

# 同步电动机调速系统参数优化研究

张成<sup>1</sup>, 韩存<sup>2</sup>, 任巍<sup>2</sup>, 赵晋雷<sup>2</sup>, 张啸<sup>1</sup>, 张旭东<sup>1</sup>

(1. 天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180;

2. 中国宝武太钢不锈冷轧厂, 山西 太原 030003)

**摘要:**以同步电机交直交变频调速系统为背景,利用混沌粒子群算法对系统中的部分PI调节器参数进行优化。通过一种混沌映射—动态整数Tent映射构造了一种伪随机序列生成方法,设计了一种粒子群算法的目标函数,能够直观地反映控制系统的阶跃响应性能指标。磁链调节仿真结果表明,利用混沌粒子群算法优化后的系统,其上升时间、调节时间、超调量分别比传统算法减少8.7%,32.5%,48.4%。现场运行情况表明,优化后的系统能够满足实际生产需要。

**关键词:**PI调节器;整数混沌映射;粒子群算法

**中图分类号:**TP273 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd23610

## Research on Parameter Optimization of Speed Regulation System of Synchronous Motor

ZHANG Cheng<sup>1</sup>, HAN Cun<sup>2</sup>, REN Wei<sup>2</sup>, ZHAO Jinlei<sup>2</sup>, ZHANG Xiao<sup>1</sup>, ZHANG Xudong<sup>1</sup>

(1. Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China;

2. China Baowu Taiyuan Iron & Steel Stainless Cold Rolling Plant,  
Taiyuan 030003, Shanxi, China)

**Abstract:** Based on the AC-DC-AC variable frequency speed control system of synchronous motor, the parameters of PI regulator were optimized by chaos particle swarm optimization algorithm. A pseudo-random sequence generation method was constructed using a chaotic map dynamic integer tent map, and an objective function of particle swarm optimization algorithm was designed, which could directly reflect the step response performance index of the control system. The simulation results of flux linkage adjustment show that the rise time, adjustment time and overshoot of the system optimized by the chaos particle swarm optimization algorithm are reduced by 8.7%, 32.5% and 48.4% respectively compared with the traditional algorithm. The situation of production field shows that the optimized system can meet the actual production needs.

**Key words:** PI regulator; integer chaotic mapping; particle swarm optimization(PSO)

电励磁同步电动机具有功率因数高、效率高和过载能力强等优点<sup>[1]</sup>,目前已在各种大功率传动场合应用广泛,如大功率水泵、空气压缩机、轧机主传动系统等。目前矢量控制是电励磁同步电动机的主流控制方法之一,通过坐标变换,将定子电流分解为励磁电流和转矩电流分量,然后对其分别进行控制,从而实现对磁链和转矩的控制<sup>[2-4]</sup>。随着人工智能技术的发展,专家系统、模糊控制、自适应控制、辨识理论、人工神经网络纷纷应用于电机控制领域,并取得了一定的成果<sup>[5-8]</sup>。

在工业自动化中,由于同步电机调速系统中PI调节器的参数对调试人员的经验依赖性较高,

调试人员很难根据控制系统的响应要求迅速整定出调节器参数。

针对上述问题,本文利用混沌粒子群算法对PI调节器参数进行优化。通过一种混沌映射—动态整数Tent映射<sup>[9]</sup>构造了一种伪随机序列生成方法,设计了一种粒子群算法的目标函数,能够直观地反映控制系统的阶跃响应性能指标,最后使系统达到最优效果。

## 1 同步电动机交直交变频调速系统

同步电动机交直交变频调速系统主要包括磁链调节、电流调节和转速调节。本文对磁链调

**基金项目:**天津电气科学研究院有限公司自立项目(GY2020ZL001)

**作者简介:**张成(1993—),男,硕士,工程师,Email:zhangcheng931206@163.com

节和电流调节做简单介绍。

### 1.1 磁链调节器

同步电动机磁链调节器由两部分组成<sup>[10]</sup>:一部分为比例调节器,作为定子电流的磁链调节外环,这部分调节较快,只在动态起作用;另一部分采用比例积分调节器,作为励磁电流环的外调节环,这部分调节较慢,但可消除静差。

由于励磁绕组轴线位于d轴且阻尼绕组电阻 $r_{Dd}$ 很小,忽略后等效电感为

$$L_e = L_{e\sigma} + \frac{L_{hd}L_{Dd\sigma}}{L_{hd} + L_{Dd\sigma}} \quad (1)$$

式中: $L_e$ 为d轴等效电感; $L_{e\sigma}$ 为定子漏感; $L_{hd}$ 为d轴主电感; $L_{Dd\sigma}$ 为d轴阻尼绕组漏感。

在磁链调节器结构中,励磁电流调节环和磁链反馈滤波时间常数等可以用一个等效惯性环节代替,时间常数为 $T_{\Sigma e}$ 。通过励磁电流环的磁链调节环传递函数框图如图1所示。

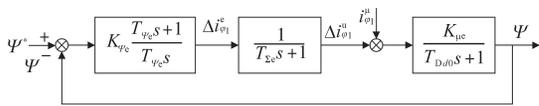


图1 通过励磁电流环的磁链调节环传递函数框图

Fig.1 Transfer function diagram1 of flux regulating ring through excitation current ring

图1中, $K_{\mu e}$ 为比例系数, $K_{\mu e} = \Psi_{MN}/i_0^*$ , $\Psi_{MN}$ 为额定磁链, $i_0^*$ 为空载励磁电流; $T_{\psi_e}$ 为磁链调节器积分时间常数; $K_{\psi_e}$ 为磁链调节器比例系数。d轴阻尼绕组等效时间常数 $T_{Dd0}$ 计算方法为

$$T_{Dd0} = (L_{hd} + L_{Dd\sigma}) / (2\pi f_N r_{Dd}) \quad (2)$$

式中: $f_N$ 为定子额定频率。

在磁链调节器结构中,定子电流磁化分量调节环可以用一个等效惯性环节代替,时间常数为 $T_{\Sigma i}$ 。通过定子电流环的磁链调节传递函数框图如图2所示。

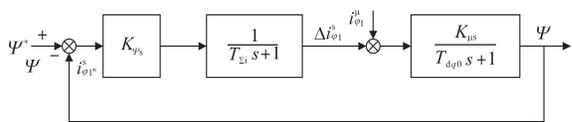


图2 通过定子电流环的磁链调节传递函数框图

Fig.2 Transfer function block diagram of flux regulation through stator current loop

图2中, $T_{\Sigma i}$ 为电流调节环等效时间常数; $K_{\psi_s}$ 为比例系数, $K_{\psi_s} = \Psi_{MN}/i_0^*$ , $i_0^*$ 为折算到定子侧的空载励磁电流。q轴阻尼绕组等效时间常数 $T_{Dq0}$ 为

$$T_{Dq0} = (L_{hq} + L_{Dq\sigma}) / (2\pi f_N r_{Dq}) \quad (3)$$

### 1.2 电流调节器

交流同步电机调速系统的电流控制包括定子电流控制和转子激磁电流控制。交直交PWM

变频调速系统的定子电流控制由磁场定向MT坐标系的直流电流控制构成<sup>[11]</sup>。

为了分析方便,取负序电感 $L_2$ 作为电流通路的电感,可以推出MT轴电流控制系统的传递函数:

$$\begin{cases} i_{sm} = \frac{1}{R_s + L_2 s} (u_{sm} - L_{s1} \omega_s i_{st}) \\ i_{st} = \frac{1}{R_s + L_2 s} (u_{st} - \Psi_{\delta} \omega_s - L_{s1} \omega_s i_{sm}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{sm}$ 为定子电流磁场分量; $R_s$ 为定子绕组电阻; $L_2$ 为负序电感; $u_{sm}$ 为M轴定子电压; $L_{s1}$ 为定子漏感; $\omega_s$ 为转速; $i_{st}$ 为定子电流转矩分量; $u_{st}$ 为T轴定子电压; $\Psi_{\delta}$ 为磁通量。

由于稳态电压方程为

$$\begin{cases} u'_{sm} = R_s i_{sm} - \omega_s L_{s1} i_{st} \\ u'_{st} = R_s i_{st} + \omega_s (\Psi_{\delta} + L_{s1} i_{sm}) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $u'_{sm}$ 为稳态M轴定子电压; $u'_{st}$ 为稳态T轴定子电压。

电流控制系统的传递函数可以写为

$$\begin{cases} i_{sm} = \frac{1}{L_2 s} (u_{sm} - u'_{sm}) \\ i_{st} = \frac{1}{L_2 s} (u_{st} - u'_{st}) \end{cases} \quad (6)$$

如果考虑电压前馈环节,把电压稳态方程构造出来,令电压前馈计算环节 $\widehat{UC}$ 等于电压稳态方程,使 $u_{sm}^* = u'_{sm}$ , $u_{st}^* = u'_{st}$ ,如下式:

$$\begin{cases} u_{sm}^* = u'_{sm} = R_s i_{sm} - \omega L_{s1} i_{st} \\ u_{st}^* = u'_{st} = R_s i_{st} + \omega (\Psi_{\delta} + L_{s1} i_{sm}) \end{cases} \quad (7)$$

M,T轴电流环完全解耦独立,消除了定子漏抗和感应电势的交叉耦合,如图3所示。

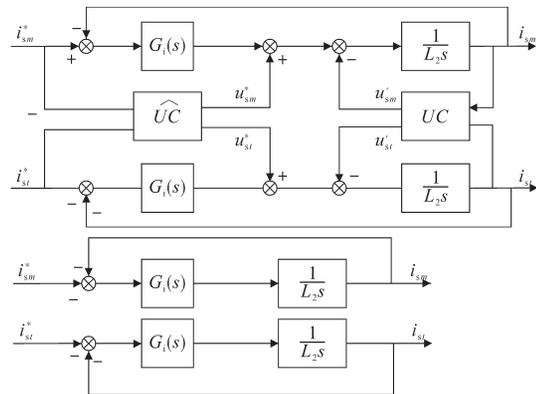


图3 电流控制系统的传递函数

Fig.3 Transfer function of current control system

由于加入电压前馈环节后,M,T轴电流控制完全独立,电流控制的对象为负序电感 $L_2$ 的积分环节,因此,比例积分调节器 $G_i(s)$ 将对积分环节 $1/(L_2 s)$ 进行工程设计。

## 2 混沌粒子群算法

### 2.1 粒子群算法

粒子群算法由 Kennedy 和 Eberhart 提出,是一种进化算法,其基本思想是通过个体间的信息交换与共享来寻找最优解。算法中的粒子从随机位置出发,通过迭代、更新操作,搜索目标函数的最优解。

粒子群算法的核心公式包括速度更新公式和位置更新公式。

速度更新公式如下:

$$v_{i+1} = \omega \cdot v_i + c_1 \cdot rand \cdot (p_{best} - x_i) + c_2 \cdot rand \cdot (g_{best} - x_i) \quad (8)$$

式中: $i$ 为迭代次数; $v_i$ 为第 $i$ 代粒子群的速度集; $\omega$ 为惯性权重因子; $c_1, c_2$ 分别为个体学习因子和社会学习因子; $rand$ 为 $(0, 1)$ 间的随机数; $p_{best}$ 为个体粒子最优位置集; $g_{best}$ 为所有粒子最优位置; $x_i$ 为第 $i$ 代粒子位置集。

位置更新公式如下:

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1} \quad (9)$$

粒子群算法流程图如图4所示。

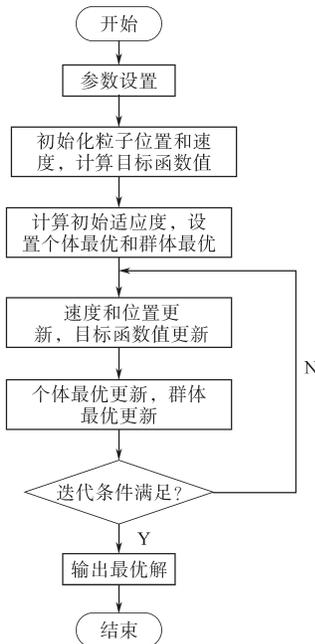


图4 粒子群算法流程图

Fig.4 Flow chart of particle swarm optimization

### 2.2 随机数生成算法

对于粒子群算法的初始位置及速度,可以采用混沌映射方法获得。混沌映射具有非线性、遍历性、随机性以及对初值的敏感性等优良特性,在生成伪随机序列方面应用广泛。对于粒子群

算法,混沌映射的引入能够有效避免算法陷入局部最优,增强算法寻优能力。常见的混沌映射有 Logistic 映射、Tent 映射、Henon 映射等。

常规混沌映射涉及的范围均为浮点型数据,从存储、运算效率、资源占用等方面看,整数运算更适合计算机系统。因此本文采用一种动态整数 Tent 映射来生成伪随机序列。

动态整数 Tent 映射描述为

$$x_{i+1} = \begin{cases} 2g_i + 1 & g_i \in [0, 2^{n-1}) \\ 2(2^n - 1 - g_i) & g_i \in [2^{n-1}, 2^n - 1] \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$g_i = (x_i + k_i) \bmod (2^n)$$

式中: $n$ 为 $x$ 取值范围内最大整数的二进制位数; $k_i$ 为整数 Tent 映射的动态参数。

利用动态整数 Tent 映射构造的随机数生成算法为:

Step 1: 确定 $x$ 取值范围,即确定整数二进制位数 $n$ ;

Step 2: 取当前时间,如 2021-03-14 20:13:12,按自右向左的顺序依次取每个有效数字对应字符的 ASCII 码,即 timearray=[50,49,51,49,48,50,52,49,51,48,49,50,48,50];

Step 3: 取 $k_i = i$ ,以 timearray 第 0 个元素为初值,利用式(10)进行迭代,每迭代 10 次依次加入 timearray 中的一个元素,如下式所示:

$$x_{m*10+1} = (x_{m*10} + \text{timearray}[m]) \bmod (2^n) \quad (11)$$

其中

$$m = 1, 2, 3, \dots, 13$$

迭代 10 次后结果为 $x_{10}$ ;然后进行运算 $x_{11} = (x_{10} + \text{timearray}[1]) \bmod (2^n)$ ,利用式(10)迭代 10 次后结果为 $x_{20}$ ;再进行运算 $x_{21} = (x_{20} + \text{timearray}[2]) \bmod (2^n)$ ,利用式(10)迭代 10 次,以此类推。将 timearray[13]加入运算后得到 $x_{131}$ ,再利用式(10)迭代 50 次,得到最终结果 $x_{181}$ ;

Step 4: 取 $rand = x_{181}/2^n$ ,得到 $(0, 1)$ 区间随机数。

### 2.3 目标函数设计

常用的目标函数包括绝对误差积分 (IAE) 指标、平方误差积分 (ISE) 指标、时间乘绝对误差积分 (ITAE) 指标。经过实验发现,以上指标均不适用于工程问题,因为上述指标均不能从超调量、调节时间等指标方面反映控制效果。

工程上同步电机 PI 调节器的参数优化问题实际上是一个多目标优化问题,即搜索一对 PI 调节器系数 $(K_p, K_i)$ 使目标函数最小。目标函数应

是与系统阶跃响应的上升时间、调节时间、超调量等指标相关的函数。

多目标优化问题一般有两种解决方案:一是将多目标优化问题转化为单目标优化问题,如将多个目标函数加权相加;二是利用多目标粒子群优化算法,传统的多目标粒子群优化算法较为复杂,且得到的是一个 Pareto 解集,其结果是一种兼顾多目标要求的解集。

本文采用第一种方案,将多目标优化问题转化为单目标优化问题,设计一种目标函数,能够满足工程上的PI调节器参数优化需求,使系统效果最优。

设控制系统阶跃响应期望上升时间为  $ex\_t_r$ , 期望调节时间为  $ex\_t_s$ , 期望超调量为  $ex\_δ$ , 则目标函数定义为

$$f = |t_r - ex\_t_r| + |t_s - ex\_t_s| - |δ - ex\_δ| \quad (12)$$

式中:  $t_r$  为实际上升时间;  $t_s$  为实际调节时间;  $δ$  为实际超调量。

$t_r, t_s, δ$  三个变量均受到自变量  $K_p, K_i$  的影响, 实际上式(12)所示的目标函数是以  $K_p, K_i$  为自变量、 $f$  为因变量的函数, 其解析式较复杂, 实际应用时根据一对  $(K_p, K_i)$  的实际响应曲线得到  $t_r, t_s, δ$ , 进而计算出目标函数值。

### 3 仿真结果

#### 3.1 磁链调节

以图1为例进行优化仿真。图1中, 取

$$i_{\phi 1}^* = K\Psi \quad (13)$$

将图1进行等效变换, 如图5所示。

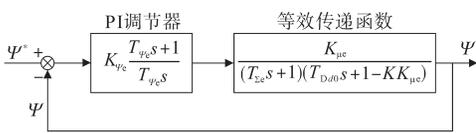


图5 通过励磁电流环的磁链调节环传递函数框图2

Fig.5 Transfer function diagram 2 of flux regulating ring through excitation current ring

取磁链调节仿真参数如下:  $T_{\Sigma e} = 0.017\text{ s}$ ,  $K_{\mu e} = 3.2$ ,  $T_{D, \phi 0} = 0.029\text{ s}$ ,  $K = 0.2$ 。设置粒子群算法参数如下: 个体学习因子  $c_1=2$ , 社会学习因子  $c_2=2$ , 惯性权重因子  $\omega=0.8$ , 迭代次数 100, 粒子群规模 40, 速度限幅  $[-1, 1]$ , 粒子位置限幅  $[0, 10]$ 。随机数生成算法参数设置如下: 整数二进制位数  $n=10$ , 迭代初值=1。

采用上述参数进行仿真, 得到粒子群算法迭代过程如图6所示。

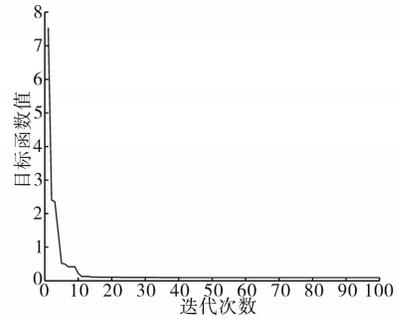


图6 粒子群寻优过程(磁链调节器)

Fig.6 Particle swarm optimization process(flux regulator)

磁链调节器参数优化结果如表1所示, 同时表中也给出了对称最佳法得到的PI调节器参数。

表1 磁链调节器参数结果

参数	$K_p$	$K_i$
本文算法	0.33	3.49
对称最佳法	0.27	3.92

对于图5给出的控制框图, 将表中磁链调节器参数代入, 得到两种方法的系统阶跃响应结果, 如图7所示。同时得到两种算法阶跃响应的三种性能指标如表2所示。可以看出, 本文采用的混沌粒子群优化算法整定出来的磁链调节器参数在上升时间、调节时间、超调量等阶跃响应指标上均优于传统的对称最佳算法。

表2 阶跃响应性能指标(磁链调节器)

指标	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%
本文算法	0.042	0.112	5
对称最佳法	0.046	0.166	9.69

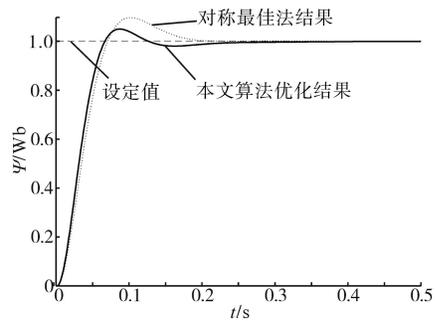


图7 磁链调节阶跃响应仿真结果

Fig.7 Simulation results of step response of flux chain regulation

#### 3.2 电流调节

对图3解耦的电流控制系统进行仿真, 混沌粒子群算法参数设置同3.1节, 负序电感  $L_2$  取值 0.012, 以上述参数进行仿真, 得到粒子群算法迭代过程如图8所示。

PI调节器参数优化结果如表3所示, 同时表中也给出了经验整定得到的PI调节器参数。

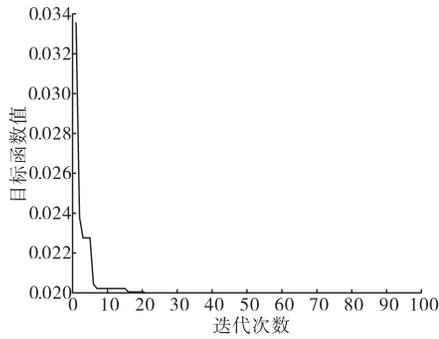


图8 粒子群寻优过程(电流调节器)

Fig.8 Particle swarm optimization process(current regulator)

表3 电流调节器参数结果

Tab.3 Current regulator parameter results

参数	$K_p$	$K_i$
本文算法	8.4	4.25
经验整定	11.82	3.23

对于图3给出的控制框图,将表中电流调节器参数代入,得到两种方法的系统阶跃响应结果,如图9所示。同时得到两种算法阶跃响应的三种性能指标如表4所示。可以看出,本文采用的混沌粒子群优化算法优化后的系统响应结果与经验整定结果差别不明显,但依旧略优于后者。

表4 阶跃响应性能指标(电流调节器)

Tab.4 Step response performance index(current regulator)

指标	上升时间/s	调节时间/s	超调量/%
本文算法	0.004	0.01	5
经验整定	0.004	0.011	6.31

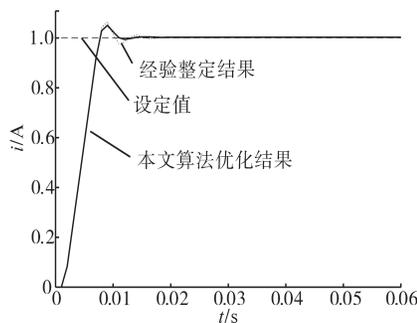


图9 电流调节阶跃响应仿真结果

Fig.9 Simulation results of step response of current regulation

## 4 现场运行结果

实际应用中,首先根据生产线工艺要求,提出系统期望的上升时间、调节时间及超调量,然后根据系统的传递函数进行优化。将本文算法应用到太钢不锈钢冷轧厂森吉米尔轧机主传动调速系统,图10为同步电机现场实际运行波形图,图中磁通调节器及电流调节器的参数如表5

所示。

表5 磁通调节器及电流调节器参数设置

Tab.5 Parameter setting of flux regulator and current regulator

类型	参数
磁通调节器	$K_p = 1$ $K_i = 7.69$
电流调节器	$K_p = 0.3$ $K_i = 25$

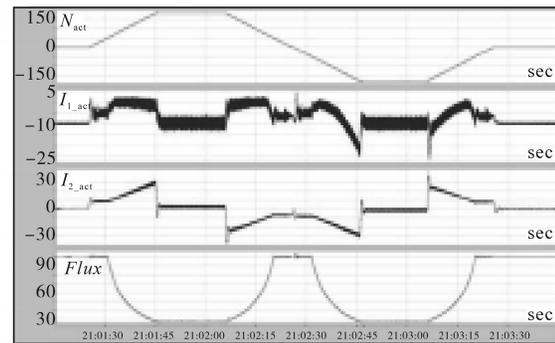


图10 实际运行结果图

Fig.10 Actual operation results

图10中, $N_{act}$ 为速度实际值, $I_{1\_act}$ 为定子电流的磁化分量, $I_{2\_act}$ 为定子电流的转矩分量, $Flux$ 为磁通。由图10可以看出,经过本算法优化的PI调节器在实际应用中能够满足控制系统的要求,能够应用于实际生产中。

## 5 结论

本文利用混沌粒子群算法对同步电机交直交变频调速系统中的PI调节器参数进行优化,提出了一种基于整数Tent映射的随机数生成算法,针对控制系统的阶跃响应,设计了一种直观的、适用于工程的目标函数。本算法对系统进行离线优化,对系统的软硬件环境没有特殊要求,实现方便,通用性强。通过对比仿真与现场应用,说明了算法的优越性与有效性。

### 参考文献

[1] 吴轩钦. 电励磁同步电机双三电平矢量控制系统研究及其应用[D]. 徐州:中国矿业大学,2011.  
Wu Xuanqin. Study on dual three-level vector control system of electrically excited synchronous motor and its application[D]. Xuzhou:China University of Mining and Technology,2011.

[2] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2012.  
Li Yongdong. Digital control system of AC motor[M]. Beijing: China Machine Press,2012.

[3] 孙宇航,姚文熙,吕征宇. 基于电流估算的永磁同步电机伺服控制系统设计[J]. 微特电机,2020,48(2):29-33.  
Sun Yuhang, Yao Wenxi, Lü Zhengyu. Design of permanent magnet synchronous motor servo control system based on current estimation[J]. Micro-motors,2020,48(2):29-33.

- rent estimation[J]. *Micromotor*, 2020, 48(2): 29-33.
- [4] 胡文刚. 全数字同步电机矢量控制系统及运行特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2004.  
Hu Wengang. Research on vector control system and operation characteristics of full digital synchronous motor[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2004.
- [5] Nevaranta N, Derammelaere S, Parkkinen J, *et al.* Online identification of a two-mass system in frequency domain using a Kalman filter[J]. *Modeling, Identification and Control (MIC)*, 2016, 37(2): 133-147.
- [6] Dou R, Duan H. Pigeon inspired optimization approach to model prediction control for unmanned air vehicles[J]. *Aircraft Engineering & Aerospace Technology An International Journal*, 2015, 88(1): 108-116.
- [7] 周扬忠, 胡育文, 黄文新. 直接转矩控制电励磁同步电机初始转子位置估计[J]. *电工技术学报*, 2007, 22(12): 55-60.  
Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Estimation of initial rotor position of direct torque control electrically excited synchronous motor[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2007, 22(12): 55-60.
- ~~~~~
- (上接第10页)
- Postlethwaite I, Mac Farlane A G J. A complex variable method for linear multivariable feedback system analysis[M]. Beijing: Science Press, 1986.
- [48] 朱宇昕, 赵晋斌, 毛玲, 等. 并网系统的广义阻抗比及其稳定性分析与研究[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7240-7249.  
Zhu Yuxin, Zhao Jinbin, Mao Ling, *et al.* Generalized impedance ratio and stability analysis for grid-connected systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(22): 7240-7249.
- [49] 吴广禄, 王姗姗, 周孝信, 等. VSC接入弱电网时外环有功控制稳定性解析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(21): 6169-6183.  
Wu Guanglu, Wang Shanshan, Zhou Xiaoxin, *et al.* Analytical analysis on the active power control stability of the weak grids-connected VSC[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(21): 6169-6183.
- [50] 吴广禄, 周孝信, 王姗姗, 等. 柔性直流输电接入弱交流电网时锁相环和电流内环交互作用机理解析研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(9): 2622-2633.
- [8] 吴伟亮, 杨合民, 杨海英, 等. 电励磁同步电机无速度传感器控制研究[J]. *电气传动*, 2021, 51(6): 38-43.  
Wu Weiliang, Yang Hemin, Yang Haiying, *et al.* Research on speed sensor-less control of electrically excited synchronous motor[J]. *Electric Drive*, 2021, 51(6): 38-43.
- [9] 刘建东, 张啸, 赵晨, 等. 动态整数帐篷映射模型及其性能分析[J]. *计算机科学*, 2016, 43(11): 226-229.  
Liu Jiandong, Zhang Xiao, Zhao Chen, *et al.* Dynamic integer tent mapping model and its performance analysis[J]. *Computer Science*, 2016, 43(11): 226-229.
- [10] 天津电气传动设计研究所. 电气传动自动化技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
TRiED. Technical manual of electrical transmission automation [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [11] 李崇坚. 交流同步电机调速系统[M]. 北京: 科学出版社, 2013.  
Li Chongjian. Speed control system of AC synchronous motor [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2021-06-03  
修改稿日期: 2021-07-12
- ~~~~~
- Wu Guanglu, Zhou Xiaoxin, Wang Shanshan, *et al.* Analytical research on the mechanism of the interaction between PLL and inner current loop when VSC-HVDC connected to weak grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(9): 2622-2633.
- [51] Shuai Z, Li Y, Wu W, *et al.* Divided DQ small-signal model: a new perspective for the stability analysis of three-phase grid-tied inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(8): 6493-6504.
- [52] 张美清, 袁小明, 胡家兵. 基于自稳/致稳性的路径级数展开方法及其在含多样化电力电子装备电力系统稳定性分析中的应用[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(5): 1637-1655.  
Zhang Meiqing, Yuan Xiaoming, Hu Jiabing. Path series expansion method based on self-/en-stabilizing properties and its application in the stability analysis of power systems with diversified power electronic devices[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(5): 1637-1655.
- ~~~~~
- 收稿日期: 2021-05-27  
修改稿日期: 2021-06-05