

최소차원 부하토크 관측기를 이용한 유도전동기의 강인한 속도제어

서영수^{*}, 임영배^{**}, 성대용^{*}, 송호빈^{*}, 김종균^{*}

*명지대학교 **충남전문대

Robust Speed Drive of Induction Motors using Least Order Load Torque Observer

Young-Soo Seo^{*}, Young-Bae Lim^{**}, Dae-Yong Sung^{*},

Ho-Bin Song^{*}, Jung-Gyun Kim^{*}

*Myong-Ji Univ. **Chung-Nam Junior College.

Abstract

In this paper, we proposed a new speed control algorithm based on the least-order observer theory. The proposed system using the new algorithm can estimate the instantaneous speed accurately even at low speed by using a load torque observer estimating the torque component of indirect-vector controlled induction motor. Thus the stable characteristics of speed control are possible at low speed even in the case of using low-resolution rotary encoder. Also, the system becomes robust against disturbance by feedforward control the load torque estimated automatically at the speed observer.

1. 서론

유도전동기의 속도제어계 설계에 있어서 현재 널리 이용되고 있는 일정 이득의 PI 제어를 기본으로 하는 속도제어계에서는 속도 응답 및 토크 응답의 극과 영점을 PI 제어기의 파라미터 범위 내에서 설계하는 것은 한계가 있기 때문에 속도제어기의 이득을 크게 하는 일 없이 부하 외란을 보상하는 방법이 요구된다 [1][2]. 특히 강인성은 파라미터 변동과 외란에 민감하게 반응을 보이는 PI 제어기만으로는 어렵다.

또한, 엔코더를 이용한 전동기의 속도제어계에 있어서 속도정보는 보통 샘플링 기간 동안의 엔코더 펄스 수에 의해 계산된다. 그러나 이러한 방법은 엔코더 펄스가 속도제어 주기보다 길게 되는 저속 영역에서는 속도제어 주기 내에 정확한 속도 정보를 얻을 수 없기 때문에 속도제어계가 불안정하게 되고 속도제어특성이 악화된다[3].

본 논문에서는 농형 3상 유도 전동기 전압형 인버터의 고성능 속도제어를 위해 최소차원 관측기 이론에 입각한 새로운 속도제어 알고리즘을 제안하였다. 제안한 시스템에서 속도는 간접벡터제어 유도전동기의 토크 성분에 의한 부하토크 관측기를 사용함으로써 저속시의 순시속도를 정확하게 추정하여 저분해능의 엔코더를 사용하는 경우에도 저속에서의 안정된 속도제어 특성을 얻고자 하였으며 속도관측기에 의해 자동적으로 추정하는 부하 토크를 이용하여 피드포워드 제어를 하므로써 외란에 대한 강인성을 갖도록 하였다[4]. 또한, 제시한 제어알고리즘에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 기존의 PI 제어방식에 비하여 기준 속도와 부하토크의 변화에 대한 과도응답특성의 우수함을 보였다.

2. 최소차원 부하토크 관측기

간접벡터제어시 전류와 자속제어가 완전하게 이루어

진다고 가정하면 전동기 구동토크는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$T_M = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr} i_{qs} \quad (1)$$

$$= K_T i_{qs}$$

$$\text{여기에서, } K_T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}$$

전동기가 부하를 구동할 때의 전동기 속도는 식 (2)와 같고, 그 속도 추정모델은 그림 1과 같이 표현할 수 있다.

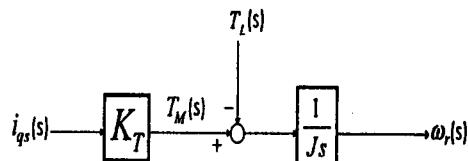


그림 1. 속도 추정모델

$$\omega_r = \frac{1}{J s} (T_M - T_L) \quad (2)$$

식 (2)에서 부하 토크 T_L 이 추정되면 식 (3)에 의해 속도 추정이 가능하다.

$$\widehat{\omega}_r' = \frac{1}{J_n s} (T_M - T_L) \quad (3)$$

여기에서 $\widehat{\omega}_r'$ = 전동기 모델 출력

J_n = 전동기 모델의 관성

\widehat{T}_L = 부하 토크 추정값

외란인 부하토크의 변화가 제어기의 샘플링주기에 의해 매우 느리다고 보면 토크는 일정하며 그 미분값은 0이라고 볼 수 있으므로 식 (4)와 같이 정의할 수 있다[5].

$$T_L(i+1) = T_L(i) \quad (4)$$

식 (2)와 식 (4)의 관계로부터 외란을 상태변수로 취한 이산계 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \omega_r(i+1) \\ T_L(i+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r(i) \\ T_L(i) \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} T_M(i) \quad (5)$$

$$\omega_r(i) = Cx(i) \quad (6)$$

$$\text{여기서, } A_{11} = 1, A_{12} = -\frac{T_s}{J}, B_1 = \frac{T_s}{J},$$

$$C = [1 \ 0], x(i) = \begin{bmatrix} \omega_r(i) \\ T_L(i) \end{bmatrix}$$

T_s : 속도제어 샘플링 주기

식 (5)과 식 (6)으로부터 고피나스 방법에 의한 최소차원 부하토크 관측기는 다음과 같이 구성되어 관측기의 불력도는 그림 2와 같이 나타낸다.

$$\xi(i+1) = \xi(i) + G \frac{T_s}{J} \{ T_M(i) - \widehat{T}_L(i) \} \quad (7)$$

$$\widehat{T}_L(i) = \xi(i) - G \omega_r(i) \quad (8)$$

단, ξ : 매개변수, G : 관측기 이득

식 (8)에서 부하 토크 추정치는 다음과 같이 표현되어 오차는 허용할 만큼 작게 할 수 있도록 관측기 비례이득 G 를 정할 수 있다.

추정오차를 더 빨리 0으로 수렴시켜 의미 있는 상태 추정을 하기 위해서는 오차로부터 상태추정모델을 연속적으로 수정해 나가는 것이 필요하다. 본 관측기는 부하토크 관측기이기 때문에 부하토크가 인가되면 전동기 모델 출력 $\widehat{\omega}_r$ 과 실제속도 ω_r 사이에는 다음 식으로 표현되는 편차 $\Delta \omega$ 가 발생하게 된다.

$$\Delta \omega = \widehat{\omega}_r - \omega_r = (T_L - \widehat{T}_L)/J_S \quad (9)$$

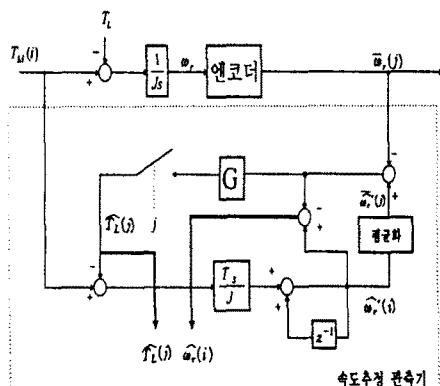


그림 2. 최소차원 관측기에 의한 속도추정 block도

연속계에서는 의미를 갖지 않으나 속도제어 주기내에 엔코더 펄스가 일어지지 않는 저속영역에서는 $\omega_r = \widehat{\omega}_r - \Delta \omega$ 로서 속도추정이 가능하게 된다. 그러나 그림 2에서 속도검출값 $\widehat{\omega}_r(i)$ 는 엔코더 펄스 $(j-1) \sim j$ 사이의 평균속도이기 때문에 $\widehat{\omega}_r(i)$ 도 이 사이의 평균값을 연산해서 전동기 모델 출력 평균치 $\widehat{\omega}_r(j)$ 를 식 (11)에 의해 구하여야 한다.

$$\widehat{\omega}_r(j) = [\sum \widehat{\omega}_r(i)] j/n(j) \quad (10)$$

식 (10)에서 $n(j)$ 는 엔코더 펄스 기간 사이의 속도 추정 횟수이다. 그림 2의 관측기에서 자동적으로 추정되는 부하토크 추정치를 전류 지령치로 피드백하면 부하토크 퍼드 포워드 보상과 같은 형태의 보상이 가능하게 된다.

3. 시뮬레이션

본 연구에서 제안된 최소차원 부하토크 관측기를 이용한 속도추정 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션으로 고찰하였다.

부하토크 추정값 \widehat{T}_L 과 부하토크 T_L 파의 오차는

$$e(i) = \widehat{T}_L - T_L(i) \quad (11)$$

$$e(i+1) = (1+GA_{12})e(i) \quad (12)$$

$$= \widehat{A}e(i)$$

으로 표현되고 \widehat{A} 의 값이 관측기의 극배치, 응답성을 결정한다. 즉, \widehat{A} 의 고유값이 관측기의 극으로 되며 관측기의 이득 G 값의 선정에 따라서 수렴속도가 결정된다.

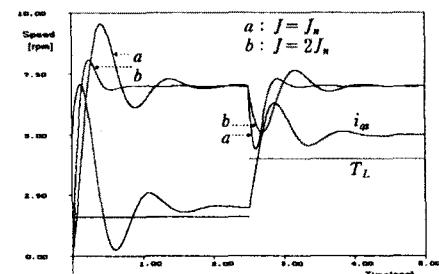


그림 3. 외란억압특성 (PI 제어)

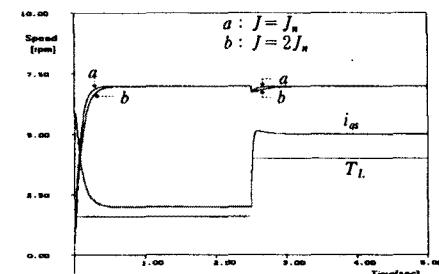
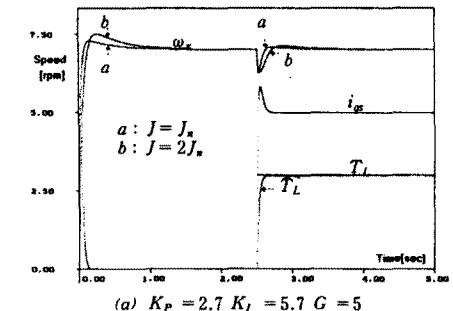
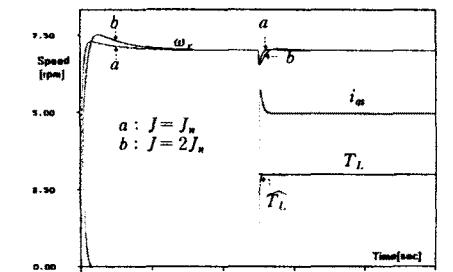


그림 4. 외란억압특성 (관측기 사용)



$$(a) K_p = 2.7, K_i = 5.7, G = 5$$



$$(b) K_p = 2.7, K_i = 5.7, G = 10$$

그림 5. G 변화에 대한 속도응답

그림 3과 그림 4는 부하를 스텝적으로 변화시켰을 경우의 외란억압 특성을 나타낸 것이다. 기존의 PI 제어기에 비하여 관측기를 사용한 때가 부하투입시의 속도변동을 억압하고 있으며, 이것은 추정외란의 피드포워드 보상에 의해서 외란억압특성이 개선됨을 입증하고 있다.

그림 5에서 (a)는 $G = 5$, (b)는 $G = 10$ 으로 선정하고, K_p 와 K_i 의 값은 (a), (b) 모두 2.7, 5.7로 선정하였을 때의 부하토크 추정치의 수렴시간을 보여주고 있다.

G 가 크면 \hat{T}_L 의 수렴시간이 빠르게 되고, 외란에 대하여 보다 강인한 시스템을 구성할 수가 있으며, 목표값에 대한 응답특성은 거의 변화가 없음을 알 수 있다. 또한 외란억압특성은 K_i 의 변화에 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 따라서 외란억압특성에 있어서 관측기는 PI제어시스템과 독립적으로 설계가 가능하고 계에게 2자유도 제어계임을 알 수 있다.

4. 실험결과

본 실험에서는 1024[ppr]의 분해능을 갖는 엔코더의 속도정보를 2체배하여 사용하였고, 10[msec]의 속도샘플링으로 제어하기 때문에 속도제어주기 사이에 엔코더펄스가 1개 들어오는 속도는 약 2.92[rpm]이 된다.

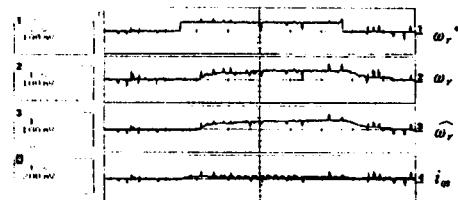


그림 6. 세안된 방법에 의한 속도응답

그림 6은 속도지령을 $2 \rightarrow 10 \rightarrow 2$ [rpm]으로 하였을 때의 목표치 응답파형으로서 원활한 속도추정이 이루어 점을 확인 할 수 있다.

그림 7과 그림 8은 부하를 각각 정격의 $1/3 \rightarrow 2/3$, $2/3 \rightarrow 1/3 \rightarrow 2/3$ 으로 스텝적으로 가변시켰을 때의 응답 특성으로써 관측기에서 얻어진 부하토크 추정값 \hat{T}_L 을 피드포워드 제어를 한 경우 부하토크에 의한 속도 변동을 고속으로 억압하고 있다.

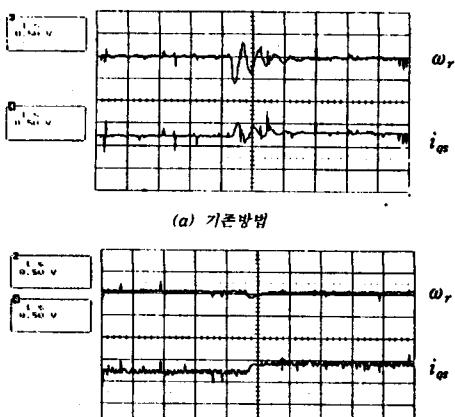


그림 7. 외란억압특성 ($1/3 \rightarrow 2/3$ 부하가변)
 $i_q : 0.5 [A/div]$, Speed : 100 [rpm/div]

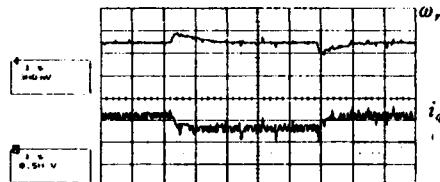


그림 8. 외란억압특성 ($2/3 \rightarrow 1/3 \rightarrow 2/3$ 부하가변)

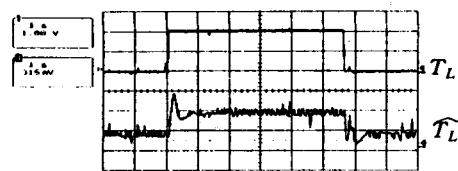


그림 9. 부하가변에 대한 응답파형

그림 9은 부하토크와 추정된 부하토크를 나타낸 것이다. 관측기 내부의 미분동작과 시스템 잡음에 의한 성분이 \hat{T}_L 에 중첩되어 리플성분이 존재하나 부하변동에 대한 양호한 부하토크 추정이 이루어지고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 간접 벡터제어 유도전동기의 시스템에 대해서 저속에서의 속도정보 부족으로 인해 발생하는 속도검출 지역에 대한 보상과 부하외란에 대해서 강인한 특성을 갖는 제어기를 구성하기 위하여 최소차원 부하토크 관측기를 제안하였다.

최소차원 부하토크 관측기를 이용해서 속도추정 관측기가 구성되어지는 것을 나타내었으며, 제안된 추정기는 정확한 순시속도를 추정하므로 기존의 PI 제어기보다 안정적이고 동특성이 우수한 속도제어기를 구성할 수 있다. 또한 속도추정 과정에서 자동적으로 추정되는 부하토크를 이용하여 피드포워드 보상을 병용하는 것에 의해서 저속 운전시에도 안정성이 뛰어나고, 기존의 제어기에 비해서 외란 억압특성이 현저하게 개선되고 있는 것을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Kouhei ohnishi et al., "One Approach to the Torque-Speed Regulation of the Separately Excited DC Motor Using the State Observer", JIEE Trans, Vol. 104, No. 6, p.p. 49 - 55, 1984.
- [2] K. matsuse and H. Kubota., "Adaptive Flux Observer of Induction Motor and Its Stability", JIEE. Trans, Vol. 111-D, No. 3, p.p. 188-194, 1991.
- [3] Y. Okamura et al., "Robust and Adaptive Control of Servomotor with Low Resolution Shaft Encoder by Average Speed Type Instantaneous Speed Obsenber", IPEC Proc., p.p. 705 - 711, 1995.
- [4] M. Koyama, "Comparison Between Performance of Several Speed Control System of Motor with Elastically Coupled Load", JIEE Trans., Vol. 107-D, No. 8, p.p. 1010 - 1017, 1987.
- [5] H. Watanabe, H. Nakatani, and T.Fujii, "A Method of Flux observer for the Induction Motor", JIEE Trans., Vol. 109-D, No. 9, p.p. 662 - 628, 1989.