

마이크로프로세서에 의한 SM형 AC SERVO MOTOR 제어기의 설계에 관한 연구

김기용 . 서울산업대학
오기봉 . 서울산업대학
김정하 . 서울산업대학

윤병도 . 중앙대학교
이병송* . 중앙대학교

A Study of the design of controller for microprocessor - Based Permanent magnet AC Servo motor

Kim Ki yong, Oh Ki Bong, Kim Jung Ha, Yoon Byung Do, Lee Byung Song
Seoul National Polytechnic Univ. Chung-Ang Univ.

ABSTRACT

The configuration of Brushless DC motor is similar to the permanent magnet Synchronous motor.

Power transistors are oftenly used to supply the switching by feedback signals of rotor positioning sensors.

Brushless DC motor have been used in Aerospace and Robotics where the electromagnetic noise or the sparking of the commutator contact can not be tolerated and long - lived maintenance - free operation is required. This paper describes the design of the microprocessor - based controller for the Brushless DC motor.

The controller is designed to operate for the constant torque generation and variable speed control using sinusoidal PWM inverters and resolvers as rotor positioning sensors.

1. 서 론

지금까지 로보트나 동작기계등 전기서보분야에 대부분 직류전동기가 이용되어 왔다.

그러나 최근 산업 전반에 있어 전기 Servo System 기술은 전력용 반도체소자의 개발과 마이크로프로세서의 기술향상으로 전력변환기를 구성하는것이 용이하게 되어 AC Servo Motor 를 이용한 AC Servo System 이 고성능화 되어가고 있다.

아직까지 산업계의 여러 서보시스템에서 DC 서어보전동기가 주류를 이루고 있는 이유는 속도가 입력 전압에 비례하고, 토오크가 속도에 비례하므로 전기자전류와 계자전류의 조정으로 회전속도와 토오크를 자유로이 변화시킬수 있는 우수한 선형제어특성 때문이며, 따라서 광

범위한 가변속 및 위치제어가 간편하기 때문이다. 그러나 직류전동기는 기계적정류로 인해 브러쉬와 정류자 (Commutator) 의 마모로 인한 정기적인 보수문제, 정류시의 불꽃발생으로 인한 잡음과 폭발성물질을 다루는 장소등 사용 환경에 제한을 받게된다.

최근 고성능 영구자석과 전력용반도체소자, 마이크로컴퓨터의 적용으로 영구자석형 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Moter, PMSM)는 AC 서어보계에 각광을 받고있다. PMSM에서는 주로 직류를 Inverter에 의하여 교류로 변환하여 고정자에 공급하고 그특성이 직류전동기와 유사하므로 부러쉬 없는 직류전동기(Brushless DC Moter, BLDM)라고도 한다.

부러쉬 없는 직류전동기는 정류자와 브러쉬에 의한 기계적정류를 전력용반도체소자와 회전자 위치검출기에 의한 전자적 정류로 바꾸어 줌으로 정기적인 보수및 전기적 잡음문제가 필요 없게되고 고속화가 용이하다.

부러쉬 없는 직류전동기를 직류전동기와 같이 뛰어난 제어성능을 갖게하기 위해서는 위치검출기를 이용, 회전자의 위치를 추적하여 고정자의 회전자계가 항상 회전자의 위치에 관계없이 전기자 코일의 자속방향을 절환하여 회전자와 항상 일정한 각을 유지하도록 회전자의 절대위치와 속도정보처리가 반드시 요구되므로 제어기의 설계가 복잡해진다.

본 논문에서는 회전자 위치검출기로 내열성, 기계적강도 및 내 noise 성이 강하고, 토오크리플을 최소화 시키는 레졸버 (Resolver) 을 위치및 속도 검출기로 사용하여, 저속 영역에서도 시스템이 안정화되고 각 상에 흐르는 전류를 정현파 PWM 으로 제어함으로써 진동과 소음을 줄이고 속도및 토오크 응답이 양호한 제어기를 제시하였다.

2. 이 론

그림 2-1 과 같이 브러쉬없는 직류전동기는 3상 영구자석 동기전동기와 같은 구조형태로써 고정자는 3상 Y 결선으로 되어있고, 회전자는 영구자석(Permanent magnet)으로 구성된다.

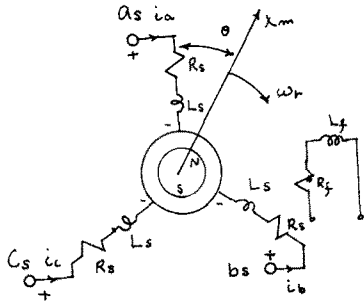


그림 2-1 고정자측에서 본 등가회로
그림에서 각 상에 대해 전압 방정식을 세우면

$$V_{a,b,c} = \begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \lambda_{a1} \\ \lambda_{b1} \\ \lambda_{c1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots ①$$

이때 전기자 쇠교자속수는

$$\lambda_{a,b,c1} = \begin{bmatrix} \lambda_{a1} \\ \lambda_{b1} \\ \lambda_{c1} \end{bmatrix} = L_s \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} + \lambda_m \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta_r - \frac{4}{3}\pi) \end{bmatrix} \dots\dots\dots ②$$

λ_m : 회전자의 영구자석에 의한 쇠교자속의 크기

L_s : 1 상당 권선 인덕턴스

영구자석에 의해 고정자에 쇠교되는 자속이 정현파 본포로 되어있다고 가정하면 식 2의 자속 λ_{abc} 를 회전자 기준속으로 d - q 변환하면

$$\begin{bmatrix} \lambda_{d1} \\ \lambda_{q1} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_{a1} \\ \lambda_{b1} \\ \lambda_{c1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots ③$$

이 되고 전동기가 회전하고 있을때 d - q 축으로 변환된 전압방정식 ①은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} V_{d1} \\ V_{q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} \lambda_{d1} \\ \lambda_{q1} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \lambda_{d1} \\ \lambda_{q1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots ④$$

식 4 에서 전동기의 출력 P_M 의 식은 다음과 같다.

$$P_M = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_{d1} i_{q1} - \lambda_{q1} i_{d1}) \dots\dots\dots ⑤$$

여기서

$$\omega_m = \frac{P}{2} \omega_r \dots\dots\dots ⑥$$

따라서 토오크 T_e 는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} (\frac{P}{2}) (\lambda_{d1} i_{q1} - \lambda_{q1} i_{d1}) \dots\dots\dots ⑦$$

여기서 $\lambda_{gs} = L_g i_{gs}$, $\lambda_{ds} = L_d i_{ds} + \lambda_m$

이므로 식 7 에서 전동기의 토오크식은

$$T_e = \frac{3}{2} (\frac{P}{2}) (\lambda_m i_{gs} + (L_d - L_g) i_{ds} i_{gs}) \dots\dots\dots ⑧$$

또 토오크와 속도의 관계식은

$$T_e = J (\frac{2}{P}) \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \frac{2}{P} \omega_r + T_L \dots\dots\dots ⑨$$

$$= J \frac{d\omega_m}{dt} + B_m \omega_m + T_L \dots\dots\dots ⑩$$

로 주어진다

B_m : 제동계수

J : 회전자의 관성 모멘트 [Kg.m²]

T_L : 부하토오크 [N.m]

P : 극수 (number of pole)

전동기의 회전자가 비돌극형이면

$L_{mg} = L_{md}$, $L_d = L_g = L$ 이므로 식 8 은

$$T_e = (\frac{3}{2}) (\frac{P}{2}) \lambda_m i_{gs} \dots\dots\dots ⑪$$

여기서

$$\lambda_m = K \omega W \phi_m \dots\dots\dots ⑫$$

로 주어지므로 브러쉬없는 직류전동기는 DC 전동기와 같이 토오크가 전류에 비례함을 알 수 있다. 이때

$$\begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin \theta_r & \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a1} \\ i_{b1} \\ i_{c1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots ⑬$$

이다.

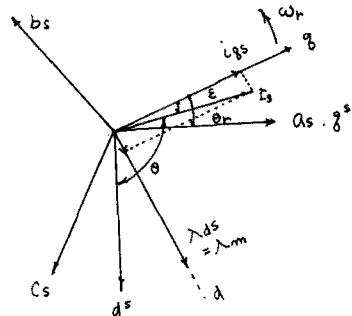


그림 2-2 전동기의 전류 및 자속 Vector

그림 2-2은 식 11 를 만족하는 전동기의 고정자 및 회전자에 대해 d-q 변환한 고정자 전류 및 자속의 Vector를 나타낸 것이다.

지금 위치검출기를 통해 $\epsilon = 0$ 가 되도록 제어하고 13 식에서 $\theta_r = \theta - \frac{\pi}{2}$ 이므로 전동기의 토오크식은 다음과 같이 된다.

$$T_e = (\frac{P}{2}) \lambda_m \begin{bmatrix} \sin \theta_r \\ \sin(\theta_r - \frac{2}{3}\pi) \\ \sin(\theta_r + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} i_{d1} \\ i_{q1} \end{bmatrix} \dots\dots\dots ⑭$$

여기서 식 12 이 식 13 을 만족하도록 제어기를 설계구성하면 식 12 식을 만족하는 Field orientation 제어알고리즘과 같은 제어결과를 가지므로 직류전동기와 같이 우수한 선형제어성을 갖는 제어기를 설계할수 있다.

3. 제어 시스템의 구성

3-1 전동기의 블록선도

브러시 없는 직류전동기의 우수한 제어특성의 실현을 위한 제어기를 설계하기 위하여 전동기의 등가블럭선도를 나타내고 전체시스템의 전달함수를 구하여 봄으로써 타여자직류전동기와 같음을 보였으며, 따라서 정현 PWM 신호로 전동기의 3상 전기자 전류를 회전자의 위치를 레졸버로 검출한 정보로 공급함으로써 3상가변주파수로 직류전동기의 특성을 갖도록 보았다.

3-2. 제어시스템의 하드웨어

그림 3-1의 블럭선도의 기능을 갖추도록 제어시스템의 하드웨어를 구성하면 그림 3-2와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 전체 제어시스템의 구성은 직류전원발생의 Converter, Bipolar Transistor module 과 Snubber 회로로 구성된 전력변환기, 3상 기준신호발생을 위한 동기검파기, 각상의 3상전류 명령신호와 상전류를 feedback 비교시켜 최적의 PWM파형을 발생하는 PWM발생기 회전자의 절대위치를 검출하는 진폭변조형 레졸버(Resolver) 및 F/V converter 또 각 부분을 software로 처리하는 microprocessor로 구성되어 있다.

본 시스템에 사용된 전동기의 제정수는 다음과 같다.

정격출력(W)	정격토크(N-m)	최대속도(rpm)
200	0.955	2000

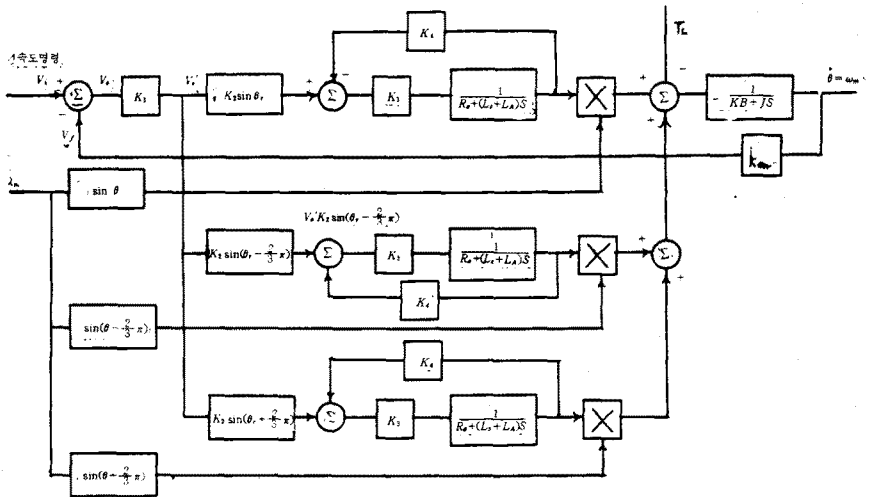


그림 3-1 전동기의 블록선도

그림 (3-1)에서 브러시없는 직류전동기의 블록선도를 보았다.

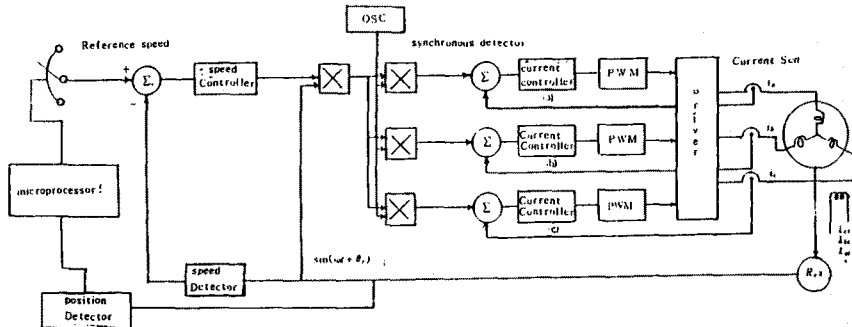
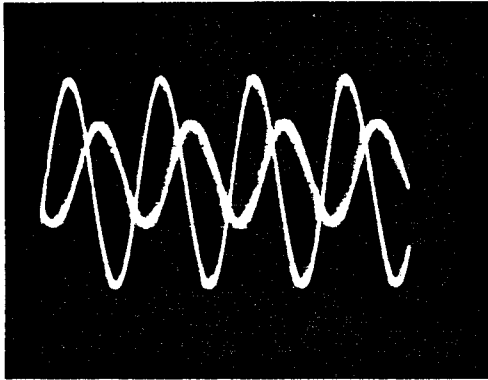


그림 3-2 브러시 없는 직류전동기의 전체 제어시스템

정격전압(V)	정격전류(A)	토포크상수(N-m/A)
230	1.9	0.32
회전자관성(GD ² /Kg-m ²)	상저항(Ω)	
5.96	1.2	
상인덕턴스(mH)		
20		

4. 실험 결과 및 고찰

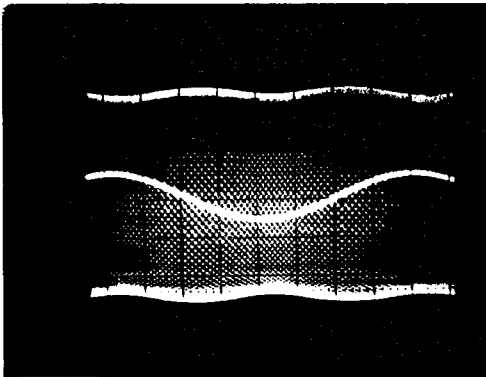
그림 4-1 에서 Resolver의 여자입력신호 +COS ωt에 대한 레졸버 출력과의 phase관계를 나타낸 것이다.



ωt 수직 0.2 V/div ωR 수직 0.2 V/div
수평 1 ms/div 수평 1 ms/div

그림 4-1 Resolver 입력과 출력신호

레졸버가 임의의 위치의 3상동기신호에 의하여 회전하면 곧 레졸버출력신호는 Modulation-wave로 나타나는데 변조파의 크기는 여자입력 크기에 비례한다. 따라서, 최적레졸버출력이 되도록 oscillator의 크기를 oscilloscope를 보면서 정확히 조정하였다.



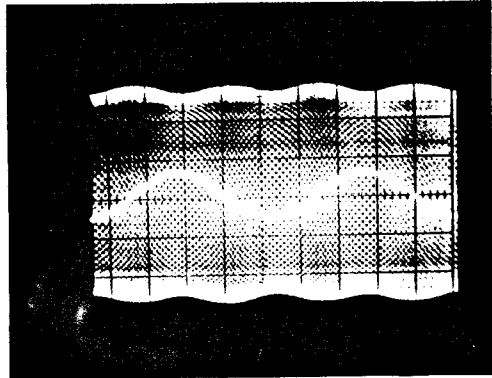
ωt 수직 2 V/div ωR 수직 2 V/div
수평 10 ms/div 수평 10 ms/div

그림 4-2(a) Modulated Wave 와 위치검출신호 (600 rpm)

그림 4-2는 modulated resolver output를 회전수 600rpm, 1000rpm, 1800rpm에 대해 변조신호를 oscilloscope CH1 으로하고 동기검파연산

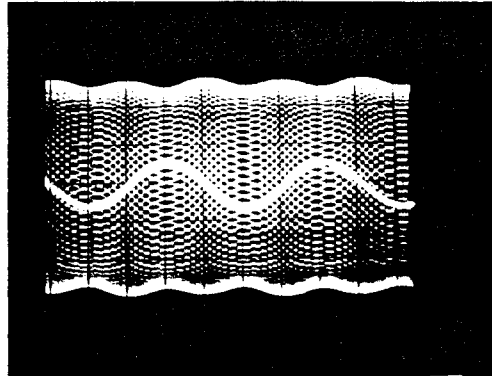
되어 위치변화를 나타내는 정현파를 CH2로 하여 보인 것인데 이들의 관계는 속도에 비례하여 상전류 명령기준신호가 변화됨을 보여주고 있다. 레졸버로부터 얻은 변조신호를 이용하여 3상전류명령을 정확히 구현하여 3상회전자계를 공급하여야만 직류기와 같은 속도-토포크의 제어특성을 얻을수 있다.

즉, CH1의 변조파를 연산처리하여 CH2의 정현파신호가 회전자의 자계와 동기를 이루는 전기자전류를 흘릴수 있도록 연산제어기를 구성하여야 그림과 같이 만족할 만한 결과를 얻을수 있다.



ωt 수직 2 V/div ωR 수직 2 V/div
수평 10 ms/div 수평 10 ms/div

그림 4-2(b) Modulated Wave 와 위치검출신호 (1000 rpm)

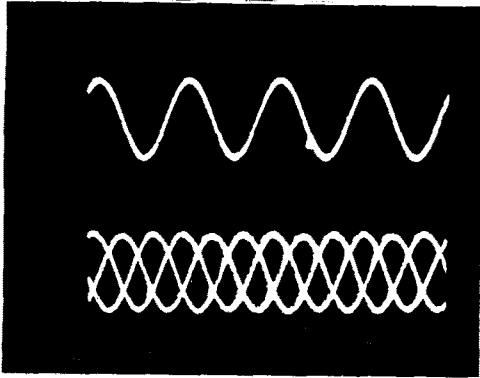


ωt 수직 2 V/div ωR 수직 2 V/div
수평 10 ms/div 수평 10 ms/div

그림 4-2(c) Modulated Wave 와 위치검출신호 (1800 rpm)

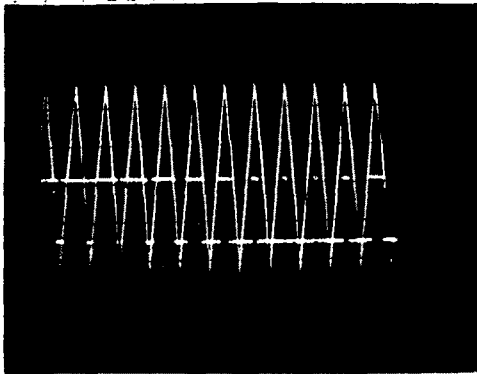
그림 3은 레졸버의 변조파로부터 a상전류명령신호와 함께 전동기터미날에 공급되는 각상 전압이 0 radian, 2π/3 radian, 4π/3 radian이 되도록 연산처리하여 나타낸 것이다.

그림 4는 3상전류명령을 기준파로 하고 삼각파를 캐리어로 비교, 그 교점에서 switching 되게하여 얻은 정현파 PWM파형이다.



수직 2 V/div
수평 10 ms/div

그림 4-3 Synchronous 3상 Frequency

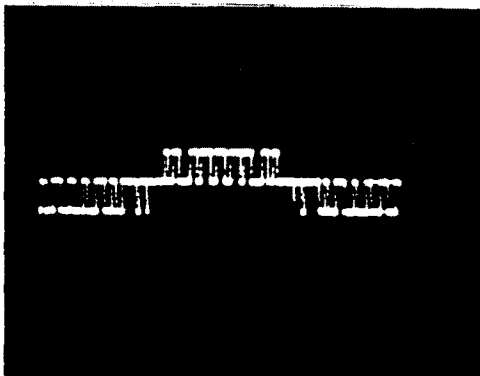


수직 5 V/div
수평 5 ms/div

그림 4-4 삼각파로 변조된 PWM Wave

이들 PWM신호가 Inverter에 인가될 때 Biopolar TR switching Device의 short를 방지하기 위해 lower base signal에 대해 각각 50 μsec 논리적으로 지연시켰다.

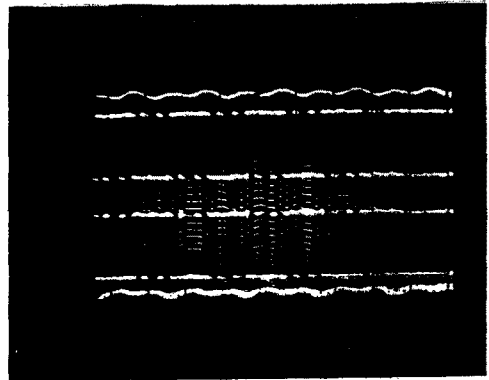
그림 5는 그림 4에서 얻어진 PWM신호를 선간 전압으로 공급한 것이며, 속도명령에 따라 주파수와 전압이 달라짐을 보였다.



수직 100 V/div
수평 50 ms/div

그림 4-5 Motor 의 Line Voltage

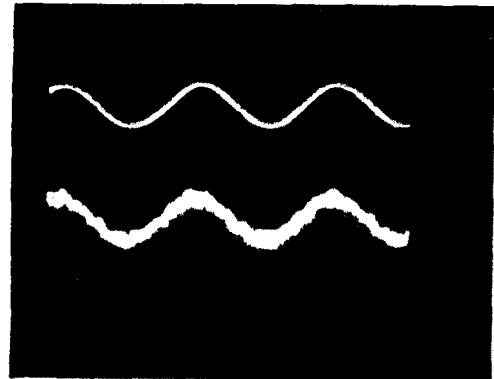
그림 6은 속도변화에 따른 위치정보sensor로서 레졸버의 변조신호와 이들로 부터 연산처리, 생성시킨 PWM과의 상호관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 변조신호의 폭은 일정하고 단지 ripple의 크기가 속도에 비례하며 이 변화에 따라 PWM파형이 달라짐을 보였다. 변조 ripple의 크기는 속도명령에 따라서만 달라짐으로 속도명령처리는 microprocessor로 담당케 함으로 정확한 가변속제어와 위치제어가 되도록 하였다.



수직 30 V/div
수평 20 ms/div

그림 4-6 변조파와 PWM파형

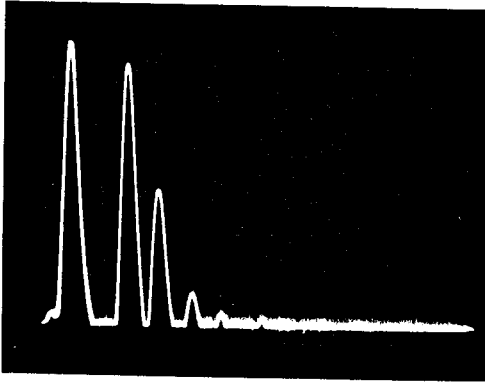
그림 7은 전동기의 각상에 PWM전압이 인가되었을 때 각상전류응답(전기자전류)를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 속도가 증가할때와 변조비가 증가할때 그림 7과 같이 고



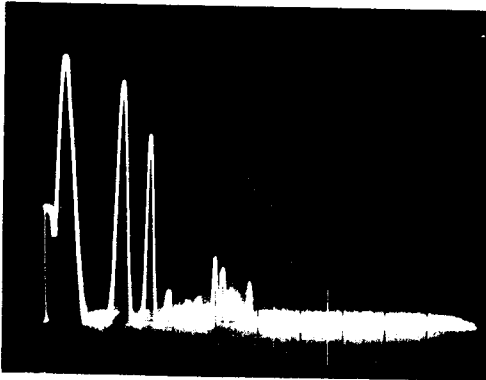
수직 0.2 V/div
수평 10 ms/div

그림 4-7 전류명령과 전기자전류응답

조파성분이 증가됨을 보였다. 이때 각 속도의 증가는 600rpm, 1000rpm, 1800rpm에 대해 나타냈으며, armature current feedback은 전류검출기의 lower pass filter를 양호하게 설계함으로서 전류명령치와 같은 기본파로 만들수 있다.

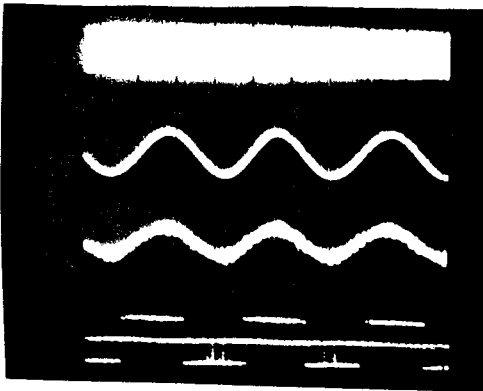


Resolution 3 [Hz]
Input Sensitivity + 10 Sweep mod Log
그림 4-8(a) 600rpm 에 선간전압의 고조파분



Resolution 3 [Hz]
Input Sensitivity + 10 Sweep mod Log
그림 4-8(b) 1000rpm 에 선간전압의 고조파분

그림 8은 최종적으로 브러시없는 직류전동기가 전동기구동전압을 최적정현파PWM전압으로 하고 이에 따른 정현파전자전류로 3상회전자계를 만들어 직류기와 같은 특성을 갖도록 신호처리된 결과를 순서적으로 제어알고리즘에 따라 나타낸 것이다. 위와 같은 제어기 설계연구로 타여자직류전동기와 같은 특성을 갖도록 제어기를 구현하였음을 제시하였다.



수직 2V/div
수평 10 ms/div

그림 4-9 번조파 및 PWM과 전자자 전류응답

* 결 론

본 논문에서는 브러시없는 직류전동기를 구동하기 위하여 Brushless DC Motor의 수학적 Model로 제어 알고리즘을 구성하고 회전자의 절대위치검출기로 Resolver를 사용하여 회전자의 절대위치와 항상 직교하는 회전자계를 만들도록 하는 전압원 3상 정현파 PWM제어기기를 설계하였다. 이들 제어시스템으로 실험 검토한 결과 저속에서 기동이 원활하지 못한 문제를 해결하였고 소음이 적고 원활한 운전이 되게하여 타여자직류전동기와 거의 같은 특성을 지니도록 하였음을 확인하였다.

이들 실험 결과는 PWM Inverter를 사용한 AC Servo Motor의 정밀속도및 위치제어 방법에 실용적인 실험적 자료로 활용될것이 기대된다

참 고 문 헌

1. Takuzo Maeno, Ryosuck Harada " ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS FO THE BRUSHLESS MOTOR, TAKING THE SATURATION EFFET INTO CONSIDERATION" IPEC-TOKYO'83 PP928~937
2. Dr.Jaroslav Tomasek "VELOCITY AND POSITION FEEDBACK IN BRUSGLESS DC SERVO SYSTEMS" MOTOP-CON April 1985 Procee Dings PP61~74
3. Erland K.Persson "MATHEMATICAL MODELLING SIMMLATION OF HIGH PERFORMAME BRUSHLESS DC MOTORS" Proceedings: Fiveth Annual Syposium , 1976 PP W1~W7
4. C.K.Taft "BRUSHLESS MOTOR TORQUE SPEED CURVES" IMCS Urbana, 1985, PP73~89
5. Jun Mochizuki, "A MICROPROCESSOR BASED BRUSHLESS SERVOMOTOR CONTROLLER" LECON,1984, PP1117~1121
6. S.OGASAWARA "A HIGH PERFORMANCE AC SERVO SYSTEM WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR" IECON, 1984, PP1111~1116
7. Erland K.Perssen "BRUSHLESS SERVO SYSTEM EXPANDED TORQUE-SPEED OPERATING RANGE" MOTOR-CON Aprill, 1985, Proceedings, PP96~106