

矩阵变换器—永磁同步电机无传感器控制系统的研究

Matrix converter, permanent magnet synchronous motor sensorless control system based on

潘宝安

PAN Bao-an

(临沂职业学院, 临沂 276000)

摘 要: 本文提出永磁同步电机的一种新型控制系统, 采用矩阵变换器供电, 并引入无传感器控制技术。首先, 介绍了间接式矩阵变换器的结构和工作原理。其次, 设计了永磁同步电机的闭环控制系统。然后, 将无传感器控制技术引入该系统。

关键词: 间接式矩阵变换器; 永磁同步电机; 无传感器

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1009-0134(2012)05(上)-0136-04

Doi: 10.3969/j.issn.1009-0134.2012.5(上).42

0 引言

矩阵变换器是一种新型交-交电力变换器, 与传统的交-直-交变频器相比, 具有很多优点, 例如矩阵变换器输入功率因数可调, 能量可双向流动, 无直流环节储能元件, 输入输出波形良好。如今, 针对矩阵变换器进行了很多研究, 如用于变频调速系统^[1], 风力发电系统^[2], 航空航天系统^[3], 车辆牵引系统^[4]等。其中变频调速系统是研究的热点, 目前已经有基于矩阵变换器的磁场定向控制^[5]和直接转矩控制^[6]方面的研究。

1 间接式矩阵变换器

矩阵变换器可分为直接式矩阵变换器和间接式矩阵变换器。间接式矩阵变换器的结构如图1所示。

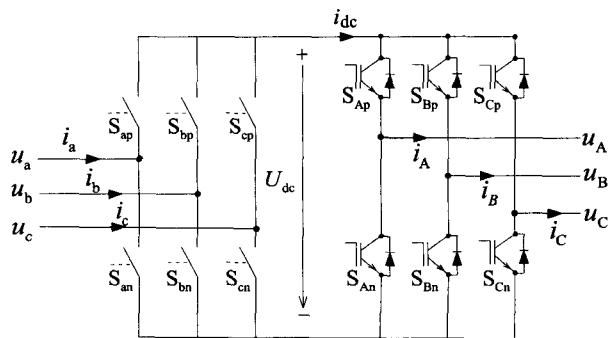


图1 间接式矩阵变换器的结构

类似于传统交-直-交变频器, 间接式矩阵变换器包含整流侧和逆变侧, 因此可分别对整流侧和逆变侧进行调制。但间接式矩阵变换器无中间直流环节储能元件。

1.1 整流侧的PWM调制

如图2所示, 将三相输入电压划分为6个扇

区, 在每个扇区中, 总有一相电压绝对值最大, 另外两相电压与之反相。这样划分的目的是为了获取最大的直流电压。例如在第1扇区, u_a 为正, 且绝对值最大, u_b, u_c 为负。此时占空比计算为

$$\begin{cases} d_1 = -\frac{u_b}{u_a} = -\frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_a} \\ d_2 = -\frac{u_c}{u_a} = -\frac{\cos \theta_c}{\cos \theta_a} \end{cases} \quad (1)$$

$\theta_a, \theta_b, \theta_c$ 输入相电压的相角。其他五个扇区与第1扇区的计算方法相同。

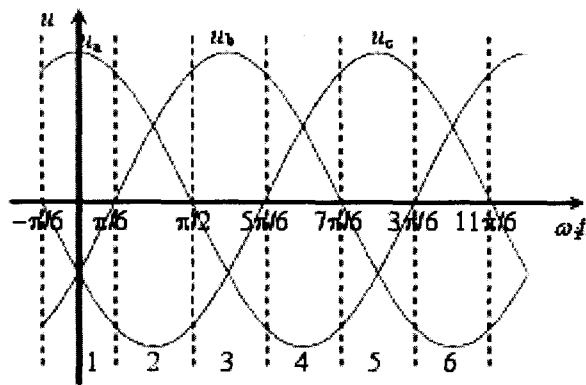


图2 输入电压扇区划分

1.2 逆变侧的SVPWM调制

如图3所示, 根据逆变侧开关状态的不同, 将输出电压也划分为六个扇区。1代表上桥臂导通, 下桥臂关断, 0则相反。因此, 共包含6个有效矢量($U_1 \sim U_6$)和2个零矢量(U_0 和 U_7)。当期望输出 U_{ref} 时

$$U_{ref} = d_n U_n + d_m U_m + d_0 U_0 \quad (2)$$

收稿日期: 2012-03-12

作者简介: 潘宝安(1961—), 男, 山东人, 副教授, 本科, 研究方向为电力变换器及电机拖动。

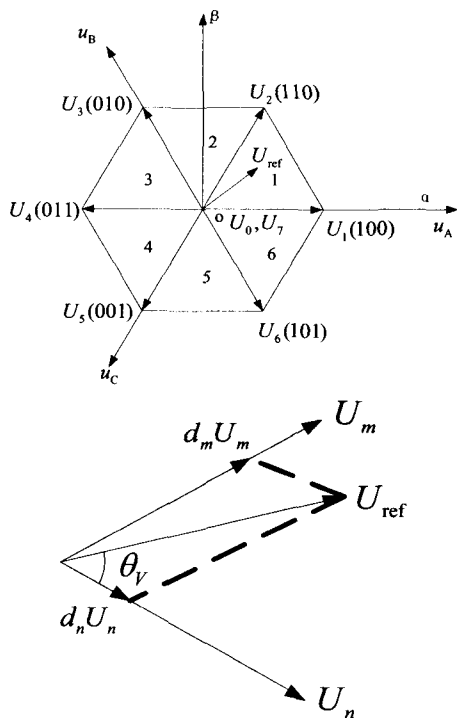


图3 输出电压扇区

U_n 和 U_m 为 U_{ref} 所在扇区内的两个相邻矢量, U_0 为零矢量 (000或111). 占空比计算为

$$\begin{cases} d_m = m_v \sin(\theta_v) \\ d_n = m_v \sin(60^\circ - \theta_v) \\ d_0 = 1 - d_m - d_n \end{cases} \quad (3)$$

m_v 为逆变侧调制系数, $0 \leq m_v \leq 1$ 。

2 矩阵变换器—永磁同步电机控制系统

永磁同步电机具有较高的功率密度, 较高的效率, 快速动态响应, 且转速与频率严格呈正比, 因此常用于需要较高精度的伺服系统中。

在永磁同步电机的控制系统中, 矢量控制可获得快速的速度响应和较好的转矩性能^[7], 因此本文采用矢量控制。上一部分矩阵变换器的逆变侧的SVPWM调制即针对于永磁同步电机的矢量控制。

矢量控制系统如图4所示, 其中的速度估算将在下一部分进行介绍。首先, 三相定子电流被变换为dq旋转坐标系下的解耦量, 包括磁通分量(i_d)和转矩分量(i_q)。系统中包含三个PI控制器, 其中一个外环控制器用于调节转速, 另外两个内环控制器用于分别调节 i_d 和 i_q 。系统采用 $i_d = 0$ 控制方式, 这旨在获得最大转矩控制。

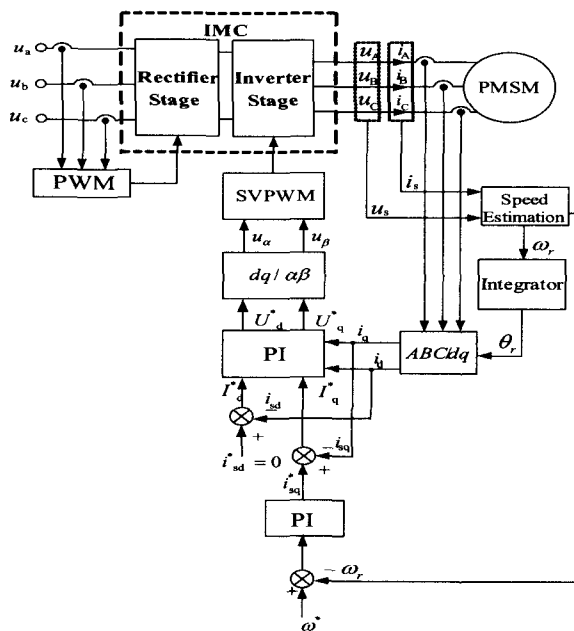


图4 矩阵变换器—永磁同步电机矢量控制系统

3 无传感器控制系统

为了获得闭环控制和磁场定向, 需要检测电机的转速^[8]。然而, 速度传感器的引入增大了系统的体积, 提高了成本, 并且限制了在恶劣环境中的应用。由永磁同步电机本身的模型, 可以通过检测电机的电压和电流推算出转速, 而不使用传感器, 这就是无传感器技术。估算转速的方法有很多, 本文采用模型参考自适应系统。

模型参考自适应系统就是将不含估算参数的方程作为参考模型, 将含有待估参数的方程作为可调模型, 通过比较两个模型, 当其差值为零时, 即认为可调模型中的待估参数为实际值。

在旋转dq坐标系中, 永磁同步电机的数学方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_d + \omega_r i_q + \frac{u_d}{L_s} \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_q - \omega_r i_d - \frac{\psi_f}{L_s} \omega_r + \frac{u_q}{L_s} \end{cases} \quad (4)$$

将定子电流作为变量

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_s} \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_s} & \omega_r \\ -\omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_s} \\ i_q \end{pmatrix} + \frac{1}{L_s} \begin{pmatrix} u_d + \frac{R_s \psi_f}{L_s} \\ u_q \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{定义 } i'_d = i_d + \frac{\psi_f}{L_s}, \quad i'_q = i_q, \quad u'_d = u_d + \frac{R_s \psi_f}{L_s},$$

$u'_q = u_q$, 由(5)得

$$\frac{d}{dt} i'_s = A i'_s + B u'_s \quad (6)$$

其中

$$i'_s = \begin{pmatrix} i'_d \\ i'_q \end{pmatrix} u'_s = \begin{pmatrix} u'_d \\ u'_q \end{pmatrix} A = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_s} \omega_r & \frac{R_s}{L_s} \\ \omega_r & -\frac{R_s}{L_s} \end{pmatrix}$$

式(6)包含转子速度信息, 将其作为参考模型。 ω_r 为待估参数, 令 \hat{i}'_d , \hat{i}'_q , \hat{u}'_d , \hat{u}'_q , $\hat{\omega}_r$ 估算值, 则

式(6)变为

$$\frac{d}{dt} \hat{i}'_s = A \hat{i}'_s + B \hat{u}'_s \quad (7)$$

如果式(7)与实际值相同, 则式(7)即为电机的精确模型。通过PI调节, 估算转速可表示为

$$\hat{\omega}_r = \left(\frac{K_i}{s} + K_p \right) \varepsilon_\omega$$

其中

$$\varepsilon_\omega = \hat{i}'_d \hat{i}'_q - \hat{i}'_d \hat{i}'_q$$

通过PI调节, 误差信号 ε_ω 产生估算转速 $\hat{\omega}_r$ 。迫使估算的定子电流 \hat{i}'_s 逼近实际定子电流 i'_s , $\hat{\omega}_r$ 即此时估算转速逼近实际转速。基于模型参考自适应系统的转速估算如图5所示。转子位置可由估算转速积分求得。

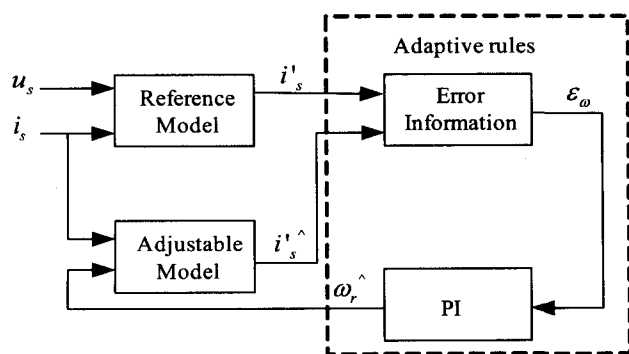


图5 基于模型参考自适应系统的转速估算

4 仿真分析

设仿真参数如下所示:

三相输入: 220V, 50Hz

定子电阻: 0.9585 Ω

定子电感: $L_d = L_q = 5.25mH$

永磁体磁通: 0.1827Wb

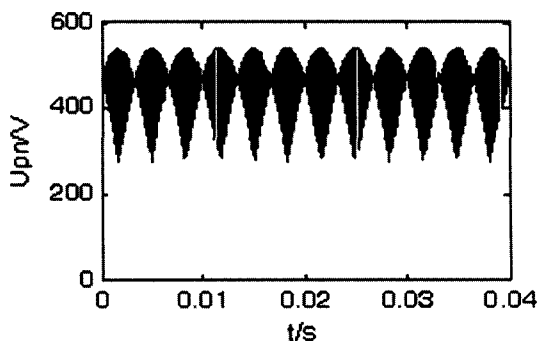
转动惯量: 0.0006329 kg·m²

摩擦因数: 0.0003035 N·m·s

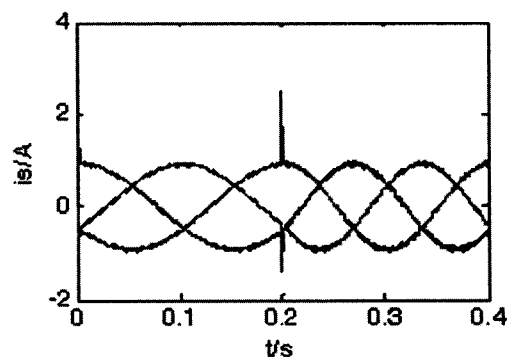
极对数: 4

1) 系统仿真结果

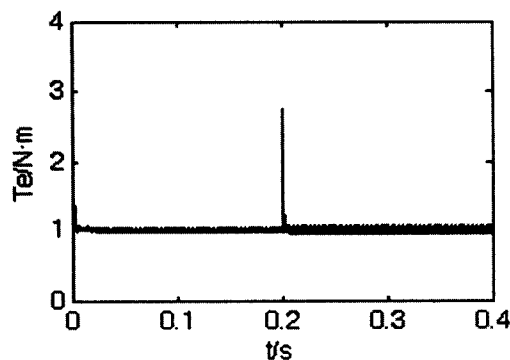
设开始时给定转速为200rpm, 0.2s时突变为300rpm, 负载转矩为1 N·m, 仿真波形如图6所示。



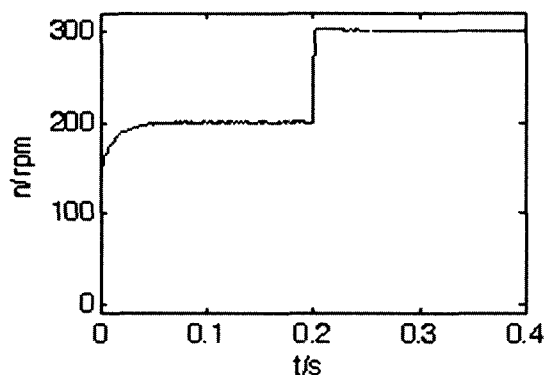
(a) 矩阵变换器的直流侧电压



(b) 定子电流



(c) 转矩



(d)电机转速

图6 转速突变时的仿真波形

图6表明间接式矩阵变换器—永磁同步电机系统可以很好地跟踪指令转速的变化。

2) 无传感器控制系统的仿真

设开始时给定转速为200rpm, 0.2s时突变为300rpm, 负载转矩为1 N·m, 仿真波形如图7所示。

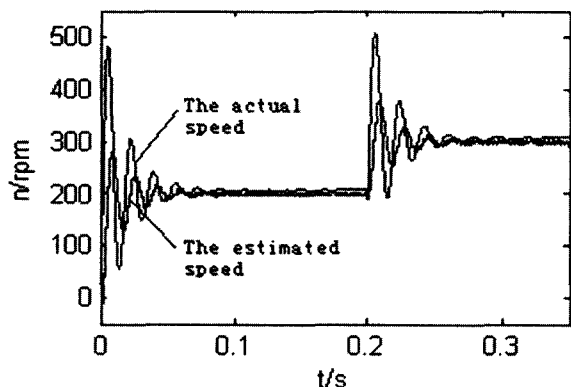


图7 无传感器控制系统的仿真

图7表明设计的无传感器控制系统可以很好地进行转速估算, 并可用估算的转速代替实际的转速, 实现了无传感器控制, 降低了成本, 缩小了体积, 提高了可靠性。

5 结论

通过仿真结果可得, 矩阵变换器是一种优越

的电力变换器, 可用作永磁同步电机的供电电源, 具有良好的指令转速跟踪性能。提出的无传感器控制技术可应用于此系统, 实现了转速估算和无传感器控制, 降低了成本, 缩小了体积, 提高了系统可靠性。

参考文献:

- [1] Klumpner C, Nielsen P, Boldea I and Blaabjerg F, "A new matrix converter motor (MCM) for industry applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(2):325-335.
- [2] Yang Jun-Hua, Zheng Jian-Hua, Feng Huan-Xia, Wu Jie and He Rui-Wen, "Doubly-fed variable-speed wind generation system using matrix converter," High Voltage Engineering, 2009, 35(11):2820-2825.
- [3] Trentin Andrew, Zanchetta Pericle, Wheeler Pat and Clare Jon, "Performance assessment of matrix converter and two stage matrix converter for EMA in aircraft application," IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2007:2692-2697.
- [4] Julian A L and Oriti G, "A DC traction drive application of a regenerative rectifier using AC/AC matrix converter theory," Proceedings IEEE IAS' 03, 2003:198-204.
- [5] Hong-Hee Lee, Nguyen Hoang M and Chun Tae-Won, "A study on rotor FOC method using matrix converter fed induction motor with common-mode voltage reduction," 7th International Conference on Power Electronics, ICPE'07, 2008:159-163.
- [6] Joshi, R.R, Gupta R.A and Wadhawani A.K, "Intelligent controller for DTC controlled matrix converter cage drive system," Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2008, 7(1):9-16.
- [7] Espina Jordi, Arias Antoni, Balcels Josep and Ortega Carlos, "Speed anti-windup PI strategies review for field oriented control of permanent magnet synchronous machines," CPE 2009-6th International Conference-Workshop-Compatibility and Power Electronics, 2009:279-285.
- [8] Morimoto Shigeo, Kawamoto Keisuke, Sanada Masayuki and Takeda Yoji, "Sensorless control strategy for salient-pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(4):1054-1061.