文章编号:1674-2869(2024)04-0446-06

适配水下电源的氢燃料电池系统设计研究

王 旭,罗 燕*,杨 侠,张 刚
武汉工程大学机电工程学院,湖北 武汉 430205

摘 要:针对水下密闭高压的特殊环境,设计出适配水下电源的2 kW氢燃料电池系统,其包括氢气供给系统、氧气供给系统、冷却循环系统、加湿系统和废气回收系统。利用MATLAB/Simulink建立氢燃料电池仿真模型,对各系统的参数进行计算,并分析温度、气体压强、膜含水量对氢燃料电池性能的影响。结果表明:燃料电池系统正常运行所需要的最小氢气体积流量为24.7 L/min,最小氧气体积流量为11.9 L/min,最小氢气加湿量的质量流量为3.6 g/min,最小氧气加湿量的质量流量为1.75 g/min,最小冷却水体积流量为3.152 L/min。温度在313~353 K范围变化时,输出电压随着温度升高而增大;气体压强在0.10~0.25 MPa范围变化时,输出电压随气体压强增大而增大;膜含水量在7~22范围变化时,输出电压随膜含水量增大而增大。所建模型可以真实反应氢燃料电池的工作特性。

关键词:水下电源;氢燃料电池;系统总体结构;Simulink仿真
中图分类号:TM912 **文献标志码**:A **DOI**:10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.202312004

Design of a hydrogen fuel cell system for underwater power supply

WANG Xu, *LUO Yan**, *YANG Xia*, *ZHANG Gang*
School of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China

Abstract: Considering the special environment of underwater confinement and high pressure, a 2 kW hydrogen fuel cell system adapted to the underwater power supply was designed, which includes a hydrogen supply system, an oxygen supply system, a cooling circulation system, a humidification system and an exhaust gas recycling system. The simulation model of the hydrogen fuel cell was established by MATLAB/Simulink. The parameters of each system were calculated, and the effects of temperature, gas pressure and membrane water content on the performance of the hydrogen fuel cell were analyzed. The results show that the hydrogen fuel cell system can be normally operated at the minimum volume flow rates of hydrogen of 24.7 L/min and oxygen of 11.9 L/min, the minimum mass flow rates of hydrogen humidification of 3.6 g/min and oxygen humidification of 1.75 g/min, and the minimum volume flow rate of cooling water of 3.152 L/min. The output voltage increases with temperatures increasing when the temperatures vary in the range of 313−353 K. The output voltage increases with gas pressures increasing when the gas pressures vary in the range of 0.10−0.25 MPa. The output voltage increases with membrane water content increasing when the membrane water content varies in the range of 7−22. The model can truly reflect the working characteristics of hydrogen fuel cell.

Keywords: underwater power supply; hydrogen fuel cell; overall system structure; Simulink simulation

收稿日期:2023-12-04
基金项目:国家自然科学青年基金(12002246)
作者简介:王 旭,硕士研究生。Email: xu_wang2022@163.com
***通信作者**:罗 燕,博士,讲师。Email: 9723805@qq.com
引文格式:王旭,罗燕,杨侠,等. 适配水下电源的氢燃料电池系统设计研究[J]. 武汉工程大学学报,2024,46(4):446-451.

近年来，随着水下设备的广泛应用，其传统动力源的排放已经对环境造成了严重的污染。而氢燃料电池具有高能量密度、零排放和低噪音等优点，能够满足现代水下装备对于长时间、高效能源、高环保的需求。因此，氢燃料电池作为水下装备的动力源是未来发展的趋势，同时将氢燃料电池技术应用于水下装备领域有望带来重大的技术突破和产业发展。质子交换膜燃料电池（proton exchange membrane fuel cell，PEMFC）以氢气为燃料、氧气为氧化剂，能够直接将氢和氧的化学能通过电极反应转换成电能，该反应过程无燃烧现象，不受卡诺循环的限制，能量转化效率一般是内燃机的2~3倍，具有比功率大、能量转化效率高、工作温度低、启动快、零排放等特点[1]，并且氢能在自然界中储量丰富、获取途径多样化、利用形式多、能量密度高，是理想的化石替代能源[2]，能够有效减少对化石能源的依赖。

燃料电池系统包含多个子系统，其结构复杂，因此燃料电池系统的设计很大程度上决定了燃料电池的输出性能。叶宗俊等[3]提出了一种由阴极腔体和各辅助部件组成的集总参数动态模型，并采用非线性最小二乘法进行参数辨识，模型仿真结果与实验数据误差较小，可以应用于在线反馈控制。张可健等[4]建立气体供应系统的机理模型，该模型可以较好地反映系统工作压力、温度、压差、过氧比等参数的静态和动态变化。Zhang等[5]提出了PEMFC辅助系统中的阴极供气系统一维动态仿真模型，阴极采用能量回收系统可以提高质子交换膜燃料电池系统的性能。

燃料电池本身结构较复杂，可以通过建立半经验模型来优化输出特性。张洁等[6]通过建立稳态模型，分析了输出电压、不可逆电压、功率和效率与电流密度的关系，得出不同条件下最佳稳态输出特性。汪龙飞等[7]对新型流场的燃料电池进行数值模拟，研究表明当氢气输入速率为9×10^{-8} kg/s时，既可获得较高的电流密度，也可以保证较高的氢燃料利用率。孙术发等[8]建立了双电层电容作用的电压动态模型并仿真，结果表明在低电流区域，工作温度对电池输出特性影响更显著，在高电流区域，膜含水量对其性能影响更显著。廖晋杨[9]在Simulink环境中建立水冷型PEMFC堆栈集总参数动态模型，并分析电堆启动、变载过程的动态响应，研究发现模型具有良好的动态预测性能且求解迅速。高慧中等[10]针对水下氢氧燃料电池-蓄电池混合动力系统特性，提出了一种功率跟随式的能量管理策略，通过Simulink建立动力系统模型并仿真，结果表明该控制策略能够充分利用蓄电池补充燃料电池不足。

综上所述，目前研究大多关注于燃料电池在陆上设备的应用，将其应用于水下环境的研究还较少，究其难点在于氢气的来源及储存安全、废气处理问题等。本文立足于前人研究成果，设计出适配水下电源的2 kW燃料电池系统，有效解决氢源安全和废气处理问题，利用MATLAB/Simulink平台建立氢燃料电池仿真模型，并分析温度、气体压强、膜含水量对燃料电池性能的影响，从而优化参数来提高燃料电池性能。

1　氢燃料电池系统设计

1.1　氢燃料电池系统的组成

氢燃料电池系统主要由氢气供给系统、氧气供给系统、电堆、加湿系统、冷却循环系统和废气回收系统组成，如图1所示。

1.1.1　供给系统的设计　供给系统包括氢气供给系统和氧气供给系统。氢气供给系统中的氢气来源于水下电源装置内铝基合金与水反应，由于产生的氢气含水量太高，直接通入电堆可能造成水淹，因此氢气先经过干燥装置去除一部分水汽，后

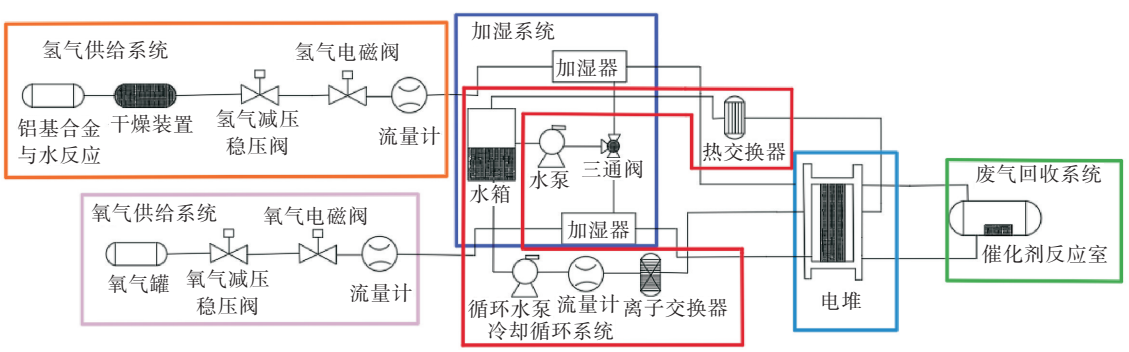

图1　氢燃料电池系统组成图

Fig. 1　Components of hydrogen fuel cell system

经过氢气减压稳压阀达到电堆所需要的压力，再经过氢气电磁阀、流量计及加湿器，达到进口流量和最佳湿度后进入电堆阳极流道。氧气供给系统中的氧气来源于氧气罐，氧气经过氧气减压稳压阀达到电堆所需要的压力，再经过氧气电磁阀、流量计及加湿器，达到进口流量和最佳湿度后进入电堆阴极流道。该供给系统特点在于“即制即用”的氢源安全技术，消除储氢罐压力过大和长时间放置氢气泄漏的安全隐患，由氧气罐为电堆提供压缩纯氧可以提高气体利用率，从而提高电池性能。

1.1.2 *电堆* 采用低压(0.25 MPa)操作的氢氧燃料电池电堆。低压操作可以降低燃料电池的运行温度，从而减少燃料电池的红外辐射温度。

1.1.3 *加湿系统* 加湿系统采用中空纤维加湿器冷却水循环对反应气体进行加湿，水通过水泵供给加湿器，由于浓度差扩散作用，水从中空纤维膜外侧扩散至内侧，并蒸发进入反应气体中，以实现电堆进口气体加湿要求。

1.1.4 *冷却循环系统* 冷却形式采用水冷却，冷却水从水箱里被循环水泵抽出，经过流量计后到达离子交换器内，离子交换器可以去除冷却水中的导电离子，保证电堆冷却系统不漏电，去除离子的冷却水进入电堆冷却流道后，从冷却流道出口流出，把电堆内部多余的热量带出，通过换热器去除冷却水中的热量。

1.1.5 *废气回收系统* 由于电堆对氢气和氧气的利用率达不到100%，会有少部分未参与反应的气体从电堆出口流出，并且在水下密闭高压的环境下，废气无法排到水中，因此考虑用催化剂催化剩余的少量氢气和氧气反应生成水，相比于废气收集，该方法减小了装置体积，节约空间。

1.2 主要参数的计算

1.2.1 *氢气供给量* 氢气体积流量为：

$$q_{V_{H_2}} = (S_{H_2} P_e / 2V_c F) \times 22.4 \times 60 \quad (1)$$

式中：S_{H_2}为氢气过量系数，取1.2时，既满足氢气流量需求又避免过多氢气浪费；P_e为输出功率，W；V_c为单片工作电压，V；F为法拉第常数，C/mol。

将参数P_e = 2 kW，V_c = 0.7 V代入式(1)中，计算得燃料电池以2 kW功率正常运行所需要的最小氢气体积流量$q_{V_{H_2}}$ = 24.7 L/min。

1.2.2 *氧气供给量* 氧气体积流量为：

$$q_{V_{O_2}} = (S_{O_2} P_e / 4V_c F) \times 22.4 \times 60 \quad (2)$$

式中：S_{O_2}为氧气过量系数，取1.2时，可以避免氧饥饿和过多的氧气浪费。

将参数P_e = 2 kW，V_c = 0.7 V代入式(2)中，计算得燃料电池以2 kW功率正常运行所需要的最小氧气体积流量$q_{V_{O_2}}$ = 11.9 L/min。

1.2.3 *氢气加湿量* 加湿1 kg氢气所需的水量为：

$$X_s = (M_{H_2O}/M_{H_2}) \cdot [\varphi p_{vs} / (p - \varphi p_{vs})] \quad (3)$$

式中：M_{H_2O}为水的摩尔质量，g/mol；M_{H_2}为氢气的摩尔质量，g/mol；φ为相对湿度，%；p为总压力，MPa；p_{vs}为饱和蒸汽压强，MPa。

取电堆入口处氢气的温度是70 ℃、相对湿度φ = 100%、总压力p = 0.2 MPa、饱和蒸汽压强p_{vs} = 0.031 08 MPa，则加湿1 kg氢气所需水量X_s = 1.650 kg。氢气密度为ρ_{H_2} = 0.089 g/L，计算得燃料电池以2 kW功率正常运行所需要的最小氢气加湿量的质量流量$q_{m_{H_2O}} = q_{V_{H_2}} \cdot \rho_{H_2} \cdot X_s$ = 3.6 g/min。

1.2.4 *氧气加湿量* 加湿1 kg氧气所需的水量为：

$$X_s' = (M_{H_2O}/M_{O_2}) \cdot [\varphi p_{vs} / (p - \varphi p_{vs})] \quad (4)$$

式中：M_{O_2}为氧气的摩尔质量，g/mol。

取电堆入口处氧气的温度是70 ℃、相对湿度φ = 100%、总压力p = 0.2 MPa、饱和蒸汽压强p_{vs} = 0.031 08 MPa，则加湿1 kg氧气所需水量X_s' = 0.103 kg。氧气密度为ρ_{O_2}=1.429 g/L，计算得燃料电池以2 kW功率正常运行所需要的最小氧气加湿量的质量流量$q_{m'_{H_2O}} = q_{V_{O_2}} \cdot \rho_{O_2} \cdot X_s'$=1.75 g/min。

1.2.5 *冷却循环水量* 电堆的理论产热量为：

$$Q_{gen} = P_e \left(1.48/V_c - 1\right) \quad (5)$$

计算得理论产热量Q_{gen}=2.22 kW=2 199.4 J/s。

冷却水体积流量为：

$$q_{V_{H_2O}} = Q_{gen} / (c\rho\Delta T) \quad (6)$$

式中：c为水的比热容，J/(kg·K)；ρ为水的密度，kg/m^3；ΔT为冷却水在燃料电池电堆内的温差，K。

将c=4 186 J/(kg·K)，ρ=1 000 kg/m^3，ΔT=10 K代入式(6)中，计算得燃料电池以2 kW功率正常运行所需要的最小冷却水体积流量$q_{V_{H_2O}}$=3.152 L/min。

2 建模仿真

2.1 电化学模型

燃料电池电化学过程中，单电池的实际输出电压V_{fc}[8]为可逆电压减去不可逆电压，不可逆电压包括活化过电压V_{act}、欧姆过电压V_{ohm}、浓差过电压V_{con}。可逆电压，即热力学电动势，可以用能斯特方程描述。

(1)热力学电动势是指没有损耗的理想电压，即能斯特电压，可表示为[11]：

$$E_{\mathrm{Nerst}}=\frac{\Delta G}{2F}+\frac{\Delta S}{2F}\left(T-T_{\mathrm{ref}}\right)+\frac{RT}{2F}\left(\ln p_{\mathrm{H_2}}+\frac{1}{2}\ln p_{\mathrm{O_2}}\right) \tag{7}$$

式中：ΔS为标准态系统熵变，−163.15 J/(mol·K)；ΔG为标准态吉布斯自由能变化量，237 180 J/mol；F为法拉第常数，96 485 C/mol；R为气体常数，8.314 J/(mol·K)；$p_{\mathrm{H_2}}$和$p_{\mathrm{O_2}}$分别为氢气分压和氧气分压；T为电池工作温度；T_{ref}为参考温度，298.15 K。

（2）活化过电压可通过经验公式表示为[12]：

$$V_{\mathrm{act}}=\xi_1+\xi_2T+\xi_3T\ln C_{\mathrm{O_2}}+\xi_4T\ln I \tag{8}$$

式中：ξ_1、ξ_2、ξ_3、ξ_4为拟合参数，可分别表示为[13] 0.948、-3.6×10^{-3}、-7.6×10^{-5}、1.93×10^{-4}；$C_{\mathrm{O_2}}$为阴极反应界面氧气浓度；I为电流。

（3）欧姆过电压是指电子通过外电路流向阴极的过程及质子克服膜的阻碍作用而产生的损耗电压，可表示为：

$$V_{\mathrm{ohm}}=JR_{\mathrm{ohm}}=Jt_{\mathrm{m}}/r_{\mathrm{m}} \tag{9}$$

式中：J为电流密度；R_{ohm}为欧姆内阻；t_{m}为质子交换膜的厚度；r_{m}为质子交换膜的传导率，表示如下：

$$r_{\mathrm{m}}=(5.139\times10^{-3}\lambda-0.00326)\exp\left(\frac{1268}{303}-\frac{1268}{T}\right) \tag{10}$$

式中：λ为质子交换膜的含水量，一般取14，即电池湿度为100%，电池性能最佳。

（4）当燃料电池发生电化学反应时，由于反应物浓度下降而产生浓差过电压，可表示为[14]：

$$V_{\mathrm{con}}=m\exp(ni) \tag{11}$$

式中：m和n为质量传递系数，主要由电解质的传导率和气体扩散层的孔隙率决定，其中m还受燃料电池工作温度的影响，当温度$T\geqslant312.15$ K，$m=1.1\times10^{-4}-1.2\times10^{-6}(T-273.15)$，当温度$T<312.15$ K，$m=3.3\times10^{-3}-8.2\times10^{-5}(T-273.15)$。

电堆的输出电压为：

$$V_{\mathrm{stack}}=N(E_{\mathrm{Nerst}}-V_{\mathrm{act}}-V_{\mathrm{ohm}}-V_{\mathrm{con}}) \tag{12}$$

式中：N为电池堆数量。

电堆的输出功率表达式为：

$$P_{\mathrm{stack}}=V_{\mathrm{stack}}I \tag{13}$$

2.2　Simulink建模

利用MATLAB/Simulink平台建立仿真模型，如图2所示，并在模型中各个模块注释相对应的燃料电池模型参数或其所代表的含义。质子交换膜采用Nafion117，其厚度t_{m}=0.017 8 cm，膜活化面积A=155 cm²；阳极氢气分压$p_{\mathrm{H_2}}$=0.25 MPa，阴极氧气分压$p_{\mathrm{O_2}}$=0.25 MPa；电池堆数量N=18；电池工作温度T=353 K。

2.3　仿真结果分析

2.3.1　温度对PEMFC性能的影响　温度对PEMFC工作性能的影响极大，目前应用最广泛的Nafion膜的最佳工作温度为80 ℃。图3为氢气和氧气压强均为0.25 MPa、膜含水量为14时，不同温

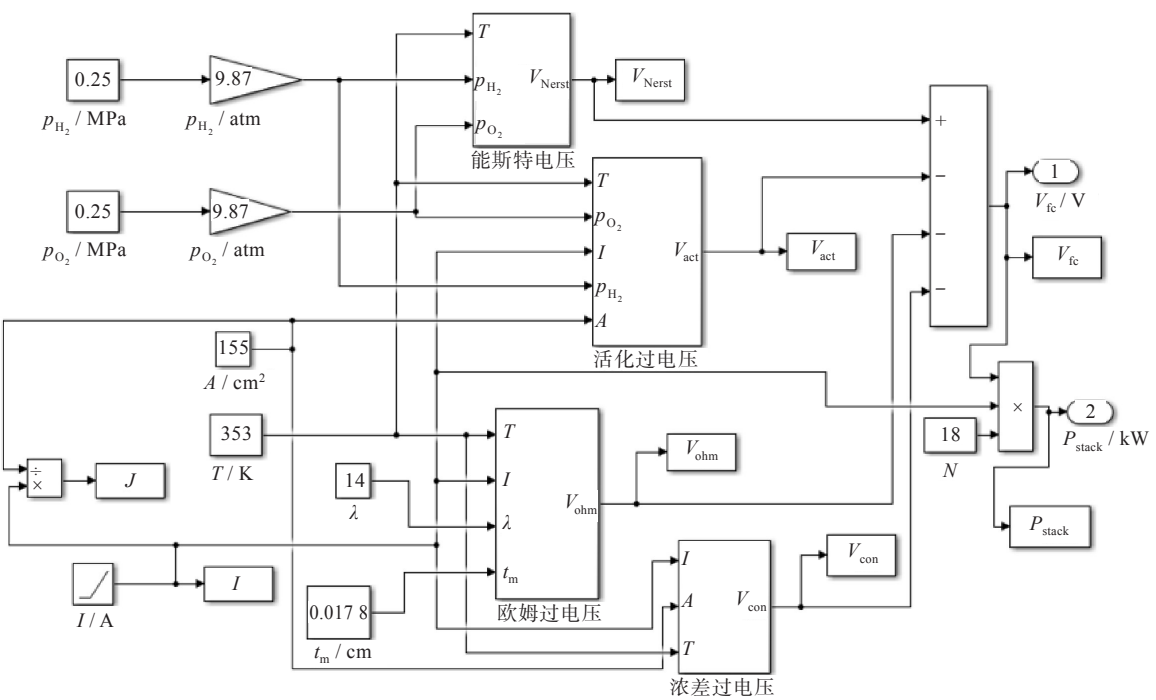

图2　Simulink模型图

Fig. 2　Simulink model

度下单电池的极化曲线和电堆的功率特性曲线。由图3(a)可知,在同一电流密度下,随着温度的升高,单电池的输出电压逐渐增大,因为温度升高,加快了电化学的反应速率,减小了燃料电池欧姆内阻,提高了反应气体扩散能力,从而提高了燃料电池的性能。

低电流密度区间(0.0~0.2 A/cm^2),输出电压主要受活化极化影响,随电流密度增加而迅速下降;中电流密度区间(0.2~0.8 A/cm^2),欧姆极化影响最大,输出电压与电流接近线性关系;高电流密度区间(0.8~1.2 A/cm^2),浓差极化开始显现,输出电压对电流密度变化较为敏感,随电流密度增加,输出电压出现陡降。

由图3(b)可知,同一电流密度下,由于温度升高,电化学反应速率和电导率增大,从而使电堆功率增大。同一温度下,电堆功率随电流密度的增大先增大后减小,且存在峰值功率,而峰值功率所对应的电流密度近似为极化曲线末端的电流密度,由此可知,浓差极化是导致功率逆转的原因之一。当电流密度过大时,输出功率反而会急速下降,严重影响电池性能,因此结合电池特性来选择合适的工作电流密度,从而使燃料电池在最佳状态下工作。

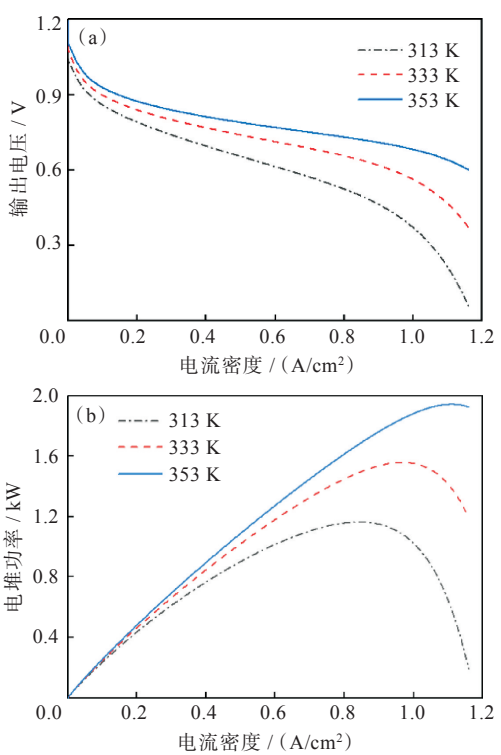

图3 不同温度下单电池的极化曲线(a)和电堆的功率特性曲线(b)

Fig. 3 Polarization curves of single cell (a) and power characteristic curves of cell stack (b) at different temperatures

2.3.2 气体压强对PEMFC性能的影响 图4为温度为353 K、膜含水量为14时,不同气体压强下单电池的极化曲线。由图4可知,在同一电流密度下,随着氢气和氧气压强增大,单电池的输出电压增大,同时燃料电池性能有所提高。从电化学模型的角度分析,增大氢气和氧气压强使能斯特电压增大,活化过电压和浓差过电压减小,同时提高了反应的氢气和氧气的浓度,增大化学反应速率,最终使输出电压增大,从而提高燃料电池性能。

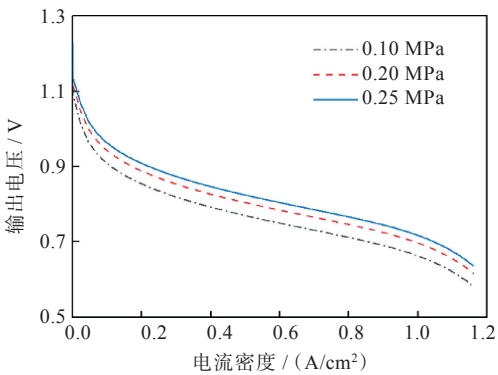

图4 不同气体压强下单电池的极化曲线

Fig. 4 Polarization curves of single cell at different gas pressures

2.3.3 膜含水量对PEMFC性能的影响 图5为温度为353 K、氢气和氧气压强均为0.25 MPa时,单电池在膜含水量分别为7(电池湿度50%)、14(电池湿度100%)和22(电池湿度过饱和状态)时的极化曲线。由图5可知,在同一电流密度下,膜含水量越大,输出电压越大。电流密度为0.8 A/cm^{2}时,膜含水量为14时的输出电压比膜含水量为7时增大了0.063 V;膜含水量为22时,电池湿度处于过饱和状态,输出电压相对膜含水量为14时增大了0.021 V。这是因为增大膜含水量,其电导率也会

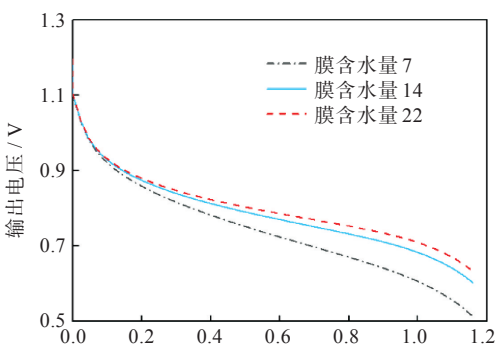

图5 不同膜含水量下单电池的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of single cells with different membrane water content

越大，电池膜电阻就越小，PEMFC的性能越好。电池湿度的过饱和状态可能会造成质子交换膜的水淹，从而降低电池性能，因此适当地增大膜含水量使电池处于100%湿度。

3　结　论

针对2 kW燃料电池电堆，考虑水下密闭高压环境的特殊性，设计出适配水下电源的燃料电池总体系统结构，利用MATLAB软件中的Simulink模块，建立了氢燃料电池仿真模型，并分析温度、气体压强、膜含水量对燃料电池性能的影响。

（1）燃料电池系统包括氢气供给系统、氧气供给系统、冷却循环系统、加湿系统和废气回收系统。在氢气供给系统中，由铝基合金与水反应为燃料电池提供氢气，采用“即制即用”的氢源安全技术。在氧气供给系统中，由氧气罐为燃料电池提供氧气；冷却循环系统采用水冷却，通过控制水流量来调节燃料电池温度。在加湿系统中，采用中空纤维加湿器对气体进行加湿。在废气回收系统中，采用催化剂将未被燃料电池利用的少量氢气和氧气催化生成水。此外还对燃料电池各子系统的设计参数进行计算得出：燃料电池系统正常运行所需要的最小氢气体积流量为24.7 L/min，最小氧气体积流量为11.9 L/min，最小氢气加湿量的质量流量为3.6 g/min，最小氧气加湿量的质量流量为1.75 g/min，最小冷却水体积流量为3.152 L/min。

（2）温度在313~353 K范围变化时，燃料电池输出电压和功率随温度升高而增大；同一温度下，功率随电流密度的增大先增大后减小，且存在峰值功率。气体压强在0.10~0.25 MPa范围变化时，在同一电流密度下，输出电压随氢气和氧气压强的增大而增大，同时燃料电池性能有所提高。膜含水量在7~22范围变化时，在同一电流密度下，膜含水量越大，输出电压也越大；电流密度为0.8 A/cm^2，膜含水量由7增大到14时，输出电压增大了0.063 V，膜含水量由14增大到22时，输出电压增大了0.021 V。

参考文献

[1] 石英乔，何彬，曹桂军，等.燃料电池混合动力瞬时优化能量管理策略研究[J].汽车工程，2008，30(1)：30-35.

[2] 孟翔宇，陈铭韵，顾阿伦，等.“双碳”目标下中国氢能发展战略[J].天然气工业，2022，42(4)：156-179.

[3] 叶宗俊，戴海峰，袁浩，等.车用燃料电池系统建模及参数辨识[J].机电一体化，2020，26(3)：18-26.

[4] 张可健，曲大为，兰洪星，等.基于MATLAB/Simulink的氢燃料电池系统建模与仿真[J].科学技术与工程，2021，21(13)：5380-5386.

[5] ZHANG Y M，BAO P L，WAN Y，et al. Modeling and analysis of air supply system of polymer electrolyte membrane fuel cell system[J]. Energy Procedia，2017，142：1053-1058.

[6] 张洁，刘立群.不同因素对质子交换膜燃料电池的影响[J].太原科技大学学报，2018，39(1)：12-17.

[7] 汪龙飞，杨侠，严智远，等.流场结构对氢燃料电池性能的影响[J].武汉工程大学学报，2022，44(4)：445-449.

[8] 孙术发，杨洁，唐华林，等.PEMFC输出特性建模与多因素仿真分析[J].哈尔滨工业大学学报，2019，51(10)：144-151.

[9] 廖晋杨.车用质子交换膜燃料电池建模与仿真研究[D].南宁：广西大学，2019.

[10] 高慧中，王志杰，尹韶平，等.水下燃料电池动力系统能量管理策略仿真[J].水下无人系统学报，2018，26(3)：242-246.

[11] CHAKRABORTY U K. Proton exchange membrane fuel cell stack design optimization using an improved jaya algorithm[J]. Energies，2019，12(16)：3176.

[12] ALTARAWNEH R M. Faradaic efficiencies for methanol oxidation in proton-exchange membrane electrolysis and fuel cells with various anode catalysts [J]. International Journal of Electrochemical Science，2019，14：52-56.

[13] 路凯.质子交换膜燃料电池动态响应特性分析及寿命预测研究[D].北京：北京交通大学，2020.

[14] WILBERFORCE T，IJAODOLA O，KHATIB F N，et al. Effect of humidification of reactive gases on the performance of a proton exchange membrane fuel cell [J]. Science of the Total Environment，2019，688：1016-1035.

本文编辑：霍淑利