

영구자석 동기전동기의 고성능 구동을 위한 적응 퍼지 속도 제어기

권 정진¹, 한 우용², 이 창구³, 김 성중⁴, 김 배선⁵
 전북대 제어계측¹, 전주공업대 전기과², 전북대 전자·정보 공학부³, 한국 전자통신연구소⁴

Adaptive Speed Controller for high performance PMSM drive

Kwon Chung-Jin¹, Han Woo-Yong², Lee Chang-Goo³, Kim Sung-Joong⁴, Kim Bae-Sun⁵
 Chonbuk Univ.¹, Chonju technical Collage.², ETRI³

Abstract - This paper presents a clustering adaptive controller to achieve robustness against parameter variations although it has simple structure and computational simplicity. The presented controller based on optimal fuzzy logic controller has a self-tuning characteristics with clustering. The controller requires no model of the system to be controlled. Simulation results show that the usefulness of the proposed controller.

1. 서 론

영구자석 동기 전동기는 다른 서보 전동기와 비교할 때 많은 장점을 가지고 있다. 유도 전동기의 고정자 전류는 토크성분 전류와 자속성분의 전류를 포함한다. 영구자석 동기 전동기는 회전자로 영구자석을 사용하기 때문에 일정한 공극자속을 위해서 고정자에 자속성분의 전류를 공급할 필요가 없게 된다. 고정자 전류는 토크성분만을 포함하게 되어 동일 출력을 위해 유도 전동기보다 높은 역률을 유지하여 효율성이 높다. 동기 전동기는 여자를 위해 브러쉬와 슬립링을 필요로 한다. 영구자석 동기 전동기는 브러쉬와 슬립링이 필요 없어 회전자 손실과 정기적인 브러쉬 보수의 필요가 없다[1], [2].

일반적인 영구자석 동기 전동기의 속도 제어 시스템은 PI 제어방식에 의한 정속도 제어를 하고 있다. PI 제어기는 구조가 간단하면서도 적분기를 통해 정상상태 오차를 제거할 수 있는 장점이 있다. 그러나 PI 제어기는 파라미터 변화나 외란의 영향으로 강한 특성을 얻기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위한 방안으로 퍼지 제어를 들 수 있다.

퍼지 제어기는 1965년에 L. A. Zade가 퍼지 이론을 정립한 이후에 많은 연구 결과가 발표되었다[3][4]. Y. F. Li는 빠른 동적 특성을 가지는 DC 서보 모터에 적용하는 연구를 시뮬레이션 결과로 발표하였다[5]. 이후로 모터에 적용한 사례가 많이 연구되고 있다. 특히 파라미터 변화나 외란의 영향을 줄이기 위해 퍼지 제어기나 신경회로망을 적용하려는 연구도 발표되었다[6][7]. 특히 퍼지 제어기는 파라미터 변화나 외란에 강한 특성을 가지고 있으나 미세한 리플을 줄이는 데에는 많은 퍼지 변수가 요구된다. 이로 인해서 고성능의 시스템 하드웨어가 요구된다.

최근에는 퍼지 논리에 적응성을 추가한 적응 퍼지 논리 시스템을 이용하여 속도 제어시 리플을 감소시키는 방법이 많이 연구되고 있다. Huy, H는 기존의 모델 기준 적응 제어기를 대신하여 적응 퍼지 논리 제어기를 시스템에 적용하였다[8]. 이 방법은 출력 오차를 감소시키는 방법으로 파라미터 변화에 대한 강인성을 부여하면서 기존의 모델 기준 적응 제어기보다 빠른 응답 특성을 보였다. Wang, L.는 시스템의 추종오차가 항상 사용자의 요구에 만족되는 최적 퍼지 논리 시스템을 제안하였다[9]. Wang은 [9]에서 최적 퍼지 논리 시스템의 추종

능력이 기존의 모델 기준 적응 제어 시스템보다 우수함을 보였다. 하지만, 학습을 위해서 한 쌍의 입·출력 데이터마다 한 개의 규칙이 사용되며, 이는 입·출력 데이터의 수가 많은 경우의 실제 시스템에는 적합하지 않음을 의미한다. 본 논문에서는 연산이 간단하고 리플 현상이 없는 속도 응답을 얻기 위해서 클러스터링을 이용한 적응 퍼지 제어기를 제시하였다. 제시된 적응 퍼지 제어기는 최적 퍼지 논리 알고리즘에 클러스터링을 도입하여 적응성이 부여된 구조를 가진다. 이러한 구조는 비슷한 여러 개의 입력을 클러스터를 이용하여 하나의 그룹으로 대치함으로써 여러 개의 규칙을 대신하여 한 개의 규칙을 이용하는 효과를 보인다. 따라서 많은 수의 입출력 데이터가 사용되는 시스템에도 적합하며 성능면에서도 최적 퍼지 논리 시스템과 비슷한 성능을 보인다. 또한 슬라이딩 윈도우는 입력의 크기에 따라서 미리 분류되어 있는 클러스터 그룹을 선택할 수 있게 한다. 이렇게 함으로써 개략 제어와 미세 제어의 이중 모드 제어효과를 볼 수 있게 된다. 또한 제시된 제어기는 제어대상의 모델을 필요로 하지 않는다. 시뮬레이션을 통하여 제시된 제어기를 이용한 시스템이 우수한 동특성을 보이고 시스템의 파라미터와 부하의 변화에도 강인함을 보였다.

2. 클러스터링 적응 퍼지 제어기

2.1 클러스터링 적응 퍼지 제어기

다음과 같이 주어진 퍼지 로직 시스템을 생각하자[9].

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

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

식 1은 singleton fuzzifier를 이용하여 입력변수를 퍼지화했고 σ 에 따라서 폭이 변하는 가우시안 멤버십 함수를 사용하였다. 또한, product-inference rule을 사용하였으며 무게중심법을 이용하여 비퍼지화했다. 식 1에서 식 2를 이용하여 다음의 최적 퍼지 로직 시스템을 유도할 수 있다.

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

$$f(x) = \frac{\sum_{i=1}^M y^i \exp\left(-\frac{|x - x^i|^2}{\sigma^2}\right)}{\sum_{i=1}^M \exp\left(-\frac{|x - x^i|^2}{\sigma^2}\right)} \quad (3)$$

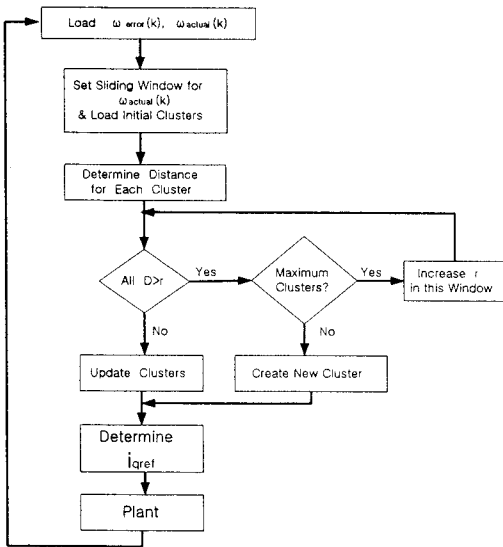


그림 1 클러스터링 적용 퍼지 제어기의 흐름도

최적 퍼지 논리 시스템은 모든 입력에 대하여 퍼지 시스템의 출력을 임의의 정확도 안에서 플랜트의 출력에 맞출 수가 있다[9]. 하지만, 최적 퍼지 논리 시스템은 학습을 위해서 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 적용 기법을 도입한다. 그림 1에 클러스터링 적용 퍼지 제어기의 흐름도를 나타내었다. 제어기의 입력은 속도오차와 속도오차의 변화량이다. 출력은 전동기의 토크 명령이다. 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. 클 경우에는 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 $|x^k - x_0^{i^k}| > r$,

• 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 $|x^k - x_0^{i^k}| \leq r$, 다음처럼 적용 변수를 갱신한다

• $A^{i^k}(k) = A^{i^k}(k-1) + y^k, B^{i^k}(k) = B^{i^k}(k-1) + 1$ (6)

• set $A^l(k) = A^l(k-1), B^l(k) = B^l(k-1)$ (7)

$$l = 1, 2, \dots, M, l \neq i^k$$

따라서, k번째 스텝의 적용 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 계산된다.

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

2.2 클러스터링 적용 퍼지 제어기의 적용

브러시리스 직류 전동기 구동 시스템의 블록 다이어그램을 그림 2에 나타내었다. 제안된 시스템에서 클러스터링 적용 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

앞절에서 제시한 클러스터링 적용 퍼지 제어기의 성능을 평가하기 위해서 Matlab/Simulink상에서 벡터제어 영구자석 동기 전동기의 시뮬레이션을 수행하였다. 이를 위하여 표 1에서 제시한 상수값을 가지는 영구자석 동기 전동기의 모델을 사용하였다.

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

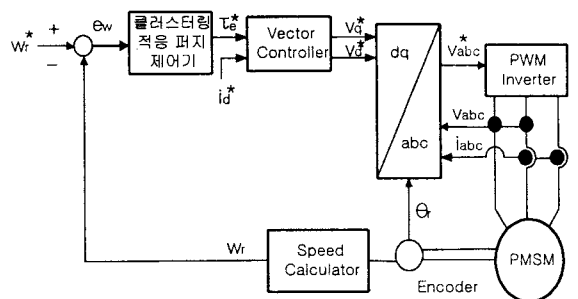


그림 2 전체 제어 시스템 블록 다이어그램

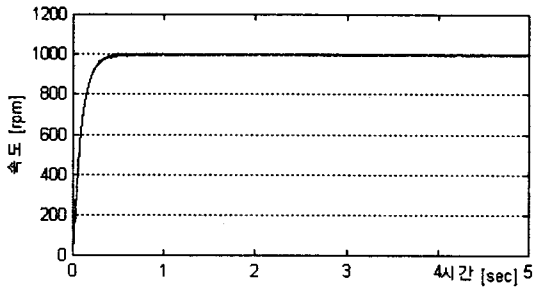


그림 3 속도 응답 1000 [rpm]

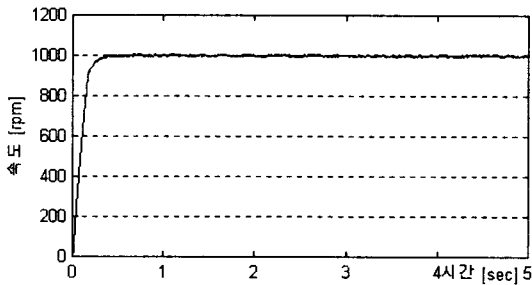


그림 4 전동기의 파라미터 변화시 속도 응답

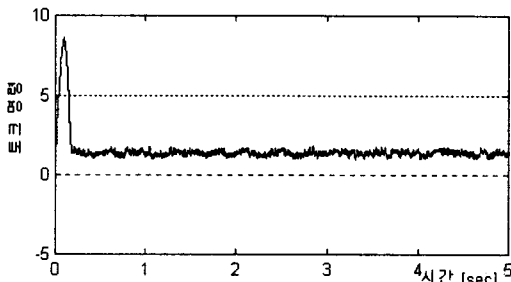


그림 5 제어기의 출력인 토크 명령

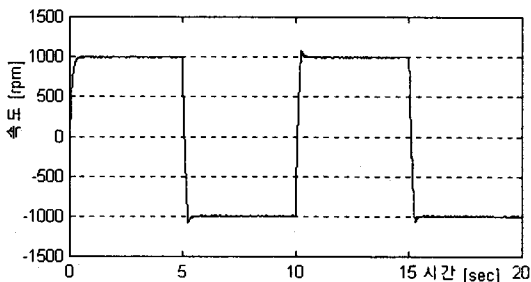


그림 6 정·역 운전시 속도 응답

그림 3은 제시된 제어기의 속도 응답이다. 기준 명령 속도는 1000 [rpm]이며 명령 속도를 잘 추종함을 보여준다. 클러스터의 반지름 r 과 표준 편차 σ 는 모두 0.3 값을 사용했으며, 제어 규칙수인 클러스터의 개수는 각 윈도우당 20개를 사용했다. 슬라이딩 윈도우는 정회전과 역회전의 경우 각 1개씩 모두 2개를 사용했다. 그림 4는 제어기의 출력인 토크 명령을 나타내며 토

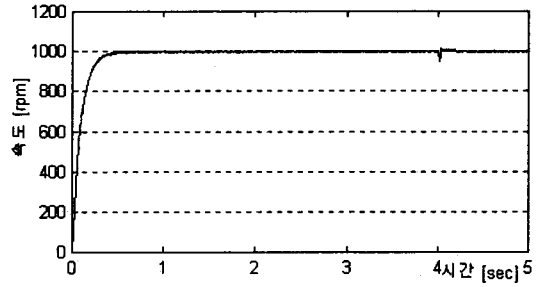


그림 7 부하토크 인가시 속도 응답

크 명령은 전동기의 토크 전류 i_q 로 변환된다. 그림 5는 정·역 회전의 속도 응답이다. 부하토크를 0.3 [sec]에 인가하였기 때문에 초기 구동시를 제외하고는 오버슈트가 발생함을 알 수 있다. 그림 6은 전동기의 파라미터를 변화($J=0.000040\text{kgm}^2$, $R=6\Omega$)했을 때의 속도 응답이다. 제시된 제어기가 파라미터 변화에 강인함을 그림을 통해 확인할 수 있다. 그림 7은 부하토크의 갑작스런 인가시 (3 N/m) 속도 응답이다. 빠른 시간내에 명령속도를 회복함을 그림을 통해서 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 클러스터링 적용 퍼지 제어기를 이용하여 영구자석 동기전동기의 속도 제어를 수행하였다. 제시된 클러스터링 적용 퍼지 제어기는 제어 대상의 모델을 필요로 하지 않으며 파라미터의 변화에 강인하고, 연산이 단순한 장점이 있다. 시뮬레이션을 통하여 제시된 제어기를 이용한 시스템의 성능이 우수함을 보였으며 속도 응답에서 리플이 많이 제거됨을 보였다. 또한, 전동기 파라미터와 부하의 변화에도 강인함을 보였다.

(참 고 문 헌)

- [1] Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", McGraw-Hill, Inc., 1987
- [2] D. C. Hanselman, "Brushless Permanent Magnet Motor Design", McGraw-Hill, Inc., 1994
- [3] 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
- [4] Jamshidi, M., Vadiie, N., Ross, T. "Fuzzy Logic and Control-Software and Hardware Applications", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1993
- [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] Jong-Sun Ko, Jae-Kyu Hwang, and Myung-Joong Youn, "Robust Position Control of BLDD Motor using Integral-Proportional plus Fuzzy Speed Controller", Proc. of IEEE IECON'93, pp. 213-218, 1993
- [7] Jong-Sun Ko, Jung-Hoon Lee, and Myung-Joong Youn, "A Robust Position Control of Brushless DC Motor with Adaptive Load Torque Observer", IEE Proceeding Part B Electric Power Applications, Vol. 141, No. 2, pp. 63-70, March 1994
- [8] Huy, H., "An Adaptive Fuzzy Controller For Permanent Magnet A.C. Servo Drives", Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference, IEEE N.Y. 1995
- [9] Wang, L. "Adaptive Fuzzy System and Control-Design and Stability Analysis", Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J. 1993