

브리시리스 전동기의 위치제어를 위한 Fuzzy Logic 제어기 구성에 관한 연구

박귀태 이기상* 김성호 배상욱 박태홍 이동원

고려대학교 대학원 전기공학과

*단국대학교 전기공학과

Design of Fuzzy Logic Position Controller for Brushless DC Motor

Gwi-Tae Park, Kee-Sang Lee*, Sung-Ho Kim, Sang-wook Bae, Tae-hong Park, Dong-won Lee

Department of Electrical Engineering

Korea University

*Department of Electrical Engineering

Dankook University

ABSTRACT

This paper discusses the possibility of applying fuzzy logic controller in a microprocessor-based brushless DC servo motor controller, which requires faster and more accurate response compared with other industrial processes. Limitations of fuzzy logic controller are also described.

1. 서론

근래 회전자 위치센서와 영구자석 제조기술의 발전에 따라 온전특성이 직류전동기와 유사하고 기계적 정류를 전력용 반도체 소자를 이용하여 전기적으로 정류시켜서 브러시의 기계적 정류에서 오는 본진과 스파크가 발생하지 않고 보수와점검이 필요없는 브리시리스 직류전동기(BLDC Motor)가 최근 널리 개발 사용되고 있다. (1)(2) 한편 80년대 이후 계통의 자동제어를 위해, 일반적 응용 가능성이 크고 정확히 모델링할 수 없는 계통을 제어할 수 있는 제어이론의 하나로써 전문가 지식을 기반으로한 FLC(Fuzzy Logic Controller)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FLC에 관한 연구로서 제어변수의 편차와 그 증분에 대한 Fuzzy Rule에 근거하여 제어 입력을 결정하는 MacVicar-Whelan(3)의 연구와 MacVicar-Whelan이 제시한 제어기 구성과 고전적인 PI제어와의 관계를 설정한 Tang[4]의 연구가 있다. 잘 알려진 위 방식의 문제점은 Fuzzy Level을 세분화(r-level)함에 따라 입력결정에 요구되는 Fuzzy Rule의 수가 r^n (n:Fuzzy Logic에 투입된 변수의 수)으로 추론과정에서 많은 시간이 소요되므로 실시간 제어에 어려움이 있다.

1988년 Haug(5)은 이 문제의 해결을 위해 Fuzzy Rule을 정량화하여 Look-Up Table화 함으로써 추론과정을 제거하여 이에 필요한 Memory Size를 감소시키는 동시에 실시간제어의 가능성을 보였다. 그러나 이 기법은 각 정량화 단계에 대응하는 미리 설정된 제어 입력을 선택함으로써 정량화 단계의 세분화 정도와 제어성능이 상충적 관계를 갖는다는 단점이 있다. 이에 대한 개선방안으로 Li(6) 등은 기존의 Look-Up Table과 미세제어(Fine Control)를 위한 Look-Up Table 추가로 사용하여 비교적 시응답이 빠른 계통으로 간주되는 DC Servo Motor를 Lookup Table 방식으로 오버슈트가 없도록 제어하여 그 유용성을 입증하였다. 본 논문에서는 일반적 DC Motor 보다 시간응답이 월등히 빠르고 사용이 급증하고 있는 브리시리스 직류전동기 제어를 위하여 Fuzzy 알고리즘을 이용한 위치제어기를 구성하고 시뮬레이션을 통하여 그 유용성을 비교하고자한다. 그 설계법은 BL Motor에 대해 안정하고 비교적 바람직한 응답특성을 나타내는 PD Gain을 선정하여 그 입력력 및 오차변화 경향을 분석하고 그 결과로부터 오버슈트 및 정상상태 편차를 최소한으로 줄일 수 있는 편차(Error), 편차변화(Change of Error) 및 제어입력(Control Input)의 Membership 함수와 Fuzzy Control Rule을 오차가 큰 경우와 오차가 작은 경우에 대하여 작성하고 이를 Lookup Table화 하는 것이다.

2. BLDC 모터의 제어를 위한 FLC의 구성

BLDC 모터의 FLC를 위해 도입할 수 있는 제어규칙의 형태는 다양하나 본연구에서는 오버슈트 없는 빠른 응답특성을 얻기 위해 PD 형태의 제어규칙을 사용한다. 그러나 PD 형태의 제어규칙에 의한 제어는

어느정도 정상상태 편차를 갖게 되며, 이를 제거하기 위해서 편차가 미리 규정된 범위내에 들 경우에만 적용되는 제어규칙(Fine Control Rule)을 사용해야 한다. 일반적으로 FLC를 위한 제어규칙을 구성하기 위해서는 입력변수와 출력변수의 선정이 요구되며, PD 형태의 제어규칙의 경우 이들은 편차와 편차의 변화량 및 제어입력이다.

본 연구에서 고찰한 BLDC 모터는 한 회전당 1000개의 pulse를 발생하는 Incremental 형태의 Encoder를 갖고 있으며 모터구동에 필요한 Amp는 $\pm 8[V]$ 범위의 전압을 발생한다. 따라서 FLC 제어기의 입출력 변수가 취할 수 있는 범위(Universe of Discourse)는 각각 다음과 같이 선정할 수 있다.

$$\begin{aligned} e &= \text{Setpoint} - \text{output} &: & -1000 \sim 1000 \\ ce &= e_2 - e_1 &: & -200 \sim 200 \\ u &= \text{Control Input} &: & -8 \sim 8 \end{aligned}$$

여기서 e_1 은 전단계의 편차이며 e_2 는 현재의 편차를 나타낸다.

2.1 제어규칙의 설계

제어대상에 인가되는 입력은 매 Sample 시각마다 편차와 편차의 변화량으로부터 결정될 수 있으며 이는 다음과 같은 IF - THEN 형태의 Linguistic Rule 로 표현된다.

$$\text{IF } (e = \text{PB and } ce = \text{PS}) \text{ THEN } (u = \text{PB})$$

여기서 PB, PS 등은 Linguistic Value 이고 본 연구에서는 각각의 입력변수에 대해 5 단계의 Linguistic Value 를 정의한다.

- PB : Positive Big.
- PS : Positive Small.
- ZE : Zero.
- NS : Negative Small.
- NB : Negative Big.

위에서 정의한 Linguistic Value를 사용하여 오버 슈트가 없는 응답특성을 갖게 하는 제어규칙은 전형적인 PD 제어기의 응답형태로부터 구할 수 있으며 이를 나타내면 표 1. 과 같다.

표 1. 의 Linguistic Value (NB, NS, ZO, PS, PB)를 Fuzzy화 하기 위해서는 Membership Function 을 도입해야 하며 본 연구에서는 제어규칙을 Look-Up Table화 하기때문에 Mamdani⁽⁷⁾가 이용한 Discrete 형태의 Membership Function을 사용한다. 이를 위해 입출력 변수를 양자화 하면 표 2.와 같고, 각 양자화 단계에 해당하는 Discrete Membership Function을 정의하면 표 3. 과 같다.

표 1. Coarse Control 을 위한 제어규칙

		Change of Error				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E r r o r	NB	NB	NB	NB	NS	PS
	NS	NB	NS	NS	ZO	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	ZO	PS	PS	PB
	PB	NS	PS	PB	PB	PB

표 2. Quantized Variables (Coarse Control)

e	ce	u	Quantize Level
-1000	-200	-8	-5
-800	-160	-6.4	-4
-600	-120	-4.8	-3
-400	-80	-3.2	-2
-200	-40	-1.6	-1
0	0	0	0
200	40	1.6	1
400	80	3.2	2
600	120	4.8	3
800	160	6.4	4
1000	200	8	5

표 3. Discrete Membership Function

Linguistic Set	Quantized Levels										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
PB	0	0	0	0	0	0	0	0	.2	.6	1
PS	0	0	0	0	0	0	.4	.8	.8	.4	0
ZO	0	0	0	.2	.6	1	.6	.2	0	0	0
NS	0	.4	.8	.8	.4	0	0	0	0	0	0
NB	1	.6	.2	0	0	0	0	0	0	0	0

표 1.의 Linguistic Rule에 위에서 정의한 Membership Function을 도입한후 Braae등⁽⁸⁾이 제시한 Min-Max Composition을 이용하면 다음과 같은 Membership Function을 갖는 Fuzzy Relation을 얻을 수 있다.

$$\mu_R(e_i, ce_i, u_i) = \max_{j=1}^N \{ \min[\mu_j(e_i), \mu_j(ce_i), \mu_j(u_i)] \} \quad \text{-- (1)}$$

여기서 μ 는 Membership Function 값, N은 Rule의 갯수를 나타낸다.

Fuzzy 알고리즘이 제어목적으로 페루프에서 사용

될때 플랜트로 부터 관측된 Non-Fuzzy 표현의 e_i 를 Fuzzy화 하기위해 다음과 같은 Fuzzy Set A1, A2 를 정의한다.

$$\mu_{A1}(e_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } e_i = e_{i0} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{--- (2)}$$

$$\mu_{A2}(ce_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } ce_i = ce_{i0} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{--- (3)}$$

식 (1) 은 식 (4) 에 의하여 Membership Function 으로 표현된 제어편차와 그 증분에 대응하는 제어입력 의 Membership Function 값을 결정하는데 사용된다.

$$\mu(u_i) = \max_{e_i, ce_i} [\min[\mu(e_i), \mu(ce_i), \mu_R(e_i, ce_i, u_i)]] \quad \text{--- (4)}$$

식 (2),(3)을 식 (4) 에 대입하면 식 (5)을 얻을 수 있다.

$$\mu(u_i) = \mu_R(e_{i0}, ce_{i0}, u_i) \quad \text{--- (5)}$$

이제 식 (5) 로부터 계통에 투입될 제어입력을 결정하기 위해 u_i 에 대한 Fuzzy 표현을 Non-Fuzzy 화 해야한다. 여기서는 Braae등⁽⁸⁾이 사용한 다음식을 이용한다.

$$u_i = \left[\frac{\sum_{j=1}^N (\text{Action}_j) (\text{Membership value}_j)}{\sum_{j=1}^N (\text{Membership value}_j)} \right] \quad \text{--- (6)}$$

여기서 Action_j 는 j 번째 Rule의 결론부에서 Membership Value가 최대로 되는 제어입력이다.

위의 과정을 통해 표 1.의 Linguistic Rule을 Look-Up Table로 만들면 표 4. 와 같다.

표 4. COARSE CONTROL 을 위한 Look-Up Table

		Change of Error										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
E r r o r	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-2	1	3
	-4	-5	-4	-4	-4	-4	-4	-3	-2	0	1	3
	-3	-5	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	3
	-2	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3
	-1	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4
	0	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
	1	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5
	2	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5	5
	3	-3	-1	0	1	2	3	3	3	4	4	5
	4	-3	-1	0	2	3	4	4	4	4	4	5
	5	-3	-1	2	3	4	5	5	5	5	5	5

그러나 표 1.의 Linguistic Rule은 근본적으로 PD 형태의 제어기와 같게되며 또한 양자화로 인해 정상 상태 편차가 존재하게 되므로 편차의 단계가 0 일 경우에만 구동되는 표 4. 와 같은 Fine Control을 위한 Linguistic Rule을 구성할 수 있다. Coarse Control의 경우와 동일한 단계를 거치면 표 7.의 Lookup Table을 얻을 수 있다.

표 5. Fine Control 을 위한 제어규칙

		Change of Error				
		NB	NS	ZO	PS	PB
E r r o r	NB	NB	NB	NB	NS	PS
	NS	NB	NS	NS	PS	PB
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
	PS	NB	NS	PS	PS	PB
	PB	NS	PS	PB	PB	PB

표 6. Quantized Variables (Fine Control)

e	ce	u	Quantize Level
-100	-60	-2.4	-5
-80	-48	-1.92	-4
-60	-36	-1.44	-3
-40	-24	-.96	-2
-20	-12	-.48	-1
0	0	0	0
20	12	.48	1
40	24	.96	2
60	36	1.44	3
80	48	1.92	4
100	60	2.4	5

표 7. FINE CONTROL 을 위한 Look-Up Table

		Change of Error										
		-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
E r r o r	-5	-5	-5	-5	-5	-4	-3	-3	-2	-1	0	0
	-4	-5	-4	-4	-4	-3	-3	-2	-2	-1	0	1
	-3	-5	-4	-4	-3	-3	-3	-2	-1	0	1	2
	-2	-5	-4	-3	-2	-2	-2	-1	0	1	2	3
	-1	-5	-4	-3	-2	-2	-1	0	1	2	3	4
	0	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
	1	-4	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5
	2	-3	-2	-1	0	1	2	2	3	4	5	5
	3	-2	-1	0	1	2	3	3	3	4	4	5
	4	-1	0	1	2	2	3	3	4	4	4	5
	5	0	1	2	3	3	3	4	5	5	5	5

전체 제어기를 나타낸 Block 선도는 그림 2. 과 같다.

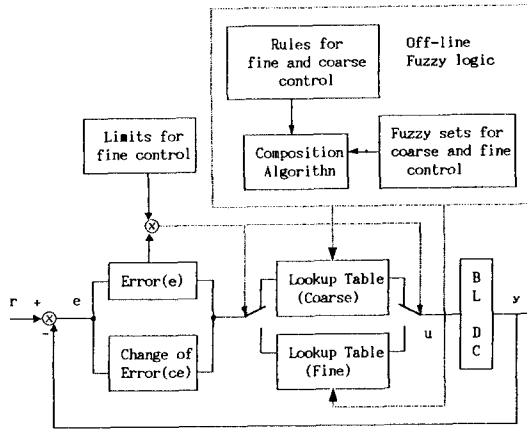


그림 1. 전체 제어기의 Block 선도

3. 시뮬레이션 결과

전동기의 위치, 속도, 전류를 각각 상태변수 x_1 , x_2 , x_3 로 선택하면 상태방정식은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} x = Ax + Bu \quad (4)$$

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -B/J & Kt/J \\ 0 & -Ke/L & -R/L \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/L \end{bmatrix}$$

위에서 각 파라미터는 아래와 같다.

$$B = 0.000001 \quad [N\text{-m}\text{-sec}^2]$$

$$Kt = 0.03582 \quad [N\text{-m}/A]$$

$$Ke = 0.03581 \quad [V\text{-sec}/\text{rad}]$$

$$R = 15.1 \quad [\text{ohm}]$$

$$L = 0.0053 \quad [H]$$

$$J = 0.000012166 \quad [V\text{-m}\text{-sec}^2]$$

Sampling time 이 0.025 초 인 경우의 FLC 응답 특성은 그림 3. 과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 계통의 응답은 오버슈트 없이 Setpoint를 잘 추종함을 알 수있다. 이에 대한 입력형태는 그림 4.와 같다.

4. 결론

Fuzzy Rule을 정량화하여 Look-Up Table화 함으로써 추론과정을 제거하여 이에 필요한 Memory Size를 감소시키므로 BLDC Motor의 위치제어에 대한 실시간제어의 가능성을 보였다. 또한 기존의 Look-Up Table과 미세제어(Fine Control)를 위한 Look-Up Table 을 함께 사용하여 정상상태편차의 감소 효과를 가져왔다. 그러나 본 연구에서 사용한 Fine Table의 제어 법칙은 PD형태이므로 보다 효과적인 정상상태 편차제거를 위하여 PI 형태의 제어법칙이 요구된다. 또한 효과적인 Membership Function의 선정 ,

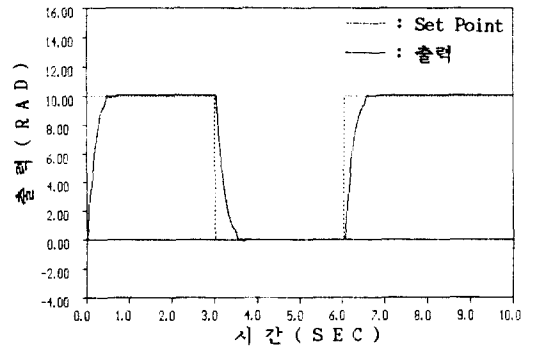


그림 3. 응답 형태

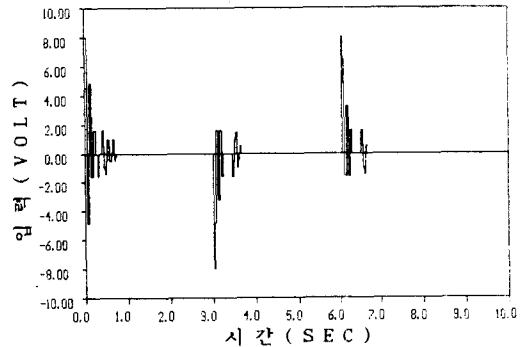


그림 4. 입력 형태

Universe of Discourse 의 체계적인 설정방법의 연구가 요망된다.

참고문헌

- [1] 송 명헌, " DSP를 이용한 브러시리스 직류 서보 전동기의 가변구조 위치제어기의 설계 ", 박사학위 논문, 고려대학교 전기공학과, 1990.
- [2] 여 형기, "DSP를 이용한 브러시리스 직류전동기의 완전 디지털화된 위치제어기 설계", 석사학위 논문, 전기공학과, 1990.
- [3] P.J. MacVicar-Whelan, "Fuzzy sets for man-machine interaction," Int.j. Man-Machine Studies, Vol.8 pp.687-697 , Nov.1976 .
- [4] K.L.Tang, "Comparing Fuzzy Logic with classical controller designs," IEEE Transactions on SYSTEMS, Man and CYBERNETICS, Vol .SMC-17, No6, NOVEMBER / DECEMBER 1987.
- [5] F.H.Haung , "Efficient Computer implementation of a rule-based three-term controller ,"

Proceedings of the 27th conference on decision and control. December 1988.

[6] Y.F.Li, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control Systems Magazine, April 1989.

[7] E.H.Mamdani, "The application of fuzzy control - systems to industrial processes," Automatica, Vol.13, pp.235-242.

[8] Braae, M. and Rutherford, D.A, "Theoretical and Linguistic aspects of the fuzzy logic controller," Automatica, Vol.13, pp.553-577.

[9] 김성호 , "Fuzzy Logic 제어기의 구성", 한국 자동제어 학술회의 논문집, 1989.

[10] J.A.Bernard, "Use of a Rule-Based system for process control, "IEEE control system magazine, October, 1988.

[11] L.A.Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, " IEEE Trans.on SMC , Vol.3, NO.1, January.

[12] R.M.Tong, "A control engineering review of fuzzy systems, " Automatica, Vol.13, pp.559-569.