

STATOR TAPPED COIL을 이용한 편축식 선형유도전동기의 직접벡터제어

임 달 호 권 병 일 김 창 업 윤 호^o 임 형 빈
한양 대학교 전기공학과

Direct Vector Control of SLIM using STATOR TAPPED COIL

Im Dal-Ho, Kwon Byung-Il, Kim Chang-Up, Yun Ho^o, Im Hyung-Bin
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT :

This paper describes a robust flux sensing scheme which utilizes the windings of the machine itself to implement field orientation control of SLIM (Single-sided Linear Induction Motor). By subtracting the voltage across adjacent motor coils of the same phase which are named STATOR TAPPED COIL, a flux signal is obtained which is insensible to stator resistor drop at a low speed that exerts a bad influence on field orientation. The method using STATOR TAPPED COIL has been implemented at SLIM in our laboratory, and experimental results are being scrutinized.

1. 서론

벡터제어는, 토오크분 전류와 자속분 전류를 독립적으로 제어 하는 것으로, 자속검출을 통한 직접 벡터제어와 전압, 전류, 속도등으로 부터 자속을 연산하는 간접 벡터제어로 대별할 수 있다.

간접 벡터제어는 슬립주파수를 통해 1차전류의 위상과 크기를 순시적으로 연산하는 방법이다. 이 때 토오크와 직접 관련이 있는 슬립주파수가 2차측 시정수와 직접 관련되기 때문에 2차 측 시정수의 값을 정확히 보정해야 할 필요가 있다.

직접 벡터제어는 검출한 순시 자속벡터를 기준좌표로 하여 제어하는 방법으로, 자속센서를 필요로 하지만, 2차저항 변동의 영향을 받지않고 다른 파라미터 변동에 대해서도 거의 영향을 받지 않는다. 그러나 구조상의 문제, 자속의 공간 고조파 성분, 저속에서의 문제점, 센서의 정도 및 센서리드선의 설치 등의 문제가 있어, 현재 대부분의 회전형 교류 전동기에는 자속 센서를 이용하는 경우가 드물다. 하지만 LIM의 경우는 공극이 회전기에 비해 상대적으로 크고 구조가 개방되어 있어 직접자 속 검출에 있어서의 구조상의 문제가 적다. 그러므로, 간편하고 高精度의 자속센서가 가능하고, 공간고조파 성분의 처리법이 확립되면 파라미터 변동의 영향이 적은 직접 자속검출에 의해 LIM의 고정도의 벡터제어를 실현할 수 있다.

본문에서는, 먼저 LIM의 벡터제어를 위한 모델링을 하고 동기좌표로의 변환을 위한 정보는 STATOR TAPPED COIL[1]과 12 bit A/D Converter로 전압차와 전류류 순시적으로 검출하여 얻는다. 본 논문에서의 STATOR TAPPED COIL은 모타자체의 코일을 이용하는 방법으로서 일반적인 센서보다 견고하고, 이웃하는 슬롯사이에서 유기는 전압차로부터 공극자속을 얻어낸다. 이러한 방법에 의하면 직접 자속검출에 있어서의 문제점인 저속에서의 일차저항의 영향에서 벗어날 수 있다.

2. 선형유도전동기의 벡터제어를 위한 모델링

모델은 단부효과와 수직력은 무시하고 가장자리효과는 집중 정수 형태로 고려하여 해석한다. 1차측과 2차측의 전압 방정식과 운동방정식을 공간 페이저[2]로 나타내기 위한 기준모델을 그림1에 나타낸다. 전체가 2극기인 LIM인 경우이고, 2차측이 이동자라고 생각할때 x_r 은 1차측 좌표축에 대해 2차측 좌표축이 앞선 거리이다.

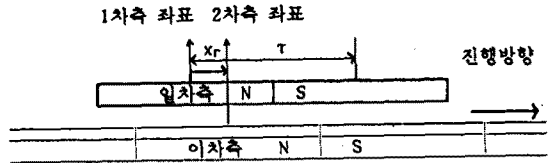


그림 1. SLIM의 해석모델

전압방정식과 운동방정식을 공간페이저로 나타내면 다음과 같다. 단, 표기법은 일반적인 전기계의 표기법에 의한다.

$$U_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{dV_s(t)}{dt} \quad (1)$$

$$0 = R_r i_r(t) + \frac{dV_r(t)}{dt} \quad (2)$$

$$m \frac{dv_r}{dt} = F_t(t) - F_l(t) - B v_r \quad (3)$$

$$V_r = \frac{dx_r}{dt} \quad (4)$$

(1)과(2)식을 전류식으로 다시 정리하면 다음과 같다.

$$R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + L_m \frac{d}{dt} (i_r(t) \exp(j \frac{\pi}{\tau} x_r)) = U_s(t)$$

$$R_r i_r(t) + L_r \frac{di_r(t)}{dt} + L_m \frac{d}{dt} (i_s(t) \exp(-j \frac{\pi}{\tau} x_r)) = 0$$

발생하는 기계적인 출력은 전부 추력으로 변환된다고 가정하면, 추력은 에너지 보존법칙에 근거하여 다음과 같이 유도한다.

$$P_{mech} = \frac{dW_{mech}}{dt} = F_t V_r = T_o W_{rm}$$

$$dW_{mech} = dW_o - dW_{loss} - dW_{field}$$

$$F_t V_r = - \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} V_r \Psi_r' \times i_r'$$

$$F_t = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m}{L_r} \Psi_r' \times i_s \quad (5)$$

(5)식 에서, 추력식을 회전자자속에 기준한 양으로 표현하면 다음과 같다.

$$F_t = (\frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m}{L_r}) (\Psi_r \phi_r(t) \times i_s \phi_r(t))$$

$$= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m^2}{L_r} i_{mr} x i_{sy} \quad (6)$$

윗식에서 $i_{mr}x$ 을 제어가능한 일차측 전류로 나타내기 위하여 회전자 자속에 기준한 회전자 방정식을 세우면 다음과 같다.

$$R_r i_{r\phi r}(t) + \frac{d\psi_{r\phi r}(t)}{dt} + j \frac{\pi}{\tau} (x_{mr} - x_r) \psi_{r\phi r}(t) = 0$$

윗 식의 허수부와 실수부를 각각 정리하면 다음과 같다.

$$T_r \frac{d|i_{mr}(t)|}{dt} + |i_{mr}(t)| = i_{sx}$$

$$\frac{\pi}{\tau} (V_{mr} - V_r) = \frac{i_{sy}}{T_r |i_{mr}(t)|}$$

빠른 추력응답을 얻기위해서 $|i_{mr}(t)| = \text{constant}$ 로 하면

$|i_{mr}(t)| = i_{sx}$ 가 되고, (6)식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} F_t &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m^2}{L_r} i_{sx} i_{sy} \\ &= \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \frac{L_m}{(1+\sigma_r)} i_{sx} i_{sy} \\ &= c i_{sy} \end{aligned}$$

그러므로, 윗식과 같은 高應答性을 얻기 위해서는 회전자자속의 순시적인 위치와 크기를 정확하게 아는 것은 대단히 중요하다.

3. STATOR TAPPED COIL에 의한 순시 자속검출과 직접벡터제어

3.1 STATOR TAPPED COIL 이론의 전개

해석대상으로 하는 모델은 매극매상 슬롯수가 2이고, 전철권인 소용량 LIM이다.

STATOR TAPPED COIL은 그림2에 나타내는 바와 같이 같은 상의 바로 이웃하는 슬롯내의 단자에서 인출한다.

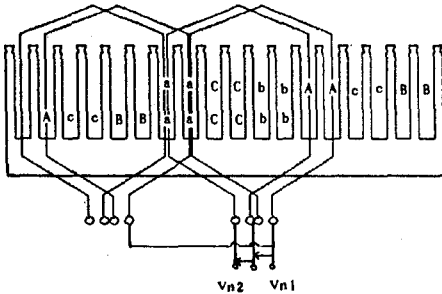


그림2. LIM의 STATOR TAPPED COIL

그림2에서의 v_{n1}, v_{n2} 는 다음과 같다.

$$v_{n1} = r_{11} i_{as} + \frac{d\lambda_{1s}}{dt} + \frac{d\lambda_{1r}}{dt}$$

$$v_{n2} = r_{11} i_{as} + \frac{d\lambda_{2s}}{dt} + \frac{d\lambda_{2r}}{dt}$$

$$v_{n2} - v_{n1} = \left(\frac{d\lambda_{2s}}{dt} - \frac{d\lambda_{1s}}{dt} \right) + \left(\frac{d\lambda_{2r}}{dt} - \frac{d\lambda_{1r}}{dt} \right)$$

윗식에서,

$$\lambda_{1s} = \lambda_{1ms} + \lambda_{11s}$$

$$\lambda_{2s} = \lambda_{2ms} + \lambda_{21s}$$

$$\lambda_{11s} = (L_{1T} + L_{1B}) i_{as} + L_{1T} b i_{as} + L_{1c} i_{as}$$

$$\lambda_{21s} = (L_{1T} + L_{1B}) i_{as} + L_{1T} b i_{as} + L_{1c} i_{as}$$

$$\lambda_{21s} - \lambda_{11s} = 0$$

$$\lambda_{1ms} = i_{as} L_{ms} \cos \epsilon + i_{bs} L_{ms} \cos(\epsilon - 120) + i_{cs} L_{ms} \cos(\epsilon + 120)$$

$$\lambda_{2ms} = i_{as} L_{ms} \cos(-\epsilon) + i_{bs} L_{ms} \cos(-\epsilon - 120) + i_{cs} L_{ms} \cos(-\epsilon + 120)$$

(8)

$$\lambda_{2ms} - \lambda_{1ms} = \sqrt{3} L_{ms} i_{ds} \sin \epsilon \quad (9)$$

동기적인 2상 회전자전류가 코일1과 코일2에 채교하는 전제자속은 다음과 같다.

$$\lambda_{1r} = L_{mr} i'_{qr} \cos(\theta_r + \epsilon) - L_{mr} i'_{dr} \sin(\theta_r + \epsilon)$$

$$\lambda_{2r} = L_{mr} i'_{qr} \cos(\theta_r - \epsilon) - L_{mr} i'_{dr} \sin(\theta_r - \epsilon)$$

$$\lambda_{2r} - \lambda_{1r} = 2L_{mr} (i'_{qr} \sin \theta_r + i'_{dr} \cos \theta_r) \sin \epsilon$$

$$i'_{dr} \sin \epsilon = (i'_{qr} \sin \theta_r + i'_{dr} \cos \theta_r) \sin \epsilon \quad \text{이므로}$$

$$\lambda_{2r} - \lambda_{1r} = 2L_{mr} i'_{dr} \sin \epsilon \quad (10)$$

$$L_{mr} = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (11)$$

(8)(9)(10)(11) 식들을 이용하여 한 상의 두 코일간의 전압차를 구하면 다음과 같다.

$$v_{n2} - v_{n1} = \frac{d}{dt} [3 L_{ms} (i_{ds} + i'_{dr}) \sin \epsilon] \quad (12)$$

또한, d축과 채교하는 공극자속을 구하면 다음과 같다.

$$\lambda_{md} = \frac{3}{2} L_{ms} (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (13)$$

(12)(13)식을 이용하면 λ_{md}^s 와 λ_{mq}^s 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_{md}^s &= \frac{1}{2 \sin \epsilon} \frac{L_{ms}}{L_{ms}} \int [v_{n2} - v_{n1}] dt \\ &= k \int [v_{n2} - v_{n1}] dt \quad (14) \end{aligned}$$

$$\lambda_{mq}^s = \frac{k}{\sqrt{3}} (\int b [v_{n2} - v_{n1}] dt - \int c [v_{n2} - v_{n1}] dt) \quad (15)$$

여기서 공극자속과 전류에 의해 발생하는 추력은 (5)식을 변형하면 다음과 같다.

$$F_t = \frac{3\pi}{2\tau} (\lambda_{md}^s i_{qs} - \lambda_{mq}^s i_{ds}) \quad (16)$$

이상에서 설명하였듯이, 같은 상에 이웃하는 슬롯사이의 전압차를 이용함으로써 as축에 수직인 d축상의 공극자속의 시간변화를 측정할 수 있다. 그리고, (16)식과 같은 추력식에 이용 할 수 있다. 또한 L_{ms} 는 L_{ms} 에 비례하는 양이므로 자기포화에 의한 영향을 같이 받아 포화가 있을 때에도 정확히 측정할 수 있다.

3.2 검출된 자속의 제어기에의 적용

회전자 자속을 이용하여 공극자속을 유도하면 다음과 같다.

$$\lambda^{s_{dr}} = \frac{L_r}{L_m} \lambda^{s_{dm}} - L_{1r} i^{s_{ds}}$$

$$\lambda^{s_{qr}} = \frac{L_r}{L_m} \lambda^{s_{qm}} - L_{1r} i^{s_{qs}}$$

여기서 $L_r = L_{1r} + L_m$ 이지만 본 논문에서 대상으로 하는 반송용 LIM에서는 $L_{1r} \neq 0$ 으로 놓을 수 있다[4]. 그러므로 공극자속이 바로 회전자속이 된다.

$$\lambda^{s_{dr}} = \lambda^{s_{dm}}$$

$$\lambda^{s_{qr}} = \lambda^{s_{qm}}$$

$$\frac{d\lambda^{s_{dr}}}{dt} = \frac{d\lambda^{s_{dm}}}{dt} = k(v_{n2} - v_{n1}) \quad (18)$$

$$\frac{d\lambda^{s_{qr}}}{dt} = \frac{d\lambda^{s_{qm}}}{dt} = \frac{k}{\sqrt{3}} ([v_{n2} - v_{n1}]_b - [v_{n2} - v_{n1}]_c) \quad (19)$$

윗식에서의 전압차를 이용하여 동기 좌표로의 변환을 위한 순시좌표는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\theta_e = \tan^{-1} \frac{\lambda^{s_{qr}}}{\lambda^{s_{dr}}} \quad (20)$$

$$\frac{d\theta_e}{dt} = \omega_e = \frac{\lambda^{s_{qr}} \frac{d\lambda^{s_{dr}}}{dt} - \lambda^{s_{dr}} \frac{d\lambda^{s_{qr}}}{dt}}{\lambda^{s_{dr}^2} + \lambda^{s_{qr}^2}} \quad (21)$$

$$|\lambda^{s_r}| = \sqrt{\lambda^{s_{dr^2}} + \lambda^{s_{qr^2}}} \quad (22)$$

이제, (18), (19)식을 이용한 직접 벡터제어시스템을 보면 그림3과 같다.

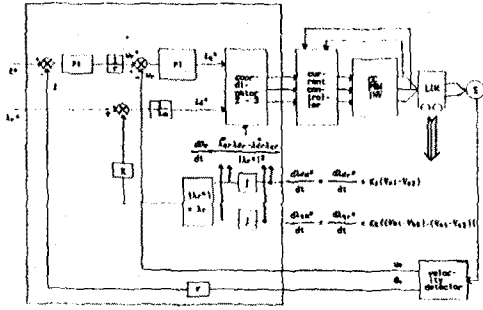
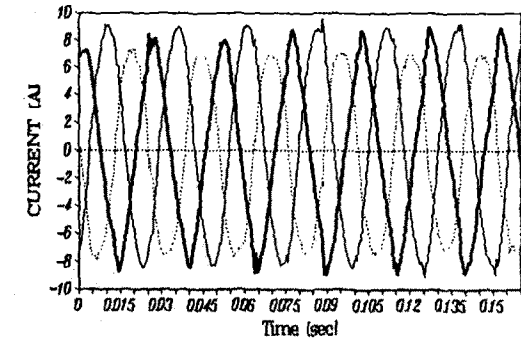


그림3. Stator tapped coil을 이용한 직접 벡터제어시스템

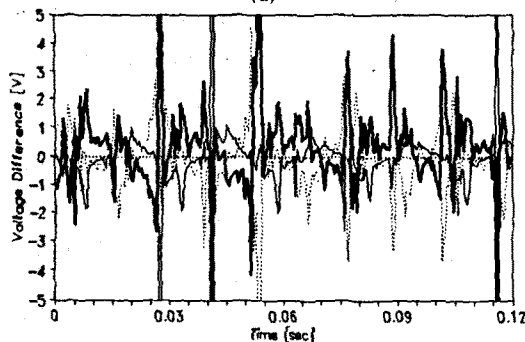
4. STATOR TAPPED COIL 실험

앞장에서 검토한 이론적 고찰을 실험을 통해 확인 한다. 전원은 범용 PWM Inverter를 이용하여 인가 하였다. Data acquisition은 12 Bit A/D Converter와 IBM-XT를 이용하여 Sampling time 0.55[ms]로 받아 같은 상의 두 슬롯 사이에 유기되는 전압차와 전류의 양상을 보았다.

그림4와 그림5는 각각 다른 주파수와 전압에서 실험을 통해 얻어낸 3상 상전류와 두 단자코일의 전압차의 파형이다. 그림들을 보면 전류는 고른 분포를 보이고 있고, 각 상의 유기전압은 차는 PWM 전원의 영향으로 파형이 고르지 않지만 일정한 주기를 가지고 반복됨을 알 수 있다. 그러므로, 이 전압차와 전류를 통해서 산출되는 공극자속과 추력의 응답이 비탄직한 결과로 연산될 것임을 예상할 수 있다. 그림6은 실험에 사용하기 위해 12개의 단자를 낸 LIM이다.

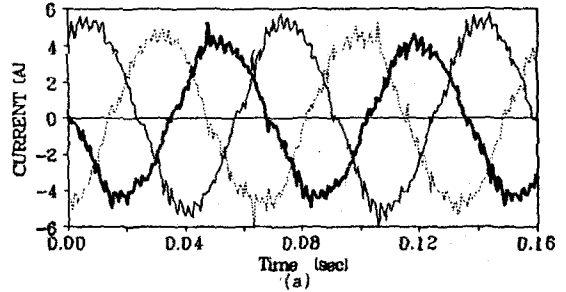


(a)

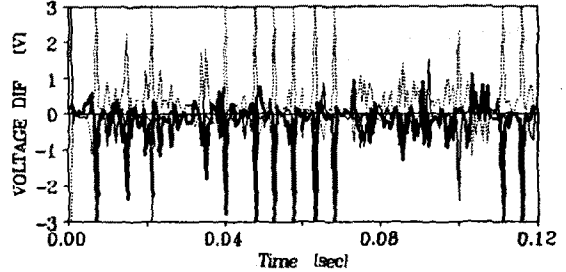


(b)

그림4. 40[Hz], 120[V] (a)3상 전류 (b)3상 단자코일 전압차



(a)



(b)

그림5. 15[Hz], 80[V] (a)3상 전류 (b)3상 단자코일 전압차

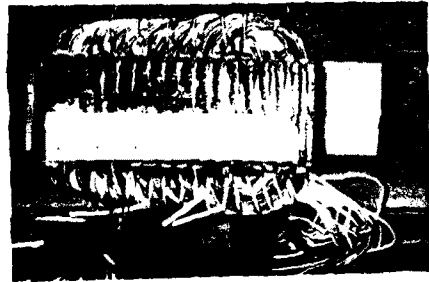


그림6. 실험 LIM모델

5. 결론

본 논문에서는 STATOR TAPPED COIL을 통한 지속검출을 통해 LIM의 순시제어의 가능성을 검토했다. 또한 이를 통한 과도추력의 양상은 실제 모델에서의 중요한 지점이 될 수 있으며, 저속뿐만 아니라 고속 LIM에서도 신뢰성있는 제어가 가능하리라 생각한다.

본 논문에서의 추력제어는 수직력을 무시하고 추력만을 전개 하였으나, 실제 LIM은 슬립에 따라 추력과 수직력이 변화하므로, 반송용 저속 LIM에서는 수직력의 영향을 최소화 할 수 있는 지지기구의 개발과 수직력과 추력을 독립적으로 제어할 수 있는 알고리즘의 연구가 앞으로의 과제가 될 것이다.

참고문헌

1. THOMAS A. LIPO, KWONGC. DHANG "A New Approach to Flux and Torque Sensing in Induction Machines", IEEE Trans on Ind Applications, vol. IA-22, NO. 4, July/August, 1986
2. PETER VAS : " Vector Control of AC Machines(book)", 1990
3. 野中作太郎, "片側式リニアインダクションモータの近似特性計算式について", 電気學會論文集, 57-B69, pp.565-572
4. S. A. NASAR, I. BOLDEA: "Linear Motion Electric Machines(book)", 1986