

本文全文线上首发由
上海电机系统节能工程技术
研究中心有限公司

支持

王 伟, 樊显绒, 闫新军, 吴东华,
程 焱, 李伟林.
数字式调压器的模糊PID控制器
设计.
电机与控制应用, 2021, 48(8): 8.



SEARI
上 電 科

NCMS
上 科 电 机

www.nems.com.cn

掌握电机行业制造核心技术,
辐射智能制造产业发展



· 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.nems.com.cn

地址: 上海市武宁路505号

手机: 18918357509

电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904

邮箱: wangcj@seari.com.cn

数字式调压器的模糊 PID 控制器设计 *

王 伟¹, 樊显绒², 闫新军³, 吴东华³, 程 焱³, 李伟林²

(1. 上海飞机设计研究院, 上海 210210; 2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710129;

3. 陕西航空电气有限公司, 陕西 西安 710065)

摘 要: 针对飞机变频交流数字式调压系统非线性特点, 将模糊控制与 PID 控制相结合设计了调压器的控制算法并构造了多闭环反馈控制策略。介绍了模糊 PID 控制器的设计方法及建模过程, 在 Simulink 中搭建了模糊 PID 控制的仿真模型, 对该控制器在不同工况下的调压性能进行了仿真并与传统 PID 控制仿真结果对比分析, 结果表明模糊 PID 控制下的调压器动态性能均优于传统 PID 控制。最后, 基于双 DSP 硬件平台进行试验验证, 并与某型飞机典型用电负载交联, 试验结果证明了所设计控制器的正确性及有效性。

关键词: 变频交流; 数字式调压器; 发电机; PID 控制; 模糊控制

中图分类号: TM 341; TP 273 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)08-0008-08

doi: 10.12177/emca.2021.064

Design of Fuzzy PID Controller for Digital Voltage Regulator *

WANG Wei¹, FAN Xianrong², YAN Xinjun³, WU Donghua³, CHENG Yan³, LI Weilin²

(1. Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 210210, China;

2. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;

3. AVIC Shaanxi Aero Electric Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: In view of the nonlinear characteristics of aircraft variable frequency AC digital voltage regulator system, the fuzzy control is combined with PID control to design the control algorithm of digital voltage regulator and construct a multi closed loop feedback control strategy. The design method and modeling process of fuzzy PID controller are introduced, and then the simulation model of fuzzy PID control is built in Simulink. The voltage regulation performance of the proposed control and the traditional PID control are compared under different operation conditions. The results show that the dynamic and steady-state performances of the regulator under fuzzy PID control are better than those of the traditional PID control. Finally, the experimental verification based on dual DSP hardware platform is carried out, and it is cross-linked with the typical electrical load of a type of aircraft. The experimental results prove the correctness and effectiveness of the designed controller.

Key words: variable frequency AC; digital voltage regulator; generator; PID control; fuzzy control

0 引 言

近年来,随着变频电源性能的提升和多电飞机的发展,变频交流电源由于结构简单、质量轻、

体积小、工作可靠、功率密度大和过载能力强等优点,在大中型飞机上得到了广泛应用^[1]。对于变频交流电源系统,传统的模拟式调压器因参数易受到环境变化、器件老化等因素影响,且使用寿命

收稿日期: 2021-04-23; 收到修改稿日期: 2021-06-21

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51777169); 中央高校基础研究基金项目(ZDHXYKYYW201914)

作者简介: 王 伟(1987—),男,高级工程师,研究方向为飞机电气系统。

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。

李伟林(1983—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为航空智能配电技术、分布式电推进飞机。

较短、故障率较高等缺点逐渐被摒弃,而数字式调压器以其强大的计算能力、可以实现复杂的控制算法以及采用微处理器实现等优点成为目前发展的主流^[2]。数字控制器只需在软件中修改算法的控制参数,控制器就能快速适应系统的不同状态。并能将控制器的状态反馈给上位机,接收上位机的控制信号,具有通信功能^[3]。

由于电压调节器应用平台为飞机变频交流电源系统,此类系统中普遍存在扰动以及多种不确定因素(例如变频大功率感性负载起动过程),会对控制系统的性能产生较大的不利影响,传统的PID控制没有考虑扰动和不确定因素,控制精度无法达到要求,而模糊控制鲁棒性好,对复杂对象或难以建立精确数学模型的对象具有较好的控制效果^[4]。因此本文提出一种基于模糊PID控制算法,模糊PID控制器是模糊控制和PID控制器的结合,采用模糊推理的方法,对PID控制参数进行调整,PID控制器的积分部分用来消除稳态误差。因此,模糊PID控制策略比传统的电压控制方法具有更好的动态性能,可以实现快速稳定的调节,从而有效提高系统的动静态特性^[5-7]。

1 数字式调压器的结构

本文设计的数字式调压系统结构如图1所示,无刷交流同步发电机由永磁机、励磁机和交流同步发电机三级结构组成,直接由航空发动机驱动^[8-9]。永磁机输出的电压经过控制器内部的整流、电源变换并稳压后供控制器内部电路、发电机接触器、汇流条连接接触器和励磁机励磁使用。励磁机输出的三相电经过旋转整流器整流后作为主发电机的励磁电流。通过对励磁电流进行调节,从而保证发电机输出电压的稳定。该控制器的硬件主要是基于双DSP(DSP28335和DSP2812)

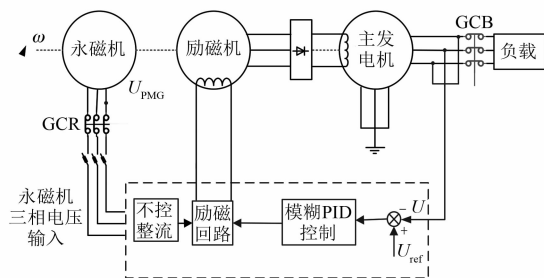


图1 数字式调压器结构图

来完成的,其中DSP28335主要实现调压功能,DSP2812主要实现控制保护及机内自检测功能^[10]。

2 模糊PID控制器设计

模糊控制的基本思想是模拟人类的思维方式做出控制决策,一般情况下,输出变量以及变化率是容易直接观察到的,因此可以凭借观察到的经验设定某种控制规则从而实现对输出变量的控制。

模糊PID控制器的结构,主要包括模糊逻辑控制器和参数可调PID控制器。模糊PID控制器能实现PID参数的自适应整定,能更好地适应宽转速、变负荷条件下发电机参数的大范围变化^[11]。因此,该控制器可以更好地保持系统的稳定性,提高系统的动态性能。本文设计的模糊PID控制器框图如图2所示,采用输出电压与给定值的误差 e 与误差变化率 ec 作为输入变量,采用比例、积分和微分系数的变化量 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d 作为输出,根据式(1)来调节各P、I、D值^[12]:

$$\begin{cases} K_p = K_{p0} + \Delta K_p \\ K_i = K_{i0} + \Delta K_i \\ K_d = K_{d0} + \Delta K_d \end{cases} \quad (1)$$

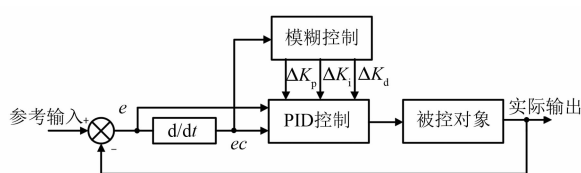


图2 模糊PID控制器

选取输入变量为电压误差及其导数,输出变量为 ΔK_p 、 ΔK_i 和 ΔK_d ,输入、输出变量的隶属函数为三角形,将模糊论域设为 $\{-6, -4, -2, 0, 2, 4, 6\}$;误差 e 和误差变化 ec 称作来自实际系统的数值变量,要将这些数值变量转换为语言变量,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)^[13]。为了确保控制器的灵敏度和鲁棒性,隶属函数如图3所示,模糊控制规则如表1~表3所示。

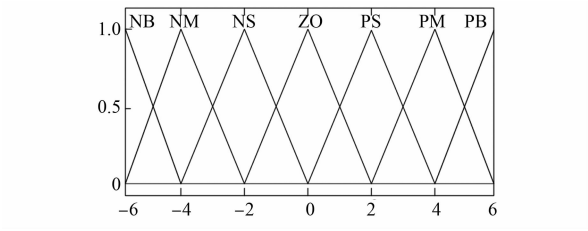


图3 输入输出变量的隶属度函数

表1 比例系数模糊控制规则表

ΔK_p	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
	NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO
	NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
	ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
	PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM
	PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NB
	PB	ZO	ZO	NM	NM	NB	NB

表2 积分系数模糊控制规则表

ΔK_i	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NB	NM	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NM	NS	ZO	PM	PM
	PS	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PM	NO	ZO	PS	PS	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB

表3 微分系数模糊控制规则表

ΔK_d	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NS	ZO
	NS	ZO	NS	NM	NS	NS	ZO
	ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	ZO
	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PS	PS	PB

3 仿真模型的设计及搭建

3.1 多闭环回路控制传递函数

由于飞机变频交流发电系统转速范围宽,对发电机控制器的调节提出了更高的要求。对于三级式无刷交流发电机,因为发电机负载电流产生的电枢反应会影响端电压和励磁电流,若在内环对负载电流进行补偿,则可以减弱负载电流对端电压的影响,从而使调压器能够适应更大的工作范围,并且稳态调节性能和动态调节性能更好^[14]。因此,本文在传统电压环和励磁电流环调节的基础上加入负载电流反馈以更好的补偿负载波动,从而提高系统的动态特性^[15]。具体传递函数框图如图4所示。从图4中可以看出,多闭环多反馈调压器的工作原理为电压外环将发电机输出电压 U_{out} 与参考电压 U_{ref} 作差,差值经过电压外环调节后,与负载电流 i_{load} 补偿值相加,作为励

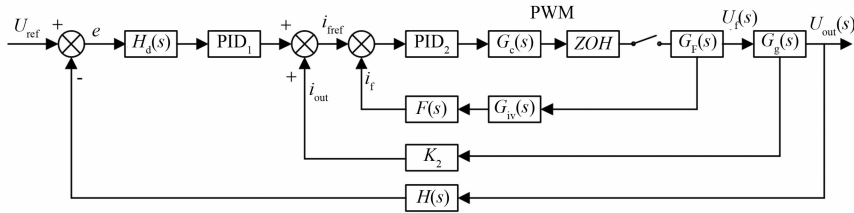


图4 多闭环反馈控制器

磁电流反馈环的参考值 i_{fref} ,再减去此刻的励磁电流 i_f ,得到的差值经过励磁反馈环调节后产生PWM信号,控制励磁回路中开关管的通断,从而控制发电机的输出电压。

图中 $H_d(s)$ 为一拍延时的传递函数, $G_c(s)$ 为PWM调制传递函数, $G_f(s)$ 为执行回路传递函数。 $G_g(s)$ 为励磁机励磁电压到主发电机输出的

传递函数。 ZOH 则是零阶保持器的传递函数。 $H(s)$ 为电压采样调理电路传递函数,模拟信号调理板上的分压电阻将发电机输出电压调理到适合DSP芯片IO口采样的电压范围,经AD采样后将数字电压信号送至电压有效值计算芯片AD637得到每一相的电压有效值,经DA转换后以模拟量输出。在CCS9.2编程软件中可观察芯片计算

得到的电压有效值。其中,对于调压 DSP28335 来说,需要将三相电压有效值通过单点算法转换为总的电压有效值,而对于控制保护 DSP2812 来说,则需要对每一相的电压有效值进行监测,若某一相发生过欠压等故障则立刻实施保护动作。由于励磁电流信号中含有大量的谐波分量,必须在励磁反馈中增加低通滤波环节 $F(s)$ 。 $G_{iv}(s)$ 是励磁环节的近似传递函数。

(1) 一拍延时。本文中调压系统的开关频率 $f_s = 2 \text{ kHz}$, 因而延迟时间 $T_s = 1/f_s = 0.5 \times 10^{-3} \text{ s}$ 。在连续域, 控制延时表示为

$$H_d(s) = e^{-sT_s} \quad (2)$$

延迟时间为一个开关周期, 其值很小, 可将传递函数按泰勒级数的方式展开, 省略高次项得:

$$H_d(s) = e^{-sT_s} \approx \frac{1}{1 + T_s s} \quad (3)$$

(2) 零阶保持器。零阶保持器是一种按恒值规律外推的保持器, 单位理想脉冲响应的拉氏变换就是零阶保持器的传递函数:

$$ZOH = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \approx \frac{1}{T/2 + 1} \quad (4)$$

(3) PWM 调制器。调制器的函数为

$$G_c(s) = \frac{K_{pwm}}{0.5T_s s + 1} = \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{0.5T_s s + 1} \quad (5)$$

(4) 执行回路。经过励磁反馈调节后产生的 PWM 信号, 控制励磁回路中开关管的通断, 从而控制励磁电流, 达到使发电机输出电压保持稳定的目的。因此, 执行回路是指将 PWM 控制信号转换为励磁电流的传递函数。根据励磁电流的大小及 PWM 控制信号的占空比即可确定执行回路传递函数如下:

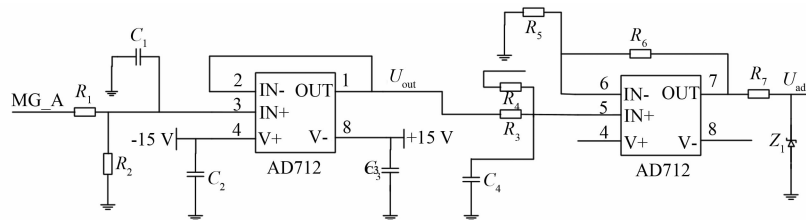


图6 电压调压电路

对图6所述控制器进行传递函数计算, 其中 PID_1 采用模糊 PID 控制, PID_2 采用经典 PID 控

$$G_F(s) = 72 \quad (6)$$

(5) 低通滤波环节。低通滤波环节如图5所示。

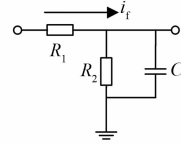


图5 低通滤波环节

传递函数为

$$F(s) = \frac{R_2}{R_1 R_2 s C + R_1 + R_2} \quad (7)$$

(6) 励磁环节。励磁机的励磁绕组可以等效为一个电阻和一个电感 (R_f 、 L_f) 的串联环节, 从而可以得到励磁环节的近似传递函数 $G_{iv}(s)$:

$$G_{iv}(s) = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (8)$$

(7) 励磁发电环节。励磁机到主发电机之间还包括一个整流环节, 整流环节的传递函数为一常数 K_z , 而主发电机可以近似为一个一阶惯性环节, 可得励磁机励磁电压到主发电机输出的传递函数 $G_g(s)$ 为

$$G_g(s) = \frac{K_z}{T_s s + 1} \quad (9)$$

(8) 电压调压电路。电压调压电路如图6所示, 变压器及分压电阻对发电机输出电压信号进行电气隔离及分压处理, 其带来的信号幅值的减小会在 DSP 中进行逆运算回最初发电机输出的电压信号值, 因此在计算 $H(s)$ 时, 不考虑分压, 只考虑 2 个 RC 低通滤波器造成的延时。电压调压电路传递函数为

$$H(s) = \frac{1}{1 + sR_1 C_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_3 C_4} \quad (10)$$

制。励磁电流反馈开环传递函数为

$$G_1(s) = G_c(s) ZOH G_F(s) G_{iv}(s) F(s) \quad (11)$$

加入 PID 控制后,其闭环传递函数为

$$G'_1(s) = \frac{\text{PID}_1(s) G_c(s) \text{ZOH} G_F(s)}{1 + \text{PID}_1(s) G_c(s) \text{ZOH} G_F(s) G_{iv}(s) F(s)} \quad (12)$$

负载电流环的开环传递函数为

$$G_2(s) = K_2 G'_1(s) G_g(s) \quad (13)$$

其闭环传递函数为

$$G'_2(s) = \frac{G'_1(s) G_g(s)}{1 - K_2 G'_1(s) G_g(s)} \quad (14)$$

外环电压环的开环传递函数为

$$G_3(s) = K_3 G'_2(s) H_d(s) \quad (15)$$

其闭环传递函数为

$$G'_3(s) = \frac{\text{PID}_1(s) G'_2(s) H_d(s)}{1 + K_3 \text{PID}_1(s) G'_2(s) H_d(s)} \quad (16)$$

将各环节的传递函数代入即可求得整个控制器的传递函数。

3.2 比例因子及量化因子

在模糊 PID 仿真模型搭建过程中,量化因子和比例因子的设定至关重要,量化因子的调整实

质为模糊控制规则的自调整,量化因子与比例因子之间相互制约,使控制器性能达到动态平衡,其具体定义如下:

设输入变量的基本论域为 $[-x, x]$, 输出变量的基本论域为 $[-y, y]$ 。设输入变量所取的模糊子集的论域为 $\{-n, -n+1, \dots, 0, \dots, n-1, n\}$, 输出变量所取的模糊子集的论域为 $\{-m, -m+1, \dots, 0, \dots, m-1, m\}$, 则输入变量的量化因子由式(17)决定, 输出变量的比例因子由式(18)确定:

$$k_{\text{input}} = \frac{n}{x} \quad (17)$$

$$k_{\text{output}} = \frac{y}{m} \quad (18)$$

3.3 模型搭建

在模糊控制器设计完成后,结合多闭环反馈控制结构在 Simulink 中搭建模糊 PID 控制器仿真模型,如图 7 所示。一般情况下只需要比例和积分调节,微分系数设置为 0 即可。若经过 PI 调节后,动态过程不能令人满意,再加入微分控制进行调节。

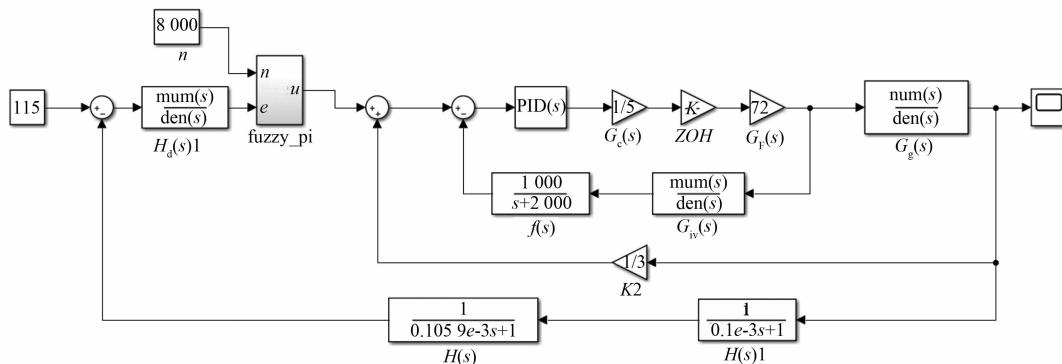


图 7 多闭环回路控制器仿真模型

4 仿真结果分析

4.1 稳态结果

在 400 Hz 频率下,发电机的输出三相稳定交流电压仿真波形如图 8 所示。发电机起动阶段 A 相电压仿真波形如图 9、图 10 所示。带阻感容不同类负载时输出电压有效值波形如图 11 所示,可见该控制器对不同属性负载的控制性能均较好。

当频率为 400 Hz 时,由增量式 PI 调节算法和模糊 PI 调节算法仿真得到的输出电压有效值

对比如图 12 所示,由仿真结果可以看出,模糊 PI 调节比增量式 PI 调节超调量更小,响应速度更快,说明模糊 PI 控制既具有模糊控制灵活、适应性强等特点,同时又保留了 PI 控制精度高,稳定性好等特点,说明了模糊 PI 调节算法的输出电压调节精度更高,稳态性能更好。

4.2 瞬态结果

在 0.5 s 时,突卸 50% 负载(即半载)时三相输出电压波形变化如图 13 所示,突加 50% 负载(即满载)时三相输出电压波形变化如图 14 所示,增量式 PI 控制和模糊 PI 控制在 0.5 s 时突卸

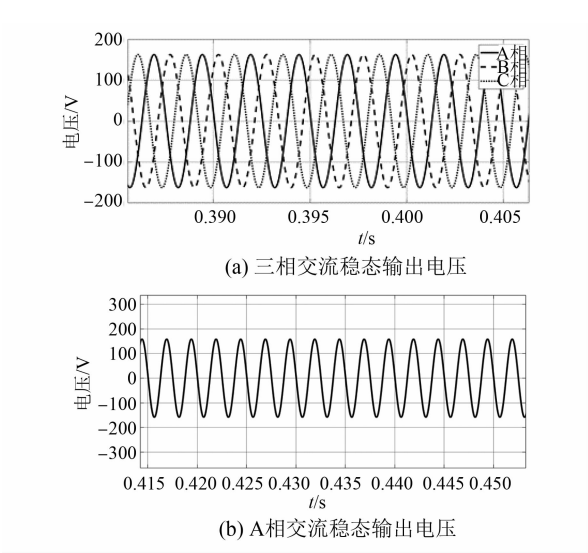


图8 交流稳态输出电压仿真波形

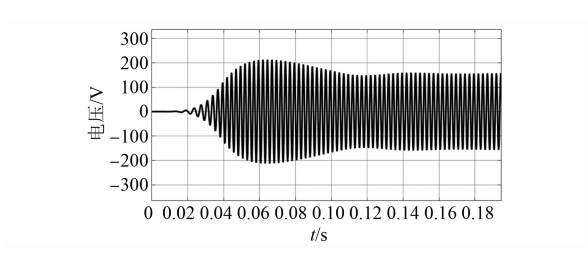


图9 增量式PI控制起动阶段A相电压仿真波形

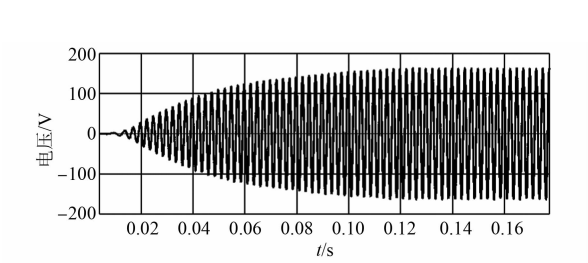


图10 模糊PI控制起动阶段A相输出电压波形

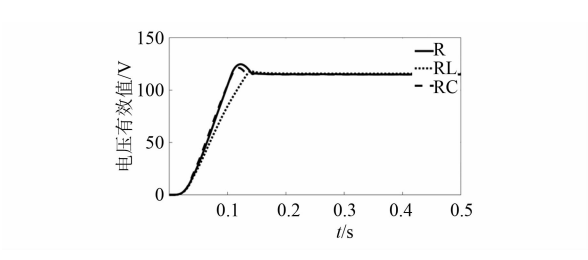


图11 带不同负载时输出电压有效值

50%负载(即由满载至半载),在1 s时又突加50%负载(即由半载至满载)时电压有效值的变化对比如图15所示。

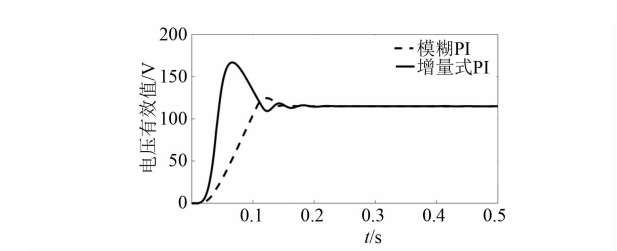


图12 输出电压有效值对比

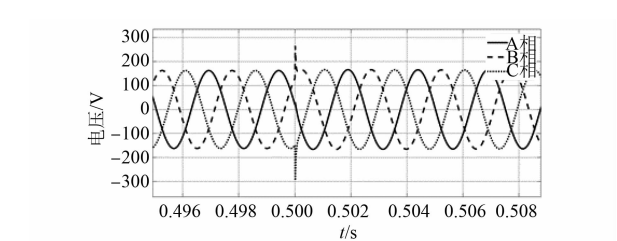


图13 突卸负载时输出三相电压变化图

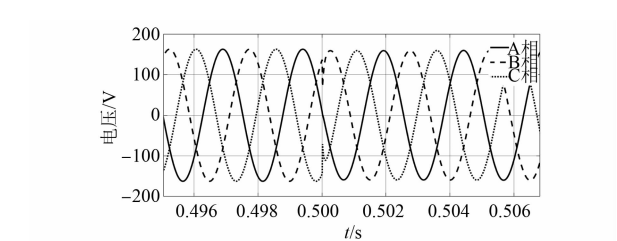


图14 突加负载时输出三相电压变化图

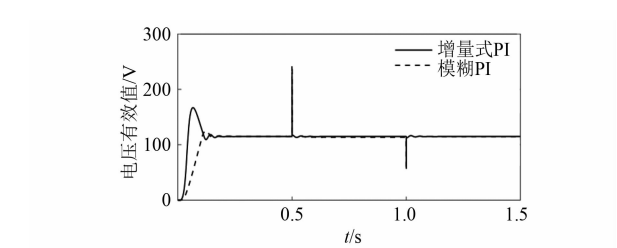


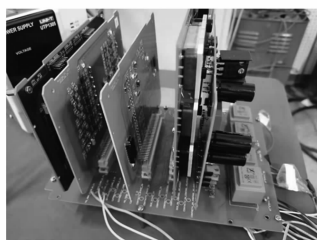
图15 突加突卸负载时输出电压有效值变化

由图13可以看出在突卸负载的情况下,发电机输出电压突然升高,这是负荷电流突然减小,消磁效果和电枢电流的反电动势都大大降低而导致的。此时调压器强制励磁电流迅速下降,使发电机端电压逐渐恢复到给定值。图14所示的突加负载同理。图15为突加突卸负载过程中输出电压有效值的变化情况,可以看出在突卸负载时增量式PI控制的电压过冲约为250 V,而模糊PI控制的电压过冲约在230 V左右,突加负载时增量式PI控制的电压突变量约为50 V,而模糊PI控制的电压突

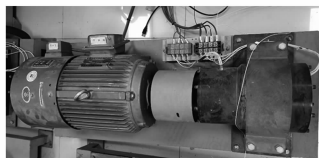
变量只有 20 V。对比看来,模糊 PI 控制算法具有比增量式 PI 控制算法更好的电压调节特性。验证了模糊 PI 控制算法的合理性及有效性。

5 试验验证

本文调压系统的硬件是通过 2 个 DSP 来实现的,主要功能包括控制保护和调压 2 部分,基于如图 16 所示硬件试验平台进行试验。图 16(a)所示为数字式调压器的主要硬件电路板(含有驱动板)、电源板、模拟信号调理板、数字信号调理板、控制板、底板共 6 块电路板。图 16(b)为试验所用的三级式发电机,图 16(c)为试验控制面板。试验前需先利用交流电源柜进行开环试验,观察 DSP 计算得到的电压有效值是否正确。之后需进行控制保护功能的验证,判断发生故障时调压器是否能顺利切除故障,最后再进行闭环试验^[9]。试验使用的发电机额定转速为 8 000 r/min,额定输出电压为 115 V。



(a) 数字式调压器硬件图



(b) 三级式同步发电机



(c) 实验控制平台

图 16 硬件试验平台

当变频器频率设置为 400 Hz,电机转速为 8 000 r/min 时,得到 A 相输出电压波形如图 17 所示,发电机起动阶段 A 相电压波形如图 18 所示。

其中通道 1 所示为发电电压波形,通道 2 为控制信号 PWM 波形,可以看出发电机起动阶段电压超调量小,平稳起动,系统稳定性较好。与图 8~图 10 所示的稳定发电阶段和起动阶段 A 相电压的仿真结果对比可以看出,试验过程中调压器的调节特性与仿真结果类似,起动阶段的输出电压试验波形比仿真波形更快地趋于稳定。

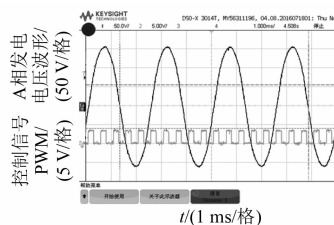


图 17 A 相输出电压波形

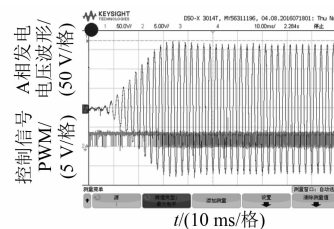


图 18 发电机起动阶段电压波形

随后接入某型号飞机电动泵作为典型负载,验证在变频环境下基于本调压器,电动泵是否正常起动运转,同时检查确认电动泵起动运转过程引起的扰动是否对调压器产生较大影响。取多个电源频率点,电动泵加载条件分别为空载、半载、满载,试验结果如图 19~图 21 所示。在空载工况下,该数字式调压器的动稳态调节特性较好,在 480 Hz 时经过约 9 s 发电机输出电压稳定。对于半载工况,在频率大于 445 Hz 时发电机输出电压趋于稳定的时间已经长达 10 s,与空载相比,调节性能明显下降。满载工况下,发电机输出电压在 410 Hz 时趋于稳定的时间已经接近 11 s,调节性能进一步下降。可见,随着负载的不断加入,系统在高频时趋于稳定的时间也逐渐增加,发电机的调节性能越来越差。因此,以 10 s 的调节时间为基准,在空载工况下可以调压至 480 Hz,而半载工况下只能调压至 445 Hz,满载工况下甚至还不到 410 Hz。起动运行过程,电源和调压器工作正常,典型电压波形如图 22 所示。

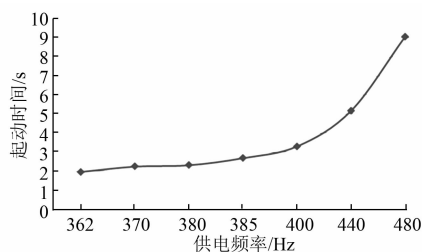


图 19 空载工况下试验结果

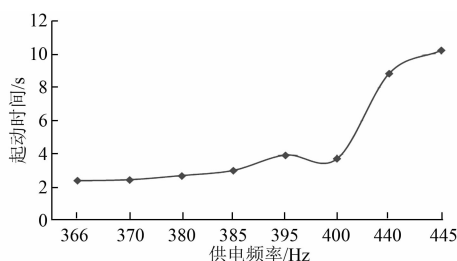


图 20 半载工况下试验结果

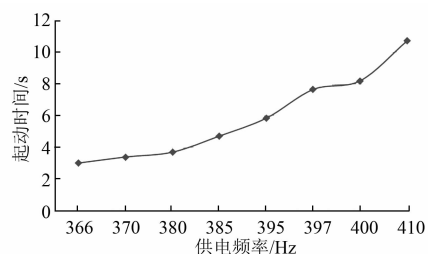


图 21 满载工况下试验结果

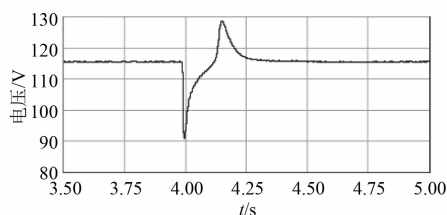


图 22 起动过程典型电压波形

6 结 语

本文提出了一种基于模糊 PID 控制的数字式调压器,首先对该调压器进行了分析,利用模糊控制工具箱设计了模糊控制器,然后设计了多闭环回路反馈控制器,通过搭建 Simulink 仿真模型,仿真结果验证了模糊 PID 控制具有比普通增量式 PID 控制更好的调节特性。最后进行了试验验证,发现发电机输出电压调节精度高,稳态性能好,同时,与某型飞机典型用电负载进行交联试

验,运行正常,证明了本文设计的模糊 PID 控制器的正确性和有效性。

【参考文献】

- [1] 张恩徐. 应用于 RAT 的三级式变频交流发电机数字控制器技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2019.
- [2] 姜建伟,郑先成,刘文韬. 基于 Saber 的飞机变频发电系统数字调压技术研究[J]. 机电一体化,2010,16(7): 47.
- [3] 李巍. 基于 DSP 的三相相控交流调压器的设计与实现[D]. 上海:上海交通大学,2009.
- [4] 王军伟. 基于 FPGA 的模糊 PID 控制算法的研究及实现[D]. 杭州:浙江工业大学,2009.
- [5] 郭再泉,陆健. 大型智能电网电压模糊控制模型仿真[J]. 华东电力,2014,42(12): 2535.
- [6] HU T,ZHANG X. Simulation of PMSM vector control system based on fuzzy PI controller[C]//2019 IEEE International Conference on Power, Intelligent Computing and Systems (ICPICS), 2019.
- [7] DALEI J,MOHANTY K B,SINGH S,et al. Fuzzy PI controller for improved voltage regulation in STATCOM based SEIG,2015.
- [8] 施诺亚. 飞机变频交流电源系统设计介绍[J]. 科技视界,2018(11): 46.
- [9] 董希建. 飞机交流发电机控制器的技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2008.
- [10] LI W,ZHANG X,LI H. A novel digital Automatic Voltage Regulator for synchronous generator[C]//2010 International Conference on Power System Technology,2010.
- [11] 金爱娟,郑天翔,纪晨烨,等. 基于模糊自适应 PID 控制的速度调节器设计与仿真[J]. 电子科技,2018,31(1): 29.
- [12] 叶立,张梦旻,叶欢,等. 基于 PSO 的模糊 PID 汽车空调控制策略优化[J]. 电机与控制应用,2020,47(12): 32.
- [13] 胡顺,沈跃,刘国海. 基于 PI 观测器的永磁同步电机自抗扰电流解耦控制[J]. 电机与控制应用,2020,47(11): 40.
- [14] GENG H,XU D,WU B,et al. Direct Voltage Control for a stand-alone wind-driven self-excited induction generator with improved power quality [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(8): 2358.

(下转第 43 页)

- [4] CHEN Y, YANG M, LONG J, et al. A moderate online servo controller parameter self-tuning method via variable-period inertia identification [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34 (12): 12165.
- [5] NIU L, XU D, YANG M, et al. On-line inertia identification algorithm for PI parameters optimization in speed loop [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 849.
- [6] 王伟然, 吴嘉欣, 张懿, 等. 永磁同步电机模糊自适应自适应积分反步控制 [J]. 电工技术学报, 2020, 35(4): 724.
- [7] JUNG J, LEU V Q, DO T D, et al. Adaptive PID speed control design for permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(2): 900.
- [8] CHAOUI H, KHAYAMY M, OKOYE O. Adaptive RBF network based direct voltage control for interior PMSM based vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2018, 67(7): 5740.
- [9] 侯利民, 申鹤松, 阎馨, 等. 永磁同步电机调速系统 H_∞ 鲁棒控制 [J]. 电工技术学报, 2019, 34 (7): 1478.
- [10] WU B, HSU P. Robust controller design for CNC servo motors against the variation of external loading via the H_∞ /QFT approach [C]//2015 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2015.
- [11] HOROWITZ I. Fundamental theory of automatic linear feedback control systems [J]. IRE Transactions on Automatic Control, 1959, 4(3): 5.
- [12] 赵长安, 贺风华. 多变量鲁棒控制系统 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [13] GARCIA-SANZ M. Robust control engineering: practical QFT solutions [M]. Los Angeles: CRC Press, 2017.
- [14] 张达方, 唐猛. 基于 QFT 的变负载特性下的电机速度控制器设计 [J]. 机械设计与制造, 2013 (6): 158.

(上接第 15 页)

- [15] LUO A, TANG C, SHUAI Z, et al. Fuzzy-PI-based direct-output-voltage control strategy for the STATCOM used in utility distribution systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (7): 2401.

(上接第 35 页)

- [16] MAHMOUDI H, ALEENEJAD M, AHMADI R. Modulated model predictive control for a Z-source based permanent magnet synchronous motor drive system [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 8307.
- [17] 张永昌, 杨海涛, 魏香龙. 基于快速矢量选择的永磁同步电机模型预测控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 66.
- [18] 王晓刚, 肖立业. Z 源逆变器直流链电压滑模控制研究 [J]. 电机与控制学报, 2015, 19(2): 1.

欢迎订阅 2022 年《电机与控制应用》

2021 年在邮局漏订的读者, 可联系编辑部补订, 具体请咨询编辑部

地址: 上海市武宁路 505 号《电机与控制应用》编辑部

邮编: 200063

电话: 021-62574990-462

邮箱: eec@seari.com.cn

国内邮发代号: 4-199

每册定价: 15.00 元

全年定价: 180.00 元