

관성능률 추정과 가속도 전향보상을 이용한 유도전동기의 속도제어 성능향상

李在王, 金相勳

Improvement of Speed Control Performance using Acceleration Feedforward and Inertia Identification for the Induction Motor

Jae-Wang Lee, Sang-Hoon Kim

요 약

본 논문에서는 시스템의 관성 추정에 의한 가속도 전향보상 방법을 이용한 새로운 속도제어 기법을 제안한다. 제안된 가속도 전향보상 방법에 의해 속도제어기의 대역폭을 충분히 크게 할 수 없는 벡터제어 유도전동기 구동시스템에서 속도제어 성능을 향상시킬 수 있고, 외란 토크에 대한 속도회복특성도 개선될 수 있다. 3.7kW 유도전동기 구동시스템에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 기법의 타당성을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, a novel speed control strategy using an acceleration feedforward compensation by the estimation of the system inertia is proposed. With the proposed method, the enhanced speed control performance can be achieved and the speed response against the disturbance torque can be improved for the vector-controlled induction motor drive systems in which the bandwidth of the speed controller cannot be made large enough. The simulation and experimental results for induction motor drive systems confirm the validity of the proposed strategy

Key Words : Speed control, Inertia identification, Acceleration feedforward, Induction motor

1. 서 론

엘리베이터 구동을 위한 벡터제어 유도전동기 시스템에서, 구동전동기의 속도는 기계적 공진이 발생하는 주파수 대역 이하에서 제어되는데, 일반적으로 속도제어기의 대역폭(Bandwidth)은 1[Hz] 이하로 제한된다.^{[1][2]} 또한 AC 전동기 구동 시스템을 이용한 강성(Stiffness)이 낮은 로봇(Robot)의 위치제어의 경우, 시스템의 안정성의 관점에서 속도제어기의 이득을 크게 설계할 수 없다.^{[5][6]}

전동기 구동시스템에서 속도제어기로는 PI 제어기가 널리 사용되는데 속도제어기의 대역폭이 낮은 경우에는 PI 제어기의 이득을 크게 선정하지 못하기 때문에

속도응답특성이 저하된다. 이러한 낮은 속도제어기 이득을 갖는 시스템에서 속도응답특성을 향상시키기 위해 속도제어기에 가속도 피드백 루프를 추가하는 방법이 제안되어왔다.^{[1]-[4]} 이들 방법에서는 실제 시스템의 가속도 정보를 필요로 하는데, 가속도 센서를 사용하거나 가속도 추정을 통해 얻는다. 가속도 센서는 추가적인 비용을 요구하고, 추정을 통한 방법은 시스템 파라미터의 정보를 요구하며 제어기 설계가 복잡하다.

본 논문에서는 낮은 속도제어기 이득을 갖는 전동기 구동시스템에서 속도응답특성을 향상시키기 위해 추정된 관성능률과 가속도 지령으로부터 보상 전류를 생성하여, 이를 기존의 PI 속도제어기의 출력에 전향 보상을 해주는 속도제어기법을 제안한다. 제안된 방법을 속도

제어기 이득을 충분히 크게 할 수 없는 시스템에 적용함으로써 가속도 지령에 따라 전동기가 가속하는 동안 속도응답특성을 향상시킬 수 있다. 또한 추정된 관성능률의 정보를 이용하여 정상상태에서 외란 토크에 대해 속도변동이 작아지고 속도회복특성을 향상시킬 수 있도록 하였다.

제안된 제어기법은 시뮬레이션과 벡터제어 유도전동기 구동시스템에 적용한 실험으로 그 타당성을 검증하였다.

2. 유도전동기의 속도제어

2.1 벡터제어 유도전동기의 속도제어

유도전동기의 고성능 구동시스템에서는 고정자 전류를 자속성분전류 i_{ds}^e 와 토크성분전류 i_{qs}^e 로 분리하여 90° 의 위상차이를 유지하며 각각 독립적으로 제어함으로써 직류전동기와 같은 빠른 토크응답 특성을 얻을 수 있는 벡터제어기법이 적용된다.^[7] 그림 1은 d-q 좌표계로 구성한 벡터제어 유도전동기의 속도제어계의 블록도이다. 여기서,

w_m^* : 속도지령[rad/s]

w_m : 전동기의 실제속도[rad/s]

i_{qs}^* : 전류지령[A]

i_{qs} : 전동기의 실제 전류[A]

T_e : 전동기의 발생 토크[$\text{N} \cdot \text{m}$]

T_L : 외란 토크[$\text{N} \cdot \text{m}$]

이다.

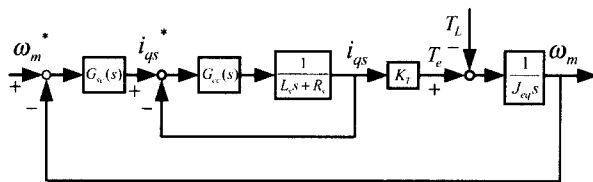


그림 1 속도제어계의 블록도

Fig. 1 Block diagram of speed control system

속도제어계는 전류제어루프를 마이너(minor)루프로 하는 직렬(cascade)구성의 제어기가 일반적으로 많이 사용되고 있다. 이와 같이 종속 접속제어계를 구성하면 마이너 루프응답이 바깥쪽 루프보다 훨씬 높아지므로, 바깥쪽 루프의 응답성과 안전성을 향상시킬 수 있는 이점이 있다^[6]. $G_{sc}(s)$ 는 일반적으로 주로 사용하는

PI 속도제어기의 개루프 전달함수이고, $G_{cc}(s)$ 는 PI 전류제어기의 개루프 전달함수이다.

2.2 PI 속도 제어기의 이득 선정

그림 1과 같은 속도제어계에서 전류 제어기의 교차각 주파수를 속도제어기의 교차각 주파수 ω_{sc} 보다 5배 이상 되도록 설계하면 전류제어기의 특성이 속도제어계 응답에 미치는 영향을 무시할 수 있다.^[6] PI 속도제어기의 전달함수 $G_{sc}(s)$ 는 식 (1)과 같고, PI 속도제어기의 비례이득 K_{ps} 와 적분이득 K_{is} 는 식 (2)와 식 (3)으로 주어진다^[6].

$$G_{sc}(s) = K_{ps} + \frac{K_{is}}{s} \quad (1)$$

$$K_{ps} = \frac{J_{eq} \omega_{sc}}{K_T} \quad (2)$$

$$K_{is} = K_{ps} \times w_{pi} \quad (w_{pi} \leq \frac{w_{sc}}{5}) \quad (3)$$

J_{eq} : 시스템 관성능률

K_T : 토크 상수[$\text{N} \cdot \text{m/A}$]

w_{pi} : $G_{sc}(s)$ 의 적분이득과 비례이득의 비

식 (2)로부터 시스템의 관성 능률 J_{eq} 및 전동기의 토크상수 K_T 와 속도제어기의 절점각 주파수 ω_{sc} 는 PI 속도제어기의 이득을 결정하는 요소이므로 속도제어기의 성능에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 주어진 시스템에서 속도제어기의 대역폭 ω_{sc} 를 높게 설정하면 속도제어기의 이득이 커져 속도 응답 특성이 좋아진다. 그러나 시스템이 가지고 있는 고유의 기계적 공진으로 인해 속도제어기의 절점각 주파수를 공진 주파수 이하로 제한해야하는 엘리베이터 구동시스템이나, 속도제어기의 이득을 크게 할 수 없는 Robot Arms의 위치 제어시스템에서는 PI 속도제어기의 이득이 작아 속도 응답 특성이 나빠지게 된다^[1, 3]. 따라서 속도제어기의 대역폭이 낮은 경우에 속도 응답 특성을 개선할 필요가 있다.

3. 제안된 방법

3.1 가속도 전향보상

PI 속도제어기의 이득이 충분히 크게 할 수 없는 시스템에서, 기존의 PI 속도제어기만 존재하는 경우의

출력전류만으로는 원하는 속도를 신속히 추정하지 못하기 때문에, 본 논문에서는 가속도 전향보상 방법에 의한 속도제어방법을 제안한다. 그림 2는 제안된 방법의 블록도이다.

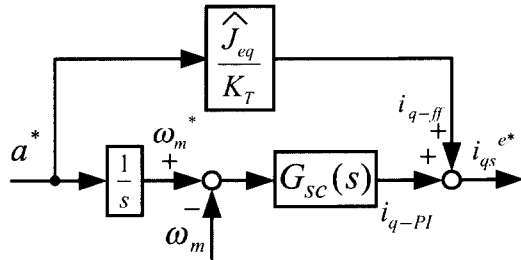


그림 2 속도제어기와 보상전류
Fig. 2 Speed controller and compensated current

제안된 기법에서는 주어진 가속도 지령 a^* 로부터 보상 전류 i_{q-ff} 를 구해 이를 PI 속도제어기 출력에 전향보상한다. 따라서, 토크 지령을 위한 전류제어기의 q축 기준전류 i_{qs}^{e*} 은 PI 속도제어기의 출력전류 i_{q-PI} 와 전향보상전류 i_{q-ff} 의 합으로 식 (4)와 같이 주어진다.

$$i_{qs}^{e*} = i_{q-PI} + i_{q-ff} \quad (4)$$

여기서, 전향보상전류 i_{q-ff} 는 벡터제어 유도전동기의 토크 식과 기계적인 시스템 방정식인 식 (5)로부터 식 (6)과 같이 얻을 수 있다.^[7]

$$T_e = K_T \times i_{qs}^e = J_{eq} \times \frac{d\omega_m}{dt} \quad (5)$$

$$i_{q-ff} = a^* \times \frac{\hat{J}_{eq}}{K_T} \quad (6)$$

a^* : 가속도지령[m/s^2]

\hat{J}_{eq} : 추정된 시스템 관성능률

$K_T = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^e$: 토크 상수

i_{qs}^e : 동기좌표계 q축 고정자 전류

식 (6)의 전향보상전류를 얻기 위해서는 가속도 지령 및 시스템의 관성능률과 토크 상수가 요구된다. 시스템 관성능률 J_{eq} 는 식 (5)로부터 전동기의 토크와 속도를 사용하여 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.

$$J_{eq} = \frac{T_e}{d\omega_m/dt} = \frac{T_e}{a_{real}} \quad (7)$$

추정된 관성 능률 \hat{J}_{eq} 는 고주파 노이즈를 제거하기 위해 저역통과 필터(low-pass filter)를 이용하여 식 (8)과 같이 최종적으로 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{J}_{eq} &= \frac{1}{1 + \tau s} \times \frac{T_e}{d\omega_m/dt} \\ &= \frac{1}{1 + \tau s} \times \frac{K_T i_{qs}^e}{d\omega_m/dt} \end{aligned} \quad (8)$$

시스템의 실제 가속도 추정에 의한 가속도 귀환제어의 방법에서 가속도 추정을 위한 속도의 미분에 대한 저역통과 필터의 사용은 시간지연으로 인해 어려우나, 시스템의 관성능률을 추정하는 경우에는 시간에 따른 관성능률의 변동이 크지 않아 시간지연으로 인한 영향이 작아 저역통과 필터의 사용이 가능하다.

3.2 외란 토크에 대한 보상법

본 논문에서는 앞 절에서 추정된 시스템의 관성능률 \hat{J}_{eq} 를 외란 토크에 대한 속도응답특성을 향상시키기 위해서도 사용하였다.

전동기가 일정속도로 회전하는 동안에는 가속도 지령이 없으므로 전향보상전류 없이 PI 속도제어기의 출력전류만으로 속도제어를 하게 된다. 이러한 경우에는 외란 토크가 존재하면 제어기 이득이 낮기 때문에 속도 회복 특성이 좋지 않다. 따라서, 본 논문에서는 외란 토크가 존재하는 경우, 외란에 의한 영향을 시스템 관성능률의 변화로 가정하여 속도변동을 억제하기 위하여 전류제어기의 기준전류 i_{qs}^{e*} 를 식 (9)와 같이 바꾸어주었다.

$$\begin{aligned} i_{qs}^{e*-new} &= \frac{\hat{J}_{eq} + \Delta \hat{J}}{\hat{J}_{eq}} \times i_{qs}^* \\ &= \frac{\hat{J}_{disturbance}}{\hat{J}_{eq}} \times i_{qs}^* = K_D \times i_{qs}^* \end{aligned} \quad (9)$$

\hat{J}_{eq} : 외란 토크가 없을 때 추정한 시스템의 관성능률

$\hat{J}_{disturbance}$: 외란 토크가 있을 때 추정한 시스템의 관성능률

이처럼 외란 토크에 의한 관성능률 변동 $\Delta \hat{J}$ 에 해

당하는 만큼의 전류를 보상해 줌으로써 속도회복특성을 향상시킬 수 있다. 그림 3은 제안된 제어 알고리즘의 블록도이다. 외란이 있는 경우와 없는 경우에 따라, 추정된 \hat{J}_{eq} 에 의해 비례상수 K_D 가 가변되어 외란에 해당하는 만큼의 보상 전류를 가변하여 인가함으로써 속도회복특성을 향상시킨다.

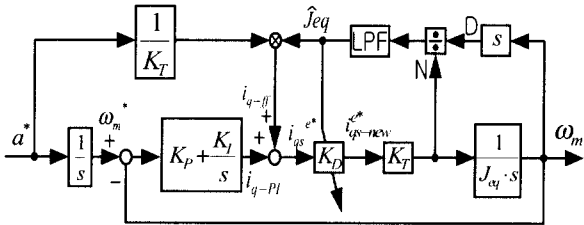


그림 3 제안된 속도제어 시스템
Fig. 3 Proposed speed control system

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 조건

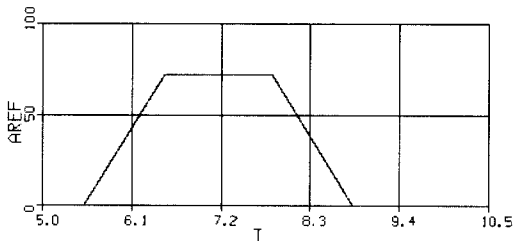


그림 4 가속도 지령
Fig. 4 Acceleration reference

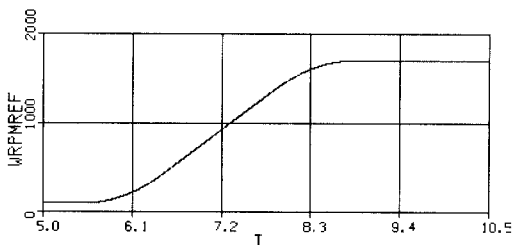


그림 5 속도지령
Fig. 5 Velocity reference

본 논문에서는 제안된 기법을 검증하기 위해 전력전자 분야에서 널리 이용되고 있는 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language) 프로그램을 이용하

여 시뮬레이션하였다.

속도제어기의 제어주기는 1[msec]이고, 관성능률을 추정하는 제어주기는 속도제어기의 주기와 같도록 하였다. 전류제어기의 주파수 대역폭과 이득은 충분히 크게 설정하여 이상적인 전류제어를 하도록 하였다.

속도지령에 대한 속도응답특성을 알아보기 위해 벡터제어 유도전동기 구동시스템을 모델링하여 그림 4와 같이 현재 산업체의 엘리베이터에 실제 적용되는 가속도패턴으로 가속하였다. 그림 5는 속도지령으로서 가속도 지령으로부터 적분하여 얻는다. 외란 토크에 대한 속도응답특성을 알아보기 위해서 정격속도로 회전하는 중에 유도전동기에 부하 토크를 인가하여 속도회복 특성을 알아보았다.

4.2 속도지령에 대한 속도응답특성

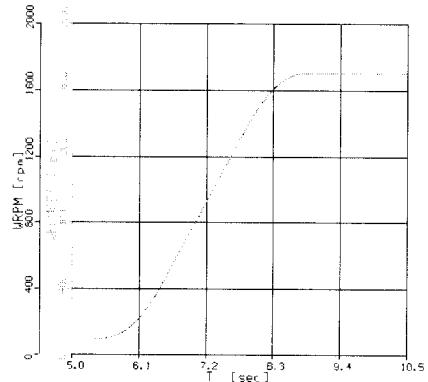


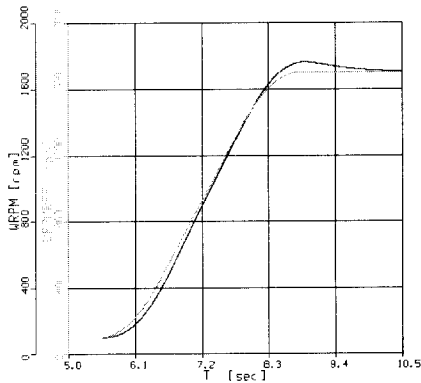
그림 6 이득이 큰 경우의 속도응답 ($\omega_{sc}=10$ [Hz])
Fig. 6 Speed response with large gain

그림 6은 PI 속도제어기의 이득이 비교적 큰 경우로서, 절점각 주파수 $\omega_{sc} = 10$ [Hz]일 때 속도응답 특성이다. 속도 제어기의 대역폭에 제한이 없는 경우에는 속도제어기의 이득을 크게 선정할 수 있기 때문에 PI 속도제어기만으로도 속도의 응답특성이 우수하다는 것을 알 수 있다.

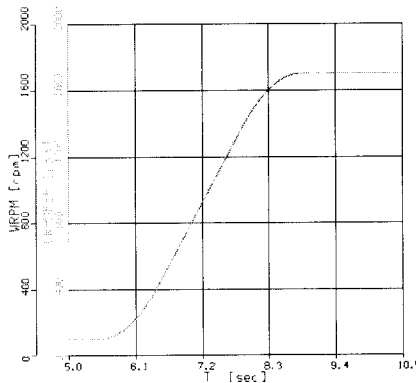
그림 7은 본 논문의 관심분야인 속도 제어기의 대역폭 제한으로 인해 속도제어기의 이득을 크게 선정할 수 없는 경우에 대한 속도응답 특성이다. PI 속도제어기의 절점각 주파수 $\omega_{sc} = 1$ [Hz]으로 선정하였는데, 이 값은 엘리베이터 구동시스템에서 기계적 공진을 피하기 위해 제한하는 값이다.

그림 7(a)의 PI 속도제어기만의 응답특성에서 보면, 제어기 이득이 작으므로 가속하기 시작하는 시점과 정

상상태에 이르는 시점에서 오버슈트가 발생하며 큰 속도오차를 발생함을 알 수 있다. 그림 7(b)는 제안된 기법으로 보상한 경우의 응답특성으로, 제어기 이득이 클 때의 속도응답과 같이 우수한 속도응답특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법을 사용한 경우 속도제어기의 대역폭이 낮은 경우에도 속도지령에 대한 속도응답 특성이 향상됨을 확인 할 수 있다.



(a) PI 제어
(a) PI Control



(b) 제안된 기법
(b) Proposed Method

그림 7 이득이 작은 경우의 속도응답($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)

Fig. 7 Speed response with small gain

4.3 외란 토크에 대한 속도회복특성

그림 8과 9에 외란 토크가 인가된 경우의 속도회복 특성을 보인다. 그림 8은 PI 속도제어기의 이득이 큰 경우의 속도회복 특성으로서, 절점각 주파수는 10[Hz]인 경우이다. 속도제어기의 이득이 큰 경우에는 외란

토크가 인가되어도 이득이 커 속도변동이 작고 속도의 회복특성이 좋아 PI 속도제어기만으로서도 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

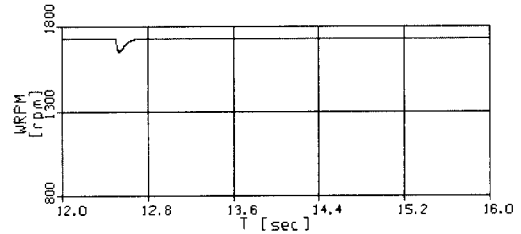
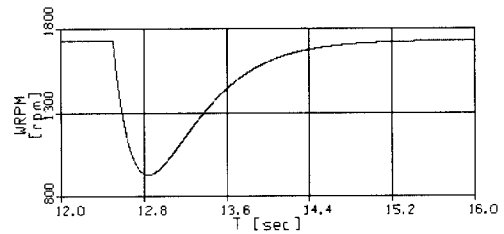


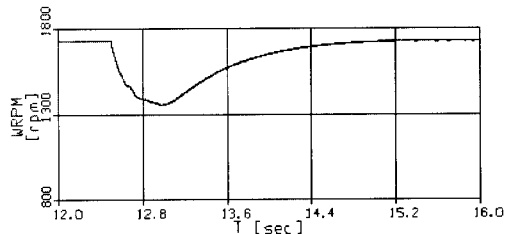
그림 8 이득이 큰 경우 외란 토크에 대한 속도응답 ($\omega_{sc}=10[\text{Hz}]$)

Fig. 8 Speed response with large gain for impact load torque

그림 9에 본 논문의 관심분야인 속도 제어기의 대역폭 제한으로 인해 PI 속도제어기 이득을 크게 선정할 수 없는 경우에 외란 토크에 대한 속도회복 특성을 보인다. 이 경우 제어기의 절점각 주파수는 1[Hz]이다.



(a) 보상전
(a) Without compensation



(b) 보상후
(b) With compensation

그림 9 이득이 작은 경우의 외란 토크에 대한 속도응답 ($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)

Fig. 9 Speed response with small gain for impact load torque

그림 9(b)의 제안된 기법으로 보상한 경우, 그림 9(a)의 보상전 보다 속도 변동 값이 800[rpm]에서 360[rpm]으로 2.2배 가량 감소하여 속도회복 특성이 크게 개선됨을 알 수 있다.

5. 실험결과 및 고찰

5.1 실험조건

본 논문에서는 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C31 DSP를 이용하여 구성된 제어기와 IGBT를 이용한 PWM 인버터로 구성된 5[hp] 유도전동기 구동시스템에 적용한 실험으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

표 1은 실험에 사용한 유도전동기의 정격을 나타낸다.

표 1 유도전동기 정격
Table 1 Specification of Induction Motor

정격출력	3.7 [kW](5hp)
정격전압	220 [V]
정격전류	12.9 [A]
정격회전속도	1730 [RPM]
극수	4 Pole

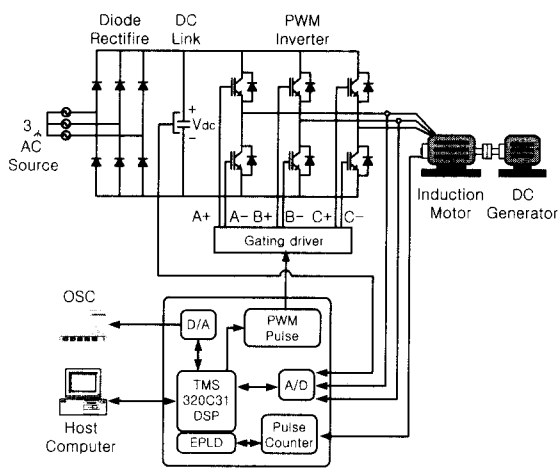


그림 10 유도전동기 구동 시스템
Fig. 10 Drive system for Induction Motor

그림 10은 실험에 사용된 유도전동기 구동시스템의 전체 구성도이다. 유도전동기는 직접벡터방법으로 제어하였으며 전류제어기로는 전향보상이 포함된 동기화

표제 PI 제어기를 사용하였다.

또한 공간전압 PWM(SVPWM)을 사용하였으며, 스위칭 주파수는 5[kHz]이다. 속도제어의 제어주기는 1[msec]이고, 관성능률을 추정하는 제어주기는 속도제어의 주기와 같이 설정하였다.

5.2 속도지령에 대한 속도응답특성

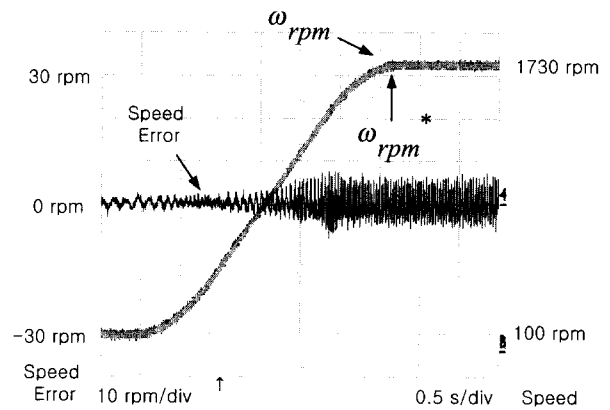


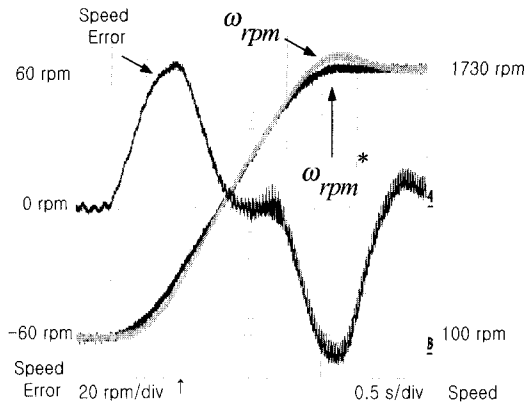
그림 11 이득이 큰 경우의 속도응답과 속도오차
($\omega_{sc}=10[Hz]$)

Fig. 11 Speed response and speed error with large gain

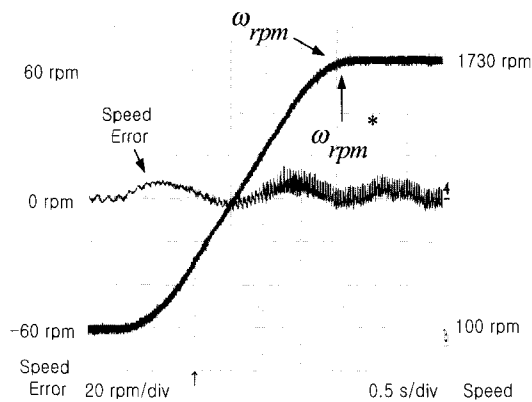
그림 11은 PI 속도제어의 이득이 큰 경우로서 절점각 주파수가 10 [Hz]일 때 전동기가 100[rpm]에서 정격속도까지로 가속한 경우의 속도특성이다. 이 경우 시뮬레이션과 마찬가지로 속도제어의 이득이 커 속도오차가 작고 속도의 응답특성이 좋아 PI 속도제어기 만으로도 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 12는 PI 속도제어의 이득이 작은 경우로서 절점각 주파수가 1[Hz]일 때 정격속도까지 가속하는 동안의 속도와 속도 오차를 보인다. 그림 12(a)의 PI 속도제어기만 존재하는 경우에는 시뮬레이션과 같이 전동기가 가속하기 시작하는 부분과 정상상태에 이르는 부분에서 속도오차가 크게 존재하여 속도응답특성이 좋지 않은 것을 알 수 있다. 그림 12(b)의 제안된 기법으로 보상한 경우, PI 속도제어기만으로 동작하는 경우보다 가속하는 동안 속도 오차의 최대 값은 약 65[rpm]에서 10[rpm] 미만으로 크게 감소하여, 응답특성이 향상된 것을 알 수 있다.

따라서, 제안된 기법으로 가속도지령에 대해 전동기가 가속하는 동안 속도응답 특성이 향상됨을 알 수 있다.



(a) PI 제어
(a) PI Control



(b) 제안된 기법
(b) Proposed Method

그림 12 이득이 작은 경우의 속도응답과 속도오차
($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)

Fig. 12 Speed response and speed error with small gain

5.3 토크 외란에 대한 속도회복특성

외란 토크에 대한 속도응답특성을 살펴보기 위해 전동기-발전기 세트(M-G Set)를 사용하여 정격속도에서 유도전동기에 1/4 정격에 해당하는 외란 토크를 인가하였다.

그림 13은 PI 속도제어기만으로 동작하는 경우와 제안된 기법으로 보상한 경우에 정격속도에서 외란 토크를 인가후의 속도 회복특성을 비교한다. PI 속도제어기의 절점각 주파수는 1[Hz]로 이득이 작은 경우이다.

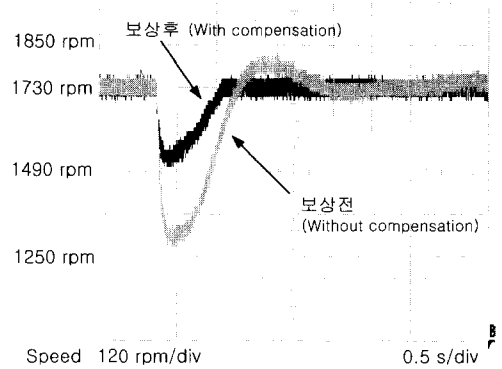


그림 13 외란 토크에 대한 속도 응답 특성
Fig. 13 Speed response for impact load torque
($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)

제안된 기법으로 보상 한 경우가 PI 속도제어기만으로 동작하는 경우보다 속도 변동이 약 60% 정도 감소하였고, 오버슈트가 없으며 속도의 회복시간이 빨라 외란 토크에 대한 속도응답 특성이 향상되었다. 따라서, 제안된 기법으로 속도제어기의 이득이 제한된 경우 토크 외란에 대해 향상된 속도응답특성을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 속도제어기의 대역폭(Bandwidth)을 충분히 높일 수 없는 엘리베이터 구동시스템이나 강성이 낮은 로봇의 제어를 위한 AC 전동기 구동시스템에서 속도제어 성능을 향상시키기 위해 새로운 속도제어 기법을 제안하였다.

PI 속도제어기 출력에 시스템의 관성능률 추정을 통한 가속도 전향보상을 하는 제안된 기법으로 속도제어기 이득이 제한된 전동기 구동시스템에서 향상된 속도응답 특성을 얻을 수 있었다.

또한 추정된 시스템의 관성능률을 이용한 보상으로 외란 토크에 대해 향상된 속도회복특성을 얻을 수 있었다.

시뮬레이션 및 5[hp]의 유도전동기 구동시스템에 적용한 실험으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] Jun-Koo Kang and Seung-Ki Sul, "Vertical Vibration Control of Elevator Using Estimated Car Acceleration

- Feedback Compensation," *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, Vol. 47, No. 1, pp.91~99, 2000, February.
- [2] Young-Min Lee, Jun-Koo Kang, Seung-Ki Sul, "Acceleration Feedback Control Strategy for Improving Riding Quality of Elevator System," *IEEE IAS Conf. Rec.*, pp.1375~1379, 1999.
- [3] Jun-Koo Kang and Seung-Ki Sul, "Application of Nolinear Observers for Elevator Vibration Control," *IEEE IAS Conf. Rec.*, pp.873~897, 2000, February.
- [4] Yoichi Hori, "Comparison of Vibration Suppression Control Strategies in 2-Mass Systems including a Novel Two-Degree-of-Freedom H_{∞} Controller," *Proc. Of 2nd Int. Conf. Of AMC*, pp.409~416, 1992.
- [5] Yoichi Hori, "Disturbance Suppression on an Acceleration Control Type DC Servo System," *IEEE PESC. Rec.*, pp.222~229, 1988.
- [6] 小中正人の 2인 저, 이용중, 유우중, 송승호 역, *산업용 서보모터의 제어시스템 설계*, 대영사, ch. 5, ch. 7, 2000, 02.
- [7] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector control and Dynamics of AC Drives*, New York: Oxford University Press, ch. 5, ch. 6, 1996.

저 자 소 개



이재왕(李在王)

1971년 2월 15일생. 1996년 강원대 전기공학과 졸업. 2001년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



김상훈(金相勳)

1964년 9월 11일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년~1996년 대우중공업 철도차량 연구소 선임연구원. 1997년~2001년 현재 강원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수.