

PD제어기와 신경망 제어기를 이용한 유도전동기의 속도제어

양 오, 김 윤서*
 청주대학교 전자공학과

Speed Control of Induction Motor using Neural Networks and PD controller

Oh Yang, Youn Seo Kim*
 Dept. of Electronic Engineering Chong-ju University

Abstract - In this paper, a hybrid controller that consists of a conventional PD controller and a neural network controller which adapts to various control conditions by online learning is used and a new learning algorithm of the neural networks is used to prevent weights of neural network from diverging. A conventional PI controller and the hybrid controller is applied to speed control of 3 phase induction motor. So in comparison with a PD controller, we prove superiority of hybrid controller by experiments.

1. 서 론

최근 수많은 현대 제어이론이 제안되었음에도 불구하고 비례, 적분(PI)제어기나 비례, 적분, 미분(PID)제어기가 산업계에 널리 사용되고 있다. 이 제어기들은 그 구조가 간단하고 빠른 응답 특성과 함께 매우 견실한 특성을 갖고 있기 때문에 많은 분야에서 대부분의 제어기로서 사용되고 있지만 운전 중에 시스템의 파라미터가 변동하거나 동작 영역이 변할 때 제어기의 파라미터인 비례이득, 적분이득, 미분이득을 제어 대상에 따라 적절히 조정하기 어렵고, 특히 외란, 부하 변동 등 외부 환경이 변하는 경우 만족할만한 제어 성능을 얻을 수 없다. 특히 정밀 제어를 요하는 시스템에서는 정상 상태 오차가 크기 때문에 적용하기가 곤란하다.[1]

유도전동기는 기계적인 구조가 견고하고 유지보수가 용이하며 출력에 비해 소형이고 가격이 저렴하며 고속운전이 가능한 장점들을 가지고 있지만 상호결합과 비선형성 때문에 제어하기가 어렵고 제어특성이 복잡하여 실제 산업 현장에서는 정속도 구동장치로 그 용도가 제한적으로 많이 사용되고 있다.[2][3] 따라서 본 논문에서는 제어의 간편성과 안정성 때문에 현재 산업현장에서 가장 많이 쓰이는 제어기인 PI제어기와 학습능력을 가지고 있어 환경이나 시스템 자체에 대한 사전 지식 없이도 변화하는 제어 환경에 스스로 적응할 수 있는 신경망 제어기와 PD제어기가 병렬로 연결된 하이브리드 제어기를 유도전동기의 속도제어 시스템에 적용하여 하이브리드 제어기의 우수성을 실험적으로 입증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 신경 회로망의 설계

신경 회로망의 구조가 간단하고 학습 능력과 외란에 대한 강인성 때문에 식별과 제어에 많이 쓰이는 것이 전향 신경 회로망(feedforward neural networks)이다. 이 신경 회로망은 일단 전방향으로 일시에 계산이 되기 때문에 계산 시간이 적지만, 외부적 시간 지연을 통해 신경 회로망의 입력에 플랜트의 입출력에 대한 과거값을 넣어 주어야 한다. 본 논문에서 사용된 전향 신경 회로망 제어기의 구조는 그림 1과 같다.[4]

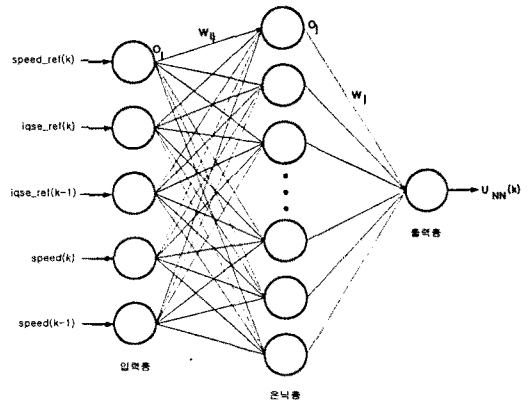


그림 1. 신경 회로망의 구조

신경 회로망의 학습 과정에 있어서 활성 함수가 학습에 미치는 영향은 매우 크다. 학습에 주로 사용되는 활성 함수로는 unipolar sigmoid, bipolar sigmoid, radial base function 등이 사용되지만, 제어 문제에서와 같이 양과 음의 값을 필요로 할 때는 bipolar sigmoid 형인 tanh(·)이 주로 사용된다. 특히 이와 같은 활성 함수는 매우 복잡한 논리나 지식을 학습할 수 있다는 장점이 있기 때문에 본 논문에서는 제어에 적합하도록 bipolar sigmoid형을 사용하였다.

$$U_{NN}(k) = \sum W_j O_j + \theta \tag{1}$$

$$O_j = \tanh(\sum W_{ij} O_i + \theta_j) \tag{2}$$

가장 많이 사용되는 학습 방법으로는 최대 경사법의 일종인 오차 역전파(error back-propagation) 학습 알고리즘을 들 수 있다.

$$W(k+1) = W(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial W} \tag{3}$$

그러나 이 학습 방법에서는 신경 회로망의 가중치들이 안정하게 학습됨을 보장할 수 없고 실제 신경 회로망의 가중치들이 발산하는 경우가 종종 있다. 이와 같은 학습 방법을 개선하기 위해 신경망의 가중치 값들이 어떤 유한한 범위에 있도록 하는 새로운 오차 역전파 학습 알고리즘을 사용하였다.[1]

먼저 은닉층 j 번째 뉴런과 출력층 사이의 가중치에 대한 학습 방법을 식 (3)의 우변에 새로운 항을 추가하여 학습 알고리즘을 식 (4)와 같이 변형한다.

$$W_j(k+1) = W_j(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial W_j(k)} - \sigma W_j(k) \left| \frac{\partial E(k)}{\partial W_j(k)} \right| \tag{4}$$

i 번째 입력층과 j 번째 은닉층 뉴런 사이의 가중치 학습 방법을 식 (4)와 같이 수정하면 다음과 같다.

$$W_{ij}(k+1) = W_{ij}(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial W_{ij}(k)} - \sigma W_{ij}(k) \left| \frac{\partial E(k)}{\partial W_{ij}(k)} \right| \quad (5)$$

이상과 같이 기존의 오차 역전파 학습 알고리즘에 새로운 항을 추가함으로써 신경 회로망의 가중치들이 발산하지 않고 안정한 신경 회로망이 설계될 수 있다.

2.2 신경망이 포함된 하이브리드형 제어기 설계

하이브리드형 제어기는 초기에는 PD제어기에 의해 제어가 이루어지다가 시간이 지남에 따라 신경망이 PD제어기의 출력을 0으로 가도록 학습함으로써 나중에는 신경 회로망 제어기가 주 제어기가 되도록 한 것이다. 이것은 PD제어기와 신경 회로망 제어기가 병렬로 연결된 구조로써 그림 2에 나타내었다.

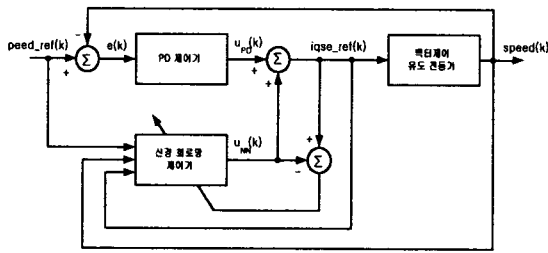


그림 2. 하이브리드형 제어기 구조

유도전동기를 제어하기 위한 제어입력 $iqse_ref(k)$ 는 기존의 PD제어기의 출력 $u_{PD}(k)$ 와 신경 회로망 제어기의 출력 $u_{NN}(k)$ 의 합으로 다음과 같다.

$$iqse_ref(k) = u_{PD}(k) + u_{NN}(k) \quad (8)$$

학습을 위한 오차 함수 $E(k)$ 는 식 (9)와 같이 선정하였다.

$$E(k) = \frac{1}{2} [iqse_ref(k) - u_{NN}(k)]^2 \quad (9)$$

이와 같이 신경 회로망 제어기가 주제어기로 되었을 때는 제어 대상 플랜트에 외란이 존재하거나 부하변동과 같은 상황에서도 강인한 제어가 가능하며 아울러 정상 상태 오차도 크게 줄어들어 정밀한 제어를 할 수 있다.

2.3 유도전동기의 속도 제어 시스템 구현

본 논문에서는 유도전동기의 속도제어로 유도전동기의 복잡한 제어특성을 직류전동기의 제어특성과 유사한 조건으로 단순화한 벡터 제어법을 사용하였으며[3], 유도전동기의 온라인 제어를 위해 신경 회로망을 간단히 구현하였다. 또한 계산량이 많은 신경 회로망을 구현하기 위해 초고속 프로세서인 DSP(TMS320C31-40MHz)를 사용하였고, PWM파형 발생과 속도계측을 위해 PWM 전용의 ASIC을 사용하여 신경회로망 구현시 문제시되어왔던 연산 속도의 문제를 개선하였으며, ASIC으로부터 100us마다 외부인터럽트를 발생시켜 전류계측과 전류 PI제어를 하도록 하였다. 전류계측을 위해 12비트의 A/D변환기가 사용되었으며, 속도계측을 위해서는 1회전당 8,192펄스를 발생하는 높은 분해능의 엔코더를 사용하여 이를 4채널하여 M/T 방법에 의해 실제 속도를 계산하였다. 스위칭소자는 Fuji사의 600V, 300A의 정격을 가지는 IGBT를 사용하였으며, 스위칭소자의 보호를 위한 deadtime을 5us로 설정하였다. 실

시간 제어 상에서 각각의 데이터는 PC를 통해 모니터할 수 있으며, 각각의 디지털 데이터들은 8비트의 D/A변환기 4채널을 통해 오실로스코프에서 계측할 수 있도록 하였다.

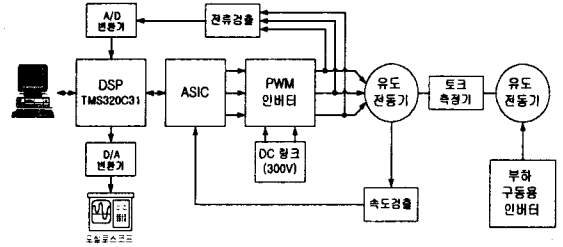


그림 3. 유도전동기의 속도제어 시스템

그림 3에 본 논문에서 사용된 유도전동기의 속도제어 시스템의 구성을 나타내었고, 표 1에 유도전동기 속도제어시스템에 대한 세부사항을 나타내었다.

표 1. 유도전동기의 제어시스템 사양

Motor	3 Phase Induction Motor (2.2 KW)	
DSP	TMS320C31-40MHz	
ASIC	동작주파수	40 MHz
	PWM의 분해능	12 비트
	Dead Time 설정	10 비트
	기타 기능	PWM 보호회로, 속도 검출(M/T 방법)
인버터	IGBT(Fuji, 정격 600V, 300A)사용	
메모리	Flash Memory : AMD29F010 RAM : 68257(32KB)×4	
A/D변환기	AD7891(8채널 12 비트)	
D/A변환기	AD7226(4채널 8 비트)	

2.4 실험방법 및 결과

본 실험에 사용된 전동기는 2.2kw(3마력)의 유도전동기로서 극수는 4개, R_s (고정자 저항)은 0.915(Ω), R_r (회전자 저항)은 1.11091(Ω), L_m (자화 인덕턴스)는 0.1132335(H), L_r (회전자 인덕턴스)와 L_s (고정자 인덕턴스)는 0.189705(H), J (관성모멘트)는 0.1(Kg·m²), $Slip Constant$ 는 5.856의 파라미터를 가진다. 또한 제어기의 파라미터로서 η (학습률)은 0.0015, α (활성함수의 기울기)는 0.007, β (오프셋의 학습률)은 0.01, 입력층의 뉴런 수는 5개, 은닉층의 뉴런 수는 15개, P 계인은 0.2, I 계인은 2.0, D 계인은 0.004의 값을 사용하였다.

하이브리드형 제어기의 성능을 평가하기 위하여 유도전동기의 속도제어에 적용하였으며 기준속도로 처음 6초 동안에는 500rpm, 그 후에는 1000rpm으로 하였다. 부하토크는 3~4초와 9~11초구간에서 5.9N·m의 부하토크를 주어 과도 특성과 부하특성을 관찰하였다.

그림 4와 그림 5에 유도전동기의 속도제어에 대한 과도특성과 부하특성에 대한 응답곡선을 나타내었다. 그림에서 한 눈금당 2V가 표시되며, 1V당 130rpm을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 PI제어기를 사용했을 때 정상상태에 도달하는 시간은 약 0.7초이며, 하이브리드제어기를 사용했을 때 정상상태에 도달하는 시간은 약 0.5초로써 더 빠름을 알 수 있으며, 부하특성 또한 하

이브리드형 제어가 훨씬 안정함을 알 수 있다.

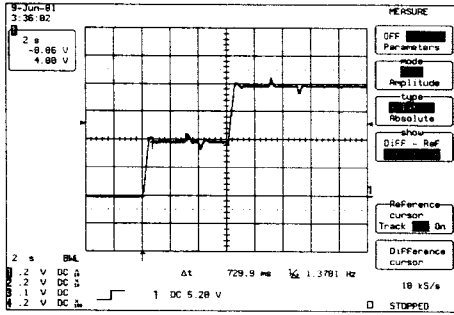


그림 4. PI제어의 속도 응답

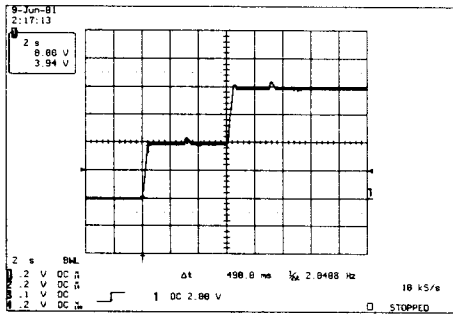


그림 5. 하이브리드형 제어의 속도 응답

그림 6과 그림 7은 각 제어기로부터 나온 유도 전동기의 제어입력전류(i_{qs_ref})를 나타낸다. 한눈에 5V를 나타내고, 1V당 3A의 값을 가지며 과도한 전류의 흐름을 방지하는 전류 리미트를 24A로 하였다.

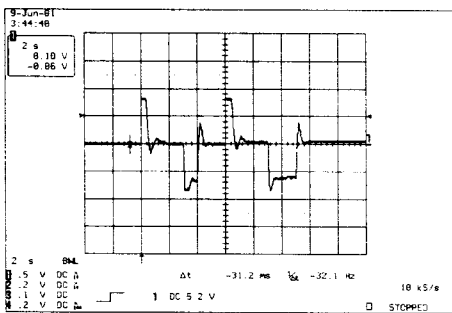


그림 6. PI제어의 출력 전류

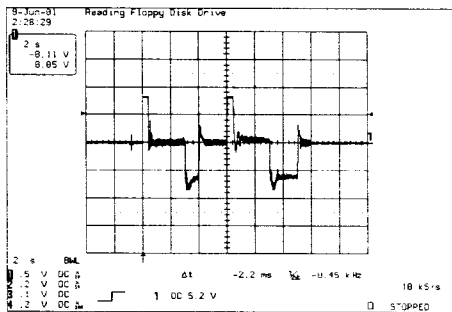


그림 7. 하이브리드제어의 출력 전류

그림 7에서 처음에는 하이브리드 제어기 중 PD제어가 주 제어 입력전류로 나타나지만 시간이 지나 신경 회로망의 학습이 이루어지면서 PD제어의 값은 적어지고 신경 회로망 제어가 주 제어 입력전류가 됨을 실험을 통해 알 수 있었다.

그림 8과 그림 9는 속도오차 절대값에 대한 함으로써 1V당 11000rpm의 값을 나타낸다.

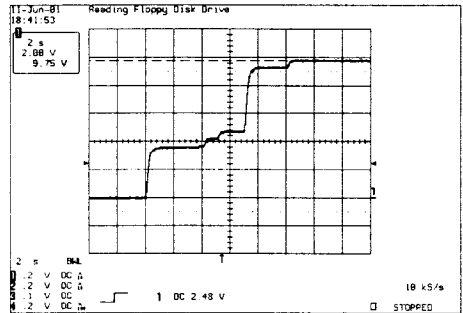


그림 8. PI제어의 속도오차 절대값에 대한 함

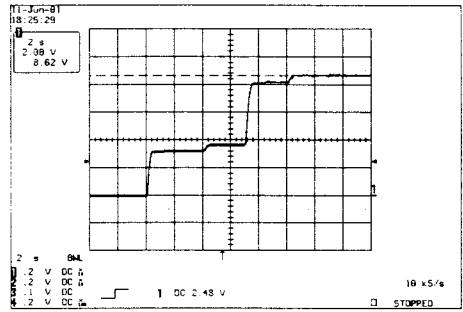


그림 9. 하이브리드제어의 속도오차 절대값에 대한 함

3. 결 론

하이브리드 제어를 3상 유도전동기의 속도제어에 적용한 실험 결과에서 알 수 있듯이 하이브리드형 제어기가 과도 상태에서 일반적인 PI제어기보다 더 빠른 응답성을 나타냄을 알 수 있다. 정상상태에서도 더 안정하고 더 작은 오차를 가지며, 외란이나 부하변동시에도 외부의 환경에 더 빨리 적응함으로써 하이브리드 제어기가 PI제어기의 단점을 개선함을 알 수 있다. 이로써 하이브리드 제어기의 우수성을 실험을 통해 확인하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 양오, 양해원, "수정된 PD제어기와 신경 회로망을 이용한 하이브리드 제어 시스템의 구현", 대한전기학회 논문지, vol 45, no5, pp 764-772, 1995
- [2] Mohamed Chtourou, Nabil Derbel, Mohamed Ben Ali Kamoun, "Control of a loaded induction machine using a feedforward neural network", Journal of Systems Science, vol 27, no 12, pp1287-1295, 1996
- [3] B.K. Bose, "Power Electronics and AC drivers", Prentice Hall
- [4] 김대수, "신경망 이론과 응용(I)", 하이테크정보