

误差自校正互补非零矢量相电流重构研究

申永鹏¹, 武克轩¹, 梁伟华¹, 吴成中²

(1. 郑州轻工业大学电气信息工程学院, 郑州 450001; 2. 湖南大学机器人视觉感知与控制技术
国家工程研究中心, 长沙 410082)

摘要: 针对传统空间矢量脉宽调制 SVPWM(space vector pulse width modulation)单传感器相电流重构方法中电流不可观测区和零点漂移误差问题, 提出 1 种误差自校正互补非零矢量脉冲宽度调制方法。通过对直流母线采样原理的分析, 定义最短采样时间, 用互补非零矢量代替零电压矢量, 延长电流采样窗口, 消除扇区边界不可观测区域; 同时, 揭示误差扩大效应的产生机理, 采用互补非零矢量双采样对电流零点漂移进行检测和自校正, 实现重构电流零点漂移的补偿。实验结果表明, 所提方法重构误差低于 1.26%, 相电流 THD 低于 6.15%。

关键词: 单传感器; 相电流重构; 零点漂移; 误差自校正互补非零矢量脉冲宽度调制

Research on Phase Current Reconstruction of Error Self-correction Complementary Non-zero Vector

SHEN Yongpeng¹, WU Kexuan¹, LIANG Weihua¹, WU Chengzhong²

(1. School of Electrical and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. National Engineering Research Center of RVC, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Aimed at the problems of current unobservable area and zero drift error in the traditional space vector pulse width modulation with single-sensor phase current reconstruction method, an error self-correction complementary non-zero vector pulse width modulation method is proposed. Through the analysis of the DC bus sample principle, the minimum sample time is defined, the complementary non-zero vector is used to replace the zero voltage vector, and the current sampling window is extended, thus eliminating the sector boundary unobservable area. At the same time, the generation mechanism of error amplification effect is revealed, and the zero drift is detected and self-corrected by means of double-sampling complementary non-zero vector, which realizes the compensation for current zero drift reconstruction. Experimental results show that the reconstruction error of the proposed method was lower than 1.26%, and the phase current THD was lower than 6.15%.

Keywords: Single sensor; phase current reconstruction; zero drift; error self-correction complementary non-zero vector pulse width modulation

三相交流感应电机由于可靠性高、动态响应快等

优点被广泛应用于电动汽车^[1-2]和伺服驱动领域^[3-7]。

收稿日期: 2022-05-15; 修回日期: 2022-09-04, 2022-09-20,
2022-09-23; 录用日期: 2022-10-09; 网络首发日期: 2023-04-26
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(6180-
3345); 河南省科技攻关资助项目(222102240005); 河南省
青年骨干教师培养计划资助项目(2021GGJS089)

This work is supported by the National Natural Science
Foundation of China under the grant 61803345; Henan Science
and Technology Research Project under the grant 22210224
0005; Young Backbone Teacher Training Program of Henan
Province under the grant 2021GGJS089

在传统高性能交流电驱动系统中, 实现电机的闭环
控制至少需要 2 个电流传感器进行采样。为减小不
同电流传感器之间的采样误差^[8], 降低成本^[9], 提
高系统的可靠性^[10], 学者们提出了单电流传感器技
术 SCST(single current sensor technology), 通过安
装在直流母线侧的单电流传感器来实现相电流重
构^[11-14]。单传感器的优点为可实现直流母线电流的
分时采集, 避免多个传感器参数不一致造成的采

样误差, 提升电流检测精度, 是交流电驱动控制领域的研究热点。SCST 技术的主要难点如下: ①在扇区边界和低调制区内, 受最短采样时间限制, 不可避免地出现电流不可观测区, 无法采样相电流的准确信息; ②单传感器误差扩大效应进一步导致电流发生零点漂移, 影响重构精度。

针对直流母线相电流重构问题, 文献[15]通过矢量脉冲插入法, 在脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)周期的开始和中间时刻插入测量电压矢量使其满足过调制区最短采样时间要求, 实现相电流重构; 文献[16]提出 1 种不可观测区补偿的脉冲宽度调制方法, 通过修改传统空间矢量脉宽调制 SVPWM(space vector pulse width modulation)的占空比对不可观测区进行补偿, 增大采样时间窗口, 实现不可观测区相电流重构; 文献[17]提出三态脉宽调制技术, 采用 3 个相邻的开关状态构成参考电压矢量, 在有效缩小电流不可观测区范围的同时降低了共模电压; 文献[18]采用多调制策略 PWM 方法, 在低调制区采用移相法, 在扇区边界插入测量矢量, 使有效电压矢量满足最短采样时间要求; 文献[19]通过插入测量和补偿矢量提出了采样电压空间矢量脉宽调制 SVPWM(sampling voltage space vector pulse width modulation)方法, 在低调制区 PWM 的两端进行补偿, 使 2 路 PWM 波高低电平跳变位置发生相移, 使电流采样窗口满足最短采样时间要求。

上述方法仅缩小了不可观测区, 未考虑零点漂移误差对重构电流的影响。基于此, 本文提出 1 种误差自校正互补非零矢量脉宽调制 ECN-PWM(error self-correction complementary non-zero vector pulse width modulation)方法, 通过定义直流母线电流的最短采样时间, 在扇区边界插入互补非零矢量增大电流采样窗口, 消除不可观测区。同时分析了误差扩大效应的产生机理, 通过对互补非零矢量进行电流双采样校正, 实现了电流零点漂移的检测和自校正, 减小了重构误差。

1 互补非零矢量脉宽调制策略

1.1 直流母线电流采样原理

在直流母线采样系统中, 相电流的检测由安装在逆变器直流母线侧的单传感器完成。三相两电平逆变电路拓扑结构如图 1 所示, 逆变器开关状态可以用变量 $S_p(p \in \{a, b, c\})$ 来表示, $S_p=1$ 为上桥臂开通, $S_p=0$ 为下桥臂的关断。

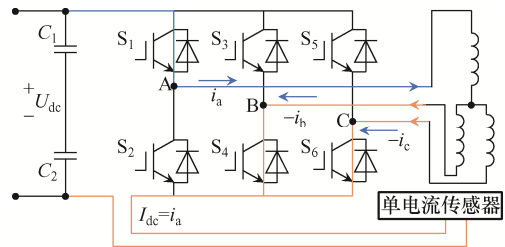


图 1 直流母线采样逆变电路

Fig. 1 DC-bus current sampling inverter circuit

根据电压空间矢量的基本原理, 8 种开关状态对应 6 个有效电压矢量 $V_1(100)$ 、 $V_2(110)$ 、 $V_3(010)$ 、 $V_4(011)$ 、 $V_5(001)$ 、 $V_6(101)$ 和 2 个零电压矢量 $V_0(000)$ 、 $V_7(111)$ 。当有效电压矢量作用时, 相电流信息通过母线电流传感器进行采集。然而, 电机在实际运行过程中, 由于开关器件的动态特性, 直流母线电流并不能瞬时建立, 直流母线电流稳定时间如图 2 所示。

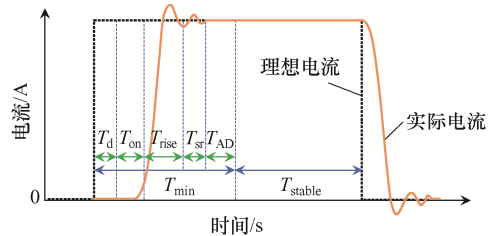


图 2 直流母线电流稳定时间

Fig. 2 DC-bus current stabilization time

直流母线电流的稳定时间包括死区延时时间 T_d 、开关导通时间 T_{on} 、模数转换时间 T_{AD} 、电流突变上升时间 T_{rise} 和电流振荡时间 T_{sr} 。定义电流达到稳定的最短时间 T_{min} 为最短采样时间, 则

$$T_{min} = T_d + T_{on} + T_{AD} + T_{rise} + T_{sr} \quad (1)$$

直流母线电流 i_{dc} 与负载相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的关系见表 1。在 1 个 PWM 周期内, 两相电流信息由单传感器分时采集获得, 第三相电流信息通过基尔霍夫电流定律 KCL 计算得出, 即

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2)$$

表 1 电压矢量、开关状态与母线电流关系

Tab. 1 Relationship between voltage space, vector switching state and DC bus current

电压矢量	开关状态	母线电流
V_1	100	i_a
V_2	110	$-i_c$
V_3	010	i_b
V_4	011	$-i_a$
V_5	001	i_c
V_6	101	$-i_b$
V_0	000	0
V_7	111	0

为保证采样的准确性和有效性, 采样窗口的持续时间必须大于 T_{min} , 当某些有效电压矢量的持续时间小于 T_{min} 时, 相电流无法被成功检测, 从而引入电流不可观测区, 如图 3 所示。

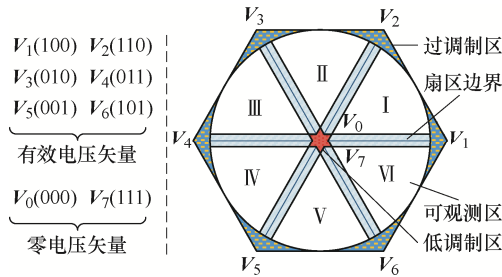


图 3 空间电压矢量平面

Fig. 3 Space voltage vector plane

1.2 ECN-PWM 发波原理

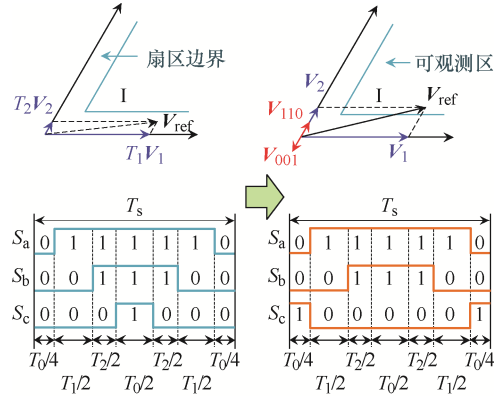
当空间电压矢量位于扇区边界时, ECN-PWM 通过插入互补非零矢量来调整 PWM 脉冲宽度, 如图 4 所示。传统的 SVPWM 方法中当参考电压矢量 V_{ref} 进入第 I 扇区边界时, 有效矢量 V_2 的作用时间小于 T_{min} , 不能满足电流采样要求。为了解决上述问题, 需要对传统 SVPWM 算法进行修改。

根据伏秒平衡原理, 传统 SVPWM 各矢量满足

$$V_{ref} T_s = V_1 T_1 + V_2 T_2 + V_0 T_0 \quad (3)$$

式中: T_s 为载波周期; T_1 、 T_2 、 T_0 分别为 V_1 、 V_2 、

V_0 的作用时间。



(a) SVPWM 发波方式 (b) ECN-PWM 发波方式

图 4 参考矢量位于第 I 扇区时 ECN-PWM 原理

Fig. 4 Principle of ECN-PWM with reference vector in sector I

ECN-PWM 方法中, 互补非零矢量 V_{110} 和 V_{001} 用来代替零矢量, 扇区边界矢量 V_2 被 V_{110} 有效延长, 同时 V_{001} 在反方向加以补偿, 如图 4(b) 所示。更新后的矢量合成表达式为

$$V_{ref} T_s = V_1 T_1 + V_2 T_2 + V_{001} \frac{T_0}{2} + V_{110} \frac{T_0}{2} \quad (4)$$

零矢量作用时间平均分配给插入的互补非零矢量, 即 $T_0/2 = T_{001} = T_{110}$, 零电压矢量的作用效果可表示为

$$V_0 T_0 = V_{001} \frac{T_0}{2} + V_{110} \frac{T_0}{2} \quad (5)$$

由式(5)可以看出, 插入互补非零矢量后仍满足伏秒平衡, 零矢量的时间被有效矢量充分利用。由于空间矢量的旋转特性, 扇区边界两侧需要延长的有效矢量不同, 在每个扇区需要发出 2 组 ECN-PWM 波形, 用不同颜色区域标注, 更新后整个扇区的发波方式如图 5 所示。

1.3 ECN-PWM 电流采样及重构

ECN-PWM 对应的 PWM 波产生过程和电流采样原理如图 6 所示。依靠系统增减模式时基计数器产生 PWM 载波; 通过时基比较寄存器 TBCTL 的比较值 CMP1 和 CMP2 确定 3 路 PWM 上升和下降的位置; 再使能动作寄存器 AQCTL 将 PWM 脉冲在 CMP1 和 CMP2 处置高/低; 最后选择电流采样位置 SP1 和 SP2 采样 2 次电流信息 i_a 和 $-i_c$ 。传统多

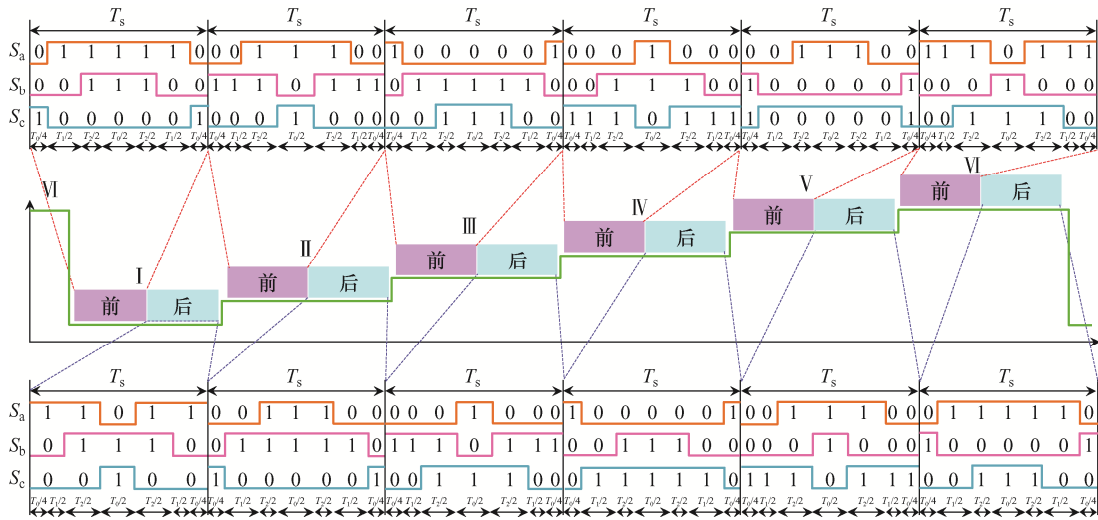


图 5 ECN-PWM 各扇区 PWM 波形

Fig. 5 ECN-PWM waveform in each sector

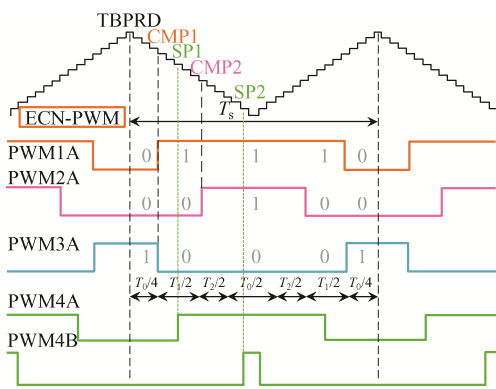


图 6 ECN-PWM 采样脉冲原理框图

Fig. 6 Block diagram of ECN-PWM sample pulse principle

表 2 ECN-PWM 各扇区采样脉冲位置

Tab. 2 Positions of ECN-PWM sample pulses in

each sector

扇区	边界位置	SP1	SP2
I	前	$(CMP1 + CMP2) / 2$	$CMP2 - T_{delay}$
	后	$(CMP2 + CMP3) / 2$	$CMP3 - T_{delay}$
II	前	$(CMP1 + CMP3) / 2$	$CMP3 - T_{delay}$
	后	$(CMP2 + CMP1) / 2$	$CMP1 - T_{delay}$
III	前	$(CMP2 + CMP3) / 2$	$CMP3 - T_{delay}$
	后	$(CMP3 + CMP1) / 2$	$CMP1 - T_{delay}$
IV	前	$(CMP2 + CMP1) / 2$	$CMP1 - T_{delay}$
	后	$(CMP3 + CMP2) / 2$	$CMP2 - T_{delay}$
V	前	$(CMP3 + CMP1) / 2$	$CMP1 - T_{delay}$
	后	$(CMP1 + CMP2) / 2$	$CMP2 - T_{delay}$
VI	前	$(CMP3 + CMP2) / 2$	$CMP2 - T_{delay}$
	后	$(CMP1 + CMP3) / 2$	$CMP3 - T_{delay}$

传感器采样方法通常在载波周期中间(TBPRD=0时)进行采样, 控制系统可以在后半周期 $T_s/2$ 时间内完成运算处理。ECN-PWM 需要 2 次采样, 同时增加了 1 次加减法运算, 为了给控制系统预留足够的处理时间, ECN-PWM 通过在前半个周期内进行 2 次电流采样(如图 6 所示的 SP1、SP2), 确保了控制系统在后半周期有足够的处理时间。表 2 为 ECN-PWM 各扇区采样脉冲位置, 其中 T_{delay} 为延时时间, 使采样脉冲 SP2 的位置处于前半个 PWM 载波周期并且接近载波的波谷, 保证程序中 1 个中断触发 2 次采样, 通过 KCL 计算得出重构电流。

2 电流零点漂移校正方法

2.1 直流母线电流零点漂移分析

在电机控制系统中, 直流母线电流零点漂移主要包括霍尔电流传感器零点漂移和运算放大器零点漂移, 如图 7 所示。霍尔电流传感器零点漂移, 即受温度和封装应力的影响, 由传感器内部霍尔元件和运算放大器产生的漂移, 直接造成了霍尔电流传感器输出信号的零点漂移; 运算放大器零点漂移, 即放大器内部元件参数不一致, 环境温度变化等因素将会导致零点漂移现象, 其中温度是漂移现象产生的最主要原因。

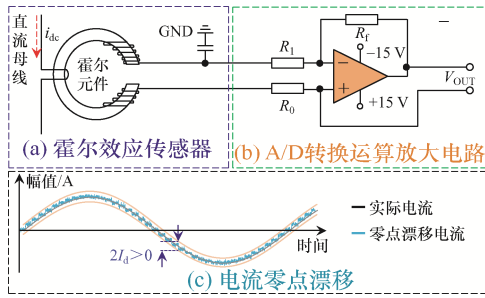


图 7 电流零点漂移分析

Fig. 7 Current zero drift analysis

2.2 误差扩大效应

采用单传感器及信号处理电路的电机控制系统的零点漂移使重构电流和实际电流之间存在一定偏差,从而引起误差扩大效应。负载三相电流理论值分别为 I_a 、 I_b 、 I_c , 直流母线电流的实际值为 $I_{R-x}(x=A, B, C)$, 零点漂移导致的电流漂移量为 I_s , 对应相电流信息可表示为

$$\begin{cases} I_a = I_{R-A} + I_s \\ I_b = I_{R-B} + I_s \\ I_c = I_{R-C} + I_s \end{cases} \quad (6)$$

当有效电压矢量 V_{100} 和 V_{011} 作用时,可以得出 2 次包含电流漂移量的 A 相电流采样值为: $I_{a1} = I_{R-A} + I_s$ 、 $I_{a2} = -I_{R-A} + I_s$, 将 2 次结果求和得 $I_{a1} + I_{a2} = 2I_s$, 即重构误差将扩大为 $2I_s$ 。

2.3 自校正策略

采用 ECN-PWM 方法的互补非零矢量作用时,对应的直流母线电流大小相等、方向相反,在 1 个 PWM 载波周期内对互补非零电压矢量进行双采样,得到电流 I_1 和 I_2 。受零点漂移的影响,采样电流中包含误差漂移量,通过添加误差补偿算法,消除采样电流中的漂移量。当进行误差自校正时,ECN-PWM 需要 3 次采样,在原基础上又增加了运算,由于 3 次采样均在前半周期完成(如图 8 所示的 SP1、SP2、SP3),控制系统可在第 3 次采样完成后,在大于 $T_s/2$ 载波周期内完成运算处理。此外,ECN-PWM 属于电压空间矢量调制方法,可灵活确定采样位置,低采样频率不影响系统运行。

误差补偿原理为在理想的电路中,2 次采样互补非零矢量的电流之和为 0, 即

$$\begin{cases} I_1 = I_C \\ I_2 = -I_C \\ I_1 + I_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中, I_C 为 C 相电流实际值。

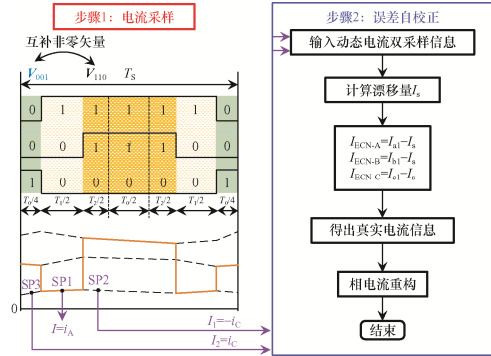


图 8 误差自校正策略

Fig. 8 Error self-correction strategy

实际电路中受零点漂移影响, C 相电流采样值 I_{c1} 和 I_{c2} 包含真实相电流 I_{R-C} 和零点漂移电流 I_s , 且漂移电流 $I_s \neq 0$, 即

$$\begin{cases} I_{c1} = I_{R-C} + I_s \\ I_{c2} = -I_{R-C} + I_s \\ I_{c1} + I_{c2} = 2I_s \end{cases} \quad (8)$$

根据式(8)可以计算出漂移电流 I_s , 从而得到校正后的电流 I_{ECN-C}

$$I_{ECN-C} = I_{c1} - I_s \quad (9)$$

3 实验验证

为了验证 ECN-PWM 方法的有效性, 本文搭建实验平台如图 9 所示。采用搭载 TMS320F28035



图 9 实验平台

Fig. 9 Experimental platform

型 DSP 的电机控制器, PWM 载波频率 10 kHz, 采样频率 20 kHz。负载电机为 MARATHON 的 D2000K 三相交流感应电机, 使用 MDA805A 电驱动分析仪对实验数据采集和分析。实验中电机参数见表 3。

表 3 电机参数
Tab. 3 Motor parameters

参数	数值或型号
功率/kW	0.183
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
额定电压/V	190/380
额定频率/Hz	50
额定电流/A	0.65
额定转矩/(N·m)	0.76
功率因数 cos φ	0.87
效率 η	0.83
电机型号	MARATHON-48T17D2000K
电机接法	Y 型

电机启动阶段校正未使能时, 受电流零点漂移的影响, 重构电流发生上下波动, 校正使能后电流漂移量显著降低, 如图 10 所示。

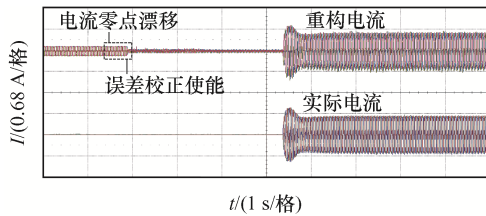


图 10 误差校正使能后的电机启动波形

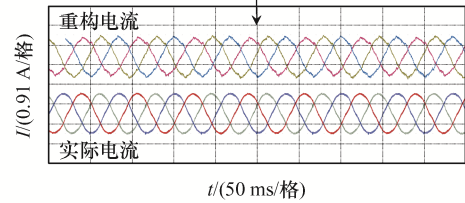
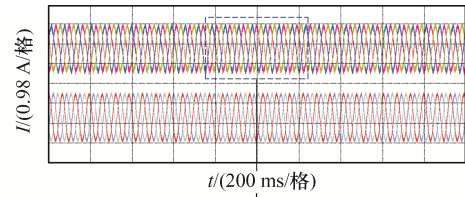
Fig. 10 Waveforms during motor start-up after error correction is enabled

电机运行于调制度 $M = 0.5$ 时实测与重构电流波形如图 11(a) 所示, 误差校正前各相重构电流存在漂移量差值。定义重构电流为 I_{rec} , 实际电流为 I_{act} , 重构误差 e 可表示为

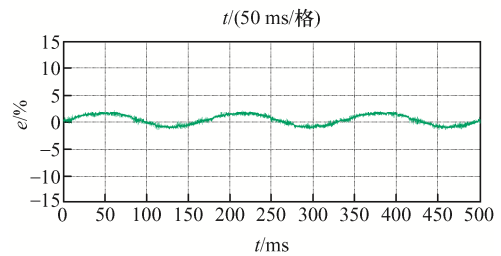
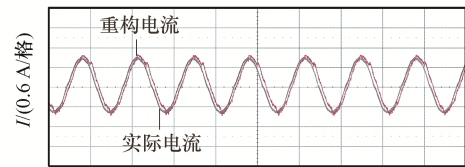
$$e = \frac{I_{act} - I_{rec}}{I_{act}} \times 100\% \quad (10)$$

校正前重构电流误差 $e = 2.43\%$, 如图 11(b) 所示。

ECN-PWM 模式下, 误差校正使能后电流漂移量减小, 校正后重构和实际电流对比如图 12(a) 所



(a) 误差校正使能前



(b) 校正前重构电流及其误差

图 11 电机启动阶段重构与实测相电流

Fig. 11 Reconstructed and measured phase current during motor start-up

示。校正后的重构电流误差 $e = 1.26\%$, 如图 12(b) 所示。

为了进一步验证 ECN-PWM 方法的有效性, 在加速和减速工况下开展实验, 结果如图 13 所示。电机在启动完成后, 加速和减速阶段重构电流均能跟随实际电流进行实时变化, 结果证实了 ECN-PWM 良好的动态特性。

电流的快速傅里叶变换 FFT (fast Fourier transform) 分析如图 14 所示。由于添加互补非零矢量, 导致逆变器开关频率有所增加, 主要谐波集中在基波频率和载波频率 10 kHz 附近。ECN-PWM 方法的 THD 相比于传统 SVPWM 方法提升了 2.04% (由 4.11% 提升至 6.15%)。

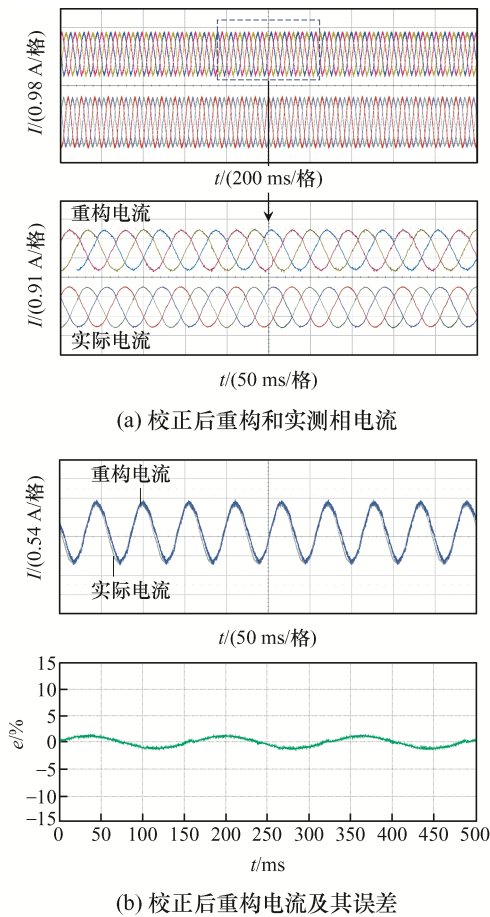


图 12 电流校正后重构与实测相电流

Fig. 12 Reconstructed and measured phase current after current correction

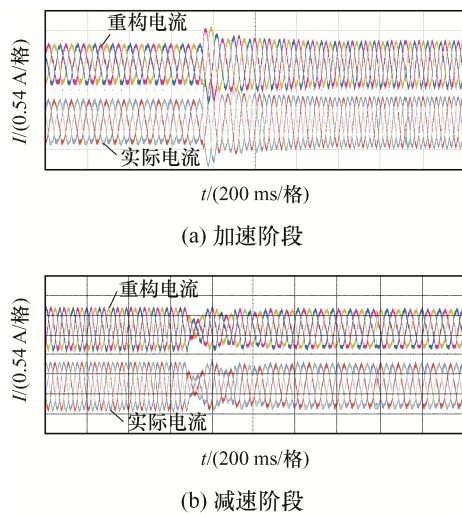


图 13 不同工况下电机运行效果

Fig. 13 Motor operation effect under different working conditions

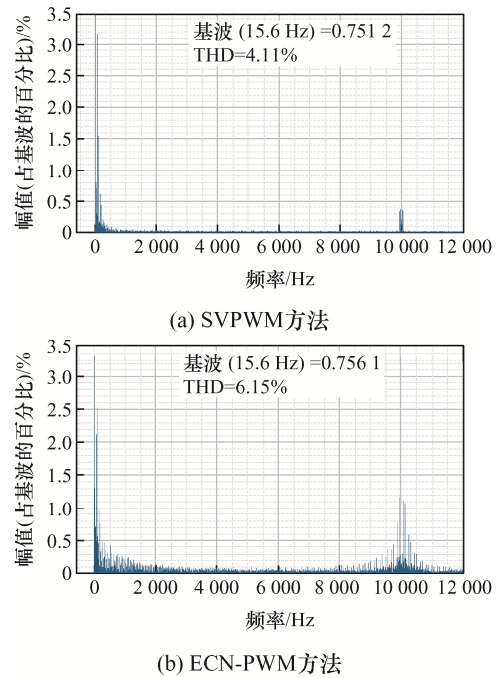


图 14 SVPWM 与 ECN-PWM 方法 FFT 分析

Fig. 14 FFT analysis of SVPWM and ECN-PWM methods

4 结论

本文针对传统脉冲宽度调制单传感器相电流重构方法存在电流不可观测区及电流零点漂移误差问题,提出了 ECN-PWM 方法,结论如下。

(1) ECN-PWM 方法用互补非零矢量代替零矢量,为电流传感器提供了精确的检测窗口,实现不可观测区的电流重构。

(2) 误差校正策略通过对互补非零矢量进行电流分时采样,实现了重构电流漂移量的检测和自校正。

(3) 实验结果表明,重构电流误差小于 1.26%,电流 THD 略有提升但仍保持在 6.15% 以下。

参考文献:

- [1] 焦晓红, 李帅. 永磁同步电机驱动电动汽车速度自适应控制[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 83-89.
Jiao Xiaohong, Li Shuai. Adaptive speed tracking control of electric vehicles driven by permanent magnet synchronous motor [J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(11): 83-89. (in Chinese)
- [2] Hu Sideng, Liang Zipeng, Zhang Xiangning, et al. Research

- on the integration of hybrid energy storage system and dual three-phase PMSM drive in EV [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(8): 6602-6611.
- [3] 张立伟, 魏维, 张超, 等. 基于全局非线性积分滑模的永磁交流伺服系统研究[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(16): 3917-3924.
Zhang Liwei, Wei Wei, Zhang Chao, et al. Study on permanent magnet synchronous motor servo system based on total sliding mode control approach with nonlinear integrator [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2018, 33(16): 3917-3924. (in Chinese)
- [4] 王宏佳, 杨明, 牛里, 等. 永磁交流伺服系统速度控制器优化设计方法[J]. *电机与控制学报*, 2012, 16(2): 25-31.
Wang Hongjia, Yang Ming, Niu Li, et al. Optimal speed controller design method for permanent magnet AC servo system [J]. *Electric Machines and Control*, 2012, 16(2): 25-31. (in Chinese)
- [5] 王萌, 杨家强, 张翔, 等. 一种表贴式永磁同步电机电流矢量闭环 I/f 控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(10): 2513-2521.
Wang Meng, Yang Jiaqiang, Zhang Xiang, et al. An I/f control method with closed-loop regulation of current vector for surface permanent magnet synchronous motor drives [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(10): 2513-2521. (in Chinese)
- [6] Wang Baofang, Iwasaki M, Yu Jinpeng. Command filtered adaptive backstepping control for dual-motor servo systems with torque disturbance and uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 1773-1781.
- [7] Sun Weichao, Liu Yanbin, Gao Huijun. Constrained sampled-data ARC for a class of cascaded nonlinear systems with applications to motor-servo systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(2): 766-776.
- [8] 陆佳琪, 吴金富, 陆彦如, 等. 永磁同步电机新型单电阻电流重构技术研究[J]. *电机与控制应用*, 2019, 46(2): 46-51.
Lu Jiaqi, Wu Jinfu, Lu Yanru, et al. A novel single-resistance current reconfiguration technique for permanent magnet synchronous motor [J]. *Electric Machines and Control Application*, 2019, 46(2): 46-51. (in Chinese)
- [9] 黄科元, 伍瑞泽, 黄守道, 等. 单电阻采样的永磁同步电动机相电流重构策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(9): 114-120.
Huang Keyuan, Wu Ruize, Huang Shoudao, et al. Phase current reconstruction strategy for PMSM using one-shunt current sampling [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(9): 114-120. (in Chinese)
- [10] 肖飞, 许观达, 连传强, 等. 永磁同步电机单电流传感器系统的三相电流重构策略[J]. *电工技术学报*, 2022, 37(7): 1609-1617.
Xiao Fei, Xu Guanda, Lian Chuanqiang, et al. Three-phase current reconstruction strategy of permanent magnet synchronous machine drives using a single current sensor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2022, 37(7): 1609-1617. (in Chinese)
- [11] Saritha B, Janakiraman P A. Single sensor current control of permanent magnet synchronous motor using field programmable gate array [J]. *IET Electric Power Applications*, 2007, 1(3): 416-422.
- [12] Ha J I. Current prediction in vector-controlled PWM inverters using single DC-link current sensor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(2): 716-726
- [13] Cho Y, Labella T, Lai J S. A three-phase current reconstruction strategy with online current offset compensation using a single current sensor [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(7): 2924-2933.
- [14] 周聪, 刘闯, 王凯, 等. 用于开关磁阻电机驱动系统的新型单电阻电流采样技术[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(5): 55-61.
Zhou Cong, Liu Chuang, Wang Kai, et al. A novel single resistance current sampling technique of switched reluctance motor [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(5): 55-61. (in Chinese)
- [15] 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 Wenjie, Yan Hao, Zou Jibin, 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

- Wang Yufei, Zheng Yunping, Xue Hua, et al. Optimal dispatch of mobile energy storage for peak load shifting based on enhanced firework algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 48-56. (in Chinese)
- [14] 邵振, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 基于改进多目标粒子群优化算法的配电网削峰填谷优化[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3984-3989.
- Shao Zhen, Zou Xiaosong, Yuan Xufeng, et al. Optimization of peak load shifting in distribution network based on improved MOPSO algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3984-3989. (in Chinese)
- [15] 段俊东, 李高尚, 李一石, 等. 考虑风电消纳的电动汽车充电站有序充电控制[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(2): 630-637.
- Duan Jundong, Li Gaoshang, Li Yishi, et al. Coordinated charging control for EV charging stations considering wind power accommodation [J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 630-637. (in Chinese)
- [16] Heidari A A, Mirjalili S, Faris H, et al. Harris Hawks optimization: Algorithm and applications [J]. Future Generation Computer Systems, 2019, 97: 849-872.
- [17] Zhang Yang, Zhou Xizhao, Shih P C. Modified Harris Hawks optimization algorithm for global optimization problems [J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2020, 45(12): 10949-10974.



刘仲民

作者简介:

刘仲民(1978—), 男, 博士, 副教授。研究方向: 智能电网、复杂系统的控制理论与技术。E-mail: liuzhxm@163.com。

王瑜(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生。研究方向: 电网优化控制与储能技术。E-mail: 2515026875@qq.com。

(责任编辑: 耿越)

(上接第 83 页)

- (17): 6050-6060. (in Chinese)
- [16] Wang Wenjie, Yan Hao, Xu Yongxiang, 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.
- [17] Kim H, Jahns T M. Phase current reconstruction for AC motor drives using a DC link single current sensor and measurement voltage vectors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1413-1419.
- [18] 章勇高, 秦盛, 刘鹏. 一种基于多调整策略的电机相电流重构技术[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 63-72.
- Zhang Yonggao, Qin Seng, Liu Peng. A motor phase current reconstruction technology based on multiple adjustment strategies [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 63-72. (in Chinese)
- [19] 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 Yongpeng, Zheng Zhufeng, Yang Xiaoliang, et al. A compatible SVPWM method for DC bus current sampling [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(8): 1617-1627. (in Chinese)



申永鹏

作者简介:

申永鹏(1985—), 男, 通信作者, 博士, 副教授。研究方向: 电动汽车动力系统驱动与控制。E-mail: shenyongpeng@zzuli.edu.cn。

武克轩(1999—), 男, 硕士研究生。研究方向: 电机调速与控制。E-mail: wkx1932@126.com。

梁伟华(1988—), 男, 博士, 讲师。研究方向: 电力电子与电力传动。E-mail: weihualiang@163.com。

吴成中(1987—), 男, 博士。研究方向: 机器人控制。E-mail: wuchengzhong@hnu.edu.cn。

(责任编辑: 郭凯凯)