

고속 회전용 슬롯리스 브러시리스 DC 전동기의 동특성

장 석 명, 조 한 육, 성 소 영*, 유 대 준, 최 장 영
충남대학교 전기공학과, 한국 재활공학 연구소*

Dynamic Characteristics of Slotless Brushless DC Motor for High-Speed Application

Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, So-Young Sung*, Dae-Joon You, Jang-Young Choi
Chungnam Nat'l Univ., KOREC*

Abstract - Slotless brushless dc motor with 높은 속도와 출력밀도를 갖는 특성을 가진 BLDC 전동기는 산업 분야에서 넓은 활용성이 있다. 이 논문은 BLDC 전동기의 동특성을 조사하고, 이를 위한 모델링과 시뮬레이션 결과를 제시한다. 모터 모델은 수학적 모델로 제작되었으며, 제어 시스템은 TMS320F2812 DSP를 기반으로 하는 인버터 회로와 드라이브 회로로 구성되었다.

1. 서 론

브러시리스 DC 전동기(이하 BLDC 전동기)는 직류 전동기에 비해 수명이 길고 응답성이 빠르며 고속운전 특성이 가능한 장점을 갖는다. 또한 선형적인 토크-전류, 속도-전압 특성을 갖고 있으며, 소음이 적고, 가감속 제어가 매우 용이한 특성을 갖고 있으므로, 빠른 변속 운전이 요구되는 응용분야에 매우 적합한 전동기라 할 수 있다. 또한, 전력용 스위칭 소자 및 고성능 마이크로 프로세서의 개발에 힘입어 디지털, 가전, 산업체 및 기타 특수 분야에서 적용분야가 확대되고 있는 추세이다 [1][2].

본 논문에서는 고속 운전에 응용되는 슬롯리스 고정자 를 갖는 BLDC 전동기의 동특성 해석을 위하여, 전동기의 동특성 모델링을 제시하였다. 또한, 해석모델의 해석적 방법에 수학적 모델링에 의한 시뮬레이션에서 필요한 여러 파라미터들을 구하였다.

그리고, 동특성 실험을 위하여 정류회로, 초기충전회로, 제동회로를 포함하는 AC-DC 변환장치를 구성하였고, 고성능 DSP TMS320F2812를 이용한 제어보드를 구성하여 고속 전동기의 구동을 위한 인버터를 구성하여 실험을 수행하였다.

2. BLDC 전동기의 동특성 모델링

그림 1은 일반적인 BLDC 전동기 드라이브 시스템의 블록도를 보여주고 있다. BLDC 전동기를 구동하려면 회전자의 위치를 검출하는 센서가 필수적으로 요구된다. 그림 1에서 홀센서는 회전자의 위치를 판별하기 위한 것으로, 3상 BLDC 전동기의 경우 3개의 센서를 전기각 120도 간격으로 배치하여 이용하는 것이 일반적이다.

사다리꼴의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는 이론적으로 120° 도통의 구형과 상전류를 인가 하였을 때, 리플이 없는 일정한 토크를 갖는다. 즉, BLDC 전동기에서 역기전력의 파형과 상전류의 파형의 형태가 토크 출력 특성을 크게 좌우하게 되는데, 일반적인 3상의 BLDC 전동기 시스템의 해석에서 전동기의 수학적 모델을 120 도 통구간을 갖는 사다리꼴로 선형화 하는 방법을 주로 사용하고 있다.

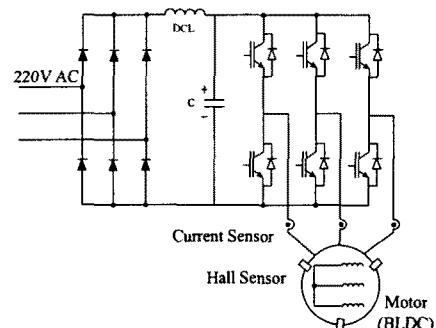


그림 1. BLDC 전동기 드라이브 시스템의 블록도

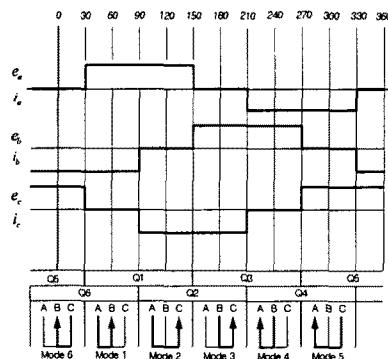


그림 2. BLDC 전동기의 역기전력과 입력파형, 스위칭 소자 도통각과의 관계

BLDC 전동기의 각 상 전기자 권선의 등가식은 전동기가 운전되고 있을 때, 상호 인덕턴스가 불변한다는 가정 하에 식(1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{di}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $L = L_a = L_b = L_c$ 이고, $R = R_a = R_b = R_c$ 이다. 그리고, 축이 비둘국 형태를 갖는 표면부착형 영구자석 BLDC 전동기에서 텔릭턴스 토크를 무시 할 수 있으므로, 전체 발생 토크 T_e 는 식(6)과 같다.

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

부하단에서 BLDC 전동기의 기계적 출력 방정식은 식(3)과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (3)$$

식(3)에 의해 기계적 출력 각속도 ω 는 식(4)와 같다.

$$\omega = (T_E - T_L) \frac{1}{J_s + B} \quad (4)$$

여기서, T_L 은 부하 토크 (Nm), J 는 회전자의 관성모멘트 ($kg \cdot m^2$), B 배어링 마찰 계수를 각각 나타낸다.

2.2 역기전력 계수의 산정

고정자의 1 슬롯피치를 쇄교하는 자속 $d\phi$ 는 자속밀도 B_n 과 1 슬롯피치의 면적 S 에 의해 식(5)와 같이 정의된다.

$$d\phi = B_n S d\theta \quad (5)$$

따라서, 1 슬롯피치에 대한 쇄교자속은 식(6)과 같다.

$$\begin{aligned} \psi &= \int_{-\frac{\theta}{2}}^{\frac{\theta}{2}} B_n r_s L_{sk} d\theta \\ &= 2 R_s L_{sk} B_n \sin \frac{\theta}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로, 1 상당 영구자석에 의한 쇄교자속 λ_f 는 식(7)에 의해 계산 할 수 있다.

$$\lambda_f = N_{sep} N_{tpa} \psi \quad (7)$$

따라서, 재계산된 역기전력의 최대값은 식(8)과 같다.

$$E_{max} = \omega \lambda_f \quad (8)$$

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 전동기 사양

시뮬레이션 및 실험에 사용된 슬롯리스 BLDC 전동기의 파라미터는 표 1와 같고, 슬롯리스 형태의 고정자와 비돌극형 표면부자 영구자석 회전자를 갖고 있으며, 고속 회전용으로 정격속도는 약 20000 rpm 정도이다.

3.2 실험 장치 구성

실험에 사용된 BLDC 전동기의 구동 장치는 컨버터에 3상 다이오드 모듈을 사용하였고, 인버터에 3상 브리지회로를 3개의 IGBT 모듈을 이용하였고, 발전 제동을 위하여 DSP 신호에 의해 동작하는 전자릴레이를 이용한 제동저항 회로를 구성하였다. 이밖에도 평활용 콘덴서, 돌입전류 제한 회로, 발전 제동을 위한 제동저항 등을 포함한다. 그림 3은 제작된 BLDC 전동기 구동용 전력변환장치를 보여준다.

표 1. 전동기 사양

항 목	크 기
정격전압, V	300 V
정격토크, T	0.35 Nm
저항, R	1.26 Ω
인덕턴스, L	0.724 μH
역기전력 상수, K_E	0.0318 V/(rad/sec)
극수, p	4

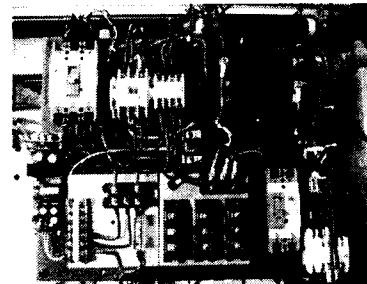


그림 3. 인버터의 제작 사진

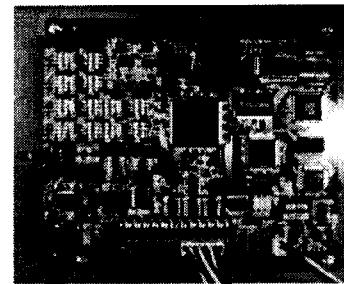


그림 4. TMS320F2812를 이용한 HSMCS-01 보드 제작 사진

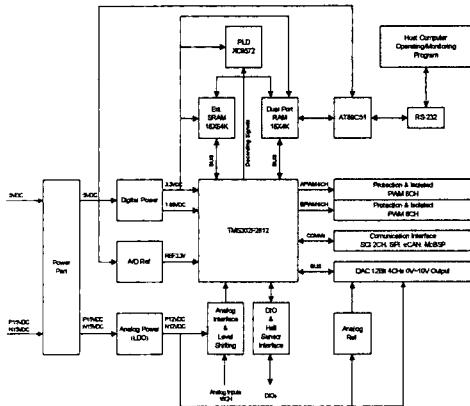


그림 5. TMS320F2812를 이용한 HSMCS-01 보드의 블록 다이어그램

그림 4-5는 제어 시스템인 HSMCS-01(High-Speed Motor Control System)의 제작사진과 블록도를 보여준다. 제어 시스템의 메인 프로세서는 TI사의 고정 소수점 연산 (Digital Signal Processor)로 TMS320F2812 DSP를 사용하였다. 이 DSP는 최대 150MIPS의 처리속도를 가지며, 12Bit/16Ch의 A/D 컨버터와 12개의 PWM을 내장하고 있으며, 22kb의 내부 메모리와 128kb의 Flash memory를 가지고 있다. HSMCS는 제어기의 내부변수를 모니터링하기 위해서 12bit/4Ch DAC를 가지고 있다. 일반적으로 고속 전동기를 제어하기 위해서는 제어 알고리즘도 모터의 속도에 비례해서 빠르게 동작해야 한다. 제어기와 유저의 인터페이스는 주로 통신을 통하여 이루어 지는데 통신 속도는 그렇게 빠르지 않기 때문에 고속의 제어 알고리즘을 수행하면서 유저 인터페이스를 구축하는 것은 어려운 일이다. 본 시스템에서는 이를 위하여 Atmel사의 MCU인 AT89C51를 사용하여 Dual CPU 구조를 채택하였다. DSP와 MCU는 Dual Port RAM을 통하여 데이터를 교환한다. 사용자는 MCU에 속도 레퍼런스나 제어기의 이득 등, 각종 시스템을 운용

하기 위한 파라메터를 통신으로 전달하면 MCU는 이 데이터를 DPRAM에 기록하여 DSP로 하여금 사용자가 원하는 동작을 수행하도록 구성하였다. 그리고 만에 하나라도 제어기가 연산에러나 노이즈에 의해서 다운 되었을 때 시스템이 이상동작을 하는 것을 막기 위하여 제어기가 정상동작을 하지 않을 시에 강제로 PWM 신호를 차단하는 회로를 구현하였다. 제어기는 PWM을 출력하기 위해서 제어 알고리즘의 시작시에 동작신호를 보호회로에 주어야 하고 제어 알고리즘의 연산이 끝난후에 다시 보호회로에 동작신호를 Toggle해 주어야 한다. 보호회로는 일정시간동안 동작신호가 Toggle 되지 않으면 않으면 제어기가 정상동작이 아니라고 판단하여 PWM신호를 강제로 OFF시키는 구조로 되어 있다.

3.3 역기전력 상수

그림 6은 전동기의 발전모드시 무부하 단자전압을 각속도 ω 에 따라 측정한 결과이며, 실험 데이터의 선형화를 통해 제어대상 전동기의 역기전력 상수를 도출하였다.

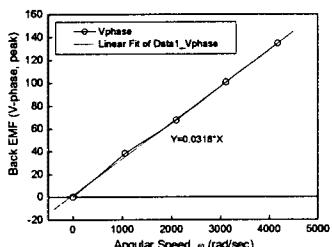


그림 6. 역기전력 상수 시험

3.4 실험결과 및 고찰

그림 7과 그림 8은 전동기의 부하시험에 의한 전압 및 전류 특성을 나타낸다. 실험에 의한 측정치는 전동기가 약 9000 rpm으로 회전할 때, 약 0.35 Nm의 토크를 가해 측정하였다. 측정에 사용된 전압 및 전류센서는 LEM사의 LV25P, LA25P를 사용하였으며, 배율은 각각 11mV/V, 400 mV/A이다. 시뮬레이션 및 실험에 의한 결과가 비교적 잘 부합함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 고속응용에 적합한 슬롯리스형 BLDC 전동기의 동특성 해석 및 드라이브를 위하여 수학적 모델을 제시하고, TMS320F2812를 이용한 HSMCS-01 보드 및 인버터를 구성하여 실험을 수행하였다. 향후, 전동기의 실제 역기전력을 고려한 연구가 요구되며, 속도의 안정성을 유지하기 위한 토크리를 저감, 전류파형의 개선 등에 관한 연구가 요구된다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sung-In Park, Tae-Sung Kim, Sung-Chan Ahn, Dong-Seok Kim, "An improved current control method for torque improvement of high-speed BLDC motor," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003, APEC '03, Eighteenth Annual Conference IEEE, vol. 1, pp. 294-299, Feb. 2003.
- [2] J.X.Shen, Z.Q.Zhu, David Howe, "Sensorless flux-weakening control of permanent magnet brushless machines using third harmonic back EMF," IEEE Trans. Indust. Applicat. vol. 40, no. 6, November/December 2004.

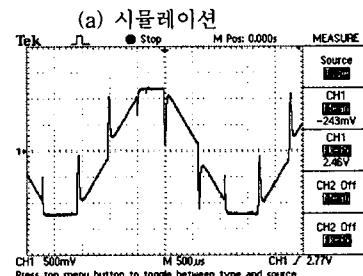
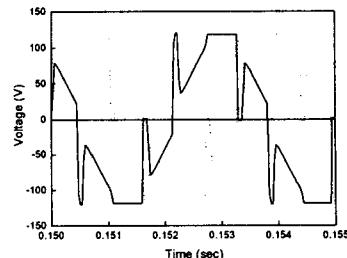
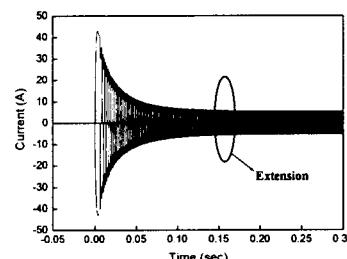
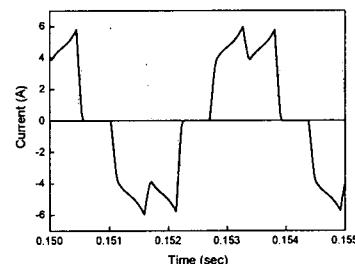


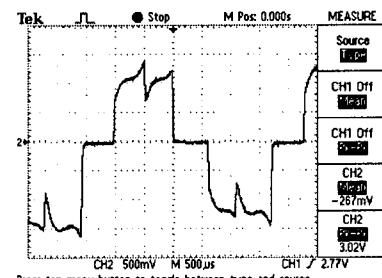
그림 7. 전압 특성 (@ 9000 rpm)



(a) 시뮬레이션



(b) 시뮬레이션 (확대)



(c) 실험

그림 8. 전류 특성 (@ 9000 rpm)