

# 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드 전압 저감을 위한 PWM 기법

김원재, 김상훈

강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

## PWM Technique for Common Mode Voltage Reduction of Single-Phase Converter/Three-Phase Inverter System

Won-Jae Kim, Sang-Hoon Kim

BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

### ABSTRACT

본 논문에서는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드 전압 저감을 위한 PWM 기법을 제안한다. 컨버터/인버터 시스템은 스위칭에 의한 공통모드 전압으로 인해 전동기의 누설전류와 절연과피 등의 문제가 발생할 수 있다. 이에 본 논문에서는 영전압벡터 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정하여 공통모드 전압을 저감하는 방법에 대해 제안한다. 모의실험을 통하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

### 1. 서 론

단상 컨버터/3상 인버터 시스템은 부하역률 1.0에 가까운 운전이 가능하므로 교류 급전계통에서 기존의 위상제어방식을 대신하여 철도차량에 적용되고 있다. 그러나 교류전동기 구동시스템에 높은 전압상승률을 갖는 전력용 반도체가 적용됨에 따라 전동기 누설전류와 절연과피, 전자파 장애(Electromagnetic Interference, EMI) 등의 문제점들이 빈번하게 발생하게 되었다<sup>[1]</sup>. 이러한 문제점들의 직접적인 원인은 교류전동기 구동시스템에서 발생하는 공통모드 전압이다. 컨버터/인버터 시스템에서 공통모드 전압은 매 스위칭 마다 펄스의 형태로 발생하며, 높은 전압상승률( $dv/dt$ )에 의해 교류전동기의 기생 캐패시턴스가 충전전됨에 따라 누설전류가 발생하게 된다. 누설전류는 전동기의 절연과피와 EMI를 발생시키는 주요 원인이 되므로 누설전류 저감과 전동기의 보호를 위해서 공통모드 전압을 저감할 필요가 있다. 컨버터/인버터의 공통모드 전압은 전압 변조 주기 내에서 인버터의 유효전압벡터를 이동하여 컨버터와 인버터의 스위칭시점을 일치시킴으로써 저감할 수 있다<sup>[1]</sup>. 그러나 스위칭시점을 일치시키기 위해 필요한 유효전압벡터의 이동시간이 유효전압벡터가 이동하는 방향의 영전압벡터 인가시간보다 긴 경우 적용하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위해 영전압벡터 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정하여 공통모드 전압을 저감하는 방법에 대해 제안한다. 모의실험을 통하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

### 2. PWM 기법을 이용한 공통모드 전압 저감

#### 2.1 단상 컨버터/3상 인버터의 공통모드 전압

교류전동기를 구동하는 컨버터/인버터 시스템에서 noise 억제와 안전상의 이유로 컨버터의 입력전원과 전동기의 외함을 동일한 점에 접지를 한다. 이러한 시스템에서 공통모드 전압은 그림 1에 나타나듯이 고정자 권선의 중성점  $s$ 와 접지점  $g$  사이의 전압차  $V_{sg}$ 로 주어지며 이는 권선의 중성점과 DC링크 중성점  $n$  사이의 전압  $V_{sn}$ 과 DC링크 중성점과 접지점 사이의 전압  $V_{ng}$ 의 합으로 구해질 수 있다.

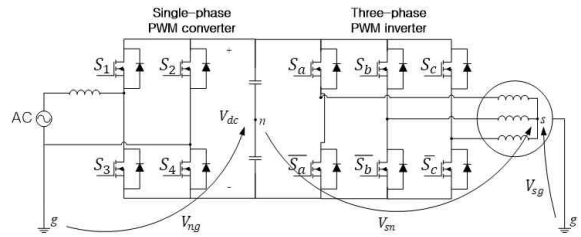


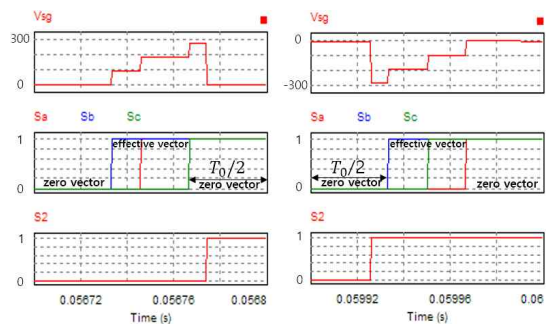
그림 1 단상 컨버터/3상 인버터 시스템

$V_{sn}$ 과  $V_{ng}$ 는 인버터와 컨버터의 스위칭 상태에 따라 식(1)과 식(2)과 같이 표현된다<sup>[2]</sup>.  $V_{sn}$ 은 인버터에서 각 레그(leg)의 윗상 스위칭마다  $V_{dc}/3$ 의 크기로 변동하며  $V_{ng}$ 은 컨버터에서  $S_2$ 의 스위칭마다  $V_{dc}$ 의 크기로 변동한다.

$$V_{sn} = \frac{V_{dc}}{3}(S_a + S_b + S_c) - \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

$$V_{ng} = \frac{V_{dc}}{2}(1 - 2S_2) \quad (2)$$

컨버터의 출력 전압이 280V인 상황에서 인버터에 대칭 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation)을 적용하는 경우 on-sequence 동안 스위칭에 따른 공통모드 전압이 그림 2에 보인다. 공통모드 전압은 컨버터와 인버터의 스위칭마다 높은 전압변동률을 보이며  $V_{dc}$  크기까지 나타남을 알 수 있다.



(a)  $V_{dc}$  전압이 발생한 경우 (b)  $-V_{dc}$  전압이 발생한 경우

그림 2 단상 컨버터/3상 인버터 시스템의 스위칭에 따른 공통모드 전압

본 논문에서는 전압 변조 주기 내에서 영전압벡터 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정하여 이상의 공통모드 전압을 저감하는 방법을 제안한다.

#### 2.2 제안된 공통모드 전압 저감 방법

컨버터/인버터의 공통모드 전압은 인버터의 한 상의 스위칭

시점을 컨버터의  $S_2$  스위칭시점과 일치시킴으로써 저감할 수 있으며 컨버터의  $S_2$  스위칭시점에 일치시키는 인버터의 스위칭시점에 따라 공통모드 전압의 크기를  $2V_{dc}/3$  또는  $V_{dc}/3$ 로 제한할 수 있다. 공통모드 전압의 크기를  $2V_{dc}/3$ 로 제한하기 위해서는 그림 2에 나타나있는  $V_{dc}$  크기의 공통모드 전압을 제거해야한다. 그림 2로부터  $V_{dc}$  전압은 인버터 3상 지령전압 중 가장 작은 상의 스위칭시점을 컨버터의  $S_2$  스위칭시점과 일치시키는 경우 제거할 수 있다. 또한,  $-V_{dc}$  전압은 인버터 3상 지령전압 중 가장 큰 상의 스위칭시점을 컨버터의  $S_2$  스위칭시점과 일치시키는 경우 제거할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 경우가 그림 3 (a)에 보이며 공통모드 전압이  $2V_{dc}/3$ 로 제한됨을 알 수 있다. 공통모드 전압의 크기를  $V_{dc}/3$ 로 제한하기 위해서는  $2V_{dc}/3$  크기의 전압을 제거해야한다.  $2V_{dc}/3$  전압은 인버터의 중간 크기 상의 스위칭 때 발생하므로 인버터의 지령전압 중 중간 크기 상의 스위칭시점을 컨버터의  $S_2$  스위칭시점과 일치시킴으로써 제거한다. 공통모드 전압의 크기를  $V_{dc}/3$ 로 제한하는 방법을 적용한 경우가 그림 3 (b)에 나타나있으며 공통모드 전압의 크기가  $V_{dc}/3$  크기로 제한됨을 알 수 있다.

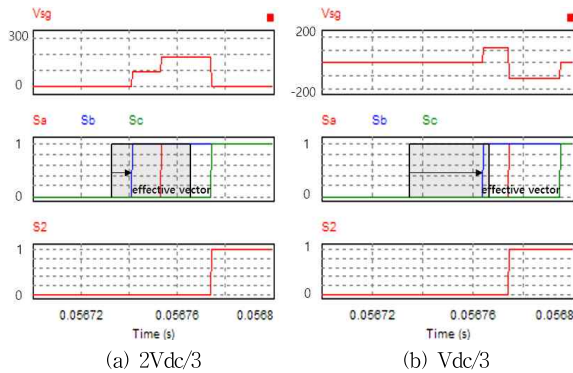


그림 3 인버터의 스위칭시점에 따른 공통모드 전압 저감

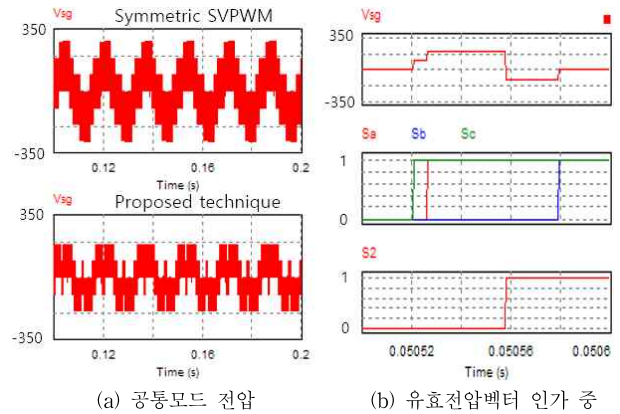
인버터의 스위칭시점을 이동하는 방법은 인버터에서 지령전압 벡터를 왜곡 없이 합성하도록 변조 주기 내에서 유효전압벡터의 위치를 그림 3과 같이 이동하게 된다. 따라서 유효전압벡터의 이동시간이 유효전압벡터가 이동하는 방향의 영전압벡터 인가시간  $T_0/2$ 보다 긴 경우 적용하기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 영전압벡터 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정하여 공통모드 전압을 저감하는 방법을 제안한다.

그림 2는 공통모드 전압을  $2V_{dc}/3$  또는  $V_{dc}/3$ 로 제한하는 방법을 적용하기 위해 필요한 유효전압벡터의 이동시간이  $T_0/2$  시간보다 짧은 상황으로 두 방법을 적용할 수 있는 경우이다. 이 경우는 공통모드 전압을 효율적으로 저감하기 위해  $V_{dc}/3$  크기로 제한하도록 그림 3 (b)와 같이 유효전압벡터의 위치를 선정한다.  $V_{dc}/3$ 로 제한하는 방법을 적용하기 위해 필요한 유효전압벡터의 이동시간이  $T_0/2$  시간보다 긴 경우에는  $2V_{dc}/3$  크기로 제한하도록 그림 3 (a)와 같이 유효전압벡터의 위치를 선정한다. 그러나  $2V_{dc}/3$  또는  $V_{dc}/3$  크기로 제한하기 위해 필요한 유효전압벡터의 이동시간이  $T_0/2$  시간보다 길어 두 방법을 적용할 수 없는 경우가 존재할 수 있다. 이 경우는 변조 주기 동안 인버터의 마지막 스위칭이 발생하기 전, 즉  $V_{dc}$  크기의 공통모드 전압이 발생하기 전에 컨버터에서 스위칭함으로써  $V_{dc}$  크기의 공통모드 전압을 제거할 수 있다. 따라서 두 방법을 적용할 수 없는 경우 컨버터의 스위칭이 유효전

압벡터 인가 중에 발생할 수 있도록 유효전압벡터의 위치를 선정하면 공통모드 전압을  $2V_{dc}/3$  크기로 제한할 수 있다. 이와 같이, 영전압벡터 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정함으로써 공통모드 전압을 저감할 수 있다.

### 3. 모의실험

제안된 기법의 효용성 검증을 위해 단상 컨버터/3상 인버터에 대해 모의실험을 하였다. 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수는 5kHz이며 제어주기는 10kHz로 동기제어를 수행하였다. 그림 4 (a)는 기존의 대칭 SVPWM을 적용한 경우와 제안된 기법을 적용한 경우 공통모드 전압을 나타낸다. 기존 대칭 SVPWM을 적용한 경우  $V_{dc}$  크기의 공통모드 전압이 발생하게 된다. 제안된 기법의 경우 공통모드 전압이  $2V_{dc}/3$  또는  $V_{dc}/3$ 으로 제한됨을 알 수 있다. 그림 4 (b)는 컨버터의 스위칭이 유효전압벡터 인가 중에 발생할 수 있도록 유효전압벡터의 위치를 선정한 경우이다. 이 경우 공통모드 전압이  $2V_{dc}/3$ 으로 제한됨을 알 수 있다. 따라서 제안된 기법으로 공통모드 전압을 저감할 수 있다.



(a) 공통모드 전압

(b) 유효전압벡터 인가 중 컨버터의 스위칭이 발생한 경우

그림 4 대칭 SVPWM과 제안된 기법을 적용한 경우 단상 컨버터/3상 인버터 시스템의 공통모드 전압

### 3. 결론

본 논문에서는 단상 컨버터/3상 인버터 시스템에서 공통모드 전압 저감을 위한 PWM 기법에 대해 제시하였다. 제안된 기법으로 영전압벡터의 인가시간에 따라 유효전압벡터의 위치를 선정함으로써 공통모드 전압을  $2V_{dc}/3$  또는  $V_{dc}/3$ 의 크기로 저감하였다. 모의실험을 통하여 제안된 기법의 효용성을 검증하였다.

본 연구는 에너지기술평가원(에너지기술개발사업 산업기술혁신사업 : 과제번호 20183010140980)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] Hyeoun-Dong Lee, Seung-Ki Sul, "Common-Mode Voltage Reduction Method Modifying The Distribution of Zero-Voltage Vector in PWM Converter/Inverter System," *IEEE Trans. Ind. Appl.* Vol. 37, No. 6, pp. 1732-1738, 2001, Nov/Dec.
- [2] Sang-Hoon Kim, Electric Motor Control DC, AC, and BLDC Motors, *Elsevier Inc.* ch.7, 2017.