
관성 모멘트 동정에 의한 유도전동기의 저속운전 특성개선

이 성 근*

The Improvement of low speed driving characteristics of induction
motor by inertia moment identification.

Sung-Geun Lee*

요 약

본 논문에서는 관성 모멘트 동정에 의해 상태관측기의 성능 및 유도전동기의 저속운전 특성을 개선하는 알고리즘을 제안하였다. 저속운전 영역에서 저 분해능 엔코더를 사용하는 속도 검출법은 속도 주기내에 펄스수가 너무적어 정확한 속도정보를 얻을 수 없다. 이러한 문제점을 개선하고자 속도와 외란을 추정할 수 있는 고퍼나스 이론에 근거한 상태관측기를 설계하여, 외란이 제거된 제어를 수행하였다. 또한 추정된 속도와 외란의 오차를 최소화하기 위하여 전동기의 관성 모멘트를 추정하고, 관측기의 공칭 관성 모멘트를 동정하였다.

시뮬레이션과 실험결과로부터 제안된 알고리즘은 6[rpm] 이하의 저속영역에서 과도응답 특성의 향상을 보여주었다.

Abstract

This paper proposes an algorithm which improves capacity of a state observer and low speed driving characteristics of a induction motor by inertia moment identification. In induction motor driving systems, it is difficult to obtain the accurate speed information by a low resolution encoder because the encoder pulses are very few in a low speed range. To improve this problem, state observer based on the Gopinath' theory which estimates speed and disturbance was designed, and disturbance rejection control was realized by application of the observer.

Also, inertia moment of the motor was estimated and the nominal inertia of the observer was identified to

* 한국해양대학교 이공대학 전기공학과

접수일자 : 1998년 12월 24일

minimize the error of estimated speed and disturbance.

From the simulation and experimental results, it is showed that the proposed observer improved the transient response characteristics in low speed region below 6[rpm].

1. 서 론

저 정밀도의 엔코더를 이용하여 저속운전을 하는 경우 짧은 제어 주기내에 엔코더 펄스가 극히 적게 들어오게 되어 속도오차가 발생되고, 시스템의 안정성을 해치게 된다⁽¹⁾. 이러한 문제의 해결책으로서 저 정밀도의 엔코더를 사용하면서도 엔코더로부터 속도정보가 얻어지지 않는 기간에 상태관측기에 의해 순시속도를 추정하여 속도제어를 수행하는 연구가 이루어져 왔다⁽²⁾. 또한, 일반적인 유도전동기의 백터제어시 기계 정수인 관성, 마찰계수 등의 파라미터가 운전중에 변하는 경우나 임팩트 부하의 경우에 운전범위에 제한을 받게되고 강인한 속도제어 특성을 얻을 수 없다. 강인한 속도제어 특성을 얻기 위하여 속도제어계에 상태관측기를 첨가하여 추정된 부하토크 전류분의 피드포워드 제어를 행하는 방법이 제안되어 직류기와 교류기에 이용한 연구가 보고되고 있다^{(3),(4)}. 이러한 속도제어 방법은 저속운전 특성에 대한 강인성과 안정성을 개선시킬 수 있으나 관성 모멘트가 변하는 시스템인 경우에 관측기의 공칭 관성 모멘트와 시스템의 관성 모멘트 오차로 인하여 내부외란이 발생되어 속도제어 특성에 문제점이 발생한다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 이러한 관점에서 기존의 간접벡터 제어 시스템에 고평나스(Gopinath) 이론⁽⁶⁾에 근거한 외란 관측기를 구성하여 외란 및 속도를 추정하여 저속운전시의 강인성과 안정성을 얻고, 관성 모멘트를 추정·보상함으로써 과도시의 부하외란 추정오차를 감소시켜 과도응답 특성을 개선하고자 한다. 또한, 제안된 알고리즘을 시험용 유도전동기를 대상으로 시뮬레이션과 실험을 통해 그 유효함을 확인하였다.

2. 유도전동기 저속운전 시스템 구성

전동기가 부하를 구동할 때 마찰계수 B 를 무시

한 기계적 동특성 식은 다음과 같다.

$$J \frac{d}{dt} \omega_r - K_T i_{qs} - T_L = T_M - T_L \dots\dots\dots (1)$$

식 (1)에서 $T_M (= K_T i_{qs})$ 은 전동기 토크이며, 전동기 속도 ω_r 을 상태변수 x_1 , 토크전류 i_{qs} 및 부하토크 T_L 을 입력 u 라고 하면, 샘플링 주기 T_s 의 이산계 상태방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x_1(i+1) = A_{11} x_1(i) + [B_1 \ B_2] u(i) \dots\dots\dots (2)$$

여기서, $x_1 = \omega_r$, $u = [i_{qs}, T_L]^T$, $A_{11} = 1$,
 $B_1 = \frac{K_T}{J} T_s$, $B_2 = -\frac{T_s}{J}$

상태변수는 가관측인 상태변수를 추정하는 것이기 때문에 부하토크 T_L 을 미지의 입력변수에서 가관측인 상태변수로 변환하여야 한다. 외란인 부하토크의 변화가 제어기의 샘플링 주기에 비해 매우 느리다고 하면 부하토크는 일정하며 그 미분값은 0으로 볼 수 있다. 따라서, 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

$$T_L(i+1) = T_L(i) \dots\dots\dots (3)$$

식 (2) 및 (3)의 관계로부터 부하외란을 상태변수로 취한 이산계 상태방정식은 다음과 같다.

$$x(i+1) = Ax(i) + Bu(i) \dots\dots\dots (4)$$

$$y(i) = Cx(i) \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{T_s}{J} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{T_s}{J} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad u(i) = T_M$$

$$C=[10], \quad x(i)=\begin{bmatrix} \omega_r(i) \\ T_L(i) \end{bmatrix}, \quad y(i)=\omega_r(i)$$

식 (4) 및 (5)는 가관측 시스템이므로 T_L 을 추정할 수 있으며, 이산계에 있어서 매개변수 η 를 도입하여 고퍼나스 이론에 의한 관측기를 구성하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{x}_2(i) = \eta(i) - Gy(i) \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\eta(i+1) = A\eta(i) + Bu(i) + Ky(i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

여기서,

$$A=1+GA_{12}, \quad B=GB_1, \quad K=-G^2A_{12}$$

식 (6) 및 (7)을 정리하면 다음과 같은 식으로 된다.

$$\hat{T}_L(i) = \eta(i) - G\omega_r(i) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\eta(i+1) = \eta(i) + G\frac{T_s}{J} (T_M(i) - \hat{T}_L(i)) \quad \dots\dots (9)$$

식 (8)에서 외란 \hat{T}_L 이 추정되면 \hat{T}_L 의 피드포워드 제어에 의해 속도응답에 영향을 주는 외란 성분의 제거가 가능하며, 추정된 외란 \hat{T}_L 을 식 (1)에 적용하여 속도 추정식을 구하면 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\omega}_m = \frac{1}{J_n s} (T_M - \hat{T}_L) \quad \dots\dots\dots (10)$$

여기서, $\hat{\omega}_m$: 관측기 출력, J_n : 관측기 관성
 \hat{T}_L : 부하외란 추정치

한편, 부하외란이 인가되는 순간에는 부하외란과 그 추정치와의 오차로 인하여 모델 속도 추정치 $\hat{\omega}_m$ 과 전동기 실제속도 ω_r 사이에는 식 (11)과 같은 속도편차 ω_{err} 가 발생하게 되므로 부하 인가 시에는 이를 보상하는 별도의 루프가 부가되어야 한다.

$$\omega_{err} = \frac{1}{J_s} (T_L - \hat{T}_L) = \hat{\omega}_m - \omega_r \quad \dots\dots (11)$$

식 (11)로부터 전동기 속도 ω_r 은 모델속도 추정치 $\hat{\omega}_m$ 과 속도편차 ω_{err} 의 감산에 의해 구할 수 있으므로 보상된 속도 추정치는 식 (12)로 표현된다. 이때 모델 속도 추정치 $\hat{\omega}_m$ 은 엔코더 펄스 사이의 속도제어 주기마다 얻어진 순시속도를 평균한 값이다.

$$\hat{\omega}_r = \hat{\omega}_m - \omega_{err} \quad \dots\dots\dots (12)$$

그림 1은 속도 및 부하토크 추정의 이산형 블록도이다.

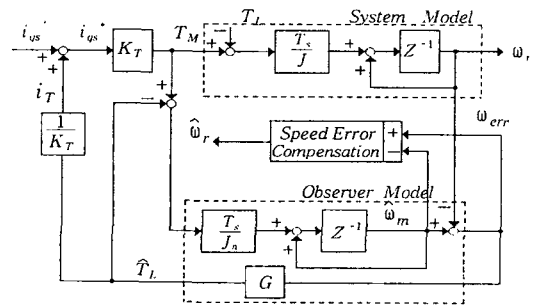


그림 1. 속도 및 부하토크 추정 블록도.
 Fig. 1 Block diagram for speed and disturbance estimation.

3. 관성 모멘트 추정·동정에 의한 저속운전 특성개선

외란 관측기를 이용한 유도전동기의 저속운전시 관성 모멘트에 오차 ($\Delta J = J - J_n$)가 발생하면 관측기의 성능에 문제점이 발생되어 부하외란의 추정에 오차가 발생되고, 과도시의 속도제어 특성에 문제점이 발생된다^{(5),(9),(10)}. 바람직한 제어특성을 얻기 위해서는 관성 모멘트를 추정하고, 이를 공칭 관성 모멘트로 순시동정하여 내부외란을 제거할 필요가 있다.

식 (1) 및 (10)을 식 (8)에 대입하여 부하외란 추정값을 주파수 영역에서 표현하면 다음과 같다.

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

식 (13)에서 관성 모멘트 추정 중에 부하토크 T_L 이 일정하다고 가정하면 식 (13)의 우변 제1항의 1차 지연요소를 무시할 수가 있으므로 식(13)은 식 (14)로 표현되며 식 (14)의 우변 제 2항은 속도 변동시 관성 모멘트 오차로 인해 발생된 내부외란 성분이다.

$$\hat{T}_L - T_L + \frac{1}{1 + \frac{J_n}{G}s} (J - J_n) s \omega_r \dots (14)$$

그림 2는 내부외란을 포함한 시스템 블록도이다.

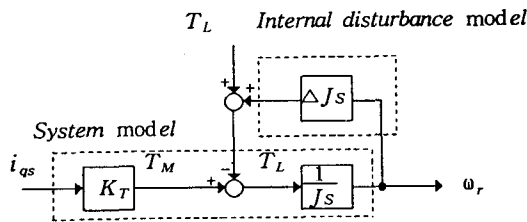


그림 2. 내부외란을 포함한 시스템 블록도
Fig. 2 System block diagram with internal disturbance model.

식 (14)를 관성 모멘트 오차비 $R = J/J_n - 1$ 에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$R = \left\{ \frac{1}{J_n s} (\hat{T}_L - T_L) + \frac{1}{G} (\hat{T}_L - T_L) \right\} / \omega_r \dots (15)$$

위 식에서 알 수 있는 바와 같이 관성 모멘트 오차비는 가감속시의 부하외란 추정치와 그 정상치로부터 구할 수 있고, 관성 모멘트 추정치 \hat{J} 는 R 을 이용하여 식 (16)으로 표현되며, 추정된 \hat{J} 를 관측기의 새로운 공칭 관성 모멘트 J_n 으로 사용할 수 있다.

$$\hat{J} = (R + 1) J_n \dots (16)$$

그림 3은 관성 모멘트를 추정·동정하는 블록도이다.

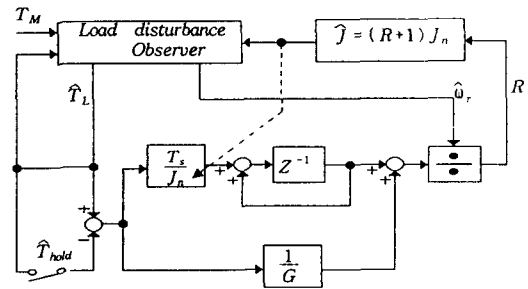


그림 3. 관성 모멘트 추정 및 동정 블록도.
Fig. 3 Block diagram for estimation and identification of inertia moment.

그림 3에서 \hat{T}_{hold} 는 속도 변화전의 \hat{T}_L 의 정상 상태 값으로 부하외란 T_L 을 나타내고, 그림 4는 이를 검출하는 방법이다. 가감속시에 진동하는 속도 증폭기 출력 i_{qs}^* 의 절대치를 필터를 거치게 하여 이를 기준토크 전류값 i_{qsf} 로 설정한다. 필터를 거치지 않은 절대치 i_{abs} 가 i_{qsf} 보다 클 경우에는 $flag1 = 1$ 의 신호로 인식하게 하고, 또 하나의 신호는 기준속도 변화가 발생할 때를 $flag2 = 1$ 로 인식하게하여, 두 신호가 동시에 1로 인식될 때 부하외란 추정치를 hold하게 되면 정확한 \hat{T}_{hold} 를 구할 수 있다. 이 값이 속도변화 전의 안정한 부하외란 추정치 \hat{T}_L , 즉 T_L 의 값이 된다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서 제안된 부하토크 관측기를 이용한 속도제어 알고리즘의 타당성을 시뮬레이션으로 고찰하였다. 속도제어기의 제어주기는 5[ms]이고, 전류제어기의 제어주기는 100[μs]이다.

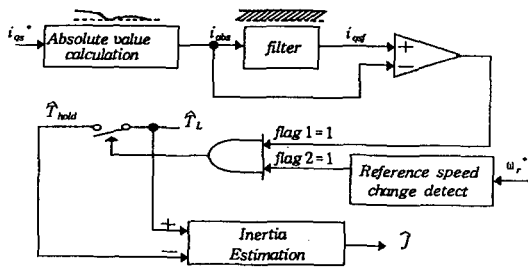


그림 4. 속도변화시 외란 검출방법.
Fig. 4 Detection method of disturbance when speed changed.

그림 5는 지령속도를 3→6→3[rpm]으로 변화시켰을 때 관성 모멘트를 추정하고 이를 보상하지 않을 때의 속도응답 특성에 대한 시물레이션이다. 그림 (1)은 $J_n = J/2$ 의 조건일 때이며 가속 중에는 부하토크 추정치가 정의 오차값이 발생되고, 감속 중에는 부의 오차값이 발생되어 과도시의 속도응답에 오버슈트 및 진동이 나타나며, 시스템이 불안정하게 된다. 그림 (2)는 $J_n = 2J$ 의 조건일 때이며 가속 중에는 부하토크 추정치가 부의 오차값이 발생되고, 감속 중에는 정의 오차값이 발생되어 과도시의 속도응답에 지연이 일어나고 있다. 관성 모멘트 오차비 추정은 A점에서 시작되어 B점에서 완료되고, 오차비는 $J_n = J/2$ 일 때에는 0에서 1, $J_n = 2J$ 일 때에는 0에서 -1/2에 수렴되고 있으며, 수렴속도는 관측기 시정수를 작게 할수록 빨라진다.

그림 6은 관성 모멘트를 추정하고 이를 보상하였을 때의 속도응답 특성에 대한 파형이며, 과도시 부하토크 추정치는 내부외란 억제에 의하여 실제치에 가깝고, 속도응답에 진동이 발생하지 않으며 신속한 응답을 보이고 있다.

5. 실험결과

그림 7은 부하토크 관측기에 관성 모멘트 보상

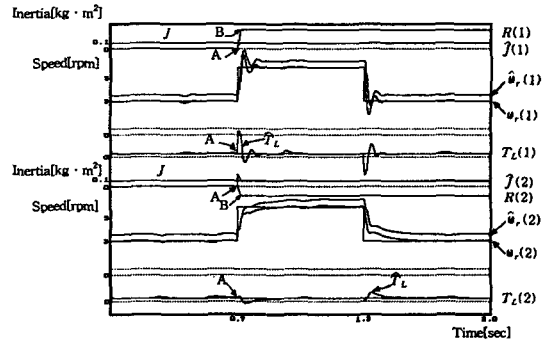


그림 5. 관성 모멘트 오차를 보상하지 않은 경우의 속도응답 특성.
Fig. 5 speed response characteristics without ΔJ compensation. ((1) : $J_n = J/2$, (2) : $J_n = 2J$)

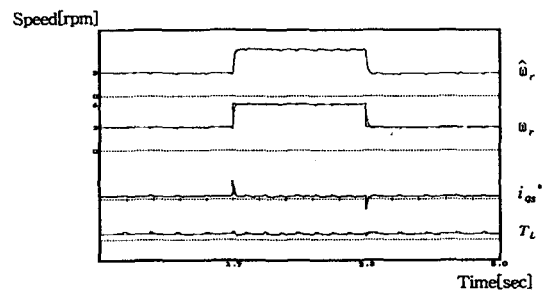


그림 6. 관성 모멘트 오차를 보상한 경우의 속도응답 특성.
Fig. 6 Speed response characteristics with ΔJ compensation

루프가 부가된 유도 전동기 시스템 블록도이다. 벡터제어에 기초를 둔 전류제어, 관성 모멘트 추정 및 부하토크 관측기를 포함한 속도제어는 DSP-TMS320C31^{(11),(12)}을 중심으로 구성되고, 고정자전류 i_a, i_b 로부터 i_c 값을 얻고, 얻어진 3상 고정자

전류는 $i_{\alpha s}, i_{\beta s}$ 로 축변한 뒤 다시 동기속도로 회전하는 회전자 자속 좌표계 i_{ds}, i_{qs} 로 변환된다. 기준속도와 추정 속도를 비교한 속도오차를 속도제어기를 거치게 하여 고정자에 인가할 q 축 기준 전류 i_{qs}^* 를 계산하고, 이에 추정된 부하토크의 전류성분을 피드포워드하여 최종 토크 지령치 i_{qs}^* 를 연산한다. 또한, 추정된 부하토크 값을 이용하여 관성 모멘트를 추정하고 이를 새로운 관측기의 공칭 관성 모멘트로 동정한다.

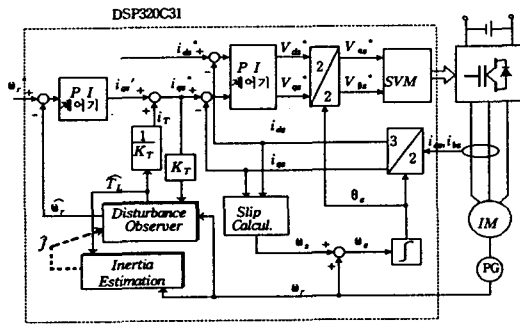
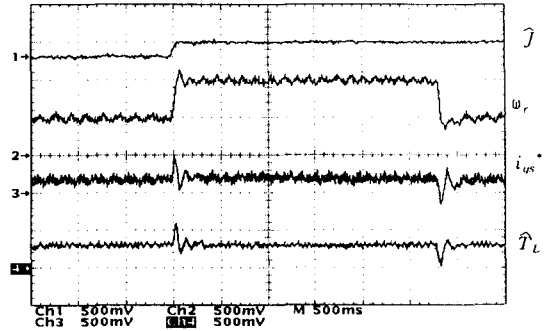


그림 7. 관측기가 추가된 유도전동기의 벡터제어 블록도.

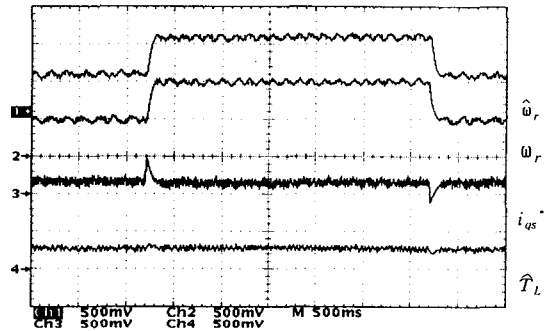
Fig. 7 Vector control diagram of induction motor with the observer.

그림 8은 일정부하 상태에서 지령속도를 3→6→3[rpm]으로 스텝적으로 변화를 주고, 관성 모멘트 오차를 보상하지 않은 경우와 보상한 경우의 속도 응답 특성을 분석하였다.

그림 (a)는 $J_n = J/2$ 일 때의 파형으로서 가속 중에는 관성 모멘트 오차로 인한 부하토크 추정치가 실제보다 크게되고, 감속 중에는 작게된다. 따라서, 부하토크 추정오차로 과도시의 속도응답에 오버슈트 및 진동이 나타나고 시스템이 불안정하게 된다. 그림 (b)는 관성 모멘트 오차보상을 한 파형으로서 부하토크 추정오차가 감소되어 과도시의 속도응답에 진동이 발생하지 않고 있다.



(a) 관성 모멘트 오차보상이 없을 때 ($J_n = J/2$)

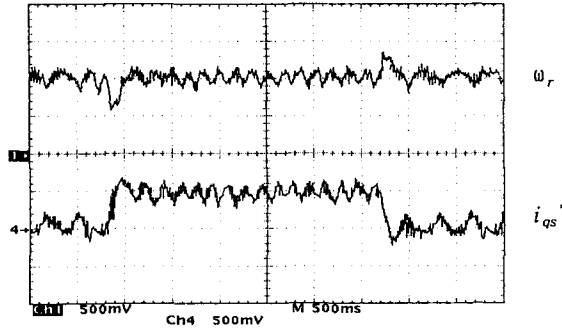


(b) 관성 모멘트 오차 보상을 했을 때

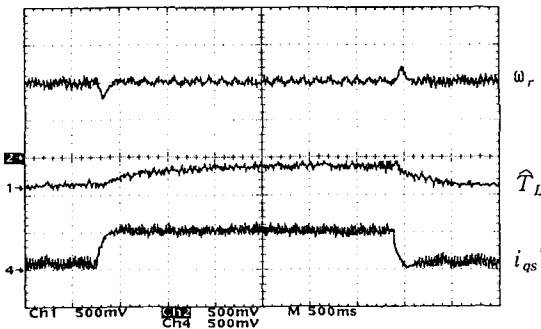
그림 8. 관성 모멘트 변화에 대한 속도응답 특성.
Fig. 8 Speed response characteristics for the variation of inertia moment. ($\hat{T}_L : 0.34[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{div}]$)

그림 9는 일정속도 6[rpm], 부하를 정격의 0→1/6→0[kg·m]으로 인가시 피드포워드 보상을 하지 않은 일반적인 벡터제어 방법과 피드포워드 보상제어한 경우의 외란억제 특성을 비교한 실험파형이다.

일반적인 방법에서는 부하토크 인가시 약 2.0[rpm]의 속도변동을 보이고 있고 정상상태에서도 고르지 못한 속도파형을 가지고 있으나, 피드포워드 제어방식은 1.1[rpm] 정도의 속도변동과 정상상태에서의 고른 속도파형이 나타나고 있음을 알 수 있다. 이는 관측기에서 추정된 부하토크 \hat{T}_L 의 피드포워드 보상에 의해 속도응답에 영향을 주는 외란 성분을 제거한 결과로서 부하변동에 강인함을 확인할 수 있다.



(a) 피드포워드 보상 하지않은 경우.



(b) 피드포워드 보상을 한 경우

그림 9. 외란억제 특성.

Fig. 9 Load disturbance rejection characteristics.

$$(\omega_r : 3.0[\text{rpm/div}], \hat{T}_L : 0.34[\text{kg} \cdot \text{m/div}], i_{as}^* : 2.0[\text{A/div}])$$

6. 결론

고피나스 이론에 근거한 부하토크 관측기를 구성하고 이를 유도전동기의 간접벡터제어 시스템에 적용하여 저속운전을 행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유도전동기의 토크성분과 실제속도를 부하토크 관측기의 상태변수로 취하여 부하토크 관측기를 구성하고, 부하토크 및 속도를 추정·보상 함으로써 관측기가 부가되지 않은 일반적인 벡터제어 방법보다 저속에서의 강인성

과 안정성이 개선되었다.

- (2) 관측기로부터 추정된 부하토크 추정치와 그 정상치를 이용하여 관성 모멘트를 추정하고 이를 관측기의 공칭 관성 모멘트로 순시동정 함으로써 과도시에 발생된 내부외란 발생을 억제시켜 부하 추정오차가 감소되고 과도응답 특성이 개선되었다.

앞으로의 과제는 점성 마찰계수 및 탄성 토크계수를 고려한 내부외란 억제에 대한 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Y. Okamura et al., "Robust and Adaptive Control of Servo Motor with Low Resolution Shaft Encoder by Average Speed Type Instantaneous Speed Observer", *IPEC-Yokohama'95*, PP. 705-711, 1995.
- [3] Y. Hori, "Disturbance Suppression on an Acceleration Control Type DC Servo System", *PESC Record.*, pp. 222-229, 1988.
- [4] H. Kobayashi et al., "High performance IM Speed Control for Torsional System with an equivalent disturbance Observer", *IECON Record.*, pp. 703-708, 1991.
- [5] 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.
- [6] David G. Luenberger, *Introduction to Dynamic Systems*, John Wiley & Sons, 1979.
- [7] 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.
- [8] H. Watanabe, H. Nakatani, and T. Fujii, "A

Method of Flux Observer for the Induction Motor", JIEE Trans., Vol. 109-D, No. 9, pp. 662-628, 1989.

- [9] T. Yamada, "A Method of Inertia Estimation by Torque Observer", JIEE Trans., Vol. 113-D, No. 2, pp. 263-264, 1993.
- [10] 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.
- [11] *TMS320C3X User's Guide*, Texas Instruments, 1992.
- [12] *TMS320C30 Optimizing C Compiler Reference Guide*, Texas Instruments, 1990.



이 성 근(Sung-Geun Lee)

1983 한국해양대학교(공학사 -
기관공학)
1990 한국해양대학교(공학석사
- 전기제어)
1998 한국해양대학교(공학박사
- 전기제어)

1983~1986 : 동지상선(주)(엔지니어)

1986~1987 : 한진해운(주)(엔지니어)

1989~1991 : 동성전자(주)(생산차장, 공장장)

1992.3~1998.8 : 대덕대학 제어계측과(조교수)

1998.9.1~현재 : 한국해양대학교 전기공학과(전임강사)

*전공 : 전기제어, 인버터 제어

*주요 연구분야 : 인버터 설계 및 전동기 제어,
디지털 응용 및 전기기기 제어.