

고속 LSM의 설계 및 동특성 시뮬레이션

성소영*, 성호경*, 유대준**, 장석명**
 한국기계연구원 자기부상연구팀, 충남대학교 전기공학과

Design of Hi-Speed LSM and Dynamic Simulation

Soyoung Sung*, Hokyung Sung*, Daejun Ryu**, S.K.Jang**

*Korea Institute of Machinery and Materials Maglev Project Team, **ChungNam National Univ. Dept. of Electric Eng.

Abstract - This paper presents the system design of high speed linear synchronous machine in the required speed and thrust considering power of inverter. in this paper, the design of manufacturing motor is optimized by characteristics of motor parameters with the variation of coil turns of rotor and stator. And, the dynamic simulation are performed from the (d-q) transformation of the current and voltage and the mechanical dynamic equation composed of the mover mass and damping ratio. Finally, the results of design and analysis are verified by finite element analysis.

1. 서 론

직선형 동기 모터 시스템은 회전형 모터에 의한 불필요한 기계적 변환 없이 부하에 직선운동을 공급하는 장치로서 우수한 속도, 토크 제어 특성을 갖는 장치이다[1]. 현재, 고속 직선형 동기 전동기는 독일의 경우, 자체 차량의 무게는 102(ton)이며, 최고 속도 도달시 부하는 20(ton)을 가지고 있다. 또한 가동자의 최고 속도 111(m/sec)에 도달하기 위한 전기적인 주파수는 215(Hz)를 필요로 한다. 본 논문은 그러한 자기 부상열차의 추력 시스템을 담당하고 있는 직선형 동기 모터(LSM)의 평가를 위한 고속 LSM 시뮬레이터의 설계 및 동특성에 대해 제시하고 있다.

가동자의 경우, 집중권 형태의 극을 이루고 있으며, 고정자는 회전자계를 형성하기 위한 3상 분포권을 이루고 있다. 또한, 가동자의 강한 자계와 고정자의 슬롯-치 사이의 코깅을 줄이기 위하여 고정자는 2극으로 설계하였다. 그림.1과 표.1은 고속 LSM 시뮬레이터의 초기설계 모델과 요구 사양을 보여주고 있으며, 외반경 0.75(m)을 갖는 가동자의 질량 1(ton)을 10분 내에 153(m/sec)에 도달하기 조건으로 최대 추력을 300(N)으로 결정하였다.

본 논문의 설계를 위한 과정에 있어서, 가동자의 전류는 교류 최대 전류 100(A)를 만족하는 권선에 대해 고정자 코어와의 관계에 있어서 포화되지 않는 범위에서 설계되어 졌으며, 고정자의 턴 수는 가동자에 의한 자계와 속도에 의한 역기전력이 400(V) 이내에서 설계되어졌다. 그러므로 본 논문의 고속 LSM의 설계는 가동자의 일정 기전력에 대한 고정자 턴 수의 산정에 의해 이루어지며, 가동자와 고정자 권선의 전류 제어를 통한 동특성 시뮬레이션 결과가 제공된다[1].

2. 고속 LSM의 설계 및 동특성

2.1 설계모델 및 요구조건

그림.1은 고속 LSM의 시뮬레이터를 위한 설계모델을 제시한다. 여기서, 가동자는 속도 153(m/sec)를 만족하기 위한 전기적 주파수를 300(Hz)이내에서 설계하기 위하여 16극으로 선정되었으며, 고정자의 경우 코깅 토크를 감소시키기 위하여 2극으로 선정하였다. 또한, LSM 시뮬레이터의 직선형 변화를 위한 속도와 추력관계식은 식 (1)과 (2)와 같이 얻어진다.

$$\omega_c = \frac{\pi}{\tau} u_s \quad (1.1)$$

$$\tau = 2\pi r_0 / 16 \quad (1.2)$$

$$F_c = M \frac{dv_s}{dt} + Bv_s \quad (2)$$

여기서, ω_c 와 τ 는 전기적인 주파수와 극당 선길이이며, M은 질량, B는 속도 마찰을 의미한다.

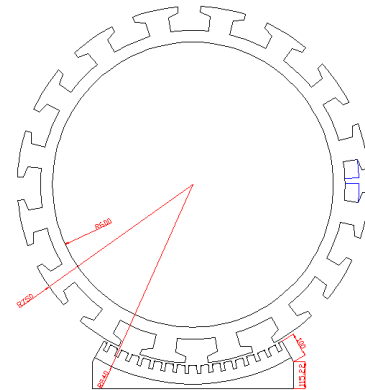


그림.1 고속 LSM의 시뮬레이터 설계 모델

표.1 고속 LSM 시뮬레이터를 위한 요구 사양

Mover Dia. (r_0)	750 (mm)
air gap	10 (mm)
Mover mass	1 (ton)
Pole pitch	0.294(m)
Mover line speed	153(m/sec)=260(Hz)
DC link of inverter	1000 (V)
Max current of inverter	100 (A)
Max thrust of LSM	300 (N)
Max power of inverter	50 (KW)

2.2 LSM의 전압방정식

설계 사양에 대한 해석적 검토 및 동특성 시뮬레이션을 위한 검증에 있어서 계자와 권선에 유기되는 쇄교 자속과 저항 성분을 고려한 전압 방정식은 (d-q)frame 에 있어서 식(3)과 같이 구성되며, 해석적 편이를 위하여 계자에 의한 쇄교 자속 λ_f 는 계자의 전류 제어에 있어서 일정한 값을 갖는다고 가정하였다[1].

$$\begin{aligned} V_{qs}^r &= r_s i_{qs}^r + \frac{\pi}{\tau} u_r \lambda_{ds}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^r \\ V_{ds}^r &= r_s i_{ds}^r - \frac{\pi}{\tau} u_r \lambda_{qs}^r + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^r \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, r_s 는 고정자 권선의 상 저항을 나타내며, 일정한 가동자 계자의 자계에 의한 고정자 권선의 쇄교 자속은 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \lambda_{qs}^r &= L_{qs} i_{qs}^r \\ \lambda_{ds}^r &= L_{ds} i_{ds}^r + \lambda_f \end{aligned} \quad (4)$$

그림.1의 설계모델에 대한 인덕턴스는 가동자와 고정자 돌극형 구조에 의한 위치에 따른 상호 인덕턴스의 변화와 함께 식 (5)로 얻어진다 [2].

$$L_s = \begin{bmatrix} L_b + L_A - L_B \cos 2\theta_r, & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}), & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{\pi}{3}), & L_b + L_A - L_B \cos 2(\theta_r - \frac{2\pi}{3}), & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{\pi}{3}), & -\frac{1}{2}L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \pi), & L_b + L_A - L_B \cos 2(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

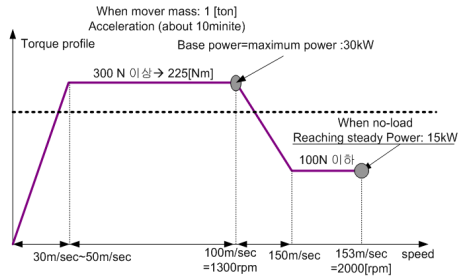


그림. 2 고속 LSM의 운영을 위한 토크 프로파일

표.2 고속 LSM 시뮬레이터의 설계사양

가동자의 권선저항	655(mΩ)
가동자의 자기 인덕턴스	36(mH)
고정자 권선저항	23.73(mΩ)
고정자 자기 인덕턴스($L_s + L_A$)	0.4065(mH)
고정자 권선의 동기 인덕턴스(L_{qs})	0.5775(mH)
계자의 linkage flux(λ_f) in 100(A)	0.245(wb-turns)
Pole pitch(τ)	0.294(m)
고정자 턴 수	8(turns)
가동자 턴 수	30(turns)
Mover line speed(u_r)	153(m/sec)=260(Hz)
Max thrust of LSM	300(N) in 100(m/sec)
Max power of LSM	30 (KW)

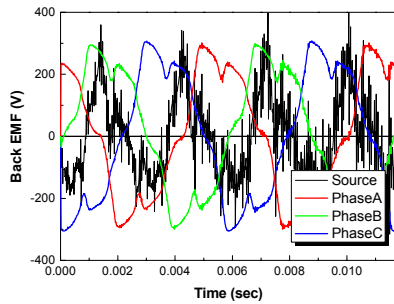


그림. 3 가동자 전류 100(A), 고정자 q-전류 100(A)인가시 가동자 속도 1300(rpm)에서의 가동자와 고정자의 역기전력

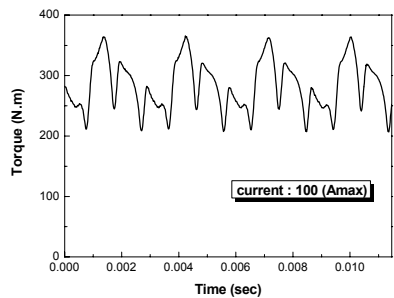


그림. 4 가동자 전류 100(A), 고정자 q-전류 100(A)인가 시 토크

2.3 고속 LSM의 설계 및 동특성 시뮬레이션

그림.2는 표.1의 요구조건을 만족하기 위한 토크 프로파일로서 가동자의 속도가 100(m/sec)일때, 최대 추력 300(N)을 만족하도록 설계되었으며, 최대 용량 30(KW)를 만족하기 위한 가동자와 고정자의 턴수는 각각 30(turns)과 8(turns)로 산정되었다. 특히, 인버터의 교류 입력의 최대 값이 500(V)로 정해진 조건에 있어서, 가동자의 속도 100(m/sec)일 때의 역기전력을 수용할 수 있게 설계되었다. 표.2는 제작된 회전형 LSM의 설계 회로 정수에 대해 나타내고 있으며, 인버터의 경우 A.C 500(V)와 A.C 100(A)에 있어서 용량 50(KW)를 갖으며 LSM의 역기전력의 상수와 추력 상수는 식 (6)과 식 (7)에 있어서 얻어진다.

$$k_{emf} = \frac{\pi \lambda_f u_r}{\tau} \quad (6)$$

$$k_t = 1.5 k_{emf} \quad (7)$$

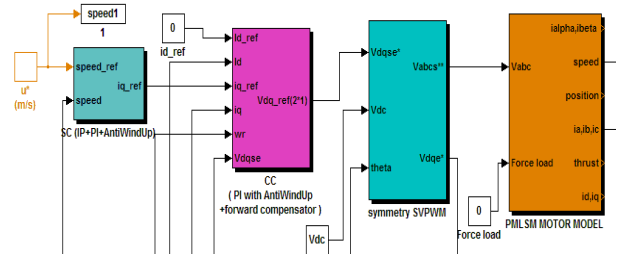


그림.5 전류 제어기와 벡터제어를 갖는 인버터를 갖는 LSM

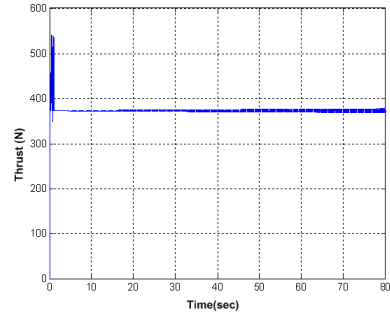


그림.6 전류 제어에 의한 추력 특성

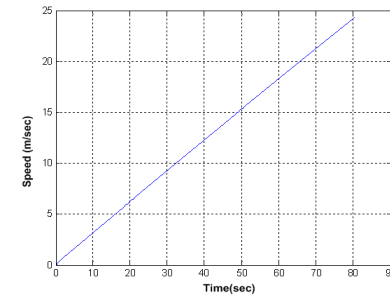


그림.7 전류 제어에 의한 속도 특성

따라서 제작된 회전형 LSM의 단순화된 추력 식은 식(8)과 같다.

$$F_e = k_t i_q \quad (8)$$

여기서, i_q 는 3상 교류 전류에 대한 Park's 변환에 의한 변환 전류로서 환상의 교류 전류에 있어서 Peak 전류 크기를 의미한다. 그림.3과 그림.4는 최대 정격시 역기전력 파형과 토크의 해석 결과를 제시하고 있으며, 이때의 가동자와 고정자의 최대 정격 전류는 각각 100(A)이다.

그림. 5는 회전형 LSM의 전류 feedback과 속도 feedback을 갖는 제어기로서 20(KHz)의 PWM과 PI제어기로 구성되어져 있다. LSM의 가동자의 무게가 1,2(ton)에 대한 큰 무게에 대해 속도 수렴이 오랜 시간이 걸리는 만큼 전류 제어기에 의한 일정한 추력에 대한 동특성 시뮬레이션 결과를 제공한다. 그림.6와 그림. 7은 그림. 5의 전류 제어에 의한 가동자의 추력과 속도 특성을 보여 주고 있다. 이때 전류 제어의 지령 값은 100(A)으로 설정되어진다.

3. 결 론

본 논문은 고속 LSM을 위한 시뮬레이터의 설계 및 동특성에 대해 제시하고 있으며, 요구된 속도 토크 특성을 만족하기 위한 가동자 및 고정자의 코일 턴수에 따른 역기전력과 토크 특성을 제시하고 있다. 또한 동특성 방정식에 의한 시스템의 최대 추력, 속도에 의해 요구된 속도, 추력 특성을 만족하기 위한 인버터 용량을 고려한 시스템적 설계를 제시하였다. 그러므로 본 논문은 직선형 동기 전동기의 파라미터와 DC link 전압 이용률을 고려한 시스템 최적 설계시 사용되어 질 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1]I. Boldea, S.A. Nasar, "Linear synchronous electric actuators and generators," Cambridge University Press, 1997.
- [2]Hamid A. Toliyat, Steven Campbell, "DSP-Based Electromechanical Motion Control," CRC Press, 2004.