

BLDC 전동기의 센서리스 구동을 위한 역기전력 필터회로 개발

宋斗榮*, 李成浩**, 鄭泰旭***, 曹洙億****, 朴晟濬§, 金桐玉†

Development of Back-emf Filter Circuit for Driving Sensorless BLDC Motors

Doo-Young Song, Sung-Ho Lee, Tae-Uk Jung, Su-Eog Cho, Sung-Jun Park and Dong-Ok Kim

요 약

구형과 BLDC (Brushless DC) 전동기를 구동시키기 위해서는 전동기의 회전자 위치에 대한 정보를 아는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 회전자 위치를 검출하기 위해 일반적으로 사용되는 홀센서나 엔코더를 이용하지 않고 각상을 저항으로 Y결선하여 만들어지는 단자의 전압에 포함되어 있는 역기전력을 클램프 회로를 통한 필터회로를 이용하여 전동기의 회전자 위치를 검출하는 구형과 BLDC 전동기를 위한 센서리스 드라이브 시스템을 제안한다. 특히 본 논문에서 제안한 새로운 역기전력 증폭 제한 회로를 통한 필터회로를 구성하여 저속영역에서 센서리스를 특성을 개선하였다. 그리고 이를 실제로 100[W]급 BLDC 구동용 프로토타입 드라이브를 제작하여 제안된 역기전력 증폭 제한 회로의 타당성 검증하였다

ABSTRACT

The position of stator is essential when a trapezoidal BLDC motor is driven. In this paper we proposed a novel sensorless drive system for the trapezoidal BLDC motor without hall sensors or encoders. The resistor Y-connecting method is used to obtain Back-emf of a trapezoidal BLDC motor. Especially, by using the new Back-emf filter circuit proposed in this paper the sensorless characteristic in low speed is improved. The prototype proposed system applied for a 100[W] rating BLDC motor is made and the propriety of the Back-EMF filter circuit is also verified.

Key Words : Back-emf filter circuit, Sensorless bldc motor, Absolute value filter circuit, Clamping circuit

1. 서 론

최근 가전제품의 에너지 저감, 저소음 요구의 증가

및 전력전자 기술의 발전과 전력전자부품 단가의 저가화에 따라 종래의 정속 운전모드에서 인버터 기술을 이용한 가변속 시스템의 개발 및 적용이 활발히 이루어지고 있다^[1]. 이러한 가변속 시스템에 사용되는 전동기로는 유도전동기 등에 비해 효율이 높고, 저속에서도 고 토크를 내는 등 토크 및 소음 특성 등이 우수한 BLDC(Brushless DC) 전동기가 주로 이용되고 있다^[2].

BLDC 전동기는 회전자 위치에 따라 전동기의 상전류를 전환해주어야 하므로 홀센서나 엔코더와 같은 회전자 위치 검출 센서가 필수적이며 이는 시스템의 가격상승, 부피 증가, 사용 환경의 제약 등의 문제점을

†교신저자 : 정회원, 전남대 전기공학과 BK연구교수
E-mail : dongok7@hotmail.com

*학생회원, 전남대 전기공학과 석사과정

**정회원, 한국생산기술연구원 선임연구원

***정회원, 경남대 전기공학과 전임강사

****정회원, 서일대 전기공학과 전임강사

§정회원, 전남대 전기공학과 부교수

접수일자 : 2007. 8. 16

1차 심사 : 2007. 9. 7

심사완료 : 2007. 12. 24

유발한다. 저가격화 및 센서를 사용할 수 없는 환경에서 BLDC 전동기의 속도 제어를 위해서는 센서리스 운전이 필요하며, 이러한 전동기의 회전자의 위치 정보를 얻기 위한 다양한 방법이 제안되고 있다^{[1]-[5]}.

일반적으로 역기전력의 ZCP(Zero-Crossing Point)에 의한 회전자의 위치를 검출하는 방식이 구현이 쉬워 BLDC 센서리스 구동방식으로 많이 사용되고 있다. 이러한 센서리스 구동방식에서 상전류 전류시 나타나는 외란 전압은 센서리스의 강인성에 치명적인 약점이 된다^[6]. 고속영역에서는 역기전력 성분이 상대적으로 크게 나타나서 이 외란의 영향이 적어 센서리스가 쉬우나, 저속영역에서는 이 외란 성분이 상대적으로 크게 나타남으로 센서리스가 어렵게 되어 센서리스가 가능한 최소 속도가 크게 된다.

본 논문에서는 ZCP로부터 회전자의 위치를 검출하는 방식에서 전류시 나타나는 외란 전압을 최소화하고, 역기전력성분을 최대화 할 수 있는 클램프 회로를 적용한 BLDC 전동기의 센서리스 제어방식을 제안한다. 특히 본 논문에서 새롭게 제안한 역기전력 정보가 포함된 상전압 제한-증폭 회로를 통하여 저속영역에서도 원활한 회전자 위치 정보를 검출하였다. 또한 프로토타입을 제작하고 실험을 통해 제안된 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

2. BLDC의 특성 및 센서리스 알고리즘

2.1 구형파 BLDC 전동기 구동 원리

그림1은 일반적인 BLDC 전동기의 인버터, 전동기, 제어기로 구성된 구동 시스템에 역기전력 정보를 가져오기 위해 Y결선 회로를 추가한 시스템을 나타내고 있다. 일반적으로 전동기 부분에 있는 각 상의 홀센서를 통해 회전자의 위치를 검출하고, 이 신호로부터 회전자의 위치에 따라 각 상에 적절한 전류가 흐르도록

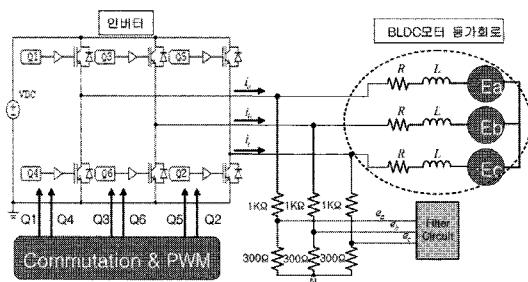


그림 1 구형파 BLDC 전동기의 구동시스템 동가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of driving system a trapezoidal BLDC motor

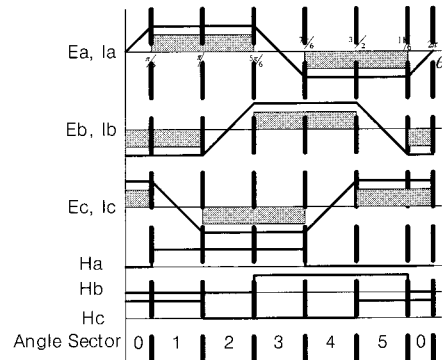


그림 2 역기전력과 입력전류 파형과 홀센서 신호
Fig. 2 Waveforms of Back-emf and input current and Hall-sensor signals

표 1 각 구간에서의 Turn-on switch
Table 1 Turn-on switch for each period

Angle Sector	0	1	2	3	4	5
Turn-on switch	Q6 Q1	Q1 Q2	Q2 Q3	Q3 Q4	Q4 Q5	Q5 Q6

인버터의 스위칭 소자를 on/off 시켜주는 상전환 시점에 대한 정보를 가져온다. 그림2에서 구형파 BLDC 전동기를 구동시 각 상의 역기전력이 평탄한 구간에서 일정한 크기의 전류를 흘려주기 위해서는 위치 센서를 사용하여 회전자의 위치를 검출하고 전기각으로 60°마다 상전류 전환을 수행해야함을 알 수 있다.

본 논문에서는 최소 토크 리플을 갖는 BLDC 전동기의 구동을 위한 120°도통 구형파 전류를 만들기 위해 일반적으로 많이 사용하는 Upper Unipolar PWM 방식을 사용하였다. 표 1은 그림 1의 구동 시스템으로 3상 2역자 Upper Unipolar PWM 방식으로 전동기를 구동시킬 경우 각 구간에서 도통되는 스위치를 나타내고 있다.

2.2 구형파 BLDC 전동기 전압방정식

그림1에서 일반적인 BLDC 전동기의 동가회로를 전압방정식으로 표현하면 다음 식과 같다^{[6][7]}.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 V_a, V_b, V_c 는 상전압, R, L 은 각각 권선저항, 각상의 인덕턴스, e_a, e_b, e_c 는 각상의 역기전력, i_a, i_b, i_c 는 각상의 전류를 나타낸다.

발생되는 전기적 토크식은 다음과 같다.

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

여기서 T_e, ω_m 은 각각 토크와 회전자 속도를 나타낸다.

2.3 BLDC 전동기의 역기전력 분석

그림 2에서 보인 바와 같이 구형파 BLDC 전동기는 회전자의 위치에 따라 각 상에 구형파 형태의 역기전력이 120°위상차를 두고 발생한다. 전동기의 발생 토크는 역기전력과 전류의 곱에 비례하므로 역기전력이 평탄한 구간에서 구형파 전류를 인가하게 되면 일정한 토크를 얻을 수 있다.

$$e = \frac{d\lambda}{dt} = \frac{d\lambda}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} = \omega \frac{d\lambda}{d\theta} \quad (3)$$

여기서 $e, \lambda, \theta, \omega$ 는 각각 역기전력, 자속, 회전자의 위치 및 각속도를 나타낸다.

식(3)에서 역기전력의 크기는 회전자의 속도에 비례한다는 것을 보여주고 있으며, 이를 통해 센서리스를 할 경우 저속영역에는 역기전력 성분이 적어 역기전력 정보를 가져오는데 어려움이 있음을 알 수 있다.

3. 센서리스를 위한 역기전력 필터 회로 제안

그림 3의 a상의 역기전력 파형에서 상전류 전류시 발생하는 DC-link전압의 영향이 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 역기전력의 영점 검출을 하는 필터회로에서 문제점은 상전류 전류시 발생하는 전류전압에 의해 그 성능이 좌우 된다는 것이다.

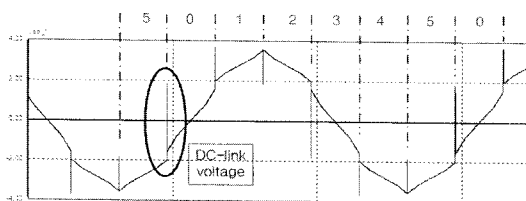


그림 3 각 구간에서의 a상의 역기전력 파형
Fig. 3 Back EMF of phase a for each period

이 전류전압은 DC-Link전압이 나타나며, DC-Link

전압이 큰 경우 그 영향이 크게 된다. 따라서 이를 해결할 수 있는 한 방법으로 DC-Link전압을 제어하여 전동기 속도제어를 행 할 경우 좀 더 강인한 센서리스 제어가 가능하다.

본 논문에서는 저속영역에서 센서리스를 행할 시 전류전압에 의한 영향을 최소화하기 위해 클램프 회로에 의한 역기전력 증폭 제한회로를 구성함으로써 강인한 센서리스 필터회로를 제한한다.

그림 5는 본 연구에서 클램프 회로에 의한 역기전력 증폭 제한회로와 기존의 필터회로를 혼용한 필터 회로이다.

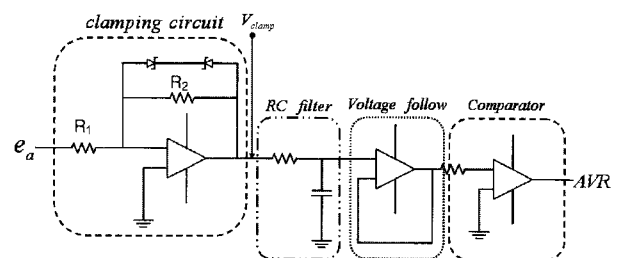


그림 4 제안된 역기전력 필터 회로
Fig. 4 Proposed filter circuit for Back-emf

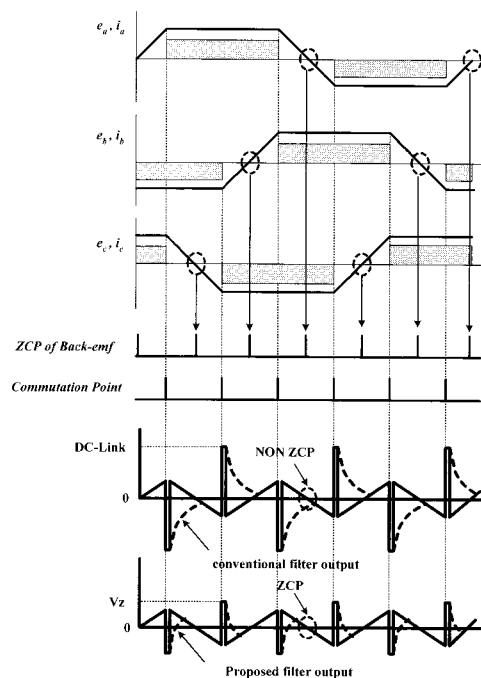


그림 5 역기전력의 ZCP와 전류 시점 비교
Fig. 5 Comparison on ZCP of Back-EMF and current

그림 4에서 클램프 회로를 R2에 병렬로 연결함으로써 상전류시 역기전력 파형에 나타나는 전류전압의 영

항을 최소화함으로써 저속영역에서도 역기전력의 ZCP 검출이 가능하다.

그림 5는 기존의 필터회로와 제안된 회로에서 역기전력에 대한 ZCP 검출성능을 표시한 것이다.

기존의 방식에서는 전류시 DC-Link전압의 영향으로 ZCP검출이 어려움을 알 수 있으며, 제안된 방식에서는 클램프 회로의 제너다이오드에 의한 설정 전압이 나타남을 알 수 있다. 따라서 제너다이오드 설정 값을 변경함으로써 DC-Link전압을 제어할 수 있다. 이 전압은 적을수록 센서리스 특성이 우수하나, 역기전력은 속도에 비례하므로 저속영역에서 역기전력의 크기가 작아지기 때문에 스위칭 소자에 의한 노이즈가 신호에 포함되어 있어, 이 영향이 없는 정도로 설정하는 것이 바람직하다. 즉 클램프 회로의 전압증폭 능력에 따라 설정하여야 한다. 본 논문에서는 클램프 회로의 증폭도를 51배, 클램프 전압은 5.6[V]로 설정하여 구동하였다.

4. 실험 결과

그림 6은 센서리스를 위한 BLDC전동기 구동시스템을 나타내고 있다. BLDC 전동기는 100W급으로 구동하고 동일 전동기를 부하로 사용하였다. 제어를 위한 마이컴은 AVR ATmega128을 사용하였으며 표 2는 본 시험에 사용된 피시험 전동기의 사양을 나타내고 있다.

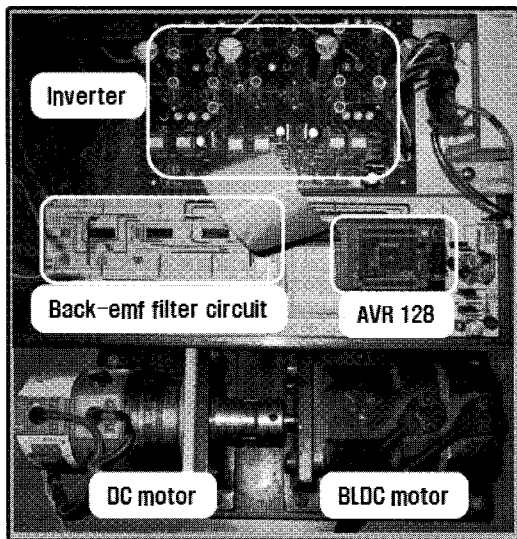


그림 6 센서리스 제어 시스템
Fig. 6 Sensorless control system

표 2 BLDC 전동기의 스펙
Table 2 Specification of BLDC motor

Item	Value
Back-emf constant	1.57 (mV/rpm)
Torque constant	14.98 (mN · m/A)
Number of poles	4
Rated voltage	24 (V)
Output power	107 (W)
Terminal resistance	0.8 (Ω)
Rotor inertia	35.64 (gcm ²)
No-load speed	15,000 (rpm)
Rated speed	11,000 (rpm)

그림 7은 제안된 클램프 회로의 출력특성 파형을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 전류전압이 클램프 회로에 의해 제한됨을 알 수 있다.

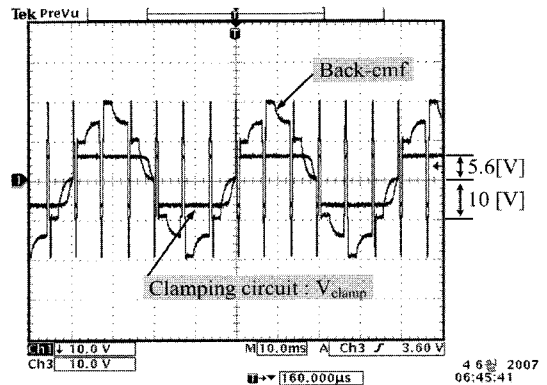
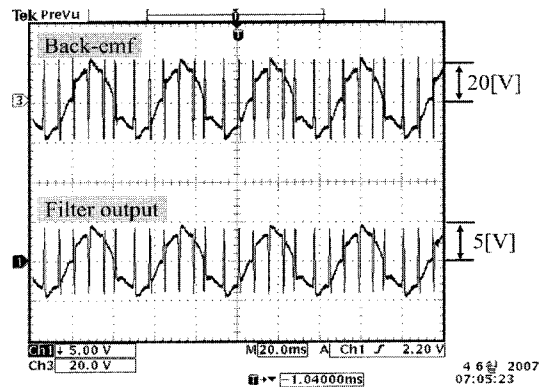
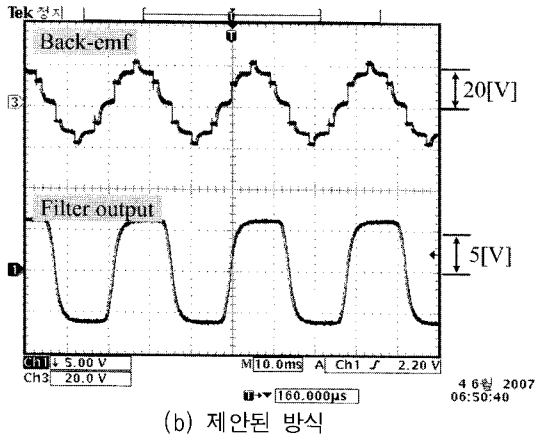


그림 7 클램프 회로의 출력 특성 파형
Fig. 7 Output characteristic of clamping circuit



(a) 기존 방식



(b) 제안된 방식

그림 8 기존 및 제안된 방식에서 역기전력 필터회로의 출력파형

Fig. 8 Output waveform of conventional and proposed Back-emf filter circuit

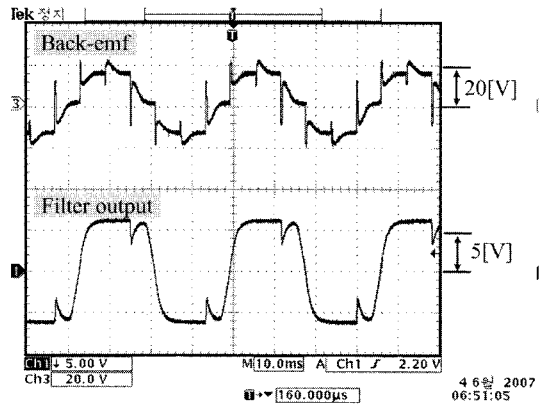


그림 10 800[rpm]에서의 역기전력 파형
Fig. 10 Waveform of Back-emf at the 800[rpm]

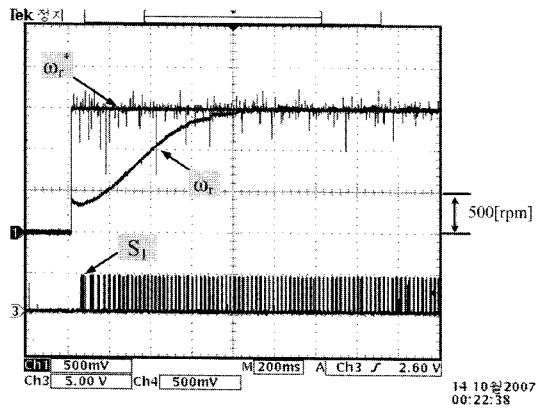
그림 8은 기존 및 제안된 방식에서 역기전력 필터회로의 출력파형을 나타내고 있다. 그림 8에서 기존방식의 역기전력 필터회로의 출력파형으로서 각 상의 전류시 전류 영향의 의해 모든 ZCP에서 검출 오류가 나타나, 제안된 방식에서는 전류시의 영향이 미비하여 그 영향이 없이 양호하게 ZCP검출이 가능함을 알 수 있다.

본 논문에서는 초기 기동을 위하여 강제정렬 후 동기기가속모드를 거쳐 역기전력 정보를 얻을 수 있는 최소 속도인 기저속도에서의 정속운전 모드를 통해서 센서리스 운전모드로 전환하는 방법을 사용하였다.

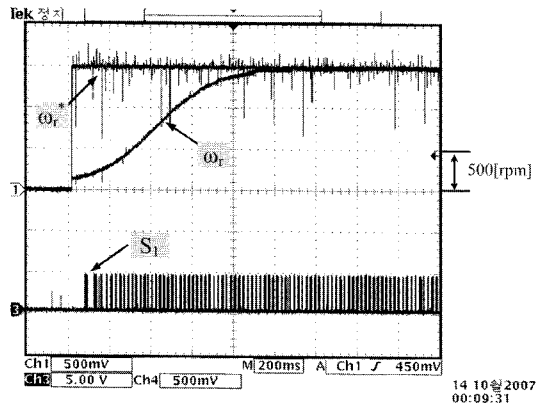
그림 9는 지령속도를 1500[rpm]으로 설정한 조건하에서 센서리스의 기동 특성을 비교하기 위한 지령속도(w_r^*), 실제속도(w_r) 및 상 신호(S1)이다. 기존의 방식은 센서리스 가능 속도가 400[rpm]으로 기동시 400[rpm]까지는 open-loop로 제어되는 것을 관찰할 수 있으며, 제안된 방식은 센서리스가 120[rpm]까지 open-loop로 제어되고, 120[rpm]이상에서는 센서리스 모드로 전환이 발생하며 양호한 기동 특성이 보임을 알 수 있다. 따라서 기동특성은 제안된 방식이 기존방식보다 우수한 것으로 판단된다.

그림 10은 800[rpm]에서 센서리스 특성을 보기 위한 역기전력 및 필터 출력파형을 나타내고 있다. 전류에 의한 파형이 어느 정도 나타나고 있음을 알 수 있으나, 전류시 부의 전압이 입력 DC 전압보다 낮게 나타남으로 센서리스의 동작 범위를 확대할 수 있다.

그림 11은 제안된 방식 제어특성을 보기위한 실험 파형이다. 그림 11(a)는 1500[rpm]에서 부하토크를 200mN·m에서 100mN·m으로 변경하였을 때의 속도 지령치, 속도 및 Gate신호를 나타내고 있다. 이 조건에



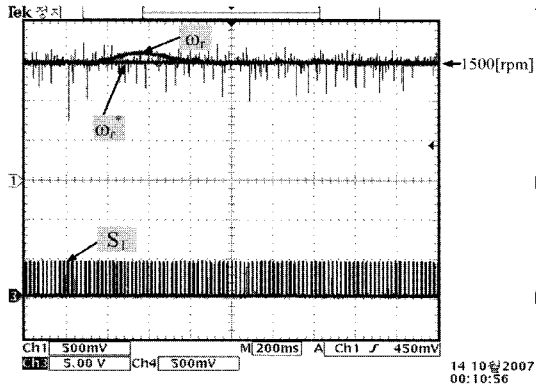
(a) 기존방식



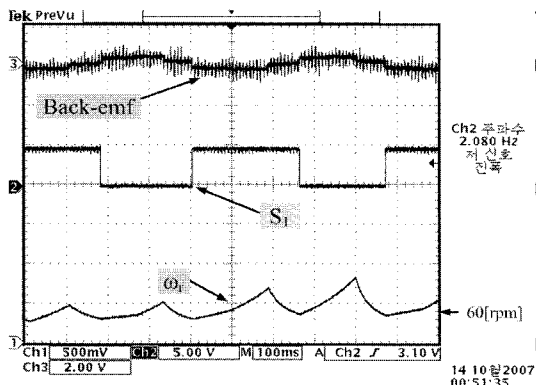
(b) 제안된 방식

그림 9 기동 특성 분석

Fig. 9 Analysis of starting characteristic



(a) 부하변동시



(b) 최저속도 60[rpm]시

그림 11 정상 상태 응답 특성

Fig. 11 Characteristic of steady state response

서 속도변동은 약 7%정도가 발생하나 200[ms]내에서 정상상태를 찾아감을 알 수 있었으며, 이 특성은 기존의 방식과 거의 유사하게 나타났다.

그림 11(b)는 센서리스 동작이 가능한 최소 속도인 60[rpm]에서의 특성을 나타내는 파형으로 역기전력, 상 신호(S1) 및 속도파형을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 센서리스 구동은 가능하나, 회전자 위치에 따른 순시속도 변동 범위가 크게 나타났다.

5. 결 론

본 논문에서는 구형과 BLDC 전동기의 센서리스 드라이브의 개발을 위한 것으로, 강인한 센서리스 드라이브 개발을 위하여 역기전력을 분석하고, 이를 이용하여 회전자 위치를 실시간으로 검출하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제작한 센서리스 드라이브 시스템은 구

형과 BLDC 전동기를 위치 센서 없이 구동함으로써 저가화 및 센서를 사용할 수 없는 환경에서 전동기 구동이 가능하도록 하였으며, 특히 저속 영역에서의 강인한 센서리스에 목표를 두고 개발하였다.

본 논문에서 제안한 클램프 회로에 의한 역기전력 증폭 제한 회로를 이용할 경우 지연각이 발생하지 않아 주파수에 따른 지연각을 보상하는 추가적인 회로가 필요 없으며, 역기전력을 증폭시키기 때문에 저속영역에서도 운전이 가능하여 저속에서 고속까지 전 영역에서 운전이 가능한 간단한 센서리스 드라이브 시스템의 구성이 가능하기 때문에 경제성 면에서 장점을 갖게 된다. 그리고 본 논문에서는 위의 내용을 검증하기 위해 클램프 회로에 의한 역기전력 증폭 제한 회로 및 기존의 필터회로를 결합한 혼용 회로를 이용한 구형과 BLDC 전동기 센서리스 드라이브 시스템을 제작하여 타당성을 실험적으로 검증하였으며, 그 결과 60 [rpm] 이상의 영역에서 센서리스 구동이 가능함을 검증하였다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신 인력양성사업으로 수행된 연구결과임. 이 연구의 참여한 연구자는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았음.

참 고 문 헌

- [1] M. A. Rahman, "Modern Electric Motors in Electronic World", *Proc. of IEEE IECON'93*, pp. 644-648, 1993.
- [2] K. Iizuka, H. Uzuhashi, and M. Kano, "Microcomputer control for sensorless brushless motor", *IEEE Trans on Indus. Appli.* vol. IA 21, no. 4, pp. 595-601, 1985, May/June.
- [3] J. Moreira, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet ac motors operating over a wide speed range", *IEEE Trans. on Indus. Appli.* vol. 32, no.6, pp.1394-1401, 1996, Nov/Dec.
- [4] G.J Su and J.W. Mckeever, "Low cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range," *IEEE Trans on Power Elec.* vol. 19, no. 2, pp. 296-302, 2004, Mar.
- [5] Y.S Lai, F.S. Shyu, and Y.H. Chang, "Novel sensorless PWM controlled BLDCM drives without using position and current sensors. filter and center tap voltage," *in*

Proc of IEEE Indus. Elec. Soc. Conf. vol. 3, pp. 2144-2149, 2003.

[6] N.Matsui, "Sensorless PM Brushless DC motor drives", *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.43 No.2, pp. 300-308, 1996.

[7] 설승기, 전기기기 제어론, 브레인코리아, 2002.

저 자 소 개



송두영(宋斗榮)

1980년 9월 14일생. 2007년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정.



이성호(李成浩)

1971년 11월 1일생. 1997년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2003년~2007년 LG 전자 디지털어플라이언스 연구소 책임연구원. 2007년~현재 한국생산기술연구원 선임연구원.



정태욱(鄭泰旭)

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1996년~2005년 LG 전자(주) 책임연구원. 2006년~2007년 8월 한국생산기술연구원 광주연구센터 선임연구원. 2007년 3월~2007년 8월 전남대 전기공학과 겸임교수. 2007년 9월 경남대 전기공학과 전임강사.



조수억(曹洙億)

1966년 9월 15일생. 1993년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 1월 LG 산전 입사~2004년 11월 OTIS_LG Engineering Center Power Electronics팀 Senior Engineer. 2002년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2005년 8월~2006년 2월 전남대 전기공학과 겸임교수. 2006년 3월~현재 서일대 전기과 전임강사.



박성준(朴晁濬)

1965년 3월 20일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2002년 동 대학원 지능기계공학과 졸업(공박). 1996년 3월~2000년 2월 거제대학 전기과 조교수. 2000년 3월~2003년 8월 동명대학 전기과 조교수. 2003년 8월~현재 전남대 전기공학과 부교수. 당 학회 편집위원.



김동옥(金桐玉)

1971년 5월 1일생. 1994년 조선대 제어계측공학과 졸업. 1996년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(공박). 2004년~2006년 일본 Tokyo Institute of Technology 연구원. 현재 전남대 전기공학과 BK 연구교수.