

dSPACE를 이용한 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어

이 동 민, 지 준 근
 순천향대학교 전기통신시스템공학과

Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor using dSPACE

Dong-Min Lee, Jun-Keun Ji

Dept. of Electrical Communication System Engineering, Soonchunhyang University

Abstract - This paper presents a implementation of speed sensorless vector control algorithm of induction motor using MATLAB/SIMULINK amd dSPACE DS1104 R&D board. The estimation of rotor flux linkage and rotor speed is carried out using model reference adaptive system(MRAS) method. Estimated rotor speed is used to speed controller of induction motor. Simulation results are presented to confirm speed sensorless vector control algorithm.

1. 서 론

유도전동기는 구조가 간단하고 견고하며 가격이 저렴한 장점으로 인해 산업 및 수송 등 여러 분야에서 광범위하게 응용되고 있다. 속도와 토오크의 가변이 요구되는 산업용 및 운송분야에서 페루프 제어를 실현하기 위해서는 엔코더 등을 이용하여 속도나 위치를 측정하는 것이 일반적이다. 벡터제어에 의해 유도전동기를 구동하는 경우에도 속도와 자속각 위치정보를 얻기 위해 일반적으로 속도센서를 사용한다. 그러나 속도센서를 사용할 경우 센서의 추가설치가 필요할 뿐 아니라 열악한 환경에서 신뢰성을 감소시키고 구동시스템의 가격을 상승시킨다. 따라서 속도 및 위치센서를 사용하지 않는 속도제어 방식에 대한 관심이 고조되었고 여러 가지 속도추정 알고리즘이 제안되었다.[1-5]

본 논문에서는 dSPACE를 이용하여 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어를 수행하였다. 속도 추정방식은 모델기준적응시스템(MRAS)을 사용하였고, SIMULINK를 이용하여 속도추정기를 구성한후 DS1104의 제어보드와 Real-Time-Interface(RTI)를 이용하여 실시간 제어를 수행하였다. 실시간 실험을 위해 IGBT 인버터를 사용하였고 0.3KW의 유도전동기 구동 실험에 의해 시스템 성능을 확인하였다.

2. MRAS에 의한 센서리스 속도제어

2.1 회전자 자속 추정[1]

유도 전동기의 고정자 전압 방정식과 자속 방정식을 d-q 정지 좌표상에서 복소수 벡터로 표현하면 다음과 같다.

$$v_s^s = R_s i_s^s + \frac{d}{dt} \lambda_s^s \quad (1)$$

$$\lambda_s^s = L_s i_s^s + L_m i_r^s \quad (2)$$

$$\lambda_r^s = L_m i_s^s + L_r i_r^s \quad (3)$$

R_s : 고정자 저항,

$L_s = L_{ls} + L_m$: 고정자 인덕턴스,

$L_r = L_{lr} + L_m$: 회전자 인덕턴스,

L_m : 상호 인덕턴스

식 (3)에서 회전자 전류는 아래와 같이 표시된다.

$$i_r^s = \frac{\lambda_r^s - L_m i_s^s}{L_r} \quad (4)$$

위 식을 식 (2)에 대입하면, 고정자 자속을 회전자 자속과 회전자 전류로 표현할 수 있다.

$$\lambda_s^s = L_s i_s^s + L_m \frac{\lambda_r^s - L_m i_s^s}{L_r} = \frac{L_m}{L_r} \lambda_r^s + \sigma L_s i_s^s \quad (5)$$

여기서, $\sigma L_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$ 는 고정자 과도 인덕턴스이다.

식 (5)를 식 (1)에 대입하면

$$V_s^s = R_s i_s^s + \frac{d}{dt} \left(\frac{L_m}{L_r} \lambda_r^s + \sigma L_s i_s^s \right) \quad (6)$$

이 되고, 이 식으로부터 다음 식과 같이 회전자 자속을 추정할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{L_r}{L_m} \left(\int_0^t (v_s^s - R_s i_s^s) dt - \sigma L_s i_s^s \right) \quad (7)$$

여기서 $\hat{\lambda}_r^s$ 는 λ_r^s 의 추정치이다.

식 (7)과 같이 회전자 자속을 추정하게 되면, 전압 혹은 전류에 오프셋(Offset)이 포함되어 있는 경우 적분기가 발산하게 되어 실용적으로 사용할 수가 없게 된다. 일반적으로 이러한 문제를 해결하기 위하여 고주파 통과 필터(HPF, High Pass Filter)를 식 (7)에 적용하여 회전자 자속을 다음과 같이 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{\lambda}_r^s &= \frac{T_C s}{1 + T_C s} \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{s} (V_s^s - R_s i_s^s) - \sigma L_s i_s^s \right) \\ &= \frac{T_C}{1 + T_C s} \frac{L_r}{L_m} (V_s^s - (R_s + \sigma L_s) i_s^s) \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 T_C 는 고주파 통과 필터의 차단 각주파수 ω_c 의 역수이고 's'는 라플라스 연산자이다.

식 (8)의 고주파 통과 필터를 사용한 자속 추정은 다음과 같이 회전자 자속지령의 저주파 통과필터(LPF, Low Pass Filter)를 포함함으로써 상당부분 개선할 수 있다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{T_C s}{1 + T_C s} \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{s} (V_s^s - R_s i_s^s) - \sigma L_s i_s^s \right) + \frac{1}{1 + T_C s} \lambda_r^{s*} \quad (9)$$

고정자 회로를 사용하여 추정된 자속을 $\hat{\lambda}_{r-vm}^s$ 이라고 하면,

$$\hat{\lambda}_{r-vm}^s = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{s} (V_s^s - R_s i_s^s) - \sigma L_s i_s^s \right) \quad (10)$$

이고, 식 (9)는 다음과 같이 바뀐다.

$$\hat{\lambda}_r^s = \frac{T_C s}{1 + T_C s} \hat{\lambda}_{r-vm}^s + \frac{1}{1 + T_C s} \lambda_r^{s*} \quad (11)$$

이 식으로부터, $\hat{\lambda}_{r-vm}^s$ 과 λ_r^{s*} 이 실제 자속과 일치하는 경우, 추정되는 자속은 실제 자속과 일치함을 알 수 있다.

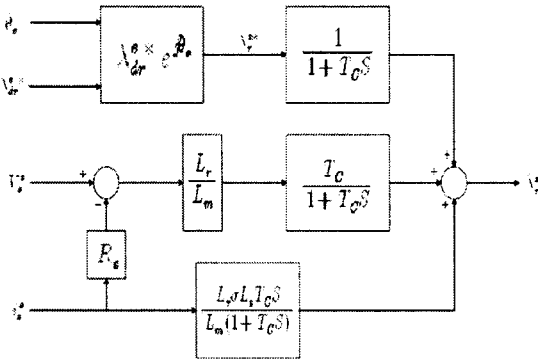


그림 1 회전자 자속 추정기의 블록도

회전자 자속이 구해지면, 회전자 자속각을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \frac{\hat{\lambda}_{qr}^s}{\hat{\lambda}_{dr}^s} \quad (12)$$

이렇게 구하여진 자속각은 벡터제어를 위한 좌표 변환에 사용된다.

2.2 속도 추정

MRAS를 이용한 센서리스 속도제어에서는 추정하고자 하는 속도정보가 포함되어 있는 제어기와 실제 모터로 구성된 가변모델의 출력이 속도와 무관한 기준모델의 출력에 일치하도록 즉, 출력오차가 0이 되도록 적응 메카니즘을 구성하여 회전자 속도를 추정한다. 유도전동기의 운동방정식으로부터 회전자 속도는 유도전동기의 출력토크에 의해 결정되고, 유도전동기의 출력토크는 고정자 전류의 q축 정보에 의해 연산이 가능하므로, 회전자 속도는 궁극적으로 고정자전류의 q축 정보로부터 추정할 수 있음을 알 수 있다.

q축 전류는

$$i_{qs}^e = |i_s^s| \sin \gamma = |i_s^s| \sin((\gamma + \hat{\theta}_e^*) - \hat{\theta}_e^*) \\ = |i_s^s| (\sin(\gamma + \hat{\theta}_e^*) \cos \hat{\theta}_e^* - \cos(\gamma + \hat{\theta}_e^*) \sin \hat{\theta}_e^*) \quad (13)$$

이고,

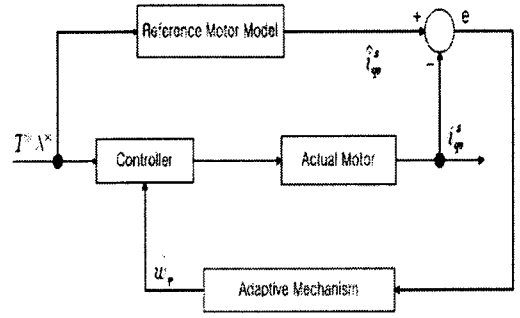


그림 2 MRAS를 이용한 속도 추정 구조

$$|i_s^s| \cos(\gamma + \hat{\theta}_e^*) = i_{ds}^s \\ |i_s^s| \sin(\gamma + \hat{\theta}_e^*) = i_{qs}^s \quad (14)$$

$$\cos(\hat{\theta}_e^*) = \frac{\lambda_{dr}^s}{\sqrt{\lambda_{dr}^{s2} + \lambda_{qr}^{s2}}} \\ \sin(\hat{\theta}_e^*) = \frac{\lambda_{qr}^s}{\sqrt{\lambda_{dr}^{s2} + \lambda_{qr}^{s2}}} \quad (15)$$

이므로 위 식을 식 (13)에 대입하면

$$i_{qs}^e = \frac{i_{qs}^s \lambda_{dr}^s - i_{ds}^s \lambda_{qr}^s}{\sqrt{\lambda_{dr}^{s2} + \lambda_{qr}^{s2}}} \quad (16)$$

로 표시될 수 있다.

i_{qs}^{e*} 와 i_{qs}^e 의 오차를 비례 적분 제어기(PI)를 통과시켜 추정회전자 각주파수, $\hat{\omega}_r$ 을 추정할 수 있다.

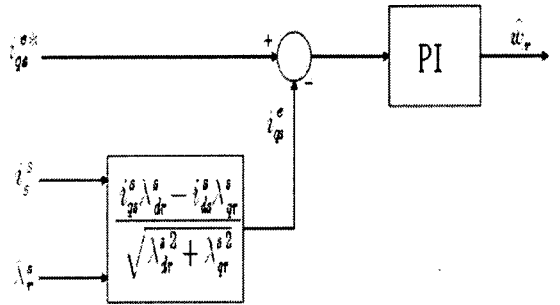


그림 3 속도 추정기 블록도

3. 시스템 구성

자속 추정기와 속도 추정기를 포함한 센서리스 유도전동기의 벡터제어 시스템을 그림 4와 같이 구성하였다. 자속 추정기의 입력은 고정자전류와 고정자전압이다. 고정자전류는 전류센서를 이용하여 직접 측정하였고, 직접 벡터제어 방식을 기반으로 하였으며 일반적인 PI 제어기를 사용한 속도 제어기, 전류 제어기, 자속 제어기, 속도 추정기로 구성하였다.

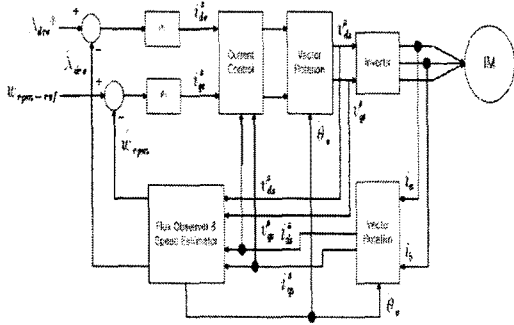


그림 4 센서리스 벡터제어 전체 구성도

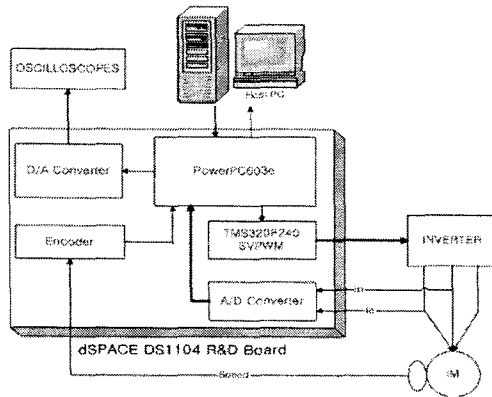


그림 5 유도전동기 구동 시스템 블록도

그림 5는 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어를 수행하기 위한 전체 시스템 구성도이다. 시스템은 호스트PC와 dSPACE DS1104 R&D Board, 4096PPR의 엔코더를 사용하여 추정속도와 실제속도를 비교하였고, 0.3KW 농형 유도전동기와 이를 구동하기 위한 인버터로 구성되어 있다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제시하는 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실험에 사용된 유도전동기는 3상 농형 유도전동기로서 전동기 사양은 표 1과 같다.

표 1. 전동기 사양

정격출력	300[W]	R_s	26.6[Ω]
정격전압	220[V]	R_r	13.78[Ω]
정격전류	1.75[A]	L_s	1.237[mH]
정격속도	1440[RPM]	L_r	1.237[mH]
극수	4	L_m	1.086[mH]

그림 6은 무부하 상태에서 속도지령을 1000[RPM]으로 입력시 자속 추정기 및 속도 추정기의 과도상태 응답이다. 추정된 회전자 자속과 속도가 실제 자속 및 속도를 잘 추종하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7은 정상상태 응답을 보여주고 있다. 추정된 자속 및 속도가 실제의 자속 및 속도와 일치함을 확인할 수 있다.

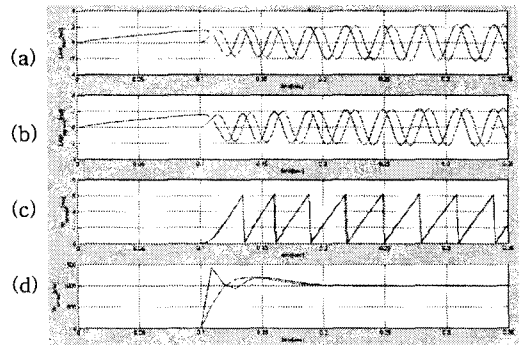


그림 6 자속 추정기 및 속도 추정기 시뮬레이션(과도상태 응답)

- (a) 실제 회전자 자속 (b) 추정된 회전자 자속
(c) 실제 자속과 추정된 자속
(d) 실제 속도와 추정된 속도

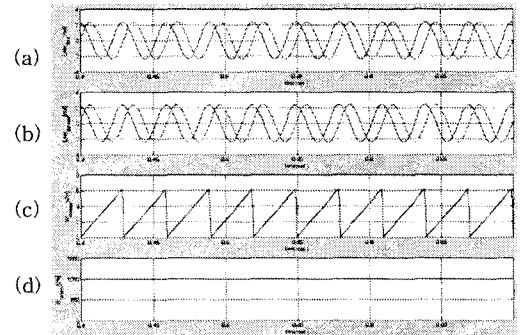


그림 7 자속 추정기 및 속도 추정기 시뮬레이션(정상상태 응답)

- (a) 실제 회전자 자속 (b) 추정된 회전자 자속
(c) 실제 자속과 추정된 자속
(d) 실제 속도와 추정된 속도

5. 결 론

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어 알고리즘을 구현하였고, dSPACE DS1104 Controller Board를 이용하여 실시간으로 실험을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 알고리즘을 검증하였고, 자속 추정기 및 속도 추정기가 정확히 추정됨을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 설승기, "전기기기제어론", pp.299-378, 2002.
- [2] Tsugutoshi Ohtani, Noriyuki Takada, Koji Tanaka, "Vect or Control of Induction Motor without Shaft Encoder", IEEE Trans. Ind. Appl., vol.28, no.1, pp.157-164, Jan/Feb. 1992.
- [3] 김경서, 조병국, "자속추정기를 이용한 유도전동기 센서리스 벡터제어", 대한전기학회 논문지, 52권 2호, pp.87-92, 2003.
- [4] 진대원, 권영안, "새로운 MRAS에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어", 대한전기학회 논문지, 48권 3호, pp.124-130, Mar. 1999.
- [5] 이진국, 정석권, "가변 회전자 자속 지령에 의한 센서리스 유도전동기의 회전자 저항 실시간 동정", 대한전기학회 논문지, 54권 2호, pp.101-109, Feb. 2005.