

Control and Protection Research for the Magnet Power Supply of EAST-NBI

Yuanzhe Zhao, Chundong Hu*, Lizhen Liang, Qinglong Cui, Junjun Pan

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui
Email: zyz@ipp.ac.cn, *Cdhu@ipp.ac.cn

Received: Dec. 20th, 2016; accepted: Jan. 5th, 2017; published: Jan. 12th, 2017

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

A control and protection system is designed to ensure magnet power supply's safe and steady state running in the neutral beam injector of the experimental advanced superconducting Tokamak (EAST-NBI). In this paper, a detailed introduction of magnet power supply's control and protection system is shown based on a brief introduction of magnet power supply's design index and technical solution. The experimental results suggest that the control and protection system ensures the synchronous output between timing and amplitude, and protects magnet power supply running safely and reliably through failure warning and interlock protection. Failure warning and interlock are crucial for EAST-NBI.

Keywords

Neutral Beam Injector, Magnet Power Supply, Control and Protection System

EAST-NBI偏转磁体电源控制与保护研究

赵远哲, 胡纯栋*, 梁立振, 崔庆龙, 潘军军

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

收稿日期: 2016年12月20日; 录用日期: 2017年1月5日; 发布日期: 2017年1月12日

*通讯作者。

文章引用: 赵远哲, 胡纯栋, 梁立振, 崔庆龙, 潘军军. EAST-NBI 偏转磁体电源控制与保护研究[J]. 核科学与技术, 2017, 5(1): 13-18. <http://dx.doi.org/10.12677/nst.2017.51002>

摘要

为满足EAST-NBI恒定磁场需求,保障磁体电源安全、稳态运行,设计了偏转磁体电源控制与保护系统并对其性能进行了实验验证。本文在简要介绍偏转磁体电源的设计指标和技术方案的基础上,详细介绍了其控制与保护系统的设计。实验结果表明,该控制与保护系统保障了磁体电源时序和幅值输出的一致性,并通过故障报警与连锁保护保障了磁体电源的安全可靠运行,满足实验需求。

关键词

中性束注入器, 磁体电源, 控制与保护系统

1. 引言

中性束注入器(Neutral Beam Injector, 简称NBI)是一套用于产生高能带电粒子束并对其进行中生化、最终将高能中性粒子束注入到聚变装置内,用以加热等离子体、驱动等离子体电流的装置,它是四种辅助加热手段(中性束注入、低杂波、离子回旋频段波、电子回旋频段波)中加热效率最高、物理机制最清楚的一种[1]。通过向磁约束聚变等离子体中注入高能中性粒子束,利用束流中的高能中性粒子在背景等离子体中的电离加热过程可大大提高等离子体温度。中性束注入器由离子源、传输线及缓冲器、中性化室、偏转磁体、离子吞食器、功率测量靶,低温真空系统、测控系统、辅助电源系统等部分组成。

离子源通过气体放电产生源等离子体,源等离子体经束引出系统引出并加速形成高能离子束,高能离子束经中性化室中性化后成为中性粒子与离子的混合束流,未被中性化的剩余离子通过偏转磁场偏移180°进入离子吞食器,经偏转磁场分离出的高能中性粒子束流经漂移管道注入到EAST托卡马克装置达到加热等离子体、驱动等离子体电流的目的。中国科学院等离子体物理研究所现已完成两条中性束注入系统的建设,并成功投入到EAST物理实验中[2]。偏转磁体电源是NBI辅助电源系统的重要组成部分,负责为偏转磁体形成磁场的线圈供电。本文将系统地介绍偏转磁体电源的设计指标、技术方案、以及磁体电源控制与保护系统的设计。

2. EAST-NBI 偏转磁体电源设计指标和技术方案

2.1. EAST-NBI 偏转磁体电源设计指标

电源系统是EAST-NBI的关键子系统之一,它向NBI装置提供不同功率等级、不同脉宽的电力供应。EAST-NBI电源系统包括弧电源、灯丝电源、缓冲器电源、等离子体电极高压电源、抑制极负高压电源和偏转磁体电源。高压电源、梯度极分压和抑制极电源为离子源的束引出系统供电,灯丝电源和弧电源为离子源源头供电,为产生稳定等离子体服务。图1为各电源系统连接示意图。

离子源的弧电源正极连接在离子源外壳上,负极与灯丝电源负极相连;加速器高压电源的正极与等离子体电极直接相连,同时与弧电源,灯丝电源的负极相连,形成高压悬浮点,需通过隔离变压器与系统中其他供电单元隔离。离子源高压平台上的各套电源传输线穿过缓冲器线圈到达离子源负载,缓冲器线圈利用磁性材料的磁滞回线和反向偏置饱和原理,使各种浪涌电流和分布参数的储能通过缓冲器的抑制作用得到释放和减少。

根据EAST-NBI束线工程技术方案要求,每条中性束注入系统辅助电源系统主要设计指标如表1所示,所有电源输入电压为380 VAC/50 Hz,电压波动范围 $\pm 10\%$ 。

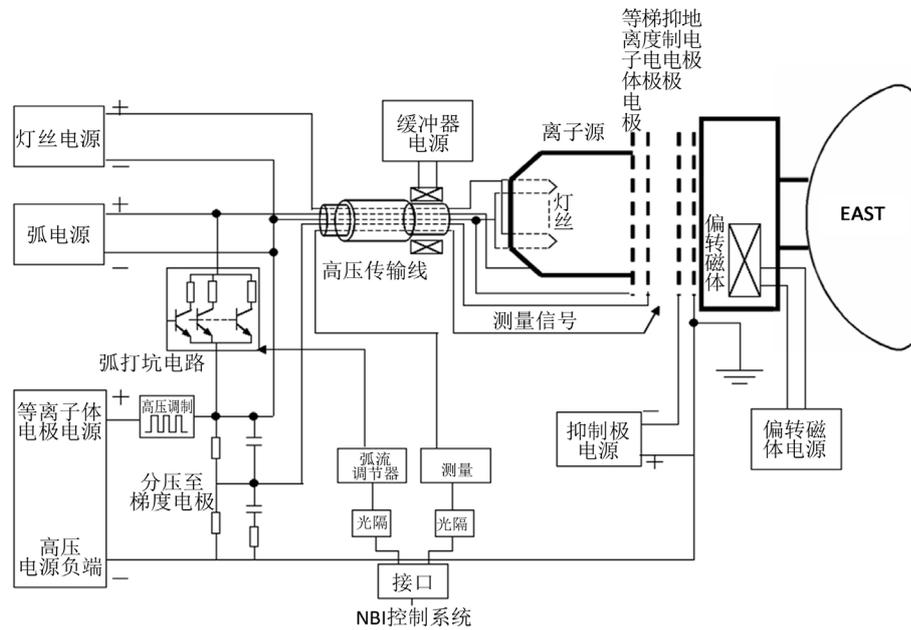


Figure 1. Connection diagram of NBI power supply systems
图 1. NBI 各电源系统连接示意图

Table 1. Design indicators of NBI power supply systems
表 1. NBI 各电源系统设计指标

电源名称	电压	电流	调整度	运行方式	数量
灯丝电源	20 V	5.5 kA	V, 3%	稳态	2
弧电源	200 V	3 kA	静电探针反馈控制	稳态	2
缓冲器电源	30 V	150 A	I, 1%	稳态	2
磁体电源	80 V	600 A	I, 1%	稳态	2
抑制极电源	-4 kV	20 A	V, 3%	稳态	2

偏转磁体以稳态方式运行，设计当线圈电流达到约 510 A 时，偏转磁体可以在磁极间范围内产生强度约 0.19 T 的均匀磁场，磁场中心区域的均匀度优于 1%，以满足剩余离子偏转 180° 的需要。因此，NBI 偏转磁场电源的设计性能要求电流稳定度应小于 $\pm 1\%$ ，稳态运行，为满足不同运行模式的需要，偏转磁体的磁场强度需要具备可调节的能力，以达到将不同能量的离子剥离束流通道的要求[3]。

2.2. EAST-NBI 偏转磁体电源技术方案

根据 NBI 束线对偏转磁场的物理要求，考虑到偏转磁场线圈的负载特性，设计偏转磁体电源采用相控整流电源方式。磁体电源主回路设计方案如图 2 所示。

该技术方案主电路技术路线为：市电经过配电柜进入整流变压器，变压器副边为双绕组，每个绕组配有一个 6 脉波可控硅整流电路，通过时序控制组合为 12 脉波可控硅整流输出，最后经过输出端 LC 滤波电路输出直流电流。

3. EAST-NBI 偏转磁体电源控制与保护系统设计

3.1. EAST-NBI 偏转磁体电源控制研究

为满足 EAST-NBI 恒定磁场需求，要求偏转磁体电源恒流稳态运行，为避免磁体电源误动作，只有

在其接收到同步的时序信号和幅值信号时才能够正常输出。同时，由于磁体电源的供电对象线圈是感性负载，上电瞬间电流过冲极易损坏磁体线圈，磁体电源接收到的幅值控制信号需是爬坡型缓慢上升。本文设计的磁体电源控制系统采用 PXI-7842R 多功能可重配置 RIO 板卡向磁体电源输出时序信号，通过 PXI-6733 高速模拟量输出板卡向磁体电源输出爬坡型幅值信号，两板卡通过硬件触发信号实现同步输出控制。磁体电源正常运行需满足图 3 所示时序和幅值信号对应关系[4] [5]。

MAG_SI 为磁体电源运行幅值设置，MAG_START 为磁体电源运行时序设置，MAG_CMD 为过脉宽保护信号，时序和幅值输出需同步控制，过脉宽保护信号需提前 START 信号开启并滞后 START 信号关闭，提前和滞后时间可根据实际需求进行设置。图 4 是在偏转磁体电源控制系统作用下 EAST-NBI 注入实验正常运行波形。

3.2. EAST-NBI 偏转磁体电源保护系统设计

为保证磁体线圈、偏转磁体电源、以及 EAST-NBI 实验装置的安全运行，当灯丝电源、弧电源、抑制极电源、高压电源、缓冲器电源和偏转磁体电源中的一个或多个电源出现故障时，需进行快速故障报警与连锁保护，停止本炮实验，保证实验设备和实验人员人身安全。

EAST-NBI 偏转磁体电源保护系统通过 FPGA 板卡实时读取磁体电源系统状态和模拟量反馈值信息，当读取到的电源状态为故障态或模拟量反馈值与输出值相差较大时停止向 NBI 各电源系统输出时序信号和幅值信号，并将相应故障状态发送到远程监控终端进行故障报警显示。图 5 为磁体电源保护系统在磁体电源故障情况下进行连锁保护的实验波形。

4. 小结

目前偏转磁体电源及其控制与保护系统已成功应用到 EAST-NBI 实验中。实验结果表明，偏转磁体

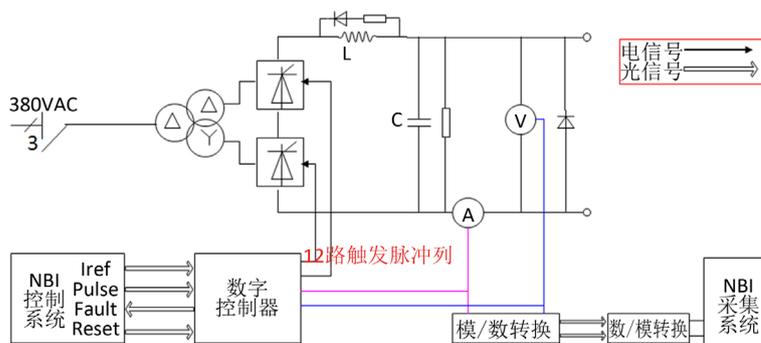


Figure 2. Design scheme of magnet power supply's main loop

图 2. 磁体电源主回路设计方案

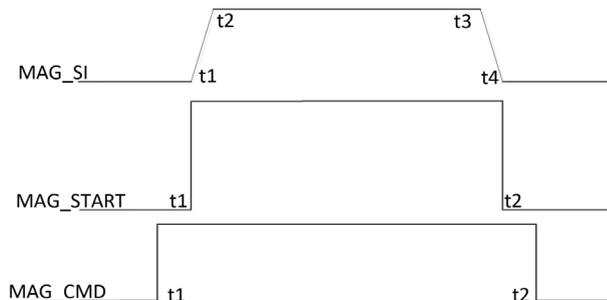


Figure 3. Digital and analog signals of magnet power supply

图 3. 磁体电源运行所需时序和幅值信号示意图

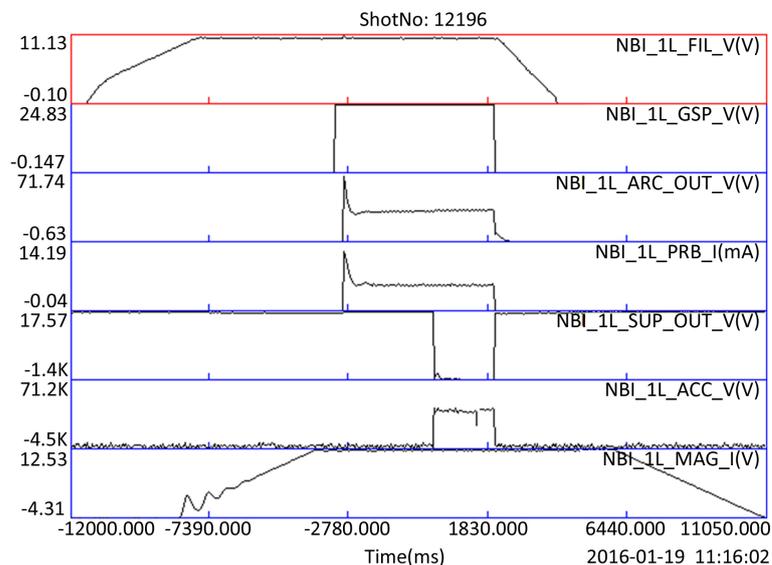


Figure 4. Normal waveform of EAST-NBI experiment

图 4. EAST-NBI 实验正常运行波形

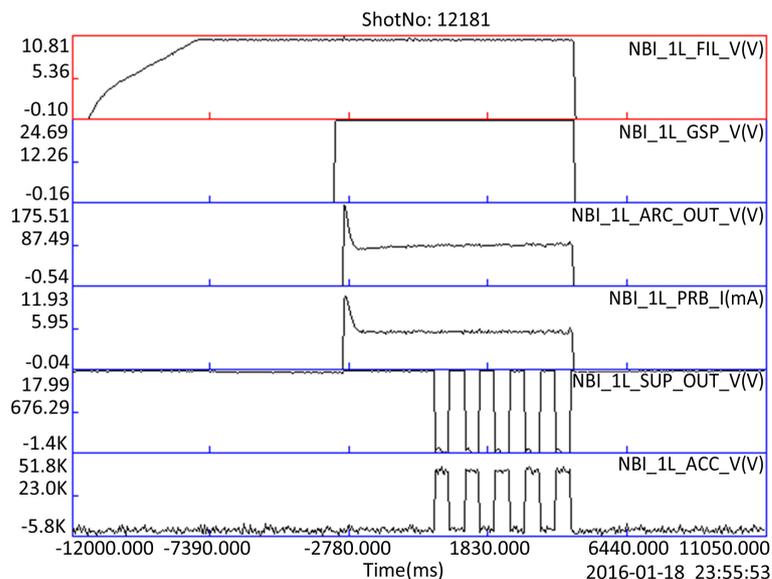


Figure 5. Experimental waveform of magnet power supply failure protection

图 5. 磁体电源故障保护实验波形

电源技术方案成熟、控制简单方便、电源输出可靠、纹波小、且采用 DSP 控制芯片及光纤传输对现场复杂电磁环境有较强的抗干扰能力，满足 EAST-NBI 实验需求。

偏转磁体电源控制与保护系统通过对偏转磁体时序和幅值输出的自治控制，保障磁体电源时序和幅值输出时间的一致性；对于磁体线圈这种感性负载，该系统通过向磁体电源输出爬坡型幅值信号，避免在上电瞬间电流过冲而损坏磁体线圈；同时控制与保护系统实时读取偏转磁体电源状态及其模拟量反馈值信息，并在系统状态或反馈值异常时进行故障报警与连锁保护，为磁体电源安全运行提供可靠保障。

基金项目

国家国际科技合作专项项目 2014DFG61950。

参考文献 (References)

- [1] 胡纯栋, 谢远来, 谢亚红, NBI 组. EAST 长脉冲中性束注入器的研制[J]. 中国核科学技术进展报告, 2009(1): 31-36.
- [2] Hu, C.D. and NBI Team (2012) Conceptual Design of Beam Injection System for EAST. *Plasma Science and Technology*, **14**, No. 6. <https://doi.org/10.1088/1009-0630/14/6/30>
- [3] 蒋才超, 胡纯栋, 刘智民. 基于数字控制大功率整流电源的设计[J]. 核电子学与探测技术, 2012, 32(2): 233-236.
- [4] Zhao, Y.-Z., Hu, C.-D., Sheng, P., Zhang, X.-D., Wu, D.-Y. and Cui, Q.-L. (2013) Design of Timing System Software on EAST-NBI. *Journal of Fusion Energy*, **32**, 557-560.
- [5] 王建松, 罗家融, 盛鹏. 中性束注入器测试台的中央定时系统设计[J]. 计算机工程, 2011, 37(14): 245-247.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org