

The Analysis and Design of High Voltage DC Power Supply of ECRH for EAST*

Zhigang Yang, Jian Zhang, Yiyun Huang, Xu Hao, Qingming Zhao, Fei Guo

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei
Email: yangzhigang@ipp.ac.cn

Received: Sep. 2nd, 2013; revised: Sep. 20th, 2013; accepted: Sep. 26th, 2013

Copyright © 2013 Zhigang Yang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: High voltage DC power supply is one of the most important parts of ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating) system, and its stability and reliability directly affect the operation of the whole system. The article introduces a design method of ECRH, using PSM (Pulse Step Modulate) module power supply technology, which overcomes the shortcomings of the traditional high voltage power supply, such as large single volume, low efficiency, net side low harmonics pollution, lower power factor, larger output ripple, slower dynamic response and so on. Meanwhile, it has the capacity of 1 KHZ modulation. Furthermore, the simulations of the Simplorer Software and the results of experiment are provided to verify the accuracy of the proposed design method.

Keywords: ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating); High Voltage DC Power Supply; Pulse Step Modulator

EAST 装置 ECRH 高压直流电源的研究与设计*

杨志刚, 张健, 黄懿云, 郝旭, 赵庆明, 郭斐

中国科学院等离子体物理研究所, 合肥
Email: yangzhigang@ipp.ac.cn

收稿日期: 2013 年 9 月 2 日; 修回日期: 2013 年 9 月 20 日; 录用日期: 2013 年 9 月 26 日

摘要: 高压直流电源是 ECRH (Electron Cyclotron Resonance Heating) 系统最重要的组成部分之一, 其工作的稳定性与可靠性直接影响整个系统的运行。本文介绍了一种 ECRH 高压直流电源的研制方案, 用 PSM (Pulse Step Modulate) 模块电源技术, 克服了传统高压电源单机体积大、效率低、网侧低次谐波污染、功率因数低、输出纹波大、动态响应慢等缺点, 同时具备 1 kHz 的调制能力。并通过 Simplorer 软件仿真和实验, 验证了该设计方案的正确性。

关键词: 电子回旋共振加热; 高压直流电源; 脉冲阶梯调制器

1. 引言

目前研究核聚变的主要任务是实现托卡马克装置的稳态运行和提高高温等离子体的磁约束性能, 单靠欧姆加热场线圈的磁通变化是不能将电流长期维

持下去的, 因此必须发展非感应电流驱动装置即辅助加热系统。电子回旋共振加热(ECRH)是一种采用回旋管产生电子回旋共振波对等离子体加热的辅助加热手段。根据 EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) 装置实验计划, 预备在后期建造 4 MW/140 GHz 的 ECRH 辅助加热系统, 因此必须研制

*基金项目: ITER 计划专项(国内配套研究)——阴极高压直流电源技术研究(2009GB102004)。

相应高压直流电源。该高压电源具备长脉冲稳态加压模式，同时为了满足物理实验的要求，电源还需具备最高达 1 kHz 调制的能力。传统的基于高压线性调整管(四极管)的高压电源和基于晶闸管相控调节技术的高压电源，无法满足长脉冲稳态运行或 1 kHz 的调制要求；基于 PSM 技术的开关电源目前发展迅速，该电源不仅能够实现稳态运行，而且能够满足快速加载与脱载的要求，实现电源电压最高达 1 kHz 的调制输出，现已应用于诸多托卡马克装置的辅助加热系统^[1]。本文在研究 PSM 模块电源技术要求的基础上，对 ECRH 高压直流电源进行研究与设计。

2. 高压直流电源的组成及技术要求

大功率回旋管是 ECRH 系统的关键组件，其性能指标直接关系到高压直流电源的设计参数^[2,3]。EAST 研制的 ECRH140 GHz/4 MW 系统分两步完成，第一步是选择美国 CPI 和俄罗斯 GYCOM 的 140 GHz/1 MW 回旋管各一只，并联运行；第二步是在第一步运行的基础上选择两只美国 CPI 或俄罗斯 GYCOM 的 140 GHz/1 MW 回旋管，并联运行。为了减少和合理利用电源功率，先设计一套高压直流电源满足系统第一步运行要求，所需高压电源的主要技术参数如表 1。

ECRH 高压直流电源主要由 10 kV 开关柜、接触器柜，多绕组整流变压器，PSM 电源模块、RPSM 电源模块，限流电阻，假负载，上位机人机交互操作软件，光-电、电光接口转换电路，故障检测与处理装置，以逻辑控制器和脉冲控制器为核心的控制单元等组成。其中 PSM 电源模块是高压直流电源的技术核心，如图

Table 1. 2 MW main technical parameters of high voltage DC power supply
表1. 2 MW 高压直流电源的主要技术参数

项目	参数
电压/kV	70
电流/A	80
调压范围/kV	20~74
调压精度	0.5%
稳定度	1%
最大脉宽/s	3600
调制频率/Hz	1~1000
调制深度	0%~100%

1 所示，PSM 技术是通过 N 个相同采用 IGBT 控制输出的电源模块串联形成需要的各类电压等级的模式。由于 IGBT 器件的全控和高速(1~3 μs) 关断性能，可实现高压电源要求的快速上下沿以及快速保护的需要。和传统高压电源相比，PSM 电源的稳态特性优越，可靠性高，功率因数高，且无谐波污染^[4]。

3. 高压直流电源的研究与设计

3.1. 主回路的计算分析

图 2 是高压电源主回路拓扑结构图^[5]，交流电网通过 10 kV 开关柜、软启动接触器柜控制两台 3150 kVA 整流变压器的进线。整流变压器原边绕组组型是延边三角形，分别移相正负 7.5°，每台整流变压器有 44 个副边绕组，两台变压器共 88 个触头，交替星形和三角形接法。再经 PSM 电源模块三相全桥不控整流对负载(大功率回旋管)进行供电，每个电源模块输出为 6 脉波的直流电压，4 个模块串联组成一个 24 脉波整流电路。极大地降低了纹波系数，提高了电源的稳定性。

对于 24 脉波 3 相不控整流桥，单个 PSM 电源模块的输出电压是：

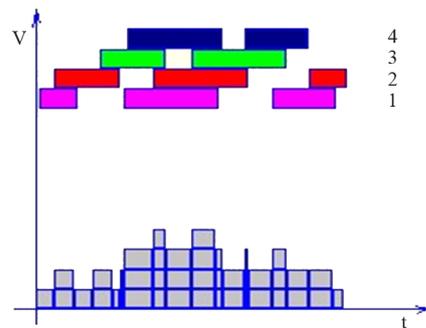
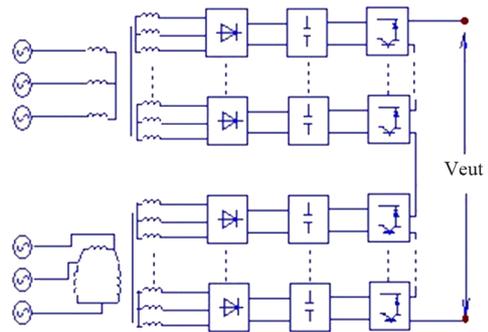


Figure 1. PSM mode and working principle
图 1. PSM 模式及工作原理

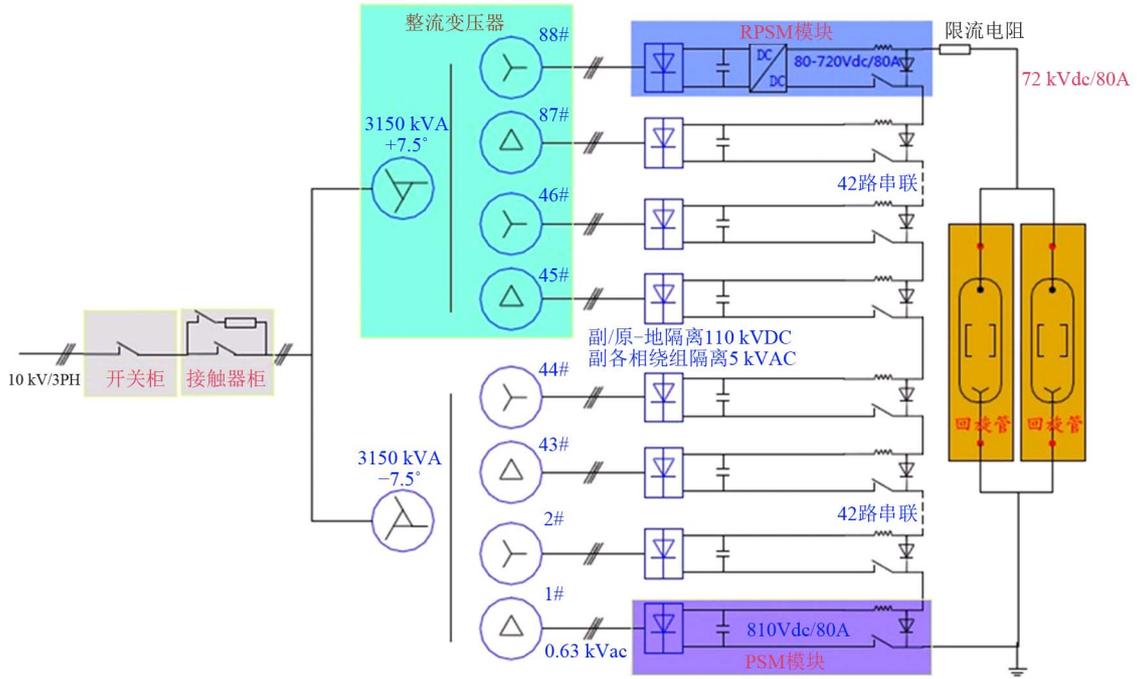


Figure 2. ECRH hv DC power supply topology
图 2. ECRH 高压直流电源拓扑结构

$$U_i = 1.35 * 630 * (1 - A\%) = 810 \text{ V} \quad (1)$$

其中, $A\%$: 整流变压器的短路阻抗, $A = 5$ 。

通过 IGBT 控制每个模块的输出, 88 个模块串联输出电压是:

$$U_o = n * U_i = 88 * 810 \text{ V} = 71.28 \text{ kV} \quad (2)$$

其电压纹波系数是:

$$\gamma_u = \frac{\sqrt{U^2 - U_{d0}^2}}{U_{d0}} * 100\% = 0.0315\% \quad (3)$$

理论上整套直流电源输出电压准确率是:

$$E\% = 1/2 * 88 = 0.57\% \quad (4)$$

如图 3 所示, 单个 PSM 电源模块的等效电路是一个二阶 RLC 系统的阶跃激励响应, U_i 为阶跃激励源, U_c 和 I_{L_s} 分别滤波电容两端电压和流过等效电感的电流, R_s 为软启动电阻, R 为负载等效电阻, C 为滤波电容, L 为变压器二次侧漏感等效电感, L_s 为限流电感, 在此电路中, k_1 是软启动电阻开关, 将 IGBT 理想化为快速开关, 用 k_2 表示。

初始情况下, k_1 和 k_2 断开, 即软启动电阻 R_s 通电, IGBT 断载, 经拉氏变换得到电容电压与阶跃激励的传递函数为^[6]:

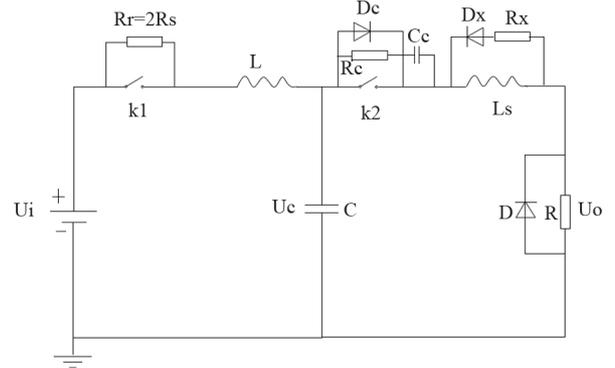


Figure 3. A theoretical analysis model of PSM power supply module
图 3. 单个 PSM 电源模块的理论分析模型

$$\frac{U_c(s)}{U_i(s)} = \frac{1/LC}{s^2 + s(R_s/L) + (1/LC)} \quad (5)$$

其中 $L = 1.6 \text{ mH}$, 期望得到两实轴极点, 取 $R_s = 10 \Omega$, $C = 3 \text{ mF}$, 则可得到 $R_s \geq 25 \sqrt{\frac{L}{C}}$, 初值为 $\frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=\infty} = 0$, 终值为 $\frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=0} = 1$, 此时 $\alpha_1 = -1/2R_sC$, $\alpha_2 = -2R_s/L$ 。 α_1 距离原点的距离远大于 α_2 距离原点的距离, 则 α_1 是主导极点。二阶 RLC 系统可以简化成一阶 RC 系统, 经过计算, 得到时域

表达式为:

$$U_c(t) = U_i(1 - e^{-\alpha t}) \quad (6)$$

通过软启动电阻控制充电电流保证前级电压稳定可靠建立后, k_1 和 k_2 闭合, 即软启动电阻 R_s 短路, IGBT 加载, 此时, 电容初始储能和电源同时激励负载 R , 分析可得到输出与输入的传递函数为:

$$\begin{aligned} \frac{U_o(s)}{U_i(s)} &= \frac{U_c(s)}{U_i(s)} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \\ &= \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{(R+sL_s)C} s + \frac{1}{LC}} * \frac{R}{R+sL_s} \end{aligned} \quad (7)$$

将实际负载电压的传递函数分解为滤波电容前 LCR 二阶电路环节和滤波电容后 RL 一阶电路环节, 滤波电容器前环节(仍包含电容器后限流电感和负载等参数):

$$\frac{U_c(s)}{U_i(s)} = \frac{s^2 + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{(R+sL_s)C} s + \frac{1}{LC}} \quad (8)$$

滤波电容器后环节:

$$\frac{U_o(s)}{U_c(s)} = \frac{R}{R+sL_s} \quad (9)$$

负载总传递函数为两环节传递函数的乘积, 初值为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=\infty} = \frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=\infty} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \Big|_{s=\infty} = 0 \quad (10)$$

终值为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=0} = \frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=0} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \Big|_{s=0} = 0 \quad (11)$$

由于负载电压及电流总传递函数是两环节传递函数乘积, 可见起始阶段主要由滤波电容器后限流电感 L_s 和负载 R 按 RL_s 的单独一阶过程决定。而当一阶过程结束后(终值为1), 负载电压(电流)的暂态总响应还是主要由滤波电容器前参数和负载共同决定, 即等于滤波电容上电压暂态及稳态, 只不过从零时刻起滞后端电压(即滤波电容电压) RL_s 的时间常数。

经过计算得到时域表达式:

$$\begin{aligned} U_o(t) &= U_i + e^{-\alpha t} \left(\cos \beta t - \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t \right) U_i \\ &\quad - e^{-\alpha t} \left(\cos \beta t + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t \right) U_i \\ &= \left(1 - \frac{2\alpha}{\beta} e^{-\alpha t} \sin \beta t \right) U_i \end{aligned} \quad (12)$$

式中, $\alpha = 1/2RC$, $\beta = \sqrt{1/LC}$ 。

当 k_2 断开, 即 IGBT 脱载, 主回路各等效电感(漏感, 电缆等杂散电感)及滤波电容通过 IGBT 开关的 RCD 回路或分布电容与负载继续导通, 继续分析, 得到输入输出传递函数为:

$$\begin{aligned} \frac{U_o(s)}{U_i(s)} &= \frac{U_c(s)}{U_i(s)} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \\ &= \frac{s^2 + \frac{1}{RC} s + \frac{1}{LC}}{s^2 + \frac{1}{\left(R+sL_s + \frac{1}{sC_{RCD}} \right) C} s + \frac{1}{LC}} * \frac{R + \frac{1}{s} L_s * R_s}{R+sL_s + \frac{1}{sC_{RCD}}} \end{aligned} \quad (13)$$

还是分为两级电路分析, 电容器前为 LCR 二阶电路, 电容器后是集中 RCD 电容 C_{RCD} 和限流电感(含杂散电感) L_s 二阶电路。负载总传递函数为两环节传递函数的乘积, 初值为

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=\infty} = \frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=\infty} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \Big|_{s=\infty} = 1 \quad (14)$$

$$\frac{U_o(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=0} = \frac{U_c(s)}{U_i(s)} \Big|_{s=0} * \frac{U_o(s)}{U_c(s)} \Big|_{s=0} = 0 \quad (15)$$

经过计算得到时域表达式:

$$U_o(t) = U_i e^{-\alpha t} \left(\cos \beta t + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta t \right) \quad (16)$$

式中, $\alpha = R/2L_s$, $\beta = \sqrt{\frac{4L_s - (R * C_{RCD})^2}{4L_s^2 C_{RCD}}}$ 。

根据时域表达式, 用 Simplerer 软件对 PSM 单模块等效电路进行仿真, 得到 IGBT 开通和关断时不同等效负载电阻输出波形, 如图4所示, 初步验证了 PSM 单模块电源分析和设计的合理性与正确性。

3.2. 控制电路的设计

ECRH 高压直流电源的控制系统主要分为三层:

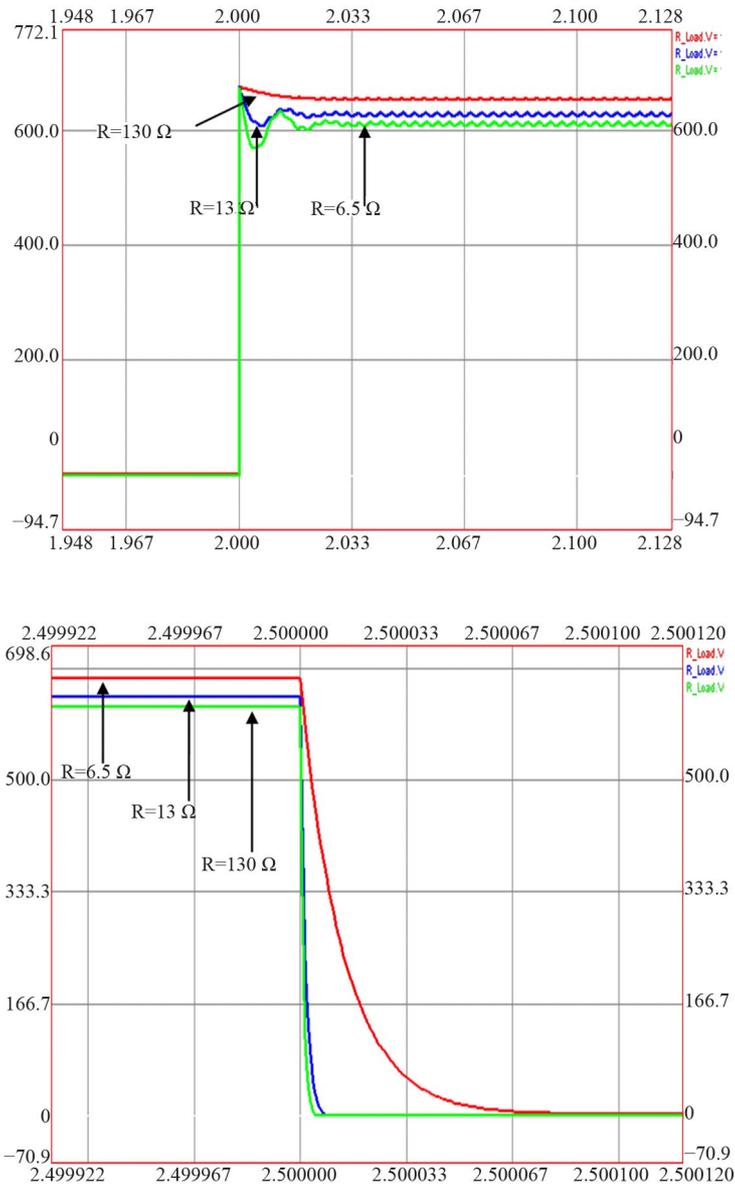


Figure 4. The simulation waveform of IGBT open and shut off under different equivalent load
 图 4. IGBT 开通和关断时不同等效负载下输出仿真波形

上位机人机交互层、现场控制层和受控设备层，如图 5 所示。人机交互层软件是利用基于 Windows XP 的 Delphi 编写的，通过位于现场或远程的监控计算机选择 PSM 电源系统的工作模式，并设置相关参数；相关数据通过 RS232 串行通信线传输给整套控制系统的核心运算部分现场控制层。现场控制层包括基于单片机的逻辑控制器和基于 FPGA 的脉冲控制器。其中单片机逻辑控制器包含了对外部设备的信息和电源的状态信息的处理，能够实现对软启动柜的控制和电源的故障锁存。根据设计方案：过流设定值、PDM 预

设定值、故障信号接收与分接触器保护、现场电压电流值传至上位机显示等信息均由单片机逻辑控制器来处理，主要信号流程是上位机通过 Delphi 编制的上位机界面，设定总电压值，经自动计算，将 PDM 的电压值送入单片机处理，将处理完之后发送到远端 PDM 模块中，通过模块内部的 PWM 调节占空比，来调整可调模块的输出电压值，而可调模块回路的另一个开关量由 FPGA 通过光纤进行数字控制，从而达到与前 83 个可调模块一样的开关效果。采用基于 FPGA 的脉冲控制器来控制 PSM 模块，利用该脉冲控制器，

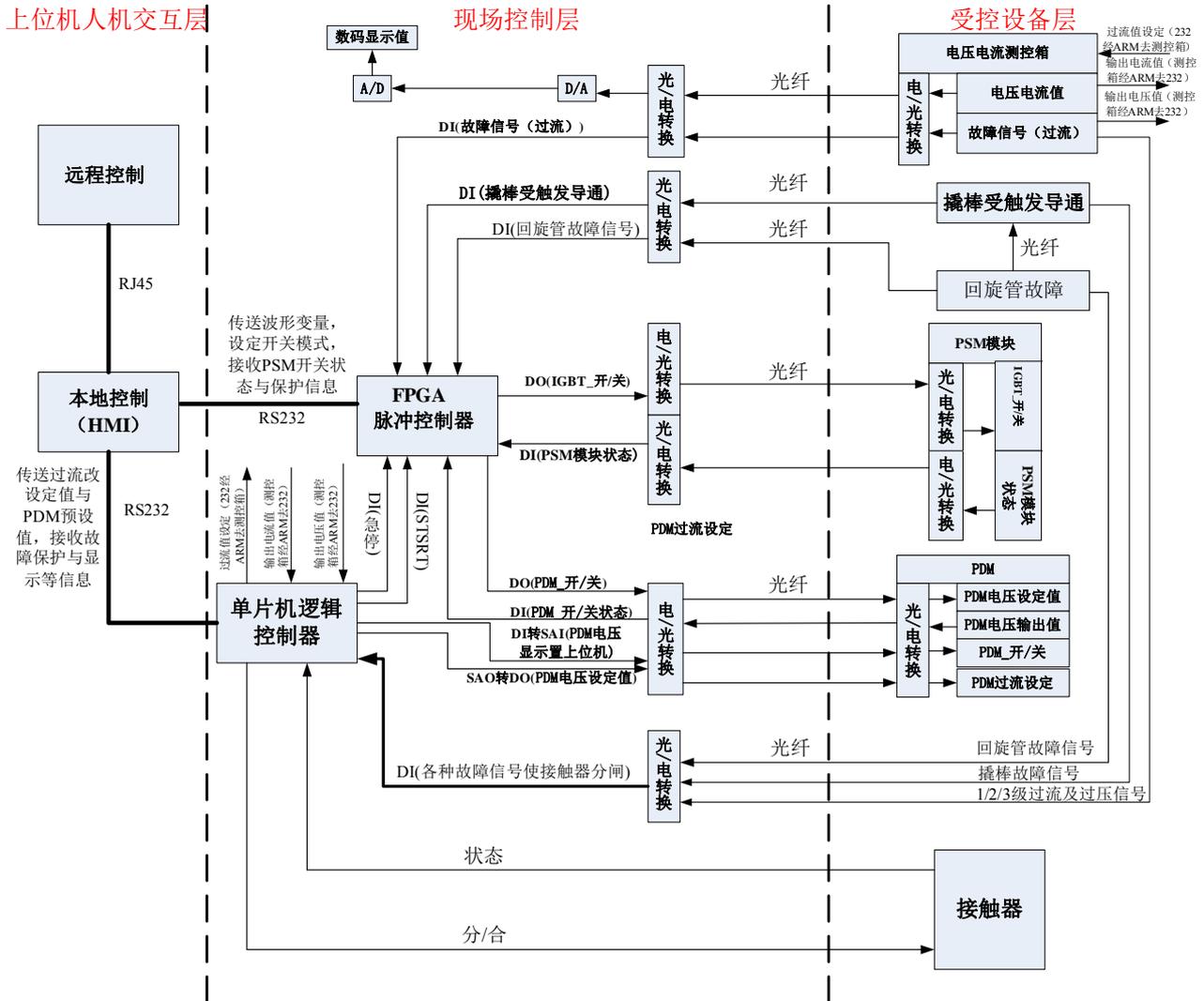


Figure 5. ECRH hv DC power supply block diagram of control system
图 5. ECRH 高压直流电源的控制系统框图

我们能够实现 PSM 电源模块精确 1 μs 间隔时间的投入与切除，满足了 PSM 电源对输出电压苛刻的上升沿和下降沿的要求；同时脉冲控制器也参与快速保护，可以在 1.2 μs 内完成电源模块开关控制数字量的全部关断，从而达到有效保护回旋管的目的。受控设备层的故障检测与处理装置是电压电流测控箱，它将检测到的电压电流直接通过光纤隔离传输的高速模拟量传送装置显示在控制机柜的数码表头上，而通过电压电流测控箱后比较出的故障信号是一个数字量，一方面送至 FPGA 脉冲控制器中关闭所有 DO 量的输出，另一方面送至单片机逻辑控制器中按设定逻辑分接触器。而其中的数字量都是通过接口转换电路转换

成光信号进行传输的。

将控制系统的核心运算部分分为逻辑控制器和脉冲控制器两个单元有 3 个优势：①将逻辑控制部分(主要包括状态锁存与故障连锁)与脉冲控制部分(主要包括对 PSM 模块的控制)分开，简化了软件的复杂程度，便于维护和修改；②脉冲控制器可以作为逻辑控制器故障后的后备保护，有效的提高了控制系统对高压电源故障处理的可靠性；③逻辑控制器主要实现组合控制，脉冲控制器主要实现时序控制，将所有组合控制从脉冲控制器中剥离可以大大提高 FPGA 的定时精度，从而实现对 PSM 模块精确的 1 μs 的控制。图 6 是利用 simplorer 软件对不同调制频率下 PSM 单

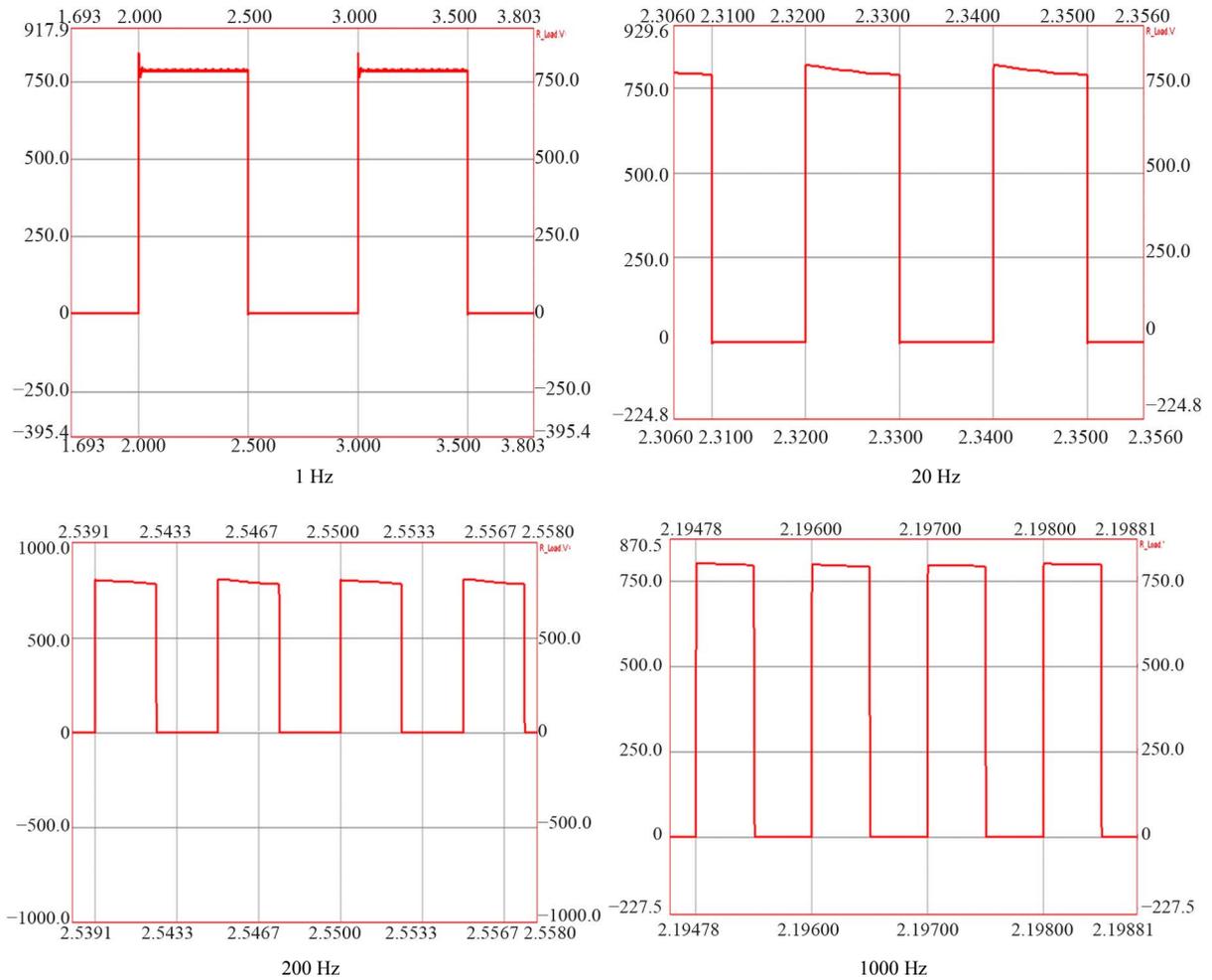


Figure 6. PSM single module output voltage simulation waveform of different modulation frequency

图 6. 不同调制频率下 PSM 单模块输出电压仿真波形

模块输出电压的仿真波形，初步验证电源具有从 1 Hz 到 1 kHz 的调制能力^[7]。

3.3. 保护电路的设计

在电路运行过程中，由于可能出现的各种因素的影响，会造成电路过压、过流故障，这些故障不但会对电源本身带来影响，也会损害到回旋管。因此为了使整流电路和元器件能够长期稳定可靠运行，除了充分留有余地的选择各元器件外，完善可靠的保护措施也是必不可少的^[8]。本高压直流电源设置了三级保护：第一级保护为三电极气体开关保护，当负载发生打火故障时，三电极开关会在 μs 级时间内将高压输出短路，保护负载不受损害。第二级保护为 IGBT 快速关断保护，当 PSM 模块输入过流时，IGBT 会在 ms 级内关断，从而切断电源与负载的回路，保护负载。第三级保护

为控制系统的保护，故障检测装置将故障信号通过光纤传递到控制系统，发出驱动信号，跳开真空断路器。前两级保护动作时间快，用于回旋管系统过流、打火、过压等保护时间要求高的快保护；第三级开关动作较慢，用于过压、欠压等保护时间要求不高的慢保护。

4. 实验结果

根据上面的设计思路，首先分别对 PSM 单模块、PSM 多模块串联、单片机逻辑控制器、FPGA 脉冲控制器和保护性能等进行了分系统调试，然后对整机进行了调试。调试结果如图 7、图 8 和图 9 所示。图 7 是电源 1 kHz 调制输出波形，CH3 为电流直接测量信号，CH4 为 40 kV 探头接在第 42 个模块负端输出的位置，精度为 1:1；图 8 是模拟负载短路情况的波形图，我们可以看到，83 个模块串联输出 70 kV，保护

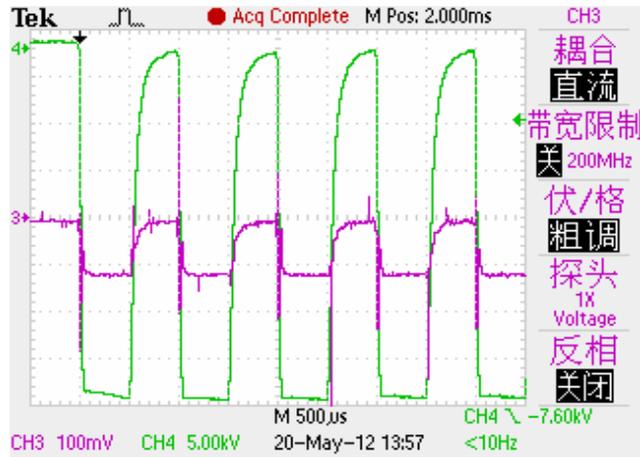


Figure 7. 1 kHz modulation output waveform
图 7. 1 kHz 调制输出波形

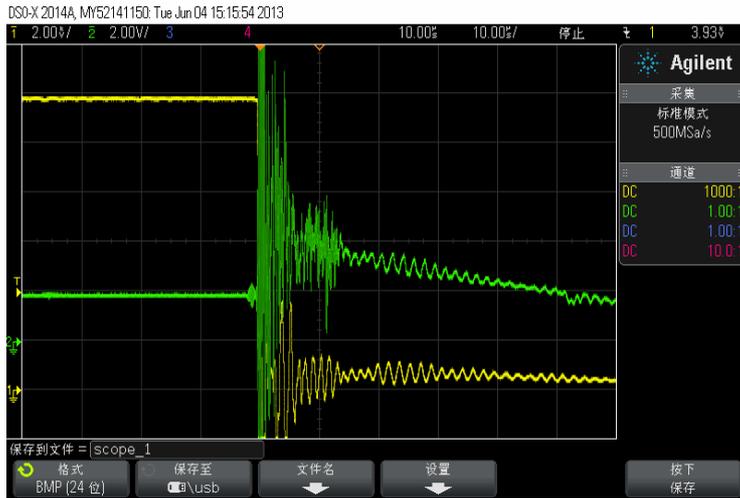


Figure 8. Power supply short circuit output voltage and current waveform
图8. 负载短路时输出电压和电流调试波形



Figure 9. Power supply normal output voltage and current waveform
图9. 电源正常输出电压和电流波形

值设置 88 A 开通, CH1 为因探头耐压原因只测到 14 个模块输出的电压, CH2 模块输出电流, 电流 82 A 稳定输出, 短路后电流最高冲到 200 A 开始下降, 响应时间为 3.5 μs , 完全关断小于 10 μs ; 图 9 是电源正常输出电压波形图, 模块开通和关断时间间隔为 1 μs , 开通 83 个模块, 输出电压 67.2 kV, 输出电流为 81.6 A, 符合了根据设定参数拟合的波形, 验证电源的设计合理。

5. 结论

PSM开关电源技术在设计高功率直流电源方面, 具有稳态特性优越, 可靠性高, 功率因数高, 且无谐波污染等优点, 已成为当前辅助加热电源普遍采用的研制方案。本文从经典控制理论的角度对基于PSM电源模块技术设计的高压电源进行了分析和研究, 为 EAST装置ECRH系统设计了一套2 MW的高压直流电源, 满足高功率长脉冲稳定输出以及高功率输出条件下的快速关断, 控制简单, 保护迅速, 输出连续可调, 且具有1 kHz调制能力; 通过仿真和实验, 说明了高压直流电源的性能满足ECRH系统回旋管的供电需求, 验证了电源设计的正确性与合理性。

6. 致谢

感谢辅助加热低杂波电源和电子回旋电源课题组全体同志的辛勤工作, 诚挚感谢等离子体物理研究所其他部门的大力支持和帮助。

参考文献 (References)

- [1] 赵庆明, 张健, 黄懿赟等. 基于 FPGA 的 PSM 高压电源脉冲控制器的研制[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 33(3): 284-288.
- [2] 陈文光, 康自华等. HL-2A 装置 ECRH 阳极高压电源系统研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009, 29(3): 239-243.
- [3] 宣伟民, 姚列英等. HL-2A 装置 ECRH 主高压电源的研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2008, 28(2): 136-141.
- [4] X. Hao, Y. Y. Huang. The design of high voltage DC power supply of 4.6GHz/500MW LHCD. Applied Mechanics and Materials, 2011, 135-136: 1027-1036.
- [5] 徐伟东, 宣伟民等. 基于 PSM 技术高压脉冲电源的模拟实验[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 110-113.
- [6] A·布达克. 电路理论基础及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [7] 赵庆明. 基于 FPGA 的 PSM 高压电源脉冲控制器的研制[D]. 中国科学院等离子体物理研究所, 2013.
- [8] 杜少武, 丁同海, 徐宁, 刘宝华, 张崇巍. ECRH 负高压脉冲电源系统保护特性研究[J]. 核聚变与等离子体物理, 2003, 23(4): 239-242.