

# 基于 SRM 非线性电感模型相电流和电磁力的解析计算

袁晓玲,王宏华

(河海大学电气工程学院,江苏 南京 210098)

**摘要** 在考虑开关磁阻电动机(SRM)的转子位置角和电流对电感曲线影响的基础上,提出一种开关磁阻电动机的非线性电感模型,根据此模型解析计算了电机的相电流、电磁转矩和径向力.计算结果表明,该电感模型在 SRM 设计阶段,在不降低 SRM 力能指标的前提下,可减小径向力,从而为抑制振动提供理论依据,对 SRM 转矩脉动、振动噪声抑制策略的研究具有一定的意义.

**关键词** 开关磁阻电动机 非线性 电磁转矩 径向力

**中图分类号** TM352 **文献标识码** A **文章编号** 1000-1980(2006)06-0705-04

开关磁阻电机(以下称为 SR 电机)的定转子为双凸极结构,定子极上绕有励磁绕组,为了获得最大的出力,设计电机磁场工作处于饱和区,使 SR 电机模型呈高度非线性. SR 电机的电感特性曲线是建立 SR 电机数学模型的基础,它直接影响电机的分析、设计和控制.由于 SR 电机的电感模型是关于转子位置角和相电流的双重非线性函数,因此电感模型的非线性分析是 SR 电机数学模型中的难点.现有的 SR 电机分析多数是基于电感线性模型,仅考虑电感与转子位置角的关系,忽略了电感与电流的非线性关系,在控制过程中对电机性能的预测存在很大误差.为解决非线性建模问题,将有限元方法应用于 SR 电机,该方法具有较高的计算精度,但计算量大,不适于 SR 电机控制策略的研究.近年来人们提出了一些非线性模型,这些模型考虑了磁路的饱和效应,但对于电流波形的预测仍有较大误差.

本文在深入分析电感曲线特性的基础上,采用解析表达式来表示电感的非线性模型,研究基于 SR 电机非线性电感模型的控制策略.

## 1 非线性电感解析模型的建立

由于 SR 电机定转子的双凸极结构和磁路呈铁磁非线性,使得实际 SR 电机的电感曲线包含两种非线性关系,一种是关于转子位置角的非线性,另一种是关于定子相绕组电流的非线性.为方便地求解电流的解析解,并考虑电感与转子位置角和电流的关系,本文用下列构造函数来拟合电感曲线<sup>[1-6]</sup>.

$$L(\theta, i) = L_0 + L_F(\theta)(e^{-iL_{\max}} + L_H e^{-iL_{\min}}) \quad (1)$$

$$L_F(\theta) = (L_1 + L_3)(1 - \cos N_r \theta) + (L_2 + L_4)(1 - \cos 2N_r \theta) + L_3(1 - \cos 3N_r \theta) + L_4(1 - \cos 4N_r \theta) \quad (2)$$

$$L_H = L_{\max} + L_{\min} \quad (3)$$

式中: $L_{\min}$ ——电机的最小电感, $L_0 = L_{\min}$ ;  $L_{\max}$ ——电机的最大电感, $L_1 = (L_{\max} - L_{\min})/2$ ;  $L_2$ ——电机定子极宽系数;  $L_3$ ——电机转子极宽系数;  $L_4$ ——定转子相对极宽系数;  $N_r$ ——转子极数;  $\theta$ ——转子位置角.由式(1)拟合的电感曲线如图 1 所示,电流值为 1~12 A,拟合的均方差为 1.96%,最大误差为 15.91%.

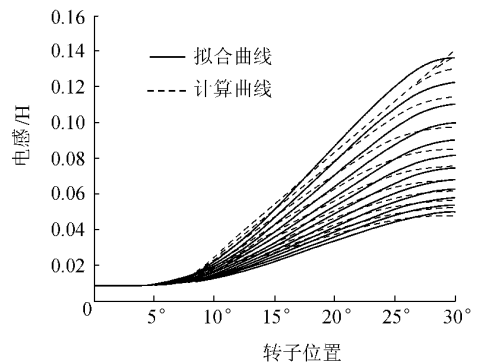


图 1 拟合电感曲线与采用非线性方法计算的电感曲线比较

Fig.1 Comparison of imitative inductance curve with that obtained by nonlinear method

从工程应用来看,拟合的电感曲线能代表实际的电感曲线.

2 相电流的解析计算

对于本文研究的四相 SR 电机,作如下假设:(a)主电路电源的直流电压保持不变;(b)忽略铁心的磁滞和涡流效应,即忽略铁耗;(c)电机各相参数对称,每相两个线圈正向串联,忽略相间互感;(d)忽略相绕组电阻的影响  $R_k i_k$ .

由电路基本定律得到一相电压平衡方程式为

$$\pm U = \left[ L(\theta, i) + i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} \right] \frac{di}{dt} + i \frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \tag{4}$$

式中:  $+U$ ——绕组励磁阶段的外加电压;  $-U$ ——开关关断后续流阶段所加的电压;  $R$ ——相绕组的电阻;  $i$ ——相绕组的电流. 式(4)中,

$$\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial i} = -L_F(\theta)(L_{\max}e^{-iL_{\max}} + L_{\min}L_He^{-iL_{\min}}) \tag{5}$$

$$\frac{\partial L(\theta, i)}{\partial \theta} = L_{dF}(\theta)(e^{-iL_{\max}} + L_He^{-iL_{\min}}) \tag{6}$$

$$L_{dF}(\theta) = N_r(L_1 + L_3)\sin(N_r\theta) + 2N_r(L_2 + L_4)\sin(2N_r\theta) + 3N_rL_3\sin(3N_r\theta) + 4N_rL_4\sin(4N_r\theta) \tag{7}$$

将式(5)和(6)代入式(4),方程两端同乘  $dt$  并积分,得

$$\begin{aligned} \pm Ut = L_0 i - L_F(\theta) \left( \frac{e^{-iL_{\max}}}{L_{\max}} - \frac{1}{L_{\max}} + \frac{L_H e^{-iL_{\min}}}{L_{\min}} - \frac{L_H}{L_{\min}} \right) + L_F(\theta) \left[ e^{-iL_{\max}} \left( i + \frac{1}{L_{\max}} \right) - \right. \\ \left. \frac{1}{L_{\max}} + L_H e^{-iL_{\min}} \left( i + \frac{1}{L_{\min}} \right) - \frac{L_H}{L_{\min}} \right] + i L_{iF}(\theta)(e^{-iL_{\max}} + L_H e^{-iL_{\min}}) \end{aligned} \tag{8}$$

其中 
$$L_{iF}(\theta) = (L_1 + L_3)(\cos(N_r\theta_{on}) - \cos(N_r\theta)) + (L_2 + L_4)(\cos(2N_r\theta_{on}) - \cos(2N_r\theta)) + L_3(\cos(3N_r\theta_{on}) - \cos(3N_r\theta)) + L_4(\cos(4N_r\theta_{on}) - \cos(4N_r\theta)) \tag{9}$$

将时间  $t$  转换为角度与速度的关系,得

$$t = \frac{\theta - \theta_{on}}{\omega_r} \tag{10}$$

将式(10)代入式(8)并化简,得电流的解析解:

$$\frac{\pm U(\theta - \theta_{on})}{\omega_r} = i \{ L_0 + [L_F(\theta) + L_{iF}(\theta)](e^{-iL_{\max}} + L_H e^{-iL_{\min}}) \} \tag{11}$$

3 电磁转矩的解析计算

根据机电能量转换的基本原理得转矩为

$$T(\theta, i) = \frac{\partial \int_0^i L(\theta, i) i di}{\partial \theta} \tag{12}$$

将式(5)代入式(12),解得电磁转矩为

$$\begin{aligned} T(\theta, i) = L_{dF}(\theta) \left[ \frac{1}{L_{\max}^2} + \frac{L_H}{L_{\min}^2} - \frac{1}{L_{\max}} e^{-iL_{\max}} \left( i + \frac{1}{L_{\max}} \right) - \right. \\ \left. \frac{L_H}{L_{\min}} e^{-iL_{\min}} \left( i + \frac{1}{L_{\min}} \right) \right] \end{aligned} \tag{13}$$

由式(13)可得基于非线性电感模型的电磁转矩曲线,如图2所示,电流值为1~12 A.

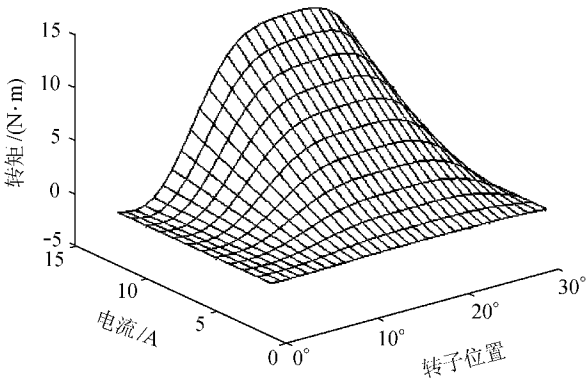


图2 基于非线性电感模型的电磁转矩曲线  
Fig.2 Electromagnetic torque curve based on nonlinear inductance model

4 径向力的解析解

SR 电机定、转子间的径向磁吸力是由磁路具有循最小磁阻路径闭合趋势产生的.

为简化分析,作如下假设<sup>[2]</sup>:(a)磁路是线性的;(b)径向力集中作用在定子磁极;(c)定子铁心刚性集中在机壳内,整个定子的变形可用一对称弹性圆筒近似,因此定子振动可用质量、弹簧、阻尼二阶系统模拟.

设相绕组励磁电流为常数,由虚位移法可知,作用在励磁极上的径向力<sup>[7-8]</sup>为

$$f_m(\theta,i) = \frac{dW_m}{dg} \Big|_{i = \text{constant}} \tag{14}$$

$$W_m = \frac{i^2 L(\theta,i,g)}{2} \tag{15}$$

式中: $W_m$ ——定、转子间气隙磁场能量; $g$ ——定、转子间气隙.将式(15)代入式(14),得

$$f_m(\theta,i) = \frac{1}{2} i(\theta,L)^2 \frac{dL(\theta,i,g)}{dg} \tag{16}$$

其中, 
$$\frac{dL(\theta,i,g)}{dg} \approx - \frac{L(\theta,i)}{g(\theta)}$$

则有 
$$f_m(\theta,i) = - \frac{1}{2} i(\theta,L)^2 \frac{L(\theta,i)}{g(\theta)} \tag{17}$$

式中负号的物理意义是 径向力有使气隙缩短的趋势.

式(17)为径向力的解析式,其中电流  $i(\theta,L)$  由式(11)确定.由式(17)可得径向力曲线,如图 3 所示,电流值为 1~12 A.

当 SR 电机运行于角度位置控制 (APC) 方式时,根据式(11)、式(13)和式(17)计算所得的相电流、电磁转矩和径向力波形如图 4 所示.

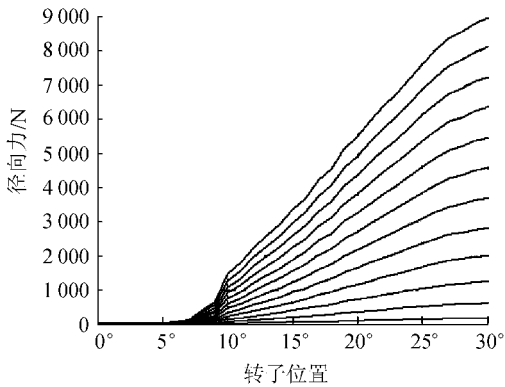


图 3 基于非线性电感模型的径向力曲线  
Fig.3 Result of radial force curve based on nonlinear inductance model

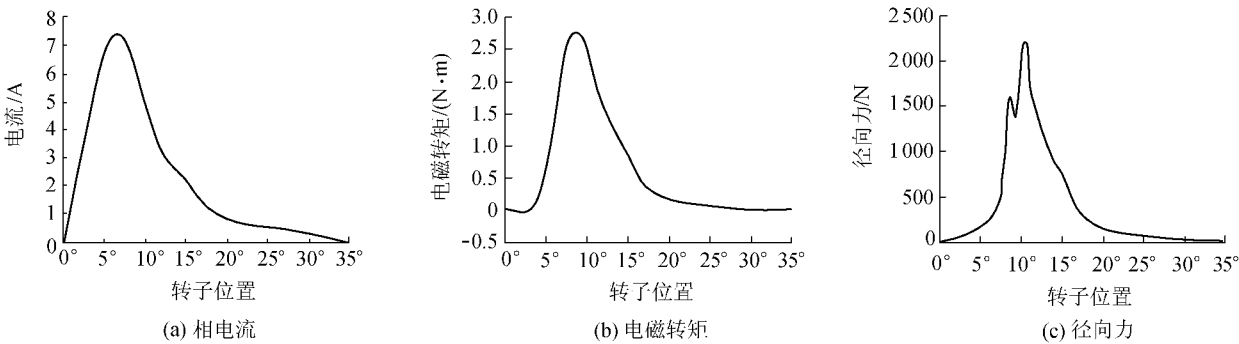


图 4 APC 方式下的相电流、电磁转矩、径向力波形 ( $\theta_{on}=0^\circ, \theta_{off}=15^\circ, n=1200\text{ r/min}$ )

Fig.4 Curves of phase current, electromagnetic torque, and radial force in APC for  $\theta_{on}=0^\circ, \theta_{off}=15^\circ$ , and  $n=1200\text{ r/min}$

5 结 语

本文提出一种 SRM 非线性电感解析模型,在此基础上运用虚位移法研究了径向力的解析计算.仿真表明,在 SRM 的设计阶段,采用本文提出的 SRM 非线性电感解析模型对径向力和电磁转矩进行分析计算,在不降低 SRM 力能指标的前提下,能减小径向力.本文研究成果可为抑制振动提供理论依据,对于进一步开展 SRM 转矩脉动、振动噪声抑制策略的研究具有一定意义.

## 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, 1999: 21-22.
- [2] 王宏华. 开关磁阻电动机振动抑制研究及控制系统设计[D]. 杭州: 浙江大学, 1997.
- [3] 袁晓玲. 开关磁阻电动机振动分析及控制研究[D]. 南京: 河海大学, 2004.
- [4] YIFAN T. Characterization, numerical analysis, and design of switched reluctance motors[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1997, 33(6): 1544-1552.
- [5] 刘珊珊, 赵争鸣, 孟朔. 开关磁阻电动机的快速仿真非线性模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2002, 42(9): 1176-1179.
- [6] 严加根, 刘闯, 严利, 等. 基于 MATLAB 的开关磁阻发电机系统的非线性建模与仿真[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 100-103.
- [7] ISMAIL A, ALEKSANDAR M S, GILEAD T, et al. Adaptive torque - ripple minimization in switched reluctance motors[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2001, 48(3): 664-672.
- [8] IQBAL HUSAIN. Minimization of torque ripple in SRM drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 28-39.

## Calculation of phase current and electromagnetic force based on nonlinear inductance model of SRM

YUAN Xiao-ling, WANG Hong-hua

(College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract** In consideration of the influences of rotor angle and phase current on inductance curve, a nonlinear inductance model of switched reluctance motor (SRM) was developed. With the model, the phase current, electromagnetic torque, and radial force were calculated. The calculated results show that, without degrading the force performance, the model can reduce radial force during the design stage of SRM, and thus it provides a theoretical basis for vibration depression. The model is of certain significance to minimization of torque fluctuation and reduction of vibration-induced noise.

**Key words** switched reluctance motor; nonlinearity; electromagnetic torque; radial force