

SLIM의 과도특성

임달호, 장석명, 김규탁, 윤상백, 박승찬, 안지영

한양대학교, * 충남대학교, ** 창원대학교

The transient performance of a SLIM

Im Dal-Ho, Jang Seok-Myeong, Kim Gyu-Tak,

Yoon Sang-Baek, Park Seung-Chan, An Ji-Young

Hanyang University,
* Chungnam National University,
** Changwon National University

Abstract

This paper treats of the transient electrical/mechanical performance characteristics of a Linear Induction Motor(LIM) by means of complex space vector and equivalent circuit theory. Consequently, the methods for the decision of optimum design parameter in power system and control unit is presented.

1. 서론

시스템을 구동하는 장치로 전동기를 사용하는 경우, 기동 및 정지는 물론 속도와 위치의 가변동에 의한 과도상태하에서의 운전이 필수적이다. 따라서 전력공급 및 제어회로의 구성 및 설계, 시스템의 보호방안을 수립하기 위해서는 과도특성의 정밀한 해석이 기본이 되어야 한다. 그런데 과도상태의 특성을 해석하기 위해서는 우선적으로 등가회로를 작성해야 만 한다. 본 장에서는 Lyon, Slemon, Lipo, Novotny교수가 공간벡터의 개념을 이용하여 회전형전동기의 과도특성을 해석한 경우를 참고하여 직선형 유도전동기(LIM)의 과도특성 해석법을 수립하고 그 결과를 제시하기로 한다. 따라서 본 연구에서 제안된 해석방법을 더욱 정밀하게 발전시키면, 전자장 이론을 정밀하게 적용하여 실제현상에 근접하는 회로정수값의 결정 및 등가회로의 작성과 이를 통한 최적설계는 물론 전기적/기계적 정상 및 과도상태의 운전 특성의 해석에 의하여 속도 및 위치의 정밀제어법, 제어회로의 구성등에 중요한 참고자료를 제공할 수있을 것으로 판단된다.

2. LIM의 과도특성

2-1 과도상태 해석 모델

2-1-1. 1차측 전류

LIM의 1차측전류는 정현적분포를 하고 있으므로 해석을 위한 모델을 그림 2-1과 같이 정한다. 이때 a상의 실제권선수 N_{as} 에 대한 도체의 밀도분포는 식(2-1)로 된다.

$$n_a = \frac{N_{as}}{2} \sin \frac{\pi}{\tau} X \quad (2-1)$$

또한 b상과 c상은 각각 전기적으로 $(2/3)\pi$, $(4/3)\pi$ 의 위상차로 대칭 3상분포를 하고 있다. 이때 a상의 전류 i_a 에 의해 1차측과 2차측 사이의 공극에는 식 (2-2)와 같은 기자력이 정현적으로 분포하게 된다.

$$F_{ax} = \frac{N_{as} i_a}{2} \cos \frac{\pi}{\tau} X \quad (2-2)$$

이때 전류 i_a 및 기자력 F_{ax} 를 공간벡터개념에 의하여 표시하고, 그림 (2-1)에서와 같이 a상축에 일치시키면 식 (2-2)는 식 (2-3)과 같이 표현된다.

$$\vec{F}_a = \frac{N_{as}}{2} \vec{i}_a \quad (2-3)$$

전류벡터 \vec{i}_a 는 권선a축에 나란하며, 크기는 a권선의 전류 i_a 의 순시치와 같도록 취한 공간벡터인데 대칭 3상기의 해석에 이를 이용하면 매우 편리하다.

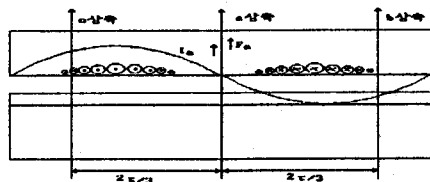


그림 2-1 1차측 전류도체밀도 분포

Fig.2-1 The distribution of primary ampere conductor density

마찬가지로 b상전류와 c상전류를 이들 권선에 나란하고 순시값을 크기로 하여 공간벡터로 표현하면 식 (2-4), (2-5)와 같다.

$$\vec{i}_b = \alpha^2 \vec{i}_b \quad (2-4)$$

$$\vec{i}_c = \alpha \vec{i}_c \quad (2-5)$$

여기서 $\alpha = e^{j(2\pi/3)}$ 이다.

대칭3상권선 전체의 순시전류의 합성을 \vec{i} 벡터라 하면 식(2-6)과 같이 표현된다

$$\vec{i} = \vec{i}_a + \vec{i}_b + \vec{i}_c \quad (2-6)$$

이들 공간벡터의 각각의 관계는 그림 2.2b와 같다. 또한 1차측은 대칭3상이므로 3상전류의 합은 0이므로 식(2-7)과 같다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2-7)$$

따라서 임의의 순간에 각 상전류의 합성벡터는 식(2-6)에 의하여 식(2-8)과 같이 된다.

$$\vec{i} = \frac{3}{2}i_a + j \frac{\sqrt{3}}{2}(i_b - i_c) \quad (2-8)$$

이 관계를 벡터도로 그린 것이 그림(2-2b)와 같다. 또한 식(2-8)로부터 a상의 전류는 식(2-9)와 같이 구할 수 있으며, 마찬가지로 b, c상의 전류도 전체전류의 공간벡터로부터 식(3-10), (2-11)과 같이 구할 수 있다.

$$i_a = \left(\frac{2}{3}\right)\text{Re}(\vec{i}) \quad (2-9)$$

$$\vec{i}_b = \left(\frac{2}{3}\right)\text{Re}(\alpha \vec{i}) \quad (2-10)$$

$$\vec{i}_c = \left(\frac{2}{3}\right)\text{Re}(\alpha^2 \vec{i}) \quad (2-11)$$

정상상태에서 정현적으로 운전되고 있는 경우 전류공간의 크기로서, 한 상의 전류의 최대값을 사용하면 편리하다. 또한 1차측의 전류벡터 \vec{i}_a 는 식(2-12), (2-13)의 관계에 의하여 그림(2-2c)에서와 같이 표시된다. 즉

$$i_a = i_a + i_b + i_c \quad (2-12)$$

라 하면 공간벡터표현은

$$\begin{aligned} \vec{i}_a &= \left(\frac{2}{3}\right)\vec{i} \\ &= i_a + j \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2i_b) \end{aligned} \quad (2-13)$$

따라서 각 상의 전류는 1차측전류의 공간벡터로부터, a, b, c상의 축상에 전류벡터 \vec{i}_a 의 사영에 의하여 각 상의 순시값을 식(2-2c)에서와 같이 표시된다. 즉

$$i_a = i_a + i_b + i_c \quad (2-12)$$

라 하면 공간벡터표현은

$$\begin{aligned} \vec{i}_a &= \left(\frac{2}{3}\right)\vec{i} \\ &= i_a + j \frac{1}{\sqrt{3}}(i_a + 2i_b) \end{aligned} \quad (2-13)$$

따라서 각 상의 전류는 1차측전류의 공간벡터로부터, a, b, c상의 축상에 전류벡터 \vec{i}_a 의 사영에 의하여 각 상의 순시값을 식(2-14)와 같이 구할 수 있다.

$$i_a = \text{Re}[\vec{i}_a], \quad i_b = \text{Re}[\alpha^2 \vec{i}_a], \quad i_c = \text{Re}[\alpha \vec{i}_a] \quad (2-14)$$

2-1-2. 2차측 전류 벡터

직선형 유도전동기는 2차측이 알루미늄판 만으로 구성되어 있기 때문에 실제의 권선은 없다. 따라서 2차측에 N_m 의 등가권선

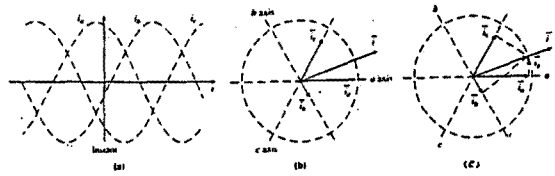


그림 2-2 특정 순간의 3상전류

Fig. 2-2 a set of phase currents in a Particular instant

이 분포하며 A상의 권선 n_a 로 전류 i_a 가 흐르고 있다고 가상하여 취급하면 아래와 같이 표시 할 수 있다. 즉

$$n_a = \frac{N_{ro}}{2} \sin \frac{\pi}{\tau} x \quad (2-15)$$

일반적으로 유도전동기의 등가회로작성 및 해석에서 2차측의 회로정수를 1차측으로 환산하여 취급하는 것이 편리하다. 그런데 권선 N_{ro} 가 분포되어 있는 1차측으로 환산한 등가권선 n_a' 에 전류 i_a' 가 흐르는 것으로 취급하여 아래와 같이 환산한다.

$$n_a' = \frac{N_{ro}}{N_{ro}} n_a \quad (2-16)$$

$$i_a' = \frac{N_{ro}}{N_{ro}} i_a \quad (2-17)$$

즉 LIM의 2차측이 실제의 권선이 없는 알루미늄판으로 2차와 전류를 돌리고 있는 등가적인 권선이 있는 것으로 가정하여 2차측 전류 벡터를 표현한다. 즉 2차측을 그림 2-3과 같이 정의하고 2차측 전류를 공간 벡터로 나타내면 다음식(2-18), (2-19)와 같다.

$$\begin{aligned} \vec{i}_r' &= \frac{2}{3}(\vec{i}_a' + \vec{i}_b' + \vec{i}_c') \\ &= \frac{2}{3}(i_a' + \alpha i_b' + \alpha^2 i_c') \end{aligned} \quad (2-18)$$

$$i_r' = i_r' \exp(j\beta) \quad (2-19)$$

2-1-3. 자화전류 벡터

1차측의 전류벡터 \vec{i}_a 와 2차측의 전류벡터 \vec{i}_r' 에 의하여 공극자속이 발생되므로 자화전류의 공간벡터표시는 이 두전류의 합성된 값과 같으므로 식(2-16)으로 표현된다.

$$\vec{i}_m = \vec{i}_a + \vec{i}_r' \quad (2-20)$$

이 자화전류에 의하여 자속이 발생하므로

$$\vec{\lambda}_m = L_m \vec{i}_m \quad \text{wb} \quad (2-21)$$

여기서

$$L_m = \frac{3\pi}{2p^2} N_{ro}^2 \frac{\mu_0 l}{g_a} \quad \text{H} \quad (2-22)$$

2-2 과도상태 특성해석을 위한 등가회로

2.2.1 등가회로의 설정

과도상태의 해석을 위해서는 물리적인 상태를 충분히 표현 할

수 있는 등가회로의 작성이 우선적이다. 이를 위하여 쇄고자속과 인덕턴스, 전류에 관한 상호관계를 찾아야 만 한다. 즉 1차측과 2차측의 쇄고자속을 λ_s, λ_r 이라 하면 인덕턴스와 전류에 의한 공간벡터 표현은 식(2-22)와 (2-23)과 같다.

$$\vec{\lambda}_s = L_{1s}\vec{i}_s + L_{1r}\vec{i}_r$$

$$= (L_{1s} + L_{1r})\vec{i}_s + L_{1r}\vec{i}_r \quad (2-22)$$

$$\vec{\lambda}_r = L_{2s}\vec{i}_s + L_{2r}\vec{i}_r$$

$$= L_{2s}(\vec{i}_s + \vec{i}_r) + L_{2r}\vec{i}_r$$

$$= L_{2s}\vec{i}_s + (L_{2s} + L_{2r})\vec{i}_r \quad (2-23)$$

식(2-22), (2-23)의 쇄고자속과 인덕턴스, 전류의 관계를 등가회로로 그리면 그림(2-3)과 같다.

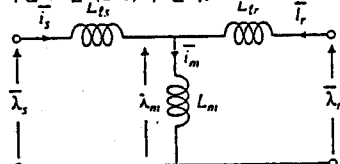


그림 2-3 쇄고자속-전류모델에 의한 등가회로
Fig 2-3 The equivalent with a flux linkage-current model

또한 1차측의 저항을 R_s 라고 하면 1차측의 전압방정식은 식(2-24)와 같이 주어진다.

$$\vec{V}_s = R_s\vec{i}_s + P\vec{\lambda}_s \quad (2-24)$$

여기서 $P = d/dt$

2차측의 리액션플레이트인 알루미늄판의 등가 A전선의 저항을 R_r 라 할 때 1차측전선으로 환산한 등가저항은 식(2-25)와 같다.

$$R_r = \left(\frac{N_{ms}}{N_{re}}\right)^2 R_A \quad [\Omega] \quad (2-25)$$

따라서 2차측의 등가전압벡터는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{V}_r = R_r\vec{i}_r + p\vec{\lambda}_r \quad [V] \quad (2-26)$$

또한 2차측의 저항을 R_r 이라 하면 2차측 전압방정식은 식(2-27)과 같다.

$$\vec{V}_r = \vec{V}_r \exp(j\beta)$$

$$= R_r\vec{i}_r + P\vec{\lambda}_r - jV_0\vec{\lambda}_r \quad (2-27)$$

여기서 $V_0 = P X$; 속도, X 는 움직인 거리

마지막 항은 속도기전력이므로

$$\vec{e}_0 = -jV_0\vec{\lambda}_r \quad [V] \quad (2-28)$$

따라서 1차측과 2차측의 전압방정식(2-24), (2-27)은 시간적인 변화를 포함하므로 과도상태를 해석할 수 있는 기본식이 된다. 이를 기본으로부터 과도등가회로를 작성하면 그림(2-4)와 같이 되는 데 이로부터 과도특성을 해석하기로 한다.

2.2.2. 변형 등가회로

해석을 용이하게 하기 위하여 과도등가회로를 간이화 시키기로 한다. 즉 그림(2-4)는 회로중에 인덕턴스가 3개가 되어 취급이

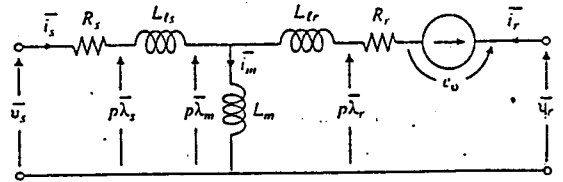


그림 2-4 편축식 직선형 유도전동기의 과도등가회로

Fig.2-4 Transient equivalent circuit of a SLIM

복잡해지므로 그림(2-5)와 같이 인덕턴스가 2개인 회로로 변환한다.

즉 새로운 변수인 $\vec{\lambda}_R$ 과 \vec{i}_R 은 식(2-29)와 (2-30)과 같이 계수 γ 에 의해 변환된다.

$$\vec{\lambda}_R = \gamma \vec{\lambda}_s \quad (2-29)$$

$$\vec{i}_R = \frac{\vec{i}_r}{\gamma} \quad (2-30)$$

식(2-22)와 식(2-23)의 쇄고자속은 식(2-31), (2-32)와 같이 변환된다.

$$\vec{\lambda}_s = (L_{ms} + L_{1s})\vec{i}_s + \gamma L_{1r}\vec{i}_R \quad (2-31)$$

$$\vec{\lambda}_R = \gamma L_{1s}\vec{i}_s + \gamma^2(L_{2s} + L_{2r})\vec{i}_R \quad (2-32)$$

$$\text{여기서 } \gamma = \frac{L_{1s} + L_{1r}}{L_m} = \frac{L_m}{L_m}$$

따라서 식(2-31), (2-32)는 식(2-33), (2-34)와 같이 변환된다.

$$\vec{\lambda}_s = L_{1s}\vec{i}_s + L_{1r}\vec{i}_R \quad (2-33)$$

$$\vec{\lambda}_R = L_{1s}\vec{i}_s + (L_L + L_m)\vec{i}_R \quad (2-34)$$

또한 전체 유효 누설인덕턴스는 식(2-35)와 같다.

$$L_L = \gamma L_{1s} + \gamma^2 L_{1r} \quad (2-35)$$

時變을 고려하여 과도상태를 해석 할 수 있는 전압방정식은 식(2-36), 식(2-37)과 같이 쓸 수 있다.

$$\vec{V}_s = R_s\vec{i}_s + p\vec{\lambda}_s$$

$$= R_s\vec{i}_s + pL_{1s}\vec{i}_s + pL_{1r}\vec{i}_R \quad (2-36)$$

$$\vec{V}_R = R_r\vec{i}_R + p\vec{\lambda}_R - jV_1\vec{\lambda}_R$$

$$= R_r\vec{i}_R + (p - j\omega_0) [L_{1s}\vec{i}_s + (L_L + L_m)\vec{i}_R] \quad (2-37)$$

R_R 과 R_r 과, 전압 \vec{e}_0 는 전압변수 \vec{e}_0 관계는 식(2-38), 식(2-39)와 같다.

$$R_R = \gamma^2 R_r \quad (2-38)$$

$$\vec{e}_0 = -jV_1\vec{\lambda}_R = \gamma \vec{e}_0 \quad (2-39)$$

또한 전압 \vec{V}_R 는 식(2-40)으로 변화된다.

$$\vec{V}_R = \gamma \vec{V}_r \quad [V] \quad (2-40)$$

위와 같은 변환된 정수들에 의하여 그림 2-4의 등가회로를 변형 하면 그림 2-5와 같이 인덕턴스성분이 2개로 줄어들어 간이화 된다.

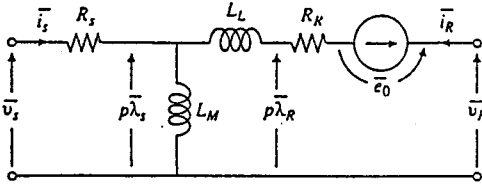


그림 2-5 변형 등가회로

Fig. 2-5 Alternate equivalent circuit

2-3 과도상태 특성방정식

그림 2-5의 등가회로로부터 순간 입력전류는 식(2-41)과 같이 된다.

$$P_i = \left(\frac{3}{2}\right) \text{Re}[\vec{V}_s \cdot \vec{i}_s] \\ = \left(\frac{3}{2}\right) \text{Re} \left[\left(\frac{3}{2}\right) (V_s + \alpha^2 V_b + \alpha V_c) \left(\frac{3}{2}\right) (i_s + \alpha i_b + \alpha i_c) \right] \\ = V_s i_s + V_b i_b + V_c i_c \quad (2-41)$$

또한 1차측 권선에서의 손실전력은 식(2-42)와 같다.

$$P_{R1} = \left(\frac{3}{2}\right) \text{Re}[\vec{R}_1 \vec{i}_s \cdot \vec{i}_s] = \left(\frac{3}{2}\right) R_1 i_s^2 \quad (2-42)$$

LIM의 출력은 다음과 같다.

$$P_r = -\left(\frac{3}{2}\right) \text{Re}[\vec{V}_R \vec{i}_s] \quad [\text{W}] \quad (2-43)$$

입력된 전기에너지가 추력으로 출력되는 에너지 P_0 는 다음과 같다.

$$P_0 = \left(\frac{3}{2}\right) \text{Re}[\vec{e}_0 \vec{i}_R] \\ = -\left(\frac{3}{2}\right) V_1 \text{Im}[\lambda_R \vec{i}_R] \quad [\text{W}] \quad (2-44)$$

따라서 임의 순간의 힘 F는 다음과 같다.

$$F = \frac{P_0}{V} = \frac{P}{2 V_0} = \frac{3P}{4} \text{Im}[\lambda_R \vec{i}_R] \quad (2-45)$$

또한 LIM이 중량 m인 차량부하를 추진하기 위한 요구추력 F_L 로 운전되는 경우의 역학방정식은 식(2-46)과 같다.

$$F = m \frac{dv}{dt} + F_L \quad (2-46)$$

LIM의 등가회로인 그림 2-5의 전압방정식(2-36), 식(2-37)과, 발생추력과 부하추력의 관계식인 식(2-45), 식(2-46), 쇄고자속과 전류, 인덕턴스의 관계식인 (2-31), (2-32)에 의하여 아래와 같이 時變을 고려할 수 있는 과도상태 특성방정식을 얻을 수 있다. 식(2-37)에서 직선형 유도전동기는 2차측이 알미늄판으로

구성되므로 2차측이 단락되어 있으므로 \vec{V}_R 은 \vec{V}_s 이 됨을 고려한 것이 식(2-48)이 된다. 이들 특성방정식을 연립방정식으로 풀면 직선형 유도전동기의 과도특성을 해석할 수 있다.

$$d\vec{\lambda}_R/dt = \vec{V}_s - R_s \vec{i}_s \quad (2-47)$$

$$d\vec{\lambda}_R/dt = jV_1 \lambda_R \vec{i}_R - R_R \vec{i}_R \quad (2-48)$$

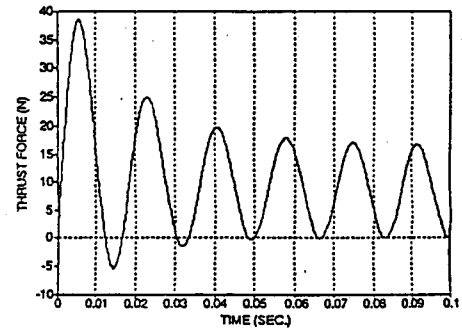
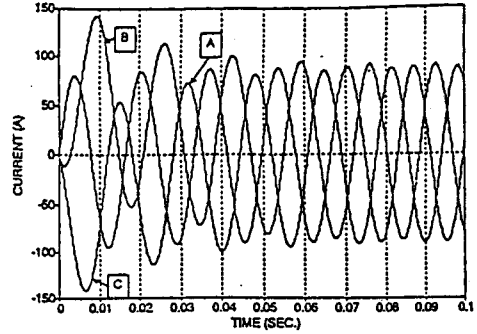
$$dv/dt = -\left(\frac{1}{m}\right) \left[-\left(\frac{3P}{4}\right) \text{Im}[\lambda_R \vec{i}_R] - F_L \right] \quad (2-49)$$

$$\vec{i}_R = \frac{(\vec{\lambda}_R - \vec{\lambda}_s)}{L_L} \quad (2-50)$$

$$\vec{i}_s = \frac{\lambda_s}{L_M} - \vec{i}_R \quad (2-51)$$

3.2 과도특성

미분방정식으로 구성되는 식(2.47)로부터 식(2.51)까지의 과도 특성식은 Runge-Kutta법에 의해 처리하였다.



제4장 결론

본 연구에서는 편축식 직선형 유도전동기(SLIM)의 추력, 수직력, 역률, 전류의 정상상태 특성을 해석하기 위하여, 전자장해법에 의한 결과를 참고하여 등가회로정수를 산정하였으며 이를 토대로 하여 등가회로를 작성하였다. 또한 Lyon의 복소수에 의한 공간벡터개념을 이용하여 등가회로를 작성하고 특성방정식을 유도함으로써 직선형 유도전동기의 과도특성을 해석하기 위한 기본을 확립하였다. 이러한 수법은 회전형 전동기의 경우는 응용된 경우가 있으나 LIM의 경우에 적용된 경우는 거의 없다. 본 논문에서 다른 해석기법에 의하면 LIM의 정상 및 과도특성의 정밀한 해석이 가능할 것으로 판단된다. 따라서 직선형 유도전동기의 최적설계, 성능평가, 전선장치의 효율적인 설계, 최적제어 등의 기본을 확립할 수 있을 것이다.

REFERENCE

- [1] GORDON K. SLEMM, "ELECTRIC MACHINES AND DRIVE" BOOK ADDISON-WILEY PUBLISHING CO. 1992.
- [2] D.W.NOVOVOTNY, T.A.LIPO"COMPLEX VECTOR ANALYSIS OF AC MACHINES" 1991
- [3] 野中作太郎, "兩側式 リニアモータ等價回路定數と特性計算式", JIEE, 45-44, 1970