

가속도 전향보상을 이용한 유도전동기의 속도제어

Speed Control of an Induction Motor using Acceleration Feedforward Compensation

김 상 훈* 이 재 왕**
Kim, Sang-Hoon Lee, Jae-Wang

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 experimental results confirm the validity of the proposed strategy

키워드 : 관성모멘트 추정, 가속도 전향보상, 유도전동기 속도제어

Keywords : inertia estimation, acceleration feedforward compensation, induction motor speed control

1. 서론

엘리베이터 구동 시스템의 벡터제어 유도전동기의 속도제어에서 속도제어의 대역폭(Bandwidth)은 일반적으로 3[Hz]인 엘리베이터 시스템이 가지는 고유의 공진을 억제하기 위해 1[Hz] 이하로 제한된다[1,2]. 또한 AC 전동기 구동 시스템을 이용한 낮은 Stiffness의 Robot Arms의 위치제어의 경우, 시스템의 안정성의 관점에서 속도제어의 이득을 크게 설계할 수 없으므로 외란 억제의 성능은 기대할 수 없다[3,4].

속도제어의 대역폭이 낮은 경우 속도제어의 이득이 작기 때문에 속도응답특성이 나빠므로, 속도응답특성을 좋게 하기 위한 효과적인 방법으로 속도제어에 가속도 피드백루프(Feedback Loop)를 추가하여 준다[1,2]. 하지만 이 방법은 가속도 센서나 가속도 추정에 의한 가속도 정보를 필요로 하는데, 가속도 센서는 추가적인 비용을 요구하고 노이즈의 영향을 쉽게 받는다.

본 논문에서는 AC전동기 구동시스템에서, 실제 시스템에서 가변하게 되는 관성모멘트의 현재 값을 전동기의 발생토크와 속도로부터 속도제어기와 같은 주기를 가지고 추정하여 관성모멘트 값과 가속도지령으로부터 전류의 형태로 전환하고, 전향보상하여 기존의 PI 속도제어의 출력에 더해주는 새로운 속도제어기법을 제안한다. 제안된 방법으로, 가속도 지령에 따라 전동기가 가속하는 동안

* 강원대학교 전기전자정보통신공학부 조교수, 공학박사

** 강원대학교 전기전자정보통신공학부 석사과정

미리 알고있는 값이고 속도제어기의 대역폭(ω_{sc})을 높게 설정하면 속도제어기의 이득이 커져 속도 응답 특성이 좋아진다. 그러나 시스템이 가지고 있는 고유의 공진으로 인해 속도제어기의 절절각 주파수가 낮아야 하는 엘리베이터 구동시스템이나, Robot Arms의 위치제어등에 사용되는 AC 전동기 구동시스템에서와 같이 속도제어기의 대역폭(Bandwidth)이 제한된 시스템에서는 PI 속도제어기의 이득이 작아 속도 응답 특성이 나빠짐을 알 수 있다[1-4]. 따라서 속도제어기의 대역폭이 낮은 경우에 속도 응답 특성을 개선할 필요가 있다.

3. 제안된 방법

3.1 보상 방법과 보상전류설정

그림 3은 PI 속도제어기와 속도제어기의 출력인 전류, 제안된 방법의 보상 전류로서 제안된 보상방법을 나타낸다.

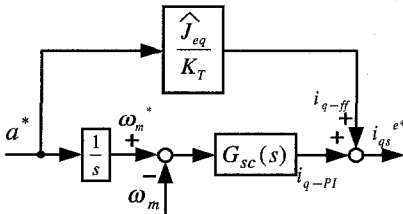


Fig. 3 Speed controller and compensated current

제안된 기법은 가속도 보상을 위해 보상전류 i_{q-ff} 를 기존의 PI 속도제어기의 출력전류 i_{q-PI} 에 더해준다. 이러한 방법으로 본 논문의 관심대상인 PI 속도제어기의 이득이 과도록 제한된 시스템에서, 기존의 PI 속도제어기만 존재하는 경우의 기준전류인 i_{q-PI} 만으로 원하는 속도를 신속히 추정하지 못하기 때문에 i_{q-ff} 로써 i_{q-PI} 전류를 보상하여 향상된 속도응답특성을 얻는다. 보상전류는 가속도 지령과 관성모멘트값을 추정하여 전동기 토크상수와 함께 전류의 형태로 변환되어 전향보상된다.

보상전류 i_{q-ff} 는 벡터제어 유도전동기의 토크 식과 기계적인 시스템방정식인 식 (6)으로부터 식 (5)와 같이 얻을 수 있다[6]. 보상전류는 식 (5)와 같이 가속도 지령과 시스템의 가변하는 관성모멘트를 추정하여 전류 성분으로 전환한 것이다.

$$i_{q-ff} = a^* \times \frac{\hat{J}_{eq}}{K_T} \quad (5)$$

$$T_e = K_T \times i_{qs}^e = \hat{J}_{eq} \times \frac{d\omega_m}{dt} \quad (6)$$

a^* : 가속도지령

\hat{J}_{eq} : 추정된 시스템 관성모멘트

K_T : 토크상수

T_e : 전동기 발생 토크

i_{qs}^e : q^e 축 고정자 전류

ω_m : 회전자 각속도([rad/s])

\hat{J}_{eq} 의 값이 잘 추정된다면 제안된 이 보상 전류는 전동기가 가속도 지령을 적절한 속도지령을 따라 가속하는 동안 매우 유용하다.

3.2 시스템의 등가 관성 추정

식 (6)으로부터 시스템관성모멘트 J_{eq} 는 전동기의 토크와 가속도를 사용하여 식 (7)과 같이 얻을 수 있고[6,7],

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

추정된 관성 모멘트 \hat{J}_{eq} 는 속도제어기와 같은 주기로 동작하여 얻게 되며 노이즈를 제거하기 위해 저역통과필터(low-pass filter)를 이용하여 식 (8)과 같이 최종적으로 얻을 수 있다.

$$\hat{J}_{eq} = \frac{1}{1 + \tau s} \times \frac{T_e}{d\omega_m/dt} \quad (8)$$

가속도 추정에 의한 가속도 귀환제어의 방법에서는 속도의 미분을 얻기 위한 시간지연으로 인해 저역통과 필터의 사용이 어려우나 시스템의 관성모멘트를 추정하는 경우에는 시간지연으로 인한 영향이 무시되어 저역통과필터의 사용이 가능하다.

따라서 속도제어기의 출력인 기준전류 i_{qs}^{**} 는 그림 3에서 알 수 있듯이 저역통과 필터가 포함된 식 (9)와 같다.

$$i_{qs}^{**} = i_{q-PI} + i_{q-ff} \quad (9)$$

3.3 토크외란이 존재하는 경우 보상법

본 논문에서 가속도지령을 추정하는 동안 속도 응답에 유용한 추정된 시스템의 관성모멘트 \hat{J}_{eq} 를 일정속도로 회전할 때 토크외란에 대한 속도응답 특성을 향상시키기 위해서도 사용한다.

토크외란이 존재하는 경우에, 전동기의 운동방정식으로부터 토크외란은 속도변화를 초래하여 시스템의 관성모멘트값이 변한것과 같아 PI 속도제어기 이득을 변화시켜 시스템의 속도제어 성능에 영향을 미치게 된다. 전동기가 일정속도로 회전하는 동안에는 가속도 지령이 없으므로 보상전류 없이 PI 속도제어기의 출력전류만으로 속도제어를 하게 된다. 따라서 이러한 경우에는 위에서 제안된 보상방법으로 원하는 속도응답을 얻을 수 없다.

제안된 기법으로 토크외란이 존재하는 경우, 의

4.2 Simulation결과

(1) 속도지령에 대한 속도응답특성

Simulation으로 속도제어기의 대역폭(Bandwidth)이 큰 경우($\omega_{sc} = 10$ [Hz])와 작은 경우($\omega_{sc} = 1$ [Hz])에 대한 결과를 보인다.

그림 6은 PI 속도제어기의 이득이 큰 경우로서 절점각 주파수 $\omega_{sc} = 10$ [Hz]일 때 속도응답 특성이다.

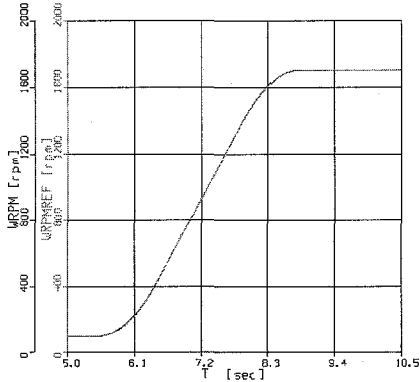
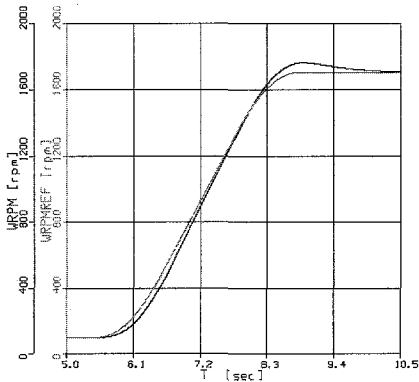


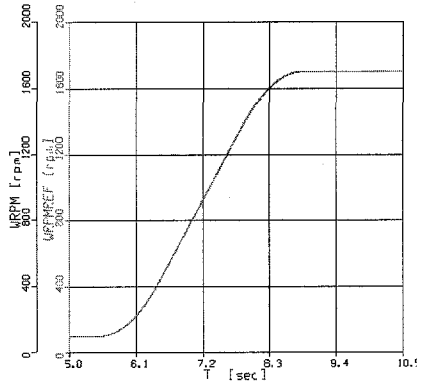
Fig. 6 Speed response with large gain($\omega_{sc}=10$ [Hz])

이러한 경우 속도제어기의 이득이 커 속도의 응답특성이 좋아 PI 속도제어기만으로도 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 7은 PI 속도제어기의 이득이 작은 경우로서 절점각 주파수 $\omega_{sc} = 1$ [Hz]일 때 보상전과 보상후의 속도응답 특성이다.



(a) Without compensation



(a) With compensation

Fig. 7 Speed response with small gain($\omega_{sc}=1$ [Hz])

보상전에는 가속하기 시작하는 시점에서 그림 7-(a)와 같이 속도추정이 느리고 정상상태에 이르는 시점에서 오버슈트가 발생하여 속도오차를 발생한다. 그러나 제안된 기법으로 보상한 그림 7-(b)에서는 속도제어기의 대역폭이 1[Hz]로 제한되는 시스템에서 향상된 속도응답특성을 얻을 수 있다.

시뮬레이션의 결과로부터 제안된 기법으로 속도제어기의 대역폭이 낮은 경우에도 속도지령에 대한 속도응답 특성이 향상됨을 확인할 수 있다.

(2) 토크외란에 대한 속도 회복 특성

본 논문에서는 유도전동기 정격의 1/4에 해당하는 외란 토크를 임팩트(Impact)부하로 인가하여 속도회복 특성을 알아보았다. 토크외란이 인가된 경우 시스템의 속도변화가 발생하여 관성모멘트가 변하고, 이것은 속도제어기의 이득이 변한 것과 같아 일정시간을 두고 속도제어기에 의해 정상상태에 이른다. 토크외란이 인가된 경우에도 PI 속도제어기의 이득이 큰 경우에는 외란에 의한 영향이 적고 이득이 작은 경우에는 외란에 의한 영향이 크다.

그림 8은 PI 속도제어기의 이득이 큰 경우로서 절점각 주파수가 10 [Hz]일 때 토크외란에 대한 속도회복 특성이다.

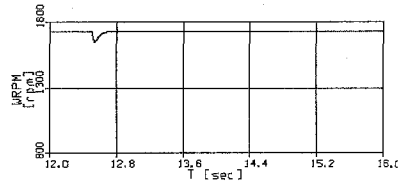
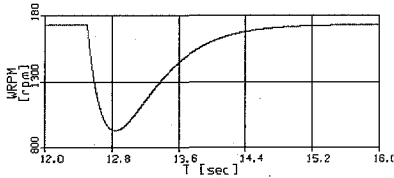


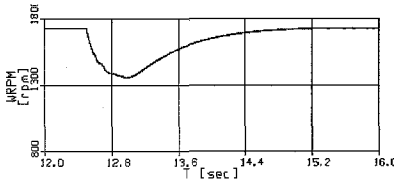
Fig. 8 Speed response with large gain for impact load torque($\omega_{sc}=10$ [Hz])

속도제어기의 이득이 큰 경우 토크의란이 인가되어도 이득이 커 속도변동이 작고 속도의 회복특성이 좋아 PI 속도제어기만으로서도 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 9는 PI 속도제어기의 이득이 작은 경우로서 절점각 주파수가 1[Hz]일 때 제안된 기법으로 보상하기 전과 보상한 후의 속도응답이다.



(a) Without compensation



(b) With compensation

Fig. 9 Speed response with small gain for impact load torque ($\omega_{sc}=1$ [Hz])

제안된 기법으로 보상전 속도 변동값이 800[rpm]에서 보상후 속도변동 값이 약 360[rpm]으로 2.2배 가량 감소하여 속도회복 특성이 개선된다.

5. 실험

5.1 실험조건

본 논문에서는 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C31 DSP칩을 이용하여 구성한 제어기와 IGBT를 이용한 PWM 인버터를 이용하여 앞의 Simulation 조건과 같은 5[hp]의 유도전동기 구동 시스템에 적용한 실험으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다. 속도제어기의 이득이 큰 경우와 작은 경우에 속도응답 특성을 알아보고 속도제어기의 대역폭이 제한되어 이득이 작은 경우 제안된 방법으로 보상하여 속도응답 특성이 향상됨을 알아본다.

표 1은 실험에 사용한 유도전동기의 정격을 나타낸다.

Table 1 Specification of Induction Motor

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

속도제어기의 제어주기는 1[msec]이고, 스위칭 주파수는 5[kHz]로 동작시켰다. 제안된 기법의 적용 및 전체 제어알고리즘은 C Language를 통해 DSP내에서 처리하였고 실험 DATA는 호스트 컴퓨터 및 오실로스코프를 통하여 확인 할 수 있다.

그림 10은 제작된 벡터제어 유도전동기 구동시스템의 전체 구성도이다.

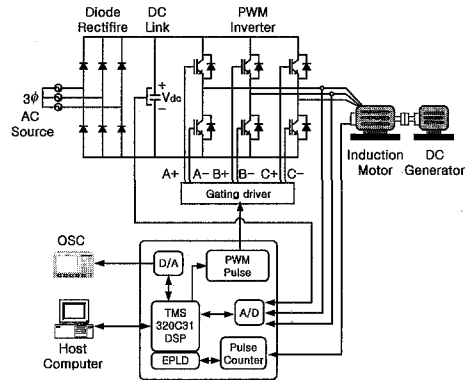


Fig. 10 Block diagram of system for Induction Motor drive

전동기 속도를 알기 위한 1024[ppr] 엔코더로부터의 펄스는 EPLD를 통하여 입력되고, 전류 및 DC-Link전압의 아날로그 물리량은 12-Bit A/D를 통하여 제어기로 입력받아 처리한다. 또한 내부변수의 모든 DATA는 12-Bit D/A를 통하여 오실로스코프로 전달되어 확인이 가능하다. 또한 호스트 컴퓨터에서도 제어기와 통신을 통하여 DSP 동작 중 실시간으로 내부 프로그램의 변수 등을 관찰 및 변경할 수 있다. 그림 11은 본 제어알고리즘에서 인가해준 가속도 지령을 보여주는 오실로스코프 파형이다.

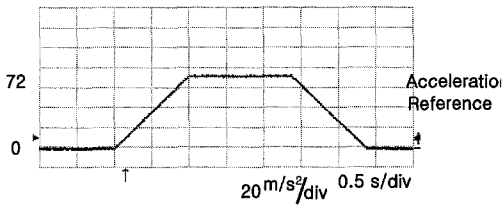


Fig. 11 Acceleration reference

만들어준 가속도 지령을 호스트 컴퓨터로부터 제어기가 받아 D/A 변환기를 거쳐 오실로스코프에 의해 출력된 파형이다. 사용된 가속도패턴(Acceleration Pattern)은 엘리베이터 구동시스템에 실제 사용되는 것으로서 속도지령은 이 가속도 지령을 적분하여 얻는다.

본 논문에서는 유도전동기 정격의 1/4에 해당하는 외란 토크를 인가하여 속도회복특성을 알아보았다. 토크외란은 1[hp]의 DC발전기의 M-G(Motor-Generator) Set을 이용하여 발전기에 전기적인 부하를 순간적으로 인가함으로써 유도전동기에 인가하였다.

5.2 실험결과

(1) 속도지령에 대한 속도응답특성

그림 12는 PI 속도제어기의 이득이 큰 경우로서 절점각 주파수가 10 [Hz]일 때 정격속도로 가속하는 동안의 속도응답 특성이다.

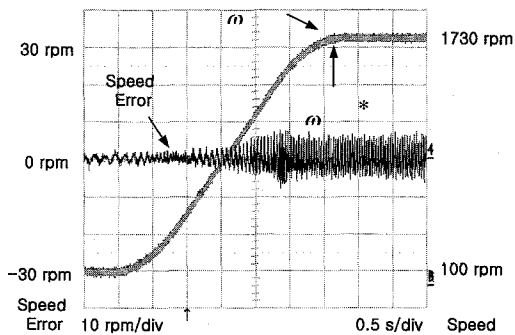
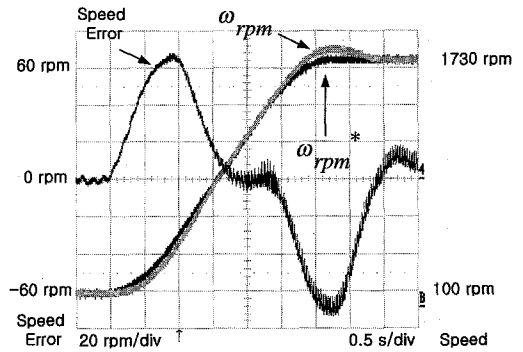


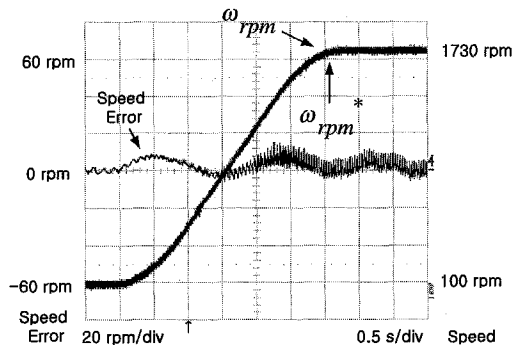
Fig. 12 Speed response with large gain ($\omega_{sc}=10[\text{Hz}]$)

이 경우 시뮬레이션과 같이 속도제어기의 이득이 커 속도오차가 작고 속도의 응답특성이 좋아 PI 속도제어기 만으로도 성능이 우수하다는 것을 알 수 있다.

그림 13은 PI 속도제어기의 이득이 작은 경우로서 절점각 주파수가 1[Hz]일 때 정격속도로 가속하는 동안의 보상전과 보상후의 속도지령과 전동기 속도의 오차이다.



(a) Without compensation ($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)



(b) With compensation

Fig. 13 Speed response with small gain ($\omega_{sc}=1[\text{Hz}]$)

제안된 기법으로 보상한 그림 13-(b)에서 PI 속도제어기만 존재하는 그림 13-(a)의 보상전보다 응답 특성이 향상된 것을 알 수 있다. 가속하는 동안 속도오차의 최대값은 보상후에 약 65[rpm]에서 10[rpm]으로 감소하였다.

제안된 기법으로 가속도지령에 대해 전동기가 가속하는 동안 속도응답 특성이 향상되었다.

(2) 토크외란에 대한 속도회복특성

본 논문에서는 M-G Set을 사용하여 유도전동기가 정격속도로 회전하는 중에 전동기 정격의 1/4에 해당하는 토크외란을 인가하여 보상전 후의 속도응답특성을 보았다.

그림 14는 PI 속도제어기의 이득이 작은 경우로서 절점각 주파수가 1[Hz]인 경우, 토크외란 인가 후의 토크외란에 대한 속도 응답 특성이다.

참 고 문 헌

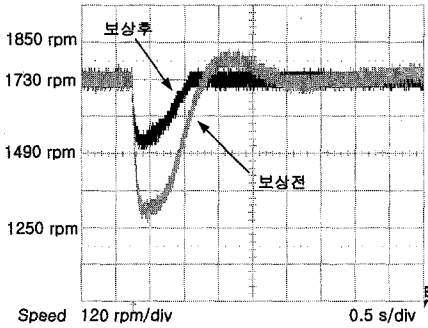


Fig. 5.14 Speed response with and without compensation against impact load torque($\omega_{sc}=1[Hz]$)

보상 후에 보상전보다 속도 변동이 약 60% 감소하였고 오버슈트가 없으며 속도의 회복시간이 빨라 토크외란에 대한 속도응답 특성이 향상되었다. 제안된 기법으로 속도제어기의 이득이 제한된 경우 토크외란에 대해 향상된 속도응답특성을 얻었다.

5. 결론

본 논문에서는 속도제어기의 대역폭(Bandwidth)을 충분히 높일 수 없는 엘리베이터 구동시스템이나 낮은 Stiffness의 Robot Arms의 위치제어시스템의 AC전동기 구동시스템의 속도제어 성능을 향상시키기 위한 새로운 속도제어 기법을 제안하였다.

이러한 구동시스템에서 PI 속도제어기의 대역폭을 높이지 못하면 이득이 작아 속도지령에 대해 원하는 속도응답특성을 얻을 수 없으며, 토크외란에 대한 속도 변동이 크고 속도회복특성이 나쁘다. 속도응답특성을 향상시키기 위한 제안된 기법으로 시스템 관성모멘트의 추정을 통한 가속도 전향보상이 사용되었으며 가변하는 시스템의 관성모멘트를 추정하여 토크외란에 대해 향상된 속도응답 특성을 얻었다. 시뮬레이션 및 DSP를 이용하여 구성한 제어기로써, 5[hp]의 유도전동기 구동시스템에 적용한 실험으로 제안된 기법의 타당성을 검증하였다.

따라서 본 논문에서 제안된 방법으로 시스템이 갖는 고유의 진동으로 인해 PI 속도제어기의 대역폭을 높일 수 없는 엘리베이터 구동시스템이나 낮은 Stiffness의 Robot Arms의 위치제어 등의 AC전동기 구동시스템에서 향상된 속도응답특성을 얻을 수 있음을 확인하였다.

- [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] Yoichi Hori, "Disturbance suppression on an acceleration control type DC servo system," *IEEE PESC Rec.*, pp. 222-229, 1988.
- [4] 小山正人の 2인 저, 이용중, 유우중, 송승호 역, *산업용 서보모터의 제어시스템 설계*, 대영사, ch. 5, ch. 7, 2000, 02.
- [5] 김상훈, *AC 전동기 고성능 구동시스템*, 강원대학교 전력전자연구실, pp. 19-39, pp. 85-95, 2000.
- [6] D. W. Novotny and T. A. Lipo, *Vector control and Dynamics of AC Drives*, New York: Oxford University Press, ch. 5, ch. 6, 1996.
- [7] Bimal K. Bose, *Power Electronics and Variable Frequency Drives: Technology and Applications*, IEEE Press, ch. 5 and pp. 470-477, 1997.