

설계 변수에 따른 리니어 스위치드 릴렉턴스 전동기의 힘특성 해석

장석명*, 박지훈*, 최장영*, 유대준*, 고경진*, 성호경**

*충남대학교 전기공학과, **한국기계연구원

Force Characteristic Analysis of Linear Switched Reluctance Motor according to Design Parameter

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi, Dae-Joon You, Kyoung-Jin Ko, Ho-Kyung Sung

Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, KIMM

Abstract - This paper deals with extraction of design parameters of Linear Switched Reluctance Motor (LSRM) based on force calculation using space harmonic analysis, 2D Finite Element Method (FEM) and experimental measurement. First, analytical solutions for flux density due to mover winding currents are derived in terms of magnetic vector potential and a 2D rectangular coordinate system, for the case when the mover is located at aligned and unaligned position. The analytical results are compared with those obtained from a 2D FEM. Second, using Fourier series expansion, this paper predicts the force profile of LSRM analytically.

1. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 모터로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구자석이 존재하지 않는 간단한 구조를 가진다. SRM의 구동원리는 고정자의 각 상을 순차적으로 여자시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로서 토크를 얻게 된다. 즉, 스위칭 소자를 ON, OFF시켜 해당권선에 전압을 인가하여 전류의 크기를 조절하고, 그때의 전류 크기와 비례하는 쇄교자속 수에 의해 가변속 운전이 가능하게 된다. SRM은 이러한 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러시를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적 당 토크, 효율 및 칸버터의 경격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다.[1] LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태의 기기로 회전기가 직선 주력을 얻기 위하여 기어, 벨트 등을 연결하는 반면에 직접 주력을 전달할 수 있다. 그러나 직선기의 경우 구조적으로 수직력이 크게 발생하게 되어 공극의 크기를 십 수 mm 정도로 취해야만 하므로 회전기에 비하여 역률이 나쁘다. 또 단부 효과 및 공극에서의 누설자속을 적게 하기 위하여 극 간격이 가능한 한 크게 해야 하는 등 회전기와는 구조 및 특성이 매우 다르다.[2]

본 논문에서는 직선형 스위치드 릴렉턴스 전동기의 설계 요소에 따른 힘특성을 다루고자 한다. 설계 요소에 대한 힘특성을 다루기 위하여 그림 1과 같이 해석 모델을 제시하였으며, 각각의 요소에 대하여 전자기 특성을

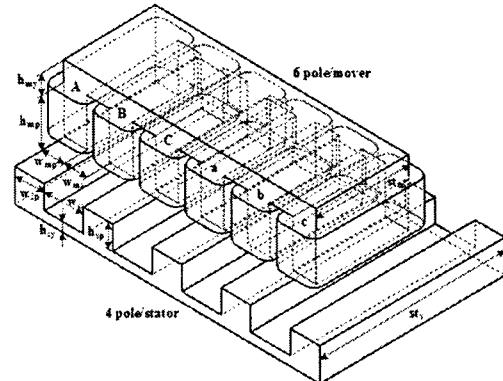


그림 1. 설계 변수를 갖는 LSRM의 해석 모델

해석하였다. 즉, 가동자의 전류에 의한 특성은 가동자의 전류분포가 면전류로 분포해 있으며, 고정자의 설계 요소에 대한 자속 밀도를 해석하였다. 해석된 결과에 대하여 전자기 특성이 우수한 설계 요소를 선정하였으며, R.Krishnan이 제시한 힘 계산식을 이용하여 해석적인 방법에 의한 LSRM의 힘특성을 해석하였고, 유한요소법과 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 설계 요소에 따른 힘특성 해석

2.1 LSRM의 해석 모델

그림 1의 LSRM은 6/4극의 구조로 가동자인 6극에 권선이 시행되고, 고정자는 4극이다. 그림 1에서 보여지는 LSRM의 설계 요소는 A는 positive phase이고, a는 negative phase이다. h_{my} 는 가동자의 요크 높이, h_{mp} 는 가동자의 치 높이, w_{mp} 는 가동자의 치 너비, w_{ms} 는 가동자 슬롯 너비, h_{sy} 는 고정자의 요크 높이, h_{sp} 는 고정자의 치 높이, w_{sp} 는 고정자의 치 너비, w_{ss} 는 고정자의 슬롯 너비이며, 가동자와 고정자의 적층 방향 길이는 각각 st_m , st_s 이다. 또한 LSRM의 공극 길이는 g 이고, LSRM의 극 간격과 이동 속도는 75 mm와 1m/s로 가정하였다.

2.2 힘 특성식과 자계 특성식

그림 2는 공간고조파법과 유한요소법을 이용한 힘 계산을 위한 과정을 보여주고 있다. 본 절에서는 그림 1의 설계 요소가 고려된 가동자 권선에 의한 자속 밀도를 해석하기 위하여 자기 벡터 포텐셜과 2D 좌표계를 사용하였으며, 가동자는 정렬 위치와 비정렬 위치에 고

정되어 있다.

R.Krishnan[1]은 공극 자속 밀도(B_g)를 이용하여 정렬과 비정렬 위치에서 힘 계산을 위한 수식을 제시하였으며 식(1)과 같다.

$$F_x = \frac{B_g^2}{2\mu_0} ZY = \frac{B_g^2}{2\mu_0} L_w g \quad (1.a)$$

$$F_y = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} XZ = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} w_{sp} L_w \quad (1.b)$$

여기서 L_w 는 적층 방향 길이이고, w_{sp} 는 고정자의 치 너비이다.

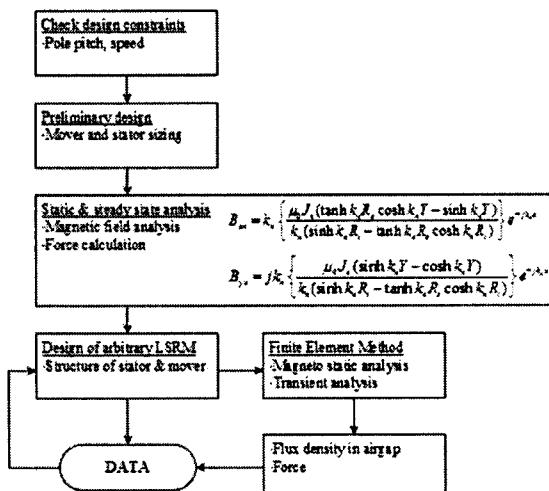


그림 2. 2D 힘 계산을 위한 과정

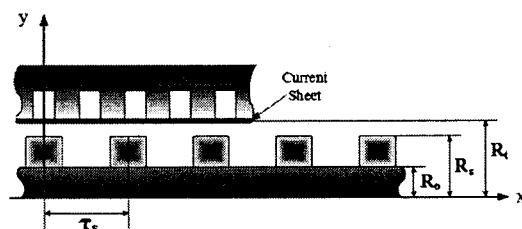


그림 3. LSRM의 해석 모델

본 논문에서는 전자기 해석에 의한 자계 분포를 예측하기 위하여 가동자의 전류분포가 그림 3에서 보이듯이 R_o 에 시트전류로 분포해 있다고 가정한다. 또한 해석의 결과에 영향이 없는 범위에서 고정자와 가동자 철심의 투사율은 무한이라고 가정한다.

가동자 코일의 전류 분포는 식(2)로 표현된다.

$$J_n(x) = \sum_{n=1, odd}^{\infty} J_{zn} e^{-jk_n x} \quad (2)$$

여기서 J_{zn} 은 전류밀도 푸리에 계수로 식(3)으로 주어진다. $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 n 은 고조파 차수이다.

$$J_{zn} = \frac{2N}{b_o} \quad (3)$$

여기서 N 은 극당 턴수, i 는 부하 전류, b_o 는 슬롯 개구간 폭이다. 한편, 맥스웰 방정식으로부터 식(4)가 도입된다.

$$\nabla \times H = J \quad (4)$$

또, 자기 벡터펜셜은 식(5)로 정의된다.

$$\nabla \times A = B \quad (5)$$

식(2), (4) 그리고 식(5)에 의해 식(6)과 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_{zn} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_{zn} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_{zn} = 0 \quad (6)$$

여기서 A_{zn} 은 자기 벡터펜셜 A 의 z 성분이고, 전류밀도와 같은 방향 성분을 갖는다.

식(6)의 해와 식(5)의 자기 벡터펜셜의 정의로부터 그림 2의 B_{xn} 과 B_{yn} 을 얻을 수 있다.

가동자와 고정자가 정렬과 비정렬 위치일 때 자속 밀도를 해석하기 위하여 카터 계수를 도입하였다. 이것은 가동자와 고정자의 치 너비가 다르고, 공극의 길이가 회전형 기기와 달리 크기 때문에 누설 성분이 발생함을 알 수 있다. 따라서 비정렬 위치에서는 정확한 자속 밀도를 해석하기 위하여 카터 계수를 도입해야 하며, 식(7)과 같다.

$$K_c = \frac{\tau_t}{\tau_t - \gamma g} \quad (7)$$

여기서 τ_t 는 슬롯 너비이며, g 는 유효 공극이다. 또한, γ 는 [3]에서 제시하고 있다.

2.3. 설계 요소에 따른 자계 특성 해석 결과

표 1은 자계 해석을 위한 해석 모델의 설계 요소를 보여주고 있으며, 각각 고정자 슬롯 너비와 치 높이 그리고 요크 높이이다.

표 1. 자계 해석을 위한 해석 모델의 설계 요소

	Case I	Case II	Case III
w_{ss}	variable	43 mm	43 mm
h_{sp}	25 mm	variable	25 mm
h_{sy}	10 mm	10 mm	variable

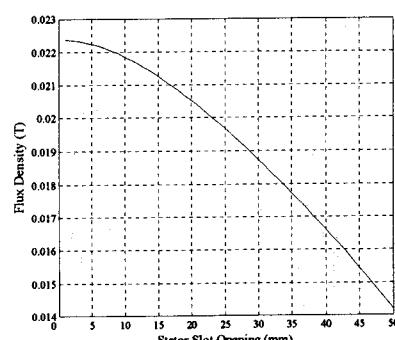


그림 4. 고정자 슬롯 너비에 따른 자속 밀도

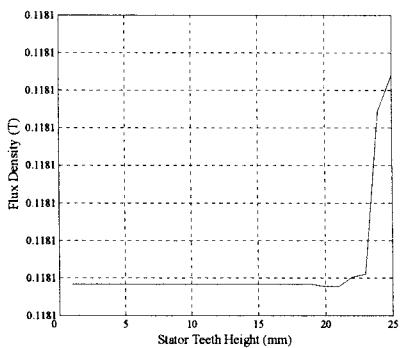


그림 5. 고정자 치 높이에 따른 자속 밀도

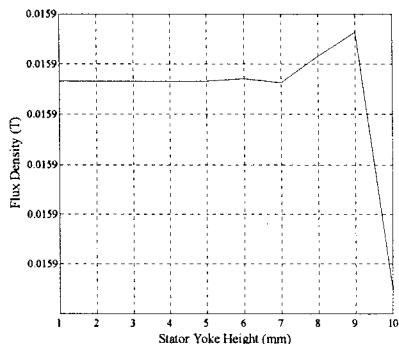


그림 6. 고정자 요크 높이에 따른 자속 밀도

그림 4~6은 고정자의 설계 요소에 대한 자속 밀도를 해석한 결과이며, 해석된 결과로부터 전자기 특성이 우수한 설계 요소를 선정할 수 있다.

2.4. 해석적인 방법과 유한요소법의 비교

그림 7은 가동자와 고정자의 위치 변화에 따른 공극의 길이를 보여주고 있으며 이러한 공극의 변화는 식(8)로 표현할 수 있다. 식(8)은 힘특성을 해석하기 위하여 식(1)에서 R.Krishnan 제시한 수식에 대하여 연속적인 힘을 얻기 위한 함수이며, 공극 길이인 g 와 같다.

$$Y = \frac{4}{\tau_s} \left\{ \int_0^{\frac{x_a}{2}} Y_a \cos k_n x dx + \int_{\frac{x_a}{2}}^{x_d} (ax + b) \cos k_n x dx + \int_{x_d}^{\frac{\tau_s}{2}} Y_u \cos k_n x dx \right\} \quad (8)$$

그림 8과 그림 9는 해석적인 방법과 유한요소법에 의하여 LSRM의 가동자와 고정자가 정렬과 비정렬 위치일 때 수직력과 수평력에 대하여 해석한 힘특성을 비교한 것이며, 해석된 결과로부터 잘 일치함을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 설계 요소에 따른 LSRM의 힘특성 해석을 다루고 있다. 힘특성을 해석하기 위하여 전자기 특성식을 이용하였으며, 이것은 R.Krishnan이 제시한 힘계산식에서 기인한다. 가동자와 고정자의 설계 요소에 대하여 우선 가동자의 전류분포를 면전류로 가정하고 고정자

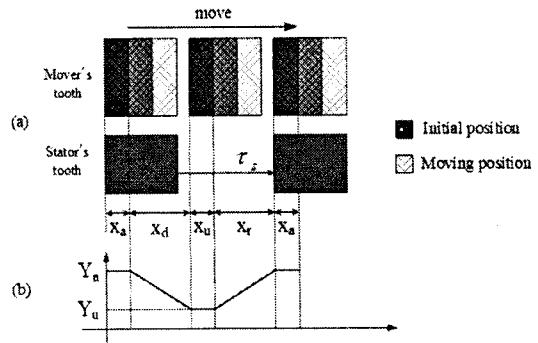


그림 7. (a)가동자와 고정자의 위치(b) 위치에 따른 공극 길이

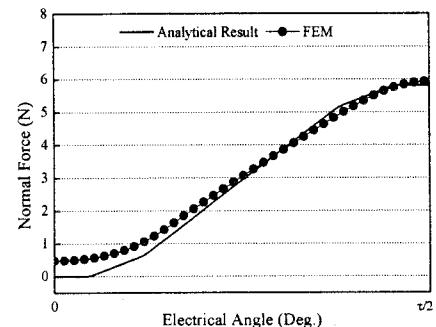


그림 8. 해석적 방법과 유한요소법에 의한 수직력 비교

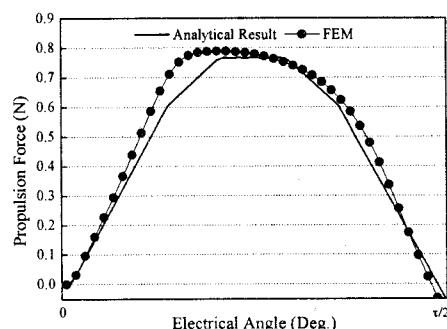


그림 9. 해석적인 방법과 유한요소법에 의한 수평력 비교

의 설계 요소에 대하여 자속 밀도를 해석하였다. 해석된 결과를 바탕으로 자속 밀도 특성이 우수한 설계 요소를 선정하여 힘특성을 예측하였으며, 유한요소법과 비교하여 해석의 타당성을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC press, 2001.
- [2] 정연호, VVVF 인버터로 구동되는 LIM의 동특성, 석사학위논문, 충남대학교, 1996.
- [3] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet dc motors, part III: effect of stator slotting," *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 29, no. 1, Jan. 1993, pp. 143-151.