

FA용 직류전동기 제어기 설계

Design of a DC Motor Controller for FA

오진석*
Jin-Suck Oh

ABSTRACT

In this paper, a speed controller using a controller is implemented and applied to a DC motor for FA (Factory Automation).

The objective of this paper treats the analytical and experimental studies on the improvement of control circuit and control method using a SCR-LEONARD circuit for the speed control of DC motor.

This system is concerned with stabilization of single input or single output systems, so the plant (SCR-LEONARD+DC motor) is simplified to the first order system.

The parameters for the PID controller are obtained by the transient-response tuning method, and this control scheme has a backward-shift operator.

The control algorithms (Chopper+transient response tuning) is used to check the performance of PID Controller through Computer simulations and experiments.

The good experiment results show that the direct control of the DC motor applied to industrial field such as factory automation.

기 호 설 명

<p>E_c : Motor Back EMF</p> <p>f : Frequency</p> <p>F : Continuous system Matrix</p> <p>G : Continuous Control Input Matrix</p>	<p>H : Continuous Output Matrix</p> <p>I_a : Motor Current</p> <p>I_f : Field Current</p> <p>J : Continuous Plant Direct Transmission Matrix</p> <p>L : Integer ($L > 0$)</p> <p>N : Motor Speed</p>
---	--

* 양산전문대학 산업안전과

- Ra : Motor Armature Circuit Resistance
- T : Time Period
- T_{off} : Off-Time of a SCR
- T_{on} : On-Time of a SCR
- V : Supply Voltage
- X : State
- Y : Output Measurement
- α : Duty Ratio of a SCR
- ϕ : Flux Per Pole
- λ : Time Delay
- Γ : Discrete Control Input Matrix

1. 서 론

반도체 기술의 눈부신 발달과 더불어 각종 산업용기기의 사용 분야에 컴퓨터 사용이 매우 넓어지고 있다. 그러므로 컴퓨터로 수행 가능한 제어 알고리즘을 도출하여 프로그램화하여 산업 현장에 적용하면 손쉬운 응용이 가능하다. 또한, 장래에 요구될 다양한 제어 요구 조건에 대하여 융통성이 확보된다.

실제로 산업현장의 각종 기기들은 전동기를 이용하여 구동력을 얻고 있는 경우가 많다. 전동기는 여러 종류가 있지만, 대부분 속도-회전력의 제어특성이 요구된다.

일반적으로 직류전동기의 속도제어법에는 계자 제어법, 전자기저항제어법, 전압제어법 등이 있으며 이 중에서 전압제어법은 다른 방법에 비하여 광범위한 속도제어가 가능한 장점이 있다.

본 연구에서는 SCR-LEONARD 장치의 제어기법을 CHOPPER 방식으로 하여 직류전동기의 속도를 제어하였다.

이 과정에서 PULSE 발생에 필요한 TRC(Time Ratio Control)는 기본회로의 ON-OFF를 디지털화한 CHOPPER 기법과 컴퓨터로 대체하여 속도를 제어한 결과 Digital 제어방식으로 program을 개발하여 임의의 전동기의 속도 및 회전력제어를 수행해 본 결과 정확도가 우수하였고, 반도체기술의 발전과 더불어 정확도가 더욱 향상 될 것이다.

이러한 제어기법은 간단한 프로그램의 개선으로 다양한 요구 특성을 쉽게 만족시킬 수 있다. 또한, 교류전동기의 제어기로 많이 활용되는 AVI(Adjustable Voltage Inverter), CSI(Current

Source Inverter) 및 PWMI(Pulse Width Modulated Inverter) 등의 제어기법으로도 응용이 가능하다.

그리고 PID제어기는 ZIEGLER-NICHOLS가 제시한 과도응답방법(Transient-Response Method)을 이용하여 제어기 계수용 패러미터(Kp, Ti, TD)을 구하였다.

설계된 제어기와 CHOPPER 제어기법으로 직류전동기의 속도제어 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다.

그 결과 양호한 속도제어 특성을 얻었다. 또한, 실용화를 위한 몇가지 보완할 분야도 파악되었다.

이러한 제반분야가 보완되면 자동화를 위한 산업용기기에 응용이 가능하다고 본다.

2. 이론적 고찰

2.1 속도제어의 개요

직류전동기의 여자방식에 관계없이 공통인 기본식을 유도한다.

전원 단자전압이 일정하다면 부하의 변동에 따라 회전속도, 토크, 전기자전류 및 출력이 변한다¹⁾.

Fig. 1 에서

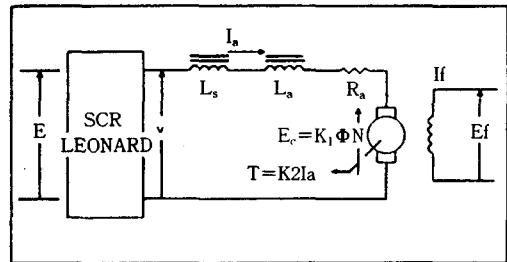


Fig. 1 SCR₁-LEONARD circuit for DC motor speed control

역기전력(Ec), 단자전압(V), 회전속도(N)및 토크의 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_c &= K_1 \phi N \dots\dots\dots (1) \\
 V &= E_c + I_a R_a \dots\dots\dots (2) \\
 T &= K_2 \phi I_a \dots\dots\dots (3)
 \end{aligned}$$

여기서 회전속도(N)은 다음과 같이 표현할 수 있

다.

$$N = Ec/K1\phi = k1(V - IaRa) / \phi \text{ (RPM)} \dots\dots (4)$$

(단 $k1 = 1/K1$)

위식 (4)에서 회전속도는 역기전력(Ec)에 비례하고 1극 자속수 ϕ 에 반비례한다.

식 (4)를 토오크와의 관계식으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$N = V/K1\phi - TRa/K1K2\phi^2 \dots\dots\dots (5)$$

식 (5)에서 토오크(T)가 일정하면 회전속도는 단자전압(V)에 의해 제어가 가능하다^{2,3,4}.

2.2 정지 와드-레오나드 방식의 기본회로

와드-레오나드(WARD-LEONARD)의 기본회로는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 G의 계자권선 F2는 직류모선에 접속되어 있고 그 계자전류는 $Rf2$ 로 조정된다. 또한, 개폐기 S에 의하여 계자전류의 방향을 바꿀 수도 있게 되어 있다. 따라서, M의 전기자에 공급되는 발전기(G)의 단자전압은 정 역방향으로 넓은 범위에 걸쳐 속도와 회전방향의 조정이 가능하다.

오늘날에는 직류전동기의 단자전압 및 계자전류의 변화를 Fig. 3과 같이 SCR(SILICON CONTROLLED RECTIFIER, 일명 : THYRISTOR)을 이용하여 직류를 위상제어에 의하여 조정하고 단자전압이나 계자전류의 평균치를 변화시켜 속도를 제어하는 정지 와드-레오나드 시스템(Static WARD-LEONARD system)을 이용하는 경향이 있다.

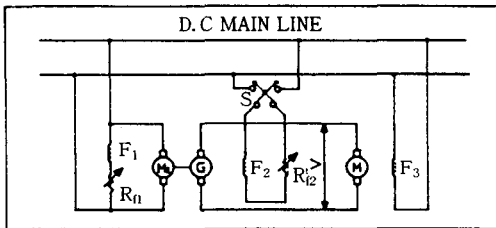


Fig. 2 Basic circuit of WARD-LEONARD

SCR을 이용하는 정지 와드-레오나드방식은 종래의 와드-레오나드방식에 비하여 경제성, 보수성, 신뢰성, 소음등의 여러가지 측면에서 우수하다.

산업기계의 자동화에 따라 직류전동기 및 SCR

을 이용한 와드-레오나드장치의 필요성이 많이 높아졌다.

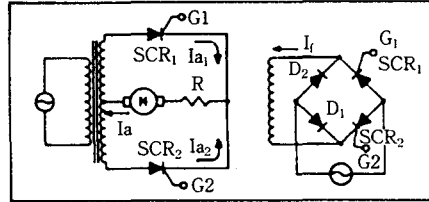


Fig. 3 Static WARD-LEONARD circuit with SCR

최근에는 교류전동기 및 스텝전동기를 이용하는 경향도 있지만, 아직도 기동성등이 요구되는 많은 분야에서 직류전동기가 이용되고 있다.

Fig. 4는 실험용 회로이며 본 연구에서는 게이트 제어회로부 및 제어알고리즘에 대한 연구에 초점을 맞추고자 한다.

실제 산업현장에 사용되기 위해서는 과전류 발생시에 자동차단하는 NFB(No fuse Breaker), 부하측 과전류에 대해 출력전류를 제한하는 전류제한장치(I-Limit), 전류제한장치 동작이후 과전류가 장시간 지속시 동작하는 OCR(Over Current Relay) 및 입력전원의 이상전압 (Surge Voltage) 발생시 SCR을 보호하기 위한 SA(Surge Absorber)에 대한 연구도 함께 수행해야 한다^{2,5,6,7}.

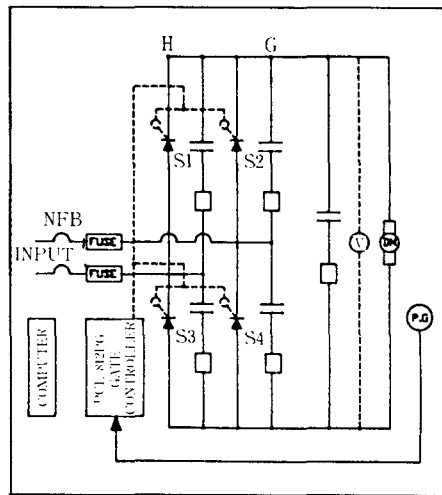


Fig. 4 Test circuit of SCR-LEONARD

3. 제어기 설계

3.1 개요

정 토오크형은 영에서 정격회전수까지 전기자전압에 의해 속도를 제어한다. 부하가 일정하다는 조건하에서 발생 토오크가 일정하다는 것이다.

직류전동기의 계자전류를 조정함에 의해 속도를 제어할 수 있다.

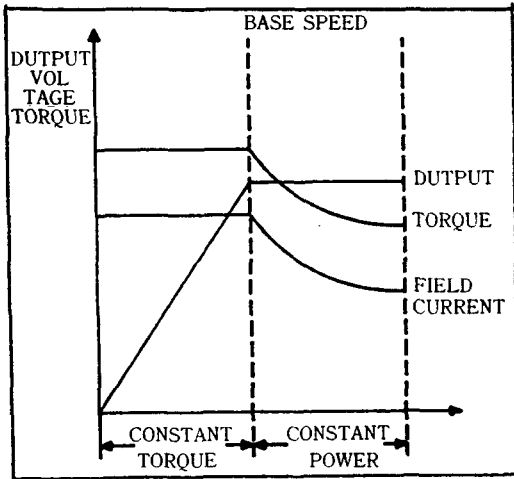


Fig. 5 Characteristic curves of DC motor

Fig. 5는 직류전동기에 있어서 출력, 전압, 토오크의 특성을 나타내고 있다.

계자제어는 제한조건이 많으므로 일반적으로 가변전압제어법을 조합해서 사용한다.

본 연구에서는 가변전압을 만들기 위하여 초퍼(Chopper)기법을 이용하였다.

Fig. 4의 정지 와드-레오나드 장치(SCR-레오나드 장치)에 적용한 전압제어기법은 CHOPPER기법으로 4개의 SCR(S1, S2, S3, S4)의 도통순서 및 TRC를 조정하여 직류전동기의 속도를 제어한다.

이러한 SCR의 TRC는 α (T_{on}/T)의 비로서 조정한다.

즉, 직류전동기의 속도제어는 SCR-레오나드 장치의 평균 직류출력전압에 의해서 제어가 되므로 정해진 주기동안에 T_{on} 의 값을 변화시키면 α 의 비가 변함으로서 속도조정이 되게 하였다. 여

기서 T 및 T_{on} 의 값은 입·출력 제어프로그램(어셈블러)에 의하여 결정되어 진다.

Fig. 6은 α 비에 따른 전기자전류의 연속 및 불연속의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.

연속 불연속의 경계는 α 의 값에 따라 변한다는 것을 보여주고 있다.

만약 전기자전류가 영이 되는 t 를 구하여 이것이 주기(T)보다 적으면 불연속이고 같거나 크면 연속이다^{4,5)}

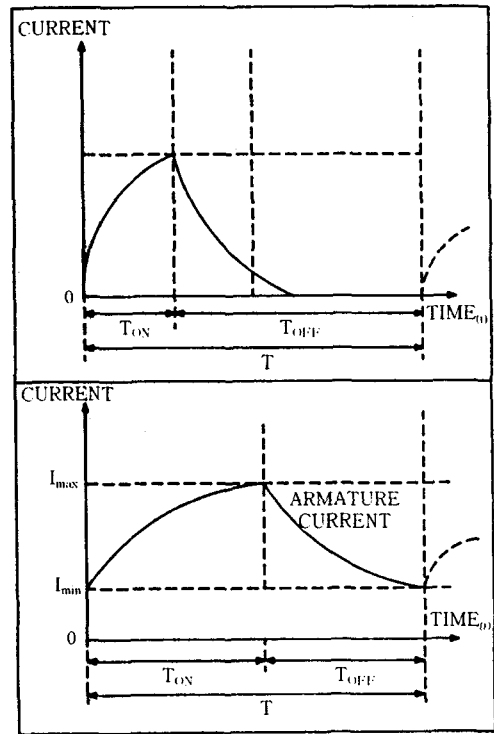


Fig. 6 Continuous and discontinuous curves of DC motor current

본 연구에서는 직류전동기의 속도제어를 FEED BACK 제어개념을 적용하여 산업자동화에 맞는 제어알고리즘을 도출하고자 한다.

SCR-레오나드장치에 의해 직류전동기를 제어할 경우 회전속도가 제어량이 되고 직류전동기가 제어대상이다.

속도제어는 SCR-레오나드장치에 지령되는 주파수와 P.G에 의해 FEED BACK 되는 신호와 비

교하여 정속도 제어하는 것이다.

P.G는 직류전동기 회전에 의해 발생하는 펄스를 제어기의 BINARY COUNTER에 전달하는 것이다.

3.2 시스템 전달함수

전체 시스템의 블록선도는 Fig. 7과 같다.

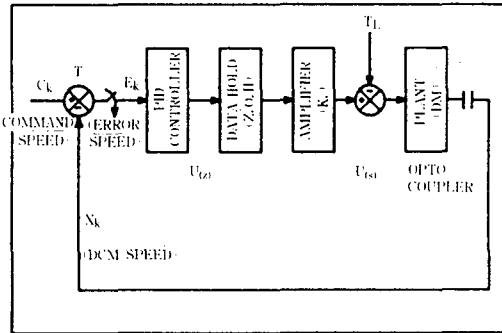


Fig. 7 Block diagram of control system

본 연구에서는 제어기의 알고리즘을 실험적인 방법으로 구한 계수를 이용하였다.

Fig. 7의 PID제어기는 ZIEGLER-NICHOLS가 제시한 과도응답방법(Transient-Response Method)을 이용하여 계수(Kp, Ki, Kd)구하여 제어기를 설계하였다.

또한 데이터 홀더(Data Holder)는 주어진 시간 동안 임펄스신호에 함축된 원신호의 진폭을 유지한다는 개념을 가진 Z.O.H(ZERO-ORDER-HOLD)를 이용하였으며, PLANT(SCR-레오나드장치+ 직류전동기)제어기의 응답특성은 스텝입력에 대해 곡선으로 나타나고, 이 곡선은 고차계의 특성을 나타내지만 PLANT의 입·출력 형태는 시간지연을 포함한 1차계로 간략화 하였다.

3.3 제어기 알고리즘

PID제어기의 전달함수는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_t = K_p + K_i/S + K_dS \dots\dots\dots (6)$$

$$= K_p(1 + 1/T_i S + T_d S)$$

샘플링 주기가 짧은 경우 이산화 시키면 식 (7)과 같다.

$$U(KT) = K_p e(KT) + K_i T \sum_{i=1}^k e(i-1) + K_d (e(KT) - e((K-1)T))/T \dots\dots\dots (7)$$

(T : Sampling Time k : 0, 1, 2, ...)

컴퓨터로 효율적으로 처리하기 위하여 순환 알고리즘으로 바꾸면 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(KT) - U((K-1)T) = A e(KT) + B e((K-1)T) + C e((K-2)T) \dots\dots\dots (8)$$

(A = Kp + (KpTd)/T, B = KpT/Ti - Kp - 2KpTd/T, C = KpTd/T)

식 (8)을 Z변환 하여 전달함수를 구하면 식 (9)와 같은 디지털 PID제어기의 전달함수를 구할 수 있다.

$$U(Z)/E(Z) = K_p + K_i T / (Z-1) + K_d (Z-1) / T Z \dots\dots\dots (9)$$

식 (9)에서 Z⁻¹은 축적기를 나타내고 이것은 T 초 동안 저장하는 OSD(ONE-SAMPLE-DELAY) 개념을 가지고 있다^(10,11)

3.4 직류전동기 및 SCR-레오나드 장치의 모델링

일반적으로 연속치계 미분방정식(X)와 출력(Y)는 식 (10)과 같이 표시된다.

$$X = F X + G U + G_1 \omega \dots\dots\dots (10)$$

$$Y = H X + J U$$

식 (10)에서 ω=0이고, U≠0인 일반해는 식 (11)과 같다.

$$X(t) = e^{F(t-t_0)} X(t_0) + \int_{t_0}^t e^{F(t-\tau)} G U(\tau) d\tau \dots (11)$$

본 연구에서는 플랜트(직류전동기+ SCR-레오나드 장치)를 시간지연을 갖는 1차계로 간략화 했다. 이러한 플랜트의 제어체통의 상태 방정식(X)와 출력(Y)는 식 (12)와 같다.

$$X = F X(t) + G U(t - \lambda) \dots\dots\dots (12)$$

시간지연을 갖는 1차계의 전달함수는 식 (13)과 같다.

$$G_t = Y(s)/U(s) = K e^{-\lambda s} / (1 + T_t s) \dots\dots\dots (13)$$

식 (13)을 식 (12)의 형태로 변환하면 식 (14)가 된다.

$$Y(t) = -(1/T_t) Y(t) + (K/T_t) U(t - \lambda) \dots\dots (14)$$

식 (14)에서 F = -1/T_t, G = K/T_t, Y = X, H = 1 이라면 식 (12)와 같아진다.

식 (14)에서 t₀ = KT, t = KT + T, τ = η (=KT + T - τ) λ = 1T - m, 1 ≥ 0, 0 ≤ m ≤ T라 두고, η

에 대해서 0-T(t에 대해서 KT-1T+T+m에서 KT-1T+m 까지의 BACKWARD 적분과 같음) 까지 적분하면 식 (15)와 같다.

$$X(KT+T) = \Phi X(KT) + \Gamma_1 U(KT-1T) + \Gamma_2 U(KT-1T+T) \dots\dots\dots (15)$$

$$(\Phi = e^{Ft}, \Gamma_1 = \int_m^T e^{F\eta} G d\eta, \Gamma_2 = \int_0^m e^{F\eta} G d\eta)$$

(15)에서 l=1 로 두고 Φ, Γ_1, Γ_2 를 구하면 시간지연을 갖는 시스템을 모델링 할 수 있다^{10,12}.

3.5 시뮬레이션

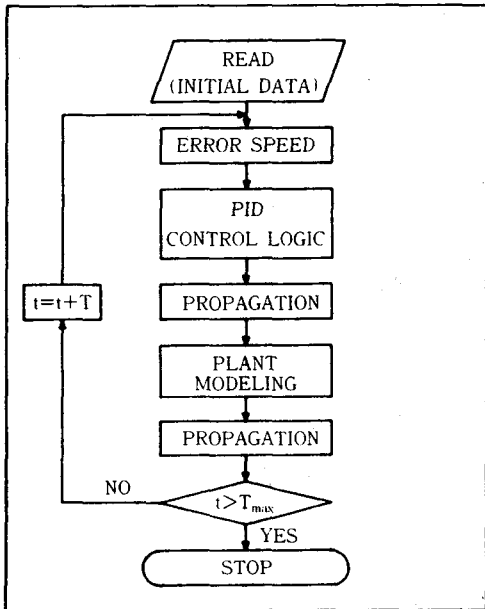


Fig. 8 Flowchart for control program

ZIEGLER-NICHOLS가 제시한 과도응답방법 (Transient-Response Method)을 이용하여 K_p, T_i, T_d 를 구하였다¹².

또한, 식 (9)를 이용하여 $U(K)$ 에 대한 방정식을 구하면 식 (16)과 같다.

$$U(K) = K_p e(K) + \{Z_1(K) - Z_1(K-1)\} + Z_2(K-1) \dots\dots\dots (16)$$

$$(Z_1(K) = K_d e(K)/T \quad Z_1(K-1) = K_d e(K-1)/T$$

$$Z_2(K) = K_i T e(K) + Z_2(K-1))$$

$Z_2(K) = Z(K)$ 라 두면 식 (16)에서 $Z_2(K)$ 는 식 (17)과 같다.

$$Z(K) = K_i T e(K) + Z(K-1) \dots\dots\dots (17)$$

순환알고리즘을 적용하기 위한 $Z(K-1) = Z, e(K-1) = e$, 명령속도 $C(K)$ 및 직류전동기 속도 $X(K)$ 의 관계식 $e(K) = C(K) - X(K)$ 을 식 (17)과 함께 식 (16)에 적용하면 $U(K)$ 및 $Z(K)$ 는 식 (18)과 같이 나타낼 수 있다.

$$U(K) = K_p e(K) + K_d(e(K) - e)/T + Z \dots\dots (18)$$

$$Z(K) = K_i T e(K) + Z$$

이상의 과정을 정리하여 순서도(flow chart)로 나타내면 Fig. 8과 같다.

이 순서도에 따라 시뮬레이션 프로그램을 작성하여 시뮬레이션을 수행한다.

4. 실험

본 연구의 목적은 산업용 자동화기기, 섬유업, 광산업 및 교통기관에 아직도 많이 사용되고 있는 직류전동기의 제어를 PID제어기와 CHOPPER제어기법으로 제어프로그램을 구성하고, SCR-레오나드 장치에 적용하여 직접 실험을 수행하였다.

PID제어기는 경험적으로 제어기의 계수를 구하는 ZIEGLER-NICHOLS가 제시한 과도응답방법을 이용했다.

과도응답방법은 단위스텝응답(Unit-Step Response)으로 부터 첨두경사(Steepest Slope) S_s 및 지연시간(Delay Time) D_t 를 측정하여 K_p, T_i, T_d 를 구하는 것으로 제어기와 매개변수(K_p, T_i, T_d)의 관계를 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Controller parameters when using the transient-response method.

PARAMETER	K_p	T_i	T_d
CONTROLLER			
P	$1/S_s D_t$		
PI	$0.9/S_s D_t$	$3D_t$	
PID	$1.2/S_s D_t$	$2D_t$	$0.5D_t$

실험장치의 계통도는 Fig. 9와 같다.

실험장치에 이용한 PCL-812PG는 IBM PC AT/XT와 호환기종을 위한 고성능 고속 및 다기능 데이터 처리카드이고, 74LS123, 14040, 74LS373 및 엔코더(OPTO-COUPLER)등은 계수용 소자들이다.

실험에 이용한 직류전동기는 출력 : 0.5KW, 최

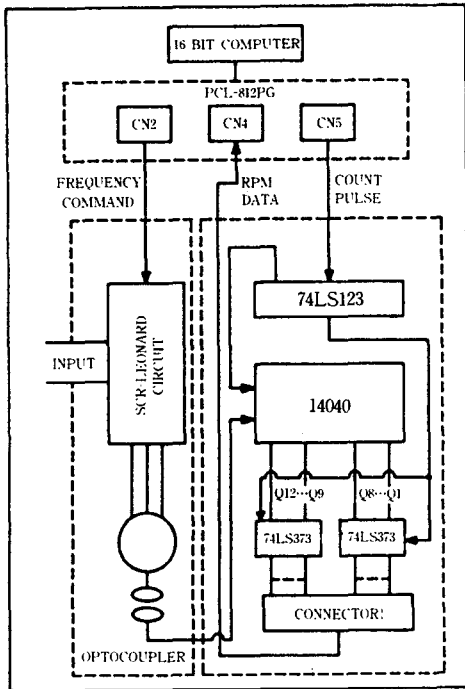


Fig. 9 Schematic diagram of experimental apparatus

대회전수 : 2000(RPM), 전압 : 110VDC, 최대 전류 : 6.5A이다.

이러한 각종 소자 및 기기를 이용하여 실험장치를 구성하고 16BIT 컴퓨터로 제어를 수행하였다.

제어프로그램 중에서 주-프로그램은 포트란으로 구성하고 입/출력 제어프로그램은 어셈블리로 작성하였다.

5. 실험 및 고찰

전동기 회전속도를 컴퓨터에 전달하고 회전속도를 감지하기 위한 입·출력 회로가 필요하며, 입출력을 제어하는 제어프로그램이 필요하다. 즉, 입·출력을 제어하는 제어프로그램은 어셈블리로 작성하였다.

이때 데이터 처리를 원활히 하기 위해서 데이터를 스트럭처로 정의해 두고, 스트럭처 내의 필드 이름을 인용해 데이터를 처리하였다.

이러한 제어프로그램을 서브-프로그램으로 활용하는 주-프로그램은 포트란으로 작성하였다⁸⁹⁾.

전기자전류는 α (T_{on}/T)가 증가할수록 원활하게 흐른다. 그러므로 전기자전류의 연속/불연속의 경계는 α 값의 변화에 따라 변한다.

Fig. 10은 지령속도(RPM) : 0-1800-1500, 샘플링시간(sec) : 0.01, 최대시간(sec) : 63, M-정수 : 0.005로 시뮬레이션 했을 때 결과를 플로터(Y1(지령속도) : 100V, Y2(전동기속도) : 40V, 스

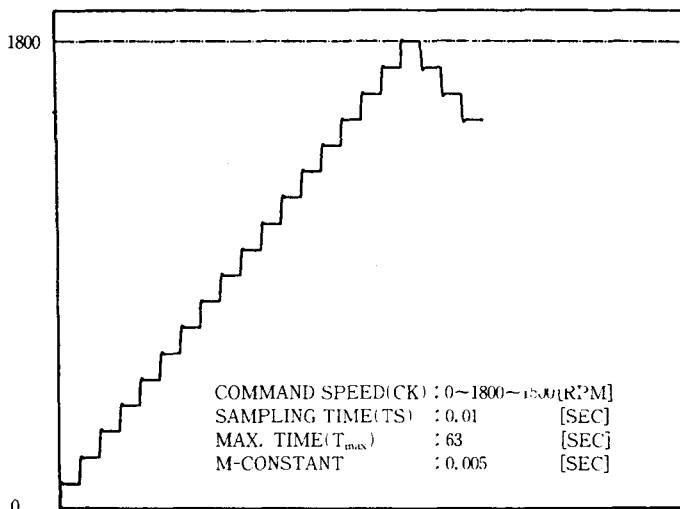


Fig. 10 Simulation results

위평시간 : 60(sec))로 플로팅 한 것이다. 또한, Fig. 11은 위의 시뮬레이션 조건과 동일한 조건으로 하여 실제 전동기의 속도를 제어한 결과를 플로팅 한 것이다.

이것은 100RPM 마다 3초의 추종시간을 주었으나, 실제로는 0.5초 이내에 추종하였다.

실험결과, 계단제어 입력신호에 대해 속도추종

능력은 우수하였으며, 전 구간에서 전동기 속도가 일정하게 증감하였다.

Fig. 12는 Fig. 11의 전동기 속도제어 실험과정에서 SCR 구동신호이다. 이 구동신호는 SCR-레오나드 장치에 부하가 연결되지 않았을 때는 침투 경사가 더욱 가파른 신호가 출력된다.

Fig. 13은 전기자 속도제어 실험시 SCR-레오나

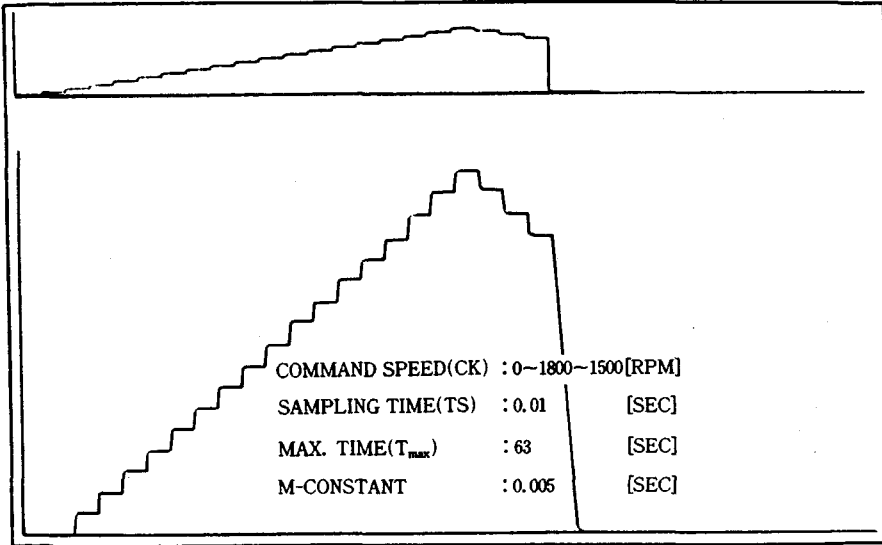


Fig. 11 Experimental results

드 회로에서 출력되는 전기자 전압 파형이다.

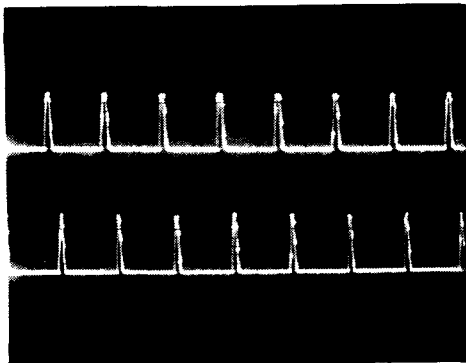


Fig. 12 Drive signal for SCR(1ms/div, 5V/div)

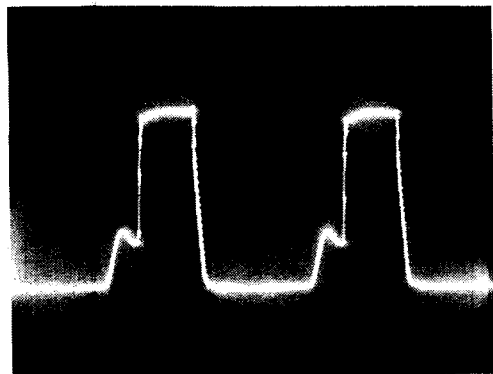


Fig. 13 Output voltage of SCR-LEONARD circuit(25V/div)

6. 결 론

본 연구에서 실험적인 방법으로 PID제어기를 설계하고, SCR-레오나드 회로에 피이드-백 제어 개념을 적용하여 직류전동기를 제어해 본 결과 비선형성의 동특성을 극복하고 속도추종성능이 양호하게 나타났다.

실험과정에서 밝혀진 사실은 다음과 같다.

- 1) 전 속도구간에서 비선형성을 극복하고 속도 추종성능이 우수하였으며, 속도별 계수변화에 대한 응답특성이 양호하였다.
- 2) 낮은 주파수 영역에서 비선형 특성이 심하게 나타나고 있으며, 이를 개선하기 위한 연구가 필요하다.
- 3) 컴퓨터와 입·출력 장치간의 데이터 처리를 원활히 하기 위하여 어셈블리로 작성한 입·출력 제어프로그램은 스트럭처 구조를 이용함으로써 데이터 처리가 매우 용이하였다.

이상의 연구결과 이외에 부연하고자 하는 점은 고부하(쇄빙선, 추진시스템, 기동시스템)에 적용하기 위해서는 SCR의 전류(Commutating) 실패에 따른 최적의 보호회로 개발이 요구된다.

본 연구의 결과는 산업용 제어기기 및 자동화 시스템에 활용이 가능하다.

참 고 문 헌

- 1) M. H. Rashid Member, "Dynamic Response of DC Chopper Controlled Series Motor", IEEE Trans. Vol. IECI-28 NO. 4, pp.300-323, Nov. 1981
- 2) J. B. Klaassens, "Analysis of a Forced Commutation Circuit for Design of Class of Thyristor Inverters", IEEE Trans. Vol., IECI-20

- NO. 3, pp.12-125, August 1973
- 3) W. Leonhard, "Control of Electrical Drives", 1985
- 4) B. D. Bedford & R. G. Hoft, "Principle of Inverter Circuits", John Wiley & Sons Inc. pp. 165-230.
- 5) J. B. Plant, "Microprocessor Control of Position or Speed of an SCR DC Motor Drive" IEEE Trans. Vol. IECI-27, NO. 3, pp.228-234, August 1980
- 6) S. B. Dewan, A. Straughen, "Power Semiconductor circuit", John wily & Sons, InC.
- 7) Paul C. Krause, "Analysis of Electric Machinery", Mcgraw-Hill International Editions, pp. 133-210, 1987
- 8) Leo J. Scanlon, "80286 Assembly Language on MS-DOS Computers", 1986
- 9) 황희용, "MS-DOS 매크로 어셈블러 활용", 1990
- 10) Yoshikazu Nisnikwa, Nobuo Sannomiya, Toukji Ohta and Haruki Tanaka, "A Method for Auto-Tuning of PID Control Parameters", Automatica, Vol. 20, No. 3, pp. 321-332, 1984
- 11) Karl J. Astrom and Bjorn Wittenmark, "Computer Controlled Systems Theory and Design", Prentice-Hall, InC., pp.1-195, 1984
- 12) Gene F. Franklin and J. David Powell, "Digital Control of Dynamic Systems", Addison-wesley Publishing Company, Inc., pp.131-246, 1980