

基于 DSP 燃料电池三相功率逆变调节系统

李 鹏, 黄石生, 熊振兴, 唐朝阳
(华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要:介绍基于燃料电池工频 380 V 三相功率逆变转换调节系统。采用 TMS320F2812 型 DSP 芯片为控制核心, 运用数字 PI 控制和死区补偿得到较为理想的电压电流输出波形。提高了系统输出的精度和稳定性, 改善了系统动态响应特性。对样机测试实验表明, 该系统输出稳定, 波形畸变量得到了较好的控制。

关键词:逆变器; 燃料电池 / 功率逆变调节系统; 正弦脉宽调制; 数字信号处理

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2009)02-0033-03

DSP-based Three-phase Power Inverting Conditioner System for Fuel Cell Power Plant

LI Peng, HUANG Shi-sheng, XIONG Zhen-xing, TANG Chao-yang
(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The DSP-based three-phase power 380 V/50 Hz inverting conditioner system for fuel cell power is introduced. As the control system core TMS320F2812 DSP chip is used, digital PI control and dead-time complement are added to the control system, favorable voltage and current waveform have been attained. Precision and stability of the system have been enhanced. The dynamic response characteristic has been improved. The experimental results demonstrate that system output waveform is nice and stable. Output waveform distortion has been well controlled.

Keywords: inverter; fuel cell / power inverting conditioner system; sine pulse width modulation; digital signal processing

Foundation Project: Supported by a Grant from the Major Programs of Science and Technology Foundation of Guangdong Province Industry (No.124B2041570); Guangdong Provincial Key Laboratory Foundation of Automotive Engineering (No. 2007A02002)

1 引言

燃料电池是 21 世纪最有吸引力的发电方法之一。通过数字化控制技术, 燃料电池的电站功率逆变转换调节系统可完成直流电力向交流电力的转换。电站功率逆变转换调节系统的核心部分是逆变电源部分, 随着电力电子技术的飞速发展和各行业对电气设备控制性能要求的提高, 逆变技术在许多领域的应用也越来越广, 呈现出对电源要求越来越高的趋势。针对国内燃料电池功率调节系统关键技术和设备由国外引进的现状, 自主设计了基于我国工业和民用用电标准, 即线电压 380 V/相电压 220 V 燃料电池功率逆变转换调节系统。该系统对整个电站系统的可靠、高效率 and 高质量运行有很重要的作用^[1]。系统采用三相全桥主电路拓扑, 由 TMS320F2812 型 DSP 芯片控制系统以纯软件方式产生 SPWM 信号, 通过电压电流双反馈环路, 在很大程度上提高了输出波形质量和系统稳定性。

2 总体设计与工作原理

图 1 示出电站功率逆变调节系统主电路整体结

基金项目: 广东省科技工业攻关重大项目(124B2041570); 广东省汽车工程重点实验室开放基金项目(2007A02002)

定稿日期: 2008-09-16

作者简介: 李 鹏(1979-), 男, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为数字化电源及其智能控制。

构框图^[2]。燃料电池向功率调节系统主电路拓扑提供直流电能, 三相全桥逆变器根据正弦脉宽调制 (SPWM) 原理将母线直流电逆变转换成交流电, 并经升压变压器升压, 达到工业三相交流电要求。输出电压、电流经隔离取样、信号处理后送给 DSP 芯片控制系统。控制系统对取样信号经 PI 控制算法处理后输出修正后的 SPWM 控制信号, 使输出电压稳定在标准工业用电正弦波形上。功率调节系统基本功能包括输出电压和频率恒定、输出电压和输出电流显示、短路保护、过流保护、过热保护、欠压保护、过载保护等。

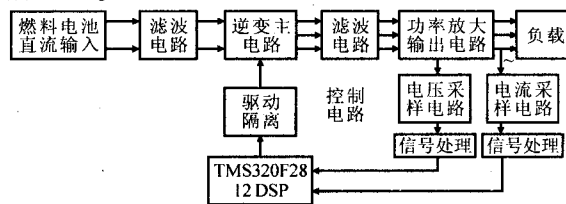


图 1 整体结构框图

3 主电路设计

主电路主要由逆变电路、滤波电路、隔离/变电路组成^[3]。该主电路由型号为 FS400 的 3 个 IGBT 管模块构成。驱动模块为专用于功率器件 IGBT 和 MOSFET 的集成驱动器, 该驱动模块内部由输入处理电路、驱动输出电路、短路和过流保护电路、隔离状态识别电路、电源检测电路和 DC/AC 开关电源构

成。LC 滤波电路的作用是滤除高频，其参数由 LC 滤波器的谐振频率和特征阻抗决定。隔离/变压电路是指在逆变电源的输出端接入变压器进行隔离、变压，然后接负载使用。图 2 示出三相全桥逆变转换主电路拓扑。

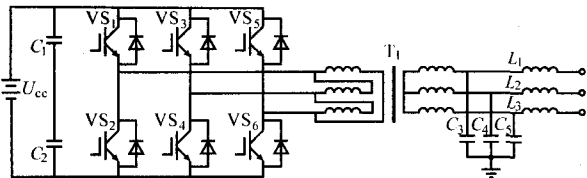


图 2 三相全桥逆变转换主电路拓扑

4 嵌入式控制系统设计

嵌入式控制系统的核心采用高性能 32 位定点 DSP 微处理器 TMS320F2812。该芯片是针对高性能控制应用的 2000 系列 DSP 中的高端产品，具有处理速度快、程序空间大、功能齐全、结构精简的特点，最大处理速度为 150 MIPS，并配有许多数字 I/O 口及实用高性能片上外设。控制系统框图见图 3。

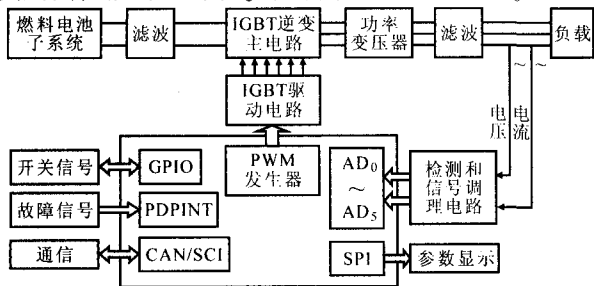


图 3 控制系统框图

4.1 功率逆变转换调节系统的 SPWM 控制

系统采用 TMS320F2812 DSP 芯片事件管理模块 EVA 以纯软件方法产生 SPWM 信号，然后经驱动器 CONCEPT 模块隔离驱动提供给逆变主电路拓扑。通过实时计算生成电压 SPWM 需要的数学模型，具体生成 SPWM 波方法采用不对称规则采样法，使用三条相位差为 120° 的正弦波与同一条三角波求交点，计算得出三相 SPWM 每一相脉宽。

顶点采样：

$$\begin{cases} t_{on2}^C = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N}\right) \right] \\ t_{on2}^B = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ t_{on2}^A = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N} + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (1)$$

式中： $k=1, 3, 5 \dots, 2N-1$ 。

底点采样：

$$\begin{cases} t_{on1}^C = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N}\right) \right] \\ t_{on1}^B = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N} + \frac{2\pi}{3}\right) \right] \\ t_{on1}^A = \frac{T_C}{2} \left[1 + M \sin\left(\frac{\pi k}{N} + \frac{4\pi}{3}\right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

式中： $k=0, 2, 4 \dots, 2N-2$ 。

三相脉宽：

$$t_{on}^C = t_{on1}^C + t_{on2}^C, \quad t_{on}^B = t_{on1}^B + t_{on2}^B, \quad t_{on}^A = t_{on1}^A + t_{on2}^A \quad (3)$$

TMS3202812 有 EVA 和 EVB 两个事件管理模块，每个事件管理模块均可独立产生 3 对 PWM 输出。本系统采用 EVA 产生 PWM 信号，控制 6 个 IGBT 通断。设置的通用定时器处于连续增/减计数模式，令计数器从开始增计数至周期寄存器值，然后减计数直至回到零，再重新增计数，周而复始，以此模拟等腰三角载波，其频率：

$$f_r = \frac{1}{nT_p K} \quad (4)$$

式中： n 为周期寄存器的时间常数； T_p 为定时器时钟周期； K 为连续增计数模式时取值，连续增计数模式时取 1，连续减计数模式取 2。

由上式可见， f_r 是由定时器的定时周期和计数模式决定的，系统所需载波频率可通过设置合适的 TXPR 值得到，其值为 6 kHz。

一个载波周期内，PWM 引脚输出电平在定时器增计数和减计数时各翻转一次，两次翻转之间的时间间隔就是相应脉宽，生成 SPWM 波形如图 4a 所示，死区时间为 2.56 μ s。

主程序是一个无限循环结构，主要提供系统的初始化，根据中断子程序给出的比较寄存器值生成 SPWM 波；中断子程序的主要功能是计算比较寄存器的值。主程序流程图如图 4b 所示，首先，电路上电后主程序对一些 DSP 硬件模块初始化，包括时钟锁相环、看门狗、外围模块的时钟、外部中断、时间管理器等；根据需要进行数据存储空间的初始化工作，包括为一些标志变量设置初始值、一些计算模块系数进行搬移等。初始化工作完成后，使能所需的中断，启动定时器。然后 CPU 执行一些要求高的程序，比如正弦波发生程序，电流电压采样等，如果有故障发生，主程序进入故障中断，封锁脉冲信号，保护系统。

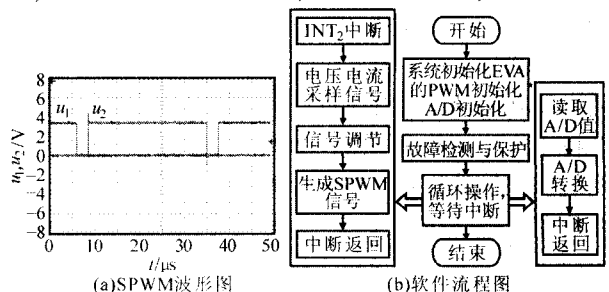


图 4 SPWM 波形图及软件流程图

4.2 数字 PI 调节

带滤波电感电流内环的电压瞬时值控制方法是主要控制策略^[4]，其具体控制方法采用数字 PI 式调节，图 5 示出该方法的示意图。滤波器输出的电压瞬时值 U_0 与电压给定值 U_{ref} 进行比较，再将得到的误差信号经电压调节器调节后作为滤波电感电流的给

定值 I_{ref} 。内环为电流控制环,将电感电流瞬时值 I_1 与电流给定值 I_{ref} 比较,然后把产生的误差信号通过电流调节器送入 SPWM 控制环节,调节功率开关管通断时间,从而调节系统输出电压。内环的引入,使滤波电感电流成为可控电流源。这样,从电压调节器的输出到电感电流 I_1 之间的部分可以看作一个近似的比例环节,使系统稳定性大大提高;同时对包含在内环的扰动也起到及时的调节作用。

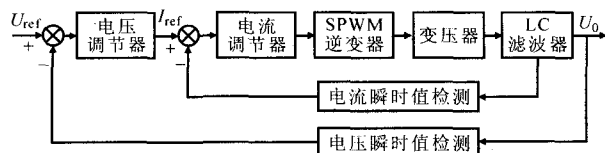


图 5 电压瞬时值反馈控制方法示意图

在试凑法基础上,采取积分分离和抗积分饱和的控制算法,达到提高燃料电池电站输出波形的稳态精度和动态响应能力的目的。积分分离控制能有效的降低积分作用对系统动态性能的影响;抗积分饱和控制能够防止被控制量出现较大超调和长时间波动。通过试凑法对比不同 PI 调节值情况下的系统输出如图 6 所示。对比发现本系统取值在 $P=0.4, I=0.05$ 条件下系统波形达到理想的控制输出要求。

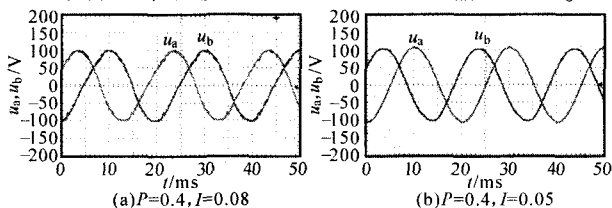


图 6 PI 调节电压波形图

5 试验结果

根据前述设计,研制了一台燃料电池电站功率调节逆变电源。其输出为线电压 380 V/50 Hz 交流电,输出滤波电感为 180 μ H,滤波电容为 60 μ F。图 7 示出实验波形。

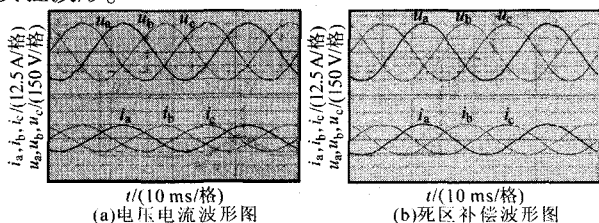


图 7 试验波形

系统输出特性采用电源品质分析仪测试,带纯阻性负载,输出功率为 5.6 kW,频率为 50.002 Hz,误差较小。图 7a 示出 5.6kW 带阻性负载时系统输出电压电流波形图。由图可见,加入负载时电压波形产生了畸变,具体表现为死区效应明显,而电流波形比较平滑。电压电流在纯阻性负载情况下可达到良好品质要求。

针对死区效应对电压波形畸变影响,设计中综

合运用了电压反馈型和电流反馈型死区补偿法^[5],其试验结果如图 7b 所示。由图可见,系统输出电压电流波形经过死区效应补偿后有了很大的改观,表明采用死区补偿法方式是完全可行的。

通过测试功率逆变转换调节系统在不同负载情况下的输入有功功率 P_1 和输出视在总功率 S_2 和输出有功总功率 P_2 ,计算电站功率调节系统的转换效率 η 和输出功率因数 $\lambda, P_2/S_2=\lambda, P_2/P_1=\eta$ 。负载有阻性负载和感性负载,实验测试仪器为 1 kA 弧焊电源测试平台,实验数据如表 1 所示。

表 1 功率调节系统实验测试数据

试验	P_1/kW	S_2/kVA	P_2/kW	λ	η
1	5.52	4.67	4.16	0.89	0.85
2	5.68	4.86	4.28	0.88	0.86
3	11.76	10.82	10.06	0.93	0.92
4	11.96	11.10	10.21	0.92	0.93

实验 1 和实验 3 为带纯阻性负载情况,实验 2 和实验 4 为带阻感性负载情况。比较两组测试结果可知,纯阻性负载时 λ 稍高于感性负载情况;但是纯阻性负载时 η 却稍低于同时带感性和阻性负载的情况,这是因为带两种负载时总负载容量大于相应纯阻性负载情况。此外,分析 4 组实验数据可知,在一定范围内输入功率增大时,系统的逆变转换效率也得到相应提高。

6 结论

设计了燃料电池电站功率逆变转换调节系统,用纯软件方式生成 SPWM 正弦波,控制系统采用嵌入式数字控制方式,具有控制系统软件修改升级方便,鲁棒性强等优点。该系统具有良好的精度、稳定性和动态响应性能。分析试验结果可知,设计思路和设计方法是正确的,给燃料电池 DC/AC 功率逆变转换调节提供了良好的工作平台,并且样机已经投入使用,使用情况良好,为燃料电池的 UPS 行业应用发展提供了参考。

参考文献

- [1] Cheng K W E, Sutanto D, Ho Y L, et al. Exploring the Power Conditioning System for Fuel Cell[A]. PESC'01 IEEE 32nd Annual[C]. 2001, 4: 2197-2202.
- [2] 黄俊,王兆安,杨君,等.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 张厚升,张晓斌.9 kVA 三相航空逆变电源的设计与实现[J].电力电子技术,2006,40(4):93-95.
- [4] 谢力华,苏彦民.正弦波逆变电源的数字控制技术[J].电力电子技术,2001,35(12):52-60.
- [5] 刘陵顺,尚安利,顾文锦.SPWM 逆变器死区效应的研究[J].电机与控制学报,2001,24(12):237-241.