

70 kW 燃料电池热电联产系统水热管理研究

符昊宇¹, 谢长君^{1*}, 朱文超¹, 李浩¹, 章雷其², 赵波², 宋洁³

(1. 武汉理工大学自动化学院, 湖北省 武汉市 430070;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院, 浙江省 杭州市 310014;

3. 国网智能电网研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Research on Water and Heat Management of 70 kW Fuel Cell Cogeneration System

FU Haoyu¹, XIE Changjun^{1*}, ZHU Wenchao¹, LI Hao¹, ZHANG Lei², ZHAO Bo², SONG Jie³

(1. School of Automation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei Province, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;

3. State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

Abstract: The electrical efficiency of the proton exchange membrane fuel cell stack is about 50%. The remaining energy of the electrochemical reaction will be lost in the form of heat, causing huge energy waste. The development of a fuel cell-based cogeneration system can efficiently generate electricity and hot water, and significantly improve the energy efficiency of the system. A 70 kilowatt-level fuel cell cogeneration system was built on the MATLAB/Simulink platform, including fuel cell electrical model, thermal management model and integrated dynamic model of cogeneration system, and an intelligent control algorithm was developed for water and heat management, and the operating temperature of the stack is controlled at about 70 °C. Under the premise of ensuring the normal operation of the stack, the heat recovery efficiency is improved and the parasitic power of the system is reduced. The results show that the system can effectively recover the waste heat generated by the fuel cell reaction. While increasing the external load to improve the stack efficiency, the cogeneration efficiency will gradually increase and then decrease, and the highest efficiency of cogeneration can reach 83.5%.

Keywords: proton exchange membrane fuel cell; cogeneration system; heat recovery; water and heat management

摘 要: 质子交换膜燃料电池堆的电效率约为50%, 电化学反应剩余的能量要以热量的形式散失, 造成巨大能量浪费,

开发基于燃料电池的热电联产系统可以高效地产生电力和热水, 并显著提高系统的能量效率。在MATLAB/Simulink平台上搭建了70 kW级燃料电池热电联产系统, 包括燃料电池电模型、热管理模型和热电联产系统综合动态模型, 并开发了一种智能控制算法进行水热管理, 将电堆运行温度控制在70 °C左右, 在保证电堆正常运行的前提下, 提升热能回收效率并降低系统寄生功率。结果表明该系统可以有效地回收燃料电池反应所产生的废热, 在增大外部负载提高电堆电效率的同时, 热电联产效率会逐渐增高然后降低, 热电联产最高效率可以达到83.5%。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 热电联产系统; 热回收; 水热管理

0 引言

由温室气体引起的全球变暖问题已成为二十一世纪亟待解决的世界性问题。在众多新型能源中, 氢能无疑是最具利用前景的能源之一, 燃料电池作为一种能量转换装置, 可以直接将氢气的化学能转化为电能^[1-2]。同时燃料电池的效率不受卡诺循环的限制, 与传统热机相比, 有着更高的氢能利用率^[3]。在几种不同类型的燃料电池中, 质子交换膜燃料电池 (proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) 因功率密度高、工作温度相对较低以及可以快速启动等优点而更受欢迎^[4]。PEMFC在正常工作条件下的电效率约为50%, 其余能量均以热量形式散出, 如不及时处理这些热量, 不仅会对电堆性能造成伤害, 还会造成严重的能

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFB1506802); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2021IVA120)。

National Key Research and Development Program of China (2020YFB1506802); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021IVA120).

量浪费^[5]。基于PEMFC搭建热电联产 (combined heat and power, CHP) 系统, 可以保证燃料电池的输出长时间保持在较高水平, 且在延长电堆的寿命的同时, 回收大量热能, 提升能源利用率^[6]。

当前, 质子交换膜燃料电池及其热电联产系统的研究越来越受到关注, 对燃料电池进行建模仿真分析, 是为了对其性能进行预测研究。文献[7-8]根据质子交换膜燃料电池稳态状态下的实验数据, 建立了一套完整的燃料电池经验模型, 该模型反映出稳态状态下电池的极化损失, 并通过改变电堆运行温度, 分析电堆的伏安特性和功率特性。文献[9]采用自适应神经模糊推理系统对电堆的动态电压进行建模, 与实际系统对比取得了较好的一致性。当前关于燃料电池CHP系统的研究多侧重于模型的建立, 对PEMFC温度的控制和CHP系统具体的结构仍缺乏研究, 文献[10]对一个家用低温燃料电池热电联产系统进行了研究和分析, 用常温冷却水通过换热器来回收电堆废热, 使电堆温度稳定在71℃。实验数据表明换热器在标定功率下回收热量最大。文献[11-13]设计了一套热回收装置, 通过控制二次泵的流速来稳定冷却液入口温度, 仿真结果与实验数据之间误差很小, CHP效率最高可达82%, 但该研究未考虑控制电堆工作保持在最佳温度范围, 只通过控制一个水泵的转速来控制稳定冷却液入口温度。文献[14]设计并搭建了一套5 kW质子交换膜燃料电池热电联供系统, 通过换热器和散热器两种冷却模式来对电堆进行冷却, 设计控制策略保证供给用户端热水温度维持在50℃左右, 热电联供系统效率最高为81.57%, 但该系统当用风扇散热器时, 会对热能造成浪费, 热电联产效率无法提升。

综上所述, 在现有的燃料电池CHP研究中虽有设计出完整的热回收系统来提升系统效率, 但均未能充分地回收废热, 并且在电池运行温度控制方面效果不佳。为了实现稳定地控制电堆工作温度, 最大程度地提升CHP系统效率, 降低系统的寄生功率的目标, 本文用Matlab/Simulink仿真软件设计了一套冷却系统和热回收系统来实现燃料电池的热电联产, 并开发了一种智能控制算法, 将电堆温度和冷却液入口温度作为控制对象, 通过协调控制冷却系统和热回收系统中两个水泵的转速来稳定电堆工作温度保持在70℃左右; 将电堆外部用隔热材料进行包裹, 用换热器通过温度控制来对电堆运行产生的废热尽可能多地进行回收, 产生的热水供给家庭日常使用, 最终实现热电联产最高效率高达83.5%, 高于已有研究的82%。

1 PEMFC-CHP系统

1.1 热回收系统设计

系统采用额定功率为70 kW的PEMFC电堆作为发电装置, 采用99.99%的纯氢作为燃料。CHP系统示意图如图1所示。在CHP系统里, 除了电堆电压模型外, 还包含氢氧供应模型、功率控制模型和热回收系统, 最终向用户供给电力和热水。

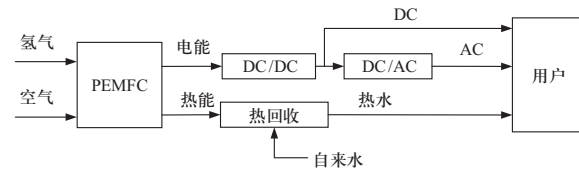


图1 燃料电池CHP系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fuel cell CHP system

燃料电池CHP热回收系统流程图如图2所示, 包括PEMFC电堆、电堆冷却液回路、换热器、二次流体回路以及用户端的热水供给回路。在换热器内的热传递过程中, 冷却液从PEMFC电堆中移除的热量被传递给二次流体, 即供给用户端的热水, 将其存储到缓冲罐中。当缓冲罐中的热水达到适用于用户使用的温度后, 通过水泵P3将热水转移到热水存储罐中, 同时向缓冲罐中注入冷水, 保证二次流体回路的正常运行。通过控制水泵P1和P2的转速, 来控制冷却液回路和二次流体回路的流量, 从而稳定电堆的工作温度, 保证电堆正常运行的同时, 回收PEMFC电化学反应产生的废热。

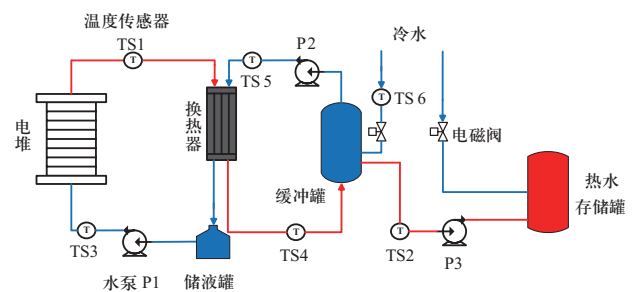


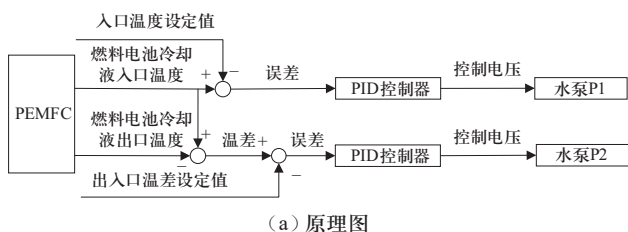
图2 燃料电池CHP热回收系统工作流程图

Fig. 2 Fuel cell CHP heat recovery system work flow chart

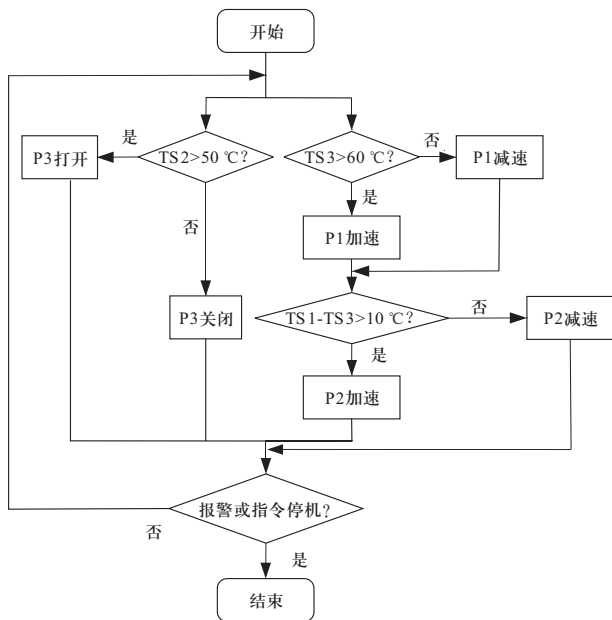
1.2 热回收系统控制策略

热回收系统控制策略原理图和控制策略流程图如图3所示。该控制策略通过跟踪电堆冷却液出口和入口温度的变化, 来控制冷却液回路和次级流体回路中

两个水泵的转速。为了提高燃料电池内部温度分布的均匀性,要求冷却液进出口温差不超过 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[15];同时为了保证电堆持续工作在 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的最佳温度,要控制冷却液进入电堆的温度稳定在 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,才能最大程度地将电堆反应产生的废热回收。通过两种PID算法来控制两个水泵P1和P2的转速,假设电堆冷却液出口温度为电堆温度,当电堆冷却液入口温度高于 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,水泵P1加速运行将其温度降低;当电堆冷却液出口温度和入口温度的差值大于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,二次流体回路水泵P2加速运行,通过换热器将进出电堆冷却液的温差降低。当缓冲罐中的热水温度上升到 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可以供应家庭使用,水泵P3便打开将热水转移到热水存储罐中,同时通过自来水管向缓冲罐中补充冷却水。



(a) 原理图



(b) 流程图

图3 热回收系统控制策略

Fig. 3 Heat recovery system control strategy

2 PEMFC输出特性建模与仿真

2.1 模型假设

PEMFC的内部电化反应过程极为复杂,其热管理系统具有时变、非线性、强耦合以及不确定等特点,

为简化燃料电池数学模型降低研究难度,在建模前需进行合理假设和近似处理。

1) PEMFC电堆运行时内部温度均匀一致。

2) 阳极和阴极分别通入的是纯度99.99%的氢气和空气,均为理想气体且完全加湿。

3) 反应过程中,忽略反应气体在电堆内的压降。

4) 忽略水蒸气对本模型的影响,质子交换膜含水量始终处于饱和状态。

2.2 PEMFC输出特性模型

当外部回路负载发生变化时,PEMFC电堆的电化学反应也会跟随变化,在这过程中会出现电压的损失,我们称之为极化损失。这种不可逆的电压损失主要体现在活化极化过电压、欧姆极化过电压和浓度差极化过电压三种。PEMFC的实际输出电压等效为热力学电动势三种活化损失,其等效电路图如图4所示。

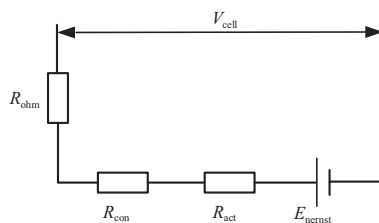


图4 燃料电池输出电压等效电路

Fig. 4 Fuel cell output voltage equivalent circuit

单片PEMFC的输出电压 V_{cell} 可表述为

$$V_{\text{cell}} = E_{\text{nernst}} - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{con}} \quad (1)$$

式中： E_{nernst} 为能斯特电动势； V_{act} 为活化极化过电压； V_{ohm} 为欧姆极化过电压； V_{con} 为浓度差极化过电压。

2.2.1 能斯特电动势

能斯特电动势是标准情况下电池开路电压,由热力学特性公式并代入相应的常数和熵值得^[16]:

$$E_{\text{nernst}} = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3} (T_{\text{st}} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T_{\text{st}} (\ln P_{\text{H}_2} + 0.5 \ln P_{\text{O}_2}) \quad (2)$$

式中： T_{st} 为燃料电池运行温度； P_{H_2} 为氢气在阳极的分压力； P_{O_2} 为氧气在阴极的分压力。

2.2.2 活化极化过电压

活化极化过电压是燃料电池进行电化学反应产生的自由电子在电极附近运动,电化学反应受到其阻碍反应速度变慢,而产生的电压损失,一般可用经验公式表述为

$$V_{\text{act}} = \xi_1 + \xi_2 T_{\text{st}} + \xi_3 T_{\text{st}} \ln C_{\text{O}_2} + \xi_4 T \ln I_{\text{st}} \quad (3)$$

式中: $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4$ 为经验参数; C_{O_2} 为阴极界面氧气浓度; I_{st} 为电堆输出电流。

2.2.3 欧姆极化过电压

欧姆极化又称阻抗极化, 欧姆极化过电压是由于两种电池内部阻抗而引起的电压降: 一种是电池内部元件的电阻, 另一种是离子通过质子交换膜的阻抗, 其中离子阻抗为主要因素, 根据欧姆定律有:

$$V_{ohm} = I_{st}(R_m + R_e) \approx I_{st}R_m \quad (4)$$

$$R_m = \frac{t_m}{\sigma_m A} \quad (5)$$

式中: R_m 为离子阻抗; R_e 为电子阻抗; t_m 为质子交换膜厚度; σ_m 为质子交换膜的传导率。

2.2.4 浓度差极化过电压

浓度差极化过电压是由于电流值过大时, 在阴阳极电极附近产生反应气体浓度差, 扩散阻力增大, 限制电化学反应的进行, 电堆输出电压急剧下降, 可用经验公式表述为

$$V_{con} = -B \times \ln \left(1 - \frac{I_{den}}{I_{max}} \right) \quad (6)$$

式中: B 为经验参数; I_{den} 为实际电流密度; I_{max} 为最大电流密度。

2.3 PEMFC输出特性仿真与分析

根据公式(1) — (6), 在MATLAB/Simulink软件中对PEMFC输出特性进行仿真建模, 分析不同工作温度下PEMFC极化特性的变化, PEMFC输出特性仿真模型如图5所示。

PEMFC输出特性仿真模型所需的各项参数值如表1所示。

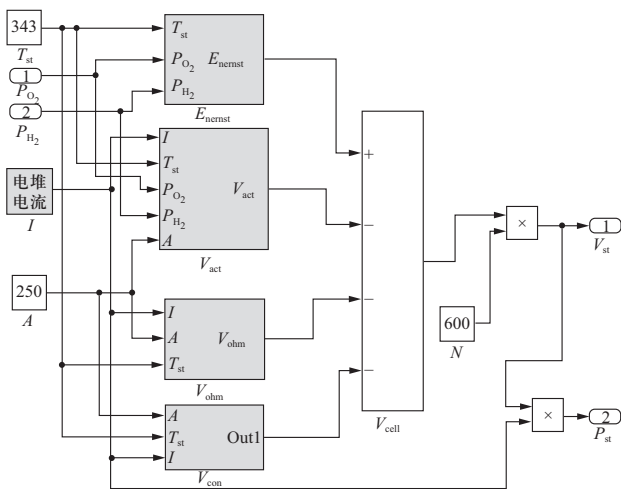


图5 PEMFC输出特性模型

Fig. 5 PEMFC output characteristic model

表1 PEMFC输出特性模型参数

Table 1 PEMFC output characteristic model parameters

名称	符号	单位	数值
单电池有效活化面积	A	cm^2	250
电堆单电池数量	N	片	600
质子交换膜厚度	t_m	μm	51
法拉第常数	F	C/mol	96 485
吉布斯自由能	G	J/mol	237 180
电堆运行温度	T_{st}	$^{\circ}\text{C}$	70

电堆在不同运行温度下的伏安特性曲线如图6所示。随着温度从30 °C升高到70 °C, 燃料电池的性能得到改善。PEMFC分为高温和低温两种, 低温PEMFC最佳的工作温度为60 °C~80 °C^[17-18], 当温度过高时, 质子交换膜水含量降低, 甚至发生脱水现象, 导致膜电导率降低, 输出性能下降^[19]; 而温度过低时, 电堆内部电化学反应受到阻碍, 各种极化阻抗均会变大。在一定温度范围内, 适当提高电池的工作温度, 可以加快气体扩散速度, 提高质子交换膜的电导率, 有效降低浓度差极化和欧姆极化过电压的损失。本系统所用上海神力电堆的最佳温度在70 °C左右, 冷却液入口温度控制在60 °C左右。

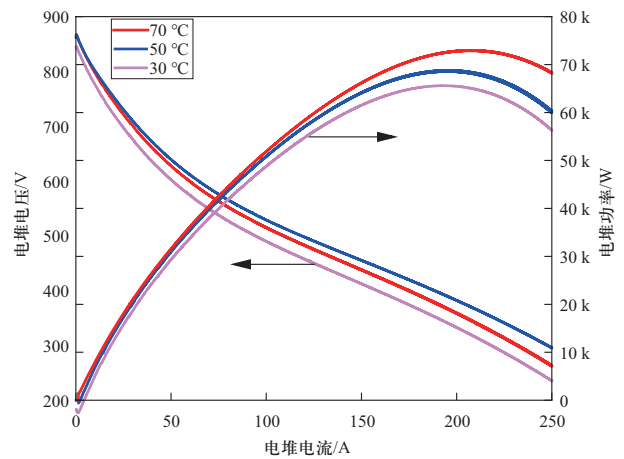


图6 PEMFC极化特性曲线

Fig. 6 PEMFC polarization characteristic curve

3 PEMFC-CHP系统建模与仿真

3.1 PEMFC-CHP系统模型

根据能量守恒原理, 电堆内电化学反应产生的能

量全部转化为电能和热能，留在电堆内的能量则会影响电堆温度。根据热平衡公式 $Q=CM\Delta T$ ，电堆温度的变化与其产热散热的关系为^[20]

$$C_{st}M_{st}\frac{d(T_{st}-T_0)}{dt}=Q_{gen}-Q_{dis}=(Q_{total}-P_{st})-Q_{dis} \quad (7)$$

式中： C_{st} 为电堆比热容； M_{st} 为电堆质量； T_0 为电堆初始温度； Q_{gen} 为电堆产热功率； Q_{dis} 为电堆散热功率； Q_{total} 为电堆总功率； P_{st} 为电堆发电功率。

3.1.1 电堆产热功率

电堆的产热功率可以用电堆总功率与输出电功率之差为

$$Q_{gen}=Q_{total}-P_{st} \quad (8)$$

电堆总功率是指单位时间内所消耗的反应气体包含的能量，可以表示为

$$Q_{total}=\Delta H\times N_{an,H_2}^{rec}=\Delta H\times\frac{N\times I_{st}}{2F} \quad (9)$$

式中： ΔH 为单位氢气的焓值； N_{an,H_2}^{rec} 为阳极氢气的消耗速率，可以通过电堆中电池的数量 N 、法拉第常数 F 计算以及电堆电流 I_{st} 算出。

电堆的输出电功率等于电堆输出的电压值 V_{cell} 和电堆电流值 I_{st} 的乘积，即：

$$P_{st}=N\times V_{cell}\times I_{st} \quad (10)$$

3.1.2 电堆散热功率

电堆在电化学反应过程中不断产热，根据热平衡产生的热量应等于散发的热量，而水冷型电堆的散热途径大致有三种：

$$Q_{dis}=Q_{gas}+Q_{atm}+Q_{cl} \quad (11)$$

式中： Q_{gas} 为气体散热功率； Q_{atm} 为辐射散热功率； Q_{cl} 为冷却液散热功率。

1) 尾气散热。根据能量与物质守恒原理，在电堆系统内只有气体和水的消耗与产生，可以用单位时间内进气与出气的能量差来表示尾气散热：

$$Q_{gas}=Q_{out}-Q_{in} \quad (12)$$

$$Q_{out}=(N_{an,H_2}^{out}C_{H_2}+N_{an,H_2O}^{out}C_{H_2O}^g)(T_{an}^{out}-T_0)+ \\ (N_{ca,O_2}^{out}C_{O_2}+N_{ca,N_2}^{out}C_{N_2}+N_{ca,H_2O,l}^{out}C_{H_2O}^l)(T_{ca}^{out}-T_0) \quad (13)$$

$$Q_{in}=(N_{an,H_2}^{in}C_{H_2}+N_{an,H_2O}^{in}C_{H_2O}^g)(T_{an}^{in}-T_0)+ \\ (N_{ca,air}^{in}C_{air}+N_{ca,H_2O}^{in}C_{H_2O}^g)(T_{ca}^{in}-T_0) \quad (14)$$

式中： Q_{out} 、 Q_{in} 分别为单位时间内气体流出和流入电堆热功率，根据氢气和空气流入和流出电堆的质量流量以及出入口温差来计算气体散热。其中冷却液进入电堆的温度与气体进入电堆温度相等，冷却液和气体从电堆内出来时温度等于电堆稳定运行的温度，即

$$T_{ca}^{in}=T_{an}^{in}=T_{st,cl}^{in} \quad (15)$$

$$T_{ca}^{out}=T_{an}^{out}=T_{st,cl}^{out}=T_{st} \quad (16)$$

2) 辐射散热。电堆运行过程中由于与环境存在温差，其热量会以电磁辐射的形式向环境传递，PEMFC电堆的辐射散热可表示为温差与热阻的比值，即

$$Q_{atm}=\frac{T_{st}-T_{atm}}{R_t} \quad (17)$$

3) 冷却液散热。冷却液散热是排出电堆热量的主要途径，也是CHP系统的重要环节，控制冷却液流量是进行电堆温度调控的主要措施，可以通过PID控制器根据温度变化来实时控制水泵的转速来进行温度调节。根据冷却液的比热、流量和进出口温差便可计算出回收的热量，单位时间内冷却液流过电堆带走的热量可以表示为

$$Q_{cl}=W_{cl}\times C_{cl}^l(T_{st,cl}^{out}-T_{st,cl}^{in}) \quad (18)$$

式中： W_{cl} 为冷却液流量； C_{cl}^l 为冷却液比热容； $T_{st,cl}^{out}$ 为电堆出口冷却液温度； $T_{st,cl}^{in}$ 为电堆入口冷却液温度。

3.2 热电联产效率

在计算热电联产效率时，需将阴极空压机、热回收系统水泵、电磁阀等设备的寄生功率也考虑在内，才能准确计算出热电联产系统总效率，公式为

$$\eta_{CHP}=\eta_E+\eta_Q=\frac{P_{st}-P_0}{n_{H_2}\times\Delta H}+\frac{Q_{cl}}{n_{H_2}\times\Delta H} \quad (19)$$

式中： η_{CHP} 为热电联产系统总效率； η_E 为系统电效率； η_Q 为热回收效率； P_0 为系统寄生功率； n_{H_2} 为氢气摩尔流量； ΔH 为氢气的焓值。

在消耗的寄生功率中，水泵的功率由冷却液的流量决定，水泵轴功率计算公式为^[21]

$$P_p=\frac{\rho\cdot g\cdot H\cdot W_{cl}}{\eta} \quad (20)$$

式中： ρ 为冷却液密度； g 为重力加速度； H 为扬程； η 为水泵效率。

3.3 PEMFC-CHP系统仿真与分析

根据公式(7)~(18)在MATLAB/Simulink软件中对PEMFC-CHP系统进行仿真建模，分析燃料电池正常工作状态下的热量变化，PEMFC-CHP系统仿真模型如图7所示。

PEMFC-CHP系统仿真模型所需的各项参数值如表2所示。

在建立的PEMFC-CHP系统仿真模型上，模拟燃料电池以额定功率70 kW恒功率启动并稳定运行一段

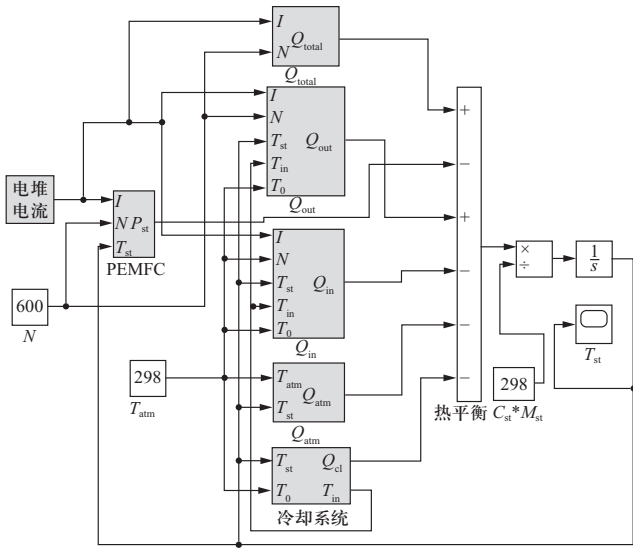


图 7 PEMFC-CHP系统模型

Fig. 7 PEMFC-CHP system model

表 2 PEMFC-CHP系统模型参数

Table 2 PEMFC-CHP system model parameters

名称	符号	单位	数值
氢气热值	H	kJ/mol	285.8
环境温度	T_0	$^{\circ}\text{C}$	25
空气比热容	C_{air}	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	1.011
液态水比热容	$C_{\text{H}_2\text{O}}$	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	4.2
冷却液比热容	C_{cl}	$\text{kJ}/(\text{kg K})$	3.5
电堆热阻抗	R_t	Ω	0.015
重力及速度	g	m/s^2	9.8
水泵效率	η	$\%$	80
冷却液密度	ρ	kg/m^3	1045

时间。PEMFC电堆温度和热回收系统回收热量随时间变化折线图如图8所示，燃料电池的温度会被冷却系统在50 s内控制在电堆最佳工作温度70 °C；同时，热回收系统通过换热器持续不断地将冷却液中的热量进

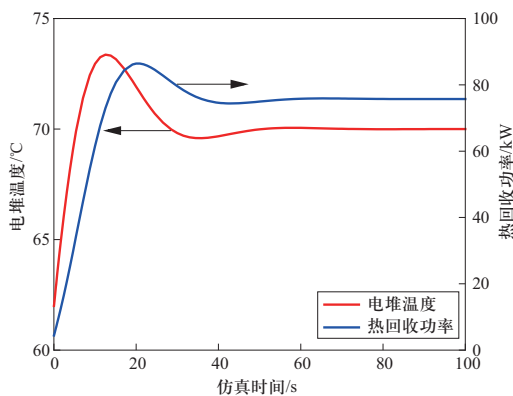


图 8 PEMFC-CHP系统仿真图

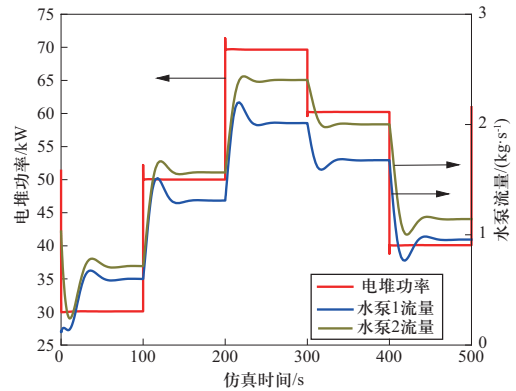
Fig. 8 PEMFC-CHP system simulation diagram

行回收，供给用户端热水使用，成功达到了热电联供的目的。

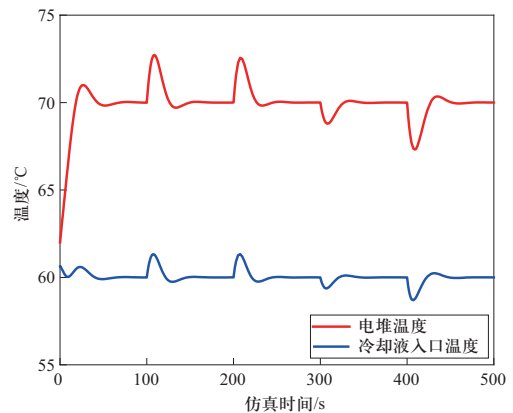
4 仿真结果与分析

4.1 电堆温度控制分析

PEMFC电堆温度会随着外部负载的变化而变化，为保证电堆始终运行在最佳温度范围内，冷却系统和热回收系统会在很短的时间内响应，将电堆温度冷却下来并将多余废热进行回收。在建立的PEMFC-CHP系统仿真模型上模拟外部负载功率每100 s以阶跃形式变化一次，电堆功率、冷却液回路水泵P1和二次流体回路水泵P2流量随时间变化如图9 (a)所示，随着电堆功率阶跃式增大或减小，水泵P1和P2通过PID控制器控制，根据温度的变化，进行相应的加速或减速，来控制冷却液回路和二次流体回路的流量。电堆温度和冷却液入口温度随时间变化如图9 (b)所示，在外部负载变化的情况下，温度会逐渐发生改变，通过控制两个回路流体的流量，可以将电堆温度和冷却液入



(a) 水泵P1、P2流量分析



(b) 电堆温度和冷却液入口温度分析

图 9 PEMFC-CHP系统温度控制分析

Fig. 9 Analysis of Temperature Control of PEMFC-CHP System

口温度在50 s内分别稳定在70 °C和60 °C左右，温度变化范围在±3 °C以内，在保证电堆正常运行的同时，进行了废热回收。

4.2 PEMFC-CHP系统效率分析

图10显示出本PEMFC-CHP系统的热回收效率、系统电效率和热电联产总效率随电堆功率的变化，为提升整个系统的效率，模拟对电堆表面进行包裹，防止热量散失，提升热回收效率。由图可知，随着电堆功率的逐渐增大，热电联产效率也不断增大，在达到最高值之后开始缓慢降低；而热回收效率则随着电堆功率的增加而不断增大；系统电效率由于寄生功率的存在，在平稳增加之后开始衰减。如表3所示，在电堆功率约为60 kW时，热电联产效率最高，约为83.5%，其中系统电效率为34%，热回收系统49.5%。

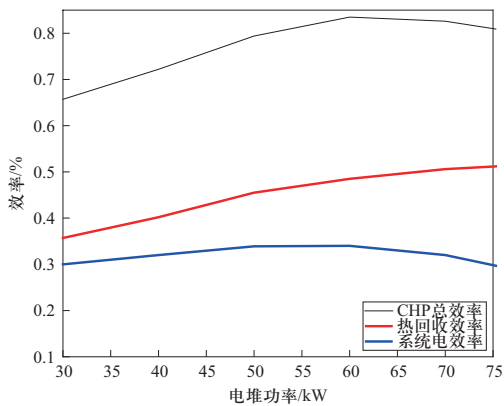


图 10 PEMFC-CHP系统效率分析

Fig. 10 PEMFC-CHP system efficiency analysis

表 3 PEMFC-CHP系统不同工况下的效率

Table 3 Efficiency of PEMFC-CHP system under different working conditions

电堆功率/kW	电效率/%	热效率/%	总效率/%
30	29.8	35.7	65.5
40	32.1	40.5	72.6
50	33.8	45.6	79.4
60	34.0	49.5	83.5
70	32.1	50.4	82.5

图11显示了电堆包裹前后，热回收效率随电堆功率变化的对比图，电堆用绝热材料进行包裹防止热量散失，可以提升热回收系统的热回收效率，由表4可知，经过绝热材料包裹后的电堆，用热回收系统进行热回收的热效率比没有包裹绝热材料进行热回收的热效率提升约为2.5%。

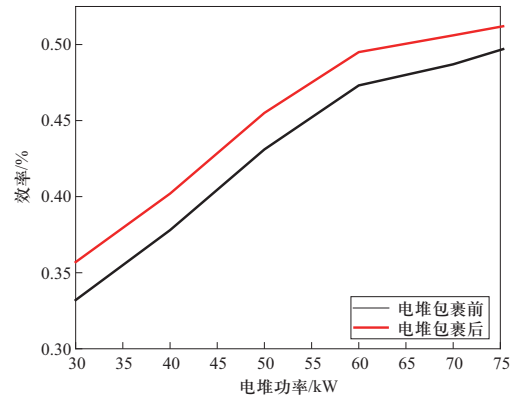


图 11 包裹电堆前后热回收效率对比

Fig. 11 Comparison of heat recovery efficiency before and after wrapping the stack

表 4 电堆包裹前后热回收效率

Table 4 Heat recovery efficiency before and after stack wrapping

电堆功率/kW	包裹前热效率/%	包裹后热效率/%
30	33.2	35.7
40	37.9	40.5
50	42.9	45.6
60	47.2	49.5
70	48.7	50.4

4.3 模拟系统运行结果分析

在本文设计的PEMFC-CHP仿真模型上，模拟一栋住宅楼白天12 h的用电情况，采用电负荷跟随模拟该系统运行，用电量每小时测量一次^[22]。白天12 h电堆功率和热回收的热功率如图12所示，详细数据见表5，12时和20时左右的用电量为一天内的最高，电堆功率在70 kW左右，热回收系统回收的热功率随着电功率的增大而增大，最高热功率约为75 kW，可以满足一栋住宅楼的电力和热水需求。

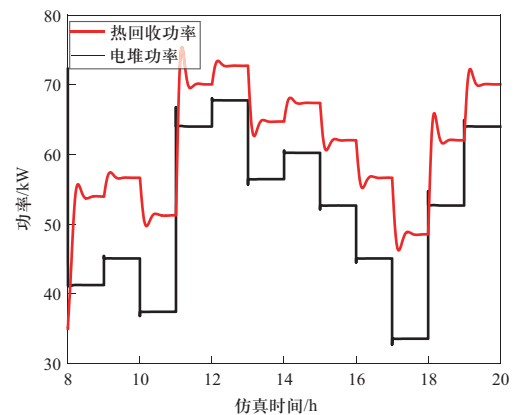


图 12 模拟PEMFC-CHP在住宅楼12 h运行情况

Fig. 12 Simulate 12-hour operation of PEMFC-CHP in residential building

表 5 住宅楼用电需求量

Table 5 Electricity demand for residential buildings

时间段	用电量需求 /kW	电堆电功率 /kW	热回收功率 /kW
8 h-9 h	40	40.50	53.80
9 h-10 h	45	45.65	56.64
10 h-11 h	35	35.39	51.01
11 h-12 h	64	64.07	70.10
12 h-13 h	65	67.77	72.87
13 h-14 h	56	56.45	64.74
14 h-15 h	60	60.23	67.50
15 h-16 h	52	52.67	61.84
16 h-17 h	45	45.07	56.61
17 h-18 h	33	33.54	48.36
18 h-19 h	52	52.67	62.00
19 h-20 h	64	64.00	70.10

5 结论

本文对PEMFC-CHP系统水热管理进行研究, 建立PEMFC输出模型和热电联产模型, 并设计出一套热回收系统用于燃料电池系统, 该热回收系统能在燃料电池进行电化学反应期间, 高效回收电堆产出的废热。结合热回收系统提出PID控制算法, 通过控制冷却液水泵和热回收水泵的转速, 准确对电堆运行温度进行控制, 将电堆运行温度始终稳定在 $(70 \pm 3)^\circ\text{C}$ 。在增大电堆功率即增大外部负载的情况下, 热电联产效率会逐渐提高然后缓慢降低, 热电联产效率最高达到83.5%, 其中系统电效率34%, 热回收效率49.5%。在本文热回收的基础上, 后续研究将进一步考虑对PEMFC阴极出口尾气以及空压机后的高温高压空气中的热量进行回收, 进一步提升热电联产效率。

参考文献

- [1] GAO J W, LI M, HU Y F, et al. Challenges and developments of automotive fuel cell hybrid power system and control[J]. Science China Information Sciences, 2019, 62(5): 1-25.
- [2] CHEN Q, ZHANG G B, ZHANG X Z, et al. Thermal management of polymer electrolyte membrane fuel cells: a review of cooling methods, material properties, and durability[J]. Applied Energy, 2021, 286: 116496.
- [3] 令狐磊, 王磊, 张财志, 等. 无人机用燃料电池动力系统分析研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(12): 47-51. LINGHU Lei, WANG Lei, ZHANG Caizhi, et al. Analysis and research on fuel cell power system for unmanned aerial vehicle[J]. Power Electronics, 2020, 54(12): 47-51(in Chinese).
- [4] 侯健, 杨铮, 贺婷, 等. 质子交换膜燃料电池热管理问题的研究进展[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(1): 19-30. HOU Jian, YANG Zheng, HE Ting, et al. Research progress on thermal management of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(1): 19-30(in Chinese).
- [5] 熊焰, 吴杰康, 王强, 等. 风光气储互补发电的冷热电联供优化协调模型及求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3616-3625. XIONG Yan, WU Jiekang, WANG Qiang, et al. An optimization coordination model and solution for combined cooling, heating and electric power systems with complimentary generation of wind, PV, gas and energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3616-3625(in Chinese).
- [6] NGUYEN H Q, SHABANI B. Proton exchange membrane fuel cells heat recovery opportunities for combined heating/cooling and power applications[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 204: 112328.
- [7] AMPHLETT J, BAUMERT R, MANN R, et al. Performance modeling of the Ballard mark IV solid polymer electrolyte fuel cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1995, 142(1): 1-8.
- [8] AMPHLETT J C, MANN R F, PEPPEY B A, et al. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells[J]. Journal of Power Sources, 1996, 61(1/2): 183-188.
- [9] KARIMI M, REZAZADEH A. Dynamic modelling of PEMFC by adaptive neuro-fuzzy inference system[J]. International Journal of Electric and Hybrid Vehicles, 2016, 8(4): 289.
- [10] BRIGUGLIO N, FERRARO M, BRUNACCINI G, et al. Evaluation of a low temperature fuel cell system for residential CHP[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(13): 8023-8029.
- [11] HWANG J J. Thermal-electrochemical modeling of a proton exchange membrane fuel cell[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2006, 153(2): A216.
- [12] HWANG J J, ZOU M L, CHANG W R, et al. Implementation of a heat recovery unit in a proton exchange membrane fuel cell system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(16): 8644-8653.
- [13] HWANG J J, ZOU M L. Development of a proton exchange membrane fuel cell cogeneration system[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(9): 2579-2585.
- [14] 辛英超. PEM燃料电池热电联供系统设计与分析[D]. 青岛: 青岛大学, 2020.
- [15] 赵兴强. 水冷型质子交换膜燃料电池热管理系统研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
- [16] 陈士忠. 质子交换膜燃料电池水管理的实验与模拟[D]. 大连: 大连理工大学, 2010.

- [17] 王瑞敏. 基于神经网络辨识模型的质子交换膜燃料电池系统建模与控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
- [18] NIAKOLAS D K, DALETOU M, NEOPHYTIDES S G, et al. Fuel cells are a commercially viable alternative for the production of “clean” energy[J]. *Ambio*, 2016, 45(Suppl 1): S32-S37.
- [19] 彭其泽. 燃料电池发动机水热管理系统研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [20] GOU B, NA W, DIONG B. Fuel cells: modeling, control and applications[M]. American: Taylor and Francis Group CRC Press, 2010.
- [21] 国家质量监督检验检疫总局. 潜水电泵 试验方法: GB/T 12785—2002[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [22] 李晓嫣, 陈维荣, 刘志祥, 等. 家用燃料电池热电联供系统的建模与仿真[J]. *电源技术*, 2014, 38(12): 2274-2277.
LI Xiaoyan, CHEN Weirong, LIU Zhixiang, et al. Modeling and simulation of PEMEC-based CHP systems for residential application[J]. *Chinese Journal of Power Sources*, 2014, 38(12): 2274-2277(in Chinese).

收稿日期: 2021-05-29; 修回日期: 2021-12-09。



符昊宇

作者简介:

符昊宇(1996), 男, 硕士研究生, 研究方向为燃料电池水热管理以及热电联供研究, E-mail: fhy777@whut.edu.cn。

谢长君(1980), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源优化及控制技术。通信作者, E-mail: jackxie@whut.edu.cn。

朱文超(1993), 男, 博士研究生, 主要研究方向为燃料电池系统控制, 高效热点发电技术, E-mail: zhuwenchao@whut.edu.cn。

李浩(1976), 男, 副教授/硕士生导师, 主要研究方向为智能控制技术, E-mail: lihao@whut.edu.cn。

章雷其(1989), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为分布式电源, 储能及微电网等相关技术, E-mail: y_delta@163.com。

赵波(1977), 男, 博士, 教授级高工, 主要研究方向为分布式电源, 储能及微电网等相关技术, E-mail: zhaobozju@163.com。

宋洁(1982), 女, 高级工程师, 主要从事氢能储存与能源转化、压缩空气储能技术方向研究, E-mail: songjie@geiri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 张鹏)