

基于电压电流混合模型的新型磁链观测器*

时维国, 桑尧尧

(大连交通大学 电气信息工程学院, 辽宁 大连 116028)

摘要: 针对传统磁链观测器存在的积分饱和及直流漂移等问题, 提出一种改进的电压电流混合模型磁链观测器。通过对定子磁链观测器的理论分析, 对传统电压模型积分方法进行改进并结合电流模型磁链观测器, 提出了基于电压电流混合模型的磁链观测器, 可以在全速范围内观测到精确的定子磁链, 解决了在不同转速下, 直流偏置、幅值衰减和相位偏移等问题。混合磁链观测器在中速区存在相位误差, 引进补偿环节, 对混合模型的输出结果进行相位补偿, 降低了饱和效应引起的误差影响, 提高了磁链观测器的动态性能。通过仿真对比, 验证了改进混合模型磁链观测器在永磁同步电机(PMSM)直接转矩控制中的可行性和优越性。

关键词: 永磁同步电机; 磁链观测器; 混合模型; 直接转矩控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)07-0014-06

Novel Flux Observer Based on Voltage-Current Hybrid Model*

SHI Weiguo, SANG Yaoyao

(School of Electronics and Information Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Aiming at the problems of integral saturation and DC drift in traditional flux observer, an improved voltage-current hybrid model flux observer was proposed. Through the theoretical analysis of the stator flux observer, the traditional voltage model integration method was improved. Combined with the current model flux observer, a voltage-current hybrid model flux observer was proposed, which could observe the accurate stator flux in the full speed range. The flux linkage solved the problems of DC offset, amplitude attenuation and phase shift at different speeds. The hybrid flux observer had phase error at the medium speed. To solve this problem, the compensation link was introduced to compensate the output of the hybrid model, which reduced the error caused by the saturation effect, and the dynamic performance of the flux observer was improved. The feasibility and superiority of the improved hybrid model flux observer in the direct torque control of permanent magnet synchronous motor were verified by simulation.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); flux observer; hybrid model; direct torque control (DTC)

0 引言

永磁同步电机(PMSM)具有多变量非线性强耦合等特点。为了应用于生活中, 需要更加快速且稳定地控制电机。直接转矩控制(DTC)是利用逆变器输出电压矢量直接控制电机定子磁链和电磁转矩的控制方法。在DTC中, 直接控制定子磁链和电磁转矩, 定子磁链和电磁转矩的估计精度

影响整个控制系统的性能; 同时, 电磁转矩的计算需要PMSM定子磁链, 即PMSM电磁转矩的控制精度取决于对电机定子磁链观测的准确度^[1-2]。因此, 对定子磁链的观测是直接转矩系统中非常重要的一环。

文献[3]采用低通滤波器来代替传统电压模型观测方法, 导致了观测定子磁链的幅值和相位出现误差。文献[4]提出对定子磁链进行限幅,

* 基金项目: 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540141)

作者简介: 时维国(1973—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为网络控制和电机驱动控制。

桑尧尧(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动控制。

然后加入高通滤波器来对磁链幅值进行补偿,但无法解决相位偏移问题。文献[5]采用新型纯积分方法在线辨识磁链,方法简单,易于实现,但在低速区性能较差。文献[6]提出采用锁相环的改进电压模型磁链观测器,基本上解决了直流偏置和积分初始值偏差问题,但在低速阶段,电机定子电动势受电阻压降影响大,测量误差较大,改进电压模型不能准确测量定子磁链。基于精确的电机数学模型、采用降阶状态观测器取代传统电压模型观测定子磁链^[7],或用于异步电机的基于扩展卡尔曼滤波的定子磁链观测器观测定子磁链^[8],或采用模型参考自适应方法辨识定子磁链^[9],均取得了较好的观测效果,但是上述方法中的观测器结构复杂。文献[10]引入一阶低通滤波器与一阶高通滤波器的串联结构,来消除电压模型磁链观测器的直流偏置和积分初值设置问题,并通过补偿环节补偿滤波器引入的幅值和相位误差。但是并没有解决电压模型观测器在低速范围内误差大的问题,同时滤波器的截止频率也会影响电机的调速性能。

根据上述问题,本文改进了传统电压模型,并与电流模型结合,提出了一种电压电流混合模型新型定子磁链观测器,通过引入PI反馈校正环节对混合模型的输出结果进行相位补偿,降低了饱和效应引起的误差影响,并调整电压模型与电流模型的耦合度,实现二者平滑切换。

1 PMSM 定子磁链观测方法

1.1 传统定子磁链观测方法

分析 PMSM 基本数学模型,利用检测所得的电机绕组电流以及永磁磁链值,可以推导出定子磁链的电流观测模型:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_{sq} = L_q i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: ψ_{sd} 、 ψ_{sq} ——直、交轴磁链;

L_d 、 L_q ——直、交轴电感;

i_d 、 i_q ——直、交轴电流;

ψ_f ——永磁体磁链。

由式(1)可知,与电压模型磁链观测器相比,电流模型磁链观测器对 PMSM 磁链真实值的观测速度更快、更精确。但电流观测模型需要电机直交轴电感、永磁体磁链以及转子的位置,对参数

的依赖较大,在高负载和高转速时,磁路饱和导致电感和磁链非线性变化,在温度等参数变化的情况下,结果误差较大。

定子磁链观测电压模型为

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - R i_{s\alpha}) dt \\ \psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - R i_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\psi_{s\alpha}$ 、 $\psi_{s\beta}$ —— α 、 β 轴上的定子磁链分量;

$u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ —— α 、 β 轴上的定子电压分量;

R ——定子电阻;

$i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$ —— α 、 β 轴上的定子电流分量。

在电压模型磁链观测器中,利用开关表状态和母线电压,计算可得相电压:

$$\begin{cases} U_A = \frac{1}{3} U_{dc} (2S_A - S_B - S_C) \\ U_B = \frac{1}{3} U_{dc} (2S_B - S_A - S_C) \\ U_C = \frac{1}{3} U_{dc} (2S_C - S_A - S_B) \end{cases} \quad (3)$$

式中: U_A 、 U_B 、 U_C ——三相绕组的相电压;

S_A 、 S_B 、 S_C ——驱动变换器的三相桥臂的开关状态;

U_{dc} ——驱动直流电源电压。

对式(2)、式(3)分析可知,在电压模型磁链观测器中,观测定子磁链只需要电机定子电阻,受电机其他参数以及外界因素的影响较小,鲁棒性更高。但当 PMSM 运行在低速区时,电压模型磁链观测方法由于受电阻参数的影响,观测精度较差。此外,电压观测模型的最关键问题在于积分方法,传统 DTC 定子磁链的电压模型采用的是纯积分器。由式(2)可知,在电压模型磁链观测方法中,磁链观测值由纯积分器对电机反电动势进行积分,由于反电动势作为一个正弦量并存在初始角度的问题,当纯积分器对反电动势进行积分时,如果包含直流分量,那么将导致磁链观测值出现积分饱和问题。

1.2 改进的电压模型积分方法

针对纯积分器在观测定子磁链时存在的一系列问题,本文提出通过对积分方法进行优化来提高对定子磁链的观测效果。

首先可以在纯积分器的基础上添加高通滤波器,用来消除反电动势中的直流分量,解决积分结

果中的直流偏置问题。对应的传递函数为

$$\psi_s(s) = \frac{1}{s} \cdot \frac{s}{s + \omega_c} e_s(s) \quad (4)$$

式中: ω_c ——积分器的截止角频率;

e_s ——电机反电动势。

化简可得一阶惯性滤波器:

$$\psi_s(s) = \frac{1}{s + \omega_c} e_s(s) \quad (5)$$

低频信号被高通滤波器阻断,根据高频信号特性,直流偏置被积分方法滤除。在低速时,高通滤波器的幅频和相频特性如式(6)、式(7)所示:

$$|G(j\omega)| = \frac{\omega}{\sqrt{\omega^2 + \omega_c^2}} \quad (6)$$

$$\angle G(j\omega) = \frac{\pi}{2} - \cot^{-1} \frac{\omega}{\omega_c} \quad (7)$$

由此可见,在观测到定子磁链时同时存在幅值衰减和相位误差问题。针对该问题,增加反馈补偿上述的幅值和相位的误差^[11]。幅值限定补偿改进积分器控制框图如图1所示。

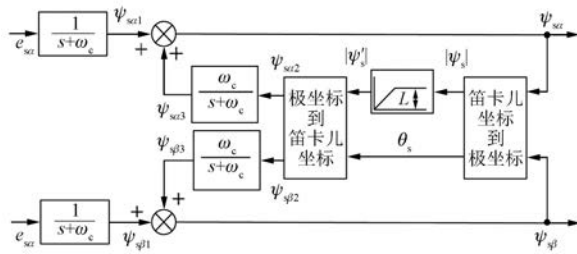


图1 幅值限定补偿改进积分器控制框图

由图1可见,新型积分方法添加一个反馈,反馈首先通过直角坐标系和极坐标系转换保持磁链的相位角作用,同时通过限幅环节抑制幅值衰减问题,而限幅环节的幅值通常设置为定子磁链给定值,可得系统的传递函数:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{1}{s + \omega_c} e_{s\alpha} + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \psi_{s\alpha 2} \\ \psi_{s\beta} = \frac{1}{s + \omega_c} e_{s\beta} + \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \psi_{s\beta 2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $e_{s\alpha}$ 、 $e_{s\beta}$ —— α 、 β 轴上的反电动势分量。

由式(8)可知,输入高频反电动势信号时,增益为零,反馈并不起作用;输入低频反电动势信号时,如果定子磁链观测幅值小于幅值限定值时,反馈通道的磁链幅值为前一时刻得到的磁链观测幅

值,有:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{1}{s} e_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} = \frac{1}{s} e_{s\beta} \end{cases} \quad (9)$$

改进的积分器等效于纯积分器,但因为增加了一个高通滤波器,所以依然能够抑制产生的直流偏置。

如果定子磁链观测幅值大于限幅值,此时反馈的磁链幅值等于幅值限定值^[12]:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = \frac{s\psi_{s\alpha}}{s + \omega_c} + \psi_{s\alpha} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} = \frac{e_{s\alpha}}{s + \omega_c} + \psi_{s\alpha} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \\ \psi_{s\beta} = \frac{s\psi_{s\beta}}{s + \omega_c} + \psi_{s\beta} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} = \frac{e_{s\beta}}{s + \omega_c} + \psi_{s\beta} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \end{cases} \quad (10)$$

同样可得精确的定子磁链观测结果。

2 电压电流混合模型磁链观测器

电流模型磁链观测器对参数依赖大,并且容易被电机参数的变化和外界因素影响。但是,电流模型磁链观测器在低、高速范围内均可以使用,是受参数影响较小。电压模型磁链观测器利用电机反电动势计算得到电机的定子磁链,电机运行在中高速区时,反电动势相对较高,可以准确得到磁链观测值。但电机运行在低速区时,定子电阻分压较大,导致磁链观测不够准确,且电压模型磁链观测器中纯积分环节存在的问题对磁链观测值影响较大^[13]。

因此,通过对2种磁链观测器分析,将两者结合,电机运行在低速区时采用电流模型观测器;电机运行在中高速区时使用电压磁链观测器。同时,采用改进的电压模型磁链观测器代替传统电压模型磁链观测器。结合两者的优点,可以使变频系统在全速度范围内获得最优磁链估算值。

基于混合模型的磁链观测器如图2所示。

由图2可知,定子磁链表达式为

$$\begin{aligned} \psi_s = & \left[(\psi_{sc} - \psi_s) \left(K_1 + \frac{K_2}{s} \right) + (u_s - R_s i_s) \right] \frac{1}{s} = \\ & \psi_{sc} \left(1 - \frac{s^2}{s^2 + K_1 s + K_2} \right) + \psi_{sv} \frac{s^2}{s^2 + K_1 s + K_2} \end{aligned} \quad (11)$$

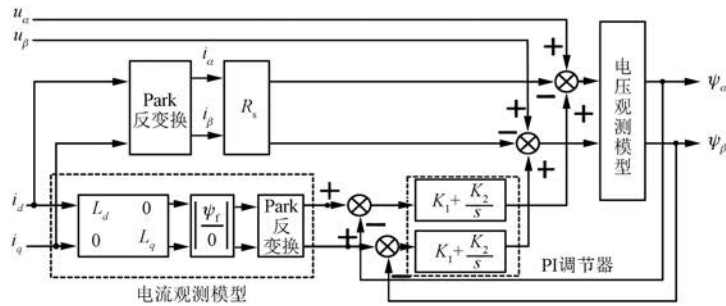


图2 基于混合模型的磁链观测器

式中: ψ_s ——转矩估计用的总磁链观测值;

ψ_{sc}, ψ_{sv} ——由电流模型和电压模型得到的定子磁链值, ψ_{sc} 和 ψ_{sv} 两项的系数和为 1。

定义 ψ_{sv} 的系数为 $H(s)$, 如式(12)所示:

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_1 s + K_2} \quad (12)$$

式(12)所示的函数可视为电压模型观测到的定子磁链占总磁链观测值的权重函数。若 K_1, K_2 为零, 则混合模型为电压模型; 若 K_1, K_2 为无穷大, 则混合模型为电流模型^[14]。

当电机稳态运行时, 令 $s = j\omega_e$, ω_e 为电机的同步电角速度, 则式(12)中的频域表达式为

$$H(j\omega_e) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_1\omega_e)^2 + (K_2 - \omega_e^2)^2}} \cdot e^{j\left\{\pi - \arctan\left[\frac{K_1\omega_e}{(K_2 - \omega_e^2)}\right]\right\}} \quad (13)$$

式(13)中 $e^{j\left\{\pi - \arctan\left[\frac{K_1\omega_e}{(K_2 - \omega_e^2)}\right]\right\}}$ 的存在使得磁链观测在中速区有较大的偏差。为此, 需要对混合模型进行相位补偿, 消除 $e^{j\left\{\pi - \arctan\left[\frac{K_1\omega_e}{(K_2 - \omega_e^2)}\right]\right\}}$ 。相位补偿后的磁链观测器如图3所示。

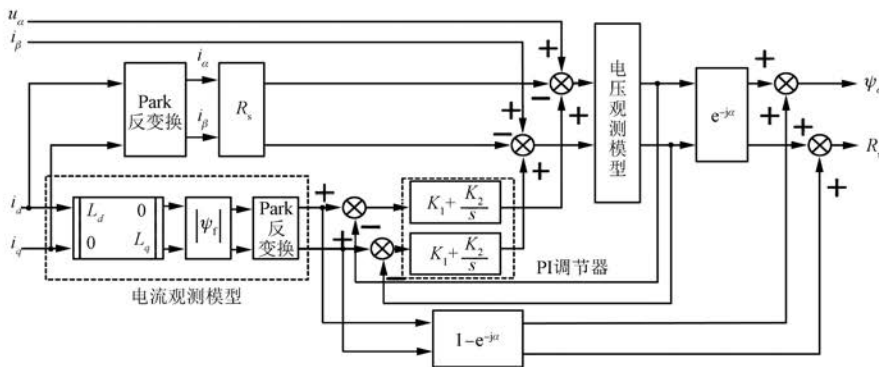


图3 相位补偿的混合模型磁链观测器

图3 相位补偿后的 $H(s)$ 如式(14)所示^[15]:

$$H(s) = \frac{s^2}{s^2 + K_1 s + K_2} e^{-j\alpha} \quad (14)$$

其中, $\alpha = \pi - \arctan\left[\frac{K_1\omega_e}{(K_2 - \omega_e^2)}\right]$, 由此可得:

$$H(s) = \frac{\omega_e^2}{\sqrt{(K_1\omega_e)^2 + (K_2 - \omega_e^2)^2}} \quad (15)$$

3 仿真结果及分析

3.1 积分方法对比仿真

为了验证改进的电压模型磁链观测器, 在 MATLAB 环境下对传统纯积分与改进后的积分方法进行仿真对比, 设置改进积分器的截止角频率 $\omega_c = 10 \text{ rad/s}$ 。当输入高频反电动势信号 $\omega = 1000 \text{ rad/s}$ 与低频反电动势信号 $\omega = 20 \text{ rad/s}$ 时, 得到 α 轴定子磁链波形图, 如图4、图5所示。

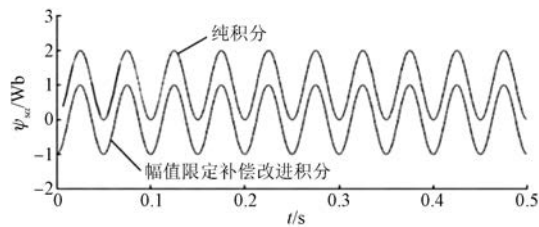


图4 $\omega=1\,000\text{ rad/s}$ 时改进方法的磁链观测对比仿真波形

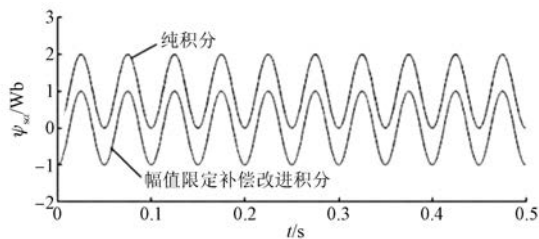


图5 $\omega=20\text{ rad/s}$ 时改进方法的磁链观测对比仿真波形

通过图4、图5对比结果可知,在输入高、低频反电动势信号时,纯积分器会产生直流偏置,但幅值限定补偿改进积分器能够抑制直流偏置,并且没有出现幅值衰减和相位前移。同时幅值限定补偿改进积分器能够准确跟踪磁链,有较好的观测性能。

3.2 新型磁链观测器在 DTC 系统中的仿真分析

为了验证改进的混合模型磁链观测器的性能,在 MATLAB/Simulink 的环境下建立基于改进混合模型磁链观测器的 DTC 系统仿真模型。系统中 PMSM 参数如表1所示。

表1 PMSM 参数

参数名称	参数值
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	1 500
额定功率/kW	3
定子电阻/ Ω	1.115
d 轴电感/mH	8.5
q 轴电感/mH	8.6
极对数	2

图6所示为正弦信号作为输入时,改进磁链观测器的输出结果和对应频谱分析图。图7所示为定子电流结果和对应频谱分析图。

通过对图6、图7分析可知,电压电流混合模型

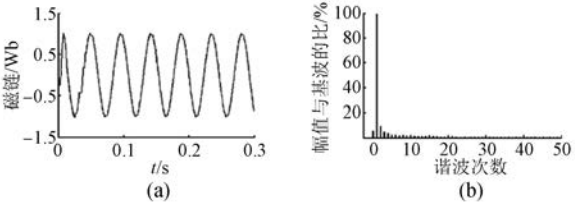


图6 定子磁链波形与频谱分析图

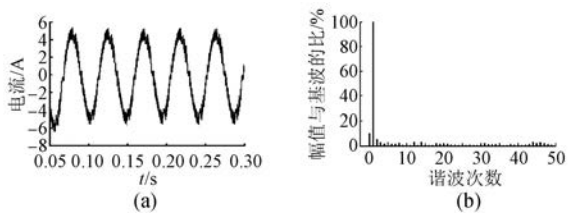


图7 定子电流波形与频谱分析图

新型磁链观测器有效地补偿了定子磁链,减弱了饱和效应的影响;定子电流并未出现严重偏差和失真。频谱分析得到的高次谐波也相对较少。

为了进一步验证改进方法法的有效性,给定转速为1 000 r/min,转矩为30 N·m,截止频率 $\omega_c=20\text{ rad/s}$ 。在 $t=0.4\text{ s}$ 时,转速下降至100 r/min。

基于低通滤波器和改进混合模型的磁链观测器的转矩波形分别如图8、图9所示。

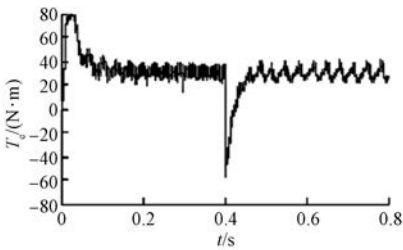


图8 基于低通滤波器的磁链观测器的转矩波形

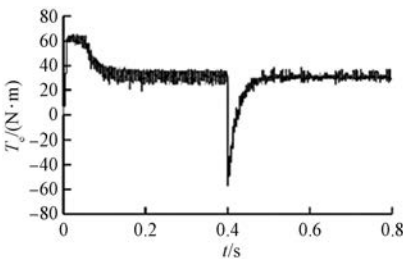


图9 基于改进混合模型的磁链观测器的转矩波形

对比图8、图9可见,在加入直流偏置量后,转矩波动较大。由图9可看出,基于改进的电压

电流混合模型新型磁链观测器观测得到的定子磁链波动较小,可以有效抑制磁链波动及幅值、相位的误差。由对比结果可看出,基于低通滤波器的磁链观测器中的观测结果波动较大,无法精确快速地观测得到定子磁链;电压电流混合模型新型磁链观测器的观测结果误差更小、精确度更高。

4 结 语

本文在混合模型磁链观测器的基础上,对电压模型部分进行了改进,并针对混合磁链观测器在中速区存在相位误差等问题,引进了相位补偿环节,降低了饱和效应引起的误差影响。同时混合模型磁链观测器不需要对电机参数进行在线调整,因此可以准确观测定子磁链,保证了在全速范围内直接转矩控制系统是有较好的效果。通过仿真结果和分析,验证了该方法的可行性,证明了改进的混合模型磁链观测器能够有效的改善定子磁链观测结果。

【参 考 文 献】

- [1] 何志明,廖勇,向大为.定子磁链观测器低通滤波器的改进[J].中国电机工程学报,2008,28(18): 61.
- [2] 厉虹,韩晔,王久和.改进的永磁同步电机直接转矩控制系统研究[J].电气传动,2017,47(11): 9.
- [3] 许净,王辉,谭健,等.基于新型磁链观测模型的矢量控制系统研究[J].电气传动,2008,38(5): 1.
- [4] HU J, WU B. New integration algorithms for estimating motor flux over a wide speed range [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13 (5): 969.
- [5] 宋庆启,苏文胜,黄晓明,等.基于新型纯积分法的定子磁链在线辨识算法[J].电机与控制应用,2017,44(10): 88.
- [6] 丁曙光,江跃.电动汽车空调无位置传感器的内置式永磁同步电机控制研究[J].电机与控制应用,2018,45(3): 1.
- [7] 王斌,王跃,郭伟,等.基于定子磁链降阶状态观测的永磁同步电机无差拍直接转矩控制系统[J].电工技术学报,2014,29(3): 160.
- [8] 张勇军,王京,李华德.基于遗传算法优化的定子磁链扩展卡尔曼估计方法[J].电工技术学报,2009,24(9): 64.
- [9] MAES J, MELKEBEEK J A. Speed-sensorless direct torque control of induction motors using an adaptive flux observer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36(3): 778.
- [10] 史黎明,王珂,李耀华.基于改进磁链观测器的直线异步电动机直接牵引力控制[J].电工技术学报,2008,23(9): 45.
- [11] 杨影,黄锐,余衍谱.直接转矩控制中定子磁链观测方案对比研究[J].电机与控制应用,2016,43(7): 7.
- [12] 张乐,杨强.永磁同步电机磁链观测改进积分方法的研究[J].微特电机,2018,46(11): 35.
- [13] 戴鹏,付凤超,符晓,等.电励磁同步电机两种综合磁链模型观测器[J].电气传动,2011,41(10): 12.
- [14] 赵文武,李晓艳,于明,等.异步电动机矢量控制混合磁链模型的设计与实现[J].电气传动,2017,47(12): 30.
- [15] 朱元,熊礼勇,吴志红,等.一种永磁同步电机转矩估计融合算法[J].信息通信,2018(4): 54.
- [8] BERNARES T, MONTAGNER V F, GRUNDLING H A, et al. Discrete-time sliding mode observer for sensorless vector control of permanent magnet synchronous machine [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(4): 1679.
- [9] 李东,冯金磊,孔全存,等.基于双H桥变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J].电机与控制应用,2018,45(7): 30.
- [10] 郭子钊,佃松宜,向国菲.基于卡尔曼滤波算法的无刷直流电机直接转矩控制[J].科学技术与工程,2016,16(17): 49.
- [11] 李珍国,章松发,周生海,等.考虑转矩脉动最小化的无刷直流电机直接转矩控制系统[J].电工技术学报,2014,29(1): 139.
- [12] 章松发.无刷直流电机无磁链环直接转矩控制系统的四象限运行[D].秦皇岛:燕山大学,2012.
- [13] 杨建飞,胡育文.无刷直流电机无磁链观测直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2011,31(12): 90.
- [14] 安群涛,孙立志,刘超,等.无刷直流电机的磁链自控直接转矩控制[J].中国电机工程学报,2010,30(12): 86.
- [15] 柳振,郭庆,徐翠锋.基于电动汽车驱动用无刷直流电机控制仿真[J].电机与控制应用,2018,45(7): 102.

收稿日期: 2019-03-25

(上接第13页)

收稿日期: 2019-02-21