

# Switched Reluctance Motor의 기본설계

장석명, 서진호, 정상섭, 성세진

충남대학교 전기공학과

## Fundamental Design for Switched Reluctance Motor

S.M. Jang, J.H. Seo, S.S. Jeong, S.J. Seong

Chungnam Nat'l Univ.

### Abstract

A reluctance motor is a electric machine in which torque is produced by the tendency of its movable part to move to a position where the inductance of the excited winding is maximized. This means physical fact that the energy stored in the field tend to be minimized as the energy stored in the field is converted the mechanical work.

In this paper, we have studied the characteristics of the electromagnetic energy conversion about SRM which have 6 stator and 4 rotor poles with 3 phase. In addition we design the fundamental model of SRM with requirements(e.g. power, speed) and simulate with PC-SRD.

### 1. 서 론

SRM은 구조가 간단하고 기동특성이 우수하며 넓은 속도범위에서의 운전이 원활하다. 따라서 다기능화가 용이하고 고효율 전동시스템이며, 경제성이 높고 시스템 제어성이 강하다. 이러한 장점 때문에 SRM을 가변속 구동시스템으로 활용하기 위한 연구가 진행중이고 선진국에서는 가정기기나 자동차, 항공기의 오일펌프, 가스터빈 등을 중심으로 실용화되고 있다.

본 연구에서는 SRM의 전자기적 에너지변환 특성과 기본설계 과정을 살펴보았다. 그리고 실제 11hp 1500rpm의 요구사항을 갖는 3상 6/4 SRM을 설계하여 시뮬레이션을 통해 기본해석을 수행하였다.

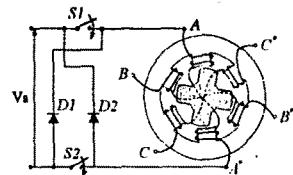
### 2. SRM의 전자기 에너지 변환 특성

#### 2.1 SRM의 개요

SRM의 운전 시스템은 기계적 에너지 변환을 주도하는 자기적 구조인 VRM과 스위칭 전원인 인버터와 회전자의 위치검출 및 운전조건을 제어하는 장치로 구성된다.

SRM은 [그림1]과 같이 고정자와 회전자 모두 둘극형 구조를 가진다. 따라서 회전자 위치에 따라 인덕턴스가 달라지므로 토크는 여자권선의 인덕턴스가 최대(자기릴리턴스는 최소)가 되는 쪽으로 발생한다. 즉, 인덕턴스 변화는 공극에 저장된 자기에너지의 변화를 가져오고 자기에너지의 변화량만큼 기계적인 에너지로 바뀌게 된다.

일반적으로 고정자에 집중권으로 감기는 여자권선은 [그림1]과 같이 여러 상으로 구성되며, 각 상은 교대로 공급되는 전류 필스에 의하여 여자된다.



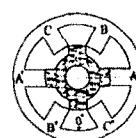
[그림1] 3상 6/4 SRM에서 VRM과 A상 이자회로

#### 2.2 회전자의 위치

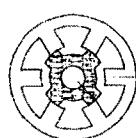
[그림2]는 회전자가 시계방향으로 회전한 때 A상에 대한 회전자의 위치를 나타낸 것이다. [그림2(a)]와 같이 어떤 회전자 극상이 A상 고정자 극과 일치했을 때, A상에 대해 회전자는 정렬(aligned)위치에 있다고 한다. 이 위치에서는 [그림1]의 스위치 S1과 S2를 터온시켜 A상에 전류가 흐르더라도 회전자가 최대 인덕턴스의 위치에 있기 때문에 토크는 발생하지 않는다.

[그림2(b)]와 같이 회전자 극축과 극축사이의 1/2지점이 A상 고정자 극과 일치했을 때는 반정렬(unaligned)위치에 있다고 한다. 이 위치에서는 A상에 전류가 흐르더라도 고정자 극과 회전자 극들 사이의 작용하는 힘의 합성이 0이기 때문에 토크는 발생하지 않는다.

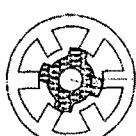
그러나 [그림2(c)(d)]처럼 부분적으로 오비레이트 위치에서는 정렬위치로 토크가 발생하므로 [그림2(d)]위치에서 A상에 전류가 흐른다면 역토크가 발생한다. 따라서 연속적인 토크를 발생시키려면 [그림2(c)]위치 근처에서 A상을 터온시키고 B상을 터온시켜야 한다.



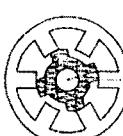
(a) 정렬위치



(b) 반정렬위치



(c) 부분적 오비레이트 위치



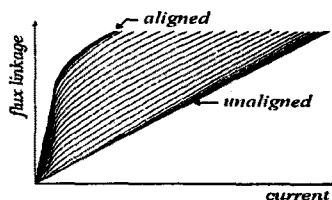
(d) 부분적 오비레이트 위치

[그림2] 회전자가 반시계방향으로 돌 때 A상에 대한 위치

### 2.3 회전자위치와 여자전류를 고려한 자화곡선과 인덕턴스 특성

[그림3]은 반정렬위치에서부터 정렬위치까지의 전류에 대한 자화곡선을 나타낸 그림이다. 정렬위치에서 고정자와 회전자 흐르는 쉽게 포화되므로 자화곡선은 [그림3]에서 가장 위쪽 곡선이 되며 정렬위치 바로 전에서는 키브 변화가 없다. 반정렬 위치에서는 큰 공극이 존재하여 누설자속이 크기 때문에 쉽게 포화되지 않는다. 따라서 자화곡선은 [그림3]에서 가장 아래쪽 곡선이 된다.

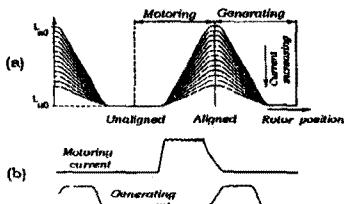
반정렬위치에서 오비웨 시작점까지는 자화곡선에 큰 변화가 없다가 오비웨가 시작되면 자화특성은 갑작스럽게 변화하여 자화곡선의 기울기가 급해진다. 부문적으로 오비웨 되었을 경우의 자화곡선은 반정렬시와 정렬시 자화곡선 사이에 존재하며 극 코너에서는 국부포화가 일어난다.



[그림3] 회전자위치에 따른 여자전류에 대한 쇄교자속

[그림3]의 회전자 위치에 따른 자화곡선의 기울기는 인덕턴스가 되므로 한 상의 인덕턴스는 [그림4(a)]와 같이 회전자 위치와 상전류의 함수로써 표현할 수 있다. 상전류가 증가할수록 최대인덕턴스값은 낮아짐을 알 수 있다.

[그림4(b)]는 인덕턴스가 증가할 때 [그림1]의 S1과 S2를 단온시킴으로써 토크가 발생시키는 전류(motoring current)파형을 나타낸 것이다. 인덕턴스가 감소할 때는 S1과 S2를 단오프시킴으로써 D1과 D2를 통해 전원측으로 퍼드백되는 전류(generating current)파형을 나타낸 것이다.



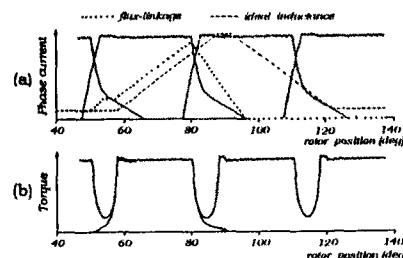
[그림4](a)회전자위치와 여자전류에 따른 인덕턴스변화  
(b)모터상태와 발전상태에서의 전류 패스

### 2.3 인덕턴스 변화에 따른 순시 토크 발생

[그림5(a)]에서 각 상은 인덕턴스가 증가할 때에 전류패스에 의해 교대로 여자되고 인덕턴스가 감소할 때 소자된다. 그 때의 각 상에 대한 쇄교자속은 삼각파가 된다. [그림5(b)]에서 정 토크는 회전자 반정렬위치와 다음 정렬 위치 사이에 있을 때만 가장 가까운 정렬위치로 발생하므로 전류 방향은 중요치 않다. 그리고 각 상은 회전자 극간의 반에서만 전행방향 토크를 만들어내므로 모든 회전자의 위치에서 최소한의 전행방향 토크를 발생시키려면 2상이 필요하다.

[그림5(b)]에서 토크딥(torque-dip)은 상 변환시 인이나미 높은 운전 토크값을 얻기 위해 고정자와 회전자의 각을 넓히므로 써 감소시킬 수 있다. 그러나 이 방식은 솔루션 절차를 감소시키고 동순을 증가시키므로 평활한 토크를 얻기 위해서는 4상 모터

가 좋다. 다만 낮은 운전토크가 요구되는 3상모터에서 발생하는 토크딥은 상전류를 boost 시킴으로써 감소시킬 수 있다.



[그림5] 이상적인 인덕턴스를 갖는 6/4 SRM

- (a)회전자 위치에 따른 세 상의 전류 및 △상의 쇄교자속
- (b)회전자 위치에 따른 A의 단방향 토크와 순시토크

### 2.4 수반에너지 변화율에 의한 평균토크

회전자가 임의의 위치에 있을 때 발생토크는 식(1)과 같이 수반에너지의 변화율로 나타낸다.

$$T = \left[ \frac{\partial W}{\partial \theta} \right]_{i=\text{const}} \quad (1)$$

만약 자기적인 포화를 무시한 경우에는 직선의 자화곡선이 되므로 계에 저장된 에너지와 수반에너지가 같게 되어 순시토크는 식(2)과 같다.

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

모터가 일정속도로 회전하고 일정한 전압  $V_s$ 이 어떤 상에 공급되면 동작방정식은 식(3)가 되고 쇄교자속  $\Psi$ 는 식(4)에 따라 변화한다.

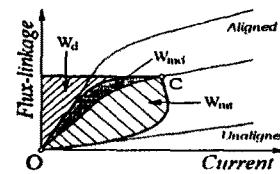
$$V_s = R_i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (3)$$

$$\Psi = \int (V_s - Ri) dt = \frac{1}{\omega} \int (V_s - Ri) d\theta \quad (4)$$

[그림1]의 S1과 S2가 단온되면 전류는 선형적으로 증가하나 인덕턴스는 낮고 거의 일정하여 [그림5(a)]에서  $i, \Psi$ 계정은 완만한 기울기를 그린다. 그러나 오비웨되면서 인덕턴스는 증가하므로 역기전력은 높아져 전류는 감소된다. 따라서 C점에서 공급에너지는  $W_d + W_{sd} + W_{mi}$ 이고 저장에너지는  $W_u + W_{mu}$ , 기계적으로 한 일은  $W_{ml}$ 이다.

C점에서 상은 변환되고 전류는 [그림1]의 다이오드 D1과 D2를 통해 환류되어 [그림6]에서  $W_d$ : 전원측으로 되돌리지므로 C와 O사이에서 기계적으로 한 일은  $W_{ml}$ 가 된다. 따라서 스트로크당 변환된 에너지는  $W_{ml} + W_{ml}$ , 되돌려진 에너지는  $W_d$ 가 되고 평균토크는 식(5)과 같다. 여기서  $m$ 은 상수이고  $N_r$ 는 회전자극수이다.

$$T = \frac{mN_r}{2\pi} (W_{ml} + W_{ml}) \quad (5)$$



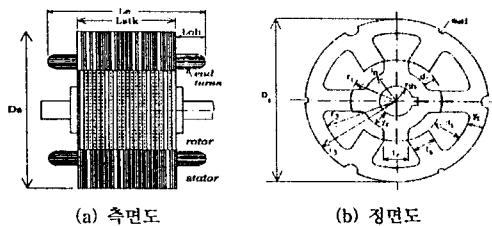
[그림6] 한 스트로크에서의 에너지변환 루프

### 3. 설계 사례

2장에서 설명한 SRM의 구동원리에 의하여 임의로 정한 요구 사양에 따라 설계해 보기로 한다.

#### 3.1 요구 사양

[그림7]은 3상 6/4 SRM의 VRM의 설계를 위한 축면도와 정면도이며 설계모델의 요구 사양은 [표3-1]과 같다.



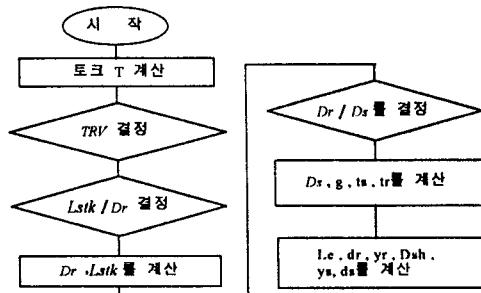
[그림7] 3상 6/4 SRM

[표 3-1] 설계 모델의 요구 사양

파라미터	기호	값	단위
출력	P	1	HP
회전자 채적당 토크	TRV	15	kNm/m <sup>2</sup>
회전자 지름에 대한 스택 길이의 비	$L_{stik}/D_r$	1	
회전자 극수	$N_r$	4	No.
고정자 극수	$N_s$	6	No.
DC 공급 전압	$V_t$	50	V
상 수	m	3	No.
정격 회전속도	n	1500	rpm

#### 3.2 설계 과정

SRM을 [표3-1]의 요구 사양에 맞도록 설계하는 과정은 간략하게 흐름선도로 나타내면 [그림8]과 같다.



[그림8] SRM 기본설계를 위한 흐름선도

#### 3.3 설계 파라미터

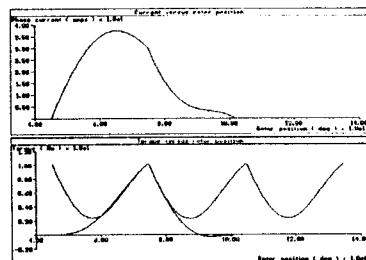
[그림8]의 기본설계과정에 따라 VRM의 외형을 설계한 결과, 그 설계 파라미터는 [표3-3]과 같다.

[표 3-3] 1HP 1500rpm 3상 6/4 SRM 설계 파라미터

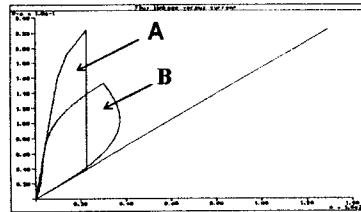
파라미터	값	파라미터	값
$D_r$	148.0 mm	$t_r$	20.6 mm
$D_s$	74.0 mm	$t_s$	19.2 mm
$L_{stik}$	74.0 mm	$d_r$	22.9 mm
$L_s$	123.0 mm	$d_s$	10.3 mm
$g$	0.4 mm	$y_r$	13.7 mm
$\beta_r$	30°	$y_s$	12.7 mm
$\beta_s$	32°	$D_{sh}$	28.0 mm

### 4. 설계모델의 시뮬레이션 결과

[표3-1]의 요구 사양과 [표3-3]의 설계 파라미터를 이용하여 PC-SRD 4 프로그램으로 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션 결과 [그림9]은 회전자 위치에 따른 한 상의 전류와 순시토크를 보여 준다. [그림10]에서 A는 이용할 수 있는 에너지 민환 영역이며 B는 실제 에너지 민환 영역이다. 따라서 설계가 잘 된 SRM은 [그림9]의 한 상의 전류가 평활해야 하고 [그림10]의 B영역이 A영역과 겹치는 면적이 많아야 한다.

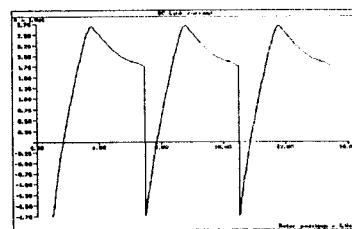


[그림9] 설계모델의 회전자 위치에 따른 상전류와 순시토크



[그림10] 설계모델의 에너지민환 루프

[그림11]은 DC Supply에서 키비미터로 들어가는 DC link 전류를 근사적으로 계산한 과정을 보여준다.



[그림11] DC Link current

그밖에 시뮬레이션 결과에는 퀸센, 컨트롤, 운전특성, 전류, 철손, 토크 리플 등 테이터를 얻을 수 있었다.

### 5. 결론

본 연구에서는 SRM의 전자기적 에너지민환 특성과 기본설계 과정을 살펴보았다. 그리고 실제 1HP 1500rpm의 요구 사양을 갖는 3상 6/4 SRM을 설계하여 시뮬레이션을 통해 기본해석을 수행하였다.

#### 참고문헌

- P.J. Lawrenson, et al., "Variable-speed switched reluctance motors", IEE Proc., Vol.127, Pt.B, No.4, July 1980.
- TJE Miller, "Switched reluctance motors and their control", 1993.
- Norbert L. Schmitz, Donald W. Novotny, "Introductory electromechanics", 1965.