

직류단 단일 전류 센서를 이용하는 3상 인버터의 평균 전류 복원 가능 영역을 넓히기 위한 PWM 기법

이경식, 김남수, 김태경, 한준호, 박정빈, 이성재, 조동현, 조용규, 최현규
 인천대학교 전기공학과, 다보코퍼레이션

PWM Technique for Expanding the Average Current Reconstruction Region in a Three-Phase Inverter Using a Single DC-Link Current Sensor

Gyeong-sik Lee, Nam-su Kim, Tae-kyung Kim, Jun-ho Han, Jeong-been Park, Sung-jae Lee, Dong-hyun Cho, Yong-gyu Cho, Hyeon-gyu Choi
 Department of Electrical Engineering, Incheon National University, Dabo Corporation

ABSTRACT

본 논문에서는 직류단 단일 전류 센서를 이용하는 3상 인버터 시스템에서 평균 전류 복원 가능 영역을 확장시킬 수 있는 PWM 기법을 제안한다. 일반적으로, 전류 복원 불가 영역을 회피하기 위해서 전압을 주입하는 방법이 널리 사용된다. 하지만 초고속 모터 등 임피던스가 작은 모터에서는 큰 전류 리플이 발생할 수 있으며, 복원된 전류와 실제 전류간의 오차로 인해 제어 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해 스위칭 캐리어의 위상 변동을 이용한 평균 전류 복원 방법이 연구되었다. 하지만 이 방법을 사용하였을 때의 전류 측정 가능 영역은 전동기 저속 영역(저변조 영역)으로 제한된다. 따라서 본 논문은 기존 스위칭 캐리어의 위상 변동을 이용한 평균 전류를 복원하는 방법을 개선 시켜, 평균 전류 복원 가능 영역을 넓히는 전략을 제시한다.

1. 서론

영구자석 동기 전동기(PMSM)는 고효율과 고출력 밀도 등의 이점을 가지고 있어, 산업계에서 널리 사용되고 있다. PMSM 제어 방식으로는 우수한 동적 성능과 저소음을 구현할 수 있는 벡터 제어가 주로 적용되며, 이를 위해서는 정확한 전류 센싱이 필수적이다. 청소기와 압축기와 같은 중소형 제품에서는 그림 1과 같이 부피, 가격 측면에서 유리한 단일 직류단 전류 센서를 이용한다. 그러나 전류 정착 시간, 아날로그-디지털 변환 시간, 데드타임 등의 실질적인 요인으로 인해 전류를 샘플링하는데 필요한 최소시간인 T_{min} 이 확보되지 않아 그림 2(a)와 같이 정상적인 전류 정보를 측정하지 못하는 dead zone 영역이 발생한다.

이러한 경우 일반적으로 그림 2(b)와 같이 최소 전압 주입 기법^[1]으로 dead zone을 회피하는데 이는 지령 전압보다 더 큰 전압을 주입함으로써 추가적인 전류 리플을 발생시킨다. 또한 기존 단일 전류 센싱 방식의 샘플링 지점에 의해 전류 재구성 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 스위칭 캐리어의 위상 변동을 활용한 전류 센싱 방법이 제안되었다. 하지만 이 방법은 전류 측정 가능 영역이 저속 영역으로 제한되는 단점이 존재한다.

본 논문에서는 기존의 스위칭 캐리어 위상 변동을 이용한 전류 센싱 방법에서 dead zone 영역을 줄이고, 전류 측정 가능

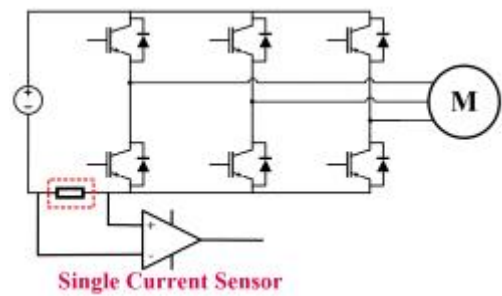


그림 1 단일 직류단 전류 센서를 이용한 3상 인버터
 Fig. 1 3-phase inverter using DC single current sensor sensor.

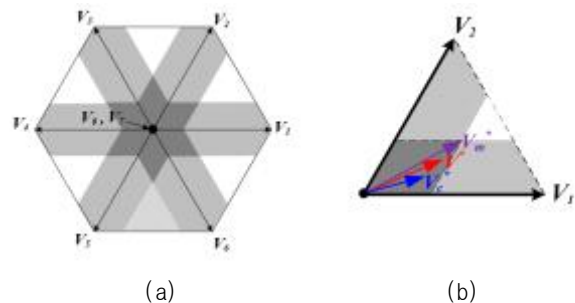


그림 2 (a) 기존 단일 전류 센서 방식의 dead zone (b) 전압 주입 방법
 Fig. 2 Dead Zone in Conventional Single Current Sensor Method (b) Voltage Injection Method.

영역을 중속 영역까지 확장하는 새로운 방법을 제안한다. 제안된 방법을 적용하면 중 고속 영역에서도 전류 재구성 오차를 이론적으로 0으로 유지할 수 있어 제어 성능을 크게 향상시킬 수 있다.

2. 본론

2.1 Switching Signal Split(SSS-PWM)의 한계점

평균 전류를 샘플링 할 수 있는 지점은 기존 SVPWM의 영

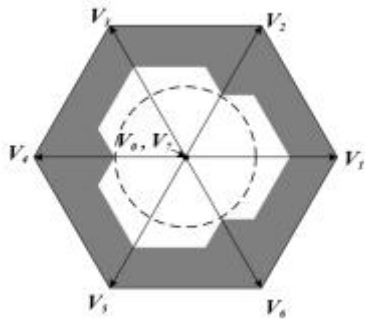


그림 3 SSS-PWM의 Dead Zone
Fig. 3 Dead Zone of SSS-PWM

전압 벡터 인가구간 정가운데로 정해진다.^[2] 따라서 SSS-PWM은 한 샘플링 주기에서 상전압 지령의 중간치인 v_{mid}^* 에 해당하는 캐리어를 반전시키는 SSS-PWM2를 적용하고 다음 샘플링에서 상전압 지령의 최소치인 v_{min}^* 에 해당하는 캐리어를 반전시키는 SSS-PWM3을 적용하여 기존 SVPWM의 영전압 벡터를 유효전압 벡터로 대체한다. 결과적으로, 샘플링 지점을 기존 SVPWM의 영전압 벡터 인가구간 정가운데로 위치시킬 수 있어 평균 전류를 샘플링 할 수 있다.^[3] 하지만 SSS-PWM2를 사용할 경우, 스위칭 주기 정가운데 유효 전압 벡터 인가 시간($T_0/2$)이 짧아 T_{min} 확보가 어렵다. 이러한 이유로 그림 3과 같이 새롭게 생긴 dead zone에 의해 전동기의 중 고속 영역에서는 이 방법을 사용할 수 없다.

2.2 제안하는 Expanded Switching Signal Split (EXSSS-PWM) 방법

기존 연구의 한계점을 개선하기 위해 본 논문에서는 그림 4와 같이 한 스위칭 주기에서 v_{mid}^* 와 v_{min}^* 에 해당하는 캐리어 2개를 반전시켜, 전류 측정 가능 영역을 넓히는 EXSSS-PWM을 사용하고 다음 스위칭 주기에서는 기존의 SSS-PWM3을 사용하여 평균 전류를 측정하는 방법을 제안한다. 전류 복원 방법은 그림 5와 같이 한 스위칭 주기에서 한 상의 전류만 획득하고 다음 샘플링에서 식(1)을 이용하여 전류를 복원한다. 이 방법을 사용하게 되면 스위칭 주기 정가운데 유효전압 벡터 인가 시간이 길어져 기존 방식보다 T_{min} 확보가 유리하다.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (1)$$

2.2.1 DeadZone 영역을 줄이기 위한 새로운 오프셋 전압 도출

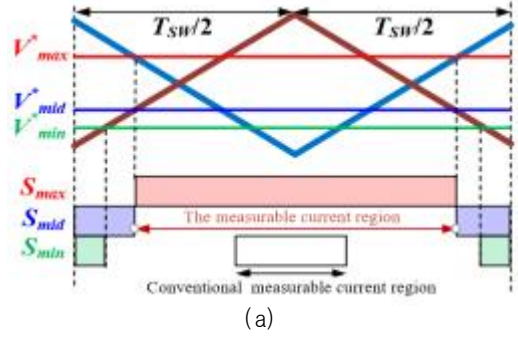
DeadZone 영역을 축소하기 위한 오프셋 도출 전략은 아래와 같다.

- (1) 스위칭 주기 중심에 위치한 유효 전압 벡터를 적용하는 지속 시간을 최대화 한다.
- (2) 중심 유효 전압 벡터가 적용되는 구간에는 스위칭이 발생하면 안된다.

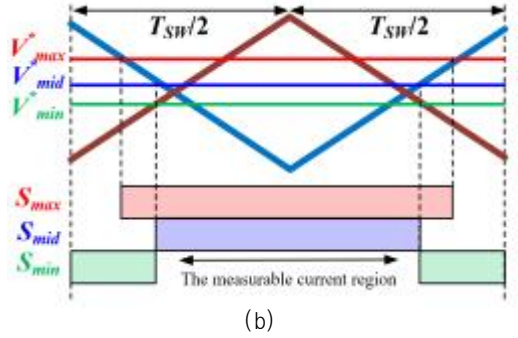
두가지 전략을 만족하는 v_{max}^* (상전압 지령의 최대치)와 v_{mid}^* 는 식(1)과 같으며, 식(2)-(3)를 통해 새로운 오프셋 전압을 도출할 수 있다. 여기서 V_{DC} 는 DC 링크 전압이다.

$$v_{max}^* = -v_{mid}^* \quad (1)$$

$$v_{sn}^* = -\frac{(v_{max}^* + v_{mid}^*)}{2} \quad (2)$$



(a)



(b)

그림 4 EXSSS-PWM의 전략 (a) EXSSS-PWM
(b) SSS-PWM3

Fig. 4 The strategy of EXSSS-PWM Method (a) EXSSS-PWM
(b) SSS-PWM3

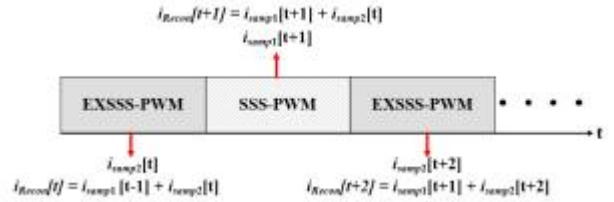


그림 5 EXSSS-PWM의 전류 복원 방법

Fig. 5 Current Reconstruction Method of EXSSS-PWM Method

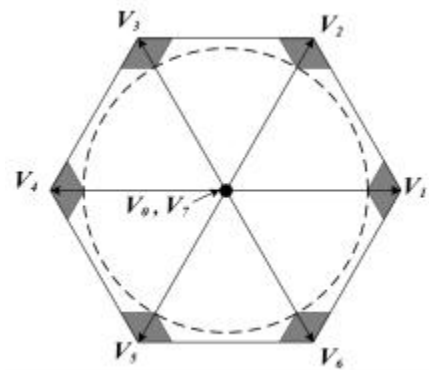


그림 6 EXSSS-PWM의 데드존

Fig. 6 DeadZone of EXSSS-PWM Method

$$v_{sn}^* = -\frac{V_{DC}}{2} - v_{min}^* \quad (\text{if } v_{min}^* + v_{sn}^* \geq -\frac{V_{DC}}{2}) \quad (3)$$

EXSSS-PWM이 적용되는 스위칭 주기에서는 식(3)을 적용하고 SSS-PWM3가 적용되는 스위칭 주기에서는 기존 SSS-PWM의 오프셋 전압을 적용함으로써 DeadZone은 그림 6과 같이 나타나게 된다.

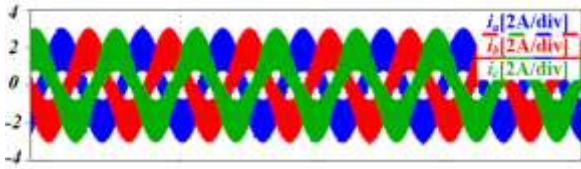


그림 9 제안하는 방식의 실제 3상 전류 파형
Fig. 9 Actual three-phase current waveform of the proposed Method

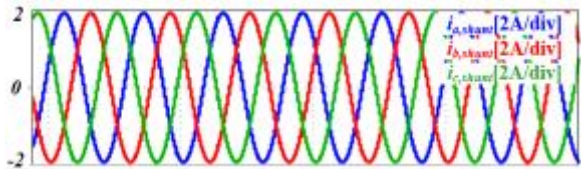


그림 10 제안하는 방식의 3상 복원 전류
Fig. 10 reconstruction three-phase current waveform of the proposed Method

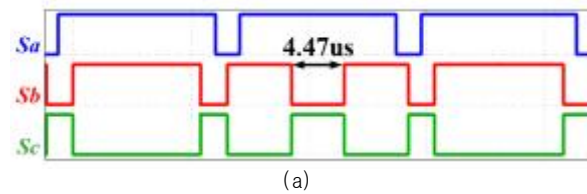


그림 11 중심 유효 벡터 시간 (a) SSS-PWM 방법
(b) EXSSS-PWM 방법

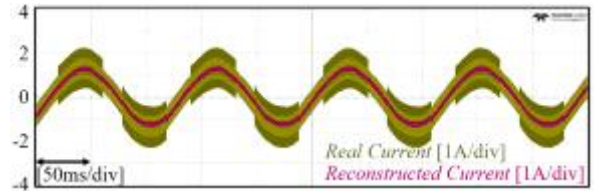
Fig. 11 Central effective voltage vector time
(a) SSS-PWM Method (b) EXSSS-PWM Method

2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

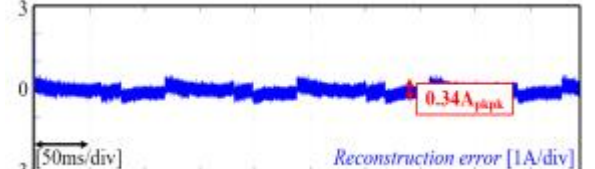
제안하는 평균 전류 복원 기법의 타당성을 검증하기 위해 PLECS 프로그램을 이용한 시뮬레이션과 실제 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 및 실험 파라미터는 표 1과 같다. 그림9-10은 단일 전류 센서 방식을 사용한 3상 인버터로 31 μ H의 매우 낮은 인덕턴스를 갖는 전동기를 구동할 때의 전류 파형이다. 그림 10에 보여진 것처럼 추가적인 전압 주입없이 3상 전류가 복원되는 것을 볼 수 있다. 그림 11은 중 고속 영역에서 기존 방식과 제안하는 방식을 사용하였을 때의 스위칭 파형이다. 그림 11(a)에 보여진 것처럼 기존 방식을 사용하게 되면 중심 유효 벡터 인가 시간이 확보가 되지 않는 반면에 제안하는 방식을 사용할 경우 그림 11(b)에서 보여진 것처럼 중심 유효 벡터 인가 시간이 확보되는 것을 볼 수 있다. 그림 12는 EXSSS-PWM을 실제 전동기 구동에 적용하였을 때의 실험파형이다. 실험 결과에서 보여진 것처럼 전류 복원 오차가 거의 없음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문은 평균 전류를 복원함과 동시에 기존 방식의 Dead Zone을 줄일 수 있는 방법을 제안하였다. 제안된 방법을 사용하면 단일 전류 센서 방식을 사용했을 때 평균 전류를 샘



(a)



(b)

그림 12 실험 결과 (a) 실제 상전류와 복원한 상전류 (b) 복원 오차

Fig. 12 Experiment Result (a) Actual phase current and reconstructed phase current (b) Reconstruction error

플링할 수 있는 전동기 운전 영역을 크게 확보할 수 있다. 또한, 위상 변동된 스위칭 캐리어에 해당시키는 전압을 1개에서 2개로 변화시켜 EXSSS-PWM과 SSS-PWM을 적용하여 비교적 간단하게 구현이 가능하므로 저가형 마이크로프로세서를 통해서도 우수한 제어 성능을 기대할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation parameter

	기호	값	단위
DC 링크 전압	V_{dc}	15	V
극 수	P	2	
권선 저항	R_s	0.26	Ω
인덕턴스(d축, q축)	L_d, L_q	31/31	μ H
스위칭 주파수	f_{sw}	65	kHz

“본 논문은 산업통상자원부와 한국산업기술평가위원회의 “자동차산업기술개발-그린카” (20020719)의 연구결과로 수행되었음”

참고 문헌

[1] J. I. Ha, “Voltage Injection Method for Three-Phase Current Reconstruction in PWM Inverters Using a Single Sensor,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 3, pp. 767-775, 2009, doi: 10.1109/TPEL.2008.2009451.

[2] S. Seung-Ho, C. Jong-Woo, and S. K. Sul, “Current measurements in digitally controlled AC drives,” *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 6, no. 4, pp. 51-62, 2000, doi: 10.1109/2943.847916.

[3] J. S. Hwang, M. S. Chae, and H. G. Choi, “Sensor-Less Drive of Ultra-Low Inductance SPMSM With DC-Link Single Current Sensor,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 78959-78968, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3405401.