

# 외란 관측기를 이용한 BLDCM의 위치 및 속도제어

전용호\*

The Position and Speed Control of the BLDC Motor Using the Disturbance Observer

Yong-Ho Jeon\*

요 약

전동기의 제어에 있어서 전동기의 수학적 모델 오차와 작용하는 외란에 대해서 강건하며 정밀한 제어의 성능을 요구한다. 강건하며 정밀한 제어를 위하여 외란 관측기를 설계하여 부하변동을 추정하고, 공칭 시스템으로 설계된 백스텝핑 제어기에 적용하였다. 설계된 시스템의 제어 성능을 확인하고자 120 [W]급의 BLDCM(Brushless Direct Current Motor)에 적용하여, 위치제어 및 속도제어의 결과 외란을 극복하고 정상상태 오차가 영으로 수렴하며, 접근적 안정한 결과를 확인할 수 있다.

ABSTRACT

Motor control requires robust and precise control performance even in the presence of errors in the mathematical model of the motor and disturbances acting on the motor. For robust and precise control, a disturbance observer was designed to estimate the load fluctuation and applied to a back-stepping controller designed as a nominal system. The control performance of the designed system was verified by applying it to the 120 [W] Brushless Direct Current Motor. As a result of the position control and speed control, the disturbance is overcome from the steady state error converges to zero, and asymptotically stable results can be confirmed.

키워드

Disturbance Observer, Position Control, Speed Control, Back-Stepping Control, Brushless Direct Current Motor  
외란 관측기, 위치 제어, 속도 제어, 백스텝핑 제어, BLDC 전동기

## 1. 서 론

전기를 사용하여 동력을 얻는 전동기는 여러 산업 분야에서 많은 사용이 되어왔으며, 현재는 전기자동차의 핵심 부품이 되고, 점차 내연기관의 동력 장치를 대체해나가고 있다. 전동기를 이용하는 장점은 전기를 에너지원으로 이용하는 장점과 조작 및 사용의 편리함이 있기 때문이다.

BLDC 전동기를 제어하기 위해 구성된 피드백 제

어 시스템은 두 개의 상태를 제어하는 제어기가 필요하다. 전동기 회전축의 위치나 속도 상태를 제어하는 것과 고정자에 흐르는 전류를 제어함으로써 출력 토크를 조절하는 제어기가 존재한다. 정밀한 제어를 위해서는 전동기의 수학적 모델이 정확한 것이 유리하지만, 실제로는 수학적 모델의 오차가 존재하고 외란이 존재하므로 이를 고려하여 제어기를 구성하는 것이 더 좋은 성능을 얻는 방법이다.

본 논문은 BLDC 전동기의 강건한 위치 및 속도

\* 교신저자 : 중원대학교 항공정비학과  
• 접수일 : 2020. 08. 24  
• 수정완료일 : 2020. 09. 19  
• 게재확정일 : 2020. 10. 15

• Received : Aug. 24, 2020, Revised : Sep. 19, 2020, Accepted : Oct. 15, 2020  
• Corresponding Author : Yong-Ho Jeon  
Dept. aviation maintenance engineering, JungWon University,  
Email : waterjllar@jwu.ac.kr

제어를 위하여 백스텝핑 제어를 구성한다[4-10]. 2장에서는 위치제어를 위한 공칭 시스템은 2차이프로 외란 관측기도 2차 필터로 설계를 하고, 속도 제어를 위한 공칭 시스템은 1차로 그에 맞춰 외란 관측기를 1차 필터로 설계를 한다[1-3]. 3장에서는 공칭 시스템에 대하여 위치와 속도에 대한 백스텝핑 제어를 설계하였다. 4장에서는 외란 관측기에서 추정된 외란의 영향이 억제되는 결과를 120W급의 BLDC 전동기에 대한 시뮬레이션으로 제안된 설계가 유용함 확인해 보았다.

## II. 외란 관측기 설계

BLDC 전동기 시스템의 수학적 모델은 식 (1)에서 식 (3)과 같다[4-6].

$$\dot{\theta}_r = \omega_r \tag{1}$$

$$\dot{w}_r = \frac{1}{J_m} \tau_e - \frac{B_m}{J_m} w_r - \frac{1}{J_m} \tau_l \tag{2}$$

$$\tau_e = \frac{\sum_{x=a,b,c} E_x i_x}{\omega_r} = K_t i_x \tag{3}$$

여기서,  $\theta_r$ ,  $w_r$ 은 회전자 축의 각도 및 각속도,  $\tau_l$ 은 부하토크,  $J_m$ 은 전동기 회전자의 관성모멘트,  $B_m$ 은 전동기 회전자의 점성 마찰계수,  $\tau_e$ 는 전자기적으로 발생하는 토크,  $E_x$ 는 각 상의 역기전압,  $i_x$ 는 각 상의 전류이다. 상수  $K_t$ 는 단위 상전류에 대해 전기적으로 발생 토크로 고정자를 3상 2여자 방식으로 구동함으로 식 (3)의 오른쪽 항과 같이 간단히 표현될 수 있다.

전동기 시스템의 외란 관측기가 포함된 구조는 그림 1과 같다[1-3]. 외란 관측기는 그림 1에서 두 가지가 있는데 관측기 A와 관측기 B이다. 관측기 A 부분은 플랜트의 공칭 시스템 전달함수의 역함수로

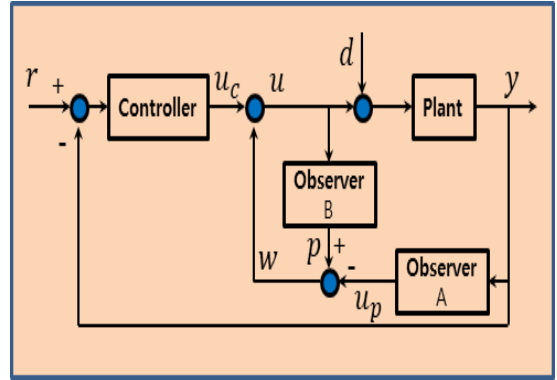


그림 1. 외란 관측기의 구조  
Fig. 1 The structure of the disturbance observer

시스템의 출력  $y$ 를 입력으로 하여 외란이 포함된 플랜트의 입력( $u + d$ )을 추정하여  $u_p$ 라 하고, 관측기의 B 부분은 외란이 없는 입력( $u$ )을 추정함으로  $p$ 라 할 때 외란을 추정한 것은 식 (4)와 같다.

$$w = p - u_p \tag{4}$$

### 2.1 위치 제어를 위한 외란 관측기

시스템의 수학적 모델에서 각 위치  $\theta_r$ 을 상태  $x_1$ , 각속도  $w_r$ 을 상태  $x_2$ , 상전류  $i_x$ 을 입력  $u_c$ , 그리고 출력  $y$ 는 상태  $x_2$ 이며, 부하 토크가 제거된 공칭 시스템은 식 (5)에서 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\bar{a}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{b}_p \end{bmatrix} u_c \tag{5}$$

$$y = [0 \ 1] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}^T \tag{6}$$

여기서,  $\bar{a}_p$ 는  $B_m/J_m$ 의 공칭값이며  $\bar{b}_p$ 는  $K_t/J_m$ 의 공칭값으로 정의한다.

공칭 시스템을 기반으로 외란 관측기 A와 외란 관측기 B는 같은 전달함수를 가지며 공칭 시스템의 전달함수와 같도록 설계를 한 것으로 식 (7)에서 식 (8)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{a_0}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_0}{\tau} \end{bmatrix} y \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_1 \\ \dot{p}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{a_0}{\tau} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{a_0}{\tau} \end{bmatrix} u \quad (8)$$

외란 관측기 A에 해당하는 것이 식 (7)이며 외란 관측기 B에 해당하는 것이 식 (8)이다. 식 (7)의 관측기는 출력을 입력으로 플랜트에 제어입력과 외란을 추정하도록 계수를 설정하고, 식 (8)의 관측기는 외란이 포함되지 않은 입력을 추정하는 것이다.

## 2.2 각속도 제어를 위한 외란 관측기

속도 제어를 하기 위한 외란 관측기의 공칭 시스템은 식 (9)에서 식 (10)과 같다.

$$\dot{x} = -\bar{a}_s x + \bar{b}_s u_c \quad (9)$$

$$y = x \quad (10)$$

여기서, 각속도  $w_r$ 을 상태  $x$ , 상전류  $i_x$ 을 입력  $u_c$ , 그리고 출력  $y$ 을 상태  $x$ 라 하고,  $\bar{a}_s$ 는  $B_m/J_m$ 의 공칭값이며  $\bar{b}_s$ 는  $K_t/J_m$ 의 공칭값으로 정의한다.

공칭 시스템을 기반으로 외란 관측기를 설계하면 식 (11)에서 식 (12)와 같다.

$$\dot{q} = -\frac{a_0}{\tau} q + \frac{a_0}{\tau} y \quad (11)$$

$$\dot{p} = -\frac{a_0}{\tau} p + \frac{a_0}{\tau} u \quad (12)$$

식 (11)의 관측기는 각속도 출력을 입력으로 하여 플랜트에 제어 입력과 외란을 추정하도록 계수를 설정하고, 식 (12)의 관측기는 외란이 포함되지 않은 입력을 추정하는 것이다.

위치 제어를 위해 설계된 외란 관측기와 각속도 제어를 위해 설계된 외란 관측기를 사용하여 외란에 대한 응답을 보기 위해 3장에서 제어기를 설계한다.

## III. 백스텝핑제어기 설계

위치나 각속도의 제어를 위한 여러 가지 제어기가

있지만, 정밀한 제어가 가능하고 특성을 점근적인 안정을 가지도록 제어기 구성이 가능한 백스텝핑 제어기를 설계한다[4-6].

### 3.1 위치 제어기

전동기 기계방정식의 공칭 시스템은 식 (5)이다. 위치 오차와 각속도 오차는 식 (13)에서 식 (14)로 정의된다.

$$e_{x_1} = x_{1,ref} - x_1 \quad (13)$$

$$e_{x_2} = x_{2,ref} - x_2 \quad (14)$$

여기서,  $x_{1,ref}$ 는 위치 레퍼런스이고,  $x_{2,ref}$ 는 평가함수의 시간에 대한 변화율이 음이 되도록 설계한다. 평가함수는 식 (15)에서 식 (16)과 같다.

$$V_1 = \frac{1}{2} e_{x_1}^2 \quad (15)$$

$$\dot{V}_1 = e_{x_1} \dot{e}_{x_1} = e_{x_1} (\dot{x}_{1,ref} - \dot{x}_1) \quad (16)$$

평가함수 식 (15)의 시간에 대한 변화율은 식 (16)이고, 식 (16)이 음이 되도록  $x_{2,ref}$ 을 정의하면 (17)과 같다.

$$x_{2,ref} = \dot{x}_{1,ref} + k_{x_1} e_{x_1} \quad (17)$$

식 (14)에 식 (17)을 대입하고 얻어진  $x_2$ 를 식 (16)에 대입하여 얻어진 결과는 식 (18)과 같다.

$$\dot{V}_1 = -k_{x_1} e_{x_1}^2 + e_{x_1} e_{x_2} \quad (18)$$

여기서  $k_{x_1}$ 은 양의 값을 선정하고, 다음 단계에서 식 (18)의 맨 마지막 항을 소거함으로 평가함수의 변화율이 음이 되도록 할 수 있다. 평가함수를 재설정하면 식 (19)에서 식 (20)과 같다.

$$V_2 = \frac{1}{2} e_{x_1}^2 + \frac{1}{2} e_{x_2}^2 \quad (19)$$

$$\dot{V}_2 = e_{x_1} \dot{e}_{x_1} + e_{x_2} \dot{e}_{x_2} \quad (20)$$

식 (14)의 미분은 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{e}_{x_2} &= \dot{x}_{2,ref} - \dot{x}_2 \\ &= \dot{x}_{2,ref} - (-\bar{a}_p x_2 + \bar{b}_p u_c) \end{aligned} \quad (21)$$

평가함수  $V_2$ 의 시간에 대한 변화율이 음이 되도록

식 (21)을 이용하여 제어입력  $u_c$ 를 구성하면 식 (22)와 같다.

$$u_c = \frac{1}{b_p} \left( \bar{a}_p x_2 + \dot{x}_{2,ref} + k_{x_2} x_2 + e_{x_1} \right) \quad (22)$$

식 (22)를 식 (20)에 대입하여 정리하면 식 (23)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_{x_2} (\dot{x}_{2,ref} - \dot{x}_2) \\ &= -k_{x_1} e_{x_1}^2 - k_{x_2} e_{x_2}^2 \end{aligned} \quad (23)$$

제어입력  $u_c$ 에서  $k_{x_2}$ 를 적절한 양의 값을 갖도록 한다면 식 (23)은 음이 된다. 그리고 식 (22)의  $e_{x_1}$ 은 식 (18)의 마지막 항을 제거하도록 첨가하는 항이다.

### 3.2 각속 제어기

전동기 기계방정식의 공칭시스템을 식 (9)라 할 때 각속도에 대한 오차는 식 (24)와 같다.

$$e_x = x_{ref} - x \quad (24)$$

식 (24)의  $x_{ref}$ 는 각속도 레퍼런스이다. 각속도 오차식을 사용하여 평가함수를 구성하면 식 (25)에서 식 (26)과 같다.

$$V = \frac{1}{2} e_x^2 \quad (25)$$

$$\dot{V} = e_x \dot{e}_x = e_x (\dot{x}_{ref} - \dot{x}) \quad (26)$$

식 (26)은 평가함수의 시간에 대한 변화율이고, 제어입력을 설계하면 식 (27)과 같다.

$$u_c = \frac{1}{b_s} \left( \bar{a}_s x + \dot{x}_{ref} + k_x e_x \right) \quad (27)$$

식 (27)의 제어 입력  $u_c$ 를 식 (9)에 대입하여 얻은 결과를 식 (26)에 대입하여 정리하면 식 (28)과 같다.

$$\dot{V} = -k_x e_x^2 \quad (28)$$

제어이득  $k_x$ 를 임의의 양의 값으로 설정하면 식 (28)은 음이 되고 점근적 안정함을 얻을 수 있다. 각속도 제어의 입력은 식 (27)으로 전류제어기의 전류 레퍼런스가 된다.

## IV. 시뮬레이션

전동기의 일반적인 제어는 레퍼런스 각도를 달성하기 위한 위치제어와 레퍼런스 각속도로 제어하는 속도 제어가 있다. 먼저 제어에 외란에 대한 강건한 제어 성능을 얻고자 위치 제어에 관련된 외란 관측기와 속도 제어에 관련된 외란 관측기를 각각 2장에서 설계를 하였다. 그리고 두 가지 제어에 대한 제어기를 각각 백스텝핑 제어기 설계 방법으로 3장에서 설계하였다. 설계된 제어기와 관측기의 성능을 검증하고자 Psim을 사용하여 시뮬레이션 수행을 하였으며, 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 $\Omega$
Stator Inductance, $L_s$	0.055 mH
Moment of Inertia, $J_m$	0.0000085 Kgm <sup>2</sup>
Friction coefficient, $B_m$	0.00010625 Nm/rad/s
back EMF constant, $K_e$	0.00234 V/rad/s
Torque Constant, $K_t$	0.0215 Nm/A

먼저, 위치제어의 성능을 살펴보기 위하여 2.1절의 위치 제어에 관한 관측기와 3.1절의 위치 제어기를 사용하였다. 그 결과는 그림 2와 그림 3에서 나타난다. 위치 레퍼런스는 125.6 [rad]로 제어가 되는 결과를 보기 위해 기동 후 시간 0.2 초에서 0.04 [Nm]의 상수 부하 토크를 작용하였다. 외란 관측기의 시상수  $\tau$ 는 0.01 [1/s]로 하고 관측기 필터 계수  $a_0$ 는 12.5로 하였으며, 제어기 이득  $k_{x_1}$ 을 10,  $k_{x_2}$ 를 40으로 하여 외란 관측기의 성능을 관찰하고자 설계된 관측기를 사용하지 않고 시뮬레이션한 결과는 그림 2이고, 관측기로 추정된 외란을 식 (4)로 적용하여 시뮬레이션한 결과는 그림 3이다.

그림 2의 상단 그림에서 기동에서 임계제동을 보이다가 시간 0.2초에서 외란인 부하 토크가 작용하게 되면 위치 제어기가 약 10 [rad]의 정상상태의 오차를 발생하는 모습을 볼 수 있다.

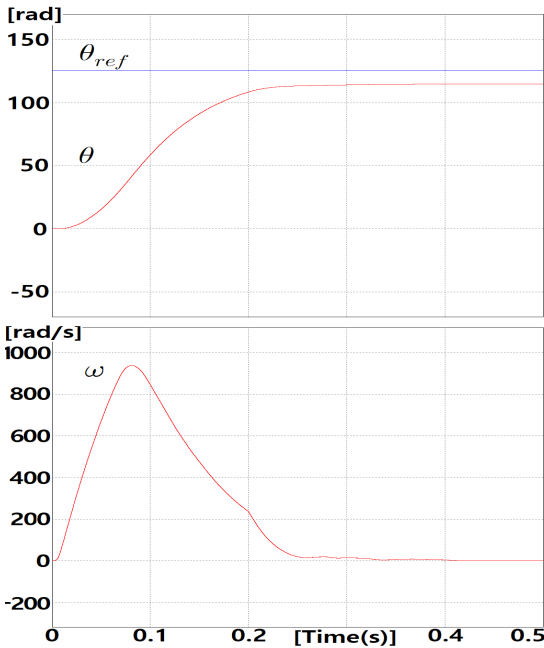


그림 2. 외란 관측기가 없는 위치 제어 결과  
Fig. 2 The position control result without the DOB

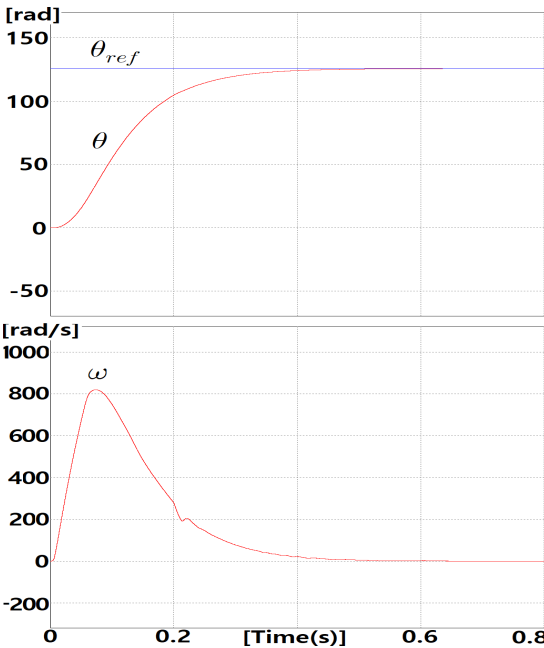


그림 3. 외란 관측기가 포함된 위치제어 결과  
Fig. 3 The position control result with the DOB

외란 관측기가 포함된 그림 3의 상단 그림을 비교하여 보면 제어 이득을 조정하지 않고 제어입력에 외란 관측기가 포함되어 0.2 초에서 부하토크가 작용되더라도 정상상태 오차가 0 [rad]으로 수렴함을 확인할 수 있다. 그림 2와 그림 3의 하단 그림은 속도 상태에 대한 그림으로 시간 0.2 초에서 외란이 작용함을 확인할 수 있다.

다음으로 속도 제어의 성능을 살펴보기 위하여 2.2 절의 외란 관측기와 3.2절의 속도제어기를 사용하였다. 그 결과는 그림 4와 그림 5에 나타낸다. 속도 레퍼런스는 62.8 [rad/s]로 제어가 되는 결과를 확인하고자 기동 후 시간 0.8 초에서 0.04 [Nm]의 상수 부하 토크를 작용하고 1.6 초에 제거하였다.

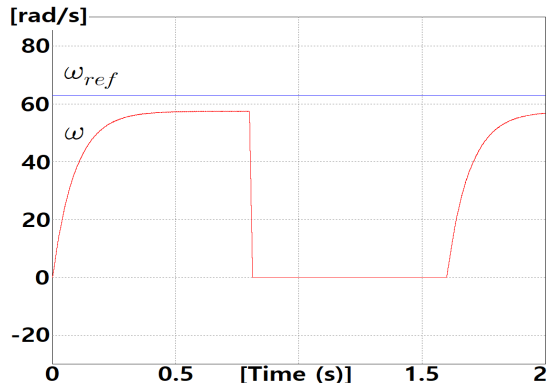


그림 4. 외란 관측기가 없는 속도 제어 결과  
Fig. 4 The speed control result without the DOB

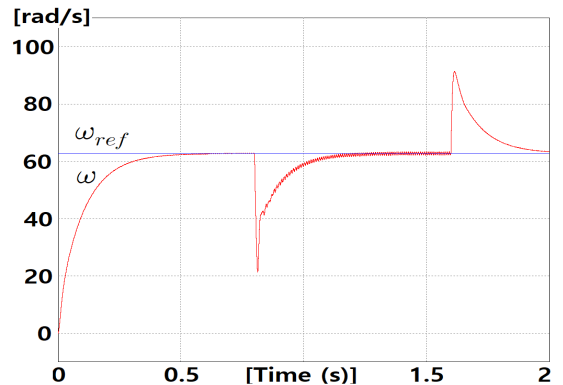


그림 5. 외란 관측기가 포함된 속도 제어 결과  
Fig. 5 The speed control result with the DOB

외란 관측기의 시상수  $\tau$ 는 0.1 [1/s]로 하고 관측기 필터 계수  $a_0$ 는 12.5로 하였으며, 제어기 이득  $k_x$ 는 10으로 하여 외란 관측기의 성능을 관찰하고자 설계된 관측기를 제어입력에 사용하지 않고 시뮬레이션한 결과는 그림 4이고, 관측기로 추정된 외란을 식 (4)로 적용하여 시뮬레이션한 결과는 그림 5이다. 그림 4의 결과는 기동에서 정상상태 오차가 약 5.4 [rad/s]가 발생하고 시간 0.8 초에서 0.04 [Nm]의 상수 부하를 작용한 결과 속도가 0[rad/s]가 되었다. 그러나 그림 5의 결과에서는 동일한 제어 이득을 가지고도 식 (11)과 식(12)의 외란 관측기를 포함하여 속도제어를 한 결과 정상상태 오차도 0 [rad/s]로 수렴함을 확인 할 수 있고, 시간 0.8 초에서 상수 부하가 작용한 순간 언더슈트가 발생하다가 이를 극복하여 정상상태 오차가 0 [rad/s]로 수렴함을 확인함으로 외란에 강건한 결과를 보인다. 시간 1.6 초에서 상수 부하를 제거함으로 오버슈트가 발생하며 정상상태 오차를 줄여나가는 것으로 동작함을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

강건하고 정밀한 전동기 제어를 위해서는 정확한 전동기 파라메타와 부하의 변동에 대한 대책이 요구된다. 따라서 부하변동을 관측할 수 있는 관측기를 설계하여 외란을 추정하고, 이를 정밀한 제어 성능을 얻을 수 있는 백스텝핑 제어기에 적용하여 정상 상태 오차가 영으로 수렴하면서 점근적인 안정을 얻는 제어 결과를 얻을 수 있었다. 추후로 관측기의 설계와 필터의 파라메타에 대한 연구와 상태 변수에 노이즈가 포함되는 것에 대한 연구가 되어야 할 것이다.

## 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-H. Jeon and M-H. 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, vol. 3, 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, vol. 2, 2009, pp. 343-346.

- [11] S. Back, "A Study on the Design and Implementation of 2-phase BLDC Fan Motor with 1-horsepower Class for 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.

### 저자 소개



#### **전용호(Yong-Ho Jeon)**

1996년 광운대학교 제어계측공학과  
졸업(공학사)

1998년 광운대학교 대학원 제어계  
측공학과 졸업(공학석사)

2008년 광운대학교 대학원 정보제어공학과 졸업(공  
학박사)

2013년 ~2017년 8월 중원대학교 메카트로닉스학과  
교수

2017년 9월 ~ 중원대학교 항공정비학과 교수

※ 관심분야 : 가변속 시스템, 지능로봇 시스템

