

基于 d-q 模型的感应电动机制动仿真及分析

屈 鲁, 谢 卫, 张贻旭, 卢颖娟
(上海海事大学, 物流工程学院, 上海 200135)

摘 要: 建立三相感应电动机在 d-q 坐标系下的动态数学模型, 并分析三相电压源型逆变器的空间矢量脉宽调制(SVPWM)技术。在 MATLAB/SIMULINK 环境下, 构建 SVPWM 电压源型逆变器供电的三相感应电动机的仿真模型, 分别进行三相感应电动机能耗制动、反接制动和回馈制动的动态仿真, 并分析这三种制动方式的特点, 为电力传动系统的设计提供理论依据。

关键词: 感应电动机; d-q 模型; 制动; 动态仿真; SVPWM

0 引言

感应电动机因其结构简单、价格便宜、维护方便, 在生产和生活中得到了广泛的应用。电机制动是电机控制中经常遇到的问题, 一般电机制动会出现在两种不同的场合, 一是为了达到迅速停车的目的, 以各种方法使电机旋转磁场的旋转方向和转子旋转方向相反, 从而产生一个电磁制动转矩; 另一是在某些场合, 当转子转速超过旋转磁场转速时, 电机也处于制动状态。电机制动方式一般分为: 能耗制动, 反接制动及回馈制动^[1,2]。该文主要在 MATLAB/SIMULINK 环境下进行三相感应电动机传动系统的建模及制动仿真研究, 为三相感应电动机设计及运行提供必要的理论依据。

1 三相感应电动机的数学模型

由于三相感应电动机的动态数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统, 所以利用 MATLAB/SIMULINK 进行电机系统仿真时, 最为关键的是建立一个便于仿真的数学模型。笔者在 d-q 坐标系下, 通过坐标变换对电机模型进行降阶、化简, 由此建立一个便于仿真的由电压源型逆变器供电的三相感应电动机的动态数学模型。

1.1 磁链方程

三相感应电动机在 d-q 坐标系下的磁链方程为

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \Psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式中, L_s 是定子等效两相绕组的自感; L_r 是转子等效两相绕组的自感; L_m 是定子与转子同轴等效绕组间的互感。

1.2 电压方程

三相感应电动机在 d-q 坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p \Psi_{sd} - \omega_{dqs} \Psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p \Psi_{sq} + \omega_{dqs} \Psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p \Psi_{rd} - \omega_{dqr} \Psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p \Psi_{rq} + \omega_{dqr} \Psi_{rd} \end{cases} \quad (2)$$

式中, p 是微分算子; ω_{dqs} 是 d-q 坐标系相对于定子的角转速; ω_{dqr} 是 d-q 坐标系相对于转子的角转速。

1.3 转矩方程与运动方程

三相感应电动机在 d-q 坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3)$$

式中, n_p 为电机极对数。

三相感应电动机在 d-q 坐标系下的转子运动方程为

$$T_e = T_L + \frac{J}{n_p} \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中, T_L 是负载转矩; ω 是转子角速度。

2 空间矢量脉宽调制技术

三相感应电动机需要输入三相正弦电流,其最终目的是为了在定、转子之间的气隙空间形成圆形旋转磁场,从而产生恒定的电磁转矩。由此可以按照跟踪圆形旋转磁场的原则来控制逆变器的工作,这称之为磁链跟踪控制,也称为空间矢量脉宽调制(SVPWM)^[3]。

2.1 基本电压空间矢量及扇区的划分

根据逆变器的工作原理可以知道,在采用三相逆变器对感应电动机供电时,逆变桥共有 8 种开关状态,若将逆变器的 8 种开关状态用电压空间矢量来表示,则形成 8 个基本的电压空间矢量,其中 6 个非零矢量,2 个零矢量,基本电压空间矢量与扇区分布如图 1 所示。

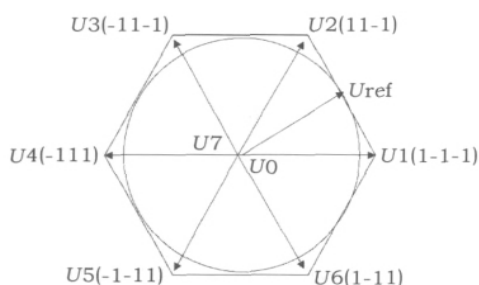


图 1 基本电压空间矢量及扇区示意图

2.2 SVPWM 的实现

SVPWM 的实现首先是根据参考矢量所属的扇区,选择参与矢量合成的基本空间矢量,然后计算每个空间矢量的作用时间,最后确定开关器件的切换时刻。

2.2.1 选择参与矢量合成的基本空间矢量

SVPWM 线性组合控制策略的目的是使参考合成电压矢量的轨迹逼近圆形。要对合成电压矢量进行控制,则首先应确定合成电压矢量所在的扇区,从而选择参与矢量合成的基本电压空间矢量。

设定子三相相电压进行合成所得电压矢量为

$$U_{\text{ref}} = U_{\alpha} + jU_{\beta} \quad (5)$$

结合矢量图几何关系分析,可以判断出合成电压矢量 U_{ref} 落在第 X 扇区的充分必要条件,如表 1 所示。

表 1 合成电压矢量落在第 X 扇区的充要条件

扇区	合成矢量落在第 X 扇区必要条件
I	$U_{\alpha} > 0, U_{\beta} > 0$ 且 $U_{\beta}/U_{\alpha} < \sqrt{3}$
II	$U_{\alpha} > 0$ 且 $U_{\beta}/ U_{\alpha} > \sqrt{3}$
III	$U_{\alpha} < 0, U_{\beta} > 0$ 且 $-U_{\beta}/U_{\alpha} < \sqrt{3}$
IV	$U_{\alpha} < 0, U_{\beta} < 0$ 且 $U_{\beta}/U_{\alpha} < \sqrt{3}$
V	$U_{\beta} < 0$ 且 $-U_{\beta}/ U_{\alpha} > \sqrt{3}$
VI	$U_{\alpha} > 0, U_{\beta} < 0$ 且 $-U_{\beta}/U_{\alpha} < \sqrt{3}$

若进一步分析以上条件,可以看出参考电压矢量所在的扇区 X 完全由 3 个式子决定,因此可令

$$\begin{cases} X_0 = U_{\beta} \\ Y_0 = \frac{\sqrt{3}U_{\alpha}}{2} - \frac{U_{\beta}}{2} \\ Z_0 = -\frac{\sqrt{3}U_{\alpha}}{2} - \frac{U_{\beta}}{2} \end{cases} \quad (6)$$

再用下式计算 N

$$N = \text{sign}(X_0) + 2\text{sign}(Y_0) + 4\text{sign}(Z_0) \quad (7)$$

式中, $\text{sign}(x)$ 是符号函数。然后,根据 N 值即可确定扇区号,如表 2 所示。

表 2 扇区号与 N 的对应关系

N	3	1	5	4	6	2
扇区	I	II	III	IV	V	VI

2.2.2 计算空间矢量的作用时间

确定好参与矢量合成的基本电压空间矢量之后,便可分别计算各扇区内基本电压空间矢量的作用时间,从而制定各开关器件的通断顺序及通断时刻。现做如下定义

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}U_{\beta}T_s}{U_d} \\ Y = \frac{(3U_{\alpha} + \sqrt{3}U_{\beta})T_s}{2U_d} \\ Z = \frac{(-3U_{\alpha} + \sqrt{3}U_{\beta})T_s}{2U_d} \end{cases} \quad (8)$$

各扇区电压矢量的作用时间如表 3 所示。

表 3 各扇区电压矢量的作用时间

扇区	I	II	III	IV	V	VI
T_d	$-Z$	Y	X	Z	$-Y$	$-X$
T_q	X	Z	$-Y$	$-X$	$-Z$	Y

表中 T_d 、 T_q 分别代表各扇区相邻电压矢量的作用时间。

2.2.3 确定开关器件的开关时刻

以上得到了各扇区基本电流矢量的作用时间, 由于基本电流矢量是对应于逆变器基本开关状态的, 从而也就得到了各开关器件处于导通和关断状态的时间, 令

$$\begin{cases} T_a = \frac{1}{4}(T_s - T_d - T_q) \\ T_b = T_a + \frac{T_d}{2} \\ T_c = T_b + \frac{T_q}{2} \end{cases} \quad (9)$$

经过上式计算就可得到 SVPWM 的参考调制信号, 最后可根据扇区确定电压空间矢量的切换点 T_{cmA} , T_{cmB} , T_{cmC} , 如表 4 所示。

表 4 开关器件的开关时刻

扇区	I	II	III	IV	V	VI
T_{cmA}	T_a	T_b	T_c	T_c	T_b	T_a
T_{cmB}	T_b	T_a	T_a	T_b	T_c	T_c
T_{cmC}	T_c	T_c	T_b	T_a	T_a	T_b

将采样周期作为三角波周期 T (此处的三角波斜率为 1, 表达的意义是时间), 与切换点进行比较, 从而调制出 SVPWM 波形。

3 MATLAB 建模及仿真

3.1 SVPWM 电压源型逆变器的建模

按照上述 SVPWM 原理, 在 SIMULINK 环境下建立其仿真模型, 并用其控制三相电压源型逆变器。将 SVPWM 模块与三相电压源型逆变器模块一起进行封装, 如图 2 所示, 形成一个 5 输入 / 3 输出的 SVM-VSI 模块, 以便于制动仿真时使用。

3.2 基于 d-q 模型的三相感应电动机建模

三相感应电动机在 d-q 坐标系下的仿真模型分别由定子模型、转子模型、磁链模型及转矩模型 4 个模块组成。由定子电压方程

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p \Psi_{sd} - \omega_{dqs} \Psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p \Psi_{sq} + \omega_{dqs} \Psi_{sd} \end{cases} \quad (10)$$

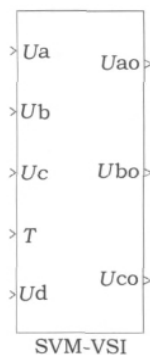


图 2 SVPWM 电压源型逆变器仿真模型的封装

可得

$$\begin{cases} p \Psi_{sd} = u_{sd} - R_s i_{sd} + \omega_{dqs} \Psi_{sq} \\ p \Psi_{sq} = u_{sq} - R_s i_{sq} - \omega_{dqs} \Psi_{sd} \end{cases} \quad (11)$$

上式构成定子模型。由转子电压方程

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + p \Psi_{rd} - \omega_{dqr} \Psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p \Psi_{rq} + \omega_{dqr} \Psi_{rd} \end{cases} \quad (12)$$

可得

$$\begin{cases} p \Psi_{rd} = u_{rd} - R_r i_{rd} + \omega_{dqr} \Psi_{rq} \\ p \Psi_{rq} = u_{rq} - R_r i_{rq} - \omega_{dqr} \Psi_{rd} \end{cases} \quad (13)$$

上式构成转子模型。由磁链方程

$$\begin{cases} \Psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \Psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \Psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \Psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (14)$$

可得

$$\begin{cases} i_{rd} = \frac{\Psi_{sd} - L_s i_{sd}}{L_m} \\ i_{sd} = \frac{\Psi_{rd} - L_r i_{rd}}{L_m} \\ i_{rq} = \frac{\Psi_{sq} - L_s i_{sq}}{L_m} \\ i_{sq} = \frac{\Psi_{rq} - L_r i_{rq}}{L_m} \end{cases} \quad (15)$$

上式构成磁链模型。

由电磁转矩方程, 即式 (3) 构成转矩模型。

在 MATLAB/SIMULINK 环境下, 根据式 (11)、式 (13)、式 (15) 和式 (3), 首先分别构建 4 个子模型, 然后将 4 个子模型组合起来即为三相感应电动机模型, 其封装图如图 3 所示。

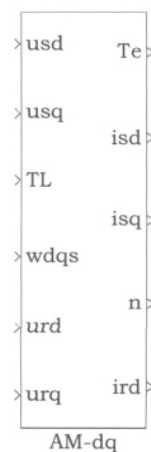


图3 三相感应电动机仿真模型的封装

3.3 三相感应电动机制动仿真

下面针对 SVPWM 电压源型逆变器供电的三相感应电动机传动系统,进行制动仿真研究,其中 SVPWM 电压源型逆变器使用如图 2 所示的 SVM - VSI 模块,三相感应电动机使用如图 3 所示的 AM - dq 模块。

三相感应电动机额定数据如下^[4]:

$$\begin{aligned} n_p &= 2, & f_1 &= 50 \text{ Hz}, \\ R_s &= 4.26 \, \Omega, & R_r &= 3.24 \, \Omega, \\ L_s &= 0.666 \, \Omega, & L_r &= 0.670 \, \Omega, \\ L_m &= 0.651 \, \Omega, & J &= 0.02 \text{ N} \cdot \text{m}^2. \end{aligned}$$

3.3.1 能耗制动仿真

所谓能耗制动,是指当三相感应电动机与三相交流电源断开后,立即在定子绕组内通入直流电流。所构建的电源模块如图 4 所示。

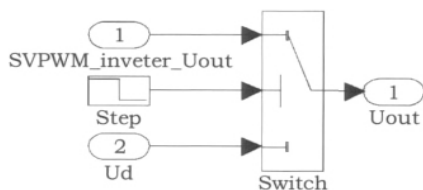


图4 能耗制动电源模块

设电机带负载运行 0.5 s 之后,进入能耗制动过程,得到仿真结果如图 5 所示。

由仿真结果可知,能耗制动的过程平稳,便于实现准确停车,但是需增设一套直流电源。

3.3.2 反接制动仿真

所谓反接制动,是指将运行着的电动机定子三根电源线中的任意两根对调。所构建的电源模块如

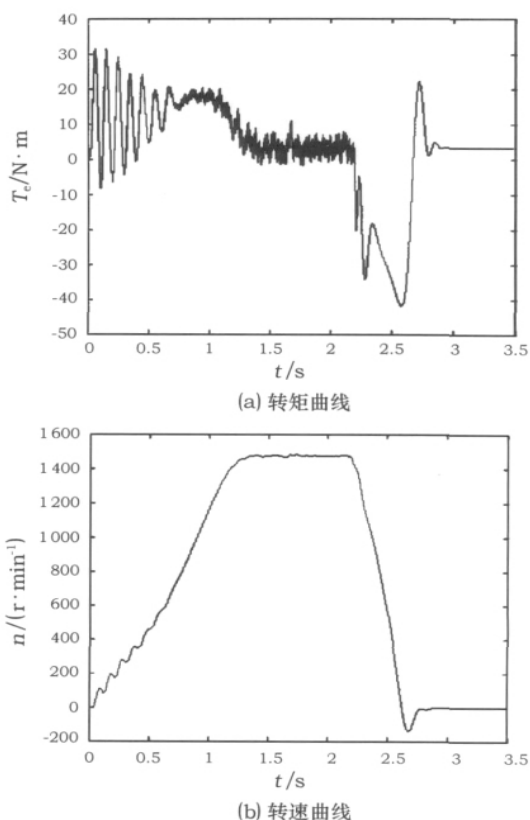


图5 能耗制动仿真结果

图 6 所示。

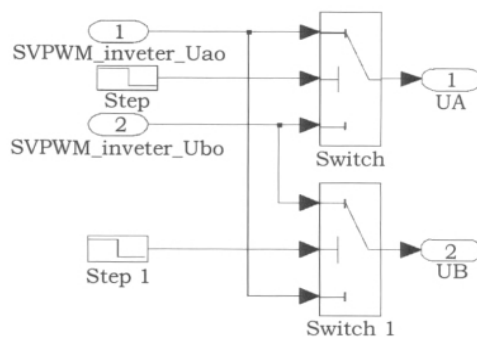
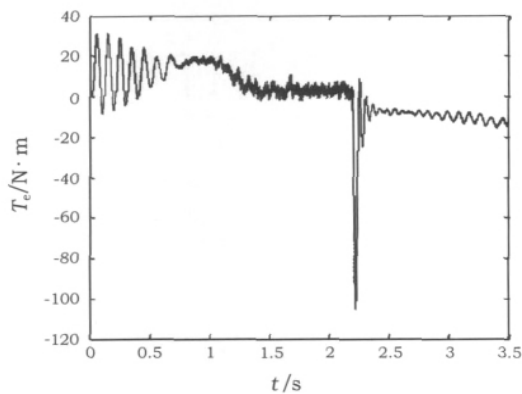


图6 反接制动电源模块

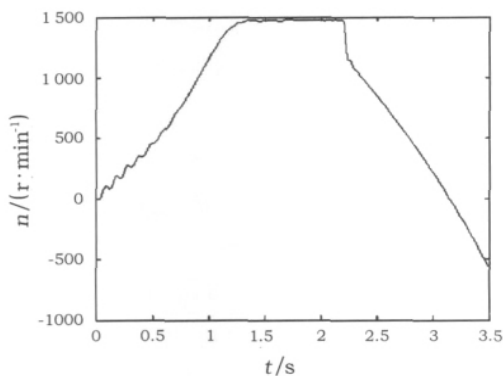
设电机带负载运行 0.5 s 之后,进入反接制动过程,得到仿真结果如图 7 所示。

由仿真结果可知,反接制动过程强烈,停车迅速,但是必须有自动控制装置控制电机,在转速接近零时将电机与电源断开,否则会出现电机反转的现象。

3.3.3 回馈制动仿真

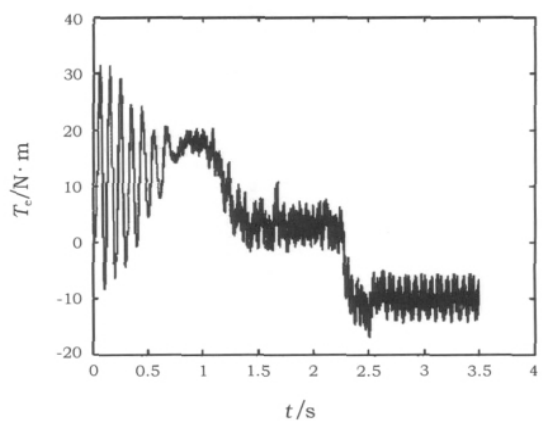


(a) 转矩曲线

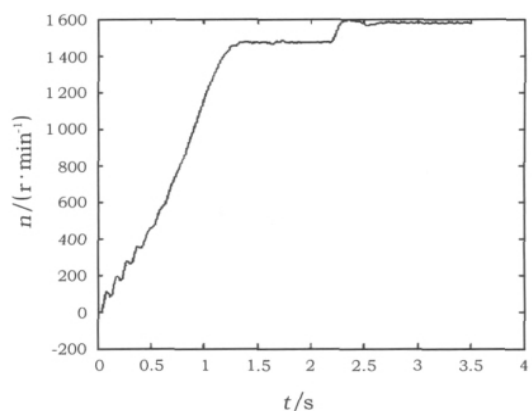


(b) 转速曲线

图7 反接制动仿真结果



(a) 转矩曲线



(b) 转速曲线

图8 回馈制动仿真结果

所谓反接制动,是指将电机的负载转矩改成负值,这样当电机转速超过同步转速时,电机自动进入发电状态。其电源模块与电机直接启动时相同。

设电机带负载运行 0.5 s 之后,进入回馈制动过程,得到仿真结果如图 8 所示。

由仿真结果可知,当电机转速超过同步转速时,电机进入发电状态,向电网回馈电能,比较经济,但是在转子转速小于同步转速时不能实现回馈制动。

4 结语

该文在 MATLAB/SIMULINK 环境下,建立了 SVPWM 三相电压源型逆变器供电的三相感应电动机传动系统的数学模型和仿真模型,并在此基础上分别进行了能耗制动、反接制动和回馈制动的动态

仿真。通过仿真结果的分析,比较了这三种制动方式的特点,为三相感应电动机的设计及运行提供了一定的理论依据。

参考文献

- [1] 顾绳谷. 电机及拖动基础(下册) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统. 3 版 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [3] 谢卫. 电力电子与交流传动系统仿真 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [4] LAVERS J D, CHEUNG R W Y. A Software Package for the Steady State and Dynamic Simulation of Induction Motor Drives [J]. IEEE Transactions on Power System, 1986, 1(2): 167-173.

作者简介:

屈鲁,男,1987 年生,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。