최소차원 토크•관성 관측기를 이용한 전동기 극저속 운전

김은기*, 전기영*, 오봉환**, 정춘병*, 이훈구§, 김용주§§, 서영수*, 한경희*
*명지대학교, **명지전문대학, §용인송담대학, §§동양공업전문대학

Low Speed Drive of Motor Using Least Order Load Torque • Inertia Observer

Eun-Gi Kim*, Kee-Young Jeon*, Bong-Hwan Oh**, Choon-Byeong Chung*
Hoon-Goo Lee §, Yong-Joo Kim §§, Young-Soo Seo*, Kyung-Hee Han*
*Myong Ji Univ. **Myong Ji College, §Song Dam College,
§§Dong Yang Technical College

ABSTRACT

In this paper, an instantaneous speed observer with a reduced order is proposed to implement an indirect control for an motor with excellent dynamic stability and performance in a very low speed region.

The proposed observer can estimate the instantaneous speed in very low speed region and simplify the system configuration by adopting a least order load torque-inertia observer to estimate the load torque and the rotor speed. Simulation are carried out to illustrate the performance of the proposed estimator at very low speed.

1. 서 론

엔코더를 사용하는 전동기의 속도제어계에 있어서 속도정보는 보통 샘플링 기간동안의 엔코더 펄스 수에 의해 계산된다. 그러나 이러한 방법은 엔코더 펄스 주기가 속도제어 주기보다 길게 되는 극저속영역에서는 속도제어 주기내에 정확한 속도정보를 얻을 수 없기 때문에 속도제어계가 불안정하게 되고 빠른 속도응답을 기대할 수 없게 된다[1-3].

본 논문에서는 전동기 시스템의 극저속 영역에서 안정적이고 동특성이 우수한 운전을 하기 위해 전차원상태관측기로부터 추정되는 속도정보를 입력으로 하는 최소차원 토크•관성관측기를 구성하여 부하외란과 관성을 피드포워드 제어를 함으로써 극저속영역에 대한 강인성을 갖도록 한다. 제시한 제어 알고리즘을 MATLAB SIMULINK를 통해 전체 시스템을 모델링하고 극저속에서 속도 추정 능력이 향상됨을 확인 한다.

2. 전차원 관측기를 이용한 속도 추정

다음과 같은 전동기 기계계를 기본으로 전차원 관측기를 구성한다.

$$T_e = J\frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r + T_L \tag{1}$$

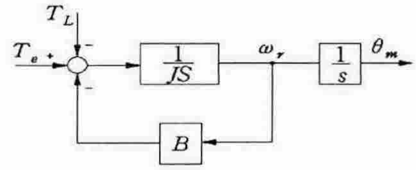

그림 1 전동기 기계계 모델링

식(1)의 시스템 모델로부터 시스템의 상태변수에 부하토크 T_L 를 부가하여 구하면 식 (2)와 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_m \\ \dot{\omega}_r \\ \dot{T}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_r \\ T_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e$$

$$u = T_e,\ C = [1\ 0\ 0],\ y = \theta_m \tag{2}$$

여기서, 부하 토크의 시간에 대한 변화는 매우 느리다고 가정하여 $dT_L/dt = 0$ 으로 둔다.

식 (2)의 상태 방정식으로부터 전차원 관측기를 구성하면 식 (3)과 같이 비례이득 L 를 포함한 형태로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\widehat{\theta}}_m \\ \dot{\widehat{\omega}}_r \\ \dot{\widehat{T}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_m \\ \widehat{\omega}_r \\ \widehat{T}_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix} T_e + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \end{bmatrix} \left[\theta_m - [1\ 0\ 0] \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_m \\ \widehat{\omega}_r \\ \widehat{T}_L \end{bmatrix} \right] \tag{3}$$

식(3)을 정리하면 다음식과 같고, 이를 블록도로 표시하면 다음 그림2와 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\theta}}_m \\ \dot{\hat{\omega}}_r \\ \dot{\hat{T}}_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_r + L_1(\theta_m - \hat{\theta}_m) \\ -\frac{\hat{B}}{\hat{J}}\hat{\omega}_r - \frac{1}{\hat{J}}\hat{T}_L + \frac{1}{\hat{J}}T_e + L_2(\theta_m - \hat{\theta}_m) \\ L_3(\theta_m - \hat{\theta}_m) \end{bmatrix} \tag{4}$$

여기서, L 은 비례 이득으로써 만족스러운 추정오차 특성을 얻기 위하여 설계자가 설정하는 값이다.

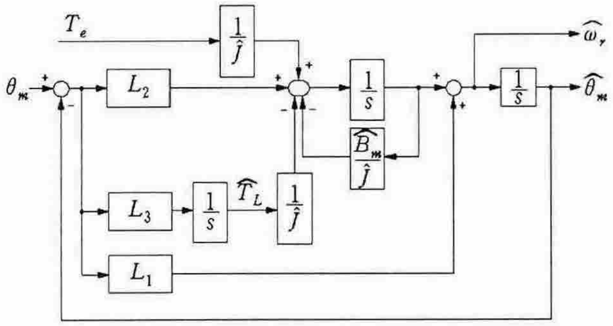

그림 2 전차원 관측기를 이용한 속도 추정 블록도

측정된 위치 정보로부터 외란 토크 T_L , 속도 ω_r , 구동 토크 T_e 를 검출하는데 있어 안정된 특성을 갖는 관측기의 비례 이득 L 을 설정하는 것이 관측기 설계의 핵심이다.

비례 이득을 계산하기 위한 특성방정식은 다음과 같다.

$$Det[SI-(A-LC)] = S_3 + \frac{L_1J+B_m}{J}S_2 + \frac{L_2J+L_1B_m}{J}S - \frac{L_3}{J} = 0 \tag{5}$$

전차원 관측기는 그림 2에서와 같이 θ_m 과 시스템의 모델을 통하여 추정된 각 $\hat{\theta}_m$ 사이의 오차를 PID 제어기를 통하여 줄여나가는 제어기로 생각 될 수 있다.

$$\frac{\hat{\theta}_m}{\theta_m} = \frac{\hat{\omega}_r}{\omega_r} = \frac{L_1S^2+L_2S+L_3}{\hat{J}S^3+(\hat{B}+L_1)S^2+L_2S+L_3} \tag{6}$$

식(6)에서와 같이 관측기는 일종의 저역 통과 필터의 특성을 나타낸다. 안정된 특성을 갖는 비례이득 L_1 , L_2 , L_3 를 설정하면 설계된 관측기는 저역 통과 필터의 차단각 주파수이내에서는 외란($\hat{J}$, $\hat{B}$)으로 인한 오차에도 불구하고 속도를 추정할 수 있다. 그러나 이러한 외란은 부하가 가변되고 극저속 영역에서는 많은 오차를 가지고 있다. 그러므로 최소차원 토크·관성 관측기를 이용하여 정확한 외란을 추정하고 피드포워드 보상하여 보다 정밀한 속도응답을 얻는다.

3. 최소차원 토크 · 관성 관측기

3.1 최소차원 토크 · 관성 관측기

전차원 관측기로부터 추정된 속도를 입력으로 하고 관성계수를 상태변수로 하는 최소차원 토크·관성 관측기를 구성하기 위해 다음과 같은 상태공간 표현식을 고려한다.

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \hat{\omega}_r \\ J \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \omega_r \\ J \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}u = AX+Bu$$
$$y = CX \tag{7}$$

식(7)의 2행으로부터 출력 $\dot{y}$ 와 제어기 모델출력 $\hat{y}$ 와의 오차를 고려하여 관측기 방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{x}}_2 = A_{21}x_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + G[(A_{11}y + A_{12}\hat{x}_2 + B_1u) - \dot{y}] \tag{8}$$

여기서, $x_2 = J$ 이다.

식(8)에서오른쪽 네 번째 항은 제어기 모델 출력 $\hat{x}_2$ 와 전차원 관측기의 상태변수 $\dot{x}_1$ 의 추정오차를 고려한 수정항이다. 식(7)의 2행과 식(8)의 차를 나타내는 추정오차 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{\hat{x}}_2 - \dot{x}_2 \\ &= A_{21}x_1 + A_{22}\hat{x}_2 + B_2u + G(\dot{\hat{y}} - \dot{y}) \\ &\quad - A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + B_2u \\ &= (A_{22} + GA_{12})e \end{aligned} \tag{9}$$

여기서, $e = \hat{x}_2 - x_2$

식(9)을 보면 출력 y 의 미분이 필요하게 된다. 미분항을 제거하고 계산을 편리하게 하기 위해 매개변수 ζ 를 도입하면 $\zeta = \hat{x}_2 - Gy$ 이 되고, 이를 식(9)식에 대입하면,

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} - G\dot{y} &= A_{21}y + A_{22}(\zeta - Gy) + B_2u \\ &\quad + G[A_{11}y + A_{12}(\zeta - Gy) + B_1u - \dot{y}] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{\zeta} &= (A_{22} + GA_{12})\zeta + (B_2 + GB_1)u \\ &\quad + (A_{21} - A_{22}G + GA_{11} - A_{12}G^2)y \end{aligned} \tag{10}$$

이 식을 이용하여 관측기를 구성할 수 있고, $x_2 = J$ 는 식 (8)에 의해 얻을 수 있다.

$$\hat{J}(t) = \zeta(t) + G\hat{\omega}_r(t) \tag{11}$$

4. 시뮬레이션

제시한 제어 알고리즘을 MATLAB SIMULINK를 통해 전체 시스템을 모델링하고 극저속 영역에서 속도 추정 능력이 향상됨을 확인하였으며, 시뮬레이션에 사용한 전동기 파라미터는 다음 표 1과 같다.

표 1. 전동기 파라미터

정격 출력, 극수	3.7 [KW] (5HP), 4극
정격 전압, 정격 전류	220 [V], 12.9 [A]
관성 모멘트	0.0148 [$kg \cdot m^2$]
고정자 저항, 회전자 저항	0.9210 [Ω], 0.5830 [Ω]
고정자, 회전자, 상호인덕턴스	0.0671 [H], 0.0650 [H]

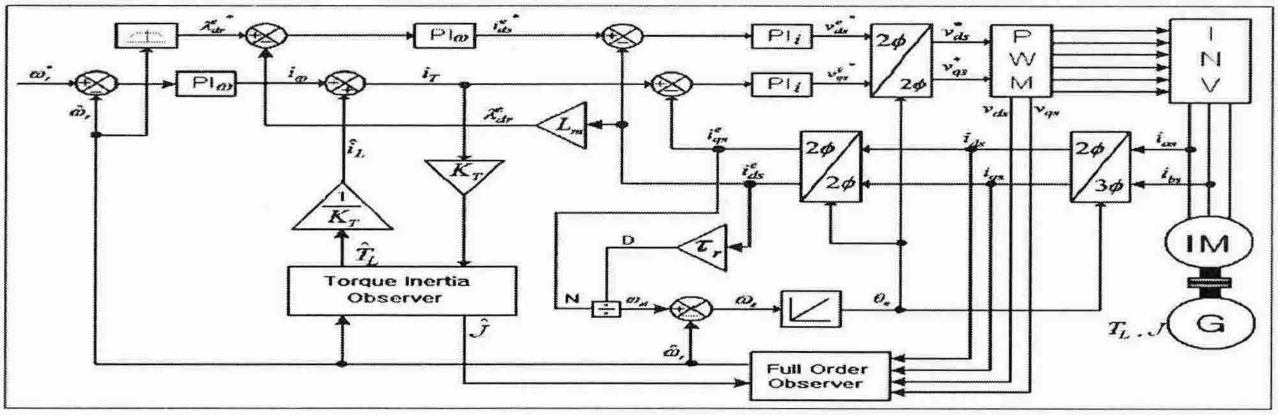

그림 3 전체 시스템 제어 블록도

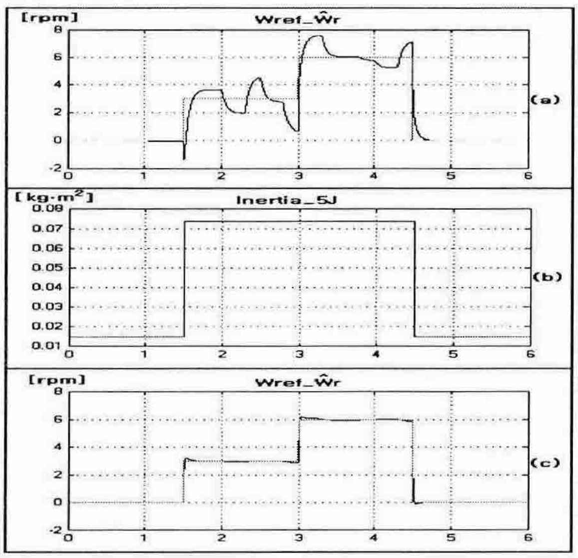

그림 4 관성계수 보상 전, 후의 추정속도 J =0.0148→0.074 [$kg \cdot m^2$]

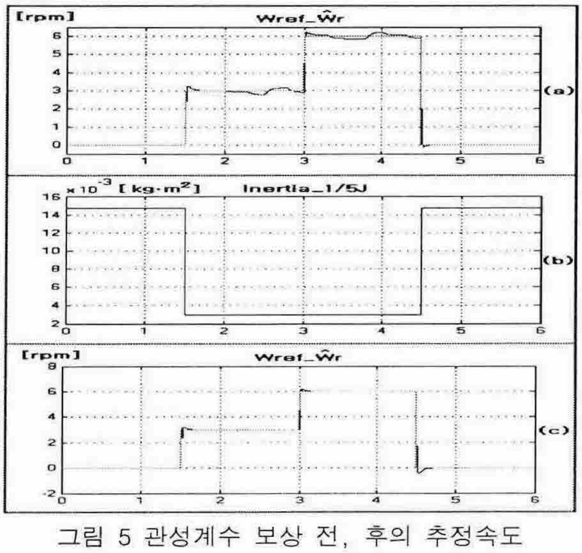

그림 5 관성계수 보상 전, 후의 추정속도 속도 J =0.0148→0.00296[$kg \cdot m^2$]

그림4(a)와 그림5(a)는 관성계수를 (b)와 같이 임의로 변화 했을 때의(J =0.0148→0.074, J =0.0148 →0.00296 [$kg \cdot m^2$])관성계수 보상전의 추정속도 파형이다. 1.5[s]~4.5[s]의 관성계수 변화시에 추정속도가 기준속도에서 약 2[rpm]까지 벗어나는 것을 알 수 있다. 그림 4(c)와 그림 5의 (c)는 관성계수를 보상하였을 때의 기준속도와 추정속도 파형이다. 최소차원 관측기를 이용해 관성계수를 보상함으로써 관성계수와 속도 변화시에도 원활한 추정이 이루어짐을 확인할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전차원 관측기를 구성하여 극저속 영역에서의 속도정보를 추정하고, 이를 입력으로 최소차원 토크·관성 관측기를 구성하여 토크와 관성을 feed-forward 제어함으로써 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1)극저속에서 속도 검출 지연에 따른 속도 리플을 저감을 기할 수 있었다.

(2)극저속 영역에서 토크와 관성을 추정, 보상함으로써 보다 정밀한 속도 응답을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] M. Rodic, K. Jezernic, and A. Sabanovic, "Speed sensorless sliding mode torque control of induction motor," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, vol. 3, 2000, pp. 1820-1827.

[2] M. Tursini, R. Petrella, and F. Parasiliti, "Adaptive sliding mode obserer for speed sensorlees control of induction motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, pp. 1380-1387, Sept./Oct. 2000.

[3] K.B.Lee. "Improvement of low speed operation of electric machine with an inertia identification using ROELO"IEE Proc.-Electr. Power Appl.,Vol. 151, No. 1 , January 2004