

적응 퍼지 P+ID 제어를 이용한 BLDC 전동기의 속도제어

권 정진, 한 우용, 신 동용, 김 성중
 전북대 제어계측, 전주공업대 전기과, 한라대 방사선과, 전북대 전자·정보 공학부

Speed Control of BLDC Motor Drive Using an Adaptive Fuzzy P+ID Controller

Kwon Chung-Jin, Han Woo-Yong, Sin Dong-Yong, Kim Sung-Joong
 Chonbuk Univ., Chonju technical Collage., Halla Univ.

Abstract - An adaptive fuzzy P+ID controller for variable speed operation of BLDC motor drives is presented in this paper. Generally, a conventional PID controller is most widely used in industry due to its simple control structure and ease of design. However, the PID controller suffers from the electrical machine parameter variations and disturbances. To improve the tracking performance for parameter and load variations, the controller proposed in this paper is constructed by using an adaptive fuzzy logic controller in place of the proportional term in a conventional PID controller. For implementing this controller, only one additional parameter has to be adjusted in comparison with the PID controller. An adaptive fuzzy controller applied to proportional term to achieve robustness against parameter variations has simple structure and computational simplicity. The controller based on optimal fuzzy logic controller has a self-tuning characteristics with clustering. Computer simulation results show the usefulness of the proposed controller.

퍼지 제어기는 샘플링한 입력과 출력 데이터를 이용하여 퍼지 시스템의 출력을 사용자가 요구하는 수준으로 맞출 수 있는 최적 퍼지 시스템을 기반으로 하면서 클러스터를 이용하여 적응성이 부여된 구조를 가진다. 이 제어기는 입력과 출력 데이터만을 이용하므로 제어대상의 모델을 필요로 하지 않는 장점이 있으며 구조가 간단하고 연산량이 적은 장점이 있다. 그림 1에 제시된 적응 퍼지 P+ID 제어를 적용한 BLDC 전동기 구동 시스템의 블록 다이어그램을 나타내었다.

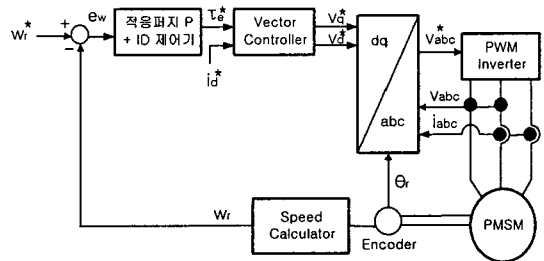


그림 1 BLDC 전동기 구동 시스템도
 Fig. 1 Block diagram of BLDC motor drives

1. 서 론

최근까지 BLDC(brushless DC) 전동기의 가변속 운전에서 사용된 PID 제어기는 구조가 간단하고 설계의 용이함등의 장점이 있지만, 제어기의 성능은 비례, 적분 및 미분 이득계수의 값에 의존하는 특성이 있다. 따라서, 외란이나 부하의 변동등 동작조건이 변하게 되면 최적의 제어이득계수의 재 동조작정이 필수적으로 요구된다[1]. 고전적 제어기의 이러한 단점을 해결하기 위해서 퍼지 논리에 기초한 제어기의 적용이 증가하고 있다. 퍼지 제어는 비선형적이고, 알려지지 않은 시스템을 전문가의 지식을 바탕으로 언어적인 변수에 의해서 제어할 수 있는 장점이 있다. 퍼지 제어기는 또한 고전적 제어기에 비해 강한 외란 적응 특성 및 유연한 제어 성능을 가지는 반면, 제어규칙 선정 및 소속함수와 스케일 팩터등의 결정을 작업자가 해야 하기 때문에 많은 시간이 소모되고 제어규칙 등의 선정이 부적합할 경우 제어기의 성능이 오히려 악화되는 결과를 초래하기도 한다. 본 논문에서는 구조가 간단한 PID 제어기의 장점을 유지하면서 BLDC 전동기의 가변속 운전시 외란이나 부하의 변동에 강한 제어성능을 얻기 위하여 적응 퍼지 P+ID 제어를 제안하였다. 제안된 제어기는 기존의 PID 제어기에서 비례 제어기 부분만 적응 퍼지 제어기로 대체된 구조를 가진다. 이렇게 함으로써 제시된 제어기는 PID 제어기와 비교했을 때 1개의 제어파라미터만이 추가되었으며 외란에 현실한 퍼지 제어기의 장점과 구조가 간단한 PID 제어기의 장점을 모두 가진다.

기존의 PID 제어기에서 비례 제어기를 대신하는 적응

2. 적응 퍼지 P+ID 제어기

2.1 퍼지 P+ID 제어기

적응 퍼지 P+ID 제어기의 구조를 그림 2에 나타내었다. PID 제어기의 출력은 일반적으로 식 1처럼 표현된다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt - K_D \dot{y}(t) \quad (1)$$

여기에서, K_p , K_I 와 K_D 는 각각 제어 이득값이다.

식 1의 이산화된 표현식은 다음과 같다.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_I T e(k) - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \quad (2)$$

여기에서, K 는 샘플링 시간이다.

식 2에 적응 퍼지 제어기의 출력 $\Delta u_r(k)$ 를 적용하여 식 3을 유도한다.

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = K_p^* \Delta u_r(k) + K_I T e(k) - K_D \frac{y(k) - 2y(k-1) + y(k-2)}{T} \quad (3)$$

식 3은 적응 퍼지 P+ID 제어기의 출력을 나타내는 식이며 K_I 와 K_D 는 PID 제어기와 같으며 K_p 는 퍼지 제어기의 비례 이득값으로 역시 K_p 와 같은 값을 사용하였다. 적응 퍼지 P+ID 제어기에서 적응 퍼지 P 제어기는 시스템 응답의 오버슈트와 상승시간의 개선에 크게 관여하므로 가장 중요하다. 한편, 적분 제어기는 정상상태 오차를 제거하며 미분 제어기는 시스템의 안정도에 관여한다.

2.2 적응 퍼지 제어기

다음과 같이 주어진 퍼지 로직 시스템을 생각하자[6].

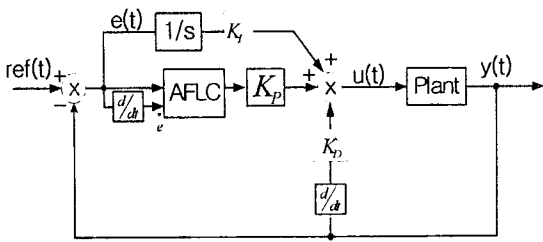


그림 2 적응 퍼지 P+ID 제어기 구조
Fig. 2 Adaptive fuzzy P+ID controller scheme

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \left[\prod_{i=1}^n a_i^l \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]}{\sum_{l=1}^M \left[\prod_{i=1}^n a_i^l \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) \right]} \quad (4)$$

여기에서, x_i : 입력의 중심값, x_i^l : 실제 입력값
 l : 규칙수, σ_i^l : 표준 편차

식 4는 singleton fuzzifier를 이용하여 입력변수를 퍼지화했고 σ 에 따라서 폭이 변하는 가우시안 멤버십 함수를 사용하였다. 또한, product-inference rule을 사용하였으며 무게중심법을 이용하여 비퍼지화했다. 식 4에서 식 5를 이용하여 다음의 최적 퍼지 로직 시스템을 유도할 수 있다.

$$\prod_{i=1}^n \exp\left(-\left(\frac{x_i - x_i^l}{\sigma_i^l}\right)^2\right) = \exp\left(-\frac{|x - x_0^l|^2}{\sigma^2}\right) \quad (5)$$

$$f(x) = \frac{\sum_{l=1}^M y^l \exp\left(-\frac{|x - x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{l=1}^M \exp\left(-\frac{|x - x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (6)$$

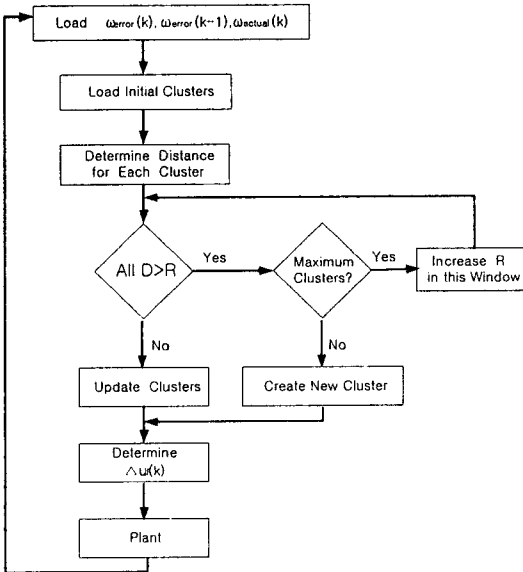


그림 3 적응 퍼지 제어기의 흐름도
Fig. 3 Flow-Chart of adaptive fuzzy controlle

최적 퍼지 논리 시스템은 모든 입력에 대하여 퍼지 시스템의 출력을 임의의 정확도 안에서 플랜트의 출력에 맞출 수 있다[6]. 하지만, 최적 퍼지 논리 시스템은 학습을 위

해서 한 쌍의 입·출력 데이터마다 한 개의 규칙이 사용되므로 적은 수의 입·출력 데이터 시스템에 적합하며, 보다 많은 수의 입·출력 데이터 시스템에 적용하기 위해 많은 데이터를 여러 개의 군으로 묶는 클러스터링 적응 기법을 도입한다. 그림 3에 클러스터링 적응 퍼지 제어기의 흐름도를 나타내었다. 제어기의 입력은 속도오차와 속도오차의 변화량이다. 출력은 전동기의 토크명령이다. 흐름도에서 슬라이딩 윈도우는 전동기의 부하와 실제 속도에 따라서 다른 클러스터 집합을 사용할 수 있게 한다. 클러스터의 집합이 결정되면 입력과 선택된 클러스터 집합내의 모든 클러스터와의 거리를 계산한다. 입력과 가장 가까운 클러스터와의 거리가 클러스터의 반지름보다 작으면 입력은 그 클러스터에 포함되며 클러스터의 출력계수를 갱신한다. 클러스터에는 새로운 클러스터를 생성한다. 생성된 클러스터의 수가 정해진 개수를 넘게되면 클러스터의 반지름을 증가시킨다. 마지막으로 입력의 비퍼지화를 통해서 크리스프(crisp) 출력을 생성한다. 단, 여기서

x^k, y^k : k 번째 샘플링 순간의 입·출력 데이터

x_0^M : M 번째 클러스터의 중심

x_0^k : k 번째 입력 x^k 와 가장 가까운 클러스터

D : 각 클러스터와 입력 데이터와의 거리

M : 각 윈도우의 클러스터의 개수

이다.

a) If $|x^k - x_0^l| > r$,

• 새로운 클러스터 생성

새로운 클러스터의 중심 : $x_0^{M+1} = x^k$

• set $A^{M+1}(k) = y^k, B^{M+1}(k) = 1$ (7)

keep $A^l(k) = A^l(k-1), B^l(k) = B^l(k-1)$ (8)
 $l = 1, 2, \dots, M$

b) If $|x^k - x_0^l| \leq r$, 다음처럼 적응 변수를 갱신한다.

• $A^l(k) = A^l(k-1) + y^k, B^l(k) = B^l(k-1) + 1$ (9)

• set $A^l(k) = A^l(k-1), B^l(k) = B^l(k-1)$ (10)
 $l = 1, 2, \dots, M, l \neq l_k$

따라서, k 번째 스텝의 적응 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$f_k(x) = \frac{\sum_{l=1}^M A^l(k) \exp\left(-\frac{|x - x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{l=1}^M B^l(k) \exp\left(-\frac{|x - x_0^l|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (11)$$

2.3 클러스터링 적응 퍼지 제어기의 적용

브러시리스 직류 전동기 구동 시스템의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다. 제안된 시스템에서 클러스터링 적응 퍼지 제어기의 입력은 연속적인 속도 오차값이며, 출력은 토크명령이다. 이렇게 함으로써 주어진 입력에 대해 시스템의 동특성 응답을 최적으로 수정된 값을 얻을 수 있다. 모든 클러스터는 같은 크기이고 최대 허용 개수는 실제 시스템의 자원에 맞추어서 정해지며, 그림 2에서 보여진 대로 클러스터의 허용 개수를 초과하면 클러스터의 반지름 r을 증가시킨다. 파라미터 σ 는 최적 퍼지 로직 시스템이 정확한 해를 가질 수 있게 하기 위해 사용된다. 이 값이 클수록 노이즈 제거에 유리하며 작을수록 추종 능력이 향상된다

3. 시뮬레이션 결과

앞에서 제시한 클러스터링 적응 퍼지 제어기의 성능을 평가하기 위해서 Matlab / Simulink를 이용하여 BLDC

표 1. 전동기 파라미터

관성모멘트 (J)	0.35 e-4	kgm ²
고정자 인덕턴스 (L)	10.9	mH
고정자 저항 (R)	4	Ω
극수 (P)	4	Nm/A
토크정수 (K _T)	0.53	Nm/A

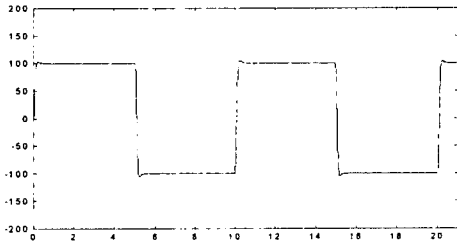


그림 4 속도응답 100(rad/s)
Fig. 4 Speed response

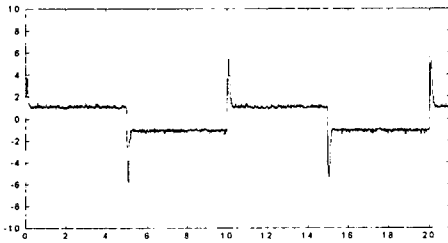


그림 5 토크응답 (Nm)
Fig. 5 Torque response

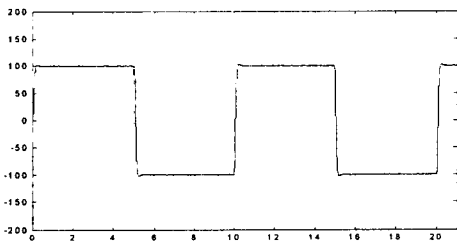


그림 6 파라미터 변화시 속도응답
Fig. 6 Speed response with varied parameter

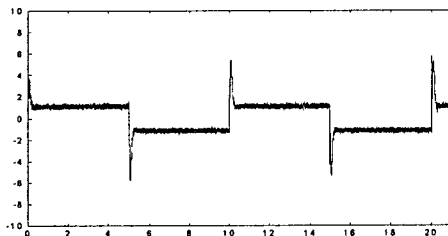


그림 7 파라미터 변화시 토크응답 (Nm)
Fig. 7 Torque response with varied parameter

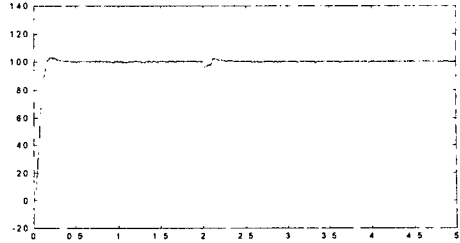


그림 8 부하외란의 인가시 속도응답
Fig. 8 Speed response to application of 2 torque at 2 (sec)

전동기의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 표 1에서 제시한 값을 가지는 BLDC 전동기의 모델을 사용하였다. 그림 4는 공칭 파라미터를 사용했을 때 제시된 제어기의 속도 응답이다. 기준 명령 속도는 100 (rad/s)이며 명령 속도를 잘 추종함을 보여준다. 클러스터의 반지름 r과 표준 편차 σ 는 모두 0.4 값을 사용했으며, 제어 규칙수인 클러스터의 개수는 하드웨어를 고려하여 40개를 사용했다. 그림 5는 이때의 토크 응답을 나타낸다. 그림 6은 파라미터가 변했을 때의 ($J=0.00105\text{kgm}^2$, $R=8\Omega$) 속도 응답이다. 제시된 제어기가 파라미터 변화에 견실함을 그림을 통해 확인할 수 있다. 그림 8은 2(sec)에서 부하외란(2 Nm)을 인가했을때의 속도 응답이다. 빠른 시간내에 명령속도를 회복함을 그림을 통해서 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 적응 퍼지 P+ID제어기를 이용하여 BLDC 전동기의 속도 제어를 수행하였다. 제시된 제어기는 제어 대상의 모델을 필요로 하지 않으며 파라미터의 변화에 견실한 특성과, 연산이 단순한 장점이 있다. 시뮬레이션을 통하여 제시된 제어기를 이용한 시스템의 성능이 우수함을 보였으며 속도 응답에서 리플이 많이 제거됨을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Chen Chien Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller Part I", IEEE Trans, V.20, no.2, pp.404-417, March/April, 1990
- [2] D. C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc., 1994
- [3] Jamshidi, M., Vadiie, N., Ross, T. "Fuzzy Logic and Control-Software and Hardware Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1993
- [4] Tang, Y., Xu, L. "Fuzzy Logic Application for Intelligent Control of a Variable Speed Drive", IEEE Transactions on Energy Conversion, V.9 pp. 679-85, IEEE N.Y. Dec. 1994
- [5] Y.F.Li and C.C. Lau, "Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems", IEEE Control System Magazine, pp. 65-72, April 1989
- [6] Wang, L., "Adaptive Fuzzy System and Control-Design and Stability Analysis," Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1994
- [7] Wei Li, "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, V.6, no.4, November 1998