

文章编号:1000-582X(2013)06-076-08

# 双频逆变器供电的感应电动机磁转矩脉动控制

王明渝<sup>1</sup>,安树怀<sup>1,2</sup>,高文祥<sup>1</sup>,王磊<sup>1</sup>

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044;  
2. 青岛供电公司,山东 青岛 266002)

**摘要:**针对大功率场合下传统直接转矩控制转矩、磁链脉动大,开关频率不恒定等不足,研究了一种新的由双频逆变器供电空间矢量调制的直接转矩控制方案。在传统直接转矩控制的基础上,理论分析了直接转矩控制中磁链、转矩脉动的影响因素,推导出异步电机空间电压矢量数学模型,运用S-函数实现空间矢量调制。系统基于双频控制理论,采用级联逆变器供电降低系统的开关损耗。双频逆变器高频单元负责改善系统动态性能,低频单元传递主要功率。仿真结果表明:该方案不仅使系统具有较好的动静态性能,而且大幅度减小了电磁转矩、磁链脉动以及开关损耗,提高了的系统效率,适合于大中功率场合。

**关键词:**转矩控制;双频逆变器;空间矢量调制;开关频率;转矩脉动;动态性能

**中图分类号:**TM343.3;TM301.2

**文献标志码:**A

## Electromagnetic torque ripple control of induction motor fed by dual frequency inverter

WANG Mingyu<sup>1</sup>, AN Shuhuai<sup>1,2</sup>, GAO Wenxiang<sup>1</sup>, WANG Lei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Qingdao Power Supply Company, Qingdao, Shandong 266002, China)

**Abstract:** Direct torque control(DTC)of space vector modulation fed by dual frequency inverter is studied in order to solve the problems of large torque, big flux ripples and inconstant switching frequency of conventional DTC in large power occasions. On the basis of conventional DTC, factors affecting flux and torque ripples are analyzed and the space voltage vector mathematical model of induction motor is deduced, which is implemented by S-function. Based on dual frequency theory, the system is supplied by cascaded inverters to decrease losses. The high frequency unit is in charge of improving the dynamic performance of the system, whose switching current is relatively low; while the low frequency unit is in charge of energy delivery, whose switching frequency is far lower than that of the high frequency unit. The simulation results illustrate that by using this program, the system has a better performance in both dynamic and static performance, and the electromagnetic torque ripple, flux ripple and switching losses are significantly reduced. Thus the system efficiency is improved and suitable for medium and large power occasions.

**Key words:** torque control; dual frequency inverter; space vector modulation; torque ripple; switching frequency; dynamic performance

收稿日期:2012-12-25

基金项目:输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室项目资助(2007DA10512711205)

作者简介:王明渝(1960-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事电力电子、电力传动等方面的研究。  
(E-mail)eeemwang@tom.com。

为了满足工业和交通快速发展的需要,对高性能电机调速系统的静态性能要求越来越高,与之对应逆变器容量及其性能要求也相对提高。随着电力电子技术以及控制技术的发展,作为高性能调速系统的重要设备,逆变器的拓扑与控制方法已成为研究热点<sup>[1-2]</sup>。将级联逆变器运用到高性能调速系统中来改善系统的动态性能引起了广大学者的兴趣,由级联逆变器供电感应电机,增大了能量等级,减小了开关损耗,提高了能量利用率,能够对电流变化快速反应<sup>[3-5]</sup>。双频思想是一种新的级联变换器控制策略,能大大降低开关损耗,提高能量等级及传递效率,改善系统的性能<sup>[6-8]</sup>。

直接转矩控制(direct torque control, DTC)是一种优秀的高性能交流调速方案,具有控制策略简单、转矩动态性能响应快、对转子参数的变化具有一定鲁棒性等优点,在高压大功率场合得以广泛应用。传统砰-砰直接转矩控制是建立在对磁链和转矩误差滞环控制基础上,并根据滞环结果查表选择基本电压矢量,由于在一个采样周期内只施加一个电压矢量,因此存在着转矩和磁链脉动大、逆变器开关频率不恒定等缺点。减小控制周期虽然能提高控制效果,但受到控制器的计算速度和功率器件的功率损耗以及开关频率的限制<sup>[9-11]</sup>。在传统制基础上,通过对滞环结果注入高频三角波提高开关管的工作频率可以减小转矩脉动,使开关频率趋于恒定<sup>[12]</sup>,而

开关频率的提高,使开关损耗也增大,降低了系统的效率。增加滞环控制器的输出等级,可以细化每个采样周期内作用的基本电压矢量,使多个电压矢量作用在一个采样周期,更精确地控制磁链的变化<sup>[13]</sup>,由于选择的电压矢量增多,使系统的控制趋于复杂。利用模糊逻辑思想、系统磁链相位角、磁链误差和转矩误差作为模糊变量,来优化电压矢量的选择,提高了转矩响应速度,有效地解决了转矩脉动问题<sup>[14]</sup>,但模糊规则的制定、隶属度函数的选取具有一定的主观性和盲目性,会对系统的控制效果造成一定负面影响。使磁链和转矩误差经过2个PI(proportional-integral, PI)调节器后通过旋转变换得到2个参考电压采用空间矢量调制,降低了转矩脉动,开关频率恒定<sup>[15]</sup>,但PI调节器参数设置对控制效果影响很大,旋转变换增加了控制的复杂性,不易实现。文中在以上研究成果的基础上,针对大中功率场合传统直接转矩控制转矩、磁链脉动大,开关频率不固定等不足,采用级联式逆变器供电的空间矢量调制的控制策略,提高了系统的能量等级,有效地减小了转矩、磁链脉动,使开关频率趋于恒定,降低了开关损耗,提高了系统的效率。

## 1 系统控制原理

双频逆变器供电的感应电动机直接转矩控制系统控制框图如图1所示。

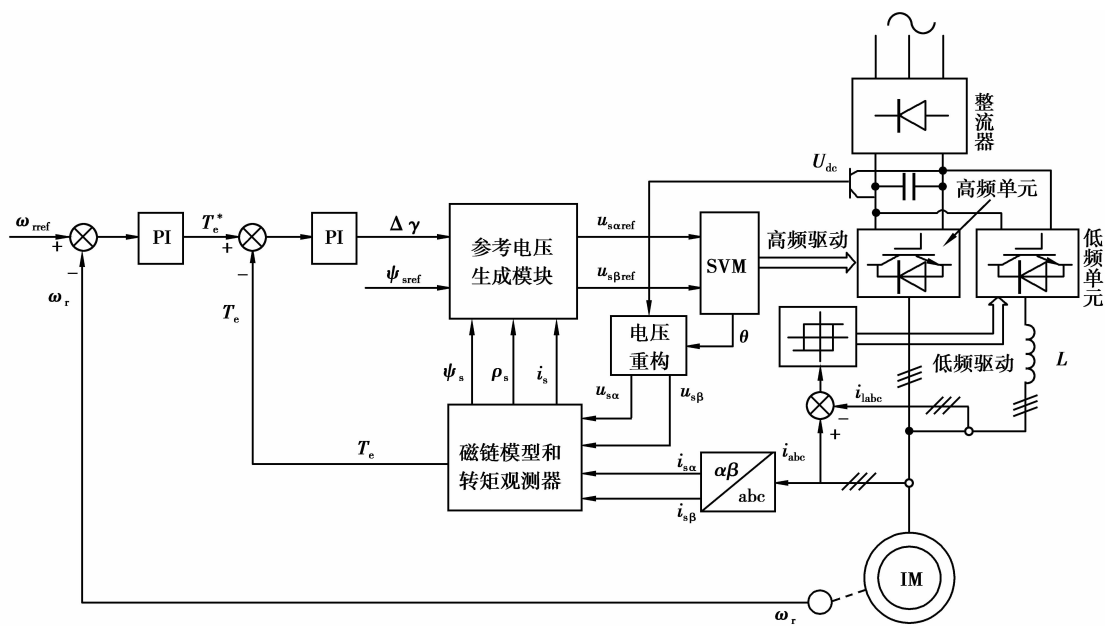


图1 双频逆变器供电的直接转矩控制框图

系统由级联式逆变器供电,级联逆变器采用双频控制思想,即一个单元工作在低频,采用电流滞环控制,跟踪输出电流,负责传递大部分功率,另一个

单元工作在高频,采用空间矢量调制,主要改善系统的动态性能。对于双频逆变器工作原理参考文献<sup>[16]</sup>,在此不再赘述。

系统中,定子磁链采用 u-i 模型,其表达式为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{sa} &= \int (u_{sa} - R_s i_{sa}) dt \\ \psi_{s\beta} &= \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) dt \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

$$|\psi_s| = \sqrt{\psi_{sa}^2 + \psi_{s\beta}^2}, \quad (2)$$

$$\rho_s = \arctan\left(\frac{\psi_{s\beta}}{\psi_{sa}}\right). \quad (3)$$

在  $\alpha\beta$  坐标系上的转矩方程为

$$\mathbf{T}_e = \frac{3}{2}n(\psi_{sa}i_{s\beta} - \psi_{s\beta}i_{sa}), \quad (4)$$

式中:  $p$  为微分算子,  $p = d/dt$ ;  $n$  为电机的极对数;  $R_s, R_r$  为定、转子电阻;  $i_{sa}, i_{s\beta}$  为定子电流在两相静止  $\alpha\beta$  坐标系下的分量;  $\psi_{sa}, \psi_{s\beta}$  为定子磁链在  $\alpha\beta$  坐标系下的分量。

图 1 中  $\omega_{\text{ref}}$  为转速参考值,  $\psi_{\text{sref}}$  为磁链参考值, 定子磁链和转矩观测器根据输入的重构电压  $u_{sa}, u_{s\beta}$  和定子电流  $i_{sa}, i_{s\beta}$  完成对电磁转矩  $\mathbf{T}_e$ 、定子磁链幅值  $\Psi_s$  和位置角  $\rho_s$  的估算; 参考电压生成模块根据输入预测负载角增量  $\Delta\gamma$ 、定子磁链参考值  $\psi_{\text{sref}}$ 、定子磁链估算值  $\Psi_s$  和位置角  $\rho_s$ , 估算所施加的电压矢量  $u_{\text{sref}}$  在  $\alpha\beta$  坐标系下的 2 个分量  $u_{\text{sa}ref}, u_{\text{s}\beta ref}$ ; SVM (space vector modulation, SVM) 模块根据输入的  $u_{\text{sa}ref}$  和  $u_{\text{s}\beta ref}$ , 进行空间矢量调制。

## 2 空间矢量调制算法

### 2.1 转矩增量分析

鼠笼式异步电机在  $\alpha\beta$  坐标系下电磁转矩方程可以表示为

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_e &= \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} \psi_r \times \psi_s = \\ & \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} |\psi_r| |\psi_s| \sin(\rho_s - \rho_r) = \\ & \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} |\psi_r| |\psi_s| \sin \gamma, \end{aligned} \quad (5)$$

式中,  $P$  为极对数,  $L_s, L_r, L_m$  分别为定子电感、转子电感以及互感,  $\Psi_s, \Psi_r$  分别为定子磁链、转子磁链,  $\rho_s, \rho_r, \gamma$  分别为定子磁链、转子磁链与  $\alpha$  轴的夹角以及负载角(转矩角)。

对式(5)求导得

$$\frac{d\mathbf{T}_e}{dt} = \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} |\psi_r| |\psi_s| \cos \gamma \frac{d\gamma}{dt}. \quad (6)$$

在一个很小的采样周期  $T_s$  内式(6)可表示为

$$\frac{\Delta\mathbf{T}_e}{T_s} = \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} |\psi_r| |\psi_s| \cos \gamma \frac{\Delta\gamma}{T_s}, \quad (7)$$

$$\text{即 } \Delta\mathbf{T}_e = \frac{3}{2}P \frac{L_m}{L_s L_r} |\psi_r| |\psi_s| \cos \gamma \Delta\gamma. \quad (8)$$

鼠笼式异步电机转子的时间常数非常大,因此在动态过程中,转子磁链变化相对于定子磁链是非常小的,可以近似认为恒值,而定子磁链是被控量,应控制其不变,因此根据式(8)可以知电磁转矩  $\mathbf{T}_e$  可以迅速地改变通过控制负载角  $\gamma$ , 对于式(8)可以通过 PI 调节器实现<sup>[17]</sup> 即(式中  $\Delta\gamma = \Delta\gamma_{k+1}$ )

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_k + k_p[\Delta\mathbf{T}_e(k) - \Delta\mathbf{T}_e(k-1)] + k_i \Delta\mathbf{T}_e(k). \quad (9)$$

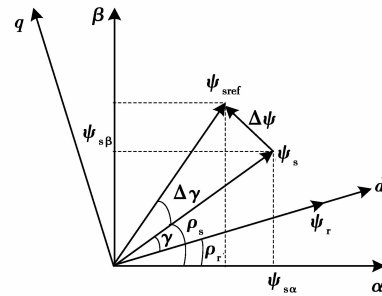


图 2 定转子磁链空间矢量关系图

### 2.2 参考电压求取

异步电机定子电压与定子磁链在  $\alpha\beta$  坐标系下关系为

$$\left. \begin{aligned} u_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{d\psi_{sa}}{dt} \\ u_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (10)$$

在一个很小的采样周期  $T_s$  内式(10)可化为

$$\begin{aligned} u_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{\Delta\psi_{sa}}{T_s} \\ u_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + \frac{\Delta\psi_{s\beta}}{T_s} \end{aligned}. \quad (11)$$

直接转矩控制中,目标是让估测磁链  $\Psi_s$  跟踪给定磁链  $\psi_{\text{sref}}$ , 因此有

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi_{sa} &= \psi_{\text{sa}ref} - \psi_{sa} \\ \Delta\psi_{s\beta} &= \psi_{\text{s}\beta ref} - \psi_{s\beta} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

由图 2 定转子磁链空间矢量关系有

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\text{sa}ref} &= \psi_{\text{sref}} \cos(\rho_s + \Delta\gamma) = \\ & \psi_{\text{sref}} (\cos \rho_s \cos \Delta\gamma - \sin \rho_s \sin \Delta\gamma) \\ \psi_{\text{s}\beta ref} &= \psi_{\text{sref}} \sin(\rho_s + \Delta\gamma) = \\ & \psi_{\text{sref}} (\sin \rho_s \cos \Delta\gamma + \cos \rho_s \sin \Delta\gamma) \end{aligned} \right\}. \quad (13)$$

由于系统采样周期非常小,且  $\Delta\gamma$  趋近于零,取近似  $\cos \Delta\gamma \approx 1, \sin \Delta\gamma \approx \Delta\gamma$ , 则式(13)化为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\text{sa}ref} &= \psi_{\text{sref}} (\cos \rho_s - \sin \rho_s \Delta\gamma) \\ \psi_{\text{s}\beta ref} &= \psi_{\text{sref}} (\sin \rho_s + \cos \rho_s \Delta\gamma) \end{aligned} \right\}. \quad (14)$$

由式(11)、(12)和(14)可得  $u_{\text{sref}}$  在  $\alpha\beta$  坐标系下的分量形式为

$$\left. \begin{aligned} u_{sa} &= R_s i_{sa} + \frac{1}{T_s} [\psi_{sref} (\cos \rho_s - \sin \rho_s \Delta\gamma) - \psi_{sa}] \\ u_{s\beta} &= R_s i_{s\beta} + \frac{1}{T_s} [\psi_{sref} (\sin \rho_s + \cos \rho_s \Delta\gamma) - \psi_{s\beta}] \end{aligned} \right\} \circ \quad (15)$$

### 2.3 空间矢量电压分配

三相逆变器中的 6 个功率开关器件可以产生 8 个基本的电压矢量,包括 6 个非零电压矢量( $u_1 \sim u_6$ )和 2 个零电压矢量( $u_0, u_7$ ),6 个非零电压矢量将整个平面分为 6 个扇区,任意给定的电压矢量便可以用它所在扇区的 2 个相邻基本电压矢量来合成。在每一个采样周期内可利用若干个基本电压矢量合成任意给定的参考电压矢量  $u_{ref}$ 。对任意的参考电压矢量  $u_{ref}$ ,当它位于由  $u_k$  和  $u_{k+1}$  组成的扇区内时,利用两个非零电压矢量  $u_k, u_{k+1}$  和 2 个零电压矢量合成参考电压矢量  $u_{ref}$ ,如图 3 所示。

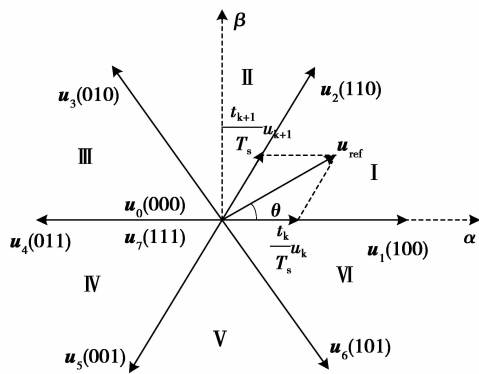


图 3 空间电压矢量表

当参考矢量  $u_{ref}$  在任一扇区时,都可以由相邻两矢量  $u_k, u_{k+1}$  以及零矢量  $u_0$  或  $u_7$  来合成,根据伏秒平衡原则有

$$T_s u_{ref} = t_k u_k + t_{k+1} u_{k+1} + t_0 u_0, \quad (16)$$

式中:  $T_s$  为系统采用周期,  $t_k, t_{k+1}, t_0$  为对应矢量电压作用的时间,根据图 3 中各个电压矢量关系可以得出

$$\left. \begin{aligned} t_k &= T_s \frac{\sqrt{3} u_{ref}}{u_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) \\ t_{k+1} &= T_s \frac{\sqrt{3} u_{ref}}{u_{dc}} \sin(\theta) \\ t_0 &= T_s - t_k - t_{k+1} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

式中  $u_{dc}$  直流母线电压。在实际应用中,为了尽量减小开关状态变化时引起的开关损耗,因此在每个扇区内都应保证每次开关切换状态时只切换一个开关器件,以 I 扇区各个开关的开关序列为例,如图 4 所示,各个扇区电压矢量作用序列总结为表 1 所示。

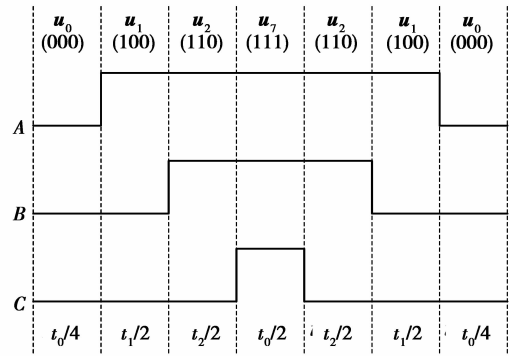


图 4 I 扇区开关序列

表 1 各扇区作用电压矢量分配序列

作用时间	扇区					
	I	II	III	IV	V	VI
$t_0/4$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$
$t_a/2$	$u_1(100)$	$u_3(010)$	$u_3(010)$	$u_5(001)$	$u_5(001)$	$u_1(100)$
$t_b/2$	$u_2(110)$	$u_2(110)$	$u_4(011)$	$u_4(011)$	$u_6(101)$	$u_6(101)$
$t_7/2$	$u_7(111)$	$u_7(111)$	$u_7(111)$	$u_7(111)$	$u_7(111)$	$u_7(111)$
$t_b/2$	$u_2(110)$	$u_2(110)$	$u_4(011)$	$u_4(011)$	$u_6(101)$	$u_6(101)$
$t_a/2$	$u_1(100)$	$u_3(010)$	$u_3(010)$	$u_5(001)$	$u_5(001)$	$u_1(100)$
$t_0/4$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$	$u_0(000)$

### 2.4 算法实现

本系统基于 Matlab/Simulink 仿真平台,用 S-函数实现空间矢量调制算法。在 S-函数中使用文本方式输入公式、方程,非常适合复杂动态系统的数学描述,并且在仿真过程中可以对仿真进行更精确的控制,简单快捷。在图 1 中,SVM 模块实现扇区判断、各扇区内矢量电压的分配,电压矢量作用时间控制,分配对应开关管驱动信号。该模块使用 S-函数实现各部分功能,其中电压矢量分配以及作用时间控制函数程序如下所示

```
function Voltagesector = secseq(x, Tt, outsec, Ts)
if x >= 0 & x < Tt(3)/4
Voltagesector = outsec(1, :);
elseif x >= (Tt(3)/4) & x < (Tt(3)/4 + Tt(1)/2)
Voltagesector = outsec(2, :);
elseif x >= (Tt(3)/4 + Tt(1)/2) & x < (Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2)
Voltagesector = outsec(3, :);
```

```

elseif x >= (Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2)
&.x < (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2)
    Voltagesector = outsec(4, :);
    elseif x >= (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2)
&.x < (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2 + Tt
(2)/2)
    Voltagesector = outsec(5, :);
    elseif x >= (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2
+ Tt(2)/2) &.x < (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/
2 + Tt(2)/2 + Tt(1)/2)
    Voltagesector = outsec(6, :);
    elseif x >= (3 * Tt(3)/4 + Tt(1)/2 + Tt(2)/2
+ Tt(2)/2 + Tt(1)/2) &.x <= Ts
    Voltagesector = outsec(7, :);
    else ;
    end

```

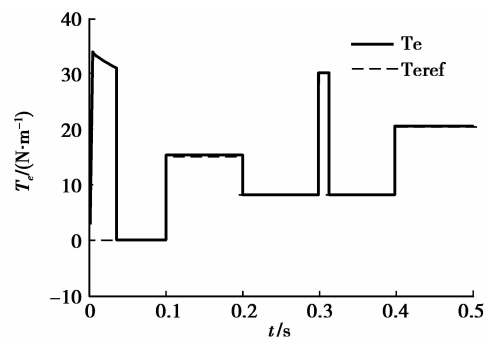
其中函数  $\text{secseq}(x, Tt, \text{outsec}, Ts)$  为电压矢量分配函数, 参数  $x$  为时间,  $Tt$  为每个扇区各个作用电压矢量根据式(17)计算的作用时间向量,  $\text{outsec}$  为根据表 1 求得的每个扇区电压作用序列,  $Ts$  为采样周期。

### 3 仿真研究

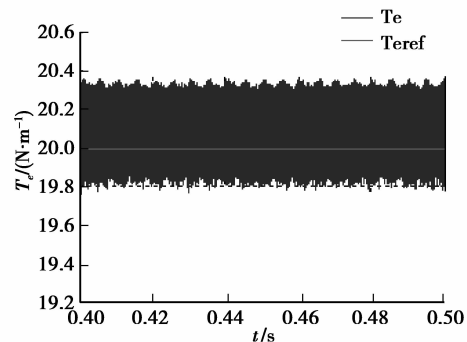
为了验证提出的双频逆变器供电的直接转矩控制系统理论分析的有效性, 根据系统的结构框图 1, 在 Matlab/Simulink 构建系统的仿真模型进行仿真分析, 感应电机的参数为: 定子电阻  $R_s = 1.405 \Omega$ , 定子漏感  $L_s = 5.839 \text{ mH}$ , 转子电阻  $R_r = 1.395 \Omega$ , 转子漏感  $L_r = 5.839 \text{ mH}$ , 互感  $L_m = 0.1722 \text{ H}$ , 转动惯量  $J = 0.0131 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 极对数  $P = 2$ 。传统直接转矩控制中, 磁链滞环宽度设置为  $0.02 \text{ Wb}$ , 转矩滞环宽度设置为  $0.2 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

#### 3.1 双频逆变器供电的调速系统仿真结果分析

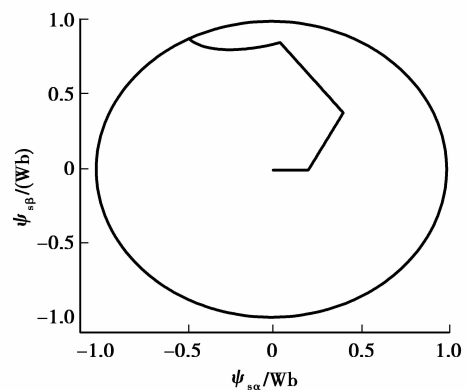
系统参考磁链  $\psi_{sref}$  为  $1 \text{ Wb}$ , 图 5 为空间矢量调制下电机响应曲线, 图 6 为传统砰-砰控制下电机响应曲线。在  $t = 0.1 \text{ s}$  时刻突然加负载, 电机负载由  $0 \text{ N} \cdot \text{m}$  阶跃为  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 在  $t = 0.2 \text{ s}$  时刻突减负载, 电机负载由  $15 \text{ N} \cdot \text{m}$  阶跃为  $8 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 在  $t = 0.4 \text{ s}$  时刻再次突加负载, 电机负载由  $8 \text{ N} \cdot \text{m}$  阶跃为  $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 对比图 5(a)、(b) 与图 6(a)、(b), 可以得出在空间调制作用下, 电磁转矩电机转矩快速跟踪了指令信号, 动态响应快, 转矩脉动小, 相比传统控制脉动减小了 70%。图 5(c) 为在改进控制下定子磁链轨迹, 其曲线光滑, 幅值稳定, 对比图 6(c) 传统控制下定子磁链, 其磁链脉动大大减小。



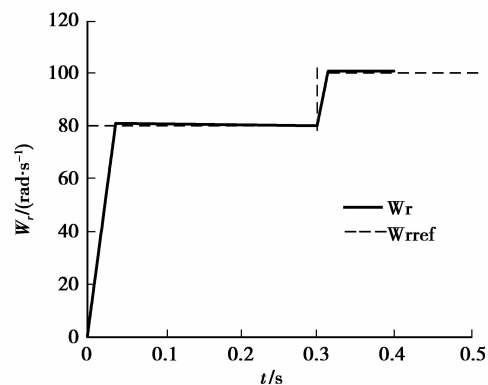
(a) 电磁转矩响应



(b) 电磁转矩局部放大

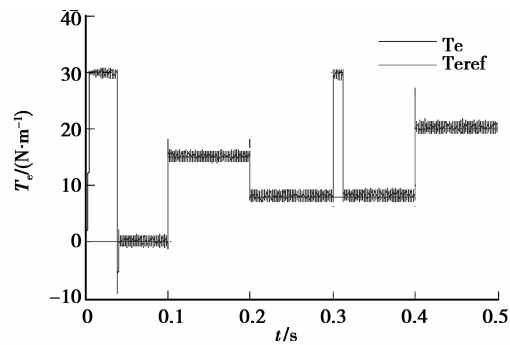


(c) 定子磁链

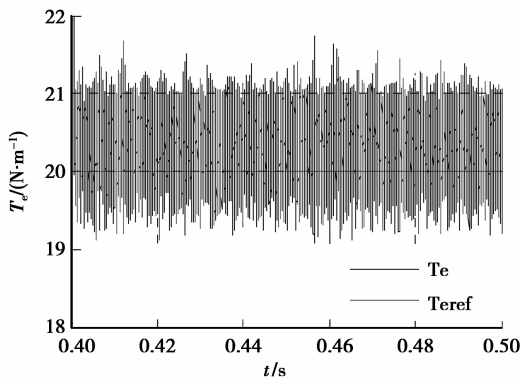


(d) 转速响应

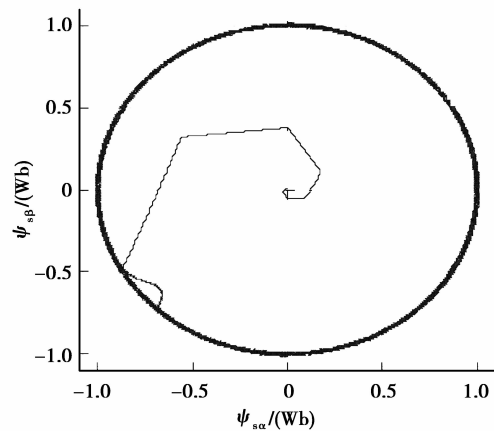
图 5 空间矢量调制电机响应波形



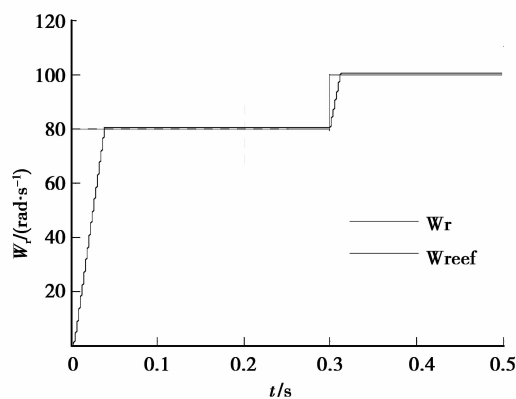
(a)电磁转矩响应



(b)电磁转矩局部放大



(c)定子磁链



(d)转速响应

图6 传统砰-砰控制电机响应波形

图5(d)为电机转速响应曲线,电机空载启动,转速给定为80 rad/s,可见电机转速在 $t=0.03$  s前后接近给定值,然后进入稳态,在 $t=0.3$  s时刻,转速给定突然由80 rad/s阶跃为100 rad/s,电机转速上升平稳,在 $t=0.31$  s前后达到给定值,进入稳态后严格跟踪给定信号。通过对比分析图5(d)中实际值与给定值的曲线可以看出,在电机负载发生变化时,转速稳态变动不大,变动误差趋于0,这说明双频逆变器供电的直接转矩控制系统具有良好的动静态性能,以及较好的鲁棒性。

### 3.2 调速系统中双频逆变器仿真结果及性能分

在调速系统中双频逆变器的仿真波形如图7~8所示。

图7为双频逆变器输出电流波形,7(a)图为高频单元电流输出波形,7(b)为低频单元电流输出波形,7(c)为总的电流输出波形,通过图7各图的对比得出,系统能量主要由低频单元通过,且低频单元电流基波含量等于双频逆变器输出电流的基波含量,而高频单元主要产生相对应的谐波含量,通过高频单元电流的修谐作用来改善低频单元电流的谐波含量,从而提高直接转矩控制系统的动态响应速度。

图8为双频逆变器A相桥臂高、低频开关电流波形,由图可以得出双频逆变器的高频开关流过的电流小于低频开关,且低频单元工作频率远远小于高频单元工作频率( $f_H \approx 8f_L$ ),因此降低了开关损耗,双频逆变器提高了能量传输的效率。适用于中、大功率场合的高性能调速系统。

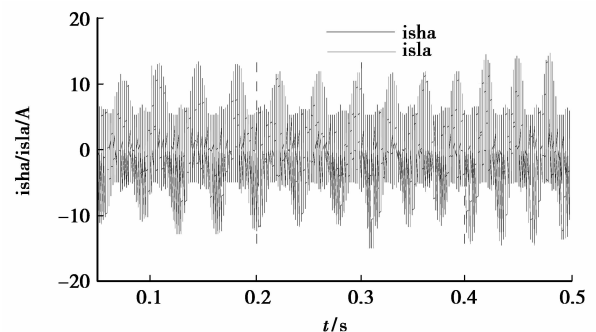


图8 A相高低频单元开关管电流波形

## 4 结论

针对传统直接转矩控制下电磁转矩脉动、磁链大,开关频率不恒定,开关损耗大、系统动态性能不理想等情况,文中研究了一种新的级联式逆变器供电的空间矢量调制的直接转矩控制系统,通过理论

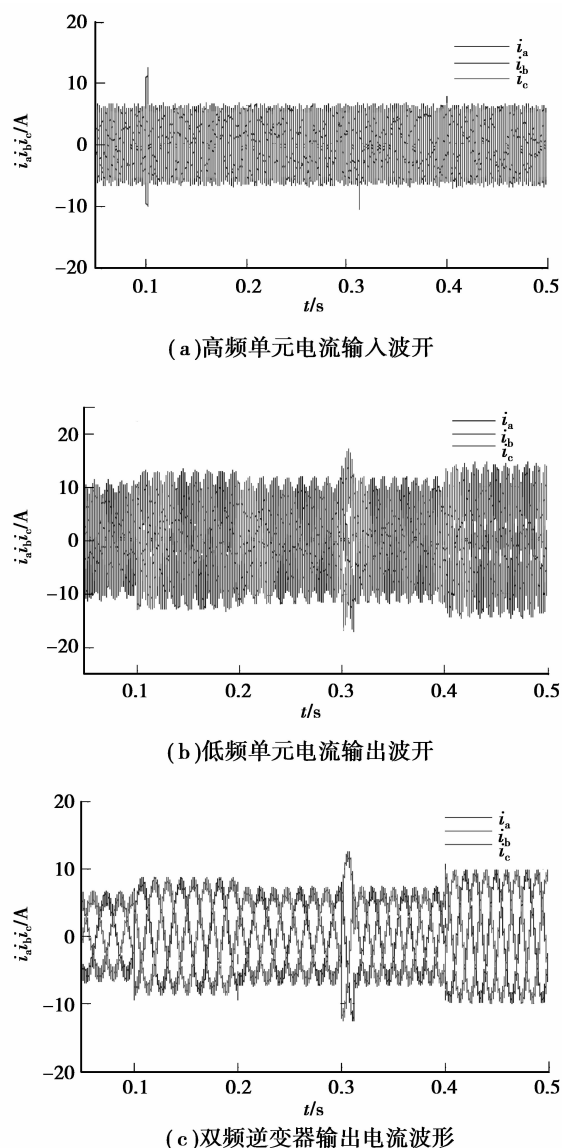


图 7 双频逆变器电流波形

分析,推导出空间矢量调制的控制算法,利用 S-函数实现控制的动态过程中,对每个扇区对应的空间电压矢量进行分配控制,最后通过仿真验证了理论分析的正确性,该系统继承了传统直接转矩控制的容易实现、不依赖于电机参数等优点,电磁转矩脉动比传统控制降低了 70%,磁链脉动也大幅度减小,开关频率趋于恒定,通过双频逆变器供电降低了开损耗,提高了系统的动静态性能,适用于中、高功率场合高性能调速系统。

#### 参考文献:

- [1] 李永东. 高性能大容量交流电机调速技术的现状及展望[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 1-10.  
LI Yongdong. High performance and high power AC

motor variable speed drives-status and trends [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(2): 1-10.

- [2] 崔桂梅, 穆志纯, 郝智红. 多电机拖动变频调速系统再生能源调度控制[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 24-26.  
CUI Guimei, MU Zhichun, HAO Zhihong. Scheduling control of the regenerative energy produced in speed control system of frequency conversion by multimotor driving[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 24-26.
- [3] Singh G K, Singh D K P, Nam K, et al. A simple indirect field-oriented control scheme for multiconverter-fed induction motor [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(6): 1653-1659.
- [4] Yao Z L, Xiao L, Yan Y G. Control strategy for series and parallel output dual-buck half bridge inverters based on DSP control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 434-444.
- [5] Vasarhelyi J, Imecs M, Incze I I, et al. Improved starting of the induction motor fed by a run-time reconfigurable frequency converter [C] // Proceedings of the International Conference on Intelligent Engineering Systems, June 26-28, 2006, London, England. Piscataway: IEEE Press, 2006: 74-79.
- [6] 周维维, 杜雄, 付志红, 等. 双频 Buck 变换器[J]. 电源世界, 2006(10): 1-5.  
DU Xiong, ZHOU Luwei, FU Zhihong, et al. The Buck converter with double frequency [J]. The World of Power Supply, 2006(10): 1-5.
- [7] 杜雄, 周维维, 侯世英, 等. 一类基本双频 DC-DC 变换器[J]. 电工技术学报, 2006, 21(5): 24-28.  
DU Xiong, ZHOU Luwei, HOU Shiying, et al. A list of basic DC-DC converters with double-frequency [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(5): 24-28.
- [8] 王明渝, 向涛峰, 李玉军. 基于 MATLAB/SIMULINK 的双频逆变器的仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1): 105-109.  
WANG Mingyu, XIANG Taofeng, LI Yujun. Simulation of double-frequency inverter based on MATLAB/SIMULINK [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(1): 105-109.
- [9] Tripathi A, Khambadkone A M, Panda S K. Torque ripple analysis and dynamic performance of a space vector modulation based control method for AC-drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(2): 485-492.
- [10] Correa P, Pacas M, Rodriguez J. Predictive torque control for inverter-fed induction machines [J]. IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 1073-1079.
- [11] Buja G S, Kazmierkowski M P. Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors: a survey [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 744-757.
- [12] Idris N R N, Ling T C, Silva E R D. A new torque and flux controllers for direct torque control of induction machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2006, 42(6): 1358-1366.
- [13] Lai Y S, Wang W K, Chen Y C. Novel switching techniques for reducing the speed ripple of AC drives with direct torque control [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 768-775.
- [14] Lai Y S, Lin J C. New hybrid fuzzy controller for direct torque control induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(5): 1211-1219.
- [15] 魏欣, 陈大跃, 赵春宇. 基于空间矢量调制的异步电机直接转矩控制 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(2): 405-408, 415.
- WEI Xin, CHEN Dayue, ZHAO Chunyu. Direct torque control of induction motors based on space vector modulation [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(2): 405-408, 415.
- [16] 安树怀, 王明渝, 李翀. 三相桥式双频逆变器仿真研究 [C]// 第四届中国高校电力电子与电力传动学术年会, 4月23日, 2010, 重庆, 中国. 重庆: 重庆大学出版社, 2010: 57-61.
- [17] 黄文新, 胡育文. 基于空间矢量调制策略 270V 高压直流笼型异步发电系统 [J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 22-28.
- HUANG Wenxin, HU Yuwen. Cage induction generator used in 270V DC power system generator system based on space vector modulation strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 22-28.

(编辑 詹燕平)

~~~~~

(上接第 64 页)

- [7] [5] Li Y S, Chen Z W, Zhan J M. Double-diffusive Marangoni convection in a rectangular cavity; transition to chaos [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2010, 53: 5223-5231.
- [6] Chen Z W, Li Y S, Zhan J M. Double-diffusive Marangoni convection in a rectangular cavity: Onset of convection [J]. Phys Fluids, 2010, 22: 0341006.
- [7] Zhan J M, Chen Z W, Li Y S, et al. Three-dimensional double-diffusive Marangoni convection in a cubic cavity with horizontal temperature and concentration gradients [J]. Phys Rev 2010, E 82: 066305.
- [8] Crll A, Mitric A, Aniol O, et al. Solutocapillary convection in germanium-silicon melts [J]. Cryst Res Technol, 2009, 44(10): 1101-1108.
- [9] Cormack D E, Leal L G. Natural convection in a shallow cavity with differentially heated end walls. Part I. Asymptotic theory [J]. J. Fluid Mech, 1974, 65(2): 209-229.
- [10] Merker G P, Leal L G. Natural convection in a shallow annular cavity [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1979, 23(5): 677-686.
- [11] Leppinen D M. Natural convection in a shallow cylindrical annuli [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2002, 45(14): 2967-2981.
- [12] Li Y R, Zhao X X, Wu S Y, et al. Asymptotic solution of thermocapillary convection in a thin annular pool of silicon melt [J]. Phys Fluids, 2008, 20: 082107.
- [13] 李友荣, 欧阳玉清, 王双成, 等. 环形浅液池内浮力-热毛细对流的渐近解 [J]. 工程热物理学报, 2010, 31(11): 1921-1924.
- Li Yourong, Ouyang Yuqing, Wang Shuangcheng, et al. Asymptotic solution of buoyant-Thermocapillary convection in a thin annular pool [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2010, 31(11): 1921-1924.
- [14] Li Y R, Wang S C, Wu S Y, et al. Asymptotic solution of thermocapillary convection in thin annular two-layer system with upper free surface [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 2009, 52: 4769 - 4777.
- [15] Li Y R, Wang S C, Wu S Y, et al. Asymptotic solution of thermocapillary convection in two immiscible liquid layers in a shallow annular cavity [J]. Sci China Tech Sci, 2010, 53(6): 1655-1665.
- [16] Li Y R, Wang S C, Wu S Y, et al. Asymptotic solution of thermocapillary convection in a differentially heated thin annular two-layer pool [J]. Microgravity Sci. Technol, 2010, 22(2): 193-203.

(编辑 陈移峰)