

BLDC 모터의 구동장치 개발 및 정밀 반복제어

Development of Driver for BLDC Motor System and Precise Repetitive Control

강 병철*, 이 충환*, 김 환성**, 김 상봉**

Byeong Chul Kang*, Choong Hwan Lee*, Hwan Seong Kim**, and Sang Bong Kim**

*부경대학교 대학원 기계공학과, **부경대학교 공과대학 기계공학과

Tel : (051) 620-6457, Fax : (051) 621-1411, E-mail : memcl@sun630cc.nfup.ac.kr

Abstracts : This paper describes a fully digitalized driver for BLDC motors and the driver is realized by a single chip microprocessor. The speed change can be done by using the signal obtained from the position detecting sensor and adjusting the pulse width at the input channel of power module. In order to verify the effectiveness, a repetitive control method is adopted in the speed control tracking a periodic reference change in the BLDC motor system. The experimental results are shown for the reference tracking accurately according to the design parameter variation in the repetitive controller design.

Key words : BLDC (Brushless DC) Motor, PWM Inverter, Precise Repetitive Control

1. 서론

산업용 각종 기계장치의 구동부로서는 종래 제어가 간편하고 제어성능이 우수한 DC모터가 사용되어져 왔으나, 기계적 정류시에 발생하는 스파크, 브러시 및 커뮤테이터의 구조적 문제로 인하여 여러가지 문제점을 일으켜 왔다. 최근 브러시가 없는 브러시리스 DC모터(이하 BLDC모터라 칭함)가 개발되어 DC모터의 대체 모터로서 주목받고 있으며, 그 구동장치 및 제어 방법에 관한 연구가 행해지고 있다^{[1) ~ (4)}.

BLDC 모터는 아날로그적인 회로기술과 소프트웨어적인 방법 어느 쪽으로도 구동 가능하지만, 아날로그적인 회로기술에 기초한 구동법은 정밀한 제어나 이론적 알고리즘을 실현하는데 어려움이 있어, 주로 위치측정용 센서가 없는 일정한 구동 전압방식이나 위치측정용 센서를 구비했을 경우의 가변전압 구동방식에 널리 이용되고 있다. 한편 소프트웨어적인 구동방식은 최근 마이크로프로세서의 눈부신 발전에 의해 제어 알고리즘의 처리 속도면에서 아날로그 방식에 비해 그렇게 뒤지지 않을 정도의 능력을 갖게 되어, 정밀성을 요구하는 제어나 순수 제어이론에 기초한 알고리즘의 실현에 있어 아주 유연성 있게 대응할 수 있는 개발환경을 갖추고 있음으로 인하여, 대부분의 산업분야에서는 이와 같은 구동방식을 선호하고 있으며, 그 응용범위도 점점 넓혀져가고 있는 추세에 있다^{[2) ~ (4)}.

본 연구에서는 마이크로프로세서에 기초한 소프트웨어적인 방법으로 BLDC 모터를 구동할 수 있는 알고리즘을 실현하였으며, 모터의 구동을 위해 파워소자의 입력단에 가해지는 펄스의 폭을 조절함으로써 속도의 가변을 가능하게 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 BLDC 모터 구동장치의 효율성을 검증하기 위해, 주어지는 목표치가 주기성을 갖는 시스템에 대해 반복제어법을 이용하여 정밀한 속도제어를 실현하는 실험시행을 행하였다. 실험시행 시스템에서는, 그 목표치 변경은 임의의 주기적 변화를 상정하여 반복제어 실험 프로그램 내에서 일정한 주기마다 변동되도록 하였으며, 설계 파라미터의 변화에 따른 목표치 추종성에 대한 실험결과를 보였다.

2. BLDC 모터의 원리 및 구동장치

2.1 BLDC 모터의 원리

BLDC 서보모터는 DC 서보모터의 보수성을 향상시킨 서보모터이며, 자속을 만들기 위한 영구자석이 로터에 내장된 회전 계자형이며 권선은 스테이터측에 설치된 정지 전기자이다. 즉, DC 서보모터와 비교해보면 로터와 스테이터의 전기적 역할이 반대로 구성되어 있다. 따라서, 기계적 정류 기구를 전자화 하는 것에 의해 전기적 노이즈, 기계적 노이즈가 적으며, 고속

회제어가 용이하다. 또한, 기기의 고밀도화에 따른 응답이 용이하며, 신뢰성이 높은 등의 장점을 지니고 있다.

2.2 BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터는 교류를 인가하므로써 구동되고 있지만, 교류와 동기해서 회전하는 축(d, q 축)에 대해 고려한다면 상대속도는 영이 되어 직류를 교류로 가정하여 수식모델을 간략화 할 수 있으며, 다음과 같은 전압·전류 관계로서 나타낼 수 있다^{[1)}.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a + \frac{d}{dt} L_a & -\omega_m L_a \\ \omega_m L_a & R_a + \frac{d}{dt} L_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_T \omega_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서

- R_a : 전기자 저항
- L_a : 전기자 인덕턴스
- ω_m : 모터의 기계 각속도
- K_T : 동가 토오크 상수
- $V_{d,q}$: d, q 축의 각각의 전압
- $i_{d,q}$: d, q 축의 각각의 전류

또한, BLDC 모터의 기계 방정식은 다음의 토오크 요소에 기초한 식으로 나타낼 수 있다.

$$J \dot{\omega}_m + B \omega_m = K_T i_q - \tau_L \quad (2)$$

- 여기서 J : 회전체의 관성 모우멘트
- B : 회전체의 점성 마찰계수
- τ_L : 부하 토오크

일반적으로, BLDC 모터는 $i_q=0$ 로써 제어되므로 i_d 는 모터의 전류로 된다. 이를 이용하면 (1)식은

$$i_d = -\frac{R_a}{L_a} i_d + \frac{V_d}{L_a} - \frac{K_T}{L_a} \omega_m \quad (3)$$

으로 기술된다.

부하 토오크와 초기치를 영으로 하여 (2), (3)식을 라플라스 변환하면

$$sJ\omega_m(s) + B\omega_m(s) = K_T I_d(s) \quad (4)$$

과

$$sI_d(s) = -\frac{R_a}{L_a} I_d(s) + \frac{1}{L_a} V_d(s) - \frac{K_T}{L_a} \omega_m(s) \quad (5)$$

로 나타내어진다. 여기서 $I_d(s)$, $V_d(s)$, $\omega_m(s)$ 는 i_d , V_d , ω_m 의 라플라스 변수이다.

(5)식을 (4)식에 대입하여 전압과 각속도에 대해 정리하면

$$P(s) = \frac{\omega_m(s)}{V_d(s)} = \frac{K_T}{s^2 J L_a + s(J R_a + L_a B) + B R_a + K_T} \quad (6)$$

과 같은 2차제로 구성이 가능하다. 따라서 입력 V_d 에 의해 각속도 ω_m 이 자유롭게 제어 가능함을 보이고 있다.

2.2 BLDC 모터의 구동장치

BLDC 모터의 권선구조는 3상권선이 일반적이며, 권선적 측면에서 보면 BLDC 모터는 교류모터, 즉 영구자석형 동기모터로 나타낼 수 있다. 따라서, BLDC 모터의 구동장치로서 종래의 PWM(Pulse Width Modulation) 파형의 인버터(Inverter)에 의한 구동법이 고려되어진다. 본 절에서는 마이크로 컴퓨터(80C196)에 근거한 디지털 3상 PWM발생법에 대해서 논한다. Fig. 1에서는 BLDC 모터의 구동장치의 하드웨어를 보이고 있다.

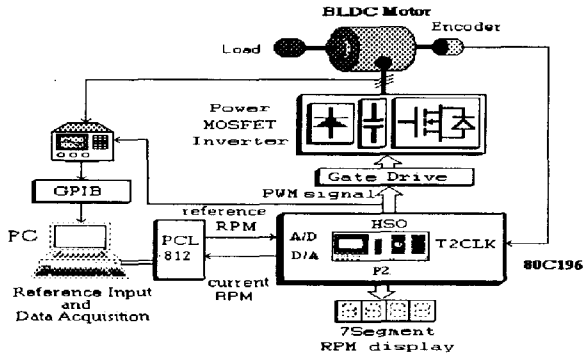


Fig. 1 Configuration of BLDC Motor Drive System

본 절에서 다루는 PWM 발생법^[6]은 Sine-PWM기법을 응용하여 80C196에 기초하여 소프트웨어적인 방법으로 실현하므로, 회로의 단순화 및 아날로그회로에서 발생하는 문제점들을 해결할 수 있다. BLDC 모터의 각상에 인가되는 상전압을 펄스폭 변조하면, 변조된 펄스폭은 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$t_{pw} = \frac{1}{2} T_c m (\cos(\omega t) + 1) \quad (7)$$

여기서, T_c 는 샘플링 주기, ω 는 변조파의 각 주파수, m 은 변조지수로서 $0 \leq m \leq 1$ 이다.

(7)식을 이산화하면, 다음과 같이 주어지며

$$t_{pw}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m (\cos(2\pi \frac{k}{N}) + 1), k=1,2,\dots,N \quad (8)$$

여기서, $N = \frac{f_c}{f_m}$ 이며 f_c 는 샘플링 주파수, f_m 은 변조파형의 주파수를 나타낸다. (8)식에서 단락방지시간 t_d 를 고려하면, 다음식으로 실현되어야 한다.

$$t_{pw}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m (\cos(2\pi \frac{k}{N}) + 1) - t_d, k=1,2,\dots,N \quad (9)$$

(9)식으로 부터 디지털 실현을 위해 한 샘플링 구간내의 최소 펄스폭을 고려하여 t_β 라고 하면, t_β 와 t_{pw} 은 최소값과 최대값을 제한하는 요소로 작용하며 최대·최소값은 각각 다음과 같이 된다.

$$t_{pw}^{\max} = T_c - 2t_d, t_{pw}^{\min} = t_\beta$$

3상 인버터회로의 6개의 스위칭 소자는 각각 120도 위상차를 두고 실현되어야 하며, (9)식으로 부터 간단히 유도 될 수 있다.

3. 반복제어기의 설계

3.1 반복제어기의 원리

스텝상의 입력 혹은 외란에 대하여 목표치 추종성 및 외란 소거성을 지니는 제어계를 구성하기 위해서는 적분보상기가 폐루프 내부에 존재하여야 한다. 그러나 이러한 적분보상기를 가진 서보계에 스텝이외의 일정주기를 지닌 목표치를 가할 경우, 이에 대한 추종성은 보장할 수 없게 되며, 임의의 주기의 목표신호에 대해서 추종성을 지니게 하기 위해서는 내부모델원리에 의해 주기적인 목표신호를 발생시키는 기구가 폐루프 내부에 존재하여야 한다. 따라서 주기 L 의 주기함수를 가진 제어기로서 Fig. 2와 같은 제어기를 구성 할 수 있으며, 이를 반복제어기(Repetitive Control System)라고 한다.

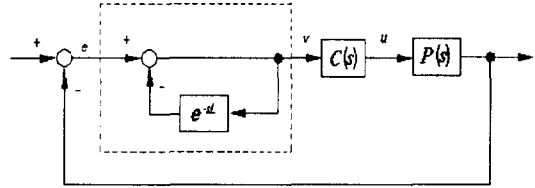


Fig. 2 Block Diagram of Repetitive Control System

그러나, 실제의 시스템에서는 주기함수의 추종이라고 하여도, 어느 정도 이상의 고주파성분은 필요하지 않으며, 이러한 점의 개선법에 대해 수정조 반복제어계(Modified Repetitive Control system)가 제안되어, 시간지연요소 앞에 저역통과 필터(Low pass filter)를 추가하여 불필요한 고주파성분을 제거하는 기능을 가지고 있다.

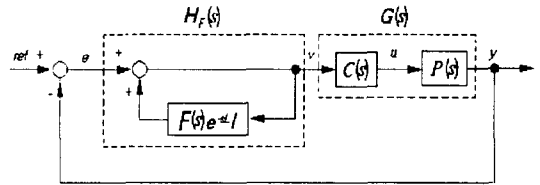


Fig. 3 Block Diagram of Modified Repetitive Control System

3.2 반복제어기의 설계^[5]

반복제어기는 상태공간표현법, 기약분해표현법 및 이산시간에 의한 설계법 등이 제안되고 있으나, 본 BLDC 모터 시스템에서는 다루기 쉬운 상태공간표현법에 의해 설계를 행하도록 한다.

<상태공간표현법에 의한 반복제어기 설계 알고리즘>

상태공간표현에 의한 반복제어계 설계법은 최적레규레이터 혹은 칼만 필터의 원조건(Circle condition)과 밀접히 관계가 있다.

먼저, 제어대상을 $P(s)$ 라 하고 다음과 같은 상태공간표현으로

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (10)$$

주어진 경우를 고려하자. 단, $x(t) \in R^n$, $u(t) \in R^m$, $y(t) \in R^p$ 으로 (A, B) 는 가제어, (C, A) 는 가관측으로 한다. 또한, $P(s)$ 는 최소 위상계로 가정한다, 즉

$$\text{Rank} \begin{bmatrix} sI - A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = n + p, \quad \forall \text{Re } s \geq 0 \quad (11)$$

이 성립한다고 한다.

Step. 1 : 제어대상 $P(s)$ 의 최소실현 (10)식을 구한다. 즉

$$P(s) = C(sI - A)^{-1}B$$

Step. 2 : 다음의 보상기 $C(s)$ 를 구성하며

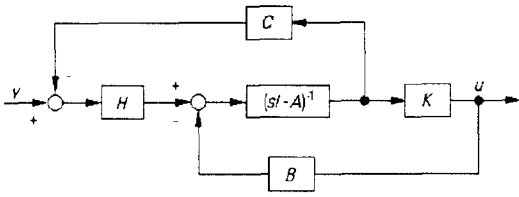


Fig. 4 Block Diagram of Compensator for Repetitive Control

보상기의 게인 H 와 K 를 다음과 같이 구한다.

(i) 게인 H 는 칼만 필터의 게인 Q 를 $(Q^{1/2}, A)$ 가 관측이 되는 적당한 반정정대칭행렬로 하여, 리카치방정식

$$A\Sigma + \Sigma A^T + Q - \Sigma C^T C \Sigma = 0 \quad (12)$$

의 유일한 정정대칭행렬 Σ 라고 할때,

$$H = \Sigma C^T \quad (13)$$

로 정한다.

(ii) 게인 K 는 최적레규레이터법에 의해 다음과 같이 정한다. 제어대상 (10)식에 대해서 2차 평가함수

$$J = \int_0^{\infty} (\rho y(t)^T \Phi y(t) + u(t)u(t)) dt$$

를 최소로 하는 상태피드백게인 K_p 을 구한다. 단, Φ 는 정정대칭행렬이다. 즉,

$$K_p = B^T P_p \quad (14)$$

단, P_p 는 리카치방정식

$$A^T P_p + P_p A + \rho \Phi - P_p B B^T P_p = 0 \quad (15)$$

의 유일한 정정대칭해이다.

여기서, 파라미터 ρ 는 주어진 추종대역내에서

$$\sigma_- [I + G(j\omega)] > 1$$

를 만족하는 충분히 큰 ρ 를 택한다.

Step. 3 : $\sigma_- [I + G(j\omega)]$ 를 보드선도상에 플롯트하여 $[F(j\omega)]$ 가 이것보다 밑에 있도록, 즉

$$\sigma_- [I + G(j\omega)] > [F(j\omega)] \quad (16)$$

를 만족하는 $F(s)$ 를 정한다. 단,

$$F(j\omega) \approx 1, \text{ all desired frequency domain}$$

이다.

4. 실험 및 고찰

4.1 실험장치의 구성

BLDC 모터의 정밀반복제어 시스템은 Fig. 1 과 같이 구성하였으며, 실험에 사용된 컴퓨터는 32bits 퍼스날 컴퓨터이다. 반복제어 알고리즘에 의해 계산된 제어 입력치를 아날로그 신호로 변환하는 D/A 변환기 및 모터 시스템의 출력치인 속도 정보의 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기는 PCL-812(Adbantech Comp.)를 사용하였다. 모터의 속도검출은 BLDC모터 구동 임프의 속도 모니터링 신호(600rpm/V)를 이용하였다. 컴퓨터와 BLDC 모터 사이에 연결된 파워 증폭기는 자체 제작 설계한 PWM 방식의 인버터를 사용하였다. 컴퓨터에서 제어의 실현은 C

언어에 의해서 이루어졌고 제어주기는 2ms로 하였다.

4.2 파라미터의 동정⁽⁷⁾

BLDC 모터의 전달함수는 (6)식과 같이 입력전압에 대한 각속도로서 표현되며, 이러한 전달함수를 실현하기 위해서는 시스템의 파라미터의 동정(Identification)이 필요하다. 시스템의 파라미터 동정은 스텝응답 및 주파수응답 등에 의한 방법이 알려져 있으나, 본 논문에서는 ARX(Auto Regressive eXogenous)모델에 의한 동정법으로 시스템의 파라미터를 동정하도록 한다.

ARX모델이란, 다음 식으로 주어지며

$$A(q)y(k) = B(q)u(k)$$

여기서

$$\begin{aligned} A(q) &\approx 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \\ B(q) &\approx b_1 q^{-1} + \dots + a_{n_b} q^{-n_b} \end{aligned}$$

입력 $u(k)$ 와 출력 $y(k)$ 으로 부터 두개의 다항식 $A(q)$, $B(q)$ 를 구하는 것을 ARX모델에 의한 동정법이다. 그러나, ARX모델은 $u(k)$ 를 확률변수열, 즉 백색잡음과 같은 확률변수열의 경우에만 시스템의 입력력 관계로 부터 기술될 수 있다. 따라서, 실제 시스템으로부터 동정을 행하기 위해서 $u(k)$ 는 백색성 동정입력이어야 하며, 이상적인 백색잡음은 실현 불가능하므로 인위적인 규칙에 따라 생성된 의사불규칙신호를 이용하여야 한다. 이에 대한 대표적인 신호로서는 M계열(Maximum Length Linear Shift Resister Sequence)을 들 수 있다.

본 실험에서는 BLDC 모터의 동정을 하기 위해서 시스템의 스텝응답을 구한 다음, 스텝응답으로 부터 정정시간(Settling time), T_{95} 을 구해

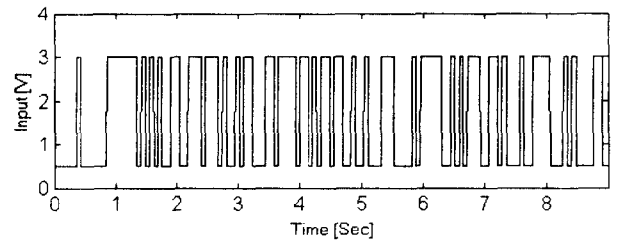
$$\frac{1}{15} T_{95} \leq T \leq \frac{1}{4} T_{95}$$

을 만족하는 범위 내에서 샘플링 시간 T 를 결정한다. BLDC 모터의 스텝응답 결과로 부터

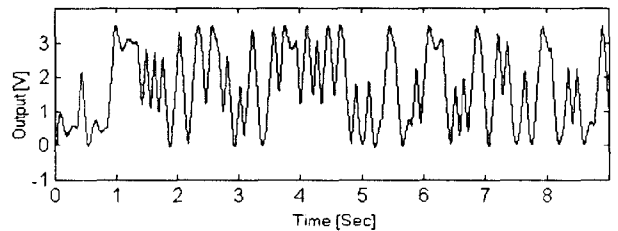
$$T_{95} = 0.456 \text{ [Sec]}$$

$$T = 0.007 \text{ [Sec]}$$

로 결정하였다. 동정입력은 M계열에 의거하여 정하여 동정실험을 행한 결과는 다음과 같이 보여진다.



(a) Input M-Sequence signal



(b) Output signal

Fig. 5 Identification of BLDC motor system

위의 동정결과에 의해 구해진 ARX모델을 상태방정식으로 변환시키면 다음과 같이 구해진다.

$$A = \begin{bmatrix} 113.62 & 205.06 & 44.04 \\ -60.08 & -191.53 & 139.51 \\ -56.12 & -12.05 & -181.22 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 4.88 \\ -0.20 \\ -0.71 \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$C = [1 \ 0 \ 0]$$

동정된 시스템모델로부터 시뮬레이션을 행한 결과와 실제 실험결과와의 비교는 Fig. 6 과 같이 보인다.

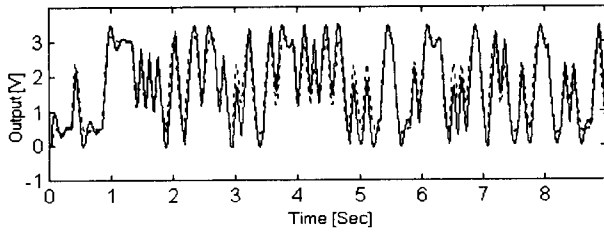


Fig. 6 Experimental result of identified system

Fig. 6으로 부터 실험결과와 시뮬레이션 결과의 일치함을 보이고 있으며, 이러한 일치로부터 BLDC 모터 시스템의 동정이 잘 행하여짐을 알 수 있다.

4.3 반복제어계의 설계

시스템동정에 의해 구해진 시스템 (17)식은 (11)식의 조건을 만족하므로 반복제어계의 구성이 가능하며, (13), (14)식으로부터 각각의 게인 H , K 는

$$H = [-4.6947 \ -2.2810 \ -1.2408]^T$$

$$K = [-7.5016 \ -6.7576 \ -6.0561]$$

와 같이 구해진다. 이때 $\rho=10$ 이다.

반복제어계의 대역필터 $F(s)$ 는

$$F(s) = \frac{1}{0.02s+1}$$

으로 설계하였으며, 이때의 (16)식에 대한 보드선도는 다음과 같이 나타내어진다.

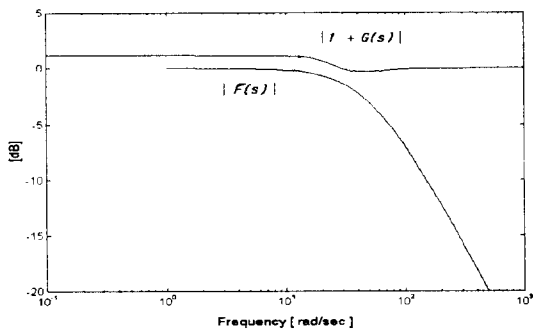


Fig. 7 Bode plot for repetitive control

따라서, 반복제어계는 안정하게 설계되었음을 알 수 있다.

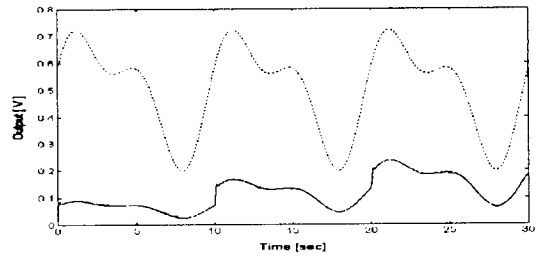
실험시 주기적인 목표치는

$$ref(t) = 1 + 0.5(\sin(\omega_L t) + 0.4(\sin(2\omega_L t) + \cos(2\omega_L t))), \quad \omega_L = 2\pi/L$$

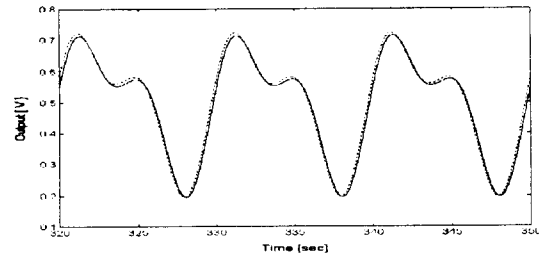
이며, $L = 10$ [Sec] 로 하였다.

4.4 결과 및 고찰

일정 주기를 속도목표입력으로 하는 BLDC 모터의 반복 속도제어를 행한 결과 Fig. 8과 같이 결과를 보인다.



(a) A result of the repetitive control (1-3 period)



(b) A result of the repetitive control (32-35 period)

Fig. 8 Experimental results of the repetitive control

Fig. 8 (a)는 반복 제어의 기동시 실험 결과를 보여주며 (b)는 여러 주기가 지난 뒤 주기적 입력에 잘 추종함을 보여 준다. 여기서, 점선은 목표치이고 실선은 출력이다. 시스템의 지연이 있어서 목표치 주기를 적게 했을 경우 응답성이 떨어진다. 따라서 지연 시간에 대한 반복 제어계가 급후과제로 남아있다.

5. 결론

본 연구에서는 마이크로프로세서에 기초한 소프트웨어적인 방법으로 BLDC 모터를 구동할 수 있는 알고리즘을 실현하였다. 또한 본 연구에서 개발한 BLDC 모터 구동장치의 효율성을 검증하기 위해, 목표치가 주기성을 갖는 시스템에 대해 반복제어법을 이용하여 정밀한 속도제어를 실현하는 실기시험을 행하였다.

실기시험 시스템에서는, 그 목표치 변경은 임의의 주기적 변화를 상정하여 반복제어 실현 프로그램 내에서 일정한 주기마다 변동되도록 하였으며, 실제 파라미터의 변화에 따른 목표치 추종성에 대한 실험결과를 보였다. 실험결과로부터 본 연구에서 개발한 디지털적인 구동방식의 유효성을 입증할 수 있었으며 앞으로 그 응용 면에서의 연구와 더불어 신뢰성 부분에 대한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 기전연구소, "브러시리스 서보모터에 기초와 응용", 첨단과학기술도서관, 1992.
- [2] T. Takashita and N. Matsui, "Sensorless Brushless DC Motor Drive with EMF Constant Identifier", IECON'94, pp. 14~19, 1994.
- [3] D. Grenier, R. Mende, and J.P. Louis, "Comparison of Several Control Strategies for D.C. Brushless Drives", IECON'94, pp. 26~31, 1994.
- [4] 정석권 외 5명, "자기동조법에 의한 BLDC전동기의 정밀 위치제어", 한국정밀공학회 '95년도 추계학술대회는문집, pp. 460~465, 1995.
- [5] 中野道雄 외 3명, "繰返し制御", 日本計測自動制御學會, 1989.
- [6] 전봉환 외 3명, "단일칩 마이크로프로세서에 의한 전 디지털화 PWM의 실현", 대한전기학회, Vol. 45-5-9, pp. 674~682, 1995.
- [7] 足立修一, "ユーザのためのシステム同定理論", 일본자동계측학회, 1993.