

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2208807

考虑部件使用寿命的 FCEV 能量管理策略*

刘静^{1,2} 孙闫² 夏长高²

(1.南京交通职业技术学院汽车工程学院 南京 211188; 2.江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 能量管理控制策略是提升燃料电池电动汽车经济性及部件耐久性的关键技术,为了解决已有能量管理控制策略存在的缺陷,本文提出了一种基于二次型效用函数的能量管理策略。首先建立了车辆和零部件的数学模型,并通过零部件试验验证模型的准确性。其次应用二次型效用函数将需求功率分解为燃料电池和电池的输出功率,该策略考虑了电池及燃料电池的历史输出状态、变载率等,此外为了提高能源的耐久性和车辆的经济性,应用纳什均衡计算出所提出策略的最佳参数。仿真结果表明,所提出的控制策略可以有效提高燃料电池和电池的耐久性,降低氢气消耗,提升续航里程。与基于有限状态机的策略相比,该策略可降低 21.15% 电池性能的衰退。与模糊控制策略相比,所提出的控制策略可减少 36.52% 燃料电池性能的衰退。

关键词: 能量管理;二次型效用函数;纳什均衡;性能衰退;燃料电池

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

Energy management strategy for FCEV considering degradation of components

Liu Jing^{1,2} Sun Yan² Xia Changgao²(1. School of Automobile Engineering, Nanjing Vocational Institute of Transport Technology, Nanjing 211188, China;
2. School of Automotive and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Energy management strategy (EMS) is a key technology to improve the economy and durability of fuel cell electric vehicles. To overcome the shortcomings of most existing strategies, a new EMS based on quadratic utility function (QUF) is proposed in this paper. Mathematical models of vehicle and components are established, and the accuracy of the models is verified by bench test. QUF is used to decompose the demand power into the output power of fuel cells and batteries, the strategy considers the historical output state and load change rate of the battery and fuel cell. In order to improve the durability of power sources and the economy of the vehicle, the coefficients of the QUF are determined and optimized by using the Nash equilibrium. Simulation results show that the proposed strategy can effectively improve the durability of fuel cells and batteries, reduce hydrogen consumption, and extend driving range. Compared with the FSM strategy, this strategy can reduce the degradation of the batteries by 21.15%. Compared with the fuzzy control strategy, the proposed strategy can reduce the degradation of fuel cells by 36.52%.

Keywords: energy management; quadratic utility function; Nash equilibrium; performance degradation; fuel cell

0 引言

在环境污染问题日趋严重以及可用化石能源不断的减少的背景下,节能减排与绿色能源的使用已经成了各国研究的重点课题^[1]。混合动力汽车,纯电动汽车,燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicle, FCEV)开始不断被开发出来以取代传统内燃机汽车^[2-3],其中燃料电池因为其高效无污染的特点越来越受到人们的关注。然而燃料电池因为其

自身存在一些问题需要与其它能源一起协同使用,例如燃料电池工作时需要空压机等辅助部件提供压缩空气^[4];燃料电池因其能量转换的不可逆性,导致其无法回收制动能量;燃料电池动态输出特性较差,单独使用无法满足车辆频繁加速减速的运行工况;所以通常燃料电池电动汽车上都会配备电池或者其他电源^[5-6]。

在采用燃料电池与电池混合的汽车中,多电源的能量管理成为一个核心问题^[7-9]。能量管理策略的制定需要考

收稿日期:2022-01-09

* 基金项目:南京交通职业技术学院科研基金(JZ2104)、省重点研发计划(BE2018343-1)项目资助

虑复杂的约束条件和优化目标,一方面需要使系统效率最大,另一方面需要考虑不同电源自身的特性^[10]。现阶段,燃料电池在使用过程中存在严重的寿命衰退问题。燃料电池在使用过程中频繁启停、变载、怠速运行、过载运行都会大大加速燃料电池寿命的衰退。FCEV 能量管理策略的制定应当重点考虑燃料电池性能衰退的问题。与此同时,也要考虑频繁的充放电以及大幅的功率波动对电池性能的影响^[11-13]。需要指出的是,延长能源部件使用寿命的同时必然会导致更高的能量消耗,因此必须平衡整车经济性和部件寿命问题^[14]。最常规的平衡方法就是将多目标优化的问题通过加权系数转化为单目标优化问题^[15],该方法较为简单,但是权重系数的确定往往带有制定者很强的主观性,不同的权重设置会导致计算结果的不同^[16]。近年来,Pareto 优化方法在解决多目标优化问题上越来越凸显其优越性,张晗等^[17]提出了一种燃料电池有轨电车能量管理多目标优化方法,设计了基于有限状态机与非支配排序的能量管理 Pareto 多目标优化方法,该方法可以有效兼顾燃料电池的经济性与耐久性。但是多目标优化问题的求解结果呈现为 Pareto 曲面,该曲面上的解均为非支配关系,因此 Pareto 曲面上的解均为可行解,最终参数的选取仍依赖个人经验。

现阶段 FCEV 能量管理控制策略往往只在经济性和耐久性的框架下解决电源如何输出的问题,很少考虑燃料电池自身的动态输出特性。王诚等^[18]指出温度对燃料电池的输出特性的影响最大,不同的温度导致其活化过电位的不同。其次是电堆内阻。负载快速变化时,动态极化曲线之间出现滞后现象,且动态极化曲线一般都位于稳态极化曲线上方。本文通过台架试验得出燃料电池最大变载能力为每秒 5 kW,将功率变化率设定在此范围内可以很好的保证燃料电池正常输出。

综上,本文提出了一种全新的基于二次型效用函数的 FCEV 能量管理控制策略,该策略兼顾了能源消耗、部件耐久性以及燃料电池的输出特性,考虑了燃料电池及电池的历史输出信息,并结合各自的输出特性计算出下一刻的输出功率值。第 1 节介绍了 FCEV 总成的结构和系统模型,包括燃料电池和电池各自的效率模型和退化模型,并通过零部件试验验证了效率模型的准确性。第 2 节设计了一种新的能量管理控制策略,利用二次型效用函数将需求功率分解为两个能源部件的输出功率。为了得出最佳的电源的耐久性和整车经济性,采用纳什均衡确定并优化了二次型效用函数的系数。第 3 节比较了能量管理控制策略在优化前后的性能。最后,结论见第 4 节。

1 能源系统建模

1.1 电池模型

本文以电池作为主要能源,由于燃料电池无法回收制动能量,为了提高整车能量利用率,由电池回收制动能量,电池采用“Rint”模型,由电压源串联内阻构成。在任意时

刻 t , 荷电状态 SOC 与输出电流的关系满足式(1)。

$$\begin{cases} V_{bat} = V_{ocv} - I_{bat}R_{bat} \\ P_{bat} = V_{bat}I_{bat} \\ I_{bat} = \frac{V_{ocv} - \sqrt{V_{ocv}^2 - 4R_{bat}P_{bat}}}{2R_{bat}} \\ SOC(t) = SOC_{max} - \int_0^t \frac{I_{bat}dt}{Q_{max}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{bat} 、 V_{ocv} 、 R_{bat} 、 I_{bat} 、 P_{bat} 、 Q_{max} 分别为电池输出电压、开路电压、内阻、输出电流、输出功率及最大容量。

考虑到电池的最佳性能和使用寿命,将电池 SOC 限制在 SOC_{min} (10%) 和 SOC_{max} (95%) 之间。电池使用寿命主要受输入输出电流和温度影响,频繁的充放电导致其寿命的快速衰退。本文主要采用电池容量衰退模型,为了简化运算,电池温度采用恒定数值。根据充放电条件对电池容量衰退进行量化,Wang 等^[19]通过实验得出电池电流和循环使用寿命关系可以表示为:

$$\begin{cases} D_{bat} = a \cdot (A_h)^b \exp\left(-\frac{E_c + d \cdot C}{R \cdot T}\right) \\ A_h = \frac{1}{3600} T_{step} \sum_{n=1}^N |I_{bat}| \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{bat} 为电池容量衰退百分比, a 为指数前因子, E_c 为活化能, d 为电池充电/放电率的修正系数, C 为充放电倍率, R 为气体常数, T 为电池温度, T_{step} 为仿真步长。

1.2 燃料电池模型

本文选择一款最大输出功率为 30 kW 的燃料电池系统作为增程器,氢气消耗量可以通过式(3)计算。

$$\begin{cases} P_{fc}(t) = N_{fc} \cdot P_{fc-stack} \cdot \eta_{fc} \\ M_{hyd} = \frac{1}{J_{low}} \int_0^t P_{fc-stack}(t) \cdot \eta_{fc} dt \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{fc}(t)$ 为燃料电池系统输出功率, N_{fc} 为电堆个数, $P_{fc-stack}$ 为单个电堆输出功率, M_{hyd} 为氢气消耗质量, J_{low} 为燃料电池低热值, $\eta_{fc}(t)$ 为燃料电池系统效率。

影响燃料电池寿命的主要因素包括启停工况、怠速工况、过载工况、变载工况,考虑以上工况对燃料电池寿命的影响,本文主要参考 Song 等^[20]提出燃料电池性能衰退模型具体如下:

$$D_{fc} = \lambda_1 \cdot N_{on-off} + \lambda_2 \cdot T_{high} + \lambda_3 \cdot T_{low} + \lambda_4 \cdot N_{change} \quad (4)$$

式中: D_{fc} 为燃料电池总衰退百分比; N_{on-off} 、 T_{high} 、 T_{low} 、 N_{change} 为启停次数、过载持续时间、怠速持续时间、变载量; λ_1 、 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 为系数。

本文燃料电池模型以及整车模型所需要的数据均来自真实的台架试验,基于燃料电池测试工况获取燃料电池系统的稳态输出特性及动态输出特性,并根据以上数据拟合燃料电池系统效率曲线如图 1 所示。通过转毂台架实验获得相关整车参数,整车及零部件参数如表 1 所示,燃料电池台架试验如图 2 所示。

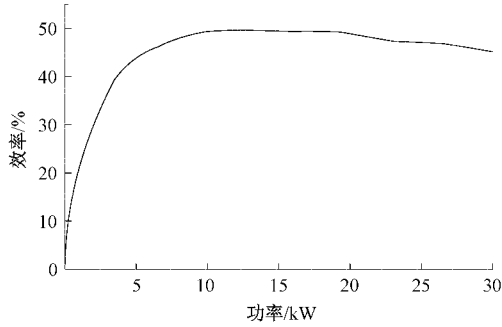


图 1 燃料电池系统效率

表 1 整车及零部件参数

	参数名称	数值
整车	长/宽/高/m	4.52/1.83/1.68
	整备质量/kg	1 500
	轴距/m	2.68
	滚动半径/mm	337.25
	速比	13
电池	额定电压/V	365
	单体容量/Ah	55
	单体个数	200
燃料电池	最大功率/kW	30
	最大电流/A	375
	额定电压/V	190
	可容氢气质量/kg	1.6

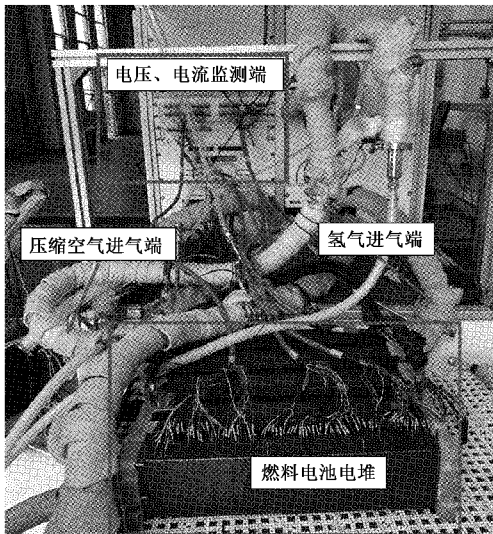


图 2 燃料电池台架试验

2 能量管理策略

2.1 策略分析

本节主要介绍一种基于二次型效用函数 (quadratic utility function, QUF) 的能量管理控制策略, 功率需求来

自于电机, 控制对象为燃料电池与电池输出功率, 策略制定主要满足 4 个预期目标。

1) 一次补充能源行驶里程最远。

2) 燃料电池性能衰退最小。

3) 电池性能衰退最小。

4) 燃料电池系统输出功率与电池输出功率之和与需求功率偏差最小。

2.2 策略制定

电池输出功率与燃料电池的输出功率按照效用二次型函数计算的功率输出, 具体如下。

本文控制对象为燃料电池及电池的输出功率 P_{fc} , P_{bat} , 各自的效用函数分别为 U_{fc}^* , U_{bat}^* , 电池与燃料电池通过其效用函数来衡量策略的收益。效用函数通常通过二次形式定义^[21]。由于二次函数的凹性保证了解存在唯一性, 这也是常用的用于模拟参与者偏好的形式。效用函数的二次形式为^[22]:

$$U = \gamma_1 + \gamma_2 x + \gamma_3 x^2 \quad (5)$$

式中: U 为效用函数, $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$ 为系数, x 为变量。

对电池而言, 影响其寿命衰退主要是功率的变化率与振幅, 电池输出功率变化越大寿命越短, 因此定义电池效用函数为:

$$U_{bat}^* = \alpha_1 - k_1 (P_{bat} - P_{bat_{ave}})^2 - k_2 (P_{bat} - P_{bat_{t-1}})^2 \quad (6)$$

式中: $P_{bat_{ave}}$ 为电池平均功率, $P_{bat_{t-1}}$ 为电池上一秒输出功率, α_1, k_1, k_2 为待定系数。

对于燃料电池而言, 由于其输出功率被限制在高效区, 燃料电池不存在怠速及过载输出情况, 因此本文主要考虑变载及启停导致的燃料电池寿命衰退, 以及燃料电池的经济性, 即燃料电池尽量以最大效率点的功率值输出。因此定义燃料电池的效用函数为:

$$U_{fc}^* = \beta_1 - k_3 (P_{fc} - P_{fc_{top}})^2 - k_4 (P_{fc} - P_{fc_{t-1}})^2 \quad (7)$$

式中: $P_{fc_{top}}$ 为燃料电池最高效率点的输出功率, $P_{fc_{t-1}}$ 为燃料电池上一秒输出, β_1, k_3, k_4 为待定系数。

电机作为能源消耗来源, 也要满足电机需求功率等于燃料电池提供的功率与电池提供的功率之和, 因此定义负载误差的效用函数为:

$$\begin{cases} U_{load} = \epsilon_1 - k (P_{req} - P_{fc} - P_{bat})^2 \\ Err = P_{req} - P_{fc} - P_{bat} \end{cases} \quad (8)$$

式中: Err 为需求功率与实际功率之间的偏差, ϵ_1, k 为待定系数。

需要注意的是, 负载的效用函数只包含了能源的控制变量 P_{fc}, P_{bat} , 而 P_{fc}, P_{bat} 由 U_{fc}^* 和 U_{bat}^* 联立求解出, U_{load} 并没有自己独立控制的变量, 因此负载的效用函数不应该作为一个独立的考虑对象。所以将负载的效用函数与电池和燃料电池的效用函数合并, 并将电池与燃料电池最终的效用函数形式修改如式(9)、(10)所示。

$$U_{bat} = 1 - k_1 (P_{bat} - P_{bat_{ave}})^2 - k_2 (P_{bat} - P_{bat_{t-1}})^2 - k_5 (P_{req} - P_{fc} - P_{bat})^2 \quad (9)$$

$$U_{fc} = 1 - k3(P_{fc} - P_{fc\text{top}})^2 - k4(P_{fc} - P_{fc\text{el}})^2 - k6(P_{req} - P_{fc} - P_{bat})^2 \quad (10)$$

式中: k_5, k_6 为修正后的待定系数。

2.3 二次型效用函数的求解

对电池以及燃料电池的效用函数求导, 以获得各自效用函数最大化。

$$\begin{cases} \frac{\partial U_{bat}}{\partial P_{bat}} = 0 \\ \frac{\partial U_{fc}}{\partial P_{fc}} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

根据式(9)~(11), 可得出电池和燃料电池输出功率满足:

$$P_{bat} = \frac{k_1 \cdot (k_3 + k_4 + k_6) \cdot P_{baxx} + k_2 \cdot (k_3 + k_4 + k_6) \cdot P_{batl}}{(k_1 + k_2 + k_5)(k_3 + k_4 + k_6) - k_5 \cdot k_6} + \frac{k_5 \cdot (k_3 + k_4) \cdot P_{req} - k_5 \cdot k_1 \cdot P_{fc} - k_5 \cdot k_3 \cdot P_{fc\text{top}}}{(k_1 + k_2 + k_5)(k_3 + k_4 + k_6) - k_5 \cdot k_6} \quad (12)$$

$$P_{fc} = \frac{k_3 \cdot (k_1 + k_2 + k_5) \cdot P_{fc\text{top}} + k_4 \cdot (k_1 + k_2 + k_5) \cdot P_{fc\text{el}}}{(k_1 + k_2 + k_5)(k_3 + k_4 + k_6) - k_5 \cdot k_6} + \frac{k_6 \cdot (k_1 + k_2) \cdot P_{req} - k_6 \cdot k_2 \cdot P_{fc\text{el}} - k_6 \cdot k_1 \cdot P_{baxx}}{(k_1 + k_2 + k_5)(k_3 + k_4 + k_6) - k_5 \cdot k_6} \quad (13)$$

2.4 基于纳什均衡的参数确定和优化

如第 2.1 节所述能量管理策略主要满足 4 个主要目标, 式(12)、(13)解决了燃料电池和电池如何输出的问题, 但是公式内部的参数尚未确定。如何确定 6 个参数从而满足 4 个主要目标, 并且使每个目标都能达到最优, 该问题本质上是一个多目标优化的问题, 如引言所述多目标求解方法以及采用加权系数将多目标问题转换为单目标问题的方法均存在一定的缺陷。

本文提出了一种解决方案, 将单目标优化算法与纳什均衡相结合。利用单目标闪电搜索优化算法分别求解出在单次补充能源到能源耗尽过程中, 不考虑燃料电池、电池性能衰退的最远行驶距离 S_{\max} 、不考虑最远行驶距离和电池性能衰退的燃料电池最小性能衰退百分比 $D_{fc\text{min}}$, 以及不考虑最远行驶距离和燃料电池性能衰退的电池最小性能衰退百分比 $D_{bat\text{min}}$ 。 $S_{\max}, D_{fc\text{min}}, D_{bat\text{min}}$ 作为单目标问题求解的最优解, 本文将将其作为参考基准, 求解目标为最佳的系数组合 $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$ 使得 $(-S, D_{fc}, D_{bat}, Err)$ 均能达到最小, 即 $\min(-S, D_{fc}, D_{bat}, Err)$ 。

2.5 纳什均衡求解过程

为了得出最佳系数组合 $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6)$, 本文将多目标优化问题转换为博弈策略问题, 将 $s = (-S, D_{fc}, D_{bat}, Err)$ 视为 4 个博弈参与者, 将 $(k_{1,i}, k_{2,i+1}, k_{3,i+1}, k_{4,i+1}, k_{5,i-1}, k_{6,i+1})$ 视为 6 个博弈策略空间中的 6 个变量集。由 4 个博弈参与者的各个策略组成的最佳策略组合 $s^i = (-S^i, D_{fc}^i, D_{bat}^i, Err^i)$ 中, 对于每个博弈方 i 的策略 s^i 给定其他博弈方策略组合 $s^j = (-S^j, D_{fc}^j, D_{bat}^j, Err^j)$ 的最

优策略, 均存在 $s^i \leq s^j$ 。称 s^i 为此轮博弈中的一个纳什均衡, s^i 对应的 6 个变量集 $(k_{1,i}, k_{2,i-1}, k_{3,i+1}, k_{4,i+1}, k_{5,i+1}, k_{6,i+1})$ 即为最优解。需要注意的是在实际求解过程中可能不存在一组或者存在多组具有非支配关系的解 $(k_{1,i}, k_{2,i+1}, k_{3,i+1}, k_{4,i-1}, k_{5,i+1}, k_{6,i+1})$ 使得 $s^i \leq s^j$ 。因此本文采用了折衷求解法, 在算法迭代求解的过程中, 当获得一组参数 $(k_{1,i}, k_{2,i-1}, k_{3,i+1}, k_{4,i+1}, k_{5,i+1}, k_{6,i+1})$ 使得此时 $|S^i - S_{\max}| < \theta_1, |D_{fc}^i - D_{fc\text{min}}| < \theta_2, |D_{bat}^i - D_{\min}| < \theta_3, |Err^i| < \theta_4$, 其中 $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ 为最小差距值, 该值由个人经验确定。

在求解过程中 Err 为误差值, 无需存在最小误差值, 只需要控制该值在合理范围 θ_4 内即可, 本文通过该方法获得的误差及燃料电池变载率如图 3 所示, 由图 3 可知燃料电池变载率控制在 5 kW/s 范围内, 且误差也控制在 1 kW 内, 达到了理想控制目标。

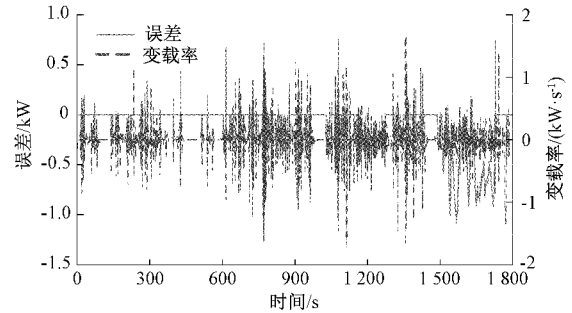


图 3 需求功率与输出功率的偏差及燃料电池变载率

3 结果与讨论

为了验证控制策略的可行性, 在典型工况 WLTC (worldwide harmonized light vehicles test cycle) 下进行了仿真验证, 并且使用了一种独立的基于有限状态机 (finite state machine, FSM) 的对比控制策略, 在对比策略 FSM 中, 燃料电池将工作在恒定功率, 此时 P_{fc} 被设定最佳效率点的输出功率 18.25 kW, 同时也满足 $P_{bat} = P_{req} - P_{fc}$ 。当燃料电池的输出功率保持不变时, 燃料电池的功率波动为 0。理论上 FSM 策略可以最大程度地减少燃料电池的退化, 但与此同时, 需求电流的波动将完全由电池承担, 这将加速电池的退化。

需求功率为负表示车辆处于驱动状态, 反之则为制动状态, WLTC 工况及在此工况下电机的需求功率如图 4 所示。

本文选取一个 WLTC 进行定性策略对比, 燃料电池及电池功率为负代表放电, 电池功率为正代表充电, 不同策略下的燃料电池输出功率对比如图 5 所示。从图 5 可以看出基于 FSM 策略的燃料电池输出功率平稳, 而基于 QUF 的燃料电池输出功率则具有一定的波动, 这与控制策略的设定符合。不同策略下的电池输出功率对比如图 6 所示, 不

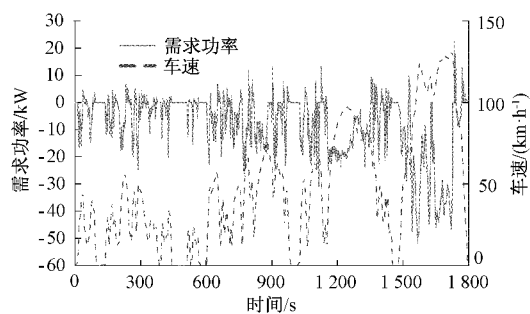


图 4 WLTC 工况与需求功率

同策略下电池 SOC 对比如图 7 所示,从图 6 可以看出,在制动能量回收阶段,电池一方面回收制动能量,另一方面燃料电池不停机给电池充电,此时基于 QUF 策略的燃料电池输出功率小于基于 FSM 策略的输出功率;在驱动阶段,基于 QUF 策略的电池输出功率大于基于 FSM 策略的输出功率,因此,基于 QUF 策略的电池 SOC 的增长速度将小于基于 FSM 策略的增长速度,两种策略的 SOC 对比也可由图 7 看出,这也表明基于 QUF 的控制策略可以在一定程度上抑制电池功率的波动,也可以延缓 SOC 的增速度。如果 SOC 快速上升以至于到达上止点,此时电池被充满电,燃料电池将关闭,所以电池 SOC 增长过快也会导致燃料电池启停次数变多,从而降低燃料电池使用寿命。

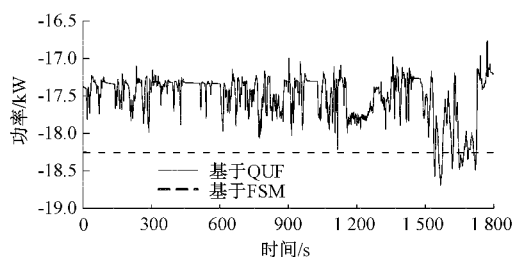


图 5 燃料电池输出功率对比

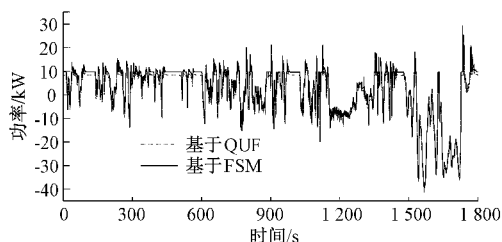


图 6 电池输出功率对比

两种不同控制策略下燃料电池效率如图 8 所示,从图 8 中可以看出,基于 FSM 的控制策略可以将燃料电池效率稳定在 49.47% (接近最高效率 49.6%)。基于 QUF 的控制策略允许燃料电池吸收需求电流的一些波动,但也可以确保燃料电池在高效区域运行。

为了量化 QUF 策略的优越性,本文进一步比较了 3 种控制策略(FSM、QUF 和 Fuzzy),3 种控制策略的性能对比如表 2 所示。3 种不同控制策略的评价目标为:电池衰退

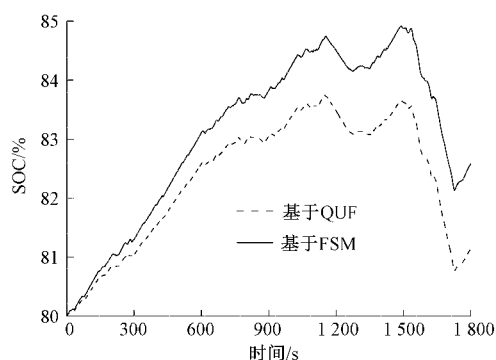


图 7 不同策略下电池 SOC 对比

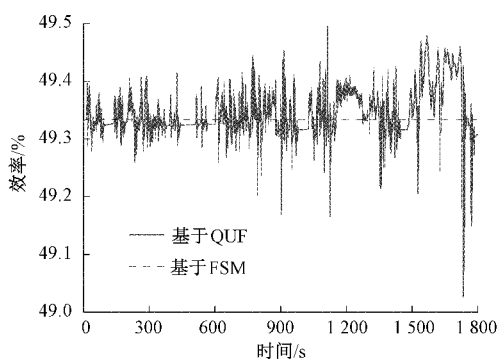


图 8 不同策略下的燃料电池效率对比

百分比、燃料电池衰退百分比、续航里程、电池能量损失(上述 4 种评价目标的初始条件是:初始氢气 1 600 g、初始 SOC 80%、终止条件为:剩余氢气 0 g、截止 SOC 10%)以及一个 WLTC 工况的氢气消耗。由表 2 可知,QUF 策略在电池性能衰退、续航里程和电池能量损失方面优于其他两种控制策略。基于 QUF 策略的燃料电池衰退量不可避免地大于 FSM,因为燃料电池吸收了部分需求功率的波动。FSM 策略在燃料电池衰退和氢消耗方面优于其他两种控制策略,因为它使燃料电池在高效率点稳定运行。可见,FSM 策略可以很好地减少燃料电池的衰退。但是,FSM 策略未考虑电池性能的保护,导致电池性能衰退和能量损失增加,续航里程短。基于模糊的控制策略只考虑分配问题,未考虑电源的衰退及经济性问题。模糊规则也是根据个人经验制定的,因此基于模糊控制策略的 5 个评价结果在 3 种控制策略中是最差的。

表 2 3 种控制策略的性能对比

控制策略	D_{bat} ($\times 10^{-3}$)	D_{fc} ($\times 10^{-5}$)	续航 里程/km	电池能量 损失/kJ	氢气 消耗/g
FSM	5.2	7.84	288.0	3 222.3	303.8
QUF	4.1	10.6	294.1	3 212.6	304.1
Fuzzy	7.2	16.7	281.0	3 230.9	310.4

4 结 论

本文提出了一种考虑了燃料电池和电池的性能衰退的能量管理策略。该方法易于使用,不需要复杂的微分方程并且能很好地满足能量管理的要求。首先,搭建了车辆模型和能源模型,包括燃料电池和电池的性能衰退模型。其次,设计了全新的能量管理策略,使用 QUF 和有限状态机将所需的需求功率分解为两种能源的输出功率。然后,为了提升电源的耐久性和车辆经济性,使用纳什均衡确定并优化了 QUF 策略的参数。最后,在 WLTC 循环工况下将 QUF、FSM 两种控制策略进行了对比。仿真结果表明,提出的 QUF 策略可以保证燃料电池的性能衰退在合理范围内,同时可以较大限度地减少电池的能量损失和性能衰退,并且可以增加续航里程。与 FSM 控制策略相比,QUF 控制策略可降低 21.15% 电池的衰退,续航里程增加 2.12%;与传统模糊控制策略相比,QUF 控制策略可降低 36.52% 燃料电池的衰退,并提升 4.66% 的续航里程。

参考文献

- [1] 胡杰,刘迪,杜常清,等. 电动汽车复合能源系统能量管理策略研究[J]. 机械科学与技术, 2020, 39(10): 1606-1614.
- [2] 吴珊. 燃料电池电动汽车能量管理系统最优控制策略研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(4): 101-105.
- [3] 周苏,王克勇,文泽军,等. 车用多堆燃料电池系统能量管理与控制策略[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2021, 49(1): 107-115.
- [4] 贾和坤,唐捷旭,陈金柯,等. 模糊逻辑的增程式燃料电池 SUV 能量管理策略研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2021, 35(9): 17-24.
- [5] AKHOUNDZADEH M H, PANCHAL S, SAMADANI E, et al. Investigation and simulation of electric train utilizing hydrogen fuel cell and lithium-ion battery [J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2021, 46: 101234.
- [6] MENG K, ZHOU H, CHEN B, et al. Dynamic current cycles effect on the degradation characteristic of a H₂/O₂ proton exchange membrane fuel cell [J]. Energy, 2021, 224: 120168.
- [7] 王永军,孙贵宾,李文涛,等. 基于小波规则的燃料电池电动汽车能量管理策略[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2021, 35(4): 322-328.
- [8] 李卫,郑春花,许德州. 基于深度强化学习的燃料电池混合动力汽车能量管理策略研究[J]. 集成技术, 2021, 10(3): 47-60.
- [9] 张利新,李双龙,杨杰君. 氢燃料电池电混合汽车能量管理控制策略研究[J]. 客车技术与研究, 2022(1): 1-3,12.
- [10] MOKRANI Z, REKIOUA D, MEBARKI N, et al. Proposed energy management strategy in electric vehicle for recovering power excess produced by fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(30): 19556-19575.
- [11] OUYANG M, FENG X, HAN X, et al. A dynamic capacity degradation model and its applications considering varying load for a large format Li-ion battery[J]. Applied Energy, 2016, 165: 48-59.
- [12] ZHOU Y, LI H, RAVEY A, et al. An integrated predictive energy management for light-duty range-extended plug-in fuel cell electric vehicle[J]. Journal of Power Sources, 2020, 451: 227780.
- [13] SHEN J, DUSMEZ S, KHALIGH A. Optimization of sizing and battery cycle life in battery/ultracapacitor hybrid energy storage systems for electric vehicle applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(4): 2112-2121.
- [14] FLETCHER T, THRING R, WATKINSON M. An energy management strategy to concurrently optimise fuel consumption & PEM fuel cell lifetime in a hybrid vehicle[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2016, 41(46): 21503-21515.
- [15] HU Z, LI J, XU L, et al. Multi-objective energy management optimization and parameter sizing for proton exchange membrane hybrid fuel cell vehicles[J]. Energy Conversion and Management, 2016, 129: 108-121.
- [16] RAHMANI Y, PAZIRANDEH A, GHOFRANI M B, et al. Calculation of the deterministic optimum loading pattern of the BUSHEHR VVER-1000 reactor using the weighting factor method [J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 49: 170-181.
- [17] 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.
- [18] 王诚,毛宗强,谢晓峰,等. PEM 燃料电池堆动态特性研究[J]. 化工学报, 2004(S1): 234-237.
- [19] WANG J, LIU P, HICKS-GARNER J, et al. Cycle-life model for graphite-LiFePO₄ cells [J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(8): 3942-3948.
- [20] SONG K, CHEN H, WEN P, et al. A comprehensive evaluation framework to evaluate energy management strategies of fuel cell electric vehicles [J]. Electrochimica Acta, 2018, 292: 960-973.
- [21] RAHBARI-ASR N, CHOW M Y, CHEN J, et al. Distributed real-time pricing control for large-scale unidirectional V2G with multiple energy suppliers[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1953-1962.

- [22] MA L, LIU N, ZHANG J, et al. Energy management for joint operation of CHP and PV prosumers inside a grid-connected microgrid: A game theoretic approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2016, 12(5): 1930-1942.

作者简介

刘静,工学硕士,在读博士,副教授,主要研究方向为车辆新能源、多电源能量管理、电机高效控制等。

E-mail:15251813528@139.com

孙闫,工学硕士,在读博士,主要研究方向为车辆新能源、多电源能量管理等。

E-mail:1360118360@qq.com

夏长高(通信作者),工学博士,博士生导师,教授,主要研究方向为车辆新能源、农业车辆智能驾驶与自主作业、多档变速箱的设计与开发等。

E-mail:xiacg@ujs.edu.cn