

BLDC 모터의 속도 제어를 위한 퍼지 PI 제어기 설계

송승준*, 김 용*, 이승일*, 이은영**, 김필수**, 조구만***
 *동국대학교, **대림대학, ***청주기능대학

Design of a Fuzzy PI Controller for the Speed Control of BLDC Motor

Seung-Joon Song*, Yong Kim*, Seung-Il Lee*, Eun-Young Lee**, Pill-Soo Kim**, Kyu-Man Cho***
 *Dongguk University, **Daelim College, ***Chongju Polytechnic College

Abstract - This paper represents a realization of a fuzzy PI control method for a speed control of BLDC motor. In other words, the gains of the PI controller is tuned by a fuzzy logic controller. Simplified reasoning methods are used for fuzzy reasoning. Fuzzy logic speed controller is designed by using the high performance of DSPchip(TMS320F240). By experiment, it is confirmed that the speed of BLDC motor well follows an command speed in the load variables or speed variables.

1. 서 론

BLDC 모터는 DC 모터의 정확한 제어성과 AC 모터의 견고성을 동시에 겸비하였고, 빠른 응답성과 광범위한 속도 제어가 가능하므로 정밀 제어 및 다양한 산업 분야에 폭넓게 사용되고 있다. 그러나 BLDC 모터는 적용 대상에 따라 관성 모우멘트 등 기계계의 부하 특성이 달라지게 되므로, 이에 적합한 시스템의 이득 조정이 이루어져야 한다. 이를 위하여 최근에 많은 산업 분야에서는 제어이득을 조정할 수 있는 장치를 사용하는데, 이들 장치를 이용한 제어이득 조정은 복잡하여 숙련자라도 조정하는데 상당한 시간이 걸린다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 드라이버 자체에 제어 이득을 자동으로 조정해 주는 자동조정(auto-tuning) 기능이 요구된다 [1][2][3].

속도 제어계에 있어서 PI 제어기는 속도 및 전류 오차를 보정하기 위하여 널리 이용되고 있다. PI 제어기는 설계가 편리하지만 지령속도나 부하관성의 변동에 대응하도록 시행착오(trial-and-error)를 통하여 제어기의 이득을 조정해주어야 한다. 만약, PI 제어기의 제어이득이 제어 대상의 상황에 맞게 조정된다면, 제어기의 성능을 향상시킬 수 있을 것이다. 실제로 제어이득을 조정해 주기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[4][5]. 본 논문에서는 퍼지 추론을 적용하여 제어이득을 조정하고자 한다. 여기서, 퍼지 추론은 경험적 제어 방식으로 정량적(수치적) 제어보다는 정성적(언어적) 제어 기술을 이용할 수 있다. 그러므로, BLDC 모터의 속도 응답에 있어서 실제 제어 대상과 수학적 추정 모델 사이의 차이를 줄이기 위하여 퍼지 추론을 적용하여 제어이득을 조정하는 제어기를 설계하였다.

실험에 사용된 BLDC 모터는 477W이며, 3상 전압형 인버터로 구동된다. 인버터의 제어는 고성능 마이크로프로세서인 DSPchip(TMS320F240)을 사용하였고, 제어 알고리즘은 C언어로 구현하였다.

2. 제어 시스템 구성

본 논문에서 제안한 제어 시스템의 전체 구성도는 그림 1과 같다. 여기에서는 증가형 PI 속도 제어기가 사용되었다. 또한, PI 제어기의 제어이득값을 조정해 주기 위한 퍼지 추론기가 사용되었다.

BLDC 모터는 3상 전압형 인버터에 의해 전원이 공급되며, 홀 소자에서 회전자의 위치를 검출하여 인버터의 출력패턴을 결정한다. 또한, 증분형 로터리 엔코더를 사용하여 회전자의 속도를 디지털적으로 측정하였다. 속도 측정 방법은 M-T methods를 적용하였다.

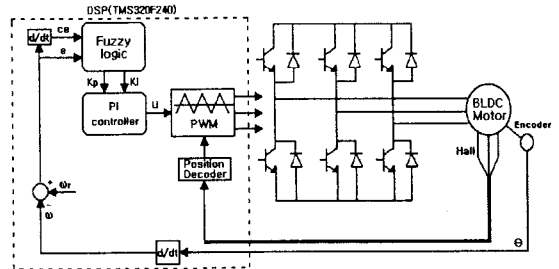


그림 1. 제어 시스템의 전체 구성도

3. 퍼지 PI 속도 제어기 설계

퍼지 PI 제어기의 두 입력 변수, 즉 속도 오차 (e)와 오차의 변화량 (ce)는 식(1)과 같다.

$$e[n] = \omega_r[n] - \omega[n],$$

$$ce[n] = e[n] - e[n-1]$$

여기서, n은 샘플링 시간 상수이고, ω는 회전속도, ωr은 기준속도이다.

퍼지 PI 제어기는 식(1)의 두 입력 변수로부터 두 개의 출력값, 즉 비례이득값 (Kp)와 적분이득값 (Ki)를 조정하여 식(2)와 같은 증가형 제어 입력값 (Δu)를 출력한다.

$$\Delta u = K_p \times ce[n] + K_i \times e[n]$$

여기서, 비례이득 (Kp)와 적분이득 (Ki)는 식(3)과 같이 정의하였다.

$$K_p = K_{p0} \times K_{p1}, \quad K_i = K_{i0}$$

여기서, Kp1과 Ki1은 각각 퍼지 추론에 의해 정해진 비례이득과 적분이득값이다. Kp0와 Ki0는 각각 이전 주기의 Kp1과 Ki1이고, 초기값을 1로 설정하였다.

3.1 퍼지화 및 소속함수 구간 결정

퍼지 PI 제어기 입·출력 변수의 값은 전체집합[-1,1]의 구간으로 크기변환을 하는 정규화 작업이 필요하다. 그러므로, 본 논문에서 입·출력 변수는 정규화되어 삼각형 형태의 소속 함수를 갖도록 설계하였다.

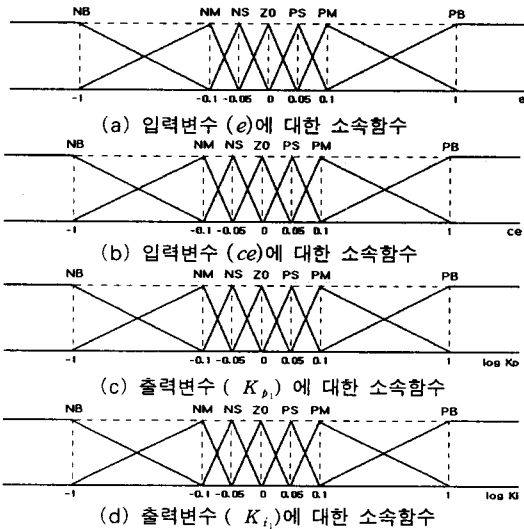


그림 2. 정규화된 소속함수

그림 2에서 (a)와 (b)는 정규화된 입력 변수에 대한 소속함수를 나타낸 것이다. 입력 변수에 대한 퍼지 전체 집합의 구간을 $[-1, 1]$ 로 설정하였고, 입력 변수의 값이 목표점에 가까워지면 더욱 세밀한 제어가 가능하도록 소속 함수의 구간을 설계하였다.

(c)와 (d)는 각각 비례이득값과 적분이득값을 나타낸 것이고, 로그를 취한 값을 사용하여 항상 양의 값을 가지게 하였다. 따라서, 각각의 이득값은 퍼지 추론 단계에서 적절하게 조정해 주어야 한다. 본 논문에서는 비례 이득과 적분이득값이 단지 하나의 스케일 팩터를 이용하여 적절하게 조정할 수 있도록 식(4)와 같이 설계하였다.

$$K_{p_i} \rightarrow s^{z_i}, \quad K_{i_i} \rightarrow s^{z_i} \quad (4)$$

여기서, s 는 스케일 팩터이고, z_i 는 퍼지 규칙에 의해 추론된 비례이득과 적분이득이다.

본 논문에서는 실험을 통하여 식(4)에서 적절한 스케일 팩터(s)는 2.5로 설정하였고, 출력되는 비례이득과 적분이득의 비율을 적절하게 설정하여 더욱 정밀한 제어가 이루어지도록 하였다.

3.2 퍼지 PI 제어 규칙 결정

퍼지 규칙은 시스템의 과도상태 응답특성을 향상시키고 정상상태에서 미세 변동분에 대해 적절한 제어가 이루어지도록 그림 3의 각 영역별 입력 변화량에 대한 요구 조건에 적합하도록 설정하였다.

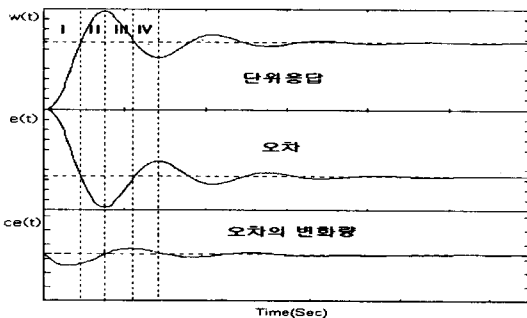


그림 3. 단위 응답 곡선

영역 I: 적분이득은 초기에는 증가시키다가 기준 속도에 근접할수록 감소시켜 빠른 과도응답을 제공하고 오버슈트가 발생하지 않도록 한다. 이 경우 비례이득은 현재 오차의 변화량(ce)가 (-)의 상태이므로 감소된 상태를 유지한다.

영역 II: 비례이득은 초기에는 감소시키다가 증가시켜 오버슈트를 줄인다. 이 경우 적분이득은 감소된 상태를 유지한다.

영역 III: 적분이득은 초기에는 감소시키다가 증가시켜 발생한 오버슈트를 억제한다. 이 경우 비례이득은 현재 오차의 변화량(ce)가 (+)의 상태이므로 증가된 상태를 유지한다.

영역 IV: 비례이득은 초기에는 증가시키다가 감소시켜 언더슈트가 발생하지 않도록 한다. 이 경우 적분이득은 속도 오차(e)가 (+)의 상태이므로 증가된 상태를 유지한다.

위의 4가지 영역에 대한 PI 파라미터의 특성을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 단위 스텝 응답에 대한 PI 파라미터의 영향

K_{p_i}, K_{i_i}		ce		
		-max	0	max
e	-max	II		III
	0	K_{p_i} : 감소→증가 K_{i_i} : 감소	K_{p_i} : 증가 K_{i_i} : 감소→증가	
	+max	K_{p_i} : 감소 K_{i_i} : 증가→감소	K_{p_i} : 증가→감소 K_{i_i} : 증가	

위의 4가지 영역에 대한 PI 제어기의 파라미터의 특성을 근거로 비례이득과 적분이득에 대한 퍼지 규칙을 구성하면 표 2와 같다.

표 2. 제안된 퍼지 PI 제어기의 퍼지 규칙

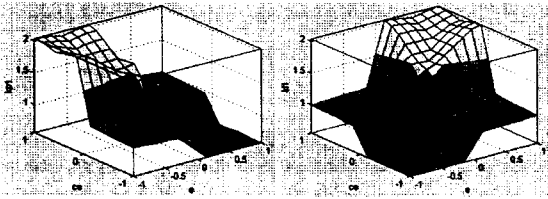
(a) K_{p_i} 의 경우

$e \backslash ce$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB
NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
PM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
PB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO

(b) K_{i_i} 의 경우

$e \backslash ce$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NS	NS	ZO	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PS	PM	PM	PB	PB

시뮬레이션을 통하여 표 2에서 각각 입력변수에 따라 출력되는 비례이득과 적분이득값을 제어 평면상에 나타내면 그림 4와 같다.



(a) 비례이득값 (K_p) (b) 적분이득값 (K_i)
그림 4. 제어 평면

3.3 퍼지 추론 및 비퍼지화

실제 입력이 주어졌을 때 제어 규칙을 이용하여 출력을 계산하는 과정을 퍼지 추론이라 하며, 본 논문에서는 Mizumoto가 제안한 product-sum gravity 방식의 일종인 simplified reasoning 방식을 적용하였다[6].

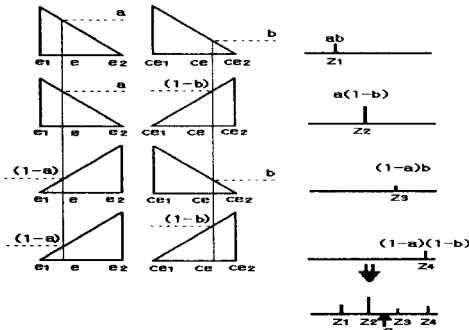


그림 5. 단순 퍼지 추론법

Mamdani의 if-then규칙에 의하여 규칙 [e_i and ce_i]에 대한 사실 [e and ce]의 적합도 h_i 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i = \mu_{e_i}(e) \cdot \mu_{ce_i}(ce) \quad (5)$$

여기서, $\mu_{e_i}(e)$ 와 $\mu_{ce_i}(ce)$ 는 각각 오차 (e)와 오차의 변화량 (ce)가 소속함수에 소속되는 정도를 나타낸다.

비퍼지화 과정은 식(5)에서 구해진 각 퍼지 제어 규칙의 적합도 h_i 를 각 규칙의 추론 결과인 z_i 의 가중치로서 사용하는 가중치 평균법(weighted average methods)을 적용하며, 식(6)과 같이 얻어진다.

$$c = \frac{abz_1 + a(1-b)z_2 + (1-a)bz_3 + (1-a)(1-b)z_4}{ab + a(1-b) + (1-a)b + (1-a)(1-b)} \\ = abz_1 + a(1-b)z_2 + (1-a)bz_3 + (1-a)(1-b)z_4 \quad (6)$$

식(6)에서, a 와 b 는 식(7)과 같이 주어진다.

$$a = \mu_{e_1}(e) = \frac{e_2 - e}{e_2 - e_1} \\ b = \mu_{ce_1}(ce) = \frac{ce_2 - ce}{ce_2 - ce_1} \quad (7)$$

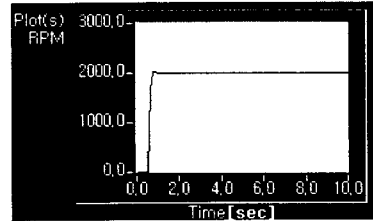
여기서, e_1, e_2 는 각각 오차 (e)가 속한 소속함수의 최소·최대값이고, ce_1, ce_2 는 각각 오차의 변화량 (ce)가 속한 소속함수의 최소·최대값이다.

식(6)의 z_1, z_2, z_3, z_4 는 각각 그림 5의 4가지 경우에 대한 각 규칙의 추론 결과값이다.

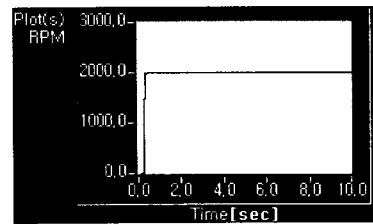
위의 비퍼지화 과정이 끝나면 PI 제어기의 비례이득값과 적분이득값이 구해지며, 실제 출력값인 증가형 제어 입력을 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

본 논문에서 제안한 퍼지 PI 제어기를 PI 제어기와 비교하였으며, 그 결과를 바탕으로 퍼지 PI 제어기의 제어 성능이 우수함을 확인하였다. PI 제어기 및 퍼지 PI 제어기는 C언어로 구현하였고, 모터 제어용 DSPchip (TMS320F240)을 사용하여 실험하였다. MAGTROL사의 Dynamometer Controller(DSP6000)를 사용하여 모터의 속도를 디지털적으로 측정하고, 부하를 인가하였다.

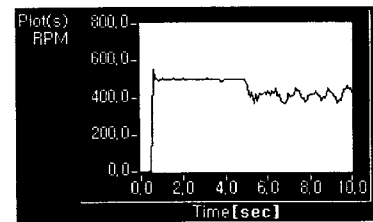


(a) PI 제어

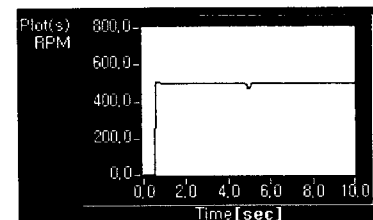


(b) 퍼지 PI 제어
그림 6. 기동 특성

그림 6은 부하($0.5\text{kg} \cdot \text{cm}$)상태에서 기준속도가 2000 rpm일 경우의 기동 특성을 나타내며, PI 제어보다 퍼지 PI 제어일 경우 오버슈트가 거의 없고, 상승시간이 감소하였음을 알 수 있다.



(a) PI 제어

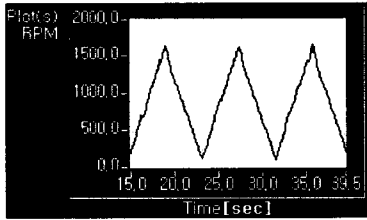


(b) 퍼지 PI 제어
그림 7. 외란 특성

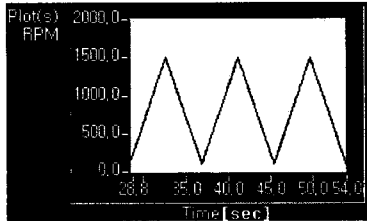
그림 7은 무부하 상태에서 기준속도가 500rpm일 경우의 기동 특성을 나타내며, 5초구간에서 외란($1.0\text{kg} \cdot \text{cm}$)을 가했을 경우의 응답특성을 나타낸다. 외란 발생 시 PI 제어의 경우 기준속도를 추종하지 못하고 댄핑을 하는 반면, 퍼지 PI 제어의 경우 약 0.3초 후에 기준속도와 오차가 0.1% 이내로 감소하여 우수한 외란 억제 성능을 나타낸다.

(참고 문헌)

- [1] Vas, P.; Chen, J.; Stronach, A.F. "Application of improved fuzzy-tuned and fuzzy controllers in variable-speed drives". Control, 1994. Control '94. Volume 2., International Conference on , 1994 . Page(s): 1501 -1506 vol.2
- [2] C.C.Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Control-Part2". IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, vol.20, March/April 1990.
- [3] Zheng, L. "A practical guide to tune of proportional and integral (PI) like fuzzy controllers". Fuzzy Systems, 1992., IEEE International Conference on , 1992 . Page(s): 633 -640
- [4] Lee, C.K.; Pang, W.H. "A brushless DC motor speed control system using fuzzy rules", Power Electronics and Variable-Speed Drives, 1994. Fifth International Conference on , 1994 . Page(s): 101 -106
- [5] Lee, C.K.; Pang, W.H. "Rule-based adaptive control in a servomotor control system", Control, 1994. Control '94. Volume 2., International Conference on , 1994 . Page(s): 1088 -1093 vol.2
- [6] M.Mizumoto, "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods". IEEE International Conference on, vol. 4, 709-715, March 1992.



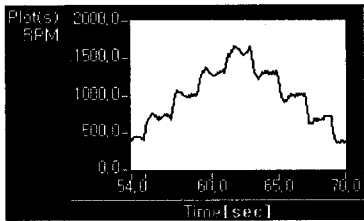
(a) PI 제어



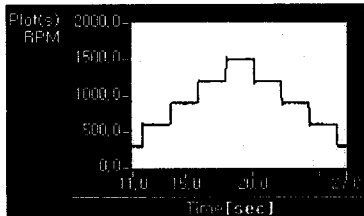
(b) 퍼지 PI 제어

그림 8. 속도 변화 특성

그림 8은 부하(0.3kg·cm)상태에서 기준속도를 100~1500rpm 사이로 가감시켰을 경우의 특성을 나타낸다. PI 제어의 경우 기준 속도에 잘 추종하지 못하는 반면, 퍼지 PI 제어의 경우 기준속도에 정확하게 추종함을 나타낸다.



(a) PI 제어



(b) 퍼지 PI 제어

그림 9. 속도 변화 특성

그림 9는 부하(0.3kg·cm)상태에서 기준속도를 계단 형태로 변화시켰을 경우의 특성을 나타낸다. PI 제어의 경우 속도 변화에 따른 댐핑이 크지만, 퍼지 PI 제어의 경우 원활한 속도 제어가 이루어짐을 나타낸다.

5.결 론

본 논문에서는 BLDC 모터의 속도를 제어하기 위한 퍼지 PI 제어기를 설계하였다. 이 퍼지 PI 제어기는 퍼지 규칙과 소속함수의 설계를 통하여 구현되며, 비례이득과 적분이득이 제어 상황에 따라서 점진적으로 변화하며 역할 분담을 이룰 수 있게 구현하였다. 실험을 통하여 퍼지 PI 제어기가 빠른 응답과 정상 상태에서의 오차를 줄일 수 있는 더욱 안정한 시스템을 제공하는 것을 확인하였다.