

基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时 最优温度无模型自适应控制

尹良震, 刘 璐, 李 奇, 陈维荣

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 空冷型质子交换膜燃料电池(PEMFC)发电系统的输出性能受工作温度、气体流速、尾气排放间隔等操作参数的影响,其中工作温度是影响输出性能的关键因素。针对空冷型 PEMFC 发电系统温度控制所具有的非线性、时滞、慢时变等复杂特性,提出基于灰色预测的无模型自适应控制方法实现实时最优温度控制。该方法将灰色预测的结果代替发电系统当前工作温度测量值。实验结果表明:所提方法能够在不同负载条件下实现对发电系统最优温度进行实时跟踪。与增量式 PID 控制相比,所提方法有效减小了系统的超调,使发电系统输出功率更平稳,有利于发电系统的长期稳定运行,延长电堆的使用寿命。且所提方法仅根据 PEMFC 输入输出数据在线对控制器进行调整,对 PEMFC 参数不敏感,可应用于类似空冷型 PEMFC 发电系统。

关键词: 质子交换膜燃料电池发电系统; 最优温度特性; 灰色预测; 无模型自适应控制; 实时控制

中图分类号: TM 911.4

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.12.023

0 引言

燃料电池是一种高效、环保的发电装置。其中,质子交换膜燃料电池 PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)是目前最具商业化前景的一种发电装置。PEMFC 具备可在室温快速启动、效率高、燃料补给时间短以及环境友好等特点,已经广泛用于交通工具动力源和分布式发电系统^[1-5]。PEMFC 发电系统包括输出电能调节系统、冷却系统、气体供应系统等子系统,其工作原理涉及流体动力学、热力学、传质学和电化学等多个领域。PEMFC 发电系统的输出性能受到工作温度、气体流速、尾气排放间隔等操作参数的影响。近年来,针对 PEMFC 发电系统控制的研究主要集中在输出特性优化^[6-9]。

本文研究的是空冷型 PEMFC 发电系统,电堆阴极采用开放式结构设计,直接与空气贯通。相比大功率水冷型 PEMFC 发电系统,空冷型 PEMFC 发电系统构成更加简单,其成本低、稳定性强、寄生功耗低,在中小型移动电源领域具有良好的应用前景。空冷型 PEMFC 发电系统主要通过调整散热风扇的转速和尾气排气间隔维持电堆内部的水热平衡,使发电系统输出性能最优。升高发电系统工作温度不仅可以加快反应速度,提高氢电氧化,还能加快阳

极水分的蒸发。定时的阳极排气可以将阳极累积的液态水吹扫出电堆,但起到的水管理能力有限,电堆的水管理主要还是依靠调节空气流量来实现。因此,空冷型 PEMFC 发电系统的水热管理是相互耦合的。控制发电系统的工作温度对于维持电堆内部的水热平衡、优化发电系统的输出性能至关重要^[10-12]。

目前,空冷型 PEMFC 发电系统输出性能的优化主要针对最优温度特性展开。文献[10-12]中通过实验证明发电系统在实际运行过程中存在最优温度特性:发电系统工作于恒流模式,当工作温度较低时,其输出电压随着温度的升高而会有明显的升高,但是存在一个最优温度点,当工作温度到达最优温度点后,发电系统的输出电压会随着工作温度的上升而急剧下降。上述实验研究表明发电系统工作温度是影响其输出性能的关键因素。

针对空冷型 PEMFC 发电系统的温度控制所具有的非线性、时滞、慢时变等复杂特性,仅采用传统的 PID 控制难以获得满意的控制效果。文献[11]采用自适应模糊 PID 控制实现对发电系统最优温度进行控制,通过模糊规则对 PID 控制器参数进行在线调整,提高温度控制系统的控制精度,但是该方法缺乏对大时滞系统的控制能力,在温度控制过程出现较为明显的超调。文献[12]提出一种分段预测负反馈温度控制方法,在比例控制的基础上增加一个预测控制量用于抵消温度控制对象响应滞后带来的影响。该方法简单易于实现,但是参数的整定需要依靠大量的操作经验,且在高输出功率运行时工作温度会出现较大幅度的波动,不利于系统的稳定运行。文献[13]采用广义预测控制在 MATLAB/Simulink 环境下实现对发电系统最优温度控制进行仿真,

收稿日期:2017-03-06;修回日期:2017-09-15

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG08B01);国家自然科学基金资助项目(61473238,51407146);四川省杰出青年基金资助项目(2015JQ0016)

Project supported by the National Key Technology R&D Program of China(2014BAG08B01),the National Natural Science Foundation of China(61473238,51407146) and Scientific Funds for Outstanding Young Scientists of Sichuan Province(2015-JQ0016)

但是广义预测控制需要在线求解复杂丢番图方程,计算量很大,在实际系统应用中,对硬件要求很高,不利于硬件实现。

本文基于 Horizon 公司 H-300 空冷型 PEMFC 电堆搭建测控实验平台,开展最优温度特性实验测试。在此基础上,提出基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时最优温度无模型自适应控制 MFAC (Model Free Adaptive Control)。该方法利用发电系统实时运行过程中的 I/O 数据,充分发挥了灰色预测的预测时延、抑制系统超调的优点和 MFAC 所具有的在线自适应特点。在此基础上,对控制器参数对系统性能的影响、系统阶跃响应能力进行了实验研究。

1 空冷型 PEMFC 发电系统测控系统实验平台

空冷型 PEMFC 发电系统测控系统实验平台如图 1 所示,其主要由空冷型 PEMFC 电堆、散热风扇、氢气调压阀、氢气进气阀、尾气排气阀、电子负载、负载断路器等辅助设备组成。其中,散热风扇为电堆提供氧气,同时带出电堆电化学反应产生的热量和气态水;氢气调压阀、氢气进气阀构成氢气供应系统,为电堆电化学反应提供足够的氢气;尾气排气阀用于排出阳极流道内不纯反应气体和电堆电化学反应产生并累积在阳极流道内的液态水;电子负载和负载断路器构成负载管理系统用于对发电系统输出进行调节。

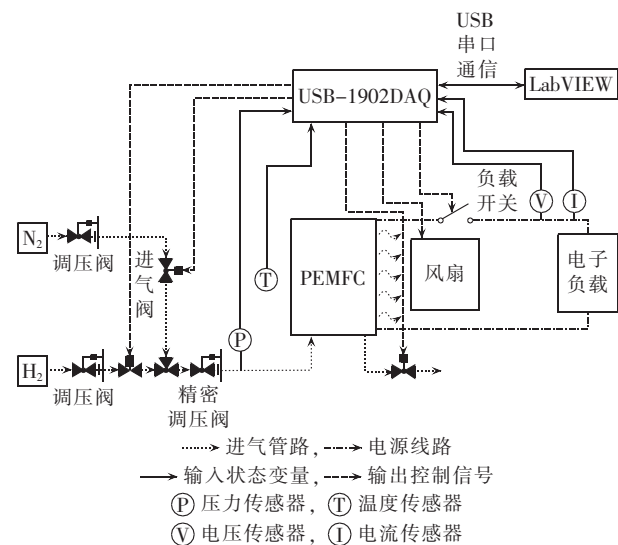


图 1 空冷型 PEMFC 发电系统测控实验平台系统结构图

Fig.1 System structure diagram of test and control experimental platform of air-cooling PEMFC power generation system

本文在实验中采用 Horizon 公司的 H-300 空冷自增湿型 PEMFC 电堆,H-300 是一款自带控制器,可以独立运行的小型发电系统。电堆由 60 片单电池组成,其额定输出功率为 300 W,额定工作电流为

8 A。允许工作环境温度为 5~30℃。电堆配备 3 个并联的 DC 12 V/0.25 A 的可调速直流风扇。为了展开对发电系统最优温度特性的研究,本文搭建了系统结构如图 1 所示的空冷型 PEMFC 测控实验平台。通过在电堆内置热敏电阻的方式对工作温度进行采集,发电系统的输出电压和输出电流在 H-300 输出端通过相应电压/电流传感器进行测量。在搭建的测控实验平台中,为更好地实现对电堆的保护,增加氮气供应回路,用于在发电系统启动和停机时吹扫电堆阳极流道内部残存的氢气和空气。

外部负载采用 ITECH 公司额定功率为 600 W 的可编程电子负载 IT8513C 进行模拟。为了便于复杂控制算法的开发和实验验证,采取 LabVIEW+ 数据采集装置作为发电系统主控单元。其中,LabVIEW 软件用于测控实验平台上位机控制程序的开发;数据采集装置选择 ADLINK 公司的数据采集卡 USB-1902DAQ,采用 USB 串口通信方式与 LabVIEW 上位机程序进行数据传输。USB-1902DAQ 采集速度快、精度高、抗干扰能力强,广泛应用于控制系统设计中。发电系统工作温度、输出电流、输出电压等状态参数由相应采样电路转换成 0~10 V 电压信号后,LabVIEW 上位机通过数据采集卡(AI 通道)实时采集发电系统工作状态变量。信号采集电路如图 2 所示,图中 FC_Temp 为电堆温度经过信号采集电路转换成的电压信号,FC+为电堆正极,FC_V 为电堆输出电压经过信号采集电路转换成的电压信号,VCC

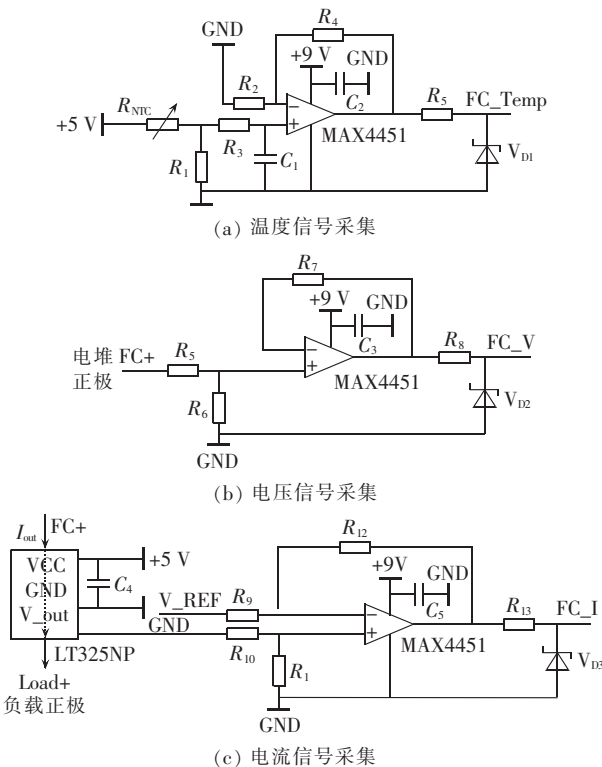


图 2 信号采集电路

Fig.2 Signal acquisition circuits

为电流传感器 LT325NP 输入电压端口, V_{out} 为电流传感器 LT325NP 输出电压端口, Load+ 为电子负载正极, V_{REF} 为电流信号采集电路基准电压, FC_I 为电堆输出电流经过信号采集电路转换成的电压信号。

空冷型 PEMFC 发电系统在实际应用中将面对复杂的工作环境, 考虑数据采集会受到外部干扰的影响, 为提高采样数据的准确性, 采用递推平均滤波算法在 LabVIEW 上位机程序中对数据进行实时滤波, 消除周期性干扰对数据采集的影响。最优温度控制程序根据发电系统工作状态变量产生当前最优风扇控制序列, 通过 USB 数据串口将最优风扇控制序列传输到数据采集卡, 数据采集卡(AO 通道)输出风扇控制电压, 调整风扇转速实现对发电系统最优温度控制。发电系统的启停控制主要通过对电磁阀以及负载断路器的控制实现。LabVIEW 上位机根据发电系统的运行状态产生电磁阀开启和关闭信号, 通过 USB 数据串口传输到数据采集卡, 数据采集卡(DO 通道)产生阀门驱动信号, 经过电磁阀驱动电路实现对电磁阀的控制。

2 空冷型 PEMFC 发电系统最优温度特性

由空冷型 PEMFC 发电系统的极化曲线可知, 在一定环境、恒定输出电流条件下, 要使空冷型 PEMFC 发电系统输出功率最大, 也即使发电系统输出电压最大。根据 PEMFC 能斯特热力学电动势、活化损失电动势、欧姆极化损失电动势及浓差极化损失电动势可知, PEMFC 输出电压与工作温度、输出电流、氢气分压、氧气分压有关^[6-9]。又因空冷型 PEMFC 采用直接与空气贯通的开放式结构设计, 其氧气分压可近似视为大气压值, 为定值; 阳极采用恒压供氢, 其氢气分压可近似为定值。因此在每个恒定输出电流下, 空冷型 PEMFC 发电系统的输出功率/电压与工作温度紧密相关。为实现空冷型 PEMFC 发电系统输出性能最优, 必须测试在一定环境条件下, 发电系统在不同输出电流下对应的最优温度, 通过合适的控制方法将发电系统工作温度维持在最优温度附近, 实现发电系统的最优性能输出。在搭建的空冷型 PEMFC 发电系统测控实验平台上, 通过实验的方法确定发电系统在不同输出电流下对应的最优工作温度。

实验中, 将电子负载 IT8513C 设置为恒流工作模式, LabVIEW 上位机程序中发电系统保护温度值设置为 75℃; 保护电流设置为 H-300 手册规定的最高工作电流 12 A; 保护电压设置为 30 V。实验所用的氢气为 99.999% 的高纯氢, 通过调整氢气调压阀将氢气进堆压力设置为 0.60 barg (1 barg = 10⁵ Pa)。

阳极排气参照 H-300 电堆自带控制器进行设计, 排气间隔 10 s/次, 排气持续时间 200 ms。

发电系统在小输出电流下启动时, 为了使得工作温度迅速升高, 应将发电系统风扇控制电压设定为最低值, 待工作温度升高后, 逐步增加负载电流。同时根据发电系统的工作特性, 发电系统工作在较低输出电流范围(活化极化区)或者较高输出电流范围(浓差极化区), 都不利于发电系统高效安全稳定运行。对于 H-300 空冷型 PEMFC 发电系统, 在实际应用中, 多将发电系统工作区间设定在欧姆极化区 (4~8 A)。为了优化发电系统在稳定运行区间的输出特性, 需要对该区间内发电系统最优温度特性展开实验研究。

待负载电流稳定在额定电流 8 A 后进行温度特性测试实验。先将风扇控制电压设置为最大 12 V, 此时风扇以最大转速运行, 使发电系统在较低工作温度工作, 此时发电系统的输出电压较低, 逐步降低风扇控制电压, 减小风扇的散热量, 使发电系统工作温度升高。在风扇控制电压降低过程中, 发电系统的输出电压随电堆温度升高逐渐增大, 当在某一温度点出现输出电压下降时, 方可停止该恒定输出电流下工作温度测试, 数据采样周期 10 ms。改变电堆输出电流, 在不同输出电流下重复上述实验, 可以得到发电系统工作在欧姆极化区多组输出电流下温度特性曲线如图 3 所示。

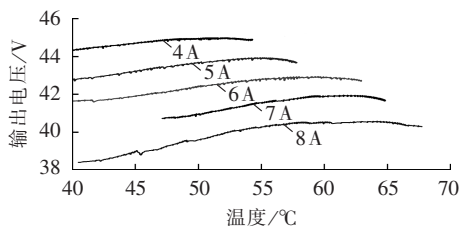


图 3 多组输出电流条件下的温度特性曲线
Fig.3 Temperature characteristics curve for multiple sets of output current condition

将各个最优工作温度点连线可以得到发电系统欧姆极化区最优温度曲线, 用式(1)表示。

$$T_{ref} = f(I_{out}) \quad 4A \leq I_{out} \leq 8A \quad (1)$$

其中, T_{ref} 为发电系统最优工作温度; I_{out} 为发电系统输出电流。对实测的最优温度数据采用基于范德蒙矩阵的 QR 分解的多项式拟合方法进行拟合, 从而得到发电系统在任意输出电流下对应的最优工作温度, 分别采用二次多项式和三次多项式拟合方法对发电系统在 4~8 A 输出电流下最优温度曲线进行拟合, 拟合曲线如图 4 所示。

本文采用三次多项式拟合方法对发电系统在稳定运行区间(4~8 A)最优温度曲线进行拟合:

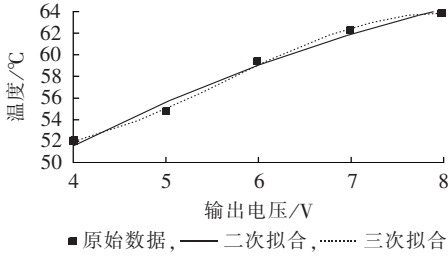


图 4 最优工作温度拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of optimal operating temperature

$$T_{\text{ref}} = -0.15I_{\text{out}}^3 + 2.44I_{\text{out}}^2 - 9.56I_{\text{out}} + 60.59 \quad (2)$$

根据式(2)可以获得发电系统在稳定运行区间(4~8 A)任意输出电流条件下对应的发电系统最优工作温度,完成发电系统最优温度多项式拟合调节器的设计。

3 基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时最优温度 MFAC

工作温度是影响空冷型 PEMFC 发电系统输出性能的一个关键参数。一方面,工作温度的升高有利于降低欧姆极化,促进传质,提高电化学反应速度,还能加快水分的蒸发;但是过高的温度容易导致膜缺水,电导率下降。因此,发电系统实时最优温度控制对于提高发电系统的输出性能、延长电堆的使用寿命至关重要^[10-12]。本文针对空冷型 PEMFC 发电系统的温度控制所具有的大时滞、慢时变等复杂非线性,提出了图 5 所示的实时最优温度控制方法。

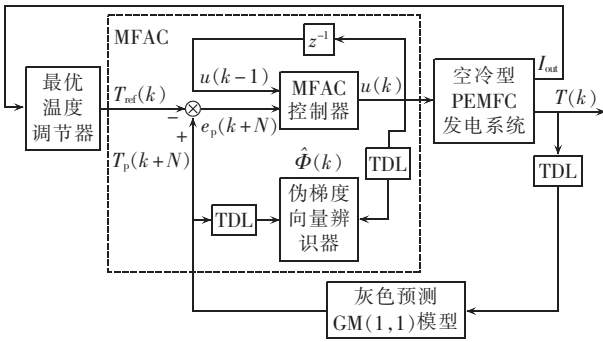


图 5 基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时最优温度无模型自适应控制

Fig.5 Real-time optimal temperature model free adaptive control of air-cooling PEMFC power generation system based on grey prediction

如图 5 所示,其中虚线框部分为 MFAC。为降低外界干扰对于控制器性能的影响,输入控制器中的发电系统状态参数均经过处理。MFAC 方法根据 LabVIEW 上位机程序实时递推平均滤波算法处理得到的空冷型 PEMFC 发电系统的输出电流 I_{out} ,通过最优温度多项式拟合调节器得到当前输出电流下对应的发电系统最优工作温度 $T_{\text{ref}}(k)$,将 $T_{\text{ref}}(k)$ 与 $T(k)$ 作差得到当前温度误差 $e(k)$,经过控制器作用产生

当前风扇控制序列作用于发电系统,同时为了在线自适应发电系统温度控制系统所具有的非线性以及模型参数慢时变的特点,在每个控制周期根据发电系统的 I/O 数据对控制器的参数进行在线校正,从而消除了基于模型控制方法中未建模动态特性对于控制性能的影响,提高了系统的抗干扰能力。但是对于发电系统温度控制所具有的时滞特性,MFAC 方法的处理能力有限。在本文中,将灰色预测与 MFAC 方法结合起来,用灰色预测 GM(1,1)模型的输出 $T_p(k+N)$ (N 为预测长度)与 $T_{\text{ref}}(k)$ 的差值 $e_p(k+N)$ 代替 $e(k)$,进行 MFAC 闭环控制,充分利用灰色预测的预测时延特点对温度控制的时滞特性进行补偿,从而实现对系统的超调进行有效的抑制^[14]。因此,本文提出的控制方法主要可以分为灰色预测 GM(1,1)模型的设计与 MFAC 控制器的设计 2 个步骤。

3.1 灰色预测 GM(1,1)模型

灰色预测通过系统行为的时间序列数据寻求系统的发展规律,从而按照规律对系统未来的行为进行预测。灰色预测具备需要的信息量少、计算简单、鲁棒性好等特点,在实际生产中得到广泛的应用^[14]。

由于很难建立精确的数学模型对发电系统的温度动态特性进行描述,但发电系统工作温度变化特性具有较好的连续性,同时考虑到便于硬件实现,在本文中采用灰色预测 GM(1,1)模型建立发电系统工作温度预测模型,对空冷型 PEMFC 发电系统的工作温度进行预测。灰色预测 GM(1,1)模型不需要建立被控对象的模型,通过实时采集发电系统输出的工作温度,建立动态递补新息模型,从而避免随着时间的增加原始数据不断增加使得计算量不断增加的问题。根据灰色预测算法对发电系统第 $k+N$ 时刻的输出进行预测,将预测结果引入 MFAC 闭环反馈中,实现对系统中的时滞特性进行补偿,改善系统的调节能力。同时灰色预测 GM(1,1)模型的引入可进一步降低控制系统对模型精度的要求,提高系统的抗干扰能力^[14]。

发电系统在第 k 时刻输出的工作温度时间序列为:

$$\begin{aligned} T^{(0)} &= [T^{(0)}(1), T^{(0)}(2), \dots, T^{(0)}(m)]^T \quad m \geq 4 \\ T^{(0)}(i) &= T(k-i) \quad i=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (3)$$

为避免原始数据中的波动性和随机性对预测精度的影响,本文中对原始数据列进行累加处理得到新的数据列 $T^{(1)}$:

$$\begin{aligned} T^{(1)} &= [T^{(1)}(1), T^{(1)}(2), \dots, T^{(1)}(m)]^T \quad m \geq 4 \\ T^{(1)}(j) &= \sum_{i=1}^j T^{(0)}(i) \quad j=1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

建立一阶线性微分方程对 $T^{(1)}$ 进行拟合:

$$\frac{dT^{(1)}}{dt} + aT^{(1)} = b \quad (5)$$

其中, a 、 b 分别为发展系数和灰色输入参数, 可用最小二乘法进行估计。

$$\begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T T_1 \quad (6)$$

$$B = \begin{bmatrix} -(T^{(0)}(1) + T^{(0)}(1))/2 & 1 \\ -(T^{(0)}(2) + T^{(0)}(3))/2 & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -(T^{(0)}(m-1) + T^{(0)}(m))/2 & 1 \end{bmatrix}, \quad T_1 = \begin{bmatrix} T^{(0)}(2) \\ T^{(0)}(3) \\ \vdots \\ T^{(0)}(m) \end{bmatrix}$$

微分方程的离散解为:

$$T^{(1)}(j+1) = \left(T^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-aj} + \frac{b}{a} \quad j=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

将灰色预测 GM(1,1) 模型得到的数据经过累减可以得到系统第 k 时刻对于第 $k+N$ 时刻系统输出 $T_p(k+N)$ 的预测公式:

$$T_p(k+N) = \left(T^{(0)}(m) - \frac{b}{a} \right) e^{-aN} (1 - e^{-a}) \quad (8)$$

3.2 MFAC 方法

MFAC 方法是由韩志刚、侯忠生等在 1989 年提出的一种自适应控制方法。针对传统的参数估计存在的参数值变化过快以及对不良数据过于敏感等问题, 利用被控系统的 I/O 数据在线估计系统的伪梯度向量, 采用一系列的动态线性时变模型代替一般的非线性系统, 从而实现非线性系统的无模型学习自适应控制。由于模型方法具有不依赖于系统模型参数、参数自适应等特点, 能够很好地解决非线性系统的建模问题^[15-17]。

空冷型 PEMFC 发电系统的最优温度控制主要通过调整风扇的转速实现对工作温度的控制。因此, 温度动态模型可以用单输入单输出 SISO (Single Input Single Output) 系统进行描述:

$$T(k+1) = f[T(k), \dots, T(k-n_a), u(k-d), \dots, u(k-n_b-d)] \quad (9)$$

其中, $f[\cdot]$ 为一个非线性函数; $T(k)$ 、 $u(k)$ 分别为温度动态模型在第 k 时刻的输出和输入; n_a 、 n_b 和 d 分别为温度动态模型的阶数和系统时滞。

式(8)通过离散时间系统的紧格式化方法可以表示为^[15-17]:

$$\Delta T(k+1) = \Phi^T(k) \Delta U_n(k) \quad (10)$$

$$\begin{cases} \Delta T(k+1) = T(k+1) - T(k) \\ \Phi(k) = [\varphi_1(k), \varphi_2(k), \dots, \varphi_n(k)]^T \\ \Delta U_n(k) = U_n(k) - U_n(k-1) \\ U_n(k) = [u(k), u(k-1), \dots, u(k-n+1)]^T \end{cases}$$

由式(10)可以得到系统的紧格式线性化模型为:

$$T(k+1) = T(k) + \Phi^T(k) \Delta U_n(k) \quad (11)$$

伪梯度向量的估计准则函数定义为^[15-17]:

$$J(\Phi(k)) = |\Delta T(k) - \Phi^T(k) \Delta U_n(k-1)|^2 +$$

$$\mu \|\Phi(k) - \hat{\Phi}(k-1)\|^2 \quad (12)$$

其中, $\hat{\Phi}(k)$ 为被控系统伪梯度向量在线估计值; μ 为权重系数。

对式(11)进行极小化处理, 可以得到第 k 时刻系统的伪梯度向量估计值:

$$\begin{cases} \hat{\Phi}(k) = \hat{\Phi}(k-1) + \frac{\eta \Delta U_n(k-1)}{\mu + \|\Delta U_n(k-1)\|^2} \times \\ \quad (\Delta T(k) - \hat{\Phi}^T(k-1) \Delta U_n(k-1)) \\ \hat{\Phi}(k) = \Phi(1) \quad \|\hat{\Phi}(k)\| \leq \varepsilon \text{ 或 } \|\Delta U_n(k-1)\| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (13)$$

其中, ε 为一个很小的正实数; $\Phi(1)$ 为系统伪梯度向量初始值。

控制输入准则函数定义为^[15-17]:

$$\begin{aligned} J(u(k)) = & |T_{\text{ref}}(k) - T_p(k+N)|^2 + \\ & \lambda |u(k) - u(k-1)|^2 \end{aligned} \quad (14)$$

其中, λ 为加权系数。

将线性化模型代入准则函数中, 对式(14)表示的准则函数进行极小化处理就可得到无约束的控制器输出风扇控制电压值:

$$\Delta U(k) = \frac{\rho \hat{\Phi}(k)}{\lambda + \|\hat{\Phi}(k)\|^2} (T_{\text{ref}}(k) - T_p(k+N)) \quad (15)$$

$$u(k) = u(k-1) + [1, 0, \dots, 0] \Delta U(k)$$

其中, ρ 为步长序列; $\Delta U(k)$ 为风扇电压无约束控制增量序列。

由式(15)可知: 加权系数 λ 主要用于预防因控制量迅猛变化导致的发电系统失稳, 避免了式(15)中分母为 0 的奇异情况。

空冷型 PEMFC 发电系统的输入约束主要体现在风扇的控制电压必须严格限制在约束范围内。控制信号的电压范围为 0~12 V。但考虑到空冷型 PEMFC 发电系统在工作时, 其风扇不仅用于调节发电系统的工作温度, 同时提供电化学反应所需的氧气。若氧气流量过低, 会造成电堆处于氧饥饿的状态, 将严重影响电堆的输出性能和使用寿命。但是对于中小型空冷型 PEMFC 发电系统, 其反映氧气供给状态的参数(阴极化学计量比)是一个不可观测量, 因此在控制系统设计中, 需设置一个风扇最小转速, 避免电堆由于长期处于氧饥饿状态造成膜电极损坏。因此风扇控制电压 $u(k)$ 需满足:

$$u_{\min} \leq u(k) \leq u_{\max} \quad (16)$$

其中, $u_{\min}$ 为发电系统在额定输出电流下运行能够稳定输出发电功率的风扇控制电压最小值, 经过多次实验确定 $u_{\min} = 7 \text{ V}$; $u_{\max}$ 为风扇全速运行时的控制电压, 由风扇参数可知 $u_{\max} = 12 \text{ V}$ 。

4 实验结果分析

MFAC 方法中,加权系数 λ 、权重系数 μ 的选取对控制系统的性能至关重要^[15-17]。灰色预测 GM(1,1)模型中的预测长度 N 也会对控制系统的性能产生影响。本文通过实验的手段在输出电流由 5 A–6 A 加载过程中,详细研究了预测长度 N 以及加权系数 λ 对于系统性能的影响。

图 6 表示的是在不同预测长度 N 下发电系统的温度响应曲线。图 7 表示的是在不同加权系数 λ 下发电系统的温度响应曲线。由图 6 可知,随着预测长度 N 的增加,在输出电流由 5 A–6 A 加载过程中,系统的超调量逐步降低,由预测长度 $N=5$ 时的 9.4% 逐步降低至 0。对比 $N=20$ 和 $N=30$ 时的温度响应曲线可以发现, $N=30$ 、工作温度小于最优温度时,工作温度出现波动上升,说明 $N=30$ 时对系统的时滞特性过补偿,增加了系统的响应时间,同时 N 的增大会增加灰色预测的不准确性^[13]。综合考虑,在控制器参数设计时,选取 $N=20$ 。

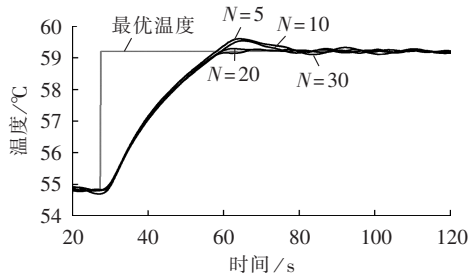


图 6 不同预测长度 N 对于系统响应的影响
Fig.6 Influence of different values of prediction length N on system response

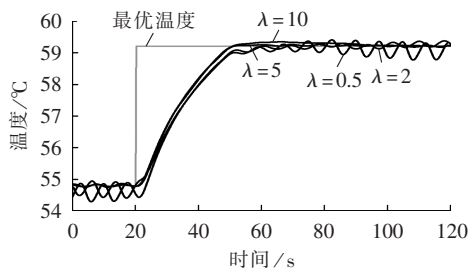


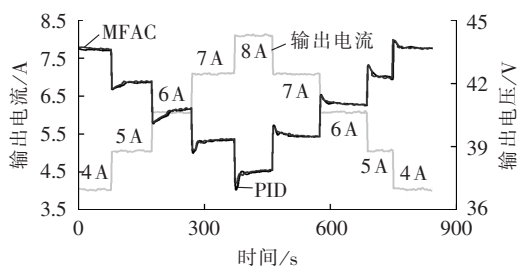
图 7 不同加权系数 λ 对系统响应的影响
Fig.7 Influence of different values of weighting coefficient λ on system response

由图 7 可知,加权系数 λ 的取值会对控制系统的稳定性产生重要的影响。 λ 取值过小,风扇控制电压变化迅猛,导致发电系统的工作温度会产生剧烈的振荡,从而导致发电系统的输出电压/功率发生波动,不利于发电系统的稳定运行。随着 λ 的增大,有效地对风扇控制电压的波动进行限制,在稳态时工作温度波动减小。当 $\lambda=10$ 时,发电系统工作温度在 5 A–6 A 加载过程中,由于 λ 取值过大,风扇电压变化过于缓慢,导致系统出现超调。同时 λ 取值

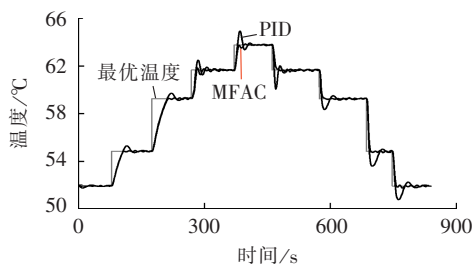
过大会降低系统抵抗外界干扰的能力。综合考虑,选取 $\lambda=5$ 。

由以上对比分析可知:控制器参数选择不合理会导致系统的控制性能下降甚至控制器失效。在实验中预测长度 N 取为 20;加权系数 λ 取为 5,权重系数 μ 取为 0.05;步长序列 ρ 取为 1; n 取为 4;阈值 ε 取为 10^{-3} ;伪梯度向量 $\Phi(1)=[1,1,1,1]^T$ 。为了对控制系统的阶跃响应能力进行分析,分别对基于增量式 PID 控制方法和本文提出的控制方法在搭建的空冷型 PEMFC 发电系统测控实验平台上进行实验,控制周期设定为 200 ms。增量式 PID 控制方法参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别设置为 0.59、0.052、0.02。

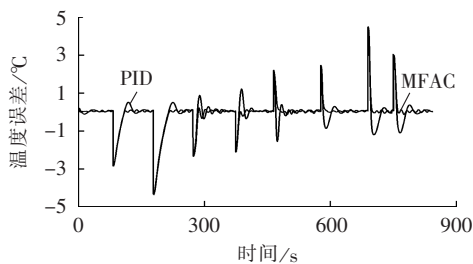
在恒流模式下开展动态加载测试,发电系统的输出动态响应曲线如图 8 所示。由图 8(a)可知:在外部负载突变的情况下,2 种控制方法都可以将发电系统的输出电压 U_{stack} 稳定在对应的最大输出电压附近;在稳定区间,与增量式 PID 控制方法相比,本文提出的控制方法发电系统输出电压 U_{stack} 波动更小,有利于发电系统长期稳定运行。由图 8(b)、(c)可知:在发电系统稳定运行区间,2 种控制方法都可以将发电系统工作温度稳定在最优温度附近,



(a) 输出电压、电流响应曲线



(b) 温度响应曲线



(c) 温度误差曲线

图 8 不同控制方法下发电系统动态响应
Fig.8 Dynamic response of power generation system under different control methods

在外部负载突变时刻,工作温度都能够快速响应最优温度的变化,实现对最优温度的跟踪。

在 2 种控制方法下系统的性能指标如表 1 所示。在 4 A-5 A-6 A-7 A-8 A 加载过程中,与增量式 PID 控制方法相比,本文提出的控制方法将系统超调量分别降低了 15.2%、10.2%、22.3%、47.6%,同时系统调节时间 T_s 分别缩短了 10 s、23 s、23 s、24 s;在 8 A-7 A-6 A-5 A-4 A 减载过程中,与增量式 PID 控制方法相比,本文提出的控制方法将系统超调量分别降低了 76.2%、36.7%、29.5%、24.7%,系统的上升时间 T_r 分别缩短了 4 s、12 s、18 s、19 s,同时系统的调节时间 T_s 分别缩短了 28 s、34 s、38 s、57 s。该方法有效避免了温度超调对发电系统输出性能以及使用寿命造成的不可逆转的影响,同时缩短了系统调节时间,减小了系统稳态时工作温度以及输出电压的波动,有利于发电系统长期高效、稳定的工作。

表 1 不同控制方法下系统性能指标

Table 1 System performance indexes for different control methods

加载/减载过程	$T_{ref}/^{\circ}\text{C}$	方法	U_{stack}/V	T_r/s	系统超调量/%	T_s/s
4 A-5 A	54.8	PID	42.12	28	15.2	60
		MFAC	42.01	28	0	50
5 A-6 A	59.2	PID	40.81	32	10.2	65
		MFAC	40.70	32	0	42
6 A-7 A	61.6	PID	39.34	8	25.7	54
		MFAC	39.22	8	3.4	31
7 A-8 A	63.7	PID	37.86	5	47.6	52
		MFAC	37.78	5	0	28
8 A-7 A	61.6	PID	39.54	14	76.2	40
		MFAC	39.45	10	0	12
7 A-6 A	59.2	PID	41.08	21	36.7	44
		MFAC	40.05	9	0	10
6 A-5 A	54.8	PID	42.28	27	29.5	48
		MFAC	42.35	9	0	10
5 A-4 A	51.9	PID	43.72	27	24.7	67
		MFAC	43.69	8	0	10

5 结论

本文提出一种基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时最优温度 MFAC 方法。提出的控制方法充分利用发电系统的实时 I/O 数据,采用灰色预测 GM(1,1)模型对发电系统温度控制对象中的时滞特性进行补偿,通过 MFAC 方法实现对控制对象中非线性以及时变特性进行自适应,从而实现对发电系统最优温度进行控制。并在搭建的发电系统测控实验平台上详细研究了控制器参数对系统性能的影响。实验结果表明:提出的基于灰色预测的空冷型 PEMFC 发电系统实时最优温度 MFAC 可以在负载突变情况下实现对发电系统最优温度实时跟踪,与增量式 PID 控制相比,基本消除了系统的超调并缩短了系统稳定时间,更有利于发电系统的长期、

稳定运行。充分考虑空冷型 PEMFC 发电系统在工业应用中所面临的复杂多变的环境条件,采用递推平均滤波算法对发电系统实时数据进行滤波处理,消除外界干扰等不确定因素对传感器信号的影响,进一步提高系统的可靠性和抗干扰能力。为空冷型 PEMFC 发电系统实时控制方法的实际应用奠定了基础。

参考文献:

[1] 丁明,严流进,茆美琴,等. 分布式发电中燃料电池的建模与控制[J]. 电网技术,2009,33(9):8-13.
DING Ming,YAN Liujin,MAO Meiqin,et al. Modeling and control of fuel cells in distributed generation system[J]. Power System Technology,2009,33(9):8-13.

[2] 杨帆,盛波,符杨. 独立直流微电网中燃料电池与超级电容的功率协调控制[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):113-120.
YANG Fan,SHENG Bo,FU Yang. Coordinated power control between fuel cell and super capacitor for isolated DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(10):113-120.

[3] 郑文迪,蔡金铨. 燃料电池/超级电容器混合发电系统能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):28-32.
ZHENG Wendi,CAI Jinding. Energy management strategy for hybrid generation system with fuel cell and super-capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):28-32.

[4] 吴志,顾伟. 孤岛方式下基于多代理系统的微电网有功-频率控制[J]. 电力自动化设备,2009,29(11):57-61.
WU Zhi,GU Wei. Active power and frequency control of islanded microgrid based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(11):57-61.

[5] LI Q,CHEN W,WANG Y,et al. Parameter identification for PEM fuel-cell mechanism model based on effective informed adaptive particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(6):2410-2419.

[6] QI L,CHEN W,LIU Z,et al. Net power control based on linear matrix inequality for proton exchange membrane fuel cell system[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2014,29(1):1-8.

[7] 李奇,陈维荣,刘述奎,等. 多变量 H_{∞} 次优控制在质子交换膜燃料电池压力控制系统中的应用[J]. 中国电机工程学报,2010,30(20):123-128.
LI Qi,CHEN Weirong,LIU Shukui,et al. Application of multivariable H_{∞} suboptimal control for proton exchange membrane fuel cell pressure control system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(20):123-128.

[8] 赵思臣,王奔,谢玉洪,等. 无外增湿质子交换膜燃料电池线性温度扫描实验[J]. 中国电机工程学报,2014,34(26):4528-4533.
ZHAO Sichen,WANG Ben,XIE Yuhong,et al. The linear temperature scanning experiment of the non-external humidification proton exchange membrane fuel cell[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(26):4528-4533.

[9] LI Q,CHEN W,LIU S,et al. Temperature optimization and control of optimal performance for a 300 W open cathode proton exchange membrane fuel cell[J]. Procedia Engineering,2012,29(4):179-183.

[10] 王斌锐,金英连,褚磊民,等. 空冷燃料电池最佳温度及模糊增量 PID 控制[J]. 中国电机工程学报,2009,29(8):109-114.

- WANG Binrui, JIN Yinglian, CHU Leiming, et al. Temperature optimization and fuzzy incremental PID control for air-breathing proton exchange membrane fuel cell stack[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 109-114.
- [11] YOU Z, XU T, LIU Z, et al. Study on air-cooled self-humidifying PEMFC control method based on segmented predict negative feedback control[J]. Electrochimica Acta, 2014, 132(20): 389-396.
- [12] 陈雪娇, 戚志东, 李蕾. 空冷型 PEMFC 电堆温度建模及改进 GPC 控制[J]. 电源技术, 2012, 36(10): 40-43, 72.
- CHEN Xuejiao, QI Zhidong, LI Lei. Temperature modeling of air-breathing PEMFC stack and improved GPC control[J]. Power Technology, 2012, 36(10): 40-43, 72.
- [13] 胡文斌, 伍宇鹏, 程海燕, 等. 基于数据驱动的主汽温度改进灰色预测 PID 控制[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 190-193.
- HU Wenbin, WU Yupeng, CHENG Haiyan, et al. An improved data-driven grey-predictive PID control for main steam temperature[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 190-193.
- [14] XU D, JIANG B, SHI P. A novel model-free adaptive control design for multivariable industrial processes[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 6391-6398.
- [15] HOU Z, JIN S T. Data-driven model-free adaptive control for a class of MIMO nonlinear discrete-time systems[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2011, 22(12): 2173-88.
- [16] JIN M, LEE J, TSAGARAKIS N G. Model-free robust adaptive control of humanoid robots with flexible joints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1706-1715.

作者简介:



尹良震

尹良震(1992—),男,安徽舒城人,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池控制技术(E-mail: 18200283272@163.com);

李奇(1984—),男,上海人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为微电网运行与控制、新能源发电系统优化与控制、燃料电池混合动力机车系统能量管理、电力系统稳定与控制等(E-mail: liqi0800@163.com)。

Real-time optimal temperature model free adaptive control of air-cooling PEMFC power generation system based on grey prediction

YIN Liangzhen, LIU Lu, LI Qi, CHEN Weirong

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The output performance of air-cooling PEMFC(Proton Exchange Membrane Fuel Cell) power generation system is affected by the operating parameters such as operating temperature, gas flow rate, exhaust interval, etc, among which, the operating temperature is the key factor. According to the complex characteristics of temperature control in air-cooling PEMFC power generation system, i.e. nonlinear, time delay, slow time variation, etc, a model free adaptive control method based on grey prediction is proposed for real-time optimal temperature control, which substitutes the results of grey prediction for the current operating temperature measurement of power generation system. Experimental results show that, the proposed method can track the optimal temperature in real-time under different load conditions. Compared with the incremental PID control, the proposed method effectively reduces the overshoot of the system and makes the output power of generation system more stable, which is helpful for long-term stable operation of power generation system and prolongs the service life of electrolysis stack. The proposed method adjusts the controller on line only according to the input and output data of PEMFC, which is insensitive to PEMFC parameters, so the method can be applied to similar air-cooling PEMFC power generation system.

Key words: PEMFC power generation system; optimal temperature characteristics; grey prediction; model free adaptive control; real-time control