

燃料电池备用电源系统设计与控制研究

游志宇, 陈维荣, 戴朝华, 李 奇

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为了弥补燃料电池作为独立备用电源存在的不足, 提出一种以燃料电池为主电源、蓄电池为辅助电源的备用电源系统。根据燃料电池备用电源系统特性, 提出了系统电压阈值补偿控制策略及蓄电池充放电控制策略, 实现备用电源的不间断切换及动态补偿。基于提出的系统结构和控制策略, 研发了一台 3 kW 燃料电池备用电源样机系统。实际测试表明, 所提的系统结构及控制策略实用、有效, 所设计的燃料电池备用电源系统可用作不间断备用电源。

关键词: 燃料电池; 备用电源; 电压阈值; 控制; 不间断切换; 补偿

中图分类号: TM 911.4

文献标识码: B

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.03.028

0 引言

由于恶劣天气条件、自然灾害或者输电线路故障等造成公用市电网断电时, 政府、医院、电信、银行等一些特定部门的直流设备就需要一种可以连续运行数小时甚至数日的可靠直流备用电源, 以防止市电突然断电而造成巨大损失^[1]。备用电源是在工作电源中断或不充足时为维持设备安全稳定运行提供电源的供电装置, 目前常用的备用电源有柴油发电机和铅酸蓄电池^[1-2]。柴油发电机存在工作噪音大、释放有害气体的缺点, 且不能作为不间断备用电源; 而铅酸蓄电池存在体积大、备电时间有限的缺点, 且具有不确定性, 对环境温度要求苛刻。鉴于常用备用电源存在噪音大、污染环境、能量利用率低等不足, 加之能源危机和人们环保意识的提高, 研发清洁、环保的新型备用电源逐渐受到业界高度关注^[3]。

燃料电池是一种高效的电化学能量转换装置, 它直接将燃料的化学能转化为电能, 不受卡诺循环限制, 具有清洁、无污染、噪声低、能量密度高、启动快、连续供电时间长等优点^[4], 且输出为直流, 这使得燃料电池非常适用于直流负载设备^[5]。燃料电池工作时比柴油发电机更加安静环保, 在同样功率下燃料电池的能量密度高于铅酸蓄电池。随着燃料电池技术的不断发展, 燃料电池将逐渐取代铅酸蓄电池和柴油发电机作为备用电源^[6], 应用前景广阔。

燃料电池虽具有诸多优点, 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^[7-8]。为了克服燃料电池存在的不足, 本文结合燃料电池的特性, 提出一种以燃料电池为主电源、蓄电池为辅助电源的备用电源系统结构, 并根据燃料电池备用电源系统特性提出了系统电压阈值补偿控制策略及蓄电池充放电控制策略, 设计了该备用电源的系统控制单元。该燃料电池备用电源通过监测市电供电状态、负载功率需求、蓄电池荷电状态(SOC)等, 实现燃料电池备用电源自动投入与切除、负载功率动态补偿、辅助蓄电池充放电管理等。最后根据提出的系统结构及控制策略研制了一台 3 kW 的燃料电池备用电源样机, 并采用单片机实现其系统控制单元及控制策略。测试结果表明, 所提出的系统结构及控制策略满足不间断备用电源的要求, 控制策略实用、有效。

1 燃料电池备用电源系统设计

燃料电池存在的不足, 使得其作为独立的备用电源需要注意以下问题: 工作电源掉电实时监测及备用电源不间断切换; 燃料电池启动辅助电源设计及管理; 燃料电池备用电源系统状态监测; 燃料电池备用电源功率补偿控制。

1.1 系统结构

针对燃料电池作为备用电源时需要注意的问题, 拟构建以燃料电池为主电源、蓄电池为辅助电源的燃料电池备用电源系统^[9], 实现工作电源掉电时为负载设备提供稳定、可靠、不间断的备用电源。根据燃料电池的特性, 提出的燃料电池备用电源系统主要由燃料电池发电系统、DC/DC 变换器、蓄电池充电管理单元、系统控制单元、蓄电池及弱电供电单元等组成, 其结构框图如图 1 虚线框内所示。

a. 燃料电池发电系统^[10]主要包含氢气供应系统、空气供应系统、冷却系统、排气系统、燃料电池电堆、燃料电池发电控制器等。燃料电池发电控制器主

收稿日期: 2013-07-19; 修回日期: 2014-01-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177138); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20100184110015); 铁道部科技研究开发计划(2012J012-D); 四川省国际科技合作与交流研究计划(2012HH0007)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177138), Doctoral Program Foundation of Institutions of Higher Education of China(20100184110015), Science and Technology Development Plan of Ministry of Railways(2012J-012-D) and International Science & Technology Cooperation & Exchange Research Plan of Sichuan Province(2012HH0007)

电池输出功率 P_{FC} 大于负载需求功率 P_{Load} , 系统控制单元将启动蓄电池充电管理单元对蓄电池进行充电, 其充电控制策略与备用电源工作在待机模式时的充电控制策略相同。

1.3.2 蓄电池放电控制策略

备用电源工作在蓄电池供电模式时, 蓄电池处于放电状态。若蓄电池充电管理单元监测到蓄电池的 SOC 达到 SOC_i 时, 系统控制单元上传报警信息, 提醒蓄电池即将停止供电, 随后切除蓄电池对负载供电, 备用电源系统停机。蓄电池放电控制策略为:

$$\begin{cases} \text{允许放电} & SOC > SOC_i \\ \text{停止放电} & SOC \leq SOC_i \end{cases} \quad (2)$$

1.3.3 电压阈值补偿控制策略

备用电源处于燃料电池供电模式时, 系统控制单元根据燃料电池输出功率 P_{FC} 、负载需求功率 P_{Load} 、蓄电池 SOC 等补偿负载功率突变, 其补偿思想为:

$$\begin{cases} \text{切入蓄电池进行补偿} & P_{FC} \leq P_{Load} \\ \text{切除蓄电池并对其充电} & P_{FC} > P_{Load} \end{cases} \quad (3)$$

如何检测备用电源中燃料电池输出功率小于负载需求功率是功率补偿控制的关键。由于燃料电池备用电源直流输出额定电压为 U_o , 其允许连接的直流负载额定电压即为 U_o , 当监测到输出直流母线电压低于设计的额定电压 U_o 时, 说明负载需求功率大于燃料电池输出功率, 导致直流母线电压下降。因此可以设置一个直流母线电压阈值下限 U_{TL} 及上限 U_{TH} 。当直流输出电压 U_o 小于阈值 U_{TL} 时, 说明负载需求功率超过燃料电池输出功率, 此时需要切入蓄电池进行功率补偿, 同时控制燃料电池发电系统增大功率输出; 当直流母线电压 U_o 大于等于阈值 U_{TH} 时, 说明燃料电池输出功率已达到负载需求功率, 此时可切除蓄电池的功率补偿, 同时根据蓄电池的 SOC 对蓄电池进行充电。电压阈值补偿控制策略为:

$$\begin{cases} \text{切入蓄电池进行补偿} & U_o < U_{TL} \\ \text{切除蓄电池并对其充电} & U_o \geq U_{TH} \end{cases} \quad (4)$$

2 系统控制单元硬件设计

本文主要研究备用电源的系统结构及系统控制, 对于燃料电池发电系统、蓄电池充电管理单元不进行详细研究。系统控制单元是整个备用电源的控制核心, 主要负责工作电源供电状态检测、燃料电池发电系统启动与停止及参数检测、蓄电池充电启动与停止、备用电源工作模式切换、与远程监控中心通信等, 其结构框图如图 3 所示。

系统控制单元主控制器选用增强型 51 单片机 C8051F040 为主控制器^①, C8051F040 内部集成了 12 位多通道 A/D 转换器、电压基准及 CAN 控制器等功能部件。集成 A/D 转换器可用于备用电源系统

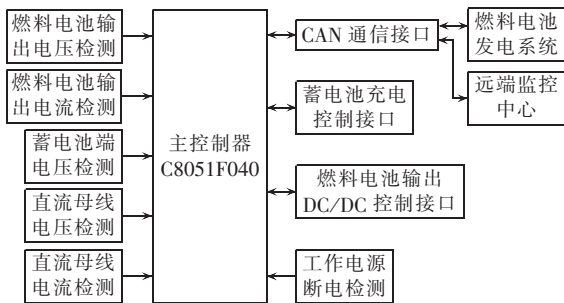


图 3 系统控制单元结构框图

Fig.3 Block diagram of system control unit

中电压、电流等模拟信号的采集, 而不用外接 A/D 转换器; 集成的 CAN 控制器完全支持 CAN2.0A 和 CAN2.0B, 可用于系统控制单元与远端监控中心及燃料电池发电系统的通信。

2.1 工作电源断电检测

工作电源中断与恢复的实时检测将影响到备用电源的不间断切换时间, 可以选择图 1 中的点 a 或 b 进行工作电源断电检测。点 a 处为交流, 需采用交流检测技术; 点 b 处为直流, 可采用分压比较检测技术。

对于直流供电一般是市电经 AC/DC 变换器转换成直流后给负载供电, 由于 AC/DC 变换器输出端有一定容量的电容, 所以通过点 b 检测断电信息有一定的延时, 不能准确检测到市电断电时刻, 导致系统控制单元不能在断电瞬间投入备用电源而使负载存在断电的危险。经过实际试验测试, 通过点 b 进行断电检测, 其延迟时间约为 50 ms, 不能满足备用电源不间断切换的要求。由于点 a 能直接反映出市电断电瞬间的信息而不存在延迟, 故选择在点 a 进行检测, 在交流断电瞬间即可检测到断电信息, 其检测电路原理图如图 4 所示。

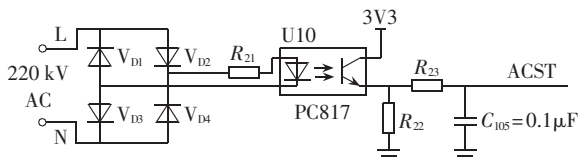


图 4 工作电源断电检测原理图

Fig.4 Schematic diagram of power outage detection

交流 220 V 首先经过整流二极管 $V_{D1} \sim V_{D4}$ 整流成高压脉动直流, 然后经光耦隔离产生断电信号。此处光耦起到电气隔离的作用以避免对主控制器产生干扰及进行信号电平匹配。当交流有电时光耦导通, 检测信号 ACST 为高电平; 当交流断电时光耦截止, 检测信号 ACST 为低电平。经实际测试, 此检测电路的检测时间约为 10 ms。

2.2 电压、电流检测

燃料电池备用电源系统需要监测系统各单元的

① Silicon Laboratories. C8051F04x family of devices datasheet. 2005.

电压、电流,为主控制器的控制策略提供数据参考,同时需将采集的参数传输到远端监控中心,方便控制中心监测备用电源系统工作状态。系统控制单元电压、电流检测主要涉及燃料电池输出端、蓄电池、直流母线等。

电压采集采用差分输入,采样信号由两级运放调理后经线性光耦 IL300 隔离处理,以减小对主控制器的干扰。隔离后的电压信号经两级运放放大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 5 所示。

电流检测使用电流霍尔传感器 LA25-NP 将采样电流值转换为电压信号,再经采样调理电路处理后接入主控制器的模拟采样通道进行采集。电流采样的调理电路与电压采样调理电路类似。

2.3 CAN 通信接口

CAN 总线是工业控制局域网的标准总线,属于现场总线的范畴,它是一种有效支持分布式控制或实时控制的串行通信总线,具有通信实时性强、速率高、传输距离远等优点。因此系统控制单元采用 CAN 通信接口与燃料电池发电系统及远端监控中心进行参数、命令传输,能保证通信的实时、稳定。

由于 C8051F040 内部集成的 CAN 控制器^[16]是一个协议控制器,它并没有提供物理层的收发功能,

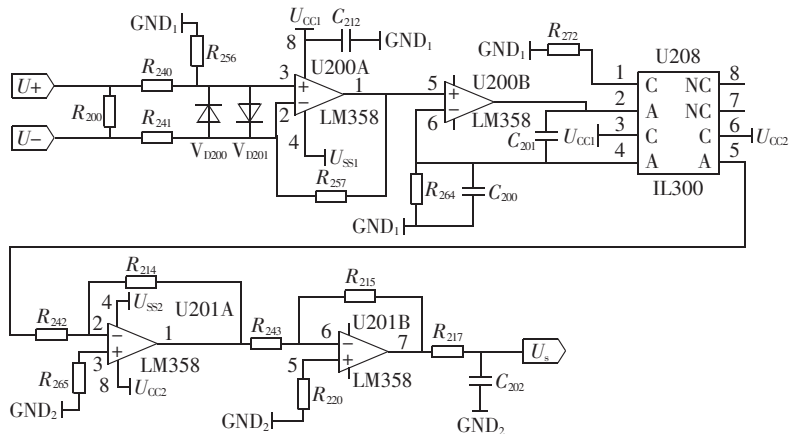
要实现与 CAN 总线的通信接口,需要增加外部 CAN 收发控制器,实现 CAN 通信数据帧的收发,其接口原理图如图 6 所示。

CAN 总线信号 CANTX 和 CANRX 经过高速光耦 6N137 进行电气隔离,再经 CAN 总线收发器接口芯片 SN65HVD230 驱动后接到 CAN 总线上。光耦 6N137 实现 CAN 节点与 CAN 总线间的电气隔离,提高节点可靠性,并保护 CAN 总线上的其他节点。

3 系统控制单元工作流程

燃料电池备用电源系统控制单元是系统的控制核心,主要负责系统参数的采集、蓄电池充放电控制、燃料电池发电控制、供电电源不间断切换及负载功率补偿等。备用电源系统具有 3 种工作模式:待机模式、蓄电池供电模式、燃料电池供电模式,不同模式下系统控制单元的任务不同,其控制单元工作流程如图 7 所示。

燃料电池备用电源系统启动后,根据工作电源的供电情况进入待机模式或蓄电池供电模式。若备用电源在工作电源供电正常时启动,则启动后备用电源进入待机模式,此时系统控制单元只负责监测备用电源系统的待机状态参数、控制蓄电池充电及备用电源异常报警。当工作电源突然断电时,控制单



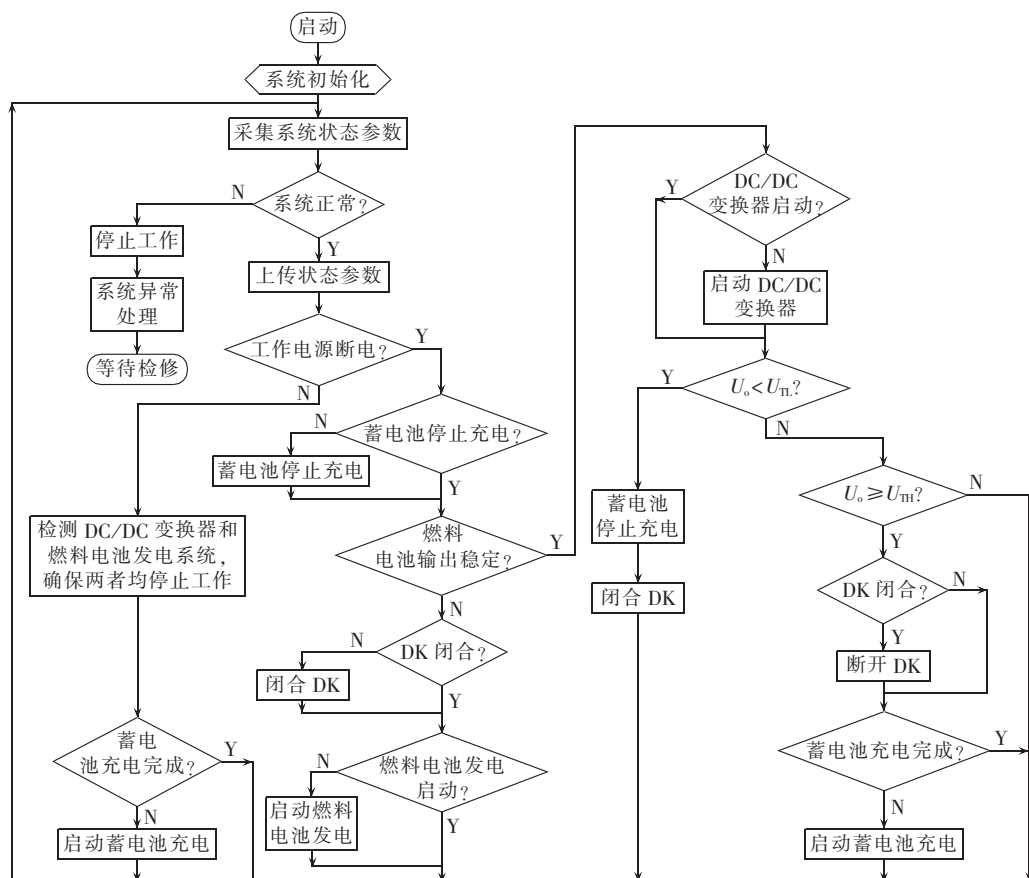


图 7 工作流程图

Fig.7 Work flowchart

元立即检测到断电信号,先停止对蓄电池的充电,然后闭合开关 DK,由蓄电池为负载提供电源,切换到蓄电池供电模式,同时启动燃料电池发电。在燃料电池输出稳定之前,备用电源一直工作在蓄电池供电模式。当系统控制单元检测到燃料电池输出稳定后,控制单元启动 DC/DC 变换器,转为燃料电池给负载供电。如果此时燃料电池输出功率 P_{FC} 大于负载需求功率 P_{Load} 即 $U_o > U_{TH}$ 时,则控制单元断开开关 DK,切除蓄电池供电,并根据蓄电池当前 SOC 决定是否启动对蓄电池充电;如果负载突然增加或者燃料电池输出功率 P_{FC} 小于负载需求功率 P_{Load} 即 $U_o < U_{TL}$ 时,则控制单元闭合开关 DK 切入蓄电池,由蓄电池、燃料电池共同为负载提供功率,实现燃料电池输出功率不足时,由蓄电池进行动态功率补偿,保障负载设备的稳定、可靠运行。

4 测试与分析

根据所提燃料电池备用电源系统结构及系统控制策略,研制了一台 3 kW 燃料电池备用电源样机。备用电源选用的燃料电池输出电压范围为 30~40 V,净输出功率为 3.5 kW,蓄电池容量为 60 A·h。设计的备用电源输出电压为直流 48 V,功率为 3 kW。

4.1 工作电源断电检测测试

工作电源中断与恢复的实时检测将影响到备用电源的不间断切换时间。在燃料电池备用电源系统安装完成后,将示波器探头连接到断电检测信号输出端 ACST、将差分探头连接到交流供电输入端,依次闭合图 1 中开关 K_1 、 K_2 ,使备用电源系统正常启动并工作于待机模式。在备用电源系统工作正常后,突然切断市电供电,示波器捕捉到的检测信号 ACST 及交流供电波形如图 8 所示。从图中可以看到交流供电断电检测响应时间大约为 7 ms ,满足不间断切换断电检测时间要求,检测信号有下降尖峰,这是由正弦交流整流脉动直流产生的,但尖峰的最低值并未达到低电平的范围,故不影响断电信号的判断。

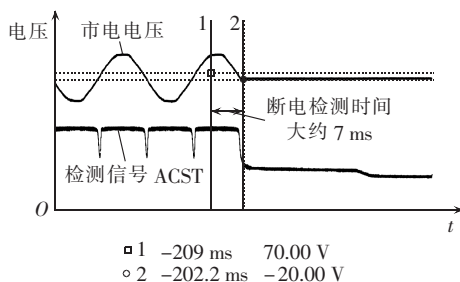


图 8 工作电源断电检测波形

Fig.8 Waveforms of power outage detection

4.2 工作模式切换测试

利用 10 kW 电子负载代替实际直流负载设备,按照图 1 所示的系统结构搭建试验测试平台,并将电子负载功率调节到 3 kW,对研制的燃料电池备用电源系统进行测试。在市电正常的情况下突然断开市电、在燃料电池供电模式下突然恢复市电供电,用示波器观测直流母线电压曲线变化情况见图 9。

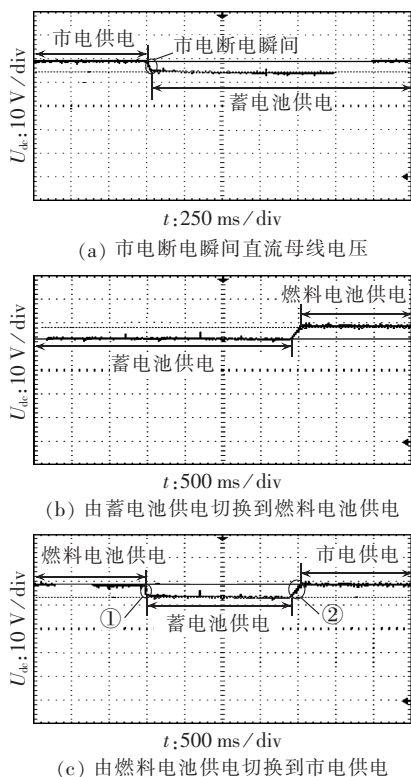


图 9 模式切换时直流母线电压曲线图
Fig.9 Curve of DC bus voltage during work mode switching

图 9(a)是在燃料电池处于待机模式时,市电断电瞬间系统控制自动切换到蓄电池供电模式的电压曲线,图中蓄电池供电电压只有 44.4 V,这是由多次试验后蓄电池容量降低导致的,示波器捕捉的切换时间大约为 20 ms。从图中可以看到在负载功率为 3 kW 的整个切换过程中,负载供电没有中断,只是发生了一定电压跌落,导致电压跌落的原因是蓄电池在多次试验后容量不足。图 9(b)是在燃料电池输出稳定后切换到燃料电池供电时的电压波形图。市电恢复供电时切换波形图如图 9(c)所示。在燃料电池供电正常的情况下突然恢复交流供电,当市电突然恢复正常供电后,系统控制单元立即检测到交流供电恢复信号 ACST 为高,并按照设计的控制策略先发送停止燃料电池发电命令(图中①处波形),同时切换到蓄电池供电模式。在燃料电池发电系统确认燃料电池停止发电后,系统控制单元立即切换到交流供电(图中②处波形),并切除蓄电池供电进入待机模式。示波器捕捉的由蓄电池模式恢复交流供电的

切换时间大约为 40 ms。

4.3 蓄电池充放电及功率补偿测试

在市电供电正常、断电及恢复供电期间,对蓄电池充放电电流进行捕捉观察,如图 10(a)所示。上面是工作电源交流电压波形曲线,下面是蓄电池充放电电流波形曲线。从图中可以看出:在市电供电正常时,蓄电池处于充电状态;在市电突然断电瞬间,蓄电池立即切入直流母线,对负载供电。

在燃料电池供电模式下,对蓄电池的充放电电流进行捕捉观察,如图 10(b)所示,上面是燃料电池供电模式下直流母线电压波形曲线,下面是蓄电池充放电电流波形曲线。从图中可见:在燃料电池供电模式下,燃料电池输出功率 P_{FC} 大于负载需求功率 P_{Load} ,蓄电池处于充电状态;手动调整负载功率,负载功率发生波动后,导致直流母线电压跌落,系统控制单元立即切入蓄电池功率补偿,蓄电池进行放电;在负载功率降低后,蓄电池再次开始充电。

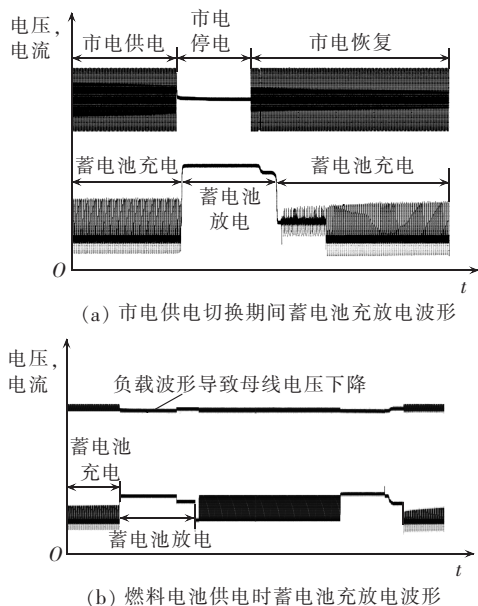


图 10 蓄电池充放电波形

Fig.10 Charge and discharge waveforms of battery

经过试验测试,研制的燃料电池备用电源系统各工作模式切换正常、有效,所提出的系统结构、控制策略及系统控制单元工作流程完全满足不间断备用电源的要求。

5 结论

针对目前备用电源系统存在的不足及燃料电池良好的应用前景,本文提出基于燃料电池的备用电源系统结构及其控制策略,替代传统的蓄电池或柴油发电机备用电源,可延长备电时间、缩短切换时间、降低环境污染。随着燃料电池技术的不断发展,燃料电池制造成本的下降,配套设施的逐渐完善,燃料电池作为一种高效节能、环境友好的发电装置,必

将在备用电源中得到广泛的应用。

参考文献:

- [1] 周苏,牛继高,徐春华,等. 全数字控制的燃料电池应急电源设计[J]. 电源技术,2012,36(2):188-191.
ZHOU Su,NIU Jigao,XU Chunhua,et al. Design of full digital controlled fuel cell emergency power system[J]. Chinese Journal of Power Sources,2012,36(2):188-191.
- [2] 李巧玲. 浅析通信电源系统的备用电源设计[J]. 通信电源技术,2003(6):43-46.
LI Qiaoling. Analyzing of the backup power design in communication power supply system[J]. Telecom Power Technology,2003(6):43-46.
- [3] JIANG Bing,SUN Zhenqing,LIU Meiqin. China's energy development strategy under the low-carbon economy[J]. Energy,2010,35(11):4257-4264.
- [4] 衣宝廉. 燃料电池——原理·技术·应用[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [5] 曹长松. 燃料电池在通信电源中的应用[J]. 通信电源技术,2012,29(1):53-57.
CAO Changsong. Fuel cell applications in the communication power supply[J]. Telecom Power Technology,2012,29(1):53-57.
- [6] TREHAN A K,CANAVAN D B. Next generation fuel cell solutions for telecommunications backup power[C]//International Telecommunications Energy Conference. San Diego,USA:IEEE Power Electronics Society,2008:1-5.
- [7] 姜志玲,陈维荣,游志宇,等. 用于燃料电池的前级DC/DC变换器[J]. 电力电子技术,2010,44(6):67-68.
JIANG Zhiling,CHEN Weirong,YOU Zhiyu,et al. A front-end DC/DC converter for fuel cell power system[J]. Power Electronics,2010,44(6):67-68.
- [8] 方如举,张元敏. 燃料电池并联供电系统的建模和控制[J]. 电力自动化设备,2011,31(1):75-78.
FANG Ruju,ZHANG Yuanmin. Modeling and control of power supply system with parallel fuel cells[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(1):75-78.
- [9] 张富刚,樊越甫,刘方,等. 氢燃料电池在电力系统后备电源的应用研究[J]. 高压电器,2012,48(2):76-80.
ZHANG Fugang,FAN Yuefu,LIU Fang,et al. Research on application of H₂ fuel cell backup power system at transformer stations for electric power system[J]. High Voltage Apparatus,2012,48(2):76-80.
- [10] 金科,阮新波,杨孟雄,等. 复合式燃料电池供电系统[J]. 电工技术学报,2008,23(3):92-98.

- JIN Ke,RUAN Xinbo,YANG Mengxiong,et al. Hybrid fuel cell power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(3):92-98.
- [11] 王影. 燃料电池备用电源用远程监控系统的设计与实现[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.
WANG Ying. Design and realization of remote monitor and control system for fuel cell as back-up power[D]. Wuhan:Wuhan University of Technology,2012.
- [12] 费万民,张艳莉,解红军. 蓄电池管理系统及其实现[J]. 电力自动化设备,2001,21(8):34-36.
FEI Wanmin,ZHANG Yanli,XIE Hongjun. Battery management system and its realization[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(8):34-36.
- [13] 李奇,陈维荣,刘述奎,等. 燃料电池混合动力车辆多能源管理策略[J]. 电工技术学报,2011,26(增刊1):92-98.
LI Qi,CHEN Weirong,LIU Shukui,et al. Energy management strategy for hybrid vehicle based on fuel cell[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(Supplement 1):92-98.
- [14] 郑文迪,蔡金铨. 燃料电池/超级电容器混合发电系统能量管理策略[J]. 电力自动化设备,2012,32(12):28-32,42.
ZHENG Wendi,CAI Jinding. Energy management strategy for hybrid generation system with fuel cell and super-capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(12):28-32,42.
- [15] 周静,何为,龙兴明. 蓄电池储能的独立光伏系统充电控制器研制[J]. 电力自动化设备,2011,31(11):13-17.
ZHOU Jing,HE Wei,LONG Xingming. Intelligent charging controller of battery-buffered stand-alone photovoltaic system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(11):13-17.
- [16] 杨志国,孙斌. 基于CAN总线的橡胶生产监测系统的开发[J]. 仪器仪表学报,2008,29(8):1686-1689.
YANG Zhiguo,SUN Bin. Development of supervisory system for rubber manufacture based on CAN bus[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2008,29(8):1686-1689.

作者简介:



游志宇

游志宇(1980-),男,四川武胜人,博士研究生,主要研究方向为新能源技术及其应用、混合动力系统能量管理及应用(E-mail: youzhiyu@my.swjtu.edu.cn);

陈维荣(1965-),男,四川隆昌人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为燃料电池混合动力技术、智能信息处理和智能监测技术。

Design and control of fuel cell backup power system

YOU Zhiyu,CHEN Weirong,DAI Chaohua,LI Qi

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

Abstract: Since fuel cell has some disadvantages as independent backup power system, a kind of backup power system is proposed, which takes fuel cells as its primary source and batteries as its auxiliary source. According to the characteristics of fuel cell backup power system, a strategy of system voltage threshold compensation control and battery charge/discharge control is proposed to implement the uninterrupted switching and dynamic compensation. A 3 kW prototype is developed and the experimental results demonstrate that, the proposed system structure and control strategy are practical and effective and the designed system can be safely used as uninterruptible backup power.

Key words: fuel cells; backup power; voltage threshold; control; uninterrupted switching; compensation