

3상 6/8극 SRM

이주현, 이동희*, Hao Chen*, 안진우
 경성대학교, China University of Mining and Technology*, OTIS-LG*

A Three-Phase 6/8 Structure SRM

Ju-Hyun. Lee, Dong-Hee. Lee*, Jin-Woo. Ahn
 Kyungsung University, China University of Mining and Technology*, OTIS-LG*

ABSTRACT

A three-phase 6/8 structure SRM (switched reluctance motor), the design and analysis of the motor 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 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 prototype developed are discussed.

1. 서 론

SRM은 이중 돌극형 구조의 전동기로 기계적 구조가 단순하며 견고하여 현재 산업용 및 가정용 전 기기의 응용에 많은 관심이 집중되고 있다. SRM은 6/4극의 경우 고정자의 상수가 3상으로 8/6극에 비해 인버터의 구조가 단순한 장점을 가지고 있으나, 8/6극 구조는 6/4극 구조에 비해 토크 맥동이 감소하는 장점을 가진다.

본 논문에서 제시된 6/8극은 고정자의 극이 6극으로 기존의 6/4극과 같은 3상 구조이므로 인버터의 구성이 단순하고, 또한 회전자의 극이 8극으로 토크의 맥동을 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 6/8극의 기본적인 설계를 위한 선형해석을 제시하고, 자기포화를 포함한 비선형적인 요소를 고려한 2D-FEM 해석을 통하여, 최적의 고정자 극호 및 턴오프각의 범위를 해석하였다. 해석된 6/8극의 적합성을 검증하기 위하여 시작기를 제작하고, 실험을 통하여 그 적합성을 검증하였다.

2. 6/8극 SRM

2.1 기본 구조

본 논문에서 제안하는 6/8극 SRM은 6개의 고정자극과 8개의 회전자극을 가진 3상 6/8극으로 6개의 고정자극에 집중권 방식의 권선이 감겨있고 반대쪽 자극의 권선과 직렬로 연결되어 있어 3상의 권선을 형성하고 있다.

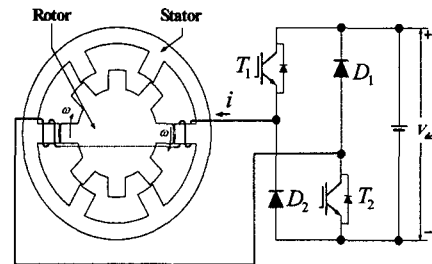
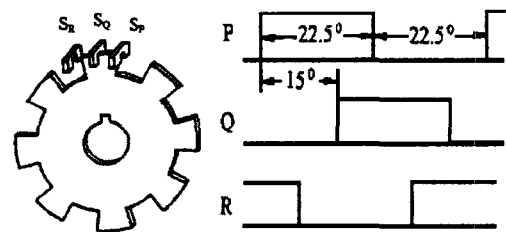


그림 1 6/8극 SRM의 기본 구조
 Fig. 1 Basic structure of 6/8 pole SRM

2.2 회전자 위치 검출

SRM에서 회전자의 위치검출은 필수적이다. 그림 3은 회전자 위치센서의 구성과 출력 신호를 나타내고 있다.



(a) 회전자 위치 센서의 구조 (b) 회전자 위치센서의 출력신호

그림 3 회전자 위치센서의 구성 및 출력신호
 Fig. 3 Schematic diagram of the rotor position detector and output signals

회전자 위치센서는 회전자의 극수와 동일한 8개의

슬롯을 가진 디스크와 3개의 포토인터럽터로 구성되어 있다. 그리고 이 디스크는 회전자 축에 부착되며, 출력신호는 한 주기가 45°, 펄스폭은 22.5°(teeth) 간격으로 된다.

또한 3개의 포토인터럽터는 고정자에 고정되어 연속으로 3상의 신호를 나타내기 위하여 15° 간격으로 배치된다. 3개의 포토인터럽터 신호 P, Q 그리고 R은 각 상의 주 스위치를 제어하기 위한 기본 신호로 사용되며, 속도 제어를 위한 PWM 신호와 조합되어 최종적인 스위칭 패턴을 형성한다.

3. 6/8극 SRM의 기본 설계 및 특성 해석

3.1 기본 설계

본 논문에서는 기본 설계를 위한 선형적인 해석과 자기포화를 고려한 비선형 해석을 병행하였다. 기본적인 SRM의 설계를 토대로, 비선형적인 요소는 FEM 해석하여 실험결과와 비교하였다.

먼저, 정토크 영역에 일정한 전류가 흐른다고 가정하면 한 상에서의 발생 토크는 다음과 같이 표현된다.

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

$$\text{단, } \Delta L = L_{\max} - L_{\min}$$

이때, 최대 인덕턴스(L_{\max})와 최소 인덕턴스(L_{\min})의 비가 선형적이라고 가정하면, 최대 인덕턴스와 최소 인덕턴스는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$L_{\min} = \frac{1}{K_1} L_{\max} \quad (2)$$

K_1 은 설계된 SRM의 최대 인덕턴스와 최소 인덕턴스의 비를 나타내며, 6/8극 SRM의 평균 토크는 전동기의 인덕턴스와 전류의 크기에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$T_{sav} = \frac{3}{\theta_r} \int_0^{\theta_r} T_{em} \cdot d\theta = \frac{3(K_1 - 1)i^2}{2K_1\theta_r} \cdot L_{\max} \quad (3)$$

이때, θ_r 은 회전자의 극호로 6/8 SRM의 경우 $\pi/4$ [rad]가 된다.

한편, 최대 인덕턴스는 회전자 극과 고정자 극이 일치하였을 경우에 발생하며, 다음과 같이 계산된다.

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

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, δ 는 공극의 길이, N 은 상당 턴수이다. 쇄교자속의 유효면적은 고정자 극과 회전자 극이 일치하였을 때의 자로의 유효폭 b 와 철심의 유효길이 l 의 곱으로 표현된다. 이중 돌극 구조의 SRM에서 자로의 유효폭 b 는 고정자의 치폭(齒幅)과 회전자의 치폭(齒幅) 중 최소값으로 결정된다.

6/8 SRM의 고정자 치폭은 전동기 설계에서 고정자의 내경 D_1 과 고정자 극수에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$b_s = D_1 \frac{\alpha_s \pi}{6} \quad (5)$$

이때, α_s 는 고정자의 치폭을 결정하는 상수로 돌극부분과 슬롯부분의 비이다. 또한 회전자의 치폭은 고정자의 내경 D_1 과 회전자의 극수에 따라 다음과 같이 결정된다.

$$b_r = (D_1 - 2\delta) \frac{\alpha_r \pi}{8} \quad (6)$$

이때, α_r 은 회전자 치폭을 결정하는 상수로 회전자 1극의 돌극부분 비이다.

일반적으로 누설자속을 줄이기 위해 고정자 치폭 b_s 는 회전자 치폭 b_r 보다 작거나 같은 것이 유리하므로, 식 (4)에서 한 상의 최대 인덕턴스를 결정하기 위한 자로의 유효치폭 b 는 b_s 와 같다. 따라서 6/8극 SRM의 전동기 구조에 따른 평균 토크는 식 (3)으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$T_{sav} = \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(K_1 - 1)i^2}{K_1} \cdot \frac{\mu_0 l}{\delta} \right) \alpha_s D_1 N^2 \quad (7)$$

즉, 식 (7)에 의해 6/8극의 평균출력 토크는 고정자의 내경과 고정자의 치폭에 비례하며, 권수의 제곱에 비례함을 알 수 있다. 그러나 출력토크를 만족하는 기계적 치수의 선정에서 최대 및 최소 인덕턴스의 비가 작은 경우 상대적으로 출력이 감소하여 전동기의 외경이 증가하게 되므로, 6/8극의 최소 인덕턴스의 값을 줄이기 위해서는 회전자의 치폭비율은 다음의 조건을 만족하여야 한다.

$$(D_1 - 2\delta)(1 - \alpha_r) \frac{\pi}{8} > b_s \quad (8)$$

따라서

$$\alpha_r < \left(1 - \frac{8D_1}{6(D_1 - 2\delta)} \alpha_s\right) \quad (9)$$

그림 4는 6/8극 SRM의 설계 가능한 고정자 극호각 β_s 와 회전자 극호각 β_r 의 관계를 도식적으로 나타내고 있다.

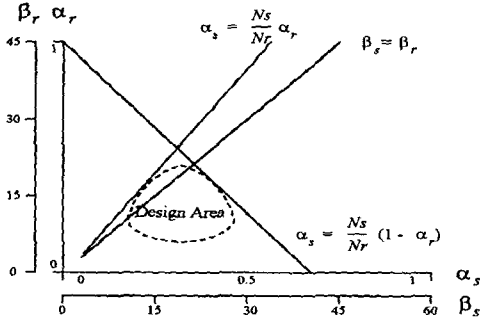


그림 4 고정자 및 회전자 극호각 설계 영역
Fig. 4 Design region of stator and rotor pole arc

한편, 고정자 슬롯의 면적은 전동기의 상전류와 전류밀도에 의해 결정되는 도체의 단면적과 턴수에 의해 결정되는 권선도체의 점유면적을 만족해야 한다. 그림 5는 SRM의 일반적인 슬롯구조를 나타내며, 그림 5에서 고정자 슬롯의 면적은 다음과 같다.

$$A_s = \frac{\pi \left[\left(\frac{D_1}{2} + h_s\right)^2 - \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \right]}{6} - h_s b_s \quad (10)$$

여기서 h_s 는 고정자극의 높이를 의미한다. 고정자 권선의 실제 점유면적은 슬롯 면적과 도선의 점적율을 고려하여 다음과 같이 계산된다.

$$A_s K_f = A_w N \quad (11)$$

여기서 K_f 는 고정자의 슬롯의 도선의 점적율이며, A_w 는 고정자 권선의 단면적이다. 고정자 권선의 단면적은 권선의 전류밀도에 의해 결정된다.

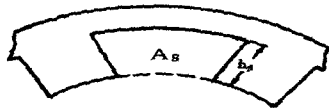


그림 5 고정자 슬롯의 구조
Fig. 5 Schematic diagram of the stator slot

식 (5)의 고정자 치폭에 대한 고정자 슬롯의 면적 A_s 은 다음의 관계로 설명된다.

$$A_s = \frac{\pi}{6} \cdot \left[\left(\frac{D_1}{2} + h_s\right)^2 - \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \right] - \frac{\pi}{6} D_1 h_s \alpha_s \quad (12)$$

따라서 식(7), (10), 그리고 (12)로부터 고정자 치폭비율 α_s 와 6/8극 SRM의 평균출력 토크 T_{sav} 는 다음과 같은 관계가 있다.

$$T_{sav} = C_1 \cdot (C_2 - C_3 \alpha_s)^2 \cdot \alpha_s \quad (13)$$

단,

$$C_1 = D_1 \cdot \left(\frac{K_f}{A_w}\right)^2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{(K_1 - 1)i^2}{K_1} \cdot \frac{\mu_0 l}{\delta}\right)$$

$$C_2 = \frac{\pi}{6} \cdot \left[\left(\frac{D_1}{2} + h_s\right)^2 - \left(\frac{D_1}{2}\right)^2 \right]$$

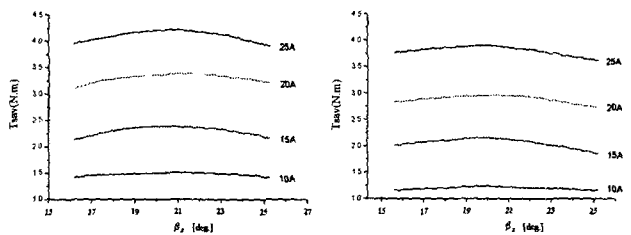
$$C_3 = \frac{\pi}{6} D_1 h_s$$

3.2 비선형적 해석

SRM은 다른 전동기구보다 자기포화가 심한 상태에서 구동하는 전동기이다. 따라서 기본 설계를 위한 선형 해석은 빠른 접근이 가능하지만, 정밀한 특성 해석을 위해서는 비선형 영역에서의 해석이 요구된다. 본 논문에서는 선형영역에서 기본적으로 설계된 6/8극 SRM의 고정자 치비율에 대한 최적의 값을 FEM 분석을 통하여 해석하였다.

그림 6은 회전자 극호각 β_r 이 각각, 15° 와 16.5° 인 경우에 상전류의 크기에 대한 출력 토크 파형을 나타내고 있다. 전류의 상승에 따라 자기회로의 포화가 증가하며, 따라서 평균출력토크의 크기는 비선형적으로 증가하게 된다.

제안된 6/8극 SRM의 비선형 해석결과 회전자 극호각이 $13 \sim 17^\circ$ 범위의 적정 설계 기준에서 고정자 극호각이 $18 \sim 23^\circ$ 의 범위에 있을 때 평균출력토크의 크기가 최대임을 알 수 있다.

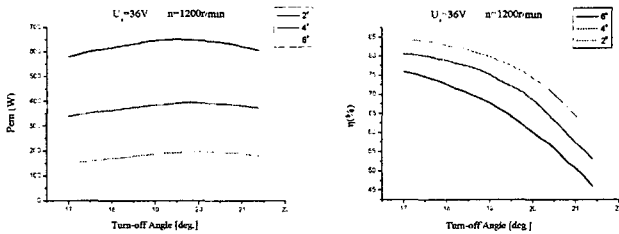


(a) 회전자 극호각이 16.5도 (b) 회전자 극호각이 15도

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

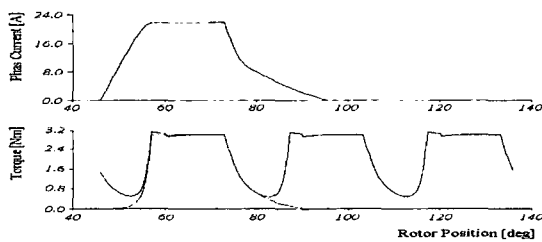
그림 7은 설계된 6/8극 SRM의 회전자와 고정자의 극호각이 각각 16.5° 와 20° 인 경우의 스위칭 각도에 따른 출력과 효율을 나타내고 있다. 설계된 전동기의 인가전압은 $36[V]$ 이며, 해석된 전동기의 속도는 $1200[rpm]$ 이다. 일정한 스위칭 온각의 크기에서는 스위칭 오프각이 감소할수록 효율은 증가하

지만, 전동기의 출력은 감소한다. 따라서 적절한 효율과 전동기의 출력을 고려할 때, 최적의 스위칭 오프 각은 17.5 ~ 18.5°의 범위 내에 존재함을 알 수 있다.

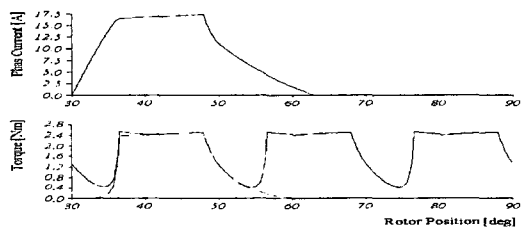


(a) 턴 오프 각에 따른 출력 (b) 턴 오프각에 따른 효율
 그림 7 스위칭 각도에 따른 SRM의 출력 및 효율
 Fig. 7 Output power and efficiency according to switching angle

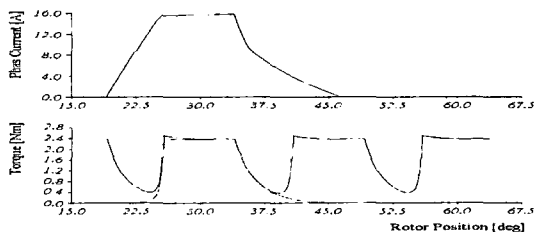
그림 8은 동일한 정격과 크기를 가진 6/4, 8/6 그리고 제안된 6/8극 SRM의 상전류 파형과 출력 토크 파형을 나타내고 있다. 입력전압 36[V], 정격속도 1800[rpm]의 조건에서 해석하였으며, 고정자의 내경 및 외경, 회전자의 내경 및 외경은 동일한 조건에서 해석되었다.



(a) 6/4 SRM



(b) 8/6 SRM



(c) 6/8 SRM

그림 8 6/4, 8/6 및 6/8 SRM의 상 전류 및 출력 토크
 Fig. 8 Output torque and phase current in 6/4, 8/6 and 6/8 SRM

6/4극 SRM의 경우 평균 출력토크는 1.6[Nm]이고, 4상 8/6극과 제안된 3상 6/8극의 경우에는 1.2[Nm]로 다소 낮게 나타났다. 그러나 토크 리플의 크기는 6/4극 SRM의 경우에 한주기 실효치가 1.048 [Nm]이며, 제안된 6/8의 경우에는 0.814[Nm]로 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, 8/6극에 비해 제안된 6/8극은 전기적으로 3상 구조를 가지므로, 전체 드라이브의 구성이 단순해지는 장점이 있다.

4. 실험 결과

제안된 3상 6/8극 SRM의 적합성을 검증하기 위하여 시작기를 제작하고 그 특성을 해석하였다. 그림 9와 표 1은 본 논문에서 설계된 6/8극 SRM의 형상 및 설계 파라미터를 나타내고 있다. 비선형 해석을 통하여 분석된 고정자와 회전자의 극호각으로 설계되었으며, 공극은 0.2[mm]이다.

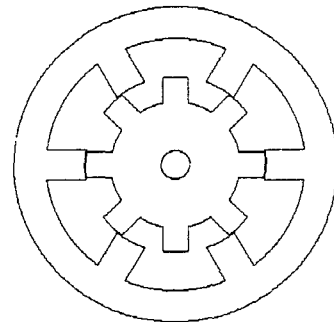


그림 9 6/8 SRM의 설계 형상
 Fig. 9 Designed 6/8 SRM

표 1. 6/8 SRM의 설계 파라미터

Table 1. Design parameters of 6/8 SRM

고정자 극수	6 극	회전자 극수	8 극
고정자 극호각	20°	회전자 극호각	16.5°
고정자 외경	45 [mm]	공극	0.2 [mm]
고정자 내경	36 [mm]	고정자 스택	95 [mm]

표 2는 제작된 시작기의 실험 결과를 나타내고 있다. PWM의 듀티비를 변경하여, 속도에 따른 출력 특성 및 효율을 측정하였다. 제작된 6/8극 SRM의 실험결과는 비선형 해석에 의한 해석결과와 매우 유사하게 나타남을 알 수 있다. 입력전압은 36[V]이고, PWM 신호의 주파수는 6[kHz]이다. 제안된 6/8극 SRM은 고정자의 슬롯 면적이 넓게 설계될 수 있으므로, 실제 설계 시 동일한 상권선의 점적율을 가지는 8/6극에 비해 상권선에 낮은 전류밀도를 유지할 수 있고 동시에 동손도 줄일 수 있기 때문에 높은 효율을 갖는다.

표 2 시작기의 실험결과

Table 2 The test results of the prototype SRM

속도 (r/min)	출력 (W)	상전류 (A)	상전류 최대치 (A)	효율 (%)	듀티비 (%)
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

[6] 손익진, 이동희, Chen Hao, 안진우, "6/8극 SRM의 설계 및 특성해석에 관한 연구", 전력전자학회, 하계학술대회, 407-410, 2002.7[5]

5. 결 론

본 논문에서는 6/8극 SRM의 기본 설계, 고정자 와 회전자 극호각의 최적 범위를 비선형 해석에 의하여 분석하였다. 제안된 6/8극 SRM은 6/4극 SRM에 비해 출력토크의 형상이 부드러워 토크 리플이 감소하며, 3상 구조이므로 8/6극 SRM에 비해 구동회로가 단순해지는 장점이 있다.

제안된 6/8극 SRM은 출력토크의 관점에서 고정자 극호각의 최적범위를 해석하였으며, 정해진 인가전압에서 효율 및 출력을 고려한 최적의 스위칭 오프각을 해석하였다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구(No. R01-2001-000-00300-0)지원에 의해 수행되었음.

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, 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.
- [3] S.G. Oh, Y.B. Choo, Y.M. Hwang, A Study on Electromagnetic Energy Recovery in SRM System , proc. of 96 IEEE/IECON, vol.1, pp90-95, 1996.
- [4] S. Y. Pyo, J. W. Ahn, "High Efficiency PLL Control for SRM Drive", The Journal of Power Electronics, KIPE, Vol.5, No.3, pp.215-220, 2000.
- [5] D. J. Cheon, D. Y. Jung, S. H. Lee, B. S. Lee, Y. R. Park, "Development of Variable Speed Digital Control System for SRM using Simple Position Detector", The Journal of Power Electronics, KIPE, Vol. 6, NO. 2, pp. 202-208, 2001.