

부하조건을 고려한 직선형 유도전동기의 동특성 해석

장석명*, 박유섭*, 박지훈*, 이운호*, 이경복**
 충남대학교*, 대전도시철도공사**

Dynamic Characteristic Analysis on Linear Induction Motor considering Load Conditions

Seok-Myeong Jang*, Yu-Seop Park*, Ji-Hoon Park*, Un-Ho Lee*, Kyoung-Bok Lee**
 Chungnam National University*, Daejeon Metropolitan Express Transit Corporation**

Abstract - This paper deals with the dynamic characteristic analysis on Linear Induction Motor(LIM) considering load conditions. The analysis on the electromagnetic characteristics is processed to derive circuit parameters, and dynamic modeling for the analysis is performed considering load conditions for speed and thrust dynamic characteristics.

1. 서 론

직선형 유도전동기(LIM)는 동력변환장치 없이 추진력을 직접 얻을 수 있으므로 시스템의 종합 효율이 높아 직선형 운동 시스템에서 절대적으로 유리하고, 단순한 구조와 유지보수의 용이성 등의 장점으로 인해 직선운동이 필요한 자동화 서보시스템 및 반송시스템에서 그 용도가 점차 증가하고 있다[1].

본 논문에서는 직선형 유도전동기의 해석모델을 선정하여 전자장 이론을 적용한 전자기 특성 해석을 하여 등가회로 회로정수를 도출하였으며, 이를 토대로 가속, 정속, 감속의 운전패턴에 따른 동특성 모델링을 통해 부하조건을 고려하여 직선형 유도전동기의 속도 및 추력에 관한 동특성 해석을 수행하였다.

2. 직선형 유도전동기의 전자계 특성식

2.1 직선형 유도전동기의 전자기적 모델링

그림 1은 치-슬롯 구조의 직선형 유도전동기를 Sheet Current로 등가화한 모델로서 내부특성이 투자율 μ 와 도전율 σ 로 표현된다. 그림 1의 2차측은 알루미늄 도체판과 철심 코어로 구성되어 있으며, z방향으로 V_x 의 속도로 직선 운동한다. 알루미늄 도체판은 공기와 같은 투자율과 $3 \times 10^8 [m/\Omega]$ 의 도전율을 갖고, 철심코어의 투자율은 ∞ 이다. 직선형 기기의 경우 제작단가의 절감을 위해 적층을 하지 않으므로 철심코어의 도전율 $1.03 \times 10^{-7} [m/\Omega]$ 이 고려되고, 공기로 이루어진 영역 1과 4의 경우 $4\pi \times 10^{-7} [H/m]$ 의 값을 가지는 투자율과 높은 저항률로 인해 전류가 존재하지 않는다고 가정한다. 영역 5는 치-슬롯 구조와 백아이언으로 구성되어 있는 1차측을 Sheet Current로 등가화하여 하나의 영역으로 도시하였고, 일반적으로 적용하여 사용되므로 도전율이 무시된다. 자성체 내부의 전자계 특성을 위한 자기적 특성식은 Maxwell 방정식으로부터 얻어지고 각 영역에서 자속밀도의 접선방향성분과 법선방향성분은 식(1)-(5)와 같이 구해진다[2].

$$B_{x1} = \frac{\partial A_{z1}}{\partial y} = \beta(C_1 e^{\beta y} - D_1 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (1)$$

$$B_{y1} = -\frac{\partial A_{z1}}{\partial x} = j\beta(C_1 e^{\beta y} + D_1 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$

$$B_{x2} = \frac{\partial A_{z2}}{\partial y} = \alpha_1(C_2 e^{\alpha_1 y} - D_2 e^{-\alpha_1 y}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (2)$$

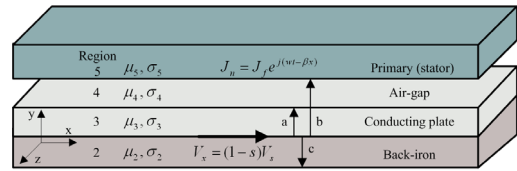
$$B_{y2} = -\frac{\partial A_{z2}}{\partial x} = j\beta(C_2 e^{\alpha_1 y} + D_2 e^{-\alpha_1 y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$

$$B_{x3} = \frac{\partial A_{z2}}{\partial y} = \alpha_2(C_3 e^{\alpha_2 y} - D_3 e^{-\alpha_2 y}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (3)$$

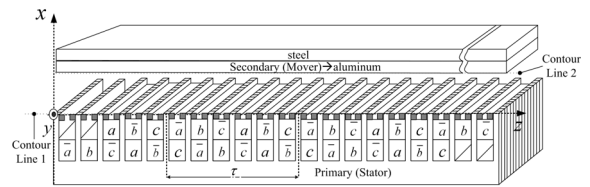
$$B_{y3} = -\frac{\partial A_{z2}}{\partial x} = j\beta(C_3 e^{\alpha_2 y} + D_3 e^{-\alpha_2 y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$

$$B_{x4} = \frac{\partial A_{z4}}{\partial y} = \beta(C_4 e^{\beta y} - D_4 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (4)$$

$$B_{y4} = -\frac{\partial A_{z4}}{\partial x} = j\beta(C_4 e^{\beta y} + D_4 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$



〈그림 1〉 직선형 유도전동기 내부 특성



〈그림 2〉 직선형 유도전동기 해석모델

〈표 1〉 직선형 유도전동기 해석모델 사양

| 파라미터 | 값 | 파라미터 | 값 |
|----------|------------------|-------|----------|
| 상수 | 3 | 코일피치 | 44 [mm] |
| 극수 | 6 | 슬롯피치 | 12 [mm] |
| 공극길이 | 3.5 [mm] | 치피치 | 11 [mm] |
| 1차측 Size | 570*190*130 [mm] | 병렬회로수 | 2 |
| 코일간격 | 4/6 | 턴수 | (75턴)*2층 |
| 극피치 | 66 [mm] | | |

$$B_{x5} = \frac{\partial A_{z5}}{\partial y} = \beta(C_5 e^{\beta y} - D_5 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)} \quad (5)$$

$$B_{y5} = -\frac{\partial A_{z5}}{\partial x} = j\beta(C_5 e^{\beta y} + D_5 e^{-\beta y}) e^{j(\omega t - \beta x)}$$

2.2 경계조건

자기회로 구성조건에 따른 각각의 범위에 있어서 각각의 자성체 특성식의 계수를 결정하기 위한 경계조건은 식(6)-(10)과 같다. 여기서, 1차측 철심코어와 공극의 경계면은 Sheet Current의 전류밀도 분포에 의해 식(10)과 같이 불연속성을 갖으며 각 경계면의 자계와 벡터퍼텐셜은 연속조건을 갖고, 직선형 기기의 내부 특성 모델에 있어서 각 영역별 자속밀도와 경계조건으로부터 식(1)-(5)의 계수가 도출되어진다[2].

$$A_{z1}|_{y=-\infty} = 0, A_{z5}|_{y=\infty} = 0 \quad (6)$$

$$B_{y1}|_{y=c} = B_{y2}|_{y=c}, H_{x1} - H_{x2}|_{y=c} = 0 \quad (7)$$

$$B_{y2}|_{y=0} = B_{y3}|_{y=0}, H_{x2} - H_{x3}|_{y=0} = 0 \quad (8)$$

$$B_{y3}|_{y=a} = B_{y4}|_{y=a}, H_{x3} - H_{x4}|_{y=a} = 0 \quad (9)$$

$$B_{y4}|_{y=b} = B_{y5}|_{y=b}, H_{x4} - H_{x5}|_{y=b} = J_n \quad (10)$$

2.3 직선형 유도전동기의 해석모델

그림 2는 직선형 유도전동기의 해석을 위한 모델이다. 고정자는 치와 슬롯을 갖는 철심 코어에 회전자계를 위한 3상 권선이 구성되어 있으며, 가동자는 와전류 발생을 위한 알루미늄과 권선전류에 의한 자속밀도를 높이기 위하여 철심 레일로 이루어져 있다. 표 1에서는 이러한 직선형 유도전동기 해석모델 사양을 제시하고 있다.

2.4 직선형 유도전동기의 회로정수 산출

그림 2의 해석모델로부터 폐곡면 S를 채워하는 자속 Φ 는 자속밀도와 자기벡터퍼텐셜에 의해 식(11)과 같이 정의된다. 식(11)으로부터 한 상 당 하나의 코일 변에 인덕턴스는 식(12)과 같이 정해진다. 식(11), (12)를 이용하여 그림 2의 contour Line 1과 2에서의 자속밀도를 구하고 이것을 면적분하면 식(13)을 얻을 수 있다. 식(13)에서 자화인덕턴스는 Contour Line 2에서 법선 성분 자속밀도를 면적분하여 식(14)과 같이 구할 수 있다. 누설인덕턴스는 Contour Line 1과 2의 법선 자속밀도의 차와 Contour Line 1의 접선성분 자속밀도로 식(15)과 같이 구할 수 있다.

$$\Phi = \oint_c A \cdot dl \quad (11)$$

$$L_{ph} = \frac{N}{I} \oint_c A \cdot dl \quad (12)$$

$$L_1 = \frac{N}{I} \oint_s B_{y3} ds, L_2 = \frac{N}{I} \oint_s B_{y4} ds, L_3 = \frac{N}{I} \oint_s B_{x4} ds \quad (13)$$

$$L_m = L_1 \quad (14)$$

$$L_l = (L_2 - L_1) + L_3 \quad (15)$$

표 2는 그림 2의 기하학적 변수가 고려된 해석모델에 있어서 수학적 모델링을 통한 등가 회로 정수 결과 값을 보여주고 있다[2].

3. 직선형 유도전동기의 동특성 수학적 모델링

3.1 동기좌표계 (d-q)에서의 전압방정식

직선형 유도 전동기의 전압방정식은 전동기가 정지하고 있는 경우를 제외하고 시변계수를 갖는 미분방정식으로 표현되지만 d-q 좌표 변환 기법을 도입하면 시변계수가 제거되어 일정한 계수를 갖는 시불변 미분방정식으로 전환된다. d축은 자속이 존재하는 축으로, 보통 교류전동기의 벡터제어에 기준이 되는 축이고, q축은 d축과 직각을 이루는 축으로 벡터제어 시 토크를 발생하는 전류의 축이다. 좌표변환기법을 통한 동기 좌표계에서의 전압방정식과 쇄교자속식, 추력식은 식(16)-(19)와 같이 정리된다. 또한, 직선형 유도전동기의 기계방정식은 식(20)에 의해서 구해진다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + d\lambda_{ds}/dt - w\lambda_{qs} \quad (16)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + d\lambda_{qs}/dt + w\lambda_{ds}$$

$$v_{ns} = R_s i_{ns} + d\lambda_{ns}/dt$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + d\lambda_{dr}/dt - (w - w_r)\lambda_{qr} \quad (17)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} + d\lambda_{qr}/dt + (w - w_r)\lambda_{dr}$$

$$v_{nr} = R_r i_{nr} + d\lambda_{nr}/dt$$

$$\lambda_{ds, dr} = L_{s, lr} i_{ds, dr} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) = L_{s, r} i_{ds, dr} + L_m i_{dr, ds} \quad (18)$$

$$\lambda_{qs, qr} = L_{s, lr} i_{qs, qr} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) = L_{s, r} i_{qs, qr} + L_m i_{qr, qs}$$

$$\lambda_{ns, nr} = L_{s, lr} i_{ns, nr}$$

$$F_d = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} (\lambda_{ds}^s i_{qs}^s - \lambda_{qs}^s i_{ds}^s) \quad (19)$$

$$M \frac{dv_r}{dt} + B_m v_r + F_L = F_d \quad (20)$$

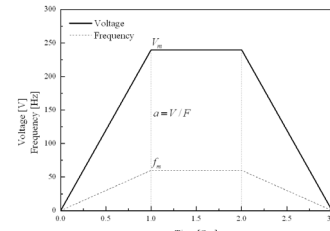
여기서, s와 r은 각각 고정자와 가동자를 의미하고, $L_{s, lr}$, L_m , $L_{s, r}$ 는 각각 누설, 자화, 자기인덕턴스이다. 또한 기계방정식의 M은 가동자의 질량, B_m 은 마찰계수이고, F_L 은 부하를 나타낸다.

4. 동특성 시뮬레이션 및 결과

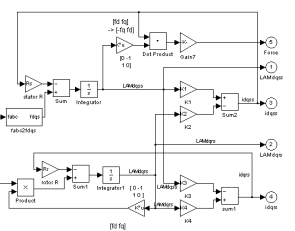
직선형 유도전동기는 일정한 전압에 있어서 주파수가 커질수록 추력이 감소하는 경향을 갖으며, 일정한 V/F의 비에 있어서 추력이 일정한 값을 갖는다. 또한, LIM의 속도는 극 간격 또는 주파수에 의해서 제어된다. 극 간격에 의한 속도 제어 범위는 매우 작기 때문에 일반적으로 주파수를 이용하여 속도 제어를 하게 된다. 하지만 직선형 유도전동기 자속이 변하게 되므로 추력이 변하게 된다. 그런데 가속 시에는 일정한 추력을 발생시켜야 하므로 자속도 일정한 크기로 발생시키며 속도를 상승시켜야 한다. 이러한 조건하에서 전력을 공급하는 전원장치로는 VVVF 기능을 갖는 인버터를 사용하게 된다. 그림 3은 이러한 직선형 유도전동기의 운행조건을 보여주고 있다[1]. 식(16)-(19)과 통해 직선형 유도전동기의 내부는 그림 4와 같이 모델링되고, 직선형 유도전동기의 V/F 일정제어 시뮬레이션이 그림 5에서 제시되고 있다. 이에 따른 3상 지령전압과 전류특성은 각각 그림 6과 7에 제시되어 있다. 그림 8과 9는 고려된 직선형 유도전동기의 무게를 5[kg]에서 20[kg]까지 달리하여 얻은 속도와

〈표 2〉 해석적 방법에 의한 회로정수 값

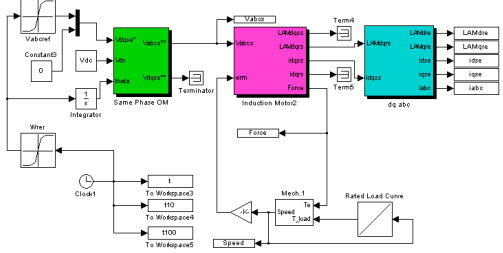
| 회로정수 | 값 | 회로정수 | 값 |
|-------|---------------------|----------|---------------------|
| R_1 | 0.0382 (Ω) | X_{m1} | 2.7797 (Ω) |
| R_2 | 1.088 (Ω) | X_r | 3.3522 (Ω) |
| X_s | 1.0198 (Ω) | Mass | 5 (kg) |



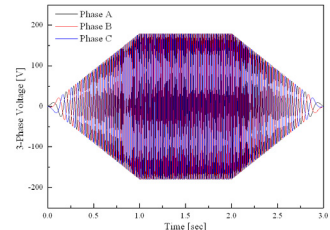
〈그림 3〉 LIM 운행조건



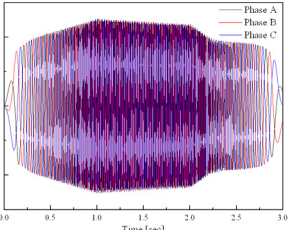
〈그림 4〉 LIM 내부 모델링



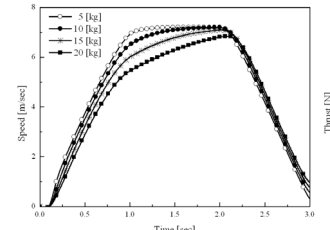
〈그림 5〉 직선형 유도전동기의 V/F 일정 제어 시뮬레이션 모델링



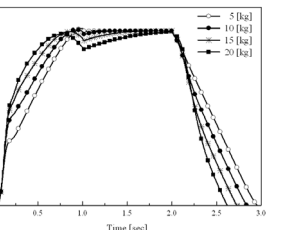
〈그림 6〉 3상 지령전압 특성



〈그림 7〉 3상 전류특성



〈그림 8〉 속도특성



〈그림 9〉 추력특성

추력특성이다. 5[kg]과 10[kg]인 경우에는 지령값에 비교적 잘 추종하고 있으나, 부하가 증가할수록 그 현상이 왜곡되고 있다. 추력의 경우 증가된 부하조건에서는 정격값에 도달하는 시간이 짧은 반면 운행 중 추력의 급격한 변화를 보이고 있다.

5. 결 론

직선형 유도전동기의 동특성 해석은 시스템의 동작범위와 안정성을 위하여 시스템의 제작시 반드시 수행되어야 한다. 이에 본 논문에서는 직선형 유도 전동기 해석모델을 제시하여, 전자기 특성해석을 통한 등가 회로정수를 산출하였고, 직선형 유도전동기의 특성식을 좌표변환기법을 통해 d-q좌표계로 변환하여 동특성 수학적 모델링을 수행하였다. 또한, 일정한 V/F의 비에 의한 동특성 시뮬레이션을 수행하여 부하조건에 따른 직선형 유도전동기의 속도와 추력 특성을 해석하였다.

〈참고 문헌〉

- [1] 장석명, 유대준, 한형석, "직선형 유도전동기의 동특성 시뮬레이션을 통한 저크의 특성해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부문회 추계학술대회 논문집, pp. 7-9, 2007.
- [2] 장석명, 권정기, 조한욱, 유대준, 이성호, "새로운 등가회로정수 산출법에 의한 편축식 직선형 유도전동기의 동특성 해석" 대한전기학회 학계학술대회 논문집, pp. 1079-1081, 2004.