

基于模糊控制的燃料电池汽车动力源能量管理

崔鹏飞¹, 沈英¹, 赵凯烨²

(1. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福建 福州 350108; 2. 温州市电子技术研究所, 浙江 温州 325003)

摘 要:提出一种基于模糊控制的燃料电池混合动力系统能量管理策略,通过设计模糊控制器的隶属度函数和模糊规则保证燃料电池工作在高效区域和限定的供电能力范围内,并通过积累燃料电池功率增量实现燃料电池功率的逐步变化。基于选定的混合动力系统结构,在 MATLAB/Simulink 环境下建立了部分子系统的仿真模型。在典型循环工况下,将其与一种有限状态机策略进行对比仿真分析,结果表明该策略能在完成功率分配的同时保证燃料电池处于更健康的工作状态。

关键词:燃料电池混合动力系统;系统建模;模糊控制;能量管理策略

中图分类号:TP273+.4 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)04-0177-03

Energy Management for Fuel Cell Vehicle Power System Based on Fuzzy Control

CUI Pengfei¹, SHEN Ying¹, ZHAO Kaiye²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Wenzhou Institute of Electronic Technology, Wenzhou 325003, China)

Abstract: In this work, an energy management strategy based on fuzzy control for fuel cell (FC) hybrid power system is introduced. The operation of the fuel cell is ensured in the high efficiency area, it is limited within the range of its Maximum power by the proposed controller and the power of FC is changed gradually by accumulating FC power increment. Several subsystem models are established in MATLAB/Simulink according to the proposed structure of hybrid power system. Furthermore, a limited state machine control strategy is used to be compared with the proposed strategy in a typical driving cycle. The simulation results show the proposed energy management strategy can be used to successfully allocate the power and keep FC power system in a better state.

Keywords: fuel cell hybrid power system; system modeling; fuzzy control; energy management strategy

0 引言

燃料电池汽车由于清洁、高效等优异特点,被国内外研究者视为未来取代传统发动机汽车的理想选择。然而,燃料电池存在动态响应速度慢、功率密度低且是单向能源等缺点,影响整车动力性和经济性^[1]。因此,燃料电池通常配给一个辅助供能的能量存储装置,如蓄电池或者超级电容,以改善整车性能。

燃料电池混合电源间的协调供能及电源系统的保护有赖于优异的能量管理策略。根据能量管理策略的实现方法不同,一般可将其分为基于优化和基于规则的能量管理策略。

基于优化的能量管理策略将燃料电池复合电源系统的供电能力、效率、经济性等作为限制条件并运用某种控制算法建立目标函数,保证混合动力系统在限制条件下完成功率分配。基于规则的能量管理策略是依据汽车运行

工况特点,如负载大小、车速高低等因素制定规则确定各个供能源工作状态,一般分为确定规则和模糊规则策略。

在文献[2]中,ZHENG C H 等利用动态规划和庞特里亚金最小值原理实现混合动力系统能量的优化分配。LI H 等基于等效燃料消耗最小策略进行混合电源间的能量分配^[3]。文献[4-5]分别基于确定和模糊逻辑规则对混合动力系统进行功率分配,仿真结果表明设计的能量管理策略达到预期的控制效果。

基于优化的能量管理策略由于考虑多项限制因素并结合优化算法导致能量管理策略运算复杂,在实车运用上存在困难;基于规则的能量管理策略主要依赖专家经验,实现简单,但是建立的能量管理策略大多忽略了燃料电池的供电能力和工作效率等实际限制因素。

本文提出了一种基于模糊控制的能量管理策略,兼顾了能量管理策略实现的简单性和燃料电池的供电能力等因素。通过在 MATLAB/Simulink 中建立的燃料电池混合动力系统模型,将其与一种有限状态机策略进行仿真对比

基金项目:温州市重大科技专项项目(2018ZG007);福建省科技厅项目(2017N0013)

第一作者简介:崔鹏飞(1991—),河南许昌人,硕士研究生,研究方向为燃料电池汽车控制与能量管理。

通信作者简介:赵凯烨(1961—),浙江温州人,高级工程师,研究方向为新能源控制系统。

分析。

1 燃料电池混合动力系统仿真模型

本文采用的燃料电池混合动力系统的结构为:燃料电池经单向直流-直流升压变换器与蓄电池组并联在母线上,电机由燃料电池混合能量系统联合供电。燃料电池和蓄电池的输出特性受多种因素影响而十分复杂。本文采用了 MATLAB/Simulink 仿真工具箱中提供的燃料电池和锂电池模型,可较为准确地描述两种电源的工作特性。

根据汽车功率平衡方程式及汽车行驶方程式,可计算得到汽车在行驶过程中的需求功率和需求转矩:

$$P_e = \left(\frac{Gf u_a}{76\ 140} + \frac{G i u_a}{3\ 600} + \frac{C_D A u_a^3}{76\ 140} + \frac{\delta m u_a}{3\ 600} \frac{du}{dt} \right) / \eta_T \quad (1)$$

$$\frac{T_{uq} i_g i_0 \eta_T}{r} = Gf \cos \alpha + \frac{C_D A}{21.15} u_a^2 + G \sin \alpha + \delta m \frac{du}{dt} \quad (2)$$

式(1)和式(2)中参数具体含义可参见文献[6]。表1为本文采用的混合动力系统的相关参数。

表1 混合动力系统参数

类别	参数/单位	数值
整车	整备质量/kg	1 200
燃料电池系统	额定功率/kW	30
	最大功率/kW	41.63
锂电池组	额定电压/V	384
	额定容量/Ah	22.5
电机	额定转速/(r/min)	2 400
	额定功率/kW	45
	最大转速/(r/min)	4 500
	最大功率/kW	75

2 混合动力系统能量管理策略

2.1 基于模糊控制的能量管理策略

本文提出一种基于模糊控制的燃料电池混合动力系统能量管理策略,其核心思想是:模糊控制器对比需求功率和燃料电池功率,考虑锂电池 SOC 的限制条件、输出燃料电池的参考功率增量。在此,燃料电池参考功率增量可为正值或负值。通过积累燃料电池参考功率增量实现燃料电池参考功率值的逐步变化,进而通过控制器实现燃料电池实际功率与参考功率的追踪。模糊控制能量管理策略的实现原理如图1所示。

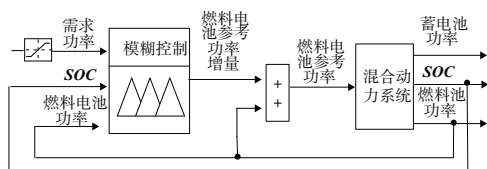
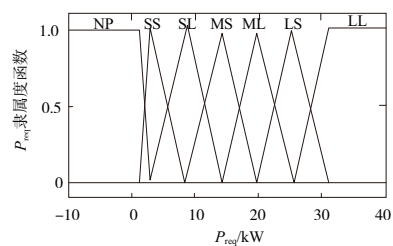
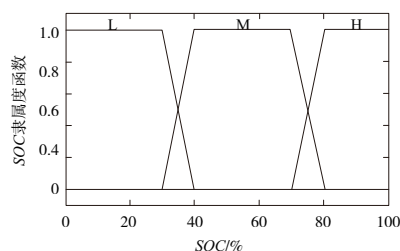


图1 基于模糊控制的能量管理原理图

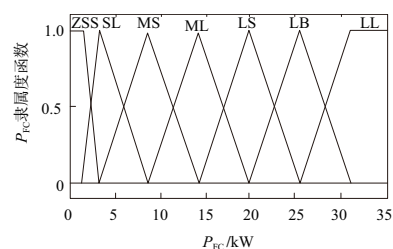
燃料电池的高效工作功率区域限制在 3 kW ~ 25.28 kW,燃料电池的最大功率变化率保守地取 4 kW/s。据此,设计模糊控制器的隶属度函数和模糊规则列于图2和表2。



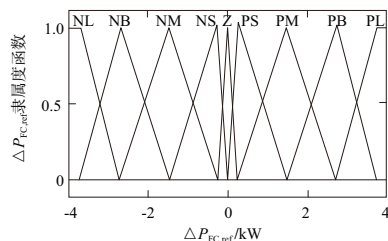
(a) 需求功率隶属函数



(b) SOC隶属度函数



(c) 燃料电池功率隶属度函数



(d) 燃料电池参考功率增量隶属度函数

图2 模糊控制器变量隶属度函数

2.2 有限状态机能量管理策略

在此建立的有限状态机能量管理策略依据汽车运行过程中的相关参数,如汽车需求功率、汽车车速、蓄电池 SOC 及汽车 AP 值,将汽车行驶过程分为 6 种工作模式,即:启动模式、燃料电池模式、蓄电池充电模式、联合供电模式、制动模式和停车模式。其中汽车 AP 值为汽车行驶过程中电机的实际转矩与可提供的最大转矩的比值,取值范围为 (-1,1)。6 种工作模式的执行策略列于表3。

表3中, AP_T 、 V_T 分别为 AP 值和汽车速度的门限值; P_L 、 P_H 分别为汽车需求功率的低门限和高门限值;蓄电池 SOC 值的低、中、高门限值由 SOC_L 、 SOC_M 、 SOC_H 表示;“+”、“-”号表示电池的放电和充电;“-”表示不考虑此因素。

表2 模糊控制器规则表

(a) SOC 处于低值 L 时 $P_{\text{req}}, \Delta P_{\text{FC,ref}}$								(b) SOC 处于低值 M 时 $P_{\text{req}}, \Delta P_{\text{FC,ref}}$								(c) SOC 处于低值 H 时 $P_{\text{req}}, \Delta P_{\text{FC,ref}}$							
P_{FC}	NP	SS	SL	MS	ML	LS	LL	P_{FC}	NP	SS	SL	MS	ML	LS	LL	P_{FC}	NP	SS	SL	MS	ML	LS	LL
Z	Z	PS	PS	PS	PS	PS	PS	Z	Z	PS	PS	PS	PS	PS	PS	Z	Z	PS	PS	PS	PS	PS	PS
SS	NS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	SS	NS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	SS	NS	NS	PS	PS	PS	PS	PS
SL	NL	PS	PL	PL	PL	PL	PL	SL	NL	Z	PS	PL	PL	PL	PL	SL	NL	NL	Z	PM	PL	PL	PL
MS	NL	Z	PS	PL	PL	PL	PL	MS	NL	NS	Z	PB	PL	PL	PL	MS	NL	NL	NS	Z	PM	PL	PL
ML	NL	NS	Z	PM	PL	PL	PL	ML	NL	NL	NS	Z	PB	PL	PL	ML	NL	NL	NL	NM	Z	PB	PL
LS	NL	NL	NS	Z	PB	PB	PB	LS	NL	NL	NL	NM	Z	PB	PB	LS	NL	NL	NL	NL	NM	Z	PB
LB	NL	NL	NL	NM	Z	Z	Z	LB	NL	NL	NL	NL	NB	Z	Z	LB	NL	NL	NL	NL	NL	NB	Z
LL	NL	NL	NL	NL	NB	NB	NB	LL	NL	NL	NL	NL	NL	NB	NB	LL	NL	NL	NL	NL	NL	NL	NB

表3 有限状态机能量管理策略工作模式划分规则

操作模式	AP	需求功率 $P/(kW)$	汽车速度 $V/(km/h)$	SOC	电池电流	功率平衡
启动模式	>0	$<P_L$	$<V_T$	$>SOC_L$	+	$P_{\text{req}} = P_{\text{BAT}}$
燃料电池模式	$<AP_T$	$P_L < P < P_H$	$>V_T$	$>SOC_M$	0	$P_{\text{req}} = P_{\text{FC}}$
蓄电池充电模式	$<AP_T$	$P_L < P < P_H$	$>V_T$	$<SOC_M$	-	$P_{\text{req}} = P_{\text{FC}} - P_{\text{BAT}}$
联合工作模式	$>AP_T$	$>P_H$	$>V_T$	$>SOC_L$	+	$P_{\text{req}} = P_{\text{FC}} + P_{\text{BAT}}$
制动模式	<0	<0	>0	$<SOC_H$	-	$P_{\text{req}} = P_{\text{BAT}}$
停车模式	$=0$	$=0$	$=0$	—	0	—

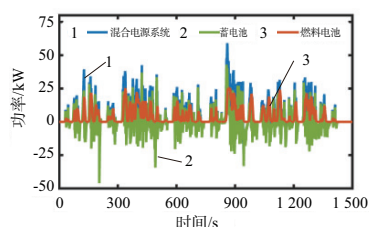
3 能量管理策略仿真分析

利用在 MATLAB/Simulink 环境下建立的仿真模型,在 LA92 循环工况中对两种能量管理策略进行仿真分析,仿真结果如图 3 所示。

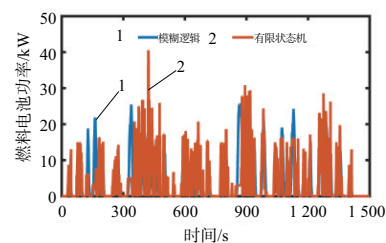
从图 3(a)中可以看到,燃料电池功率曲线处于连续变化状态,且燃料电池工作在高效区间范围内——燃料电池避免了在低功率工况下持续放电,同时保证其最大供电功率不超过高效区间允许的最大值。由图 3(b)和图 3(c)中两种能量管理策略分配的燃料电池功率曲线对比结果表明,模糊控制策略分配的燃料电池曲线更加平滑,避免了燃料电池工作点的突变,保证燃料电池处于限定的供电能力范围。图 3(d)中,锂电池在模糊控制策略下的 SOC 曲线变化也更平滑,反映出模糊控制策略下的锂电池处于更平稳的工作状态,有利于延长锂电池寿命。

4 结语

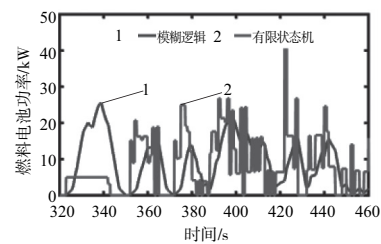
本文提出的基于模糊控制的燃料电池混合动力系统



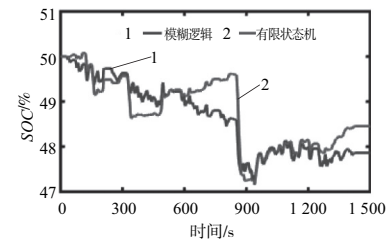
(a) 模糊逻辑能量管理策略的功率分配



(b) 燃料电池功率曲线对比



(c) 燃料电池部分功率曲线对比



(d) 蓄电池 SOC 曲线对比

图3 LA92 工况下能量管理策略仿真结果

(下转第 187 页)

由表1可知,调温时间保持在2s以内,每次节水量在5 L左右,所需电量仅需电池总量的2%~5%。说明了该装置可以实现高效率、低功耗的出水并有效节约水资源。此外,为了验证装置的恒温效果,将智能节能恒温控制装置与普通家用热水器,即文献[3]恒温混水阀控制器的温度偏差率进行对比,如图6所示。

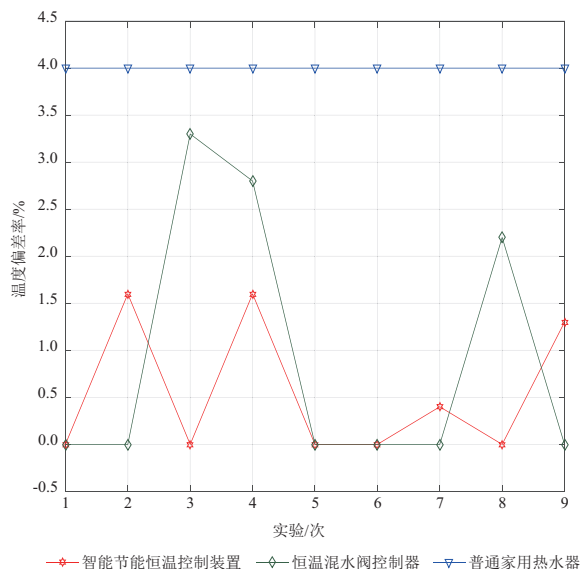


图6 多种装置的温度偏差率对比

由图6可知,该装置与恒温混水阀控制器的恒温效果都要优于普通家用热水器。将该装置与恒温混水阀控制器进行比较,该装置的温差率保持在2%以内,要低于恒温混水阀控制器。同时该装置的温度波动比恒温混水阀控制器小,具有更好的恒温平衡性。基于数据分析,充分显示了智能节能恒温控制装置恒温控制的优越性。

4 结语

为了解决当今家用热水器热水管内储蓄的冷却水无法回收,且需要手动反复调温的问题,设计了一款基于STM32单片机的智能节能恒温控制装置。通过理论分析、实物检验,得出如下结论:

- 1) 该装置能够解决热水器内热水管储蓄冷却水直接被浪费的问题,可以有效地将冷却水回收并再利用。
- 2) 该装置能够实现智能恒温出水,解决了普通热水器需要手动调温的问题。
- 3) 该装置可以低功耗地运行,有效地降低了能源的消耗。

参考文献:

- [1] 李建红. 基于价值工程的恒温混水阀研发及国产化[D]. 广州:华南理工大学, 2010.
- [2] 喻秋山,徐大鹏,刘志勇,等. 一种自动控温混水阀系统的设计[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2017(9):69-73.
- [3] 潘凌峰. 基于STM32的恒温混水阀控制器的设计与实现[D]. 杭州:杭州电子科技大学, 2012.
- [4] 江自强,葛亚炬,张乐年. 基于STM32的数据采集及存储系统设计[J]. 机械制造与自动化, 2017,46(4):136-139.
- [5] 袁世斐,孟政. 基于温度控制原理的浴室淋浴系统[J]. 中国高新技术企业, 2008,19:112-117.
- [6] 张淑清. 嵌入式单片机STM32设计及应用技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2015.
- [7] 张仲明,郭东伟,吕巍,等. 基于DS18B20温度传感器的温度测量系统设计[J]. 实验技术与管理, 2018(5): 82-85,94.
- [8] 冯晓伟,王雷阳,李正生. 多路舵机控制PWM发生器的设计与Proteus仿真[J]. 现代电子技术, 2011, 34(11):167-169.

收稿日期:2018-05-17

(上接第179页)

能量管理策略,实现了燃料电池功率在高效工作区域和限定的功率变化率下的逐步变化,保证燃料电池处于自身的供电能力范围内,一定程度上反映了燃料电池真实的动态反应特性,有望为实际燃料电池汽车混合动力系统能量管理设计提供参考依据。

参考文献:

- [1] 倪红军,吕帅帅,陈青青,等. 氢电混合燃料电池汽车动力系统研究进展[J]. 电源技术, 2015(4):855-856.
- [2] ZHENG C H, XU G Q, PARK Y I, et al. Comparison of PMP and DP in fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2014, 15(1): 117-123.
- [3] LI H, RAVEY A, N'DIAYE A, et al. A novel equivalent con-

sumption minimization strategy for hybrid electric vehicle powered by fuel cell, battery and supercapacitor [J]. Journal of Power Sources, 2018, 395: 262-270.

- [4] NING Q, XUAN D, KIM Y. Modeling and control strategy development for fuel cell hybrid vehicles[J]. International Journal of Automotive Technology, 2010, 11(2): 229-238.
- [5] ZHANG X, LIU L, DAI Y, et al. Experimental investigation on the online fuzzy energy management of hybrid fuel cell/battery power system for UAVs [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2018, 43(21): 10094-10103.
- [6] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.

收稿日期:2019-03-25