

고정자 자속 기준 제어 기법을 이용한 선형 유도 전동기의 속도 센서리스 벡터제어

조 민호, 오 성철
한국기술교육대학교 전기공학과

Speed Sensorless Vector Control of a Linear Induction Motor using Stator-Flux Oriented Control Scheme

Min-Ho Cho, Sung-chul Oh

Dept, of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

ABSTRACT

벡터 제어이론은 교류전동기의 토크와 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 특징이 있으므로 토크 제어를 주로 하는 견인용 전동기의 제어에 적용하기 위한 연구가 활발히 수행되어 왔다. 그러나, 선형 유도 전동기 구동에는 아직 널리 사용되지 않은 실정이다. 벡터 제어 이론은 일반적으로 회전자 자속 기준 제어 (Rotor flux oriented control)을 의미하며 이를 구현하기 위한 방법은 자속을 직접 측정 혹은 연산하는 직접제어 방식과 속도를 측정하여 슬립주파수 명령을 제어하는 간접방식으로 분류된다. 최근에는 기존의 회전자자속 기준방식뿐만 아니라 고정자자속 (Stator flux oriented), 공극자속 (Air gap flux oriented) 기준 방식등이 제안되고 있다.

본 연구에서는 자기부상열차의 추진용 선형유도 전동기의 추진에 가장 적합하다고 생각되는 고정자자속 기준 벡터제어 방식과 이를 구현하기 위한 고정자 자속을 추정하는 방법에 대하여 설명한다. 또한, 속도제어를 위한 속도 추정방식도 안내코일 등 부가장치 없이 전동기 파라미터로부터 추정할 수 있는 기법에 대하여 논한다.

1. 서론

최근 선형 유도 전동기는 직선운동을 필요로 하는 시스템에서는 회전 운동을 직선 운동으로 변환시키는데 필요한 기어나 랭크 등의 기구가 필요치 않아 이들 변환장치에 의한 손실이나 소음, 진동 등이 발생하지 않으며 회전형 기기에 비하여 운전 속도에 제한이 없다는 장점으로 인하여 초고속 자기부상형 열차, 반송 장치, HA, FA, OA기기 등에 널리 사용되고 있고 이에 대한 연구가 활발히 진행

되고 있다.

이러한 용도의 선형 유도 전동기의 속도 측정시 안내 코일 등 부가 장치가 필요하게 되고 간접 벡터제어시 2차 저항 변동과 같은 파라미터의 변동에 매우 민감하기 때문에 자속의 위치를 계산하는데 전동기의 회전자 시정수, 특히 회전자 저항에 크게 좌우된다. 이러한 영향을 주는 회전자 시정수 변화는 자속의 위치를 잘못 추정하게 하여 정상상태 및 과도 상태의 제어 성능을 저하시키는 단점이 있다.

본 연구에서 제안된 고정자 자속 기준 센서리스 벡터 제어 방식은 고정자 전압과 전류를 제한 받아 전류와 전압벡터를 통해 고정자 자속을 추정할 수 있기 때문에 빠른 속도 응답과 전동기의 파라미터 변동에 둔감하다는 장점이 있고 또한 추정된 자속으로부터 속도를 추정하여 별도의 속도 센서없이 선형 유도 전동기의 속도를 추정할 수 있다. 또한 일반적으로 유도 전동기의 컴퓨터 시뮬레이션시 동특성을 해석하기 위한 방안으로 시스템을 근사화 시키고 이에 대한 수학적인 등가 모델을 유도한 후 이를 이용하여 시뮬레이션을 행하고 있지만 이 경우 동특성을 정확히 표현할 수 없기 때문에 시뮬레이션 신뢰성을 저하시킬 수 있다. 이를 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 실제회로와 유사한 형태로 시뮬링크 윈도우상에서 설계하고 이를 통해 시뮬레이션을 행하였다.

2. 본론

전동기의 고정밀, 고성능 속도 제어를 위해서는 회전자의 정확한 속도 정보가 필요하고 이는 리졸버나 펄스 엔코더 등의 속도 센서를 이용하여 얻을 수 있지만 이들 센서 분해능의 한계는 시스템의 성능향상의 문제 요소로 작용하고 전체 시스템의 가격 상승 요인이 된다.

본 연구에서는 고정자 자속 기준 속도 센서리스 벡터

제어를 이용하여 자속의 위치와 크기를 추정하는 방법과 별도의 속도 센서없이 속도를 추정할 수 있는 방법에 대해 알아본다.

2.1 고정자 자속 기준 벡터제어 모델 방정식

전동기의 자속의 크기와 위치를 검출하여 고정자 전류를 자속성분과 토크성분으로 분리하고 각 성분을 독립적으로 제어를 하기 위하여 고정자 자속 기준 벡터 제어 모델 방정식으로터 자속명령과 토크를 명령을 이끌어 내면 식(1)~식(3)과 같이 나타낼 수 있고 그림 1과 같이 블럭도로 나타낼 수 있다.

$$(1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{qs}^{es} = S\omega_e \tau_r (\lambda_{ds}^{es} - \sigma L_s i_{ds}^{es}) \quad (1)$$

$$(1 + \tau_r p) \lambda_{ds}^{es} = (1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{ds}^{es} - S\omega_e \tau_r \sigma L_s i_{qs}^{es} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} \lambda_{ds}^{es} i_{qs}^{es} \quad (3)$$

그러나 식(3)에서 토크를 발생시키는 고정자 전류 i_{qs}^{es} 성분과 고정자 자속 λ_{ds}^{es} 성분은 서로 coupling되어 있다. 결과적으로 i_{ds}^{es} 의 변화없이 i_{qs}^{es} 가 변화하게 되어 고정자 자속의 과도현상을 야기시킬 수 있다. 이것을 해결하기 위해 Decoupler 보상기를 추가하여 coupling된 부분을 보상하고 식(4)과 같이 Decoupler 보상기를 구현할 수 있다.

$$i_{ds}^{es} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) (\lambda_{ds}^* - \hat{\lambda}_{ds}) + i_{dq}^{es} \quad (4)$$

$$i_{dq}^{es} = \frac{S\omega_e \tau_r \sigma L_s i_{qs}^{es}}{(1 + \sigma\tau_r p)L_s} \quad (5)$$

식(4)에서 i_{dq}^{es} 는 Decoupler의 출력값이고 식(5)와 같이 나타낼 수 있으며 고정자 자속을 제어하기 위하여 (P-I) Regulator를 사용하였다.

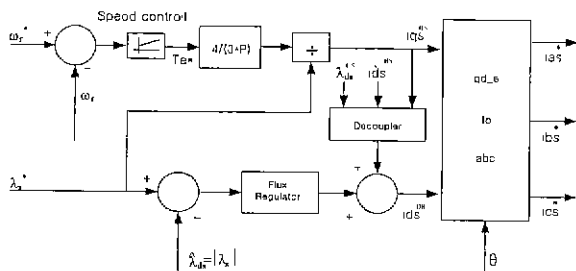


그림 1 자속과 토크명령에 의한 d-q 전류 명령의 블럭도

또한 속도를 추정하기 위해 식(1)에서 필요한 슬립 주파수 $S\omega_e$ 를 구하면

$$S\omega_e = \frac{(1 + \sigma\tau_r p)L_s i_{qs}^{es}}{\tau_r} (\lambda_{ds}^{es} - \sigma L_s i_{ds}^{es}) \quad (6)$$

2.2 고정자 자속의 추정

전동기 d-q모델방정식을 이용하여 측정 되어진 고정자 전압과 전류로부터 고정자 자속의 식을 유도하면 식(7)에서 식(9)와 같이 전압과 전류의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$v_{qds}^s = R_r i_{qds}^s + p\lambda_{qds}^s \quad (7)$$

$$\lambda_{qds}^s = \frac{1}{p} (v_{qds}^s - R_r i_{qds}^s) \quad (8)$$

$$\lambda_s^s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (9)$$

2.3 속도 추정

식(3-7)에서 (3-9)에 측정 되어진 고정자 전압과 전류를 통해 추정된 자속으로부터 자속 벡터각 및 속도를 계산해 낼 수 있으며 고정자 자속 벡터의 각을 정의하면 식(3-24)과 같다.

$$|\lambda_s^s| = \sqrt{\lambda_{ds}^{s2} + \lambda_{qs}^{s2}} \quad (10)$$

$$\theta_e = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}^s}{\lambda_{ds}^s} \right) \quad (11)$$

$$\cos(\theta) = \frac{\lambda_{ds}^s}{|\lambda_s^s|}, \quad \sin(\theta) = \frac{\lambda_{qs}^s}{|\lambda_s^s|}$$

식(3-24)의 고정자 자속각을 미분하면 그 미분값은 동기각 주파수 ω_e 가 되므로 식(3-25)과 같이 고정자 자속값으로 구할 수 있다.

$$\omega_e = \frac{[(v_{qs}^s - i_{qs}^s R_s) \lambda_{ds}^s - (v_{ds}^s - i_{ds}^s R_s) \lambda_{qs}^s]}{\lambda_s^{s2}} \quad (12)$$

$$= \frac{(p \lambda_{qs}^s \lambda_{ds}^s) - (p \lambda_{ds}^s \lambda_{qs}^s)}{\lambda_s^{s2}}$$

따라서 속도 ω_r 은 고정자 자속 기준 모델 방정식의 식(6)에서 구한 슬립 주파수 $S\omega_e$ 와 추정된 고정자 자속으로부터 구한 식(12)의 동기 각속도 ω_e 로부터 구하게 되면 식(14)와 같다.

$$\omega_r = \omega_e - S\omega_e \quad (13)$$

$$\omega_r = \frac{(p \lambda_{ds}^s \lambda_{ds}^s) - (p \lambda_{ds}^s \lambda_{qs}^s)}{\lambda_s^2} - \frac{(1 + \sigma \tau_r p) L_s i_{qs}^{es}}{\tau_r} (\lambda_{ds}^{es} - \sigma L_s i_{ds}^{es}) \quad (14)$$

따라서 식(7)에서 (14)의 식으로부터 고정자 자속 및 속도 추정 블럭도는 그림 3-5와 같고 전체적인 시스템 블럭도는 그림 4와 같다.

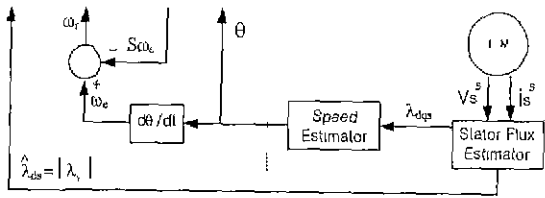


그림 2 고정자 자속 및 속도 추정 블럭도

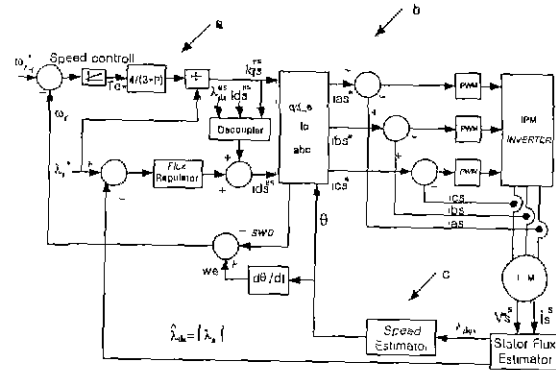


그림 3 고정자 자속 기준 센서리스 벡터제어 시스템 블럭도

2.4 시뮬레이션

본 시뮬레이션은 Matlab/Simulink Program으로 시뮬레이션 되었고, 전동기의 정격 및 파라미터는 표 1과 표 2에 나타내었고 그림 4에서 그림 7은 자속과 속도추정의 시뮬레이션 결과를 나타내었으며 속도reference와 부하토크 인가시 양호한 속도 응답특성을 얻었다.

표 1 2.2kW 4극 전동기 정격

정격 전압	220 [V]
정격 주파수	60 [Hz]
정격 전류	58 [A]
정격 토크	11.9 [Nm]
베이스 속도	1800 [rpm]

표 2 2.2kW 전동기 파라미터

R _s	0.435 [Ω]
R _r	0.816 [Ω]
L _s	0.0713 [H]
L _r	0.0713 [H]
L _m	0.0693 [H]
J	0.0089 [Kg m ²]

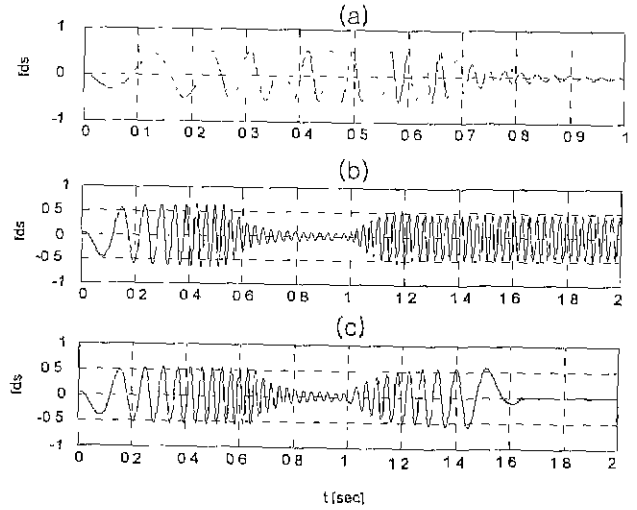


그림 4 고정자 자속의 추정

- (a) 1000 rpm 속도 명령시 d축 자속
- (b) 부하토크(11.9Nm) 인가시 d축 자속
- (c) 속도 감속시 d축 자속

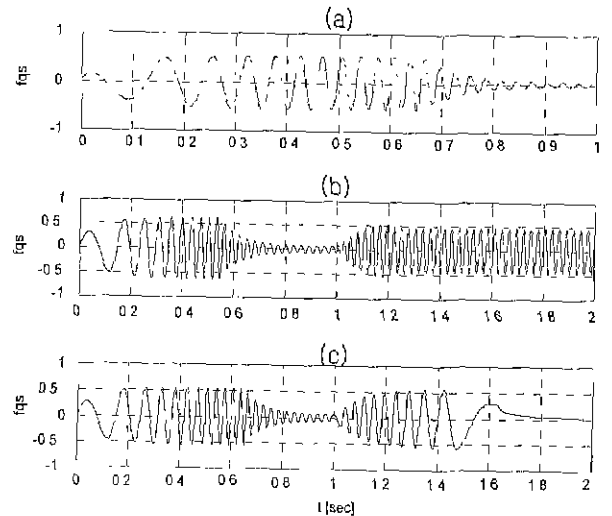


그림 5 고정자 자속의 추정

- (a) 1000 rpm 속도 명령시 q축 자속
- (b) 부하토크(11.9Nm) 인가시 q축 자속
- (c) 속도 감속시 q축 자속

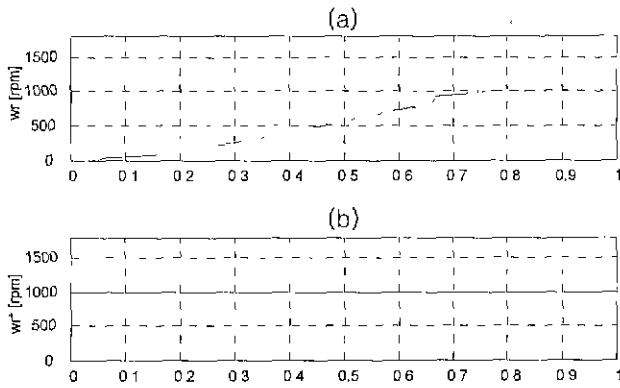


그림 6 속도 제어 응답특성(1000 rpm)
(a) 속도 Reference (b) 추정된 속도

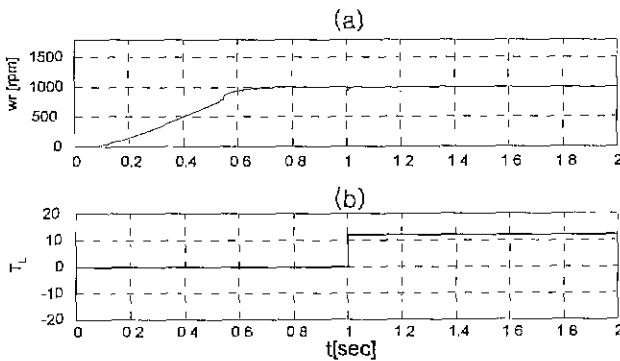


그림 7 부하 토크 인가시 속도 제어 응답특성
(a) 추정된 속도 (b) 속도 Reference

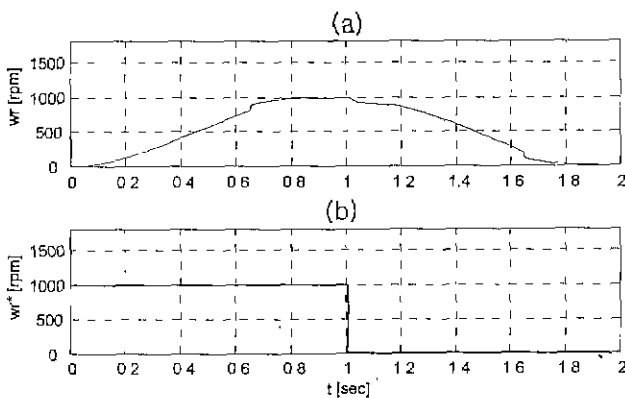


그림 8 속도 감속 명령시 속도 제어 응답특성
(a) 추정된 속도 (b) 속도 Reference

3. 결론

본 연구에서는 선형 유도 전동기의 속도 센서리스 운전을 위해 고정자 자속 기준 속도 센서리스 벡터 제어를 이용한 자속 및 속도 추정 방법을 제안 하였고 자속의 위치와 크기를 고정자 전압과 전류벡터로부터 추정함으로써 독립적인 추력의 제어가 가

능하였다. 또한 측정된 속도 정보 대신 추정 되어진 고정자 자속으로부터 동기 각속도와 슬립 주파수의 합으로 추정된 속도를 사용하여 속도 센서리스 운전을 행하였고 전동기의 파라미터 특히, 회전자 저항의 변동에 영향을 적게 받았다. 그러나 선형 유도 전동기의 추력 발생 원리는 회전력 전동기의 회전력 발생 원리와 동일하지만 1차 철심과 여자 전류의 분포가 전동기 진행 방향과 유한하기 때문에 특히, 고속으로 운전되고 있는 경우는 단부효과의 영향이 커지기 때문에 이러한 단부효과를 고려하여 적용하면 보다 견실한 운전특성을 얻을 수 있으리라 보며, 이는 차후 연구 과제라 하겠다.

참 고 문 헌

- [1] Giuseppe Buja, Domenico Casadei, Giovanni Serra "DIRECT TORQUE CONTROL OF INDUCTION MOTOR DRIVES," Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics vol.1, pp.TU2-TU8, Jul.1997.
- [2] Myoung-Ho Shin, Dong-Seok Hyun, Soon-Bong Cho and Song-Yul Choe "An Improved Stator Flux Estimation for Speed Sensorless Stator Flux Orientation Control of Induction Motors," Proceedings of the Record of the 29th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference vol.2, pp.1581-1586, May 1998.
- [3] Marian P. Kazmierkowski, Mariusz Malinowski, Dariusz L. Sobczuk, Frede Blaabjerk, and John K. Pedersen "Simplified Stator Flux Oriented Control," Proceedings of the IEEE vol.2, pp.474-479, July 1999.
- [4] Bimal K.Boss, Nitin R.Patel, and Kaushik Rajashekara "A Start-Up Method for a Speed Sensorless Stator-Flux-Oriented Vector-Controlled Induction Motor-Drive," IEEE Trans. on industrial electronisc, vol.44, no.4, pp.587-590, Aug. 1997
- [5] Sol Kim, Kyung-Il Woo, Byung-Il Kwon, "Implementation of Indirect Field-Oriented Control of Linear Induction Motor using Voltage Source Inverter," Proceedings of the Internatioanl Conference on Electrical Engineering 1999 - Vol.2, pp.263-266, oct. 1999