

Fast Tracking Response of Fast Control Power Supply

Jianjun Chen

Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei Anhui
Email: cjianjun@ipp.ac.c

Received: Nov. 26th, 2019; accepted: Dec. 13th, 2019; published: Dec. 20th, 2019

Abstract

In order to realize the purpose of high parameter discharge of EAST plasma, the whole machine is redesigned on the basis of the old fast control power supply system; the parameters are improved, and the new fast control power supply system is designed. Through the theoretical simulation of the parameters of the new fast control power supply; the test waveforms and results are obtained; the expected design requirements are achieved, and it is proved that the new fast control power supply system can fully meet the requirements of fast tracking response of plasma displacement.

Keywords

EAST, Fast Control Power Supply, Plasma, Response Speed

快控电源快速跟踪响应

陈建军

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

收稿日期: 2019年11月26日; 录用日期: 2019年12月13日; 发布日期: 2019年12月20日

摘要

为了实现EAST等离子体高参数放电的目的, 在老快控电源系统基础之上进行重新整机设计, 提高运行参数, 设计新快控电源系统, 并通过对新快控电源参数进行理论仿真, 得到了试验波形与结果, 达到了预期设计要求, 证明了新快控电源系统完全可以达到等离子体位移快速跟踪响应的要求。

关键词

EAST, 快控电源, 等离子体, 响应速度

Copyright © 2019 by author(s) 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

1. 新快控电源的背景

现在能源是人们一直在思考的问题,石油、天然气、煤炭是一次能源,随着使用的时间,日益减少同时产生很大的环境污染。然而聚变能源清洁高效,资源丰富。东方超环托卡马克装置被认为是最有希望第一个建成聚变堆的发电核聚变装置。

通过论证得到拉长比越高,对等离子体放电约有好处。但也存在一些缺陷,例如,当拉长的等离子体受到某种信号干扰的时候,就会存在垂直位移不稳定性,此时可以施加反馈控制,防止等离子体失去平衡控制,避免等离子体在垂直方向上沿着同一个方向运动,发生等离子体碰壁破裂,从而造成等离子体放电失败[1] [2]。反馈控制系统对等离子体的垂直不稳定性进行反馈控制,可以大大提高放电效率。EAST 垂直位移主要通过真空室以及内部的真空板提供被动稳定,快控电源对等离子体在垂直位移稳定性上起着至关重要的作用。由于 EAST 实验的参数不断优化与升级,老快控电源的参数(最大输出电流和电压分别是 ± 2500 A, ± 800 V),而且只有电流工作模式,不在足以满足实验的需求,因此设计了新快控电源系统。新快控电源系统最大输出电压为 ± 1600 V,稳态电流 ± 6000 A,最大短暂电流 ± 9000 A。

托卡马克装置为了实现高参数放电的目的,经过多次试验验证,证明拉长位形的非圆截面的等离子体位形是最有效、最有可靠保障的方法。 β 表征磁场约束等离子体的能力。提高约束等离子体的能力可以通过增大等离子体的拉长比。但是可能会存在等离子体在垂直位移上不稳定。那么快控电源的反馈控制对等离子体的稳定性就起到了重要的作用了。垂直位移稳定性的控制方式有 2 种,被动反馈和主动反馈。被动反馈是一种毫秒级的快速响应[2],一般使用被动结构;主动反馈一般使用快速控制线圈维持等离子体的位置。

主动反馈是将采集的等离子体垂直位移信号快速反馈到电源系统,此时快控线圈得电,会产生与之对应大小的磁场,从而实现主动反馈线圈控制等离子体的目的。

2. 快控电源工作原理

EAST 装置在内真空室中放置快速控制线圈的目的是:对拉长的等离子体的垂直不稳定性进行有效的控制。在内真空室中放置着相对平衡对称的快速控制线圈 IC1 和 IC2 (如图 1 所示),从图中可以看出他们成 90° 的鞍形状态。检测等离子体垂直面位移的控制系统是 PCS 系统,首先是它按照一定的计算方法,推出对应磁场所需要的主动控制线圈的励磁电流大小,其次作为下发命令发送到快控电源系统,最后电源系统实时跟踪输入指令,同时进行有效的线性缩放,产生快速变化的磁场,用来抑制等离子体的不稳定垂直位移[3]。

3. 新快控电源设计方案

快控电源的主要作用在于根据等离子体垂直位移为装置内真空室中的主动反馈控制线圈励磁,线圈

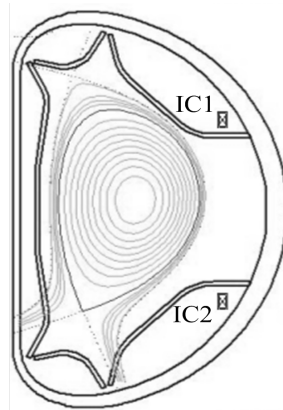


Figure 1. Layout of fast control coil of EAST device

图 1. EAST 装置快控线圈布置图

在励磁过程中会产生快速变化的磁场用来维持等离子体在垂直方向上的稳定性[4]。电源运行特性主要体现在电源跟踪响应速度和输出最大电流的能力。当等离子体位移发生很大的变化时，PCS 控制系统对电源系统发出控制命令，电源系统要输出非常大的电流，才能够将等离子体拉回到平衡位置；当等离子体位移发生很小的变化时，此时 PCS 控制系统能够快速、准可靠的对快控电源系统发出控制指令，此时电源系统能够轻松建立所需要的磁场，电源系统出很小的电流就可以轻松将漂移的等离子体拉回到原来平衡位置。通过研究分析，尽可能的加强提高主动反馈电源的快速响应能力和控制精度，与持续不断提高电源系统输出电流能力相比，前者可以发挥主动反馈线圈的作用更大。快控电源的快速响应能力主要包含两个方面，一方面线圈电流的建立时间；另一方面电源响应输入信号的速度，这主要与电源输出电压能力相关。所以托卡马克垂直位移快速电源最基本的技术指标是：响应时间、额定电压和额定电流[4] [5] [6]。由于 EAST 放电能力的提高，为了得到高参数等离子体电流的目标要求。但是对于装置来讲，最大可以控制的位移是 2.5 cm 以及 5 cm，由于老快控电源系统最大可控位移是 1.2 cm，极大地限制了控制能力，远远达不到高参数等离子体电流目标，为了解决这一难题，设计了新快控电源系统。

3.1. 新快控电源系统整机设计

快控电源整机系统由隔离变压器、整流桥、断路器、逆变器、均流电抗器和撬棒保护等电路组成。新快控电源系统框架流程图如图 2 所示。逆变器、变压器、整流桥和断路器组装在同一个单元逆变柜中。EAST 装置要求快控电源具有快速的电流跟踪响应能力和输出数千安培负载电流的能力，于是采用多组逆变柜级联方式实现，每个级联支路配置一个支路控制器，为级联支路扩容提供预留。逆变柜电路框图如图 3 所示。

逆变器、整流桥和隔离变压器组装一个电源机柜内，隔离变压器容量大小 60 kVA，变比为 380 V/380V (1:1)，则整流后直流电压约为 532 V，三个 H 桥级联理论上有 1596 V 的最高电压输出。在通常情况下，为了保证电网电能质量，会投入无功补偿。导致输出电压高于 10 kV，一般高出 10%，三个 H 桥级联实际最高输出可达 1756 V。同时输出电流根据 EAST 放电要求，每个级联电路要有额定 1000 A 的电流输出，6 个级联电路就会有 6000 A 的电流，短暂过载能力 9000 A，0.1 s。系统设计方案中，设置了软起电路(功率电阻与断路器常开触头并联电路)，软起电路串在隔离变压器副边与整流桥之间，霍尔电流传感器 LT308-S7/T7 (± 15 V 供电，测量范围 ± 500 A)测量电容器充电电流；当断路器闭合时，电容器充电是通过软起电路实现的，当直流侧电压接近额定电压时，断路器常开触头闭合，短接软起电阻；当电容器放电过多，充电电流过大时，接触器常开触头断开，再次通过软起电阻限制充电电流，从而达到保护整流桥

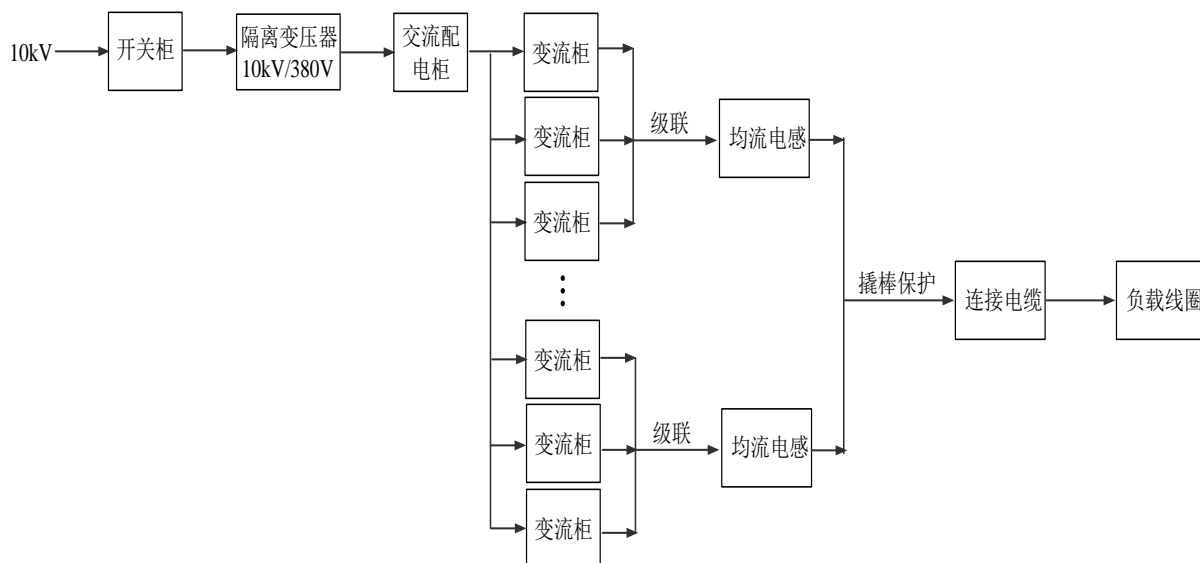


Figure 2. Flow chart of new fast control power system framework

图 2. 新快控电源系统框架流程图

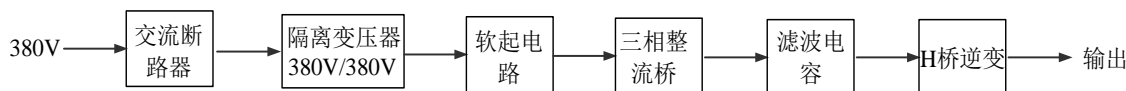


Figure 3. Structure diagram of inverter cabinet

图 3. 逆变柜结构框图

的目的[4]；在变流柜内安装电压霍尔传感器 LV100 采集直流侧电压、电流霍尔传感器 LT1005-S/T 采集直流侧电流，输出电流信号经屏蔽电缆送至控制柜。控制柜内设信号采集和分析处理电路，接受总控信号，同时把信号下发各个支路控制器。设置比例给定电路，用于在电流给定情况下，某个级联支路发生故障退出而实验又要继续进行的情况。

3.2. 新快控电源的参数

快控电源设计原理：根据等离子体垂直位移为托卡马克装置内真空室的主动反馈线圈励磁，快速变化的磁场作用是维持等离子体在垂直方向上的稳定性，电源运行能力主要体现在两个方面：一是电源响应速度、二是输出最大电流的能力。对电源额定电压、额定电流以及响应时间等参数重新设计，新快控电源参数如表 1 所示：

Table 1. Parameters of new fast control power system

表 1. 新快控电源系统参数

新快控电源参数设计	
最高输出电压	$U_m = \pm 1600 \text{ V}$
额定输出电流	$I_n = \pm 6000 \text{ A}$
短时过载能力	$I_m = \pm 9000 \text{ A}, 0.1 \text{ s}$
电压响应时间	小于 1 ms

快控电源采用的控制方式：电流闭环跟踪、电压开环给定等控制方式。

4. 新快控电源系统仿真

4.1. 新快控电源电流控制仿真

快控电源运行能力主要体现在两个方面：一是电源响应速度、二是输出最大电流的能力。电流控制方式仿真结果如图 4 所示。1 通道是给定信号，4 通道是总电流，2、3 通道是两个支路的电流。新的快控电源系统是 18 个 H 桥 3 串 6 并的运行模式，技术参数为 $\pm 1600\text{ V}/\pm 6000\text{ A}$ 。

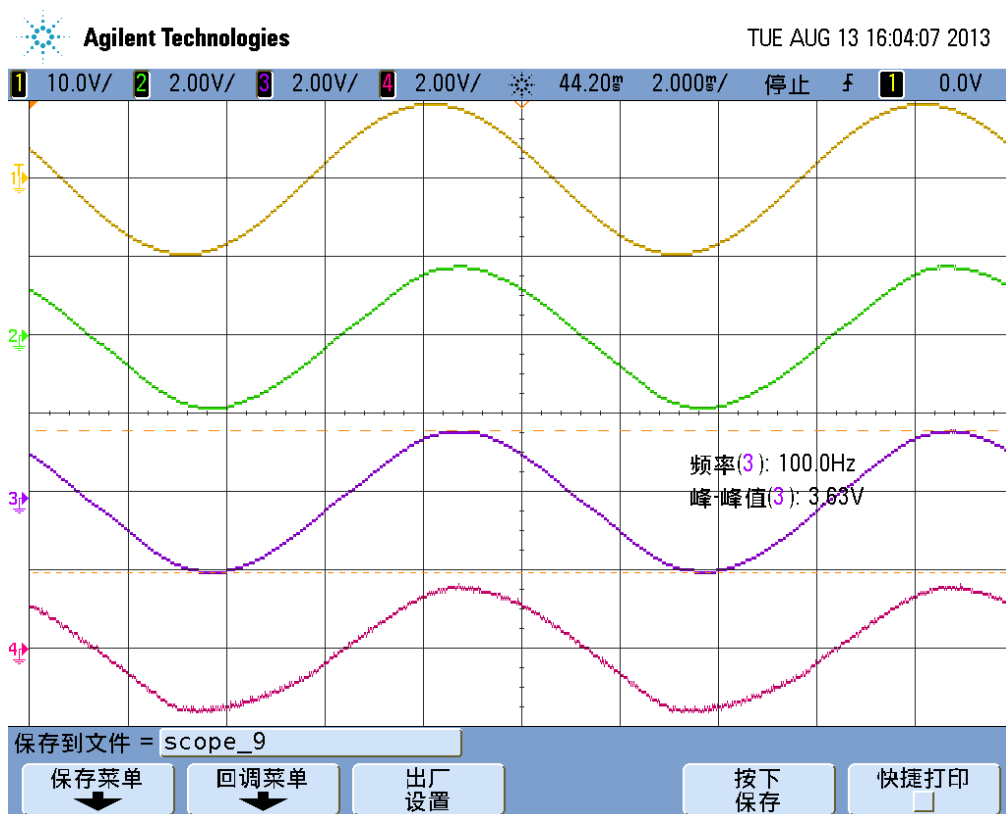


Figure 4. Simulation results of current control
图 4. 电流控制仿真结果

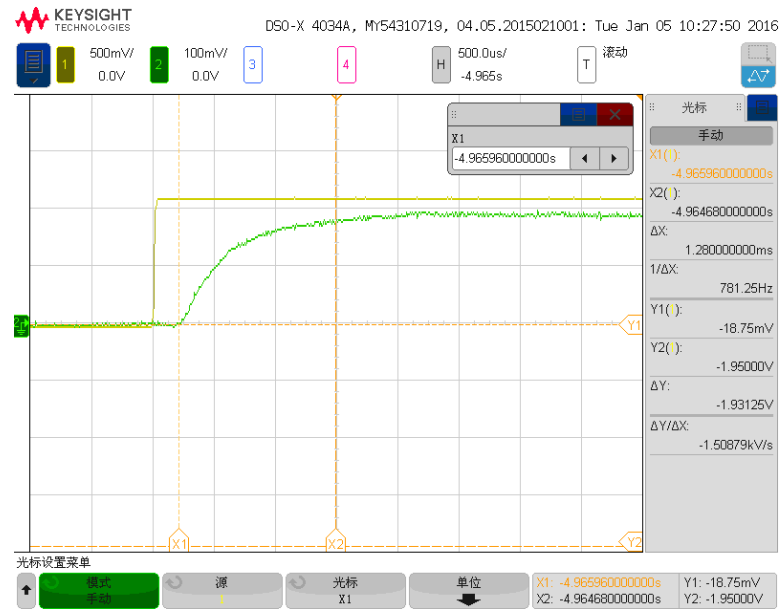
4.2. 新快控电源响应速度仿真

以前用于等离子体垂直稳定的快速电源均采用速度和电流闭环的电压调节方式，电源输出电压与等离子体运动速度成比例，控制环节中还有微小的电流反馈。其电源的输出电压计算公式如下式所示：

$$u_c = -g_u \left[I_p \frac{dZ_p}{dt} \right] + g_i \left[i_{\text{FREA}} + k_i \int i_{\text{FREA}} dt \right]$$

式中： g_u ， g_i ， k_i 为控制器增益， I_p 为等离子体电流， Z_p 为等离子体垂直位移， i_{FREA} 为 FREA 输出电流， u_c 为 FREA 输出电压。老快控电源和新快控电源比较，新快控电源采用的是电流闭环反馈控制模式，在负载中没有电压积分部分，负载上的电压实际为电源直流电压的 PWM 波，根本无法实现电压闭环反馈跟踪。所以新系统电压控制模式为开环给定工作模式。

新快控电源响应速度仿真结果如图 5 所示，电流响应时间 0.22 ms；电流-1000 A 达到 1000 A 的时间是 1.28 ms；1000 A 到 0 的时间是 0.33 ms，均小于 1 ms。



(a)



(b)

Figure 5. Simulation results of power response speed
图 5. 电源响应速度仿真结果

5. 结论

通过对等离子体放电的要求, 计算出快控电源的参数, 确定了整机设计方案, 同时对系统进行仿真验证, 证明了新快控电源系统方案的快速跟踪响应目标, 同时对等离子体垂直位移的控制起到了很好的抑制作用。

参考文献

- [1] 刘成岳, 陈美霞, 宋逢泉. EAST 托马克等离子体电流和位形演化的数值模拟[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2008, 31(2): 313-316.

- [2] 王海欣, 汪凤凤, 黄海宏, 等. EAST 等离子体垂直不稳定位移主动反馈控制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2013, 33(4): 342-347.
- [3] 黄海宏, 毕楠夏, 俞佳, 王海欣. 新 EAST 快控电源电压模式的探索[J]. 核聚变与等离子体物理, 2017, 37(3): 331-335.
- [4] 汪凤凤. EAST 快控电源灰色预测控制预研[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
- [5] 黄海宏, 俞佳, 王海欣, 毕楠夏. 升级 EAST 快控电源控制器研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2018, 38(3): 357-361.
- [6] 毕楠夏. EAST 新快控电源控制系统的研究与优化[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.