차량용 2축구동장치를 위한 BLDC 서보제어시스템 설계

주재훈* · 심동석* · 이규환** · 최중경*
*창원대학교 전자공학과 해군정비창

The Design BLDC Servo Control System for 2-Axis Actuator Mounted on Vehicle

Jae-Hun Joo* · Dong-Seok Sim* · Gyu-Hwan Lee** · Jung-Keyng Choi*
*Changwon National University
E-mail : cjk@changwon.ac.kr

요 약

이 논문은 BLDC 서보모터를 사용하여 고각 방위각 2축 무기발사체 시스템을 구동하기 위한 TMS320F28335 DSP 제어기와 MOSFET 인버터 드라이버 설계에 관한 논문이다.

ABSTRACT

This paper presents a study on the TMS320F28335 DSP (Digital Signal Processor) Controller and MOSFET inverter driver for the azimuth-elevation 2-axis heavy projectile system using BLDC (Brushless Direct Current) servo motors.

키워드

DSP(TMS32F28335), BLDC, MOSFET inverter

Ⅰ. 서 론

과거 무기 발사체의 조준은 대부분 유/공압 엑츄에이터 장치를 사용하였고 사람에 의한 수동식 조준이 많았다. 현대에 들어 효율적인 전술 운용을 위해 반응속도와 발사속도, 기동성, 방어력을 높임과 동시에 자동 조준의 필요성이 대두되었다. 이는 고속 처리가 가능한 전자장치들의 개발과 BLDC(Brushless Direct Current) 모터의 성능 향상으로 가능해졌고, 현재 개발되고 있는 무기 발사체에는 대부분 BLDC 서보 전동기와 기계장치를 결합한 엑츄에이터들이 사용되고 있는 상황이다.

본 연구는 무기 발사체의 정밀 위치제어와 서보 전동기의 속도, 전류제어 알고리즘을 탑재한 엑츄에이터 구동 제어기(Actuator Control Unit, ACU)를 소개한다. 이 시스템은 PWM 발생기, A/D 변환기, FPU(Floating Ponit unit)등 다양한 주변장치를 내장하고 있으며 고속 연산이 가능한 TI 사의 DSP(TMS320F28335)를 사용하였고, 고각 방위각 두 축 동시 위치제어가 가능하다. 그리고 24V/100A 용량의 차량용 밧데리를 이용하기 때문에, 인버터 구동부는 온저항(R_{DSon})이 낮아 에너지 효율이 높은 MOSFET 파워소자를 사용하였다.

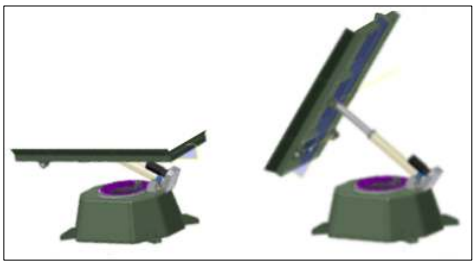

그림 1 발사체 형상도

고각 구동장치는 BLDC 모터, 감속기어, 엑츄에이터용 볼나사로 구성되어 있다. BLDC 모터 용량은 2800rpm/3.51Nm이며, 엑츄에이터용 볼나사는 모터의 회전 운동을 0 ~ 400mm의 거리를 왕복하는 직선운동으로 변환시켜 준다.

방위각 구동장치는 BLDC 모터, 감속기어, 웜기어로 구성되어 있으며, -180° ~180° 무한회전이 가능하다. 그리고 BLDC 모터 용량은 2700rpm/1.76Nm이다.

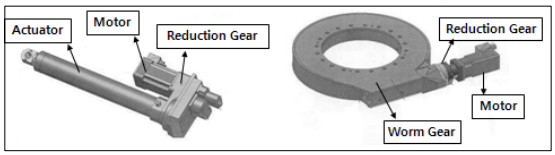

그림 2 고각/방위각 구동장치

II. 하드웨어 설계

ACU는 크게 제어보드와 인버터 보드로 나뉜다. 제어보드는 위치, 속도, 전류제어 알고리즘을 수행하고, 센서 신호처리, 상위제어기와 통신, PWM 신호를 발생하는 역할을 한다. 인버터 보드는 제어보드로부터 전달되는 PWM 신호를 증폭하여 모터의 각 상에 전달하는 기능을 수행한다. 그림 3은 ACU의 하드웨어 구성도를 나타내고 있다.

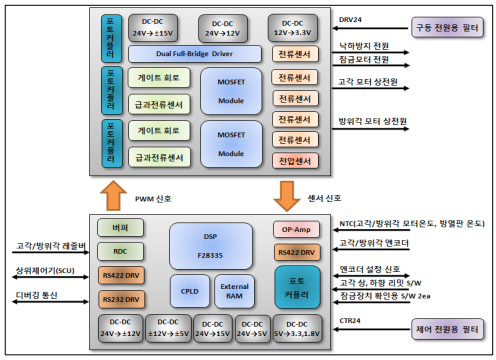

그림 3 ACU의 하드웨어 구성도

제어 알고리즘과 ACU의 운용 조건은 TMS320F28335 DSP를 통해 수행되고, DSP 주변 소자들의 Chip Select 신호 생성, 엔코더의 위치 정보 획득은 CPLD로 보조하도록 하였다. 상위 제어기와는 RS-422 방식을 통해 통신하였으며, 고각/방위각의 절대위치 엔코더 값은 SSI(Serial Synchronous Interface)를 통해 획득 하였다.

BLDC 모터의 전류제어를 위해 필요한 전류 값은 상전류 센싱회로를 통해 획득되는데, 스위칭 노이즈를 제거하기 위해 차단 주파수가 16kHz가 되도록 2차 저역통과 필터가 추가되어 있다. 그림 5는 이 회로의 주파수 응답 파형을 시뮬레이션한 결과이다.

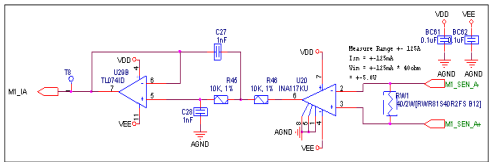

그림 4 상전류 센싱회로

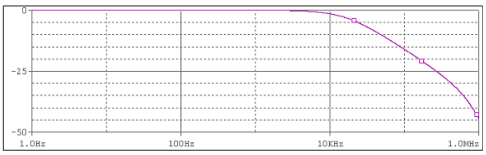

그림 5 주파수 응답 특성

인버터 보드는 게이트 구동회로와 인버터 회로로 구성된다. 게이트 구동회로는 전원의 절연을 위해 고속 스위칭 포토커플러를 사용하였고, Bootstrap 방식을 통해 인버터 회로로 스위칭 신호를 전달한다.

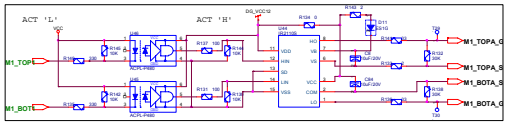

그림 6 게이트 구동회로

모터의 상 전원을 공급하는 인버터 회로는 IXYS 사의 6-pack full bridge MOSFETs가 내장된 파워소자 GWM120-0075X1로 구성되어 있다. 파워 소자는 최대 75V V_{DSS}, 110A I_{DS}, R_{DSon} 4.0mΩ의 전기적 특성을 나타낸다.

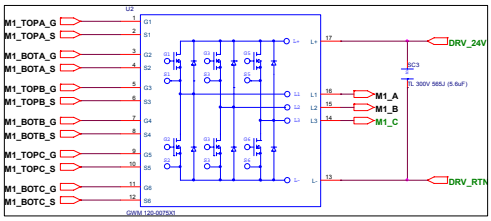

그림 7 인버터 회로

III. 소프트웨어 설계

BLDC 모터 구동 시스템의 전체 블록도는 그림 8과 같다. 크게 위치 및 속도 센싱부, 상전류 센싱부, 위치제어기, 속도제어기, 전류제어기, MIN-MAX PWM을 위한 좌표변환, 인버터를 통한 출력 등으로 구성되어 있다. 속도, 전류 제어는 PDFF 제어기법을 적용하였고, 위치 제어는 비례 제어기법을 사용하였고 전류 제어는 100[us]마

다, 속도와 위치제어는 1[ms] 마다 수행한다.

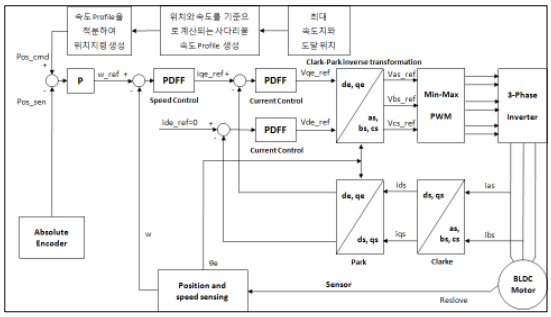

그림 8 벡터제어와 Min-Max Pwm 구성도

DSP는 100[us]마다 인터럽터를 발생한다. 이때 벡터 제어에 필요한 모터의 상전류와 회전자 절대 위치 값을 계측하고, Park-Clark 변환을 통해 iqe, ide 전류 값을 계산한다. 전류 제어기를 거쳐 산출된 전압지령 Vqe_ref, Vde_ref는 iPark-iClark 변환을 통해 상전압 Vas, Vbs, Vcs를 계산하고, 3상 PWM 출력은 Min-Max 전압변조 방식에 결정된다. 위치 제어기는 1[ms]마다 생성되는 위치지령과 절대위치 엔코더를 통해 계측된 현재 위치의 오차를 통해 속도 지령 ω_ref을 생성하며, 속도 제어기는 입력된 속도지령과 RDC를 통해 산출된 속도 데이터를 비교하여 뺀 값이 속도 제어기의 입력이 되어 PDFF 제어를 하게 된다.

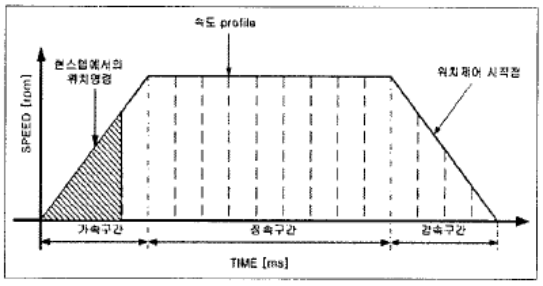

그림 9 제안된 위치제어 방법

본 시스템에서 제안된 위치제어 방법은 목표위치 명령이 주어지면 가속구간, 정속구간, 감속구간을 지정한 뒤 각 구간별로 세분화된 위치 지령을 형성하는 방법이다. 따라서 위치제어기는 제어가 경과된 시간에 따라 가속, 정속, 감속 중 어느 구간인지를 판별한 뒤 각 구간별로 그 구간에 해당하는 면적을 계산해 위치 지령을 생성하고, 그 위치 지령과 센싱된 위치로부터 위치 오차를 계산하여 속도 지령을 만들어 내는 방법을 사용하였다. 이러한 형태로 제어를 할 경우 계산량이 많아지는 단점이 있으나 고속의 DSP를 사용하므로 큰 문제가 되지 않았고 단순한 P 제어만을 사용하여 만족할 만한 제어 특성을 보였다

□

Ⅳ. 시험 결과

본 연구를 통해 설계된 액추에이터 구동 장치의 전류, 속도 제어와 무기 발사체의 고각, 방위각 위치제어 특성 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결과들을 얻었다.

(a) 제어보드 (b) 인버터보드

그림 10 제작된 보드의 형상

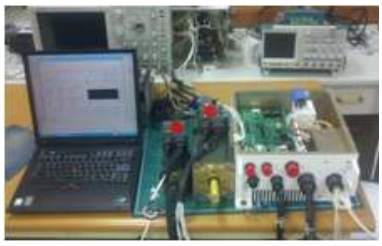

그림 11 성능시험 장면

표 1 구현된 무기 발사체의 제원

발사체 총중량		750kg
전원		24V, 100Ah
구동 범위	방위각	-180 ~ 180°
	고각	0 ~ 55°
최대 구동시간	방위각	180°/ 18s
	고각	50°/ 10s
구동 정밀도		±2mil

그림 12와 그림 13은 속도 프로파일에 의해 생성된 속도 지령을 추종하는 BLDC 모터의 무부하 특성 시험 결과이다. 그리고 그림 14와 그림 15는 무기 발사체에 위치 명령이 전달된 후 액츄에이터 위치 변화와 속도, 전류 데이터를 나타내고 있다.

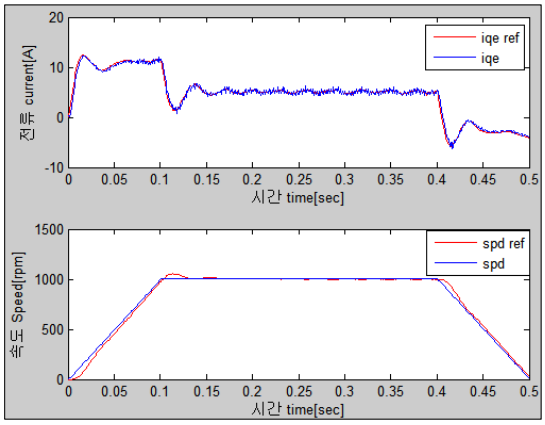

그림 12 고각용 모터 속도제어 1000rpm

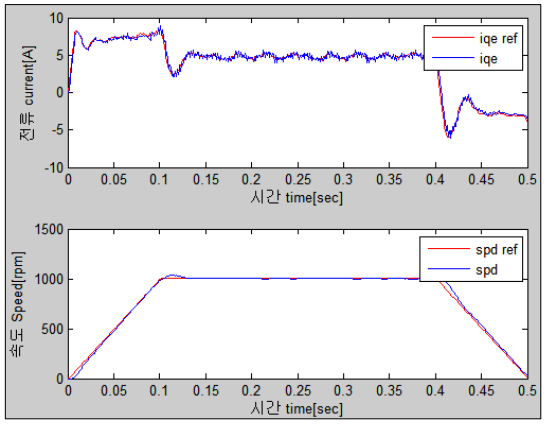

그림 13 방위각용 모터 속도제어 1000rpm

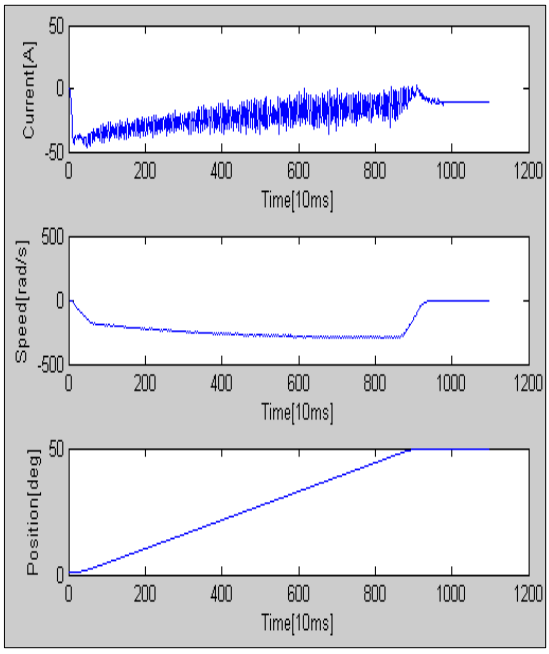

그림 14 고각 위치제어 0° → 50°

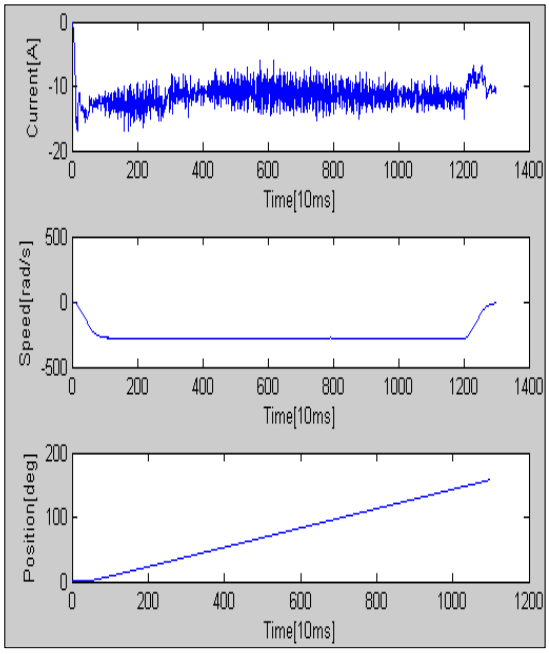

그림 15 고각 위치제어 0° → 180°

V. 결 론

본 논문에서 무기 발사체에 적용된 엑추에이터 구동 장치(ACU)는 전달된 위치 명령을 빠른 응답 특성과 정밀한 위치제어가 가능하도록 설계되었음을 실험을 통해 확인해 보았다. 이러한 특성을 만족하도록 하기 위해서 PWM 생성기법으로 MIN-MAX 전압변조 방식을 적용하고, 속도 프로파일에 따른 위치제어 기법과 PDFF 속도/전류 제어기로 시스템을 구성하였다.

고저/선회 두 축 동시제어가 가능하도록 하기 위해 고속 연산이 가능하고 모터 제어에 유용한 주변장치를 내장한 DSP(TMS320F28335)를 사용하였다. 이는 제어 보드의 크기를 줄일 수 있는 효과를 가져왔다. 그리고 엑추에이터 구동 전원으로 배터리를 사용하기 때문에 본 연구에서 적용된 무기 발사체 뿐만 아니라 차량에 필요한 다양한 엑츄에이터 구동에도 즉시 적용이 가능하다