정적 및 동적 단부효과를 고려한 선형유도전동기의 특성 해석

°김대경, 권병일, 우경일
한양대학교 대학원 전기공학과

Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor considering Static and Dynamic End Effect

°Kim Dae-Kyong, Kwon Byung-Il, Woo Kyung-Il
Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.

Abstract - Linear induction motors have static and dynamic end effects due to its finite core length, so that per-phase impedances are asymmetric and the air gap flux distribution is distorted. Because of these points the d-q equivalent circuit model considering both end effects has not been exactly completed. So this paper proposes a characteristic analysis method considering both static and dynamic end effect of the LIM. This method is to utilize asymmetric d-q equivalent circuit model with dynamic end effect coefficient. As a result, it is shown that the simulation results have a good agreement with experimental ones.

1. 서 론

구조가 단순하고, 유지보수가 용이한 선형 유도전동기(Linear Induction Motor : LIM)는 동력 변환 장치 없이 직선 추진력을 직접 얻을 수 있으므로 직선운동이 필요한 공장자동화 서보 시스템에서 그 용도가 점차 증가되고 있다.

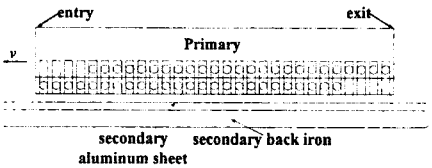
원통형 유도전동기(Rotary Induction Motor : RIM)는 매극마다 전자기적으로 대칭적인 구조를 가지므로 d-q 등가회로를 쉽게 구성할 수 있다. 그러나, LIM은 유한한 길이를 갖는 1차측의 구조에 의하여 각 상의 임피던스가 불평형하게 되는 정적 단부효과(static end effect)와 1차측과 2차측이 상대적 운동을 할 때에 공극 자속 분포가 왜곡되고 2차측 회로가 비대칭적으로 되는 동적 단부 효과(dynamic end effect)의 영향 때문에 d-q 등가회로를 정확히 모델링하기는 힘들다. LIM에 대한 기존의 d-q 등가회로 모델로서는 2차측 회로의 대칭성을 고려한 pole-by-pole d-q 등가회로[1], 구속시험 및 등가 무부하 시험에 의한 비대칭 d-q 등가회로[2], LIM의 속도항을 고려한 d-q등가회로[3]등이 있다. 그러나, 정적 및 동적 단부효과의 영향을 모두 고려한 LIM의 d-q 등가회로 모델에 관한 논문은 아직 발표되지 않고 있다.

따라서, 본 논문에서는 LIM의 정적 및 동적 단부효과를 고려하는 d-q 등가회로를 제시하며, 벡터제어시의 특성 해석 및 실험을 통하여 제안한 방법의 타당성을 입증한다.

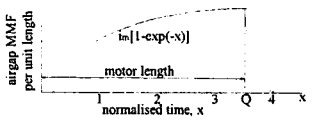
2. LIM의 특성해석

2.1 LIM

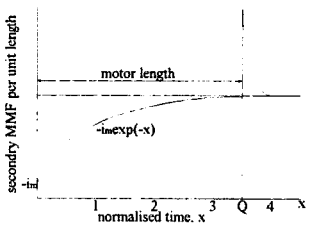
그림 1은 LIM의 구조와 기자력 분포를 나타낸다. 그림 1(a)는 LIM의 구조이며 RIM를 축 방향으로 잘라서 펼쳐 놓은 형태이므로 RIM과 달리 양단이 존재함에 따른 자기회로의 불평형이 발생하여 그 회로정수는 각 상에 따라 서로 다르다. 자속은 입구단의 2차측을 통과해서 1차측의 출구단에서 사라진다. 2차측의 알루미늄



(a) LIM의구조



(b) 공극의 기자력



(c) 2차측 기자력
그림 1 LIM의 구조와 기자력 분포

시트는 자속이 갑자기 변화하는 것을 막고, 단지 점진적으로 증가하도록 하거나 공극에서 자속 밀도를 감소하도록 한다. 이것은 자속의 변화가 2차측에 와전류를 발생시키기 때문이다. 그림 1(b)는 자속을 발생시키는 자화전류의 분포를 나타내고, 그림 1(c)는 2차측의 와전류 분포를 나타내고 있다. 따라서 LIM의 보다 정확한 d-q 등가회로를 얻기 위해서는 공극자속분포에서 입구단과 출구단에 나타나는 효과를 정량화할 필요와 비대칭 회로정수를 구할 필요가 있다.

2.1.1 동적 단부효과의 정량화[3][4]

와전류에 의한 평균 공극자속의 감소를 자화인덕턴스의 감소로 나타내면,

$$M' = M \cdot (1 - \frac{1 - e^{-Q}}{Q}) \tag{1}$$

$$Q = \frac{v \cdot T_v}{v \cdot T_r} = \frac{D \cdot R_r}{(M + L_{lr}) \cdot v} \tag{2}$$

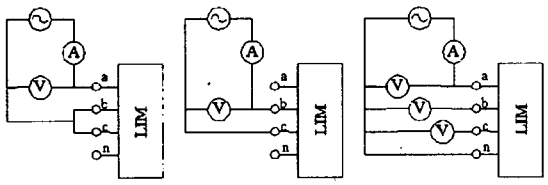
여기서 $T_v = D/v$, $T_r = L_r/R_r$는 시상수, D는 모터길이, v는 속도이다. 와전류에 의한 전력손실(power loss)로부터 직렬저항(series resistance) R_m을 계산한다.

$$R_m = R_r \cdot \frac{1-e^{-Q}}{Q} \quad (3)$$

여기서 R_r는 회전자 저항이다.

2.1.2 LIM의 비대칭 d-q 회로정수 산정[2][5]

비대칭 d-q 회로정수를 구하기 위해서 구속시험 및 등가무부하시험(이차측 도체를 제거하여 등가적으로 무부하상태를 만들어 행하는 시험)을 하였다. 그림 2는 비대칭 d-q 등가회로정수 산정을 위한 실험장치이며 표 1은 LIM의 제원과 실험으로 구해진 회로정수이다.



(a) d-axis (b) q-axis (c) a-axis

그림 2 비대칭 d-q 등가회로정수 산정을 위한 실험장치

표 1 LIM의 제원 및 회로정수

1차측 길이, 폭	325, 63 [mm]
극 수	4극
극 피치(τ)	66.6 [mm]
2차측 시트 두께	2 [mm] 알루미늄
2차측 Iron 두께	16 [mm]
공 극	3 [mm]
1차측저항(R_s)	4.2 [Ω]
2차측 d,q축저항(R_{dr},R_{qr})	11.424, 12.822 [Ω]
d,q축상호인덕턴스(M_d,M_q)	0.0633, 0.0568 [H]
d축1차측,2차측 자기인덕턴스(L_{ds},L_{dr})	0.0978, 0.0637 [H]
q축1차측,2차측 자기인덕턴스(L_{qs},L_{qr})	0.0867, 0.0602 [H]
유효모터길이(D)	288.6 [mm]

2.2 단부효과를 고려한 LIM의 d-q 등가회로

분리제어를 위해서 회전자의 모든 자속을 d축에 있다고 가정하면, d축 전류 i_{ds}는 자화전류 i_m과 같다. 그래서, [3]에서 제시한 등가회로를 LIM의 비대칭 등가회로의 d축에 사용하였다.

2.2.1 RIM의 d-q 등가회로 및 전압방정식

그림 3은 회전형 유도전동기의 고정좌표축의 d-q 등가회로이고, 그 전압방정식을 표현하면 다음과 같다.

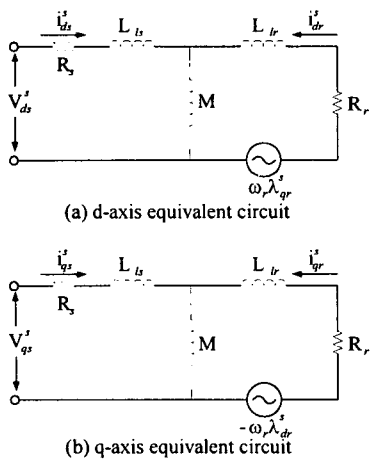


그림 3 고정좌표축의 RIM d-q 등가회로

$$V^s_{ds} = R_s i^s_{ds} + p\lambda^s_{ds} \quad (4)$$

$$V^s_{qs} = R_s i^s_{qs} + p\lambda^s_{qs} \quad (5)$$

$$0 = R_r + p\lambda^s_{dr} + \omega_r\lambda^s_{qr} \quad (6)$$

$$0 = R_r + p\lambda^s_{qr} - \omega_r\lambda^s_{dr} \quad (7)$$

$$\lambda^s_{ds} = L_{ls} i^s_{ds} + M(i^s_{ds} + i^s_{dr}) \quad (8)$$

$$\lambda^s_{qs} = L_{ls} i^s_{qs} + M(i^s_{qs} + i^s_{qr}) \quad (9)$$

$$\lambda^s_{dr} = L_{lr} i^s_{dr} + M(i^s_{dr} + i^s_{ds}) \quad (10)$$

$$\lambda^s_{qr} = L_{lr} i^s_{qr} + M(i^s_{qr} + i^s_{qs}) \quad (11)$$

여기서, $p = \frac{d}{dt}$, $L_{ls} = L_s - M$, $L_{lr} = L_r - M$이다.

2.2.2 LIM의 d-q 등가회로 및 전압방정식

그림 4는 선형 유도전동기의 속도 및 비대칭 정수를 고려한 고정좌표축의 d-q 등가회로이고, 그 전압방정식을 표현하면 다음과 같다.

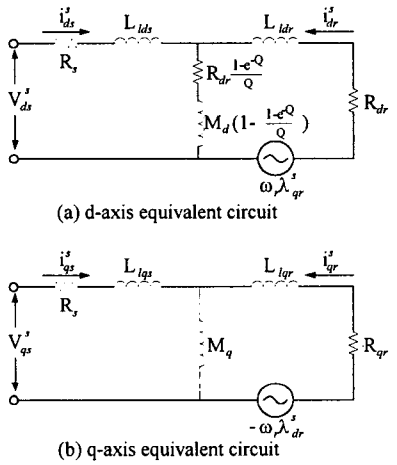


그림 4 고정자표축의 LIM d-q 등가회로

$$V^s_{ds} = R_s i^s_{ds} + R_{dr}(\frac{1-e^{-Q}}{Q})(i^s_{ds} + i^s_{dr}) + p\lambda^s_{ds} \quad (12)$$

$$V^s_{qs} = R_s i^s_{qs} + p\lambda^s_{qs} \quad (13)$$

$$0 = R_{dr}[i^s_{dr} + (\frac{1-e^{-Q}}{Q})(i^s_{ds} + i^s_{dr})] + p\lambda^s_{dr} + \omega_r\lambda^s_{qr} \quad (14)$$

$$0 = R_{qr} + p\lambda^s_{qr} - \omega_r\lambda^s_{dr} \quad (15)$$

$$\lambda^s_{ds} = L_{lds} i^s_{ds} + M_d[1-(\frac{1-e^{-Q}}{Q})](i^s_{ds} + i^s_{dr}) \quad (16)$$

$$\lambda^s_{qs} = L_{lqs} i^s_{qs} + M_q(i^s_{qs} + i^s_{qr}) \quad (17)$$

$$\lambda^s_{dr} = L_{ldr} i^s_{dr} + M_d[1-(\frac{1-e^{-Q}}{Q})](i^s_{dr} + i^s_{ds}) \quad (18)$$

$$\lambda^s_{qr} = L_{lqr} i^s_{qr} + M_q(i^s_{qr} + i^s_{qs}) \quad (19)$$

슬립주파수 가변제어에 있어서, 변환각의 수식은 다음과 같다.

$$\omega_e = \omega_{sl} + \omega_r \ , \ \theta_e = \int \omega_e \cdot dt \quad (20)$$

여기서, ω_e는 전원 각속도이며, ω_r는 이동자의 전기 각속도이며, 다음식으로부터 구한다.

$$\omega_r = (\tau / \pi) \cdot v_r \quad (21)$$

여기서, v_r은 선형적인 속도이며 τ는 극간격이다.
그리고, ω_{sl}은 슬립 각속도이며, 수식은 다음과 같다.

$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}^e}{T_r \cdot i_{ds}^e} = \left[\frac{(R_{qr}+R_{dr})/2}{(L_{qr}+L_{dr})/2}\right] \cdot \frac{i_{qs}^e}{i_{ds}^e} \quad (22)$$

그리고 추력에 관한 수식은 다음과 같다.

$$F = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}(\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e) \quad (23)$$

식(23)으로부터 구한 추력과 식(24)의 운동방정식을 이용하여 이동자의 매순간마다의 속도를 구할 수 있다.

$$F = M_g \cdot \frac{dv_r}{dt} + F_L \quad (24)$$

여기서, F : 발생추력, F_L : 부하추력
M_g : 가동자 질량, v_r : 이동속도

2.3 시뮬레이션과 실험의 결과

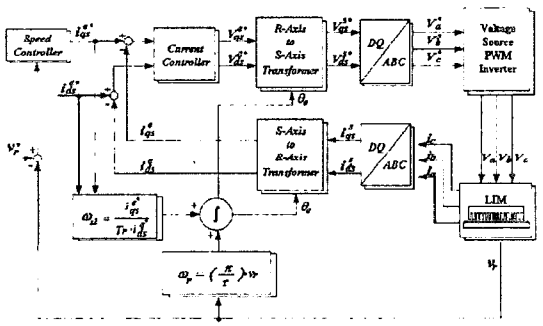
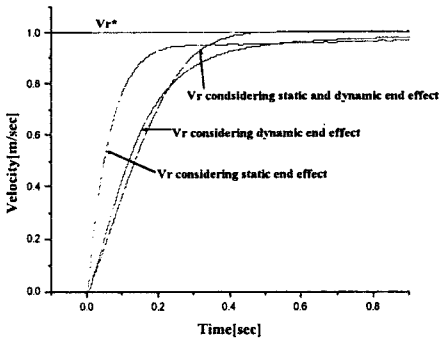


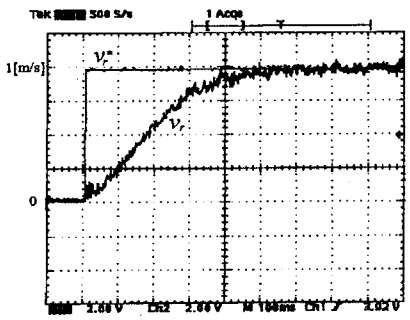
그림 5 속도제어시 벡터제어의 기본 구성도

그림 5는 속도제어시 벡터제어의 기본 구성도를 나타낸다. 기준속도 v_r^*는 1.0[m/sec]로 하였으며 가동자의 질량 M_g는 34[kg], 부하 추력 F_L은 30[N]으로 하였다. 실험을 위해 실시간연산속도를 가지는 T.I.사의 TMS320C31를 사용하였고, 전력변환장치로는 IGBT(SEMIKRON사의 SKM22GB121D)를 사용하였다. 측정된 2상의 전류는 A/D 컨버터(MAXIM사의 MAX122BENG)를 통해서 DSP에서 계산되어진 다음, d-q 축으로 변환된다. 실제속도를 측정하기 위해서 5[μm/pulse]의 분해능을 가지는 Futaba Linear Scale(SMG05A)를 사용하였다.

그림 6은 기준 속도를 1.0[m/sec]로 하였을 경우이며, (a)는 정적 및 동적 단부효과를 고려했을 경우의 속도 응답과 정적 단부효과와 동적 단부효과를 각각 고려했을 경우의 속도 응답과 비교하였다. (b)는 실험에 의한 속도 응답 곡선을 나타낸 것인데, 시뮬레이션의 정적 및 동적 단부효과를 고려했을 경우의 속도 응답과 일치함을 알 수 있다.



(a) 시뮬레이션



(b) 실험

그림 6 속도제어시 속도 응답

3. 결 론

본 논문에서는 선형 유도전동기의 정적 및 동적 단부효과를 고려하는 등가회로 해석을 위하여, 동적 단부효과 계수를 갖는 비대칭 d-q 등가 회로 모델을 제시하였다. 제시한 방법을 이용하여 벡터 제어시의 특성 시뮬레이션을 하였으며, 계산값이 실험값에 비교적 잘 일치함을 보임으로써 제안한 방법의 타당성을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] T. A. Lipo, T. A. Nondhl, "Pole-by-Pole d-q model of a linear induction machine", IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-98, No.2, March/April, 1979.

[2] H. Sugimoto, M. Tomoe, "A Vector Control Method of a Linear Induction Motor with Asymmetrical Constants and its Characteristics", T. IEE Janpan, Vol. 114-D, pp.17-23, 1994.

[3] J. Duncan and C. Eng., "Linear Induction Motor-Equivalent-Circuit Model", Proc. IEE, Vol. 130, Pt. B, No. 1, pp. 51-57, 1983.

[4] Jeong-hyoun Sung, Kwanghee Nam, "A New Approach to Vector Control for a Linear Induction Motor Considering End Effects", IEEE IAS annual meeting, Vol. IAS-99, pp.2284-2289, 1999.

[5] 권병일, 우경일, 이중호, "유한요소법에 의한 선형 유도전동기의 벡터제어 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 46권, 7호, pp.1016-1021, 1997