

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107724

燃料电池汽车分层能量管理策略优化研究*

阮永利 詹跃东

(昆明理工大学 信息工程与自动化学院 昆明 650504)

摘要: 为在改善车用燃料电池系统氢耗和耐久性的同时抑制直流母线电压波动,提出一种自适应滑动平均滤波、等效成本最小和超级电容能量状态非线性控制相结合的燃料电池汽车分层能量管理策略。首先,构建燃料电池汽车动力系统模型、氢耗成本和退化成本的数学模型;然后采用自适应滑动平均滤波和等效成本最小策略优化燃料电池输出功率,并通过非线性控制策略将超级电容能量状态控制于合理区间,以提高超级电容动态功率输出能力,抑制母线电压波动。仿真实验结果表明,相比于功率跟随策略,氢耗下降了12.94%,燃料电池耐久性提高了12.6%,燃料电池使用总成本降低了12.63%,直流母线电压波动明显减弱,表明所提出的能量管理策略能够改善燃料电池氢气消耗和耐久性,并能提高母线电压的稳定性。

关键词: 燃料电池汽车;能量管理;氢气消耗;耐久性;等效成本最小策略;非线性控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Research on optimization of hierarchical energy management strategy for fuel cell vehicles

Ruan Yongli Zhan Yuedong

(Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650504, China)

Abstract: In order to optimize the performance of the fuel cell system for vehicles and decrease the fluctuation of the DC bus voltage, proposes a hierarchical energy management strategy based on adaptive moving average filter, equivalent cost minimum and nonlinear control of the energy state of super capacitors. Firstly, construct the fuel cell vehicle power system model and the mathematical model of hydrogen consumption and degradation cost. Then, the adaptive moving average filter and the equivalent cost minimum strategy are used to optimize the output power of fuel cell. And the super capacitor energy state is controlled by a nonlinear control strategy within a reasonable range, to improve the dynamic power output capability of the super capacitor and suppress the fluctuation of the DC bus voltage. The simulation experiment results show that compared with the power following strategy, the hydrogen consumption is reduced by 12.94%, the durability of the fuel cell is improved by 12.6%, the total cost is reduced by 12.63%, and the DC bus voltage fluctuation is significantly decreased, which indicates that the proposed energy can optimize the hydrogen consumption and durability of the fuel cell, and can improve the stability of the bus voltage.

Keywords: fuel cell vehicles; energy management; hydrogen consumption; durability; equivalent cost minimization strategy; non-linear control

0 引言

在动态工况下,轻载运行和重载运行使得燃料电池效率降低,导致氢耗增加;启停、轻载、重载以及变载等工况会导致燃料电池的耐久性下降^[1]。因此燃料电池汽车必须采用燃料电池、蓄电池或超级电容组成的混合电源系统驱动,并且基于可靠的功率分配策略对混合电源系统进行能量管

理,以提高燃料电池的经济性和耐久性^[2]。

燃料电池汽车在加速或制动时,需求功率波动较大,造成蓄电池性能衰退以及母线电压波动。超级电容具有寿命长,功率密度高的优点,在汽车加速或制动时,提供或吸收峰值功率,能够减缓燃料电池和蓄电池的性能衰退。因此燃料电池、锂电池以及超级电容构成的混合电源系统及其优化控制策略有待进一步研究^[3]。

收稿日期:2021-08-30

* 基金项目:国家自然科学基金(51667012)项目资助

燃料电池汽车能量管理策略分为基于规则策略和基于优化策略两类。基于规则的策略又分为功率跟随、滤波器以及模糊控制策略。刘楠等^[4]基于功率跟随策略,分析了不同的超级电容 SOC 限值和充电功率参数对氢耗量和波动的影响。张泽辉等^[5]通过实时小波变换对燃料电池、蓄电池和超级电容进行功率分配,延长了燃料电池和蓄电池寿命,提升了混合电源系统的供电质量。Fu 等^[6]设计了基于自适应低通滤波和等效氢耗最小的能量管理策略,提高了燃料电池的耐久性和经济性。王筹等^[7]采用模糊逻辑控制进行能量管理,降低了氢耗。刘新天等^[8]采用改进的快速非支配排序遗传算法对模糊策略的参数进行多目标优化,提高了燃料电池的经济性和耐久性。

基于优化的策略分为全局优化和实时优化策略,该类策略以经济性、耐久性或者总成本(氢耗成本与退化成本之和)为优化指标,通过最优化控制或者智能算法寻优获得燃料电池输出功率控制量。宋传学等^[9]基于动态规划求解离线最优解,根据离线最优解来设计实时规则策略,实现近似最优的能量管理。全局优化策略提供离线优化的结果,不适合于在线应用,但可以用于指导实时能量管理策略设计,以及用于评价实时能量管理策略的性能。林歆悠等^[10]采用自适应等效氢耗最小策略进行能量管理,相比与规则策略氢耗降低了 8.75%。刘琦等^[11]通过建立等效氢耗和燃料电池的衰退数学模型,并以氢耗成本和衰退成本之和作为瞬时总成本,对燃料电池功率进行实时优化。Li 等^[12]提出了基于自适应庞特里亚金原则的能量管理策略,减少了氢气消耗,并减缓了燃料电池输出功率波动。应天杏^[13]采用短期功率预测和实时优化控制,实现了近似于动态规划法的优化效果。Yang 等^[14]基于马尔科夫驾驶模式辨识器和模型预测控制器进行能量管理,有效地改善了经济性和耐久性。林歆悠等^[15]采用强化学习方法进行能量管理,降低了氢耗。

综上,基于规则的策略不能保证经济性和耐久性的最优化,而基于优化的策略主要关注经济性的提高,另外采用滤波器分配锂电池和超级电容的功率时,超级电容能量状态不受控,使得超级电容提供峰值功率的能力下降,导致母线电压波动。因此本研究提出一种基于自适应滑动平均滤波、等效成本最小和超级电容能量状态非线性控制相结合的燃料电池汽车分层能量管理策略:首先建立等效氢耗和燃料电池退化成本的数学模型,以计算瞬时成本;然后采用自适应滑动平均滤波器和等效成本最小策略(equivalent cost minimization strategy, ECMS)优化燃料电池输出功率;最后采用滑动平均滤波和超级电容能量状态非线性控制策略实现锂电池和超级电容器间能量分配,确保超级电容能量状态在合理区间,从而实现氢耗、耐久性和直流母线电压稳定性的优化管理。

1 燃料电池汽车动力系统

燃料电池卡车动力系统结构,如图 1 所示。

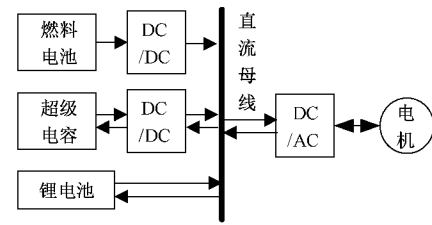


图 1 燃料电池汽车动力系统结构

燃料电池、锂电池以及超级电容组成混合电源系统,采用单向 DC/DC 变换器对燃料电池进行升压和功率控制,采用双向 DC/DC 变换器对超级电容进行充放电控制,锂电池组直接连接在直流母线上,锂电池端电压即为直流母线电压。整车以及动力系统参数如表 1 所示。

表 1 整车及动力系统参数

名称	参数	数值
整车参数	整备质量 m/kg	12 000
	迎风面积 A/m^2	8
	风阻系数 C_D	0.4
	滚动阻力系数 f_r	0.015
电机参数	峰值功率/kW	180
	额定功率/kW	90
燃料电池参数	燃料电池额定功率 $P_{fc, \text{nom}}/\text{kW}$	30
	燃料电池最大功率 $P_{fc, \text{max}}/\text{kW}$	60
蓄电池参数	容量/Ah	50
	额定电压/V	540
超级电容	单体参数	2.5 V-3 500 F
	串联数	216

1.1 驱动系统模型

电机通过传动系统和车轮向汽车提供牵引力,驱动汽车前进。滚动阻力、爬坡阻力、空气阻力以及加速阻力之和为汽车所需的牵引力,如式(1)所示。

$$F_{tr} = mgf_r \cos\theta + mg \sin\theta + ma + \frac{1}{2} C_D A \rho v^2 \quad (1)$$

式中: m 为汽车质量; g 为重力加速度; f_r 为滚动阻力系数; θ 为坡度角; a 为汽车加速度; C_D 为空气阻力系数; ρ 为空气密度; A 为迎风面积; v 为汽车速度。汽车需求功率由式(2)计算:

$$P_{tr} = \frac{F_{tr} \cdot v}{\eta_T \cdot \eta_M \cdot \eta_I} \quad (2)$$

式中: η_T 、 η_M 、 η_I 分别为传动系统、电机以及逆变器的能量传递效率。燃料电池、锂电池以及超级电容器功率存在如式(3)所示关系。

$$P_{tr} = P_{fc} \cdot \eta_{DC/DC} + P_{sc} \cdot \eta_{DC/DC} + P_{bat} \quad (3)$$

1.2 燃料电池模型

本研究根据燃料电池电气特性计算其经济性和耐久性,因此燃料电池模型选择伏安特性模型,如式(4)所示。

$$\begin{cases} v_{fc} = N_{cell}(E_{oc} - A \ln(i_{fc}/i_0)) \cdot \frac{1}{sT_d/3+1} - i_{fc}R_{ohm} \\ P_{fc} = v_{fc}i_{fc} \end{cases} \quad (4)$$

式中: v_{fc} 为电堆输出电压; N_{cell} 为单体数; E_{oc} 为开路电压; A 为塔菲尔系数; i_{fc} 、 i_0 分别为工作电流和交换电流; T_d 为燃料电池响应时间; R_{ohm} 为等效内阻; P_{fc} 为电堆输出功率。

燃料电池瞬时氢耗由式(5)计算。

$$\dot{m}_{fc} = \frac{N_{cell}i_{fc}M_{H_2}}{2F} \quad (5)$$

式中: M_{H_2} 为气体摩尔质量; F 为法拉第常数。

根据式(4)和(5),并扣除燃料电池系统附件消耗功率 P_{aux} , 燃料电池的效率计算式如式(6)所示。

$$\eta_{fc} = \frac{P_{fc} - P_{aux}}{\dot{m}_{fc}H_{LHV}} \quad (6)$$

式中: H_{LHV} 为氢气的低热值(取 1.2×10^5 J/g)。

在动态工况下,燃料电池的启停、重载、轻载以及变载操作会使燃料电池内部物理化学环境恶化,从而导致燃料电池性能衰退,当性能衰退至 80% 时,燃料电池必须退役。本研究采用文献[1]提出燃料电池衰退模型,计算瞬时衰退速率,如式(7)所示。

$$\dot{D}_{fc} = \frac{k(n_1V_1 + t_1U_1 + n_2V_2 + t_2U_2)}{\Delta V} \quad (7)$$

式中: ΔV 为燃料电池从开始使用到寿命终止允许的最大电压衰退量; k 为工况修正系数; n_1 为燃料电池启停次数; t_1 为轻载运行时间; n_2 为燃料电池功率变化次数; t_2 为重载运行时间; V_1 、 U_1 、 V_2 、 U_2 分别为启停、轻载、单位负载功率变化、重载工况下引起的电压衰退量,如表 2 所示。

表 2 燃料电池衰退值

运行状态	符号	衰退量
启停	V_1	23.91 μ V/次
轻载运行	U_1	10.17 μ V/h
负载变化	V_2	0.044 1 μ V/ Δ kW
重载运行	U_1	11.74 μ V/h

根据表 2 可知,为了改善燃料电池耐久性和经济性,应当避免燃料频繁启停,并使燃料电池工作在额定功率点附近。

1.3 蓄电池模型

蓄电池的内阻模型是由电压源 E 与内阻 R_{in} 串联组成,蓄电池的工作电流和荷电状态由式(8)计算。

$$\begin{cases} i_{bat} = \frac{E - \sqrt{E^2 - 4R_{in}P_{bat}}}{2R_{in}} \\ SOC_{bat}(t) = SOC_{bat,0} - \int_0^t \frac{i_{bat}}{Q} dt \end{cases} \quad (8)$$

式中: $SOC_{bat,0}$ 为电池初始荷电状态; i_{bat} 为电池工作电流(放电为正); Q 为蓄电池额定容量。

1.4 超级电容模型

超级电容具有高功率特性,在汽车加速和制动时承担峰值功率,以减小母线电压的波动。超级电容器模型如图 2 所示。

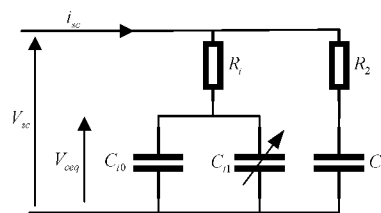


图 2 超级电容器模型

其中,第 1 条支路中 R_1 为等效内阻, C_{10} 为常值电容, C_{11} 为可变电容,其数值与自身的电压成正比;第 2 条支路表征其电荷再分布效应, R_2 为自放电电阻, C_2 为常值电容。

超级电容器的数学模型为:

$$\begin{cases} P_{sc} = v_{sc} \cdot i_{sc} \\ SOC_{sc} = \frac{V_{ceq}^2}{V_{nom}^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_{sc} 为超级电容的端口功率; v_{sc} 、 i_{sc} 分别为超级电容端口电压和工作电流; SOC_{sc} 为超级电容能量状态; V_{ceq} 、 V_{nom} 分别为超级电容有效电压和满电电压。

2 分层能量管理策略

2.1 分层控制策略结构

为提高燃料电池的经济性和耐久性,并抑制直流母线电压波动,本研究提出了基于自适应滑动平均滤波、等效成本最小以及超级电容能量状态非线性控制结合的分层控制策略。在第 1 层控制策略中,自适应滑动平均滤波对需求功率进行低通滤波,以抑制负载功率波动对燃料电池耐久性的影响,再采用等效成本最小化对燃料电池输出功率参考值进行优化。在第 2 层控制策略中,通过滑动平均滤波实现电池和超级电容的功率分配,并采用非线性反馈控制策略对超级电容能量状态进行控制,保证超级电容的峰值功率输出能力,以抑制母线电压波动。分层控制策略的结构如图 3 所示。

2.2 第 1 层控制策略

第 1 层控制策略通过自适应滑动平均和等效成本最小策略优化燃料电池输出功率,即燃料电池承担需求功率的低频部分,并采用瞬时等效成本最小策略进一步优化燃料电池的耐久性和经济性。

1) 自适应滑动平均滤波

滑动平均滤波是一种低通滤波器,其参数仅有窗口大小 T_w ,其数学模型如式(10)所示。

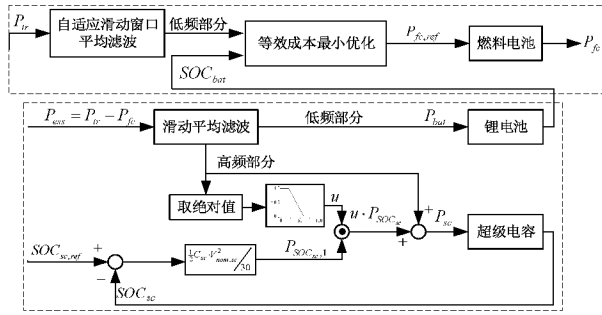


图3 分层控制策略结构

$$P_{tr,lowpass}(t) = \frac{1}{T_w} \int_{t-T_w}^t P_{tr}(\tau) d\tau \quad (10)$$

T_w 越大,输出信号越平滑,越有利于改善燃料电池耐久性,但输出信号滞后变大。当汽车从行驶模式转入制动减速模式时,需求功率由正转为负,较大的滞后使锂电池和超级电容的功率应力变大。因此,需要自适应调整窗口宽度,以保证较好的滤波效果和较小的滞后。本文提出参数 ϵ_{delay} 用于评估滞后程度,计算 2 s 内滤波器输出值、输入值差的平方积分与输入值的平方积分之比作为 ϵ_{delay} , 如式(11)所示。

$$\epsilon_{delay} = \frac{\int_{t-2}^t (Ptr(\tau) - Ptr,lowpass(\tau))^2 d\tau}{\int_{t-2}^t (Ptr(\tau))^2 d\tau} \quad (11)$$

当 $\epsilon_{delay} = 0$ 时,表明滤波器输入值等于输出值,没有滤波作用;当 $\epsilon_{delay} \geq 1$ 时,表明 T_w 较大,而且需求功率发生较大变化,导致滤波器输出值严重滞后于需求功率。

T_w 自动调整规则:当 $\epsilon_{delay} < 0.8$,表明需求功率变化不大, T_w 调整为 $1.5T_w$,以加强滤波效果;当 $\epsilon_{delay} \geq 0.8$,表明总线需求功率变化巨大, T_w 调整为 $\frac{1}{6}T_w$,以减小滤波滞后,降低蓄电池和超级电容的功配,但滤波器不能对超级电容 SOC_{sc} 状态进行主动管理。当 SOC_{sc} 较高时,超级电容吸收制动功率的能力减弱;当 SOC_{sc} 较低时,超级电容输出加速功率的功率应力。 T_w 的取值范围为 [5 s, ..., 35 s], 初值取 5 s。

$$T_w = \begin{cases} 1.5T_w, & \epsilon_{delay} < 0.8 \\ \frac{1}{6}T_w, & \epsilon_{delay} \geq 0.8 \end{cases} \quad (12)$$

2) 等效成本最小策略

在自适应滑动平均滤波对总线功率进行低通滤波的基础上,采用等效成本最小策略对燃料电池的经济性和耐久性进行优化。将滤波器输出值 $P_{tr,lowpass}$ 、燃料电池实际功率 P_{fc} 以及蓄电池 SOC_{bat} 作为输入,选择能使瞬时氢耗与燃料电池瞬时退化成本之和最小的输出功率,作为燃料电池瞬时最优输出功率 $P_{fc,ref}$ 。在三电源混合系统中,超级电容器承担需求功率的高频部分,而蓄电池和燃料电池承担了需求功率的低频部分,因此仅考虑蓄电池的等效氢耗 \dot{m}_{bat} 。

$$\dot{m}_{bat} = \begin{cases} \frac{P_{bat}}{\eta_{bat} \eta_{DC/DC} \eta_{fc} \cdot LHV}, & P_{bat} > 0 \\ \frac{\eta_{bat} \cdot P_{bat}}{\eta_{DC/DC} \eta_{fc} \cdot LHV}, & P_{bat} \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

蓄电池和超级电容退化速度远小于燃料电池退化速度,因此在瞬时总成本中不考虑两者退化成本。瞬时总成本 \dot{C} 包含氢耗成本 \dot{C}_{H_2} 和燃料退化成本 \dot{C}_{fc} , 如式(14)所示。

$$\dot{C} = \dot{C}_{H_2} + \dot{C}_{fc} = (\dot{m}_{H_2} + \dot{m}_{bat}) \cdot \alpha_{H_2} + \dot{D}_{fc} \cdot \alpha_{fc} \quad (14)$$

式中: α_{H_2} 为氢气单价,取 70 元/kg; α_{fc} 为燃料电池购置价格,取 60 万元。

等效成本最小化策略步骤如下:

- (1) 根据 $P_{tr,lowpass}$, P_{fc} , SOC_{bat} 状态值,确定燃料电池输出功率范围 $[P_{fc,ref,min}, P_{fc,ref,max}]$ 。
- (2) 将燃料电池输出功率区间 $[P_{fc,ref,min}, P_{fc,ref,max}]$ 离散为 N 个控制量组成的集合。
- (3) 计算每个控制量对应的瞬时总成本 \dot{C} 。
- (4) 选择使 \dot{C} 最小化的控制量作为燃料电池输出功率最优参考值 $P_{fc,ref}$ 。

2.3 第2层控制策略

燃料电池提供需求功率中低频且大于 0 的部分。蓄电池和超级电容器提供的功率为需求功率与燃料电池实际功率之差: $P_{ess} = P_{tr} - P_{fc}$ 。蓄电池提供高频需求功率易造成母线电压频繁波动,影响系统稳定性。故蓄电池提供 P_{ess} 中的低频部分,超级电容提供 P_{ess} 中的高频部分,以窗口为 16 s 滑动平均滤波器对蓄电池和超级电容进行功率分配,蓄电池承担的功率为 $P_{bat,1}$,而超级电容器承担的功率为 $P_{sc,1}$,如式(15)所示。

$$\begin{cases} P_{bat,1} = \frac{1}{16} \int_{t-16}^t P_{ess} d\tau \\ P_{sc,1} = P_{ess} - P_{bat,1} \end{cases} \quad (15)$$

尽管滤波器能够实现了蓄电池和超级电容的功率分力减弱。 SOC_{sc} 较高或较低时,其不能提供高频功率,导致母线电压的跳变。因此超级电容的 SOC_{sc} 需要进行反馈控制,超级电容的最优状态值 $SOC_{sc,ref}$ 取 0.6,超级电容实际功率为高频功率 $P_{sc,1}$ 和状态修正功率 $P_{SOC_{sc}}$ 之和。

根据实际值 SOC_{sc} 与参考值 $SOC_{sc,ref}$ 之差 ΔSOC_{sc} 和超级电容最大存储能量 E_{sc} 确定需要调整能量 ΔE_{sc} ,超级电容状态调整时间为 30 s,用于调节超级电容 SOC_{sc} 功率为 $P_{SOC_{sc,1}}$ 如式(16)所示。

$$\begin{cases} \Delta SOC_{sc} = SOC_{sc,ref} - SOC_{sc} \\ E_{sc} = 1/2 C_{sc} V_{sc,nom}^2 \\ \Delta E_{sc} = \Delta SOC_{sc} \cdot E_{sc} \\ P_{SOC_{sc,1}} = \Delta E_{sc} / 30 \end{cases} \quad (16)$$

高频功率 $P_{sc,1}$ 的幅值较大时,超级电容 SOC_{sc} 变化迅

速,导致 SOC_{sc} 易于偏离 $SOC_{sc,ref}$, 此时超级电容的调节功率 $P_{SOC_{sc,1}}$ 也变化剧烈。为了减弱状态调节功率 $P_{SOC_{sc,1}}$ 对 $P_{sc,1}$ 的影响,提出如下非线性控制律 u , 如式(17)所示。

$$u = \begin{cases} 1, & |P_{sc,1}| < 20 \text{ kW} \\ -0.025 \cdot (|P_{sc,1}| - 60), & 20 \leq |P_{sc,1}| < 50 \text{ kW} \\ 0, & |P_{sc,1}| \geq 50 \text{ kW} \end{cases}$$

$$P_{SOC_{sc}} = u \cdot P_{SOC_{sc,1}} \quad (17)$$

式中: $|P_{sc,1}|$ 为超级电容承担高频功率 $P_{sc,1}$ 的绝对值, $P_{SOC_{sc}}$ 为非线性控制律修正后的超级电容状态调节功率。超级电容最终的功率为高频功率 $P_{sc,1}$ 和状态调节功率 $P_{SOC_{sc}}$ 之和,蓄电池最终的功率为低频功率 $P_{bat,1}$ 和状态修正功率 $P_{SOC_{sc}}$ 之差,如式(18)所示。

$$\begin{cases} P_{sc} = P_{sc,1} + P_{SOC_{sc}} \\ P_{bat} = P_{bat,1} - P_{SOC_{sc}} \end{cases} \quad (18)$$

3 仿真分析

为验证所提出策略的有效性,搭建了基于 MATLAB/Simulink 燃料电池卡车动力系统仿真模型,如图 4 所示。行驶工况的参考速度信号经过汽车动力学模型转化为牵引力以及实际车速信号;牵引力和实际车速信号经过车轮、传动系、电机以及逆变器转化为需求功率信号。将需求功率 P_{tr} 、燃料电池实际功率 P_{fc} 、蓄电池 SOC_{bat} 以及超级电容 SOC_{sc} 输入至能量管理策略,能量管理策略输出燃料电池功率参考值 $P_{fc,ref}$ 、蓄电池功率 P_{bat} 以及超级电容功率 P_{sc} 。

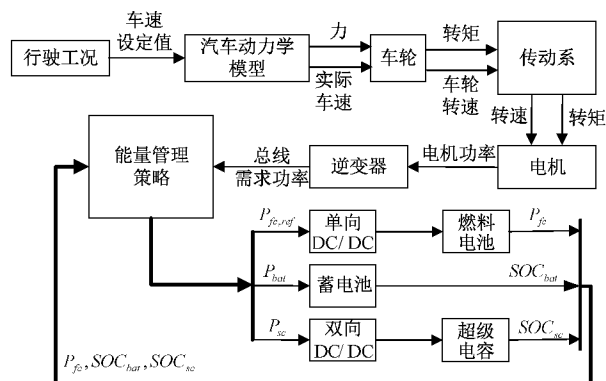


图 4 燃料电池动力系统仿真模型

采用中国重型商用货车行驶工况 (China heavy-duty commercial vehicle test cycle-truck, CHTC-HT) 作为测试工况,对本文提出的分级控制策略进行仿真实验验证。工况包含了市区、郊区以及高速公路 3 种路况,工况速度曲线、需求功率分别如图 5 和 6 所示。

从图 5 和 6 可知,市区路况下,汽车需求功率较小;而市郊和高速路况下,汽车需求功率较大。在行驶过程中,需求功率频繁变化;加速或者制动时,汽车需求功率变化较大。

本文提出的自适应滑动平均滤波和 ECMS 结合策略与滤波器策略、功率跟随策略对比,对比的参数有燃料电池

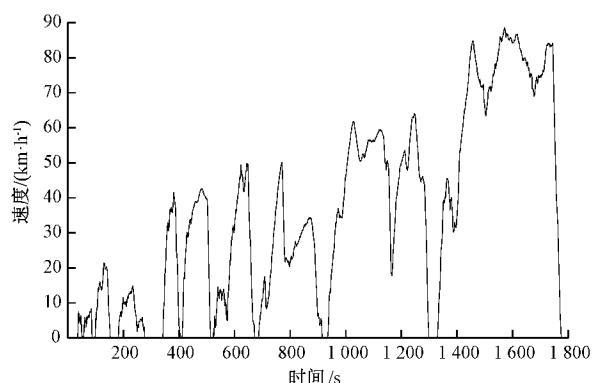


图 5 CHTC-HT 工况速度曲线

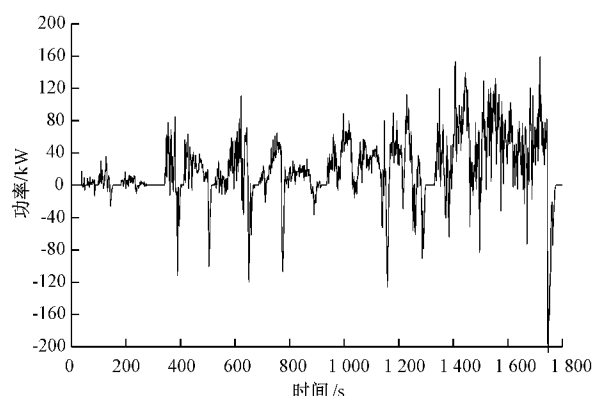


图 6 总线需求功率

输出功率 P_{fc} 、氢耗 m_{H_2} 、燃料电池退化速率 D_{fc} 以及蓄电池 SOC , 分别如图 7~10 所示。

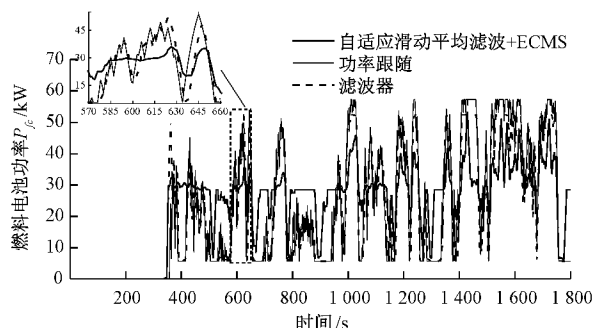


图 7 不同策略下燃料电池输出功率对比

由图 7 可知,功率跟随策略下燃料电池输出功率频繁波动,且轻载和重载运行时间占比较高。滤波器策略能够有效地抑制燃料电池输出功率波动。自适应滑动平均滤波器和 ECMS 结合策略能够抑制输出功率波动,并使燃料电池工作在额定功率 30 kW 附近。

由图 8 可知,自适应滑动平均滤波和 ECMS 结合策略、滤波器策略的氢气消耗量小于功率跟随策略的氢气消耗量。自适应滑动平均滤波和 ECMS 结合策略的氢气消耗速率波动较小,而功率跟随策略和滤波器策略氢气消耗速率波动大。

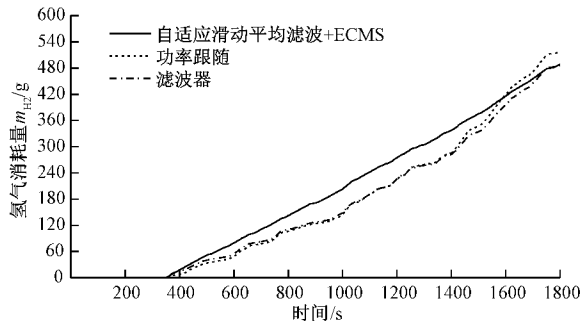


图 8 不同策略下燃料电池氢气消耗对比

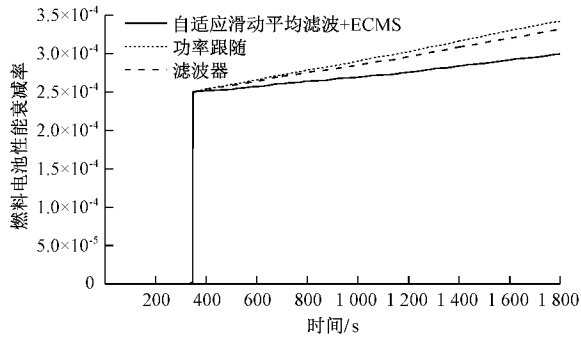


图 9 燃料电池性能衰减率对比

由图 9 可知,351 s 时,燃料电池启动导致燃料电池瞬时衰减率为 2.5033×10^{-4} ; 从 351~1800 s,3 种策略的衰减率均增加,3 种策略的衰减率由大至小依次是:功率跟随策略、滤波器策略、自适应滑动平均滤波和 ECMS 结合策略。

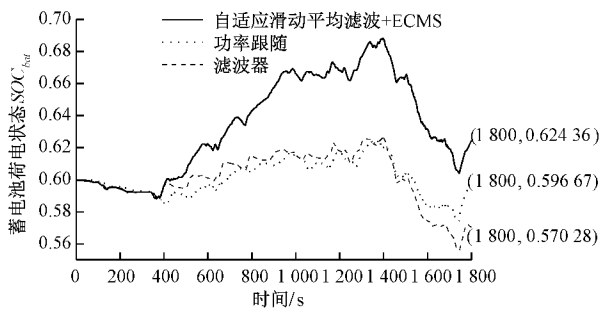


图 10 不同策略下蓄电池 SOC 曲线对比

由图 10 可知,当蓄电池初始 SOC 为 0.6 时,自适应滑动平均滤波+ECMS 策略、功率跟随策略和滤波器策略下,蓄电池的 SOC 终值依次为 0.62436、0.59667 和 0.57028,根据式(14)计算得 3 种策略下蓄电池的等效氢耗 m_{bat} 为 -35.45、4.85、46.66 g。上述 3 种策略下,燃料电池的性能对比如表 3 所示(DC/DC 变换器效率取 0.95,燃料电池效率取 0.6)。

由表 3 可知,自适应滑动平均滤波和 ECMS 结合策略相比于功率跟随策略,氢耗降低了 12.94%,燃料电池衰退量降低了 12.6%,总成本降低了 12.63%。

表 3 燃料电池管理策略性能对比

性能指标	功率跟随策略	滤波器策略	自适应滑动平均滤波+ECMS
总氢耗/g	520.90	531.63	453.50
燃料电池性能衰减率/%	3.42×10^{-4}	3.31×10^{-4}	2.99×10^{-4}
燃料电池使用成本/元	241.660	235.814	211.145

对于蓄电池和超级电容一级的能量管理,滑动平均滤波器的窗口大小对母线电压 V_{bus} 和超级电容能量状态 SOC_{sc} 有明显影响。滑动平均滤波器窗口宽度为 2、8、16 s 时,母线电压 V_{bus} 和超级电容 SOC_{sc} 曲线,分别如图 11 和 12 所示。

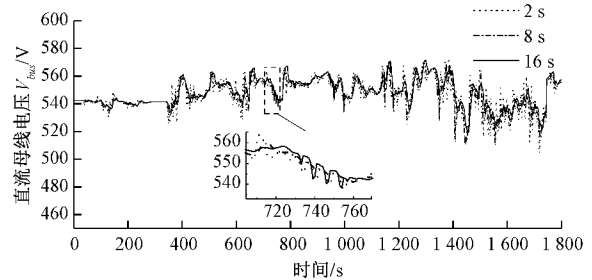


图 11 滑动平均滤波的窗口宽度对母线电压的影响

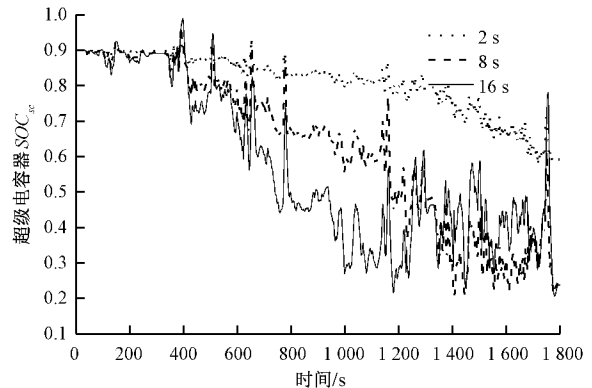


图 12 滑动平均滤波的窗口宽度对超级电容能量状态的影响

由图 11 和 12 可知,总体而言滑动平均滤波器的窗口越大,直流母线电压越平滑,超级电容状态 SOC_{sc} 波动范围也越大。但是在区间[720 s,762 s]内,8 s 窗口滤波器对母线电压波动抑制的效果优于 2 s 和 16 s;16 s 窗口滤波器不能有效抑制母线电压波动,母线电压出现了 4 次跳动。当 SOC_{sc} 较低或者较高时,超级电容提供峰值功率的能力减弱,蓄电池被迫提供峰值功率,导致母线电压波动,此时滤波器对抑制母线电压波动没有效果。因此单纯地调大滑动平均滤波器的窗口,对母线电压的稳定效果是有限的, SOC_{sc} 在合理区间时,超级电容才具有提供高频功率的能力,才能有效抑制母线电压波动。滑动平均滤波和 SOC_{sc}

状态非线性控制结合后的母线电压和超级电容 SOC_{sc} 的曲线,如图13和14所示。

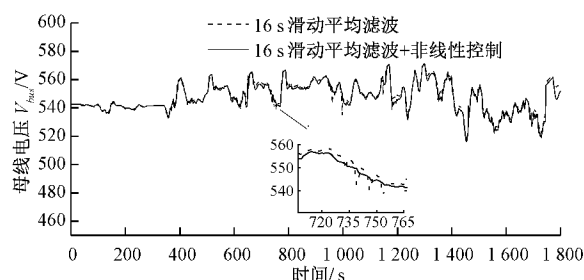


图13 采用非线性控制和滑动平均滤波后母线电压曲线

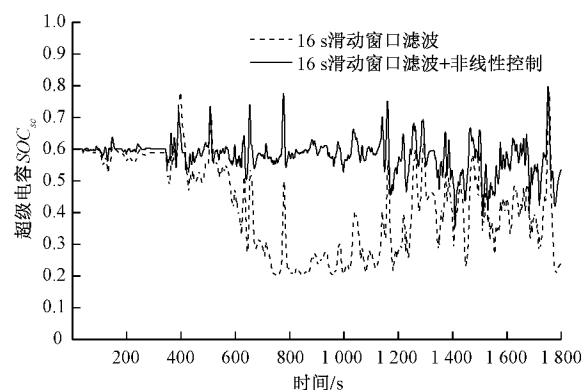


图14 采用非线性控制和滑动平均滤波后 SOC_{sc} 曲线

由图13和14可知,采用非线性控制律调控 SOC_{sc} 后,直流母线电压更加平滑,消除了母线电压跳变的情况,且 SOC_{sc} 始终在参考点0.6上下波动,超级电容具备更好的峰值功率输出能力。

4 结 论

本研究基于燃料电池汽车动力模型、等效氢耗和退化成本模型,提出了自适应滑动平均滤波、等效成本最小以及超级电容能量状态非线性控制相结合的燃料电池汽车分层能量管理策略。第1层控制策略对燃料电池输出功率进行优化管理,能够明显改善燃料电池的氢耗和耐久性;第2层控制策略管理锂电池和超级电容之间的功率分配,并将超级电容的能量状态控制在合理区间,以发挥超级电容的功率特性,从而有效抑制母线电压波动。仿真结果表明,所提出的能量管理策略能够实现燃料电池氢耗、耐久性和母线电压稳定性的改善。不足之处,本研究仅在仿真环境下验证了所提能量管理策略的有效性,后期还需在实车上进一步验证其性能。

参考文献

- [1] 张晗,杨继斌,张继业,等. 燃料电池有轨电车能量管理 Pareto 多目标优化[J]. 自动化学报, 2019, 45(12): 2378-2392.
- [2] 吕沁阳,滕腾,张宝迪,等. 增程式燃料电池车经济性与

耐久性优化控制策略[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2021, 53(7):126-133.

- [3] 李桢辉,付主木,陶发展. 燃料电池混合动力汽车分层能量管理策略[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(10): 113-118.
- [4] 刘楠,于博轩,郭爱,等. 燃料电池混合动力的功率跟随管理策略分析[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(6): 1147-1154.
- [5] 张泽辉,陈辉,高海波,等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(2):127-136.
- [6] FU Z, LI Z, SI P, et al. A hierarchical energy management strategy for fuel cell/battery/supercapacitor hybrid electric vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(39):22146-22159.
- [7] 王骞,李顶根,苗华春. 基于模糊逻辑控制的燃料电池汽车能量管理控制策略研究[J]. 汽车工程, 2019, 41(12):1347-1355.
- [8] 刘新天,李强,郑昕昕,等. 基于多目标优化的燃料电池汽车能量管理策略[J]. 电子测量技术, 2021, 44(6): 81-89.
- [9] 宋传学,周放,肖峰. 基于动态规划的复合电源能量管理优化[J]. 吉林大学学报(工学版), 2017, 47(1):8-14.
- [10] 林歆悠,夏玉田,李雪凡,等. 燃料电池汽车行驶里程自适应 ECMS 策略[J]. 汽车工程, 2019, 41(7):750-756.
- [11] 刘琦,詹跃东,李瑞棋. 燃料电池汽车能量管理策略多目标优化研究[J]. 电子测量技术, 2020, 352(20): 36-41.
- [12] LI X, WANG Y, YANG D, et al. Adaptive energy management strategy for fuel cell/battery hybrid vehicles using pontryagin's minimal principle [J]. Journal of Power Sources, 2019, 440:227105.
- [13] 应天杏. 基于功率需求预测的燃料电池汽车能量管理自适应控制策略研究[D]. 上海:上海交通大学, 2018.
- [14] YANG Z, RAVEY A, MARION P M C. Multi-mode predictive energy management for fuel cell hybrid electric vehicles using Markov driving pattern recognizer [J]. Applied Energy, 2020, 258:114057.
- [15] 林歆悠,夏玉田,魏申申. 基于增强学习算法的插电式燃料电池电动汽车能量管理控制策略[J]. 工程科学学报, 2019, 41(10):1332-1341.

作者简介

阮永利,硕士研究生,主要研究方向燃料电池汽车能量管理策略研究。

E-mail:18683668946@163.com

詹跃东(通信作者),教授,硕士生导师,主要研究方向为燃料电池汽车能量管理策略研究、燃料电池建模与优化控制等。

E-mail:ydzhan@163.com