

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.021

# 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统

王洪诚<sup>1</sup>, 陈刚<sup>1</sup>, 王钰涵<sup>2</sup>, 沈霞<sup>1</sup>

(1. 西南石油大学电气信息学院, 成都 610500; 2. 大港油田滩海开发公司, 天津 300028)

**摘要:** 针对开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM) 存在的问题, 笔者基于 SRM 的线性模型, 对转换器的结构和控制策略进行了研究, 通过对 SRM 的系统结构、电感曲线和换域前后的等效电路分析, 在 SRM 完全运行在线性磁链区域理想情况下, 得到磁性特性曲线。并讨论了 SRM 的控制参数、功率转换器结构和换向方法, 对部分参数进行 Matlab 仿真。结果表明: 在  $\theta_{on}=0^\circ$  和  $\theta_{off}=30^\circ$  和无负载情况下, 仿真与理论分析是一致的, 从而为开关磁阻电机调速系统 (switched reluctance drive, SRD) 在工程实践中的应用提供了一种理论支持。

**关键词:** 开关磁阻电机; 非线性; 线性模型; 控制策略

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## The Switched Reluctance Motor Control System Based on Linear Model

Wang Hongcheng<sup>1</sup>, Chen Gang<sup>1</sup>, Wang Yuhuan<sup>2</sup>, Shen Xia<sup>1</sup>

(1. School of Electric Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. The Beach Development Company of CNPC, Tianjin 300028, China)

**Abstract:** The converter structure and control strategy were researched in response to the problems of switched reluctance motor (SRM) based on the linear model of SRM. The magnetic characteristic curve was got after analyzing the system structure of SRM, the inductance curve and the equivalent circuit of heat transfer domain and post under the ideal conditions of SRM ran entirely in linear flux region. The control parameters of SRM, power converter structure and the method of commutation were discussed and the Matlab simulation of some parameters was finished. The simulation results show that the simulation is consistent with the theoretical analysis on the condition of  $\theta_{on}=0^\circ$ ,  $\theta_{off}=30^\circ$  and without load, so this provides a theoretical support for switched reluctance drive (SRD) application in engineering practice.

**Key words:** switched reluctance motor; nonlinear; linear model; control strategy

### 0 引言

开关磁阻电机 (switched reluctance motor, SRM 或 SR 电机) 是近 20 年来快速发展起来的一种特殊结构的新型调速电机, 已被广泛应用于航空、汽车、纺织、家电生产、石油开发生产等行业<sup>[1]</sup>。SRM 的主要优点是高输出转矩、宽速度调节范围、结构简单、制造成本低、容错性强、起动转矩大并适合频繁起制动工作、适用高温高湿环境可靠性高、可控参数多调速性能好和效率高损耗小。

以 SRM 为核心组成的电力拖动系统或调速系统 (switched reluctance drive, SRD) 是继直流调速系统、交流变频调速系统、无换向器电动机调速系统之后发展起来的最新一代交流无级调速系统, 称为第三代调速系统, 它具有结构简单、坚固、成本低、工作可靠、控制灵活、运行效率高等许多特点, 具有交、直流传动系统和无换向器电动机调速系统所没有的优点。但由于 SRM 的双凸极结构, 使它的磁特性不仅具有高度的非线性, 导致它的扭矩和励

磁电流之间存在着严重的非线性特性<sup>[2]</sup>, 电动机的磁链是定子电流和转子位置的二元非线性函数, 要确定它的性能是非常困难的; 因此, 笔者对基于线性模型的 SRM 控制系统进行研究。

### 1 SRM 调速系统的结构及线性模型

开关磁阻电动机调速系统结构如图 1 所示。笔者假定电机磁场分布为正弦, 转子位置为  $\theta$ , 电机的凸极形状对每相电感而言, 基频上面没有谐波, 并忽略由于两相之间耦合产生的互感, 但不忽略定子绕组的内阻。

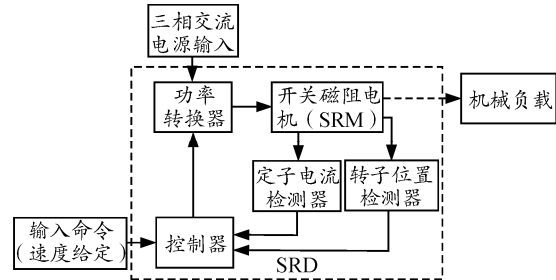


图 1 开关磁阻电动机调速系统结构框图

收稿日期: 2012-02-13; 修回日期: 2012-03-13

基金项目: 2011年度四川省教育厅重点项目 (11ZA022)

作者简介: 王洪诚 (1955—), 男, 四川人, 教授, 从事电气传动与控制研究。

线性模型下 SRM 的 A 相电感曲线  $L(\theta)$  如图 2 所示。

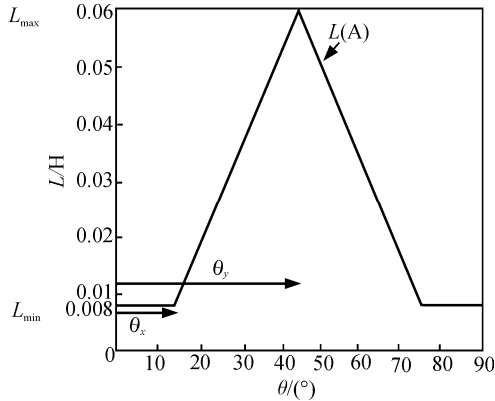


图 2 线性模型下 SRM 的 A 相电感曲线

$L(\theta)$  是对 A 相而言的。  $L(\theta)$  关于  $\theta = 0^\circ$  对称，每相电感由  $\theta_s$  表示，有

$$\theta_s = 2\pi \left( \frac{1}{N_r} - \frac{1}{N_s} \right) \quad (1)$$

$N_r$  和  $N_s$  分别是转子和定子的磁极数。当电机转子和定子的极弧相等即  $\beta_r = \beta_s$  时，有如下角度关系

$$\theta_x = \left( \frac{\pi}{N_r} - \beta_r \right), \quad \theta_y = \frac{\pi}{N_r} \quad (2)$$

$\theta_x$  和  $\theta_y$  如图 2 所示。对于 6/4 极 SRM，具有如下参数关系： $L_{\min} = 8 \text{ mH}$ ， $L_{\max} = 60 \text{ mH}$ ， $\beta_r = \beta_s = 30^\circ$ 。

由式 (2) 得到

$$\theta_x = 15^\circ, \quad \theta_y = 45^\circ$$

A 相方程为

$$\frac{d\Psi_i(\theta, I)}{dt} + RI = V \quad (3)$$

不考虑饱和和互感的影响，A 相磁通可以用式 (4) 来表示

$$\Psi(\theta, I) = L(\theta)I \quad (4)$$

三相 ( $n=3$ ) 总的能量为

$$W_{\text{total}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 L[\theta + (n-i-1)\theta_s] I_i^2 \quad (5)$$

总的转矩为

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 \frac{dL[\theta + (n-i-1)\theta_s]}{d\theta} I_i^2 \quad (6)$$

机械方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} = T - T_1 - \mu\omega \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (8)$$

其中： $T_1$  表示负载转矩； $\mu$  为摩擦系数。角速度为一个恒定值 ( $\omega = 230 \text{ rad/s}$ )。

图 3(a) 所示 SRM 一相的等效电路， $V(t)$  为电压源， $R$  为相电阻， $L(\theta)$  为瞬时电感， $e(t)$  为瞬时反电动势， $\omega = 230 \text{ rad/s}$  和电压源  $V(t) = [150, -150, 0]V$  为定值。

将以转子位置为变量的函数转换为以时间为变量的函数 (从  $\theta$  域到  $t$  域)，变换关系为

$$t = \frac{\theta}{\omega} \quad (9)$$

其中： $\theta$  为转子位置，rad； $\omega$  为角速度，rad/s。

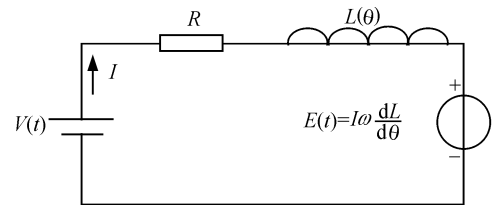
A 相的电感为时域曲线，经式 (9) 将转子位置角转换到时域

$$\theta_x \rightarrow t_x \Rightarrow t_x = \frac{\theta_x}{\omega} \quad (10)$$

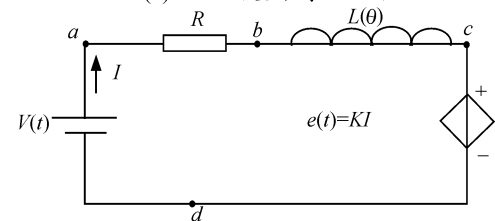
$$\theta_y \rightarrow t_y \Rightarrow t_y = \frac{\theta_y}{\omega}$$

$$K = \omega \frac{dL}{d\theta} \quad (11)$$

经域转换后的 A 相等效电路如图 3(b)。



(a) SRM 的基本等效电路



(b) 域转换后 SRM 的等效电路

图 3 SRM 换域前后的等效电路

其中  $e(t)$  为 SRM 的电动势，相当于一个电流控制的电压源。

## 2 SRM 的磁链特性

如果 SRM 的定子和转子磁极对称分布，则磁

链  $\Psi$  具有如下特性:

- 1) 磁链  $\Psi$  是定子电流  $i_A$  (A 相) 和转子位置  $\theta$  的函数;
- 2) 对于确定的转子位置  $\theta$ , 在不考虑饱和度影响的前提下, 磁链  $\Psi$  只是定子电流  $i_A$  的线性函数;
- 3) 对于确定的定子电流  $i_A$ ,  $\Psi$  是转子位置  $\theta$  的周期函数;
- 4) SRM 的磁特性如图 4 所示。

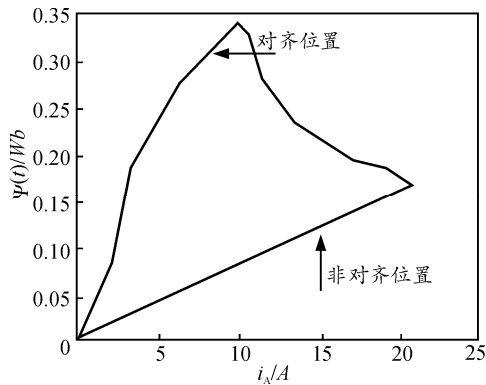


图 4 SRM 的磁链特性曲线

可以肯定: 磁链  $\Psi$  在转子位置对齐和非对齐位置之间总是有界的。同时对于相同的  $i_A$ , 在转子位置对齐和非对齐位置处  $\Psi$  是对称的;

5) 对于较大值  $i_A$ , 在不同的  $\theta$  处, 饱和程度不同。越接近对齐位置, 饱和度的影响越强烈。

### 3 线性磁链区 SRM 的控制

如果 SRM 完全运行在线性区域, 其磁链特性曲线就非常简单。根据图 4 中的 SRM 的磁链特性曲线, 如果定子电流足够小, 就可以保证 SRM 运行于线性区域。笔者采用一台 6/4 极 SRM 进行实验, 在实验过程中, SRM 完全运行在线性磁链区域内。

1) 线性磁链区域模型。

设 SRM 的控制是在以下条件下进行。

- ① 无饱和度影响;
- ② 定子对称, 互感值为理想值 0;
- ③ 磁场分布为正弦, 转子位置为  $\theta$ ;
- ④ 凸极形状通过每相电感的基频中没有谐波来描述。

2) 功率转换器的结构。

SRM 驱动器的相间转换必须根据转子位置精确确定, 才能得到平稳的输出转矩。笔者采用了转子位置反馈控制, 相间转换通过功率半导体开关器件实现。

功率转换器的结构对 SRM 的性能影响较大, 根据连续相之间是否独立控制原则, 分为独立和非独立 2 种结构。独立结构比非独立结构需要功率半导体器件少。但独立结构的关断角对部分 SRM 控制有一定的局限性, 这些局限性会直接影响换向方法。

3) 换向方案。

SRM 必须工作在连续的相间切换模式, 而执行切换动作的是转换器的功率半导体器件。因此除了驱动器硬件电路外, 还必须有相应的控制算法来作为执行切换的指令。

当前导通相和即将导通相的控制是否独立, 会直接影响换向时刻和闭合角, 即除了要满足 SRM 自己的运行规则外, 还应考虑转换器可能存在的其他控制要求。笔者假定电压源为可变电压源, 它的周期通过切换周期来定义, 如图 5 所示。

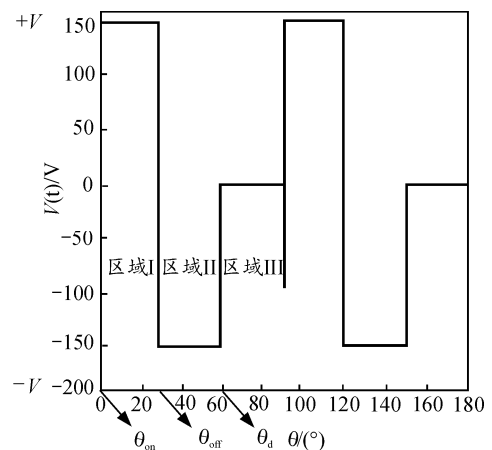


图 5 SRM 在线性模型下的相电压曲线

图 5 中的切换周期被划分为 3 个区域:

区域 I: 从开通角  $\theta_{on}$  处向一相线圈供电时开始控制, 直到关断角  $\theta_{off}$  处控制结束。

区域 II: 外加电压反向, 直到确定的消磁角  $\theta_a$  为止, 在这期间反馈磁通接近于 0。

区域 III: 外加电压的值保持为 0。

4) 闭环控制。

SRM 的闭环控制调速系统结构框图如图 1 所示。电流环由电流控制器、功率转换器、SRM 定子绕组和电流反馈传感器组成。换向控制器和速度调节器由数字信号处理器 DSPACE 控制器实现。转子速度和位置检测采用位置编码器。

最后采用 Matlab 对 SRM 模型进行仿真, SRM 的仿真参数如下:

$$\omega = 230 \text{ rad/s}$$

$$V(t) = (150 \ \& -150 \ \& 0)V$$

$$R = 130 \ \Omega$$

$$L_{\min} = 8e-3 \text{ H}$$

$$L_{\max} = 60e-3 \text{ H}$$

$$\beta_r = \beta_s = (30^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

$$\theta_x = (15^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

$$\theta_y = (45^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

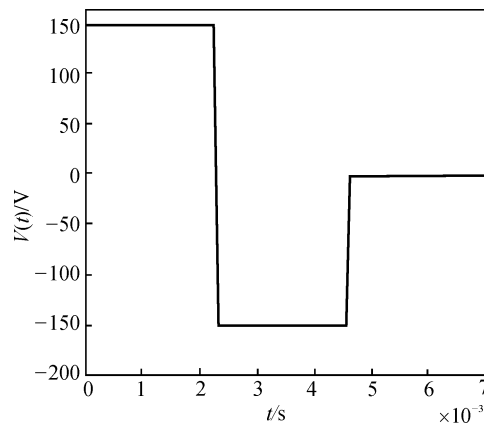
$$\theta_{\text{on}} = (0^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

$$\theta_{\text{off}} = (30^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

$$\theta_d = (60^\circ) \times (\pi/180) \text{ rad/s}$$

设速度常数, 初值为 0。当  $N_r = 4$ , 转子对齐  $45^\circ$ , 换向角  $\theta_{\text{off}}$  接近  $30^\circ$ 。

图 6 为  $\theta_{\text{on}} = 0^\circ$ ,  $\theta_{\text{off}} = 30^\circ$ , 空载情况下对 SRM 模型部分参数仿真的结果。结果表明  $\theta_{\text{on}} = 0^\circ$ ,  $\theta_{\text{off}} = 30^\circ$  时无负载情况。



(c) 电压仿真曲线

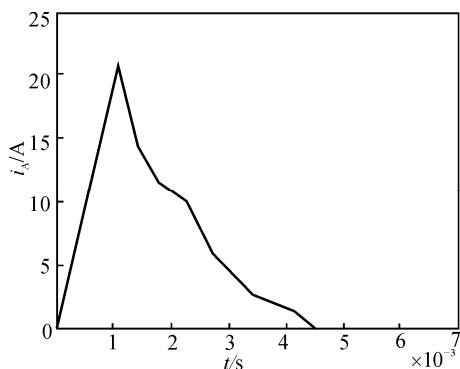
图 6 SRM 部分参数的仿真曲线

### 4 结论

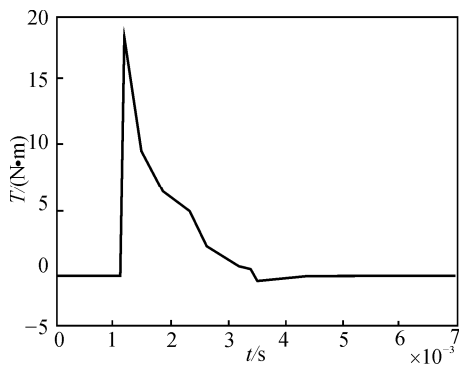
结果表明: 该研究对由开关磁阻电机为核心所组成的调速系统的性能研究有非常积极的意义, 也为这种调速系统在工程实践中的推广应用提供了一定的理论支持。

### 参考文献:

- [1] Radun A. Design considerations for the switched reluctance motor[J]. IEEE Transactions on Ind. Appl., 1995, 31(5): 5.
- [2] Miller T J. Switched reluctance motor and their control[M]. Hillsboro/London, Magna Physics Publishing/Oxford University Press, Hillsboro, 1993.
- [3] Y Tang. Characterization, numerical analysis and design optimization of switched reluctance motors[J]. IEEE Transactions on Ind. Appl., 1997, 33(11): 6.
- [4] 孙晓明, 赵德安, 李瑶, 等. 基于 Matlab 的开关磁阻电机非线性建模仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(1): 67-70.
- [5] 孙丹, 贺益康, 智大为. 基于非线性模型的开关磁阻电机自适应模糊控制[J]. 电工电能新技术, 2001(4): 9-13.
- [6] 阮毅, 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009, 8: 1-2; 59-60.
- [7] 胡猛, 张芊. 开关磁阻电动机的原理及控制策略研究[J]. 机电设备, 2010(3): 22-25.
- [8] 孙建忠, 白凤仙. 基于 DSP 的开关磁阻电机调速系统的模糊控制[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(5): 33-36.
- [9] 李大凡, 王守臣, 诸静. 开关磁阻电机的模糊神经网络模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 11-14.



(a) A 相电流仿真曲线



(b) 转矩仿真曲线