

DSP를 이용한 BLDC 전동기의 디지털 제어기

조규만* 김용** 백수현**
 *청주 기능대 **동국 대학교 전기공학과

Digital Controller of BLDC Motor Using DSP

Gyu-Man Cho* Yong Kim** Soo-Hyun Baek**
 *Chongju Ploytechnic College **Dong Guk University

Abstract -This paper presents the software control of a brush-less DC motor. Not only speed and current controls but also a real-time identification of the motor parameters can be implemented by software using the digital signal processor (DSP) TMS320F240. The DSP Controller TMS320F240 from Texas Instruments is suitable for a wide range of motor drives. TMS320F240 provides a single chip solution by integrating on-chip not only a high computational power but also all the peripherals necessary for electric motor control. The main benefits are increased system reliability and cost reduction of the overall system. The present paper describes how a speed controlled brushless DC drive can be implemented using TMS320F240.

1. 서 론

현재까지 각종 컨버터, 전동기, 제어 등의 산업 자동화 분야에서 One-chip μ -controller가 사용되고 있었다. 그러나 이러한 One-chip μ -controller 들은 실시간 고속의 연산이 불가능해 새로운 형태의 μ -controller의 필요성이 요구되고 있다. TMS320F240은 제어에 필요한 각종 주변 장치를 chip에 포함시킨 제품으로 DSP controller는 기존의 μ -controller를 대체할 제품으로 부상하고 있다. TMS320F240은 20 MIPS(50ns)의 고속 연산이 가능하고 별도의 외부 메모리 없이 칩 하나로 모든 동작을 할 수 있도록 되어 있으며 특히 각종 전동기의 속도 및 위치제어에 적합하도록 설계되어 chip 하나만으로 간단한 Digital Motor Control 시스템을 구성할 수 있다. 특히 TMS320F240에는 전동기를 구동하는 6개의 PWM출력 단자가 full compare unit으로 제공되며 공간벡터 PWM mode를 지원하고 있다. 양호한 응답 특성과 높은 회전 정밀도 및 고효율 특성을 추구하기 위하여 소형화와 고출력이 가능한 BLDC 전동기를 제어대상 모델로 TMS 320F240을 이용하여 제어기의 소형화와 저가격화 및 신뢰성 향상을 실현하고자 한다.⁽¹⁾⁽²⁾

2. 디지털 제어기

2.1 디지털 PI 제어

일반적인 전동기 제어 구조는 토크 제어용 내부 제어 루프, 속도, 위치 제어용 외부 제어 루프등 3개의 제어 루프로 구성된다. 표준 디지털 PI 제어기는 식(1)과 같은 전달 함수로 나타낼 수 있다.

$$R(z) = K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} \quad (1)$$

K_p 는 비례 이득, K_i 는 적분 이득이다. 2차계의 폐루프 제어계의 모델 전달함수는 기본적으로 제어 시스템의 통과 대역을 결정하는 자연 진동 ω_0 , 제

동비 ξ 에 관한 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$H_0(s) = \frac{2\xi\omega_0s + \omega_0^2}{s^2 + 2\xi\omega_0s + \omega_0^2} \quad (2)$$

ω_0 와 샘플링 타임 T_s 는 식(3)으로 정한다.

$$\omega_0 = \frac{1}{4T_s} \quad (3)$$

2.1 전류 / 토크 PI 제어

전동기 전압 방정식은 전압 입력 u , 전류 i , 역기전력을 E 라 하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$u = Ri + L\frac{di}{dt} + E \quad (4)$$

PI 제어기의 구조는 그림1과 같이 나타낼 수 있다.

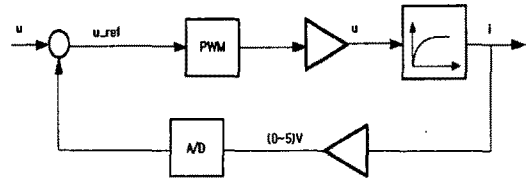


그림 1. PI 제어기

전기적 시정수 τ_{el} 이 $4T_s$ 보다 큰 경우 전류 PI 제어기 파라미터는 식(5)으로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$K_{i\ crt} = R\omega_0^2\tau_{el}T_s\frac{k_u}{k_i}$$

$$K_{p\ crt} = R(2\xi\omega_0\tau_{el} - 1)\frac{k_u}{k_i} \quad (5)$$

전기적 시정수 τ_{el} 이 $4T_s$ 보다 작을 경우 전류 PI 제어기 파라미터는 식(6)으로 나타낼 수 있다.⁽³⁾

$$K_{i\ crt} = R\omega_0T_s\frac{k_u}{k_i}$$

$$K_{p\ crt} = R\left(\frac{\tau_{el}}{T_s 2\sqrt{2}} - 1\right)\frac{k_u}{k_i} \quad (6)$$

식(5), 식(6)에서 k_u, k_i 는 전압, 전류 스케일 상수이다.

2.2 속도 / 위치 PI 제어

기계적 구동 시스템은 마찰 항을 무시하면 다음과 같은 운동 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$J\frac{d\Omega}{dt} = T - T_r = K\Phi I - T_r \quad (7)$$

식(7)에서 J 는 관성 모멘트, Ω 는 각속도 T 는 발생 토크, T_r 은 부하 토크, K 는 상수, Φ 는 자속, I 는 전류 성

분이다.

μ 는 가속 향으로 다음과 같이 정의된다.

$$\mu = \frac{K\Phi}{J} \quad (8)$$

일반적으로 속도 $\omega_0 \leq 0.1 \times$ 전류 ω_0 로 정한다.

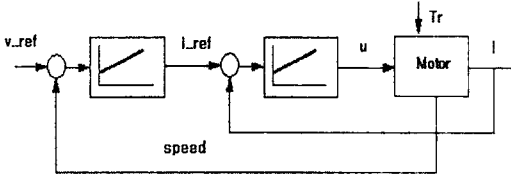


그림 2 속도/전류 PI 제어

속도 PI 제어기의 전달 함수는 다음과 같다.

$$R(s) = \frac{sK_{p\Omega} + K_{i\Omega}}{s} \quad (9)$$

내부 루프의 전달 함수는 식(10)으로 나타낼 수 있다.

$$H_0(s) = \frac{s\mu K_{p\Omega} + \mu K_{i\Omega}}{s^2 + s\mu K_{p\Omega} + \mu K_{i\Omega}} \quad (10)$$

식(10)을 2차계 전달 함수와 비교하면

$$K_{p\Omega} = \frac{2\xi\omega_0}{\mu} \quad (11)$$

$$K_{i\Omega} = \frac{\omega_0^2}{\mu}$$

이 되며 이산화된 속도 제어기는

$$R(z) = K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega} T_s}{1-z^{-1}} \quad (12)$$

가 되며 엔코더 슬롯수가 N 이고 4 체배하여 사용한 경우 속도 스케일링 상수(k_v)는 식(13)과 같다.

$$k_v = \frac{N \times 4}{2\pi} T_s \quad (13)$$

속도 제어기 파라미터는 측정 요소의 스케일링 상수를 고려하면 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.³⁾

$$K_{p\,spd} = \frac{2\xi\omega_0}{\mu} \frac{k_i}{k_v} \quad (14)$$

$$K_{i\,spd} = \frac{\omega_0^2}{\mu} T_s \frac{k_i}{k_v}$$

위치 제어기의 전달 함수는 식(15)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\theta(z)}{\Omega(z)} = \frac{1}{1-z^{-1}} \quad (15)$$

위치 제어기의 PI 파라미터는 식(16)으로 나타낼 수 있다.³⁾

$$K_{p\,pos} = 2\xi\omega_0 T_s \quad (16)$$

$$K_{i\,pos} = \omega_0^2 T_s^2$$

페루프 전달 함수는 식 (17)로 표현된다.

$$H_0(z) = \frac{(2\xi\omega_0 T_s + \omega_0^2 T_s^2) - 2\xi\omega_0 T_s z^{-1}}{2\xi\omega_0 T_s \omega_0^2 T_s^2 + 1 - (2\xi\omega_0 T_s + 2)z^{-1} + z^{-2}} \quad (17)$$

(ω_0, ξ) 값에 따라서 계단 응답 특성이 원하는 특성보다 오버슈트가 커지는 경우는 기준 신호를 1차 디지털 필터로 필터링하여 전달 함수의 영점을 보상하고 오버슈트를 감소시키기 위한 식(18)과 같은 디지털 필터를 사용한다.

$$F(z) = \frac{\omega_0^2 T_s^2 + 2\xi\omega_0 T_s(1-z^{-1})(b-1)}{(2\xi\omega_0 T_s + \omega_0^2 T_s^2) - 2\xi\omega_0 T_s z^{-1}} \quad (18)$$

단 b 는 기준 하중 항목이다.

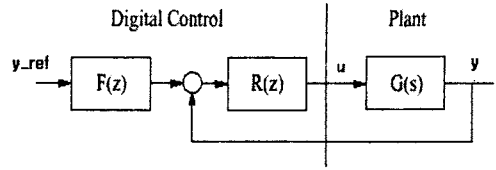


그림 3 디지털 필터

3. 실험 결과

제어보드의 사양은 3-phase PWM inverter(36V, 2A, 100kHz), 증분형 encoder port(500 펄스), 32-K word 0-wait state SRAM 외부 데이터/프로그램 메모리, RS-232 Serial communication port, Standard I/O headers (MC-BUS), JTAG interface, Power supply(15±10%)V DC, 3상 brushless motor(3개의 홀 센서와 엔코더)로 구성되어 있다. 회로의 구성은 정류 및 평활부와 IR2132를 이용한 인버터 드라이브회로, 3상 인버터부로 구성하였으며 위치정보는 홀소자를 이용하여 DSP의 IOPA0,1,2로, 회전속의 계산은 500펄스의 엔코더를 이용하여 DSP의 QEP1/IOPC4, QEP2/IOPC5, CAP3/IOPC6으로, PWM 신호의 발생은 DSP의 PWM1~6로 구성하였다. 또한 피드백 되는 전류는 DSP의 ADCIN4,11,12를 이용하였다.^{[4]:[5]:[6]}

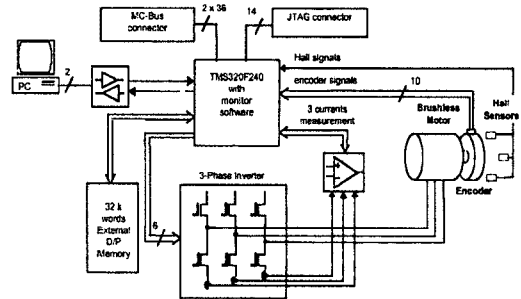


그림 4 DSP 제어 보드의 구조

실험에 사용된 제어 블록도의 구조는 그림 5와 같다.

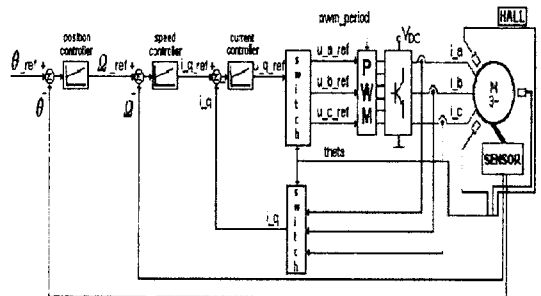


그림 5 제어 블록도

실험에 사용된 BLDC 전동기 사양은 표 1과 같다.

표 1 BLDC 전동기의 사양

Coil dependent parameters		
Phase resistance	ohm	7.5
Phase inductance	μ H	480
Back-EMF constant	V/1000rpm	2.1
Torque constant	mNm/A	20
Dynamic parameters		
Rated voltage	V	10
Max. cont. torque	mNm	17
Mechanical parameters		
Rotor inertia	$\text{kgm}^2 \cdot 10^{-4}$	4.6
Mechanical time constant	ms	8.6

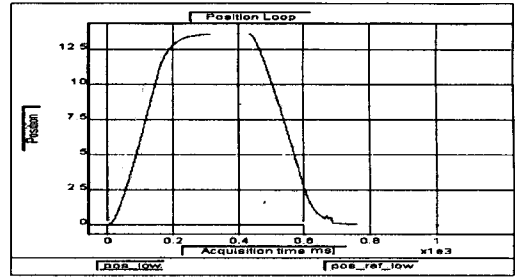


그림 10 속도 응답 파형

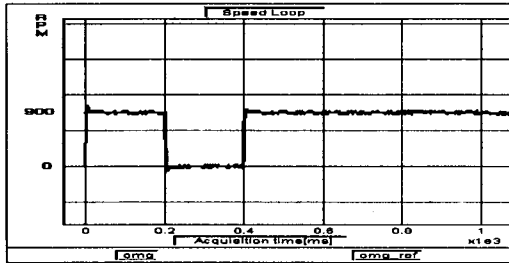


그림 6 무부하 속도 응답 파형

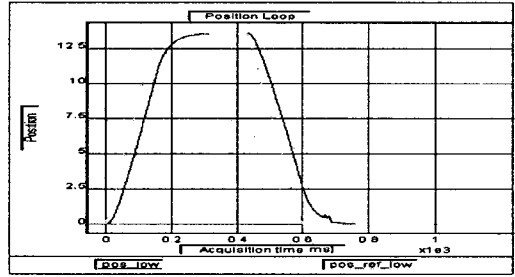


그림 11 위치 응답 파형

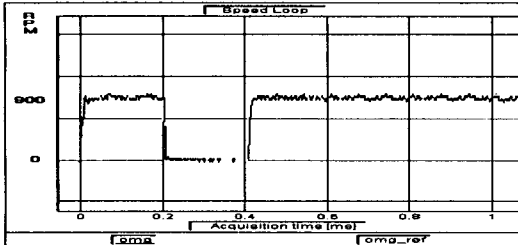


그림 7 부하 속도 응답 파형

그림 6, 그림 7은 각각 부하 및 무부하 상태에서 기준 속도 900 RPM인 경우 응답 속도 파형으로 기준값에 우수하게 추종하는 것을 알 수가 있다.

그림 8, 그림 9는 각각 부하 및 무부하 상태의 전류 응답 파형으로 기준값에 대한 양호한 특성을 나타내고 있다. 그림 10, 그림 11은 속도 및 위치특성 파형을 나타낸 것이다. 실험 결과에서 나타낸 것과 같이 위치/속도 기준값에 대하여 양호한 응답 파형 특성을 얻을 수 있었고 i_q 기준값에 대한 실제 i_q 전류 파형도 양호한 추종상태를 나타내고 있다. 부하를 인가한 상태 및 부하 변동시에도 양호한 위치/속도 특성을 나타내고 있다.

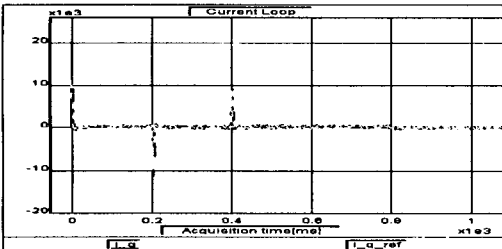


그림 8 무부하 상태 전류 응답 파형

4. 결 론

본 논문에서 적용한 고전적인 PI 제어기법의 BLDC 전동기 디지털 제어기는 제어 알고리즘이 간단하면서도 제어 성능 특성이 우수하고 주변회로 기능이 DSP Chip에 내장되어 있어 신뢰성을 향상시킬 수 있으며 소형으로 제작 가능하고 연산 처리 속도가 고속이어서 실시간 제어가 가능하다.

앞으로 전동기 용량이 큰 경우와 고속으로 운전하는 경우에 및 부하가 급변하는 시스템에 대한 제어 성능 특성에 대한 연구가 필요로 된다.

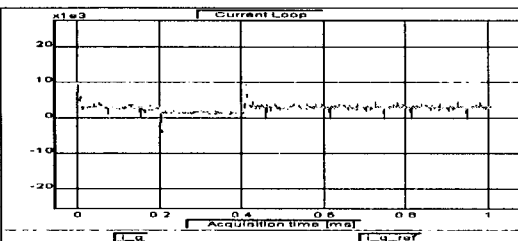


그림 9 부하 상태 전류 응답 파형

참고 문헌

- [1]Texas Instruments, "DSP Solution for BLDC Motor part #BPRA055", 1997
- [2]Texas Instruments, "Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive part #BPRA064", 1997
- [3]TECHNOSOFT, "DMCS-ac Toolbox user Manual", 1998
- [4]Texas Instruments, "TMS320F240C24x DSP Controllers Reference Set : CPU, System, and Instruction Set", 1997
- [5]Texas Instruments, "TMS320F240C24x DSP Controllers Reference Set : Peripheral Library and Specific Devices", 1997
- [6]T.J.E Miller "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives", Oxford Science publications ,1993