

자기부상/추진 일체형 차량용 LHSM의 자기형상계수를 고려한 설계와 특성해석

장석명, 정상섭, 이성호, 서진호
충남대학교 전기공학과

Design and Analysis with the magnetic shape coefficients of Linear Homopolar Synchronous Motor for vehicles

S.M. Jang, S.S. Jeong, S.H. Lee, J.H. Seo
Chungnam Nat'l Univ.

Abstract

The 4-pole LHSM was composed of the figure-of-eight shaped 3-phase armature windings, DC field windings, and the segmented secondary with the transverse bar track. The motor was designed on the base of the performance characteristic equations and the equivalent circuit model, with the coefficients of the magnetic shape. These coefficients were computed from the analytical expressions and examined from FEM analysis. The magnetic equivalent circuit of 3-D model of LHSM was obtained, and this concept provided the equivalent models for 2-D FEM analysis. Therefore, the airgap field, the lift and thrust force were calculated and compared with the results of magnetic equivalent circuit method.

1. 서론

LHSM(Linear Homopolar Synchronous Motor)은 자기부상시스템에 있어서 전자기적 부상과 추진, 그리고 제동과 안내가 일체형인 것이 특징이다. 따라서 자기부상시스템에 LHSM을 이용하는 것은 추진용 LIM과 부상용 전자석이 이용된 시스템에 비해 중량당 출력이 크다. 그리고 동일 조건에서 LIM에 비해 역률이 크므로 전력공급장치의 정격과 무게가 작아진다.

본 논문에서는 8자형 3상 아마추어 권선을 갖는 1차측과 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는 2차측으로 구성되는 4극 LHSM의 설계 및 특성 해석이 이루어졌다. 모터는 LHSM의 특성 방정식과 등가회로 및 벡터도에 기초하여 설계되었으며[2], 자기형상계수인 Green 계수와 Carter계수, 그리고 공극자속밀도의 최소치와 최대치의 비를 고려하였다. Carter 계수와 Green 계수는 1차측 슬롯구조와 돌극구조에 의해, 그리고 공극자속밀도의 최소치와 최대치의 비는 2차측 세그먼트의 길이와 형상에 의해 결정된다. 이 계수들은 공극자속밀도와 그 기본파를 계산하는데 있어서 중요한 파라미터가 된다.

또한 특성해석에 있어서 LHSM의 3차원 모델은 2차원 FEM 해석을 어렵게 만드므로 등가 2차원 모델을 선정하고, 이는 3차원 자기동가회로의 구성 개념을 통해 이루어졌다[1]. 그러나, LHSM의 길이방향 FEM 해석시에는 DC 여자 와 스택사이의 누설자속을 고려할 수 없으므로 등가 영구자석 모델을 고안했다. 이 등가 영구자석 FEM 모델을 통해 DC 여자와 3상 AC 여자가 동시에 이루어질때의 추력과 수직력을 계산하여 자기동가회로법에 의한 해석치와 비교검토했었다.

2. LHSM의 설계

2.1. 모델 선정과 요구 사양

그림. 1은 선정된 LHSM의 모델로서 횡방향 성층된 1차측에 3상 아마추어 권선과 DC 계자권선이 감기고, 2차측은 solid형 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는다. 따라서 8자형 아마추어 권선이 필요하며, 2차측의 단순한 형태는 경제성과 가공성이 좋고 권선의 냉각에 효과적이다. 표. 1은 설계 요구사항으로 편축식 LIM의 설계와 운전의 경험자료를 통해 이루어졌다.

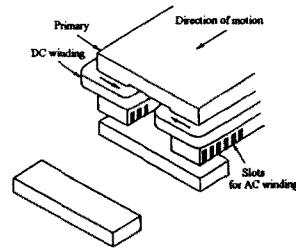


그림. 1 Linear homopolar synchronous motor (횡방향 자속형 LHSM)

표. 1 LHSM의 설계 사양

파라미터	값	단위
추력	250	N
수직력	2500	N
속도	14.4	m/s
선간전압	220	V
주파수	60	Hz
공극	8	mm
총 유효 스택폭	80	mm
치에서의 설계 자속밀도	1.4	T
허용 전류밀도		
DC 계자 권선에서	4	A/mm ²
아마추어 권선에서	5	A/mm ²

2.2. 설계 파라미터의 계산

LHSM의 설계에서 유효공극은 자기형상계수인 Green계수와 Carter계수에 의해 고려되고, 공극자속밀도의 최소치와 최대치의 비(B_{min}/B_{max})도 2차측 형상계수로 자속의 기본파의 크기에 영향을 미친다. 이 계수들을 고려한 설계 순서도는 그림. 2와 같다.

D, Q축 리액턴스는 극당 아마추어 쇠교자속의 기본파성분으로부터 계산할 수 있다.

$$X_{ad, aq} = \frac{16\pi^2 k_m W_1 a r B_{d,q}}{\pi I_{ph}} \quad (3)$$

여기서 $B_{d,q}$ 는 그림. 7에서 보여준 기본파 성분의 크기이고 I_{ph} 는 상당 아마추어 전류의 피크치이다. 실제 이와 같이 FEM에 의해 계산된 X_{ad} 과 X_{aq} 는 이론적 방법에 의해 구해진 값보다 크게 나타났다.

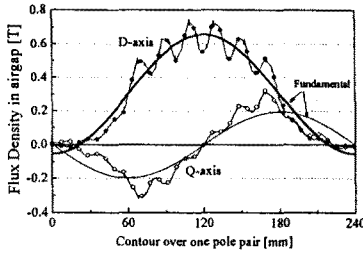


그림. 7 아마추어 여자시 공극자속밀도 파형과 그 기본파

3.3. 수직력과 추력 특성

수직력과 추력은 FEM의 Maxwell stress법과 자기등가회로법의 시뮬레이션값에 의해 구해졌다. 그림. 8은 DC 기자력에 따른 수직력 특성으로 자기등가회로법과 FEM 해석에 의해 구해졌다.

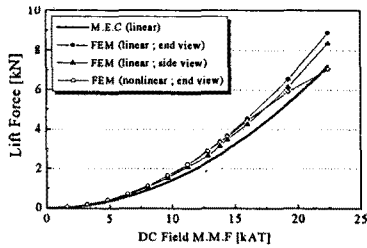


그림. 8 DC 계자 기자력에 따른 수직력 특성

그림. 9는 아마추어 전류만 입력시켰을 때의 리액턴스 토크에 해당하는 추력을 나타낸다. 추력은 2차속 돌극이 1차속 자극 사이의 중간에 있을 때(Q축)와 1차속 자극과 정렬이 되었을 때(D축)에 영(zero)가 된다. 양(+) 전류 부하각에서의 추력과 수직력은 각자 영점과 y축에 대칭된다.

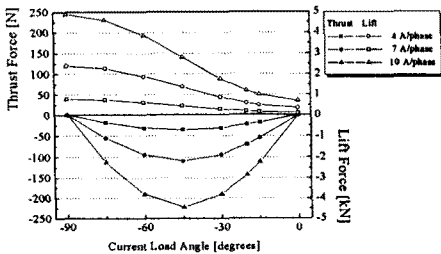


그림. 9 전류부하각에 따른 추력과 수직력 특성

아마추어 전류에 의한 이동자계는 DC 자계와 상호작용을 일으켜 전류부하각에 따라 2차속 세그먼트의 돌극에 공극자속밀도를 부분적으로 증가시키거나 감소시킨다. 이는 추력의 원인이 되므로, 결국 수직력과 추력은 그림. 10에서 보듯이 전류부하각의 함수가 된다.

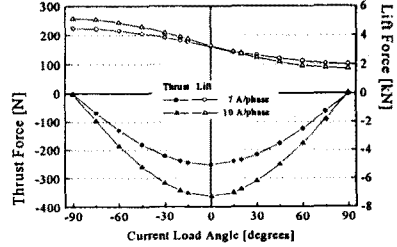


그림. 10 DC 계자와 아마추어 코일의 동시 여자시 추력과 수직력 특성

수직력과 추력을 계산함으로써 LHSM의 정특성 시험 결과와 아마추어 전류에 따른 LHSM의 운전특성을 예측할 수 있다. 그림. 11에서의 추력과 수직력은 Q축일 때 특성곡선이다. 그림에서 "[kAT]"는 DC 기자력, "[A]"는 상당 아마추어 전류를 나타내고, 점선은 자기등가회로에 의한 해석치이며 실선은 FEM 해석치이다. FEM 해석치는 시뮬레이션 결과와 약 90%의 일치율을 보이나 수직력은 잘 맞지 않았다. 이러한 결과는 고려되지 않은 아마추어 누설자속과 돌극에서의 길이방향 fringing 자속에 의한 것으로 생각된다.

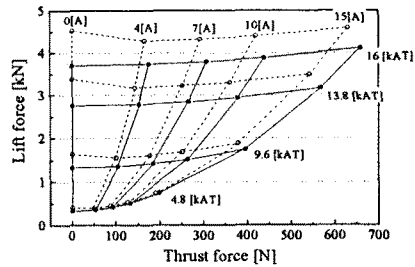


그림. 11 Q-축에서의 수직력 및 추력 특성

4. 결론

횡방향 세그먼트 트랙을 갖는 4극 LHSM은 특성방정식과 등가회로모델에 기초하여 설계되었고, 공극 자계와 추력 및 수직력 특성은 자기등가회로법과 2-D FEM에 의해 해석되었다. 그러나 Green계수와 Carter 계수, B_{min}/B_{max} 와 누설계수들은 설계와 해석에 있어서 중요하기 때문에 이들 계수들은 해석적 방법과 FEM 해석에 의해 면밀히 검토되었다. 또한 특성해석에 있어서 2-D FEM 해석을 위한 등가영구자석모델은 LHSM의 3차원 형상을 고려하기 위해 설정되었고, 이 모델을 통해 횡방향 FEM 해석시에 DC 계자코일의 기자력과 누설자속을 고려할 수 있었다. 또한 이 등가 영구자석모델을 통해 DC 계자와 아마추어 코일에 동시에 여자되었을 때의 수직력과 추력이 계산하였다. 추력은 자기등가회로법에 의한 시뮬레이션치와 약 90% 정도 일치율을 보였으나 수직력에서 많은 차이가 있었다.

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910-060-2로 수행된 연구결과입니다.

참고 문헌

- [1] R. G. Gilliland and G.W. Pearson, "A linear synchronous unipolar motor for integrated magnetic propulsion and suspension", *Maglev Transport*, Maglv-84
- [2] I. Boldea and S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", pp268, chapter 7, John Wiley & sons, Inc., 1985

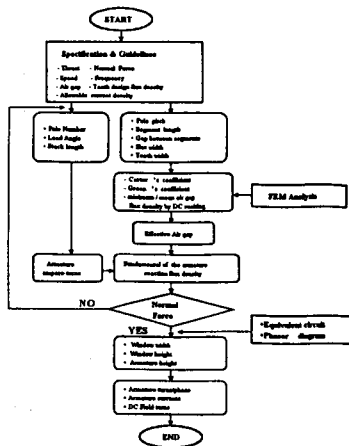


그림. 2 자기형상 계수를 고려한 LHSM 설계 순서도

LHSM의 1차축 슬롯구조와 2차축의 돌극구조는 공극 자속밀도를 감소시키므로, 이는 공극의 증가, 즉 유효공극으로 가상할 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$g_e = k_C * k_G * g \quad (1)$$

여기서 g 는 실제 공극, k_C 는 Carter계수, k_G 는 Green계수이다.

3상 아마추어 권선은 5/6의 코일간격을 갖고 8자형 코일이다. 1차축은 극당 6개의 슬롯을 가지며 양쪽의 5개 슬롯은 반슬롯이다. 운전중에 1차축과 2차축의 흡인력에 의한 수직력 맥동을 줄이기 위해 극수는 짝수로 결정했다[2]. 1차축 양 스택사이의 창폭 l_w 은 횡방향 누설자속에 영향을 주며 8자형 코일을 구부리기 위한 공간을 결정하는 파라미터이다. 따라서 창폭은 다음 수식에 의해 계산된다.

$$l_w = r_c \tan \left(\sin^{-1} \frac{CC + CW}{r_s} \right) + 2 \times 20$$

$$\approx r_c \tan \left(\sin^{-1} \frac{w_s}{r_s} \right) + 2 \times 20 \quad (2)$$

여기서 r_c = 코일간격, CC = 코일사이 간격, CW = 코일 폭, r_s = 슬롯간격, w_s = 슬롯폭이다.

2차축의 구조, 즉 길이, 두께, 세그먼트 사이의 길이, 형상 등은 모터의 힘특성에 크게 영향을 미친다. 다시말해, LHSM을 자기부상 및 추진 일체형 시스템에 응용할 경우에는 단지 추진력만 얻기 위한 시스템에서보다 좀 더 긴 세그먼트가 필요하다. 결과적으로 공극자속의 기본과 성분의 감소에 따른 추력의 현저한 감소를 고려하기 위해 세그먼트 길이는 극간격과 같게 했다. 또한 누설자속을 줄이기 위해 세그먼트의 두께와 공극의 비는 0.25 보다 작아야 한다[2].

3. LHSM의 특성해석

3.1 해석 모델

그림. 3은 LHSM의 3차원 모델로부터 얻어진 자기등가회로 모델이며, 이러한 개념은 2-D FEM 해석을 위한 자기등가 모델을 가져다준다[1]. 또한 DC 계자코일의 기자력과 스택사이에서의 누설자속은 길이방향(side view) 해석시 고려할 수 없으므로 그림. 4와 같은 등가 영구자석모델을 설정하였다. 횡방향(end view) FEM 해석시의 공극은 식(1)로부터 구해진 유효공극으로 정격공극보다 크다. 그림. 5는 LHSM 특성해석을 위한 FEM 해석 순서도이다.

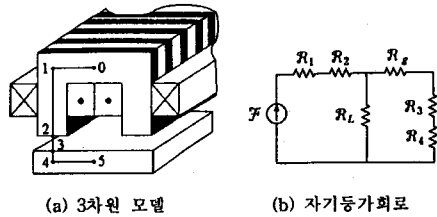


그림. 3 자기등가회로 모델

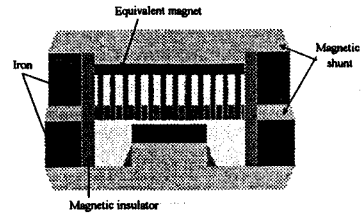


그림. 4 2-D FEM 해석을 위한 등가 영구자석 모델

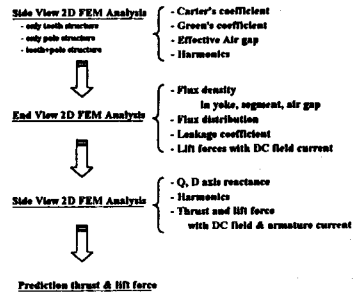


그림. 5 LHSM의 특성해석을 위한 FEM 해석 순서도

3.2. 공극에서의 자계 특성

FEM 해석과 이론식에 의해 계산된 Green계수와 Carter계수, 그리고 B_{min}/B_{max} 과 누설계수는 표 2에서 보여진다.

표 2 자기형상 계수

Coefficient	theoretical value	FEM Analysis
Carter's	1.135	1.127
Green's	1.6	1.6
B_{min}/B_{max}	$\leq 0.15 \sim 0.24$ [2]	0.13
leakage	1.18	1.2

그림. 6은 DC 계자 코일 여자시 공극자속밀도 파형과 기본파를 보여준다. 기본파의 크기는 B_{min}/B_{max} 로부터 이론적으로 계산된 값과 일치하였다.

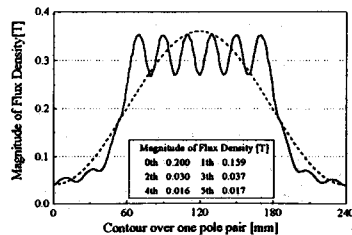


그림. 6 DC 코일 여자시 공극자속밀도 파형과 그 기본파