

상전류 복원 가능 영역을 고려한 3-선트 센싱 인버터에서의 60° DPWM

이주현, 조제형, 강정일
삼성 전자

60° DPWM in 3-shunt sensing inverter considering phase current reconstruction region

Joohyun Lee, Je-Hyung Cho, Jeong-Il Kang
Samsung Electronics

ABSTRACT

본 논문에서는 3-선트 방식으로 상전류를 측정하는 인버터에서 60° DPWM을 적용하는 경우의 상전류 복원 가능 영역에 대해서 분석한다. 60° DPWM을 3-선트 센싱 인버터에 적용할 경우, SVPWM 대비 상전류 복원 가능 영역이 감소한다. 특히 낮은 MI영역에서도 상전류 복원 불가능 영역이 발생하게 된다. 본 논문에서는 60° DPWM 적용 시의 전류 복원 불가능 영역을 전압 평면 상에 도시하고 이를 기반으로 운전 방법을 제안하였다. 제안된 분석은 시뮬레이션 및 실험으로 검증하였다.

1. 서론

전동기 구동이나 회로 보호를 위해서는 상전류 측정이 필수적이다. 기존에 여러가지 상전류 측정 기술들(홀 효과 센서, 셉트 등)이 검토되었다. 이 중 셉트 저항을 이용한 측정 방식은 회로에 저항을 삽입함으로써 추가적인 손실을 야기하지만, 다른 방식에 비해 저렴하다는 장점이 있다. 이로 인해 가전 산업 분야에서 널리 사용되고 있다.

셉트 센싱 방식에 대해 기존에 여러 방면으로 연구된 바 있다 [1]-[3]. 각 인버터 레그의 전류를 측정하는 3-선트 센싱 인버터(3-shunt sensing inverter, TSSI)와 DC link 전류만을 측정하는 1-선트 센싱 인버터(1-shunt sensing inverter, SSSI)가 있다. SSSI는 유효 전압 벡터가 인가되었을 때, DC link 전류를 측정하여 상전류를 복원한다. 특히 낮은 MI영역에서 측정 불가능 영역(DZ, dead zone)이 생기는데, 측정을 위한 전압을 주입하여 이를 회피하는 방법들도 제안되었다 [1]. 이에 반해 TSSI는 각 상의 전류를 직접 측정하기 때문에 구현이 상대적으로 간단하다. 따라서 셉트 저항에 의한 추가적인 손실에도 불구하고, 특히 저전류 응용에서는 TSSI가 사용되기도 한다.

TSSI는 영벡터 중 모든 스위치를 끄는 (000) 벡터 인가 시에 3상 전류를 모두 읽을 수 있기 때문에 SSSI에 비해 DZ이 좁다 [1]. 참고문헌 [2]은 샘플링 시점에 따라 DZ이 달라짐을 보이고, DZ을 최소화 하기 위해 캐리어의 피크 대신 다른 시점에 샘플링 할 것을 제안하였다. 또한 [3]에서는 SVPWM (Space-vector pulse-width modulation)과 120° off DPWM (Discontinuous PWM)시에 DZ이 달라짐을 보이고, 전압 주입을 통해 이를 최소화 할 수 있는 방법을 제안하였다. 영벡터의 인가 방식에 따라 DZ이 달라지는 TSSI에서는 SSSI와 달리 PWM 방법에 따라 DZ이 변화하게 된다. 그러나 기존에는 60° DPWM을 적용했을 때의 DZ에 대해 분석된 바가 없다.

본 논문에서는 TSSI에 60° DPWM을 적용했을 때의

DZ이 어떻게 형성되는지 분석하였다. 일반적으로 TSSI에서 적용되었던 SVPWM과는 달리 저속 운전 영역에 추가적인 DZ이 발생함을 확인하고, 이를 기반으로 운전 가능 영역을 수식적으로 계산하였다. 제안된 분석은 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었다.

2. SVPWM 시의 상전류 측정 불가능 영역

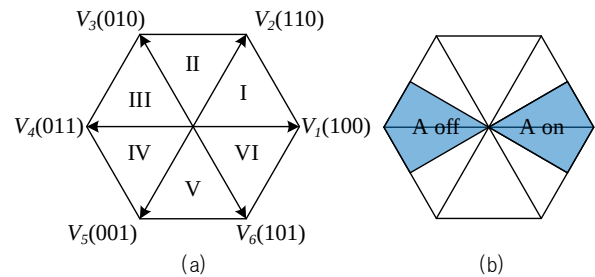


그림1 (a) 전압 육각형과 (b) 60° DPWM

Fig.1 (a) Voltage hexagon and (b) 60° DPWM

그림 1(a)에 3상 2레그 인버터로 합성 가능한 유효 전압 벡터가 나타나있다. 전동기 구동 시, 인접한 2개의 유효 벡터와 두 개의 영벡터 (000)과 (111)을 이용하여 필요한 전압을 합성한다. SVPWM은 두 개의 영벡터를 균등하게 사용하고 DPWM은 전압 섹터에 따라 하나의 영벡터를 선택하여 사용한다. 그림 1(b)에 60° DPWM 시에 A상 스위치의 동작이 나타나있다. 이와 같은 동작을 통해 역률이 1인 부하의 경우에는 60° DPWM을 적용하면 스위칭 손실을 저감할 수 있다.

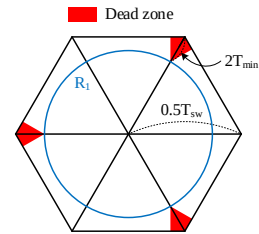


그림2 SVPWM 시의 전류 측정 불가능 영역

Fig.2 Dead zone under SVPWM

[3]에서 SVPWM 시의 DZ에 대해서 분석한 결과가 그림 2에 그려져 있다. 위 그림에서 T_{sw} 는 스위칭 주기, T_{min} 은 전류 측정을 위해 전압 벡터가 유지되어야 하는 최소 시간을 의미한다. 이 때의 운전 가능한 최대 MI (Modulation index)는 다음과 같이 계산된다.

$$MI_{max} = (\frac{2}{3} V_{dc} \frac{R_1}{0.5T_{sw}}) / (\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}). \quad (1)$$

위 식에서 $R_1 = 0.5T_{sw} - 2T_{min}$ 이다.

3. 60° DPWM 시의 상전류 측정 불가능 영역

60° DPWM 시의 DZ에 대한 분석 결과가 그림 3(a)에 그려져 있다. 그림 3(b)에는 전압 육각형의 1번 섹터를 확대하여 나타내었다.

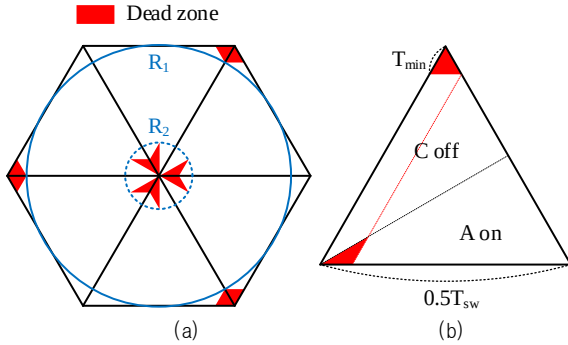


그림3 60° DPWM 시의 전류 측정 불가능 영역. (a) 전체 영역. (b) 섹터 1.
Fig.3 Dead zone under 60° DPWM. (a) Whole area. (b) Sector 1.

60° DPWM시의 DZ은 (000)을 사용하는 구간과 (111)을 사용하는 구간으로 나뉘어서 분석할 수 있다. 우선 (000)을 사용하는 구간에서는 기존에 120° off DPWM과 동일한 DZ을 가진다 [3]. 이 때의 운전 가능한 최대 MI는 식 (1)에 $R_1 = 0.5T_{sw} - T_{min}$ 을 대입하여 계산할 수 있다.

다음으로 (111)을 사용하는 구간에서는 낮은 MI 영역에서 DZ이 발생한다. 이 경우, (000)을 사용하는 구간과는 달리 영벡터 인가 중에는 전류 측정이 불가능하다. 따라서 아랫상 스위치가 2개 켜지는 유효 벡터가 인가되는 시간이 확보되어야 한다. 따라서 그림 3(b)와 같이 한 번의 길이가 T_{min} 인 이등변 삼각형 꼴의 DZ이 생기게 된다. 이를 기반으로 운전 가능한 최소 MI는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$MI_{min} = \left(\frac{2}{3}V_{dc} \frac{R_2}{0.5T_{sw}}\right) / \left(\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}}\right). \quad (2)$$

위 식에서 $R_2 = \sqrt{3}T_{min}$ 이다. 즉 기존에 SVPWM이나 120° off DPWM을 적용할 때와 달리, 스위칭 손실을 최소화하기 위해서 60° DPWM을 적용할 경우 높은 MI 제한 뿐만 아니라 낮은 MI 제한 조건이 발생한다. 따라서 60° DPWM을 적용하는 MI를 제한하거나 기존에 [1], [3] 등에서 제안한 전압 주입을 통한 회피 방법을 응용해서 적용할 필요가 있다. 다만 저속에서 저전류만을 필요로 하는 응용에서는 저속에서 60° DPWM을 적용하더라도 스위칭 손실 저감효과가 크지 않다. 따라서, 전압 주입을 통한 DZ 회피를 구현하기 보다는 저속에서는 SVPWM을 적용하고 MI_{min} 이상일 때부터 60° DPWM을 적용하는 것이 효과적인 운전 전략일 것으로 생각된다.

4. 시뮬레이션 및 실험

그림 3의 분석을 검증하기 위해 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 먼저 앞으로의 결과에서 사용된 전동기 및 시스템 제정수가 아래 표 1에 나타나있다.

표 1 전동기 및 시스템 제정수

Table 1 Motor and system specifications

R_s [Ω]	7.3	V_{dc} [V]	311
L_{ds} [mH]	62	f_{sw} [kHz]	8
L_{qs} [mH]	99	T_{min} [μ s]	16
λ_f [Wb·t]	114	$I_{s,Rated}$ [A]	3

이를 식 (2)에 대입하면 주어진 시스템에서의 MI_{min} 은 0.51이다. 이를 확인하기 위해 시뮬레이션을 진행한 결과가 아래와 같다.

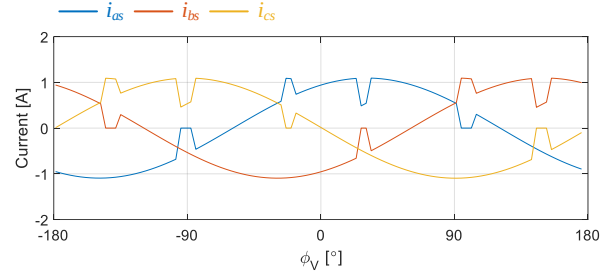


그림4 60° DPWM 시의 시뮬레이션 결과 (MI = 0.4).

Fig.4 Simulation result under 60° DPWM (MI = 0.4).

그림 4에서 가로축은 전압 벡터의 위상각 (ϕ_v)을 나타낸다. 그림 3의 분석 결과에 부합하게 한 주기에 총 6번의 측정 불가능 영역이 나타남을 확인할 수 있다. 그림 4의 시뮬레이션 결과를 실험을 통해 확인한 결과가 아래와 같다.

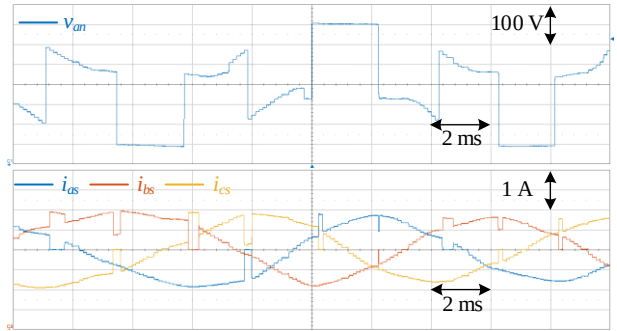


그림5 60° DPWM 시의 실험 결과 (MI = 0.4).

Fig.5 Experiment result under 60° DPWM (MI = 0.4).

5. 결론

TSSI에서는 SSSI와 달리 저전압 영역에서 영벡터 인가 시에 전류를 측정할 수 있다. 이로 인해 SSSI는 상대적으로 PWM 방식에 따라 DZ의 변화가 적지만, TSSI는 DPWM과 같이 (111) 벡터를 사용하는 PWM을 적용할 경우에는 저전압 영역에서도 DZ이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이를 고려하여 TSSI에서는 PWM 방식을 절환할 때 해당 전압 영역을 회피하는 등의 추가적인 구현이 필요하다.

참고 문헌

- [1] J. I. Ha, "Voltage Injection Method for Three-Phase Current Reconstruction in PWM Inverters Using a Single Sensor," in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 24, no. 3, pp. 767-775, Mar. 2009.
- [2] Z. Zhang, D. Leggate and T. Matsuo, "Industrial Inverter Current Sensing With Three Shunt Resistors: Limitations and Solutions," in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4577-4586, Jun. 2017.
- [3] B. G. Cho, J. I. Ha and S. K. Sul, "Analysis of the Phase Current Measurement Boundary of Three Shunt Sensing PWM Inverters and an Expansion Method" *JOURNAL OF POWER ELECTRONICS*, 13(2), 232-242, 2013.