

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.03.010

# 基于28069M的参数辨识和无位置控制算法研究

龙德平, 马钧华

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对电压检测中的滤波环节会产生相位滞后,对高速区的观测器造成不良影响的问题,在研究TI公司28069M的参数辨识及无位置控制算法的基础上,引入了电压重构算法来代替通常的电压检测。分析了电压重构中实际死区时间的影响。利用同一台电机电阻辨识结果不变的特性,设计了利用2次电阻辨识获得实际死区时间的方法,完善了电压重构公式,提高了电压重构的精度。使用电压重构代替电压检测,进行参数辨识及无位置控制实验,在验证28069M算法有效性的同时,也说明改进后的电压重构算法具有工程实用性。

**关键词:**电机控制;参数辨识;电压重构;实际死区时间;无位置控制

中图分类号:TM343 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2018)03-0051-07

## Research of Parameter Identification and Sensorless Control Algorithm Based on 28069M

LONG Deping, MA Junhua

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** Filter in voltage detection can cause phase lag, which affects the estimator in the range of high speed. Voltage detection was replaced by voltage reconstruction algorithm to solve the problem while researching the parameter identification and sensorless control algorithm of TI 28069M. The effect of real dead time on the voltage reconstruction was analyzed. Using the characteristic that the stator resistance identification results of the same motor remained the same, the method to get the real dead time by identifying the resistance twice was designed, the voltage reconstruction formula was completed and the accuracy was enhanced. The parameter identification and sensorless control experiments were carried out by using the voltage reconstruction instead of voltage detection. The results show the effectiveness of 28069M algorithm and the practicability of voltage reconstruction can be used in practical application.

**Keywords:** motor control; parameter identification; voltage reconstruction; real dead time; sensorless control

电机矢量控制的关键在于磁场的准确定向,以实现定子电流的正确解耦。如何快速、准确地获得电机转子的位置,成为提高电机控制性能的关键。通常,电机的转子位置可以通过位置传感器获取。现在电机有位置传感器的控制已经达到了比较高的水平。机械式传感器虽然可以简单、快速地提供的转子位置信号,但也会带来安装、维修等问题,甚至在某些恶劣环境下根本无法使用<sup>[1-2]</sup>。因此,电机无位置检测控制成为现今电机控制领域的一个研究热点。无位置检测控制利用参数辨识和状态观测等手段,从定子侧易测量的状态量(三相电压、三相电流)中计算出转子位置信号,并

将其应用到控制系统中<sup>[3]</sup>。

针对电机的无位置控制, TI公司推出了28069M芯片。该芯片集成了电机无位置控制算法库,其中最重要的就是参数辨识<sup>[4-6]</sup>算法和FAST观测器。FAST观测器相当于一个软件编码器,通过输入电机的参数、三相电压和三相电流等变量,就可以实时计算出电机转子的位置,并得到磁场、转速和转矩等重要信息。三相电压可以通过电压重构算法得到,并且用于参数辨识和无位置控制等算法中。

课题组分析了PWM实际死区时间 $T_{\text{shut}}$ 对于电压重构的影响,并提出了该实际死区时间的测量方法。

收稿日期:2017-11-20;修回日期:2018-01-19

第一作者简介:龙德平(1994),男,江西宜春人,硕士研究生,主要研究方向为电机无位置控制算法。E-mail:ldps@zju.edu.cn

最终通过实验验证了电压重构的实用性。

### 1 28069M 主要功能简介

#### 1.1 参数辨识

28069M 算法库中集成了电机的参数辨识程序,并且适用于所有三相异步、同步电机。该程序能够辨识电机定子电阻、转子电阻(ACIM)、定子电感、额定磁通(PMSM)和额定感应电流(ACIM)等。对于电机的定子电阻辨识,28069M 采用的是按电角度  $\sigma = 0^\circ$ ,  $d$  轴电流  $I_d$  等于设定电流  $I_{Rs}$ ,  $q$  轴电流  $I_q = 0$  的方式施加激励,待电流稳定后进行电压采样,最终计算出定子电阻。

#### 1.2 FAST 观测器

除了参数辨识外,28069M 最重要的功能就是 FAST 观测器<sup>[7-8]</sup>。图 1 所示为 FAST 观测器的主要功能。它将电机参数辨识的结果、相电压、相电流和母线电压作为输入,输出电机的磁场、转子位置、转速和转矩等信息,并将转子位置用于后续的无位置控制算法中。

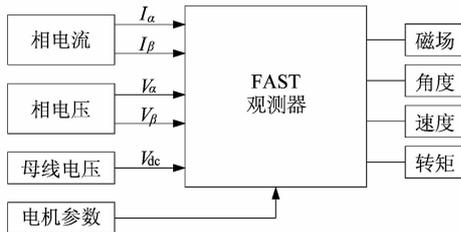


图 1 FAST 观测器的主要功能

Figure 1 Main function of FAST estimator

### 2 电压重构中实际死区时间的影响

FAST 观测器需要输入电机的相电压,所以需要对三相电压进行采样,通常都是采用硬件电路进行三相电压的隔离并检测。这样的电压检测法需要滤掉相电压中固有的 PWM 谐波,低通滤波引入的相位滞后对高速区的观测器会有不良的影响。课题组采用电压重构<sup>[9-10]</sup>来取代电压检测,完全通过软件计算的方式来得到电机的三相电压。这样不但可以降低硬件成本,还能够减少硬件电路带来的检测延时等干扰。

#### 2.1 三相电压重构原理

图 2 是电机驱动逆变器的主电路结构。根据母线电压  $V_{dc}$  以及三相 IGBT 开关的导通状态,可以重构出电机的三相电压  $V_a$ 、 $V_b$  和  $V_c$ ,参考点为直流母线的负端。

由逆变器主电路结构图可知,当 IGBT1 导通而 IGBT2 关断时,  $V_a = V_{dc}$ ; 当 IGBT2 导通而 IGBT1 关断时,  $V_a = 0$  V。所以根据 IGBT1 在一个周期  $T$  内的导通

时间  $T_{aon}$ , 可以重构出 a 相电压为

$$V_a = \frac{T_{aon}}{\tau} \cdot V_{dc} \quad (1)$$

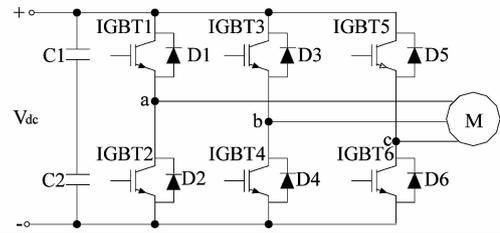


图 2 逆变器主电路结构

Figure 2 Main circuit structure of inverter

同理,可以重构出电机 b、c 两相的相电压。但式(1)是在理想情况下的计算结果,实际电路中,由于 DSP 设置了 PWM 信号死区、驱动电路及开关管导通和关断延时的存在,在上桥臂开关管关断后,下桥臂开关管不会立刻导通,所以相电压的重构公式需要修正。图 3(a)为给定的理想 PWM 波形,其中  $T_a$  为一个周期内 IGBT1 理想的导通时间;图 3(b)和(c)为计入死区影响的 PWM 信号波形,  $T_d$  为设定的死区时间;图 3(d)和(e)为 IGBT 实际的导通波形,其中  $T_{on,up}$  为上桥臂触发电路和 IGBT 引起的开通延时,  $T_{off,up}$  为上桥臂关断延时,  $T_{on,dn}$  为下桥臂开通延时,  $T_{off,dn}$  为下桥臂关断延时,  $T_{shut}$  为上下 IGBT 都关断的时间,即实际的死区时间。

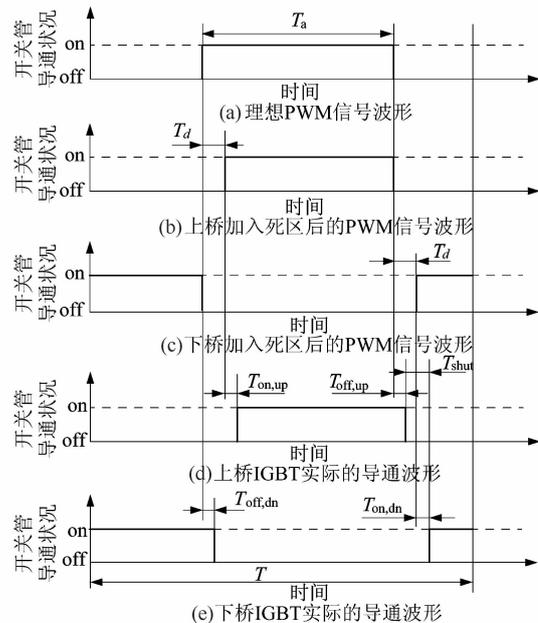


图 3 PWM 信号与开关管的实际导通波形

Figure 3 PWM signal waveform and actual waveform of switch tubes

由图 3 可知,a 相电压公式需修正为

$$V_a = \frac{T_a - T_d - T_{on,up} + T_{off,up}}{T} \cdot V_{dc} \quad (2)$$

同时得到

$$T_{shut} = T_d - T_{off,up} + T_{on,dn} \quad (3)$$

逆变电路上下桥臂对称,则认为上下桥臂的导通、关断延时相同,即有  $T_{on,up} = T_{on,dn}$ ,  $T_{off,up} = T_{off,dn}$ ,代入式(3)中可得

$$T_{shut} = T_d - T_{off,up} + T_{on,up} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2),得到 a 相电压重构公式为

$$V_a = \frac{T_a - T_{shut}}{T} \cdot V_{dc} \quad (5)$$

类似地,可以得到 b 和 c 相的电压重构公式。其中  $T_a$  和  $T$  可以通过 PWM 寄存器读取,周期  $T$  为固定值,母线电压  $V_{dc}$  可以通过电压检测得到,所以电压重构公式中只有  $T_{shut}$  是未知的。 $T_{shut}$  是影响电压重构准确性的基础参数,需要进行求解。

## 2.2 实际死区时间 $T_{shut}$ 的计算方法

由式(5)可知,要使用电压重构来代替电压检测,关键在于求解出系统的实际死区时间  $T_{shut}$ 。由于 28069M 可以准确地辨识出定子电阻,现采用电压重构取代电压检测并进行定子电阻辨识,利用多次辨识过程中辨识结果不变的特性,求解出实际死区时间  $T_{shut}$ 。

电机的定子电阻辨识采用的是按电角度  $\sigma = 0^\circ$ ,  $I_d = I_{Rs}$ ,  $I_q = 0$  的方式施加激励。辨识过程中,电流从 a 相流入,b、c 相流出,此时有 a 相电流  $I_a = I_{Rs}$ 。定子的辨识拓扑如图 4(a) 所示,辨识过程中的电压矢量如图 4(b) 所示。

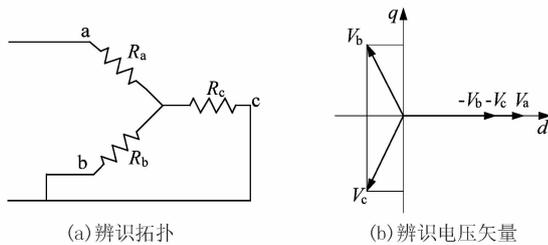


图 4 定子电阻辨识拓扑及电压矢量  
Figure 4 Topology and voltage vector of stator identification

根据电压矢量图以及三相电压重构公式,可以得到电压重构下的纯定子电阻辨识的计算公式为

$$R_s = \frac{V_a - \frac{1}{2}(V_b + V_c)}{I_{Rs}} = \frac{T_a - \frac{1}{2}(T_b + T_c) - T_{shut}}{T} \cdot \frac{V_{dc}}{I_{Rs}} \quad (6)$$

式中: $T_b$ 、 $T_c$  分别为 IGBT3 和 IGBT5 在一个 PWM 周期

内的理想导通时间。

可见,忽略电感时电阻求解公式中实际死区时间  $T_{shut}$  的影响已经抵消了。然而,实际电机绕组中由于电感的存在,电流不能够发生突变,而且电机的定子绕组时间常数一般远大于 PWM 的开关频率,所以,在实际死区  $T_{shut}$  内,电流会通过 IGBT 并联的二极管进行续流,实际死区时间  $T_{shut}$  变为续流时间。

由于续流时间存在,电阻辨识过程中的三相电压重构公式会发生变化。在图 2 所示的逆变器结构中进行电阻辨识时,当 IGBT1 导通,IGBT2 关断,电流由 a 相流入,b、c 相流出。当 IGBT1 与 IGBT2 都关断时,即在  $T_{shut}$  的时间内,由于电机绕组电感的存在,电流不能发生突变,电流会通过 IGBT 并联的二极管进行续流。如图 5 所示,a 相电流通过 D2 二极管进行续流,这段时间内,a 相电压为 0 V。类似的,在 b、c 相各自的  $T_{shut}$  时间内,电流分别通过 D3、D5 二极管进行续流,此时 b、c 相电压都等于直流母线电压  $V_{dc}$ 。可见,由于电感的存在,导致续流期间三相电压发生变化,所以三相电压重构公式需要修正为

$$\left. \begin{aligned} V_a &= \frac{T_a - T_{shut}}{T} \cdot V_{dc}; \\ V_b &= \frac{T_b}{T} \cdot V_{dc}; \\ V_c &= \frac{T_c}{T} \cdot V_{dc}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

根据式(7)中修正的三相电压重构公式,得到修正后的定子电阻

$$R_s = \frac{T_a - \frac{1}{2}(T_b + T_c) - T_{shut}}{T} \cdot \frac{V_{dc}}{I_{Rs}} \quad (8)$$

由式(8)可知,由于电感的存在,导致实际死区时间  $T_{shut}$  变为续流时间,对定子电阻的计算也会产生影响。因此,也可以利用定子电阻的辨识,反过来求解实际死区时间  $T_{shut}$ ,从而完善三相电压重构公式。

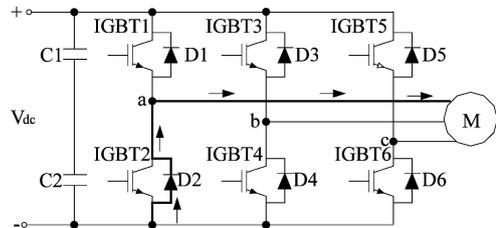


图 5 上下 IGBT 都关断期间电流流向  
Figure 5 Current direction while up and down IGBT shut off

对于一台电机,定子电阻是一定的,而对于同一硬件系统,实际死区时间  $T_{shut}$  也可认为是基本恒定的,所以式(8)中  $R_s$  与  $T_{shut}$  为固定值。多次定子电阻辨识的过程中,PWM 周期  $T$  为已知量,变化量为母线电压  $V_{dc}$ 、三相开关管理想导通时间以及辨识电流  $I_{Rs}$ 。这些变化量可以通过电压、电流检测和读取寄存器值得到。通过进行多次定子电阻辨识,检测母线电压、辨识电流以及记录三相开关的理想导通时间,就可以建立方程组,求解出  $R_s$  与  $T_{shut}$ 。

电阻辨识过程中,三相开关管的理想导通时间是相互关联的,可以使用一个变量进行替换,使得方程更加简化,令

$$T_{on} = T_a - \frac{1}{2}(T_b + T_c)。 \tag{9}$$

则有 
$$R_s = \frac{T_{on} - T_{shut}}{T} \cdot \frac{V_{dc}}{I_{Rs}}。 \tag{10}$$

通过在不同母线电压下对定子电阻进行两次辨识,记录下两次辨识过程中的各个参数,则有

$$\left. \begin{aligned} R_s &= \frac{T_{on1} - T_{shut}}{T} \cdot \frac{V_{dc1}}{I_{Rs1}}; \\ R_s &= \frac{T_{on2} - T_{shut}}{T} \cdot \frac{V_{dc2}}{I_{Rs2}}。 \end{aligned} \right\} \tag{11}$$

联立两个方程求解得到

$$\left. \begin{aligned} T_{shut} &= \frac{T_{on2} V_{dc2} I_{Rs1} - T_{on1} V_{dc1} I_{Rs2}}{V_{dc2} I_{Rs1} - V_{dc1} I_{Rs2}}; \\ R_s &= \frac{V_{dc1} V_{dc2} (T_{on1} - T_{on2})}{T(V_{dc2} I_{Rs1} - V_{dc1} I_{Rs2})}。 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

由此得到了实际死区时间  $T_{shut}$  的计算方法。

### 3 实验求解 $T_{shut}$

由于电机的定子电阻比较小,实验中测量参数的

表 1 不同母线电压及给定 PWM 比较值下的实验结果

Table 1 Results of different bus voltage and PWM comparison values

$T_a/ms$	$T_b/ms$	$T_c/ms$	$V_{dc}/V$	$I_{Rs}/A$	$T_{shut}/ms$	$R_s/\Omega$	$R_s$ 误差/%
0.061 00	0.037 24	0.037 24	19.8	1.75	0.002 49	2.406	3.48
0.057 11	0.040 02	0.040 02	30.0	1.82	0.002 49	2.406	3.48
0.055 60	0.042 13	0.042 13	39.9	1.81	0.002 64	2.387	2.67
0.054 78	0.043 02	0.043 02	50.0	1.91	0.002 64	2.387	2.67
0.054 31	0.044 20	0.044 20	60.2	1.88	0.002 74	2.359	1.46
0.053 56	0.045 02	0.045 02	70.4	1.73	0.002 74	2.359	1.46
0.061 00	0.037 24	0.037 24	19.8	1.75	0.002 67	2.387	2.67
0.053 07	0.045 56	0.045 56	80.3	1.63	0.002 67	2.387	2.67

注:周期  $T=0.1 ms$ 。

表 1 中的死区时间  $T_{shut}$  平均值为 0.002 64 ms,  $R_s$  的平均值为 2.385  $\Omega$ 。从表 1 的实验数据可以看出,不同组数据计算出的  $T_{shut}$  值偏差较小,计算出的定子

波动会对计算结果产生较大的影响,而不同激励施加方式所需测量的参数也不同。

方法 I:使用恒流控制的方式来施加激励,即对辨识电流  $I_{Rs}$  进行恒流控制,则实验中需要测量的参数为  $T_a$ 、 $T_b$  和  $T_c$ ,以及母线电压  $V_{dc}$ ,其中三相开关管的理想导通时间  $T_a$ 、 $T_b$  和  $T_c$  可以通过读取三相 PWM 寄存器的比较值后转换得到。这种激励方式下要测量的变量有 4 个。因为辨识电流一直在 PID 的动态调节过程中,所以三相 PWM 的比较值处于波动中,容易使最终的计算结果产生较大的误差。

方法 II:通过直接给定三相 PWM 的比较值,即设定好  $T_a$ 、 $T_b$  和  $T_c$  的方式来施加激励,则需要测量的参数只有母线电压  $V_{dc}$  以及辨识电流  $I_{Rs}$ ,相对于 PWM 的比较值,这 2 个参数波动较小,最终的计算结果更加稳定可靠。

最终实验时,采用方法 II,即通过给定三相 PWM 比较值的方式来施加激励。

实验中被辨识的电机为米格 80ST-M02430 电机,使用电阻表测量该电机三相间的线间电阻分别为 3.062、3.126 和 3.144  $\Omega$ 。所以在电机定子电阻辨识的拓扑结构下,理论的辨识结果为 2.325  $\Omega$ 。

表 1 所示为不同母线电压、不同给定 PWM 比较值下实验数据。由式(6)可知,施加在定子电阻上的电压与三相 PWM 比较值的差值有关。在母线电压相等的情况下,三相 PWM 的比较值差值越大,加在定子电阻上的电压也越大,使得电阻上的电流也越大。而当电流过大时,可能会导致定子电阻发热严重,使得阻值发生较大变化。所以在给定三相比较值时需要根据母线电压的大小进行调整,以保证辨识电流不会过大。

电阻与基准值 2.325  $\Omega$  之间的误差也都在可接受的范围之内。

## 4 28069M 主要功能的实验验证

计算出  $T_{shut}$ , 三相电压重构得以完善, 可以用于替代电压硬件检测。下面通过实验验证使用三相电压重构算法也能实现 28069M 的主要功能。

### 4.1 定子电阻辨识结果

$T_{shut}$  是逆变器的基础的稳定参数, 不依赖具体的电机, 现选择一台内嵌式永磁电机 (IPM) 来进行参数辨识实验验证。

电阻表测量的该电机三相线间电阻分别为 2.989, 2.729 和 2.937  $\Omega$ , 则根据定子电阻辨识拓扑得到理论辨识结果为 2.164  $\Omega$ 。使用完善后的三相电压重构公式, 以电角度  $\sigma = 0^\circ$ ,  $I_d = 1.5$  A,  $I_q = 0$  的恒流控制方式施加激励, 根据检测的母线电压、辨识电流计算出定子电阻值。实验结果如表 2 所示, 其中辨识电阻平均值为 2.154  $\Omega$ , 辨识电阻误差在可接受范围之内, 说明使用修正后的三相电压重构公式, 可以准确地辨识出定子电阻, 满足 FAST 观测器的工程使用要求。

表 2 使用电压重构的定子电阻辨识结果

Table 2 Identification results of stator resistance using voltage reconstruction

$V_{dc}/V$	$I_{Rs}/A$	辨识电阻 $R_s/\Omega$	$R_s$ 误差/%
9.9	1.49	2.122 202 63	-1.93
40.0	1.50	2.177 702 43	0.63
60.1	1.51	2.168 402 43	0.20
80.3	1.51	2.145 902 63	-0.84

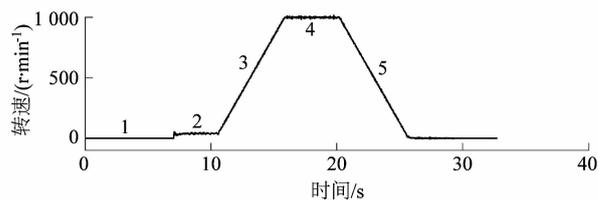
### 4.2 FAST 观测器性能验证

以 28069M 为基础构建实验平台, 选取米格 80ST-M02430 型号电机作为控制对象, 其额定转速为 3 000 r/min, 4 对极。首先进行参数辨识实验, 并将参数辨识的结果作为输入变量对 FAST 观测器进行设置。之后, 进行电机无位置控制实验。因为电机无位置控制的关键在于转子位置的检测, 而该电机正好安装有编码器, 所以可以通过对比编码器的检测角度与观测器的观测角度, 来判断 FAST 观测器观测角度的准确性。

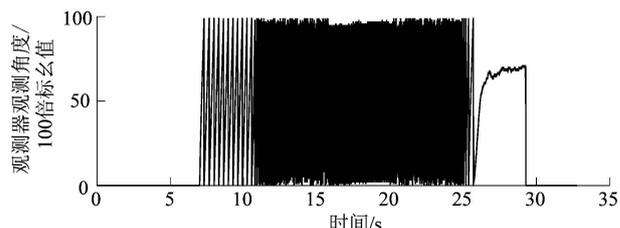
此外, 电机无位置控制一般都是通过检测电机反电势波形<sup>[11-12]</sup>, 处理后提取出转子位置。而当电机转速比较低时, 反电势的幅值比较小, 观测器计算出的转子位置误差会比较大。所以电机无位置控制能够达到的最低稳定运行转速也是衡量无位置控制性能优劣的重要标准之一<sup>[13]</sup>。同时, 电机带载运行时的性能也是重要的考虑因素。

图 6(a) 为电机无位置控制运行时 FAST 观测器的观测转速波形, 图 6(b) 为对应的转子观测角度波

形。图 6(a) 主要分为 5 个阶段: 第 1 个阶段为硬件校验和电阻校验阶段, 电机转速为 0, 在这个阶段会对电流 ADC 进行校验, 并重新辨识定子电阻; 第 2 个阶段为低速运行阶段, 运行转速为 40 r/min, 此时的 FAST 观测角度与编码器检测角度的对比如图 7 所示, 可见, 当电机转速为 40 r/min 时, 观测器观测角度能较好地反映出转子所在的位置; 第 3 个阶段为加速阶段, 当加速到给定转速时, 转速没有发生太大的波动就保持了稳定, 达到第 4 个阶段, 并维持稳定运行; 第 5 个阶段为减速阶段。



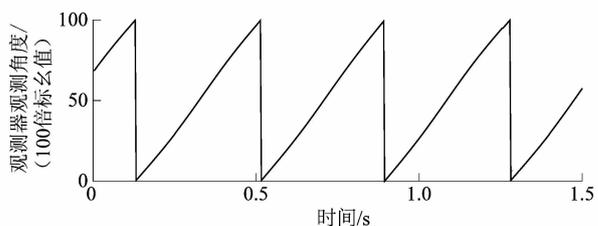
(a) 观测器观测速度波形



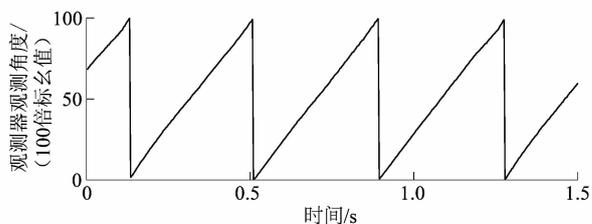
(b) 观测器观测角度波形

图 6 无位置控制转速及转子观测角度波形

Figure 6 Waves of speed and angle of sensorless control



(a) FAST 观测器观测角度



(b) 编码器检测角度

图 7 40 r/min 时 FAST 观测器观测角度与编码器检测角度对比

Figure 7 Comparison between angle from FAST estimator and encoder at 40 r/min

实验中,当给定转速低于 40 r/min,如 30 r/min 时,实际电机的转速出现来回晃动的情况,不能稳定运行。此时 FAST 观测角度与编码器检测角度如图 8 所示。图 8(b)是实际的电机位置角,反映出电机转子出现的前后晃动的情况。而图 8(a)观测器角度还维持 30 r/min 的角度波形,已经不能与编码器角度同步,观测器角度只有上升的过程,已经完全不能正确反映出转子的实际位置了。这说明无位置算法存在最低可运行的转速下限,需要限制电机进行这个区域运行。

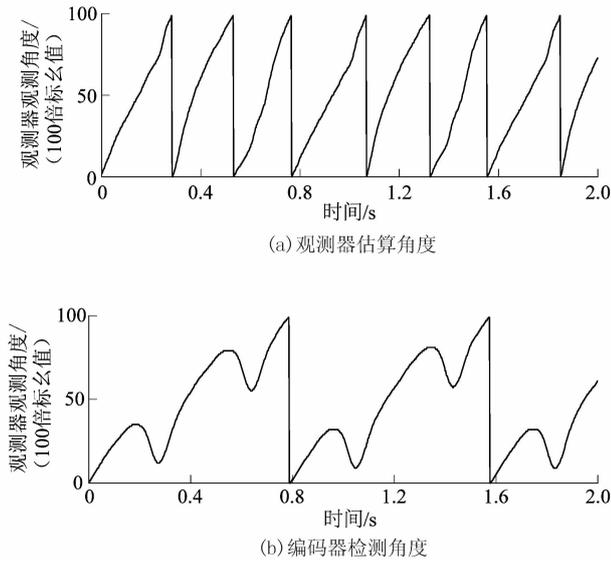


图 8 30 r/min 时 FAST 观测器观测角度与编码器检测角度对比

Figure 8 Comparison between angle from FAST estimator and encoder at 30 r/min

图 9 所示为带载时的无位置控制速度波形,相比于空载时的速度波形,虽然转速的波动相对较大,但无位置控制程序还是完成了正常的速度控制。

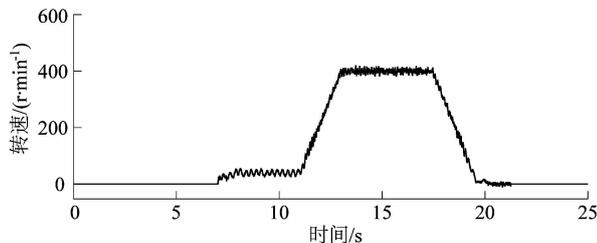


图 9 带载时的无位置控制速度波形

Figure 9 Speed wave of sensorless control under load

为了避开不稳定的低速区,在任何给定转速下都保持稳定运行,根据无位置控制实验中电机能够维持稳定运行的最低转速 40 r/min,修改控制程序中转速的给定方式。如图 10 所示,当设置转速低于 40 r/min

时,程序中实际的给定转速为 0;当设置转速大于等于 40 r/min 时,程序中的实际给定转速等于设置转速。

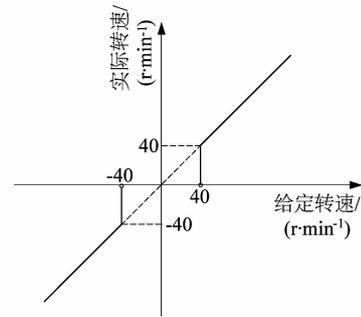


图 10 修改转速给定方式和后的转速对应关系

Figure 10 Corresponding relation between given speed and actual speed

由实验结果可知,使用电压重构代替电压检测,28069M 的无位置控制算法能够达到的最低稳定运行转速为电机额定转速的 1.33%,已经满足了大多数无位置控制场合的要求。当给定转速大于 40 r/min 时,FAST 观测器能够准确地检测出转子的位置,从而保证了电机的稳定运行。这在验证 28069M 无位置控制算法性能的同时,也说明了三相电压重构算法的实用性。

### 5 结语

课题组在研究 28069M 的参数辨识和无位置控制算法的过程中,使用电压重构代替了通常的电压检测,并分析了实际死区时间  $T_{shut}$  对于电压重构公式的影响。此外,利用电机定子电阻  $R_s$  是一个定值的特点,通过不同电压、电流下的多次定子电阻辨识,反推出了  $T_{shut}$  这个影响电压重构的基础参数。最后,通过 28069M 的参数辨识及无位置控制算法,分别在空载和负载的情况下进行实验,验证了电压重构算法的有效性。这是属于 28069M 算法库之外的算法,可以免去电压硬件检测电路,扩大 28069M 参数辨识和无位置控制算法的使用范围。

### 参考文献:

[1] 刘春苹. 永磁同步电机无位置传感器控制[D]. 长春: 吉林大学, 2016:1-2.

[2] 张耀中. 永磁同步电机无位置传感器矢量控制系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015:1-2.

[3] 苏健勇. 基于磁链观测器的永磁同步电动机无传感器控制技术[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009:1-2.

[4] 李旭春, 张鹏, 严乐阳, 等. 具有参数辨识的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 139-147.

[5] 李红梅, 陈涛. 永磁同步电机参数辨识研究综述[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 638-647.