。空气流量通过改变压气机转速进行调节，随着工况降低，GT 的转速降低，压气机进气量减小。工况为 51.28%时，GT 转速降至 70,000 rpm，接近喘振边界线，工况继续降低时，压气机将发生喘振，所以在本文采用的调节策略下，SOFC-GT 系统的工况调节范围为 51.28%~100%。

为保证 SOFC 的燃料利用率不变，改变燃料流量大小时，必须同时调节放电电流的大小。图 3 显示了各工况下 SOFC 的电流大小，电流随工况降低而下降，通过调节电流大小使燃料利用率始终保持在 85%左右。由于电池温度不变，电流密度降低，使电池欧姆极化降低，电池输出电压小幅上升，单电池输出电压曲线如图 4 所示，燃料电池由额定工况降至 51.28%工况时，单电池电压由 0.623 V 升至 0.716 V。

随着燃料流量的减小，进入催化燃烧室的燃料流量降低，燃烧后的尾气温度降低，涡轮前温不断下降，涡轮前温变化曲线如图 5 所示，51.28%工况下涡轮前温为 1075 K，相对于额定工况时下降超过 100 K。温度过低将会导致涡轮输出功率急剧下降，此时可以向催化燃烧室内补充燃料提高涡轮前温，但这会造成系统热效率降低。

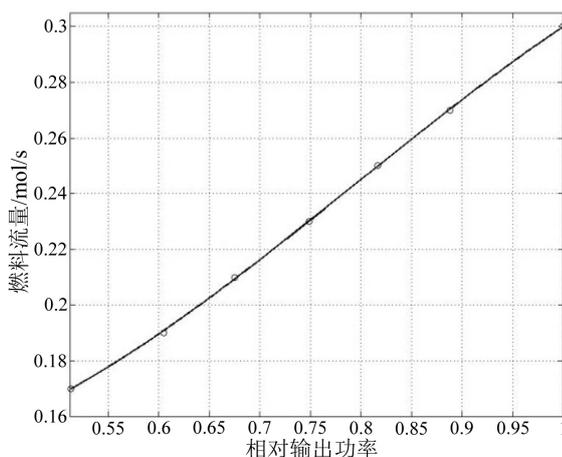


Figure 1. Fuel flow curve under variable working conditions
图 1. 变工况下燃料流量变化曲线

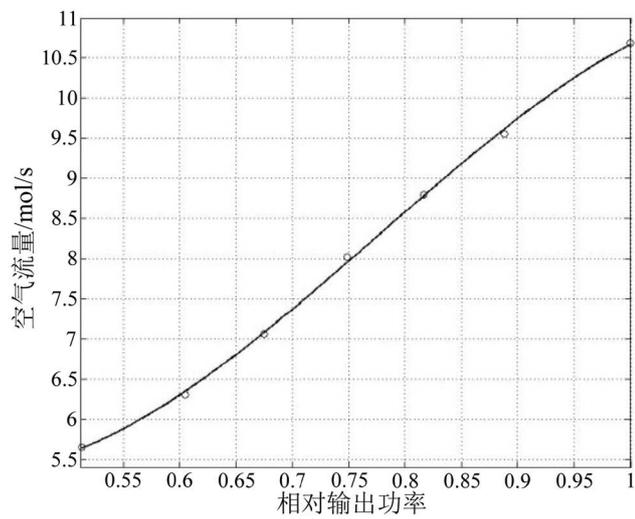


Figure 2. Air flow curve under variable working conditions
图 2. 变工况下空气流量变化曲线

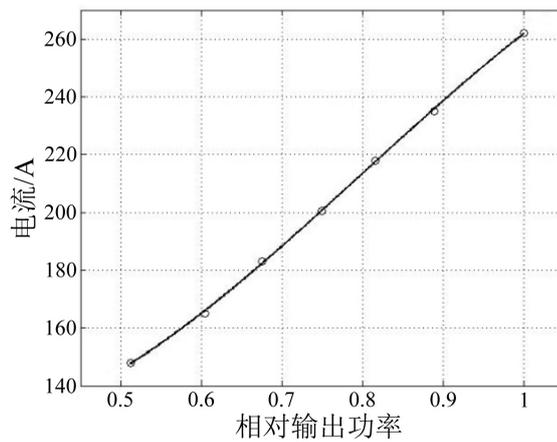


Figure 3. Current variation curve
图 3. 变工况电流变化曲线

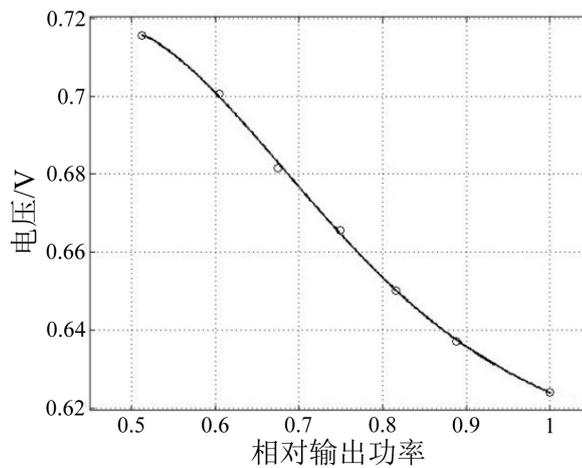


Figure 4. Voltage variation curve
图 4. 变工况电压变化曲线

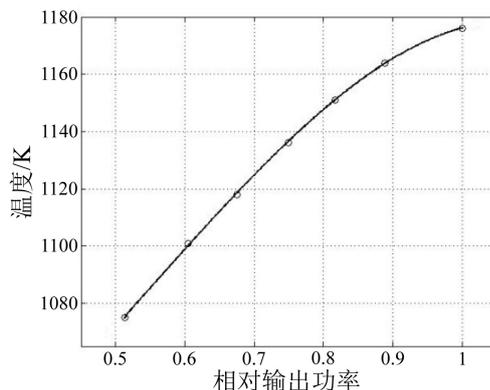


Figure 5. Turbine front temperature curve under variable working conditions
图 5. 变工况下涡轮前温变化曲线

SOFC、GT 和系统功率变化曲线如图 6 所示，系统工况降低时，涡轮前温和压气机流量同时减小，导致 GT 输出功率迅速减小。系统处于 51.28% 工况时，GT 输出功率降为 0.7 kW，若系统工况继续降低，GT 将无法工作，系统功率完全由 SOFC 提供。由图 7 是 GT 和 SOFC 的功率比变化曲线可以看出， P_{GT}/P_{SOFC} 随工况降低而减小，SOFC 功率占系统总功率比重不断提高，系统总功率变化和 SOFC 功率变化趋于一致。

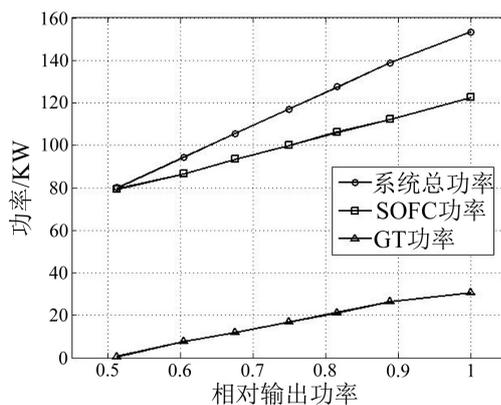


Figure 6. Power variation curve of each part under variable working conditions
图 6. 变工况下各部分功率变化曲线

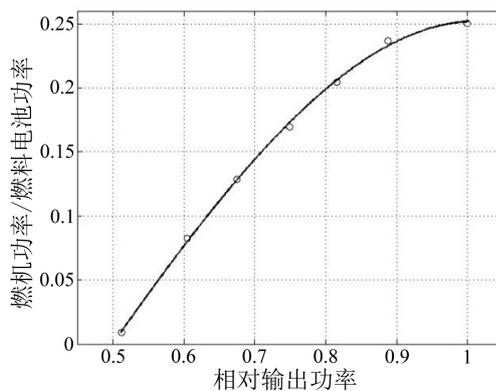


Figure 7. GT/SOFC power ratio curve under variable operating conditions
图 7. 变工况下燃机/燃料电池功率比

由于保持燃料电池温度不变, 系统工况降低时, SOFC 电效率提高, 燃机采取变转速调节, 其功率不断降低, 所以系统总效率先上升后下降。如图 8 所示, 88.83% 工况时系统总效率为 64.10%, 高于额定工况效率, 51.28% 时系统总效率为 58.77%, 接近 SOFC 效率。系统由额定工况降至 90% 工况时, 燃机功率减小, 但减小量不大, SOFC 电效率升高, 系统总效率升高。系统由 90% 工况降至 51.28% 工况时, 燃机性能恶化, 功率迅速下降, 虽然 SOFC 效率提升, 但系统总效率下降, 越来越接近于 SOFC 效率。

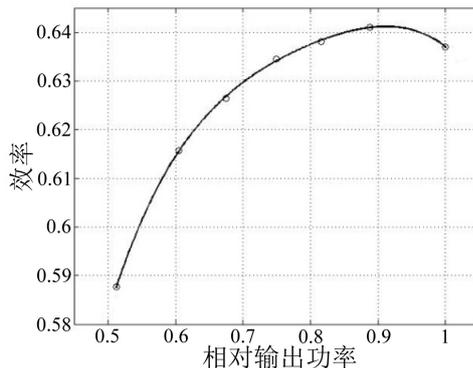


Figure 8. System variable operating efficiency curve
图 8. 系统变工况效率曲线

4. 小结

对系统在电流和燃料流量改变时的稳态性能和动态响应过程进行了研究, 并设计了合适的变工况控制策略。结果表明:

1) 通过参数设计实现了燃料电池与燃气轮机的良好匹配运行。设计点工况下, 系统总功率达到 153.32 kW, 其中燃料电池功率 122.6 kW, 燃机功率 30.72 kW, 系统效率为 63.70%, 远高于一般发电系统。

2) 在系统额定工况附近, 单独调节燃料流量和电流大小, 对系统功率调节范围有限。电流增大时, 燃料电池功率和系统效率都增加, 但燃机功率下降。燃料流量增大时, 电池和燃机功率都增大, 但系统效率减小。

3) 电流和燃料流量突减时, 由于燃料电池热惯性以及电压不能突变, 系统动态响应具有一定的滞后性。由于受到系统中催化燃烧室和换热器等部件容积惯性和热惯性的影响, 燃机动态响应相对燃料电池较慢。

4) SOFC-GT 系统在变工况时, 系统工况调节范围为 51.28%~100%。系统效率随工况降低先增加后减小, 在 60%~100% 工况区间时, 系统效率在 60% 以上, 证明了控制策略的可行性。低工况下燃机效率将急剧下降, 无法保证正常运行, 系统效率也降低。SOFC-GT 联合发电系统受环境温度、负载、燃料流量等影响较大, 一个容量较小独立运行的电力系统的负荷改变会对电网产生很多冲击, 这就要求发电设备具有良好的变工况调节能力。因此, 研究系统的变工况性能具有十分重要的指导作用和极大的理论意义。

基金项目

国防科技创新基金资助项目(18-163-13-ZT-001-001-04)。

参考文献

[1] 国家能源局. 中国制造 2025——能源装备实施方案[R/OL].

- http://www.nea.gov.cn/135451381_14664128050361n.pdf, 2016-06-12.
- [2] Ellis, M.W., von Spakovsky, M.R. and Nelson, D.J. (2001) Fuel Cell Systems: Efficient, Flexible Energy Conversion for the 21st Century. *Proceedings of the IEEE*, **89**, 1808-1818. <https://doi.org/10.1109/5.975914>
- [3] Boscaino, V., Miceli, R., Capponi, G. and Ricco Galluzzo, G. (2014) A Review of Fuel Cell Based Hybrid Power Supply Architectures and Algorithms for Household Appliances. *International Journal of Hydrogen Energy*, **39**, 1195-1209. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.10.165>
- [4] Lu, Y., Cai, Y., Souamy, L., *et al.* (2018) Solid Oxide Fuel Cell Technology for Sustainable Development in China: An Over-View. *International Journal of Hydrogen Energy*, **43**, 12595-12916. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.008>
- [5] 蔡浩, 陈洁英, 邓奎, 等. 固体氧化物燃料电池系统及其应用[J]. 当代工, 2014, 43(7): 1260-1261+1264.
- [6] 赵洪滨, 杨倩, 江婷, 等. SOFC——联合循环系统性能分析[J]. 工程热物理报, 2014, 35(5): 848-853.
- [7] Bohn, D. (2005) Micro Gas Turbine and Fuel Cell—A Hybrid Energy Conversion System with High Potential. *Micro Gas Turbines*, 13-1-13-46.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org