

变频调速—变量泵复合调节液压系统仿真研究

白国长, 王占林

(北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)



摘要: 在建立交流异步电机矢量控制、液压容积控制系统数学模型的基础上, 建立在 MATLAB/Simulink 环境下的电气采用 simpowersys 库函数建模, 液压采用传递函数联合仿真模型, 实现变频调速和变量泵联合仿真, 并进行仿真实验研究, 结果表明采用复合控制, 能提高系统的响应性能且节能, 并指出系统发展应用的方向。

关键词: 矢量控制; 变频调速; 液压复合控制; 容积控制

中图分类号: TP27 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2006) 02-0424-03

Simulation and Study of Composite Hydraulic System with Frequency Control and Variable Pump

BAI Guo-chang, WANG Zhan-lin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the mathematical models of AC motor vector control and hydraulic cubage control, a model combined with electric and hydraulic was established in MATLAB. Simulation and analysis show that, with composite control, the model can improve the response performance of the system and the developing direction of this system is proposed. A new thought way for analyzing machine and electric systems was offered.

Key words: vector control; frequency control; hydraulic composite control; cubage control

引言

液压系统的复合调节是指同时改变驱动电机转速和液压泵的排量进而改变系统流量的容积式控制系统。泵的输出直接接执行元件如缸、马达。这种系统由于避免了溢流损失, 具有温升低、效率高的优点, 非常适用于大功率的场合。近年来由于变频调速技术的不断发展, 使得采用矢量控制的交流调速系统的性能完全可以和直流电机相媲美, 甚至通过矢量控制可以实现类似弱磁的控制, 能在动态响应方面优于直流电动机。由于交流电机结构简单、可靠性高, 大有取代直流调速的趋势。本文就对采用矢量控制的交流调速的复合控制系统进行理论分析、研究, 建立系统的数学模型, 并在 MATLAB/Simulink 环境下对 simpowersys 工具库中矢量控制电动机和用传递函数的液压系统联合仿真, 结果表明采用复合控制的液压系统其动态性能得到提高, 并指出该系统需进一步研究的方向。

1 交流异步电机的数学模型及仿真模型建立

交流异步电机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。对它的控制不象直流电机那么简单, 采用矢量控制的方法就是解决交流电机的控制问题。为便于分析, 忽略了磁饱和、空间谐波、铁损、涡流和磁滞损耗, 不考虑频率和温度

变化对绕组的影响。

1.1 矢量控制原理

矢量控制理论是由德国的 F·Blaschke 于 1971 年提出的, 是基本原理是模仿直流电动机的控制原理, 把三相交流电压等效为静止的两相电流, 再经过旋转坐标变换后就变成两相同步旋转坐标系上的模型, 对此模型进行控制也就是对定子三相电流的瞬时值进行控制, 从而调节电机的磁场与转矩, 从而得到和直流电机一样的控制性能。为达到所需的速度精度, 还加有电流和电压校正环节。所以交流电机的矢量控制包括三相/二相变换、静止/旋转坐标变换、直角坐标/极座标变换等几个环节, 其原理如图 1 所示。可以认为旋转反变换 VR⁻/2/3 变换可以和异步电机内的 VR 及 3/2 相抵消, 若忽略逆变器的滞后, 剩下的就是等效直流电机了。下面介绍各个环节并建立适合在 MATLAB\simulink 环境下运行的模块。

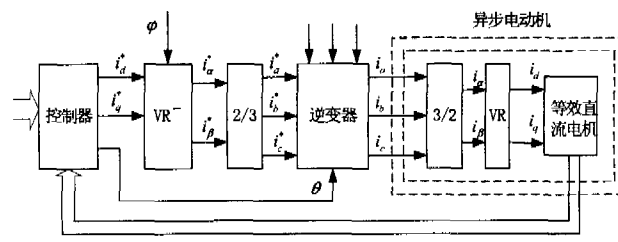


图 1 矢量控制的基本原理

1.2 异步电机矢量控制仿真模型的建立

(1) 坐标变换

坐标变换包括电机前三相/静止两相和电机后静止两相/

收稿日期: 2004-12-20 修回日期: 2005-06-20
作者简介: 白国长(1968-), 男, 河南襄城人, 博士生, 研究方向为机电液一体化及系统控制。

三相变换。其变换公式为:

$$\begin{cases} U_\alpha = \frac{2}{3} \left[U_a - \frac{1}{2}(U_b + U_c) \right] \\ U_\beta = (U_b + U_c) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = i_a \\ i_\beta = -\frac{1}{2}i_a + \frac{\sqrt{3}}{2}i_b \\ i_c = -\frac{1}{2}i_a - \frac{\sqrt{3}}{2}i_b \end{cases} \quad (2)$$

(2) 矢量控制模块

矢量控制的目的是对定子电流分解为相互垂直的两个分量, 一个用于控制转子磁链, 一个用于调节电磁转矩, 进而对转子磁链和电磁转矩进行解耦控制。其相互垂直的两相参考相电流的求取方程为:

$$\begin{cases} i_q^* = \frac{L_r}{n_p L_m} \frac{T_e^*}{\Psi_r^*} \\ i_d^* = \Psi_r^* (T_r p + 1) / L_m \\ \omega_r = \frac{L_m i_q^*}{T_r \Psi_r^*} \end{cases} \quad (3)$$

式中 L_r —转子绕组电感; n_p —极对数; L_m —一定、转子间互感; Ψ_r —转子磁链 $T_r = L_r / J$, 带*号的为参考信号, 不带*号的为实际测得或计算出的值。该模块输入为参考磁链 Ψ_r^* 和参考电磁转矩 T_e^* , 输出为 dq 两相参考电流 i_d^* 、 i_q^* 和转差角频率 ω_r , ω_r 再和实际测得的 ω_m 相加积分, 即可求取位置信号 θ 。

(3) PARK 变换模块

该模块实现的是旋转坐标系 dq 向三相静止坐标系 abc 的电流变换。其变换公式为:

$$\begin{cases} i_a^* = i_d^* \cos \theta - i_q^* \sin \theta \\ i_b^* = i_d^* \cos(\theta - 120^\circ) - i_q^* \sin(\theta - 120^\circ) \\ i_c^* = i_d^* \cos(\theta + 120^\circ) - i_q^* \sin(\theta + 120^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

其输入信号是位置信号 θ 和 dq 两相参考电流 i_d^* 、 i_q^* , 输出为三相参考电流 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 。

(4) 电流调节模块

电流调节模块是实现滞环控制, 输入的是三相参考电流和三相实际电流, 输出为逆变器的控制信号。当实际电流低于参考电流且偏差大于滞环比较器的环宽时, 对应相正向导通, 负向关断; 反之正向关断, 负向导通。

(5) 速度控制模块

速度控制模块输入的为参考速度和实际速度的差, 输出的参考电磁转矩 T_e^* 。采用常规的 PID 控制器, 也可采用其它的控制方法。

上述各模块可根据公式在 Simulink 环境下建立。其它模块如交流异步电机模块、IGBT 逆变模块及测量模块可在 simpowersystem 库中直接选取搭建。所用的总的电机模块如图 2 所示。该仿真模块所用的参数为 $P = 30\text{KW}$, $U = 380\text{V}$,

定子电阻 $R_s = 2.32$, 转子电阻 $R_r = 2.32$, $L_s = 1.23\text{H}$, $L_r = 2\text{mH}$, $L_m = 0.69\text{mH}$, $J = 0.93\text{kg} \cdot \text{m}^2$, $n_p = 2$ 利用 Simulink 的封装技术, 把该变频调速封装为一个子模块, 供后面仿真使用。

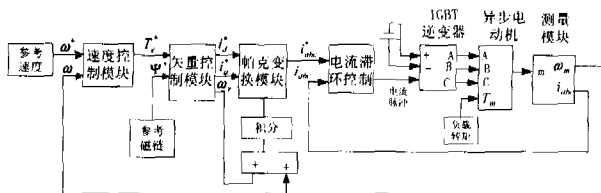


图 2 交流异步电机仿真模型

2 液压系统的数学模型及仿真模型

2.1 变量泵伺服变量机构的仿真建模

改变变量泵排量的伺服机构包括伺服放大器、电液伺服阀、伺服液压缸、变量泵斜盘和位置传感器等。由于控制变量泵斜盘的伺服液压缸负载相对较小, 故不计流体的泄漏和压缩性及斜盘的反力, 该环节可简化为一积分环节 $\frac{1}{A_s s}$; 而伺服放大器简化为 K_a 、位置传感器简化为 K_x 、电液伺服阀简化为 K_s 、变量泵斜盘可简化 K_ϕ 。故以斜盘转角为输出的系统传递函数为:

$$\frac{\Phi}{u_{1a}} = \frac{K_{p1}}{1 + T_{p1}s} \quad (5)$$

式中: $k_{p1} = \frac{1}{K_x}$, $T_{p1} = \frac{A_t}{K_a K_s K_\phi K_x}$

泵的排量与斜盘转角关系:

$$q_p = K_{qp} \Phi \text{ 故 } \frac{q_p}{u_{1a}} = \frac{K_{p1} K_{qp}}{1 + T_{p1}s} = \frac{K_p}{1 + T_{p1}s} \quad (6)$$

2.2 动力机构的仿真建模

作为一个泵控缸环节输入的流量方程

$$Q_f = q_p n \quad (7)$$

液压缸的流量连续程:

$$Q_f = A_s y + C_{se} p_f + \frac{V_t}{2E_y} s p_f \quad (8)$$

液压缸的力平衡方程:

$$A_t p_f = m_t S^2 y + B_t S y + K_t y + F_L \quad (9)$$

式中: V_t —泵和液压缸压力油一侧的油液容积; p_f —负载压差; y —液压缸输出位移; m_t —负载与活塞的总质量; F_L —外负载力; K_t —弹性负载刚度; K_{qp} —泵排量相对于泵斜盘倾角的增益。

在此, 如果仅考虑惯性负载, 可写出液压缸输出位移相对泵的输出流量的传递函数为

$$\frac{y(s)}{Q_f(s)} = \frac{1/A_t}{S \left(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\xi_h}{\omega_h} s + 1 \right)} \quad (10)$$

式中 ω_h —泵控缸环节的液压固有频率;

ξ_h —泵控缸环节的液压阻尼比。

仿真所用参数经计算得:

$$\omega_n = 77.5, \zeta_n = 0.196, 1/A_t = 1.59$$

3 转速容积复合系统的建模与仿真

把上述各环节在 Simulink 环境下封装成各个子模块, 把各个连接起来即建立系统的整体仿真模型, 如图 3 所示。

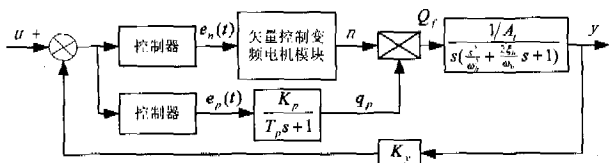


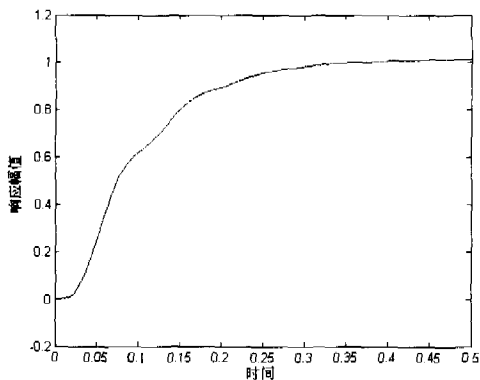
图 3 复合控制仿真模型

系统所用的控制器为 PID 控制器。固定泵的排量改变电机转速系统的响应曲线如图 4a)所示; 固定电机转速改变泵的排量系统的响应曲线如图 4b)所示; 同时改变排量和转速系统的响应曲线如图 4c)所示。各个状态下响应参数如表 1 所示。

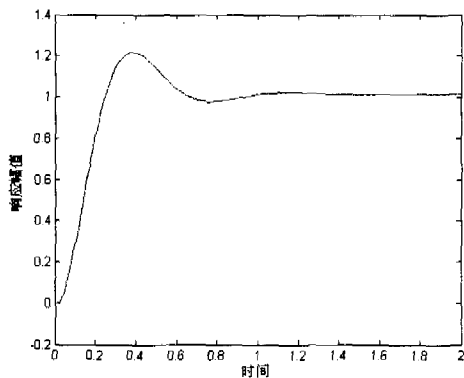
表 1 各种控制下的调整时间

控制方式	定转速变排量	定排量变转速	复合控制
调整时间(秒) t_s	0.37	0.96	0.18

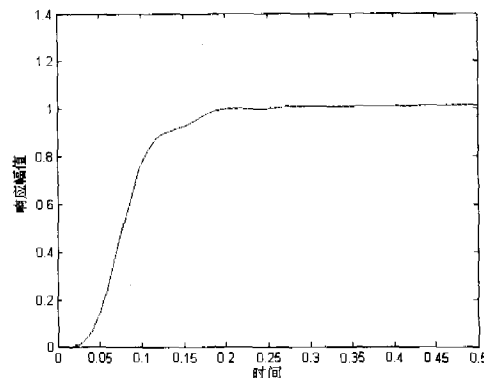
从表里我们可以看出采用复合控制系统的性能得到显著提高。但从图上也可以看出, 电机的响应曲线要慢于改变泵排量的响应曲线, 这种复合控制方法虽然能起到改善容积调速性能的作用, 但不能充分发挥变频调速的优势。解决该



a) 定排量改变电机转速系统的响应



b) 定转速改变排量系统的响应



c) 复合系统响应

图 4 电液容积控制响应曲线

问题的最简单方法是改变控制规律, 在满足性能要求的前提下尽可能加快电机的响应速度, 改变泵排量仅作为补充, 即泵和电机联合协同动作的智能控制方法, 在响应速度要求较高时采用复合控制, 在响应速度要求低时采用变频控制。怎样充分发挥该系统节能且高响应速度高的优点, 是液压容积控制有待研究的课题。

4 各种调节方法的效率比较

节流调速是通过改变通向执行件阀门的开度来调节流量的, 多余的流体经溢流阀流出, 其能量化为热能, 所以不管执行件的流量是多大, 电机和液压泵都满负荷运转, 而电机和液压泵是按最大的流量和压力来选定, 故效率低。变排量调速时, 若排量减小在压力不变时所需电机输出扭矩, 但电机是按最大的扭矩和转速设计, 故出现“大马拉小车”现象, 虽没有流体的发热损失但电机的效率下降; 变频器具有根据负荷大小自动调节电压的能力, 使电机在负载变化时能工作在效率最高的点上, 且没有流体的发热损失故效率最高^[4]。

5 结论

由电力系统电机矢量控制和液压系统机电联合仿真发现, (1)MATLAB\Simulink 是一个很好的仿真平台, 可以进行很多情况下的仿真运算, 各个模块兼容性强, 且不用编程, 简单易行; (2)液压系统采用变频调速的容积控制系统可行, 能显著提高系统的响应速度且节能和减少发热, 提高液压控制系统的效率, 有广阔的发展前途。(3)怎样设计控制方法使该系统在满足要求的情况下节能且效率最高是有待研究的课题。

参考文献:

- [1] 纪志成. 基于 MATLAB 交流异步电机矢量控制系统的仿真建模[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 384-389.
- [2] 王占林. 近代液压控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- [3] 张大华, 等. 采用多泵并联变频调速技术实现机场恒压供油[J]. 航空学报, 2003, 24(3): 170-173.
- [4] 张燕宾. 变频调速应用实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.