

인버터로 구동되는 영구자석형 선형 동기전동기의 유한요소 해석

^a우경일^a, 권 병일^a, 류 세현^a, 박 승천^b
한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b

Finite Element Analysis of Inverter - Fed Permanent Magnet Linear Synchronous Motor

^aK. I. Woo^a, B. I. Kwon^a, S. H. Rhyu^a, S. C. Park^b
Dept. of Elec., Graduate School of Hanyang Univ.^a, RIET^b

Abstract – This paper describes on the dynamic characteristic analysis of a inverter-fed linear synchronous motor with surface type permanent magnet using time-stepped finite element method. We can certify that the proposed simulation method can be used at the dynamic characteristic analysis of other inverter-fed linear motor.

1. 서 론

선형 동기전동기는 별도의 동력 변환장치 없이 직선 추진력을 얻을 수 있는 장점이 있으므로, 리니어 엘리베이터, 공작기계 등에 이용되고 있다. 또한, 최근에 에너지 밀도가 높은 Nd-Fe-B계 재료의 개발로 인하여 고에너지밀도의 영구자석을 이용한 선형 동기전동기의 관심이 높아지고 있다. 영구자석형 선형 동기전동기의 전자제 해석에 관한 연구로서, 등가회로법과 2차원 유한요소법을 이용한 정수력 해석한 논문이 발표되었고[1], 분할 영구자석형 선형 동기전동기에 있어서 제동권선의 영향을 3차원 유한요소 해석과 실험을 통하여 고찰한 논문[2]도 발표되었다. 그리고, 영구자석형 선형 동기전동기를 정현파로 구동하였을 경우의 동특성을 해석한 논문도 발표되었다.[3] 그러나, 이들 논문에서는 인버터 출력 전압을 고려하지 않고 해석하였기 때문에 전동기의 제어 시에 정확한 파도 자계의 해석에 근거한 동특성을 구하기가 어렵다.

따라서, 본 논문에서는 시간 차분 유한요소법을 이용하여 인버터로 구동되는 영구자석형 선형 동기전동기의 동특성을 이동mesh 기법을 사용하여 고찰하고자 한다.

2. 인버터 특성을 고려한 유한요소 해석

전동기가 1차질심의 적중방향으로 무한하다고 가정하고 이동좌표계를 사용하면, 자기벡터 포텐셜 A 와 전류밀도 J_o , 그리고 잔류자화량 M_r 을 사용한 식(1)과 같은 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_o \\ + \sigma \frac{dA}{dt} - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{rx}}{\partial x} - \frac{\partial M_{ry}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

각 상에 대하여 Kirchhoff의 전압법칙을 적용하면, 식 (2)와 같은 전압방정식을 구 할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\Psi] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [R][I] = [V] \quad (2)$$

단,
 $[V]$: 각상의 전압
 $[I]$: 각상의 권선전류
 $[R]$: 각상의 1차축 권선 및 회로저항
 $[L_o]$: 각상의 1차축 누설 인덕턴스
 $[\Psi]$: 각상 권선의 쇄교자속량

식 (1)과 식 (2)를 결합하고, 시간미분항을 후퇴차분법을 이용하여 정리하면 식 (3)와 같은 시스템 방정식이 얻어진다.[3] 그림 1은 인버터가 고려된 해석모델을 나타낸다.

$$= \begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & -[C] & [A] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{h_{eff}} & [I] \\ \frac{[T]^T}{\Delta t} & [0] & [A] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o]}{h_{eff}} & [I] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} [G] \\ \frac{\Delta t}{h_{eff}} [V] \end{bmatrix}, \quad (3)$$

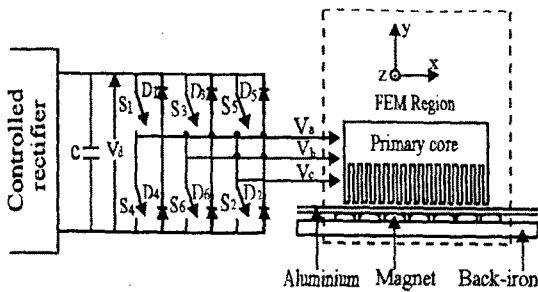


그림 1 해석 모델
Fig. 1 Analysis model

영구자석형 선형 동기전동기를 구동하는 인버터는 전류제어형 전압원 히스테리시스 인버터를 사용하였다. 그림 2와 같이 히스테리시스 밴드폭 내에 출력 전류를 유지하도록 하는 구형파 PWM전압이 발생한다. 발생된 전압으로부터 모터 구동에 필요한 상전압을 구하여, 식(3)의 우변항 V 에 대입한 후 matrix를 끈다. 그림 3은 전체 block diagram을 나타내며, 기준 전류의 크기 및 주파수는 각각 8[A], 2[Hz]이다.

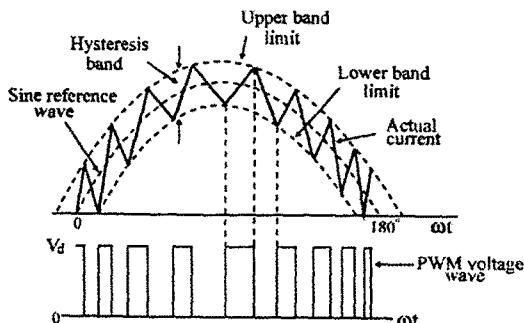


그림 2 히스테리시스 전류 제어
Fig. 2 Hysteresis current control

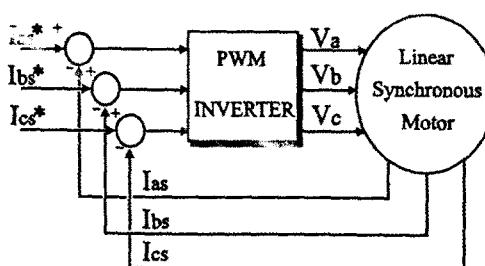


그림 3 전체 시스템 구성도
Fig. 3 Block diagram

3. 특성 시뮬레이션 및 결과

선형 동기 전동기의 동작특성은 매순간마다 식(3)을 풀어서 구한 자제해석 결과를 이용하게된다. 추력과 수직력을 구하기 위해 공극을 3층으로 나누어 임의의 적분경로를 취하고 한 절점을 둘러싸고 있는 요소들의 자속밀도를 이용하여 평균자속밀도를 구한 후 Maxwell 용력법을 이용하여 계산하였다.[4] 재분할 과정은 2차측의 자석이 한 극피치만큼 이동하기 전까지는 형상 그대로 이동mesh를 행하고, 한 극피치를 지나쳤을 경우에는 2차측을 다시 처음으로 옮겨서 재분할하였다. 이동mesh를 할 경우 절점이 하나씩 생성되며, 경계조건도 다시 처리하여야 한다. 이때 경계조건을 포함하는 요소의 절점도 바뀌어야 한다. 이동자의 속도는 식 (4)와 같은 운동방정식을 풀어서 구할 수 있다. 그림 4는 해석 순서도를 나타낸다. 영구자석형 선형 동기전동기의 상수는 3, 극수는 4, 상당권선수는 216이고 공극은 0.7[mm]이며, 기본적인 구성은 그림 5와 같다.[3]

$$F = (M + M') \frac{dv}{dt} + F_t \quad (4)$$

단, F : 발생 추력 M : 1차측의 질량
 F_t : 부하 M' : 흡인력에 의한 동가질량
 v : 이동자 속도

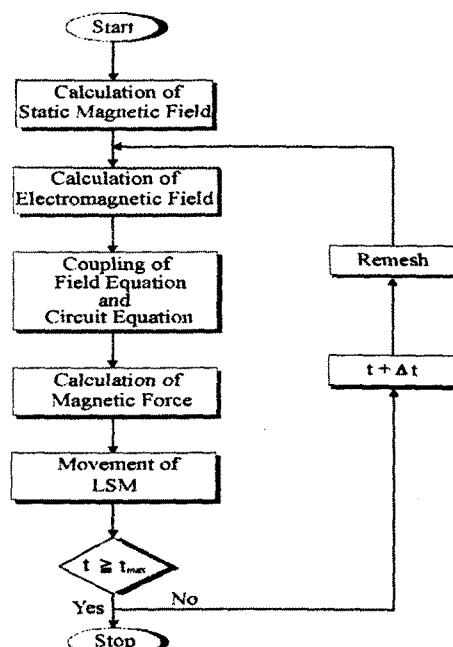


그림 4 해석 순서도
Fig. 4 Flow-chart of analysis

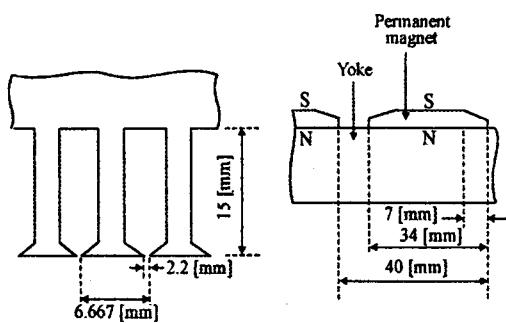


그림 5 선형 동기전동기의 기본적인 구조

Fig. 5 Basic structure of a LSM

그림 6에서 9까지는 추력, 속도, 전압, 전류에 대한 시뮬레이션 결과치를 보이고 있다. 추력 특성 곡선에서 알 수 있듯이 인버터에 포함된 고조파의 영향으로 인하여 추력에 ripple이 많이 발생된 것을 알 수 있다. 그리고 속도 특성은 약 8초 후에 동기속도 0.16[m/sec]로 수렴함을 알 수 있다.

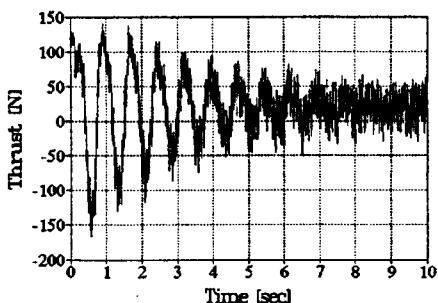


그림 6 추력 특성

Fig. 6 Characteristic of thrust

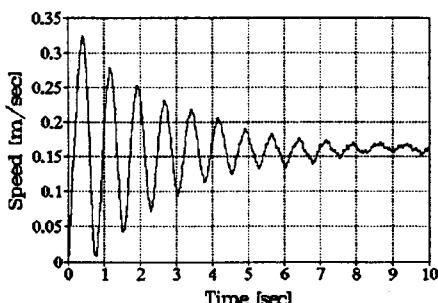


그림 7 속도 특성
Fig. 7 Characteristic of speed

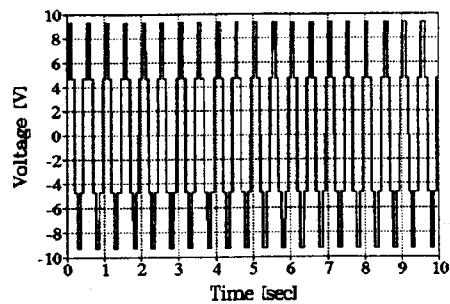


그림 8 전압 특성

Fig. 8 Characteristic of voltage

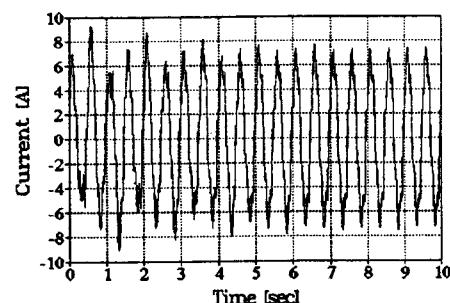


그림 9 전류 특성

Fig. 9 Characteristic of current

4. 결 론

본 논문에서는 시간 차분 유한요소법을 이용하여, 지상 2차방식의 인버터 구동 영구자석형 선형 동기전동기의 동특성을 해석하여, 추력, 속도, 전압, 전류등의 순시값을 얻을 수 있었다. 제안된 시뮬레이션 기법으로 다른 인버터로 구동되는 선형 기기의 동특성 해석에 도움이 되리라 생각된다.

[참고 문헌]

- [1] Tsutomu Mizuno, Hajime Yamada, "Magnetic Circuit of a Linear Synchronous Motor with Permanent Magnets", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 28, No.5, pp. 3027-3029. 1992.
- [2] Geras, Jacek F., SPANNENBERG, Alfred., WING, Mitchell, "Analysis of a Linear Synchronous Motors with Buried Permanent Magnets", Proc. of LDIA. pp. 323-326. 1995.
- [3] 권병일, 류세현, 우경일, 박승찬, "유한요소법을 이용한 영구자석형 선형 동기전동기의 동특성 해석", 추계학술대회 논문집, pp. 25-28, 1996.
- [4] 中田高義 外, "有限要素法による交直電磁石の設計と應用", pp. 56 - 62, 森北出版社