

# 基于自适应零电压矢量双脉冲法的 永磁同步电机带速重投策略

张国强,李润东,黄圆明,丁大尉,王高林,徐殿国

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:**在某些特殊应用场合,永磁同步电机运行过程中可能发生断电,需要其在旋转状态下重新启动,即带速重投,准确的初始位置/转速观测是带速重投的基础。针对传统零电压矢量脉冲法在高转速下初始位置/转速观测时脉冲宽度和脉冲间隔无法自动调节的问题,研究零电压矢量脉宽和脉冲间隔自适应调节策略。通过比较实时监测的短路电流矢量幅值与所设置的临界值,进行零电压矢量脉冲宽度自适应调节;根据零电压矢量单脉冲法的转速预估结果,实现脉冲间隔自适应调节。实验结果表明,所研究的自适应零电压矢量双脉冲法能够针对不同的初始转速自适应确定合适的脉宽和脉冲间隔,有利于提高高转速下初始位置/转速观测和带速重投性能。

**关键词:**永磁同步电机;带速重投;初始位置/转速观测;自适应零电压矢量双脉冲法

**中图分类号:**TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25114

## Flying Start of PMSM Strategy Based on Adaptive Double Zero Voltage Vector Pulse Method

ZHANG Guoqiang, LI Rundong, HUANG Yuanming, DING Dawei, WANG Gaolin, XU Dianguo

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology,  
Harbin 150001, Heilongjiang, China)

**Abstract:** Supply interruption may occur during the operation of permanent magnet synchronous motor (PMSM) in some special applications and it needs to be restarted in the rotating state which is called flying start, the accurate initial position/speed observation is the foundation of flying start. Aiming at the problem that the pulse width and interval time cannot be adjusted automatically when the traditional zero-voltage vector (ZVV) pulse method is used to observe the initial position/speed, the adaptive adjustment strategy of ZVV pulse was studied. The ZVV action time was adjusted adaptively through comparing the amplitude of short circuit current vector monitored in real time with the threshold value. The ZVV interval time was adjusted adaptively according to the speed prediction results of single ZVV pulse method. The experimental results show that the designed adaptive double ZVV pulse method can adjust appropriate pulse width and interval time of ZVV pulse for different initial speed, which is conducive to improving the performance of initial position/speed observation and flying start at high speed.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor (PMSM); flying start; initial position/speed observation; adaptive double zero voltage vector (ZVV) pulse method

永磁同步电机(PMSM)由于调速性能好等优势而被广泛应用于电力传动系统中<sup>[1]</sup>。无传感器控制通过检测电压或电流信号实现转子位置/转速信息观测,有利于降低系统体积和成本<sup>[2]</sup>。在电力机车牵引、空调风机顺风启动等应用场合中,PMSM常需要在旋转状态下重新启动,因此需要首先观测其初始位置/转速,然后应用于无传感

器控制进行带速重投<sup>[3-4]</sup>。由于初始位置/转速观测结果直接影响带速重投初始阶段逆变器所输出电压矢量的幅值和相位,若输出电压矢量与反电动势不匹配则可能引发过流,导致启动失败,严重时甚至会损坏电机,因此初始位置/转速观测性能对带速重投控制性能起到关键作用。

为实现高转速下初始位置/转速观测,文献[5]

**基金项目:**国家自然科学基金(52177034)

**作者简介:**张国强(1987—),男,博士,教授,主要研究方向为交流电机控制理论与应用技术,Email:ZhGQ@hit.edu.cn

提出了通过测量电机绕组端子反电动势信息实现初始位置/转速跟踪的策略,该方法原理较为简单,但需要额外的电压传感器,成本和局限性较高;文献[6]采用零电流矢量闭环法进行初始位置/转速观测,通过将电流环给定设置为零,进而使逆变器输出电压与反电动势相匹配,通过观测逆变器电压给定实现初始位置/转速观测,但是,该方法在将电流调节为零时可能引起过流,且观测耗时较长;文献[7]使用零电压矢量脉冲法进行初始位置/转速观测,通过将逆变器上桥臂或下桥臂所有开关管接通从而使电机发生瞬态短路,永磁体在定子绕组中所感应出的反电动势激励出短路电流,通过采样短路电流可以提取初始位置/转速信息。根据所需的零电压矢量脉冲数目,可分为零电压矢量单脉冲法<sup>[8-9]</sup>、双脉冲法<sup>[10]</sup>和多脉冲法等<sup>[11-12]</sup>。

传统的零电压矢量脉冲法的脉冲宽度和脉冲间隔是固定的,初始位置/转速观测精度随着电机初始转速的变化而变化,可靠性较低。因此,本文提出一种自适应零电压矢量双脉冲法,可以根据永磁电机实际转速自适应确定合适的脉宽和脉冲间隔,提高初始位置/转速观测精度和带速重投的可靠性。

## 1 传统零电压矢量脉冲法初始位置/转速观测策略

施加零电压矢量脉冲时,逆变器的上桥臂或下桥臂所有开关管处于开通状态,永磁同步电机定子绕组发生瞬时短路并激励短路电流。通过检测该短路电流矢量实现初始位置/转速的观测。零电压矢量脉冲施加完毕后,再次关闭所有开关管,短路电流通过反并联二极管续流而衰减至零。施加零电压矢量脉冲时所激励的电流矢量位置示意图如图1所示,电流矢量在 $d-q$ 坐标系和 $\alpha-\beta$ 坐标系中的位置分别为 $\theta_{dq}$ 和 $\theta_{\alpha\beta}$ 。

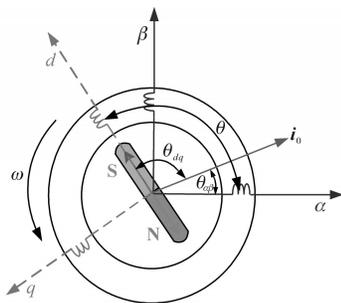


图1 零电压矢量脉冲所激励的电流矢量

Fig.1 Current vector excited by the zero voltage vector pulse

### 1.1 基于零电压矢量脉冲法的初始位置观测

施加零电压矢量脉冲时,永磁同步电机定子端电压为零,且定子电阻压降可以忽略,因此其 $d, q$ 轴电压方程为

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Psi_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $i_d, i_q$ 分别为 $d, q$ 轴电流; $\omega$ 为转子电角速度; $\Psi_f$ 为永磁体磁链; $L_d, L_q$ 分别为 $d, q$ 轴电感。

求解微分方程式(1),可得:

$$\mathbf{i}_0 = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\Psi_f}{L_d} [1 - \cos(\omega T_c)] \\ -\frac{\Psi_f}{L_q} \sin(\omega T_c) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $T_c$ 为零电压矢量脉冲宽度。

由于 $\omega T_c$ 较小,可将式(2)中的正、余弦函数通过二阶泰勒级数展开,式(2)近似为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\Psi_f}{2L_d} \omega^2 T_c^2 \\ -\frac{\Psi_f}{L_q} \omega T_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

因此, $\theta_{dq}$ 可近似计算为

$$\theta_{dq} = \begin{cases} -\frac{L_q}{2L_d} \omega T_c - 90^\circ & \omega > 0 \\ -\frac{L_q}{2L_d} \omega T_c + 90^\circ & \omega < 0 \end{cases} \quad (4)$$

电流矢量在 $\alpha-\beta$ 坐标系中的位置为

$$\theta_{\alpha\beta} = \tan^{-1}(i_\beta, i_\alpha) \quad (5)$$

因此,转子初始位置观测结果为

$$\theta = \theta_{\alpha\beta} - \theta_{dq} \quad (6)$$

### 1.2 基于零电压矢量脉冲法的初始转速观测

观测初始转速时,需先后施加零电压矢量脉冲1和零电压矢量脉冲2,所激励的电流矢量分别为 $i_{10}$ 和 $i_{20}$ ,其在 $\alpha-\beta$ 坐标系中的位置分别为 $\theta_{\alpha\beta 1}$ 和 $\theta_{\alpha\beta 2}$ ,两个零电压矢量脉冲所对应的转子位置分别为 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ ,如图2所示。根据式(4), $d-q$ 坐标系中电流矢量位置和转子位置近似无关,因此电流矢量转速与转子转速近似一致,可以通过观测电流矢量的转速实现转子初始转速的观测。 $\theta_{\alpha\beta 1}$ 和 $\theta_{\alpha\beta 2}$ 可通过下两式计算:

$$\theta_{\alpha\beta 1} = \tan^{-1}(i_{\beta 1}, i_{\alpha 1}) \quad (7)$$

$$\theta_{\alpha\beta 2} = \tan^{-1}(i_{\beta 2}, i_{\alpha 2}) \quad (8)$$

初始转速观测结果为

$$\omega = \frac{\theta_{\alpha\beta 2} - \theta_{\alpha\beta 1}}{\tau_{12}} \quad (9)$$

式中: $\tau_{12}$ 为零电压矢量脉冲1和零电压矢量脉冲2之间的时间间隔。

如果观测的转速大于0,则电机正转;若小于0,电机反转。另外,为确保 $\tan^{-1}(\cdot)$ 函数计算的正确性,需限制两脉冲间隔时间内转子转过电角度在 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 范围内。

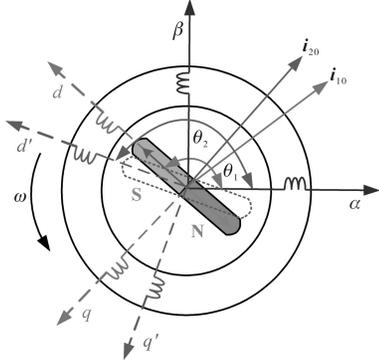


图2 零电压矢量双脉冲所激励的电流矢量

Fig.2 Current vector excited by the double zero voltage vector pulses

式(3)中,由于 $\omega T_c$ 较小, $\omega^2 T_c^2$ 可作为二阶小量被忽略,因此初始转速观测可简化为

$$\omega = \frac{L_q i_0}{\Psi_f T_c} \quad (10)$$

由式(10)可知,零电压矢量单脉冲法进行转速观测时输出结果恒为正,因此无法通过单脉冲法识别电机转速方向。

综上,传统的零电压矢量脉冲法能够实现永磁同步电机高转速下的初始位置/转速观测。但在实际应用中,可能面临脉冲宽度和脉冲间隔的确定问题,这关乎初始位置/转速观测的快速性和准确性。

## 2 自适应零电压矢量双脉冲法初始位置/转速观测策略

### 2.1 零电压矢量脉冲宽度自适应调节策略

若零电压矢量脉冲宽度过大,则所激励的电流矢量较大,容易引起过流或较大的转矩冲击;若零电压矢量脉冲宽度过小,则所激励的电流矢量幅值较小,由电流采样精度等因素造成的误差相对较大,观测精度下降。另外,根据式(10),相同脉冲宽度下,零电压矢量脉冲所激励的电流矢量幅值与初始转速成正比,因此,可以根据不同的初始转速调节合理的脉冲宽度。

以2.2 kW永磁同步电机对拖实验平台为例,分析零电压矢量脉宽和脉冲间隔自适应调节策

略。2.2 kW永磁电机参数如下:额定电压380 V,额定电流4.4 A,额定功率2.2 kW,额定转速1 500 r/min,额定转矩14 N·m,定子电阻1.88  $\Omega$ ,d轴电感22.4 mH,q轴电感51.8 mH,磁链0.52 Wb。

由于零电压矢量脉冲法适用于高转速下初始位置/转速观测,因此考虑带速重投初始转速范围为500~1 500 r/min。当电流矢量幅值达到电流额定值的50%(2.2 A)时,电流采样精度即可达到较高的水平且电流矢量幅值满足系统安全性需求,因此可设置电流矢量幅值为2.2 A。根据式(10),1 500 r/min初始转速条件下,零电压矢量脉冲宽度被自适应调节为0.5 ms,500 r/min条件下,脉冲宽度被自适应调节为1.4 ms。

实际系统中电流采样频率与PWM更新频率一致,因此在每次电流采样时均可计算电流矢量幅值,并将该幅值与设定值相比较,若未达到设定值,则继续施加零电压矢量脉冲;若达到设定值则停止施加零电压矢量脉冲,采样脉冲结尾处的电流并进行初始位置/转速观测。

### 2.2 零电压矢量脉冲间隔自适应调节策略

根据式(9),初始转速观测误差与电流矢量位置计算误差、脉冲之间的时间间隔相关,而前者取决于系统的电流采样精度,无法直接控制,因此初始转速观测误差主要受脉冲之间的时间间隔影响。若脉冲间隔过大则观测耗时较长,甚至因间隔时间内转子旋转角度超过 $180^\circ$ 而导致 $\tan^{-1}(\cdot)$ 函数计算错误,从而导致电流矢量位置计算错误;若零电压矢量脉冲间隔过短,则式(9)中较小的分母易将电流矢量位置观测误差放大并引入到初始转速观测中。

假设 $\theta_{\alpha\beta 1}$ 和 $\theta_{\alpha\beta 2}$ 的观测最大误差为

$$\theta_{\alpha\beta 1}^{\text{err}} = -\theta_{\alpha\beta 2}^{\text{err}} = \theta_{\alpha\beta}^{\text{err,max}} \quad (11)$$

式中: $\theta_{\alpha\beta}^{\text{err,max}}$ 为电流矢量位置的最大观测误差。

对应转速观测相对误差可以计算为

$$\delta_\omega = \frac{\omega^{\text{err,max}}}{\omega} \cdot 100\% = \frac{2 \times \theta_{\alpha\beta}^{\text{err,max}}}{\omega \tau_{12}} \cdot 100\% \quad (12)$$

式中: $\omega^{\text{err,max}}$ 为转速观测的最大误差。

由于传统零电压矢量脉冲法的脉冲间隔时间是固定的,根据式(12),这会导致转速观测误差随着初始转速的变化而变化。因此,应该根据实际初始转速调节脉冲间隔,确保在间隔时间内转子转过电角度小于 $180^\circ$ 的前提下,尽量增大脉冲间隔来减小初始转速观测误差。

因此,可利用第一个零电压矢量脉冲根据式

(10)进行初始转速的预估,然后根据预估结果进行脉冲间隔的自适应调节。为确保脉冲间隔时间内转子转过电角度不超过 $180^\circ$ ,本文在已知初始转速情况下将脉冲间隔调节为间隔时间内转子转过 $120^\circ$ 电角度。

基于以上分析,自适应零电压矢量双脉冲法初始位置/转速观测流程图如图3所示。

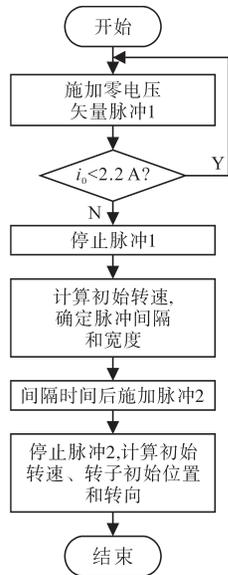


图3 自适应零电压矢量双脉冲法流程图  
Fig.3 Flow chart of adaptive double zero voltage vector pulses method

通过本文所提出的自适应零电压矢量双脉冲法,在初始转速不同时可以根据电流采样结果决定零电压矢量脉冲是否继续施加,从而自适应调节合适的脉冲宽度,避免造成短路电流冲击或观测精度下降。由电机电感和磁链参数便可以根据式(10)计算初始转速,根据该预估初始转速值自适应调节脉冲间隔,能够在确保脉冲间隔时间内转子转过电角度不超过 $180^\circ$ 的前提下尽可能提高初始转速的观测精度,最后根据式(9)中电流矢量脉冲和脉冲间隔计算重投阶段的初始速度。由此可见,与传统零电压矢量脉冲法的固定脉冲宽度和脉冲间隔相比,本文提出的自适应调节策略能够实现脉宽和脉冲间隔自动调节,有利于提高初始位置/转速观测性能。

### 3 实验结果

为验证本文所提出的自适应零电压矢量双脉冲法脉宽和脉冲间隔自适应调节性能以及初始位置/转速观测性能,在如图4所示的2.2 kW永磁同步电机对拖平台上进行实验验证。

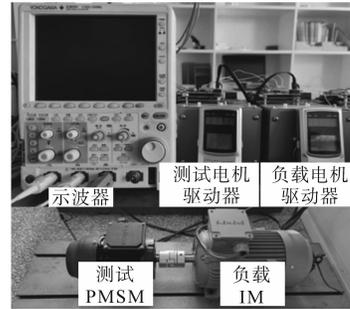


图4 2.2 kW 永磁同步电机实验平台

Fig.4 Experiment platform of 2.2 kW PMSM

图5为500 r/min转速下基于传统零电压矢量脉冲法的初始转速观测实验结果。图中从上至下依次为转子位置观测值、转子转速观测值以及定子相电流,转速相对较低并且脉冲宽度过小,激励的电流矢量幅值较小时,观测转速与实际转速存在偏差。

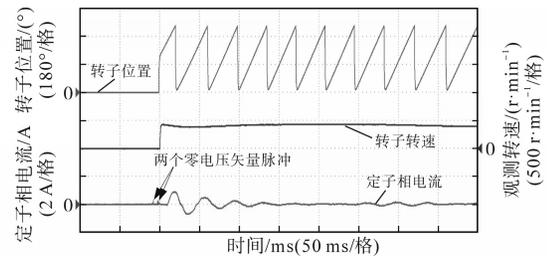


图5 基于传统零电压矢量脉冲法的初始转速观测实验波形 ( $n = 500 \text{ r/min}$ )

Fig.5 Experimental result of initial speed observation based on traditional zero voltage vector pulse method ( $n = 500 \text{ r/min}$ )

图6为1500 r/min转速下的初始位置观测及带速重投实验结果。其中,图6b放大图为基于自

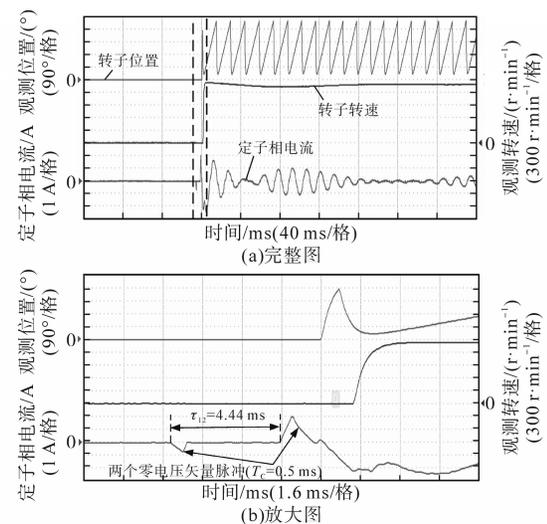


图6 基于自适应零电压矢量双脉冲法的带速重投实验结果 ( $n = 1500 \text{ r/min}$ )

Fig.6 Experimental result of flying start based on proposed adaptive double zero voltage vector pulses method ( $n = 1500 \text{ r/min}$ )

适应零电压矢量双脉冲法的初始位置/转速观测环节。可知,该转速下零电压矢量脉冲宽度被自适应调节为0.5 ms,脉冲间隔被自适应调节为4.44 ms。零电压矢量脉冲所激励的定子电流较小,既符合安全性要求,也能满足初始位置观测的精度需求。完成初始位置/转速观测之后,观测结果应用于无传感器控制进行带速重投。重投过程中,定子电流波动不超过2.5 A,并在200 ms内趋于稳定,具有较好的稳定性和快速性。

图7为1 000 r/min转速下的初始位置观测及带速重投实验结果。如图7b所示,在该初始转速下,零电压矢量脉冲宽度被自适应调节为0.9 ms,这是因为反电动势随着转速的下降而下降,激励相同电流矢量所需要的零电压矢量脉冲宽度变大;另外,随着转速下降,转子转过一定电角度所需的脉冲间隔时间变长,脉冲间隔被自适应调节为6.7 ms。完成初始位置/转速观测后进行带速重投,电流最大波动约2 A,带速重投过程较为稳定。

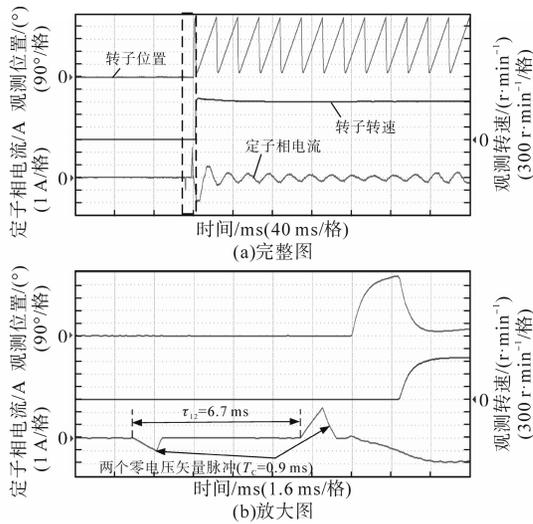


图7 基于自适应零电压矢量双脉冲法的带速重投实验结果( $n = 1\ 000\ \text{r/min}$ )

Fig.7 Experimental result of flying start based on proposed adaptive double zero voltage vector pulses method ( $n = 1\ 000\ \text{r/min}$ )

图8为500 r/min转速下的初始位置/转速观测及带速重投实验结果。如图8b所示,随着转速进一步下降,脉冲宽度和脉冲间隔被进一步自适应放大为1.5 ms和13.3 ms。可见,重投过程中未发生明显转速波动或电流冲击,零电压矢量脉宽和脉冲间隔自适应调节策略工作正常,带速重投较为平稳可靠。

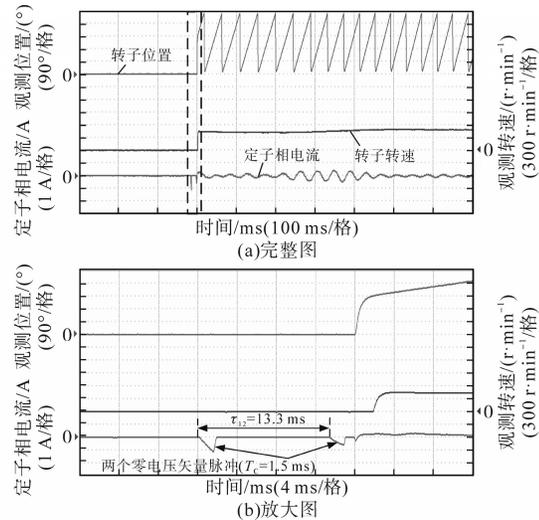


图8 基于自适应零电压矢量双脉冲法的带速重投实验结果( $n = 500\ \text{r/min}$ )

Fig.8 Experimental result of flying start based on proposed adaptive double zero voltage vector pulses method ( $n = 500\ \text{r/min}$ )

为验证反向旋转时初始位置/转速观测及带速重投性能,图9为-1 500 r/min下带速重投实验结果。可见,自适应零电压矢量双脉冲法能够实现脉宽和脉冲间隔自适应调节,带速重投过程较为平稳。

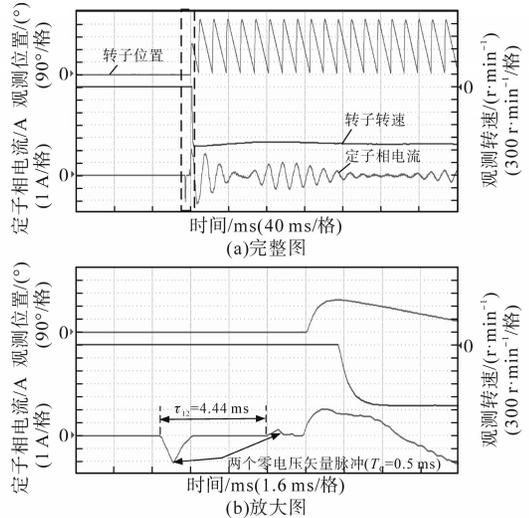


图9 基于自适应零电压矢量双脉冲法的带速重投实验结果( $n = -1\ 500\ \text{r/min}$ )

Fig.9 Experimental result of flying start based on proposed adaptive double zero voltage vector pulses method ( $n = -1\ 500\ \text{r/min}$ )

#### 4 结论

针对传统零电压矢量脉冲法在高转速下初始位置/转速观测时脉冲宽度和脉冲间隔固定,在电机转速发生改变时观测性能下降的问题,本文提出一种零电压矢量脉宽和脉冲间隔自适应调

节策略。根据电流采样结果决定脉冲是否继续施加,进而确定合适的脉冲宽度。使用零电压矢量单脉冲进行转速预估,根据预估结果自适应调节脉冲间隔,从而确保初始转速观测结果的准确性。初始位置/转速观测完成之后,将观测结果应用于无传感器控制从而实现带速重投。实验结果表明,所提出的自适应零电压矢量双脉冲法能够自适应调节合适的脉宽和脉冲间隔,带速重投过程稳定、可靠。

#### 参考文献

- [1] 赵楠楠,周峰,丁大尉,等. 永磁电机无电解电容驱动系统网侧电流谐波抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(3): 1145-1154.  
ZHAO Nannan, ZHOU Feng, DING Dawei, et al. Suppression strategy of grid-side current harmonics for electrolytic capacitor-less permanent magnet motor drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(3): 1145-1154.
- [2] 朱良红,张国强,李宇欣,等. 基于级联扩张观测器的永磁电机无传感器自抗扰控制策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(18): 4614-4624.  
ZHU Lianghong, ZHANG Guoqiang, LI Yuxin, et al. Active disturbance rejection control for position sensorless permanent magnet synchronous motor drives based on cascade extended state observer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(18): 4614-4624.
- [3] 宋承霖. 高速列车永磁同步牵引电机的控制系统研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.  
SONG Chenglin. Research on permanent magnet synchronous traction motor control system of high-speed train[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [4] 巩思茜. 高速列车永磁牵引电机同步控制建模与仿真研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.  
GONG Siqian. Research of simulation and modeling of high speed train traction permanent magnet motor synchronous control[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [5] 黄希. 风机用永磁同步电机全速范围无位置传感器控制技术[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2020.  
HUANG Xi. Research on full-speed range sensorless control technology for fan-type permanent magnet synchronous motor [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2020.
- [6] IURA H, IDE K, HANAMOTO T. An estimation method of rotational direction and speed for free-running AC machines without speed and voltage sensor[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 153-160.
- [7] 孙伟. 永磁同步电动机无位置传感器控制与高性能运行策略的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.  
SUN Wei. Study of PMSM position sensorless control and high-performance operation strategy[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [8] PRAVICA L, SUMINA D, BARIŠA T. Flying start of a permanent magnet wind power generator based on a discontinuous converter operation mode and a phase-locked loop[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(2): 1097-1106.
- [9] HORIE T, KONDO K. Experimental study on a restarting procedure at coasting condition for a rotational angle sensorless PMSM[J]. IEEE Journal of Industry Applications, 2014, 3(2): 131-137.
- [10] 袁倩. 牵引永磁同步电机无传感器控制的带速重投的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
YUAN Qian. Sensorless restarting process of traction permanent magnet synchronous motor[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [11] YAMAKAWA T, WAKAO S, KONDO K, et al. Starting procedure of rotation sensorless PMSM at coasting condition for railway vehicle traction[J]. Electrical Engineering in Japan, 2009, 169(2): 56-63.
- [12] TANIGUCHI S, MOCHIDUKI S, YAMAKAWA T, et al. Starting procedure of rotational sensorless PMSM in the rotating condition[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(1): 194-202.

收稿日期: 2023-04-27

修改稿日期: 2023-07-15