

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

林聪,肖玲斐,陈勇兴.
基于GWO-PSO优化的三级式发电机
二自由度分数阶PID调压控制.
电机与控制应用,2021,48(12):1.



SEARI **NCMS** www.nems.com.cn

上電科 上科電機

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

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

基于 GWO-PSO 优化的三级式发电机二自由度分数阶 PID 调压控制 *

林 聪，肖玲斐，陈勇兴
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要：针对航空三级式发电机存在建压超调、响应速度慢、电压稳定性差、负载扰动等问题，在双环调压结构的基础上，设计了一种基于灰狼混合粒子群算法（GWO-PSO）优化的二自由度分数阶 PID（2DOF FOPID）调压控制器。利用二自由度控制，增强抗干扰和目标跟踪能力；结合分数阶控制，使参数的整定更加灵活，并具有对被控对象参数变化不敏感的特点，可以提升系统的控制性能；改进的 GWO-PSO 以灰狼优化算法的机制开始搜索过程，然后用 PSO 算法改进灰狼的位置，以平衡算法的局部搜索和全局开发的能力，利用改进的优化算法对 2DOF FOPID 控制器进行参数优化。仿真结果表明，所设计的控制器具有响应速度快、超调小的优点，提高了发电机的动静态性能和抗扰能力。

关键词：航空三级式发电机；电压调节；二自由度分数阶 PID；灰狼优化算法；粒子群优化算法

中图分类号：TM 31 文献标志码：A 文章编号：1673-6540(2021)12-0001-06

doi: 10.12177/emca.2021.143

Two-Degree-of-Freedom Fractional Order PID Voltage Regulation Control of Three-Stage Generator Based on GWO-PSO Optimization *

LIN Cong, XIAO Lingfei, CHEN Yongxing

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The built-in voltage overshoot, slow response speed, poor voltage stability and load disturbance exist in the aerospace three-stage generator. To solve these problems, a two-degree-of-freedom fractional order PID (2DOF FOPID) voltage regulation controller optimized by gray wolf hybrid particle swarm optimization (GWO-PSO) is designed on the basis of double loop voltage regulation structure. The two-degree-of-freedom control is used to enhance the ability of anti-interference and target tracking. The fractional order control is used to make the parameter setting more flexible and insensitive when the parameter of the controlled object changes, and the control performance of the system is improved. The improved GWO-PSO starts the search process with the mechanism of GWO algorithm, and then uses PSO algorithm to improve the position of grey wolf, so as to balance the ability of local search and global development of the algorithm. Then the improved algorithm is used to optimize the parameters of 2DOF FOPID controller. Simulation results show that the designed controller has the advantages of fast response and small overshoot. It improves the dynamic and static performance and anti-interference ability of the generator.

Key words: aircraft three stage generator; voltage regulation; two-degree-of-freedom fractional order

收稿日期：2021-09-13；收到修改稿日期：2021-11-22

* 基金项目：国家自然科学基金项目(51876089)

作者简介：林 聪(1997—)，男，硕士研究生，研究方向为航空发电系统及变换器控制与优化。

肖玲斐(1982—)，女，博士，副教授，研究方向为航空动力系统建模、控制与优化。

陈勇兴(1995—)，男，硕士研究生，研究方向为航空起动发电系统控制、电机控制。

PID (2DOF FOPID); grey wolf optimization (GWO); particle swarm optimization (PSO)

0 引言

随着飞机电气化的发展,人们对飞机电源系统的发电功率、可靠性、工作效率、可操作性和可维护性等方面的要求不断提高。三级式发电机由于其独特的结构和性能优势,在当代航空电源系统中得到了广泛应用^[1]。

飞机三级式发电机的调压主要是通过控制主励磁机的励磁电流电压,从而间接地实现对主发电机励磁的调节,以达到控制主发电机输出电压的目的^[2-3]。三级式发电机在发电过程中的稳态调压问题,不仅要考虑负载对发电机的影响,同时还需考虑具有非线性强耦合特性的发电机本身的影响。传统的 PID 控制器由于其结构简单且易于实现,广泛应用在各种工业系统当中,但是传统电压调节控制尤其是固定单一的 PID 控制器在这种状况下很难满足系统的要求^[4],目前有很多的 PID 控制改进方法,如模糊 PID 控制、LQR-PID 控制、分数阶 PID(FOPID)控制等^[5-7]。

其中分数阶 PID 近年来在工业领域得到广泛应用,与传统的整数阶 PID 相比,分数阶 PID 当中增加了积分阶次和微分阶次两个可调参数,使控制器设计更灵活,也有利于提高系统的控制精度及鲁棒性,更适合于复杂系统^[8]。

考虑到一自由度控制器无法平衡系统的目标跟踪性能和抗扰性能,因此本文在分数阶 PID 控制器的基础上引入二自由度控制器的设计方法,二自由度控制器设计在设计控制器时对目标跟踪能力和干扰抑制能力进行独立设计,使控制器的目标跟踪性能和干扰抑制性能同时达到最优,可以克服传统一自由度 PID 控制效果不理想的缺点。但是二自由度分数阶 PID(2DOF FOPID)与传统 PID 一样,控制器的参数固定,需要对参数进行整定^[9],以寻找最优参数以实现最优的控制性能。因此,需要采用合适的方式对控制器参数进行调整。

灰狼优化算法(GWO)基于灰狼猎捕猎物这一过程启发,由于其结构简单和易于实现,已有广泛应用^[10]。然而,作为一种智能技术,每一代 GWO 没有使用任何机制来增强灰狼的最佳位置,这可能导致最终解决方案的质量较差。为了克服这些问题,提高搜索能力,本文引入一种结合粒子

群优化(PSO)的灰狼混合粒子群算法(GWO-PSO)来解决全局开发和复杂问题的优化,GWO 被用作搜索工具,利用其机制开始搜索过程,然后用 PSO 算法改进阿尔法灰狼的位置。最后针对三级式发电机,在 MATLAB/Simulink 环境下,建立仿真模型进行仿真研究,通过仿真验证了所设计的调压系统的有效性。

1 三级式同步发电机数学模型

三级式同步发电机通常由永磁副励磁机、主励磁机、主发电机、整流器等部分组成。其中主励磁机和主发电机都是采用电励磁同步发电机,其结构如图 1 所示。

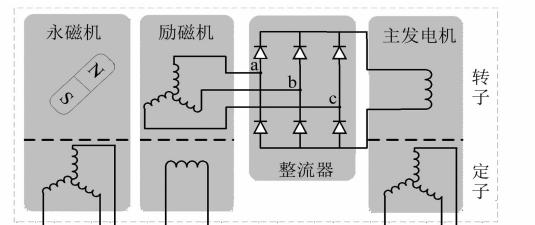


图 1 三级式同步发电机结构示意图

在忽略电机饱和、磁滞、假设磁路线性等因素后,为便于计算和分析,将三相静止坐标系下的同步发电机数学模型经过 Clarke 和 Park 变换,建立两相旋转坐标系下的数学模型。

对同步发电机进行电路等效,可以获得主发电机电压方程为

$$\begin{cases} \mathbf{V}_{dqs} = -\mathbf{r}_{dqs}\mathbf{i}_{dqs} + p\boldsymbol{\psi}_{dqs} + \omega_e\boldsymbol{\psi}_{qds} \\ \mathbf{V}_{DQr} = \mathbf{r}_{DQr}\mathbf{i}_{DQr} + p\boldsymbol{\psi}_{DQr} \end{cases} \quad (1)$$

其中参数为

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{dqs} &= [u_q \quad u_d \quad u_0]^T \\ \mathbf{r}_{dqs} &= \text{diag}[r_s \quad r_s \quad r_s] \\ \mathbf{i}_{dqs} &= [i_d \quad i_q \quad i_0]^T \\ \boldsymbol{\psi}_{dqs} &= [\psi_d \quad \psi_q \quad \psi_0]^T \\ \boldsymbol{\psi}_{qds} &= [-\psi_q \quad \psi_d]^T \\ \mathbf{V}_{DQr} &= [u_f \quad u_D \quad u_Q]^T \\ \mathbf{r}_{DQr} &= \text{diag}[r_f \quad r_D \quad r_Q] \\ \mathbf{i}_{DQr} &= [i_f \quad i_D \quad i_Q]^T \\ \boldsymbol{\psi}_{DQr} &= [\psi_f \quad \psi_D \quad \psi_Q]^T \end{aligned} \quad (2)$$

式中:下标 s 表示定子侧的变量; r 表示转子侧的变量; d、q 表示定子三相绕组在 dq 坐标系下的变量; u_d 、 u_q 、 u_0 、 i_d 、 i_q 、 i_0 、 ψ_d 、 ψ_q 、 ψ_0 分别为定子三相绕组在 dq 轴下的电压、电流及磁链; u_f 、 i_f 和 ψ_f 分别为励磁绕组电压、电流和磁链; u_D 、 u_Q 、 i_D 、 i_Q 、 ψ_D 、 ψ_Q 分别为转子直、交轴阻尼绕组的电压、电流和磁链; ω_e 为转子角速度, p 为磁极对数; r_s 、 r_f 、 r_D 和 r_Q 分别为定子电阻、励磁绕组电阻及转子直、交轴等效阻尼绕组电阻。

由电磁感应原理,可获得主发电机的磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{qQ} \\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{df} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{dD} & 0 & 0 & M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & M_{qQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L_d 、 L_q 、 L_0 、 L_f 和 L_Q 分别为各自绕组自感; M_{xy} 为各自互感。

由于励磁机转子无阻尼绕组,其电压方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} u_{dE} \\ u_{qE} \\ u_{fE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_E & 0 & 0 \\ 0 & r_E & 0 \\ 0 & 0 & r_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{dE} \\ -i_{qE} \\ i_{fE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\psi}_{dE} \\ \dot{\psi}_{qE} \\ \dot{\psi}_{fE} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega_E \psi_{dE} \\ \omega_E \psi_{qE} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: u_{dE} 、 u_{qE} 、 i_{dE} 、 i_{qE} 、 ψ_{dE} 、 ψ_{qE} 分别为主励磁机三相绕组在 dq 轴下的电压、电流及磁链; u_{fE} 、 i_{fE} 和 ψ_{fE} 分别为励磁绕组电压、电流和磁链; ω_E 为转子角速度; r_E 为定子电阻。

在传统的航空三级式同步发电机电压调节中,通过采集调节点电压与参考电压进行比较得到电压偏差,将偏差输入调压器实现对输出电压的稳定控制,但是三级式发电机是一个非线性系统,其存在时滞,系统受到的干扰作用强且频繁,对控制质量要求高。

随着多电飞机中电力电子设备的增多,影响电压稳定性的因素增多,如果单纯采用单级控制算法会无法满足系统控制的高质量要求。因此,在单闭环反馈的基础上增加励磁电流反馈,利用

励磁电流反馈来提高对主发电机输出电压的控制质量,同时因为副回路的存在,对于进入副回路的干扰进行超前控制,从而使得干扰对主变量的影响降低,增强发电机负载变化时的自适应能力。

2 基于 GWO-PSO 算法优化的 2DOF FOPID 控制器设计

2.1 2DOF FOPID 控制器原理

分数阶微积分是由传统的整数阶微积分拓展而来的,分数阶微积分的积分和微分阶次可以为任意实数,不再局限于传统微积分的整数阶次。通常,分数阶微积分可以表示为如下形式:

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

式中: a 表示积分运算的下界; t 表示积分运算的上界; α 表示分数阶微分的阶次。

整数阶 PID 控制器的积分和微分的阶次只能为 0 或者 1,而分数阶 PID 控制器的积分和微分的阶次选择范围宽广很多,理论上可以是任意的非负实数,因此分数阶 PID 控制器使参数的整定更加灵活,有利于提升系统的控制性能。

分数阶 PID 控制器在时域上可表示为

$$u(t) = K_p e(t) + K_i D^{-\lambda} e(t) + K_d D^\mu e(t) \quad (6)$$

式中: $e(t)$ 为跟踪误差; K_p 为比例系数; K_i 为积分系数; K_d 为微分系数; μ 为微分阶次, λ 积分阶次; $u(t)$ 为控制器输出。

在分数阶 PID 控制器的基础上,本文结合二自由度控制器设计理论,设计基于二自由度的分数阶 PID 控制器,如图 2 所示,将负载扰动的控制与参考输入变化的控制进行分别设计以实现更好的抗干扰和目标跟踪能力。

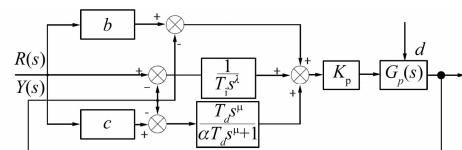


图 2 2DOF FOPID 控制器结构图

图 2 中 $G_p(s)$ 为被控对象; $b \in [0, 1]$ 为比例

权值; $c \in [0,1]$ 为积分权值; d 为扰动。2DOF FOPID 控制器的输出为

$$\begin{aligned} U(s) = & K_p \left(b + \frac{1}{T_i s^\lambda} + \frac{c T_d s^\mu}{\alpha T_d s^\mu + 1} \right) R(s) - \\ & K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s^\lambda} + \frac{T_d s^\mu}{\alpha T_d s^\mu + 1} \right) Y(s) \end{aligned} \quad (7)$$

2.2 基于 GWO-PSO 的 2DOF FOPID 控制

GWO 基于灰狼猎捕猎物这一过程启发。GWO 算法将狼群中的灰狼分为四类, 分别表示为 α, β, δ 和 ω , 其中 α 表示当前最优的解位置, 第二和第三优解分别为 β 狼和 δ 狼, 其余的解为 ω 狼, ω 狼会追随这三个最佳狼进化。

灰狼围猎猎物的过程可表述为

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot |\mathbf{C} \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (8)$$

式中: t 表示当前迭代次数; X_p 和 X 分别表示当前猎物和灰狼的位置。

A 和 C 的具体表达式为

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (9)$$

$$\mathbf{C} = 2r_2 \quad (10)$$

式中: a 是从 2 到 0 的线性递减参数, 以保证搜索和趋近能力; r_1 和 r_2 均为 $[0,1]$ 之间的随机向量。

灰狼围猎过程由 α 狼引领, 并根据 α, β, δ 与猎物之间的距离判断猎物的位置, 有如下表达式:

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot |\mathbf{C}_1 \cdot X_\alpha - X| \quad (11)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot |\mathbf{C}_2 \cdot X_\beta - X| \quad (12)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot |\mathbf{C}_3 \cdot X_\delta - X| \quad (13)$$

通过使用 α, β 和 δ 狼来更新位置的过程如下:

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (14)$$

PSO 初始化为一群随机粒子, 然后通过迭代找到最优解。在每一次的迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”来更新自己。

假设在一个 D 维的搜索空间当中, 包含 N 个粒子组成的粒子群 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_N)$, 其中第 i 个粒子的位置可以记为

$$x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad (15)$$

第 i 个粒子的速度可以记为

$$v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (16)$$

其中第 i 个粒子找到的最优值可以记为

$$p_{best_i} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad (17)$$

粒子群搜索到的全局最优值可以表示为

$$g_{best} = (g_1, g_2, \dots, g_D) \quad (18)$$

在找到这两个最优值后, 粒子通过式(19)和式(20)来更新自己的速度和位置:

$$\begin{aligned} v_{id}(k+1) = & \omega \cdot v_{id}(k) + c_1 \cdot \text{rand} \cdot [p_{id}(k) - \\ & x_{id}(k)] + c_2 \cdot \text{rand} \cdot [g_d(k) - x_{id}(k)] \end{aligned} \quad (19)$$

$$x_{id}(k+1) = x_{id}(k) + v_{id}(k+1) \quad (20)$$

式中: ω 为初始权重系数, 当 ω 较小时, 粒子群的局部搜索能力较强, 较大时全局搜索能力强; $d = 1, 2, \dots, D; i = 1, 2, \dots, M; k$ 表示当前的迭代次数; c_1 和 c_2 为加速度常数, 也被称为学习因子; rand 为随机数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。

GWO 在单峰基准测试函数问题上表现出良好的性能, 然而当处理多峰函数时可能陷入局部最优及过早收敛问题, 无法寻找灰狼的最佳位置。此外, 处理多维度问题时也可能降低单一算法的性能。为了克服这些问题, 提高搜索能力, 引入一种新的基于 GWO 和 PSO 的 GWO-PSO 来解决 2DOF FOPID 的这类多参数复杂问题的优化, GWO 被用作搜索工具, 利用其的机制开始搜索过程, 传统灰狼算法并没有体现出灰狼寻优的方向, 其对解的判断只有位置信息, 因此将 PSO 中的速度向量引入到 GWO 中, 然后用 PSO 算法改进阿尔法灰狼的位置, 改进后的速度和位置更新公式为

$$\begin{aligned} v_i(k+1) = & \xi(\omega \cdot v_i(k) + c_1 \cdot \text{rand} \cdot \\ & [X_1 - x_i(k)] + c_2 \cdot \text{rand} \cdot [X_2 - x_i(k)] + \\ & c_3 \cdot \text{rand} \cdot [X_3 - x_i(k)]) \end{aligned} \quad (21)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + v_i(k+1) \quad (22)$$

GWO-PSO 算法的流程如图 3 所示。

为了更好地实现电压的超调量、调节时间等指标的统一优化, 本文选取绝对误差积分指标作为目标函数:

$$F = \int_0^t |e(t)| dt \quad (23)$$

式中: $e(t)$ 为主发电机输出电压跟踪误差。

为了验证本文所设计的 GWO-PSO 算法的性能, 基于 Mirjalili 等^[11]设计的测试函数进行测试, 图 4 分别展示了基于 PSO 算法、GWO 算法和 GWO-PSO 算法的参数优化性能, 可以看到 GWO-PSO 优化算法具有较好的寻优性能。

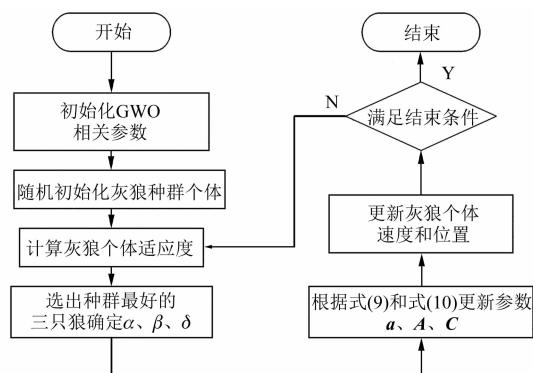


图 3 GWO-PSO 算法的流程图

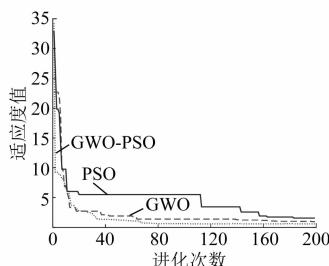


图 4 优化算法对比

结合电压外环控制器和励磁电流内环控制器的结构,电压外环直接影响着电流内环,电压外环的重要性较高,对内环路采用传统 PID 控制就可以实现稳定控制,并利用 Z-N 整定法进行整定。电压外环采用 2DOF FOPID 控制,并利用 GWO-PSO 进行参数整定,得到基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制结构如图 5 所示。

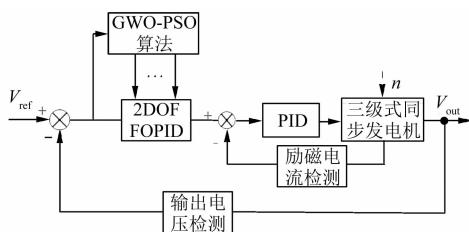


图 5 基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制结构图

3 仿真与结果分析

为了验证本文所设计控制策略的有效性和实用性,根据发电机数学模型利用 MATLAB/Simulink 搭建飞机三级式发电机系统仿真平台,然后在 MATLAB/Simulink 中验证上述设计的控制方法针对发电过程的调压控制的有效性。

表 1 主发电机主要仿真参数

参数名称	参数值
额定相电压/V	115
额定转速/(r·min ⁻¹)	12 000
励磁电阻/Ω	0.020 4
电枢电阻/Ω	0.107 2
主发电机极对数	2
额定频率/Hz	400

对电流内环采用传统 PID 进行控制,利用 Z-N 整定法进行整定得到各参数,再调整外回路中的 2DOF FOPID 控制器参数,由 GWO-PSO 算法调节 K_p 、 K_i 、 K_d 、 λ 和 μ ,并在 [0, 1] 范围内依照二分法原则调节 b 和 c 两个参数,同时与采用 GWO 算法调节的进行对比。

表 2 控制器参数

调节方式	参数值				
	K_p	K_i	K_d	λ	μ
GWO	0.545	1.953	0.052	0.90	0.85
GWO-PSO	0.592	1.651	0.043	0.75	0.65

对本文所设计的控制方法在发电过程的建压和稳态调压过程进行仿真分析。图 6 和图 7 分别为基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制输出的 a 相电压波形和建压阶段三相输出电压波形图。

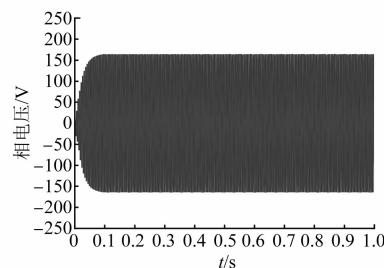


图 6 基于 GWO-PSO 优化 2DOF FOPID 控制的输出 a 相电压波形

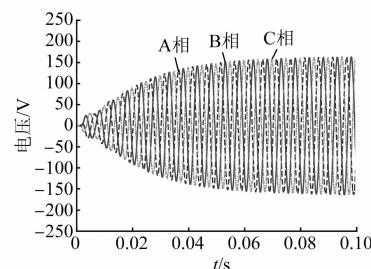


图 7 基于 GWO-PSO 优化 2DOF FOPID 控制的建压阶段三相输出电压波形

由图 6 可知,本文所设计的控制器可以实现快速建压,且建压之后具有很好的稳态性能,电压平稳无波动,从图 7 中可以看出建压过程平滑、无超调。

随后分别对基于 GWO 优化的 2DOF PID 控制、基于 GWO 优化的 2DOF FOPID 控制及基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制在 0.2 s 和 0.6 s 分别突加和突卸 0.5 倍负载,得到的主发电机输出电压有效值如图 8 所示。图 9 和图 10 分别为基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制的发电机在加、卸负载时输出三相电压局部放大图。

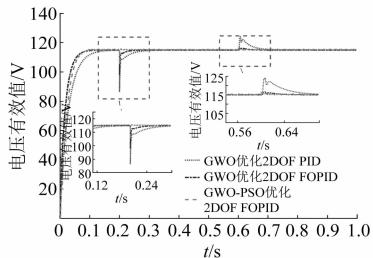


图 8 主发电机输出电压有效值对比

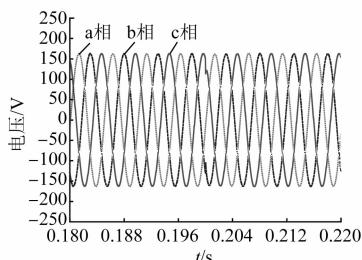


图 9 基于 GWO-PSO 优化 2DOF FOPID 控制的突加负载时三相电压局部波形

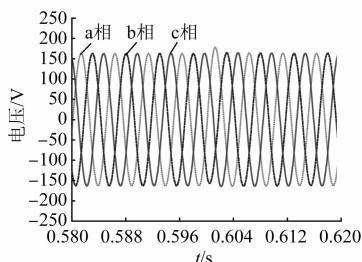


图 10 基于 GWO-PSO 优化 2DOF FOPID 控制的突卸负载时三相电压局部波形

从图 8 中可以看到基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 的响应速度比传统基于 GWO 优化的控制更快,在基于 GWO-PSO 优化的 2DOF

FOPID 控制下,输出电压有效值能够在 0.099 s 左右达到额定值,基于 GWO 优化的 2DOF FOPID 控制器需要 0.102 s,而基于 GWO 优化的 FOPID 控制需要 0.18 s,与之相比本文所设计调压控制器可以减少调节时间 0.09 s,有利于实现快速建压。同时在负载突加的扰动情况下,基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制器在突增负载时的电压有效值跌落到 105 V,而基于 GWO 优化的 2DOF PID 控制跌落至 85 V。在突卸负载时,基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制的电压突变量只有 3 V,而基于 GWO 优化的 2DOF PID 控制的突变量约为 12 V,可以看到本文所设计的控制器电压的跌落和上升值更小,调节时间也明显缩短,表明对外界扰动的抑制能力提升,稳定性更好。并从图 9 和图 10 的三相电压的局部波形可以看出,本文所设计控制器三相电压在负载突加和突卸阶段的波形也较为平滑,峰值变化很小,有利于减小电子器件受压值,增加使用寿命。

4 结语

本文提出了一种基于 GWO-PSO 优化的 2DOF FOPID 控制器,利用分数阶 PID 取代整数阶 PID 控制,使得控制器灵活性得到加强,改善了建压阶段性能。同时结合二自由度控制实现对负载突变等外界变化的有效抑制,增强了动态调节性能,实现了输出电压稳定控制。最后设计 GWO-PSO 优化方法对 2DOF FOPID 控制器进行优化,利用 PSO 改进了 GWO 的全局搜索能力和收敛速度不足问题。仿真结果表明本文设计的调压控制器能够使主发电机输出电压更加快速地恢复到额定电压,具有良好的抗扰能力,使发电性能得到改善,更有利于满足飞机对电力系统的电压调节的需求,保障飞行稳定。

【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.
- [2] 程若发,于新红,陈立虎,等.飞机发电机励磁系统的建模与控制仿真[J].计算机仿真,2015,32(5): 24. (下转第 20 页)

ADRC 电流控制的无传感器控制系统能有效估计出转子的位置和速度, 电流的振荡量和超调量较小, 保证了无传感器控制系统的稳定性与精确性, 是一种提高无传感器控制系统暂态收敛速度快及位置估计精度的有效方法。

【参考文献】

- [1] ICHIKAWA S, TOMITA M, DOKI S, et al. Sensorless control of permanent-magnet synchronous motors using online parameter identification based on system identification theory [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 363.
- [2] BODE G H, LOH P C, NEWMAN M J, et al. An improved robust predictive current regulation algorithm [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1720.
- [3] 杜博超, 韩守亮, 张超, 等. 基于自抗扰控制器的内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 105.

(上接第 6 页)

- [3] 李玉忍, 梁波, 张智慧, 等. 飞机三级式发电机调压系统滑模变结构控制方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2013, 31(2): 195.
- [4] 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.
- [5] 彭斌, 王文奎. 基于模糊系数修正 BP 神经网络 PID 的 BLDCM 控制系统仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 17.
- [6] 杨蕾, 李胜男, 黄伟, 等. 永磁同步发电机自适应分数阶 PID 控制设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 49.
- [7] 李宗帅, 张革文, 刘艳敏, 等. 基于 LQR 的直流电机伺服系统三闭环 PID 控制器设计[J]. 微电机, 2016, 49(5): 58.

- [4] 刘刚, 肖烨然, 孙庆文. 基于改进反电势积分的永磁同步电机位置检测[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(2): 36.
- [5] 黄雷, 赵光宙, 年珩. 基于扩展反电势估算的内插式永磁同步电动机无传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(9): 59.
- [6] 文建平, 曹秉刚. 无速度传感器的内嵌式永磁同步电机自抗扰控制调速系统[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(30): 58.
- [7] 韩京清. 从 PID 技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002(3): 13.
- [8] 诸德宏, 汪瑶, 周振飞. 基于模糊滑模算法的永磁同步电机无位置传感器矢量控制[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(8): 29.
- [9] GAO Z. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003.
- [10] 王辉航, 赵朝会, 万东灵, 等. 基于非奇异快速终端滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(1): 28.

- [8] GIRGIS M E, FAHMY R A, BADR R I. Optimal fractional-order PID control for plasma shape, position, and current in Tokamaks [J]. Fusion Engineering and Design, 2020, 150: 111361.
- [9] 吴延凯, 张伟, 王亚刚. 基于 GA-PSO 的印版滚筒温度二自由度 PID 参数整定[J]. 包装工程, 2020, 41(5): 185.
- [10] 张燕, 陈慧丹, 周颖, 等. 基于改进的 GWO-LSSVM 磨矿粒度软测量模型[J]. 计算机仿真, 2020, 37(6): 298.
- [11] MIRJALILI S, SAREMI S, MIRJALILI S M, et al. Multi-objective grey wolf optimizer: a novel algorithm for multi-criterion optimization [J]. Expert Systems with Applications, 2016, 47: 106.