

BLDC 모터의 구동방법과 정밀 반복제어

강병철* · 이충환* · 김상봉**

A Driving Method and Precise Repetitive Control of BLDC Motor

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

Key words : BLDC motor(BLDC모터), Repetitive Control(반복제어), Identification(확정),
Auto regressive exogenous model(ARX 모델)

Abstract

This paper describes a fully digitalized driver for BLDC motors which 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 establish a speed control system, a repetitive control method is adopted to track a periodic reference change in the BLDC motor system. The experimental results show accurate reference tracking performance under the given periodic reference in the repetitive controller design.

1. 서 론

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

BLDC 모터는 아날로그 회로기술 또는 소프트웨어 방법 어느 쪽으로도 구동 가능하지만, 아날로

그 회로기술에 기초한 구동법은 정밀한 제어나 이론적 알고리즘을 실현하는데 어려움이 있다. 따라서, 아날로그 회로는 위치측정용 센서가 없는 일정한 구동 전압방식이나 위치측정용 센서를 구비했을 경우의 가변전압 구동방식에 널리 이용되고 있다. 한편 소프트웨어 구동방식은 마이크로프로세서의 발전에 따라 제어 알고리즘의 처리속도면에서 아날로그 방식에 비해 뒤지지 않을 정도의 능력을 갖게 되었다. 정밀성을 요구하는 제어나 순수 제어이론에 기초한 알고리즘의 실현에 있어 소프트웨어 구동방식은 유연성 있게 대응할 수 있는 환경을 갖추게 되었으며, 그 응용범위도 점점 넓혀져 가고 있는 추세에 있다^{[2]-[4]}.

* 부경대학교 대학원 기계공학과(원고접수일 : 98년 10월)
** 부경대학교 대학원 기계·자동차학부

본 연구에서는 마이크로프로세서를 이용한 소프트웨어 방법으로 BLDC 모터를 구동할 수 있는 알고리즘을 실현하였으며, 모터의 구동을 위해 파워 소자의 입력단에 가해지는 펄스의 폭을 조절함으로써 속도의 가변을 가능하게 하였다. 또한 본 연구에서 개발한 BLDC 모터 구동장치의 타당성을 검증하기 위해, 목표치가 주기성을 갖는 시스템에 대해 반복제어법을 이용하여 정밀한 속도제어를 실현하는 실기시험을 행하였다. 실험 시스템에서는, 그 목표치 변경은 임의의 주기적 변화를 상정하여 반복제어 실현 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 모터이며, 차속을 만들기 위한 영구자석이 로터에 내장된 회전 계자형이며 권선은 스테이터 측에 설치된 정지 전기자이다. 즉, DC 서보모터와 비교해 보면 로터와 스테이터의 전기적 역할이 반대로 구성되어 있다. 따라서, 기계적 정류기구를 전자화 하는 것에 의해 전기적 노이즈, 기계적 노이즈가 적으며, 고속화제어가 용이하다. 또한, 기기의 고밀도화에 따른 응답이 용이하며, 신뢰성이 높은 등의 장점을 지니고 있다.

2.2 BLDC 모터의 모델링

BLDC 모터는 교류에 의해 구동되지만, 교류와 동기해서 회전하는 축(d, q 축)에 대해 고려한다면 상대속도는 영이 되어 교류를 직류로 가정하여 수식모델을 간략화 할 수 있으며, 다음과 같은 전압·전류관계로써 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 는 전기자 저항, L_a 는 전기자 인덕턴스, ω_m 는 모터의 회전각속도, K_T 는 등가 토크 상

수, V_{dq} 는 d, q 축의 전압, i_{dq} 는 d, q 축의 전류이다.

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

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

여기서 J 는 회전체의 관성 모멘트, B 는 회전체의 점성 마찰계수, τ_L 는 부하 토크이다.

일반적으로, BLDC 모터는 $i_q=0$ 으로서 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 토크와 초기치를 영으로 하여 (2), (3)식을 라플라스 변환하면

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

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

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

(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 2차계로 모델링 된다. 따라서 (6)식으로부터 입력 V_d 에 의해 각속도 ω_m 이 자유롭게 제어될 수 있음을 볼 수 있다.

2.3 BLDC 모터의 구동장치

BLDC 모터의 권선 구조는 3상권선이 일반적이며, 권선적 측면에서 보면 BLDC 모터는 교류모터, 즉 영구자석형 동기모터로 나타낼 수 있다. 따라서, BLDC 모터의 구동장치로서 종래의 PWM(Pulse Width Modulation)파형의 인버터에 의한 구동법이 고려되어 진다. 본 절에서는 마이크

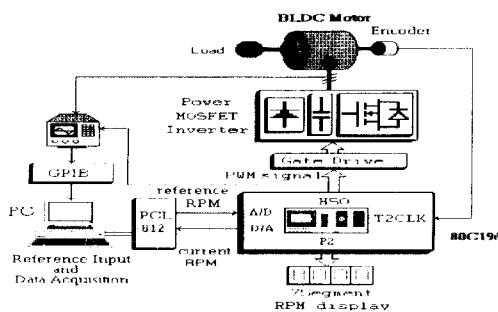


Fig. 1 Configuration of BLDC motor drive system

로프로세서 80C196에 의한 디지털 3상 PWM발생법에 대해서 논한다. Fig. 1에서는 BLDC 모터의 구동장치의 하드웨어를 보이고 있다.

본 절에서 다루는 PWM 발생법^[6]은 Sine-PWM 기법을 응용한 소프트웨어로 실현하므로 회로를 단순화시킬 뿐만 아니라 아날로그회로에서 발생하는 문제점을 해결할 수 있다. BLDC 모터의 각 상에 인가되는 상전압을 펄스폭 변조하면, 변조된 펄스폭은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$t_{pw} = \frac{1}{2} T_c m(\cos(\omega t) + 1), \quad 0 \leq t \quad (7)$$

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

(7)식을 이산화 하면, 다음과 같이 주어지며

$$t_{pw}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m \left(\cos\left(2\pi \frac{k}{N}\right) + 1 \right), \quad k=0,1,2,\dots,N \quad (8)$$

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

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

(9)식으로부터 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.

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

3상 인버터회로의 6개의 스위칭 소자는 각각 120도 위상차를 두고 실현되어야 하며, (9)식으로부터 간단히 유도될 수 있다.

3. 반복제어기의 설계

3.1 반복제어기의 원리

스텝 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, 임의 주기를 가진 목표신호에 대해서 추종성을 향상시키기 위해서는 내부모델원리에 의해 주기적인 목표신호를 발생시키는 기구가 폐루프 내부에 존재하여야 한다. 따라서 주기 L 의 주기함수를 가진 제어기로서 Fig. 2와 같은 제어기를 구성할 수 있으며, 이를 반복제어기(repetitive control system)라고 한다. 여기서 $P(s)$ 는 플랜트, $C(s)$ 는 안정화 제어기이며, 점선으로 표시한 부분은 반복제어기를 나타낸다.

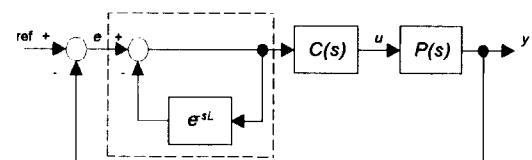


Fig. 2 Block diagram of repetitive control system

그러나, 실제의 시스템에서는 주기함수의 추종이라고 하여도, 어느 정도 이상의 고주파성분은 필요하지 않으며, 이러한 점을 개선한 방법으로 수정 반복제어계(modified repetitive control system)

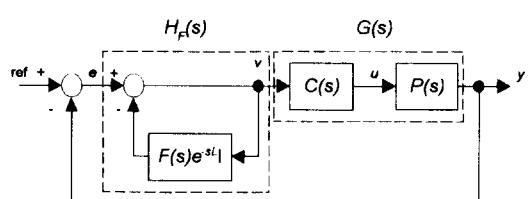


Fig. 3 Block diagram of modified repetitive control system

가 제안되어(Fig. 3), 시간지연요소 앞에 저역통과 필터를 추가하므로써 불필요한 고주파성분을 제거하는 기능을 가지고 있다.

3. 2 반복제어기의 설계⁽⁵⁾

반복제어기는 상태공간표현법, 기약분해표현법 및 이산시간에 의한 설계법 등의 형태로 제안되고 있으나, 본 BLDC 모터 시스템에서는 다루기 쉬운 상태공간표현법에 의한 반복제어기의 설계에 관하여 논하였으며 그 알고리즘은 다음과 같다.

〈상태공간표현법에 의한 반복제어기 설계 알고리즘〉

상태공간표현에 의한 반복제어계 설계법은 최적레귤레이터 혹은 칼만필터의 원조건(circle condition)과 밀접한 관계가 있다. 먼저, 제어대상을 $P(s)$ 라 하고 다음과 같은 상태공간표현으로 모델된 경우를 고려하자.

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (10a)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (10b)$$

단, $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$ 으로 (A, B) 는 가제어, (C, A) 는 가관측이라 가정한다. 또한, $P(s)$ 는 최소위상계로 가정한다, 즉

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

이 성립한다고 한다. 여기서 s 는 복소수를 나타낸다.

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

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

Step. 2 : 다음과 같이 보상기 $C(s)$ 를 구성한 후,

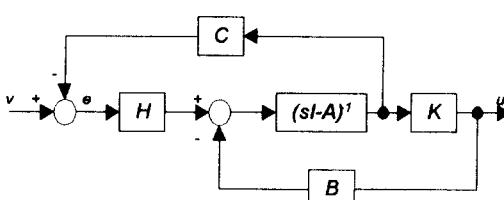


Fig. 4 Block diagram of compensator for repetitive control

보상기의 계인 H 와 K 를 다음과 같이 구한다.

(i) 계인 H 는 칼만필터의 계인 Q 를 $(Q^{1/2}, A)$ 가 가관측이 되는 적당한 반한정대칭행렬로 하여, 리카치방정식

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

의 유일한 한정대칭해를 Σ 라고 할 때,

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

로 정한다.

(ii) 계인 K 는 최적 레귤레이터법에 의해 다음과 같이 정한다.

제어대상(10)식에 대해서 2차 평가함수

$$J = \int_0^\infty (\rho y(t)^T \Phi y(t) + u(t)^2) dt$$

를 최소로 하는 상태피드백계인 K 을 구한다. 단, Φ 는 한정대칭행렬이다. 즉,

$$K = B^T P_\rho \quad (14)$$

단, P_ρ 는 리카치방정식

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

의 유일한 한정대칭해이다.

여기서, 파라미터 ρ 는 주어진 추종대역내에서

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

를 만족하는 충분히 큰 ρ 를 택한다. 여기서 $\sigma_-(\cdot)$ 는 최저특이치이다.

Step. 3 : $\sigma_- |I + G(j\omega)|$ 를 보드선도상에 기록하여 $|F(j\omega)|$ 를 이보다 작도록, 즉

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

를 만족하는 $F(s)$ 를 정한다. 단, 고려되는 모든 주파수영역에서 $F(j\omega) \approx 1$ 이다.

4. 실험 및 고찰

4. 1 실험장치의 구성

BLDC 모터(50W, 3000rpm)의 정밀 반복제어시스템은 Fig. 1과 같이 구성하였다. 반복제어 알고리즘은 Fig. 4와 같은 구조로 구성되었다.

리듬에 의해 계산된 제어 입력치를 아날로그 신호로 변환하는 D/A 변환기 및 모터 속도신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기는 PCL-812를 사용하였다. 모터의 속도검출은 BLDC모터 구동 앰프의 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 이루어 졌고 제어주기는 2ms로 하였다.

4. 2 파라미터의 확정⁽⁷⁾

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

ARX모델이란, 다음 식으로 주어지며

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

여기서

$$\begin{aligned} A(q) &\approx 1+a_1q^{-1}+\cdots+a_{na}q^{-na} \\ B(q) &\approx b_1q^{-1}+\cdots+b_nbq^{-nb} \end{aligned}$$

입력 $u(k)$ 와 출력 $y(k)$ 로부터 두개의 다항식 $A(q), B(q)$ 를 구하는 것을 ARX모델에 의한 확정법이다. 그러나, ARX모델은 $u(k)$ 를 확률변수열, 즉 백색잡음과 같은 확률변수열의 경우에만 시스템의 입출력 관계로부터 기술될 수 있다. 따라서, 실제 시스템으로부터 확정을 행하기 위해서 $u(k)$ 는 백색성 확정입력이어야 하며, 이상적인 백색잡음은 실현 불가능하므로 인위적인 규칙에 따라 생성된 의사불규칙신호를 이용하여야 한다. 이에 대한 대표적인 신호로서는 M계열(maximum length linear shift register sequence)을 들 수 있다.

본 실험에서는 BLDC 모터의 확정을 하기 위해서 시스템의 스텝응답을 구한 다음, 스텝응답으로부터 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 결과로부터

$$T_{95}=0.456(\text{s})$$

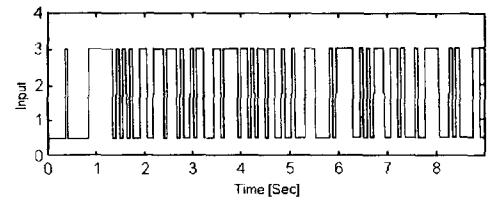
$$T=0.007(\text{s})$$

로 결정하였다. M계열의 확정입력으로 사용된 입력데이터는 Fig. 5(a)와 같이 나타내며, 이를 모터에 인가하여 실험을 행한 결과데이터는 Fig. 5(b)와 같다.

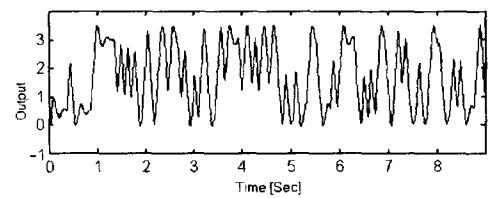
위의 확정결과로부터 구해진 ARX모델을 상태방정식으로 변환하면 다음과 같이 구해진다.

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

Fig. 6는 확정된 시스템모델로부터 시뮬레이션



(a) Input M-sequence signal



(b) Output signal

Fig. 5 Identification of BLDC motor system

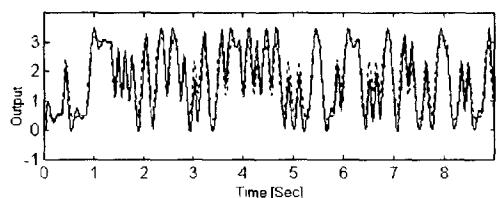


Fig. 6 Experimental result of the identified system

을 행한 결과와 실제 실험결과를 나타낸 그림이다.

Fig. 6에는 실험결과와 시뮬레이션 결과의 일치함이 나타나 있으며, 이로부터 BLDC 모터 시스템의 확정성이 잘 행하여졌음을 알 수 있다.

4.3 반복제어계의 설계

시스템확정에 의해 구해진 시스템의 모델 (17)식은 (11)식의 조건을 만족하므로 반복제어계의 구성이 가능하며, (13), (14)식으로부터 각각의 계인 H, K 는

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

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

와 같이 구해진다. 이때 $\rho=10$ 이다.

반복제어계의 대역필터 $F(s)$ 는

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

으로 설계하였으며, 이 때 (16)식에 대한 보드선도를 Fig. 7과 같이 나타내었다. 이로부터 반복제어계는 안정하게 설계되었음을 알 수 있다.

실험시 주기적인 목표치는

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

이며, $L=10$ [s]로 하였다.

4.4 결과 및 고찰

일정 주기의 신호를 속도목표입력으로 하는

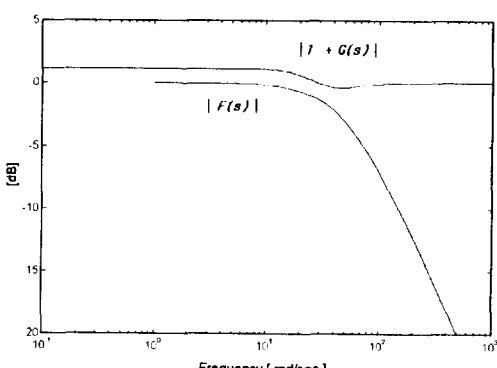
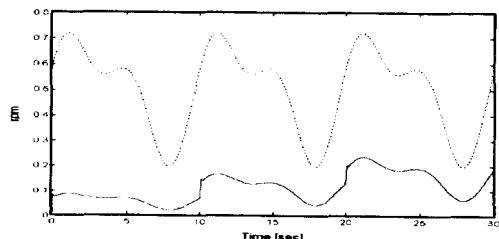
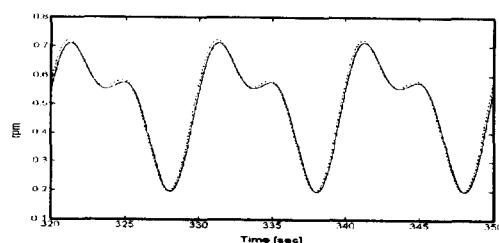


Fig. 7 Bode plot for the repetitive control



(a) Result of the repetitive control (1-3 period)



(b) Result of the repetitive control (32-35 period)

Fig. 8 Experimental results of the repetitive control

BLDC 모터의 반복 속도제어를 행한 결과 Fig. 8과 같은 결과가 얻어졌다.

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

5. 결 론

본 연구에서는 마이크로프로세서 소프트웨어 구현으로 BLDC 모터를 구동할 수 있는 알고리즘을 실현하였다. 또한 본 연구에서 개발한 BLDC 모터 구동장치의 타당성을 검증하기 위해, 목표치가 주기성을 갖는 시스템에 대해 반복제어법을 이용하여 정밀한 속도제어를 실현하는 실기시험을 행하였다.

실험에서 목표치 변경은 임의의 주기적 변화를 상정하여 반복제어 실현 프로그램 내에서 일정한 주기마다 변동되도록 하였으며, 목표치 추종성에

대한 실험결과를 보였다. 실험결과로부터 본 연구에서 개발한 디지털 구동방식의 유효성을 입증할 수 있었으며 앞으로 응용 면에서의 연구와 더불어 신뢰성 부분에 대한 검토가 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 기전연구사, 브러시리스 서보모터에 기초와 응용, 첨단과학기술도서출판, 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 추계학술 대회논문집, 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 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, 日本자동계측학회, 1993.

저자소개



강병현

1972년 5월생. 1996년 부경대학교(구. 부산수산대학) 기계공학과 졸업(공학사). 1998년 2월 동 대학원 졸업(석사). 현 Neocon(주) 근무. 관심분야는 생물·기계공학분야.



이충환(李忠煥)

1967년 12월생. 1991년 부경대학교(구. 부산수산대학) 기계공학과 졸업(공학사). 1993년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1993년~현재 (주)쌍용자동차 보전부 근무. 관심분야는 로바스트제어분야, 전동기제어 및 응용분야 등.



김상봉(金相奉)

1955년 8월생. 1978년 부경대학교(구. 부산수산대학) 기관공학과 졸업(공학사). 1980년 2월 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대학 졸업(박사). 1988년~현재 부경대학교 기계·자동차 공학부 교수. 관심분야는 로바스트제어분야, 생물·기계공학분야, 화상처리응용분야 등.