

基于 OPC 技术的水冷 PEMFC 热管理控制系统

牛 茁, 张玉瑾, 邓惠文, 陈维荣, 刘志祥

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘 要: 为改善传统温度控制方法在水冷型质子交换膜燃料电池(PEMFC)系统工作中出现的冷却水泵和散热器风扇的强耦合特性, 该文提出一种流量跟随功率的改进温度控制策略。通过 OPC 技术(用于过程控制的 OLE)实现可编程逻辑控制器(PLC)和 Matlab 的实时通讯, 利用 Matlab/Simulink 模拟电堆功率和输出控制量。最后, 在水冷 PEMFC 热管理实验平台对流量跟随功率控制与传统温度控制策略进行实验对比, 实验结果表明, 流量跟随功率控制策略实现了冷却水泵和散热器风扇有效解耦, 具有较好的控制精度和响应速度, 取得了优于传统温度控制策略的控制效果, 能够满足水冷 PEMFC 系统对温度控制的需求。

关键词: 质子交换膜燃料电池; 耦合; PLC; 控制; OPC 技术

中图分类号: TP273; TM911.4 **文献标识码:** A

0 引 言

质子交换膜燃料电池是一种清洁和高效的新型发电装置, 具有效率高、寿命长和能量密度高等优点^[1]。电堆温度会对水冷型质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)的气体传输特性、膜的含水量、输出特性甚至工作寿命都会产生不同程度的影响^[2,3]。在 PEMFC 系统工作时, 约有一半能量以热能形式输出。为保持电堆工作温度的稳定, 同时维持合理的电堆内部温差^[4,5], 必须采用合适的温度控制方法, 及时将电堆内多余的热量排出, 从而保证电堆可靠、稳定地运行。

目前关于水冷燃料电池的温度控制方法已有大量研究。传统的控制方法主要采用 PID 控制(比例、积分、微分控制)。文献[6]已建立燃料电池热管理系统模型, 基于预测的智能 PID 算法有效地减小了超调。文献[7]基于 PEMFC 温度机理动态模型, 提出一种带积分环节的二维增量模糊控制器并实现了 PEMFC 温度的实时控制。文献[8,9]分别采用模糊增量 PID 和递归神经网络, 实现对燃料电池温度的控制。上述控制方法主要跟踪电堆温度的变化情况, 运用不同的算法对散热风扇或冷却水

泵进行控制, 由于温度控制系统具有纯滞后和大惯性等非线性特性, 会导致温度控制的滞后, 出现较大超调。同时, 基于模型的温度预测对系统数学模型的准确性要求较高, 控制的精确度和鲁棒性仍有不足, 且研究多局限于仿真分析。

综上所述, 本文提出一种流量跟随功率的改进温度控制策略, 实现冷却水泵和散热风扇的解耦。由于搭建的水冷 PEMFC 热管理测试平台无法实现对电堆功率的模拟, 因此在 Matlab/Simulink 中建立电堆动态数学模型实现功率的模拟, 利用 OPC, 即用于过程控制的 OLE(object linking and embedding)技术完成 Matlab 与可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)的实时通讯和数据传输。最后, 针对本文提出的控制策略, 在搭建的实验平台上进行对比实验验证。

1 电堆动态模型

质子交换膜燃料电池在负载电流大幅变化时, 电堆的输出电压会出现下过冲和上过冲现象^[10]。当电流阶跃上升时, 阳极会出现短时缺水, 电堆内阻增加, 供气系统来不及补充电堆所需的空气, 导致电压发生下过冲现象, 随着空气供给逐渐充足,

收稿日期: 2016-11-24

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAG08B01); 国家自然科学基金面上项目(51677157)

通信作者: 陈维荣(1965—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事智能监测技术和新能源应用等方面的研究。wrchen@home.swjtu.edu.cn

电压小幅上升后趋于稳定。当电流阶跃下降时,电堆内阻减小且空气过量,将导致电压出现上过冲,随后小幅下降后趋于稳定。在此过程中,电堆的输出功率也会出现下过冲和上过冲现象。在水冷 PEMFC 热管理测试平台中电阻型加热管的电流可直接换算得到模拟电堆电流,由于测试平台只能模拟电堆的产热效果,而不能模拟电堆电压和功率在抽取电流阶跃变化时的动态响应情况。因此本文首先建立电堆动态数学模型,通过电堆电流得到对应的电堆输出功率,水泵频率跟随电堆动态模型得到的功率值变化,从而实现控制器对 PEMFC 热管理系统的控制。

单体电池由各个模块层构成,化学反应生成水时的理想标准电势为 1.229 V,由于膜中存在欧姆过电压 V_{ohm} 、阴极侧催化剂存在活化过电压 V_{act} 及表示电流电压静态关系的浓差极化过电压 V_{con} ,实际电势随平衡电势的降低而下降。单片电池的压降取决于反应分压和膜的含水量,根据文献[11,12]建立的 PEMFC 输出特性经验公式,可得单电池输出电压为:

$$V_{fc} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohm} - V_{con} \quad (1)$$

式中, E_{Nernst} ——能斯特开路电压, V。

能斯特开路电压可表示为:

$$E_{Nernst} = 1.229 - 8.5 \times 10^{-4}(T_{fc} - 298.15) + 4.308 \times 10^{-5} \times T_{fc} \times [\ln p_{H_2} + 0.5 \times \ln p_{O_2}] \quad (2)$$

式中, T_{fc} ——电堆工作温度, K; p_{H_2} ——阳极氢气的有效分压, kPa; p_{O_2} ——阴极氧气的有效分压, kPa。

活化极化过电压产生于移动电子在阴阳极之间形成化学键的过程中,可表示为:

$$V_{act} = \zeta_1 + \zeta_2 T_{fc} + \zeta_3 T_{fc} [\ln(c_{O_2})] + \zeta_4 T_{fc} [\ln(I_{st})] \quad (3)$$

式中, $\zeta_1 \sim \zeta_4$ ——燃料电池经验常数; I_{st} ——电堆电流, A; c_{O_2} ——气液界面氧气的溶解浓度, mol/cm³。

气液界面氧气的溶解浓度由亨利定律可得:

$$c_{O_2} = 0.197 \times p_{O_2} \times \exp\left(\frac{498}{T_{fc}}\right) \quad (4)$$

欧姆过电压可表示为:

$$V_{ohm} = I_{st} R \quad (5)$$

式中, R ——单电池膜阻抗, Ω 。

由电阻定律得:

$$R = \frac{\rho \times l}{A_{fc}} \quad (6)$$

式中, ρ ——膜电阻率,与膜的含水量、电流和活化面积有关; l ——膜质子交换膜的厚度, cm; A_{fc} ——单体电池的活化面积, cm²。

浓差极化过电压可表示为:

$$V_{con} = -a \ln\left(1 - \frac{i}{i_{max}}\right) \quad (7)$$

式中, a ——常数; i_{max} ——最大电流密度, A/cm²; i ——实际电流密度, A/cm²。

实际电流密度可表示为:

$$i = \frac{I_{st}}{A_{fc}} \quad (8)$$

最终, N 片单体电池串联组成了燃料电池堆,电堆电压为单片电压之和,假设所有的单片电池是完全相同的,燃料电池电压 V_{st} 和功率 P_{st} 可分别表示为:

$$V_{st} = NV_{fc} \quad (9)$$

$$P_{st} = NV_{fc} I_{st} \quad (10)$$

根据式(1)~式(10)建立燃料电池动态数学模型,模型动态响应曲线如图 1 所示,该模型能正确反映电堆电压和输出功率的动态响应特性。

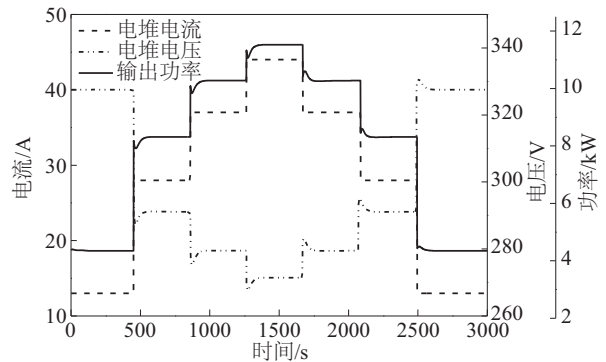


图1 电堆电压和功率动态响应

Fig. 1 Dynamic response of stack voltage and power

2 水冷 PEMFC 温度控制策略设计

2.1 水冷 PEMFC 温度控制原理

水冷 PEMFC 热管理系统的工作原理如图 2 所示。电堆温度控制的执行机构为冷却水泵和散热器风扇。通过控制散热风扇的电压来调节电堆入口温度,控制冷却水泵的频率调节电堆冷却水进出口温差,冷却水泵和散热风扇的协调控制实现电堆工作温度的稳定。

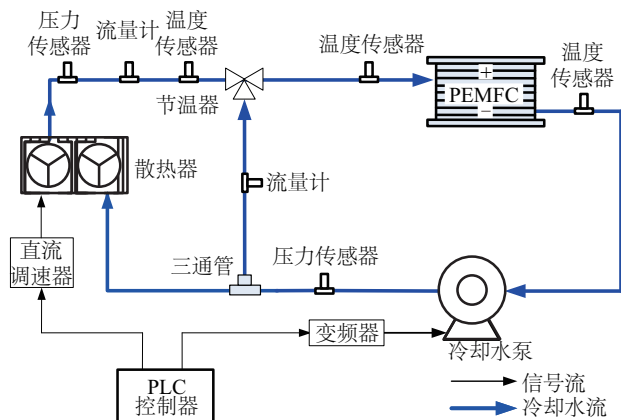


图2 水冷 PEMFC 热管理系统工作原理

Fig. 2 Operating principle of thermal management control system for water-cooled PEMFC

2.2 流量跟随功率控制策略

传统的温度控制策略通过 2 个独立的 PID 控制器分别控制水泵和散热风扇, PID 控制器是典型的闭环反馈控制, 本身具有时滞问题, 同时温度控制系统的延时特性, 使得在传统控制策略下, 当负载动态变化时, 温度超调量叠加、波动较大、调节时间较长, 不利于热管理系统的稳定。因此本文提出一种流量跟随功率控制水泵和 PID 控制器控制散热器风扇相结合的复合控制策略, 流量跟随功率温度控制原理如图 3 所示, 实现水泵和散热器风扇的解耦, 从而改善负载动态变化时的温度波动。

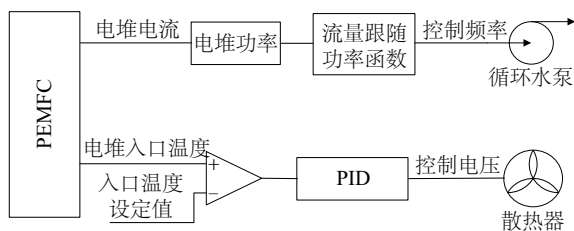


图3 流量跟随功率温度控制原理

Fig. 3 Temperature control principle of flow-following-power

流量跟随功率控制策略利用测量得到的电堆功率对水泵频率进行直接控制, 对系统运行过程中温差可能出现的状态偏差, 提前实施相应的调控措施。流量跟随功率控制策略为前馈控制, 在一定程度上能够解决反馈控制的时滞问题, 控制策略跟踪变化量的改变使得水泵和散热风扇的控制实现解耦。前馈-反馈控制的结合使两者互相补充, 提升了时滞系统的控制效果。流量跟随功率控制策略首

先在电堆冷却水进出口温差固定的条件下, 得到水泵频率和电堆输出功率的关系, 由于水泵频率与冷却水流量成正比, 故可由水泵频率值得到冷却水流量, 流量跟随功率控制策略可通过以下步骤实现:

1) 根据 PEMFC 系统的温度特性和冷却水泵的特性曲线, 为达到预设的温差对每个电堆功率值所需的冷却水流量进行预估, 得到水泵频率值与电堆功率的函数关系。

2) 利用实际测试系统对求得的水泵频率值进行实验修正, 获取对应的准确频率值。

3 基于 OPC 技术的 PLC 与 Matlab 实时通讯

3.1 OPC 通讯技术

OPC 以微软公司的 OLE (object linking and embedding) 技术为基础, 它的制定是通过提供一系列标准的 OLE/COM (component and model) 接口完成的, 可允许在自动化/PLC 应用、现场设备和基于 PC 的应用程序之间进行实时的标准化数据交换。OPC 技术为基于 Windows 的应用程序和现场过程控制应用建立了桥梁, 为服务器和客户机的连接提供统一开放的接口标准和技术规范, 解决了各仪器接口不统一而无法通讯的问题, 使不同的系统和设备能便捷的通讯, 提高了工作效率^[13]。

使用 OPC 技术要确定 OPC 服务器和 OPC 客户端, OPC 服务器负责收集现场设备的数据信息, 通过标准 OPC 接口传递给 OPC 客户端, OPC 客户端处理 OPC 服务器提供的数据, 再反馈给 OPC 服务器。一般 OPC 服务器主要由服务器对象、组对象和数据项对象构成^[14]。OPC 架构和服务器层次关系如图 4 所示。

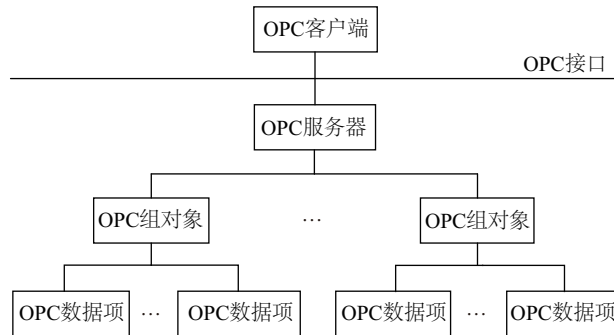


图4 OPC 架构和服务器层次关系图

Fig. 4 Framework of OPC and hierarchy diagram of OPC Server

目前主流的计算机程序语言都支持基于 OPC 通讯协议的程序开发,多数组态软件也带有 OPC 通讯接口。Matlab 7.0 以上版本中集成的 OPC 工具箱是一个 OPC 客户端数据访问软件,提供了服务器和客户端互相访问的通信机制,通过该 OPC 工具箱可以连接任何一个 OPC 数据服务器,实现对连接的 OPC 服务器数据的读写。SIMATIC NET 是西门子在自动化集成系统中提供的一个开放和高效的通信系统,可以实现现场仪表、西门子 PLC、主机和个人电脑的联网通信。SIMATIC NET 包含 OPC 服务,是服务器/客户端结构中客户端访问服务器的程序。当上位机软件不支持直接访问西门子 PLC 时,就需要通过 SIMATIC NET OPC 服务连接上位机和 PLC,实现基于 OPC 技术的上位机与 PLC 通讯。

3.2 控制系统的结构设计

在搭建的水冷 PEMFC 热管理测试系统中使用德国 Siemens 公司的 S7-1200 PLC 作为系统控制器,PLC 为可编程逻辑控制器,因其可靠性高、抗干扰能力强、灵活性强、编程简单等优点被广泛应用在控制领域,但 PLC 的梯形图语言无法实现复杂的逻辑运算,限制了先进控制算法在 PLC 中的应用。Matlab 语言以矩阵和向量为基本单位,科学计算力强大,运算效率高,能便捷的实现复杂逻辑运算,因此可在 Matlab 的 Simulink 组件中完成电堆功率的模拟。应用 OPC 技术实现 Matlab 和 PLC 的实时通讯,控制系统的结构设计如图 5 所示。Matlab 通过 OPC 通讯协议读取 PLC 采集的系统数据信息,在 Simulink 模型中运算后再通过 OPC 协议把输出量

传送给 PLC 进行系统的控制,并通过实验证明 OPC 技术的有效性,实现对流量跟随功率温度控制策略的实验研究。

3.3 S7-1200 PLC 与 Matlab 通讯的实现

首先利用 S7- 1200 编程软件 STEP7 对 SIMATIC PC 站进行组态,SIMATIC NET 对 PC 站进行配置。SIMATIC NET 把 PC 站设为 OPC 服务器,通过以太网与 S7-1200 PLC 实现通信,与 S7-1200 交换数据信息。在 Matlab 工作空间输入命令“opctool”可打开 OPC 工具箱,添加客户端和服务

器,把 Matlab 设为客户端访问 OPC 服务器,设置 Matlab 与 SIMATIC NET 的连接,把 SIMATIC NET 中设置的变量添加到客户端,从而实现 Matlab 与 S7-1200 PLC 的通讯。

PEMFC 动态模型输入变量为电堆电流,输出变量为电堆输出功率,流量跟随功率函数根据实时功率值可得对应的冷却水泵频率值。调用 OPC Write 模块、OPC Read 模块和 OPC Configuration 模块。输入量为电堆电流并添加到 OPC Read 模块,输出量为水泵频率并添加到 OPC Write 模块,通过 OPC 通讯协议两变量分别与 PLC 进行读写操作

4 实验验证与分析

4.1 水冷 PEMFC 热管理测试系统

本文对流量跟随功率控制策略和传统温度控制策略进行了实验测试,结合实验分析 2 种控制策略的控制效果,相关实验参数如表 1 所示。

表 1 实验参数

Table 1 Experiment parameters		
参数	传统温度控制策略	流量跟随功率控制策略
冷却水入口温度/℃	60	60
出入口温差/℃	5.5	5.5
电流变化/A	13~28~37~44	—
功率变化	—	4.26~8.21~
(对应电流)/kW	—	10.46~11.92

为方便对热管理系统开展研究,避免对燃料电池造成损伤,搭建水冷 PEMFC 热管理测试系统如图 6 所示。系统选用额定功率 15 kW 的电阻型加热管模拟 PEMFC 的热量输出,通过三相调压器可

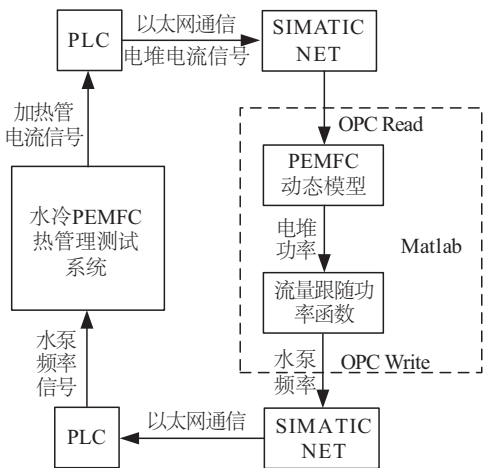


图5 控制系统的结构设计
Fig. 5 Structure design of control system

以调整加热管功率,从而控制产热量。系统控制器 S7-1200 PLC 完成对数据信息的采集记录和系统的控制。系统其余部分参照加拿大 Ballard 公司 FCvelocity-HD6 150 kW 燃料电池的热管理系统进行缩比搭建,包含交流水泵、节温器、散热器以及多个流量、温度和压力传感器等。



图6 水冷 PEMFC 热管理测试系统

Fig. 6 Thermal management test platform of water-cooled PEMFC

4.2 传统温度控制策略

根据表 1 中的实验参数测试得到传统温度控制策略的实验结果,冷却水流量和散热风扇电压曲线如图 7 所示,传统控制方法冷却水出入口及温差的曲线如图 8 所示。从图 7 可看出,电流阶跃变化时,冷却水流量和散热风扇电压出现较大的震荡现象且变化趋势相同,表明两者的作用相互影响,冷却水泵和散热风扇的控制有很强的耦合性。

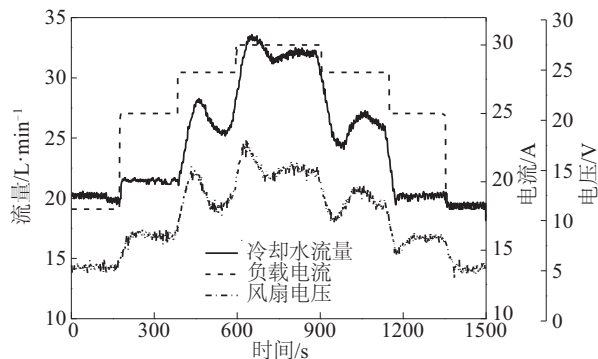


图7 传统控制策略的冷却水流量和散热风扇电压曲线

Fig. 7 Cooling water flow and fan voltage of traditional control strategy

图 8 中,实际温差小于 5.5°C 时冷却水流量给定最小值,当温差大于 5.5°C 时水泵 PID 控制器开始动作。由于散热风扇与水泵的耦合作用,导致冷却水出入口温度,尤其是冷却水出口温度震荡明显出现较大波动。控制水泵的 PID 控制器动作时,出口温度的最大超调量超过 1.1°C ,并出现反复震荡的现象,调节时间也较长。电流阶跃变化时的控制效果很不理想,冷却水出口温度出现大幅尖峰,会导致电堆内部出现短时高温,势必会影响电堆的性能和寿命。

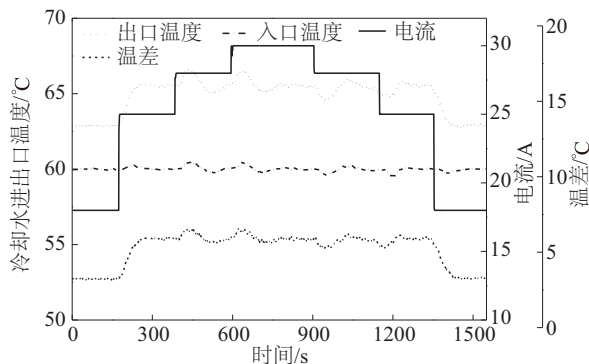


图8 传统控制策略的冷却水进出口温度和温差曲线

Fig. 8 Cooling water inlet and outlet temperature and temperature difference changes of traditional control strategy

4.3 流量跟随功率温度控制策略

在相同实验条件下,基于 OPC 通讯技术进行流量跟随功率控制策略的实验测试,流量跟随功率控制策略冷却水流量和风扇电压曲线如图 9 所示,冷却水进出口温度及温差曲线如图 10 所示。从图 9 中可看出 OPC 技术能够实现对电堆输出功率动态特性的模拟,冷却水流量能够跟随功率变化快速做

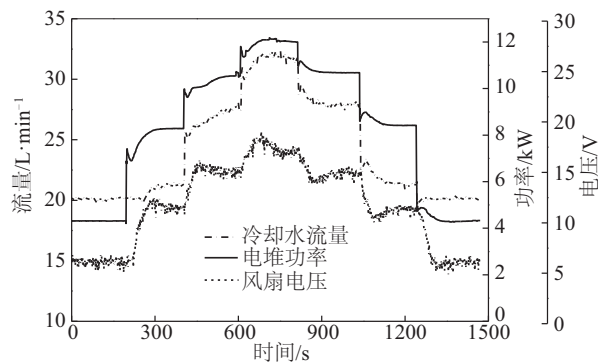


图9 流量跟随功率控制策略的冷却水流量和散热风扇电压曲线

Fig. 9 Cooling water flow and fan voltage of flow-following-power strategy

出反应,实现了冷却水流量对电堆功率的跟随,控制效果较好。此外,冷却水流量和散热风扇电压变化较为平缓,震荡减小,没有明显的相互作用效果,冷却水流量响应速度很快,冷却水泵和散热风扇的耦合作用减弱。

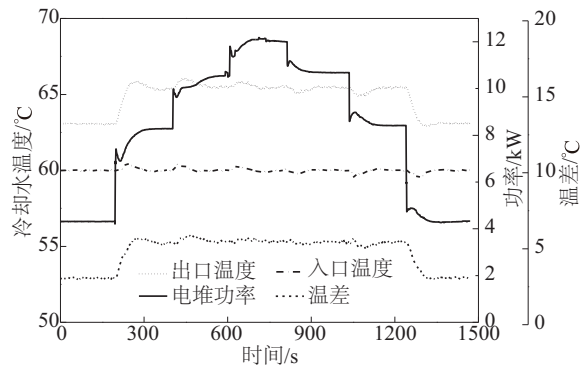


图 10 流量跟随功率控制策略的冷却水进出口温度和温差曲线

Fig. 10 Cooling water inlet and outlet temperature and temperature difference changes of flow-following-power control strategy

从图 10 可知,冷却水入口温度变化较为稳定,出口温度实际值与设定值偏差保持在 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,并保持基本稳定。为了方便对比 2 种控制策略的控制效果,表 2 为 2 种控制策略的实验对比结果。表 2 可见,本文控制方法的冷却水出口最大超调小于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,温差最大偏差相比于传统方法减少了 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$,并且调节时间从 168 s 减小到 108 s ,流量跟随功率控制明显优于传统的温度的控制。图 11 为 2 种控制策略的冷却水进出口温度变化对比,可以看出,流量跟随功率控制策略的各项参数均优于传统温度控制。在电流阶跃变化时流量跟随功率控制的冷却水出入口温度变化相对平缓,震荡明显减弱,超调量和波动减小,调节时间也

表 2 流量跟随功率和传统控制策略实验数据

Table 2 Experimental data of flow-following-power and traditional control strategy

温度控制策略	电堆冷却水温度/ $^{\circ}\text{C}$			平均调节时间/s
	入口最大超调	出口最大超调	温差最大偏差	
传统温度控制	0.50	1.12	0.75	168
流量跟随功率	0.50	0.64	0.50	108

大幅缩短。由于 2 种控制策略对散热风扇控制方法相同,冷却水出口温度控制效果提升程度要大于冷却水入口温度。

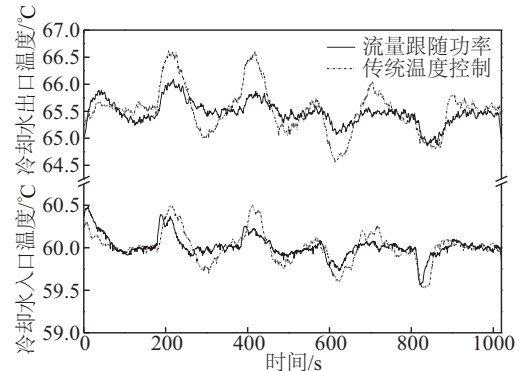


图 11 流量跟随控制策略与传统控制策略的冷却水进出口温度变化对比

Fig. 11 Inlet and outlet temperature changes comparison of flow following power control strategy and traditional control strategy

流量跟随功率控制根据 2 个不同变化率分别控散热风扇和冷却水泵,将前馈控制与反馈控制同时应用在温度控制中,很大程度上解决了散热风扇和冷却水泵的耦合问题,冷却水流量可根据电堆输出功率的变化快速响应,保证热管理系统温度的稳定,在电流大幅加载时避免电堆内部的局部高温,提高电堆的工作性能,延长电堆的寿命。综合上述的实验分析,流量跟随功率控制策略优于传统控制策略。

5 结 论

1) 本文针对水冷型 PEMFC 传统温度控制策略中存在的散热器风扇和冷却水泵的强耦合特性,将前馈与反馈控制相结合,提出一种流量跟随功率控制冷却水泵的水冷 PEMFC 热管理系统控制策略。为了解决水冷 PEMFC 热管理实验平台无法模拟电堆功率动态响应特性的问题,在 Matlab/Simulink 中搭建了电堆的动态数学模型,利用 OPC 通讯技术实现 PLC 和 Matlab 的实时通讯和数据传输,完成对电堆输出功率的模拟。

2) 在搭建的水冷 PEMFC 热管理实验平台中,将传统温度控制策略和流量跟随功率控制策略进行实验对比,实验结果表明提出的流量跟随功率控制优于传统的温度控制,能有效对冷却水泵和散热

器风扇进行解耦,可在电流变化时快速、准确地控制电堆内部的工作温度,使其维持在正常的工作范围,避免电堆内部出现短时高温,损坏质子交换膜。从而提高 PEMFC 的工作性能,并延长其工作寿命,具有良好的控制效果。

[参考文献]

- [1] Peighambaroust S, Rowshanzamir S, Amjadi M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(1): 9349—9384.
- [2] Liu Zhixiang, Zhang Haiyong, Wang Cheng, et al. Numerical simulation for rib and channel position effect on PEMFC performances[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, 35(7): 2802—2806.
- [3] Zhao Dongdong, Gao Fei, Massonnat P, et al. Parameter sensitivity analysis and local temperature distribution effect for a PEMFC system[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2015, 30(3): 1008—1018.
- [4] Kandlikar S G, Lu Zijie. Thermal management issues in a PEMFC stack: A brief review of current status[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(7): 1276—1280.
- [5] Rojas J D, Ocampo-Martinez C, Kunusch C. Thermal modeling approach and model predictive control of a water-cooled PEM fuel cell system[A]. *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*[C], Vienna, Austria, 2013.
- [6] 谷 靖, 卢兰光, 欧阳明高. 燃料电池热管理子系统建模与温度控制[J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2007, 47(11): 2036—2039.
- [6] Gu Jing, Lu Languang, Ouyang Minggao. Thermal management subsystem model and temperature control for fuel cells[J]. *Journal of Tsinghua University: Science and Technology*, 2007, 47(11): 2036—2039.
- [7] 胡 鹏, 曹广益, 朱新坚. 质子交换膜燃料电池温度模型与模糊控制[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(10): 1371—1376.
- [7] Hu Peng, Cao Guangyi, Zhu Xinjian. Temperature model and fuzzy control for the proton-exchange-membrane fuel cell[J]. *Control Theory and Application*, 2011, 28(10): 1371—1376.
- [8] 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.
- [8] Wang Binrui, Jin Yinglian, Chu Leimin, 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.
- [9] 李春华, 朱新坚. 基于递归模糊神经网络的 PEMFC 温度控制研究[J]. *热能动力工程*, 2012, 27(6): 721—725.
- [9] Li Chunhua, Zhu Xinjian. Study of the temperature control of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) based on a regressive fuzzy neural network[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2012, 27(6): 721—725.
- [10] Kim Sunhoe, Shimpalee S, Van Zee J W. The effect of stoichiometry on dynamic behavior of a proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) during load change[J]. *Journal of Power Source*, 2004, 135(1-2): 110—121.
- [11] Pukrushpan J T, Stefanopoulou A G, Peng Huei. *Control of fuel cell power systems*[M]. Berlin: Springer, 2004, 31—53.
- [12] Yang Yanxia, Luo Xu, Dai Chaohua, et al. Dynamic modeling and dynamic responses of grid-connected fuel cell[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2014, 39(26): 14296—14305.
- [13] Mahmoud M S, Sabih M, Elshafei M. Using OPC technology to support the study of advanced process control[J]. *ISA Transactions*, 2015, 55: 155—167.
- [14] 王 杰, 高昆仑, 王万召. 基于 OPC 通信技术的火电厂 DCS 后台控制[J]. *电力自动化设备*, 2013, 33(4): 142—147.
- [14] Wang Jie, Gao Kunlun, Wang Wanzhao. Thermal power plant DCS for background control based on OPC communication technology[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(4): 142—147.

THERMAL MANAGEMENT SYSTEM OF WATER-COOLED PEMFC BASED ON OPC TECHNOLOGY

Niu Zhuo, Zhang Yujin, Deng Huiwen, Chen Weirong, Liu Zhixiang

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

Abstract: In order to solve the strong coupling problem that exists during the operation process of the water-cooled proton exchange membrane fuel cell (PEMFC), a flow-following-power strategy focusing on temperature control was proposed in this paper. The OPC (OLE for Process Control) technology was introduced to achieve real-time communication between Matlab and PLC while the simulation of stack power and the output of control variable were completed in Matlab/Simulink. Finally, comparative experiments between the traditional control strategy and the flow-following-power strategy were made on a thermal management test platform of water-cooled PEMFC. The experimental results indicate that the flow-following-power strategy is superior to the traditional control strategy in controlling precision and response speed by means of effectively decoupling between water pump and radiator fan. The proposed strategy can well satisfy the temperature controlling requirements of the water-cooled PEMFC.

Keywords: PEMFC; coupling; PLC; control; OPC technology