

전기차량에 적용한 Bang-Bang 제어기 연구

A Study on The Bang-Bang Controller Applied to Electrical Vehicle

배종일*
(Jong-Il, Bae)

Abstract - In order to establish the robust controller design technique of series wound motor driver system. This paper proposes a method of Bang-Bang controller using a series wound motor driver system under improperly variable load. A Bang-Bang controller structure is simpler than the structure of PID plus Bang-Bang controller. This paper shows that a general 8 bits microprocessor is used efficiently implementing such an algorithm. The calculation time of software is extremely small when compared with conventional PID plus Bang-Bang controller. Both nonlinear operating characteristics of digital switching elements and describing function methods are used for the analysis and synthesis. Real time implementation of Bang-Bang controller is achieved. Concept design strategy of the control and PWM waveform generation algorithms are presented in the paper.

Key Words : Bang-bang controller, Driver system, Digital switching, Microprocessor, PWM amplifier, Chopper power circuit, Forward high gain, Ripple

1. 서론

직류직권 전동기는 우수한 기동 토크로 인하여 속도 및 토크 제어가 필요한 물류산업계에 널리 사용되어 왔다. 본 논문은 부하의 부적당한 변수 하에서, 직류직권모터를 이용한 최소시간 토크제어를 할 때, PID plus Bang-Bang 제어기보다 간단한 하드웨어구조와 실시간 소프트웨어부담이 적은 전류형 디지털 PWM 제어기를 구현하기 위해, 비선형 Bang-Bang 제어의 우수한 응답특성과 모델링오차 및 외란 등에 의한 시스템의 불확실성이 존재하더라도 원하는 제어성능을 얻을 수 있는 궤환제어의 강한 특성을 접목한 Bang-Bang 제어기를 구성하고자 한다.

2. 본론

2.1 토크제어

토크제어를 위해 전압제어에서의 문제점들을 들고 그 해결책으로 전류제어에 대하여 설명하면, 전압제어에서의 문제점은 유한한 크기의 입력단 콘덴서 필터 및 모터 내부저항의 온도에 따른 변화, 전류에 따른 모터 내부인덕턴스의 변화 때문에 나타난다. 이와 같은 문제를 해결하는 전류제어는 실제 부하를 포함

한 모터 시스템의 전기적인 시정수가 기계적인 시정수에 비하여 무시할 만큼 작기 때문에 가능하며, 그리고 중요한 것은 전류제어가 사용되면 부하를 포함한 전체 모터 시스템이 1차 미분방정식으로 표현되므로, 마이크로컴퓨터를 이용하여 실시간으로 최적제어 알고리즘을 실현할 수 있다.

2.2 전압제어와 전류제어

그림 1은 2상한에서 동작이 가능한 직류직권 모터를 위한 초퍼 전력회로(Chopper Power Circuit)이다. 여기서, PWM 증폭기는 전압원이나 전류원 어느 것으로도 사용이 가능하며, 그리고 전압제어의 문제점은 배터리 전압원으로 되어 있는 제어시스템을 해석하는 경우, 전력 증폭기의 입력전압(콘덴서 필터전압)은 일정한 값으로 계산되는 것이 보통이다. 그러나 전력 증폭기의 입력단은 콘덴서 필터로 되어 있으므로 기동시나 제동시 증폭기의 입력전압이 크게 변하게 되는데, 이때의 전압리플은 출력의 속도나 토크에 직접 영향을 미친다. 따라서 입력전압의 변화를 측정할 필요성이 생기는데, 이것 역시 모터 내부저항의 온도에 따른 변화, 전류에 따른 모터 내부의 인덕턴스변화, 하드웨어 복잡성 및 소프트웨어에서의 부담 이외에도 모터가 전압에 의하여 구동되는 경우, 제어시스템의 차수가 높아지므로 해석이 복잡하게 되며, 실시간 계산 또한 힘들게 된다.

2.3 마이콤을 이용한 Bang-Bang 제어기

대부분의 모터는 제어기나 모터 자체를 보호할 필요성으로 인하여 어떠한 형태이던지 전류의 제한이 필요하므로 전압제어에서

* Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Pukyong National University, Korea.
E-mail : jibae@pknu.ac.kr
Received : May 10, 2016; Accepted : May 18, 2016

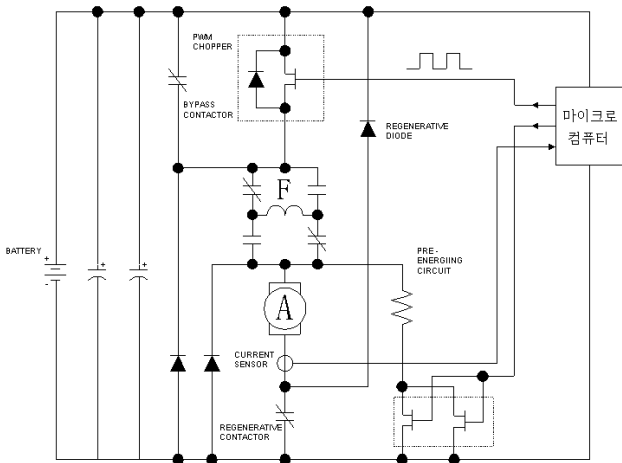


그림 1 직류직권 모터 구동을 위한 전력회로
 Fig. 1 The power circuit for DC series wound motor driving

의 문제점을 해결하는 빠른 응답특성의 전류제어기로서 흔히 사용되는 것은 모터 속도제어에서 2위치 ON/OFF 제어루프(Two Position ON/OFF Control Loop)에 사용되는 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 제어기이다.

Bang-Bang 제어기의 구성은 그림 2와 같으며, Bang-Bang 루프는 제어변수인 모터 전류의 평균값을 조절하기 위해 히스테리시스특성을 갖는 제어소자인 비교기를 궤환루프에 적용하여 포화영역 ON/OFF로 동작을 수행하므로 출력값이 결정되는 ON/OFF 제어기이다.

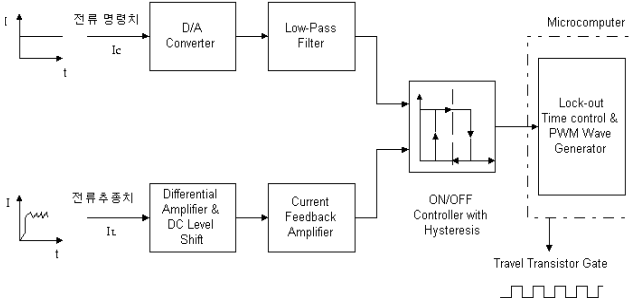


그림 2 Bang-Bang 제어기의 구성도
 Fig. 2 The configuration of Bang-Bang controller

2.4 R-L부하에 의한 Bang-Bang 제어기

일반적인 R-L부하에서의 Bang-Bang 제어기의 부하전류 응답 특성을 살펴보면, 스텝입력의 전류명령(Ic)에 따른 스텝응답의 부하전류(Id)와 Unipolar PWM 증폭기(K2)의 전압파형(Vd)을 그림 3에 나타내었다.

여기서, α는 전류 궤환이득이고, EDS는 오차 불감영역(Error Dead Space)이다. Lockout Time은 PWM 증폭기의 최대 스위칭 주파수와 듀티 사이클을 조절하기 위해서 마이크로컴퓨터의

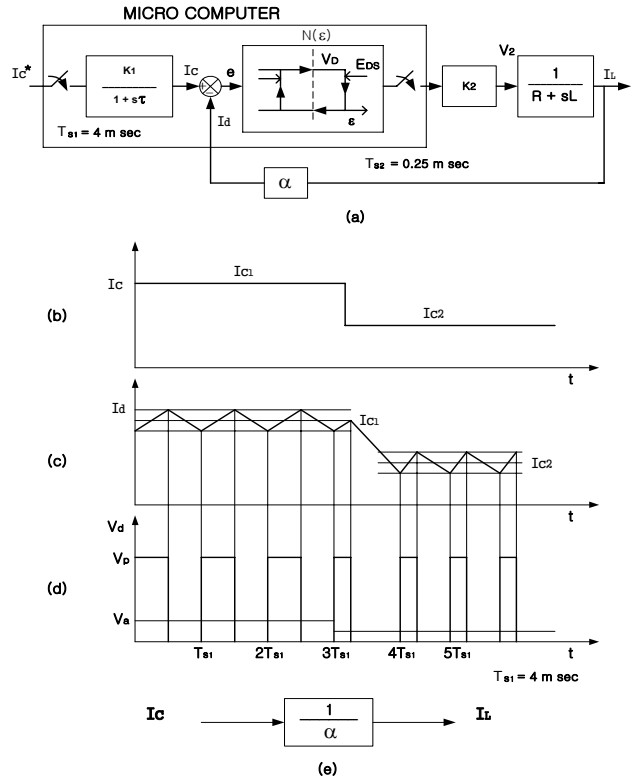


그림 3 R-L 부하에 의한 Bang-Bang 제어기
 Fig. 3 Bang-Bang controller for R-L load

Foreground Loop에서 250[μsec]의 인터럽트를 이용하여 처리되며 비선형동작에 대한 보상과 함께 PWM ON Duty Length가 결정된다.

그림 3에서 보는 것과 같이 Vp의 리플(Ripple)은 IL에서의 Limit Cycle 주파수에만 영향이 있으며, 평균값인 IC/α에는 영향이 없음을 알 수 있다. 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 제어기는 입력의 전압리플에 무관한 전류제어기이다. 전류제어기의 평균 출력전류는 IC/α이므로 평균의 관점에서 준선형증폭기(Quasi-Linear Amplifier)라고 할 수 있다.

Bang-Bang 제어기를 갖는 시스템은 비선형시스템이며, 전류 출력은 입력의 전류명령에 대하여 EDS만 정의되므로, 시스템을 주파수영역에서 해석하는 것은 곤란하다. 제어기는 그림 4에서 보는 바와 같이, 제어기의 출력 전압이 전류의 명령에 따라 주파수와 듀티가 적응적으로 변화하는 Adaptive Current Control PWM제어기와는 달리, 저전력 소비형 PWM Chopper회로를 구현하기 위해 초핑주파수(250Hz)의 PWM 신호를 마이크로컴퓨터의 I/O Port에서 발생하며, 듀티 사이클은 ON/OFF 제어기의 출력 정보를 검출한 후 실시간 인터럽트 서브루틴에서 순차적으로 처리하여 모터의 평균 출력전류가 전류 명령치와 같아지도록 한다. 그리고 시스템에서는 스위칭주파수를 제한하기 위한 하드웨어적인 Lockout기능이 ON/OFF 제어기의 출력정보의 샘플링시간(TS2)에 의해 마이크로컴퓨터에서 소프트웨어적으로 결정된다.

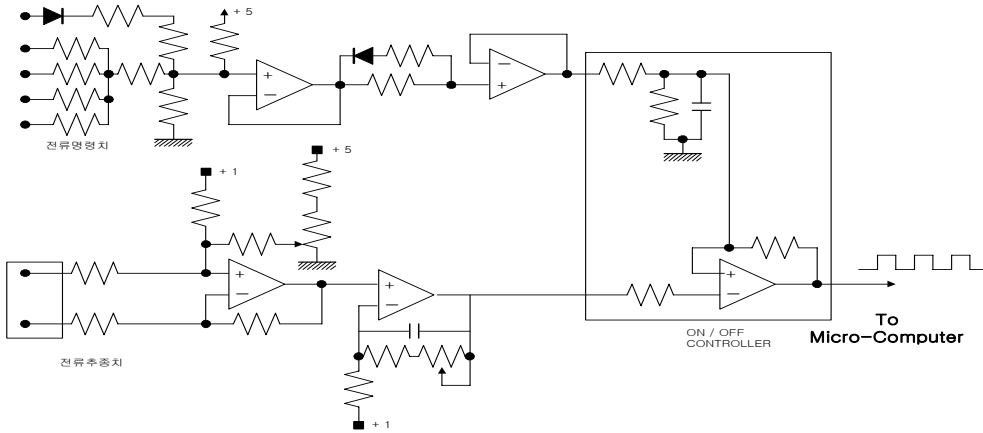


그림 4 Bang-Bang 제어루프의 회로도
 Fig. 4 The circuit of Bang-Bang control loop

2.5 직류직권 모터에 의한 Bang-Bang 전류제어기

본 장에서는 직류직권 모터에 전달함수 기법을 적용하여 해석하였다. 부하를 포함하는 모터시스템의 직류직권 모터 방정식을 유도하면 다음 식과 같다.

$$v_a = K_2 \cdot v_r \tag{2.1.a}$$

$$e_g = Kv \cdot i_a \cdot \bar{\omega} \tag{2.1.b}$$

$$v_a = R_m \cdot i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + e_g \tag{2.1.c}$$

$$T_d = K_t \cdot (i_a)^2 \tag{2.1.d}$$

$$= J \frac{d\bar{\omega}}{dt} + B\bar{\omega} + T_L \tag{2.1.e}$$

여기서, v_a 는 초퍼의 출력전압이고, K_2 는 선형이득, v_r 는 초퍼의 기준전압이며, e_g 는 역기전력이고, K_v 는 역기전력 상수, i_a 는 전기자전류이다.

모터방정식 (2.1.d)에서 가변·비선형(variable-type non-linearity) 특성을 나타내므로 전달함수 해석기법을 적용하기 위해 제한된 작동범위 내에서만 비선형시스템을 선형화하여 제어기 설계를 한다. 따라서 작동점 부근에서 시스템 파라미터를 다시 정의하고 라플라스영역으로 변환하면 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta v_a(S) = K_2 \cdot \Delta v_r(S) \tag{2.2.a}$$

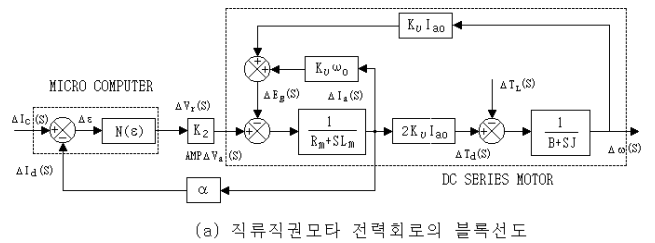
$$\Delta E_g(S) = Kv [I_{ao} \cdot \Delta \bar{\omega}(S) + \bar{\omega}_o \cdot \Delta I_a(S)] \tag{2.2.b}$$

$$\Delta v_a(S) = R_m \cdot \Delta I_a(S) + SL_m \Delta I_a(S) + \Delta E_g(S) \tag{2.2.c}$$

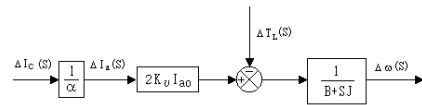
$$\Delta T_d(S) = 2K_t \cdot I_{ao} \cdot \Delta I_a(S) \tag{2.2.d}$$

$$= SJ \Delta \bar{\omega}(S) + B \Delta \bar{\omega}(S) + \Delta T_L(S) \tag{2.2.e}$$

위 식으로 부터 Bang-Bang 제어기를 사용한 시스템 블록선도는 그림 5와 같다. 모터 임피던스는 R_m 과 L_m 으로 구성되며, 인덕턴스 L_m 는 모터 내부인덕턴스와 외부인덕턴스를 모두 포함



(a) 직류직권모터 전력회로의 블록선도



(b) 간략화된 등가 블록선도

그림 5 직류직권 모터의 시스템 블록선도

Fig. 5 The block diagram of DC series wound motor system

한 성분이다. 상기 시스템의 전류제어에서 IC(S)가 입력일 때 직류직권 모터 시스템의 전달함수는 다음 식과 같이 된다.

$$\frac{\Delta W(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{N(\epsilon) \cdot K_2 \cdot 2K_v \cdot I_{ao}}{[(R_m + SL_m)(B + SJ) + N(\epsilon)K_2\alpha(B + SJ) + K_v\omega_o(B + SJ) + 2K_v^2 I_{ao}^2]} \tag{2.3.a}$$

이 시스템에서 전력증폭기의 이득(K2)과 기술함수N(ε)은 매우 큰 값을 갖기 때문에 이런 조건하에서 전달함수는 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.

$$\lim_{N(\epsilon) \rightarrow \infty} \frac{\Delta \omega(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{2K_v I_{ao}}{\alpha \cdot (B + SJ)} \tag{2.3.b}$$

따라서, 간략화된 전류제어기의 전달함수는 그림 5(b)와 같으며, 간략화된 등가모델에 대한 해석은 스위칭 PWM 증폭기에서

의 순방향 고이득(Forward high gain)에 기인하며 그의 응답은 궤환회로에 의해 결정되어진다. 또한 간략화된 전류제어기의 모델은 R-L부하에서의 전류 제어회로인 그림 3(e)와 같아지므로 직류직권 모터에서의 전류제어기는 R-L부하에서와 같이 동작한다. 일반적으로 모터는 기계적인 관점에서 전기적인 동역학은 무시할 수 있다. 즉 전기적인 관점에서 역기전력은 일정한 전압원으로 볼 수 있으며, 입력전압의 리플, 내부저항 및 인덕턴스에 무관하게 평균 전류의 제어가 가능하여진다. 그림 5(b)에서와 같이 전류를 입력, 속도를 출력으로 하는 경우 직류직권 모터시스템은 1차 미분방정식이 된다. 전류 궤환이득을 $\alpha(S)$ 의 동적소자로 변화시킬 때 이 등가 전달함수(2.3c)가 시스템에서 어떤 동적특성을 갖는지 예측할 수 있다.

$$\frac{\Delta\omega(S)}{\Delta I_c(S)} = \frac{2K_v I_{ao}}{\alpha(S) \cdot (B + S J)} \quad (2.3.c)$$

2.6 소프트웨어 구조 및 제어 알고리즘

Bang-Bang 제어 알고리즘의 개요 및 초과 전력회로 구동용 PWM 발생 알고리즘을 개략적으로 서술하고, 소프트웨어 구조는 그림 6과 같으며 Foreground/Background 시스템을 적용하여 Foreground Part에 실시간 인터럽트 루틴이 수행되고, Background Part에 표준 프로그램이 Non-scheduled 형식으로 수행되도록 하였다.

2.6.1 제어 알고리즘

대량 급전송(Mass Rapid Transit, MRT)시스템에서의 제어 특성은 마찰 및 무게와 같은 부하 변수의 변화가 있는 상황에서, 고속 응답특성을 갖는 속도제어, 토오크제어를 필요로 한다.

제어구간을 제어변수의 크기에 따라 Bypass Mode와 Fine Mode의 2개 구간으로 나누고 첫번째 구간은 제어변수의 오차가 큰 경우의 Coarse한 제어이며, 이 때 Bang-Bang 제어방식을 이용한다. 이 때의 동작모드는 다음과 같은 ON/OFF 제어모드로서 존재한다.

- 1) Current Bypass Mode
- 2) Voltage Bypass Mode
- 3) Over-drive Mode (모터 정격 속도 이상으로 주행시 동작하는 모드)

두번째 구간은 위의 Coarse한 Bang-Bang 제어가 끝나고 오차가 작은 경우의 Fine제어이며, 이 때 Bang-Bang 제어방식을 이용한다.

이 Bang-Bang 제어방식은 고속 주행시 최대 전압을 모터에 인가하여 가속하고, 등판시에는 차량의 속도에 따라 최대 전류를 조절하여 속도와 토오크가 동시에 제어되도록 Fine한 전류제어를 수행한다. 평지 정상주행시는 정전압 제어에 의한 전류제어를 수행한다. 이 때의 전류 모드는 다음과 같은 제어 모드가 존재한다.

- 1) Power (Acceleration) Control Mode
- 2) Regenerative/Brake Control Mode
- 3) Torque Boost Mode (최대 등판시 최대 전류 상한치를 높일 때 동작하는 모드)

2.6.2 PWM 신호발생 알고리즘

전류제어기는 실시간 동작이 요구되는 시스템이므로 이를 동작시키기 위한 소프트웨어도 실시간 운영체계를 갖추어야 한다. 이를 위해서 개발한 컨트롤러의 소프트웨어는 주로 R.T.S. (Real

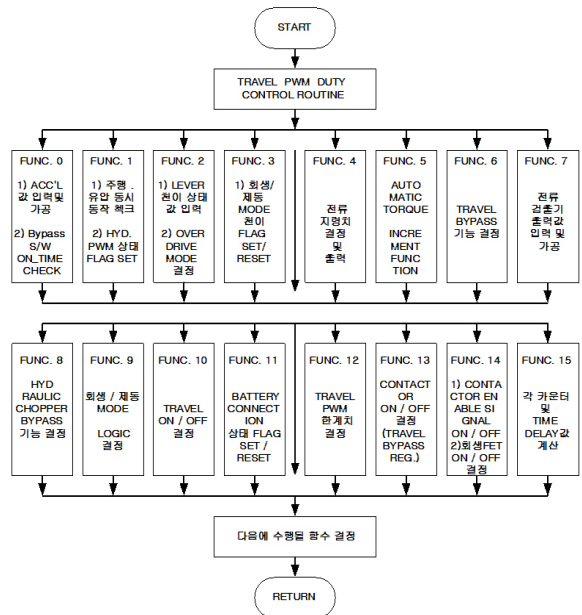


그림 6 전류제어기의 Interrupt Program 구성도
Fig. 6 The interrupt program configuration of current controller

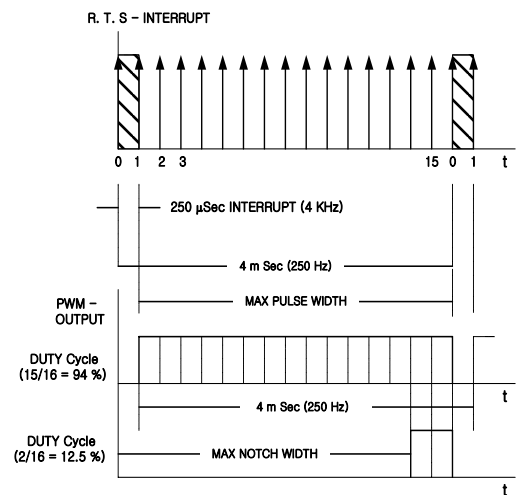


그림 7 PWM 파형의 타임 차트
Fig. 7 The PWM waveform time chart

Time Scheduler)에 의한 250 [μsec] 인터럽트 서비스루틴의 실행으로 동작된다.

인터럽트 발생시 각 기능구현을 위한 16단계의 프로그램 모듈(Program Module)이 마련되어 현재 시스템의 전류상태 및 동작모드를 검출하여, 초퍼 전력회로의 Gate Drive용 Signal인 PWM 파형의 ON/OFF Pulse 상태결정 및 신호출력을 수행하고, 실시간 인터럽트의 적산치계수 즉, 16-Unit (250μsec×16=4ms : 250Hz PWM주파수)를 1주기(4 msec)로 PWM 신호의 On Duty Length를 (1/16)의 단위로 가변하여, 동작 시스템의 상태검출에 따른 비선형 동작에 대한 보상과 함께 적절한 디지털 PWM 신호 파형을 적응적으로 발생시킨다. 그림 7에서는 PWM 신호의 순차적인 발생을 위한 Time Chart를 제시하였다.

3. 실시스템에 대한 실험

본 논문에서 제안된 제어방법의 유효성을 입증하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다. 제2장에서 언급한 보상된 Bang-Bang 전류제어기와 초퍼 전력회로를 제작하였으며, 속도와 토오크의 검출을 위하여 Pickup Sensor와 Torque Transducer를 사용하였다. 실험에 사용된 모터는 13.4 [kW], 1325 [rpm] 직류직권 모터이며, 실시간 디지털제어를 위하여 80C196KC Single Board Computer를 제작하여 어셈블리 언어로 프로그래밍 하였다. 실험에 사용된 모터의 사양은 표 1과 같다.

표 1 직류 직권 모터의 사양

Table 1 Specification of DC series wound motor

항목	사양
Power [kW]	13.4 kW
Speed [RPM]	1325 RPM
Voltage [V]	44.5 V DC
Current [A]	370 A
Winding	Series Wound
Time rating [min]	60 min at 140 °C

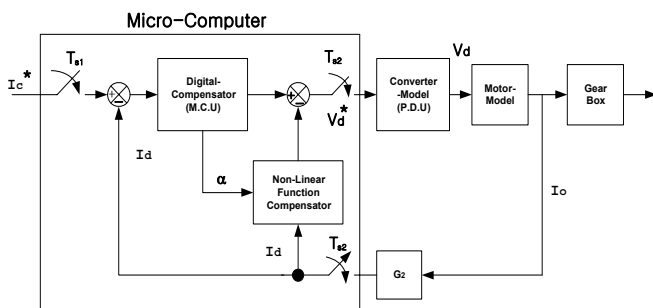
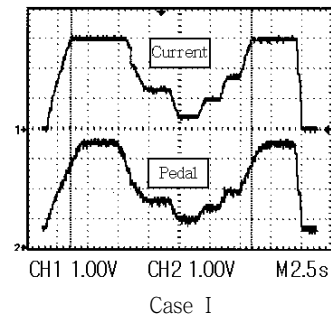
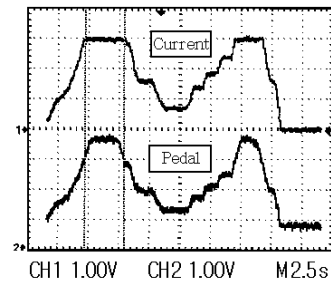


그림 8 실시스템의 전류 제어를 위한 전체 하드웨어 구성도
Fig. 8 Total system block diagram for current control of the real system

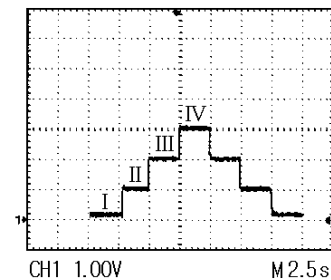


Case I

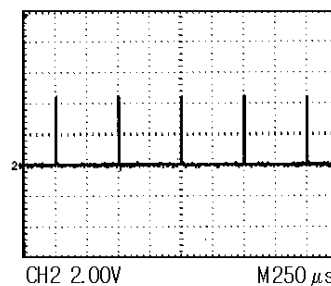


Case II

(a) Acceleration Pedal값을 전류 명령치로 했을 때의 응답



(b) 전류 명령치가 일정 스텝으로 변할 때의 응답



(c) 각 구간에 대한 PWM 입력 파형

그림 9 전류명령을 달리 했을 때의 부하전류 응답특성

Fig. 9 The load current response characteristic when change current command

4. 결 론

본 논문에서는 직류직권 모터시스템의 토오크제어시 전류제어 방식이 전압제어 방식에 비하여 보다 더 적절함을 보였다. 이와 같은 결과는 전류원으로 직류직권 모터를 구동함으로써 PWM 증폭기 입력전원의 변동, 모터 내부과라미타인 저항과 인덕턴스의 열적 변화에 영향을 받지 않는 것이 그 중요한 요인이었다. 그리고 이 실험에서 나타난 결과로서 그림 8의 IL과 Ic가 일치하지 않는 이유는 직류직권 모터에 충분한 부하를 가지지 않으며 모터의 기동특성이 매우 좋아서 모터가 급속하게 폭주상태(과속도)에 도달하는 경우가 발생하여 모터의 역기전력에 의해 전류가 감소함을 관찰할 수 있었다. 이 전류제어기는 전압제어시 필요한 전류 제한의 기능까지 겸하고 있으므로 전압, 전류 병용제어가 가능하며 하드웨어에서의 복잡성을 크게 증가시키지 않고도 간단한 회로로 구성하는 것이 특징이다. 그러나 이런 방법들은 시스템의 비선형성이 높아지고 규모가 커짐에 따라 시스템의 안정성 및 Limit Cycle의 결정에 대한 연구가 추후에 보완되어야 할 사항으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Park, "A Study on Performance Improvement for The Time Optimal Position Control Using DC Servo Motor," Conference Record, KAIST Press, pp. 3~12, 2006.
- [2] E. O. Doebelin, *Control System Principles and Design*, John Wiley & Sons Inc., pp. 22, 1~238, 2015.
- [3] B. K. Bose, *Power Electronics and AC Drivers*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 149~152, 2016.
- [4] M. H. Rashid, *Power Electronics Circuits, Device, and Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 326~328, 2016.
- [5] DC Motor, Speed Controls, Servo Systems, Engineering Handbook (3rd Ed.), Electro-Craft Corp., Minnesota, pp. 4-32~36, 2015.
- [6] S. Bennett, *Real Time Computer Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 137~145, 2016.
- [7] J. J. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 203~205, 2015.
- [8] NASA Tech Briefs September, Vol. 18, No 9, pp. 52~54, 2014.

저 자 소 개



배 종 일 (Jong-Il, Bae)

1954년 3월 11일생
 1979년 중앙대 전기공학과 졸업
 1981년 중앙대 전기공학과 졸업(석사)
 1989년 성균관대 전기공학과 졸업(박사)
 1986년~현재 부경대 전기공학과 교수
 E-mail : jibae@pknu.ac.kr

감사의 글

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음.