

직류 서보 전동기 센서리스 속도제어를 위한 뉴로-퍼지 관측기 설계

論 文
56P-3-3

Design of a Neuro-Fuzzy Observer for Speed-Sensorless Control of DC Servo Motor

安昌煥[†]
(Chang-Hwan Ahn)

Abstract - This paper deals with speed-sensorless control of DC servo motor using Neuro-Fuzzy Observer. DC servo motor has very low rotor inertia and excellent response characteristic and it is very useful to control torque and speed. It is easy to detect the voltage and current and resolver or encoder is used to measure a rotor speed. But it has a limit as a driving speed to detect speed precisely. So it is problem to improve the performance of the driving system. To solve this problem, it is studied to detect a speed of DC servo motor without sensor. In particular, study on the method to estimate the speed using the observer is performed a lot. In this paper, the gain of the observer is properly set up using the Neuro-Fuzzy control and Neuro-Fuzzy Observer that have a superior transient characteristic and is easy to implement compared the existing method is designed. It calculates the differentiation of the rotor current directly using the rotor current measured in the DC servo motor and estimates the speed of the rotor using the differentiation. Proposed speed sensorless control method is performed using the estimated speed. Also, it is proved feasibility of the proposed observer from the comparison tested a case with a speed sensor and a case without a speed sensor which used a highly efficient drive and 200[w] DC servo motor starting system.

Key Words : DC servo motor, Neuro-Fuzzy observer, Speed-sensorless control

1. 서 론

오늘날 VLSI 회로를 테스트하는 데 있어서 어려운 점은 본질적으로 검침(probing)을 위해 내부 점점에 접근하기 어려운 데 기인한다. 이와 같은 VLSI를 테스트하기 위해 회로 내에서 패턴을 만들기 위해 메모리 소자를 사용해서 테스트 패턴 생성기(TPG : Test Pattern Generator) 같은 추가 로직으로 묶는 것이다[1]. 결과 분석도 출력결과 분석기(ORA : Output Response Analyzer) 등을 통해 칩 내에서 이루어질 수 있다[2]. 이와 같은 방법을 내장된 자체 테스트라고 한다. 현재로서는 BIST가 가중되는 회로의 복잡도와 집적도에 기인한 테스트 문제를 해결할 최적의 해결책으로 여겨지고 있다[3]. 만일 256개의 의사 무작위 패턴이 가해졌을 때, 66개의 결정 패턴만을 가하면 고장 검출률 100%를 보장할 수 있다. 현재 산업현장에 사용되고 있는 직류서보전동기는 회전자 관성이 매우 적고 응답특성이 우수하다는 장점이 있으며 전기자 전류를 독립적으로 제어할 수 있어 전동기의 토크 제어와 속도 제어에 있어 매우 용이하다. 그러나, 직류서보전동기의 전압과 전류의 검출은 비교적 용이하지만 회전자의 속도 정보를 얻기 위해서는 레졸버(Resolver)나 엔코

더(Encoder)와 같은 속도 센서가 필요하게 된다[1][2]. 엔코더나 레졸버 등의 속도센서를 이용해 속도를 검출하지 않고 전동기의 속도를 제어하는 방법에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서도 추정 알고리즘을 이용하여 속도 추정 및 보상하는 관측기 설계 법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 속도 센서리스 운전에 대한 연구 관점을 크게 두 가지 방향으로 나누어 살펴보면, 과도상태에서의 응답특성 개선과 저속에서의 운전 특성 향상을 들 수 있다. 과도 상태에서 응답특성이 나빠지는 이유로는 전동기 매개변수 추정오차, 인버터에서의 실제 기준치와 동일한 출력 발생의 오차 및 추정 알고리즘에 대한 견실성 보장의 미흡 등을 원인으로 들 수 있고 이로 인하여 정확하고 속응성을 갖는 제어를 실현하지 못하기 때문이다. 또한, 전동기를 저속으로 구동하는 경우에 있어서는 제어기의 연산 정밀도와 전류, 전압 센서의 분해능이 허용되는 범위 내에서 어느 정도의 제어 성능을 얻는 것은 가능하지만 운전 주파수가 영에 가까워질수록 제어기의 신호 대 잡음비가 낮게 되고 적분기가 포화될 수 있어 정확한 속도 정보를 얻기가 어렵게 되므로 만족할 만한 제어 성능을 얻을 수 있는 저속영역은 극히 제한을 받게 된다[3][4]. 센서리스 운전을 위한 대표적인 관측기로는 루엔버저 관측기와 슬라이딩 관측기 및 고이득 관측기가 있다. 첫째, 1964년 D.G. Luenberger에 의해 제안된 Luenberger 관측기는 속도관측기로 사용하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있으며 상태를 관측하기 위해 시스템의 동특성이나 내부파라미터를 알아야 한다는 문제점을 가지고 있으며 직류 서보 전동기와 같은 삼각형의 구조를 갖는 시

[†] 교신저자, 正會員 : 仁荷工業專門大學 디지털電子情報科
教授·工博

E-mail: aza@inhac.ac.kr

接受日字 : 2007年 4月 30日

最終完了 : 2007年 8月 3日

시스템에는 적용에 한계를 가진다. 이러한 Luenberger 관측기의 문제점을 해결하기 위해서는 불확실한 시스템 동특성에 대해 강인한 구조를 갖는 관측기를 설계하거나, 별도의 파라미터 적용규칙이 필요하게 되며 직류 서보 전동기의 속도 관측을 위해서는 도함수를 직접 추정해야 하는 문제점을 가진다[5]. 둘째, Khalil이 제안한 고이득 관측기는 삼각형으로 표현 가능한 시스템에 적용가능하며, 시스템의 동특성 및 내부 파라미터에 대한 정보를 필요로 하지 않는다. 그러나 고이득 관측기의 이득이 관측상태의 개수에 비례해서 제곱 꼴로 커지게 된다. 이는 관측 초기의 과도상태 및 관측하려는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측오차가 심하게 진동하는 상태의 급격한 변화에 대하여 관측오차가 심하게 진동하는 원인이 될 수 있다. 이러한 경우 제어기의 출력이 심하게 진동함으로써 시스템을 불안정하게 할 수도 있다. 또한 고정연산(Fixed point calculation) 방식으로 디지털 제어를 구현할 경우 이득값의 크기는 데이터 바이트 수에 종속되므로 크기조정에 제약이 따를 수 있으며 직류 서보 전동기와 같이 빠른 응답 및 운전점이 급변하는 경우에는 관측기 이득의 고정으로 인한 추정오차를 가지게 된다는 문제가 발생한다[7][8]. 이러한 여러 관측기들의 문제점을 극복하기 위하여 현재 지능형 제어기법이 다양하게 도입되고 있으며, 그 중 대표적인 방식이 퍼지제어 및 신경회로망 기법이다[9][10].

본 논문에서는 전동기 속도제어 시 속도검출을 위한 센서들의 문제점을 개선하고 Luenberger 관측기를 이용하여 속도관측기 설계 시의 도함수 추정의 문제를 해결하기 위하여 고이득 관측기를 도입하는 경우의 문제인 관측기 이득 선정의 문제점을 개선하기 위하여 적응 제어 기법 중 뉴로-퍼지 제어 기법을 이용하여 관측기의 이득 값을 최적값으로 선정하여 기존의 방식에 비해 과도특성 및 정상특성이 우수하고 구현이 용이한 뉴로-퍼지 관측기 (NFO : Neuro-Fuzzy Observer)라 명명한 새로운 형태의 속도관측기를 설계하였다. 설계한 NFO는 일반적으로 전동기 속도센서리스 제어 시에 속도관측기로 사용되는 Luenberger 관측기의 문제점인 도함수 추정의 문제를 개선하기 위하여 도입한 고이득 관측기의 성능개선을 위하여 뉴로-퍼지 제어방식을 이용하여 고이득 관측기의 관측기 이득을 조정하여 관측기 이득을 최적값으로 선정하였다. 제한한 NFO의 추정 성능을 검증하기 위해 직류 서보 전동기에 적용하여 속도센서가 있는 경우와 속도센서 없이 Luenberger형 관측기를 이용하여 속도를 추정한 경우와 고이득 관측기를 이용하여 속도를 추정한 경우를 전동기 정속운전 시와 저속운전 시로 나누어서 비교 실험하여 본 논문에서 설계한 NFO의 속도 추정 성능을 입증하였다.

2. 뉴로-퍼지 관측기 설계

직류 서보 전동기의 동특성을 이용하여 속도관측기로서 Luenberger 관측기를 설계하면 식 (1)과 같다.

$$\frac{d\hat{i}_a(t)}{dt} = \frac{1}{L_a} [e_a(t) - R_a \hat{i}_a(t) - k_b \omega] + L (\dot{i}_a - \hat{\dot{i}}_a) \quad (1)$$

여기서, $e_a(t)$: 전기자전압, k_b : 역기전압 상수, L_a : 인덕턴스, L : Luenberger 관측기 이득

본 논문에서는 관측기의 이득상수를 루엔버거 관측기의

식에 대입하여 시물레이션을 통해 적정한 이득 값을 -5.32 로 선정하였으며 시물레이션 블록은 그림1과 같다.

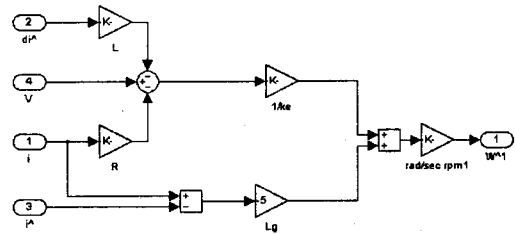


그림 1 루엔버거 관측기 구조
Fig. 1 Structure of Luenberger Observer

Luenberger형의 관측기는 전기자 전류의 도함수를 구할 수 없기 때문에 속도를 직접 추정하는 것은 불가능하며 속도관측기로 사용하기 위해서는 직접 측정이 가능한 전기자 전류를 미분기를 이용하여 도함수를 직접 구해서 사용하게 된다. 그러나 이 경우 미분기의 특성에 따라 시스템의 특성이 좌우될 수 있다는 단점을 가지게 된다. 따라서 도함수 추정 시 간단한 알고리즘만으로 도함수를 직접 추정할 수 있는 고이득 관측기를 Luenberger형의 관측기의 전단에 사용하여 도함수를 구하는 방법을 사용하게 된다. 일반적인 고이득 관측기의 알고리즘은 식(2)와 같다.

$$\hat{x}_i = \hat{x}_{i+1} + k_i (y - \hat{y}) / \epsilon^i \quad (2)$$

여기서, \hat{x}_i : 상태 x_i 의 추정값

본 논문에서는 고이득 관측기를 이용하여 직류서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류 도함수를 추정하였으며 직류 서보 전동기의 전기자 전류와 전기자 전류 도함수를 추정하기 위한 고이득 관측기 설계 식은 식(3)과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{i}_1 &= \hat{i}_2 + k_1 (i_1 - \hat{i}_1) / \epsilon \\ \hat{i}_2 &= \quad + k_2 (i_1 - \hat{i}_1) / \epsilon^2 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, i_1 는 전기자 전류이며 \hat{i}_1 는 전기자 전류의 추정 값이다. 그러나, 이러한 고이득 관측기는 관측기의 이득인 ϵ , k_1 , k_2 을 적절히 조정해야 하는 어려움이 발생하며 이러한 관측기의 이득이 시스템의 성능을 좌우하는 값이 된다. 본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도센서리스 제어 시 고이득 관측기를 이용하여 전기자 전류의 도함수를 추정하여 이것을 이용하여 속도관측기를 구성하는 경우의 가장 큰 문제점인 속도관측기 이득 선정의 문제를 개선하기 위하여 지능형 제어기법 중 성능이 우수한 뉴로-퍼지 제어기법을 도입하여 고이득 관측기 이득 선정의 문제점을 개선하였으며 그 구조는 그림 2와 같다. 설계한 뉴로-퍼지 관측기는 기본적인 제어 구조는 퍼지 제어기의 형태를 취하고 있으며 그 세부적인 요소를 신경회로망으로 구성한 것이다. 따라서 본 관측기는 아래의 그림 2에서와 같이 퍼지화부, 추론부, 비퍼지화부의 구조로 되어 있다. 본 논문에서 설계한 NFO는 기본적으로 도함수 추정을 위한 고이득 관측기 부분과 고이득 관측기의 이득인 ϵ , k_1 , k_2 을 자동 조정하기 위한 뉴로 퍼지 제어 부분으로 구성하였다. 따라서 NFO는 고이득 관측기의 이득 선정을 하기 위한 제어 부분이 뉴로- 퍼지 제어 형

태이지만 구조는 거의 퍼지제어의 구조를 가지며 신경회로망 부분은 주로 미세조정을 위한 것이다. 따라서 본 관측기는 퍼지화 부분, 추론 및 퍼지 규칙 부분, 그리고 비퍼지화 부분으로 구성되어 있다.

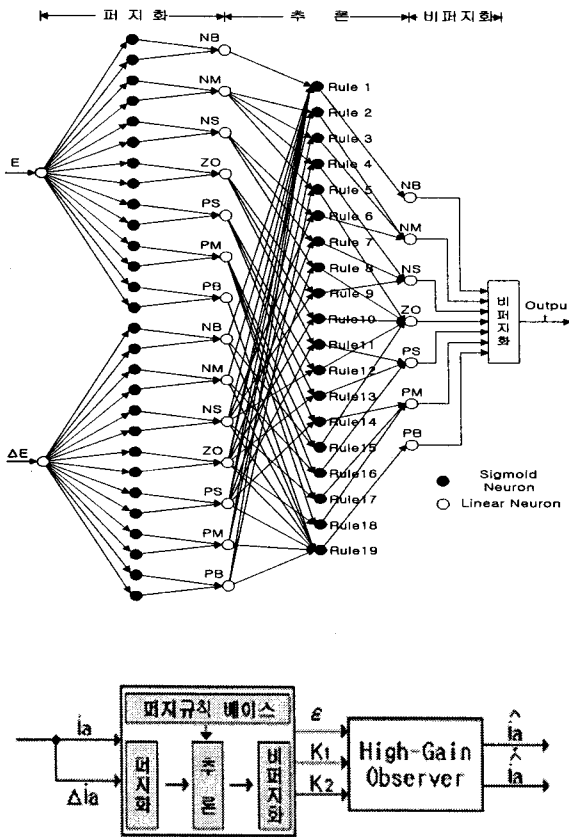


그림 2 NFO의 구조
Fig. 2 Structure of NFO

먼저 퍼지화 부분은 직류 서보 전동기에서 직접 측정된 전기자 전류와 전기자 전류의 변화율을 입력으로 하여 비선형 삼각형 소속함수와 비선형 양자화 과정을 통하여 퍼지 변수로 입력 값을 변환하였다. 실제 전기자 전류나 전기자 전류의 변화율이 선형적으로 변화되는 경우에는 선형의 양자화 방법을 사용하게 되나 본 논문에서 적용한 직류 서보 전동기는 정격으로만 운전되는 것이 아니라 운전 점에 따라 비선형적인 값들이 사용되는 경우가 많기 때문에 비선형의 소속함수 및 양자화 방법을 사용하였다. 추론부와 퍼지규칙은 퍼지제어에서 가장 성능이 우수하다고 알려져 있는 Mamdani의 Min-Max 연산을 수행하였고 퍼지 규칙은 시행 오차법을 통하여 관측기 이득에 따른 시스템의 성능 분석을 통하여 설정하였다. 마지막으로 비퍼지화부에서는 추론된 결과를 고이득 관측기의 이득으로 사용하기 위하여 무게중심법을 사용하였다. 본 논문에서는 퍼지 동조기법을 통하여 직류 서보전동기의 전기자 전류와 전기자 전류의 도함수를 사용하여 관측기 이득 ϵ , k_1 , k_2 을 선정하였으며 퍼지 시스템은 그림 3과 같이 퍼지화부, 추론부, 비퍼지화부의 세 부분으로 구성되며 연산속도의 개선을 위하여 입력 값인 전기

자 전류와 전류의 변화율이 정해지면 나머지 모든 연산과정은 Look-Up Table을 사용하여 연산속도를 개선하였다.

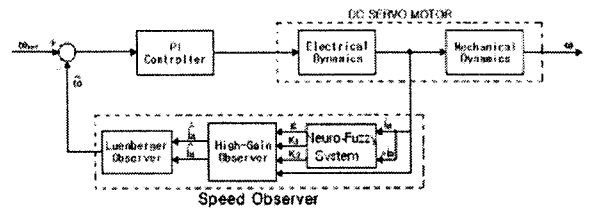


그림 3 NFO를 이용한 속도 관측기 구조
Fig. 3 Configuration of Speed Observer using NFO

2.1 퍼지화부

본 논문에서 설계한 NFO는 입력 값을 퍼지 값으로 변환하기 위하여 그림 4에 나타낸 것과 같은 비선형의 삼각형 소속함수를 사용하였다. 또한, 퍼지화의 효율을 증대하기 위하여 퍼지 시스템의 입력으로 사용되는 전기자 전류와 전기자 전류의 변화율의 전체구간을 실험 대상인 직류 서보 전동기의 서보 제어기의 전류 제한치 인 전류 $-7[A] \sim 7[A]$ 의 범위를 $-1 \sim 1$ 사이로 정규화(normalization) 하였으며 퍼지 시스템의 입력을 다시 $-7 \sim 7$ 의 15개 양자화 준위로 나누어 모든 입력을 15개의 패턴으로 구분하였다. 전체 15개의 입력 패턴에 대한 퍼지 변수 값들을 계산하기 위해서 양자화별 대표 값을 그 중앙값으로 설계하였다.

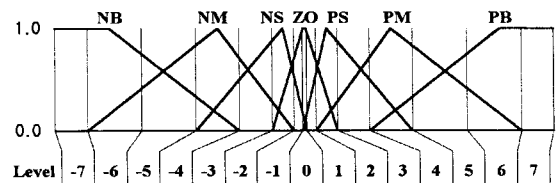


그림 4 비선형 삼각형 소속함수
Fig. 4 Nonlinear triangle membership function

2.2 퍼지 규칙 설계

본 논문에서 설계한 NFO에 사용된 퍼지 규칙의 형태는 식(4)와 같이 조건부는 전기자 전류와 전기자 전류의 변화율로 되어 있는 혼합명제로 결론부는 고이득 관측기의 이득인 ϵ , k_1 , k_2 를 각각의 단일명제로 설계하였다.

$$\begin{aligned}
 \text{Rule } i : & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{ THEN } \epsilon \text{ is } D_i \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{ THEN } k_1 \text{ is } E_i \\
 & \text{ IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{ THEN } k_2 \text{ is } F_i \quad (4)
 \end{aligned}$$

여기서 i_a 는 퍼지 시스템의 입력인 전기자 전류이며, Δi_a 는 또 다른 퍼지시스템의 입력인 전기자 전류의 변화율이며 ϵ , k_1 , k_2 는 각각 출력인 고이득 관측기의 이득이다. 또한, A_i , B_i , C_i , D_i , E_i , F_i 는 i 번째 퍼지 규칙에 사용된 각 상태변수의 정성적 언어 값을 나타낸다.

2.3 추론

본 논문에서 설계한 NFO의 추론방법은 Mamdani의 Min-Max 연산을 이용하여 수행하였다. Mamdani의 Min-Max 연산은 퍼지 연관 함수로 Mamdani가 제안한 minimum 연산(Rc)을 이용하여 퍼지 합성 규칙을 이용한 방법이다. 본 논문에서와 같이 n개의 퍼지 제어 규칙으로 구성된 관측기의 경우를 보면 식(5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \text{Rule } i : \text{IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{THEN } \epsilon \text{ is } D_i \\
 & \text{IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{THEN } k_1 \text{ is } E_i \\
 & \text{IF } i_a \text{ is } A_i \text{ and } \Delta i_a \text{ is } B_i \quad \text{THEN } k_2 \text{ is } F_i \quad (5)
 \end{aligned}$$

여기서 $i \in U, \Delta i \in V, \epsilon, k_1, k_2 \in W$ 이다.

그러면, 퍼지 관계 R_i 는 전체집합 $U \times V \times W$ 의 부분집합으로써 식(6)과 같다.

$$R_i = (A_{i1} \times A_{i2}) \times C_i \quad (6)$$

이 때 전체 제어규칙은 식(7)과 같다.

$$\begin{aligned}
 R &= R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_n \\
 &= \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (7)
 \end{aligned}$$

여기서 입력이 A_1^0, A_2^0 라고 하면 추론결과 c 는 식(8)과 같다.

$$C = R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \quad (8)$$

이것은 $C = (R \cdot A_1^0) \cdot A_2^0$ 로 쓸 수 있으며 식(8)의 우변은 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned}
 & \max_{\Delta i} [\max_i (\mu_{R_i}(i, \Delta i, \epsilon), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\
 &= \max_i, \max_{\Delta i} [(\mu_{R_i}(i, \Delta i, \epsilon) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\
 & \max_{\Delta i} [\max_i (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_1), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\
 &= \max_i, \max_{\Delta i} [(\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_1) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\
 & \max_{\Delta i} [\max_i (\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_2), \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \\
 &= \max_i, \max_{\Delta i} [(\mu_{R_i}(i, \Delta i, k_2) \wedge \mu_{A_1}(i) \wedge \mu_{A_2}(\Delta i))] \quad (9)
 \end{aligned}$$

따라서 결론 $C(\epsilon, k_1, k_2)$ 는 식(10)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 C(\epsilon) &= R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\
 &= \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, \epsilon) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \\
 C(k_1) &= R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\
 &= \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, k_1) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \\
 C(k_2) &= R \cdot (A_1^0 \times A_2^0) \\
 &= \max_{i, \Delta i} [(R(i, \Delta i, k_2) \wedge A_1^0(i) \wedge A_2^0(\Delta i))] \quad (10)
 \end{aligned}$$

이로서 퍼지 집합 $C(\epsilon), C(k_1)$ 및 $C(k_2)$ 가 출력으로 구해진다.

2.4 비퍼지화

본 논문의 비퍼지화 방법은 일반적으로 가장 우수한 성능을 보이는 무게 중심(Center of Gravity)방법을 사용하였다. 이 방법은 합성된 출력부 퍼지 집합에서 무게중심을 구하는 방법으로 식 (11)과 같다.

$$u_0 = \frac{\sum_{j=1}^k \mu(u_j) \cdot u_j}{\mu(u_j)} \quad (11)$$

j : 제어변수 전체집합의 양자화준위(quantization level)

3. 실험

3.1 시스템 구성

본 논문에서는 직류서보전동기의 속도센서리스 속도제어를 하기 위하여 적응 고이득 관측기를 적용하였다. 이를 위하여 제작된 디지털 서보 시스템을 이용하여 속도센서를 장착한 경우와 속도센서 없이 뉴로-퍼지 관측기를 적용하여 속도를 추정한 경우를 동일한 조건으로 정속운전 및 저속영역운전에서 비교실험을 하였으며, 속도제어기로는 PI제어기를 사용하였으며 PI 제어기의 제어상수는 직류 서보 전동기의 수식을 이용하여 Matlab을 통하여 시뮬레이션으로 정하였다. 그림 5는 실험장치 구성도를 나타낸 것이다.

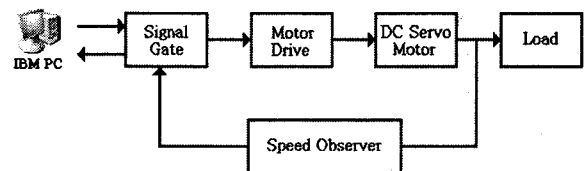


그림 5 실험장치 구성도

Fig. 5 Experimental system configuration

본 실험에서 사용한 전동기는 최대출력 200W(LG기전, FMD-E205A)이며 속도측정을 위한 센서로 1,000[펄스/회]의 분해능을 갖는 엔코더를 사용하였다. 실험대상인 직류 서보 전동기 특성을 표 1에 나타내었다.

표 1 직류 서보전동기의 사양

Table 1 DC Servo motor specification

정격출력	Pr	200W
정격토크	Tr	6.50 Kgf.cm
정격회전수	Nr	3000 rpm
정격전류	Ir	3.3A
정격전압	Er	75V
유기전압정수	Ke	22.50V/K rpm
토크정수	Kt	2.10 Kgf.cm/A
전기자관성	Jm	$1.33 \times 10^{-3} \text{Kgf.cm Sec}^2$
전기자저항	Ra	2.12Ω
전기자인덕턴스	La	1.02mH
마찰토크	Tf	0.5 Kgf.cm
순시최대토크	Tp	27.36Kgf.cm
기계적시정수	tm	6.25ms
전기적시정수	te	0.48ms

3.2 실험 결과

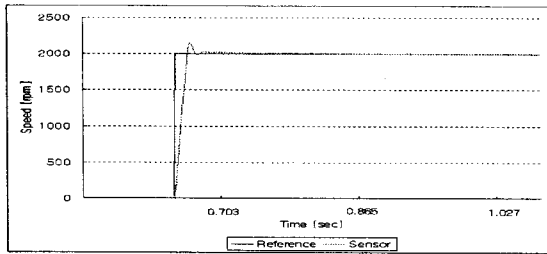
3.2.1 정속운전

직류 서보 전동기를 목표 값이 3,000[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우, Luenberger관측기 및 NFO를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 6에 나타내었으며 결과를 표 2에 정리하였다.

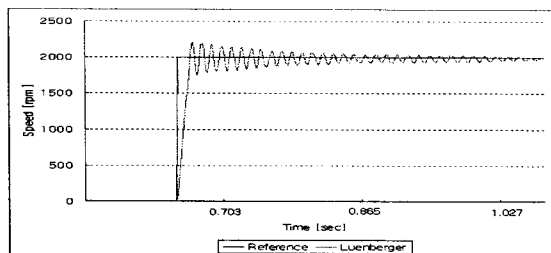
표 2 정속운전 실험결과표

Table 2 The results table of constant speed control

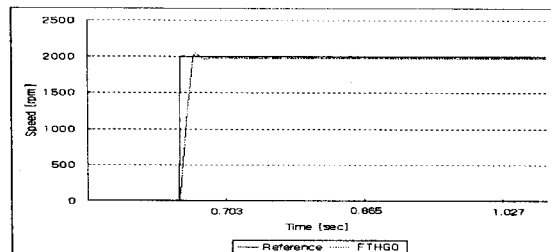
응답특성	Sensor	Luenberger	NFO
최대초과량 [rpm]	49	57	145
최대 백분율 초과량 [%]	2.45	12.85	7.26
상승시간 [sec]	0.0198	0.0286	0.0213
정착시간 [sec]	1.1268	2.17	1.29



(a) 센서를 이용한 응답



(b) Luenberger관측기를 이용한 응답



(c) NFO를 이용한 응답

그림 6 정속운전 실험결과 (2,000[rpm])

Fig. 6 The results of constant speed control (2,000[rpm])

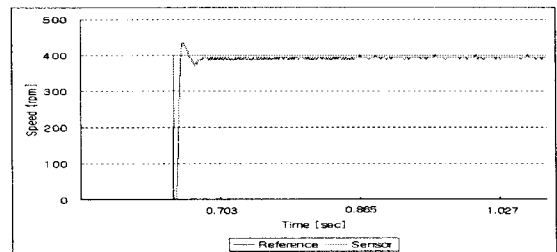
3.2.2 저속운전

직류 서보 전동기를 목표값이 400[rpm]일 때, 각각 센서를 이용한 경우, Luenberger관측기 및 NFO를 적용한 경우의 시스템 응답을 비교하여 그림 7에 나타내었으며 결과를 표 3에 정리하였다.

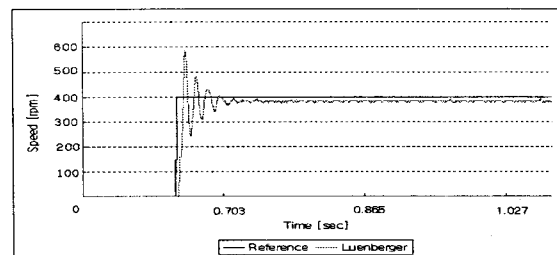
표 3 저속운전 실험결과표 (400[rpm])

Table 3 The results table of low speed control

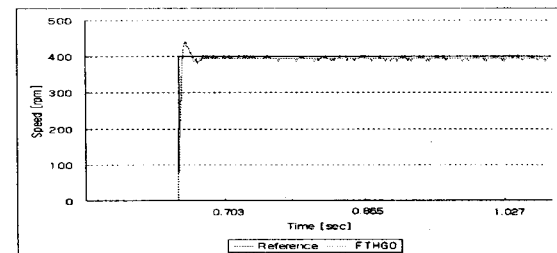
응답특성	Sensor	Luenberger	NFO
최대초과량 [rpm]	51	93	35
최대 백분율 초과량 [%]	12.75	48.25	8.74
상승시간 [sec]	0.0108	0.0109	0.0071
정착시간 [sec]	1.116	1.402	1.112



(a) 센서를 이용한 응답



(b) Luenberger관측기를 이용한 응답



(c) NFO를 이용한 응답

그림 7 저속운전 실험 (400[rpm])

Fig. 7 The results of low speed control (400[rpm])

3.3 고찰

3.3.1 정속운전

직류 서보전동기를 2,000[rpm]을 목표 값으로 하여 정속 운전을 하였을 때의 응답특성은 센서의 출력응답이 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수하며 이 경우에 본 논문에서 설계한 NFO가 Luenberger 관측기에 비해 최대 백분율 오버슈트에서 약 3.37~5.6(%) 정도 감소되었고 상승시간에서는 8.3~12[msec]빠르게 나타났으며 정착시간도 0.4~0.8[sec]정도 빠른 특성을 나타내었다. 이것은 정격속도 및 정격속도와 근접한 경우에는 센서를 이용한 응답이 속도관측기를 사용한 경우에 비해 우수하며 속도관측기를 사용하는 경우에는 관측기 이득이 정격속도 추정에 맞게 뉴로-퍼지 제어기법을 이용한 NFO가 관측기의 이득이 고정된 Luenberger관측기에 비해 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 센서를 이용한 응답과 NFO의 응답이 거의 유사하다 할 수 있다.

3.3.2 저속운전

직류 서보 전동기를 저속인 400[rpm]을 목표 값으로 하여 정속운전을 하였을 때의 응답특성은 NFO의 출력이 최대 백분율 오버슈트에서 센서를 이용한 응답에 비해서 4(%)적고 Luenberger 관측기에 비해서는 약 40(%)적게 나타났다. 상승시간은 NFO가 센서를 이용한 출력에 비해서 2.9[msec] 빠르고 Luenberger 관측기에 비해 2.8[msec]빠르게 나타났 다. 정착시간에서는 NFO가 센서를 이용한 출력에 비해서 0.01[sec]빠르고 Luenberger 관측기에 비해 0.26[sec]빠르게 나타났 다. 이것은 전동기를 저속영역에서 운전하는 경우에는 속도관측기를 사용하는 경우가 센서를 이용한 응답에 비해 우수하며 속도관측기를 사용하는 경우에는 관측기 이득이 정격속도 추정에 맞게 고정된 Luenberger관측기에 비해 뉴로-퍼지 제어기법을 이용한 NFO가 과도상태 및 정상상태에서 우수한 성능을 나타냈음을 알 수 있으며 퍼지 제어 기법 에서도 우수한 특성을 나타내는 방법인 Min-Max 추론 및 무게중심을 이용한 비퍼지화를 통해 조건표를 만들어서 사용하여 퍼지 연산시간을 감소하여 모든 응답에서 양호한 특성을 나타내었다. 또한 Luenberger관측기의 경우와 같이 미분기를 직접 사용하는 경우는 도함수 추정이 정확하게 이루어지지 않기 때문에 특성이 저하되었으며 센서를 이용한 응답의 경우에는 센서의 분해능이 높지 않은 경우 저속에서의 속도 측정 오차가 발생하였다.

4. 결 론

본 논문에서는 직류 서보 전동기의 속도제어를 위하여 속도센서를 사용하는 경우 속도센서가 가지는 문제점 및 속도 센서를 대체할 속도관측기를 설계하는 경우의 문제점인 도함수 추정의 문제 및 관측기 이득에 따른 시스템의 성능 저하를 개선하기 위하여 전동기에서 측정된 전류와 전류의 변화율을 이용하여 속도관측기의 이득이 시스템의 특성에 맞게 자동 동조 되도록 설계하여 속도추정오차개선 및 저속운전 영역에서의 성능을 개선할 수 있는 새로운 형태의 NFO

를 설계하였다. 본 논문에서 설계한 NFO의 속도추정 성능을 평가하기 위하여 속도센서 없는 직류 서보 전동기에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 직류 서보 전동기를 정격속도로 정속 운전을 하였을 때의 응답특성은 센서와 NFO가 적은 오차 범위에서 유사한 특성을 나타내었으며 도함수 추정이 불확실한 Luenberger 관측기에 비해서는 NFO가 우수한 성능을 나타내었다.

(2) 직류 서보 전동기를 저속영역에서인 정속 운전을 하였을 때의 응답특성은 NFO가 센서를 이용한 응답 및 Luenberger관측기에 비해 과도상태 및 정상상태에서 모두 우수한 성능을 나타내었다. 이것은 센서의 분해능이 높지 않은 경우에는 속도관측기를 구성하여 속도제어를 수행하는 것이 더 유리하다는 것을 확인하였다.

추후에 연구 할 과제로는 직류 서보전동기의 속도제어를 하는 경우 스위칭을 통하여 정격과 유사한 영역에서는 속도 센서를 이용하여 제어하고 운전점이 급격히 변화하는 경우 및 저속영역에서는 속도관측기를 이용하여 제어를 수행하는 하이브리드 형태의 속도제어에 관한 연구를 수행해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2006년도 인하공업전문대학의 교내연구비 지원에 의하여 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Masahiro Takigawa, et. al. "A Wide Speed Control System for Brushless DC Motor Regarding to the Transient Response Characteristics," T. IEEE Japan, vol.113-D, No.2 pp.151-158, 1993
- [2] K, Nandam. Pradeep, " Analog and Digital Speed Control of DC Drives Using Proportional-Integral and Integral-Proportional control techniques," IEEE Trans. Ind. Elect., Vol. IE-34, No.2, pp. 227-233, 1987
- [3] H. Nakano and I. Takahashi, "Speed Sensorless Field-Orientation Control of the Induction Motor Using an Instaneous slip Frequency Estimation Method," IEEE PESC., pp. 847-854, 1988
- [4] Joachim Holtz, "Speed Estimation and Sensorless Control of AC Drives," IEEE IECON, pp.649-654, 1993
- [5] S. K. chang, W. T. You, and D. L. Hsu, " Design of General Structured Observers for Linear System with Unknown Input," J. Franklin Inst., Vol.334B, No.2, pp. 213-232. 1997.
- [6] T.H. Liu and C.P. Cheng, " Adaptive Control for a Sensorless Permanent-Magnet Synchronous Motor

- Drive," IEEE-IECON Conf. Rec., pp.413-418, 1992.
- [7] G. B. Wang, S. S. Peng, and H. P. Huang, "A sliding Observer for nonlinear Process Control," Chemical Engineering Science, Vol. 52, pp.787-805, 1997.
- [8] H.K.khalil, "Numerical Differentiation Using High-Gain Observer," Proceedings of the 36th IEEE Conference on a decision and Control, Vol. 2, pp. 4790-4795, December 1997.
- [9] Junhong Nie, "A Neural Approach to Fuzzy Modeling," Proceeding of the American Control Conference, pp. 2139-2142, 1994.
- [10] 이광형, 오길록 공저, "퍼지이론 및 응용", 홍릉과학출판사, pp 5.3-5.6, 1992.
- [11] G. Griva, F. Profumo, L. Rosell, R. Bojoi, "Optimization of Fuzzy-Like Luenberger Observer for High Speed Sensorless Induction Motor Drives Using Genetic Algorithms," IEEE Industry Applications Conference., REc, Vol. 2, pp.1268-1274, Oct 2000.
- [12] E. Purwanto, Member, IEEE, S. Arifin, Bian-Sioe So, "Application of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System on the Development of the Observer for Speed Sensorless Induction Motor," IEEE Catalogue No. 01, CH37239, pp. 409-414, 2001.

저 자 소 개



안 창 환 (安昌煥)

1959년 11월 4일생. 1983년 원광대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 8월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인하공업전문대학 디지털전자정보과 교수

Tel : 032-870-2214

Fax : 032-870-2508

E-mail : aza@inhac.ac.kr