DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2017.02.020

基于燃料电池/储能装置的混合辅助能源 单元建模与仿真

徐郭霞^{*}, 翁晓光, 王莉 南京航空航天大学 自动化学院, 南京 江苏 211100

摘 要: 传统飞机的辅助动力装置噪声大、碳排放量大、效率低,已无法满足多电/全电飞机的发展要求。而燃料电池具 有高能量密度、零排放、使用寿命长、低噪声和高效率等优势。本文建立了燃料电池模型并进行优化,以更好地体现其 稳态和瞬态性能。建立了由燃料电池和超级电容组成的混合系统作为飞机辅助能源单元的模型,验证了其电能质量满足 GJB181A-2003标准,并与传统辅助动力装置进行对比,显示其在响应速度、效率以及功重比上具有明显优势。

关键词:燃料电池,超级电容,辅助动力装置,多电飞机,全电飞机

中图分类号: V242.3 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2017)02-0020-05

在航空供电系统中,一般由发动机或燃油涡轮辅助动 力装置(APU)启动发电机为飞机供电系统提供能量。传统飞 机APU的涡轮发动机存在噪声严重、燃油多、碳排放量大、效 率低、使用寿命短等问题。在飞机飞行中,主发动机和辅助发 电机(APUG)供电的最大效率为10%~20%,而当在地面、发 动机关闭时,辅助动力装置的燃油效率则小于10%^[1]。而燃料 电池清洁无污染、使用寿命长、效率高、能量密度高,满足多 电/全电飞机的发展要求。随着各国对燃料电池研究的深入, 其技术水平逐步提升。燃料电池混合系统在航空航天领域的 研究具有重大前景。目前,欧洲已研制出燃料电池/锂电池驱 动的小型飞机并试飞成功。

在燃料电池系统的建模方法上,主要分为数学建模方法、等效电路建模方法和电化学建模方法^[2],不同建模方法 各有利弊。本文将各种模型进行对比分析后采取基于电化学 原理的数学建模方法。

本文以低温燃料电池和储能装置(蓄电池/超级电容)并联 作为APUG^[3,4],通过对燃料电池系统稳态和瞬态性能的仿真,论 证了基于燃料电池/储能装置在性能上取代传统APUG的可能性。

1 燃料电池系统构架

目前,燃料电池具有3种应用形式:低温燃料电池/储能装置系统、高温燃料电池/涡轮起动发电机系统以及可再生燃料电池/涡轮起动发电机系统以及可再生燃料电池系统。其中,低温燃料电池/储能装置系统能量密度最低^[5]。

本文以低温燃料电池/储能装置系统为对象,根据B787 中的APU的发电要求,设计构架如图1所示。综合考虑体积、 重量、成本、效率以及性能要求:

(1)在输出功率恒定的情况下,燃料电池和蓄电池组/超 级电容重量固定。

(2)蓄电池组/超级电容是否外接充放电器仅取决于系 统对动态性能和能量的要求。

(3)蓄电池组/超级电容接入位置影响逆变器的前级变换器的功率,从而对其重量产生影响。

综上,选择图1中的构型③燃料电池通过一个DC/DC变换器与超级电容串联作为APUG的替代对象。

收稿日期:2016-11-04; 退修日期:2017-01-14; 录用日期:2017-01-17 *通讯作者. Tel.: 13260976515 E-mail: xuguoxia@nuaa.edu.cn

引用格式: XU Guoxia, WENG Xiaoguang, WANG Li. Modeling of a hybrid auxiliary power system with fuel cell/energy storage device for more electric aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2017,28(02):20-24.徐郭霞, 翁晓光,王莉.基于燃料电池/储能装置的混合辅助能源单元建模与仿真 [J]. 航空科学技术, 2017,28(02): 20-24.



图1 燃料电池系统典型构架 Fig.1 Configurations of fuel cell systems

2 燃料电池模型研究

2.1 各模型对比

燃料电池的模型主要有等效电路模型、数学经验模型 和电化学模型^[6]。质子交换膜燃料电池(PEMFC)各模型的 *V-I*特性曲线如图2所示。由图2可以看出,等效电路模型仿真 精度最低;数学经验模型虽然仿真精度高且模型简单,但主 要是依靠经验参数,很多参数并无实际物理意义,并不能体现 燃料电池的内特性;电化学模型的仿真精度较高,并且由于其 是从燃料电池的电化学原理出发,在一定假设的基础上,运用 基本守恒定律、传质传热方程和电化学反应方程^[7],结合电池 内部的特征而获得的数学模型,更能反应燃料电池的内特性。



2.2 模型优化

电化学模型也存在一定缺陷,电化学模型不能体现燃料电池输出电压随负载变化的平缓响应过程^[8]。可以在电化学模型的基础上建立电压动态模型,将一个等效电容C与等效电阻并联。如图3所示,E为理想电压源,R₀为电池欧姆内阻,U为电池端电压。令R₁上的总极化过电压为v_d,则电池单体动态特性可由微分方程式表示为:

$$v_d / d_t = i / C - v_d / \tau$$
 (1)
式中: τ 为时间常数;等效电阻 R_1 是活化过电压、浓度极化过



图3 燃料电池等效电路 Fig.3 Equivalent circuit of fuel cell

电压和电流的函数:

$$v_d = iR_1 = V_{\text{act}} + V_{\text{con}} \tag{3}$$

燃料电池堆是由n个燃料电池单体串联而成,电池堆电 压可以表示为单体电压V_{fc}之和,假设燃料电池单体电压相 同,则电堆电压V_s表示为:

$$V_{\rm st} = n \cdot V_{\rm fc} \tag{4}$$

PEMFC在反应生成液态水时的理想标准电势E₀为 1.229V,有3种极化作用会导致PEMFC电压的不可逆损失。

$$V_{fc} = E_n - V_{act} - V_{ohm} - V_{con}$$
(5)
中: V_{act} 为活化极化过电压, V_{ohm} 为欧姆极化过电压, V_{con} 为

式中: V_{act} 为活化极化过电压, V_{ohm} 为欧姆极化过电压, V_{con} 为浓度极化过电压, E_n 为热力学预测电压^[9]。

由图4 PEMFC电化学模型和电压动态模型的仿真结果 对比可知:在电化学模型上改进的电压动态模型能够更好地 诠释在负载发生变化时电池电压外特性的平缓响应过程。









3 燃料电池系统仿真分析

本燃料电池系统主要装置包括:燃料电池堆、DC/DC变换器、超级电容(SC)和高压直流母线负载(直流电机)。如图 5所示,90V/3kW燃料电池通过一个高功率DC/DC变换器与 270V/1000F的超级电容并联在270V高压直流母线上,直流 负载的额定功率为2.7kW^[10]。





3.1 系统控制策略

在t=0s时突加负载,若负载大于燃料电池额定功率的 50%,设置0~5s的延迟,燃料电池冷启动,此时超级电容供电; 5s后,燃料电池提供负载所有能量(2.7kW),超级电容的荷电 状态(SOC)保持不变,停止放电。如果负载的稳定功率大于燃 料电池稳定输出功率的50%,加载时需按照额定电流的20% (最大)逐次增加电流,每次电流增加的时间间隔为30s^[11]。此 时,虽然仿真中燃料电池输出功率也能够实现负载跟随,但实 际使用中会损坏燃料电池,遂将系统控制策略进行以下修改:

(1)检测负载功率,若有大于1.5kW的突加,将负载 需求功率 P_L 与燃料电池功率 P_{FC} 作差,即 $\Delta P = P_L - P_{FC}$ 。若 $\Delta P < 0.6 kW$,燃料电池输出功率增加 ΔP ,若 $\Delta P > 0.6 kW$,燃料 电池输出功率增加0.6 kW。延迟30s后,再将 P_L 与 P_{FC} 作差,重 复前面的逻辑。 (2)在燃料电池加载时间里,燃料电池不能满足负载需 求的功率均由SC提供。

3.2 仿真结果分析

启动性能如图6所示,0~5s内燃料电池端电压不变(冷 启动),超级电容快速响应放电(响应时间在0.1s以内),5s后 超级电容的电流I_{sc}降为零,由燃料电池为负载供电。

稳态性能如图7所示,负载为恒定阻性负载时,*P*L始终 保持在2.7kW周围,电压一直保持在270V母线电压左右。

瞬态性能如图8所示,燃料电池输出功率随负载需求功率 变化具有很好的跟随效果。由于燃料电池输出功率能够跟随负载,几乎提供了所有的负载功率,超级电容的SOC只有小幅减 少(0.03%),电压一直保持在270V母线电压左右,如图9所示。

参考飞机供电系统电能质量标准GJB 181A-2003,燃料电池系统性能指标均为合格。表1为燃料电池APU与传统APU的指标对比,主要具有以下优势:

(1) 在动态响应速度方面,由于加入了毫秒级响应时间的储能元件,在启动时间上比传统APU大大减少。

(2) 在发电效率上,虽然加入了大功率变换器但效率也 是远远高于传统APU,目前,燃料电池的效率国际先进水平 已能达到90%以上。

(3) 在能量密度上,以现有燃料电池技术水平计算,当APU 运行时间大于1.37h,燃料电池系统的重量就能够低于传统APU, 随着燃料电池技术水平尤其是储氢技术的提高,燃料电池系统 有望在未来替代传统APU,而不再是运行足够小时数才占优势。

















表1 燃料电池APU和传统APU各指标对比 Table 1 Comparison of FC APU and traditional APU

 ••••••••••••••••••••••••••••••••••••••		
FC APU	传统APU	

0

4 结论

本文建立了燃料电池和储能元件的模型,对燃料电池混 合系统的稳态和动态特性进行了仿真分析,仿真结果表明,燃 料电池系统能够满足飞机供电系统电能质量标准GJB 181A-2003的要求。与传统APU在效率和性能上的对比表明,基于燃 料电池系统的APU发电系统在动态性能、效率上远高于传统 APU,并有望在未来替代传统APU,从而验证了基于燃料电池 /储能装置的混合辅助能源单元在性能上取代传统APUG的可 能性。

参考文献

- [1] Eid A, El-Kishky H, Abdel-Salam M, et al. Modeling and characterization of an aircraft electric power system with a fuel cell-equipped APU connected at HVDC bus[C]//Power Modulator and High Voltage Conference (IPMHVC), 2010 IEEE International. IEEE, 2010: 639-642.
- [2] El-kishky H, Ibrahimi H, Abu Dakka M, et al. Transient performance of battery/fuel cell-based APU on aircraft electric power systems with nonlinear loading[C]//Pulsed Power Conference (PPC), 2011 IEEE. IEEE, 2011: 1486-1489.

[3] 朱雅俊. 电动汽车用磷酸铁锂电池建模与SOC估算研究[D]. 安徽:合肥工业大学, 2012.

ZHU Yajun. Research on modeling and SOC estimation of LiFeO₄ battery for electric vehicle [D]. Anhui: Hefei University of Technology, 2012. (in Chinese)

- [4] 姜久春,文锋,温家鹏,等. 纯电动汽车用锂离子电池的建模和 模型参数识别[J].电力科学与技术学报, 2010, 25(1):67-74.
 JIANG Jiuchun, WEN Feng, WEN Jiapeng, et al. Li-ion battery modeling and on-line model parameters identification for PEV[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1):67-74. (in Chinese)
- [5] Jiang Z, Gao L, Dougal R A. Flexible multiobjective control of power converter in active hybrid fuel cell/battery power sources[J].
 Power Electronics, IEEE Transactions on, 2005, 20(1): 244-253.
- [6] Corcau J, Grigorie T L, Dinca L. Simulation and analysis of a fuel cell/battery hybrid power supply for More-Electric Aircraft[C]//IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012: 5477-5481.
- [7] 施皮格尔. 质子交换膜燃料电池建模与MATLAB仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2013.
 Collen S. PEM fuel cell modeling and simulation using MATLAB
 [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2013. (in Chinese)
- [8] 刘鹤,白焰,刘旭. 质子交换膜燃料电池模型的比较分析与仿 真[J]. 电源技术, 2011, 35(12):1605-1608.

LIU He, BAI Yan, LIU Xu. Comparison, analysis and simulation of PEMFC models [J]. Power Technology, 2011, 35(12):1605-1608. (in Chinese)

- [9] Ryan O W C. 燃料电池基础[M]. 北京:电子工业出版社, 2007.
 Ryan O W C. Fuel cell fundamentals [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [10] 金科. 燃料电池供电系统的研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.

JIN Ke. Research on fuel cell power system [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[11] 张立炎. 燃料电池系统建模与优化控制[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.

ZHANG Liyan. Fuel cell system modeling and optimized control [M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2011. (in Chinese)

作者简介

徐郭霞(1992-) 女,硕士研究生。主要研究方向:基于燃料电 池/储能元件的混合辅助能源单元的能量管理。 Tel: 13260976515 E-mail: xuguoxia@nuaa.edu.cn 王莉(1969-) 女,博士,教授。主要研究方向:航空航天电源系 统,固态功率控制器,健康管理与故障预测及高频变换器的研究。

Tel: 13851632296

E-mail: liwang@nuaa.edu.cn

Modeling of a Hybrid Auxiliary Power System with Fuel Cell/Energy Storing Device for More Electric Aircraft

XU Guoxia*, WENG Xiaoguang, WANG Li

College of Autom, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211100, China

Abstract: The traditional auxiliary power system with some disadvantages such as wide noise, huge carbon emission and low efficiency, cannot meet the requirement of more/full electric aircraft. However, with the development of the technological level, fuel cells with many advantages such as high energy density, zeroemission, long service life, less noise and high efficiency come to the horizon. This paper modeled the renewable energy device (fuel cell) and optimized it to characterize the performance. And then, modeling the hybrid auxiliary power system with fuel cell/ supercapacitor, and comply with the aircraft standard of GJB 181A-2003. Comparing with the traditional APU, the fuel cell system dominates the response speed, efficiency and power to weight ratio.