

Fuzzy Logic Control를 이용한 BLDC 모터의 전압 제어 속도 제어기

박준호* 한상수**

Voltage Controlled Speed Controller of BLDC Motor Using Fuzzy Logic Control

Jun-Ho Park* Sang-Soo Han**

요약 DC 모터는 브러시 구조가 있는 DC 모터와 브러시 구조가 없는 BLDC(Brushless DC) 모터로 분류된다. BLDC 모터는 DC 모터의 브러시가 없이 정류를 전자적으로 수행하는 모터로 BLDC 모터의 속도제어를 대표하는 것은 PI 제어이다. PI 제어기를 이용한 속도제어는 정상상태에 도달하는 응답 특성이 느리다는 단점을 가지고 있다. 이를 보완하기 위해 정상 상태까지 도달하는 시간이 짧고 비선형 제어에도 쉽게 제어가 가능한 FLC(Fuzzy Logic Controller)를 이용해 전압을 가감하는 방식의 전압 제어 속도 제어기 제안하였다. 제시한 퍼지 속도 제어기의 타당성과 유용성은 MATLAB 프로그램의 Simulink를 통해 모의실험으로 입증하였다. 모의실험은 기준 속도를 500rpm, 800rpm, 1500rpm의 3가지 경우로 각각 PI 제어기와 제안한 퍼지 속도 제어기를 실험하였다. 실험 결과 제안한 퍼지 속도 제어기가 30% 정도 개선된 정상 상태 속도 응답 특성을 보이며 PI 제어기에 비해서 빠른 속도 응답 특성을 갖고 있음을 입증하였다.

Abstract DC motors are classified as DC motors with brush structure and BLDC motors without brush structure. Representing the speed control of the BLDC motor is the PI control. The speed control using the PI controller has a disadvantage that the response characteristic to reach the steady state is slow. Therefore in this paper, a voltage controlled speed controller using a Fuzzy Logic Controller (FLC), which has a short steady response time and usefulness of nonlinear control. The validity and usefulness of the proposed fuzzy speed controller are verified by simulation through Simulink of MATLAB program. Experiments were performed on the PI controller and the proposed fuzzy speed controller in three cases with reference speeds of 500rpm, 800rpm, and 1500rpm. Experimental results show that the proposed fuzzy controller has more 30% improved steady state speed response than PI controller.

Key Words : BLDC Motor, Fuzzy Logic Control, PI Control, Speed Control, Voltage control.

1. 서론

DC 모터는 일반적으로 브러시 구조가 있는 DC 모터와 브러시 구조가 없는 BLDC(Brushless DC) 모터로 분류된다.

BLDC 모터는 DC 모터의 브러시가 없이 정류를 전자적으로 수행하는 모터이다. 동기 모터와 비슷한 특

성을 가지고 있는 BLDC 모터는 영구자석의 위치를 홀센서(Hall Sensor)를 통해 확인하고, 홀센서에서 확인된 신호의 전기 각을 판단하여 코일에 전류를 흘려 토크를 발생시킨다[1].

BLDC 모터는 고효율, 고 역률, 소형, 신뢰성 및 낮은 유지 보수로 인해 기기, 전기 견인, 항공기, 군사

*First Author : Gachon University, Department of Energy IT

**Corresponding Author : Gachon University, Department Energy IT (sshhan@gachon.ac.kr)

Received August 02, 2018

Revised August 28, 2018

Accepted October 01, 2018

장비, 하드 디스크 드라이브, 산업 자동화 장비 등 고속, 정밀 기계 분야에서 많이 사용되고 있다[2-3].

BLDC 모터의 속도제어를 대표하는 것은 PI 제어이다. PI 제어기의 장점은 알고리즘이 간단하고, 제어 이득 값이 적절하게 조정될 경우에 좋은 운전 특성을 갖게 된다. 하지만 PI 제어기의 속도제어의 경우 외란 및 부하 변동과 같은 여러 상황에 따라 제어 상수를 적절히 조절해야 되는 점과 정상상태에 도달하는 응답 특성이 느리다는 점이 발생한다[4].

본 논문에서는 PI 제어기의 문제점을 보완하기 위해 퍼지 논리 제어기를 이용하여 모터의 인가전압을 조절하고 모터의 속도를 자동적으로 유지할 수 있게 하여 BLDC 모터의 속도를 제어하는 BLDC 모터 전압 제어 속도 제어기를 제안하였다.

제안한 제어기의 타당성과 유용성은 MATLAB 프로그램의 Simulink를 통해 모의실험으로 입증하였다. 모의실험은 기준 속도를 500rpm, 800rpm, 1500rpm의 3가지 경우로 나누어 PI 제어기와 제안한 퍼지 속도 제어기를 실험하여 비교하였다.

2. BLDC 모터

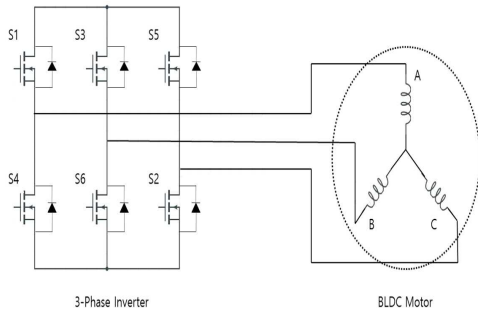


그림 1. BLDC모터 제어 회로 구조도.
Fig. 1. Schematic diagram of BLDC Motor control circuit.

그림 1.은 BLDC 모터의 구동을 위한 인버터 와 BLDC 모터의 등가회로로 권선 3개, 각 상에 해당하는 권선마다 2개의 스위칭 소자가 있고 총 6개로 구성되어 있다.

위쪽 스위칭 소자 3개는 각 상(A, B, C 상)에 +방향으로 전류를 흘려주는 역할을 하고, 아래쪽 스위칭 소자 3개는 -방향으로 전류를 흘려주는 역할을 하게 된다.

BLDC 모터 각 상의 전압 방정식은 아래의 식 (1) ~ (3)과 같다. BLDC 모터의 등가회로 해석은 각 상의 변수에 대한 식을 이용하여 직접적인 해석을 통해 모델링이 가능하다.

$$V_a = I_a R_a + L \frac{dI_a}{dt} + EMF_a \quad (1)$$

$$V_b = I_b R_b + L \frac{dI_b}{dt} + EMF_b \quad (2)$$

$$V_c = I_c R_c + L \frac{dI_c}{dt} + EMF_c \quad (3)$$

V 는 각 상의 전압, R 은 각 상의 저항, I 는 각 상의 전류, EMF 는 각상의 역기전력, L 은 각 상의 인덕턴스이다.

각 상의 역기전력은 아래의 식과 같다.

$$EMF_a = K_e f(\theta_e) \omega_r \quad (4)$$

$$EMF_b = K_e f(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \omega_r \quad (5)$$

$$EMF_c = K_e f(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \omega_r \quad (6)$$

K_e 는 역기전력 상수, $f(\theta_e)$ 는 역기전력 Reference Function, θ_e 는 회전자 위치, ω_r 은 각속도, 이다.

BLDC 모터의 토크에 대한 식은 다음과 같다.

$$T_e = (EMF_a I_a + EMF_b I_b + EMF_c I_c) / \omega_r \quad (7) [5]$$

3. 퍼지 전압 제어 속도 제어기

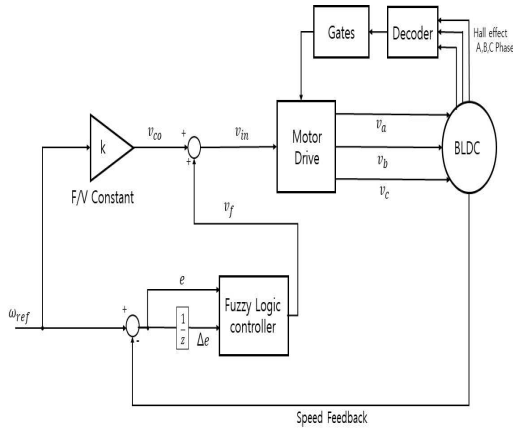


그림 2. 퍼지 전압 제어 속도 제어기 블록도.
Fig. 2. Block Diagram of Fuzzy Voltage Controlled Speed Controller.

그림 2.는 제한한 퍼지 전압 제어 속도 제어기의 구조를 나타내었다.

초기 속도 값을 변경하였을 때에도 기준 속도를 유지하기 위하여 기준 속도와 기준 전압의 비율을 이용한 전압-주파수 상수값(k)을 계산하여 고정 입력 전압(v_{co})이 나오도록 설계하였다.

기준 속도와 모터에서 측정된 속도 피드백 값을 연산하여 나온 결과는 오차 값(e)이 되고 이 오차 값을 지연 함수($\frac{1}{z}$)를 이용하여 나온 결과 값은 오차의 변화율(Δe)이 된다.

이 두 값은 입력 변수로 지정되어 퍼지 제어기로 들어가게 된다. 퍼지 제어기 내부에서 두 입력 변수를 퍼지화하고 룰 베이스의 제어 규칙에 맞게 퍼지 추론 과정을 거쳐 비퍼지화 과정으로 나온 출력값을 출력 전압(v_f)으로 사용한다.

이 출력 전압은 고정 입력 전압과 더해져 모터에 공급 전압(v_i)으로 사용함으로써 퍼지 속도 제어기를 통해 모터의 속도를 전압 제어로 사용한다.

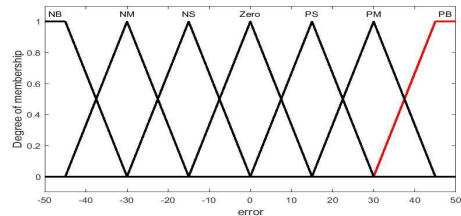


그림 3. 입력 속도 오차 e 에 대한 멤버십함수.
Fig. 3. Membership functions of input speed error.

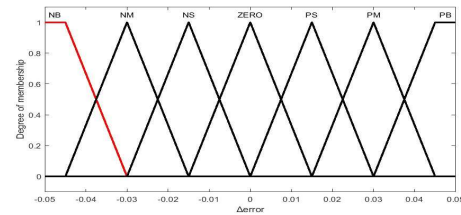


그림 4. 오차의 변화율 Δe 에 대한 멤버십함수.
Fig. 4. Membership functions of input error rate Δe .

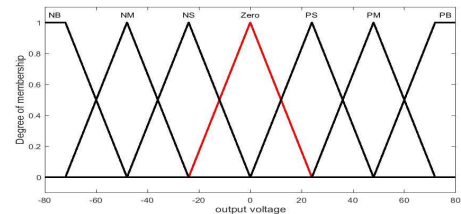


그림 5. 출력 전압 변수 v_f 에 대한 멤버십함수.
Fig. 5. Membership functions of output voltage variable v_f .

그림 3, 그림 4, 그림 5.는 퍼지 논리 제어기의 입력과 출력의 멤버십 함수 (Membership Function) 설정에 대한 그림을 나타내었다. 그림의 가로 축은 오차, 오차의 변화율, 출력 전압에 대한 범위를 나타내었고 세로축은 멤버십 함수의 정도를 나타내었다.

본 논문에서는 퍼지 논리 제어기의 INPUT인 BLDC 모터의 측정된 속도의 오차(e), 오차의 변화율(Δe), OUTPUT인 출력 전압의 경우 7개의 멤버십 함수로 범위를 나누어 삼각형 형태의 함수로 설계하였다 [6-8].

출력은 정격 속도 전압에 맞춰 가감을 할 수 있게 범위를 설정하였다.

표 1. 퍼지 논리 제어기 룰 베이스.

Table 1. Fuzzy Logic Controller Rule base.

$e/\Delta e$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NB	NB	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NB	NM	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PM	PB	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PB	PB	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 1.은 입력과 출력에 대한 멤버십 함수에 대한 규칙 관계를 Matrix 형태로 나타낸 표이다. 퍼지 논리 제어기의 RULE은 입력 변수의 상황에 맞게 총 49개의 상황을 설정해주어 최적의 전압을 유지할 수 있게 설계하였다.

BLDC 모터에서 나온 속도는 피드백 되어 기준 속도와 비교하여 오차와 오차의 변화율이 나오게 되고 이 과정을 반복하여 퍼지 논리 제어기에 출력이 변하게 되면서 일정한 속도를 제어할 수 있게 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과

표 2. BLDC 모터 사양

Table 2. Specification of BLDC Motor

Rated Speed (rpm)	1500
Rated Voltage (V)	160
Numver of phases($\bar{\Phi}$)	3
Poles of the Motor (P)	4
Torque Constant(k)	0.84
Stator Phase inductance $L_s(H)$	$2.72e^{-3}$
Stator Phase Resistance $R_s(\Omega)$	0.7
Viscos Damping($F(N.m.s)$)	$1e^{-3}$
Inertia($J(kg.m^2)$)	$0.8e^{-3}$

표 2.는 BLDC 모터의 사양에 대하여 나타내었다. 제안한 제어기와 PI 제어기를 비교하기 위해 동일한 모터의 정격을 가지고 실험을 진행하였다.

본 논문은 MATLAB의 BLDC 모듈을 이용하여

Simulink로 진행되었으며 기존 Simulink의 PI 제어기와 제안된 퍼지 전압 제어 속도 제어기를 이용한 시뮬레이션을 500rpm, 800rpm, 1500rpm의 경우로 나누어 각각 실험하여 결과 값을 측정하고 그래프를 이용하여 비교하였다.

실험의 동등한 조건을 맞추기 위해 PI 제어기의 K_p 계수와 K_i 계수를 기준 속도를 바꿀 때마다 바꾸어 실험을 진행하였다. 각 실험 결과에 대한 그림의 가로 축은 BLDC 모터의 구동 시간(sec)을 나타내었고 세로축은 Rotor Speed(rpm)를 나타내었다.

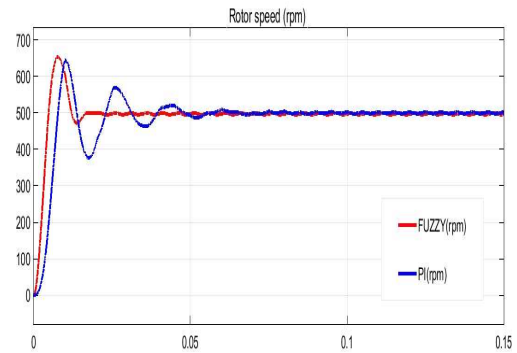


그림 6. 500rpm일 때 퍼지 제어기와 PI 제어기의 속도 응답.

Fig. 6. Speed response of Fuzzy controller and PI controller at 500rpm.

그림 6.는 500rpm을 기준속도로 맞추어 실험을 진행하였을 경우 실험 결과이다.

실험 결과 PI 제어기를 이용한 속도제어에서는 500rpm의 속도로 정상상태에 도달할 때까지 0.075초의 시간이 걸렸고 퍼지 속도 제어기를 이용한 속도제어에서는 정상상태에 도달할 때까지 0.021초의 시간이 걸렸다.

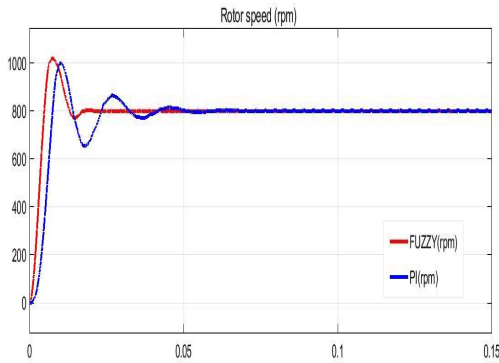


그림 7. 800rpm일 때 퍼지 제어기와 PI 제어기의 속도 응답.
Fig. 7. Speed response of Fuzzy controller and PI controller at 800rpm.

그림 7.은 800rpm을 기준속도로 맞추어 실험을 진행하였을 경우 실험 결과이다.

실험 결과 PI 제어기를 이용한 속도제어에서는 800rpm의 속도로 정상상태에 도달할 때까지 0.062초의 시간이 걸렸고 퍼지 속도 제어기를 이용한 속도제어에서는 정상상태에 도달할 때까지 0.022초의 시간이 걸렸다.

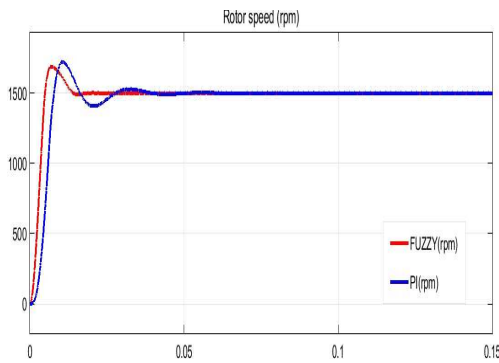


그림 8. 1500rpm일 때 퍼지 제어기와 PI 제어기의 속도 응답.
Fig. 8. Speed response of Fuzzy controller and PI controller at 1500rpm.

그림 8.은 1500rpm을 기준속도로 맞추어 실험을 진행하였을 경우의 실험 결과이다.

실험 결과 PI 제어기를 이용한 속도제어에서는 1500rpm의 속도에 도달할 때까지 0.86초의 시간이

걸렸고 퍼지 속도 제어기를 이용한 속도제어에서는 0.029초의 시간이 걸렸다.

표 3. PI 제어기, 퍼지 제어기의 정상 상태 응답 시간.
Table 3. Steady State Response time of PI controller, Fuzzy controller.

	500rpm	800rpm	1500rpm
PI	0.075s	0.062s	0.086s
Fuzzy	0.021s	0.022s	0.029s

표 3.과 속도별 각 제어기들의 실험 결과를 정리하여 나타낸 것이다. 퍼지 제어기를 이용한 실험 결과 기준속도를 변경하였을 때에도 정상상태에 도달할 때까지의 응답속도의 차이가 크게 나타나지 않았다. 반면 PI 제어기의 경우 기준속도를 바꿔 줄 경우 응답시간의 차이가 평균적으로 0.01초 정도 나타났다.

또한 퍼지 속도 제어기는 기존 PI 제어기 보다 속도 결과에서는 과도현상 이후 정상상태에 도달할 때까지의 시간 차이가 평균적으로 0.05초 정도 차이가 났다.

5. 결론

기존 PI 제어기의 단점을 보완하기 위하여 퍼지 논리 제어기를 이용하여 전압 제어를 통해 BLDC 모터의 속도를 제어하는 제어기를 제안하고 MATLAB Simulink를 이용해 기존 PI 제어기와 각각 실험하여 비교하였다.

퍼지 논리 제어기를 통해 퍼지 변수인 오차와 오차의 변화율을 입력으로 사용하여 룰 베이스 설정에 따라 출력 전압을 설정해 간단하게 작동이 가능하였다.

실험의 동등한 조건을 맞추기 위하여 기준 속도를 바꿔 진행할 때 PI 제어기의 제어 상수인 K_p 계수와 K_i 계수를 직접 계산을 통하여 구해서 조정하여 실험을 진행하였다.

실험 결과 퍼지 속도 제어기가 정지 상태에서 정상상태에 도달할 때까지의 응답 시간이 500rpm, 800rpm, 1500rpm 모두 PI 제어기 보다 평균적으로 30% 정도 개선된 정상 상태 속도 응답 특성을 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 PI 제어기에 비해서 퍼지

제어기가 PI 제어기의 문제점인 외란과 부하 변동에 따른 제어 상수의 변동 문제와 응답 특성이 느리다는 점을 해결할 수 있다는 것을 확인하였다.

REFERENCES

- [1] Dong ju Seok, Sang min Ha, Tae Min Lee, Sang Tae Lee, Jong Sik Park, "The Control Parameters Estimation Using Modeling of the Brushless DC Motor", The Korean Society of Mechanical Engineers, 2274-2278, Nov, 2012.
- [2] M.Valan Rajkumar, G.Ranjitha, M.Pradeep, Mohammad Fasil PK, R.Sathish Kumar, "Fuzzy based Speed Control of Brushless DC Motor fed Electric Vehicle", IJISSET, pp.12-17, March, 2017.
- [3] Muhammad Mubeen, "Brushless DC Motor Primer", July, 2008.
- [4] Ho-Shin Song, Oh-Geul Lee, Joon-Tark Lee, Jung-In Woo, "A study on the Speed Controller with High Accuracy of an Induction Motor by Fuzzy Algorithms", Journal of Korean Institute of Intelligent Systems 3(2), 45-57, June, 1993.
- [5] Pragasen Pillay and Ramu Krishnan, "Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives, Part II: The brushless DC motor drive", IEEE Transactions on Industry Application, vol. 2, no. 3, pp. 575- 578, Mar/Apr, 2001.
- [6] Adil Usman, and Bharat Singh Rajpurohit, "Speed control of a BLDC Motor using Fuzzy Logic Controller", ICPEICES, 2016.
- [7] Kim, Young-Shik, Kim, Sung-Joong "The Design of Fuzzy P+ID Controller for Brushless DC Motor Speed Control". Journal of The Korea Academy Industrial Cooperation Society, pp. 823-829, Oct, 2006.
- [8] J. Sriram and K. sureshkumar, "Speed Control of BLDC Motor Using Fuzzy Logic Controller Based on Sensorless Technique", Green Computing Communication and Electrical Engineering (ICGCCCE), October 2014.

저자약력

박 준 호 (Jun-Ho Park)

[학생회원]



- 2015년 가천대학교 에너지IT학과 (공학사)
- 2018년 가천대학교 대학원 IT융합공학과 (공학석사)

<관심분야>

전력전자제어, 로봇 제어, IOT, 딥 러닝, 빅 데이터

한 상 수 (Sang-Soo Han)

[평생회원]



- 1985년 명지대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 1995년 홍익대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 1989년 - 현재 가천대학교 에너지IT학과 교수

<관심분야>

지능 및 퍼지제어, 전력전자제어, 로봇시스템제어, 임베디드 하드웨어 설계