

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.09.011

双 Y 移 30° 永磁同步电机串联系统矢量控制仿真

刘陵顺, 张海洋, 苗正戈

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 为解决同一直流母线电源下的多台多相电机驱动系统中各电机能同时独立运行的问题, 将一定数量的多相电机通过适当的相序转换规则串联起来, 由一台逆变器供电而实现对所有串联电机的独立控制。以 2 台双 Y 移 30° 永磁同步电机 (PMSM) 串联系统为例, 采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略和载波调制 PWM 技术, 控制 2 台电机的串联系统, 并在 Matlab/simulink 环境下对系统进行了建模仿真。仿真结果表明, 该串联系统的 2 台电机在一台逆变器的驱动下, 可以实现独立解耦控制。该研究可以为多相电机串联系统的深入研究提供参考。

关键词: 双 Y 移 30° 永磁同步电机; 串联系统; 矢量控制; 仿真

中图分类号: TJ05 **文献标志码:** A

Simulation of Vector Control for Double Y Shift 30° PMSM Series System

Liu Lingshun, Zhang Haiyang, Miao Zhengge

(Dept. of Control Engineer, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: To solve the problem that each motor can operate independently by the same DC bus power, in the multiple multi-phase motor drive system, a number of multi-phase motors can be series connected and driven by a single inverter via the appropriate phase transformation rules, and all motors in series can be independently controlled. Taking two double Y shift 30° permanent magnet synchronous motor (PMSM) series system as example, the vector control strategy of $i_d=0$ and the carrier modulation PWM technology are adopted to control the two motors. Simulation of the two motors series system is obtained based on Matlab/simulink and the results show that these two motors can be decoupled controlled by a single inverter. The research can provide a reference for the depth study of multi-phase motor series system.

Keywords: Double Y shift 30° PMSM; series system; vector control; simulation

0 引言

多相电机较普通三相电机有力矩脉动小、容错性好等很多优点^[1], 而技术性能优良的多电机或全电机以及综合电力系统舰船, 需要解决同一直流母线电源下的多台多电机驱动系统中各电机能同时独立运行的问题。因此, 采用一台逆变器同时驱动不同电压额定值或不同转速或负载条件下的多台多相电机串联系统应运而生。笔者以 2 台双 Y 移 30° 永磁同步电机串联系统为例, 采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略和载波调制 PWM 技术控制两电机的串联系统, 并在 Matlab/Simulink 环境下对系统进行建模仿真, 以验证系统的可行性、可靠性及有效性。

1 2 台双 Y 移 30° PMSM 串联系统

1.1 矢量空间变换

多相电机是一个多变量强耦合的非线性系统, 根据机电能量建立的多相电机原始微分方程非常复杂, 分析起来十分困难, 选择适当的空间变换, 能简化方程。从矩阵分析的角度, 六相电机的电感矩

阵是一个循环矩阵, 可以通过矩阵变换实现电感矩阵的对角化, 消除相绕组之间的强耦合。

在对双 Y 移 30° 六相电机的解耦研究中, 通常引入广义两轴正交变换 T 将六相电压和电流空间矢量投影到 3 个相互正交的两维子平面 $\alpha\text{-}\beta$ 、 $x\text{-}y$ 和 $o1\text{-}o2$ 中去。其中, 自然坐标系下的电压和电流的基波和 $6k\pm 1$ (k 为偶数) 次谐波投影到 $\alpha\text{-}\beta$ 平面, $6k\pm 1$ (k 为奇数) 次谐波投影到 $x\text{-}y$ 平面, 零次和 $3k$ 次谐波投影到 $o1\text{-}o2$ 平面。双 Y 移 30° 的电机的两相实变换矩阵 $[T]$ 为^[2]:

$$[T] = \sqrt{\frac{1}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \cos\theta & 0 & \cos 5\theta & \sin 5\theta & 1 & \sin\theta \\ \cos 4\theta & 1 & \cos 8\theta & \sin 8\theta & 0 & \sin 4\theta \\ \cos 5\theta & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 1 & \sin 5\theta \\ \cos 8\theta & 1 & \cos 4\theta & \sin 4\theta & 0 & \sin 8\theta \\ \cos 9\theta & 0 & \cos 9\theta & \sin 9\theta & 1 & \sin 9\theta \end{bmatrix} (\theta = 30^\circ) \quad (1)$$

经广义两轴正交变换后的定子电压方程中含有转子的旋转角 θ_r , 需由旋转变换 $[R]$ 消去 θ_r , 得到静止坐标系下的模型。旋转变换矩阵 $[R]$ 形式为:

收稿日期: 2011-05-27; 修回日期: 2011-06-27

基金项目: 国家博士后科学基金(20090450205); 山东省自然科学基金(ZR2010EM029)

作者简介: 刘陵顺(1969—), 男, 山东人, 博士, 副教授, 从事电机控制研究。

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \sin \theta_r \\ -\sin \theta_r & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.2 2 台双 Y 移 30° 永磁同步电机串联系统结构

根据多相电路坐标变化的一般理论, 多相电机基于自然坐标下的数学模型经过解耦矩阵运算后, 电机转矩完全由定子和转子的 $\alpha-\beta$ 电流分量决定, 而与它们的 $x-y$ 电流分量和零序分量无关^[3]。因此, 任意 n 相电机的磁通和转矩控制只需要 2 个电流分量。对于六相电机而言, 可以用 $x-y$ 电流分量来控制另一台电机, 将另一台电机的定子绕组与第一台电机定子绕组通过适当相序转换串联在一起。要对 2 台串联电机进行独立解耦控制, 就要求一台电机的磁通/转矩生成电流不会在另一台电机中生成磁通/转矩。即一台电机的 $\alpha-\beta$ 轴电流分量应为另一台的 $x-y$ 分量, 反之亦然。那么用一台电流控制电压源逆变器向这些电机供电, 就可以分别独立控制这 2 台串联电机的转速或位置。这里需要特别指出的是: 只有定子绕组正弦分布的电机, 才可以满足串联驱动的条件^[4]。

由逆变器输出的六相电流经过空间变换矩阵变换后, 投影到 3 个正交的子空间中 ($\alpha-\beta$ 平面、 $x-y$ 平面和 $o1-o2$ 平面), 在 $\alpha-\beta$ 平面和 $x-y$ 平面的电流分量可以产生独立控制的磁动势。根据双 Y 移 30° 电机的解耦方式, 2 台双 Y 移 30° 电机串联系统与逆变器连接如图 1。

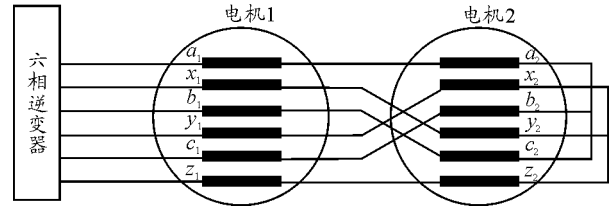


图 1 2 台双 Y 移 30° PMSM 串联

2 基于 $i_d=0$ 的串联系统矢量控制仿真

2.1 串联系统的矢量控制

为了使单位定子电流的力矩最大, 或者在产生所要求的力矩情况下, 只需最小的定子电流, 因此采用最简单的定子激磁电流分量 $i_d = 0$ 的控制策略^[5]。该串联系统控制系统如图 2。

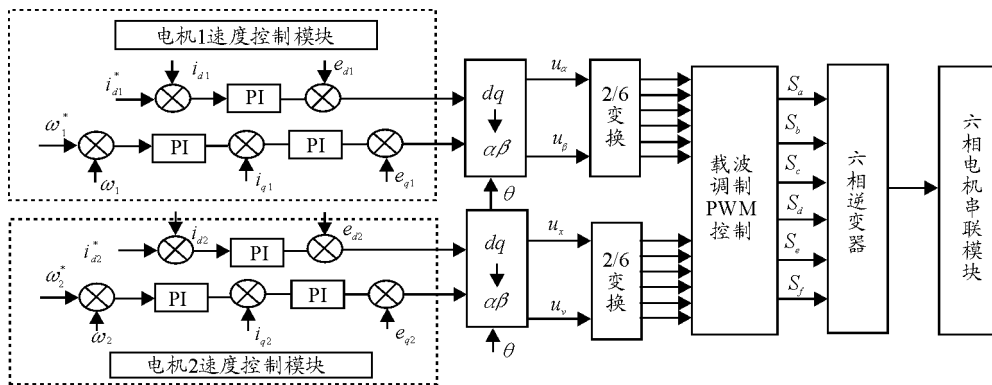


图 2 2 台双 Y 移 30° 永磁同步电动机串联控制技术

图 2 中的 i_d, i_q, ω, θ 都是六相电机串联系统的反馈值。通过电流传感器检测六相逆变器的六相输出电流 (该电流实际上包含了 2 台六相永磁同步电机的定子绕组电流瞬时值之和), 然后经过式 (1) 和 (2) 的变换矩阵计算变换后分别得到控制电机 1 的 $\alpha\beta$ 电流分量和控制电机 2 的 xy 分量; 根据计算得到各电机的位置信号 θ , 一方面用来进行静止坐标到旋转坐标的变换, 分别将电机 1 的 $\alpha\beta$ 电流分量转变为同步旋转坐标下的电流分量 i_{d1}, i_{q1} , 同理得电机 2 的电流分量 i_{d2}, i_{q2} 。

将闭环控制所得到的电压信号分别进行旋转坐

标到静止坐标的变换, 然后把得到的参考电压经 2/6 变换, 得到第 1 台电机的参考电压 $u_{a1}^*, u_{b1}^*, u_{c1}^*, u_{d1}^*, u_{e1}^*, u_{f1}^*$ 和第 2 台电机的参考电压 $u_{a2}^*, u_{b2}^*, u_{c2}^*, u_{d2}^*, u_{e2}^*, u_{f2}^*$, 按照一定的串联相序关系分别相加, 得到逆变器输出端的参考电压: $u_A^*, u_B^*, u_C^*, u_D^*, u_E^*, u_F^*$ 。再经载波 PWM 技术输出的六路控制信号分别控制六相逆变器的 6 个桥臂的上下 2 个开关器件的导通与关断。

按相序转换关系相加得到的逆变器控制电压 $u_A^*, u_B^*, u_C^*, u_D^*, u_E^*, u_F^*$, 没有考虑其中一台电机的

磁通力矩电流分量在另一台电机所产生的压降，从而使系统的动态性能下降。为了精确的解耦控制，在构造电压参考值时需要考虑补偿电压(如图 2 中电机 1 的 e_{d1}, e_{q1})。

电机 1 和电机 2 补偿电压分别为：

$$\begin{aligned} e_{d1} &= -\omega_{r1} * L_{s1} * i_{q1}, & e_{q1} &= \omega_{r1} * L_{s1} * i_{d1} + \omega_{r1} * \psi_{f1} \\ e_{d2} &= -\omega_{r2} * L_{s2} * i_{q2}, & e_{q2} &= \omega_{r2} * L_{s2} * i_{d2} + \omega_{r2} * \psi_{f2} \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 串联驱动系统的仿真分析

串联系统在 Matlab/Simulink 环境中的仿真模型包括电机串联模块、速度调节模块、坐标变换模块、逆变器模块等。对系统仿真参数设定见表 1。

表 1 仿真参数

电压	电机参数	运动参数
$U_{dc} = 300 \text{ V}$	$R = r_{s1} + r_{s2} = 2.875 \Omega$	
	$L_1 = 8.5 \text{ mH}$	$J_1 = 0.089 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	$L_2 = 12 \text{ mH}$	$J_2 = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
	$\psi_{f1} = 0.175 \text{ Wb}$	$F_1 = 0.005$
	$\psi_{f2} = 0.2 \text{ Wb}$	$F_2 = 0.01$
	$p_1 = p_2 = 4$	

首先对串联驱动系统的变速运行情况进行仿真分析。电机 1 的转速为 300 r/min，电机 2 的转速为 200 r/min，0.5 s 时刻电机 2 加速到 400 r/min 的仿真波形如图 3；电机 2 转速为 200 r/min，0.5 s 时刻电机 1 逆转-100 r/min 的仿真波形如图 4。

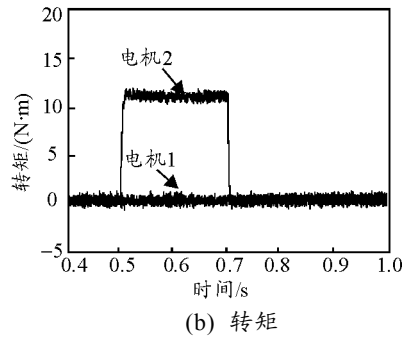
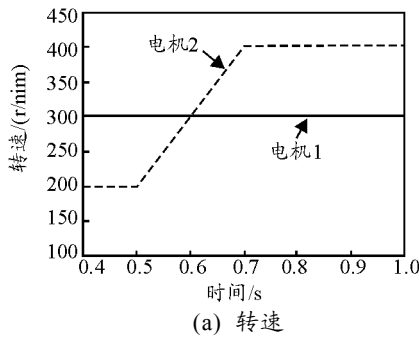


图 3 电机 2 突然加速时的仿真波形

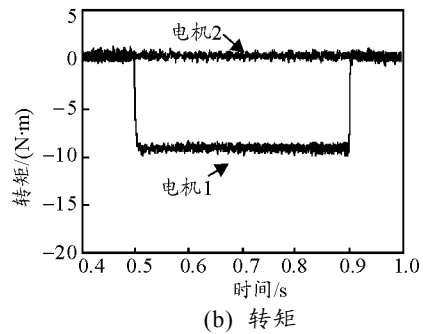
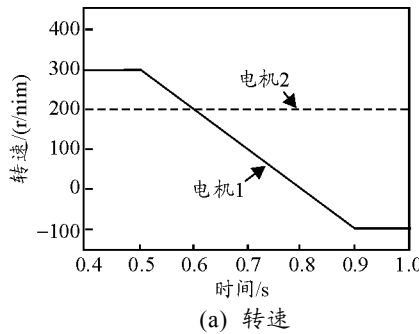


图 4 电机 1 逆转时的仿真波形

从仿真波形可以看出：电机 2 突然加速运动时，电机 2 转矩增加，达到额定转速，转矩恢复，而整个过程电机 1 的转速和转矩大小不变；同理，

电机 1 速度突变时，电机 2 的转矩和转速不变。因此，系统中任意一台电机变速不会影响到另一台电机的运行。

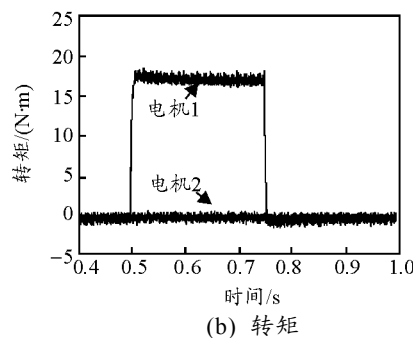
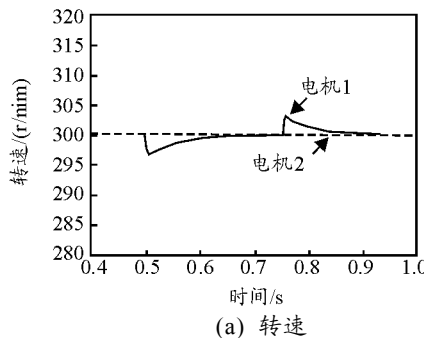


图 5 电机 1 突加负载，稳定后卸负载