

# Performance Evaluation of FuzzyPID Controller for Speed Control of Brushless DC Motor Drive

BLDC MOTOR 드라이브의 속도제어를 위한 FuzzyPID의 성능 평가

## <FuzzyPID란?>

Fuzzy제어 시스템은 Fuzzy logic기반의 제어시스템이다. – 수학적인 시스템

\*Fuzzy logic: "참의 정도"기반으로 한 컴퓨팅 방식

(현대 컴퓨터에서는 0또는1, 거짓또는참인 부울논리 기반)

**Abstract—** This paper presents a comprehensive evaluation of FuzzyPID controller by providing an in-depth comparison with PID controller for speed control of permanent magnet brushless DC motor.

BLDC Motor 영구 자석의 속도 제어를 위해 PID 제어기와 상세한 비교를 통해 의해 FuzzyPID 제어기의 종합적인 평가를 나타낸다.

Motor speed responses are studied for a variety of operating conditions including response to small and large step speed reference change, and response to step load change.

Motor 속도 응답은 작고 큰 스텝 속도 참조 변경에 대한 응답, 스텝 로드 부하 변경에 대한 응답을 포함한 다양한 작동조건을 통해 연구된다.

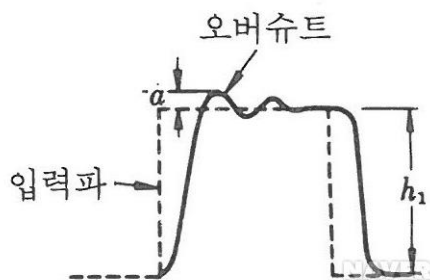
Simulation results are further validated with the experiment.

시뮬레이션 결과는 더 나아가 실험에 검증되었다.

The experimental results proved that FuzzyPID controller provides a superior speed response compared to PID controller with faster rise time, faster settling time and minimize the amount of overshoot.

실험적인 결과에 따르면 FuzzyPID 제어기는 PID 제어기와 비교해서 상승 시간이 더 빠르고 설정시간이 빠르며 오버슈트를 최소화 할 수 있는 우수한 속도 응답 제공한다.

\*overshoot란?



This is achievable since the FuzzyPID controller is able to continuously tune the gain parameter online, resulting in more robust motor operation for both transient and steady-state condition.

FuzzyPID 제어기가 gain파라메타를 온라인으로 지속적으로 조정할 수 있기 때문에 정상적인 상태와 과도상태에서 견고한 모터작동이 가능하다.

Keywords—PID; Fuzzy; Hybrid Controller; BLDC Motor; Speed Control;

키워드-PID : Fuzzy, Hybrid Controller(혼합형 제어기); BLDC Motor ; Speed Control

## 1. INTRODUCTION

The development of motor speed controller has always been increasing in terms of number as well as the level of complexity.

Motor 제어기의 개발은 복잡성의 수준 뿐 아니라 숫자 관점에서도 항상 증가하고 있다.

The technological advancement in the capability of modern microcontrollers, power electronics converters and state of the art of motor design, raises the demand for more comprehensive solutions for better control and efficiency.

현대적인 마이크로컨트롤러, 전력 전자 변환기와 모터 디자인 기술의 상태의 기술발전은 더 나은 제어와 효율성을 위해 종합적인 해결을 요구를 제기한다.

Electric motors have broad applications in many areas such as manufacturing industry, transportations, medical and household electrical appliances, powering a variety of equipment including wind blowers, water pump, compressors, machine tools, etc.

전기 모터는 제조산업, 운송, 의료와 가정용 전기 제품, 풍력송풍기, 물펌프, 압축기, 공작 기계 등 다양한 장비에 전력을 공급하는 등 다양한 분야에서 폭넓게 응용된다.

Among the electric motors, the permanent magnet BLDC motors are very popular because of their high efficiency, high power factor, silent operation,

compact form, reliability and low maintenance which make them widely used in many applications [1].

전기 모터중에서, 영구 자석 BLDC모터는 고효율, 고전력 요소, 조용한 작동, 소형형태, 신뢰성 과 낮은 유지보수로 인해 많은 응용분야에서 널리 사용된다.

Apart from that, a standard approach for speed control in industrial drives is to use a Proportional, Integral and Derivative (PID) controller.

그 외에도 산업용 드라이브의 속도제어를 위한 표준 접근은 PID제어기를 사용하는것이다.

Nevertheless, PID controller has some weakness in controlling the nonlinear system [2].

그럼에도 불구하고, PID제어기는 비선형 시스템 제어에서 약점을 가지고 있다.

Hence, recent developments in technology have brought into focus a possibility of shifting from the conventional PID controller to the artificial intelligent controller such as Fuzzy Logic Control (FLC) [3].

따라서 최근 기술 개발로 기존의 PID제어기에서 FLC같은 인공지능제어기로 전환될 가능성이 제기되었다.

However, PID controller remains a valid approach to implementing a feedback control system.

그러나 PID제어기는 피드백 제어 시스템을 구현하는데 유효한 접근법으로 남았다.

When the nonlinearities of the system are the major issues in motor control, there is an option to improve the PID control strategy rather than to replace with complicated dynamic models which require sophisticated control strategies.

시스템의 비선형성이 모터제어의 주요 쟁점이라면 정교한 제어 전략을 필요로 하는 복잡한 동적 모델로 대체하기 보다는 PID 제어 전략을 개선할 수 있는 옵션이 있다.

Thus, FuzzyPID controller can be one of the alternative solutions for improving the speed control of BLDC motor.

FuzzyPID 제어기는 BLDC Motor의 속도 제어를 개선하기 위한 대안 솔루션 중 하나일 수있다.

From the literature review, we notice that the existing works on FuzzyPID controller for speed control of PM BLDC motor as reported in [6], [9], [10] and [11] are only based on simulation study.

문헌 고찰에서 [6],[9],[10],[11]에서 보고 된 PMBLDC 모터의 속도 제어를 위한 Fuzzy PID 제어기 의 기존 연구는 단지 시뮬레이션 연구를 기반으로 한 것임을 알 수 있다.

Thus, in order to have a comprehensive analysis, in this research, we also conducted the experiments under various motor operating conditions to further support and validate the simulation results.

따라서 본 연구에서는 종합 분석을 위해 다양한 모터 운전 조건에서 실험을 수행 하여 시뮬레이션 결과 더욱 뒷받침 하고 유효성을 검증했다.

## 2. MATHEMATICAL MODEL OF BLDC

PM BLDC motor can be modeled in the 3-phase abc variables which consist of two parts.

PM BLDC 모터는 두 부분으로 구성된 3 상 abc 변수로 모델링 할 수 있습니다.

The first is an electrical part which estimates the electromagnetic torque and current of the motor.

첫 번째는 모터의 전자기의 토크와 전류를 추정하는 전기 부품입니다.

The other is a mechanical part which governs the motor's rotating motion.

다른 하나는 모터의 회전 동작을 제어하는 기계 부품입니다.

Refer to Fig. 1, the electrical part of PM BLDC motor can be represented in matrix form as follow [4]:

그림. 1, PM BLDC 모터의 전기 부분은 다음과 같이 매트릭스 형태로 표현 될 수 있다 [4]:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_b & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

where  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  and  $V_{cn}$  are the phase winding voltages,  $R_s$  is the resistance per phase of the stator winding, while  $i_a$ ,  $i_b$  and  $i_c$  are the phase currents.

$V_n$ ,  $V_{bn}$  및  $V_{cn}$  은 위상 권선 전압이고,  $R_s$  는 고정자 권선의 위상 당 저항이며,  $i_a$ ,  $i_b$  및  $i_c$  은 위상 전류이다.

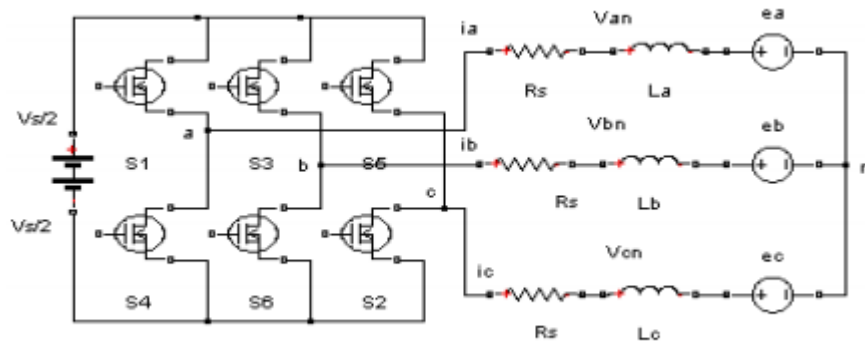


Fig. 1. Equivalent circuit of BLDC Motor



If there is no change in rotor reluctance with angle because of a non-salient rotor, and assuming three symmetric phases, the following are obtained:

비 돌출 회전자 때문에 각도에 따른 회전자 자기저항에 변화가 없으면, 세 개의 대칭 위상을 가정하면 다음이 얻어집니다.

$$L_a = L_b = L_c = L \quad (2)$$

$$L_{ab} = L_{ba} = L_{ac} = L_{ca} = L_{bc} = L_{cb} = M \quad (3)$$

Substituting equations (2) and (3) into equation (1) gives the PM BLDC model as:

방정식 (2)와(3)을 방정식(1)에 대입하면 PM 모델은 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

From equation (4), phase voltage for phase A,  $V_{an}$  can be derived as:

방정식(4)로부터, 위상 A,  $V_{an}$ 을 위한 위상 전압은 다음과 같이 유도 될 수 있다.

$$V_{an} = R_s i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{di_b}{dt} + M \frac{di_c}{dt} + e_a \quad (5)$$

$$V_{an} = R_s i_a + L \frac{di_a}{dt} + M \frac{d}{dt} (i_b + i_c) + e_a \quad (6)$$

The stator phase currents are constrained to be balanced and  $i_a + i_b + i_c = 0$ .

고정자 위상 전류는 균형과  $i_a + i_b + i_c = 0$  로 제한된다.

So, equation (6) can be expressed as:

그래서,방정식(6)은 다음과 같이 나타낼수있다.

$$V_{an} = R_s i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (7)$$

Similarly for phase b and c:

위상 b 와 c 도 유사하게

$$V_{bn} = R_s i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (8)$$

$$V_{cn} = R_s i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (9)$$

Next, add equations (7), (8) and (9), yields:

다음, 방정식(7),(8)과 (9)를 더하면 다음과 같다.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = R_s (i_a + i_b + i_c) + (L - M) \frac{d}{dt} (i_a + i_b + i_c) + e_a + e_b + e_c \quad (10)$$

As shown in Fig. 1, neutral voltage is referred to the zero reference potential at midpoint of dc-link.

Fig.인 경우 , 중성점 전압은 DC 링크의 중간 지점에서 제로 기준 전위를 기준으로 한다.

So the phase voltages can be expressed as:

따라서 위상 전압은 다음과 같이 표현 된다.

$$V_{an} = V_{a0} - V_{n0} \quad (11)$$

$$V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \quad (12)$$

$$V_{cn} = V_{c0} - V_{n0} \quad (13)$$

where  $V(a0)$  ,  $V(b0)$  ,  $V(c0)$  and  $V(n0)$  are the output phase voltages from the inverter and the potential of the star point referred to the neutral, respectively.

여기서  $V(a0)$  ,  $V(b0)$  ,  $V(c0)$  와  $V(n0)$ 은 인버터로부터의 출력 위상 전압이고, 스타포인트의 전위는 각각 중립이라고 불린다.

In order to avoid unbalance in the applied voltages, a balance three-phase winding with starconnected is considered.

인가(응용) 전압의 불균형을 피하기 위해 성형결선(다상교류에서의 트랜스코일,임티던스 따위의 결선 방식)이 있는 평형 3 상 권선이 고려된다.

This leads to estimate the value of  $V_{n0}$  by substituting equations (11), (12) and (13) into (10), and considering the equivalent of phase currents, equation (10) becomes:

이는 식(11),(12)와(13)을 식(10)에 대입하여  $V(n0)$ 의 값을 추정하고 상전류의 등가성을 고려하면 식(10)은 다음과 같이 된다.

$$V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} - 3V_{n0} = (e_a + e_b + e_c) \quad (14)$$

Thus, the neutral voltage is equal to:

따라서, 중립 전압은 다음과 같다.

$$V_{n0} = \frac{V_{a0} + V_{b0} + V_{c0} - (e_a + e_b + e_c)}{3} \quad (15)$$

The developed electromagnetic torque can be expressed as:

개발된 전자기의 토크는 다음과 같이 나타낼수있다.

$$T_e = \frac{(e_{an} i_a + e_{bn} i_b + e_{cn} i_c)}{\omega_r} \quad (16)$$

The mechanical part of BLDC motor can be modeled as:

BLDC 모터의 기계부품은 다음과 같이 모델링 할 수 있다.

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r = (T_e - T_l) \quad (17)$$

where J is moment of inertia in kg-m<sup>2</sup> , B is frictional coefficient in N-ms/rad, T(e) is the electromagnetic torque, T(l) is load torque in Nm.

여기서 J 는 kg-m<sup>2</sup> 단위의 관성 모멘트, B 는 N-ms/rad 의 마찰계수, T(e)는 전자기의 토크, T(l)는 Nm 단위의 부하 토크다.

The derivative of electrical rotor position  $\theta(r)$  , is expressed as:

전기 회전자위치  $\theta(r)$ 의 의 미분은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{P}{2} \omega_r \quad (18)$$

where P is number of pole,  $\omega(r)$  is the rotor speed in mechanical rad/sec and  $\theta$  is the electrical rotor position in electrical radian.

여기서 P 는 극의 수,  $\omega(r)$ 는 기계식 rad/sec 의 회전자 속도,  $\theta$ 는 전기 라디안의 전기 회전체다.

### 3. SIMULATION STUDY

The model of speed controller has been realized using the Simulink toolbox of the MATLAB software.

속도 제어기의 모델은 MATLAB 소프트웨어의 Simulink 도구박스를 사용하여 실현되었다.

The main function of speed controller block is to provide a reference speed which in turn is converted to reference current and is fed to reference generator.

속도제어기 블록의 주요 기능은 기준속도를 제공하는 것이며, 이 속도는 기준 전류로 변환되어 기준 발전기로 공급된다.

The output of the speed controller is limited to a proper value in accordance with the motor rating to generate the reference speed.

속도 제어기의 출력은 모터 속도에 따라 적절한 값으로 제한되어 기준속도를 생성한다.

The speed controllers realized in this study are PID controller and FuzzyPID controller, respectively.

본 연구에서 실현된 속도 제어기는 각각 PID 제어기와 FuzzyPID 제어기다.

#### A. PID Controller

The performance specifications of the systems such as rise time, percentage of maximum overshoot, settling time and error steady state can be improved by tuning parameter values  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  for the PID controller, because each component has its own special purpose as shown in Fig. 2. The PID controller can be represented as [5]:

PID 제어기의 파라미터 값  $K_p, K_i$  와  $K_d$  를 조정하면 상승시간, 최대 오버슈트 비율, 정착시간과 오류정상 상태와 같은 시스템의 성능 사양을 향상시킬 수 있다, 왜냐하면 각 구성 요소는 Fig.2 PID 제어기는 [5]와 같이 나타낼수있다.

$$y(t) = \left[ K_p e(t) + K_d \frac{d(e)}{d(t)} + K_i \int_0^t e(t) d(t) \right] \quad (19)$$

where  $y(t)$  is the output of the PID controller,  $K_p$  is the proportional gain,  $K_i$  is the integral gain,  $K_d$  is derivative gain and  $e(t)$  is the instantaneous error signal.

여기서  $y(t)$ 는 PID 제어기의 출력,  $K_p$ 는 비례이득,  $K_i$ 는 적분 이득,  $K_d$ 는 미분 이득,  $e(t)$ 는 즉각적인 에러 신호다.

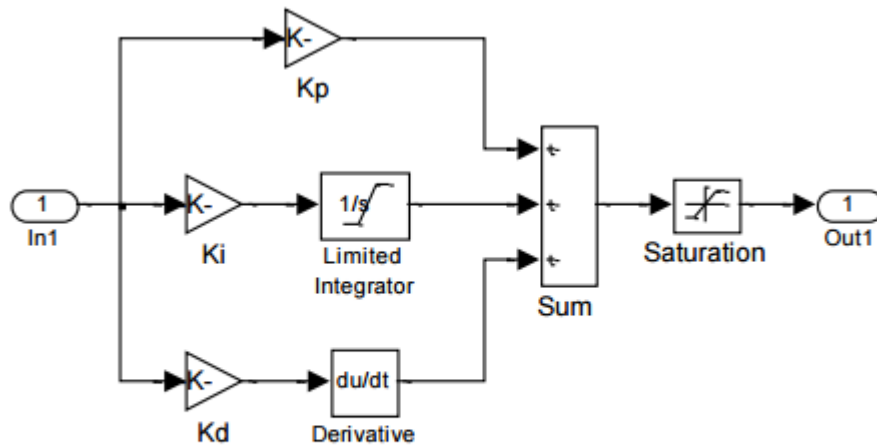


Fig. 2. Block diagram of PID control system

#### B. FuzzyPID Controller

The description of FuzzyPID controller is the three parameters  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  of PID controller which are tuned by using Fuzzy Logic Controller (FLC) [6, 7].

FuzzyPID 컨트롤러에 대한 설명은 FuzzyLogic 제어기(FLC)[6,7]를 사용하여 튜닝 된 PID 컨트롤러의 세가지 파라미터  $K_p, K_i$ 와  $K_d$ 다.

The coefficients of the conventional PID controller are not often properly tuned for the nonlinear plant with unpredictable parameter variations.

평범한 PID 제어기의 계수는 예측할 수 없는 파라미터 변동을 갖는 비선형 설비에 대해 종종 적절하게 조정되지 않는다.

Hence, it is necessary to automatically tune the PID parameters.

따라서 PID 파라미터를 자동으로 튜닝할 필요가 있다.

The structure of the FuzzyPID controller is shown in Fig. 3.

FuzzyPID 제어기의 구조는 fig3. 에서 보여준다.

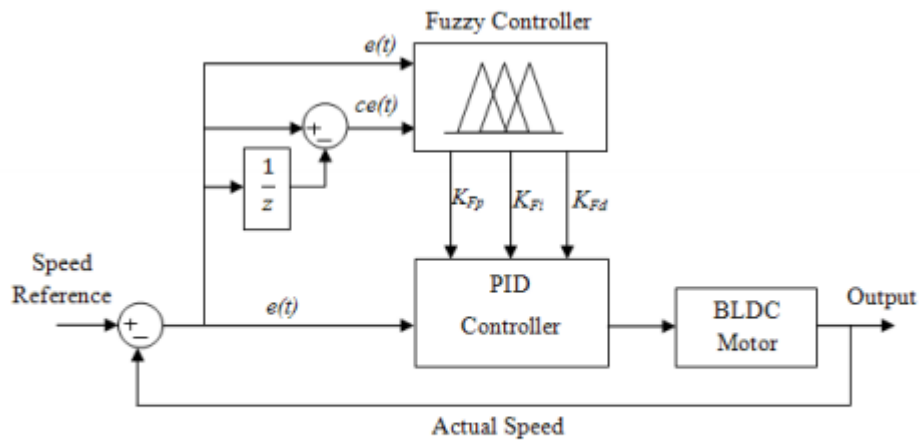


Fig. 3. Structure of FuzzyPID controller

The PID parameters are tuned by using fuzzy inference, which provide a nonlinear mapping from the error and derivation of error to PID parameters.

PID 파라미터는 fuzzy 추론을 사용하여 조정된다. 이 fuzzy 추론은 오류와 PID 파라미터에 대한 미분으로부터 비선형 매핑을 제공한다.

With regarding to the fuzzy structure in Fig. 3, there are two inputs to the fuzzy inference block which are error  $e(t)$  and change of error  $ce(t)$  [8], while the three outputs are  $K(Fp)$ ,  $K(Fi)$  and  $K(Fd)$ .

Fig.3 fuzzy 구조에 관한 것이다. 3 개의 출력은  $K(Fp)$ ,  $K(Fi)$  와  $K(Fd)$ 인 반면 오류  $e(t)$  와 오류  $ce(t)$  [8] 변경인 fuzzy 추론 블록에 대한 두개의 입력이 있다.

Speed error is calculated after comparing the reference speed,  $\omega_{ref}$  with the actual speed,  $\omega_{act}$ .

속도 오차는 기준속도  $\omega_{ref}$  와 실제 속도  $\omega_{act}$  를 비교한 후에 계산된다.

Based on equation (20), the variable values of  $K_p$ ,  $K_i$  and  $K_d$  are added up with  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  and  $K_{Fd}$  respectively which had been calculated from the fuzzy block and these values  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  and  $K_{Fd}$  vary dynamically and continuously online during the motor operating conditions

식(20)에 기초하여,  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  와  $K_{Fd}$ 의 변수 값은 각각 fuzzy 블록으로부터 계산된  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  와  $K_{Fd}$ 로 합산되고, 이러한 값  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  와  $K_{Fd}$ 는 모터 작동 조건에서 동적으로 온라인에서 연속적으로 변한다.

So it can tune the conventional PID parameters online in order to adapt the dynamic change in the motor drive system.

따라서 모터 구동 시스템의 동적 변화를 적응시키기 위해 기존의 PID 파라미터를 적응시키기 위해 기존의 PID 파라미터를 온라인으로 조정 할 수 있다.

FuzzyPID can be expressed with the following equation:

FuzzyPID 는 다음 방정식으로 표현할 수있다.

$$y(t) = \left\{ \begin{aligned} &[K_p + K_{Fp}]e(t) + [K_d + K_{Fd}] \frac{d(e)}{d(t)} + \\ &[K_i + K_{Fi}] \int_0^t e(t)dt \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Mamdani model is applied as structure of fuzzy inference with some modification to obtain the best values for  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  and  $K_{Fd}$

Manmdani 모델은  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  와  $K_{Fd}$ 에 대한 최상의 값을 얻기 위해 일부 수정을 통해 fuzzy 추론의 구조로 적용된다.



By having five and three membership functions for speed error and change of speed error respectively, the total number of rules is equal to 15.

속도 오차와 속도 오차의 각각에 대해 5 개와 3 개 멤버쉽 기능을 가짐으로써 총 규칙 수는 15 개다.

The fuzzy rule base is shown from Tables 1-3.

fuzzy 룰베이스는 표 1~3 에 나와있다.

The membership function consists of five sets which are NB: Negative Big, NS: Negative Small, ZE: Zero, PS: Positive Small and PB: Positive Big.

멤버쉽 함수는 NB: Negative Big, NS: Negative Small, ZE: Zero, PS: Positive Small and PB: Positive Big 의 5 개 세트로 구성된다.

Table 1  
The Fuzzy Rule-Base for  $K_{Fp}$

		ce		
		NB	ZE	PB
e	NB	NM	PM	NB
	NS	NS	PS	NM
	ZE	PS	ZE	NS
	PS	PM	NS	NM
	PB	PB	NM	NB

Table 2  
The Fuzzy Rule-Base for  $K_{Fi}$

		ce		
		NB	ZE	PB
e	NB	PS	PM	PS
	NS	PS	PS	PS
	ZE	ZE	PS	PS
	PS	NS	PS	PM
	PB	NM	NS	PM

Table 3  
The Fuzzy Rule-Base for  $K_{Fd}$

		ce		
		NB	ZE	PB
e	NB	NS	NM	NM
	NS	NS	NM	NS
	ZE	NS	ZE	ZE
	PS	NS	ZE	PS
	PB	NM	NS	PM

Through many simulation runs, FLC were fine-tuned manually based on the rule designed, so that the best possible response is obtained.

많은 시뮬레이션 실행을 통해 FLC 는 설계된 규칙을 기반으로 수동으로 미세 조정되어 최고의 가능한 응답이 얻어졌습니다.

Fig. 4 and Fig. 5 illustrate the membership functions of the optimized FLC tuned PID variables, which are of unequal widths and asymmetrically positioned peaks.

Fig. 4와 Fig.5 는 최적화되지 않는 FLC튜닝 PID변수의 멤버쉽 함수를 보여주고 그 변수는 비대칭인 폭과 비대칭으로 배치된 피크다.

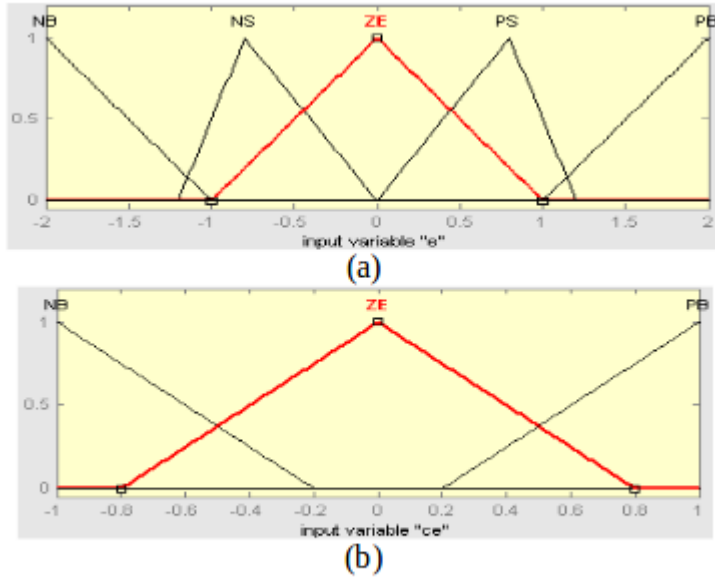


Fig. 4. Membership function of (a) error  $e(t)$ , (b) change of error  $ce(t)$

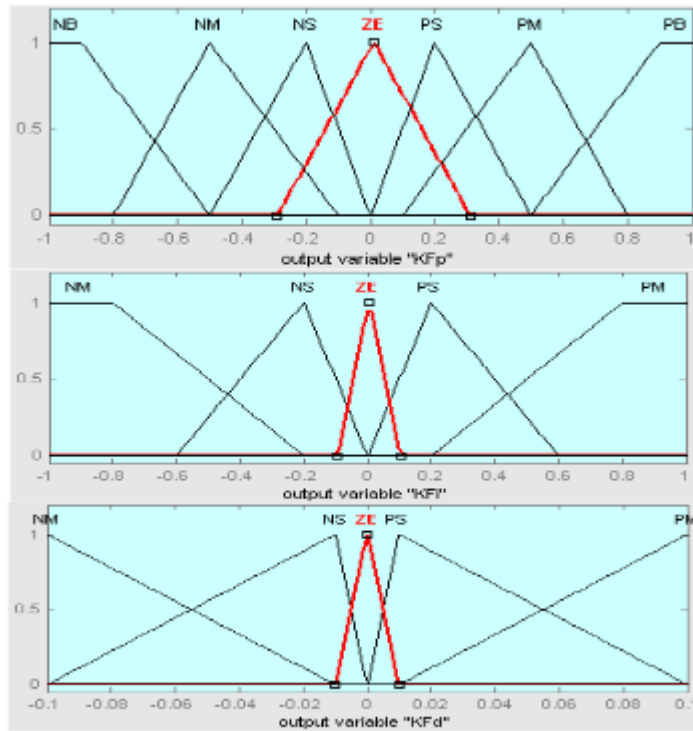


Fig. 5. Membership function of  $K_{Fp}$ ,  $K_{Fi}$  and  $K_{Fd}$

The simulation parameters of BLDC motor are summarized in Table 4

BLDC모터의 시뮬레이션 파라미터는 표4에 요약되어있다.

Table 4  
Simulation parameter of BLDC motor

Parameters	Value
Pole-pair number, $p$	5
Supply voltage, $V_{dc}$	48 V
Armature resistance, $R_s$	4.03 ohm
Self inductance, $L$	4.6 mH
Mutual inductance, $M$	-0.35 mH
Motor inertia, $J$	0.00033 kgm <sup>2</sup>
Emf constant, $K$	0.76 (Vs/rads <sup>-1</sup> )

The PID controller is designed first, while the FuzzyPID controller is designed next.

PID 제어기가 먼저 설계되고 FuzzyPID 제어기는 다음에 설계된다.

The PID controller was tuned by using Ziegler-Nicholas tuning method to yield an optimum speed response with minimum settling time and overshoot.

PID 제어기는 Ziegler-Nicholas 튜닝 방법을 사용하여 최소 안정 시간과 오버슈트로 최적의 속도 응답을 얻도록 조정되었다.

After some manual fine tuning through simulation, the final controller parameters for PID are  $K_p=0.1$ ,  $K_i=4$  and  $K_d=0.0004$ .

시뮬레이션을 통한 수동 미세조정 후 PID의 최종 컨트롤러 파라메타는  $K_p=0.1$ ,  $K_i=4$  와  $K_d=0.0004$ 다.

For FuzzyPID controller, the same values of PID parameters are used and will be integrated with Fuzzy Logic Controller.

FuzzyPID 제어기의 경우 동일한 PID 파라메타 값이 사용되며 Fuzzy Logic Controller 와 통합된다.

The simulation study is performed in two cases which include the speed response to the step change of load at constant speed and the speed response to step change of reference speed at constant load.

시뮬레이션 연구는 일정한 속도에서 하중의 스텝 변화에 대한 속도 응답과 일정한 하중에서의 기준 속도의 스텝변화에 대한 속도 응답을 포함하는 두 가지 경우에서 수행된다.

#### 4. SIMULATION RESULTS AND ANALYSIS

시뮬레이션 결과 및 분석

Case 1: Step change of load from 2Nm to 3Nm at constant reference speed 600rpm

사례1: 일정한 기준 속도 600rpm 에서 2Nm 에서 3Nm 으로 하중을 단계적으로 변경

Initially the motor was loaded with 2Nm load.

처음에 모터는 2Nm 으로 부하로 로드 되었다.

Then the motor was run at speed reference 600rpm.

그런 다음 모터를 소독 600rpm 으로 작동시켰다.

At  $t=0.15s$ , the load was increased to 3Nm. Fig. 6 shows the simulation results of speed response for PID controller and FuzzyPID controller.

$t=0.15s$  에서 하중은 3Nm 으로 증가되었고 그림 6은 PID 제어기와 FuzzyPID 제어기의 속도 응답을 시뮬레이션 한 결과다.

From the simulation results, it is observed that the FuzzyPID controller has the faster rise time and settling time during start-up compared to the PID controller.

시뮬레이션 결과로부터 FuzzyPID 제어기는 PID 제어기에 비해 시작하는 동안 상승시간과 안정시간이 빨라진다는 것을 알 수 있다.

At  $t = 0.15s$ , the load was increased from 2Nm to 3Nm which caused the speed to undershoot momentarily.

$t=0.15s$  에서 부하가 2Nm 에서 3Nm 으로 증가하여 속도가 순간적으로 언더 슈트하는 원인이 되었다.

This happened because during the transition period when the motor is loaded with higher load, the previous amount of current is not enough to support the increasing load. 이것은 전이 기간동안 모터가 높은 부하가 걸리면 이전의 전류량으로는 증가하는 부하를 지원하기에 부족했기 때문에 발생했다.

So the motor speed undershoot for a moment and then, it managed to get back to the targeted speed by increasing the amount of phase current.

그래서 모터속도는 잠깐동안 언더슈트하고 위상 전류의 양을 증가시켜 목표속도로 되돌아간다.

PID controller has slightly larger amount of undershoot compared to FuzzyPID controller, however, both controllers managed to track the reference speed with smaller settling time. PID 제어기는 FuzzyPID 제어기에 비해 약간 더 큰 언더슈트를 가지지만 두제어기는 모두 작은 안정시간으로 기준속도를 추적 할 수 있다.

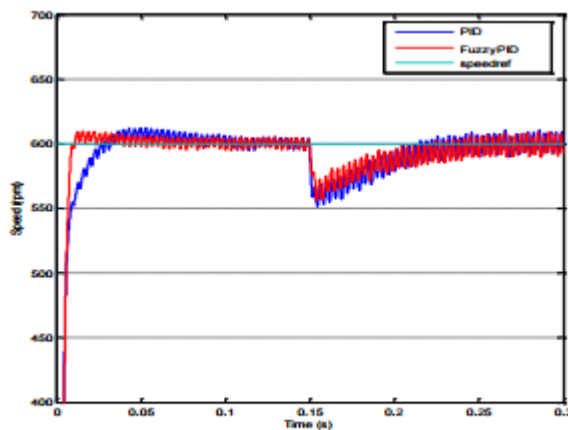


Fig. 6. Comparison of speed response between PID controller and FuzzyPID controller for Case 1

Case 2: Step change of speed reference from 400rpm to 600rpm at constant load 3Nm

사례2 : 일정한 하중 3Nm 에서 400rpm 에서 600rpm 으로 속도기준의 단계 변경

The simulation analysis was continued to observe the performance of speed response against a step change of speed reference at constant load.

시뮬레이션 분석은 일정한 부하에서 속도 기준의 스텝 변화에 대한 속도 응답의 성능을 관찰하기 위해 계속되었다.

During start-up, the speed reference was set at 400rpm with load 3Nm.

시동중, 속도 기준은 부하 3Nm 로 400rpm 으로 설정되었다.

At  $t=0.15s$ , the speed reference was increased to 600rpm.

$t=0.15s$  에서 속도기준은 600rpm 으로 증가되었다.

Fig. 7 shows the simulation results of speed response for PID controller and FuzzyPID

controller respectively

그림7은 PID 제어기와 FuzzyPID 제어기 각각에 대한 속도 응답의 시뮬레이션 결과를 보여준다.

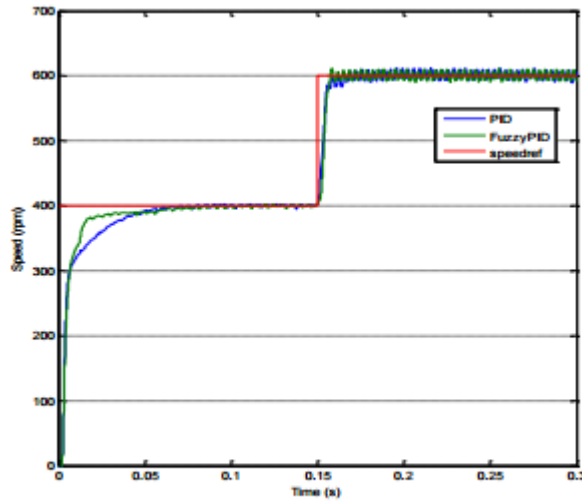


Fig. 7. Comparison of speed response between PID controller and FuzzyPID controller for Case 2

The results illustrated in Fig. 7 shows that both controllers provide approximately the same performance during the step change of speed reference.

그림 7은 두 제어기가 속도 기준의 단계변경 중에 거의 동일한 성능을 제공하는 것을 보여준다.

PID controller manages to adapt the small step changes in speed reference with no overshoot, fast rise time and short settling time during the transient.

PID 제어기는 오버슈트가 발생하지 않고 빠른 상승시간과 짧은 안정시간으로 속도 기준의 작은 스텝 변화를 조정한다.

Similarly, almost the same results were obtained by FuzzyPID controller.

유사하게, 거의 동일한 결과가 FuzzyPID 제어기에 의해 얻어졌다.

However, there is still a gap which FuzzyPID manages to fill in to get a slightly better performance since FuzzyPID controller provides faster rise time during the startup from standstill as clearly shown in Fig. 7.

그러나 여전히 FuzzyPID 제어기와 차이가 있고 FuzzyPID 제어기가 시동중 정지상태에서보다 빠른 상승시간을 그림8에서 명확히 보여주기 때문에 약간 더 나은 성능을 얻기위해 관리한다고 그림 7에서 자세히 보여준다.

## 5. EXPERIMENTAL SETUP

### 실험 설정

The research is continued with the experiment in the laboratory with hardware implementation.

이 연구는 하드웨어 구현으로 실험실에서 실험을 계속한다.

Fig. 8(a) shows the block diagram of the experiment which consists of a controller board, three-phase BLDC motor, three-phase PM generator, three-phase Y-connected resistive load and a PC.

그림8(a)는 제어기 보드, 3상 BLDC 모터, 3상 PM 발전기, 3상 Y 연결된 저항 부하와 PC 로 구성된 실험의 블록 다이어그램이다.

The experiment was carried out using PICDEM MC LV Development Board manufactured by Microchip Technology.

실험은 마이크로칩 테크놀로지가 제조한 PICDEM MC LV 개발보드를 사용하여 수행되었다.

The the source codes for PID control and FuzzyPID control algorithm were programmed and embbed into the dSPIC30F2010 microcontroller.

PID 제어 와 FuzzyPID 제어 알고리즘의 소스코드는 프로그래밍 되어 Dspic30f2010마이크로 컨트롤러에 내장되었다.

Fig. 8(b) shows the experimental setup for evaluating the performance of both speed controllers.

그림8(b)은 두 속도 제어기의 성능을 평가하기 위한 실험구성을 보여준다.

The PM brushless DC motor was coupled to the PM generator.

PM BLDC 모터는 PM 발전기에 연결되었다.

Three-phase Y-connected resistive loads were connected to the output of the generator.

3상 yY 결선 저항 부하는 발전기의 출력에 연결된다.

Three sets of knife switch were used to vary the loads.

하중을 변화시키기 위해 세 세트의 나이프스위치가 사용되었다.

The resistive loads were connected in such a way that the net load at the generator can



be instantaneously changed from initially  $16.5\Omega$  to  $9.3\Omega$ , and finally to  $3.8\Omega$  per phase with different positions of the knife switch.

저항 부하는 발전기에서 순 부하가 처음에는  $16.5\Omega$  에서  $9.3\Omega$ , 으로 순간적으로 변경될 수 있고 마지막으로 나이프스위치 위치에 따라 위상당  $3.8\Omega$  으로 변경될 수 있도록 연결되었다.

The speed response of the motor was displayed in the PC via RS232 cable.

모터의 속도 응답은 RS232 케이블을 통해 PC 에 표시된다.

The input of PID controller is the speed error.

PID 제어기의 입력은 속도 오차다.

The Hall sensors are used to get the feedback of the motor speed.

홀센서는 모터속도의 피드백을 얻는데 사용된다.

The PID controller adjusts the duty cycle of the PWM to get the actual speed close to the reference speed.

PID 제어기는 PWM 의 듀티 사이클을 조정하여 실제속도를 기준속도에 가깝게 만든다.

The PID controller was initially tuned using Ziegler Nichols tuning method.

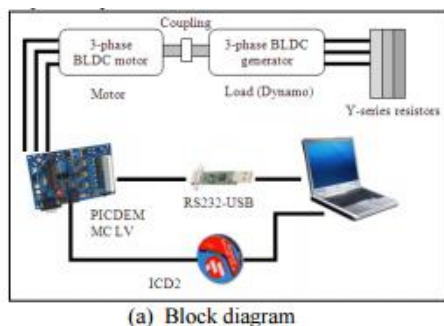
PID 제어기는 Ziegler Nichols 튜닝 방법을 사용하여 초기에 조정했다.

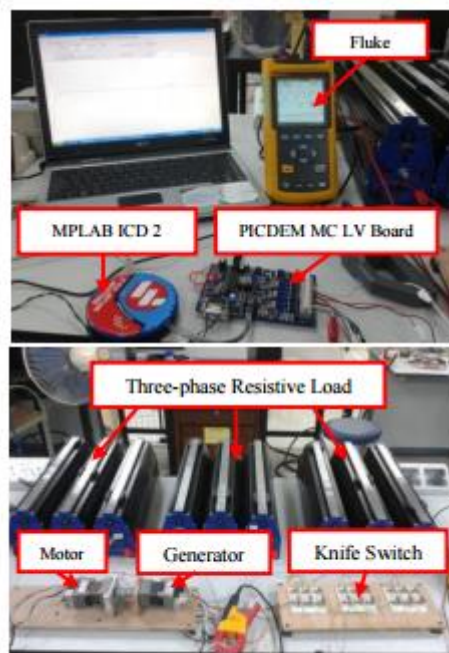
Subsequently, the gains were tuned manually around the calculated to optimize the performance of the motor.

그 결과, 모터의 성능을 최적화하기 위해 계산 된 값을 수동으로 조정했다.

Final parameter values for the PID controller: proportional, integral and derivative gains are 350, 0.5 and 0.045 respectively

PID 제어기의 최종 파라미터 값 : 비례,적분, 미분 이득은 각각 350,0.5,0.045다.





(b) Experiment Setup  
Fig. 8. Experiment and Measurements

To implement FuzzyPID algorithm in the microcontroller, the same source code of PID controller has been modified by adding the fuzzy algorithm, yielding a FuzzyPID control system.

마이크로 컨트롤러에서 FuzzyPID 알고리즘을 구현하기 위해 PID 제어기의 동일한 소스 코드가 FuzzyPID 제어 시스템을 생성하는 Fuzzy 알고리즘을 추가하여 수정되었다.

A standard form of Fuzzy Logic control structure normally uses two inputs which are error,  $e$  (for example, how close is the actual speed to the reference speed) and change in error,  $ce$  (for example how fast is the measured speed approaching the desired speed).

Fuzzy Logic 제어 구조의 표준 형식은 일반적으로 오류,  $e$ (예 : 실제 속도가 기준 속도에 얼마나 가깝나)와 오류  $ce$ (예 : 원하는 속도에 도달한 속도가 얼마나 빠른가)의 두 입력을 사용한다.

So in this research, the error is the difference between actual speed to the desired speed, while change in error is the difference between the previous error to the current error.

이 연구에서 오류는 실제 속도와 원하는 속도의 차이이며 오류의 변화는 이전 오류와 현재 오류의 차이이다.

Five membership functions for speed error and three membership functions for change of speed error with overlap, triangle shape and same width are used for each input variable, so that 15-rules are created.

겹침,삼각형 모양 및 같은 너비의 속도 오류 변경을 위한 속도 오류 및 세가지 멤버십 기능을 위한 다섯가지 멤버십 기능이 각 입력 변수에 사용되므로 15가지 규칙이 작성 된다.

The experiments were conducted in several cases to observe the performance of the speed response of the BLDC motor between PID and FuzzyPID controllers respectively.

실험은 PID 와 FuzzyPID 제어기 사이의 BLDC 모터의 속도 응답 성능을 관찰하기 위해 여러경우에 수행되었다.

Most of the experiments are focusing on the speed reference of 2000rpm since the PID controller has been tuned at this reference speed.

대부분의 실험은 PID 제어기가 이 기준 속도로 조정 되었기 때문에 2000rpm 의 속도 기준에 초점을 맞추고 있다.

However, there are two speed references which are 20% higher and lower of the 2000rpm which have been selected to verify the performance of the speed response

그러나 속도 응답의 성능을 확인하기 위해 선택한 2000rpm 의 20% 더 높고 낮은 두개의 속도 참조가 있다.

## 6. EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSIS

### 실험 결과 및 분석

Case A: Response to 20% step increase / decrease of the speed command at no load

사례 A : 무부하시 속도 명령의 20%스텝증가/감소에 대한 응답

The system initially operates in steady state at reference speed 2000rpm with the PM generator terminals were left opened.

시스템은 초기에 기준속도 2000rpm 에서 정상 상태로 작동하고 PM 발전기 터미널은 열린 상태로 유지된다.

A step speed command of increase and decrease, equal to 20% of the previous reference setting is applied 5s after start-up.

시동 5초후에 이전 기준 설정의 20%와 동일한 증가 및 감소의 스텝속도 명령이 적용된다.

The results are shown in Fig. 9 and Fig. 10 for increase and decrease of speed command

respectively.

그 결과를 그림 9와 10을 통해 각각 속도 명령의 증가 및 감소를 나타낸다.

The response obtained with the FuzzyPID controller is much better in terms of both the reduction of overshoot and increase of settling time.

FuzzyPID 제어기로 얻은 응답은 오버슈트 감소 안정 시간 증가 측면에서 훨씬 낫다.

Although the rise time of the PID controller is slightly faster than FuzzyPID controller, but it resulted in an overshoot during the transient

PID 제어기의 상승 시간은 FuzzyPID 제어기보다 약간 빠르지만 과도 상태에서는 오버슈트가 발생한다.

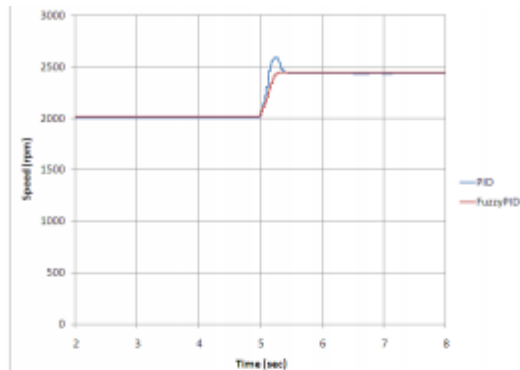


Fig. 9. Speed response to 20% step speed increase at no load for PID and FuzzyPID controllers

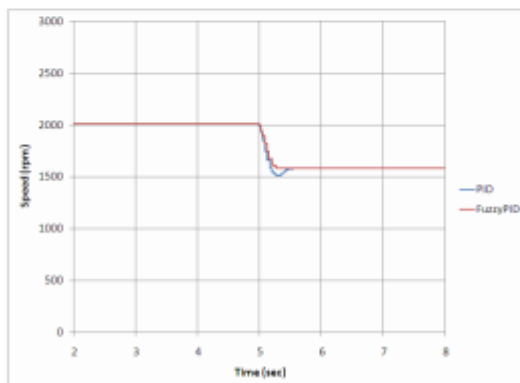


Fig. 10. Speed response to 20% step speed decrease at no load for PID and FuzzyPID controllers

Case B: Response to 20% step increase / decrease of the speed command at 16.5Ω load

사례 B : 16.5Ω 부하에서 속도 명령의 20% 스텝 증가/감소에 대한 응답

The same experiment as described in Case A was repeated by connecting the terminals of

the PM generator with  $16.5\Omega$  load per phase.

Case A 에서 설명한 것과 동일한 실험을 PM 발전기의 단자를 위상 당  $16.5\Omega$  부하로 연결하여 반복했다.

At time equal to 5s, a step speed command of increase and decrease, equal to 20% of the previous steadystate 2000rpm is applied respectively.

시간이 5초일 때, 이전의 정상적인 2000rpm 의 20%에 해당하는 증가 및 감소의 스텝속도 명령이 각각 적용된다.

The results illustrated in Fig. 11 and Fig. 12 show that both controllers provide approximately the same performance for both tests except FuzzyPID controller provides a slightly faster rise time and settling time during the increase of the speed reference setting.

그림 11과 12는 FuzzyPID 제어기가 속도 기준 설정을 증가 시키는 동안 약간 더 빠른 상승 시간과 안정시간을 제공하다는 것을 제외하고 두 제어기가 두개 테스트에서 거의 동일한 성능을 제공함을 보여준다.

PID controller manages to adapt the step changes in speed reference with no overshoot during the transient as the same result obtained by FuzzyPID controller.

PID 제어기는 FuzzyPID 제어기에서 얻은 결과와 같이 과도 상태에서 오버슈트없이 속도기준의 스텝변경사항을 조정한다.

However, there is still a gap which FuzzyPID manages to fill in to get a slightly better performance which indicates that FuzzyPID offers the best speed response with faster rise time and settling time.

그러나 FuzzyPID 가 약간 더 나은 성능을 얻기 위해 관리하는 차이가 여전히 존재한다.

이는 **FuzzyPID 가 빠른 상승 시간과 안정시간으로 최고의 속도 응답을 제공함을 나타낸다.**

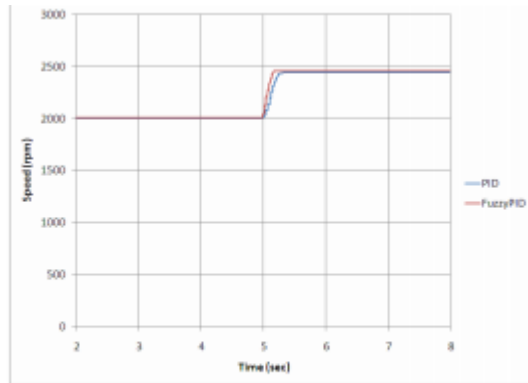


Fig. 11. Speed response to 20% step speed increase at 16.5Ω load for PID and FuzzyPID controllers

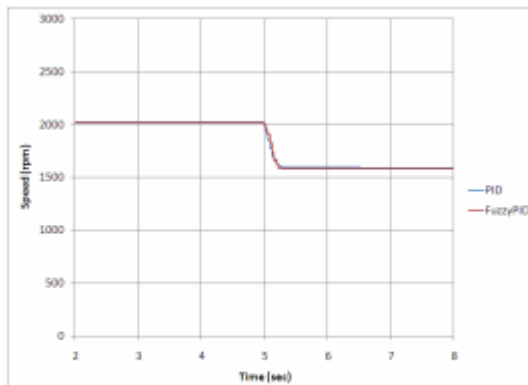


Fig. 12. Speed response to 20% step speed decrease at 16.5Ω load for PID and FuzzyPID controllers

Case C: Response to step increase / decrease of load at reference speed 2000rpm

사례 C : 기준 속도 2000rpm 에서 부하의 증가와 감소에 대한 반응

In this section, resistive loads of 3.8Ω, 9.3Ω and 16.5Ω are applied in a stepwise manner i.e. being increased and decreased by connecting the PM generator terminals to a set of Y-series connected resistive load at speed reference setting 2000rpm.

이 섹션에서, 3.8Ω, 9.3Ω 및 16.5Ω 의 저항성 부하가 계단식 방식으로 인된다. 즉, PM 발생기 단자를 속도 기준 설정 2000rpm 에서 Y 시리즈로 연결된 저항 부하 세트에 연결함으로써 증가 와 감소된다.

The results of the speed response are shown in Fig. 13 and Fig. 14 where the loads being increased and decreased respectively.

속도 응답의결과는 그림13,14에서 보여주고 여기서 부하는 각각 증가와 감소 된다.

For instance of increasing load in stepwise manner, the motor will operate from idle condition to reference speed with generator connected to 16.5Ω load per phase.

예를 들어 단계적으로 부하가 증가하는 경우 모터는 유힐상태에서 기준속도까지 작동하며 발전기는 위상 당  $16.5\Omega$  부하에 연결된다.

Later, at time interval of 5s, the load was increased by using  $9.3\Omega$  per phase.

나중에, 5초의 시간 간격에서, 부하는 위상당  $9.3\Omega$  사용함으로써 증가되었다.

At time interval of 10s, the generator load was further increased by using  $3.8\Omega$  per phase.

10s의 시간 간격에서 발전기 부하는 위상 당  $3.8\Omega$ 을 사용하여 추가로 증가되었다.

Therefore, at time interval of 5s and 10s, the load was increased and decreased continuously.

따라서, 5초와 1초의 시간 간격에서 하중은 연속적으로 증가하고 감소했다.

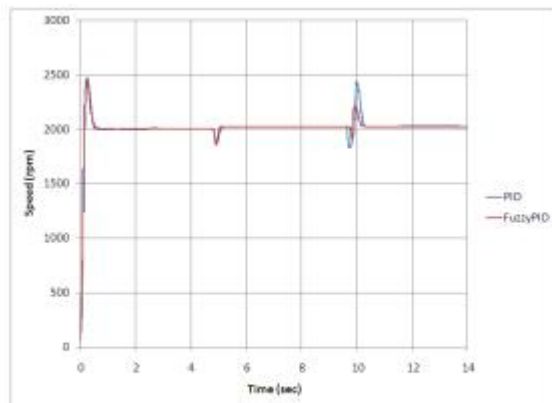


Fig. 13. Speed response to step load increase at every 5s for PID and FuzzyPID controllers

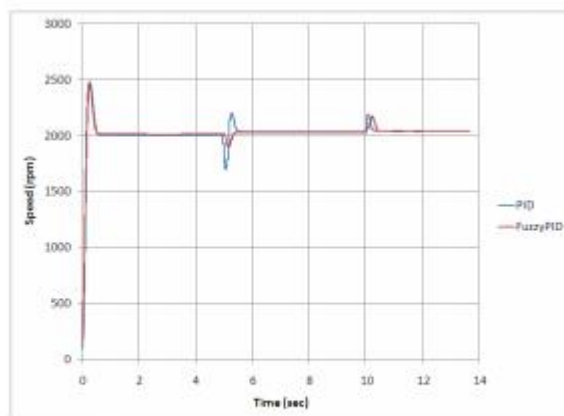


Fig. 14. Speed response to step load decrease at every 5s for PID and FuzzyPID controllers

As evident from Fig. 13 and Fig. 14, FuzzyPID controller yields better response during the

transient of load increase and decrease with smaller overshoot and smaller settling time. 그림13와 14로부터 명백한 바와 같이 FuzzypID 제어기는 오버슈트가 작고 안정시간이 짧아짐에 따라 부하 증가와 감소의 과도현상 동안 보다 양호한 응답을 산출한다.

It shows that the overshoot of the FuzzyPID controller is between 5% to 10% during the transient, while the PID controller exhibits up to 30% overshoot.

PID 제어기가 최대 30% 의 오버슈트를 나타내는 반면, FuzzyPID 컨트롤러의 오버슈트는 일시적으로 5%에서 10%사이다.

Better robustness with respect to the load variation is one of the most frequently cited advantages of the Fuzzy Logic speed control over PID control.

부하 변동에 대한 견고성은 PID 제어에 비해 FuzzyLogic 속도 제어의 가장 빈번하게 인용되는 장점 중 하나다.

So the advantages of Fuzzy Logic can be adapted in the FuzzyPID controller which has been verified by the results in Fig. 13 and Fig. 14.

따라서 FuzzyLogic 의 장점은 그림13과14의 결과에 의해 검증 된 FuzzyPID 제어기에서 적용될 수 있다.

However, during the steady-state motor operation, the motor terminal voltage waveforms and current waveforms do not show significant difference while the motor was under conventional PID controller and FuzzyPID controller respectively as shown in Fig. 15.

그러나 모터가 정상상태 일 때, 모터 단자 전압 파형과 전류파형은 그림15에서와 같이 모터가 평범한 PID 제어기와 FuzzyPID 제어기 아래에 있는 동안 큰 차이를 보이지 않는다.





(a) PID Controller



(b) FuzzyPID Controller

Fig. 15. Motor terminal voltage and current waveforms at 2000rpm speed and 3.8  $\Omega$  load

## 7. CONCLUSION

### 결론

As observed from the simulation results, FuzzyPID controller shows a better performance compared to the PID controller since the former provides faster rise time, faster settling time and smaller overshoot.

시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 FuzzyPID 제어기는 빠른상승시간, 빠른 안정시간과 작은 오버슈트를 제공하기 때문에 PID 제어기에 비해 우수한 성능을 보여준다.

Hence, the proportional, integral and derivative gains in the FuzzyPID controller are dynamically and continuously tuned online for optimal motor performance.

따라서 FuzzyPID 제어기의 비례적분과 미분 이득은 최적의 모터성능을 위해 동적으로 지속적으로 온라인 조정이 된다.

From the experimental results, it can be concluded that FuzzyPID controller can tune the PID gains, via fuzzy algorithm in the source code embedded in PIC30F2010 microcontroller, online dynamically and continuously during motor operation.

실험결과에서 , FuzzyPID 제어기는 PIC30F2010마이크로 컨트롤러에 내장 된 소스 코드의

Fuzzy 알고리즘을 통해 동적으로 온라인에서 모터작동 중에 PID 이득을 조정할수있다고 결론 내릴수있다.

The most significant result is FuzzyPID controller managed to limit the overshooting during the step load changes in the experimental study up to 10% compared to PID controller.

가장 중요한 결과는 FuzzyPID 제어기가 PID 제어기에 비해 실험 부하에서 단계부하 변경 중에 오버슈트를 최대 10%까지 제한 할 수 있다는 점이다.

Therefore, the FuzzyPID controller is better equipped, more robust and more effective to handle load variations during motor operation.

따라서 FuzzyPID 제어기는 모터 작동 중 부하변동을 처리를 보다 강력하고 견고하게 처리 할 수 있다.

Moreover, the computing power of the PIC30F is so fast (40MHz clock freq), thus there is no apparent delay due to longer computation time in FuzzyPID controller.

게다가 PIC30F 의 연산 능력은 매우 빠르기 때문에(40MHz 클럭 주파수), 따라서 FuzzyPID 제어기의 계산 시간이 길어져도 명백한 지연이 없다.

Whereas, the conventional PID controller has constant PID gains, optimally pretuned at specific motor speed.

반면, 평범한 PID 제어기는 특정 모터 속도에서 최적으로 사전 설정된 PID 이득을 일정하게 유지한다.

Therefore, as indicated by the simulation and experimental results, the FuzzyPID controller is better than conventional PID controller.

따라서 시뮬레이션과 실험결과에서 알수 있듯이 FuzzyPID 제어기는 기존의 PID 제어기보다 우수하다.

The FuzzyPID controller provides very good speed response in all cases, consistent with reducing the rise time and settling time for all initial speed settings.

FuzzyPID 제어기는 모든경우에 매우 빠른속도 응답을 제공하며 모든 초기 속도 설정의 상승시간과 안정시간을 줄이는 것과 일치한다.

Besides that, FuzzyPID controller is superior in reducing the overshoot of the speed response during the transient condition.

FuzzyPID 제어기는 과도상태에서 속도응답의 오버슈트를 줄이는데 탁월하다.