

개선된 자속관측기에 의한 유도전동기의 센서리스 속도제어

신영준, 박성조, 오동길, 김상균, 권영안
부산대학교

Sensorless Control of an Induction Motor by the Improved Observer

Y. J. Shin, S. J. Park, D. G. Oh S. K. Kim and Y. A. Kwon
Pusan National University

Abstract - 유도전동기의 가변속 구동시스템에서 자속 관측기제어를 이용하는 경향이 증가하고 있으며 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서가 없는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다. 본 논문은 유도전동기의 센서리스 제어에 관한 연구로서 과도상태에서 슬라이딩모드 관측기를 사용함으로써 속응성이 빠르고 파라미터의 변동에 강인하며, 정상상태에서는 적응상태관측기를 사용함으로써 채터링을 감소하는 센서리스 제어를 제시한다. 시뮬레이션 및 실험결과에서 과도상태와 정상상태에서 양호한 성능을 나타내었다.

1. 서 론

유도전동기는 산업 및 여러 분야에서 많이 사용되고 있는 전동기로서 전력소자의 발전과 더불어 넓은 범위의 가변속 전동기로서도 그 이용이 증가되고 있다. 최근 유도전동기의 가변속 구동시스템에서 벡터제어를 이용하는 경향이 증가하고 있으며 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서가 없는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다[1, 2]. 본 연구는 유도전동기의 센서리스 속도제어에 관한 연구로서 초기 과도상태에서 슬라이딩모드 자속관측기를 구성하고, 정상상태에서 적응자속관측기를 구성하는 개선된 자속관측기에 의한 센서리스 제어를 수행한다. 슬라이딩모드 제어는 볼락실한 조건 하에서 효율적인 제어 방법으로서 속응성이 빠르고 과도상태 성능이 우수한 장점을 가진다[3]. 본 연구에서는 슬라이딩모드 자속관측기와 적응 자속관측기를 적절히 혼합하여 과도상태와 정상상태에서 안정적인 센서리스 속도제어를 수행하며 시뮬레이션과 실험을 통해 이를 검증한다.

2. 유도 전동기의 수학적 모델

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

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

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

$$\text{단. } (f_{abcs})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}]$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}]$$

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

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

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

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

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

$$p = d/dt$$

3. 개선된 자속관측기 및 속도추정

본 센서리스 제어에서는 초기 과도상태에서 슬라이딩모드 자속관측기를 구성하고, 정상상태에서 적응자속관측기를 구성하여 과도상태와 정상상태에서 안정적인 센서리스 속도제어를 수행한다.

3.1 슬라이딩모드 자속관측기

본 연구에서 슬라이딩모드 관측기는 추정전류와 측정전류의 오차를 이용한 슬라이딩 함수를 사용한다. 정지좌표계상에서의 전압방정식을 고정자전류와 회전자 쇄교자속을 상태변수로 하는 상태방정식으로 나타내면 식(1), (2)로부터 축변환하여 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} = k_1 \left(\begin{bmatrix} \eta & w_r \\ -w_r & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \end{bmatrix} - \eta L_m \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} \right) - k_2 \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \end{bmatrix} = - \left(\begin{bmatrix} \eta & w_r \\ -w_r & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \end{bmatrix} - \eta L_m \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} \right) \quad (4)$$

$$\text{단. } k_1 = \frac{k_3 L_m}{L_r}, \quad k_2 = \frac{R_s}{\sigma L_s}, \quad k_3 = \frac{1}{\sigma L_s}$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

$$\eta = \frac{1}{\tau_r} = \frac{R_r}{L_r}$$

슬라이딩 함수 S 를 다음과 같이 정의한다.

$$S = \begin{bmatrix} \eta & w_r \\ -w_r & \eta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{ar} \\ \lambda_{br} \end{bmatrix} - \eta L_m \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \end{bmatrix} \quad (5)$$

그리고 $\Psi_{\alpha r}$ 을 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \Psi_{ar} &= -k \operatorname{sign}(S_{as}) \\ \Psi_{br} &= -k \operatorname{sign}(S_{bs}) \end{aligned} \quad (6)$$

단, $S_{as} = \widehat{i_{as}} - i_{as}$, $S_{bs} = \widehat{i_{bs}} - i_{bs}$
여기서, " $\widehat{\cdot}$ "는 추정치를 나타낸다.

식(3)-(6)으로부터 다음과 같이 전류 및 자속을 추정한다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \widehat{i_{as}} \\ \widehat{i_{bs}} \end{bmatrix} = k_1 \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \end{bmatrix} - k_2 \begin{bmatrix} \widehat{i_{as}} \\ \widehat{i_{bs}} \end{bmatrix} + k_3 \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \widehat{\lambda_{ar}} \\ \widehat{\lambda_{br}} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Psi_{ar} \\ \Psi_{br} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3.2 적응 자속관측기

유도전동기의 회로방정식을 정지좌표계상의 상태방정식으로 나타내면 식(1),(2)로부터 축변환하여 다음과 같이 된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ \lambda_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} v_s \quad (9)$$

$$\begin{aligned} i_s &= Ax + Bv_s \\ i_s &= Cx \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{단, } i_s = [i_{as} \ i_{bs}]^T \quad \lambda_r = [\lambda_{ar} \ \lambda_{br}]^T$$

$$v_s = [v_{as} \ v_{bs}]^T$$

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

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

$$A_{21} = (M/\tau_r)I$$

$$A_{22} = -(1/\tau_r)I + \omega_r J$$

$$B_1 = 1/(\sigma L_s)I \quad C = [I \ 0]$$

$$I = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad J = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\sigma = 1 - M^2/(L_s L_r) \quad \tau_r = L_r/R_r,$$

전류를 측정하여 관측기의 출력과 비교하는 폐루프 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\hat{x} = \hat{A}\hat{x} + Bv_s + k_p(i_s - \hat{i}_s) \quad (11)$$

$$\hat{i}_s = C\hat{x} \quad (12)$$

식(9)에서 시스템 계수행렬 \hat{A} 는 속도추정기에서 추정한 회전자속도 ω_e 에 의해 가변되는 적응관측기를 구성한다.

3.3 속도 추정

상기한 슬라이딩모드 자속관측기 및 적응 자속관측기

에서 추정된 회전자의 자속벡터로부터 동기회전 전기각은 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{br}}{\lambda_{ar}} \right) \quad (13)$$

회전자의 속도는 동기각속도 및 슬립각속도로부터 구하며 동기각속도 ω_e 는 관측기에 의해 추정한 자속벡터의 전기각을 미분하면 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_e = p\hat{\theta}_e = \frac{p\lambda_{br}\lambda_{ar} - p\lambda_{ar}\lambda_{br}}{\lambda_{ar}^2 + \lambda_{br}^2} \quad (14)$$

동기각속도로 회전하는 $d-q$ 좌표계에서 d 축의 회전자속을 합성자속벡터 λ_r 가 일치시킨다면 유도전동기의 토크는 q 축전류에 비례하게 되고 토크와 슬립각속도의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = \lambda_r i_{qr} = -\frac{M}{L_r} \lambda_r i_{qs} \quad (15)$$

$$\omega_s = -\frac{M}{L_r} R_r \frac{i_{qs}}{\lambda_r} = R_r \frac{T_e}{\lambda_r} \quad (16)$$

식(16)을 고정좌표계 상의 성분들로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_s = \frac{R_r}{L_r} M \cdot \frac{\lambda_{ar} i_{bs} - \lambda_{br} i_{as}}{\lambda_{ar}^2 + \lambda_{br}^2} \quad (17)$$

식 (14)와 (17)로부터 회전자의 속도는 다음과 같이 구한다.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_e - \hat{\omega}_s \quad (18)$$

그림 1은 상기한 속도추정의 블록도를 나타낸다.

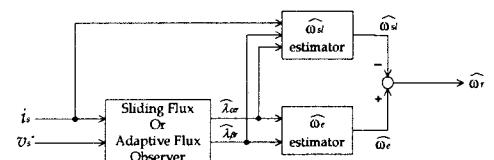


그림 1 속도추정 블록도

이상에서 기술한 유도전동기의 센서리스 속도제어 시스템의 전체 구성도는 그림 2와 같다.

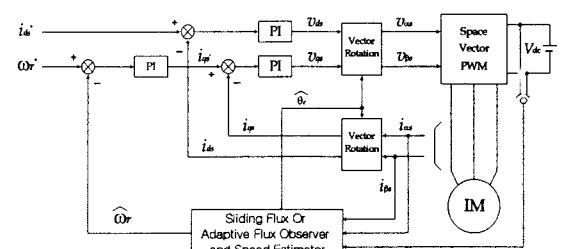


그림 2 전체시스템의 구성도

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제시한 방식으로 시뮬레이션을 수행하였다. 사용된 전동기는 3hp 농형 유도전동기이다.

그림 3과 그림 4는 무부하에서 자령속도가 각각 25, 100rpm인 경우의 시뮬레이션 결과로써 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

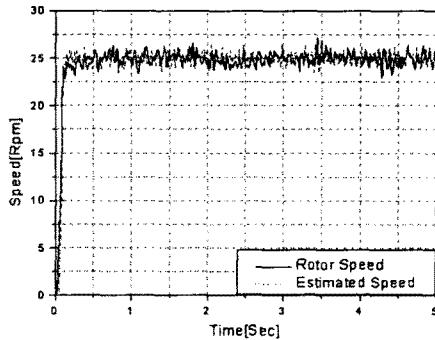


그림 3 지령속도 25rpm인 경우의 속도응답

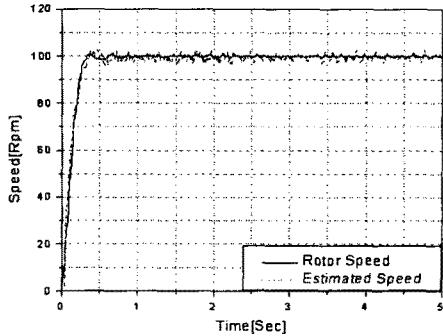


그림 4 지령속도 100rpm인 경우의 속도응답

5. 실험결과 및 검토

그림 2와 같은 유도전동기 센서리스 제어 구동시스템을 제작하고 실험을 수행하였다. 구동시스템의 구성은 다이오드 정류부, 직류링크 커�패시터, 3상 PWM 인버터의 전력변환장치와 마이크로프로세서(Intel80586), 게이트 드라이브, 12bit A/D, 공간전압벡터 PWM을 수행하기 위한 카운터/타이머로 구성되며 그림 5는 본 구동시스템의 주회로를 나타낸다.

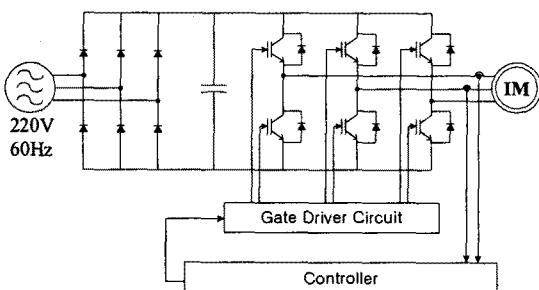


그림 5 구동시스템의 주회로

그림 6과 7은 무부하에서 자령속도가 각각 25, 100rpm인 경우의 실험 결과로서 시뮬레이션 결과와 같이 양호한 속도응답을 나타내고 있다.

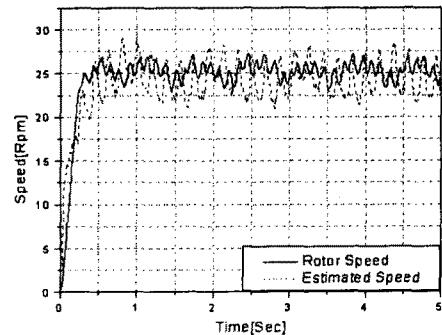


그림 6 지령속도 25rpm인 경우의 속도응답 실험결과

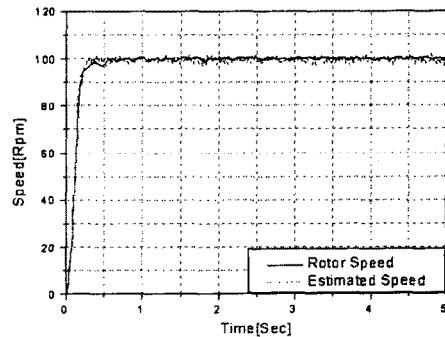


그림 7 지령속도 100rpm인 경우의 속도응답 실험결과

6. 결론

유도전동기는 산업현장 및 응용분야에서 많이 사용되고 있는 전동기로서 전력소자의 개발 및 응용기술의 발전과 더불어 넓은 범위의 가변속 전동기로서도 그 이용이 증가되고 있다. 또한 유도전동기의 가변속 구동시스템에서 자속축 기준제어로서 벡터제어를 이용하는 경향이 증가하고 있으며 설치환경, 가격 등의 제약으로 인하여 위치 및 속도센서가 없는 센서리스 속도제어가 많이 연구되고 있다.

본 논문은 유도전동기의 센서리스 제어에 관한 연구로서 과도상태에서 슬라이딩모드 관측기를 사용함으로써 속응성이 빠르고, 파라미터의 변화에 강인하였으며, 정상상태에서는 적응상태관측기를 사용함으로써 채터링을 감소하였다.

시뮬레이션 및 실험결과에서 초기 과도상태와 정상상태에서 양호한 성능을 나타내었다.

(참 고 문 헌)

- [1] K. Rajashekara, A. Kawamura and K. Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, 1996
- [2] J. Holtz, "State of the Art of Controlled AC Drives without Speed Sensors", Int. J. Electronics, vol.80, no.2, pp.249-263, 1996
- [3] A. Benchaib et al. "Real-time sliding-mode observer and control of an induction motor," IEEE, IE-46, No.1, pp.128-138, 1999