

디스크형 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 기본 설계

이 중 한\*, 이은웅\*, 조현길\*, 김성현\*\*  
 \*충남대학교 전기공학과, \*\*천안공업전문대학

Fundamental Design of Disk type Single-Phase Switched Reluctance Motor

Jong-Han Lee\*, Eun-Woong Lee\*, Hyun-Gil Jo\*, Sung-Hun Kim\*\*  
 Chungnam National University, Chun An Industrial College

Abstract

The Switched Reluctance Motor is an 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. The main advantages of this motor lie in the simple robust construction and low manufacturing cost.

In this paper, we describe the design features of single-phase switched reluctance motor for low-power variable-speed drives.

그림 1-(a)는 DSPSRM의 형태를 나타낸 것으로 일반적인 형태의 SRM과의 차이를 살펴보면 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

- i) 단중 코일에 의한 단상여자
- ii) 회전자를 외부에, 고정자를 내부에 배치한 형태를 갖는다.
- iii) 고정자와 회전자의 수가 같다.
- iv) 축방향의 자로를 형성한다.
- v) 정지용 자석에 의한 가동

I. 서론

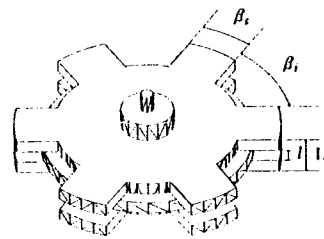
1840년대 'Electromagnetic Engine'으로 구동원리가 소개된 SRM(Switched Reluctance Motor)은 1980년대에 활발히 연구되면서 스위칭 기술과 소음, 토오크리플 등의 문제점들이 해결되어야 했다. 그런데 전력전자기술이 발달하고 전자계 해석기술이 발달한 1990년대에 들어서면서 이들의 기술을 이용한 SRM의 문제점을 해결하여 실용화하려는 연구가 활발히 진행되고 있다.

SRM의 고정자 각상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자와 회전자 사이의 쇠교자속이 최대가 되도록 작용하는 자기적 성질을 이용하여 토오크를 얻는 SRM은 일반적으로 고정자와 회전자의 극수가 다르고, 모든 극이 이중돌극의 구조로 되어 있다. 그리고 권선이 고정자에만 감겨져 있고 회전자는 규소강판을 적층하거나 다이캐스팅으로 제작할 수 있어 구조상으로 매우 간단하고 견고하다.<sup>[1]</sup>

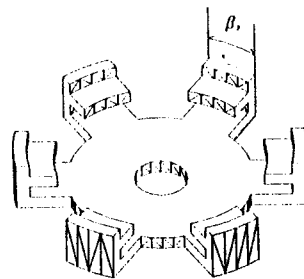
이와 같은 특징을 갖는 SRM의 구조는 여러 형태의 구성이 가능한데 회전자와 고정자의 극수가 같고, 축방향 길이가 짧으며, 회전자가 외부에, 고정자가 내부에 배치된 Disk type Single-phase Switched Reluctance Motor (DSPSRM)의 구동원리를 정립하고 시작기를 제작하기 위한 설계파라미터를 산출하고자 한다.

II. DSPSRM의 기본 이론

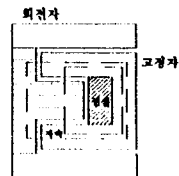
1. DSPSRM의 구조



(a) stator



(b) rotor



(c) flux pattern

그림 1. DSPSRM의 구조

DSPSRM의 구조는 그림 1(a)처럼 알루미늄으로 된 원판에 'C'자형의 고정자극이 60°의 간격을 두고 배치되어 있고, 그림 1(b)처럼 회전자극도 고정자극과 같이 60°의 간격으로 고정자의 바깥쪽에 위치하고 있다.

고정자와 회전자 철심은 와류손을 줄이기 위해 슬롯을 만들거나, 적층하여 만든다. 코일은 단중권으로 고정자에만 감겨져 있다. 또한 회전자는 자속분포면적을 넓게 하기 위해 극면에 그림1(b)와 같이 톱극을 갖도록 하였으며 돌극이 없는 구조와 비교하였을 때 다음과 같은 특징을 갖는다.<sup>[3]</sup>

i) 공극자속면적이 넓기 때문에 높은 전력 밀도를 얻을 수 있다.

ii) 유효렐럭턴스를 감소시켰기 때문에 Ampere turns수를 줄일 수 있다.

iii) Ampere Turns수가 줄기 때문에 코일의 직경이 줄고 코일의 무게와 동손을 줄일 수 있다.

이상과 같은 특징을 갖는 DSPSRM은 구조가 매우 간단하고 견고하기 때문에 유지보수의 횟수를 줄일 수 있고, 수명이 길며, 타전동기에 비해 고장을 줄일 수 있다. 그리고 가장 큰 장점으로 축방향 길이를 줄일 수 있기 때문에 좁고 낮은 장소에 설치하기에 적합한 다른 전동기보다 우수성을 갖고 있다.

## 2. 구동 원리

DSPSRM의 구동원리는 고정자의 권선에 전류를 흘려서 자화되면 회전자는 권선의 인덕턴스가 최대가 되고, 렐럭턴스가 최소가 되는 방향으로 이동한다. 회전자와 고정자의 극이 일치하기 전에 고정자 권선에 인가된 전류를 off시키면 회전자의 관성으로 극피치의 1/2이 넘도록 회전했을 때 다시 스위치를 on하도록 고정자극의 여자를 회전방향에 따라 순차적으로 on-off시켜 회전력을 얻는다.

또한 스위치의 on-off주기를 제어하기 위해 회전자와 고정자사이의 위치를 감지하는 위치센서를 사용하고, 회전자를 고정자 극과 일치하지 않는 위치에 정지시키고, 그 위치를 유지하기 위해 정지용 자석을 사용한다. 그림2는 DSPSRM의 동작원리와 구조를 나타내었다.

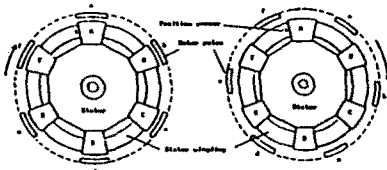


그림 2. DSPSRM의 동작원리

## 3. 쇄교자속과 유기기전력

DSPSRM에서 고정자와 회전자 극 사이에 발생하는 쇄교자속은 입력전류와 회전자의 위치에 따라 달라진다. 만약 회전자의 회전속도와 전류값이 일정하다면 쇄교자속은 회전자와 고정자가 일치된 위치에 있을 때 최대값  $\phi_{max}$ 을 갖게 되고, 회전자극이 2개의 고정자 극사이에 위치할 때 최소값  $\phi_{min}$ 을 갖게 된다. 또한 자계의 비선형성과 fringing effect를 무시한다면 공극자속의 변화는 그림3과 같이 삼각파가 된다.

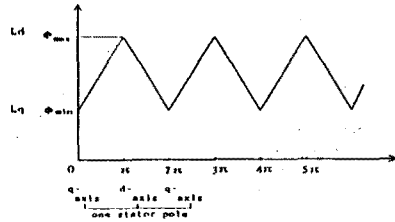


그림 3. 공극의 쇄교자속과 인덕턴스

이 때 고정자와 회전자의 쇄교자속을 푸리에 급수로 나타내면 식(1)과 같다.<sup>[3]</sup>

$$\phi = \phi_0 + \sum_{m=1}^{\infty} \phi_m \cos \omega t \quad (1)$$

$$\phi_0 = \frac{1}{2} (\phi_{max} + \phi_{min}) \quad (2)$$

$$\phi_m = \frac{2((-1)^m - 1)}{\pi^2 m^2} (\phi_{max} - \phi_{min}) \quad (3)$$

이거시,  $m = 1, 3, 5, 7, \dots$

$\phi_0$  : 쇄교자속 평균값

$\phi_m$  : 쇄교자속 중 m차수의 고조파성분

$\omega$  : 각속도

식1,2,3에서 기본파성분만을 고려한다면 식 (4)와 같다.

$$\phi = \phi_0 + \phi_1 \cos \omega t \quad (4)$$

식4로부터 유기기전력  $e$ 는 식(5)와 같다.<sup>[3]</sup>

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} = N\phi_1 \omega \sin \omega t \quad (5)$$

$$E = \frac{kN\phi_1 \omega}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

이거시,  $N$  : 턴수,  $k = \frac{\phi_1}{\phi_0}$

## 4. 출력방정식

일반 회전기는 고정자와 회전자의 직경, 축방향 길이, 운전속도, 자기장하, 전기장하 등의 변수에 의해 결정되는 출력방정식을 사용하여 설계하므로, DSPSRM의 설계에 있어서도 비록 기존의 회전기의 출력방정식과 차이가 있지만 식(7)과 같은 출력식을 적용한다.<sup>[3]</sup>

$$P = EI \cos \theta = \frac{kN\phi_0\omega}{\sqrt{2}} I \cos \theta \quad (7)$$

여기서,  $I$  : 입력전류,  $\cos \theta$  : 역률

그리고, DSPSRM의 전기장하  $\Lambda$ 와 자기장하  $B$ 는 구성형태에서 식(8)과 식(9)와 같이 구해진다.

$$A = \frac{NI}{l} \quad [\text{AT/m}] \quad (8)$$

$$B = \frac{b\phi_0}{\pi D} \left( \frac{L-l}{2} \right) + \pi k(D-d) \quad [\text{Wb/m}^2] \quad (9)$$

여기서,  $l$  : 고정자의 슬롯길이,  $L$ : 고정자의 축길이  
 $p$ :극수,  $D$ : 고정자의 외경,  $d$ : 회전자의 돌극길이  
 식(8),(9)를 식(7)에 대입하고,  $D \gg d$ 을 고려하여, 식을 간소화하면 식(10)과 같은 DSPSRM의 출력식을 얻을 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$[k(L-l) + 2dD]I = \frac{CP}{BA \eta \cos \phi} \quad (10)$$

여기서,  $\eta$  : 효율,  $n$  : 회전속도 [rpm],

$$C = \frac{120}{4.44k\pi}$$

#### 5. 극호

고정자 극과 회전자 극의 극호인  $\beta_s, \beta_r$ 는 DSPSRM의 설계자속의 변화, 토오크리플 등에 영향을 미쳐 동작특성을 결정짓는 중요한 파라미터이다.

최대의 토오크를 얻기 위해서는  $\beta_s$ 를  $\beta_r$ 값과 거의 같게 하아야 하고, 고정자와 회전자 사이의 인속적인 토오크를 얻기 위해서는 통과한 회전자 극과 고정자 극의 반발력을 최소화하여야 한다. 그러므로 고정자극 사이의 극호  $\beta_i$ 와 고정자극호  $\beta_s$ 와 회전자극 사이의 극호  $\beta_r$ 의 비를  $\beta_i/\beta_r = 1.3$ 로 그리고, 회전자도 마찬가지로  $\beta_i/\beta_r = 1.4$ 가 적당하다.<sup>[3]</sup>

### III. DSPSRM의 설계

II장의 기본 이론을 적용하여 제작하고자 하는 시작기의 전기적 설계사양은 표 1과 같다.

표 1. DSPSRM의 설계 사양

파라미터	기호 / 단위	요구 사양
출력	$P$ [W]	40
토오크	$T$ [Nm]	1.53
속도	$n$ [rpm]	250
인가전압	$V$ [V]	110
회전자극수	$N_r$	6
고정자극수	$N_s$	6
극호비	$\beta_i/\beta_s, \beta_i/\beta_r$	1.3, 1.4

표1과 같은 전기적 요구사양에 따라 제작하고자 하는 시작기 DSPSRM의 설계파라미터는 표2와 같다

표 2. DSPSRM의 설계 파라미터

파라미터	기호 및 단위	설계값
고정자 외경	$D$ [mm]	225
고정자 외축길이	$L$ [mm]	57
고정자 내축길이	$l$ [mm]	32
회전자 돌극길이	$d$ [mm]	34
고정자 극호	$\beta_s$ [mm]	52
회전자 극호	$\beta_r$ [mm]	67
고정자극사이의 극호	$\beta_i$ [mm]	48

표2의 DSPSRM의 설계파라미터를 적용하여 성능을 예측한 동작특성은 그림4와 같다. 그림 4(a)는 속도-토오크 특성곡선으로, 속도가 증가함에 따라 토오크가 감소하게 된다. 토오크대 속도 특성은 직류자극 전동기의 특성과 유사하고, 효율은 저출력의 범용전동기와 비슷하다. 그림4(b)는 속도-전류 특성곡선으로, 속도가 증가함에 따라 전류는 감소하게 된다. 그림4(c)는 속도-효율 특성곡선으로, 속도가 증가함에 따라 효율이 증가하고 400[rpm]에서 30%의 효율을 가진다.

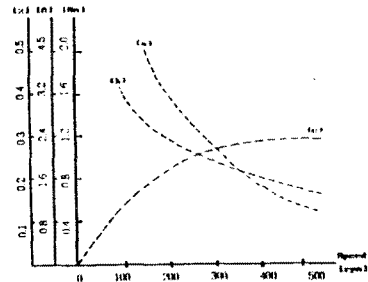


그림 4. DSPSRM의 동작특성 예측

### IV. 결론

본 연구에서는 DSPSRM의 구조, 기본동작원리를 정리하여, 시작기 제작을 위한 설계파라미터를 결정하여 제시하였고, 시작기의 동작특성을 예측하였다.

#### 참고문헌

1. P. J. Lawrenson, et al., "Variable-speed switched reluctance motors", IEE Proc., Vol.127, Pt.B, No.4, pp.253-265, July 1980.
2. H. R. Bolton, et al., "Low-cost reluctance drive system for low-power, low-speed application", IEE Conf. Publ.179, pp.99-102, September 1979
3. C.C.Chan, "Single-phase switched reluctance motors", IEE Proc., Vol.134, Pt.B, No.1, pp.53-56, January 1987
4. R.Krishnan, et al., "Design Procedure for Switched Reluctance Motors", IEE Trans. on IA, Vol.24, No.3, pp.456-461, May/June 1988