

BLDC 전동기의 속도 제어를 위한 퍼지 P+ID 제어기 설계

김영식^{1*}, 김성중²

The Design of Fuzzy P+ID Controller for Brushless DC Motor Speed Control

Young-Sik Kim^{1*} and Sung-Joong Kim²

요약 본 논문에서는 기존의 PID 제어기의 P 부분만을 퍼지 논리제어기로 대체한 퍼지 P+ID 제어기를 제안하였으며. 제안된 퍼지 P+ID 제어기는 단지 하나의 제어파라미터만을 추가하여 기존 PID 제어기를 조절하기 때문에 쉽게 설계 할 수 있으며, PID 제어기의 구조를 유지함으로써 기존 장치의 하드웨어 부분을 수정할 필요가 없다. 또한, 퍼지 P+ID 제어기는 기존 PID 제어기와 비교해서 충분한 안정성을 보여주며, 구조가 단순하고 계산 량이 적어 제어기의 동조시간을 기존의 퍼지 제어기에 비해서 많이 줄일 수 있는 장점이 있다. 제안된 Fuzzy P+ID 제어기를 BLDC 모터에 적용하여, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 제어기가 기존의 제어기보다 제어성능이 우수함을 확인하였다.

Abstract In this paper presents approaches to the design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral- derivative(fuzzy P+ID) controller in an incremental form. This controller is constructed by using an incremental fuzzy logic controller in place of the proportional term in a conventional PID controller. The PID type controller has been widely used in industrial application due to its simply control structure, easy of design, and inexpensive cost. However, control performance of the PID type controller suffers greatly from high uncertainty and nonlinearity of the system, large disturbances and so on. This paper presents a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral derivative controller. In comparison with a conventional PID controller, only one additional parameter has to be adjusted to tune the Fuzzy P+ID controller. In this case, the stability of a system remains unchanged after the PID controller is replaced by the Fuzzy P+ID controller without modifying the original controller parameters. Finally, the proposed hybrid Fuzzy P+ID controller is applied to BLDC motor drive. Simulation results demonstrated that the control performance of the proposed controller is better than that of the conventional controller.

Key Words : BLDC Motor, PID Control, Fuzzy Logic, Nonlinearity.

1. 서론

브러쉬 없는 직류전동기(BLDCM)는 영구자석 동기 전동기(PMSM)와 유사한 구조이면서 직류 전동기와 같이 선형적인 토크 대 전류, 또는 속도 대 전압 특성을 지닌 전동기이다. 따라서 가변속 운전과 제어가 용이하며 동시에 구조적으로 기계적인 정류자와 브러시가 없기 때문에 소음과 분진, 스파크 등이 없어서 사용환경에 제약이 없고 토크 대 관성의 비가 매우 높아 소형으로 높은

출력을 낼 수 있으며 또한, 회전자에 영구자석을 이용하기 때문에 계자 전류가 필요한 DC 전동기에 비하여 효율과 역률이 높다. 반면에 DC 전동기에 비해 제어하기가 어렵고 제어기 구성에 비용이 많이 드는 단점이 있다 [1][2]. 이러한 단점을 극복하기 위한 여러 가지 방법 중에서 벡터 제어 방법은 BLDC(Brushless Direct Current) 전동기의 고정자 전류를 동기속도로 회전하는 $d-q$ 축으로 변환하고, d 축을 회전자 자속 페어저(Phasor)와 일치시킴으로써 d 축 성분은 자속 성분 전류, q 축 성분은 토크 성분 전류로 상호 분리하여 BLDC 전동기를 DC 모터와 유사한 특성을 갖도록 제어하는 방식이다. 그러나 기

¹전북대학교 전자정보공학부

*교신저자: 김영식(yskim1973@chonbuk.ac.kr)

존의 제어기의 성능은 BLDC 전동기의 파라미터에 의존하기 때문에 파라미터의 변화가 빈번한 BLDC 전동기 시스템에서는 강인한 제어 성능을 기대하기가 어려운 단점이 있다. 따라서 BLDC 전동기의 정밀한 속도 제어를 위한 제어기의 구성은 시스템의 구동상태나 주위환경에 따라 파라미터가 변화되어도 좋은 제어 성능을 낼 수 있는 강인성이 요구된다[3][4].

본 논문에서 제안한 퍼지 P+ID 제어기는 기존의 PID 제어기의 P 부분만을 퍼지 논리제어기로 대체한 구조이기 때문에 외란에 견실한 퍼지 제어기의 장점과 구조가 간단한 PID 제어기의 장점을 모두 가진다. 제안된 퍼지 P+ID 제어기는 단지 하나의 제어파라미터만을 추가하여 기존 PID 제어기를 조절하기 때문에 쉽게 설계 할 수 있으며, PID 제어기의 구조를 유지함으로써 기존 장치의 하드웨어 부분을 수정할 필요가 없다. 또한, 퍼지 P+ID 제어기는 기존 PID 제어기와 비교해서 충분한 안정성을 보여준다[5]. 따라서 제안된 퍼지 P+ID 제어기는 구조가 단순하고 계산 량이 적어 제어기의 동조시간을 기존의 퍼지 제어기에 비해서 많이 줄일 수 있다. 제안된 Fuzzy P+ID 제어기를 BLDC 전동기에 적용하였으며 다양한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 본 논문에서 제안한 제어기가 기존의 제어기보다 제어성능이 우수함을 보였다.

2. BLDC 전동기

2.1 BLDC 전동기 구조

BLDC 전동기는 그림 1과 같이 3상 동기모터와 구조가 같아 고정자는 고정자 철심(stator core)과 고정자 권선(stator winding)으로 구성되어 있으며, 고정자 권선은 3상 Y권선 또는 Δ결선으로 이루어져 있다. 그리고 고정자에 전기자 권선이 설치되어 있어 DC 전동기나 유도 전동기에 비해 방열 효과가 커서 높은 전력 용량을 가질 수 있다.

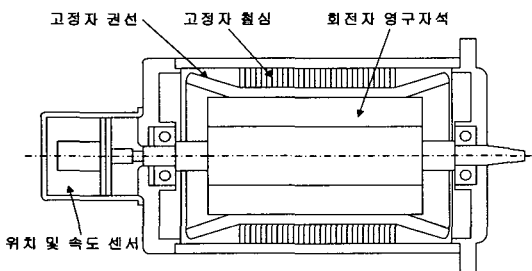


그림 1. BLDC 전동기 구조

회전자는 영구자석과 축으로 구성되어 있으며 축에 영구자석을 고정시키는 방법에 따라 표면 부착형(surface mount type)과 인테리어형으로 구분된다. 표면 부착형의 회전자는 축 표면에 영구자석을 접착한 것으로 인테리어형보다 기계적인 강성이 떨어지나 돌출 효과(saliency effect)에 의한 영향을 무시할 수 있으므로 인테리어형의 경우보다 토크 제어가 용이하다.

2.2 BLDC 전동기의 동적 상태방정식

소용량 (small horsepower) 모터제어에 널리 사용되는 브러쉬 없는 직류전동기는 3상 영구자석 동기전동기와 같은 형태를 가지고 있다. BLDC 전동기의 동적 상태방정식을 고정자 기준 dq 고정 좌표계에서 표현하면 식 (1)과 같다[6][7].

$$\begin{aligned}
 i_{qs} &= -\frac{r_s}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_{ds} + \frac{1}{L_q} V_{qs} - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \\
 i_{ds} &= \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_{qs} - \frac{r_s}{L_d} i_{ds} + \frac{1}{L_d} V_{ds} \\
 L_q &= L_{ls} + L_{mq} ; L_d = L_{ls} + L_{md}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 i_{qs} : 토크성분 전류, i_{ds} : 자속성분 전류, v_{qs} : 토크성분 전압, v_{ds} : 자속성분 전압 λ_m : 쇄교자속의 크기 ω_r : 기계적 각속도, L_q : q축상의 인덕턴스 L_d : d축상의 인덕턴스

토크 방정식은 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 T_e &= \frac{3}{2} \left(\frac{P}{2} \right) [\lambda_m i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}] \\
 &= J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B \frac{2}{P} \omega_r + T_l
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 ω_r : 기계적 각속도, J : 회전자 관성, T_L : 부하 토크, P : 극수

3. 퍼지 P+ID 제어기

3.1 퍼지 P+ID 제어기 구조

PID 제어기는 그림 2와 같은 간단한 구조를 가지고 있다. 제어기 신호는 P, I, D 부분의 조합에 의해서 식 (3)처럼 쉽게 계산 할 수 있다.

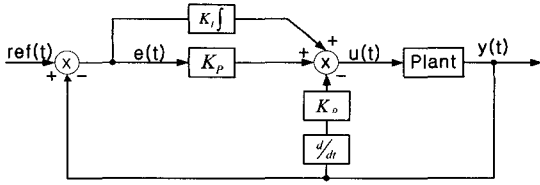


그림 2. PID 제어기 구조

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) dt - K_D \dot{y}(t) \quad (3)$$

여기서 K_P , K_I , K_D 는 각각 비례, 적분, 미분 이득이다. 식 (3)을 이산화 하여 변형하면 식 (4)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta u(t) = u(k) - u(k-1) = & K_P [e(k) - e(k-1)] \\ & + K_I T e(k) - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \end{aligned} \quad (4)$$

PID 제어기를 많이 사용하는 이유는 세 개의 제어기 매개변수를 조절하여 쉽게 제어기를 설계할 수 있기 때문이며 또한 많은 응용이 가능하기 때문에 실제 산업현장에서 많이 사용된다. 따라서 우리는 이러한 PID 제어기의 장점을 유지하면서 퍼지 논리 제어기를 설계하여야 하며, 이러한 목적을 가지고 설계한 퍼지 P+ID 제어기가 그림 3에 있다.

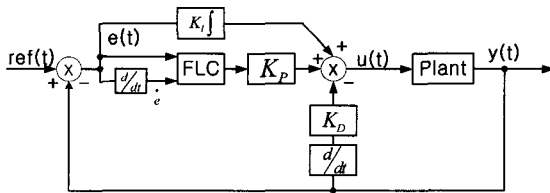


그림 3. 퍼지 P+ID 제어기 구조

식 (4)에 퍼지 제어기의 출력 $\Delta u_f(k)$ 를 적용하여 식 (5)를 유도한다[8].

$$\begin{aligned} \Delta u(t) = u(k) - u(k-1) \\ = K_P^* \Delta u_f(k) + K_I T e(k) \\ - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)는 퍼지 P+ID 제어기의 출력을 나타내는 식이며 K_I 와 K_D 는 기존 PID 제어기와 같으며 K_P^* 는 퍼지 제어기의 비례 이득 값으로 역시 K_P 와 같은 값을 사용한다.

퍼지 P+ID 제어기에서 퍼지 P 제어기는 시스템 응답의 오버슈트와 상승시간의 개선에 크게 관여하고, 적분 제어기는 정상상태 오차를 제거하며 미분 제어기는 시스템의 안정도에 관여한다.

퍼지 P+ID 제어기의 P 부분인 $K_P^* \Delta u_f(k)$ 는 그림 3에서 보는 것처럼 기존 PID 제어기의 $K_P \Delta e(k)$ 대신에 사용하였다. 개선된 퍼지 제어기는 $e(k)$ 와 $\dot{e}(k)$ 두 개의 입력과 $\Delta u_f(k)$ 하나의 출력을 가지며, 퍼지 제어기 출력은 식 (6)과 같다.

$$\Delta u_f = FLC(e(k), \dot{e}(k)) = \Delta u_f^i(k) \quad (i=1, \dots, 36) \quad (6)$$

3.2 퍼지 P+ID 제어기 설계

BLDC 전동기의 속도제어를 위한 퍼지 제어기의 조건 변수를 위치 명령에 따라 모터속도의 오차 (e)와 속도 오차의 시간에 대한 변화량 (de)로 선정하고, 속도 오차 변화량은 표본 주기 사이의 속도 오차 변화로 간단히 구할 수 있다.

퍼지 언어 변수 (Fuzzy Linguistic Variable)를 PB (Positive Big), PM (Positive Medium), PS (Positive Small), ZO (Zero), NS (Negative Small), NM (Negative Medium), NB (Negative Big)의 7단계로 선택하였다. 또 그에 대한 소속 함수를 그림 4와 같이 각 양자화 값이 있는 이산 함수로 사용하였고, 본 논문에 적용된 규칙은 표 1에 나타내었다.

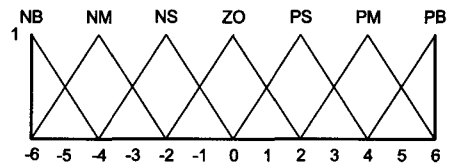


그림 4. 소속 함수

표 1. 제어 규칙 표

de	θ	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NM	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB	PB

추론은 MAX-MIN 합성을 사용하고, 비퍼지화는 식 (7)처럼 표현되는 무게중심법 (Center of gravity) 을 사용하여 제어신호를 계산하였다[9].

$$\Delta u_f(k) = \frac{\sum f_{i,j} \times u_{i,j}}{\sum f_{i,j}} \quad (7)$$

퍼지 제어를 설계한 다음에는 PID 제어기 파라미터를 결정해야한다. 본 논문에서는 Ziegler and Nichols' 방법을 기초로 하여 퍼지 P+ID 제어기를 설계하였다. 시스템의 미분과 적분 부분을 고정시키고 비례 부분의 이득을 시스템 응답이 임계진동 할 때까지 증가시켜서 임계진동이 되는 순간의 비례이득 ($K_{P(CRIT)}$) 과 샘플링 구간 ($T_{(CRIT)}$)을 구하고, 식 (8)에 의해서 PID 제어기 파라미터를 결정하였다.

$$\begin{aligned} K_P &= 0.6K_{P(CRIT)} \\ K_I &= \frac{2.0K_P}{T_{(CRIT)}} \\ K_D &= (T+2)K_P + K_I T^2 \end{aligned} \quad (8)$$

3.3 퍼지 P+ID 제어기의 적용

동기축에서 BLDC 전동기의 전압 방정식은 다음 식 (9)와 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_d[k] &= \frac{T_s}{L} v_d[k-1] + (1 - \frac{T_s R}{L}) i_d[k-1] + T_s w_r[k-1] i_q[k-1] \\ i_q[k] &= \frac{T_s}{L} v_q[k-1] + (1 - \frac{T_s R}{L}) i_q[k-1] - T_s w_r[k-1] (i_d[k-1]) + \frac{\lambda_m}{L} \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 두 번째 항과 세 번째 항의 합은 측정할 수 있는 상태 변수 i_d, i_q, ω_r 로 구성된다. 상태변수의 합

수로서 식 (9)을 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_d[k] &= \frac{T_s}{L} v_d[k-1] + f_d(i_d, i_q, \omega_r)[k-1] \\ i_q[k] &= \frac{T_s}{L} v_q[k-1] + f_q(i_d, i_q, \omega_r)[k-1] \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 함수 $f_d(i_d, i_q, \omega_r), f_q(i_d, i_q, \omega_r)$ 은 BLDC 전동기의 비선형 동적 방정식을 표현한 것이고, 이 함수 $f_d(i_d, i_q, \omega_r), f_q(i_d, i_q, \omega_r)$ 를 얻을 수만 있다면 이들을 이용하여 벡터 제어를 구성 할 수 있다. 본 논문에서는 퍼지논리를 이용하여 $f_d(i_d, i_q, \omega_r), f_q(i_d, i_q, \omega_r)$ 함수를 측정하였다.

기준 토크를 계산하면 다음과 같다.

$$\tau_e^* = K_P e_w + K_I \int e_w dt - K_D \dot{\omega}_r \quad (11)$$

여기서 K_P, K_I, K_D 는 비례, 적분, 미분이득이며 $e_w (= \omega_r^* - \omega_r)$ 는 속도 에러이다. 기준 토크 전류 i_q^* 는 기준 토크로부터 결정할 수 있고 기준 전류 i_d^* 는 0으로 고정시킨다. 제어기는 퍼지논리에서 추정된 함수와 기준 전류를 사용하여 기준 전압 v_d^*, v_q^* 를 계산할 수 있다.

그림 5는 BLDC 전동기 속도 제어의 전체 시스템 구성을 나타내었으며, 속도 제어기로 퍼지 P+ID 제어기를 사용하였다.

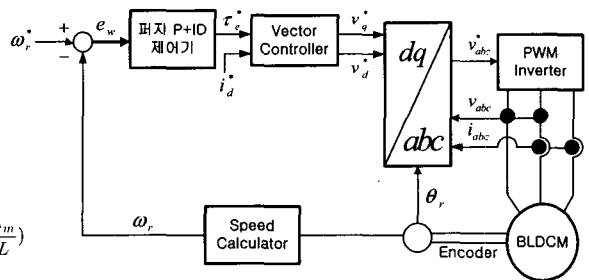


그림 5. 전체 제어 시스템 블록 다이어그램

4. 시뮬레이션 및 실험

4.1 시뮬레이션 결과

Matlab/Simulink에서 시뮬레이션을 실시하여 설계된 모델 및 제어기의 성능을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 BLDC 전동기의 정격을 표 2에 나타내었다. 여기서 PWM 인버터의 스위칭 주파수는 10 [kHz]로, 기준 명령 속도는 1,000 [rpm]으로 설정하고 시뮬레이션을 수행하였다.

표 2. BLDC 전동기의 정격 및 파라미터

관성모멘트 (J)	$0.35 e^{-4}$	$kg \cdot m^2$
고정자 인덕턴스 (L)	10.9	mH
고정자 저항 (R)	4.3	Ω
극수 (P)	4	.
토크정수 (K_T)	0.53	Nm / A
샘플링 시간 (T_s)	250	μs

그림 6은 제시된 제어기의 정격 파라미터 사용자 속도 응답 파형이다. 명령 속도 1000 [rpm]을 잘 추종함을 보여준다. 또한 시스템의 동특성이 우수함을 그림을 통해서 알 수 있다. 그림 7은 제어기의 출력인 토크 명령을 보여준다. 토크 명령은 전동기의 기준 토크 전류 i_q 로 변환된다.

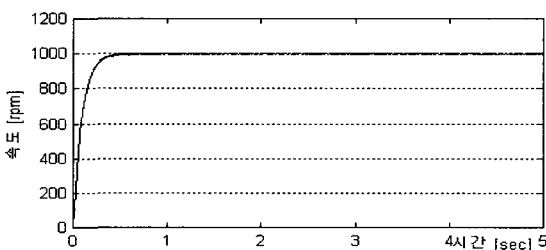


그림 6. 속도 응답 1000 [rpm]

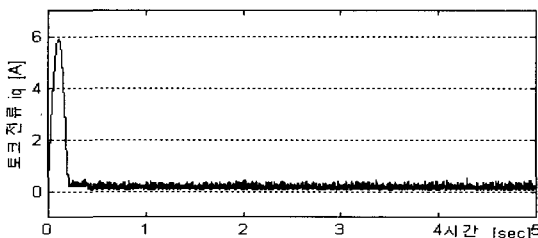


그림 7. 기준 토크 전류 i_q [A]

그림 8과 9는 각각 정·역 운전시의 속도 파형이다. 그림에서처럼 제시된 제어기를 이용한 시스템이 명령 속도를 잘 추종함을 알 수 있다. 정·역 회전시에 생기는 오버슈트는 1초 후에 부하토크를 인가하여 발생하는 현상이다.

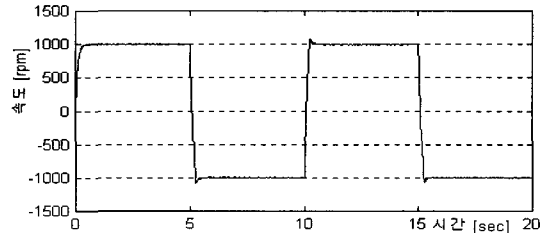


그림 8. 정·역 운전시 속도 응답 1000 [rpm]

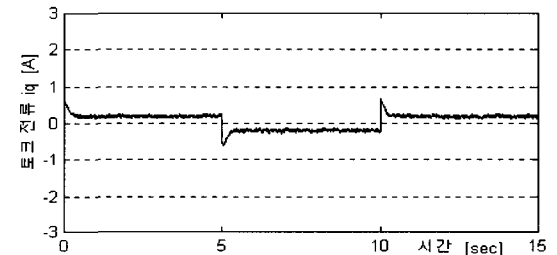


그림 9. 정·역 운전시 토크 전류 i_q [A]

4.2 실험 결과

BLDC 전동기 구동 실험을 하기 위하여 그림 10과 같은 실험장치를 구성하였다. 프로세서는 고속 연산이 가능한 Tms320C31을 사용하였고 직류전압을 교류전압으로 변화하는 방법으로 SVPWM방식을 이용하였다. 스위칭 반도체소자로서는 스위칭 주파수가 10 kHz인 IGBT를 사용하였으며, 각종 변수들을 실시간으로 관찰하기 위해 4 채널의 고속 D/A 컨버터를 사용하였다. 속도 센서는 1024[pulse/rev]인 엔코더를 사용하여 시스템을 구성하였다.

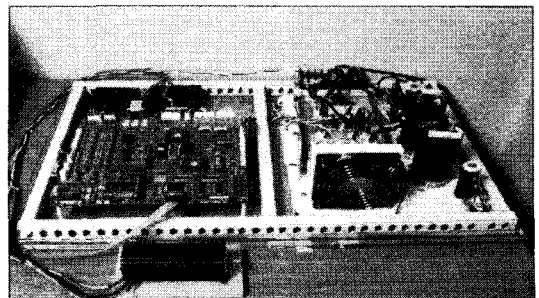


그림 10. 전체 구동 시스템

그림 11과 그림 12는 각각 공칭 파라미터를 사용하고 명령 속도가 1000 [rpm]일 때의 속도 응답과 토크 전류 파형이다. 제안된 제어를 사용한 시스템의 응답이 시뮬레이션 결과와 같이 속도 응답에서 리플 성분이 많이 제거되었음을 알 수 있다.

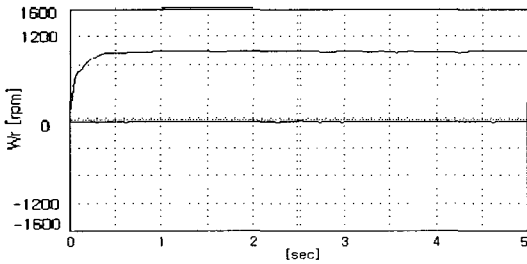


그림 11. 속도 응답 1000 [rpm]

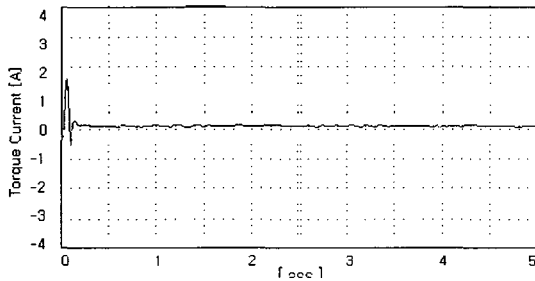


그림 12. 토크 전류 i_q 파형 [A]

그림 13과 그림 14는 전동기의 파라미터를 변화 ($J=0.000070 \text{ kgm}^2$, $R=8.6\Omega$)했을 때의 속도응답 파형이다. 역시 파라미터 변화에 강인함을 알 수 있다.

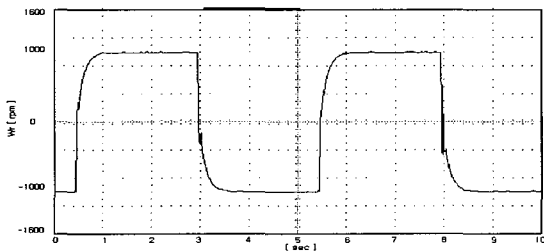


그림 13. 파라미터 변화시 속도 응답 [rpm]

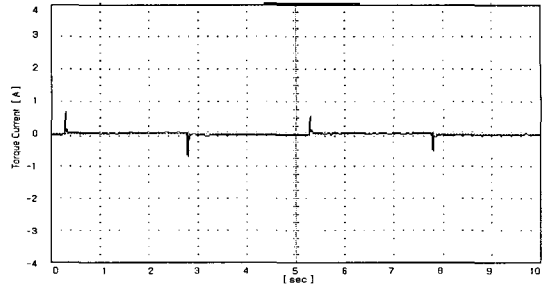


그림 14. 파라미터 변화시 토크전류 i_q 응답

5. 결론

일반적인 BLDC 전동기의 속도 제어 시스템은 PID 제어 방식에 의한 정속도 제어를 하고 있다. 하지만, PID 제어기는 파라미터 변화나 외란의 영향으로 강인한 특성을 얻기가 쉽지 않기 때문에 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 퍼지 P+ID 제어를 제안하였다. 본 논문에서 제안된 퍼지 P+ID 제어를 이용하여 BLDC 전동기의 속도 제어 수행하였다. 제안된 제어기는 단지 하나의 파라미터만 추가되었기 때문에 기존 PID 제어기의 하드웨어적인 부분을 수정하지 않고도 사용할 수 있으며, PID 제어기에 사용하는 초기 동조 기법을 동일하게 사용할 수 있고, 기본 구조가 단순하여 제시된 퍼지 P+ID 제어기는 제어 대상의 모델을 필요로 하지 않으며 파라미터의 변화에 강인하고, 연산이 단순한 장점이 있다. 제안된 제어기의 성능 확인을 위하여 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션과 고속 연산이 가능한 TMS320C31 DSP(Digital Signal Processor)를 이용하여 실험을 수행하였다.

Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 응답 파형에서 제안된 퍼지 P+ID 제어기는 우수한 동적 응답 특성과 파라미터와 부하의 변화에 강인한 응답 특성을 보였으며 또한, 실험을 통하여 얻은 영구자석 동기 전동기의 속도 응답 파형과 토크 전류 i_q 파형, 토크 파형 등을 통하여 제안된 제어를 이용한 시스템의 응답이 파라미터 변화에도 거의 같은 성능을 나타내는 것을 볼 수 있었다. 이를 통해서, 제안된 제어기가 파라미터의 변화에 강인하고 우수한 동적 응답 특성을 나타낼 수 있음을 입증하였다.

참고문헌

- [1] Paul. C, Krase, "Analysis of Electric Machinery," McGraw-Hill, 1984.
- [2] Chee-MUN ONG, Dynamic simulation of Electric Machinery using Matlab/Simulink, Prentice Hall, pp 167-243, 415-455, 1998.
- [3] W. Li and X. G. Chang, "Application of hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller to combustion control of stoker-boilers", Fuzzy Sets Syst., to be published.
- [4] 고종선, 조관열, 윤명중 "외란에 둔감한 브러시 없는 직류전동기 (BLDC Motor) 의 디지털 위치 제어", KIEE, 39 권 1호, 1990.
- [5] Li-Xin Wang, Adaptive fuzzy systems and control : Design and Stability Analysis, Prentice Hall, 1994.
- [6] T. Kenjo and S.Nagarmori, "Permnet magnet and Brushless DC motors", pp. 96, 1984.
- [7] Huy, H., "An Adaptive Fuzzy Controller For Permanent Magnet A.C. Servo Drives", Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference, IEEE N.Y. 1995.
- [8] D. Misir, H.A. Malki, G. Chen, "Design and analysis of fuzzy proportional-integral-derivative controller, Fuzzy Sets and Systems, vol. 79, pp 297-314, 1994.
- [9] H. Ying, W. Siler, and J. J. Buckeley, "Fuzzy control theory: A nonlinear case", Automatica, vol. 26, pp. 513-520, 1990.

김 영 식(Young-Sik Kim)

[정회원]

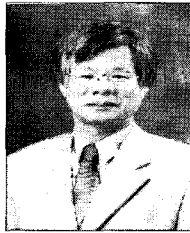


- 2000년 8월 : 전북대학교 제어계측공학과 (공학사)
- 2002년 8월 : 전북대학교 메카트로닉스공학과 (공학석사)
- 2003년 2월~현재 : 전북대학교 제어계측공학과 박사과정 수료

<관심분야>
자동제어, 퍼지제어, 임베디드시스템.

김 성 중(Sung-Joong Kim)

[정회원]



- 1965년 2월 : 전북대학교 전기공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 전남대학교 전기공학과(공학박사)
- 1996년 6월~현재 : 전북대학교 메카트로닉스연구센터 소장
- 1985년 10월~현재 : 전북대학교 전자정보공학부 교수

<관심분야>
모터제어, 자동제어, 제어계측.