

마이크로프로세서를 이용한 GTO초퍼회로의 直流電動機
速度 制御에 關한 研究
(A Study on the speed control of DC Motor for GTO
chopper circuit using a Microprocessor)

Sung Baek Kim,^{*} Byong Won Ahn and Myong Chul Shin^{**}

^{*} Korea Navy

^{**} Graduate School,

Korea Maritime University, Pusan, Korea

1. 序 論

근간에는 전력전자의 발달로 인하여 직류전동기 속도제어시 초퍼 제어방식을 많이 사용하고 있다. 많은 산업용분야에서 일정한 전압의 DC에서 DC로 변환시키며 이것은 DC-DC컨버터로도 알려져 있다.

한편 전력용 반도체 소자의 발달은 전력변환기와 그 제어회로의 구성에 커다란 변화를 가져왔다. SCR을 사용한 변환기는 턴 오프 기능이 없으므로 전류(轉流)회로를 필요로 하여 장치가 대형화 되고 손실이 증가하며 전류시간이 길기 때문에 고속구동에 한계가 있다는 점등이 결점으로 지적되어 왔다.

그러나 최근에는 GTO, PTR(Power Transistor), SI(Static Ind uction) 사이리스터 등의 자기 소호 소자의 개발 및 대용량화가 활발히 추진되고 있으며 특히 GTO는 게이트 신호만으로 통전(通電)을 ON, OFF시킬 수 있는 특징(特徵)을 가지고 있다. 또 PTR등과는 달리 대전력의 취급도 가능한 고속소자($f_{max} = 10kHz$)이므로 고주파의 초퍼, 인버터 등의 구성이 용이하여 전력변환기의 소자로서 주목되고 있다.

본 논문에서는 직류 서보모터 제어를 위한 변환 회로로 1상한(강압형 초퍼) 회로를 이용하였으며, 출력의 속도 정보값을 증분형 부호기에 의해 감지되어 이 값을 8 BIT 마이크로프로세서에 의해 정보를 처리하도록 구성하였다.

또한 본 논문의 GTO초퍼제어 방식에서는 초핑 주파수가 일정하고 가변 온시간을 제어하는 P.W.M 방식을 채택하였고, 제어계의 구성은 제어량을 검출하여 목표치와 비

교하여 그 편차를 없애는 피드백제어를 이용하였다.

이상의 결과로부터 마이크로프로세서에 의한 제어는 아날로그 제어에 비해 다양한 프로그램으로 시스템을 구성할 수 있으며, 연속적인 산업용 동력계에 마이크로프로세서를 적용함으로써 직류전동기의 효율을 높일 수 있음을 입증하였다.

2. 理論的 考察

2.1 직류전동기의 전달 함수

직류 전동기의 등가회로는 Fig. 2.1과 같이 표현할 수 있다.

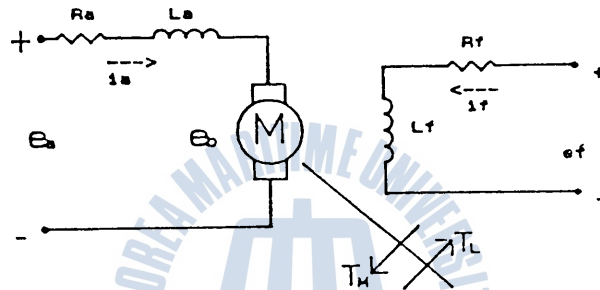


Fig. 2.1 DC motor equivalent circuit

등가회로로부터 직류전동기 제어는 인가전압 $e_a(t)$ 의 형식으로 전기자 단자에 인가된다. 자계가 형성되는 방법에 관계없이 공극자속 $\phi(t)$ 는 일정하게 유지된다고 가정하고 이를 ϕ 로 표기한다. 또한 선형해석을 위하여, 전동기에 의하여 발생된 토크는 공극자속과 전기자 전류에 비례한다고 가정하면 식(1)이 성립된다.

$$T_m(t) = K_m \phi i_a(t) = K_t i_a(t) \text{-----(1)}$$

직류 전동기의 전압 방정식, 회전력, 역기전력, 토크 방정식을 Laplace변환하면 다음과 같다.

$$E_a(s) = E_b(s) + R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) \text{-----(2)}$$

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \text{-----(3)}$$

$$E_b(s) = K_b N(s) \text{-----(4)}$$

$$T_m(s) = T_L(s) + B N(s) + J S N(s) \text{-----(5)}$$

따라서, 윗식을 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$I_a(s) = \frac{E_a(s) - E_b(s)}{R_a + L_a s} = \frac{[E_a(s) - E_b(s)]/R_a}{1 + \tau_e s} \quad \text{-----(6)}$$

$$N(s) = \frac{T_m(s) - T_L(s)}{B + J s} = \frac{[T_m(s) - T_L(s)]/B}{1 + \tau_m s} \quad \text{-----(7)}$$

여기서 $\tau_e = L_a/R_a$: 전기 시정수 , $\tau_m = J/B$: 기계 시정수

Fig.2.2, Fig.2.3은 이들 관계식에 대한 신호흐름선도 및 블럭선도를 나타내고 있다.

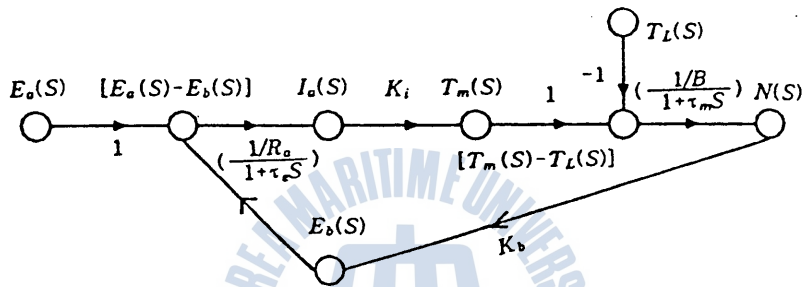


Fig. 2.2 Signal flow graph of DC motor

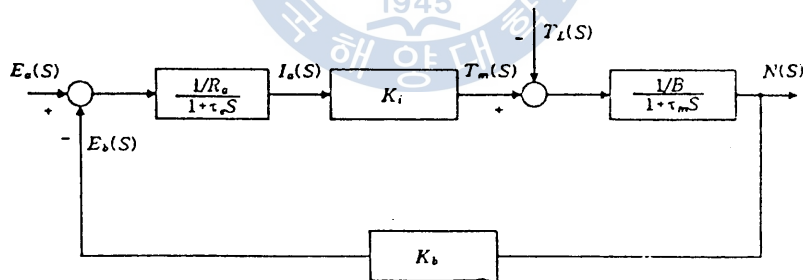


Fig. 2.3 Complete transfer function of a motor

위의 전체 전동기의 전달함수는 다음과 같다.

$$N(s) = \frac{K_i}{K_b K_i + R_a B (1 + \tau_e s) (1 + \tau_m s)} E_a(s)$$

$$-\frac{R_a(1+\tau_e S)}{K_b K_i + R_a B(1+\tau_e S)(1+\tau_m S)} T_L(s) \text{-----}(8)$$

여기서 τ_e 및 τ_m 은 전기 회로의 시정수 및 전동기 시정수으로써 실제 전동기계에서는 $\tau_e \ll \tau_m$ 의 관계가 항상 성립하기 때문에, 전기자 인덕턴스 L_a 를 무시함으로써 2차계통을 1차계통으로 근사화 시키면, 전동기의 속도 관계식은 다음과 같이 간략화 할 수 있다.

$$N(s) = \frac{K_1}{1+\tau_{em} S} E_a(s) - \frac{K_2}{1+\tau_{em} S} T_L(s) \text{-----}(9)$$

2.3 직류전동기, 초퍼 및 검출기의 모델링

본 연구에서는 무부하 상태로 고찰하였다. 따라서, 식 (9)의 부하 토크 T_L 항을 0으로 하였다. 초퍼 회로의 초핑 주파수 대역은 전동기 주파수 대역보다 훨씬 높기때문에 초퍼회로의 모델링을 간략화하기 위하여 출력 전압의 평균치를 이용할 수 있다.

따라서, 초퍼회로는 상수 이득 K_c 를 가진 영차 유지 요소(Zero Order Holder)로써 구성시킬 수 있게 된다. 본 연구에서 적용된 회로는 8비트 2진수에 의해 제어 가능하도록 설계하였으며 이득 $K_c = V_0 / 256$ 으로 주어졌다. 여기서 V_0 의 값은 초퍼 회로의 공급 전압이다.

전동기의 속도 정보는 속도 샘플링 주기 T_w 동안 펄스의 갯수를 계수함으로써 얻을 수 있다. 즉 i 번째 샘플링 주기에서 속도를 나타내는 2진수 $N_w(i)$ 는 다음과 같다.

$$N_w(i) = \frac{M}{2\pi} [\theta(i) - \theta(i-1)] \text{-----}(10)$$

윗식을 Z - 변환하여 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{N_w(Z)}{\theta(Z)} = \frac{M}{2\pi} (1 - Z^{-1}) \text{-----}(11)$$

이상에서 디지털 제어계의 전 구성은 Fig.2.4와 같이 구성시킬 수 있다.

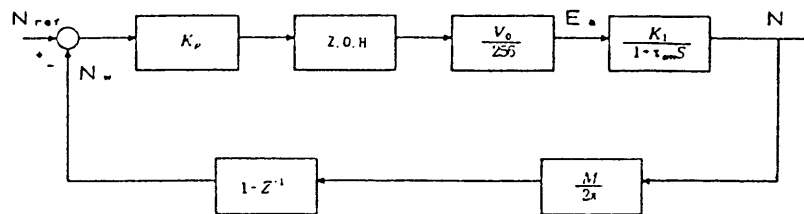


Fig.2.4 Block diagram of digital control System

2.4 비례 제어기의 이산화

본 연구에서 적용한 제어기는 비례제어를 적용하였는데 이 요소들을 마이크로 프로세서로 처리하려면 이산화 과정이 필요하다. 먼저 비례 제어기의 기준 입력 N_{ref} 와 변환신호 $N_w(t)$ 와 제어기 출력 $N(t)$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$N(t) = K_p[N_{ref} - N_w(t)] \text{-----(12)}$$

이 값은 디지털 제어 방식에 적용하기 위하여는 이산화 과정이 필요하기 때문에 다음과 같이 할 수 있다.

$$N(KT) = K_p[N_{ref} - N_w(KT)] \text{-----(13)}$$

여기서, $K = 0, 1, 2 \dots$, $T =$ 샘플링 주기

본 연구에서 속도 제어 요소로서 윗식의 값이 변환기 출력값을 결정하는 듀티값을 계산하기 위해서는 다음과 같은 과정이 필요로 하게된다.

$$D[(K+1)T] = \frac{N[(K+1)T]}{N_0} \times 100 \text{-----(14)}$$

여기서 N_0 는 듀티가 100%일때의 전동기 속도이다.

3. 制御 시스템 設計

3.1 전력 변환 회로

본 연구에서는 선형성이 좋은 직류 전동기의 속도 제어를 하기 위해서 마이크로프로세서 Main Clock 4MHZ를 CTC, 8253 소자를 여러모드로 조합하여 분주시킨 펄스를 소프트웨어적으로 듀티폭을 가변시켜 GTO 게이트 펄스 증폭회로에서 증폭시켜 초퍼부인 GTO를 온, 오프시켜 전기자 양단의 전압을 가변하는 방식을 사용하고 있는데, Fig.3.1은 본 실험에서 직류 전동기를 구동하기 위하여 1상한 GTO 초퍼회로를 나타내고 있다.

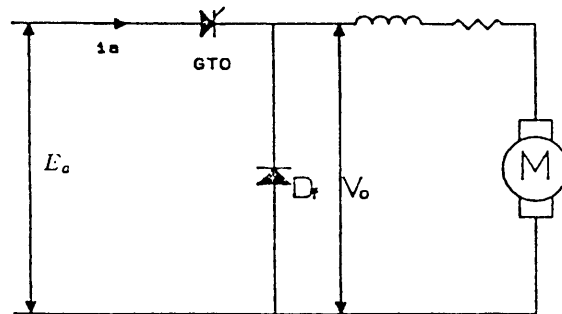


Fig.3.1 Power conversion circuit

3.2 제어 시스템의 구성도

Fig.3.2는 본 연구에서 사용한 제어 시스템 구성도를 나타내고 있다. 점선안의 부분이 디지털 처리 부분이며 매 샘플링 시간동안 증분형 부호기(Incremental Encoder)의 값을 계수하고 그 값을 속도명령값과 비교하여 그 오차를 비례 제어함으로써 GTO 게이트의 펄스폭을 제어 조정한다. 따라서 평균전압이 제어되어 전동기를 정속운전할 수 있다. GTO 게이트 펄스 증폭회로는 OPTO Isolator 4N28소자를 사용하여 전력부와 마이크로 프로세서부를 분리하여 마이크로 프로세서부를 보호한다.

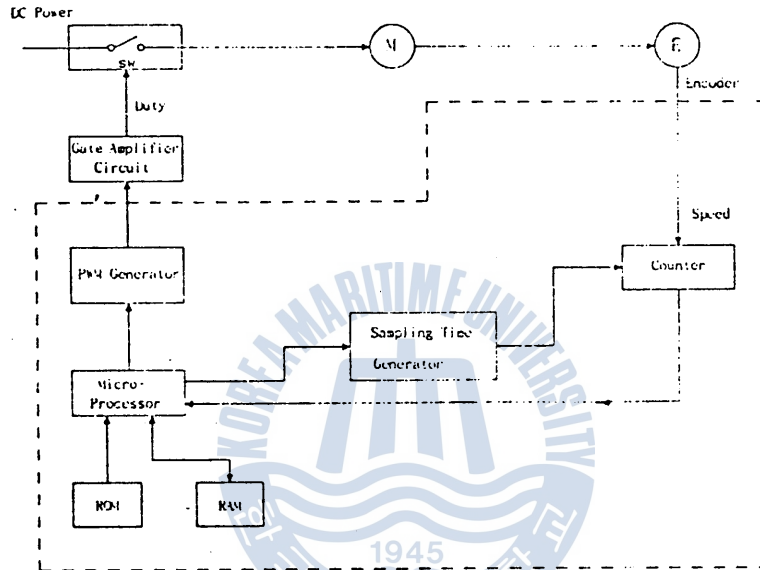


Fig.3.2 Control configuration

1) CPU

중앙연산처리장치는 직류전동기로 부터 변환되는 속도 정보에 따라 적절한 제어값을 계산하는 회로로 8BIT Microprocessor를 사용하였으며,메모리는 8K 바이트의 ROM과 RAM으로 시스템을 구성하였다.

2) P.W.M 발생

본 실험에서는 Intel사의 8253소자와 Zilog사의 CTC소자를 여러모드로 조합하여 4MHZ의 Main clock을 분주하여 8253소자의 mode3(구형파 발생기)를 이용하여 PWM 초퍼주파수인 473HZ를 만들었다.

그리고, 초퍼 회로출력 듀티(Duty)량의 가변은 모드 1 (Programmable one-shot)을 473HZ로 트리거시키며, Encoder 에서 입력과 목표치를 마이크로 프로세서의 Software로 처리하여 제어값을 8253소자의 계수 레지스터에 세트하고, 세트되어 있는 숫자만큼

을 역계수(Down Counter)하여 PWM을 발생시켰다.

3) 샘플링시간 발생기(Sampling Time Generator)

정확한 Sampling Time을 발생시키기 위하여 본 연구에서는 8253소자를 사용하였으며, 속도검출을 위하여 CPU는 wait상태에있는 8253소자의 Sampling Time마다 인터럽트를 발생시키고 CPU는 속도검출과 비례제어를 하여 듀티값을 산출해 놓고 wait 상태로 대기한다.

4) 증분형 부호기(Incremental Encoder)

속도검출을 위하여 증분형 부호기를 사용하였으며, 그 펄스를 계수하기 위하여 8253 소자를 사용하였다. CTC에 의해 발생된 인터럽트(Interrupt)에 의해 CPU나 8253소자의 계수값을 읽고 다음 식으로 RPM을 산출하게 된다.

$$N = \frac{60 \times N_p}{T \times M} (rpm) \quad \text{----- (15)}$$

N : 전동기 속도

M : 증분형 부호기 한바퀴 회전시 나오는 펄스 발생수

N_p : 증분형 부호기 펄스갯수

T : 샘플링 시간 (SEC)

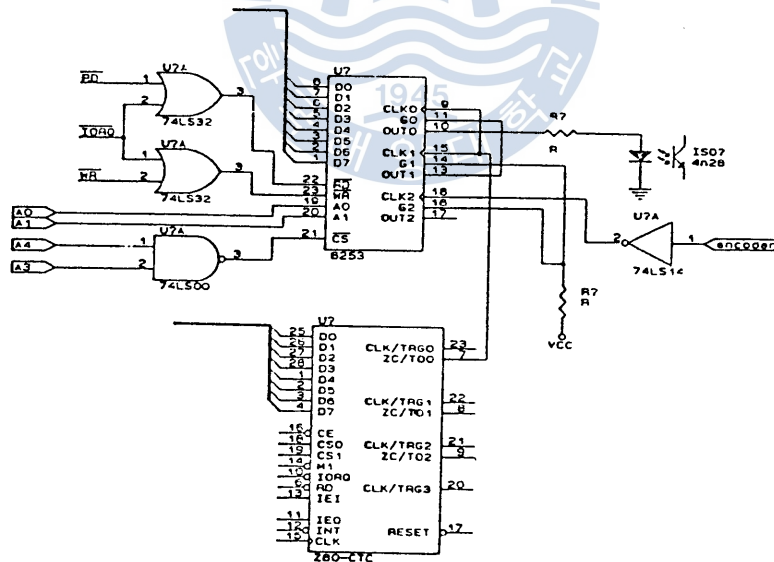


Fig.3.3 P.W.M and Sampling time generating circuit

5) 게이트 펄스중폭회로

8253소자 카운터 0에서 출력된 제어신호는 GTO를 확실하게 동작시키기 위하여 게이트 입력파형의 상승과 하강을 될 수 있는 한 급준하게 되도록 구성하였으며, 제어회로의 입력펄스의 상승에 동기시켜 온 펄스를 발생시키고 하강에 동기시켜서 오프펄스를 발생시킨다.

3.3 Software 구성 및 속도제어 알고리즘

제어 알고리즘은 Fig.3.4 의 순서도와 같다.

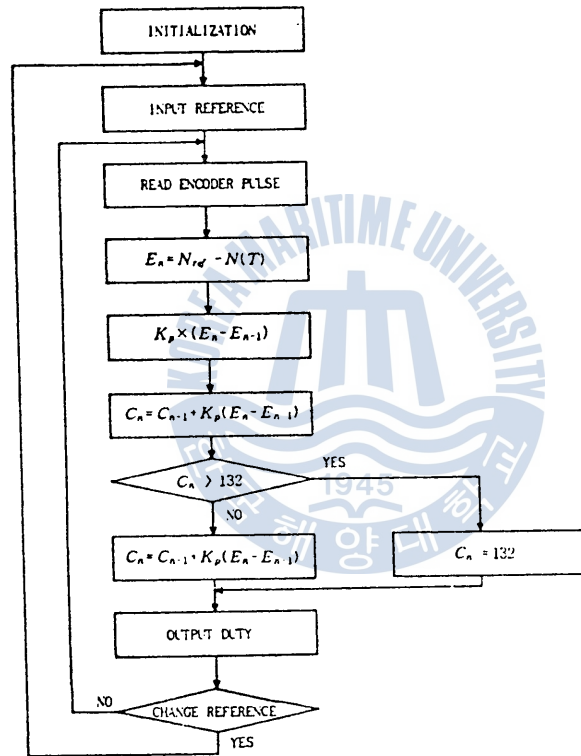


Fig.3.4 Speed control algorithm

마이크로프로세서의 각 소자들을 초기값으로 설정한 다음 요구하는 속도값을 설정해 주게 되면 구동명령을 통하여 전동기가 구동한다. 일정한 샘플링 시간내에서 중분형 부호기로 부터 검출되는 실제속도와 요구하는 값을 비교하여 오차를 계산하여 아래와 같이 전개된 비례제어식에 의하여 요구하는 속도값을 찾아가도록 수정된 듀티(Duty)값이 계산된다.

계산되어 나온 듀티값이 100% (132)이상이 되면된다. 최대출력인 100%의 듀티값이 출력 되며 그 이하인 경우는 실제 계산되어 나온 듀티값이 출력되어 전동기의 전기자 전압을 가변시켜 요구하는 속도값으로 따라가게 된다.

이때 만약 요구하는 속도값이 새로이 주어진다면 증분형 부호기의 속도검출로 부터의 과정을 반복해서 요구하는 속도값을 찾아간다.

실제속도 $N(T)$ 는 16비트를 사용하였으며 오차 $e(T)$ 는 16비트중 최상위 비트를 부호비트로 사용하였다.

비례제어 구성은 다음 식과 같다.

$$C_n = K_p E_n$$

$$C_{n-1} = K_p E_{n-1}$$

$$C_n = C_{n-1} + K_p (E_n - E_{n-1}) \text{ -----(16)}$$

4. 實驗 및 考察

본 연구에서는 직류전동기 서어보 시스템을 구성하여 실험을 하였으며, 실험장치는 Fig.4.1에 주어져 있고 실험장치의 주요구성은 직류전동기, 전원 단속장치인 GTO 초퍼 회로, Z-80 마이크로세서와 X-Y Plotter 이에 따른 인터페이스 회로로 구성되어 있다.

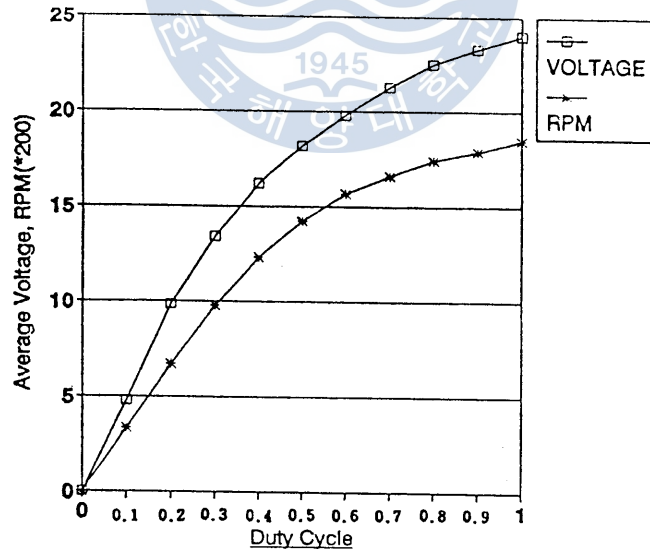


Fig 4.1 Measured output voltage and speed vs. duty cycle α

Fig.4.1은 마이크로프로세서 제어 프로그램상에서 듀티비의 입력치를 바꾸어 주었을 때 실험측정치에 의한 듀티비와 평균전압, 회전수와의 관계를 그래프로 나타낸것이다. 이것을 보면 듀티비의 변화에 대한 평균전압과 회전수가 거의 직선적으로 변화하는 것을 알수있고 본 실험은 듀티비를 0-1 사이에서 측정하였다.

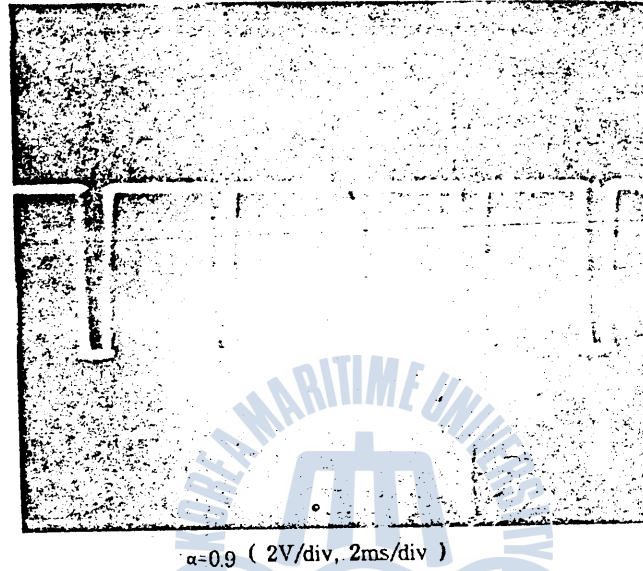


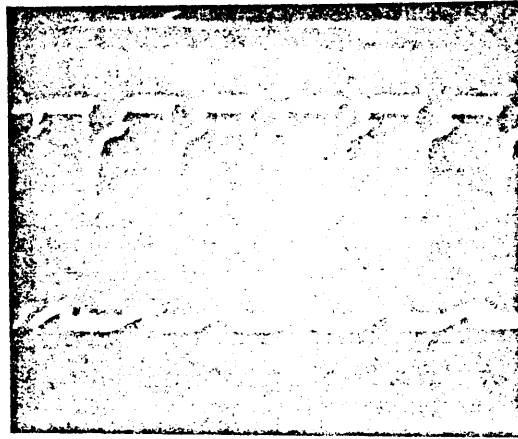
Fig 4.2 Waveforms of input gate amplifying circuit

Fig.4.2는 마이크로프로세서의 Main clock 4MHZ를 인터페이스회로, CTC, 8253소자를 여러 모드로 조합하여 분주한 펄스가 8253 카운터0 단자에서 포토커플러 4N28소자로 입력되는 펄스 파형을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 제어프로그램의 입력 목표값을 변화 시켰을때 온, 오프 되는 펄스 파형($\alpha=0.7, 0.9$)이 양호하게 변화되는 것을 알 수 있다. 이 펄스는 GTO 게이트 증폭회로에 입력되어 GTO 소자를 턴 온, 턴 오프 시킨다.

Fig.4.3은 듀티비 α 를 변화($\alpha=0.7, 0.9$)했을 때 전기자 전압, 전류 파형을 나타낸다. 전기자 전류는 듀티비가 증가 할수록 완만하게 흐른다.

Fig.4.4는 본 실험에서 X-Y Plotter를 연결하여 속도의 비례이득($k_p=7,9$)을 각각 변화했을때 단위속도 입력에 대한 응답특성 속도(rpm), 전기자 전압, 전류를 나타내고 있다.

속도제어시 과도응답 특성은 비례이득값의 변화에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 본 연



$\alpha=0.9$ (10/div,1ms/div)

Fig 4.3 Waveforms of output voltage of current, at each α

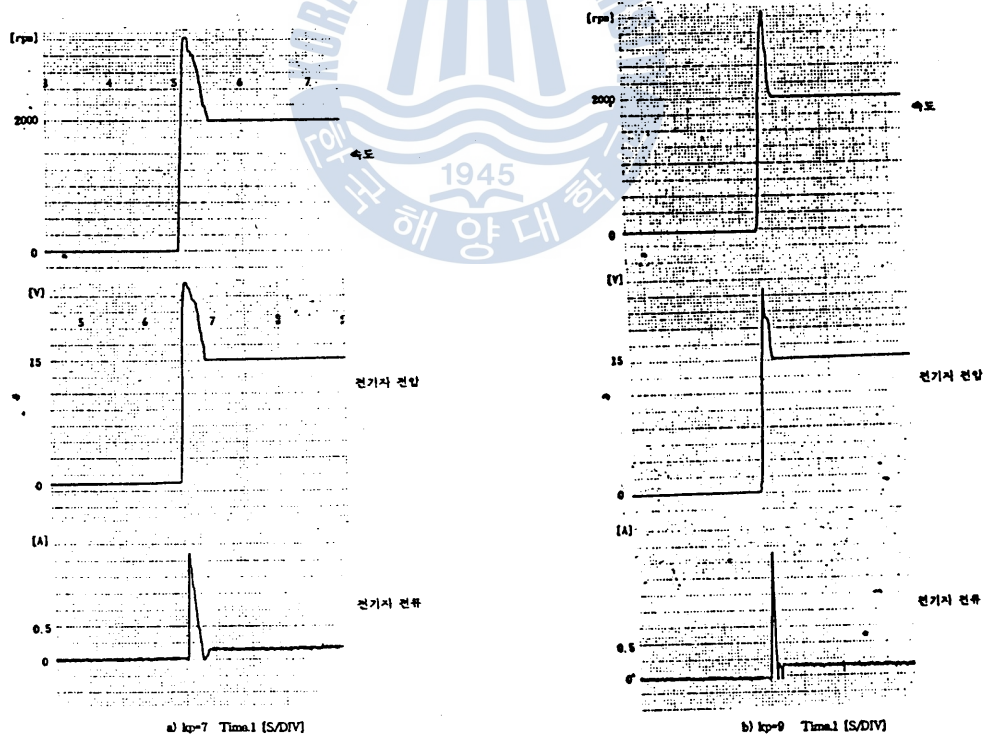


Fig.4.4 Speed response characteristics to gain change ($K_p: 7,9$) Fig.4.4 Speed response characteristics to gain change ($K_p: 7,9$)

구에서는 일반적으로 많이 쓰이는 정수(7,9)를 이용하여 실험하였다. 여기서 속도기준량은 2000 rpm이며, 보상회로의 비례이득을 9로 한 경우 과도응답시간은 약 400ms로 양호하게 나타남을 알 수 있었다.

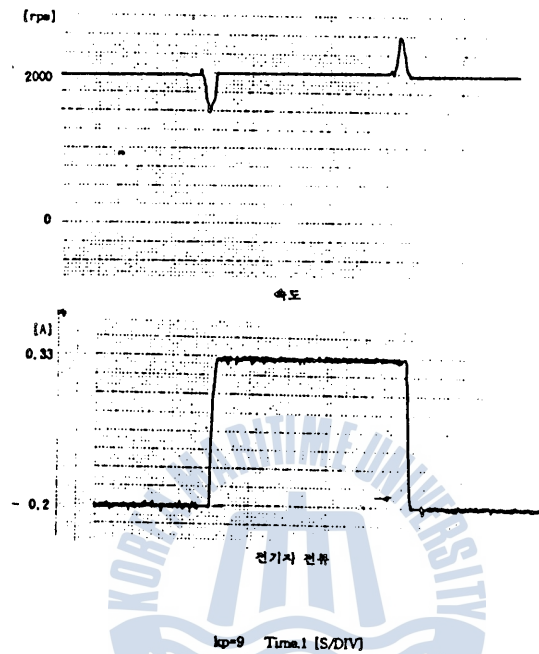


Fig 4.5 Constant speed response to unit torque change

Fig.4.5는 전동기의 정속도 운전시 단위 토크의 변화에 따른 전류와 속도특성을 나타내고 있다. 여기서는 속도 2000 rpm에서 일정부하 토크를 가한 순간 전기자 전류에는 약간의 리플이 포함되어 있음을 알 수 있었다. 이는 기계적인 요소로서 이상적인 단위토크 입력을 가할 수 없었다. 그러나 과도시 응답특성은 매우 양호함을 알 수 있었고 정상상태에서의 케환특성 역시 매우 양호함을 알 수 있었다.

Fig.4.6은 전동기의 정속도 운전시 전원전압 변동(4V)에 따른 속도 응답특성을 나타내고 있다. 이때 과도응답에서 약간의 진동이 있는 후 다시 목적된 속도로 찾아감을 알 수 있었다.

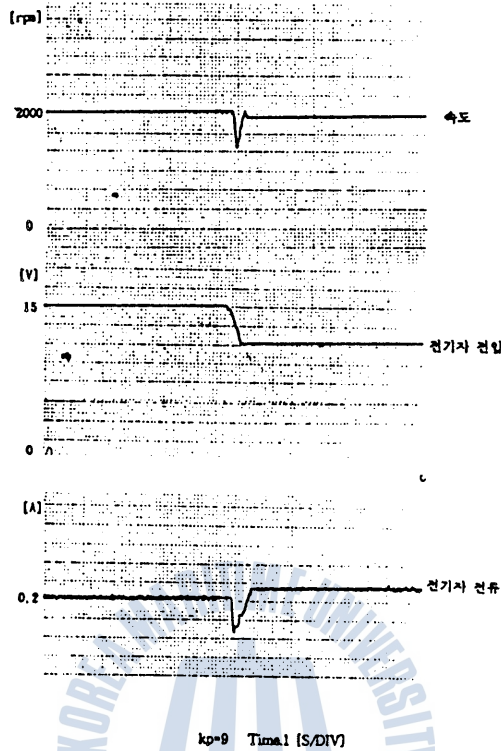


Fig 4.6 Constant speed response characteristics to electrical source change

5. 結 論

본 연구에서는 GTO 초퍼회로의 제어회로를 설계하여 Z-80 마이크로 프로세서로 직류전동기 속도제어를 할 수 있게 하였고, 종전의 아날로그 제어방식 대신에 점차로 전 산업분야로 확산되어 가고 있는 디지털 제어방식을 채택하여 비례제어를 실행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 초퍼의 제어회로는 실험에서 구성한 디지털 비례제어기의 비례이득 계수들을 제어 프로그램의 입력 데이터로 처리하였기 때문에 간단히 계수들의 값을 변화시킬 수 있어 어떤 종류의 직류전동기에 대하여도 원하는 속도특성을 갖는 제어계를 설계할 수 있었다.

2) 제한 제어시 출력의 정보를 감지 하는데 있어서는 타코메타와 같은 속도검출 요

소가 필요없고 또한 A/D 및 D/A와 같은 신호변환장치도 필요없이 증분형 부호기만으로 속도검출이 가능하였다. 이 결과 전시스템의 크기를 줄일 수 있었다.

3) 초퍼의 주회로에 GTO를 사용한 결과 SCR을 사용한 초퍼와 같은 동작을 하고 듀티비 α 의 변화에 따라 출력전압이 선형적으로 변화됨을 확인 하였다.

본 연구에서는 8비트 마이크로 프로세서를 사용한 결과 K_p 의 값을 증가시키면 시스템의 오차를 감소시키는데 도움이 되지만 비례 제어만을 써서 오차를 줄일 수 있는 데는 한계가 있음을 알 수 있었고 여러가지 물리적인 제한으로 인하여 좀더 개선된 응답 특성을 볼 수 없었다. 또한 최적한 K_p 값을 이론적으로 유도할 수는 있으나, 전동기의 제정수등의 정확한 값을 얻을 수 없는 상황에서는 몇 종류의 실험을 통해 좀더 엄밀한 $K_p(7,9)$ 값을 선정해서 실험을 행하였고, 본논문에서 차후의 연구과제로는 적용모터의 제정수들을 측정하고 제어이론을 적용하여 최적조건에서 최적상태를 구한 후 정교한 속도제어를 할 수 있으리라 생각되며, 차후 여러가지 개선된 응답특성을 보기 위해서는 비례제어뿐 아니라 적분 및 미분제어를 함으로써 양호한 응답특성을 볼 수 있으리라 믿는다.

參考文獻

1. 坪島茂彦, 中村修照, "電動機 技術完成", 一信 技術서적, 編輯室譯, 日新書籍, 1976
2. S. B. Dewan, A. Stranghen, "Power semiconductor circuits", John wily & sons, Inc., 1975
3. 倉田衛. 竹內南編, "GTO의 原理와 應用", Modern Technology series, 電氣書院
4. J. B. Plant, "Microprocessor control of position or speed of an SCR DC motor drive" IEEE Trans. Vol. IECI-27, No.3, August 1980, pp. 228-234
5. Philippe Mota, Jean pierre Rogon, "Digital position Servo system : A state variable feedback system", IEEE, Trans. Vol. IA-30, No. 6, Nov/DEC, 1984, pp. 1473-1481
6. Mita Ray and Asit k. Datta, "Optimum design of commutation circuit in a thyristor chopper for DC motor control" IEEE Trans. Vol. IECI-23, No.2, May 1976, pp.129-132
7. G. K. Dubey and William Shepherd, "Transient analysis of chopper fed DC series motor" IEEE Trans. Vol. IECI-28, May 1981, pp. 146-158
8. 電氣學會 半導體 電力變換方式 調査 專門委員會編, "半導體 電力變換回路", 電氣學會, 1990

9. Rodney Zaks, "programming the Z-80", New York, Sybex, 1982
10. James W. Coffron, "Z80 Applications", Sybex, Inc, 1983
11. 구동현, "AT 하드웨어 특성과活用", 크라운출판사, 1991
12. 조순복, 김광희, "8086/88 마이크로프로세서와 그 주변소자들", 집문당, 1992
13. Benjamin C. Kuo, "自動制御", 청문각, 1990
14. 박정일, 이강용, "마이크로컴퓨터 인터페이스", 대영사, 1990
15. 윤병도, 정재륜 공저, "최신전력전자공학", 김영출판사, 1987.



