

## 직류단 캐패시터 전단 전류를 이용한 상 전류 추정 알고리즘

이 원<sup>1</sup> · 문종주<sup>2</sup> · 김장목<sup>†</sup>

(Received April 7, 2016 ; Revised May 10, 2016 ; Accepted August 1, 2016)

### Real time phase current estimation for brushless DC motor drive system

#### by using front current of dc-link capacitor

Won Lee<sup>1</sup> · Jong-Joo Moon<sup>2</sup> · Jang-Mok Kim<sup>†</sup>

**요약:** 본 논문은 플래너 버스바가 적용된 BLDC 전동기 드라이브 시스템에서, 직류단 캐패시터 전단 전류를 이용한 BLDC 전동기의 상전류 추정 알고리즘을 제안한다. 플래너 버스바는 기생 인덕턴스의 크기를 최소화하여 스위칭 시 스파크에 의한 소자 파손을 방지하고, EMC (ElectroMagnetic Compatibility) 특성을 향상시킨다. 하지만 플래너 버스바의 장점을 극대화하기 위해서는 직류단 캐패시터의 전단에 전류 센서를 설치할 수밖에 없는 구조적 제약이 따른다. 직류단 캐패시터 전단에 설치된 전류 센서는 캐패시터에 흐르는 전류와 인버터 입력전류의 합을 측정하게 된다. 따라서 직류단 캐패시터 전단 전류로부터 인버터의 입력전류를 정확하게 추출하는 것이 BLDC 전동기의 전류 제어를 위해서는 필수적이다. 본 논문에서는 BLDC 전동기의 온/오프 구간 동안의 등가 회로를 분석하여 캐패시터 전단 전류로부터 인버터 입력 전류를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

**주제어:** 전류 추정 알고리즘, BLDC 전동기, 플래너 버스바, 전원전류

**Abstract:** This paper proposes an estimation algorithm of phase currents of inverter systems with the planar bus bars for brush-less DC (BLDC) motors. The planar bus bar can improve the characteristic of the EMC(Electro-Magnetic Compatibility). In these inverters, a single current sensor of the dc-link measures the sum of a smooth capacitor current and phase currents of brush-less DC motor. Thus, it is essential to extract phase currents from the measured single current to control BLDC motor. Therefore, in this paper, the phase current is estimated by analyzing equivalent circuits of the BLDCM in ON and OFF periods of switching elements. The usefulness of the proposed algorithm is verified through experimental results.

**Keywords:** Current estimation algorithm, Brushless DC motor, Planar bus bar, Source current

## 1. 서 론

BLDC (Brushless DC) 전동기는 사다리꼴의 역기전력을 가지기 때문에 사인파 역기전력을 가지는 영구자석형 동기 전동기에 비해 단위 체적 당 출력 밀도가 높으며 제어에 용이한 장점이 있다. 이러한 BLDC 전동기는 체적 및 중량의 제한이 있는 항공기, 군사 장비 및 수중 운동체의 액츄에이터 또는 추진기 등으로 널리 이용되고 있다. 그에 따라 다양한 설계기법과 제어기법이 연구되고 있다[1]-[3].

일반적으로 BLDC 전동기의 속도와 토크를 제어하기 위해서는 상전류 제어가 필수적이다. 전류 센서를 부착하는 방법은 BLDC 전동기의 3상 중 2개의 상에 전류센서를 부착하거나[4] 직류단에 하나의 전류센서를 부착하는 방식이 있다[5]-[6]. 전자의 방식은 BLDC 전동기의 정역 운전 시

스위칭 패턴에 따른 전류의 재배열 과정이 필요 없기 때문에 개발이 용이하다. 하지만 두 개의 전류 센서를 사용하기 때문에 비용이 증가하는 단점이 있다. 후자의 방식은 시스템의 가격을 줄이고 공간 및 무게를 줄일 수 있지만 인버터의 입력 전류를 이용하여 상전류로 변환해야 하는 단점이 있다. 이러한 단일 전류 센서를 이용한 상전류의 재배열은 매우 널리 알려진 방식이기 때문에 본 논문에서는 기존의 방식을 그대로 사용하였다[6].

제한된 공간 및 중량의 제약을 극복하기 위한 방안의 일환으로 직류단에 케이블을 사용하지 않고 플래너 버스바를 적용하는 연구가 증가하고 있다[7]-[11]. 플래너 버스바는 기생 인덕턴스의 크기를 최소화하여 스위칭 시 스파크에 의한 소자 파손을 방지하고, EMC (ElectroMagnetic

<sup>†</sup> Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6922-0325>): Department of Electrical Engineering, Pusan National University, 63-2, Pusandaehak-ro, Geumjeong-gu, Busan 46241, Korea, E-mail: [jmok@pusan.ac.kr](mailto:jmok@pusan.ac.kr), Tel: 051-510-2366

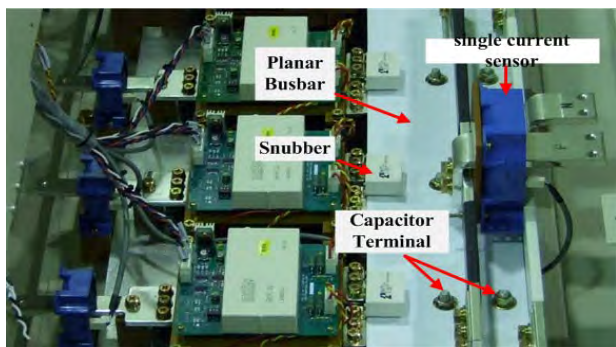
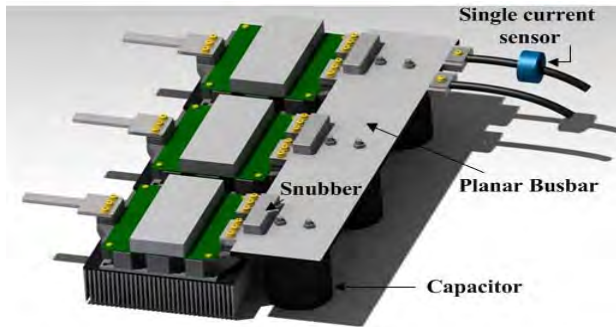
1 Agency for Defence Development, Korea, E-mail: [leewon@add.re.kr](mailto:leewon@add.re.kr), Tel: 055-540-6810

2 Department of Electrical Engineering, Pusan National University, E-mail: [moonjongjoo@gmail.com](mailto:moonjongjoo@gmail.com), Tel: 051-510-2866

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Compatibility) 특성을 향상시킨다[8]-[12]. **Figure 1**은 직류단을 평평한 플레너 버스바로 설계한 예시이다. 이러한 플레너 버스바 시스템의 장점을 극대화하기 위해서는 직류단 캐패시터와 스위치 소자 간의 거리를 '0'에 가깝게 해야 하기 때문에 전류 센서를 **Figure 1**과 같이 캐패시터 전단에 설치할 수밖에 없는 구조적인 제약이 있다. 캐패시터 전단에 설치된 전류 센서는 인버터의 입력전류와 직류단 캐패시터 전류의 합을 측정하므로, 캐패시터로 인한 지연성분을 포함하고 있는 캐패시터 전단에서 측정된 전류는 BLDC 전동기를 제어하기에는 부적합하다. BLDC 전동기의 전류 제어를 위해서는 정확한 상전류 정보가 필수적이다. 이를 위해서 직류단 캐패시터 전단 전류로부터 인버터의 입력전류를 추정하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 온/오프 구간 동안의 등가 회로를 분석하여 캐패시터 전단 전류로부터 인버터 입력 전류를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 인버터 입력전류를 상 전류로 변환하는 알고리즘은 앞서 언급한 기존의 방식을 그대로 사용하였다. 스위칭의 온/오프 시간 및 캐패시터스를 이용하여 인버터의 입력전류를 추정할 수 있다. 제안된 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

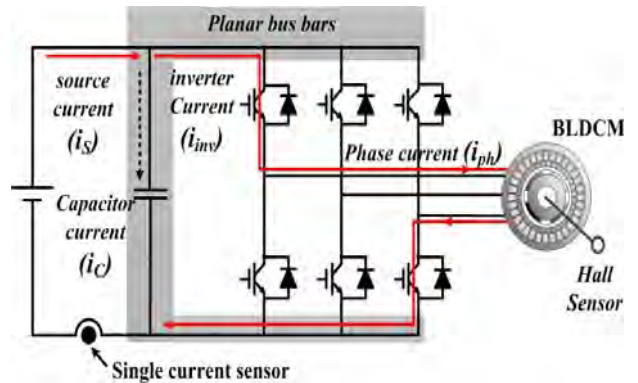


**Figure 1:** Structure of the voltage source inverter system with planar bus bar and current sensor (3D modeling & real products)

## 2. 스위치 온/오프 상태의 해석

3상 BLDC 전동기의 고정자 회로는 3상 Y결선으로 구성되어 있다. 3상 PWM(Pulse Width Modulation) 인버터로 구성된 3상 BLDC 전동기 구동 시스템은 직류 전압원(V)과 직류단 커패시터(C), 단일 전류센서 및 인버터의 스위칭 소

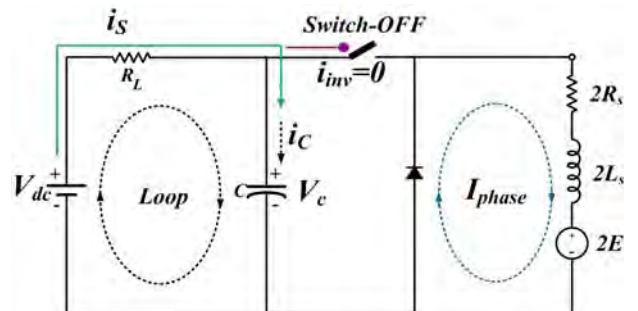
자(Switching Device)인 IGBT와 역방향 다이오드로 구성되고 **Figure 2**와 같이 표현할 수 있다. 본 논문에서는 120° 도통방식으로 구동되는 3상 BLDC 전동기를 기준으로 등가 회로를 모델링 하였다. 플레너 버스바는 회색 음영으로 나타내었으며, 서론에서 언급한 것처럼 이 영역에는 전류센서를 설치할 수가 없으므로 전류센서는 캐패시터의 전단에 설치될 수밖에 없으며 그 결과 캐패시터에 의해 지연된 전류를 획득하게 된다. 이러한 지연된 전류를 본 논문에서는 전원전류로 명명하였다. 실제 전동기로 유입되는 인버터 전류를 추정하기 위해서 스위치의 온/오프 구간의 해석이 필요하다. 스위치가 오프일 때 캐패시터 전압의 변화량을 획득하고, 이것을 이용하여 스위치가 온 일 때 캐패시터의 방전 전류를 구할 수 있으며, 최종적으로 실제 BLDC 전동기에 유입되는 인버터 전류를 추정할 수 있다.



**Figure 2:** 3-phase BLDC motor drive system with planar bus-bar

### 2.1 스위치 오프 구간 해석

**Figure 3**은 **Figure 2**를 등가 모델링하여 스위치 오프 구간에서의 전류 흐름을 나타낸 것이다. 3상 PWM 인버터는 하나의 스위치와 역방향 다이오드로 나타내었고, 직류단은 캐패시터와 전원단 저항으로 나타내었다. BLDC 전동기는 선간 임피던스와 선간 역기전력으로 나타내었다. 스위치가 OFF 구간에서, 인버터 전류( $i_{inv}$ )는 0이고, 전원전류( $i_s$ )는 캐패시터의 충전전류( $i_c$ )와 같다. 그림3의 직류단 전압( $V_{dc}$ ), 선로저항( $R_L$ ), 커패시터(C)로 구성된 회로에 KVL을 적용한 전압방정식은 식 (1)과 같다.



**Figure 3:** Equivalent circuit in the switch-OFF period

$$V_{dc} = R_L i_S(t) + v_c(t) \quad (1)$$

스위치 오프 구간에서 전원전류( $i_S$ )는 캐패시터 전류( $i_C$ )와 같으므로 식 (2)와 같다.

$$i_S(t) = i_C(t) = C \frac{dv_c(t)}{dt} \quad (2)$$

식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같다.

$$V_{dc} = R_L C \frac{dv_c(t)}{dt} + v_c(t) \quad (3)$$

식 (3)의 일반해는 식 (4)와 같다.

$$v_c(t) = V_{dc} - (V_{dc} - V_c(t_0)) e^{-\frac{1}{R_L C} t} \quad (4)$$

여기서,  $v_c(t_0)$ 은 스위치 오프 구간에서 캐패시터 전압의 초기 값이다.

프로세서의 샘플링 포인트인 Figure 4의  $t_1$ 에서 식 (1)과 식(4)는 식 (5)와 식 (6)으로 표현할 수 있다.

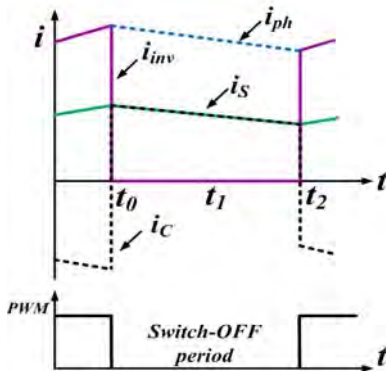


Figure 4: The current flows in the switch-OFF period

$$V_{dc} = R_L i_S(t_1) + v_c(t_1) \quad (5)$$

$$v_c(t_1) = V_{dc} - (V_{dc} - V_c(t_0)) e^{-\frac{1}{R_L C} (t_1 - t_0)} \quad (6)$$

식 (5)를 식 (6) 대입하면 스위칭 오프 구간에서 캐패시터 전압의 초기 값을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_c(t_0) = V_{dc} - R_L i_S(t_1) e^{-\frac{1}{R_L C} (t_1 - t_0)} \quad (7)$$

여기서  $i_S(t_1)$  전류 센서로부터 측정된 값이고,  $R_L$ ,  $C$  는 선로 정수 그리고  $(t_1 - t_0)$ 는 PI 전류 제어기의 출력인 PWM 듀티 비로부터 쉽게 얻을 수 있다. 따라서 캐패시터 전압의 초기 값이 식 (7)에 의해 구해지고 나면, 캐패시터 전압의 최종 값도 식 (8)과 같이 얻을 수 있다.

$$v_c(t_2) = V_{dc} - (V_{dc} - V_c(t_0)) e^{-\frac{1}{R_L C} (t_2 - t_0)} \quad (8)$$

식 (7)과 식 (8)에서 획득된 캐패시터 전압의 초기 값과 최종 값은 스위치 온 구간에서 캐패시터 전압의 변화량과 방전 전류를 구할 때 사용된다.

## 2.2 스위치 온 구간 해석

Figure 5는 Figure 2를 등가 모델링하여 스위치 온 구간에서의 전류 흐름을 나타낸다. 인버터 입력전류( $i_{inv}$ )는 전원전류( $i_S$ )와 캐패시터 방전전류( $i_C$ )의 차와 같다. 또한 이 구간에서 인버터 입력전류( $i_{inv}$ )는 상전류( $i_{ph}$ )와 동일하다.

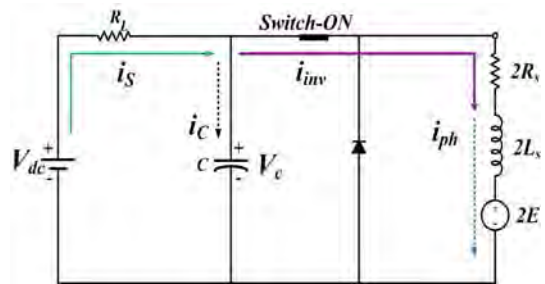


Figure 5: Equivalent circuit in the switch-ON periode

Figure 6은 스위치 온 구간동안의 캐패시터 전류, 전원 전류, 인버터 전류 및 전동기 상전류를 나타낸다. 플래너 버스바 시스템에서, 단일 전류 센서를 이용한 BLDC 전동기의 상전류 복원을 위해서는 Figure 6의  $t_3$  지점에서의 인버터 전류의 추정이 필수적이다. 스위치 오프 구간에서 캐패시터의 충전에 의한 캐패시터 전압 증가량과 스위치 온 구간에서 캐패시터 방전에 의한 캐패시터 전압 감소량이 동일하다고 가정하면 스위치 온 구간의 경우 캐패시터의 평균 전류는 식 (9)와 같다.

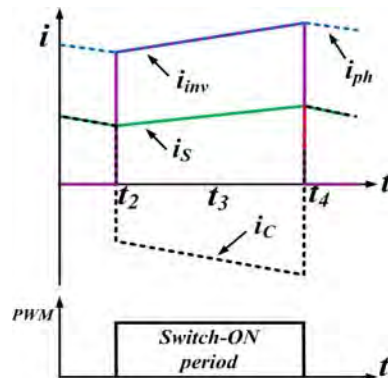


Figure 6: The current flows in the switch-ON period

$$\begin{aligned} i_c(t_3) &= C \frac{dv_c(t_3)}{dt} = C \frac{\Delta v_c(t_{on})}{t_{on}} \\ &= C \frac{v_c(t_2) - v_c(t_0)}{t_4 - t_2} \end{aligned} \quad (9)$$

최종적으로 BLDC 전동기의 상전류를 획득하기 위한 인버터 전류를 식 (10)과 같이 추정할 수 있다.

$$i_{inv}(t_3) = i_S(t_3) - i_C(t_3) \tag{10}$$

### 3. 제안하는 인버터 전류 추정 알고리즘

본 장에서는 2장에서 해석한 BLDC 전동기 드라이버 시스템의 스위치 온/오프 구간의 전류 특성 및 커패시터의 충/방전에 의한 전압 변화량을 이용하여 스위치 온 구간의 인버터 전류를 추정하는 알고리즘을 제안한다.

Figure 7은 스위치 온/오프 1주기 동안의 전원전류( $i_S$ ), 커패시터 전류( $i_C$ ), 인버터 전류 및 커패시터 전압을 나타낸 것이다. Figure 7에 표기된 숫자는 제안된 알고리즘을 구현하기 위해 필요한 정보의 획득 순서이다. Figure 8은 제안된 인버터 전류 추정 알고리즘의 블록 다이어그램을 나타낸다. 먼저  $t_1$  시점에서 커패시터 전단 전류인 전원 전류와 커패시터 양단의 전압을 플레너 버스바 시스템에 설치된 전류 센서와 전압센서로 측정한다.  $t_0$  지점의 스위치 오프 구간의 커패시터 전압의 초기 값  $v_C(t_0)$ 와 최종 값  $v_C(t_2)$ 를 식(7)과 식 (8)을 통해 계산한다. 정상상태에서는, 전류 센서로부터 측정된 전원전류( $i_S(t_1)$ )와 스위치 온 구간에 흐르는 전원전류( $i_S(t_3)$ )는 같다. 그리고 스위치 오프 구간의 커패시터 전압의 증가량과 스위치 온 구간동안의 커패시터 전압의 감소량은 동일하다. 위의 조건에 따라서 스위치 온 구간의 커패시터 전류( $i_C(t_3)$ )는 식 (9)에 의해 쉽게 구할 수 있다. 최종 적으로 식 (10)에 의해 인버터의 입력 전류( $i_{inv}(t_3)$ )가 획득 가능하다. BLDC 전동기의 상 전류는 스위치 온 구간 동안의 인버터 입력 전류와 동일하므로 6개의 IGBT 스위칭 패턴에 따라서 쉽게 재배열 가능하다.

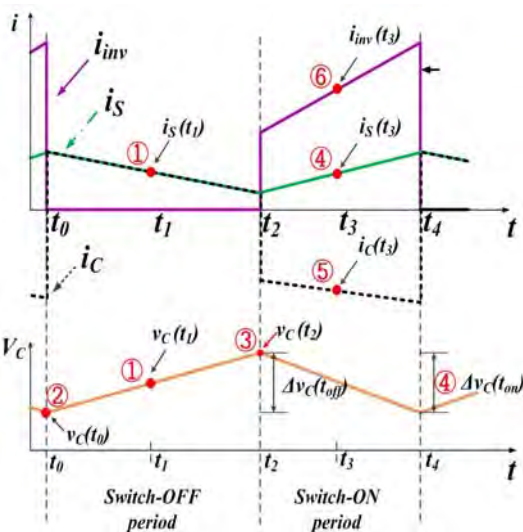


Figure 7: The current flows in the switch-ON/OFF period

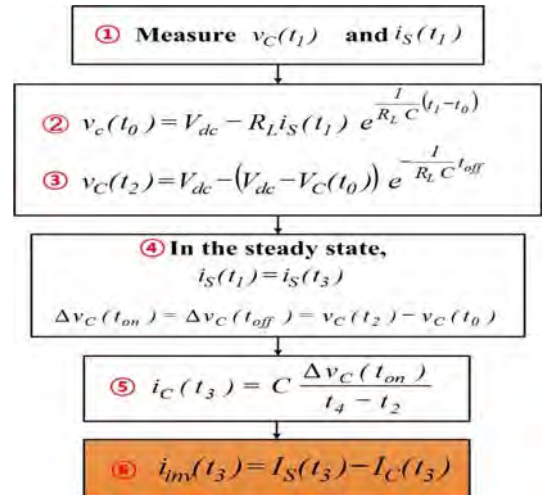


Figure 8: Block diagram for estimation of the inverter current

### 4. 실험

본 논문에서 제안한 인버터 전류 추정 알고리즘을 검증하기 위하여 Figure 9와 같은 전력 회로를 구성하여 실험을 수행하였다. 기본 구성은 100W급 BLDC 전동기와 커플링된 직류 전동기, 3상 PWM 인버터 세트, TI사의 TMS320C28346 기반의 DSP 제어기로 구성되어 있다. 인버터 전류 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 전원 전류( $i_S$ ) 측정과 인버터 전류( $i_{inv}$ ) 측정을 위하여 전류 센서로 LEM사의 LA-25NP를 사용하였다. Figure 10은 실험에 사용된 BLDC 전동기로서 모터 제정수(Parameter)는 Table 1과 같다. Figure 11의 3상 PWM 인버터는 Mitsubishi사의 450V, 50A급 IPM (Intelligent Power Module)을 사용되었다. 스위칭 주파수는 10kHz이고, DSP는 TI사의 TMS320C28346을 사용하였다. 전류제어기의 제어 주기는 100[usec]로 설정하였으며, 속도제어기의 대역폭은 100[Hz]이다. 직류단 전류를 커패시터 전단과 후단으로 나누어 측정하기 위해서 전류센서는 LEM사의 LA25P를 사용하였다.

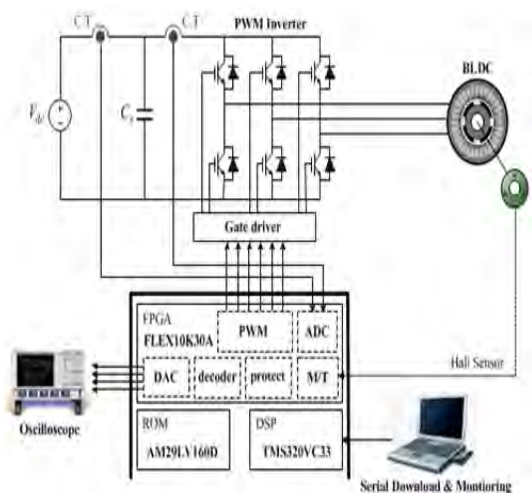


Figure 9: Configuration of the overall experimental system

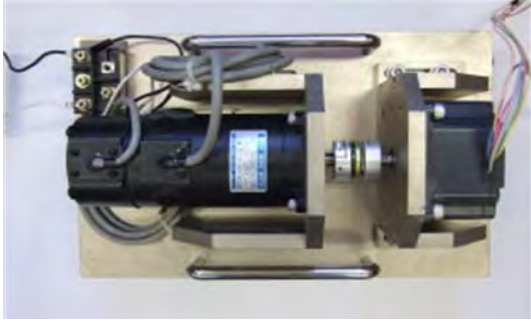


Figure 10: 3-phase BLDC motor

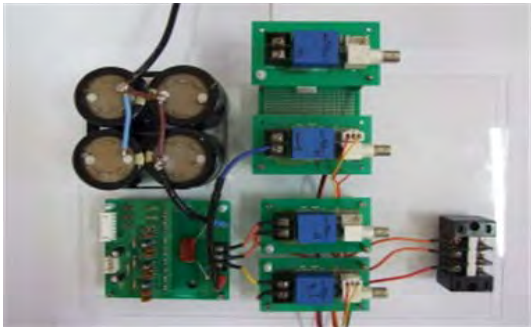


Figure 11: Power conversion system

Table 1: Parameter of BLDCM

Motor Parameter	
Rated Power	100 [W]
Rated Current	5 [A]
Pole	10
Rated Speed	2,500 [rpm]
Phase resistance	0.25 [ $\Omega$ ]
Phase inductance	565 [ $\mu$ H]
Back-emf constant	0.0083 [V/rad/s]
DC-link capacitance	3300 [ $\mu$ F]

Figure 12와 13은 PWM 듀티비 0.25와 0.5일 때의 오픈 루프 방식으로 BLDC 전동기를 구동하였을 때의 전원전류 및 인버터 입력전류를 각각 보여준다. 파형에서 나타난 전류들은 모두 LeCroy사의 전류 프로브를 이용하여 측정된 파형이다. 2장에서 설명한 것과 동일하게 인버터 입력 전류는 스위치 온 구간에서만 전류가 흐르고, 오프 구간에서는 0전류가 흐르는 것을 확인할 수 있다. 또한 전원전류( $i_s$ )는 스위치 온/오프 구간동안 증/감을 반복하며 정상상태일 때의 크기는 동일함을 확인할 수 있다.

Figure 14와 15는 PWM 듀티비가 0.25, 0.5일 때의 인버터 전류를 각각 나타낸다. 측정된 전류는 세 가지 방법으로 측정되거나 추정되었다. 전류 프로브 및 전류 센서를 이용하여 측정된 인버터 전류와 제안된 알고리즘을 통해 추정된 인버터 전류의 크기가 스위치 온 구간에서 정확히 동일함을 알 수 있다.

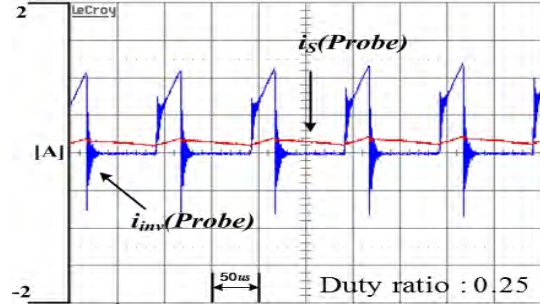


Figure 12: source current and inverter current in 0.25-duty ratio

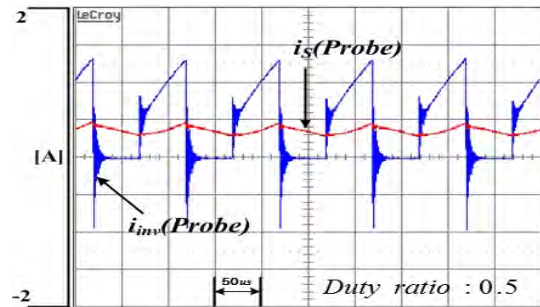


Figure 13: source current and inverter current in 0.5-duty ratio

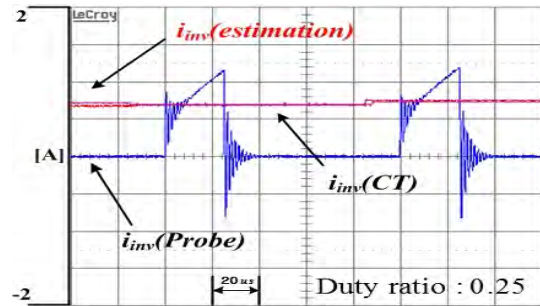


Figure 14: Estimated inverter current and the inverter currents measured by current probe and current sensor in 0.25 duty ratio

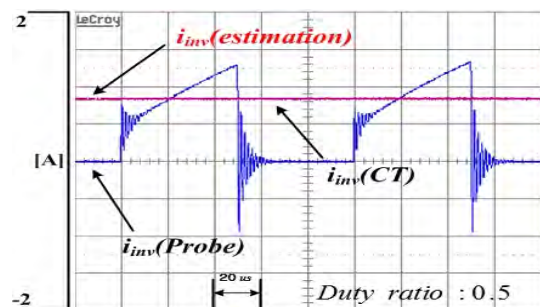


Figure 15: Estimated inverter current and the inverter currents measured by current probe and current sensor in 0.5 duty ratio

Figure 16은 전류 센서로 측정된 인버터 전류를 이용한 BLDC 전동기의 속도 제어 파형이고 Figure 17은 본 논문에서 제안된 알고리즘을 통해 추정된 인버터 전류를 이용한 BLDC 전동기의 속도 제어 파형이다. 두 가지 실험 조건 모두 동일한 속도/전류 제어기 이득을 적용하였다.

제안한 인버터 전류 추정 알고리즘을 이용하여 BLDC 전동기의 속도제어가 지령을 잘 추종함을 Figure 17을 통해 확인할 수 있다.

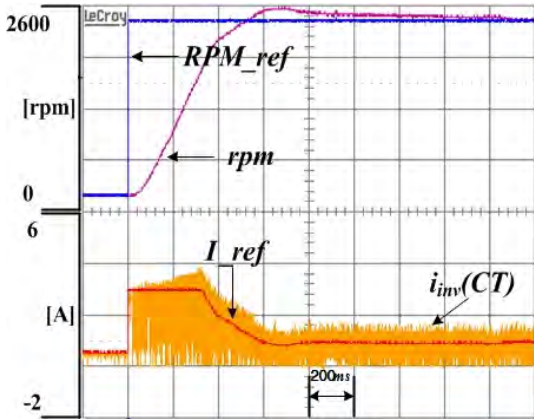


Figure 16: Speed control by using the measured inverter current

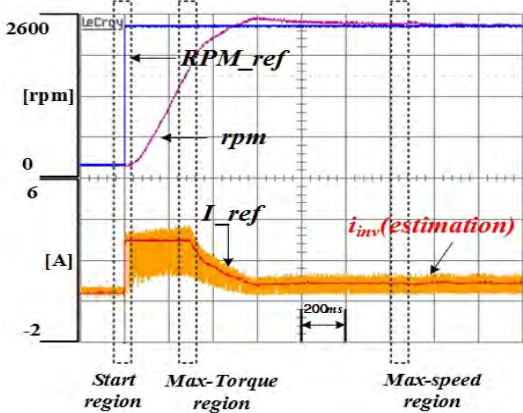


Figure 17: Speed control by using the estimated inverter current

Figure 17은 기동 구간, 최대 토크 구간 및 최대 속도 구간으로 세 단계로 나눌 수 있다. Figure 18, 19 및 Figure 20은 기동 구간, 최대토크 구간 및 최대 속도 구간에서의 추정된 인버터 전류와 전류 지령을 나타낸다. 기동 구간에서는 속도가 저속이기 때문에 전류 지령을 추정 전류가 잘 추종함을 Figure 18을 통해 확인할 수 있다. 또한 전류구간(commutation)마다 나타나는 맥동도 센서로 제어되는 실험 파형과 유사한 것을 확인할 수 있다.

Figure 18은 기동 구간에서의 전류지령 및 추정 전류 파형이다.

Figure 19는 최대 토크 구간에서의 전류 지령 및 추정 전류 파형이다. 30[V]로 제한된 직류단 전압 조건하에서 전동기가 정격 속도 운전하기 때문에 전압의 여유가 부족한

영역이다. 그렇기 때문에 추정 전류가 전류지령을 순시적으로 추종하지 못하고 평균적으로 추종함을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 Figure 16과 같이 전류 센서를 이용했을 때에도 나타난다.

Figure 20은 BLDC 전동기의 최대 속도에서 운전할 때의 전류 지령 및 추정된 인버터 전류 파형이다. 샘플링의 횟수가 부족한 고속 영역에서도 전류 지령을 중심으로 일정한 밴드 내에서 전류가 맥동하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 현상은 전류 센서를 이용하여 제어하는 결과 파형인 Figure 16에서도 동일한 현상이 발생한다.

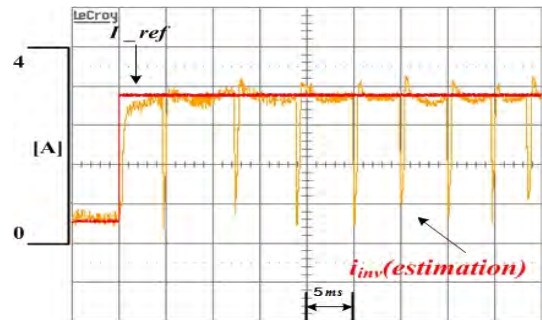


Figure 18: Estimated inverter current and current reference in the starting region

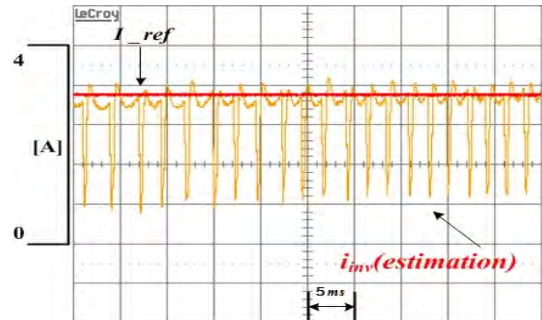


Figure 19: Estimated inverter current and current reference in the maximum torque region

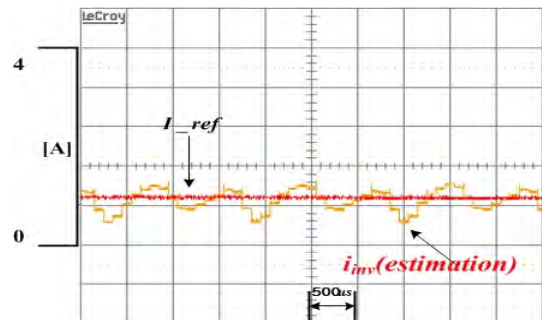


Figure 20: Estimated inverter current and current reference in the maximum speed region

제안된 인버터 전류 추정 알고리즘에 사용된 BLDC 전동기의 등가회로 해석은 정확히 2상 도통일 경우에만 수행되었다. 따라서 3개의 상전류가 모두 도통되는 전류구간(commutation)에서는 2상 도통 시의 등가회로와 달라지기

때문에 추정전류와 실제 전류의 오차가 필연적으로 나타날 수밖에 없다. Figure 21은 전류 구간에서의 추정된 인버터 전류와 측정된 인버터 전류 사이의 오차를 보여주는 파형이다. 점선으로 표시된 전류 구간에서 추정된 전류가 오차를 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

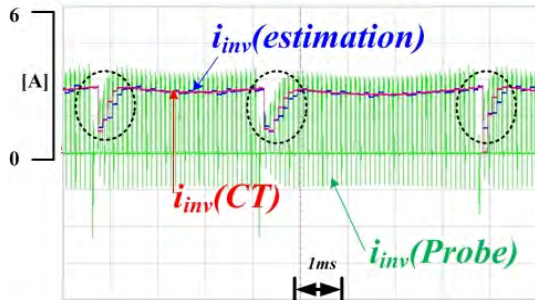


Figure 21: Estimated inverter current, the measured inverter currents by the current probe and current sensor

### 5. 결 론

본 논문은 3상 BLDC 전동기 구동 시스템의 직류단 캐패시터 전단 전류를 이용하여 인버터 입력전류를 추정하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 BLDC 전동기의 스위치 온/오프 구간동안의 등가회로를 해석하여 구현가능하다. 제안된 전류 추정 방식은 2상 도통 구간에서만 정확한 전류 추정이 가능하며 3상 전류가 모두 도통되는 전류 구간에서는 약간의 오차를 포함한다. 하지만 그 오차의 크기가 크지 않으며, 오차가 발생하는 시간 또한 매우 짧기 때문에 BLDC 전동기의 속도 제어에 큰 영향을 주지 않음을 실험을 통해 확인하였으며, 최종적으로 제안된 인버터 전류 추정 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 입증하였다.

### 후 기

이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

본 논문은 BK21플러스, IT기반 융합산업 창의인력양성 사업단에 의하여 지원되었음.

### References

[1] N. H. Kim, O. Yang, and M. H. Kim, "BLDC motor control algorithm for industrial applications using a general purpose processor," *Journal of Power Electronics*, vol. 7, no. 2, pp. 132-139, 2007.

[2] W. S. Im, J. P. Kim, J. M. Kim, and K. R. Baek, "Torque maximization control of 3-phase BLDC motors in the high speed region," *Journal of Power Electronics*, vol. 10, no. 6, pp. 717-723, 2010.

[3] H. W. Kim, H. K. Shin, H. S. Mok, Y. K. Lee, and K. Y. Cho, "Novel PWM method with low ripple

current for position control applications of BLDC motors," *Journal of Power Electronics*, vol. 11, no. 5, pp. 726-733, 2011.

[4] J. J. Moon, H. J. Heo, and J. M. Kim, "Sensorless control of BLDC motor using d-q synchronously rotating reference frame concept," *Transaction of Korean Institute of Power Electronics*, pp. 232-238, 2015.

[5] Y. D. Son and G. S. Han, "Simulation of speed control system for brushless DC motor drives using a single DC current sensor," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 27-28, July, 2011.

[6] D. J. Baek, C. H. Won, K. B. Lee, I. Choi, J. H. Song, and J. Y. Yoo, "Torque ripple reduction of BLDC motors using single DC-link current sensor," *The Korean Institute of Electrical Engineers*, pp. 974-976, July, 2001.

[7] F.Zare, G. F. Ledwich, "Reduced layer planar busbar for voltage source inverters," *IEEE TRANSACTION ON POWER ELECTRONICS*, vol. 17, no. 4, pp. 508-516, 2002.

[8] M. C. Caponet, F. Profumo, R. W. De Doncker, A. Tenconi, "Low stray inductance bus bar design and construction for good EMC performance in power electronics circuits," *IEEE Transaction on POWER ELECTRONICS*, vol. 17, no. 2, pp. 225-231, 2002.

[9] L. Yuan, H. Yu, X. Wang, and Z. Zhao, "Design, simulation and analysis of the low stray inductance bus bar for voltage source inverters," *International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-5, 2011.

[10] Z. Qiu, H. Zhang, and G. Chen, "Study and design of noninductive bus bar for high power switching converter," *Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC)*, vol. 2, pp. 1-4, 2006.

[11] Z. Wang and G. Chen, "Study on planar busbar regarding stray inductance minimization and oscillation suppression for high power converter," *International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, IEEE, pp. 1-7, 2009.

[12] X. Zhu, D. Su, Y. Zhang, and L. Wei, "Bus bar design for EMC performance of power converters in fuel cell electric vehicles," *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety(ICVES)*, pp. 144-147, 2006.