

EAST 装置大功率速调管保护系统研制

冯建强, 单家方, 杨永, 王茂, 王冬霞

(中科院等离子体物理研究所, 安徽合肥 230031)

摘要: 依据速调管耗散能量的安全值与最大故障电流、电弧电压和电源供电切断时间的关系, 介绍了 EAST 上 2.45 GHz/2 MW 低杂波速调管过流保护系统的设计。采用过电流电路触发和引燃管旁路速调管电流的方法来实时保护速调管。经自检测试和在 EAST 放电实验中的应用表明, 该系统能在 50 μ s 内完成保护, 完全满足设计需求。

关键词: 速调管; 保护; 低杂波; EAST; 实时

中图分类号: TP 206+ .3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0258-0934(2010)06-0743-05

低杂波电流驱动(LHCD)是维持先进超导托卡马克(EAST)核聚变装置等离子体长脉冲放电、改善等离子体约束进而提高其品质的关键技术^[1,2], 而速调管是低杂波系统的核心部件且价格非常昂贵, 所以保证其安全有效地运行是本系统的重中之重。

HT-7 是中科院等离子体物理研究所之前的一个托卡马克, 其低杂波系统包含 12 只工作频率为 2.45 GHz 的 KU-2.45 速调管, 其中过流保护系统由 12 路的管体过流硬件保护电路和 12 路的阴极过流硬件保护电路组成。在多年放电实验中成功地完成了保护速调管的艰巨任务, 但也发现该系统一些缺陷: (1) 这些电路易受到电磁高频影响, 特别是管体过流保护电路, 因为管体电流保护阈值低, 在电磁环境恶劣的情况下, 地线浮动和保护快速响应等等都可能引起误动作; (2) 由于速调管是并联地连接上高压源, 在撬棒动作时, 保护指示也受到地

线浮动强大干扰, 过流保护系统在过流发生时通常是许多保护电路同时动作; (3) 管体电流保护阈值和响应时间是在实验开始前手工一路一路定标完成的, 若在实验期间过流保护系统出现问题时, 也无法判断保护阈值和响应时间是否还在设定的正常范围内, 速调管保护的很大。

EAST 中 2.45 GHz 低杂波系统包含 20 只俄罗斯 ISTOK 公司生产的 KU-2.45 型微波速调管放大器(Klystron Amplifier), 同样需要有两重过流保护系统: 管体过流保护和阴极过流保护, 为此我们设计了一种新型的速调管保护系统, 该系统解决了以上所述问题。

1 需求分析

速调管内真空损毁是影响整个低杂波系统可靠性的最关键因素。尽管速调管两极间的电场强度很小(3.5 kV/mm), 但由于电源电压的不稳定性和速调管两极间短期过电压, 极有可能引起电弧放电, 导致内真空损坏。因此, 对于速调管的保护就是针对真空故障(即电弧放电)采取有效的保护措施^[3]。

众所周知, 对于大功率速调管, 两极间吸收的能量不能超过 50 J。两极间的能量耗散, 可

收稿日期: 2009-05-20

基金项目: 国家“九五”重大科学工程子项目。

作者简介: 冯建强(1981), 男, 汉族, 山西平定人, 中国科学院等离子体物理研究所博士研究生, 从事受控核聚变低杂波电流驱动系统技术研究。

以通过最大故障电流、电弧电压和电源供电切断时间估算出来。如图 1 所示。

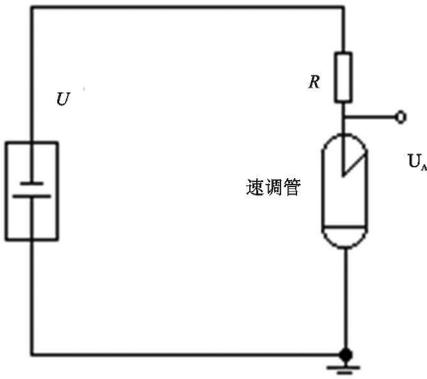


图 1 一只速调管由一个高压电源单独供电的示意图

根据能量公式,

$$W_A = U_A I_A t_A = U_A \cdot \frac{U}{R} \cdot t \leq 50 \text{ J}$$

如果电源电压设为 -35 kV , 限流电阻设为 20Ω , 电弧电压取为 $20 \sim 30 \text{ V}$, 可得电源供电切断时间不能超过 $1\,500 \mu\text{s}$ 。考虑余量之后, 保护时间要求为 $150 \mu\text{s}$ (按耗散能量减小 10 倍计算)。事实证明, 对于这种保护时间, 不能采取机械手段, 只能用电子保护电路。

与上面每个速调管由单一高压源供电不同, EAST 2.45 G/2 MW 低杂波系统包含 20 只速调管, 每 5 只速调管由一个高压源供电。如图 2 所示, 同上分析, 保护时间要求为 $150 \mu\text{s}$ 。

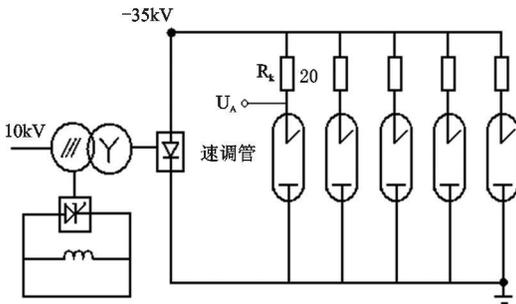


图 2 EAST 2.45 G/2 MW 低杂波系统 5 只速调管共用一个高压电源示意图

如果将限流电阻增大, 并且串联电感 L , 如图 3 所示。

假设某一只速调管在 0 时刻导通, 则有:

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + Ri = U_s \\ i_0 = 6.5 \text{ A} \times 5 = 32.5 \text{ A} \end{cases}$$

其中, U_s 为高压源电压, i_0 为导通时刻的电

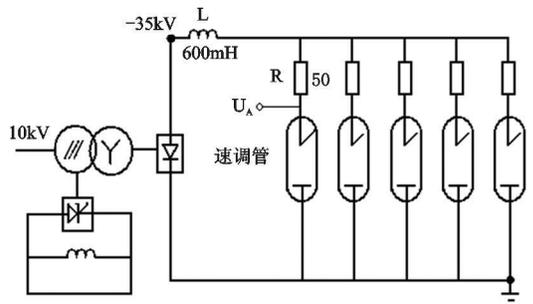


图 3 改进后的 EAST 2.45 G/2 MW 低杂波系统 5 只速调管共用一个高压电源示意图

流(在导通前每只速调管正常工作电流 6.5 A)。计算可得:

$$i = -667.5e^{-\frac{t}{\tau}} + 700$$

$$\text{其中, } \tau = \frac{L}{R}$$

如果按耗散能量减小 10 倍计算, 可假设速调管短路到保护的时间 t 内耗能 W_A (单位 J):

$$W_A = \int_0^t U_A i dt < 5 \text{ J}$$

取一阶近似后, 计算可得 $t < 5\,000 \mu\text{s}$ 。可以看出, 改进后的电路所要求的保护时间比原先增大了 30 多倍, 这有利于我们设计保护系统。

根据俄制速调管手册^[3], 以及考虑到低杂波系统的实际电路, 速调管主回路工作电流为 6.5 A , 当主回路电流超过 $7.5 \sim 9 \text{ A}$ 时, 必须在 $5\,000 \mu\text{s}$ 内实施保护; 管体电流最大不能超过 250 mA (根据第一次样品的测试结果), 否则实施保护不超过 $150 \mu\text{s}$ 。

2 保护设计方案

2.1 总体架构

速调管保护设计方案如图 4 所示, 通过霍尔电流传感器分别采集每一只速调管的主回路电流和管体电流, 送给检测处理电路进行过电流判断, 如果电流超过保护阈值, 则产生触发信号, 该触发信号一方面经过光电转换, 通过光纤传送及光电转换后, 由撬棒触发单元使引燃管导通。引燃管导通后, 将旁路掉速调管上的电流, 从而达到迅速保护速调管的目的; 同时, 由检测处理电路产生的触发信号被下位机的采集卡采集, 经下位机处理后, 通过低杂波系统网络传给上位机, 故障信息将显示在上位机界面上。如果引燃管正常导通后, 撬棒响应单元会发一个信号给检测处理电路, 该信号也被下位机采

集并传给上位机在界面上显示。上位机还将计

算并显示出整个保护系统的响应时间。

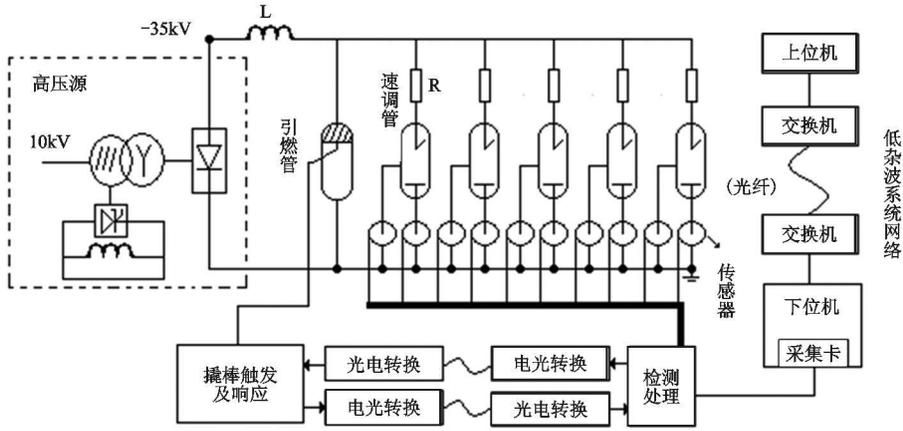


图 4 速调管保护设计方案整体架构示意图

2 2 硬件设计

为了使检测处理电路与整个低杂波系统电隔离,主回路和管体电流检测都采用 LEM 公司的 LT108-S7 霍尔电流传感器,它的测量范围宽,体积小,响应时间小于 10 ns,完全满足测量要求。

检测处理电路原理图如图 5 所示,从霍尔传感器感应出来的副边电流信号经过电流—电压变换电路变为电压信号,再经过滤波电路进入比较器(LM311)作比较,若输入电流大于预设电流阈值,则比较器(LM311)产生触发脉冲,经过脉冲展宽为一定时间宽度的脉冲,通过光隔离(4N25)触发撬棒动作和被计算机采集。下位机发出自检信号,可以检测整个保护系统。

集成开发环境下开发。

软件架构如图 6 所示,上、下位机采用 C/S 模式。上位机主要负责远程启动、关闭下位机,发送自检或监控命令,并且显示自检结果和过流状态。下位机被上位机启动后,先创建自检和监控两个线程,分别根据上位机的命令执行自检或监控程序,并将执行结果送到上位机的主界面显示。因为监控线程负责监测速调管的过流状态,所以将该线程的优先级设置为最高。

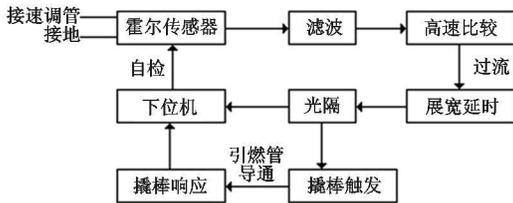


图 5 检测处理电路框图

撬棒单元采用的引燃管是美国理查德公司产品 NL-7703EHV,容量 50 kV/30 C,单管导通时间 3 μs。撬棒触发和响应通过 PLC 控制^[4]。

2 3 软件设计

由于本系统实时性要求比较高,我们采用加拿大 QSSL 开发的分布式、实时操作系统 QNX。它采用了优先级抢占调度算法,而且用户能够设定和改变进程的优先级,根据实际应用的需,选择进程调度算法。本软件在 IDE

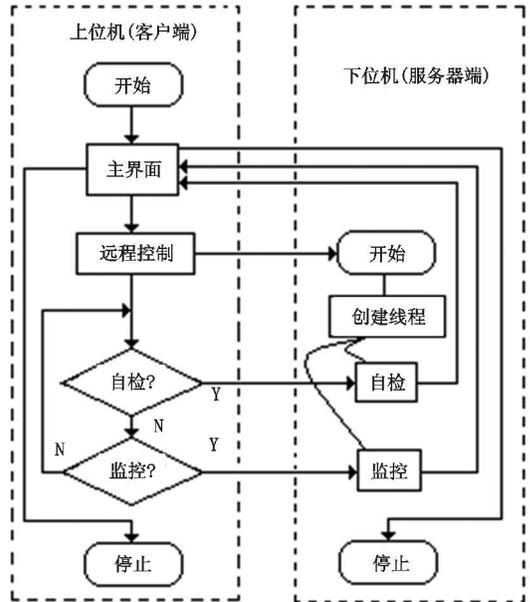


图 6 软件架构图

3 测试结果及分析

分析整套保护系统可知,从过流发生到产生保护,主要有两段时间延迟:检测处理电路和引燃管响应时间。图 7 是由示波器所测的检测处理电路的响应时间。图中 1 号线是模拟发生

过流时的电流触发电路的信号, 2 号线是电路输出的触发撬棒的信号(大于 3 V 时触发), 两者时间差小于 20 μs。引燃管响应时间大约 22 μs^[5]。可以估计出保护时间大约为 42 μs。

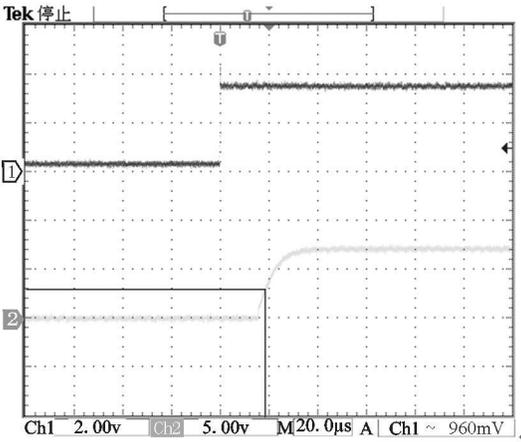


图 7 示波器测得的检测处理电路响应时间

图 8 是由计算机测得的保护系统自检测试的结果, 图中所示响应时间是指从发出自检模拟的过流信号开始计时, 到撬棒响应信号被采集到结束。可以看出, 响应时间在 45~ 50 μs 范围内。由速调管耗能公式:

$$W_A = \int_0 U_A i dt$$

可以计算出速调管耗能在 0.04~ 0.05 J 范围内, 远远小于设计需求所要求的 5 J。

检测撬棒	检测通道	响应时间(μs)	撬棒状态
1号撬棒检测开始	1	49.8	OK
2号撬棒检测开始	1	47.6	OK
3号撬棒检测开始	1	45.1	OK
4号撬棒检测开始	1	47.8	OK

图 8 保护系统自检测试的结果

图 9 是 2008 年 EAST 夏季放电实验中, 某次过流时上位机主界面的记录数据, 由图中

可以看出, 该保护系统从 20 只速调管中, 准确判断出 18# 速调管管体发生过流, 并且测得响应时间为 47 μs。经过 2 个多月的放电实验, 整个保护系统的实时性、可靠性和稳定性得到了进一步验证。

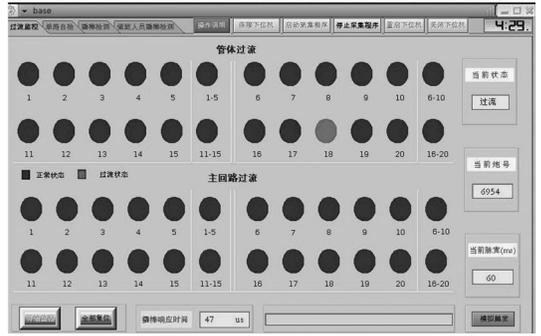


图 9 过流时上位机主界面

4 结语

该套保护系统在 2008 年 7 月和 2009 年 3 月两轮 EAST 放电实验中, 安全可靠地保护了速调管, 并能从 20 路速调管中分辨出真正发生过流的速调管。由于具有在线监控和自检功能, 大大方便了操作人员自检和调试。在实验期间也发现本系统的不足之处: 不能采集过流信号的波形, 笔者将进一步解决此问题。

致谢: 感谢所有中科院等离子体物理研究所低杂波组成员。

参考文献:

- [1] Fisch N J. Conductivity of rf heated plasma[J]. Phys. Fluids. 1985, 28(1): 245-247.
- [2] Fisch. N. J., Karney. C. F. F.. Conversion of wave energy to magnetic field energy in a plasma torus [J]. Phys. Rev. Lett., 1985, 54(9): 897-900.
- [3] 俄 ISTOK 研究所. HT-7 LHCD 微波器件手册 [Z]. 中科院等离子体所馆藏, 1995.
- [4] 胡怀传, 单家方, 郑光华, 等. EAST 低杂波高压电源保护系统的设计和实现[J]. 核聚变与等离子体物理, 2009 (2): 171-173.
- [5] 黄懿赞. 用撬棒快速保护技术保护高功率微波管 [J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 31-37.

Development of a Protection System for High Power Klystrons in EAST

FENG Jiar-qiang, SHAN Jia-fang, YANG Yong, WANG Mao, WANG Dong-xia

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, 230031)

Abstract: The energy dissipated on the electrodes of a klystron can be estimated from maximal breakdown current, value of the arc discharge voltage and time of turning off the power supply. It mainly introduces the design of over-current protection of Klystrons for 2.45 G/2 MW LHCD System on EAST. Circuits triggering by an over-current and ignitrons are adopted to protect klystrons. Experiment results prove that the system can protect klystrons efficiently.

Key words: Klystron, Protection, LHCD, EAST, Real-time

(上接第 738 页, Continued from page 738)

- [18] L. R. Surguladze, M. A. Samuel. Total hadronic Cross Section in e^+e^- annihilation at the four-loop level of perturbative QCD [J]. Phys. Rev. Lett., 1991, 66(5): 560-563.
- [19] F. A. Berends, K. J. F. Gaemers, R. Gastmans. Hard photon corrections for the process $e^+e^- \rightarrow \mu^\pm\mu^\mp$ [J]. Nucl. Phys. B, 1973, 57(2): 381-400.
- [20] BES Collaboration, J. Z. Bai, G. P. Chen, et al. A measurement of J/Ψ decay widths [J]. Phys. Lett. B, 1995, 355(1-2): 374-380.
- [21] BES Collaboration, J. Z. Bai, Y. Ban, et al. A measurement of $\Psi(2S)$ resonance parameters [J]. Phys. Lett. B, 2002, 550(1-2): 24-32.
- [22] 王平, 苑长征, 莫晓虎. e^+e^- 实验中 $\Psi(2S)$ 能区连续态单光子湮没过程的贡献 [J]. 高能物理与核物理, 2003, 27(6): 465-473.
- [23] Fu Cheng Dong, Zou Jia Heng, Mo Xiao Hu, et al. Study of the online event filtering algorithm for BES III [J]. Chin. Phys., 2008, C32(5): 329-337.
- [24] S. Jadach, E. Richter-Was, B. F. L. Ward, et al. Monte Carlo program BHLUMI 2.01 for Bhabha Scattering at low angles with Yennie Frautschi surura exponentiation [J]. Comput. Phys. Commun., 1992, 70: 305-344.
- [25] 傅成栋. BES-III 在线事例分类的实现与应用 [R]. 北京: 清华大学, 博士后研究报告, 2008.

Online Luminosity Measurement at BES III

SONG Weirbo^{1,2}, FU Cheng-dong², MO Xiao-hu², HE Kang-lin²,
ZHAO Shu-jun¹, ZHU Ke-jun², LI Fei²

(1. Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China,

2. Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: As a crucial parameter of both accelerator and detector, the realization of online luminosity measurement is of great importance. Several methods of luminosity measurement are recapitulated and the emphasis is laid on the algorithm of using e^+e^- and $\Upsilon\Upsilon$ final states. Taking into account the status at the beginning of the joint commissioning of detector and accelerator, the information from endcap electromagnetic calorimeter is used to select the good event. With the help of online Eventfilter, the luminosity is calculated and the monitoring of online cross section of hadron is realized. The preliminary results indicate that the online luminosity measurement is stable and its role for machine tuning and monitoring of the overall running status is indispensable.

Key words: Bhabha Event, Luminosity, Cross section, Online monitoring