

市域动车组多模块并联氢燃料电池/锂电池混合发电系统能量管理优化控制方法研究

谈浩澜, 王天宏, 李奇, 王海龙, 李响, 陈维荣
(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:为了减缓燃料电池的性能衰减、延长多堆燃料电池系统的使用寿命,提出一种考虑燃料电池性能优化的市域动车组多模块并联氢燃料电池/锂电池混合发电系统能量管理优化控制方法。该方法通过离散系数评估多堆燃料电池使用寿命一致性,构建了考虑燃料电池和锂电池氢耗、多堆燃料电池性能衰减和使用寿命一致性以及锂电池荷电状态约束的成本函数,并采用序列二次规划算法对成本函数进行优化求解。半实物仿真结果表明,所提能量管理方法相较于等效氢耗最小和考虑系统总运行成本最小的能量管理方法,系统氢耗分别减少了2.58%和0.43%,多堆燃料电池系统使用寿命分别延长了45.53%和21.35%,表明所提方法能够有效控制多堆燃料电池一致性,提高多堆混合发电系统运行经济性。

关键词:燃料电池;多堆混合发电;能量管理;市域动车组;寿命一致性

DOI:10.15938/j.emc.2025.06.005

中图分类号:TM911.4

文献标志码:A

文章编号:1007-449X(2025)06-0044-10

Energy management optimization control strategy for multi-module parallel hydrogen fuel cell/battery hybrid power generation system for urban electric multiple units

TAN Haolan, WANG Tianhong, LI Qi, WANG Hailong, LI Xiang, CHEN Weirong
(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract:To reduce the performance degradation of fuel cells and prolong the service life of multi-stack fuel cell systems, an energy management optimization control strategy for multi-module parallel fuel cell/battery hybrid power generation system for urban electric multiple units considering fuel cells performance optimization (FPO-EMS) was proposed. This strategy evaluated the service life consistency of multi-stack fuel cells through discrete coefficients, and constructed a cost function that considered the hydrogen consumption of fuel cells and battery, the performance degradation and service life consistency of multi-stack fuel cells, and the state of charge constraints of battery. The sequential quadratic programming algorithm was used to optimize the cost function. The semi physical simulation results show that compared with the equivalent consumption minimum strategy and the energy management strategy based on the minimum to-

收稿日期:2024-10-19

基金项目:国家重点研发计划(2023YFB4301604);国家自然科学基金(52377123,52307142)

作者简介:谈浩澜(2002—),男,硕士研究生,研究方向为混合动力系统能量管理;

王天宏(1994—),男,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为新能源混合动力系统能量管理、燃料电池运行优化;

李奇(1984—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为燃料电池优化控制、分布式发电、综合能源系统优化与控制;

王海龙(2001—),男,硕士研究生,研究方向为混合动力系统能量管理;

李响(1996—),男,博士研究生,研究方向为多堆燃料电池混合动力系统控制与能量管理;

陈维荣(1965—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为可再生能源及其应用、燃料电池机车技术、电力系统控制。

通信作者:王天宏

tal cost of the system operating, the proposed energy management strategy reduces system hydrogen consumption by 2.58% and 0.43% respectively, and extends the service life of multi stack fuel cell systems by 45.53% and 21.35% respectively. It shows that the proposed strategy can effectively control the consistency of multi-stack fuel cells and improve the operation economy of the system.

Keywords: fuel cell; multi-stack hybrid power generation system; energy management; urban electric multiple units; service life consistency

0 引言

目前,化石燃料大量消耗引发的环境问题日益严重,发展清洁能源已经成为世界各国的研究重点。在众多清洁能源中,氢能由于具有高效、稳定、易获得等优点备受关注^[1]。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)作为一种将化学能转化为电能的装置,具有高效能转换、低排放污染以及长期运行稳定等^[2-3]等优点,在交通、军事、应急等场景已经得到了广泛地应用^[4-7]。为进一步优化能源利用效率并有效回收制动能量,燃料电池(fuel cell, FC)通常与储能系统构成燃料电池混合发电系统^[8-10]。在燃料电池混合发电系统中,燃料电池作为主电源负责供给系统所需的大部分功率,储能系统作为辅助电源提供系统的差额功率^[11]。单体燃料电池输出功率有限,为了满足大功率场景的需求,通常将多个燃料电池模块并联构成多堆燃料电池系统,实现燃料电池更高功率输出^[12]。

混合发电系统的能量管理方法影响着系统的整体性能,是确保系统高效、稳定运行的关键。目前,对混合发电系统能量管理方法的研究大多同时考虑了系统的经济性和耐久性。HAN Ruoyan等^[13]提出一种多目标分层能量管理策略,该策略将燃料电池因性能衰减而损失的功率转换为经济成本,在总成本优化的过程中限制了燃料电池的性能衰减。SAHWAL Chandra Prakash^[14]提出一种改进的等效氢耗最小策略,该策略在传统等效氢耗最小能量管理策略的基础上通过模糊逻辑将燃料电池的性能衰减量化为附加氢耗,从而降低燃料电池在运行过程中的性能衰减。为了实现混合发电系统中不同类型动力源的寿命一致,LU Dangang^[15]建立了燃料电池和动力电池的性能衰减模型,根据系统的平均速度、需求功率等参数识别系统运行状态,再根据不同状态调整低通滤波器的控制参数,最终实现燃料电池

和动力电池寿命衰减趋于一致。根据有关研究,燃料电池输出功率的频繁波动造成了其56%的性能衰减,是燃料电池性能衰减的首要原因^[16],因此也有部分研究通过限制燃料电池输出功率的变化量来减缓燃料电池的性能衰减。HUANGFU Yigeng^[17]提出一种基于庞特里亚金最小值原理的改进实时能量管理策略。该方法将含有燃料电池输出变化率的惩罚项引入哈密顿函数以限制燃料电池功率的频繁波动,并根据实时荷电状态(state of charge, SOC)确定协态变量,最终实现燃料电池运行压力降低和系统经济性的提升。JIA Chunchun^[18]将燃料电池输出功率波动率与预设最大波动率之比作为惩罚项,考虑路况和环境因素通过TD3网络的高效学习,实现了包括燃料电池性能衰减在内的多目标优化控制。

综合分析相关文献,当前有关燃料电池耐久性的研究大多聚焦于燃料电池单堆的优化,忽视了多堆燃料电池系统的整体寿命往往受限于寿命最短的燃料电池^[19],这意味着多堆燃料电池系统内某个燃料电池电堆相较于其他电堆因过度衰减而导致的使用寿命提前结束会严重影响整个多堆燃料电池混合发电系统的安全性和稳定性。为了减缓燃料电池的性能衰减、延长多堆燃料电池系统的使用寿命,本文提出一种考虑燃料电池性能优化的市域动车组用多模块并联氢燃料电池/锂电池混合发电系统能量管理优化控制方法。首先分析多堆燃料电池使用寿命一致的关键条件,引入离散系数量化多堆燃料电池系统内各燃料电池电堆使用寿命的偏差程度。在此基础上考虑系统运行氢耗和锂电池的SOC约束最终构建了系统的成本函数,通过序列二次规划算法(sequential quadratic programming, SQP)对成本函数进行求解实现对市域动车组需求功率的高效分配。

1 燃料电池市域动车组

1.1 系统结构

本文以时速为160 km/h的市域动车组为研究对象,该动车组采用“四动四拖”动力结构,共配备4

组相同的燃料电池混合发电系统,每组系统配备了3个110 kW燃料电池系统和一个锂电池。每个110 kW燃料电池系统连接单向DC/DC变换器后与其他燃料电池并联接入直流母线,锂电池则通过双向DC/DC变换器接至直流母线。燃料电池市域动车组拓扑结构如图1所示,由于4组动力单元具有相同的结构,本文针对其中之一进行研究,系统内110 kW燃料电池相关数据如图2所示^[20]。

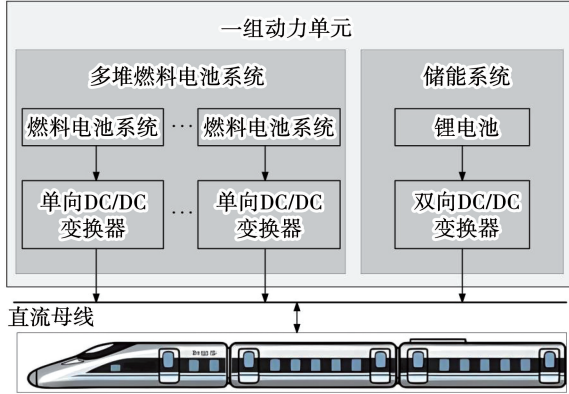


图1 燃料电池市域动车组拓扑结构

Fig.1 Topology of urban electric multiple units

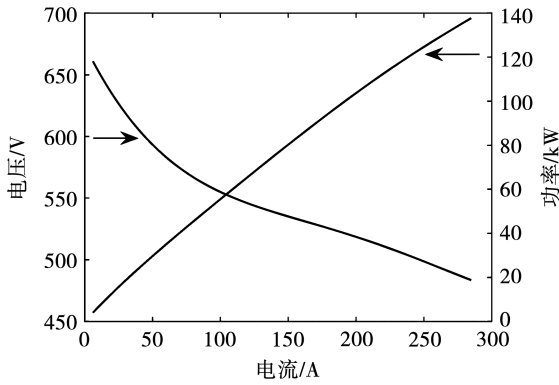


图2 燃料电池数据曲线

Fig.2 Data curves for three fuel cells

1.2 燃料电池输出特性分析

燃料电池在 ΔT 时间内的氢气消耗^[21]为

$$M_{fc} = \frac{1}{E_{low,H_2}} \int_{t_0}^{t_0+\Delta T} \frac{P_{fc}}{\eta_{fc}} dt \quad (1)$$

式中: P_{fc} 和 η_{fc} 分别表示燃料电池的净输出功率和效率; E_{low,H_2} 表示氢气燃烧的低热值。根据实验室测量得到的数据,110 kW燃料电池效率曲线如图3所示。

根据式(1)可以计算得到燃料电池的氢耗数据,燃料电池的氢耗可以用关于其输出净功率的二

次函数进行拟合,即

$$C_{fc} = a_{fc}P_{fc}^2 + b_{fc}P_{fc} + c_{fc} \quad (2)$$

拟合 R^2 值为0.9999,这表明拟合结果良好,可以用于燃料电池运行过程中的实时氢耗评估。

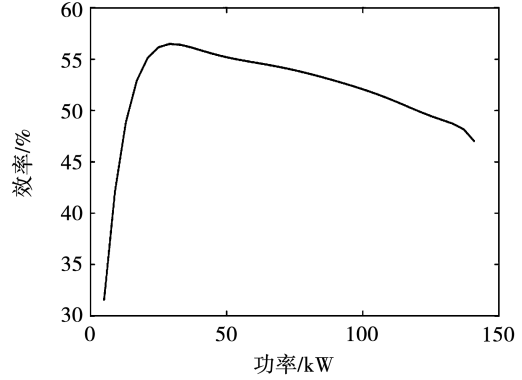


图3 燃料电池效率曲线

Fig.3 Efficiency curves of fuel cells

1.3 锂电池输出特性分析

锂电池在燃料电池混合发电系统中作为辅助动力源补充系统运行所需的差额能量并回收系统的制动能量。根据锂电池的 R_{int} 模型,其工作状态可通过下式^[22]计算:

$$\left. \begin{aligned} I_{bat} &= (U_{ocv} - \sqrt{U_{ocv}^2 - 4P_{bat}R_{int}}) / (2R_{int}); \\ SOC &= SOC_{init} - \int_0^t I_{bat} dt / Q_{max} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: U_{ocv} 为电池的开路电压; I_{bat} 为电池工作电流; R_{int} 为电池内阻,当电池处于充电状态时为充电内阻,放电状态时为放电内阻; SOC_{init} 为电池的初始SOC; Q_{max} 为电池的最大容量。电池的效率可表示为:

$$\left. \begin{aligned} \eta_{dis} &= (1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{dis}P_{bat}}{U_{ocv}^2}}) / 2, P_{bat} \geq 0; \\ \eta_{chg} &= 2 / (1 + \sqrt{1 - \frac{4R_{chg}P_{bat}}{U_{ocv}^2}}), P_{bat} < 0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

根据等效氢耗理论,将锂电池消耗的能量转化为与等效氢耗便于系统经济性评价,转换过程如下式^[23]:

$$\left. \begin{aligned} C_{bat} &= \frac{P_{bat}}{\eta_{bat_DC/DC} \eta_{dis} \eta_{chg_avg}} a_{fc}, P_{bat} \geq 0; \\ C_{bat} &= P_{bat} \eta_{bat_DC/DC} \eta_{chg} \eta_{dis_avg} a_{fc}, P_{bat} < 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

式中: η_{dis_avg} 和 η_{chg_avg} 为锂电池的平均放电和充电效率; $\eta_{bat_DC/DC}$ 为双向DC/DC变换器的平均效率; a_{fc} 为多堆燃料电池系统的平均氢耗速率。

此外,锂电池的性能衰减受到其充放电程度的

影响,可以通过下式^[24]计算:

$$D_{\text{bat}} = \frac{I_{\text{bat}} \Delta t}{Q_{\text{max}} L_c} \quad (6)$$

式中: Δt 为控制单元的采样时间; L_c 为锂电池的循环使用次数,可从锂电池的数据手册中查询得到。

2 市域动车组多模块并联氢燃料电池/锂电池混合发电系统能量管理优化控制方法

2.1 多堆燃料电池使用寿命一致条件

根据美国能源部的建议,燃料电池端电压下降10%视为其使用寿命终止^[25],因此,为了量化燃料电池的性能衰减状况,通过下式对燃料电池的剩余性能进行评估:

$$R_{\text{fc}} = \frac{\Delta U_{\text{rated_max}} - \Delta U_{\text{rated_degraded}}}{10\% \times U_{\text{rated}}} \quad (7)$$

式中: $\Delta U_{\text{rated_max}}$ 为燃料电池以额定电流运行时允许的最大压降; $\Delta U_{\text{rated_degraded}}$ 为燃料电池因性能衰减导致的压降; U_{rated} 为燃料电池的额定电压。当燃料电池性能完好时 $\Delta U_{\text{rated_degraded}}$ 为0,此时 R_{fc} 为100%,反之当 R_{fc} 为0时表示燃料电池寿命终止。

为了保证多堆燃料电池的使用寿命一致,燃料电池性能衰减与其剩余性能的关系可由以下数学表达式描述:

$$C = \frac{R_{\text{fc}i,\text{init}}}{D_{\text{fc}i,\text{cycle}}} = \dots = \frac{R_{\text{fc}i,\text{init}}}{D_{\text{fc}i,\text{cycle}}} \quad (8)$$

式中: C 表示多堆燃料电池系统的使用寿命; $R_{\text{fc}i,\text{init}}$ 表示第*i*个燃料电池在投入使用前的初始剩余性能; $D_{\text{fc}i,\text{cycle}}$ 表示第*i*个燃料电池在经过一个完整的工况循环造成的性能衰减,通常用压降来表示,这里换算为百分比。

本文采用燃料电池性能衰减快速评估方法实时评估燃料电池在运行过程中的性能衰减,燃料电池的性能衰减主要由启停、低功率运行、高功率运行和变载状态造成,可用下式表示:

$$D_{\text{fc}} = D_{\text{on/off}} + D_{\text{low}} + D_{\text{high}} + D_{\text{chg}} \quad (9)$$

式中: $D_{\text{on/off}}$ 、 D_{low} 、 D_{high} 和 D_{chg} 分别表示燃料电池运行在启停、低功率运行、高功率运行状态以及负载变化状态下导致的电压衰减,可通过下式表示:

$$\left. \begin{aligned} D_{\text{on/off}} &= sU_0; \\ D_{\text{low}} &= t_1 U_1; \\ D_{\text{high}} &= t_2 U_2; \\ D_{\text{chg}} &= |\Delta P_{\text{fc}}| U_3. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: U_0 、 U_1 、 U_2 、 U_3 分别表示燃料电池启停、低功率运行、高功率运行以及变载状态的电压衰减系数,它们的值如表1所示; s 表示燃料电池的启停次数; t_1 和 t_2 分别表示燃料电池处于低功率和高功率运行的时间; ΔP_{fc} 为燃料电池功率变化量。

表1 燃料电池电压衰减系数

Table 1 Fuel cell voltage degradation coefficients

参数	数值
启停电压衰减系数 $U_0/(\mu\text{V})$	13.79
低功率电压衰减系数 $U_1/(\mu\text{V}/\text{h})$	8.662
高功率电压衰减系数 $U_2/(\mu\text{V}/\text{h})$	10
变载电压衰减系数 $U_3/(\mu\text{V}/\text{kW})$	0.044 1

由于在运行过程中燃料电池的性能衰减程度不断变化,不同时刻下根据式(8)评估得到的燃料电池使用寿命也在不断改变。为了控制多堆燃料电池使用寿命的一致性,需要判断多个燃料电池使用寿命的偏离程度,并控制该偏差尽可能减小。为了在能量管理过程中实时判断控制效果以及时调整系统目标函数,需要比较不同时刻下多堆燃料电池使用寿命的偏离程度。

针对上述问题,本文引入统计学中的离散系数,离散系数不仅可以评价当前时刻多堆燃料电池使用寿命的一致性,还能直接比较不同时刻下使用寿命的偏离程度。离散系数通过标准差与平均值的比值,消除了数据量纲和平均水平差异对离散程度测量的影响,能够更加准确地衡量不同时刻下多堆燃料电池使用寿命的一致性。具体而言,多堆使用寿命一致性通过下式评估:

$$V_s = \frac{\sigma}{\mu} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{D_{\text{fc}i}}{R_{\text{fc}i,\text{init}}} - L_{\text{fc}} \right)^2}}{L_{\text{fc}}} \quad (11)$$

其中

$$L_{\text{fc}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{D_{\text{fc}i}}{R_{\text{fc}i,\text{init}}} \quad (12)$$

式中: n 表示多堆燃料电池系统内的单堆个数; $D_{\text{fc}i}$ 为第*i*个燃料电池的实时衰减程度。离散系数越大,多堆性能协调性越差,反之越接近0表示性能协调性越好。

2.2 目标函数构建及求解

以2.1节的分析为基础,为了兼顾市域动车组

运行时的燃料经济性和多堆燃料电池系统耐久性,保证锂电池 SOC 在预设范围内波动,本文在系统氢耗函数的基础上加入了多堆燃料电池寿命一致性惩罚项、燃料电池功率波动惩罚项以及锂电池性能衰减和 SOC 惩罚项,最终构建系统的成本函数如下:

$$J = m_{H_2} + m_{D_{bat}} + m_{v_s} + m_{D_{fc}} + m_{soc} \quad (13)$$

其中:

$$\left. \begin{aligned} m_{H_2} &= \sum_{i=1}^n C_{fci} + k_{bat} C_{bat}; \\ m_{D_{bat}} &= k_{D_{bat}} \sum_{t=1}^{T_{max}} D_{bat}/20\%; \\ m_{v_s} &= k_{v_s} V_s; \\ m_{D_{fc}} &= k_{D_{fc}} \sum_{i=1}^n (P_{fci,t} - P_{fci,t-1})^2; \\ m_{soc} &= k_{soc} (SOC_t - SOC_{init}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中: m_{H_2} 为系统运行过程中的氢耗,包括燃料电池氢耗和锂电池的等效氢耗; $m_{D_{bat}}$ 为锂电池性能衰减惩罚项,以性能衰减 20% 为锂电池更换的标准; m_{v_s} 为多堆性能协调性约束; $m_{D_{fc}}$ 为燃料电池衰减约束; $P_{fci,t}$ 表示第 i 个燃料电池 t 时刻的输出功率;SOC _{t} 是电池 t 时刻的 SOC;SOC_{init}为电池初始 SOC; k_{v_s} 、 $k_{D_{fc}}$ 、 $k_{D_{bat}}$ 和 k_{soc} 分别对应燃料电池一致性和性能衰减、锂电池性能衰减和 SOC 约束的附加系数; k_{bat} 为平衡系数,通过下式计算:

$$k_{bat} = 1 - 2\omega \frac{SOC_t - (SOC_H + SOC_L)/2}{SOC_H - SOC_L} \quad (15)$$

式中: ω 为修正因子;SOC_H和 SOC_L分别表示预设的电池最高 SOC 和最低 SOC。

利用序列二次规划算法求解式(13)可以获取系统在任意时刻 t 下的功率分配方案,通过调节 DC/DC 变换器间接地实现对燃料电池与锂电池输出功率的精确控制。系统的算法流程图如图 4 所示,需要注意的是,序列二次规划算法对初始值的设定十分敏感,因此初始值的选择对系统的最终优化结果影响较大。为了保护燃料电池,在控制过程中通常会限制燃料电池单位时间内的功率变化量,即下一时刻燃料电池的输出功率位于当前时刻输出功率的邻域内。因此将前一时刻燃料电池的输出功率值作为下一时刻求解目标函数的初始估计,可以确保即使序列二次规划得出的解是局部最优,该解也

仍位于可行解空间的较优位置。

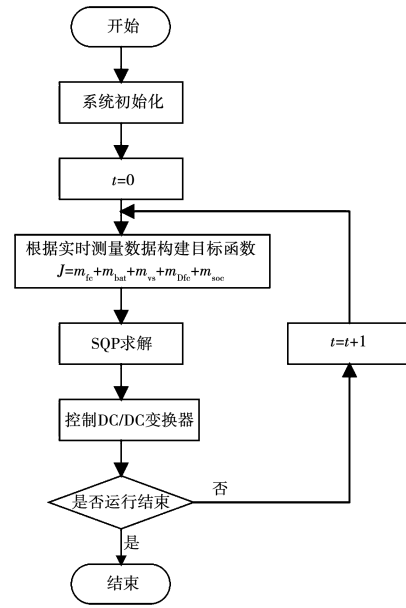


图4 能量管理算法流程图

Fig. 4 Energy management algorithm flow chart

此外,为了确保燃料电池市域动车组的安全稳定运行,在求解过程中还需满足下式的约束条件:

$$\left. \begin{aligned} P_{fcimin} &\leq P_{fci} \leq P_{fcimax}; \\ P_{batmin} &\leq P_{bat} \leq P_{batmax}; \\ \Delta P_{fci} &\leq 12.5\% \times P_{fci_rated}; \\ \sum_{i=1}^n P_{fci} + P_{bat} &= P_{load} \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

式中: P_{fcimax} 和 P_{fcimin} 分别表示第 i 个燃料电池的最大输出功率和最小输出功率; P_{batmax} 和 P_{batmin} 表示锂电池的最大输出功率和最小输出功率; ΔP_{fci} 表示第 i 个燃料电池的功率变化量; P_{fci_rated} 表示第 i 个燃料电池的额定功率; P_{load} 表示负载需求功率。

2.3 对比方法介绍

为了验证所提能量管理方法的优越性,等效消耗最小策略 (equivalent consumption minimization strategy, ECMS) 和考虑系统总运行成本最小的能量管理策略 (energy management strategy based on the minimum total cost of the system operating, TCO-EMS) 被用作对比方法。

1) 等效消耗最小策略。

由于锂电池消耗的电能与燃料电池消耗的化学能无法直接比较,ECMS 根据式(5)将锂电池消耗的电能转化为等效氢气体积。考虑锂电池 SOC 约束,

ECMS 将等效氢气的量乘以修正系数后与燃料电池消耗的氢气量累加,形成系统的氢耗函数^[26]如下:

$$J = C_{fc} + kC_{bat} \quad (17)$$

式中 k 为修正系数,与式(15)相同。

ECMS 以等效氢耗最小为目标求解式(17)获得系统每一时刻的功率分配,从而实现能量管理。其中

$$C_{fc} = \sum_{i=1}^n C_{fci} \quad (18)$$

式中: C_{fci} 为第 i 个燃料电池的氢耗; C_{bat} 为锂电池的等效氢耗。

根据上述分析,ECMS 仅考虑了系统的经济性,优化了系统运行时的等效氢耗量,并未对燃料电池的性能衰减进行优化。

2) 考虑系统总运行成本最小的能量管理策略。

在考虑系统总运行成本最小的能量管理策略中,系统的总运行成本包括3个因素,系统的燃料消耗成本(包括燃料电池氢耗和锂电池等效氢耗成本),燃料电池单堆的性能衰减成本以及锂电池的性能衰减成本,系统的总运行成本函数为:

$$\left. \begin{aligned} J &= J_{energy} + J_{fcs} + J_{bat}; \\ J_{energy} &= \gamma_{hydrogen} (C_{fc} + C_{bat}); \\ J_{fcs} &= \sum_{i=1}^n \gamma_{fc} D_{fci} P_{fci_rated}; \\ J_{bat} &= \gamma_{bat} D_{bat} Q_{bat}. \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

式中: $\gamma_{hydrogen}$ 、 γ_{fc} 、 γ_{bat} 分别表示氢气价格、燃料电池价格及锂电池价格,分别为 4 \$/kg、93 \$/kW 及 178.41 \$/kWh^[27]; D_{fci} 表示第 i 个燃料电池的性能衰减百分比; D_{bat} 表示锂电池的性能衰减百分比; P_{fci_rated} 为第 i 个燃料电池的额定功率; Q_{bat} 为锂电池的容量。

根据式(19),TCO-EMS 在考虑系统燃料经济性的基础上还加入了对燃料电池和锂电池性能衰减的优化,但需要注意的是,这仅是对燃料电池单堆的优化,并未考虑多堆燃料电池一致性。

3 半实物仿真结果与分析

为了验证所提方法的有效性,对其进行了半实物仿真实验。半实物仿真平台的配置如图5所示,主要由 RT-LAB 软件平台、OP5600 实时仿真机、YXSPACE 2000 快速原型控制器和监视器组成。其中,

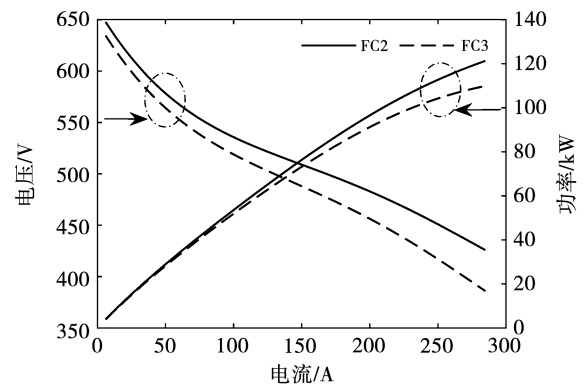
OP5600 实时仿真机用于模拟混合发电系统的响应, YXSPACE 2000 快速原型控制器为混合发电系统的控制单元,用于实现能量管理优化控制算法,监视器可以在半实物仿真过程中实时监控混合发电系统的各项数据。



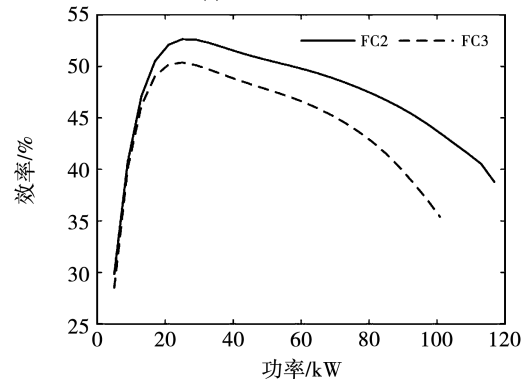
图5 半实物仿真平台

Fig. 5 Semi physical simulation platform

为了验证所提方法能够有效控制多堆燃料电池的使用寿命一致,以标准 110 kW 燃料电池电堆(FC1)为基准,在半实物仿真实验中设置了另外2个初始剩余性能分别为 80% 和 60% 的燃料电池电堆(分别为 FC2 和 FC3),这2个电堆的数据曲线如图6所示。



(a) 燃料电池输出特性



(b) 燃料电池效率特性

图6 初始剩余性能分别为 80% 和 60% 的燃料电池数据
Fig. 6 Fuel cell data with initial residual performance of 80% and 60%

在验证模型的正确性后用市域动车组的实际运行工况对 ECMS、TCO-EMS 和所提的 FPO-EMS 进行测试。3 种能量管理方法控制下一组动力单元内燃料电池和锂电池和输出功率曲线如图 7 所示,相较于 ECMS,采用 FPO-EMS 的燃料电池输出功率曲线更加平滑,说明在 FPO-EMS 地控制下燃料电池输出功率的波动显著减少,有利于降低燃料电池的性能衰减。对各种能量管理方法下多堆燃料电池的运行状态进行分析,统计各个燃料电池分别在低功率(low power operation, LPO)和高功率(high power operation, HPO)下的运行时间以及变载量($|\Delta P_{fc}|$),结果如表 2 所示。

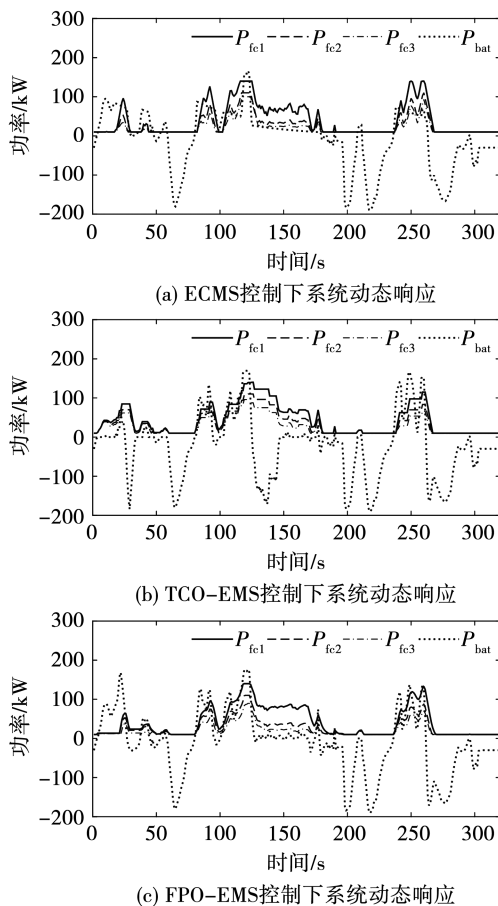


图7 燃料电池和锂电池和输出功率曲线

Fig.7 Fuel cells and battery output power curves

对 3 种能量管理方法下不同燃料电池的输出功率区间进行分析,可以得到燃料电池在不同效率下的占比如图 8 所示。图 8 从上到下依次为 FC1、FC2、FC3,从左往右依次为 ECMS、TCO-EMS、FPO-EMS 控制下的系统,图中的曲线为效率,柱状图表示燃料电池在对应功率区间下的时间占比。

表 2 多堆燃料电池运行状态统计

Table 2 Multi-stack fuel cells operation state statistics

参数	方法	FC1	FC2	FC3
LPO/s	ECMS	193	202	204
	TCO-EMS	169	168	168
	FPO-EMS	183	193	211
HPO/s	ECMS	29	16	13
	TCO-EMS	26	22	10
	FPO-EMS	20	8	6
$ \Delta P_{fc} /\text{kW}$	ECMS	1 509	1 018	806
	TCO-EMS	1 019	848	752
	FPO-EMS	1 036	812	615

3.1 系统经济性分析

从表 2 可知,ECMS 和 TCO-EMS 控制下 3 个燃料电池的低功率运行时间无明显差异,这是因为燃料电池在低功率运行状态下不同性能衰减程度对燃料电池的效率影响不大(从图 3 所示的燃料电池效率曲线可知)。因此,低功率状态运行时间的较小差异对系统经济性几乎无影响。此外,在 3 种方法的控制下燃料电池高功率运行时间都在减少,这是因为在高功率状态下,不同性能衰减程度对燃料电池效率地影响较大,以同一高功率输出时,性能衰减程度较小的燃料电池的效率相较于性能衰减程度较大的燃料电池明显提升。为了保证系统的经济性,负载功率较少分配至性能衰减程度大的燃料电池,因此性能衰减程度小的燃料电池更多处于高功率运行状态。

从图 8 可知,相比于 ECMS 和 TCO-EMS, FPO-EMS 降低了 3 个燃料电池处于高功率运行时间的占比,系统处于低效率运行状态的时间明显缩短。此外,从图中还可以看到在 FPO-EMS 地控制下,3 个燃料电池的运行更加靠近各自的高效率区间,证明了所提方法在提升燃料电池经济性方面的效果。多堆燃料电池系统效率的提升进一步体现在系统运行氢耗的变化上。3 种能量管理方法下系统的运行氢耗如图 9 所示,ECMS、TCO-EMS 和 FPO-EMS 控制下的市域动车组氢耗分别为 504.865、493.943 及 491.819 g。FPO-EMS 相较其他两种方法系统氢耗分别降低了 2.58% 和 0.43%,凸显出所提方法在优化系统经济性方面的良好性能。

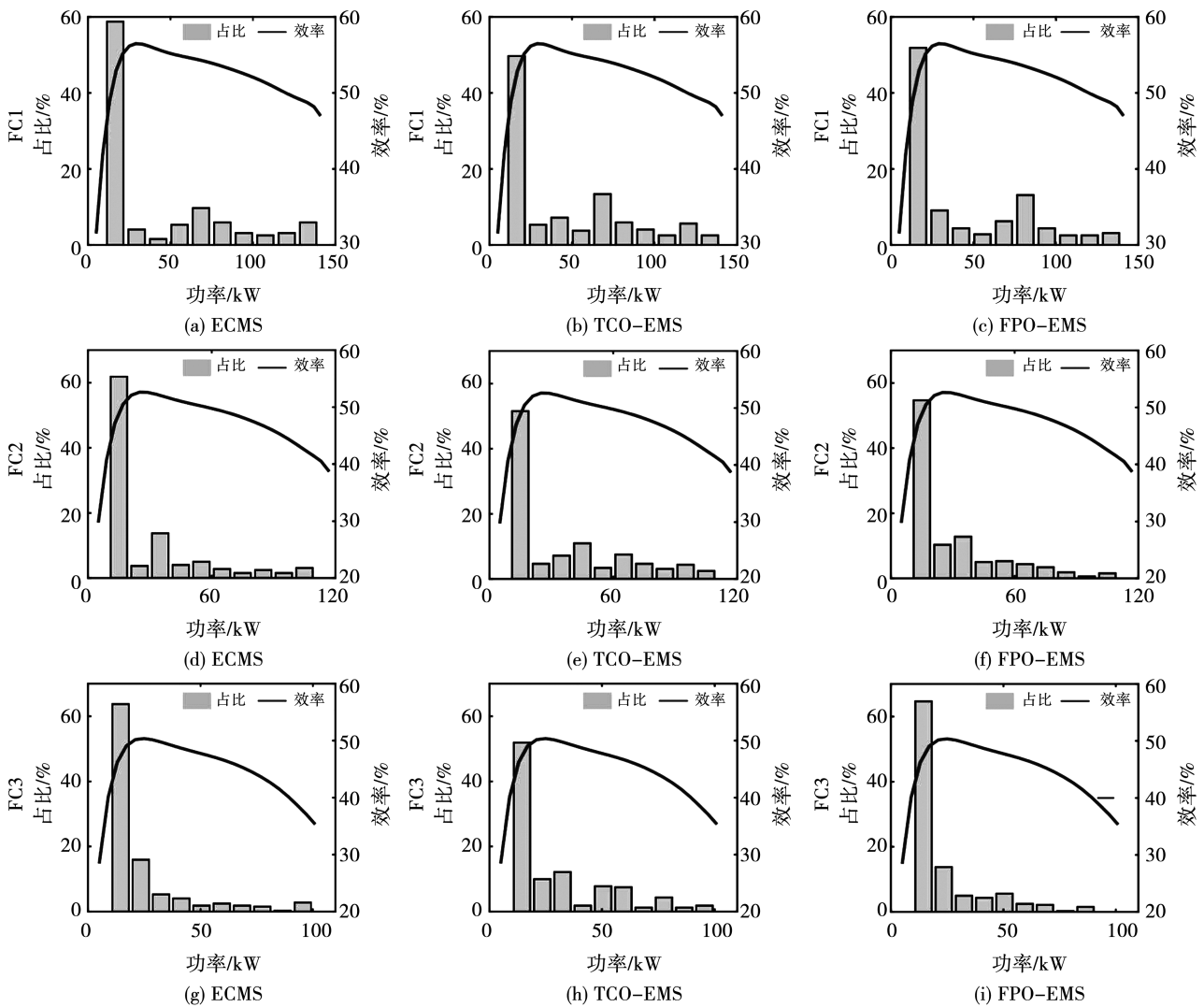


图 8 燃料电池输出功率区间图

Fig. 8 Fuel cells output power interval diagrams

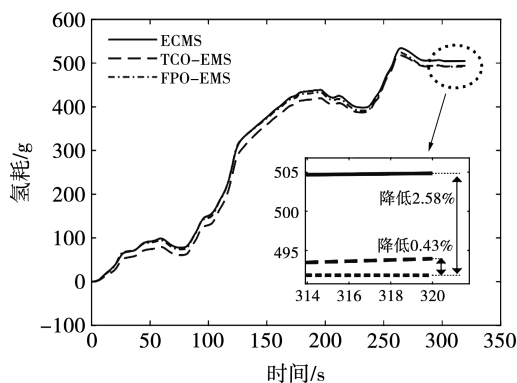


图 9 市域动车组运行氢耗对比

Fig. 9 Comparison of hydrogen consumption in urban electric multiple units operation

3.2 多堆燃料电池系统耐久性分析

从表 2 可知,相较于无燃料电池性能衰减优化

的 ECMS,在所提 FPO-EMS 地控制下 3 个燃料电池的变载量都明显减小。TCO-EMS 由于在总成本函数中设置了燃料电池性能衰减项,同样减少了燃料电池的变载量。不同能量管理方法下,燃料电池的使用寿命总结如图 10 所示,可以看到相较于 ECMS,TCO-EMS 和 FPO-EMS 延长了 3 个燃料电池单堆的使用寿命,证明了 TCO-EMS 和 FPO-EMS 减少单堆燃料电池性能衰减的良好效果。

然而,相较于 TCO-EMS 仅优化单堆的性能衰减,所提出的 FPO-EMS 还考虑了多堆燃料电池的一致性。如图 10 所示,在 FPO-EMS 的控制下,3 个燃料电池的使用寿命一致性较高,这意味着多堆燃料电池系统的使用寿命几乎不再受限于系统内的任何一个电堆,而相反,ECMS 和 TCO-EMS 控制下的多堆燃料电池系统使用寿命均与系统内使用寿命最长

的燃料电池差异较大。

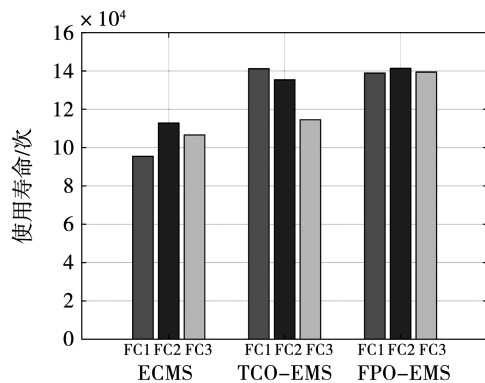


图 10 市域动车组多堆燃料电池系统寿命对比

Fig. 10 Comparison of service life of multi-stack fuel cells in urban electric multiple units

从图 8 可知,在 FPO-EMS 的控制下,3 个燃料电池的高功率运行时间显著减少,FC3 的高功率运行时间占比几乎为 0,表明所提的 FPO-EMS 能够较好地控制多堆燃料电池的差异化衰减,为保护性能衰减较大的燃料电池,性能衰减较小的燃料电池承担更多的输出功率,最终实现其使用寿命趋于一致。表 2 的数据可以定量地证明上述分析,FPO-EMS 的控制下,3 个燃料电池处于高功率运行状态的时间分别是 20、8 和 6 s,这正好与 3 个燃料电池的初始剩余性能比例 5:4:3 相同,3 个燃料电池变载量为 1 036、812 以及 615 kW 也与初始剩余性能比例 5:4:3 非常接近,而低功率运行下的时间比例差异较大。这表明 FPO-EMS 实现多堆燃料电池使用寿命一致性的本质是控制燃料电池在不同状态下的性能衰减符合初始剩余性能比例,3 个燃料电池在低功率运行状态下的时间与初始剩余性能比例不一致是导致系统经过 FPO-EMS 控制后燃料电池使用寿命仍然具有差异的重要原因。

3 种方法下的多堆燃料电池系统使用寿命分别为 95 456、114 476 以及 138 917 次工况循环,采用 FPO-EMS 控制的多堆燃料电池系统寿命相较于 ECMS 和 TCO-EMS 分别延长了 45.53% 和 21.35%,验证了所提方法在延长多堆燃料电池系统使用寿命的优越性。

此外,由于在评价函数中加入锂电池 SOC 约束,FPO-EMS 能够有效控制锂电池 SOC 在预设范围内波动。图 11 为 FPO-EMS 控制下系统锂电池 SOC 的变化曲线,从图中可知,经过一个完整工况,电池

SOC 回到其初始状态。

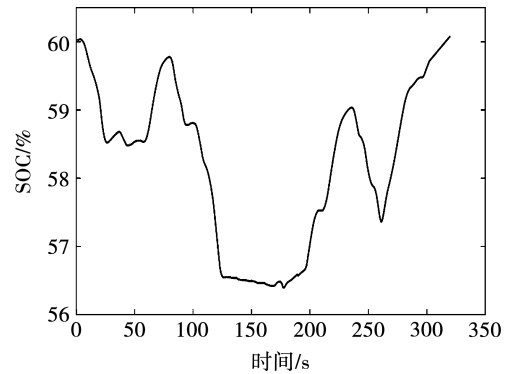


图 11 采用 FPO-EMS 的系统电池 SOC 曲线

Fig. 11 Battery SOC curve of system using FPO-EMS

最后,3 种能量管理方法结果汇总如表 3 所示。表中(-)表示对比基准方法,括号内的上下箭头表示相较于基准方法该参数有所提升或下降,上下箭头后的百分数表示具体提升或下降的幅度。

表 3 ECMS、TCO-EMS 和 FPO-EMS 能量管理结果

Table 3 Energy management results for ECMS, TCO-EMS and FPO-EMS

能量管理方法	氢耗/g	多堆系统寿命/次
ECMS	504.865 (-)	95 456 (-)
TCO-EMS	493.943 (↓2.16%)	114 476 (↑19.92%)
FPO-EMS	491.819 (↓2.58%)	138 917 (↑45.53%)

4 结 论

为延缓多堆燃料电池内部各单堆的性能衰减,延长整个多堆燃料电池系统使用寿命,本文提出一种考虑燃料电池性能优化的市域动车组多模块并联氢燃料电池/锂电池混合发电系统能量管理优化控制方法。该策略重点研究多堆燃料电池性能优化管理,引入离散系数评价多堆燃料电池使用寿命一致性,并结合系统运行氢耗、燃料电池性能衰减以及锂电池 SOC 约束,采用序列二次规划算法实现了市域动车组需求功率在燃料电池和电池之间的分配。半实物仿真结果表明,相较于 ECMS 和 TCO-EMS,FPO-EMS 分别降低了 2.58% 和 0.43% 的系统运行氢耗,多堆燃料电池系统使用寿命分别延长了 45.53% 和 21.35%,证明了所提方法在优化系统经济性,延长多堆燃料电池系统寿命方面的优越性。

参考文献:

- [1] DENG K, FANG T, FENG H, et al. Hierarchical eco-driving and energy management control for hydrogen powered hybrid trains [J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 264: 115735.
- [2] MOLINA S, NOVELLA R, PLA B, et al. Optimization and sizing of a fuel cell range extender vehicle for passenger car applications in driving cycle conditions[J]. *Applied Energy*, 2021, 285: 116469.
- [3] 杨淇, 陈景文, 华志广, 等. 基于集成型极限学习机的氢燃料电池寿命预测[J]. *电工技术学报*, 2025, 40(3): 964.
YANG Qi, CHEN Jingwen, HUA Zhiguang, et al. Research on PEMFC lifetime prediction based on ensemble extreme learning machine [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2025, 40(3): 964.
- [4] WU J, ZHANG Y, RUAN J, et al. Rule and optimization combined real-time energy management strategy for minimizing cost of fuel cell hybrid electric vehicles[J]. *Energy*, 2023, 285: 129442.
- [5] ANSELMA P G, BELINGARDI G. Fuel cell electrified propulsion systems for long-haul heavy-duty trucks: present and future cost-oriented sizing[J]. *Applied Energy*, 2022, 321: 119354.
- [6] PIRAINO F, GENOVESE M, PAGNOTTA L, et al. Integrated hydrogen and battery energy systems as emergency backup in electric trains [J]. *Energy Conversion and Management*; X, 2023, 18: 100382.
- [7] ZHANG Y, ZHANG Y, MA R, et al. An online energy management strategy based on SOC fluctuation optimization for fuel cell UAV [J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2024, 10(2): 3105.
- [8] ZHAN S, LIU C, YIN Y, et al. Eco-driving strategy for fuel cell vehicles in car-following scenarios considering stack heat and durability based on SAC [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 315: 118744.
- [9] ELKAFAS A, SEDDIEK I. Application of renewable energy systems in seaports towards sustainability and decarbonization: energy, environmental and economic assessment [J]. *Renewable Energy*, 2024, 228: 120690.
- [10] MA M, XU E, ZHENG W, et al. The optimized real-time energy management strategy for fuel-cell hybrid trucks through dynamic programming [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 59: 10.
- [11] 李奇, 刘鑫, 孟翔, 等. 基于近端策略优化算法的燃料电池混合动力系统综合价值损耗最小能量管理方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(12): 4788.
LI Qi, LIU Xin, MENG Xiang, et al. Comprehensive value depletion minimization energy management method for fuel cell hybrid systems based on proximal policy optimization algorithm [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(12): 4788.
- [12] JOUDA B, JOBRAN A A, MALLOUH M A. Deep stochastic reinforcement learning-based energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 301: 117973.
- [13] HAN R, HE H, ZHANG Z, et al. A multi-objective hierarchical energy management strategy for a distributed fuel-cell hybrid electric tracked vehicle [J]. *Journal of Energy Storage*, 2024, 76: 109858.
- [14] SAHWAL C P, SENGUPTA S, DINH T Q. Advanced equivalent consumption minimization strategy for fuel cell hybrid electric vehicles [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 437: 140366.
- [15] LU D, YI F, HU D, et al. Online optimization of energy management strategy for FCV control parameters considering dual power source lifespan decay synergy [J]. *Applied Energy*, 2023, 348: 121516.
- [16] PEI P, CHEN D, WU Z, et al. Nonlinear methods for evaluating and online predicting the lifetime of fuel cells [J]. *Applied Energy*, 2019, 254: 113730.
- [17] HUANGFU Y, LI P, PANG S, et al. An improved energy management strategy for fuel cell hybrid vehicles based on Pontryagin's minimum principle [J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2022, 58(3): 4086.
- [18] JIA C, LIU W, HE H, et al. Deep reinforcement learning-based energy management strategy for fuel cell buses integrating future road information and cabin comfort control [J]. *Energy Conversion and Management*, 2024, 321: 119032.
- [19] 李奇, 刘强, 李艳昆, 等. 考虑燃料电池老化的多堆自适应功率分配方法 [J]. *西南交通大学学报*, 2022, 57(4): 713.
LI Qi, LIU Qiang, LI Yankun, et al. Multi-stack adaptive power allocation method considering fuel cell aging [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2022, 57(4): 713.
- [20] 杨明泽, 李奇, 蔡良东, 等. 考虑电堆性能一致性的燃料电池混合动力系统多目标优化能量管理方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(1): 385.
YANG Mingze, LI Qi, CAI Liangdong, et al. Multi-objective optimization energy management method for fuel cell hybrid power system considering stack performance consistency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(1): 385.
- [21] LI M, YIN L, YAN M, et al. Hierarchical intelligent energy-saving control strategy for fuel cell hybrid electric buses based on traffic flow predictions [J]. *Energy*, 2024, 304: 132144.
- [22] GAO S, ZONG Y, JU F, et al. Scenario-oriented adaptive ECMS using speed prediction for fuel cell vehicles in real-world driving [J]. *Energy*, 2024, 304: 132028.
- [23] XU L, OUYANG M, LI J, et al. Application of Pontryagin's minimal principle to the energy management strategy of plugin fuel cell electric vehicles [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(24): 10104.

- [14] 马永光, 冯勇升. 基于 HCEEMDAN-PCA-GRU 的风电机组齿轮箱故障预警方法研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(4): 67.
MA Yongguang, FENG Yongsheng. Research on fault warning method of wind turbine gearbox based on HCEEMDAN-PCA-GRU [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(4): 67.
- [15] 王喜莲, 秦嘉翼, 耿民. 基于 d-q 变换及 WOA-LSTM 的异步电机定子匝间短路故障诊断方法[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(6): 56.
WANG Xilian, QIN Jiayi, GENG Min. Asynchronous motor stator turn-to-turn short circuit fault diagnosis based on d-q transform and WOA-LSTM [J]. Electric Machines and Control, 2024, 28(6): 56.
- [16] LIU Huan, WANG Yuze, ZENG Tao, et al. Wind turbine generator failure analysis and fault diagnosis: A review[J]. IET Renewable Power Generation, 2024, 18(15): 3127.
- [17] CHEN Hansi, LIU Hang, CHU Xuening, et al. Anomaly detection and critical SCADA parameters identification for wind turbines based on LSTM-AE neural network [J]. Renewable Energy, 2021, 172: 829.
- [18] LING Xiang, WANG Penghe, XIN Yang, et al. Fault detection of wind turbine based on SCADA data analysis using CNN and LSTM with attention mechanism [J]. Measurement, 2021, 175: 109094.
- [19] LIU Yirong, WU Zidong, WANG Xiaoli. Research on fault diagnosis of wind turbine based on SCADA data[J]. IEEE Access, 2020, 8: 185557.
- (编辑:朱美华)

(上接第 53 页)

- [24] WANG T, QIU Y, XIE S, et al. Energy management strategy based on optimal system operation loss for a fuel cell hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2024, 71(3): 2650.
- [25] LU D, HU D, YI F, et al. Optimal selection range of FCV power battery capacity considering the synergistic decay of dual power source lifespan [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(36): 13578.
- [26] 高锋阳, 苏红宇, 查鹏堂, 等. 基于工况预测和动力源寿命衰减协同的燃料电池有轨电车能量管理策略[J/OL]. 电工技术学报, 2024:1-16[2025-05-18]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.240996>.
- [27] LI Q, MENG X, GAO F, et al. Approximate cost-optimal energy management of hydrogen electric multiple unit trains using double Q-learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 9099.
- (编辑:刘琳琳)