

영구자석/전자석을 갖는 릴럭턴스 타입 기기의 전자기적 특성 해석

장석명, 박지훈, 최장영
충남대학교 전기공학과

Electromagnetic Analysis of Reluctance Type Machines with Permanent Magnet/Electromagnet

Seok-Myeong Jang, Ji-Hoon Park, Jang-Young Choi
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - This paper deals with electromagnctic analysis of reluctance type machines with permanent magnet/electromagnet. First, we calculated flux density of reluctance type machines with permanent magnet /electromagnet according to position. Second, analyzed normal force and horizontal force from flux density of machine according to position. Also, analysis result compares with data that is derived through a finite element analysis (FEA), and proved validity.

1. 서 론

최근 영구자석과 전자석을 이용한 많은 전동기가 설계/제작되어지고 있다. 영구자석 전동기는 전자석 전동기에 비해 단위체적당 큰 공극자속밀도를 갖는 장점이 있고, 전자석을 이용한 전동기의 경우 영구자석 전동기에 비해 제작이 쉽고 단가가 저렴한 특징을 가지고 있다. 영구자석과 전자석을 이용한 전동기에는 BLDCM, PMSM, SRM 등이 있으며, 각각의 장점과 단점에 따라 응용에 맞게 설계되어야 한다.

영구자석의 큰 장점이 이유가 되어 많은 산업 현장에서 BLDCM과 PMSM이 상용화되어 발전하고 있으며 이에 발맞추어 전자석을 이용한 릴럭턴스 타입 기기에 대한 연구도 많이 진행되어 있는데 릴럭턴스 타입기기는 SRM이 대표적이며 SRM은 스위칭 제어 장치가 결합된 특수형태의 전동기로 분류되어진다. SRM은 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며 각기 다른 개수의 극을 가지고 있다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있고 회전자 부분에는 권선이나 영구 자석이 존재하지 않는 간단한 구조이기 때문에 제작 생산적인 측면에서 상당한 이점을 지니고 있고, 직류모터와 같이 기동특성이 좋고 토크가 큰 반면에 정기적으로 브러쉬를 교환하는 등 유지, 보수의 필요성이 적으며, 유도전동기에 비하여 구동장치의 구조가 간단하며 단위 체적당 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 저토크 리플, 고 토크 밀도가 요구되며 이를 위한 전동기 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하다.[1]

본 논문에서는 전자기 해석 방법인 공간고조파법을 이용하여 영구자석과 전자석을 이용한 릴럭턴스 타입 기기의 특성을 해석하고자 한다. 전자석인 경우 수직력과 수평력을 위치에 따라 해석하였고, 영구자석의 경우 수직력에 대해서만 해석하였다. 해석된 결과는 유한요소법과 비교하여 타당성을 증명할 것이며, 해석된 결과로부터 릴럭턴스 타입 기기의 일반적인 특성을 제시하고자 한다

2. 릴럭턴스 타입 기기의 특성 해석

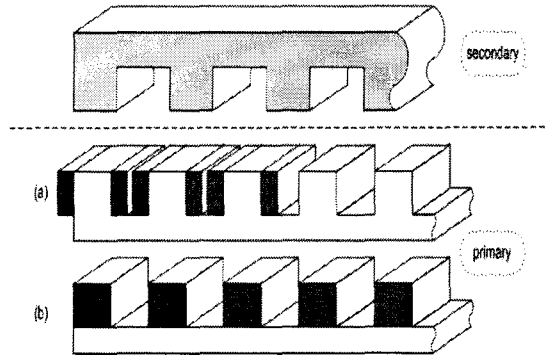


그림 1. 해석 모델

다.

2.1 해석 모델

그림 1은 릴럭턴스 타입 기기의 해석 모델을 보여주고 있다. 그림 1(a)는 전자석 형태의 기기 구조를 보여주고 있으며, 그림 1(b)는 같은 사양에 대하여 영구자석으로 대체한 것을 보여주고 있다. 그림 1(a), (b)는 같은 2차 축을 가지고 있다. 그림 1에 대한 사양은 표 1과 같다.

2.2 전자석에 의한 자계특성식

전자석의 코일에 의한 자계특성식은 식(1)의 코일에 의한 전류밀도로부터 계산할 수 있다.

$$J_n(x) = \sum_{n=1, \text{odd}}^{\infty} \frac{2Ni}{b_0} e^{-jk_n x} \tag{1}$$

여기서 N 은 극당 턴수, i 는 부하 전류, b_0 는 슬롯 개구 간 폭이며, $k_n = n\pi/\tau$ 로 주어지며 n 은 고조파 차수이다. 식(1)과 맥스웰 방정식을 이용하여 식(2)와 같은 지배방정식이 유도된다.

$$\frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A_{zn}}{\partial z^2} = 0 \tag{2}$$

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

식(2)의 해와 자기 벡터퍼텐셜의 정의로부터 식(3)의 자계특성식을 얻을 수 있다.

$$B_{zn} = k_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\tanh k_n R_s \cosh k_n Y - \sinh k_n Y)}{k_n (\sinh k_n R_s - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_s)} \right\} e^{-jk_n x} \quad (3.a)$$

$$B_{yn} = jk_n \left\{ \frac{\mu_0 J_n (\sinh k_n Y - \cosh k_n Y)}{k_n (\sinh k_n R_s - \tanh k_n R_s \cosh k_n R_s)} \right\} e^{-jk_n x} \quad (3.b)$$

식(3)의 자계특성식을 이용하여 자속밀도를 구하기 위한 경계조건은 주어져 있다.[2]

2.3 영구자석에 의한 자계특성식

영구자석의 자계특성을 해석하기 위한 자화분포는 식(4)와 같다.

$$M = M_{yn} e^{-jk_n x} i_y \quad (4)$$

여기서 M_{yn} 은 자화의 수직성분이다.

식(4)와 맥스웰 방정식을 이용하여 식(5)의 지배방정식이 유도된다.

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

자기 벡터퍼텐셜의 정의 $\nabla \times A = B$ 에 식(5)의 A_{zn} 을 이용하여 자계특성식을 구하면, 식(6)과 같다.

$$B_x^I = k_n [A^I e^{k_n y} - B^I e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.a)$$

$$B_x^{II} = k_n [A^{II} e^{k_n y} - B^{II} e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.b)$$

$$B_y^I = jk_n [A^I e^{k_n y} + B^I e^{-k_n y}] e^{-jk_n x} \quad (6.c)$$

$$B_y^{II} = jk_n [A^{II} e^{k_n y} + B^{II} e^{-k_n y} - j\mu_0 M_{yn} / k_n] e^{-jk_n x} \quad (6.d)$$

여기서 위첨자 I, II 는 각각 공기영역과 영구자석영역을 의미한다. 자속밀도를 계산하기 위한 경계조건은 식(7)과 같다.

$$y = 0 \quad B_x^{II} = 0 \quad (7.a)$$

$$y = h_m \quad B_x^I = B_x^{II}, B_y^I = B_y^{II} \quad (7.b)$$

$$y = h_m + g \quad B_x^I = B_x^{II}, B_y^I = B_y^{II} \quad (7.c)$$

여기서 h_m 과 g 는 각각 영구자석과 공극의 높이이다.

2.4 힘 특성식

R. Krishnan은 LSRM (Linear Switched Reluctance Motor)의 설계에 관한 논문에서 해석적인 방법으로 힘을 구하였다.[3] 릴럭턴스 타입 기기의 수직력과 수평력은 각각 식(8)과 (9)로부터 구할 수 있다.

$$F_x = \frac{B_g^2}{2\mu_0} ZY \quad (8)$$

$$F_y = -\frac{B_g^2}{2\mu_0} XZ \quad (9)$$

여기서 B_g 는 공극자속밀도이고, X 는 치 피치이고, Y

는 공극길이, Z 는 기기의 길이이다.

3. 전자기해석과 유한요소해석의 특성 비교

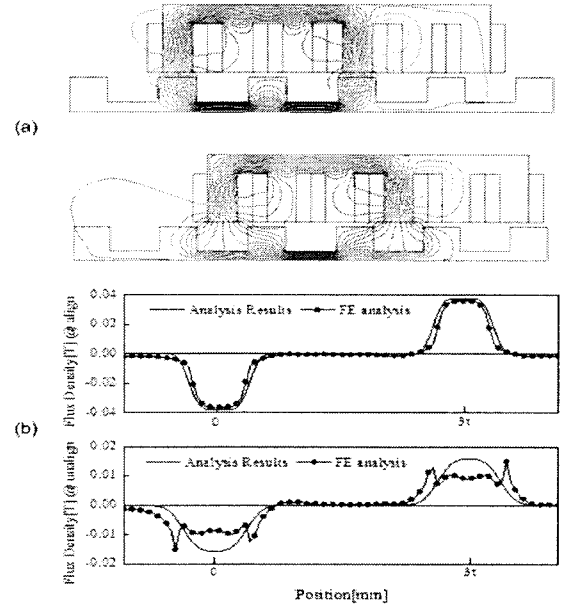


그림 2. (a)위치에 따른 상의 자속경로 (b)위치에 따른 전자기해석과 유한요소해석의 자속밀도 비교

그림 2는 1차축이 전자석인 경우 정렬과 비정렬 위치에 따른 자속밀도를 비교한 것이다. 그림 2(b)에서 정렬 위치에서 전자기해석과 유한요소해석의 자속밀도는 거의 일치하지만, 비정렬 위치에서 전자기해석과 유한요소해석 결과는 일치하지 않는다. 이것은 1차축과 2차축의 공극 길이가 크기 때문에 생긴 누설의 영향으로 볼 수 있다. 하지만 비정렬 위치의 자속밀도에 대한 면적의 크기는 거의 같음을 확인할 수 있다.

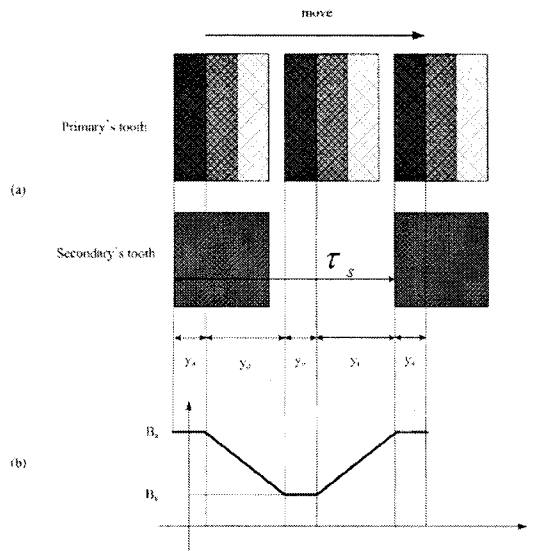


그림 3. 위치에 따른 힘에 대한 예상

수직력과 수평력은 식(8)과 (9)로부터 계산할 수 있으며,

본 논문에서는 수직력과 수평력을 계산하기 위하여 식 (8), (9)에 대하여 위치에 따른 함수를 푸리에 전개하여 대입하였다.

$$Y = \frac{4}{\tau_p} \left[\int_0^{\tau/2} B_a \cos k_a x dx + \int_{\tau/2}^{\tau} (ax + b) \cos k_a x dx \right] + \int_{\tau/2}^{\tau} B_a \cos k_a x dx \quad (10)$$

여기서 Y는 공극 길이에 대한 함수를 의미하며, 나머지는 그림 3에 표시된 것과 같다.

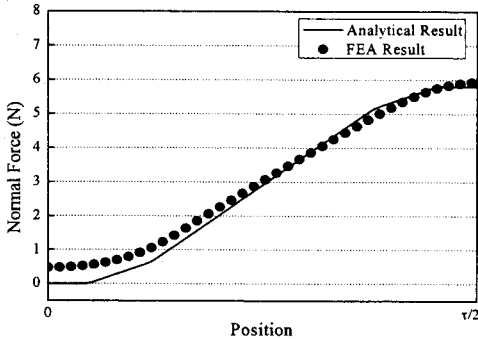


그림 4. 해석 방법에 대한 수직력 비교(전자석)

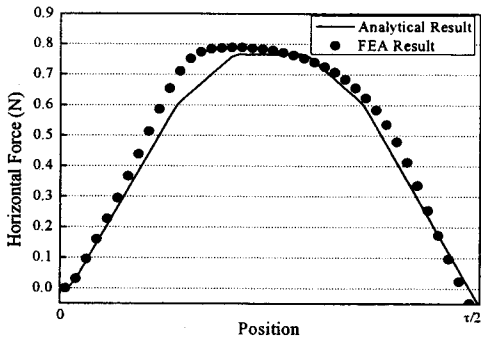


그림 5. 해석 방법에 대한 수평력 비교(전자석)

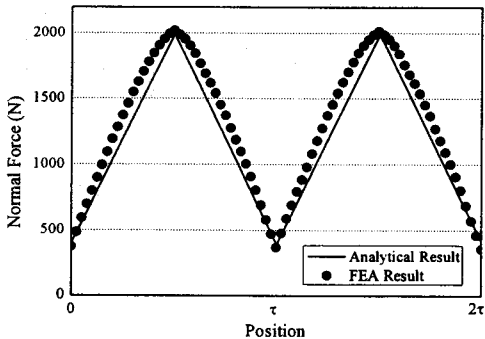


그림 6. 해석 방법에 대한 수직력 비교(영구자석)

그림 4, 5, 6은 수직력과 수평력에 대해 전자기해석과 유한요소해석의 결과를 비교한 것이다. 전자석의 경우인 그림 4와 그림 5는 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 정확히 일치하지는 않는데, 이것은 자속밀도로부터 힘을 계산하기 때문에 그림 2의 자속밀도 결과로부터 정렬과 비정렬 위치에서 전자기해석과 유한요소해석사이에서 차이가 있음을 확인하였고, 이로 인하여 위치에 따른 차이가 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

릴럭턴스 타입 기기는 영구자석과 전자석을 사용하여 구현할 수 있다. 전자석을 사용한 릴럭턴스 기기는 대표적인 것으로 SRM이 있으며, 영구자석을 사용한 릴럭턴스 기기는 주가 아닌 보조적인 의미로 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 기기를 SRM으로 특정짓지 않고 전반적인 릴럭턴스 타입에 대한 특성을 해석하였다. 릴럭턴스 타입 기기의 수직력과 수평력을 해석하기 위하여 전자석을 사용한 경우에 대하여 해석하였고, 부가적으로 영구자석이 사용되었을 경우를 산정해 수직력을 해석하였다.

수직력과 수평력을 해석하기 위하여 전자석과 영구자석에 대한 자속밀도를 계산하였으며, 해석된 자속밀도로부터 수직력과 수평력을 얻을 수 있었다. 해석된 결과는 그림 4, 5, 6과 같으며, 유한요소해석과 비교하여 일치하는 것을 확인할 수 있다.

[참 고 문 헌]

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

표 1 해석 모델 사양

항 목		사 양
1차측	치 폭	25 [mm]
	치 높이	50 [mm]
	슬롯 폭	25 [mm]
	슬롯 높이	50 [mm]
	극 호	0.524
2차측	치 폭	32 [mm]
	치 높이	25 [mm]
	슬롯 폭	43 [mm]
	슬롯 높이	25 [mm]
	극 호	0.670
스택 길이		205 [mm]
공극 길이		5 [mm]