

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2108668

# PEMFC 建模及性能分析控制

王季康<sup>1</sup> 李 华<sup>2</sup> 彭宇飞<sup>1</sup> 李晓燕<sup>1</sup> 张新宇<sup>1</sup>

(1. 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010080; 2. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院 呼和浩特 010051)

**摘要:** 探明质子交换膜燃料电池(PEMFC)输出性能尤为重要,现有 PEMFC 模型复杂,内部阐述不详细。以 Srinivasan 模型为基础,建立欧姆极化电压、浓度差极化电压、活化极化电压、各自详细模型及输出电压模型,分析其与电流密度的关系。以控制变量法研究电堆温度、氢气压力、氧气压力、极限电流等关键参数对单体电池电压影响。考虑 PEMFC 实际应用情况,设计了采用电压电流双闭环控制的 Buck 变换器,基于状态空间平均法,建立变换器 S 域小信号模型,得出被控对象传递函数,加入补偿控制器,改善输出电压性能。通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证所建模型及控制策略的有效性、正确性。结果表明,气体(氢气、氧气)压力、电堆温度及极限电流的增大,使得输出电压增加。应用该控制策略,额定电压(70 V)输入时,调整时间 5.5 ms 到达目标值(35 V),负载由 30  $\Omega$  突变为 15  $\Omega$  时,扰动电压尖峰 5.4 V,重新稳定在目标值时间 64 ms。该策略稳/动态特性良好,正确有效,对工程设计有一定参考意义。

**关键词:** 氢能应用;膜燃料电池;模型;可再生能源

**中图分类号:** TM911.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4077

## PEMFC modeling and performance analysis control

Wang Jikang<sup>1</sup> Li Hua<sup>2</sup> Peng Yufei<sup>1</sup> Li Xiaoyan<sup>1</sup> Zhang Xinyu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China;

2. School of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) output performance is particularly important. The existing PEMFC model is complex and the internal description is not detailed. Based on Srinivasan model, ohmic polarization voltage, concentration difference polarization voltage, activation polarization voltage, their detailed models and output voltage models are established to analyze their relationship with current density. The stack temperature, hydrogen pressure, oxygen pressure and limit electricity are studied by control variable method Influence of key parameters such as current on cell voltage. Considering the practical application of PEMFC, a Buck converter with voltage and current double closed-loop control is designed. Based on the state space average method, the s-domain small signal model of the converter is established, the transfer function of the controlled object is obtained, and the compensation controller is added to improve the output voltage performance. PSCAD/EMTDC simulation is used to verify the effectiveness and correctness of the model and control strategy. The results show that the output voltage increases with the increase of gas ( $H_2$ ,  $O_2$ ) pressure, electric push temperature and limit current. When the rated voltage (70 V) is input, the adjustment time is 5.5 ms to reach the target value (35 V), when the load changes from 30  $\Omega$  to 15  $\Omega$ , the peak of disturbance voltage is 5.4 V, and the time to stabilize at the target value is 64 ms. The strategy has good stable/dynamic characteristics, correct and effective, and has certain reference significance for engineering design.

**Keywords:** hydrogen energy application; fuel cells; model; renewable energy

## 0 引言

质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)环境友好、启停迅速、运行温度低、带载能力大<sup>[1-4]</sup>、能源转化效率高,是一种绿色能源<sup>[5]</sup>。目前 PEMFC

研究主要关注于新材料、新结构、新技术等方面<sup>[6-9]</sup>,而模型是分析研究上述问题的基础与关键。PEMFC 模型有机理模型、半经验模型、数据驱动模型、经验模型,机理模型通过质量守恒定律、热力学定律,电化学反应方程式等揭示电池内部规律,半经验模型是机理模型的简化,数据驱动模

型和经验模型是基于实验数据构建,计算过程简单,但数据驱动模型需要大量数据支撑,经验模型则计算参量少。经验模型和数据驱动模型常用于系统控制,优化参数等<sup>[10]</sup>。文献[11]建立 PEMFC 输出电压经验模型研究了温度、气体、压力等因素对输出电压的影响,但并未涉及 PEMFC 应用中的配套设施的讨论。文献[12]通过建立 PEMFC 动态模型分析了负载突变情况下输出电压动态特性,且建立的模型仿真结果与实验测得的数据十分接近,模型能较好的模拟燃料电池的实际动态过程,却未能细致展示建模过程及电池输出电压各组成单元的模型。文献[13]建立了质子交换膜燃料电池模型并设计采用 PID 控制的 Boost 升压电路,将燃料电池输出不稳定的电压转换为稳定输出,却未考虑输出电压需降压的 Buck 变换器设计,也未给出其与电流密度的关系曲线。文献[14]以经验公式建立 PEMFC 动态模型,并通过设置 PEMFC 在不同温度下运行,观察温度对电堆功率和电压的影响,结果表明负载电流越大,温度对电堆电压和功率的输出影响越明显,但研究未单独讨论分析活化极化电压、欧姆极化电压、浓度差极化电压与电流密度间的关系。模型是理论研究和指导工程实践的基础,工程应用中以变工况较为常见,需改善 PEMFC 的性能时,若不知各参数对其输出性能的影响,盲目调节参数势必得不到期望的效果,也会影响电池的输出特性。同时充分明确电压与电流密度的关系,可自如地实现特定的电压或电流,此外,PEMFC 输出的电压通常需变换器调整后达到目标电压/电流后才能用电设备相连,使其工作。因此建立详尽的模型,明确电压与电流关系,探寻不同参数对电池输出性能的影响和研究 PEMFC 配套设施(变换器)的控制显得尤为重要。

本文介绍了质子交换膜燃料电池的组成结构和工作原理,以 Srinivasan 所提出的经验公式为依据建立 PEMFC 输出电压模型,研究活化极化电压、欧姆极化电压、浓度差极化电压随电流密度变化的关系。分析了气体压力、电堆温度、极限电流密度对电池输出性能的影响,针对 PEMFC 用做直流源的情况,设计了电压电流双闭环控制的 Buck 变换器,利用状态空间平均法建立其小信号模型,在双环控制中加入补偿器,改善稳态输出性能提高动态特性。最后通过仿真验证所建模型和控制策略的正确性及有效性。

### 1 PEMFC 机理及结构

#### 1.1 组成结构

质子交换膜燃料电池单体由质子交换膜、电极(催化层和气体扩散层)和双极板构成如图 1 所示。

PEMFC 各部件介绍:

1) 质子交换膜:是 PEMFC 的核心,很大程度决定 PEMFC 性能,具有选择性,能令带正电的质子通过,阻止电子通过。目前质子交换膜主要包括全氟磺酸型质子交换膜、Nafion 膜、非氟聚合物质子交换膜以及新型质子交换

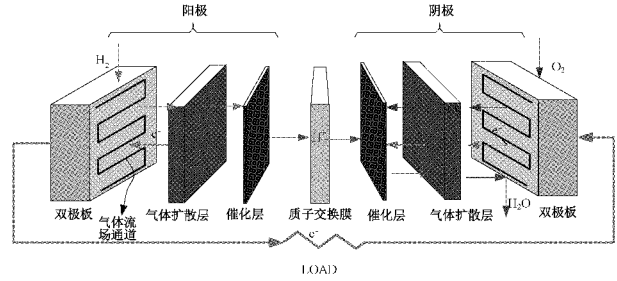


图 1 PEMFC 内部结构

膜。大多数的 PEMFC 采用 Nafion 膜。Nafion 膜制作困难,存在燃料渗透严重且对温度要求苛刻<sup>[15]</sup>,开发性能优良的聚合物质子交换膜替代 Nafion 膜是当下研究热点。

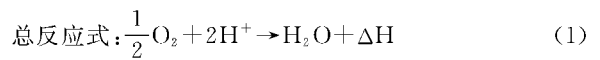
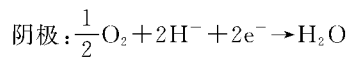
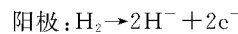
2) 电极:由扩散层和催化层组成。催化层起着提高化学反应速率的作用,通常由石墨和 Pt 构成。扩散层在收集电流的同时还有支持催化层的作用,高功率模式下,优越的电极设计可避免电池水淹。

3) 双极板:能将正负极分离,保障反应气体充分接触双极板,是多个单体电池连接的媒介,左右两侧连接不同单体电池的阴阳极。

4) 膜电极:阴、阳电极和质子交换膜组成膜电极,是最基本单元之一。10~20 μm 膜厚度最佳,反应速率最快<sup>[16]</sup>。

#### 1.2 发电原理

质子交换膜发电机理为,两极反应物透过扩散层移动,催化剂作用下,氢气从阳极流场板进入,发生氧化反应。氧气从阴极进入,发生还原反应,H<sup>+</sup>透过质子交换膜,从阳极传至阴极,H<sup>+</sup>和电子、氧气生成水,在阴极流出。电子在外电路形成通路,从阳极流至阴极,产生直流电,供给负载。反应方程式:



### 2 PEMFC 温度模型

PEMFC 的热集总参数模型为:

$$\begin{cases} Q_{\text{stack}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{elec}} - Q_{\text{cool}} - Q_{\text{loss}} \\ Q_{\text{stack}} = C_t \frac{dT_{\text{fc}}}{dt} \\ P_{\text{tot}} = m_{\text{H}_2} \Delta H = \frac{NI_{\text{fc}}}{2F} \Delta H \\ P_{\text{elec}} = U_s I_{\text{fc}} \\ Q_{\text{loss}} = (T_{\text{fc}} - T_{\text{amb}}) / R_{\text{fet}} \\ Q_{\text{cool}} = UAHX \frac{(T_{\text{fc}} - T_{\text{w,in}}) - (T_{\text{fc}} - T_{\text{w,out}})}{\ln[(T_{\text{fc}} - T_{\text{w,in}}) / (T_{\text{fc}} - T_{\text{w,out}})]} \\ UAHX = h_{\text{cond}} + h_{\text{conv}} I_{\text{fc}} \\ \tau = R_{\text{fet}} \cdot C_t \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $Q_{stack}$  为电堆吸收的热功率,  $P_{tot}$  为进入电堆功率,  $P_{elec}$  是电堆向外输出功率,  $Q_{cool}$  为冷却水消耗功率,  $Q_{loss}$  为电堆辐射功率,  $T_{fc}$  为电堆温度,  $T_{amb}$  为环境温度, 一般为室温  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{w,in}$ 、 $T_{w,out}$  为冷却水进、排口温度,  $h_{cond}$ 、 $h_{conv}$  为热交换器导热系数和对流换热系数,  $C_t$  表示热容,  $R_{fet}$  为热阻,  $UAHX$  为热交换系数,  $\tau$  为时间常数。

### 3 PEMFC 输出电压建模

燃料电池是一个复杂的非线性系统<sup>[17]</sup>, 电化学反应机理实质是电子在电极与化学反应物间传递, 传递过程存在阻碍反应的阻力, 消耗反应所需能量, 即极化效应如图 2 所示。

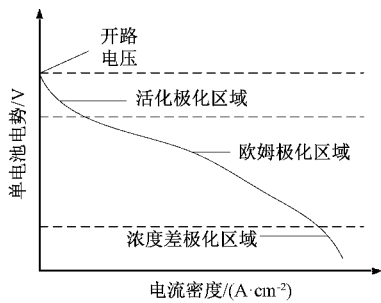


图 2 燃料电池极化曲线

PEMFC 单体电池输出电压由式(3)算得:

$$U_{cell} = E_{nernst} - U_{act} - U_{ohm} - U_{con} \quad (3)$$

式中:  $E_{nernst}$ 、 $U_{act}$ 、 $U_{ohm}$ 、 $U_{con}$  分别为热力学电势(能斯特电势)、活化极化电压、欧姆极化电压、浓度差极化电压。

PEMFC 电堆由  $n$  个电池串联构成, 电堆输出电压:

$$U_s = nU_{cell} \quad (4)$$

#### 3.1 能斯特电势

能斯特电势能描述离子在两体系间形成的扩散电位。电化学中, 用能斯特方程定量计算能斯特电位。它将化学能和电池电极电位联系起来。  $E_{nernst}$  由式(5)计算:

$$E_{nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T_{fc} - T_{ref}) + \frac{RT_{fc}}{2F} \left[ \ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right] \quad (5)$$

式中:  $\Delta G$  为反应的吉布斯自由能变,  $F$  是法拉第常数,  $\Delta S$  代表焓变,  $T_{fc}$  为电堆温度,  $T_{ref}$  为温度参考值, 本文取  $298.15\text{ K}$ ,  $R$  为气体常数,  $P_{H_2}$  为阳极的氢气界面有效分压,  $P_{O_2}$  为阴极的氧气界面有效分压。

#### 3.2 活化极化电压

活化极化电压是指极板附近的电子随能量升高会吸收部分能量, 远离极板, 致使电压损失, 即驱动电子/质子定向运动而消耗的能量, 形成能量壁垒, 本质是由电子移动破坏电极化学键而形成, 由式(6)表示:

$$U_{act} = \xi_1 + \xi_2 T_{fc} + \xi_3 T_{fc} \ln(C_{O_2}) + \xi_4 T_{fc} \ln(I_{fc}) \quad (6)$$

其中, 根据亨利定律得:

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5.08 \times 10^6 \exp(-498/T_{fc})} \quad (7)$$

式中:  $\xi_1$ 、 $\xi_2$ 、 $\xi_3$ 、 $\xi_4$  表示经验系数, 分别取  $0.9514$ 、 $-0.00315$ 、 $-7.4 \times 10^{-5}$ 、 $1.87 \times 10^{-4}$ ,  $C_{O_2}$  为阴极的氧气浓度,  $I_{fc}$  为电池电流。根据式(6)建立活化极化电压模型如图 3(a)所示, 图 3(b)为活化电压与电流关系。

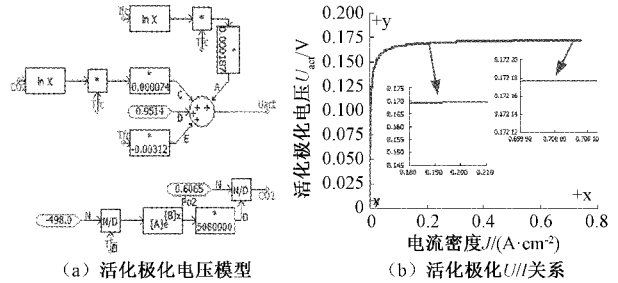


图 3 活化极化电压模型与仿真

由图 3(b)知, 活化极化电压在电流密度高时电压损失较小, 电流密度低时相反。  $0 \sim 0.2\text{ A/cm}^2$  时, 电压损失约为  $0.17\text{ V}$ 。  $0.2 \sim 0.7\text{ A/cm}^2$  期间电流密度虽持续增加, 电压损失较低约为  $0.002\text{ V}$ ,  $0.7\text{ A/cm}^2$  后则更少, 曲线以低增益线性模式增长。原因是电池从歇机进入工作需克服分子间活化能由此引起压降, 反应初期, 阻碍质子透过质子交换膜, 阻碍电子流向外电路, 且极化现象发生在两极, 阴阳两极反应物所需活化能不同, 知低电流密度时电压损失较大。

#### 3.3 欧姆极化电压

欧姆极化电压是因电子搬运过程中所受阻碍形成, 规律遵循欧姆定律。欧姆极化电压与电极材料、结构、反应条件有关, 大部分取决于质子交换膜厚度、含水量、工作温度等条件。欧姆极化电压关系如式(8)所示。

$$U_{ohm} = I_{fc} \left( \frac{r_m l}{A} + R_c \right) \quad (8)$$

$$r_m = \frac{181.6 \left[ 1 + 0.03 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right) + 0.062 \left( \frac{T_{fc}}{303} \right)^2 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right)^{2.5} \right]}{\left[ \lambda - 0.634 - 3 \left( \frac{I_{fc}}{A} \right) \right] \exp \left[ 4.18 \left( \frac{T_{fc} - 303}{T_{fc}} \right) \right]} \quad (9)$$

式中:  $R_c$  为质子通过膜的阻抗,  $A$  是膜有效面积,  $l$  为膜厚度,  $r_m$  代表质子交换膜的电阻率,  $\lambda$  为质子膜的含水量。根据式(8)在 PSCAD/EMTDC 中建立模型如图 4(a)所示。

欧姆电压随电流密度变化关系如图 4(b)所示, 可得知欧姆极化电压与电流密度为正相关。低电流密度时电压损失值较小 ( $0 \sim 0.2\text{ A/cm}^2$  时电压损失约为  $0.07736\text{ V}$ ), 随电流密度增大而增加, 中电流密度时, 欧姆极化电压损失较大 (电流密度处于  $0.2 \sim 0.7\text{ A/cm}^2$  期间电压损失约为  $0.113\text{ V}$ )。  $H^+$  向质子交换膜运动时受到一定阻性, 电子向外电路迁移时也有一定阻碍, 质子、电子定向运动过程中能量降低, 电势降低。

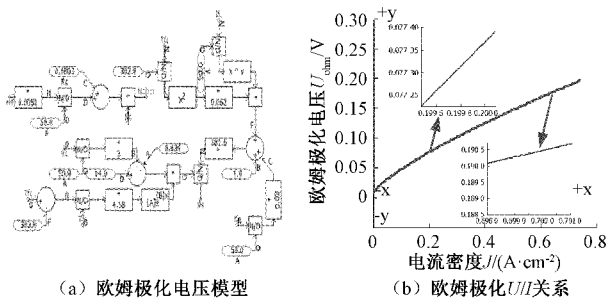


图 4 欧姆极化电压模型与仿真

3.4 浓度差极化电压

浓度差极化电压形成是由于电极上反应物浓度变化,反应物不断消耗,形成浓度梯度,当一时刻反应物浓度小于此电流密度下的进行反应浓度时,浓度差降低使端电压下降。浓度差极化电压根据式(10)计算,图 5(a)为浓度差极化电压模型。

$$U_{con} = -B \ln\left(1 - \frac{J}{J_{max}}\right) \quad (10)$$

式中:  $B$  代表电池运行系数取 0.016,  $J$  为电流实际密度,  $J_{max}$  为电流密度限值,这里取  $1.5 \text{ A/cm}^2$ 。

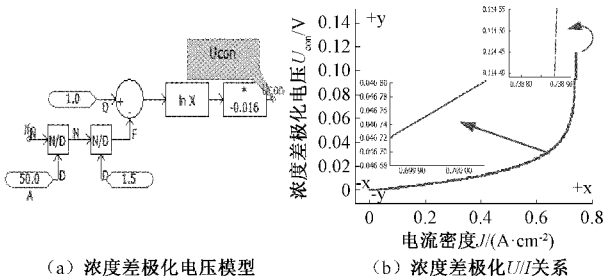


图 5 浓度差极化电压模型与仿真

由图 5(b)知,电流密度处于中/低等时浓度差极化电压损失较小,电流密度高时电压损失较大,  $0 \sim 0.7 \text{ A/cm}^2$  时,电压损失约为  $0.04678 \text{ V}$ ,  $0.7 \text{ A/cm}^2$  后电压损失较大为  $0.1145 \text{ V}$ 。这是由于离子表面浓度变化致使电压降,电流密度增大时反应气体不能立即满足此刻反应所需浓度,电压下降。

3.5 单电池输出电压

结合式(3)构建单体电池电压输出模型如图 6(a)所示,图 6(b)为单体电池电压随电流密度的关系,仿真结果符合极化曲线,模型正确有效。

4 PEMFC 性能检测

PEMFC 工作环境比较复杂,当工作环境发生变化时,系统参数就会发生变化<sup>[18]</sup>,明确系统参数对 PEMFC 性能的影响,在理论和实际应用方面十分重要,下面对 PEMFC 输出性能进行检测,参数如表 1 所示。

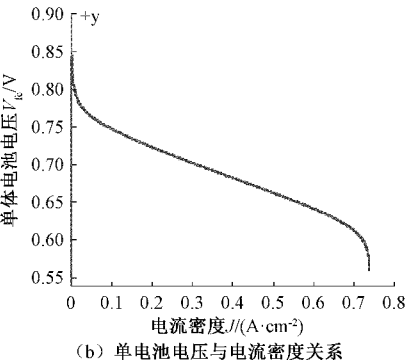
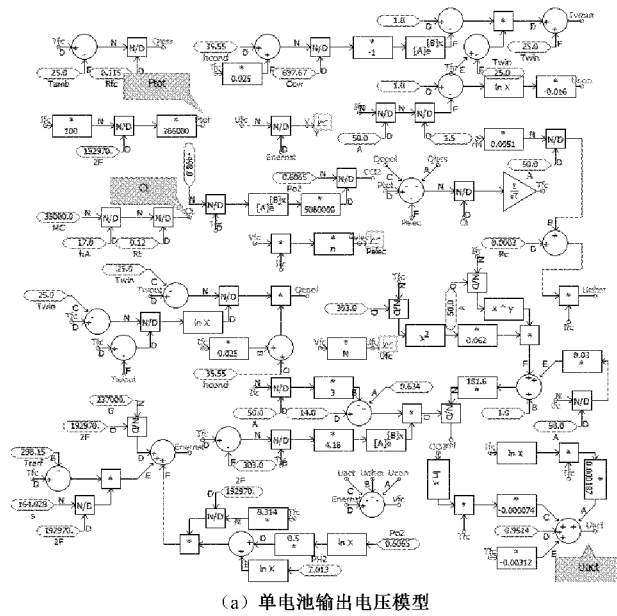


图 6 单体电池输出电压模型与仿真

表 1 仿真参数

参数	数值	参数	数值
$l/\text{cm}$	20	$P_{H_2}/\text{Pa}$	$2.013 \times 10^5$
$R_c/\text{m}\Omega$	0.3	$C_t/(\text{KJ}/^\circ\text{C})$	17.9
$A/\text{cm}^2$	50	$P_{O_2}/\text{Pa}$	$0.5065 \times 10^5$

4.1 温度和气体压力

图 7(a)中描述了温度变化时输出电压随电流密度的变化关系。图中上中下 3 曲线分别对应温度  $318.15 \text{ K}$ 、 $289.15 \text{ K}$ 、 $278.15 \text{ K}$  时电压输出。显然,随温度升高电压输出性能存在不同程度提升。其他条件不变且同一电流密度不同温度下,提高电推温度使输出电压增加,这是由于催化剂活性受温度影响,温度升高活性增强,此外,温度上升使得质子膜内水和气体的扩散系数加大,膜电阻减小,输出电压增加。

图 7(b)显示了变  $H_2$  压力时的输出电压与电流密度关系,其余条件不变氢气压力作为单一变量,图中上中下 3 曲线分别为  $8.015 \times 10^5$ 、 $6.013 \times 10^5$ 、 $2.013 \times 10^5 \text{ Pa}$ ,压力增

大,输出电压有一定增加。原因是氢气压力增加表明反应物浓度增加,根据“碰撞理论”,增大反应物浓度,物质的量增加,活化分子数增多,有效碰撞次数增多,化学反应速率加快,输出性能提高。

如图7(c)所示,分析氧气压力变化时输出电压与电流密度的关系知,电流密度相同,仅阴极氧气压力变化,阴极氧气压力与输出电压呈正增益,氧气压力越大输出电压越大,原理与氢气压力类同,仅是反应物质为氧气。

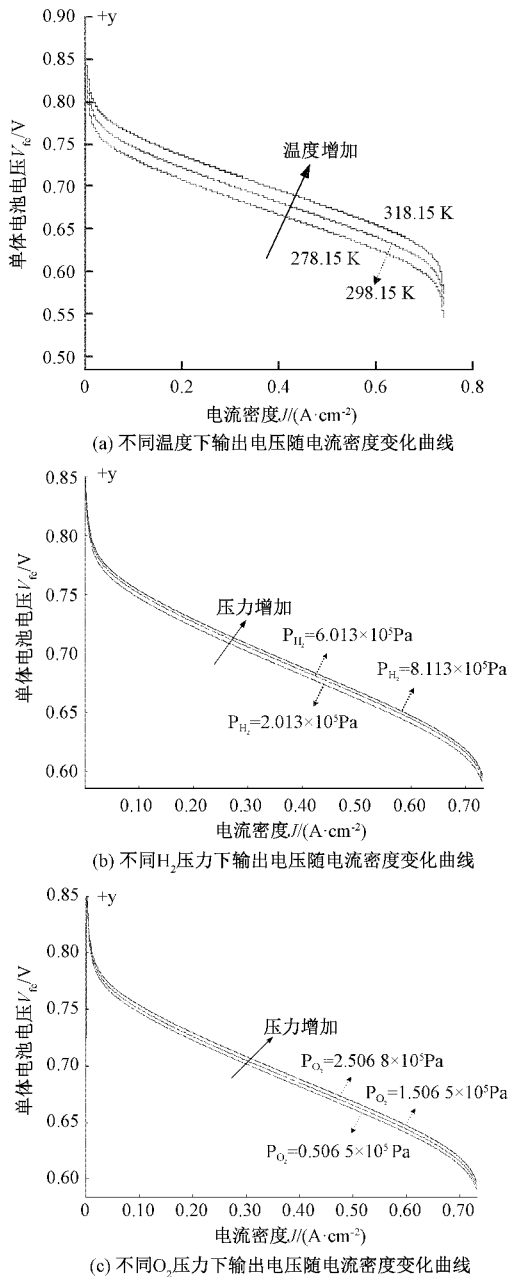


图7 温度/气体压力变化时输出电压随电流密度变化曲线

4.2 极限电流密度

反应物浓度的增减对应输出电压增减,反应物浓度与

电流密度成正比,考虑电流密度为影响输出电压的因素。图8反映出不同极限电流下的输出电压关系,增大极限电流密度,电压曲线斜率降低,电压降减慢。同一电流密度,大极限电流密度输出电压增高,提升PEMFC性能。

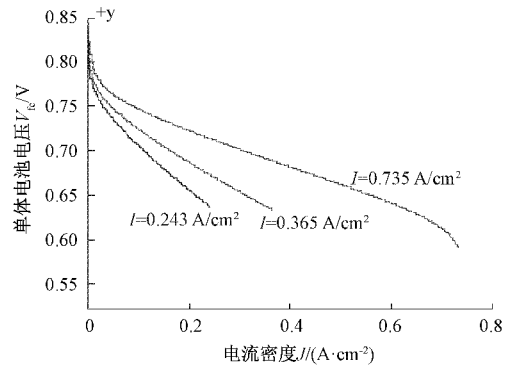


图8 不同极限电流时输出电压波形

5 PEMFC用电源变换器设置

如图9所示,Buck变换器是开关电源3大基本拓扑之一,试验电堆输入电压约为60~80V,输出电压35V,选择Buck变换器。

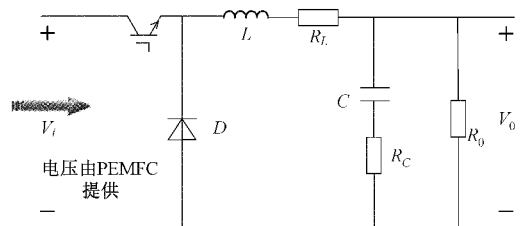


图9 Buck变换器拓扑

5.1 硬件设计

技术指标包括:输入电压:60~80V;额定电压:70V(假定电流密度不变);输出电流:3A;输出电压:35V。

1) 占空比

由伏秒积平衡原理算得占空比。理论上Buck变换器占空比范围为0~1,实际中占空比存在最小限制,不能实现从0开始连续调整,最小占空比/最小导通时间取决于电路中的延迟,峰值电流模式控制中,时钟发出MOSFET栅极开启信号,MOSFET电流峰值与电压误差比较发出MOSFET栅极关断信号,过程中存在PWM内部比较器、逻辑电路和驱动器的延迟,MOSFET栅极电容充放电延迟,电流检测信号时延和前沿消隐延迟等延迟环节。延迟累积导致最小占空比受限,在最小和无脉宽输出间不能平滑过渡,通常发生“打嗝”或跳频。对于最大限制,目前常用脉宽调制器集成芯片都有最大占空比,一般0.9,且可通过定时电阻/电容调节。

$$D_{\max} = \frac{V_o}{V_{i\min}} = \frac{35}{80} = 0.438 \quad (11)$$

$$D_{\min} = \frac{V_o}{V_{i\max}} = \frac{35}{60} \approx 0.59 \quad (12)$$

$$D_{\text{nom}} = \frac{V_o}{V_i} = \frac{35}{70} = 0.50 \quad (13)$$

2) 电感

电感电流伏秒平衡时电流处于稳态,伏秒值和电感量决定电感电流的脉动峰峰值。通过电感的直流分量超过脉动峰峰值 1/2 时,电感电流始终大于 0,为连续模式,反之则为断续模式。若电感电流可双向流动,则无断续模式。设计要求工作在电感电流连续 (CCM) 模式下,电感量越大,连续模式下支持的占空比范围越宽。

$$L = \frac{V_i - V_o}{2\Delta i_{L,f}} D_{\text{nom}} = \frac{(70 - 35) \times 0.50}{2 \times 0.3 \times 50 \times 10^3} \approx 5.83 \times 10^{-4} \text{ (H)} \quad (14)$$

其中要求纹波小于 10% 即纹波电流峰值 0.3 A。实际情况取 750 μH。

3) 电容

电容值与输出电压/电流纹波、暂态响应等性能有关。要求纹波系数不超过 0.2%, 即  $\Delta u_f = 35 \times 0.002 = 0.07 \text{ V}$ 。

$$C = \frac{\Delta i_{L,f}}{8\Delta u_f} \approx 1.071 \times 10^5 \text{ F} \quad (15)$$

考虑实际电容寄生参数选取 200 μF 电容。

5.2 控制策略

电压电流双闭环控制思想源于平均电流控制。图 10 为 Buck 变换双闭环控制系统框图,图中  $G_c$  为电流内环被控对象,  $G_p$  是电压外环被控对象,  $G_{pwm}$  为调制器传递函数,依据状态空间平均法建立 S 域小信号模型,导出 Buck 变换器在 CCM 模式下的电流内环和电压外环被控对象传递函数。

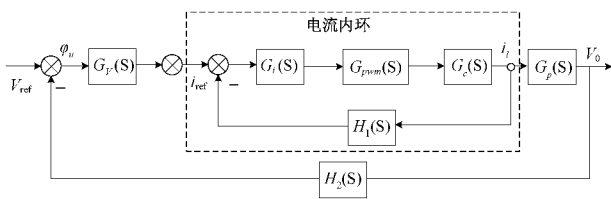


图 10 电压电流双闭环控制框图

电流内环被控对象传递函数:

$$G_c(s) = \frac{i_L(s)}{d(s)} = \frac{s(RC V_m + r_c V_{in}) + V_{in}}{s^2 LCR + s(RC r_c + L) + R} \quad (16)$$

调制器模型:

$$G_{pwm}(s) = \frac{1}{V_m} \quad (17)$$

电流控制框图如图 11 所示。图中  $G_i$  是内环补偿控制器,采用 PI 控制器,  $V_m$  是锯齿波峰值,  $H_1$  为内环反馈系数取 1。

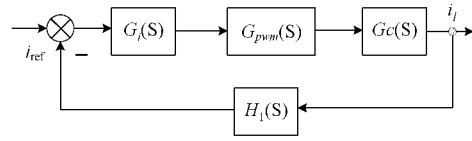


图 11 电流环控制框图

$G_i(s)$  是用 PI 控制器形式补偿:

$$G_i(s) = k_{p1} + \frac{k_{i1}}{s} \quad (18)$$

补偿后的电流内环开环传递函数:

$$G_{ic}(s) = \frac{s^2(RC V_m k_{p1} + r_1(CV_m k_{p1}) + sRC V_m k_{i1} + k_{i1} V_m)}{s^2 LCR V_m + s^2(RC r_c V_m + L V_m) + R V_m s} \quad (19)$$

电压外环控制框图如图 10 所示,内层为电流内环,  $G_p$  代表被控对象,  $G_v$  是电压外环补偿器,与电流内环控制类同,得到  $G_p(s)$ :

$$G_p(s) = \frac{sCr_c Z + Z}{s(CZ + Cr_c) + 1} \quad (20)$$

$G_v(s)$  补偿器同样采用 PI 控制器,补偿后开环传递函数:

$$G_{vp}(s) = \frac{s^2 Cr_c Z k_{p2} + s(Cr_c Z k_{i2} + Z k_{p2}) + Z k_{p2}}{s^2(CZ H_1 + Cr_c H_1) + s H_1} \quad (21)$$

双闭环控制具有精度高,噪声抑制力强的特点,电压环和电流环彼此有明确的分工,高频段是电流环起主要作用,低频段则为电压环。

5.3 试验及结果分析

为了证明第 5.2 节所提控制策略的有效性和正确性,验证燃料电池连接 Buck 变换器后的输出电压、电流是否达到期望要求及输出性能的稳定性,在 PSCAD/EMTDC 仿真软件上进行试验,仿真采样时间步长 50 μs,以秒级时间尺度为代表,电路元件参数为电容 200 μF、电感 750 μH、选择补偿器参数电压外环  $P = 200$ 、 $I = 158$ ,电流内环参数  $P = 30$ 、 $I = 31$ ,外环电压反馈系数 1.000 1,调制波采样频率 5 000 Hz 进行额定输入及负载扰动试验。

图 12(a) 为额定输入 70 V 时电压电流输出波形,由图可知,输出电压初始略有超调,由于电压电流双闭环 PI 参数作用,经 5.5 ms 时间调整后达到目标值 35 V,电压误差约为 0.06%,输出电流平稳为 3 A,符合试验要求。图 12(b) 为负载扰动仿真,3 s 时负载由 30 Ω 变成 15 Ω,扰动尖峰电压为 5.4 V,调整 64 ms 后重新恢复目标值 35 V。由图 12 可知说明运用双闭环控制策略有效可达到期望值,说明所提策略有效,与 PID 或其他控制策略(同等双闭环控制条件下,若单环控制则无意义)相比该控制其优越性在于调节参数( $P/I$  两个参数)少,方便调节,且工程中 PI 控制多以普遍应用,该策略简单,易于面向工程推广。

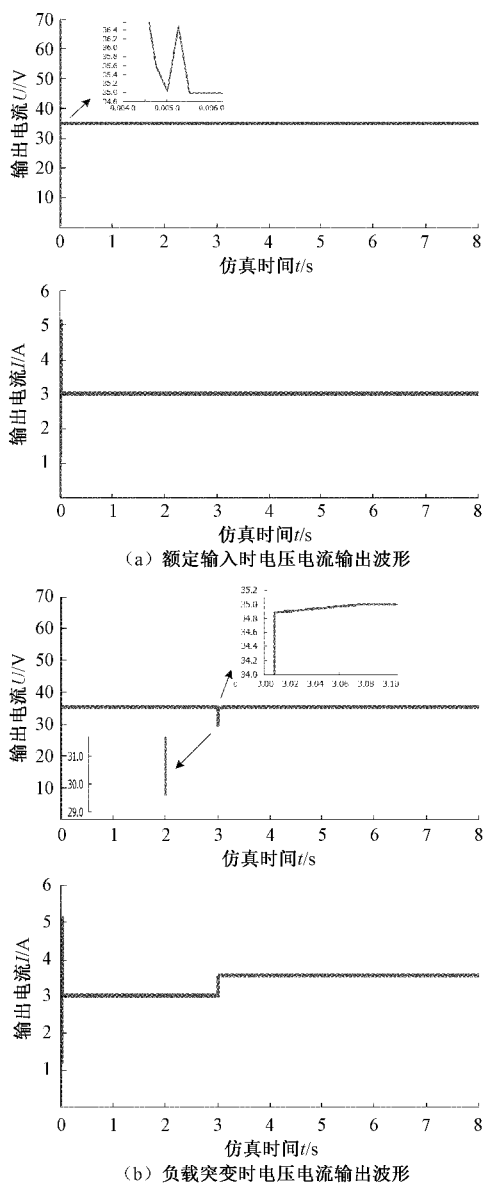


图12 额定输入及负载扰动试验结果

## 6 结 论

本文针对目前 PEMFC 模型复杂、内部阐述不详尽和实际工况的复杂性,基于电化学原理、质量守恒方程、热力学定律,对 PEMFC 进行建模,在此基础上通过控制变量法研究了温度、气体(氢/氧)压力、极限电流三因素对 PEMFC 输出性能的影响。结合工程应用的实际情况,提出 PEMFC 的配套设施 Buck 变换器的控制策略,建立了变换器的小信号模型,所得结论如下。

1) 适当增大电堆温度、氢气压力、氧气压力、极限电流密度会使输出电压增加。

2) 由活化极化电压、欧姆极化电压、浓度差极化电压与电流密度的关系得知,极化曲线中 3 区的划分是基于 3 个区里的主要极化来源,实质上 3 种极化均存在,矛盾在于

不同电位区域的主导性。

3) 对于变换器的控制策略,进行了电压额定输入及负载变化( $30\ \Omega$  突变为  $15\ \Omega$ ) 测试,表明额定输入时,调整  $5.5\ \text{ms}$  后达到设定值  $35\ \text{V}$ ,电流输出稳定,负载突变时扰动电压尖峰  $5.4\ \text{V}$ ,重新恢复时间  $64\ \text{ms}$ ,稳/动态性能好,响应快速(毫秒级)。

4) 与现有研究工作相比,这里建立了电压模型的同时详细地给出了各组成部分的电压模型,得出极化电压在不同电位区域的主导性,明确了不同因素对 PEMFC 性能的影响。研究虽明确了参数对其性能的影响,但也应考虑不同时间尺度下的动态特性,多时间尺度下的动态特性是后续进一步研究的方向。此外,就实现双碳目标而言,质子膜燃料电池未来可向轻量化,低成本化、家用化方向发展。

## 参考文献

- [1] 潘沿予,詹跃东.基于改进粒子群 PID 的 PEMFC 阴极压力控制[J].电子测量技术,2020,43(22):1-6.
- [2] 陈立,詹跃东.基于变论域模糊 PID 的 PEMFC 温度控制[J].电子测量技术,2020,43(7):1-5.
- [3] 鲁鹏飞,吕宁,詹跃东.具有低输入电流纹波带耦合电感的双向 DC-DC 变换器[J].电子测量技术,2021,44(15):30-37.
- [4] 游志宇,陈维荣,张德玉,等.空冷自增湿 PEMFC 测试平台设计[J].电子测量与仪器学报,2015,29(15):68-76.
- [5] 于飞,王雷,郭宏宇.基于 MMC 的质子交换膜燃料电池并网研究[J].电子测量技术,2020,43(20):143-149.
- [6] 杜尚峰.基于一维纳米结构阵列的质子交换膜燃料电池电极设计的研究进展[J].Engineering,2021,7(1):71-106.
- [7] 罗芳,潘书媛,杨泽惠.中高温质子交换膜燃料电池催化剂研究进展[J].物理化学学报,2021,37(9):66-78.
- [8] 周伟,朱鑫宁,连云崧,等.质子交换膜燃料电池的三维流场技术研究进展[J].机械工程学报,2021,57(8):2-12.
- [9] 杨博龙,韩清,向中华.质子交换膜燃料电池膜电极结构与与设计研究进展[J].化工进展,2021,40(9):4882-4893.
- [10] 马睿,任子俊,谢任友,等.基于模型特征分析的质子交换膜燃料电池建模研究综述[J].中国电机工程学报,2021,41(22):7712-7730.
- [11] 顾洮,袁野.质子交换膜燃料电池仿真建模与分析[J].电源技术,2021,45(4):459-462.
- [12] 皇甫宜耿,任子俊,张羽翔,等.质子交换膜燃料电池动态特性建模及仿真[J].电力电子技术,2020,54(12):44-46.
- [13] 皇甫宜耿,石麒,李玉忍.质子交换膜燃料电池系统建模仿真与控制[J].西北工业大学学报,2015,33(4):

- 682-687.
- [14] 张磊,徐元利,王仁广,等. PEMFC 电堆动态模型建立及试验验证[J]. 现代电子技术,2021,44(19):140-143.
- [15] 刘旭坡,张运丰,邓邵峰,等. 燃料电池用聚合物质子交换膜的研究进展[J]. 电化学,2020,26(1):103-120.
- [16] 李萌. 质子交换膜燃料电池建模与参数预测研究[D]. 大连:大连理工大学,2020.
- [17] 刘琦,詹跃东,李瑞棋. 燃料电池汽车能量管理策略多目标优化研究[J]. 电子测量技术,2020,43(20):31-36.
- [18] 罗刚,王永富,张化锴. 燃料电池空气系统的自适应模糊建模与控制[J]. 仪器仪表学报,2018,39(12):245-254.

#### 作者简介

王季康,硕士研究生,主要研究方向为燃料电池技术、嵌入式开发技术、FPGA、DSP 等。

E-mail:1172549157@qq.com