

**BLDC 전동기의 디지털 속도제어기에 관한 연구**

노광호\*, 김용\*, 이은영\*\*, 조규만\*\*\*, 이규훈\*\*\*\*  
 \*동국대학교, \*\*대림대학, \*\*\*청주기능대학, \*\*\*\*아주하이텍

**A Study on the Implementation of a Digital Speed Controlled BLDC Drive**

Kwang-Ho Roh\*, Yong Kim\*, Eun-Young Lee\*\*, Gyu-Man Cho\*\*\*, Kyu-Hun Lee\*\*\*\*  
 \*Dongguk University, \*\*Daerim College, \*\*\*Chong-Ju Polytechnic College, \*\*\*\*AJUHITEK Inc.

**Abstract** - The paper presents the software control of a brush-less dc motor with parameter identification. 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 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. This new family of DSPs enables single chip, cost effective, modular and increased performance solutions for BLDC drives. The present paper describes how a speed controlled brushless DC drive can be implemented using TMS320F240 and what kind of results can be achieved.

또한 영구자석형 전동기의 경우 공극에서의 자계를 일정한 것으로 가정한다면 전동기의 발생토크는 전류에 비례하게 되어 식(2)로 나타낼 수 있다. 여기서  $K_T$ 는 토크 상수이다.

$$T = K_T I \tag{2}$$

전동기와 부하의 관성모멘트를 각각  $J_M, J_L$ , 전동기의 마찰 토크와 부하 토크를  $T_f, T_L$ , 회전수에 비례하는 점성 마찰토크를  $D\omega$ 라 하면 전동기의 운동방정식은 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$T = (J_M + J_L) \frac{d\omega}{dt} + D\omega + T_f + T_L \tag{3}$$

**2) 전동기의 속도 전달함수**

전동기의 전달함수를 구하기 위해 식(1), (2), (3)을 라플라스 변환하면 식(4), (5), (6)과 같다.

$$V(s) = (sL + R)I(s) + K_E \omega(s) \tag{4}$$

$$T(s) = K_T I(s) \tag{5}$$

$$T(s) = (Js + D)\omega(s) + (T_f + T_L)\left(\frac{1}{s}\right) \tag{6}$$

여기서  $J = J_M + J_L$ 이다.

또한 식(4), (5), (6)을 이용하여 전동기를 그림1의 블록도로 나타낼 수 있다.

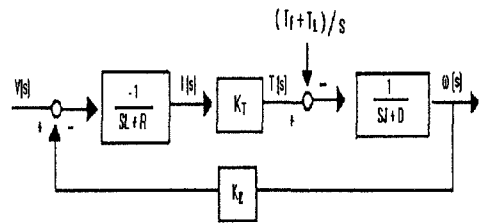


그림1 BLDC 전동기의 블록도

그림 1에서 전달함수는 식(7)과 같다.

$$G_P(s) = \frac{\omega(s)}{V(s)} = \frac{G(s)}{(1 + G(s)H(s))} \tag{7}$$

여기서  $G(s) = \frac{K_T}{(Ls + R)(Js + D)}$ ,  $H(s) = K_E$

$$G_P(s) = \frac{K_T}{(sL + R)(sJ + D) + K_E K_T} \tag{8}$$

만약 전동기의 댐핑이 없고 인덕턴스가 매우 작을 경우, 식(8)은 식(9)과 같이 간단히 표현된다.

**1. 서 론**

최근 산업화의 동향은 소형전동기의 활용이 증가하는 추세이다. 특히 산업용 로봇제어, 자동화 공작기계 등 Motion Control에 BLDC전동기가 널리 사용되고 있다. BLDC 전동기는 일반 DC 전동기에 비해 정류자가 없으므로 소음과 유지비가 작고 정류자에 의한 전력손실이 없으며 수명이 길고 신뢰성이 높아 산업용 및 가전제품의 구동장치로 연구·개발이 진행되고 있다. 본 논문에서는 양호한 응답 특성과 고정밀도 및 고효율 특성을 추구하기 위하여 소형화와 고출력이 가능한 영구자석형 BLDC 전동기를 제어대상 모델로 하였으며 드라이브 회로의 저가격화와 제어기의 소형화를 위해 PWM 발생 모듈, 엔코더 신호처리모듈, A/D Converter 모듈, SCI, SPI 모듈등이 내장되어 있는 TMS 320F240을 이용하여 적은 비용으로 신뢰성이 높은 제어기를 구성하였다. 시뮬레이션을 통하여 BLDC 전동기의 제어 파라미터를 산출하고, 제어대상 전동기를 최소의 오버슈트로 지령속도에 추종시키기 위하여 피드백 회로를 이용한 최적의 페루프 제어회로를 설계하였다.<sup>1),2),3)</sup>

**2. 본 론**

**2.1 BLDC 전동기의 특성 방정식**

**1) 전압방정식**

BLDC 전동기의 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$V = L\left(\frac{dI}{dt}\right) + RI + E = L\left(\frac{dI}{dt}\right) + RI + K_E \omega \tag{1}$$

여기서 E:역기전력,  $K_E$ :역기전력 상수,  $\omega$ :각속도

$$G_P(s) = \frac{K_T}{s^2 L J + s R J + K_E K_T} \quad (9)$$

이때 전달함수의 극점은 식(10), (11)로 표현된다.

$$p_1 = \frac{-R J_m + R J_m (1 - \frac{2L k_E k_T}{R^2 J_m})}{2L J_m} \approx -\frac{k_E k_T}{R J_m} \quad (10)$$

$$p_2 = \frac{-R J_m - R J_m (1 - \frac{2L k_E k_T}{R^2 J_m})}{2L J_m} \approx -\frac{R}{L} \quad (11)$$

또한 식(9)의 전달함수는 식(12), (13)으로 나타낼 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{\frac{K_T}{L J}}{(s + \frac{K_E K_T}{R J})(s + \frac{R}{L})} \quad (12)$$

$$G_P(s) = \frac{(\frac{1}{K_E})}{(s \tau_M + 1)(s \tau_E + 1)} \quad (13)$$

$$\tau_M = \frac{R J}{K_E K_T}, \quad \tau_E = \frac{L}{R}$$

앞에서 인덕턴스가 매우 작다고 가정했으므로  $\tau_M$ (기계적 시정수)은  $\tau_E$ (전기적 시정수)보다 훨씬 크며 ( $\tau_M > 10 \tau_E$ ),  $\tau_E \ll 1$  경우, 식(13)은 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$G_P(s) = \frac{\frac{1}{K_E}}{(s \tau_M + 1)} \quad (14)$$

### 3) 디지털 제어기의 설계

PID 제어기는 지상 및 진상 보상으로 양호한 특성과 제어의 강인성으로 인해 산업분야에서 제어기법으로 널리 사용되고 있다. 디지털 PID 제어기를 표현하는 일반식은 식(15)과 같이 나타낼 수 있다.<sup>(4)(5)</sup>

$$G_D(z) = K_P + K_I \frac{z T_s}{z-1} + K_D \frac{z-1}{z T_s} \quad (15)$$

여기서,  $T_s$ 는 샘플링 시간으로, 0.1(ms)로 하였다. 표 1은 BLDC 전동기의 파라미터를 나타낸다.

표 1. 제어대상 전동기의 사양

Phase resistance	7.5 [ $\Omega$ ]
phase inductance	0.48 [mH]
Back-EMF constant	2.1 [V/1000 rpm]
Torque constant	20 [mNm/A]
Rated voltage	10 [V]
Max. cont. torque	17 [mNm]
Max. recommended speed	15000 [rpm]
Rotor inertia	4.6 [ $\text{kgm}^2 \cdot 10^{-7}$ ]
Mechanical time constant	8.6 [ms]

따라서 PID 제어기를 포함한 BLDC 전동기 제어시스템의 페루프 전달함수  $G_{CL}(z)$ 는 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{CL}(z) = \frac{G_P(z) G_D(z)}{1 + G_P(z) G_D(z)} \quad (16)$$

식(13)으로 표현된 BLDC 전동기의 전달함수는 식(17)과 같다.

$$G_P(z) = \frac{0.2861z + 0.1708}{z^2 - 1.1981z + 0.2072} \quad (17)$$

Ziegler-Nichols의 제안에 따라 페루프 시스템의 극이 단위원 내의 경계점 ( $|z| = 1$ )에 있을 때 시스템이 발진하도록 비례이득  $K_P$ 만을 증가 ( $K_I = K_D = 0$ )시켜 근궤적과 일치하는 점에서 가상이득  $K_m$ 을 설정한 후 식(18)를 이용하여 각각의 이득을 설정한다.

$$K_P = 0.6 K_m, \quad K_I = \frac{K_P \omega_m}{\pi}, \quad K_D = \frac{K_P \pi}{4 \omega_m} \quad (18)$$

여기서,  $\omega_m$ 은 시스템이 진동 ( $K_I = K_D = 0$ )할 때 즉, 근궤적이 단위원과 교차하는 곳에서의 주파수를 의미하며,  $K_m$ 은 이때의 이득을 나타낸다. 그림 2는 Ziegler-Nichols 방법을 적용하여 구한 BLDC 전동기의 근궤적을 나타낸다.

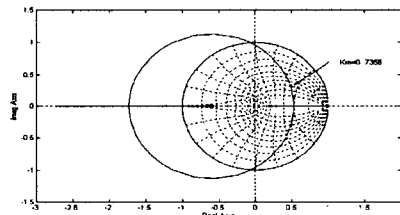


그림2 제동비 0.7에서의 근궤적도

그림3은 그림2에서 제시한 Ziegler-Nichols의 이득 설정 방법을 직접 적용한 경우 단위응답 특성을 나타내며 시스템의 정상상태에 도달하는 정정시간이 약 0.015 [s]임을 나타낸다. 시간영역에서 응답 특성의 결과로부터 안정된 응답특성을 나타내는 제동비를  $\zeta \approx 0.7$ 로 선정하여 근궤적 상에서 이득을 결정하였다.

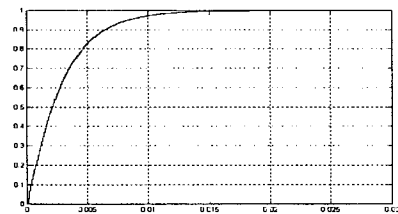


그림3 제동비 0.7에서의 스텝 응답 파형

### 3. 실험 및 결과

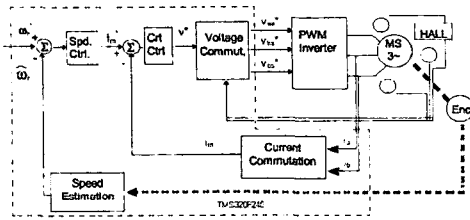


그림4 BLDC 전동기의 제어블록도

그림4는 BLDC 전동기의 제어 블록도이다. 회로의 구성은 정류 및 평활부와 IR2132를 이용한 인버터 드라이브 구동 회로, 3상 인버터부, DSP Chip으로 구성하였다. 전동기의 위치정보는 홀소자를 이용하여 DSP의 IOPA 모듈로, 속도계산을 위한 엔코더 펄스는 DSP의 QEP1/IOPC 4, QEP2/IOPC5, CAP3/IOPC6 모듈로, PWM 신호는 DSP의 PWM 모듈로 구성하였다. 또한 피드백 되는 전류는 DSP의 ADCIN 모듈을 이용하여 설계하였다. 그림5는 BLDC 전동기를 정격속도인 5000(rpm)으로 운전하였을 때 속도출력을 나타낸다. 속도출력이 정격속도 지령치에 도달 하는 시간은 약0.03(S)이며 그림6은 이때 측정한 전류를 나타낸다.

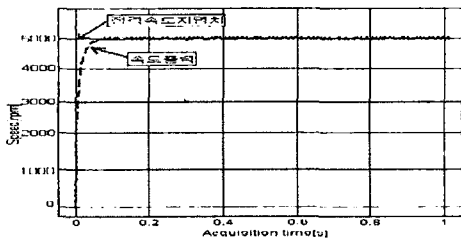


그림5 정격속도 운전 (무부하시)

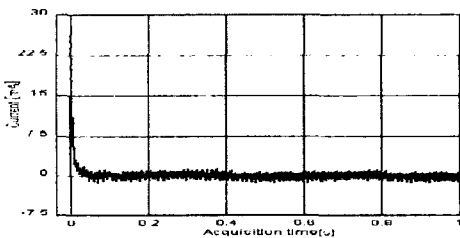


그림6 정격속도 운전시 전류

그림7.8은 정격속도 운전시 임의의 외란을 가했을 경우 측정한 속도와 전류이다. 지령속도에 도달하는 시간은 약 0.04(S)임을 알수있다.

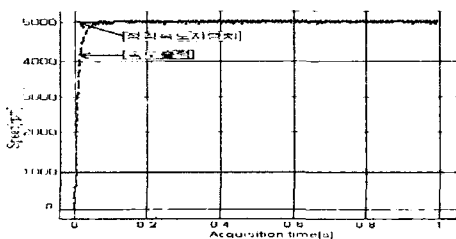


그림7 외란 발생시 속도출력

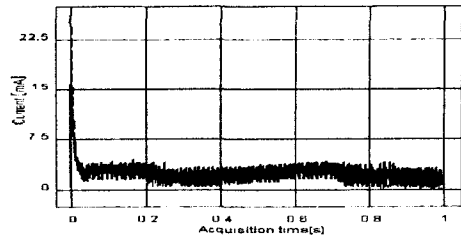


그림8 외란 발생시 전류

그림9는 정격속도의 가·감속운전을 나타낸 그래프로서 전동기의 속도는 사다리꼴의 속도지령치에 원활히 추종함을 알 수 있다.

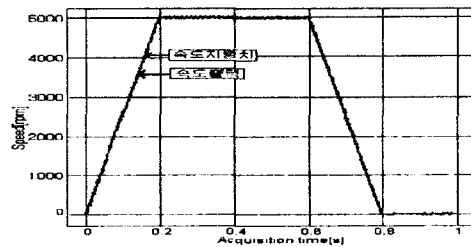


그림9 정격속도의 가·감속운전 (무부하시)

### 4. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기를 TI사의 TMS320F 240 Chip을 이용하여 최소의 오버슈트로 속도 지령치에 추종시키기 위하여 피드백 회로를 구성하여 속도편차가 최소가 되는 폐루프 제어회로를 설계하였다. 제어 대상 BLDC 전동기에 대하여 파라미터를 산출하고 근궤적도에서 제동비를 0.7로 선정 한 후 Ziegler-Nichols 방법을 응용하여 제어기의 이득을 결정하여 0.05(s)의 이내에 안정적으로 구동 가능한 디지털 제어 시스템을 실현할 수 있었다. 또한 TMS320F240으로 제어회로를 구성하는데 주변회로가 DSP Chip에 내장되어 있어 적은 비용으로 신뢰성이 높고 크기가 작은 제어기를 설계할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Texas Instruments "DSP Solutions for BLDC Motors" BPRA055 1997
- [2] Texas Instruments "Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive Using TMS320F240" BPRA064 1997
- [3] T.J.E Miller "Brushless Permanent Magnet and Reluctance Motor Drives" Oxford Science publications 1993
- [4] SHAHIAN / HASSU "Control system Design using MATLAB" PRENTICE HALL 1993
- [5] Katsuhiko Ogata "Discrete - Time Control system" Second Edition 1995
- [6] Texas Instruments "TMS320F24x DSP Controllers Reference Set: CPU, System and Instruction Set"
- [7] Texas Instruments "TMS320F24x DSP Controllers Reference Set: Peripheral Library and Specific Devices"