

직류단 1-선트 전류 측정 영역 확장을 위한 고속 BLDC 전동기의 혼합 PWM 제어 방법

박귀열*, 허남*, 박형석**, 허홍준**, 김장목**
*현대위아(주) PT전장개발팀, **부산대학교 전기공학과

A Combining PWM Control Method of High-speed Brushless DC Motor for Expansion of DC-link 1-Shunt Current Sensing Region

Gui Yeol Park*, Nam Heo*, Hyung Seok Park**, Hong Jun Heo** and Jang Mok Kim**
*Hyundai Wia Corp., **Pusan National University

ABSTRACT

본 논문에서는, 직류단 1 선트 전류 측정을 이용하는 고속 BLDC 전동기 운전 시스템의 제어 성능 향상 및 전류 측정 영역 확장을 위한 제어 방법을 제안한다. 고속 BLDC 전동기의 PWM 기법과 그에 따른 직류단 1 선트 전류 측정 방법 및 측정 영역을 분석하고, 측정 가능 범위를 수식적으로 정리한다. 제안된 제어 방법은 전류 맥동 감소 및 고속 운전 정밀도 향상에 적합한 PWM 기법과 직류단 1 선트 전류 측정 범위가 넓은 PWM 기법을, 정리된 수식을 바탕으로 운전 영역에 따라 사용하여 제어 성능을 향상 시킨다. 계산 데이터 및 실험 결과를 통해 제안된 방법의 효용성을 확인한다.

1. 서론

빠른 응답성과 넓은 운전 영역이 요구되는 고속 BLDC 전동기 운전 시스템은 전동기의 관성과 전기적 인덕턴스가 매우 작기 때문에 전류 맥동이 매우 크고, 이는 전기적 시스템의 스트레스와 기계적 진동 및 소음을 유발한다. 고속 영역에서는 제어 정밀도 부족 문제도 발생 가능하다.

또한, 가격 절감 및 시스템 축소를 위한 직류단 1 선트 전류 측정에서, 전력 스위치 소자의 스위칭 지연 시간으로 인해 선트 전류 측정이 불가능한 영역이 존재하며, 영역의 범위는 동일 스위칭 지연시간 조건에서 PWM 기법의 종류와 스위칭 주파수에 따라 달라진다.

따라서 직류단 1 선트 전류 측정을 이용하는 고속 BLDCM 운전 시스템의 제어 성능 향상을 위해, PWM 기법에 따른 직류단 1 선트 전류 측정 방법을 분석하고, 전류 측정 영역에 대한 수식적 정리가 필요하다. 또한, 고속 운전 제어가 고려되면서 전류 측정 영역 확장을 위한 제어적 방안이 요구된다.

2. 본론

2.1 PWM 기법과 1-선트 전류 측정

다양한 BLDCM의 PWM 기법들 중 *Unified Bipolar PWM* 기법은 일반적인 *Unipolar type PWM* 기법들과 달리, 기법 특성상 상, 하단 스위치를 인터리브하게 교대로 스위칭 동작한다. 그에 따라 동일 스위칭 주파수 조건에서 2배 주파수의 전류가 생성되기 때문에, 고속 BLDCM 운전 시스템의 전류 맥동 감소에 매우 유리하다. 그림 1은 직류단 선트 전류 측정을 이용하는 고속 BLDCM 운전 시스템에서의 *Unified Bipolar PWM* 동작과 직류단 선트 전류 측정 방법을 보여준다.^[1]

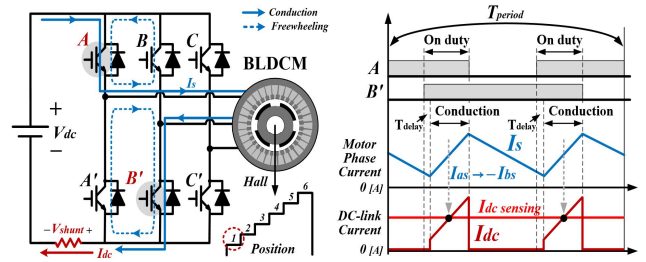


그림 1 Unified bipolar PWM 동작과 직류단 1-선트 전류 측정 방법
Fig. 1 A method of unified bipolar PWM and DC-link 1-shunt current sensing

PWM 기법에 따른 환류 동작과는 무관하게 선트 저항의 위치상 도통 구간에서만 전류 측정이 가능하다. 일반적인 *Unipolar PWM* 기법들은 스위칭 한 주기에 한 번 도통 동작하므로 한 번의 전류 센싱이 가능한 반면, *Unified Bipolar PWM* 기법은 절반으로 나누어진 두 번의 도통 동작으로 한 주기에 두 번의 전류 센싱이 가능하며, 이로 인해 전류 맥동의 감소뿐만 아니라 고속에서 제어 정밀도 또한 향상되는 장점이 있다. 그러나, 이러한 2분할 도통은 동일 듀티비 조건에서 유효 전압 인가 시간이 절반 이하로 감소되고, 스위칭 지연 시간이 2배로 필요하므로, 직류단 1 선트 전류 측정 불가능 영역이 증가하는 단점을 가진다.

2.2 1-선트 전류 측정 영역에 대한 분석

직류단 1 선트 전류 측정이 가능한 실제 도통 구간은 PWM 듀티비(혹은 MI)와 스위칭 주파수, 그리고 스위칭 지연시간(턴온/오프 타임 및 세틀링 타임, 회생 제동을 위한 상보 스위칭 사용 시 데드타임 포함)에 의해 결정되며, 아래 식 (1)과 같이 정리할 수 있다. 여기서, T_{cond} 은 실 도통 시간, f_{sw} 는 스위칭 주파수, D 는 PWM 듀티비, N_{div} 는 PWM 기법에 따른 스위칭 한 주기에서의 도통 횟수, T_{delay} 는 스위칭 지연 시간이다.

$$T_{cond} = \left(\frac{1}{f_{sw}} \times D \right) / N_{div} - T_{delay} \quad (1)$$

$$\text{단, } N_{div} \in \{1, 2\}, 0 \leq D \leq 1$$

$$\begin{cases} T_{cond} > 0 : \text{전류 센싱 가능} \\ T_{cond} \leq 0 : \text{전류 센싱 불가능} \end{cases}$$

계산된 실제 도통 시간 T_{cond} 의 값이 '0'보다 클 경우 전류 센싱이 가능함을 뜻하고, '0' 이하일 경우 도통 시간 확보가 되지 않는 전류 센싱 불가능을 뜻한다. 동일 듀티비 조건에서, 스위칭 주파수와 스위칭 지연시간이

증가할수록 도통 시간이 감소되며, PWM 기법의 도통 분할 횟수에 따라 도통 시간이 크게 감소 될 수 있다.

그러나, 스위칭 지연시간과 스위칭 주파수의 경우, 시스템 사양 설계 단계에서 전력 스위치 소자 특성과 인버터 및 제어 시스템의 사양 등이 고려되어 결정되므로, 제어적 측면에서 스위칭 주파수와 지연시간은 미리 결정된 상수 값으로 볼 수 있다. 따라서, 실제 도통 시간은 듀티비와 PWM 기법에 의해 결정되며, 도통 횟수 차이로 인해 *Unipolar PWM* 기법이 *Unified Bipolar PWM* 기법에 비해 더 낮은 듀티비에서 실제 도통 시간 확보가 가능하다.

아래 그림 2는 식 (1)을 이용하여 PWM 듀티비에 대한 실제 도통 시간을 PWM 기법 및 스위칭 주파수별로 정리한 그래프이다. (스위칭 지연시간 1[us] 조건으로 계산) 실제 도통 시간이 '0' 이하인 붉은색 음영 처리된 영역은 전류 센싱이 불가능한 영역이며, 노란색 음영 처리된 영역은 이론상 전류 센싱은 가능하지만, 실제 전류 센싱 노이즈가 발생할 수 있는 불안정 영역이다. 25kHz 스위칭 주파수 기준으로 *Unipolar PWM*은 듀티비 2.5%에서부터 전류 센싱이 가능한 반면, *Unified Bipolar PWM*은 듀티비 10%에서부터 전류 센싱이 가능한 것을 확인 할 수 있다.

동일한 스위칭 주파수 조건에서 PWM 기법에 따라 선트 전류 센싱이 가능한 영역이 다르며, *Unipolar PWM* 기법이 더 낮은 듀티비에서부터 센싱 가능하여 센싱 영역이 넓은 것으로 확인 할 수 있다.

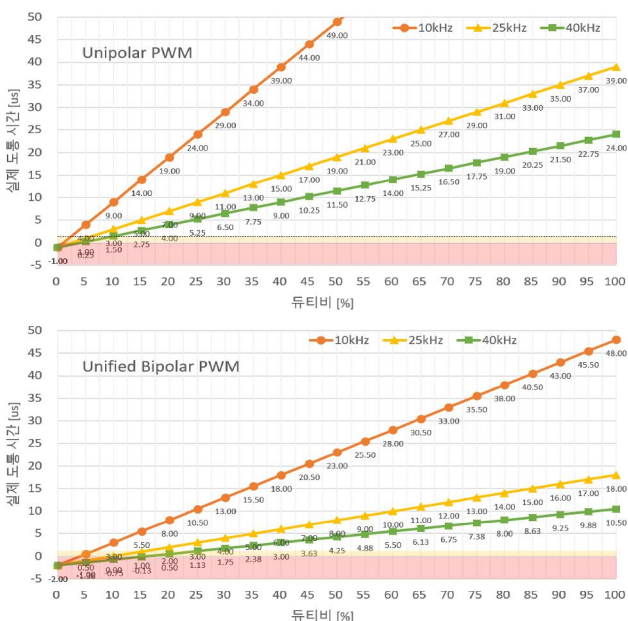


그림 2 스위칭 주파수와 PWM 기법별 1-선트 전류 측정 영역
Fig. 2 A region of 1-shunt current sensing according to switching frequency and PWM method

2.3 BLDCM의 고속 운전 및 1-선트 전류 센싱 영역 확장을 위한 혼합 PWM 제어 방법

고속 BLDCM 운전에서의 전류 맥동 감소 및 제어 정밀도 향상을 위해서는 *Unified Bipolar PWM* 기법의 사용이 적합하지만, 직류단 1 선트 전류 측정 성능에서는 *Unipolar PWM* 기법에 비해 측정 영역이 감소되는 문제를 가진다. 특히 높은

스위칭 주파수의 시스템 일수록 PWM 기법 간의 전류 측정 가능 영역의 범위차가 커진다.

따라서, 본 논문에서는 고속 BLDCM의 전류 맥동 감소와 제어 정밀도 향상을 위해 기본적으로는 *Unified Bipolar PWM* 기법을 사용하되, 듀티비가 낮고 직류단 전류 측정이 불가능한 저속 영역에서는 직류단 전류 측정 영역의 확장을 위해 *Unipolar PWM* 기법을 부분적으로 사용하는 제어 시스템을 제안한다.

그림 3은 제안하는 제어 시스템의 구성도를 보여준다. 디지털 제어기의 전압 지령에 따른 PWM 듀티비가 정해지면 식 (1)을 이용하여 스위칭 주파수와 스위칭 지연시간이 고려된 실도통 시간이 계산되며, 계산된 값에 따라 아래 식 (2)와 같이 다른 PWM 기법으로 PWM 신호를 생성 및 출력한다.

$$\begin{cases} T_{cmd} > 0 : \text{Unified Bipolar PWM} \\ T_{cmd} \leq 0 : \text{Unipolar PWM} \end{cases} \quad (2)$$

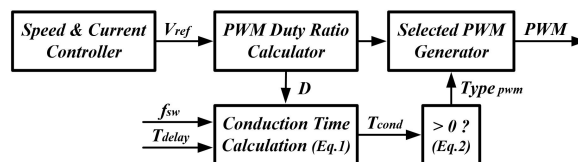


그림 3 제안하는 BLDCM의 PWM 혼합 제어 방법
Fig. 5 Proposed Combining PWM Control Method

2.4 실험 결과

그림 4는 제안하는 알고리즘을 사용하여, 전류 측정 영역에 따라 2가지 PWM 기법이 각각 적용된 1 선트 전류 센싱 및 전동기 운전 실험 파형이다. (스위칭 주파수 25kHz) *Unified Bipolar PWM*의 전류 측정 불가능 영역에서는 *Unipolar PWM*으로 구동되며(좌측), 고속의 전류 측정 가능 영역부터는 *Unified Bipolar PWM*으로 구동(우측)됨을 확인 할 수 있다.

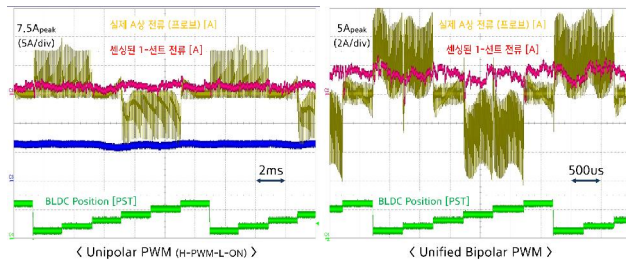


그림 4 제안하는 제어 방법의 실험 결과
Fig. 4 Experimental result of proposed control method

3. 결론

본 논문에서는 고속 BLDCM 운전 시스템의 직류단 1 선트 전류 측정 영역 확장을 위한 혼합 PWM 제어 방법을 제안하였다. BLDCM PWM 기법에 따른 직류단 1 선트 전류 측정 방법 및 그 영역에 대해 분석하고 수식적으로 정리하였다. 또한, 고속 운전 성능 향상과 전류 측정 영역 확장을 위한 제어 방법을 제안하고 실험 결과를 이용하여 효용성을 확인하였다.

참고 문헌

[1] 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 Electron.*, Vol. 11, No. 5, pp. 726-733, 2011.