

동기형 릴럭턴스 전동기의 자속장벽 변화에 따른 특성 해석

신정민, 윤준보, 김술, 최재학, 이주
한양대학교 전기공학과

Characteristics Analysis of a Synchronous Reluctance Motor according to the Flux Barrier Variation

Jeong-Min Shin, Jun-Bo Yun, Sol Kim, Jae-Hack Choi, Ju Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanyang University

Abstract - The rib in synchronous reluctance motor(SynRM), which has segment type rotor, is mechanical weak point. To make up for the weak point, a web has inserted in the flux barrier. However, the inductance in the q-axis is increased and then the motor performance has been decreased because of the inserted web. This paper presents a model, which has permanent magnets on the both side of the web, to decrease the inductance in the q-axis. The finite element method is applied to analyze the characteristics.

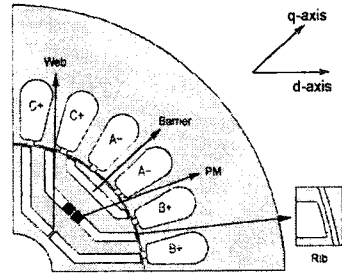


그림 1. 웹을 가지는 단편형 동기 릴럭턴스 전동기의 단면도

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 회전자의 돌극 구조로 인한 릴럭턴스 토오크가 발생하는 전동기로서 고정자는 유도전동기와 동일한 3상의 정현파 구조를 가지며 회전자의 구조가 간단하여 고속 또는 장시간 운전이 가능하다. 동기형 릴럭턴스 전동기는 토오크가 d축과 q축 인덕턴스의 차에 비례하게 되어 전동기의 성능에 중요한 변수가 되므로 회전자의 구조를 최적화 하여 인덕턴스의 차를 극대화 시키는 연구가 진행되고 있다.[1],[2]

동기형 릴럭턴스 전동기의 토오크와 역률에 인덕턴스 차($L_d - L_q$)와 인덕턴스 비(돌극비, L_d/L_q)는 각각에 비례하는 요소이다. 이 것에 영향을 주는 d축과 q축의 인덕턴스에서 큰 d축 인덕턴스를 얻기 위해서는 d축 자속이 전체 극 표면을 따라 흘러야 하고, q축 인덕턴스를 최소화하기 위해 q축 자속은 적게 흘러야 한다. 단편형(segment type) 회전자 구조의 동기형 릴럭턴스 전동기는 단편들을 기계적으로 고정시키는 역할을 하는 림(rib)이 회전자에 있다. 이 림은 q축 자속이 흐를 수 있는 통로를 형성하게 되고 그로 인해 q축의 인덕턴스가 증가하게 되므로 인덕턴스 차와 인덕턴스 비가 감소하여 전동기 성능이 저하된다. 따라서 림의 폭을 최소화하는 것이 설계에 중요한 요소가 된다. 그러나, 림은 제조 가공 공정상 줄일 수 있는 한계가 있고, 고속운전 시 단편에 가해지는 원심력에 의하여 구조적으로 림이 비산될 수 있는 문제점을 가지고 있다. 따라서, 이러한 문제점을 보완하기 위해 자속장벽(flux barrier)에 웹(web)을 삽입한 형태가 연구되었다.[3] 그러나, 웹을 삽입함으로써 기계적 강성을 얻을 수 있는 반면 q축 자속의 통로를 형성하므로 자속의 증가로 인한 q축의 인덕턴스가 증가하는 현상이 발생한다. 따라서, 웹의 폭을 최소화 하는 설계가 요구된다. 그러나, 이 역시 폭을 줄이게 되면 기계적 견고함을 얻을 수 없기 때문에 기계적인 설계의 한계를 가지고 있다.

본 논문에서는 자속장벽에 영구자석을 삽입하여 웹에 흐르는 q축 자속을 감소시킬 수 있는 회전자 설계를 제안한다. 제안된 형태의 전동기는 유한 요소 해석(Finite Element Method)을 이용하여 각각 d축과 q축의 인덕턴

스를 구하여 인덕턴스 차와 비를 계산해서 그 특성을 비교하였다.

2. 본 론

2.1 구조 및 사양

본 논문에서 해석한 모델인 단편형 회전자를 가진 동기형 릴럭턴스 전동기를 그림 1에 나타내었다. 그림에서처럼 기계적으로 취약한 림을 보완하기 위해 회전자의 자속장벽에 웹을 삽입하였고, 웹을 통해 흐르는 q축 자속을 감소시키기 위해 자기적인 포화현상의 발생목적으로 웹의 양측 자속장벽 내에 영구자석을 삽입하였다.

표 1은 본 논문에서 적용된 전동기의 해석모델 사양이다. 극수는 4극, 매극 매상당 슬롯수는 2이며 자속장벽의 개수는 3인 모델이다. 영구자석의 잔류자속밀도는 웹의 폭에 따라 적절한 값을 선택해야 한다. 본 논문에서 페라이트 영구자석의 잔류자속밀도가 각각 0.1[T], 0.3[T]인 경우의 특성을 해석하였다.

2.2 토오크, 역률과 동기 인덕턴스

전동기의 성능 평가시 중요한 요소인 토오크와 역률은 동기형 릴럭턴스 전동기에서 그림 2의 페이지도를 이용하여 다음의 토오크식과 역률식이 유도된다.

표 1. 해석 모델의 기본적인 사양

항목	값	단위
정격 입력	220	W
상수	3	phases
극수	4	poles
적층길이	50	mm
공극 길이	0.32	mm
림의 폭	0.3	mm
웹의 폭	0.6	mm
영구자석	페라이트	T

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$PF = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (2)$$

여기서, i_d, i_q 는 각각 d 축, q 축 전류이고, L_d, L_q 는 각각 d 축과 q 축의 인덕턴스이다. 식 (1)과 (2)에서 토오크는 인덕턴스 차에 역률은 인덕턴스 비의 직접적인 영향을 받는다. 본 논문에서 인덕턴스 차와 인덕턴스 비를 계산하고 비교하였다.

2.3 유한요소해석의 정식화

동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석을 위한 자기 벡터포텐셜을 미지수로 하는 지배방정식을 맥스웰 방정식으로부터 도출하면 다음과 같다 [4].

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] = -J_0 - \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

여기서, A 는 자기벡터포텐셜, J_0 는 전류밀도, M_x, M_y 는 각각 x 및 y 축 방향으로의 자화의 세기이다. 해석대상을 1차 삼각요소로 분할하고, 식 (3)에 요소의 형상함수를 가중함수로 하는 Galerkin 법을 적용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\int_S \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{ie} dx dy = \int_S J_0 N_{je} dx dy + \int_S \frac{1}{\mu} \left(M_y^e \frac{\partial N_{je}}{\partial x} - M_x^e \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) dx dy \quad (4)$$

($j = 1, 2, 3$)

여기서, N_e 은 요소의 형상함수이다. (4) 식으로부터 하나의 요소에 대한 요소 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[S]^e [A]^e = \{J\}^e + \{J_m\}^e \quad (5)$$

여기서, $[S]^e$ 은 요소 e 의 계수 행렬, $\{J\}^e$ 은 입력 전류 밀도의 계수 행렬, $\{J_m\}^e$ 은 등가자화전류분에 해당하는 입력 구동 행렬이다.

유한요소해석에서 교류전동기를 해석할 경우 통상 3상 정현파 전류를 입력으로 하는 전류원 해석을 시행하지

만, 본 논문에서는 좌표변환을 통한 d 축, q 축 전류를 입력으로 전류원 해석을 시행하여 d 축과 q 축의 인덕턴스 계산을 용이하게 하였다.

2.4 유한요소해석을 이용한 인덕턴스 계산

본 논문에서 동기형 릴럭턴스 전동기의 평가 기준인 토오크와 역률을 직접적인 영향을 미치는 인덕턴스 차와 인덕턴스 비를 계산하기 위한 d 축과 q 축의 인덕턴스를 유한요소해석을 이용하여 그 값을 구할 경우 각상의 쇠교자속을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int B dS = N(A_1 - A_2)l \quad (6)$$

여기서, A_1, A_2 는 슬롯의 자기벡터 포텐셜, N 은 턴수, l 은 철심의 적층폭이다. 식(6)를 이용하여 구한 각상의 쇠교자속을 좌표변환을 통해 각각 d 축과 q 축의 쇠교자속을 계산하고 전류원 해석시 입력인 d 축과 q 축의 전류로써 인덕턴스를 다음의 식과 같이 구할 수 있다.

$$L_d = \frac{\lambda_d}{i_d}, \quad L_q = \frac{\lambda_q}{i_q} \quad (7)$$

입력전류의 변화에 따른 인덕턴스 특성곡선은 d 축 전류인가 시 q 축 전류는 영(zero)으로 일정하며, q 축 전류인가 시 d 축 전류 또한 영(zero)으로 하여 도시하였고 다른 축 전류를 영(zero)로 하였기 때문에 교차포화 현상에 의한 영향(Cross magnetization)은 무시한다.

3. 해석결과

웹의 양측에 영구자석을 삽입하여 해석을 시행하였을 때의 자속밀도의 분포를 다음의 그림에 나타내었다.

그림 3에서 많은 점으로 표시된 부분이 자속밀도가 높아 포화현상이 심하게 나타나는 것을 나타낸다. 웹 양측에 영구자석이 있는 경우 자석의 잔류자속밀도에 따라 값의 차이는 있지만 회전자의 다른 부분에 비해 자속밀도가 현저히 높은 것을 알 수 있다. 그림 3에서 웹의 자속밀도가 2.04[T]로 포화되었음을 나타낸다. 따라서 웹의 양측에 영구자석을 삽입할 경우 q 축 자로를 포화시킬 수 있음을 확인할 수 있었다. 웹의 폭이 커질 경우 영구자석의 잔류자속밀도 값을 높여줌으로써 같은 효과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

그림 4는 영구자석이 없는 경우와 잔류자속이 0.1[T], 0.3[T]인 경우의 전류변화에 대한 d 축과 q 축의 인덕턴스 특성곡선, 그림 5는 인덕턴스 차, 그림 6은 인덕턴스의 비를 각각 나타내었다.

그림 4에서 볼 수 있듯이 d 축의 인덕턴스는 거의 변화가 없으나, q 축의 인덕턴스는 영구자석의 잔류자속이 증가함에 따라 그 크기가 감소한다. 이로써 영구자석이

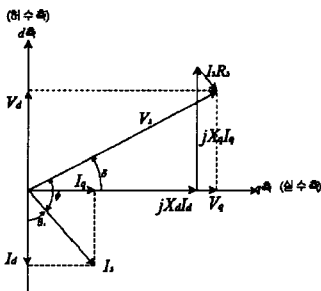


그림 2. 동기형 릴럭턴스 전동기의 정상 상태 페이저도

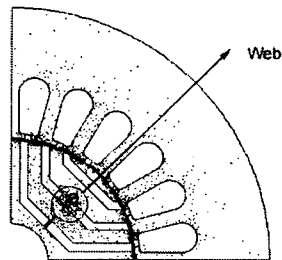


그림 3. 자속밀도 분포

q축 자속의 자료인 웹을 자기적으로 포화시켜 자속이 감소함을 확인할 수 있다.

그림 5에서는 전류가 1 [A]인 경우 최대 인덕턴스 차를 가지는데, 영구 자석이 없는 경우보다 최대 6.5 [mH] 정도 증가 하였고, 입력 전류가 2 [A]를 초과할 경우 값의 변화가 미미하다.

그림 6에서 전류 1.5 [A]인 경우 최대 인덕턴스 비는 0.45 증가된 것을 확인할 수 있고, 정도의 차는 있지만 입력전류가 큰 경우에도 인덕턴스 비가 증가되었음을 알 수 있다.

대상 모델의 해석결과에 대한 구체적인 수치를 입력전류가 각각 1 [A], 1.5 [A], 2 [A]인 경우에 대해 표 2에 나타내었다.

표 2. 해석 결과 데이터

	형태	1 [A]	1.5 [A]	2 [A]
L_d [mH]	PMless	252.87	236.31	209.67
	0.1[T]	252.87	236.35	209.7
	0.3[T]	252.49	236.09	209.6
L_q [mH]	PMless	60.97	50.76	45.39
	0.1[T]	58.81	49.31	44.28
	0.3[T]	54.08	46.14	41.88
$L_d - L_q$ [mH]	PMless	191.90	185.55	164.28
	0.1[T]	194.05	187.04	165.42
	0.3[T]	198.41	189.95	167.73
$\frac{L_d}{L_q}$	PMless	4.14	4.66	4.62
	0.1[T]	4.29	4.79	4.74
	0.3[T]	4.66	5.11	5.01

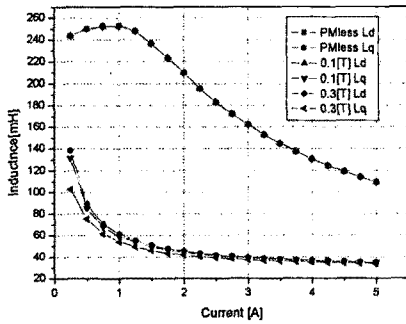


그림 4. 전류 변화에 대한 d축과 q축의 인덕턴스

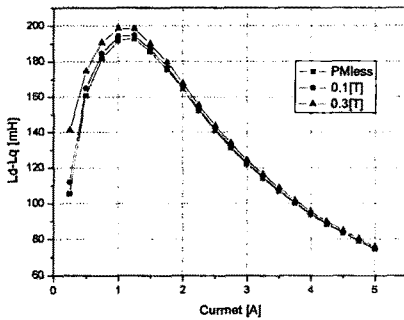


그림 5. 전류 변화에 대한 $L_d - L_q$

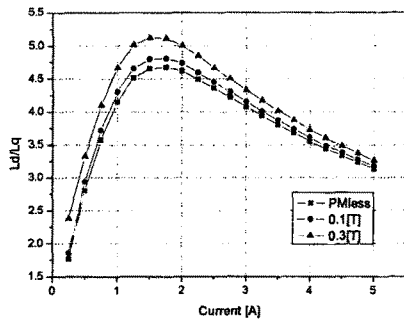


그림 6. 전류 변화에 대한 L_d/L_q

4. 결 · 론

본 논문에서 제안된 모델에서 웹의 양측 자속장벽 영구자석의 삽입으로 인해 q축 자속이 감소하여 인덕턴스 차와 인덕턴스 비를 개선할 수 있음을 알 수 있었다. 향후 영구자석을 고정하기 위해 자속장벽에 다른 변화를 가질 때에 대한 특성해석과 더 나은 기계적, 전기적 특성을 가진 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국학술진흥재단의 협동연구지원사업에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이중호, "가전용 340W급 동기형 릴럭턴스 전동기 설계 및 효율특성 실험", 대한 전기학회 논문지, 제52B권, pp. 39-52, 2003, 2
- [2] D.A.Staton, T.J.E.Miller, S.E.Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor.", IEE Proceedings-B, Vol. 140, No.4, pp 249-259 July 1993
- [3] M.J. Kamper, A.F. Volschenk, "Effect of rotor dimensions and cross magnetisation on L_d and L_q inductances of reluctance synchronous machine with cageless flux barrier rotor", IEE Proc.-Electr, Power Appl., Vol. 141, No.4, pp 213-220, July 1994
- [4] Ju Lee, Hyung-Woo Lee, Yon-Do Chun, MyoungHo Sun woo, and Jung-Pyo Hong, "The Performance Prediction of Controlled-PMLSM in Various Design Schemes by FEM", IEEE Transaction on Magnetics, Vol.36, No.4, pp. 1902-1905 July 2000