

전압형 인버터로 구동되는 BLDC 모터의 퍼지 로직 속도 제어기 설계

송승준*, 김 용*, 백수현*, 이승일*, 조규만**
*동국대학교, **청주기능대학

Design of a Fuzzy Logic Speed Controller for BLDC Motor
drived by Voltage Source Inverter

Seung-Joon Song*, Yong Kim*, Soo-Hyun Baek*, Seung-Il Lee*, Kyu-Man Cho**
*Dongguk University, **Chongju Polytechnic College

Abstract - This paper represents a realization of a fuzzy logic speed controller for BLDC motor drives. Fuzzy sets are regulated by using parameters of BLDC motor. Simplified reasoning methods are used for defuzzification. 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 low-speed area.

1. 서 론

BLDC모터는 DC모터의 정확한 제어성과 AC모터의 견고성을 동시에 겸비하였고, 빠른 응답성과 광범위한 속도 제어 범위를 가지고 있으므로 속도 제어 응용 분야에 널리 사용되고 있다. 그러나 BLDC모터가 부하의 변화와 같은 조건에서도 원활히 제어되기 위해서는 강인한 제어 기법이 필요로 된다. 이를 위하여 최근에 많은 분야에서 비선형 제어 이론을 기초로 한 퍼지 로직 제어 기법이 연구되고 있다[1][2].

일반적으로 퍼지 제어기는 전문가의 경험과 직관으로부터 언어적인 제어규칙을 설정한다. 또한 입력변수의 퍼지 집합을 정의하는데 있어서도 시스템에 대한 전문적인 지식이 요구된다. 본 논문에서는 제어 대상에 대한 정확한 모델화 없이 단지 모터의 파라미터만을 이용하여 퍼지 집합을 정의하고, 단순 추론 기법(simplified reasoning methods)을 적용하여 출력동작을 결정하는 제어기를 설계하였다[3].

실험에 사용된 BLDC모터는 477W이며, 3상 전압형 인버터로 구동된다. 인버터의 제어는 고성능 마이크로프로세서인 DSPchip(TMS320F240)을 사용하였고, 제어알고리즘은 C언어로 구현하였다[4][5].

2. 제어 시스템 구성

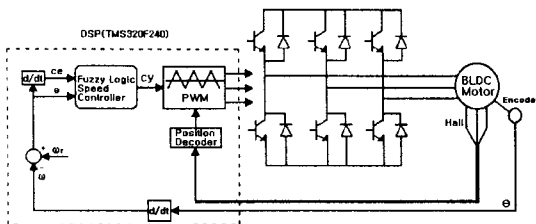


그림 1. 제어 시스템의 전체 구성도
Fig 1. Overall structure diagram of control system

제어 시스템의 전체 구성도는 그림1과 같다. BLDC 모터는 3상 전압형 인버터에 의해 전원이 공급되며, 각 상에 대한 제어 신호는 마이크로 프로세서에서 만들어진 삼각파와 비교되어 PWM신호로 인버터에 공급된다.

홀 소자에서 회전자의 위치를 검출하여 인버터의 출력 패턴을 결정하며, 중분형 로터리 엔코더를 사용하여 회전자의 속도를 디지털적으로 측정하였다. 속도 측정 방법은 M-T methods를 적용하였다.

3. 퍼지 로직 속도 제어기 설계

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

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

$$ce[n] = e[n] - e[n-1] \quad (1)$$

여기서, n 은 샘플링 시간 상수이고, ω 는 회전속도, ω_r 은 기준속도이다.

퍼지 로직 속도 제어기는 식(1)의 두 입력 변수로부터 증가형 제어 입력값 (cy)을 출력한다.

3.1 퍼지화 및 입력 이득값 결정

퍼지 로직 제어기는 실제 측정값의 영역을 퍼지 집합의 전체 집합 영역으로 변환시키는 정규화 작업이 필요하다. 일반적인 경우 전체 집합은 [-1,1]의 구간을 가진다. 또한, 실제 측정값을 정규화된 퍼지 집합의 값으로 변환하기 위한 스케일링 팩터로서 각각의 이득값이 필요하다. 퍼지 로직 제어기의 입·출력변수 (e, ce, cy)에 대한 이득값을 각각 Ge, Gce, Gcy라 하고, 정규화된 입·출력변수는 식(2)와 같이 정의한다.

$$a = e \cdot Ge, \quad b = ce \cdot Gce, \quad cy = c \cdot Gcy \quad (2)$$

모터의 정격속도(ω_{nom})와 기준속도의 단위 변화값(Δω_r)이 같다고 가정하면, 제어기의 입력 이득값은 식(3)과 같이 표현될 수 있다.

$$Ge = 1 / \omega_{nom}, \quad Gce = 1 / \omega_{nom} \quad (3)$$

이 경우 정규화된 입력 변수 (a = e · Ge, b = ce · Gce)의 소속함수는 그림2에서와 같이 서로 중첩된 형태로 설정한다.

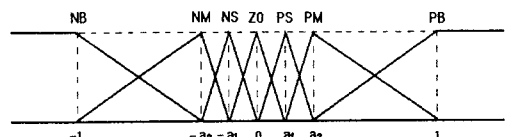


그림 2. 정규화된 소속 함수
Fig 2. Normalized membership function

표1은 정규화된 소속함수를 가지고 Mamdani의 IF-THEN 퍼지 규칙에 의해 만들어진 제어 룰 베이스를 나타낸다.

표 1. 퍼지 로직 제어기의 룰 베이스
Table 1. Rule base of fuzzy logic controller

a	-1	-a ₂	-a ₁	0	a ₁	a ₂	1
b	-1	-c ₅	-c ₄	-c ₃	-c ₂	-c ₁	0
-1	-1	-c ₅	-c ₄	-c ₃	-c ₂	-c ₁	0
-b ₂	-c ₅	-c ₄	-c ₃	-c ₂	-c ₁	0	c ₁
-b ₁	-c ₄	-c ₃	-c ₂	-c ₁	0	c ₁	c ₂
0	-c ₃	-c ₂	-c ₁	0	c ₁	c ₂	c ₃
b ₁	-c ₂	-c ₁	0	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄
b ₂	-c ₁	0	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅
1	0	c ₁	c ₂	c ₃	c ₄	c ₅	1

표1에서 퍼지 룰 베이스의 퍼지 분할은 다음절의 제어 평면으로부터 얻어질 수 있다.

3.2 제어 평면에 의한 소속함수 구간 결정

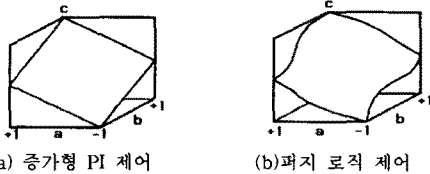


그림 3. 제어 평면
Fig 3. Control space

증가형 PI 제어기의 제어 평면은 그림3(a)와 같이 평평한 반면, 퍼지 로직 제어기의 제어 평면은 그림3(b)와 같이 굴곡된 면을 갖는다. 위의 두 제어 평면은 어떤 공통되는 점들을 갖는다. 즉, 두 제어기 모두 입력 변수 (e, ce)에 대해 같은 제어 입력값 (cy)을 출력한다. 증가형 PI 제어기에 대한 제어 입력값 (cy)은 식(4)와 같이 표현된다.

$$cy = k_p \left[\frac{T_s}{T_i} \cdot e + ce \right] \quad (4)$$

여기서, k_p 는 비례계수, T_s 는 PI 제어 샘플링타임, 그리고 T_i 는 적분시간이다.

식(4)에서, 입력 변수 (e, ce)가 (0,0)이라면, PI 제어기의 제어 입력값 (cy)은 0이 된다. 또한, 표1에서 입력 변수 (e, ce)가 (0,0)이라면, 퍼지 로직 제어기의 제어 입력값 (cy)이 0임을 알 수 있다.

PI 제어의 경우, 제어 입력값 (cy)이 0인 모든 입력 변수 (e, ce)는 식(4)로부터 식(5)와 같이 얻어진다.

$$0 = T_s \cdot e + T_i \cdot ce \quad (5)$$

식(5)에 의해 얻어지는 모든 점들은 한 라인으로 이어지는데, 이 라인을 δ 라인이라 하고, 그림4에 도시하였다.

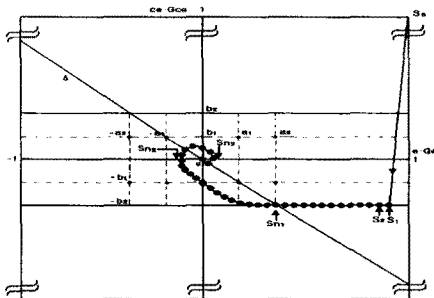


그림 4. 속도 제어 평면
Fig 4. Speed control space

퍼지 로직 속도 제어기의 제어 룰 베이스에서 제어 입력값 (cy)이 0인 점들을 이어보면, PI 제어기의 δ 라인과 동일한 라인으로 그려진다. 즉, 두 제어기에서 제어 입력값 (cy)을 0으로 출력하는 입력변수 (e, ce)의 값은 같다. 따라서, 퍼지 로직 속도 제어기의 입력변수들은 식(6)을 만족하게 된다.

$$0 = T_s a_1 - T_i b_1, \quad 0 = T_s a_2 - T_i b_2 \quad (6)$$

그림4에서 [$S_1 \leq n \leq S_{n1}$] 구간동안 속도 오차 (e)는 점차 감소하지만, 오차의 변화량 (ce)은 일정한 값을 갖는다. 이 구간에서 오차의 변화량 (ce)은 그림4로부터 b_2 임을 알 수 있다. 이 값은 식(7)과 같이 모터의 기계적 방정식으로부터 유도될 수 있다.

$$J \frac{dw}{dt} = T_{max} \quad (7)$$

여기서, J 는 관성 모멘트이고, T_{max} 는 초기 과도상태의 무부하시에 모터에서 발생하는 최대 토크이다.

이 경우, $\frac{dw}{dt}$ 는 식(8)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{dw}{dt} = - \frac{d(\omega_r - \omega)}{dt} = - \frac{ce}{T_s} = - \frac{b \cdot Gce}{T_s} \quad (8)$$

식(7)과 식(8)을 이용하여 b_2 의 값을 식(9)와 같이 얻을 수 있다.

$$b_2 = \frac{T_{max}}{J} \cdot T_s \cdot Gce = \frac{T_{max}}{J} \cdot \frac{T_s}{\omega_{nom}} \quad (9)$$

a_2 의 값은 식(9)를 식(6)에 대입하여 얻을 수 있고, 그림4에서 a_1 과 b_1 의 값은 각각 a_2 와 b_2 의 값의 절반으로 설정한다. 이를 정리하면 식(10)과 같다.

$$a_2 = \frac{T_{max}}{J} \cdot \frac{T_i}{\omega_{nom}}, \quad a_1 = 0.5 \cdot a_2$$

$$b_2 = \frac{T_{max}}{J} \cdot \frac{T_s}{\omega_{nom}}, \quad b_1 = 0.5 \cdot b_2 \quad (10)$$

3.3 출력 이득값 결정

퍼지 로직 속도 제어기의 제어 입력값 ($cy = c \cdot Gcy$)은 $\pm 1 \cdot Gcy$ 에서 최대가 되고, 같은 조건하에 PI 제어기에서의 제어 입력값 (cy)과 같으므로 식(2)를 식(4)에 대입하여 Gcy 를 얻을 수 있다,

$$Gcy = k_p \left[\frac{T_s}{T_i} \cdot e_{max} + ce_{max} \right]$$

$$= k_p \left[\frac{T_s}{T_i} + 1 \right] \omega_{nom} \quad (11)$$

여기서, e_{max} 와 ce_{max} 는 각각 오차 (e)와 오차의 변화량 (ce)의 최대값이다.

3.4 출력 소속함수 결정

모터의 속도가 기준속도에 근접할수록 더욱 세밀한 제어가 필요하므로 적절한 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 의 값을 설정해야 한다. 이를 위하여 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 의 값을 식(12)와 같이 기하수열로 설정하였다.

$$c_{i+1} - c_i = c_1 \cdot s^i \quad (12)$$

여기서, i 는 1..5, ($c_6=1$)이다,

식(12)에서 c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 의 값은 s 값만을 사용하여 결정되며, 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$c_i = \frac{\sum_{k=0}^{i-1} s^k}{\sum_{k=0}^n s^k} \quad i = 1..5 \quad (13)$$

3.5 비퍼지화

퍼지 로직 제어기로부터 추론된 결과는 제어 출력의 가능성 분포를 표시하는 퍼지 집합이다. 이 가능성 분포로부터 가장 효과적인 제어기 출력값을 정하는 것을 비퍼지화라 한다.

본 논문에서는 비퍼지화 기법으로 단순 퍼지 추론법(simplified reasoning methods)을 적용하였다.

Mamdani의 IF-THEN 규칙에 의하여 규칙 [e_i and ce_j]에 대한 사실 [e and ce]의 적합도 (h_i)는 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$h_i = \mu_{e_i}(e) \cdot \mu_{ce_j}(ce) \quad (14)$$

이 경우 제어 입력값 (c)은 가중치 평균법(weighted average methods)을 적용하여 식(15)와 같이 얻어진다.

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

$$= abz_1 + a(1-b)z_2 + (1-a)bz_3 + (1-a)(1-b)z_4 \quad (15)$$

위의 식에서, a 와 b 는 식(16)과 같이 주어진다.

$$a = \mu_{e_1}(e) = \frac{e_2 - e}{e_2 - e_1}$$

$$b = \mu_{ce_1}(ce) = \frac{ce_2 - ce}{ce_2 - ce_1} \quad (16)$$

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

식(15)의 z_1, z_2, z_3, z_4 는 그림5의 4가지 경우의 각각 제어 룰 베이스에 따라 추론된 값이다.

전동기의 속도제어를 위한 퍼지 제어 입력값 (cy)은 식(15)에서 구한 c 값과 이득값 (Gcy)를 곱한 값이다.

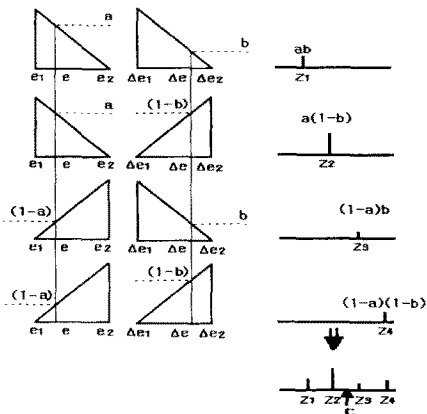


그림 5. 단순 퍼지 추론법
Fig 5. Simplified fuzzy reasoning methods

4. 실험 결과

퍼지 로직 속도 제어기는 C언어로 구현하였고, 모터 제어용 DSPchip(TMS320F240)을 사용하여 실험하였다. MAGTROL사의 Dynamometer Controller (DSP6000)로 속도를 측정하였다.

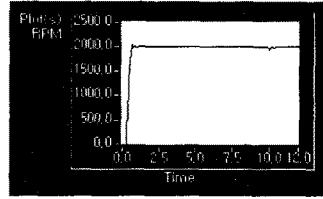


그림 6. 외란 발생시 속도출력 2000[rpm]
Fig 6. Speed result in disturbance

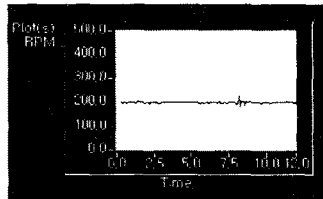


그림 7. 외란 발생시 속도출력 200[rpm]
Fig 7. Speed result in disturbance

그림6은 무부하 상태에서 기준속도가 2000rpm일 경우의 기동 특성을 나타내며, 10초구간에서 외란(0.5kg·cm)이 발생하였을 경우의 응답특성을 나타낸다. 외란이 발생한 시점에서 모터속도는 20rpm정도가 감소하였으나, 약 0.2초 후에 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 감소하였다. 그림7은 기준속도가 200rpm일 경우, 8초구간에서 외란(0.5kg·cm)을 가했을 경우의 응답특성을 나타낸다. 외란이 발생한 시점에서 모터속도는 약 20rpm정도가 감소하였으나, 약 0.5초 후에 기준속도와의 오차가 0.1% 이내로 감소하여 매우 우수한 외란억제 성능을 나타내었다.

5.결론

본 논문에서는 BLDC모터의 속도를 제어하기 위한 퍼지 로직 속도 제어기를 설계하였다. 이 퍼지 로직 속도 제어기는 제어 알고리즘을 소프트웨어적으로 처리하여 하드웨어를 간략화 하였다. 실험을 통하여 외란이 발생했을 때 기준속도에 잘 추종함을 확인하였고, 특히 저속 영역에서도 원활한 제어가 이루어짐을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] M.Mizumoto, "Realization of PID Controls by Fuzzy Control Methods", IEEE International Conference on, vol. 4, 709-715, March 1992.
- [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] V.Donescu, D.O.Neacsu, G.Griva, "A Systemic Design Method for Fuzzy Logic Speed Controller for Brushless DC Motor Drives", PESC 96", vol. 1, 689-694, June 1996.
- [4] Texas Instruments "Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive Using TMS320F240", BPA064, 1997.7.
- [5] B.K.Bose, "Power Electronics and AC Drives", Englewood Cliffs, N.J: Prentice Hall, 1986.