

# 积分分离的电子回旋共振加热高压脉冲电源 模糊控制研究

杜鹏英<sup>1</sup>, 罗小平<sup>1,\*</sup>, 杜少武<sup>2</sup>

(1. 浙江大学城市学院 智能系统重点实验室, 浙江 杭州 310015;

2. 合肥工业大学 能源研究所, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**基于四极管的电子回旋共振加热负高压脉冲电源是支持回旋管工作的关键组件,对稳态误差精度和响应速度等性能有较高的要求。分析了电源系统的工作原理,给出了数学模型。针对四极管的非线性特点和电源的控制要求,将智能控制方法与电源技术相结合,提出积分分离模糊控制器的控制策略。通过仿真实验,与传统PID控制策略进行比较,结果表明,该控制器具有抑制超调、自适应自调节的功能,为实现高性能的负高压脉冲电源提供了一种新的控制策略,同时也为智能化数字控制的实现打下基础。

**关键词:**高压脉冲电源;积分分离;模糊控制;自调节

中图分类号:TP303

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2010)05-0623-06

## Fuzzy Control of High-Voltage Pulse Power Supply for Electron Cyclotron Resonance Heating Based on Integral-Separate Method

DU Peng-ying<sup>1</sup>, LUO Xiao-ping<sup>1,\*</sup>, DU Shao-wu<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Intelligent System, Zhejiang University City College, Hangzhou 310015, China;

2. Energy Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** The negative high-voltage pulse power supply for the electron cyclotron resonance heating (ECRH) is a key support to the cyclotron's functioning and good performance is highly required. The principle of operation was analyzed and the model was given. According to the nonlinear characteristics of tetrode and the supply's control requirements, fuzzy control theory based on integral-separate was adopted, which combined intelligent control with power technology. Simulation results show that this system has good overshoot-restrained, self-adaptive and auto-negotiating abilities using this method in comparison with PID method. This is a good new control and will be benefit to digital control intelligently.

**Key words:** high-voltage pulse power supply; integral-separate; fuzzy control; auto-negotiating

收稿日期:2009-11-04;修回日期:2010-02-03

基金项目:浙江省自然科学基金资助项目(Y1080776);浙江省教育厅科研计划资助项目(200909877)

作者简介:杜鹏英(1978—),女,安徽阜阳人,讲师,硕士,电力电子及控制理论专业

\* 通信作者:罗小平, E-mail: luoxp@zucc.edu.cn

电子回旋共振加热(ECRH)是托卡马克等离子体辅助加热常用的方法之一<sup>[1]</sup>, ECRH 负高压脉冲电源是等离子体二次加热用的微波发生器回旋管的电源, 提供回旋管阴极与阳极之间所必需的高稳定直流脉冲电源; 同时, 分压作为回旋管枪阳极的电源, 还担负着回旋管故障及其他故障的适时保护任务, 是支持回旋管工作的关键组件, 也是整个 ECRH 系统技术难点所在。该电源容量大、控制性能要求很高: 要求输出电压  $-80\text{ kV}$ , 最大脉宽  $100\text{ ms}$  (脉宽可调), 稳态误差小于  $0.3\%$ , 调整时间小于  $200\text{ }\mu\text{s}$ 。

目前, ECRH 高压电源系统常用的电路拓扑有 3 种: 1) 印度等离子体所 SST-1 托卡马克设备中采用的 AC/AC-AC/DC 结构; 2) 德国的 W7-X 托卡马克装置中采用的  $N$  个开关电源(SMPS)模块的输出串联结构<sup>[2]</sup>; 3) 美国的 DIII-D 托卡马克装置中的基于四极管调压的 AC/AC-AC/DC-DC/DC 结构<sup>[3]</sup>。方案 1 控制原理简单, 但电路较复杂, 且晶闸管关断存在延迟, 对保护电路产生不利影响; 方案 2 控制方案先进, 但模块较多时不宜实现; 方案 3 基于四极管响应较快, 线性调整输出纹波小<sup>[4-5]</sup>, 本系统采用方案 3。

较好的控制策略是该电源实现高性能指标的关键, ECRH 脉冲电源是非线性系统<sup>[4]</sup>, 其控制存在以下几个难点: 1) 容量大、控制性能要求高; 2) 非线性控制; 3) 系统控制应具有自适应能力。采用常规的控制策略很难实现对其实时有效的控制, 文献<sup>[6]</sup>中提出了前馈 PI 控制方法, 系统在某种状态下具有较好的性能指标, 但当负载和输入信号改变时, 控制性能变差, 不具备参数自适应、自调整能力。其他的控制方法尚未见报道。基于以上情况, 将适用于非线性控制具有自适应调节功能的智能控制方法——模糊控制应用于该系统, 提出积分分离的模糊控制方法。

## 1 基本结构与工作原理

ECRH 负高压电源系统分为主电路和控制驱动部分, 基本结构如图 1 所示。主电路由充电电源、电容器组 C、大功率四极管 T、缓冲器(L-R<sub>4</sub>-D)、负载回旋管和泄放电阻 R<sub>3</sub>等组成; 控制驱动电路由反馈采样电路、控制器、光纤传输、

四极管控栅极驱动电路等组成。图 1 中,  $I_A$  为四极管阳极电流(也是负载回路的电流),  $V_K$  为四极管的阴极电压(也是电容器组的电压),  $V_{g1}$  为四极管控栅极驱动信号,  $V_A$  为四极管的阳极电压(也是负载电压),  $U_{V_{g1}}$  为控制器输出信号。

系统工作时, 充电电源将电容器组 C 充电至  $-100\text{ kV}$ , 作为该负高压脉冲电源的输入电源(也是电容放电的初始电压), 电容器组储存的能量再通过四极管的脉冲调制放电输出稳定的  $-80\text{ kV}$  电源给负载回旋管供电。四极管控栅极脉冲调整控制信号  $V_{g1}$  由控制器根据给定信号  $V_r$  与反馈信号  $V_{Af}$  的偏差  $e$  进行调整, 并经光纤传输和控栅极驱动电路产生。

另外, 主电路缓冲器用来限制负载电流的变化, 以防过压损坏回旋管。回旋管在正常工作时可等效成纯电阻 R, 但在启动时相当于开路, 由于缓冲器的存在, 不利于四极管对脉冲前沿的调节, 因此, 在负高压电源主电路的输出端接  $40\text{ k}\Omega$  的泄放电阻 R<sub>3</sub> (一般采用水电阻)。

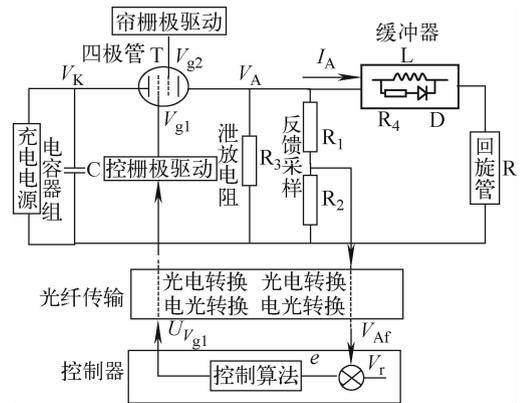


图 1 电源系统结构简图

Fig. 1 Block diagram of power supply system

## 2 系统控制结构及数学模型

根据系统工作原理, 系统的控制结构如图 2 所示。

为研究系统控制策略, 各部分模型的建立非常必要。根据系统控制结构, 分别建立四极管模型、电容器组放电模型、采样反馈模型、负载网络模型、光纤传输和控栅极驱动模型。

选择美国 ETIMC 公司生产的水冷高压脉冲调节型四极管 4CPW100KA/Y841, 不考虑时间延时, 根据其工作特性和实验, 得到四极管

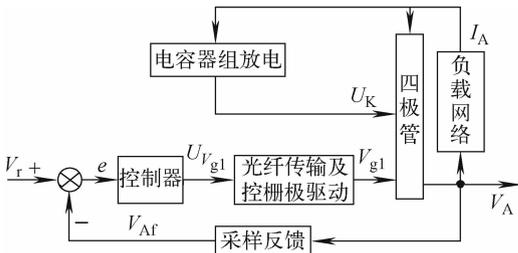


图2 系统控制框图

Fig. 2 Control diagram of power supply system

的数学模型<sup>[6]</sup>为:

$$V_A = V_K + 1.8 \times 10^4 - (1.720e^{-0.055I_A} - e^{-1.055I_A}) \cdot (V_{g1} + 200 + 230e^{-I_A/4.5} + 170e^{-0.55I_A}) \quad (1)$$

电容器组放电回路中,电容器组的电压 \$V\_K\$ 与放电电流 \$I\_A\$ 的传递函数为:

$$G_c(s) = \frac{V_K}{I_A} = \frac{1}{Cs} \quad (2)$$

其中:\$C\$为电容器组的电容。

采样反馈由精密电阻 \$R\_1\$、\$R\_2\$ 分压组成,其传递函数为:

$$G_f(s) = \frac{V_A}{V_{Af}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

负载回路是由回旋管和缓冲器串联而成的,\$L\$为缓冲器的电感,不考虑缓冲器电阻和二极管的影响,其传递函数为:

$$G_o(s) = \frac{I_A}{V_A} = \frac{1/R}{\frac{L}{R}s + 1} \quad (4)$$

光电传输与控栅极驱动电路中控制器输出经过光纤传输、功率放大、抗干扰处理,其传递函数可等效成惯性环节(\$T\$为该电路的延时时间,\$K\$为增益):

$$G_{g1}(s) = \frac{V_{g1}}{U_{V_{g1}}} = \frac{K}{Ts + 1} \quad (5)$$

控制器是该系统高性能指标实现的关键,

输入为 \$e\$,输出为 \$U\_{V\_{g1}}\$,其关系可简单表示成:

$$U_{V_{g1}} = f(e) \quad (6)$$

### 3 积分分离模糊控制器设计及系统仿真

#### 3.1 积分分离模糊控制器设计

常规PID控制策略应用广泛,控制简单,适合线性系统或可简化为基本线性的系统。由式(1)可见,四极管是非线性复杂对象,该系统是非线性系统,采用常规的PID控制策略很难实现较好的控制。本工作将智能控制与大容量电源技术相结合,提出积分分离的模糊控制方法。

模糊控制是一种非线性控制方法,特别适合于非线性系统和复杂系统的控制,比常规控制系统具有更好的稳定性和鲁棒性,设计参数易选择、调整。另外,根据该系统较高稳定精度性能指标的要求,需引入积分环节。但在过程的启动、结束、大幅度设定时,短时间内系统有很大的偏差,会造成控制运算的积分积累,致使控制量超过四极管控栅极可承受的极限控制量,引起系统较大的超调,甚至引起系统较大的振荡。基于以上分析,该系统采用积分分离的模糊控制策略,如图3所示。当被控量与设定量的偏差较大时,取消积分调节作用,采用模糊PD调节以避免由于积分作用使系统稳定性降低,超调量增大;当被控量接近给定量时,引入积分控制,以便消除静差,提高电压控制精度。

图3中,控制器的输入信号为 \$e\$,输出信号为 \$U\_{V\_{g1}}\$, \$K\_1\$、\$K\_2\$ 分别为比例、微分的量化系数, \$K\_3\$ 为积分系数, \$K\_4\$ 为输出论域反变换系数。误差项 \$e\_1\$ 和误差变化率 \$ec\_1\$ 经过模糊化变为 \$E\_1\$ 和 \$EC\_1\$,根据模糊规则,进行模糊决策,利用加权平均法解模糊输出 \$U\$,再经过系数 \$K\_4\$ 进行论域反变换,与积分部分相叠加,输出控制信号 \$U\_{V\_{g1}}\$。

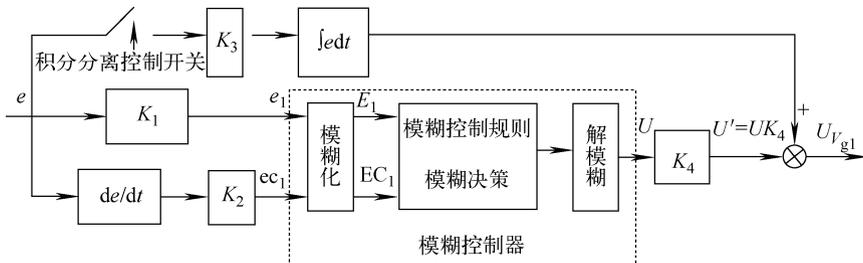


图3 积分分离模糊控制器

Fig. 3 Integral-separate fuzzy controller



表 2 模糊控制规则表  
Table 2 Fuzzy control rule table

EC	E						
	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	Z
PM	PB	PB	PB	PS	PS	Z	NS
PS	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NM
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
NS	PM	PS	Z	NS	NS	NM	NB
NM	PS	Z	NS	NS	NM	NB	NB
NB	Z	NS	NS	NM	NM	NB	NB

系统各参数取为: $C=126\ \mu\text{F}$ ,  $L=2\ \text{mH}$ ,  $T=6.5\ \mu\text{s}$ ,  $K=82$ ,  $R_1=390\ \text{M}\Omega$ ,  $R_2=390\ \text{k}\Omega$ 。根据  $e_1$ 、 $ec$  的论域范围及  $e$  的范围,取控制器量化参数  $K_1=0.02$ ,  $K_2=0.001$ ;积分可有效消除误差,但过大会引起超调,取其系数为  $K_3=0.023$ ;根据模糊控制器的输出  $U$  的论域及控制器的输出  $U_{V_{gl}}$  范围,取  $K_4=10$ 。当给定  $V_r=8\ \text{V}$ ,负载电阻分别取  $10\ \text{k}\Omega$  和  $9.5\ \text{k}\Omega$  时,采用传统 PID 控制及积分分离模糊控制方法分别对该系统进行仿真,输出电压的仿真波形示于图 6、7。

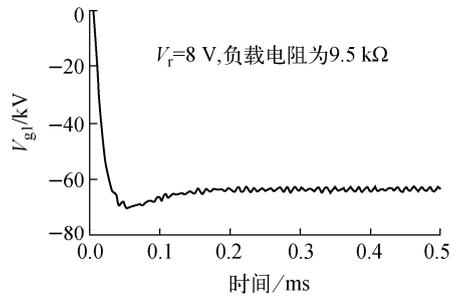
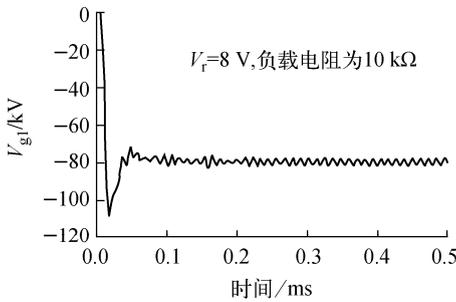


图 6 基于 PID 控制的输出曲线

Fig. 6 Output curves using PID controller

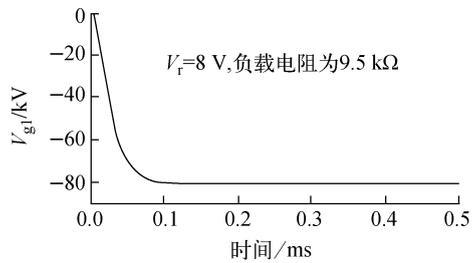
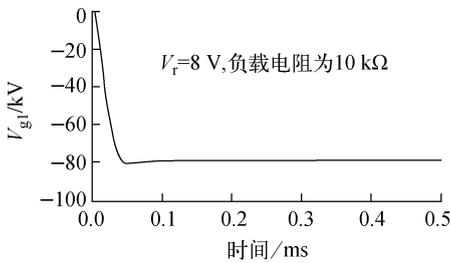


图 7 基于积分分离模糊控制的输出曲线

Fig. 7 Output curves using integral-separate fuzzy controller

根据图 6、7 输出电压曲线,得出系统的输出性能列于表 3。由表 3 可知,采用积分分离模糊控制方法与采用 PID 控制方法相比,系统超调量小、稳态误差小、响应速度快;采用 PID 控制时,当负载由  $10\ \text{k}\Omega$  变为  $9.5\ \text{k}\Omega$  时,系统性能指标变化较为明显,稳态误差明显增大,不能满足系统的要求,响应时间也明显加长;而采用积分分离的模糊控制,负载变化前后的性能指标变化不大,均能满足系统的要求。可见,采用积分分离的模糊控制在负载变化时,系统具有自调节能力,而采用 PID 则不具备此功能;另外,

积分分离的采用有效控制了系统的超调,消除了 PID 控制时系统输出电压小的震荡。

表 3 两种控制方法下系统性能指标  
Table 3 System performance indexes using two different methods

控制方法	超调量/%		稳态误差/%		响应时间/ $\mu\text{s}$	
	10 k $\Omega$	9.5 k $\Omega$	10 k $\Omega$	9.5 k $\Omega$	10 k $\Omega$	9.5 k $\Omega$
PID	31	16	0.028	9.2	70	170
积分分离模糊控制	3.6	0	0.012	0.011	62	85

## 4 结论

控制策略研究是 ECRH 负高压脉冲系统的研究难点和核心,针对 ECRH 负高压电源的较高的控制要求以及非线性特点,将模糊集合论、模糊语言变量以及模糊逻辑推理为基础的模糊控制首次应用于该电源系统。同时,考虑系统的稳态精度的高要求和较小的超调量需要,将积分分离与模糊控制相结合,构建了积分分离的模糊控制器,并实施对该电源系统的控制,取得了较好的控制效果,调整时间为  $62 \mu\text{s}$  (小于  $200 \mu\text{s}$ ),稳态误差为  $0.012\%$ ,符合系统要求。该方法与传统 PID 控制方法相比具有以下优点:1) 适用于非线性控制系统,可实现 ECRH 负高压脉冲电源非线性系统的较好控制;2) 对该系统的干扰、负载变换等情况能够自适应调整,使得该系统具有较强的鲁棒性,增加系统的可靠性。

### 参考文献:

[1] 杜少武,丁同海,徐宁,等. ECRH 负高压脉冲电源系统控制特性研究[J]. 核聚变与等离子体物理,2003,23(3):181-185.  
DU Shaowu, DING Tonghai, XU Ning, et al. Study on control method of high-voltage pulse power supply for ECRH[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2003, 23(3): 181-185(in Chi-

nese).

- [2] MICHE G, BRAND P, PEREVERZEV G, et al. Progress of the 10 MW ECRH system for W7-X[EB/OL]. <http://washop.free.fr/ec12/PAPERS.044-Michel.pdf>.
- [3] PRONKO S G E, DELAWARE S, HARRIS T E, et al. The performance of 8.4 MW modulator/regulator power system for the electron cyclotron heating upgrade at DIII-D[C]//The 14th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy. Park City, Utah: [s. n.], 2000.
- [4] NEREM A, KELLMAN D H, PRONKO S C E, et al. Circuit modeling and feedback controller development of the 8.4 MW modulator/regular power system for the electron cyclotron heating facility upgrade at DIII-D[C]//The 14th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy. Park City, Utah: [s. n.], 2000.
- [5] PRONKO S G E, BAGGEST D S. The 8.4 MW modulator/regulator power system for the electron cyclotron heating upgrade at DIII-D[C]//The 18th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering. New Mexico, USA: [s. n.], 1999.
- [6] DING Tonghai, DU Shaowu, LIU Baohua, et al. The high voltage power supply system of ECRH for HU-7[C]//Power Modulator Symposium, 2002 and 2002 High-Voltage Workshop. [S. l.]: [s. n.], 2002.