Regular paper | Journal of the KIECS. pp. 955-962, vol. 11, no. 10, Oct. 31 2016, t. 78, pISSN 1975-8170 | eISSN 2288-2189
http://dx.doi.org/10.13067/JKIECS.2016.11.10.955

외란 관측기를 이용한 BLDC 전동기의 속도제어

전용호*

Speed Control of the BLDC Motor using the Disturbance Observer

Yong-Ho Jeon*

요 약

본 논문은 BLDC 전동기의 정밀한 속도제어를 위하여 외란 관측기의 설계 및 영향을 제거하는 제어기 설계 방법을 제안한다. BLDC 전동기의 외부에서 회전축에 작용하는 부하의 변동과 전기적인 시스템에서 발생하는 역기전력을 외란으로 가정하고, 외란은 구간에 대한 상수로 가정하여 루엔버거 관측기를 설계한다. 시스템 상태에 대한 관측기의 오차가 0으로 수렴할 수 있도록 적절한 이득을 설정하는 방법을 보이고, 추종성능을 향상시킬 수 있는 적절한 PI제어기의 이득을 설정하기 위한 방법을 제시한다. 제안된 제어기를 120W급의 BLDC 전동기에 적용하여 속도 그리고 전류 레퍼런스를 추종하는 능력을 시뮬레이션 시험하였다. 상수부하의 변동을 외란으로 적용하였고, 그 결과 설계된 제어기의 정상상태 오차가 0.1 [%] 이내를 가짐으로 상태 추종성능에 대해 유용한 제어기임을 보일 수 있었다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a design method for speed controller, current control of a Brushless Direct Current(: BLDC) motor using disturbance rejection techniques. Disturbance assumes a back electromotive force occurring in the electrical system and the variation of the load acting on the rotary shaft from the outside of the motor. And it assumed to be constant during the time interval and the Luenberger's observer design. So that the error of the observer about the system status can converge to zero show how to set the appropriate gain. Further, to stabilize the whole system, and proposes a method for setting the appropriate PI gain control to improve the tracking performance. By applying the proposed controller to 120W BLDC motors were tested for the ability to follow the velocity and current reference. Since the simulation results of the steady state error is within 0.1%, we were able to show the usefulness of the tracking performance of the proposed controller.

키워드

Brushless Direct Current Motor, Luenberger Observer, Disturbance Rejection, Speed Control
브러쉬리스 직류전 동기, 루엔버거 관측기, 외란 제거, 속도 제어

Ⅰ. 서 론

회전자가 코일인 DC전동기는 전류의 극성을 일정한 방향으로 유지하기위해 금속형태의 접점인 브러쉬를 가진다. 접점의 교번으로 인한 전기적인 스파크와 회전시 마찰로 인한 마모로 브러쉬는 영구적인 사용

* 교신저자 : 중원대학교 메카트로닉스학과
• 접 수 일 : 2016. 09. 05
• 수정완료일 : 2016. 10. 13
• 게재확정일 : 2016. 10. 24
• Received : Sep. 05, 2016, Revised : Oct. 13, 2016, Accepted : Oct. 24, 2016
• Corresponding Author : Yong-ho Jeon
Dept. of Mechatronics Engineering, JungWon University
Email : waterjliar@jwu.ac.kr

이 불가능하다. 이에 반하여 회전자가 영구자석인 구조를 갖는 BLDC는 회전력을 얻기 위해 회전자 마그네트의 위치에 따라 고정자 코일에 전류를 흘려주는 구조로 DC전동기를 개선한 것이다[1-3].

현재 사용되는 BLDC 전동기의 정밀한 제어를 위한 많은 연구가 되고 있다[1-8]. 전동기의 제어성능은 기준속도에 대한 도달시간, 과도 상태에서의 최대 오버슈트, 그리고 정상상태의 오차 등으로 판단할 수 있다. 이러한 제어기의 성능에 지대한 영향을 미치는 요소 중 하나는 부하 변동으로 수학적 모델을 이용하여 적응법칙을 유도하여 제어기에 포함하는 방식의 적응제어가 연구되었다[4-8]. 하지만 정밀한 제어를 하기 위해서는 부하에 대한 추정 모델과 시스템의 수학적 모델이 정밀하게 구성되어야 하는데, 이는 수학적인 복잡함이 증가되어 안정된 제어기를 구성하는데 어려움이 가중된다. 그래서 부하변동 및 시스템의 수학적인 모델의 오차를 외란에 포함, 구간 상수로 간주하여 이를 추정하는 관측기에 대한 연구가 되고 있다[9].

본 논문은 BLDC 전동기의 정밀한 제어를 위하여 외란 제거기가 결합된 PI 제어기를 구성한다. 외란은 기계적인 부하변동과 전기적인 역기전압을 포함하여 두 가지 관측기가 결합된 루엔버거 관측기가 사용되었다. 관측 이득의 적절한 설정을 위한 방법으로 제어기와 관측기의 근 배치를 이용하는 방법을 제시하였다. 설계된 제어기를 바탕으로 120W급의 BLDC 전동기에 성능시험을 하였다.

II. 전동기 시스템의 상태정의

BLDC전동기의 기계적인 시스템은 다음 식 (1)에서 식 (2)와 같고, 전기적인 시스템은 식 (3)과 같다.

$$\dot{\omega}_r = -\frac{1}{J_m} d_\omega - \frac{B_m}{J_m}\omega_r + \frac{1}{J_m}\tau_e \tag{1}$$

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

$$\dot{i}_x = -\frac{R_s}{L_s} i_x - \frac{1}{L_s} E_x + \frac{1}{L_s} U_i \;\; x = a,b,c \tag{3}$$

여기서, 식 (1)에서 사용된 w_r은 회전자의 각속도이고, 마그네트 회전자의 회전에 의해 발생되는 토크를 τ_e라 한다. 그리고 회전축에 상수로 작용하는 부하토크를 d_ω라 하며, J_m은 전동기 회전자의 관성모멘트, B_m은 점성 마찰계수이다.

식 (2)의 토크는 회전자의 회전으로 발생하는 각 상의 사다리꼴 모양 역기전압 E_x와 각 상에 흐르는 전류 i_x를 곱해서 얻어지는 값이고, 상수 K_t는 단위 상전류에 대해 전기적인 발생 토크로 정의된다.

식 (3)은 삼상 2 여자방식의 바이폴라 구동방식으로 인버터를 구동할 때 전기적 회로방정식으로 U_i는 각 상의 입력전압을 나타내고, i_x는 각 상의 전류, R_s, L_s는 고정자 권선의 상 저항, 상 인덕턴스이다.

식 (2)의 K_t를 이용하여 식 (1)에 대입하여 얻은 식에서 상전류 i_x를 입력 U_ω라 하고, 전동기 각속도 ω_r을 상태변수 x_1라 하고, 식 (3)에서 상전류 i_x를 상태변수 x_3라 할 때, 전동기 방정식을 상태방정식으로 변환하면 식 (4)에서 식 (8)과 같다[9].

$$x_1 = \omega_r \tag{4}$$

$$\dot{x}_1 = \underbrace{-\frac{B_m}{J_m} x_1 - \frac{1}{J_m}\tau_l + \Delta\frac{K_t}{J_m} U_\omega}_{generalize\, disturbance\;\; f_\omega} + \frac{K_t}{J_m} U_\omega \tag{5}$$

$$x_2 = f_\omega = -\frac{B_m}{J_m} x_1 - \frac{1}{J_m}\tau_l + \Delta\frac{K_t}{J_m} U_\omega \tag{6}$$

$$\dot{x}_3 = \underbrace{-\frac{R_s}{L_s} x_3 - \frac{1}{L_s} E_x + \Delta\frac{1}{L_s} U_i}_{generalize\, disturbance\;\; f_i} + \frac{1}{L_s} U_i \tag{7}$$

$$x_4 = f_i = -\frac{R_s}{L_s} x_3 - \frac{1}{L_s} E_x + \Delta\frac{1}{L_s} U_i \tag{8}$$

식 (6)의 상태 x_2은 식 (1)에서 부하 및 입력 오차를 포함하여 외란 f_ω으로 치환한 식이다. 그리고 식 (8)의 상태 x_4는 식 (3)에서 역기전압과 입력 오차를 포함하여 외란 f_i으로 치환한 식이다.

식 (4)에서 식 (8)의 전동기 전체 시스템의 상태방정식으로 식 (4)에서 식 (6)의 기계시스템에 대한 방정식과 식 (7)에서 식 (8)의 전기적인 방정식으로 시스템 상태모델로 표현하면 다음의 식 (9)와 같다.

$$\begin{pmatrix}\dot{x}_1\\ \dot{x}_2\\ \dot{x}_3\\ \dot{x}_4\end{pmatrix}=\underbrace{\begin{pmatrix}0&1&0&0\\0&0&0&0\\0&0&0&1\\0&0&0&0\end{pmatrix}}_{A}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}b_0&0\\0&0\\0&b_1\\0&0\end{pmatrix}}_{B}\begin{pmatrix}U_\omega\\U_i\end{pmatrix}+\underbrace{\begin{pmatrix}0&0\\1&0\\0&0\\0&1\end{pmatrix}}_{F}\begin{pmatrix}\dot{f}_\omega\\\dot{f}_i\end{pmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{pmatrix}y_\omega\\y_i\end{pmatrix}=\underbrace{\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\end{pmatrix}}_{C}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix} \quad (10)$$

식 (9)에서 b_0는K_t/J_m이고, b_1은 $1/L_s$이다. 식 (10)은 관측방정식으로 전동기의 회전축의 각속도와 상전류를 계측함을 나타낸다.

III. 루엔버거 관측기 설계

관측방정식을 이용하여 루엔버거 관측기를 설계하면 다음 식 (11)과 같다[9].

$$\dot{\hat{X}}=A\hat{X}+BU+\underbrace{\begin{pmatrix}l_1&0\\l_2&0\\0&l_3\\0&l_4\end{pmatrix}}_{L}\begin{pmatrix}y_\omega-\hat{y}_\omega\\y_i-\hat{y}_i\end{pmatrix} \quad (11)$$

여기서, l_1와 l_2는 각속도를 계측하여 추정각속도와의 오차를 상태관측기에 보상하기위한 관측이득이다. 그리고 l_3와 l_4는 상전류를 계측하여 추정전류와의 오차를 이용하여 상태관측기의 정확도를 증가하기위한 관측이득이다.

루엔버거 관측기의 정확도를 증가시키기 위하여 관측이득을 적절히 설정하여야 한다. 이를 위하여 오차의 상태방정식을 구하면 다음의 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned}\dot{e}&=\dot{X}-\dot{\hat{X}}\\&=AX+BU+F\dot{f}-\left(A\hat{X}+BU+L(y-\hat{y})\right)\\&=(A-LC)e+F\dot{f}\\&\approx(A-LC)e\end{aligned} \quad (12)$$

여기서, f_ω과 f_i는 구간에서 상수 값으로 가정하면 $\dot{f}_\omega$과 $\dot{f}_i$는 제거될 수 있다. 따라서 식 (12)의 맨 아래 식으로 오차방정식을 얻을 수 있고, 오차방정식의 근 배치를 통하여 오차가 점근적으로 영으로 수렴하는 관측기의 이득을 설정할 수 있다. 식 (12)의 관측기 오차의 특성방정식을 구하면 다음의 식 (13)과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta&=sI-(A-LC)\\&=\begin{pmatrix}s+l_1-1&0&0\\l_2&s&0&0\\0&0&s+l_3-1\\0&0&l_4&s\end{pmatrix}\\&=(s^2+l_1s+l_2)(s^2+l_3s+l_4)\end{aligned} \quad (13)$$

식 (13)의 l_1와 l_2는 기계방정식에 대한 관측이득이고 l_3와 l_4는 전류에 대한 관측이득으로 전체 시스템에서 전류의 관측오차가 0으로 수렴하는 속도가 각속도에 대한 오차의 수렴 속도보다 빠르도록 실수부의 크기가 50배 이상이 되도록 선정하며, 간편한 이득 설정을 위하여 중근을 가지도록 설계한다.

IV. 전체 제어기 설계

전체 제어기는 레퍼런스에 대한 오차의 보상을 위한 PI제어기와 관측기를 통해 추정된 외란을 감하는 제어기를 구성한다. 먼저 레퍼런스 각속도 r_ω에 대한 PI 제어기와 외란을 제거하기 위한 제어기는 다음의 식 (14)에서 식 (15)와 같다.

$$U_\omega=\frac{u_\omega-\hat{f}_\omega}{b_0} \quad (14)$$

$$u_\omega=K_{p,\omega}\left(r_\omega-\hat{y}_\omega\right)+K_{i,\omega}\int(r_\omega-\hat{y}_\omega)dt \quad (15)$$

$K_{p,\omega}$와 $K_{i,\omega}$는 제어기 이득이고, 적절히 설계된 관측이득으로 관측오차 e_ω가 0으로 수렴한다면 전달함수는 다음의 식 (16)과 같다.

$$\frac{x_1}{r_\omega} = \frac{K_{i,\omega}}{s^2 + K_{p,\omega}s + K_{i,\omega}} \tag{16}$$

식 (14)의 속도제어기의 제어이득을 설계하기 위해 식 (16)은 2계 표준응답으로 해석할 수 있다. 제어이득은 정상상태 도달시간으로 특성방정식근의 위치를 선정하고 과도상태의 댐핑을 고려하여 특성근이 중복근을 갖도록 설계할 수 있다.

속도 제어기에서 설계된 제어입력 식 (14)는 전류제어기의 기준 전류 r_i로 사용한다. 기준전류에 대한 상전류의 오차를 보상하기 위한 PI제어기와 관측기를 통해 추정된 외란 $\hat{x}_4$를 이용하여 전류제어기를 구성하면 다음의 식 (17)에서 식 (18)과 같다.

$$U_i = \frac{u_i - \hat{f}_i}{b_1} \tag{17}$$

$$u_i = K_{p,i}\left(r_i - \hat{y}_i\right) + K_{i,i}\int (r_i - \hat{y}_i)dt \tag{18}$$

$K_{p,i}$와 $K_{i,i}$는 제어기 이득이고, 적절히 설계된 관측이득으로 관측오차 e_i가 0으로 수렴한다면 전달함수는 다음의 식 (19)과 같다.

$$\frac{x_3}{r_i} = \frac{K_{i,i}}{s^2 + K_{p,i}s + K_{i,i}} \tag{19}$$

속도제어기의 제어이득을 설계하는 것과 동일한 방법을 적용하여 전류제어기의 제어이득은 정상상태 도달시간으로 특성방정식근의 위치를 선정하고 과도상태의 댐핑을 고려하여 특성근이 중복근을 갖도록 설계할 수 있다.

V. 성능평가

성능검증을 위해서 사용된 전동기사양은 다음 표 1과 같다.

표 1. BLDC 전동기 파라메타
Table 1. The 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	0.055 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

전동기는 251.2 [rad/s]의 각속도로 1.5초 간격으로 정역회전을 교번하여 운전하며, 외란의 성능 시험을 위해서 시간 약 0.833초에서 상수부하를 인가하고 약 2.33초에서 상수부하를 제거하는 운전을 하였다.

초기기동의 속도응답에서 98% 정착시간이 되도록 식 (16)을 이용하여 제어이득을 $K_{p,\omega} \approx 4/T$으로 설정하였다. 즉 정착시간은 약 0.133초가 되도록 설정하면 제어이득과 관측기의 이득은 다음의 표 2와 같다.

표 2. 제어이득 및 관측 이득
Table 2. Controller and observer gain

Gain	Speed				Current			
	$K_{p,\omega}$	$K_{i,\omega}$	l_1	l_2	$K_{p,i}$	$K_{i,i}$	l_3	l_4
value	30	225	300	22.5K	1.5K	562.5K	15K	56.25M

표 2의 속도제어이득은 식 (16)에서 $K_{p,\omega}/2$를 근으로 하여 중근이 되도록 $K_{i,\omega}$를 정하였고, 속도 관측기는 속도 제어기의 응답보다 빠르도록 실근의 위치가 원점으로부터 좌 반면으로 10배 정도 떨어지게 하였다. 또한 식 (19)의 전류제어기의 이득을 설정하기 위해 속도 관측기보다 실수부의 위치를 5배 좌측으로 배치하였고, 전류 관측기는 전류 제어기보다 10배 좌

측에 위치하도록 하여 모두 중근을 갖도록 하였다.

시간응답 결과는 다음 그림 1에서 그림 4와 같다.

그림 1의 결과는 초기 기동하여 시간 약 0.17초에서 283.12 [rad/s]의 최대치에 도달하여 약 12.7 [%]의 최대 오버슈트를 가진다. 98 [%]이내의 정상상태에 도달하는 시간이 약 0.414 [s]로, 설정치의 0.133초보다 많은 오차가 발생하였는데 이는 속도관측기, 전류 제어기, 전류관측기 등의 근이 영향을 끼침을 나타낸다. 또한 속도제어기가 중근을 갖도록 설계하여 임계제동에 가깝게 설계하였지만 오버슈트가 발생함도 같은 이유인 것으로 판단된다. 정상상태오차는 0.1 [%] 이내를 유지하고 있다.

정상상태에 도달 후 외란으로 상수부하가 가해질 때의 제어기의 응답결과는 다음 그림 2와 같다.시간 0.833 초에서 0.01, 0.03, 0.05 [Nm]의 부하를 인가하였을 때 각 외란에 대한 반응으로 약 0.843초에 244.1 [rad/s], 230.4 [rad/s], 215.8 [rad/s]의 언더슈트가 발생하였다. 그리고 약 1 초에서 0.5 [%], 1.4 [%], 2.3 [%]의 오버슈트가 발생하였는데 외란의 크기가 클수록 큰 오버슈트와 언더슈트가 발생하였으며, 외란을 제거하여 다시 정상상태에 도달하는데 걸리는 시간은 약 0.47 초로 거의 동일한 모습을 보인다.
시간 1.5 초에서 전동기를 -251.2 [rad/s]의 기준속도로 역회전하는 결과는 다음 그림 3과 같다.

상수부하 0.01 [Nm]의 경우는 약 1.67 초에 -316.7 [rad/s]의 음의 최대로 약 26 [%]의 오버슈트가 발생하였으며, 0.03 [Nm]의 경우 -320.6 [rad/s]로 약 27.6 [%]의 오버슈트가 발생하고, 0.05 [Nm]의 경우는 -324. [Nm]의 28.9 [%]의 오버슈트가 발생하였다. 그리고 정상상태에 도달하는 시간은 약 0.49 초로 세 가지 경우 거의 동일한 결과로 판단된다.

그림 4는 약 2.33초에서 상수부하를 제거한 결과로 그림 2의 결과와 거의 유사하게 동작하는 모습으로 외란에 대한 상태관측기가 잘 동작하고 있음 판단할 수 있다.

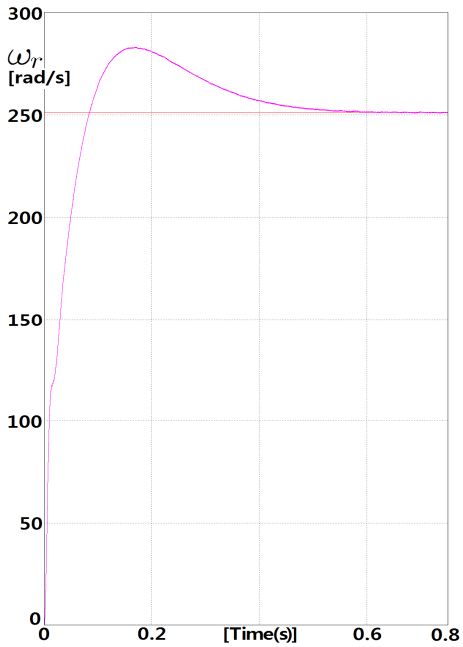

그림 1. 기동에서 0.8 초까지 속도응답
Fig. 1 Speed Response from 0 s to 0.8 s

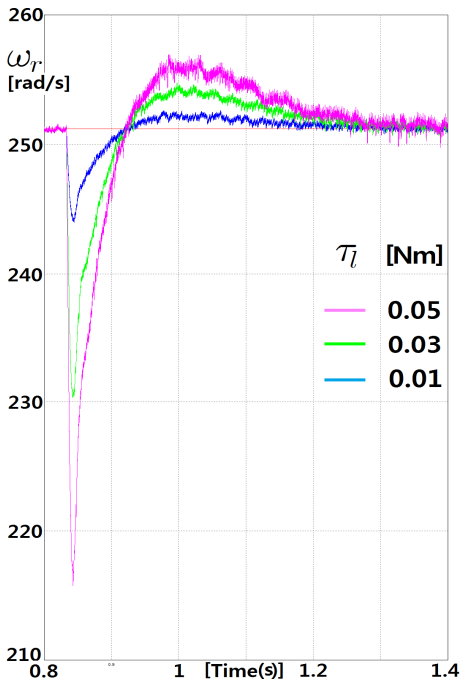

그림 2. 0.8 초에서 1.4 초까지 속도응답
Fig. 2 Speed Response from 0.8s to 1.4s

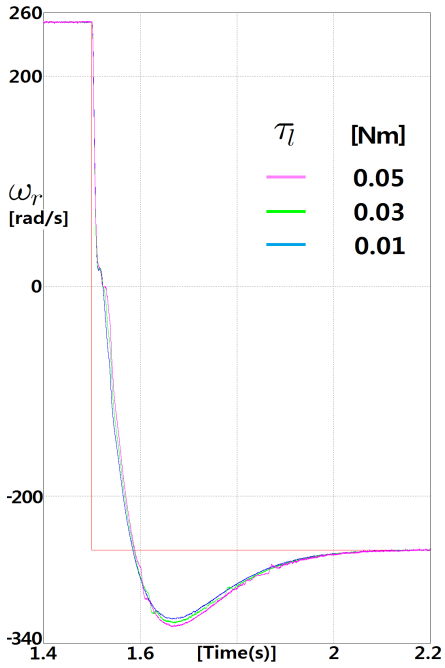

그림 3. 1.4 초에서 2.2 초까지 속도응답
Fig. 3 Speed Response from 1.4s to 2.2s

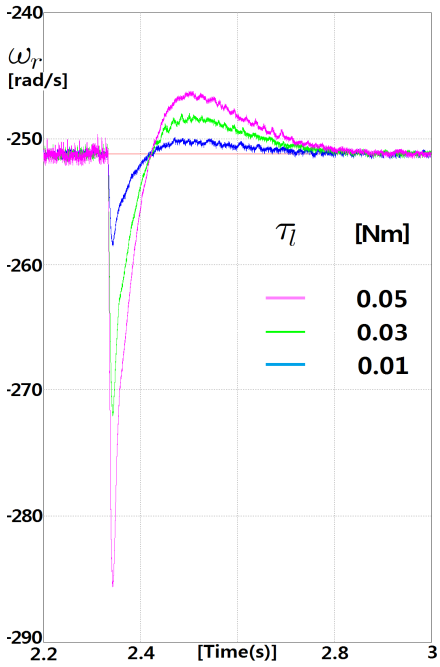

그림 4. 2.2 초에서 3 초까지 속도응답
Fig. 4 Speed Response from 2.2s to 3s

V. 결 론

본 논문에서는 BLDC의 정밀한 제어를 위한 외란에 대해 추정하여 제거할 수 있는 제어기 설계 방법을 제안하였다. 먼저, 외란에 대한 루엔버거 관측기를 설계하였고, 관측기로부터 추정된 외란상태를 이용하여 속도 및 전류제어를 위해 각각 PI제어기를 설계하였다. 설계된 제어기의 성능을 개선하고자 제어기 및 관측기의 이득을 설정하는데 있어서 근의 배치를 이용하여 적절히 선정하는 방법을 제시하였다. 그 결과 속도, 전류에 대해 시스템이 전체 운전 영역에서 안정하며 약 0.47초 이내에 외란이 제거되는 모습을 보이고 정상상태 오차가 0.1 [%] 이내의 고른 추종성능을 보일 수 있었다.

References

[1] 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.

[2] 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.

[3] S. Kwak, H. Kim, and J. Yang, "Design and Implementation of Oil Pump Control System Driven by a Brushless DC Electric Motor," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 1, 2014, pp. 83-90.

[4] 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.

[5] J. Zhou and Y. Wang, "Adaptive backstepping speed controller design for a permanent magnet synchronous motor," *Electric Power Applications IEE Proceedings*, vol. 149, no. 2, 2002, pp. 165-172.

[6] L. Dongliang and Z. Lixin, "Application of back stepping control in PMSM servo system," *Electronic Measurement & Instruments*

2009, ICEMI '09. *9th Int. Conf. on*, vol. 3, Beijing, China, Aug. 2009, pp. 638-641.
[7] 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*), vol. 3, Hammamet, Tunisia, Dec. 2004, pp. 1287-1292.
[8] S. Rebouh, A. Kaddouri, R. Abdessemed, and A. Haddoun, "Adaptive Back stepping speed Control for a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Management and Service Science 2011 Int. Conf.*, Wuhan, China, Aug. 2011.
[9] G. Herbst, "A Simulative Study on Active Disturbance Rejection Control (ADRC) as a Control Tool for Practitioners," *Electronics*, vol. 2, 2013, pp. 246 - 279.

저자 소개

전용호(Yong-Ho Jeon)

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