

文章编号:1672-6413(2016)02-0192-03

# 三相永磁同步电机直接转矩控制技术研究

郭强, 李强

(中北大学机电工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 电动机控制的核心是实现对其电磁转矩的控制, 其控制方法有矢量控制和直接转矩控制等, 相比矢量控制而言, 直接转矩控制省去了磁场定向、矢量变换和电流控制等复杂环节, 具有优良的动静态性能。介绍了直接转矩控制技术的原理, 并在 MATLAB/Simulink 中建立了三相永磁同步电机的直接转矩控制模型, 通过对模型仿真结果的分析, 可以看到直接转矩控制具有良好的转矩控制效果和快速响应能力。

**关键词:** 永磁同步电机; 直接转矩控制; 研究

**中图分类号:** TM351

**文献标识码:** A

## 0 引言

直接转矩控制(DTC)法于20世纪80年代中期由德国人提出, 直接转矩控制系统具有结构简单、转矩动态响应快、调速性能优良等优点, 并在电机控制中取得了快速的发展, 尤其是在永磁同步电机(PMSM)中的发展更体现出直接转矩控制诸多的优良特性, 比如功率因素更高、更节省电能、启动转矩与最大转矩倍数更大等, 所以对永磁同步电机直接转矩控制技术的研究具有非常重要的实际意义<sup>[1]</sup>。

## 1 直接转矩控制原理

以面装式永磁同步电机为例来说明直接转矩控制原理。在面装式 PMSM 中, 存在着 3 个磁场: ①永磁体产生的励磁磁场, 称为转子磁场  $\Psi_r$ ; ②定子电流  $i_s$  产生的电枢磁场  $L_s i_s$ ; ③由转子磁场和电枢磁场合成的定子磁场  $\Psi_s$ 。图 1 为面装式 PMSM 中的定子电流和磁链矢量图。

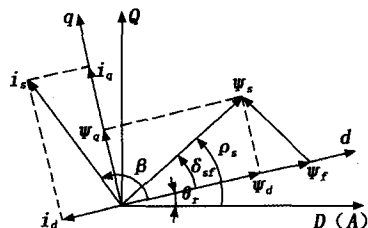


图1 面装式 PMSM 的定子电流和磁链矢量图

图 1 中,  $D(A)-Q$  为两相静止轴系,  $d-q$  为两相旋转轴系,  $\theta_r$  为  $D(A)-Q$  轴系与  $d-q$  轴系的夹角,  $\Psi_s$  为定子磁场,  $\Psi_d$  和  $\Psi_q$  为  $\Psi_s$  在  $d-q$  轴系中  $d$  轴和  $q$  轴的分量,  $i_s$  为定子电流,  $i_d$  和  $i_q$  为  $i_s$  在  $d-q$  轴系中  $d$  轴和  $q$  轴的分量,  $\delta_{sf}$  为负载角,  $\rho_s$  为空间相位角,  $\beta$  为定子电流  $i_s$  和  $d$  轴的夹角。

电磁转矩的生成本质上是两个磁场相互作用的结

果, 假如将电磁转矩看成是转子磁场  $\Psi_r$  和定子磁场  $\Psi_s$  相互作用的结果, 则电磁转矩可以表示为:

$$T_e = p_0 \frac{1}{L_s} \Psi_r \times \Psi_s \quad (1)$$

其中:  $p_0$  为极对数;  $L_s$  为定子电感。

由式(1)可得:

$$T_e = p_0 \frac{1}{L_s} \Psi_r \Psi_s \sin \delta_{sf} \quad (2)$$

式(2)中, 转子磁链矢量幅值  $\Psi_r$  不变, 控制定子磁链矢量  $\Psi_s$  的幅值不变, 就可以通过控制负载角  $\delta_{sf}$  来控制电磁转矩, 这就是 PMSM 直接转矩控制的基本原理。

## 2 基于电压模型的磁链和转矩估计

### 2.1 滞环比较控制

由直接转矩控制原理可知, 直接转矩控制以定子磁链和负载角作为控制变量, 这两个变量的控制可以通过滞环比较器来实现。滞环比较器的原理是通过选择合理的开关电压矢量来控制逆变器逆变桥的开关, 从而通过控制定子电压来控制电磁转矩。滞环比较器和电压源逆变器相当于一个高增量的 P 调节器, 能够使得实际电流快速跟踪参考电流, 消除电流跟踪过程中的延迟和滞后<sup>[2]</sup>。图 2 为定子磁链矢量运行轨迹的控制图。

图 2 中,  $u_{s1}, u_{s2}, u_{s3}, u_{s4}, u_{s5}, u_{s6}$  为空间 6 个平均分布的电压矢量, 1、2、3、4、5、6 为 6 个电压矢量对应的扇区, 在每个扇区中可以选择合适的开关电压矢量来控制定子磁链  $\Psi_s$  的幅值和旋转速度<sup>[3]</sup>。例如, 当定子磁链矢量  $\Psi_s$  处于区间 1 时, 在  $G_2$  点  $|\Psi_s|$  达到了磁链滞环比较器的下限值, 可以选择  $u_{s2}$  或  $u_{s6}$  来增加  $|\Psi_s|$ ; 在  $G_1$  点  $|\Psi_s|$  达到了磁链滞环比较器的上限值, 可以选择  $u_{s3}$  或  $u_{s5}$  来减小  $|\Psi_s|$ 。表 1 为开关电压矢量选择

表,其中的  $\Delta\Psi$  和  $\Delta T$  为控制变量,其值由磁链和滞环比较器得出; $\Delta\Psi=1$  表示应使定子磁链矢量  $\Psi_s$  增加, $\Delta\Psi=-1$  表示应使定子磁链矢量  $\Psi_s$  减小; $\Delta T=1$  表示应使电磁转矩  $T_e$  增加, $\Delta T=-1$  表示应使电磁转矩减小。

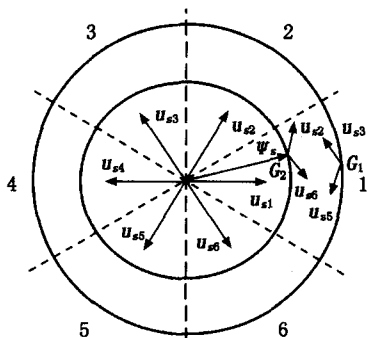


图2 定子磁链矢量运行轨迹控制图

表1 开关电压矢量选择表

$\Delta\Psi$	$\Delta T$	1	2	3	4	5	6
1	1	$u_{s2}$	$u_{s3}$	$u_{s4}$	$u_{s5}$	$u_{s6}$	$u_{s1}$
	-1	$u_{s6}$	$u_{s1}$	$u_{s2}$	$u_{s3}$	$u_{s4}$	$u_{s5}$
-1	1	$u_{s3}$	$u_{s4}$	$u_{s5}$	$u_{s6}$	$u_{s1}$	$u_{s2}$
	-1	$u_{s5}$	$u_{s6}$	$u_{s1}$	$u_{s2}$	$u_{s3}$	$u_{s4}$

## 2.2 PMSM 的数学模型

可以用定子电压矢量方程估计定子磁链矢量  $\Psi_s$ ,

即有:

$$\Psi_s = \int (u_s - R_s i_s) dt \quad (3)$$

其中:  $u_s$  为定子电压;  $R_s$  为定子电阻;  $i_s$  为定子电流。

定子磁链矢量  $\Psi_s$  的幅值和空间相位角  $\rho_s$  由其在  $D-Q$  坐标系中的两个分量  $\Psi_D$  和  $\Psi_Q$  来估计,计算公式如下,即:

$$\Psi_D = \int (u_D - R_s i_D) dt \quad (4)$$

$$\Psi_Q = \int (u_Q - R_s i_Q) dt \quad (5)$$

$$|\Psi_s| = \sqrt{\Psi_D^2 + \Psi_Q^2} \quad (6)$$

$$\rho_s = \arcsin \frac{\Psi_D}{|\Psi_s|} \quad (7)$$

其中:  $u_D$ 、 $u_Q$  为定子电压在两相静止  $D-Q$  轴系中的  $D$  轴与  $Q$  轴电压分量;  $i_D$ 、 $i_Q$  为定子电流在两相静止  $D-Q$  轴系中的  $D$  轴与  $Q$  轴电流分量。

电磁转矩估计式为:

$$T_e = p_0 (\Psi_D i_Q - \Psi_Q i_D) \quad (8)$$

其中:  $\Psi_D$  和  $\Psi_Q$  由式(4)、式(5)求得,  $i_D$ 、 $i_Q$  为实测值。

## 3 控制系统仿真

### 3.1 控制系统模型搭建

在 MATLAB 2012 环境下,利用其内置 Simulink 模块工具,搭建 PMSM 的直接转矩控制系统仿真模型,整体框图如图3所示。

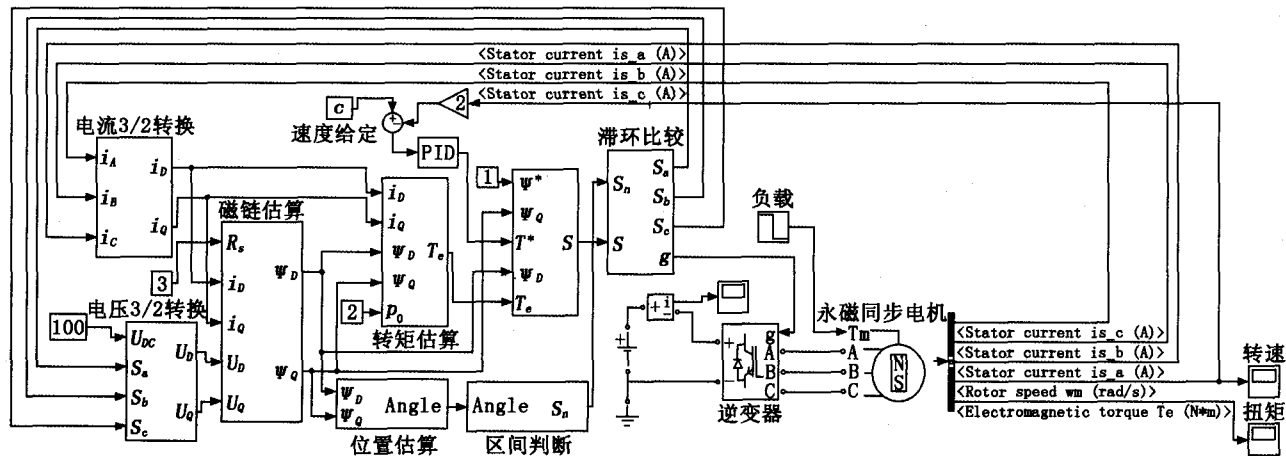


图3 基于 Simulink 的 PMSM-DTC 系统仿真模型

图3中,  $i_A$ 、 $i_B$  和  $i_C$  为定子三相电流,  $U_{DC}$  为供给逆变器的直流电压,  $\Psi^*$  为磁链给定,  $T^*$  为参考转矩,  $S_a$ 、 $S_b$  和  $S_c$  为开关序列,  $S$  为滞环比较器控制逻辑输出,  $Angle$  为定子磁链空间位置角度,  $S_n$  为扇区号,  $g$  为脉冲序列。

该模型总体分为电动机模块和控制系统模块两大部分,利用模块化思想,将仿真模型分解为以下8个小模块:电流和电压坐标转换模块;磁链估算模块;转矩估算模块;位置估算模块;区间判断模块;滞环比较模块;脉冲模块;电动机参数测量模块。其中脉冲模块通过查表法来产生脉冲序列,控制绝缘栅双极型晶体管 IGBT 的通断,查表法的作用为在表1中选择合适的开关电压矢量来控制定子磁链矢量的幅值和旋转速度,从而控制电磁转矩。

下面列出了几个重要模块的结构框图,图4为定子磁链估算模块结构框图,图5为转矩估算模块结构

框图,图6为位置估算模块结构框图,图7为区间判断模块结构框图,图8为滞环比较模块结构框图,图9为脉冲模块结构框图。

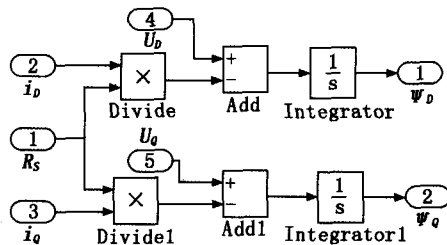


图4 定子磁链估算模块结构框图

### 3.2 仿真结果与分析

PMSM 的参数设定为:直、交轴等效电感  $L_d = L_q = 0.026$  H,定子电阻  $R_s = 4.2$   $\Omega$ ,转动惯量  $J = 0.0008$   $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ,转子磁链  $\Psi_f = 0.175$  Wb,极对数  $p_0 =$

2,黏滞系数  $B=0$ ,转矩滞环范围设为  $[-0.05, 0.05]$ 。磁链滞环范围为  $[-0.005, 0.005]$ 。系统的转速、转矩和磁链轨迹分别如图 10、图 11 和图 12 所示。

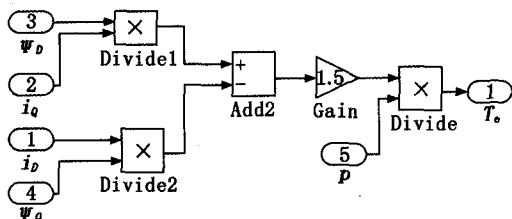


图 5 转矩估算模块结构框图

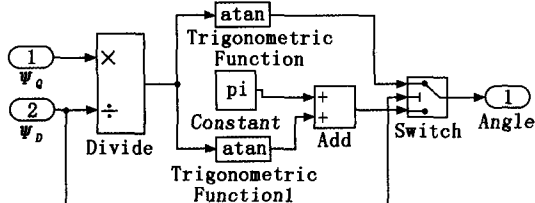


图 6 位置估算模块结构框图

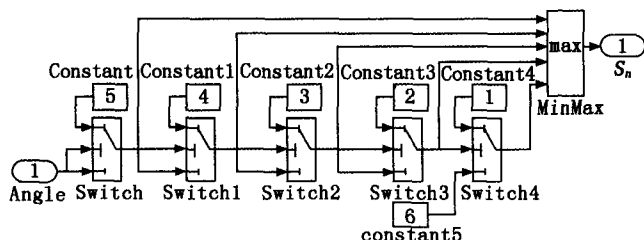


图 7 区间判断模块结构框图

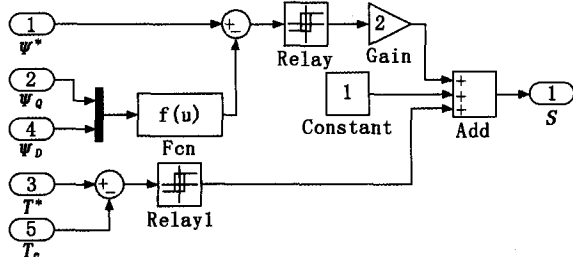


图 8 滞环比较模块结构框图

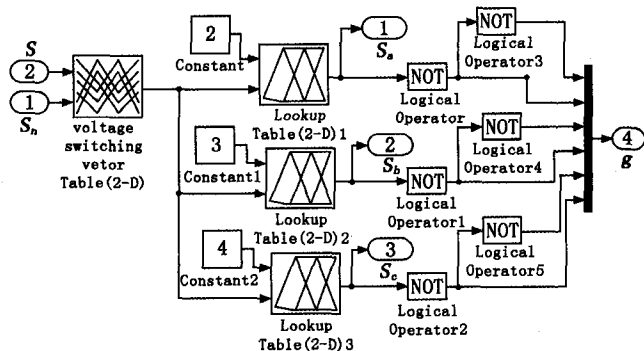


图 9 脉冲模块结构框图

由仿真曲线可以看出,在参考转速为  $80 \text{ rad/s}$  时,系统响应快速平稳,仅用时  $0.01 \text{ s}$ ,在此阶段系统的转矩恒定为  $30 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,定子磁链轨迹近似为圆形,满足磁链幅值不变的控制要求,由此可见基于 PMSM 的直接转矩控制系统结构简单并且具有优良的动静态调速性能。

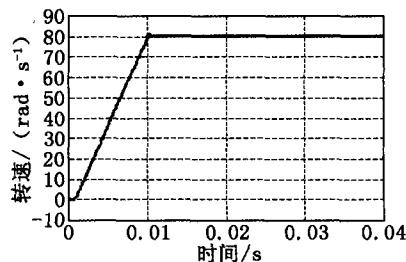


图 10 转速响应曲线

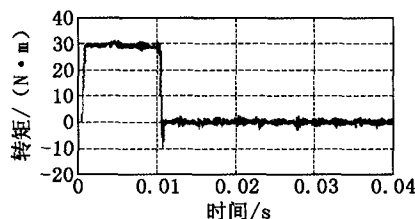


图 11 转矩响应曲线

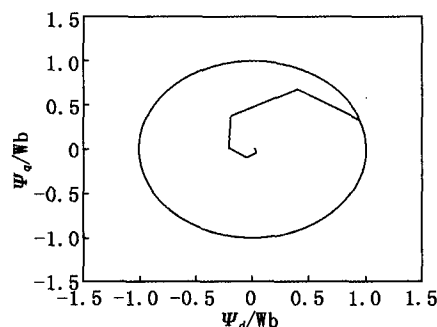


图 12 定子磁链响应曲线

#### 4 结束语

本文对三相永磁同步电机的直接转矩控制原理和实现方法进行了详细介绍,利用磁链估算和滞环比较等方式来实现对 PMSM 的控制,最后在 MATLAB/Simulink 环境下对三相交流永磁同步电机的直接转矩控制方法进行了建模仿真,通过查表的方法实现定子电压矢量的选择,完成对 PMSM 的控制。仿真结果表明 PMSM 的直接转矩控制方法具有优良的动静态响应特性,能够完成对 PMSM 的良好控制,并且实现方法简单,具有重要的工程实践价值。

#### 参考文献:

- [1] 王成元. 现代电机控制技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2014.
- [2] 万芳瑛. 电机、拖动与控制[M]. 北京:北京大学出版社, 2013.
- [3] 汤蕴缪. 电机磁场的分析与计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.

## Direct Torque Control Technology of Three-phase Permanent Magnet Synchronous Motor

GUO Qiang, LI Qiang

(School of Mechatronic Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

**Abstract:** The core of the motor control is to control the electromagnetic torque. The principle of direct torque control(DTC) is introduced in this paper, and the model of three-phase permanent magnet synchronous motor DTC is built in MATLAB/Simulink. The result of the simulated analysis shows that the direct torque control has good torque control effect and quick response ability.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; direct torque control; study