

산업용 전기차량의 주행 모터용 보상된 Bang-Bang 전류제어기 개발

천영신*, 정영일*, 배종일**, 이만형***

The Development of a Compensated Bang-Bang Current Controller for Travel Motor of Industry Electrical Vehicle

Young-Shin Chen*, Young-Il Jung*, Jong-Il Bae**, and Man-Hyung Lee***

ABSTRACT

In order to establish the design technique of the robust current controller in d.c series wound motor driver system, this paper proposes a method of the compensated Bang-Bang current control using d.c series wound motor driver system under the improperly variable load to get minimum time for the torque control. The compensated Bang - Bang current controller structure is simpler than that of PID plus Bang-Bang controller. This paper shows that a general 16 bits microprocessor is efficiently used to implement such an algorithm. The calculation time of software is extremely small when compared with that of 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 the compensated Bang-Bang current controller is achieved. The concept of design strategy of the control and the PWM waveform generation algorithms are presented in this paper.

Key Words : Bang-Bang Controller (Bang-Bang 제어기), P.W.M (펄스폭 변조), Quasi-Linear Amplifier (준선형 증폭기), Limit Cycle (제한주기), Real-Time Scheduler (실시간 스케줄러)

1. 서론

직류직권 모터는 우수한 기동 토크로 인하여 속도 및 토크 제어가 필요한 물류 산업계에 널리 사용되어 왔다. 본 논문은 부하의 부적당한 변수 하에서 직류직권 모터를 이용한 최소시간 토크제어를

할 때, PID plus Bang-Bang 제어기보다 간단한 하드웨어구조와 실시간 소프트웨어부담이 적은 전류형 디지털 PWM 제어기를 구현하기 위해서, 비선형 Bang-Bang 제어의 우수한 응답특성과 모델링오차 및 외란 등에 의한 시스템의 불확실성이 존재하여

* 부산대학교 대학원

** 부경대학교 전기·제어계측공학부

*** 부산대학교 기계공학부, 정형정밀 및 금형가공 연구센터

도 원하는 제어성능을 얻을 수 있는 레환제어의 간단한 특성을 접목한 보상된 Bang-Bang 제어를 구성하고자 한다.

2. 본 론

2.1 직류직권 모터와 전류제어

본 장에서는 토크제어를 위해 전압제어에서의 문제점을 들고 그 해결책으로 전류제어에 대하여 설명한다. 전압제어에서의 문제점은 한정된 콘덴서 용량 설치 (필터), 모터 내부저항의 온도에 따른 변화 및 전류에 따른 모터 내부인덕턴스의 변화 때문에 나타난다. 이와 같은 문제를 해결하기 위한 전류제어는 실제 부하를 포함한 모터시스템의 전기적인 시정수가 기계적인 시정수에 비하여 무시할 만큼 작기 때문에 가능하다. 그리고 중요한 것은 전류제어기가 사용되면 부하를 포함한 전체 모터 시스템이 1차 미분방정식으로 표현되므로, 마이크로컴퓨터를 이용하여 실시간으로 최적제어 알고리즘을 실현할 수 있다.⁽¹⁾

2.2 전압제어와 전류제어

Fig. 1은 2상한에서 동작이 가능한 직류직권 모터를 위한 초퍼 전력회로(Chopper power circuit)이다. 여기서, PWM 증폭기는 전압원이나 전류원 어느 것으로도 사용이 가능하다. 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 복잡성 이외에도 모터가 전압에 의하여 구동되는 경우, 제어시스템의 차수가 높아지므로 해석이 복잡하게 되며 실시간 계산 또한 힘들게 되므로, 본 연구에서는 전류제어를 다루게 되었다.

2.3 마이크로컴퓨터를 이용한 보상된 Bang-Bang 전류제어기

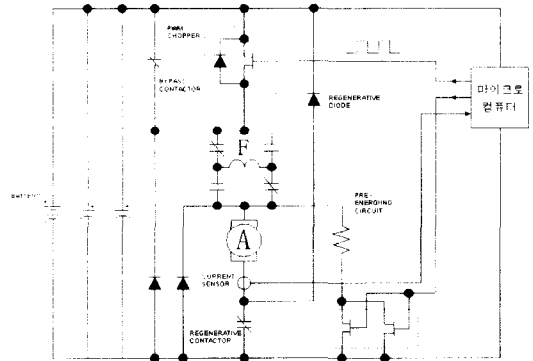


Fig. 1 The power circuit for DC series wound motor driving

대부분의 모터는 제이거나 모터 자체를 보호할 필요성으로 인하여 어떠한 형태이던지 전류의 제한이 필요하다. 따라서, 전압제어에서의 문제점을 해결하는 전류제어기로서 흔히 사용되는 것은 모터 속도제어에서 2위치 ON/OFF 제어루프(Two position ON/OFF control loop)에 사용되는 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 전류제어기이다.

본 논문에서의 보상된 Bang-Bang 전류제어기의 구성은 Fig. 2와 같다. 그리고, Bang-Bang 루프는 제어변수인 모터 전류의 평균값을 조절하기 위해 히스테리시스특성을 갖는 제어소자인 비교기를 레환루프에 적용하여 포화영역 ON/OFF로 동작을 수행시키므로써 출력값이 결정되는 ON/OFF 제어기이다.

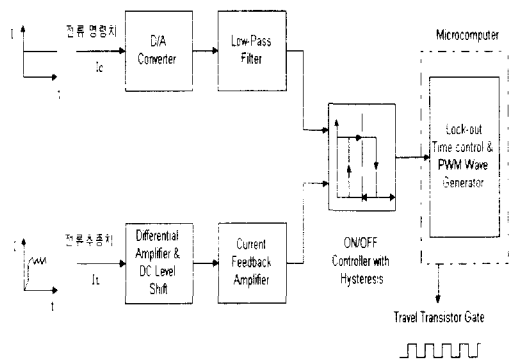


Fig. 2 The configuration of a compensated Bang-Bang current controller

2.4 R-L 부하와 보상된 Bang-Bang 전류제어기

일반적인 R-L 부하에서의 보상된 Bang-Bang 전류제어기의 부하전류 응답특성을 살펴보면, 스텝 입력의 전류명령(I_c)에 따른 스텝응답의 부하전류(I_a)와 Unipolar PWM 증폭기(K_2)의 전압과형(V_a)을 Fig. 3에 나타내었다.

여기서, α 는 전류 제한이득이고, EDS는 오차 불감영역(Error Dead Space)이다. Lockout Time은 PWM 증폭기의 최대 스위칭 주파수와 듀티 사이클을 조절하기 위해서 마이크로컴퓨터의 진단모드 루프에서 250[μ sec]의 인터럽트를 이용하여 처리되며 비선형동작에 대한 보상과 함께 PWM 신호 주기폭이 결정된다.

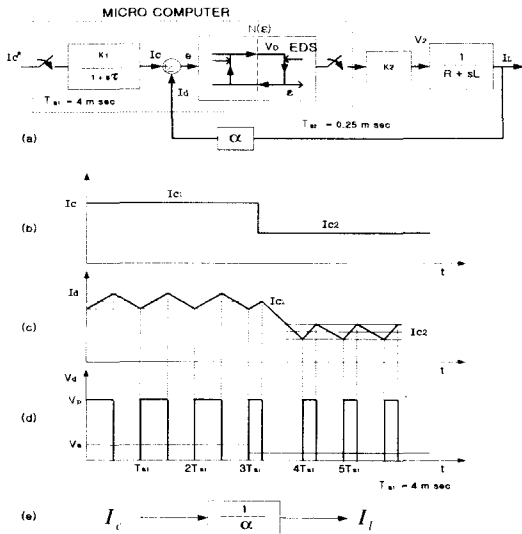


Fig. 3 The R-L loader of a compensated Bang-Bang current controller. (a) : Current control loop diagram. (b) : Signal current. (c) : Current control command. (d) : Signal width. (e) : Feedback diagram.

Fig. 3에서 보는 것과 같이 V_p 의 리플(Ripple)은 I_c 에서의 제한주기(Limit cycle) 주파수에만 영향이 있으며, 평균값에는 영향이 없음을 알 수 있다. 즉, 히스테리시스를 이용한 Bang-Bang 전류제어기는 입력의 전압리플에 무관한 전류제어기이다. 그리고, 이 전류제어기의 평균 출력전류는 I_c/α 이므로 평균의 관점에서 준선형증폭기(Quasi-linear amplifier)라고 할 수 있다.^(2,3)

Bang-Bang 전류제어기를 갖는 시스템은 비선형

시스템이며, 전류출력은 입력의 전류명령에 대하여 EDS만 정의되므로, 이 시스템을 주파수영역에서 해석하는 것은 곤란하다. 제어기의 출력 전압이 전류의 명령에 따라 주파수와 듀티가 적응적으로 변화하는 PWM 제어기와는 달리, 저전력 소비형 PWM 초퍼(Chopper)회로를 구현하기 위해 초평주파수(250 Hz)의 PWM 신호를 마이크로컴퓨터에서 발생시켜 듀티 사이클의 ON/OFF 제어신호를 출력한다. 이렇게 출력된 신호는 마이크로프로세서의 실시간 인터럽트 서브루틴에서 순차적으로 처리하여 모터의 평균 출력전류가 전류 명령치와 같아지도록 한다. 그리고 이 시스템에서는 스위칭 주파수를 제한하기 위한 하드웨어적인 Lockout 기능이 ON/OFF 제어기의 출력정보의 샘플링시간에 의해 마이크로컴퓨터에서 소프트웨어적으로 결정된다.

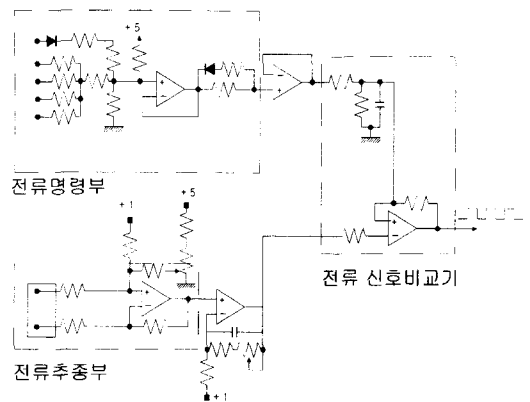


Fig. 4 The circuit of Bang-Bang control loop

2.5 직류직권 모터와 보상된 Bang-Bang 전류제어기

본 장에서는 직류직권 모터에 전달함수 기법을 적용하여 해석하였다. 부하를 포함하는 모터시스템의 직류직권 모터방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$v_a = K_2 \cdot v_r \tag{1}$$

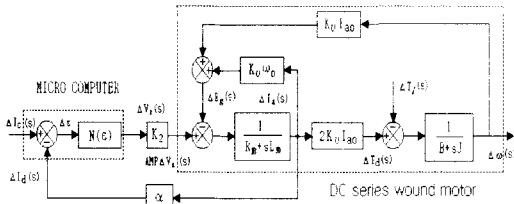
$$e_g = K_r \cdot i_a \cdot \bar{\omega} \tag{2}$$

$$v_a = R_m \cdot i_a + L_m \frac{di_a}{dt} + e_g \tag{3}$$

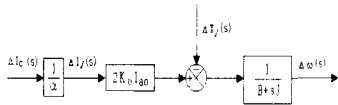
$$T_d = K_t \cdot (i_a)^2 \tag{4}$$

$$= J \frac{d\bar{\omega}}{dt} + B\bar{\omega} + T_l \tag{5}$$

이거시, v_a : 회전자 전압, v_r : 단자 전압
 e_g : 회전자 기전력, i_a : 회전자 전류.
 T_d : 출력 토크, T_l : 회전자 토크,
 K_t : 역기전력 상수, K_f : 회전자 상수



(a) The block diagram of a power circuit for DC series wound motor



(b) The equivalent block diagram

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

모터방정식의 식(4)에서 전달함수 해석기법을 적용하기 위해 제한된 작동범위 내에서만 비선형시스템을 선형화하여 제어기 설계를 한다. 따라서 작동점 부근에서 시스템 파라미터를 다음과 같다.

$$\Delta V_a(s) = K_2 \cdot \Delta V_r(s) \quad (6)$$

$$\Delta E_g(s) = K_t [I_{a0} \cdot \Delta \bar{\omega}(s) + \bar{\omega}_0 \cdot \Delta I_a(s)] \quad (7)$$

$$\Delta V_a(s) = R_m \cdot \Delta I_a(s) + sL_m \Delta I_a(s) + \Delta E_g(s) \quad (8)$$

$$\Delta T_d(s) = 2K_f \cdot I_{a0} \cdot \Delta I_a(s) \quad (9)$$

$$= sJ\Delta \bar{\omega}(s) + B\Delta \bar{\omega}(s) + \Delta T_l(s) \quad (10)$$

위 식으로 부터 Bang-Bang 전류제어기를 사용한 시스템 블록전도는 Fig. 5와 같다. 모터입피턴스는 R_m 과 L_m 으로 구성되며, 인덕턴스 L_m 는 모터 내부인덕턴스와 외부인덕턴스를 모두 포함한 성분이다. 상기 시스템의 전류제어에서 $I_a(s)$ 가 입력일 때 직류직권 모터시스템의 전달함수는 다음과 같이 된다.

$$\frac{\Delta \omega(s)}{\Delta I_c(s)} = \frac{N(\epsilon) \cdot K_2 \cdot 2K_f \cdot I_{a0}}{[(R_m + sL_m)(B + s) + N(\epsilon)K_t \alpha (B + s) + K_t \omega_0 (B + s) + 2K_f^2 I_{a0}^2]} \quad (11)$$

이 시스템에서 전류증폭기의 이득(K_2)과 기승함수 $N(\epsilon)$ 은 매우 큰 값을 갖기 때문에 이런 조건하에서 전달함수는 다음과 같이 간략화시킬 수 있다.

$$\lim_{N(\epsilon) \rightarrow \infty} \frac{\Delta \omega(s)}{\Delta I_c(s)} = \frac{2K_f I_{a0}}{\alpha \cdot (B + s)} \quad (12)$$

따라서 증가적인 전류제어기의 전달함수는 Fig. 5(b)와 같으며, 증가모델에 대한 해석은 스위칭 PWM 증폭기에서의 순방향 고이득(Forward high gain)에 기인하며 응답은 궤환회로에 의해 결정되어진다. 또한 전류제어기의 모델은 R-L부하에서의 전류제어 회로인 Fig. 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. Fig. 5(b)에서와 같이 전류를 입력, 속도를 출력으로 하는 경우 직류직권 모터시스템은 1차 미분방정식이 된다. 전류 궤환이득을 $\alpha(s)$ 의 동적소자로 변화시킬 때 증가 전달함수인 식(13)에서 시스템이 어떤 동적특성을 갖는지 예측할 수 있다. ⁽¹⁻⁶⁾

$$\frac{\Delta \omega(s)}{\Delta I_c(s)} = \frac{2K_f I_{a0}}{\alpha(s) \cdot (B + s)} \quad (13)$$

Fig. 4에서는 마이크로컴퓨터로 부터 출력된 디지털 신호의 전류명령치를 아날로그 신호의 전류값으로 변환하는 디지털/아날로그 신호 변환회로에 의해 변환된 아날로그 전류값의 리플 성분을 제거하기 위해 고역(High frequency ripple)성분을 제거하는 저역 필터(Low pass filters)와 Fig. 4에 표시된 전류검출기에서 검출된 전류추종치 즉, 모터시스템에 흐르는 궤환 전류값의 전압레벨을 설정된 기준 전압레벨로 전이(Shift)시키는 DC 레벨 전이기(DC level shifter)와 DC 레벨 전이기에 의해 전이된 궤환 전류를 증폭하는 궤환 전류증폭기(Feedback current amplifier)의 전류와 저역 필터로 부터 입력된 전류명령치 및 궤환 전류증폭기로 부터 궤환된 전류 추종치를 비교하여 전류 제한의 정보를 담고있는 ON/OFF 논리신호를 제공하는 히스테리시스형 ON/OFF 비교기로 구성되어 있다.

2.6 소프트웨어 구조 및 제어 알고리즘

본 장은 보상된 Bang-Bang제어 알고리즘의 개

요 및 초과 전력회로 구동용 PWM 발생 알고리즘을 개략적으로 서술하고, 소프트웨어 구조는 Fig. 6과 같으며 전단모드/후단모드 시스템을 적용하여 전단부에 실시간 인터럽트 루틴이 수행되고, 후단부에 표준 프로그램이 일괄 신호형식으로 수행되도록 하였다.

2.6.1 제어 알고리즘 개요

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

제어구간을 제어변수의 크기에 따라 일반모드와 미세모드의 2개 구간으로 나눈다.

첫번째 구간은 제어변수의 오차가 큰 경우의 불안정한 제어이며, 이 때 Bang-Bang 제어방식을 이용한다. 이 때의 동작모드는 다음과 같은 ON/OFF 제어모드가 존재한다.

- 1) Current Bypass Mode (부하상태에서 등판시 동작하는 모드)
- 2) Voltage Bypass Mode (부부하 상태에서 평지 고속 주행시 동작하는 모드)
- 3) Over-drive Mode (모터 정격 속도 이상으로 주행시 동작하는 모드)

두 번째 구간은 위의 불안정한 Bang-Bang 제어가 끝나고 오차가 작은 경우의 미세한 제어이며, 이 때 보상된 Bang-Bang 제어방식을 이용한다.

이 보상된 Bang-Bang 제어방식은 고속 주행시 최대 전압을 모터에 인가하여 가속하고, 등판시에는 차량의 속도에 따라 최대 전류를 조절하여 속도와 토크가 동시에 제어되도록 미세한 전류제어를 수행한다. 평지 정상 주행시는 정전압 제어에 의한 전류제어를 수행한다. 이 때의 전류 모드는 다음과 같은 제어모드가 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 개요

전류제어기는 실시간 동작이 요구되는 시스템

이므로 이를 동작시키기 위한 소프트웨어도 실시간 운영체계를 갖추어야 한다. 이를 위해서 개발한 컨트롤러의 소프트웨어는 주로 실시간 스케줄러에 의한 250[μsec] 인터럽트 서브루틴의 실행으로 동작된다.

Fig. 6에 표시된 흐름도는 전류제어기의 16개 인터럽트 프로그램 모듈이다. 인터럽트 발생시 각 기능 구현을 위한 16단계의 프로그램 모듈이 마련되어 현재 시스템의 전류상태 및 동작모드를 검출하여, 초과 전력회로의 게이트 구동용 신호인 PWM 파형의 ON/OFF 펄스 상태결정 및 신호출력을 수행하고, 실시간 인터럽트의 적산치계수 즉, 16 Unit (250[μsec] × 16 = 4[msec] : 250Hz PWM 주파수)를 1주기(4[msec])로 PWM 신호의 신호 주기폭을 1/16의 단위로 가변하여, 동작 시스템의 상태검출에 따른 비선형 동작에 대한 보상과 함께 적절한 디지털 PWM 신호파형을 적응적으로 발생시킨다. Fig. 7에서는 PWM 신호의 순차적인 발생을 위한 흐름도를 제시하였다.

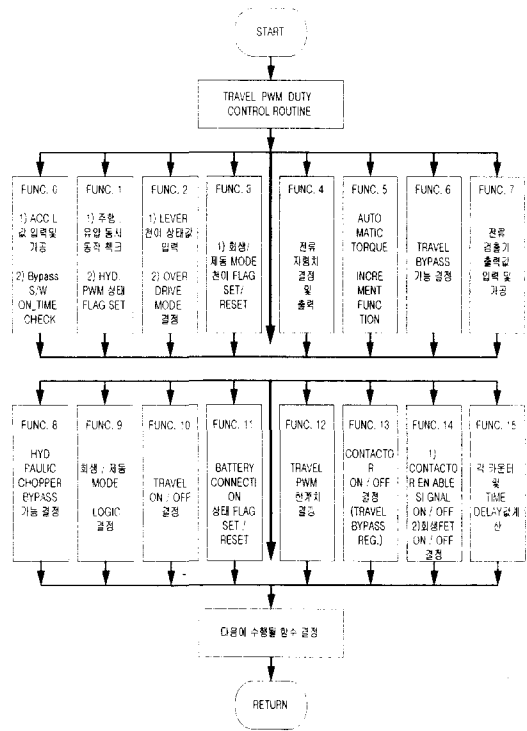


Fig. 6 The interrupt program configuration of a current controller

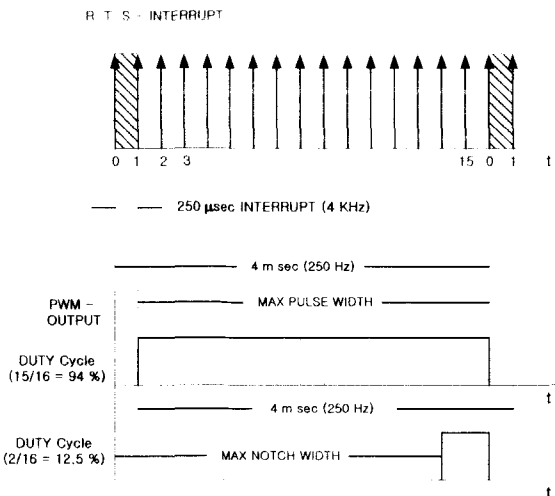


Fig. 7 The time chart of a PWM waveform

3. 실험

본 논문에서 제안된 제어방법의 유효성을 입증하기 위하여 다음과 같은 실험을 행하였다. 제2장에서 언급한 보상된 Bang-Bang 전류제어기와 초과 전력회로를 제작하였으며, 속도와 토크의 검출을 위하여 픽업 센서(Pickup sensor)와 토크 트랜스듀서(Torque transducer)를 사용하였다. 실험에 사용된 모터는 13.4[kw], 1,325[rpm] 직류직권 모터이며, 실시간 디지털제어를 위하여 80C196KC Single Board Computer를 제작하여 어셈블리 언어로 프로그래밍하였다.

실험에 사용된 모터의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 The Specification of DC series wound motor

항 목	사 양
Power [Kw]	13.4 [Kw]
Speed [rpm]	1,325 [rpm]
Voltage [V]	44.5 [V] DC
Current [A]	370 [A]
Winding	Series Wound
Time rating [min]	60 min at 140 °C

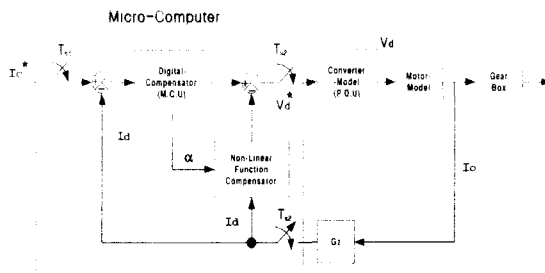
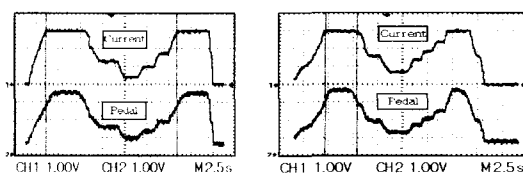
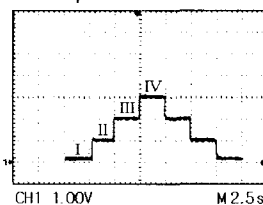


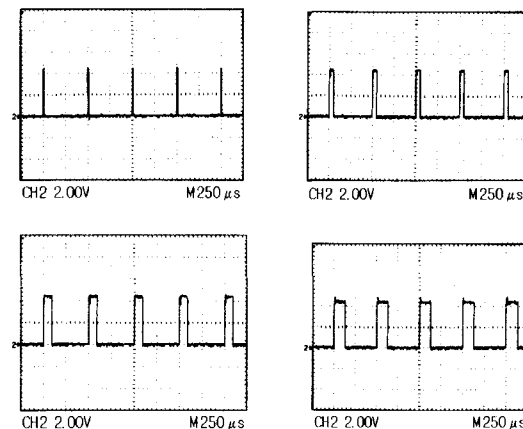
Fig. 8 The total system block diagram for current control of a real system



(a) The response of current command for acceleration pedal value



(b) The response of changing with continuous step for current command



(c) The input wave form of PWM for each zone

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

Fig. 9(a)는 가속 페달(Acceleration pedal)을 사용하여 전류명령치로 임의의 과형을 입력하였을 때의 과형이다. 아래쪽이 페달값이고 위쪽이 전류 센서에서 읽은 값이다. 여기서, 페달값은 3[V]이상 이 되면 포화가 되어 300[A]로 인식하도록 하였다.

시간 축에 있는 보조선들이 이러한 포화점을 표시하고 있다. Fig. 9(a)에서 알 수 있듯이 보조선과 교차하는 점 이상의 페달값에서는 전류 센서값이 300[A]로 포화된다.

Fig. 9(b)는 전류명령치가 주기적으로 상승(각각 0, 100[A], 200[A], 300[A])할 때의 응답을 나타낸 것이다. Fig. 9(c)는 Fig. 9(b)의 각 구간에 대한 PWM 제어 입력과형을 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 직류직권 모터시스템의 토크제어시 전류제어 방식이 전압제어 방식에 비하여 보다 더 적절함을 보였다. 이와 같은 결과는 본문에서 기술한 바와 같이 전압제어 방식에서는 전력 증폭단이 컨덴서 필터 입력으로 되어 기동/재동시 변동이 크게 변하여 출력 속도나 토크에 직접 영향을 끼쳤으나, 전류제어 방식으로 직류직권 모터를 구동했을때 PWM 증폭기 입력전원의 변동, 모터 내부 파라미터인 저항과 인덕턴스의 열직 변화에 영향을 받지 않고 제어할 수 있었다. 그리고 이 실험에서 나타난 결과로서 Fig. 9(a)의 I_L 과 I_c 가 일치하지 않는 이유는 직류직권 모터에 충분한 부하를 가하지 않으며 모터의 기동특성이 매우 좋아서 모터가 급속하게 복주상태(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 제한주기의 결정에 대한 연구가 추후에 보완되어야 할 사항으로 사료된다.

후 기

본 연구는 삼성중공업(주) 연구비와 부산대학교 정밀 정형 및 금형가공 연구센터의 지원하에 연구되었으며, 관계기관에 감사사를 드립니다.

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, 1986.
2. E. O. Doebelin, *Control System Principles and Design*, John Wiley & Sons Inc., pp. 221~238, 1985.
3. M. H. Rashid, *Power Electronics Circuits, Device, and Applications*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 326~328, 1988.
4. DC Motor, Speed Controls, Servo Systems, *Engineering Handbook* (3rd Ed.), Electro-Craft Corp., Minnesota, pp. 4-32~36, 1975.
5. S. Bennett, *Real Time Computer Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 137~145, 1988.
6. J. J. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, New Jersey, pp. 203~205, 1991.
7. 김종건, 이만형, 윤강섭, 배종일, "직류직권 모터용 보상된 Bang-Bang 전류제어기 개발," '96 한국자동제어학술회의 논문집 국내학술편, pp. 52-55, 10월, 1996.
8. 김종건, 배종일, 이만형, *전동차 주행 제어시스템 개발*, 삼성중공업(주) 위탁연구 최종보고서, 6월, 1998.