

상태관측기를 이용한 유도전동기의 속도제어 특성개선에 관한 연구

이성근¹⁾, 노창주²⁾

A Study on the Improvement of Speed Control Characteristics of Induction Motor using State Observer

Sung-geun Lee , Chang-joo Noh

Abstract

In this paper, we suggest a new speed control algorithm using the load disturbance observer based on the Gopinath' theory for the robust and stable speed control of a 3 phase induction motor driven by a voltage source inverter. It estimates load disturbance and speed using motor torque and real speed, and estimates inertia moment using estimated load disturbance.

The proposed system becomes robust against disturbances by means of a feedforward control of the load disturbance estimated from the observer. And also, by means of a feedback control of estimated speed information inherently included in the load disturbance observer, the stable characteristics of the speed control can be obtained even at low speed region. However, when the moment of inertia changed, it is difficult to obtain good transient response characteristics because the estimated load disturbance has error and the performance of the observer decreased. For this reason, we estimate and identify the moment of inertia using the estimated load disturbance.

1) 한국해양대학교 기관공학과 박사과정 전기제어 전공
2) 한국해양대학교 전기공학과 교수

The proposed control algorithm is confirmed through the Computer simulations and experimental implementations by TMS320C31 microprocessor.

1. 서론

유도전동기 속도제어계 설계에 있어서 쉽게 구현할 수 있는 PI 제어기가 널리 사용되고 있으며, 이는 제어기 이득값을 잘 선정함으로써 속도 및 토크를 효율적으로 제어할 수 있으나, 부하외란이나 플랜트의 파라미터 변동에 대해 스스로 제어기 이득값을 수정해 나갈 수 없기 때문에 운전범위에 제한을 받게 된다^[1]. 유도기의 강인한 속도제어를 위한 알고리즘에 대한 연구가 진행되고 있으나 시스템 파라미터의 불확실한 측정이나, 미지의 외란 등으로 인해서 전동기 구동 시스템의 바람직한 서보특성을 얻기가 어렵다. 최근에 상태관측기를 이용하여 부하외란을 추정하고, 추정된 부하외란에 대한 피드포워드 제어를 행함으로써 부하외란 변동에 대해 강인한 속도제어 방법이 보고되고 있다^[2].

한편, 엔코더를 이용한 속도검출 방법으로 저속운전을 하는 경우 짧은 제어주기 내에 엔코더 펄스가 극히 적게 들어오게 되어 속도오차가 발생하고, 별도의 펄스 열이 엔코더 펄스와 독립적으로 동작하게 되어 측정시간과의 동기를 유지하기 힘들다. 엔코더를 이용한 저속운전시의 속도검출 오차를 개선하기 위한 방안으로 상태관측기를 이용하여 현재의 샘플링 시점에서의 순시속도를 추정하여 이를 속도 정보로 사용하는 연구가 진행되어 왔다^[3]. 상태관측기를 이용한 속도제어 방법은 저속운전 특성 및 파라미터 변화에 대한 과도응답 특성을 개선시킬 수가 있으나, 관측기에는 공칭 관성 모멘트가 중요한 파라미터이기 때문에 관성 모멘트에 오차가 존재하는 경우에는 가감속시 내부외란으로 인해 부하외란 추정에 오차가 발생되어 과도시의 속도응답에 오버슈트 및 추종지연이 발생된다^{[4],[5]}. 따라서, 관측기의 설계시 가장 중요한 파라미터인 기계계의 관성모멘트를 정확히 추정·동정할 필요가 있다.

본 논문에서는 유도전동기의 간접벡터제어 시스템에 대해서 고티나스(Gopinath) 이론^[6]에 근거한 부하외란 관측기를 구성하고 추정된 부하외란의 피드포워드(feedforward) 제어에 의해 외란에 강인성을 갖게하며, 추정된 부하외란을 이용하여 속도를 추정함으로써 저속영역에서의 안정된 속도제어 특성을 얻고자 한다. 또한, 가감속시의 부하외란 추정치와 그 정상치를 이용하여 기계계의 관성 모멘트를

추정·동정하는 알고리즘을 적용함으로써 가감속시의 부하외란 추정오차를 감소시켜 바람직한 과도응답 특성을 얻고자 한다.

시뮬레이션과 실험을 통해 기존의 PI 제어에 의한 방법과 제안된 관측기알고리즘에 의한 제어방법과의 외란에 대한 강인성 및 저속운전시의 안정성을 비교·검토하고, 관성 모멘트 추정 및 동정에 의해 관측기로부터 추정된 부하외란의 오차 감소로 속도제어시의 과도응답 특성이 개선됨을 확인하고자 한다.

2. 상태관측기를 이용한 제어시스템 구성

2.1 부분 관측기를 이용한 속도제어 시스템 및 관성 모멘트 추정

주어지는 제어대상은 가관측인 상태변수 X_1 , 직접 관측이 불가능한 상태변수 X_2 로 분리하여 상태방정식 및 출력방정식이 다음과 같은 선형 시스템을 고려한다.

$$\begin{bmatrix} X_1(k+1) \\ X_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u(k) \quad (2-1)$$

$$y(k) = [C_1 \quad C_2] \begin{bmatrix} X_1(k) \\ X_2(k) \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

식 (2-1) 및 식 (2-2)로 표시되는 이산치형 시스템에 대하여 고티나스(Gopinath)^[6] 방법에 의한 부분 관측기를 구성하면

$$\begin{aligned} \zeta(k+1) &= (A_{22} + G A_{12}) \zeta(k) + (A_{21} - G A_{22} + G A_{11} - G A_{12} G) x_1(k) \\ &\quad + (B_2 + G B_1) u(k) \end{aligned} \quad (2-3)$$

$$\hat{X}_2(k) = \zeta(k) - G X_1(k) \quad (2-4)$$

여기서 $\zeta(k)$: 매개변수, $(n-q)$ 관측기 상태벡터

G : $(n-q) \times q$ 귀환 이득행렬, $\hat{X}_2(k)$: X_2 의 추정치

로 되며, 식 (2-3) 및 식 (2-4)에 의해 관측기를 구성할 수 있고, 식 (2-4)에 의해 \hat{X}_2 를 얻을 수 있다.

마찰계수를 무시하고 관성 모멘트가 J 인 전동기가 부하를 구동할 때 라플라스 변환된 기계적 동특성식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_r = \frac{1}{J_s} (T_M - T_L) \quad (2-5)$$

부하외란 T_L 이 외란으로서 작용하는 시스템의 경우에 부하외란 T_L 에 해당하는 전류성분을 피드포워드 하는 것에 의해 부하 외란 T_L 을 상쇄시킬 수 있다. 부하외란 T_L 이 추정되면 식 (2-6)에 의해 속도추정이 가능하고, 이를 이산계로 나타낸 상태방정식으로 나타내면 식 (2-7)로 표현될 수 있다.

$$\hat{\omega}_m = \frac{1}{J_n s} (T_M - \hat{T}_L) \quad (2-6)$$

$$\hat{\omega}_m(k+1) = \hat{\omega}_m(k) + \frac{T_s}{J_n} (T_M(k) - \hat{T}_L(k)) \quad (2-7)$$

여기서, $\hat{\omega}_m$: 관측기 출력, J_n : 관측기 관성, \hat{T}_L : 부하외란 추정치이다. 그러나, 이러한 시스템을 구현하기 위해서는 부하외란 T_L 을 미지입력 변수로 부터 가관측인 상태변수로 변환하여야 한다. 샘플링 주기 T_s 사이에서 부하외란의 변화가 완만하다고 하면 부하외란을 스텝상의 함수로 근사해서 다음 식과 같이 정의할 수 있다^[1].

$$T_L(k+1) = T_L(k) \quad (2-8)$$

식 (2-7), 식 (2-8)의 관계로부터 부하외란을 상태변수로 취한 상태방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \omega_r(k+1) \\ T_L(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_r(k) \\ T_L(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ 0 \end{bmatrix} T_M(k) \quad (2-9)$$

$$\omega_r(k) = Cx(k) \quad (2-10)$$

$$\text{여기서, } A_{11}=1, \quad A_{12}=-\frac{T_s}{J}, \quad B_1=\frac{T_s}{J}, \quad C=[1 \ 0], \quad x(k)=\begin{bmatrix} \omega_r(k) \\ T_L(k) \end{bmatrix}$$

이며, T_M 은 전동기의 발생토크이다. 식 (2-3)에 위 전동기 구동 시스템을 적용하면 식(2-11)이 되고 부하외란 추정치 \hat{T}_L 은 식 (2-12)로 된다.

$$\zeta(k+1) = \zeta(k) + G \frac{T_s}{J_n} \{ T_M(k) - \hat{T}_L(k) \} \quad (2-11)$$

$$\hat{T}_L(k) = \zeta(k) - G \omega_r(k) \quad (2-12)$$

식 (2-7)과 식 (2-11)의 관계로부터 매개변수 ζ 는 $G \hat{\omega}_m$ 이 되고, 식 (2-12)에 식 (2-5) 및 식 (2-6)의 관계를 적용하여 부하외란 추정치를 주파수 영역에서 표현하면 식 (2-13)과 같고, $J=J_n$ 이라고 가정하면 식 (2-13)은 식 (2-14)로 정리되며, 부하외란 추정치 \hat{T}_L 은 부하외란 T_L 의 1차 지연된 값이 되는 것을 알 수 있다.

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + \frac{J_n}{G} s} T_L + \frac{1}{1 + \frac{J_n}{G} s} (J - J_n) s \omega_r \quad (2-13)$$

$$\hat{T}_L = \frac{1}{1 + T_b s} T_L \quad (2-14)$$

부하외란 인가시 부하외란과 부하외란 추정치와의 오차로 인하여 모델 속도 추정치 $\hat{\omega}_m$ 과 전동기 실제속도 ω_r 사이에는 식 (2-15)와 같은 속도편차 ω_{err} 가 발생하므로 관측기 설계시에는 부하외란 관측기에 부하외란 추정오차로 인한 속도편차를 보상한 루프가 별도로 부가되어야 한다. 또한, 저속영역의 실제속도 추정치 $\hat{\omega}_r$ 은 식 (2-15)에서 알 수 있는 바와 같이 모델 출력 $\hat{\omega}_m$ 에서 속도편차 ω_{err} 를 감하여 구할 수 있으므로 식 (2-16)과 같이 표현할 수 있다.

$$\omega_{err} = \hat{\omega}_m - \omega_r \quad (2-15)$$

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_m - \omega_{err} \quad (2-16)$$

기계계의 관성 모멘트와 관측기의 관성 모멘트에 오차($\Delta J = J - J_n$)가 발생하면 관측기의 성능에 문제점이 발생되고 부하외란의 추정에 오차가 발생되어 과도시의 속도제어 특성에 문제점이 발생한다^{[4],[5],[7]}. 따라서, 바람직한 제어특성을 얻기 위해서 관성 모멘트를 추정하고, 이를 관측기의 공칭 관성 모멘트로 순시동정할 필요가 있다. 식 (2-13)에서 관성 모멘트 추정중은 부하외란 T_L 이 일정하다고 가정하면 식 (2-13)의 우변 제1항의 1차 지연요소를 무시할 수가 있으므로 식(2-13)을 관성 모멘트 오차비 $R = J/J_n - 1$ 에 대해 정리하면 식 (2-17)과 같고, 관성 모멘트 추정치 \hat{J} 는 식 (2-18)로 표현되며, 추정된 \hat{J} 를 관측기의 공칭

관성 모멘트 J_n 으로 사용할 수 있다.

$$R = \left\{ \frac{1}{J_n s} (\hat{T}_L - T_L) + \frac{1}{G} (\hat{T}_L - T_L) \right\} / \omega_r \quad (2-17)$$

$$\hat{J} = (R+1) J_n \quad (2-18)$$

Fig. 2.1은 부분 관측기를 이용하여 부하외란 및 속도추정을 하고, 추정된 부하외란으로부터 관성 모멘트를 추정·보상하는 이산형 제어블록도이다.

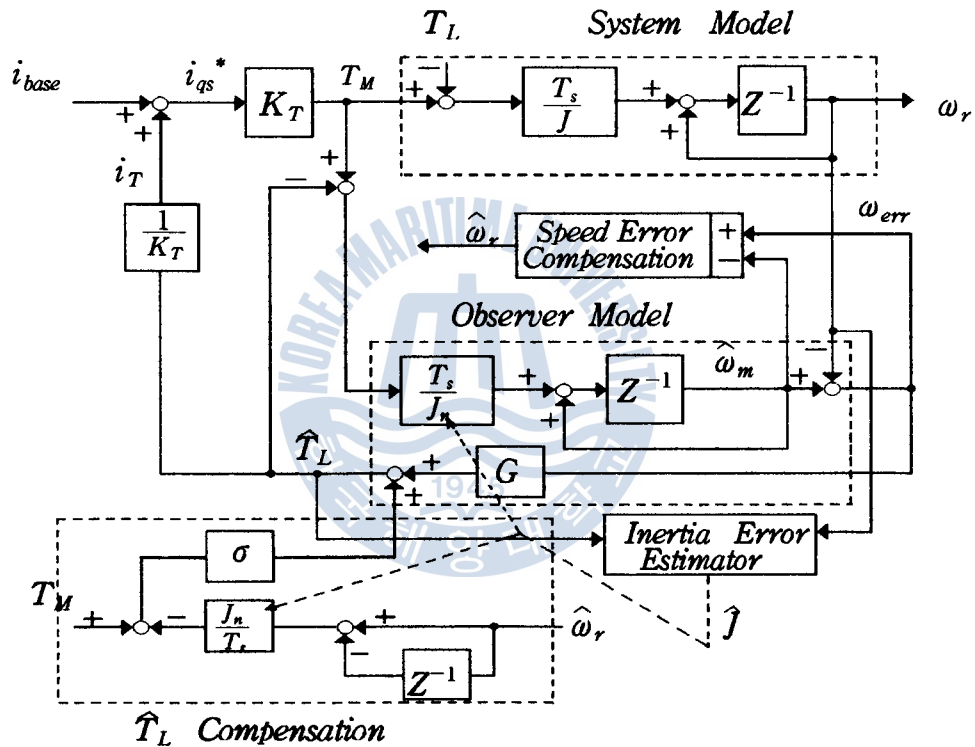


Fig. 2.1 Estimation block diagram of load disturbance and speed using the disturbance observer

2.2 시뮬레이션 및 실험

Fig. 2.2는 관성 모멘트 값에 오차가 발생할 때 기계 관성 모멘트값을 추정하는 시뮬레이션이다. 가감속시 부하외란 추정치가 정상치에서 정 혹은 부의 값으로 값으로 커지는 오차가 발생되어 과도시의 속도응답에 오버슈트 및 진동이 나타나며,

관성 모멘트 오차 추정값 R 은 A점에서 추정이 시작되어 B점에서 완료된다. R 로부터 계산된 관성 모멘트 추정치 \hat{J} 는 실제 기계 관성 모멘트보다 1/2 작은 값에서 실제 기계 관성모멘트 J 값에 빨리 수렴되고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2.3은 Fig. 2.2와 같은 조건에서 ΔJ 보상을 한 파형으로서 과도시 부하와 관련된 추정치는 실제치에 가깝고, 속도응답에 진동이 발생하지 않으며 신속한 응답을 보이고 있다. 또한, 속도추정도 원활하게 이루어지고 있음을 알 수 있다.

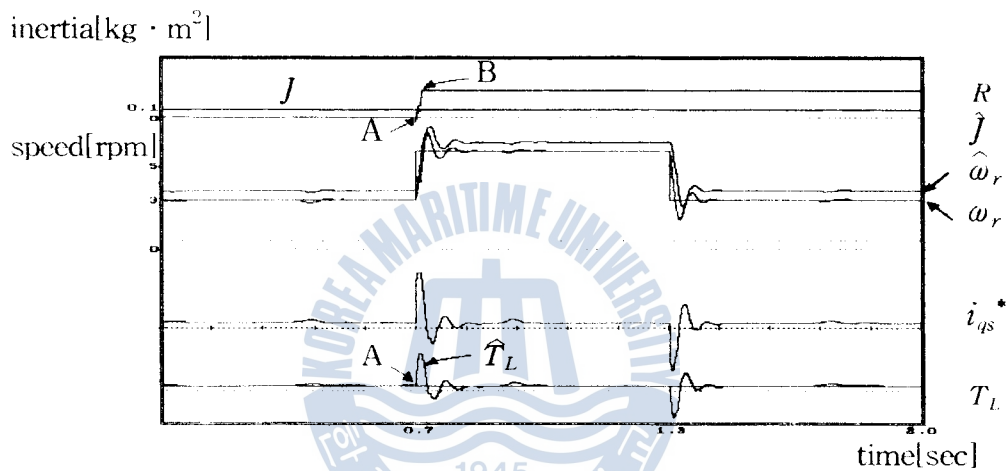


Fig. 2.2 Speed response and inertia estimation characteristics when $J_n = J/2(= 0.042[\text{kg} \cdot \text{m}^2])$.

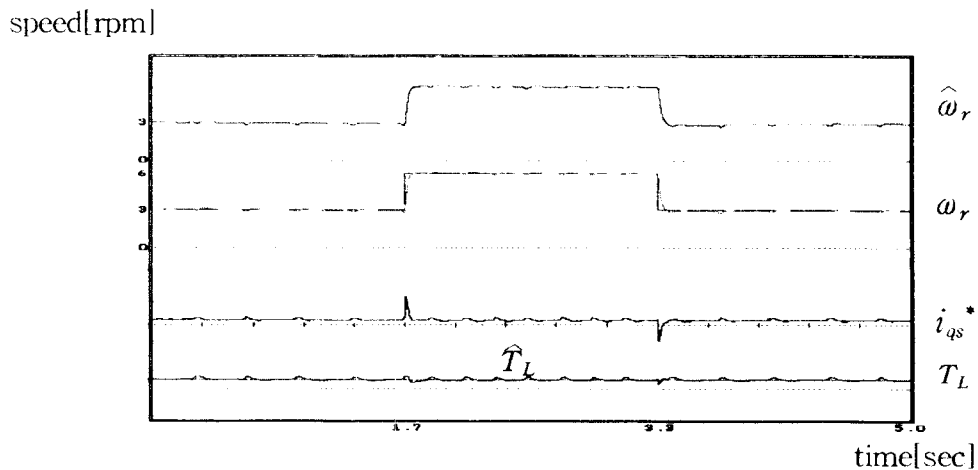
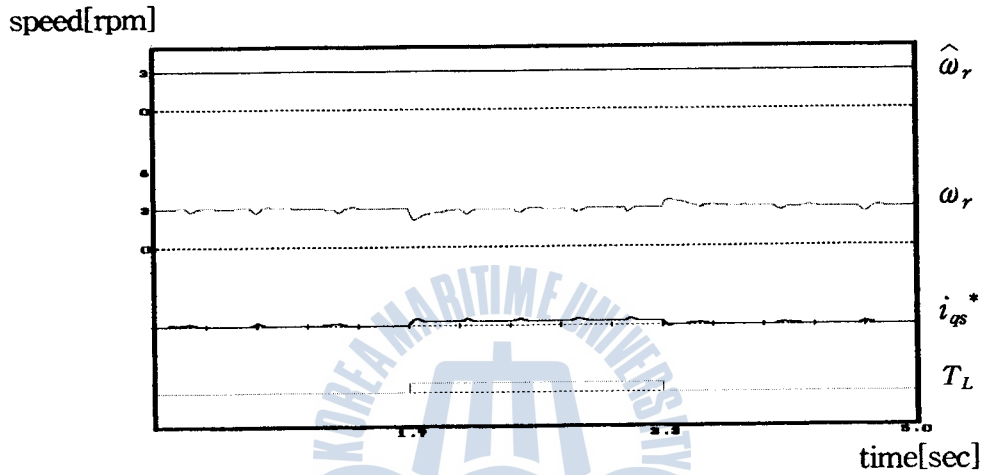
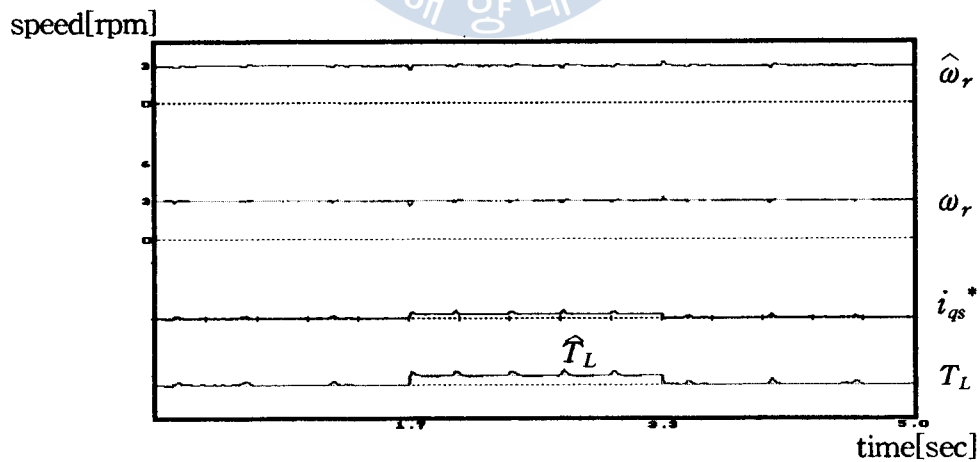


Fig. 2.3 Speed response characteristics with ΔJ compensation.

Fig. 2.4는 일정속도 3[rpm]으로 회전하고 있는 전동기에 부하를 무부하에서 정격(1.23[kg · m])의 1/6(0.205[kg · m])로 다시 무부하로 인가하였을 때 기존의 방법과 제안된 방법의 외란억제 특성을 비교한 파형이다. 기존의 방법은 부하 인가시 약 0.8[rpm]의 속도변동을 보이고 있으나, 제안한 방식은 0.3[rpm]의 속도변동을 보이고 있다.



(a) Conventional PI control.



(b) Proposed control with ΔJ compensation.

Fig. 2.4 Disturbance rejection characteristics.

Fig. 2.5는 $J_n = J/2 = 0.042[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ 인 조건에서 과도시의 속도특성의 문제점을 분석하고 기계계의 관성 모멘트값을 추정하는 실험파형이다. 가감속시에는 부하외란 추정치가 실제보다 커지거나 작게 된다. 따라서, 부하외란 추정오차로 인해 과도시의 속도응답에 오버슈트 및 진동이 나타나고, 시스템이 불안정하게 된다. 또한, 관성 모멘트 추정치 \hat{J} 는 $0.084[\text{kg} \cdot \text{m}^2]$ 에 수렴되고 있다. Fig. 2.6은 Fig. 2.5와 같은 조건에서 ΔJ 의 보상에 의해 과도시의 속도제어 특성이 개선된 실험파형이다. 과도시의 부하외란 추정치가 실제치와 거의 같고 속도추정이 원활하게 이루어지고 있으며, 과도응답 특성이 양호함을 알 수 있다.

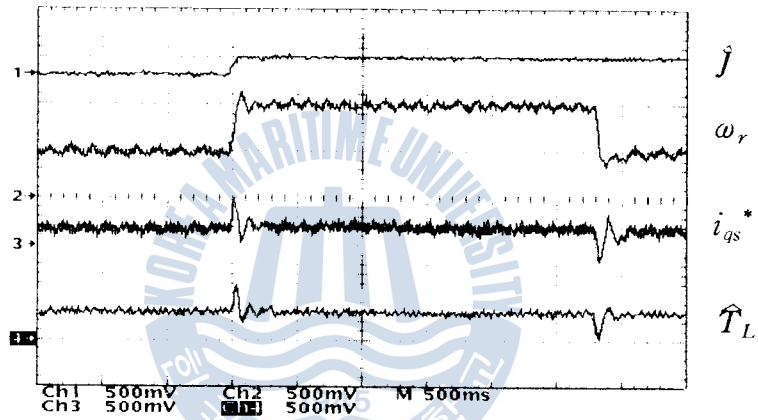


Fig. 2.5 Estimation characteristics for the moment of inertia.
 ($\hat{J} : 0.21[\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{div}]$, $\omega_r : 3.0[\text{rpm}/\text{div}]$,
 $i_{qs}^* : 4.0[\text{A}/\text{div}]$, $\hat{T}_L : 0.34[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{div}]$)

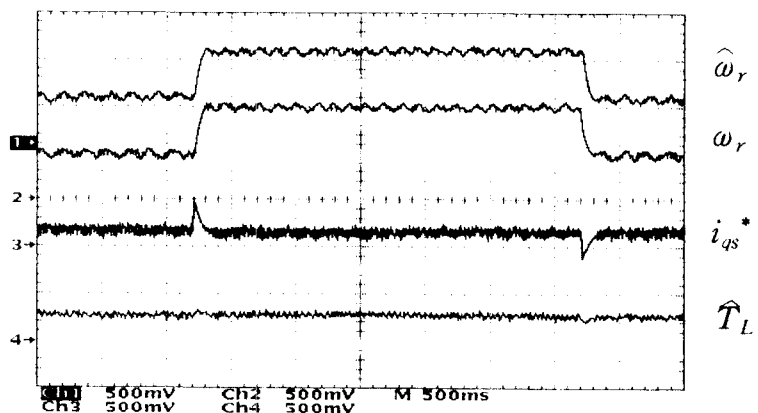
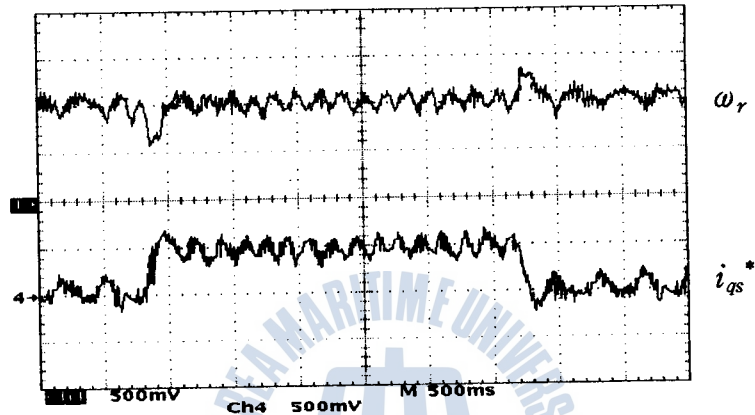
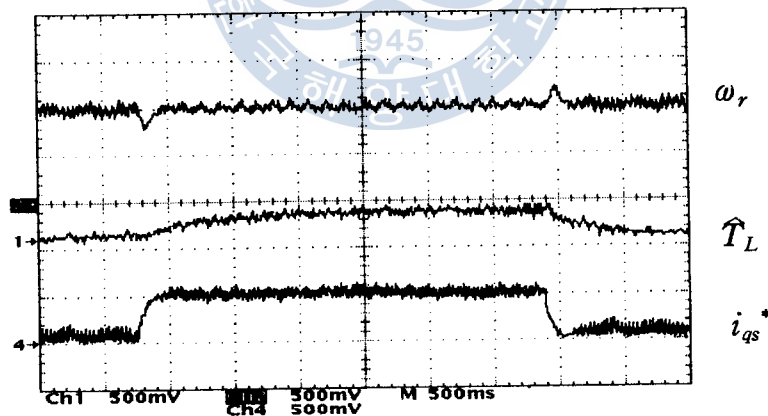


Fig. 2.6 Speed response characteristics with ΔJ compensation.
 ($\omega_r, \hat{\omega}_r : 3.0[\text{rpm}/\text{div}]$, $i_{qs}^* : 4.0[\text{A}/\text{div}]$, $\hat{T}_L : 0.34[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{div}]$)

Fig. 2.7은 일정속도 6[rpm]에서 부하를 정격의 0→1/6→0으로 스텝 인가하였을 때의 외란억제 특성에 대한 실험과형이다. 그림(a)는 기존의 방법에 의한 제어특성이고, 그림(b)는 제안된 방법에 의한 제어특성이다. 기존의 방법에서는 부하 인가시 약 2.0[rpm]의 속도변동을 보이고 있고, 제안한 방식은 1.1[rpm] 정도의 속도 변동과 정상상태에서의 고른 속도과형이 나타나고 있음을 알 수 있다.



(a) Conventional PI control.



(b) Proposed control with ΔJ compensation.

Fig. 2.7 Load disturbance rejection characteristics.

(ω_r : 3.0[rpm/div], i_{qs}^* : 2.0[A/div], \hat{T}_L : 0.34[kg · m/div])

3. 결론

시뮬레이션 및 실험을 통해 본 논문에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 직류링크전압과 기준상전압의 비로부터 유효시간을 구하고, 이로부터 실제 스위칭시간을 구하는 간단하고 효과적인 공간전압벡터 PWM을 구현하였으며, 추정된 부하외란의 피드포워드 제어에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 피드포워드 제어가 PI 제어보다 외란억압 특성이 우수함을 확인하였다.
- (2) 부하외란 관측기로부터 추정된 속도를 속도정보로 사용함으로써 저속영역에서의 속도감응 오차로 인한 불안정한 속도제어 특성을 개선할 수 있었다.
- (3) 가감속시의 부하외란 추정치와 그 정상치를 이용하여 관성 모멘트를 추정하고, 이를 보상함으로써 과도시에 관성 모멘트 오차로 인해 부하외란 및 속도 추정 오차가 감소되어 속도제어 성능이 개선됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [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, pp. 49-55, 1984.
- [2] K. Ohishi et al., "Robust Control of a DC Servo Motor Based on Linear Adaptive Control System" , JIEE Trans., Vol. 108-D, No. 1, pp. 39-45, 1988.
- [3] H. Kamei, "High performance Control of a Servomotor using a Low Precision Shaft Encoder". JIEE Trans. Vol. 114-D, No. 4, pp. 424-431, Jul./Aug. 1994.
- [4] T. Yamada et al., "A Method for Improving Speed Control characteristics at Very Low Speed Region by the Least Order Disturbance Observer", JIEE Trans., Vol. 114 D, No. 4, pp. 415-422, 1994.
- [5] A. Shimada et al., "Analysis of Estimation Error on Observer for Disturbance and Velocity". JIEE Trans., Vol. 113-D, No. 7, pp. 874-882, 1993.
- [6] David G. Luenberger, *Introduction to Dynamic Systems*, John Wiley & Sons, 1979.
- [7] T. Yamada, "A Method of Inertia Estimation by Torque Observer", JIEE Trans., Vol. 113-D, No. 2, pp. 263-264, 1993.

