

基于双级矩阵变换器的直接转矩控制系统

栗梅, 覃恒思, 余岳
(中南大学, 湖南长沙 410083)

摘要: 研究了基于双级矩阵变换器的异步电机直接转矩控制策略。传统的直接转矩控制 (Direct Torque Control, 简称 DTC) 算法直接施加在双级矩阵变换器的逆变级, 而在整流级使用空间矢量调制的方法。在此设计了一种特殊的换流策略, 即在整流级换流前后, 在逆变级插入零开关状态, 保证了整流级的零电流换流特性。该方法结合了 DTC 和双级矩阵变换器的优点。设计并实现了实验样机系统, 实验结果验证了该控制策略的可行性和有效性。

关键词: 变换器; 矩阵 / 直接转矩控制; 零开关状态

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2008)03-0049-03

Two-stage Matrix Converter-fed Direct Torque Control Drive

SU Mei, QIN Heng-si, YU Yue

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A two-stage matrix converter-fed direct torque control (DTC) strategy for induction motor drive was investigated. The traditional direct torque control scheme was used in the inverter stage, while space vector modulation method was used in the rectifier stage. The feature of zero current switching in the rectifier stage was implemented by inserting short periods of zero switching states around the points at which the rectifier stage commutes. In this way, the characteristics of both direct torque control and two-stage matrix control were combined. An experimental prototype was designed. The experimental results are provided to show the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

Keywords: converter; matrix / direct torque control; zero switching state

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.60674065)

1 引言

矩阵变换器是一种新型的直接 AC/AC 电力变换器, 现已日益受到重视, 但目前它仍存在一些缺陷。双级矩阵变换器的提出^[1], 在一定程度上解决了传统矩阵变换器所面临的问题, 而且在实现传统矩阵变换器所有功能的同时, 还具有很多优点, 如控制策略和换流算法简单, 电网侧的整流级可实现零电流换流, 箝位电路简单等。在交流调速系统中, 使用双级矩阵变换器驱动异步电机, 一方面能够实现较好的传动性能, 另一方面也能满足日益严格的电网电能质量的要求。在新型变换器不断出现的同时, 异步电机的直接转矩控制 (DTC) 也有了长足发展^[2]。DTC 使用空间矢量的分析方法, 直接在静止坐标系下估计并控制异步电机的转矩, 采用定子磁链定向, 直接对开关状态进行控制。它省去了旋转坐标变换和电流控制内环, 降低了控制器的复杂性; 其定子磁链的估计不易受电机转子参数波动的影响。

如果能将双级矩阵变换器和 DTC 各自的优点相结合, 就有可能构成一种新型的高性能交流调速系统^[3]。这里在研究双级矩阵变换器和异步电机 DTC

系统的基础上, 提出了一种双级矩阵变换器结合 DTC 的调制策略, 样机实验结果验证了该调制策略的可行性。

2 DTC 基本原理

图 1 示出 DTC 系统的基本原理。定子磁链和转矩的给定值通过与它们的估计值相比较, 所得的差值经过滞环比较器得到磁链和转矩的控制信号。开关状态表根据磁链比较器、转矩比较器的输出和当前定子磁链所处的扇区来选取开关状态, 从而控制电机的转速。

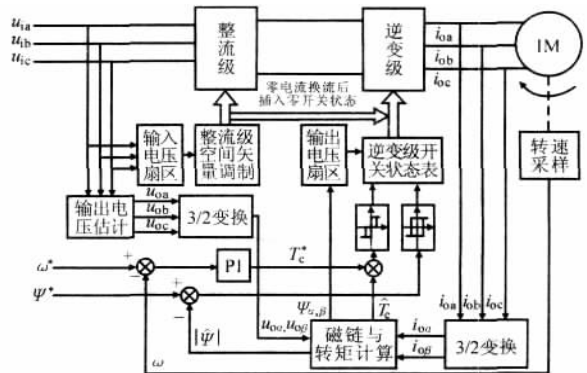


图 1 直接转矩控制系统原理框图

DTC 以三相异步电机在两相定子坐标系的解析模型为基础, 需要将电机定子电压和电流采样值进行坐标变换, 其算法为:

$$\begin{bmatrix} x \\ x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix}, \quad x = u, i \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金项目(60674065)

定稿日期: 2007-10-26

作者简介: 栗梅(1967-), 女, 湖南汉寿人, 博士, 教授, 研究方向为电力系统自动化、电力电子及电力传动。

在 α, β 坐标系下, 定子磁链和电磁转矩分别为:

$$\begin{cases} \psi_s = \int_0^t (u_s - i_s R_s) dt \\ T_e = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} i_{s\alpha} - i_{s\alpha} i_{s\beta}) \end{cases} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (i_{s\beta} i_{s\alpha} - i_{s\alpha} i_{s\beta}) \quad (3)$$

式中 R_s 为电机的定子电阻 p 为极对数。

采用圆形磁链轨迹的控制方法, 电压空间扇区的划分如图 2 中虚线标记的区域所示。DTC 算法就是以磁链扇区、磁链比较器输出和转矩比较器输出为输入的开关状态表, 见表 1。

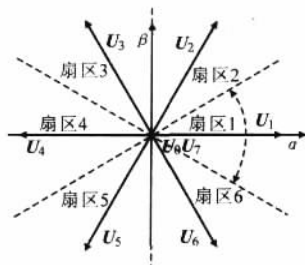


图 2 逆变级电压区间划分

表 1 DTC 开关状态表

H	H_{Te}	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
1	1	001	101	100	110	010	011
1	0	000	111	000	111	000	111
-1	0	010	011	001	101	100	110
-1	1	101	100	110	010	011	001
-1	0	111	000	111	000	111	000
-1	-1	110	010	011	001	101	100

3 系统调制策略

图 3 示出双级矩阵变换器的逆变级拓扑结构。它实际上与传统电压型逆变器的拓扑结构一样, 所以可以将 DTC 算法直接施加在双级矩阵变换器的逆变级。但是, 双级矩阵变换器在控制电机调速的同时, 还要满足电网单位功率因数的要求, 所以需要在整流级进行空间矢量调制。同时, 双级矩阵变换器作为一种 AC/AC 变频器, 缺乏中间的直流储能环节, 所以需要从输入电压来估计电机定子电压。此外, 为了保持整流级的零电流换流特性, 需要对现有逆变级的开关换流策略进行修改。下面将分别对这些问题进行讨论。

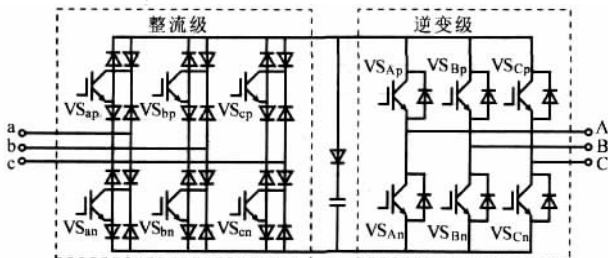


图 3 双级矩阵变换器的拓扑结构

3.1 双级矩阵变换器整流级调制策略

在假设输入电压为正弦且平衡的前提下, 输入电压可表示为:

$$\begin{cases} u_a = U_i \cos \omega t \\ u_b = U_i \cos (\omega t - 2\pi/3) \\ u_c = U_i \cos (\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

为了尽可能充分地利用三相输入线电压, 以合成较大的直流电压, 在整流级将三相正弦输入电压划分为 6 个扇区, 见图 4, 每个区间内就有一相的绝对值最大, 且极性与另两相的电压相反。在保证整流级输入端为单位功率因数的条件下, 以扇区 1 为例, 整流级的调制策略可表示为:

$$d_{ab} = -\frac{\cos \theta_b}{\cos \theta_a}, \quad d_{ac} = -\frac{\cos \theta_c}{\cos \theta_a} \quad (5)$$

式中 d_{ab}, d_{ac} 为 VS_{bn}, VS_{cn} 在一个 PWM 开关周期中的占空比。

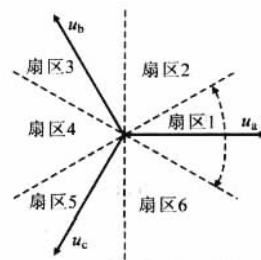


图 4 整流级扇区划分

类似可得到其他扇区的整流级开关, 见表 2。

表 2 整流级开关状态表

扇区	段 1		段 2	
	开关状态	直流电压	开关状态	直流电压
1	VS_{ap}, VS_{bn}	$u_a - u_b$	VS_{ap}, VS_{cn}	$u_a - u_c$
2	VS_{bn}, VS_{ap}	$u_a - u_c$	VS_{bn}, VS_{cp}	$u_b - u_c$
3	VS_{cp}, VS_{bn}	$u_b - u_c$	VS_{cp}, VS_{an}	$u_b - u_a$
4	VS_{an}, VS_{cp}	$u_b - u_a$	VS_{an}, VS_{bp}	$u_c - u_a$
5	VS_{bp}, VS_{an}	$u_c - u_a$	VS_{bp}, VS_{cn}	$u_c - u_b$
6	VS_{cn}, VS_{bp}	$u_c - u_b$	VS_{cn}, VS_{ap}	$u_a - u_b$

3.2 双级矩阵变换器的输出电压估计算法

由式 (2) 和式 (3) 可知, DTC 需要知道双级矩阵变换器的输出电压, 即电机定子电压, 以估计电机定子磁链。而变频器的输出电压是非连续的 PWM 波, 难以直接检测, 需要估计。与传统的 AC/DC/AC 变频器不同, 双级矩阵变换器的中间直流电压也是脉动的, 同样不能从中间直流电压估计输出电压。所以采用根据整流级和逆变级的开关状态, 由输入电压估计输出电压的方法。

双级矩阵变换器的开关频率远大于输入输出频率, 所以可以认为一个 PWM 控制周期的中间直流电压是恒定值。假设输入电压处于第一扇区, 一个 PWM 周期的中间直流电压平均值为:

$$U_d = d_{ab}(u_a - u_b) + d_{ac}(u_a - u_c) \quad (6)$$

将式 (4) 和式 (5) 代入式 (6) 得:

$$U_d = \frac{3U_i}{2\cos \theta} \quad (7)$$

双级矩阵变换器的逆变级, 与 DC/AC 逆变器类似, 唯一的区别在于中间直流电压是式 (7) 所示的变化量。定义逆变级的开关状态 $S_i=1$ 表示为 i 相上

桥臂开关闭合, $S_i = -1$ 表示为 i 相下桥臂开关闭合, 其中 $i=A, B, C$ 。于是输出电压就可写成:

$$U_o = (S_A + S_B e^{-j\frac{2}{3}} + S_C e^{j\frac{2}{3}}) U_{\alpha} \quad (8)$$

3.3 用于 DTC 的双级矩阵变换器换流策略

双级矩阵变换器的一个优点就是在整流级实现了零电流换流, 避免了复杂的四步换流策略。为了在实现 DTC 的同时保留零电流换流的特性, 设计了用于 DTC 的双级矩阵变换器换流策略。

如图 5 所示, 在整流级开关切换的前后 $8 \mu s$ 内, 在逆变级插入一个零开关状态, 以实现零电流换流。为防止短路, 整流级和逆变级都插入 $4 \mu s$ 死区。

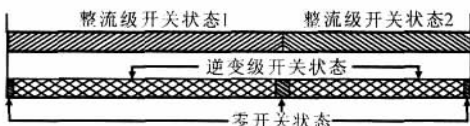


图 5 用于 DTC 的双级矩阵变换器换流策略

4 系统实验

实验系统的硬件部分以文献[4]的样机为平台, 在原有 DSP+CPLD 控制板的基础上, 增加了带数据采集卡的 PC 机做为采样和算法处理单元, 见图 6。输入电压和输出电流由数据采集卡采样, 转速编码盘的信号由 DSP 采样并处理后, 送到 PC。闭环控制算法在 A/D 卡运行, 通过接口板中的 DSP 处理器将 PC 机计算得到的开关状态占空比计数值送入 CPLD 计数。CPLD 根据计数值, 按照所提出的换流策略将开关信号送至驱动板, 最后由驱动板控制主电路的 IGBT 动作。实验数据和控制器的中间变量由 PC 机保存, 便于分析和调试。该系统设计方案具有一个优点, 即控制程序可先在 Matlab 中进行调试, 然后直接移植到实际的控制器中, 提高了开发效率。实验结果显示, 控制程序的采用时间为 $60 \mu s$, 计算时间为 $10 \mu s$, 通信时间为 $30 \mu s$, 能够满足控制需求。

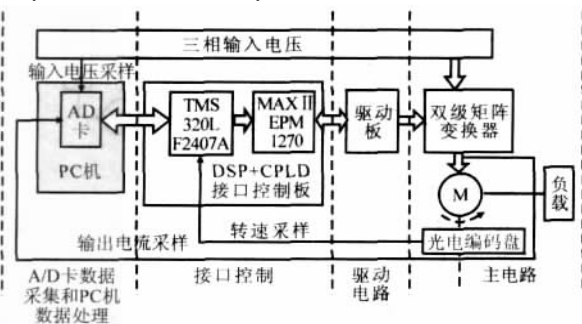


图 6 实验系统框图

DTC 控制周期为 $400 \mu s$, 实验样机整流级主电路采用 1MBH60-100 型 IGBT, 二极管采用 DSEI30-12A 功率二极管, 逆变级采用 1MBH60D-100 型 IGBT。实验用异步电机参数: $P_n=1.1 kW$, $U_n=380 V$, $I_n=2.89 A$, $R_s=7.9$, $R_r=6.8$, $L_s=L_r=0.3312 H$, $L_m=0.4634 H$, $f_n=$

$50 Hz$, $n_p=2$, $N_n=1390 r/min$ 。

图 7 示出输入电压 $110 V$ 、参考转速 $1000 r/min$ 、参考磁链等于 $0.5 Wb$ 时的空载实验波形。

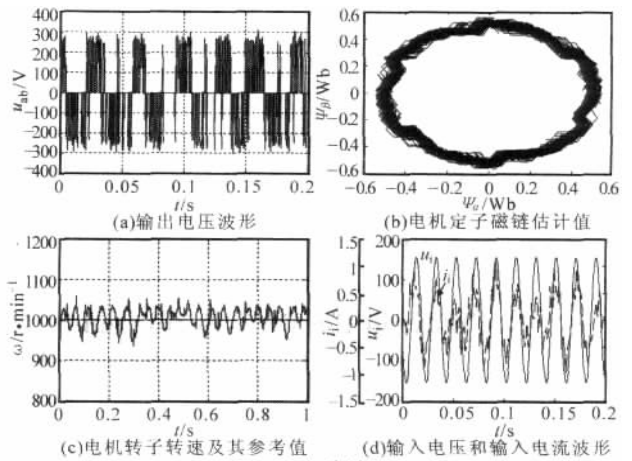


图 7 实验结果

由实验波形可知, 电机定子磁链幅值等于给定值, 轨迹基本为圆形。电机定子转速等于给定转速。但是, 较低的控制频率和滞环比较的 DTC 控制策略影响了控制系统的性能。

观察图 7d 可见, 经过滤波后的输入电流与输入电压基本同相位, 说明功率因数基本为 1。实验结果表明, 该实验系统在实现电机转速闭环控制的同时, 具有输入端单位功率因数的特性, 验证了前述理论分析的正确性。

5 结论

设计了基于双级矩阵变换器的异步电动机直接转矩控制调速系统。结合双级矩阵变换器和异步电动机各自的优点, 在获得较好调速性能的同时, 提高了变频器的输入端电能质量。研究了双级矩阵变换器直接转矩控制系统的一些实现问题, 设计并实现了的实验样机, 实验结果验证了理论分析的正确性和有效性。下一步的工作将专注于提高控制器频率, 并结合空间矢量调制来提高调速性能和输入端的电能质量。

参考文献

- [1] J W Kolar, F Schafmeister, S D Round, et al. Novel Three-Phase AC-AC Sparse Matrix Converters[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2007, 22 (5): 1649-1661.
- [2] G S Buja and M P Kazmierowski. Direct Torque Control of PWM Inverter—Fed AC Motors—A Survey[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2004, 51 (4): 744-757.
- [3] D Casadei, G Serra, A Tani. The Use of Matrix Converters in Direct Torque Control of Induction Machines[J]. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2001, 48 (6): 1057-2001.
- [4] 粟梅, 余岳, 覃恒思, 等. 基于 DSP+CPLD 的双级矩阵变换器的设计与实现[J]. 电力电子技术, 2007, 41 (6): 1-3.