

能量将灌入离子源加速极。研究表明,如果负载故障吸收的能量多于几个焦耳(约5个),离子源加速极将严重损坏^[5-6]。为实现NBI在托卡马克上的稳定运行,世界上所有NBI无一例外的采用高压缓冲器(Snubber)作为抑制短路电流保护离子源的重要手段^[5-7]。Snubber是一种利用铁磁材料涡流损耗和磁滞损耗消耗故障能量的方法,它通过用N个铁心磁环套在通向离子源的电流导线上实现保护离子源^[6-7]。由于EAST内的空间限制,为了优化Snubber的结构,通常都给它添加一个偏置直流源,将Snubber的性能维持在BH曲线的负饱和点附近,这样能使Snubber的质量减小一半^[7-8]。而目前普遍使用的偏置直流源是将50/60 Hz的交流电经过高压隔离变压器变压后整流直接得到。但是50/60 Hz的高压隔离变压器体积大、质量重,将带来移动不便和占用大量空间等缺点。这让我们想到高频、高压隔离变压器,它具有体积小、质量轻、性能好、技术成熟等诸多优点。在EAST大厅空间有限的情况下我们当然愿意选择高频、高压隔离变压器来得到偏置电源。

由目前国内的研究来看,对直流源的要求为20 V/125 A持续时间大于100 s且需要做100 kV隔离^[1-3]。整个系统悬浮在100 kV的基础上,高压隔离尤为重要。本论文就在现有的高频高压技术下设计Snubber的偏置电流源的控制系统,使其具有体积小、性能高等优点,并实现输出电流值可控,为EAST其它高频高压隔离电源研究提供了技术手段。

1 系统原理

本文在新发展IGBT高性能器件基础上,搭建框图如图2所示脉冲数控电源实验系统。三相工频电源先通过全桥整流电路转化为直流,然后再经过串联谐振的全桥逆变电路得到高频电压,接着通过变压器做隔离,最后经整流器得到所需要的电压值输出到负载上。

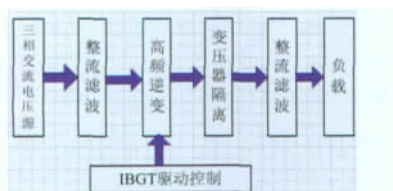


图2 系统原理拓扑图

1.1 系统各部件及其功能

为了实现电源的小型化、低噪声和高效节能,本电源采用了脉宽调制方式,逆变开关采用IGBT(绝缘栅双极晶体管)。同时为了降低开关损耗和开关应力,逆变电路采用了串联零电流谐振式结构^[9-10],如图3所示。首先,将50/60 Hz的交流电经三相全桥整流得到直流,对电容 C_1 充电,接着IGBT1-IGBT4组成全桥逆变器逆变得到交流。其中 C_1 为谐振电容,与变压器T1的一次侧的漏感,以及电阻 R_1 组成串联谐振回路。由以上三个值便可计算出电路谐振所需频率。PC机与DSP控制芯片通过RS232接口利用光纤进行通信。通过PC机可提供两种控制模式,即开环电压控制和闭环电流控制。电流作为IGBT的反馈信号,当电流大于某值时,系统自动调制。高频电压经100 kV变压器隔离后对电容 C_3 充电,作为Snubber的直流源。主回路的典型参数见表1。

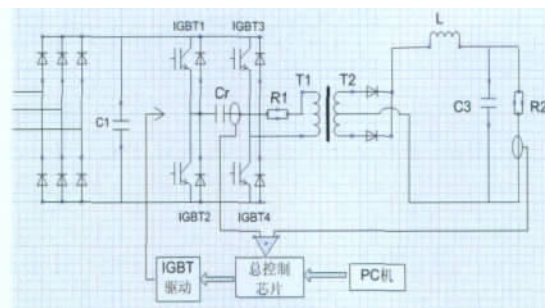


图3 直流源发生器主回路

表1 主回路典型参数

元件	典型参数
T1漏电感/ μH	10.24
电容 $C_1/\mu\text{F}$	0.6
谐振频率/kHz	64
阻抗 R_1/Ω	4.15

1.2 电流的快速检测和校准

主回路中产生一个脉冲电流,作为全桥电路的驱动信号^[11],控制IGBT1、IGBT4和IGBT2、IGBT3的导通,如图4所示。此处将一个IGBT桥的最小导通时间设置为 $3 \mu\text{s}$ 。首先判断驱动信号是否大于 $3 \mu\text{s}$,如果是则IGBT导通,否则继续检测驱动信号。IGBT导通后接着进行电流检测,电流为0则延时然后停止,不为0则继续检测。通过将IGBT的最小导通时间由 $3 \mu\text{s}$ 降低到 $2 \mu\text{s}$,我们能够得到驱动信号的最高频率200 kHz。最后可人为的通过PC机对最小导通时间进行改变,也就是改变IGBT的导通频率,即实现了可控。

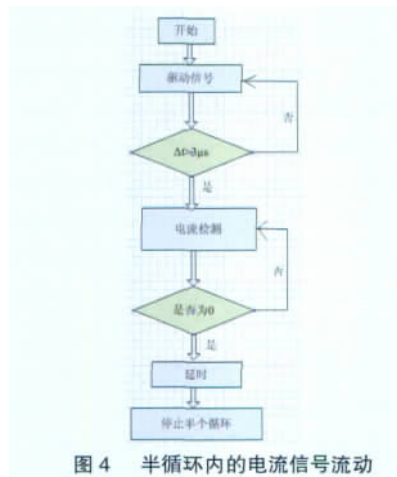


图4 半循环内的电流信号流动

1.3 100 s 直流源的获得

通过控制一个周期内的IGBT的导通时间以及导通次数,便可以对系统的谐振电压及谐振次数进行调整。此处利用PWM调制原理,通过改变IGBT导通时间及次数,就能得到所需要的占空比,也即是得到直流源时间。如当周期调节为400 s后,占空比只要大于1/3就能得到大于100 s的直流源。

图5(a)为一个周期(10 ms)内,每个IGBT导通4次得到的变压器二次侧电压的波形,图5(b)为增加周期时间、导通次数以及电压值后得到的波形,此时二次侧为直接接电阻。由此也可以看出,逆变后得到的交流波频率达到了40 kHz,且得到的电压值可调、可控。较高的频率对以后的隔离和降低噪声都是

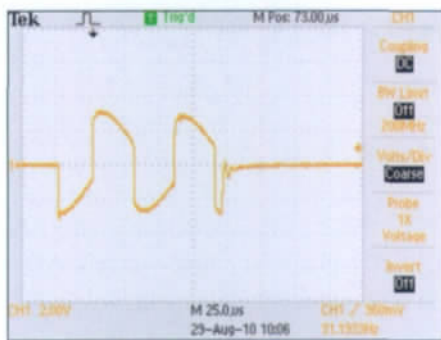


图 5(a) 变压器一次侧电压波形图

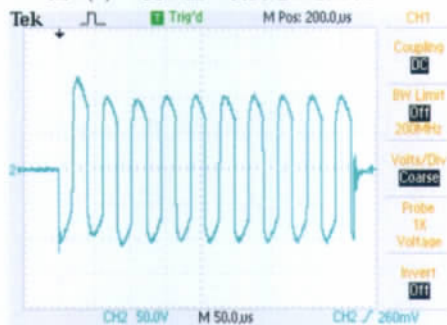


图 5(b) 变压器一次侧电压波形图

一个很好的参数,大大降低了隔离的难度以及变压器二次侧的失真度。

通过调节变压器匝数比,就可以得到所要的电压值。然后通过二极管整流,LC滤波得到直流。由以上可以看出,本系统切实可行,能得到 20 V/150 A 时间大于 100 s 的数字可控直流电源。

2 实验

2.1 器件选择

高频逆变部分,选用 IGBT 作为开关器件,因为 IGBT 与其它类型的开关器件相比,具有开关频率高、开关损耗小、输入阻抗高、耐脉冲电流冲击等优点。本电源中选择了 EUPEC 公司的 BSM300GA120DLC,它的额定电流为 300 A,耐压 1 200 V,完全可以满足系统的需要。

隔离变压器采用自制的变压器,搭建了一个 100 kV HVDC 的实验平台来测试其性能,实验表明该变压器在大气中能在 90 kV HVDC 的条件下正常工作。

IGBT 的控制通过自制驱动板和采用 LabVIEW 开发环境的上位机软件来实现^[12-15]。如图 6 所示,驱动板为 4 路独立输出,控制信号的上升时间和下降时间都在 100 ns 以内,远低

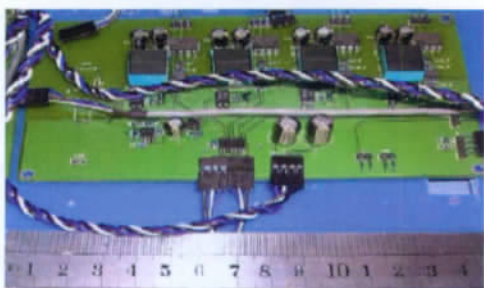


图 6 高速 IGBT 驱动控制板

于商业 M57962L 驱动器相应时间,从而降低了 IGBT 开通和关断损耗,并使得开关频率可以达到 30 kHz 以上。图 7 为主回路实验箱,可以看出,内部电缆靠近内部框架、金属舱和导电舌部,这样能减小辐射。电路清晰、布局合理、且体积小、质量轻,完全满足质量方面的要求。



图 7 主回路

图 8 为控制软件界面,可以通过设定死区时间 t_0 ,开通时间 t_1 ,开通次数 t_2 和周期长度 t_3 来实现对脉冲电压输出的控制。

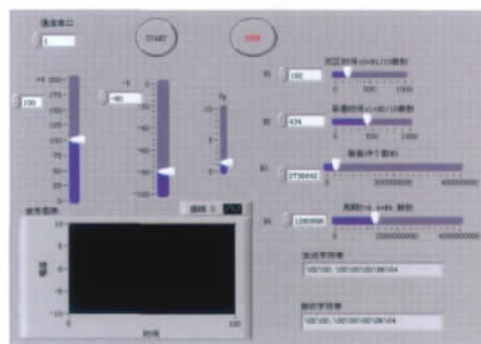


图 8 PC 界面

2.2 结果分析

实验电源由工频三相交流电经变压器调压然后再经过隔离变压器提供,以实现电压的逐步上调,检测整个系统的稳定性和可靠性。图 3 电路中的各参数分别为 $R_2=0.25 \Omega$, $L=0.65 \text{ mH}$, $C_3=100 \mu\text{F}$, 其他参数设置为 $N_1=10$, $N_2=54$, $N_3=2.062 \times 10^7$, $N_4=3 \times 10^9$, 即是死区时间 $t_0=1 \mu\text{s}$, 导通时间 $t_1=5.4 \mu\text{s}$, 微脉冲数 $t_2=2.062 \times 10^7$, 周期 $t_3=300 \text{ s}$ 时测得的直流脉冲波形如图 9 所示,探测点为负载电阻 R_2 两端电压。由图中可以看出

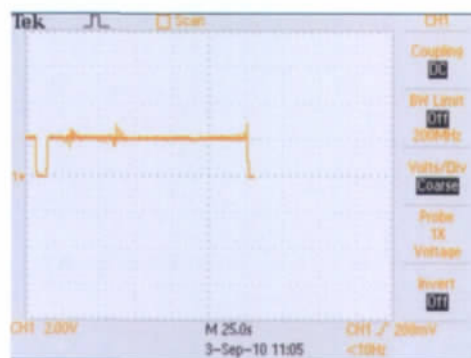


图 9 实验结果

(下转第 117 页)

闸管热稳定时,不可采用稳态计算方法来校验,只需考虑短时限制条件。(3)旁通柜。EAST 极向场电源实验现场布局经过严格设计,旁通设备需做到整体成柜化,因此在考虑元件尺寸、导线连接方式等问题时,要注意空间布局的限制。

EAST 实用旁通装置如图 7 所示拍摄的 EAST 极向场电源第 7、8 套电源 PS7、PS8 的旁通装置。图 7(a)为并联晶闸管(共 9 支)与母排,图 7(b)为现场旁通柜外观,柜内还包含晶闸管触发与保护装置等。

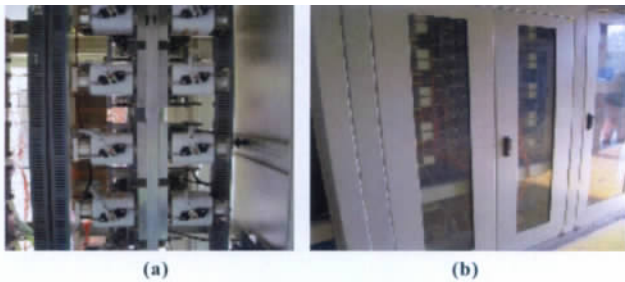


图 7 EAST 用旁通装置照片

(上接第 113 页)

直流源时间长度大于 125 s,电压为 20 V(探头具有十倍的衰减)通过改变变压器两侧的匝数比以及负载电阻的阻值,就能得到我们所需要的电压与电流值,能较好的达到目标,为 Snubber 提供反偏直流源。

实验结果显示直流源还存在毛刺,为了得到更好的效果,我们可以采用无源滤波器和有源电力滤波器构成混合型滤波器对谐波进行抑制^[12-14]。

3 结语

(1) 在实验中,该电源实现了时间大于 125 s、电压值为 20 V 的直流电压输出,开关频率可达到 50 kHz。这说明了该电源的原理正确性和实际的可行性。由 PC 机控制的高频高压发生器已经完成了设计、制造、测试。在高压电源的不同谐振频率下可以通过 PC 调节微脉冲和宏脉冲的个数来控制电压值和频率,以满足不同电路的需要。

(2) EAST 是一个非常庞大的装置,它周围紧密的排列着许多其他器件,且工作时具有强烈的电磁干扰。该发生器与一般的 50/60 Hz 供电系统相比具有体积小、效率高、能直接接三相电、且做到了 90 kV 的隔离等许多优点,能直接放入 EAST 实验大厅,为 EAST 服务。它的研制成功对 EAST 的许多外围系统如 NBI、DNB 等等离子体加热或者诊断系统具有重大意义。

(3) 进一步实验将完善构造闭环系统,通过输出电压的反馈来自动调节开关频率,以实时匹配负载的变化,将直流源升高到 100 V/500 A,持续时间 3 600 s 以上,为 ITER 服务^[15]。

参考文献:

[1] 李伟. EAST-NBI 系统高压电源传输线及缓冲器(Snubber)的研究与设计[D].合肥:中国科学院等离子体物理研究所,2009:15-35.

4 总结

(1) EAST 极向场电源带大电感线圈负载,发生故障时必须为其提供续流通道以避免过压的产生破坏绝缘,保护电源系统,而旁通可以提供续流通道。

(2) 适应电源系统的四象限运行,旁通必须是逆并联结构,对晶闸管并联数目、热稳定、母排动稳定、可靠动作与闭锁等都有严格的要求。

(3) 从脉冲工作特性及成柜整体化的角度去设计旁通,是需要注意的问题。

参考文献:

- [1] 高格.可控并联十二脉波四象限运行整流电源的研制[J].电工技术学报,2004,7:17-20.
- [2] 杨荫福.电力电子装置及系统[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [3] 陈坚.电力电子学-电力电子变换和控制技术[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [4] 杨文焕.变流器均流系数的温度特性[J].电力电子技术,2003,4:75-78.
- [5] 许敬涛.整流设备动态均流技术[J].中国氯碱,2010,3:5-7.

- [2] 李伟,刘小宁,黄懿赞. EAST 中性束注入器打火保护的缓冲器设计[J].高电压技术,2009,35(3):667-671.
- [3] CAO L, LI G, WANG H T. Development of iron core snubber[J]. High Voltage Engineering, 2010, 31(5):1269-1274.
- [4] BIGI M, TOIGO V, ZANOT TO L. Protections against grid break downs in the ITER neutral beam injector power supplies[J]. Fusion Engineering and Design, 2007, 82(5):905-911.
- [5] 潘圣民,傅鹏,蒋力.采用 DSP 和 CPLD 的 100 kV 高压脉冲电源控制系统[J].高电压技术,2009,35(7):1667-1671.
- [6] HAUGHIAN J, LOU K, BYRNS R, et al. Fabrication and testing of the flexible transmission line to the TFTR neutral beam ion sources [C]//Proceedings of the 10th Symposium on Fusion Engineering. Philadelphia, USA: [s.n.],1983:1629-1633.
- [7] 杨雷,傅鹏,刘小宁.大功率直流高压电源的变压器分布电容分析[J].高电压技术,2009,35(6):1403-1408.
- [8] WANG H T, LI G, CAO L, et al. Parameter analysis for arc Snubber of EAST neutral beam injector[J]. Plasma Science and Technology, 2010,12(4):499-505.
- [9] PREBEN L. Application of pulse energisation on electrostatic precipitators for various processes[J]. Journal of Electrostatics, 1990,25(6):41-53.
- [10] BISHOP S R, MAYHALL D J, WILSON J H, et al. Design and test of 80 kV snubber core assemblies for MFTF sustaining neutral beam power supplies[C]//The 9th Symposium on Engineering Problems of Fusion Research. Palmer House Chicago, Illinois, USA: IEEE Press, 1981:419-422.
- [11] CLAESSEN R, BAUR U, BERTOLINI E, et al. The JET neutral injection 160 kV transmission lines, the associated snubbers and the SF6 tower for the termination of the transmission lines housing of the snubbers and voltage breaks[C]//The 14th Symposium on Fusion Technology. Congress Center of the Palais des Papes. Avignon, France: Pergamon Press, 1986:941-947.
- [12] LI G, ZHOU Y G. Compact digital high voltage charger[C]//IEEE PAC. Knoxville, Tennessee:IEEE,2005:3964-3966.
- [13] BRAMBILLA A, DALLAGO E, BERTOLOZZI P L. Circuit analysis of a power pulse generator for electrostatic precipitators[J]. IEEE, 1990,137(2):83-88.
- [14] WATANABE K, MIZUNO M. Development of a high performance core snubber for high power neutral beam injectors[J]. Review of Scientific Instruments, 1998, 69(12):4136-4141.
- [15] MONDINO P L, BAYETTI P, PIETRO E D, et al. ITER neutral beam system[J]. Nuclear Fusion, 2000, 40(3):501-507.