
자동 조립 및 공급을 위한 BLDC 서보 전동기 제어시스템 설계

심동석* · 최중경**

Design of a BLDC Servo Motor Control System for the Auto Process of Assembly and Supply

Dong Seok Sim* · Jung Keyng Choi**

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음

요 약

본 논문은 DSP 제어기와 IGBT 구동기를 이용하는 조립과 공급의 자동처리를 위한 BLDC 서보 모터 제어시스템 설계를 제안한다. 조립, 공급 자동처리 시스템은 다양한 동작을 위해 서보모터의 토크, 속도, 위치 제어를 필요로 한다. 본 논문은 이러한 서보제어를 벡터제어와 공간벡터 PWM 기법을 이용하여 구현한다. 제어기의 CPU로서 PWM 파형발생기, A/D 컨버터, SPI 통신 포트 및 많은 입/출력 포트를 갖는 TMS320F240 DSP를 채택하였다. 이 제어시스템은 메인 호스트 PC가 위로부터의 명령을 전달하고 끝단의 서보제어기의 상태들을 모니터링하는 세 개의 부 DSP 시스템을 관리하는 3레벨의 계층적 구조로 이루어져 있다. 각 부 DSP 시스템은 DSP와 IPM을 사용하여 BLDC 서보모터를 제어하는 8개의 BLDC 서보모터제어부를 운영한다. 호스트 시스템과 중간의 DSP는 RS-422을 이용하여 통신하며, 주프로세서와 제어기는 SPI 포트를 이용하여 통신한다.

ABSTRACT

This paper presents a design of a BLDC servo motor control system for the auto process of assembly and supply using DSP(Digital Signal Processor) controller and IGBT driver. The assembly and supply auto processing system needs torque, speed, position control of servo motor for variable action. This paper implements those servo control with vector control and space vector PWM(Pulse Width Modulation) technique. As CPU of controller, TMS320F240 DSP was adopted because it has PWM waveform generator, A/D converter, SPI(Serial Peripheral Interface) port and many input/output port etc. This control system consists of 3-level hierarchy structure that main host PC manages three sub DSP system which transfer downward command and are monitoring the states of end servo controllers. Each sub DSP system operates eight BLDC servo controllers which control BLDC motor using DSP and IPM. Between host system and sub DSP communicate with RS-422, between main processor and controller communicate with SPI port.

키워드

자동조립, 서보전동기, 제어시스템

Key Words

DSP(Digital Signal Processor) controller, multi-axes transportation system, BLDC

* 정회원 : 대영산전(주)

** 정회원 : 창원대학교 (교신저자, cjk@changwon.ac.kr)

접수일자 : 2011. 12. 02

심사완료일자 : 2012. 04. 24

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2012.16.5.1095>

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

자동조립 및 공급시스템은 일반적으로 여러 개의 기계적인 장치와 구동장치 그리고 센서시스템이 연결되어 각각 또는 동시에 동작하는 복합 시스템이라고도 할 수 있다. 이러한 자동화시스템은 보편적으로 공장라인에 많이 설치되지만 본 응용에서는 이동 중 차량 내에서 포탄을 자동으로 조립하고 정지 상태에서 탄을 밀어주는 고 신뢰성 정밀 이송 장치를 위해 설계되었다. 이러한 정밀 이송 시스템의 액츄에이터로 교류 전동기의 한 종류인 BLDC(Brushless Direct Current) 전동기를 사용하는 것이 현대의 추세이다. 이 전동기는 기존의 직류전동기로 인한 브러시(Brush)와 정류자(Commutator)에 의한 문제점을 전자적인 정류로 해결한 우수한 교류전동기로 단위체적당 효율이 높은 응용성이 큰 현대의 전동기이다.

본 응용시스템은 24개의 BLDC 전동기로 구성되며, 각 전동기 구동에 의해 잡기, 밀기, 당기기, 돌리기 등이 구현된다. 본 연구는 BLDC 구동 전용의 16비트 프로세서인 TMS320F240 DSP를 이용하여 BLDC 다축 서보 제어시스템 제어를 설계하였고, 어셈블리어로 전류, 속도, 위치 제어프로그램을 작성하였다. 그리고 공간전압 벡터 방식을 구현하는 인버터를 소형경량화 하기 위해 IPM(Intelligent Power Module)을 이용하여 구성하였다. 벡터제어 및 현대의 PI 제어기법을 사용하여 주어진 시간 내에 정현파형 BLDC 전동기의 전류, 속도, 위치제어를 실현하였다. 또한, RS-422 및 SPI 통신을 이용하여 상위 제어기로부터 지령을 받아 동작하는 다축 이송 시스템을 실현하였다.

II. BLDC 서보전동기 제어 알고리즘

먼저 3상의 전압, 전류, 자계 변수를 단상의 변수로 바꾸어주는 벡터제어기법을 이용하여 BLDC 전동기의 전압방정식 및 토크 식을 유도하였다.

그림1의 전체 제어 블록도에서 보는 것과 같이 위치 제어기에서는 수정된 PI 제어기를 사용하였고, 속도 제어기에서는 PDFF(Pseudo-Derivative Control with Feedforward) 제어기를 사용하여 오버슈트 제거 노력을

수행하였다. d축 및 q축의 전류제어기에는 고전적인 PI 제어기를 사용하였다.

$$\begin{cases} T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \\ T_e = \frac{3}{2} P \Psi_F i_{qe} \\ \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}, (\omega_m = \frac{\omega_e}{P}, P: \text{극쌍수}) \end{cases} \quad (1)$$

[T_e : 토크, T_L : 부하토크, ω_m : 기계 각속도, ω_e : 전기 각속도, Ψ_F : 쇠교자속, J : 관성모멘트, B : 마찰계수, θ_m : 기계각 위치]

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

[$i_{qe}, i_{de}, v_{qe}, v_{de}$: 2축(d-q) 동기회전좌표계의 전류-전압, R_s : 고정자권선상저항, $L_d - L_q$: d-q 축 인덕턴스성분]

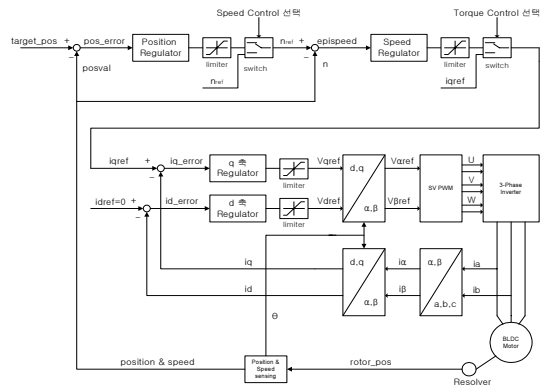


그림 1. 전체 제어 블록도
Fig. 1 Overall Control Block Diagram

라플라스 변환된 PI 전류제어기의 구성

$$\begin{cases} v_{qe}(s) = (K_{pq} + K_{iq}/s) I_{qerr}(s) \\ v_{de}(s) = (K_{pd} + K_{id}/s) I_{derr}(s) \end{cases} \quad (3)$$

$$(i_{qerr} = i_{qeref} - i_{qe}, \quad i_{derr} = i_{deref} - i_{de})$$

[K_{pd}, K_{pq} : d, q축 전류 비례이득, K_{id}, K_{iq} : d, q축 전류 적분이득, i_{derr}, i_{qerr} : d, q축 전류 오차, i_{deref}, i_{qeref} : d, q축 전류 지령치]

오버슈트 제거를 위한 PDFF 속도제어기 구성[1]

$$i_{qref}(s) = (K_i/s)w_{error}(s) + K_{pr}w_{ref}(s) - K_{pf}w_e(s) \quad (4)$$

[K_{pr} : 속도지령기반 비례이득, K_{pf} : 궤환 각속도기반 비례이득, K_i : 속도제어 적분이득, w_{ref} : 속도지령, w_{error} : 속도오차]

PI 위치제어 시작시점을 개선한 제한된 위치제어기

$$w_{ref}(s) = (K_{pp} + K_{ip}/s)Pos_{error}(s) \quad (5)$$

[K_{pp} : 위치 비례이득, K_{ip} : 위치 적분이득, Pos_{error} : 위치오차]

위치제어는 정속구간 끝에서 위치오차가 8회전 이상이 되면 정속구간을 연장하게 되고, 8회전 미만이 되었을 때부터 위치오차에 의한 속도지령을 계산하게 된다. 그리고 위치오차에 따른 PI 위치입력(속도지령)이 정속구간의 속도지령보다 크면 그 값을 정속 구간치로 제한한다. 이렇게 하면 일반적으로 정속구간은 조금 연장되지만 최고 속도 지령으로 위치오차가 빨리 줄어들고 제한된 속도지령으로 인해 지령의 연속성을 유지할 수 있다. 이 방법은 이득 설정도 간단하며, 위치제어 시간을 줄일 수 있는 장점이 있다.

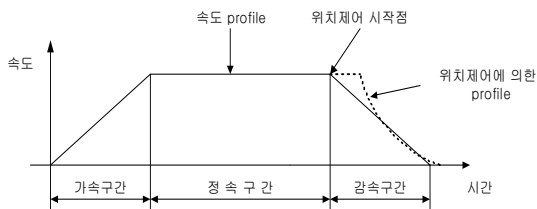


그림 2. 감속시점에서 위치제어를 시작하는 경우
Fig. 2 In case of position control start at dec. time

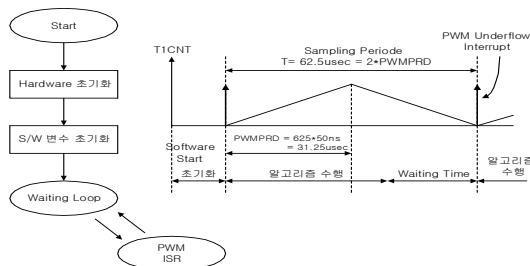


그림 3. 전류제어를 위한 PWM 시간 계획
Fig. 3 Current control time schedule for PWM

III. 자동화 제어 시스템의 구성

전체 제어 시스템의 구성은 주제어기(PC)가 있고 주제어기로부터 RS-422 통신을 통하여 지령을 받아 각 전동기 제어프로세서로 명령을 전달하는 주프로세서가 있다. 하나의 주프로세서는 8개의 제어프로세서를 관장하게 된다. 제어프로세서는 주프로세서로부터 전송된 명령에 따라 각각의 BLDC 전동기를 제어 및 구동하게 된다.

주프로세서와 제어프로세서 사이의 통신은 DSP에서 제공하는 SPI 통신 방식을 사용하였다. SPI 통신은 DSP와 외부 장치 또는 다른 제어기와 통신을 위한 것으로 4개의 I/O 핀이 제공되며, Master/Slave 모드를 설정하여 쓸 수 있다. SPI 동작을 살펴보면, Master는 SPICLK 신호를 전송하여 데이터 전송을 초기화한다. SPICLK의 에지에 데이터가 시프트되고 다음 에지까지 래치되어 있게 된다. Master는 SPICLK 신호를 이용하여 언제든지 데이터 전송을 초기화 할 수 있다. 그러나 Slave가 데이터를 전송할 준비가 되어 있는지를 Master에서 소프트웨어로 검출하여야 한다.[2][3]

3.1. 서보 시스템의 하드웨어 구성

서보 시스템의 구성은 그림4 에서와 같다.

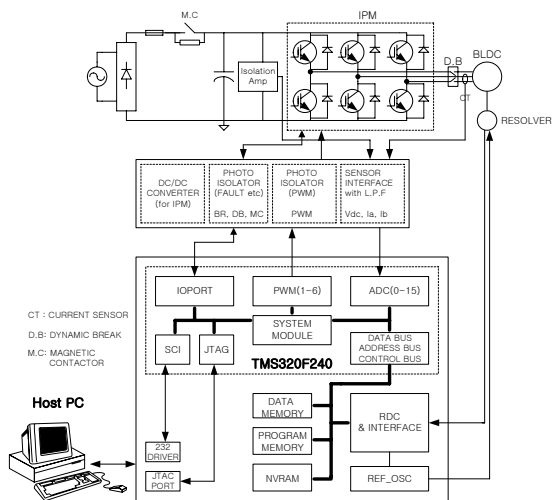


그림 4. 서보 시스템 구성
Fig. 4 Configuration of servo system

DSP(TMS320F240)를 중심으로 BLDC 전동기 각 상의 전류를 홀(Hall) 센서를 통하여 검출하는 회로, 절연 앰프를 이용하여 DC 링크 전압의 변동을 검출하는 회로, DC 링크 전압이 일정한 값 이상 되면 제동저항을 통해 에너지를 방출하는 회생제동회로, 전동기의 회전자와 내부적으로 결합되어 회전자의 절대위치를 알려주는 아날로그 교류출력 2상 브러시리스 레졸버, 그리고 이 출력을 인터페이스하고 디지털 정보화하는 RDC 회로, 전동기, IPM, 각종 소자의 보호를 위한 보호회로 등으로 구성되어 있다. 스위칭 소자인 IPM의 게이트를 구동하기 위한 PWM 펄스는 DSP 자체에서 제공하는 게이트구동 신호를 사용하였다.

특히 레졸버는 위치 및 속도 센서로서 일반 증가형 엔코더에 비해 견실하며, 정지 시에도 절대위치 판별을 위한 지정된 캐리어 주파수에 진폭 변조된 정현(sin) 및 역현(cos) 전압 파형이 발생하며, 회전 각에 따라 각 아날로그 교류 전압 파형의 진폭이 변화하는 특성을 갖고 있다. 그러나 아날로그 전압을 DSP가 절대위치로 받아들이기 위해 RDC라는 아날로그 레졸버신호를 디지털 절대위치 신호로 바꾸는 고가의 변환 칩이 사용되어져야 한다.[4]

3.2. 조립 및 이송장치의 사양 및 기구 구성

실험에 사용한 조립 및 이송장치의 대표적 사양과 기구 구성은 각각 표1, 그림5와 같다.

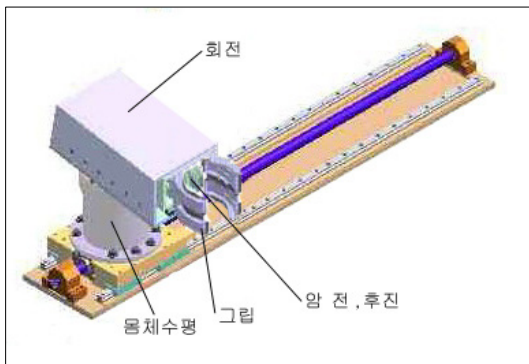


그림 5. 다축 이송장치의 일부 기구 구성
Fig. 5 Mechanical construction of multi axes system

표 1. 다축 이송장치의 사양
Table. 1 Spec. of multi axes system

[모터사양]	압 전, 후진	그 립	회 전	수 평	비 고
용 량	0.45	0.45	0.95	1.15	kW
정격전류	1.6	1.6	3.2	3.4	Arms
정격토크	0.6	0.6	1.65	2.55	Nm
정격속도	8800	8800	6300	4800	RPM
Inertia	0.16	0.16	0.39	0.62	kgcm ²
토크상수	0.4	0.4	0.53	0.75	Nm/Arms
R(상)	15.2	15.2	4.9	5.1	Ω
L(상)	18.8	18.8	8.5	10.3	mH
최고속도	3000	3000	1000	1780	RPM
가감속시간	200/200	100/100	400/400	400/400	msec
제어방법	위치	토크	위치	위치	
감속비	30	20	160	3	
모터1회전 이송거리	5.756	14.9935	9.000°	10.6667	mm

IV. 실험 결과

4.1. 전류제어

그림6은 -1.6A의 전류 지령 값을 주었을 때 토크제어에 의한 q-축 전류파형 모양이고 그림7은 같은 전류 지령 값을 주었을 때 토크제어에 의한 U, V, W 상의 전류파형이다. 세로축 (A)는 암페어 단위를 의미한다.

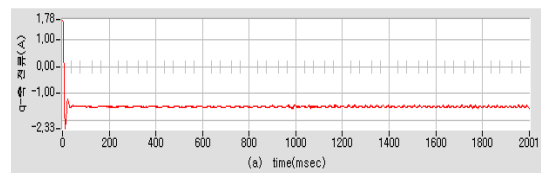


그림 6. q-축 전류
Fig. 6 Waveform of q-axis

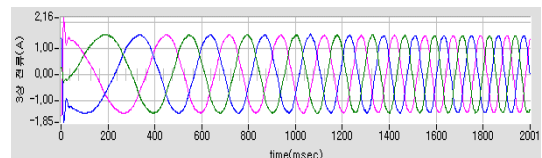


그림 7. 기동 시 3상 전류
Fig. 7 3-phase current on start

q축 전류 지령치 및 상전류 제어가 잘 이루어지고 있음을 보인다.

4.2. 속도제어

그림8,9는 가속시간 200msec, 정속시간 1000 msec, 감속시간 200msec, 최고속도 2000RPM의 시계방향 속도지령을 주었을 때, 속도 추종 과정과 이때 계산된 q-축 전류 지령과 검출된 q-축 전류 파형이다.

사다리꼴 속도지령케적을 전반적으로 잘 추종하고 있지만, 속도가 꺾이는 정속구간 양 끝에서는 PDFF 제어의 오버슈트 감소 특성에 의해 완만하게 꺾이는 실제 속도 특성을 보이고 있다.

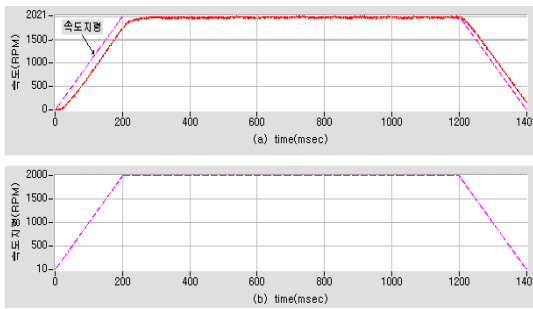


그림 8. 속도 파형
Fig. 8 Waveform of speed

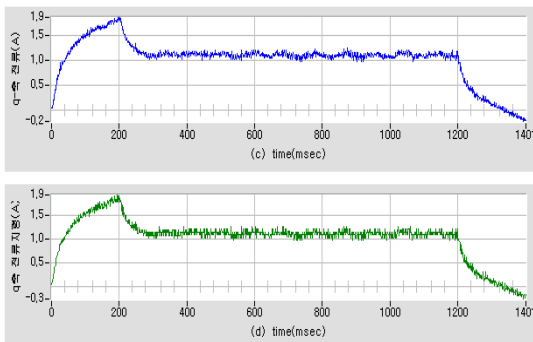


그림 9. q-축 전류(시계방향)
Fig. 9 Waveforms of q-axis current(CW)

4.3. 위치제어

그림10, 그림11은 위치제어를 실행하면서 얻은 속도 지령 값, 속도 추종특성, q-축 전류와 위치오차를 나타낸

다. 위치오차를 나타내는 파형의 y축은 모터의 1회전을 12비트(4096)로 환산한 오차이다.

그림 10은 위치제어를 위해 전통적인 사다리꼴 속도케적이 300ms 까지 가속 500ms 까지 정속, 800ms까지 감속 하는 속도케적이 되도록 계산된 경우에 제안된 방법을 사용하는 실험 결과이다.(위치지령 값이 정확히 기록되지 않은 관계로 설명은 속도케적지령으로 대신한다.) 제안된 방법에서는 이전의 정속구간 끝인 500ms 지점에서 위치오차가 8회전 이상이 되어 정속구간이 연장되고, 8회전 미만의 위치오차가 되는 580ms 지점부터 위치제어가 시작되나 이때의 속도지령이 최대속도가 넘어 정속 구간의 속도로 제한되게 된다. 결국 690ms 까지 정속속도를 유지하다 속도지령이 낮아짐에 따라 속도지령이 급커브로 낙하하고 위치오차도 그 시점부터 지수함수적으로 감소한다.

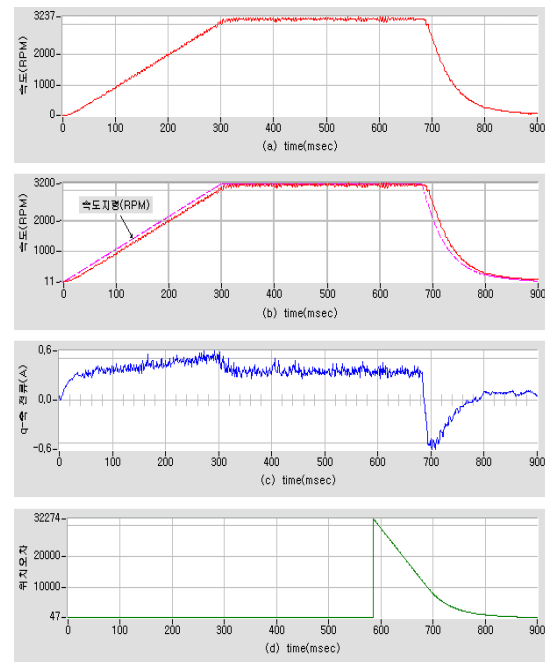


그림 10. 순방향 위치제어 시 속도, q-축 전류 및 위치오차(시계방향)
Fig. 10 Waveforms of speed, q-axis current and position error(CW)

그림 11은 역방향 위치제어를 위해 사다리꼴 속도케적이 300ms 까지 가속 800ms 까지 정속, 1100ms까지 감

속 하는 속도궤적이 되도록 계산된 경우에 제안된 방법을 사용하는 실험 결과이다. 제안된 방법에서는 이전의 정속구간 끝인 800ms 지점에서 위치오차가 8회전 이상이 되어 정속구간이 연장되고, 8회전 미만의 위치오차가 되는 830ms 지점부터 위치제어가 시작되나 이때의 속도지령이 최대속도가 넘어 정속 구간의 속도로 제한되고 결국 940ms 까지 정속을 유지하다 속도지령이 낮아짐에 따라 위치오차도 그 지점부터 지수함수적으로 감소하는 특성을 보인다.

위치오차 그림은 위치제어가 시작되는 구간부터 위치 값이 계산되도록 하였으며, 각 시작점에서의 편차가 8회전(8x4096)이 넘음을 알 수 있다. 위치제어 결과 예상대로 정속구간이 연장된 형태의 실제 속도 궤적이 보여지고 있으며, 제안된 위치제어 방법이 적용되고 있음을 보인다.

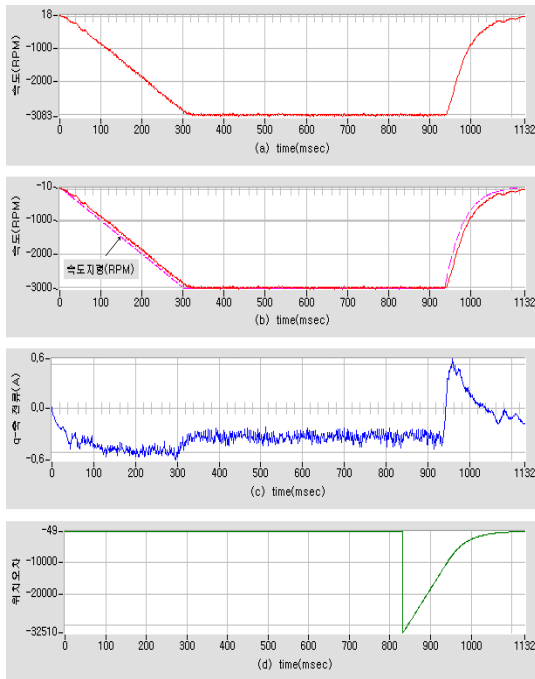


그림 11. 역방향 위치제어 시 속도, q-축 전류 및 위치오차(반시계방향)

Fig. 11 Waveforms of speed, q-axis current and position error(CCW)

V. 결론

본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다. 첫째, 주프로세서와 제어프로세서 모두 TMS320F240 DSP를 사용하였고, DSP에서 제공하는 SPI 통신을 통하여 다수의 서보 제어시스템을 구현하였다. 둘째, 벡터제어 및 공간전압벡터 알고리즘을 실현하였으며, 3상 대칭 PWM 변조법을 소프트웨어로 구현하였다. 셋째, 부동 소수점 연산을 못하는 TMS320F240의 고정소수점 표현 단점을 Q8, Q12 형태를 이용하여 보완하였으며, 어셈블리어로 제어 프로그램을 작성하여 주어진 시간 내에 전류, 속도 및 위치제어를 실현하였다. 넷째, IPM을 이용하여 회생제동이 가능한 BLDC 전동기의 구동 드라이브를 설계하였다. 그리고 RS-422를 통하여 호스트PC시스템의 명령을 주프로세서에 전달하고, 주프로세서로부터 SPI 통신을 이용하여 서보명령을 전달받아 BLDC 전동기를 구동하는 제어프로세서 등 3단계 구조의 제어를 이용하여 자동화 서보 시스템을 구현하였다.

논문의 주된 목적이 자동조립 및 공급을 위해 궤도 차량 내에 다수 장착되는 레졸버 기반 BLDC 서보제어시스템을 현대의 마이크로프로세서인 DSP와 IPM 인버터를 통해 설계 구현하였다는 것과 그 구동을 실험을 통해 입증하였다는 것이다.

감사의 글

이 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 「2단계 BK21 사업」의 지원비를 받았음

참고문헌

- [1] D.Y.Ohm, "A PDFF Controller for Tracking and Regulation in Motion Control," Proceeding of 18th PCIMConference, Oct.21-26, 1990.
- [2] TMS320F/C24x DSP Controllers Reference Guide, Peripheral Library and Specific Devices, Texas Instruments, June 1999.

- [3] TMS320F/C24x DSP Controllers Reference Guide,
CPU and Instruction Set, Texas Instruments, June
1999
- [4] 최중경, “서보기기 제어특론” 창원대학교, 1999.

저자소개



심동석(Dong-seok Sim)

2008. 1. 인천대학교 산업공학과
공학석사
2008. 3. 대영산전(주)입사
- 2010년 ~현재 창원대학교
전자공학과 박사과정

※ 관심분야: 마이크로프로세서 응용, DSP 응용



최중경(Jung-keyng Choi)

1986. 2. 고려대학교 전기공학과
공학사
1988. 2. 고려대학교 전기공학과
공학석사

1992. 3. 고려대학교 전기공학과 디지털제어 공학박사
1992년 ~ 현재 창원대학교 전자공학과 정교수

※ 관심분야: 서보기기제어, 자동동조제어, 마이크로
프로세서응용, DSP응용, 전자회로설계