

파라미터 보정을 가지는 센서리스 유도전동기의 상태관측기

박강효, **문 철**, 남기현, 정문규, 권영안
부산대학교 전자전기공학부

State Observer of Sensorless Induction Motor with Parameter Compensation

Kang Hyo Park, Cheol Moon, Kee Hyun Nam, Mun Kyu Jung, Young Ahn Kwon
School of Electrical Engineering, Pusan National University

Abstract - 유도전동기의 가변속 구동시스템에서 자속측 기준제어를 이용하는 경향이 증가하고 있으며 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서가 없는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다. 대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 유도전동기의 속도 추정에서 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도 오차를 배제하기 위하여 파라미터 보상을 가지는 상태관측기를 제안하고 종래의 방식과 비교하여 본 연구에서 제안한 방식을 검증한다.

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 전동기 방정식의 직접 이용 방식, MRAS 방식, 상태관측기 방식, 칼만 필터 방식, 고조파 분석 방식, 슬라이딩모드 관측기 방식, 자속 및 속도추정 없는 전류오차 방식, 직접 토크제어 방식 및 인공지능 방식 등이 연구되고 있다.[1-6]

본 연구에서 적용되는 상태관측기 방식은 넓은 범위에서 양호한 속도응답을 나타내는 제어방식으로 알려져 있다. 그러나 파라미터 오차는 상태관측기에 의한 센서리스 제어방식의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 상태관측기에 의한 유도전동기의 센서리스 속도 제어를 개선하기 위하여 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도 추정 오차가 배제되도록 하는 연구로서 본 연구에서는 파라미터 보상을 가지는 상태관측기를 제안하고 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 연구에서 제안한 방식을 검증한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

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

$$\begin{bmatrix} v_{abcs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & pL_{sr} \\ p(L_{sr})^T & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

단, $(f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]$, $(f_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}]$, $p = d/dt$,

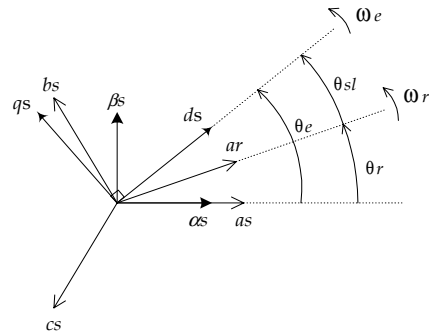
$$R_s = \text{diag}[R_s \ R_s \ R_s], \quad R_r = \text{diag}[R_r \ R_r \ R_r],$$

$$L_s = \begin{bmatrix} L_s + L_m - \frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m - \frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_s + L_m \end{bmatrix}, \quad L_r = \begin{bmatrix} L_r + L_m - \frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & L_r + L_m - \frac{1}{2}L_m \\ -\frac{1}{2}L_m & -\frac{1}{2}L_m & L_r + L_m \end{bmatrix}$$

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

3. 파라미터 보정을 가지는 상태관측기

그림 1은 정지좌표계와 동기속도로 회전하는 동기회전좌표계의 축을 나타낸다.



〈그림 1〉 α-β 축과 d-q 축

식 (1)-(2)로부터, 정지 좌표계(α-β축)상에서의 전압방정식 및 쇄교자속은 아래와 같다.

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

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

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

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

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

단, $M = \frac{3}{2}L_m$, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$.

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

$$\frac{d\hat{\mathbf{x}}}{dt} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{v}_s + \mathbf{L}(\mathbf{i}_s - \hat{\mathbf{i}}_s) \quad (8)$$

단, $\hat{\cdot}$: 추정값, \mathbf{L} : 관측기 이득,

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{i}_s \\ \hat{\lambda}_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \end{bmatrix}, \quad \lambda_r = \begin{bmatrix} \lambda_{\alpha r} \\ \lambda_{\beta r} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_s = \begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{11} = -[R_s/(\sigma L_s) + (1-\sigma)/(\sigma\tau_r)]\mathbf{I},$$

$$A_{12} = M/(\sigma L_s L_r)[(1/\tau_r)\mathbf{I} - \omega_r \mathbf{J}], \quad A_{21} = (M/\tau_r)\mathbf{I},$$

$$A_{22} = -(1/\tau_r)\mathbf{I} + \omega_r \mathbf{J}, \quad B_1 = 1/(\sigma L_s)\mathbf{I}, \quad \sigma = 1 - M^2/(L_s L_r).$$

본 연구에서 적용하는 상태관측기에서 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도 오차를 보상하기 위한 파라미터 보정은 다음과 같다.

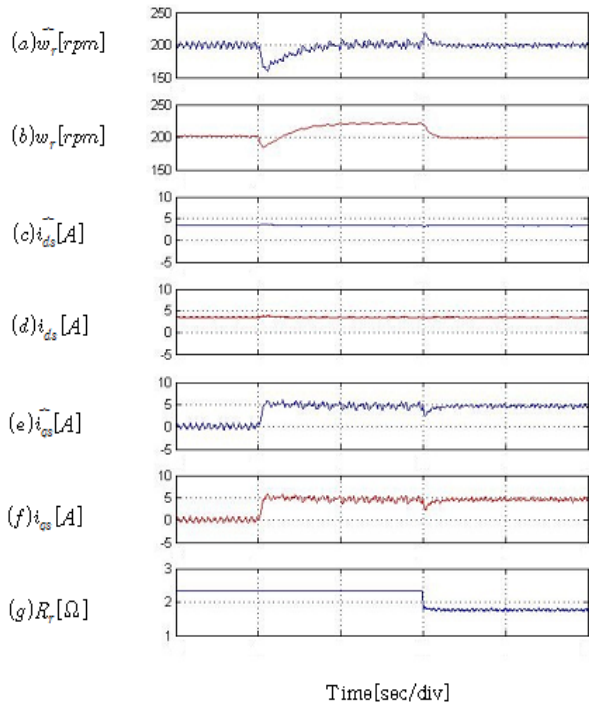
$$R_{r1} = R_{r,old} M \frac{\hat{i}_{ds} \widehat{\lambda}_{\alpha r} \widehat{i}_{\beta s} - \widehat{\lambda}_{\beta r} \widehat{i}_{\alpha s}}{\widehat{i}_{qs} \lambda_{\alpha}^2 + \widehat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (9)$$

$$\Delta R_r = R_{r,old} - R_{r1} \quad (10)$$

$$\widehat{R}_r = K_{pr} \Delta R_r + K_{ir} \int \Delta R_r dt \quad (11)$$

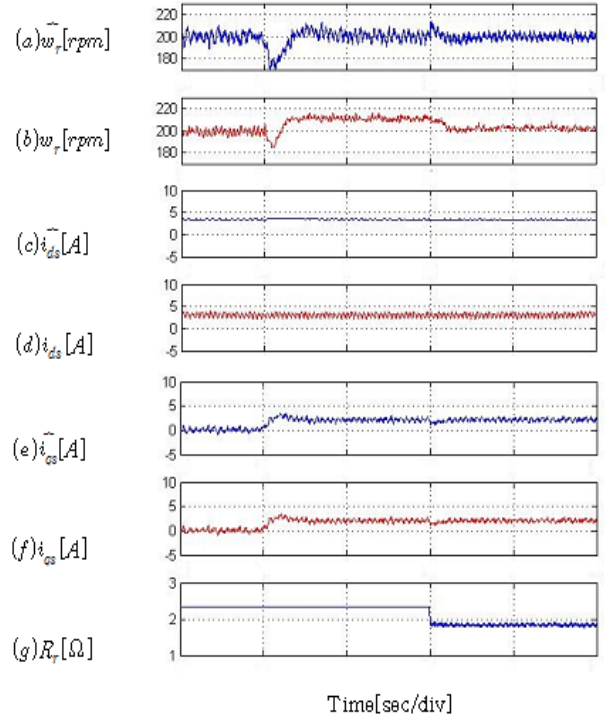
4. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에서 제안한 방식을 검증하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며 사용된 전동기는 2.2kW 3상 농형 유도전동기이다. 그림 2와 3은 속도지령 값 200rpm으로 운전 중에 6Nm의 부하를 인가하는 경우에 대한 시뮬레이션 및 실험으로서 회전자권선 저항을 공칭 값보다 30% 증가한 경우의 속도 응답 결과이다. 결과에서 나타난 바와 같이 본 연구에서 제안한 방식이 양호한 특성을 나타내고 있다.



<그림 2> 회전자저항 변동에서 속도응답 시뮬레이션 결과

($\widehat{R}_r = 1.3R_r$, $\omega_r^* = 200$ rpm, $T_L : 0 \rightarrow 6$ Nm)



<그림 3> 회전자저항 변동에서 속도응답 실험 결과

($\widehat{R}_r = 1.3R_r$, $\omega_r^* = 200$ rpm, $T_L : 0 \rightarrow 6$ Nm)

5. 결 론

대부분의 센서리스제어 방식에서 위치 및 속도추정은 전동기 전압방정식으로부터 계산된다. 따라서 파라미터 오차는 센서리스 제어성능에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 상태관측기 방식은 넓은 범위에서 양호한 속도응답을 나타내는 제어방식으로 알려져 있다. 그러나 파라미터 오차는 상태관측기에 의한 센서리스 제어방식의 성능에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구는 상태관측기에 의한 센서리스 제어방식에서 파라미터 오차에 의해 발생하는 속도추정 오차를 배제하도록 파라미터 보상을 가지는 상태관측기를 제안하였으며 종래의 방식과 비교하기 위하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 시뮬레이션 및 실험 결과에서 본 연구에서 제안한 파라미터 보정 방식이 회전자저항 변동에서 상대적으로 속도응답을 크게 개선하는 특성을 나타내고 있다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제 (No. 20104010100670) 이다.

[참 고 문 헌]

- [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] P. Vas, *Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Univ. Press, 1999.
- [4] J. Holtz, "Sensorless control of induction motor drives", *Proc. IEEE*, Vol.90, No.8, pp. 1359-1394, 2002.
- [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.
- [6] I. Boldea, "Control issues in adjustable speed drives." *IEEE Ind. Elect. Magazine*, vol.2, no.3, pp.32-50, Sept. 2008.