

基于多工况寿命预测的 PEMFC 延迟退化控制

窦真兰¹, 李荣盛², 张春雁¹, 袁铁江²

(1. 国网上海电力公司, 上海 200120; 2. 大连理工大学电气工程学院, 大连 116081)

摘要: 针对当前质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)在控制研究中未能考虑其在运行过程出现的性能衰退, 难以解决 PEMFC 在不同工况下寿命退化的问题, 提出一种延迟电池退化的控制策略。首先通过对燃料电池的寿命预测得到稳态和动态工况下的电压退化曲线, 然后在计算出预测电压退化速率的基础上, 设置满足电池稳定运行的参考电压退化速率, 通过引入 PID 迭代学习控制算法控制燃料电池的进气压力来实现跟踪电池参考电压退化速率的目标, 达到减缓电压衰减的目的。最后通过 MATLAB/Simulink 仿真对 PEMFC 在稳态工况和动态循环工况下的延迟退化控制响应进行验证, 结果证明了所设计的基于多工况寿命预测的 PEMFC 控制策略能够有效地延迟 PEMFC 系统在稳态和动态工况下的电压退化速率, 提高了燃料电池的耐久性。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 寿命预测; 数据驱动; 迭代学习控制; 延迟退化

Delayed Degradation Control of PEMFC Based on Multi-condition Life Prediction

DOU Zhenlan¹, LI Rongsheng², ZHANG Chunyan¹, YUAN Tiejia²

(1. State Grid Shanghai Electric Power Company, Shanghai 200120, China;

2. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116081, China)

Abstract: Aiming at the problem that the performance degradation of PEMFC during operation is not considered in the current control research, and it is difficult to solve the problem of life degradation of PEMFC under different working conditions, we put forward a control strategy to delay battery degradation. Firstly, the voltage degradation curves under steady-state and dynamic conditions are obtained by predicting the life of the fuel cell. Then, on the basis of calculating the predicted voltage degradation rate, the reference voltage degradation rate satisfying the stable operation of the battery is set. The PID iterative learning control algorithm is introduced to control the inlet pressure of the fuel cell to achieve the goal of tracking the reference voltage degradation rate of the battery and achieve the purpose of slowing down the voltage attenuation. Finally, the delayed degradation control response of PEMFC under steady-state and dynamic cycle conditions is verified by MATLAB/Simulink simulation. The results show that the designed PEMFC control strategy based on multi-condition life prediction can be adopted to effectively delay the voltage degradation rate of PEMFC system under steady-state and dynamic conditions, and improve the durability of fuel cells.

Key words: proton exchange membrane fuel cell; life prediction; data-driven; iterative learning control; delay degradation

0 引言

在全球能源转型的背景下, 质子交换膜燃料电池因其无污染和能量利用率高等特点, 广泛应用于交通运输、分布式储能、新型电力系统等领域^[1-2]。面向新能源电力系统时, 扰动因素较多导致质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell,

PEMFC)运行工况时变, 在稳态和动态运行工况下的耐久性将是其商业化推广的重要挑战。准确的预测 PEMFC 在不同工况下的剩余寿命并采取适当的延迟退化控制作为解决耐久性问题的重要途径, 可以实现延长 PEMFC 的使用寿命和降低维护成本的目的^[3-4]。

然而大多数 PEMFC 控制研究都集中在系统级的功率跟踪能力上, 比如控制阴极中的氧气流量以防止反应物匮乏或者故障容错控制^[5-10]。然而, 解决其耐久性问题的延迟退化控制研究较少。Deng 等人^[11]提出了一种线性参数变化(linear parameter

基金资助项目: 国家电网公司总部科技项目(基于电氢可逆转换的电力应急保供技术研究及示范验证)(5400-202328240A-1-1-ZN)。Project supported by Science and Technology Project of SGCC(Research and Demonstration Validation of Electricity Emergency Supply Technology Based on Reversible Electrochemical Hydrogen Conversion)(5400-202328240A-1-1-ZN).

varying, LPV)状态空间模型, 旨在为 PEMFC 系统设计一种快速线性控制器。文献[12]中针对 PEMFC 系统提出了一种模型预测控制(model predictive control, MPC)策略, 使用 LPV 模型, 一方面跟踪功率需求, 另一方面确保工作效率最大化和堆栈耐用性最大化。为了实现不同规模的 MPC 策略, Jouin 等人^[13]提出了一种基于粒子过滤器(particle filter, PF)的组合预报方法, 可以实现短期和长期的寿命预测。Polverino 等人^[14]提出了一种基于物理模型的控制算法, 旨在减轻电化学活性表面积(electrochemical active surface area, ECSA)上的堆栈退化。同样, 文献[15]中也提出了一种非线性模型预测控制策略, 以最大限度地提高阴极催化剂层的活性催化表面积, 避免催化剂位点的饥饿。此外, Bressel 等人^[16]在电化学宏观表示形式中为 PEMFC 提出了一个多物理 LPV 模型。该模型考虑了与降解相关的参数, 以实现耐老化控制。该模型允许在性能衰减的情况下调节 PEMFC 的所需功率。Cheng 等人^[17]中提出, 可以通过管理 PEMFC 供气系统来缓解性能衰减, 其控制效果是基于供气系统模型中的废气再循环功能实现的, 它可以降低进气中的氧气配比, 从而缓解燃料电池输出电压衰减。此外, 降解容限控制也可以在混合动力系统中进行。Kong 等人^[18]为燃料电池/超级电容器混合系统开发了一种基于互联和阻尼分配-通量的控制策略, 其中降解信息是通过滤波状态估计给出的。由于存在燃料电池衰减, 该方法可确保系统正常运行, 同时避免电池工作在过载状态。综上, 现有研究在延迟退化控制方面存在若干不足。大多数研究集中于系统级的功率跟踪和故障容错控制, 对耐久性问题的延迟退化控制关注较少。提出的模型通常复杂度较高, 计算复杂且实施难度大。尽管一些研究结合剩余使用寿命(remaining useful life, RUL)信息的模型预测控制策略, 但预测算法提供的 RUL 信息未能充分与控制策略结合, 无法综合考虑当前的退化状态和系统的 RUL。

本文从延迟退化控制的角度出发, 在预测稳态和动态两种工况下电压退化速率的基础上, 设置满足电池稳定运行的参考电压退化速率, 通过引入 PID 迭代学习控制算法控制燃料电池的进气压力实现跟踪电池参考电压退化速率的目标, 并使用 MATLAB/Simulink 工具对 PEMFC 在稳态工况和动态循环工况下的延迟退化控制响应进行仿真验证,

从而达到延缓燃料电池使用寿命衰减的目的。

1 稳态寿命预测模型

PEMFC 系统作为复杂的电化学反应系统, 在运行中会出现老化, 影响其可靠性和耐久性, 缩短使用寿命。PEMFC 的剩余寿命预测已成为预防电池失效、避免事故发生、确保系统安全运行的关键。因此, 本章将研究 PEMFC 在稳态长周期运行下的寿命预测模型。

ESN 网络与传统的循环神经网络相比, 其输入权重随机生成, 且输出权重矩阵可线性求解, 所以有更快的训练速度和更好的泛化能力。但是随机的储备池参数对 ESN 的模型性能有较大影响, 而且灰狼算法随机初始化所生成的初始种群无法产生较好的种群多样性。为了解决上述问题, 本文提出 Bernoulli 混沌映射改进灰狼优化算法 IGWO 和回声状态网络 ESN 相结合, 利用 IGWO 的全局优化能力对 ESN 的储备池参数: 储备池大小 N 、谱半径 S_r 和稀疏度 S_D 进行寻优, 以实现提高模型的预测精度的目标。

该算法流程图如图 1, 具体步骤为:

1) 对 PEMFC 数据集进行预处理, 首先进行数据平滑和归一化, 再将数据集划分为训练集和测试集。

2) 构建回声状态网络(echo state network, ESN)网络, 初始化输入神经元数量、输出神经元数量、储备池内部激活函数、储备池神经元数量、谱半径和稀疏度。

3) 引入 Bernoulli 混沌映射并生成初始改进灰狼优化算法(improved grey wolf optimization, IGWO)种群。

4) 选择 ESN 网络的均方根误差(root mean square error, RMSE)作为灰狼适应度的计算式, 并保存适应度最小的 α (领导者层)、 β (智囊团队)和 δ (底层狼群)狼。

5) 按照式(1)更新其他普通狼位置, 计算其适应度。

6) 利用 ESN 模型进行训练, 判断算法是否达到最大迭代次数或适应度 RMSE 值最小, 否则重复步骤 4)和 5), 直到适应度值足够小, 最终输出最优的储备池神经元数量、谱半径和稀疏度。

7) 将最优的超参数储备池神经元数量、谱半径和稀疏度带入 ESN 网络模型中, 得到最终的

IGWO-ESN 预测模型。

$$\begin{cases} D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X| \\ D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{cases} \quad (1)$$

式中： D_α 、 D_β 和 D_δ 分别代表 ω 层狼与 α 、 β 和 δ 狼之间的距离； C_1 、 C_2 和 C_3 为确定的系数； X_α 、 X_β 和 X_δ 分别代表受 α 层狼群、 β 层狼群、 δ 层狼群影响， ω (外围狼群)灰狼个体需要调整的位置； X 代表 ω 狼的最终位置。

图 1 中 a 、 A 、 C 代表灰狼个体位置更新的参数，属于中间求解参数；GWO 代表灰狼优化算法。

2 PEMFC 动态寿命预测模型

在实际生产活动中，PEMFC 系统运行的工况往往是动态的，而动态循环变载工况是影响燃料电池寿命衰退最严重的工况^[19]。因为物理场的波动使其电化学反应速率加快，PEMFC 的性能衰减随之加剧，使用寿命大大缩短，因此对其动态工况下的剩余寿命预测具有重要意义。

PEMFC 的性能退化受到很多因素影响，又因系统复杂的多尺度、多领域耦合的特点，难以通过机理模型来准确描述 PEMFC 系统的退化过程。直接利用衰退机理模型预测 PEMFC 的剩余使用寿命会产生较大误差，因此本章将采用数据驱动的方法结合退化电压对动态循环工况下的 PEMFC 剩余寿命预测，本文选取基于注意力机制 Attention 的卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)结合双向长短记忆(Bi-directional long-short term memory, BiLSTM)神经网络模型进行动态剩余寿命预测。在建立模型时，考虑到修正线性单元(rectified linear unit, ReLU)函数计算简单高效，适合大规模数据处理，且能有效缓解梯度消失问题，促进深层网络的梯度传播，加快模型收敛速度，因此采用 ReLU 函数作为卷积层的激活函数。基于注意力机制的卷积神经网络-双向长短记忆(convolutional neural network-Bi-directional long-short term memory, CNN-BiLSTM)神经网络模型结构如图 2 所示。

本模型的第 1 层为输入层，将 PEMFC 在动态工况下的实验数据进行输入，数据维度可以根据数据种类选择。第 2 层是卷积神经网络层，输入的数据首先进入一维卷积层(Conv1D)。Conv1D 设置有 64 个卷积核，每个卷积核的大小为 1，移动步长为

1，ReLU 函数用作卷积层的激活函数。对输入数据进行特征提取之后，将数据传输到池化层。池化层采用最大池化策略，池化窗口大小为 3。在通过池化层保留数据的关键信息并降低数据的维度后，为了防止过拟合，插入 Dropout(表示防止深度神经网络过拟合的正则化技术)层，并将参数设置为 0.2。第 3 层为双向长短记忆神经网络层，在此层中将 Dropout 层的输出用作 BiLSTM 层的输入，设置了 64 个隐藏层节点，激活函数采用 tanh 函数。第 4 层为注意力层，BiLSTM 隐藏层输出向量作为注意力层的输入，通过一个全连接层进行训练，再对全连接层的输出使用 sigmoid 函数进行归一化，得出每一个隐藏层向量的分配权重。最后一层是输出层，由此输出 PEMFC 的动态剩余寿命预测结果。

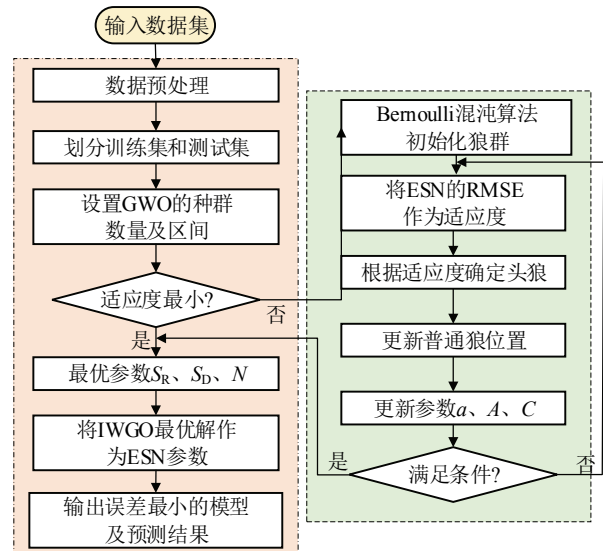


图 1 IGWO-ESN 算法流程图

Fig.1 Flowchart of IGWO-ESN algorithm

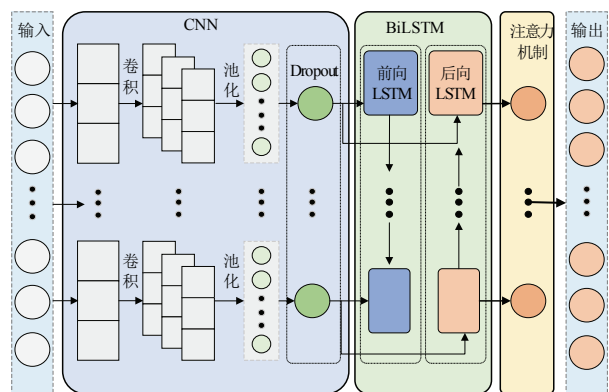


图 2 CNN-BiLSTM-Attention 模型结构

Fig.2 Structure of CNN-BiLSTM-Attention model

3 PEMFC 延迟退化控制方案

3.1 燃料电池延迟退化控制策略

本节将结合前面章节稳态工况和动态循环工况下的 PEMFC 剩余寿命预测对 PEMFC 的电压退化进行预测, 通过预测结果得到 PEMFC 运行电压的退化轨迹; 在根据退化电压轨迹计算电压退化速率, 延迟退化控制模块的核心是以控制 PEMFC 在运行过程中减缓性能衰减为目的的控制器, 根据寿命预测的电压退化速度, 通过电池的气体控制对气体流量进行控制, 实现电压退化速率的降低和系统运行效率的稳定, 并以合适的电压退化速率为参考值, 最后利用控制模块实现目标值的准确跟踪控制。延迟退化的 PEMFC 控制策略如图 3 所示。

在第 2 章中提出的寿命预测基础上, 建立 PEMFC 燃料电池的剩余寿命预测 RUL, 剩余寿命预测的结果是根据 PEMFC 系统的状态做出的, 它可以反映电池退化的程度, 即电池从当前状态到失效点的时间。一般燃料电池的失效点用其输出电压来反映, 当电池电压低于额定电压的 90% 时, 电池就被视为故障状态无法正常工作。因此寿命预测模块将以 90% 电压为失效点, 对燃料电池的剩余寿命进行预测, 剩余寿命应该为预测时间与当前时间之间的时刻。寿命预测模块如图 4 所示。

根据 PEMFC 运行状态的不同, 可将 PEMFC 的剩余寿命预测分为两种: 稳态工况下的寿命预测和动态工况下的寿命预测。稳态工况一般指燃料电池负载基本恒定, 工作电流波动较小的运行状态, 比如固定发电站和便携式电源; 动态工况一般指电池负载电流幅值变化较大的运行状态, 负荷多呈现循环波动的特点。目前氢能源汽车数量增加, 氢燃料电池在汽车领域的应用更加广泛, 车载氢燃料电池的运行工况既有动态工况也有稳态工况, 因此燃料电池寿命预测模块将包含两种工况下的寿命预测方法, 在不同工况下选择对应的预测模型, 大大提高预测的准确度。其中稳定工况下的 PEMFC 剩余寿命预测模型为改进的 ESN 模型, 动态工况下的预测模型为基于注意力机制的 CNN-BiLSTM 模型。

3.2 燃料电池延迟退化模块

考虑到 PEMFC 系统外部因素的不确定性, 本文将迭代学习控制与传统反馈控制相结合, 提出了一种 PID-ILC 控制策略, 将上一时刻的误差及其导数作为历史遗留的有效信息传递给学习单元。由图

5 可知, 第 k 次的迭代学习控制器的输出 $u_k(t)$ 与第 $k-1$ 次迭代学习的输出 $u_{k-1}(t)$ 、偏差积分、偏差 $e_{k-1}(t)$ 和偏差的导数 $\dot{e}_{k-1}(t)$ 有关, 其学习率的更新形式采用 PID 型迭代算法, 具体表达式如下:

$$u_k(t) = u_{k-1}(t) + k_p e_{k-1}(t) + k_i \int_0^t e_{k-1}(\tau) d\tau + k_d \dot{e}_{k-1}(t) \quad (2)$$

式中: k_p 、 k_i 和 k_d 分别为误差、误差积分以及误差导数的增益; k 为迭代学习次数。其主要内容是根据控制器当前时刻的实际输出信号与期望信号之间的偏差以及控制系统历史控制经验, 力求寻找到一种理想的输入特性曲线。“寻找”的过程可以等效为一个数学问题: 在 $t \in [0, t]$ 有限的时间区间内, 已知被控对象初始状态和期望输出信号 $y_d(t)$, 利用迭代的方法求解输入信号 $u_k(t)$, 使得真实的响应信号 $y_k(t)$ 趋近于 $y_d(t)$ 。

$$e_k(t) = y_d(t) - y_k(t) = \Delta \varepsilon_d(t) \quad (3)$$

$$\dot{e}_k(t) = \frac{e_k(t) - e_k(t-1)}{\tau_s} \quad (4)$$

式中: τ_s 为时间间隔; $\Delta \varepsilon_d(t)$ 为理想电压退化率轨迹

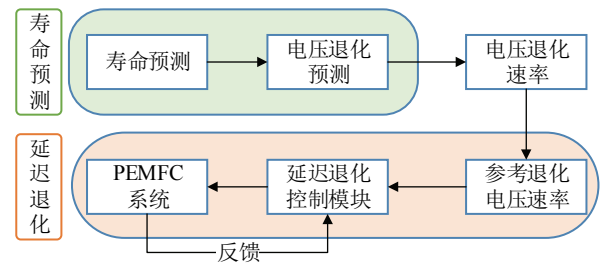


图 3 延迟退化的 PEMFC 控制策略

Fig.3 PEMFC control strategy with delayed degradation

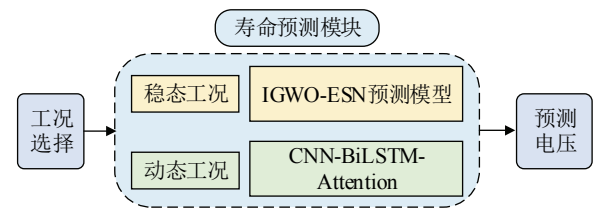


图 4 寿命预测模块

Fig.4 Life prediction module

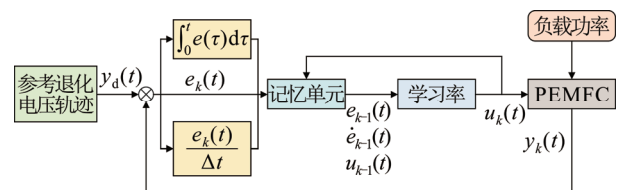


图 5 PID 迭代学习控制算法原理

Fig.5 Schematic of PID iterative learning control

和实际的电压退化率曲线之差。

综合上述的迭代控制学习方法，下面将展示出迭代控制算法的流程：

1) 设置 $k=0$ ，设置给定参考轨迹 $y_d(t)$ 、初始状态 $x_k(0)$ 、初始控制输入 $u_0(t)$ 。

2) 设置第 k 次的操作任务所使用迭代学习率的相关参数值。

3) 被控系统开始迭代运行，计算被控系统实时输出值与参考轨迹的误差量。

4) 判断此次迭代得到的输出误差值是否符合停止条件： $|y_d(t)-y_k(t)|<\varepsilon$ ，符合则停止迭代，被控系统恢复正常运行；若不符合，转步骤 5)。

5) 更新迭代学习的控制输入。根据之前批次的控制输入、输出以及二者的误差值产生下一批次的控制输入值，同时迭代次数加 1 并转至步骤 4) 继续运行。

图 6 为基于 PID-ILC 的 PEMFC 延迟退化控制方案。该控制方案结合了前文中所提的稳态寿命预测模型 IGWO-ESN 和基于注意力机制的 CNN-BiLSTM 预测方法，能够实现对理想状态下的 PEMFC 动态工况电压退化轨迹预测。

4 仿真分析

为了验证第 3 章提出的延迟 PEMFC 退化的迭代学习控制策略的有效性，在满足负载电流的条件下对 PEMFC 系统的氢气入口压力，空气入口压力进行控制，使其在稳态和动态循环两种工况下都能稳定运行。在保障 PEMFC 系统正常运行的状态下，对其退化速度进行控制，来实现延迟电压退化的速度，进而延长 PEMFC 在两种工况下的使用寿命。在本章实验中所采用的受控基础模型是 Avista 实验室制造的 SR-12500 W 型 PEMFC 电堆模型^[20]，并加入退化电压模型。实验平台采用 MATLAB2018a，燃料电池的额定运行状态参数如表 1 所示。

4.1 PEMFC 退化仿真

在仿真过程中，不对 PEMFC 进行任何干扰，先进行耐久性实验仿真并记录运行数据，其运行参数如下：燃料电池的电堆运行最高温度为 307.7 K，阳极进气压强在 0.152 MPa 左右，阴极进气压强约为 0.101 MPa，电池额定电流为 20 A，仿真运行时间 1 000 h，分别在两中工况下运行，其中不同工况下的运行情况如下。

1) 稳态工况: PEMFC 系统运行额定功率为 500 W，

初始电压为 25 V，持续运行 1 000 h，为了使仿真数据更加符合实际运行工况，在负载电流中加入了随机噪声代表负荷的波动，其中负载电流波动幅度不超过额定的 10%。PEMFC 的输出电压仿真见图 7。

2) 动态循环工况: 为了设计实验的可靠性，PEMFC 的耐久性动态循环工况将参考燃料电池动态负载循环的电流趋势设计，每个循环运行周期为 1 000 s。考虑到 SR-12500 W 型 PEMFC 电堆模型的运行参数，将负载最大电流设置在 20 A，初始阳极进气压强在 0.152 MPa 左右，初始阴极进气压强约为 0.101 MPa。一个循环周期的动态循环电流波形如图 8 所示。

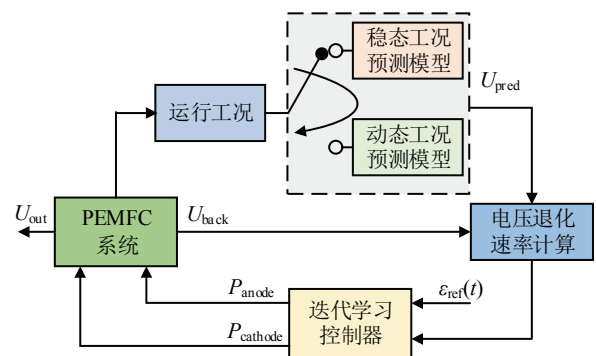


图 6 基于 PID-ILC 的 PEMFC 延迟退化控制方案

Fig.6 Delay degradation control scheme of PEMFC based on PID-ILC

表 1 SR-12500 W 型 PEMFC 的运行参数

Table 1 Operating parameters of SR-12500 W PEMFC

参数	数值
容量/W	500
电堆数	48
运行环境温度/°C	5~35
阳极进气压强 P_{anode} /MPa	≈0.152
阴极进气压强 $P_{acathode}$ /MPa	≈0.101
输出电流/A	0~20

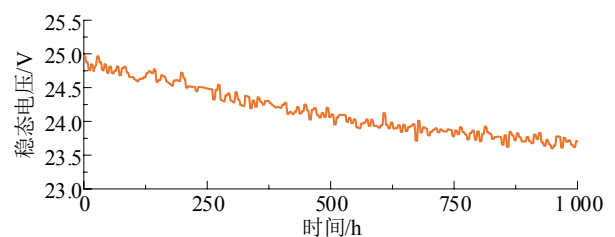


图 7 稳态工况运行 1 000 h 输出电压

Fig.7 Steady-state operating conditions 1 000 h output voltage

4.2 延迟电压衰退控制

为了验证延迟退化控制的有效性, 在 PEMFC 系统运行 1 000 h 记录数据, 然后重新引入延迟退化控制进行仿真。为了得到参考电压退化速率, 首先根据第 2 章的 IGWO-ESN 预测模型对稳态工况下的电压退化情况进行预测, 得到稳态工况下退化模型的输出电压, 同样的在动态工况下的电压退化曲线可利用 CNN-BiLSTM-Attention 预测模型得到, 稳态工况下的预测电压和经过控制后的稳态输出电压退化曲线如图 9 所示。

图 10 中随着运行时间的增加, 氢气进气压强和空气进气压强都呈现不断上升的趋势, 因为在 PEMFC 电堆长期运行过程中, 铂催化剂的分解和团聚等过程加剧, 碳腐蚀越来越严重, 有效催化面积也越来越少, 随之反应的速率也越来越低, 导致电池的输出电压退化加剧。因此为了降低 PEMFC 的电压退化速率, 控制器将通过增大反应物的压力来提高电池的输出电压, 于是运行时间越长, 氢气和空气的进气压力越大。

在 PEMFC 系统动态循环工况的延迟退化控制过程中, 其基本流程与稳态工况延迟退化控制相同, 只有在电压退化的预测环节采用的模型不同, 在动态工况下的电压预测利用第 3 章中的 CNN-BiLSTM-Attention 预测模型, 动态工况预测电压曲线及控制后动态电压曲线如图 11 所示。

不难看出, 控制后的动态工况输出电压相比于无控制器的 PEMFC 输出电压衰退明显减少。从图 11 中发现, PEMFC 系统在经过 1 000 h 的动态工况运行后, 无控制器的基于退化电压的燃料电池模型的仿真电压衰退达到了 5.8 V, 而通过延迟退化控制模块控制的 PEMFC 系统输出电压只下降了 2.98 V, 减少了 2.82 V 的电压退化, 明显减缓了 PEMFC 系统寿命衰减的速度。通过稳态工况下 PEMFC 输出电压的衰减幅度和动态循环工况的对比, 可以发现动态循环工况下的寿命衰减更快, 这个现象从电压退化模型的角度可以解释为频繁的电位变化和较高的电压使电堆内部的铂催化剂退化加速, 进而影响了反应速率, 最后导致电池的输出电压也随之降低。

4.3 控制效果对比

为了更好地证明本控制策略的优越性, 本节将所设计的比例积分微分-迭代学习控制(proportional-integral-derivative-iterative learning control, PID-ILC) 迭代学习控制器与目前燃料电池常见的 PID 控制器

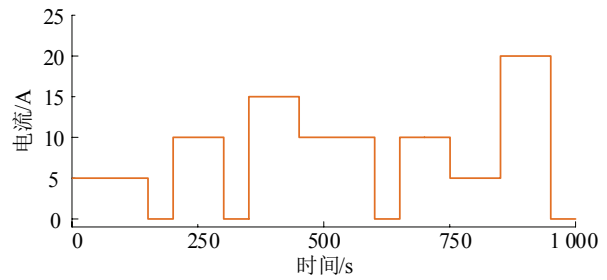


图 8 燃料电池动态循环电流

Fig.8 Dynamic cycle current of fuel cell

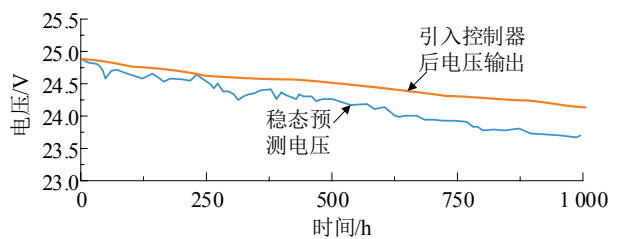


图 9 PEMFC 的稳态预测电压和引入控制器后电压输出

Fig.9 Steady state prediction voltage of PEMFC and voltage output after introducing controller

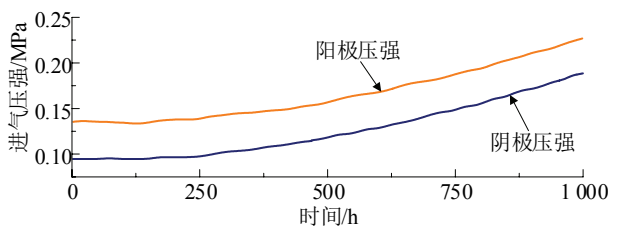


图 10 阴极和阳极进气压强变化

Fig.10 The change of inlet pressure of cathode and anode

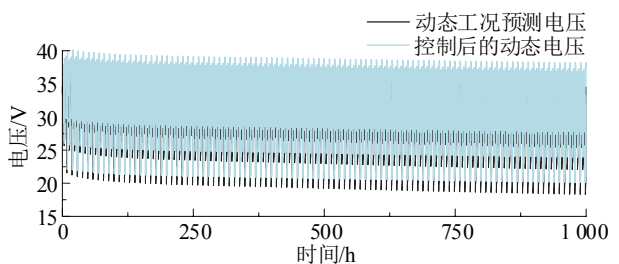


图 11 动态工况预测电压曲线及控制后动态电压曲线

Fig.11 Dynamic operating condition prediction voltage curve and controlled dynamic voltage curve

进行对比。对比实验分别在动态工况和稳态工况下进行, 具体的仿真参数和模型设置与前文保持一致, 通过控制负载电流来使 PEMFC 工作在稳态工况和动态工况, PEMFC 运行最高温度为 307.7 K, 阳极

进气压强在 0.152 MPa 左右, 阴极进气压强约为 0.101 MPa, 稳态时电池工作在恒定电流 20 A, 动态工况的负载电流为图 8 所示波形。稳态和动态控制仿真结果如图 12 和 13 所示。

从图 13 中可以看出, 在动态的延迟退化控制过程中, PID-ILC 控制器的输出电压与 PID 控制器在前 50 h 内效果较好都能及时控制电压的衰减, 但是随着运行时间的增加, PID 控制器的输出电压越来越低, 在 1 000 h 时 PID 控制器输出的最低电压相较于本文的控制器电压低 1.2 V。综上可知, 本章节所提出的 PID-ILC 迭代学习控制器在稳态和动态工况下响应速度较快, 可以在两种工况下有效地延迟燃料电池的电压衰退, 从而延长系统的运行寿命。

5 结论

本文从延迟退化控制的角度出发, 基于多尺度的 PEMFC 寿命预测提出了一种考虑稳态和动态工况下的延迟退化控制策略, 具体结论如下:

1) 相较于目前文献中常见的 BP 神经网络和循环神经网络模型, 所构建的预测模型能够产生更低的预测误差和更好的拟合效果, 有利于提高后续 PEMFC 系统的延迟退化控制准确度。

2) 在对 PEMFC 进行延迟退化控制后, 动态工况下的输出电压衰退明显减少。通过对比发现, 无控制器的 PEMFC 在 1 000 h 动态工况下电压衰退为 5.8 V, 而通过延迟退化控制的 PEMFC 电压仅下降了 2.98 V, 减少了 2.82 V 的衰退幅度。这表明, 延迟退化控制显著减缓了 PEMFC 的电压衰退速度, 提升了系统的使用寿命。

3) 将 ILC 引入 PEMFC 的延迟退化控制中, 通过对比不同工况下 ILC 和 PID 的控制效果发现, ILC 控制下的 PEMFC 电压退化速率显著降低。在 1 000 h 运行时, PID 控制器输出电压最低值比 ILC 控制器低 1.2 V, 表明 ILC 控制策略在延迟电压衰退方面表现更优。证明本文提出的 PID-ILC 控制策略在延缓 PEMFC 电压退化和延长系统运行寿命方面具有更好的效果。

本文提出的模型方法具有一定的实用性, 该方法理论上可以应用于质子交换膜燃料电池实物系统, 完成各场景工况中性能衰减预测、健康评估及故障诊断等研究及应用。未来应针对该方法进行长周期实物测试, 以进一步证明稳态、动态寿命预测模型和延迟退化控制策略的有效性。

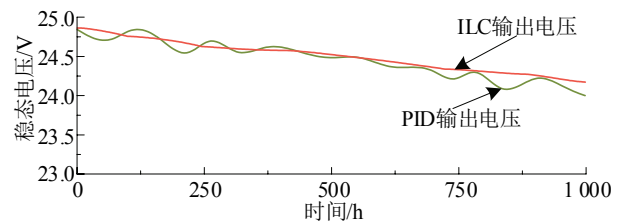


图 12 两种控制方式下的稳态电压退化对比

Fig. 12 Comparison of steady-state voltage degradation under two control modes

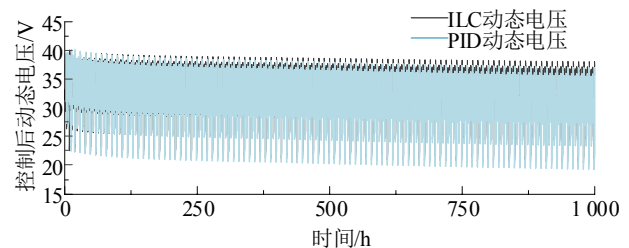


图 13 两种控制方式下的动态电压退化对比

Fig. 13 Comparison of dynamic voltage degradation under two control modes

参考文献 References

- [1] 邵志刚, 衣宝廉. 氢能与燃料电池发展现状及展望[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(4): 469-477.
SHAO Zhigang, YI Baolian. Developing trend and present status of hydrogen energy and fuel cell development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2019, 34(4): 469-477.
- [2] 周孝信, 赵强, 张玉琼. “双碳”目标下我国能源电力系统发展前景和关键技术[J]. 中国电力企业管理, 2021(31): 14-17.
ZHOU Xiaoxin, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. The development prospects and key technologies of China's energy power system under the goal of “double carbon”[J]. China Power Enterprise Management, 2021(31): 14-17.
- [3] 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.
- [4] 邵誉钧, 綦戎辉. 质子交换膜电化学系统动态特性及控制策略研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(6): 1360-1365.
SHAO Yujun, QI Ronghui. Research progress in dynamic operation characteristics and control strategies of electrochemical system based on proton exchange membrane[J]. Applied Chemical Industry, 2024, 53(6): 1360-1365.
- [5] 郭泽林. 质子交换膜燃料电池的故障诊断与容错控制[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
GUO Zelin. Fault diagnosis and fault tolerant control of proton exchange membrane fuel cells[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2022.
- [6] 肖仰淦, 吴肖龙, 李曦. 基于 ADRC 的 PEMFC 系统阴极相对湿度和氧气过量比控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 499-509.
XIAO Yanggan, WU Xiaolong, LI Xi. Control of cathode relative humidity and oxygen excess ratio in PEMFC system based on ADRC[J]. Solar Energy, 2023, 44(12): 499-509.

- midity and oxygen excess ratio in PEMFC system based on ADRC[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 499-509.
- [7] 李 奇, 李 朔, 尹良震, 等. 基于扩张状态观测器的 PEMFC 发电系统串级滑模控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(4): 1470-1480.
- LI Qi, LI Shuo, YIN Liangzhen, et al. Cascade sliding mode control strategy for PEMFC power generation system based on extended state observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(4): 1470-1480.
- [8] 谭 超, 韩国鹏, 戴朝华, 等. 基于改进滑模控制的 PEMFC 热管理控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(16): 5899-5909.
- TAN Chao, HAN Guopeng, DAI Chaohua, et al. Thermal management control method of PEMFC based on improved sliding mode control[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(16): 5899-5909.
- [9] 吴 琼, 苏建徽, 解 宝, 等. 基于最大净功率输出的 PEMFC 阴极供气系统优化控制研究[J]. *太阳能学报*, 2024, 45(2): 283-290.
- WU Qiong, SU Jianhui, XIE Bao, et al. Study on optimal control of cathode gas supply system of PEMFC based on maximum net power output[J]. *Acta Energeticae Solaris Sinica*, 2024, 45(2): 283-290.
- [10] 韩国鹏, 詹天昶, 戴朝华, 等. 基于自适应滑模观测器的氢燃料电池空气供应系统泄露故障容错控制[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(5): 1848-1859.
- HAN Guopeng, ZHAN Tianyang, DAI Chaohua, et al. Fault tolerant control of PEMFC air supply system based on adaptive sliding mode observer[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(5): 1848-1859.
- [11] DENG Z H, CHEN Q H, ZHANG L Y, et al. Control oriented data driven linear parameter varying model for proton exchange membrane fuel cell systems[J]. *Applied Energy*, 2020, 277: 115540.
- [12] GOSHTASBI A, ERSAL T. Degradation-conscious control for enhanced lifetime of automotive polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. *Journal of Power Sources*, 2020, 457: 227996.
- [13] JOUIN M, GOURIVEAU R, HISSEL D, et al. Combined predictions for prognostics and predictive control of transportation PEMFC[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2016, 49(28): 244-249.
- [14] POLVERINO P, PIANESE C. Control algorithm design for degradation mitigation and lifetime improvement of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. *Energy Procedia*, 2017, 142: 1706-1713.
- [15] LUNA J, USAI E, HUSAR A, et al. Enhancing the efficiency and lifetime of a proton exchange membrane fuel cell using nonlinear model-predictive control with nonlinear observation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 64(8): 6649-6659.
- [16] BRESSEL M, HILAIRET M, HISSEL D, et al. Model-based aging tolerant control with power loss prediction of Proton Exchange Membrane Fuel Cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(19): 11242-11254.
- [17] CHENG S L, LI J Q, XU L F, et al. Air supply system model with exhaust gas recirculation for improving the life of fuel cell[C]//2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). Beijing, China: IEEE, 2014: 1-6.
- [18] KONG S, BRESSEL M, HILAIRET M, et al. Advanced passivity-based, aging-tolerant control for a fuel cell/super-capacitor hybrid system[J]. *Control Engineering Practice*, 2020, 105: 104636.
- [19] 章雷其, 林 沁, 刘 敏, 等. 质子交换膜燃料电池退化机制及寿命预测方法综述[J]. *洁净煤技术*, 2024, 30(1): 265-276.
- ZHANG Leiqi, LIN Qin, LIU Min, et al. Review of degradation mechanism and remaining useful life prediction of PEMFC[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(1): 265-276.
- [20] WANG C S, NEHRIR M H, SHAW S R. Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2005, 20(2): 442-451.



DOU Zhenlan
Ph.D.
Senior engineer



LI Rongsheng
Corresponding author

窦真兰

1980—, 女, 博士, 高工

主要从事综合能源系统、能源互联网、氢能、储能、微网、风力发电等研究工作

E-mail: douzhl@126.com

李荣盛(通信作者)

1997—, 男, 硕士生

主要从事氢燃料电池故障预测及控制等研究工作

E-mail: 2360869775@qq.com

收稿日期 2024-06-27 修回日期 2024-08-22 编辑 陈 蔓