

Electro-Magnetic Brake를 위한 BLAC 구동시스템

全美林*, 李載賢**, 趙官烈†, 睦亨洙***

BLAC Drive System for Electro-Magnetic Brake

Mi-Rim Jeon, Jae-Hyun Lee, Kwan-Yuhl Cho, and Hyung-Soo Mok

요 약

전기제동 시스템(Electric braking system)은 기존 자동차 시스템에서 사용된 유압 브레이크를 대신하여 전동기를 이용하여 제동력을 얻게 된다. 전기제동은 기존 유압식에 비해 부품의 수가 감소되며 ABS, ESC 등의 응답성 향상 및 제동거리 감소효과를 얻을 수 있다. 본 논문에서는 EMB(Electro-Magnetic Brake)용 BLAC 전동기의 제어기를 개발하였다. 제어 시스템은 BLAC 전동기 구동을 위한 전력변환장치와 속도제어를 위한 디지털제어기로 구성되었으며, 빠른 토크 응답특성을 위해 벡터제어 기법을 적용하였다. 또한 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 및 실험 결과를 제시하여 EMB용 BLAC 전동기의 성능을 검증하였다.

ABSTRACT

The electric braking system obtains its braking force by a motor instead of the hydraulic brake which has been used in conventional automobile systems. Electric braking system is consisted of fewer numbers of components than hydraulic braking system, and it has effects of improved response and reduced braking distance for the ABS(Anti-lock Brake System) and ESC(Electronic Stability Control). This paper presents the BLAC motor drive system for Electro-Magnetic Brake(EMB). Proposed control system consists of the power converter for driving a motor and the digital control system for speed control, and the vector control is applied for fast torque response. It is verified through the simulation using Matlab/Simulink and experiment that the proposed BLAC drive system can be applied to EMB.

Key Words : Electric Braking, Electro-Magnetic Brake(EMB), BLAC Control System, Vector Control

1. 서 론

최근 전력전자 분야와 마이크로프로세서 성능의 발전으로 자동차 산업에 새로운 기술들이 적용되고 있

다. 최근에 기계 혹은 유압으로 제어되던 장치들이 전력전자 기술을 활용한 전기제어 시스템으로 점차 대체되어지고 있다. 특히 제동 시스템 부분에서 기존의 유압 브레이크를 대신하여 전기적 제어를 이용하여 제동력을 얻는 것을 Brake-By-Wire 시스템이라 한다. 이 시스템의 일종으로 활발히 연구되고 있는 전기제동 분야 중 EMB(Electro-Magnetic Brake)는 차세대 제동 장치로 주목받고 있다.^{[1]~[6]}

EMB는 제동력을 전동기의 토크로만 얻는 시스템으로 기존의 유압 브레이크 시스템에 비해 부품수가 감소되어 경량화가 가능하고 신뢰성이 향상되며 조립공

†교신저자 : 정회원, 충주대 제어계측공학과 부교수

E-mail : kycho@cjnu.ac.kr

*정회원, LS산전 연구원

**정회원, (주)에이디티 중앙연구소 주임연구원

***정회원, 건국대 전기공학과 교수

접수일자 : 2009. 8. 17

1차 심사 : 2009. 9. 20

2차 심사 : 2010. 6. 1

3차 심사 : 2010. 7. 19

심사완료 : 2010. 7. 25

정(Assembling process)이 단순화 될 수 있다. 또한 EMB 시스템은 운전자의 제동신호에 대해 전동기가 빠른 속도로 응답하기 때문에 기존의 유압시스템에 비해 제동거리를 줄일 수 있다.

그러나 EMB 시스템을 실제 자동차에 적용하기 위해서는 기본적인 제동장치의 요구조건인 응답특성, 감성 품질 및 안정성을 만족시켜야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 EMB 시스템 구성의 핵심인 전동기의 선정 및 설계가 중요하다. 전동기의 선정에 있어서 제어 가 편리한 영구자석 직류 전동기는 효율과 내구성이 낮고, 급제동시의 높은 역기전력으로 인하여 고속운전에 제한을 받으므로 급속제동에 한계가 있다. 따라서 EMB용 전동기로는 효율이 높고 제어특성이 우수한 BLAC(Brushless Alternating Current) 전동기가 적절하다.

본 논문에서는 새로운 자동차 제동 시스템으로 연구되고 있는 EMB 시스템용 BLAC 전동기의 성능 검증과 제어 알고리즘의 적용 및 보안을 위한 연구를 진행하였다. EMB용 BLAC 전동기는 빠른 토크 응답 특성이 요구되므로 본 논문에서는 고성능 순시 토크제어가 가능한 벡터제어 기법을 적용하였고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 BLAC 전동기의 성능을 검증하였다.

2. EMB용 BLAC 전동기 특징 및 설계 사양

본 연구에 사용된 EMB용 BLAC 전동기는 그림 1에 나타난 바와 같이 고정자가 6슬롯, 회전자가 4극으로 영구자석이 회전자 코어 표면에 부착되어 있는 영구자석 표면부착형 구조를 갖는다.

BLAC 전동기의 상수(Parameter)는 LCR 미터기를 사용하여 선간 저항 및 인덕턴스를 측정하고, 유기전압 파형 측정을 통하여 역기전력 상수 및 고조파를 계산하였다. 그림 2는 EMB용 BLAC 전동기의 선간 유기전압 파형을 나타낸다.

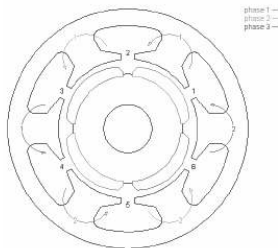


그림 1 EMB용 BLAC 전동기의 구조
Fig. 1 Structure of BLAC Motor for EMB

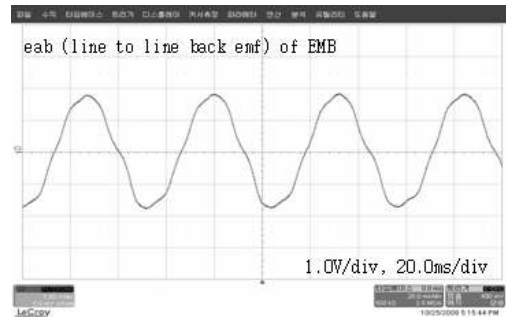


그림 2 BLAC 전동기의 선간 유기전압 파형(@568rpm)
Fig. 2 Waveform of line to line back EMF of BLAC motor(568rpm)

EMB용 BLAC 전동기의 유기전압은 고조파가 함유되어 있기 때문에 FFT 분석을 통해 기본파와 고조파로 분리하여 유기전압 상수를 구할 필요가 있다. EMB용 BLAC 전동기의 선간 유기전압의 기본파의 크기는 568[rpm]일 때 1.75[V]로 선간 유기전압 상수는 0.015[Vsec], 상 유기전압 상수는 0.0087[Vsec]이다.

표 1은 EMB용 BLAC 전동기의 사양을 나타낸다. 자동차 운전시 전동기 주위온도를 감안하여 전동기의 상 저항은 70[°C]를 기준으로 환산하였다.

표 1 EMB용 BLAC 전동기 상수
Table 1 Parameters of BLAC motor for EMB

구분	기호	측정값	단위
고정자저항 (@70°C)	rs	0.125	Ω
q축 인덕턴스	Lq	90	uH
d축 인덕턴스	Ld	90	uH
극수	pole	4.0	-
관성모멘트	Jm	0.1	mkgm ²
점성계수	Bm	0.1	kgm ² /sec
상 유기전압 상수	φf	0.0087	Vsec

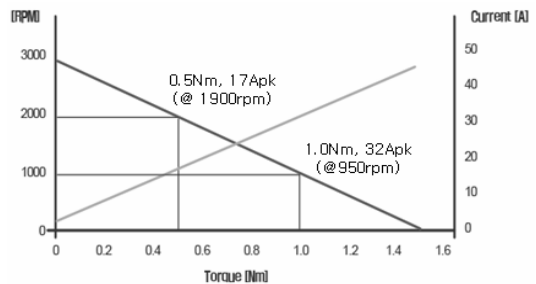


그림 3 EMB용 BLAC 전동기의 TN 특성
Fig. 3 TN curves of BLAC Motor for EMB

그림 3은 EMB용 BLAC 전동기의 TN 특성을 나타낸다. 정격토크는 1900[rpm]에서 0.5[N·m], 정격전류는 17[Apeak]이고 최대토크는 950[rpm]에서 1.0[N·m], 최대토크 시 전류는 32[Apeak]이다.

3. EMB용 BLAC 전동기 구동 시스템 설계

3.1 BLAC 전동기 구동 시스템

EMB 시스템의 BLAC 전동기를 구동하기 위한 시스템은 그림 4와 같다. 전체 시스템은 BLAC 전동기 구동을 위한 전력변환장치와 이를 제어하기 위한 디지털 제어기로 구성되어 있다. 제어 시스템은 고성능 순시 토크제어가 가능한 벡터제어, 전류 제어기 및 속도 제어기로 구성된다.

EMB용 BLAC 전동기 구동 시스템 중 직접적으로 BLAC 전동기를 제어하여 부하에 제동을 가하게 되는 부분을 살펴보면 그림 5와 같다. BLAC 전동기의 회전력을 변환하여 나사(Screw)를 통해 브레이크 패드(Pad)를 밀어 제동을 하게 되는 방식이다. 이 때 발생하는 토크는 토크센서를 통해 측정되며, 이 값을 외부의 앰프(Amplifier)를 이용하여 증폭시켜서 측정한다. 또한 브레이크에 가해지는 힘은 피스톤(Piston)에 의해 패드가 밀리면서 패드 사이의 부하 셀(Load cell)에 압력이 가해져 이를 통해 측정된다. 이와 같은 방법을 통해 제동력 및 토크를 확인할 수 있게 된다.

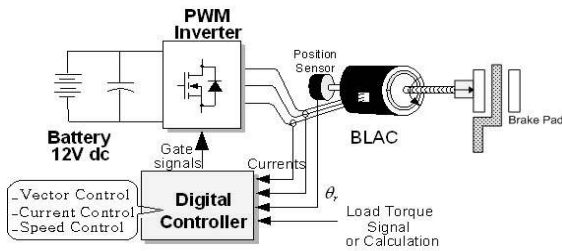


그림 4 BLAC 구동 시스템
Fig. 4 BLAC drive system

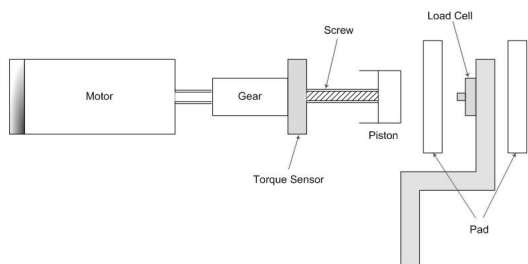
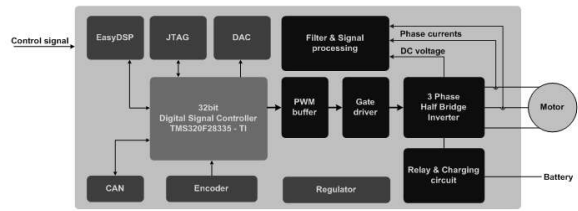
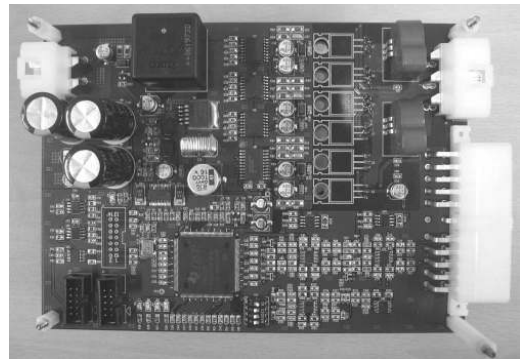


그림 5 EMB 시스템
Fig. 5 EMB system



(a)제어기 구성도



(b) 제어기 사진

그림 6 BLAC 제어기 구성도 및 사진
Fig. 6 Block diagram and photograph of BLAC driver

EMB 시스템 구동용 BLAC 전동기를 제어하기 위해 본 연구에서 개발된 드라이버의 대략적 구성 요소는 그림 6과 같다.

그림 6의 드라이버에서 디지털 제어기 부분은 연산을 담당하는 DSC(Digital Signal Controller), 통신, 엔코더 및 각종 신호 처리 회로, 버퍼, 모니터링 및 디버깅을 위한 인터페이스로 구성되어 있다. 전력변환 장치 부분은 전동기에 전압을 인가하기 위해 MOSFET 6개로 구성된 3상 인버터, 게이트 드라이버, 초기충전 회로로 구성되었다.

본 연구에서 사용된 제어 프로세서는 TI사의 32bit 부동소수점 연산 기반의 DSC인 TMS320F28335이다. 이 DSC는 하나의 IC에 PWM, ADC, 엔코더 모듈, 캔 모듈, 동기/비동기 통신 등의 다수 패러패럴을 보유하고 있으며 전동기 드라이버와 같은 제어 시스템 설계에 맞는 편의성을 제공한다.

3.2 EMB용 BLAC 전동기 제어

EMB의 제어는 자동차 시스템에 사용되므로 기본적으로 안정적이며 빠른 제어가 가장 중요하다. 따라서 본 연구의 목적인 EMB 시스템용 전동기의 성능 검증

을 위해 EMB에서 사용된 표면부착형 영구자석 동기 전동기(SPM)의 벡터 제어 방법을 적용하였다.

전동기의 순시 토크 제어를 위해서는 자속과 토크 성분 전류는 독립적인 제어가 되어야 하며, 두 성분 전류가 공간상에서 90°로 유지되어야 한다. 자속과 토크 성분 전류를 90°로 유지하기 위해서는 고정자 전류를 동기 속도로 회전하는 회전 좌표계로 변환해야 한다. 이런 좌표변환을 위해 회전자의 위치정보를 레졸버(Resolver)나 엔코더(Encoder) 등의 위치검출 센서를 사용하여 알아낸다. 본 연구에서 사용된 BLAC 전동기는 엔코더를 사용하여 자속각을 알아내었다.

회전자 위치정보를 이용하여 abc축의 3상 전압과 전류를 dq축 전압과 전류로 좌표 변환할 수 있다. dq축에서의 d축 전류를 영(Zero), 즉 $i_d = 0$ 으로 제어하면, 고정자 전류는 모두 q축 전류 i_q 가 되며 i_q 의 방향은 자속 ϕ_f 와 항상 90°의 각을 가지게 되므로 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우 단위전류 당 최대토크를 발생하게 된다. 표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우 d축 인덕턴스와 q축 인덕턴스는 거의 동일하므로 톨러턴스 토크가 영(Zero)이 되므로 전동기에서 발생하는 토크는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \phi_f i_q \quad (1)$$

토크 성분 전류 i_q 의 크기를 요구되는 지령 토크의 크기에 따라 제어한다면, 영구자석 표면부착형 BLAC 전동기도 빠른 순시 토크 응답을 얻을 수 있다.

그러나 본 연구에서 사용된 EMB용 BLAC전동기의 유기전압은 고조파를 함유하고 있다. 따라서 영구자석의 자속(Magnet flux)에 고조파를 반영하여 나타낸 고정자 자속을 구하고, 이를 이용하여 고정자 권선 a상에 유기되는 유기전압을 기본파의 15차 이상의 고조파를 무시할 경우 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e_{an} = \frac{d}{dt} \phi_{an} = \omega_r \frac{d}{d\theta_r} \phi_{an} = \omega_r \sum_{n=1}^{\infty} (n\phi_{fn}) \cos(n\theta_r) \quad (2)$$

$$= \omega_r [\phi_{f1} \cos \theta_r + 5\phi_{f5} \cos(5\theta_r) + 7\phi_{f7} \cos(7\theta_r) + 11\phi_{f11} \cos(11\theta_r) + 13\phi_{f13} \cos(13\theta_r)]$$

이 때 고조파를 함유한 abc축의 3상 쇄교자속을 dq축으로 표현하면 식 (3) 및 (4)와 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_{df} \quad (3)$$

$$\lambda_q = L_q i_q + \lambda_{qf}$$

$$\lambda_{df} = \lambda_{df0} + \lambda_{df6} \cos(6\theta_r) + \lambda_{df12} \cos(12\theta_r) \quad (4)$$

$$\lambda_{qf} = \lambda_{qf0} - \lambda_{qf6} \sin(6\theta_r) - \lambda_{qf12} \sin(12\theta_r)$$

전압 방정식을 자속의 고조파를 반영하여 식 (5)와 같이 표현하고, 토크식은 식 (6)으로 나타나게 된다.

$$v_d = r_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r \lambda_q$$

$$= r_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q - \omega_r \lambda_{qf} \quad (5)$$

$$v_q = r_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r \lambda_d$$

$$= r_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + \omega_r \lambda_{df}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_{df} i_q - \lambda_{qf} i_d) \quad (6)$$

$$= J_m \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d}{dt} \omega_r + B_m \left(\frac{2}{P} \right) \omega_r + T_L$$

4. 시뮬레이션

본 논문에서는 EMB용 BLAC 전동기에 벡터제어를 적용하였을 때의 특성을 해석하기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 모의해석을 수행하였다. 시뮬레이션 조건으로 PWM 주파수는 20[kHz]이고, 전류제어는 PWM 주기마다 한번 씩 실행하였다. 그리고 속도제어 주기는 300[usec]로 PWM 6주기마다 한번 씩 실행하였다. 표 2는 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

표 2 토크 및 속도제어 조건

Table 2 Conditions of torque and speed control

구분	기호	값	단위
DC 전압	Vdc	12.0	V
PWM 주파수	fpwm	20.0	kHz
정격부하 조건	토크	Trat	0.5 Nm
	속도	rpm_rat	1,900 rpm
최대부하 조건	토크	Tmax	1.0 Nm
	속도	rpm	950 rpm

그림 7은 1500[rpm]과 150[rpm]으로 속도제어를 할 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 정격부하의 약 1/3 부하에서 속도명령을 추종하고 있음을 알 수 있다.

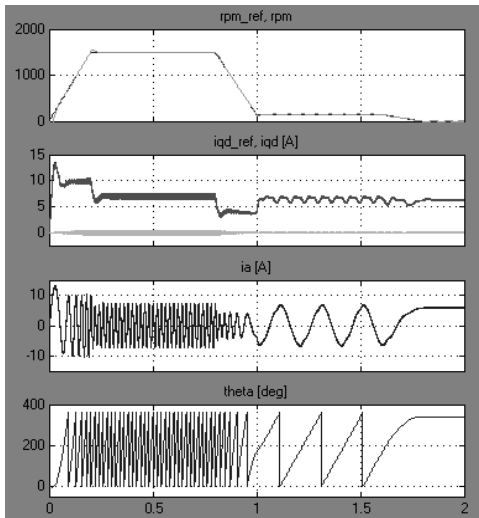


그림 7 속도제어 특성(1500rpm→150rpm)
Fig. 7 Speed control characteristics(1500rpm→150rpm)

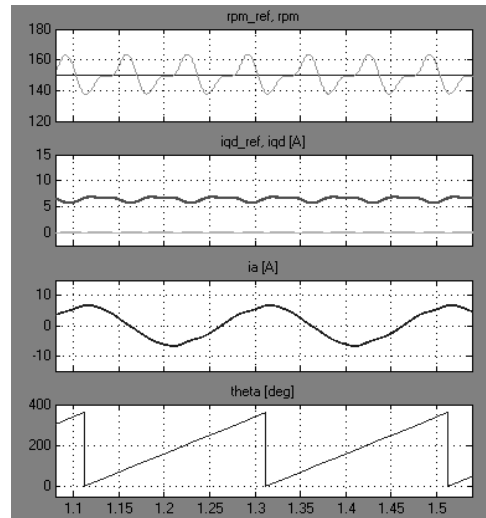


그림 9 150rpm 운전 시 상세 파형
Fig. 9 Enlarged waveforms at 150rpm

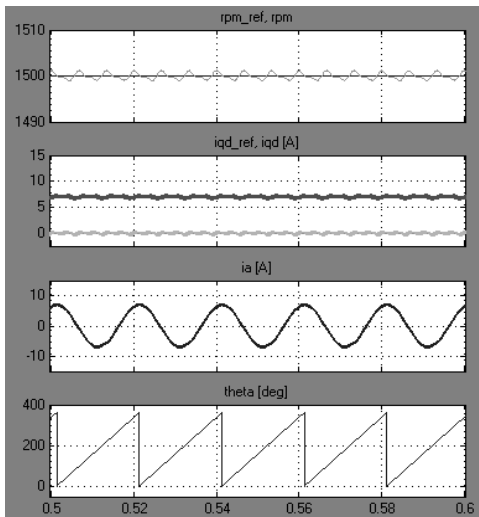


그림 8 1500rpm 운전 시 상세 파형
Fig. 8 Enlarged waveforms at 1500rpm

그림 8은 1500[rpm]으로 운전 시 상세 파형을 나타낸다. 1500[rpm]에서 약 2[rpm]의 속도리플이 발생한다. 이는 유기전압의 고조파에 의해 발생되며, 고속으로 운전함으로써 전동기에서 필터링 되어 리플이 작게 나타난다.

그림 9는 150[rpm]으로 운전 시 상세파형을 나타낸다. 150[rpm] 운전 시 속도리플은 약 12[rpm]으로 크게 나타난다. 이는 유기전압의 고조파에 의해 발생하며 고속에서와 달리 전동기에서 토크리플이 거의 필터

링 되지 않아 크게 나타나며 저속으로 운전 시 진동의 원인이 된다.

5. 실험 결과

제안된 제어 방법으로 EMB용 BLAC 모터의 특성 및 성능을 실험세트를 구성하여 검증하였다.

그림 10은 무부하 조건에서 -1500[rpm]과 1500[rpm] 정역 회전 운전을 했을 때의 실험 파형을 나타낸다. BLAC 전동기의 속도가 속도 명령을 추종하고 있음을 나타내며 무부하 상태이므로 정속운전 시의 전류는 약 1[Apeak]로 작게 나타난다. 반면, 가속 시는 6[Apeak]의 전류가 흐른다. 그림 11은 이 때의 전기각과 d, q 축 전압 레퍼런스를 나타낸다.

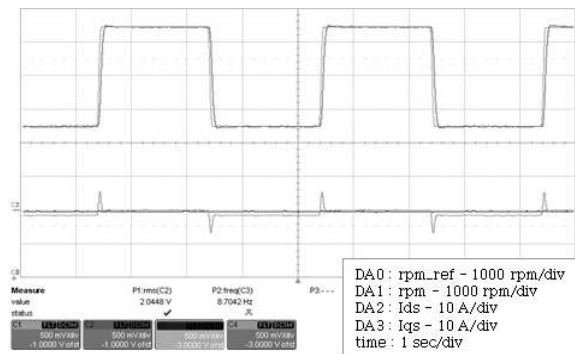


그림 10 -1500 ~ 1500rpm 정역 운전 속도 특성
Fig. 10 Speed control performance at no load (-1500 ~ 1500rpm)

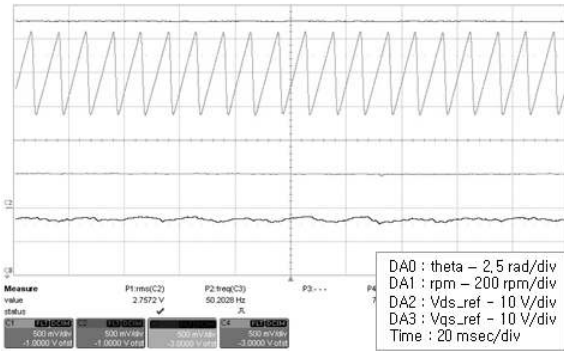


그림 11 1500rpm 에서의 dq 전압명령 확대
Fig. 11 Enlarged waveform of dq voltage reference at 1500rpm

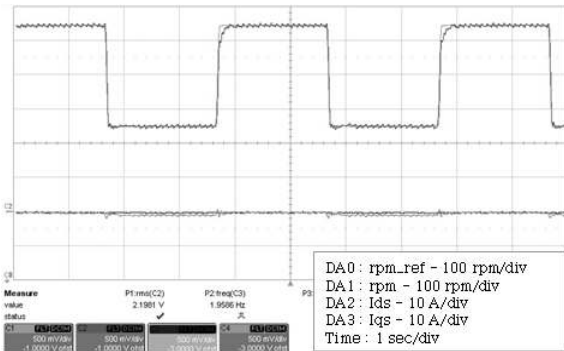


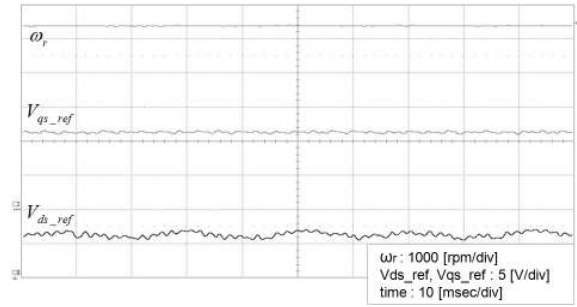
그림 12 -150 ~ 150rpm 정역 운전 속도 특성
Fig. 12 Speed control performance at no load (-150 ~ 150rpm)

그림 12는 150[rpm]으로 정역회전 운전 시 실험 파형을 나타낸다. 이때의 실제 속도 리플은 약 13[rpm]으로 시뮬레이션 결과와 유사한 결과를 보였다.

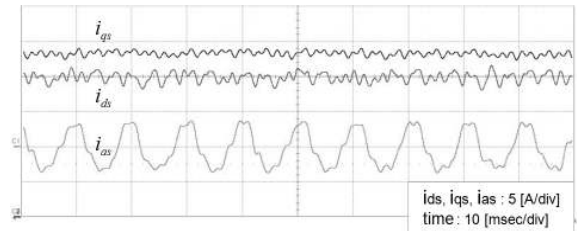
그림 13은 약 18[%] 부하 조건에서의 1500[rpm]에 대한 전동기 속도와 전류를 보여주고 있으며, 이와 유사하게 그림 14는 약 15[%]부하 조건에서 150[rpm]에 대한 실험 파형을 나타낸다. 그림 13과 14에서 상전류는 역기전력 고조파의 영향으로 왜곡을 갖게 되는 것을 볼 수 있다. 150[rpm]의 속도로 운전되고 있을 때 속도 리플은 약 10[rpm]으로 이것은 토크리플에 의해 야기되었다.

6. 결 론

본 논문에서는 기존의 유압 시스템을 대체하기 위한 EMB용 BLAC 전동기의 구동 및 제어 드라이브 시스템을 개발하였다. 또한 시뮬레이션과 실험을 통하여 BLAC 전동기의 성능을 검증하였다.

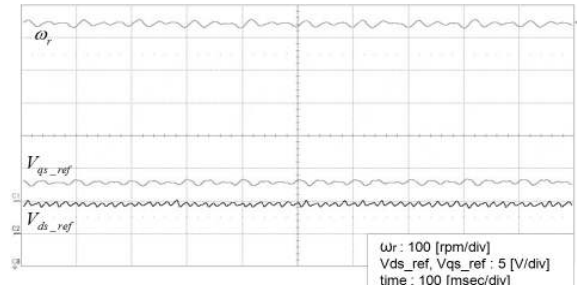


(a) 전동기 속도 및 dq 전압 명령
(a) Motor speed and dq voltage references

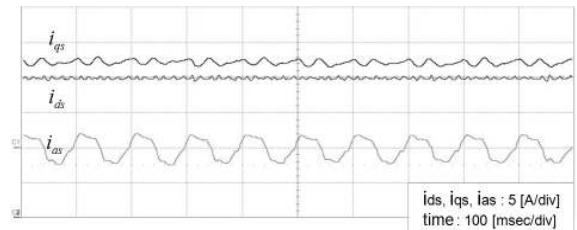


(b) dq축 전류 및 상전류
(b) dq currents and phase current

그림 13 부하 조건에서의 1500rpm 정속 운전 특성
Fig. 13 Speed control at 1500rpm under load condition



(a) 전동기 속도 및 dq 전압 명령
(a) Motor speed and dq voltage references



(b) dq축 전류 및 상전류
(b) dq currents and phase current

그림 14 부하 조건에서의 150rpm 정속 운전 특성
Fig. 14 Speed control at 150rpm under load condition

이를 통해 무부하 및 부하 조건에서 BLAC 전동기의 속도 및 전류가 각각의 지령 값을 추종함을 확인하였다. 그러나 제작된 EMB용 BLAC 전동기의 경우 유기전압의 고조파에 의해 토크리플이 발생하고 이로 인해 속도에도 리플이 발생하였다. 이러한 토크리플 및 속도리플은 특히 저속에서 전동기 및 EMB 시스템의 진동을 유발하는 원인이 된다.

EMB는 실제 자동차 시스템에 적용되는 시스템이기 때문에 안정적인 면이 우선시 된다. 따라서 본 논문에서는 새로운 제어 알고리즘의 개발보다 BLAC 전동기 제어에 일반적으로 사용되고 있는 벡터제어를 기본으로 적용하였다. 향후 저속에서의 진동저감을 위해서는 진동의 주요 원인인 토크리플 저감을 위한 전동기 설계 및 제어 알고리즘의 보완이 필요하다.

본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA- 2009-(C1090-0904-0007))

본 논문은 2008년도 현대모비스의 연구비 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] R. Shemanske, "Electric motor braking", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. IA-19, No. 5, pp. 824-831, 1983, Sept.
- [2] N. Mutoh, Y. Hayano, H. Yahagi, and K. Takita, "Electric braking control methods for electric vehicles with independently driven front and rear wheels", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 2, pp. 1168-1176, 2007, April.
- [3] P. Krishnamurthy, W. Lu, F. Khorrami, A. Keyhani, "A robust force controller for an SRM based electromechanical brake system", in Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control, and European Control Conference, Seville, Spain, pp. 2006-2011, 2005, Dec.
- [4] Y.S Lee and W.S. Lee, "Hardware-in-the-loop simulation for Electro-mechanical brake", in SICE-ICASE International Joint Conference, Busan Korea, pp. 1513-1516, 2006, Oct.
- [5] C. Line, C. Manzie, and M.C. Good, "Electromechanical brake modeling and control : from PI to MPC", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 16, No. 3, pp. 446-457, 2008, May.
- [6] R. Hoseinnezhad, H.H. Alireza, and T. Rocco, "Real-time clamp force measurement in electromechanical brake calipers", *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol. 57, No. 2, pp. 770-777, 2008, March.
- [7] H. Nakai, H. Ohtani, E. Satoh, and Y. Inaguma, "Development and testing of the torque control for the permanent magnet synchronous motor", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 52, No. 3, pp. 800-806, 2005, June.
- [8] 김상훈, DC 및 AC 모터 제어, 북두출판사.

저자 소개



전미림(全美林)

1985년 12월 17일생. 2008년 강원대 전기전자공학과 졸업. 2010년 건국대 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 LS산전 자동차제품연구소 연구원.



이재현(李載賢)

1982년 10월 16일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2008년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학과(공박). 2010년~현재 (주)에이디티 중앙연구소 주임연구원.



조관열(趙官烈)

1964년 2월 20일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기및전자공학과 졸업(공박). 1993년~2003년 LG전자(주) DA연구소 책임연구원. 2004년~현재 충주대 제어계측공학과 부교수. 당 학회 JPE Publication editor.



목형수(睦亨洙)

1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1993년~1997년 서울산업대 제어계측공학과 조교수. 1997년~현재 건국대 전기공학과 교수. 현재 당 학회 재무이사.