

유도전동기의 센서리스 속도제어에서 상전압 정보의 영향

김상균, 김창화, 이기욱, 권영안  
부산대학교 전기공학과

Voltage Information Effect in Speed Sensorless Control of Induction Motor

S. K. Kim, C. H. Kim, K. U. Lee, Y. A. Kwon  
Department of Electrical Engineering, Pusan National University

**Abstract** - Sensorless induction motor drive is much studied due to the cost and reliability of speed and position sensors. Most sensorless algorithms are based on the mathematical modeling of induction motor including electrical variables such as phase current and voltage. Therefore, the accuracy of such variables largely affects the performance of sensorless induction motor drive. However, the phase voltage does not have to be directly monitored because of switching noise, and they may be reconstructed by using the command voltage. The output voltage of SVPWM-VSI supplying the motor has a considerable error, especially in a low speed range because SVPWM-VSI has a poor resolution in a low command voltage. Such a voltage information effect in speed sensorless control of induction motor has been investigated in this paper.

상전압 정보는 인버터의 지령전압을 사용하게 된다[1]. 그러나, 이러한 전압 정보는 센서리스 제어의 성능에 직접적인 영향을 미치고 있음에도 불구하고 그 상관관계가 정확하게 연구되지 않았다. 특히, 센서리스 속도제어 유도전동기 구동에서 지령전압이 낮아지는 저속 운전영역에서는 전압 해상도가 낮아져 운전 성능이 크게 악화된다. 본 연구에서는 상태관측기를 사용하는 센서리스 속도제어에서 전압정보로서 일반적으로 사용하는 지령전압을 이용하는 경우와 본 연구에서 제안하는 인버터의 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 이용하는 경우에 관하여 분석한다. 그리고, 각각의 경우에서 시뮬레이션을 수행하여 전압정보가 유도전동기의 센서리스 속도제어에 미치는 영향을 제시한다.

2. 유도전동기의 수학적 모델

2.1 실속순시 전압방정식

3상 대칭 농형 유도전동기에서 고정자와 회전자와 전압방정식 및 채교자속은 다음과 같다.

1. 서 론

속도와 토크의 가변이 요구되는 산업응용 및 운송분야에서 폐루프제어를 실현하기 위해서는 엔코더 등을 이용하여 속도나 위치를 측정하는 것이 일반적이다. 벡터제어에 의해 유도전동기를 구동하는 경우에도 속도와 자속 각 위치정보를 얻기위해 일반적으로 속도센서를 사용한다. 그러나 속도센서를 사용할 경우 센서의 추가설치가 필요할 뿐 아니라 신뢰성을 감소시키고 구동시스템의 가격을 상승시킨다. 따라서 속도센서를 사용하지 않고 속도를 제어하는 방법에 대한 관심이 고조되었고 여러 가지 속도추정 알고리즘이 제안되었다. 유도전동기의 센서리스 제어 방식으로서 고정자전압 및 전류값을 측정하여 전동기 상태방정식으로부터 자속 및 회전자속도를 추정하는 방식, 유도전동기의 두 모델, 예를 들어 고정자모델과 회전자모델에 의해 구한 추정치의 차이를 적응메카니즘에 적용시킴으로써 속도를 추정하는 방식, 관측기에 의해 회전자속도를 추정하고 고정자전류 오차와 회전자속도를 이용하여 속도정보를 얻는 방식, 임출력이 잡음의 영향을 받을 경우에 최적의 필터링 알고리즘인 칼만 필터를 이용하는 방식 및 회전자슬롯에 의한 킬러턴스 변화로 야기되는 고정자전압 및 전류고조파를 측정하여 속도를 추정하는 방식등이 있다.[1] 이러한 대부분의 센서리스 제어방식은 유도전동기의 방정식으로부터 상전압, 전류 정보 그리고 유도전동기의 전기적 및 기계적인 파라미터를 근거로 회전자속도와 위치를 추정하게 된다. 유도전동기의 상전류는 고정도의 전류센서와 적절한 필터의 사용을 통하여 비교적 정확한 측정이 가능하다. 그러나, 상전압은 PWM 인버터를 통하여 인가되는 경우에 스위칭 노이즈 등으로 인하여 정확하게 측정하기 어려운 문제가 발생한다. 따라서 대부분의 센서리스 제어에서

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

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

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

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \ f_{br} \ f_{cr}] \quad (4)$$

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

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

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

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

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

단,  $\theta_r$ : 회전자 위치,  $p$ : 미분연산자( $d/dt$ )

## 2.2 정지좌표계의 전압방정식

정지좌표계( $\alpha-\beta$  축)상에서의 전압방정식 및 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{\alpha s} \\ v_{\beta s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & pM & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 & pM \\ pM & \omega_r M & R_r + pL_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & pM & -\omega_r L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha s} \\ i_{\beta s} \\ i_{\alpha r} \\ i_{\beta r} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\lambda_{\alpha s} = L_s i_{\alpha s} + M(i_{\alpha s} + i_{\alpha r}) = L_s i_{\alpha s} + M i_{\alpha r} \quad (11)$$

$$\lambda_{\beta s} = L_s i_{\beta s} + M(i_{\beta s} + i_{\beta r}) = L_s i_{\beta s} + M i_{\beta r} \quad (12)$$

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

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

$$\text{단, } M = \frac{3}{2} L_m, \quad L_s = L_k + M, \quad L_r = L_r + M$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}$$

## 2.3 동기회전좌표계의 전압방정식

동기회전 좌표계( $d-q$  축)상에서의 전압방정식 및 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{d s} \\ v_{q s} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s & pM & -\omega_e M \\ \omega_e L_s & R_s + pL_s & \omega_e M & pM \\ pM & -\omega_{sl} M & R_r + pL_r & -\omega_{sl} L_r \\ \omega_{sl} M & pM & \omega_{sl} L_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d s} \\ i_{q s} \\ i_{d r} \\ i_{q r} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\lambda_{d s} = L_s i_{d s} + M(i_{d s} + i_{d r}) = L_s i_{d s} + M i_{d r} \quad (16)$$

$$\lambda_{q s} = L_s i_{q s} + M(i_{q s} + i_{q r}) = L_s i_{q s} + M i_{q r} \quad (17)$$

$$\lambda_{d r} = L_r i_{d r} + M(i_{d s} + i_{d r}) = L_r i_{d r} + M i_{d s} \quad (18)$$

$$\lambda_{q r} = L_r i_{q r} + M(i_{q s} + i_{q r}) = L_r i_{q r} + M i_{q s} \quad (19)$$

$$\text{단, } \omega_{sl} = \omega_e - \omega_r$$

발생토크와 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{M}{L_r} (i_{\alpha s} \lambda_{d r} - i_{\beta s} \lambda_{q r}) \quad (20)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{-B}{J} \omega_r + \frac{T_e - T_L}{J} \quad (21)$$

## 3. 상태관측기에 의한 센서리스 속도제어

본 연구에서 적용한 센서리스 제어방식은 상태관측기에 의한 방식으로서 비교적 넓은 속도범위에서 우수한 성능을 보이는 방식으로 알려져 있다.[1,2]

유도전동기의 회로방정식을 정지좌표계상의 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

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

$$= A x + B v_s$$

$$i_s = C x \quad (23)$$

$$\text{단, } i_s = [i_{\alpha s} \ i_{\beta s}]^T, \quad \lambda_r = [\lambda_{\alpha r} \ \lambda_{\beta r}]^T$$

$$v_s = [v_{\alpha s} \ v_{\beta s}]^T$$

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

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

$$A_{21} = (M/\tau_r) I \quad A_{22} = -(1/\tau_r) I + \omega_r J$$

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

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

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

전류를 측정하여 관측기의 출력과 비교하는 페루프 관측기를 구성하면 다음과 같다.

$$\hat{\dot{x}} = \hat{A} \hat{x} + B v_s + k_p (i_s - \hat{i}_s) \quad (24)$$

$$\hat{i}_s = C \hat{x} \quad (25)$$

추정된 회전자의 자속벡터로부터 동기회전 전기각은 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\theta}_e = \tan^{-1} \left( \frac{\hat{\lambda}_{\beta r}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}} \right) \quad (26)$$

회전자의 속도는 동기각속도 및 슬립각속도로부터 구해진다. 먼저 동기각속도  $\omega_e$ 는 관측기에 의해 추정한 자속벡터의 전기각을 미분하면 다음과 같이 추정된다.

$$\hat{\omega}_e = p \hat{\theta}_e = \frac{p \hat{\lambda}_{\beta r} \hat{\lambda}_{\alpha r} - p \hat{\lambda}_{\alpha r} \hat{\lambda}_{\beta r}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}^2 + \hat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (27)$$

동기각속도로 회전하는  $d-q$  좌표계에서  $d$ 축의 회전자자속을 합성자속벡터  $\lambda_r$ 과 일치시킨다면 유도전동기의 토크는  $q$  축전류에 비례하게 되고 토크와 슬립각속도의 관계식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = \lambda_r i_{q r} = -\frac{M}{L_r} \lambda_r i_{\alpha s} \quad (28)$$

$$\omega_s = -\frac{M}{L_r} R_r \frac{i_{\alpha s}}{\lambda_r} = R_r \frac{T_e}{\lambda_r^2} \quad (29)$$

식(29)를 고정자표계상의 성분( $\alpha, \beta$ )들로 나타내면 다음과 같다.

$$\hat{\omega}_s = \frac{R_r}{L_r} M \cdot \frac{\hat{\lambda}_{\alpha r} i_{\beta s} - \hat{\lambda}_{\beta r} i_{\alpha s}}{\hat{\lambda}_{\alpha r}^2 + \hat{\lambda}_{\beta r}^2} \quad (30)$$

식(27)과 (30)으로부터 회전자의 속도는 다음과 같이 추정한다.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_e - \hat{\omega}_s \quad (31)$$

그림 1은 본 연구에서 구성한 유도전동기 센서리스 속도제어 시스템의 전체 블록도를 나타낸다. 여기에서 자속 및 속도추정은 상 전압, 전류 정보 그리고 유도전동기의 파라미터를 근거로 이루어진다. 상전류는 고정도의 전류센서와 적절한 필터의 사용을 통하여 비교적 정확한 측정이 가능하다. 그러나, 상전압은 PWM 인버터를 통하여 인가되는 경우에 스위칭 노이즈 등으로 인하여 정확하게 측정하기 어려운 문제가 발생한다. 따라서 대부분의 센서리스 제어에서 상전압 정보는 인버터의 자

령전압을 사용하게 된다. 그러나, 지령전압이 낮아지는 저속 운전영역에서는 전압 해상도가 낮아져 운전 성능이 크게 악화된다. 본 연구에서는 전압정보로서 일반적으로 사용하는 지령전압을 이용하는 경우와 본 연구에서 제안하는 인버터의 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 이용하는 경우에 관하여 분석한다.

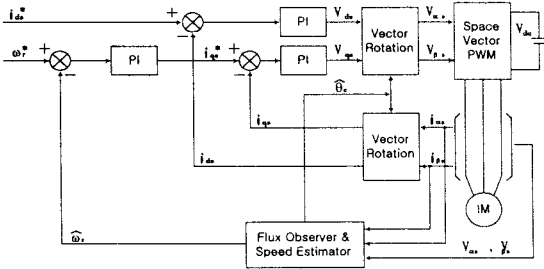


그림 1 전체시스템의 블록도

#### 4. 시뮬레이션 결과 및 검토

그림 1과 같은 상태관측기에 의한 센서리스 속도제어 시스템을 구성하여 시뮬레이션을 수행하였다. 전동기에 인가되는 상전압은 SVPWM-VSI의 출력전압으로서 샘플링 주기는  $150\mu s$ 이며, 전압해상도를 결정하는 서브샘플링 구간은  $2\mu s$ 로 설정하였다.

그림 2와 3은 지령속도 25rpm에서 자속 및 속도추정을 위한 전압정보로서 지령전압을 사용하는 경우와 SVPWM-VSI의 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 사용하는 경우에서 각각 시뮬레이션을 수행한 결과로서 저속 운전에서 속도응답을 나타낸다.

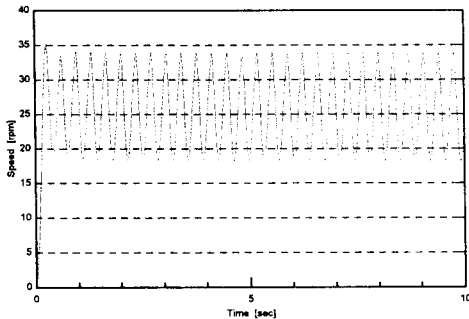


그림 2 지령전압 정보인 경우의 속도응답(25rpm)

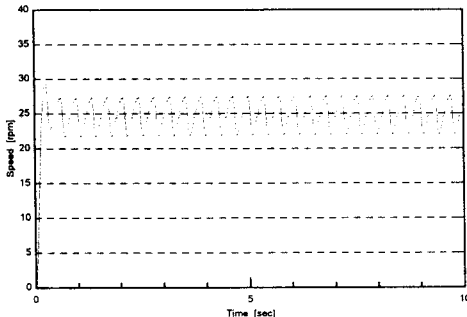


그림 3 인버터 출력전압 정보인 경우의 속도응답(25rpm)

그림 4와 5는 지령속도 1000rpm에서 각각의 경우에 대한 속도응답을 나타낸다. 시뮬레이션 결과에서 나타난 바와 같이 저속영역에서 낮은 전압해상도로 인한 속도 변동이 크게 나타나며, 인버터 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 전압정보로서 사용하는 경우에 속도응답이 크게 개선됨을 보여주고 있다.

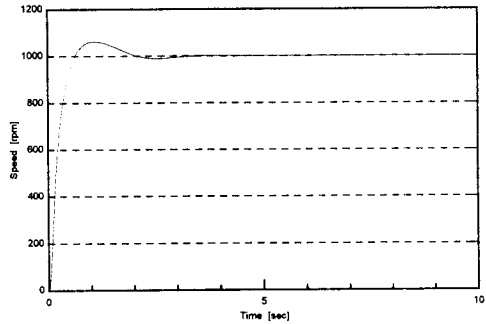


그림 4 지령전압 정보인 경우의 속도응답(1000rpm)

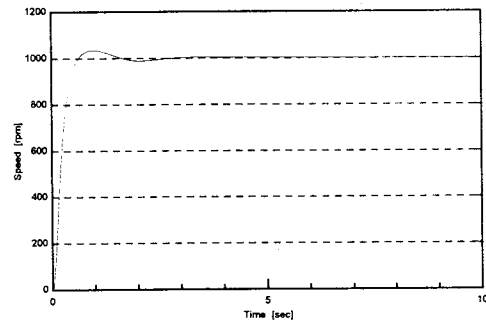


그림 5 인버터 출력전압 정보인 경우의 속도응답(1000rpm)

#### 5. 결 론

대부분의 센서리스 제어방식은 유도전동기의 방정식으로 부터 상 전압, 전류 정보 그리고 유도전동기의 전기적 및 기계적인 파라미터를 근거로 회전자속도와 위치를 추정하게 된다. 따라서, 상전압, 전류의 정확도는 유도전동기의 센서리스 제어성능에 큰 영향을 준다. 그러나, 유도전동기의 상전압 정보는 PWM 인버터의 스위칭 노이즈 등으로 인하여 정확한 측정이 용이하지 않으므로 지령전압을 사용하게 된다. 이러한 전압 정보는 센서리스 제어의 성능에 직접적인 영향을 미치고 있음에도 불구하고 그 상관관계가 정확하게 연구되지 않았다. 본 연구에서는 상태관측기를 사용하는 센서리스 속도제어에서 전압정보로서 일반적으로 사용하는 지령전압을 이용하는 경우와 본 연구에서 제안하는 인버터의 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 이용하는 경우에 관하여 분석하였다. 각각의 경우에서 시뮬레이션을 수행한 결과, 인버터의 스위칭에 의해 결정되는 출력전압을 전압정보로서 이용하는 경우에 저속에서 운전성능이 크게 향상됨을 보여주고 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] K. Rajashekar, A. Kawamura and K. Matsuse, Sensorless Control of AC Motor Drives, IEEE Press, 1996.
- [2] C. Ilaş et al., "Comparison of Different Schemes without Shaft Sensors for Field Oriented Control Drives", IEEE/IECON, pp. 1579-1588, 1994.