

## MATLAB/SIMULINK의 모델기반 제어기 설계를 이용한 직류전동기 구동 시스템의 임베디드 제어 시스템

최승필\*, 이용석, 지준근  
 순천향대학교 정보기술공학부

### Embedded Control System of DC Motor Drive System Using Model Based Controller Design in MATLAB/SIMULINK

Seung-Pil Choi\*, Yong-Seok Lee, Jun-Keun Ji  
 Division of Information Technology Engineering, SoonChunHyang University

**Abstract** - This paper presents a modeling method of speed controller for DC motor drive system by using the *Embedded Target for TI C2000 DSP* in MATLAB/SIMULINK. Speed controller is easily designed and implemented by using the MATLAB/SIMULINK program, and speed control response and stability of the DC motor can be improved. Feedback of motor speed is processed through C28x QEP(Quadrature Encoder Pulse) from encoder pulse. The controller is designed as PI speed controller. Simulation program is drawn using SIMULINK. Then a real-time program for speed control of the DC motor is downloaded into the eZdsp F2811 control board. Speed control response is verified through simulations and experiments.

QEP 블록은 전동기의 전기자에 연결된 광학식 엔코더의 구형파 펄스 출력을 받아들여 전기자의 위치와 회전속도를 계산한다. PWM 블록은 전동기에 인가되는 전기자전압을 PWM 방식으로 조절한다.

#### 1. 서 론

메카트로닉스(Mechatronics)의 기초인 전동기 제어는 일반적으로 먼저 Simulation을 통해 제어기를 설계한 후, 다시 C나 assembly 언어로 프로그램을 작성하여 구현하였다. 그러나 본 연구에서는 TI사의 eZdsp F2811보드를 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 텍스트 방식이 아닌 그래픽 방식으로 제어기를 설계하고 Simulation을 한 다음 직접 실시간 프로그램으로 자동 변환하여 제어기의 응답을 테스트함으로써 전동기의 제어 시스템 개발을 짧은 시간 안에 매우 편리하게 구현할 수 있는 모델기반 제어기 설계 및 임베디드 제어시스템 구현을 소개하고자 한다.

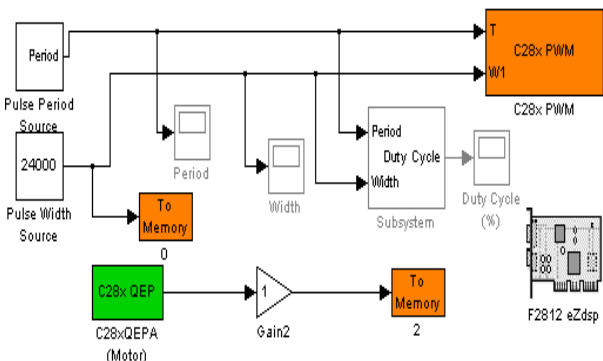
#### 2. 모델기반 제어기 설계

##### 2.1 Embedded Target for TI C2000 DSP

"Embedded Target for TI C2000 DSP" 플랫폼은 SIMULINK와 MATLAB을 TI의 *express DSP tool*들과 통합한 것이며, 이는 디지털 신호처리 및 제어기 설계에 있어서 개발자의 이론 및 개념을 코드 생성을 통한 검증 및 빠른 모형 제작이 가능토록 하도록 한 것이다. 이를 위해 이 플랫폼은 사용자의 SIMULINK 모델의 C 언어 구현을 생성하기 위해 MATLAB의 Real-Time Workshop과 TI의 개발도구들을 이용한다. 이 때 Real-Time Workshop은 Code Composer Studio 프로젝트를 만드는데, 사용자는 생성된 프로젝트를 Compile, Link 및 Download to Target Board를 할 수 있다.

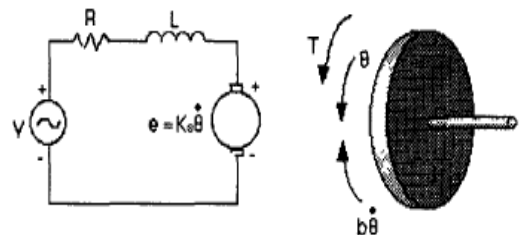
##### 2.2 MATLAB/SIMULINK의 모델기반 설계예

그림 1은 Duty Cycle의 규칙적인 변화를 가진 펄스 파형에 따른 Embedded Target for TI C2000 DSP 플랫폼의 C28x QEP 블록과 C28x PWM 블록의 사용예이다.



〈그림 1〉 PWM Duty Cycle Control via Period Change

#### 3. 직류 전동기의 모델링



〈그림 2〉 직류전동기의 등가회로

직류전동기의 전기자회로는 그림 2와 같이 저항 R에 직렬로 연결되어 있는 인덕턴스 L과 회전자 회전할 때 전기자에서 생기는 역기전력을 나타내는 전압원 e로 낼 수 있다. KVL에 의해서 전기자 전압방정식은 다음과 같다.

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (1)$$

역기전력 e는 회전자의 각속도에 비례하므로,

$$e = K_e w = K_e \dot{\theta} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)에 의해

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + K_e \dot{\theta} \quad (3)$$

직류전동기에 발생된 토크는 전기자 전류에 비례하며, 점성마찰과 관성에 대해 식 (4)와 같은 관계가 성립한다.

$$T = J\ddot{\theta} + b\dot{\theta} = K_t i \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에 대해 Laplace 변환을 하고  $K_e = K_t = K$ 라고 하면,

$$V(s) = RI(s) + LsI(s) + Ks\Theta(s) \quad (5)$$

$$s(Js + b)\Theta(s) = KI(s) \quad (6)$$

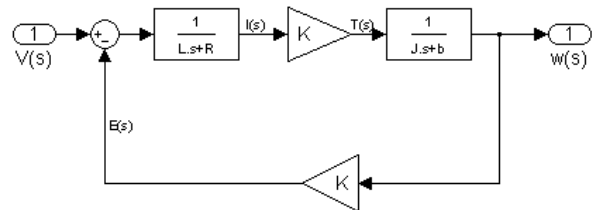
(5)식을 I(s)와  $\Theta(s)$ 에 대해서 정리하여 다시 표현하면,

$$(Ls + R)I(s) = V(s) - Ks\Theta(s) \quad (7)$$

식 (6)과 (7)을 연립하여 I(s)를 소거하면,

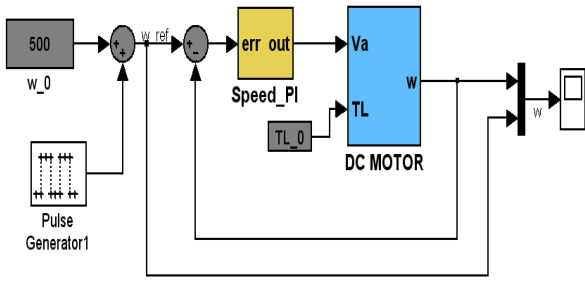
$$\frac{\dot{\theta}(s)}{V(s)} = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{(Js + b)(Ls + R) + K^2} \quad (8)$$

따라서 입력 전압과 전동기 속도의 전달함수가 식 (8)과 같이 구해짐을 알 수 있고, 이것을 이용하면 그림 3과 같은 직류전동기의 SIMULINK 모델을 만들 수 있다. 이 모델을 사용하여 실제 실험에 앞서 시뮬레이션을 통하여 속도제어기의 설계 및 응답을 확인할 수 있다.



〈그림 3〉 직류전동기의 SIMULINK 모델

#### 4. MATLAB/SIMULINK 시뮬레이션



〈그림 4〉 시뮬레이션 프로그램

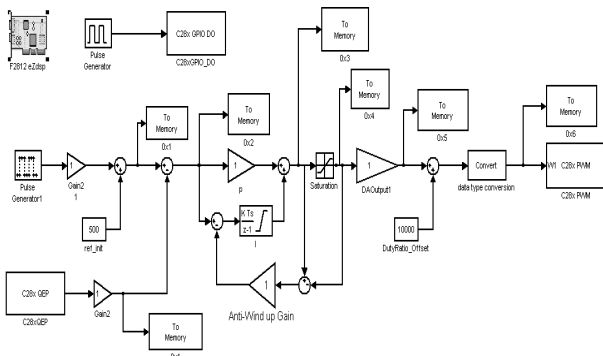
실제 실험에서 보다 정확하고 안전한 실험을 하기 위하여 실험 전에 미리 MATLAB/SIMULINK로 직류전동기 모델과 PI 속도제어기를 사용하여 그림 4와 같은 시뮬레이션 프로그램을 수행하면서 속도제어기의 이득을 설계할 수 있었다.

#### 4. 시스템 구현 및 실험 결과



〈그림 5〉 eZdsp F2811 DSP 보드를 이용한 실험장치 구성

그림 5의 시스템 하드웨어 구성은 직류전동기의 속도 측정부, 측정된 속도값을 읽어 속도제어 및 제어기 출력을 발생하는 제어부, 그리고 제어기 출력에 따라 전동기를 구동시키기 위한 구동회로부 및 전동기로 구성된다. 먼저는 시뮬레이션 이후에 그림 6과 같은 실시간 제어 프로그램을 작성하고 Compile과 Link를 수행한 후, CCS v3.1 프로그램을 사용하여 실행파일인 COFF 파일을 생성하였다. 그리고 리얼시스(사)에서 제공하는 Real DSP DataMON 프로그램을 통해 TMS320F28X의 SCI 부트 기능을 사용하여 프로그램을 DSP 내부 플래시 램에 Download 할 수 있었고 변수 및 메모리 내용의 확인 또는 그래프 표시가 가능하였다.



〈그림 6〉 eZdsp F2811 DSP 보드를 위한 실시간 제어 프로그램

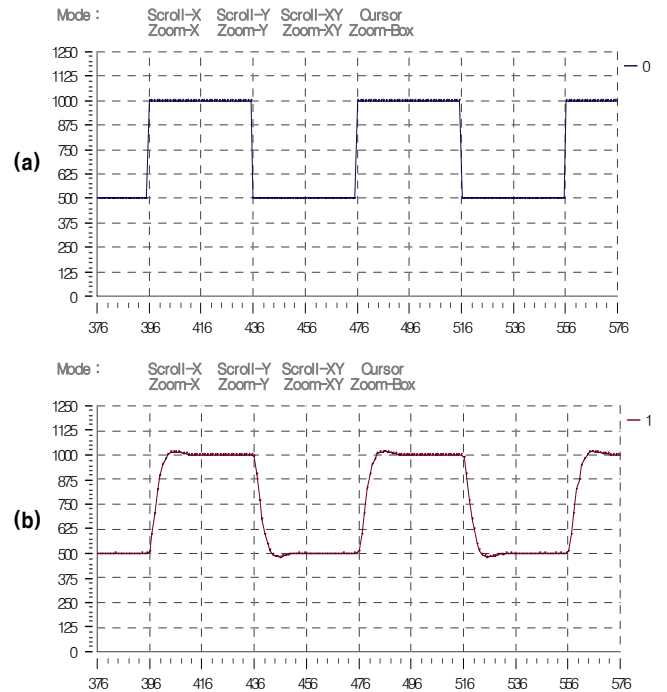
펄스발생기를 사용하여 기준 속도를 500[rpm]에서 1000[rpm]으로 5초 주기로 변경하였고, 전동기의 속도와 위치정보를 얻는데 유용한 C28x QEP 블록을 사용하여 실제 속도를 측정할 수 있었다. 이 때 QEP의

Counting mode는 RPM으로 설정하여 분당 전동기의 회전수를 측정하였으며, 사용한 엔코더의 분해능은 432[P/R]서 4채배를 하여 속도를 측정하였다. 기준 속도와 실제 속도의 차가 PI 속도제어기의 입력으로 들어가게 되고 속도 제어 후 출력된 데이터는 최종적으로 데이터 타입 변환 블록을 거쳐 C28x PWM 블록으로 입력된다.

PI 속도제어시 Anti-Windup 블록이 추가 되었는데, 이는 속도 제어기에 적분기가 포함되어 있을 경우 적분기의 적분값이 제어기의 출력값에 제한되지 않고 제어기의 제한폭을 넘어 쌓이게(wind-up)됨을 방지하기 위해서이다. 이 경우 제어기 입력의 부호가 반전 될 경우에도 쌓여 있는 적분기의 내부 적분값으로 인하여 제어기의 출력이 입력에 대해 제대로 반응하지 않거나 그 응답이 느려지는 현상이 발생하므로 적분기 내부의 값을 제어기 출력의 제한값에 따라 적절히 제한할 필요가 있다.

F2811 DSP는 다양한 신호를 발생시키기 위해 사용되는 PWM을 포함한다. PWM 블록을 통해 전동기의 속도를 가변시키는 PWM 신호의 파형을 하드웨어적으로 구성하지 않고도 발생할 수 있다. PWM 블록의 Waveform period는 20000, Waveform period unit은 clock cycle로 설정하였다. PI 속도제어기의 출력값에 offset 10000을 더해 PWM 블록에 10000~20000의 값을 입력되도록 하였는데, 이는 전동기의 인가 전압으로 0~12V의 양의 전압을 주기 위함이다.

그림 7은 실험 결과 기준속도와 실제속도를 보여주는 PI 속도제어기의 응답 파형들이다. 그림에서 볼 수 있듯이, PI 속도제어를 통해서 속도명령의 스탭변경시 정상상태 오차가 없고 빠른 응답속도를 갖는 제어기를 설계할 수 있음을 확인할 수 있었다.



〈그림 7〉 PI 속도 제어 후 응답  
(a) 기준속도 (b) 실제속도

#### 5. 결 론

본 논문에서는 TI C2000 DSP Embedded Target을 이용하여 직류전동기의 속도 제어를 구현하여 속도 스탭 명령시 속도 응답을 보았다. 기준 속도 명령에 대해 거의 0에 가까운 정상 상태 오차를 가진 응답의 결과를 확인할 수 있었고 무엇보다도 Matlab/Simulink의 TI C2000 DSP Embedded Target을 이용할 경우 기존의 제어 시스템 개발 시 보다 제어기의 설계 및 구현이 매우 쉽고 응답 결과 확인이 편리하다. 따라서 이를 통해 제어시스템 해석 및 설계에 관하여 쉽게 이해하고 단기간에 설계할 수 있다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 설승기, "전기기기제어론", p.41-128, 2002.
- [2] 최준동, "DSP를 이용한 속도 및 전류 제한을 갖는 직류 전동기 제어", 순천향대학교 정보기술공학부 학사학위논문, 2002.
- [3] 이용석, 성인재, "dSPACE 시스템을 이용한 직류전동기 구동 시스템", 순천향대학교 정보기술공학부 학사학위논문, 2005.
- [4] 리얼시스(사), "MATLAB을 사용한 DSP28X 제어", 2005.