

---

# 슬립각속도를 사용하는 회전자 저항 보정에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어 개선

박강효\* · 권영안\*\*

Improved Sensorless Control of Induction motor by Rotor Resistance Compensation

Kang-hyo Park\* · Young-ahn Kwon\*\*

---

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

---

## 요 약

유도전동기는 상대적으로 저가이며 보수가 용이하여 산업 및 여러 분야에서 많이 사용되고 있는 전동기이다. 유도전동기의 정확한 속도 및 토크 제어를 위해서 회전자의 속도 및 위치정보가 요구된다. 회전자의 위치 및 속도 센서들은 경제성 및 주위 환경에 따른 센서의 신뢰도 감소 문제를 가져온다. 최근에는 이러한 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 속도 및 위치센서를 사용하지 않는 센서리스 제어방식의 연구가 많이 이루어지고 있다. 대부분의 센서리스 제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 유도전동기의 속도 추정에서 회전자 저항 오차에 의해 발생하는 속도 오차를 보상하기 위하여 회전자 저항 보상방식을 제안한다. 본 논문에서 제안한 방식은 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한다.

## ABSTRACT

Induction motors are relatively cheap and rugged machines. For the vector control of induction motors, a position or speed sensor is needed. But a speed sensor increases motor cost and reduces reliability in harsh environment. Recently, many studies have been performed for sensorless speed control. This paper investigates an improved flux observer with the parameter error compensation for a sensorless induction motor. The proposed algorithm is verified through simulation and experiment.

## 키워드

유도전동기, 센서리스 제어, 회전자 저항 추정, 슬립각속도

## Key word

induction motor, sensorless control, rotor resistance estimation, slip angular velocity

---

\* 준회원 : 부산대학교 대학원 전자전기공학과  
\*\* 정회원 : 부산대학교 전자전기공학부 교수  
(교신저자, yakwon@pusan.ac.kr)

접수일자 : 2010. 12. 23  
심사완료일자 : 2011. 02. 01

## I. 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 센서들이 사용되고 있다. 그러나 이러한 센서들은 경제적인 문제점과 센서의 안정성을 확보하기 위한 전동기의 설계 및 가공공정이 복잡해지는 단점이 있으며, 주위 온도가 높거나 습기가 심한 곳 또는 진동 심한 환경에서는 센서의 신뢰도가 감소한다. 최근에는 이러한 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 속도 및 위치센서를 사용하지 않는 센서리스 제어방식의 연구가 많이 이루어지고 있다. 유도전동기의 센서리스 속도제어 방식으로는 전동기 방정식 직접 이용 방식, MRAS 방식, 상태관측기 방식, 칼만 필터방식, 고조파 분석 방식, 슬라이딩모드 관측기 방식, 자속 및 속도추정 없는 전류오차 방식, 직접토크제어 방식 및 인공지능 방식 등이 연구되고 있다.[1-5]

본 논문에서는 유도전동기의 센서리스 속도 제어를 개선하기 위하여 자속 관측기에서 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도 추정 오차를 감소 하기 위하여, 회전자 저항 보상방식을 제안하고 종래의 방식과 비교하여 제안한 방식을 검증한다.

## II. 유도전동기의 수학적 모델

3상 대칭 농형 유도전동기에서 고정자와 회전자의 전압방정식 및 쇠교자속은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{abs} \\ v_{abr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pL_{sr} \\ p(L_{sr})^T & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abs} \\ i_{abr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abs} \\ \lambda_{abr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abs} \\ i_{abr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

단,  $(f_{abs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]$ ,

$(f_{abr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}]$ ,  $p = d/dt$ ,

$R_s = \text{diag}[R_s \ R_s \ R_s]$ ,  $R_r = \text{diag}[R_r \ R_r \ R_r]$ ,

$$\begin{aligned} L_s &= \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{ls} + L_m \end{bmatrix} \\ L_r &= \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_{lr} + L_m \end{bmatrix} \\ L_{sr} &= L_m \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos\theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## III. 제안된 회전자 저항 추정

식 (1)-(2)로부터, 정지 좌표계( $\alpha - \beta$ 축)상에서의 전압방정식 및 쇠교자속은 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\lambda_{\alpha s} = L_{ls} i_{\alpha s} + M(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_s i_{\alpha s} + M i_{\alpha r} \quad (4)$$

$$\lambda_{\beta s} = L_{ls} i_{\beta s} + M(i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_s i_{\beta s} + M i_{\beta r} \quad (5)$$

$$\lambda_{\alpha r} = L_{lr} i_{\alpha r} + M(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_r i_{\alpha r} + M i_{\alpha s} \quad (6)$$

$$\lambda_{\beta r} = L_{lr} i_{\beta r} + M(i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_r i_{\beta r} + M i_{\beta s} \quad (7)$$

단,  $M = \frac{3}{2}L_m$ ,  $L_s = L_{ls} + M$ ,

$$L_r = L_{lr} + M, \quad \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

정지좌표계에서 전압방정식을 고정자 전류와 회전자 쇠교자속을 상태변수로 하는 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (8)$$

$$= Ax + Bv_s,$$

$$i_s = Cx \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{단, } x &= [\mathbf{i}_s \ \lambda_r]^T, \mathbf{v}_s = [\mathbf{v}_{\alpha s} \ \mathbf{v}_{\beta s}]^T, \\ \mathbf{i}_s &= [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^T, \lambda_r = [\lambda_{\alpha r} \ \lambda_{\beta r}]^T \\ \mathbf{A}_{11} &= -[R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma T_r)] \mathbf{I}, \\ \mathbf{A}_{12} &= M/(\sigma L_s L_r)[(1/T_r) \mathbf{I} - \omega_r \mathbf{J}], \\ \mathbf{A}_{21} &= (M/T_r) \mathbf{I}, \mathbf{A}_{22} = -(1/T_r) \mathbf{I} + \omega_r \mathbf{J} \\ \mathbf{B}_1 &= 1/(\sigma L_s) \mathbf{I}, \mathbf{C} = [\mathbf{I} \ 0], \\ \mathbf{I} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

정지좌표계에서 고정자 전류와 회전자 쇄교자속을 상태변수로 하는 자속관측기를 나타내면 다음과 같다.

$$p\hat{\mathbf{x}} = \hat{\mathbf{A}}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{v}_s + k_p(\mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s) \quad (10)$$

$$\hat{\mathbf{i}}_s = \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}} \quad (11)$$

여기서 ‘^’은 추정 값을 의미하고  $k_p$ 는 관측기의 이득이다.

그림 1은 유도전동기의 자속관측기와 속도추정의 블록도이다.

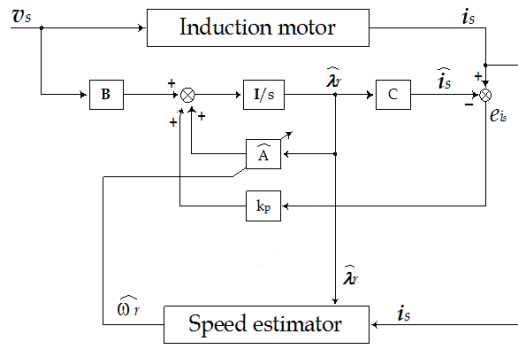


그림 1. 자속 관측기와 속도추정의 블록도  
Fig. 1 Block diagram of flux observer and speed estimation

전압 방정식으로부터 동기각속도는 및 슬립각속도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\omega}_e = p\hat{\theta}_e = \frac{p\lambda_{\beta r}\hat{\lambda}_{\alpha r} - p\lambda_{\alpha r}\hat{\lambda}_{\beta r}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}^2 + \hat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (12)$$

$$\hat{\omega}_{sl} = \frac{R_r M}{L_r} \cdot \frac{\hat{\lambda}_{\alpha r} i_{\beta s} - \hat{\lambda}_{\beta r} i_{\alpha s}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}^2 + \hat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (13)$$

회전각속도는 다음과 같이 동기각속도와 슬립각속도의 차가 된다.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_e - \hat{\omega}_{sl} \quad (14)$$

본 논문에서는 슬립각속도 식을 이용하여 회전자 저항을 추정한다. 슬립각속도는 정지좌표계 및 회전좌표계에서 다음과 같이 된다.

$$\omega_{sl} = \frac{R_r M}{L_r} \frac{i_{qs}}{\lambda_{dr}} = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}} \quad (15)$$

$$\omega_{sl} = \frac{R_r M}{L_r} \cdot \frac{\lambda_{\alpha r} i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} i_{\alpha s}}{\lambda_{\alpha r}^2 + \lambda_{\beta r}^2} \quad (16)$$

식(15)와 (16)을 이용하여 회전자 저항값을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R_{r1} = \frac{\hat{i}_{ds}}{\hat{i}_{qs}} \cdot R_r M \cdot \frac{\hat{\lambda}_{\alpha r} i_{\beta s} - \hat{\lambda}_{\beta r} i_{\alpha s}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}^2 + \hat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (17)$$

식 (17)에서 얻은 회전자 저항 값과 초기 회전자 저항 값의 오차를 이용하여 회전자 저항 변동분을 얻을 수 있다.

$$\Delta R_r = R_{ro} - R_{r1} \quad (18)$$

회전자 저항 변동분을 PI제어하여 회전자 저항의 추정 값을 구한다.

$$\hat{R}_r = K_{pr} \Delta R_r + K_{ir} \int \Delta R_r dt \quad (19)$$

식 (19)에서 추정된 회전자 저항 값으로 관측기의 회전자 저항을 갱신하여 전동기의 실제 회전자 저항을 추종하도록 하며 이를 통하여 속도오차를 개선한다.

#### IV. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문의 전체시스템 구성도는 그림 2와 같다.

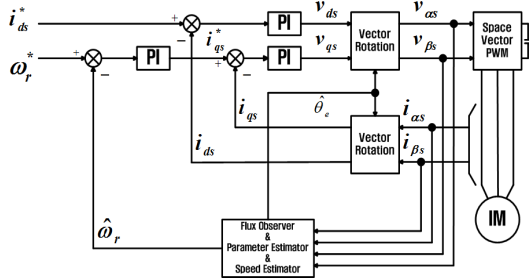


그림 2. 전체 시스템 구성도  
Fig. 2 Configuration of the overall system

본 논문에서 제안한 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 사용된 전동기는 2.2KW 3상 유도전동기이다.

그림 3(a)와 그림 3(b)는 회전자 저항 오차가 있을 때 부하 변동에 의한 속도 응답 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 속도 지령치 200rpm으로 운전 중에 부하 3Nm이 인가된다.

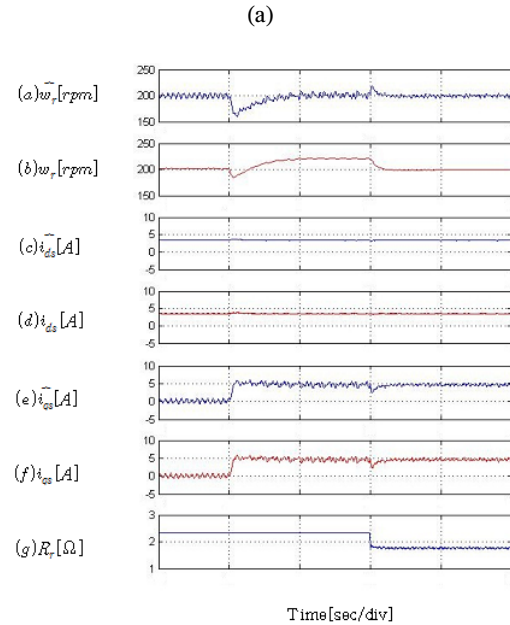
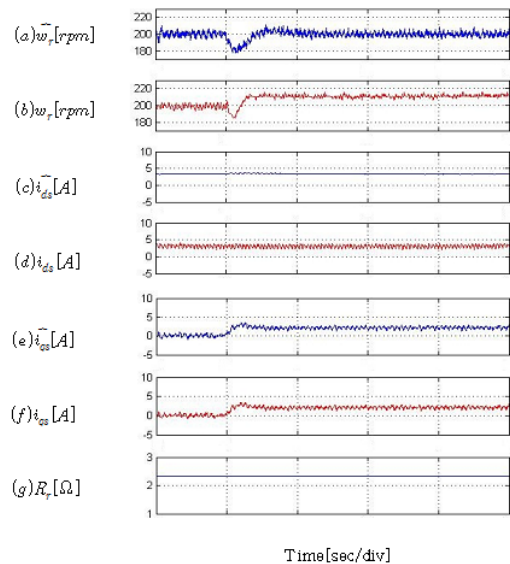
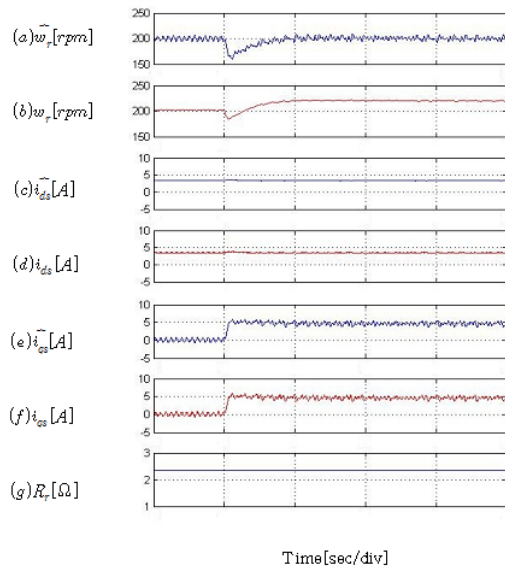


그림 3. 회전자 저항 오차에서 속도응답  
( $\hat{R}_r = 1.3R_r$ , 200rpm, 0 → 3Nm)

(a) 종래의 방식 (b) 제안된 방식  
Fig. 3 Speed response in the rotor resistance variation ( $\hat{R}_r = 1.3R_r$ , 200rpm, 0 → 3Nm)  
(a) Conventional (b) Proposed



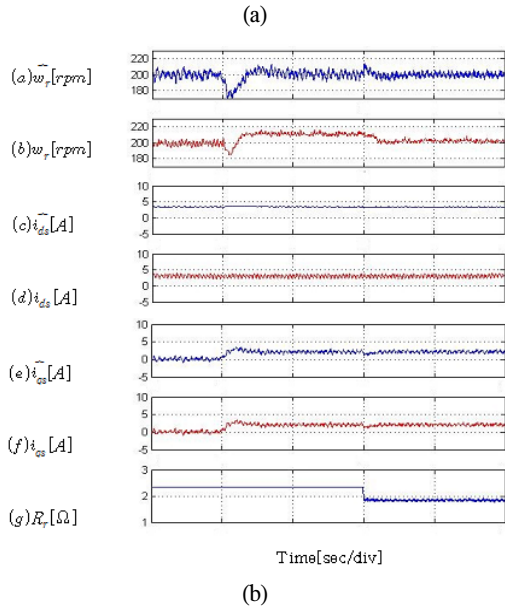


그림 4. 회전자 저항 오차에서 속도응답 실험결과  
 ( $\hat{R}_r=1.3R_r$ , 200rpm, 0 → 3Nm)  
 (a) 종래의 방식 (b) 제안된 방식  
 Fig. 4 Experimental speed response in the rotor resistance variation ( $\hat{R}_r=1.3R_r$ , 200rpm, 0→3Nm)  
 (a) Conventional (b) Proposed

그림 4(a)와 그림 4(b)는 회전자 저항 오차가 있을 때 부하 변동에 의한 속도 응답 실험결과를 나타낸다. 속도 지령치 200rpm으로 운전 중에 부하 3Nm이 인가된다. 시뮬레이션 및 실험 결과에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안한 방식이 종래의 방식보다 정상상태오차가 크게 감소하는 특성을 나타내고 있다.

### V. 결 론

대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산 된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 논문에서는 자속 관측기의 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도추정 오차를 감소하도록 회전자 저항 보상 방식을 제안하였으며, 종래의 방식과 비교하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션과 실험 결과에서 본 논문에서 제안한 파라미터 보정 방식이

회전자 저항 변동에서 속도응답을 개선하는 특성을 나타내고 있다.

### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의해 연구되었음.

### 참고문헌

- [1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, *Sensorless Control of AC Motor Drives*, IEEE Press, 1996.
- [2] P. Vas, *Sensorless Vector and Direct Torque Control*, Oxford Univ. Press, 1998.
- [3] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives", *Proc. IEEE*, Vol.90, No.8, pp. 1359-1394, 2002.
- [4] 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.
- [5] I. Boldea, "Control issues in adjustable speed drives." *IEEE Ind. Elect. Magazine*, vol.2, no.3, pp.32-50, Sept. 2008.

### 저자소개

#### 박강효(Kang-hyo Park)



부산대학교 대학원  
 전자전기공학과 공학석사

※관심분야: 전력전자

#### 권영안 (Young-ahn Kwon)



부산대학교 전자전기공학부 교수

※관심분야: 전력전자