

DSP를 사용한 브러시리스 DC 모터의 향상된 디지털 전류제어기 설계

하영석\*, 안호균, 박승규, 이종주, 김성환  
 창원대학교 전기공학과 제어 및 전력전자연구소

A Design of Improved Digital Controller of BLDC Motor Using DSP

Young-Suk Ha\* · Jong-Ju Lee · Seung-Kyu Park · Ho-Kyun Ahn · Sung-Hwon Kim  
 Changwon National University Control & Power Electronic Lab

**Abstract** - Generally, the current controller is located inner the whole controller, so the characteristic of the current controller is important in controlling performance of the upper controller. A current control loop in motor control is designed so that it is 10 times faster than the speed control loop of the upper controller. Thus, the current controller with complex control algorithm is not proper.

In this paper, the improved current controller using a conventional digital PI controller and feedforward controller for the brushless DC motor is designed.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(이하 BLDC 전동기)는 기존의 직류 전동기의 단점인 브러시와 정류자를 제거한 것으로 고효율화, 고속화, 저소음 및 유지보수성 등의 특성이 우수하며, 비교적 제어가 용이하며 효율이 높은 장점을 가지고 있어 산업용 및 가정용으로 널리 사용되고 있다.

한편 DSP(TMS320F24x)는 우수한 연산능력과 모터구동에 필요한 외부장치들이 내장되어 있어 Motion Control에 적합하다고 할 수 있다.

일반적으로 전류 제어기는 다른 모든 제어기의 안에 위치함으로써 전류 제어기의 특성이 전체 시스템에 큰 영향을 미침으로 매우 중요하다고 할 수 있다. 따라서 전동기 제어에 있어서 전류제어루프는 상위제어기인 속도제어기의 속도제어루프보다 기본적으로 10배이상 빠르도록 설계하는게 일반적이다. 이처럼 빠른 제어주기를 요구하는 전류제어기의 설계에 있어서 복잡한 제어알고리즘을 전류제어기로 사용하는 것은 오히려 적합하지 않다. 즉, 전류루프를 수행하는 시간이 너무 길어져 상위 제어기의 수행시간에 영향을 미침으로써 전체 시스템의 제어기 성능을 떨어뜨리는 결과를 초래할 수 있다.

본 논문에서는 쉽게 구현이 가능한 기존의 디지털 PI 제어기와 피드포워드(Feed Forward) 제어기를 이용하여 BLDC 전동기를 위한 향상된 디지털 전류제어기를 설계하였으며, DSP를 이용하여 3상 Y결선 형태의 BLDC 전동기를 구동하기 위한 시스템을 제작함으로써 제안한 전류제어기의 성능을 실험을 통해 검증하였고, 전동기구동 시스템을 간략화하였다.

2. BLDC 전동기

2.1 BLDC 전동기의 동특성 방정식

BLDC 전동기의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V = RI + L \frac{di}{dt} + K_E \omega \quad (2.1)$$

(여기서 E : 역기전력,  $K_E$ :역기전력상수,  $\omega$ :각속도)

또한 영구자석형 전동기의 경우 공극에서의 자계를 일정한 것으로 가정한다면 전동기의 발생토크는 전류에 비

례하게 되어 식(2.2)로 나타낼 수 있다. 여기서  $K_T$ 는 토크상수이다.

$$T = K_T I \quad (2.2)$$

전동기와 부하의 관성모멘트를 각각  $J_M, J_L$ , 전동기의 마찰토크를  $B\omega$ 라 하면 전동기의 운동 방정식은 식(3)으로 표현될 수 있다.

$$T = (J_M + J_L) \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_L \quad (2.3)$$

2.2 BLDC 전동기의 구동방식

2.2.1 구동특징

BLDC 모터는 직류 전동기의 기계적인 정류자를 전기적인 정류자, 즉 인버터로 대체하여 회전자와 위치에 따라 전기자 전류를 분배함으로써 모터에 지속적인 기전력을 발생한다. 이때 전기자 기전력과 계자 기전력의 상호작용에 의해 발생하는 회전력을 일정하게 유지하려면, 계자의 자극위치를 기준으로 전기자 전류의 분배시퀀스를 결정해 주어야 하는데 고정자의 전류방향 및 분배시퀀스를 바꾸기 위하여 회전자와 자극위치를 검출하는 자극위치 검출기를 이용한다. 가장 일반적인 위치 검출기는 홀센자(Hall sensor), 엔코더(Encoder), 리졸버(Resolver)를 사용하는 방법과 센서없이 위치를 검출하는 센서리스 방법을 사용한다. 본 논문에서는 회전자와 위치를 검출하기 위해서 홀 센서를 이용하였다.

2.2.2 구동방식

BLDC 모터를 구동하기 위해서는 모터의 초기 위치값을 검출해야 된다. 이를 위해 본논문에서는 DSP 내의 Capture Unit을 이용하여 홀센서에서 출력되는 위치신호를 받아서 IGBT 스위칭소자의 스위칭 패턴을 결정하고 DSP 내에서 계산된양에 의해 PWM의 필수폭을 결정하여 Gate Drive에 전달하여 IGBT를 스위칭한다. 인버터는 6 스텝 방식으로 동작하고 120° 도통 방식을 사용 하였다

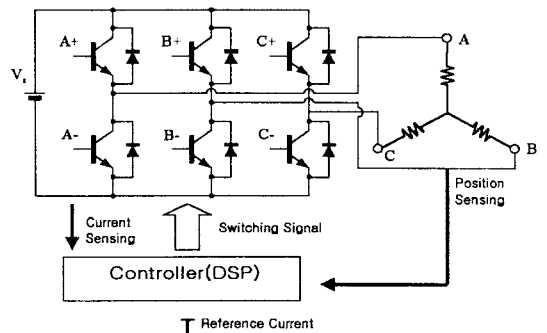


그림 1 . BLDC 전동기의 구동 인버터 회로

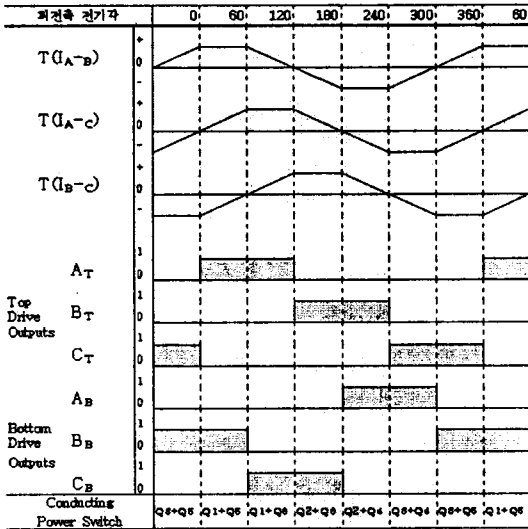


표1. 홀센서의 신호와 스위칭 패턴(CW방향)

회전차 위치	홀센서	스위칭 소자의 패턴							
		3	2	1	Q1	Q3	Q5	Q2	Q4
0 - 60	0 0 1	1	0	0	0	0	0	0	1
60 - 120	0 1 1	0	1	0	0	0	0	0	1
120 - 180	0 1 0	0	1	0	1	0	0	0	0
180 - 240	1 1 0	0	0	1	1	0	0	0	0
240 - 300	1 0 0	0	0	1	0	1	0	1	0
300 - 360	1 0 1	1	0	0	0	0	1	0	0

표1에서 홀센서가 동작할 때는 '1'로, 동작하지 않을 때는 '0'으로 표시했다. IGBT가 turn\_on 상태가 '1'이고, turn\_off 상태가 '0'이다. 위의 그림과 표는 180° 동동방식의 인버터 스위칭 역기전력 파형의 모습이다.

### 3. 제안된 전류 제어 방식

#### 3.1 제안된 전류 제어기의 전체 구성

전류제어기에서 전류루프는 상위제어기인 속도제어기의 속도 루프보다 기본적으로 10배이상 빠르도록 설계하는게 일반적이다. 이처럼 빠른 제어주기를 요구하는 전류제어기의 설계에 있어서 무엇보다도 중요한 점은 얼마나 정해진 제어주기내에서 정확하게 전류제어 루틴을 수행할 수 있는지의 여부라 하겠다. 따라서 복잡한 제어 알고리즘을 전류제어기로 사용하는 것은 오히려 적합하지 않다. 즉, 전류 루프를 수행하는 시간이 너무 길어져 상위제어기의 수행시간에 영향을 미침으로써 전체 시스템을 위한 제어기의 제어 성능을 떨어뜨리는 결과를 초래할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 쉽게 구현이 가능한 기존의 디지털 PI 제어기와 피드포워드(Feed forward) 제어기를 이용하여 BLDC 전동기 구동을 위한 디지털 전류제어기를 설계하였다. 그림2는 제안된 전류제어기의 전체 구성도이다.

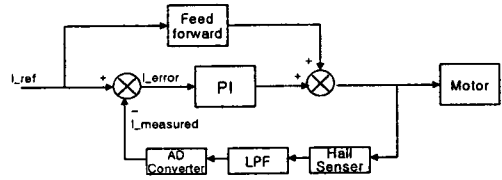


그림2. 제어기의 전체 구성도

홀 센서에 의해 검출된 DC Link단의 아날로그 전류 신호를 Offset 전압으로 보정한 다음, 저역통과필터로 필터링 한 후, DSP내부에 있는 AD Converter를 통해서 CPU에 인가된다. 이렇게 입력된 전류값은 CPU 내에서 소프트웨어적으로 기준전류와 센싱전류 사이의 오차를 연산하고 디지털 값으로 연산된 오차는 PI제어기를 통한 PWM의 Duty 값을 결정하게 되고, 여기에 피드포워드 제어기에서의 Duty 값을 더함으로써 전체 PWM의 Duty가 결정된다.

### 3.2 제안된 전류제어기의 PWM 발생

#### 3.2.1 디지털 PI(비례 적분) 제어기

PI제어기는 산업계에서 가장 보편적으로 사용하는 제어기로서 오차신호를 적분하여 제어신호를 만들어내는 적분제어를 비례제어에 병렬로 연결하여 사용하는 제어기법을 가리킨다. 비례제어 부분과 더불어 오차신호를 적분(Integral)하여 제어신호를 만드는 적분제어를 함께 쓴다는 뜻에서 비례적분제어기 (Proportional-Integral Controller), 또는 영문약자를 써서 PI제어기라고 부른다. 그림의 블럭선도는 플랜트에 비례적분 제어기를 연결해서 구성한 피드백 제어시스템을 보여주고 있다. 오차신호와 제어신호 사이의 전달함수로 표시되는 PI제어기의 전달함수는 다음과 같은 꼴로 나타난다.

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (3.1)$$

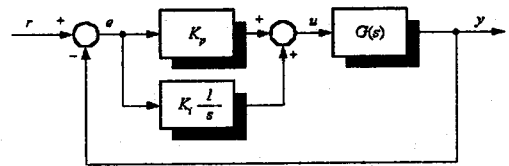


그림3. PI제어기에 의한 피드백 시스템

여기에서  $K_p$ 는 비례계수,  $K_i$ 는 적분계수라고 부른다. 이 제어기의 제어신호를 시간영역에서 나타내면 다음과 같다

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

전류 제어를 위해서 PI 제어기를 통한 PWM을 이용하였고, 본 논문에서는 DSP에서 디지털 방식으로 PWM을 출력하였다.

이산 시스템에서, k번째 스텝에서의 PI 제어기는 다음 식과 같이 오차  $E_k$ 에 대한 출력  $u_k$ 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$u_k = K_p E_k + K_i T \sum_{n=1}^k E_n \quad (3.3)$$

여기서, T는 샘플링 시간 간격(Sampling Time)이다.

식(3.3)과 k-1 번째 스텝에서의 차이를 구하면 다음

과 같다.

$$u_k = u_{k-1} + K_p(E_k - E_{k-1}) + K_i T E_k \quad (3.4)$$

출력  $u_k$ 는 PWM Duty Ratio의 디지털 값이고, 현재 스텝에서의  $E_k$ , 이전 스텝에서의  $u_{k-1}$ 과  $E_{k-1}$ 을 이용하여 현재의 출력  $u_k$ 를 구한다.

### 3.2.2 Feed Forward 제어기

피드포워드(Feed forward) 제어기는 시스템의 직렬 보상성분으로서 전동기의 초기 구동시 제안한 전류제어기의 응답특성을 좋게 한다.

본 논문에서는 피드 포워드 계인을 PWM Duty 60%에서의 값을 넣어서 실험하였다.

따라서 제안된 전류제어기는 PI제어기를 통해서 구한 PWM의 Duty값에 피드포워드제어기를 통해서 주어지는 Duty값을 더하여 전체 PWM Duty값을 구한 후 BLDC 전동기를 구동하기 위한 스위칭 소자에 인가하게 된다.

## 4. 실험 및 결과

본 논문에서 제안한 전류제어기를 사용한 시스템의 실험과형을 검토하여 하였다.

논문에서 사용한 BLDC 모터의 파라미터는 다음과 같다

표2. BLDC 전동기 사양

파라미터(Parameter)	값(Value)
Rotor Inertia(J)	$6.86 \times 10^{-5}$ [Kg · m <sup>2</sup> ]
Phase Inductance(L)	6.4 [mH]
Phase Resistance	3 [ $\Omega$ ]
Torque constant	0.068 [Nm/A]
Back-EMF constant	0.068 [V · s/rad]
Rate Voltage/Current	24 [V]/1.45 [A]
Rate Speed	2100 [rpm]

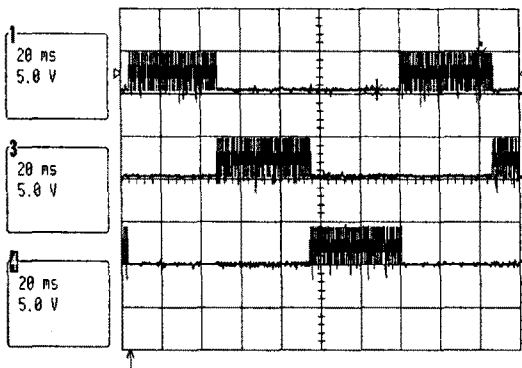


그림 4. 시스템의 상위 스위칭을 Drive를 위한 출력과형

그림5는 기존의 전류제어기를 사용한 전류과형을 나타낸 것이고, 그림6은 본 논문에서 제안한 전류제어기를 사용한 경우의 전류과형을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 본 논문에서 제안된 전류제어기를 사용한 경우 전류의 리플이 급격히 감소하는 것을 알 수 있다.

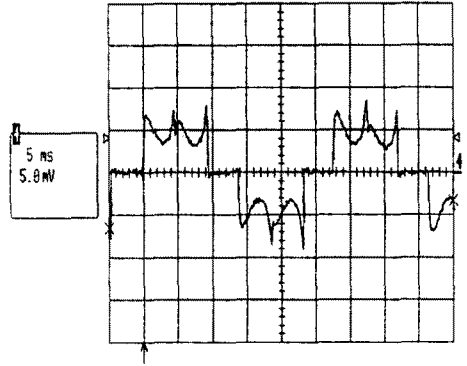


그림 5. 기존의 전류제어기를 사용한 전동기의 전류과형

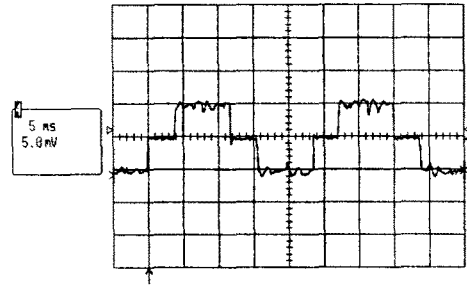


그림 6. 제안된 전류제어기를 사용한 전동기의 전류과형

## 5 결 론

BLDC 전동기의 제어를 위해서는 내부적으로 안정성과 응답특성이 빠른 고성능의 전류제어기를 필요로 한다. 이러한 전류제어기의 설계에 있어서 무엇보다도 중요한 점은 얼마나 정해진 제어주기내에 정확하게 전류제어 루틴을 수행할 수 있는지의 여부라 하겠다. 따라서 복잡한 제어알고리즘을 전류제어기로 사용하는 것은 오히려 적합하지 않다. 즉, 전류루프를 수행하는 시간이 너무 길어져 상위제어기의 수행시간에 영향을 미침으로써 전체 시스템을 위한 제어기의 제어 성능을 떨어뜨리는 결과를 초래할 수 있다.

그러므로 본 논문에서는 쉽게 구현이 가능한 기존의 디지털 PI 제어기와 피드포워드(Feed forward) 제어기를 이용하여 BLDC 전동기를 위한 향상된 디지털 전류제어기를 설계하고, DSP를 이용한 실험을 통해 검증하였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] "브러시리스 서보모터의 기초와 응용", 기전연구소, 1992.
- [2] Takashi Kenjo, "Power Electronics for the Microprocessor Age", Oxford Science Publications, 1994.
- [3] 이왕현, "메카트로닉스를 위한 모터제어기술", 성안당, 1998.
- [4] TMS320C/F241, C242, F243 DSP Controllers Reference Guide, Texas Instrument, 1999.
- [5] 박재현, "인덕턴스의 변화를 이용한 브러시리스 DC 모터의 구동 알고리즘 개발 및 구현에 관한 연구", 한양대학교, 1999.
- [6] 유길상, "DSP를 이용한 브러시리스 직류전동기의 고성능 전류 제어에 관한 연구", 창원대학교, 2000.