

脉冲发电机鲸鱼优化自适应 PID 励磁控制

赵强强, 李华俊, 叶 强
(核工业西南物理研究院, 四川 成都 610225)

摘 要: 针对大惯性脉冲发电机励磁控制问题, 提出了鲸鱼优化的自适应 PID 控制方法。根据脉冲发电机的工作特点和励磁控制的基本要求, 从考虑反映发电机参数随转速变化的二阶有名值模型出发, 建立了脉冲发电机简化的单输入单输出线性励磁控制系统。对该系统采用基于经典控制理论的 PID 控制方法, 为提高系统的响应时间和控制精度, 设计了参数随误差自动调节的参数自适应 PID 控制。对于参数调整系数的整定, 构建了以时间权重误差积分为优化目标, 参数调整系数为优化变量的优化问题, 并使用鲸鱼优化算法 (WOA) 进行求解。最后, 对控制方法进行仿真, 并与鲸鱼优化 PID 相比, 空载起励阶跃响应的上升时间从 1.21 s 提高到了 0.88 s, 稳态误差两者相当; 负载时, 上升时间从 2.01 s 提高为 1.60 s, 稳态误差从 4.04% 降低为 1.96%。仿真结果证实了所提方法的有效性。

关键词: 脉冲发电机; 励磁控制; 自适应 PID; 鲸鱼优化; 大惯性系统

中图分类号: TM31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)03-0065-07

doi: 10.12177/emca.2023.005

Design of Self-Adaptive PID Using Whale Optimization Algorithm for Pulse Generator

ZHAO Qiangqiang, LI HuaJun, YE Qiang
(Southwestern Institute of Physics, Chengdu 610225, China)

Abstract: The large inertial impulse generator has the problem of excitation control. To solve this problem, a self-adaptive PID control method of whale optimization is proposed. According to the working characteristics of pulse generator and the basic requirements of excitation control, a simplified single-input single-output linear excitation control system of pulse generator is established based on the second-order name-value model of reaction generator parameters varying with speed. The PID control method based on classical control theory is adopted for the system. In order to improve the response time and control accuracy of the system, a parameter self-adaptive PID is designed which adjusts parameters automatically with the error. For the tuning of parameter adjustment coefficient, an optimization problem is constructed with the time weight error integral as the optimization objective and the parameter adjustment coefficient as the optimization variable, and the whale optimization algorithm (WOA) is used to solve the problem. Finally, the control method is simulated, and compared with the whale optimization PID, the rise time of the excitation response under no-load increases from 1.21 s to 0.88 s, and the steady-state error is similar. Under load, the rise time increases from 2.01 s to 1.60 s, and the steady-state error decreases from 4.04% to 1.96%. The effectiveness of the proposed method is verified.

Key words: pulse generator; excitation control; adaptive PID; whale optimization; large inertial system

收稿日期: 2022-11-08; 收到修改稿日期: 2022-12-08

作者简介: 赵强强(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为大功率脉冲发电机励磁控制。

李华俊(1970—), 男, 研究员级高级工程师, 研究方向为大功率脉冲供电技术。

叶 强(1996—), 男, 助理工程师, 研究方向为大功率脉冲发电机励磁控制技术。

0 引言

大功率脉冲发电机常应用于托卡马克装置、激光雷达、电磁轨道发射等需要短时大功率能量的场景^[1-2]。脉冲发电机机端电压的稳定性是其供电质量的重要指标,对所带负载以及所带二次电源的工作性能均起着决定性的作用。放电过程中,脉冲发电机的转速快速下降和负载电流的突然增加均会引起机端电压剧烈下降,此时只有通过施加额定励磁电压才能使其机端电压快速恢复,即脉冲发电机的励磁控制系统应具有较高的响应速度,且具有一定维持额定输出的作用。为提励磁控制的响应速度,高性能的处理器^[3-4]、优化控制^[5]应用于励磁控制系统中,但基于反馈的优化控制无法突破反馈控制固有的滞后特性,为此有文献^[6]在励磁系统中引入了前馈控制,该方法较好地提高了励磁控制的动态响应,降低了负载电流增大时的电压降落,但并未考虑发电机转速下降带来的扰动。

本文从反映发电机转速对电机参数影响的有名值模型出发,通过使用机端电压、输出电流、以及转速等脉冲发电机的运行变量来实现对发电机的暂态电动势的观测,最后得到了以变化的暂态电动势为给定值,包含电流扰动的单输入单输出线性控制系统模型。之后为提高控制系统的响应速度和稳态精度,采用了随误差动态变化的参数自适应的 PID 控制。对于自适应 PID 参数的整定,构建了以绝对误差积分(IAE)为优化目标,控制器参数为优化变量的优化问题,并使用鲸鱼优化算法(WOA)对该优化问题进行求解。最后,通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 脉冲发电机励磁控制系统模型

1.1 六相脉冲发电机

六相脉冲发电机为六相同步发电机,结构上采用了大惯性的转子轴系来储存能量。将储存在转子轴系上的动能转化为电能,供给脉冲负载,避免了大功率脉冲负载直接从电网取电而造成的对电力系统的冲击。脉冲发电机在放电的过程中由于飞轮能量的释放从而使转速持续下降,使发电机电抗参数变化。因为脉冲发电机所带的负载类型通常为无源负载,与用于电力系统的负载为恒

电压负载的同步发电机不同,所以发电机模型采用阻感参数表示的有名值二阶模型,包括励磁绕组电压方程和转子运动方程:

$$\begin{cases} T'_{d0} E'_q = E_f - E'_q - (L_d - L'_d) i_{d1} - (L_d - L'_d) i_{d2} \\ \frac{J}{p} \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e \end{cases} \quad (1)$$

式中: E'_q 为 d 轴暂态电动势; L_d 、 L'_d 为发电机 d 轴同步电感和暂态电感; L_q 为 q 轴同步电感; J 为转子轴系的转动惯量; p 为极对数; ω_r 为发电机转子电角频率; i_{d1} 、 i_{q1} 、 i_{d2} 、 i_{q2} 分别为 1Y 绕组和 2Y 绕组的 d 轴和 q 轴电流分量; T_m 、 T_e 分别为输入的机械转矩和发电机的电磁转矩,在脉冲发电机放电过程中 $T_m=0$ 。

发电机的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p E'_q (i_{q1} + i_{q2}) - (L'_d - L_q) \cdot (i_{d1} i_{q1} + i_{d1} i_{q2} + i_{d2} i_{q1} + i_{d2} i_{q2}) \quad (2)$$

发电机的输出电压可以表示为

$$\begin{cases} u_{t1\text{Max}} = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{q1}^2} \\ u_{t2\text{Max}} = \sqrt{u_{d2}^2 + u_{q2}^2} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} u_{d1} = \omega_r [L_q i_{q1} + (L_q - L_{ss}) i_{q2}] - R_s i_{d1} \\ u_{q1} = \omega_r [E'_q - L'_d i_{d1} - (L'_d - L_{ss}) i_{d2}] - R_s i_{q1} \\ u_{d2} = \omega_r [(L_q - L_{ss}) i_{q1} + L_q i_{q2}] - R_s i_{d2} \\ u_{q2} = \omega_r [E'_q - (L'_d - L_{ss}) i_{d1} - L'_d i_{d2}] - R_s i_{q2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{t1\text{Max}}$ 、 $u_{t2\text{Max}}$ 分别为 1Y 绕组电压和 2Y 绕组电压的最大值; u_{d1} 、 u_{q1} 、 u_{d2} 、 u_{q2} 分别为 1Y 绕组和 2Y 绕组的 d 轴和 q 轴电压分量; L_{ss} 为定子绕组的自漏感; R_s 为定子绕组电阻。

1.2 线性化

脉冲发电机在放电过程中转速表现为持续下降,所以 ω_r 也在不断变化,如果以暂态电动势 E'_q 和转子角频率 ω_r 为状态变量,则该系统的平衡点为 $E'_q=0$ 、 $\omega_r=0$ 。这不符合脉冲发电机励磁控制的控制任务,因此考虑只将暂态电动势 E'_q 作为状态变量,而将转子角频率 ω_r 视为扰动。此外当六相脉冲发电机 1Y 和 2Y 对称运行时,两者的运行状态相同,所以直将其中一个 Y 的机端电压最大值作为输出。从而使得脉冲发电机系统为一个包含扰动输入的单输入单输出非线性系统。即:

$$\begin{cases} T_{do}' \dot{E}_q' = E_f - E_q' - 2(L_d - L_d') i_{d1} \\ u_{t1\text{Max}} = \sqrt{u_{d1}^2 + u_{d2}^2} \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出脉冲发电机状态方程不仅为线性方程,而且其不包含扰动 ω_r 。扰动变量 ω_r 和系统的非线性环节均集中在输出方程中,而输出方程为代数方程,显然易从输出方程中反解出状态变量:

$$E_q' = \frac{\sqrt{u_{d1}^2 - u_{d0}^2} + u_{q0}}{\omega_r} \quad (6)$$

式中: $u_{d0} = \omega_r [L_q i_{q1} + (L_q - L_{ss}) i_{q2}] - R_s i_{d1}$; $u_{q0} = \omega_r [L_d' i_{d1} + (L_d' - L_{ss}) i_{d2}] + R_s i_{q1}$; u_{t1} 为机端电压幅值。

最后得到包含励磁功率单元和测量回路的脉冲发电机励磁控制系统的控制框图如图1所示。

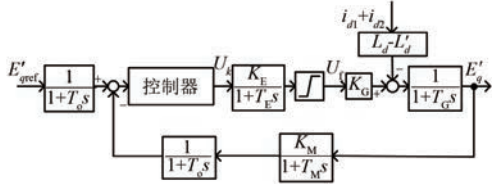


图1 脉冲发电机励磁控制系统框图

E'_{ref} 和 E'_q 可以根据机端电压给定值 u_{tref} 和机端电压的测量值 u_{tm} 计算得出。

从简化后的励磁控制系统的框图图1可以看出,该控制系统为包含扰动输入的单输入单输出线性系统,从而便可以运用经典控制理论的系统设计和分析方法对系统进行矫正、分析,且控制器的设计不会受到系统工作点的影响。系统的传递函数为多个惯性环节串联,发电机模型的惯性时间常数较大,其余均为小惯性环节,所以整个系统表现为大惯性系统。

2 鲸鱼优化的自适应PID控制

对于单输入单输出线性系统的控制,常采用基于经典理论系统矫正的PID控制器。PID控制器原理简单、实现方便,在工业控制领域具有广泛的应用。发电机带脉冲负载时,其工作时间很短,在几毫秒到几秒之间,对控制器的快速性有着更高的要求。而对于大惯性系统的控制,为提高系统的动态响应能力,往往采用高增益的控制器,控制器的增益过大会使系统对噪声扰动变得敏感,不利于系统的稳定运行。因此,本文根据脉冲发

电机的工作特点以及PID控制器的原理,提出一种基于误差的参数自适应PID。当系统的误差较大时,设计控制器参数使控制器增益较高,使系统的误差快速减小;当系统的误差较小时,控制器恢复正常的工作状态,维持系统的稳定运行。

通过PID控制器参数的动态调节,提高大惯性系统的动态响应,同时保证系统正常运行的稳定性。但这意味着控制器引入更多的参数,因为PID各个环节输出调节的同时,还要进行各环节参数的调节,使控制器参数的整定更加复杂。WOA是一种模拟座头鲸捕食行为的智能搜索算法,在PID控制器的参数寻优能力较好。因此,本文使用WOA对参数自适应PID控制器的多个参数进行寻优。

2.1 参数自适应PID控制

位置式离散PID的控制规律:

$$u(k) = K_p e(k) + K_I T_s \sum_{i=1}^k e(i) + \frac{K_D}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \quad (7)$$

PID控制有比例环节、积分环节以及微分环节构成,相应的 K_p 、 K_I 、 K_D 为比例系数、积分系数和微分系数,PID控制的整定即为确定 K_p 、 K_I 、 K_D 的值,使系统达到预期的控制效果:

(1) 比例环节:直接根据当前的误差进行控制,误差越大时比例环节的输出也越大,当误差为0时,比例环节的输出为0。比例系数 K_p 用来调整比例控制的权重,当比例系数过小时,当前的误差项在输出控制量占比较小,从而使系统的误差无法快速消除,快速性较差;当比例系数过大时,会使系统对于误差信号过于敏感,从而发生高频振荡。

(2) 积分环节:根据误差的累积量进行调节,只要当误差存在时,积分环节的输出也一直变化,直到误差为0时,积分环节的输出保持为恒定值。当积分系数过小时,累计误差的控制效果不够明显,从而使得稳态时系统的稳态精度较低;当积分系数过大时,积分项控制输出太大,且由于积分的延迟特性使系统发生低频振荡,此外还会使积分环节进入饱和,从而一段时间内积分环节的调节效果失效。

(3) 微分环节:根据误差的变化量进行调节,当误差减小时,微分环节的输出为负;当误差增大

时,输出为正,微分环节表现为对误差变化的抑制,起到阻尼的作用;当微分系数过大时,使控制输出的抑制效果增强,从而使误差变化缓慢,使系统的调节时间增大。对于一般的控制系统,往往设置较小的 K_D ,或者使 $K_D=0$ 构成PI控制。

从以上分析可以得出,想要提高系统的快速性,需要增大 K_P 、 K_I ,减小 K_D ,而 K_P 、 K_I 的增大又会使系统引起不同程度的振荡,这与系统的快速性矛盾。而脉冲发电机的工作特点又需要系统有较好的动态性能,使脉冲发电机的机端电压快速达到负载的供电需求,同时也减少系统在调整过程中的能量损耗,提高脉冲发电机的输出效率。因此,考虑使用参数自调节的PID控制方法:

(1) 当系统的误差较大时,采用较大的比例系数 K_P 和积分系数 K_I 来增大控制器的输出,使控制器快速达到饱和,实现误差较大时系统的快速响应。

(2) 当系统的误差较小时,使用稳态运行的PID控制参数,来提高系统的稳定性,抑制振荡。

从而得到参数自适应PID控制规律,如图2所示。

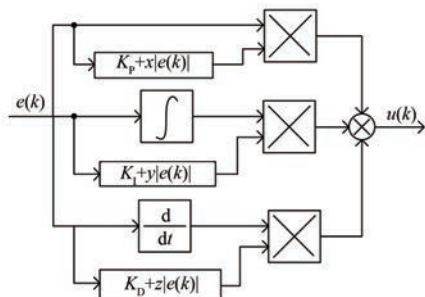


图2 自适应PID控制原理框图

据图2有表达式如下:

$$u(k) = [K_P + x |e(k)|]e(k) + [K_I + y |e(k)|]T_s \sum_{i=1}^k e(i) + [K_D - z |e(k)|] \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \quad (8)$$

式中: $K_P+x|e(k)|$ 、 $K_I+y|e(k)|$ 、 $K_D-z|e(k)|$ 分别为自适应比例系数、自适应积分系数、自适应微分系数。

在调节系数中通过引入当前误差项,使控制器在误差较大时,获得较大的比例系数和积分系数,以及较小的微分系数,使控制器输出快速增

大,从而实现快速调节的目的。而当误差消失之后,调节系数又恢复到原来的值,保证了系统的稳定运行,而不发生振荡。

2.2 WOA 设计

2.2.1 算法原理

WOA 是一种模拟座头鲸捕食行为的智能优化算法。座头鲸在捕食过程通过吐出螺旋上升的气泡将猎物包围并逐渐收紧,从而将聚集到气泡网顶端的所有猎物吞食。通过模拟座头鲸气泡网捕食行为,来更新智能个体的位置,该智能搜索方法称为 WOA,该算法的流程如图3所示。

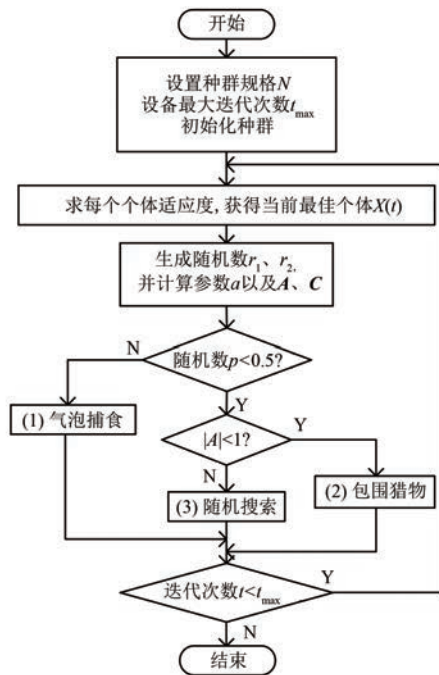


图3 WOA 原理流程图

参数: $A = 2a \cdot r_1 - a$, $C = 2r_2$, 图3中 r_1 和 r_2 是 $[0,1]$ 的随机向量, a 随着迭代次数的增加从2下降到0。

WOA 在搜索过程中通过随机数 p 和随机向量 A 来决定智能个体的行为:气泡网捕食、包围猎物以及随机搜索。

(1) 气泡网捕食。智能个体以螺旋方式向最佳个体靠近:

$$X(t+1) = D' \cdot e^{Bl} \cdot \cos(2\pi l) + X^*(t) \quad (9)$$

式中: D 为智能个体到目标个体之间的距离向量,该阶段的目标个体为最佳个体, $D = |X^*(t) - X(t)|$; B 为螺旋形状参数; l 为 $[-1,1]$ 之间的随机数。

(2) 包围猎物。使所有智能个体向最佳个体

线性靠近:

$$X(t+1) = X^*(t) = A \cdot D \tag{10}$$

式中: $D' = |CX^*(t) - X(t)|$ 。

(3) 随机搜索。使智能个体向随机个体线性靠近:

$$X(t+1) = X_{rand}(t) - A \cdot D \tag{11}$$

式中: $D'' = |X_{rand}(t) - X(t)|$ 。

2.2.2 问题描述

控制方法参数优化的目的是为了提高控制器的性能,改善系统的动态响应指标。常见的控制系统的优化函数有误差绝对值积分、带时间权重的误差绝对值积分、误差平方积分和带时间权重的误差平方积分。为了更好地反映大惯性系统的快速性的特征,本文采取带时间权重的误差绝对值积分,于是优化目标为

$$\min F = \int_{t_0}^{t_1} t |e(t)| dt \tag{12}$$

优化变量为式(8)所示的控制方法调节系数 K_p 、 K_i 、 K_d 以及调节系数 x 、 y 、 z 。

等式约束为图2所示的控制系统的框图和式(8)所示的控制方法。

不等式约束:

$$0 < K_p, K_i, K_d, x, y, z < 1 \tag{13}$$

对于 WAO-PID 的优化,其不等式约束为

$$0 < K_p, K_i, K_d < 2 \tag{14}$$

2.2.3 优化结果

优化结果如图4和表1所示。

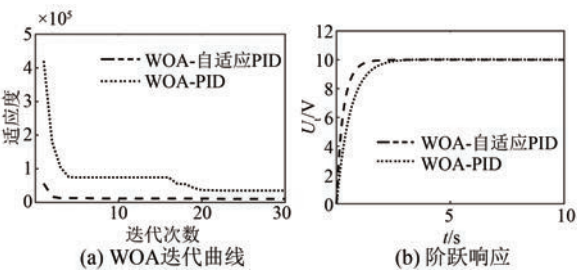


图4 WOA 优化结果

表1 优化结果参数

参数名称	WOA-自适应 PID	WOA-PID
比例系数 K_p	$0.35 + 0.42 e(k) $	2
积分系数 K_i	$1 + e(k) $	0.54
微分系数 K_d	$0.17 - 0.81 e(k) $	0.005

2.3 自适应 PID 励磁控制

(1) 当误差较大时,为了快速减小稳态误差,使用了较大的比例系数和积分系数,较大的积分系数会使积分器快速进入深度饱和,从而使控制器的输出为最大值或者最小值,只有当积分器退饱和之后,控制器才能重新发挥调节控制的作用。在使用较大的积分系数时防止积分器进入饱和,采用抗饱和积分环节。抗饱和积分环节通过在积分环节中减去过饱和量,当积分器的积分值超过控制器输出的最大或最小限制时,减去的饱和量使积分器快速退饱和,从而抑制积分环节进入饱和状态。

(2) 从式(1)可以看出,负载电流也是系统的扰动,所以为了提高对负载电流的响应速度,在控制器中引入负载电流作为补偿。

(3) 由于控制规律以暂态电动势作为反馈量和给定量,而暂态电动势的计算需要负载电流和发电机的参数,这些数据较难获取而且与发电机通过电机试验获得的试验参数与运行参数有一定的差距,这些参数一定程度上会影响到控制器的性能,此外过于复杂的运算还会使计算速率下降,降低控制器的实时性,因此只用 U_i/ω_r 来代表暂态电动势,这样一方面极大简化了计算,而且也在控制信号中直接反映了脉冲发电机的转速变化。

结合以上三点,最后得出的控制器结构如图5所示。

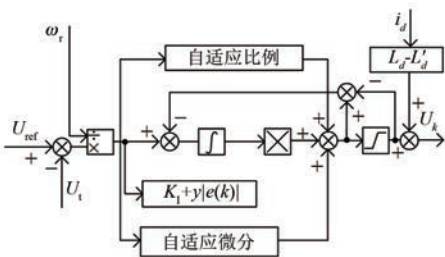


图5 自适应 PID 励磁控制方法

3 仿真结果

为了验证本文所提方法的有效性,以一台300 MVA 的脉冲发电机带阻感负载模型进行仿真,系统参数如表2所示。

设置发电机的初始转速为500 r/min。

表 2 仿真系统参数

参数名称		参数值
励磁功率	放大系数 K_E	40
	时间常数 T_E/s	0.002 67
测量回路	放大系数 K_M	1
	时间常数 T_M/s	0.002
发电机	d 轴时间常数 T_{do}/s	3.879
	d 轴同步电感 L_d/H	2.766×10^{-4}
	d 轴暂态电感 L'_d/H	6.627×10^{-5}
	q 轴同步电感 L_q/H	1.745×10^{-4}
	转动惯量 $GD^2/(kg\cdot m^2)$	7.3×10^6
负载	电阻 R/Ω	3.899×10^{-2}
	电阻 R/Ω	$1.083\ 2\times 10^{-4}$

3.1 空载试验

图 6 为脉冲发电机空载起励的阶跃响应,在 $t=0$ 时突加给定。可以看出 WOA-PID 和 WOA-自适应 PID 均可以实现无静差调节,但是 WOA-自适应 PID 的响应速度明显高于 WOA-PID。空载起励阶跃响应的时域性能指标如表 3 所示。

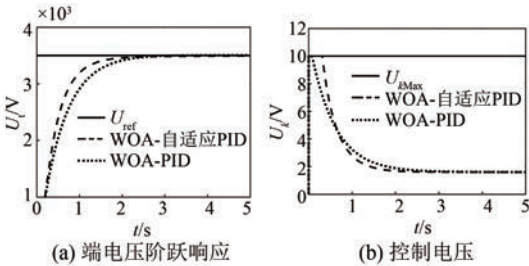


图 6 空载起励仿真结果

表 3 空载起励性能指标

参数名称	WOA-自适应 PID	WOA-PID
上升时间 t_p/s	0.88	1.21
95% 调节时间/s	1.23	1.65
98% 调节时间/s	1.67	2.10
稳态误差 ($t>3\ s$)/%	<0.5	<0.5

3.2 负载试验

脉冲发电机有两种带负载的方式,一种是发电机带负载起励,起励过程中负载电流逐渐上升;另一种是发电机经过励磁阶段是机端电压达到额定值之后,再将负载投入,负载电流瞬间上升为较大值。为模拟脉冲发电机的工作情况,下面分别

仿真重载起励和空载起励后突加负载。

(1) 重载起励。脉冲发电机带负载起励,在 $t=0$ 时突加给定。图 7(a) WOA-自适应 PID 在 2 s 左右时以及接近给定值并趋于稳定,而 WOA-PID 在 3 s 时才趋于稳定,另外 WOA-自适应 PID 的稳态误差明显小于 WOA-PID 的稳态误差。图 7(b) 中,两种控制方法均会产生超过额定输出的控制电压,原因是引入了负载电流补偿;WOA-自适应 PID 的控制方法额定输出的保持时间要长于 WOA-PID,机端电压在误差较大时有更好的响应速度。图 7(c) 为发电机的输出电流,即使发电机的机端电压趋于稳定,但是输出电流明显有一个呈上升增大的趋势,原因是发电机转速的下降使负载以及发电机的电抗减小。重载起励阶跃响应如表 4 所示。

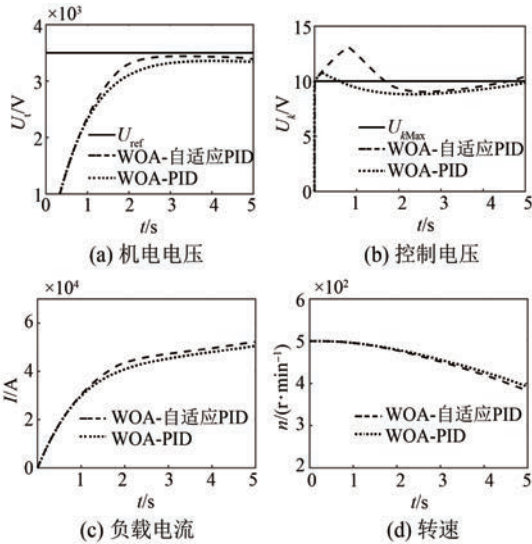


图 7 重载起励阶跃响应

表 4 重载起励阶跃响应时域性能指标

参数名称	WOA-自适应 PID	WOA-PID
上升时间 t_p/s	1.60	2.01
95% 调节时间/s	2.06	3.06
98% 调节时间/s	2.77	无
稳态误差 ($t=4\ s$)/%	1.96	4.04

(2) 突加负载。图 8 为发电机空载起励,在 $t=1\ s$ 时突加负载的仿真结果。可以看出由于负载的接入,输出电流突然增大使发电机的机端电压严重下降,出现了较大的误差,从图 8(b) 可以看出,该误差在有电流补偿的情况下,WOA-PID

并未使控制电压达到额定输出,而 WOA-自适应 PID 达到了额定输出并较好地维持了一定的时间,使得机端电压有较快的上升速率。

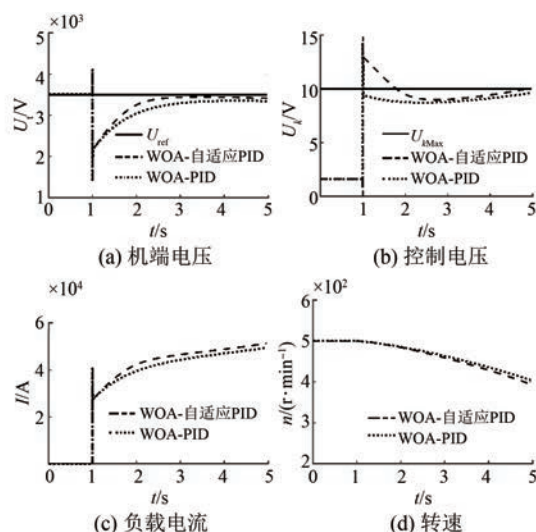


图8 突加负载机端电压恢复

3.3 参数扰动

为了验证所提控制方法的鲁棒性能,以发电机参数变化进行仿真,图9(a)为发电机时间常数分别是标称值、110%标称值、90%标准值时,空载起励后在 $t=5\text{ s}$ 突加负载,发电机端电压的波形对比。图9(b)为发电机的 d 轴参数分别增加10%和减小10%的对比情况。可以看出当参数改变时,脉冲发电机机端电压的变化,与参数为标称值情况下相比具有较好的致性,且误差在合理的范围之内。因此,所提控制方法对发电机的参数具有一定的鲁棒性。

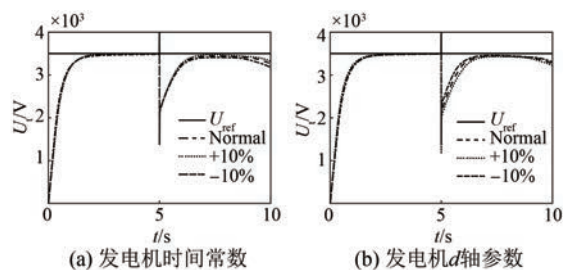


图9 发电机参数扰动

4 结 语

脉冲发电机励磁控制的主要任务是在保证机端电压的稳态误差和响应的快速性。本文提出了参数自适应的 PID 控制方法,控制器在误差较大时有较大的增益,保证了系统的快速响应;在误差较小时,控制器的增益恢复为较小的值,来保证系统的稳定性。对于引入的多个调节系数,使用 WOA 来对其进行寻优。最后通过仿真脉冲发电机空载起励、负载起励、突加负载的情况,结果显示自适应 PID 的效果明显优于传统的 PID 控制方法:上升时间能够提高为原来的 20% 以上,负载时的稳态误差也从原来的 4% 左右降低为 2%。稳态误差降低为原来的 50%。最后在发电机参数扰动的情况下进行仿真,证明了控制方法对参数扰动具有一定的鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 宣伟民,王英翹,李华俊,等. HL-2M 装置供电系统研制[J]. 核聚变与等离子体物理, 2021, 41(增2): 437.
- [2] 孙志刚,刘宇鹏,郝兴斌. 电磁轨道发射用脉冲电源系统的发展与现状[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(7): 49.
- [3] 王驰,李华俊,卜明南. 基于 CompactRIO 的脉冲发电机励磁调节器[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(7): 34.
- [4] 叶强,李华俊,李维斌. 脉冲发电机励磁控制器的先进触发控制[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 37.
- [5] MOSAAD A M, ATTIA M A, ABDELAZIZ A Y. Whale optimization algorithm to tune PID and PIDA controllers on AVR system [J]. Ain Shams Engineering Journal, 2019, 10(4): 755.
- [6] 翟小飞,马伟明,欧阳斌,等. 前馈控制在脉冲整流发电机数字励磁控制系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 151.