

基于单直流母线电流采样的永磁同步电机无位置传感器控制研究

黄玲林*, 王 爽, 李志伟

(上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

Research on Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Single DC Bus Current Sampling

HUANG Linglin*, WANG Shuang, LI Zhiwei

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Abstract: Traditional field oriented control method requires multiple phase current sensors and position sensors, leading to high system costs, large size, and reduced reliability. To address this issue, a sensorless control strategy for permanent magnet synchronous motor (PMSM) based on single DC bus current sampling was proposed. To solve the problem of current reconstruction blind zones in conventional single DC bus sampling schemes, a vector phase-shifted method was introduced. Additionally, a high-frequency square-wave injection control strategy was proposed to tackle the sensorless control challenges of PMSM at low speeds. Finally, a simulation model was built on the Matlab/Simulink platform to verify the theoretical analysis. The simulation results showed that the proposed strategy effectively solved the blind zone problem in the low modulation ratio region and sector boundaries, enabling sensorless low-speed operation of the PMSM.

Key words: permanent magnet synchronous motor; sensorless control; vector phase-shifted method; high-frequency square-wave injection

摘 要: 传统的磁场定向控制方法需要安装多个相电流传感器和位置传感器,导致系统成本高、体积大且可靠性低。为解决此问题,提出了一种基于单直流母线电流采样的永磁同步电机(PMSM)无位置传感器控制策略。针对传统单直流母线采样方案存在电流重构盲区的问题,提出了矢量移相法。针对 PMSM 低速无位置传感器控制问题,提出了高频方波注入控制策略。最后,基于 Matlab/Simulink 平台搭建仿真模型对理论分析进行验证,仿真结果表明所提策略能够有效解决低调制比区域和扇区边界盲区的问题,实现 PMSM 无位置传感器低速运行控制。

关键词: 永磁同步电机; 无位置传感器控制; 矢量移相

法; 高频方波注入

0 引言

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)因具备高功率密度、高可靠性、精确控制和低噪声等特性,在电动汽车、工业自动化等领域得到广泛应用^[1-6]。准确获取相电流和转子位置信息对于实现高精度的电机控制至关重要。但是,多个传感器的使用会增加系统的成本与体积,降低电控系统在恶劣环境下的可靠性。此外,多电流传感器存在的直流偏置以及采样增益不等,可能会引起额外的采样误差,导致转矩脉动^[7]。因此,单电流传感器采样和无位置传感器控制技术应运而生。

常见的单电流传感器直流母线采样方案在扇区边界和低调制比区域存在电流重构盲区,影响三相电流值的准确获取^[8-9]。若在单电流传感器采样基础上完成无位置传感器控制,不仅能够降低成本,改善抗干扰能力和鲁棒性,而且可以作为位置传感器失效时的一种保护方案,提高 PMSM 的容错性能^[10]。因此,研究基于单电流传感器相电流重构技术的无位置传感器控制具有重要的研究意义和实用价值。

文献[11]利用直流母线电流在不同电压矢量下与相电流的关系提出了相电流重构方法。针对直流母线采样重构盲区的问题,国内外学者展开了大量研究,主要分为三类方法:脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)波形修改法、多

组矢量合成法以及观测器法。

关于 PWM 波形修改法,文献[12-13]提出了一种在一个完整 PWM 周期内插入测量矢量解决电流重构盲区的方法,该方法会使整个 PWM 周期增加,限制了其在高调制比区的应用。文献[14]提出注入开关频率的电压信号以改变 PWM 波形,从而实现电流重构,并提出相应的补偿算法降低电流的谐波。文献[15]提出了开关状态移相法,当进行采样的有效矢量作用时间不满足最小采样时间时,通过软件将 PWM 信号提前或延迟,从而实现电流重构。

关于多组矢量合成法,文献[16]提出经典的空问矢量脉宽调制(Space Vector PWM, SVPWM)和仅利用有效矢量而不使用零开关状态的 PWM 混合调制方法。文献[17]将矢量空间的每一扇区细分为三个独立的区域,并在每个特定区域内,采用三种不同的电压矢量调制策略,以实现相电流的解耦重构,这种方法消除了重构盲区,但是由于需要设计大量的约束条件细分区域,极大地增加了算法复杂度,且不使用零电压矢量的调制方式也增加了电流谐波含量。

观测器法是针对不修改 PWM 波形实现单电流传感器电流重构的方法。其核心思路是在重构盲区中利用所设计的观测器构造出三相电流。文献[18]基于直流母线电流采样重构策略的特性,在扇区边界和低调制比区的重构盲区内分别实现电流的重构。文献[19]提出了将渐近正弦曲线拟合观测器应用于三相电流重构,但是当电机受到强谐波干扰或非正常运行时,该算法的重构效果受到影响。因此,观测器法可以保持 PWM 波形的对称性,但更加依赖电机参数,并需要更复杂的辅助算法。

另一个关键采集信息即位置信息,通常通过光电编码器、磁编码器或旋转变压器等位置传感器获取^[20]。在 PMSM 无位置传感器低速运行控制中,一般采用高频信号注入法^[21-22]。即将高频旋转/脉动信号注入到静止/旋转坐标系中,经过解调和信号处理来提取位置信息。

针对传统的直流母线采样相电流重构方法中存在的问题,本文提出了矢量移相法,有效解决了重构盲区问题。此外,对于 PMSM 低速无位置传感器控制,提出了高频方波注入控制策略。通过

理论分析与仿真,验证了本文所提的单直流母线采样相电流重构方案在高频注入无位置传感器应用中具有良好的控制性能。

1 基于直流母线电流采样的单电流传感器电流重构方案

1.1 单直流母线电流采样法原理

直流母线电流采样仅在有效矢量作用期间进行采集^[23]。以空问矢量六边形的第一扇区为例,如图 1 所示,两组有效矢量 $V_4(100)$ 和 $V_6(110)$ 共同形成该区域内的参考电压矢量。当 $V_4(100)$ 作用时,直流母线电流传感器采集得到 A 相电流,当 $V_6(110)$ 作用时,传感器采集到 C 相电流,即在同一开关周期内采集得到两相电流。以 PMSM 最常见的 Y 型接法为例,根据基尔霍夫电流定律可得出第三相的电流。第一扇区的采样形式可推广到空问矢量六边形的所有扇区。

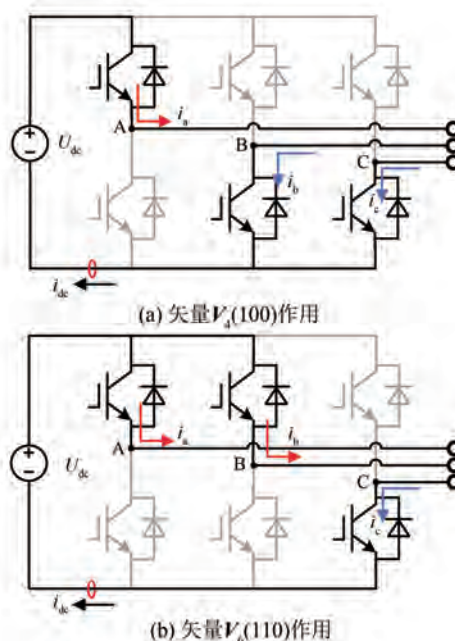


图 1 第一扇区内两组有效矢量作用时电流流向图

Fig. 1 Current flow diagram when two effective vectors are applied in the first sector

1.2 电流重构盲区及其产生原因

就电机控制硬件系统来说,电流采样并非即时的,通常需要一定时间得到准确的采样值。定义该过程所需的最短时间为最小采样时间

$T_{\min}^{[24]}$ 。 $T_{\min}$ 由以下几部分构成: 模拟数字转换器 (Analog-to Digital Converter, ADC) 采样保持所耗费的时间 T_{adc} ; 功率器件开关切换过程, 电流跟随电压的延迟时间 T_{set} ; 为避免功率开关器件直通所设置的死区时间 T_{dead} 。即最小采样时间需满足:

$$T_{\min} \geq T_{\text{set}} + T_{\text{adc}} + T_{\text{dead}} \quad (1)$$

在空间矢量六边形中存在某些不可测电流的电压矢量区域, 称之为电流重构盲区。若不对重构盲区实施补偿, 直接将采样得到的电流反馈到控制闭环中, 将会产生严重的转矩脉动。因此需要添加补偿算法, 才能实现直流母线采样与重构的稳定和准确。

1.3 电流重构盲区及其补偿算法

基于以上分析, 直流母线单电流采样存在两种重构盲区, 如图 2 所示。一种是扇区边界盲区, 该盲区内某一组有效矢量所对应的电流无法顺利完成采样; 另一种则是低调制比区域, 该盲区内用于参考电压矢量合成的两组有效矢量都不满足最小采样时间。

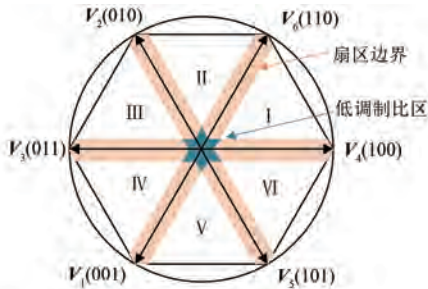


图 2 重构盲区示意图

Fig. 2 Schematic diagram of reconstruction blind zone

因此, 为使落在重构盲区上的电压矢量能够准确地完成电流重构, 需要对重构盲区实施适当的补偿算法。本文采用矢量移相法进行补偿, 其核心思想是修改 PWM 信号, 在一半周期内, 对不满足最小采样时间的有效矢量进行平移, 构造满足电流传感器采样时间的矢量, 并在另一半周期对平移操作带来的影响进行补偿。以参考电压矢量落在第一扇区的低调制比区域为例, 矢量移相法 PWM 补偿过程如图 3 所示。将 A 相 PWM 信号向右平移, C 相 PWM 信号向左平移, 保证在后半周期内, $V_4(100)$ 和 $V_6(110)$ 的持续时间均满足最小采样时间, 以此实现三相电流重构。

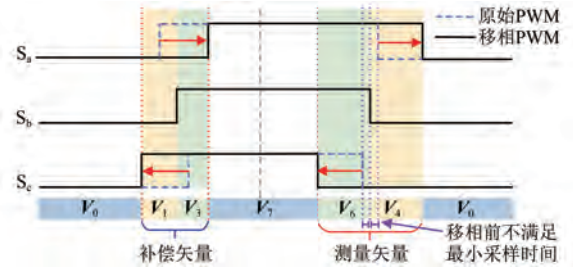


图 3 矢量移相法 PWM 补偿

Fig. 3 Vector phase-shifted method for PWM compensation

2 基于直流母线电流采样的高频方波注入无位置传感器控制分析

PMSM d - q 坐标系和 α - β 坐标系关系如图 4 所示。图 4 中: θ_e 为实际电角度; $\hat{\theta}_e$ 为估计电角度; $\tilde{\theta}_e$ 为估计角度与实际角度之差。内置式 PMSM 在 d - q 坐标系下的电压方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = (R_s + pL_d)i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = \omega_e L_d i_d + (R_s + pL_q)i_q + \omega_e \psi_f \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为 d 、 q 轴电压分量; i_d 、 i_q 分别为 d 、 q 轴电流分量; R_s 为定子电阻; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ω_e 为电角频率; ψ_f 为永磁体磁链; p 为微分算子。

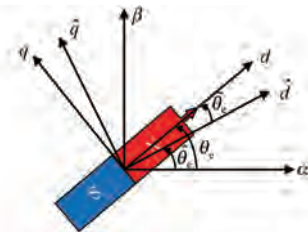


图 4 PMSM 坐标关系示意图

Fig. 4 Schematic diagram of coordinate relationship in PMSM

当采取高频信号注入提取转子位置时, 其整体控制框图如图 5 所示。由于注入频率远高于电机基频运行频率, 因此, 可以忽略电压方程中电阻压降与反电势项, 得到:

$$\begin{cases} u_{dh} = L_d \frac{di_{dh}}{dt} \\ u_{qh} = L_q \frac{di_{qh}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

式中: u_{dh} 、 u_{qh} 分别为 d 、 q 轴高频电压分量; i_{dh} 、 i_{qh} 分别为 d 、 q 轴高频电流分量。

利用 α - β 坐标系和 d - q 坐标系之间的关系, 对式(3)进行坐标变换:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha h} \\ u_{\beta h} \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta_e) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \left(\mathbf{R}^{-1}(\theta_e) \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta_e)$ 为反 Park 坐标变换矩阵, $\mathbf{R}(\theta_e) = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix}$ 。

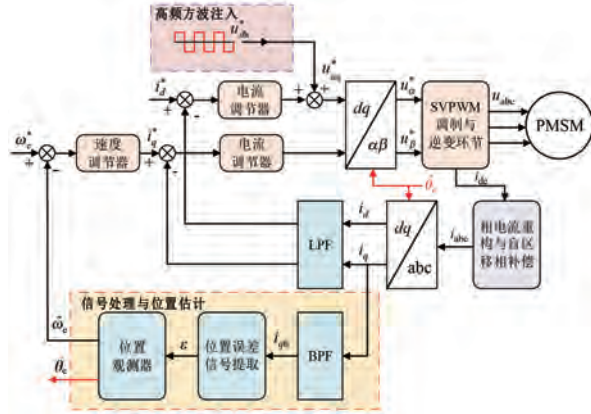


图5 基于直流母线电流采样的高频方波信号注入无位置传感器控制

Fig. 5 High-frequency square-wave signal injection sensorless control based on DC bus current sampling

因此,可以推导出 PMSM 在 α - β 坐标系中的高频数学模型为

$$\begin{cases} u_{\alpha h} = [\Sigma L + \Delta L \cos(2\theta_e)] \frac{di_{\alpha h}}{dt} + \Delta L \sin(2\theta_e) \frac{di_{\beta h}}{dt} \\ u_{\beta h} = \Delta L \sin(2\theta_e) \frac{di_{\alpha h}}{dt} + [\Sigma L - \Delta L \cos(2\theta_e)] \frac{di_{\beta h}}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \frac{di_{\alpha h}}{dt} = \frac{\Sigma L - \Delta L \cos(2\theta_e)}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} u_{\alpha h} - \frac{\Delta L \sin(2\theta_e)}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} u_{\beta h} \\ \frac{di_{\beta h}}{dt} = \frac{\Delta L \sin(2\theta_e)}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} u_{\alpha h} + \frac{\Sigma L + \Delta L \cos(2\theta_e)}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} u_{\beta h} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u_{\alpha h}$ 、 $u_{\beta h}$ 和 $i_{\alpha h}$ 、 $i_{\beta h}$ 分别为 α - β 坐标系下的高频电压和高频电流; ΣL 为平均电感, 即 $\Sigma L = (L_d + L_q)/2$; ΔL 为半差值电感, 即 $\Delta L = (L_d - L_q)/2$ 。

向 $\hat{d}$ 轴注入电压信号:

$$\begin{bmatrix} u_{\hat{d}h} \\ u_{\hat{q}h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_h f(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $u_{\hat{d}h}$ 、 $u_{\hat{q}h}$ 为估计旋转坐标系 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 下的电压分量; U_h 为高频注入电压幅值; $f(t)$ 为高频注入电压的单位函数, 其表达式为

$$f(t) = \begin{cases} 1, & 0 < t_x(T) < \frac{T}{2} \\ -1, & \frac{T}{2} < t_x(T) < T \end{cases} \quad (8)$$

式中: T 为注入方波的周期; $t_x(T)$ 为时间与 T 相除的余数。

对式(3)进行离散化, 可得:

$$\begin{bmatrix} u_{\hat{d}h} \\ u_{\hat{q}h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{1}{\Delta T} \begin{bmatrix} \Delta i_{\hat{d}h} \\ \Delta i_{\hat{q}h} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: ΔT 为间隔时间。

对式(9)进行坐标变换, 求取估计坐标系 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 下的差分电流:

$$\begin{bmatrix} \Delta i_{\hat{d}h} \\ \Delta i_{\hat{q}h} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{-1}(\tilde{\theta}_e) \begin{bmatrix} \Delta i_{dh} \\ \Delta i_{qh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pm \Delta T \cdot U_h \left[\frac{\Sigma L - \Delta L \cos(2\tilde{\theta}_e)}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} \right] \\ - \Delta L \sin(2\tilde{\theta}_e) \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: Δi_{dh} 、 Δi_{qh} 和 $\Delta i_{\hat{d}h}$ 、 $\Delta i_{\hat{q}h}$ 分别为在 d - q 坐标系和 $\hat{d}$ - $\hat{q}$ 坐标系下当前时刻与上一时刻的 d 、 q 轴电流的差分量。

分析式(10)可知, 电流的差分信号中包含转子位置信息。且当误差 $\tilde{\theta}_e$ 很小时, 可近似认为 $\sin(2\tilde{\theta}_e) \approx 2\tilde{\theta}_e$ 。按照如图6所示的信号处理过程进行符号处理, 即可得到转子位置误差信号, 如式(11)所示:

$$\varepsilon = \text{sign}(\pm u_{\text{inj}}^*) \cdot \Delta i_{\hat{q}h} \approx \frac{\Delta T \cdot U_h \Delta L}{\Sigma L^2 - \Delta L^2} \cdot 2\tilde{\theta}_e \quad (11)$$

式中: $\text{sign}(\cdot)$ 为符号函数。

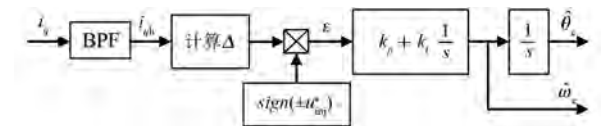


图6 转子位置信号处理过程

Fig. 6 Rotor position signal processing

将位置误差信号输入到位置观测器即可估计出转速和位置信息, 本文采用比例积分 (Proportional Integral, PI) 型转子位置观测器进行位置估计。

3 仿真分析

3.1 基于直流母线采样的单电流传感器电流重构方案

在 Matlab/Simulink 平台上搭建仿真模型。电机主要参数如表 1 所示, 开关频率为 5 kHz, 最小采样时间设置为 8 μ s, 死区时间设置为 2 μ s。

表 1 PMSM 主要参数

Tab. 1 Main parameters of PMSM	
参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.23
d 轴电感/mH	0.197
q 轴电感/mH	0.257
极对数	5
额定功率/W	200
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	3 000
额定转矩/($N \cdot m$)	0.64

图 7 为电机转速为 200 r/min 且无电流重构盲区补偿时, 重构电流波形和三相电流采样波形图。可以看到由于直流母线采样特点与其固有的重构盲区, 使得参考电压矢量位于扇区边界区域时, 无法完成准确的电流重构。

以参考电压矢量位于第三扇区重构盲区为例, 通过矢量移相法对 SVPWM 进行修改后的直流母线电流变化情况如图 8 所示。

图 9 为加入重构盲区补偿算法后三相电流采样波形。由图 9 可知, 经过矢量移相操作, 之前扇区边界和低调制比区域存在的电流重构失败问题得以有效解决, 与三相全采样得到的电流基本一致。

图 10 为采用经典 SVPWM 三相全电流采样和采用移相 SVPWM 的直流母线采样下的相电流快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析结果。由图 10 可知, 在对直流母线采样方案进行重构盲区补偿后, 基频电流的重构可以达到一定的精度。

当注入频率为 1/16 开关频率、幅值为 2 V 的高频方波信号时, 电机低速运行在 60 r/min 和 120 r/min 时空载转子位置的仿真结果如图 11 所

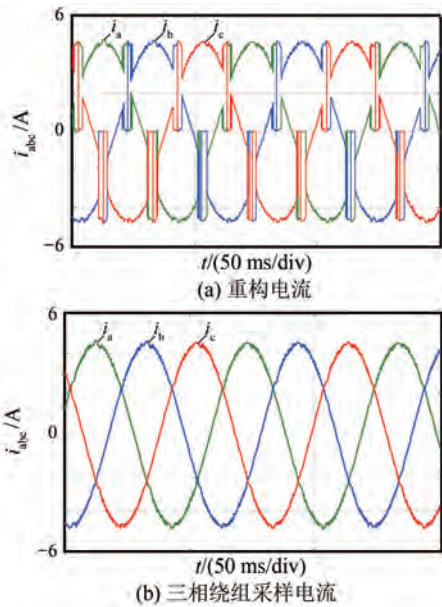


图 7 无盲区补偿时直流母线方案重构电流与三相绕组采样电流对比

Fig. 7 Comparison between the reconstructed current from the DC bus scheme without blind zone compensation and the three-phase winding sampled current

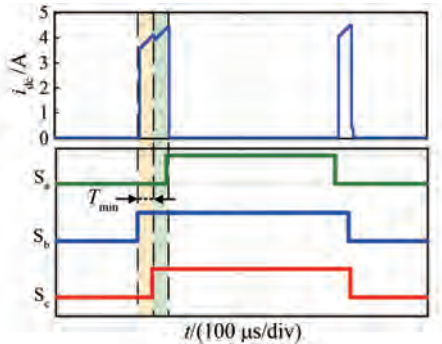


图 8 III 扇区重构盲区移相补偿 SVPWM 及对应直流母线电流

Fig. 8 Reconfiguration of the blind zone phase shift compensation in sector III with SVPWM and the corresponding DC bus current

示。使用直流母线采样方案, 电流环带宽设置为 80 Hz。由图 11 可知, 在 60 r/min 下, 其转子位置误差为 $-0.26 \text{ rad} \sim 0.5 \text{ rad}$; 在 120 r/min 下, 其转子位置误差在 $-0.24 \text{ rad} \sim 0.2 \text{ rad}$ 。

4 结语

本文针对传统单直流母线采样方案存在的电流重构盲区问题, 提出了矢量移相法。针对

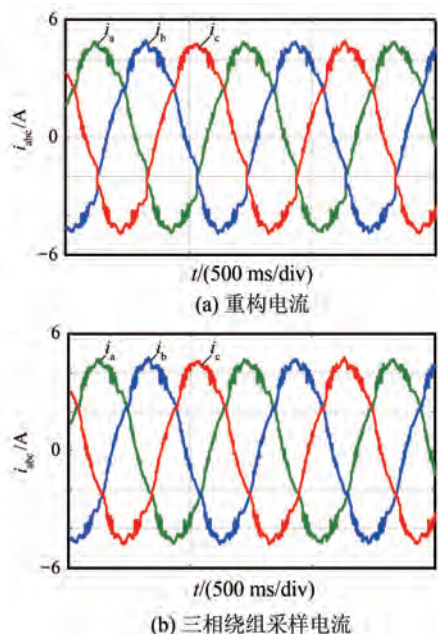


图9 盲区移相补偿时直流母线方案重构电流与三相绕组采样电流对比

Fig. 9 Comparison between the reconstructed current from the DC bus scheme with blind zone phase shift compensation and the three-phase winding sampled current

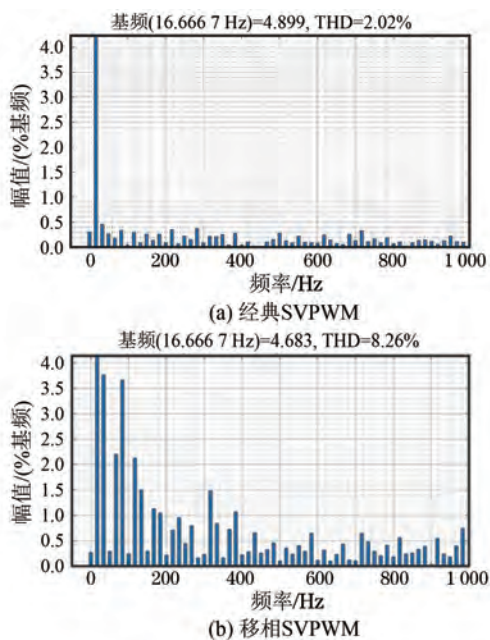


图10 移相前后电流的FFT分析对比

Fig. 10 Comparison of FFT analysis of current before and after phase shifting

PMSM 无位置传感器低速运行控制问题,提出了高频方波注入控制策略。在 Matlab/Simulink 平

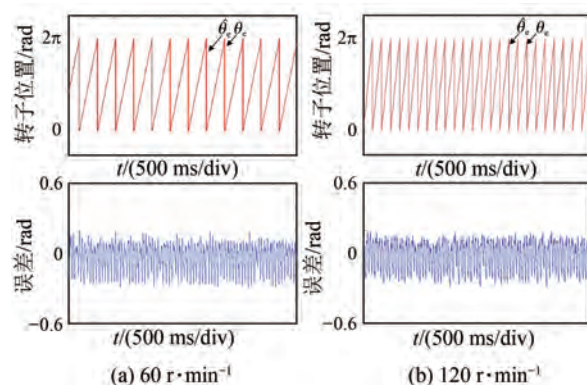


图11 基于直流母线电流采样的无位置传感器控制的位置及其误差

Fig. 11 Position and error of sensorless control based on DC bus current sampling

台上搭建了仿真模型,分析了传统的直流母线采样方案存在的问题,并验证了本文所提方案能够有效解决低调制比区域和扇区边界盲区的问题,实现 PMSM 无位置传感器低速运行控制。

参考文献

- [1] 杨成顺, 华涛, 戴宇辰, 等. 电动汽车用永磁同步电机宽速域抗干扰滑模控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(12): 21-29.
YANG C S, HUA T, DAI Y C, et al. Wide speed domain anti-interference sliding mode control of permanent magnet synchronous motor for electric vehicle [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 21-29.
- [2] KWON Y C, LEE J, SUL S K. Recent advances in sensorless drive of interior permanent-magnet motor based on pulsating signal injection [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(6): 6577-6588.
- [3] HUO J Y, ZHAO N N, GAO R F, et al. Torque ripple compensation with anti-overvoltage for electrolytic capacitorless PMSM compressor drives [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(5): 6148-6159.
- [4] 李敏, 李林林, 周俊鹏. 基于改进型滑模变结构的永磁同步电机的无位置传感器矢量控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 22-33.
LI M, LI L L, ZHOU J P. Sensorless vector control of PMSM based on improved sliding mode with variable structure [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 22-33.

- [5] 张国强, 杜锦华. 永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(1): 1-13.
- ZHANG G Q, DU J H. Review of position sensorless control technology for permanent magnet synchronous motors [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(1): 1-13.
- [6] 何栋炜, 曾志伟, 蒋学程, 等. 带延时补偿的永磁同步电机自适应无差拍电流预测控制[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(2): 123-134.
- HE D W, ZENG Z W, JIANG X C, et al. Adaptive deadbeat current predictive control of permanent magnet synchronous motor with delay compensation [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(2): 123-134.
- [7] 林治臣, 史婷娜, 李新旻, 等. 准 Z 源逆变器-PMSM 控制中多电流传感器比例误差平衡方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(7): 2706-2714.
- LIN Z C, SHI T N, LI X M, et al. Scaling errors balance method of multi-current sensors for permanent magnet synchronous motor driven by quasi-Z-source inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(7): 2706-2714.
- [8] TIAN L S, WANG Z X, YU Q, et al. Current reconstruction by one-step compensation for permanent magnet synchronous motor with fixed sampling interval in position sensorless control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 200-210.
- [9] 王文杰, 闫浩, 邹继斌, 等. 基于混合脉宽调制技术的永磁同步电机过调制区域相电流重构策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6050-6060.
- WANG W J, YAN H, ZOU J B, et al. Phase current reconstruction strategy of PMSM under overmodulation mode based on a hybrid space vector pulse width modulation technique [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6050-6060.
- [10] XIAO S X, SHI T N, LI X M, et al. Single-current-sensor control for PMSM driven by quasi-Z-source inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(7): 7013-7024.
- [11] GREEN T C, WILLIAMS B W. Derivation of motor line-current waveforms from the DC-link current of an inverter [J]. IEE Proceedings B Electric Power Applications, 1989, 136(4): 196-204.
- [12] KIM H, JAHNS T M. Current control for AC motor drives using a single DC-link current sensor and measurement voltage vectors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(6): 1539-1547.
- [13] KIM H, JAHNS T M. Phase current reconstruction for AC motor drives using DC link single current sensor and measurement voltage vectors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1413-1419.
- [14] HA J I. Voltage injection method for three-phase current reconstruction in PWM inverters using a single sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3): 767-775.
- [15] GU Y K, NI F L, YANG D P, et al. Switching-state phase shift method for three-phase-current reconstruction with a single DC-link current sensor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(11): 5186-5194.
- [16] LAI Y S, LIN Y K, CHEN C W. New hybrid pulse width modulation technique to reduce current distortion and extend current reconstruction range for a three-phase inverter using only DC-link sensor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(3): 1331-1337.
- [17] 鲁家栋. 内置式永磁同步电机无位置传感及复合容错控制关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2018.
- LU J D. Research on key technologies of position sensorless and hybrid-fault-tolerant control for interior permanent magnet synchronous motor drives [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018.
- [18] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. Comparison of single-sensor current control in the DC link for three-phase voltage-source PWM converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 491-505.
- [19] SARITHA B, JANAKIRAMAN P A. Sinusoidal three-phase current reconstruction and control using a DC-link current sensor and a curve-fitting observer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2657-2664.
- [20] WANG S, LI Z W, WU D L, et al. Sensorless control of SPMSM based on high-frequency positive- and negative-sequence current dual-demodulation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,

- 2023, 70(5): 4631-4639.
- [21] YAN H, WANG W J, XU Y X, et al. Position sensorless control for PMSM drives with single current sensor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 178-188.
- [22] 甘醇, 曲荣海, 石昊晨, 等. 宽调速永磁同步电机全域高效运行控制策略综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2496-2512.
- GAN C, QU R H, SHI H C, et al. Review of high-efficiency control strategy for permanent magnet synchronous motors under wide speed range [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2496-2512.
- [23] 郑晔明, 张建忠. 基于单母线电流传感器的三相永磁同步电机驱动方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(19): 5164-5175.
- ZHENG Y M, ZHANG J Z. A single DC-link current sensor drive technology of three-phase permanent magnet synchronous motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(19): 5164-5175.
- [24] 徐航, 肖曦, 谢玉龙, 等. 基于单电流传感器的改进相电流重构技术[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(6): 96-101.
- XU H, XIAO X, XIE Y L, et al. Improved phase current reconstruction technology based on single current sensor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(6): 96-101.
-
- 收稿日期:2024-04-30
收到修改稿日期:2024-06-04
作者简介:
黄玲林(2000-),女,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机驱动与控制,huanglinglin@shu.edu.cn;
*通信作者:黄玲林(2000-),女,硕士研究生,研究方向为永磁同步电机驱动与控制,huanglinglin@shu.edu.cn。

Research on Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Single DC Bus Current Sampling

HUANG Linglin^{*}, WANG Shuang, LI Zhiwei

(School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Key words: permanent magnet synchronous motor; sensorless control; vector phase-shifted method; high-frequency square-wave injection

Permanent magnet synchronous motor (PMSM) is widely used in applications such as electric vehicles and industrial automation due to its high power density, reliability, precise control, and low noise characteristics. Accurate acquisition of phase current and rotor position information is essential for achieving high-precision motor control.

However, the use of multiple sensors not only increases the system's cost and size but also reduces the reliability of the entire motor control system in harsh environments. Therefore, current reconstruction technology using a single current sensor and sensorless control techniques is of great research significance and practical value.

Single current sensor reconstruction based on DC bus sampling is a common approach. First, this paper introduced the principle of DC bus sampling. Then, to address the problem of current reconstruction blind zones in traditional single current bus sampling schemes, a vector phase-shifted method was proposed. Furthermore, to resolve the sensorless control challenges of PMSM at low speeds, a high-frequency square-wave injection control strategy was introduced. The structural block

diagram of the high-frequency square-wave signal injection sensorless control based on DC bus current sampling was shown in Fig. 1.

Finally, a simulation model was built on the Matlab/Simulink platform to verify the theoretical analysis. The simulation results demonstrated that the proposed strategy effectively solved the blind zone issues in the low modulation ratio region and sector boundaries, achieving low-speed sensorless operation of the PMSM.

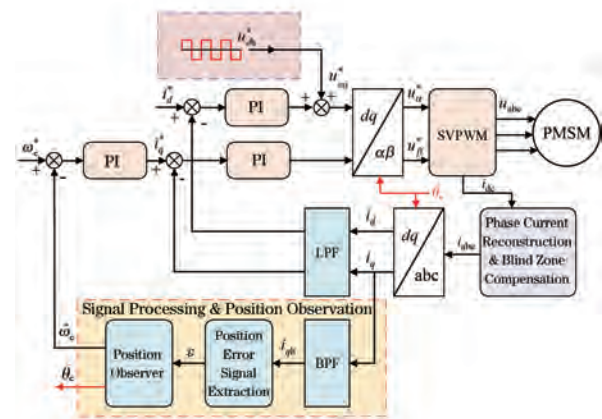


Fig. 1 Structural block diagram of high-frequency square-wave signal injection sensorless control based on DC bus current sampling