

Study on the Regenerative Braking of Switched Reluctance Motor Based on DSP

WANG Chao, DU Liufeng

School of Machinery and Electricity Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang, China

Abstract: This paper takes a 3kw switched reluctance motor as the research object, and studies the regenerative braking function of the fourth quadrant. It has been analyzed that three kinds of control method while the regenerative braking of switched reluctance motor is functioning and the switched reluctance motor regenerative braking control system based on DSP56F803 has been designed. Through experiment we come to the conclusion that switched reluctance motor has good capability of brake and can realize the function of the fourth quadrant easily.

Key words: switched reluctance motor; digital signal processor; regenerative braking; control strategy

基于 DSP 的开关磁阻电机的回馈制动的研究

王超, 杜留峰

河南科技学院机电学院, 新乡, 中国, 453003

摘要: 本文以一个 3KW 开关磁阻电机为研究对象, 对其第四象限的回馈制动运行进行了研究, 分析了三种开关磁阻电机回馈制动运行时的控制方法, 设计了基于 DSP56F803 的开关磁阻电机回馈制动控制系统。实验结果表明, 中小功率开关磁阻电机具有较好的制动效果, 可以比较方便的实现四象限运行。

关键词: 开关磁阻电机; 数字信号处理器 (DSP); 回馈制动; 控制策略

1 引言

开关磁阻电机(SRM)作为一种新型电机, 以其结构简单、可靠性高、容错能力强以及调速范围广的优势, 在电力传动领域具有广阔的发展前景。本文以一个 3KW 四相(8/6)结构开关磁阻电机为研究对象, 对其第四象限的回馈制动运行特点及其控制策略进行研究, 以 DSP56F803 为控制核心, 设计开关磁阻电机回馈制动的控制系统, 旨在为拓宽开关磁阻电机的应用奠定基础。

2 开关磁阻电机回馈制动工作原理

2.1 开关磁阻电机回馈运行的励磁模式

开关磁阻电机回馈发电运行时可以采用自励和他励两种回馈发电工作模式。所谓自励模式就是在电压建立初始瞬间, 有外接电源(蓄电池)提供初始励磁, 当电压建立后, 断开外接电源, 由输出电容提供励磁能量。在这种模式中, 由于建压后则不再需要外电源, 系统体积较小, 效率高。他励模式是指在回馈运行过程中始终由外接电源提供励磁电压。在他励模式下,

励磁回路与发电回路彼此独立, 线路比较复杂, 励磁电压与输出电压无关, 两者可以独立调节, 因此控制比较方便。对自励模式而言, 其励磁电压就是输出电压, 相电流的回馈发电区域相绕组上的反压也是输出电压, 而他励模式的励磁电压是电源电压而相绕组续流反压是输出电压。本课题设计的开关磁阻电机回馈控制系统采用的是自励模式。

2.2 开关磁阻电机回馈运行的励磁过程

开关磁阻电机回馈发电的励磁过程和异步发电机类似, 是靠剩磁来实现自励的。它对应转速 n 的磁化曲线是一族与转角 θ 相关的相磁链曲线, 如图 1 所示。

开关磁阻电机必须有对应于转速 n 的足够的剩磁通 $\dot{\Phi}_s$ 才能实现自励, 由于存在剩磁通 $\dot{\Phi}_s$, 依据电磁感应定律, 定子绕组将感应产生剩磁电势 \dot{E}_s , 此电势加在电容器上, 使定子绕组流过相位超前此电势 90° 的电容电流 \dot{I}_c 。 \dot{I}_c 通过定子绕组便生成磁通 $\dot{\Phi}_c$, 而且 $\dot{\Phi}_c$ 与 \dot{I}_c 是同相位的, 矢量图如图 2 所示, 由图可见, $\dot{\Phi}_c$ 与 $\dot{\Phi}_s$ 相位相同, 说明电容电流产生的磁通方向正好与剩磁的磁通方向相同, 它们直接相加而使气

隙中的磁通增加，随之定子绕组中的感应电势跟着升高。由于电势的升高，则又引起电流、磁通以及电势继续增加，如此反复，电容 C 上的电压便逐步建立起来，以作为开关磁阻电机的励磁电压，这就是自励模式的励磁过程。

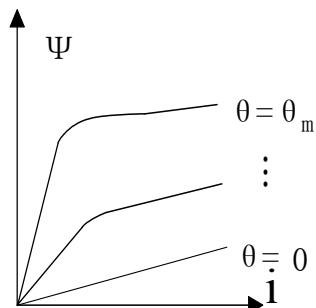


图 1. 自励模式的相磁链

Figure 1. The phase magnetic flux linkage of self-excited model

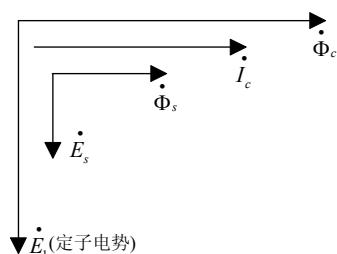


图 2. 自励时的矢量图

Figure 2. The vector diagram of self-excitation

3 开关磁阻电机回馈运行的数学模型

对开关磁阻电机回馈制动运行线性分析的基本方法与电动运行的情况类似，以四相 8/6 结构电机为例，假设电机磁路不饱和，因此，相绕组电感 $L(\theta)$ 与电流无关。下面以自励模式为例对开关磁阻电机回馈制动运行进行线性模式分析。

3.1 基本电路方程

开关磁阻电机各相绕组由开关电路控制工作。设主开关在 $\theta = \theta_1$ 时刻触发，在 $\theta = \theta_2$ 时刻关断。即 $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$ 阶段为励磁阶段，在 $\theta > \theta_2$ 阶段为回馈发电阶段。开关磁阻电机的每一相绕组可看作是由一个电阻 R 和电感线圈 L 串联而成。相应电路方程为：

$$\pm U_s = -e + ir \quad (1)$$

式中， $\pm U_s$ 适于励磁阶段， $-U_s$ 适于回馈发电阶段； e 为相绕组电势。

相绕组磁链方程为：

$$\psi = Li \quad (2)$$

相应可得相绕组电势：

$$e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} - i \frac{\partial L}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (3)$$

设电机匀速旋转，则上式可改写为：

$$\pm U_s = L \frac{di}{dt} + i \left(\frac{\partial L}{\partial \theta} \omega + r \right) \quad (4)$$

若不计漏磁和边缘散磁，回馈制动线性模式相电感曲线 $L(\theta)$ 可简化为图 3 所示梯形规律。一个周期为 90° ，相电感最小处对应 0° 位置，最大处对应 45° 位置。开关磁阻电机电动/制动状态的改变只需要简单地把开关角改变即可。电动状态的工作电流主要作用在电感的上升区，即在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 范围；回馈制动状态的工作电流主要作用在电感下降区，即 $45^\circ \sim 90^\circ$ 范围。一般而言，转子齿极宽略大于定子齿宽，出现了一个 L_{\max} 的小平顶；而转子槽宽常大于定子齿宽，故存在 L_{\min} 小平台。图中画出了一个齿距角 θ_r 周期。

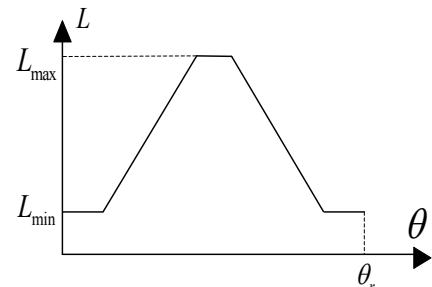


图 3. 线性模式相电感曲线

Figure 3. The curve of phase inductance in linear model

3.2 相电流表达式

相绕组电阻影响很小，忽略电阻及管压降，以做进一步简化，那么

$$\pm U_s = \frac{d\psi}{dt} \quad (5)$$

据此，以主开关触发开通瞬间为时间坐标原点，则得图 4 粗实线所示相绕组磁链规律：

$$\begin{cases} \psi = U_s t & \theta_1 < \theta < \theta_2 \\ \psi = 2\psi_{\max} - U_s t & \theta_2 < \theta < 2\theta_2 - \theta_1 \end{cases} \quad (6)$$

其中：

$$\psi_{\max} = U_s \frac{\theta_2 - \theta_1}{\omega} \quad (7)$$

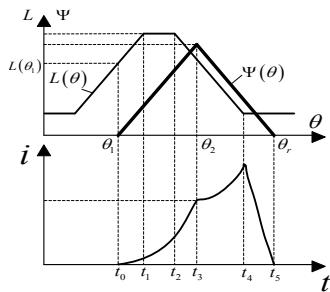


图 4 相电流与转子位置角的关系

Fig.4 The relation between phase current and the angle of rotor position

由 ψ 和 L 的变化规律, 不难根据(2)式获得相电流规律。其具体过程分五个工作阶段:

(1) ($t_0 \sim t_1$) 阶段:

$$i = \frac{U_s t}{L(\theta_1) + K\omega t} \quad (8)$$

由上式可见, 导通开始瞬间, 由于在时刻 O (对应 $\theta = \theta_1$) 时 $L(\theta_1)$ 的值较大, 相电流上升速度较慢。

(2) ($t_1 \sim t_2$) 阶段:

$$i = \frac{U_s t}{L_{\max}} \quad (9)$$

进入此阶段电流上升变快, 将按正比例上升。

(3) ($t_2 \sim t_3$) 阶段:

$$i = \frac{U_s t}{L_{\max} - K\omega(t - t_2)} \quad (10)$$

因此, 该阶段电流上升率比上一阶段更快, 且越来越快。

(4) ($t_3 \sim t_4$) 阶段:

$$i = \frac{2\psi_{\max} - U_s t}{L_{\max} - K\omega(t - t_2)} \quad (11)$$

转速较高时, 电流将继续上升; 转速较低时电流将下降。

(5) ($t_4 \sim t_5$) 阶段:

$$i = \frac{2\psi_{\max} - U_s t}{L_{\min}} \quad (12)$$

此阶段在 U_s 作用下电流下降很快。

3.3 电磁转矩表达式

在线性化模型下, 可以写出电磁转矩的解析表达式为:

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (13)$$

由上式结合 和 以及相电流 的变化规律不难求出电磁转矩的变化规律。

$$T = \begin{cases} \frac{1}{2} K i^2 & t_0 \leq t \leq t_1 \\ 0 & t_1 \leq t \leq t_2 \\ -\frac{1}{2} K i^2 & t_2 \leq t \leq t_4 \\ 0 & t_4 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (14)$$

4 开关磁阻电机回馈制动控制策略

开关磁阻电机在回馈制动运行中控制的主要目标是转矩, 这主要是通过控制励磁电流 I_c , 实现控制的目标。 I_c 的大小反映了励磁的强度, 同时反映了储存磁场能量的大小, 是开关磁阻电机回馈制动运行时的主控参数。

4.1 开关磁阻电机回馈制动控制方法

开关磁阻电机的实际控制变量包括: 开通角 θ_1 、关断角 θ_2 、励磁电压及相电流上限, 因此控制非常灵活。与电动状态类似, 其回馈制动控制方法可分为: 角度位置控制(Angular Position Control 简称 APC)、脉宽调制控制(Pulse-Width Modulation 简称 PWM)、电流斩波控制(Chopped Current Control 简称 CCC)。虽然这三种控制方式控制变量不同, 但都是调节励磁电流 I_c 最终实现对回馈制动运行时转矩的控制。

4.2 三种控制方法的比较

APC 控制模式、PWM 控制模式和 CCC 控制模式之间存在不同的特点:

(1) APC 控制模式宜采用优化固定 θ_2 、调节 θ_1 的控制方式, θ_2 不宜直接作控制变量。通过优化固定 θ_2 , 在很宽的转速范围下, 电机能保持较高的出力和能量比; 同时 APC 控制模式只是调节 θ_1 或 θ_2 , 实现简单; 由于开关频率低(与 PWM 模式相比)且电压的品质与转速有很大的关系, 转速越高, 电压的品质越好。因此这种新的 APC 控制模式只适用于在高速的场合。在低速场合, 不适于用 APC 控制方式。

(2) PWM 斩单管方式与斩双管方式相比性能更优。由于 PWM 方式的控制变量是占空比, 开关角 θ_1 、 θ_2 根据转速均可分别优化设计, 使得在很宽的转速范围内达到能量及效率优化控制, 因此控制很灵活并且可控性好, 尤其在低速时控制特性优于 CCC 或 APC 控制方式。但由于开关频率快, 在大功率时则开关损耗大, 降低了系统的效率, 因此 PWM 控制方式在转速变化

范围大, 以及中、小功率场合才能体现出其特殊的优勢。

(3) 对于 CCC 方式, 由于斩单管方式可控性差等因素, 导致其实用性不大, 一般 CCC 方式不宜采用斩单管方式; 回馈发电运行的斩双管 CCC 方式, 其实是通过调节电流斩波限 I_{max} 来间接调节 θ_2 , 是间接调 θ_2 的 APC 方式, 而采用 I_{max} 作控制变量会使得控制变得简单, 且实现也很容易。由于 CCC 斩双管方式实质调节 θ_2 变量, 因此在能量和效率的性能比不上 APC(调节 θ_1)控制方式。与 PWM 方式相比, CCC 方式较适合于大功率、高速场合。

4.3 本文采取的控制策略

通过以上的分析比较, 可见每一种控制方法都有其优势, 同时也有其局限性。本系统拟采取以上三种控制方法相结合的控制方案。由于开关磁阻电机在起动和低速运行状态时, 存在起动阶段电流峰值过大可能引起对绕组和功率器件造成损坏, 以及在低速阶段由于电流幅值波动过大而导致转矩和转速不平稳的问题。在起动和低速运行状态时, 本系统采用电流斩波控制和 PWM 电压斩波控制相结合的办法, 限制电流峰值。

开通角 θ_1 和关断角 θ_2 对系统输出功率和制动转矩都有较大的影响, 这是因为, 调节 θ_1 、 θ_2 可以改变开关磁阻电机回馈发电运行区域的宽度。在制动运行状态时, 本文采用优化固定关断角 θ_2 , 改变开通角 θ_1 的角度控制和 PWM 电压斩波控制相结合的办法, 控制制动转矩。

5 回馈制动控制系统的设计

5.1 功率主电路的设计

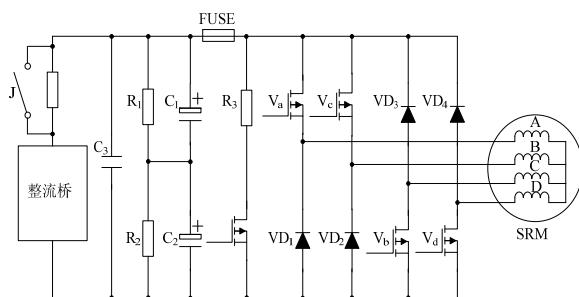


图 5. 功率主电路

Figure 5. The main circuit of power conversion unit

图中在直流电源侧接无感电容 C_3 和串接的两个电解电容 C_1 和 C_2 , 其作用是对整流输出电压平滑滤波, 做相绕组能量回馈的元件。 $V_a \sim V_d$ 为 IGBT 管, $VD_1 \sim VD_4$ 为续流二极管。电阻 R_1 、 R_2 起到平衡 C_1

和 C_2 电压及整个系统关闭时对 C_1 、 C_2 电容放电的作用。在系统加电开始工作的瞬间, 为了防止滤波电容开始充电所引起的过大的浪涌电流, 需要采取一定的保护措施。本系统采用了电阻—接触器并联网络。当充电电压小于 400V 时, 接触器 J 断开, 限流电阻流过电流, 把浪涌电流限制到一个安全的范围。当充电电压大于 400V 时, 接触器 J 闭合, 把限流电阻短路。

5.2 控制系统硬件设计

在本系统中, DSP 综合位置转向信号、过流过压保护信号、转速电流给定信号、检测的转速和相电流信号等, 运用 PI 算法实现转速调节。PI 控制输出的 PWM 信号、相通断信号、电流斩波信号及电流保护信号相结合产生 IGBT 管的触发信号。

在微控制器能正常工作的前提下, 电流采样周期 T 的确定应尽量快, 电流环 4ms 调用一次, 转速环 20ms 调用一次, 电流采集用霍尔电流传感器完成, 四相采集并求平均值, 此为软件滤波, 并判断各相电流的平衡程度。电流斩波用硬件完成。

转速环 20ms 调用一次, 转速的采集, 应做到准确快速, 开关磁阻电机的转速用光耦采集 (与位置信号复用), 低速测两个脉冲之间的时间间隔, 高速测单位时间内的脉冲数。

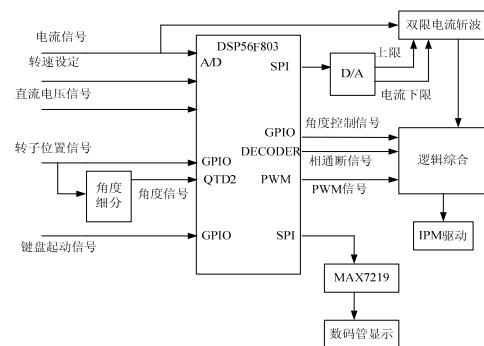


图 6. 控制电路硬件框图

Figure 6. The hardware block diagram of control circuit

5.3 控制系统软件设计

本系统采用 Motorola DSP56F803 作为主控制器, 它是适用于数字电机控制的控制器, 它们把 DSP 的运算功能和 MCU 的控制特点集中到一块芯片上。DSP56F80x 系列提供了基于 C 语言的开发工具、IDE 的集成环境以及 SDK 等先进的开发工具, 大大缩短了开发周期。主程序流程如图 7 所示。

本软件中主要程序有: 主程序、转速计算子程序、转速调节子程序、电流调节子程序、PWM 参数重载中

断子程序、PWM 错误中断子程序、显示子程序、捕捉中断子程序、A/D 采集中断子程序等。

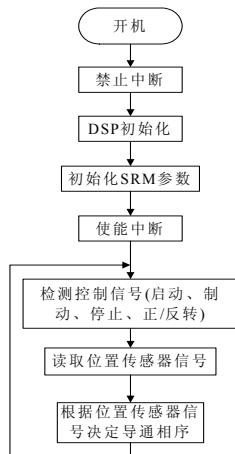


图 7. 主程序流程图

Figure 7. The flow diagram of main program

主程序主要完成 SDK 的初始化；根据位置信号和正反转信号输出相应的相通断信号。位置传感器信号和电机正反转信号接到相位检测器的 PHASEA0、PHASEB0、INDEX0 和 HOME0 引脚。通过读取相位检测器输入监控寄存器 IMR 的值，就可同时获得位置信号和转向信号，然后输出相应的相通断信号。

6 实验结果及结论

6.1 实验结果

在实验过程中采用了 1 台 3kw 三相异步电机与开关磁阻电机对拖，来模拟开关磁阻电机的制动过程。开关磁阻电机起动后，异步电机作为负载和开关磁阻电机同方向旋转，当开关磁阻电机进入制动状态运行时，异步电机仍然按原方向旋转。然后，利用变频器慢慢降低异步电机的转速直至其停转。这样就模拟了开关磁阻电机由开始制动到停机的整个过程。

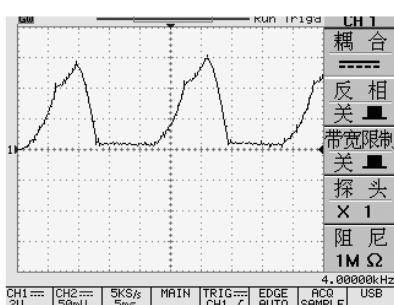


图 8(a). 制动运行时的相电流波形($\theta_i=25^\circ$)

Figure 8(a). The waveform of phase current during regenerative braking ($\theta_i=25^\circ$)

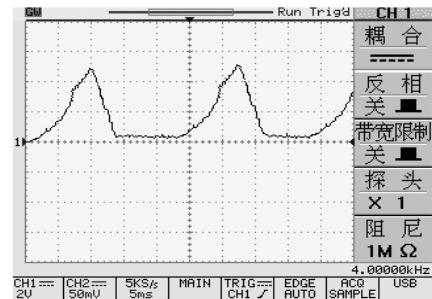


图 8(b). 制动运行时的相电流波形($\theta_i=30^\circ$)

Figure 8(b). The waveform of phase current during regenerative braking ($\theta_i=30^\circ$)

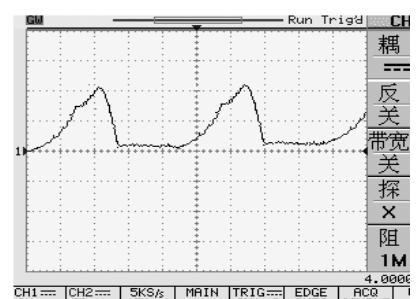


图 8(c). 制动运行时的相电流波形($\theta_i=35^\circ$)

Figure 8(c). The waveform of phase current during regenerative braking ($\theta_i=35^\circ$)

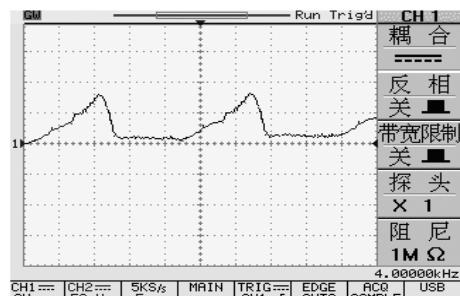


图 8(d). 制动运行时的相电流波形($\theta_i=40^\circ$)

Figure 8(d). The waveform of phase current during regenerative braking ($\theta_i=40^\circ$)

图 8 (a) ~ (d) 为开关磁阻电机回馈制动运行时的相电流波形，其中，关断角 θ_2 被固定为 70° ，改变开关角 θ_1 分别为 25° 、 30° 、 35° 、 40° 。由图中可见，在一定范围内适当将开关角 θ_1 提前，将增加励磁区的长度和励磁强度，进而引起相电流有效值的增高。相电流波形较为平滑，可见本课题中所采取的控制方案其效果还是很好的。实现了对系统的稳定控制。

6.2 结论

通过研究和实验测试，可以看出中小功率开关磁阻电机具有较好的制动效果，可以比较方便的实现四

象限运行,这对降低中小功率系统成本、提高系统性能价格比和中小功率驱动系统的再生制动设计,具有一定参考价值,对开拓开关磁阻电机的应用有着十分重要的意义。

References (参考文献)

- [1] LI Guanghai etc.The realization of switched reluctance motor regenerative braking. *Journal of Chinese Electrical Engineering Science*, 2004, 24(2): 1~3.
李广海等.3kW 开关磁阻电动机的再生制动实现.中国电机工程学报, 2004; 24(2): 1~3.
- [2] HE Yuejun etc.The study and practice of the regenerative braking control strategy of SRD in the electric power motorcycle. *Small & Special Electrical Machines*, 2001(2): 22~24.
何跃军等.SRD 电动摩托车再生制动控制策略的研究与实践. 微特电机,2001(2): 22~24.
- [3] MAO Jingfeng etc.The operation principle and realization of electric power generation of switched reluctance motor. *Journal of Nantong University*, 2005, 4(1): 57~59.
茅靖峰等.开关磁阻电机发电运行原理与实现. 南通大学学报,2005; 4(1): 57~59.
- [4] CHU Junjian. The design of regenerative power system of switched reluctance motor: [Master Thesis], Beijing Jiaotong University, Beijing: 2005.
- [5] LIU Chuang.The theory research and engineering practice of starting/ power generation system of switched reluctance motor: [PhD Dissertation], Nanjing Aero-Space University, Nanjing: 2000.
褚军舰. 开关磁阻电机能量回馈系统设计: [硕士论文], 北京交通大学, 北京: 2005.
- [6] CAO Zhiliang etc.The analysis and application of switched reluctance motor regenerative braking. *Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2001, 33(1): 60~62.
曹志亮等.开关磁阻电机再生制动分析与应用.南京航空航天大学学报, 2001, 33(1): 60~62.
- [7] David A. Torrey. Switched Reluctance Generators and Their Control. *IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS*, 2002, 49(1): 3~14.
- [8] CHEN Hao XIE Guilin.The study of switched reluctance generator system. *Transactions of Chin Electrotechnical Society*, 2001, 16(6): 7~12.
陈昊, 谢桂林.开关磁阻发电机系统研究.电工技术学报, 2001, 16(6): 7~12.
- [9] HUANG Jianzhong.The control model of switched reluctance motor. *Electric Transmission*, 1997(5): 10~13.
黄建中.开关磁阻电机的控制模式.电气传动, 1997(5): 10~13
- A. Radun. Generating with the switched-reluctance motor, Proc.IEEE APEC, 1994(94): 41~47.