

# 直接转矩控制转矩脉动最小化方法研究

瞿成明, 江明, 陈其工

(安徽工程科技学院电气工程系 安徽 芜湖 241000)

**【摘要】**针对基于直接转矩控制中的感应电动机在低速运转时存在较大的转矩脉动问题,提出了一种新的控制方法。该方法在对传统直接转矩控制的开关控制表进行改进的基础上,建立了新型双层滞环控制的开关控制表,使感应电动机的转矩脉动达到最小。实验结果表明该方法能有效地解决转矩脉动问题。

**关键词** 直接转矩控制; 转矩脉动; 双层滞环控制

中图分类号 TP273.2; TP271 文献标识码 A

## Research on Torque Ripple Minimum Approach of Direct Torque Control System

QU Cheng-ming, JIANG Ming, CHEN Qi-gong

(Electrical Engineering Department, Anhui University of Technology and Science Wuhu Anhui 241000)

**Abstract** For the large torque ripple of inductance motor based on direct torque control, especially at a low speed, this paper proposes a new control strategy. On the basis of improving conventional switch table of direct torque control system, a two-hysteresis control switch table is established in the strategy in order to decrease torque ripple. The simulation shows that it can get good torque performance.

**Key words** direct torque control; torque ripple; a two-hysteresis control

传统的直接转矩控制选择合适的电压矢量可将定子磁链和转矩控制在两个滞环之内。目前直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)系统中电压矢量的选择通常采用开关选择表<sup>[1]</sup>、转矩自控制策略和空间矢量调制的方法<sup>[2-3]</sup>。然而采用传统的开关表以及滞环控制器会带来转矩锯齿波脉动问题。本文利用新型的转矩和磁链的双层滞环控制方案代替了传统滞环控制方法。

### 1 传统的开关选择方式对转矩脉动的影响

采用*u-i*模型(积分器)计算定子磁链时,如忽略定子电阻,电机的定子磁链可表示为:

$$\psi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt + \psi_{s0} \approx \int v_s dt + \psi_{s0} \quad (1)$$

式中  $\psi_{s0}$  为定子磁链的初始值;  $\psi_s$  为定子磁链;  $v_s$ 、 $i_s$ 、 $R_s$  分别为定子电压矢量、定子电流矢量、定子电阻。

传统DTC是在每一个固定的开关周期内选择最优的空间矢量<sup>[1-2]</sup>,使系统获得更优良的动态性能。但当电机速度很低时,采用此方法会导致电流的品质下降,使电机转矩的脉动严重。因为在相同的开关周期内,不同电压矢量作用时所产生的转矩变化量不相同,而在不同的工作区间内电压空间矢量的选择表却是固定的,这必然会使转矩中包含有低频锯齿分量。若要进一步提高DTC的低速性能,则需要改进传统的开关选择模式。

### 2 直接转矩控制系统的转矩变化规律

假设直接转矩控制系统的控制周期  $T_s$  足够小,根据感应电机的状态方程可以得到离散化的感应电机的

收稿日期: 2005-09-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60574028); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(2005KJ068); 教育部重点项目(03060)

作者简介: 瞿成明(1973-), 男, 硕士, 讲师, 主要从事电力电子及电力传动方面的研究。

状态方程。 $t_{k+1}$ 时刻的定子磁链和转子磁链可以表示为:

$$\psi_{s_{k+1}} = \psi_{s_k} \left(1 - \frac{R_s}{\sigma L_s} T_s\right) + \psi_{r_k} \frac{L_m R_s}{\sigma L_s L_r} T_s + v_{s_k} T_s \quad (2)$$

$$\psi_{r_{k+1}} = \psi_{r_k} + \psi_{r_k} \left(j\omega_{r_k} - \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) T_s + \psi_{s_k} \frac{L_m R_r}{\sigma L_s L_r} T_s \quad (3)$$

式中  $\sigma = 1 - [L_m^2 / (L_s L_r)]$  为电机漏感系数;  $L_s$ 、 $L_r$  和  $L_m$  分别为定子和转子的自电感及两者的互感;  $\omega_r$  为电机的电角速度;  $\psi_s$ 、 $\psi_{sr}$  分别为定、转子磁链矢量;  $v_s$  为定子电压矢量; 各字母下脚标加  $k$  表示该量离散化。

式(2)描述了在  $t_k \sim t_{k+1}$  期间由于定子电压矢量  $v_{s_k}$  的作用所引起的定子磁链的变化规律。根据式(2)和(3), 代入电磁转矩公式, 得到电磁转矩的离散化表达式为:

$$T_{e_{k+1}} = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_{s_{k+1}} \times \psi_{r_{k+1}} \quad (4)$$

式中  $P$  为电机极对数。将式(2)和(3)带入式(4), 并忽略  $T_s$  的平方项可以得到电磁转矩离散化递推式为:

$$T_{e_{k+1}} = T_{e_k} + \Delta T_{e_k} = T_{e_k} + \Delta T_{e_{k1}} + \Delta T_{e_{k2}} \quad (5)$$

式中  $\Delta T_{e_k}$  是转矩的增量, 它由  $\Delta T_{e_{k1}}$  和  $\Delta T_{e_{k2}}$  两部分组成, 其表达式分别为:

$$\Delta T_{e_{k1}} = -T_{e_k} \left(\frac{R_s}{\sigma L_s} + \frac{R_r}{\sigma L_r}\right) T_s \quad (6)$$

$$\Delta T_{e_{k2}} = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} [-v_{ds_k} \psi_{qr_k} + v_{qs_k} \psi_{dr_k} - \omega_{r_k} (\psi_{ds_k} \psi_{dr_k} + \psi_{qs_k} \psi_{qr_k})] T_s \quad (7)$$

式中 定子电压矢量  $v_s$  和磁链矢量  $\psi_s$ 、 $\psi_r$  下脚标加上  $d$ 、 $q$  是该矢量在定子坐标系下的  $d$  轴、 $q$  轴分量; 转矩增量  $\Delta T_{e_{k1}}$  是由于定转子电阻作用所造成的电磁转矩的衰减;  $\Delta T_{e_{k2}}$  反映了电压矢量的作用对转矩变化的影响, 而且受到电机运行状态的影响。当电机运行于稳态时 ( $T_{e_k} > 0$ ), 在  $t_k$  时刻分别选用零电压矢量、正向电压矢量和反向电压矢量代入式(5), 可以得到结论:

(1) 当零电压矢量作用时, 零电压矢量所产生的负转矩的大小将受到电机转速的影响, 转速越高, 产生的负转矩越大。

(2) 当正向电压矢量作用时, 正向电压矢量所产生的转矩变化量的大小同样受到电机转速的影响。随着转速的提高, 正向电压矢量产生的转矩增量会相应减少。

(3) 当反向电压矢量作用时, 反向电压矢量所产生的转矩变化量大小同样受到电机转速的影响。随着转速的提高, 反向电压矢量所产生的负转矩会进一步增大。

(4) 在同样的工作状态下, 反向电压矢量所引起的转矩减少量大于正向电压矢量所引起的转矩增加量, 两者的差值是零电压矢量所造成的转矩减少量的两倍。

### 3 定子磁链和转矩的双层滞环控制

图1为新型的电压矢量和磁链区域及磁链幅值内外环示意图。图2所示为新型的定子磁链比较器的结构图。当定子磁链的给定值与定子磁链实际值的差小于外环限, 即:  $|\psi_s^* - \psi_s| < \Delta |\psi_s|'$  时, 磁链比较器的工作方式与传统的方式完全相同。为了降低转矩的脉动, 对传统开关表进行了修改, 利用零矢量取代了反向矢量。当定子磁链的给定值与实际值的差大于外环限, 即  $|\psi_s^* - \psi_s| > \Delta |\psi_s|'$  时: 若转矩比较器的输出  $r=1$ , 表示需要增加转矩, 这时选择使磁链增加的正向矢量; 若转矩比较器的输出  $r=0$ , 表示需要保持转矩值, 这时选择斩波矢量。斩波矢量是指在某一磁链工作区间内, 仅使磁链发生径向变化的矢量, 即斩波矢量的作用主要是引起磁链幅值的变化。若转矩比较器的输出  $r=-1$ , 则利用斩波矢量取代反向矢量; 当电机运行于较低转速时, 由于不采用反向矢量, 零矢量的作用时间很长,

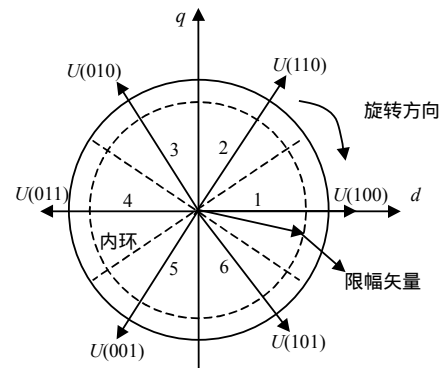


图1 电压矢量、磁链区域及磁链幅值内外环示意图

将导致定子磁链的衰减严重。当定子磁链衰减至内环(图1中的虚线圆)时,斩波矢量替代零矢量起作用,使磁链幅值迅速增大,有效地克服了零矢量的不足,同时保持了零矢量的优势。

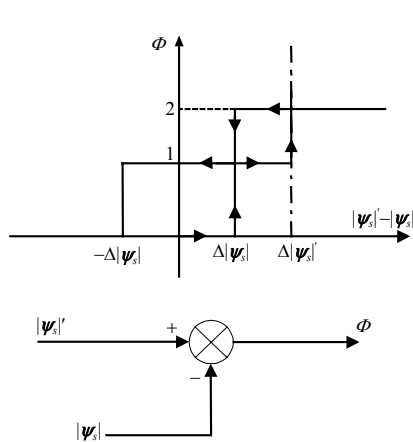


图2 定子磁链的双层滞环控制器

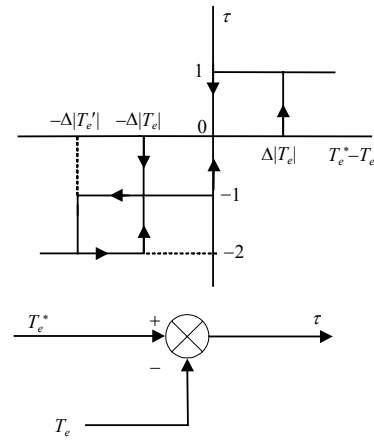


图3 电磁转矩的双层滞环比较器

如完全采用上述开关表,仍会出现如电机无法实现正反反转运行、电机减速或制动速度太慢等问题。主要原因是去掉了原开关表中的反向矢量,这样虽然降低了转矩的脉动,但无法实现转矩的迅速减小。折衷的方法是采用转矩双层滞环比较器,如图3所示。当该滞环比较器的输出为-2时,电压反向矢量又开始起作用;转矩脱离外环后,即 $\tau=1$ 、0或-1时,反向矢量不再起作用。

### 4 仿真结果

利用MATLAB/Simulink软件分别对传统开关表控制方式和双层滞环开关表控制进行了对比仿真分析。图4是仿真模型原理结构图,图中仿真参数分别为:电动机额定功率1.1 kW、线电压380 V、极对数2、额定转速1 500 r/min、定子电阻5.9 Ω、转子电阻5.6 Ω、互感0.55 H、定子电感0.573 H、转子电感0.58 H。

通过对仿真模型中开关表改动得到的仿真结果如图5~8所示。图5是采用传统开关表的转矩阶跃响应,转矩脉动幅值达到了近4 N·m。图6是采用零矢量取代反向矢量时的转矩阶跃响应,可以看出,转矩脉动缩小至了1.5 N·m。而图7是采用新的开关选择表之后,电机转矩的脉动情况,其转矩脉动幅值与采用零矢量时转矩脉动幅值(图6)差别不大。但从图8的磁链曲线看,此时磁链衰减减小,接近圆形,消除了低速(零速)时定子磁链衰减的问题,同时仍可以实现转矩的迅速消减,使电机实现迅速减速和制动运行。

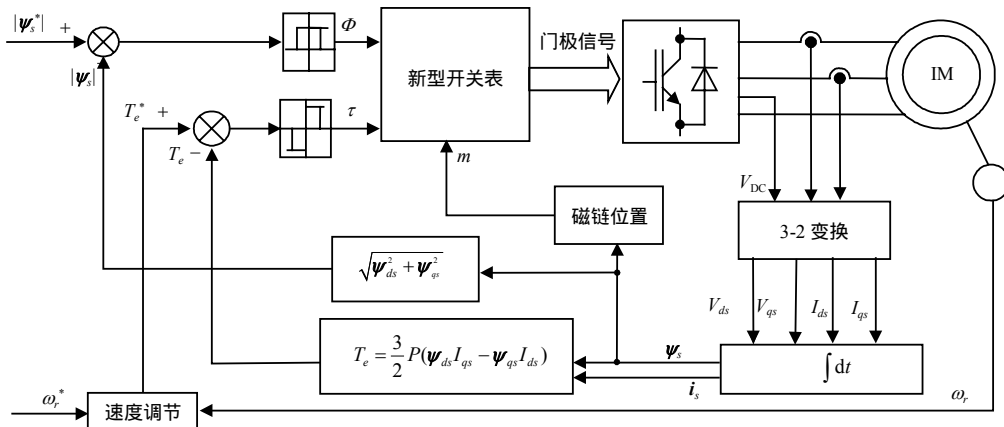


图4 仿真模型原理结构图

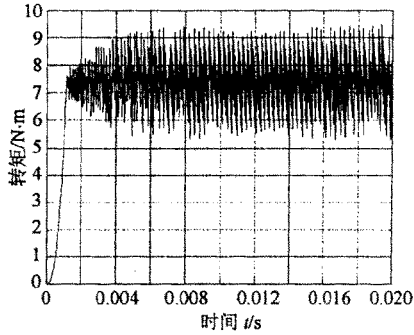


图5 采用传统的开关表时的转矩阶跃响应

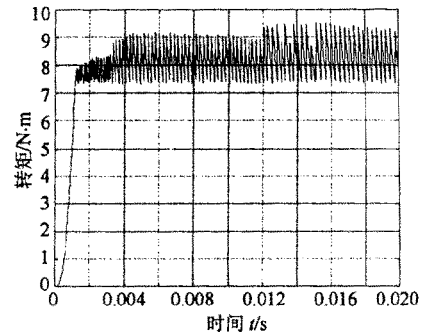


图6 用零矢量取代反向矢量时的转矩阶跃响应

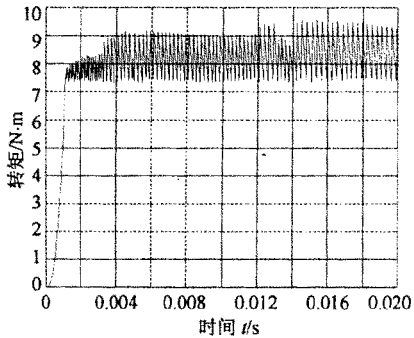


图7 采用新型开关选择表时的转矩阶跃响应

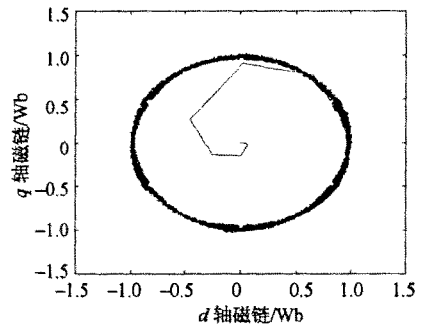


图8 采用新型开关选择表时的定子磁链轨迹

## 5 结束语

本文对传统的开关表进行了改进, 并利用新型的转矩和磁链的双层滞环控制方案代替了传统滞环控制方法。仿真和实验均表明, 采用了新型控制方案之后大大削减了电机的转矩脉动和电磁噪声。但如何从硬件上实现这一控制方案还需进一步研究。

### 参 考 文 献

[1] Takahashi I, Noguchi T. A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor[J]. IEEE Trans. Ind. Application, 1986, 22(5): 820-827.  
 [2] Depenbrock M. Direct Self-Control (DSC) of inverter-fed induction machine[J]. IEEE Trans. on PE, 1998, PE-3(4): 420-429.  
 [3] Schauder C. Direct self control of induction motors without rotational transducers[J]. IEEE Trans. Ind. Application, 1992, 28(5): 1054-1061.  
 [4] 许大中. 交流电机调速理论[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1991.

编辑 漆 蓉