

BLDC 모터용 Fuzzy PWM 속도 알고리즘

신동하*, 한상수**

Fuzzy PWM Speed Algorithm for BLDC Motor

Dong-Ha Shin*, Sang-Soo Han**

요약 기존에 BLDC모터의 속도 제어 알고리즘으로는 PI 제어 알고리즘이 많이 사용되어왔다. PI 제어 알고리즘의 경우 다양한 속도 변화에 대한 속도와 토크의 응답 특성이 느려, 정상상태에 도달하는 것이 느리다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 오버슈트가 조금 있지만 응답 속도를 개선해 정상상태에 빠르게 도달할 수 있는 PWM 퍼지 논리 제어 알고리즘을 제안하였다. PWM으로 응답속도를 줄이고, 퍼지 논리 제어 알고리즘으로 오버슈트를 최소화하였다. 제안된 PWM 퍼지 논리 제어 알고리즘은 DC 초퍼, PWM 듀티 사이클 조정기, 퍼지 논리 제어기 등으로 구성했다. 제안된 알고리즘의 성능과 타당성은 Matlab 2018a의 Simulink를 이용한 시뮬레이션을 통해 입증하였다.

Abstract Conventionally, a PI control algorithm has been widely used as a speed control algorithm for BLDC motor. The PI control algorithm has a disadvantage in that it is slow to reach the steady state due to the slow speed and torque response with various speed changes. Therefore, in this paper, PWM fuzzy logic control algorithm which can reach the steady state quickly by improving the response speed although there is a little overshoot is proposed. PWM reduces response speed and fuzzy logic control algorithm minimizes overshoot. The proposed PWM fuzzy logic control algorithm consists of DC chopper, PWM duty cycle regulator, and fuzzy logic controller. The performance and validity of the proposed algorithm is verified by simulation with Simulink of Matlab 2018a.

Key Words : Brushless Motor, DC Chopper, Fuzzy Logic Control, Pulse Width Modulation, Speed Control

1. 서론

BLDC (Brushless DC) 모터는 기존의 DC모터의 수명에 큰 영향을 주었던 브러시를 제거한 모터이다. 따라서 BLDC 모터는 기존 서보 모터, DC 모터 등과 같이 산업현장에서 자주 사용하는 모터보다 안정적인 속도와 토크, 낮은 내부 저항을 통해 높은 효율성을 보여준다.[1] 따라서 최근에는 BLDC 모터 성능을 향상시키기 위해 PI 제어기 [2-4]를 사용하거나 PWM (Pulse Width Modulation) 제어기 [5-7]를 사용하는 등 제어 알고리즘 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

하지만 PI 제어기를 사용하여 속도 제어를 할 경우 속도와 토크가 정상상태에 도달하기까지의 시간이 오래 걸리는

단점이 있다. 또한, 계수를 직접적으로 사용자가 설정해야 하는 문제점을 가지고 있다[7]. 이를 개선하기 위해 PWM 제어기를 사용하지만 PWM 제어기는 응답속도만 개선할 뿐, 오버슈트를 줄여주지는 못한다.

따라서 본 논문에서는 BLDC 모터 속도 제어를 위한 PWM 퍼지 논리 제어 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘을 통해서 기존 제어 알고리즘 보다 빠르게 정상상태에 도달하고, 오버슈트가 있지만 최소화 할 수 있다. 본 논문의 실험 환경은 Matlab 2018a이며, 실험을 통해 본 논문의 효율성과 타당성을 입증하였다.

*First Author : Gachon University, Department of Energy IT

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

Received May 04, 2018

Revised May 14, 2018

Accepted May 31, 2018

2. 본론

2.1 BLDC 모터

BLDC 모터는 회전자에 브러시가 없다. 따라서 영구 자석을 사용한 고정자에 의해 형성된 전자기장과 회전자에 의해서 형성된 전자기장이 같은 주파수로 회전한다. BLDC 모터는 U, W, Y 총 3상으로 작동하며 Y결선 혹은 델타 결선을 사용한다[8]. 3상은 모터에서의 전압 리플을 줄여주고, 사다리꼴 형태로 된 각 상의 역기전력은 일정한 토크를 발생시킨다. 여기에 자기장을 검출하는 Hall Sensor를 통해 나오는 각 상의 위치에 대한 파형을 바탕으로 6개의 스위치를 제어하는 6-Step Switch 인버터를 사용하는 것이 기본적인 BLDC 모터 작동방식이다.[9] 그림1. 에 Y결선으로 이루어진 BLDC 모터의 작동에 대한 간략한 회로도를 나타내었다.

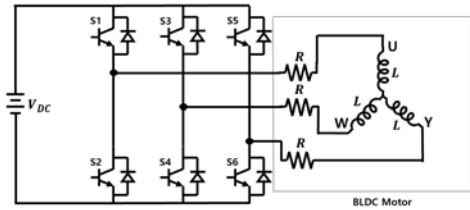


그림 1. BLDC 모터 작동 회로
Fig. 1. Equivalent circuit of BLDC motor

U, W, Y 각 상의 전압은 수식(1)로 나타낼 수 있다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

V 는 각 상의 전압, R 은 각 상의 저항, i 는 각 상의 전류, L 은 각 상의 인덕터, e 는 각 상의 역기전력이다. U, W, Y 각 상의 역기전력은 수식(2)로 나타낼 수 있다.

$$e = K_e \lambda_f w_m \quad (2)$$

K_e 는 역기전력 상수, λ_f 는 전기적 회전자 위치 즉, 자속쇄교수, w_m 은 모터의 회전각 속도이다. 모터의 자속쇄교수의 경우 수식(3)으로 정의된다.

$$\lambda_f = Li_f \quad (3)$$

L 는 모터 안의 인덕터, i_f 는 모터의 계자 권선 전류이다. 모터에 가해지는 토크는 수식(4)에 나타내었다.

$$T_e = K_T \lambda_f i_a \quad (4)$$

K_T 는 토크 상수, λ_f 는 자속쇄교수, i_a 는 전기자 권선의 전류이다. 식(4)는 식(5)와 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + Bw_m + T_L \quad (5)$$

J 는 관성, $\frac{dw_m}{dt}$ 가속도이며 위의 식에서 관성에 따른 부하를 의미한다. B 는 마찰계수, w_m 은 회전각 속도로 수식(5)에서 속도에 따른 부하를 의미한다. 마지막 T_L 은 부하 토크이다. 관성과 속도에 따른 부하는 모터의 특성에 따라서 결정되며, 부하 토크는 외부에서 결정된다.

2.2 제안 모델

본 논문에서는 PWM 파형을 이용한 DC초과와 퍼지 논리 제어기 그리고 PWM 듀티 사이클 조정기를 사용하여 BLDC 모터를 제어하였다. 그림 2에 제안된 모델의 전체 블록도에 대해서 나타냈다.

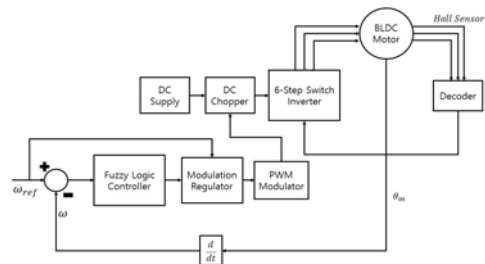


그림2.제안 모델 블록도
Fig.2.Block Diagram of proposed model

DC Supply에서 나온 전압은 DC 초퍼를 통해 6-Step Switch 인버터로 들어간다. 이 때, DC 초퍼는 PWM 파형의 듀티 사이클에 따라 크기가 다른 전압을 전달한다. DC 초퍼에서 인가받은 전압과 디코더를 통과한 Hall Sensor 값을 바탕으로 6-Step Switch 인버터는 BLDC 모터를 작동시킨다. BLDC 모터에서는 각속도 또한 측정되는데, 측정된 각속도 값은 미분기를 통해 속도 값으로 전환되고 이는 퍼지 논리 제어기의 입력 값 중 하나인 오차 값을 만들어낸다. 그림 3에 퍼지 논리 제어기에 대한 블록도를 나타내었다.

입력된 오차 값은 그대로 퍼지 논리 제어기의 입력 값이 된다. 또한, 오차 값을 delay 함수를 통해 오차변화율로 만들어 퍼지 논리 제어기의 또 다른 입력 값으로 넣어준다. 2개의 입력 데이터를 갖는 퍼지 논리 제어기는 PWM 파형의 듀티 사이클을 출력 값으로 갖는다. 표 1.에 퍼지 논리 제어기의 퍼지 룰(Rule)에 대한 진리표를 나타내었다.

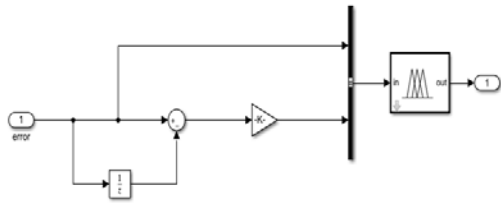


그림 3. 퍼지 논리 제어기 블록도
Fig. 3. Block Diagram of Fuzzy Logic Controller

표 1. 퍼지 논리 제어기 진리표
Table 1. Rule base table of Fuzzy Logic Controller

$e/\Delta e$	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

또한, 그림 4, 그림 5, 그림 6에 각각 입력 값과 출력 값에 대한 퍼지 멤버십 함수에 대해서 나타내었다.

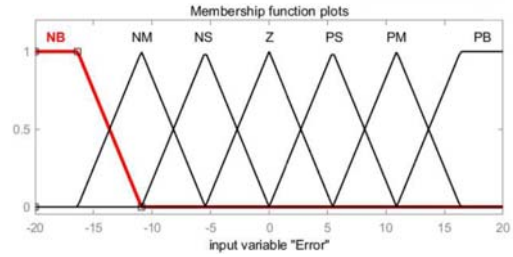


그림 4. 속도 오차에 대한 퍼지 멤버십 함수
Fig. 4. Membership Function of speed error

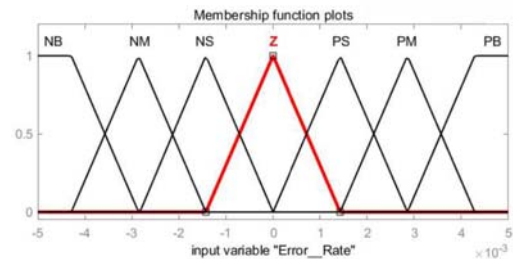


그림 5. 속도 오차변화를 대한 퍼지 멤버십 함수
Fig. 5. Membership Function of speed change

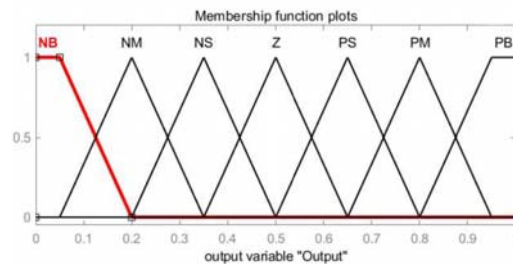


그림 6. 듀티 사이클에 대한 퍼지 멤버십 함수
Fig. 6. Membership Function of duty cycle

본 논문에서는 비퍼지화 방법으로 무게중심법(Centre Of Gravity)을 사용하였다. 무게중심법은 수식(6)을 통해서 정의된다.

$$COG = \frac{\int_a^b \mu_A(x)x dx}{\int_a^b \mu_A(x) dx} \quad (6)$$

$\mu_A(x)$ 은 멤버십 함수를 통해 나온 멤버십 값의 집합

들로 이뤄진 함수로 수식(6)은 이 함수의 구간 a , b 의 사이의 무게 중심을 구한다.

퍼지 논리 제어기에서 나오는 출력은 듀티 사이클 조정기의 입력 값이 된다. 수식 7에 듀티 사이클 조정기를 수식으로 나타내었다.

$$DC_{regulator} = \frac{1}{10k}x_{ref} + a + b_{out} \quad (7)$$

k 는 개루프 상태에서 듀티 사이클의 값을 0부터 1까지 0.1씩 증가시킬 때 각 듀티 사이클 마다 나오는 모터의 속도 값들 사이의 평균 차이이다. x_{ref} 은 기준 속도다. a 는 조정상수, b_{out} 은 퍼지 논리 제어기의 출력 값이다. 듀티 사이클 조정기에서 나온 출력 값과 퍼지 논리 제어기에서 나온 출력 값을 바탕으로 PWM 발생기의 듀티 사이클 값을 결정한다.

3. 실험

본 논문의 실험은 Matlab 2018a를 사용하였다. Simulink를 이용하여 DC 초퍼, BLDC 모터, 듀티 사이클 조정기, 6-step Switch 등을 구현하였고, DC 전압은 160V로 하였다. 1400RPM, 700RPM일 때의 무부하 상태에서 실험하였다. 또한, PI 제어기와의 비교를 통해 제안된 모델의 성능을 입증하였다.

실험 결과 1400RPM 일 때, 제안 모델의 속도 응답 시간은 0.0175초, PI 제어기의 속도 응답 시간은 0.0349초로 제안모델이 PI 제어기보다 0.0174초 빨랐다. 제안 모델의 토크 응답 시간은 0.0183초, PI 제어기의 토크 응답 시간은 0.0375초로 제안모델이 0.0174초 빨랐다. 700RPM 일 때, 제안 모델의 속도 응답 시간은 0.0168초, PI 제어기의 속도 응답시간은 0.0437초로 제안 모델이 0.0269초 빨랐다. 제안 모델의 토크 응답 시간은 0.0185초, PI 제어기의 토크 응답 시간은 0.0375초로 제안 모델이 0.019초 빨랐다. 제안 모델과 PI 제어기의 1400RPM일 때와 700RPM일 때의 속도 응답 특성을 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 또한, 제안 모델과 PI 제어기의 1400RPM일 때와 700RPM일 때의 토크 응답 특성을 그림 9과 그림 10에

나타내었다.

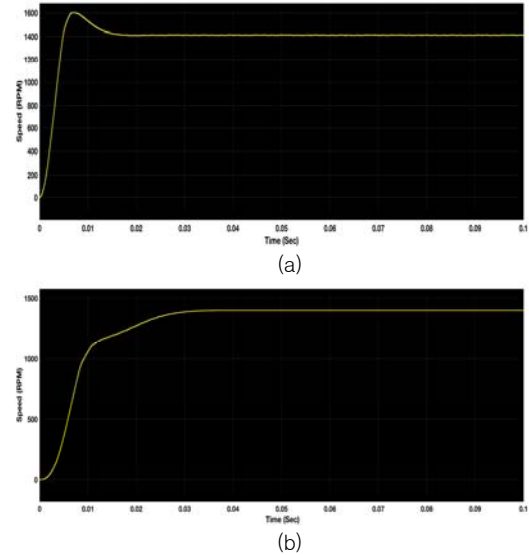


그림 7. 1400 RPM에서의 속도 응답
a) 제안된 모델 b) PI 제어기
Fig. 7. Speed response on 1400 RPM
a) proposed model b) PI controller

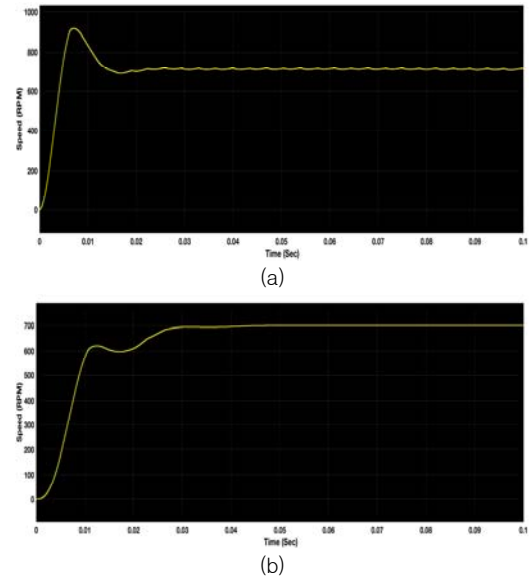
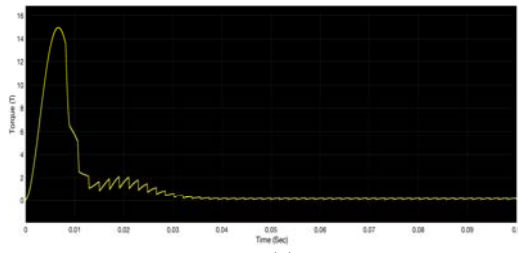
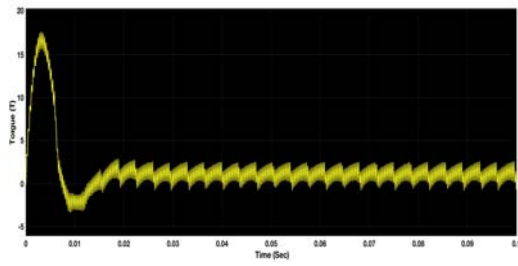


그림 8. 700 RPM에서의 속도 응답
a) 제안된 모델 b) PI 제어기
Fig. 8. Speed response on 700 RPM
a) proposed model b) PI controller

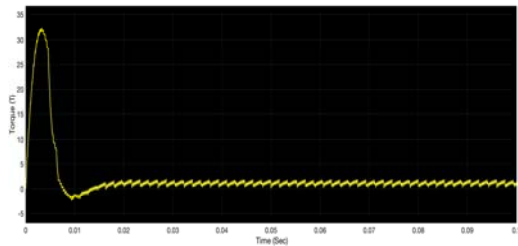


(a)

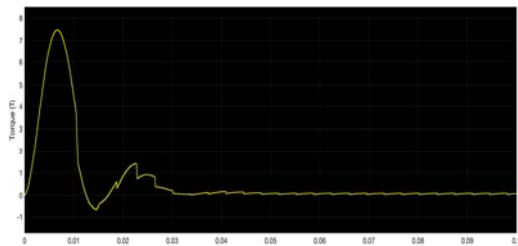


(b)

그림 9. 1400 RPM에서의 토크 응답
 a) 제안된 모델 b) PI 제어기
 Fig. 9. Torque response on 300 RPM
 a) proposed model b) PI controller



(a)



(b)

그림 10. 700 RPM에서의 토크 응답
 a) 제안된 모델 b) PI 제어기
 Fig. 10. Torque response on 700 RPM
 a) proposed model b) PI controller

표 2.에 모든 실험 결과에 따른 응답 속도를 표로 정리하여 나타내었다.

표 2. 실험결과에 따른 응답시간
 Table 2. Response time of the results

		Speed Response (s)	Torque Response (s)
Proposed Model	1400 RPM	0.0175	0.0183
	700 RPM	0.0168	0.0185
PI controller	1400 RPM	0.0349	0.0375
	700 RPM	0.0437	0.0375

4. 결론

본 논문에서는 퍼지 논리 제어기와 DC Chopper, PWM 등을 사용한 BLDC 모터의 제어를 제안하였다. 제안된 모델은 Matlab 2018a의 Simulink를 이용해 시뮬레이션 했으며, PI 제어기 또한 구현해 1400RPM 일 때와 700RPM 일 때의 두 개의 제어를 비교하였다.

실험 결과 실험 결과 1400RPM 일 때, 제안 모델의 속도 응답 시간이 PI 제어기 보다 0.0174초 빨랐다. 제안 모델의 토크 응답 시간이 PI 제어기 보다 0.0174초 빨랐다. 700RPM 일 때, 제안 모델의 속도 응답 시간이 PI 제어기 보다 0.0269초 빨랐다. 제안 모델의 토크 응답 시간이 PI 제어기 보다 0.019초 빨랐다. 결과적으로 제안 모델이 PI 제어기보다 속도, 토크 응답시간이 더 빠른 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

- [1] M. K. Lee, K. C. Kong, "Design of Sensorless BLDC Motor Driver Using Variable Voltage and Back-EMF Differential Line", Journal of Institute of Control, Robotics and Systems, Vol. 21, No. 10, pp. 910-916, Oct, 2015.
- [2] G. Y. Chen, J. W. Perng, "PI speed controller design based on GA with time delay for BLDC motor using DSP", Mechatronics and Automation IEEE International Conference, pp. 1174-1179, Aug, 2017.
- [3] C. Kiree, D. Kumpanya, S. Tunyasirirut, D. Puangdownreong, "PSO-Based Optimal PI(D) Controller Design for Brushless DC Motor Speed Control with Back EMF Detection", Journal of

Electrical Engineering & Technology, Vol.11, No.3, pp. 715-723, Mar, 2016.

- [4] A. Azarudeen, M. Dolly, "Performance analysis of conventional and digital PWM control scheme for speed control of BLDC motor drives", Advances in Electrical Technology for Green Energy 2017 International Conference on IEEE, pp. 69-75. Apr, 2017.
- [5] M. A. Islam, M. B. Hossen, M. S. Hasan, B. C. Ghosh, "Field oriented rectangular current regulated PWM control of permanent magnet brushless DC motor", Advances in Electrical Engineering 2017 4th International Conference on IEEE, pp. 346-351, Sep, 2017.
- [6] A. Tashakori, M. Hassanudeen, M. Ektesabi, "FPGA based controller drive of BLDC motor using digital PWM technique", Power Electronics and Drive Systems 2015 11th International Conference on. IEEE, pp. 658-662, June. 2015.
- [7] S. Y. Yun, J. Lee, "Speed Control of Permanent Magnet Brushless DC Motor using Variable Gain PI Controller", The transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers, Vol. 62, NO. 9, pp. 1234-1239, Sep, 2013.
- [8] P. Yedamale, "Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals", Microchip Technology, 2003.
- [9] B. Akin, M. Bhardwaj, J. Warriner, "Trapezoidal Control of BLDC Motors Using Hall Effect Sensors", Texas Instrument, 2015.

한 상 수 (Sang-Soo Han)

[평생회원]



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

<관심분야>

지능 및 퍼지제어, 전력전자제어, 로봇시스템제어, 임베디드하드웨어 설계

저자약력

신 동 하 (Dong-Ha Shin)

[정회원]



- 2016년 가천대학교 에너지IT학과 (공학사)
- 2016년-현재 가천대학교 대학원 IT융합공학과 석사 과정

<관심분야>

엑츠크에이터, 인공지능, IOT