

DSP를 이용한 BLDC전동기의 토크리플 저감을 위한 전류제어 기법에 관한 연구

이인재, 김병국, 황동원, 조윤현  
 동아대학교

A Study of Current Control Method for Reduction of Torque Ripple of BLDC Motor using DSP

In-Jae Lee, Byong-Kuk Kim, Dong-Won Hwang, Yun-Hyun Cho  
 Dong-A University

**Abstract** - BLDC 전동기는 선형적인 토크 대 전류, 속도 대 전압 특성을 갖고 있으며 기계적, 전기적인 잡음이 없고, 가감속 제어가 용이하며, 토크 대 관성의 비가 매우 높아 소형으로 높은 출력을 낼 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 전기자 전류의 전환(Commutation) 시 고정자 권선의 인덕턴스 성분과 역기전력으로 인해 발생하는 전류 리플은 BLDC 전동기 토크리플의 중요한 원인이 된다. 이에 본 논문에서는 고속 연산이 가능하고 별도의 외부 메모리 없이 칩 하나로 모든 동작을 할 수 있는 TMS320LF2407 DSP칩을 사용, Hard-chopping PWM 방식을 이용하여 전류 리플을 감소시켰으며, 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 증명하였다.

$$\begin{bmatrix} V_{ap} \\ V_{bp} \\ V_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{di}{dt} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_e = \frac{(e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c)}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서,  $V_{ap}, V_{bp}, V_{cp}$ : 모터의 상 전압,  $R_s$ : 상의 전기자 저항,  $i_a, i_b, i_c$ : 상전류,  $L_s$ : 상의 전기자인덕턴스,  $e_a, e_b, e_c$ : 상의 역기전력,  $\omega_m$ : 각속도이다.

1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동차기기에 널리 사용되고 있는 서보 전동기는 영구 자석으로 구성된 브리시리스(Brushless) 서보전동기의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이 중에서 영구 자석 형 BLDC(Brushless DC) 전동기는 일반 DC 전동기에 비해 정류자가 없으므로 Brush에 의한 마찰 부분이 없어, 마모가 없고 수명이 길며 소음과 유지비가 적다는 장점을 가진다. 또한 제어가 간편하며 신뢰성이 높아 산업용 및 가전제품의 구동장치로 대단히 중요한 위치를 차지하고 있다.

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC전동기는 이론적으로 120° 도통의 구형파 전류를 공급하면 직류 전동기처럼 전류에 비례하는 일정한 토크를 발생시킬 수 있지만 고정자 권선의 인덕턴스 성분으로 인하여 이상적인 구형파 전류를 흘려주는 것은 거의 불가능하기 때문에 권선에 흐르는 전류가 전환(Commutation)되는 구간에서 출력 전류에 맥동이 생긴다. 이러한 전류 맥동은 토크리플의 원인이 되며, 전동기가 회전할 때 진동과 소음의 원인이 되어 BLDC 전동기를 고정밀 제어에 사용하는 것에 큰 문제가 되고 있다.

이에 본 논문에서는 고속 연산이 가능하고 별도의 외부 메모리 없이 칩 하나로 모든 동작을 할 수 있는 TMS320LF2407 DSP Controller를 사용, Hard-chopping PWM 방식을 이용하여 전류 리플을 감소 시켰으며, 이를 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 및 실험을 통해 증명하였다.

2. BLDC 전동기 모델 및 제어 시스템

2.1 BLDC 전동기의 모델링

BLDC 전동기의 상 전압 방정식은 식 (1)과 같으며, 발생하는 토크는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

BLDC 전동기는 역기전력의 형태가 사다리꼴 모양을 갖기 때문에 역기전력의 값이 일정한 부분에 구형파 형태의 상전류가 입력될 때 토크리플이 가장 작게 됨을 식 (2)를 통해 알 수 있다. 그러나 고정자 권선의 인덕턴스 성분과 역기전력으로 인해 이상적인 전류의 입력이 사실상 불가능하다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 정밀제어나 고속 운전을 위해서 전류 제어시 응답특성이 우수한 Hard-chopping PWM 방식을 사용하였으며, PWM 형태를 그림 1에서 보이고 있다.

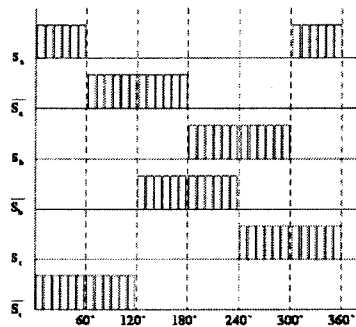


그림1 스위칭 신호

2.2 제어 시스템 구성

제어 시스템 구성도는 그림 2에 보여 지는 바와 같이 크게 제어부, 전압원 인버터부로 구성된다. 제어부는 속도 오차로부터 전류 기준값을 생성하는 속도 제어기와 전류 오차로부터 PWM을 변화시키는 전류 제어기로 구성되며 이들 제어기는 각각 PI 제어기로 구성되었다. 전압원 인버터부는 전류 오차로부터 변화된 PWM에 의해 구동되는 전압원 인버터이다.

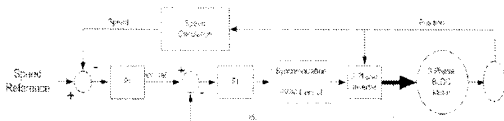
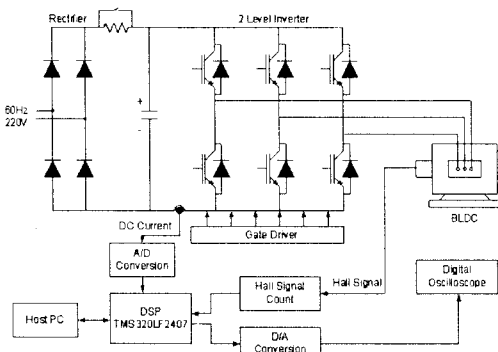


그림2 제어 시스템 구성도

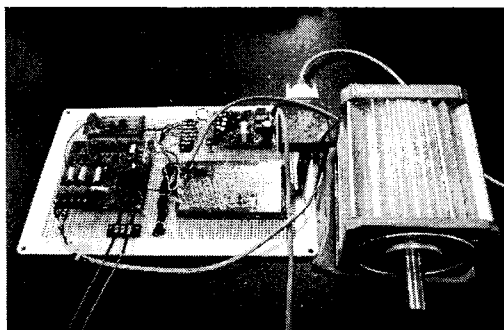
그림 2의 제어 시스템 구성도를 바탕으로 한 전력회로 구성도 및 실제 실험 장치는 아래의 그림 3과 같다. 전력회로는 크게 피드백 신호 처리 및 PWM신호를 발생시키는 DSP보드, PWM신호에 의해 실제 전력을 제어하는 전압원 인버터 모듈, 인버터 모듈 및 DSP보드가 필요로 하는 전원을 공급해주는 SMPS 그리고 전류, 위치 검출 신호를 DSP보드가 필요로 하는 신호로 가공 처리하는 인터페이스 회로들로 구성되어 있다.

전체 시스템의 두뇌에 해당하는 TMS320LF2407 DSP는 25ns(40MIPS)의 고속 연산이 가능하며, A/D Converter 및 SPPWM등을 한 개의 칩에 내장시켜 만들어서 외부에 A/D Converter 및 PWM 발생회로가 필요하기 않으며 부품의 최소화 및 layout의 최적화를 할 수 있다.

SMPS는 Mutli Output Flyback Converter로써 마이크로 프로세서용 +5V와 인터페이스 부에서 각종 신호를 증폭 및 비교하는데 사용되어지는  $\pm 15V$ , 그리고 Gate Drive에서 IGBT를 ON/OFF하기 위해 쓰여 지는 +24V의 4가지 출력 전압을 생성한다.



(a) 전력회로 구성도



(b) 실험 장치  
그림3 전력 회로의 구성

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

#### 3.1 시뮬레이션

본 논문에서는 DSP를 이용한 Hard-chopping PWM 방식을 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다.

그림 4는 시뮬레이션의 전체 구성도를 나타낸다.

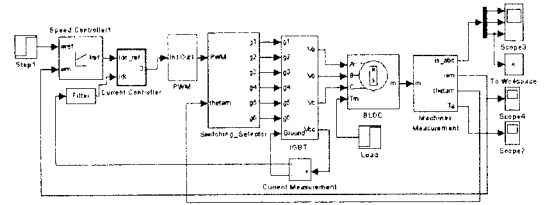


그림4 시뮬레이션 전체 구성도

시뮬레이션 및 실험에 사용된 2hp급 대상 전동기 파라메타는 아래의 표 1과 같다.

표 1 전동기 파라메타

정격 사양 및 정수	수치
정격용량	1.5[kW]
정격전압	220[V]
정격전류	12.5[A]
정격속도	1800[rpm]
정격토크	9.5[N·m]
고정자 저항	3.5[Ω]
관성 모멘트	0.015[kg·m <sup>2</sup> /sec]

시뮬레이션은 지령 속도 700[rpm]에서 실시하였다. 그림5는 전동기의 속도 응답특성 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 0.05초에 지령 속도를 700[rpm]으로 설정하면 전동기는 오버슈트 없이 빠른 시간에 지령속도에 도달하는 것을 확인 할 수 있다.

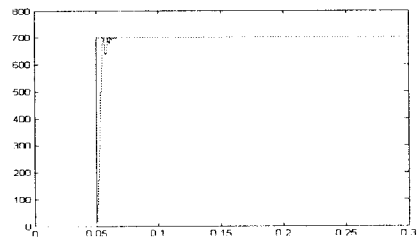


그림5 속도 응답

그림 6은 일반적인 BLDC 6-step 구동시 전류 파형의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전기자 전류의 전환시 고정자 권선의 인덕턴스 성분과 역기전력으로 인해 전류 리플이 발생하는 것을 확인 할 수 있다.

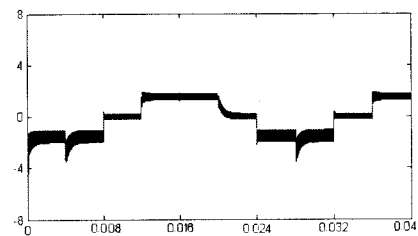


그림6 일반적인 BLDC 전류

그림 7은 본 논문에서 연구한 Hard-chopping PWM 방식에서의 전류 파형을 시뮬레이션 한 결과이다. 전류

리플이 발생하는 부분의 PWM duty를 조절하여 스위칭한 결과 그림 6과 비교하여 전류 리플이 현저히 감소하는 것을 확인할 수 있다.

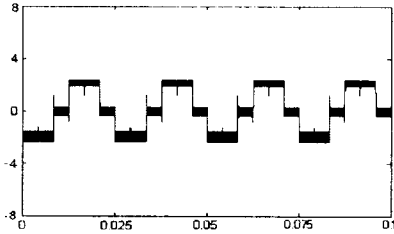


그림7 제어시 전류 파형

### 3.2 실험 결과 및 고찰

실험은 시뮬레이션과 동일하게 지령속도가 700[rpm]인 경우로 실시하였다. 그림 8은 속도 응답 특성을 나타내며 스코프의 채널 2와 3은 각각 전동기의 지령 속도와 실제 속도를 나타낸다. 이는 DSP로부터 DAC변환기를 이용하여 출력한 파형으로 스코프 레인지 500[mV]가 600[rpm]을 의미한다.

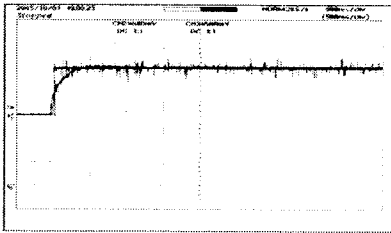


그림8 속도 응답

그림 9는 일반적인 BLDC 6-step 구동시 나타나는 전류 파형이며, 이는 시뮬레이션 결과에서 보았듯이 리플이 매우 심함을 알 수 있다. 그림 10은 본 논문에서 연구한 Hard-chopping PWM방식을 사용한 전류 파형을 나타내고 있다. 그림 9와 비교해 보면 위의 시뮬레이션 결과와 같이 일반 BLDC 6-step 보다 전류 리플이 현저히 감소함을 실험 결과를 통해 알 수 있다.

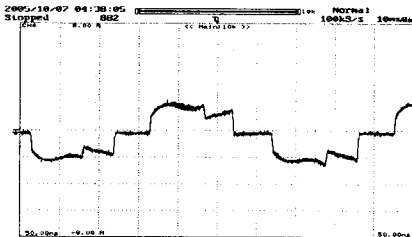


그림9 일반적인 BLDC 전류

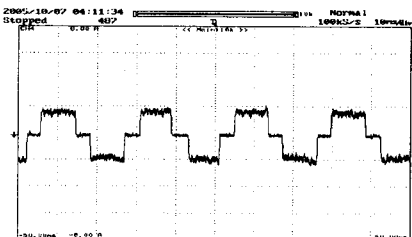


그림10 제어시 전류 파형

## 4. 결 론

본 논문에서는 TMS320LF2407 DSP를 이용하여 Brushless DC 전동기의 토크 리플 저감을 위한 전류 제어 기법의 한가지인 Hard-chopping PWM 방식에 대해 고찰하였다. 제어기 구성을 위해 먼저 전동기를 모델링 하였으며 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 실제 시스템을 구성하여 실험을 실시하였다. 실험과 시뮬레이션을 통해 설계된 시스템은 일반적인 BLDC 6-step 구동시보다 전류 리플이 현저히 감소함을 확인할 수 있었다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 차준호, "공간전압벡터 PWM 방식을 이용한 영구 자석형 동기 전동기의 가감속 운전 특성 고찰", 동아대학교, 2004
- [2] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent Magnet Synchronous Motor Drive" IEEE Trans, Ind. Applicat., Vol.25, No.2, pp.265~273, March/April 1989
- [3] Implementation of a Speed Controlled Brushless DC Drive Using TMS320F240, 1997
- [4] Renato Carlson, Michel Lajoie Mazenc and Joao C.dos S.Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation In Brushless DC machines", In Conf. Rec. LAS Annual Meeting, pp.287~292, 1990
- [5] D. C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 41, No. 3, pp.292~300, June 1994.