

6/8극 SRM의 설계 및 특성해석에 관한 연구

손익진, 오석규*, Chen Hao, 안진우
 경성대, 진주산업대*

Study on Design and Characteristic Analysis of 6/8 SRM

Ick-Jin. Sohn, Seok-Gyu Oh*, Chen Hao, Jin-Woo Ahn
 Kyungseong Univ., Chinju Nat'l Univ.*

ABSTRACT

A three-phase 6/8 structure Switched Reluctance Motor drive, the construction of the stator and the rotor in the motor, the scheme of the rotor position detector and the main circuit of the power converter are described. The range of the stator pole arc factor and the rotor pole arc factor of the motor are analyzed in the linear region. The optimum range of the stator pole arc factor and the optimum range of the turn-off angle of the main switches in the power converter are given with the 2-D finite element electro-magnetic field calculation of the motor and the nonlinear simulation. Test results of the developed prototype are discussed.

1. 서 론

SRM은 여러 가지 장점으로 인하여 가전용, 산업용, 견인용 등으로 적용이 확대되고 있는 가변속 전동기이다[1][2][3]. 지금까지의 대부분의 SRM은 고정자와 회전자극의 극이 6/4극, 6/6극, 8/6극, 그리고 12/8극 등이 주로 제작이 이루어지고 실용화되고 있다.

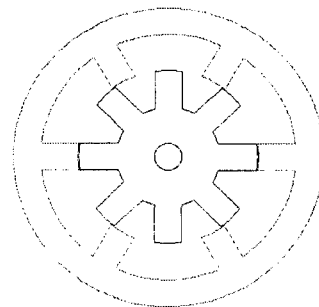
이에 본 논문에서는 6/8극의 SRM은 인버터구성의 유리한 점(6/4극)과 8/6극의 장점인 토크 맥동이 줄일 수 있는 장점을 갖추고 있는 3상이고 고정자극이 6이나 회전자극이 8인 6/8 SRM의 구동특성에 대해 해석하였다. 6/8극 SRM의 권선방식 및 인버터 구성은 6/4극과 같다. 본 논문에서는 6/8극 SRM의 구조, 회전자 위치센서, 그리고 구동특성 등에 대해 해석하였다.

2. 6/8극 SRM의 구조

6/8 SRM은 전동기부, 인버터부, 그리고 PWM 제어부로 구성되어 있다.

2.1 전동기부

전동기는 6개의 고정자극과 8개의 회전자극을 가진 3상 6/8극 SRM이다. 6개의 고정자극에 집중권으로 권선이 감겨있고 반대쪽 자극에 직렬로 연결되어 있어 3상의 권선을 형성하고 있다. 전동기의 출력을 증가시키고 소음의 원인이 되고 있는 방사방향의 자기흡인력[4]을 감소시키기 위해 한상을 이루는 한 고정자극은 N극으로 다른 고정자극을 S극으로 동작하게 하고 각 상에 전류가 흐르는 동안 자기 통로는 NS-SN이 되도록 하였다[5][6]. 그리고 회전자에는 권선이나 영구자석, 브러쉬 같은 것은 없다. 그림 1은 3상 6/8극 SRM을 보여주고 있다.



회전자극수	8
고정자극수	6
직경	90[mm]
극호각	17°
길이	100[mm]
공극	0.25[mm]

그림 1 3상 6/8극 SRM의 단면도

Fig.1 Cross section of the three-phase 6/8 structure Switched Reluctance Motor

2.2 회전자 위치검출부

회전자 위치검출은 회전자의 위치정보와 속도정보를 얻기 위해 3상 6/8극 SRM에서 필수적인 요소이다. 그림 2는 회전자 위치센서의 구성도를 보여주고 있다. 회전자 위치센서는 8개의 슬롯을 가진 디스크와 3개의 포토커플러로 구성되어 있다. 그리고 회전자 축에 부착되어 있는 슬롯을 가진 디스크는 22.5. 의 치호와 22.5. 의 치간격을 가지고 있다. 또한 3개의 포토커플러는 연속으로 15. 간격으로 배치되어 있다.

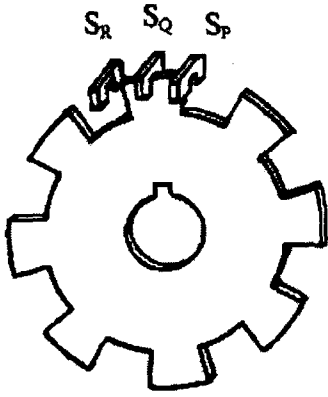


그림 2. 회전자 위치센서의 구성도
Fig.2 Schematic diagram of the rotor position detector

2.3 인버터부

3상 6/8 SRM 드라이브의 인버터 시스템은 3상 비대칭 브릿지 회로를 이용하여 기존의 3상 6/4 SRM 드라이브의 인버터 시스템과 동일하다.

2.4 3상 6/8 SRM의 구조

회전자 극절은 다음과 같다.

$$\theta_r = \frac{360^\circ}{Z_r} \quad (1)$$

여기서, Z_r 은 회전자 극수이다. 3상 6/8극 SRM의 회전자 극절은 45° 이다. 따라서 상인덕턴스의 한주기도 45° 이다. $\theta = 0^\circ$ 는 고정자와 회전자극이 만나기 시작하는 각, 즉 인덕턴스가 상승하기 시작하는 각이다. $0^\circ \sim 22.5^\circ$ 는 인덕턴스 상승구간이고 $22.5^\circ \sim 45^\circ$ 는 인덕턴스가 감소하는 구간이다.

회전자가 회전을 할 때, 회전자 위치센서인 포토커플러의 출력 P, Q, 그리고 R은 그림 3과 같은 형태로 출력되어 회전자 위치의 기본적인 정보를 제공한다. P, Q, 그리고 R 신호는 인버터의 주 스위치를 제어하는 신호, 즉 $P \Rightarrow A$ 상, $Q \Rightarrow B$ 상, $R \Rightarrow C$ 상 로 사용된다.

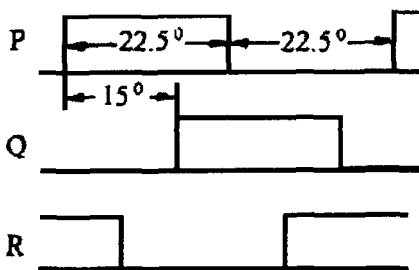


그림 3 회전자 위치에 대한 기본적인 정보
Fig.3 The basic information of the rotor position

3. 3상 6/8 SRM의 구조적 해석 및 실험

3.1 선형적 해석

전류원을 가질 때 공급 전류의 크기 i 는 $\theta=0^\circ$ 에서 $\theta=22.5^\circ$ 까지 3상 6/8극 SRM의 권선에 흐른다. 전류원은 이상적으로 사각파를 만든다고 가정한다. 자기회로가 포화되지 않은 선형구간에서의 전류와 인덕턴스는 그림 4와 같다.

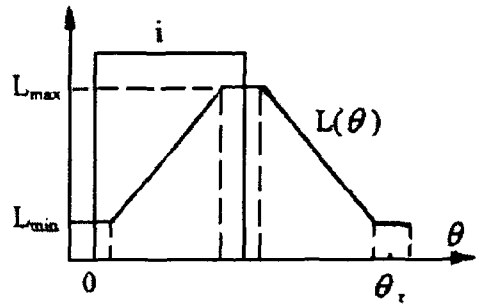


그림 4 상인덕턴스와 상전류
Fig.4 The phase inductance and the phase current

SRM의 토크는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{em} = \frac{1}{2} i^2 \frac{\Delta L}{\Delta \theta} \quad (2)$$

여기서 $\Delta L = L_{max} - L_{min}$

$$L_{min} = \frac{1}{K^2} L_{max}$$

그리고 L_{max} 는 상 인덕턴스 최대값이고 L_{min} 은 최소값이다. K_2 는 L_{max} 와 L_{min} 의 비이다. 따라서 m상의 SRM의 평균 토크는

$$T_{sav} = \frac{m}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} T_{em} d\theta = \frac{m(K_2 - 1)i^2}{2K_2\theta_r} L_{max} \quad (3)$$

와 같고 상 인덕턴스의 최대값은 아래와 같다.

$$L_{max} = \frac{1}{2} W^2 \frac{\mu_0 b l}{\delta} \quad (4)$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, l 은 철심의 유효길이, δ 는 공극의 길이, W 는 상당 권선수이고 고정자극과 회전자극의 유효넓이와 아래와 같다.

$$b = \min\{b_s, b_r\} \quad (5)$$

고정자극의 넓이는

$$b_s = D_1 \frac{\alpha_s \pi}{Z_s} \quad (6)$$

이다. 여기서 Z_s 는 고정자극 수, α_s 는 고정자 극호 상수, D_1 은 고정자 내경이다.
회전자극의 넓이는

$$b_r = (D_1 - 2\delta) \frac{\alpha_r \pi}{Z_r} \quad (7)$$

이고 α_r 은 회전자 극호 상수이다.
일반적으로 누설자속을 줄이기 위해

$$b_s \leq b_r \quad (8)$$

와 같다. 따라서

$$T_{sav} = C_1 W^2 \alpha_s \quad (9)$$

여기서 C_1 은 상수이다.
고정자 슬롯의 구조는 그림 5와 같고 고정자에서 슬롯 면적은 아래와 같다.

$$S_e = \frac{\pi \left[\left(\frac{D_1}{2} + h_s \right)^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2 \right]}{Z - s} - h_s b_s \quad (10)$$

여기서 h_s 는 고정자극의 높이이고

$$S_e K_s = S_c W \quad (11)$$

여기서 K_s 는 고정자의 슬롯의 도선의 점유율이다.

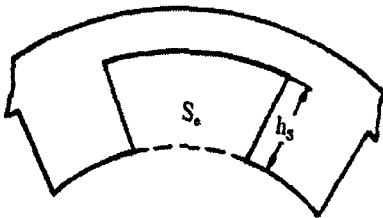


그림 5 고정자 슬롯의 구조
Fig.5 Schematic diagram of the slot in the stator

상권선의 권선면적, S_c 는 전류, i 와 상권선의 전류밀도에 따른 상수이다. 따라서

$$S_e = C_2 W \quad (12)$$

여기서 C_2 는 상수이다. 식 (6)과 (10)으로부터

$$S_e = C_3 - C_4 \alpha_s \quad (13)$$

여기서 C_3 와 C_4 는 상수이다. 따라서 식(9), (12), 그리고 (13)으로부터 고정자 극호 상수 α_s 와 T_{sav} 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_{sav} = C_5 (1 - C_6 \alpha_s)^2 \alpha_s \quad (14)$$

여기서 C_5 와 C_6 는 어떤 상전류, i 에서의 상수이다.
상 인덕턴스의 최소값을 줄이기 위해 회전자 극호는 다음을 만족하여야 한다.

$$(D_1 - 2\delta)(1 - \alpha_r) \frac{2\pi}{Z_r} > b_s \quad (15)$$

따라서

$$\alpha_r < 1 - \frac{Z_r D_1}{Z_s (D_1 - 2\delta)} \alpha_s \quad (16)$$

3.2 비선형적 해석

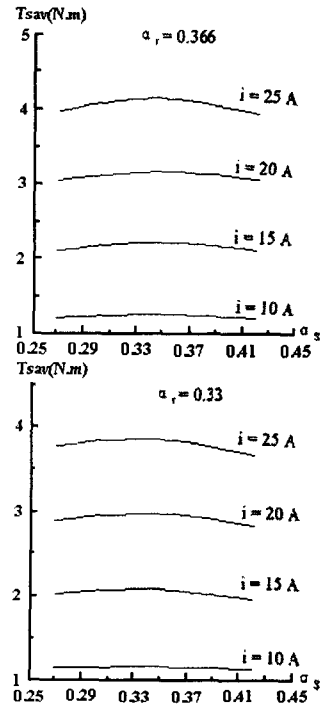


그림 6. 고정자 극호의 최적범위
Fig.6 Optimum basis of the stator pole arc factor

SRM은 다른 전동기구보다 자기포화가 심한 상태에서 구동하는 전동기이다. SRM의 운전특성을 알기 위해 FEM 해석을 통하여 시뮬레이션하였다. 그림 6은 6/8 SRM의 2D FEM에 의한 고정자 극호 최적범위에 대한 시뮬레이션 결과이다.

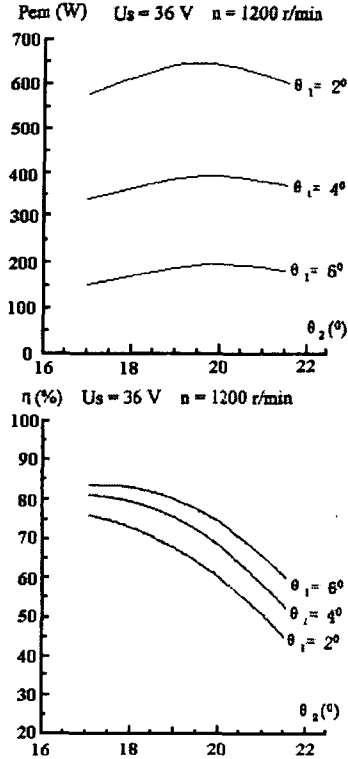


그림 7 스위치 오프각의 최적범위
Fig.7 Optimum basis of the turn-off angle

그림 6에서 고정자 극호 상수의 적정범위는 더 큰 평균 토크값을 기준으로 0.29~0.39이다.

주 스위치의 오프각 θ_2 는 부토크의 영향을 줌으로 중요한 제어변수이다. 그림 7은 2D FEM에 의한 주 스위치의 오프각의 최적범위를 보여주고 있다. 그림 7의 결과에서 출력, 토크, 효율 등을 고려할 때 스위치 오프각의 최적범위는 17.5°~18.5°임을 알 수 있다.

표 1 시작기의 실험결과

Table 1 The test results of the prototype

n (r/min)	P2 (W)	I _{ph} (A)	i _{max} (A)	η (%)	Dr (%)
500	190	15.5	48.7	63.6	46.0
800	190	10.6	28.9	76.4	59.0
1000	190	8.7	20.2	80.6	66.5
1200	190	7.7	16.1	83.0	73.5
1600	190	6.4	12.4	85.7	89.6
1800	190	6.0	11.6	86.5	96.5

이상의 해석을 입증하기 위해 PWM 제어를 하는 6/8 극 SRM의 시작기를 제작하여 실험하였다. 입력전압은 36V 이고 PWM 신호의 주파수는 6KHz 이다. 표 1은 속도, 출력, 상전류 실효값, 최대전류값, 효율 그리고 PWM 신호의 시비율에 따른 실험 결과를 보여주고 있다. 시작기는 고정자의 슬롯 면적이 넓기 때문에 상권선에 낮은 전류밀도로 흘릴 수 있고 동손도 줄일 수 있기 때문에 높은 효율을 갖는다.

4. 결 론

본 논문은 3상 6/8극 SRM의 고정자와 회전자의 구조, 회전자 위치센서, 그리고 인버터회로에 대해 기술하였다. 선형영역에서 고정자 극호 상수와 회전자 극호 상수의 범위에 대해 해석하였다. 또한 시뮬레이션을 통하여 고정자 극호 상수의 최적 범위는 0.29~0.39이고 스위치 오프각의 최적 범위는 17.5°~18.5°임을 알 수 있었다. 또한 실험결과 높은 효율을 가짐을 알 수 있었다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구
(R01-2001-000300-0)지원으로 수행하였음.

참 고 문 헌

- [1] P. J. Lawrenson, J.M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", *IEE Proc. B*, vol.127, no.4, 1980, pp.253-265.
- [2] H. Chen and G. Xie, "A Switched Reluctance Motor Drive System for Storage Battery Electric Vehicle in Coal Mine", in *Proceedings of the 5th IFAC Symposium on Low Cost Automation*, 1998, pp.90-95.
- [3] H. Chen and G. Xie, "A Switched Reluctance Drive For the Axial-Flow Fan in Coal Mine", in *Proceedings of the 14th IFAC World Congress, Vol.B*, 1999, pp.533-537.
- [4] D.E. Cameron, J.H. Lang and S.D. Umans, The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. IA-28, no.6, Dec. 1992, pp.1250-1255.
- [5] H. Chen, G. Xie and D. Liu et al, "Analyzing the Windings Arrangement of Switched Reluctance Motor Using FEM", in *Proceedings of the 3rd International Conference on Electro- magnetic Field Problems & Applications*, 1997, pp.162-165.
- [6] H. Chen and G. Xie, "Double-Excitation Magnetic Paths of SR Motors and their Effect on the Radial Magnetic Attraction", *Journal of China University of Mining & Technology*, vol.28, no.4, July 1999, pp.338-341.