

电子废弃物热裂解用逆变式等离子体加热电源的设计及样机试验^①王振民^{②*} 张 芬^{**} 吴祥森^{**}

(* 华南理工大学机械与汽车工程学院 广州 510640)

(** 华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510640)

摘 要 根据电子废弃物等离子体热裂解工艺的高压、大功率及长负载持续率特点,研制了一种高可靠、模块式结构的全数字化大功率等离子体裂解加热逆变电源样机。该电源采用移相零电压零电流开关(ZVZCS)高频软开关逆变技术实现了功率模块的电能高效变换;基于信号磁隔离调制原理设计了功能完善的强功率驱动器,解决了功率器件的可靠驱动和保护问题;利用片上系统(SOC)级 ARM 嵌入式微处理器搭建全数字化的智能控制器,实现了功率模块的数字化,构建了具备自限流能力的智能功率变换模块;通过控制器局域网络(CAN)实现了各智能功率模块的分层控制和实时协同工作。该样机已在自行研制的电子废弃物资源化裂解实验平台上进行了性能测试,测试结果表明这种电源能满足持续高效裂解生产的需要。

关键词 电子废弃物, 热裂解, 等离子体, 加热电源, 软开关, 数字化控制

0 引言

电子废弃物的等离子体热裂解技术清洁环保,可实现近零排放^[1,2]。根据电弧理论以及强电弧等离子体裂解工艺特点,等离子体电弧主要呈水平或上升的伏安特性,为保证电弧-电源系统的稳定以及防止出现双弧现象,一般采用陡降特性电源,要求能在 100% 负载下长时间高压大电流工作,传递的等离子体能量可高达几百甚至几千 kW 级,因此,为等离子体弧提供电能的等离子体电源需要具备很高的电能变换效率、优异的可靠性和良好的控制性能^[2,3]。目前普遍采用高可靠性的整流式电源(甚至使用工频变压器),但由于自身结构特点,需在回路串入较大的阻抗以获得所需的陡降特性,电能变换效率低,体积庞大,动特性以及控制性能不够理想,需要附加感应器等复杂措施来实现对电弧的快速控制^[2,3]。采用逆变技术,能够提高等离子体加热电源的效率和动态性能,但它在严酷热裂解工艺环境下的推广应用还面临着因并联均流、温升、电磁

干扰、复杂结构、寄生参数等因素造成的强能量传递可靠性问题^[2,4]。国外整流式等离子体电源已可做到兆瓦级,逆变式的也已达到 200kW 级别^[6],国内虽已有采用硬开关全桥拓扑,通过模块式结构实现 300kW 级功率输出的逆变式等离子体电源的报道,但还没有 100kW 以上级别的效率更高、成熟可靠的软开关等离子体裂解加热电源技术^[2],大功率等离子体电源的研制和开发是国内大功率等离子体系统发展的瓶颈^[2,6,7]。本研究致力于高可靠性模块式结构的全数字大功率等离子体裂解加热电源的构建,设计了一种可以满足热裂解工艺需要的新颖的逆变式等离子体加热电源。

1 加热电源总体结构设计

总体结构如图 1 所示。本电源利用多个智能功率模块通过积木方式来实现功率增强,通过“N+M”的智能冗余措施确保电源整体的可靠性,即正常情况下由 N 个模块智能并联实现所需的功率输出,一旦其中有某个或某几个模块出现故障,M 个处于

① 国家自然科学基金(50805051),中央高校基本科研业务费专项资金(2012ZZ0059)和广东省教育部产学研结合专项资金(2011B090400081)资助项目。

② 男,1974 年生,博士,副教授;研究方向:等离子体技术及应用;联系人,E-mail:wangzhm@scut.edu.cn
(收稿日期:2011-08-22)

冗余状态的某个或某几个模块自动切入,确保整机继续工作^[4,6]。各功率模块具有独立的控制器,能完成脉宽调制(pulse width modulation, PWM)控制、自限流及其他自我管理功能;控制器局域网络(CAN)总线采用多主方式,位速率高达1Mbps,抗电磁干扰性能强,防冲突机制好^[6,8,9],因此利用CAN来实现多智能功率模块的智能并联和冗余,各智能功率模块通过CAN实现相互之间以及与系统级控制器的通信;上位机通过USB/CAN转换模块与系统控制器通信,获取各模块的状态信息并实现监控管理。

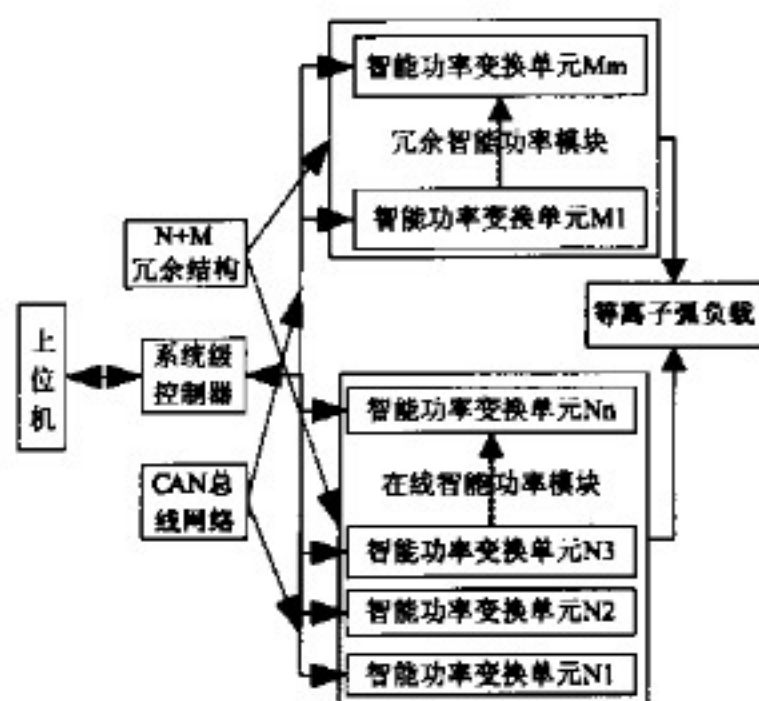


图1 加热电源系统总体结构框图

2 功率拓扑结构设计

软开关技术对逆变电源可靠性以及效率的提高均有积极作用^[3,6,10-12]。移相全桥软开关拓扑结构简单,功率器件承受的电流电压低,比较适合等离子体裂解加热电源的能量传递特点,但存在绝缘栅双极晶体管(IGBT)拖尾电流大、环流时间长、损耗高以及占空比丢失较严重等问题^[10-12]。为此,本文在基本移相全桥拓扑的基础上,采用了如图2所示的移相全桥零电压零电流开关(ZVZCS)拓扑,其中, D1-D4分别为对应功率管 Q1-Q4 的反并联二极管, Q1、Q2 组成超前桥臂, C1、C2 为 IGBT 的输出电容和外接电容之和; Q3、Q4 组成滞后桥臂; Cb 为隔直电容, Ls 为饱和电感; Lf 为输出电抗器, R2 为等效等离子弧负载; U_{dc} 为直流母线电压。利用原边串联的饱和电感和隔直电容来实现超前臂的零电压开关和滞后臂的零电流开关,解决了占空比丢失问题,环流时间和损耗也大幅减小。

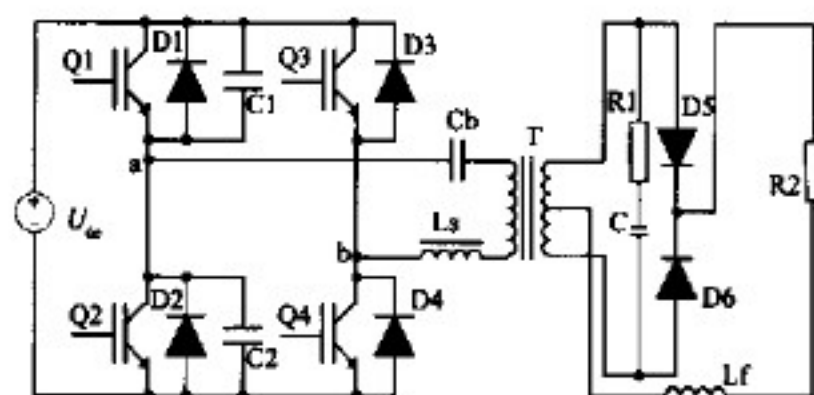


图2 ZVZCS 拓扑结构示意图

3 数字化控制器设计

为简化设计和节约成本,电源的系统级控制器和各功率模块的控制器在硬件结构上一致,仅在软件系统上有所差异。

3.1 硬件总体设计

以功率模块的控制器为例,它主要产生4路PWM信号、电流电压采样、数字PI运算以及均流控制、PWM信号的隔离和放大、给定信号的接收和参数显示、故障诊断与保护以及实现与CAN网络通信等功能^[6]。为此,以基于CORTEX-M3内核的SOC级ARM微处理器LM3S8971为核心构建数字控制器(如图3),包括ARM最小系统、电源模块、反馈信号采样电路、驱动电路、异常状态检测电路、数字面板以及内置的CAN接口电路。利用内置的CAN接口可方便地构建CAN总线控制网络。数字面板采用了ARM+复杂可编程逻辑器件(CPLD)的双芯结构^[6],利用ARM的控制和运算能力对面板的输入输出操作进行程序控制,利用CPLD丰富的I/O引脚和可灵活编程的特点,把ARM发送的命令转化为面板上数码管和相应LED的显示。

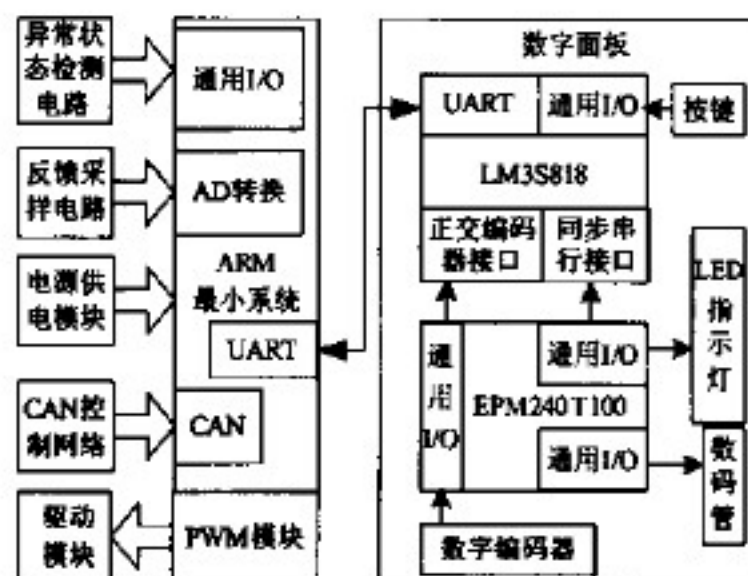


图3 控制器结构框图

3.2 驱动模块设计

驱动器对电源的功耗和可靠性有极大关联^[13]。

由于加热电源的工况极其恶劣,本文采用可靠性高、传输延迟小的脉冲变压器驱动方式。针对传统脉冲变压器在大功率开关管驱动时可能存在的磁芯饱和、波形失真等问题^[2,6,13],基于信号磁隔离调制原理,将驱动脉冲信号的上升沿和下降沿调制成两个反相窄脉冲信号,然后利用脉冲变压器 T 将该窄脉冲信号耦合到次级,并通过信号重构还原驱动脉冲信号,其原理如图 4 所示。脉冲变压器只传递窄脉冲信号,因此能保证 PWM 信号占空比可在较宽范围变化,且变压器的结构小巧紧凑。驱动模块内置高隔离等级 DC/DC 变换器,驱动输出峰值电流达 30A,根据检测的集射极电压 V_{ce} 来判断 IGBT 短路/过流现象,利用内置基准电压来判断欠压驱动故障,根据不同故障状态进行软关断或驱动锁止。

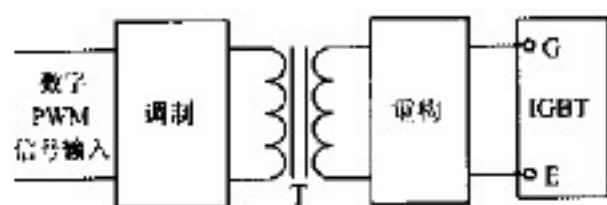


图 4 信号磁隔离调制原理

3.3 均流控制

在等离子体裂解过程中,各智能功率模块要稳定工作在最佳工作点附近,并尽可能工作在等功率状态,需要解决各模块的均流问题^[14-16]。

由于等离子体电弧主要呈水平或上升伏安特性,根据电弧-电源系统的稳定条件,本文的功率模块均采用恒流外特性。各智能功率模块具有相对独立的高性能控制器,且均为直流输出,在实现自我管理方面与普通电源并无太大差异,通过平均电流法就可达到各模块自限流控制效果^[6,14-16];然后,在各功率模块现有的平均电流单环控制前引入均流控制环节(见图 5),即按参与工作的模块数量,对等离子体电源整体输出电流值进行平均,将智能功率模块的初始预设值 I_0 与该平均电流值的采样反馈值 I_a 进行减法运算,得到对应的偏差量,进行 PI 运算后得到经过均流补偿的智能功率模块输入设定值 I_{s1} ,实现均流控制,使各模块尽可能工作于等功率状态。其中, $G(s)$ 为智能功率模块的传递函数, I_o 为智能功率模块的实际输出电流值。

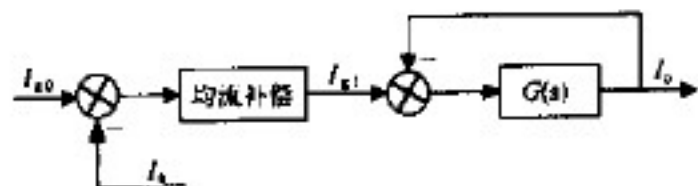


图 5 均流控制原理框图

3.4 CAN 网络协同设计

各模块之间通过 CAN 总线来相互传送和反馈信息,以实现要求的系统输出,因此,各模块之间的协同设计至关重要^[6]。在硬件设计上,由于 ARM 微处理器已内置 CAN 寄存器模块,只需外置 CAN 总线收发器,然后对其进行应用程序编程接口 (API) 函数设定即可实现 CAN 总线网络的数字通信。在通信程序设计上,主要包括 CAN 初始化、数据的发送、数据的接收及数据处理。如图 6 所示,主要任务流程包括两个方面:一是管理在线智能功率模块,根据在线功率模块的状态来发送/调节工作参数,确定是否关闭(或激活)某个或某些在线(或冗余)智能功率模块,使整个系统的总输出始终符合工艺要求;二是接收已激活的各智能模块的参数并传送到系统级控制器和上位机,实现各智能功率模块工作过程的监控。

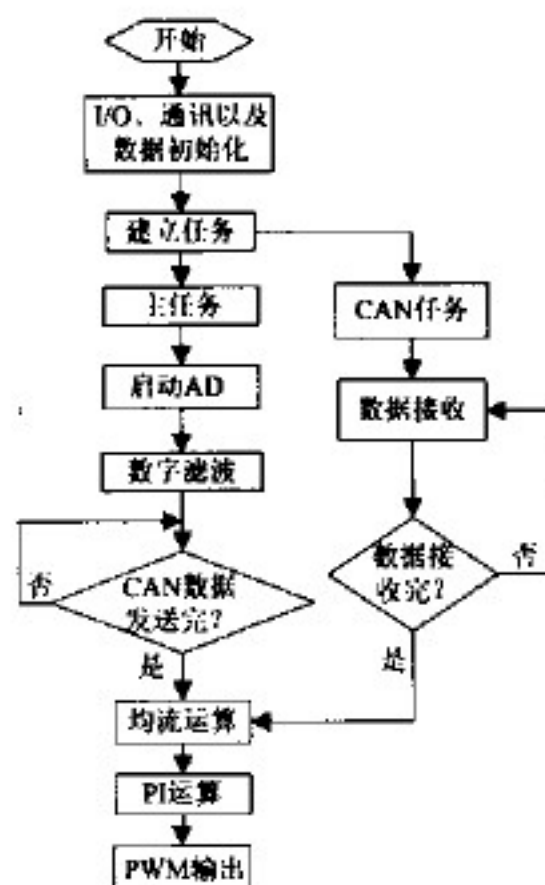


图 6 软件任务流程示意图

为实现 CAN 网络协同,要重点考虑延时问题^[8,9],包括总线延时和智能功率模块动态响应过程的时间。采用平均电流法时,智能功率模块从启动(或关断)上升(或下降)到设定值(或 0 值)的动态响应时间在 10 ~ 100ms。而 CAN 总线延时由报文编译码、仲裁延时和传输延时组成,由于 ARM 处理速度很快,报文编译码的延时可忽略不计。而传输延时 C_m 即数据从占用网络到释放网络的时间主要跟传输数据个数成正比,和总线波特率成反比,可通过公式 $C_m = [N \times 8 + 64 + (N \times 8 + 54 - 1)/5]/S$

估算^[8],式中 N 为报文中包含的数据个数, S 为总线设定的波特率,报文格式最多含有64位(29位标识符)的控制信息。

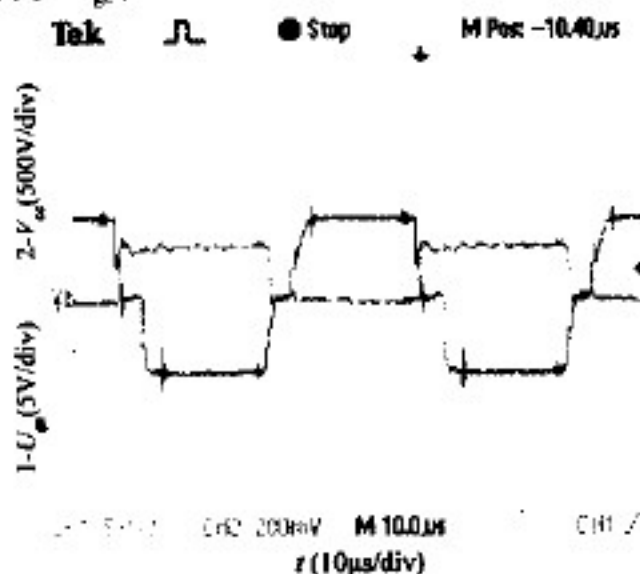
由于传输距离很短,波特率可达到500kbps以上,由上式可知传输延时为微秒级^[8]。而仲裁延时要根据总线状态和高优先级竞争总线的关系来决定。为提高效率,减少延时,本文在软件设计上采用RTX实时内核,通过优先级设定进行时间片抢占模式实现系统程序流程的优化设置,保证冗余智能模块的实时切入和故障功率模块的快速退出,确保整机不因个别功率模块出现问题而停机。

4 样机测试及分析

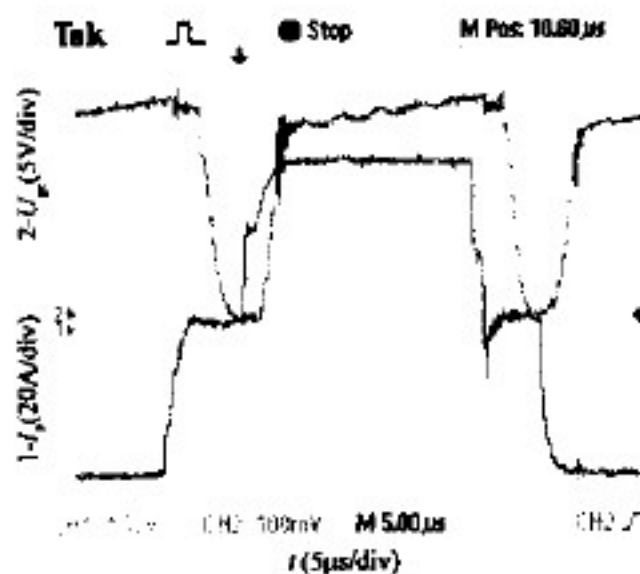
研制的等离子体加热电源样机采用“3+1”结构,单个模块的额定功率为25kW。利用示波器、传感器、高压探头及裂解实验平台开展相关实验。

4.1 功率驱动及软开关实验

图7为实测的驱动及工作波形。其中,标识2为驱动波形 U_{gr} ,正向幅值为+13V,反向幅值为-13V,



(a) 超前桥臂波形



(b) 滞后桥臂波形

图7 驱动及工作波形测试结果

驱动波形无畸变,关断期间无过零尖峰,导通期间波形较平滑,波形形状较好,在运行80min后稳定为48℃(室温28℃)。图7(a)为超前臂IGBT的驱动波形和集射极电压波形 V_{ce} 。在开通时,其反并联的二极管续流,管压降为零;而在关断时,其并联的电容使IGBT两端电压上升缓慢,基本实现超前臂的零电压开关。图7(b)为滞后臂IGBT驱动波形和变压器原边电流经快速整流之后的波形 I_p 。在开通时,由于饱和电感的作用,电流延迟一段时间上升,实现零电流开通。在关断时,由于隔直电容的作用,电流迅速衰减为零,基本实现零电流开关。

4.2 智能功率模块协同实验

利用两个智能功率模块模拟故障功率模块自动停机到冗余模块自动切入的过程,测量模拟负载的电压 U_L 变化情况。由于输出端未接滤波电容,波形毛刺较多,采用ORIGIN软件将采集点数据生成波形(见图8),切换响应的延时 t_d 在12ms左右。由于裂解炉的工作温度超过1400℃,而电子废弃物只需在1200℃以上停留2s便可实现较充分热解,因此,因个别功率模块的故障而导致冗余模块介入的短时间切换过程对裂解炉的温度变化影响很小。

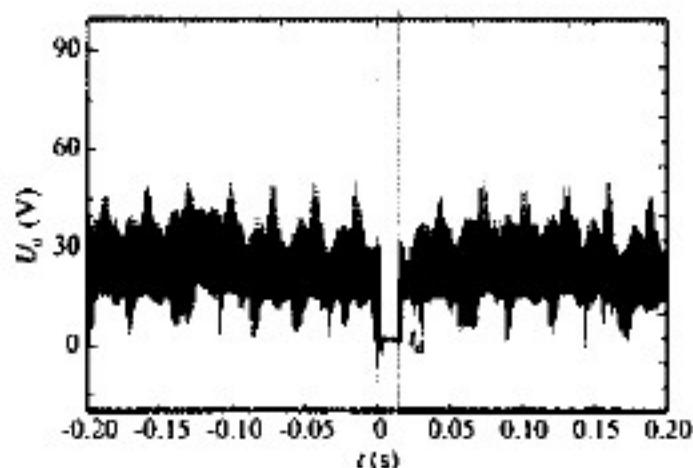


图8 在线及冗余模块故障模拟切换实验

4.3 裂解加热试验

利用自行研制的电子废弃物等离子体资源化裂解实验系统进行裂解加热试验,滤光处理之后的裂解加热过程照片如图9所示。等离子体射流长而稳,加热速度快,裂解炉的温度在2s内即可达电子废弃物热裂解工艺要求,等离子体电源稳定可靠,电能变换效率高达93%。

5 结论

由于利用移相ZVZCS高频逆变技术实现了电能的高效变换,通过ARM微控制器技术实现了数



图 9 加热工艺试验

数字化控制,利用 CAN 网络实现了各智能功率模块分层控制和实时协同,基于信号磁隔离调制原理研制的高性能驱动器实现了功率器件的可靠驱动和保护,因而研制的逆变式等离子体加热电源性能稳定可靠,效率高,能满足严酷的电子废弃物等离子体裂解加热工艺的要求。

参考文献

- [1] 丁恩振,丁家亮. 等离子体弧熔裂解—危险废弃物处理前沿技术. 北京:中国环境科学出版社,2009. 1-5
- [2] Wang Z M, Huang S S. A novel 300 kW arc plasma inverter system based on hierarchical controlled building block structure. *China Welding*, 2008, (4): 1-4
- [3] 黄石生,杜贵平,李阳等. 电弧等离子体及其高效电源. 华南理工大学学报(自然科学版), 2003, 31(10): 11-14, 19
- [4] Chen G, Burgos R, Liang Z, et al. Reliability-oriented design considerations for high-power converter modules. In: IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004. 419-425

- [5] Lee F C, Wang S, Xu M, et al. Optimized design of distributed power systems for high efficiency, high power density and low EMI noise. In: Proceedings of the 28th Annual International Telecommunications Energy Conference, Providence, USA, 2006. 1-12
- [6] Wang Z M, Zhang Q, Wu X M. Optimized design of plasma inverter based on bionics. *China Welding*, 2011, 20(3): 37-41
- [7] 黎林村. 磁分散电弧等离子体的实验研究与数值模拟[博士学位论文]. 合肥:中国科学技术大学, 2008
- [8] 关学峰. CAN 总线网络的实时性能分析、改进和测试[硕士学位论文]. 成都:西华大学, 2008
- [9] 胡雪莲,王雷,陈新. 基于 CAN 总线的并联 DC/DC 变换器数字均流技术. 电力电子技术, 2007, 41(3): 67-69, 84
- [10] Packnezhad M, Farzanehfar H. A fully soft-switched ZVZCS full-bridge PWM converter. In: IEEE Symposium on Industrial Electronics & Applications, Kuala Lumpur, Malaysia, 2009. 801-806
- [11] Solero L, Boroyevich D, Li Y P, et al. Design of resonant circuit for zero-current-transition techniques in 100-kW PEBB applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(6): 1783-1794
- [12] Rahimi K, Nazeran M A, Pakdel M. A new ZVZCS isolated DC-DC converter. In: IEEE International Conference on Industrial Technology, Gippeland, Australia, 2009. 1-5
- [13] Hunter G P. A reliable, low-cost IGBT gate drive circuit. *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 2009, 6(3): 213-219
- [14] 符赞宜,翟文龙,张旭. 平均电流模式 DC-DC 变换器均流控制方法. 清华大学学报(自然科学版), 2003, 43(3): 337-340
- [15] Jovanovic M M, Crow D E. A novel low-cost implementation of "demo-cratic" load-current sharing of paralleled converter modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, 11(4): 604-611
- [16] 王浩,刘进军,侯丹. 含均流环 DC-DC 变换器并联系统输出阻抗获取方法的研究. 电源学报, 2011, 1(1): 1-6

The design and performance test of a heating inverter for plasma based thermal pyrolysis of e-waste

Wang Zhenmin*, Zhang Qin**, Wu Xiangmiao**

(* School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

(** School of Computer Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

Abstract

A novel full digital prototype heating inverter with the high reliability and modular structure for plasma based thermal pyrolysis of e-waste was developed. The phase shifting zero voltage zero current switching (ZVZCS) technology was adopted to realize the high efficiency power conversion; An integrated high power driver was designed based on the magnetic isolation modulation principle to ensure the reliable drive and protection for the high power IGBT module; The SOC grade ARM microprocessor was used as the cybernetics core of the full digital intelligent controller, and the intelligent power electronic building block was established; Through CAN, the hierarchical control and cooperative operation among the intelligent power modules and the system controller were realized. The performance test of the heating inverter was carried out on the self-developed plasma based thermal pyrolysis system, and the results indicate that it can fulfil the demand of e-waste thermal pyrolysis.

Key words: e-waste, thermal pyrolysis, plasma, heating inverter, soft switching, digital control