

表面式永磁同步电机初始转子位置估计技术

韦 赜, 金辛海

(上海新时达电气有限公司研发中心, 上海市 嘉定区 201802)

Initial Rotor Position Estimate Technique on Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor

WEI Kun, JIN Xin-hai

(R&D Center, Shanghai STEP Electric Co. Ltd, Jiading District, Shanghai 201802, China)

ABSTRACT: A novel initial rotor position estimate method is proposed on the surface mounted permanent magnet synchronous motor(PMSM), which is based on the PMSM de-coupled model analysis. In the scheme, a space voltage pulse width modulation(SVPWM) algorithm is adopted firstly. The equivalent phase current values are compared and an initial rotor position angle is acquired. Secondly, identical width voltage pulses are applied to the motor armatures. The orientation zone of permanent magnet pole of the rotor is gained according to the compare results of the corresponding change rates of phase currents. The resulted rotor position angle is thought to be the right rotor position angle only when the gained angle lies in the acquired orientation zone. The proposed method is implemented and verified by the experimental results on a DSP based control system. The experimental results are analyzed. In the proposed method, an initial rotor position angle is gained more reliably and efficiently.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor; inductor saturation effect; initial rotor position; space voltage pulse width modulation; identical width voltage pulse

摘要: 针对表面安装式永磁同步电机, 给出了电机解耦模型, 分析了电枢绕组的电感饱和效应, 提出了一种判断初始转子位置的综合性方法。该方法中给电枢绕组施加电压空间矢量, 将各矢量下对应的电流变换为等效直流电流并通过判断其大小, 确定出转子初始位置角度; 在此基础上, 给电机定子绕组施加等宽电压脉冲, 通过比较各绕组电流的变化率, 得到转子磁极指向区域; 在电压空间矢量方法下判断得到的转子位置角度如果位于磁极指向区域内, 表明判断结果正确。给出了该方法的原理介绍以及实施策略。以 DSP 控制的永磁同步电机系统为试验平台, 对所提出的方法进行了试验验证及试验结果分析, 结果表明, 该方法能够可靠而有效的估计初始转子位置。

关键词: 永磁同步电机; 电感饱和效应; 转子初始位置; 电压空间矢量; 等宽电压脉冲

0 引言

永磁同步电机初始转子位置判断的准确性关系到电机能否顺利起动, 以及能否以最大转矩起动的问题, 历来是工程技术界研究的热点和难点问题之一。在此方面, 近年来有许多方法被提出。

尽管有各种不同的方法被提出以估计永磁同步电机的转子位置^[1-4], 但是利用电感的饱和效应检测初始转子位置是最常用的一种方法^[5-12]。这类方法理论上认为可以达到较高的估计精度; 但在实际应用中, 对电流检测硬件电路要求高, 要可靠的检测转子初始位置, 实现起来具有一定的难度; 文献[13]介绍了一种通过给 d 轴方向电枢绕组注入高频电压脉冲来获取初始转子位置的方法, 适用于凸极和隐极电机, 算法较复杂。文献[14]介绍了一种给定子绕组注入恒定幅值的高频正弦电流, 通过测算定子电压确定初始转子位置的方法; 实际应用时, 该方法会引入相位延迟以及需要测算线圈中的二次谐波电流, 实现方法较复杂。

永磁同步电机转子初始位置的估计是一个难点, 特别是转子磁钢表面安装式永磁同步电机, 因其直轴和交轴电感近似相等, 相对于内埋式电机, 要可靠估计其初始转子位置, 难度较高。为解决以上问题, 本文在分析了电枢绕组的电感饱和效应的基础上, 提出了一种能够准确、可靠估计转子初始位置的复合型方法; 该方法对硬件和软件的要求较低, 有利于工业实现, 具有较高的可靠性。

传统的给电枢绕组施加电压空间矢量检测相电流来估计转子位置的方法, 理论上可达较高的精

度，软件算法简单，易于实现；但其缺点在于对电流检测硬件电路的精度要求高，要求采样电路能够准确反映电枢电流的微小变化；另外，具体实现时，如果施加的电压空间矢量不合适或者电流采样电路受到干扰，很难准确判断出永磁转子的磁极，直接导致判断错误甚至失败。

采用给电枢绕组施加等宽电压脉冲检测电流变化判断初始位置的方法，优点在于能准确快速判断出永磁转子磁极的指向。

因此，本文提出将以上 2 种方法相结合采用，利用各自的优点，这样，可降低对电流采样电路的要求，提高转子位置估计的准确性和可靠性；试验证明，所提出的方法有效而可靠，估计算法简单，可应用于永磁体同步电机。

1 电枢绕组的电感饱和和效应分析

1.1 永磁同步电机的解耦模型

三相永磁同步电机具有正弦波形反电动势波形，其定子绕组和异步电机的定子绕组结构相同，转子为永磁体，产生恒久的磁场，定子绕组始终处于永磁磁场中；对于永磁体为表面安装式电机(本文以该类型电机为例)，气隙磁通均匀，直轴电感等于交轴电感；但是气隙磁通增大到一定程度时，与转子磁极处于同一轴线方向的电枢绕组等效电感会出现饱和现象，使等效直轴电感变小，出现小于交轴电感的现象，造成所谓的“小凸极”，这就是电感饱和效应，根据这个原理，可以检测静止时转子位置。

为了分析方便，假设永磁同步电机为一对极结构，三相定子绕组完全对称，星形连接，永磁转子在电枢绕组上产生的反电动势为理想的正弦波形，参数不随温度变化，忽略磁滞、涡流损耗，转子无阻尼绕组。

永磁同步电机的数学模型是一个多变量、非线性、强耦合的系统，根据交流电机的解耦思想，将三相永磁同步电机的三相定子绕组坐标系(ABC)等效变换为两相静止坐标系(ab)，再经过 park 变换，变换为 dq 坐标系，其 d 轴和永磁转子 N 极同向。经过以上变换，就完成了同步电机的解耦过程，如图 1 所示。

图 1 中，A、B、C 分别表示三相定子绕组的轴线(相差 120°)，静止两相定子坐标系的 a 轴和 A 轴重合，b 轴逆时针超前 a 轴 90°；dq 坐标系的 d 轴与永磁转子轴线重合，q 轴逆时针方向超前 d 轴 90°，q 为 d 轴和 a 轴之间的夹角，为转子初始位置

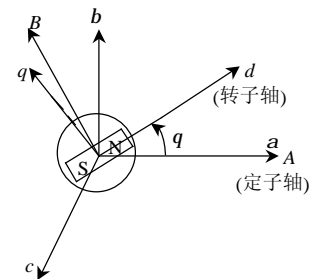


图 1 永磁同步电机解耦模型
Fig.1 The mathematics model of PMSM

角；dq 坐标系下的电机模型为

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + D \begin{bmatrix} y_d \\ y_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_d \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} y_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中： U_d 、 U_q 分别为 d、q 轴电压矢量； R_s 为定子绕组电阻； i_d 、 i_q 分别为直轴和交轴电流；D 为微分算子； y_d 、 y_q 分别为直轴和交轴磁链； L_d 、 L_q 分别为直轴和交轴电感， $L_d=L_q$ ； y_f 为转子永磁体磁极产生的磁链。

经过式(1)所示变换，就可以象分析直流电机一样在 dq 坐标系下分析永磁同步电机的特性。

1.2 电枢绕组的电感饱和和效应分析

电机气隙内“小凸极”的形成与永磁转子磁极产生的磁场具有对应的关系，因而可以该“小凸极”估计永磁转子的位置。

永磁转子磁链 y_f 为定值，结合图 1 和式(2)可得，当转子处于 q 位置，直轴磁链增加到一定程度时，会导致直轴电感饱和，引起 L_d 减小；当磁路不饱和时，直轴电感为常数；当磁链增加到一定程度时，磁路饱和，直轴电感随电流增大而减小^[15]。据此，可以根据绕组中电流值的大小判断绕组的饱和程度，结合永磁同步电机数学解耦模型，做如下分析。

如图 2 所示为 2 组 dq 绕组相对于转子在不同位置时的示意图。图中 q_1 、 q_2 分别表示两组绕组的 d 轴与 a 轴的夹角， d_1 绕组轴线和转子磁极处于同一位置角度 q_1 ， $L_{d1}=L_{q1}=L_{d2}=L_{q2}$ 。

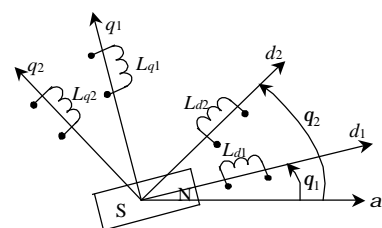


图 2 两组 dq 绕组相对于转子位置在不同位置时的示意图
Fig.2 Two coils in dq reference frame with different angles

设图2所示的2组绕组产生的合成磁链幅值相等,合成磁链相对于a轴的角度不同;当2组q绕组中无电流或电流相等,以 $L_{d1}i_{d1}$ 表示绕组 L_{d1} 在 d_1 轴方向产生的磁链, $L_{d2}i_{d2}$ 表示绕组 L_{d2} 在 d_2 轴方向产生的磁链,则有

$$L_{d1}i_{d1} = L_{d2}i_{d2} \quad (3)$$

设转子磁极产生的磁链为 y_f ,方向和 d_1 轴重合,则在 d_2 轴方向的分量为 $y_f \cos(q_2 - q_1)$;设 y_{d1} 、 y_{d2} 分别表示 d_1 轴和 d_2 轴方向的合成磁链分量大小, i_{d1} 、 i_{d2} 分别表示绕组 L_{d1} 和 L_{d2} 中的电流大小,根据式(2)得

$$y_{d1} = L_{d1}i_{d1} + y_f \quad (4)$$

$$y_{d2} = L_{d2}i_{d2} + y_f \cos(q_2 - q_1) \quad (5)$$

结合式(3),比较式(4)和(5)

$$y_{d1} > y_{d2} \quad (6)$$

可见,因为 L_{d1} 绕组磁通方向和永磁磁极方向一致,因而当2组绕组中的电流同时增加时,处于 d_1 轴方向的磁路更趋于饱和,根据文献[15]结论,可得 $L_{d1} < L_{d2}$,则有

$$i_{d1} > i_{d2} \quad (7)$$

由以上分析可得如下结论:当2组相同的绕组产生的合成磁链相等时,磁通方向与转子磁极最接近的那组绕组等效电感饱和度最高,其电感值最小,电流最大。图2中2组dq绕组可以看作是永磁同步电机中的2个处于不同角度的电压矢量的等效变换,该电压矢量产生的磁链大小相等,方向不同;因此,可以根据在恒定电压矢量作用下电枢绕组电流的大小判断出转子的磁极位置。

本文根据以上理论分析,采取了2种方法来得到转子位置。2种方法均基于电感饱和和效应原理,但实现方式不同,只有当两者估计结果一致时才认为找到了正确的转子位置。2种方法结合使用,具体如下:

(1) 电机静止时,给电枢绕组施加1个电周期(360°)的恒定电压空间矢量,在电机气隙内形成圆形磁链;增加磁链幅值(磁链圆半径)到一定程度,理论上认为与转子磁极最接近的绕组等效电感饱和度最高,该处的矢量对应的电流幅值最大,由此判断出转子角度位置。

(2) 在实际应用中,当电压矢量的幅值不是足够高,致使绕组饱和度不高或者电流采集受到干扰时,容易得到错误的判断结果,如图6所示试验结果,出现2个电流幅值相近的情况,这种情况下

很难准确估计出转子的实际位置。为了解决以上问题,提高转子位置判断的可靠性和准确性,本文提出在以上电压矢量判断方法的基础之上,再采取给电枢绕组施加等宽电压脉冲的方法以准确找到转子的磁极(N极)指向,只有该方法判断的转子位置和前述方法判断的位置相一致时,说明已经找到了转子的实际位置。

1.3 等宽电压脉冲方法判断转子磁极指向

设转子位置角为 q ,三相绕组和转子的相对位置示意图如图3所示。

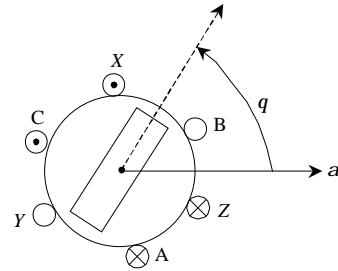


图3 三相绕组和转子的相对位置示意图

Fig.3 Three phases and the rotor

图3中,设转子的磁极轴线和绕组C的轴线处于同一个轴线区域附近(不一定处于同一个轴线上),由前面的理论分析不难得出,当给3个绕组中分别施加相同宽度不同方向的电压脉冲时,绕组C的饱和度最高,其电流变化(正负电流绝对值之差)绝对值最大,且负电流绝对值要高于正电流幅值。这是因为绕组C中流过负电流时,产生的磁场方向和转子磁场同方向,产生增磁作用,促使绕组C的等效电感较其他绕组等效电感更趋于饱和,等效电感变小,从而电流幅值更高。据此原理,通过比较三相绕组在相同宽度电压脉冲作用下的电流变化值的大小,就可以确定转子磁极的指向区域(方向)。

2 实施策略及试验结果分析

2.1 电压空间矢量的实施策略

电压空间矢量判断法按照判断精度分步骤进行。第一步,每个电压矢量间隔30°电角度,施加12个电压矢量;第二步,在第一步判得的位置基础上,以15°电角度间隔施加电压矢量;15°精度判断完成之后,开始7.5°精度的判断;如此依次细分判断,直到所需要的精度。

为了保证在施加电压空间矢量过程中,转子保持静止状态,需要采取如图4所示的特殊的电压矢量施加措施。

图4中,施加电压矢量时,从电压矢量1~12

依次序施加，每个电压矢量施加一个开关周期，每 2 个电压矢量之间需要关闭 6 个开关管一段时间，以使绕组电流充分衰减到零。

在第二步施加电压矢量时，按照如图 5 所示执行，设第一步判断出的转子位置为 q 角度，电压矢量施加顺序为从矢量 1~6，相邻 2 个矢量相隔 15° 电角度。

后续的细分角度判断和 15° 判断过程的措施一样，只是角度的不同。

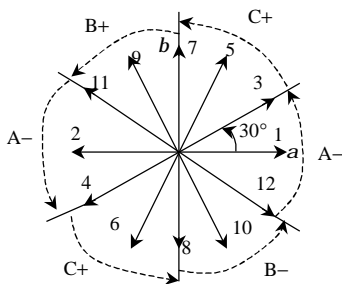


图 4 施加电压空间矢量的次序
Fig.4 The applied voltage vector sequence of SVPWM

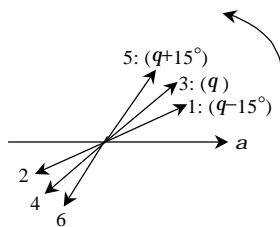


图 5 第二步施加电压矢量方法示意图
Fig.5 The applied method in the second step

2.2 等宽电压脉冲方法的实施策略

等宽电压脉冲方法和电压矢量判断法结合采用，能够提高转子位置判断的准确性和可靠性。

等宽电压脉冲具体分配规则如表 1 所示。设 $S=1$ 表示上桥臂导通， $S=0$ 表示下桥臂导通，如 $S(ABC)=100$ 表示 A 相上桥臂导通，B 和 C 相下桥臂导通。

表 1 中，电压脉冲施加次序为从 1~6；表中“所在区域及电压矢量”意为：在 6 个目的电流中，分

表 1 等宽电压脉冲法实施规则
Tab.1 The method of identical voltage pulses

电压脉冲顺序	规则 S (ABC)	目的电流	所在区域及电压矢量
1	100	i_{A+}	A+ : 12,1,3
2	011	i_{A-}	A- : 11,2,4
3	010	i_{B+}	B+ : 7,9,11
4	101	$-i_{B-}$	B- : 8,10,12
5	001	$i_{C+} = -(i_{A+} + i_{B-})$	C+ : 4,6,8
6	110	$i_{C-} = -(i_{A-} + i_{B+})$	C- : 3,5,7

别计算每相电流的变化率，电流变化率最大的相绕组轴线所在区域即为转子磁极所在区域，由变化率的正负判断出转子磁极的具体指向，1 个电周期分为 6 个区域，每个区域内包含 3 个电压空间矢量(30° 电角度间隔时)，如图 4 所示。

电压矢量判断法第一步判断得到的某个电压矢量，如果位于等宽电压脉冲判断得到的该区域内，表明电压空间矢量判断结果正确，得到的电压矢量对应的角度靠近真实的转子磁极指向角度，否则说明判断结果有误。

2.3 试验结果分析

以 1 台两对极，额定电压为 380 V，额定电流为 1.9 A，额定转速为 3000 r/min 表面安装式永磁同步电机为试验对象，以 TI 公司 2407 为控制核心，对本文提出的方法进行了试验验证。

图 6 所示为转子处于某随机位置，调制度 $M=0.75$ 时，电压空间矢量判断法第一步得到 12 个电压矢量对应的电流值。

从图 6 看出，12 个电流中，有 2 个电流峰值，分别为矢量 5 和矢量 6 对应的电流峰值。由图 4 可知，矢量 5 和 6 互为反矢量，在该调制度下，矢量 5 和 6 对应的电流大致相等，很难确切判断出转子磁极方向是与矢量 5 所在方向一致还是与矢量 6 所在方向一致；方法之一就是增加调制度 M ，使得转子磁极对应的绕组等效电感更趋于饱和，如图 7 所示为 $M=0.8$ 时，转子处于同一位置时的试验结果。

由试验结果可知，增大调制度 M ，有助于增加与转子磁极所对应的绕组等效电感的饱和度，对应的绕组在该矢量下电流幅值会更大，从而可以初步判出，转子磁极位置与电压矢量 6 所在角度最接近，转子 S 极在电压矢量 5 所在位置附近。图 8 所示分别为 $M=0.75$ 和 $M=0.8$ 时矢量 5 和 6 分别对应的 A 相电流波形。

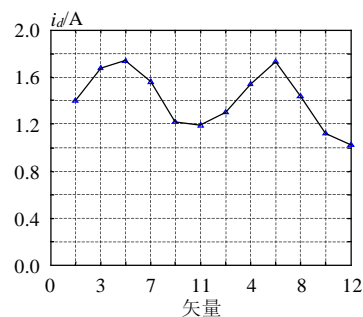


图 6 $M=0.75$ 时采集到的电流
Fig.6 Sensed current in $M=0.75$

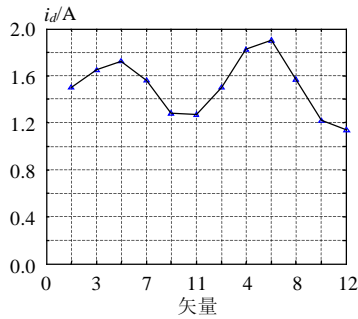
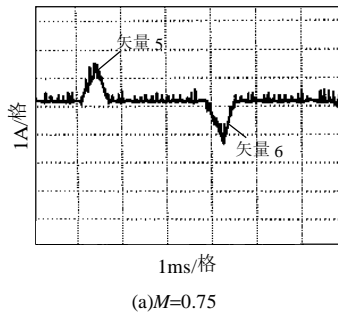
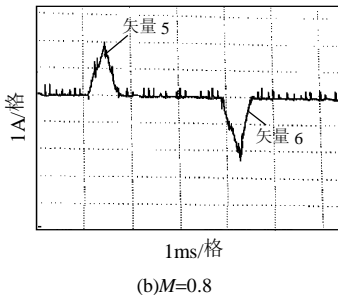
图7 $M=0.8$ 时采集到的电流Fig.7 Sensed current in $M=0.8$ (a) $M=0.75$ (b) $M=0.8$

图8 矢量5和6的电流波形

Fig.8 Sensed current of vector 5 and 6, respectively

以上试验尽管通过增大调制度的方法得到了转子位置,但是实际实现时,该方法是采集电压矢量对应的瞬态峰值电流,采集稳定性和采集精度受到滤波电路的滤波深度的影响,要想取得较高的估计精度,要求电流变化反映绕组电感量变化的能力要强,需要较低的滤波深度,但低滤波深度会引起电流检测误差增大和稳定性降低,这种互为矛盾的情况致使实际系统设计时,软硬件协调处理较复杂,如图7、8所示。如果电路滤波深度较大,调制度 M 增加 0.05 时电流产生的变化就无法反映出来;因电机制造工艺等原因,即使调制度增加到最大,仍然无法明确的鉴别出最大电流值,会导致检测结果错误。

因此,为了解决以上问题,本文提出在电压矢量判断的基础上,采用等宽电压脉冲的方法确定转子磁极的指向区间。仍以图6所示情况为例,得到如表2所示试验结果。

表2表明,三相绕组中电流变化最大的必然是其绕组轴线和转子磁极最靠近的那一相,且调制度增大时,该相的电流变化幅度也最大。

采取如上措施,在得到如图6所示结果的基础上,不用进行图7所示步骤,采用等宽电压脉冲方法可得转子磁极的准确指向和角度位置。

理论认为,只要电压矢量细分的足够密集和相关的电流采集软硬件允许,电压空间矢量方法可以达到无限高精度;本文根据试验所用的电流采集电路和软件的实际情况,细分到 3.75° 电角度,可以满足以最大转矩启动的要求。因此,本文未再进一步为取得更高的精度而进行试验研究。

试验结果证明,本文采用的两种估计策略相结合的方法,很好的解决了对电流采样软硬件要求高,判断可靠性差的缺点,提高了转子位置估计的可靠性和准确性,本文取得的最终精度为 $\pm 1.875^\circ$ 电角度。

表2 等宽电压脉冲试验结果
Tab.2 Experimental results
in identical voltage pulse method

调制度	电流变化率/mA			磁极指向 区域	转子 位置/ $^\circ$	对应 矢量
	A相	B相	C相			
0.75	-29	-18	101	C+	240	6
0.85	-31	-18	240	C+	240	6

3 结论

(1) 理论认为,电压空间矢量方法估计转子位置可以达到较高的精度,适用于永磁体表面安装式和内埋式电机。

(2) 电压空间矢量方法理论简单,实现容易;但是要想取得较好的效果,实际实现时受到许多因素的制约,从而影响其可靠性和判断结果的准确性。

(3) 本文提出的方法实现容易,软硬件简单,具有可靠性高,位置估计准确,很好的解决了电压矢量方法在实际实现时遇到的问题。普遍适用性好的优点。

参考文献

- [1] Stefan, Ostlund, Michael brokemper, Sensorless rotor-position detection from zero to rated speed for an integrated permanent synchronous motor drive[J], IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(5): 1158-1165.
- [2] 李鸿儒, 顾树生. 基于神经网络的 PMSM 速度和位置自适应观测器的设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 32-35.
Li Hongru, Gu Shusheng. Neural-network-based adaptive observer of position and speed of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002,

- 22(12): 32-35(in Chinese).
- [3] 邹继斌, 徐永向, 于成龙. 正弦波无刷直流电机的新型转子位置检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(12): 47-55.
Zou Jibin, Xu Yongxiang, Yu Chenglong. A novel detecting method of rotor position of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 47-55(in Chinese).
- [4] 徐征, 李铁才. 准无位置传感器永磁同步电动机驱动系统中霍尔传感器位置检测误差的分析及消除方案[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 168-173.
Xu Zheng, LI Tiecai. Position-measuring error analysis and solution of hall sensor in pseudo-sensorless PMSM driving system [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 168-173(in Chinese).
- [5] 秦峰, 贺亦康, 刘毅, 章玮. 永磁同步电机转子位置的无传感器自检测[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(4): 465-469.
Qin Feng, He Yingkang, Liu Yi, Zhang Wei. Rotor position sensorless estimation of permanent magnet synchronous motors[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(4): 465-469(in Chinese).
- [6] Wang Chuanyang, Xu Longya. A novel approach for sensorless control of pm machines down to zero speed without signal injection or special pwm techqique[C]. Anaheim, CA: Proc. IEEE APEC' 01, 2001.
- [7] Satoshi ogasawara, Hirofumi akagi. An approach to real-time position estimation at zero and low speed for a pm motor based on saliency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34(1): 163-168.
- [8] Kulkarni A B, Ehsani M. A novel position sensor elimination technique for the interior PMSM drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(1): 144-150.
- [9] Schimidt P B, Gasperi M L, Ray G, et al. Initial rotor angle detection of a non-salient pole permanent magnet synchronous machine [C]. New Orleans, Louisiana: IEEE Industry Application Society Annual Meeting, 1997.
- [10] 秦峰, 贺亦康, 刘毅, 等. 两种高频信号注入法的无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 116-121.
Qin Feng, He Yikang, Liu Yi, et al. Comparative investigation of sensorless control with two high-frequency signal injection schemes [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 116-121(in Chinese).
- [11] 刘毅, 贺亦康, 秦峰, 等. 基于转子凸极跟踪的无位置传感器永磁同步电机矢量控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 121-126.
Liu Yi, He Yikang, Qin Feng, et al. Investigation of rotor saliency-tracking based sensorless vector control drive for PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 121-126(in Chinese).
- [12] 梁艳, 李永东. 无传感器永磁同步电机矢量控制中转子初始位置的估算方法[J]. 电工技术杂志, 2003, 22(2): 10-13.
Liang Yan, Li Yongdong. Initial rotor position estimation for the sensorless vector control of PMSMs, Journal of Elec-tric technique, 2003, 22(2): 10-13(in Chinese).
- [13] Consoli A, Scarcella G, Testa A. Industry application of zero-speed sensorless control techniques for PM synchronous motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(2): 513-521.
- [14] Kim J S. New stand- still position detection strategy for PMSM drive without rotational transducers[C]. Sapporo, Japan: APEC'94, 9th Annual Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1994: 363-369.
- [15] 谢宝昌, 任永德. 电机的 DSP 控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2005.

收稿日期: 2006-05-27。

作者简介:

韦 鲲(1972—), 男, 甘肃人, 工程师, 博士, 主要从事电力电子及电力传动方面的研究, Email: weikuncn@yahoo.com.cn;

金辛海(1974—), 男, 山东人, 工程师, 主要从事电力电子及电力传动方面的研究。

(责任编辑 云爱霞)