
BLDC 전동기를 이용하는 직동력(PBW) 구동시스템의 제어기 및 구동기 설계

주재훈·구본민·김진애·조대성·최중경

창원대학교 전자공학과 산업전자제어연구실

Design of a DSP Controller and Driver for the Power-by-wire(PBW) System Using BLDC Servo Motor

Jae-Hun Joo·Bon-Min Goo·Jin-Ae Kim·Dae-Seong Zo·Jung-Keyng Choi

Dept. of Electronic Engineering, Changwon National University

E-mail : j2hoon2518@nate.com

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

요 약

본 논문은 BLDC 서보모터를 사용하는 power-by-wire(PBW) 시스템을 위한 DSP 제어기와 IGBT 인버터 드라이버를 설계하는 연구를 제안한다. 이 BLDC 서보모터 시스템은 DSP(Digital Signal Processor)와 IGBT 인버터 모듈로써 구현되어진다. PBW 시스템은 직선 추력 동작을 위해 서보 모터의 속도 제어가 필요하다. 본 논문에서는 벡터 제어와 min-max PWM 기술로 이러한 서보 제어기를 구현한다. 제어기의 CPU로써, TMS320F2812 DSP는 PWM(펄스폭변조) 파형발생기, A/D변환기, SPI(직렬인터페이스) 포트 그리고 많은 입/출력 포트 등을 가지고 있기 때문에 채택되었다.

Abstract

This paper presents a study on the DSP controller and IGBT inverter driver design for the power-by-wire(PBW) system using BLDC servo motor. This BLDC servo motor system was realized with DSP(Digital Signal Processor) and IGBT inverter module. The PBW system needs speed control of servo motor for linear thrust action. This paper implements a servo controller with vector control and min-max PWM technique. As CPU of controller, TMS320F2812 DSP was adopted because it has PWM(Pulse Width Modulation) waveform generator, A/D(Analog to Digital) converter, SPI(Serial Peripheral Interface) port and many input/output port etc.

키워드

DSP 제어기, 직동력(PBW) 시스템, BLDC

I. 서론

항공기를 전기적으로 제어하는 기술인 More-Electric(ME) 기술이 이제 연구단계에서 벗어나 항공기에 실제 실현되고 있다. 특히 비행조종기술인 가용성 및 정비성의 증대, 항공기 중량과 지상 정비 시간의 단축 등과 같은 장점을 얻기 위해서 기존의 유압식 작동방식을 직동력(PBW, Power-by-wire)방식으로 진보시키는 많은 기술이 적용되는 분야이다.

초기 항공기는 각 조종면을 움직이기 위해 필요한 유압을 공급해야 하고 항공기 내부에 고압의 유압배관을 복잡하게 설치하여 이용한다.

직동력 방식의 목적은 작동기에 전기동력을 직접 제공함으로써 유압라인과 이와 관련된 위험요소를 획기적으로 줄이거나 제거하는데 있다. 직동력 기술의 제품이 바로 직동력 고응답 액츄에이터이다. 이러한 직동력 고응답 액츄에이터의 지능화, 소형화, 경량화를 이루기 위해서는 본 연구대상인 BLDC 서보전동기 제어 기술이 필수적이다.

II. 본론

I. 직동력 고응답 액츄에이터의 구성

직동력 고응답 액추에이터는 유압 펌프, 서보 모터, 유압 실린더, 스트로크 센서 등을 일체화한 액추에이터부와 모터앰프, 센서앰프의 제어기부로 나누어진다. 제어기는 지령 신호와 스트로크 센서로부터의 피드백 신호를 연산하고, 모터의 회전속도에 상당하는 새로운 지령신호를 모터 앰프에 출력한다. 실린더의 동작은 모터의 회전 속도와 회전 방향의 절환에 의하여 이루어지며, 펌프의 토출 유량이 제어되어 직선 서보기구를 실현한다.

조종면에 필요한 변위와 속도 그리고 힘은 유압 펌프 및 매니폴드에 장착된 밸브에 의하여 조정되는 구성으로서, 유압 펌프의 회전 방향에 의하여 유압 액추에이터가 전·후진하며, 유압 액추에이터의 정지는 바이패스 밸브에 의하여 행해진다. 전동모터의 회전속도 변화에 따라 유압펌프의 송출량이 변하게 되고 이에 의해 유압 액추에이터의 전·후진 속도가 변하게 된다.

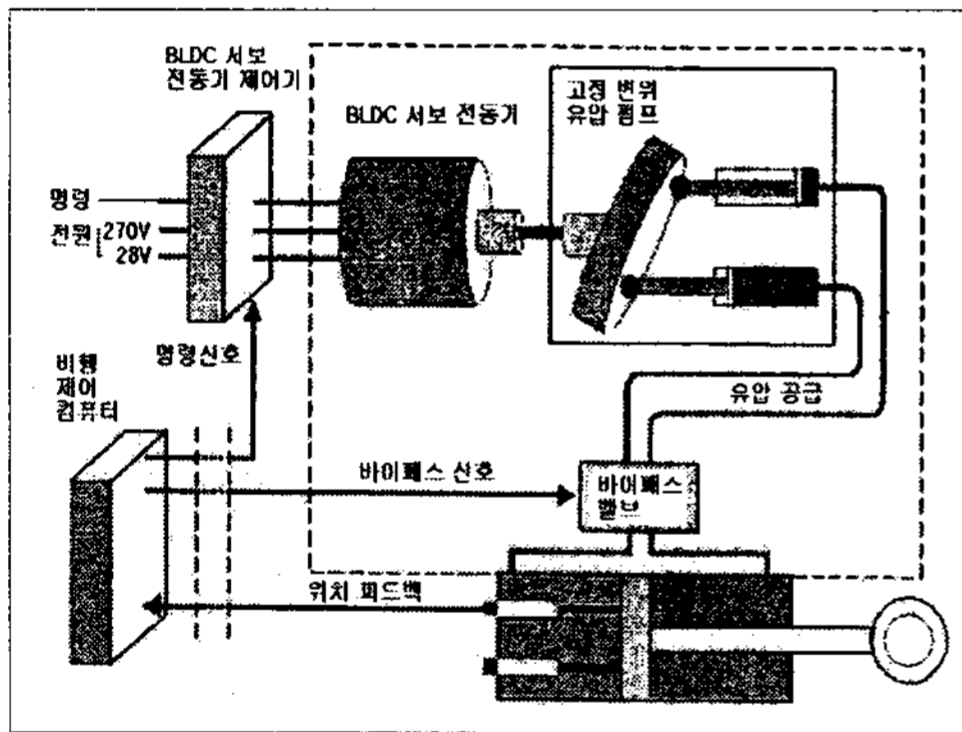


그림 1. 직동력 고응답 액추에이터의 구성

II. BLDC 전동기의 등가 방정식

먼저 제어 대상 시스템인 BLDC 전동기에 대하여 고전적인 벡터기법을 적용하여 전류제어가 용이한 수학적 모델 식을 얻는다.

먼저 3상 고정자 좌표계(as-bs-cs)와 2상 직각 동기회전좌표계(de-qe)의 관계 그리고 각 좌표계에서의 등가 코일 형상과 합성 벡터의 모습을 그림 2에 보인다. 그림 3은 코일로 등가 표현된 영구자석 자계가 de축과 일치되도록 벡터제어를 실행하는 경우에 있어 BLDC 전동기의 등가 de-qe 모델을 보여준다.

이 그림 상에서 보면, 실제 고정자에 인가되는 전원은 3상의 서로 120도 위상차를 갖는 전압, 전류이지만 타여자 직류전동기와 같은 특성을 갖게 하기 위해 한 축(qe 축)이 회전자 영구자석 자계와 직각을 유지하면서 회전자와 같은 속도로 회전하는 2상의 직각 동기회전축을 제안하고, 이 직

각 축 상에서 토크발생 전류(iqe)를 계산한 후 다

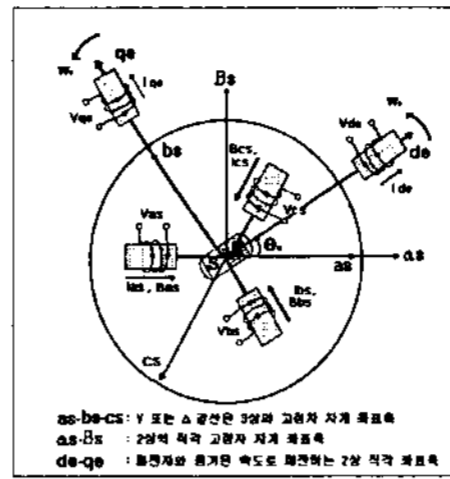


그림 2. 3상 고정좌표계와 2상 동기회전좌표계의 관계

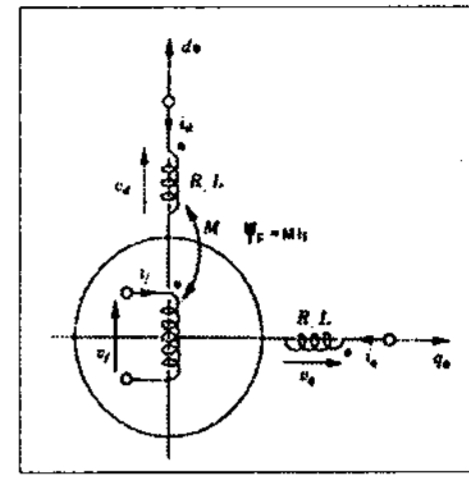


그림 3. 코일 등가된 영구자석 자계와 동기회전축과의 관계

시 이를 구현할 수 있는 3상 전류를 만드는 것이 BLDC 전동기의 벡터제어 임을 알 수 있다. 그리고 이러한 동기 회전좌표계 변환에 의해 BLDC 전동기의 기계적 표현식이 다음과 같이 직류전동기와 유사하게 표현됨을 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_{qe} \\ \dot{i}_{de} \\ \dot{\omega}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_q} & -\frac{\omega_e L_d}{L_q} & -\frac{\Psi_F}{L_q} \\ \frac{\omega_e L_q}{L_d} & -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ \frac{3}{2}(P)^2 \frac{\Psi_F}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qe} \\ i_{de} \\ \omega_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_{qe}}{L_q} \\ \frac{v_{de}}{L_d} \\ -\frac{P}{J} T_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 P는 극 쌍수이고, ωe는 전기적 각속도이다.

$$\begin{cases} v_{de} = v_{de}' - \omega_e L_q i_{qe} \\ v_{qe} = v_{qe}' + \omega_e L_d i_{de} + \omega_e \Psi_F \end{cases} \quad (2)$$

위식의 vde, vqe는 기본적인 전류제어기 입력(vde', vqe')에 각 상 방향으로의 간섭 항을 제거하기 위한 보상 항이 첨가된 비간섭 제어입력 포함 전체 전류제어 입력이 된다.

III. 회전자의 절대위치에 따른 θe의 결정

BLDC 전동기에 벡터제어를 잘 적용하기 위해서는 3상 고정자좌표계와 2상 동기회전좌표계사이의 정, 역 변환을 잘 할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 변환 공식에 포함되어 있는 θe의 정보가 필요하다.

본 연구에서는 레졸버 케환센서를 이용하여 모터 구동 전 기간 동안 벡터제어를 지켜주는 θe의 정보를 얻을 수 있었다. 레졸버를 이용하는 디지털 정류동작은 레졸버의 SIN, COS 신호를 RDC(Resolver to Digital Converter)가 처리하여 얻어지는 특정 비트(10비트~16비트) 분해능의 디지털 절대위치 신호(기계 각 정보) 정보를 이용하여 모터의 회전자 영구자석 자계와 고정자인

전기자 합성자계와의 관계를 전기 각 90도의 위상 차 관계를 갖도록 하는 것이다.

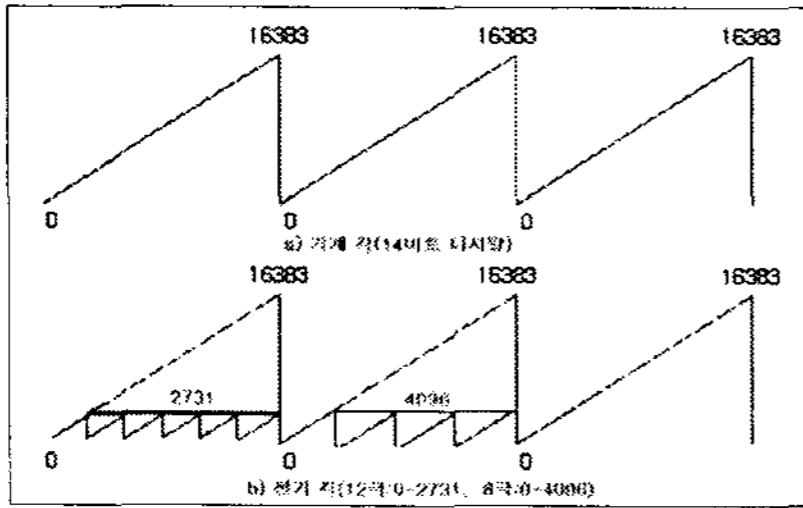


그림 4. 14비트 RDC를 통한 기계 각과 전기 각 검출

이렇게 얻어진 θ_e 의 정보는 프로그램 상에서 sin, cos 함수를 호출하는데 사용되어 진다. 이 함수들은 TMS320F2812 프로세서에 의해 제공되는 라이브러리에 의해 빠르게 연산된다.

아래 그림은 전체 제어시스템의 블록도이다.

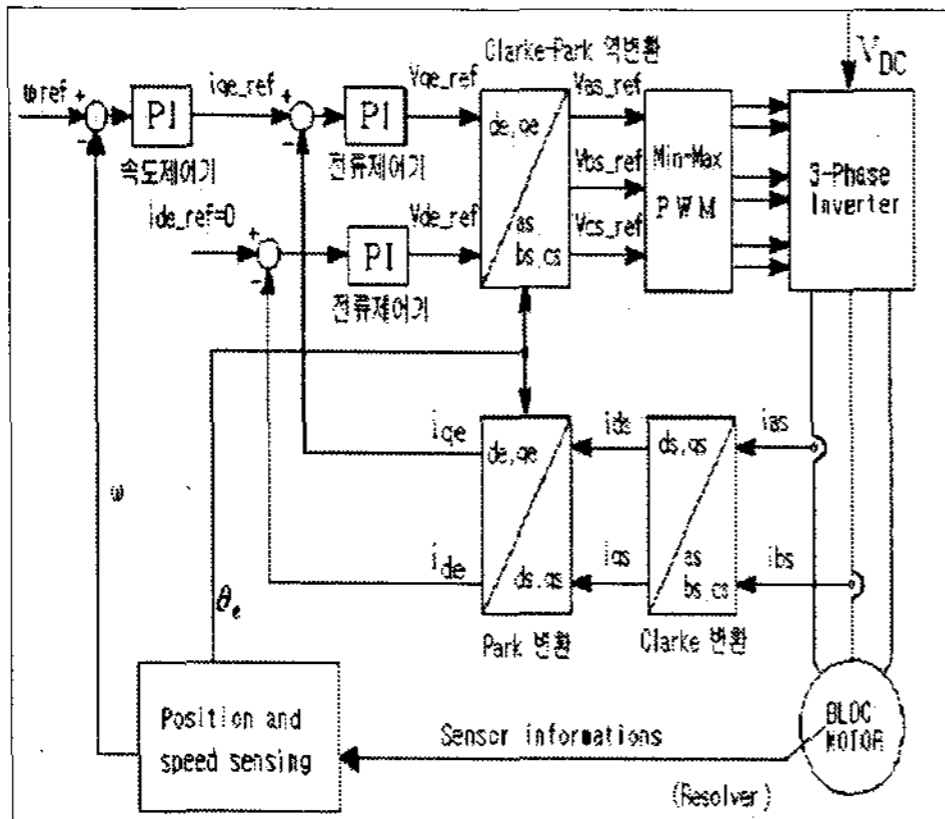


그림 5. 옹섯 전압을 이용하는 MIN-MAX PWM 및 벡터제어 블록도

IV. BLDC 전동기의 전류제어

BLDC 전동기의 전류제어는 전류지령과 실제 센싱 된 전류 값으로부터 전압 지령을 만들어 낸다. 전류제어 흐름을 살펴보면 전류제어의 시작은 먼저 상전류의 센싱과 RDC값으로부터 회전자의 절대 위치 정보를 알아내는 것으로부터 시작된다.

이렇게 센싱된 정보를 이용해서 좌표변환과 PDFF제어기를 통해 최종적인 전압 지령인 V_{as} , V_{bs} , V_{cs} 가 만들어 진다.

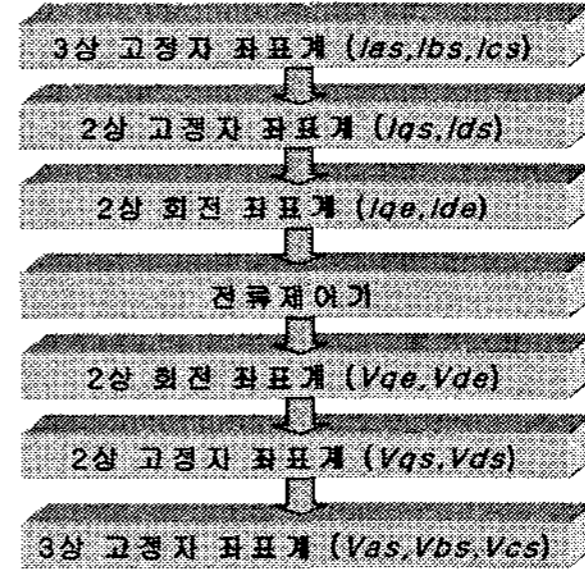


그림 9. 전류제어를 위한 좌표변환 과정

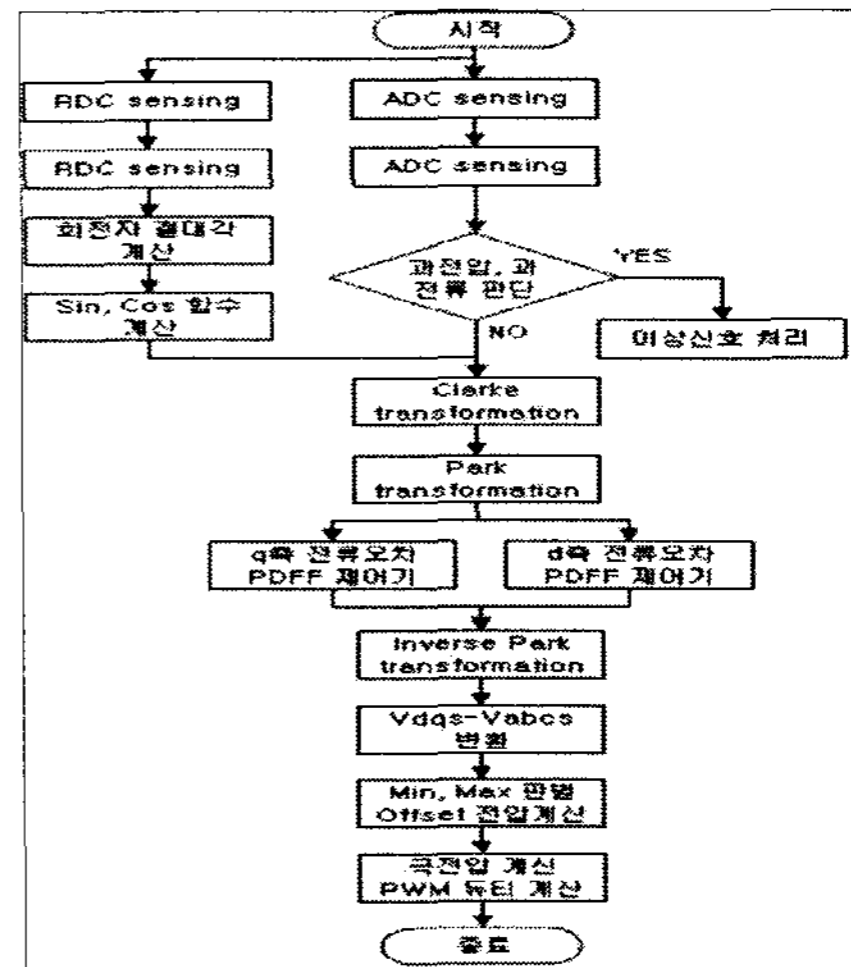
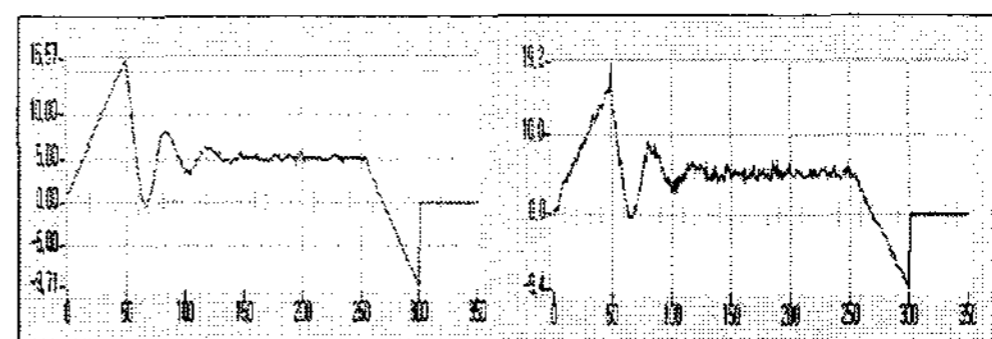


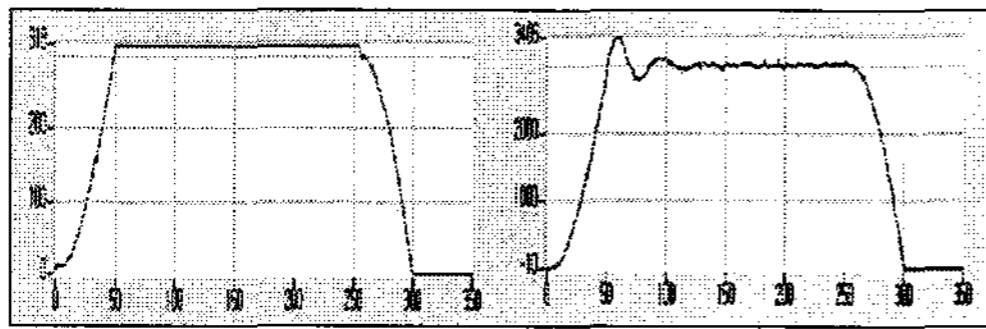
그림 10. 전류제어 순서도

III. 성능 평가 결과 및 분석

본 논문에서 사용된 BLDC 전동기 제어기의 전류, 속도제어 특성과 BLDC가 정속 회전할 때 직동력 고응답 액추에이터의 유압실린더 위치를 LVDT로 측정하여 시험한 결과 다음과 같은 결과를 얻었으며, 이는 시스템 요구조건을 만족하는 것이다.



(a) i_{qe_ref} (전류지령) (b) i_{qe} (전류응답)
그림 8. 전류제어 결과

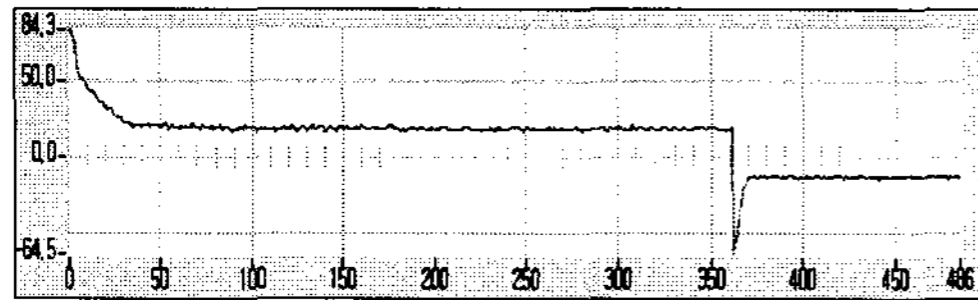


(a) ω_{ref} (속도지령) (b) ω (속도응답)
그림 9. 속도제어 결과

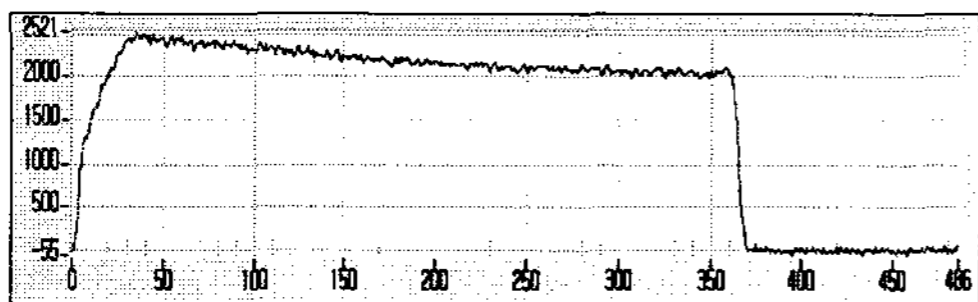
용하였다. BLDC 전동기의 정·역 회전 속도를 이용하여 유압 실린더의 위치를 제어함으로써 기존의 유압펌프 및 밸브를 통하여 유압 실린더를 제어하는 방식보다 구조를 간소화 하였고, 고속 정밀 제어가 가능하게 됨으로써 성능의 향상을 가져 올수 있음을 확인할 수 있었다.

참고문헌

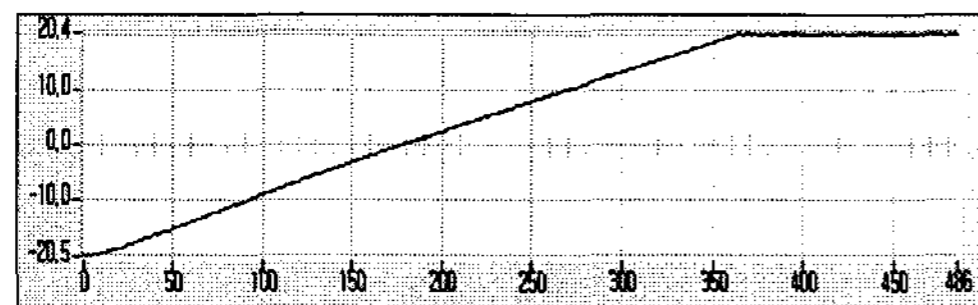
- [1] 최중경, "서보기기 제어특론 I", 창원대학교 대학원, 1999
- [2] Phillips & Nagle, "Digital Control System Analysis and Design", Prentice Hall, 2th
- [3] Texas Instruments, "TMS320F2812 Peripherals Reference Guide", June 2003



(a) i_{qe} (전류응답)



(b) ω (속도 응답)



(c) LVDT 측정결과

그림 10. 2000rpm 정속 회전시 직동력 액추에이터 제어결과

그림 10은 BLDC 서보 전동기를 이용하여 유압 실린더의 변위를 LVDT를 통해 측정한 결과를 보여준다. BLDC 서보 전동기를 2000rpm으로 정속 회전하였을 때 전류 응답과 속도 응답을 볼 수 있으며 유압 실린더의 위치가 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서 고속 정밀 제어가 가능한 BLDC 서보 전동기를 이용하여 직동력 고응답 액추에이터를 제어하기 위하여 벡터제어 기법과 MIN-MAX PWM을 적용한 BLDC 전동기 제어시스템을 설계 하였다. 빠른 처리 속도와 ADC, PWM, SPI 등 많은 주변 장치를 내장하고 있는 DSP (TMS320F2812)를 사용하였고, 고속의 부동소숫점 연산을 가능케 해주는 Q math 라이브러리를 사