

## dSPACE 시스템을 이용한 직류 전동기 구동 시스템의 제어기 설계

지준근, 이용석  
순천향대학교 정보기술공학부

### Controller Design of DC Motor Drive System Using dSPACE System

Jun-Keun Ji , Yong-Seok Lee  
Division of Information Technology Engineering, Soonchunhyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 직류전동기의 속도 및 전류제어를 위하여 dSPACE 시스템을 이용하여 전류 제한을 갖는 속도 제어시스템을 구현하였다. 속도 및 전류제어기의 설계는 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 사용하여 간편하고 손쉽게 구현하였으며 직류전동기 속도제어의 안정성과 응답성을 향상시킬 수 있었다. 직류전동기의 전류제어 및 속도제어는 DSP 보드와 dSPACE 시스템을 사용하여 수행하였으며, 속도의 제한은 속도센서인 엔코더 펄스를 이용해서 QEP로 처리하였고 전류의 제한은 전류센서인 홀센서를 통해서 A/D 변환기로 처리하였다. 제어기들은 각각 PI 속도제어기 및 PI 전류제어기를 설계하였고 시뮬레이션과 실험을 통해서 속도 및 전류 응답을 확인하였다.

## 1. 서 론

메카트로닉스(Mechatronics)의 기초인 전동기제어는 일반적으로 먼저 Simulation을 통해 제어기를 설계한 후, 다시 C나 assembly 언어로 프로그램을 작성하여 구현하였다. 그러나 본 연구에서는 dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 텍스트 방식이 아닌 그래픽 방식으로 제어기를 설계하고 Simulation을 한 다음 직접 실시간 프로그램으로 자동 변환하여 제어기의 응답을 테스트함으로써 전동기 구동 시스템의 제어기 설계를 짧은 시간안에 매우 편리하게 구현할 수 있음을 소개하고자 한다.

## 2. 제어기 설계

### 2.1 전류제어기 설계

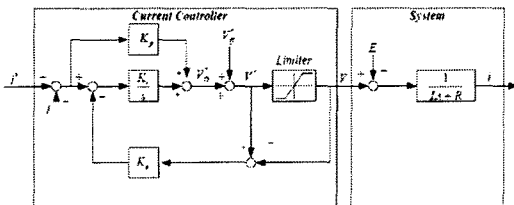


그림 1. 전류제어기

그림1은 직류전동기 구동을 위한 전류제어기이다.

전압지령 :  $V^* = V_{jb}^* + V_{ff}^*$

전향(Feedforward) 성분 :  $V_{ff}^* = E$

제한(Feedback) 성분 :

$$V_{jb}^* = K_p(i^* - i) + K_i \int \{(i^* - i) + K_a(V^* - V)\}$$

$K_p$  : 비례이득,  $K_i$  : 적분이득,

$K_a$  : Anti-windup이득( $K_a=1/K_p$ )

전류제어부의 페루프 전달함수는 다음과 같다

$$I(s) = \frac{a \frac{K_p}{L} s + \frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p + R}{L} s + \frac{K_i}{L}} I^*(s) \quad \rightarrow \quad \frac{I(s)}{I^*(s)} = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}}$$

$\omega_{cc}$  : 전류제어기의 주파수대역(Bandwidth)

제어기 이득의 선정:  $K_p = L\omega_{cc}$ ,  $K_i = R\omega_{cc}$

### 2.2 속도제어기 설계

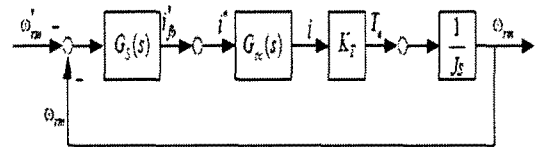


그림 2. 속도제어기

전류제어계 : 1차 시지연요소로 고려  $G_{cc}(s) = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}}$

속도제어기 : 비례적분(PI) 제어기  $G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s}$

$K_{sp}$  : 비례이득,  $K_{si}$  : 적분이득

$K_T$  : 토크상수,  $J$  : 관성

속도제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같다.

$$G_{sc}^o(s) = \left\{ K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right\} \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \frac{K_T}{J s}$$

속도제어기의 이득 교차각주파수  $\omega_{sc}$ 부근에서,

전류제어계의 전달함수 :  $G_{cc}(s) = \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \approx 1$

속도제어기의 전달함수 :  $G_s(s) = K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \approx K_{sp}$

$\omega_{pi} = K_{si}/K_{sp}$ : PI 절점 각주파수( $\omega_{pi} \ll \omega_{sc}$ )

속도제어계의 개루프 전달함수는 다음과 같이 간략화할 수 있다.

$$G_{sc}^o(s) = \left\{ K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right\} \frac{\omega_{cc}}{s + \omega_{cc}} \frac{K_T}{J s} \approx K_{sp} \frac{K_T}{J s}$$

$$|G_{sc}^o(j\omega_{sc})| = 1, \quad \omega_{sc} \approx K_{sp} \frac{K_T}{J}$$

비례이득 :  $K_{sp} = \frac{J\omega_{sc}}{K_T}$

적분이득 :  $K_{si} = K_{sp}\omega_{pi}$ ,  $\frac{\omega_{sc}}{10} \leq \omega_{pi} \leq \frac{\omega_{sc}}{5}$

$\omega_{sc}$ 의 결정은 다음과 같다.

$\omega_{sc} \ll \omega_{cc}$  (보통 1/10-1/5 이하)

$\omega_{sc} < 2\pi f_{sc}/(10-20)$  ( $f_{sc}$ :속도제어기의 샘플링 주파수)

### 3. 전체 시스템

#### 3.1 전체 시스템 구성도

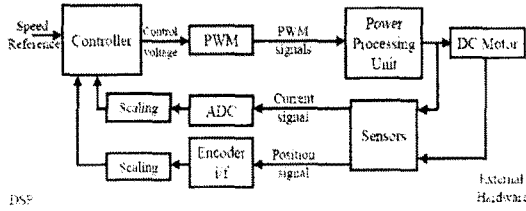


그림 3. 전체 시스템 구성도

그림 3의 전체 시스템은 제어부인 DSP 보드와 전력변환장치 및 모터로 이루어져 있다. DSP 보드에서 진류 및 속도제어기가 프로그램으로 설계되어 있으며 진류센서를 통해 ADC로 전동기 전류값을 받고, 모터의 엔코더 신호를 QEP로 받아 제어가 동작하여 최종출력은 PWM 신호로 내보낸다.

#### 3.2 제어기 구성도

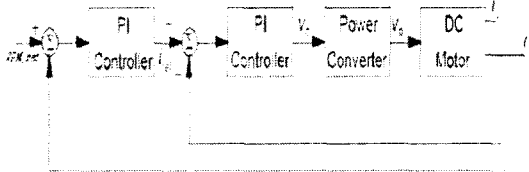


그림 4. 제어기 구성도

그림 4는 속도 및 전류제어기 구성도이며 바깥쪽이 속도제어기이고 안쪽이 전류제어기이다. 속도제어기 동작 타이밍을 전류제어기보다 1/10로 느리게 설정하여 전류제어기( $f_{cc}=10\text{KHz}$ )가 10번 동작할 때 속도제어기( $f_{sc}=1\text{KHz}$ )는 1번 동작한다.

### 3.3 전력 변환 장치

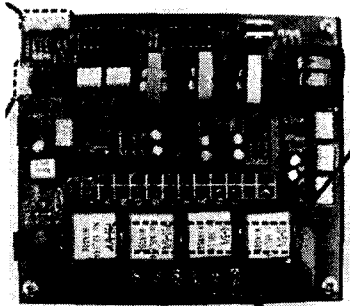


그림 5. 전력 변환 장치

전력변환장치이다. IPM 모듈을 사용하여 직류전동기 구동을 위한 단상인버터를 구성하였다. 표1은 사용한 IPM 모듈의 사양을 나타낸다.

표1. IPM:MP6750(TOSHIBA)

Collector-Emitter Voltage	$V_{CES}$	600 V
Gate-Emitter Voltage	$V_{GES}$	$\pm 20$ V
Collector Current	$I_C$	15 A
Forward Current	$I_{CP}$	15 A
Collector-Emitter Saturation Voltage	$V_{CES(sat)}$	4 V
Gate-Emitter Cut-off Voltage	$V_{GES(off)}$	6.0 V

### 4. 시뮬레이션 및 실험

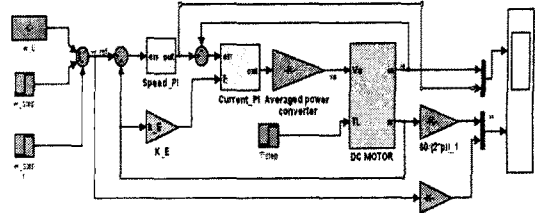


그림 5. 시뮬레이션 제어블록

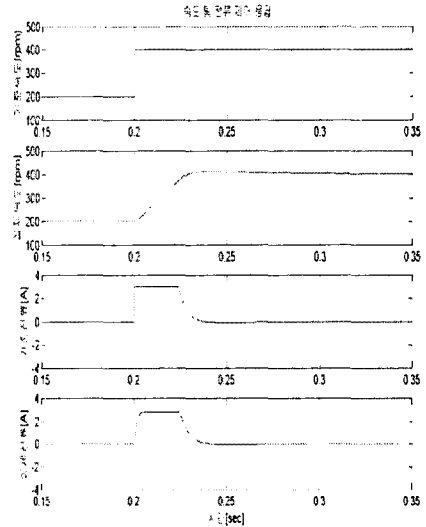


그림 6. 가속시 스텝응답(200→400RPM)

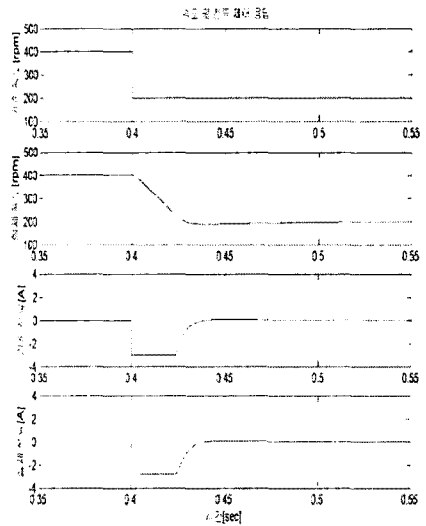


그림 7. 감속시 스텝응답(400→200RPM)

그림 5는 시뮬레이션 제어블록이다. 실험을 하기 전에 먼저 실제 직류전동기를 모델링하여 시뮬레이션을 수행함으로써 실제 실험에서의 실수나 잘못된 제어기 설계 등을 피하여 보다 안전하게 실험을 할 수가 있었다. 그림 6과 7은 속도 가감속시 시뮬레이션 결과 파형이다.

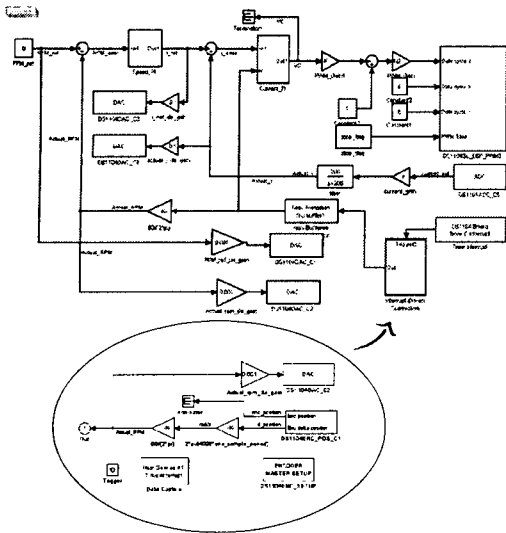


그림 8. 직류전동기 제어블록

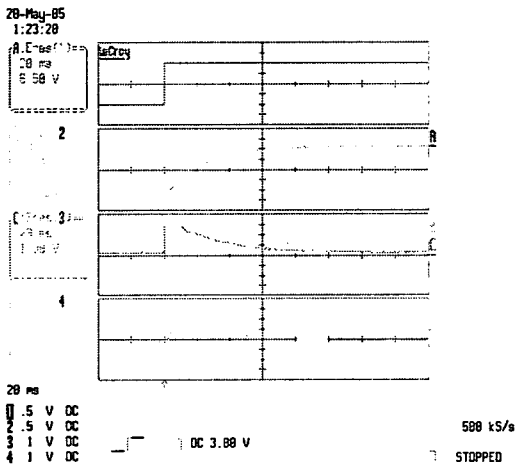


그림 9. 가속시 스텝응답(200→400RPM)

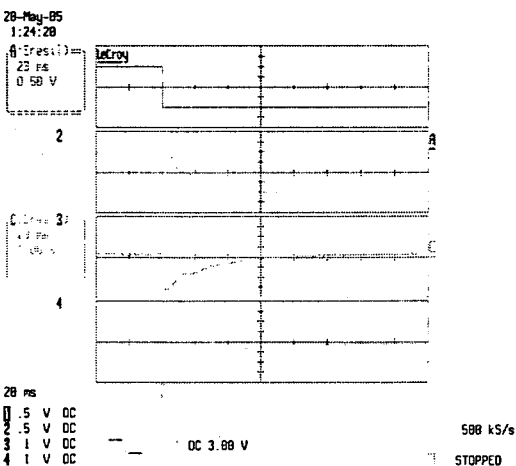


그림 10. 감속시 스텝응답(400→200RPM)

그림 8은 실험을 위한 직류전동기 속도 및 전류제어기 블록을 나타내며 기본주기는 전류제어주기로서( $T_{cc}=100 \mu s$ )로 동작하도록 설정되어 있다. 하지만 속도제어기는 이보다 1/10 정도 느려야 하기 때문에 인터럽트 블록을 만들어 전류 제어기와 서로 다른 주파수( $T_{sc}=10\mu s$ )로 동작하도록 설계하였다. 제어기가 제대로 동작하는지 확인하기 위해 속도지령, 실제속도, 전류지령, 실제전류의 값들을 각각 DAC로 출력하였고, 각각의 실제 값들과 DAC 출력전압을 서로 맞추어주기 위해서 DAC 앞단에 적절한 Gain을 곱하여 속도는 0.01V/RPM 이고 전류는 1V/A가 되도록 설정하였다. PI 전류제어기 설계이론을 바탕으로 제어기의 Gain값들을 설정하여 전류제어기의 설계의 정당성을 확인할 수 있었다.

그림 9와 10의 전동기의 속도 가감속시 실험결과 파형에서, 각 채널은 1:속도지령, 2:실제속도, 3:전류지령, 4:실제전류를 나타낸다.

본 연구에 사용한 전동기는 그림 11에서 보여지는 Leroy Somer MG set의 콘버터용 타여자 직류 전동기이다. 속도센서인 엔코더가 직류전동기 옆에 있는 BLDC에 달려 있기 때문에 커플링으로 서로 연결하여 사용하는 과정에서 약간의 백래시 현상이 발생하여 스텝명령의 20ms이후 부근에서 진동이 생겨났다. 명령추종을 빠르게 하기 위하여 제어주파수대역을 높이면 축진동 현상이 심하게 발생하기 때문에 더 빠르고 안정한 응답을 구할 수 없음을 확인할 수 있었다.

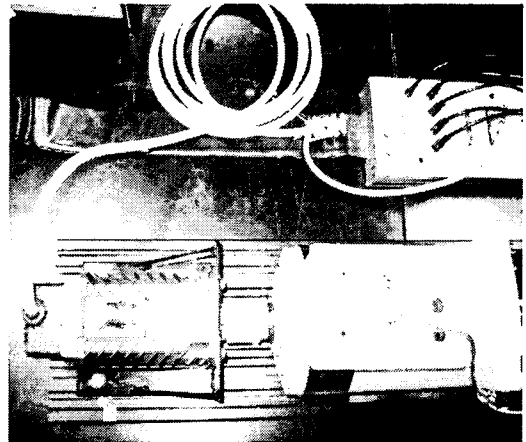


그림 11. 실제 전동기 시스템 구성도

### 5. 결 론

본 논문에서는 dSPACE 1104 시스템을 사용하여 직류 전동기의 속도 및 전류제어기를 구현하여 속도 스텝명령 시 속도 및 전류 응답을 보았다. dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용할 경우 기존의 제어시스템 개발시보다 제어기의 설계 및 구현이 매우 쉽고 응답결과도 보기에 편하여 제어시스템 해석 및 설계에 관해 쉽게 이해하고 단기간에 설계할 수 있었다.

본 연구는 한국과학재단 지정 순천향대학교 차세대BIT무선 부품연구센터(20040179)의 지원에 의한 것입니다

### [참 고 문 헌]

- [1] 설승기, "전기기기제어론" p.41-128, 2002
- [2] Amit Kumar Jain "Hands-on Tutorial on Using Simulink in Modeling of Controlled Drives"
- [3] 최준동, DSP를 이용한 속도 및 전류 제어를 갖는 직류전동기 제어, 순천향대학교 학사논문, 2002