



Fuzzy 논리를 이용한 로봇 관절용 BLDC 전동기의 자기 동조 PID 제어기 설계

Design of Self – Tuning PID Controller for Brushless DC Motor Robot Arm using Fuzzy Logic

저자 (Authors)	김정환, 김선규, 이상혁, 이태민, 임준홍 Jung-Hwan Kim, Sun-Kyu Kim, Sang-Hyuk Lee, Tae-Min Lee, Joonhong Lim
출처 (Source)	정보 및 제어 논문집 , 2017.4, 302-305 (4 pages) INFORMATION AND CONTROL SYMPOSIUM , 2017.4, 302-305 (4 pages)
발행처 (Publisher)	대한전기학회 The Korean Institute of Electrical Engineers
URL	http://www.dbpia.co.kr/Article/NODE07161529
APA Style	김정환, 김선규, 이상혁, 이태민, 임준홍 (2017). Fuzzy 논리를 이용한 로봇 관절용 BLDC 전동기의 자기 동조 PID 제어기 설계. 정보 및 제어 논문집, 302-305.
이용정보 (Accessed)	한양대학교(안산) 166.***.230.105 2017/05/17 13:28 (KST)

저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Fuzzy 논리를 이용한 로봇 관절용 BLDC 전동기의 자기 동조 PID 제어기 설계

*김정환, 김선규, 이상혁, 이태민, 임준홍†
한양대학교 전자시스템공학과

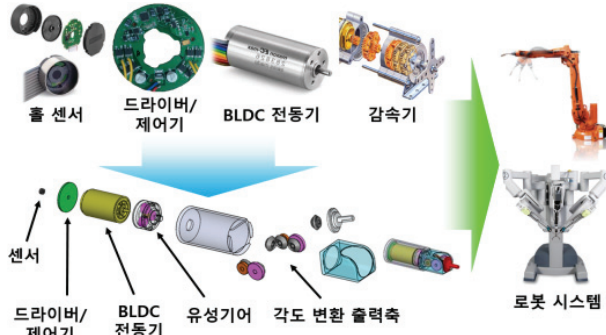
Design of Self-Tuning PID Controller for Brushless DC Motor Robot Arm using Fuzzy Logic

*Jung-Hwan Kim, Sun-Kyu Kim, Sang-Hyuk Lee, Tae-Min Lee and Joonhong Lim†
Hanyang University, Department of Electronic Systems Engineering

Abstract - We investigate the control problem of BLDC motor for robot arm. The conventional controllers such as PID and Fuzzy may not be suitable for robot arm motor control because a load of motor is changed each time by various works of robot arm. To solve the problem, we propose a self-tuning PID by Fuzzy logic in this paper. We designed controller which consists of twenty five Fuzzy rules for self-tuning of each parameter of PID controller. The errors and error derivatives are used as the input variables of logic. Three outputs of the logic are used for the gains of PID controller. Defuzzifier employs a centroid method. The parameters of self-tuning PID controller are adjusted according to these gains. We perform simulations for the Brushless DC motor model and controllers using a MATLAB/Simulink tool. The simulation results show that the self-tuning PID by Fuzzy logic has better performance compared to Ziegler-Nichols PID and conventional Fuzzy controller. The self-tuning PID controller by Fuzzy logic gives slow rise-time, short settling-time, small overshoot and no steady state error.

1. 서 론

최근 컴퓨터의 연산 속도 향상으로 지능형 로봇의 개발이 증가하고 있으며 다양한 곳에서 활용되고 있다. 이에 따라 로봇의 핵심 필요 부품인 액추에이터에 대한 수요가 늘어나고 제어의 정밀화가 필수적인 요소로 부각되고 있다. 로봇에 들어가는 전동기로는 다양한 종류가 있으나 그 중에서 브러시와 정류자가 없기 때문에 DC모터에 비해 구조가 간단하고 소음과 분진이 없으며 수명이 길고 고효율 고투출의 장점을 가지고 있기 때문이다. 본 논문에서도 BLDC 전동기를 이용한 로봇 관절용 액추에이터를 설계하였다.



〈그림 1〉 BLDC 전동기를 이용한 로봇 관절용 액추에이터 구조도

로봇의 팔은 물건 들기, 밀기, 당기기 등 다양한 작업을 수행하기 때문에 전동기에 걸리는 부하의 변동이 많다. 그러므로 부하의 가변에 대응이 가능한 자기 동조를 이용한 제어기를 대부분 설계한다. 본 논문에서는 Fuzzy 논리로 PID 계수를 실시간으로 동조하도록 설계하여 부하 가변에 대응하였다. 성능 평가를 위해 Ziegler-Nichols 방법을 이용한 PID와 Fuzzy 제어기도 설계하여 단위 계단 입력에 대한 응답을 서로 비교하였다.

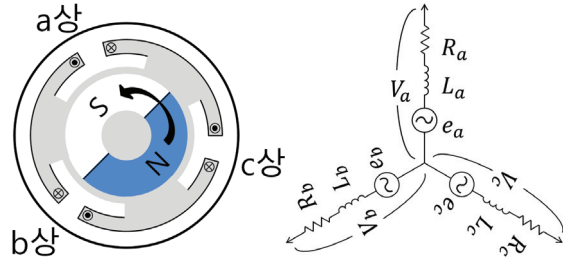
2. BLDC 전동기

2.1 BLDC 전동기의 구조 및 구동 원리

전동기를 일정한 방향으로 회전하기 위해서는 회전자의 회전 방향에 맞춰 전기자 전류의 극성을 바꾸어야 일정한 방향으로 토크가 발생한다. DC 전동기의 경우에는 정류자와 브러시의 접촉을 이용하여 극성을 바꾸어준다. 반면 BLDC 전동기의 경우에는 브러시와 정류자가 없기 때문에 회전자의 정확한 위치를 검출하고 모터의 회전자 상태에 맞게 상전류를 전환시켜주어야 한다. 회전자의 위치를 검출하는 방법으로는 엔코더, 홀센서, 레졸버 등 센서를 이용하는 방법과 역기전력의 변화율을 이용하는 센서리스 구동 방법이 있다.[1-3] 본 논문에서는 회전자의 위치를 정확히 알고 있다는 가정하에 전동기의 제어 알고리즘을 설계하였다.

† 교신 책임자 : 한양대학교, 전자시스템공학과

2.2 BLDC 전동기의 수학적 모델링



〈그림 2〉 BLDC 전동기의 내부 구조 및 권선 등가회로

그림 2와 같은 3상 BLDC 전동기를 키르히호프의 법칙을 이용하여 전압 방정식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

와 같다. 이때 $i_a + i_b + i_c = 0$ 이고 $M \cdot (i_a + i_b)$ 는 $-M \cdot i_c$ 이다. 여기서 전압 V_a, V_b, V_c 는 단자 전압이고 전류 i_a, i_b, i_c 는 상전류, e_a, e_b, e_c 는 상 역기전력, R 은 고정자의 상저항, L 은 각 상의 자기 인덕턴스이다. 이를 회전 운동 방정식으로 표현하면

$$T_e = Bw_m + J \frac{dw_m}{dt} + T_L \quad (2)$$

와 같이 나타낼 수 있다. w_m 은 전동기의 회전 각속도이고 T_L 은 부하토크, J 는 회전자 관성모멘트, B 는 점성 마찰계수, T_e 는 출력토크이다. 여기서 식 (1)과 (2)에 라플라스 변환을 적용하여 BLDC 전동기의 전달함수를 회전 각속도 w_m 와 입력 전압 V_s 의 입력력비로 나타내면

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{JLs^2 + (RJ + BL)s + BR + k_e k_t} \quad (3)$$

와 같이 할 수 있다. k_e 는 역기전력 상수이고 k_t 는 토크 상수이다. 여기서 점성 마찰계수 B 가 미소값을 가진다고 가정하면

$$G(s) = \frac{\omega_m}{V_s} = \frac{k_t}{JLs^2 + RJ + k_e k_t} \quad (4)$$

와 같이 전달함수를 간결화시킬 수 있다. 최종적으로 기계적 상수 τ_m

$$\tau_m = \sum \frac{RJ}{K_e K_t} = \frac{3R_\phi J}{K_e K_t} \quad (5)$$

과 전기적 상수 τ_e

$$\tau_e = \sum \frac{L}{R} = \frac{L}{3R} \quad (6)$$

을 이용하여 BLDC 전동기의 전달함수를

$$G(s) = \frac{1}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (7)$$

와 같이 2차 시스템으로 표현할 수 있다.[1-4]

본 논문에서는 Maxon사의 EC-max 30 No. 272763 BLDC 전동기를 이용하여 제어기를 설계하였다. 그러므로 표 1을 참고하여 BLDC 전동기의 전기적 상수 τ_e 를 구하면

$$\tau_e = \frac{L}{3R} = \frac{0.143 \times 10^{-3}}{3 \times 1.27} = 37.3533 \times 10^{-6} \quad (8)$$

와 같고 기계적 상수 τ_m 는

$$\tau_m = \frac{3R_\phi J}{K_e K_t} = 4.73 \times 10^{-3} \quad (9)$$

이 된다. 전기적 토크 K_e 는 표 1과 식 (9)를 이용하여

$$K_e = \frac{3R_\phi J}{\tau_m K_t} = \frac{3 \times 1.27 \times 21.9 \times 10^{-6}}{0.00473 \times 24.3 \times 10^{-3}} = 725.9416 \times 10^{-3} \quad (10)$$

와 같이 구할 수 있다. 이에 BLDC 전동기의 최종 전달함수는

$$G(s) = \frac{1.3775}{0.1767 \times 10^{-6} s^2 + 0.00473s + 1} \quad (11)$$

와 같이 나타낼 수 있다.

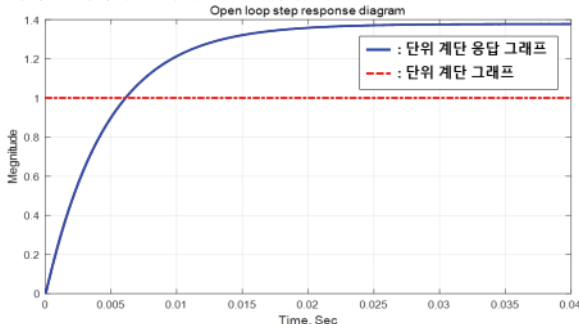
〈표 1〉 Maxon EC-max 30 No. 272763 사양

특성	값	단위	특성	값	단위
정격전압	24	V	최대 효율	81	%
정격 속도	8040	rpm	단자 인덕턴스	0.143	mH
정격 토크	60.7	mNm	토크 상수	24.3	mNm/A
정격 전류	2.66	A	속도 상수	393	rpm/V
단자 저항	1.27	Ω	속도/토크 기울기	20.6	p/mNm
로터 관성	21.9	gcm ²	기계적 시상수	4.73	ms

3. BLDC 전동기 제어기 설계

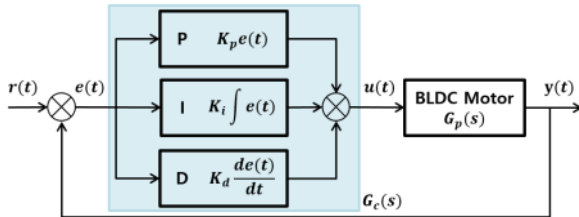
3.1 개루프에서의 BLDC 전동기 시스템 해석

제어시스템을 설계하고 해석하는데 있어서 입력 및 응답 기준으로 임펄스함수, 계단함수, 램프함수 등 다양한 입력신호를 사용한다. 본 논문에서는 단위 계단 입력에 대한 시스템 응답특성을 해석하고 제어기를 설계하였다. BLDC 전동기의 단위 계단 입력에 대한 응답은 그림 3과 같이 1.3775로 정상 상태에서 0.3775의 오차를 가졌다. 그러므로 정상 상태에서 오차를 줄이기 위해서는 제어기 설계의 필요성이 있다.



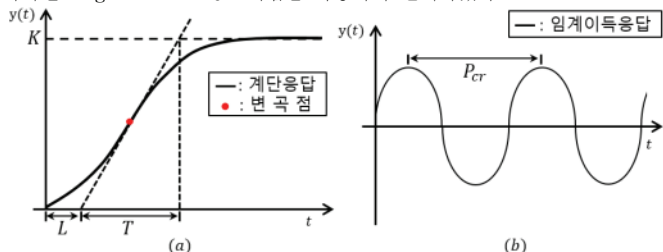
〈그림 3〉 단위 계단 입력에 대한 BLDC 전동기 시스템의 응답특성

3.2 PID 제어기



〈그림 4〉 PID를 이용한 BLDC 전동기 제어 블록 다이어그램

PID 제어기는 그림 4와 같이 페루프 플랜트에 비례항, 적분항, 미분항을 설계하여 설정값 $r(t)$ 와 정상 상태 오차값 $e(t)$ 에 맞게 제어값 $u(t)$ 를 조정함으로써 원하는 출력값 $y(t)$ 를 출력시키는 제어기이다. 이에 PID 제어기에서 가장 중요한 부분은 비례, 적분, 미분항의 계수값을 설계하는 것이다. 계수값의 설계에 따라 제어기 성능에 큰 차이가 있기 때문이다. 계수값의 동조기법에는 시스템의 모델이 있는 모델기반 동조기법과 모델이 없는 무모델 동조기법으로 크게 나누어진다. 본 논문에서는 무모델 동조기법 중 하나인 Ziegler-Nichols 동조기법을 사용하여 설계하였다.



〈그림 5〉 Ziegler-Nichols 동조법 (a)제1방법 (b)제2방법

Ziegler-Nichols 동조기법에는 그림 5와 같이 두 가지 방법이 있다. 제1방법은 단위 계단 입력에 대한 S형 응답곡선을 해석하여 PID 계수값을 찾는 방법이고 제2방법은 플랜트가 원점에 극점을 갖거나 불안정하여 S형 응답곡선을 가지지 못할 때 적용하는 방법으로 임계 이득값 K_{cr} 을 이용해서 PID 계수값을 찾는다. Maxon EC-max 30 BLDC 전동기의 단위 계단 응답은 그림 3과 같이 S형 응답곡선이 나오므로 Ziegler-Nichols 제1방법을 사용할 수 있다. Ziegler-Nichols 제1방법의 규칙에 의해 동조된 PID 제어기는

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \quad (12)$$

와 같다. 따라서 이 PID 제어기는 원점에 극점과 $s = -1/L$ 에 2중 영점을 갖는다. 여기서 지연시간 L 과 시정수 T 는 그림 5의 (a)와 같이 S형 응답곡

선의 변곡점으로부터 나온 접선이 시간축과 만나는 점과 직선 $y(t) = K$ 와 만나는 점으로부터 각각 구할 수 있다.

그림 3에서 지연시간 L 은 $33.99 \mu\text{Sec}$, 시정수 T 는 4.9mSec 이고 직류이득 K 는 1.3768이다. 이에 표 2를 참고하여 계산한 PID 계수는

$$K_p = 172.3032, K_i = 67.981 \mu, K_d = 16.995 \mu \quad (13)$$

이다. Ziegler-Nichols 제1방법의 규칙에 의해 동조된 최종 PID 제어기는

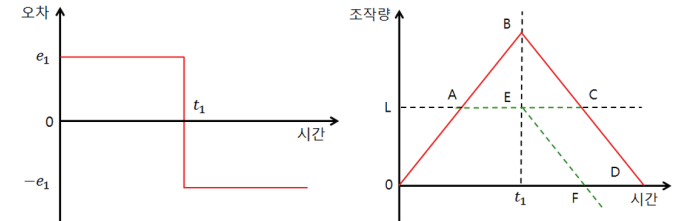
$$G_c(s) = \frac{2928 \times 10^{-6} s^2 + 172.3s + 2.535 \times 10^6}{s} \quad (14)$$

와 같이 표현할 수 있다.

〈표 2〉 계단 응답에 근거한 Ziegler - Nichols 동조 제1방법

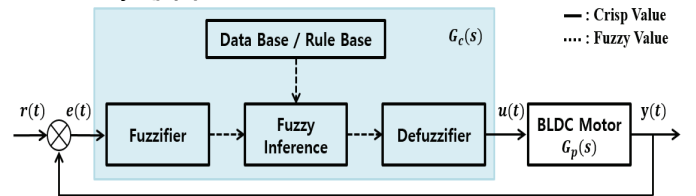
제어기 형태	K_p	K_i	K_d
P	T/L	∞	0
PI	$0.9T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2T/L$	$2L$	$0.5L$

오차가 그림 6의 (a)와 같을 때 PID제어를 하면 이상적인 조작량은 그림 6의 (b)와 같이 0ABCD로 변동을 한다. 하지만 실제 모터의 조작량에는 허용되는 최대, 최소치가 있기 때문에 L 지점에서 포화하게 되어 적분기의 출력은 0ABCD로 변화하지만 실제 조작량은 0AEC로 변화하게 된다. 그러므로 EC의 사이에서는 오차의 적분량이 감소함에도 불구하고 조작량은 감소하지 않는 Integral Windup 현상이 발생된다. 본 논문에서는 PID 제어기의 적분기에 제한치를 설정하여 Integral Windup 현상을 방지하였다.



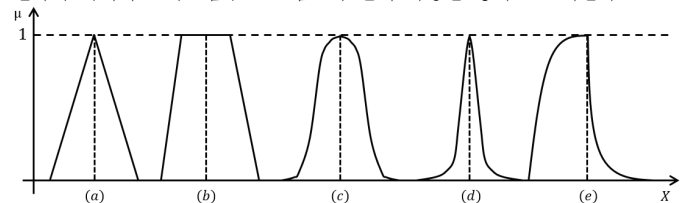
〈그림 6〉 Integral Windup 현상

3.3 Fuzzy 제어기



〈그림 7〉 Fuzzy를 이용한 BLDC 제어 블록 다이어그램

Fuzzy 제어기는 그림 7과 같이 Fuzzifier, Rule Base, Data Base, Fuzzy Inference, Defuzzifier로 구성된다. 여기서 Fuzzifier는 수학적인 Crisp값을 문장형태인 Fuzzy 입력으로 변환시켜주는 역할을 하고 Data Base는 제어 규칙에 사용되는 Fuzzy 집합의 소속도함수들과 Fuzzifier 및 Defuzzifier에 필요한 정보를 가지고 있다. Rule Base는 If-Then의 문장형태로 제어규칙들이 이루어져있다. 이때 Rule은 제어 대상에 대한 전문적 지식 및 목적을 바탕으로 설계된다. Fuzzy Inference는 Rule Base의 규칙들과 Data Base의 소속도함수들을 이용하여 입력 Fuzzy 집합에서 출력 Fuzzy 집합으로 사영하는 것을 추론한다. Fuzzy 집합은 불분명한 경계를 갖고 있기에 이를 표현하기 위해서 소속도함수는 그림 8과 같이 다양한 형태로 존재한다.



〈그림 8〉 대표적인 5가지 Fuzzy수 형태

여기서 (a)는 삼각형, (b)는 사다리꼴, (c)는 정규분포형, (d)는 지수형, (e)는 L-R 형태의 Fuzzy수이다.[4-5] Defuzzifier는 Fuzzy Inference에서 구한 Fuzzy값을 수학적인 Crisp값으로 변환시켜준다. Defuzzifier하는 방법들로는 무게 중심법, 최고 소속도함수법, 최대치 평균법, 가중 평균법, 최종 최대값법, 합중심법, 최대 면적중심법 등이 있다.

본 논문에서는 Mamdani 방식의 Fuzzy 추론을 사용하였고 Fuzzy수는

$$\mu_F(x) = \begin{cases} 0 & (x < a) \\ \frac{1}{(b-a)}(x-a), & (a \leq x \leq b) \\ \frac{1}{(c-b)}(-x+c), & (b \leq x \leq c) \\ 0 & (x > c) \end{cases} \quad (15)$$

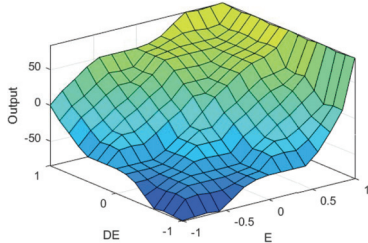
와 같은 삼각형 소속도함수로 설계하였다.[5] Defuzzifier하는 방법으로는

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu_F(y) dy}{\int \mu_F(y) dy} \quad (16)$$

와 같은 무게중심법을 사용했다. 식 (16)은 Fuzzy 집합 F 에 대한 Crisp 형태의 출력값 y^* 를 구한 것이다. 입력 변수는 오차 E 와 오차 변화율 ΔE 로 설계하여 표 3과 같이 25개의 제어 규칙을 성립하였다. 여기서 NB는 Negative Big, NS는 Negative Small, ZE는 Zero, PS는 Positive Small, PB는 Positive Big을 의미한다. 그림 9는 오차 E 와 오차 변화율 ΔE 에 대한 제어 표면이다.

〈표 3〉 BLDC 전동기의 Fuzzy 제어 규칙

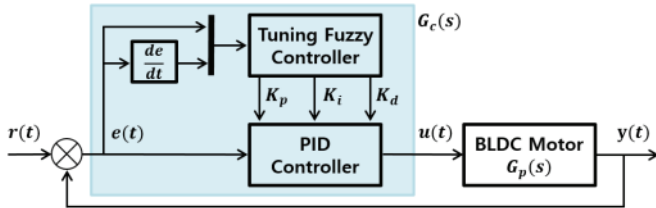
$\Delta E \mid E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NB	NS	ZE	PS	PB
NS	NB	NS	ZE	PS	PB
ZE	NS	NS	ZE	PS	PB
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PB



〈그림 9〉 오차 E 와 오차 변화율 ΔE 에 대한 제어 표면

3.4 자기 동조 Fuzzy - PID 제어기

그림 4의 PID와 같은 종래의 고전제어들은 모델링의 오차, 외란, 플랜트 파라미터들의 변동에 의해 제어 성능이 저하되는 단점을 가지고 있다. 그리고 Fuzzy 제어기는 입력력 소속도함수들의 범위를 설계하는 것에 따라 제어기의 성능이 달라진다. 그렇기에 일반적으로 좋은 성능을 나타내기 위해서 많은 시행착오를 실행하게 된다. 본 논문에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 그림 10과 같은 자기 동조 Fuzzy - PID 제어기를 설계하였다.[4-8]

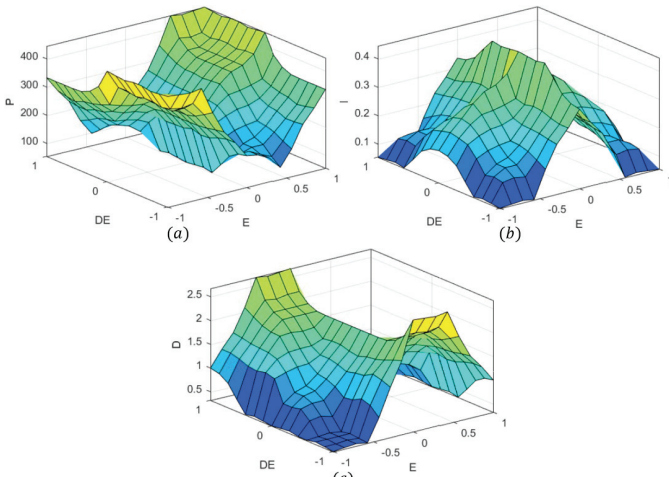


〈그림 10〉 Fuzzy 논리를 이용한 자기 동조 PID 제어 블록 다이어그램

자기 동조 Fuzzy-PID 제어기는 Online상에서 PID 계수값을 Fuzzy Rule로 실시간 동조하기 때문에 외란에 강하고 가변하는 부하에 대응할 수가 있다. PID 제어기의 계수값을 동조하는 Fuzzy의 입력 변수로는 오차 E 와 오차 변화율 ΔE 로 설정하였고 출력 변수는 비례이득 K_p , 적분이득 K_i , 미분이득 K_d 로 표 4와 같이 설계하였다. 여기서 S는 Small, M은 Medium, B는 Big, VB는 Very Big을 의미하고 그림 11은 비례이득 K_p , 적분이득 K_i , 미분이득 K_d 에 대한 제어 표면이다.

〈표 4〉 Fuzzy - PID 제어기의 K_p , K_i , K_d 계수값 규칙

$\Delta E \mid E$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	VB S S	VB S S	M B VB	S S VB	B S M
NS	VB S S	B M S	S VB B	M M B	B S S
ZE	VB M S	B B M	S VB B	B B M	VB M S
PS	B S S	M M B	S VB B	B M S	VB S S
PB	B S M	S S VB	M B VB	VB S S	VB S S

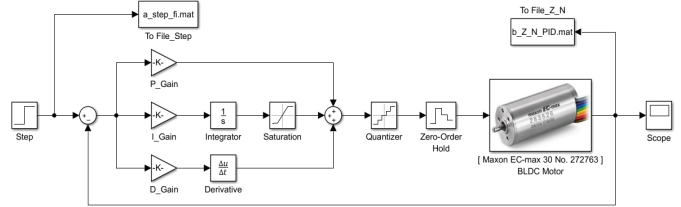


〈그림 11〉 제어 표면 (a)비례이득 K_p (b)적분이득 K_i (c)미분이득 K_d

4. BLDC 전동기의 제어기 설계 및 시뮬레이션 결과

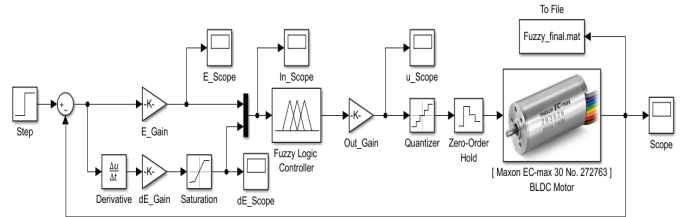
4.1 구현 환경 및 방법

본 논문에서는 MATLAB의 M-file과 Simulink를 이용해서 BLDC 전동기의 제어기들을 설계하고 시뮬레이션을 하였다. 실제로 전동기를 제어할 때는 프로세서를 사용하기 때문에 연속신호인 아날로그가 아닌 이산화가 된 디지털신호를 가지고 제어를 한다. 그러므로 Sampling Time을 통한 프로세서의 A/D변환을 표현하기 위해서 MATLAB의 Simulink에서 Quantizer라는 양자화 블록과 Zero-Order Hold 블록을 사용하여 12bit에 $0.5\mu\text{sec}$ 의 Sampling Time 갖도록 설계하였다. 그리고 적분기에 Saturation 블록을 사용함으로써 적분량을 제한하여 Integral Windup 현상을 방지하였다. 그림 12는 Ziegler-Nichols의 제1동조법을 이용한 PID 제어기의 Simulink 설계를 나타낸 것이다.

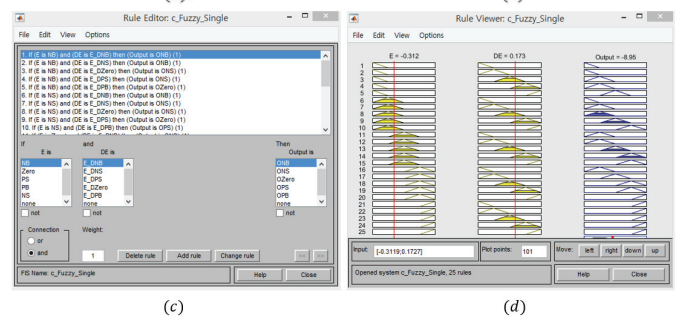
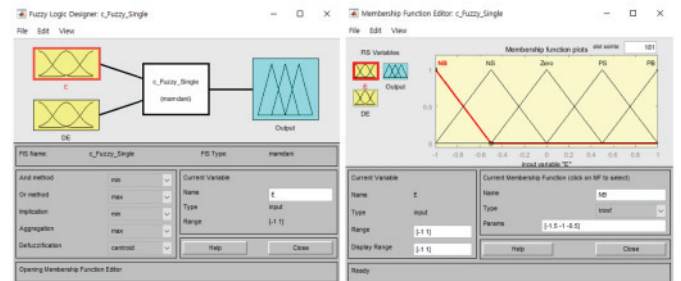


〈그림 12〉 Ziegler-Nichols PID 제어기의 Simulink

그림 13은 Fuzzy 제어기의 Simulink를 나타내는 것으로 성능을 향상시키기 위해서 E_Gain, dE_Gain, Out_Gain 요소들을 추가하였다. Fuzzy 제어기는 그림 14의 (a)와 같이 MATLAB의 FIS Editor를 사용하여 설계하였고 소속도함수는 (b)와 같이 Membership Function Editor로 삼각 형태의 Fuzzy수를 사용했다. 여기서 (c)는 Fuzzy 제어 입력하는 Rule Editor로 본 논문에서는 입력 변수를 NB, NS, ZE, PS, PB 이렇게 총 5가지로 나누었기에 표3과 같이 25가지의 규칙들로 이루어져 있다. 그리고 (d)는 Rule Viewer로 지금까지 구성한 Fuzzy 추론 시스템을 확인할 수 있게 보여주는 창이다.



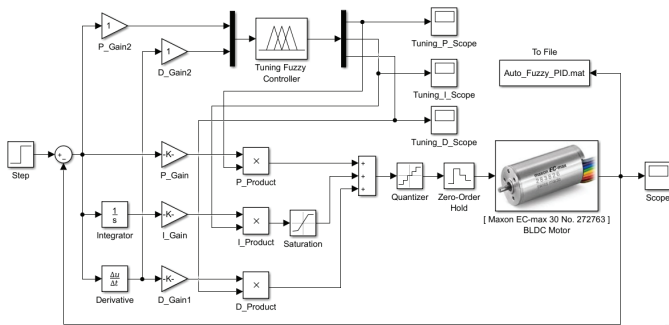
〈그림 13〉 Fuzzy 제어기의 Simulink



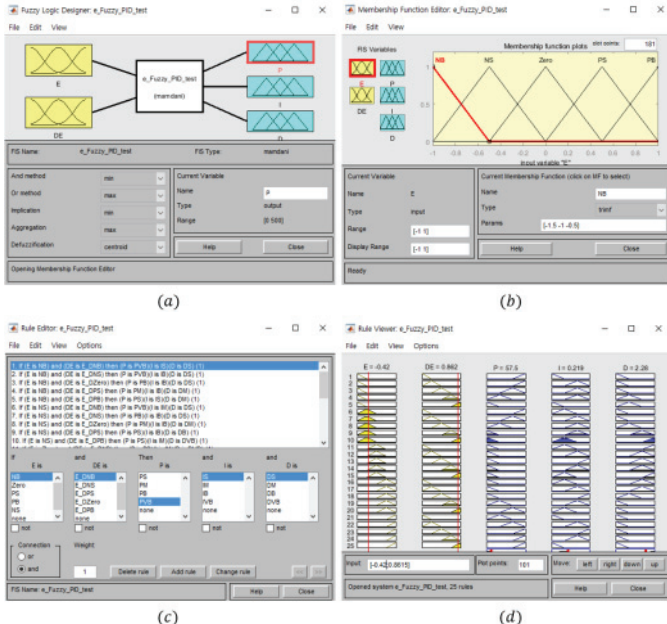
〈그림 14〉 FIS Editor를 이용한 Fuzzy 제어기 설계

그림 13에서 E_Gain은 오차 Gain으로 값을 증가시키면 응답속도가 빨라지지만 Overshoot 또한 증가하게 된다. dE_Gain은 오차를 Gain으로 값을 증가시키면 감쇠 반응이 증가한다. Out_Gain은 출력 Gain으로 값을 증가시켜 정상 상태 오차를 감소시킬 수 있다 하지만 동시에 Overshoot 현상이 증가하게 된다. 그러므로 위의 세가지 Gain 요소들을 적절히 선정하여 시뮬레이션을 하였다.

Fuzzy 제어기는 그림 13과 같이 입력 변수가 2개이고 출력 변수가 1개인 형태를 가지고 있다. 하지만 Fuzzy 논리를 이용한 자기 동조 PID 제어기의 경우에는 PID 제어기의 비례이득 K_p 와 적분이득 K_i 그리고 미분이득 K_d 를 동조해야하기 때문에 출력 변수를 그림 15와 같이 3개로 구성해야한다. 그러므로 MATLAB의 FIS Editor를 이용해서 3개의 출력을 갖는 자기 동조 Fuzzy - PID 제어기를 구성하면 최종적으로 그림 16과 같은 결과가 나온다.



〈그림 15〉 Fuzzy 논리를 이용한 자기 동조 PID 제어기의 Simulink



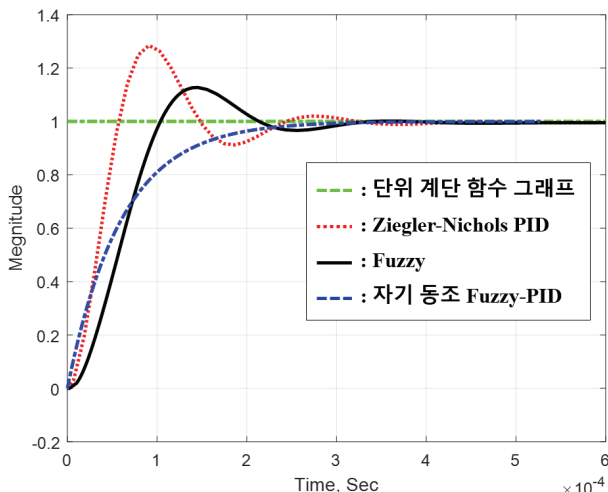
〈그림 16〉 FIS Editor를 이용한 Fuzzy 논리 설계

4.2 시뮬레이션 결과

표 5는 각 제어기들의 응답 성능을 비교하는 표로 Overshoot의 단위는 %이고 상승 시간은 설정값의 10%에서 90% 사이에 도달하는데 필요한 시간으로 μsec 단위로 측정하였다. 정착 시간의 단위 또한 μsec 로 설정값에 $\pm 2\%$ 로 도달하는 시간을 측정하였다. 정상 상태 오차는 %단위로 측정하여 나타내었다. 그림 17은 단위 계단 함수의 입력에 대한 출력으로 Ziegler - Nichols를 이용한 PID 제어기와 Fuzzy 제어기 그리고 Fuzzy 논리를 이용한 자기 동조 PID 제어기의 응답 곡선을 나타낸 것이다.

〈표 5〉 각 제어기들의 응답 성능 비교 결과표

	Overshoot (%)	상승 시간 (μsec)	정착 시간 (μsec)	정상 상태 오차 (%)
Ziegler-Nichols PID	28.474	39.8428	282.95	0.0042351
Fuzzy	12.738	69.464	291.919	0.0047258
Self - Tuning Fuzzy - PID	0	132.218	235.71	0.0000509



〈그림 17〉 단위 계단 함수 입력에 대한 각 제어기들의 응답 비교

표 5와 그림 17에서 보듯이 Ziegler - Nichols PID의 Overshoot가 약 28%로 가장 크고 자기 동조 Fuzzy - PID는 없었다. 정착 시간은 자기 동조 Fuzzy - PID, Ziegler - Nichols PID, Fuzzy 순으로 빠르게 도달하였다. 정상 상태 오차는 Fuzzy 제어기가 단위 계단 함수로부터 약 0.0047%만큼의 오차를 가져 가장 컸고 자기 동조 Fuzzy - PID가 가장 적었다.

5. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문의 목적은 부하 변동이 많은 로봇 관절에 들어가는 BLDC 전동기의 제어기를 설계하는 것으로 설정값에 대한 출력의 응답 속도가 빠르고 Overshoot가 없으며 정상 상태의 오차를 최대한 줄이는 것이 최종 목표이다. 이에 BLDC 전동기를 모델링하고 부하 변동에 대응이 가능한 자기 동조 제어기를 설계하여 기존의 제어기들과 비교를 하였다.

시뮬레이션 결과 자기 동조 Fuzzy - PID 제어기의 정상 상태 도달 시간이 가장 짧았으며 Overshoot 없고 정상 상태 오차가 가장 적었다. 기존의 PID 제어기에서 이러한 결과를 얻기 위해서는 Gain값을 증가시켜야 한다. 하지만 이러한 경우 Overshoot가 발생하는 문제점이 생긴다. 그리고 자기 동조를 하는 부분이 없으므로 부하의 변동에 적절히 대응하지 못한다. Fuzzy 제어기의 경우에는 제어 대상에 대한 전문적 지식 및 경험이 없으면 입출력 소속도함수들의 범위를 설계하는데 한계가 있어 제어기의 성능이 좋지 못하는 경우가 발생하고 부하의 변동에 적절히 대응을 하지 못한다. 반면 Fuzzy 논리를 이용한 자기 동조 PID 제어기는 PID 계수값을 실시간 동조하기 때문에 외란에 강하고 부하의 가변에 대응할 수가 있다. 그러므로 로봇 관절용 BLDC 전동기의 제어기로 자기 동조 Fuzzy - PID 제어기가 가장 적절하다.

향후 연구 방향으로는 로봇 팔에 들어가는 BLDC 드라이버를 실제로 제작하고 전동기의 전류 및 속도, 위치를 제어할 것이다.

감사의 글

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2017년도 산학협력력 기술개발사업 No. C0395427의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

[참 고 문 헌]

- [1] MuraliMuniraj Ramaswamy Arulmozhiyal, "Modeling and Simulation of Control Actuation System with Fuzzy-PID Logic Controlled Brushless Motor Drives for Missiles Glider Applications", Hindawi Publishing Corporation, Article ID 723298, pp.1-11, 2015
- [2] Ritu Shakyra, Kritika Rajanwal, Sanskriti Patel, Smita Dinkar, "Design and Simulation of PD, PID and Fuzzy Logic Controller for industrial Application", IJICT, Vol.4, No.4, pp.363-368, 2014
- [3] 김정환, 김선규, 임준홍, "역기전력 변화율을 이용한 센서리스 BLDC 구동기에서의 Commutation Point 추정 방법", 대한전자공학회 학술대회 논문집, Vol.2014, No.6, pp.1388-1391, 2014
- [4] 이병룡, "퍼지신경망 제어 Matlab/Simulink를 중심으로", 울산대학교출판부, ISBN 978-89-7868-282-4 (93550), 2012
- [5] 홍대선, "공학도를 위한 퍼지시스템 입문", 문운당, ISBN 978-89-7393-687-8 (93550), 2010
- [6] 윤용호, 김재문, 김덕현, 원충연, "퍼지 PI 제어기를 사용한 BLDC 제어 응답특성", 대한전기학회논문지, 제60권, 제10호, pp.1978-1983, 2011
- [7] 김영식, 김성중, "BLDC 전동기의 속도 제어를 위한 퍼지 P+ID 제어기 설계", 한국산학기술학회논문지, 제7권, 제5호, pp.823-829, 2006
- [8] 이영수, 김재혁, 오훈, "자기동조 퍼지 제어기를 이용한 스위치 릴렉턴스 모터의 전류제어", 한국산학기술학회논문지, 제17권, 제3호, pp.473-479, 2016