

부하변동이 존재하는 DC 모터의 속도 제어를 위한 외란관측기 설계

Design of a Disturbance Observer for DC Motor Speed Control under Load Variation

김성종*, 신명준**, 손영익#, 김갑일##, 임승철§, 강환일§§

(Sung-Jong Kim, Myong-Jun Shin, Young-Ik Son, Kab-Il Kim, Seung-Chul Lim, Hwan-Il Kang)

Abstract - This paper considers a speed control problem of DC motor under load variations. In order to reduce the effect of load variation, a disturbance observer has been designed for the given system. With a cheap encoder there exists considerable measurement noise in the velocity feedback and it should be reflected in designing the disturbance observer. The authors have obtained the nominal transfer function of a DC motor and designed a disturbance observer for the control purpose. With the disturbance observer a digital controller has been implemented using a DSP(TMS320F2812). Some experiments show the enhanced performance of the control system with the proposed method.

Key Words : Disturbance Observer, DC Motor, Speed Control, Load Variation

1. 서론

부하가 크게 변동하는 경우에도 모터의 회전 속도를 일정하게 유지하기 위한 제어는 다양한 분야에서 많은 적용 예를 찾을 수 있다. 본 논문에서는 부하 변동을 시스템의 외란으로 생각하고, 주기적인 외란 입력을 제거하는 외란 관측기(Disturbance Observer, DOB)를 설계하여 모터의 속도를 일정하게 제어하는 알고리즘을 시험한다. 외란 관측기는 정밀 제어, 로봇 제어 등 다양한 분야에서 이용되고 있으며, 외란 관측기가 가지는 특성을 분석하고 성능을 향상시키려는 노력이 계속 수행되고 있다.[1-3]

본 논문에서는 먼저 무부하 상태에서 구한 DC 모터의 공칭(nominal) 전달함수를 이용하여 PI 속도 제어를 설계한다.[4] 제어 성능을 저하시키는 부하 변동에 대비하기 위해 주어진 모터의 엔코더 사양에 맞도록 외란 관측기를 구성하고 Matlab/Simulink를 이용하여 모의실험을 행한 이후에 TMS320F2812(이하 DSP)를 이용한 디지털 제어기로 전체 제어 시스템을 구현한다.[5][6] C++빌더를 이용하여 DC 모터의 속도를 모니터링 하고, 부하 변동에 따른 외란에 대하여 외란 관측기의 성능을 실험한다.[7] 본문에서 속도 단위 [r/s]와 [r/m]은 초 및 분에 대한 모터 회전수를 의미한다.

2. 본론

2.1 문제 설정

본 논문에서는 그림 1과 같은 시스템에서 바닥면에 대해 수직 방향으로 회전하는 모터의 속도 제어 문제를 다룬다.

(그림 1은 무거운 부하가 탑재된 상태이다.) 변동 부하에 따른 중력의 영향을 시스템 모델링에 고려하는 대신, 간단한 공칭 시스템의 제어 입력을 방해하는 외란으로 생각하여 시스템 구성 요소의 사양에 맞는 외란 관측기를 설계한다. 이 경우 변동 부하에 의한 외란은 모터의 회전 속도와 같은 주파수를 가짐을 알 수 있다.



그림 1 제어 대상 시스템

2.2 외란 관측기의 구조

외란 관측기는 그림 2와 같이 구성된다. $P(s)$ 와 $P_n(s)$ 는 각각 실제 시스템 및 공칭 시스템의 전달함수이고, $Q(s)$ 는 Q 필터 전달함수이다.[1] 입력 v 는 주 제어기에서 생성되는 제어 입력 신호이며, d 와 ξ 는 각각 외란과 측정 잡음을 나타낸다.

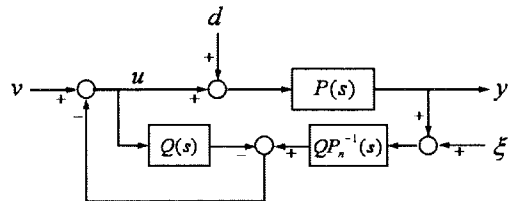


그림 2 외란 관측기의 구조

* 김성종:明知大學校 電氣工學科 碩士課程
 ** 신명준:明知大學校 電氣工學科 碩士課程
 # 손영익:明知大學校 電氣工學科 助教授·工博
 ## 김갑일:明知大學校 電氣工學科 教授·工博
 § 임승철:明知大學校 機械工學科 教授·工博
 §§ 강환일:明知大學校 情報工學科 教授·工博

그림 2에서 출력 y 에 대한 식은 다음과 같다.

$$y = \frac{PP_n}{P_n + (P - P_n)Q} v + \frac{PP_n(1-Q)}{P_n + (P - P_n)Q} d + \frac{PQ}{P_n + (P - P_n)Q} \xi \quad (1)$$

외란 관측기의 Q 필터는 저주파 통과 필터이며, 본 논문에서는 아래 식과 같은 Binomial 형태를 사용하였다.[1][2]

$$Q_{mn}(s) = \frac{\sum_{i=0}^n C_i (\tau s)^i}{(\tau s + 1)^m} \quad (2)$$

일반적으로 외란과 잡음이 저주파 영역 및 고주파 영역으로 구분되는 경우, 식 (1)을 살펴보면 저주파 영역에서 $Q(s) \approx 1$ 이면 외란에 대한 영향은 사라지고, 고주파 영역에서 $Q(s) \approx 0$ 이면 측정 잡음에 대한 영향은 사라지게 됨을 알 수 있다.

2.3 모터 전달함수 및 PI 제어기

전기차 전류 제어 방식 DC 모터의 경우 전압에서 속도까지 전달함수는 다음과 같이 간단하게 표현할 수 있다.[4]

$$\frac{\omega}{V} = \frac{K_t}{RJs + K_t K_e} = \frac{K_t/RJ}{s + K_t K_e/RJ} \quad (3)$$

그림 3은 12[V]의 전압을 무부하 상태의 모터에 인가했을 때 응답이다. 그림에서 모터의 최종속도는 약 4.92[r/s]이다. 최종값 정리로부터 $1/K_e = 4.92/12$ 이고, 속도가 최종치의 63.21%일 때 $t \approx 0.075$ [s] 이므로 $K_t K_e/RJ \approx 13.3333$ 이고, $K_t/RJ = 5.4667$ 이다. 결국 무부하 모터의 전달함수를 아래 식과 같이 근사한다.

$$\frac{\omega}{V} = \frac{5.4667}{s + 13.3333} \quad (4)$$

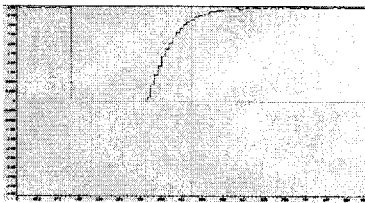


그림 3 모터 속도 그래프

시스템 (4)에 대한 PI 제어기 이득은 $K_p = 100$, $K_I = 2000$ 으로 정하였다.[4]

2.4 외란 관측기 시뮬레이션

외란 관측기에서 저주파 통과 필터는 외란 관측기의 특성을 결정하는 가장 중요한 요소이다.[1] 앞서 설명한 대로 본 논문의 실험에서 외란의 주파수는 모터의 속도에 비해한다. 또한 분해능이 낮은 엔코더를 이용한 속도 측정 시 비동기 특성은 무시할 수 없는 측정 잡음을 나타내며 이는 샘플링 시간에 따라 다르다. Q 필터는 저주파 통과 필터로서 외란의

주파수는 통과시키고 측정 잡음의 주파수는 제거해야 한다.

모터의 목표 속도가 50[r/m]일 때 외란의 주파수는 5/6 [Hz]이고, 샘플링시간이 0.01초 일 때 실험에 사용된 엔코더 측정 잡음 주파수가 25[Hz]라면 Q 필터의 차단주파수는 5/6[Hz]보다 크고 25[Hz]보다 작아야 한다. 따라서 실험에서는 차단주파수를 8[Hz]로 하고 Q 필터의 분모의 차수 $m=4$, 분자의 차수 $n=2$ 로 결정하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 $5000\sin(5\pi t/3)$ 의 외란이 시스템에 인가될 때 모의실험이다. 외란 관측기를 사용하면 그림 5의 결과에서 알 수 있듯이 외란 관측기를 사용하지 않았을 때보다 외란 제거 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 측정 잡음에 인한 영향은 관측기를 사용하지 않았을 때 보다 커진다. 이는 외란과 잡음이 주파수 영역에서 서로 멀리 떨어져 있지 않기 때문이다.

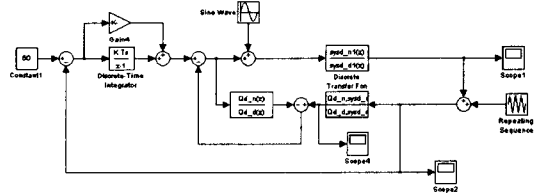


그림 4 외란관측기의 블록선도

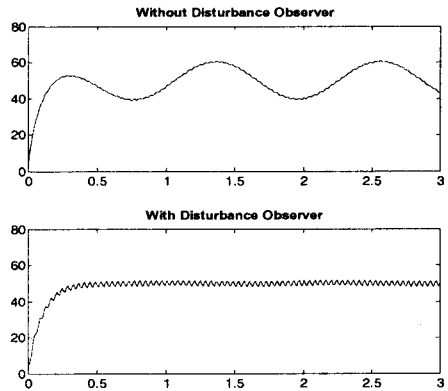


그림 5 외란이 인가될 때 속도 그래프

2.5 외란 관측기 실험

본 논문에서 실험한 하드웨어는 그림 6과 같이 구성되어 있다. DSP를 이용하여 모터 컨트롤러를 구현하였고 직렬 통신으로 모터의 속도를 PC에 전송한다. PC에서는 C++ 빌더로 작성한 모니터링 프로그램을 이용하여 모터 속도를 관찰할 수 있다.[7]

실험에서는 먼저 속도 제어기를 설계하고 부하가 있을 때와 없을 때의 속도를 측정하였다.(그림 7, 그림 8) 그리고 외란 관측기를 적용한 후 부하가 있을 때와 없을 때의 속도를 측정하여 외란제거 성능을 비교하였다.(그림 9, 그림 10)

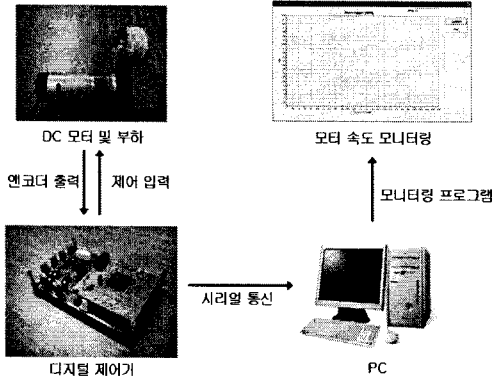


그림 6 하드웨어 구성도

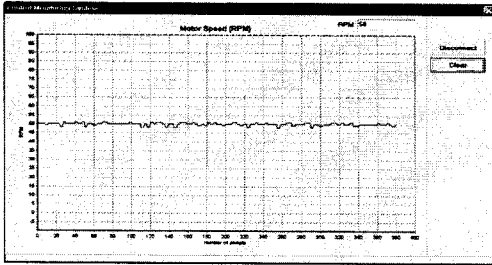


그림 7 부하가 없을 때의 모터속도 (외란관측기 사용안함)

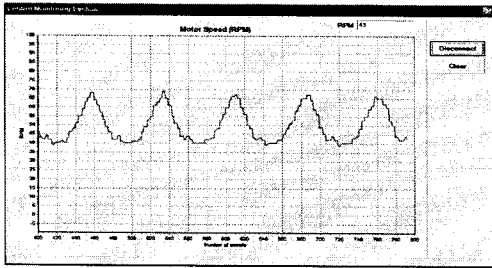


그림 8 부하가 있을 때의 모터속도 (외란관측기 사용안함)

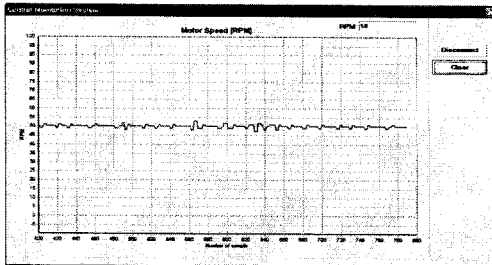


그림 9 부하가 없을 때의 모터속도 (외란관측기 사용)

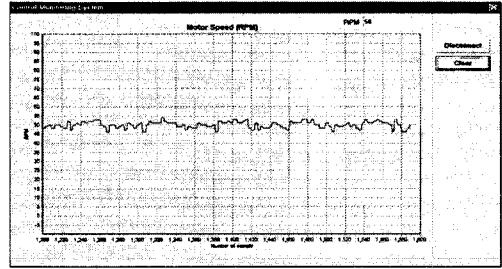


그림 10 부하가 있을 때의 모터속도 (외란관측기 사용)

3. 결 론

본 논문에서는 부하 변동에 따른 DC 모터의 속도 변동을 줄이기 위해 주 제어기에 외란 관측기를 적용하여 제어기를 강인하게 만드는 방법을 연구하였다. 모의실험을 통한 예측 결과는 실제 실험을 통해 확인할 수 있었다. 특히, 외란 관측기 설계과정에서 저렴한 엔코더를 사용할 때 발생하는 외란과 측정 잡음의 연관 관계로 인해 제어 주기의 결과와 외란 관측기의 성능이 좌우되는 것을 관찰할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 BK21 프로젝트 및 과학기술부 / 한국과학재단 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었음
(차세대전력기술연구센터)

참 고 문 헌

- [1] 최영진, 양광진, 정완균, 김홍록, 서일홍 “강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (1) : 2차 시스템에 대한 이론적 해석” 제어·자동화시스템공학 논문지, 8권 8호, pp655~663, 2002
- [2] 김홍록, 최영진, 서일홍, 정완균, 박명관, 이경호 “강인성과 제어 성능을 고려한 외란 관측기의 설계 (2) : 광디스크 드라이브 서보 시스템에의 적용 실험” 제어·자동화시스템공학 논문지, 9권 4호, pp270~276, 2003
- [3] 양광진, 최영진, 정완균 “2차 시스템에 대한 이산시간 외란 관측기의 분석” 제어·자동화시스템공학 논문지, 9권 6호, pp425~434, 2003
- [4] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, *Modern Control Systems 10th Edition*, Pearson Education, 2004
- [5] 백종철, *TMS320F28X CPU 핸드북*, 싱크웍스, 2005
- [6] 신명준, 김성중, 손영익, 김갑일, 임승철, 강환일 “Matlab CCSLINK 기능을 이용한 제어기 설계 실험” 제어자동화시스템 심포지엄 논문집, pp388~393, 2006
- [7] 김성중, 신명준, 손영익, 김갑일 “DSP를 이용한 제어기 실험용 모니터링 시스템”, 정보 및 제어 심포지엄 논문집, pp222~224, 2006