

디지틀 필터를 이용한 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브의 성능 향상에 관한 연구

여형기^o 이광운 박정배 김태형 이인호 유지윤
고려대학교 전기공학과

Performance Enhancement of a Sensorless Drive for Brushless DC Motor Using Digital Filter

H.G. Yeo, K.W. Lee, J.B. Park, T.H. Kim, I.H. Lee, J.Y. Yoo
Department of Electrical Engineering, Korea University, Seoul, Korea

Abstract - This paper describes a digital sensorless drive of permanent magnet brushless DC (PM BLDC) motors. The sensorless drive adopts a digital filter - moving average finite impulse response filter for accurate estimation of commutation time. Experimental results show that the performance of the proposed sensorless drive is superior to that of the sensorless drive without filtering.

1. 서 론

브러시리스 직류 전동기(BLDC motor)는 유도기에 비하여 넓은 속도 범위에 대하여 높은 효율을 유지하고 제어가 용이하여 가변속 운전이 요구되는 응용 개소에 최적의 전동기로 각광받고 있다. 그러나 BLDC 전동기를 구동하려면 홀센서나 엔코더와 같은 위치 검출 센서가 요구되어 유도기에 대한 가격 경쟁력에서 크게 뒤떨어진다. 이에 따라 근래에는 BLDC 전동기의 위치를 센서 없이 간접적으로 추정하여 구동하는 센서리스 드라이브 개발에 대한 연구가 활발히 이뤄지고 있다.[1]-[4]

센서리스 드라이브는 고정자 단자 전압이나 단자 전류의 특성을 이용하여 위치를 검출하며, 轉流(commutation) 시점을 직접 찾는 방법[1][3]과 역기 전력이 0이 되는 시점(ZCP, zero crossing point)을 찾아서 轉流 시점을 계산하는 방법[2][4]으로 구분할 수 있다. 전동기의 효율을 높이기 위해서는 부하 또는 고정자 권선 인덕턴스의 변화에 따라 轉流 시점을 변화시키는 것이 유리하므로 ZCP를 실시간으로 찾는 방법이 선호되고 있다. 그러나 이 방법은 단자 전압이나 단자 전류의 측정이 PWM 펄스가 on 되었을 때만 가능하기 때문에 전동기 속도가 높아지면 상대적으로 회전당 PWM 펄스 수가 감소하므로 위치 추정시 오차가 심화되는 단점이 있다. 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위하여 ZCP를 실시간으로 찾은 다음, 디지틀 필터링을 통

하여 轉流 시점을 찾는 방법을 센서리스 드라이브에 적용함으로써 드라이브의 성능을 향상시키고자 한다.

2. 간접 센싱 원리와 위치 분해능

그림1에 BLDC 전동기의 등가 회로를 나타내었다. BLDC 전동기는 일반적으로 그림2와 같은 사다리꼴의 역기전력을 갖기 때문에 120° 도통 구간을 갖는 구형과 전류로 구동하며, 그림3과 같은 unipolar PWM으로 인버터를 스위칭한다. 이때 단자 전압은 그림4와 같이 나타난다. 여자되지 않는 구간에서의 단자 전압 또는 단자 전류를 검출하면 ZCP를 알 수 있다. 예를 들어 회전자가 210° 에서 270° 사이에 있을 때(a,b상 여자, c상 개방)의 개방된 상의 단자 전압은 다음과 같다.[1][4]

$$V_c \begin{cases} = V_{dl}2 + e_c & (T_b^+ \text{ ON}) \\ = e_c & (T_b^+ \text{ OFF}) \end{cases} \quad (1)$$

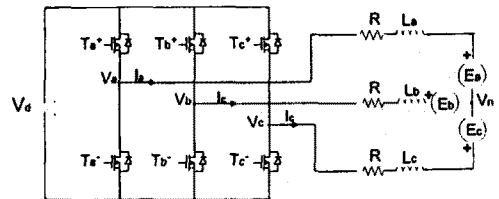


그림 1. 브러시리스 직류 전동기의 등가회로

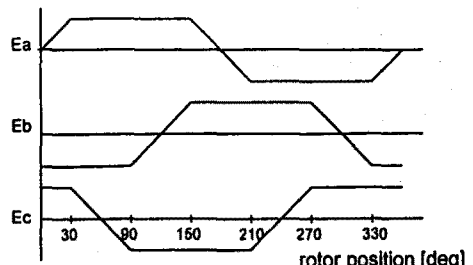


그림 2. 회전자 위치에 따른 역기전력 파형

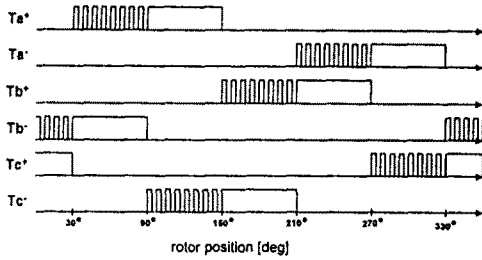


그림3. Unipolar PWM 파형

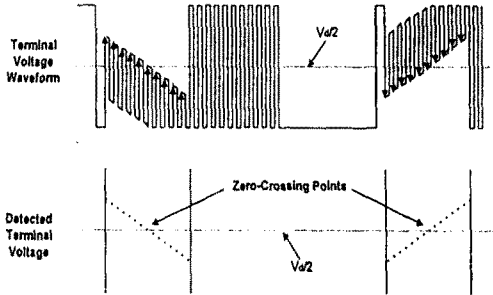


그림4. 단자 전압 파형과 위치 검출 방법

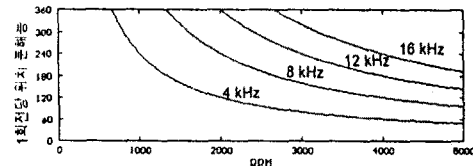


그림 5. PWM 주파수 및 회전자 속도에 따른 회전자 위치 검출 분해능 (3상6극 전동기의 경우)

따라서 T_b^* 가 ON일 때 단자전압 v_c 가 $V_d/2$ 와 같을 때를 검출하면 역기전력 e_c 가 0이 될 때 (ZCP)를 검출 할 수 있다. ZCP가 검출되면 이전에 검출한 ZCP와의 시간 Δt_{zcp} 을 측정하여 회전 속도를 계산하고, 이로부터 전기각으로 30° 지연된 시점에서 轉流하는 방식으로 위치 센서 없이 구동이 가능하다. 이 방법은 PWM 신호가 ON될 때만 역기전력을 센싱하기 때문에 그림5와 같이 PWM 주파수와 회전 속도에 따라 회전자 위치에 대한 분해능이 달라진다. BLDC 전동기의 센서리스 드라이브는 경제성을 목적으로 개발되기 때문에 주로 power Tr이 스위칭 소자로 사용되며 PWM 주파수는 최대 5 kHz 이다. 이 경우 고속으로 갈수록 개발된 구간 동안의 PWM 펄스 수가 작아져서 ZCP 검출시 오차가 심하여 3상 6극 전동기의 경우 3,600 rpm 이상 고속 운전이 불가능하다.

3. 디지털 필터 설계

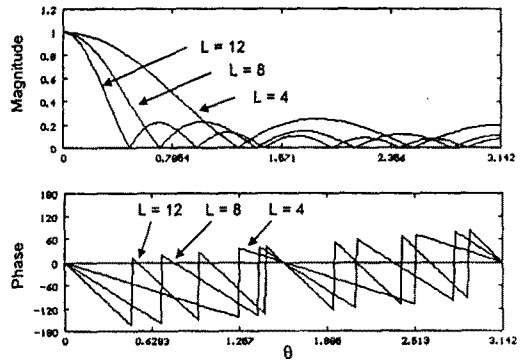


그림 6. 이동평균 FIR 필터의 주파수 응답 특성

轉流 시점을 정확히 찾으려면 Δt_{zcp} 가 정확히 검출되어야 하나 고속에서는 회전당 PWM 펄스 수가 감소하여 Δt_{zcp} 에 측정 잡음이 커지게 된다. 따라서 Δt_{zcp} 를 필터링할 필요가 있다. 본 연구에서는 Δt_{zcp} 를 회전자 위치가 ZCP일 때마다, 즉 전기각으로 $\frac{\pi}{6}$ 마다 샘플링하는 것으로 가정하고, 전기각으로 한 회전 주기 당 30° 이상의 오차를 발생하는 고주파 성분을 제거하기 위해 이동평균 (moving average, MA) FIR 필터를 적용하였다. MA 필터의 차분 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta \hat{t}_{zcp}(n) = \frac{1}{L+1} \sum_{k=0}^L \Delta t_{zcp}(n-k) \quad (2)$$

(2)식의 특성값(eigen value)은 (3)으로 표현되며, L에 따른 주파수 응답 특성은 그림6과 같다.

$$H(e^{j\theta}) = \frac{1}{L+1} e^{-j\theta L/2} \left[\frac{\sin\left(\theta \cdot \frac{L+1}{2}\right)}{\sin(\theta/2)} \right] \quad (3)$$

(3)에서 $\theta(=\pi f/f_s)$ 는 Δt_{zcp} 의 고주파 성분의 주파수 f 를 샘플링 주파수 f_s 로 표준화한 것이다. L이 크면 필터링 특성은 좋아지나 통과 대역이 작아져서 전동기의 변속시 가속도가 제한되고, L이 작으면 가속도의 제한이 감소하나 필터링 특성이 떨어지므로 PWM 주파수와 속도 응답을 동시에 고려하여 적절한 값을 선정해야 한다.

4. 실험 결과 및 검토

본 연구에서 제시한 센서리스 운전 기법을 구현하기 위하여 그림7과 같은 센서리스 드라이브를 구성하였으며 실험에 이용된 전동기의 사양은 표1과 같다. 그림8과 그림9는 인버터를 4 kHz로 스위칭할 때, 필터링 없이 운전한 경우와 MA FIR 필터(L=4)를 적용한 경우를 각각 비교하여 제시하였다.

그림7은 3,600 rpm으로 회전시의 회전자 위치를 간접 검출한 결과로서, MA 필터를 적용한 경우의 검출 결과가 더 정확함을 알 수 있다. 그림8은 각각의 상전류 및 단자 전압으로서 필터를 적용하지 않은 경우는 전류 크기가 일정치 못하고 폭도 불균일하게 나타난다. 이는 곧 토크의 맥동을 유발하게 되어 진동과 소음의 원인이 된다. 필터를 적용한 경우는 전류 크기 및 폭이 균일하게 나타남을 알 수 있다. 필터를 적용하지 않은 드라이브의 경우에는 3,600 rpm 이상 운전시 ZCP 검출에 오차가 심하여 轉流 시점을 정확히 찾지 못하고 운전이 정지되었으나, MA 필터를 적용한 드라이브는 4,500 rpm까지 운전이 원활하였다.

표 1. 전동기 사양

상수/극수	3상 / 6극
정격 출력	300 W
정격 속도	3,000 rpm
정격 토크	0.95 Nm
입력 전압	110 VAC
관성 모멘트	0.000082614 Kg·m ²
역기전력 상수	0.29 V·sec/rad

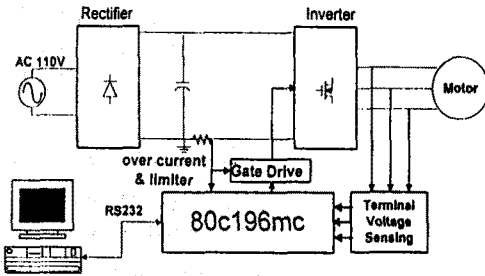
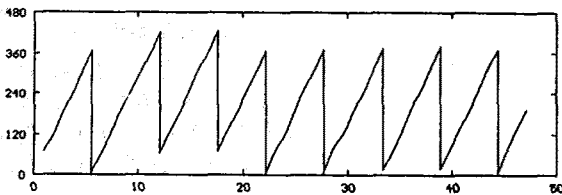
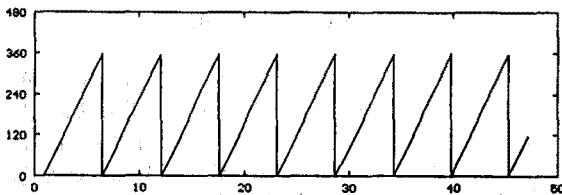


그림 7. 센서리스 드라이브의 H/W 구성도

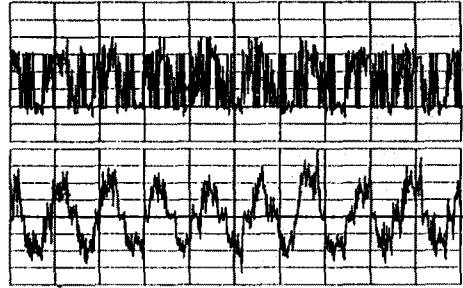


(a) 필터 없이 구동할 경우

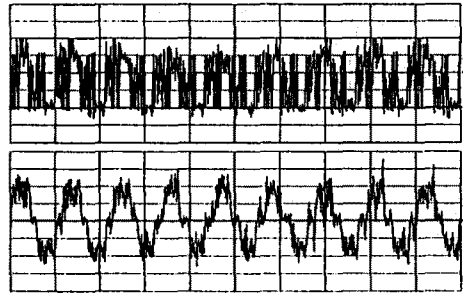


(b) MA FIR 필터를 적용한 경우

그림8. 3,600 rpm 운전시 회전자 위치 간접 검출 결과(중축 전기각, 횡축 ms)



(a) 필터 없이 구동할 경우



(b) MA FIR 필터를 적용한 경우
그림9. 3,600 rpm 운전시 단자전압 및 상전류 파형(50 V/div, 1 A/div)

5. 결 론

본 연구에서는 브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브에 MA FIR 필터를 적용하여 轉流 시점의 추정을 개선하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 센서리스 드라이브에 적용한 결과, 전류 맥동을 저감되고 소음 및 진동이 개선되었다. 또한 고속 운전시 위치 분해능이 저하되는 단점을 보완되어 운전 속도 영역을 25% 확대할 수 있었다.

(참 고 문 헌)

- [1] K.Iizaka, et.al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless DC Motor," *IEEE Trans. on IA*, vol. IA-21, No. 4, pp.595-601, May/JUN 1985
- [2] S.Ogasawara and H.Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor," *Conf. Rec. of 1994 IEEE IAS'90*, pp. 443-447, 1990
- [3] J.C.Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating in a Wide Speed Range," *Conf. Rec. of 1994 IEEE IAS'94*, pp. 401-407, 1994
- [4] 여형기, 이광운, 박정배, 김태형, 황건, 유지운, "브러시리스 직류 전동기용 센서리스 드라이브 개발에 관한 연구", 대한 전기학회 하계학술대회는문집, pp.2095-2097, 1997.