

# BLDC 고속 센서리스 구동의 ZCP 추정 오차 저감을 위한 Programmable Low Pass Filter 설계

## A Design of Programmable Low Pass Filter to Reduce the ZCP Estimation Error at High Speed BLDC Sensorless Drive

서 은 정\* · 이 강 석\* · 이 우 택†  
(Eunjeong Seo · Kangseok Lee · Wootaik Lee)

**Abstract** - This paper presents a design method of programmable low pass filter(PLPF) which reduce an estimation error of a zero crossing point(ZCP) for a high speed brushless DC(BLDC) motor drive. BLDC motor sensorless drive is possible by estimation of ZCP. The ZCP estimated by detecting a change of back-EMF polarity has the estimation error because noises exist on the measured back-EMF. Therefore a calculated commutation timing using the ZCP is inaccurate. And the inexact commutation timing leads to ripples of 3-phase current and degradation of drive performance. This paper proposes the design method of the PLPF to overcome these problems. First, a speed calculated a inaccurate period of the ZCP is analyzed in the frequency domain. Then, the PLPF that has varying cut-off frequency according to change of the speed is designed on the frequency analysis result. The proposed method is verified by the experiment.

**Key Words** : Brushless DC motor, Sensorless, Zero crossing point, Programmable low pass filter, Measurement noise of terminal voltage, Estimation error

### 1. 서 론

Brushless DC(BLDC) 전동기는 DC 전동기의 기계적 접촉 구조인 정류자와 브러시를 제거하여, 전자적인 정류를 이용하여 신뢰성을 향상 시킨 전동기이다. 이러한 BLDC 전동기는 간단한 구조, 우수한 내구 수명, 고효율, 고토크 등의 장점으로 인해 다양한 산업분야에 많이 이용되고 있다[1-4]. 하지만 전자적인 정류를 위해서는 영구자석의 회전자의 위치 정보를 알아야 하기 때문에 홀센서, 레졸버 및 엔코더와 같은 위치 센서를 필요로 하는데, 위치 센서의 장착으로 인해 전동기 시스템의 가격 상승, 부피 증가, 사용 환경의 제약 등 많은 문제들이 야기된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 위치 센서를 사용하지 않고 회전자의 위치를 간접 검출하여 BLDC 전동기를 구동하는 센서리스 기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[5-7]. 특히 센서리스 기법 중 역기전력이 '0'이 되는 시점(ZCP, Zero Crossing Point)을 검출하고, 이를 이용하여 전류의 전환 시점을 계산하여 구동하는 방법이 많이 사용되고 있다.8) 역기전력은 스위칭하지 않는 상의 단자 전압(terminal voltage)을 PWM 주기와 동기화하여 샘플링함으로써 얻을 수 있으며, 역기전력의 극성이 변화한 시점을 ZCP로 판단내린다.

하지만 검출된 ZCP에는 추정 오차가 존재하기 때문에 정확한 전류의 전환 시점을 계산 할 수 없다. 정확하지 않은 전류의 전환 시점으로 인해 전류 리플이 증가하는데, BLDC 전동기 구동에서 전류 리플은 진동, 소음의 원인이 되는 토크 리플을 증가시키는 가장 큰 요인이므로 이는 구동 성능의 저하를 야기 시킨다[9]. 이러한 추정 오차의 원인으로서는 단자 전압의 샘플링 주기의 제한과 단자 전압의 측정 노이즈의 두 가지로 나눌 수 있다[10]. 단자 전압의 샘플링 주기의 제한으로 인한 추정 오차는 한 회전당 단자 전압의 샘플링 수가 적은 고속에서 오차가 심화되는 특징이 있으며, ZCP간의 주기에 저역 통과 필터를 적용함으로써 이러한 추정 오차를 저감시키는 방법이 연구되었다[11].

ZCP 추정 오차의 원인인 단자 전압의 측정 노이즈를 저감시키기 위해서 단자 전압을 직접 필터링하는 방법을 생각해 볼수 있는데, 전환 구간으로 인해 샘플링되는 단자 전압이 불연속적이어서 필터를 적용하기가 어렵고, 필터를 적용한다 하더라도 고속에서는 단자 전압의 샘플 개수가 적기 때문에 그 효과가 제한적이다. 따라서 ZCP 주기로 계산되는 속도를 필터링함으로써 간접적으로 ZCP의 추정 오차를 저감시키는 방법을 사용해야한다. 하지만 단자 전압의 측정 노이즈로 인한 추정 오차는 구동 속도에 따라서 그 주파수 특성이 변하기 때문에 필터의 차단 주파수를 작게 설정하면 추정 오차 저감은 효과적이지만 속도 응답이 느리고, 반대로 차단 주파수를 크게 설정하면 속도 응답은 빨라지지만 추정 오차 저감 효과가 적다.

본 논문에서는 ZCP 주기로 계산되는 속도의 주파수 분석을 바탕으로 구동 속도에 따라 필터의 차단 주파수가 가변되는 프로그래머블 저역 통과 필터(Programmable Low

† Corresponding Author : Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Changwon National Univ., Korea  
E-mail : wootaik@changwon.ac.kr

\* Department of Control & Instrumentation Engineering, Graduate School, Changwon National Univ., Korea

Received : August 12, 2013; Accepted : December 17, 2013

Pass Filter)를 설계하였다. 설계한 필터를 적용함으로써 넓은 구동 영역에서 단자 전압의 측정 노이즈로 인한 ZCP 추정 오차를 저감시킬 수 있고, 이는 토크 리플을 감소시켜 BLDC 전동기 구동에서 발생하는 진동, 소음을 줄일 수 있다. 실험을 통하여 제시된 방법을 통해 ZCP 추정 오차가 저감됨을 전류 리플률을 비교함으로써 검증하였다.

## 2. 역기전력의 ZCP를 이용한 센서리스 구동

### 2.1 BLDC 전동기 센서리스 구동원리

BLDC 전동기는 일반적으로 사다리꼴의 역기전력을 갖기 때문에 120° 도통 구간을 갖는 구형과 전류로 구동한다. 이때 60° 씩 여섯 개의 섹터(sector)로 나눌 수 있으며, 섹터에 따라 도통 순서를 바꿔 권선의 전류를 바꾸어 주면 일정한 방향으로 토크가 발생하여 회전하게 된다. 그림 1은 BLDC 전동기 구동 시 3상 단자 전압을 측정한 결과이다.

BLDC 전동기는 2상 여자 방식 구동이므로 그림 1과 같이 스위칭하지 않는 구간(switching-off region)이 존재한다. 이러한 구간에서 단자 전압을 측정하여 역기전력의 ZCP를 검출할 수 있다. ZCP로부터 30°가 지난 시점이 상전류를 전환하는 시점이므로 이 시점에서 전류의 도통 순서를 바꿔 줌으로써 BLDC 전동기의 센서리스 구동이 가능해진다.

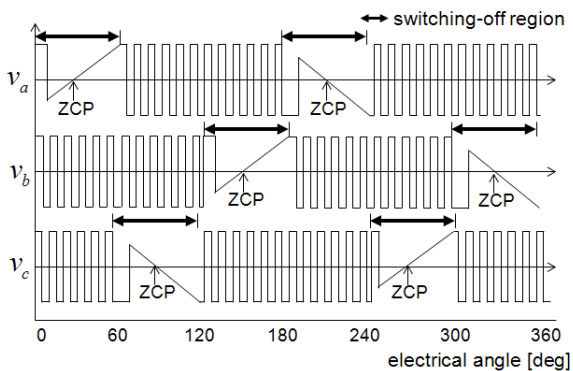


그림 1 BLDC 전동기의 3상 단자 전압 파형  
Fig. 1 3-phase terminal voltage of BLDC motor

### 2.2 ZCP 검출과 전류의 전환 시점 계산

BLDC 전동기의 역기전력은 스위칭하지 않는 상의 단자 전압을 측정함으로써 얻을 수 있는데, 전동기의 중성점과 인버터 접지 간의 전위차로 인해 단자 전압은 항상 직류 링크 전압(DC link voltage)의 1/2 배만큼 큰 값을 갖는다. 본 논문에서는 단자 전압을 샘플링할 때 이를 고려하고, 샘플링된 단자 전압과 역기전력의 크기 차이가 없는 것으로 간주하였다.

그림 2는 BLDC 전동기의 구동 시 측정되는 단자전압과 실제 역기전력을 나타낸 그림이다. 전동기의 유한한 인덕턴스로 인해서 전환 직후 스위칭하지 않는 상에 전류가 흐른다. 이러한 전류로 인하여 전환 구간(commutation period)이 존재하며, 이 구간에서는 역기전력을 측정할 수가 없다.

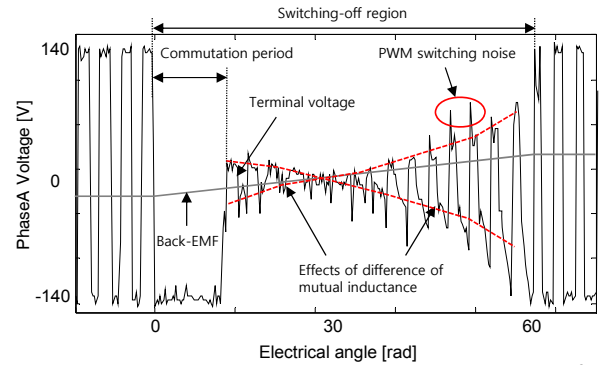


그림 2 BLDC 전동기의 역기전력과 단자 전압  
Fig. 2 Back-EMF and terminal voltage of BLDC motor

전환 구간 후에는 전동기의 상호 인덕턴스 불균형에 의한 영향으로 인해 그림 2에 보이는바와 같이 역기전력에 PWM 파형이 중첩되어 나타내며, PWM 스위칭 시 노이즈가 발생한다. 따라서 역기전력을 PWM 스위칭 주파수에 동기화하여, PWM 중간 지점에서 샘플링하는 것이 바람직하다. 이렇게 샘플링된 단자 전압의 극성 변화로부터 Zero Cross Point (ZCP)를 추정하게 된다.

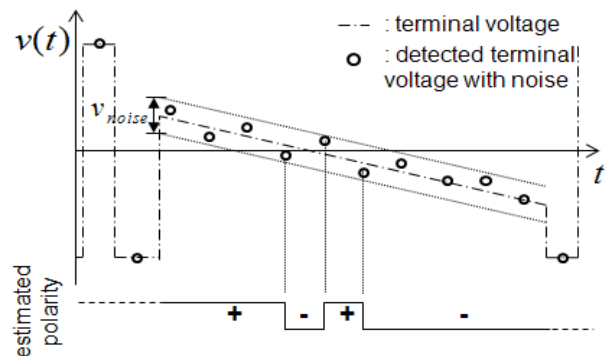


그림 3 역기전력의 노이즈로 인한 영향  
Fig. 3 The effects of back-EMF noise

하지만 화이트 노이즈와 앞서 언급한 스위칭 노이즈, 상호 인덕턴스 불균형에 의한 영향, 그리고 정확히 PWM 중간 지점에서 샘플링이 되지 않는 경우 등에 의하여 샘플링된 단자 전압은 실제 역기전력에  $V_{noise}$ 의 크기를 갖는 측정 노이즈가 더해진 형태로 나타나게 된다. 이러한 측정 노이즈로 인해 저속에서는 그림 3과 같이 0[V] 부근에서 극성이 여러 번 변화하는 채터링(Chattering) 현상이 나타나며, ZCP 추정 시 히스테리시스 밴드(hysteresis band)를 적용함으로써 이러한 채터링 현상을 방지할 수 있다. 그림 4에 역기전력의 극성이 (+)에서 (-)로 변화할 경우 히스테리시스 밴드를 적용하여 ZCP를 추정하는 방법을 나타내었다.  $V(t) < V_{LT}$ 를 만족하는 시점을 ZCP로 추정하며, 추정 시점을  $\hat{t}_{zc}$ 라 한다. 이때  $V(t)$ 는 측정되는 단자전압이고  $V_{UT}$ 와  $V_{LT}$ 는 히스테리시스의 문턱(Threshold) 전압이다.

역기전력 극성이 (-)에서 (+)로 변화하는 경우에는  $V(t) >$

$V_{UT}$  를 만족하는 시점을 ZCP로 추정한다. 이렇게 추정된 현재 섹터의 ZCP 시점  $\hat{t}_{zc}$  와 이전 섹터의 ZCP 시점으로부터 ZCP간의 주기  $\hat{T}_{zc}$  를 구하여, 전류의 전환 시점  $\hat{t}_{cmt}$  을 식(1)과 같이 계산한다.

$$\hat{t}_{cmt} = \hat{t}_{zc} + \frac{\hat{T}_{zc}}{2} \quad (1)$$

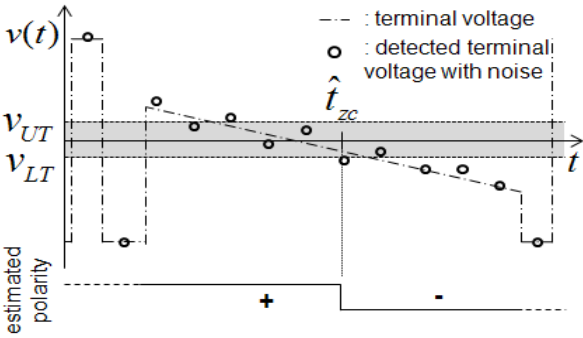


그림 4 히스테리시스가 적용된 ZCP 추정  
Fig. 4 ZCP detection with hysteresis

### 2.3 ZCP 추정 오차 저감을 위한 BLDC 전동기 센서리스 구동

이러한 추정오차로 인해 정확한 전류의 전환 시점을 계산할 수 없다. 따라서 실제 전환이 이루어져야 하는 시점보다 앞선 시점이나 혹은 느린 시점에서 전환이 이루어져 전류의 리플이 증가하고 구동 성능이 저하된다. 일반적으로 노이즈의 영향을 저감하기 위해서는 노이즈가 존재하는 신호를 직접 필터링하지만, 전환 구간으로 인해 샘플링 된 역기전력이 불연속적이며 고속에서는 ZCP를 검출하는데 사용되는 역기전력 샘플이 적기 때문에 필터를 적용하더라도 필터링 효과가 제한적이다.

BLDC 전동기의 센서리스 구동 시 ZCP간의 주기를 이용하여 속도를 계산하기 때문에 ZCP 추정 오차는 곧 속도 오차로 나타난다. 따라서 필터링된 속도로부터 ZCP간의 주기를 계산하고, 이를 이용하여 전류의 전환 시점을 계산함으로써 ZCP의 추정 오차의 영향을 저감할 수 있다.

3장에서 속도의 필터를 설계하기 위하여 BLDC 전동기 구동 시 속도를 주파수 분석하고, 이를 바탕으로 추정 오차 저감을 위한 프로그래머블 저역 통과 필터 (Programmable Low Pass Filter) 를 설계하였다.

## 3. 프로그래머블 저역 통과 필터 설계

### 3.1 ZCP 추정 오차 분석

2장에서 ZCP를 검출하고, 검출된 ZCP로부터 전류의 전환 시점을 계산하는 방법을 설명했다. 하지만 앞서 설명한 단자 전압의 노이즈와 히스테리시스 밴드를 적용함으로써 실제 ZCP와 검출된 ZCP간에는 추정 오차가 발생한다. 그림 5에 이러한 추정 오차를 나타내었다.  $t_{zc}$ 는 실제 ZCP

이며,  $T_{zc}$ 는 실제 ZCP간의 주기로 전기각으로  $60^\circ$ 이다.  $t_{cmt}$ 은  $t_{zc}$ 로부터  $30^\circ$ 가 지난 시점인 전류의 전환 시점을 나타낸다.  $\hat{t}_{zc}$ ,  $\hat{T}_{zc}$ ,  $\hat{t}_{cmt}$ 은 앞에서 정의한 ZCP 검출을 통해 계산되는 값이며,  $T_{err}$ 는  $t_{zc}$ 에 대한  $\hat{t}_{zc}$ 의 추정 오차를 나타낸다.

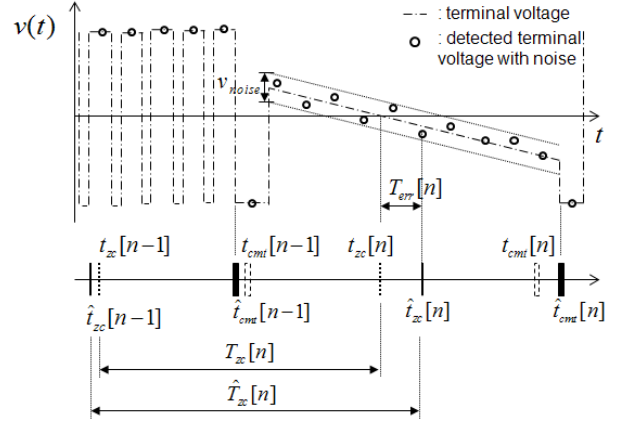


그림 5 ZCP의 추정 오차  
Fig. 5 Estimation error of ZCP

식(2)와 같이 추정된 ZCP간의 주기  $\hat{T}_{zc}$ 에는 추정 오차  $T_{err}$ 가 존재한다.

$$\begin{aligned} \hat{T}_{zc}[n] &= \hat{t}_{zc}[n] - \hat{t}_{zc}[n-1] \\ &= (t_{zc}[n] + T_{err}[n]) - (t_{zc}[n-1] + T_{err}[n-1]) \\ &= T_{zc}[n] + T_{err}[n] - T_{err}[n-1] \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 ZCP간의 주기를 필터링하여 이러한 추정 오차의 영향을 저감하고자 한다. 하지만 필터링된 ZCP간의 주기와 실제 ZCP간의 주기가 같다고 가정하더라도, 식 (3)과 같이 여전히 ZCP에 추정 오차가 존재하기 때문에 정확한 전류의 전환 시점을 계산하기 어렵다. 따라서 전류의 전환 시점을 계산할 때, 식 (4)와 같이 필터링된 ZCP간의 주기를 이용하여 추정 오차가 저감된 이전의 전류의 전환 시점으로부터 다음 전류의 전환 시점을 계산함으로써 추정 오차가 저감된 전류의 전환 시점 계산이 가능하다. 이 때  $\tilde{T}_{zc}$ 는 필터링된 ZCP간의 주기를 나타낸다.

$$\hat{t}_{cmt}[n] = \hat{t}_{zc}[n] + \frac{1}{2} \hat{T}_{zc}[n] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &\approx t_{zc}[n] + T_{err}[n] + \frac{1}{2} T_{zc}[n] \\ \hat{t}_{cmt}[n] &= \hat{t}_{cmt}[n-1] + \tilde{T}_{zc}[n] \end{aligned} \quad (4)$$

$\tilde{T}_{zc}$ 를 구하기 위해서 속도의 주파수 분석을 통해 ZCP 추정 오차를 분석하고자 한다. BLDC 전동기 구동 시 ZCP의 주기는 곧 속도이기 때문이다. ZCP의 주기와 기계 각속도의 관계는 식(5)와 같으며,  $\hat{\omega}_m$ 은 ZCP간의 주기로 계산되는 전동기의 기계 각속도를,  $P$ 는 전동기의 극수를 나타낸다.

$$\hat{w}_m = \frac{60}{T_{zc}(P/2)} \frac{1}{6} \quad (5)$$

센서리스로 정속 구동 시 속도의 변화를 그림 6에 나타내었다. 점선이 이상적인 속도이며 실선은 ZCP의 주기로부터 계산되는 속도를 나타낸다. ZCP가 전기각 60°마다 검출이 되므로 속도 또한 60°마다 계산되게 된다. 점선과 같이 속도가 1500[rpm]으로 일정할 것으로 기대하지만, ZCP 추정 오차로 인해 속도가 실선과 같이 변화한다.

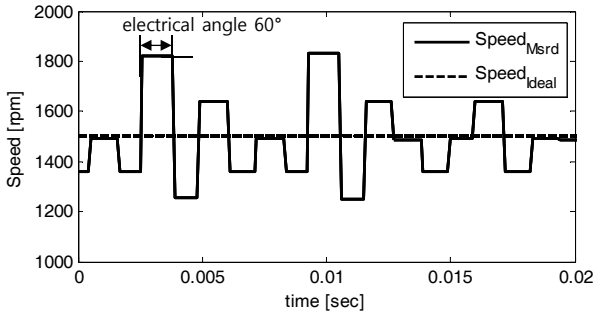


그림 6 1500[rpm] 구동 시 속도 변화  
Fig. 6 Speed variation at 1500[rpm]

이러한 속도를 FFT를 이용하여 주파수 영역에서 분석하였다. 이 때 속도의 샘플링 주파수는 10k[Hz]이며, 전동기의 구동 속도가 기계각으로 500, 1500, 2500[rpm] 일 때의 결과를 차례대로 그림 7에 나타내었다. 500[rpm]으로 구동한 경우, 속도가 일정하다면 0[Hz]에서 500[rpm]의 크기를 가지는 성분만 존재해야한다. 하지만 ZCP 추정 오차로 인해 0[Hz] 이외의 주파수에서 속도 변화에 의한 노이즈 성분이 존재하며, 특히 50, 100, 150[Hz]에서 이러한 노이즈 성분의 크기가 크게 나타남을 확인 할 수 있다. 식(6)을 이용하여 전동기의 구동 속도를 전기각의 구동 주파수로[Hz]로 변환할 수 있는데, 실험에 사용한 전동기의 극수가 12극이므로 500[rpm]일 때의 전기각 구동 주파수는 50[Hz]가 된다. 따라서 ZCP 추정 오차로 인한 속도의 노이즈 성분이 전기각 구동 주파수를 기본 주파수(Fundamental frequency)로 하는 1, 2, 3 고조파에서 나타남을 알 수 있다.

$$f_{w_c} = \frac{w_m(P/2)}{60} \quad (6)$$

1500[rpm]에서도 전기각 구동 주파수 150[Hz]의 1, 2, 3 고조파인 150, 300, 450[Hz]에서 상대적으로 큰 속도 노이즈 성분이 존재하였고, 2500[rpm]에서도 동일한 양상을 확인하였다.

### 3.2 프로그래머블 저역 통과 필터 설계

3.1절에서 ZCP 추정 오차로 인해 나타나는 속도의 노이즈 성분들이 전기각 구동 주파수의 고조파로서, 구동 속도에 따라서 그 주파수가 가변되는 것을 확인하였다. 이러한 ZCP 추정 오차의 영향의 저감을 위하여, 일반적인 저역 통과 필

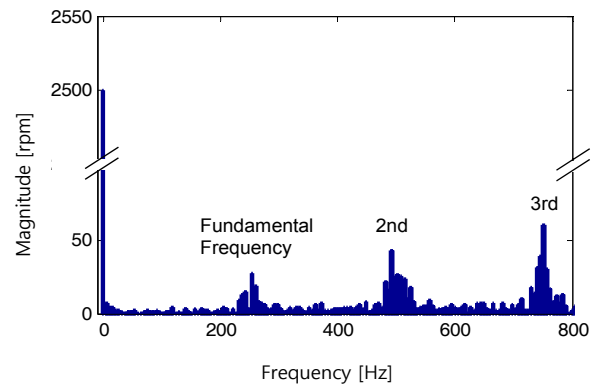
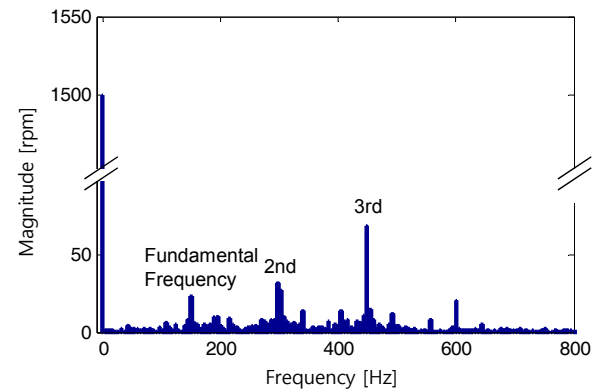
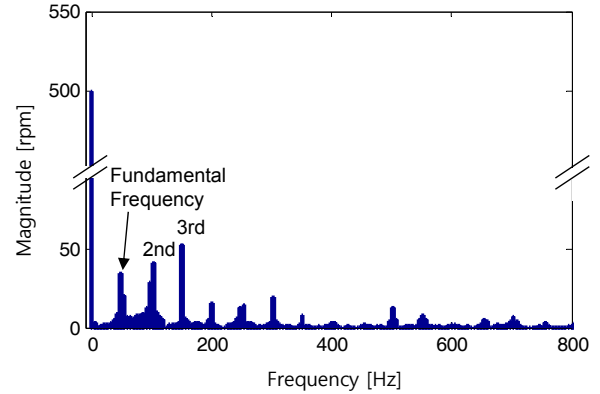


그림 7 속도의 FFT 분석

(500[rpm](위), 1500[rpm](중간), 2500[rpm](아래))

Fig. 7 FFT Analysis Result

(500[rpm](Top), 1500[rpm](Middle), 2500[rpm](Bottom))

터를 사용하여 차단 주파수(cut-off frequency)를 50[Hz]보다 작게 고정하면 전 속도 영역에서 속도의 오차의 영향을 제거할 수는 있지만 속도의 응답이 느려지는 단점이 있다. 반대의 경우로, 속도 응답을 빠르게 하기 위해서 고속에서의 FFT 결과를 기준으로 차단 주파수를 설정하게 되면 저속에서의 ZCP 추정 오차의 영향을 저감하는데 한계가 있다. 따라서 속도에 따라 차단 주파수를 가변 할 수 있는 프로그래머블 저역 통과 필터(Programmable Low Pass Filter)를 이용함으로써 전 속도 영역에서 ZCP 추정 오차의 영향을 제거하고, 고속에서는 빠른 속도 응답을 얻을 수 있도록 하고자 한다. 필터의 기본 형태는 1차 저역 통과 필터로 설정하여 식(7)와 같은 전달 함수를 갖는다. 이 때,  $w_c$ 는 차단 주

과수이다.

$$H(s) = \frac{w_c}{s + w_c} \quad (7)$$

속도에 필터를 적용하여 식(8)과 같이 나타낼 수 있으며,  $\widehat{\Omega}_m(s)$ 는 식(2)에서의 기계 각속도를 주파수 영역에서 나타낸 것이며,  $\widetilde{\Omega}_m(s)$ 는 필터를 적용한 속도를 나타낸다.

$$\widetilde{\Omega}_m(s) = H(s)\widehat{\Omega}_m(s) \quad (8)$$

식 (8)을 Backward Euler Method를 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있으며,  $T_s$ 는 샘플링 주기이다.

$$\widetilde{\Omega}_m[n] = \frac{w_c T_s}{1 + w_c T_s} \Omega_m[n] + \frac{1}{1 + w_c T_s} \widetilde{\Omega}_m[n-1] \quad (9)$$

주파수 분석을 통해 속도 변화에 의한 노이즈 성분이 나타나는 주파수가 구동 주파수  $f_c (= \frac{w_c}{2\pi})$ 의 배수임을 확인하였는데, 속도 변화의 영향을 제거하기 위하여  $w_c < w_c$ 를 만족하도록 차단 주파수를 결정해야한다. 하지만 차단 주파수를 너무 작게 설정하면 느린 응답 속도로 인하여 전동기의 가감속 시 ZCP를 추정 할 수 없는 문제가 발생한다. 따라서 차단 주파수를 설정 할 때 전동기의 기계적 시정수  $\tau_m$ 를 고려하여 설정해야 하며, 필터를 적용하는 최저 속도의 차단주파수  $w_{c(\min)}$ 를 기계각속도의 약 두 배 이상으로 식(10)과 같이 제한하기로 한다.

$$w_{c(\min)} > \frac{2}{\tau_m} (2\pi) \quad (10)$$

식(10)를 만족하며 전 속도 영역에서 노이즈의 영향을 제거할 수 있도록 차단 주파수를 식 (11)과 같이 설정하였다.

$$w_c = \frac{1}{2} w_c \quad (11)$$

본 논문에서 500[rpm]이상의 속도 범위에서 필터를 적용시키므로  $w_{c(\min)}$ 는 식 (12)와 같고, 실험에 사용한 전동기의 기계적 시정수가 식 (13)와 같으므로 식 (10), (14)를 만족한다.

$$w_{c(\min)} = \frac{1}{2} (500) \frac{2\pi}{60} \frac{P}{2} = 157 [\text{rad/s}] \quad (12)$$

$$\tau_m = \frac{J}{B} = \frac{0.005m}{0.11m} = 0.45 [\text{sec}] \quad (13)$$

$$w_{c(\min)} > \frac{2}{(0.5)} (2\pi) \approx 25 [\text{rad/s}] \quad (14)$$

식(9)의 주파수 영역에서의 필터링 된 속도를 라플라스 역변환을 이용하여 시간 영역으로 표현한 것을  $\widetilde{w}_m$ 이라 할

때, 식 (15)과 같이 ZCP간의 주기를 계산 할 수 있다.

$$\widetilde{T}_{zc} = \frac{60}{w_{zc}(P/2)} \frac{1}{6} \quad (15)$$

### 3.3 실험 및 검증

실험을 통해 설계한 필터를 적용함으로써 ZCP 추정 오차가 저감됨을 확인하였다. 실험 및 검증을 위하여 그림 8과 같이 BLDC 센서리스 구동 시스템을 구성하였다. BLDC 센서리스 구동 시스템에는 ZCP 추정을 위한 단자 전압과 직류 링크 전압 측정부가 있으며, ADC 모듈을 통해 각 전압이 샘플링된다. 샘플링된 전압들을 이용하여 ZCP를 검출하여 ZCP간의 주기를 계산한다. 설계된 프로그래머블 저역 통과 필터를 적용하여 ZCP간의 주기로부터 속도를 계산하여 전류의 전환 시점을 계산하고 전환 순서를 결정한다. 계산된 속도와 지령 속도로부터 PI 속도 제어를 통해 PWM 방식을 사용하기 위한 인가전압이 결정된다. PWM 모듈에서는 전환 순서와 인가전압을 이용하여 전력 변환부인 3상 인버터에 PWM을 출력한다. 실험에 사용한 전동기의 파라미터는 Table. 1과 같고, PWM 스위칭 주파수는 10 [kHz]로 설정하였다.

ZCP 추정 오차가 미치는 영향에 대하여 분석하기 위하여 500, 1500, 2500[rpm]으로 구동 할 때 필터를 적용하지 않은 경우, 필터를 적용한 경우에 대하여 각 각을 Method 1과 Method 2라 하고, 3상 전류의 리플률(RF, Ripple Factor)을 비교하였다. 전류의 리플률은 2상 도통 구간 내에서 발생하는 피크 전류의 최대값  $i_{\max1}$  과 최소값  $i_{\max2}$  으로 식 (16)과 같이 구하였다.

$$RF = \frac{i_{\max1} - i_{\max2}}{i_{\max1}} \times 100 [\%] \quad (16)$$

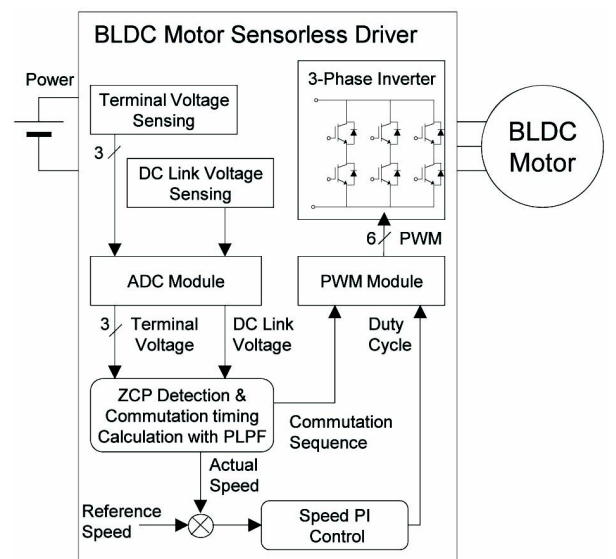


그림 8 BLDC 전동기 센서리스 구동 시스템  
Fig. 8 BLDC motor sensorless drive system

표 1 BLDC 전동기 파라미터

Table 1 Parameters of BLDC motor

Parameter	Value	Unit
DC bus voltage	24	V
Phase resistance	0.158	$\Omega$
Phase inductance	0.176	mH
Back-EMF constant	6.55	mV/(rad/s)
Rated speed	3000	rpm
Number of pole	12	-

2500[rpm]으로 구동 시 3상 전류 파형을 각 각의 경우에 대하여 그림 9, 10에 나타냈으며, 구동 속도에 따른 전류 리플률을 비교한 결과를 Table. 2에 정리하였다.

Method 1의 경우, ZCP 추정 오차로 인해 ZCP간의 주기가 일정하지 않다. 따라서 실제 전류의 전환 이루어져야 하는 시점 보다 빠르거나 느린 시점에서 전류의 전환이 이루어져 전류의 리플률이 크게 나타난다.

반면, 필터를 적용한 Method 2의 경우 ZCP의 추정 오차의 저감으로 인한 전류 리플이 감소하며, 500, 1500, 2500[rpm]에서 각 각 24.0, 5.8, 16.9[%] 감소하였다.

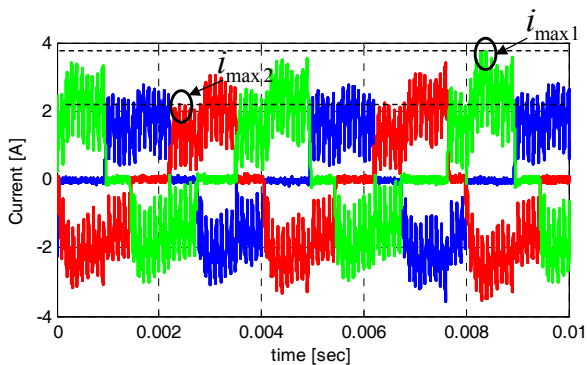


그림 9 2500[rpm] 구동 시 필터를 적용하지 않은 경우 3상 전류 파형 (Method 1)

Fig. 9 3-phase current wave without filter at 2500[rpm] (Method 1)

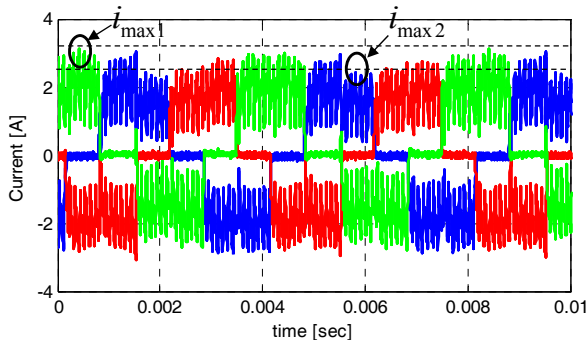


그림 10 2500[rpm] 구동 시 필터를 적용한 경우 3상 전류 파형 (Method 2)

Fig. 10 3-phase current wave with filter at 2500[rpm] (Method 2)

표 2 전류의 리플률

Table 2 Ripple factor of current

Speed [rpm]	Method 1 [%]	Method 2 [%]
500	50.3	26.3
1500	24.2	18.4
2500	39.3	22.4

#### 4. 결 론

이 논문은 BLDC 전동기의 센서리스 구동 시 속도에 따라 차단 주파수가 가변되는 프로그래머블 저역 통과 필터를 속도에 적용하여, 단자 전압의 노이즈로 인한 ZCP 추정 오차가 저감됨을 보였다. 필터를 설계하기 위해 ZCP 주기로 계산되는 속도를 주파수 영역에서 분석하였고, 구동 속도를 기본 주파수로 하는 고조파에서 ZCP 추정 오차가 나타남을 보였다. 이를 바탕으로 속도에 따라 필터의 차단 주파수가 가변되는 프로그래머블 저역 통과 필터를 설계하였고, 실험 결과로부터 제안한 필터를 적용함으로써, 500, 1500, 2500 [rpm]의 속도에서 각 각 전류 리플률이 24.0, 5.8, 16.9[%] 감소함을 보였다. BLDC 전동기 구동에서 전류 리플은 진동, 소음의 원인이 되는 토크 리플을 증가시키는 가장 큰 요인이므로, 제안한 필터를 적용함으로써 BLDC 전동기의 센서리스 구동 시 성능 향상을 기대할 수 있다.

#### 감사의 글

이 논문은 2013-2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음

#### References

- [1] Q. Tran, T. Chun, H. Lee, H. Kim and E. Nho, "Control Techniques of Sensorless BLDC Motor Drive for a Vehicle Fuel Pump Application," Transactions of KIEE, Vol.60, No.10, pp.1858- 1864, 2011.
- [2] H. Kim, J. Bae, J. Jang and I. Joo, "The Characteristic Improvement of the Motor for Electric Compressor by the Lead Angle Control," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.879- 882, 2012.
- [3] S. Kim, S. Jeong, S. Rhyu and B. Kwon, "Reduction of Cogging Torque of BLDC Motor by Sinusoidal Air-Gap Flux Density Distribution," Transactions of KIEE, Vol.56, No.1, pp.57-65, 2007.
- [4] H. Kim, H. Oh, J. Kim and C. Kim "A Study On the Phase Advance Angle of High Speed Operation for 7 Phase BLDC Motor Drives," Transactions of KIEE, Vol.56, No.11, pp.1930-1936, 2007.
- [5] J. C. Moreira, "Indirect Sensing for Rotor Flux Position of Permanent Magnet AC Motors Operating Over a Wide Speed Range," IEEE Trans. Ind. Appl.,

vol. 32, no. 6, pp.1392-1401, Nov./Dec. 1996.

- [6] S. Ogasawara and H. Akagi, "An approach to position sensorless drive for brushless dc motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.27, pp.928-933, Sept./Oct. 1991.
- [7] G. Su and J. McKeever, "Low cost sensorless control of brushless DC motors with improved speed range," IEEE Applied Power Electronics Conference, pp.286-292, 2002.
- [8] D. song, S. Lee, T. Jung, S. Cho, S. Park and D. Kim, "Development of Back-emf Filter Circuit for Driving Sensorless BLDC Motors," Transactions of KIPE, Vol.13, No.1, pp.63-69, 2008.
- [9] R. Carlson, M. Lajoie-Mazenc and J. C. dos Fagundes, "Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 28, no. 3, pp.632-638, 1992
- [10] E. Seo, K. Lee and W. Lee, "The effects of back-EMF signal noise and sampling period for BLDC motor sensorless drives at high speed," KSAE Spring Conference Proceedings, pp.1065-1068, 2013
- [11] H. Yeo, T. Kim, J. Park, K. Lee and J. Yoo, "Performance Enhancement of a Sensorless Drive for Brushless DC Motors using Digital Filter," Transactions of KIEE, Vol.48B, No. 2, pp.63-68, 1999.



**이 우 택 (李 愚 澤)**

1970년 11월 17일 생, 1996년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2002년 동 대학원 자동차공학과 졸업(박사), 현재 창원대학교 제어계측공학과 교수.

Tel : 055-262-7558

E-mail : wootaik@changwon.ac.kr

저 자 소 개



**서 은 정 (徐 銀 正)**

1989년 2월 5일 생, 2011년 창원대학교 제어계측공학과 졸업, 2013년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사)

E-mail : ejseo1989@gmail.com



**이 강 석 (李 康 碩)**

1982년 4월 30일 생, 2008년 창원대학교 제어계측공학과 졸업, 2011년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사), 현재 창원대학교 제어계측공학과 박사과정 대학원생.

E-mail : ks1549@gmail.com