

영구자석 삽입형 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전자기 특성 해석

장석명* 김진순*, 박지훈* 이운호* 구철수**
 충남대학교* 한국원자력안전기술원**

Characteristic Analysis of the Linear Switched Reluctance Motor with Interior Permanent Magnet according to Magnetization of Permanent Magnet

Seok-Myeong Jang*, Jin-Soon Kim* Ji-Hoon Park* Un-Ho Lee* Cheol-Soo Goo**
 Chungnam National University, KOREA INSTITUTE OF NUCLEAR SAFETY**

Abstract - This paper deals with characteristic analysis on the Linear Switched Reluctance Motor with Interior Permanent Magnet (LSRM-IPM) according to the magnetization of permanent magnet. The governing equations and force equations are derived using analytical method for the suggested models. This paper compares the force characteristics in terms of three cases considering the position and size of permanent magnet.

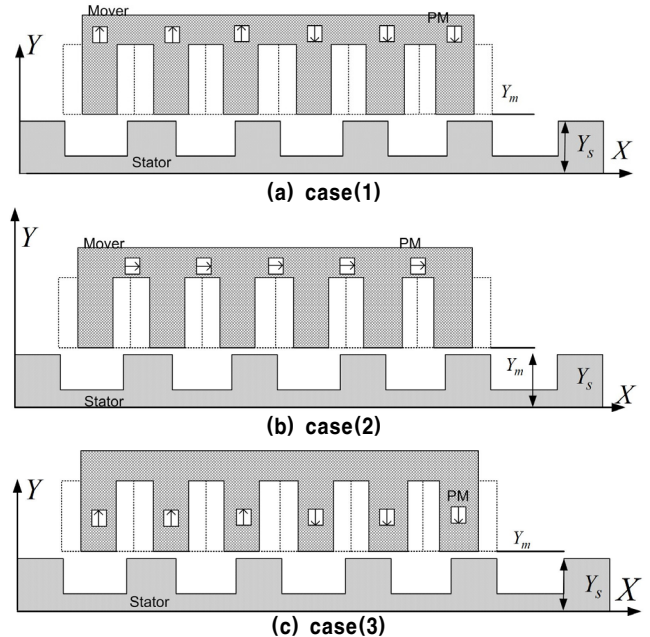
1. 서 론

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 여자 시킬 때 고정자의 쇄교자속이 최대가 되려는 방향으로 회전자가 회전하려는 특성을 이용한 것으로 회전자의 위치에 따라 고정자의 해당 권선을 여자시킴으로써 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 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수 등의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적 당 토크, 효율 및 컨버터의 정격 등 많은 부분에서 우수한 특성을 지니고 있다. 그러나 SRM은 고정자와 회전자가 이중 돌극으로 구성된 구조와 펄스 형태의 여자방식으로 인해 토크 맥동이 크고 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 따라서 SRM을 산업분야에 널리 이용하기 위해서는 저 토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하며, 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 회생하는 방법이 사용된다.[1]

본 논문에서는 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기(LSRM)의 영구자석의 삽입유무와 삽입된 영구자석이 자화에 따라 전자기특성 해석을 수행하였으며, 해석적인 방법은 공간고조파법을 이용한 수학적 해석 방법이며, 해석결과와 타당성을 위해 유한요소해석과 비교 검증하였다.

〈표 1〉 해석 모델 사양

항목	사양	
가동자	치 폭	25[mm]
	치 높이	50[mm]
	슬롯 폭	25[mm]
	요크 높이	50[mm]
고정자	치 폭	32[mm]
	치 높이	25[mm]
	슬롯 폭	43[mm]
	요크 높이	25[mm]
스택 길이	205[mm]	
공극 길이	5[mm]	
영구자석 너비	18[mm]	
영구자석 높이	6[mm]	
영구자석 잔류자속밀도	1.06[tesla]	
영구자석 재질	smc017	



〈그림 1〉 영구자석이 삽입된 LSRM의 해석모델

2. 스위치드 릴럭턴스 전동기의 전자기 특성 해석

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 자계특성식

가동자 코일의 전류 분포는 식(1)로 표현된다.

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

여기서 J_{zn} 은 전류밀도 푸리에 계수로 식(2)로 주어진다. $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 n 은 고조파 차수이다.

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

여기서 N 은 극당 턴수, i 는 부하 전류, b_o 는 슬롯 개구간 폭이다. 한편, 맥스웰 방정식으로부터 식(3)이 도입된다.

$$\nabla \times H = J \quad (3)$$

또, 자기 벡터퍼텐셜은 식(4)로 정의된다.

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

식(1), (3) 그리고 식(4)에 의해 식(5)와 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} A_{zn} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} A_{zn} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} A_{zn} = 0 \quad (5)$$

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

식(5)의 해와 식(4)의 자기 벡터퍼텐셜의 정의로부터 식 (6)의 자계특성식을 얻을 수 있다.

$$B_{zn} = k_n \{ \alpha \cosh k_n Y + \beta \sinh k_n Y \} e^{-jk_n x} \quad (6,a)$$

$$B_{yn} = jk_n \{ \alpha \sinh k_n Y + \beta \cosh k_n Y \} e^{-jk_n x} \quad (6,b)$$

A 상에 의한 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 식 (7)으로 주어진다.

$$Y = Y_m \quad B_{xn} = -\mu_0 J_n \quad (7.a)$$

$$Y = Y_s \quad B_{xn} = 0 \quad (7.b)$$

2.2 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)로 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 수행하였다. 가동자의 진행방향을 x 축, 수직방향을 y 축, 적층길이를 L_w , 치 피치를 w_i , 공극길이를 g 로 정의하였다. 가동자가 y 축 방향 변위 dy 에 대하여 기계적 에너지는 식(9)로 정의된다.

$$dW_{my} = f_y \cdot dy \quad (9)$$

여기서 f_y 는 normal force이며, 식(8)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.

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

또한, 식(8)의 저장 에너지 W_s 는 식(13)으로 표현된다.

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

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

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

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

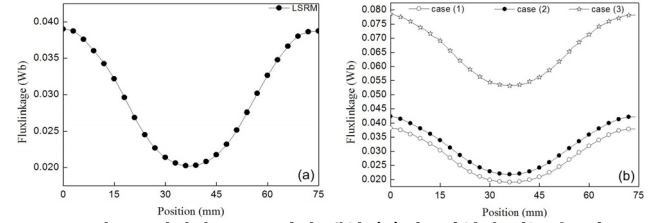
$$\begin{aligned} dW_{my} &= dW_e - dW_{sy} \quad (15) \\ &= \frac{\phi Y}{\mu_0 XZ} \cdot d\phi - \frac{\phi^2}{2\mu_0 XZ} \cdot dy - \frac{\phi Y}{\mu_0 XZ} \cdot d\phi \\ &= -\frac{\phi^2}{2\mu_0 XZ} \cdot dy \end{aligned}$$

식(15)을 식(9)를 이용하여 다시 표현할 수 있다.

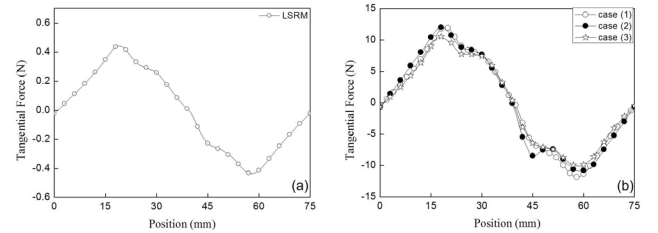
$$f_y = \frac{dW_{my}}{dy} = -\frac{\phi^2}{2\mu_0 XZ} = -\frac{(B_g XZ)^2}{2\mu_0 XZ} = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} \cdot L_w w_i \quad (16)$$

3. 힘 특성 해석 결과

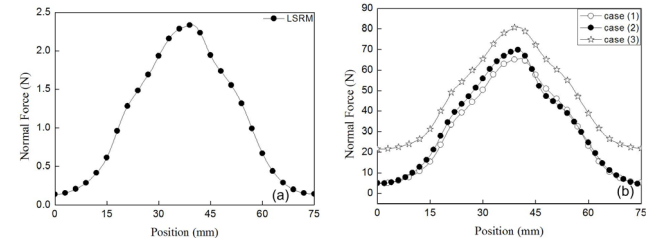
영구자석이 사용된 LSRM의 특성 해석은 영구자석이 사용됨으로 인하여 간단한 스위칭에 의하여 동작하는 LSRM에서 발생하는 토크리플의 감소시킬 수 있으며, 영구자석의 재질, 크기, 사용위치에 따라서 결과값이 달라지므로 본 논문에서는 영구자석의 위치 및 크기 등을 고려해 3가지 경우에 대해 힘 특성을 비교 하였다.



<그림 2> 인덕턴스 프로파일 해석 (a)영구자석이 없는경우와 (b)있는경우의 결과.



<그림 3> 추력에 대한 힘 특성 결과 (a)영구자석이 없는 경우와 (b)있는경우의 결과.



<그림 4> 수직력에 대한 힘 특성 결과 (a)영구자석이 없는경우와 (b)있는경우의 결과.

4. 결론

본 논문에서 영구자석의 위치와 자화 방향에 따른 힘 특성 해석을 다루고 있다. 힘 특성을 해석하기 위하여 전자기 특성식을 이용하였으며, 이것은 R.Krishnan이 제시한 힘계산식에서 기인한다. 영구자석의 사용으로 인한 힘 특성이 수직력과 추력이 우수함을 알 수 있으며, 자화 방향에 따라 힘 특성이 달라지는 것을 알 수 있다. 또한 영구자석을 사용함으로써 인해 LSRM의 크기를 최소화 할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] 김운현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001
- [2] Byeong-Seok Lee, Han-Kyung Bae, P. Vijayragha van, R. Krishnan, "Design of a linear switched reluctance machine," IEEE Trans. Ind Appl. vol.36, no.6, Nov.2000, pp.1571~1580
- [3] 장석명, 박지훈, 최장영, 성호경, 해석적 방법에 의한 리니어 스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 프로파일 산정, 2005년도 대한전기학회전기기기및에너지변환시스템분회추계학술대회, 2005, pp.254~256