

EAST 离子回旋加热系统高功率射频放大器 阳极电源的研制

王磊, 赵燕平, 毛玉周, 袁帅

(中国科学院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要:离子回旋共振加热是 EAST 超导托卡马克核聚变实验中重要的辅助加热手段。高性能的高功率射频放大器阳极电源对整个加热系统的稳定运行起重要作用。本工作设计了基于脉冲阶梯调制(PSM)技术的阳极电源及其控制保护系统,通过采集电源的实验数据对电源的设计进行了验证。实验结果表明,本阳极电源的设计和参数选择均是合理正确的,电源的开通和关断以及控制保护的数据指标完全达到设计要求。

关键词:脉冲阶梯调制技术;离子回旋加热;阳极电源;绝缘栅双极晶体管

中图分类号:TM924.75

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2009)10-0935-07

Design of Anode Power Supply of High Power RF Amplifier for Ion Cyclotron Resonance Heating System in EAST

WANG Lei, ZHAO Yan-ping, MAO Yu-zhou, YUAN Shuai

(*Institute of Plasma Physics, China Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

Abstract: Ion cyclotron resonance heating (ICRH) is a necessary auxiliary heating method in EAST Tokamak nuclear fusion experiment. It is very important to develop a qualified anode power supply for the operation of ICRH system. The anode power supply based on pulse step modulation (PSM) technology was designed. The experimental data show that the design of the anode power supply is reasonable.

Key words: pulse step modulation technology; ion cyclotron resonance heating; anode power supply; insulated gate bipolar transistor

离子回旋共振加热是中国科学院等离子体物理研究所 EAST 超导托卡马克核聚变实验中重要的辅助加热手段,其系统主要由高功率射频放大器、射频传输系统、天线 3 大部分组成。其中,高功率射频放大器是整套加热系统中提供功率的重要部分,将射频信号源输出的

mW 量级射频波放大到 MW 量级来实现能量注入。高功率射频放大器采用电子管作为功率放大器件,其电源系统由阳极电源、帘栅电源、偏压电源和灯丝电源 4 部分组成。阳极电源是电子管工作时的能量输出,即射频放大器放大输入信号时的功率完全来源于阳极电源。因

此,阳极电源的性能优劣直接决定了射频放大器的工作状态。本工作拟设计基于脉冲阶梯调制(PSM)技术的阳极电源及其控制保护系统。

1 阳极电源系统

PSM 技术是将阶梯调制(SM)技术和脉宽调制(PWM)技术相结合形成的一种重要的调制技术,主要应用于高电压、大功率直流电源系统。基于 PSM 技术的高压开关电源拓扑简单、输出电压连续可调、启动冲击小、运行可靠、效率高,其电路拓扑结构如图 1 所示。

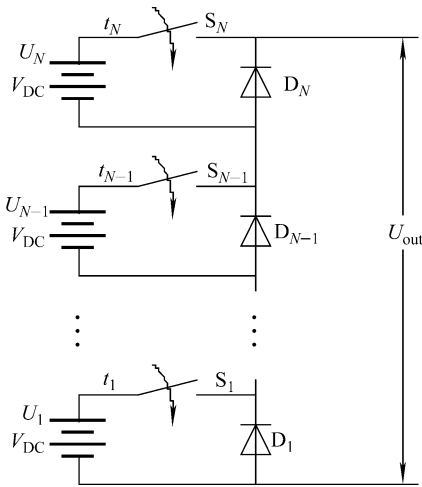


图 1 基于 PSM 技术的电源的电路拓扑结构

Fig. 1 Topology of power supply based on PSM

电源由若干相同的直流低压电源单元串联形成高压电源输出。每个低压电源单元包括 1 个直流电源、1 个开关 S 和 1 个旁路二极管 D。在开关 S 断开时电源单元通过旁路二极管为电源主回路续流,所以,任一电源单元的关断均不会造成整个电源的输出中断。

若电源由 N 个电源单元串联组成,其中 n 个电源单元导通($n-1$ 个单元全开通,1 个单元工作在 PWM 方式下),则电源的输出电压为:

$$V_{\text{out}} = (n-1)(V_{\text{DC}} - V_{\text{S}}) + V_{\text{PWM}} - (N-n)V_{\text{D}} \quad (1)$$

式中: V_{PWM} 为 PWM 工作方式下电源单元的输出电压,范围为 $0 \sim V_{\text{DC}}$; V_{DC} 为直流电源电压; V_{D} 为旁路二极管的导通压降; V_{S} 为开关 S 的导通压降。

设计阳极电源时,为减小输出直流电压的纹波系数,采用了 12 脉整流电路^[1]。电源主功率变压器采用 2 台移相变压器,其初级绕组相位分别为 $\pm 15^\circ$,每台变压器均有 16 组次级绕组输出。电源由 32 个相同的单元在直流侧依次串联而成,1#~16# 电源单元为第 1 组,使用 1 号变压器;17#~32# 电源单元为第 2 组,使用 2 号变压器。每个电源单元均由直流电源模块、控制保护模块和光电隔离系统组成,直流电源模块内部均设有旁路续流二极管。为确保操作人员的人身安全,采用光纤隔离系统将电源的高压部分和控制保护部分隔离开,通过光纤在两部分间进行控制信号和采集信号的传输。其中,1# 电源单元工作在 PWM 方式下,在其电路中另外设置了 1 套 PWM 控制系统。除对每个电源单元分别进行监测外,同时还设有电源总电流监测系统和总电压监测系统。阳极电源的原理图如图 2 所示。

电源设计工作参数为:输出电压可调范围, $0 \sim 19.2 \text{ kV}$; 输出电流, 20 A ; 进线供电,三相交流 10 kV 、 50 Hz ; 电源单元过流保护设定值, 40 A ; 电源主回路过流保护设定值, 25 A 。

2 电源单元

对于基于 PSM 技术的高压开关电源,开关管的选择及其驱动保护是关键因素。绝缘栅双极晶体管 IGBT 由 MOSFET 和晶体管技术结合而成。IGBT 综合了单极性器件功率 MOSFET 和双极性器件 GTR 及 GTO 的优点,具有输入阻抗高、工作速度快、通态电压低、阻断电压高、承受电流大等优点^[2]。本电源设计时选用富士公司生产的 6RI75G-120 型 IGBT 作为开关器件。

使用 IGBT 时,应注意以下几点:1) I_{CE} 过流保护、 U_{CE} 过压保护、过热保护等;2) 栅极正向驱动电压为 $12 \text{ V} \leq U_{\text{GE}} \leq 18 \text{ V}$,栅极负偏置驱动电压为 -5 V ,选择合适的栅极驱动电阻 R3;3) 选用内阻很小的驱动电源使栅极控制电压 U_{GE} 有足够陡的前后沿,减小 IGBT 的开关损耗;4) 栅极驱动电路要有较强的抗干扰能力,PCB 板布线合理,驱动电路与栅极连线尽可能短;5) 驱动电路和控制电路在电位上应严格隔离,高压场合时需通过光纤进行信号传输。

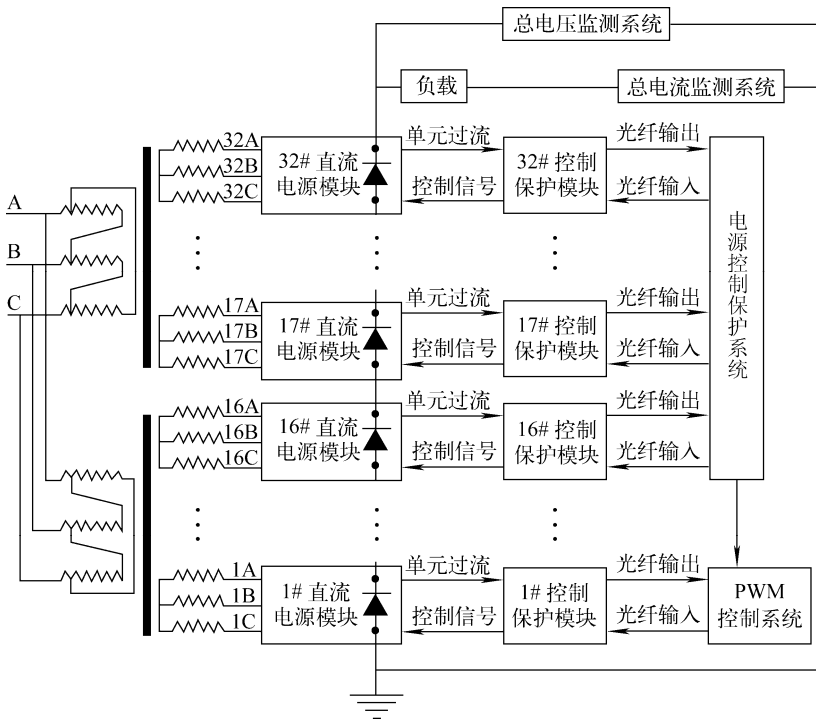


图 2 阳极电源原理图

Fig. 2 Schematic diagram of anode power supply

针对以上问题,本电源在设计时采用IGBT专用高速驱动 M57962L 进行驱动电路的设计、IGBT 模块 CE 极间并联 RC 吸收回路(图 3 中 R1 和 C1)、在主回路中串联抗干扰电感(图 3 中 L)等措施。

电源单元原理图如图 3 所示。电源单元分为直流电源系统和 IGBT 驱动保护系统两部分。

直流电源系统负责将变压器次级交流输入整流滤波为直流输出,输出端并联旁路二极管 D1;同时输出端并联工作指示电路,通过光纤送出指示电源单元处于工作状态的信号 A。

IGBT 驱动保护系统的工作原理是在单元高压回路中串接电流取样电阻 R2,通过采集电阻两端的电压(0~5 V)来反映回路中电流的大小。采集的电压信号 S 经光电隔离后,送至比较器的输入端,与预设的过流电压进行比较。当采集的电压超过设定值时,比较器输出 1 个低电平的过流信号,经 NE555 单稳保持电路使过流信号保持 1 s 后送至可编程逻辑器件 GAL16V8D。GAL16V8D 经逻辑运算后,将此信号分为两路送出,一路送给 IGBT 的驱动模块 M57962L,封锁 IGBT;另一路信号 C 通过光

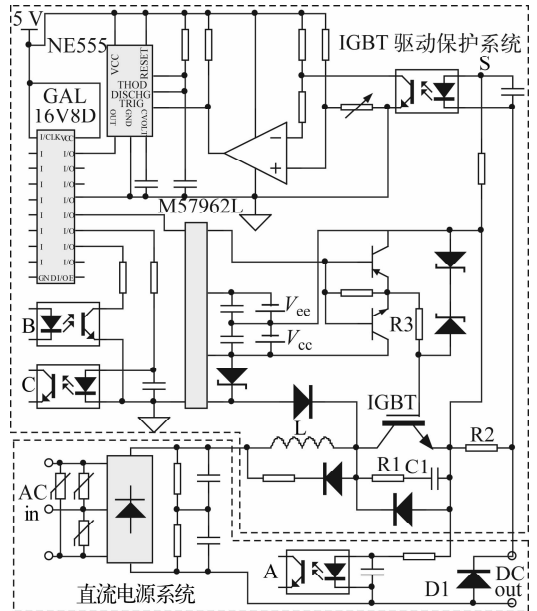


图 3 电源单元原理图

Fig. 3 Schematic diagram of power supply unit

纤发送给阳极电源控制保护系统,控制保护系统接收到该信号后,经逻辑处理,再通过光纤发送 1 个关断信号 B 给 IGBT 驱动保护电路,确保 IGBT 模块被可靠封锁。

3 电源控制保护系统

3.1 工作原理

电源控制保护系统是整套电源的核心控制保护部分,由 32 套单元控制保护系统、1 套主回路控制保护系统和 1 套人机界面组成。阳极电源控制保护系统的工作原理如图 4 所示。

1) 开通某一电源单元时,以 2# 单元为例,首先通过触摸屏在人机界面的设置菜单中将 2# 单元的工作状态设置为开通。按下人机界面的合高压按钮后,PLC 会先判断 2# 单元的 PLC 输入信号 F1 是否为高电平,若为是,则 PLC 执行程序打开 2# 光纤发送管,2# 单元的 IGBT 驱动保护系统在接收到光信号后,开通 2# 电源单元;若为否,则继续关闭 2# 光纤发送管。

2) 在电源运行中,关断运行中的某一电源单元时,在设置菜单中将该单元的工作状态设置为关闭即可,此时 PLC 会关闭相应的光纤发

光管,封锁该电源单元的 IGBT。当需阳极电源停止运行时,按下人机界面中的断高压按钮,则会以同样的原理关断所有的 32 个电源单元。

3) 阳极电源的过流分为单元回路过流和主回路过流两种情况。以 2# 单元为例,为在出现两者中的任意一种过流情况时控制保护系统均能及时响应,2# 单元控制保护系统首先将通过光纤传输的单元过流信号与主回路过流信号 G 相或,生成 1 个新过流信号 G1。当出现任一过流时,信号 G1 变为高电平,接通 2# 保持继电器的线包回路。通过继电器常闭接点的动作将 PLC 的 2# 输入信号 F1 变为低电平,PLC 接收到低电平信号后运行程序将信号 H1 变为高电平。由于 PLC 输出接点动作需一定的反应时间(约 10 ms),为提高过流保护的速度,信号 G1 还同时直接与信号 H1 相或。这样在出现过流时可先不经过 PLC,直接将过流信

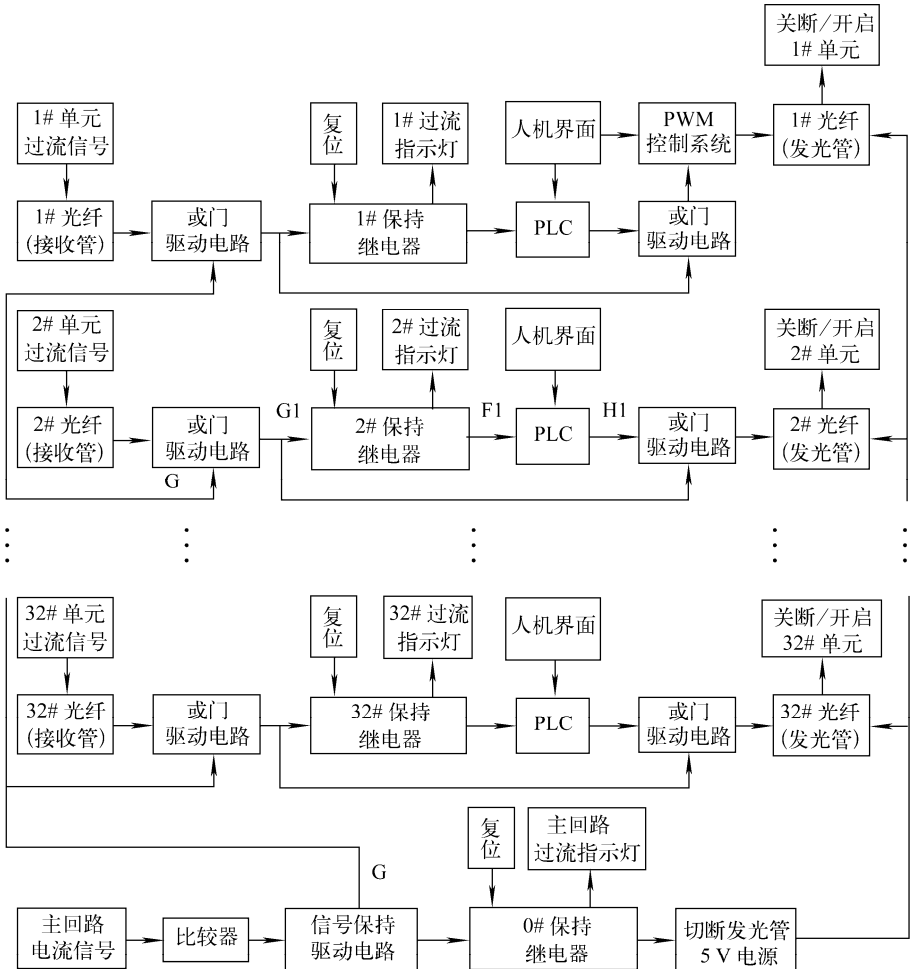


图 4 电源控制保护系统

Fig. 4 Control protection system of power supply

号送至或门驱动电路, 关闭 2# 光纤发送管, 封锁 2# 单元的 IGBT, 将 2# 单元从主回路中切除。其余正常单元通过 2# 单元中旁路二极管继续工作。

4) 主回路过流保护是将主回路中的霍尔电流传感器采集到的电流信号送至比较器, 与设定的正常电流信号进行比较。当出现过流时, 比较器的输出端产生 1 个高电平信号, 经由信号保持驱动电路送出保持 4 s 的主回路过流信号 G, 分别送至 32 个单元控制保护电路和 0# 保持继电器。在按照 3) 中所述工作原理关闭所有 32 个发送管的同时, 0# 保持继电器的常闭接点动作断开所有发送管的供电电源, 以确保实现整个系统的封锁。PLC 执行断高压程序, 阳极电源退出合高压状态。

5) 1# 单元的控制保护系统工作原理与其它单元相同, 只是在或门驱动电路与 1# 光纤发光管间加入了 1 套 PWM 控制系统, 通过在人机界面中输入所需的电压值来控制 1# 单元输出电压的大小。

6) 在回路过流发生后, 需对系统进行仔细的检修。在确认系统状态恢复正常后, 可按下复位按钮, 使所有已动作的保持继电器的接点复位, 解除系统封锁。

3.2 PLC 选型和编程

综合考虑各方面因素, 最后选定了 LS 产电株式会社生产的 MASTER-K120S 系列 PLC。该系列 PLC 指令丰富, 功能强大, 可靠性高, 便于扩展, 性价比高, 能够满足本控制保护系统的技术要求。PLC 系统配置为: 主机 K7M-DR60U(36 点输入, 20 点输出)+2 个扩展模块 G7E-RY08A(8 点输出)。

PLC 逻辑控制流程如图 5 所示。根据此逻辑控制的流程图, 利用 LS 公司提供的 KLG_WIN 编程软件设计 PLC 控制程序的梯形图^[3]。流程图中虚线方框内的流程为 PLC 1 个扫描周期内所执行的程序, 工作时 PLC 循环扫描。

3.3 PWM 控制系统^[4+6]

复杂可编程逻辑器件(CPLD)是一种用户根据各自需要而自行构造逻辑功能的数字集成电路, 具有运行速度快、抗干扰能力强、编程灵活等优点。本电源的 PWM 控制系统采用 ALTERA

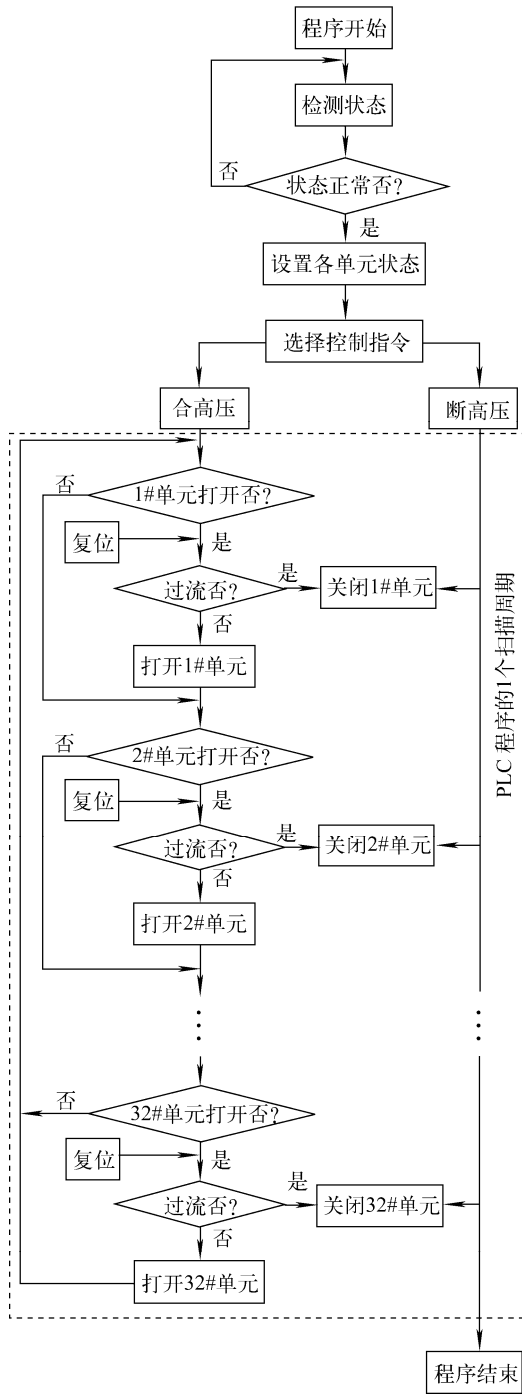


图 5 PLC 逻辑控制流程图
Fig. 5 Flow chart of PLC

公司生产的 MAX7000 系列 EPM7128AE 型 CPLD, 利用 VHDL 语言进行编程设计。通过在人机界面中输入所需的电压, 对 PWM 控制系统输出的 PWM 波形的占空比进行改变, 从而实现控制 1# 电源单元输出电压大小的目的。PWM 控制系统的原理图如图 6 所示。

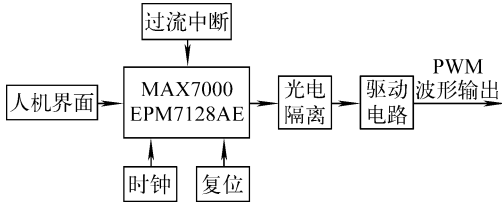


图6 PWM控制系统原理图

Fig. 6 Schematic diagram of PWM control system

3.4 人机界面

人机界面设计采用韩国 M2I 触摸屏公司生产的 TOP5TAS 型触摸屏,系统的整个控制过程可通过人机界面直接进行可视化操作,简单直观。操作人员可控制电源的开启和关断;在电源工作中可随时关断任一工作中的电源单元或开启任一未投入的电源单元;可对 32 组电源单元进行任意组合,设定相邻开通的两个电源单元的时间间隔;可对 PWM 控制系统输出电压进行控制。触摸屏与 PLC、CPLD 通过 RS-232 协议进行通信。

4 实验数据

为了解阳极电源真实的工作性能,对电源单元和阳极电源分别采集实验数据进行分析 and 比较。

4.1 电源单元开通和关断实验

在电源单元开通实验,纯电阻性负载,输出电压 600 V、电流 20 A 测试条件下的 IGBT 栅极驱动电压 U_{GE} (波形 1) 和 CE 极间电压 U_{CE} (波形 2) 的关系如图 7 所示,电源单元的响应时间约为 0.2 μs 。

在电源单元关断实验,纯电阻性负载、输出

电压 600 V、电流 20 A 测试条件下的 IGBT 栅极驱动电压 U_{GE} (波形 1) 和 CE 极间电压 U_{CE} (波形 2) 的关系如图 8 所示,电源单元的响应时间约为 1.4 μs 。

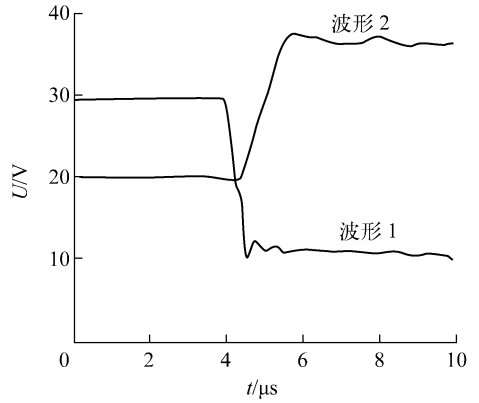


图8 电源单元关断波形

Fig. 8 Turn-off waveforms of power supply unit

4.2 阳极电源开通和关断实验

为尽可能获得电源的真实输出波形,减少采集过程中的波形失真,采用了电源输出端并联分压电阻进行电源波形采集的方式,采集电压与电源电压的分压比设定为 1 : 3 500。

测试条件:阳极电源各电源单元的开通时间间隔设置为 1 s。电源开通波形如图 9 所示。从波形上可体现出本电源基于 PSM 技术所表现出的阶梯调制特性,采集的电压最大值为 5.5 V,换算成电源最大输出电压为 $5.5 \text{ V} \times 3 500 = 19.25 \text{ kV}$,即电源输出电压的可调整范围为 0 ~ 19.25 kV。采集的波形与理论分析完全吻合。

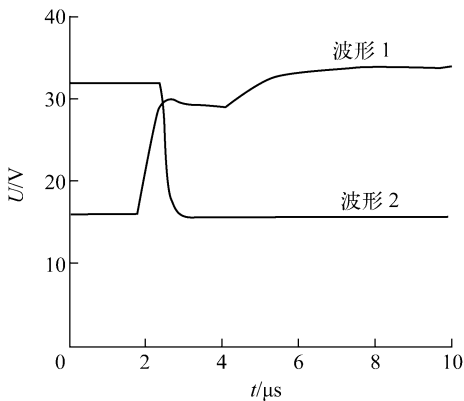


图7 电源单元开通波形

Fig. 7 Turn-on waveforms of power supply unit

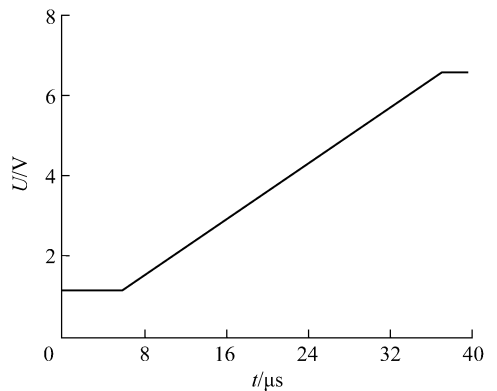


图9 阳极电源开通波形

Fig. 9 Turn-on waveform of anode power supply

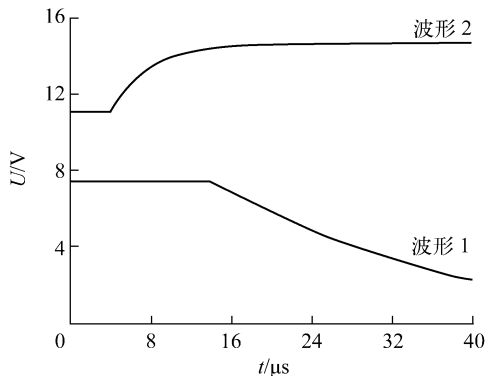


图 10 阳极电源关断波形

Fig. 10 Turn-off waveforms of anode power supply

测试条件: 阳极电源的负载为 100 kW 射频放大器 4CW100000E 电子管, 电源输出电压为 12 kV, 电流为 6 A。电源运行时, 将模拟过流信号送至阳极电源控制保护系统使电源带载关断, 电源电压(波形 1)与过流信号(波形 2)的波形如图 10 所示。从波形可看出, 控制保护系统接收到过流信号到电源开始关断的响应时间为 $4 \mu\text{s}$; 电源输出电压关断时间约为 $30 \mu\text{s}$ 。

将电源单元的关断速度和阳极电源的关断速度进行比较, 发现前者的关断远快于后者。这一方面是因 IGBT 模块的关断速度与其负载电流大小成反比, 另一方面, 单元实验时采用的是纯电阻性负载, 而电源实验时的负载是电子管及其调谐电路, 其中存在着电感和电容; 从电源电气结构上分析, 32 组模块间的连线及电源与电子管间的连线较长, 这些均可看成电感。以上各

种因素均会在微观时间(μs 量级)上对电流有阻碍作用, 但在宏观时间上则表现并不明显。

5 结论

实验结果证明, 本阳极电源的设计和参数选择均是合理正确的, 电源的开通和关断以及控制保护的数据指标完全达到设计要求。本阳极电源于 2008 年初完成制作、安装和调试, 已在 100 kW 射频高功率放大器中投入使用, 性能指标完全满足使用中的实际要求。

参考文献:

- [1] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 周志敏. IGBT 和 IPM 及其应用电路 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2006.
- [3] 关中俊, 黄永红. 可编程控制器原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [4] 何西凤, 黄念慈. 数字化通用 PWM 控制器的设计 [J]. 电源技术应用, 2006, 9(5): 1-5.
HE Xifeng, HUANG Nianci. Design of digital general PWM controller [J]. Power Supply Technologies and Applications, 2006, 9(5): 1-5 (in Chinese).
- [5] 包明, 包奎. 实现 PWM 脉宽调制的 FPGA 芯片研制 [J]. 电工技术, 2003(6): 30-31.
BAO Ming, BAO Kui. Development of PWM generator based on FPGA [J]. Electric Engineering, 2003(6): 30-31 (in Chinese).
- [6] 高有堂. EDA 技术及应用实践 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.