

동특성 시뮬레이션을 이용한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 힘 특성 해석

장석명, 박지훈, 박유섭, 김진순, 최지환
 충남대학교 전기공학과

Force Characteristic Analysis of Linear Switched Reluctance Motor using Dynamic Simulation

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Yu-Seop Park, Jin-Soon Kim, Ji-Hwan Choi
 Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper deals with force characteristic analysis of linear switched reluctance motor using dynamic simulation. First, we calculated flux density of linear switched reluctance motor according to position. Second, analyzed normal force from flux density of linear switched reluctance motor according to position. Also, analysis result compares with data that is derived through a finite element analysis, and proved validity. However, linear switched reluctance motor has non linear characteristic, hence, analysis of propulsion force do not easy using analytical method. Therefore, we presented dynamic characteristic analysis model which is consisted at motor and sensor signal part, etc., and substitute circuit constant that get using magnetic equivalent circuit method, we confirmed propulsion force.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor: SRM)는 구조가 간단하고 견고하며, 높은 효율과 낮은 제작비용, 권선은 간단한 집중권으로 고정자에만 감겨있고, 회전자에는 권선, 도체 바, 영구자석이 없는 기계적으로 간단한 구조로 되어있다. 그러므로 다른 전동기 보다 전동기 자체의 제조단가가 저렴하고 기계적으로 견고하며, 고온 등의 열악한 환경에서도 신뢰성이 높아 유지비가 거의 들지 않는 많은 장점을 지니고 있다. 또한 광범위한 속도 제어 범위를 가지고 있으며, 초고속 운전이 용이하고, 단위체적 당 토크 및 효율 면에서도 기존 전동기보다 우수한 것으로 나타나 있으며 최근에 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 스위치드 릴럭턴스 전동기는 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 전동기를 산업분야에 널리 이용하기 위해서는 저 토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하고, SRM의 인덕턴스 프로파일은 중요한 요소로 작용한다. 인덕턴스 프로파일은 최소인 구간과 상승 구간 그리고 최대인 구간에서 전류의 턴-온 시점에 따라서 토크 리플의 발생을 최소화 할 수 있다. 일반적으로 최소인 구간에서부터 상승구간 전에서 턴-온하고 최대인 구간에서 턴-오프를 통한 소호를 통해 전류를 희생하는 방법이 사용된다.[1][2]

본 논문에서는 LSRM의 힘 특성을 해석하기 위한 동특성 해석을 수행하였다. LSRM은 다른 직선형 기기와 마찬가지로 수직력과 추력을 갖는다. 이때 수직력은 LSRM의 비정렬 위치에서 최소이고, 정렬 위치에서 최

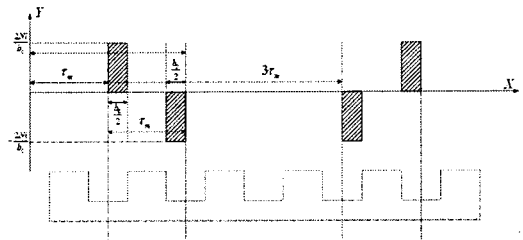


그림 1. LSRM 6극 가동자 전류 분포 모델링

대임을 예측할 수 있고, 많은 해석법으로부터 해석이 검증되었다. 반면에 추력은 전기각으로 90도인 곳에서 최대이며, 비정렬 위치에서 전원이 인가되어 급속히 증가하다가 정렬 위치에서는 평활한 특성을 갖는다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 인덕턴스 프로파일과 LSRM의 위치에 따른 전류와 자속 특성 등을 통한 해석이 필요하다. 그러나 정확한 해석에는 비선형 특성 등이 해석의 문제점으로 야기된다. 따라서 본 논문에서는 LSRM의 정확한 힘 특성을 예측하기 위하여 수직력과 추력을 해석적인 방법과 동특성 시뮬레이션을 통하여 제시하였다.

2. LSRM의 특성 해석

2.1 해석 모델의 구조 및 가정

LSRM은 6극 가동자와 4극 고정자로 구성되어 있으며, 가동자가 고정자 하단에 위치하는 구조와, 가동자의 전류분포가 면전류로 분포해 있다고 가정한다. 그림 1은 면전류 분포를 해석하기 위한 가동자 한 상의 전류 분포 모델링을 보여주고 있으며, b_0 는 슬롯 개구간, N 는 상당 턴수, i 는 입력전류이다. LSRM의 해석 모델은 표 1을 통하여 제시하였다.

표 1. LSRM 해석 모델의 사양

	항 목	사 양
가동자	치 폭	15 (mm)
	치 높이	15 (mm)
	극 간격	30 (mm)
	요크 높이	10 (mm)
고정자	치 폭	22.5 (mm)
	치 높이	22.5 (mm)
	극 간격	50 (mm)
	요크 높이	8 (mm)
적층 방향 길이		50 (mm)

2.2 가동자 전류 분포에 의한 자속밀도 특성식

가동자 한 상의 전류 분포는 식(1)로 표현된다.

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

여기서 k_n 은 $n\pi/\tau$ 이며, n 은 n 차 고조파 차수, τ 는 극간격이다. 또한, J_{zn} 은 한 상 전류밀도에 대한 n 차 고조파 최대값을 나타낸다. 맥스웰 방정식으로부터 식(2)가 도입된다.

$$\nabla \times H = J \quad (2)$$

자속밀도 B 와 자기 벡터 퍼텐셜 A 는 식(3)의 관계가 성립한다.

$$\nabla \times A = B \quad (3)$$

자계의 세기 H 와 자속밀도 B 의 관계를 이용하여, 식(3)을 식(2)에 대입하면 식(4)로 정리된다.

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

따라서 식(4)를 벡터 연산 후, Coulomb gauge 조건 $\nabla \cdot A = 0$ 을 적용하여 정리하면 식(5)의 지배방정식이 유도된다.

$$\nabla^2 A = -\mu J \quad (5)$$

식(5)의 지배방정식과 맥스웰 방정식을 이용하여 자속밀도 특성식을 정리하면 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$B_x = \frac{\partial A_n}{\partial y} \quad (6.a)$$

$$B_y = -\frac{\partial A_n}{\partial x} \quad (6.b)$$

해석모델의 자속밀도를 해석하기 위한 경계조건은 식(7)로 주어지며, 경계조건과 자속밀도 특성식을 이용하여 본 논문에서는 LSRM의 정렬과 비정렬 위치일 때 자속밀도를 해석하였다. 특히, 비정렬 위치일 때 카터계수를 사용하여 해석하였다.[3]

$$H_x|_{y=y_m} = -J \quad (7.a)$$

$$H_x|_{y=y_g} = 0 \quad (7.b)$$

2.3 힘 특성식

본 절에서는 LSRM의 힘을 해석하기 위한 특성식을 제시한다. 에너지는 힘과 이동거리의 곱으로 표현되며, x 방향 변위 dx 에 대하여 $dW = f \cdot dx$ 의 관계를 갖는다. 이때 에너지 dW 를 전기적 입력 에너지, 손실 에너지, 자기 에너지 그리고 기계적 에너지로 나타낼 수 있으며, 식(8)으로 표현된다.

$$dW_e = dW_l + dW_s + dW_m \quad (8)$$

여기서 dW_e 는 전기적 입력 에너지, dW_l 은 손실 에너지, dW_s 는 저장되는 자기적 에너지, dW_m 은 기계적 에너지이다. 힘을 해석하기 위해서는 기계적 에너지를 이용해야 하며 힘과 에너지의 관계로부터 계산이 가능하고, LSRM의 자속밀도를 해석하기 위한 해석 모델을 3차원으로 확장하여 힘 계산을 위한 해석 모델을 제시하였으며, 가동자의 진행방향을 x 축, 수직방향을 y 축, 적층길이를 L_w , 치 피치를 w_t , 공극길이를 g 로 정의하였다. 가동

자가 y 축 방향 변위 dy 에 대하여 기계적 에너지는 식(9)로 정의된다.[1]

$$dW_{m,y} = f_y dy \quad (9)$$

여기서 f_y 는 normal force이며, 식(9)의 $dW_e = i \cdot d\lambda$ 이고, $\lambda = N\phi$ 이다. ϕ 는 식(10)으로부터 계산된다.

$$\phi = B_g \cdot XZ = \mu_0 H_g \cdot XZ = \mu_0 \frac{N_i}{Y} \cdot XZ \quad (10)$$

여기서 B_g 는 공극자속밀도, X 와 Z 는 가동자와 고정자가 x, z 방향에 대하여 겹쳐지는 길이를 나타내며, 식(10)을 식(11)로 다시 쓸 수 있다.

$$N_i = \frac{\phi Y}{\mu_0 XZ} \quad (11)$$

식(11)을 $dW_e = i \cdot d\lambda$ 에 대입하여 정리하면, 식(12)를 얻을 수 있다.

$$dW_e = \frac{\phi Y}{\mu_0 XZ} \cdot d\phi \quad (12)$$

또한, 식(9)의 저장 에너지 W_s 는 식(13)으로 표현된다.

$$W_s = \frac{B_g^2 \cdot XYZ}{2\mu_0} = \frac{\phi^2 Y}{2\mu_0 XZ} \quad (13)$$

저장 에너지 W_s 를 변위 y 축 방향 변위 dy 에 대하여 $dW_{s,y}$ 를 식(14)와 같이 나타낸다.

$$dW_{s,y} = \frac{\phi^2}{2\mu_0 XZ} \cdot dy + \frac{\phi Y}{\mu_0 XZ} \cdot d\phi \quad (14)$$

$dW_{s,y}$ 는 동손, 철손, 마찰손과 같은 에너지 손실을 나타내며, 식(12)와 식(14)를 이용하여 변위 dy 에 대한 기계적 에너지 $dW_{m,y}$ 를 계산할 수 있다.

$$dW_{m,x} = dW_e - dW_{s,y} = -\frac{\phi^2}{2\mu_0 XZ} \cdot dy \quad (15)$$

식(15)를 식(9)를 이용하여 다시 표현할 수 있다.

$$f_y = \frac{dW_{m,y}}{dy} = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot L_w w_t \quad (16)$$

식(16)을 통하여 LSRM의 normal force를 해석할 수 있지만, LSRM의 한 지점에 대한 힘만이 계산가능하다. 이것은 위치에 따른 반복적인 해석을 통하여 LSRM의 전체 힘을 계산함을 의미하며, 해석에 많은 시간이 필요하게 된다. 따라서 LSRM의 한 상의 여자에 의하여 가동자가 이동하는 구간에 대하여 가동자와 고정자가 겹쳐지는 부분에 대한 면적 프로파일을 도입하여 LSRM의 힘 특성식을 보완하였다.

그림 2는 2.2절의 LSRM의 가동자 전류 분포에 따른 자속밀도 특성식과 표 1의 해석 모델 사양을 이용하여 해석적인 방법인 공간고조파법을 이용하여 LSRM의 공극에서의 자속밀도를 해석한 결과이며, 유효요소법과 비교하여 매우 잘 일치하는 결과를 얻을 수 있으며, 해석된 결과로부터 해석법의 타당성을 입증할 수 있다.

그림 3은 LSRM의 힘 특성식을 이용하여 LSRM의 수직

력을 위치에 따라 해석한 결과이며, 해석된 결과는 유한 요소법과 비교하여 매우 잘 일치함을 알 수 있다. LSRM의 수직력은 비정렬 위치에서 최소이며, 정렬 위치에서 최대임을 알 수 있다. 그러나 추력 특성은 수직력과 비교하여 전기적으로 90° 위치에서 최대값을 갖으며, LSRM의 인덕턴스 상승 구간이며, 입력전류의 크기와 포화 등이 고려되어 해석되어야 한다. 해석의 정확성을 위해서 유한요소법과 같은 비선형 해석법이 사용되어야 하지만 해석 시간과 해석 결과의 활용도 등을 고려하여 LSRM의 전압 방정식을 이용한 동특성 시뮬레이션의 해석 결과로 LSRM의 추력을 예상하였다.

3. 동특성 해석 모델 및 해석 결과

동특성 해석을 수행하기 위해서는 LSRM의 설계 사양 및 특성, 회로 정수들을 알아야 한다. 본 논문에서는 회로 정수인 R과 L값을 해석적인 방법을 통해 계산하였다. 이렇게 얻어진 R과 L값을 이용하여 LSRM을 구동시킬 때 특히 L값에 대한 턴-온 위치가 중요하게 작용한다. 해석을 위해 LSRM은 1m/s로 이동한다고 가정하였다.

인가전압에 의한 권선의 모델링은 식(17)의 저항성분과 전류에 의한 쇠교자속의 시간적 변화율에 의해 표현되어지며, 쇠교자속의 시간적 변화율은 인덕턴스에 의한 전압강화와 속도 기전력으로 다시 나누어진다.

$$V_s = Ri_s + \frac{d\lambda_s}{dt} = Ri_s + L \frac{di_s}{dt} + \omega_m \frac{dL}{dx} i_s \quad (17)$$

인덕턴스 L의 경우 하나의 전류에 대한 인덕턴스 프로파일은 x에 따른 변동만을 갖는다.

$$VI = Ri^2 + i \frac{d\lambda(x, i)}{dt} \quad (18)$$

여기서 $i \frac{d\lambda}{dt} = \frac{dW_m}{dt} + \frac{dW_f}{dt}$ 이고, Ri^2 는 전기적 에너지, W_m 은 기계적 에너지, W_f 은 자기적 에너지로 정의할 수 있으며, $\frac{dW_m}{dt} = F_e v = F_e \frac{dx}{dt}$ 이므로, 식(18)을 이용하여 식(19)가 얻어진다.

$$F_e(x, \lambda) = i \frac{d\lambda}{dx} - \frac{dW_f(x, \lambda)}{dx} \quad (19)$$

식(19)는 자기수반에너지를 도입하여 간단히 할 수 있으며 식(20)과 같다.

$$F_e(x, i) = \frac{\partial W_c(x, i)}{\partial x}, i \text{ constant} \quad (20)$$

또한 $\lambda = L(x)i$ 에 대하여, $W_c = \int_0^i L(x)idi$ 가 성립하므로 식(21)과 같이 표현될 수 있다.

$$W_c = \frac{i^2}{2} L(x) \quad (21)$$

전기적인 추력은 식(22)와 같다.

$$F_e = \frac{dW_c}{dx} = \frac{i^2}{2} \frac{dL(x)}{dx} \quad (22)$$

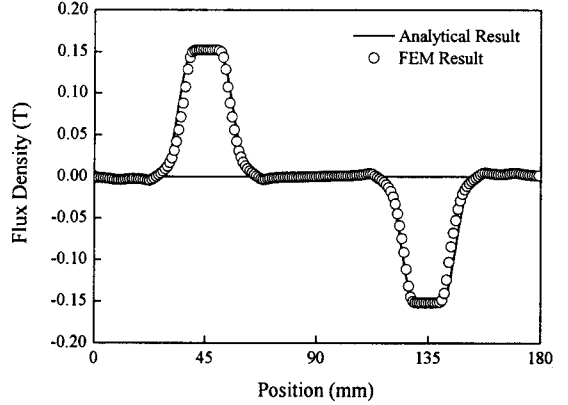


그림 2. LSRM의 공극 자속 밀도

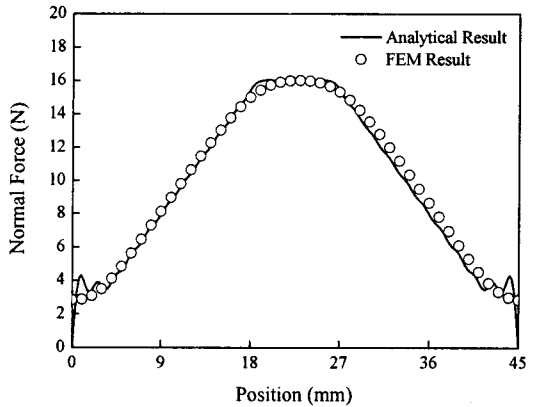


그림 3. LSRM의 수직력 해석

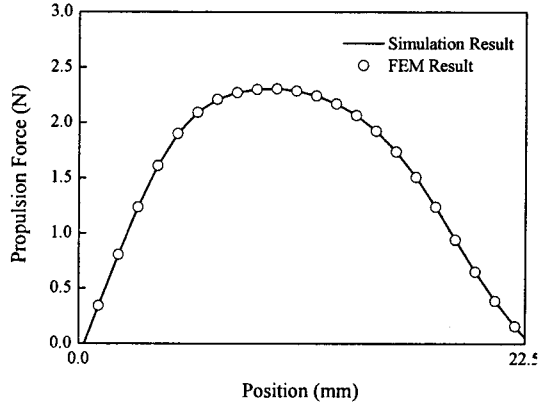


그림 4. LSRM의 추력 해석

따라서 LSRM의 추력은 전류와 인덕턴스 프로파일에 의해서 얻어진다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC press, 2001.
- [2] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.
- [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.