

改进 FOC 的三级式发电机多参数调压策略

刘勇智¹, 万宸旭², 李 杰², 鄯成龙³

(1. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038; 2. 空军工程大学研究生院, 西安, 710051;
3. 95503 部队, 新疆和田, 848000)

摘要 针对航空三级式无刷发电机存在建压超调、调节范围有限、响应速度慢、难以满足高质量供电要求的问题,提出了基于改进分数阶控制(FOC)的多参数调压策略。通过增加励磁电流和负载电流反馈,实现多参数调压,改善动态性能。用改进分数阶 PI^λ 控制器改善建压阶段的调节性能。将模糊规则引入分数阶控制器,使分数阶 PI^λ 控制器兼具动态和稳态性能。为了有效验证所提方法的合理性,搭建了航空三级式无刷发电机仿真平台,进行了相关仿真分析。结果表明,与传统单参数反馈调压控制相比,所提方法能减少建压超调 6.4%,在建压和突加、卸负载阶段,响应时间分别缩短了 42.76%、37.01%、32.88%。

关键词 航空发电机;多参数;电压调节;分数阶控制;模糊控制

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2020.03.002

中图分类号 V242 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2020)03-0006-06

A Multi-Parameter Voltage Regulation Strategy to Improve Three-Stage Generators Based on Improved Fractional Order Control

LIU Yongzhi¹, WAN Chenxu², LI Jie², SHAN Chenglong³

(1. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China;
2. Graduate College, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;
3. Unit 95503, Hetian 848000, Xinjiang, China)

Abstract Aimed at the problems that as for the aerospace three-stage brushless generators, the built-in voltage is overshoot, the adjustment range is limited, the response is low at speed, and difficult to meet the needs of high-quality power supply, a multi-parameter voltage regulation strategy to improve three-stage generators based on the improved fractional order control is proposed. Firstly, by increasing the excitation current and load current feedback, multi-parameter voltage regulation is achieved to improve dynamic performance. Second, the improved fractional order PI^λ controller is used, and the controller improves the regulation performance during the build-up phase. Finally, the fuzzy rules are introduced into the fractional order controller to make the controller have both dynamic and steady-state performance. In order to effectively verify the rationality of the proposed method, an aerospace three-stage brushless generator simulation platform is set up and the related simulation analysis are performed. The results show that compared with the traditional voltage control, the proposed method can reduce the construction pressure overshoot by 6.4%. In the construction pressure and sudden loading and unloading phases, the response

收稿日期: 2020-01-03

作者简介: 刘勇智(1972—),男,湖南娄底人,教授,主要从事航空电气工程研究。E-mail: wcx2019@126.com

引用格式: 刘勇智, 万宸旭, 李杰, 等. 改进 FOC 的三级式发电机多参数调压策略[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21(3): 6-11.
LIU Yongzhi, WAN Chenxu, LI Jie, et al. A Multi-Parameter Voltage Regulation Strategy to Improve Three-Stage Generators Based on Improved Fractional Order Control[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21(3): 6-11.

time goes down by 42.76%, 37.01%, and 32.88% respectively.

Key words aero-generator; multi-parameter; voltage regulation; fractional order control; fuzzy control

航空三级式无刷同步发电机具有高转速稳定运行、高磁负荷、耐高温等优点,能够适应多种复杂飞行环境,极具可靠性,被广泛应用于飞机电源系统^[1-2]。但是,多级式结构使得发电机输出电压调节须历经多个环节,导致调节性能不佳。同时,随着先进机载用电设备的发展,对发电机输出电能质量提出了更高的要求^[3],传统单参数反馈电压调节已难以满足电源系统稳、动态性能要求。在现代控制研究中发现,多闭环控制可以改善动态性能^[4],故本文将多参数反馈策略应用于三级式无刷同步发电机电压调节中。

由于反馈参数增加,控制难度陡增,控制策略选择显得至关重要。PI 控制简单易于实现而被广泛应用,但对高度非线性强耦合的电机而言,单纯 PI 调节范围有限^[5]。分数阶控制器具有细腻、柔性、对被控对象参数变化不敏感的特点,相比于整数阶控制器,具有更好的鲁棒性和动态性能,更适用于复杂系统^[6-9]。但分数阶 PI^λ 控制器仍然存在参数设定后,无法动态调整的问题。而电机受外界环境干扰较大,固定参数难以兼顾稳态和动态性能,无法达到最佳控制效果^[10],故需要采用合理方式对控制器参数进行动态调节。

模糊控制是 L. A. Zadeh^[11]提出的一种智能控制方法,具有无须被控对象精确模型、抗干扰能力强等特点,能根据外部变化,实时调整控制器参数以改善其性能,使控制器能良好适应高阶、非线性、多参数强耦合系统,已被广泛应用于军事科学、航空航天等多个领域^[12-14]。文献[15~16]将模糊规则与分数阶控制结合,应用于 PEMFC 系统和开关磁阻电机中,提高了实时性和抗扰能力,改善了控制性能。

1 三级式同步发电机数学模型

航空同步发电机采用三级式无刷结构,主要由副励磁机、主励磁机、主发电机、旋转整流器等部件构成。副励磁机采用永磁同步电机,主励磁机和主发电机采用电励磁同步发电机,其结构如图 1 所示。

忽略磁滞损耗及涡流损耗,假设产生的磁场在定子和转子之间按正弦分布,三相电压对称,经过 park 变换后,可以忽略 0 轴分量,建立主励磁机和主发电机电压方程及磁链方程。

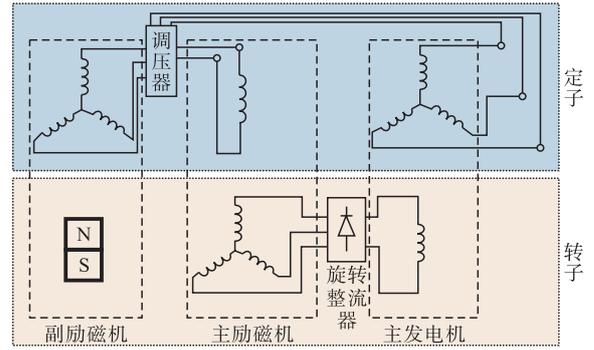


图 1 三级式无刷同步发电机结构

1.1 电压方程

对同步发电机进行电路等效,可以计算得到主发电机电压方程:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \\ U_f \\ U_D \\ U_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\psi_q \\ \omega\psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由于主励磁机中转子无阻尼绕组,则主励磁机电压方程为:

$$\begin{bmatrix} U_{dE} \\ U_{qE} \\ U_{fE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{dE} & 0 & 0 \\ 0 & r_{qE} & 0 \\ 0 & 0 & r_{fE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{dE} \\ -i_{qE} \\ i_{fE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_{dE} \\ \dot{\psi}_{qE} \\ \dot{\psi}_{fE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_E\psi_{qE} \\ \omega_E\psi_{dE} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $U_d, U_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$ 是定子三相绕组 park 变换后的电压、电流和磁链; U_f, i_f, ψ_f 为励磁绕组电压、电流和磁链; $U_D, U_Q, i_D, i_Q, \psi_D, \psi_Q$ 为转子直轴和交轴阻尼绕组电压、电流和磁链; ω 为角速度。

1.2 磁链方程

根据电磁感应原理,可以得到主发电机电磁方程矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{af} & M_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{aq} \\ M_{af} & 0 & L_f & M_{fd} & 0 \\ M_{ad} & 0 & M_{fd} & L_D & 0 \\ 0 & M_{aq} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

同理,在不考虑阻尼绕组条件下,主励磁机电磁方程矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \psi_{dE} \\ \psi_{qE} \\ \psi_{fE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dE} & 0 & M_{fE} \\ 0 & L_{qE} & 0 \\ M_{fE} & 0 & L_{fE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{dE} \\ -i_{qE} \\ i_{fE} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: L 为绕组自感系数; M 为两相绕组之间互感系数。

2 模糊分数阶多参数反馈调压策略

2.1 多参数电压调节策略

在传统航空三级式同步发电机电压调节中,采集调节点电压与参考电压进行比较得到电压偏差,将偏差输入调压器,通过调压器对主励磁机励磁电流大小的调节来实现对主发电机输出电压稳定的控制。但是,随着机载设备更新换代,大量电力电子设备应用于飞机电网中,影响电压稳定的因素增多,传统单参数调节很难满足电源系统动态及稳态需求。为妥善解决该问题,在单参数基础上,一方面,增加励磁反馈,根据发电机特性,得出主励磁机励磁电压与励磁电流的关系,将励磁电流作为反馈参数。另一方面,由于负载变化会导致发电机端电压出现大幅度波动,难以满足电能质量要求。为了更好地实现对负载扰动等变化的跟踪,提高对突加、突卸负载的适应能力,将负载电流作为补偿环节,加入到电压调节中,构成多参数调压控制器结构,见图2。多参数调节模式下,反馈的负载电流经计算得到相对应的励磁电流参考值,与电压偏差转换得到的励磁电流参考值相加,产生励磁电流给定值,反馈的励磁电流与给定值相比较而形成差值,经过转换得到励磁调节电路控制信号,通过励磁变化以实现输出电压的稳定控制^[4]。

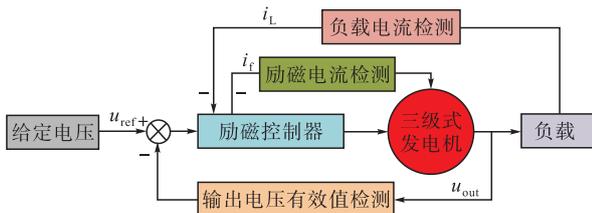


图2 多参数调压控制器结构

2.2 改进分数阶控制器设计与分析

分数阶微积分的一般定义为:

$${}_a D_t^\alpha f(t) = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} f(t), & \alpha > 0 \\ f(t), & \alpha = 0 \\ \int_a^t f(t) (dt)^{-\alpha}, & \alpha < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中:函数 $f(t)$ 的 α 次积分或导数用算子 ${}_a D_t^\alpha$ 来表示; $\alpha > 0$ 时表示求分数阶微分, $\alpha < 0$ 时表示分数阶积分,运算的上、下限分别用 a 和 t 表示。

在实际应用中,航空发电机为高度非线性系统,极易受到噪声的影响而产生振荡,微分环节对噪声有放大作用,会加剧电机振荡,故一般采用 PI 控制。但 PI 控制容易出现积分饱和而引起超调,且动态性能欠佳,对调压系统产生负面影响。而积分阶次 λ

可以使控制器在所选频率范围的低频段性能得到改善,有效抑制由积分环节饱和引起的超调,同时,能在一定程度上改善动态性能^[6,8],故加入分数阶积分算子,构建分数阶 PI ^{λ} 控制器,其微分方程为:

$$u(t) = (K_p + K_i D_t^\lambda) e(t) \quad (6)$$

式中: $u(t)$ 为输入; K_p 为比例系数; K_i 为微分系数; $e(t)$ 为输入误差。

对分数阶求解常采用 Oustaloup 滤波器方法,但是,在实际运用中,Oustaloup 滤波器在所选频率段(ω_a, ω_b)边界处的逼近效果并不理想,为了确保在(ω_a, ω_b)的全频率段都具有较高的准确性、实用性,同时,为避免在电机控制中出现振荡,本文选取分数阶阶次 $\alpha \in (0, 1)$,引入常数值 c, d 组成适当的系数,对滤波器进行调整,改善其逼近性能^[17]。则分数阶算子 S^α 可以被传递函数近似表示为:

$$K(s) = \left(\frac{1 + \frac{S}{\frac{d}{c}\omega_a}}{1 + \frac{S}{\frac{c}{d}\omega_b}} \right)^\alpha \quad (7)$$

由于 $0 < \alpha < 1$,且 $s = j\omega, c > 0, d > 0$,则:

$$K(s) = \left(\frac{cs}{d\omega_a} \right)^\alpha \left(1 + \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + c\omega_b s} \right)^\alpha \quad (8)$$

在所选取频率范围内,对传递函数进行泰勒展开,可以得到:

$$K(s) = \left(\frac{cs}{d\omega_a} \right)^\alpha \left[1 + \alpha p(s) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} p^2(s) + \dots \right] \quad (9)$$

$$p(s) = \frac{-ds^2 + d}{ds^2 + c\omega_b s} \quad (10)$$

那么算子 s^α 可以近似表示为:

$$s^\alpha \approx \left(\frac{(d\omega_a)^\alpha c^{-\alpha}}{1 + \alpha p(s) + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} p^2(s)} \right) \left(\frac{1 + \frac{s}{\frac{d}{c}\omega_a}}{1 + \frac{s}{\frac{c}{d}\omega_b}} \right)^\alpha \quad (11)$$

将泰勒级数进行一级截断,则可以得到:

$$s^\alpha \approx \left(\frac{d\omega_a}{c} \right)^\alpha \left(\frac{ds^2 + c\omega_b s}{d(1-\alpha)s^2 + c\omega_b s + d\alpha} \right) \left(\frac{1 + \frac{s}{\frac{d}{c}\omega_a}}{1 + \frac{s}{\frac{c}{d}\omega_b}} \right)^\alpha \quad (12)$$

为验证改进后效果,选取阶次为 0.3 的算子 $s^{0.3}, \omega_a = 0.0001, \omega_b = 10000, N = 5$ 进行验证,所得改进前后的 Bode 图如图3所示。

由图3可知,改进后的滤波器在所选频率段具备更好的逼近效果。

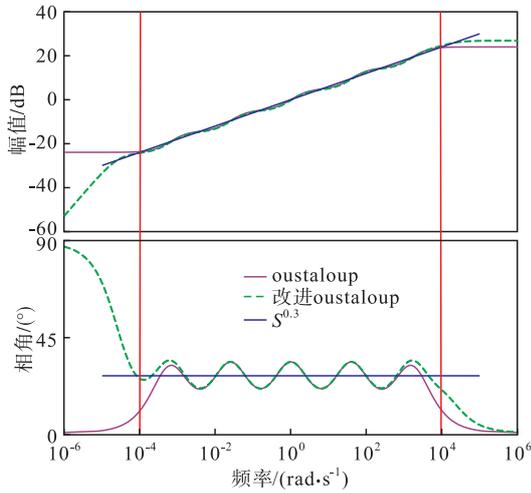


图 3 改进前后 oustaloup 滤波器 Bode 图

2.3 模糊分数阶 PI^λ 控制器设计

根据控制目标需求,模糊控制器输入为电压误差 $e(t)$ 和误差变化率 $e'(t)$,输出为 P, I, λ 的变化量 $\Delta P, \Delta I, \Delta \lambda$ 。选定量化因子,对输入 $e(t)$ 和 $e'(t)$ 进行模糊化,设定模糊论域均为 $[-0.3, 0.3]$,同时,设定 $\Delta P, \Delta I$ 的模糊论域为 $[-2, 2]$, $\Delta \lambda$ 的模糊论域设置为 $[-0.5, 0.5]$,隶属度函数选取三角形函数,模糊子集数 $N = 7$,分别用 NB、NM、NS、Z、PS、PM、PB 表示,模糊规则制定主要依据以下几方面^[18-19]:

1) 当 $e(t)$ 较大时,为在短时间内消除误差与超调,选择较大积分阶次 λ 和较小积分系数 I 、较大比例系数 P ;当 $e(t)$ 较小时,防止电机发生振荡,同时减小稳态误差与超调,应当选择较小积分阶次 λ 和减小 λ, P 。

2) 当突加、卸负载等扰动发生时, $e(t)$ 和 $e'(t)$ 会出现异号和同号情况,异号时,被控量偏离预期值,选取较小比例系数 P ;同号时,被控量趋向预期值,需选取较大积分阶次 λ 和较小积分系数 I 。

根据上述规则和系统测试基础,总结经验并制定了 $\Delta P, \Delta I, \Delta \lambda$ 模糊规则表。分数阶控制器核心参数 $\Delta \lambda$ 的模糊推理表和空间曲面图见表 1 和图 4。

表 1 $\Delta \lambda$ 模糊推理表

$e(t)$	$e'(t)$						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PM	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NS	PM	PM	PS	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PS	PS	Z	NS	NS	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB
PB	Z	Z	NS	NM	NB	NB	NB

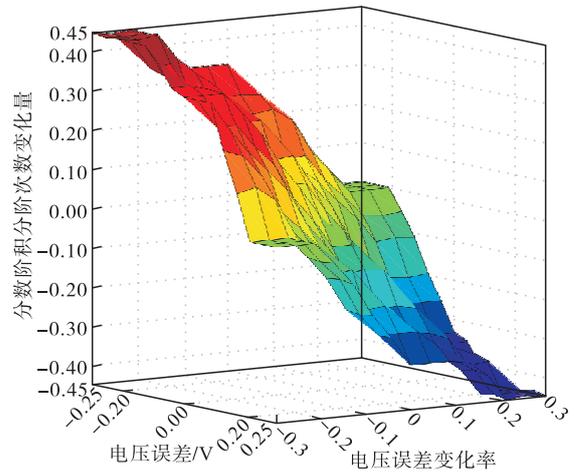


图 4 $\Delta \lambda$ 空间曲面图

3 仿真试验及结果分析

为验证本文所提控制算法的有效性和实用性,首先,利用 JMAG 搭建电机模型,进行电磁场分析,获取电机的互感和自感;随后,根据式(1)~(4),基于 MATLAB/Simulink 建立了主励磁机和主发电机核心模块;最后,构建副励磁机、整流器和连接电路,搭建了航空三级式同步发电机系统仿真平台。分数阶控制部分通过在 MATLAB 中编写函数来实现,引入的常数值 $c = 10, d = 9$ 。模糊规则通过 S-function 与分数阶控制器相连,实现参数的传递和更新。发电机关键参数如表 2 所示。

表 2 同步发电机关键参数

参数	数值
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	12 000
主发电机输出额定相电压/V	115
磁钢材料	DW360_50
永磁体磁钢材料	1J22
主发电机额定频率/Hz	400
主励磁机额定频率/Hz	1 000
主发电极对数	2
主励磁极对数	5
功率因数	0.85

3.1 单参数与多参数对比试验

为验证多参数调压效果,设定在额定转速 12 000 r/min 条件下,对传统单参数调压和多参数调压进行对比试验,在发电机建压稳定后,分别在 2.5 s 和 4.5 s 进行突加和突卸 0.5 倍负载试验,所得输出电压有效值、励磁电流对比波形如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在发电机建压阶段,单参数反馈时,输出电压在 0.50 s 时达到峰值 122.4 V,超调量为 6.4%,发电机在 1.52 s 达到稳定状态;多参数

反馈时,输出电压在 0.47 s 达到峰值 119.5 V,超调量为 3.9%,发电机在 1.29 s 达到稳定状态。在突加、卸负载阶段,2 种控制电压跌落和上升值相同,单参数反馈分别在 3.54 s 和 5.46 s 达到稳定状态,多参数反馈在 3.18 s 和 5.12 s 达到稳定状态。由此可知,相比于单参数反馈,多参数反馈控制建压超调减少 2.5%,建压调节时间减少 0.23 s,有助于电机实现快速建压,并能减小电子器件受压值,增强使用寿命。当负载突变时,多参数反馈作用下,调节时间明显缩短,具有更快的响应速度,可以有效改善电压调节系统的动态性能。但是,多参数反馈下,超调现象仍然存在,系统还有待进一步改善。

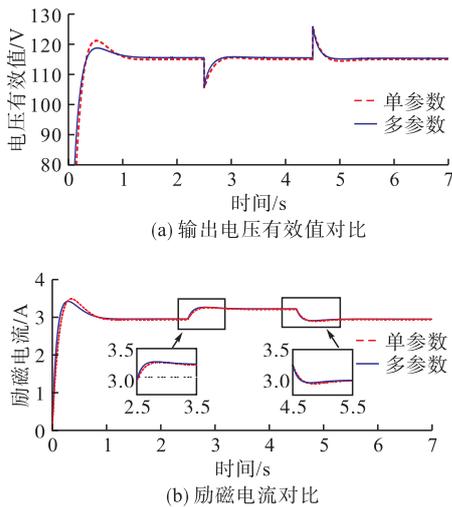
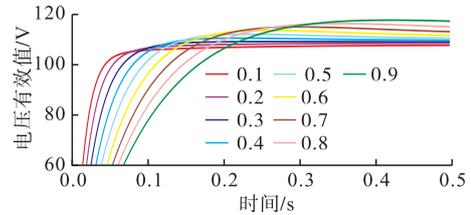


图5 单参数与多参数对比示意图

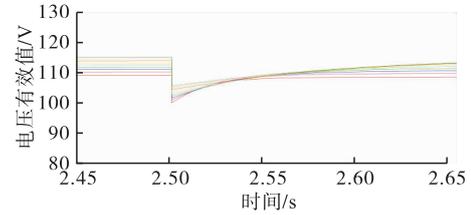
3.2 不同积分阶次对比试验

为有效验证加入积分阶次 PI^λ 后,PI 相比于 PI 控制更加柔性、细腻,增强控制器参数变化灵活性,有效抑制超调,在多参数反馈基础上,选取额定转速 12 000 r/min, λ 在区间 $[0.1, 0.9]$ 内每间隔 0.1 进行取值,选择滤波器阶次 5,进行建压试验和 2.5 s、4.5 s 时突加负载、突卸 0.5 倍负载试验,所得输出电压有效值波形如图 6 所示。

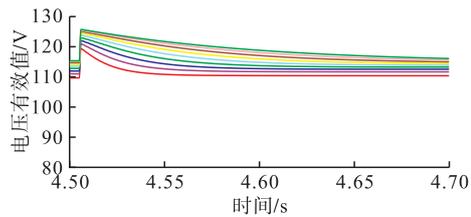
由图 6 可以看出,在建压阶段,随着 λ 阶次从 0.1 逐渐增大至 0.9,达到稳态时间从 0.12 s 增大到 0.98 s,响应速度随积分阶次增加而变缓。当阶次 λ 小于 0.5 时,在多参数基础上,可以进一步提高响应速度,并且实现无超调建压,大大改善了发电机建压过程。在突变负载阶段,阶次 λ 越小,对扰动响应越快,但是,相比于整数阶,随着分数阶控制器积分阶次 λ 减小,输出电压有效值稳态误差增大,以上结果表明,固定参数控制器难以同时具备优良的动、稳态性能,故需要对分数阶控制器进行优化改进,使参数 P, I, λ 可动态调整,能够在有效抑制超调时,兼顾稳态性能。



(a) 建压阶段输出电压有效值对比



(b) 突加负载输出电压有效值对比



(c) 突卸负载输出电压有效值对比

图6 变阶次输出电压有效值示意图

3.3 模糊分数阶对比试验

为使分数阶控制器能兼具各阶次性能,引入本文制定的模糊规则,实现对分数阶参数在线调整。为验证其效果,在额定转速 12 000 r/min,多参数反馈条件下,对模糊分数阶调压控制器进行建压和 2.5 s、4.5 s 突加、突卸 0.5 倍负载试验,得到输出相电压波形如图 7 所示。同时,为凸显本文所提方法较传统控制方法的改进,将模糊分数阶 PI^λ 控制器与单参数反馈控制器进行对比,所得励磁电流与输出电压有效值波形如图 8 所示。

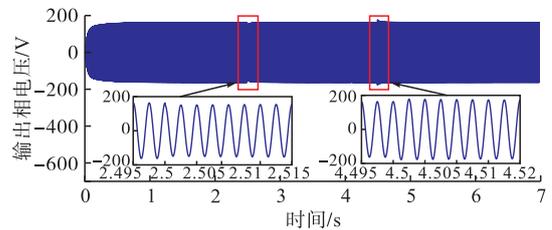


图7 模糊分数阶控制器相电压波形

由图 7 可知,加入模糊规则后,分数阶 PI^λ 控制可以实现快速、无超调、平滑的建压,并且无稳态误差。结果表明,模糊分数阶控制器能够同时兼顾动态和稳态性能,具备更强抗干扰能力。由图 8 可知,在模糊分数阶控制器作用下,发电机在 0.87 s 时完成建压,达到稳定运行状态,相比于单参数控制,建压时间缩短了 42.76%,超调量减少了 6.4%;在突变负载阶段,分别在 2.97 s 和 4.98 s 恢复到稳定状态,与单参数调节相比,调节时间缩短了 0.57 s 和

0.48 s,调节时间分别减少了37.01%和32.88%,体现出对外界干扰有更好的调节性能,更有利于飞机在各种复杂环境中稳定飞行。

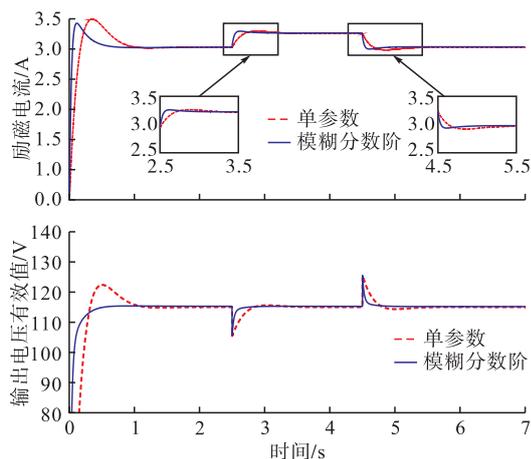


图8 单参数和模糊分数阶对比

4 结论

1)在传统单参数反馈调压方式的基础上,增加励磁电流和负载电流反馈,构成多参数调压控制,实现了对负载突变等外界变化的有效跟随,提高了控制器的动态调节性能。

2)利用分数阶微积分细腻、柔性的特点,以分数阶PI控制取代电压反馈环中的整数阶PI控制,增加了一个可调节参数,使控制器灵活性得到加强,可以消除建压超调,改善建压阶段性能,同时,进一步提高调节速度。

3)将模糊规则引入到PI^λ控制器中,使控制器突破了参数固定的束缚,能够根据电压误差和误差变化率,在线整定控制器参数,分阶段对电压快速无差的进行调节,具有较强的抗干扰能力,兼具优良的动态和稳态性能,能更好地满足电压调节的实际需求。

参考文献

[1] SARLIOGLU B, MORRIS C T. More Electric Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities for Commercial Transport Aircraft [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2015, 1(1): 54-64.

[2] 马鹏,刘卫国,毛帅,等.一种三级式同步电机转矩脉动抑制方法[J].电机与控制学报,2015,19(11): 98-103.

[3] 张卓然,于立,李进才,等.飞机电气化背景下的先进航空电机系统[J].南京航空航天大学学报,2017,49(5):622-634.

[4] 杨善水,张卓然,杨春源,等.基于多环控制的混合励磁航空变频交流发电系统[J].电工技术学报,2012,

127(3):176-180.

- [5] 刘景林,公超,韩泽秀,等.永磁同步电机闭环控制系统数字PI参数整定[J].电机与控制学报,2018,22(4):26-32.
- [6] ZAMANI A A, TAVAKOLI S, ETEDALI S. Fractional Order PID Control Design for Semi-Active Control of Smart Base-Isolated Structures: A Multi-Objective Cuckoo Search Approach [J]. ISA Transactions, 2017, 67(5):222-232.
- [7] 鲍雪,王大志,杨永生.基于CAPSO算法的修正炮弹分数阶控制器设计[J].仪器仪表学报,2015,36(11): 2556-2562.
- [8] 高哲.一类采用分数阶控制器的分数阶系统可镇定性判定准则[J].自动化学报,2017,43(11):1993-2002.
- [9] INDRANIL P, SAPTARSHI D. Chaotic Multi-Objective Optimization Based Design of Fractional Order Controller in AVR System [J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2012, 43(1):393-407.
- [10] 许颜贺,周建中,薛小明,等.抽水蓄能机组空载工况分数阶PID调节控制[J].电力系统自动化,2015,39(18):43-48.
- [11] LIN H R, CAO B Y, LIAO Y. Fuzzy Control [M]. Cham:Springer International Publishing AG,2018.
- [12] CASTILLO O, CERVANTES L, SORIA J, et al. A Generalized Type-2 Fuzzy Granular Approach with Applications to Aerospace [J]. Information Sciences, 2016, 354(8):165-177.
- [13] KHOOBAN M H, SHASADEGHI M, NIKNAM T, et al. Analysis, Control and Design of Speed Control of Electric Vehicles Delayed Model: Multi-Objective Fuzzy Fractional Order PI^λ~μ Controller [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2017, 11(3):249-261.
- [14] 杨宁宇,韩宇超,田录林,等.基于模糊规则的自适应分数阶PI^λ控制器的研究[J].西安理工大学学报,2017,33(3):304-309.
- [15] 戚志东,周茜,卞慧娟,等. PEMFC 动态建模与模糊分数阶PI^λD^μ控制[J].控制与决策,2017,32(6): 1148-1152.
- [16] 党选举,彭慧敏,姜辉,等.基于模糊分数阶PID的开关磁阻电机直接瞬时转矩控制[J].振动与冲击,2018, 37(23):104-110.
- [17] XUE D Y, ZHAO C N, CHEN Y Q. A Modified Approximation Method of Fractional Order System [C]// Proceedings of IEEE Conference on Mechatronics and Automation. Luoyang, China:IEEE,2006:1043-1048.
- [18] 薛定宇.分数阶微积分学与分数阶控制[M].北京:科学出版社,2018.
- [19] 温嘉斌,麻宸伟.无刷直流电机模糊PI控制系统设计[J].电机与控制学报,2016,20(3):102-108.

(编辑:姚树峰)