

# 基于模糊反步自适应算法的飞机发电控制研究

吴明星<sup>1</sup>, 樊显绒<sup>2</sup>, 李照地<sup>2</sup>, 李伟林<sup>2</sup>

(1. 上海飞机设计研究院 民用飞机模拟飞行国家重点实验室, 上海 201210;

2. 西北工业大学 自动化学院电气工程系, 陕西 西安 710100)

**摘要:** 随着多电化和全电化趋势的发展, 飞机电气与电子设备大量增加, 恒频系统已不能满足飞机用电需求。飞机供电体制需要由恒频系统向变频系统转变, 而变频发电机是变频系统中尤为重要的设备。传统的 PID 控制采用固定参数, 无法很好地在宽变频发电系统中工作, 因此提出了基于模糊反步自适应控制算法的控制参数修正方法以提高调压系统适应性。结合三级式发电系统数学模型, 设计了调压系统中不确定参数的自适应律分析方法, 并建立了基于该算法的调压系统仿真模型。通过仿真验证了模糊反步自适应控制可以有效抑制工作条件变化对调压系统造成的影响, 增强调压系统的稳定性和调节性能, 为飞机发电机控制器的设计提供理论支持。

**关键词:** 发电机控制器; 模糊控制; 反步自适应控制; 变频发电系统; 仿真模型

中图分类号: TM921.5 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)08-0021-07

doi: 10.12177/emca.2022.064

## Research on Aircraft Power Generation Control Based on Fuzzy Backstepping Adaptive Algorithm

WU Mingxing<sup>1</sup>, FAN Xianrong<sup>2</sup>, LI Zhaodi<sup>2</sup>, LI Weilin<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Civil Aircraft Flight Simulation, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China;

2. Department of Electrical Engineering, School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** With the development of more-electric and all-electric, aircraft electrical and electronic equipment has increased greatly, and the constant frequency system can no longer meet the demand of aircraft power. The aircraft power supply system needs to transform from constant frequency system to variable frequency system, and variable frequency generator is the most important equipment in variable frequency system. The traditional PID control adopts fixed parameters and cannot work well in the wide variable frequency power generation system, so a control parameter modification method based on fuzzy backstepping adaptive control algorithm is proposed to improve the adaptability of the voltage regulating system. Combined with the mathematical model of three-stage power generation system, an adaptive law analysis method for uncertain parameters in the voltage regulating system is designed, and a simulation model of the voltage regulating system based on the algorithm is established. The simulation results showed that the fuzzy backstepping adaptive control could effectively suppress the influence of working condition changes on the voltage regulating system, enhance the stability and regulation performance of the voltage regulating system, and this algorithm provides theoretical support for the design of aircraft generator controller.

收稿日期: 2022-03-16; 收到修改稿日期: 2022-06-17

作者简介: 吴明星(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为民用飞机电气系统设计、试验及集成测试。

樊显绒(1997—), 女, 硕士研究生, 研究方向为飞机电源系统的发电机控制。

李照地(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为多电飞机变频发电调压系统控制。

**Key words:** generator controller; fuzzy control; backstepping adaptive control; variable frequency generation system; simulation model

## 0 引言

随着飞机多电化和全电化趋势的发展,飞机用电设备大量增加,飞机恒频系统已不能满足飞机用电需求,随着电力电子技术的发展和其在飞机上的应用,飞机电源系统逐渐向变频交流系统方向发展。在最新研制的大型民用飞机上,变频交流发电系统得到了很好的应用。在飞机供电体制从恒频系统转换为变频系统的过程中,需要重点关注变频发电机,常规变频发电机工作频率一般为 400~800 Hz。

发电机控制器是影响飞机变频发电机可靠性、稳定性的重要控制设备。20 世纪 70 年代,国外发达国家就开始了数字式飞机发电机控制器的研究。一些发达国家已经实现了全数字式飞机发电机控制器的开发与应用,并利用数字信号处理器(DSP)强大的运算处理能力和速度实现各种复杂的控制算法。而我国数字式飞机发电机控制器发展的起步相对比较晚,1986 年微机控制器才开始运行使用,且现在大多仍采用由微控制器组成的半数字式飞机发电机控制器。

目前,大部分数字式飞机发电机控制器上采用的控制策略仍为传统的 PID 控制,控制稳定性已不能满足先进飞机电源系统的要求。为了更好地提升飞机发电机工作的稳定性,本文提出了基于模糊反步自适应控制算法的控制参数修正方法,将模糊控制与反步自适应控制相结合,分析系统中不确定参数的自适应律设计方法,并分析基于模糊反步自适应控制的调压系统动稳态性能,建立了基于该算法的调压系统仿真模型,通过仿真验证了模糊反步自适应控制可以有效抑制工作条件变化对调压系统造成的影响,增强调压系统的稳定性和调节性能。

## 1 飞机发电机控制器主要功能

本文以常用的飞机三级式无刷交流同步发电机为控制对象,如图 1 所示,三级结构包括永磁副励磁机、交流主励磁机和主发电机。永磁副励磁机的转子侧永磁体在旋转时产生旋转磁场使定子侧产生感应电流,并经过整流后作为励磁电流流入交

流励磁机定子侧,主励磁机转子侧输出端连接旋转整流器,为主发电机提供励磁电流,从而在主发电机定子侧输出三相交流电。三级式发电机的无刷特点使其具有较低的维护成本及较高的可靠性。

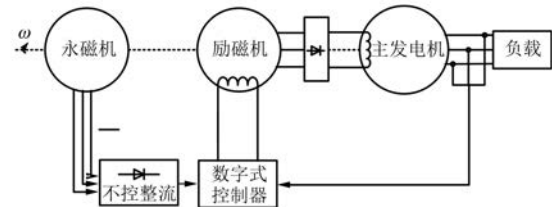


图 1 飞机三级式无刷交流同步发电机结构

数字式飞机发电机控制器的电压调节功能主要是调节交流励磁机定子侧励磁电流输入,以控制主发电机输出端发电电压输出,输出电压的调节精度是衡量整个发电系统性能最重要的指标。变频交流供电系统的电压调节采用的是多回路闭环控制,通过对输出电压、励磁电流、负载电流等变量的反馈实现对系统输出电压的调节。调压器主要由检测环节、比较环节、放大环节和执行环节组成,有时需增加补偿和校正环节。

数字式飞机发电机控制器的控制保护功能主要是保证飞机电源系统正常工作,其在发电机故障时进行保护,可根据负载情况、调节点电压、系统状态以及逻辑关系来控制相应接触器动作,完成发电机和电网之间的通断与转换。

## 2 模糊反步自适应飞机发电机控制器

### 2.1 反步控制原理

反步控制最早在 1991 年由 KANELAKOPOULOS 提出<sup>[1]</sup>。反步控制法通过反向递推法为每个子系统设计 Lyapunov 函数和中间虚拟控制量,最终完成整体控制律的推导。但反步控制较依赖控制对象数学模型中各参数的精确性,所以在时变系统中较难保证稳定性。在实际应用中,反步控制很少单独使用,需要与一些参数观测方法相结合来适应系统运行时控制参数的变化<sup>[2-5]</sup>。其中,自适应控制与反步控制的结合运用最为广泛。反步自适应控制针对反步控制算法中每一个不确定参数设计自适应律,来提高系统克服参数扰动的能力。反步自适应控制设计

方法较为简单,增加不确定参数不需要改变子系统的结构,仅需要改变构造的 Lyapunov 函数<sup>[6-9]</sup>。

以一个二阶非线性系统为例,介绍反步控制算法的设计步骤:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \end{cases} \quad (1)$$

式中: $b$ 为未知参数; $u$ 为系统实际控制律;子系统非线性部分 $f(x_1, x_2)$ 只与状态变量 $x_1, x_2$ 有关,该系统为严格反馈系统。

设式(1)中的第一个式子为子系统一, $x_2$ 即为第一个子系统的虚拟控制量,此二阶非线性系统反步设计步骤如下。

第一步,定义状态误差 $e_1 = x_{1d} - x_1, x_{1d}$ 为实际输入的参考值。

对状态误差 $e_1$ 求导:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_{1d} - \dot{x}_1 = \dot{x}_{1d} - x_2 \quad (2)$$

定义子系统一的 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{e_1^2}{2} \quad (3)$$

对式(3)求导并代入式(2)可得:

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1(\dot{x}_{1d} - x_2 + k_1 e_1) \quad (4)$$

式中: $k_1$ 为正实数。

令 $\dot{x}_{1d} - x_2 + k_1 e_1 = 0$ ,即 $x_2 = \dot{x}_{1d} + k_1 e_1$ 时, $\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 \leq 0$ ;结合式(3),可得 $V_1 \geq 0$ ,根据 Lyapunov 渐近稳定性定理,可知子系统一全局渐近稳定。

第二步,对于第二个子系统 $\dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu$ ,因为状态变量 $x_2 = \dot{x}_{1d} + k_1 e_1$ 可使第一个子系统稳定,所以取状态变量为

$$x_{2d} = \dot{x}_{1d} + k_1 e_1 \quad (5)$$

定义虚拟状态误差 $e_2 = x_{2d} - x_2$ ,将式(5)代入式(4)中得:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 \quad (6)$$

对虚拟状态误差求导可得:

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_{2d} - \dot{x}_2 = \dot{x}_{2d} - f(x_1, x_2) - bu \quad (7)$$

定义 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{e_2^2}{2} \quad (8)$$

对式(8)求导可得:

$$\dot{V}_2 = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (9)$$

将式(4)和式(7)代入式(9)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 = & -k_1 e_1^2 + e_1 e_2 + e_2 [\dot{x}_{2d} - bu - f(x_1, x_2)] = \\ & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 + e_2 [e_1 + \dot{x}_{2d} - bu - f(x_1, x_2) + k_2 e_2] \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $k_2$ 为正实数。

为了保证 $\dot{V}_2$ 不大于0,则实际控制律 $u$ 为

$$u = \frac{1}{b} [e_1 + \dot{x}_{2d} - f(x_1, x_2) + k_2 e_2] \quad (11)$$

此时 $\dot{V}_2 = -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2$ ,根据 Lyapunov 渐近稳定性定理可知第二个子系统渐近稳定。因此整个非线性系统是全局渐近稳定的。

## 2.2 反步自适应飞机发电机控制器的设计

结合图1,能够根据永磁同步发电机、交流励磁机、旋转整流器以及主发电机的传递函数得到飞机三级式发电机数学模型。由于三级式发电机高阶与低阶传递函数的幅频特性曲线呈现出较高的匹配性,可以使用二阶传递函数近似描述三级式发电机<sup>[10]</sup>,如式(12)所示:

$$G(s) = \frac{Y_r(s)}{u(s)} = \frac{K_p}{s^2 + a_1 s + a_0} \quad (12)$$

式中: $s$ 为复空间内的微分算子;参数 $a_0, a_1, K_p$ 由发电机工作频率以及电机特性等系统参数决定,因此在变频发电系统中,相关参数便具备一定不确定性。

本文将具有未知参数的线性对象控制看作一个非线性问题,针对具有不确定性的线性系统,基于 Lyapunov 函数的线性控制律提出了一种自适应反步控制设计方法,再结合模糊控制,完成控制律的整体设计。经典的反步自适应方法利用调节函数和非线性阻尼项来稳定闭环系统,而本文通过自适应增益和标准化的估计律来稳定系统。本文所采用的方法在处理参数估计误差时,没有采用过参数化、调节函数和非线性阻尼项,所以闭环系统的局部稳定性可以得到保证。

对于式(12)所示的具有不确定性参数的线性系统,也可采用反步自适应控制方法设计控制律,用参数的估计量来代替未知的参数量,并设计相应的参数估计律来不断更新参数的估计值。

针对式(12)所示系统,根据传递函数与状态空间方程之间的关系得出本系统的状态空间方程如式(13)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu \\ y = x_1 \end{cases} \quad (13)$$

式中:具有不确定参数的线性项  $f(x_1, x_2) = -a_0x_1 - x_2; b = K_p$ 。

为了使实际输出电压  $y$  跟随参考电压  $y_r$ , 定义广义输出误差为

$$e(t) = y_r - y \quad (14)$$

接下来使用反步自适应方法对上述系统进行发电机控制器设计, 使  $\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$ 。

首先令  $x_1 = y, x_2 = \dot{x}_1 = \dot{y}$ , 定义系统跟踪误差变量  $z_1$ , 并设  $\sigma$  为虚拟控制量, 则有:

$$\begin{cases} \dot{\xi} = z_2 \\ z_1 = x_1 - y_r \\ z_2 = x_2 - \sigma \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $\xi$  是为了消除稳态误差而引入的积分变量。

设第一个 Lyapunov 函数为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 \quad (16)$$

$V_1$  对时间的导数为

$$\dot{V}_1 = z_1 \dot{z}_1 = z_1(z_2 + \sigma - \dot{y}_r) \quad (17)$$

为保证式(17)的负定性, 取虚拟控制变量  $\sigma$  为

$$\sigma = -c_1 z_1 + \dot{y}_r \quad (18)$$

式中:  $c_1$  为发电机控制器设计参数,  $c_1 > 0$ 。

将式(18)代入式(17)得:

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 \quad (19)$$

设第二个 Lyapunov 函数为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2} \lambda \xi^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \tilde{\theta} + \frac{1}{2\gamma_\rho |\rho|} \tilde{\rho}^2 \quad (20)$$

式中:  $\rho = \frac{1}{b}; \hat{\rho}$  为  $\rho$  的估计值;  $\tilde{\rho}$  为估计误差,  $\tilde{\rho} = \rho - \hat{\rho}; \theta = [\theta_0 \theta_1]^T, \theta_0 = -a_0, \theta_1 = -a_1; \hat{\theta}_0, \hat{\theta}_1$  分别为  $\theta_0, \theta_1$  的估计值;  $\tilde{\theta}_0 = \theta_0 - \hat{\theta}_0, \tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \hat{\theta}_1$  分别为  $\theta_0, \theta_1$  的估计误差;  $\tilde{\theta} = [\tilde{\theta}_0 \tilde{\theta}_1]^T; \gamma_\rho$  为自适应增益, 为正数, 自适应增益值越小, 系统自适应速度越慢, 反之, 系统自适应速度越快;  $\lambda$  为引入的控制参数;  $\Gamma = \text{diag}(\gamma_0 \gamma_1)$  为正定设计参数,  $\gamma_0, \gamma_1$  分别为自适应增益, 均为正数。

结合式(19), 设  $F(x) = [x_1 x_2]^T$ , 则:

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + z_2 [\theta^T F(x) + bu - \dot{\sigma} + \lambda \xi] -$$

$$\begin{aligned} & \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{\theta}} - \frac{1}{\gamma_\rho |\rho|} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} = \\ & -c_1 z_1^2 + z_2 [z_1 + \hat{\theta}^T F(x) + \hat{b}u - \dot{\sigma} + \lambda \xi] - \\ & \tilde{\theta}^T \Gamma^{-1} [\dot{\tilde{\theta}} - \Gamma F(x) z_2] + \Phi \end{aligned} \quad (21)$$

其中,

$$\Phi = -\frac{1}{\gamma_\rho |\rho|} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\hat{\rho}} \right) uz_2 \quad (22)$$

取控制律:

$$u = \hat{\rho} K \quad (23)$$

$$K = [-z_1 - c_2 z_2 - \lambda \xi - \hat{\theta}^T F(x) + \dot{\sigma}] \quad (24)$$

定义参数  $\theta$  的自适应控制律为

$$\dot{\tilde{\theta}} = \Gamma F(x) z_2 \quad (25)$$

将式(23)代入式(22)可以得到:

$$\begin{aligned} \Phi = & -\frac{1}{\gamma_\rho |\rho|} \tilde{\rho} \dot{\tilde{\rho}} + \left( \frac{1}{\rho} - \frac{1}{\hat{\rho}} \right) \hat{\rho} K z_2 = \\ & -\frac{1}{\gamma_\rho} \tilde{\rho} \rho^{-1} (|\rho|^{-1} \dot{\tilde{\rho}} + \gamma_\rho K z_2) \end{aligned} \quad (26)$$

因此参数  $\rho$  的自适应律可定义为

$$\dot{\tilde{\rho}} = -\gamma_\rho \text{sgn}(b) K z_2 \quad (27)$$

式中:  $\text{sgn}(b) = \text{sgn}(\rho) = |\rho|^{-1} \rho$ 。

将式(23)、式(25)和式(27)代入式(21)可得:

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 \leq -c_1 z_1^2 \quad (28)$$

对上式两边积分得:

$$\int_0^\infty c_1 z_1^2 \leq V_2(0) - V_2(\infty) \quad (29)$$

由式(29)可知  $V_2$  是非增函数, 同时通过式(13)、式(15)、式(18)可得到系统的误差变量  $z_1$  和  $z_2$  具有如下关系:

$$\dot{z}_1 = -c_1 z_1 + z_2 \quad (30)$$

于是可知控制律式(23)和自适应律式(25)、式(27)能够使系统的电压误差收敛到零, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = -\lim_{t \rightarrow \infty} z_1(t) = 0 \quad (31)$$

通过式(13)、式(15)、式(18), 对控制律式(23)进行整理得:

$$\begin{aligned} u = & \hat{\rho} [-z_1 - c_2 z_2 - \lambda \xi - \hat{\theta}^T F(x) + \dot{\sigma}] = \\ & \hat{\rho} \left[ -(1 + c_1 c_2 + \lambda) z_1 - (c_1 + c_2) \dot{z}_1 - \lambda c_1 \int z_1 dt + U_r \right] - \\ & \hat{\rho} \hat{\theta}^T F(x) \end{aligned} \quad (32)$$

本文所提的闭环系统控制采用负反馈, 因此

发电机控制器的输入误差信号为  $e = y_r - y = -z_1$ 。基于本文的飞机变频交流发电系统的控制目标为输出电压跟随参考电压 115 V, 所以有  $\dot{y}_r = \ddot{y}_r = 0$ , 则控制律式(32)可改写成:

$$u = \hat{\rho}(k_p e + k_i \int e dt + k_d \dot{e}) - \hat{\rho} \theta^T F(x) \quad (33)$$

式中:  $k_p = 1 + c_1 c_2 + \lambda$ ;  $k_i = \lambda c_1$ ;  $k_d = c_1 + c_2$ 。

### 3 飞机发电机控制算法建模及仿真

在上述所推导的反步自适应飞机发电机控制器中,若忽略微分环节,仅采用 PI 控制,则可以得到  $c_1 = -c_2$ ,控制律中的 PI 环节只受  $c_1$  和  $\lambda$  两个参数的影响,可以采用模糊控制算法对这两个待定参数进行在线调节,以此改善系统的控制性能<sup>[11]</sup>。

#### 3.1 发电机控制器模型搭建

根据上文建立的反步自适应控制律,对其中的两个未知参数采用模糊控制算法,在 Simulink 软件中搭建了基于模糊反步自适应控制算法的发电机控制器等效数学模型,其控制框图如图 2 所示。

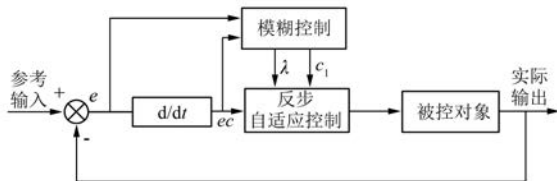


图 2 模糊反步自适应控制框图

根据比例积分系数在电压调节时的作用,模糊控制规则的确立需要服从以下规律。

(1) 当  $|e|$  较大时,应取较大的  $k_p$  以加快系统响应速度,此时仅靠比例作用就可以达到电压环输出上限,加入积分环节也无法进一步提高响应速度,反而容易引起积分饱和,导致超调,因此该阶段可以不引入积分作用。

(2) 当  $|e|$  中等时,应减小  $k_p$ ,适当降低电压环输出来减小  $ec$  从而减小超调,同时缓慢加入  $k_i$ ,利用积分环节来收敛系统静差,缓慢增大  $k_i$  也可避免积分环节输出增长过快,产生积分饱和。

(3) 当  $|e|$  较小时,为提高系统稳态性能,可加大  $k_i$  提高稳定时的调节精度。

本文采用输出电压与参考电压的误差  $e$  和误差变化率  $ec$  作为输入变量,采用比例和积分系数

的变化量作为模糊控制单元的输出,再与前一个计算周期的  $k_p$ 、 $k_i$ 、 $k_d$  累加之后作为本周期的输出值,这种调节方式称为模糊增益自调整 PID 控制,其输出变化平稳,调节效果较好。本文选取输入、输出变量的隶属函数为三角形,将模糊论域设为  $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$ ,选取以下 7 个模糊集:负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM)和正大(PB),解模糊化方法选择重心法。

根据上述模糊控制单元的相关设置及模糊规则的确立方法,利用 MATLAB 的模糊控制工具箱建立了模糊控制单元,将模糊控制单元的输出作为反步控制单元的输入,最终完成模糊反步自适应飞机发电机控制算法数学模型搭建。

#### 3.2 控制器的仿真验证

根据上文所设计的控制器,在 Simulink 中搭建基于模糊反步自适应飞机发电机控制算法的调压系统仿真模型,如图 3 所示。

对各频段进行动稳态仿真分析,得到如图 4(a)所示的输出电压有效值波形,如图 4(b)与图 4(c)所示的系统参数自适应曲线,如图 4(d)所示的突加、突卸载动态电压波形,可以发现调压系统具有很好的适应性,且无超调,调节速度快,在各个频段下均具有良好的调节性能。

对增量式 PI 控制、模糊 PI 控制及模糊反步自适应控制在 400 Hz 下的稳态性能进行对比分析,如图 5 所示,模糊反步自适应控制器相比于其他两种控制器,不仅无超调且调节时间更短,具有更好的稳态调节性能。突加、突卸负载时动态电压仿真波形如图 6 所示,模糊反步自适应控制相比于其他两种控制器在突加、突卸载时发电电压恢复至稳态的时间更短,且电压浪涌值更小,具有更好的动态性能。

针对上述三种不同的控制器,将仿真结果进行对比分析,得到如表 1 所示的稳态性能仿真结果和如表 2 所示的动态性能仿真结果。

## 4 结 语

由于飞机变频交流发电机的非线性特点,传统的 PID 控制在超调和电压浪涌等稳态特性和瞬态特性上存在局限性,本文提出了一种基于模糊反步自适应控制的飞机发电机控制算法,分析算

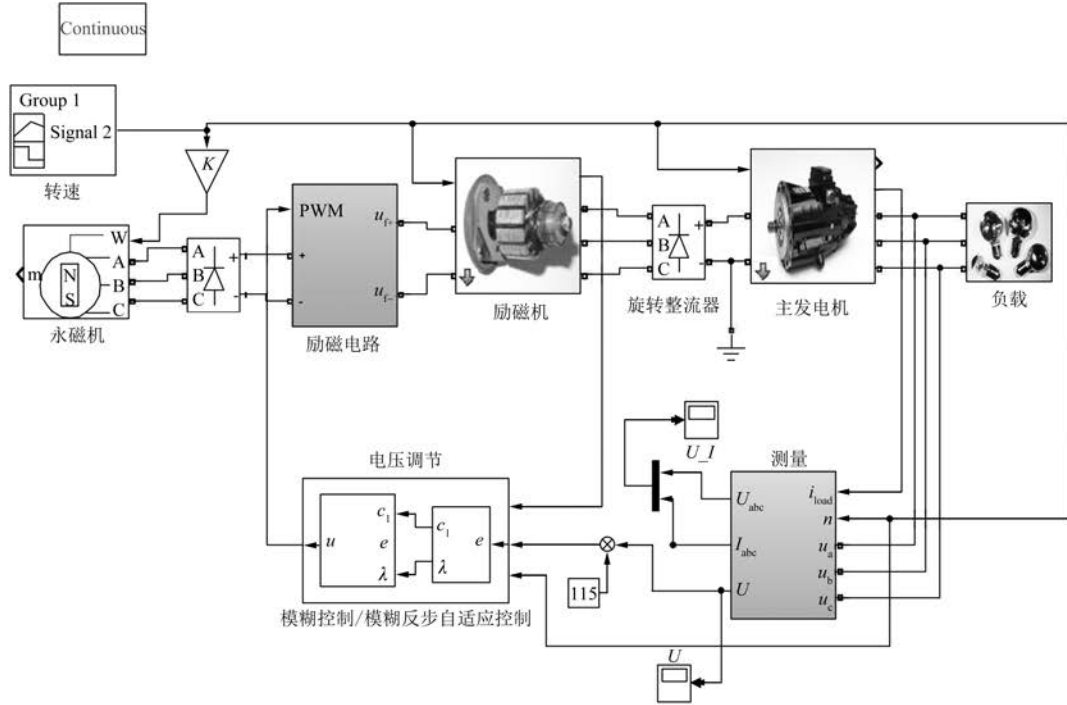


图3 调压系统仿真模型

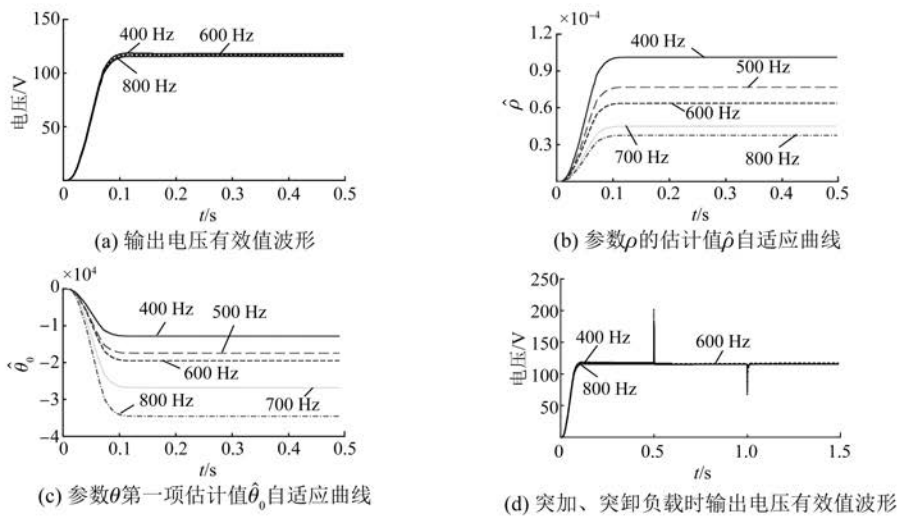


图4 400~800 Hz 模糊反步自适应控制仿真波形

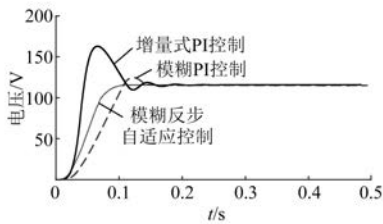


图5 输出电压有效值波形对比

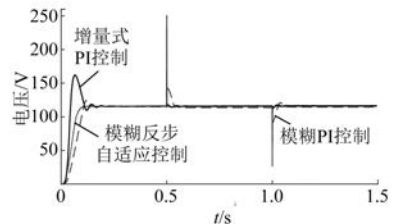


图6 突加、突卸负载输出电压有效值波形对比

表 1 三种控制器稳态性能仿真结果

频率/Hz	增量式 PI 控制		模糊 PI 控制		模糊反步自适应控制	
	超调量/%	调节时间/s	超调量/%	调节时间/s	超调量/%	调节时间/s
400	40.00	0.226	8.78	0.144	0	0.081
500	65.74	0.243	18.96	0.140	0	0.081
600	97.57	0.337	29.83	0.151	0	0.082
700	125.65	0.361	52.43	0.188	0	0.083
800	146.70	0.379	75.05	0.231	0	0.084

表 2 三种控制器动态性能仿真结果

频率/ Hz	增量式 PI 控制				模糊 PI 控制				模糊反步自适应控制			
	电压浪涌/V		调节时间/s		电压浪涌/V		调节时间/s		电压浪涌/V		调节时间/s	
	突卸负载	突加负载	突卸负载	突加负载	突卸负载	突加负载	突卸负载	突加负载	突卸负载	突加负载	突卸负载	突加负载
400	230.3	57.73	0.069	0.049	320.2	56.58	0.037	0.052	167.7	78.02	0.003 6	0.016
500	230.8	57.93	0.101	0.103	320.8	56.40	0.043	0.069	174.5	72.26	0.005 6	0.019
600	231.9	59.31	0.092	0.075	322.6	55.64	0.057	0.080	182.7	66.56	0.005 1	0.018
700	233.2	60.02	0.071	0.068	323.4	54.67	0.066	0.113	192.6	58.04	0.006 2	0.017
800	234.7	60.90	0.071	0.060	325.9	53.42	0.133	0.151	202.1	50.37	0.005 7	0.021

法原理并搭建基于该控制律的调压系统仿真模型。仿真结果表明模糊反步自适应控制可以有效抑制工作条件变化对调压系统造成的影响,增强调压系统的稳定性和调节性能,为飞机发电机控制器产品设计提供有效的理论支持。

### 【参考文献】

- [ 1 ] KANELAKOPOULOS I, KOKOTOVIC P V, MORSE A S. Systematic design of adaptive controllers for feedback linearizable systems [ J ]. IEEE Transactions on Automation Control, 1991, 36 ( 11 ): 1241.
- [ 2 ] WANG Z, WU Z. Nonlinear backstepping control of reentry warhead with hybrid actuators [ C ] // Proceedings of the 31st Chinese Control Conference, 2012.
- [ 3 ] SEN P T H, MINH N Q, ANH D T T, et al. A new tracking control algorithm for a wheeled mobile robot based on backstepping and hierarchical sliding mode techniques [ C ] // 2019 First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics ( ICA-SYMP ), 2019.
- [ 4 ] 李靖. 几类非线性系统的自适应 Backstepping 神经网络控制 [ D ]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [ 5 ] MA J, MA S. Adaptive backstepping control of chaotic systems with unknown parameters [ C ] // 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2010.
- [ 6 ] WANG S, ZHANG X, WEI A, et al. Adaptive backstepping PID control for boiler-turbine units [ C ] // 2021 40th Chinese Control Conference ( CCC ), 2021.
- [ 7 ] 杨启涯, 庄海, 张颖杰. 永磁同步电机积分反步自适应控制 [ J ]. 电机与控制应用, 2018, 45( 8 ): 15.
- [ 8 ] 安顺, 何燕, 王龙金. 基于反步自适应控制算法的船舶航向控制方法 [ J ]. 机电设备, 2020, 37( 6 ): 65.
- [ 9 ] SUN X, YU H, LIU X. Design and application of sliding mode controller in PMSM position tracking control based on adaptive backstepping [ C ] // 2018 Chinese Automation Congress ( CAC ), 2018.
- [ 10 ] LI J, GAO J, YANG Y, et al. Digital generator control unit for a variable frequency synchronous generator [ C ] // 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems ( ICEMS ), 2016.
- [ 11 ] LIU S, ZHANG Y, WANG H. Tracking control for nonlinear systems with input delay and dead-zone via adaptive fuzzy backstepping approach [ C ] // 2021 13th International Conference on Advanced Computational Intelligence ( ICACI ), 2021.