

자기부상 및 추진 일체형 LHSM의 등가회로 모델 구성

장석명, 정상섭, 양현섭
충남대학교 전기공학과

Composition the Equivalent Circuit of Linear Homopolar Synchronous Motor for Integrated Suspension/Propulsion System

S.M. Jang, S.S. Jeong, H.S. Yang
Chungnam National 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. These parameters were computed from the analytical expressions and examined from FEM analysis.

1. 서 론

현재까지의 부상 및 추진 시스템의 세계적인 개발현황과 응용추이는 영국, 미국, 캐나다, 독일, 일본 등에서 편축식 유도형 리니어모터(SLIM)가 매우 적합한 추진 시스템으로 평가되어 널리 이용되고 있지만, 근년에는 동기형 리니어모터(LSM)의 채용을 검토하는 예가 많다. 더구나 최근에는 동극형 동기 리니어모터(Linear Homopolar Synchronous Motor : 이하 LHSM이라 말한다)와 같이 추진력과 부상력을 單一 시스템에서 동시에 발생시키는 모델도 개발하여 응용하는 추세이다.

이러한 모델들은 대부분 신호통신시스템에의 응용에이지만 최근에는 미국, 독일, 일본 등에서 먼지가 없는 청정 상태가 절대적으로 필요한 반도체 웨이퍼 반송 시스템, 클린 룸이나 병원, 사무실에서의 자기부상식 반송 시스템이 일본의 도시바(주), 마쓰시다 등에서 이미 개발된 바가 있으며 그 응용개발도 점차 확산되고 있다.

추진력과 부상력을 단일시스템에서 一體적으로 발생하는 모델인 LHSM은 전자석 등의 부상시스템과 리니어모터에 의한 추진시스템을 각각 별도의 개별시스템으로 하여 자기부상방식 추진을 구성하는 종래의 방식에서 발전된 방식이다. 따라서 LHSM 자체로는 구조가 복잡하여 설계, 해석 및 제작은 물론 운전제어의 어려움 등의 문제가 수반되지만, 추진시스템과 부상시스템이 별도로 구성되는 기존 시스템에 비하여 시스템 전체의 관점에서 보면 부피, 중량 등에서 매우 컴팩트해지고, 에너지 효

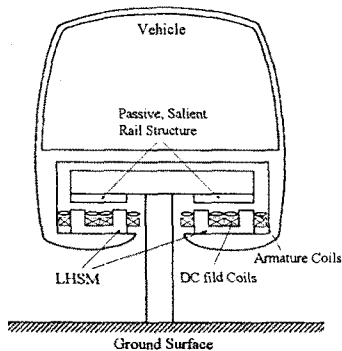


그림 1. 자기부상 및 추진 일체형 LHSM을 이용한 자기부상차량의 개념도

율이 높고 유지보수, 운전제어 등의 종합 시스템의 관점에서 단연 유리한 시스템이 된다. 그림 1은 자기부상 및 추진 일체형 LHSM을 이용한 자기부상 차량의 개념도이다.

본 논문에서의 4극 LHSM 모델은 8자형 3상 전기자 권선과 DC 계자권선을 갖는 1차측과 횡방향으로 세그먼트형 자성체를 갖는 트랙의 2차측으로 구성된다. 그런데 이러한 LHSM의 운전특성은 일반적인 2-리액턴스 등가회로 모델을 통해 얻어질 수 있다. 본 논문에서는 설계된 LHSM의 특성해석을 위해 등가회로 정수를 이론적 수식과 FEM 해석을 통해 산정하였다.

2. 본 론

2.1 Linear Homopolar Synchronous Motor 2.1.1 LHSM 모델

LHSM은 이동자계와 추진력을 발생시키는 3상 교류 권선과, 횡방향으로의 자속을 발생시키는 별도의 직류 권선을 설치하는 인덕터와 같은 특수구조로, 추진력과 흡인 부상력이 단일체에서 동시에 발생하는 전자기시스템이다.

그림 2(a)는 본 논문에서 다루고자 하는 LHSM의 모델로써 "U"자형 철심이 길이방향으로 성층된 1차측에 3상 아마추어 권선과 직류 계자권선이 감긴다. 2차측은 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는데, 이러한 2차측의 단순한 형태는 경제성과 가공성이 좋으며, 그림 1(b)와 같은 8자형 아마추어 권선이 필요하다. 표.1은 설계 파라미터를 보여준다.

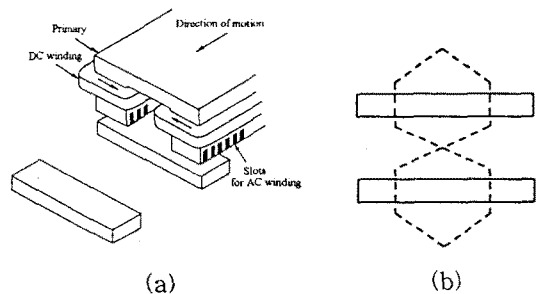


그림 2. 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는 LHSM과 그 전기자 코일 (a) 전체 모양 (b) 양 스탭에 감겨진 8자형 전기자 코일

2.1.2 구동원리

LHSM의 직류 계자권선은 1차측 양쪽에 서로 다른 극성의 극을 만들며, 그림 3에서 보듯이 트랙의 길이방향에 따라 맥동하는 자계를 만든다. 그리고 3상 전기자 권선은 트랙의 길이방향에 따라 이동자계를 만들고, 부하각에 따라 맥동하는 DC 자계를 2차측 물극 아래에서의 부분적으로 증가시키거나 감소시킨다. 따라서 증가

표. 1 LHSM의 설계 파라미터

파라미터	값	파라미터	값
스택폭	40 [mm]	트랙 폭	189 [mm]
창폭	109 [mm]	트랙 두께	33 [mm]
창높이	53 [mm]	트랙 길이	120 [mm]
공극	8 [mm]	트랙 간격	120 [mm]
극수	4	코일피치	100 [mm]
1차측 길이	480 [mm]	코일수/극/상	2
슬롯수	24	코일 턴수	58
슬롯간격	20 [mm]	권선계수	0.966
치폭	9 [mm]	계자권선수	1000
슬롯깊이	25 [mm]		
극간격	120 [mm]		

된 자속은 2차측과 정렬하기 위해 추력이 발생하고 1차측은 이동자계를 따라 동기속도로 움직이게 된다.

즉, 그림 3(a)에서 보듯이 D-축일 때에는 이동자계는 2차측 돌극과 일치하여 추력은 발생하지 않고, 다만 자속이 증가하여 수직력은 증가한다. 그러나 그림 3(b)처럼 돌극이 이동자계와 90° 이동했을 때, 즉 Q-축일 때에는 최대추력이 발생한다.

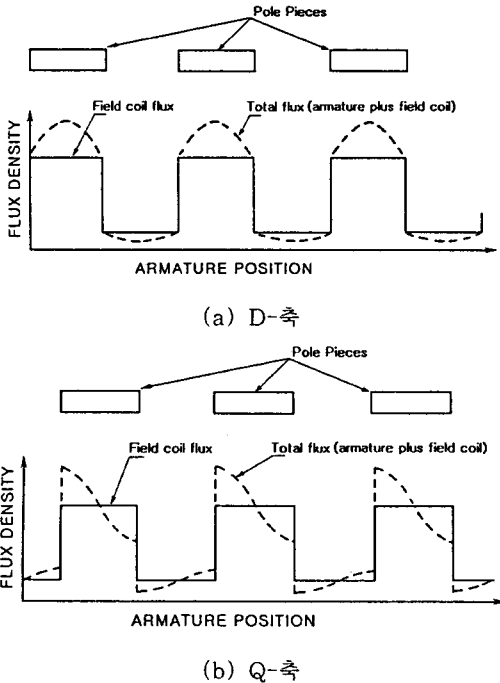


그림 3. D-축/Q-축에서의 공극자속밀도 분포

2.2 LHSM의 등가회로와 벡터도

일반적으로 LHSM의 운전특성은 그림 3과 4는 2-리액턴스 등가회로 모델과 그 페이지도를 보여준다. 전기자 누설리액턴스는 슬롯, 치, 코일단, 고조파, 중앙갭에서 기인된 누설리액턴스의 합이다. 중앙 갭 누설리액턴스는 전기자 권선의 중앙 교차부분에서 발생하는 것으로 LHSM의 가하학적 형상에서 기인된 특징적인 것이다. D, Q-축 리액턴스와 유효기전력은 FEM 해석에 의한 자계분포와 이론적 표현식에 의해 얻어질 수 있다. LHSM의 자화리액턴스는 다음 식(1)과 같다.

$$X_{dm} = X_{qm} = \frac{6\mu_0}{\pi} f_1 [(W_1 K_{w1})^2] \frac{2a\tau}{bg_c} \quad (1)$$

또한 1차측 누설리액턴스 $X_{1\sigma}$ 는 다음 식(2)와 같다.

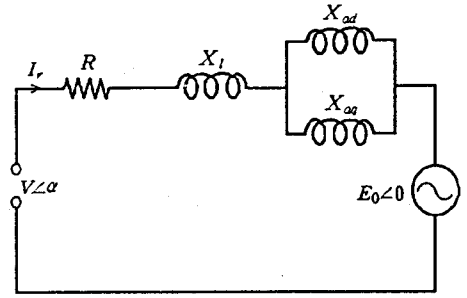


그림 4 LHSM의 2-리액턴스 등가회로 모델

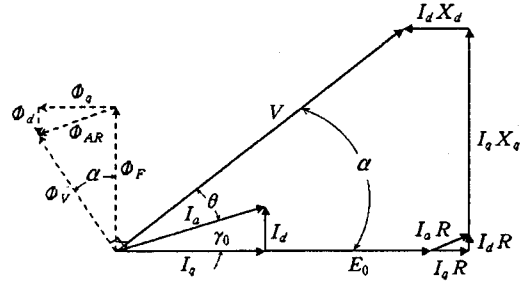


그림 5 LHSM의 페이지도

$$X_{1\sigma} = 4\mu_0 \pi f_1 [q(4p-3)(\lambda_s + \lambda_d)4a + \lambda_f \frac{4\tau\beta q^2}{\sqrt{3}d} 4a + \lambda_f \frac{4\tau\beta q^2}{\sqrt{3}} (p-1)] W_c^2 \quad (2)$$

여기서 λ_s, λ_d = differential specific permance, β = chording factor, q = 상당 극당 슬롯수, W_c = 코일당 턴수이다.

$$\beta = \frac{\tau_c}{\tau} \quad (3)$$

$$\lambda_s = \frac{h_s}{24 b_s} (1 + 3\beta) \quad (4)$$

$$\lambda_d = \frac{5g_e / b_s}{5 + 4g_e / b_s} \quad (5)$$

$$\lambda_f = 0.3(3\beta - 1) \quad (6)$$

상당 저항 R_1 은 다음 식(7)과 같다.

$$R_1 = \frac{\rho_{\infty} W_1}{I_1} J_{\infty} \left(8a + 0.08 + \frac{8\tau}{\sqrt{3}} \right) \quad (7)$$

여기서 ρ_{∞} = 구리의 저항률, J_{∞} = 전류밀도이다.

2.3 FEM 해석에 의한 등가회로 파라미터 산정

2.3.1 FEM 해석을 위한 모델링

본 논문에서 그림 6과 같은 모터의 측면에서의 등가 모델을 통해 2-D FEM 해석이 이루어졌다. 이 모델은 LHSM을 길이방향으로 펼친 모습으로 모터의 1/4 해석영역을 갖는다. 따라서 모델을 둘러싼 프레임층 철심 영역은 요크와 세그먼트의 1/2로 구성되고, 그 길이와 폭은 자속경로의 자기저항과 같도록 정했다. 그리고 철심영역사이에는 손실없는 magnetic shunt와 자속의 집중을 돕는 magnetic insulator의 가상물질로 구성하였다.

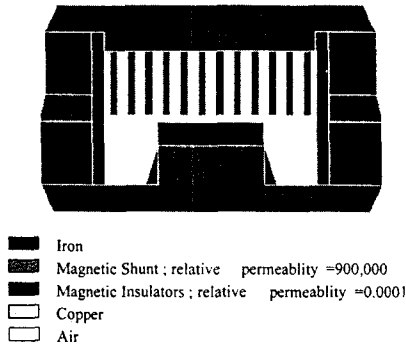


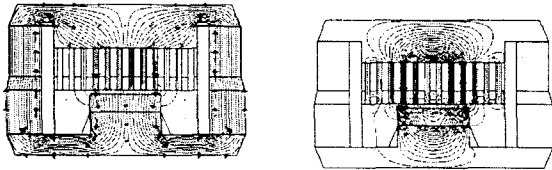
그림 6. LHSM의 2-D FEM 모델

2.3.2 D, Q 축 리액턴스

앞절에서 설명한 그림. 6의 모델을 이용하여 D와 Q 축 전기자 여자시 자속분포와 경로를 그림 7에서 보여 준다. 그림에서 Q축시 자속은 2차측 돌극에서 순환하고 요크와 트랙을 지나지 않으나 D축시 자속은 요크와 트랙을 지나며 대칭적이다. D와 Q축 리액턴스는 극당 전기자 쇄교자속의 기본파성분으로부터 계산할 수 있다.

$$X_{ad, aq} = \frac{16\pi f k_{a1} W_1 a r B_{d,q}}{\pi I_{pk}} \quad (7)$$

여기서 $B_{d,q}$ 는 그림. 8에서 보여진 기본파 성분의 크기 이고 I_{pk} 는 상당 전기자전류의 피크치이다.



(a) D 축 (b) Q 축

그림 7. 3상 전기자 여자시 자속분포

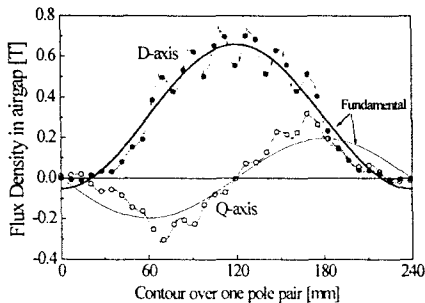


그림 8. 3상 여자시 공극자속밀도 파형과 그 기본파

2.3.3 전기자권선의 유기기전력

2차측의 돌극구조에 의해 맥동하는 DC. 공극자계는 동기속도로 움직이는 전기자 권선에 유기기전력을 발생 시킨다. 그런데 모터 출력식에 의한 추력 계산에서 유기기전력은 기본파성분만을 고려한다. 그림 9는 FEM과 자기등가회로법에 의해 구해진 공극자속밀도의 기본파 성분을 통해 계산되어진 공극주파수에 따른 유기기전력 특성곡선이다. 이러한 결과는 무부하 개방회로시험 시 유기기전력 특성을 예측할 수 있다.

2.4 등가회로 정수 선정

표 2는 60(Hz)일 때 이론적 수식 (1)~(7)에 의해 계산된 값과 FEM 해석에 의해 계산된 등가회로정수를

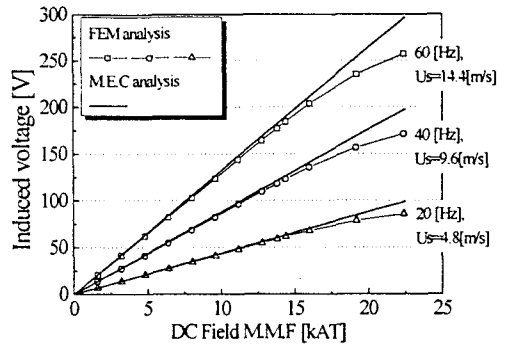


그림 9. 주파수에 따른 전기자 코일의 유기기전력

표 2. 등가회로 정수(60Hz일때) [Ω/상]

파라미터	기호	이론값	FEM값
전기자 저항(25°C)	R	5.781	-
누설 리액턴스	X_l	4.846	-
D축 리액턴스	X_{ad}	1.614	1.682
Q축 리액턴스	X_{aq}	1.614	0.926
유기 기전력 [V]	E_0	171	177
슬롯 누설 리액턴스	X_s	1.933	-
치 누설리액턴스	X_{TT}	1.688	-
코일단 누설리액턴스	X_{EW}	0.584	-
고조파 누설리액턴스	X_H	0.057	-
중앙 갭 누설리액턴스	X_{CG}	0.583	-
자화리액턴스	X_m	1.588	-

보여준다. FEM 해석치에서 Q-축 리액턴스는 D-축 리액턴스보다 작다. 그 이유는 FEM 모델에서 자기절연체 때문이다. 즉, 만약 자기절연체를 제거하면 릴럭턴스가 감소하고 Q-축 리액턴스는 증가할 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 횡방향 세그먼트 트랙을 갖는 4극 LHSM의 특성 해석을 위해 일반적인 2-리액턴스 등가회로의 정수를 산정하였다.

등가회로 정수는 이론적 수식과 FEM 해석을 통해 얻어졌는데, FEM 해석치에서 Q-축 리액턴스는 D-축 리액턴스보다 작았다. 따라서 이러한 차이는 특성해석시 추력의 오차가 발생할 것으로 예상된다. 이를 위해 D-/Q-축 리액턴스 계산시 자기절연체를 제거하거나 좀 더 긴 영역에서의 해석이 필요하다.

[참고 문헌]

- [1] S.A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", pp268, chapter 4, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [2] I. Boldea and S.A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", pp268, chapter 7, John Wiley & sons, Inc., 1985

본 연구는 한국과학재단 핵심연구과제 971-0910-060-2로 지원되어 수행된 연구결과와 일부입니다.