

3-18-2021

Comparative Study of Energy Management Strategy Based on Value Loss of Tram Hybrid Power System

Guo Ai

1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Chen Chao

1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

Junjie Shi

2. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000, China;

Zhengjie Liu

1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; ;

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Comparative Study of Energy Management Strategy Based on Value Loss of Tram Hybrid Power System

Abstract

Abstract: *In order to comprehensively evaluate the economy of fuel cell hybrid power system for tram and improve its durability, a value loss function based on the life of fuel cell and lithium battery in hybrid system is proposed.* The demanded power in actual conditions is adopted and the value loss function is used to analyze the three energy policies including the state machine, power following, and minimum equivalent hydrogen consumption. The simulation results show that the value loss of state machine strategy is the smallest, and compared with power following and equivalent hydrogen consumption minimization strategies, this method reduces the value loss of the system by 11.0% and 6.3%, respectively.

Keywords

fuel cell, hybrid power, energy management strategy, value loss, evaluation function

Authors

Guo Ai, Chen Chao, Junjie Shi, Zhengjie Liu, Weirong Chen, Jiayi Liang, and Liu Nan

Recommended Citation

Guo Ai, Chen Chao, Shi Junjie, Liu Zhengjie, Chen Weirong, Liang Jiayi, Liu Nan. Comparative Study of Energy Management Strategy Based on Value Loss of Tram Hybrid Power System[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(3): 572-580.

基于价值损耗的有轨电车混合动力能量策略比较研究

郭爱¹, 陈超¹, 石俊杰², 刘正杰¹, 陈维荣¹, 梁嘉懿¹, 刘楠²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 中车唐山机车车辆有限公司, 河北 唐山 064000)

摘要: 为了全面评价燃料电池有轨电车混合动力系统的经济性和提高系统的耐久性, 计及燃料电池和锂电池寿命; 提出了一种基于混合动力系统寿命的价值损耗评价函数。采用实测工况的需求功率, 利用价值损耗函数对状态机、功率跟随和等效氢耗最小 3 种能量方法进行经济性分析。仿真结果表明: 状态机策略的价值损耗最小, 相比功率跟随和等效氢耗最小策略, 该方法使系统的价值损耗分别减小了 11.0%, 6.3%。

关键词: 燃料电池; 混合动力系统; 能量管理策略; 价值损耗; 评价函数

中图分类号: TM911.4; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2021) 03-0572-09

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.19-0561

Comparative Study of Energy Management Strategy Based on Value Loss of Tram Hybrid Power System

Guo Ai¹, Chen Chao¹, Shi Junjie², Liu Zhengjie¹, Chen Weirong¹, Liang Jiayi¹, Liu Nan²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. CRRC Tangshan Co., Ltd., Tangshan 064000, China)

Abstract: In order to comprehensively evaluate the economy of fuel cell hybrid power system for tram and improve its durability, a value loss function based on the life of fuel cell and lithium battery in hybrid system is proposed. The demanded power in actual conditions is adopted and the value loss function is used to analyze the three energy policies including the state machine, power following, and minimum equivalent hydrogen consumption. The simulation results show that the value loss of state machine strategy is the smallest, and compared with power following and equivalent hydrogen consumption minimization strategies, this method reduces the value loss of the system by 11.0% and 6.3%, respectively.

Keywords: fuel cell; hybrid power; energy management strategy; value loss; evaluation function

引言

质子交换膜燃料电池具有绿色环保、低噪声和高效等优点, 已经成为新一代动力源^[1-2]; 现代有轨电车具有安全可靠、环保节能等优点, 在轨道交通领域内越来越受到关注^[3-4]; 以燃料电池混合动力作为有轨电车动力源摆脱了线路接触网供电, 在城市轨道交通领域具有广阔的应用前景^[5]。

燃料电池混合动力有轨电车的能量管理是核心技术之一^[6]。国内外学者对燃料电池混合动力系统能量管理策略进行了大量研究。孟翔等^[7]以燃料的经济性和耐久性为优化目标, 提出了一种基于庞特里亚金极小值原理满意优化的分层能量管理方法, 有效减小了氢耗, 降低了燃料电池输出功率波动, 提高了系统耐久性。陈维荣等^[6]以燃料经济性为评价指标, 设计了一种基于改进动态规划算法的

收稿日期: 2019-10-25 修回日期: 2020-01-18

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB1201003, 2017YFB1201005)

第一作者: 郭爱(1970-), 女, 博士, 讲师, 研究方向为车载燃料电池建模与控制、混合能量管理技术。E-mail: 634576728@qq.com

通信作者: 陈超(1994-), 男, 硕士生, 研究方向为混合能量管理技术。E-mail: 284106868@qq.com

能量管理方法,使燃料经济性提高了 78%。张国瑞等^[8]以系统氢耗量为优化指标,提出了基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力系统能量管理方法,减小了母线电压波动率,降低了系统等效氢耗量。

现有的燃料电池混合动力有轨电车能量管理研究多以机车系统效率、氢耗量、功率波动率和母线电压波动率等为评价指标,很少有涉及到以燃料电池或动力电池的价值损耗、剩余寿命作为评价指标。然而,混合动力有轨电车使用寿命短、性能衰减快、维护成本高等缺点是制约其商业化的关键因素^[9-10]。为了分析能量管理策略对燃料电池混合动力系统寿命和经济性影响,本文通过燃料电池混合动力系统相对寿命模型,构造一个价值损耗评价函数,对有轨电车的能量方法进行价值损耗分析,以达到计算混合动力系统相对寿命和减小系统价值损耗,提高有轨电车寿命的目的。

1 有轨电车混合动力系统

由于质子交换膜燃料电池输出特性较软、动态响应慢,在负载变化较大的情况下难以满足负载的功率需求^[11]。因此,燃料电池常和超级电容或动力电池组成混合动力系统,以提高系统的动态响应速度^[12]。

本文研究的燃料电池有轨电车混合动力系统拓扑结构如图 1 所示。在该结构中,锂电池直接与直流母线连接,能够有效减少系统损耗、提升系统能量传递效率^[13]。燃料电池输出电压随负载变化较大,需要通过一个单向 DC/DC 连接到直流母线上,保证燃料电池输出电压和负载电压相匹配。

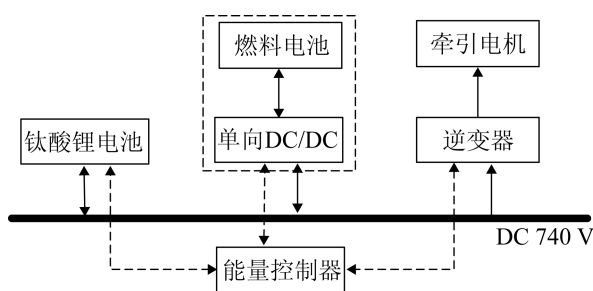


图 1 燃料电池混合动力拓扑结构
Fig. 1 The topology structure of fuel cell hybrid system

2 价值损耗评价函数

2.1 燃料电池寿命损耗

燃料电池在实际工况中,通常有 4 种工作状态^[14]: (1) 启/停机; (2) 加/减载; (3) 低功率; (4) 高功率。其中,当燃料电池输出功率大于其额定功率的 80%,为高功率运行状态;当燃料电池输出功率小于其额定功率的 20%时,为低功率运行状态。根据文献^[15]的研究,电堆的 4 种工作状态会对单体电池的电压造成不同的衰减:(1) 一次启/停机电压衰减 13.91 μV ; (2) 每千瓦加/减载电压衰减 0.044 1 μV ; (3) 低功率运行每小时电压衰减 10.17 μV ; (4) 高功率运行每小时电压衰减 11.74 μV 。

燃料电池电堆工作一段时间后,其电压衰减量 ΔV_{fc} 为

$$\Delta V_{fc} = N(\bar{d}_h t_h + \bar{d}_l t_l) + \bar{d}_{ss} n_{ss} + \bar{d}_c |\Delta P_{fc}|, \quad (1)$$

式中: N 为燃料电池单体数; \bar{d}_h 为高功率运行状态下单体电压每小时平均衰减率, $\mu\text{V}/\text{h}$; \bar{d}_l 为低功率运行状态下单体电压每小时平均衰减率, $\mu\text{V}/\text{h}$; \bar{d}_{ss} 为启/停机一次单体电压平均衰减率, $\mu\text{V}/\text{cycle}$; \bar{d}_c 为每千瓦加/减载单体电压平均衰减率, $\mu\text{V}/\text{kW}$; n_{ss} 为起/停次数; ΔP_{fc} 为电堆输出功率的变化率, kW 。

当燃料电池输出电流为额定电流时,燃料电池端电压下降至其额定电压的 80%,即认为燃料电池寿命终结^[16]。基于此,定义燃料电池的相对寿命 L_{fc} 为

$$L_{fc} = \frac{k_{fc} \Delta V_{fc}}{0.2 V_{fc,rate}}, \quad (2)$$

式中: $V_{fc,rate}$ 为燃料电池额定电压, V ; k_{fc} 为燃料电池的相对寿命放大系数,用来放大燃料电池的衰减电压便于对比分析。

2.2 燃料电池相对氢耗量

当燃料电池电流为 I_{fc} 时,根据法拉第定律和电化学反应方程式,电堆单位时间内消耗的氢气量 F_{H_2} 为

$$F_{H_2} = \frac{NI_{fc}M_{H_2}}{2F}k_{H_2}, \quad (3)$$

式中： F 为法拉第常数，为 96 487 C/mol； M_{H_2} 为氢气的摩尔质量，取值 2.02 g/mol； k_{H_2} 为考虑到系统的氢气损耗而定义的过量系数，取值范围为 1.01~1.05。

总氢耗量为

$$W_{H_2} = \frac{NM_{H_2}k_{H_2}}{2F} \int_0^{t_{cyc}} I_{fc} dt. \quad (4)$$

式中： t_{cyc} 为燃料电池工作时长，s。

定义 $W_{H,rel}$ 为相对氢耗量

$$W_{H,rel} = \frac{\int_0^{t_{cyc}} I_{fc} dt}{\int_0^{t_{cyc}} I_{fc,rate} dt}, \quad (5)$$

式中： $I_{fc,rate}$ 为燃料电池额定电流，A。

2.3 锂电池寿命损耗

锂电池的循环寿命受充放电次数、峰值电流以及温度等诸多因素的影响^[17]。为简化分析，本文仅考虑放电深度 DoD (depth of discharge) 和放电次数对电池循环寿命的影响。其中放电深度越大，电池循环寿命越短^[18]。首先电池的放电深度通过雨流计数法计算，然后根据表 1 某厂家提供的钛酸锂电池不同放电深度与对应的循环寿命^[19]，计算电池的等效循环寿命。

表 1 放电深度与循环寿命对应关系

Tab. 1 Relationship between the depth of discharge and cycle life

放电深度/(%)	寿命/万次	放电深度/(%)	寿命/万次
10	28.00	60	2.32
20	12.40	70	1.73
30	7.24	80	1.32
40	4.72	90	1.00
50	3.24	100	0.75

对表 1 数据进行曲线拟合，得到表征循环寿命与放电深度的关系为

$$N_{ctf} = 2.864DoD^4 - 7.611DoD^3 + 7.377DoD^2 - 3.099DoD + 0.519, \quad (6)$$

式中： N_{ctf} 为循环寿命，百万次； DoD 为放电深度， DoD_i 为锂电池第 i 次循环周期的放电深度，第 i 次

的等效循环寿命定义为

$$N(DoD_i) = \frac{N_{ctf}(DoD_i)}{N_{ctf}(DoD_1)}, \quad (7)$$

式中： $N_{ctf}(DoD_i)$ 为放电深度为 DoD_i 时的循环寿命； $N_{ctf}(DoD_1)$ 为放电深度为 1 时的循环寿命；

锂电池等效循环寿命为

$$N = \sum_{DoD=0.1}^{DoD=1} \frac{N_{ctf}(DoD_i)}{N_{ctf}(DoD_1)}. \quad (8)$$

基于此，定义锂电池的相对寿命 L_{bat} 为

$$L_{bat} = \frac{k_{ctf} \cdot N}{N_{ctf}(DoD_1)}, \quad (9)$$

式中： k_{bat} 为锂电池相对寿命放大系数。

2.4 价值损耗评价函数

由于锂电池寿命、燃料电池寿命、氢耗量各自的衡量单位不一样，无法对能量管理方法的经济性进行全面评价。本文将燃料电池相对寿命和锂电池相对寿命分别乘以其市场价格系数得到二者的价值损耗，而氢耗量乘以其市场价格系数就是氢气价值损耗。利用锂电池价值损耗、燃料电池价值损耗、氢气价值损耗构建一个混合动力系统的价值损耗评价函数，统一、直观地对混合动力系统的能量管理方法进行经济性分析，价值损耗评价函数 J 定义为

$$J = c_{fc}L_{fc} + c_{bat}L_{bat} + c_{H_2}W_{H,rel}$$

式中： c_{fc} 、 c_{bat} 和 c_{H_2} 为燃料电池、钛酸锂电池和氢气的市场价格系数。

对于既定的混合动力系统，不同能量管理策略下的价值损耗指标 J 不同；指标 J 小，表示该策略下系统的价值损耗低，能量管理策略的经济性好，同时系统耐久性高。

3 能量管理策略

本文设计了有限状态机、功率跟随和等效氢耗最小 3 种能量管理方法。

3.1 有限状态机

有限状态机依赖于专家经验的一种能量管理策略，广泛应用在实际工程中^[20]。该方法通过

对锂电池的 SOC 和负载需求功率不同区间划分, 得到两个状态变量的不同区间组合; 每一个区间的组合都对应一个燃料电池输出参考功率, 从而完成混合动力系统的功率分配^[21]。本文制定如表 2 所示的有限状态机控制策略规则表。其中, $P_{fc,max}$, $P_{fc,min}$, $P_{fc,rate}$ ——燃料电池的最大、最小、额定功率。

表 2 有限状态机控制策略规则表
Tab. 2 State machine control policy rule table

SOC	需求功率(P_{req})	燃料电池期望功率
	$P_{req} < P_{fc,min}$	$P_{fc,min}$
(0.71,0.8)	$P_{fc,min} < P_{req} < P_{fc,rate}$	$P_{fc,min}$
	$P_{req} > P_{fc,rate}$	$P_{fc,opt}$
[0.69,0.71]	—	保持
	$P_{req} < P_{fc,min}$	$P_{fc,min}$
(0.52,0.7)	$P_{fc,min} < P_{req} < P_{fc,rate}$	P_{req}
	$P_{fc,rate} < P_{req} < P_{fc,max}$	$P_{fc,rate}$
	$P_{req} > P_{fc,max}$	$P_{fc,max}$
[0.49,0.52]	—	保持
	$P_{req} < P_{fc,min}$	$P_{fc,rate}$
(0.2,0.49)	$P_{fc,min} < P_{req} < P_{fc,rate}$	$P_{fc,rate}$
	$P_{req} > P_{fc,rate}$	$P_{fc,max}$

特别地, $SOC \in [0.69,0.71]$ 和 $[0.49,0.72]$ 是为了避免 SOC 在相邻两个临界点来回跳动, 引起燃料电池输出功率波动而设置的迟滞状态。该状态下, 燃料电池的输出功率不会随 SOC 值的变化而变化, 而是保持上一次的输出功率。

3.2 功率跟随

功率跟随是混合动力系统中常用的能量管理方法^[7]。该方法的目标是维持锂电池的荷电状态 (SOC) 在期望值附近^[22]。本文设计的各能量单元的功率分配关系如下

$$P_{fc,ref} = P_{req} - P_{bat,ref}^* \quad (11)$$

$$P_{bat}^* = P_{bat,rate} \frac{SOC - SOC^*}{\Delta SOC} \quad (12)$$

$$SOC^* = \frac{1}{2}(SOC_H + SOC_L) \quad (13)$$

$$\Delta SOC = \frac{1}{2}(SOC_H - SOC_L) \quad (14)$$

式(11)~(14)中: P_{req} 为需求功率, kW; $P_{fc,ref}$ 为燃料电池输出参考功率, kW; $P_{bat,ref}^*$ 为锂电池输出参考功率, kW; $P_{bat,rate}$ 为锂电池的额定功率, kW; SOC_H 为锂电池荷电状态的最高值; SOC_L 为锂电池荷电状态的最低值。

3.3 等效氢耗最小

等效氢耗最小能量管理方法属于瞬时优化方法^[23]。该能量管理策略实现系统单位周期内等效氢气消耗最小, 从而达到燃料经济性最优^[24]。约束表达式为

$$\begin{cases} P_{fc,opt} = \arg \min C = \arg \min (C_{fc} + kC_{bat}), \\ \text{s.t. } SOC_L \leq SOC \leq SOC_H, \\ U_{bat,min} \leq U_{bat} \leq U_{bat,max}, \\ 0 \leq P_{fc} \leq P_{fc,max}, \end{cases} \quad (15)$$

式中: $U_{bat,min}$, $U_{bat,max}$ 为锂电池电压的最小值和最大值, V; $P_{fc,opt}$ 为燃料电池最优输出功率, kW; k 为定义的修正系数, 其表达为

$$k = 1 - 2\mu \frac{SOC - 0.5(SOC_H + SOC_L)}{SOC_H - SOC_L} \quad (16)$$

式中: μ 为 SOC 平衡系数; C_{fc} 为燃料电池的瞬时氢耗量, 其是关于燃料电池输出功率的函数, 二者的关系可等效为线性的, 表达如下

$$C_{fc} = aP_{fc} + b \quad (17)$$

式中: a , b 是拟合系数。

式(15)中 C_{bat} 为锂电池的等效瞬时氢耗, 可计算为

$$C_{bat} = \begin{cases} \frac{P_{bat} C_{fc,avg}}{\eta_{dis} \eta_{chg,avg} P_{fc,avg}}, P_{bat} \geq 0, \\ \frac{P_{bat} C_{fc,avg}}{\eta_{chg} \eta_{dis,avg} P_{fc,avg}}, P_{bat} \leq 0, \end{cases} \quad (18)$$

式中: P_{bat} 为锂电池功率, kW; $\eta_{chg,avg}$, $\eta_{dis,avg}$ 为锂电池的平均充、放电效率; $P_{fc,avg}$ 为燃料电池平均功率, kW; $C_{fc,avg}$ 为燃料电池平均瞬时氢耗, g; η_{chg} , η_{dis} 为锂电池的充、放电效率。

作如下定义

$$\begin{cases} x_{\max} = \sqrt{1 + \frac{4U_{\text{bat,max}}(U_{\text{bat,max}} - U_{\text{bat}})}{U_{\text{bat}}^2}}, \\ x_{\min} = \sqrt{1 + \frac{4U_{\text{bat,min}}(U_{\text{bat,min}} - U_{\text{bat}})}{U_{\text{bat}}^2}}, \\ K = k\eta_{\text{chg,avg}}, \\ A = \frac{1}{\eta_{\text{chg,avg}}\eta_{\text{dis,avg}}}, \\ B = \frac{x_{\max}}{\eta_{\text{chg,avg}}\eta_{\text{dis,avg}}} \end{cases} \quad (19)$$

将式(16), (18)~(19)带入式(15)中, 进一步化简, 求解式(15)瞬时优化问题的解析解, 如式(20)~(21)所示。

$$P_{\text{bat,opt}} = \begin{cases} \frac{U_{\text{bat,min}}(U_{\text{bat}} - U_{\text{bat,min}})}{R_{\text{dis}}}, K \leq x_{\min}, \\ U_{\text{bat}}^2 \frac{1-K^2}{4R_{\text{dis}}}, x_{\min} \leq K \leq 1, \\ 0, 1 \leq K \leq A, \\ U_{\text{bat}}^2 \frac{1-(K\eta_{\text{chg,avg}}\eta_{\text{dis,avg}})^2}{4R_{\text{chg}}}, A \leq K \leq B, \\ \frac{-U_{\text{bat,max}}(U_{\text{bat,max}} - E)}{R_{\text{chg}}}, K \geq B, \end{cases} \quad (20)$$

$$P_{\text{fc,opt}} = \min(\max(P_{\text{req}} - P_{\text{bat,opt}}, P_{\text{fc,min}}), P_{\text{fc,max}}) \quad (21)$$

由式(20)可知, 锂电池的最优输出功率 $P_{\text{bat,opt}}$ 是荷电状态 SOC 和平衡系数 μ 的函数, 得到锂电池的最优输出功率之后, 利用式(21)即可求出燃料电池的最优输出功率 $P_{\text{fc,opt}}$ 。

4 仿真及结果分析

本文以某市 1 km 的有轨电车线路数据作为测试工况, 验证所设计的 3 种能量管理策略。然后, 利用价值损耗评价函数对 3 种能量管理方法进行经济性分析。

4.1 工况和仿真参数设置

4.1.1 工况设置

本文采用有轨电车为 2 动 2 拖, 共 8 套相同的电源系统为机车提供功率, 其中每套电源系统应为有轨电车提供的需求功率如图 2 所示。

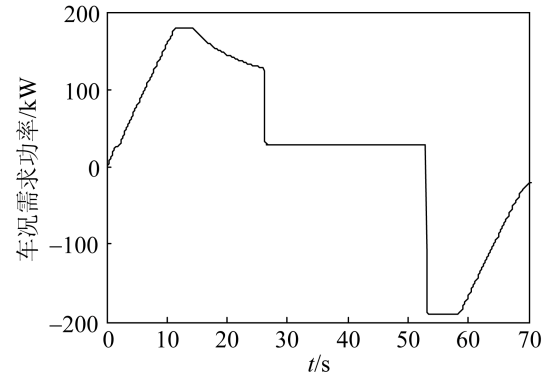


图 2 需求功率

Fig. 2 The required power of the locomotive

图 2 所示的有轨电车工况包含牵引、巡航、制动、停车 4 个阶段, 是一段典型的有轨电车线路数据。为了保证各种能量管理策略具有可比性, 锂电池初始 SOC 均设为 65%。

4.1.2 仿真参数设置

每套采用额定功率为 75 kW 的燃料电池、773 V, 20 Ah 锂电池, 系统参数如表 3。3 种能量策略相关参数如表 4 所示。

表 3 燃料电池和锂电池参数

Tab. 3 The parameters of fuel cell and lithium battery

燃料电池系统		锂电池系统	
电压范围/V	80~300	额定电压/V	773
电流范围/A	0~530	额定电流/A	200
额定功率/kW	75	安时容/Ah	20
额定效率/(%)	55	额定功率/kW	154

表 4 能量策略相关参数

Tab. 4 Energy management policy related parameters

参数	数值	参数	数值
$P_{\text{fc,min}}/\text{kW}$	13	$P_{\text{fc,rate}}/\text{kW}$	75
$P_{\text{fc,max}}/\text{kW}$	95	$P_{\text{fc,opt}}/\text{kW}$	24
$P_{\text{bat,rate}}/\text{kW}$	154	$SOC_H/(\%)$	80
k_{bat}	668	$SOC_L/(\%)$	20
k_{fc}	500	$SOC^*/(\%)$	50
μ	0.6	$U_{\text{bat,min}}/\text{V}$	630
η_{dis}	0.95	$U_{\text{bat,max}}/\text{V}$	850
η_{chg}	0.9	U_{bat}/V	750

4.2 能量管理策略验证

4.2.1 状态机策略

根据表 2 状态机规则, 仿真得到系统功率波形如图 3 所示。

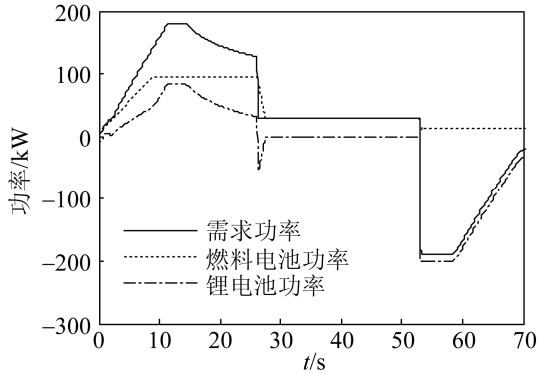


图 3 状态机策略下混合动力系统功率

Fig. 3 Hybrid system power under state machine strategy

图 3 中, 在整个仿真周期内, 燃料电池和锂电池输出功率之和等于机车需求功率, 表明混合动力系统能够满足向机车需求功率, 实现能量动态分配。在 26 s 时机车由牵引阶段变为巡航阶段, 需求功率急剧减小, 由于燃料电池动态响应较慢, 导致锂电池有一个时长为 1 s, 大小为 55 kW 的充电功率。

4.2.2 功率跟随策略

根据式(11)制定功率跟随方法, 仿真得到系统功率分配波形如图 4 所示。

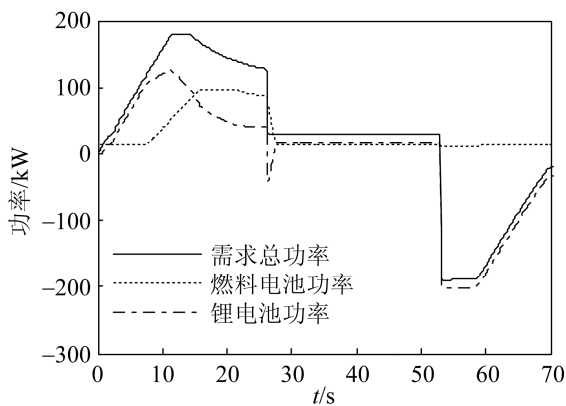


图 4 功率跟随策略下混合动力系统功率

Fig. 4 Hybrid system power under power tracking strategy

图 4 中, 功率跟随能量方法能够完成燃料电池和锂电池之间的功率分配。机车加速时由燃料电池和锂电池共同为机车提供功率; 15 s 之前锂电池作为动力源为机车提供功率; 15 s 后, 燃料电池和锂电池共同为机车提供功率; 26 s 后, 燃料电池以最小功率输出, 直到机车停车。

4.2.3 等效氢耗最小策略

等效氢耗最小的系统功率波形如图 5 所示。

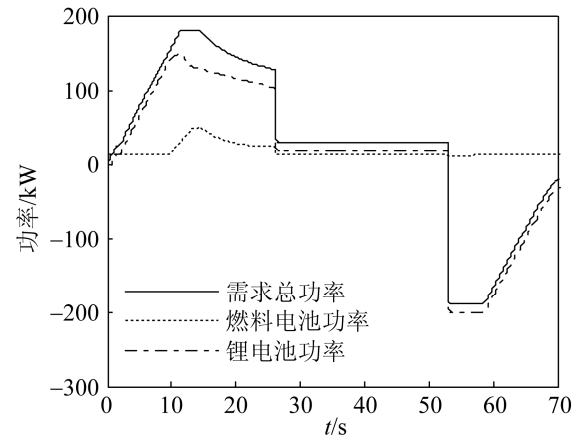


图 5 等效氢耗最小策略混合动力系统功率

Fig. 5 Hybrid system power under equivalent consumption minimization strategy

对比式(20)和图 5 能够看出, 锂电池的输出功率为最优输出功率, 能量管理单元完成了功率分配, 且实现了系统等效氢耗最小化。

4.3 3 种能量管理方法的价值损耗分析

仿真中有限状态机、功率跟随、等效氢耗最小 3 种策略下电堆电压衰减情况如表 5 所示。

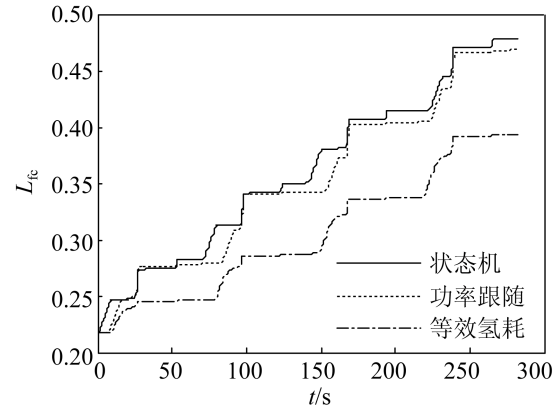
表 5 3 种策略下燃料电池单体衰减电压
Tab. 5 For single fuel cell degradation voltage under three strategy

工况	衰减电压值/ μV		
	状态机	功率跟随	氢耗最小
启停机	23.91	23.91	23.91
加减载	35.23	34.08	24.42
低功率	0.24	0.61	0.59
高功率	0.24	0.14	0.06

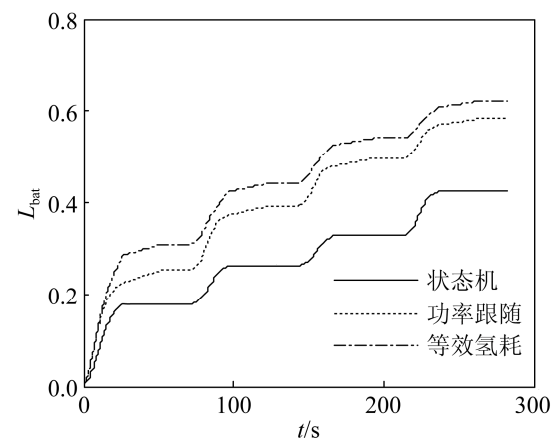
由表5可知,燃料电池在3种策略下都仅启停了一次,且启停一次燃料电池单体电压有 $23.91\ \mu\text{V}$ 的衰减。3种能量管理策略中,状态机策略下的单体电压衰减最大,等效氢耗最小策略下的单体电压衰减最小;且启停机和加减载是造成燃料电池单体电压衰减的主要因素。

图6为3种能量策略下燃料电池的相对价值损耗、锂电池的相对价值损耗和系统的相对氢耗量。图6(a)燃料电池的相对价值损耗,起始值都是0.22,这是燃料电池开机启动引起的相对寿命衰减。仿真结束,状态机、功率跟随、等效氢耗最小下燃料电池相对寿命损耗分别为0.479, 0.470, 0.394。如图3状态机策略中,26 s机车牵引变为巡航和52 s机车制动时,燃料电池输出功率发生65 kW, 19 kW急剧跳变,导致状态机方法燃料电池的相对寿命损耗最大。图6(b)反应了3种策略下锂电池相对的价值损耗情况。仿真结束,状态机、功率跟随、等效氢耗最小下锂电池相对寿命损耗分别为0.424, 0.584, 0.622。见图5等效氢耗策略总锂电池作为系统的主动动力源,锂电池长时间的大功率充、放电,导致该策略下锂电池相对寿命损耗最大。图6(c)是3种策略下系统相对氢耗量波形曲线。仿真结束,状态机、功率跟随、等效氢耗最小策略下相对氢耗量分别为0.593, 0.307, 0.249。状态机相对氢耗量是等效氢耗最小的2.38倍,等效氢耗最小方法中系统的相对氢耗量最小。

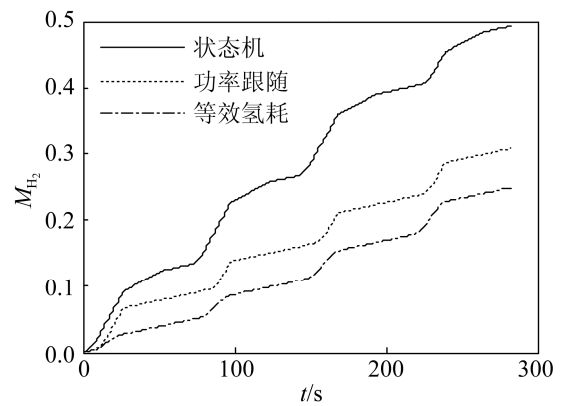
利用式(10)价值损耗评价函数计算3种策略下系统的价值损耗。目前,燃料电池电堆、钛酸锂电池、高纯度的氢气市场价格约分别为:12 000元/kW, 8 000元/kWh, 60元/kg。仿真结束,状态机、功率跟随、等效氢耗最小策略下一套电源系统的价值损耗分别为766.4, 861.5, 817.7元。状态机策略下系统价值损耗最小。状态机方法相比功率跟随和等效氢耗最小方法,该方法下系统的价值损耗分别减小了11.0%, 6.3%。



(a) 燃料电池相对价值损耗



(b) 锂电池相对价值损耗



(c) 相对氢耗量

图6 相对价值损耗和相对氢耗量

Fig. 6 Relative value loss and relative hydrogen consumption

5 结论

本文通过燃料电池相对寿命、锂电池相对寿命、相对氢耗量构建了一个价值损耗评价函数,对所设计的状态机、功率跟随、等效氢耗最小3种能

量方法进行了经济性分析, 得出如下结论:

(1) 等效氢耗最小策略引起的燃料电池单体电压衰减最小, 为 49.0 μV ; 且启停机和加减速是造成燃料电池单体电压衰减的主要因素;

(2) 3 种能量管理策略中, 状态机策略下电源系统价值损耗最小, 为 766.4 元。相比与功率跟随和等效氢耗, 状态机下系统的价值损耗分别减小了 11.0%, 6.3%。

参考文献:

- [1] Sulaiman N, Hannan M A, Mohamed A, et al. Optimization of Energy Management System for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles: Issues and Recommendations[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2018, 228(15): 2061-2079.
- [2] Wang T, Li Q, Wang X, et al. An Optimized Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Power System based on Maximum Efficiency Range Identification[J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2020, 445(1): 227333.
- [3] 游志宇, 邵仕泉, 刘涛, 等. 空冷自增湿燃料电池最优控制方法研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 259-267.
You Zhiyu, Shao Shiquan, Liu Tao, et al. Study on Optimal Control Method for Selfhumidifying Fuel Cell with Aircooled[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 259-267.
- [4] 陈维荣, 张国瑞, 孟翔, 等. 燃料电池混合动力有轨电车动力性分析与设计[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(1): 1-8.
Chen Weirong, Zhang Guorui, Meng Xiang, et al. Dynamic Performance Analysis and Design of Fuel Cell Hybrid Locomotive[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(1): 1-8.
- [5] Fernandez L M, Garcia P, Garcia C A, et al. Hybrid Electric System based on Fuel Cell and Battery and Integrating a Single dc/dc Converter for a Tramway[J]. Energy Conversion and Management (S0196-8904), 2011, 52(5): 2183-2192.
- [6] 陈维荣, 胡斌彬, 李奇, 等. 基于改进动态规划算法的燃料电池混合动力有轨电车能量管理方法研究[J]. 西南交通大学学报, 2018, 40(2): 1-8.
Chen Weirong, Hu Binbin, Li Qi, et al. Fuel Cell Hybrid Tram Power Management Method based on Improved Dynamic Programming Algorithm[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 40(2): 1-8.
- [7] 孟翔, 李奇, 陈维荣, 等. 基于庞特里亚金极小值原理满意优化的燃料电池混合动力系统分层能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 782-792.
Meng Xiang, Li Qi, Chen Weirong, et al. An Energy Management Method Based on Pontryagin Minimum Principle Satisfactory Optimization for Fuel Cell Hybrid Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 782-792.
- [8] 张国瑞, 李奇, 韩莹, 等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6905-6914.
Zhang Guorui, Li Qi, Han Ying, et al. Study on Equivalent Consumption Minimization Strategy based on Operation Mode and DDOH for Fuel Cell Hybrid Tramway[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6905-6914.
- [9] 李奇, 刘嘉蔚, 陈维荣. 质子交换膜燃料电池剩余使用寿命预测方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(8): 2365-2375.
Li Qi, Liu Jiawei, Chen Weirong. Review and Prospect of Remaining Useful Life Prediction Methods for Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(8): 2365-2375.
- [10] Li X, Xie C, Quan S, et al. Energy Management Strategy of Thermoelectric Generation for Localized Air Conditioners in Commercial Vehicles based on 48 V Electrical System[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2018, 231(1): 887-900.
- [11] 洪志湖, 朱亚男, 韩莹, 等. 基于 SOC 滞环控制的燃料电池混合动力系统[J]. 太阳能学报, 2019, 40(1): 268-276.
Hong Zhihu, Zhu Yanan, Han Ying. Fuel Cell Hybrid System based on Hysteretic Control of SOC[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(1): 268-276.
- [12] Tazelaar E, Veenhuizen B, Jagerman J, et al. Energy Management Strategies for Fuel Cell Hybrid Vehicles[C]// An Overview: 2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS 27), 2013.
- [13] 游志宇. PEMFC 混合动力叉车能量管理策略及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
You Zhiyu. Strategy and Application Study on Energy Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Hybrid Forklift[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [14] Pei P, Chen H. Main Factors Affecting the Lifetime of Proton Exchange Membrane Fuel Cells in Vehicle

- applications: A Review[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2014, 125(1): 60-75.
- [15] Chen H, Pei P, Song M, et al. Lifetime Prediction and the Economic Lifetime of Proton Exchange Membrane fuel Cells[J]. Applied Energy (S0306-2619), 2015: 154-163.
- [16] Pei P, Chang Q, Tang T. A Quick Evaluating Method for Automotive Fuel Cell Lifetime[J]. International Journal of Hydrogen Energy (S0360-3199), 2008, 33(14): 3829-3836.
- [17] Sauer D U, Wenzl H. Comparison of Different Approaches for Lifetime Prediction of Electrochemical Systems Using Leadacid Batteries as Example[J]. Journal of Power Sources (S0378-7753), 2008, 176(2): 534-546.
- [18] 韩晓娟, 程成, 籍天明, 等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 91-97.
Han Xiaojuan, Cheng Cheng, Ji Tianming, et al. Capacity Optimal Modeling of Hybrid Energy Storage Systems Considering Battery Life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97.
- [19] 李稭乐. 间歇式供电有轨电车地面储能系统优化配置[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
Li Zile. Optimal Configuration of Ground Energy Storage System of Intermittent Power Supplying Tramcar[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [20] 郭高易. 叉车用燃料电池混合动力系统能量管理策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Guo Gaoyi. Research and Design of Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Power System of Forklift Truck[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [21] Han J, Charpentier J F, Tang T. An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat[J]. Energies (S1996-1073), 2014, 7(5): 279-280.
- [22] 于爽. 机车用燃料电池混合动力系统建模与能量管理[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
Yu Shuang. Modeling and Energy Management of Fuel Cell Hybrid System for Locomotive[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [23] 王天宏, 李奇, 韩莹, 等. 燃料电池混合发电系统等效氢耗瞬时优化能量管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4173-4182.
Wang Tianhong, Li Qi, Han Ying, et al. Fuel Cell Hybrid Power Generation System Equivalent Hydrogen Consumption Instantaneous Optimization Energy Management Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(14): 4173-4182.
- [24] 张国瑞, 李奇, 韩莹, 等. 基于运行模式和动态混合度的燃料电池混合动力有轨电车等效氢耗最小化能量管理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6905-6914.
Zhang Guorui, Li Qi, Han Ying, et al. Study on Equivalent Consumption Minimization Strategy based on Operation Mode and DDOH for Fuel Cell Hybrid Tramway[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6905-6914.