

基于改进最小二乘法永磁同步电机多参量辨识^{*}

宋建国, 张振路, 李向诚
(北京工业大学 信息学部, 北京 100124)

摘要: 针对永磁同步电机(PMSM)多参量辨识数学模型欠秩的情况,将电机参数分为快变化和慢变化2种类型参数,结合慢参量入口和电机稳态信息建立慢辨识模型和快辨识模型,提出了一种改进的分步迭代在线辨识方法。该方法基于电机在旋转坐标系下的稳态电压方程,分时分步固定慢变化参数,利用遗忘因子递推最小二乘法,能够辨识表贴式永磁同步电机(SPMSM)的3个电气参数,计算压力小,辨识速度快,适于工程应用。以DSP控制器和测功机试验平台为基础的试验证明了辨识方法的可行性。

关键词: 表贴式永磁同步电机; 最小二乘法; 多参量辨识; 快慢参量; DSP控制器

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2021)03-0016-06

doi: 10.12177/emca.2020.221

Multi-Parameter Identification of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Improved Least Square Method^{*}

SONG Jianguo, ZHANG Zhenlu, LI Xiangcheng

(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In view of the low rank of the multi-parameter identification mathematical model of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the motor parameters are divided into two types: fast change and slow change. The slow identification model and fast identification model are established by combining the slow parameter entry and the steady-state information of the motor, and a step-by-step iterative online identification method is proposed. Based on the steady-state voltage equation of the motor in the rotating coordinate system, the slowly changing parameters is fixed in time and step by step. The forgetting factor recursive least square algorithm can identify the three electrical parameters of the surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM). It has small calculation pressure and fast identification speed, which is suitable for engineering application. Experiments are performed based on DSP controller and dynamometer test platform. The experimental results prove that the identification method is feasibility.

Key words: surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM); least square method; multi-parameter identification; fast and slow parameters; DSP controller

0 引言

由于温升、磁路饱和和负载扰动等因素,永磁同步电机(PMSM)在实际运行过程中往往会出现电磁参数不匹配的情况,导致控制效果不佳甚至电机故障。因此,实时精确获取电机参数可以有效保障电机高性能的安全运行^[1-2]。

PMSM参数在线辨识的难点主要集中在多参数同时辨识上,由于电机数学模型方程数小于待辨识参量数,其结果的收敛性和唯一性会因电机工况变化而缺乏理论支撑。为此,国内外研究提出了诸多解决办法。文献[3-4]通过注入扰动信号增加方程的秩从而建立满秩方程组。文献[5-6]通过测量额外的电气参量,构建其他的方程组

收稿日期: 2020-11-27; 收到修改稿日期: 2021-01-18

^{*} 基金项目: 北京市教育委员会项目(PXM2019_014204_500034)

作者简介: 宋建国(1974—),男,博士,副教授,研究方向为电力电子与电力传动。

入到辨识模型中。

根据电机的运行状态可以构建电机的动态数学模型和稳态数学模型。动态数学模型基于 PMSM 的动态电压方程,需要采集足够多不同状态时的辨识数据,但因为微分器引入的高频分量需要滤波处理,所以难以保证辨识数据输入辨识算法的时效性^[7]。电机稳定运行时,稳态数学模型基于 PMSM 的稳态电压方程建立,方程中不含电流微分项,数据集相位延迟导致的错拍输入问题得以解决^[8-9]。因此,本文构建稳态数学模型,利用遗忘因子递推最小二乘法分步迭代辨识,无需外部信号注入,解决了 PMSM 同时辨识多个参数的问题。

1 数学模型及系统结构

1.1 PMSM 的稳态数学模型

在实际的 PMSM 控制应用中,PMSM 是一个多变量、强耦合的非线性系统。为了便于研究,先假定 PMSM 三相对称平衡,反电动势为正弦波形,忽略磁滞和涡流损耗的影响,忽略谐波因素等^[10-11]。从而得到 PMSM 在旋转坐标系下 dq 轴的动态电压方程:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e \Psi_q \\ U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式中: U_d 、 U_q 为 d 、 q 轴电压; R_s 为定子电阻; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感; ω_e 为转子电角速度; Ψ_d 、 Ψ_q 为 d 、 q 轴磁链, $\Psi_d = L_d i_d + \Psi_f$, $\Psi_q = L_q i_q$ 。

整理式(1)可得:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_q i_q \\ U_q = R_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: Ψ_f 为转子磁链。

对于表贴式永磁同步电机 (SPMSM), d 、 q 轴电相感等,即 $L_d = L_q = L_s$,则有:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d + L_s \frac{d}{dt} i_d - \omega_e L_s i_q \\ U_q = R_s i_q + L_s \frac{d}{dt} i_q + \omega_e L_s i_d + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (3)$$

电机平稳运行时,动态电压方程的电流微分

部分为零,可得 SPMSM 稳态电压方程:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d - \omega_e L_s i_q \\ U_q = R_s i_q + \omega_e L_s i_d + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (4)$$

1.2 控制系统在线辨识框图

PMSM 参数在线辨识需要在电机运行过程中实时采集数据并送至 DSP 运算得到参数结果。控制结构采用 $i_d=0$ 控制方式,在电机平稳运行的工况下采集旋转坐标系下的电压电流信息和转速信息,通过在线辨识算法得到电机参数。系统总体框图如图 1 所示。

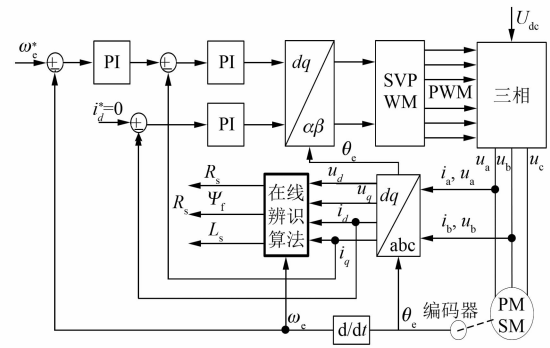


图 1 系统总体框图

2 遗忘因子递推最小二乘法

本文辨识算法基于最小二乘法在线辨识 PMSM 电气参数:定子电阻 R_s 、转子磁链 Ψ_f 和 dq 轴电感 L_s 。模型的最小二乘法如下:

$$Y_m = \Phi_m \Theta \quad (5)$$

式中: Φ_m 为 m 组输入数据, $\Phi_m^T = [\Phi_1^T \ \Phi_2^T \ \cdots \ \Phi_m^T] \in R^{m \times n}$; Φ_i^T 为第 i 组输入数据, $\Phi_i^T = [x_{i1} \ x_{i2} \ \cdots \ x_{in}] \in R^{1 \times n}$; Y_m 为 m 组输出数据, $Y_m = [y_1 \ y_2 \ \cdots \ y_m]^T \in R^{m \times 1}$; Θ 为待辨识的参数序列, $\Theta = [\theta_1 \ \theta_2 \ \cdots \ \theta_n]^T \in R^{n \times 1}$ 。

考虑到 DSP 运算能力和大数据量的矛盾,推导适合离散系统运算且计算量合适的递推最小二乘法,同时为了解决“数据饱和”引起的收敛误差问题,引入遗忘因子调节新旧数据的比例,利用新引入的数据进行递推计算,直到参数估计收敛到正确结果^[12]。遗忘因子递推最小二乘法的表达式如下:

$$\begin{cases} \hat{\theta}_m = \hat{\theta}_{m-1} + K_m \varepsilon_m \\ \varepsilon_m = y_m - \Phi_m^T \hat{\theta}_{m-1} \\ K_m = \frac{P_{m-1} \Phi_m}{1 + \Phi_m^T P_{m-1} \Phi_m} \\ P_m = [I - K_m \Phi_m^T] P_{m-1} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\hat{\theta}_m$ 、 $\hat{\theta}_{m-1}$ 分别为第 m 次和第 $m-1$ 次参数辨识结果; ε_m 为实际输出与观测输出的误差数据序列; K_m 和 P_m 为递推运算过程中的中间矩阵; I 为单位矩阵; λ 为遗忘因子。

3 改进递推最小二乘算法

本文基于 SPMSM 进行参数辨识研究, q 轴电感和 d 轴电感相等, 故只需要辨识 R_s 、 Ψ_f 和 L_s 3 个参数, 但仍不能满足数学模型满秩要求。

通过对 3 个参数的分析可知, 与电流的瞬时变化相比, R_s 和 Ψ_f 的变化缓慢, 可以在短时间内视为常量。而电感 L_s 变化较快且受影响的因素多, 甚至会因转子角度不同而产生较大差异。因此, 将定子电阻 R_s 和转子磁链 Ψ_f 划分为慢变化参量, 分时分步固定为常量满足系统的满秩条件; 将电感 L_s 划分为快变化参量, 在慢参量固定的时间内进行快参量辨识, 实现对快参量变化的跟踪。

3.1 慢参量辨识

慢参量辨识算法分为两步循环迭代辨识, 在已知一个慢参量 R_s 或 Ψ_f 的情况下, 辨识另一个慢参量和快参量, 在 2 个慢参量逐步收敛稳定到小于误差要求后, 固定慢参量的值, 为快参量辨识算法提供参数。因为电阻 R_s 可以通过毫欧表或直流伏安法测量获得, 方便简单, 所以本文在慢参量辨识过程中将 R_s 固定为入口参数。

在定子电阻 R_s 初次测量固定或辨识固定的情况下, 辨识转子磁链 Ψ_f 和电感 L_s 。将稳态电压方程式(4)变换得到式(7):

$$\begin{cases} U_d - R_s i_d = -\omega_e L_s i_q \\ U_q - R_s i_q = \omega_e L_s i_d + \omega_e \Psi_f \end{cases} \quad (7)$$

结合式(5)和式(6), 令 $n=2$, 可得输入数据、输出数据以及待辨识的参数序列如下:

$$\begin{cases} Y_m = \begin{bmatrix} U_d - R_s i_d \\ U_q - R_s i_q \end{bmatrix} \\ \Theta = \begin{bmatrix} L_s \\ \Psi_f \end{bmatrix} \\ \Phi_m = \begin{bmatrix} -\omega_e i_q & 0 \\ \omega_e i_d & \omega_e \end{bmatrix} \end{cases} \quad (8)$$

在转子磁链 Ψ_f 辨识固定的情况下, 辨识定子电阻 R_s 和电感 L_s 。将稳态电压方程式(4)变换可得:

$$\begin{cases} U_d = R_s i_d - \omega_e L_s i_q \\ U_q - \omega_e \Psi_f = R_s i_q + \omega_e L_s i_d \end{cases} \quad (9)$$

结合式(5)和式(6), 令 $n=2$, 可得输入数据、输出数据以及待辨识的参数序列如下:

$$\begin{cases} Y_m = \begin{bmatrix} U_d \\ U_q - \omega_e \Psi_f \end{bmatrix} \\ \Theta = \begin{bmatrix} R_s \\ L_s \end{bmatrix} \\ \Phi_m = \begin{bmatrix} i_d & -\omega_e i_q \\ i_q & \omega_e i_d \end{bmatrix} \end{cases} \quad (10)$$

3.2 快参量辨识

慢参量辨识算法迭代运算得到收敛的 R_s 和 Ψ_f , 在设定的时间内固定慢参量的值并进入快参量辨识算法, 辨识跟踪电感 L_s 。由于该部分待辨识参数只有一个, 则基于 q 轴稳态电压方程合理构造辨识模型。将稳态电压方程式(4)变换得到:

$$U_q - R_s i_q - \omega_e \Psi_f = \omega_e L_s i_d \quad (11)$$

结合式(5)和式(6), 令 $n=1$, 可得输入数据、输出数据以及待辨识的参数序列如下:

$$\begin{cases} Y_m = U_q - R_s i_q - \omega_e \Psi_f \\ \Phi_m = \omega_e i_d \\ \Theta = L_s \end{cases} \quad (12)$$

慢辨识算法中为了增加算法稳定性和促成最小二乘法格式, 待辨识参数序列也引入了 L_s 。但慢辨识算法主要关注慢参量的收敛, 而后续试验也发现在 R_s 和 Ψ_f 收敛时, 慢参量辨识算法辨识的 L_s 误差较大。因此, 电感 L_s 的辨识采用快辨识算法。

3.3 快慢参量分步迭代辨识

辨识算法流程如图 2 所示。将参数辨识算

法分为慢辨识与快辨识 2 部分,在电机稳定运行的阶段进入中断,读取电压电流和转速信号。初次辨识需要先测定慢参数类型中的一个,其中定子电阻 R_s 可以利用仪器直接测得,转子磁链可以在空载拖动指定转速的情况下,给定 dq 轴电流为零测得。若不是初次辨识,判断慢参量是否收敛,如果不收敛,进入慢参量辨识阶段;如果收敛,在设定的时间或变化范围内认定慢参量不改变,进入快参量辨识阶段。直到设定的时间达到或者变化的范围超出,认定慢参量发生改变,进入慢参量辨识算法再次更新慢参量的值。

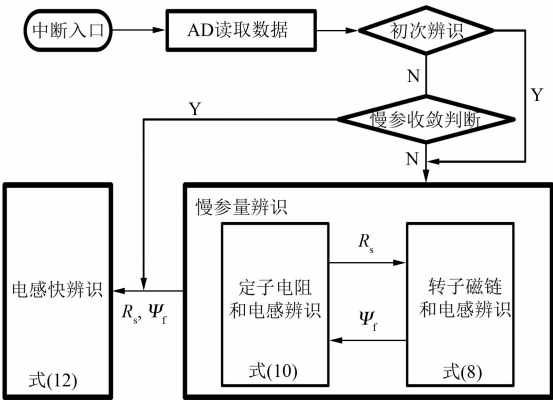


图 2 辨识算法程序流程图

4 试验结果

试验平台搭建如图 3 所示。控制器采用 TI 公司的 TMS320F28335 浮点型 DSP,进行电机矢量控制算法及参数辨识算法的开发。

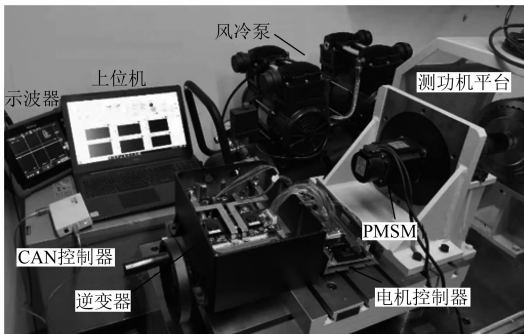


图 3 试验平台

电机型号为 90ST-M02430, SPMSM 参数如表 1 所示。

表 1 SPMSM 参数

参数名称	参数值
额定线电压/V	220
额定线电流/A	3
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
额定转矩/(N·m)	2.4
定子电阻 R_s/Ω	1.6
磁链 Ψ_f/Wb	0.133
电感 L_s/mH	3.5

采用 $i_d=0$ 控制方式,设计 PMSM 矢量控制算法以及双闭环调节使电机稳定运行。通过电流传感器采集相电流,经过 AD 转换送至 DSP 控制算法所需,观察电机起动和平稳运行阶段的相电流波形,分析得到辨识算法需要的电机稳态运行时的可靠数据集。图 4 为电机空载起动后平稳运行时的两相相电流波形。可以看出,电流波形平滑,无尖峰电流,辨识数据满足稳态电压方程。

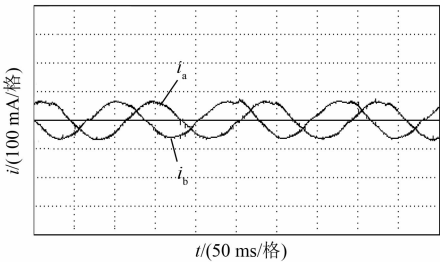


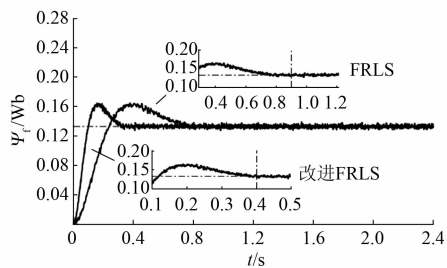
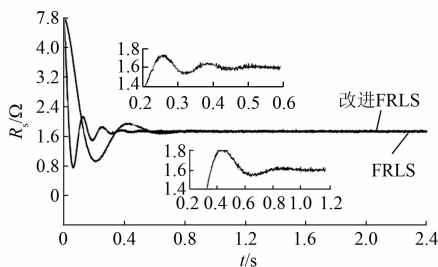
图 4 电机稳态运行相电流波形

4.1 空载起动辨识试验

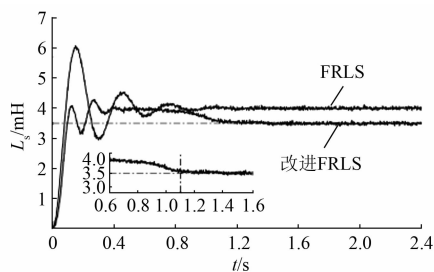
基于以上试验平台,采用图 2 的分步迭代辨识算法,即改进遗忘因子递推最小二乘算法(FRLS)进行参数辨识。利用毫欧表测得实际电机参数 R_s ,辨识算法进入慢参量辨识阶段,当 Ψ_f 的值收敛且变化率小于 5% 时,固定 Ψ_f 的值。 Ψ_f 辨识结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,在约 0.4 s 时 Ψ_f 已经基本收敛稳定,相较于改进前的遗忘因子 FRLS,收敛速度较快。当 R_s 和 Ψ_f 均固定时进入快参量辨识阶段。由于慢参量会缓慢变化,需要阶段更新, R_s 辨识结果如图 6 所示。

由图 6 可以看出,改进 FRLS 算法在 0.5 s 时 R_s 已经基本收敛稳定,与 FRLS 算法相比,辨识速度较快。因为在此之前慢参量 R_s 和 Ψ_f 均没有收

图5 空载试验 Ψ_f 辨识结果图6 空载试验 R_s 辨识结果

敛,所以 0.5 s 之前 FRLS 和改进 FRLS 的 L_s 辨识结果均不稳定且偏离了真实值。0.5 s 之后改进 FRLS 进入快辨识阶段,慢参量已经收敛且代入快辨识算法, L_s 很快收敛到了准确值。而 FRLS 由于仍然欠秩, L_s 辨识结果偏离了真实值。 L_s 辨识结果如图 7 所示。

图7 空载试验 L_s 辨识结果

4.2 负载辨识试验

电机负载运行所伴随的温度变化和磁路饱和现象是引起电磁参数变化的重要因素。定子电阻会随着温度的升高呈现明显的非线性变化。铁磁材料的磁导率会随温度不同和磁路饱和现象出现非线性变化,进而影响电感和转子磁链的变化。不同负载工况下的永磁体磁链如图 8 所示。

电机空载起动运行至稳定阶段后,进行负载工况下辨识试验。初始给定空载运行,持续至 5 s

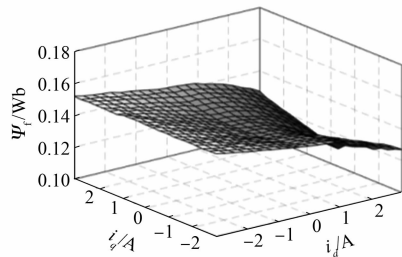
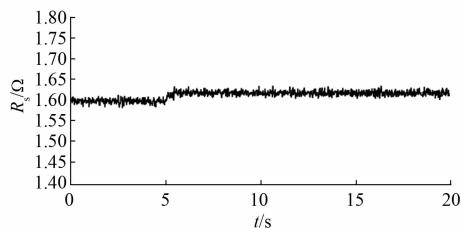


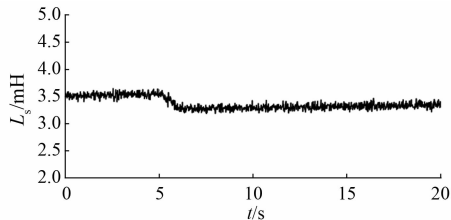
图8 不同负载工况下永磁体磁链

时通过测功机平台给定额定负载,通过分步迭代辨识算法对试验电机的定子电阻 R_s 、电感 L_s 及磁链 Ψ_f 进行相应辨识。

负载试验定子电阻 R_s 辨识结果如图 9 所示。可以看出,在 5 s 前为空载运行辨识结果,辨识值稳定在真实值;在 5 s 给定额定负载后,定子电流增大导致绕组温度升高, R_s 辨识值略有增大。

图9 负载试验 R_s 辨识结果

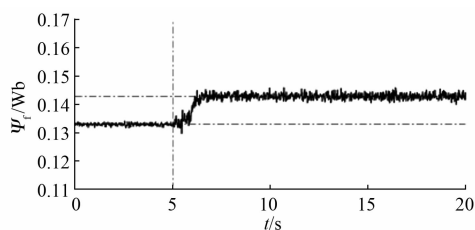
负载试验电感 L_s 辨识结果如图 10 所示。给定额定负载前的辨识结果基本接近于真实值,在 5 s 给定额定负载后,定子电流增大导致定子电磁化曲线靠拢饱和区域, L_s 辨识值相应减小。

图10 负载试验 L_s 辨识结果

负载试验磁链 Ψ_f 试验辨识结果如图 11 所示。空载工况下辨识结果与真实值基本一致,在 5 s 给定额定负载, Ψ_f 辨识值相应增大,辨识结果抖振略有增大。

4.3 温升动态辨识试验

电机参数变化受温度的影响较大,但是电机

图 11 负载试验 Ψ_f 辨识结果

内部的温度难以直接测量。由焦耳定律可知,通电导体差生的热量跟电流的二次方和时间成正比,跟导体电阻成反比。故考虑控制电机稳态运行时间,以电机定子电流标定电机内部温度。

设计测功机平台对拖试验将电机拖到期望转速,通过上位机控制电机以不同的定子电流稳态运行相同时间(设定 15 min),进而改变不同温度下的电阻和磁链。利用离线辨识和分步辨识算法辨识电机参数,结果如图 12 所示。

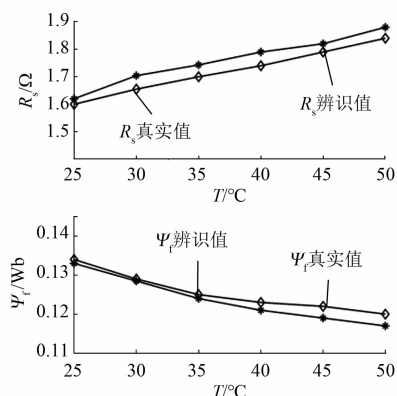


图 12 慢参数随温度变化曲线

由图 12 可以看出,随着温度上升, R_s 会缓慢上升, Ψ_f 会缓慢下降,而快慢参量分步迭代辨识算法可以准确地跟踪参数的变化。

5 结 语

本文分析了 PMSM 参数动态辨识的数据相位延迟错拍和稳态辨识模型欠缺问题。在矢量控制的基础上控制电机平稳运行,采集稳态数据。设计以参量变化快慢为依据的分步迭代辨识算法,通过 FRLS 辨识电机参数,能够快速收敛至实际值,并且随着温度的改变可以有效地跟随电机参

数的变化。而且分步辨识算法可以根据实际运行情况分阶段调节计算量,降低了 DSP 的计算压力。

【参考文献】

- [1] 刘细平,胡卫平,丁卫中,等. 永磁同步电机多参数辨识方法研究[J]. 电工技术学报,2020,35(6): 1198.
- [2] BOILEAU T, LEBOEUF N, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Online identification of PMSM parameters: parameter identifiability and estimator comparative study [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1944.
- [3] 吴敏,俞烨隆. 基于 FFRLS 与转速扰动注入法的永磁同步电机在线参数辨识[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(4): 44.
- [4] 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.
- [5] REIGOSA D D, BRIZ F, GARCÍA P, et al. Magnet temperature estimation in surface PM machines using high-frequency signal injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(4): 1468.
- [6] LIU K, ZHANG Q, CHEN J, et al. Online multiparameter estimation of nonsalient-pole PM synchronous machines with temperature variation tracking [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1776.
- [7] 刘金海,陈为. 表贴式永磁同步电机准稳态多参数在线辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 154.
- [8] 牛莹,路建,尹小龙. 一种有效的异步电机参数辨识方法及运用[J]. 微特电机, 2020, 48(10): 54.
- [9] 刘细平,胡卫平,邹永玲,等. 改进粒子群算法的永磁同步电机多参数辨识[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(7): 112.
- [10] 秦灿华,高巧玲. 基于高频电压注入的永磁同步电机参数辨识方法[J]. 微特电机, 2020, 48(5): 14.
- [11] 王利辉,张旭,张伟锋. 基于神经网络的永磁同步电机参数辨识[J]. 电力电子技术, 2020, 54(5): 47.
- [12] 刘永钦,沈艳霞,纪志成. 基于改进型最小二乘法的感应电机转动惯量辨识[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(12): 13.