

便携式燃料电池电源系统的设计与控制研究

付 洋, 戴朝华, 张玉瑾, 陈维荣, 郭高易

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘 要: 为了克服传统便携式电源的不足,提出一种以燃料电池为主电源、蓄电池为辅助电源的便携式燃料电池电源系统。根据空冷自增湿燃料电池的运行特点和输出响应,设计该便携式电源的系统结构和控制器的硬件单元,提出适用于燃料电池的控制策略,实现电源的稳定供电。基于提出的系统结构和控制策略研发一台 1.5 kW 便携式燃料电池电源并进行实际运行测试。经测试表明,所提的系统结构和控制策略有效可行。

关键词: 燃料电池; 便携式电源; 蓄电池; 控制策略

中图分类号: TM911.4

文献标志码: A

0 引 言

在医疗救援、抢险救灾、野外活动等特殊场合中,由于环境复杂,为了防止电能不能供给而造成的巨大损失,需要一种可稳定运行的便携式电源。便携式电源具有便携、小巧、环保等特点。目前常用的便携式电源有柴油发电机和铅酸蓄电池。柴油发电机存在工作噪音大、运行时释放有害气体等缺点;铅酸蓄电池存在体积大、备电时间过长、对环境温度要求苛刻等缺点^[1]。因此,十分有必要研发一种清洁、环保的新型便携式电源。

近年来,燃料电池凭借其高效率 and 绿色环保的优势,成为飞速发展的重要新能源。其中质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)以其比功率高、能量转换效率高、启动迅速和环境友好等一系列优点,在众多领域有着广阔的应用前景,得到全世界认可^[2]。其中以空冷技术与自增湿技术结合的空冷自增湿 PEMFC,由于该电池阴极采用与空气贯通的开放式结构设计,无外部水循环系统和空压机系统^[3],具有产业链短、系统结构简单、体积小、成本低、性能稳定可靠以及非常便于实现模块化设计等突出优点。

空冷自增湿燃料电池虽然具有诸多优点,但也存在输出特性较软、动态响应较慢、输出电压波动较大、启动时需要辅助电源等不足^[4]。为了克服这些缺点,本文提出一种适用于燃料电池的便携式电源系统结构,设计该

便携式电源的系统控制单元。该便携式燃料电池电源系统可连续稳定输出工频 220 V 交流电。最后根据提出的系统结构及控制策略研制 1 台 1.5 kW 的便携式燃料电池电源样机,并采用单片机实现其系统控制单元及控制策略。样机整体质量 34.49 kg,体积 71.8 L。测试结果表明,所提出的系统结构及控制策略满足便携式电源的工作要求,控制策略有效。

1 便携式燃料电池电源系统结构

1.1 PEMFC 工作原理

空冷自增湿 PEMFC 采用阴极敞开式结构,与外部空气直接相通,流经阴极流道的空气不仅可为电堆的化学反应提供必要的氧气,还能带走电堆反应所产生的热量^[5]。阳极采用的是封闭式结构,高纯氢气进入后,流经内部流场参与电堆的化学反应,反应后的尾气由出口排出。空冷自增湿 PEMFC 通过提高质子交换膜两侧的水浓度差^[6],增大反应生成水的扩散力,实现质子交换膜自增湿的目的。从而减去外加增湿装置,降低空冷自增湿 PEMFC 电堆辅助系统复杂程度,使其具有简单、易用的优点。

1.2 系统结构

便携式燃料电池电源系统主要由 PEMFC 电堆子系统、DC/DC 变换器、系统控制器、蓄电池、逆变电子系统等构成,如图 1 所示。

收稿日期: 2017-06-21

基金项目: 国家自然科学基金(51177138)

通信作者: 戴朝华(1973—), 男, 博士、副教授, 主要从事电力系统规划与运行优化、新能源发电方面的研究。daichaohua@swjtu.cn

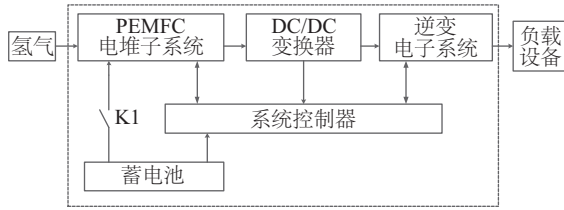


图1 燃料电池电源系统结构

Fig. 1 Fuel cell power system architecture

1.2.1 PEMFC 电堆子系统

PEMFC 电堆子系统包含 PEMFC 电堆、电堆冷却供氧风扇、空气过滤器、氢气进气阀、热敏电阻、尾气排气阀等器件。其结构框图如图 2 所示。

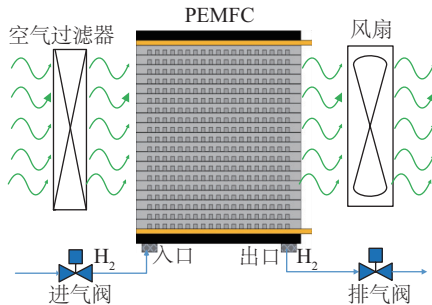


图2 PEMFC电堆子系统框图

Fig. 2 PEMFC system block diagram

本文提出的便携式燃料电池电源使用空冷自增湿 PEMFC 作为供电电池。空冷自增湿 PEMFC 电堆采用西南交通大学与江苏冰城公司联合开发的 1.5 kW 系列空冷自增湿 PEMFC 电堆。该电堆由 62 片单电池组成,额定功率为 1.5 kW,最高工作温度为 50 ℃,氢气工作压力范围为 0.05~0.07 MPa,输出电压范围为 31~62 V。

空冷自增湿 PEMFC 电堆在运行时阴极需要足够的氧气。一般通过电堆外置的冷却风扇转动将空气吸入电堆阴极流道。另一方面,PEMFC 电堆的发电效率为 40%~60%,其余的化学能均转换成热能,以热的形式排出。这部分热能将使 PEMFC 电堆的温度迅速升高,由文献[7]可知,质子交换膜需要在特定的温度下才能达到水合最佳状态。所以需要外置冷却风扇将多余的热量尽快散掉,让电堆催化剂的活性充分激活,使电堆输出性能最优,延长电堆寿命,避免对电堆造成不可逆的损害。

由上面的分析可知,空冷自增湿 PEMFC 电堆的冷却风扇不仅为阴极提供氧气,而且还帮助电堆散热。但是由于空气流量和电堆温度是一对相互耦合的量^[8],电堆温度依靠冷却风扇控制。所以只需使电堆工作在适当的温度,冷却风扇就能提供充足的空气流量,满足电堆对过氧比的要求,降低电堆的浓差极化。

空冷自增湿 PEMFC 电堆的温度使用热敏电阻来检测,其温度测试原理如图 3 所示。因为热敏电阻的阻值随着温度的变化而变化,所以可根据电阻的分压原理计算出热敏电阻 NTC 的阻值,从而根据阻值-温度曲线表获得对应的温度值。由上述分析推算出的温度计算公式如式(1)所示。

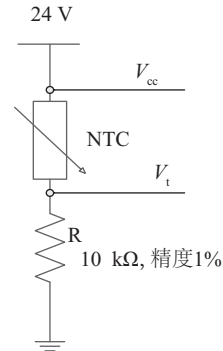


图3 温度测试电路

Fig. 3 Temperature test circuit

$$\begin{cases} R_{NTC} = \frac{(V_{cc} - V_t) \times R}{V_t} \\ T_t = \frac{B \times T_0}{B + T_0 \times \ln(R_{NTC}/R_0)} - 273.15 \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_{cc} 、 V_t ——热敏电阻两端的电压值; R ——高精度分压电阻的阻值; B ——热敏电阻 NTC 的 B 值常数; R_0 —— T_0 开氏温度时的阻值,均可通过热敏电阻阻值-温度曲线表获得; R_{NTC} ——计算出的热敏电阻阻值; T_t ——测量出的电堆当前温度值,℃。

PEMFC 温度的控制,由图 4 所示的拓扑结构来进行。控制系统根据电堆输出电流 I_{out} 计算出当前电流下使燃料电池运行性能最优的电堆温度 $T_{opt}^{[9]}$,再与当前电堆实际温度 T_{stack} 比较得到误差信号 e 。控制器根据误差信号 e 来调整电堆冷却风扇的控制电压,改变风扇转速,进而实现电堆温度的实时控制。最终完成使电堆工作在最优工作温度附近的控制。

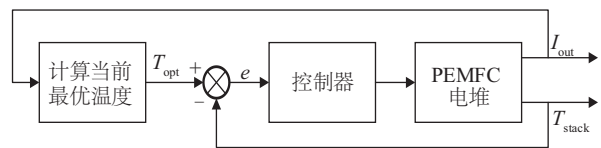


图4 PEMFC温度控制拓扑

Fig. 4 PEMFC temperature control topology

1.2.2 逆变电子系统

由于几乎所有的大功率电器都需要工频交流电供电,而空冷自增湿 PEMFC 采用直流电输出,所以就需要逆变电子系统将直流电转换为工频交流电。

燃料电池的输出电压范围为 31~62 V, 电压波动较大, 这就给 DC/AC 逆变器的设计增加了很大的难度。为了简化系统结构, 在逆变器前增加非隔离 DC/DC 模块, 将波动的电压转换为恒定的 48 V。然后再将 48 V 直流电逆变为 220 V 交流电。

燃料电池刚启动时不具备带载能力, 直接切入大功率负载会使燃料电池的性能变差, 降低其使用寿命。在启动时加入辅助负载不仅能有效降低催化剂碳载体的腐蚀, 还能提高燃料电池的单电池电压均衡性^[10], 可很大程度上减缓上述情况, 保证燃料电池的性能。所以在逆变电子系统中加入 1 个 300 W 的辅助负载。在燃料电池启动时先切入辅助负载, 运行 10 s, 等系统稳定后, 再切除辅助负载切入真实负载。

2 系统控制器的设计

根据图 2 便携式燃料电池电堆子系统结构图及上一节的分析可知, 空冷自增湿 PEMFC 电堆运行期间需要监测的参量有电堆入口氢气压力、电堆温度、电堆输出电压、电堆输出电流, 与空冷自增湿 PEMFC 电堆启停相关需要控制的电磁阀有氢气进气阀、尾气排气阀、负载断路器和电堆冷却风扇。针对需要采集的监测参量和需要控制的电磁阀, 设计的 PEMFC 发电控制系统硬件结构框图如图 5 所示。

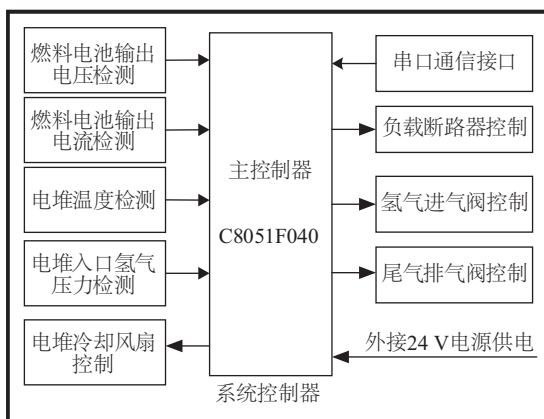


图5 PEMFC发电控制系统硬件结构框图

Fig. 5 PEMFC control system hardware block diagram

系统控制器的主控单元芯片选用增强型 51 单片机 C8051F040, C8051F040 内部集成 3 个 12 位多通道 ADC、2 个 12 位 DAC 通道、5 个串口通信接口、4 个 16 位定时器、高达 100 多个 IO 口, 最高工作频率可达 72 MHz, 具有单周期乘法和硬件除法。集成的 ADC 可用于采集 PEMFC 的输出电压、输出电流、电堆温度和入口氢气压力, 采集电压范围为 0~3.3 V, 转换时间高达 1 μ s; 集成的 DAC 通道可用于 PEMFC 电堆冷却

风扇控制, 输出电压范围为 0~3.3 V; 集成 IO 口可用于氢气进气阀、尾气排气阀、负载断路器的控制, 其输出高电平为 3.3 V, 低电平为 0 V。

2.1 模拟信号采样电路设计

空冷自增湿 PEMFC 发电控制器监测的电堆温度、氢气入口压力、电堆输出电流需要转换成对应的电压信号后才能用 C8051F040 集成的 ADC 进行采集。电堆温度可用热敏电阻来检测。热敏电阻阻值与所测温度一一对应, 所以只需获得当前热敏电阻阻值, 便可计算出对应的温度。PEMFC 发电控制器温度采集电路按照图 3 所示的电阻分压测温电路进行设计, 只需采集电压 V_{cc} 、 V_i , 即可按照式(1)计算出对应的温度值; 电堆入口氢气压力采用压力传感器, 将入口压力物理信号转变成 0~5 V 电压信号, 再经采样调理电路处理后, 由主控制器采集; 电堆输出电流采用霍尔电流传感器将电流信号转变成 0~5 V 电压信号, 再经采样调理电路处理后, 由主控制器采集。

通过传感器的变换处理后, 需要检测的 4 个参量转变成 5 个对应的电压信号。由于 C8051F040 集成的 ADC 变换器可采集的模拟信号范围是 0~3.3 V^[11], 故需要对将要采集的 5 个电压信号进行变换处理, 通过采样调理电路缩放到 ADC 可接收的范围才能由主控制器的 ADC 通道采集。电压信号在经运放调理后得到采样信号 U_s , U_s 随后接入主控制器的模拟采样通道进行采集, 其采样电路如图 6 所示。

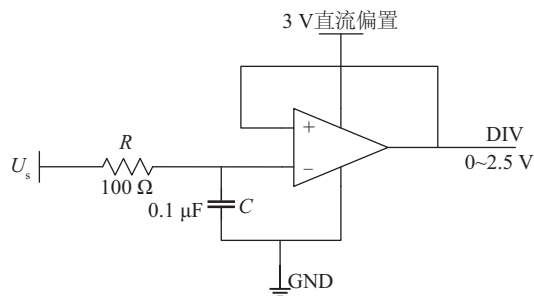


图6 信号采样电路

Fig. 6 Signal sampling circuit

2.2 开关控制信号驱动电路设计

PEMFC 发电控制器涉及氢气进气电磁阀、尾气排气电磁阀、负载断路器 3 个开关控制设备, 需要大电流驱动。电磁阀、直流断路器驱动电流较大, 正常工作时额定电流约 1 A, 峰值电流约 3 A。系统选择的电磁阀、断路器供电电压为 24 V, 而 C8051F040 主控制器输出的 IO 开关信号高电平为 3.3 V, 不能直接驱动电磁阀及直流断路器, 需要设计大功率驱动电路对电磁阀及直流

断路器进行控制^[12]。驱动电路采用隔离功率驱动电路,主控制器 C8051F040 输出的控制信号 K1Driver 经光耦隔离 MOSFET 继电器 G3VM-61B 进行隔离与放大后,再通过 24 V 继电器实现电磁阀、负载断路器的开关控制。该驱动电路即实现光电隔离,保护主控制器 C8051F040,又起到功率驱动作用。

3 系统控制器工作流程

空冷自增湿 PEMFC 发电控制器的作用是负责便携式燃料电池电源系统中空冷自增湿 PEMFC 电堆的启动、运行、停止,使 PEMFC 电堆工作在最佳性能。在启动 PEMFC 电堆后,PEMFC 发电控制器便按照预先设置的参数和控制策略运行。

PEMFC 发电控制器主控程序启动后,先设置系统初始参数,断开电磁阀,随后进入电源系统的待机状态。这时,控制器不断采集 PEMFC 电堆状态参数并上传,并等待有效控制命令。当接收到 PEMFC 启动命令后,便启动 PEMFC 电堆发电。待 PEMFC 输出电压 V_{Stack} 达到 33 V 后,主控程序才闭合负载断路器,以避免在启动时立即闭合负载断路器,切入负载,拉低电堆端电压而产生电堆反极化现象。控制系统主控程序流程图如图 7 所示。

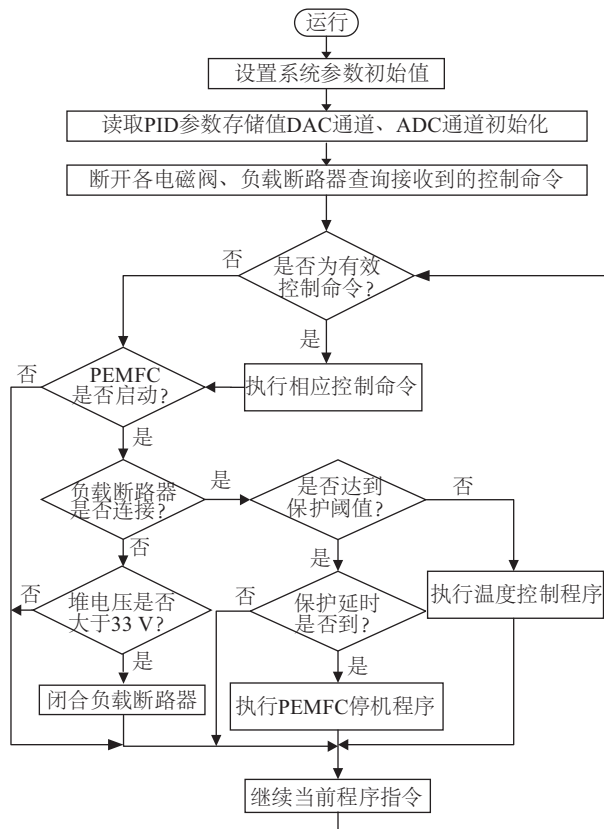


图7 控制流程图

Fig. 7 Control flow chart

便携式燃料电池电源系统中 PEMFC 电堆的启停控制流程如图 8 所示。

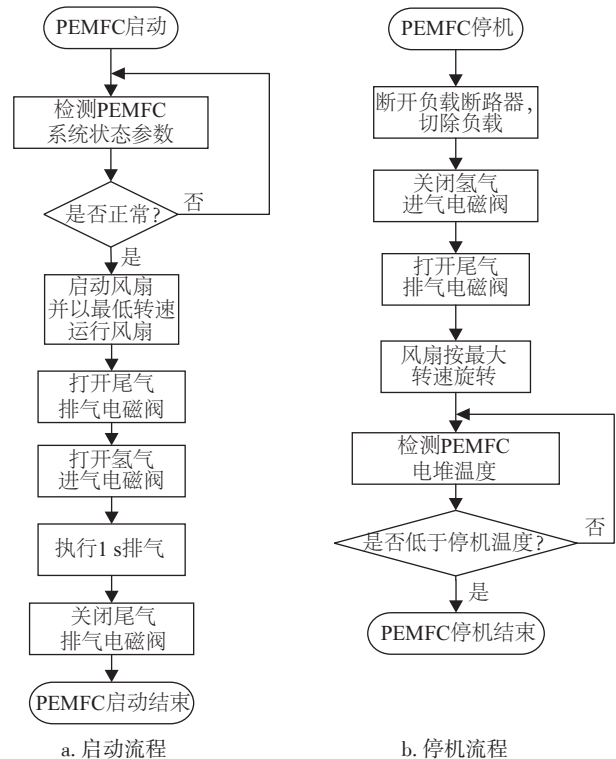


图8 启停流程

Fig. 8 Start and stop process

空冷自增湿 PEMFC 电堆的尾气排放控制由 C8051F040 主控制器的定时器实现,避免占用 CPU 的控制时间。排气周期及排气间隔初始参数参照 PEMFC 数据手册的建议参数进行设置,排气间隔为 200 ms,排气周期可根据输出电流进行实时调整,其关系表达为^[13]:

$$T_{\text{Purge}} = T_{\tau} / I_{\text{Stack}} \quad (2)$$

式中, T_{τ} ——常数,数据手册建议为 2300 Amp·s。

4 样机实现与运行测试

根据所提便携式燃料电池电源系统结构及系统控制策略,研制 1 台 1.5 kW 燃料电池电源样机。其样机内部结构如图 9 所示,可完全封装为箱体。为了验证样机系统的性能,对样机进行实际运行测试,测试现场如图 10 所示。其中,由便携式燃料电池电源样机给气象雷达和雷达上位机供电。

国家发布实施的交流电源标准 GB/T 14714 规定,交流电源的电压和频率的最大波动率为 10%。为了检验燃料电池电源样机是否满足这个标准。在电源样机稳定运行时,将示波器探头连接到电源输出端,交流供



图9 样机箱体图

Fig. 9 Prototype box



图10 测试现场

Fig. 10 Testing platform

电波形如图 11 所示。从图 11 中可看到,交流输出稳定正弦波形,其有效值为 222 V,与国家交流标准电压 220 V 相比,上下波动不超过 10%。其频率为 49.83 Hz,与工频国标 50 Hz 相比,上下波动不超过 5%。输出性能符合便携式电源的国家标准。

之后进行工况测试,按图 10 接好各设备后,使燃料电池电源样机正常启动并工作于待机模式。然后控制上位机开启雷达,让雷达完成 1 个完整的运行周期。之后,启动燃料电池电源停机流程。整个运行流程中样机的功率输出曲线如图 12 所示。雷达启动后,先使用零仰角工作,发射低频雷达波,功率消耗情况如 A 段所示。之后调整仰角,并测试雷达发射各种频率雷达波的情况,其功率消耗如 B 点之后所示。

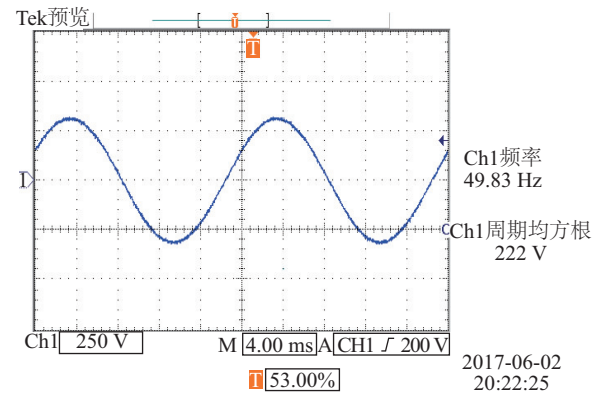


图 11 输出波形

Fig. 11 Output waveform

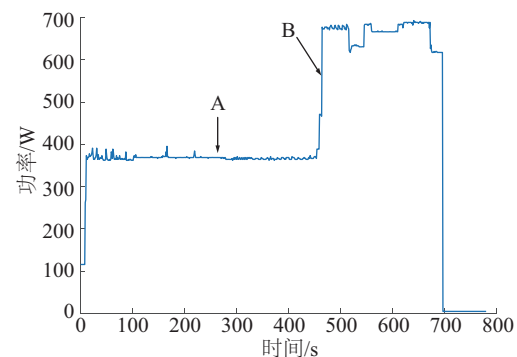


图 12 功率曲线

Fig. 12 Power curve

从图 12 可看出,雷达运行时的功率变化情况较多。为了验证在负载功率变化时电源输出波形是否稳定,提取分别在 A、B 时刻下的示波器波形,如图 13 所示。可看出当功率变化后,电压波形依然维持在标准的正弦波形,且输出频率保持在 49.9 Hz 未改变。

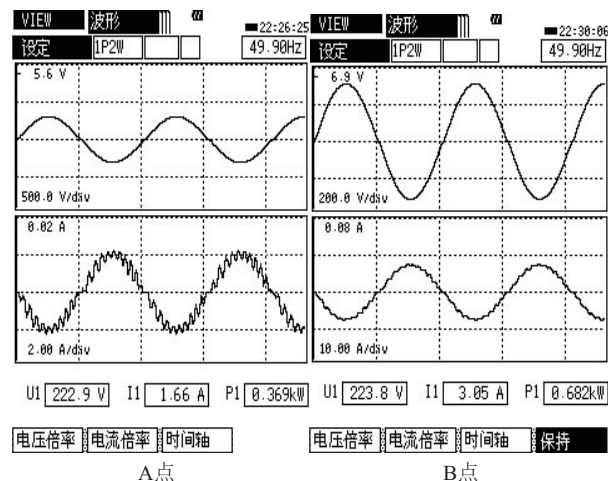


图 13 示波器电压波形

Fig. 13 Waveform of oscilloscope voltage

经过实际工作测试,研制的便携式燃料电池电源系统工作正常稳定,所提出的系统结构、控制策略及系统控制单元工作流程适用于燃料电池并且能满足便携式电源的工作要求。

5 结 论

针对目前便携式电源的不足以及燃料电池优良的应用前景,本文提出基于燃料电池的便携式电源替代传统的便携式电源。新型的便携式燃料电池电源可降低污染,减轻重量,缩短备电时间。

主要工作及结论总结如下:

1)提出一种便携式燃料电池系统总体方案。在系统方案中给出便携式燃料电池电源系统结构框图、功能单元结构框图。所提出的总体方案为后续系统控制方法研究、硬件设计实现的打下了有利基础。

2)提出空冷型燃料电池控制策略。通过实际测试表明,控制策略可有效解决电堆运行中存在的动态响应慢、输出特性软等问题,控制性能优越,满足空冷自增湿 PEMFC 系统最优温度控制的动态性能要求。

3)设计便携式燃料电池电源硬件系统,研制便携式燃料电池电源样机。在对空冷自增湿 PEMFC 控制方法的基础上,设计 PEMFC 系统控制器。通过样机实际运行表明该设计的控制策略实用、有效,燃料电池电源样机运行性能优越,各子系统工作正常,具有较高的实用与推广价值。

随着燃料电池技术的不断发展,燃料电池制造成本的下降,燃料电池作为一种高效节能、环境友好的发电工具,必将拥有更加广泛的应用空间。

[参考文献]

- [1] 张纯江,董杰,刘君,等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG CHUNJIANG, DONG JIE, LIU Jun, et al. Control strategy of hybrid energy storage system with battery and supercapacitor [J]. Journal of electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [2] 衣宝廉,俞红梅. 质子交换膜燃料电池关键材料的现状与展望[J]. 电源技术, 2003, 27(S1): 175-178, 182.
YI B L, YU H M. Present situation and prospect of key materials for proton exchange membrane fuel cell[J]. Power technology, 2003, 27(S1): 175-178, 182.
- [3] 彭跃进,彭赞,李伦,等. 质子交换膜燃料电池启动策略[J]. 工程科学学报, 2016, 38(3): 417-424.
PENG Y J, PENG Y, LI L, et al. Proton exchange membrane fuel cell startup strategy [J]. Chinese journal of engineering, 2016, 38(3): 417-424.
- [4] 游志宇,陈维荣,戴朝华,等. 燃料电池备用电源系统设计与控制研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 167-173.
YOU Z Y, CHEN W R, DAI C H, et al. Research on design and control of fuel cell standby power supply system [J]. Power automation equipment, 2014, 34(3): 167-173.
- [5] 张传升,陈凤祥,高昆鹏,等. 1 kW 自呼吸 PEMFC 堆控制因素试验[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(6): 890-894.
ZHANG C S, CHEN F X, GAO K P, et al. 1 kW self-breathing PEMFC reactor control factor test [J]. Journal of Tongji University (nature science), 2011, 39(6): 890-894.
- [6] 彭赞,欧阳家俊,阙海丹,等. 考虑环境温湿度的空冷 PEMFC 最佳工作温度研究与控制[J]. 太阳能学报, 2016, 37(6): 1423-1430.
- [6] PENG Y, OUYANG J J, QUE H D, et al. Research and control of optimum operating temperature of air-cooled PEMFC considering environmental temperature and humidity [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(6): 1423-1430.
- [7] 卫东,郑东,褚磊民. 空冷型质子交换膜燃料电池堆最优性能输出控制[J]. 化工学报, 2010, 61(5): 1293-1300.
WEI D, ZHENG D, CHU L M. Optimal performance output control of air-cooled proton exchange membrane fuel cell stack [J]. Journal of chemical industry, 2010, 61(5): 1293-1300.
- [8] 王斌锐,金英连,褚磊民. 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): 10-9114.
WANG B R, JIN Y L, CHU L M. Optimal temperature and fuzzy incremental PID control of air-cooled fuel cell [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(8): 109-114.
- [9] LI Q, CHEN W R, 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: 179-183.
- [10] 游志宇,陈维荣,彭赞,等. 大功率空冷自增湿 PEMFC 温度控制方法[J]. 西南交通大学学报, 2015, 50(1): 44-50.
YOU Z Y, CHEN W R, PENG Y, et al. Control method of high power air-cooled self-humidification PEMFC [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2015, 50

- (1): 44-50.
- [11] 江贤志, 刘华章, 张教育, 等. 基于C8051F020单片机的RS485串行通信设计[J]. 电子测量技术, 2014, 37(3): 121-124.
- JIANG X Z, LIU H Z, ZHANG J Y, et al. Design of RS485 serial communication based on C8051F020 single chip microcomputer[J]. Electronic measurement technology, 2014, 37(3): 121-124.
- [12] 马晓虹, 吴延海, 尹向雷. 直流电机的IR2110驱动控制设计及DSP实现[J]. 微型机与应用, 2013, 32(15): 34-36+44.
- MA X H, WU Y H, YIN X L. Design and DSP realization of IR2110 drive control for DC motor[J]. Microcomputer and application, 2013, 32(15): 34-36, 44.
- [13] 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(1): 68-76.
- YOU Z Y, CHEN W R, ZHANG D y, et al. Design of PEMFC test platform for air-cooled self-humidification[J]. Journal of electronic measurement & instrumentation, 2015, 29(1): 68-76.

DESIGN AND CONTROL OF PORTABLE FUEL CELL POWER SUPPLY SYSTEM

Fu Yang, Dai Chaohua, Zhang Yujin, Chen Weirong, Guo Gaoyi

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

Abstract: In order to overcome the shortcomings of traditional portable power supply, a portable fuel cell power supply system with fuel cell as the main power supply and battery as the auxiliary power supply is proposed. According to the operation characteristics and output response of the air-cooled self-humidifying fuel cell, the system structure of the portable power supply and the hardware unit of the controller are designed, and the control strategy suitable for the fuel cell is put forward, which realizes the stable power supply of the power supply. Based on the proposed system structure and control strategy, a 1.5 kW portable fuel cell power supply is developed and tested. The test results show that the proposed system structure and control strategy are effective and feasible.

Keywords: fuel cell; portable power supply; battery; control strategy