

MRAS를 이용한 권선형 유도전동기의 온-라인 고정자 저항 조정에 의한 속도센서리스 벡터제어

이재학*, 김윤호**
*순천청암대학, **중앙대학교

Sensorless Vector Control with On-Line Stator Resistance Tuning of Wound Induction Motor Using a MRAS

Jae-Hak Lee*, Yoon-Ho Kim**
*Suncheon Cheongam College, **Chung-Ang Univ.

ABSTRACT

권선형 유도전동기는 기동시에 충분히 큰 저항을 외부에서 삽입하여 기동전류를 작게하는 동시에 기동토크를 크게 할 수 있다. 또한, 유도전동기의 각 기동 방식중에서 가장 우수한 시동특성을 가지고 있으며 크레인, 시멘트공장 등 중부하 시동이 요구되는 경우 널리 사용되고 있다. 권선형 유도전동기 드라이브 시스템의 전류, 토크, 위치 및 속도 등의 제어를 위하여 일반적으로 산업현장에서는 PI 제어기가 많이 적용되고 있다. 그러나 이러한 시스템은 센서 부착시 여러가지 환경적 제약으로 인한 전체시스템의 성능 저하를 가져올 수 있어 이를 개선하기 위한 센서리스 벡터제어가 활발히 연구되고 있다. 본 논문은 권선형 유도전동기의 센서리스 벡터제어를 위해 MRAS 기법을 적용하였고, 기존의 MRAS 기법 적용시 발생하는 파라미터 변동에 따른 속도추정오차를 개선하기 위해 센서리스 벡터제어의 속도제어에 크게 영향을 미치는 고정자 저항을 온라인으로 튜닝함으로써 파라미터 변화에 강인한 센서리스 속도제어를 구현하였다. 제안된 기법의 타당성 및 유효성을 디지털 컴퓨터에 의한 시뮬레이션에 의해 확인하였다.

1. 서 론

권선형 전동기는 고정자측 뿐만이 아니라 회전자측에도 3상 권선을 설치하여 슬립링과 브러시를 통하여 외부로 인출하여 가변저항에 연결한 형태로, 농형 유도전동기에 비해 기동전류가 작고, 기동토크와 토크 효율이 큰 잇점이 있어 산업현장에서 크레인이나 호이스트 등에 사용되고 있다. 이러한 권선형 유도전동기를 벡터제어할 경우 펄스 엔코더 등과 같은 속도 센서를 이용하여 정확한 속도 센싱을 해야 하는데, 이 경우 펄스 엔코더 등과 같은 센서를 이용하면 비용적인 부담은 물론 주변 환경

에 따라 센싱 값에 오차가 있고, 설치 자체가 어렵다.^[1] 이러한 문제점을 개선하기 위해 속도센서 없이 속도정보를 추정하여 얻는 연구들이 계속되어 왔지만 저속 운전시 등에서 만족할 만한 특성을 얻지 못하고 있다. 지금까지 유도전동기에 사용되어 온 속도추정기는 대체로 두가지 종류로 나뉜다. 첫번째는 확장 칼만 필터(Extended Kalman Filter) 기술을 사용하여 설계된 것을 근거로 한 추정기이고, 두번째는 MRAS(Model Reference Adaptive System) 기법에 근거를 둔 추정기이다.

MRAS 접근법은 모델이 단순하고, 실현하기 쉬우며, 직접 물리적인 해석이 가능하다는 장점을 가지고 있지만, 속도추정에 필요한 각종 파라미터(고정자 저항 R_s , 회전자 저항 R_r , 회전자 인덕턴스 L_r 그리고 고정자 쇄교 인덕턴스 σL)들은 온도 변화시 그 값들에 변동을 가져오기 때문에 정확한 속도추정을 기대하기 어렵고, 특히 고정자 저항은 주파수가 감소하는 저속 운전시 그 값이 커지기 때문에 이로 인한 전압강하의 증대 등 전체 제어시스템의 성능을 저하시킨다.^{[2][3][4]} 따라서, 본 논문에서는 고정자 자속기준 벡터제어의 MRAS 기법을 이용한 권선형 유도전동기의 속도센서리스 벡터제어 방법을 제안하는 동시에, 온도와 주파수에 민감한 고정자 저항을 온라인으로 추정하여, 속도 추정시 추정속도의 정확성을 기하고, 저속 운전시의 특성을 개선시켰다.

2. 권선형 유도전동기 모델링

그림 1은 동기속도 ω_e 로 회전하는 기준축에서의 권선형 유도전동기의 d,q 등가회로이다. 권선형 유도전동기에서 고정자는 전원선에 연결되고, 회전자는 PWM 인버터에 연결되기 때문에 회전자 전압 방정식은 농형 유도 전동기의 전압 방정식과 달리 단락 권선으로 가정하지 않는다.

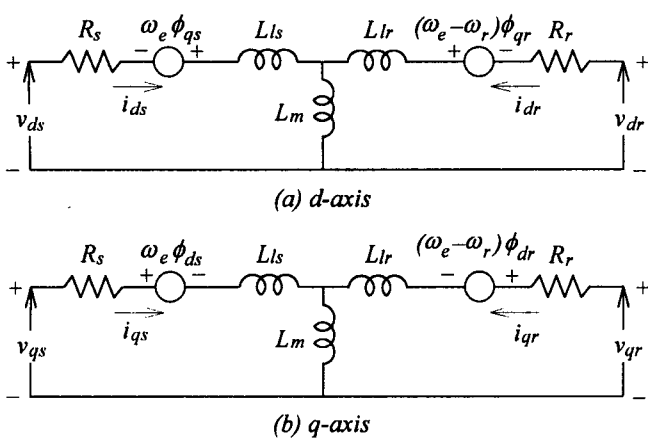


그림 1 동기회전 기준축에서 d-q 등가회로

그림 1의 등가회로로부터 전압, 전류, 토크 방정식은 다음과 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + p\Phi_{ds}^e - \omega_e \Phi_{qs}^e \quad (1)$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p\Phi_{qs}^e + \omega_e \Phi_{ds}^e \quad (2)$$

$$V_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + p\Phi_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \Phi_{qr}^e \quad (3)$$

$$V_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + p\Phi_{qr}^e + (\omega_e - \omega_r) \Phi_{dr}^e \quad (4)$$

여기서,

$$\Phi_{ds}^e = L_s i_{ds}^e + L_m i_{dr}^e \quad (5)$$

$$\Phi_{qs}^e = L_s i_{qs}^e + L_m i_{qr}^e \quad (6)$$

$$\Phi_{dr}^e = L_r i_{dr}^e + L_m i_{ds}^e \quad (7)$$

$$\Phi_{qr}^e = L_r i_{qr}^e + L_m i_{qs}^e \quad (8)$$

발생토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{2P}{3} \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr}^e i_{qs}^e - \Phi_{qr}^e i_{ds}^e) \quad (9)$$

d 와 q축 사이에 이상적인 비간섭 제어는 회전자의 자속벡터를 d축에 일치시키고, 회전자누설자속을 일정하게 놓음으로서 얻을 수 있다.

$$\Phi_{qr}^e = \frac{d\Phi_{qr}^e}{dt} = 0 \quad (10)$$

$$\Phi_{dr}^e = \Phi_r = \text{constant} \quad (11)$$

식 (10), 식 (11)를 식 (1), (2), (3), (4) 에 대입하면,

$$\frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\Phi_r}{dt} + \Phi_r = L_m \cdot i_{dr}^e \quad (12)$$

식 (12)와 같고, 슬립 각속도는 식 (13)과 같이 추정된다.

$$\omega_{sl} = \omega_e - \omega_r = \frac{L_m R_r}{\Phi_r L_r} \cdot i_{dr}^e \quad (13)$$

따라서, 식 (9)의 토크식은 식 (14)와 같이 된다.

$$T_e = \frac{2P}{3} \frac{L_m}{L_r} (\Phi_{dr}^e \cdot i_{qs}^e) \quad (14)$$

식 (14)의 조건에서 전동기가 정토크 영역에서 운전할 때는 i_{ds} 명령을 일정하게 해서 얻을 수 있고, 비간섭 제어된 전동기의 토크 발생은 고정자 전류 i_{qs} 에 의해 제어된다.

3. MRAS를 이용한 속도추정

MRAS 기법은 속도추정에 있어 매우 효과적임이 증명되었다. 전동기의 전압, 전류를 고정자 기준 좌표계로 나타내면 다음과 같다.

$$p \begin{bmatrix} \Phi_{dr}^s \\ \Phi_{qr}^s \end{bmatrix} = \frac{L_r}{L_m} \left\{ \begin{bmatrix} V_{ds}^s \\ V_{qs}^s \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} (R_s + \sigma L_s p) & 0 \\ 0 & (R_s + \sigma L_s p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}^s \\ I_{qs}^s \end{bmatrix} \right\} \quad (15)$$

$$p \begin{bmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ \widehat{\Phi}_{qr}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-1/\tau_r) & (-\omega_r) \\ \omega_r & (-1/\tau_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\Phi}_{dr}^s \\ \widehat{\Phi}_{qr}^s \end{bmatrix} + \frac{L_m}{\tau_r} \begin{bmatrix} i_{dr}^s \\ i_{qr}^s \end{bmatrix} \quad (16)$$

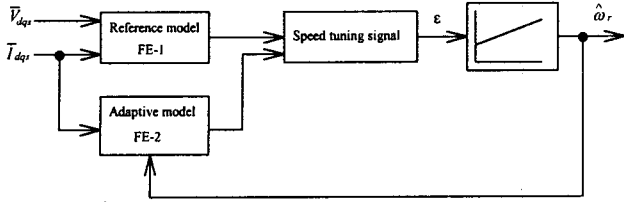


그림 2 속도추정을 위한 MRAS 시스템 구조.

그림 2는 속도추정을 위한 MRAS 시스템 구조를 보여주고 있다. 그림에서 FE-1, FE-2는 고정좌표계에서 독립적으로 회전자 자속 벡터의 성분을 평가하는 자속 추정기이고, FE-1은 기준 모델, FE-2는 적응 모델을 나타낸다. 두 모델의 상태 편차 ϵ 은 적응 모델을 위한 전동기 추정속도를 만드는 선형제어기에 인가된다. 선형제어기로 PI 제어기를 사용하면 식 (17)과 같다.

$$\hat{\omega}_r = K_p \epsilon + K_I \int \epsilon dt \quad (17)$$

$$\epsilon = \Phi_{qr}^s \Phi_{dr}^s - \hat{\Phi}_{dr}^s \hat{\Phi}_{qr}^s \quad (18)$$

여기서 $\Phi_{qr}^s \Phi_{dr}^s$ 은 FE-1으로부터 얻어진 회전자 자속 벡터의 dq 성분이고, $\hat{\Phi}_{dr}^s \hat{\Phi}_{qr}^s$ 은 FE-2에 의한 추정치이다. 파라미터 τ_r 은 MRAS를 이용한 속도 추정의 정확성에 거의 영향을 미치지 않는다는 것이 연구 되어 왔다. R_s 의 오차 영향은 높은 여자 주파수에서는 일반 적으로 무시할 수 있을 정도로 되지만, 여자 주파수가 영에 근접하게 되면 매우 심각한 영향을 끼친다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문의 고정자 저항 추정치는 식 (19)을 이용하여 고정자 저항을 온라인으로 튜닝 한다. [3]

$$\hat{R}_s = (V_q - \omega_e \Phi_d) / I_{qs} \quad (19)$$

4. 해석 결과

그림 3은 MRAS 방식에 의한 권선형 유도전동기의 센서리스 벡터제어를 수행하는 블록도를 나타낸다.

MRAS 블록을 통해 $\hat{\omega}_r$ 과 $\hat{\Phi}$ 을 계산하였고 자속 제어기와 속도제어기, 전류제어기는 PI제어기를 사용하여 최적화하였다. 본 연구에 사용한 권선형 유도전동기 드라이브 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

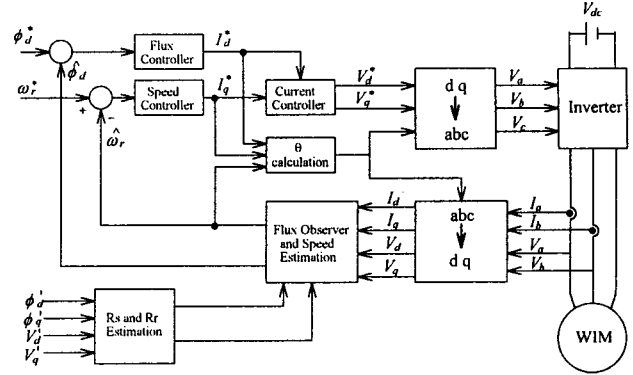


그림 3 MRAS에 의한 권선형 유도전동기 센서리스벡터제어 블록도

표 1 : 권선형 유도전동기 드라이브 시스템 파라미터

3(Phase), 10(Hp), 4(Pole), 60(Hz)
$R_s = 0.3085(\Omega), R_r = 0.536(\Omega), L_s = 46.30(mH)$
$L_r = 46.30(mH), L_m = 44.10(mH)$
$J = 0.036(Kg \cdot m^2), B = 0.000658(N \cdot m \cdot sec/rad)$

그림 4는 기동시 0.1초에서 지령속도를 180(rad/s)의 속도로 상승후 정상상태 운전중 0.5초에서 부하토크를 10(N·m)주었을 경우 시스템의 응답특성을 나타낸다. 그림(a)는 지령속도와 실제속도, 추정속도 (b)는 q축 전류, (c)는 발생토크를 나타낸다. (a)에서 실제속도와 추정속도는 지령속도에 양호하게 추종되고 있다. (d)에서 발생토크는 q축 전류에 의해 제어되고 있으며 이는 MRAS를 이용한 벡터제어가 효율적으로 이루어지고 있다는 것을 입증한다.

참 고 문 헌

- [1] 이재학, 김운호, "상태 觀測機를 利用한 非線型 모델을 갖는 電動機의 센서없는 制御", 중앙대학교 전기공학과 74회 碩師學位論文, 1991. 2.
- [2] R. Blasco-Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner, and K.J Bradley, "Dynamic Performance Limitations for MRAS based Sensorless Induction Motor Drives. Part1 : Stability analysis for the closed loop drive" IEE Proc. - Electr. Power Appl. Vol-143, No. 2, March 1996.
- [3] Hu Jun B. R. Duggal "A MRAS-based Speed Sensorless Field Oriented Control of Induction Motor with On-line Stator Resistance Tuning" IEEE .1998.
- [4] R. Blasco-Gimenez, G. M. Asher, M. Sumner, and K.J Bradley, "Dynamic Performance Limitations for MRAS based Sensorless Induction Motor Drives. Part2 : Online Parameter Tuning and Dynamic Performance Studies", IEE Proc. - Electr. Power Appl. Vol-143, No2, March 1996.

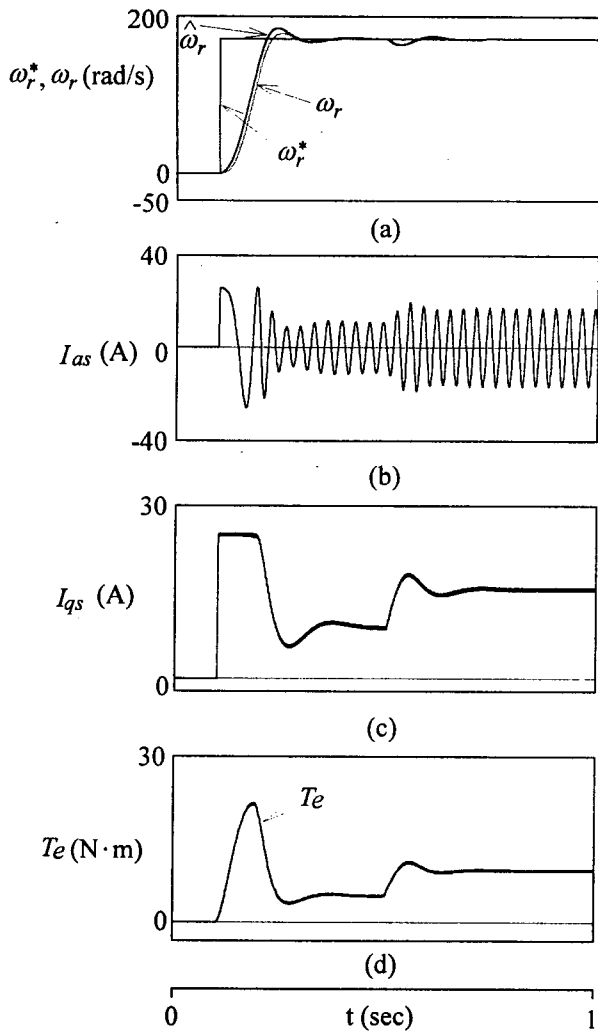


그림 4 MRAS에 의한 권선형 유도전동기의 시스템 응답

5. 결 론

본 논문에서는 권선형 유도전동기에 대한 센서리스 속도제어를 위해 MRAS 시스템을 적용하였다. 본 논문에서 적용한 MRAS 기법은 고정자 저항을 온라인으로 튜닝함으로써 속도추정 오차를 최소화 하였다. 제안된 제어시스템의 특성을 분석함으로써 그림4에 나타난 것처럼 MRAS를 이용한 권선형 유도전동기의 온라인 고정자 튜닝에 의한 속도센서리스 벡터제어가 효과적으로 수행되었다.