

BLDC 전동기의 고속운전을 위한 디지털제어기에 관한연구

천동진, 신미영, 이승호, 정도영, 김춘삼, 이봉섭, 곽동걸*
삼척대학교, 동해대학교*

A study on the Digital Control System for high speed operation of BLDC Motor

D. J. Cheon, M. S. Shin, S. H. Lee, D. Y. Jung, B. S. Lee, D. G. Goak*
Samcheok University, Donghae University*

ABSTRACT

This paper presents a PM type BLDC (Brushless DC) Motor servo drive system using high performance DSP TMS320F2812. The DSP controller with 150MIPS enables an enhanced real time implementation and increased efficiency and high performance for motor drive. The suggested drive system consists of PI action for the constant speed control and PID action for the current control with only 3 Halls, no encoders. The developed servo drive control system shows a good response speed characteristics at high speed up to 10000 [rpm].

1. 서 론

최근 전동기 디지털제어장치로 많은 각광을 받고 있는 TI사의 TMS320F2812는 고도의 정밀성 및 고속데이터 처리, IQ Math Library를 이용한 실시간(Real Time) 부동소수점연산, 전동기제어를 위한 전용 주변기기(Timer, AD변환기, 고속인터럽트, Capture, QEP), 32bit 곱셈 연산 등의 고속전동기 운전엔 필수요소를 갖추고 있다. 특히, 150[Mhz]의 빠른 연산처리 및 150MIPS의 고속명령처리속도, Sampling Hold 및 양자화 시간이 80ns 이므로 실시간제어에 적합하며, 제품생산 시 TMS F2812와 코드 호환성을 갖는 제품생산전용 DSP F2810 또는 F2811로 저가형의 DSP 제어기를 구현하여 제조원가를 줄일 수 있어서 대량생산에 적합하다.

BLDCM의 고속 제어시스템에서는 회전자의 위치 및 속도검출기로 엔코더를 대부분 연구에 이용되고 있으나 고가이면서 고속에서는 많은 문제가 제기되고 있다.^[4]

본 연구에서는 BLDCM의 광범위한 고속운전에 적합하도록 저가의 TMS320F2812를 사용한 제어시스템을 제안하였다. BLDCM 회전자의 위치 검출용 Hall 센서 3개

의 출력신호를 이용하여 논리회로 및 TMS320F2812의 Event Manager Capture 장치로 6채배하여 회전자 속도를 검출하는 알고리즘을 제안하였다. 고속운전에서 정속도제어를 위하여 PI 제어기를, 전류제어를 위해서 PID 제어기를 사용하였다. 개발 툴과 DSP를 통해 BLDCM을 실시간으로 제어하도록 구현하였다.

2. 본 론

2.1 BLDC의 동작원리

그림 1은 BLDCM의 상여자 권선이 120° 간격으로, 홀센서가 60° 간격으로 위치한 구조를 보이고 있다.

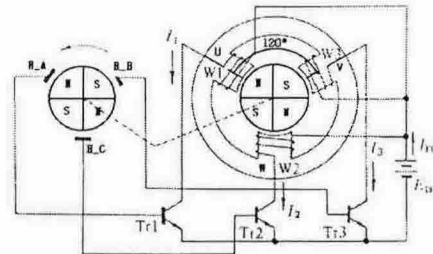


그림 1 BLDCM의 구조 및 스위칭 회로 구성
Fig 1 Structure of BLDCM and Switching

그림 2는 그림 1의 영구자속 회전자 위치에 따라 H_A, H_B, H_C 위치신호를 홀센서 별 출력신호를 보이고 있다.

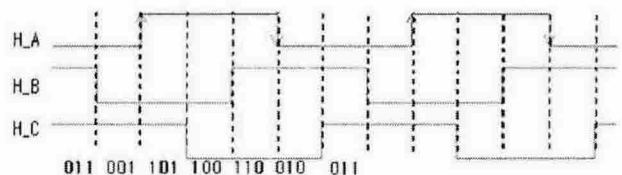


그림 2 Hall Sensor 신호파형
Fig 2 Signal wave of Hall Sensor

그림 3은 본 논문에서 2상여자로 사용된 Half Bridge Power 인버터를 나타낸다.

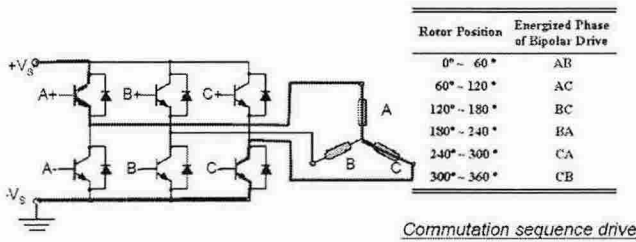


그림 3 IGBT Power 회로
Fig 3 IGBT power circuit

그림 2의 홀센서의 위치신호에 따라 IGBT Gate 단자에 표 1과 같은 입력신호가 들어가며, 이 시퀀스에 따라 BLDCM의 회전자는 회전하게 된다.

표 1 Hall Sensor 신호에 의한 상여자순서

Hall	IGBT Gate driver 입력신호					
	A+	A-	B+	B-	C+	C-
A,B,C	A+	A-	B+	B-	C+	C-
100	1	0	0	1	0	0
110	1	0	0	0	0	1
010	0	0	1	0	0	1
011	0	1	1	0	0	0
001	0	1	0	0	1	0
101	0	0	0	1	1	0

그림 4는 표 1에 의한 상여자 전류 $i_{a,b,c}$ 및 역기 전력 $e_{a,b,c}$ 를 보이고 있다.

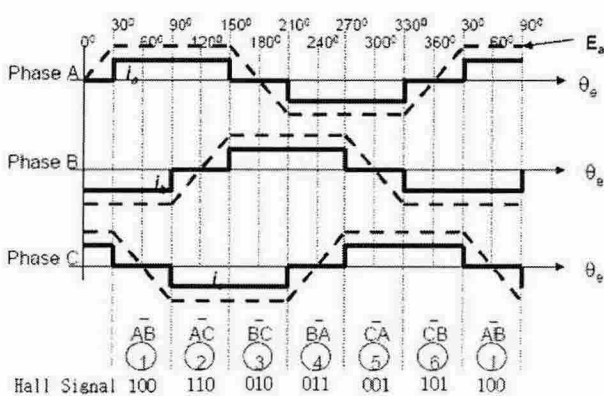


그림 4 역기전력 및 상전류 파형
Fig 4 Back-EMF and Current Wave

2.2 디지털 제어시스템 구현

그림 5는 본 연구에서 제안한 전체 디지털 제어 시스템 블록도를 나타낸다.

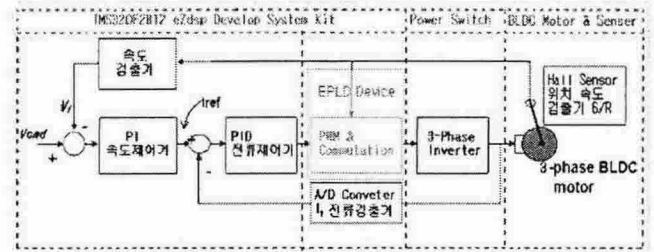


그림 5 전체 디지털 제어시스템 블록도
Fig 5 Block diagram of digital control system

2.3.1 DSP TMS320F2812 특징

DSP F2812는 클럭이 150Mhz으로 Real Time 제어를 위한 명령처리 속도가 150 MIPS 이며, 32bit 곱셈연산, 16bit×4개의 TIMER, 고속인터럽트, Real Time 시뮬레이션을 위한 CPU 32bit Timer 3개, 펄스 신호 검출을 위한 Capture 장치, 엔코더 2개의 QEP 장치, 80ns 12bit AD변환기 등으로 구성되어있으며, 클럭 주기를 체배하기 위한 PLL이 포함 되어 있다.

뿐만 아니라 DSP F2812개발 프레임 Code Composer Studio를 이용하면 각종 계수변화에 따른 실시간 제어가 가능하며, 시간영역 및 주파수 영역에서 결과를 분석 할 수 있다. 그림 6은 Code Composer Studio DSP 개발환경을 보여주고 있다.

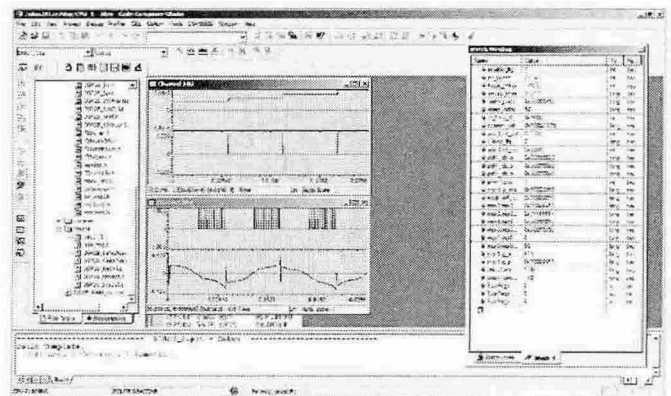


그림 6 DSP F2812 개발환경
Fig. 6 DSP F2812 Development Environment

2.3.2 회전자 속도검출 알고리즘

회전자의 속도검출에 일반적으로 사용되는 엔코더는 위치제어 및 정밀성을 요하는 시스템에 적합하며, 고속회전 속도검출에는 기계적인 진동이나 포토 커플러의 제한된 주파수 특성으로 적합하지 않다.

따라서 본 논문에서는 그림 2에서 3개의 Hall Sensor H_A, H_B, B_C 출력신호를 이용하여 속도를 검출하는 논리 알고리즘을 적용하였다. 그림 7

는 3체배 논리회로를 나타내며, 표 2는 진리표이다.

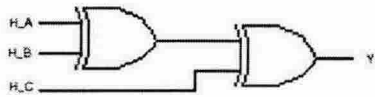


그림 7 3체배 속도검출 논리회로
Fig. 7 Logical circuit for velocity detection

표 2 3체배 논리 진리표

H.A, B, C 입력	출력 Y
100	1
110	0
010	1
011	0
001	1
101	0

표 2에서 출력 Y신호는 DSP 펄스신호 검출장치인 CAPTURE에서 펄스신호 상승 및 하강에서 검출하여 6체배가 되도록 하였다. BLDCM은 홀센서에서 전기각 360°에 대해 1개의 펄스가 생성되며, 회전자의 기계각 360°에 대해 2개의 펄스 신호가 출력된다. 그러므로 본 연구에서 제시한 6체배 알고리즘을 적용하면, 12펄스/Rev 신호를 30ms 동안 카운트 하여 정속도 PI제어기 비교기 케환신호로 사용하였다.

2.3.3 상여자 시퀀스 Commutation 알고리즘 구현

IGBT 전력변환 Gate 신호로 직접 6개의 PWM 신호를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 고속운전에서는 Capture를 이용한 회전자 속도검출 오류 및 각 TIMER의 지연 및 알고리즘 명령처리 시간으로 인한 Commutation 시점을 잃어버릴 수 있으므로 고속 운전에서는 제한성이 있다.

본 연구에서는 단일 PWM을 사용하였으며, 표 1의 홀센서 신호에 따른 Gate Driver Commutation 시점을 하드웨어적인 논리회로 표 1의 동작을 갖도록 EPLD를 사용하였다.

2.3.4 정속도 디지털 제어기

그림 6에서 속도 PI제어 및 전류 PID제어기를 구현하기 위해 시간영역 PID 출력 $m(t)$ 는 식 (1)과 같다.

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad \text{식(1)}$$

식(1)로부터 디지털 제어시스템에 적용하고자 이산

시간영역으로 변환하면 식(2)과 같다.

$$m[n] = K_p e[n] + K_i \sum_{h=0}^n \frac{e[h] + e[h-1]}{2} + K_d [e[n] - e[n-1]] \quad \text{식(2)}$$

여기서, $K_p = K_p, K_i = K_i T, K_d = \frac{K_d}{T}$ 이다.

본 연구에서는 식(2)를 속도제어기는 PI 제어기로, 전류제어기는 PID 제어 알고리즘을 적용 하였다. 오차에 대한 보정을 위하여 TIMER3 주기 인터럽트 1[ms] 간격으로 보상 하였다. 그림 8은 DSP 제어기 구현을 위한 flow chart를 보여주고 있다.

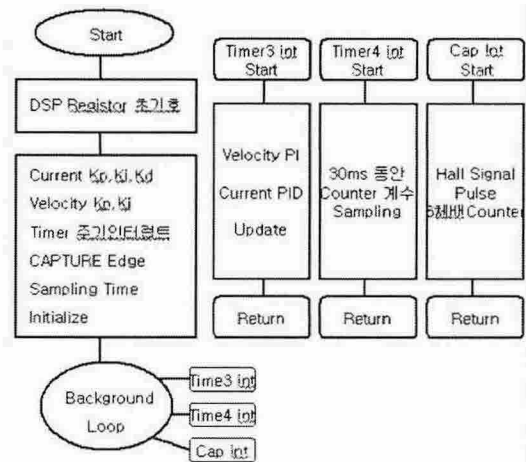


그림 8 DSP 알고리즘 처리 flow chart
Fig. 8 Show Control Algorithm flow chart

3. 실험 결과

그림 9는 본 연구에서 제작한 제어시스템을 나타낸다.

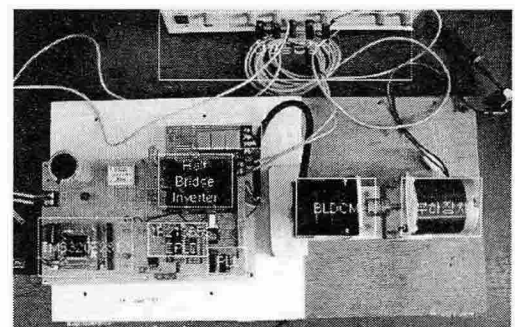


그림 9 실험장치
Fig. 9 Experimentation System

실험에서 사용된 3상 4극 BLDC 전동기의 사양은 표 3과 같다.

표 3 BLDC 전동기 사양

관성모멘트(Jm)	$2.27 \times 10^{-4} [\text{Kgm}^2]$
상 고유저항(R)	4.8Ω
인덕턴스(L)	630 μH
역기전력상수(Ke)	0.0346[Vsec/rad]
토크상수(Kt)	0.0346[Nm/A]
정격속도(rpm)	3,000[RPM]
상 및 극수	3상 4극
전격전류(A)	1.2A at 12V

그림 10은 3채배된 출력 신호를 나타내며, 그림 11은 8000→4000→2000→8000 [rpm] 명령을 주었을 때의 응답을 나타낸다. 그림 12는 BLDCM의 상전압과 상전류 파형을 나타낸다.

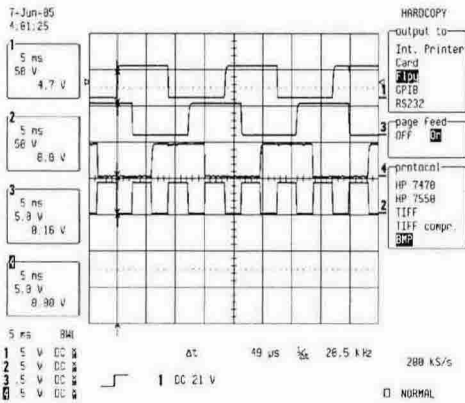


그림 10 측정된 신호
Fig. 10 The estimation signal

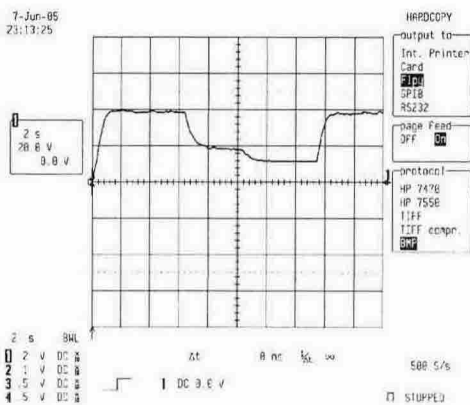


그림 11 속도변화에 따른 응답
Fig. 11 Response characteristics according to high speed

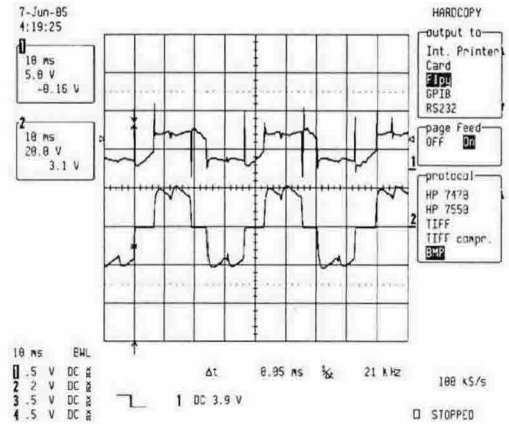


그림 12 상전압 및 상전류 파형
Fig. 12 Phase voltage and current wave

3. 결론

본 연구에서는 Back-EMF가 Trapezoidal 특성을 갖는 BLDCM의 고속운전을 위하여 속도검출용으로 사용되는 엔코더 없이 위치검출용 3개의 Hall 소자만으로 저가형의 DSP TMS320F2812를 이용하여 디지털 제어시스템을 구현한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1). 속도검출기인 엔코더없이 3개의 홀소자만으로 저속 및 고속제어가 가능하였다.
- 2). DSP 이외의 부가장치가 없어 제어시스템이 보다 간단하게 되었다.
- 3). 32비트 Timer 연산으로 실시간(real time)제어가 가능하였다.
- 4). 대량생산 시 저가의 드라이브 회로(F2810) 공급이 가능하게 되었다.

참고 문헌

- [1] Texas Instrument, "TMS320F2810, TMS320F2812 Digital Control Processors: Data Manual", 2003.
- [2] J.R. Hendershot Jr And TJE Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet: First Edition, Magna Physics Publications · Oxford Science Publications Company, Inc. pp. 14~1~14-46, 1994..
- [3] Texas Instrument, "DSP Solutions for BLDC Motors Literature Number: BPRA055 ,March 1997.
- [4] 윤용호 외4인, "2Hall-ICs를 이용한 저가형 PM Brushless DC Motor 속도 제어", 전력전자학회논문지 제9권 제4호, pp. 311~318, 2004.
- [5] 윤신용 외4인, "브러시리스 직류전동기의 정속도 운전을 위한 디지털 PI제어", 전기학회논문지 제49B권 제6호, pp. 395~401, 20004.