

# 퍼지 속도 제어를 이용한 BLDD 모터의 이산 위치 제어

고 종선, 황 제규, 윤 명중  
한국과학기술원 전기및 전자 공학과

## Digital Position Control of BLDD Motor using Fuzzy Speed Controller

°Jong Sun Ko, Jae Gyu Hwang, Myung Joong Youn  
Dept. of Electrical Engineering KAIST, Korea

**Abstract :** In this paper, a new control for the robust position control of a brushless direct drive(BLDD) motor using fuzzy logic controller(FLC) is presented. The integral-proportional(IP) position with speed FLC is employed to obtain the robust BLDD motor system, which is approximately linearized using the field-orientation method for an AC servo. The speed FLC for a BLDD motor has the two rule tables. One is the coarse rule table for the transient state and another is the fine rule table for the steady state. The overall system is controlled by using the microprocessor in IBMPC 486 and the the robustness is also obtained.

### 1 서론

직접구동용 브러쉬 없는 직류 전동기는 기어나 체인의 사용 없이 직접 부하를 구동시킬 수 있다. 직접 구동 방식에서는 주로 저속 운전을 행하며 직접 구동의 특성상 높은 정밀도의 제어가 필요하고 토크 리플에 대한 고려가 필요하다. 이에 더불어 파라메타의 변화나 부정확성으로 기인한 위치의 미소한 변화도 직접 구동 방식에서는 문제가 될수 있다. 퍼지 제어기는 이러한 분야에 하나의 해결 방안이 될수 있다. 1965년에 L. A. Zadeh가 퍼지 이론을 정립한 이후에 많은 연구가 뒤를 따랐다[4][5][6]. 특히, Y. F. Li는 빠른 동적 특성을 가지는 DC 서보 모터에 적용하는 연구를 시뮬레이션 결과로 발표하였다[7]. 이러한 퍼지 제어기는 파라메타나 외란에 강한 특성을 가지고 있으나 미세한 리플을 줄이는 데에는 많은 퍼지 변수와 양자 레벨 혹은 다중 모드가 요구된다[2]. 본 논문에서는 퍼지 제어를 이용한 새로운 구조를 지니는 제어를 제안 하고 BLDD 모터의 위치제어에 응용하여 제어기의 성능과 장단점을 실험을 통하여 비교 분석 하였다.

### 2 직접 구동용 브러쉬 없는 직류 전동기의 수학적 모델

BLDD 모터도 3상 2극 동기 전동기의 등가 회로와 같고, 회전자는 영구자석으로 만들어져 있으므로 전압 방정식은

$$V_{abc} = r_s i_{abc} + p \lambda_{abc} \quad (2-1)$$

으로 주어진다[1]. 정현적 분포 가정에 의하여 회전자 기준축으로 d-q변환을 하면  $i_{qs} = i_a + i_b + i_c = 0$  이므로

$$i_{qs} = -\frac{r_s}{L_q} i_{qs} - \frac{L_d}{L_q} \omega_r i_{ds} + \frac{1}{L_q} - \frac{\lambda_m}{L_q} \omega_r \quad (2-2)$$

$$i_{ds} = \frac{L_q}{L_d} \omega_r i_{ds} - \frac{r_s}{L_d} i_{ds} + \frac{1}{L_d} V_{ds} \quad (2-3)$$

로 주어진다. 또 토크는

$$T_r = J \left( \frac{2}{p} \right) \frac{d\omega_r}{dt} + B \frac{2}{p} \omega_r + T_L \quad (2-4)$$

로 주어진다. 식에서 알 수 있듯이  $\omega_r i_{ds}$ ,  $\omega_r i_{qs}$ ,  $i_{qs} i_{ds}$ 에 의해 비선형 시스템의 특성을 갖는다. 만일 Field Orientation 방법으로 d 상 전류 명령  $i_{ds}^*$  를 영 으로 하면 실제 d상 전류  $i_{ds}$  는 거의 영이 된다[3]. 전류 제어를 이용한 위치 제어를 하기 때문에 위치의 동특성이 필요하므로 플렌트 모델은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\omega}_r = \frac{3}{2} \frac{1}{J} \left( \frac{p}{2} \right)^2 \lambda_m i_{qs} - \frac{B}{J} \omega_r - \frac{p}{2J} T_L \quad (2-5)$$

$$\theta = \omega_r \quad (2-6)$$

### 3 퍼지 제어의 응용

[2]에서 BLDC 모터의 위치제어에 PD형 퍼지 제어를 적용하여 증 방법으로 정상상태의 오차를 적게 만들려는 노력을 시도한 바 있으나 퍼지 변수를 많게 하거나 혹은 양자화를 더욱 미세하게 하여야 하는 문제점이 있었다. 일반 산업용 제어가 위치 제어 루우프의 PI와 그 안쪽 루우프에 속도 제어를 PI로 하는 구조로 되어 있으므로, 본 논문에서는 여기에 착안하여 IP+Fuzzy (IPFUZZY) 제어 방법을 도입하였다. 앞쪽 IP에서는 정상 상태의 위치 오차를 영으로 보내도록 하고 안쪽 속도제어 루우프에서는 비록 약간의 리플은 있으나 [2]의 연구결과에 따른 강인성을 얻도록 한다. 이상의 기존 제어 방법과 새로 제안된 제어 방법의 전체 시스템의 블럭 선도는 그림 1과 그림 2에 보인 바와 같다. 퍼지 제어기의 설계 단계는 다음과 같은 방법을 이용한다. 각 경우에 대하여 제어 입력을 오프라인으로 구하고 개

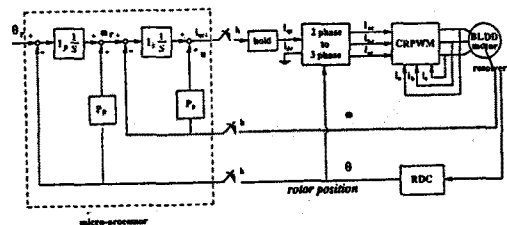


그림 1 기존 위치 제어기의 블럭 선도

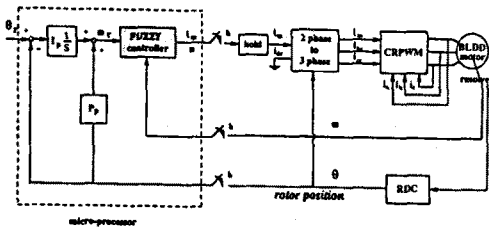


그림 2 제안된 위치 제어기의 블럭 선도

략 규칙표와 미세 규칙표를 만들어서 룩업 테이블 방식으로 제어를 하게 된다.

BLDD모터의 속도제어를 위한 위치 제어기의 조건 변수를 위치 명령에 따라 모터 속도의 오차(e)와 속도 오차의 시간에 대한 변화량(ce)으로 선정하며, BLDD 모터의 속도는 속도와 위치를 모두 얻을 수 있는 RDC의 속도 출력을 AD 컨버터로 읽어 얻을 수 있다. 속도 오차 변화량은 표본 주기 사이의 속도 오차 변화로 간단히 구하였다.

$$e(k) = \omega_r - \omega \quad (3-1)$$

$$ce(k) = e(k) - e(k-1) \quad (3-2)$$

BLDD모터의 q축 전류를 제어 입력으로 정하고, 본 시스템에서 퍼지 변수들의 전공간(Universe of Discourse)은 다음과 같다.

$$e : [-76.7 \ 76.7] \text{ [rad/sec]} \quad ce : [-13.7 \ 13.7] \text{ [rad/sec}^2]$$

퍼지 언어 변수를 PB, PM, PS, ZE, NS, NM, NB의 7단계로 선택하였다. 또 그에 대한 멤버십 함수(MF)를 각 양자와 레벨에 값이 있는 이산 함수로 사용하였다. 양자화의 단계는 11 단계로 하였고 또 여기서는 비선형 양자화를 택하였다. 양자화는 사사오입 형태를 사용했으며 이산 멤버십 함수에 의하여 양자화된 값에 퍼지 언어 변수에 대한 멤버십 함수를 부여 한다. 추론 과정은 e와 ce 각각에 부여된 언어 변수에 대한 MF를 사용하여 각 규칙표에 의거하여 e와 ce에 대한 제어 입력의 멤버십 함수를 구하는 과정이다. 본 논문에서는 직접법에서 Mizumoto의 방법인 Product-Sum 방법[8]을 사용하여 e와 ce에 대한 제어 입력의 MF를 구하였다. 직접 방법을 if-then 형식으로 표현하면 다음과 같이되고 여기에서 R은 퍼지 관계 이다.

$$\left( \begin{array}{l} e \text{ is } NB \\ ce \text{ is } NB \end{array} \right) \rightarrow u \text{ is } NB = (e, ce, u) \text{ is } R$$

Product sum method :

$$m_B(u) = m^i_{A_1}(e) \cdot m^i_{A_2}(ce) \cdot m^i_{A_1 A_2 \rightarrow B}(e, ce, u)$$

$$m_B(u) = m_{B_1}(u) + m_{B_2}(u) + \dots + m_{B_n}(u)$$

앞에서 구한 제어 입력의 MF를 사용하여 제어할 실제 제어 입력을 구하는 것으로, 본 논문에서는 가장 널리 쓰이고 있는 무게 중심법은 확률적인 평균이 되어 적절한 제어 입력으로 될 수 있으므로 이 방법을 사용하였다. 이것을 식으로 나타내면 다음과 같다. 양자화 단계에 따른 각 c와 ce에 대하여 속도 제어를 하기 위한 제어 입력의 룩업 테이블을 구한다. 제어 루틴은 속도 정보를 이용하여 속도 명령에 대한 e와 ce를 구하여 모듈 선택한 후 양자화를 한다. 그리고 위에서 생성된 규칙표를 사용하여 속도 제어를 실행한다.

$$uu = \frac{\sum_1^N m(u) \cdot u}{\sum_1^N m(u)} \quad (3-3)$$

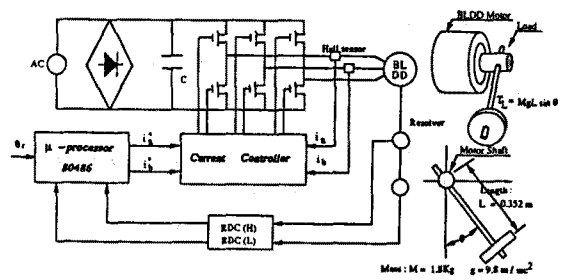


그림 3 전체 시스템 구성도

#### 4 실험 장치의 구성

전체 시스템의 구성은 그림 3과 같으며, 디지털 제어부는 검출된 신호를 받고 제어 명령을 구동부에 보내기 위해 인터페이스용으로 PC712 - Multilab Card를 사용하고 이를 내장한 486 PC로 이루어져 있다. 전동기의 상태 검출부는 회전자의 위치와 속도 정보를 검출한다. BLDD 모터의 특성상 정밀도를 높이기 위해 두개의 레졸버가 들어 있으며 이를 이용해 16비트 위치 신호를 만든다. 전동기의 토크와 직접 비례하는 q상 전류를 제어하기 위해 삼각파 비교형 PWM방식의 인버터를 사용하였다. 실험에 사용된 직접 구동용 브러쉬 없는 직류 전동기 및 부하의 사양은 다음과 같다.

교정자 저항(선간) : 34.5±10% [Ω]	교정자 인덕턴스(선간) : 40 [mH]
정격 전압 : 140 [V]	정격 전류 : 2.0 [A]
정격 속도 : 120 [rpm]	정격 출력 : 123 [W]
정격 토크 : 100 [kgf-cm]	기계 시상수 : 2.8 [msec]

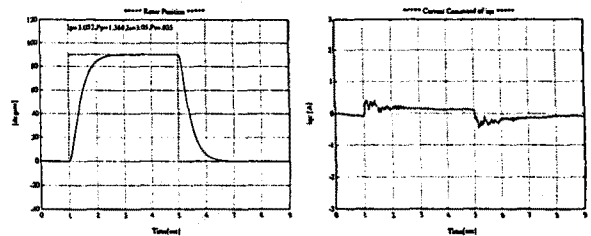


그림 4 기존 제어기(IPPI)의 무부하시 실험결과

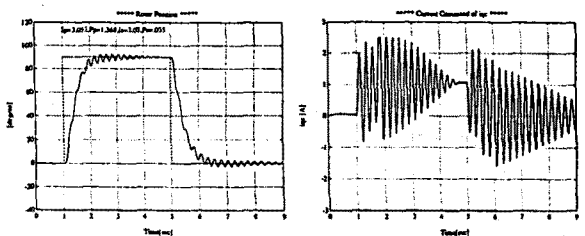


그림 5 기존 제어기(IPPI)의 불균형 부하 인가시 실험결과

### 5. 제어 시스템의 실험결과

PI 제어기는 처음에 비해 제어기에 의한 동작으로 갑자기 점프하는 출력이 나오는 반면에 IP제어기는 처음에 적분 제어기가 동작을 시작하기 때문에 처음부터 완만한 속도 프로파일 얻을 수 있다. 그림 4는 IP 위치기에 속도도 IP 제어기로 실험한 결과이다. 이 경우 속도 응답이 처음부터 완만한 것을 볼 수 있다. 또, 부하가 없는 경우에는 위치 응답특성이 좋고 오버 슈루트도 없다. 그러나 이 고정된 이득에서 불균형 관성부하를 인가하면 그로 인하여 그림 5에서와 같이 속도 응답이 글썽이 생기고 위치 응답에서도 과도상태에서 많은 떨림 현상이 발생한다.

CE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
C	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
M	NM	NB	NM	NM	NS	ZE	PS
S	NS	NB	NM	NS	NS	ZE	PS
Z	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
P	PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
M	PM	NS	ZE	PS	PM	PM	PB
B	PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

표 1 개략과 미세 제어의 규칙표

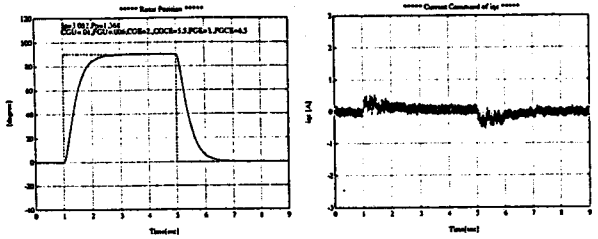


그림 8 제안된 제어기(IPFUZZY)의 무부하시 실험결과

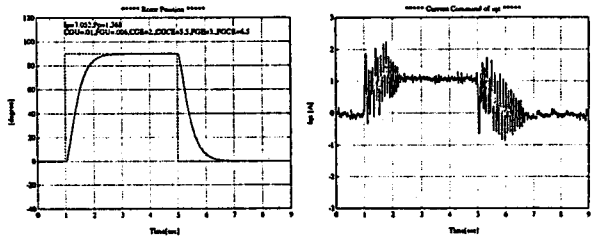


그림 9 제안된 제어기의 불균형 부하인가시 실험결과

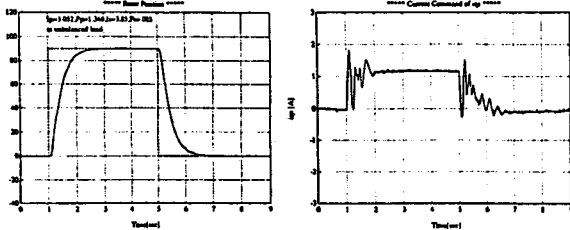


그림 6 기존 제어기의 부하인가 상태에서 이득을 조절한 실험결과

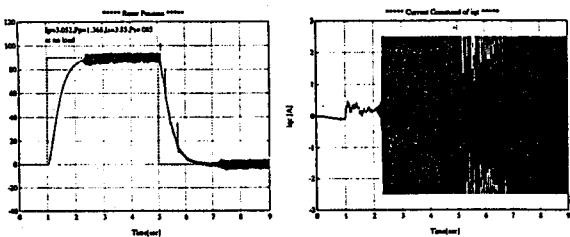


그림 7 그림 6의 경우에서 불균형 부하를 제거한 실험결과

물론 여기서 사용된 제어기의 이득들은 무부하에서 사용된 이득들과 똑같다. 그림 6에서는 불균형 부하를 인가한 상태에서 응답 특성이 잘 나오도록 이득을 맞추후 실험한 결과이다. 이상 상태에서 부하를 제거 하여 실험을 실시한 경우가 그림 7에 표시되었다. 이로인하여 기존 알고리즘은 부하의 큰 변화에 민감함을 알수 있다. 그림 8과 그림9는 제안된 시스템으로써 내부 루우프의 IP 속도 제어기를 퍼지 속도 제어기로 대체하여 실험한 결과이다. 그림에서 알수 있듯이 앞의 기존 방식에서 발생하는 진동 현상이 불균형 부하가 있거나 혹은 없는 것에 관계없이 거의 발생하지 않아 매우 안정하다. 즉 외란의 변화에 매우 강인하다.

### 6 결론

본 논문에서는 최근 산업체에서 많은 관심을 보이고 있는 퍼지 제어기를 빠른 동특성을 가지는 BLDD 모터의 위치제어에 적용하였다. 그 결과를 동일한 구조를 가지는 IPIP 제어기와 제안된 IPFUZZY 제어기의 특성을 비교하였다. 기존의 IPIP제어기는 고정된 이득하에서 부하의 큰 변화에 대해 강인하지 못함을 실험을 통해 확인하였다. 이것과는 달리 퍼지 제어기를 응용한 제안된 IPFUZZY 알고리즘은 빠른 응답을 요구하는 속도제어부분을 퍼지로 제어하고, 정상 상태에서 오차가 영으로 되는 것이 필수인 위치제어 부분은 기존의 IP제어기로 구성하였다. 그 결과 제안된 알고리즘이 부하등의 외란에 대해 매우 강인함을 실험적으로 보였다.

### 참고 문헌

- [1] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery," McGraw-Hill, 1984.
- [2] 고중선, 이정훈, 윤명중, "회로회로를 이용한 브러쉬리스 직류전동기의 파라미터의 변화와 외란에 둔감한 위치 제어," 대한 전기학회, 1991.
- [3] D. W. Novotny and R. D. Lorentz, "Introduction to Field Orientation and High Performance AC Drives," IAS-Tutorial Course, 1986.
- [4] M. Sugeno, "An Introductory Survey of Fuzzy Control," Information Science, vol. 36, pp.59-83,1985
- [5] D. A. Rutherford and G. C. Bloore, "The Implementation of Fuzzy Algorithms for Control," Proc. of The IEEE, pp. 572-573, April, 1976.
- [6] H. T. Chunyu, K. Toguchi, S. Shenoi and L. T. Fan, "A Technique for Designing and Implementing Fuzzy Logic Control," Proc. of the ACC, pp. 2754-2755, 1989.
- [7] Y. F. Li and C. C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems," IEEE Control System Magazine, pp. 65-72, April, 1989.
- [8] M. Mizumoto, "Min-Max-Gravity Method Versus Product-Sum-Gravity Method For Fuzzy Control," IFSA, 1991.
- [9] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision processes," IEEE Trans. Syst. Man. Cybern., Vol. SMC 3, pp. 28-44, 1973.
- [10] Kenji Sugiyama, "Rule-Based Self Organizing Controller, in "Fuzzy Computing, Theory, Hardware, and Applications," M. M. Gupta and T. Yamakawa, Elsevier Science Publishers B. V., 1988.