

开关磁阻电机的滑模变结构控制研究

孙亚宁, 乔登攀

(1. 昆明理工大学 应用技术学院, 云南 昆明 650093 2. 昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 基于开关磁阻电机存在转矩脉动且电机数学模型不精确问题, 利用滑模变结构控制的快速性和完全自适应性, 设计了一种滑模变结构控制的开关磁阻电机驱动系统, 通过仿真实验证明, 这种系统可有效降低转矩脉动。

关键词: 开关磁阻电机; 滑模变结构控制; 转矩脉动; 仿真实验

中图分类号: TP271.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2005)05-0057-04

Study on Switch Reluctance Motor Drive System Using Variable Structure Control with Sliding

SUN Ya-ning¹, QIAO Deng-pan²

(1. Faculty of Application Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China

2. Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract Based on the torque ripple and the imprecise model of the switch reluctance motor, using the rapidity and fully self-adaptability of variable structure control system with sliding, a kind of variable structure control system with sliding is designed in this paper. It is shown through the computer simulation experiments that the variable structure control system with sliding is effective to reduce the motor torque ripple.

Key words switch reluctance motor; variable structure control system with sliding; torque ripple; simulation experiments

0 引言

开关磁阻电机 (SR) 是一种依靠磁阻效应工作的电机, 初期电机性能不完善. 随着高性能的大功率电子器件的开发和各种智能控制方案的实施, 开关磁阻电机得到了大力发展. 但是开关磁阻电机存在因换相、扰动等引起的转矩脉动, 较高的转矩脉动限制了其在要求平稳且有一定静态转矩保持能力的场合中的应用^[1, 2, 5]. 同时, 转矩脉动引起电机的振动和噪音. 开关磁阻电机是双凸极结构, 具有时变非线性的磁路体系和开关性的电路体系, 电机的模型不精确, 电机长时间运行造成的过热也会使电机参数有所变化, 各种扰动也影响着电机运行. 为使得 SR 电机转矩脉动降低, 文献 [3] 提出利用导通角的控制来减小转矩脉动, 通过控制导通角来优化相电流, 实现降低转矩脉动, 但对于常压激励, 脉动的最小值由电动机的转矩 / 位置特性决定, 此方法有局限性. 文献 [4] 利用模糊控制降低转矩脉动是可能的, 但因 SR 电机驱动系统具有时变性, 系统的抗干扰性、鲁棒性较差.

基于以上问题, 设计了一种滑模变结构控制系统, 采用合适的开关角度后实现了电机无超调运行, 可使电机的转矩脉动变小, 降低电机的振动和噪音.

1 线性条件下开关磁阻电机的状态方程

开关磁阻电机每相电感随转子位置变化, 由于开关磁阻电机轮流在各相电感上升段励磁, 故只考虑相

收稿日期: 2004-10-12

第一作者简介: 孙亚宁 (1970~), 女, 副教授. 主要研究方向: 控制理论与控制工程研究. E-mail: qiaodengpan690821@

126.com

电感上升情况,在保证开关磁阻电机基本特性的情况下,为简化分析,忽略相电感的非线性因素.根据电机定、转子相对位置可知相电感与转子位置角的表达式为(假定定子极靴前极尖与转子极靴后极尖对准时的角度 θ_0 为参考角度):

定子极靴后极尖与转子极靴后极尖对准时的角度为 θ_1 ; 定子极靴前极尖与转子极靴前极尖对准时的角度为 θ_2 ; 定子极靴后极尖与转子极靴前极尖对准时的角度为 θ_3 .

由图 1 可知

$$L(\theta) = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_1} \theta + L_{\min} \quad (1)$$

式中电感 L_{\max} 和 L_{\min} 由定子磁极导磁率、相绕组匝数、电机结构等决定, $\theta \in (\theta_0, \theta_1)$ 令

$$k_L = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\theta_1} \quad \text{则}$$

$$L(\theta) = k_L \theta + L_{\min} \quad (2)$$

根据电机的机械运动方程可知 $T_e = J \frac{d^2 \theta}{dt^2} + \mu \frac{d\theta}{dt} + T_L$ (3)

式中: T_e —电动机的电磁转矩; J —电动机转子和负载的转动惯量; μ —粘性摩擦系数; T_L —负载转矩.

为研究方便,在这里可忽略粘性摩擦.则 $J \frac{d^2 \theta}{dt^2} = T_e - T_L$ (4)

由磁能 W 可推出开关磁阻电机每相的线性瞬时电磁转矩 $T_e = \frac{\partial W(i, \theta)}{\partial \theta}$ (5)

又因 $W = \int_0^i \psi(i, \theta) di$ 通常,开关磁阻电机的磁链 ψ 是相绕组电流和转子位置的函数,在线性条件下

$$\psi(\theta) = L(\theta) \cdot i \quad \text{从而可得} \quad (6)$$

$$T_e = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 \quad (7)$$

设供电电压为 U , 则每相电压平衡方程为 $u = R_i + \frac{d\psi}{dt}$ (8)

忽略相电阻 R , 各相励磁电压方程为 $u = L \frac{di}{dt} + k_L \frac{d\theta}{dt} i$ (9)

整理(4)式、(7)式和(9)式得 $\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{J} \left[\frac{1}{2} k_L i^2 - T_L \right]$ (10)

令 $y_1 = \theta$, $y_2 = \frac{d\theta}{dt}$, $y_3 = \frac{d^2 \theta}{dt^2}$, 可得一组非线性表达式, 将上述方程作状态变换 $x = T(y)$, 将其转化为正则

型后, 求其控制律. 令 $x_1 = y_1 = \theta$, $x_2 = y_2 = \frac{d\theta}{dt}$, $x_3 = i$ 则系统状态方程的正则型为

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = y_2 \\ \dot{y}_2 = y_3 \\ \dot{y}_3 = -\frac{k_L^2 x_2 x_3^2}{JL(x_1)} + \frac{k_L x_3}{JL(x_1)} u \end{cases} \quad (11)$$

式中 y_1, y_2, y_3 这三个状态量具有实际物理意义, 用它们完全可以描述系统的运动状态.

2 开关磁阻电机的滑模变结构控制设计

2.1 滑模变结构控制方式的优点

滑模变结构控制方式可使系统在一定条件下沿规定的状态轨迹作小幅度、高频率的来回运动, 是一种

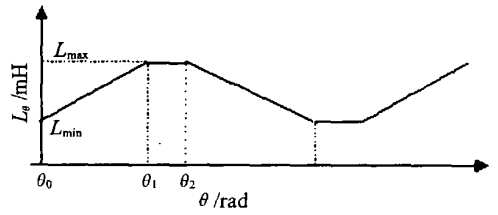


图1 开关磁阻电机相绕组电感曲线
Fig.1 Phase winding inductance curve of the switch reluctance motor

滑动模态, 并且可根据实际需要设计滑动模态, 与系统的参数和扰动无关. 滑模变结构系统的滑动模态具有完全自适应性, 任一系统都有不确定的参数, 要受到外部环境的各种干扰等, 但通过构造滑模变结构控制的控制律可使得各种外界扰动对滑动模态不发生影响, 实现完全自适应.

2 2 滑模变结构控制设计

针对电动机存在转矩脉动和电机模型不精确等特点, 可利用滑模变结构的完全自适应性, 把滑模变结构控制应用于开关磁阻电机驱动系统, 只要选择合适的开关角, 设计变结构控制系统, 就能实现降低电机转矩脉动, 提高系统的鲁棒性.

根据控制系统, 滑模变结构切换函数: $h = h(\theta)$, $h \in R^n$, 其中切换函数维数一般等于控制矢量的维数, 选取滑模切换函数:

$$h = k \left[\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta^*}{dt} \right] + \frac{d}{dt} \left[\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta^*}{dt} \right] \quad (12)$$

式中 $\frac{d\theta^*}{dt}$ 给定转速.

$$\dot{h} = k \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{d^3\theta}{dt^3} = ky_3 - \frac{k_L^2 x_2 x_3^2}{JL(x_1)} + \frac{k_L x_3}{JL(x_1)} u \quad (13)$$

$$\text{令 } R(x) = \frac{k_L^2 x_2 x_3^2}{JL(x_1)^2}, T(x) = \frac{k_L x_3}{JL(x_1)}$$

$$\text{则 } \dot{h} = ky_3 + R(x) + T(x)u \quad (14)$$

众所周知, 变结构控制系统趋近并到达滑模切换面由可达性条件决定, 即 $h\dot{h} < 0$ 但此条件不能反映正常运动时如何趋近切换面. 而正常运动品质要求趋近律优良, 以保证运动品质. 在这里选择一种等速趋近律.

$$\dot{h} = -\varepsilon \cdot \text{sign } h \quad \varepsilon > 0 \quad (15)$$

根据式 (14), (15) 可得

$$u = -T^{-1}(x) \left[\varepsilon \cdot \text{sign } h + ky_3 + R(x) \right], \quad T(x) \neq 0 \quad (16)$$

上式即为滑模变结构控制律.

根据滑模切换函数 $h = k \left[\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta^*}{dt} \right] + \frac{d}{dt} \left[\frac{d\theta}{dt} - \frac{d\theta^*}{dt} \right]$, 在 $h = 0$ 的滑动模态上解得

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta^*}{dt} (1 - e^{-kt}) \quad (17)$$

如果 $k > 0$ 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta^*}{dt}$, 可使得滑模变结构控制系统在滑动模态 $h = 0$ 上是渐进稳定的.

上述选择等速趋近律 $\dot{h} = -\varepsilon \cdot \text{sign } h$ 满足 $h\dot{h} < 0$ 能确保滑模变结构控制系统的可达性.

3 滑模变结构控制系统的结构

在式 (16) 中, 设 $T(x) \neq 0$ 也就是 $i \neq 0$ 要求相电流 i 的初值不为零, 即要求各相提前导通. 一般选择开通角 $\theta_{on} = \theta_0$, 关断角 $\theta_{off} < \theta_2$, 导通角 $\theta_b = \theta_{off} - \theta_{on} \leq Tr/2$ 式中 Tr 为转子极距角. 综上, 设计开关磁阻电机的滑模变结构控制系统如图 2 所示.

4 仿真实验

选取仿真实验电机参数如下:

$$N_s = 8, N_r = 6, P_N = 7.5 \text{ kW}, n_N = 1900 \text{ r/min}, U_N = 460 \text{ V}, L_m = 32 \text{ mH}$$

$$L_{m \min} = 10 \text{ mH}, L_{m \max} = 110 \text{ mH}, \theta_1 - \theta_0 = 0.35 \text{ rad}, J = 0.0016 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, T_L = 9 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$\frac{d\theta^*}{dt} = 4000 \text{ r/min}$$

利用 MATLAB 的 SIMULINK 仿真工具进行仿真, 实验结果描述如图 3 4 所示.

由多相轴转矩波形图 3 可见, 轴转矩脉动明显地减小, 脉动值约为 $\pm 8\%$. 而在未实施滑模变结构控制系统以前, 多相轴转矩的脉动值约为 $\pm 13\%$. 仿真结

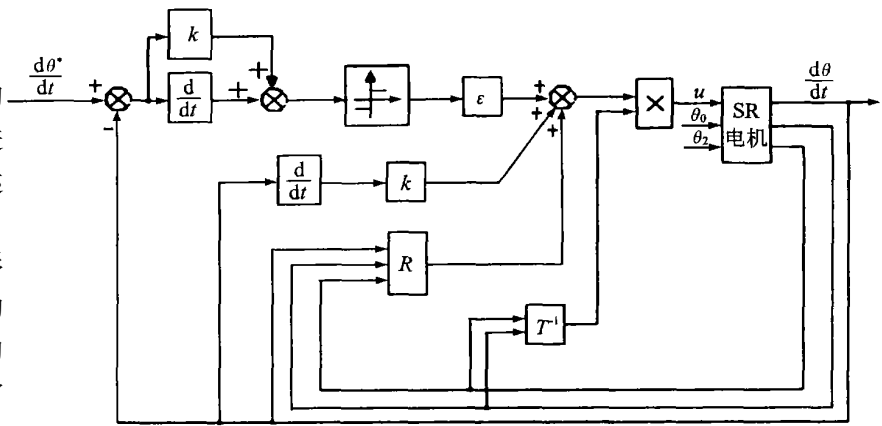


图2 滑模变结构控制系统框图

Fig.2 Block graph of variable structure control system with sliding

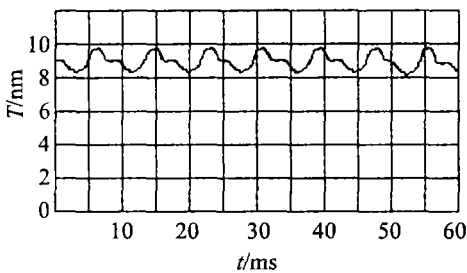


图3 多相轴转矩波形图

Fig.3 Multiphase axis-torque waveform

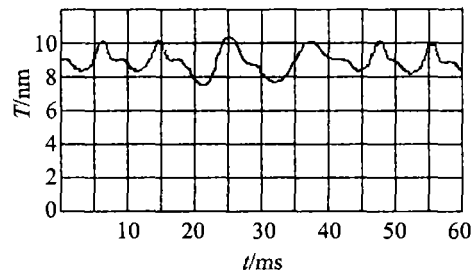


图4 突加负载扰动时多相轴转矩波形图

Fig.4 Multiphase axis-torque waveform on the condition of impact load disturbance

果表明图 4 即使在突然施加负载扰动的情况下, 采用前述设计的滑模变结构控制系统, 多相轴转矩的脉动值约为 $\pm 12\%$, 也可使电机实现无超调运行, 提高系统的鲁棒性.

5 结束语

开关磁阻电机已广泛应用于生产实际, 但是开关磁阻电机存在因换相、扰动等引起的转矩脉动, 较高的转矩脉动限制了其应用范围. 目前常利用导通角的控制或利用模糊控制降低转矩脉动, 控制系统均具有一定局限性.

设计采用滑模变结构系统控制, 从仿真实验结果来看, 即使在有扰动的情况下, 也能使开关磁阻电机的转矩脉动幅度明显下降, 实现电机无超调运行. 因此, 将滑模变结构控制引入开关磁阻电机驱动系统是可行的, 可使电机转矩稳定, 系统能实现无超调运行.

参考文献:

- [1] 王宏华. 开关型磁阻电动机调速控制技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995. 36~39
- [2] 黄建中, 蒋全, 周鹏. 开关磁阻电机的控制模式 [J]. 电气传动, 1997, 27(5): 10~13
- [3] Jiang Q, Ye J, Zhou E. Control Strategy to Minimize Torque Ripples of Switched Reluctance Motors [J]. Proc. of 1992 international conference on Electrical machines, 1992 (2): 475
- [4] 韩安荣, 韩默, 边春元, 等. 开关磁阻电机的模糊控制系统 [D]. 中国控制与决策学术年会论文集, 1999. 538~542
- [5] 陈隆昌, 顾宏. 开关磁阻电动机驱动系统的特点和性能 [J]. 电气传动, 1997, 27(4): 55~56