ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 66, No. 11, pp. 1663~1668, 2017
http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.11.1663

Fuzzy 제어기를 이용한 7상 BLDC 전동기 속도제어 구동시스템

Driving System of 7-Phase BLDC Motor Speed Control by Fuzzy Controller

윤 용 호*
(Yong-Ho Yoon)

Abstract - A BLDC motor with higher number of phases has several advantages, compared to the conventional three-phase BLDC motors. It can reduce the commutation torque ripple and the iron loss without increasing the voltage per phase and increase the reliability and power density. Higher number of phases increase the torque-per-ampere ratio for the same machine volume and output power by widening the electrical conduction period. In this paper, the proposed seven-phase BLDC motor drive system is made into several functional modular blocks, so that it can be easily extended to other ac motor applications: back-EMF block, hysteresis current control block, pwm inverter block, phase current block, and speed/torque control block. Also in a system of BLDC motor drive, the PI controller has been widely used in the speed controller because of the simple implementation. To obtain a good speed response in a general drive system using the PI controller, the high bandwidth of a controller is established. therefore, in this paper, a Fuzzy controller is applied to the 7-phase BLDC motor drive system in order to improve the speed control performance. The Fuzzy controller is compared with a conventional PI controller through the experiment with respect to speed dynamic responses. These experimental results show that the Fuzzy controller of the 7-phase BLDC motor drive system is superior over the conventional PI controller. The algorithm using the Fuzzy controller can improve a comfortable ride in the field of high performance 7-phase BLDC motor drive applications.

Key Words : 7-phase BLDC motor, Speed control, Fuzzy controller, PI Controller, Hysteresis current control.

1. 서 론[1,2]

다상(多相) BLDC (Brushless DC) 전동기는 전통적인 3상 BLDC 전동기보다 여러 가지 장점을 가지고 있다. 그 예로 토오크 리플을 줄이고, 효율을 증가시키고, 상(相)당 전압 증가 없이 철손을 줄일 수 있다. 또한 군사적 목적으로 응용되는 제품에서는 고장 배제 요소가 가장 중요한 고려 대상 중의 하나이다. 이러한 이유로 다상(多相) 전동기는 한 두 상이 고장 나더라도 작동할 수 있으므로 다상(多相) BLDC 전동기는 군사 응용 제품이나 에너지 절약을 요하는 분야에 응용 가능한 고려 요소가 된다.

그러나 이러한 장점들에도 불구하고 BLDC 전동기에 관련된 대부분의 연구들이 3상 BLDC 전동기에 의존되어 왔으며, 2000년대에 이르러 5상 BLDC 전동기에 관한 연구들이 시작되고 있으나, 7상 BLDC 전동기에 관한 연구는 국내 응용개발 제품인 어뢰 추진시스템에 적용이 되는 수준에 불과한 연구가 전부이다. 또한 다상(多相) BLDC 전동기는 제어 복잡성 및 높은 가격으로 인하여 3상 BLDC 전동기에 비해 적용가능 범위가 좁았다.

하지만 디지털 신호 처리(DSP : Digital Signal Processing) 컨트롤러의 발달로 인하여 이러한 문제들이 대다수 해결되었다. 그 결과 다상(多相) BLDC 전동기 구동 방식은 전체 시스템의 여러 가지 고려 요소 중에서 가격이 차지하는 비중이 낮은 분야 즉, 전기자동차, 항공, 선박 추진 및 고 출력 군사 응용 제품 등의 고성능 및 고 신뢰도가 요구되어지는 분야에 적용될 수 있다.

본 논문에서는 시스템의 전압방정식과 토오크 관계식을 유도하여 7상 BLDC 전동기를 모델링 및 Fuzzy 제어기를 사용한 7상 BLDC 전동기 속도제어 구동시스템을 구현하였다. 기존 속도제어기인 PI 속도제어기와 본 논문에서 제안 및 구현한 Fuzzy 제어기를 적용한 구동시스템의 속도 응답특성에 대해 각각의 결과를 비교 분석하였다. 그 결과 7상 BLDC 전동기 구동시스템에 무부하 상태 및 외란발생 상태에서 PI제어기를 적용하였을 때보다 Fuzzy 제어기를 적용했을 경우 속도명령에 대한 추종 및 부하변동에 대한 응답성이 우수함을 나타내고자 한다.

2. 7상 BLDC 전동기 구동시스템[3,4]

그림 1은 7상 BLDC 전동기의 각상의 해당되는 각 부 파형을 나타낸 그림으로 전체 14 통전모드구간으로 나누어서 각 상의 역기전력, 상전류, 홀센서 신호의 동작을 확인할 수 있다. 전기각 한 주기에 따른 각 상전류 도통 상태에 따라 14가지의 동작 모드를 보여주며, 매 전기각 $\pi/7$마다 6상만 여자되고 1상은 비여자 구간으로 동작되는 것을 확인 할 수 있다.

그림 2는 7상 BLDC 전동기 구동용 인버터로 전원으로부터 얻어지는 직류단(DC Link) 전압부, 직류전압을 전동기의 구동전력

* Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Gwangju University. Korea.
E-mail: yhyoon@gwangju.ac.kr
Received : September 29, 2017; Accepted : October 13, 2017

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

형태로 변환하는 인버터부 및 전동기로 구성된다. 또한 히스테리시스 전류제어를 위한 펄스폭변조 인버터 회로는 직류단 전압을 14개 스위치에 의하여 전동기 구동전압을 전동기에 인가하는 전압원 구동 방식이다.

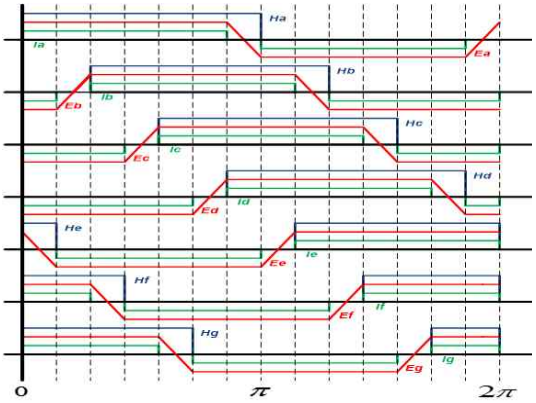

그림 1 7상 BLDC 전동기의 홀센서, 역기전력, 전류파형

Fig. 1 Hall sensor, back-EMF, current waveform of 7-phase BLDC motor

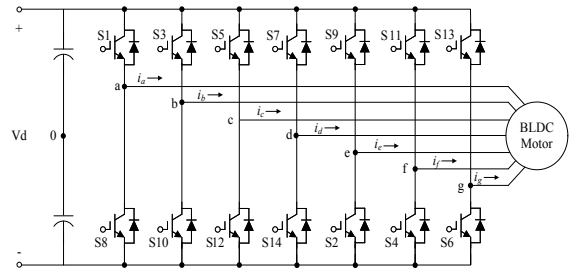

그림 2 7상 BLDC 전동기 구동용 인버터

Fig. 2 7-phase BLDC motor driving inverter

2.1 Fuzzy 제어기

이득 계획 비례적분 제어기는 속도명령을 기준으로 제어기의 이득 값을 조정하므로 외란에 의한 실제 속도 변화를 고려하지 못한다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 이의 해결 방안으로 Fuzzy 제어기를 제안하였으며 Fuzzy 제어는 기본적으로 적응제어이며 비선형제어로써 매개변수 변화나 잡음에 대한 민감도가 낮아 선형 또는 비선형 플랜트에 대해 견실한 결과를 제공 한다. 또한 제어조정능력의 자유도가 높고 실제적으로 활용하기 쉽고 범용성이 높다.

그림 3은 7상 BLDC 전동기의 Fuzzy 제어기 블록도로 그림에서 $\Delta\omega_r$은 지령 속도와 실제 속도의 오차 값을 나타내고, Δe는 오차 값에 대한 샘플링 구간에서의 변화량을 나타낸다. 제어 블록도에서 지령 속도(ω_r^*)은 7상 BLDC 전동기의 속도 프로파일이 되고 실제 속도(ω_r)은 7상 BLDC 전동기로부터의 속도 값이다. 지령 속도와 실제 전동기 속도의 오차를 구하고, 이 속도 오차의 미분에 해당하는 속도 오차 변화량(Δe)을 계산한다. 두 개의 변수를 Fuzzy 제어기의 입력 값으로 하고 7상 BLDC 전동기 시스템에 맞는 이득 값을 곱하여 제어규칙과 소속 함수를 사용하여 Fuzzy 추론을 수행한다. Fuzzy 제어기의 출력은 전동기의 토오크를 발생시키기 위하여 기준전류(i^*)를 만들며, 비 Fuzzy화된 보통의 집합(Crisp Set)에 출력 이득을 곱하여 전류명령을 발생시킨다.

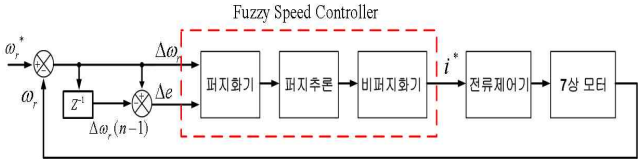

그림 3 Fuzzy 제어기의 블록도

Fig. 3 Fuzzy controller block diagram

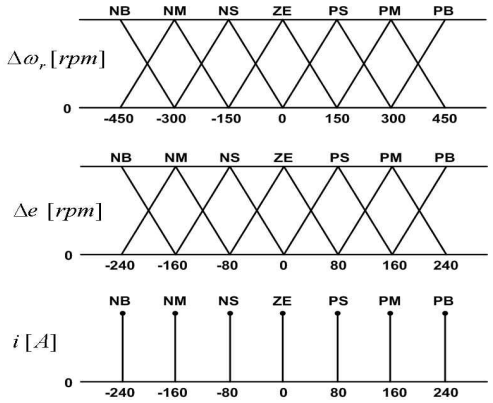

그림 4 7상 BLDC 전동기를 위한 소속 함수

Fig. 4 Membership functions for the 7-phase BLDC motor

본 논문에서는 7상 BLDC 전동기의 속도제어를 위해 사용한 Fuzzy 제어는 속도 오차에 해당하는 양을 Fuzzy 제어기를 거쳐 토오크 지령치 i^*를 생성한다. 또한 속도 제어를 위한 Fuzzy 제어기 각각에서의 오차 변화 분에 대해 제어 규칙 값을 선택한다.

Fuzzy 규칙은 두 가지 입력 조건이 다음과 같다면,

$\Delta\omega_r$ = 80[rpm]

Δe = 30[rpm]

그림 4에서 $\Delta\omega_r$은 ZE, PS에 속하며 Δe은 ZE, PS에 속하며 다음과 같은 4가지의 규칙이 성립이 되며 4가지 규칙은 표 1의 굵은 선으로 표현된 영역의 값을 나타낸다.

If $\Delta\omega_r$ is ZE and Δe is ZE, Then C_i is 0[A].

If $\Delta\omega_r$ is ZE and Δe is PS, Then C_i is 1[A].

If $\Delta\omega_r$ is PS and Δe is ZE, Then C_i is 1[A].

If $\Delta\omega_r$ is PS and Δe is PS, Then C_i is 2[A].

표 1 Fuzzy 규칙 기반의 행렬
Table 1 Fuzzy rule based matrix

Δe \ $\Delta\omega_r$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	-3	-3	-3	-3	-2	-1	0
NM	-3	-3	-3	-2	-1	0	1
NS	-3	-3	-2	-1	0	1	2
ZE	-3	-2	-1	0	1	2	3
PS	-2	-1	0	1	2	3	3
PM	-1	0	1	2	3	3	3
PB	0	1	2	3	3	3	3

NB : Negative Big　　PB : Positive Big
NM : Negative Medium　　PM : Positive Medium
NS : Negative Small　　PS : Positive Smal
ZE : Zero

모델링 된 7상 BLDC 전동기는 Fuzzy 제어기를 이용하여 속도를 제어하며 회전자 속도와 각 상의 상전류를 센싱 받아 Fuzzy 제어기의 실제 값으로 입력된다.

2.2 히스테리시스 전류제어기[5,6]

히스테리시스 전류제어기의 기본 동작원리는 기준전류와 실제 전류의 차이에 따른 오차 값에 따라 인버터의 스위칭 상태가 결정된다. 기준전류의 일정한 밴드 값(보통 기준전류의 10% 정도로 산정함)을 갖는 히스테리시스 전류제어기는 실제 전류 값이 기준전류보다 커져 상단 히스테리시스 밴드 값보다 커지면 실제전류를 감소시키기 위해 스위치가 턴-오프한다.

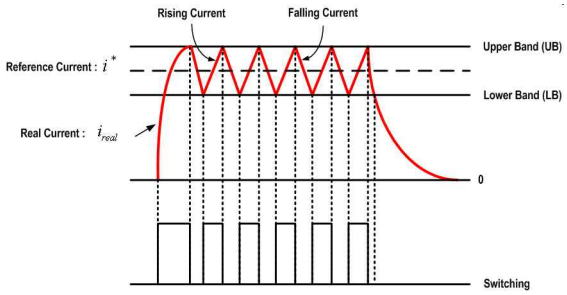

그림 5 히스테리시스 전류제어기의 동작(I_{real} 〉0)
Fig. 5 Operation of hysteresis current control

반대로 실제 전류가 기준전류보다 작아 하단 히스테리시스 밴드 값보다 작아지면 실제전류를 증가시키기 위해 스위치를 턴-온한다.

그림 5는 히스테리시스 전류제어기의 동작으로 스위치 온-오프 동작은 다음과 같이 정의 된다.

1. $I_o > 0$인 경우
   (1) $I_o > Upper\ Band\,(UB)$: 스위치 턴-오프, 상보적인 스위치의 환류다이오드 통전
   (2) $I_o < Lower\ Band\,(LB)$: 스위치 턴-온, 해당 스위치 통전
2. $I_o < 0$인 경우
   (1) $I_o > Upper\ Band\,(UB)$: 스위치 턴-온, 해당 스위치통전
   (2) $I_o < Lower\ Band\,(LB)$: 스위치 턴-오프, 상보적인 스위치의 환류다이오드 통전

3. 실험결과

7상 BLDC 전동기 구동시스템의 속도제어를 위해 4개의 퍼지 규칙으로 이루어진 Fuzzy 제어기를 구성하여, 기존의 PI 제어기를 사용한 속도제어 시스템과 비교 분석하였다.

그림 6은 7상 BLDC 전동기 구동시스템 블록도로 구성은 크게 1) DC전압을 얻기 위한 다이오드 정류부와 AC전압 및 전류를 공급하는 인버터부, 2) 제어보드와 인버터를 연결하는 인터페이스부, 3) 제어출력인 전압을 전동기로 인가하기 위한 게이팅 신호 및 연산을 담당하는 제어보드, 4) 제어보드로 알고리즘을 다운로드하고 변수를 모니터링 할 수 있는 컴퓨터와의 통신장치 등으로 구성되어있다. 또한 제안한 7상 BLDC 전동기 구동시스템에 적용된 전동기의 사양은 표 2와 같다.

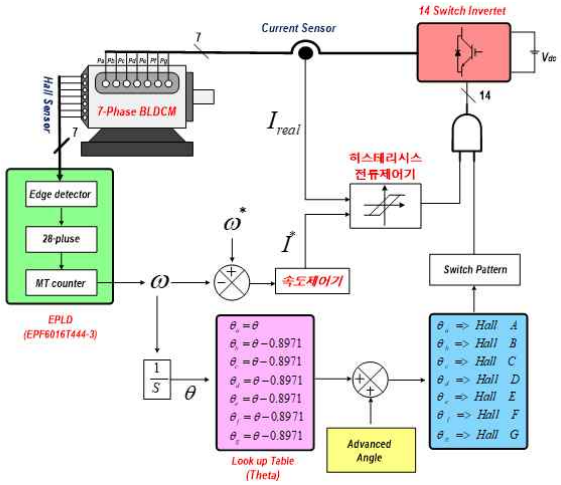

그림 6 7상 BLDC 전동기 구동시스템
Fig. 6 7-phase BLDC motor driving system

표 2 7상 BLDC 전동기 파라미터
Table 2 7-phase BLDC motor specification

V_{DC}	300[V]
$R_{a,b,c,d,e,f,g}$	0.476[Ω]
K_e	0.076373[V/rad/sec]
ω_r	25,000[rpm]
$L_{a,b,c,d,e,f,g}$	2.47[mH]
J	0.0033407[$kg \cdot cm^2$]

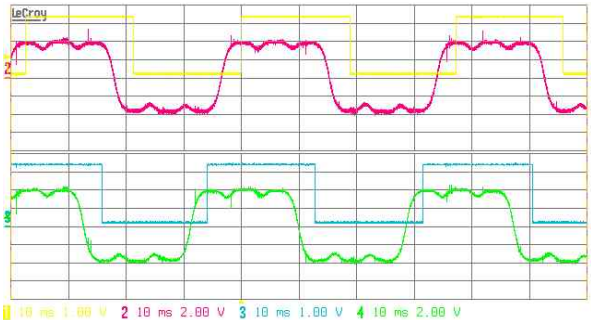

그림 7 A, B상 역기전력 및 Hall sensor 신호
Fig. 7 Back-EMF and Hall sensor signal of A, B phase

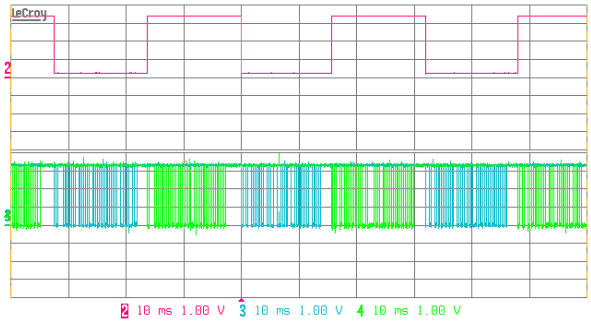

그림 8 A상의 홀센서 신호와 PWM 신호
Fig 8 Hall sensor and PWM signal of A phase

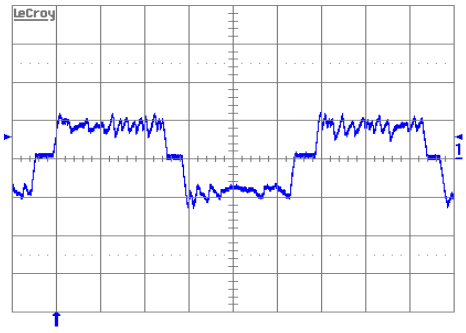

그림 9 PI 제어기의 A상 전류파형 (2msec/2A/div.)
Fig 9 Current waveform of A phase by the PI controller

본 논문의 실험에 사용된 7상 BLDC 전동기 A, B상의 역기전력 신호 및 Hall sensor 신호의 측정 결과를 그림 7에서 보여주고 있다. 역기전력 신호가 평탄하지 않고 요철현상이 나타난 것은 전동기의 영구자석을 착자 시에 착자 요크를 사용하지 않고 동심 솔레노이드를 사용하여서 자석이 균일하게 착자 되지 않았기 때문이다.

그림 8은 A상의 홀센서 신호와 인버터 A상의 상단스위치 와 하단 스위치 PWM 신호로 스위치의 PWM 신호가 A상의 홀센서 신호에 맞게 동작하는 것을 볼 수 있다.

일정 부하 조건에서 속도명령 2,500rpm으로 인가하였을 때 PI

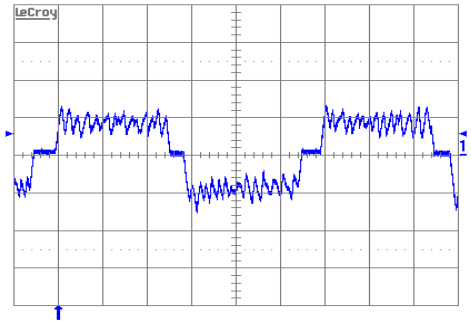

그림 10 Fuzzy 제어기의 A상 전류파형 (2msec/2A/div.)
Fig 10 Current waveform of A phase by the Fuzzy controller

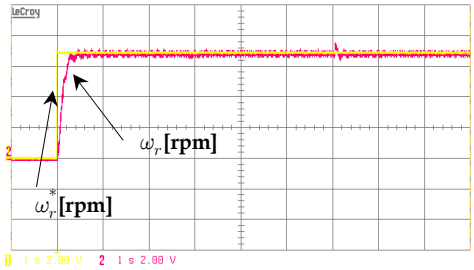

그림 11 PI 제어기 속도응답 특성(ω_r^*=1,500rpm)
Fig 11 Speed response of PI controller

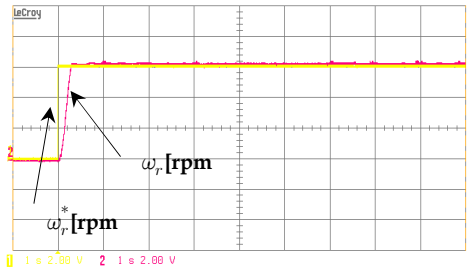

그림 12 Fuzzy 제어기 속도응답 특성(ω_r^*=1,500rpm)
Fig 12 Speed response of Fuzzy controller

제어기와 Fuzzy 제어기의 A상의 전류파형을 그림 9와 10에서 각각 보여주고 있다. 결과적으로 두 전류파형의 실험적 결과는 큰 차이가 없으나 Fuzzy 제어기의 전류명령이 PI 제어기의 전류명령보다 안정적이어서 전류제어가 잘 되는 것을 확인할 수 있다.

3.1 무부하 상태

그림 11과 12는 무부하 조건에서 속도명령을 1500rpm 으로 지령하였을 경우 PI 제어기의 속도응답과 Fuzzy 제어기의 속도응답의 결과로 속도명령 1500rpm에서 PI 제어기와 Fuzzy 제어기의 속도 응답특성은 비슷한 결과를 보여주고 있다.

그림 13, 14는 속도명령을 0 → 2,500 → 5,000→2,500→0rpm

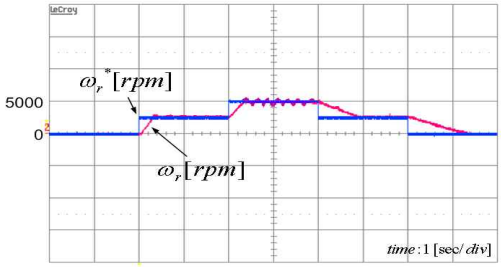

그림 13 PI 제어기 속도응답 특성
(ω_r^*=2,500→5,000→2,500→0rpm)

Fig 13 Speed response of PI controller

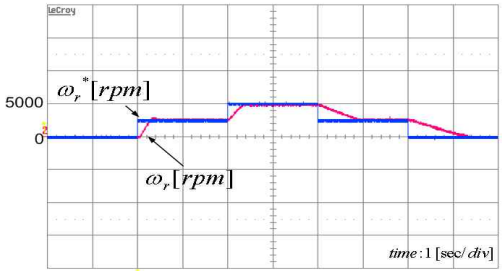

그림 14 Fuzzy 제어기 속도응답 특성
(ω_r^*=2,500→5,000→2,500→0rpm)

Fig 14 Speed response of Fuzzy controller

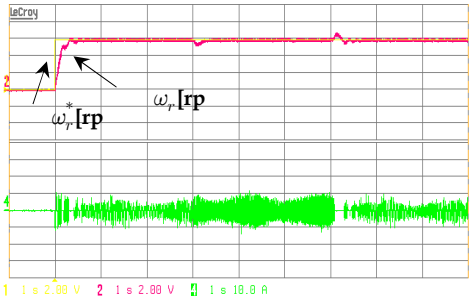

그림 15 외란발생시 PI 제어기 속도응답 특성

Fig 15 PI controller speed response characteristic when disturbance occurs

으로 가변 하였을 경우 PI 제어기와 Fuzzy 제어기의 속도응답 특성으로 Fuzzy 제어의 경우 속도오차 없이 속도명령을 잘 추종하는 응답특성을 보여주고 있다. 반면에 PI 제어기는 속도 오차량이 존재하면서 정상상태 및 속도명령을 추종하는 부분에서 오버슈트(overshoot)가 발생되는 결과를 보여주고 있다.

3.2 외란 발생상태

7상 BLDC 전동기를 속도명령 1,500rpm 구동 및 정상상태에서 외란(정격부하 인가 및 제거)을 발생시켰을 경우의 속도응답

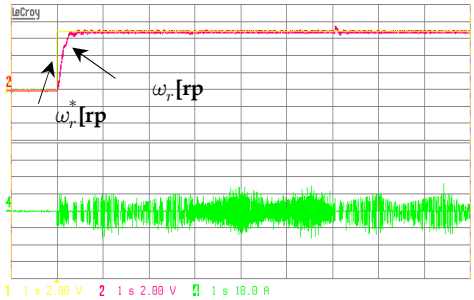

그림 16 외란발생시의 Fuzzy 제어기 속도응답 특성

Fig 16 Fuzzy controller speed response characteristic when disturbance occurs

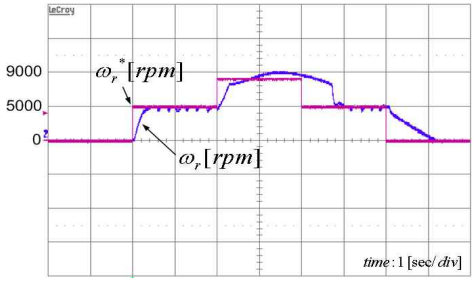

그림 17 스텝 입력시 PI 제어기 속도응답 특성

Fig 17 PI controller speed response characteristic at step input

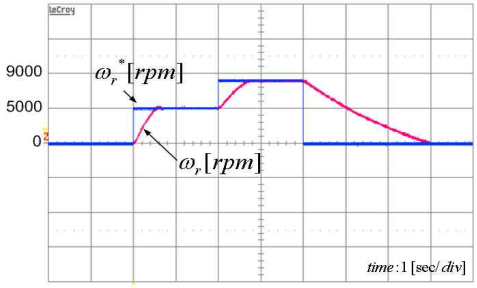

그림 18 스텝 입력시 Fuzzy 제어기 속도응답 특성

Fig 18 Fuzzy controller speed response characteristic at step input

파형을 그림 15, 16에서 각각 보여주고 있다. PI 제어기를 적용하였을 경우 속도명령에 대한 응답특성은 Fuzzy 제어기와 동일하게 응답하는 것을 볼 수 있다. 그러나 PI 제어기 경우 정상상태 이후 외란 발생시 속도 응답에 대한 오버슈트(overshoot)가 본 논문에서 제안한 Fuzzy 제어기보다 다소 크게 발생하는 것을 확인할 수 있다.

속도명령을 연속적인 스텝입력으로 가변 하였을 경우 각 제어기의 속도응답 특성을 그림 17과 18에서 보여주고 있다. 그림 17은 PI 제어기를 적용 및 속도명령을 0→5,000→9,000→5,000→0rpm으로 가변 하였을 경우의 속도응답으로 5,000rpm에서 실제

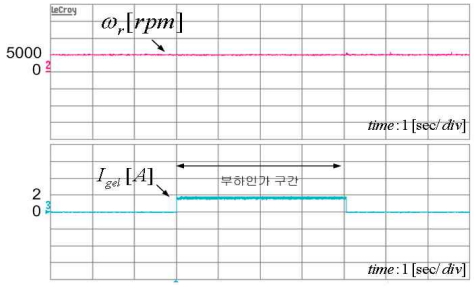

그림 19 Fuzzy 제어기의 속도 응답 특성(5,000rpm 1.8A)
Fig 19 Speed response of Fuzzy controller

속도의 맥동이 발생하며 9,000rpm에서는 속도명령을 추종하지 못하는 결과를 보여주고 있다. 반면에 그림 18은 Fuzzy 제어기를 적용 및 속도명령을 0→5,000→9,000→0rpm으로 스텝입력을 주었을 경우의 속도응답특성을 보여주고 있다. Fuzzy 제어기를 적용하였을 경우 각 단계별로 속도명령을 잘 추종하는 결과를 확인할 수 있으며 PI 제어기의 결과와 비교해보면 상대적으로 작은 오버슈트가 발생이 되나 속도명령 9,000→0rpm으로 가변구간에서는 오버슈트(overshoot) 발생이 없이 속도명령을 잘 추종하는 결과를 보여주고 있다.

그림 19는 7상 BLDC 전동기가 속도명령 5,000rpm으로 회전하고 있는 상태에서 부하로 사용된 DC 직류발전기에 부하전류를 흘렸을 경우 Fuzzy 제어기의 속도응답 특성으로 부하 인가 구간에서 속도명령을 잘 추종한다는 결과를 보여주고 있다. I_{gel}은 본 논문에서 부하로 사용된 DC 직류 발전기의 전류 파형이다.

5. 결 론

본 논문에서는 높은 효율과 출력특성을 가지는 7상 BLDC 전동기 구동시스템의 속도제어를 위해 Fuzzy 제어기를 제안 및 설계하였으며, 제어기의 성능비교 관점에서 PI 제어기와 비교 분석하였다.

본 논문의 실험결과에서 보여주듯이 7상 BLDC 전동기 구동시스템에 무부하 상태 및 외란발생 상태에서 PI제어기를 적용하였을 때보다 Fuzzy 제어기를 적용했을 경우 속도명령에 대한 추종 및 부하변동에 대한 응답성이 우수함을 알 수 있다.

감사의 글

이 연구는 2017년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.

References

[1] M.G. Simoes and P. Vieira, “A High-Torque Low -Speed Multiphase Brushless Machine-A Perspective Application for Electric Vehicles,” IEEE Trans. on Industry Electronics, vol. 49, no 5, pp. 1154-1164, 2002.

[2] M. Godoy Simões and P Vieira Jr.,"A Five-Phase Brushless DC-Machine Direct Drive System," European Power Electronics and Drives, vol. 14, no. 5, pp.15-24, 2004.

[3] T. Y. Kim, B. K. Lee, and C. Y. Won, “Modeling and Simulation of Multiphase BLDC Motor Drive Systems for Autonomous Underwater Vehicles,” in Proc. IEEE International Electric Machines and Drives Conference, vol. 2, pp. 1366-1371, 2007.

[4] L. Parsa, and H. A. Toliyat, “Five-Phase Permanent -Magnet Motor Drives,” IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 41, no. 1, pp. 30-37, 2005.

[5] T. H. Kim, H. W. Lee and Ehsahi, “Advanced Sensorless Drive Technique for Multiphase BLDC Motor," Industrial Electronics Society, vol. 1, pp. 926-931, 2004.

[6] Fernando Rodriguez and Ali Emadi, “A Novel Digital Control Technique for Brushless DC Motor Drives,” IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 54, no. 5, pp. 2365-2373, 2007.

저 자 소 개

윤 용 호 (Yong-Ho Yoon)

2007년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(박사). 2007년~2011년 삼성탈레스 종합연구소 메카트로닉스그룹 전력전자팀 전문연구원. 현재 광주대학교 전기공학부 교수.