

직류단 단일 전류 센서를 이용하는 3상 인버터의 평균 전류 복원을 위한 PWM 기법

황준식, 채민석, 최현규

인천대학교 전기공학과

Novel PWM Strategy for Average Current Reconstruction of 3-Phase Inverter with DC Link Single Current Sensor

Jun-sik Hwang, Min-seok Chae, Hyeon-gyu Choi

Department of Electrical Engineering, Incheon National University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류단 단일 전류 센서를 이용하는 3상 인버터 시스템에서 평균 전류를 복원하는 스위칭 기법을 제안한다. 일반적으로, 전류 복원 불가 영역을 회피하기 위해서 스위칭 전압을 주입하는 방법이 널리 사용된다. 하지만 초고속 모터 등 임피던스가 작은 모터에서는 큰 전류 리플로 인해 복원된 전류와 실제 전류간의 오차로 인해 제어 성능이 저하되는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 스위칭 캐리어의 위상 변동을 이용하여 전류 복원 가능 영역을 확장하는 방법을 제시하고, 샘플링 주파수를 스위칭 주파수의 절반으로 낮춤으로써, 스위칭 주기 내의 평균 전류를 정확하게 측정할 수 있는 방법을 제시한다.

1. 서론

3상 인버터를 이용한 모터 제어 시스템에서 그림 1과 같이 직류단 단일 전류 센서를 이용한 전류 복원 기법은 비용 효율적이고, 회로의 소형화가 가능하여 청소기, 압축기와 같은 중소형 제품에 많이 적용되어 왔다. 이에 따라 3상의 전류를 복원할 수 없는 dead zone을 전압을 주입하여 회피하는 기법들이 연구되어왔다[1]. 그러나 이러한 기법은 평균 전류를 복원하지 못해 복원 오차가 존재한다. 특히, 청소기와 같이 100kr/m 이상의 고속 회전을 하는 경우, 고속 회전 시 제어 성능의 저하를 방지하고자 고속 스위칭 제어를 하는데, 이 경우 스위칭 주기 내 전류를 샘플링하는데 필요한 최소시간인 T_{min} 의 크기가 지배적이다. 따라서 dead zone 영역이 확장됨에 따라 이를 회피하기 위한 더 큰 전압 주입이 필요하고 이는 토크 리플을 발생시킨다[2]. 따라서 본 논문에서는 고속 스위칭 시에도 dead zone 회피가 가능한 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 제안하고, 이를 통해 제어의 정확성을 향상시키는 방안을 제안한다.

2. 본론

1.1 각 영역별 데드존 발생 요인

단일 전류 센서를 사용하여 전류를 복원할 때, dead zone은 그림2(a)와 같이 나타나는데 3상 인버터 전압 지령의 최대, 중간, 최소치인 v_{max} , v_{mid} , v_{min} 에 따라 발생한다. 전체 dead zone 중 그림2(b)의 영역은 v_{max} 와 v_{mid} 크기 차이가 작아 T_{min} 이 확보되지 않는 영역이고, 그림2(c)의 영역은 v_{mid} 와 v_{min} 의 크기 차이가 작아 T_{min} 이 확보되지 않는 영역이다. 육각형 중심 부근의 육각별 모양 dead zone은 두 영역 모두에서 T_{min} 이 확보되지 않는 구역이다. 따라서 다음 섹션에서는 전류를 원활하게 복원하기 위하

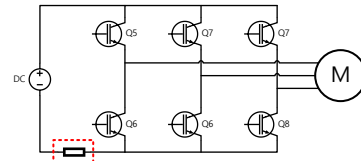


그림 1 직류단 단일 전류 센서를 사용하는 3상 인버터.

Fig.1 3-phase VSI (Voltage source inverter) utilizing dc current sensor.

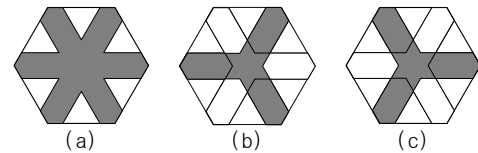


그림 2 직류단 단일 전류센서 이용 시 전류 복원 불가 영역

(a) 전체 dead zone, (b) v_{max} 와 v_{mid} 에 의한 dead zone, (c) v_{mid} 와 v_{min} 에 의한 dead zone

Fig.2 Current immeasurable area of a single current-shunt inverter (a) Entire dead zone, (b) dead zone by v_{max} and v_{mid} , (c) dead zone by v_{mid} and v_{min}

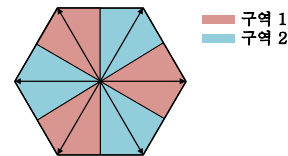


그림 3 제안하는 방법의 전압에 따른 PWM 선정 구역

Fig.3 Voltage region selecting PWM method in proposed method.

여 각 dead zone이 생기는 이유에 대해 분석하고 이에 대응하는 방법을 제안할 것이다.

1.2 제안하는 PWM 기법 및 평균 전류 추정을 위한 샘플링 타이밍

기존의 SVPWM(Space Vector PWM)방식으로 인버터를 구동 시, 그림2의 표시된 구역에서 유효벡터 인가시간이 짧아져 dead zone이 생기는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 영벡터 구간을 대신하여 유효전압 벡터를 인가하는 AZSPWM(Active Zero State PWM)방식을 이용하여 기존 SVPWM 스위칭 방식에서 영벡터였던 구간에 i_{dc} 를 샘플링하여 3상의 전류를 복원하는 방식을 제안한다. 본 방식을 이용하면 복잡한 연산 없이 그림3과 같이 전체 주기에서 오직 2개의 구간

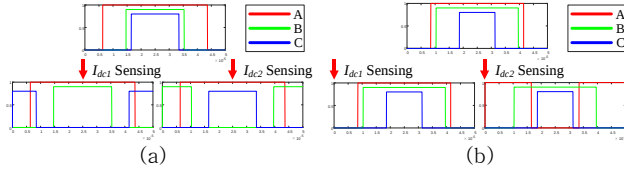


그림 4 (a) $\theta_e = 10^\circ$, (b) $\theta_e = 50^\circ$ 일 때, 기존 방법 (위쪽)과 제안하는 방법 (아래쪽)에서의 PWM 파형.

Fig.4 PWM waveform of the conventional (upper) and proposed method (lower) at $\theta_e = 10^\circ$ and 50°

표 1 제안하는 방식의 dc 전류와 상전류 관계

Table 1 Current sensing table of the proposed method

구역	각도 [°]	i_{dc1}	i_{dc2}	구역	각도 [°]	i_{dc1}	i_{dc2}
1	0~30	$-i_c$	$-i_b$	2	180~210	i_c	i_b
2	30~60	i_a	i_b	1	210~240	$-i_a$	$-i_b$
2	60~90	i_b	i_a	1	240~270	$-i_b$	$-i_a$
1	90~120	$-i_c$	$-i_a$	2	270~300	i_c	i_a
1	120~150	$-i_a$	$-i_c$	2	300~330	i_a	i_c
2	150~180	i_b	i_c	1	330~360	$-i_b$	$-i_c$

만 나누어 주면 된다. 아래 절에서 dead zone을 회피하는 방식을 그림3의 구역에 따라 나누어 소개할 것이다.

1.2.1 구역1

구역1에서는 v_{mid} 과 v_{min} 의 크기가 비슷해서 그림4(a)의 위쪽 그래프와 같이 유효전압이 작아지는 구간이 발생한다. 만약 v_{min} 에 의한 스위칭을 중앙이 아닌 양쪽 끝으로 대칭이 되도록 인가하면 그림4(a)의 왼쪽 그래프와 같이 되고, v_{mid} 에 의한 스위칭을 양쪽 끝으로 인가하면 그림(4)의 오른쪽 그래프와 같은 스위칭 파형이 된다. 따라서 두 방식을 교번하며 적용하면 스위칭 주기의 중앙 지점에서 직류단 전류인 i_{dc} 를 샘플링할 수 있다.

1.2.1 구역2

구역2에서는 v_{max} 와 v_{mid} 의 크기가 비슷해서 그림4(b)의 위쪽 그래프와 같이 유효전압이 작아지는 구간이 발생한다. 따라서 구역1과 다르게 v_{max} 와 v_{mid} 에 의한 스위칭을 교번하며 양쪽 끝으로 대칭 인가하면 그림4(b)의 아래쪽 그래프와 같은 스위칭 파형이 된다. 따라서 스위칭 주기의 시작지점에서 i_{dc} 를 샘플링할 수 있다.

이 경우 영벡터는 반대 방향의 두 대칭유효벡터로 대체되며, 따라서 스위칭 주기 내 평균 전압은 동일하게 된다. 대칭 스위칭을 하는 경우 스위칭 주기의 시작지점과 절반지점에서 전류가 평균값을 가지게 되므로 제안하는 방식을 적용하면 상전류의 평균값을 샘플링할 수 있게 된다. 제안하는 방식에서 직류단 전류 센서로부터 얻을 수 있는 전류 정보를 표1에 정리하였다. 제안하는 방식은 기존 SVPWM에서 영벡터가 인가되는 구간에서 직류단 전류를 샘플링한다. 때문에 영벡터 구간이 짧은 MI(Modulation Index)가 높은 구간이 dead zone이 된다.

1.3 시뮬레이션 결과

그림5~8은 100kHz로 고속 스위칭하는 3상 인버터로 인덕턴스 31 μ H인 매우 낮은 전동기를 5kr/m의 속도로 구동할 때의 전류 파형이다. 그림5에 나온 것처럼 별도의 전압 주입이나 추가적인 연산 없이 제안한 방식만으로 3상의 전류를 그림5, 6에 나온 것 같이 복원한 것을 알 수 있다. 기존의 방식은 그림7(b)에 나온 것처럼 평균 전류를 복원하지 못해 실제 전류와 복원된 전류의 위상차가 존재하는 반면, 제안하는 방식은 그림7(a)와 같이 평균 전류를 복원하는 것을 알 수 있다.

3. 결론

본 논문은 직류단 전류 정보를 가지고 제안하는 AZSPWM을 통해 3상 전류의 평균을 복원할 수 있는 방법에 대해 제안하였

표 2 제안하는 방식의 전류 센싱표

Table 2 Current sensing table of the proposed method

	기호	값	단위
DC링크 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}	100	kHz

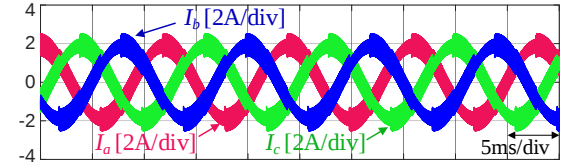


그림 5 제안하는 방식의 실제 3상 전류 파형

Fig.5 Actual three-phase current waveform of the proposed Method

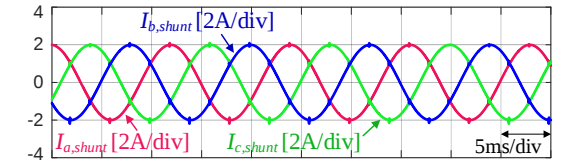
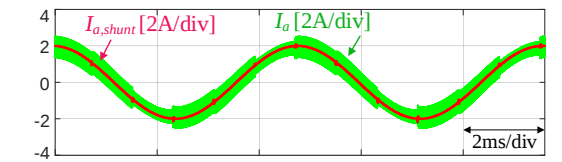
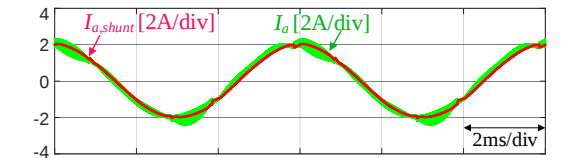


그림 6 복원된 3상 전류 파형

Fig.6 Reconstructed 3-phase current waveform of the proposed method



(a)



(b)

그림 7 실제 상전류와 복원한 상전류의 전류 파형

(a) 제안하는 방식, (b) 기존의 방식

Fig.7 Current waveform of actual phase current and reconstructed phase current (a) Proposed method, (b) Traditional method

다. 지령 전압 벡터에 따라 2개의 구역만 나누어도 3상 전류를 복원할 수 있으므로 간단하게 구현할 수 있고, 상전류의 평균값을 복원할 수 있으므로 저가형 마이크로 프로세서로 좋은 제어 성능을 기대할 수 있다.

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] Y. S. Lai, Y. K. Lin, and C. W. Chen, "New Hybrid Pulsewidth Modulation Technique to Reduce Current Distortion and Extend Current Reconstruction Range for a Three-Phase Inverter Using Only DC-link Sensor," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 3, pp. 1331–1337, 2013, doi: 10.1109/TPEL.2012.2207406.