

MRAS 센서리스 유도전동기의 성능 개선

박성조, 장민영, 이근보, 장봉수, 권영안  
부산대학교

Improved Performance of MRAS Based Sensorless Induction Motor

S J Park, M Y Jang, G B Lee, B S Jang and Y A Kwon  
Pusan National University

**Abstract** - Speed and torque controls of induction motors are usually attained by the application of position and speed sensors. However, speed and position sensors require the additional mounting space, reduce the reliability in harsh environments and increase the cost of a motor. Therefore, many studies have been performed for the elimination of speed and position sensors. This paper investigates an improved sensorless control of an induction motor. The proposed control strategy utilizes the MRAS(Model Reference Adaptive System) for estimating the speed of a sensorless induction motor. The proposed algorithm is verified through the simulation and experimentation.

1. 서 론

유도전동기는 산업 및 여러 분야에서 많이 사용되고 있는 전동기로서 전력소자의 발전과 더불어 넓은 범위의 가변속 전동기로서도 그 이용이 확대되었다. 유도전동기의 정확한 속도 및 토크 제어를 위해서 회전자의 속도 및 위치정보가 반드시 요구된다. 회전자의 위치 및 속도 센서로서는 홀 소자, 레졸버 및 엔코더와 같은 센서 등이 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서들은 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공 공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동이 심한 환경에서는 센서의 신뢰도가 감소한다. 최근에는 이러한 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 속도 및 위치 센서를 사용하지 않는 센서리스 제어방식의 연구가 많이 이루어지고 있다. 유도전동기의 센서리스 속도제어 방식으로는 고정자전압 및 전류를 측정하여 전동기 방정식으로부터 자속 및 속도를 추정하는 방식, 유도전동기의 두 모델, 예를 들어 고정자 모델과 회전자 모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식, 관측기에 의해 회전자자속을 추정하고 고정자전류 오차와 회전자자속을 이용하여 속도정보를 얻는 방식, 무효전력으로부터 속도를 추정하는 방식, 입출력 및 시스템이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식, 전동기 슬롯에 의한 릴럭턴스 변화로 야기되는 고정자전압 및 전류 고조파를 측정하여 속도를 추정하는 방식, 가변구조제어를 활용한 방식, 자속 및 속도추정 없이 전류오차를 활용하는 방식, 자속 및 토크 직접제어를 활용한 방식 및 인공지능을 활용한 방식 등이 연구되고 있다.[1]-[5]

본 논문에서는 유도전동기의 센서리스 제어방식으로서 모델기준 적응시스템에 의해 속도를 추정하는 방식의 개선을 제시한다. 유도전동기의 여러 가지 센서리스 속도

제어 방식 중 모델기준 적응시스템(MRAS)은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이하여 비교적 폭넓게 사용되는 제어구조의 하나이다. 본 논문에서는 MRAS에 의한 센서리스 제어방식의 저속영역에서 성능개선을 위하여 가변 링크 전압을 적용한다. 가변 링크전압은 센서리스 제어기에서 요구하는 지령전압의 크기에 따라서 직류링크 전압을 능동적으로 제어하는 시스템이다. 이에 의해 저속운전 영역에서 발생하는 낮은 지령전압의 경우에도 유효전압백터의 인가시간이 작지 않게 되므로 인가시간의 오차로 인한 영향이 감소되어 운전성능이 개선된다. 이 상에서 제시한 본 방식은 시뮬레이션과 실험을 통해 검증한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

2.1 실속순시 전압방정식

3상 농형 유도전동기의 회전자 권선은 등가적으로 그림 1과 같으며, 고정자와 회전자의 전압방정식 및 쇄교자속은 아래와 같다.

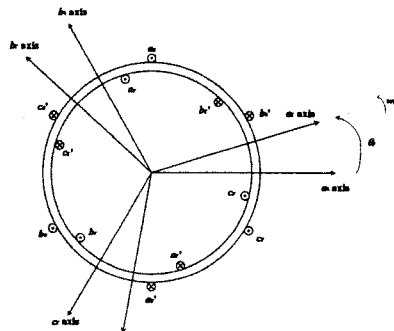


그림 1. 3상 대칭 유도전동기의 등가모델

$$\begin{bmatrix} v_{abc} \\ v_{abc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pL_{sr} \\ R_r + pL_r & p(L_{sr})^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{abc'} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{abc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{abc'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$(f_{abc})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (3)$$

$$(f_{abc'})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (4)$$

$$R_s = \text{diag}[R_s, R_s, R_s] \quad (5)$$

$$R_r = \text{diag}[R_r, R_r, R_r] \quad (6)$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$L_{sr} = L_m \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (9)$$

- 여기서,  $v_s, v_r$  : 고정자와 회전자의 공급전압  
 $i_s, i_r$  : 고정자와 회전자의 전류  
 $R_s, R_r$  : 고정자와 회전자의 권선저항  
 $\lambda_s, \lambda_r$  : 고정자와 회전자의 쇄교자속  
 $L_{ls}, L_{lr}$  : 고정자와 회전자권선의 누설인덕턴스  
 $L_m$  : 고정자와 회전자 권선사이의 상호인덕턴스  
 $\theta_r$  : 회전자의 위치,  $p$  : 미분연산자 ( $\frac{d}{dt}$ )

## 2.2 정지좌표계의 전압방정식

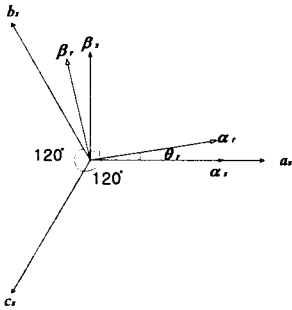


그림 2. 실축-정지좌표계의 축 변환

평형 3상좌표계와 정지 2상좌표계의 축 변환관계는 그림 2와 같으며 이들 좌표계간의 변환행렬은 다음과 같다.

$$[C_1] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[C_2] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_r & -\sin\theta_r & 0 \\ 0 & \sin\theta_r & \cos\theta_r & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

위의 변환행렬에 의해 고정자와 회전자의 전압, 전류, 쇄교자속, 저항, 인덕턴스를 좌표변환하면 정지좌표계 ( $\alpha-\beta$  축)상에서의 전압방정식 및 쇄교자속을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\lambda_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + M(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_s i_{\alpha s} + M i_{\alpha r} \quad (13)$$

$$\lambda_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + M(i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_s i_{\beta s} + M i_{\beta r} \quad (14)$$

$$\lambda_{\alpha r} = L_r i_{\alpha r} + M(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_r i_{\alpha r} + M i_{\alpha s} \quad (15)$$

$$\lambda_{\beta r} = L_r i_{\beta r} + M(i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_r i_{\beta r} + M i_{\beta s} \quad (16)$$

여기서,

$$M = \frac{3}{2} L_m \quad (17)$$

$$L_s = L_{ls} + M \quad (18)$$

$$L_r = L_{lr} + M \quad (19)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (20)$$

## 2.3 동기회전좌표계의 전압방정식

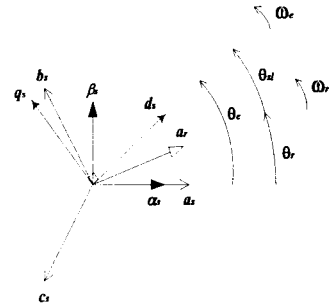


그림 3. 정지좌표계-동기회전 좌표계의 축 변환

정지-동기회전 좌표계의 축 변환관계는 그림 3과 같으며 변환행렬은 다음과 같다.

$$[C_3] = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & \sin\theta_e & 0 & 0 \\ -\sin\theta_e & \cos\theta_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos\theta_e & \sin\theta_e \\ 0 & 0 & -\sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \quad (21)$$

위의 변환행렬에 의해 동기회전 좌표계 ( $d-q$  축)상에서의 전압방정식 및 쇄교자속을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s & pM & -\omega_r M \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s & \omega_r M & \omega_r M \\ pM & \omega_r M & R_r + pL_r & -\omega_r M \\ R_r + pL_r & -\omega_r L_r & \omega_r M & -\omega_r M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + M(i_{ds} + i_{dr}) = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (23)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + M(i_{qs} + i_{qr}) = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (24)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + M(i_{ds} + i_{dr}) = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (25)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + M(i_{qs} + i_{qr}) = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (26)$$

### 3. MRAS을 적용한 센서리스 제어

본 논문에서는 MRAS의 단점을 극복하기 위하여 기준모델로서 추정전류 피이드백을 가지는 상태관측기를 사용하고 비교모델로서 회전자 전류모델을 사용하는 개선된 MRAS를 구성한다. 그림 4는 제안한 MRAS의 속도추정 블록도이다.

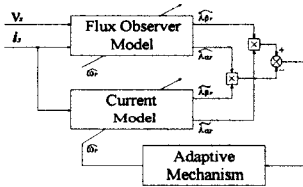


그림 4 MRAS의 속도추정 블록도

본 방식에서 적응메카니즘에 의한 회전자속도는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_r = K_p(\hat{\lambda}_{dr} \hat{\lambda}_{qr} - \hat{\lambda}_{or} \hat{\lambda}_{br}) + K_i \int (\hat{\lambda}_{dr} \hat{\lambda}_{qr} - \hat{\lambda}_{or} \hat{\lambda}_{br}) dt \quad (27)$$

단,  $\hat{\lambda}_{or}$ ,  $\hat{\lambda}_{br}$  : 상태관측기의 회전자속 추정값

$\hat{\lambda}_{or}$ ,  $\hat{\lambda}_{br}$  : 회전자 전류모델의 회전자속 추정값

좌표변환을 위한 동기회전 위치각은 상태관측기에서 추정된 회전자속을 이용하여 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{br}}{\hat{\lambda}_{or}} \right) \quad (28)$$

$$\omega_{sl} = \frac{i_{qs}^*}{T_r i_{ds}} \quad (29)$$

그림 5는 MRAS에 의한 센서리스 제어 및 가변 링크 전압을 이용하는 전체 시스템의 구성도이다.

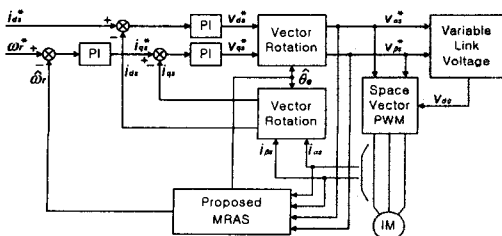


그림 5. 전체 시스템 구성도

### 4. 실험결과 및 검토

그림 5와 같은 유도전동기 센서리스 제어 구동시스템을 제작하고 실험을 수행하였다. 그림 6과 7은 무부하 및 지령속도 10rpm에서 각각 링크전압을 정적전압에 고정한 경우와 가변한 경우의 센서리스 제어 실험 결과로서 MRAS에 의한 센서리스 제어의 실험결과 양호한 속도응답을 나타내었으며 특히 가변링크 전압의 경우에 저속에서 개선된 성능을 나타내었다.

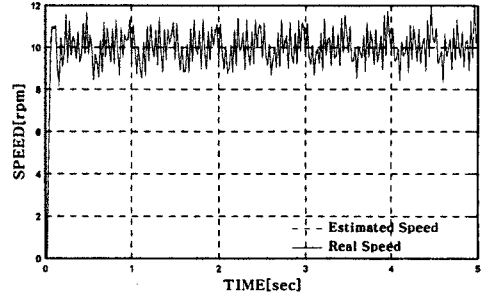


그림 6. 지령속도 10rpm인 경우의 속도응답 (고정링크전압)

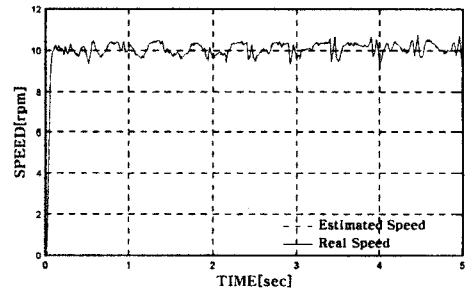


그림 7. 지령속도 10rpm인 경우의 속도응답 (가변링크전압)

### 5. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 센서리스 제어방식으로서 MRAS에 의해 속도를 추정하는 방식의 개선을 제시한다. MRAS를 이용한 센서리스 방식은 물리적 해석이 간결하고 적용이 용이한 제어구조를 가지는 방식이다. 본 논문에서는 개선된 MRAS에 의한 센서리스 제어방식을 제안하고 저속영역에서 성능개선을 위하여 가변 링크 전압을 적용하였다. 제시된 센서리스 제어방식을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한 결과, 양호한 속도응답을 나타내었다.

### [참고 문헌]

- [1] Edited by K. Rajashekar, A. Kawamura, and K. Matsuse, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996.
- [2] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives," *Proc. IEEE*, vol.90, pp.1359 - 1394, 2002.
- [3] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Univ. Press, 1998.
- [4] P. Vas, *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Univ. Press, 1999.
- [5] Y. A. Kwon and S. H. Kim, "New scheme for speed sensorless control of induction motor," *IEEE Trans. Ind. Electr.*, vol.51, pp.545-550, 2004.