

基于 mSDTFT 的无速度传感器异步电机转速估计

宋向金^{1,2,3}, 胡静涛^{1,2}, 祝洪宇⁴, 张吉龙¹

(1. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;

2. 中国科学院 网络化控制系统重点实验室, 辽宁 沈阳 110016;

3. 中国科学院大学, 北京 100049;

4. 辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 采用 Teager-Kaiser 能量算子对定子电流进行解调, 有效消除了基频频谱泄露对提取转子速度谐波的影响, 然后分析了 SDTFT 对转速估计精度的影响, 在此基础上提出一种新的 mSDTFT 频谱分析方法估计转速。该方法有效降低了计算开销, 特别是可以只针对某些需要的谱线进行计算, 提高了谱分析的灵活性和高效性。试验结果表明, 所提方法在不同负载条件下能够有效提取转子速度谐波, 且具有较高的转速估计精度。

关键词: 偏心谐波; 转子速度谐波; Teager-Kaiser 能量算子; mSDTFT; 转速估计

中图分类号: TM 343 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)01-0083-06

Sensorless Speed Estimation for an Induction Motor Using mSDTFT

SONG Xiangjin^{1,2,3}, HU Jingtao^{1,2}, ZHU Hongyu⁴, ZHANG Jilong¹

(1. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

2. Key Laboratory of Networked Control System, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. School of Electronic and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: The stator current was first demodulated by the Teager-Kaiser energy operator, thus this could effectively eliminate the effect of the supply component spectral leakage on extracting the speed harmonic component. Then the influence of SDTFT on the precision of speed estimation was analyzed, and a new method for mSDTFT frequency analysis used to speed estimation was proposed. The mSDTFT method largely reduced the computational overhead, especially for certain spectrum lines that need. The mSDTFT method also could improve the flexibility and effectiveness of spectral analysis. Experimental results showed that the proposed method could validity extract the speed harmonic component under different load conditions, and had high precision of speed estimation.

Key words: eccentricity harmonics; speed harmonic component; Teager-Kaiser energy operator; mSDTFT; speed estimation

0 引言

异步电动机作为电力传动系统的核心部件, 其转速估计对电力传动系统矢量控制、在线状态

监测及故障诊断等具有重要意义^[1-4]。由于具有缩小系统体积、降低系统维护成本及提高系统在恶劣环境下工作的可靠性等优点, 无速度传感器转速估计一直是众多学者的研究热点。

作者简介: 宋向金(1989—), 女, 博士, 研究方向为电机状态监测与故障诊断。

胡静涛(1967—), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为设备远程监测与故障诊断。

祝洪宇(1971—), 男, 副教授, 研究方向为电机状态监测与故障诊断。

目前,异步电机无速度传感器转速估计方法可分为3类:(1)基于电动机数学模型计算转速;(2)基于闭环控制作用构造转速信号;(3)利用电动机结构特征提取转速信号^[5]。

由于不受电动机数学模型误差和参数变化的影响,所以利用电动机结构特征提取转速信号的方法得到了科研工作者的广泛研究,主要包括基于齿谐波的转速估计方法^[6-9]和基于电机固有偏心谐波的转速估计方法。其中,基于齿谐波转速估计方法一直以来运用较为广泛,然而研究实践表明,齿谐波有可能不存在在异步电机中,导致无法利用齿谐波估计转速^[10]。同时,制造工艺及装配误差等因素造成电机的定子和转子之间存在不均匀的气隙,进而引起定子电流中某种特定的频率变化,即电机固有偏心谐波。因此,通过监测这些特征分量的大小,可以实现转速估计。

近年来,对固有偏心谐波在电机无速度传感器转速估计的研究主要包括两个方面:(1)基频频谱泄露的抑制;(2)提高转速估计的精度。文献[11]提出使用希尔伯特变换对定子电流作相位和幅度解调,以削弱基频频谱泄露的影响,并使用插值傅里叶变换改善转速估计的精度。试验结果表明使用相位解调信号实现了在稳态和暂态情况下较宽范围的转速估计。文献[12]则提出对定子电流作派克变换,提取空间矢量角波动信号进行转速估计,实现了变频器供电的异步电机稳态转速估计。文献[13]提出使用一种自适应频率跟踪方法,利用电机固有偏心谐波进行转速估计,研究结果表明该方法能够快速跟踪转速信号的变换,具有较强的鲁棒性和实时性。

本文在研究众多解调方法中,分析了Teager-Kaiser能量算子(Teager-Kaiser Energy Operator, TKEO)对定子电流的解调作用。为了提高转速估计精度,在滑动离散时间傅里叶变换(Sliding Discrete Time Fourier Transforms, SDTFT)基础上,提出了一种基于mSDTFT(Modulated Sliding Discrete Time Fourier Transforms, mSDTFT)频谱分析的固有偏心谐波无速度传感器转速估计方法,并将试验结果与SDTFT结果对比分析证明了所提方法的有效性。

1 基于固有偏心谐波检测的转速估计原理

电机的固有偏心包括静态偏心和动态偏心。静态偏心是由于加工不精确或转子装配误差,造成定子中心与转轴中心不重合,使得定转子之间气隙出现偏心的现象,其径向最小气隙长度在空间上是固定的;而动态偏心则是由转轴挠曲、转子铁心与转轴或轴承不同心或转子铁心不圆等原因造成,其径向最小气隙长度随着转子旋转^[14]。由于设计及制造工艺等问题,异步电机不存在单一的静态或动态偏心,二者在一定程度上同时存在^[15]。

转子偏心的存在,会使定子间径向气隙长度变得不均匀,进而影响电机的气隙磁导。由于气隙磁通密度等于磁导与磁动势的乘积,气隙磁通密度也会受到影响,最终定子电流频谱中会形成一些特定的频率分量。

为简化分析,选择定、转子最小气隙处为机械角 θ 原点的坐标系,如图1所示。

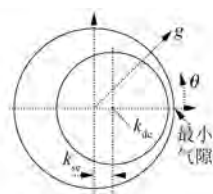


图1 气隙偏心

不考虑定、转子线槽的影响,当转子偏心时,径向气隙长度近似为^[16-17]

$$g(\theta, t, k_{se}, k_{de}) = g_0 [1 - k_{se} \cos(\theta) - k_{de} \cos(\theta - w_r t)] \quad (1)$$

式中: θ ——标定气隙周向位置的机械角度;

t ——时间;

k_{se} 、 k_{de} ——静态偏心度和动态偏心度,

$$0 \leq k_{se} < 1, 0 \leq k_{de} < 1;$$

g_0 ——不偏心时气隙径向长度;

w_r ——转子角频率, $w_r = 2\pi f_r$;

f_r ——转子速度频率。

忽略气隙磁导高阶分量后,对单位面积气隙磁导进行幂级数展开为

$$\Lambda(\theta, t, k_{se}, k_{de}) = \frac{\mu_0}{g(\theta, t, k_{se}, k_{de})} =$$

$$\Lambda_0 [1 + k_{se} \cos(\theta) + k_{de} \cos(\theta - 2\pi f_r t)] \quad (2)$$

式中: μ_0 ——气隙磁导系数;

$\Lambda_0 = \mu_0 / g_0$ ——气隙磁导常值分量。

仅考虑气隙基波磁动势, 转子偏心情况下的气隙磁通密度如下所示:

$$B_g(\theta, t, k_{se}, k_{de}) = F(\theta, t) \Lambda(\theta, t, k_{se}, k_{de}) =$$

$$F_1 \cos(p\theta - 2\pi f_1 t) \Lambda(\theta, t, k_{se}, k_{de}) =$$

$$F_1 \Lambda_0 [\cos(p\theta - 2\pi f_1 t) +$$

$$\frac{1}{2} k_{se} \cos[(p \pm 1)\theta - 2\pi f_1 t] +$$

$$\frac{1}{2} k_{de} \cos[(p \pm 1)\theta - 2\pi(f_1 \pm f_r)t] \quad (3)$$

式中: F ——气隙基波磁动势;

F_1 ——基波磁动势幅值;

p ——极对数;

f_1 ——供电频率。

由式(3)可以看出, 转子偏心后, 气隙磁通密度不仅会在定子电流中感应出 f_1 次谐波, 还会产生 $(f_1 \pm f_r)$ 次谐波, 即固有偏心谐波 f_{ecc} 。

通过转子偏心在定子电流中感应的固有偏心谐波, 可以获得计算任意滑差条件下的转子速度谐波公式:

$$f_r = f_1 \pm f_{ecc} \quad (4)$$

2 基于电机固有偏心谐波检测的转速估计方法

2.1 基于电机固有偏心谐波检测的转速估计方法原理框图

本文提出的无速度传感器转速估计方法原理框图如图2所示。主要由数据采集、Teager-Kaiser 能量算子解调变换、mSDTFT 频谱分析和谱峰估计4部分组成。首先, 采用 Teager-Kaiser 能量算子对采集得到的定子电流进行解调, 可以削弱基波频谱泄露的影响, 有利于转子速度谐波 f_r 的提取。然后, 构造特征信号 $i_{TKEO}(n)$, 并对特征信号进行 mSDTFT 频谱分析。最后, 通过谱峰识别得到转子速度谐波 f_r , 即估计转速。使用本文提出的 mSDTFT 频谱分析估计转速, 可以针对需要的谱线进行计算, 不仅能提高转速估计的精度, 而且进一步减少计算量, 可以满足实际应用要求。

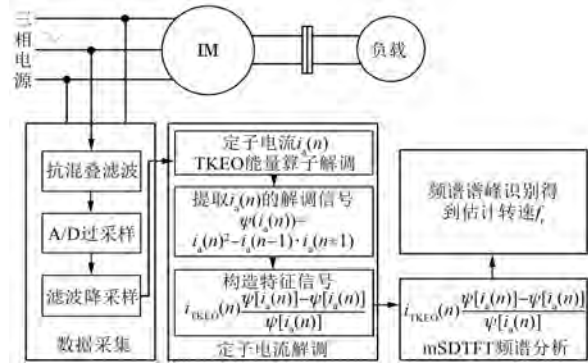


图2 基于电机固有偏心谐波检测的转速估计方法原理框图

2.2 基于 Teager-Kaiser 能量算子的转子速度谐波提取方法

由于基频频谱泄露, 故直接对定子电流作频谱分析来识别电机固有偏心谐波极为困难。通过使用 Teager-Kaiser 能量算子对定子电流进行解调, 能够将固有偏心谐波 $(f_1 \pm f_r)$ 中的转子速度谐波 f_r 解调出来, 从而消除基频频谱泄露对转子速度谐波 f_r 的影响, 有利于实现转子速度谐波 f_r 的提取。

假设定子电流中出现固有偏心谐波 $(f_1 - f_r)$, 电机定子电流 i_a, i_b, i_c 表示为

$$\begin{cases} i_a(t) = I_{\max} \cos(2\pi f_1 t + \phi) + I_{ecc} \cos[2\pi(f_1 - f_r)t + \phi_e] \\ i_b(t) = I_{\max} \cos(2\pi f_1 t + \phi - 2\pi/3) + I_{ecc} \cos[2\pi(f_1 - f_r)t + \phi_e - 2\pi/3] \\ i_c(t) = I_{\max} \cos(2\pi f_1 t + \phi + 2\pi/3) + I_{ecc} \cos[2\pi(f_1 - f_r)t + \phi_e + 2\pi/3] \end{cases} \quad (5)$$

式中: $I_{\max}$ 、 ϕ ——定子电流基频分量的最大值和初始相角;

I_{ecc} 、 ϕ_e ——定子电流中固有偏心谐波分量的最大值和初始相角。

Teager-Kaiser 能量算子解调只需一相定子电流, 假设使用 a 相定子电流解调, 其连续 Teager-Kaiser 能量算子解调公式为^[18-19]

$$\begin{aligned} \psi[i_a(t)] &= [i_a(t)]^2 - i_a(t) * [\dot{i}_a(t)] = \\ &= 4\pi^2 f_1^2 I_{\max}^2 + 4\pi^2 (f_1 - f_r)^2 2I_{ecc}^2 + \\ &= 2\pi^2 f_r^2 I_{\max} I_{ecc} \cos(2\pi f_r t + \phi - \phi_e) + \\ &= 2(4\pi^2 f_1^2 - 4\pi^2 f_1 f_r + \pi^2 f_r^2) I_{\max} I_{ecc} \cdot \\ &\quad \cos[2\pi(f_1 - f_r)t + \phi - \phi_e] \end{aligned} \quad (6)$$

从式(6)第3项中可以看出,定子电流经过Teager-Kaiser能量算子解调后,固有偏心谐波($f_1 \pm f_r$)中的转子速度谐波 f_r 存在于解调信号波形中,有效抑制了基波频率频谱泄露对转子速度谐波 f_r 的覆盖影响。与定子电流直接估计转速相比,这些波形中转子速度谐波更容易提取。

为了抑制解调信号 $\psi[i_a(t)]$ 中的直流分量,并改善转速估计时频谱分析的质量,可构造如下特征信号 $i_{\text{TKEO}}(t)$:

$$i_{\text{TKEO}}(t) = \frac{\psi[i_a(t)] - \overline{\psi[i_a(t)]}}{\overline{\psi[i_a(t)]}} \quad (7)$$

式中: $\overline{\psi[i_a(t)]}$ —— $\psi[i_a(t)]$ 的均值,并使用 $i_{\text{TKEO}}(t)$ 代替 $\psi[i_a(t)]$ 作转速估计。

2.3 基于 mSDTFT 频谱分析的转速估计原理

SDTFT 递推算法具有计算量小和实时性强等优点^[20-21]。其单个频率单元实现结构如图3(a)所示。由于在计算算子 W_N^k 时存在引入舍入误差,进而会带来计算频谱时的不稳定性(舍入误差会引起系统的极零点出现在单位圆外)和累积误差,所以利用离散时间傅里叶变换(Discrete Time Fourier Transforms, DTFT)的时移特性对SDTFT算法进行改进,提出了一种 mSDTFT 频谱分析方法。

给定采样频率为 F_s 的 N 点采样序列 $x(0), x(1) \cdots x(N-1)$,其DTFT变换为

$$X(w) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-jwn}, \quad w \in R \quad (8)$$

令 $w_k = 2\pi k/N$,可得

$$X(w_k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{-kn} \quad k, w_k \in R \quad (9)$$

其中:算子 $W_N = e^{j2\pi/N}$ 。

给所观测的采样序列加一个 N 点的矩形窗,并让这个时间窗随着采样点的增加不断向前滑动,随着窗函数的滑动,在每个采样点计算 N 点序列的离散时间傅里叶变换,其SDTFT的递推公式为

$$X_n(w_k) = W_N^k [X_{n-1}(w_k) - x(n-N) + x(n) W_N^{-kN}] \quad k, w_k \in R \quad (10)$$

式中: $X_n(w_k)$ —— n 时刻第 k 个频率单元;

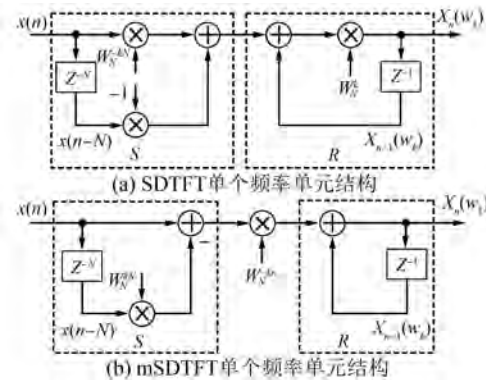


图3 SDTFT、mSDTFT 单个频率单元结构

$X_{n-1}(w_k)$ —— $n-1$ 时刻第 k 个频率单元。

在式(10)中,令 $k=0$ (直流分量频谱估计),可得

$$X_n(w_0) = X_{n-1}(w_0) - x(n-N) + x(n) \quad (11)$$

SDTFT 的第 k 个频率单元频值计算可以通过将输入序列 $x(n)$ 乘以 W_N^{-kn} 算子相移到第0个频率单元来完成,则得到 mSDTFT 的递归表达式为

$$X_n(w_k) = X_{n-1}(w_k) - x(n-N) W_N^{-k(n-N)} + x(n) W_N^{-kn} \quad k, w_k \in R \quad (12)$$

mSDTFT 单个频率单元实现结构如图3(b)所示。可以看出,其在反馈回路 R 中没有包含算子 W_N^k ,故系统的零极点不会出现在单位圆外,SDTFT 算法中的稳定性和累积误差问题在 mSDTFT 算法中得到解决。

3 试验及结果分析

3.1 试验装置及数据采集

本试验装置由 YE3-100L2-4 型超高效率三相异步电机和 Z2-42 直流电机构成。异步电机拖动直流电机,通过调节直流电机励磁电压来改变电机转速,并使用福祿克 F931 转速计测量转速和 JLB-21 型霍尔电流传感器采集三相定子电流信号。电机数据采集试验台如图4所示。

试验过程中,在负载电压分别为 0~120 V 时采集电机定子侧电流数据。数据采集采用过采样方法,过采样后的信号经过 8 阶切比雪夫低通滤波器数字滤波并降采样,得到采样频率为 4 096 Hz,采样时间为 10 s 的待分析信号。在



图4 电机数据采集试验平台

MATLAB R2013b 环境下对测得的数据进行离线分析。

3.2 高效感应电机定子电流和特征信号频谱分析

图5所示为定子电流和特征信号 $i_{TKEO}(n)$ 进行FFT频谱分析的图形。图5中标注的分别是基波频率 f_1 、固有偏心谐波 $f_1 \pm f_r$ 以及转子速度谐波 f_r 。从图5(a)中可以看出,当直接对定子电流作FFT频谱分析时,固有偏心谐波 $f_1 \pm f_r$ 幅值与基波频率 f_1 幅值相比较小,几乎完全被基波频率 f_1 频谱泄露所覆盖,采用定子电流直接作频谱分析提取固有偏心谐波估计转速非常困难。然而从图5(b)中可以看出,通过对定子电流作Teager-Kaiser能量算子解调,固有偏心谐波 $f_1 \pm f_r$ 中与转速有关的谐波 f_r 被解调出来,同时基波频率 f_1 也在很大程度上被削弱,转子速度谐波 f_r 清晰可见,由此表明使用特征信号 $i_{TKEO}(n)$ 有利于实现转子速度谐波 f_r 的提取。

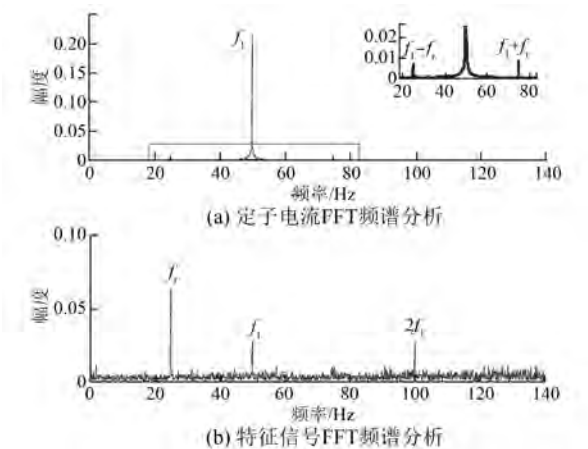


图5 定子电流、特征信号 $i_{TKEO}(n)$ FFT 频谱分析

对于一个工频供电的四极电机,转子的速度 f_r 使用转差率表示为 $25(1-s)$ 。由于电动机在电动状态转差率 s 满足 $0 < s < 1$, 因此转子速度 $0 < f_r <$

25。为了减少计算量,提高算法的实时性,本文选定 25 Hz 附近的部分频谱进行 mSDTFT 频谱分析,如图6所示。由图6可以看出使用 mSDTFT 对特征信号 $i_{TKEO}(n)$ 进行局部频谱分析,突出了所要观察的转子速度谐波,提高了转速估计算法的实时性。

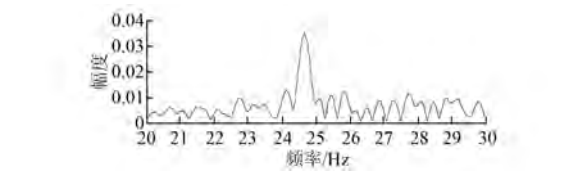


图6 特征信号 $i_{TKEO}(n)$ mSDTFT 频谱分析

本文在不同工况条件下对特征信号 $i_{TKEO}(n)$ 采用 SDTFT 和 mSDTFT 进行转子速度谐波 f_r 估计,结果如表1所示。观察表1中数据可以发现,使用 SDTFT 频谱分析方法估计转速时,由于反馈回路中算子的存在造成估计转速时出现累计误差,在负载电压为 60 和 80 情况下转速估计精度较低;而使用本文所提 mSDTFT 频谱分析方法在不同负载条件下估计转速时,都获得了较高转速估计精度,说明了所提 mSDTFT 方法的有效性。试验结果进一步表明,从空载到满载的不同负载条件下,使用 Teager-Kaiser 能量算子解调定子电流能够有效抑制基频频谱泄露,而且使用 mSDTFT

表1 不同工况下实际测量转速和估计转速

负载 电压/V	实际测量 转速/(r·s ⁻¹)	SDTFT		mSDTFT	
		估计转速/(r·s ⁻¹)		估计转速/(r·s ⁻¹)	
		估计值	误差	估计值	误差
0	24.983 3	24.983 3	0	24.983 3	0
10	24.933 3	24.950 0	0.016 7	24.950 0	0.016 7
20	24.933 3	24.933 3	0	24.933 3	0
30	24.883 3	24.883 3	0	24.883 3	0
40	24.783 3	24.750 0	0	24.783 3	0
50	24.733 3	24.633 3	0.016 7	24.750 0	0.0167
60	24.666 7	24.583 3	0.033 4	24.666 7	0
70	24.583 3	24.483 3	0	24.583 3	0
80	24.516 7	24.433 3	0.033 4	24.500 0	0.0167
90	24.433 3	24.435 2	0	24.433 3	0
100	24.350 0	24.333 3	0.016 7	24.350 0	0
110	24.266 7	24.250 0	0.016 7	24.266 7	0
120	24.183 3	24.183 3	0	24.183 3	0

估计转子速度谐波 f_r 能取得比较好的效果。

4 结 语

本文通过电机固有偏心谐波检测实现了异步电机的无速度传感器转速估计。针对转速估计过程中基频频谱泄露和提高转速估计精度两方面的问题,首先采用 Teager-Kaiser 能量算子解调方法,使用三个连续的采样点对定子电流进行解调,有效削弱了基波频率频谱泄露的影响,转子速度谐波清晰可见;在此基础上,使用本文提出的 mSDTFT 频谱分析方法估计转速,可以针对需要的谱线进行计算,提高了频谱分析的灵活性与高效性,具有计算简单、易于嵌入式系统应用的优点。与使用 SDTFT 频谱分析方法估计转速相比,mSDTFT 获得了较好的转速估计精度,而且在不同负载条件下估计转速都取得了比较好的效果。

【参 考 文 献】

- [1] BRADLEY W J, MASON B, PEZOUVANIS A, et al. A sensorless speed estimation algorithm for use in induction motor fault detection applications [J]. Journal of Systems and Control Engineering, 2014, 228(4): 257-264.
- [2] ALONGE F, IPPOLITO D F, SFERLAZZA A. Sensorless control of induction-motor drive based on robust Kalman filter and adaptive speed estimation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(3): 1444-1453.
- [3] 祝洪宇,胡静涛,高雷,等.负载连续变化时鼠笼电机早期转子断条故障诊断[J].仪器仪表学报, 2014, 35(7): 1646-1653.
- [4] 于洪霞,胡静涛.基于铭牌信息的异步电机等效电路参数辨识方法[J].信息与控制, 2013, 42(1): 73-76.
- [5] 车香芝,胡静涛,郭前进.基于齿谐波检测的无速度传感器感应电机的转速估计[J].仪器仪表学报, 2008, 29(4): 414-417.
- [6] SILVA W L, LIMA A M N, OLIVEIRA A. Speed estimation of an induction motor operating in the nonstationary mode by using rotor slot harmonics [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(4): 984-994.
- [7] ZHU G, TURNER L, COLBY R S. Application of linear-phase filters in induction motor speed detection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3727-3737.
- [8] KEYSAN O, ERTAN H B. Real-time speed and position estimation using rotor slot harmonics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2): 899-908.
- [9] ORJI U A, REMSCRIM Z, SCHANTZ C, et al. Non-intrusive induction motor speed detection [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(5): 388-396.
- [10] JOKSIMOVIC G M, RIGER J, WOLBANK T M, et al. Stator-current spectrum signature of healthy cage rotor induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(9): 4025-4033.
- [11] SHI D, UNSWORTH P J, GAO R X. Sensorless speed measurement of induction motor using Hilbert transform and interpolated fast Fourier transform [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2006, 55(1): 290-299.
- [12] ARKAN M. Sensorless speed estimation in induction motor drives by using the space vector angular fluctuation signal [J]. IET Electric Power Applications, 2008, 2(2): 113-120.
- [13] MCNAMARA D M, ENAYATI B, ZIARANI A K, et al. Sensorless speed measurement of induction motors using an adaptive frequency-tracking algorithm [C] // Iecon 2008: 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Vols 1 - 5, Proceedings, New York, IEEE. 2008: 1855-1860.
- [14] YAHIA K, CARDOSO A J M, GHOGGAL A, et al. Induction motors airgap-eccentricity detection through the discrete wavelet transform of the apparent power signal under non-stationary operating conditions [J]. ISA Transactions, 2014, 53(2): 603-611.
- [15] GUESMI H, SALEM S B, BACHA K. Smart wireless sensor networks for online faults diagnosis in induction machine [J]. Computers & Electrical Engineering, 2015(41): 226-239.
- [16] HYUN D S, LEE S H, HONG J M, et al. Detection of airgap eccentricity for induction motors using the single-phase rotation test [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2012, 27(3): 689-696.
- [17] 狄冲,鲍晓华,王汉丰,等.感应电机混合偏心情况下径向电磁激振力的研究[J].电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 138-144.

(下转第 93 页)

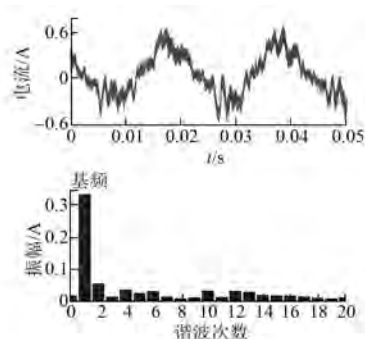


图 12 DSC 控制下 A 相电流及 FFT 分析

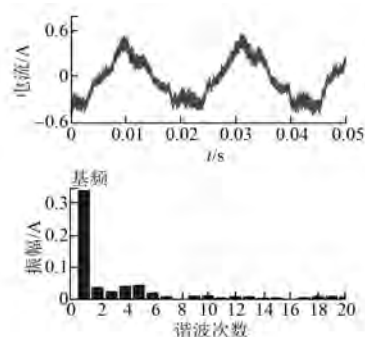


图 13 FPGA 控制下 A 相电流及 FFT 分析

4 结 语

本文分析了电流环的数学模型,利用调节器工程设计方法选择合理的参数,推导出了电流环的闭环传递函数,进而得出电流环的带宽与其环路的延时成反比,延时时间越长,其带宽越小。基于 DSC 的控制系统由于运算速度慢,一般采用的是延迟一拍的控制策略,因此导致电流环路的延时比较大,而 FPGA 的控制系统,充分利用了 FPGA 高速计算能力,采用即时采样、即时更新的控制策略,可以减小一倍的电流环路的延时。在相同控制参数的情况下,基于 FPGA 的控制系统具有更好的速度响应能力,并且转速变化越大,电

流环带宽的影响越明显。

【参 考 文 献】

- [1] 朱海燕,吴根忠.鲁棒于电流环脉宽调制符合控制在同步电机控制中的应用[J].电机与控制应用,2011,38(8): 27-31.
- [2] WANG W, XI X. Current control method for PMSM with high dynamic performance [C] // Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International, 2013: 1249-1254.
- [3] 王伟华,肖曦.永磁同步电机高动态响应电流环控制方法[J].中国电机工程学报,2013,33(21): 117-123.
- [4] 王伟华,肖曦,刘欢,等.电流增量预测控制策略参数稳定域拓展[J].中国电机工程学报,2014,29(3): 50-56.
- [5] MOHAMED Y A R I, EI SAADANY E F. Robust high bandwidth discrete-time predictive current control with predictive internal model—A unified approach for voltage-source PWM converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(1): 126-136.
- [6] 楚远征,郭强强,祁世民,等.永磁同步电机的新型滑膜抗饱和控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(9): 38-43.
- [7] NALEPA R. Generic criterion for tuning of adaptive digital PI current compensators of PMSM drives [C] // 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, IEEE, 2011: 601-606.
- [8] 韦克康,周明磊,郑琼林,等.基于复矢量的异步电机电流环数字控制[J].电工技术学报,2011,26(6): 88-94.
- [9] 王恩德,黄声华.表贴式永磁同步电机伺服系统电流环设计[J].中国电机工程学报,2012,32(33): 82-88.

收稿日期: 2017-06-22

(上接第 88 页)

- [18] HENRÍQUEZ R P, ALONSO J B, FERRER M A, et al. Application of the teager-kaiser energy operator in bearing fault diagnosis [J]. ISA Transactions, 2013, 52(2): 278-284.
- [19] PINEDA S M, PUCHE P R, RIERA G M, et al. Application of the teager-kaiser energy operator to the fault diagnosis of induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(4):

1036-1044.

- [20] 李叶,徐科军,朱志海,等.面向时变的科里奥利质量流量计信号的处理方法研究与实现[J].仪器仪表学报,2010,31(1): 8-14.
- [21] 刘翠,徐科军,侯其立,等.适用于频繁启停流量测量的科氏质量流量计信号处理方法[J].计量学报,2014,35(3): 242-247.

收稿日期: 2017-07-28