

BLDC 전동기의 속도 제어를 위한 적응 퍼지 기법

권정진*, 한우용**, 김성중*, 임정흠***
전북대 전자정보*, 전주 공업대 디지털 전기정보**, 항공우주연구소***

An Adaptive Fuzzy Tuning Method for the Speed Control for BLDC Motor Drive

Chung-Jin kwon*, Woo-Yong Han**, Sung-Joong Kim*, Chang-Goo Lee*, Jeong-Heum Lim***
Chonbuk National University*, Jeongju Technical College**, KARI***

Abstract - This paper presents a speed controller based on the adaptive fuzzy tuning method for brushless DC(BLDC) motor drives under load variations. Generally, the speed tracking control systems use PI controller due to its simple structure and easy of design. PI controller, however, suffers from the electrical machine parameter variations and disturbances. In order to improve the tracking control performance under load variations, PI controller of which the parameters are modified during operation by adaptive fuzzy tuning method. This method based on optimal fuzzy logic system has simple structure and computational simplicity. It needs only sample data which is obtained by optimal controller off-line. As the sample data implemented in the adaptive fuzzy system can be modified or extended, a flexible control system can be obtained. Simulation results show the usefulness of the proposed controller.

1. 서 론

브러시리스 직류(BLDC:brushless DC) 전동기는 넓은 속도 범위에 걸쳐 높은 효율을 유지하고 정밀도가 높으며 제어가 용이하여 산업현장에서 널리 사용되고 있다. 최근까지 BLDC 전동기의 가변속 운전에서 사용된 PI 제어기는 구조가 간단하고 설계가 용이한 점동의 장점이 있지만, 제어기의 성능이 비례와 적분 이득계수의 값에 의존하는 단점이 있다. 따라서, 외란이나 부하의 변동등 동작조건이 변하게 되면 최적의 제어 이득계수의 재 동조과정이 필수적으로 요구된다[1]. 최근들어 고전적인 PI 제어기의 문제점을 해결하기 위해서 퍼지 논리에 기초한 제어기의 적용이 증가하고 있다.

퍼지 제어기는 고전적 제어기에 비해 강인한 외란 적응 특성 및 유연한 제어성능을 가지지만, 제어규칙 선정과 소속함수 및 스케일 팩터등의 결정을 작업자가 해야 하기 때문에 많은 시간이 소모되고 제어 규칙등의 선정이 부적합할 경우 제어기의 성능이 오히려 악화되는 결과를 초래하기도 한다[2]-[5].

본 논문에서는 구조가 간단한 PI 제어기의 장점을 유지하면서 BLDC 전동기의 가변속 운전시 외란이나 부하의 변화에 둔감한 제어성능을 얻기 위하여 PI 제어기의 제어 이득을 적응 퍼지 시스템을 이용하여 실시간으로 수정하는 제어기를 제안하였다. 제안된 제어기에 사용된 적응 퍼지 시스템은 샘플링한 입력과 출력 데이터를 이용하여 퍼지 시스템의 출력을 사용자가 요구하는

오차수준으로 제어할 수 있는 최적 퍼지 시스템을 기반으로 하면서 클러스터를 이용하여 적응성이 부여된 구조를 가진다. 또한 입력과 출력 데이터만을 이용하므로 제어대상의 모델을 필요로 하지 않는 장점이 있으며 구조가 간단하고 연산량이 적어 실시간 제어에 적용이 가능하다[6].

2. 제안된 속도 제어기

그림 1은 BLDC 전동기의 속도 제어에 많이 사용되고 있는 PI 제어기의 구조를 나타낸다. PI 제어기의 제어 명령은 식 (1)처럼 비례항과 적분항의 합으로 표현된다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int e(t) dt \quad (1)$$

여기에서, K_p 와 K_I 는 제어 이득값이다. 이를 이산화하여 표현하면 식 (2)처럼 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p [\Delta e(k) - e(k-1)] + K_I T e(k) \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, T 는 샘플링 시간이다.

BLDC 전동기 구동 시스템의 성능이 부하의 변화에 둔감하게 하기 위하여 본 논문에서는 시스템의 출력 오차와 그 변화율에 따라서 K_p 와 K_I 값이 적응 퍼지 시스템에 의하여 실시간으로 수정된다. 제안된 제어기의 구조는 그림 2에 나타내었으며 식 (3)처럼 표현된다.

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k) \\ &= K_p \Delta u(k) + K_I \Delta u_i T e(k) \end{aligned} \quad (3)$$

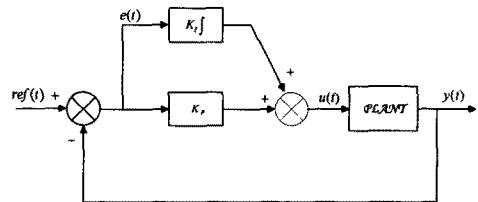


그림 1. PI 제어기 구조도

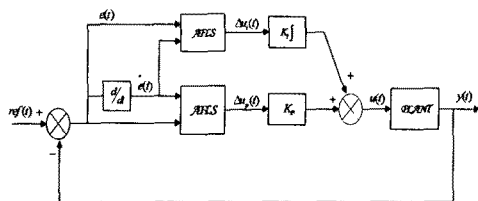


그림 2. 제안된 제어기의 구조도

여기에서, $\Delta u_r(k)$ 와 $\Delta u_i(k)$ 는 증분형 이산식으로 표현된 적응 퍼지 시스템의 출력이며, K^*p 와 K^*i 는 적응 퍼지 시스템을 적용한 제어기의 비례항과 적분항으로 PI 제어기의 K_p , K_i 와 같은 값을 사용하였다[7].

3. 적응 퍼지 시스템

그림 3은 제안된 제어기를 이용한 BLDC 전동기 제어 시스템의 블록 다이어그램이다. 그림 4는 적응 퍼지 시스템의 제어 흐름도를 나타낸다. 그림에서처럼 먼저 전동기의 실제 속도에 따라서 다른 클러스터 집합을 사용할 수 있도록 윈도우가 선택된다. 이를 통하여 시스템의 동특성과 제어 명령 신호에 정확히 응답할 수 있게 하는 클러스터 집합이 선택된다. 적응 퍼지 시스템의 입력은 속도 오차의 과거와 현재값으로 구성된다. 출력은 시스템의 동적 응답 특성을 수정하기 위하여 제어 이득값인 비례항과 적분항을 변화시키는 제어 명령의 변화량이다. 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. 클러스터의 개수에는 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^{lk} : k 번째 입력 x^k 와 가장 가까운 클러스터
 - D : 각 클러스터와 입력 데이터와의 거리
 - M : 각 윈도우의 클러스터의 개수
- 이다.

- a) If $|x^k - x_0^{lk}| > r$.
- 새로운 클러스터 생성
 - 새로운 클러스터의 중심 : $x_0^{M+1} = x^k$
 - set $A^{M+1}(k) = y^k, B^{M+1}(k) = 1$ (4)
 - keep $A^l(k) = A^l(k-1), B^l(k) = B^l(k-1)$ (5)
 - $l = 1, 2, \dots, M$
- b) If $|x^k - x_0^{lk}| \leq r$. 다음처럼 적응 변수를 갱신한다.
- $A^l(k) = A^l(k-1) + y^k, B^l(k) = B^l(k-1) + 1$ (6)
 - set $A^l(k) = A^l(k-1), B^l(k) = B^l(k-1)$ (7)
 - $l = 1, 2, \dots, M, l \neq l_k$

따라서, k번째 샘플의 적응 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 계산된다.

$$f_k(x) = \frac{\sum_{l=1}^M A^l(k) \exp\left(-\frac{|x-x_0^{lk}|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{l=1}^M B^l(k) \exp\left(-\frac{|x-x_0^{lk}|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (8)$$

클러스터의 개수는 시스템 환경에 적합하게 설정하며 적응 퍼지 시스템의 적응성은 새로운 입력을 주어진 개수의 클러스터 중심 주위로 위치시키는 능력에서 비롯된다. 클러스터의 반경과 σ 의 초기값은 off-line으로 구했다. 반경 r 은 흐름도에서 나타낸 것처럼 크기가 가변되며 작아질수록 새로운 클러스터의 생성 가능성이 높아진다. 파라미터 σ 는 적응 퍼지 시스템의 정확한 해를

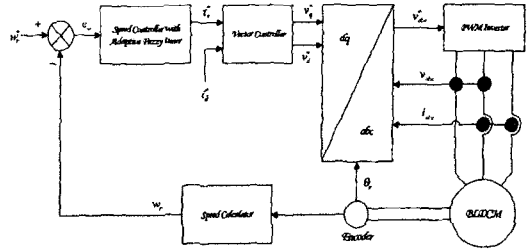


그림 3. BLDC 전동기 구동 시스템도

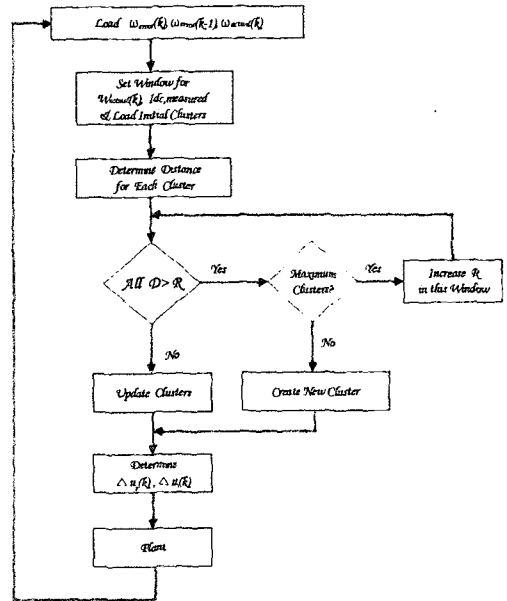


그림 4. 적응 퍼지 시스템의 흐름도

가질 수 있게 하기 위해서 사용된다. 이 값이 클수록 잡음 제거에 유리하며 작을수록 정확한 출력을 제공하며 추종 능력이 향상된다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제시한 속도 제어기의 성능을 평가하기 위해서 Matlab / Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 표 1에서 제시한 파라미터를 갖는 BLDC 전동기 모델을 사용하였다. 그림 5는 공칭 파라미터를 사용했을 때 제시된 제어기의 속도 응답이다. 기준 명령 속도가 300[rad/s]로 정·역으로 구동하였으며 명령 속도를 잘 추종함을 보여준다. 클러스터의 반지름 r 과 표준 편차 σ 는 모두 0.4 값을 사용했으며, 제어 규칙수인 클러스터의 개수는 하드웨어를 고려하여 40개를 사용했다. 그림 6은 이때의 토크 응답을 나타낸다. 그림 7은 파라미터가 변했을 때의 ($J=0.00105\text{kg m}^2, R=12\Omega$) 속도 응답이다. 제시된 제어기가 파라미터 변화에 견실함을 그림을 통해 확인할 수 있다. 그림 9는 2[sec]에서 부하토크(4 Nm)를 인가했을 때의 속도 응답이다. 빠른 시간내에 명령속도를 회복함을 그림을 통해서 알 수 있다.

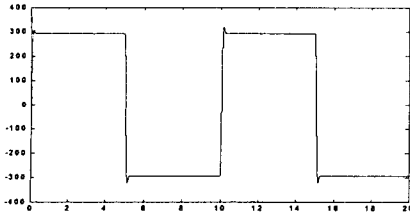


그림 5. 속도 응답 300 [rad/s]

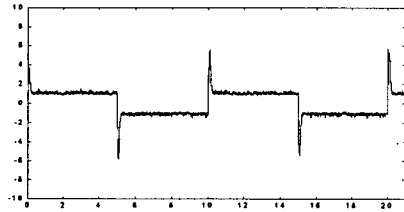


그림 6. 토크응답 [Nm]

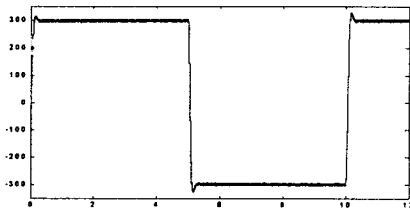


그림 7. 파라미터 변화시 속도응답 300 [rad/s]

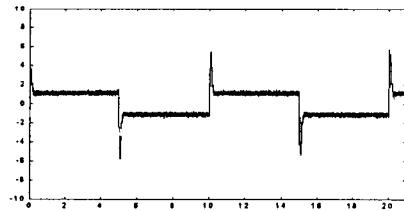


그림 8. 파라미터 변화시 토크응답 [Nm]

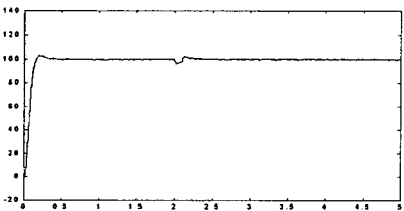


그림 9. 부하외란 인가시 속도응답 100 [rad/s]

5. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기의 가변속 운전시 부하와 전동기 파라미터의 변화에 둔감한 제어 성능을 얻기 위한 속도 제어를 제안하였다. 제안된 제어기는 PI 제어기의 제어 이득인 비례항과 적분항을 적용 퍼지 시스템

를 이용하여 시스템의 동적 응답이 속도 지령을 추종할 수 있도록 실시간으로 수정한다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 제어기를 적용한 BLDC 전동기 구동 시스템의 성능이 우수함을 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

표 1. BLDC 전동기 파라미터

Rotor Inertia	0.35e-4	kgm ²
Inductance	10.9	mH
Resistance	4	Ω
Torque Constant	0.53	Nm/A
Number of Pole Pairs	4	#
Mechanical Time constant	1.96	ms
Electrical Time Constant	1.08	ms