

基于ADRC的THBSM无传感器矢量控制

侯甜甜 郝润科 杨文煥 刘俊锋

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

摘要: 三相混合式步进电机(three-phase hybrid stepping motor, THBSM)等同于低速运行的永磁同步电机,可以使用同步电机的先进控制方法对其进行闭环控制。通过对自抗扰控制器(active disturbance rejection controller, ADRC)理论分析,提出了一种新颖的三相混合式步进电机无传感器矢量控制方法。将转速和 d 轴电流对 q 轴电流的作用看作是对转矩电流环的扰动量,通过自抗扰控制器将其估算出来并给予补偿,实现对电机速度的实时观测。利用MATLAB工具建立了三相混合式步进电机无传感器控制系统仿真模型,仿真结果表明:系统能够实时估计电机转速,估计误差小,响应速度快,抗扰动能力强。该方法提高了三相混合式步进电机无传感器系统的控制精度,为工程应用奠定了良好的理论基础。

关键词: 三相混合式步进电机;自抗扰控制器;矢量控制;无传感器控制

中图分类号: TM921.47 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1010

Sensorless vector control of THBSM based on ADRC

Hou Tiantian Hao Runke Yang Wenhuan Liu Junfeng

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The three-phase hybrid stepping motor (THBSM) is equivalent to the permanent magnet synchronous motor (PMSM) running at low speed, which can be controlled by the advanced control method of synchronous motor. Based on the theory of auto disturbance rejection controller (ADRC), a novel method of sensorless vector control for THBSM is proposed, which transforms THBSM under the three-phase static coordinate system to the two-phase rotating coordinate system. The action of the speed and the d axis current on the q axis current is considered as the disturbance of the torque current loop. Using MATLAB/Simulink to build the simulation model, the simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Keywords: THBSM; ADRC; vector control; sensorless control

1 引言

三相混合式步进电机作为一种特种电机,以脉冲波作为其控制信号,采用高细分驱动时,开环控制下能够达到较高的运动精度,因而广泛应用于小功率及对运动精度有一定要求的场合。但是由于其存在的固有缺陷,如传统开环控制时,电机低速振动大,高速输出力矩小等,以及人们对运动精度的要求越来越高,传统开环控制已经不能够满足要求,限制了三相混合式步进电机的进一步发展与应用。通过国内外众多学者通过分析研究,发现三相混合式步进电机的运行原理与永磁同步电机类似,可以将其等效为低速步进运行的永磁同步电机。通过结合细分驱动技术^[1]与

空间矢量脉宽调制(SVPWM)^[2]技术实现了对三相混合式步进电机的闭环矢量控制,使得其运行更加平稳,噪声减小,输出力矩稳定。

自抗扰控制技术是一种新型的非线性控制算法^[3],不依赖被控对象的精确数学模型,能够实时估计并补偿系统内外扰动,具有较强的适应性、鲁棒性。考虑到机械传感器的使用引起的一系列问题,如系统成本大幅增加、可靠性降低、传感器安装维护困难等。本文在此基础上对三相混合式步进电机进一步研究,提出了一种新颖的三相混合式步进电机无传感器矢量控制方法^[4-5],利用自抗扰控制技术完成电机转速的实时估计,实现了三相混合式步进电机的无传感器控制。

2 三相混合式步进电机数学模型

三相混合式步进电机的实际数学模型具有高度非线性,为简化数学模型,做如下假设。

三相绕组产生的磁动势沿气隙周围按正弦规律分布;忽略磁路饱和,认为各相绕组的自感系数恒定;忽略铁心损耗;不考虑频率和温度变化对绕组电阻的影响。

如图1所示,定义 d 轴与转子磁场方向重合, q 轴超前 d 轴 90° 。三相混合式步进电机的定子电压方程如下:

$$\begin{bmatrix} u_u \\ u_v \\ u_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_u \\ \lambda_v \\ \lambda_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & -\frac{1}{2}M_s & -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s & L_s & -\frac{1}{2}M_s \\ -\frac{1}{2}M_s & -\frac{1}{2}M_s & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_r \cos\theta \\ M_r \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) \\ M_r \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} I_m \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_a & \omega_e L_a \\ \omega_e L_a & R_s + pL_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K_E \omega_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:

$$L_a = \frac{3}{2}L_s, p = \frac{d}{dt}, K_E = \sqrt{\frac{3}{2}}M_r I_m, \frac{d\theta}{dt} = \omega_e,$$

$$\begin{cases} V_d = L_d \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega_e + R i_d \\ V_q = L_q \frac{di_q}{dt} + L_d i_d \omega_e + \varphi_f \omega_e + R i_q \end{cases} \quad (3)$$

式中: V_d 、 V_q 、 i_d 、 i_q 、 L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴定子绕组电压、电流以及定子绕组电感, R 为定子绕组电阻, ω_e 为电角速度, φ_f 为转子永磁体产生的磁链。

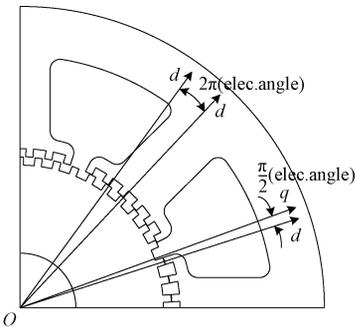


图1 d - q 坐标与转子永磁体关系

输出电磁转矩方程:

$$T_e = \frac{3}{2}Z[\varphi_f i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (4)$$

式中: T_e 为电磁转矩, Z 为混合步进电机转子齿数。

机械方程:

$$T_e = T_l + B\omega_r + J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

式中: T_l 为负载转矩, B 为粘滞摩擦系数, J 为转动惯量。 ω_r 为机械角速度。

3 自抗扰控制技术原理

ADRC由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)以及非线性状态反馈控制规律(NLSEF)三部分组成。ADRC结构如图2所示。其中跟踪微分器对控制系统输入进行跟踪并得到跟踪信号的微分,解决了经典PID控制中系统响应和超调之间的矛盾^[6-7];扩张状态观测器实时观测出系统变量的各阶状态和系统内外扰动;非线性状态反馈控制规律实现“小误差大增益,大误差小增益”的非线性控制。通过非线性变换,将非线性系统转化为积分串联型结构^[8]。

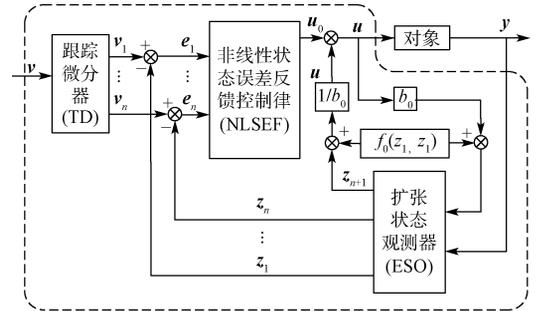


图2 ADRC结构

ADRC的阶数由被控对象阶数决定^[9-10]。设被控对象的数学模型为:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + f_0(x) + b_0 u \\ y = x \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为系统未知部分, $f_0(x)$ 为系统已知部分。对这个系统采用如下形式的一阶ADRC算法:

$$\begin{cases} \dot{v}_1 = v_2(t) \\ \dot{v}_2 = fh(v_1 - v, v_2, r, h_0) \\ e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01} \text{fal}(e, 0.5, \delta) + f_0(z_1) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\beta_{02} \text{fal}(e, 0.25, \delta) \\ e_1 = v_1 - z_1 \\ e_0 = \int e_1 \\ u_0 = \beta_1 \text{fal}(e_0, 0.25, \delta) + \beta_2 \text{fal}(e_1, 0.75, \delta) \\ u = u_0 - [z_2 + f_0(z_1)]/b_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:最优综合控制 fal 函数表达式为:

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta \\ e \cdot \delta^{\alpha-1}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (8)$$

fh 函数计算表达式为:

$$\begin{aligned} d &= rh_0, d_0 = dh_0 \\ j &= v_1 - v + h_0 v_2 \\ a_0 &= \sqrt{d^2 + 8r|j|} \\ a &= \begin{cases} v_2 + \frac{j}{h_0}, & |j| \leq d_0 \\ v_2 + 0.5(a_0 - d)\text{sign}(j), & |j| > d_0 \end{cases} \\ fh &= \begin{cases} -\frac{ra}{d}, & |a| \leq d \\ -r\text{sign}(a), & |a| > d \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: v 是 ADRC 的输入, v_1 、 v_2 分别为 v 的跟踪信号和其广义微分信号, r 为跟踪速度因子, h_0 为滤波因子, y 为被控对象输出, z_1 为 y 的跟踪信号, z_2 为系统未知部分 $f(x)$ 估计值, δ 为滤波因子, α 为非线性因子。

4 三相混合式步进电机速度观测器设计

由式(3)得:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q - \frac{L_d}{L_q}\omega_e i_d - \frac{1}{L_q}\varphi_f \omega_e \quad (10)$$

将 ω_e 和 i_d 对 i_q 的耦合作用 $-\frac{L_d}{L_q}\omega_e i_d - \frac{1}{L_q}\varphi_f \omega_e$ 看作是对 q 轴电流环的扰动量 $\omega(t)$, 则式(10)可表示为:

$$\frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \omega(t) \quad (11)$$

将式(11)按照式(6)的形式表达, 即可得到速度估计的一阶系统:

$$\begin{cases} \dot{i}_q = f(x) + f_0(i_q) + b_0 v_q \\ y = i_q \end{cases} \quad (12)$$

式中:系统放大系数 $b_0 = 1/L_q$, 系统已知部分为:

$$f_0(i_q) = -\frac{R}{L_q}i_q \quad (13)$$

未知部分 $p = T_{em}\Omega$, 有:

$$f(x) = \omega(t) = -\frac{L_d}{L_q}\omega_e i_d - \frac{1}{L_q}\varphi_f \omega_e \quad (14)$$

当采用 $i_d \equiv 0$ 的控制策略时有:

$$f(x) = \omega(t) = -\frac{1}{L_q}\varphi_f \omega_e \quad (15)$$

如果扩展状态观测器能够实时准确的估算出扰动 $\omega(t)$ 的值, 那么即可以准确的观测出电机的速度:

$$\omega_e = \frac{\omega_e}{Z} = -\frac{L_q}{\varphi_f Z} \cdot z_2 \quad (16)$$

式中: z_2 为扰动 $\omega(t)$ 的估计值。

采用 $i_d \equiv 0$ 控制方式, 三相混合式步进电机的自抗扰无速度传感器矢量控制框图^[11]如图 3 所示。

SVPWM 法^[12]最终目标是产生幅值恒定的圆形磁场, 以电机通入的三相对称正弦电压产生圆形磁链为基准, 通

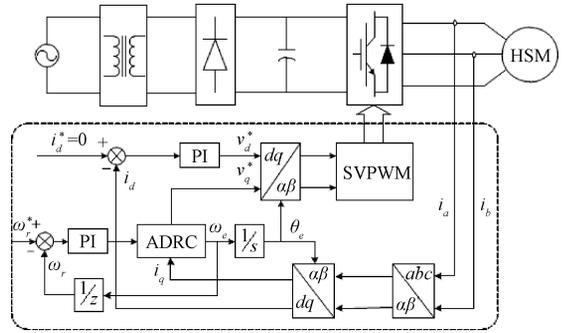


图 3 三相混合式步进电机无传感器矢量控制图

过逆变器产生有效矢量来近似达到基准圆, 产生三相正弦电流来驱动电机。SVPWM 方法通过 8 个基本空间电压矢量中两个相邻的有效矢量及零矢量, 并根据作用时间来等效电机所需的空问电压矢量。其原理如图 4 所示。

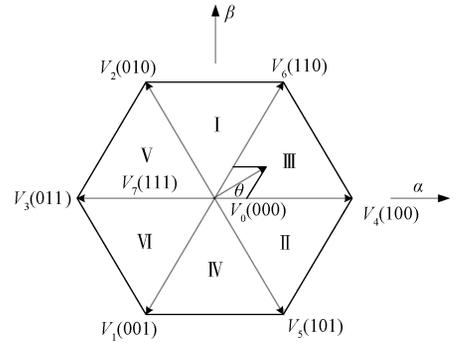


图 4 基本电压矢量图

5 仿真实验

5.1 仿真电机参数

基于 MATLAB/Simulink 软件平台搭建系统仿真模型, 仿真中所用三相混合式步进电机参数如表 1 所示。

表 1 电机参数

电机参数	数值
相电流(星型接法)	5.2 A
步距角	1.2°
保持转矩	11.3 N·m
空载启动频率	1 600 Hz
空载运行频率	30 kHz
转动惯量	11.3 kg·cm ²
相电感	10 mH
相电阻	1.9 Ω

5.2 仿真结果及分析

给定转速为 500 r/min、负载为 5 N·m 的情况下电机实际转速波形和由 ADRC 观测出来的电机转速波形和转速偏差如图 5 所示。

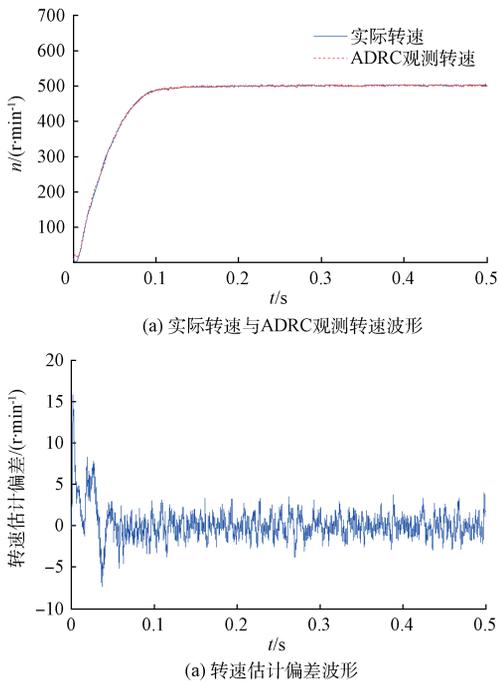
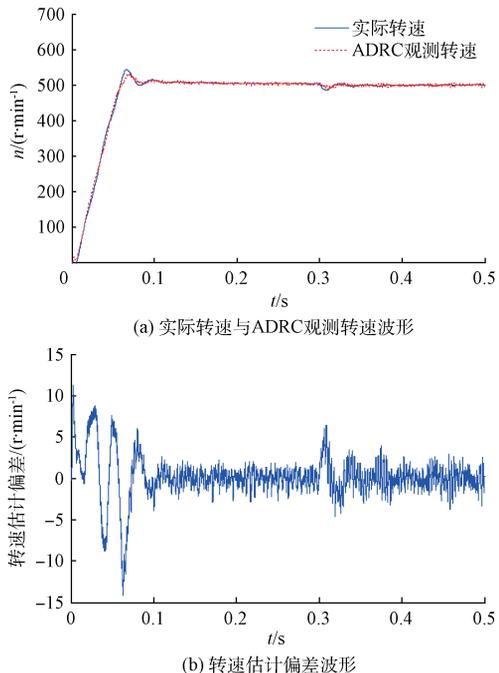


图5 速度 500 r/min,空载启动时波形

由图4可知,在无传感器控制情况下,带载启动时,ADRC能实时估计电机的转速,且转速估计误差较小。

给定转速为500 r/min、空载启动,在0.3 s时突然施加 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载的情况下电机实际转速波形和由ADRC观测出来的电机转速波形和转速偏差如图6所示。

图6 速度 500 r/min、空载启动,0.3 s时突然施加 $8\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载时波形

由图5可知,空载启动时,ADRC仍能进行良好的实时电机转速估计,并且具有较强的抗扰动能力。

6 结 论

通过对基于ADRC的三相混合式步进电机无传感器控制系统仿真结果分析,验证了该方案的可行性。ADRC能够对电机转速进行良好的实时估计,并且加快了系统的响应速度,增强了系统的抗扰动能力,达到了很好的控制效果,为工程应用奠定了良好的理论基础。

参考文献

- [1] 林鑫,余世明,朱建江.混合式步进电机细分控制方法优化策略研究与仿真[J].机电工程,2012,29(2):196-199.
- [2] 苏义鑫,孙功武,聂巍.基于矢量控制的步进电机驱动细分技术[J].微特电机,2014,42(2):56-59.
- [3] 侯利民,任志玲,王巍.基于自抗扰控制的永磁同步电机无源调速系统[J].电力电子技术,2011,45(3):37-39.
- [4] 赵凯辉,陈特放,张昌凡.永磁同步牵引电机无速度传感器转矩精确控制[J].电子测量与仪器学报,2015,29(1):38-47.
- [5] 杨泽斌,樊荣.基于EKF的无轴承异步电机无速度传感器控制[J].仪器仪表学报,2015,36(5):1023-1030.
- [6] 张朝阳,冯晓云,许峻峰.永磁同步电机弱磁运行控制策略研究[J].电气传动,2014,44(5):40-45.
- [7] 丛自龙,袁朝辉,杨芳.基于模糊自适应PID控制的定位系统设计[J].机床与液压,2013(7):138-142.
- [8] 孔小兵.永磁同步电机高效非线性模型预测控制[J].电力科学与工程,2014(9):1958-1966.
- [9] 卢达,赵光宙,曲铁龙.永磁同步电机无参数整定自抗扰控制器[J].电工技术学报,2013,28(3):27-34.
- [10] 焦姣姣,张兴华.基于自抗扰控制的永磁同步电机无源调速系统[J].电力电子技术,2011,45(3):37-39.
- [11] 薛薇.永磁同步电机调速系统的模糊自抗扰控制[J].电机与控制应用,2013,40(8):57-60.
- [12] 丁硕,崔总泽,巫庆辉,等.基于SVPWM的永磁同步电机矢量控制仿真研究[J].国外电子测量技术,2014,33(6):81-85.

作者简介

侯甜甜,1993年出生,在读研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:htt124129@163.com