

선간 역기전력을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 센서리스 제어

A sensorless control method of BLDC(Brushless DC) motors using line-to-line back EMFs

김 상 훈* 이 성 경**
Kim, Sang-Hoon Lee, Seong-Kyeong

Abstract

This paper proposes a sensorless control method of BLDC motors using line-to-line back-EMFs. Typical sensorless control methods have various problems such as the difficulty in operation at low speed and difficulties in application and so forth. However, the control method using line-to-line back-EMFs that this paper proposes solved not only such problems but also problems of noise and difficulty of commutation detection. The method is to divide line-to-line back EMF into the constant. With 550[W] BLDC motor driving system, simulations and experiments have been carried out for the verification of the proposed control method.

키워드 : 센서리스 제어 방법, 브러시리스 직류 전동기, 선간 역기전력, 전환 함수
Keywords : *Sensorless control method, BLDC Motor, Line-to-line back EMF, Commutation function*

1. 서론

역기전력 모양이 사다리꼴인 브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor)는 기존의 직류 전동기의 고정자와 회전자 바뀐 구조로 소음이 작고, 2상 여자방식으로 구동되므로 스위칭 손실이 적다. 또한 정류자가 필요하지 않으므로 수명이 오래가고 제어가 용이하며 권선이 고정자에 있어 냉각이 용이하다[1][2].

그러나 구동 원리상 회전자 위치 검출 센서의 사용은 불가피하다. 이러한 센서의 사용은 시스템의 가격을 상승시키고 센서의 노이즈 등의 문제점이 있다. 이러한 문

제점을 개선하기 위해 회전자 위치 검출 센서 없이 BLDC 전동기를 구동하고자 하는 많은 연구들이 진행되어 왔다[3].

그 중 가장 대표적인 방법들을 살펴보면, 먼저 단자 전압의 역기전력 측정방법이 있다[4]. 이 방법은 구현이 간단하여 많이 사용되는 방법이지만, 상 역기전력의 ZCP(Zero Crossing Point)시점으로부터 30°후에 전환(Commutation)이 이루어짐으로 단자 전압을 적분하여 전환 시점을 얻는다 하더라도 정확한 전환 시점을 얻을 수 없고, 저속에서는 역기전력이 작아 제어가 불가능하다는 단점이 있다. 또 다른 방법으로는 전동기의 중성점을 이용한 제 3고조파 성분으로 전환 시점을 알아내는 방법이 있다[5]. 이 방법은 제 3고조파를 적분하여 비교적 정확한 전환 시점을 얻을 수 있지만 일반적으로 제 공되지 않는 전동기 내부의 중성점을 이용해야하는 응용상의 문제와 저속에서는 제 3고조파가 검출되지 않는다는 단점을 가지고 있다. 저속 제어가 가능한 방법으로는 비 여자상의 환류다이오드에 흐르는 전류를 검출하

* 강원대학교 전기전자공학과 교수, 공학박사, 교신저자

** 강원대학교 전기전자공학과 석사과정

여 상 역기전력의 ZCP를 찾아내는 방법이 있다[6]. 이 방법은 환류다이오드에 흐르는 전류를 검출하기 위해 6개의 독립 양극성전원과 비교기가 필요해 구현 면에서 비용을 증가시킨다. 또한 펄스폭 변조(PWM)의 스위치 턴-오프 상태에서에서만 검출이 가능하므로 고 시비율의 고속에서 분해능이 저하되는 문제점이 있다. 마지막으로 선간 역기전력을 이용한 전환 시점 검출방법이 있다[7][8]. 이 방법은 비교적 저속에서부터 고속까지 넓은 범위의 센서리스 제어가 가능하나 노이즈 문제와 고속에서 좁은 폭으로 발생하는 전환 함수를 검출하기 위해 제어기의 샘플 측정시간을 짧게 가져야하는 문제가 있다.

본 논문에서는 선간 역기전력을 상수로 나눔으로써 전환함수의 검출 폭을 넓게 하는 동시에 분모 상수의 큰 값으로 인하여 전환 시점 이외에 '0' 점에서 벗어난 값을 갖기 때문에 노이즈의 영향을 받지 않는 전환시점 검출 방법을 제안하였다. 또한 본 논문에서 제안한 방법은 실험에 앞서 시뮬레이션 프로그램 Matlab의 Simulink를 이용하여 제안된 제어기법을 확인하고, TI사의 저가형 Fixed point DSC인 TMS320F2808을 이용한 제어기를 구성하여 550[W]의 3상 BLDC 전동기로 실험을 실시함으로써 제안한 방법의 타당성을 증명하였다.

2. BLDC 전동기 모델

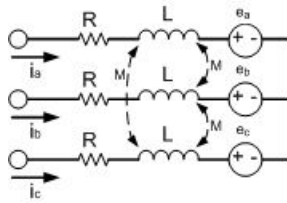


그림 1 BLDC 전동기의 모델

BLDC 전동기의 전기적인 모델은 그림 1에서 보여준다. 자기(Self) 인덕턴스(L)와 상호(Mutual) 인덕턴스(M) 성분을 회전자 위치에 따라 변하지 않는 상수(constant)라고 가정할 경우 BLDC 전동기의 전압방정식은 다음과 같다.

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

여기서, v_a, v_b, v_c 는 상전압, i_a, i_b, i_c 는 상전류, R은 상저항, e_a, e_b, e_c 는 역기전력, $\mathcal{L} = L - M$ 이다.

발생되는 토크는 다음과 같다.

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

여기서 ω_m 은 회전 각속도이다.

3. 제안하는 센서리스 제어 방법

선간 역기전력이 '0'점을 교차하는 시점은 전환 시점과 일치하여 속도계산과 무관하게 회전자 위치를 파악할 수 있는 장점이 있다[7]. 선간 역기전력은 다음 식과 같이 선간 전압 방정식으로부터 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{ab} &= R i_{ab} + L \frac{d i_{ab}}{dt} + e_{ab} \\ V_{bc} &= R i_{bc} + L \frac{d i_{bc}}{dt} + e_{bc} \\ V_{ca} &= R i_{ca} + L \frac{d i_{ca}}{dt} + e_{ca} \end{aligned} \quad (3)$$

따라서 선간 역기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} e_{ab} &= V_{ab} - R i_{ab} - L \frac{d i_{ab}}{dt} \\ e_{bc} &= V_{bc} - R i_{bc} - L \frac{d i_{bc}}{dt} \\ e_{ca} &= V_{ca} - R i_{ca} - L \frac{d i_{ca}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

그림 2는 선간 역기전력 e_{ca} 와 상전류 i_a 를 나타낸 것이다. 선간 역기전력의 ZCP가 전환 시점과 정확하게 일치하는 것을 알 수 있다.

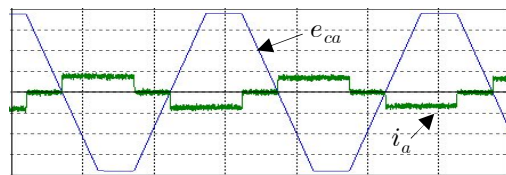


그림 2 선간 역기전력 e_{ca} 와 상전류 i_a 파형

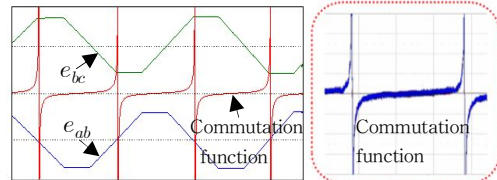


그림 3 기존의 전환 함수 파형

그림 3은 기존의 선간 역기전력을 이용한 전환함수를 나타낸다.

기존의 전환 함수는 선간 역기전력의 ZCP시점을 보다 정확하게 알아내기 위하여 다음 식과같이 주어진다.

$$\text{Commutation function} = \frac{e_{bc}}{e_{ab}} \quad (5)$$

기존의 전환 함수는 분모항의 선간 역기전력이 '0'점을 교차할 때에 분자항의 선간 역기전력은 최대 또는 최소 값을 가지므로 그림 3에서 보는 바와 같이 전환 시점에서만 좁은 폭으로 발생하는 함수 형태로 나타난다. 따라서 기존의 전환 함수를 검출하기 위해서는 제어기의 검출 주기가 매우 짧은 시간에 이루어져야 하며 또한 페루프 역기전력 관측기를 사용하여 역기전력의 추정치를 사용한다 하더라도 전환 시점에서 발생하는 노이즈로 인하여 전환 시점 검출의 어려움이 따른다.

본 논문에서는 노이즈의 영향을 받지 않으면서 제어기에 부담이 되지 않는 전환 시점 검출 방법을 제안한다.

여기서 전환 시점 정보가 되는 선간 역기전력의 ZCP를 정확하게 검출하기 위하여 식 (6)과 같이 상수 A값을 각각의 선간 역기전력으로 나누어 전환 함수를 만든다.

본 논문에선 보다 정확한 선간 역기전력을 얻고자 미지 입력 관측기를 이용한 선간 역기전력 관측기를 사용하였다[8]. 관측기는 식(6)으로부터 관측할 수 있는 전류를 이용하여 미지 입력인 선간 역기전력을 얻을 수 있다.

$$\frac{di_{ab}}{dt} = -\frac{2R_s}{2L_s} i_{ab} - \frac{1}{2L_s} e_{ab} + \frac{1}{2L_s} v_{ab} \quad (6)$$

이 관측기는 각 상 전류와 스위칭 패턴만을 이용하기 때문에 별도의 단자 전압을 얻기 위한 하드웨어 없이 선간 역기전력을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} C1 \text{ function} &= \frac{A}{e_{ca}} \\ C2 \text{ function} &= \frac{A}{e_{ab}} \\ C3 \text{ function} &= \frac{A}{e_{bc}} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 식 (7)과 같이 나타낸 함수를 C function (Commutation function)이라 정의한다.

식 (7)의 상수 A값의 선정은 사용하는 BLDC 전동기의 정격 속도에서 얻을 수 있는 선간 역기전력의 최대값 보다 큰 값으로 주어져야 한다. 이 A값이 크면 클수록 노이즈의 영향에서 벗어나게 된다.

그림 4는 식 (7)으로부터 얻은 C function의 파형이다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 제안된 C function은 선간 역기전력의 부호 변화에 의해서 전환 시점을 검출하므로 제어기에 부담 없이 정확하고 쉽게 전환 시점을 검출할 수 있다.

그림 5는 제안된 C function과 홀센서 신호를 비교한 것이다.

C function은 홀센서 신호와 정확하게 동기 하므로 제어기에 별도의 프로그램 없이 쉽게 C function을 바로 홀센서 신호처럼 사용할 수 있다.

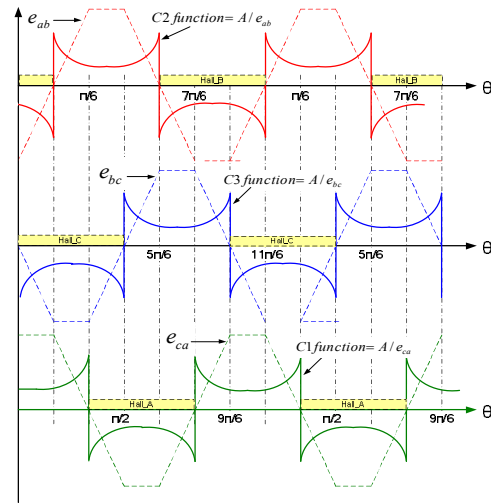


그림 4 C function과 선간역기전력 및 홀센서 신호 파형

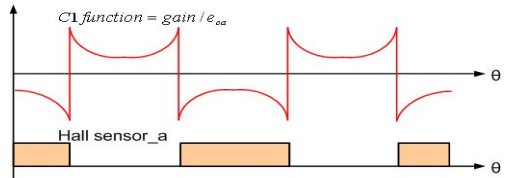


그림 5 C function과 홀센서 신호

각 홀센서 신호와 C function의 관계는 표 1과 같다.

표 1 홀센서 신호와 C function과의 관계

홀센서 신호 a	$C1 \text{ function} = \frac{\text{gain}}{e_{ca}}$
홀센서 신호 b	$C2 \text{ function} = \frac{\text{gain}}{e_{ab}}$
홀센서 신호 c	$C3 \text{ function} = \frac{\text{gain}}{e_{bc}}$

그림 6은 기존의 선간 역기전력을 이용한 전환 함수 (a)와 본 논문에서 제안한 전환 함수(b)를 비교한 것이다.

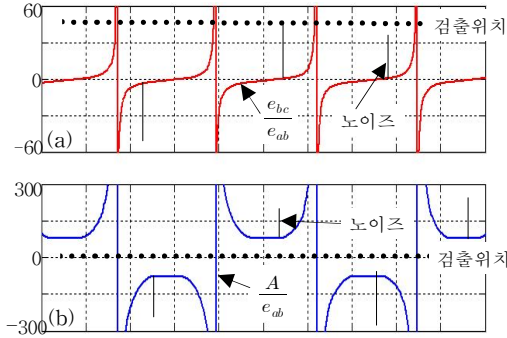


그림 6 (a)기존의 전환 함수 파형과
(b)제안된 전환 함수 파형

기존의 선간 역기전력을 이용한 전환 함수는 두 개의 서로 다른 선간 역기전력을 나눈 형태로 검출 폭이 매우 좁다. 또한 전동기의 회전 속도가 증가함에 따라 선간 역기전력의 시간에 대한 기울기가 커지기 때문에 전환 함수의 폭도 좁아지게 되어 전환 함수를 검출함에 있어 검출 제어주기를 짧게 가져야 한다.

또한 전환 함수에서 발생하는 노이즈는 잘못된 전환 시점을 검출하게 만든다. 이러한 노이즈를 피하고자 전환 함수를 뒤집어 음의 방향을 먼저 검출한 후에 양의 방향을 검출하여 정확한 전환 시점을 찾는 방법[8]이 있지만, 노이즈의 크기와 위치가 일정하지 않고 검출방법이 빠른 시간 내에 이루어져야 하기 때문에 제어기에 부담을 준다. 그러나 본 논문에서 제안한 전환 함수는 그림 6에서 보이는 바와 같이 '0'점에서 검출이 이루어짐으로 검출 폭이 넓어 제어기에 부담 없이 검출할 수 있고 전환 함수의 부호 변화에 의해서만 전환 시점이 결정되므로 노이즈의 영향에서 벗어날 수 있다.

전동기의 속도 계산은 3개의 C function을 이용하여 얻은 전환 신호를 가지고 T방식으로 계산 하였다[9].

여기서 속도 제어기는 5[ms]의 제어주기를 갖는 비례 적분(PID) 제어기를 사용하였고 전류 제어기는 100[us]의 제어주기를 갖는 히스테리시스 전류 제어기를 사용하였다. 제안된 센서리스 방법은 550[W]의 BLDC 전동기를 사용하여 구동하였다.

4. 시뮬레이션

제안한 BLDC 전동기의 센서리스 제어기법의 타당성을 확인하기 위해 시뮬레이션 프로그램인 Matlab의 Simulink를 사용하였다. 전동기의 역기전력 형태는 이상적이라고 가정하였으며 실험에서 사용된 550[W]의 BLDC 전동기의 파라미터로 시뮬레이션을 실행하였다.

그림 7은 제안한 센서리스 구동 시스템의 전체 구성

도를 나타낸다.

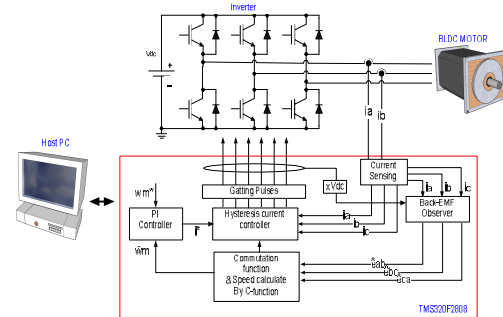


그림 7 제안한 센서리스 구동 시스템의 전체 구성도

BLDC 전동기의 파라미터는 표 2와 같다.

표 2 브러시리스 전동기의 정격과 파라미터

정격출력	W	550 [W]
정격전압	V	170 [V]
정격전류	A	3.2 [A]
관성	J_m	0.001323 [$kg \cdot m^2$]
극수	P	4
고정자 저항	R_s	2.47 [Ω]
고정자 인덕턴스	L_s	21.8 [mH]
토크상수	K_t	0.18284 [Nm]
역기전력상수	K_e	0.09142 [V/(rad/sec)]
정격속도	N_r	5000 [rpm]

그림 8과 그림 9는 본 논문에서 제안한 센서리스 제어방법으로 전동기를 각각 10[rpm], 5000[rpm]에서 구동하였을 때에 회전 속도와 상전류, 제안한 C function, C function으로 얻은 전환 신호와 홀센서 신호를 나타낸다.

그림 8에서 보이는 바와 같이 제안한 C function에 의해 만들어진 전환 신호는 홀센서 신호와 동기를 이루어 동작한다는 것을 알 수 있다.

또한 그림 9에서와 같이 5000[rpm]의 고속 운전에서도 C function의 검출은 쉽게 이루어지며 C function에 의해 얻어진 전환 신호는 홀센서 신호처럼 사용할 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 전 부하로 10[rpm]에서 5000[rpm]으로 운전하였을 때의 회전 속도와 상전류, 제안한 C function, C function으로 얻은 전환 신호와 홀센서 신호를 나타낸다.

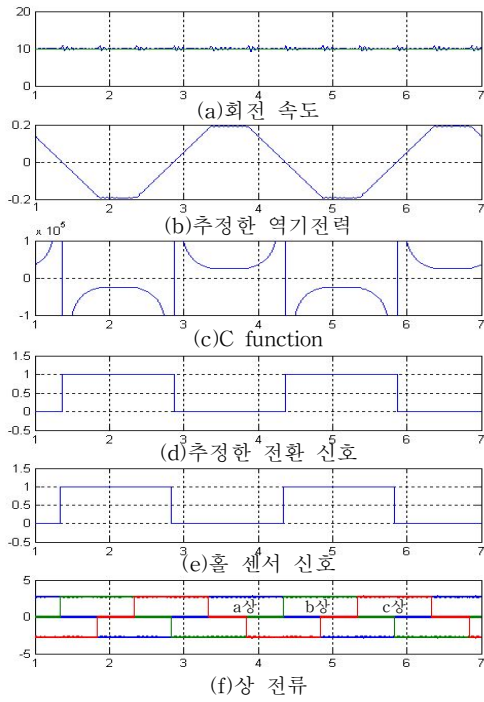


그림 8 센서리스 제어 10[rpm]

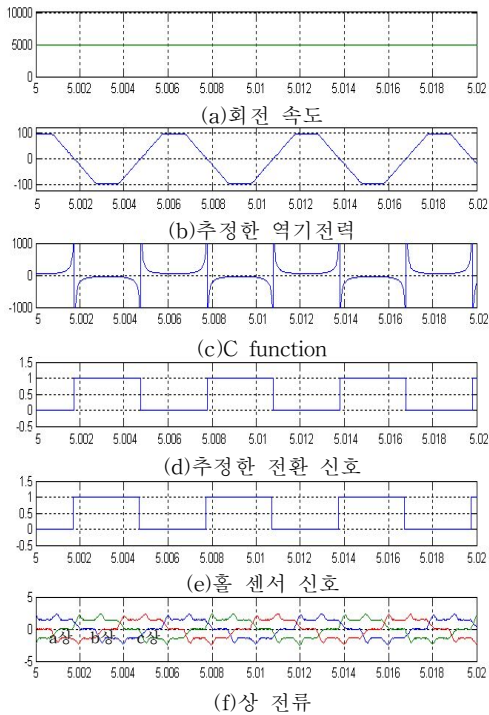


그림 9 센서리스 제어 5000[rpm]

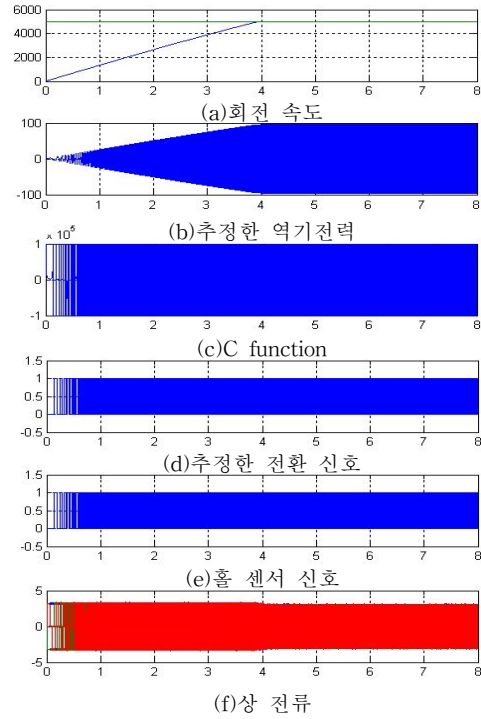
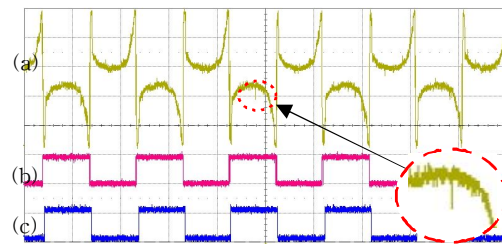


그림 10 센서리스 제어 10-5000[rpm]

5. 실험결과

제안한 센서리스 제어기법을 검증하기 위하여 TI사의 저가형 Fixed point DSC인 TMS320F2808을 주 처리기로 하는 제어시스템을 사용하였다.



(a) C function [250V/div]
(b) C function을 이용한 전환 신호 (c) 홀센서 신호
그림 11 제안한 센서리스 방법의 실험결과

그림 11의 실험 파형에서도 알 수 있듯이 C function을 이용한 전환 신호는 홀센서 신호와 잘 일치하는 것

을 알 수 있다. 또한 분자항의 이득 값이 충분히 크다면, C function은 전환 시점 즉, ZCP시점 외엔 '0'점에서 크게 벗어난 매우 큰 값을 가지므로 점선원에 보이는 노이즈는 전환 시점을 검출함에 있어 아무런 문제를 발생시키지 않는다는 것을 알 수 있다.

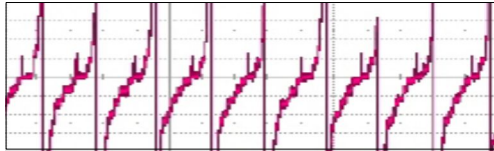
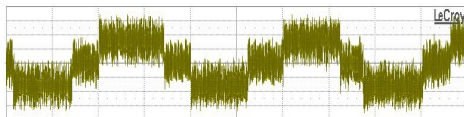
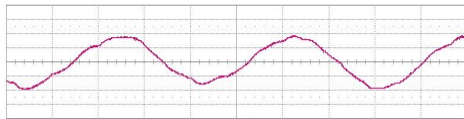


그림 12 기존 방식의 전환 함수

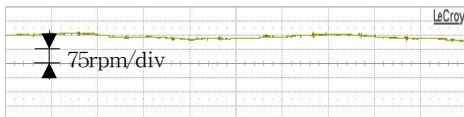
그림 12는 기존 방식의 전환함수를 나타낸다. 보는바와 같이 전환 시점을 검출함에 있어 노이즈의 영향을 받는다는 것을 알 수 있고 또한 좁은 폭으로 발생하는 전환 함수를 검출함에 있어 검출 제어주기를 짧게 가져야 한다는 것을 알 수 있다.



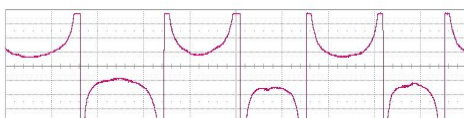
(a) 상 전류 [0.5A/div]



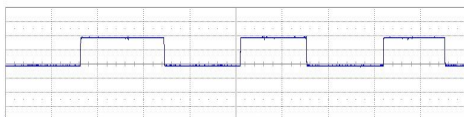
(b) 추정된 순간 역기전력 [1.2V/div]



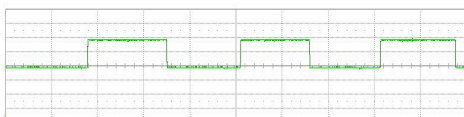
(c) 추정된 회전 속도



(d) C function [250V/div]



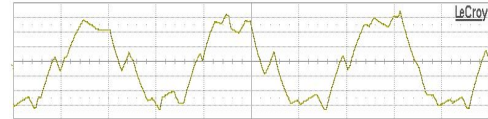
(e) 추정된 전환 신호



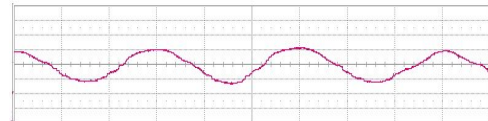
(f) 홀 센서 신호

그림 13 센서리스 제어 150[rpm] [50ms/div]

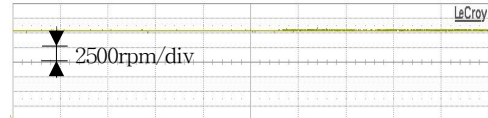
그림 13과 그림 14는 제안한 센서리스 방법으로 각각 150[rpm], 5000[rpm]으로 전동기를 구동하였을 때의 회전자속도, 상전류, C function, C function을 이용한 전환 신호, 홀센서 신호를 보여준다.



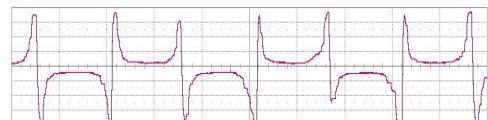
(a) 상 전류 [1A/div]



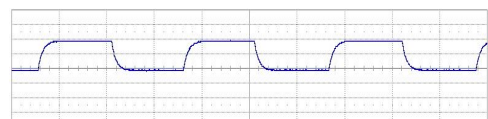
(b) 추정된 순간 역기전력 [50V/div]



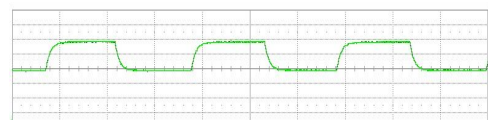
(c) 추정된 회전 속도



(d) C function [50V/div]



(e) 추정된 전환 신호



(f) 홀 센서 신호

그림 14 센서리스 제어 5000[rpm] [2ms/div]

그림 15는 BLDC 전동기를 150[rpm]에서 2500[rpm], 2500[rpm]에서 5000[rpm]으로 운전하였을 때의 실제 속도와 제안한 방법의 추정속도를 나타낸다.

그림에서 보이는 바와 같이 속도를 정확하게 추정하는 것을 알 수 있다.

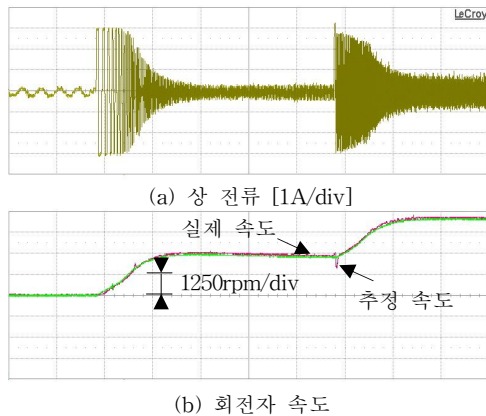


그림 15 150-2500-5000rpm 센서리스 제어 [500ms/div]

6. 결론

본 논문에서는 기존의 BLDC 전동기의 센서리스 제어의 단점들을 포함하지 않는 BLDC 전동기의 센서리스 기법인 선간 역기전력을 이용한 센서리스 제어방법을 제안하였다.

기존의 선간 역기전력을 이용한 전환 시점 검출방법에서 문제되었던 노이즈 문제와 전동기의 고속 회전 시 전환 함수 검출의 어려움을 간단한 제어 알고리즘 방법으로 해결함으로써 노이즈의 영향을 받지 않으면서 쉽게 전환 시점을 검출 할 수 있었다.

또한 Matlab의 Simulink를 이용한 시뮬레이션과 TI사의 저가용 DSC인 TMS320F2808을 이용하여 550[W]의 BLDC 전동기로 실험함으로써 제안한 센서리스 제어 방법의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] 권경준, 김상훈 "Brushless DC Motor에서 토크리플 저감을 위한 전환 구간에서의 전류제어 기법", *전력전자학회지*, 제9권, 제3호, June, 2004.
- [2] P. James. Johnson and M. Ehsani, "Sensorless BLDC(Brushless DC) Control Using A Current Waveform Anomaly". *Conf. Rec. of IEEE IAS*, pp.151-158. 1999.
- [3] J. P. Johnson, M. Ehsani, and Y. Guzelgunler, "Review of sensorless methods for brushless DC", *IEEE IAS Conf.* vol. 1, pp.143-150. 1999.
- [4] K. Iizuka, et al., "Microcomputer control for sensorless brushless motor," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.27, pp.595-601. May-June. 1985.

- [5] J. Moreira, "Indirect sensing for rotor flux position of permanent magnet ac motors operating in a wide speed range," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.32, pp.401-407. November/December. 1996.
- [6] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to position sensorless drive for BLDC(Brushless DC) motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 27, pp.928-933 September/October. 1991.
- [7] T. H. Kim and M. Ehasani, "Sensorless control of the BLDC motors from near-zero to high speeds," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 6, pp.1635-1645, 2004.
- [8] T. S. Kim "A Novel Approach to Sensorless Control Method for BLDC(Brushless DC) Motors" *International Journal of Control Automation and Systems*, vol.6, no.4 pp. 477-487, August. 2008.
- [9] 김상훈, *DC 및 AC 모터 제어*, 북두출판사, 2007.