

무철심형 선형 동기전동기의 드라이브 설계에 관한 연구

論 文
50D-6-2

A Study on the Design of Drive for Coreless Linear Synchronous Motor

金相佑** · 李在憲* · 金相殷* · 金種武** · 李錫圭***
(Sang-Woo Kim · Jae-Hun Lee · Sang-Eun Kim · Jong-Moo Kim · Suk-Gyu Lee)

Abstract - In this paper, a controller design for coreless linear synchronous motor is proposed. The designed controller is mainly composed of speed and current control, which are carried out by the high-speed digital signal processor(DSP). In addition the PWM inverter is controlled by space voltage PWM method. This system is implemented using by 32-bit DSP(TMS320C31), a high-integrated logic device(EPM940), and IPM(Intelligent Power Modules) for compact and powerful system design. The experimental results show the effective performance of controller for coreless linear synchronous motor.

Key Words : Digital Signal Processor, Erasable Programmable Logic Device, Intelligent Power Modules, Coreless Linear Synchronous Motor

1. 서 론

최근 수송·반송 시스템의 고속화를 위한 연구개발은 회전축에 회전력을 주는 회전형 모터의 고속화·고출력화의 연구로서 진행되어 왔다. 그러나, 회전형 모터의 연구개발이 상당한 수준까지 진행하면서 고속화의 난점으로서 직선운동 변환장치의 마찰에 기인하는 간접 구동방식 그 자체에 한계가 있다는 것을 알게 되었다. 따라서 차량이나 반송 차에 직접 추진력을 부여할 수 있는 선형 모터가 주목받게 되었다. 이들 선형 모터 중 무철심형 선형 동기전동기(Coreless linear synchronous motor)는 철심이 없는 구조로 추력 정수가 일정하며, 또한 추력을 직접 발생하므로 직선운동이 요구되는 시스템에 적용할 경우 여러 가지 장점을 갖고 있기 때문에 메카트로닉스 분야를 비롯하여 교통차량용 기기, 산업용 기기, 사무 자동화 기기와 같이 고속, 고 정밀을 요하는 분야에 많이 적용되고 있다. 그리고 제어 시스템 구현시 고속, 고 정밀 제어가 가능하기 때문에 수직, 수평의 장거리 운송시스템 등에도 적합한 것으로 연구, 보고되고 있다[1].

실제로 회전형 모터로 직선운동을 얻을 때에는 기계적 운동방향 변환 장치의 내구성, 고속성 및 정밀도에 한계가 있기 때문에 제어 대상에 직접 직선운동 모터를 장착하여 직접구동 시키는 방식이 필요하다. 특히 급속히 발전하는 제어 및 센서기술을 조합하여 고속 고정밀도 위치결정을 가능케 하는 서보 모터로서 선형 모터 구동에 대한 연구가 필요

하다. 본 연구에서 무철심형 선형 동기전동기의 장점인 고속, 고 정밀의 특성을 발휘하기 위해서는 선형모터에 적합한 구동용 제어장치인 드라이브를 설계하였다. 선형 모터의 구동을 위하여 주 제어기로는 DSP(TMS320C31)를 사용하고, 인버터 스위칭 소자로는 IPM(Intelligent power modules)을 사용하여 구성하였으며, 이를 제작 및 실험을 통해 드라이브 설계를 위한 자료를 얻었다.

2. 본 론

선형 모터를 구동하는 시스템의 구성도는 그림1과 같이 구성되어 있다. 제어대상인 선형모터와 전력을 공급하는 전력변환부, 이를 제어하는 마이크로 컨트롤러 및 기타 장치 등으로 구성되어 있다.

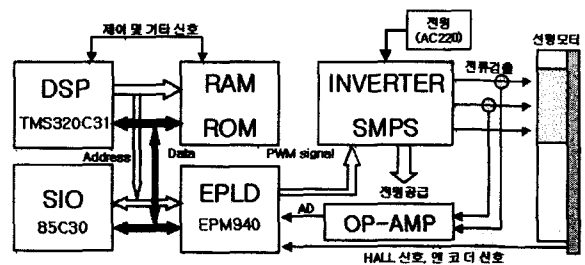


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System block diagram

2.1 무철심형 선형 동기전동기의 모델링

본 연구의 제어대상인 무철심형 선형 동기전동기의 기계적인 구조는 그림 2와 같다.

* 準 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 碩士
** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 博士課程
*** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電子情報科 教授 · 工博博士
接受日字 : 2000年 11月 29日
最終完了 : 2001年 5月 31日

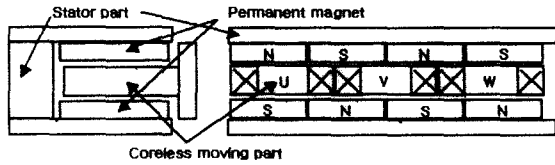


그림 2 무철심형 선형 동기전동기
Fig. 2. Coreless linear synchronous motor

고정자 부분(Stator part)에는 영구자석(Permanent magnet)이 대칭적으로 배치되어 있는 구조로 되어 있으며, 이동자 부분(Moving part)에는 코어가 없는 U, V, W상의 권선이 120° 전기적인 위상차를 가지도록 배치 구조로 되어 있다. 코어가 없는 타입은 선형 모터 구동시 추력 리플에 나쁜 영향을 주는 코깅(Cogging)이 없으며, 또한 브러시와 정류자와 같은 기계적 정류 기구를 생략되어 기계적인 수명이 길다. 이외에도 선형모터 구조는 많은 이점을 가진다.

드라이브의 설계 이전 제어 대상인 모터의 특성을 파악해야 한다. 따라서 본 연구에서는 모터의 동적 모델을 다음과 같이 사용하였다[2].

$$\begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + p l_d & -\omega_s l_q \\ \omega_s l_d & r_s + p l_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \omega_s K_e \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, 각 파라미터는 다음과 같다.

- v_{ds}, v_{qs} : 동기 좌표계 d, q 축의 전압
- r_s : 이동자 권선 상의 저항
- l_{qs}, l_{ds} : 동기 좌표계 d, q 축의 인덕턴스
- ω_s : 이동자의 동기속도
- K_e : 추력상수
- p : 미분연산자

식(1)은 전동기의 벡터제어를 위한 d, q 축에서의 모델이다. 지면상 본 논문에서는 좌표 변환과정은 생략한다. 그리고 선형모터가 발생하는 추력은

$$F_e = \frac{3}{2} K_e i_{qs} \quad (2)$$

이다. 마지막으로 기구적인 부분에 대한 동적 모델은

$$F_e = M\ddot{x} + D\dot{x} + w \quad (3)$$

이다. 여기서, 각 파라미터는 다음과 같다.

- M : 이동자의 질량
- D : 마찰 계수항
- w : 부하 외란항

2.2 마이크로 컨트롤러부

마이크로 프로세서는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로서 속도제어, 전류제어, 기타 입출력 제어 등을 수행한다. 여러 가지 입력 데이터에 해당하는 속도, 전류 데이터 처리, 제어 알고리즘 연산 수행, 각종 제어신호나 시스템의 상태를 출력한다. 그 중에서 속도, 전류제어기에서는 PI제어 알고리즘을 수행하고, 전류와 전압의 좌표변환 등을 실시간으로 처리해야 하며, 부동소수점 및 삼각함수 등의 많은 연산을 필요로 한다. 범용 프로세서를 사용할 경우 부동소수점 연산 프로그램을 작성해야 하므로 처리시간이 길어지고, 그리고 삼각함수 등의 시간으로 시간이 길어진다. 따라서 본 연구에서는 Texas Instrument사의 32비트 DSP 소자인 TMS320C31을 사용하였다[3]. 이러한 특성을 지닌 TMS320C31을 CPU로 사용하고 선형 모터와 전력변환부 사이에 동작지령이나 전류 검출, 마이크로 컨트롤러의 상태를 외부에 표시하거나 외부의 컨트롤러에서 각종 지시를 받아서 수행할 수 있는 입출력 기능 등이 필요하다. 이상에서 기술된 기능을 수행하기 위해서는 CPU주변에는 메모리 및 각종 디지털 IC로 구성되는 CPU관련 회로들이 필요하며 이를 고집적회로인 EPLD(Erasable programmable logic device)를 사용하여 각종 회로를 구현하였다[4]. EPLD에는 다음에 해당하는

- ① 어드레스 디코더
- ② Wait 발생기
- ③ 인터럽트 신호처리
- ④ PWM발생기
- ⑤ 모터 위치 UP/DOWN 카운터 및 4채배 회로
- ⑥ 디지털 입출력 회로

기능들이 내장되어 있다. 그리고 각각의 기능을 실장하기 이전에 시뮬레이션 과정을 통하여 회로의 타당성을 사전에 검증하였다. 또한 ISP(In-system program)기능이 지원됨으로 기판에 실장 하더라도 차후 회로 기능변경이 필요한 경우 부가 장치 없이 용이한 변경이 가능하다.

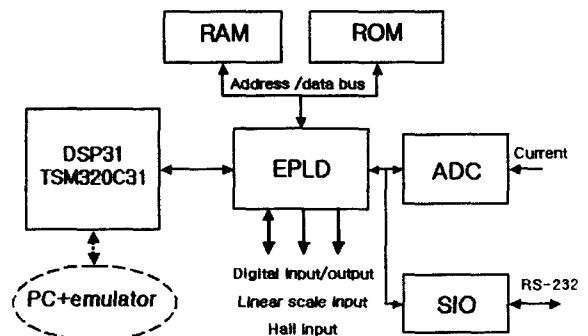


그림 3 마이크로 컨트롤러부
Fig. 3. Microcontroller part

2.3 전력변환부

전력변환부는 마이크로 컨트롤러의 지시를 받아 선형 모터에 구동에 적합한 가변주파수 및 전압의 교류 전원으로 공급하는 부분이다. 전력변환부는 정류회로, 인버터 회로, 전원 공급장치부 등으로 구성되어 있다.

인버터 경우 빠른 응답특성과 출력전압 또는 출력전류에 고조파가 적은 것이 요구되며, 특히 서보제어용으로 사용되는 것을 전제로 하면 매우 빈번한 기동, 정지 및 속도변화가 이루어지므로 충분한 과부하 내량을 갖도록 설계되어야 한다. 또한 전체 구동장치의 외형의 크기는 대부분 전력변환부에 의하여 결정되므로 가급적 소형 및 박형화를 지향하는 집적형 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 TEMIC사의 IPM소자를 사용하였으며, 정격은 600[V], 15[A]인 PMC 15 U060 B001이다. IPM은 시스템의 요구에 맞도록 IPM용으로 설계한 IGBT칩, IGBT를 최적의 상태로 구동, 보호가 가능한 전용 IC, 노이즈나 서지 전압 대책을 고려한 고집적 패키지 기술을 융합한 것이다. 또한 자체적으로 게이트 드라이브 회로 및 각종 보호회로가 내장되어 있다. 그리고 전자회로에 전원을 공급하는 부분이 필요하며, 이를 SMPS(Switching mode power supply)로 구현하여 전력변환부에 인버터부와 같이 제작하였다.

2.4 소프트웨어

전체 제어 프로그램의 순서도는 그림 4와 같다. 먼저 주 프로그램에서는 CPU의 내부 레지스터 변수, 제어변수, PWM제어 회로 및 인터럽트 벡터 등을 초기화한다. 전류 측정오차를 줄이기 위하여 2개의 상전류를 측정하여 전류의 offset을 구한다. 그리고 모터의 구동을 위하여 이동자의 초기 위치 정보가 필요하므로 홀 센서로부터 신호를 검출하여 현재 이동자의 위치구역을 판별한다. 이러한 초기화 수행이후 주 프로그램을 수행한다. 우선 과속도, 과전류 등을 검사하고 이상이 있으면 시스템을 정지시킨다. 메인 루프 수행과 동시에 타이머 인터럽트에 의하여 50μs마다 전류 제어부가 수행되고, 500μs마다 속도제어부가 수행된다.

2.4.1 전류제어 소프트웨어

EPLD내부에 구성된 PWM(Pulse width modulation)회로는 10bit분해능을 가지며 주기는 50μs, 주파수로는 20Khz로 동작한다. 사용된 IPM특성상 이 영역의 주파수도 충분히 구동 가능하다. 타이머 인터럽트에 의하여 일정시간마다 전류 제어부가 수행되면, 먼저 A/D변환기를 통하여 변환된 2개의 전류신호로부터 상전류 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 계산하고 또한 과전류 검사도 동시에 수행한다. 그리고 현재의 이동자의 위치를 측정하여 $\sin \theta, \cos \theta$ 를 계산한다. 이를 이용하여 3상의 고정좌표계의 상전류 i_{as}, i_{bs}, i_{cs} 를 동기 회전좌표계로 변환하여 i_{ds}, i_{qs} 를 계산한다. 이렇게 계산된 전류값 i_{ds}, i_{qs} 과 기준전류 i_{ds}^*, i_{qs}^* 를 비교하여 전류제어를 수행한다. 전류 제어기는 히스테리시스, PI, 예측 제어 등의 제어기법을 사용할 수 있으며, 그 중에서 소용 비용에 비해 성능이 우수한 PI제어기

를 사용한다. 또한 전류제어는 전압형 인버터에 의하여 구동되어지며, 각 스위칭 소자를 구동하는 게이트 펄스 열을 만들기까지는 전압변조가 필요하다. 따라서 본 연구에서 사용된 변조방법은 최적 PWM, 삼각파 비교 PWM, 공간벡터 변조기법 중에서 타 기법에 비하여 고조파 왜형율과 디지털 구현의 용이성과 선형 제어 영역을 증가시킬 수 있는 공간 벡터 변조기법을 사용하였다[5-6]. 최종적으로 계산된 v_{ds}, v_{qs} 로부터 공간전압형 PWM방식으로 전류제어를 위한 스위칭 패턴을 얻는다.

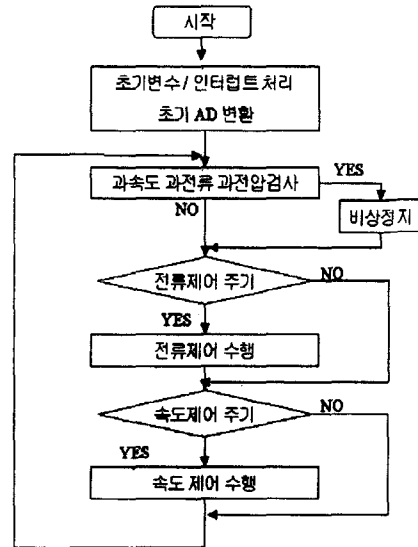


그림 4 소프트웨어 순서도
Fig 4. Software flow chart

2.4.2 속도제어 프로그램

속도제어부 소프트웨어의 주기는 전류제어부 주기의 10배인 500μs의 주기로 수행된다. 속도 제어부에서는 EPLD에 구현된 위치 카운터로부터 현재의 속도를 계산한다. 속도제어부에서 측정된 현재속도는 속도제어부의 기준입력과 비교하여 제어기를 수행하여 오차성분을 보정한다. 속도제어기는 구현이 간단한 PI제어로 구현되었다[7].

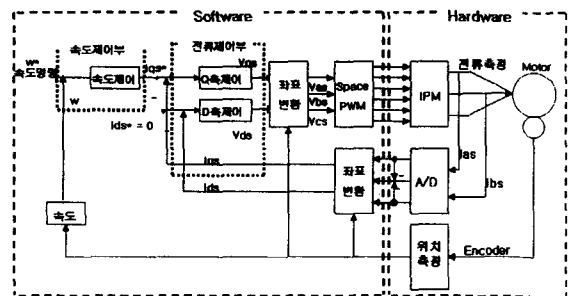


그림 5 벡터 드라이브 제어 블록선도
Fig 5. Block diagram of vector drive

그림 5에는 벡터제어를 적용한 드라이브의 블록선도이다.

전류, 속도제어의 신호의 흐름에 대하여 쉽게 알 수 있으며, 각 부분은 이미 설명되었던 내용이다.

2.5 제작 및 실험

선형 모터에 제안된 제어시스템을 적용하여 실험을 수행하였다. 제어 프로그램은 PC에서 작성하여 TMS320C31에 플래이어 장비를 이용하여 제어시스템에 다운 로드한 후 수행된다. 실험결과는 디지털, 아날로그 출력을 사용하여, PC와 계측기를 통하여 측정할 수 있도록 하였다. 본 실험에서는 전력변환부의 공급전원으로 AC220전원을 공급하여 사용하며 표1은 실험에 사용된 모터에 대한 기본사양을 보여준다.

표 1 무철심형 선형동기모터 사양

Table 1. Specification of coreless linear synchronous motor

| | |
|-----------|-----------|
| 전기자 저항 | 23.5 Ω |
| 전기자 인덕턴스 | 13.6 mH |
| 추력상수 | 59.56 N/A |
| 이동자 질량 | 3.5 Kg |
| Stroke 길이 | 1 m |
| 엔코더 분해능 | 5 μm |

전류제어 경우 추력을 직접 발생하는 역할을 수행하며 제어기 구조상 가장 내측에 해당하는 부분이다. 그림6에서는 동기 회전좌표계인 q축의 Step입력에 대한 전류응답을 볼 수 있으며, 약간의 Overshoot가 발생하는 1차 지연응답으로 제어된다.

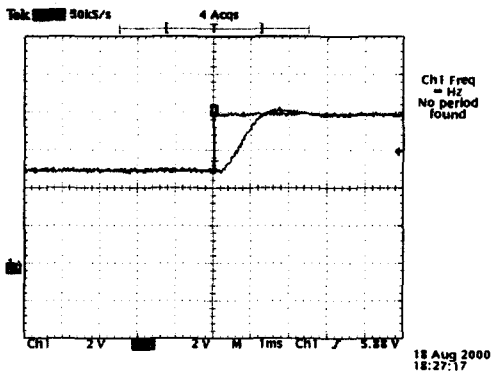
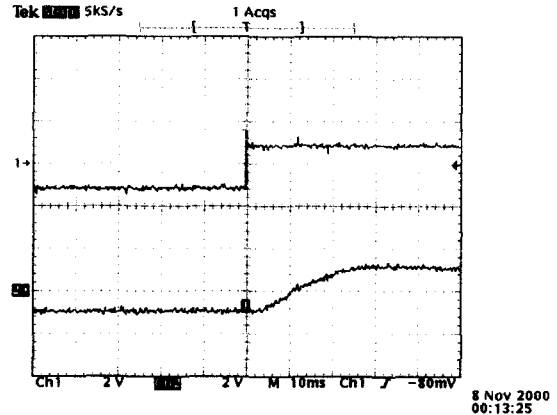


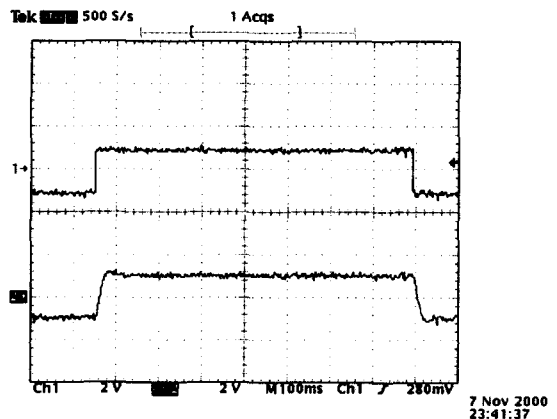
그림 6 전류 응답(기준전류 : 2.0(A))
Fig 6. Step response of current (reference current : 2.0(A))

그림7은 무부하 조건에서 정역방향 속도 운전시 기준속도와 응답속도, q축 전류 응답을 보여주고 있으며, 측정된 값은 실시간으로 DA출력을 통하여 측정된 값이다. 그림7(a)에서는 모터 구동중 역방향 속도 -0.5%에서 정방향 속도 0.5%로 기준값을 변경할 때의 기준속도와 응답속도를 보여준다. 측정된 결과를 통하여 약간의 Overshoot가 존재하는 속도 응답을 보이며, 정역방향 전환시 속도응답특성이 우수한

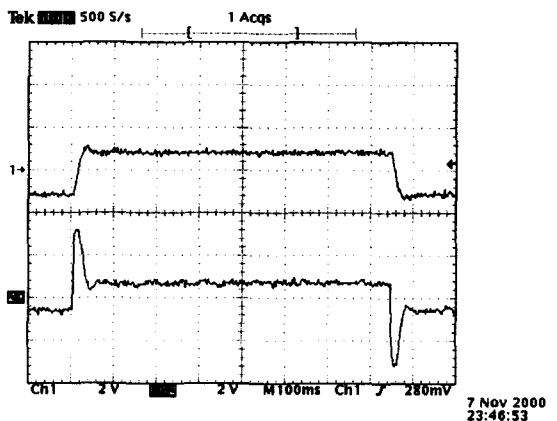
것을 알 수 있다. 또한 가속도 특성은 약 3G의 가속능력을 보여준다.



(a) 기준속도와 속도응답



(b) 기준속도와 속도응답

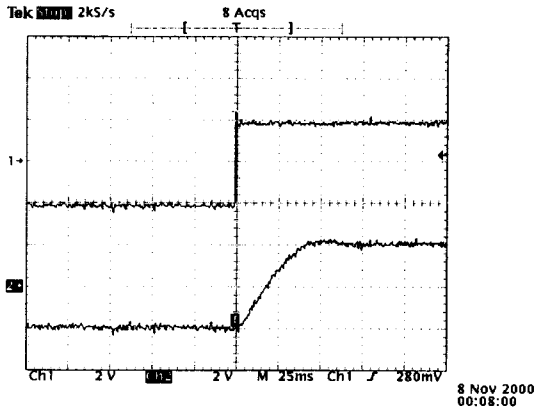


(c) 속도응답과 q축 전류 응답

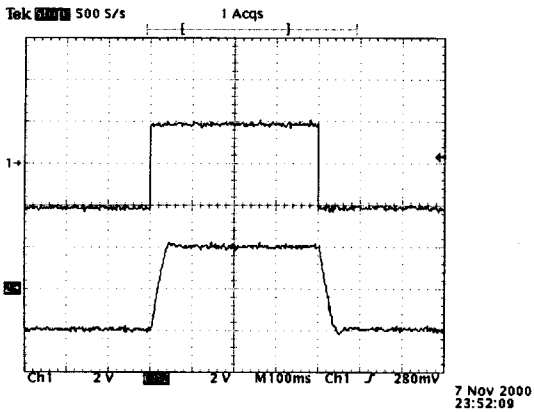
그림 7 속도응답 특성(무부하 0.5% → -0.5%)
Fig 7. characteristic speed response(no load 0.5% → -0.5%)

그림 7(b)는 시간을 확대한 경우 측정된 값이며, 정역방향 전환시 속도 응답 특성을 알 수 있다. 그리고 그림 7(c)에서

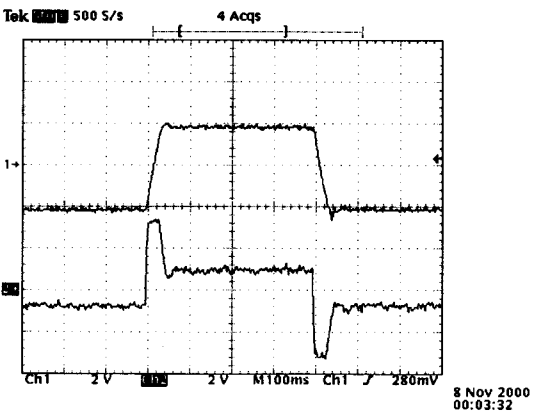
는 속도 응답과 q 축 전류응답특성을 동시에 볼 수 있다. 정역방향 전환시 q 축 전류가 순간적으로 증가하고, q 축 전류는 일정한 값으로 유지됨을 알 수 있다.



(a) 기준속도와 속도응답



(b) 기준속도와 속도응답



(c) 속도응답과 q 축 전류응답

그림 8 속도응답 특성(무부하 1.0% → -1.0%)

Fig 8. characteristic speed response(no load 1.0% → -1.0%)

그림8은 무부하 조건에서 동일한 실험으로 정역방향 속도 운전시 기준속도와 응답속도, q 축 전류 응답을 보여주고 있

으며, 정역방향 속도는 1.0%이며 동일한 속도 응답 특성을 보여준다. 그림 9는 실제 제작된 드라이브와 무철심형 선형 동기전동기(Coreless linear synchronous motor)를 볼 수 있으며, 기타 입출력 회로를 통하여 모터의 엔코더 및 센서 신호가 드라이브와 연결되어 있다.



(a) 모터와 실험장치



(b) 모터 드라이브

그림 9 실험장치

Fig 9. Experimental device

3. 결 론

본 논문에서는 무철심형 선형 동기전동기 구동을 위한 드라이브를 설계 및 제작하였다. 제작된 드라이브는 DSP에 의해서 구현되는 전류제어기, 속도제어기로 구성되고, 인버터는 공간전압형 PWM변조 방식을 사용하여 구동하였다. 또한 이러한 기능을 수행하기 위하여, IPM과 EPLD를 이용하여 전력변환부와 주변회로를 구성된 드라이브를 제작하고, 전류제어기, 속도제어기로는 PI제어기를 적용하여 구성하였다. 실험 결과를 통하여 각각의 제어기의 성능을 검증할 수 있었으며, 선형모터의 속도제어 경우 정역속도 전환 특성과 가속도 특성이 우수함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] 백수현, 소형 모터 설계 편람, 세화출판사, 1988.
 [2] Kraus, C.K., Waszynuk, O., Elettromechanical motion devices. McGraw Hill, 1989.

- [3] TMS320C3X User's Guide, Texas Instrument, 1992.
- [4] Altera Data Book, Altera Corporation, 1993.
- [5] H. W. Vab der Broeck and H. C Skudelny, "Analysis and Realization of a Pulse Width Modulation Based on Voltage Space Vectors", IEEE Trans on Ind. Appl. Vol 24, No. 1, pp. 124-150, 1988.
- [6] J. W. Choi, S. K. Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation," IEEE, Transactions on Power Electronics, Vol. 11, pp. 221-227, March 1996.
- [7] K.Ogata, Modern control engineering, Prentice Hall, 1997.
- [8] F.Blaschke. "The principle of field orientation applied to the new transvector closed loop control system for rotation field machines", Siemens Review, Vol. 34, pp. 217~221, 1972.
- [9] Jacek F. Giera and Zbigniew J. Piech, Linear Synchronous Motors, CRC Press, 1999.

저 자 소 개



김 상 우 (金相佑)
 1974년 6월 8일 생. 1997년 영남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2001년~현재 미래산업 근무.

Tel : 031-780-1451
 E-mail : ksw97@hanmail.net



김 종 무 (金種武)
 1970년 1월 4일 생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1994년~현재 한국전기연구원 선임연구원.

Tel : 055-280-1483
 E-mail : kimjm@keri.re.kr



이 재 헌 (李在憲)
 1974년 2월 3일 생. 1999년 영남대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 해동정보통신 근무.

Tel : 042-823-1066
 E-mail : yanlee@hanmail.net



이 석 규 (李錫圭)
 1956년 12월 7일 생. 1979년 서울대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 (석사) 1990년 UCLA (University of California, Los Angeles) (공학박). 1996년 7월~1997년 7월 University of Michigan, Ann Arbor 교환 교수. 1982년 3월~현재 영남대 전자정보공학부 교수.

Tel : 053-810-2487
 E-mail : sglee@yu.ac.kr



김 상 은 (金相殷)
 1974년 1월 16일 생. 2000년 계명대 산업공학과 졸업. 2000년~현재 영남대 전기공학과 석사과정.

Tel : 053-810-1519
 E-mail : kseun@hotmail.com