

基于多支路采样法的电流重构技术研究

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 Current Reconstruction Technology Based on Multiple-Branch Sampling Method

HUANG Linglin*, WANG Shuang, LI Zhiwei

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

Abstract: [Objective] The DC bus sampling method introduces additional harmonics into the phase current due to the use of pulse width modulation (PWM) phase shifting to compensate for the current reconstruction dead zone. To solve this problem, a phase current reconstruction scheme based on the multiple-branch sampling method was proposed.

[Method] A theoretical analysis of the DC bus sampling method and the multiple-branch sampling method was conducted, focusing on the causes of the current reconstruction dead zone. Matlab/Simulink simulations were used for a comparative analysis of both methods. [Results] Simulation results indicated that the multiple-branch sampling method effectively avoided the dead zones in the low modulation index region and sector boundaries present in the DC current sampling method, reduced the harmonic content in the current, and enhanced the accuracy of current reconstruction. Experiments conducted at a motor speed of 60 r/min demonstrated that the maximum error in the reconstructed current was less than 0.5 A. [Conclusion] The experimental results verified the effectiveness and feasibility of the proposed multiple-branch sampling method for current reconstruction.

Key words: DC bus sampling; current reconstruction technology; pulse width modulation; multiple-branch sampling method

摘 要: [目的] 直流母线采样法因采用脉宽调制移相来补偿电流重构盲区会导致相电流引入额外谐波。针对此问题,本文提出了一种基于多支路采样法的电流重构方案。[方法] 理论分析了直流母线采样法和多支路采样法的原理以及电流重构盲区的成因,并基于 Matlab/Simulink 对两种方案进行仿真对比分析。[结果] 仿真结果表明,多支路采样法有效避免了直流母线采样法存在的低调制比区域和扇区边界盲区,降低了电流谐波含量,提高了电

流重构的准确性。在电机转速为 60 r/min 时进行了试验,重构电流最大误差小于 0.5 A。【结论】试验结果验证了所提多支路采样法电流重构方案的有效性和可行性。

关键词: 直流母线采样; 电流重构; 脉宽调制; 多支路采样法

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 因其高功率密度、卓越可靠性以及高效率等特性,在家用电器、电气化交通等领域应用广泛^[1-6]。经典的 PMSM 控制策略有磁场定向控制和直接转矩控制等。准确获取相电流信息对于实现高精度电机控制至关重要。在某些可靠性要求较高的场合,利用软件算法为电控系统提供冗余备份同样重要。

三相 PMSM 矢量控制系统通常至少需要安装两个电流传感器,以实现固定周期的相电流检测和电流闭环控制。但是采用多个电流传感器无疑导致成本与体积的增加,也会存在某一相传感器损坏导致系统无法正常运行等问题。此外,多电流传感器存在的直流偏置及采样增益不等问题可能会引起额外的采样误差,导致转矩脉动^[7]。而单电流传感器采样方案通过重构方式获取各相电流值,不仅给电机驱动器的成本和体积带来优势,而且避免了因多个电流传感器采样差异造成的误差。同时,也能够给系统提供容错和保护方案。

然而,传统直流母线采样电流重构技术在扇区边界、低调制比区域会引入电流重构盲区,影响三相电流值的准确获取^[8]。现有的补偿算法,如

矢量移相等操作会导致相电流引入额外谐波,降低控制性能^[9]。因此,解决重构盲区,实现精确电流重构成为该研究方向的一大热点问题。

电流传感器虚拟化技术,即基于单电流传感器采样的相电流重构技术,简称单电流传感器技术(Single Current Sensor Technology, SCST)。SCST 仅使用一个电流传感器即可获取三相电流信息,其实现思路为:首先通过传感器安装位置,推算出各个电压矢量作用下对应电流传感器所采集到的电流;随后在一个脉宽调制周期内多次采样,以获取周期内两相的电流值;最后依据基尔霍夫电流定律求解得到周期内无法采集的电流信息,获取全部三相电流信息。

直流母线电流采样相电流重构的实现思路为:首先,通过扇区判断确定合成参考矢量的两组基本有效矢量;然后,在一个周期内两组有效矢量作用时进行电流采样,得到两组相电流信息,实现电流重构。但是,当有效矢量作用时间过短时,在矢量空间中会形成重构盲区。如何让矢量六边形中所有区域均可通过单电流传感器采样方法得到准确的电流信息,是直流母线电流采样相电流重构的主要研究内容。目前主要的电流重构盲区补偿方法有三种:脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)波形修改法^[10-13]、多组矢量合成法^[14-15]以及观测器法^[16-18]。

针对直流母线采样相电流重构方案在 PMSM 控制应用中存在的问题,本文提出了一种基于多支路采样法拓扑结构的电流重构技术,避免了低调制比区域和扇区边界盲区的出现。理论与仿真分析表明本文所提的多支路采样方案的电流谐波含量更低,电流重构效果更好。试验结果也进一步验证了该方案的有效性与可行性。

1 基于直流母线采样电流重构策略

1.1 电流重构盲区及其成因

对于实际电机控制系统来说,电流采样并非瞬时完成,通常需要一定时间得到准确的采样值。将该过程所需的最小时间定义为最小采样时间 $T_{\min}$ ^[19]。 $T_{\min}$ 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} ;功率器件开关切换时电流

跟随电压的延迟时间 T_{set} ;为避免功率开关器件直通设置的死区时间 T_{dead} 。即,最小采样时间需满足:

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

对于直流母线电流采样方案,当某个电压矢量作用时间不满足最小采样时间,其采样结果将与实际期望存在较大误差,最终导致电流重构失效。在空间矢量六边形中不可测电流的电压矢量区域,称为电流重构盲区。为避免严重的转矩脉动,需要通过软件或硬件补偿方法实现稳定准确的电流采样与重构。

1.2 电流重构盲区补偿算法

直流母线采样方案存在两种重构盲区,如图 1 所示。一种是扇区边界区域,该盲区内某一组有效矢量作用下的电流无法顺利完成采样;另一种是低调制比区域,该盲区内用于参考电压矢量合成的两组有效矢量作用时间都不满足最小采样时间。

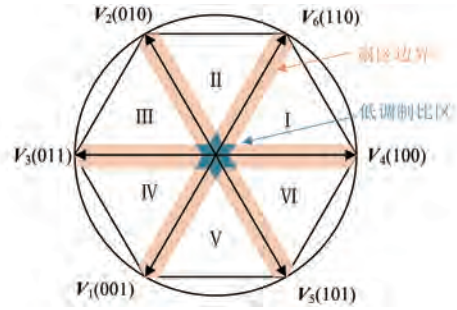


图 1 重构盲区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of reconstruction blind zone

目前运用最为广泛的电流重构盲区补偿方法为矢量移相法。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低调制比区域为例,如图 2 所示。此时,将 A 相 PWM 信号 S_a 向右平移, C 相 PWM 信号 S_c 向左平移,保证在后半周期内, V_4 和 V_6 的持续时间均满足最小采样时间,从而实现电流重构。

该重构盲区补偿方法可以保证 PWM 移相前后输出的电压矢量相同,且不依赖于电机和系统参数,在实际工程中应用广泛。然而,判断采样时间和矢量移相等操作相较于经典的调制策略更为

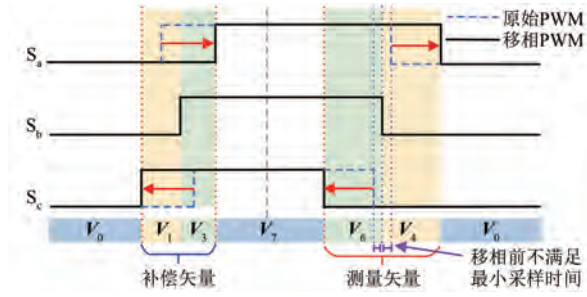


图 2 矢量移相法 PWM 补偿

Fig. 2 Vector phase-shifted method for PWM compensation

复杂,且相较于两/三电流采样方案带来更多的电流谐波和额外噪声,使得电流重构效果变差。

2 基于多支路采样法电流重构策略

2.1 多支路采样法原理

在两组零电压矢量作用时进行电流采样,可以大大降低电流重构的复杂度。图 3 为基于多支路法采样的单电流传感器技术的拓扑结构。同时对 B 相绕组和 A 相下桥臂支路的电流进行采样,具体采样时刻为零电压矢量 $V_0(000)$ 和 $V_7(111)$ 作用中点。

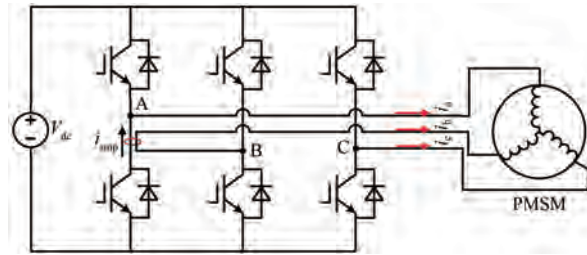


图 3 基于多支路法的电流采样拓扑结构

Fig. 3 Topology of current sampling based on multiple-branch method

图 4 为两组不同的零电压矢量作用时电流流通的路径。当 $V_7(111)$ 作用时,负载电流通过上桥臂通路,电流传感器输出为

$$i_{\text{smp}1} = i_b \quad (2)$$

当 $V_0(000)$ 作用时,负载电流通过下桥臂通路,电流传感器的输出为

$$i_{\text{smp}0} = i_a + i_b \quad (3)$$

式中: $i_{\text{smp}1}$ 、 $i_{\text{smp}0}$ 和 i_a 、 i_b 分别为在 V_7 、 V_0 作用时电流传感器的采样值和 A、B 相绕组电流值。

根据一个开关周期内两次采样的电流值,进行三相电流重构计算:

$$\begin{cases} i_{a,\text{rec}} = i_{\text{smp}0} - i_{\text{smp}1} \\ i_{b,\text{rec}} = i_{\text{smp}1} \\ i_{c,\text{rec}} = -i_{\text{smp}0} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_{a,\text{rec}}$ 、 $i_{b,\text{rec}}$ 和 $i_{c,\text{rec}}$ 分别为 A、B 和 C 相重构电流。

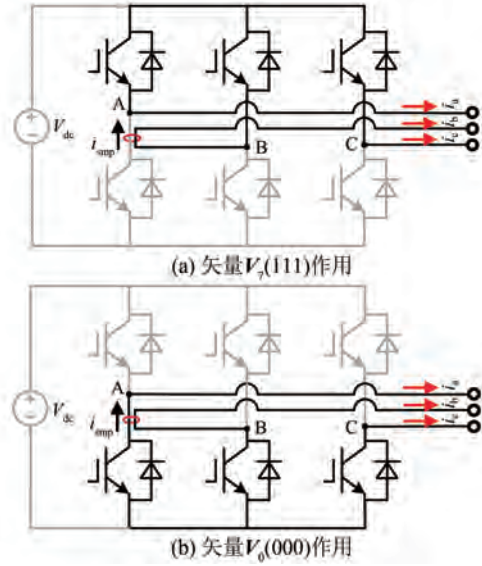


图 4 零电压矢量作用时多支路法采样的电流路径

Fig. 4 Current path during zero voltage vector operation in multiple-branch sampling method

图 5 展示了多支路法电流采样具体时刻与 PWM 的关系。其中, D_x ($x=a, b, c$) 为经过空间矢量脉宽调制 (Space Vector PWM, SVPWM) 计算得到的占空比。 $V_0(000)$ 的中点对应载波的峰值, $V_7(111)$ 的中点对应载波的谷值。根据文献 [20], 如果在 PWM 的峰值或谷值处对相电流进行采样, 即可获得周期内的电流平均值。

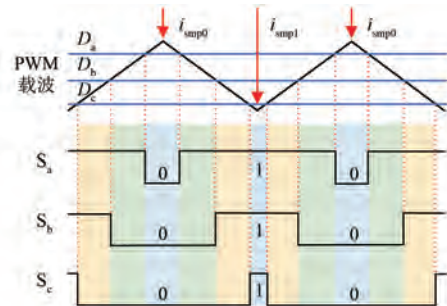


图 5 多支路法采样时刻与 PWM 波形的关系

Fig. 5 Relationship between multiple-branch sampling times and PWM waveform

2.2 电流重构盲区分析

与基于直流母线采样的方案类似, 由于电流

在空间矢量中可以到达的矢量幅值 $V_{\max}$ 为

式中: V_{dc} 为直流母线电压。

最大电压利用率主要受最小采样时间和开关频率影响。其中,最小采样时间与系统硬件及配置相关,可以认为是一个固定值;而对于开关频率,由式(5)和式(6)可知,随着开关频率不断增大,电流重构盲区所覆盖的范围也会增大。本文主要讨论电机在零低速工况下的电流重构情况,因此不涉及重构盲区问题。对于该重构盲区,文献[21]采取的准Z源逆变器方案或是文献[22]采取的动态调制策略都可以有效实现重构盲区消除,本文不再赘述。

2.3 基于多支路法采样的电机控制系统

基于多支路采样法进行三相电流重构的系统控制框图如图 7 所示。相较于直流母线采样法,多支路采样法存在以下优势:由于在三角载波的波峰和波谷处进行采样,在低速域无重构盲区,不会引入额外谐波;直流母线采样法在同周期内的两次电流采样均不在同步采样点,无法准确反映开关周期内的平均电流,而多支路采样法有一相电流为准确的同步采样点电流。

电压利用率 ζ 与最小采样时间和开关频率的关系可以表示为

$$\zeta = 1 - 2f_s T_{\min} \quad (5)$$

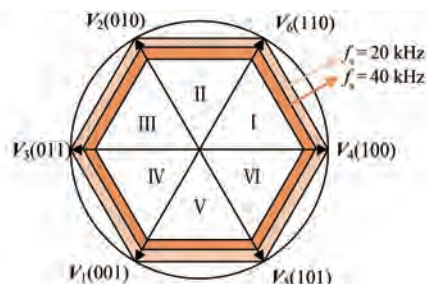


图 6 多支路采样方案在不同开关频率下的电流重构盲区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the current reconstruction blind zone using multiple-branch sampling method at different switching frequencies

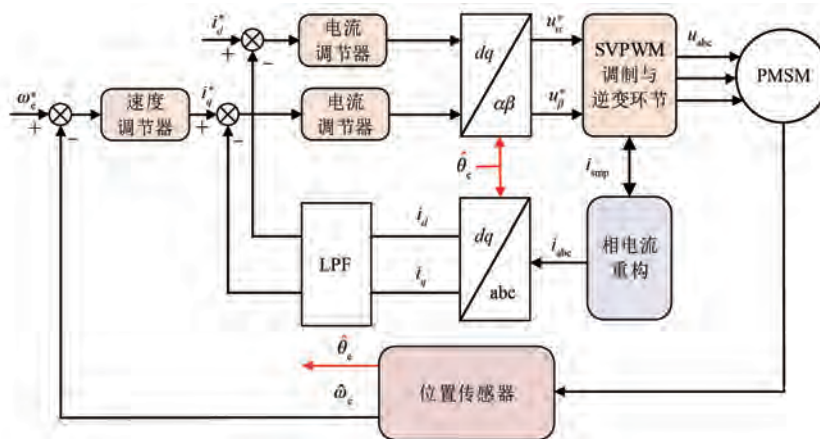


图7 多支路采样法的电流重构系统控制框图

Fig. 7 Block diagram of current reconstruction system using multiple-branch sampling method

3 仿真分析

3.1 直流母线采样法电流重构方案

为分析基于直流母线采样方案的重构盲区补

偿策略,在 Matlab/Simulink 平台上进行了建模与仿真。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。PMSM 主要参数如表 1 所示。

电机转速为 200 r/min 且无电流重构盲区补偿时,采用直流母线采样法重构电流波形和三相全采样电流波形如图 8 所示。可以看到由于直流母线采样方案的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。

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

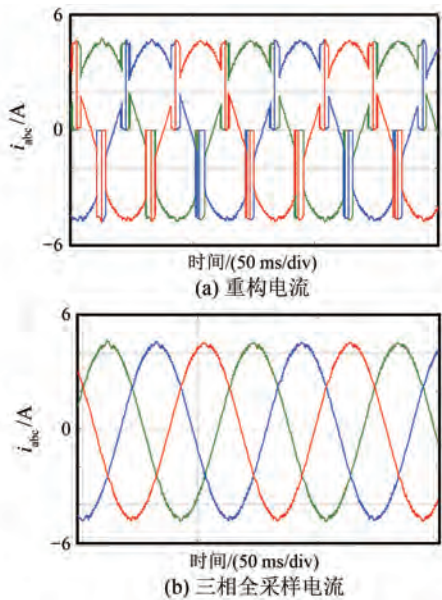


图 8 无重构盲区补偿时直流母线采样法重构电流与三相全采样电流对比

Fig. 8 Comparison of current between full current sampling and DC bus sampling without blind zone compensation

图 9 为加入重构盲区补偿算法后的重构电流波形和三相全采样电流波形。由图 9 可知, SVPWM 移相操作解决了扇区边界区域电流重构失败的问题,但该操作改变了其对称性,导致电流波形存在明显的谐波。

图 10 为采用经典 SVPWM 三相全电流采样

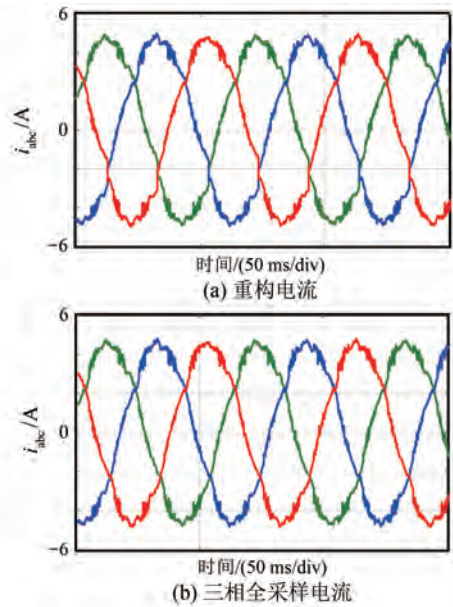


图 9 加入重构盲区补偿时直流母线采样法重构电流与三相全采样电流对比

Fig. 9 Comparison of current between full current sampling and DC bus sampling with blind zone compensation

和采用移相 SVPWM 的直流母线采样的相电流快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 分析结果。由图 10 可知,采用移相 SVPWM 的直流母线采样方案时,由于移相的影响,电流谐波含量提高了 6.24%。

3.2 多支路采样法电流重构方案

多支路采样法电流重构方案在零低速域无重构盲区,不存在修改 PWM 波形导致引入额外谐波的问题。保持电机和逆变器参数与 3.1 节一致。通过仿真建模分析多支路采样法相较于直流母线采样法的优势。

图 11 为电机转速为 200 r/min 且带 50% 负载时采用多支路采样法重构电流波形和三相全采样电流波形。由图 11 可知,通过多支路采样法三相电流实现了准确重构。重构误差结果如图 12 所示,可见仅 A 相和 B 相电流存在重构误差。在电机基频运行时电流重构误差非常小,最大误差约为 0.1 A。

对基于多支路采样法重构电流和三相全采样电流进行 FFT 分析,结果如图 13 所示。由图 13 可知,多支路采样法几乎没有引入额外谐波。

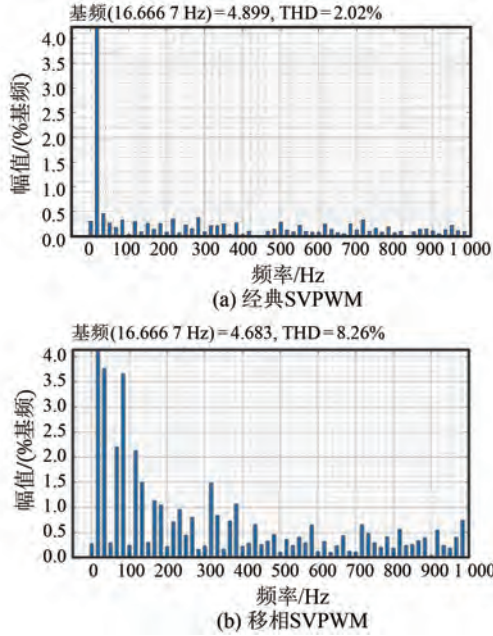


图 10 移相前后电流 FFT 对比

Fig. 10 FFT comparison of current before and after phase shifting

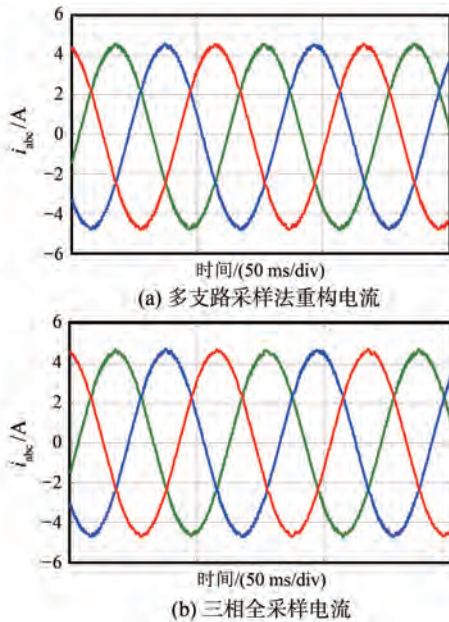


图 11 多支路采样法重构电流与三相全采样电流对比

Fig. 11 Comparison of three-phase current between multiple-branch reconstruction method and full sampling method

4 试验验证

搭建基于多支路采样法的电流重构系统试验平台,如图 14 所示。使用直流电源给功率板

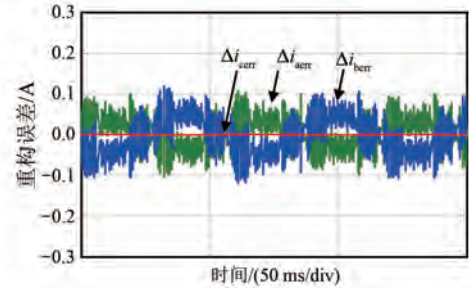


图 12 多支路采样法重构电流与三相全采样电流的误差

Fig. 12 Error between reconstructed three-phase current by multiple-branch method and full sampling method

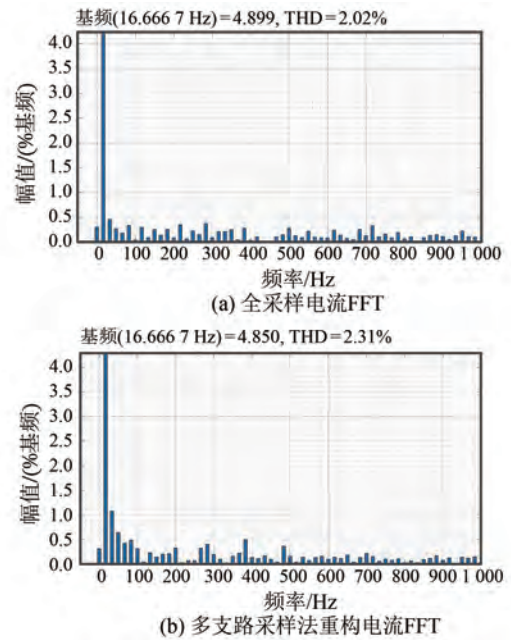


图 13 全采样电流与多支路采样法重构电流 FFT 对比

Fig. 13 FFT comparison between fully sampled current and current reconstructed using the multiple-branch method

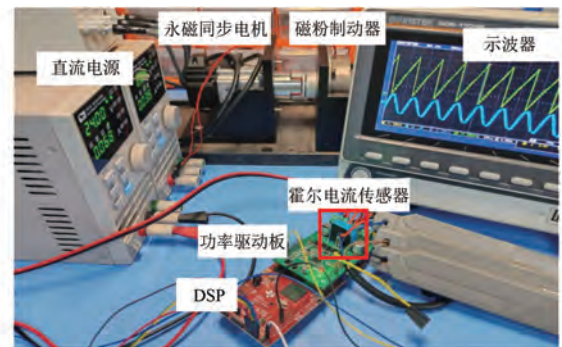


图 14 试验平台

Fig. 14 Experimental platform

的三相逆变器供电,经过 DC-DC 转换芯片给控

制板单片机供电。数字控制芯片采用 TI 的 TMS320F28379D。试验参数与 3.1 节仿真一致。并安装霍尔传感器和 2 500 线光电编码器用于位置比较。数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 以 115 200 bps 的波特率实时与上位机进行串口通信, 获取试验中电流和位置波形。

图 15 为电机静止状态下, 利用电流钳测得的 B 相实际电流、利用多支路采样法获取的重构电流以及利用三相下桥臂电阻获取的同步采样点电流波形对比。由图 15 可知, 在一定误差允许范围内, 采用基于多支路采样法的单电流传感器采样方案, 三相电流实现了较为准确的重构, 电流重构误差不超过 0.5 A。

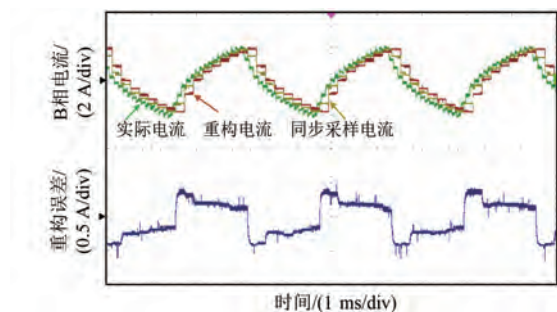


图 15 电机静止状态下电流响应及其重构误差
Fig. 15 Current response and reconstruction error of motor in static state

为了验证本方案在低速运行时的有效性, 在电机转速为 60 r/min 时进行了相应的试验测试, 结果如图 16 所示。由图 16 可知, 重构电流依然能够较为准确地反应实际电流, 最大重构误差小于 0.5 A。

5 结语

本文针对直流母线采样方案的不足, 提出了一种基于多支路采样法的电流重构方案。通过理论分析、仿真建模以及试验验证得出以下结论:

(1) 对于直流母线采样方案, 当参考电压矢量位于重构盲区时, 需要进行矢量移相操作, 会引入额外谐波。而多支路采样法在零低速域不存在电流重构盲区, 因此, 无需修改 PWM 波形。

(2) 多支路采样法的采样模式相对固定, 易于实现, 采样点始终位于零电压矢量作用中点, 使得两次采样有一次必定为同步采样电流, 提高了

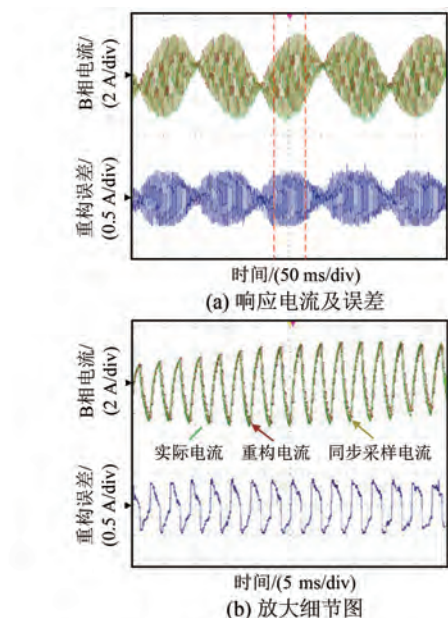


图 16 电机运行于 60 r/min 下电流响应及重构误差
Fig. 16 Current response and reconstruction error of motor running at 60 r/min

电流重构的准确性。

综上所述, 基于多支路采样法的电流重构方案可以解决直流母线采样方案存在的额外谐波引入问题, 电流重构效果更好。

参考文献

- [1] 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 Machine & Control Application, 2024, 51(2): 22-33.
- [2] 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.
- [3] HUO J, ZHAO N, GAO R. 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] 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.
- [5] 何栋伟, 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.
- [6] 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-range anti-interference sliding mode control for permanent magnet synchronous motor in electric vehicles [J]. Electric Machines & Control Application, 2021, 48(12): 21-29.
- [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, WANG Z, 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] 魏海峰, 陆彦如, 江廷宇, 等. 考虑非观测区补偿的永磁同步电机单电阻采样重构 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(12): 2695-2702.
- WEI H F, LU Y R, JIANG T Y, et al. Single resistor sampling reconstruction of permanent magnet synchronous motor considering non-observation area compensation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (12): 2695-2702.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] JUNG-IK H. 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.
- [13] YIKUN G, FENGLEI N, DAPENG Y, 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.
- [14] LAI Y S, LIN Y K, CHEN C W. New hybrid pulsewidth 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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 driving method for three-phase permanent magnet synchronous motor based on single bus current sensor [J]. Journal of

- Electrical Engineering Technology, 2023, 38 (19): 5164-5175.
- [19] 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, 6: 96-101.
- XU H, XIAO X, XIE Y L, et al. Improved phase current reconstruction technology based on a single current sensor [J]. Power Automation Equipment, 2024, 6: 96-101.
- [20] SONG S H, CHOI J W, SUL S K. Current measurements in digitally controlled AC drives [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2000, 6(4): 51-62.
- [21] 肖树欣. 准 Z 源逆变器-永磁同步电机系统控制方法研究 [D]. 天津: 天津大学, 2022.
- XIAO S X. Research on control methods of permanent magnet synchronous motor driven by quasi-Z-source inverter [D]. Tianjin: Tianjin University, 2022.
- [22] 黄立立. 永磁同步电机矢量控制中单电流传感器相电流重构技术研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- HUANG L L. The phase current reconstruction technique with single current sensor in vector control of permanent magnet synchronous motor [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.

收稿日期:2024-06-13

收到修改稿日期:2024-08-07

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 Current Reconstruction Technology Based on Multiple-Branch Sampling Method

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

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

Key words: DC bus sampling; current reconstruction; pulse width modulation; multiple-branch sampling method

Accurately obtaining phase current information is crucial for achieving high-precision motor control. However, the use of multiple current 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, single current sensor current reconstruction technology has garnered sustained attention.

The DC bus sampling current reconstruction technology is a common single current sensor reconstruction scheme, but it has many issues. Addressing the pulse width modulation (PWM) problem in DC bus sampling, the mechanism of the reconstruction blind zone caused by the limitation of minimum sampling time is revealed. To solve the issue of additional harmonics introduced by PWM phase shifting, a circuit topology and current reconstruction method based on the multiple-branch sampling method were studied. The detailed topology is shown in Fig.1. Through theoretical analysis and the construction of a simulation model on the Matlab/Simulink platform, the issues with the DC-bus current sampling scheme were clarified, and experiments verified that the proposed multiple-branch sampling method provides better current

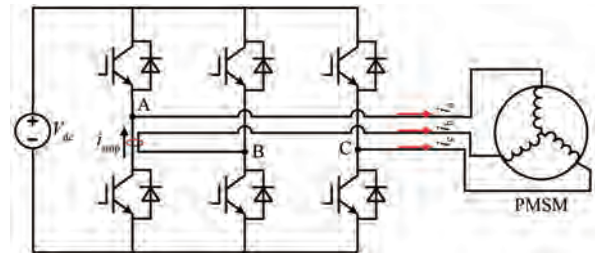


Fig. 1 Topology of current sampling based on the multiple-branch method

reconstruction performance.

The following conclusions were drawn:

1. In the DC bus sampling scheme, when the reference voltage vector is located in the reconstruction blind zone, PWM phase-shifting operations are required, which introduce additional harmonics. However, the multiple-branch sampling method does not have a current reconstruction blind zone in the zero-low-speed range, so there is no need to modify the PWM waveform.

2. The sampling mode of the multiple-branch sampling method is relatively fixed and easy to implement. The sampling point is always located at the midpoint of the zero-voltage vector operation, ensuring that one of the two samples is always a synchronous current sample, thereby improving the accuracy of current reconstruction.