

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902674

基于频率自适应 PLL 的传动系统 牵引电机转速实时估计*

刘文俊¹ 李学明² 陈志文³ 徐佳敏³

(1. 中车大同电力机车有限责任公司技术中心 大同 037038; 2. 株洲中车时代电气股份有限公司技术中心 株洲 412001; 3. 中南大学 自动化学院 长沙 410083)

摘要:为满足传动系统在牵引电机无速度传感器控制、速度传感器异常诊断与预测等领域对牵引电机转速精确估计的要求,提出了一种基于频率自适应锁相环的转速实时估计方法。首先针对传统锁相环(PLL)算法无法实现频率大范围跟踪问题,提出了一种前馈参考频率自适应调节的二阶广义积分锁相环(RFSOGI-PLL)算法,实现定子电流基波频率的大范围实时跟踪;再利用牵引电机转速与定子电流基波频率以及齿槽谐波关系模型,结合电机结构参数,实现了传动系统牵引电机转速大范围实时估计;最后在某型大功率交流传动系统上对所提算法的有效性进行了验证。仿真与试验结果表明,与传统PLL算法相比,所提的RFSOGI-PLL算法可有效提升算法对跟踪频率变化的适应性,满足牵引电机转速估计在快速性和估计误差等指标方面的要求。

关键词:传动系统;转速估计;前馈频率自适应;齿槽谐波

中图分类号: TP273; TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Real-time estimation for traction motor speed of drive system based on PLL with adaptive frequency

Liu Wenjun¹ Li Xueming² Chen Zhiwen³ Xu Jiamin³

(1. Technology Center, CRRC Datong Co., Ltd., Datong 037038, China; 2. Technology Center, Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou 412001, China; 3. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: In order to meet the requirements of the drive system for the accurate estimation of the speed of traction motor in the fields of speed sensorless control, abnormal diagnosis and prediction of speed sensor, etc., a real-time speed estimation method based on frequency adaptive phase-locked loop is proposed. Firstly, to solve the problem that traditional phase-locked loop (PLL) algorithm cannot track the frequency in a large range, a second-order generalized integral phase-locked loop algorithm with feed-forward reference frequency self-adaptive adjustment (RFSOGI-PLL) is proposed to track the fundamental frequency of stator current in a large range in real time. Then, using the relation model of speed of traction motor, fundamental frequency of stator current and cogging harmonic, together with the structural parameters of traction motor, the traction motor speed of the drive system can be estimated in a large range in real time. Finally, the effectiveness of proposed algorithm is verified on a high-power AC drive system. The simulation and field test results show that, compared with the traditional PLL algorithm, the RFSOGI-PLL algorithm proposed in this paper can effectively improve the adaptability of the algorithm to track frequency change, and meet the requirements of traction motor speed estimation in celerity and estimation error.

Keywords: drive system; speed estimation; feed-forward frequency adaption; slot harmonics

因此可将齿槽谐波频率写为:

$$\omega_{sh} = \frac{Z}{P}\omega_r - \alpha\omega_0 \quad (4)$$

其中, $\alpha = \pm 1, \pm(6m \pm 1), \dots$ 为齿槽谐波次数, 对于感应电机, $\alpha = 1$ 的齿槽谐波总是存在^[8], 在带载情况下, 将还会存在 $\alpha = -5, +7, -9, +11$ 等次数齿槽谐波。

由式(4)可得, 牵引电机电角速度(频率)可描述为:

$$\omega_r = \frac{P}{Z}(\omega_{sh} + \alpha\omega_0) \quad (5)$$

或:

$$f_r = \frac{P}{Z} \cdot (f_{sh} + \alpha f_0) \quad (6)$$

式中: f_r 为转子电频率, f_{sh} 为转子齿槽谐波频率, f_0 为供电电源基波频率。

1.2 转速估计

由式(6)可知, 空载 ($f_r = f_0$) 情况下, 空载齿槽谐波频率为:

$$f_{sh0} = \left(\frac{Z}{P} - \alpha\right)f_0 \quad (7)$$

由于 Z/P 一般为偶数, f_{sh0} 一般为基波的奇数次谐波(对于一个 $Z = 60, P = 3$ 的感应电机, 若取 $\alpha = 1$, 其空载齿槽谐波频率 $f_{sh0} = 19f_0$)。

则齿槽谐波频率为:

$$f_{sh} = f_{sh0} - \frac{Z}{P}f_s \quad (8)$$

其中, $f_s = f_0 - f_r$ 为转差频率。可以定义跟踪窗口的宽度:

$$\Delta f_{sh} = \frac{Z}{P}f_{s(\max)} \quad (9)$$

式中: $f_{s(\max)}$ 为转差频率最大值, 可以根据电机特性在各个供电频率点的最大转差频率取值。

牵引工况下, 齿槽谐波频率的跟踪窗口为 $[f_{sh0} - \Delta f_{sh}, f_{sh0}]$, 而制动工况时, 由于转差频率为负, 则跟踪窗口变成 $[f_{sh0}, f_{sh0} + \Delta f_{sh}]$ 。

将式(6)写成转速形式, 可得:

$$\hat{n} = \frac{60}{Z} \cdot (f_{sh} + \alpha f_0) \quad (10)$$

若已知电机的转子齿槽数, 则可利用式(10), 通过估算 f_{sh} 和 f_0 来估计电机转速 n 。而由 2.2 节可知, 齿槽谐波频率跟踪窗口与 f_0 密切相关, 因此, 准确估计基波频率 f_0 对转速的估计效果尤为重要。

综上所述, 要实现牵引电机转速大范围实时估计, 则需要对基波频率 f_0 和转子齿槽谐波 f_{sh} 进行实时准确检测。

2 电机转速估计

2.1 转速估计框架

基于频率自适应 PLL 的传动系统牵引电机转速估计方法原理框图如图 2 所示。

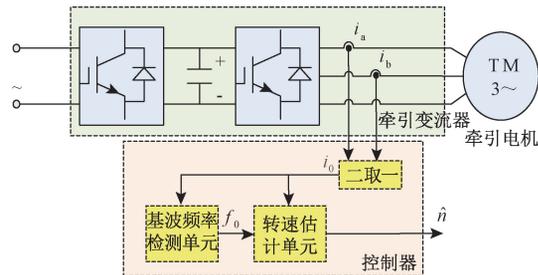


图 2 牵引电机转速估计框架

Fig. 2 Speed estimation framework of traction motor

图 2 所示传动系统主电路由整流单元、中间直流回路、逆变单元及异步电机组成, 整流单元将单相或三相交流电转换成直流电, 逆变单元再将其转换成电压频率可调的三相交流电, 供给异步电机。速度估计功能在控制器中实现, 它主要由定子电流基波频率检测单元和转速估计单元组成。基波频率检测单元实现定子电流基波频率精确计算; 转速估计单元基于定子电流基波频率自适应调节齿槽谐波频率跟踪窗口, 实现齿槽谐波频率快速跟踪, 从而实现转速的实时自适应估计。

2.2 基波频率实时检测

论文在单相 SOGI-PLL 算法基础上, 利用二阶广义积分器输出的正交同频分量来对参考输入频率 ω_{ff} 进行实时估计, 构造如图 3 所示基于 RFSOGI-PLL 算法的框架, 来实现电流基波频率的大范围内实时检测。

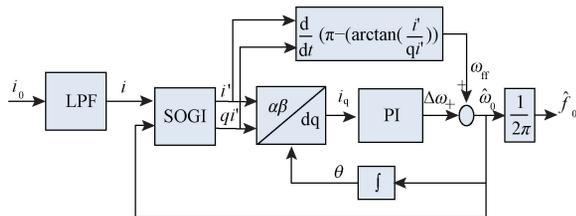


图 3 RFSOGI-PLL 原理

Fig. 3 Principle of RFSOGI-PLL

如图 3 所示, 在传统 SOGI-PLL 算法基础上, 增加前馈频率自适应调节单元, 来实现对基波频率大范围内实时检测。

采集的原始电机电流测量信号经过低通滤波 (LPF) 后, 送入二阶广义积分单元 (SOGI), SOGI 用来产生一个正交系统, 当输出稳定时, 作为输出信号, i^d 与输出 i

基波同相同幅的正交信号,且与 qi' 相差 90° 。其输入输出的传递函数式如式(11)和(12)所示。

$$D(s) = \frac{i'(s)}{i(s)} = \frac{k\hat{\omega}_0 s}{s^2 + k\hat{\omega}_0 s + \hat{\omega}_0^2} \quad (11)$$

$$Q(s) = \frac{qi'(s)}{i(s)} = \frac{k\hat{\omega}_0^2}{s^2 + k\hat{\omega}_0 s + \hat{\omega}_0^2} \quad (12)$$

式中: $\hat{\omega}_0$ 为 SOGI 的谐振频率; k 为 SOGI 的衰减因子,一般取为 $\sqrt{2}$ 。

然后利用式(13)对电流矢量进行 Park 变换。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\hat{\theta} & \sin\hat{\theta} \\ -\sin\hat{\theta} & \cos\hat{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i' \\ qi' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \cos(\Delta\theta) \\ \sin(\Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $\Delta\theta = \theta - \hat{\theta}$; A 为幅值。

控制的目标是计算输入信号实际相位 θ 的精确估计 $\hat{\theta}$ 。由于周期的相位为该信号频率对时间的积分,因此, $\hat{\theta}$ 通过对 $\hat{\omega}_0$ 积分得到。通过 PI 调节使 $\Delta\theta$ 为 0,从而实现输入信号的实时跟踪。

在传统 SOGI-PLL 中, ω_{ff} 为固定不变的参考频率。由于估计相位 $\hat{\theta}$ 被用于计算新的 i_q 分量直至 i_q 变为 0,当输入信号频率与参考频率相差较大时, SOGI-PLL 将产生稳态误差。为此,引入参考频率自适应调节环节,根据输入信号频率偏差 $\Delta\omega$ 来实时改变参考频率 ω_{ff} ,从而迅速消除频率偏差。

设 i 为频率为 ω_0 的正弦信号,则由式(11)和(12)可知, SOGI 输出信号 i, i' 将满足式(14)和(15)的幅频特性。

$$i' = Di \begin{cases} |D| = \frac{k\omega_0\hat{\omega}_0}{\sqrt{(k\omega_0\hat{\omega}_0)^2 + (\omega_0^2 - \hat{\omega}_0^2)^2}} \\ \angle D = \arctan\left(\frac{\hat{\omega}_0^2 - \omega_0^2}{k\omega_0\hat{\omega}_0}\right) \end{cases} \quad (14)$$

$$qi' = Qi \begin{cases} |Q| = \frac{\hat{\omega}_0}{\omega_0} |D| \\ \angle Q = \angle D - \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (15)$$

由于 PI 闭环调节作用,估计频率 $\hat{\omega}_0$ 与信号真实频率 ω_0 将迅速减小,若式(14)中 k 取为 $\sqrt{2}$,将满足如下关系式:

$$i' \approx Di \begin{cases} |D| = 1 \\ \angle D = 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$qi' \approx Qi \begin{cases} |Q| = 1 \\ \angle Q = -\frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (17)$$

令 $i = I\sin(\omega_0 t)$, 则 $i' \approx I\sin(\omega_0 t), qi' \approx I\sin(\omega_0 t -$

$\frac{\pi}{2}) = -I\cos(\omega_0 t)$, 那么 ω_{ff} 可取式(18)估计的频率作为

自适应前馈频率。

$$\omega_{ff} = \frac{d(\omega_0 t)}{dt} = \frac{d}{dt}(\pi - \arctan(\frac{i'}{qi'})) \quad (18)$$

2.3 电机转速实时估算

对电机电流 i 进行实时采样,并以一定时间 T_c 为计算周期,对 i 进行实时快速傅里叶变换(FFT),并在齿槽谐波频率的跟踪窗口 $[f_{sh0} - \Delta f_{sh}, f_{sh0}]$ 和 $[f_{sh0}, f_{sh0} + \Delta f_{sh}]$ 上搜索最大谐波分量对应的齿槽谐波频率 f_{sh} , 则估算的电机速度为:

$$\hat{n}(k) = \frac{60}{Z}(f_{sh}(k) + \hat{f}_0(k)) \quad (19)$$

式中: $f_{sh}(k)$ 为根据快速 FFT 算法得出的第 k 个计算周期的电机齿槽谐波频率; $\hat{f}_0(k)$ 为基于前馈频率自适应调节的 SOGI-PLL 算法得出的第 k 个计算周期的电流基波频率。

估算出转速后,根据牵引传动系统速度变化特性,将其变化斜率限制在 $[-2 \text{ m/s}^2, 2 \text{ m/s}^2]$,再根据式(20)计算出第 k 个计算周期速度残差 $r(k)$ 。

$$r(k) = \frac{n(k) - \hat{n}(k)}{\hat{n}(k)} = \frac{\frac{60}{Z}(\hat{f}_{sh}(k) + \hat{f}_0(k)) - n(k)}{\frac{60}{Z}(\hat{f}_{sh}(k) + \hat{f}_0(k))} \quad (20)$$

3 仿真与试验验证

使用 MATLAB Simulink R2015B 对所提出的 RFSOGI-PLL 算法进行仿真验证,并以某大功率交流传动系统所用三相鼠笼式异步牵引电机为试验对象,对本文所提出的转速估计算法进行试验验证。电机控制算法为低频段采用间接转矩控制,较高频率段采用直接转矩控制,高频段采用磁场削弱的直接转矩控制^[22],该异步电机主要参数如表 1 所示。

表 1 某型三相鼠笼式异步牵引电机主要参数

Table 1 Main parameters of a three-phase squirrel cage asynchronous traction motor

| 参数名 | 参数值 | 参数名 | 参数值 |
|------|-------------|--------|------|
| 额定功率 | 775 kW | 冷却方式 | 强迫风冷 |
| 额定电压 | 1 720 V | 定子绕组接法 | Y |
| 额定电流 | 335 A | 定子极对数 | 3 |
| 额定频率 | 55.2 Hz | 定子齿槽数 | 72 |
| 额定转速 | 1 090 r/min | 转子齿槽数 | 60 |

3.1 RFSOGI-PLL 算法仿真验证

为了验证本文提出的 RFSOGI-PLL 算法的有效性,分别利用本文所提 RFSOGI-PLL 方法和文献[18]所提

SOGI-PLL 跟踪频率阶跃变化信号,两种算法 PLL 均采用相同的参数,主要参数设置如下:SOGI-PLL 的参考频率设为 20 Hz,两种算法的 SOGI 衰减因子均设为 $k = \sqrt{2}$, PI 控制器参数均设置为 $K_p = 0.4, K_i = 1$ 。输入信号(图 4)为幅值 100,频率 20 Hz 的正弦信号,当 $t = 1$ s 时,将输入信号频率变成 40 Hz,仿真结果如图 5 所示。

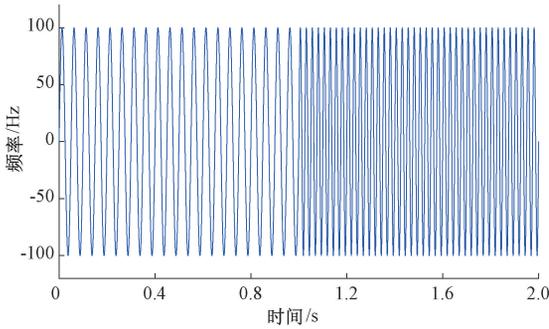
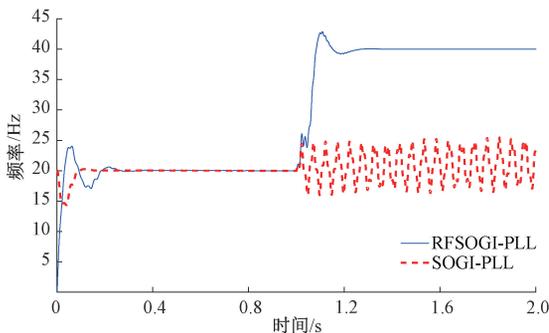
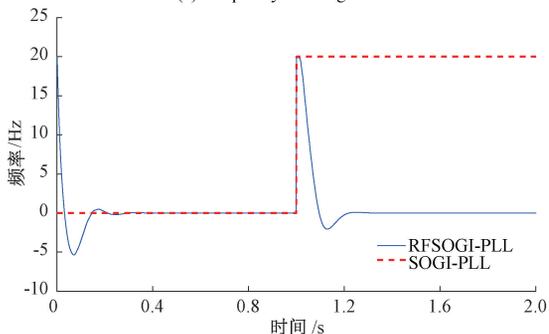


图 4 输入信号波形
Fig. 4 Input signal waveform



(a) 频率跟踪效果
(a) Frequency tracking effect



(b) 参考频率偏差
(b) Reference frequency deviation

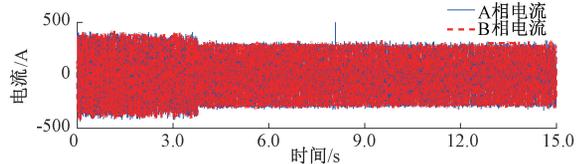
图 5 基波频率跟踪结果

Fig. 5 Fundamental frequency tracking results

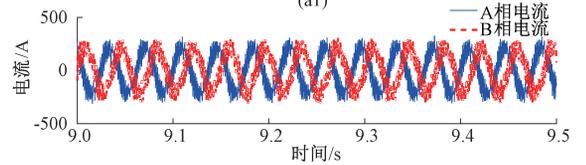
由图 5(a) 可以看出,当 SOGI-PLL 算法的参考频率与输入信号频率一致(均为 20 Hz)时,SOGI-PLL 算法与本文提出的 RFSOGI-PLL 算法均能快速跟踪输入信号频率。而当输入信号频率大幅度变化(从 20 增至 40 Hz)时,传统 SOGI-PLL 算法的输出频率在参考频率 20 Hz 附

近波动,无法准确跟踪频率变化;而本文提出的 RFSOGI-PLL 算法,能在一个周期内快速跟踪输入频率,且在 3 个周期内达到稳态状态,且无稳态误差。

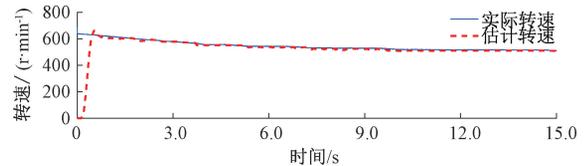
图 5(b) 可以看出,当 $t = 1$ s 输入信号频率发生突变后,SOGI-PLL 算法由于参考频率保持不变,其频率偏差一直保持在 20 Hz;而 RFSOGI-PLL 算法计算出的前馈参考频率能自动调节,偏差速度降至 0,具有良好的自适应能力。



(a1)

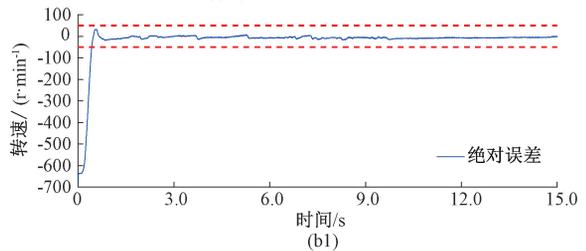


(a2)

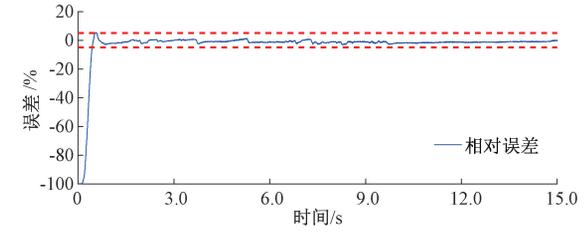


(a) 转速估算效果

(a) Speed estimation effect



(b1)



(b2)

(b) 转速估计误差
(b) Speed estimation error

图 6 低速工况转速估计结果

Fig. 6 Speed estimation results at low speed

3.2 速度估计效果试验验证

由于一般速度传感器故障都是由于断线或脉冲丢失导致速度测量值偏小。因此,分别在低频段、较高频段以及高频段时模拟速度传感器漂移故障,验证速度传感

器故障诊断效果。FRSOGI-PLL 速度估计算法主要参数如下:采样周期 $T_s = 200 \mu s$, SOGI 的衰减因子 $k = \sqrt{2}$, PI 控制器参数均设置为 $K_p = 0.1, K_i = 0.1$ 。低速、中速、高速工况下速度估计结果依次如图 6~8 所示。其中图 6(a1)~8(a1)为 A、B 相电流采样值,图 6(a2)~8(a2)为电流采样值局部放大图,图 6(a3)~8(a3)为电机转速采样值以及实际估计值;图(b)为速度估计的绝对误差和相对误差曲线,图 6(b1)~8(b1)中虚线为 $\pm 50 \text{ r/min}$ 的参考限值;图 6(b2)~8(b2)中虚线为 $\pm 5\%$ 的绝对误差参考限值。

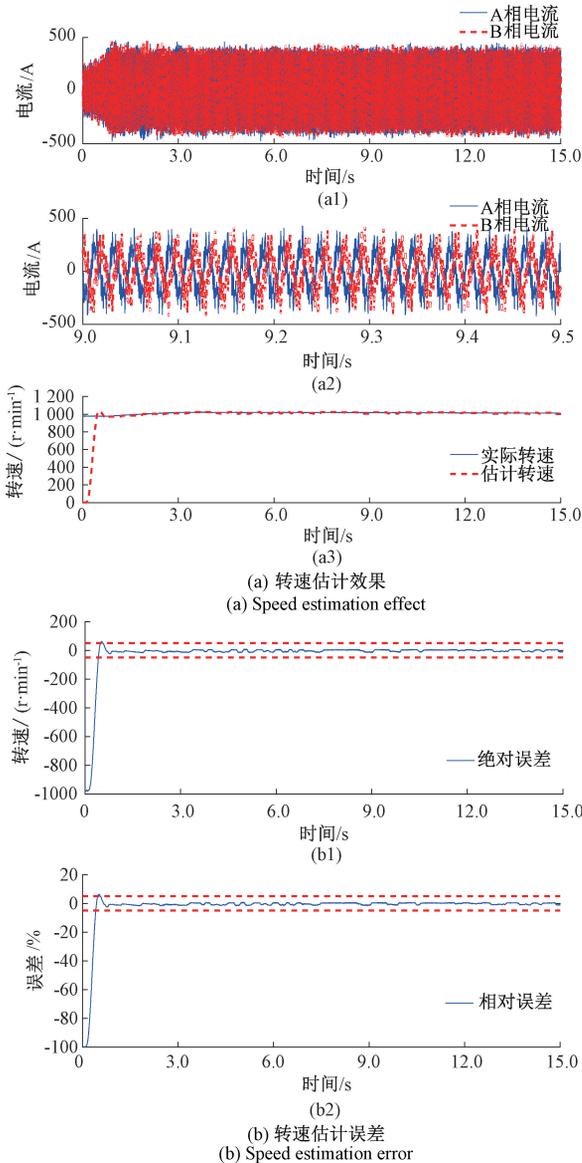


图 7 中速工况转速估计结果

Fig. 7 Speed estimation results under medium speed condition

由图 6~8 可以看出,FRSOGI-PLL 算法启动后能快速跟踪其实际转速,稳定后其速度估计相对误差在 $\pm 3\%$

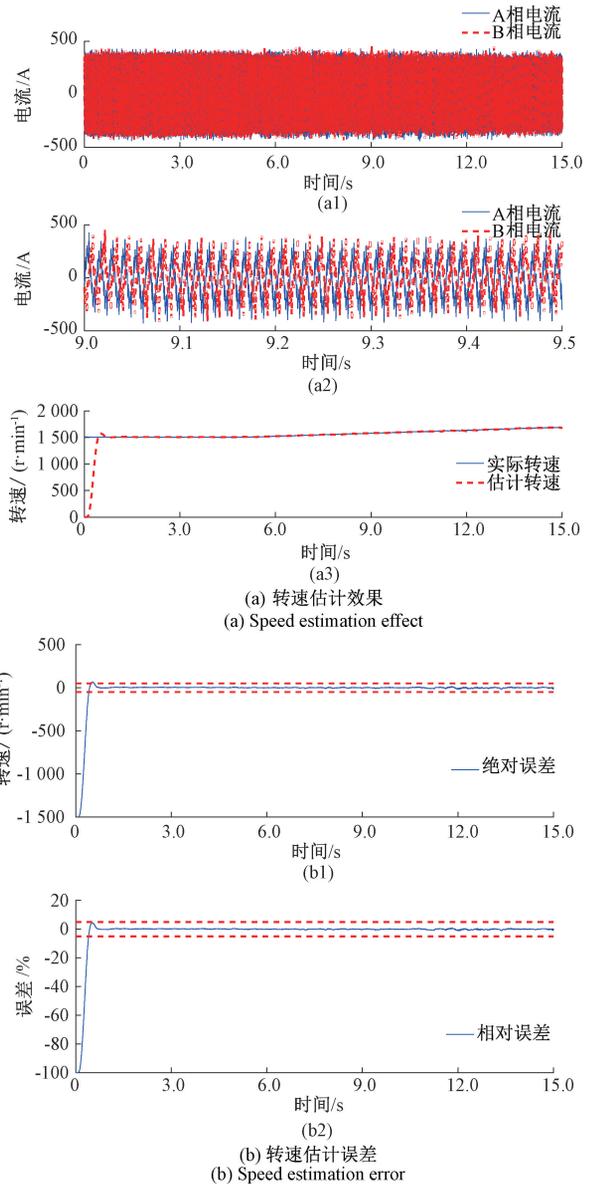


图 8 高速工况转速估计结果

Fig. 8 Speed estimation results at high speed

以内,且速度越高,其绝对误差及相对误差越好,在高速工况时达 1%左右,具有良好的快速性及准确性。

4 结 论

转速估计是实现传动系统无速度传感器控制与异常诊断的基础,本文在单相 SOGI-PLL 算法基础上,通过构造前馈参考频率自适应调节环节,实现了电机基波电流大范围频率内实时检测,并结合齿槽谐波理论和电机结构参数,完成了转速实时自适应估计;并通过仿真与试验对所提算法进行了对比验证,证明了该方法的有效性。

参考文献

- [1] 王侠辉, 童军, 刘丽娟. 基于全阶状态观测器转速估算方法的研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(1): 40-44.
WANG X H, TONG J, LIU L J. Research on speed estimation method based on full order state observer[J]. Electric Machines & Control Application, 2017, 44(1): 40-44.
- [2] 高艳霞, 陈静, 范应鹏. 一种用于异步电机无速度传感器控制的自适应滑模观测器[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(4): 8-16.
GAO Y X, CHEN J, FAN Y P, et al. Adaptive sliding mode observer based sensorless control system of induction motor [J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(4): 8-16.
- [3] 于泳, 蒋生成, 王高林, 等. 基于状态观测器的感应电机速度传感器故障诊断及容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(18): 123-130.
YU Y, JIANG SH CH, WANG G L, et al. Fault diagnosis and tolerant control for speed sensors based on state observers in induction motor drives[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(18): 123-130.
- [4] 纪科辉, 沈建新. 采用扰动转矩观测器的低速电机伺服系统[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 100-106.
JI K H, SHEN J X. A low speed servo motor drive system with disturbance torque observers [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2012, 32(15): 100-106.
- [5] 韦文祥, 刘国荣. 基于扩展状态观测器模型与定子电阻自适应的磁链观测器及其无速度传感器应用[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(23): 6194-6202.
WEI W X, LIU G R. Sensorless control with flux observer based on parallel stator resistance adaptation and extended state observer model [J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(23): 6194-6202.
- [6] 潘月斗, 郭映维, 贺靛. 基于重置算法的感应电机转速自适应观测器[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 190-195.
PAN Y D, GUO Y W, HE J. Rotor flux and speed adaptive observer for induction motor based on a reset law [J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 190-195.
- [7] 吴文进, 苏建徽, 刘鹏, 等. 感应电机全阶磁链观测器设计及其控制性能对比分析[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 78-83, 92.
WU W J, SU J H, LIU P, et al. Design of full-order flux observer and comparison analysis for its control performance[J]. Electric Machines and Control, 2016, 20(4): 78-83, 92.
- [8] 尹忠刚, 张延庆, 杜超, 等. 基于双辨识参数全阶自适应观测器的感应电机低速性能[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 111-121.
YIN Z G, ZHANG Y Q, DU C, et al. Low-speed performance of sensorless vector control for induction motor based on two-parameter identified adaptive full-order observer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(20): 111-121.
- [9] 汪彩萍, 陈炫瑞, 卫星, 等. 模糊自适应无人驾驶矿井机车故障 Petri 网模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 32(12): 113-122.
WANG C P, CHEN X R, WEI X, et al. Fault petri nets model for driverless mine locomotives based on fuzzy adaptive [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018, 32(12): 113-122.
- [10] 王慧莹, 吴亮红, 梅盼盼, 等. 果蝇优化广义神经网络的风电功率短期预测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(6): 177-183.
WANG H Y, WU L H, MEI P P, et al. Fruit fly optimization based generalized regression neural network for wind power short-term prediction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(6): 177-183.
- [11] 王玉萍. 基于定子电流谐波的异步电动机转速测量研究[J]. 机电一体化, 2012(7): 34-37.
WANG Y P. Asynchronous motor speed measurement using harmonic in stator current [J]. Mechatronics, 2012(7): 34-37.
- [12] GUAN Q X, ZHANG Y, KANG Y. Single-phase phase-locked loop based on derivative elements [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4411-4420.
- [13] FERREIRA R J, ARAUJO R E, LOPES J A P. A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids [C]. Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE), IEEE, 2011, 1-8.
- [14] 黄海宏, 张庭茂, 魏亚坤, 等. 电压不平衡时单同步坐标系锁相环的改进算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 937-944.
HUANG H H, ZHANG T M, WEI Y K, et al. Improved algorithm for phase-locked loop of single synchronous coordinate system under unbalanced three-phase voltage [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30(6): 937-944.

- [15] 徐云鹏, 薛雅丽, 武玉衡, 等. 基于平面电感角位置传感器的双同步参考系锁相环[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 408-415.
XU Y P, XUE Y L, WU Y H, et al. Double synchronous reference frame PLL based on a planar inductive angular position sensor[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(2): 408-415.
- [16] 回楠木, 王大志, 李云路. 复杂电网下基于双改进型 SOGI 的三相并网锁相环[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 123-132.
HUI N M, WANG D ZH, LI Y L. Three-phase PLL based on dual modified SOGI under complex power grid conditions[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(4): 123-132.
- [17] 邓哲, 周峰武, 林辉品, 等. 电网故障时基于双输入 SOGI-FLL 的新型电网快速同步方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 32-43.
DENG ZH, ZHOU F W, LIN H P, et al. A novel fast grid-synchronization method under grid failure based on dual-input SOGI-FLL [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 32-43.
- [18] 张纯江, 赵晓君, 郭忠南, 等. 二阶广义积分器的三种改进结构及其锁相环应用对比分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 42-49.
ZHANG CH J, ZHAO X J, GUO ZH N, et al. Three improved second order generalized integrators and the comparative analysis in phase locked loop application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 42-49.
- [19] 杨才伟, 王剑, 游小杰, 等. 二阶广义积分器锁频环数字实现准确性对比[J]. 电工技术学报, 2019, 34(12): 2584-2588.
YANG C W, WANG J, YOU X J, et al. Accuracy comparison of digital implementation on the second-order generalized integrator frequency-locked loop [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(12): 2584-2588.
- [20] 辛振, 赵仁德, 郭宝玲, 等. 基于二阶广义积分器-锁频环的异步电机同步角频率估计方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 116-122.

XIN ZH, ZHAO R D, GUO B L, et al. New Induction motor synchronous angular frequency estimation method based on second order generalized integrator-frequency locked loop[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 116-122.

- [21] 涂娟, 汤宁平. 基于改进型 DSOGI-PLL 的电网电压同步信号检测[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2350-2356.
TU J, TANG N P. Synchronizing signal detection for grid voltage based on modified DSOGI-PLL[J]. Proceedings of The Chinese Society for Electrical Engineering, 2016, 36(9): 2350-2356.
- [22] 侯黎明, 冯晓云, 王永强, 等. 异步牵引电机全速域直接转矩控制策略的研究[J]. 铁道机车车辆, 2013, 33(2): 38-42.
HOU L M, FENG X Y, WANG Y Q, et al. Direct torque control strategies of traction motor during all speed range[J]. Railway Locomotive & Car, 2013, 33(2): 38-42.

作者简介



刘文俊, 1996 年于太原重型机械学院获得学士学位, 中车大同电力机车有限责任公司教授级高级工程师, 主要研究方向为电力机车系统及其可靠性。

E-mail: sxdtljw2000@163.com

Liu Wenjun received his B. Sc. degree from Taiyuan University of Science and Technology in 1996. Now he is a professorate senior engineer in CRRC Datong Co., Ltd. His main research interest includes electric locomotive system and its reliability.



李学明, 2011 年于中南大学获得硕士学位, 株洲中车时代电气股份有限公司高级工程师, 主要研究方向为牵引系统控制, 故障诊断与预测。

E-mail: lixueming@csu.edu.cn

Li Xueming received his M. Sc. degree from Central South University in 2011. Now he is a senior engineer in Zhuzhou CRRC times Electric Co., Ltd. His main research interest covers traction system control, fault diagnosis and prediction.