

HL-2A MW 级中性束注入系统弧流电源设计

陈文光, 饶 军, 李 波, 雷光玖, 康自华, 王明伟, 冯 鲲

(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 中性束注入是磁约束受控核聚变实验装置中加热等离子体最有效的方法之一。针对中国环流器 2 号中性束大功率离子源的特点, 从系统功能、主电路拓扑结构、控制硬件及控制时序等方面对弧流电源进行设计。整个电源由低位移相交流调压、高压隔离降压变压器、整流滤波和电流快速转移电路 4 部分组成。IGBT 与电阻串联组成电流快速转移阵列电路, 与离子源并联, 可实现电流单次或多次快速转移、参数远程设定, 有效用于强流离子束的引出和保护。选用 DSP 和 CPLD 电路技术实现低位与高位控制器。实验数据显示, 该电源最大输出为 200 kW/1 000 A, 纹波小于 2%, 开关上升下降时间达 μs 级。目前, 该电源已安全运行 3 年, 可靠性高, 完全满足装置离子源及系统要求, 也可应用于其它等离子体技术应用场合。

关键词: 中国环流器 2 号; 中性束注入; 弧流电源; 强流离子束; 高电压

中图分类号: TL623

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)03-0379-06

Technical Design of Arc Power Supply for MW Neutral Beam Injector System on HL-2A Tokamak

CHEN Wen-guang, RAO Jun, LI Bo, LEI Guang-jiu, KANG Zi-hua,

WANG Ming-wei, FENG Kun

(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: Neutral beam injection (NBI) is one of the most effective ways to heat plasma in Tokamak. The arc discharge ion source of NBI on HL-2A Tokamak is the bucket cusped multiple magnetic field ion source. According to the characteristics of the ion source and requirements of system, the technical design of the arc power supply was expounded from several aspects of its function, main circuit topology, control hardware circuits and control sequence. The apparatus includes phase-shifted AC low-voltage regulator, high-voltage isolated step-down transformer, and rectifier with an output filter and the notch circuit. IGBT in series dummy resistance load and parallel with ion source was implemented in the notch circuit, and it can shift the current instantaneously single or multiple times to make the NBI system operating safety in the process of intense current ion beam extraction or to protect arcing in grids. The low-level-voltage and the

收稿日期: 2010-08-27; 修回日期: 2010-10-28

基金项目: 国家科研专项资助项目 (HL-2APTS-1-01)

作者简介: 陈文光 (1968—), 男, 湖南茶陵人, 副教授, 博士研究生, 从事磁约束聚变装置电源技术研究

high-level-voltage controller adopted the high performance digital signal processor and complex programmable logic device. The experimental waveforms prove that the maximum output capacity specification of the arc power supply is 200 kW/1 000 A, ripple is less than 2%, turn off time can achieve several microseconds. The arc power supply has operated safely for three years, and it meets the requirements of the system and the ion source device.

Key words: HL-2A; neutral beam injection; arc power supply; high intensity ion beam; high-voltage

在磁约束受控核聚变实验装置中,中性束注入(NBI)加热等离子体是提高离子温度,或用于驱动等离子体电流并控制等离子体性能的最有效方法之一。国内于 20 世纪 90 年代在 HL-1M 上对 1 个离子源的 NBI 有关技术进行了研究^[1]。由于当时电子技术发展水平的限制,使用模拟芯片作为控制器,可关断晶闸管(GTO)为直流快速开关,驱动电路复杂,易出现故障;当输出弧电流过大时,弧等离子体易发生振荡现象^[2]。国外只有少量文献提及,但技术细节不详^[3-6]。目前,中国环流器 2 号(HL-2A)装置已建成 MW 级 NBI 辅助加热系统,在近 3 年的物理实验中开展了高参数注入实验,注入中性束功率超过 0.7 MW,瞬时离子束功率超过 2.2 MW,脉冲宽度为 1 s,在国内首次使等离子体离子温度超过 2.0 keV。整个 NBI 系统采用 4 个大功率桶式会切磁场约束的弧放电离子源,因原来弧流电源的设计及其性能不能满足目前系统的要求,需重新设计。NBI 是一项多学科的复杂工程技术,本工作仅对弧流电源进行设计。

1 HL-2A 装置 NBI 离子源电源系统

图 1 为离子源及其电源系统连接示意图。主要包括放电电源、引出电源及辅助束线电源 3 大类^[1,7]。放电电源由灯丝电源(Fil-PS)、弧流电源(Arc-PS)和送气电源组成;引出电源包括加速极电源(Acc-PS)和抑制极电源(Dec-PS);辅助束线电源包括偏转磁体电源(Mag-PS)和钛泵电源。灯丝电源用于加热阴极灯丝,当达到电子发射温度时,由送气电源启动工作气体阀门,电子碰撞气体,在弧流电源的放电下,产生足够高的温度、密度和时间空间分布的等离子体;加速极电源从气体放电等离子体中

引出强流离子束,然后将离子束加速,加速后的高能离子束进入中性化室,与气靶碰撞捕获电子,完成中性化,最后将高能大束流的中性粒子束漂移到托克马克装置等离子体中,在等离子体中,中性粒子通过碰撞电离,从而实现等离子体加热和电流驱动。未中性化的粒子在偏转磁体的作用下,被吞噬器吸收。抑制极电源主要用于稳定引出电流和抑制反向电子流扰动弧流及对灯丝的轰击。偏转磁体电源供给线圈用于产生偏转磁场,钛泵电源供给钛丝,通过钛丝升华,在中性化室获得合适的真空度。各电源在整个系统中相互制约影响,所以弧流电源的设计必须兼顾其它电源。参数指标如图 1 所示。

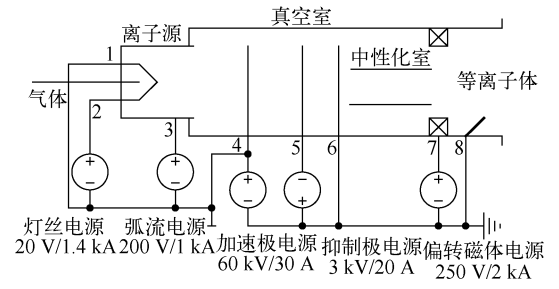


图 1 离子源电源系统连接示意图

Fig. 1 Power supplies connection schematic for ion source

2 NBI 大功率弧流电源设计

2.1 弧流电源的要求

理论和实践证明,欲使引出系统处于最佳状态,弧放电等离子体密度 n_e 与引出电压 V_a 满足 $n_e \propto V_a^{3/2}$ 关系。此时引出电流与等离子体密度成正比^[7]。考虑到 MW 级注入功率,因此,弧流电源需满足下列要求:1) 弧流大小可调,恒流方式输出,最大输出 200 kW/1 000 A,工作脉宽 5 s;2) 实现电流闭环控制,满足脉冲波形平顶阶段稳定性要求,纹波小于 2%;3) 输

2.2 弧流电源主电路设计

图 1 中电源之间的连接有利于束流的引出。加速极电源正极、加速电极、弧流电源负极及灯丝电源负极四者相连,形成高压悬浮点;加速极电源负极、抑制极电源正极、偏转磁体电源负极与中性化器外壳相连,构成 NBI 系统接地。由于灯丝与弧流电源浮在加速极电源上,所以,弧流电源与供电电网及大地间需隔离

根据上述要求设计了如图 2 所示的电源主电路拓扑结构。将整个弧流电源分为 4 个部分构建:1) 低压交流调整部分,由电力变压器 Tr1、晶闸管组及低压控制器组成,Tr1 变比为 1,初级为 Δ 连接,次级为 Δ 和 Y 连接各一,两组对应绕组相差 30° ,从而获得 12 脉整流需要的正弦交流电,减小对电网的谐波干扰,变压器利用系数高;2) 降压变压器 Tr2,采用油冷却,变比为 380/160,多层屏蔽,一层接地,初级与次级对地分布电容小于 500 pF;3) 由双六脉波整流、LC 滤波电路;4) 绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 电流快速转移电路(又称为打坑电路)及其控制器。其中,后两者安装在 1 个柜内,靠近离子源,称为高位部分。高低部分之间用传输线连接。

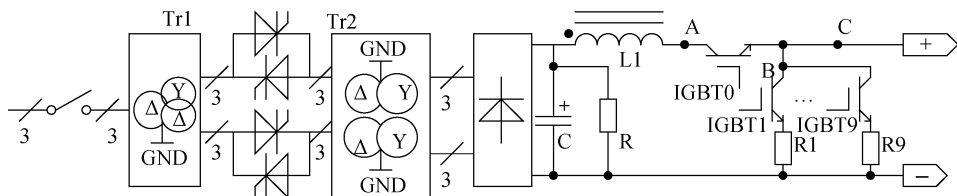


图 2 弧流电源主电路原理图

Fig. 2 Main circuit of arc power supply

弧流电源的伏安曲线是一族曲线带。分析电源外特性与负载伏安特性曲线可知,提高弧流的稳定性可通过增加弧流电源变压器短路电抗,或人为地串联电抗器来达到目的,可限制打火状态下的短路电流。但这些方法会增加电源的空载输出电压,过高的输出电压不利于与离子源的阻抗匹配,易击穿等离子体。所以,在主电路设计时,在参数稳定法的基础上,适当增加电感 L_1 的大小,并通过低位控制器检测 A 点的输出电流,使用 PID 调节器调节低压部分晶闸管的开通角,实现电流闭环控制。但这是一滞后惯性系统,大电流输出状态下很难实现系统快速响应,以及开启和断开功能。于是,在整流电路的后面串联了固态全控器件 IGBT0,用于在离子源发生意外情况下的快速保护。

其余 IGBT 与 R 串联组成打坑电路。所谓打坑技术就是 A 点电流基本稳定并流向 C 点放电室真负载的情况下,利用 IGBT 快速开

关的性质,使部分电流转移到 B 路电阻假负载上。其本质就是电流快速转移电路,电流转移的比例称为打坑深度,IGBT 开通时间称为打坑宽度。打坑深度由多个 IGBT 编码与电阻大小确定,打坑精度由 IGBT 管的数量确定,以 7 只 IGBT 为准设计打坑电路,电阻的大小按最大等效负载 $0.2\ \Omega$ 的 2^N 顺序编码排列,后两个 IGBT 用于电流的精确调整。

打坑电路的优点是可根据各种实验要求,配合其他电源实现离子束光学性能的匹配,在加速极电压加入时,防止放电室过高的等离子体密度而引起加速极电源电流过大而保护,防止弧流电源进入负阻区引起打弧。

上面这些设计完全可满足弧流电源的要求,然后在设计闭环控制的参数时,将晶闸管和整流装置的传递函数近似为时间常数为 1 ms 的一阶惯性环节,利用 Matlab 中的 SISO tool 系统进行控制参数的优化设计。

2.3 控制电路设计

控制电路包括低位和高位控制器。将控制电路进行模块化设计,分别设计了 CPU 板、辅助供电板、数字量输入输出板、脉冲功放板、脉冲功放电源板、光纤接收板、光纤发送板、模拟量输入板、VF/FV 电路板以及同步信号电路板等。CPU 板主要由 TMS320F2812 和 CPLD EPM1270T144 组成。

低位控制器原理框图如图 3a 所示。DSP 在此完成参数的设定、信息显示、晶闸管移相角的计算以及与中控计算机通讯等功能;而 CPLD 主要完成地址译码、三相同步信号的锁相环技术、六脉波触发信号列的形成、数字量的输入输出和保护接口等功能。图 3b 为高位控制器的原理图。主要完成通讯以及打坑控制。

工作过程为:上位计算机与低位和高位控制器通过 RS232 设置输出电流上升时间、平顶

脉宽、下降时间、额定电流大小等参数,在低位和高位部分正常情况下,PLC 向 IGBT0 发出启动信号,高位控制器收到 IGBT0 启动信号后,向 IGBT0 模块发出动作信号,IGBT0 模块向低位发出信号,同时低位向中控返回 IGBT0 状态信号。如果这个信号不正常,中控中的状态监测将显示故障,整个 NBI 不能进入流程。IGBT0 启动后,低位部分开始输出,高位 A、C 点的电流经 V/FC、光纤、F/VC 送入低位控制器,实现 A 点电流的恒流控制,当输出电流达到额定值时,低位向高位和中控发出额定态触发信号,只有输出达到额定态才能加上其他电源。打坑启动信号来自中控,打坑深度、宽度通过设置外部的 μs 信号时序发生器决定。同时高位控制器也对电压电流进行采样,并通过 IGBT8~9 实现 C 点电流在稳态情况下的精确调整。

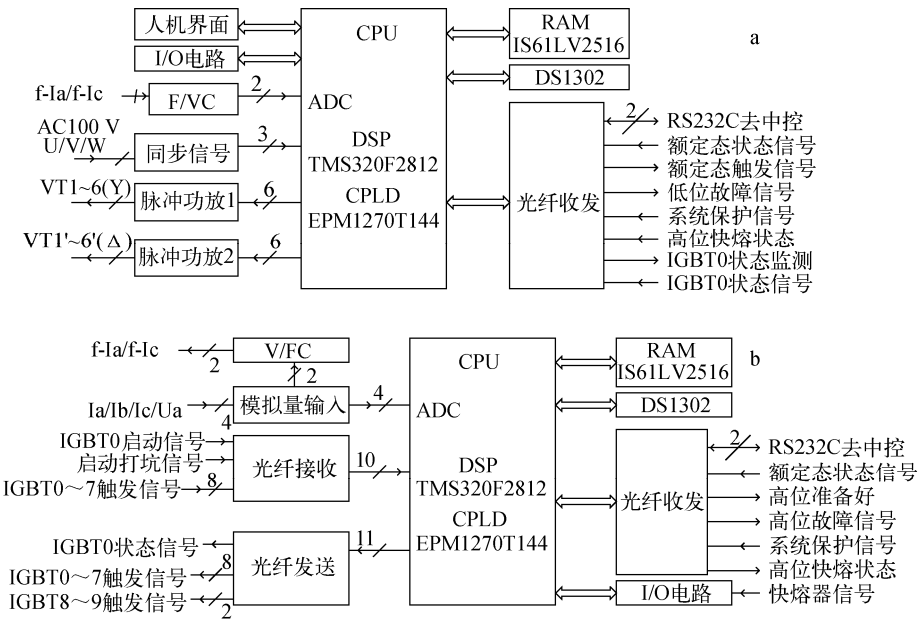


图 3 低位(a)与高位(b)控制器原理框图

Fig. 3 Schematic of controllers for low (a) and high (b) parts

2.4 控制时序

弧流电源的控制除了自身的闭环控制外,还必须结合 NBI 其它设备运行。为此,在 HL-2A 装置等离子体放电前 3~7 s,装置中控向 NBI 发出一时基脉冲,启动 NBI 系统。NBI 各主要电源按图 4 所示时序运行[8]。灯丝电源常态以额定电流的 20%(可调)输出,当时基脉

冲触发后,经 3~7 s 达到额定值,在一定时间间隔后,启动弧流电源,弧流电流稳定后,利用打坑电路,降低放电室的弧流大小,打坑宽度 2 ms。打坑开始后 1.9 ms,启动抑制极电源,1.95 ms 后启动加速极电源,经 2 ms 打坑结束,形成稳定的离子束引出。当有打火保护信号时,快速断开加速电源和抑制电源,同时开始

打坑,周而复始,当保护信号记录 9 次后,结束本次放电。在正常放电结束的情况下,为了减少系统地电位浮动和各电源相互影响,采用一定的时间间隔,断开时序为加速电源、抑制电源、弧流电源,最后将灯丝电流降为额定值的 20%。

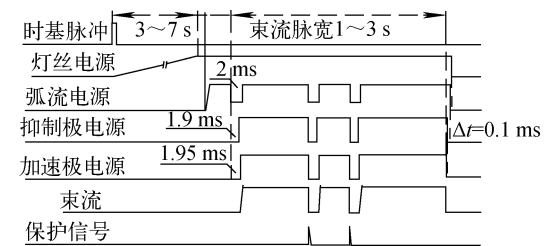


图 4 NBI 主要电源时序图
Fig. 4 Control sequence of NBI main power supplies

3 实验及装置中运行结果

完成弧流电源研制后,对弧流电源进行了假负载测试,假负载为 0.2 Ω 的大功率线绕电阻。首先测试是否能够达到最大输出指标。以 2 号弧流电源为例,测试额定参数波形如图 5a

所示。从波形上可看出,假负载上弧流电源输出为 1 016 A/200 V,平顶时间 3 s,电流纹波系数 1.3%。其次是测试打坑电路的功能,波形如图 5b 所示。打坑宽度 3 ms,打坑深度为 50%,波形的下降沿与上升沿时间小于 50 μs,达到预期要求。同时也可看出,打坑结束后电流在变大,电源本身在进行调整,经 12 ms 后恢复正常,调整时间较长,这也进一步说明若无打坑电路,按常规方法设计的弧流电源则不可能适应放电室的快速变化。最后测试 IGBT0 在保护动作下的可靠性。IGBT0 的任务是在离子源发生意外情况下,实现快速关断进行保护。因工作电流大及串联了大电感,必须确保在关断瞬间,IGBT0 集电极与发射极间电压 V_{ce} 不超过额定值。图 6 为输出 1 000 A 时,首先启动 IGBT1 和 IGBT2 打坑,然后关断 IGBT0,用示波器观测到的波形。其中:CH1 为 IGBT0 V_{ce0} 的波形;CH2、CH3 为 IGBT1、IGBT2 串联电阻两端的电压波形;CH4 为负载上的电压波形。从图中可看出, V_{ce0} 最大为 660 V,未超过

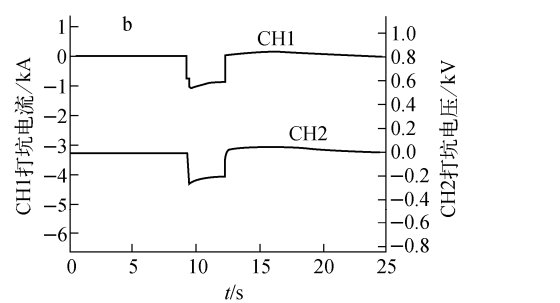
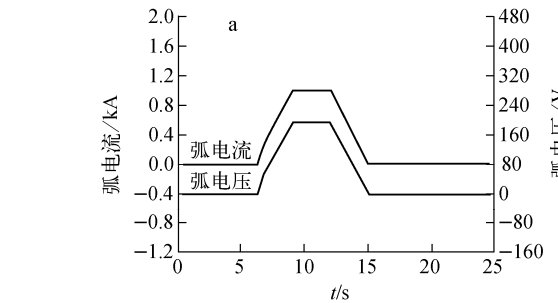


图 5 假负载情况下弧流电源输出测试波形
Fig. 5 Waveforms tested on dummy load
a——弧电源输出波形;b——打坑电阻上的波形

1 200 V 额定电压,关断上升沿时间约为 8 μs,完全关断时间不大于 35 μs,满足了 NBI 保护要求。图中的振荡波形为 IGBT0 尖峰吸收回路中寄生电感造成的。

NBI 装置的弧流电源经过 3 年实验,一直运行稳定可靠。并与其它电源配合,在 HL-2A 装置 NBI 加热实验取得了一些非常有意义的实验数据,另外还协同 ECRH 进行了共同加热实验,取得了一些前沿性的物理研究。图 7 为 HL-2A 装置 NBI 实验 61 525 次放电 4 号离子源的部分工作波形,由聚变研究专业数据采集

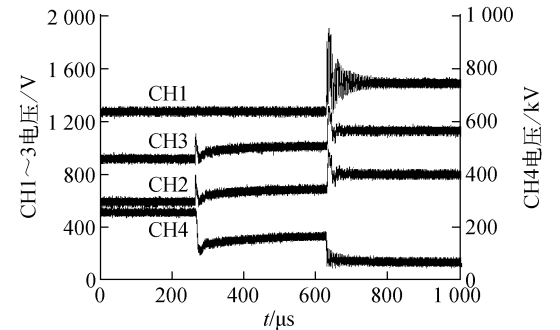


图 6 IGBT0 关断保护时的波形
Fig. 6 IGBT0 turn-off waveforms

系统得到。引出束流约为 40 kV/15 A。同时也可看出,弧流在 1 495~1 515 ms 之间有一些

波动,主要是受气压、灯丝电流的影响,但未引起进一步打火,说明弧流电源工作稳定。

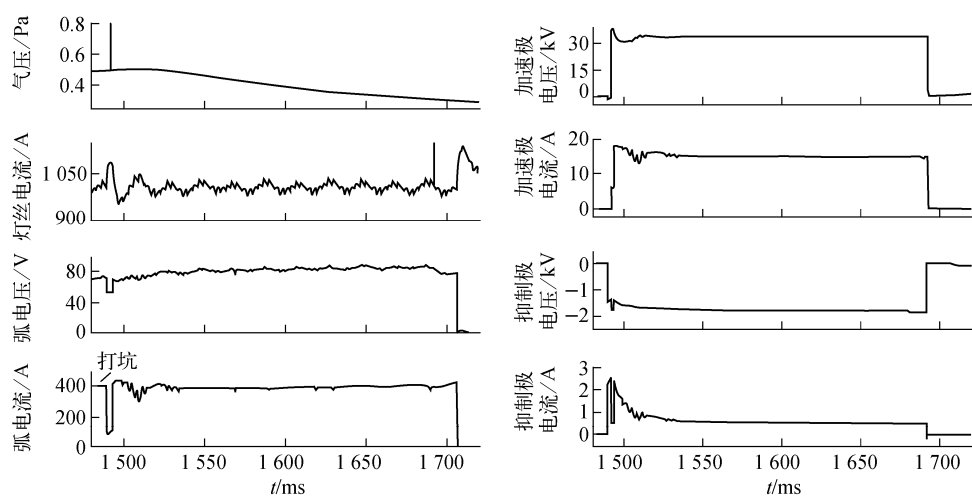


图 7 HL-2A 装置 NBI 实验部分电源波形

Fig. 7 Experimental waveforms on HL-2A

4 结语

针对中国环流器 HL-2A 装置大功率离子源负载及系统的要求,研制了大功率弧放电电源。采用自主设计的 IGBT 模块与串联电阻组成假负载阵列与真负载离子源并联连接,利用 IGBT 的快速开关性能实现电流的快速转移,有效用于强流离子束的引出和保护。并用先进的 DSP 和 CPLD 电路技术实现了弧流电源低位部分与高位部分的控制,并通过光纤信号传输技术,实现了在恶劣的电磁环境下电源的抗干扰与绝缘。NBI 控制系统复杂,涉及电源的参数设置、时序控制、保护关断以及关联物理实验等功能,本大功率弧流电源经过 3 年的实验运行,证明该电源可靠性高,完全满足装置离子源的要求,达到预定的设计指标。

在制造、调试、运行过程中,得到聚变科学所 104 室其他人员和株洲变流技术国家工程中心有限公司的协助,在此表示感谢。

参考文献:

[1] 王德泰. 强流脉冲中性束源的等离子体发生器电源[J]. 核电子学与探测技术, 1987, 7(4): 207-211. WANG Detai. Power supply for the plasma generator of high current pulsed neutral beam source [J]. Nuclear Electronics & Detection Technolo-

gy, 1987, 7(4): 207-211(in Chinese). [2] 王德泰, 钱家湄, 赵志民, 等. HL-1M 中性束注入器弧流电源的研制[J]. 电力电子技术, 1997, 31(3): 42-46. WANG Detai, QIAN Jiamei, ZHAO Zhimin, et al. Development of the arc power supply for HL-1M neutral beam injector[J]. Power Electronics, 1997, 31(3): 42-46(in Chinese). [3] STORK D. Neutral beam heating and current drive systems[J]. Fusion Eng Des, 1991, 14(1-2): 111-133. [4] ZACCARIA P, BELLOA S D, MARCUZZI D, et al. Maintenance schemes for the ITER neutral beam test facility[J]. Fusion Eng Des, 2005, 74(1-4): 255-259. [5] MATSUDA S, AKIBA M, ARAKI M, et al. The JT-60 neutral beam injection system[J]. Fusion Eng Des, 1987, 5(1): 85-100. [6] GAIO E, TOIGO V, de LORENZI A, et al. The alternative design concept for the ion source power supply of the ITER neutral beam injector [J]. Fusion Eng Des, 2008, 83(1): 21-29. [7] 张华顺. 离子源和大功率中性束源[M]. 北京: 原子能出版社, 1985: 410-440. [8] LI B, LI L, FENG K, et al. The supervisory control system for the HL-2A neutral beam injector[J]. Plasma Sci Technol, 2009, 11(3): 374-376.