고속 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계

장석명[1], 박지훈[1], 최장영[1], 유대준[1], 성호경[2]
충남대학교 전기공학과[1], 한국기계연구원[2]

Design of high speed linear switched reluctance motor

Seok Myeong Jang[1], Ji Hoon Park[1], Jang Young Choi[1], Dae Joon You[1], Ho Kyung Sung[2]
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National Univeristy[1], KIMM[2]

Abstract - This paper deals with design of high speed linear switched reluctance motor(LSRM). First, we derived design factor from pole arc ratio of stator and mover, and calculated time constant using inductance and resistance. Second, we decided design parameter from design factor using time constant. Finally, analyze characteristics for LSRM using finite element analysis

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 영구 자석이 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 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.[1] LSRM은 SRM을 축 방향으로 잘라 펼쳐놓은 형태의 기기로 회전기가 직선 추력을 얻기 위하여 기어, 벨트 등을 연결하는 반면에 직접 추력을 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 고속으로 운전되는 직선형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계를 다루고자 한다. LSRM의 설계는 SRM의 설계를 이용하여 진행한다. SRM의 평균 토크는 고정자의 극호(β_s)와 회전자의 극호(β_r)에 따라 값이 달라진다.[3] 본 논문에서는 요구 속도를 만족시키기 위한 극수를 선정하고 고정자의 극호의 크기에 대한 회전자 극호의 크기로부터 설계 사양을 도출한 후 속도를 만족하는지를 반복적으로 해석하여 요구사양을 만족하는 설계 사양을 도출하였으며, 유한요소해석을 통하여 세부적인 설계 특성을 확인하였다.

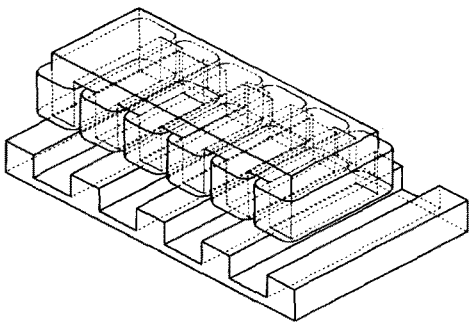

그림 1. LSRM 모델

표 1. 설계 요구 사양

항목	사양
속도	150[m/s]
입력전압	1000[V]
입력전류	200[A]

2. 고속 LSRM의 설계

2.1 설계 과정과 가정

LSRM은 6/4극의 구조로 고정자인 6극에 권선이 시행되고, 가동자(회전자)는 4극이다. 극호 비에 따른 평균 토크 특성은 $\beta_r > \beta_s$일 때 가장 크게 해석된다.[3] 따라서 본 논문에서는 고정자 극호의 크기 값에 대한 가동자 극호를 변화시켜 고정자 슬롯 면적에서 시행가능한 권선과 고정자와 가동자의 구조로부터 정렬과 비정렬일 때의 인덕턴스를 해석하였다. 이때 고정자 슬롯에 시행되는 권선은 입력전류를 만족시키는 면적을 가지고 있으며 슬롯에 대하여 0.5의 점적율을 가지고 있다고 가정한다.

2.2 설계 특성식

LSRM의 설계는 고정자와 가동자의 극호를 이용하여 고정자와 가동자의 치 너비, 치 높이, 요크 길이 등의 설계 변수에 대한 결과를 얻을 수 있으며, 식(1)~(10)은 설계 특성식이다.

$$bsy = (r+g)\times\beta_s \tag{1}$$

$$hs = 1.85\times bsy \tag{2}$$

$$wsp = bsy \tag{3}$$

$$wss = (\pi\times(D+g) - spn\times wsp)/spn \tag{4}$$

$$bo = wss \tag{5}$$

$$bry = r \times \beta_r \tag{6}$$

$$hr = 0.625 \times bry \tag{7}$$

$$wrp = bry \tag{8}$$

$$wrs = (\pi \times D - rpn \times wrp)/rpn \tag{9}$$

$$bo1 = wrs \tag{10}$$

여기서 bsy는 고정자 요크길이, r은 회전자 반경, g는 공극 길이, hs는 고정자 치 높이, wsp는 고정자 치 너비, wss는 고정자 슬롯 너비, bo는 슬롯 개구 너비이며, 가동자도 같은 형식이다. R. Krishnan은 저서[4]에서 SRM의 설계와 관련하여 요크 길이와 슬롯 길이 그리고 치 너비와의 관계를 설명하였으며, 식(2), (3), (5), (7), (8), (10)로 정리할 수 있다.

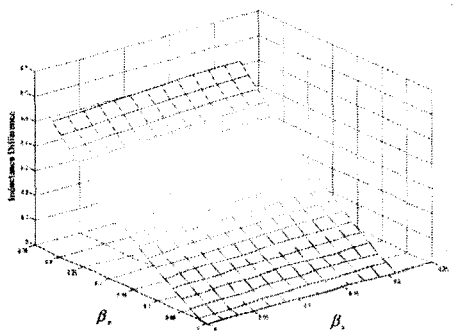

그림 2. 극호에 의한 인덕턴스 차

LSRM의 토크 수식은 식(11)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} \tag{11}$$

식(11)에서 토크는 인덕턴스의 값의 영향을 받으며, 이것은 스위칭에 따라 전류의 인가를 결정하는 요소가 인덕턴스임을 설명한다. 그림 2은 설계 과정에 의하여 고정자 극호에 대하여 가동자 극호를 변화시켜서 식(1)~(10)으로 얻어지는 설계 변수로부터 인덕턴스를 계산[5]하여 정렬일 때와 비정렬일 때의 차를 보여주고 있다.

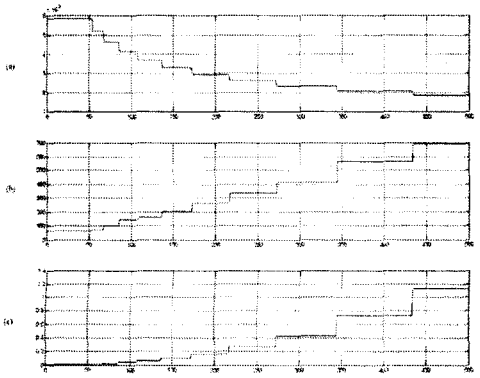

그림 3. (a)도선 반지름, (b)도선 길이, (c)저항

2.3 시정수를 이용한 설계 변수 결정

설계 특성식으로부터 얻어진 설계 변수들로부터 요구 사양을 만족하는 고정자와 가동자의 극호를 결정해야 한다. 인덕턴스를 계산하기 위해서는 고정자와 가동자의 설계 변수와 고정자에 시행되는 권선의 턴 수가 필요하며, 고정자의 턴 수와 입력전류의 크기를 만족하는 한 턴당 면적으로부터 상당 저항을 계산할 수 있으며, 그림 3은 설계 사양으로부터 계산된 턴 수에 대한 도선반지름과 길이 그리고 저항을 보여주고 있다. 그림 3의 계산된 상당 저항과 상 인덕턴스 값으로부터 시정수를 계산할 수 있으며, 설계 변수에 의하여 요구 속도를 만족하기 위해서 입력전류가 인가될 수 있는 시간이 결정된다. 따라서 저항과 인덕턴스에 의한 시정수인 τ의 5배인 5τ가 안정 시간임 이용하여 요구 사양에 적합한 설계 변수를 결정할 수 있다.

3. 유한요소해석을 이용한 특성 해석

표 2는 설계 특성식과 상당 저항과 인덕턴스에 의한 시정수에 의해 결정된 설계 사양이며, 결정된 설계 변수로부터 특성 해석을 수행하였다. LSRM의 특성 해석을 위해서 상용 유한요소해석프로그램인 MAXWELL을 사용하였으며, 또한 LSRM의 고정자가 길기 때문에 해석에서 발생하는 시간을 단축하기 위하여 설계 변수를 회전기의 형태로 변환하여 해석하였다.

표 2. 설계 사양

항 목		사 양
가동자	치 너비	150 [mm]
	치 높이	93 [mm]
	슬롯 너비	147 [mm]
	요크 길이	107 [mm]
고정자	치 너비	99 [mm]
	치 높이	120 [mm]
	슬롯 너비	99 [mm]
	요크 길이	80 [mm]
스택 길이		200 [mm]
공극 길이		10 [mm]

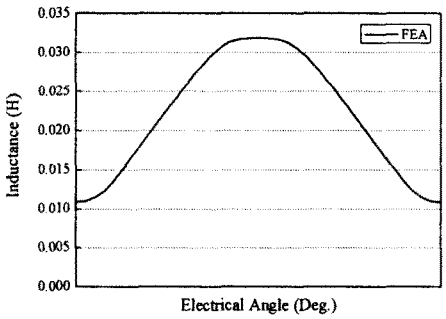

그림 4. 인덕턴스 프로파일 해석

그림 4는 설계 변수를 이용하여 유한요소해석을 통하여 해석된 인덕턴스 프로파일 결과를 보여주고 있다. 비정렬일 때의 인덕턴스 값은 0.0108(H)이고, 정렬일 때의 인덕턴스 값은 0.0318(H)이다. 그림 5는 정렬과 비정렬 위치일 때의 전류에 대한 쇄교자속의 해석 결과를 보여주고 있다. 해석된 결과로부터 에너지 이용을 확인할 수 있다. 그림 6은 LSRM이 요구 속도로 동작하기 위

한 입력전류에 대하여 회전기 형태로 변환하였을 때의 토크 해석 결과이며, 300(N.m)를 만족해야 한다. 이때 입력전류는 50(A)이다. 그림 7은 전류에 대한 토크 해석 결과를 보여주고 있다. 설계 요구 사양에 의하여 입력전류의 최대값은 200(A)이다. 따라서 200(A)까지에 대한 한 상의 토크 해석 결과를 보여주고 있으며, 이것은 LSRM을 구동하기 위해서는 입력전류가 모두 필요하지 않으므로 전류제어가 중요함을 의미한다. 그림 8은 평균 토크를 해석한 결과이다. LSRM은 스위칭에 의하여 동작하는 기기이다. 따라서 한 상에 의하여 발생한 힘의 크기가 동작시키기 위한 최소를 만족하여도 3상에 의하여 합쳐진 힘이 동작시키기 위한 힘에 미치지 못하면 동작이 힘들게 된다. 따라서 3상에 대한 평균토크가 300(N.m)이 되는 상당 전류의 크기를 해석해야 하며, 해석된 결과로부터 상당 70(A)의 전류가 필요함을 알 수 있다. 표 3은 설계 사양에 따라 수직력과 수평력을 해석한 결과이다.

3. 결 론

LSRM은 SRM을 축방향으로 잘라 펼쳐 놓은 형태의 기기로 동일 체적의 다른 기기에 비해 토크가 크고, 제작단가와 유지보수 면에서 우수한 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 고속으로 동작하는 LSRM의 설계를 다루고 있으며, 설계 요구 사양을 만족하기 위하여 고정자와 가동자의 극호를 이용하여 설계 변수를 도출하였으며, 고정자 권선과 고정자와 가동자간의 구조 등으로부터 인덕턴스와 저항을 계산하여 요구 속도에 적합한 시정수를 이용하여 설계 사양을 결정하였다. 또한 설계 사양으로부터 유한요소해석을 이용하여 LSRM의 특성 해석을 수행하였으며, 해석된 결과는 요구 사양과 만족함을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] 김윤현, 토크 리플 저감을 위한 SRM 최적 설계 및 직접 토크 제어, 박사학위논문, 한양대학교, 2001.

[2] 정연호, VVVF 인버터로 구동되는 LIM의 동특성, 석사학위논문, 충남대학교, 1996.

[3] K.N.Srinivas, R.Arumugam, "Analysis and characterization of switched reluctance motors," IECON '03, The 29th Annual Conference of the IEEE, vol.3, 2-6 Nov. 2003, pp.2690-2698.

[4] R.Krishnan, Switched reluctance motor drives, CRC Press, 2001.

[5] Seok Myeong Jang, Ji Hoon Park, Jang Young Choi, Han Wook Cho, "Analytical prediction and measurements for inductance profile of linear switched reluctance motor," IEEE Trans. Magnet., vol.42, Oct. 2006, pp.3428-3430.

표 3. 입력전류에 대한 힘 특성

입력전류 (A)	Normal Force (N)	Tangential Force (N)
50(A)	846.3(N)	231.7(N)
70(A)	1663.1(N)	471.6(N)
90(A)	2753.3(N)	779.9(N)
110(A)	4115.1(N)	1149.9(N)
130(A)	5731.6(N)	1514.9(N)
150(A)	7511.9(N)	1514.9(N)
200(A)	11985.7(N)	2943.9(N)

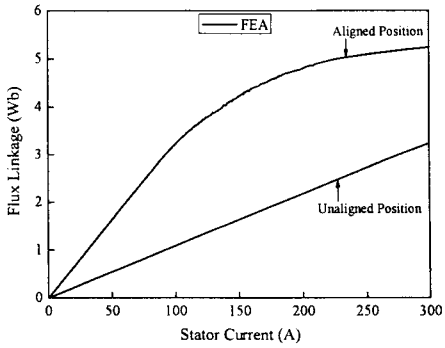

그림 5. 전류 대 쇄교자속 해석 결과

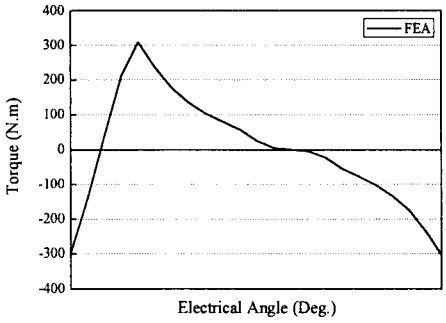

그림 6. 토크 해석 결과

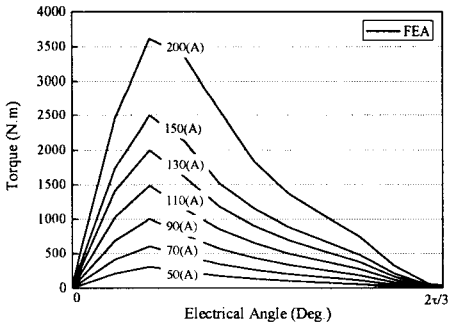

그림 7. 토크 특성 해석

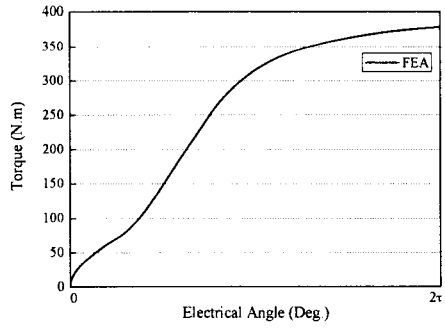

그림 8. 평균 토크