스크린도아용 고효율 직접구동 PMAC Driver 개발

(Development of Hi-efficiency Direct Drive PMAC Controller for Screen Door)

박 재 삼*
(Jae-Sam Park)

요 약 본 논문은 최근 급속히 늘어나고 있는 승강장 스크린 도어장치 제어의 효율성과 안전성을 확보하기 위해 현재 스크린 도어에 적용되고 있는 BLDC 기어드모터 제어시스템을 대치할 수 있는 고효율, 고토크 기어리스 PMAC 모터를 스크린 도어장치에 적용시키 위한 드라이브 및 제어장치 설계, 제작 및 적용에 관한 시스템 개발 연구이다. 개발시스템은 구동장치를 단순화하기위해 고효율 및 고 토크의 영구 자석형 BLAC 모터와 그에 따르는 구동드라이버를 채택하여 도어 구동시스템을 단순화하여 고장요인을 줄이고 에너지를 절약할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 스크린도어 제어시스템 구성, 고효율 PMAC 모터를 Drive 하기 위한 회로설계, PMAC 모터 Drive 보드 제작, 구동 프로그래밍을 위한 알고리즘 및 구현 및 테스트 결과 등에 관하여 고찰한다.

Key Words : PMAC, BLDC, BLAC, Motor Driver, Motor Controller

Abstract To control screen door installed in the subway platform, geared BLDC motors have been being used. However, because of the geared mechanisms, the control profile of the screen door in slow speed is very poor. Moreover, geared mechanism tends to leads system malfunctions and low efficiency. To overcome those problems, in this paper, the techniques of developing hi-efficiency direct drive gearless PMAC motor controller and application example to control the screen door of subway platforms are proposed. The developed system has advantages that; the energy efficiency has been increased by adopting gearless PMAC motor; the system break-down factor has been decreased due to the actuator mechanism has been simplified. In this paper, the screen door control system structure, PMAC motor drive circuit design, implementations of vector control algorithm, and test results are shown.

Key Words : PMAC motor, BLDC motor, screen door, vector control, direct drive

1. 서 론

승강장 스크린도어장치는 평상시에는 닫혀있는 상태로 있다가 차량이 도착하여 차량문의 개폐와 동시에 스크린도어도 개폐함으로서 지하철 승강장을 이용하는 이용객의 안전을 도모하고 역사 내 승강장에 진입하는 차량에서 발생하는 미세먼지로부터 이용객 건강을 보호하기 위한 장치이다. 현재 스크린도어 시스템을 운영하는 역사가 급속히 확대되고 있으나 시스템

* 인천대학교 전자공학과

에 적용되는 주요부품은 주로 일본, 프랑스, 독일 등 외국사에 의존하고 있는 실정이다. 스크린도어장치는 인명사고 등 안전사고의 발생을 미연에 방지하는 역할을 하면서 이용객의 불편을 줄이기 위해 원할히 작동되어야 하나, 도어모터, 드라이버, 신호시스템 및 운영시스템 등 종합제어시스템을 외국사 제품을 들여와 국내제작 기계장치에 부착하는 단순 설치공사만 하여 독자적 운영에 미숙함을 보일 수 밖에 없는 실정이다. 특히 일본에서 수입되는 도어구동시스템은 복잡한 부수적 기구물을 필요로 하여 향후 잦은 보수가 예상되는 부분이며, 결국 이용객의 불편과 안전사고에 악영향을 줄 수 도 있어 시급히 개선되어야 할 부분이며, 현재에도 잦은 고장으로 보수가 빈번한 실정이다.

본 논문는 최근 급속히 늘어나고 있는 승강장 도어장치와 그에 따르는 안전성을 확보하기 위해 시스템 개선을 목표로 구동장치를 단순화 하기위해 고효율 및 고 토크의 영구 자석형 BLAC 모터와 그에 따르는 구동드라이버를 채택하여 도어구동시스템을 단순화하여 고장요인을 줄이고 에너지를 절약할 수 있는 기술개발을 하고자 하는 것이다.

2. 직접구동형 동기전동기 벡터제어

2.1 영구자석형 동기전동기의 3상 모델링

그림 1은 2극 3상 영구자석 동기전동기의 등가회로이다.

영구자석형 동기전동기의 3상에서의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p(l_s + M) & -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & R_s + p(l_s + M) & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM & R_s + p(l_s + M) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서,

V_{as} , V_{bs} , V_{cs} : 고정자 a, b, c상전압

i_{as} i_{bs} , i_{cs} : 고정자 a, b, c상전류

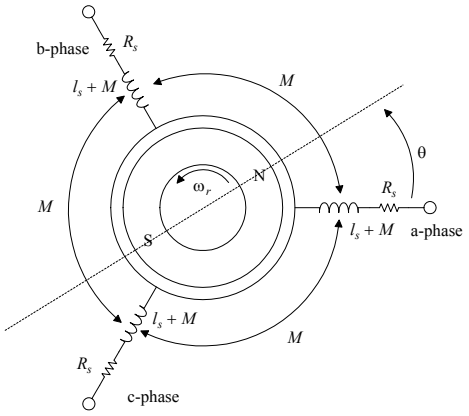
e_{as} , e_{bs} , e_{cs} : 영구자석 계자가 a, b, c상 고정자 권선에 유기되는 속도 기전력

R_s : 고정자 권선 저항

l_s : 전기자 권선의 누설 인덕턴스

M : 전기자 권선 사이의 상호 인덕턴스

p : 미분연산자 ($=\frac{d}{dt}$) 이다.



<그림 1> 3상 영구자석 동기전동기의 등가회로

일반적으로 3상의 전류의 합이 영이므로, 이 조건을 이용하면 위의 전압방정식은 다음과 같이 간단해진다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$L_s = l_s + \frac{3}{2}M$ 이므로 다음식을 얻는다.

$$\mathbf{V}_{abc} = R_s \mathbf{I}_{abc} + L_s \frac{d}{dt}\mathbf{I}_{abc} + \mathbf{E}_{abc} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{V}_{abc} = [V_{as} \quad V_{bs} \quad V_{cs}]^T$, $\mathbf{I}_{abc} = [i_{as} \quad i_{bs} \quad i_{cs}]^T$,

$\mathbf{E}_{abc} = [e_{as} \quad e_{bs} \quad e_{cs}]^T$ 이다.

영구자석 계자의 3상 전기자 권선의 쇄교 자속수를 각각 ϕ_a , ϕ_b , ϕ_c 라고 하고, 그 최대값을 ϕ_f 라고 하면 a상 쇄교 자속수를 기준으로 하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\phi_a = \phi_f \cos\theta$$
$$\phi_b = \phi_f \cos(\theta - \tfrac{2\pi}{3})$$
$$\phi_c = \phi_f \cos(\theta + \tfrac{2\pi}{3}) \quad (4)$$

여기서, 'q'는 그림 2와 같이 a상 고정자 권선을 기준으로 하여 반시계 방향으로 측정된 자석의 전기각을 나타내며, 자석의 전기각속도 ω_r 에 대하여 $\theta = \int \omega_r dt$ 의 관계가 있다. 그러므로 속도 기전력은 e_{as}, e_{bs}, e_{cs} 는 다음과 같다.

$$e_{as} = p\phi_a = -\omega_r \phi_f \sin\theta$$
$$e_{bs} = p\phi_b = -\omega_r \phi_f \sin(\theta - \tfrac{2\pi}{3})$$
$$e_{cs} = p\phi_c = -\omega_r \phi_f \sin(\theta + \tfrac{2\pi}{3}) \quad (5)$$

2.2 영구자석형 동기전동기의 정지좌표계 d-q 모델링

정지좌표계에서의 영구자석형 동기전동기의 d-q 전압방정식[1,2]을 구하기 위해 식 (3)의 양변에 $\mathbf{T}(0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix}$ 를 곱하면 다음식을 얻을 수 있다.

$$\mathbf{T}(0)\mathbf{V}_{abc} = R_s \mathbf{T}(0)\mathbf{I}_{abc} + L_s \frac{d}{dt}\mathbf{T}(0)\mathbf{I}_{abc} + \mathbf{T}(0)\mathbf{E}_{abc}$$
$$\mathbf{V}^s_{dqs} = R_s \mathbf{I}^s_{dqs} + L_s \frac{d}{dt}\mathbf{I}^s_{dqs} + \mathbf{E}^s_{dqs} \quad (6)$$

즉

$$\begin{bmatrix} V^s_{ds} \\ V^s_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 \\ 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s_{ds} \\ i^s_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^s_{ds} \\ e^s_{qs} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 된다. 여기서 $\begin{bmatrix} V^s_{ds} & V^s_{qs} \end{bmatrix}^T$ 는 정지좌표계 고정자 d-q 전압이고, $\begin{bmatrix} i^s_{ds} & i^s_{qs} \end{bmatrix}^T$ 는 정지좌표계 고정자 d-q 전류이며, 정지좌표계 속도기전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e^s_{ds} \\ e^s_{qs} \end{bmatrix} = \mathbf{T}(0) \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_r \phi_f \sin\theta \\ \omega_r \phi_f \cos\theta \end{bmatrix} \quad (8)$$

영구자석 계자의 고정자 권선의 자속쇄교수는 정지좌표계에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \phi^s_d \\ \phi^s_q \end{bmatrix} = \mathbf{T}(0) \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_f \cos\theta \\ \phi_f \sin\theta \end{bmatrix} \quad (9)$$

2.3 영구자석형 동기전동기의 동기좌표계 d-q 모델링

동기좌표계에서의 영구자석형 동기전동기의 d-q 전압방정식을 구하기 위해 식 (6)의 양변에 $\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$ 를 곱하면 다음식을 얻는다.

$$\mathbf{R}(\theta)\mathbf{V}^s_{dqs} = R_s \mathbf{R}(\theta)\mathbf{I}^s_{dqs} + L_s \mathbf{R}(\theta)\frac{d}{dt}\mathbf{I}^s_{dqs} + \mathbf{R}(\theta)\mathbf{E}^s_{dqs}$$
$$\mathbf{V}^e_{dqs} = R_s \mathbf{I}^e_{dqs} + L_s \mathbf{R}(\theta)\frac{d}{dt}\left[\mathbf{R}(\theta)^{-1}\mathbf{I}^e_{dqs}\right] + \mathbf{E}^e_{dqs}$$
$$\mathbf{V}^e_{dqs} = R_s \mathbf{I}^e_{dqs} + L_s \mathbf{R}(\theta)\left[\mathbf{R}(\theta)^{-1}\left(\frac{d}{dt}\mathbf{I}^e_{dqs}\right) + \left(\frac{d}{dt}\mathbf{R}(\theta)^{-1}\right)\mathbf{I}^e_{dqs}\right] + \mathbf{E}^e_{dqs}$$
$$\mathbf{V}^e_{dqs} = R_s \mathbf{I}^e_{dqs} + L_s \frac{d}{dt}\mathbf{I}^e_{dqs} + L_s \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r \\ \omega_r & 0 \end{bmatrix} \mathbf{I}^e_{dqs} + \mathbf{E}^e_{dqs} \quad (10)$$

즉

$$\begin{bmatrix} V^e_{ds} \\ V^e_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^e_{ds} \\ i^e_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e^e_{ds} \\ e^e_{qs} \end{bmatrix} \quad (11)$$

이 된다. 여기서 $\begin{bmatrix} V^e_{ds} & V^e_{qs} \end{bmatrix}^T$ 는 동기좌표계 고정자 d-q 전압, $\begin{bmatrix} i^e_{ds} & i^e_{qs} \end{bmatrix}^T$ 는 동기좌표계 고정자 d-q 전류이고, 동기좌표계 속도기전력은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} e^e_{ds} \\ e^e_{qs} \end{bmatrix} = R(\theta) \begin{bmatrix} e^s_{ds} \\ e^s_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_r \phi_f \sin\theta \\ \omega_r \phi_f \cos\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (12)$$

또한, 영구자석 계자의 고정자 권선의 자속쇄교수는 동기좌표계에서 다음과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} \phi^e_d \\ \phi^e_q \end{bmatrix} = \mathbf{R}(\theta) \begin{bmatrix} \phi^s_d \\ \phi^s_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_f \cos\theta \\ \phi_f \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

여기서 주목할 것은 영구자석 계자에 의해 유기되는 자속 쇄교수는 동기좌표계에서 d축에 집중되고 또 이로 인해 발생하는 속도기전력은 q축에만 집중한다는 사실이다. 또 속도기전력(=$\omega_r\phi_f$)은 속도가 증가할수록 커지는데 ϕ_f를 속도기전력 상수 혹은 역기전력 상수라고 하고 'K_e'라고도 표현한다.

최종적으로 영구자석 동기기의 동기좌표계 d-q축 전압방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다[3].

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.4 영구자석 동기전동기의 토오크

영구자석 동기전동기의 출력 전력은 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= \frac{3}{2}(V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e) \\ &= \frac{3}{2}R_s\left(i_{ds}^{e\,2} + i_{qs}^{e\,2}\right) + \frac{3}{2}\frac{L_s}{2}\frac{d}{dt}\left(i_{ds}^{e\,2} + i_{qs}^{e\,2}\right) + \frac{3}{2}\omega_r \phi_f i_{qs}^e \end{aligned} \quad (15)$$

우변의 첫번째 항은 고정자 동손이고, 두번째 항은 자기에너지 변화에 해당하는 전력으로서 무효전력 성분이다. 좌변의 마지막항이 기계적인 출력이므로

$$\frac{3}{2}\omega_r \phi_f i_{qs}^e = T_e \omega_{rm} \quad (16)$$

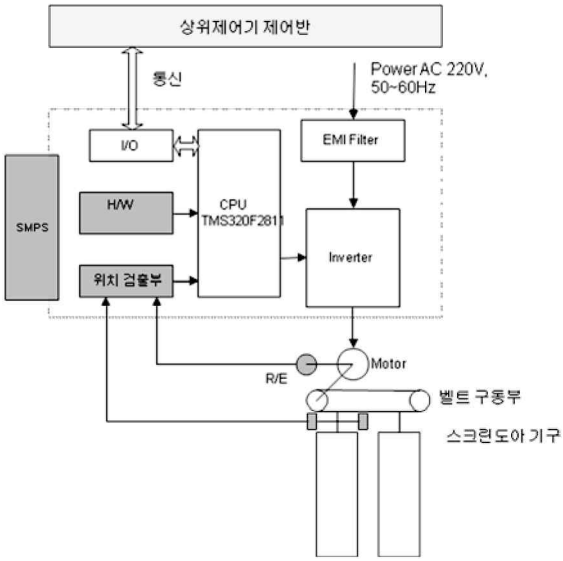
이 된다. 여기서 기계각속도 ω_{rm}은 전기각속도 ω_r과 $\omega_r = \frac{P}{2}\omega_{rm}$ (P : 극수)인 관계가 있으므로

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\phi_f i_{qs}^e = K_T i_{qs}^e \quad (17)$$

이 된다. 즉, 토오크는 동기좌표계 q축전류와 비례하게 되고, 그 비례이득 $K_T = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\phi_f$를 토오크 상수라고 한다[4].

3. PMAC 벡터제어 시스템 설계

전체 시스템 구성도 는 그림 2와 같다.



<그림 2> 전체시스템 구성도

3.1 컨버터, 인버터부

전력 변환부 중 Inverter 부는 가장 중요한 부분이며 DC-Link 단의 DC 전원을 원하는 주파수의 AC전원으로 변환시켜 주는 장치이다. 때문에 고주파로 스위칭할 수 있는 IGBT 를 사용하였으며 IGBT는 Vincotech사의 P443C2001로 구성하였다. P443C2001은 20Apeak 전류 용량을 갖고 있고, 내압은 600V이며 IGBT 6개가 직렬로 연결되어 있고 6개의 Diode가 있어 컨버터를 구성할 수 있는 제품이며 1개로 구성하였다. IGBT Switching 주파수는 10㎑로 선정하였다.

3.2 제어기의 하드웨어 구성

제어기의 구현을 실시간 제어가 가능한 TI사의 TMS 320 F2811 DSP 를 이용하였다. 제어기는 전체 시스템의 두 뇌에 해당하는 부분으로 전동기의 안정적인 동작을 위해 속도 제어, 전류 및 전압 제어, 입·출력 제어 등을 담당하며, 이를 위해 각종 입력 데이터를 바탕으로 본 논문에서 연구한 복잡한 알고리즘이 실시간 수행을 위해서 많은 연산을 수행하게 되는

부분으로, 보다 정밀하고 신속한 제어를 위해 32bit 연산이 가능한 TI 사(미국)의 TMS TMS 320 F2811 (150㎒)을 사용하여 설계하였고, 전력 노이즈를 고려하여 4층 PCB로 제작하였다. 메모리나 I/O 또는 Timer 등의 주변 소자와의 디코딩 회로나 Wait 회로, 클럭 분주회로, 인버터와 컨버터에 PWM 신호를 인가하기위한 PWM발생회로, Dead Time발생회로 등은 DSP칩에 있는 내부주변기기를 사용하여 PCB를 최소화 하였다[5].

DSP 내부 변수나 RPM 등의 측정을 위한 D/A 변환기로는 2 채널 12-Bit DAC 인 DAC7612을 2개 사용하였다. PC에서 작성한 C 코드를 TI사의 C-Compiler로 Compiler한 다음 이를 PC의 에뮬레이터 통하여 DSP Target Board에 다운로드시켜 동작하게끔 하였다. 메모리 할당시 자주 쓰이게 되는 변수등과 100mSec마다 수행되는 인터럽트 루틴 및 전체 프로그램 코드는 256Kbyte 용량의 내부 FLASH에서 수행하도록 하였다..

3.3 Gate drive PCB

인버터를 구성하는 스위칭소자인 IGBT 모듈(P443C200)을 스위칭하기 위한 게이트 구동회로는 도시바사의 TLP251 6개 사용하였다. TLP251 를 사용함으로써 구동회로가 대폭 간단해질 수 있었으며 또한 회로의 신뢰성을 높였다. 게이트 구동용 저항 값은 82옴,1/4W를 사용하였다.

3.4 HALL-CT

HALL-CT는 모터에 흐르는 전류를 측정하기 위한 전류검출 소자이다. 모터에 흘러들어가는 3상 전류의 합은 영이므로 U상,V상 전류만 측정하면 W상 전류는 연산으로 구할 수 있기 때문에 2상만 측정한다. 이 HALL-CT는 모터에 흐르는 전류를 제어하기 위한 피드백용으로 사용하고 있으며 일본의 TAMURA사 의 HALL-CT(15A/4V) L07P-S05 1개를 사용하고 있다. 이 HALL-CT는 입력전압이 15V이고 U,V상이 같은 몸체에 붙어 있는 타입이다. 또한 컴팩트한 사이즈를 구현하기 위하여 IGBT모듈과 드라이버회로 제어기, 전원공급을 위한 SMPS회로를 원보드내에 다 구현하였다.

제어대상인 동기전동기는 LS메카피온사의 PMAC SERVO MOTOR - APMSC04AACK1을 사용하였으며 사양은 다음과 같다.

- 출력: 400W 3000rpm
- 입력: 220V - 3상
- 엔코더 : 인크리멘탈 엔코더 2500펄스/1회전
- 정격토크: 1.27N.m

스크린도아의 전체 제어를 위해서는 위치제어기와 위치제어기에서 연산된 속도지 령을 추종하는 속도제어기를 설계한다. 속도제어기는 안티와인드업 (Anti-Windup)PI제어기와 슬라이딩모드제어기[6]를 적용하여 강인하고 최적화된 제어성능을 구현하였다.

모터제어 방법으로는 벡터 제어기, 전류 제어기, 토크 제어기등을 사용하였고PMAC 모터를 벡터제어를 하기 위해서는 정확한 자속의 위치를 검출하고 강인한 전류제어기와 토크제어기가 설계되어야 한다 또한 PMAC 모터의 초기각 제어를 위한 자속위치 검출기 벨터벡어를 위해서는 회전자의 자속각위치를 정확하게 검출하여야 하며 이를 위 한 핵심 알고리즘을 설계한다 또한 제어기와의 인터페이스를 위한 통신 프로토콜 구현도 구현하였다.

완성된 제어기를 그림3에 보여준다.

<그림 3> 완성된 제어기

4. 실험결과

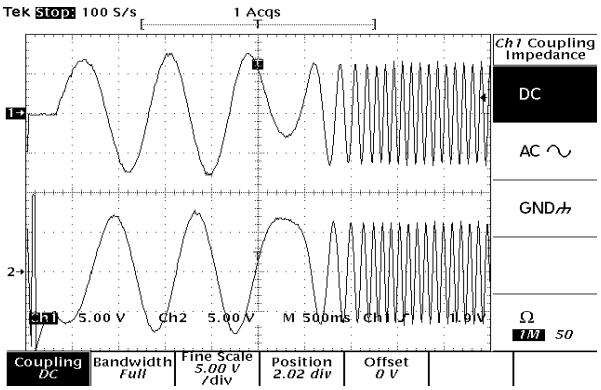
본 논문에서 제시한 실험결과의 측정은 Textronix의 Digital Storage Oscilloscope TDS 420을 사용하여

측정하였다. Textronix의 Digital Storage Oscilloscope TDS 420 은 4channel 까지 storage 가 가능한 dscilloscope 이다.

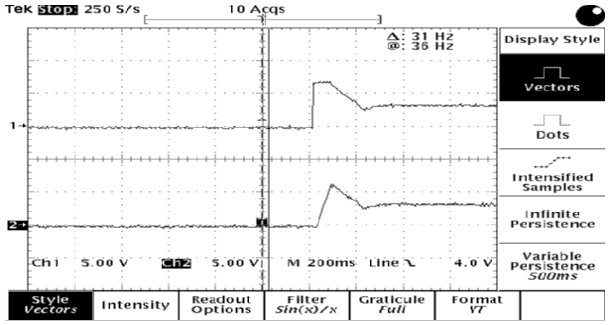
다음 그림들은 동기전동기의 각각의 파형은 제어 PCB에서 읽어들인 센서값들을 D/A converter로 출력하고 이 D/A converter의 값을 오실로스코우프 TDS420으로 측정하여 USB메모리에 저장하였다. 특히 내부 제어 변수들의 측정에는 DSP board 내에 있는 2 channel D/A converter DAC7612을 사용하여 측정하였다.

그림 4는 부하보상시의 모터에 인가되는 U,V상 선전류를 측정한 파형이다

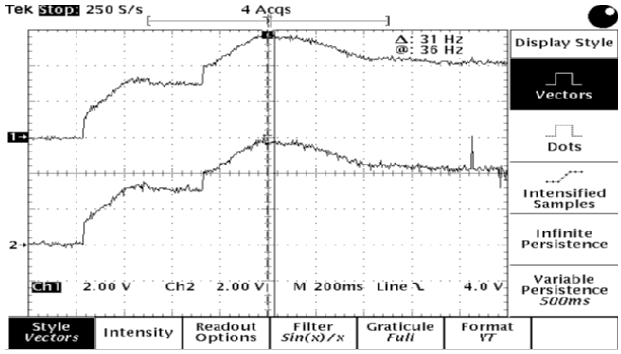
그림 5의 a)는 자속 제어기의 출력인 여자 전류 지령치와 실제 여자전류의 파형을 보여 준다. 초기에 빠른 시간 내에 자속을 build up 시키기 위해 전류를 2배이상으로 강계자시키고, 이후 자속이 build up 되면 정상전류로 제어한다. 그림 5 a)에서 보듯이 일정한 자속을 얻기 위하여 여자전류가 빠른 시간(140msec) 안에 build up 되고 있음을 보여주고 있고 자속제어 및 여자전류제어가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있다. 그림 5의 b)는 Torque 전류 지령치와 실제 Torque 전류를 보여주고 있다. 실제Torque 전류가 지령치를 빠른 시간에 추종하고 있음을 알 수 있으며 거의 지연이 없는 빠른 응답성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.



<그림 4> 부하보상시의 모터에 인가되는 U,V상 선전류 ch1 U상 선전류, ch2 V상 선전류(2V/0.5A, 5V/div)



a) ch1 여자 전류 지령치와 ch2실제 여자전류의 파형



b) ch1 Torque 전류 지령치와 ch2 실제 Torque 전류

<그림 5> 모터 전류 지령치와 실제치(2V/0.5A, 2v/div)

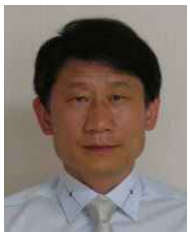
5. 결 론

본 논문에서는 직접구동형 동기전동기 제어기를 최적화된 원보드형태로 모든 제어소자와 상위제어기와의 통신 모듈 및 IGBT 드라이버 회로가 일체화된 형태의 제어기를 를 설계하고 제작하여 잘 동작하는 것을 확인하였으며 방열판과 제어보드가 일체화된 형태로 컴팩트한 구조의 설계 고효율 PMAC 모터를 기어장치 없이 직접구동 함으로서 시스템의 효율을 향상시켰다.

참 고 문 헌

[1] Y. Dote, and S. Kindoshita, “Brushless Servomotors Fundamentals and Applications”, 1990, Clarendon Press. Oxford

[2] Y.Hu, X. Ji, K. Chen and X. Ma, “Elementary Study on BLDC Controller for Electric Power Steering System, “ SAE Techenical paper series, 2004-01-1096.
[3] 조관열, 양순배, 홍찬희, “영구자석 동기전동기의 제동 알고리즘” 전력전자 학회 논문지 2002, 8 Vol.7 No.4 pp. 313-321
[4] 석줄기, 이동춘, “전류제어기 동특성을 고려한 산업용 서보 구동시스템의 속도제어기 설계”, 전력전자 학회 논문지 2001.10, Vol.7 No.5 pp. 465-471
[5] M. H. Rashid, “ Power Electronics Circuits, Devices, and Applications,” 1988, Prentice-Hall International Editions.
[6] 박재삼, “Discrete-Time Sliding Mode control for Robot Manipulators”, 한국산업정보학회 논문지 제16권 제4호, 2011.12



박 재 삼 (Jae-Sam Park)

• 정회원
• 충북대 전기과(공학사)
• University of New South Wales, Australia(공학석사 및 공학박사)
• 대우중공업 중앙연구소 주임연구원
• 인천대학교 전자공학과 교수
• 관심분야: 비선형제어, 로보틱스, 퍼지및 신경망응용