Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 511-518, vol. 16, no. 3, Jun. 30. 2021, t. 107, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2021.16.3.511

외란 관측기 기반의 이산시간 전동기 추종제어

전용호* · 강정욱**

Discrete Time Tracking Control of Motor Based on Disturbance Observer

Yong-Ho Jeon* · Jung-Yoog Kang**

요 약

전동기의 좋은 추종 성능을 얻기 위해서는 외란 관측기가 포함되어 외란에 대응할 수 있는 제어기를 설계하는 것이 필요하다. 전동기의 외란 관측기는 1차 저역통과 필터를 기반으로 부하 토크과 역기전압을 추정하도록 설계하였다. 외란 관측기와 제어기의 상호관계를 비교하고, 개선된 제어 성능을 얻기 위하여 PI 제어기와 IP 제어기를 설계하였다. 설계된 관측기와 제어기의 성능을 확인하고자 120 [W]급의 BLDC 전동기에 적용하였다. 그 결과 오버슈트가 줄어들며, 정상상태 오차가 영으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다.

ABSTRACT

In order to obtain a good tracking performance of the motor, it is necessary to design a controller that can respond to a disturbance by including a disturbance observer. The disturbance observer of the motor is designed to estimate the load torque and the back electromotive voltage based on the first-order low-pass filter. A PI controller and an IP controller were designed to compare the correlation between the disturbance observer and the controller and to obtain improved control performance. To check the performance of the designed observer and the controller, it was applied to a 120 [W] class BLDC motor. As a result, overshoot is reduced, and it can be seen that the steady-state error converges to zero.

키워드

Disturbance Observer, Back Electromotive Voltage, Load Torque, Pi Controller, IP Controller
외란 관측기, 역기전압, 부하 토크, PI 제어기, IP 제어기

Ⅰ. 서 론

외란 대한 관측기는 여러 제어 분야에서 많은 요구가 되고 있으며 선형에서 비선형을 포함한 영역까지 주파수 영역에서의 해석과 설계, 상태공간에서의 해석과 설계로 활발히 연구되고 있다[1-3].

BLDC 전동기는 고정자 권선에 전류를 흐르게 하여 발생하는 전자기력과 회전자 영구자석의 자기력이 상호작용하여 회전력을 얻는 시스템이다[4-14].

전동기의 회전축의 속도를 제어하기 위해서는 회전축으로부터 얻어지는 속도를 기준속도와 오차에 대하여 보상을 하는 방법을 사용한다. 일반적이고 간단하게 구성할

*중원대학교 항공정비학과 교수(waterjliar@jwu.ac.kr)
**교신저자 : 신라대학교 수학교육과
· 접 수 일 : 2021. 04. 28
· 수정완료일 : 2021. 05. 23
· 게재확정일 : 2021. 06. 17
· Received : Apr. 28, 2021, Revised : May. 23, 2021, Accepted : Jun. 17, 2021
· Corresponding Author : Jung Yoog Kang
Dept. Mathmatics Education, Silla University
Email : jykang@silla.ac.kr

수 있는 PID 제어기는 산업 현장에서 가장 많이 과거로부터 현재까지 가장 많이 사용되는 제어기이다.

제어기의 성능이 개선하기 위하여 외란에 대한 추정이 또한 필요하다. 전동기 시스템은 기계적인 요소와 전기적인 요소가 복합되어 있고 여러 가지 외란이 존재한다. 따라서 외란 추정이 복잡하지 않으면서 효과적인 관측기에 대한 설계 필요하고 제어기와 함께 시스템에 적용하였을 때 성능 개선의 결과를 얻을 수있어야 한다.

본 논문은 BLDC 전동기의 강건한 속도와 전류제어기를 구성하기 위하여 외란 관측기를 설계한다. 외란 관측기는 기계적인 부분과 전기적인 부분의 두 공칭 시스템에 맞춰 1차 저역 필터로 설계한다[1-3]. 또한 외란 관측기의 이득을 설정할 수 있도록 하여 외란 추정의 정밀도를 향상시키고, 4장에서는 속도와 전류 제어기를 PI 제어기와 IP 제어기로 나누어 설계한다. 그리고 설계는 주파수 영역에서 수행하고, 설계된 제어기와 관측기를 z변환을 이용하여 이산시간 영역으로 변환한다. 5장에서는 설계된 관측기와 제어기를 120W급 BLDC 전동기에 적용하여 속도를 추종하는 시뮬레이션 하였고, 제안된 외란 관측기와 제어기가 유용함을 확인한다.

II. BLDC 전동기 시스템

BLDC 전동기 시스템의 수학적 모델은 식 (1)에서 식 (3)과 같다[4-14].

$$J\dot{w} = \tau_e - Bw - \tau_l \tag{1}$$

$$\tau_e = \frac{\sum_{x=a,b,c} E_x i_x}{\omega} = K_t i_x \tag{2}$$

$$L_s \dot{i}_x = U_x - R_x i_x - E_x \; x = a,b,c \tag{3}$$

여기서, ω은 회전자 축의 각속도, τ_l은 부하토크, J은 전동기 회전자의 관성모멘트, B은 전동기 회전자의 점성 마찰계수, τ_e는 전자기적으로 발생되는 토크, E_x는 각 상의 역기전압, i_x는 각 상의 전류, R_x는 고정자의 상 저항, L_s는 각 상의 인덕턴스, U_x는 각 상의 입력전압이다.

식 (1)은 기계적인 역학방정식이고 식 (3)은 전기적인 역학 방정식이다. 상수 K_t는 단위 상 전류에 대해 전기적으로 발생 토크로 고정자를 3상 2여자 방식으로 구동함으로 식 (2)의 오른쪽 항과 같이 간단히 표현될 수 있다. 전기 시스템의 출력 i_x에 의해 발생된 토크가 기계 시스템의 입력으로 동작한다.

전동기 시스템의 이산시간 영역에서 제어기와 외란 관측기를 설계하기 위하여 먼저 주파수 영역에서 설계를 하고 Z변환을 사용하여 이산시간으로 변환한다.

전동기의 회전축의 속도 추종을 위해 전향 보상된 제어기와 외란 관측기가 포함된 전체 시스템의 구조는 그림 1과 같다.

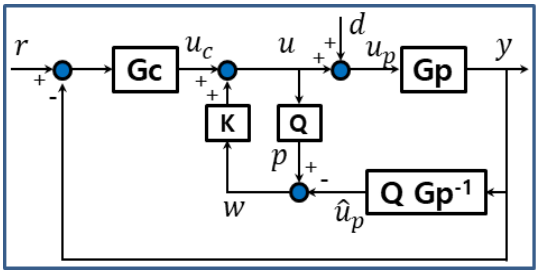

그림 1. 외란 관측기가 포함된 전체 제어 시스템
Fig. 1 The full control system with disturbance observer

그림 1에서 $G_p(s)$는 전동기의 기계적인 시스템의 전달함수이다. $G_c(s)$는 기준 각속도에 전동기 회전축에 대한 오차를 입력으로 하는 제어기의 전달함수이다. $Q(s)$는 외란을 관측기의 한 부분으로 외란이 포함되지 않은 순수한 제어입력 u를 추정하기 위한 필터의 전달함수이다. 그리고 $Q(s)G_p^{-1}(s)$는 출력신호 y를 입력으로 하여 플랜트의 입력을 추정하기 위한 필터의 전달함수이다.

전동기 기계적인 시스템 식 (1)의 전달함수 $G_p(s)$는 식 (4)와 같다.

$$\omega(s) = \frac{1}{Js+B}\left(\tau_e(s) - \tau_l(s)\right) \tag{4}$$

식 (4)는 전기 시스템에서 발생한 토크 τ_e를 입력으로 하고 전동기 회전축의 각속도 ω를 출력으로 한다. 상수 부하 τ_l은 외란 입력으로 가정한다.

전기적인 시스템 식(2)의 전달함수 $G_p(s)$는 식 (5)와 같다.

$$i_x(s) = \frac{1}{L_x s + R_x}\big(U_x(s) - E_x(s)\big) \tag{5}$$

식 (5)는 삼상 인버터의 상전압 U_x을 입력으로 하고 고정자 코일 상전류 i_x를 출력으로 한다. 회전자 마그네트의 회전으로 인해 발생하는 역기전압 E_x를 외란으로 가정한 전달함수이다.

III. 외란 관측기 설계

외란 관측기를 설계하기 위하여 식 (4)에서 식 (5)의 공칭 시스템은 식 (6)에서 식 (7)와 같다.

$$\frac{\omega}{\tau_e} = \frac{\bar{b}_m}{s + \bar{a}_m} \tag{6}$$

$$\frac{i_x}{U_x} = \frac{\bar{b}_i}{s + \bar{a}_i} \tag{7}$$

식 (6)의 $\bar{a}_m$는 B/J이고 $\bar{b}_m$는 $1/J$ 이다. 식 (7)의 $\bar{a}_i$는 R_x/L_x이고 $\bar{b}_i$는 $1/L_x$이다. 식 (6)에 식 (7)의 공칭 시스템과 같은 차수의 $Q(s)$ 필터를 설계하면 식 (8)에서 식 (9)가 된다.

$$\frac{q_m}{u_m} = \frac{a_m}{s + a_m} \tag{8}$$

$$\frac{q_i}{u_i} = \frac{a_i}{s + a_i} \tag{9}$$

식 (8)은 기계적인 제어입력 τ_e를 추정하기 위한 필터로 외란이 포함되지 않은 값이 된다. 또한 식 (9)는 전기적인 제어입력 U_x를 추정하기 위한 필터이며 외란이 포함되지 않은 순수 제어입력을 추정한다.

외란이 포함된 시스템의 입력을 추정하기 위하여 $G_p^{-1}(s)$을 구현하는데 이는 플랜트의 입력을 출력으로 출력을 입력으로 하는 것으로 식 (10)에서 식 (11)과 같다.

$$\hat{u}_m = (1/\bar{b}_m)\big(\dot{y}_m + \bar{a}_m y_m\big) \tag{10}$$

$$\hat{u}_i = (1/\bar{b}_i)\big(\dot{y}_i + \bar{a}_i y_i\big) \tag{11}$$

식 (10)은 기계적인 시스템의 입력 $\hat{u}_m$을 추정하는 식으로 식 (6)의 공칭값을 사용한다. 또한 식 (11)은 전기적 시스템의 입력 $\hat{u}_i$을 추정하는 식으로 식 (7)의 공칭값을 사용한다. 식 (7)의 $\dot{y}_m$과 식 (11)의 $\dot{y}_i$는 구할 수 없으므로 y_m은 식 (8)을 이용하여 q_m으로 치환하고 y_i는 식 (9)을 이용하여 q_i로 대치하여 얻은 추정 식은 식 (12)에서 식 (13)과 같다.

$$\hat{u}_m = \frac{1}{\bar{b}_m}\big(-a_m q_m + a_m y_m + \bar{a}_m q_m\big) \tag{12}$$

$$\hat{u}_i = \frac{1}{\bar{b}_i}\big(-a_i q_i + a_i y_i + \bar{a}_i q_i\big) \tag{13}$$

식 (12)의 y_m은 전동기 출력 ω이다. 그리고 식 (13)의 y_e는 상전류 i_x이다.

설계된 외란 관측기를 포함하는 전체 시스템의 전달함수는 식 (14)에서 식(17)와 같다.

$$\frac{y}{r} = \frac{G_c G_p}{1 + KQ(G_p G_p^{-1} - 1) + G_c G_p} \tag{14}$$

$$\frac{y}{d} = \frac{(1 - KQ)G_p}{1 + KQ(G_p G_p^{-1} - 1) + G_c G_p} \tag{15}$$

$$\frac{w}{u_c} = \frac{KQ(1 - G_p G_p^{-1})}{1 + KQ(G_p G_p^{-1} - 1)} \tag{16}$$

$$\frac{w}{d} = \frac{KQG_p G_p^{-1}}{1 + KQ(G_p G_p^{-1} - 1)} \tag{17}$$

기계 시스템이나 전기시스템 모두 같은 구조의 전달함수를 가지며 파라메타만 다를 뿐이다. 식 (14)는 레퍼런스 입력에 대한 출력의 전달함수이다. 식 (15)는 외란에 대한 출력의 전달함수이다. G_p^{-1}가 잘 설계되어 $G_p^{-1}G_p$가 1이 된다면 $Q(s)$가 1이 된다면 식 (16)에서 제어기에 의한 외란 추정값은 사라지게 되며, 식 (17)에서 외란을 잘 추정할 수 있다. 식 (17)으로 추정되는 값을 제어입력에 더하여 시스템 입력으로 더해지면 외란이 제거가 되는 구조이다. K는 관측된 외란에 곱해지는 이득이다. K를 이용하여 출력에 나타나는 외란의 영향을 조절하여 출력의 응답 성능을 개선하도록 설계된 이득이다.

설계된 외란 관측기의 $Q(s)$를 이산시간으로 포워드

변환을 하면 식 (18)에서 식 (19)과 같다.

$$q_{m,k} = (1 + a_m T_{s,m}) q_{m,k-1} + a_m T_{s,m} u_{m,k-1} \quad (18)$$

$$q_{i,k} = (1 + a_i T_{s,i}) q_{i,k-1} + a_i T_{s,i} u_{i,k-1} \quad (19)$$

여기서 $T_{s,m}$는 기계 시스템의 이산시간 샘플링 주기이고, $T_{s,i}$는 전기 시스템의 이산시간 샘플링 주기다.

식 (12)에서 식 (13)의 이산시간 변환하면 식 (20)에서 식 (21)과 같다.

$$\hat{u}_{m,k} = (1/\bar{b}_m)\left(-a_m q_{m,k} + a_m y_{m,k} + \bar{a}_m q_{m,k}\right) \quad (20)$$

$$\hat{u}_{i,k} = (1/\bar{b}_i)\left(-a_i q_{i,k} + a_i y_{i,k} + \bar{a}_i q_{i,k}\right) \quad (21)$$

식 (18)에서 식 (21)의 $q_{m,k}$, $q_{i,k}$에 쓰인 k는 샘플링 시간 스텝을 나타낸다.

IV. 속도 및 전류 제어기

전동기의 제어기를 설계하기 위하여 일반적으로 PID 제어기가 많이 사용한다. 특히 간단하게 설계가 가능한 PI 제어기가 특히 많이 활용하는데, 전동기 시스템은 전기적인 부분의 제어기와 기계적인 부분의 제어기를 가져야 정밀한 제어가 가능하다. 또한 전향 보상으로 사용되는 PI 제어기는 폐루프 전달함수에 영점을 첨가하는 것으로 오버슈트 발생의 원인이 되기도 한다. 그래서 이를 개선한 IP 제어기를 사용하기도 한다. 외란 관측기가 포함된 시스템에서 PI 제어기와 IP 제어기의 성능을 비교하기 위해 두 제어기의 설계를 한다.

4.1 PI 제어기

전동기의 각속도 오차와 전류 오차는 식 (22)에서 식 (23)와 같다.

$$e_m = \omega_{ref} - \omega \quad (22)$$

$$e_i = i_{ref} - i_x \quad (23)$$

여기서. ω_{ref} 는 레퍼런스 각속도이고 i_{ref}는 추종 전류이다. 추종 전류는 식 (2)를 사용하여 계산된다. 이를 이용하여 각속도 제어기와 전류 제어기는 식 (24)에서 식 (25)로 구성된다.

$$\frac{u_{c,m}}{e_m} = k_{m,p} + \frac{k_{m,i}}{s} \quad (24)$$

$$\frac{u_{c,i}}{e_i} = k_{i,p} + \frac{k_{i,i}}{s} \quad (25)$$

여기서, $u_{c,m}$은 각속도 제어기의 출력이고 $k_{m,p}$는 각속도에 대한 비례 제어이득이고 $k_{m,i}$는 적분 제어이득이다. $u_{c,i}$은 전류 제어기의 출력이고, $k_{i,p}$는 전류에 대한 비례 제어이득이고, $k_{i,i}$는 적분 제어이득이다.

제어이득을 설정하기 위해 식 (14)의 전달함수에서 G_p^{-1}가 잘 설계되어 $G_p^{-1}G_p$가 1이 되고 Q가 1을 가정하여 특성방정식을 구하면 식 (26)에서 식 (27)와 같다.

$$\Delta_m = s^2 + (\bar{a}_m + \bar{b}_m k_{m,p})s + \bar{b}_m k_{m,i} \quad (26)$$

$$\Delta_e = s^2 + (\bar{a}_i + \bar{b}_i k_{i,p})s + \bar{b}_i k_{i,i} \quad (27)$$

Δ_m은 기계 시스템의 특성방정식이고 Δ_e는 전기 시스템의 특성방정식으로 식 (28)에서 식 (31)과 같이 설정할 수 있다.

$$\zeta_m = \frac{(\bar{a}_m + \bar{b}_m k_{m,p})}{2\sqrt{\bar{b}_m k_{m,i}}} \quad (28)$$

$$\omega_{n,m} = \sqrt{\bar{b}_m k_{m,i}} \quad (29)$$

$$\zeta_i = \frac{(\bar{a}_i + \bar{b}_i k_{i,p})}{2\sqrt{\bar{b}_i k_{i,i}}} \quad (30)$$

$$\omega_{n,i} = \sqrt{\bar{b}_i k_{i,i}} \quad (31)$$

여기서 ζ_m는 기계 시스템의 감쇠비이고 $\omega_{n,m}$는 고유주파수이다. ζ_i는 전기 시스템의 감쇠비이고 $\omega_{n,i}$는 고유주파수이다. 비례 제어이득과 적분 제어이득을 적절히 설정하여 원하는 감쇠비와 고유 주파수를 갖는 응답을 얻을 수 있다. 설계된 PI 제어기를 이산시간으로 변환하면 식 (32)에서 식 (33)과 같다.

$$u_{c,m,k} = u_{c,m,k-1} + k_{m,p}(e_{m,k} - e_{m,k-1}) + k_{m,i}T_{s,m}e_{m,k} \quad (32)$$

$$u_{c,i,k} = u_{c,i,k-1} + k_{i,p}(e_{i,k} - e_{i,k-1}) + k_{i,i}T_{s,i}e_{i,k} \quad (33)$$

4.2 IP 제어기

전동기의 각속도 오차와 전류 오차는 PI 제어기의 식 (22)에서 식 (23)와 같다. IP 제어기는 다음 식 (34)에서 식 (35)와 같다.

$$u_{c,m} = \frac{k_{m,i}}{s}e_m - k_{m,p}\omega \quad (34)$$

$$u_{c,i} = \frac{k_{i,i}}{s}e_i - k_{i,p}i_x \quad (35)$$

오차에 대하여 적분하여 적분 제어이득을 곱하고 비례 제어이득은 출력에 곱하는 구조이다. 이 제어기의 특징은 폐루프 전달함수에서 PI 제어기는 한 개의 영점이 첨가되지만, IP 영점이 첨가되지 않아 오버슈트 발생이 줄어드는 장점이 있다.

IP 제어기의 이득을 설정하기 위해 식 (14)의 전달함수에서 G_p^{-1}가 잘 설계되어 $G_p^{-1}G_p$가 1이 되고 Q가 1을 가정하여 특성방정식은 PI 제어기의 식 (26)에서 식 (27)와 같고, 식 (28)에서 식 (31)와 같이 감쇠비와 고유 주파수를 설정할 수 있다. IP 제어기를 이산시간으로 변환하면 식 (36)에서 식 (37)와 같다.

$$u_{c,m,k} = u_{c,m,k-1} + k_{m,i}T_{s,m}e_{m,k-1} - k_{m,p}\omega \quad (36)$$

$$u_{c,i,k} = u_{c,i,k-1} + k_{i,i}T_{s,i}e_{i,k-1} - k_{i,p}i_{x,k} \quad (37)$$

V. 시뮬레이션

설계된 제어기와 외란 관측기의 성능을 검증하고자 PSIM 시뮬레이션 수행을 하였으며, 레퍼런스 각속도를 1200 [RPM] 하여 기동시의 출력 각속도를 확인하였다. 그리고 시간 0.5 초에서 상수 부하를 0.1 [Nm] 를 작용하고 시간 1 초에 상수 부하가 제거되도록 하였다. PI 제어기의 응답과 IP 제어기의 응답을 비교하였다. 시뮬레이션에 사용된 BLDC 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. BLDC 전동기 파라메타
Table 1. BLDC Motor Parameter

Motor Rated Power	3-phase 120W
Motor Rated Speed	5000 RPM
Pole Number (p)	4
Stator Resistance, R_s	0.215 Ω
Stator Inductance, L_s	0.0000366 mH
Moment of Inertia, J_m	0.0000085 Kgm^2
Friction coefficient, B_m	0.00010625Nm/rad/s
back EMF constant, K_e	0.00234 V/rad/s
Torque Constant, K_t	0.0215 Nm/A

외란 추정을 위한 관측기 이득은 표 2와 같다. 기계부의 외란 관측기 Q 필터의 시상수는 전동기의 기계부의 $\bar{a}_m$와 일치하도록 설정하였다. 전기부의 외란 관측기도 전기부의 $\bar{a}_i$와 일치하도록 설정하였다. Q 필터는 저역 통과 팔터로 이득이 1이 되도록 설계되어 이를 보상하기 위해 이득 K를 설정하였고, 기계부의 이득만 조절하였다.

표 2. 외란 관측기 이득
Table 2. Disturbance Obsever's gain

$\hat{\tau}_l$		$\hat{E}_x$	
a_m	12.5	a_i	5874
K	0 ~ 10.625	K	0.215

PI 제어기와 IP 제어기의 성능을 비교하고자 제어기 이득을 표 2와 같이 설정하였다.

표 3. 제어기 이득
Table 3. Disturbance Observer's gain

	PI controller	IP controller
$k_{m,p}$	0.001	0.001
$k_{m,i}$	0.036	0.036
ζ_m	1	1
$\omega_{n,m}$	65.1	65.1
$k_{i,p}$	0.01	0.01
$k_{i,i}$	329.4.	329.4.
ζ_i	1.02	1.02
$\omega_{n,i}$	3000	3000

PI 제어기와 IP 제어기의 이득을 같이 설정하여 기동 상태의 응답과 외란에 영향에 대한 성능을 비교하였다. 기계부의 외란 관측기 이득 K를 0.000106 로 하고 외란 관측기 출력을 제어입력에 가하지 않은 결과는 그림 2와 같다.

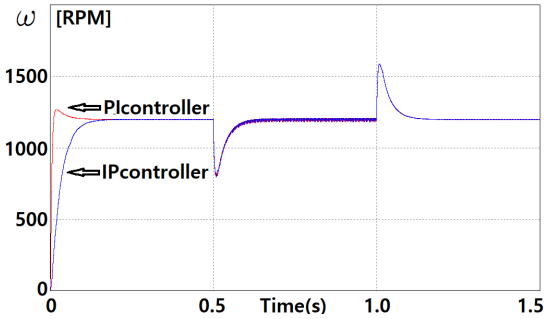

그림 2. 외란을 적용하지 않은 속도 제어 결과
Fig. 2 The speed control result without $\hat{\tau}_l$

그림 2의 결과는 외란을 추정하고 제어입력에 사용하지 않은 결과이다. 위쪽 파형은 PI 제어 결과로 ζ_m을 1로 하였지만 파라메타 오차들이 존재하여 약 5.7 %의 오버슈트 발생하고, IP 제어기는 임계제동의 모습으로 기동하였다. 상승시간은 PI 제어기는 약 0.009 초이며 IP 제어기는 0.07 초의 시간이 소모되었다. 시간 0.5 초에서 외란 작용으로 인해 PI 제어기는 32.7 %의 언더슈트가 발생하고, IP 제어기는 33.8 %의 언더슈트가 발생하며 시간 1.0 초에서 외란이 제거되어 두 제어기 모두 약 32.3 %의 오버슈트 발생하였다.

다음으로 $\hat{\tau}_l$을 추정하기 위한 외란 관측기의 이득 K를 0.0106으로 하였을 때 결과는 그림 3과 같다. 그림 3의 상단은 속도 결과 파형으로 PI 제어기는 약 5.6 %의 오버슈트가 발생하고 상승시간은 PI 제어기가 약 0.0088 초이며 IP 제어기는 0.07 초이다. 상수 부하의 외란이 작용하였을 때 제어기의 응답은 그림 2와 거의 비슷한 결과를 얻었다. 하단은 $\hat{\tau}_l$의 외란을 추정한 결과인데 IP 제어기의 경우 외란 없는 경우에도 약 1.25 [mNm]의 값을 얻고 있다. 그에 비해 PI 제어기의 경우 거의 -0.1 [mNm]의 값을 얻고 있다. 시간 0.5초에서 PI 제어기는 약 0.5 [mNm]의 값으로 수렴하고, IP 제어기는 약 1.8 [mNm]의 값으로 수렴하고 있다. 이로 외란 추정치가 너무 작아 제어 성능에 큰 영향을 끼치지 못하는 결과를 보인다.

다음으로 외란에 대한 영향을 줄여 응답 성능을 개선하기 위하여 외란 관측기의 이득 K를 0.0106 으로 하였을 때 결과는 그림 4과 같다.

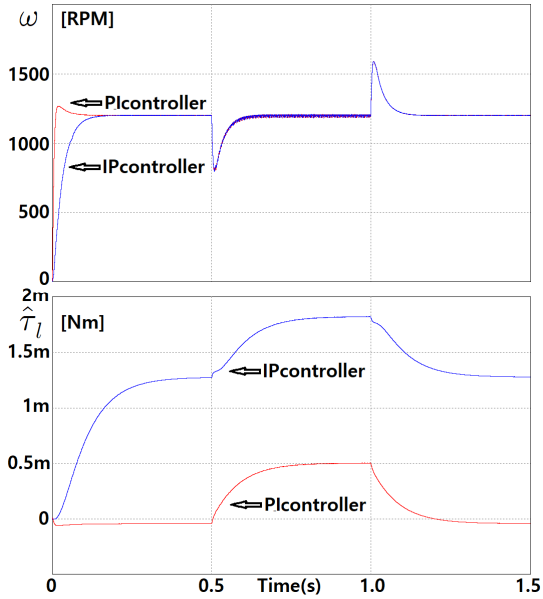

그림 3. 관측기 이득 0.0106의 속도 제어 결과
Fig. 3 The speed control result when K=0.0106

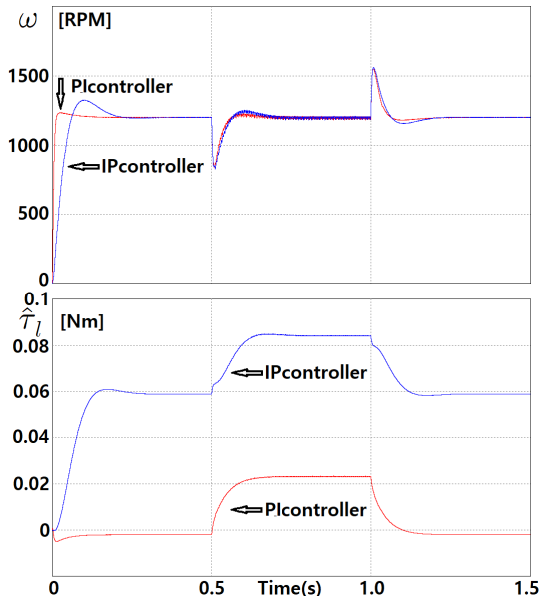

그림 4. 관측기 이득 1.06의 속도 제어 결과
Fig. 4 The speed control result when K=1.06

그림 4의 상단 그림은 PI 제어기는 약 2.9 %의 오버슈트가 발생하고 있어서 그림 3의 PI 제어기의 약 5.6 %

오버슈트보다 줄어든 것을 알 수 있다. IP 제어기의 경우 약 10.4 %의 오버슈트가 발생함을 보인다. 상승시간에서 PI 제어기는 약 0.0093 초이고 IP 제어기는 0.0498 초가 걸렸다. 시간 0.5초에서 상수 부하의 작용으로 PI 제어기는 30.3 %의 언더슈트가 발생하고, IP 제어기는 31.7 %의 언더슈트가 발생하며 시간 1초에서는 PI 제어기는 28.9 %의 오버슈트가 발생하고, IP 제어기는 30.0 %의 오버슈트가 발생하였다. 하단 그림의 외란 추정을 보면 IP 제어기의 경우 외란이 없는 경우에도 약 0.06 [Nm]의 값을 얻고 있다. 그에 비해 PI 제어기의 경우 거의 -0.02 [Nm]의 값을 얻고 있다. 시간 0.5초에서 PI 제어기는 약 0.023 [Nm]의 값으로 수렴하고, IP 제어기는 약 0.084 [Nm]의 값으로 수렴하고 있다. 적절히 외란 관측기 이득 K가 0.0106 에서 1.06 으로 설정됨으로 외란의 추정치가 커져 PI 제어기는 기동에서 5.6 %에서 2.9 % 오버슈트가 줄어들고 외란에 대해서 약 32.7 % 언더슈트에서 30.3 %의 언더슈트로 줄어들었다. PI 제어기의 성능 개선 결과를 표 3으로 요약하였다.

표 4. 관측기 이득 K에 따른 제어 결과
Table 4. Control result according to observer gain

K	0.0106	1.06
overshoot after the beginning	5.6 %	2.9 %
undershoot after 0.5 s	32.7 %	30.3 %
overshoot after 1.0 s	32.3 %	28.9 %

다음으로 IP 제어기는 관측기 이득이 증가함에 따라 오버슈트가 커지고 점차로 불안정한 결과를 보이는데 이는 외란이 없는 상태에서 추정된 외란 값이 제어기에 영향을 끼치는 것으로 판단된다. PI 제어기의 경우 관측기의 이득이 커질수록 외란 추정 성능이 개선되어 제어 성능을 개선하는 결과를 보인다.

VI. 결 론

전동기의 추종 성능의 개선을 위해서는 전동기 시스템의 정확한 파라메타가 필요하며, 작용하는 외란에 대한 대응이 필요하다.

작용하는 외란을 추정하고자 외란 관측기를 설계하고 적절한 관측기의 이득을 설정함으로 제어기의 추종 성능이 개선함을 보일 수 있었다. 제어기는 PI 제어기와 IP 제어기를 설계하였는데 PI 제어기와 관측기의 결합이 IP 제어기와 관측기의 결합보다 우수한 성능을 보이는 결과를 얻었다. 이는 출력에 대한 외란의 전달함수에서 관측기의 이득이 커지면 우반면에 영점이 첨가되는 되어 이 결과가 IP 제어기는 영점이 없어 외란 없어도 특정한 옵셋을 가지며, PI 제어기의 경우 영점을 가지고 고역 통과 필터로 작용하여 제거되는 것으로 판단된다. 추후로 정밀한 관측기의 설계와 Q 필터의 파라메타에 대한 연구와 이산시간 영역에서의 필터 설계에 대한 연구가 되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2017년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임.(No.2017R1E1A1A03070483)

References

[1] K. Ohnishi, “A new servo method in mechatronics,” *Trans. of Japanese Society of Electrical Engineers,* vol. 107-D, 1987, pp. 83-86.

[2] J. Back and H. Shim, “Adding robustness to nominal output feedback controllers for uncertain nonlinear systems: A nonlinear version of disturbance observer,” *Automatica,* vol. 44, no. 10, 2008, pp. 2528-2537.

[3] J. Back and H, Shim, “An inner-loop controller guaranteeing robust transient performance for uncertain MIMO nonlinear systems,” *IEEE Trans. on Automatic Control,* vol. 54, no. 7, 2009, pp. 1601-1607.

[4] J. Kim, “A robust sensorless speed control of sensorless BLDC motor,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 3, no. 4, 2008, pp. 266-275.

[5] H. Lee, W. Cho, and K. Lee, “Improved switching method for sensorless BLDC motor drive,” *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 5, no. 2, 2010, pp. 164-170.

[6] Y. Jeon and M. Cho, “A Speed Control of

BLDC Motor using Adaptive Back stepping Technique," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 8, 2014, pp. 899-905.
[7] J. Zhou and Y. Wang, "Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor," *Electric Power Applications IEE Proc.* vol. 149, no. 2, 2002, pp. 165-172.
[8] M. Ouassaid, M. Cherkaoui, and Y. Zidani, "A Nonlinear Speed Control for a PM Synchronous Motor Using an Adaptive Back -stepping Control Approach," *IEEE Int. Conf. on Industrial Technology* (*ICIT*), Hammamet, Tunisia, 2004, pp. 1287-1292.
[9] S. Rebouh, A. Kaddouri, R. Abdessemed, and A. Haddoun, "Adaptive Back stepping speed Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Management and Service Science* (*MASS*) *2011 Int. Conf.*, Wuhan, China, 2011, pp. 1-4.
[10] L. Yuan, H. Feng-you, and W. Feng "Nominal Model-Based Control for Permanent Magnet Synchronous Motor," *2009 Int. Conf. on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics*, Hangzhou, China, 2009, pp. 343-346.
[11] S. Back, "A Study on the Design and Implementation of 2-phase BLDC Fan Motor with 1-horsepower Class 8for Air Conditioning," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 4, Aug. 2018, pp. 760.
[12] H. Kwon, "Knee Rehabilitation System through EMG Signal analysis and BLDC Motor Control," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 5, Oct. 2019, pp. 1009-1018.
[13] H. Cho, and W. Kim, "Sensorless Control of High-Speed BLDC," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 3, Jun. 2020, pp. 503-512.
[14] Y. Jeon and S. Lee, "Tracking Control of BLDC Motor Based on Disturbance Observer," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 15, no. 5, Oct. 2020, pp. 907-912.

저자 소개

전용호(Yong-Ho Jeon)

1996년 광운대학교 제어계측공학과 졸업(공학사)
1998년 광운대학교 대학원 제어계측공학과 졸업(공학석사)
2008년 광운대학교 대학원 정보제어공학과 졸업(공학박사)
2013년 ~2017년 8월 중원대학교 메카트로닉스학과 교수
2017년 9월 ~ 중원대학교 항공정비학과 교수
※ 관심분야 : 가변속 시스템, 지능로봇 시스템

강정욱(Jung-Yoog Kang)

2006년 신라대학교 수학과 졸업(이학사)
2011년 한남대학교 대학원 수학교육학과 졸업(교육학석사)
2016년 한남대학교 대학원 수학과 졸업(이학박사)
2017. ~2018.8 안양대학교 정보통계학과 교수
2018.9 ~현재 신라대학교 수학교육과 교수
※ 관심분야 : 응용 수학