

基于脉宽调制中点采样移相的无刷直流电机 相电流重构方法

张立广, 朱修辉*, 姚明亮, 赵玉茜

(西安工业大学 电子信息工程学院, 陕西 西安 710021)

Phase Current Reconstruction Method for Brushless Direct Current Motors Based on Midpoint Sampling Phase-Shifting in Pulse Width Modulation

ZHANG Liguang, ZHU Xiuhui*, YAO Mingliang, ZHAO Yuqian

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: [Objective] Current sampling serves as a critical component to achieve efficient and stable operation of the motor, and its accuracy directly determines the motor control performance. In brushless direct current motor (BLDCM) control systems, conventional multi-sensor schemes not only increase the hardware costs, but also degrade the closed-loop control accuracy due to sensor parameter drift or characteristic differences. Aiming at the problem of current reconstruction blind zones of single current sensor in the low index modulation regions and sector boundary areas under space vector pulse width modulation (SVPWM), this paper proposes a midpoint sampling phase-shifting method in the second half cycle of pulse width modulation (PWM).

[Methods] By adjusting the phase of the PWM pulse, the phase compensation set two times the minimum sampling time after the falling edge as the actual sampling window and implemented the current sampling operation at the midpoint of the window. This method not only ensured that the minimum sampling time requirement was met, but also reserved a sufficient margin for the signal aberration caused by the switching noise, which effectively reduced the uncertainty of sampling timing and current transient fluctuations. [Results] Simulation and experimental results demonstrated that the proposed method effectively reduced the current reconstruction blind zones in low index modulation regions and sector boundary areas. Compared with the uncompensated phase-shifting method, the accuracy of reconstructed phase current was significantly improved under the proposed compensation

method, and the reconstruction error was stabilized at a lower level. The maximum error was reduced from 6.8 A to 1.38 A, which was a reduction of 79.71%, and the total harmonic distortion was reduced from 26.38% to 3.37%, which was a significant effect of harmonic suppression. [Conclusion] The method proposed in this paper effectively addresses the challenge of single-sensor current reconstruction in SVPWM-driven BLDCM systems, while reducing the hardware costs, and provides a feasible reference for the current sampling design of motors.

Key words: brushless direct current motor; single current sensor; reconstruction blind zones; total harmonic distortion

摘 要: 【目的】电流采样是实现电机高效稳定控制的关键环节,其精度直接决定系统性能。在无刷直流电机 (BLDCM) 控制系统中,传统多传感器方案不仅会增加硬件成本,还会因传感器参数漂移或特性差异导致闭环精度下降。针对空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 下,单电流传感器在低调制比区和扇区边界存在电流重构盲区的问题,本文提出了一种脉宽调制 (PWM) 后半周期中点采样移相法。【方法】通过调整 PWM 脉冲相位,使相位补偿设定下降沿后的 2 倍最小采样时间为实际采样窗口,并在窗口中点实施电流采样操作,该方法既保证满足最小采样时间条件,又为开关噪声引起的信号畸变预留了足够的裕量,有效降低了采样时机的不确定性和电流瞬态波动。【结果】仿真与试验结果表明,本文所提方法有效减小了低调制比区与扇区边界的电流重构盲区。相比于无补偿移相法,在所提补偿方法下重构相电流精度显著提升,重构误差稳定在较低水平,最大误差从 6.8 A 降至 1.38 A,降幅达 79.71%;总谐波畸变率从 26.38% 降至 3.37%,谐波抑制效果明显。【结论】本文所提方法有效解决了 SVPWM 驱动型 BLDCM 系统中单传感器电流重构的难

基金项目: 陕西省重点研发项目 (2024GX-YBXM-059)

Shaanxi Provincial Key Research and Development Program
(2024GX-YBXM-059)

题,同时降低了硬件成本,为电机的电流采样设计提供了可行性参考。

关键词: 无刷直流电机;单电流传感器;重构盲区;总谐波畸变率

0 引言

无刷直流电机 (Brushless Direct Current Motor, BLDCM) 因其效率高、寿命长和设计紧凑,被广泛应用于工业自动化、家用电器以及航空航天等众多领域^[1]。然而,传统 BLDCM 驱动系统通常需要安装三个独立的电流传感器来分别测量三相电流,这不仅增加了系统的成本和复杂性,还对电机控制系统的可靠性和空间布局提出了更高的要求^[2-8]。因此,研究如何减少电流传感器的数量同时保持电机性能具有重要的理论意义与实用价值。单电流传感器技术的核心在于摒弃传统三相逆变器交流侧的多路传感装置,转而在直流母线侧配置单点霍尔传感器。该方案基于空间矢量时域分布特性,在脉宽调制 (Pulse Width Modulation, PWM) 控制周期的两个非零矢量作用区间实施母线电流采样,从而实现三相电流的重构^[9]。然而受限于传感单元固有物理特性及功率器件开关暂态过程的非线性时变特性,直接使用单电流传感器会带来重构盲区问题^[10]。针对盲区消除问题,相关学者相继提出了矢量脉冲插入法、多位置耦合法以及电流预测法等控制策略。

文献[11]提出了一种改进的电压矢量生成方法,用互补的有效矢量替换零矢量,该方法在极低的速度下采样直流母线电流,并减少了盲区时间引入的误差,但由于没有零矢量作用,会大大增加电流纹波及开关复杂度。文献[12]通过将两个具有不同相位和幅值的附加矢量组合成电压指令矢量,来获得可观测的母线电流,虽然有效扩展了母线电流可观测窗口,但是使电流总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 上升。文献[13]采用非对称 PWM 方法提升了有效观测区域覆盖率,但仍存在扇区边界的相位盲区问题。文献[14]通过在空间矢量脉宽调制 (Space Vector PWM, SVPWM) 控制周期末端插入测量电压矢量,实现了相电流的重构,但也增加了开关损耗,且此方法的使用范围有限。

本文提出了一种 PWM 后半周期中点采样移相法,采样时刻移动到逆变器开关状态的后半周期,同时通过开关状态移相,使相位补偿设定下降沿后的 2 倍最小采样时间作为实际采样窗口,通过在窗口中点实施采样操作,既满足采样频率要求,又为信号畸变容错预留了一定裕量。该方法有效降低了采样时机的不确定性和电流瞬态波动,显著减小了电流重构误差和 THD。

1 相电流重构原理

1.1 直流母线采样策略

在电机矢量控制系统中,通常运用 SVPWM 技术来驱动电机。该技术通过逆变器开关状态的不同组合,使实际产生的磁通轨迹尽可能接近理想的圆形磁通轨迹。直流母线电流检测电路如图 1 所示,此电路中,三相电压型逆变器的每个桥臂均被编码,1 代表上桥臂导通,0 代表下桥臂导通^[14]。

在 SVPWM 下,逆变器存在八种基本开关状态,对应 8 种基本电压矢量。SVPWM 算法中扇区矢量关系如图 2 所示,可见空间复平面被划分为 6 个 60° 扇区^[15]。

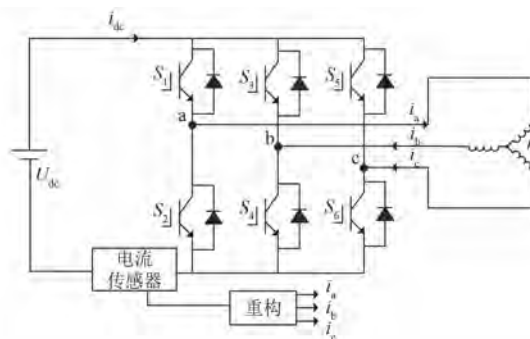


图 1 直流母线电流检测电路

Fig. 1 DC bus current detection circuit

直流母线电流与功率器件开关状态直接对应。以非零电压矢量 $U_4(100)$ 作用为例,此时 S_1 、 S_4 和 S_6 开关管导通,A 相电流 i_a 与直流母线电流 i_{dc} 大小相同,即 $i_{dc} = i_a$,如图 3 所示。

8 种电压矢量与直流母线电流的对应关系如表 1 所示。

在七段式 SVPWM 调制中^[16],每个载波周期包含两段有效矢量作用区间。为准确实现三相电流重构,需在两个有效矢量作用区间分别完成对母线电流的采样。以扇区 1 为例,首次采样时刻

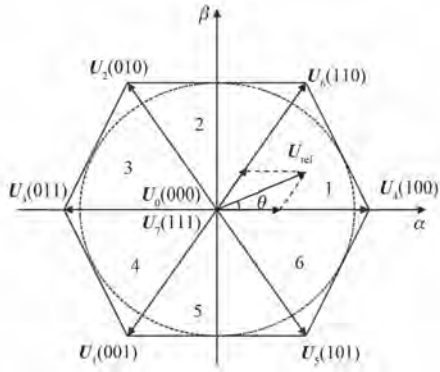


图2 SVPWM下的空间电压矢量图

Fig. 2 Space voltage vector diagram under SVPWM

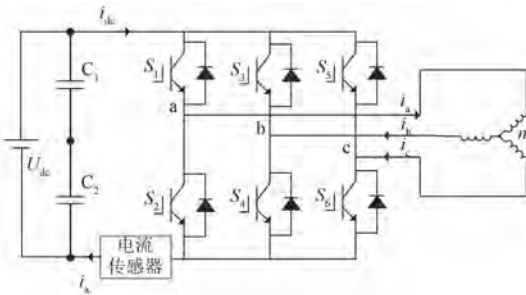


图3 电压矢量(100)作用时的电流流向图

Fig. 3 Current flow diagram under voltage vector (100) operation

T_{sam1} 获取初始非零电压矢量对应的电流 i_a , 第二次采样时刻 T_{sam2} 获取切换后非零电压矢量对应的电流 i_c , 剩余一相电流 i_b 通过基尔霍夫电流定律 $i_a + i_b + i_c = 0$ 推导得到。扇区1直流母线采样波形如图4所示。

表1 电压矢量与直流母线电流的关系

Tab. 1 Relationship between voltage vector and DC bus current

电压矢量	直流母线电流
$U_0(000)$	0
$U_1(001)$	i_c
$U_2(010)$	i_b
$U_3(011)$	$-i_a$
$U_4(100)$	i_a
$U_5(101)$	$-i_b$
$U_6(110)$	$-i_c$
$U_7(111)$	0

1.2 SVPWM 电流重构盲区

在实际电路中, 由于死区时间 T_d 、开关管导

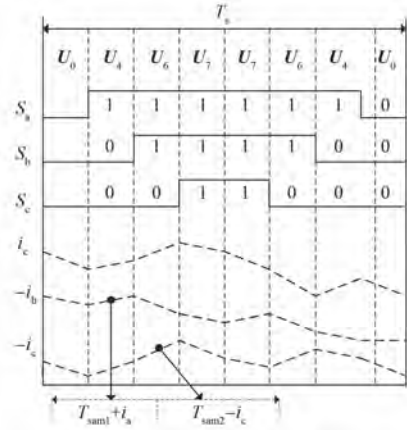


图4 扇区1直流母线采样波形

Fig. 4 DC bus sampled waveform in sector one

通时间 T_{on} 、开关关断时间 T_{off} 以及 A/D 转换最短时间 T_h 的存在, 桥臂导通时母线电流无法瞬时建立。同时由于电机绕组中电感以及开关管寄生电容的影响, 电流在开关管导通或关断后从建立到趋于稳定存在一段时间^[17], 记为 T_{set} 。实际电流与理想电流如图5所示。为实现精准采样, 最小采样时间 T_{min} 需满足:

$$T_{min} \geq T_d + T_{on} + T_{set} + T_h \quad (1)$$

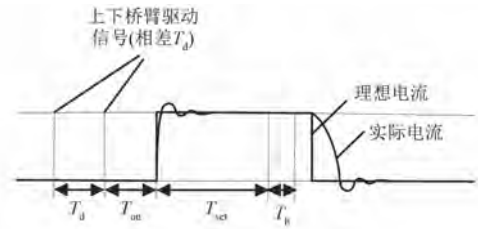


图5 实际电流与理想电流

Fig. 5 Actual current and ideal current

在电流重构过程中, 当空间矢量分布在扇区切换边界或低调制比区域, 会导致电流重构失败, 这些区域统称为电流重构盲区, 如图6所示。

1.2.1 扇区边界盲区

扇区边界盲区问题如图7所示。当参考电压矢量 U_{ref} 跨越扇区6至扇区1的交界区域时, 基本电压矢量 $U_6(110)$ 作用时间 T_6 过短^[18], 导致有效采样窗口时间不足而无法捕获C相电流, 引发电流重构失败^[19]。

当参考电压矢量 U_{ref} 位于临界角度外时, 会导致电流重构失败, 临界角度推导过程如下。

空间电压矢量合成过程如图8所示。设扇区1参考电压矢量 U_{ref} 由基本电压矢量 $U_4(100)$ 和

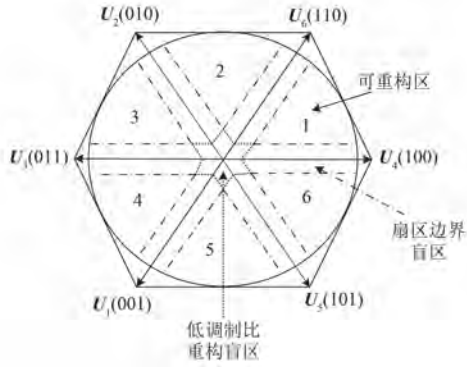


图 6 电流重构盲区示意图

Fig. 6 Schematic diagram of current reconstruction blind zone

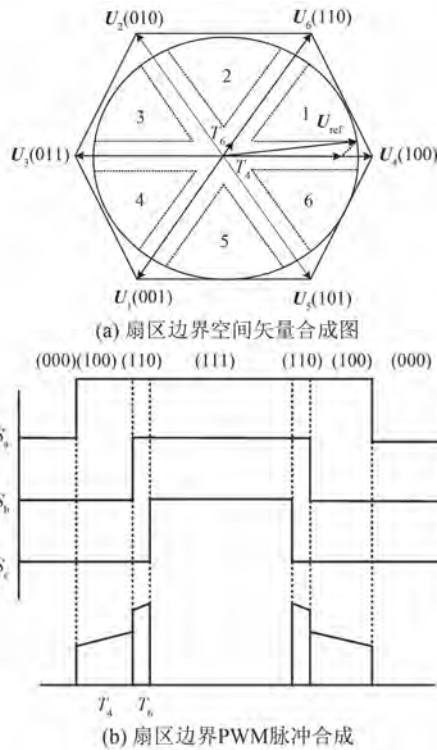


图 7 扇区边界盲区问题

Fig. 7 Blind zone issue at sector boundary

$U_6(110)$ 合成且调制比 $m = 1$, 则 $U_4(100)$ 作用时间 T_4 和 $U_6(110)$ 作用时间 T_6 由式(2)确定:

$$\begin{cases} T_4 = T_s \sin(60^\circ - \theta) \\ T_6 = T_s \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s 为 PWM 周期; θ 为 U_{ref} 与 U_4 的夹角, $0 \leq \theta \leq 60^\circ$ 。

当 T_4 小于 T_{min} 时, 将临界角度 θ_{c1} 代入式(2), 解得临界角度 θ_{c1} 为

$$\begin{cases} T_4 < T_{min} \\ \theta_{c1} = 60^\circ - \arcsin\left(\frac{T_{min}}{T_s}\right) \end{cases} \quad (3)$$

同理当 T_6 小于 T_{min} 时, 解得临界角度 θ_{c2} 为

$$\begin{cases} T_6 < T_{min} \\ \theta_{c2} = \arcsin\left(\frac{T_{min}}{T_s}\right) \end{cases} \quad (4)$$

综上所述, 当 U_{ref} 在扇区 1 的角度 θ 大于 θ_{c1} 或小于 θ_{c2} 时, 电流重构失败。

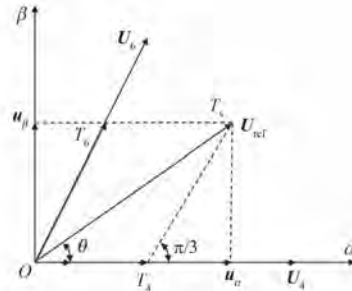


图 8 空间电压矢量合成图

Fig. 8 Space voltage vector synthesis diagram

1.2.2 低调制比盲区问题

低调制比盲区问题如图 9 所示。当 U_{ref} 位于低调制比区时, $U_4(100)$ 和 $U_6(110)$ 的作用时间 T_4 和 T_6 均较短^[20-23], 从而无法获取 A 相和 C 相电流的状态, 导致电流重构失败^[24]。

当调制比小于某个临界值时, 会导致电流重构失败^[25], 临界调制比推导过程如下。

如图 8 所示, 在扇区 1, U_{ref} 由 $U_4(100)$ 和 $U_6(110)$ 合成得到^[26], 其作用时间 T_4 和 T_6 由式(5)确定:

$$\begin{cases} T_4 = mT_s \sin(60^\circ - \theta) \\ T_6 = mT_s \sin \theta \end{cases} \quad (5)$$

式中: m 为调制比, $0 \leq m \leq 1$ 。

在低调制比区时, 两相电流采样时间 T_4 和 T_6 均小于 T_{min} , 即:

$$\begin{cases} mT_s \sin(60^\circ - \theta) < T_{min} \\ mT_s \sin \theta < T_{min} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中两式同时成立的临界情况发生在 $\theta = 30^\circ$ 时, 即:

$$\sin(60^\circ - 30^\circ) = \sin 30^\circ = 0.5 \quad (7)$$

将式(7)代入式(6)中, 可得:

$$m < \frac{2T_{min}}{T_s} \quad (8)$$

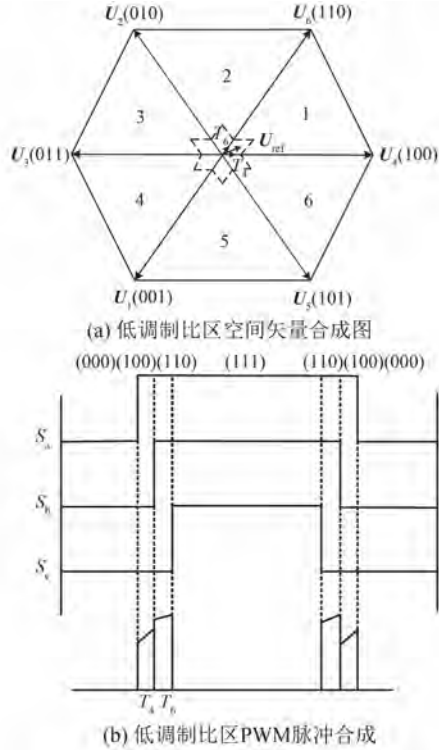


图9 低调制比盲区问题

Fig. 9 Blind zone issue under low index modulation region

所以,临界调制比 m_c 为

$$m_c = \frac{2T_{\min}}{T_s} \quad (9)$$

当 $m < m_c$ 时,存在角度 θ ,使得 T_4 和 T_6 均小于 $T_{\min}$,导致电流重构失败。

2 PWM 后半周期中点采样移相法

本文提出一种 PWM 后半周期中点采样移相法。采样时刻移动到逆变器开关状态的后半周期,相比于前半周期电流采样,该方法可以减小采样延迟带来的影响,采样值可以更快地用于电机的控制算法;同时后半周期采样电流趋于稳定,采样值更能反映真实的电流值。通过开关状态移相,使相位补偿设定下降沿后的 $2T_{\min}$ 作为实际采样窗口,并在窗口中点实施采样操作,既满足采样频率要求,又为信号畸变容错预留一定裕量。固定的采样间隔可以减少采样时机不确定性,在采样窗口的正中间进行电流采样,电流的瞬态波动较小,从而减少因电流波动引起的误差。PWM 后半周期中点采样移相示意图如图 10 所示。

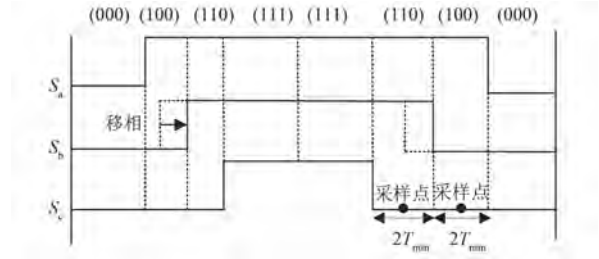


图10 PWM 后半周期中点采样移相示意图

Fig. 10 Schematic diagram of midpoint sampling phase-shifting in the second half cycle of PWM

针对盲区内电压矢量作用时间不足的问题,采用 PWM 脉冲平移策略扩展有效采样窗口。下面验证该平移策略对合成电压矢量幅相特性无影响^[27]。

根据七段式 SVPWM 每个基本电压矢量扇区分布可知,在一个 PWM 周期内参考电压矢量的合成式为

$$U_{\text{ref}} = (T_0 U_0 + T_4 U_4 + T_6 U_6 + T_2 U_2 + T_3 U_3 + T_1 U_1 + T_5 U_5 + T_7 U_7) / T_s \quad (10)$$

式中: $T_0 \sim T_7$ 分别为 $U_0 \sim U_7$ 的作用时间。

分析图 2 可知,基本电压矢量存在式(11)、式(12)所示关系:

$$\begin{cases} U_3 = U_1 + U_2 \\ U_5 = U_1 + U_4 \\ U_6 = U_2 + U_4 \\ U_7 = U_1 + U_2 + U_4 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} T_a = T_3 + T_4 + T_5 + T_7 \\ T_b = T_2 + T_3 + T_6 + T_7 \\ T_c = T_1 + T_3 + T_5 + T_7 \end{cases} \quad (12)$$

式中: T_a 、 T_b 和 T_c 为三相 PWM 的脉宽持续时间。

将式(12)代入式(10)可得:

$$U_{\text{ref}} = \left(\frac{T_a}{T_s}\right) \times U_1 + \left(\frac{T_b}{T_s}\right) \times U_2 + \left(\frac{T_c}{T_s}\right) \times U_4 \quad (13)$$

由式(13)可知,移相过程中, T_a 、 T_b 和 T_c 保持恒定,所以 U_{ref} 的幅值和相位保持不变。

本文所提方法将采样窗口时间 T_{window} 固定为

$$T_{\text{window}} = 2T_{\min} \quad (14)$$

当开关状态在下降沿完成切换后,延时 $T_{\min}$ 对窗口的电流信号进行采样,采样时刻 t_{sample} 为

$$t_{\text{sample}} = t_{\text{fall}} + \frac{T_{\text{window}}}{2} = t_{\text{fall}} + T_{\min} \quad (15)$$

式中: t_{fall} 为 PWM 信号的下降沿时刻。

假设电流在窗口内近似线性变化,则电流表达式为

$$i(t) = i_0 + k(t - t_{\text{fall}}) \tag{16}$$

式中: i_0 为下降沿时刻电流; k 为电流变化率。

中点采样电流 i_{mid} 与窗口内电流平均值 $\bar{i}$ 的误差 ε 为

$$\varepsilon = |i_{\text{mid}} - \bar{i}| = \left| (i_0 + kT_{\text{min}}) - \left(i_0 + \frac{kT_{\text{window}}}{2} \right) \right| = 0 \tag{17}$$

由式(17)可知,此时中点采样无理论误差。

电压矢量在扇区 1 边界的 PWM 波形如图 11(a)所示。经过 B 相右移,两次电流采样窗口均能满足 T_{min} 要求。后半周期依然由 U_4 与 U_6 合成 U_{ref1} ,但在每个 PWM 周期的前半周期需要引入 U_5 与 U_4 来合成 U_{ref2} ,再由 U_{ref1} 和 U_{ref2} 合成 U_{ref} ,合成过程如图 11(b)所示。

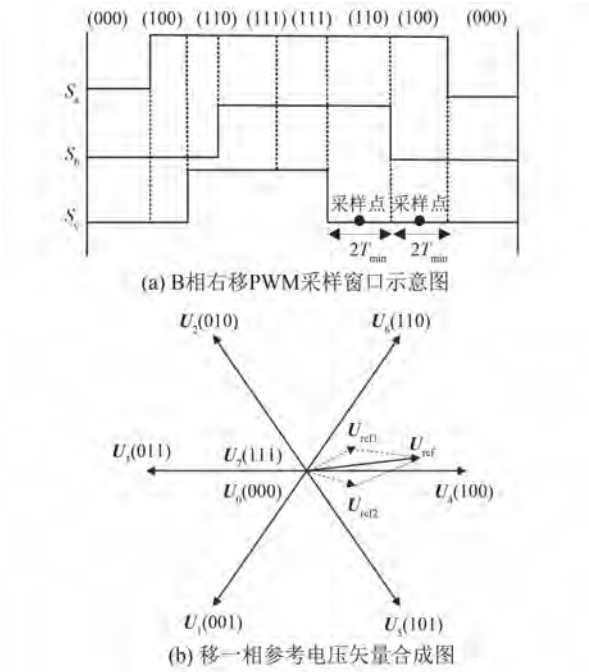


图 11 扇区边界的相位移动

Fig. 11 Phase shift in the sector boundary region

电压矢量在扇区 1 低调制比区的 PWM 波形如图 12(a)所示。经过 A 相右移、C 相左移,两次电流采样窗口均能满足 T_{min} 要求。后半周期依然由 U_4 与 U_6 合成 U_{ref1} ,但在每个 PWM 周期的前半周期需要引入 U_5 与 U_4 来合成 U_{ref2} ,再由 U_{ref1} 和 U_{ref2} 合成 U_{ref} ,合成过程如图 12(b)所示。

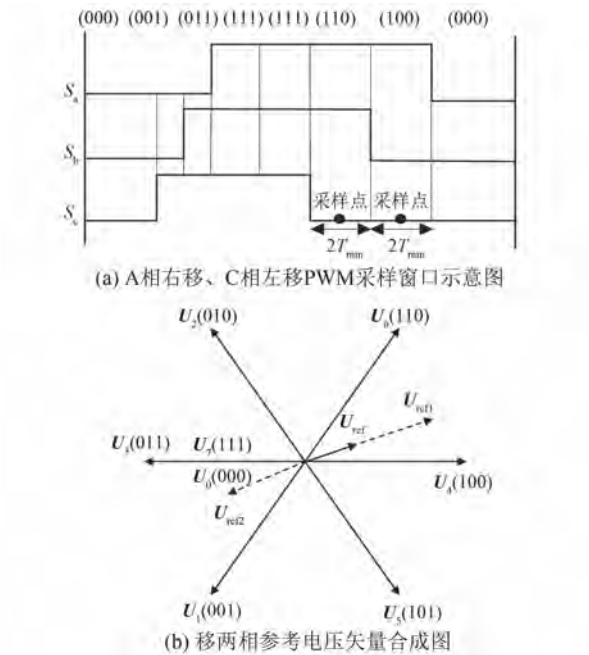


图 12 低调制比区相位移动

Fig. 12 Phase shift in the low index modulation region

3 仿真分析

为了验证本文所提的 PWM 后半周期中点采样移相法的有效性与可行性,基于 Matlab/Simulink 搭建仿真模型。逆变器开关频率 $f_s = 10 \text{ kHz}$, $T_{\text{min}} = 10 \text{ us}$ 。BLDCM 的具体参数如表 2 所示,控制系统原理图如图 13 所示。

表 2 BLDCM 具体参数

Tab. 2 Specific parameters of BLDCM	
参数名称	参数值
定子电阻/ Ω	0.457
d 轴电感/mH	5.3
q 轴电感/mH	7.6
极对数	4
额定转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	2 000
额定转矩/($\text{N} \cdot \text{m}$)	9.5

电机以额定转速 2 000 r/min 运行。图 14(a)和图 14(b)分别为无移相补偿的重构相电流波形与实际三相电流波形。可见,由于直流母线采样方案的特点及重构盲区限制,使得参考电压矢量无法实现准确地电流重构。

由图 14(a)可知,重构电流在特定相位区间呈现显著幅值偏差,该误差来自采样盲区效应。

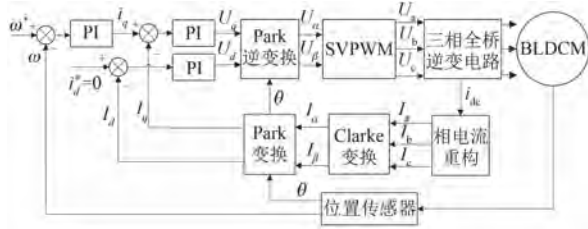


图 13 控制系统原理框图

Fig. 13 Block diagram of control system

当有效电压矢量的作用时长低于 $T_{\min}$ 时,独立相电流信号无法有效捕获,导致重构电流波形畸变。由图 14(c)可知,重构盲区的电流误差最大达 6.8 A,严重影响电机的控制性能。

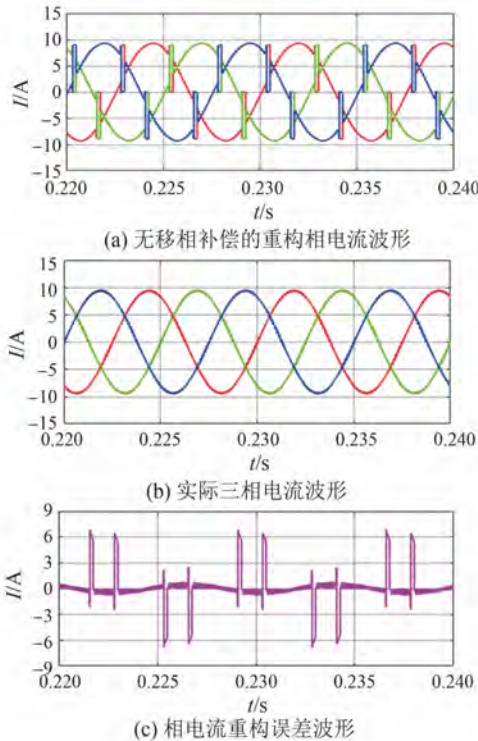


图 14 无移相补偿的重构相电流和实际三相电流波形对比

Fig. 14 Waveforms comparison between reconstructed phase currents without phase-shifting compensation and actual three-phase currents

为实现系统运行状态下完整的相电流重构,对本文提出的 PWM 后半周期中点采样移相法进行仿真验证。电机以额定转速 2 000 r/min 运行,图 15(a)~图 15(c)依次为移相补偿后的重构相电流波形、实际三相电流波形以及相电流重构误差波形。

由图 15 可知,引入移相补偿策略后,重构相

电流与实际三相电流呈现高度吻合,重构盲区问题得到有效抑制。重构误差较低,最大误差为 1.38 A,较无移相补偿时的最大误差 6.8 A 降幅达 79.71%,仿真结果验证了补偿策略对提高电流精度的有效性。

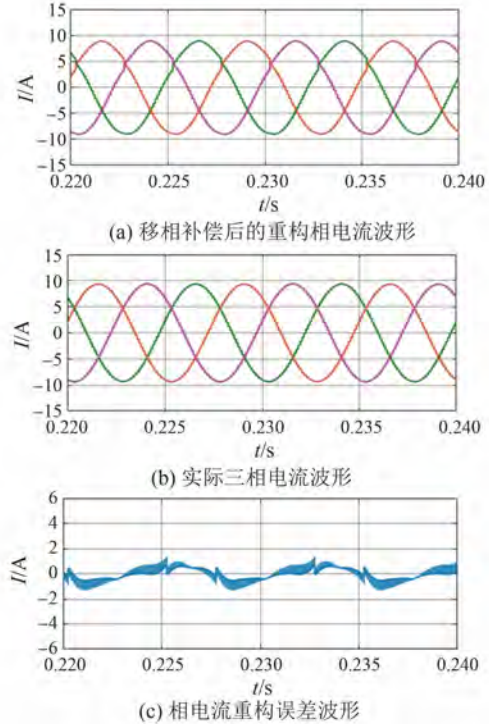


图 15 移相补偿后的重构相电流和实际三相电流波形对比

Fig. 15 Waveforms comparison between reconstructed phase currents with phase-shifting compensation and actual three-phase currents

为便于直观呈现本文所提方法的优势,对无移相补偿法与 PWM 后半周期中点采样移相法进行电流重构质量的对比分析。重构电流谐波对比如图 16 所示,通过快速傅里叶变换频谱分析发现:无移相补偿时的重构电流存在显著的高频谐波分量,THD 高达 26.38%;相比之下,基于本文所提 PWM 后半周期中点采样移相补偿后的重构电流谐波含量明显降低,THD 仅为 3.37%,THD 降低了 23.01%,验证了本文所提方法对重构电流谐波的抑制效果。

4 试验验证

为进一步验证所提方法的有效性和准确性,搭建基于 GD32F450 工业级 ARM Cortex-M4 微控

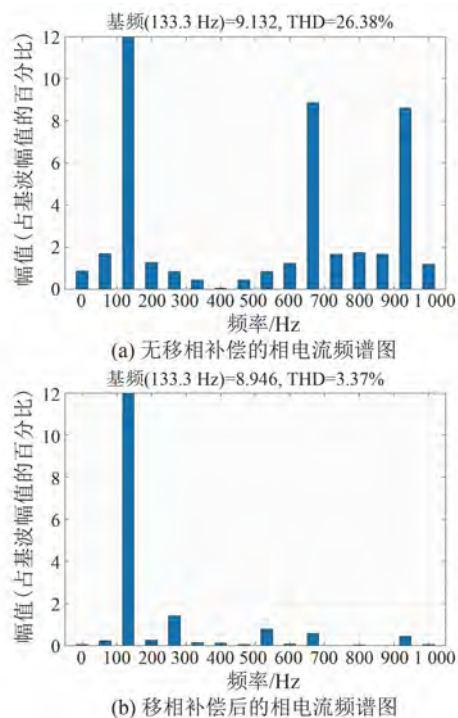


图 16 重构相电流谐波对比

Fig. 16 Comparative of harmonic in reconstructed phase currents

制器的试验平台,主频 200 MHz,内置高级 DSP 硬件加速器和 FPU 浮点运算单元,以实现电机控制、AD 采样以及 PWM 信号输出等功能,设置 $f_s = 10$ kHz, $T_{\min} = 10$ μ s。

电机以额定转速 2 000 r/min 运行。为验证所提中点采样移相法的时序特性,通过逻辑分析仪对 PWM 脉冲信号进行读取,以扇区 1 为例,移相补偿后的 PWM 波形如图 17 所示。以 PWM2 和 PWM3 下降沿后的 $2T_{\min}$ 作为采样窗口,并在窗口中点进行电流采样,以减少因电流波动引起的误差。

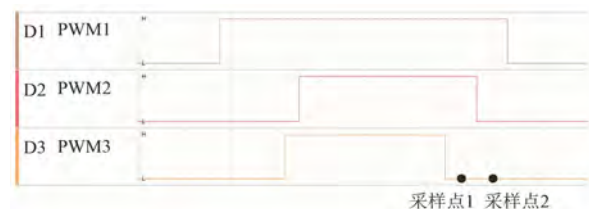


图 17 移相补偿后的 PWM 波形

Fig. 17 PWM waveforms after phase-shifting compensation

图 18(a) 和图 18(b) 分别为重构相电流波形和实际相电流波形。可见,二者均呈现出较好的

正弦度,重构电流波形始终跟随实际电流。由图 18(c) 可知,电流重构误差稳定在较低水平,最大瞬时误差为 1.49 A,与仿真结果高度吻合。

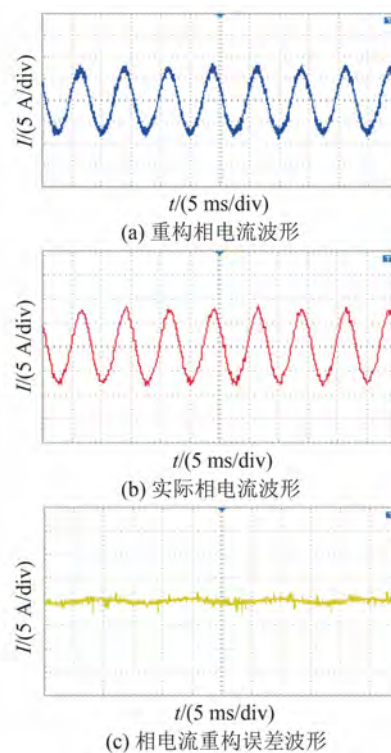


图 18 电机在 2 000 r/min 条件下电流波形及重构误差

Fig. 18 Current waveforms and reconstruction error of the motor operating at 2 000 r/min

由试验结果可得,本文所提 PWM 后半周期中点采样移相法能够有效地解决电流重构盲区问题,实现电流高精度重构,验证了本方法的工程实用性。

5 结语

针对传统单电流传感器直流母线采样方案存在电流重构盲区的问题,本文提出了一种 PWM 后半周期中点采样移相法,通过调整 PWM 脉冲相位以保持固定采样窗口时间,并在窗口中点实施电流采样操作。固定的采样间隔可以降低采样时机的不确定性;在采样窗口的正中间进行电流采样,电流的瞬态波动较小,从而降低因电流波动引起的误差。通过搭建仿真模型和试验平台对所提方法的有效性进行了验证,仿真与试验结果表明,本文所提方法有效减小了低调制比区与扇区边界的电流重构盲区。相比于无补偿移相法,在本文所提补偿方法下重构相电流精度显著提升,

重构误差稳定在较低水平,最大误差从 6.8 A 降至 1.38 A,降幅达 79.71%;THD 从 26.38% 降至 3.37%,谐波抑制效果明显。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

张立广进行了方案设计、内容总结,朱修辉进行了仿真分析、试验验证以及论文撰写,姚明亮、赵玉茜参与了论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The scheme design and content summary were carried out by Zhang Liguang. The simulation analysis, experimental validation, and manuscript drafting were carried out by Zhu Xiuhui. The manuscript was reviewed and revised by Yao Mingliang and Zhao Yuqian. All authors have read and approved the final version of the manuscript for submission.

参考文献

- [1] 黄玲林,王爽,李志伟. 基于多支路采样法的电流重构技术研究[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(11): 11-20.

HUANG L L, WANG S, LI Z W. Research on current reconstruction technology based on multiple-branch sampling method [J]. Electric Machines & Control Application, 2024, 51(11): 11-20.

- [2] 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.

- [3] 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.

- [4] 胡亚山,汪涛,刘理,等. 一种高调制比单电阻采样三相电流重构策略[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2024, 51(10): 145-153.

HU Y S, WANG T, LIU L, et al. A strategy of three-phase current reconstruction for single resistor sampling with high modulation ratio [J]. Journal of Hu'nan University: Natural Sciences, 2024, 51(10): 145-153.

- [5] 金浩,高涵,王飞飞,等. 基于母线电流重构的空心杯 BLDCM 无位置传感器换相误差闭环补偿方法[J]. 实验技术与管理, 2024, 41(2): 98-105.

JIN H, GAO H, WANG F F, et al. Commutation error compensation method based on DC-link current reconstruction for a coreless brushless direct current motor without a rotor position sensor [J]. Experimental Technology and Management, 2024, 41(2): 98-105.

- [6] 申永鹏,刘迪,王延峰,等. 误差自校正随机脉冲宽度调制相电流重构研究[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(9): 108-118.

SHEN Y P, LIU D, WANG Y F, et al. Phase current reconstruction of error self-calibration random pulse width modulation [J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(9): 108-118.

- [7] 马鸿雁,孙凯,魏庆,等. PWM 逆变器相电流重构研究与误差分析[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 108-114+161.

MA H Y, SUN K, WEI Q, et al. Phase current reconstruction method for PWM inverter and error analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 108-114+161.

- [8] 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.

- [9] 黄玲林,王爽,李志伟. 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[J]. 电机与控制应用, 2024, 51(9): 51-59.

HUANG L L, WANG S, LI Z W. Research on

- sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on single DC bus current sampling [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2024, 51(9): 51-59.
- [10] 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.
- [11] 马梓洋. 单传感逆变器相电流重构及故障诊断策略研究[D]. 郑州: 郑州轻工业大学, 2024.
- MA Z Y. Research on phase current reconstruction and fault diagnosis strategy of single sensing inverter [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University of Light Industry, 2024.
- [12] HUANG Y L, XU Y X, ZHANG W T, et al. The hybrid RPWM technique based on modified SVPWM to reduce the PWM acoustic noise [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(6): 5667-5674.
- [13] HUO J Y, ZHAO N N, GAO R F. Torque ripple compensation with anti-overflow for electrolytic capacitorless PMSM compressor drives [J]. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, 10(5): 6148-6159.
- [14] 申永鹏, 郑竹风, 杨小亮, 等. 直流母线电流采样电压空间矢量脉冲宽度调制[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(8): 1617-1627.
- SHEN Y P, ZHENG Z F, YANG X L, et al. A compatible SVPWM method for DC bus current sampling [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(8): 1617-1627.
- [15] 李文. 非理想反电势永磁同步电机转矩控制研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2019.
- LI W. Research on torque control of PMSM with non-ideal back EMF [D]. Nanjing: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.
- [16] ZHANG J Z, XU Z, W J Y, et al. Detection and discrimination for incipient stator faults for inverter-fed permanent magnet synchronous machines [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(8): 7505-7515.
- [17] 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.
- [18] 陈思宇, 向学位, 李辉, 等. 基于改进零脉冲插入法的永磁同步电机相电流重构策略[J]. *电机与控制学报*, 2024, 28(6): 25-35.
- CHEN S Y, XIANG X W, LI H, et al. Phase current reconstruction strategy of PMSM based on improved zero pulse insertion method [J]. *Electric Machines and Control*, 2024, 28(6): 25-35.
- [19] 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.
- [20] LU J D, HU Y H, LIU J L. Analysis and compensation of sampling errors in TPFS IPMSM drives with single current sensor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(5): 3852-3855.
- [21] WANG G L, CHEN F F, ZHAO N N, et al. Current reconstruction considering time-sharing sampling errors for single DC-link shunt motor drives [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(5): 5760-5770.
- [22] WANG W J, YAN H, XU Y X, et al. New three-phase current reconstruction for PMSM drive with hybrid space vector pulse width modulation technique [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2021, 36(1): 662-673.
- [23] 黄政, 陈永军, 刘湃, 等. 基于单电流传感器的永磁同步电机高速控制技术[J]. *微电机*, 2022, 55(1): 48-54.
- HUANG Z, CHEN Y J, LIU P, et al. Permanent magnetic synchronous motor high speed control technique based on single current sensor [J]. *Micromotors*, 2022, 55(1): 48-54.
- [24] LU J D, HU Y H, LIU J L, et al. Position sensor fault detection of IPMSM using single DC-bus current

- sensor with accuracy uncertainty [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(2): 753-762.
- [25] SONG Y G, LU J D, HU Y H, et al. Expanding limit of minimum sampling time using auxiliary vectors for PMSM drives with single DC-link current sensor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 70(4): 3437-3448.
- [26] 尚姝钰, 赵亚谦, 吕恒志, 等. 并网变换器电流重构模型预测容错控制[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 77-85.
- SHANG S Y, ZHAO Y Q, LYU H Z, et al. Model predictive fault-tolerant control of grid-connected converters with current reconstruction [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 77-85.
- [27] 伍文俊, 魏选, 王文轩, 等. NPC 三电平双 PWM 变换器直流母线电流的重构[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 130-135.
- WU W J, WEI X, WANG W X, et al. Reconfiguration of DC bus current for three-level NPC dual-PWM converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 130-135.
-
- 收稿日期:2025-03-16
收到修改稿日期:2025-05-14
作者简介:
张立广(1979-),男,硕士,副教授,研究方向为计算机控制系统、智能控制系统,zhangliguang@xatu.edu.com;
*通信作者:朱修辉(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动控制,15225935760@163.com。