

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

赵致远, 陈志辉, 茆林仪.
基于粒子群算法的无刷交流发电系统
PI参数整定.
电机与控制应用, 2022, 49(1): 96.

MTST系列 电机型式试验系统



MTST系列 电机型式试验系统①



MTST系列 电机型式试验系统②



MTST系列 电机型式试验系统③



MTST系列 电机型式试验系统④



MTST系列 电机型式试验系统⑤

CS-XY型电机出厂试验测试系统



DZC系列电机定子性能综合测试仪



TZ型电机堵转转矩测试仪



RZJ系列绕组匝间冲击耐电压测试仪



SEARI
上电科



地址: 上海市武宁路505号 传真: 021-62163904

电话: 021-62574990-436、18918357509

邮编: 200063

邮箱: wangcj@seari.com.cn

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 www.seari.com.cn

基于粒子群算法的无刷交流发电系统 PI 参数整定

赵致远, 陈志辉, 茆林仪

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 在 MATLAB/Simulink 软件中搭建三级式无刷交流同步发电机调压控制系统模型时, 需要选取合适的 PI 参数使系统的输出电压满足相应的指标。考虑到传统的 PI 参数整定方法计算复杂, 且计算出的参数需要经过多次调整才能满足系统指标, 设计了一种基于粒子群(PSO)算法整定 PI 参数的方法, 用以提高三级式同步发电机调压控制系统模型的 PI 参数整定效率。仿真结果验证了 PSO 算法整定无刷交流发电系统 PI 参数的可行性, 可以根据需要的输出电压指标整定合适的 PI 参数。

关键词: 三级式同步发电机; 调压控制; PI 参数整定; 粒子群算法

中图分类号: TM31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)01-0096-07

doi: 10.12177/emca.2021.164

PI Parameter Setting of Brushless AC Power Generation System Based on Particle Swarm Optimization

ZHAO Zhiyuan, CHEN Zhihui, MAO Linyi

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,
Nanjing 211100, China)

Abstract: When a three-stage brushless AC synchronous generator voltage regulation control system model is built in MATLAB/Simulink software, it is necessary to select appropriate PI parameters to make the output voltage of the system meet the corresponding indicators. Considering that the traditional PI parameter setting method is complex and the calculated parameters need to be adjusted many times to meet the system indicators, a method for PI parameter setting based on the particle swarm optimization (PSO) algorithm is designed to improve the PI parameter tuning efficiency of the three-stage brushless AC synchronous generator voltage regulation control system model. The simulation results verify that the PSO algorithm to adjust the PI parameters of the brushless AC power generation system is feasible, and the appropriate PI parameters can be adjusted according to the required output voltage indicators.

Key words: three-stage synchronous generator; voltage regulation control; PI parameter setting; particle swarm optimization (PSO)

0 引言

三级式无刷交流同步发电机具有维护成本低、可靠性高等优点, 主要组成部分有副励磁机、主励磁机、旋转整流器和主发电机。其中副励磁

机为永磁同步发电机, 主励磁机和主发电机为电励磁同步发电机, 旋转整流器的作用是取代电刷滑环使电机成为无刷结构^[1-2]。

粒子群算法适合求解多目标优化问题, 并且优化方法不依赖精确数学模型, 对求解的问题特

收稿日期: 2021-10-18; 收到修改稿日期: 2021-12-15

作者简介: 赵致远(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为三级式电机发电控制技术。

陈志辉(1972—), 男, 博士, 教授, 研究方向为航空电源系统、电机及其控制技术。

征及连续性不敏感,能够很好地解决非凸性或者不连续问题。其次,粒子群算法可以同时处理多个优化变量,从而获得一组有效解^[3-4]。国外学者将 PSO 算法应用到电机调速领域^[5]。文献[5]展示了在直流电机调速中利用粒子群优化算法设计了一种用于永磁直流电机驱动系统的最优自整定 PID 控制器。改进后的 PID 控制器实现了系统绝对误差的最小化。文献[6]展示了在永磁同步电机调速领域,采用自适应加权粒子群算法对模糊逻辑控制器的隶属函数的参数和规则进行优化^[6],通过仿真结果表明设计的控制器具有良好的鲁棒性和动态响应能力。文献[7]为提高同步电机励磁调节器的响应速度及鲁棒性,提出一种基于粒子群优化方法的同步电机分数阶励磁控制器的设计方法。使用分数阶系统理论推导了同步电机励磁调节器的分数阶传递函数模型,在此基础上使用粒子群优化算法对分数阶控制器的参数进行优化整定。文献[8]将通过粒子群优化算法后的分数阶 PI- λ 控制器应用在双闭环直流调速系统的速度调节器上^[8],以提高调速系统的控制性能。仿真研究结果表明,采用 PSO 分数阶 PI- λ 控制器的双闭环直流调速系统的稳定性、快速性和鲁棒性均优于普通 PI 控制器的系统。

在搭建三级式无刷交流同步发电机调压控制系统模型时,选择的一般是电压、电流双闭环 PI 控制结构。三级式无刷交流同步发电机是一个非线性的系统,同时存在高耦合度以及多变量的问题,使得电机系统很难用数学模型来精确地描述^[9]。本文在传统的 PI 控制器基础上,运用 PSO 算法对控制器进行优化。在突加、突卸负载时观察双闭环 PI 控制方式下系统的动态性能,仿真验证 PSO 算法对于复杂电机控制系统的调节能力,为推广到一般的电压电流双闭环发电调压系统提供参考。

1 三级式无刷交流同步发电机的数学模型及仿真模型

1.1 数学模型

三级式无刷交流同步发电机的主发电机结构为传统的电励磁同步发电机,主励磁机的结构为旋转电枢式三相同步发电机,副励磁机的结构为永磁同步发电机。其结构示意图如图 1 所示^[10]。

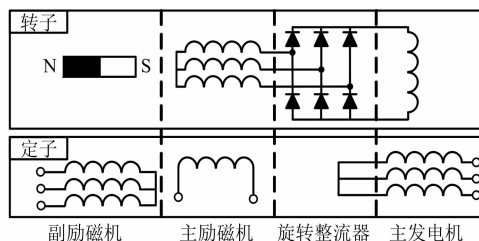


图 1 三级式无刷交流同步发电机结构图

在发电调压系统中,副励磁机为主励磁机提供励磁电流,并不参与调压控制,本节只对主发电机与主励磁机的数学模型进行分析。主发电机和主励磁机均为电励磁同步发电机,不同之处在于是否存在阻尼条以及主发电机的励磁绕组在转子上而主励磁机的励磁绕组在定子上,二者建模方法一致。以主励磁机为例,一对极结构如图 2 所示。

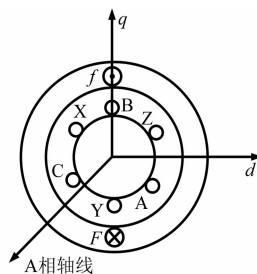


图 2 主励磁机模型示意图

将电机绕组的差异、磁滞、饱和等因素忽略不计,设转子绕组电阻为 R_r ,励磁绕组电阻为 R_f , d 轴、 q 轴的阻尼绕组电阻分别为 R_{od} 和 R_{oq} 。列出三相同步电机定转子电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{oq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ I_f \\ i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_f \\ \psi_{od} \\ \psi_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_A 、 u_B 、 u_C 为三相电压; i_A 、 i_B 、 i_C 为三相电流; ψ_A 、 ψ_B 、 ψ_C 为三相磁链; p 为微分算子。

将定转子电压方程从 ABC 三相坐标变换到 dq 两相坐标,可以得到在 dq 坐标下同步电机电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \\ U_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{od} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{oq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ I_f \\ i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_f \\ \psi_{od} \\ \psi_{oq} \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_{rq} \\ \psi_{rd} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

磁链方程为

$$\begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_f \\ \psi_{od} \\ \psi_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma r} + L_{md} & 0 & L_{md} & L_{md} & 0 \\ 0 & L_{\sigma r} + L_{mq} & 0 & 0 & L_{mq} \\ L_{md} & 0 & L_f & L_{md} & 0 \\ L_{md} & 0 & L_{md} & L_{od} & 0 \\ 0 & L_{mq} & 0 & 0 & L_{oq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ I_f \\ i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $L_{\sigma r}$ 为等效两相电枢绕组漏感; L_{md} 为 d 轴电枢反应电感; L_{mq} 为 q 轴电枢反应电感; L_{od} 和 L_{oq} 分别为 d 轴阻尼绕组自感和 q 轴阻尼绕组自感; L_f 为电机的励磁绕组电感, $L_f = L_{\sigma f} + L_{md}$, 其中 $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组漏感。

为了便于建模分析, 忽略阻尼绕组的影响, 将电压方程进行降阶:

$$\begin{bmatrix} u_{rd} \\ u_{rq} \\ U_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ I_f \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_f \end{bmatrix} + \omega \begin{bmatrix} -\psi_{rq} \\ \psi_{rd} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

磁链方程变为

$$\begin{bmatrix} \psi_{rd} \\ \psi_{rq} \\ \psi_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{\sigma r} + L_{md} & 0 & L_{md} \\ 0 & L_{\sigma r} + L_{mq} & 0 \\ L_{md} & 0 & L_f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

同理可以得到主发电机的数学模型及数学

方程。

1.2 仿真模型

根据 1.1 节得到的主励磁机和主发电机的数学模型和方程, 在 Simulink 的电励磁同步电机模型中输入对应参数即可得到电机的仿真模型, 如图 3 所示。主发电机模型的输入有电机转速以及励磁电压 V_f , 励磁电压 V_f 由主励磁机的电枢绕组经过旋转整流器后通入主发电机的励磁绕组得到。同理可得到主励磁机的电机模型。

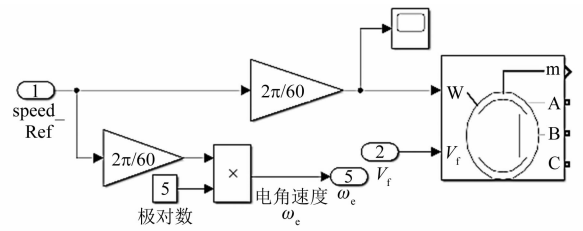


图 3 主发电机仿真模型

永磁副励磁机的三项电枢绕组输出三相交流电经过整流电路后通过直流母线 V_{DC} 给控制器以及主励磁机的励磁绕组 L_f 供电, 励磁功率电路如图 4 所示。通过控制斩波管 VT2 实现电压的自动调节, VT1 作为灭磁功率管在调压系统需要将电压骤降时关断, 正常调压时处于开通状态。二极管 VD1、VD2 起到续流作用。

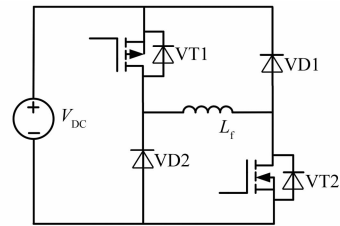


图 4 主励磁机励磁功率电路

三级式无刷交流同步发电机调压系统由外环电压环和内环电流环构成, 电压环是一个 PI 调节器, 调节输出电压为期望电压, 用于抵抗负载扰动、发电机参数变化带来的扰动; 电流环也是一个 PI 调节器, 目的是让电流快速跟随给定值, 以获得更好的动态特性。电流环输出占空比给到图 4 中的斩波管 VT2, 三级式同步发电机调压控制系统框图如图 5 所示。

发电时, 电流先达到容许最大值, 发电机输出

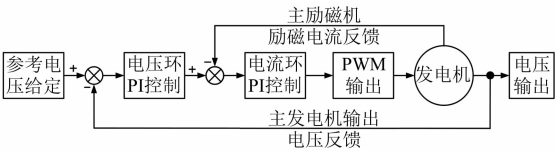


图5 三级式同步发电机调压控制系统框图

电压以最大的加速度进行建压。当到达期望电压时让励磁电流迅速减小并达到负载所需电流,发电机输出三相交流电,系统维持期望电压不变。搭建三级式无刷交流同步发电机调压控制系统模型如图6所示。

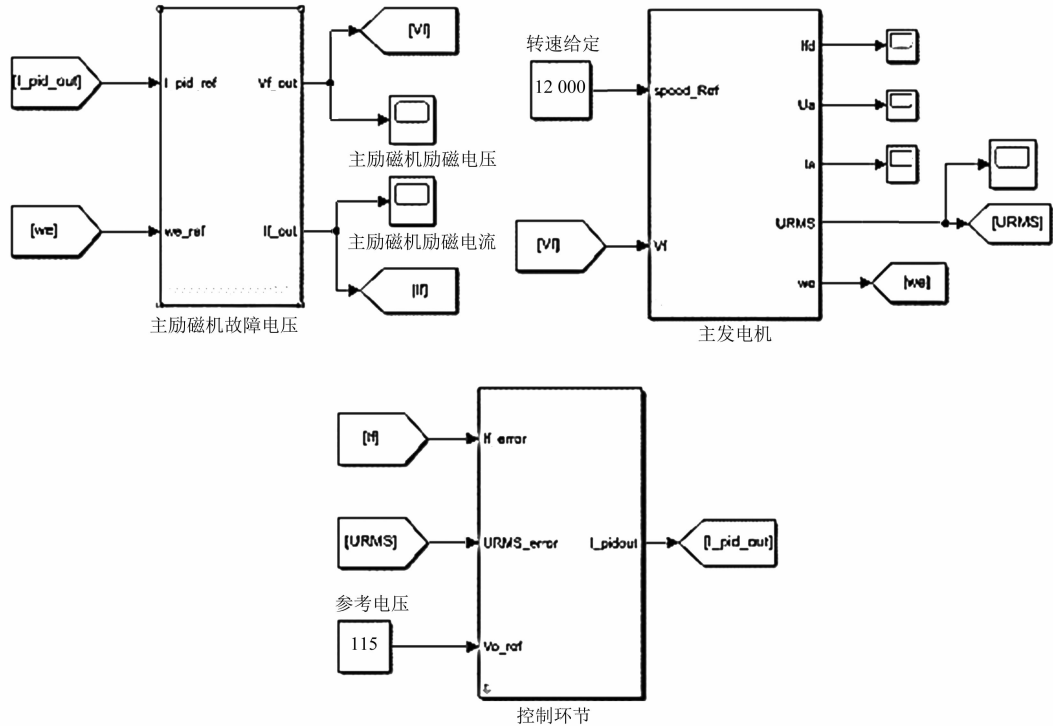


图6 无刷交流调压控制系统模型

由于三级式无刷交流同步发电调压系统存在非线性、强耦合以及多变量的问题,难以用准确的离散数学模型表达出来,从而导致调压控制系统的PI参数难以确定。本文在第2节利用粒子群算法不依赖精确数学模型的特性,通过多次迭代计算寻得系统最优的PI参数,以避免PI参数整定时因为系统非线性、强耦合以及多变量所带来的不便。

2 基于 PSO 算法的三级式发电机调压系统 PI 参数整定

2.1 PSO 算法原理

在进行 PSO 算法设计时,需要设置粒子群的种群规模 m 、迭代次数 n 、参数维度 N 以及每个参数的取值范围,同时设定惯性系数 c_1 、 c_2 、 ω 。初始位置是随机的,输入的向量 x 必须有一定范围:

$$\begin{cases} x_{\min}^{(1)} < x_1 < x_{\max}^{(1)} \\ x_{\min}^{(2)} < x_2 < x_{\max}^{(2)} \\ \vdots \\ x_{\min}^{(N)} < x_N < x_{\max}^{(N)} \end{cases} \tag{6}$$

设定每个粒子初始速度设为 $v_0=0$,第 j 个粒子 ($1 \leq j \leq m$) 下一次迭代的速度可以表示为

$$v^{(j)} = \omega \cdot v_0 + c_1 \cdot rand \cdot (P^{(j)} - X^{(j)}) + c_2 \cdot rand \cdot (P_c - X^{(j)}) \tag{7}$$

式中: $rand$ 表示 $(0,1)$ 随机数; v_0 表示上一个时刻粒子的速度,第一项代表粒子惯性因子,因为下一次的迭代次数保留了上一次的速度信息;第二项代表粒子最优因子, $P^{(j)}$ 为第 j 个因子在之前所有迭代中自适应度最高的位置。第三项代表社会因子, P_c 为种群在之前所有迭代次数中自适应度最高的位置。一般情况下,取 $\omega=1$, $c_1=c_2=2$ 。当种群规模较大时,可以让 ω 的值随迭代次数减小以

增加收敛速度。

按照速度公式(7)计算下一个时刻的速度和粒子位置,对于第 j 个粒子, $k+1$ 次迭代的位置 $X_{k+1}^{(j)}$ 和第 k 次迭代的位置 $X_k^{(j)}$ 以及速度 v_{k+1}^j 的关系可以表示为

$$X_{k+1}^{(j)} = X_k^{(j)} + v_{k+1}^j \cdot dt \quad (8)$$

则第 $k+1$ 次迭代中适应度最高的粒子位置表示为 $P_G^{(k+1)}$,最终的 P_G 则为:

$$P_G = \begin{cases} P_G^{(k)}, F(P_G^{(k)}) > F(P_G^{(k+1)}) \\ P_G^{(k+1)}, F(P_G^{(k)}) < F(P_G^{(k+1)}) \end{cases} \quad (9)$$

进一步可以计算出每个粒子历史最优位置 $P^{(j)}$:

$$P^{(j)} = \begin{cases} P_k^{(j)}, F(P_k^{(j)}) > F(P_{k+1}^{(j)}) \\ P_{k+1}^{(j)}, F(P_k^{(j)}) < F(P_{k+1}^{(j)}) \end{cases} \quad (10)$$

2.2 PSO 算法 PI 参数整定

对三级式同步发电机的模型进行修改,方便基于 PSO 算法的 M 文件对其进行调用。需要整定电压环的 PI 控制器参数 K_{pv} 和 K_{iv} 以及电流环的 PI 控制器参数 K_{pi} 和 K_{ii} ,通过运行 M 函数实时调整模型中的 PI 参数进行动态仿真。需要对迭代次数、种群规模以及参数最大最小值限幅进行设置。励磁电流环的目的是让电流快速跟随给定值,以获得更好的动态特性,因此只需设置励磁电流的最大幅值,期望励磁电流上升越快越好。系统空载建压完成后,施加一个阶跃响应将系统由空载切换至额定负载容量,电压稳定后再由额定负载容量切换至空载。将加载时发电机输出电压的最大降落值记为动态降落 $\Delta C_{\max}$,发电机输出电压恢复到 (115 ± 1) V 所需要的时间记为加载恢复时间 t_{rv} 。将卸载时发电机输出电压的超调量记为 σ ,发电机输出电压恢复到 (115 ± 1) V 所需要的时间记为卸载恢复时间 t_{fv} 。构造评价函数如下所示:

$$f = \ln\left(\frac{\Delta C_{\max}}{\Delta C_{\max}^*} + 1\right) + \ln\left(\frac{t_{rv}}{t_{rv}^*} + 1\right) + \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma^*} + 1\right) + \ln\left(\frac{t_{fv}}{t_{fv}^*} + 1\right) \quad (11)$$

式中: $\Delta C_{\max}^*$ 和 t_{rv}^* 分别为期望的电压动态降落和加载恢复时间; σ^* 和 t_{fv}^* 分别为期望的电压超调量和卸载恢复时间。

利用这四个参数组合为评价函数,使评价函数越小仿真得到的 PI 参数就越能够满足控制系

统的指标。具体详细的算法流程如下:

(1) 设定电压环 PI 控制器参数 K_{pv} 、 K_{iv} 以及电流环 PI 控制器参数 K_{pi} 、 K_{ii} 的初始值和取值范围,设置粒子群的种群规模 m 、迭代次数 n 、参数维度 N ,设定每个粒子的初始速度和初始位置,同时设定惯性系数 c_1 、 c_2 、 ω ;

(2) 在 M 文件中调用 Simulink 模型,将初始化的 PI 参数进行单次加载、卸载仿真,得到电压动态降落 $\Delta C_{\max}$ 和加载恢复时间 t_{rv} ,电压超调量 σ 和卸载恢复时间 t_{fv} ,根据目标函数 f 计算每个粒子的适应值;

(3) 对于每一个粒子,将其适应值和其历史最优位置的适应值 $P^{(i)}$ 进行比较,若较好,则将其作为当前的最优位置;将其适应值和种群的最优位置的适应值 P_G 进行比较,若较好,则将其作为种群的最优位置;

(4) 对种群中的粒子速度和位置进行更新。若满足迭代终止条件,则输出四个 PI 参数的最优解;否则返回步骤(2)进行下一轮迭代计算。

PSO 算法 M 文件设计流程如图 7 所示。

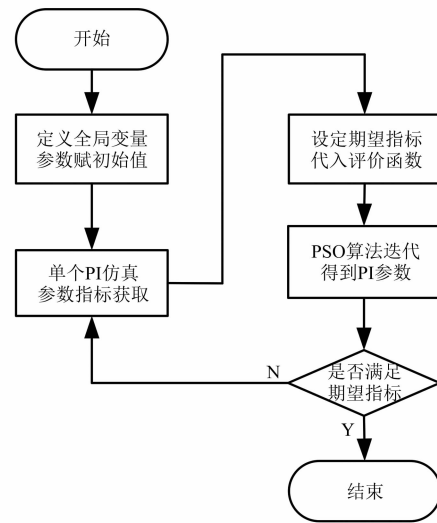


图 7 PSO 算法 M 文件设计流程图

3 仿真优化结果及分析

3.1 固定惯性因子的仿真结果

设定仿真时间 1.5 s, 给定参考电压有效值 115 V/400 Hz, 转速 12 000 r/min, 施加的负载为纯阻性负载。将迭代次数设置为 10, 种群规模设置为 100, 电压环的 PI 控制器参数 K_{pv} 的取值范

围为 $[0, 10]$, K_{iv} 的取值范围为 $[0, 60]$; 电流环的 PI 控制器参数 K_{pi} 的取值范围为 $[0, 20]$, K_{ii} 的取值范围为 $[0, 120]$ 。将期望的电压动态降落 $\Delta C_{\max}^*$ 和电压超调量 σ 设置为 21.7%, 期望的加载恢复时间 t_{rv}^* 和卸载恢复时间 t_{fr}^* 设置为 30 ms。迭代后得到的 PI 参数 $K_{pv} = 4.2$, $K_{iv} = 11.5$, $K_{pi} = 13.4$, $K_{ii} = 25.8$ 。仿真结果如图 8 所示。

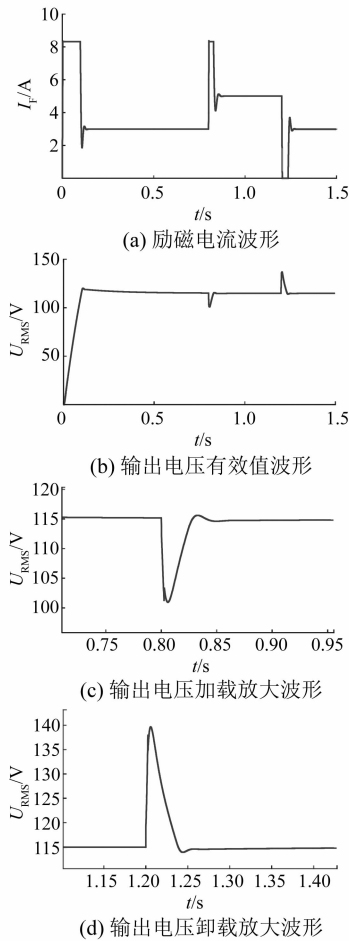


图 8 固定惯性因子仿真结果

由仿真结果可以得到, 励磁电流在空载建压启动和系统加载后能够迅速上升到允许的最大值。在 0.8 s 时对系统实施从空载到额定负载的加载阶跃, 仿真得到的电压动态降落 $\Delta C_{\max} = 11.3\%$, 加载恢复时间 $t_{rv} = 23$ ms。在 1.2 s 时对系统实施从额定负载到空载的仿真测试, 仿真得到的电压超调量 $\sigma = 21.4\%$, 卸载恢复时间 $t_{fr} = 34.5$ ms。可以看出除了电压卸载恢复时间 t_{fr} 未满足设定指标, 其余三项指标均得到满足。

3.2 惯性因子随迭代次数减小的仿真结果

由于粒子的惯性速度过大、在迭代点附近很长时间无法收敛到一个点, 同时也很难找到比上一次迭代更优的解, 可以让惯性因子 ω 的值随迭代次数减小以增加收敛速度。将每次迭代后的惯性因子表示为

$$\omega_{k+1} = \omega_k - i/n \cdot 0.5\omega_k \quad (12)$$

式中: i 为当前迭代数; n 为迭代总数 10。

迭代后得到的 PI 参数 $K_{pv} = 3.8$, $K_{iv} = 17.2$, $K_{pi} = 15.5$, $K_{ii} = 10.2$ 。设定仿真时间 1.5 s, 给定电压 115 V, 转速 12 000 r/min, 施加的负载为纯阻性负载。发电机输出电压的仿真结果如图 9 所示。

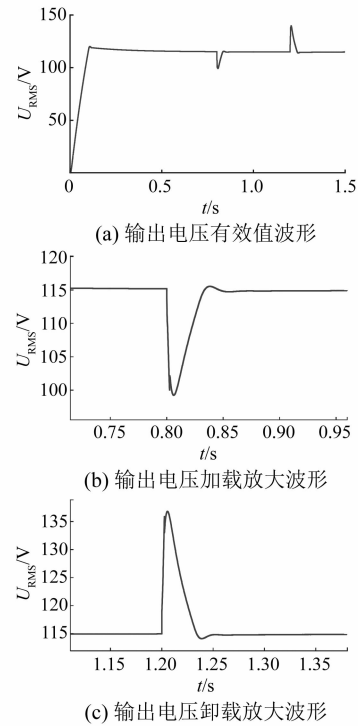


图 9 改变惯性因子得到的 PI 参数的输出电压

由仿真结果可以得到电压动态降落 $\Delta C_{\max} = 12.1\%$, 加载恢复时间 $t_{rv} = 25$ ms; 电压超调量 $\sigma = 18.9\%$, 卸载恢复时间 $t_{fr} = 28.7$ ms。可以看出四项指标均得到满足, 但适当提升了卸载参数性能指标的同时, 也牺牲了加载时的参数性能指标。

4 结 语

传统的 PI 参数整定方法计算复杂, 且计算出的参数需要经过多次调整才能满足系统指标。本文设计了一种基于 PSO 算法整定 PI 参数的方

法,从仿真结果中可以看出,PSO 算法整定 PI 参数的优缺点主要体现在以下三个方面:

(1) 整定方便,提升了仿真时 PI 参数的整定效率。该方法不依赖于基于电机本身参数模型,可以推广到任意电压、电流双闭环发电调压系统。

(2) 整定出来的 PI 参数结果基本满足期望的参数性能指标。如加载时电压动态降落 $\Delta C_{\max} = 12.1\%$,加载恢复时间 $t_{rv} = 25 \text{ ms}$;卸载时电压超调量 $\sigma = 18.9\%$,卸载恢复时间 $t_{fv} = 28.7 \text{ ms}$ 。

(3) 参数性能指标过多时,会出现牺牲部分优异的参数性能指标来补偿部分不达标参数的情况。如仿真时为了将卸载恢复时间 $t_{fv} = 34.5 \text{ ms}$ 调整到 28.7 ms ,牺牲了电压动态降落 $\Delta C_{\max}$ 和加载恢复时间 t_{rv} ,但是依旧满足期望的参数指标要求。之后的研究目标可以集中在利用 PSO 算法实时调整 PI 参数使系统获得更优越的动态性能上。

【参考文献】

- [1] 戴卫力,王慧贞,严仰光,等. 航空起动/发电系统的发展趋势与研究现状[J]. 航空科学技术,2010(5): 28.
- [2] 周鹏飞. 航空发电机现状及发展[J]. 科技视界,2017(8): 260.
- [3] 尹忠刚,肖鹭,孙向东,等. 基于粒子群优化的感应电机模糊扩展卡尔曼滤波器转速估计方法[J]. 电

- 工技术学报,2016,31(6):55.
- [4] 李伟起,林荣文,陶涛. 基于多目标粒子群算法的异步起动永磁同步电机优化设计[J]. 电机与控制应用,2020,47(11):56.
- [5] SHARAF A M, EL-GAMMAL A A A. An integral squared error (ISE) optimal parameters tuning of modified PID controller for industrial PMDC motor based on particle swarm optimization (PSO)[C]// 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference,2009.
- [6] YANG M, WANG X. Fuzzy PID controller using adaptive weighted PSO for permanent magnet synchronous motor drives [C] // 2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation,2009.
- [7] 姚舜才,潘宏侠. 粒子群优化同步电机分数阶鲁棒励磁控制器[J]. 中国电机工程学报,2010,30(21):91.
- [8] 缪仲翠,党建武,张鑫,等. PSO 优化分数阶 PI- λ 控制的双闭环直流调速控制[J]. 计算机工程与应用,2015,51(07):252.
- [9] 文力,陈志辉,郭润龙,等. 变论域模糊 PID 控制在交流发电系统中的应用[J]. 电机与控制应用,2020,47(2):34.
- [10] 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.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行人,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。