

레졸버를 이용한 BLDC 모터의 드라이브 개발

Development of Drive for BLDC Motor Using Resolver

이근유 · 이충환 · 김상봉 · 권순재

G. Y. Lee, C. H. Lee, S. B. Kim and S. J. Kwon

Key Words : BLDC Motor(브러시리스 DC 모터), Microprocessor(마이크로프로세서), PWM Wave(펄스 폭 변조), Resolver(레졸버), Inverter(인버터)

Abstract : The paper shows a result for development of BLDC motor drive by using a resolver as position detection sensor. The developed drive use a method detecting rotor position based on HSI interrupt function of microprocessor without a specialized counting circuit. The algorithm generating three-phase PWM wave to change switching voltage and current is realized based on single chip microprocessor. The PWM generating part and position counting circuit are realized by software technique without usage of conventional analogue circuit or object-oriented chips. So the drive system become compact. The effectiveness of the developed drive is verified by experimented results of speed response for step reference input.

1. 서 론

산업용 기계장치의 구동을 위해서는 제어가 간편하고 성능이 우수한 DC 모터가 자주 사용되어져 왔다. 그러나, DC 모터는 계자속과 전류의 방향이 직교되도록 하기 위해 기계적 스위칭 기구인 브러시와 정류자를 가지므로 브러시의 교환, 기계적 정류시에 발생하는 스파크 등의 문제점들을 가지고 있다. 따라서, 브러시가 없는 BLDC 모터가 DC 모터의 구조적 문제점을 극복하는 모터로 주목받고 있으며, 그 구동장치 및 제어에 관한 연구가 행해지고 있다^{1,2)}.

브러시와 정류자가 없는 BLDC 모터의 특성상 그 구동을 위해서는 회전자의 위치검출이 필요하게 된다. BLDC 모터의 회전자 위치검출을 위한 센서로서는 엔코더, 레졸버 등이 사용되고 있으며, 특히 레졸버(resolver)는 진동, 충격 등의 내환경성이 우수하며 사용온도범위가 넓고, 시스템의 소형화가 가능하다는 장점이 있다. 따라서, 수중 로봇이나 심해저 탐사선 등에 레졸버를 사용한 BLDC 모터가 사용될 수 있다.

레졸버를 BLDC 모터의 회전자 위치검출 센서로 사용하는 경우에는 변위량을 아날로그량으로 출력하는 레졸버의 특성상 회전자 위치검출에 별도의 카운트 회로를 사용하거나, 시스템의 소형화를 위해서 마이크로프로세서로 실현된 컨트롤러에서 카운트를 하는 것이 일반적이다. 마이크로프로세서가 회전자 위치검출을 실행하는 경우에 있어 위치검출에 소요되는 시간이 시스템의 성능에 영향을 미치게 된다. 따라서, 별도의 카운트 회로를 사용하지 않고 회전자의 위치검출에 소요되는 시간을 최소화함과 동시에 BLDC 모터의 구동을 위한 PWM(Pulse Width Modulation) 파형을 생성할 수 있는 드라이브의 개발이 요구된다¹⁾.

본 연구에서는 브러시리스 레졸버를 BLDC 모터의 회전자 위치검출 센서로 사용하는 경우에 있어, 80C196kc 원칩 마이크로프로세서를 이용하여 간단히 BLDC 모터의 속도를 제어할 수 있는 드라이브를 개발하였다. 80C196kc의 HSI(High Speed Input) 기능을 이용하여 회전자의 위치를 검출하였으며, HSO(High Speed Output) 기능으로 PWM 파형을 발생하였다. PWM 파형의 발생을 위해서 sin 테이블을 80C196kc 내에 작성하여 소프트웨어적으로 PWM 파형을 발생하도록 하였다. 따라서, 아날로그회로 등에 의해 실현되던 PWM 파형 발생회로나 회전자 위치검출 회로가 80C196kc

접수일 : 1998년 9월 30일
이근유 : 부경대학교 대학원
이충환 : (주)쌍용자동차
김상봉, 권순재 : 부경대학교 기계·자동차공학부

내에서 소프트웨어로 실현되어 시스템이 소형화 될 수 있었다. 본 연구에서 개발된 드라이브의 유효성을 검증하기 위하여 스탭입력을 가하여 BLDC 모터의 속도응답을 구하였다.

2. BLDC 모터의 구동 원리 및 수식 모델

2.1 BLDC 모터의 구조와 구동원리

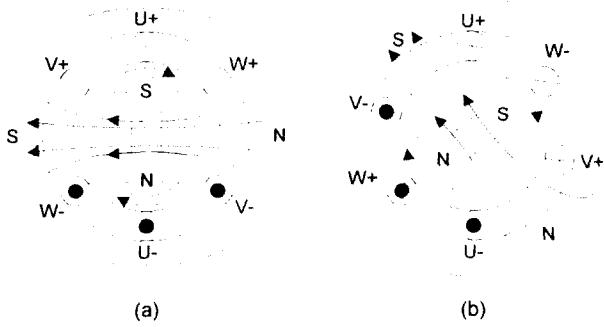


Fig. 1 Principle of BLDC Motor

BLDC 모터의 구조는 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. BLDC 모터는 영구자석이 회전자를 이루고 있으며, 권선은 고정자에 배치되어 있다. 즉, DC 모터와 비교하면 회전자와 고정자의 전기적 역할이 반전되어 있다. DC 모터에서는 토크를 발생하기 위한 계자속이 정지하고 있는데 반해, BLDC 모터에서는 계자속은 회전자와 함께 회전하게 된다^{1,2)}.

BLDC 모터의 구동은 Fig. 1의 (a), (b)와 같이 고정자의 전류에 의해 형성된 자속이 회전자의 계자속에 직각으로 교차하도록 3상 교류를 입력하면, 자석끼리의 반발력과 흡인력에 의해 회전자는 회전을 하게 된다. 따라서, BLDC 모터를 회전시키기 위해서는 회전자의 위치를 검출하여 회전자의 계자속에 고정자의 자속이 직각이 되도록 고정자 전류를 계속적으로 인가하여야 한다. 본 연구에서는 회전자의 위치검출을 위해 레졸버를 사용하였다.

3. 모터 드라이브의 구성

3.1 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 BLDC 모터 드라이브의 구성을 Fig. 2에 나타내었다. 모터 드라이브는 전원회로와 인버터회로, 게이트-드라이브회로, 레졸버회로, 마이크로프로세서로 구성되어 있다.

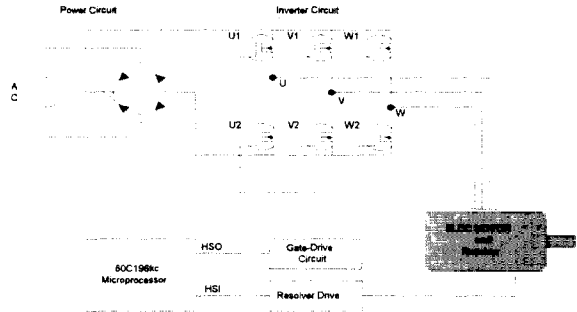


Fig. 2 Schematic diagram of BLDC motor drive

전원회로는 인버터회로로 정류된 직류를 공급하고, 인버터회로는 게이트-드라이브회로에서 출력된 스위칭 신호에 따라 전원회로에서 공급된 직류를 스위칭하여 BLDC 모터로 3상 교류를 공급한다. 또한, 회전자 각도를 검출하기 위하여 모터에 레졸버를 부착하였으며 이를 위한 인터페이스 장치인 레졸버회로를 구성하였다. 마이크로프로세서는 레졸버회로에서 회전자의 각도를 검출하여 PWM 파형을 게이트-드라이브회로로 출력한다.

3.2 레졸버회로

Fig. 3에 레졸버회로를 나타내었다. 레졸버회로는 입력 sine, cosine 파형의 발생을 위한 2상 발진회로와 입력파형의 증폭을 위한 버퍼앰프 그리고 디지털 인터페이스를 위한 zero-crossing 회로로 구성되었다.

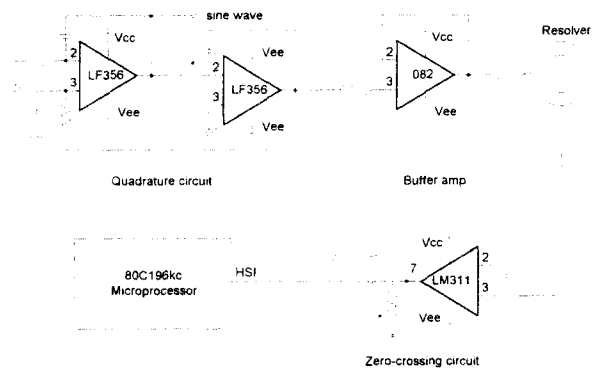


Fig. 3 Circuit of resolver

2상 발진회로의 주파수는 5.5kHz로 설정하여, sin 파형의 주기를 180 μ s로 하였다. 또한, 80C196kc의 기준 클럭은 1 μ s이므로 레졸버회로의 각도 분해능은 2°가 된다.

3.3 게이트-드라이브회로

Fig. 4에 게이트-드라이브의 회로를 나타내었다.

게이트-드라이브회로는 HCPL-3120 optocoupler를 사용하였으며, 80C196kc에서 출력된 스위칭 파형을 MOS-FET를 구동할 수 있는 전압으로 증폭하여 인버터회로로 전달한다. 또한, 게이트-드라이브회로는 80C196kc측 전원과 인버터회로측의 전원을 절연하고 있다³⁾.

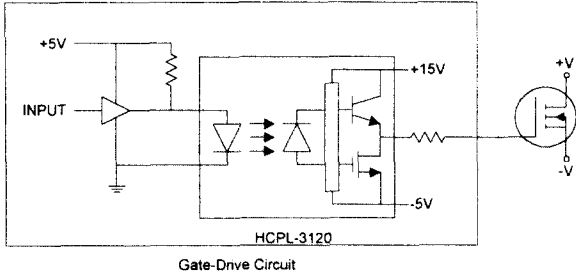


Fig. 4 Circuit of gate-drive

3.4 인버터회로

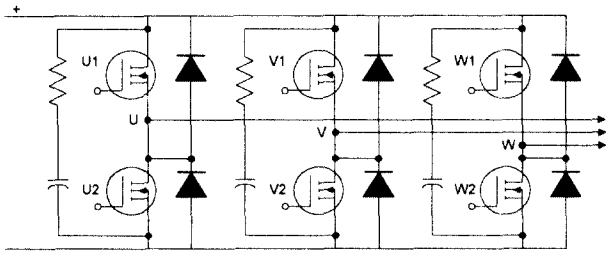


Fig. 5 Circuit of inverter drive

인버터회로는 Fig. 5와 같이 3상 전압형 인버터로 구성하였다. 이것은 파워소자와 그것에 역병렬 접속된 다이오드를 1조로 하여 1개의 스위치가 구성되며, 1상당 2개의 파워소자, 즉 3상으로 6개의 파워소자로 구성된다. 따라서, 모터로 3상 교류를 인가할 수 있게 된다. 각 상의 2개의 파워소자가 동시에 ON 되는 경우 파워소자의 소손을 일으키므로 80C196kc 프로그램상에서 단락방지시간을 설정하였다. 또한, 인버터회로 내에 스너버회로를 구성하여 파워소자에 인가되는 서지 전압을 억제하고, 파워소자를 보호할 수 있도록 하였다^{3,4)}.

3.5 마이크로프로세서

본 연구에서 사용한 마이크로프로세서는 80C196kc로서 기준 클럭이 1μs이며, HSI(High Speed Interrupt) 기능과 HSO(High Output Interrupt)기능을 가지고 있다. HSI 기능은 HSI 핀에 입력이 들어올 경우 수행하던 루틴을 잠시 멈추고 인터럽트루

틴을 수행하도록 하는 기능으로 펄스간의 시간 간격을 쉽게 계산할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 레졸버의 입력 sine 파형과 출력 sine 파형의 시간 간격을 HSI 기능을 이용하여 별도의 카운트회로 없이 회전자의 위치 검출이 가능하였다. HSO 기능은 기준 시간에 대하여 CAM 파일에 지정된 시간 후에 HSO 핀을 ON/OFF 하는 인터럽트기능으로 HSO 기능을 이용하여 디지털화 된 PWM 파형을 발생하였다.

4. 회전자 위치 검출 및 PWM 파형의 발생

4.1 회전자 위치 검출

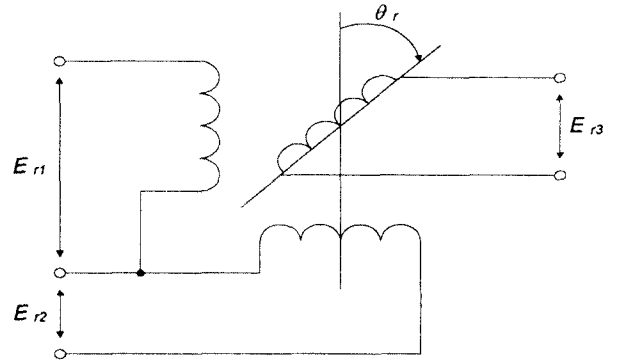


Fig. 6 Principle of brushless resolver

본 연구에서는 회전자의 위치 검출을 위하여 2상여자 1출력형 브러시리스 레졸버를 사용하였으며, 그 등가 회로는 Fig. 6과 같다.

Fig. 6과 같이 입력 E_{r1} 과 E_{r2} 를 식(1)과 같은 전압으로 여자시켰을 때, 출력 전압 E_{r3} 는 식(2)와 같이 나타나 입력 E_{r1} 과의 차이인 로터의 위상 θ_r 을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{r1} &= E \sin \omega t \\ E_{r2} &= E \cos \omega t \end{aligned} \quad (1)$$

$$E_{r3} = E \sin(\omega t + \theta_r) \quad (2)$$

따라서, 식(1)의 $\sin \omega t$ 를 기준신호로 하고 식(2)와의 위상차를 구하면 회전자의 위치를 검출할 수 있음을 알 수 있다¹⁾.

본 연구에서는 마이크로프로세서에서 손쉽게 회전자의 위치를 검출하기 위하여 Fig. 7과 같이 식(1)의 $\sin \omega t$ 와 식(2)의 $\sin(\omega t + \theta)$ 를 각각 zero-

crossing하여 각각 마이크로프로세서의 HSI.0와 HSI.1의 입력으로 하여 소프트웨어적으로 위상차를 구하였다. 또한, 인터럽트 기능을 사용하여 마이크로프로세서가 두 입력의 시간동안에 PWM파형의 출력과 같은 다른 작업을 수행할 수 있도록 하였다.

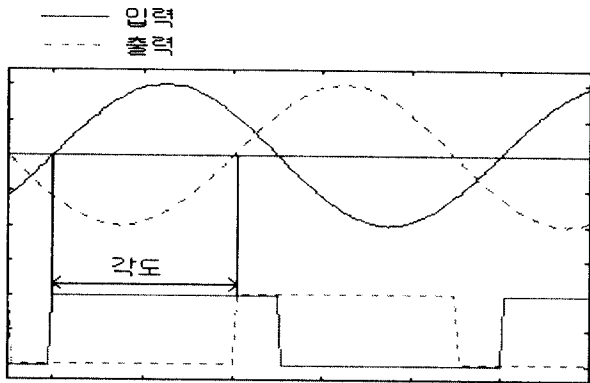


Fig. 7 Detection of angle

HSI에 의해 계산된 클럭수를 t_{period} 라하고 식(1)의 sine파형 주기를 T 라고 하면 회전각도 θ 는 식(3)과 같이 계산될 수 있다.

$$\theta = \frac{2\pi \times t_{\text{period}}}{T} [\text{rad}] \quad (3)$$

4.2 PWM 파형의 발생

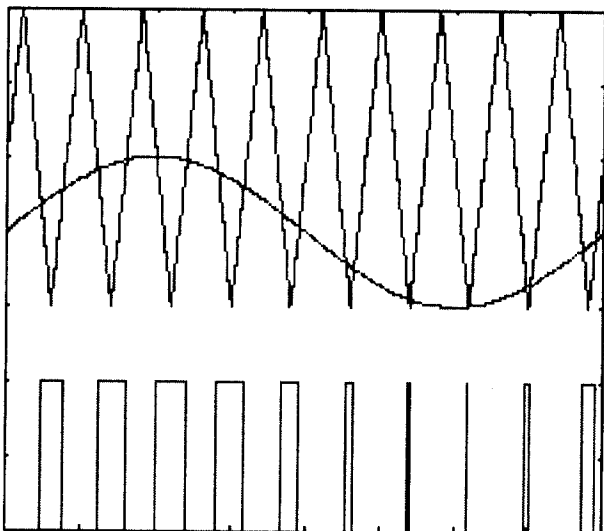


Fig. 8 Principle of PWM wave

BLDC 모터에 4.1절에서 결정된 회전자 위치에 부합하는 사인파 전류를 인가하기 위하여 PWM

방식의 스위칭 패턴을 사용하였다. Fig. 8에 사인파와 PWM의 원리를 나타내었다. Fig. 8과 같이 사인파가 삼각파 보다 상회하는 부분만을 꺼내면 부등폭인 펄스가 생성된다.

본 연구에서는 Sine-PWM기법을 응용하여 소프트웨어적인 방법으로 PWM파형을 실현하였다^{5,6)}.

Sine-PWM방법을 이용하여 U상의 전압을 펄스폭 변조하면, 변조된 펄스폭 t_{pw}^u 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{pw}^u = \frac{1}{2} T_c m \{ \cos(\omega_m t) + 1 \} \quad (4)$$

여기서, T_c 는 샘플링 주기, ω_m 은 변조파의 각주파수, m 은 변조지수로 $0 \leq m \leq 1$ 이다. 식(4)를 인버터의 U1상에 해당하는 파워소자의 스위칭 ON 시간으로 하고, U2상에 해당하는 파워소자는 이의 반전된 형태로 한다. 변조파형의 주파수를 f_m , 샘플링 주파수를 f_c , f_m 과 f_c 의 비를 N 으로하여 식(4)를 이산화 하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$t_{pw}^u(k) = \frac{1}{2Nf_m} m \left\{ \cos\left(\frac{2\pi k}{N}\right) + 1 \right\} \quad (5)$$

$$N = \frac{f_c}{f_m}, \quad k = 1, 2, \dots, N$$

식(5)에서 단락방지시간 t_d 를 고려하여 3상 인버터회로의 6개의 스위칭 소자의 ON 시간을 나타내면 다음과 같다.

$$U1 : t_{pw}^{u1}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m \left\{ \cos\left(2\pi \frac{k}{N}\right) + 1 \right\} - t_d$$

$$U2 : t_{pw}^{u2}(k) = T_c - t_{pw}^{u1}(k) - 2t_d$$

$$V1 : t_{pw}^{v1}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m \left\{ \cos\left(2\pi \frac{k}{N} - \frac{2}{3}\pi\right) + 1 \right\} - t_d$$

$$V2 : t_{pw}^{v2}(k) = T_c - t_{pw}^{v1}(k) - 2t_d$$

$$W1 : t_{pw}^{w1}(k) = \frac{1}{2Nf_m} m \left\{ \cos\left(2\pi \frac{k}{N} + \frac{2}{3}\pi\right) + 1 \right\} - t_d$$

$$W2 : t_{pw}^{w2}(k) = T_c - t_{pw}^{w1}(k) - 2t_d \quad (6)$$

식(6)은 3상 펄스폭 변조를 실행함에 있어, 마이크로프로세서에서 펄스를 출력하는데 소요되는 단락방지시간이 고려된 펄스폭 계산식으로 PWM파

형 발생 프로그램에 직접 사용되는 식이다. 식(6)은 단일칩 마이크로프로세서에서 연산함으로써 3상 전압을 전 디지털로 펄스폭 변조 가능하고, 펄스폭 변조를 위한 회로뿐만 아니라 단락방지시간 발생회로까지 불필요하게 되어 하드웨어를 대폭 줄일 수 있다⁶⁾.

BLDC 모터의 속도는 PWM 파형의 주파수보다는 변조지수 m 에 관계되므로 본 연구에서는 PWM 파형의 주파수를 고정하고, 변조지수 m 을 변화할 수 있는 프로그램을 사용하였다. HSO의 0~5번 핀을 각각 인버터부의 U1, U2, V1, V2, W1, W2의 입력으로 하였을 경우의 PWM 파형의 실험을 Fig. 9에 나타내었다. 구간 1은 BLDC 모터에 모터의 구동을 위한 3상 전류가 공급되는 구간이며, 구간 2는 전류가 공급되지 않는 구간으로 구간 1과 2의 비에 의해 모터에 공급되는 전류가 결정되게 된다. 또한, 구간 3은 Dead-Time으로 과워소자가 동시에 ON되어 손상되는 것을 막기 위한 시간으로 본 연구에서는 $10\mu s$ 로 하였다.

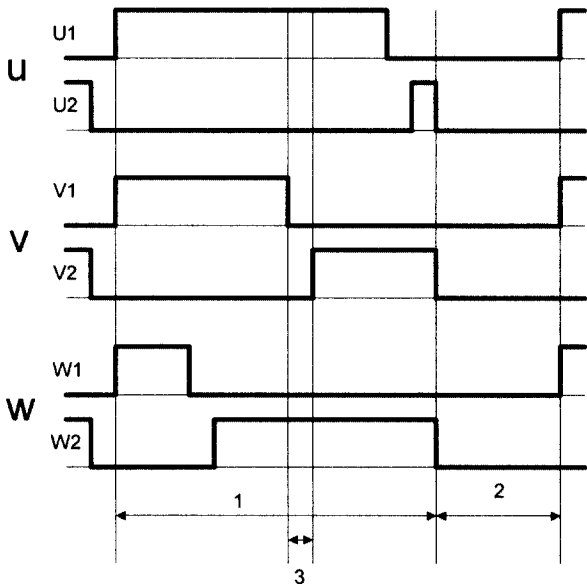
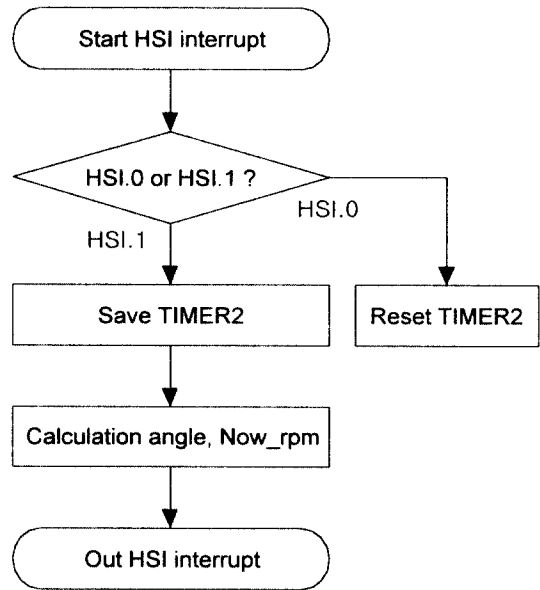


Fig. 9 Realization of PWM wave

본 연구에서 사용한 PWM 파형의 발생 단계는 30단계로 하고, 발진 주파수를 2kHz로 하였다. 또한, sin 테이블을 80C196kc에 테이블로 작성하여 PWM 파형의 계산에 소요되는 시간을 최소화할 수 있었으며, Fig. 9와 같이 비대칭 PWM 파형을 사용하였다.

4.3 프로그램 알고리즘

프로그램은 Main 루틴과 HSI, HSO 인터럽트 루틴으로 구성되었다. Main 루틴에서는 사용되는 변수와 인터럽트의 초기화, 사용자의 입력에 따라 저장된 데이터의 전송을 실행하였다. Fig. 10에 HSI, HSO 인터럽트 루틴 알고리즘을 나타내었다. HSI 인터럽트 루틴은 회전자의 현재 위치를 검출



(a) HSI interrupt routine

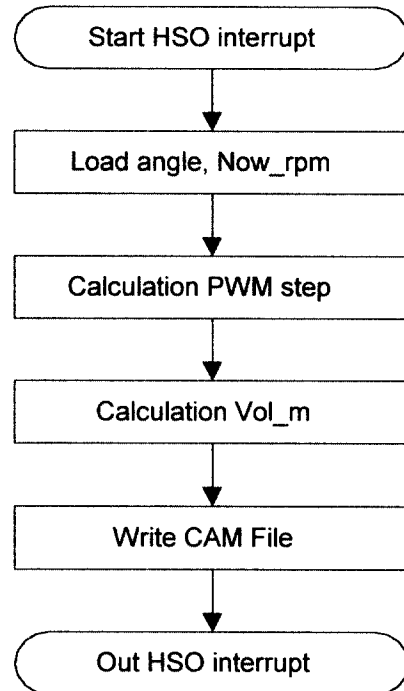


Fig. 10 Algorithm of program

하고 회전 속도 계산 및 속도 데이터의 저장을 실행한다. 또한 HSI 인터럽트 루틴은 레졸버의 출력이 발생할 경우 자동으로 수행되도록 하여 프로그램에서 다른 작업을 수행 할 수 있도록 하였다. HSO 인터럽트 루틴은 HSI 인터럽트 루틴에서 검출된 회전자의 위치에 따라 비대칭 PWM 파형의 출력을 실행한다.

5. 실험결과

Table 1 Specifications of BLDC motor

| | |
|---------------|--------------------------|
| Rated Output | 300W |
| Rated Torque | 29kgf · cm |
| Rated Current | 3A |
| Rated Speed | 1000rpm |
| Rotor Inertia | 13.5kg · cm ² |

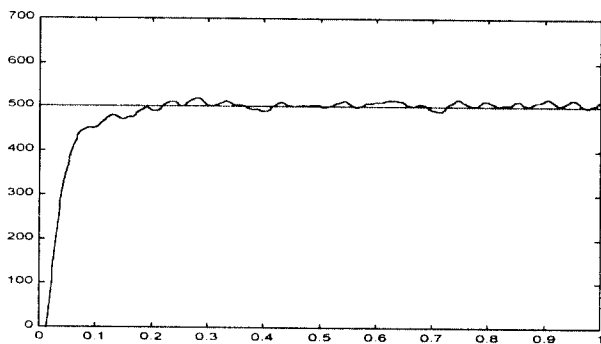


Fig. 11 Speed response(m = 0.5)

본 연구에서 사용된 BLDC 모터의 사양은 Table 1과 같다. Fig. 11은 변조지수 m 을 0.5로 고정하여 스텝입력을 가하였을 때의, 모터의 속도를 나타낸다. 그리고 Fig. 12에 m 을 0.5에서 0.9로

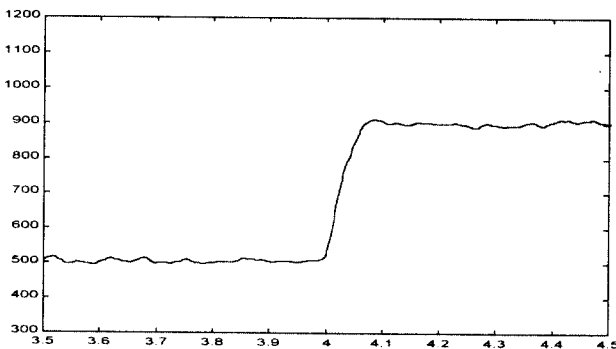


Fig. 12 Speed response(m = 0.5 - 0.9)

변화하였을 경우의 결과를 나타내었다. 또한 속도 검출의 샘플링 시간은 2ms로 설정하였다. 속도결과에서 리플이 발생하는 원인은 샘플링 시간이 짧기 때문이며, 본 연구에서 요구되는 드라이브는 고속의 속도제어가 필요한 드라이브가 아니므로 샘플링 시간을 길게 설정할 경우 속도결과의 리플을 감소할 수 있다.

6. 결 론

본 연구에서는 회전자 위치 검출 센서로 레졸버를 사용한 BLDC모터의 드라이브 개발에 대한 결과를 보였다. 개발된 드라이브는 각도검출을 위하여 별도의 카운터 회로를 사용하지 않고, 마이크로프로세서의 HSI 인터럽트 기능을 이용하여 회전자의 위치를 검출하였다. 또한 스위칭 전류의 전압을 변화시키는 PWM파형의 발생기법을 단일칩 내에서 실현할 수 있었다. 따라서, 기존의 아날로그 회로나 전용칩에 의해 실현되던 PWM발생부나 카운터회로를 단일칩 내에서 소프트웨어로 실현함으로써 전체 시스템의 소형화를 구현할 수 있었다.

본 연구에서 개발된 드라이브를 평가하기 위해, 스텝입력을 가하여 속도결과를 확인하였다. 실험결과로부터 본 연구에서 개발된 드라이브의 유효성을 입증 할 수 있었다. 그리고, 속도의 정밀한 제어와 외란에 강인한 제어성능을 가지기 위해, 검출된 각도와 속도에 대해 최적의 PWM파형을 발생하는 제어 알고리즘에 대해 지속적인 연구가 있어야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 土手康彦, “브리시레스 서보모터의 기초와 응용”, 기전연구사, 1992
2. 杉本英彦, “AC サーボシステムの理論と設計の實際”, 総合電子出版社, 1991
3. 高橋久, “パワーデバイスの使い方と實用制御回路設計法”, 総合電子出版社, 1989.
4. 相擇範幸, 加藤肇, “インバータの實用設計, 工業調査會”, 1994
5. 김상봉, 전봉환, 정석권, “자기동조법에 의한 유도전동기의 강인한 속도제어계 설계”, 한국정밀공학회지, 제12권 8호, pp. 168~175, 1995
6. 김상봉, 김환성, 전봉환, 정석권, “단일칩 마이크로프로세서에 의한 전 디지털화 PWM의 실현”, 대한전기학회논문집, 제45권 5호, pp. 674~672, 1996