

基于遗传算法的内埋式永磁同步电机 参数辨识方法

肖曦¹ 许青松² 王雅婷³ 史宇超¹

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备安全控制和仿真国家重点实验室 北京 100084
2. 长园深瑞继保自动化有限公司 深圳 518057
3. 江西省电力公司电力经济技术研究院 南昌 330043)

摘要 针对内埋式永磁同步电机的反凸极特性及传统参数辨识方法存在的缺陷,结合电机的数学模型提出了一种基于遗传算法的参数辨识方法,该方法能同时辨识定子电阻、d轴电感、q轴电感和永磁体磁链四个参数。该方法所用的信号均为可直接检测的状态变量,从而减少了其他干扰对电机参数辨识的影响,提高了参数辨识的准确性。仿真和实验结果表明,利用遗传算法进行参数辨识鲁棒性强、收敛性好,在不同的转速、不同的负载以及不同的控制策略下,四个待辨识参数也能够较短的时间内收敛到真实值,具有较高的精度,同时也克服了一般遗传算法对辨识参数初始值要求高的缺点。

关键词: 内埋式永磁同步电机 遗传算法 参数辨识

中图分类号: TM341

Parameter Identification of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Genetic Algorithm

Xiao Xi¹ Xu Qingsong² Wang Yating³ Shi Yuchao¹

(1. State Key Laboratory of Security Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments Tsinghua University Beijing 100084 China 2. Cyg Sunri Co.,Ltd Shenzhen 518057 China
3. Power Economic Research Institute of Jiangxi Power Company Nanchang 330043 China)

Abstract On account of the reverse salient pole characteristic and defects of the traditional parameter identification method, this article puts forward a parameter identification method based on genetic algorithms combine with the mathematical model of the motor. This method can identify the four parameters in same time such as the stator resistance, the d-axis inductance, the q-axis inductance and the permanent magnet flux. The signal used in the method are all can be directly detected the state variables so it can reduce the influence of the other disturbance on the motor parameters identification and improve the accuracy of the parameter identification. Simulation and experimental results show that the genetic algorithm to identify the parameters has a strong robustness and convergence. Four pending identification parameters can converge to the true value in a relatively short time and has a high accuracy no matter in the different speeds, loads and control strategies. It also overcomes the drawback of high requirements in the initial parameter values which in the commen genetic algorithm to identify.

Keywords: Interior permanent magnet synchronous motor, genetic algorithm, parameter identification

1 引言

内埋式永磁同步电机(IPMSM)具有效率高、易于控制和具有宽弱磁扩速能力等优点,在伺服、电动汽车等应用领域获得了越来越多的应用。多年来,随着永磁同步电机驱动控制技术的发展,国内外学者提出了大量的控制技术以实现永磁电机高性能控制^[1-8]。无论是控制速度、位置,还是转矩控制,高动态响应和高精度控制目标的实现都需要用到精确的电机参数,但这些参数受温度、定子电流和磁通饱和等因素的影响变化很大,使得矢量控制、直接转矩控制等方法实际效果难以达到理论分析的结果。例如定子电阻主要随着温升而增大,尤其在低速时会对控制效果产生显著的影响。另外,各种常规的PID控制器参数整定时也需要一些电机参数,若偏差较大将导致转速响应波形的畸变(例如响应慢、波动剧烈等),精确的参数辨识可以为该环节提供重要的参考,从而降低了控制器整定时的难度。为此出现了许多种电机的参数辨识方法:其中文献[2,3]是基于扩展的卡尔曼滤波器(EKF)方法进行参数辨识,但是其中 P 、 Q 矩阵很难确定而且与系统状态关系密切。同时扩展卡尔曼滤波具有内在的一些缺点,如易受噪声影响,运行时间长,算法设计和目标函数很难确定。由于表贴式永磁同步电机 d 轴电感和 q 轴电感相等,故辨识方法相对简单。文献[4-6]是基于模型参考自适应方法(MRAS),但它们都是针对表贴式的永磁同步电机,虽然 MRAS 具有很好的收敛特性且实现起来也不复杂,但面临的问题是自适应律的选取,当像内埋式永磁同步电机需要辨识的参数增多时,自适应律的确定将非常困难。文献[7]针对表贴式永磁同步电机实现了基于最小二乘类电机参数辨识方法,文献[8]针对内埋式永磁同步电机采用递推最小二乘法辨识参数,但是其对于噪声的鲁棒性较差,且信号处理系统的设计非常复杂。

针对控制系统参数辨识方法存在的缺陷,不少学者提出了一些智能算法在控制系统的参数辨识应用,为系统辨识开辟了一片新天地。其中遗传算法是一种模拟生物进化机制的随机全局优化搜索算法,由于具有很强的全局优化能力及鲁棒性,近年来已被普遍用于生产规划、信号处理、最优控制等各个领域^[9]。遗传算法在电机的参数辨识中的应用已经出现了许多研究成果^[10-12]。其中文献[10]是基于感应电机的参数辨识,文献[11,12]是基于异步电

机的参数辨识,此类文献中已经将遗传算法应用在异步电机不同参数的辨识。

针对具有反凸极特性的内埋式永磁同步电机,数学模型相对复杂,所需辨识参数较多,一般为电机定子电阻、 d 轴电感、 q 轴电感和永磁体磁链等。如能设计遗传算法进行准确辨识将具有很好的应用价值。为此,本文结合电机的数学模型提出了一种基于遗传算法的参数辨识新方法,通过易测量的定子电压、电流和转速信号,能同时实现对定子电阻、 d 轴电感、 q 轴电感和永磁体磁链 4 个参数准确辨识。这种辨识方法发挥了遗传算法鲁棒性好的优点,克服了传统辨识方法中待辨识参数需在真实值附近的缺点,电机运行在不同的转速,不同的负载以及不同的控制策略下,4 个待辨识参数也能够快速收敛到真实值,具有较高的精度。为内埋式永磁同步电机的参数辨识提供了一条可行的思路。

2 IPMSM 的数学模型

在固定于转子永磁体方向的 d - q 坐标系下,永磁同步电机的电压方程可描述为^[13,14]

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

式中 u_d, u_q —— d 轴, q 轴定子电压;
 i_d, i_q —— d 轴, q 轴定子电流;
 R_s ——定子电阻;
 L_d, L_q —— d 轴, q 轴定子电感;
 ω ——电角速度;
 ψ_r ——转子磁链。

对式(1)进行进一步变换可得

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s i_d + \omega L_q i_q + u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s i_q - \omega L_d i_d - \omega \psi_r + u_q}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

3 遗传算法在 IPMSM 的应用

假设被辨识系统的动态数学模型如下状态方程描述

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\theta, \mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases} \quad (3)$$

式中, \mathbf{x} 状态矢量; \mathbf{u} 为输入矢量; $\boldsymbol{\theta}$ 为待辨识的参数矢量; \mathbf{y} 为可以测量的矢量; \mathbf{C} 为合适阶数的常数矩阵, 则等价的跟踪系统可以表示为式 (4), 在式 (4) 中的变量与式 (3) 中类似。

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{x}} = f(\hat{\boldsymbol{\theta}}, \hat{\mathbf{x}}, \mathbf{u}) \\ \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\hat{\mathbf{x}}$ 是等价跟踪系统的状态矢量; $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ 是 $\boldsymbol{\theta}$ 的估计值; $\hat{\mathbf{y}}$ 是 \mathbf{y} 的估计值。

如果定义输出误差

$$\mathbf{e} = \mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \quad (5)$$

那么等价跟踪系统的输出和被辨识系统输出的差别程度可以用如下性能指标表示

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \int_{t_1}^{t_2} \mathbf{e}^T \mathbf{e} \quad (6)$$

遗传算法是借助计算机计算的, 表示成离散形式如下

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ [\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)]^T [\mathbf{y}(k) - \hat{\mathbf{y}}(k)] \right\} \quad (7)$$

如果以 $J(\boldsymbol{\theta})$ 作为目标函数, 遗传算法参数辨识问题即可描述为求 $J(\boldsymbol{\theta})$ 的最小值。

为了将电机的数学模型转化为遗传算法的问题描述, 将式 (2) 电流方程变换如下

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{-R_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \omega i_q + \frac{u_d}{L_d} \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{-R_s}{L_q} i_q + \frac{-L_d}{L_q} \omega i_d + \frac{u_d - \omega \psi_r}{L_q} \end{cases} \quad (8)$$

将式 (8) d 轴电流方程采用帕德逼近^[15]并进行离散化如下:

$$\begin{aligned} i_d(k) = & \theta_{d1} i_d(k-1) + \theta_{d2} [\omega(k) i_q(k) + \omega(k-1) i_q(k-1)] + \\ & \theta_{d3} [u_d(k) + u_d(k-1)] \end{aligned} \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} \theta_{d1} = \frac{-T_s R_s + 2L_d}{T_s R_s + 2L_d} \\ \theta_{d2} = \frac{L_q T_s}{T_s R_s + 2L_d} \\ \theta_{d3} = \frac{T_s}{T_s R_s + 2L_d} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_s = \frac{1 - \theta_{d1}}{2\theta_{d3}} \\ L_d = \frac{1 + \theta_{d1}}{4\theta_{d3}} T_s \\ L_q = \frac{\theta_{d2}}{\theta_{d3}} \end{cases} \quad (10)$$

式 (10) 中 T_s 是系统采样时间, 同理将式 (8) q 轴电流方程进行离散化并进行帕德逼近如下:

$$\begin{aligned} i_q(k) = & \theta_{q1} i_q(k-1) + \theta_{q2} [\omega(k) i_d(k) + \omega(k-1) i_d(k-1)] + \\ & \theta_{q3} [u_d(k) + u_d(k-1)] + \theta_{q4} [\omega(k) + \omega(k-1)] \end{aligned} \quad (11)$$

方程中的参数为

$$\begin{cases} \theta_{q1} = \frac{-T_s R_s + 2L_q}{T_s R_s + 2L_q} \\ \theta_{q2} = \frac{-L_d T_s}{T_s R_s + 2L_q} \\ \theta_{q3} = \frac{T_s}{T_s R_s + 2L_q} \\ \theta_{q4} = \frac{-T_s \psi_r}{T_s R_s + 2L_q} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R_s = \frac{1 - \theta_{q1}}{2\theta_{q3}} \\ L_d = -\frac{\theta_{q2}}{\theta_{q3}} \\ L_q = \frac{1 + \theta_{q1}}{4\theta_{q3}} T_s \\ \psi_r = -\frac{\theta_{q4}}{\theta_{q3}} \end{cases} \quad (12)$$

设 $\hat{\theta}_{d1}$, $\hat{\theta}_{d2}$, $\hat{\theta}_{d3}$ 分别为 θ_{d1} , θ_{d2} , θ_{d3} 的估计值, 建立 d 轴电流的等价跟踪函数如下:

$$\begin{aligned} \hat{i}_d(k) = & \hat{\theta}_{d1} i_d(k-1) + \hat{\theta}_{d2} [\omega(k) i_q(k) + \omega(k-1) i_q(k-1)] + \\ & \hat{\theta}_{d3} [u_d(k) + u_d(k-1)] \end{aligned} \quad (13)$$

同理设 $\hat{\theta}_{q1}$, $\hat{\theta}_{q2}$, $\hat{\theta}_{q3}$, $\hat{\theta}_{q4}$ 分别为 θ_{q1} , θ_{q2} , θ_{q3} , θ_{q4} 的估计值, 建立 q 轴电流的等价跟踪函数如下:

$$\begin{aligned} \hat{i}_q(k) = & \hat{\theta}_{q1} i_q(k-1) + \hat{\theta}_{q2} [\omega(k) i_d(k) + \omega(k-1) i_d(k-1)] + \\ & \hat{\theta}_{q3} [u_d(k) + u_d(k-1)] + \hat{\theta}_{q4} [\omega(k) + \omega(k-1)] \end{aligned} \quad (14)$$

根据式 (7) 可建立系统的目标函数如式 (15), 则问题转变成了基于遗传算法求式 (15) 的最小值时的参数辨识问题。

$$J(\boldsymbol{\theta}_q) = \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ [(i_d(k) - \hat{i}_d(k))]^2 + [(i_q(k) - \hat{i}_q(k))]^2 \right\} \quad (15)$$

故系统辨识可以看成是把需要辨识的 L_d , L_q , R_s , ψ_r 转换成了辨识 θ_{d1} , θ_{d2} , θ_{d3} , θ_{q3} , θ_{q4} 的问题, 如果辨识得到 θ_{d1} , θ_{d2} , θ_{d3} , θ_{q3} , θ_{q4} 便可以通过式 (10) 和式 (12) 反推出 L_d , L_q , R_s , ψ_r 。

如图 1 所示, 参数辨识过程是根据电机的实际

输出和电机模型输出的差值，通过遗传算法对电机模型不断进行修正，从而辨识出参数。其中 u_d 、 u_q 和 ω 都是作为系统的输入， i_d 、 i_q 作为系统的输出， \hat{i}_d 、 \hat{i}_q 作为跟踪系统的输出。

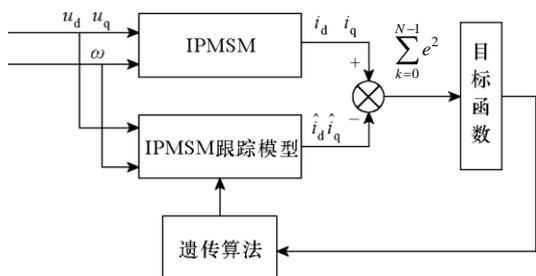


图1 遗传算法原理图

Fig.1 Block diagram of system simulation

4 实验结果

IPMSM 参数辨识仿真框图如图 2 所示，电机的控制方法采用的矢量控制策略。其中遗传算法模块的输入信号是电机的定子电压、电流和转子转速信号。

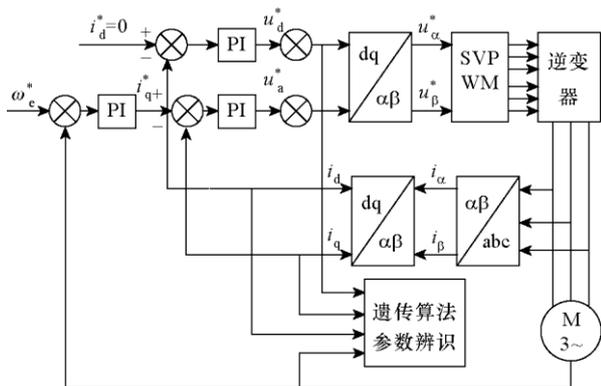


图2 系统辨识仿真框图

Fig.2 Block diagram of genetic algorithm

辨识算法利用了各采样点时的定子电压、电流以及电流的一阶导数，所以测量环节中的噪声干扰对于可靠计算影响较大，本文采用的电压和电流通道均为二阶巴特沃兹低通滤波器，截止频率分别为 10Hz 和 5Hz。整个实验装置由电机控制系统、永磁同步电机以及作为负载的直流电机组成，其中永磁同步电机通过电机控制系统中的电力电子变换装置进行驱动。用于实验的永磁同步电机参数见表 1。

表 1 电机参数

参数	数值	参数	数值
额定功率/W	800	额定转矩/(N·m)	3
额定电流/A	10	额定转速/(r/min)	1 000
最大转速/(r/min)	1 500	额定电压/V	220
定子电阻/ Ω	0.618	定子 d 轴电感/mH	7.418
定子 q 轴电感/mH	12.285	转动惯量/(kg·m ²)	0.000 59
永磁体磁链/Wb	0.225 6	极对数	2

在采用遗传算法对 IPMSM 进行参数辨识时，经过多次试验比较最后的辨识最优结果来设置遗传算法的初始参数。4 个参数的编码长度均为 10 位，编码精度为 0.001。系统的控制周期为 0.1ms，其控制参数中的交叉概率取 0.4，变异概率取 0.1，种群规模取 30。遗传算子分别为比例选择，单点交叉和单点变异，最大进化代数 1 000。

当工况处于 d 轴电流为零，恒转矩为 2N·m，转速为 1 000r/min 的情况下，遗传算法的辨识实验结果如图 3~图 7 所示。从辨识结果可以看出，待辨识参数的初始值虽然远离真实值，但目标函数可以收敛到零附近，待辨识的 4 个参数都收敛到真实值附近，并且每个参数误差都在 5% 之内，辨识效果较准确，对于电机运行控制已有足够的精度。

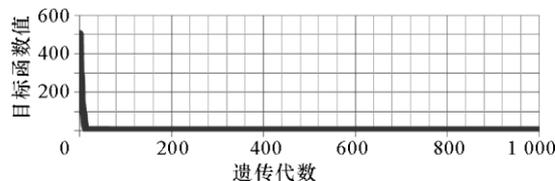


图3 目标函数值

Fig.3 Value of objective function

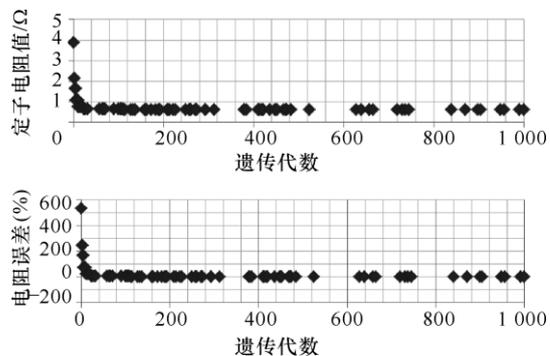


图4 定子电阻值与误差

Fig.4 Value and error of stator resistance

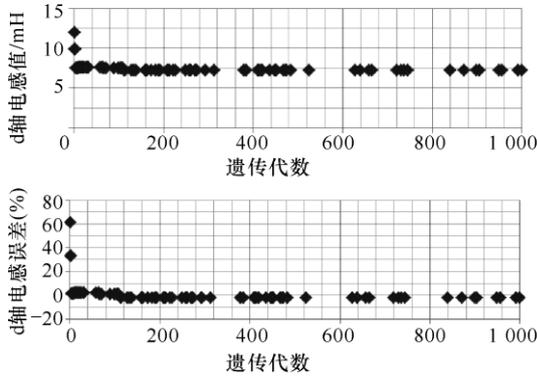


图 5 d 轴电感值与误差
Fig.5 Value and error of d-axis inductance

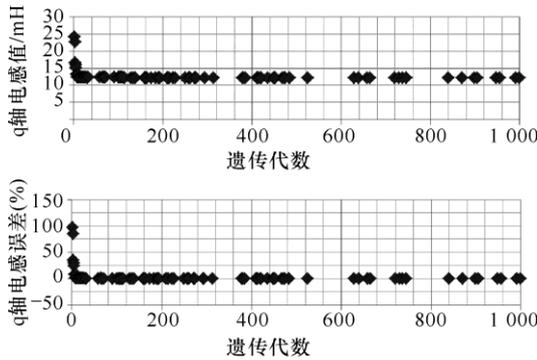


图 6 q 轴电感值与误差
Fig.6 Value and error of q-axis inductance

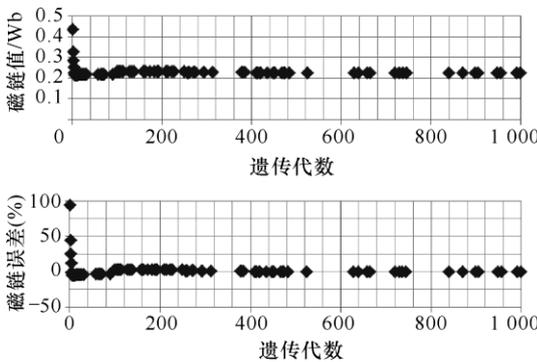


图 7 永磁体磁链值与误差
Fig.7 Value and error of flux

为不失一般性，每次辨识的初始参数都相同并且远离真实值，在不同的工况下进行辨识的结果见表 2。从表 2 可以看出，最终辨识定子电阻、d 轴电感、q 轴电感以及永磁体磁链的收敛结果都比较接近真实值，说明这种辨识算法最终的鲁棒性强和收敛性好能得到保证。

表 2 辨识结果

Tab.2 Result of identification

参 数	真实值			
	R_s/Ω	L_d/mH	L_q/mH	ψ_r/Wb
d 轴电流 0A 转矩 2N·m $n=1000r/min$	0.620 8	7.548	12.334	0.223 0
误差(%)	0.467	1.763	0.423	-1.133
d 轴电流 0A 转矩 3N·m $n=1000r/min$	0.622 2	7.250 1	12.287	0.227
误差(%)	0.683 9	-2.262	0.023 5	0.983
d 轴电流 0A 转矩 2N·m $n=1500r/min$	0.611 5	7.248 8	12.285	0.224
误差(%)	-0.447	-2.280	0.000 7	-0.572
d 轴电流 1A 转矩 2N·m $n=1000r/min$	0.622 2	7.250 1	12.287	0.227
误差(%)	0.683 9	-2.262	0.023 5	0.912

5 结论

本文基于电机的电压方程提出了一种基于遗传算法的内埋式永磁同步电机参数辨识方法，能同时辨识定子电阻、d 轴电感、q 轴电感和永磁体磁链 4 个参数。针对不同工况、不同参数及不同初始值的系列仿真和实验结果表明，待辨识的电机参数均能够在较短的时间内收敛到真实值，具有较高的辨识精度，算法的鲁棒性很好，并克服了一般遗传算法对待辨识参数初始值要求高的缺点。

参考文献

- [1] 史宇超, 孙凯, 马鸿雁, 等. 内埋式永磁同步电机永磁磁链的在线辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(9): 48-53.
Shi Yuchao, Sun Kai, Ma Hongyan, et al. On-line identification of permanent magnet flux in IPMSM drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(9): 48-53.
- [2] Boileau T, Nahid Mobarakeh B, Meibody Tabar F. On-line identification of PMSM parameters: model-reference vs EKF[C]. IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 2008, Edmonton, Canada, 2008: 1-8.
- [3] Jaramillo R. Identification of induction motor parameter

- using an extended Kalman filter[C]. 1st International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2004: 584-588.
- [4] Li Jie, Ren Haipeng. A novel on-line MRAS rotor resistance identification method insensitive to stator resistance for vector control systems of induction machines[C]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2010: 591-595.
- [5] Liu L, Cartes D A. Synchronisation based adaptive parameter identification for permanent magnet synchronous motors[J]. IET Control Theory Application, 2007, 1(4): 1015-1022.
- [6] An Quntao, Sun Li. On-line parameter identification for vector controlled PMSM drives using adaptive algorithm[C]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference(VPPC), Harbin, China, 2008: 1-6.
- [7] Makara K, Jeremi R, Jean F. On-line parameter estimation of PMSM in open loop and closed loop[C]. IEEE International Conference on Industrial Technology, Churchill, Australia, 2009: 1-6.
- [8] 陈振锋, 钟彦儒, 李洁. 基于 RLS 的嵌入式永磁同步电机参数辨识技术[J]. 西安理工大学学报, 2009, 25(3): 309-313.
Chen Zhenfeng, Zhong Yanru, Li Jie. Parameter estimation technique for vector controlled interior permanent magnet synchronous motor drive based on RLS[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2009, 25(3): 309-313.
- [9] 刘长良, 于希宁, 姚万业, 等. 基于遗传算法的火电厂热工过程模型辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 170-174.
Liu Changliang, Yu Xining, Yao Wanye, et al. Model identification of power thermal process based on genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 170-174.
- [10] 罗鹏辉, 刘梦亭. 基于遗传算法的感应电动机稳态模型参数辨识[J]. 微特电机, 2010, 1: 51-53.
Luo Penghui, Liu Mengting. Research on parameter identification system of motor static model based on genetic algorithm[J]. Small & Special Electrical Machines, 2010, 1: 51-53.
- [11] 黄玉水, 丁雄勇. 运用于交流电机矢量控制的遗传算法参数辨识[J]. 电测与仪表, 2010, 47(4): 17-20.
Huang Yushui, Ding Xiongyong. The GA parameter identification applied the AC motor vector control system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(4): 17-20.
- [12] 金海, 杜鹏英, 麻寿光. 基于遗传算法的异步电动机参数辨识[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(4): 549-552.
Jin Hai, Du Pengying, Ma Shouguang. Parameters identification of asynchronous motor based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(4): 549-552.
- [13] 吴茂林, 黄声华. 永磁同步电机非线性参数辨识[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 65-68.
Wu Maolin, Huang Shenghua. Nonlinear parameters identification of PMSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 65-68.
- [14] 杨立永, 张云龙, 陈智刚, 等. 基于参数辨识的 PMSM 电流环在线自适应控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 86-91.
Yang Liyong, Zhang Yunlong, Chen Zhigang, et al. On-line adaptive control of PMSM current-loop based on parameter identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 86-91.
- [15] Makara K, Jeremi R, Jean F. Detection of turn short-circuit faults in stator of PMSM by on-line parameter estimation[C]. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Ischia, Italy, 2008: 161-166.

作者简介

肖曦 男, 1973 年生, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为交流伺服电机高性能、高精度控制, 新能源发电与电力储能。

许青松 男, 1987 年生, 硕士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动。