

# 1-shunt 인버터의 스위칭 상태에 따른 새로운 평균 상전류 추정 방법

유재준, 구현근, 염한범, 김장목  
부산대학교 전기전자컴퓨터공학과

## New method of estimating average phase current in accordance with the switching state of the One-shunt inverter

You Jae Jun, Ku Hyun Keun, Yeom Han Beom, Kim Jang Mok  
Department of Electrical and Computer Engineering, Pusan National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 3상 인버터 직류단에 하나의 shunt 저항을 삽입한 1 shunt 인버터의 평균 상전류를 추정하는 새로운 알고리즘을 제안한다. 2개의 영벡터와 6개의 유효전압 벡터의 조합으로 구현되는 SVPWM 방식에서, 각 스위칭 상태에 따른 상전류 기울기를 알 수 있다면, 유효전압 벡터 인가시간을 이용하여 평균 상전류를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 각 스위칭 상태에서의 전류기울기와 인가시간을 이용하여 평균 상전류를 추정하고 이를 일반화 한다. 제안된 알고리즘의 정확성은 실험적 결과를 통해 증명한다.

### 1. 서론

인버터제어를 통하여 모터를 구동하는 벡터 제어를 하기 위해서는 인버터회로에서 전동기로 흐르는 상전류를 감지하는 것이 필수적이다. 감지된 상전류를 이용하여 전류제어기를 통해 토크를 제어하게 된다.

모터 드라이브의 가격 절감이 중요시되는 분야에서는 비싼 전류 센서 대신 가격이 저렴하고 설치가 용이한 셉트 저항을 인버터에 삽입하여 상전류를 획득하는 shunt 알고리즘 개발이 활발히 이루어지고 있다<sup>[1]</sup>. shunt 알고리즘은 인버터에서의 셉트 저항 설치의 위치와 개수에 따라 1 shunt, 2 shunt, 3 shunt로 구분이 되는데 특히 기술적으로 구현이 어렵고 가격 경쟁력을 가질 수 있는 1 shunt 방법에 대해 산업계의 관심이 높아지고 있다.

기존의 1 shunt 인버터에서 상전류를 획득하는 방법은 SVPWM 방식에서 유효전압 벡터가 인가될 때 shunt 저항으로부터 상전류를 획득하였다. 하지만 이러한 방법은 실제 평균 상전류 값과 차이가 있어 전동기 제어를 하는데 있어 성능을 저하시키는 문제점이 발생한다. 본 논문은 1 shunt 인버터의 스위칭 상태에 따른 평균 상전류 추정 방법으로 한 PWM 주기의 유효전압 벡터 구간에서 직류단 셉트 저항에 흐르는 전류를 감지하여 평균 상전류를 추정한다.

## 2. shunt저항을 이용한 평균 전류추정 알고리즘

### 2.1 1-shunt 저항으로부터의 전류측정

그림 1은 하나의 shunt 저항을 가지는 1 shunt PWM 인버터 회로도이다. 이는 3상전류 정보를 직류단에 하나의 shunt 저항만으로 획득한다. 그림 2는 3상 SVPWM 인버터의 IGBT의 스위칭 조합에 따른 전압 벡터를 표시한다. 상단 암의 IGBT가 모두 On인 (111)과 하단 암의 IGBT가 모두 On인

(000)의 영 벡터가 2개 존재하며, 상단 암의 IGBT와 하단 암의 IGBT의 On/Off 조합에 따라 6개의 유효전압 벡터가 존재한다. 각 Sector에서의 지령 전압벡터는 2개의 영벡터와 2개의 유효전압 벡터의 조합에 의해 표현된다. 유효전압 벡터가 인가될 때 shunt 저항으로부터 모터에 흐르는 상전류를 검출하는데 각 유효전압 벡터에 따라 검출되는 전류는 표 1과 같다.

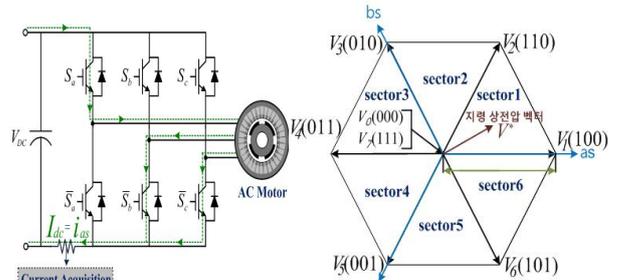


그림 1 1-shunt 인버터 회로

그림 2 SVPWM 육각형

표 1 스위칭 상태에 따라 직류단에 흐르는 전류

유효전압 벡터	$V_1$ (100)	$V_2$ (110)	$V_3$ (010)	$V_4$ (011)	$V_5$ (001)	$V_6$ (101)	$V_0, V_7$ (000, 111)
DC-Link 전류	$I_{as}$	$-I_{cs}$	$I_{bs}$	$-I_{as}$	$I_{cs}$	$-I_{bs}$	Not available

### 2.2 영역별 SVPWM 육각형

직류단 shunt저항을 이용한 상전류 복원은 유효전압 벡터 구간에서 직류단 shunt에 흐르는 직류 전류를 감지하여 상전류를 복원하는 것이 기본 원리이다. 하지만 유효전압 벡터가 인가되는 구간이 짧을 경우 shunt저항에 흐르는 전류를 감지하는데 문제가 발생하게 된다. IGBT가 스위칭을 할 경우 스위칭시 발생하는 링잉(ringing)현상에 따른 세틀링 타임( $T_{settling}$ )과 인버터의 데드타임( $T_{dead}$ ), A/D변환 시간( $T_{A/D}$ )에 의해 정상적인 전류를 검출하기 위해서는 일정 시간이 필요하다. 이 시간을 전류 샘플링을 위한 최소한의 시간이라 하며  $T_{min}$ 이라 정의한다.  $T_{min}$ 은 수식 (1)과 같다.

$$T_{min} = T_{settling} + T_{dead} + T_{A/D} \quad (1)$$

유효전압 벡터 인가 시간이  $T_{min}$ 보다 큰 경우에 정상적인 전류 샘플링이 가능한데 복원가능 상전류의 개수에 따라 SVPWM 육각형은 그림 3과 같이 3가지의 영역으로 나누어진다. Region 0은 두 상전류 모두 복원이 가능한 영역, Region 1은 한 상전류만 복원이 가능한 영역, Region 2는 두 상전류 모두 복원이 불가능한 영역을 나타낸다.

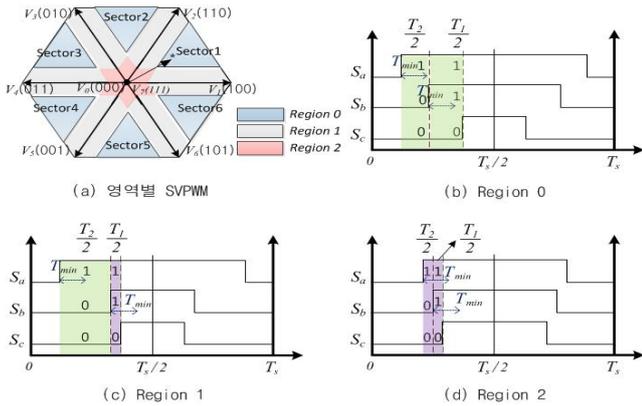


그림 3 영역별 SVPWM

### 2.3 제안된 평균 상전류 추정 수식의 일반화

본 논문에서는 유효전압 벡터 인가시간이  $T_{min}$  보다 큰 경우에 대한 평균 상전류 추정 알고리즘을 제안한다.

SVPWM 방식의 모든 스위칭 패턴에 따른 상전류 기울기를 구해보면 표 2와 같다<sup>[2]</sup>. 그림 4, 5은 유효 전압 인가시간이  $T_{min}$ 보다 큰 경우 전류기울기와 유효벡터 인가시간을 이용하여 평균 상전류를 구하는 과정을 나타낸다.

표 2 스위칭 패턴에 따른 각 상의 전류 기울기

스위칭	a상전류 기울기	b상전류 기울기	c상전류 기울기
000	$-\frac{V_a}{L}$	$-\frac{V_b}{L}$	$-\frac{V_c}{L}$
001	$\frac{-3V_a - V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b - V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c + 2V_{dc}}{3L}$
010	$\frac{-3V_a - V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b + 2V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c - V_{dc}}{3L}$
011	$\frac{-3V_a - 2V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b + V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c + V_{dc}}{3L}$
100	$\frac{-3V_a + 2V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b - V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c - V_{dc}}{3L}$
101	$\frac{-3V_a + V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b - 2V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c + V_{dc}}{3L}$
110	$\frac{-3V_a + V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_b + V_{dc}}{3L}$	$\frac{-3V_c - 2V_{dc}}{3L}$
111	$\frac{V_a}{L}$	$\frac{V_b}{L}$	$\frac{V_c}{L}$

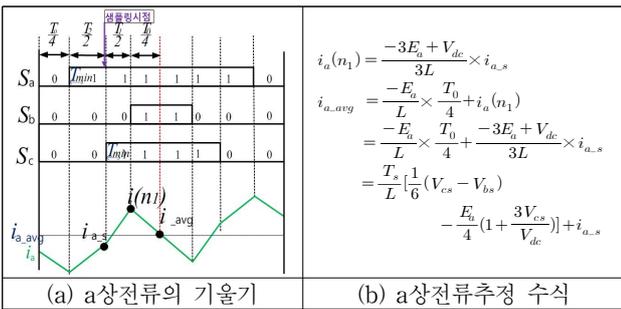


그림 4 스위칭 패턴에 따른 a상전류의 기울기와 전류 추정수식

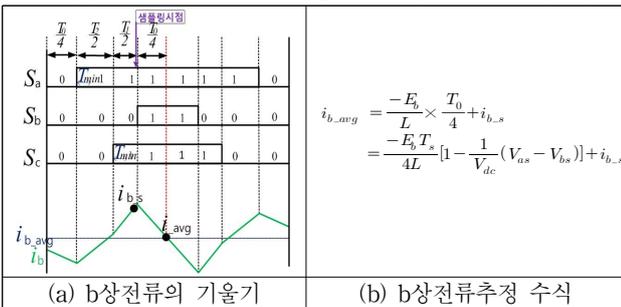


그림 5 스위칭 패턴에 따른 b상전류의 기울기와 전류 추정수식이 스위칭 패턴에 따른 평균 전류 추정 알고리즘을 일반화

해 보면 식 (2),(3) 과 같다

$$i_{1st.avg} = \frac{T_s}{L} \left[ \frac{1}{6} (V_{2nd} - V_{3rd}) - \frac{E_{1st}}{4} \left( 1 + \frac{3V_{2nd}}{V_{dc}} \right) \right] + i_{1st.sampling} \quad (2)$$

$$i_{3rd.avg} = \frac{-E_{3rd} \times T_s}{4L} \left[ 1 - \frac{1}{V_{dc}} (V_{1st} - V_{3rd}) \right] + i_{3rd.sampling} \quad (3)$$

여기서 sampling은 선트저항으로부터 sampling 한 시점에서의 전류, 1st, 2nd, 3rd 각각은 PWM 한 주기 동안 duty비가 가장 긴 순서대로 나열한 것이다.

표 3은 Sector당 duty비의 길이 순서를 나타낸다.

표 3 Sector당 길이 순서

Sector	1st	2nd	3rd
1	a상	b상	c상
2	b상	a상	c상
3	b상	c상	a상
4	c상	b상	a상
5	c상	a상	b상
6	a상	c상	b상

### 3. 실험 결과

그림 6은 M/G set를 기반으로 속도 1600rpm의 정상상태에서 shunt저항을 통해 상전류를 측정된 파형을 나타낸다. 그림 6 (a)에서 알고리즘 미 적용 파형은 유효전압 벡터에서 샘플링한 전류를 그대로 사용한 것으로 식 (4)을 이용하여 정확도를 구해보면 98.4%를 가진다. 반면 그림 6 (b)의 전류 추정 알고리즘을 적용한 파형은 유효전압 벡터에서 샘플링한 전류를 전류의 기울기와 인가시간을 이용하여 평균전류를 추정된 파형으로 식 (4)을 이용하여 정확도를 보면 99.5%를 가진다.

$$(\text{정확도}(\%)) = \left( 1 - \frac{[\text{실제전류} - \text{복원전류}]}{\text{실제전류의 RMS}} \times 100 \right) \quad (4)$$

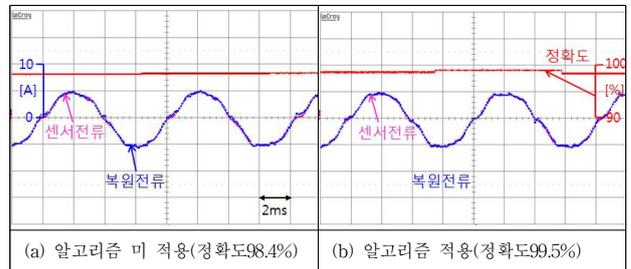


그림 6 상전류 추정 알고리즘을 미적용/적용한 전류파형

### 4. 결론

본 논문에서는 1 shunt 인버터의 스위칭 상태에 따른 새로운 평균 전류 추정 방식을 제시하고 이를 일반화하였다. SVPWM의 유효전압 벡터 인가시간이  $T_{min}$ 보다 클 경우, 각 구간에서의 스위칭 패턴에 따른 상전류의 기울기와 인가시간을 이용하여 평균 상전류를 추정할 수 있고 이를 Sector당 인가 벡터의 길이 순서로 일반화 할 수 있다. 실험을 통하여 알고리즘을 적용하여 평균 상전류를 추정된 파형이 알고리즘을 적용하지 않은 파형보다 더 높은 정확도를 나타내는 것을 검증하였다.

### 참고 문헌

[1] Jee Sang Lee, "An overmodulation method for space vector PWM inverters with dc link shunt resistor", ICPE & ECCE, pp. 1997-2004, 2011, June  
 [2] D. Jiang and F.Wang, "Current ripple prediction for three phase PWM converters", Transactions of the IEEE, Vol. 50, No. 1, pp. 531-538, 2014, Jan