

# 基于有效磁链观测器的内置式永磁同步电机的 无差拍直接转矩控制\*

文 婷, 张兴华

(南京工业大学 电气工程与控制科学学院, 江苏 南京 211816)

**摘 要:** 为提高永磁同步电机驱动系统的性能, 提出一种无速度传感器内置式永磁同步电机(IPMSM)无差拍直接转矩控制方法。在建立电机离散化模型的基础上, 导出了转矩与磁链的无差拍电压控制律。采用图形化辅助解析的方法, 直观地表达了无差拍直接转矩控制电压矢量解的物理含义。将无差拍直接转矩控制与基于有效磁链观测器的速度估算方法相结合, 实现了 IPMSM 的无速度传感器控制。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 内置式永磁同步电机; 无差拍直接转矩控制; 空间矢量调制; 有效磁链; 无速度传感器

**中图分类号:** TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)05-0027-05

## Deadbeat Direct Torque Control for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Active Flux Observer\*

WEN Ting, ZHANG Xinghua

(College of Electrical Engineering and Control Science, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

**Abstract:** To improve the performance of permanent magnet synchronous motor drive system, a speed-sensorless deadbeat direct torque control (DB-DTC) of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) was presented. Based on the discrete model of the motor, the deadbeat voltage control law of the torque and flux linkage was derived. By employing a graphical analysis method, the physical meanings of the voltage vector solution were explained clearly. The speed sensorless control of IPMSM was realized by combining the DB-DTC and the speed estimation method which based on the active flux observer. Simulation results verified the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM); deadbeat direct torque control (DB-DTC); space vector modulation; active flux; speed-sensorless

## 0 引 言

永磁同步电机具有体积小、可控性好、调速范围广和功率因数高等一系列优点, 在工业中获得了广泛应用。内置式永磁同步电机 (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM) 因其凸极性的存在, 产生了额外的磁阻转矩, 从而有更好的弱磁扩速能力<sup>[1-3]</sup>。近些年来, 永磁同步电机的高性能调速控制方法主要是磁场定向控制 (Field

Oriented Control, FOC) 和直接转矩控制 (Direct Torque Control, DTC)。与 FOC 不同的是, DTC 技术是直接控制磁链和转矩, 具有结构简单、转矩动态响应快、对参数依赖性小等优点。但是传统 DTC 存在电机磁链、转矩脉动过大, 逆变器开关频率不恒定等问题。此外, 由于机械式转速传感器安装困难、容易受温度等外部干扰的影响, 且成本较高等<sup>[4]</sup>, 使无速度传感器控制也成为研究热点。

针对传统 DTC 存在的问题, 文献[5]采用多

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477073); 江苏省自然科学基金项目(BK20161549)

作者简介: 文 婷(1992—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机驱动控制。

张兴华(1963—), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为电机驱动控制和复杂系统控制。

层滞环比较器代替传统 DTC 的两层滞环比较器来控制磁链和转矩,减小容差范围。文献[6]重新分配扇区空间,细分为十二扇区,通过细分扇区来抑制转矩脉动。文献[7]采用两个 PI 调节器控制转矩和磁链,空间矢量脉宽调制技术控制电机运行。但两个 PI 控制器需选择合适的 PI 参数,否则会影响控制系统的动态效果。无速度传感器也有较多研究方案的提出,文献[8]设计了一种扩展卡尔曼滤波磁链观测器,估计电机的定子磁链、电机转子位置信息和转速,估计精度高但是计算较为复杂。文献[9]设计了一种定子磁链自适应观测器用来估计电机的转速,具有较强的抗干扰性,但不能保证其准确度。文献[10]利用高频信号注入法获得转子位置信息,适用于具有凸极性的电机,但在高速运行状态下的应用效果还有待提高。

无差拍控制是利用 IPMSM 的离散状态方程<sup>[11-12]</sup>直接控制磁链和转矩,理论上可在一个采样周期内,使电磁转矩和定子磁链误差为零,即让下一时刻的值等于当前时刻的值,且具有不受 PI 调节器带宽限制的快速动态响应特性。针对传统滞环控制加开关表的 DTC 转矩脉动大和 PI 控制器加空间矢量调制技术的 DTC 转矩动态响应慢等问题,本文提出了一种基于有效磁链观测器的 IPMSM 无差拍 DTC 方案。最后通过仿真结果验证了该控制方法的有效性。

### 1 永磁同步电机的无差拍 DTC 原理

在转子磁场定向坐标系下,IPMSM 的电压方程为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \dot{\lambda}_d - \omega_r \lambda_q \\ u_q = R_s i_q + \dot{\lambda}_q + \omega_r \lambda_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{cases} \lambda_d = L_d i_d + \lambda_{pm} \\ \lambda_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (3)$$

式中:  $u_d, u_q, \lambda_d, \lambda_q, i_d, i_q, L_d, L_q$ ——定子电压、定子磁链、定子电流和电感在直、交轴上的分量;

$L_d, L_q$ ——电机的  $d, q$  轴电感;

$R_s$ ——定子电阻;

$\omega_r$ ——转子电角速度;

$\lambda_{pm}$ ——转子磁链幅值;

$p$ ——电机的极对数。

对转矩求导得

$$\dot{T}_e = \frac{3}{2} p (\dot{\lambda}_d i_q + \lambda_d \dot{i}_q - \dot{\lambda}_q i_d - \lambda_q \dot{i}_d) \quad (4)$$

将式(1)和式(2)代入式(4)并离散化可得

$$\frac{T_e(k+1) - T_e(k)}{T_s} = \frac{3p}{2} \left\{ u_d(k) \lambda_q(k) \left( \frac{L_d - L_q}{L_d L_q} \right) + u_q(k) \frac{(L_d - L_q) \lambda_d(k) + L_q \lambda_{pm}}{L_d L_q} + \frac{\omega_r(k)}{L_d L_q} \{ (L_q - L_d) [\lambda_d(k)^2 - \lambda_q(k)^2] - L_q \lambda_d(k) \lambda_{pm} \} + \frac{R_s \lambda_q(k)}{L_d^2 L_q^2} [ (L_q^2 - L_d^2) \lambda_d(k) - L_q \lambda_{pm} ] \right\} \quad (5)$$

式中:  $T_s$ ——采样周期;

$k$ ——当前采样时刻。

转矩误差可写成  $\Delta T_e = T_e(k+1) - T_e(k)$ , 整理后得

$$u_q(k) T_s = M u_d(k) T_s + B \quad (6)$$

其中:

$$M = \frac{(L_q - L_d) \lambda_q(k)}{(L_d - L_q) \lambda_d(k) + L_q \lambda_{pm}}$$

$$B = \frac{L_d L_q}{(L_d - L_q) \lambda_d(k) + L_q \lambda_{pm}}$$

$$\left\{ \frac{2 \Delta T_e}{3p} - \frac{\omega_r T_s}{L_d L_q} [ (L_q - L_d) (\lambda_d(k)^2 - \lambda_q(k)^2) - L_q \lambda_d(k) \lambda_{pm} ] \right\}$$

当  $\Delta T_e$  一定时,在定子电压的伏秒空间平面上,以  $u_d(k) T_s, u_q(k) T_s$  为变量,式(6)可表示为一条斜率为  $M$ 、截距为  $B$  的直线,如图 1 所示。

图 1 中的直线即为一个离散采样周期的转矩期望变化值,从原点出发的多条线段表示满足转矩变化  $\Delta T_e$  的多个电压矢量(单位为  $V \cdot s$ )。

同样,将保持磁链幅值恒定的电压矢量也按

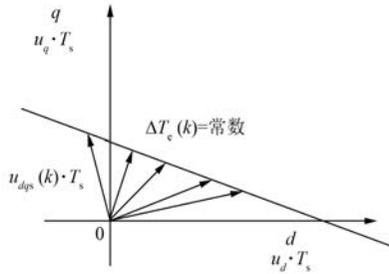


图1 满足转矩变化要求的电压矢量

照相同方法表示。将式(2)代入式(1),并整理离散后可得

$$\begin{aligned} \lambda_d(k+1) &= u_d(k)T_s + \lambda_d(k) + \omega_r \lambda_q(k)T_s - \\ &\quad \frac{R_s}{L_d} \lambda_d(k)T_s + \frac{\lambda_{pm} R_s T_s}{L_d} \\ \lambda_q(k+1) &= u_q(k)T_s + \lambda_q(k) - \\ &\quad \omega_r \lambda_d(k)T_s - \frac{R_s}{L_d} \lambda_q(k)T_s \end{aligned} \quad (7)$$

若忽略定子电阻项,令  $\lambda_s(k+1) = \lambda_s^*$ , 定子磁链在离散系统中可表示为

$$\begin{aligned} \lambda_s^{*2} &= \lambda_d(k+1)^2 + \lambda_q(k+1)^2 = \\ &\quad \{u_d(k)T_s + [\lambda_d(k) + \omega_r \lambda_q(k)T_s]\}^2 + \\ &\quad \{u_q(k)T_s + [\lambda_q(k) - \omega_r \lambda_d(k)T_s]\}^2 \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)可在伏秒空间平面上,以  $u_d(k)T_s$ 、 $u_q(k)T_s$  为变量,表示一个半径为  $|\lambda_s^*|$  的圆轨迹,如图2所示。

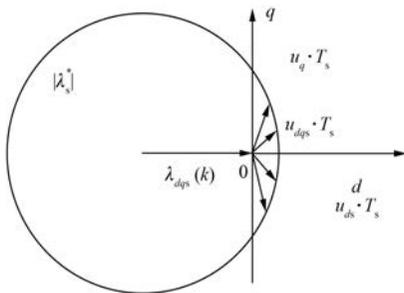


图2 保持磁链幅值恒定的多个电压矢量

图2中的从原点出发的多条线段则表示可以达到恒定磁链幅值的目标电压矢量  $u_{dqs}(k)T_s$ 。明显图1和图2量纲相同,若将磁链圆和转矩直线绘制在坐标系中,则可通过圆轨迹和直线在伏秒平面的交点确定一个采样周期内同时满足期望转矩变化值和保持定子磁链幅值恒定的定子电压

矢量解  $u_{dqs}(k)T_s$ , 如图3所示。

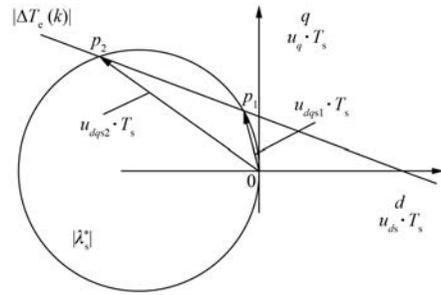


图3 DB-DTC 电压矢量解

本文主要考虑逆变器电压、电流不受限情况下的DB-DTC实现方法。由图3可知,DB-DTC通过选择合适的定子电压矢量(一般选取  $p_1$  和  $p_2$  中绝对值较小的点,即  $|u_{dqs}(k)T_s|$  值较小的解)作用在下一个采样周期,同时达到参考转矩和保持定子磁链幅值恒定,实现无差拍控制。在上述图形化解析的基础上,可直观地理解为解二元二次,因此DB-DTC的定子电压矢量解为

$$\begin{cases} u_d(k) = \frac{-\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - (1+M^2)\beta}}{(1+M^2)T_s} \\ u_q(k) = \frac{Mu_d(k)T_s + B}{T_s} \end{cases} \quad (9)$$

其中:

$$\begin{aligned} \alpha &= MB + M[\lambda_q(k) - \omega_r \lambda_d(k)T_s] + \\ &\quad \lambda_d(k) + \omega_r \lambda_q(k)T_s \\ \beta &= [\lambda_d(k) + \omega_r \lambda_q(k)T_s]^2 + \\ &\quad [\lambda_q(k) - \omega_r \lambda_d(k)T_s]^2 + \\ &\quad B^2 + 2[\lambda_q(k) - \omega_r \lambda_d(k)T_s]B - \lambda_s^{*2} \end{aligned}$$

式(9)即为DB-DTC控制律,根据观测  $k$  时刻电机的定子磁链、电磁转矩、转速及所需的电机参数,可以分别计算出  $k$  时刻应施加在定子端的电压矢量  $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$ 。 $u_d(k)$ 、 $u_q(k)$  经过旋转坐标逆变换即可得到两相静止坐标系下的目标电压矢量  $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 。

## 2 转子位置和转速估算

由于DTC控制系统中采用传统机械检测转速存在安装困难、成本高及易受环境影响等问题,利用有效磁链的概念来观测转子位置信息和转速,可省去机械传感器。定义  $dq$  旋转坐标系下定

子磁链的有效磁链<sup>[13]</sup>分量为

$$\begin{cases} \lambda_{ad} = \lambda_d - L_q i_d = (L_d - L_q) i_d + \lambda_{pm} \\ \lambda_{aq} = \lambda_q - L_q i_q = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $\lambda_{ad}$ 、 $\lambda_{aq}$ ——有效磁链的直轴分量和交轴分量。

图 4 是有效磁链的坐标定义。从图 4 可以看出有效磁链矢量与转子  $d$  轴方向相同。因此,无论在动态还是稳态情况下,要准确地观测 IPMSM 转子位置信息和转速,都可以通过观测出有效磁链之后直接计算得到。

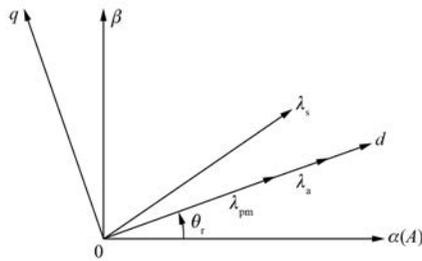


图 4 坐标系定义

将式(10)旋转到  $\alpha\beta$  静止坐标系中得到  $\lambda_a$  分量,再结合定子磁链计算式可得

$$\begin{cases} \lambda_{a\alpha} = \int (u_\alpha - R_s i_\alpha) dt - L_q i_\alpha \\ \lambda_{a\beta} = \int (u_\beta - R_s i_\beta) dt - L_q i_\beta \end{cases} \quad (11)$$

式中： $\lambda_{a\alpha}$ 、 $\lambda_{a\beta}$ ——有效磁链在  $\alpha$ 、 $\beta$  静止坐标系的分量。

则转子位置可观测如下：

$$\theta_a = \theta_r = \arctan\left(\frac{\lambda_{a\beta}}{\lambda_{a\alpha}}\right) \quad (12)$$

将式(12)进行微分可得转子速度为

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{\lambda_{a\alpha} \dot{\lambda}_{a\beta} - \dot{\lambda}_{a\alpha} \lambda_{a\beta}}{\lambda_{a\alpha}^2 + \lambda_{a\beta}^2} \quad (13)$$

式中： $\theta_a$ ——有效磁链角；

$\theta_r$ ——转子位置。

将式(13)离散化并整理可得

$$\omega_r = \frac{\lambda_{a\alpha}(k-1)\lambda_{a\beta}(k) - \lambda_{a\alpha}(k)\lambda_{a\beta}(k-1)}{[\lambda_{a\alpha}^2(k) + \lambda_{a\beta}^2(k)] T_s} \quad (14)$$

### 3 DB-DTC 系统

基于有效磁链的无速度传感器 IPMSM DB-

DTC 系统原理框图如图 5 所示。采样定子侧电压  $u_a$ 、 $u_b$  与电流  $i_a$ 、 $i_b$  分别经过静止坐标变换得到两相静止坐标系下的电压  $u_\alpha$ 、 $u_\beta$  与电流  $i_\alpha$ 、 $i_\beta$ , 然后输入到磁链和转矩观测器中,对定子磁链  $\lambda_s$ 、电磁转矩  $T_e$  进行观测,得到有效磁链  $\lambda_a$ ,同时有效磁链速度观测器计算得到估计转子位置信息和转速。比较有效磁链计算出的转速与给定转速  $\omega_r^*$ ,误差经过 PI 调节器输出给定电磁转矩  $T_e^*$ 。给定电磁转矩  $T_e^*$ 、参考磁链  $|\lambda_s^*|$ 、磁链与转矩观测器得到的定子磁链  $\lambda_s$  和转矩  $T_e$  以及转速  $\omega_r$  通过无差拍控制器可以得到目标电压矢量  $u_{dq}^*$ 。最后由空间矢量 PWM 模块根据当前电压值得到逆变器的开关信号,从而控制电机运行。

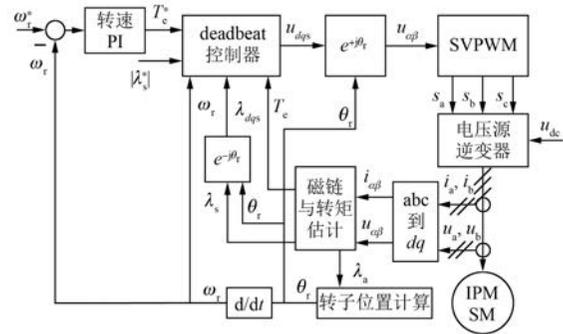


图 5 IPMSM 的 DB-DTC 系统

### 4 仿真及结果

为验证基于有效磁链观测器的 DB-DTC 系统的可行性,在 MATLAB/Simulink 平台上对该系统进行仿真。仿真采用的 IPMSM 的参数如下:额定功率  $P_N = 1.3 \text{ kW}$ ,额定电压  $U_N = 220 \text{ V}$ ,额定电流  $I_N = 5 \text{ A}$ ,额定转矩  $T_e = 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ ,额定转速  $n_N = 2500 \text{ r/min}$ ,定子磁链给定值  $|\lambda_s^*| = 0.127 \text{ Wb}$ ,极对数  $p = 4$ ,定子电阻  $R_s = 1.35 \Omega$ , $d$  轴电感  $L_d = 7.76 \text{ mH}$ , $q$  轴电感  $L_q = 17 \text{ mH}$ ,永磁体磁链  $\lambda_{pm} = 0.158 \text{ Wb}$ ,阻尼系数  $b = 0.001 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$ ,转子转动惯量  $J = 0.8 \times 10^{-2} \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 。仿真时系统的 PWM 采样周期为  $T_s = 100 \mu\text{s}$ ,转矩输出限幅  $\pm 5 \text{ N}\cdot\text{m}$ 。

仿真结果如图 6 所示,DB-DTC 空载起动,给定转速为  $1000 \text{ r/min}$ 。图 6 分别给出了实际转速和参考转速对比波形图、电磁转矩波形图和定子磁链幅值。电机的运行条件为,电机空载起动, $t = 0 \text{ s}$  时,给定转速  $1000 \text{ r/min}$ 。

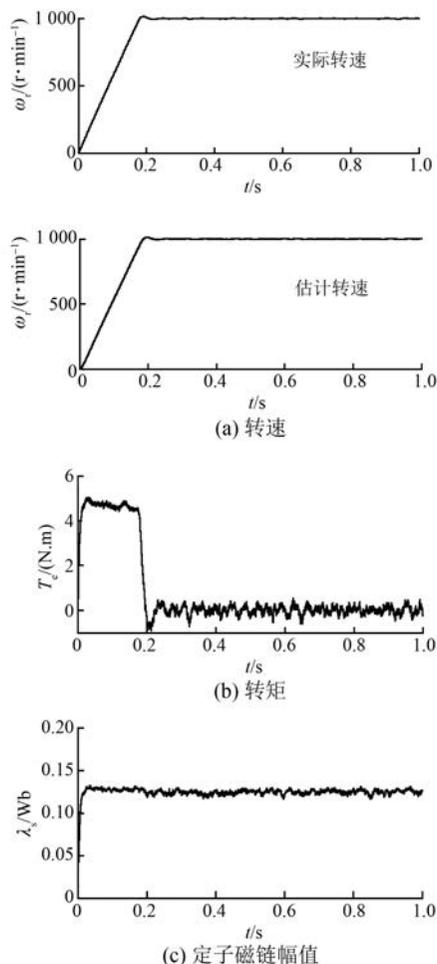


图6 DB-DTC在转速1000 r/min时仿真结果

由图6可知,采用有效磁链法的转速观测器在起动和稳定运行时,都能较准确地估计电机转速。从图6也可看出DB-DTC起动速度快,响应迅速,具有和传统DTC同样优异的动态性能,并且转矩和磁链的脉动得到明显减小,稳态性能显著提高。

## 5 结 语

本文在IPMSM离散模型状态方程的基础上,提出一种结合有效磁链法无速度传感器的DB-DTC系统控制方案。仿真结果表明IPMSM DB-DTC方法,不但继承了传统DTC优异的动态性能,且电机的电磁转矩和磁链脉动明显减小,具有良好的静态性能;而与DB-DTC系统结合的有效磁链法的无速度传感器算法简单,观测精度高,易于实现。

## 【参考文献】

- [1] SOONG W L, ERTUGRUL N. Field-weakening performance of interior permanent magnet motors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 1(5): 1251-1258.
- [2] JAHNS T M. Flux-weakening regime operation of an Interior permanent-magnet synchronous motor drive [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1987, IA-23(4): 681-689.
- [3] WAI J, JAHNS T M. A new control technique for achieving wide constant power speed operation with an interior PM alternator machine [C] // Industry Applications Conference, 2001: 807-814.
- [4] 王高林,杨荣峰,于泳,等.内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2010,30(30): 93-98.
- [5] 谢顺依,胡达平.多层滞环比较器的异步电机直接转矩控制研究[J].电力电子技术,2005,39(1): 98-100.
- [6] 李耀华,商蓓,刘卫国,等.永磁同步电机直接转矩控制转矩脉动抑制研究[J].电气传动,2008,38(3): 21-24.
- [7] LEE J S, LORENZ R D. Deadbeat-direct torque and flux control of IPMSM drives using a minimum time ramp trajectory method at voltage and current limits [C] // Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013, IEEE, 2013: 1778-1785.
- [8] 谷善茂,何凤有,谭国俊,等.扩展卡尔曼滤波的PMSM无传感器低速性能研究[J].电气传动,2009,39(12): 12-18.
- [9] 冯江华,许峻峰.基于定子磁链自适应观测的永磁同步电机直接转矩控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(12): 122-127.
- [10] 秦峰,贺益康,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.
- [11] 聂晶,张兴华,孙振兴.效率最优的感应电机无差拍直接转矩控制[J].电气传动,2013,43(10): 23-27.
- [12] LEE J S, CHOI C H, SEOK J K, et al. Deadbeat-direct torque and flux control of interior permanent magnet synchronous machines with discrete time stator current and stator flux linkage observer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(4): 1749-1758.
- [13] BOLDEA I, PAICU M C, ANDREESCU G D. Active flux concept for motion-sensorless unified AC drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23(5): 2612-2618.

收稿日期: 2016-11-01