

PWM 승압형 컨버터/인버터를 시스템에서 커먼 모드 전압 저감을 위한 새로운 PWM 기법

이 현 동, 설 승 기
서울대학교 전기공학부

A New PWM Strategy for reducing Common Mode Voltage in PWM boost Converter/Inverter Fed ac Motor Drives.

Hyeoun-Dong Lee and Seung-Ki Sul

School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - 본 논문에서는 PWM 승압형 컨버터/인버터를 사용한 교류전동기 구동시스템에서 커먼 모드 전압의 크기를 dc 버스 전압 1/3이하로 제한시키는 새로운 공간전압벡터 PWM 기법을 제안한다. Dc 버스 전압의 2/3에 해당하는 커먼 모드 전압 펄스가 발생하는 경우에 대하여 고찰하고 각각의 경우에 대한 인버터 스위칭 시점의 이동을 통한 제거 방법을 제안한다. 제안된 방법은 부가의 하드웨어를 요구하지 않고 소프트웨어적으로 손쉽게 구현될 수 있으며, 전력변환기의 제어 성능에 영향을 미치지 않는다는 장점을 가진다.

으로써 구현된다. 본 논문에서는 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스가 발생하는 경우를 2가지로 구분하고 각각의 경우에 대하여 인버터 스위칭 시점의 이동을 통한 제거 방법을 제안한다. 제안된 방법은 부가의 하드웨어를 요구하지 않고 소프트웨어적으로 손쉽게 구현될 수 있으며, 전력변환기의 제어 성능에 영향을 미치지 않는 장점을 가진다.

1. 서 론

최근 교류전동기 가변속 구동시스템에서 IGBT 등과 같이 높은 전압상승률을 가지며 고속 스위칭이 가능한 전력용 반도체가 널리 적용됨에 따라 전동기 누설전류, 전동기 베어링 손상[1] 등과 같은 문제점들이 증가하게 되었다. 전동기 베어링 손상의 주된 원인은 전동기 축전압과 이에 따른 베어링 전류이며, 커먼 모드 전압과 전동기 축전압과 용량성 결합의 관계에 있으므로[2], 이를 감소시키기 위해서는 전동기 구동시스템의 커먼 모드 전압을 제거 또는 일정한 범위 이내로 제한시키는 것이 무엇보다 중요하다.

커먼 모드 전압을 저감시키려는 기존의 연구들은 주로 수동 소자를 이용한 필터 등의 설계[3] 또는 스위칭 소자 등을 사용한 커먼 모드 전압의 능동적 상쇄[4]등에 초점을 맞추고 있다. 이러한 방법들에서는 전력변환기의 무게, 부피, 그리고 가격 상승이 불가피하며, 시스템의 신뢰성 확보 차원에서 불리하다고 할 수 있다. 최근들어 PWM기법을 이용한 커먼 모드 전압의 저감 방법이 소개되었으나[5], 전동기 상전류의 리플 성분 증가, 인버터 변조지수상의 제한 등과 같은 이유로 인하여 실제 적용에는 무리가 따른다고 할 수 있다. 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수를 동일하게 선정하고 각각의 제어주기를 동기화시킴으로써 커먼 모드 전압의 크기를 $2V_{dc}/3$ 이하로 제한시키는 연구가 진행되었다[6]. 그러나, $2V_{dc}/3$ 의 커먼 모드 전압은 전동기 베어링 윤활 필름의 절연파괴나 전동기 권선의 절연파괴를 야기시킬 수 있을 만큼 여전히 높다.

본 논문에서는 PWM 승압형 컨버터/인버터를 사용한 교류전동기 구동시스템에서 커먼 모드 전압의 크기를 dc 버스 전압, V_{dc} 의 1/3이하로 제한할 수 있는 새로운 공간전압벡터 PWM(SVPWM)기법을 제안한다. 제안된 방법은 동일 스위칭 주파수, 동기화된 제어주기를 갖는 PWM 컨버터/인버터 시스템에서 V_{dc} 의 2/3에 해당하는 커먼 모드 전압 펄스를 제거함

2. 본 론

2.1 스위칭 함수와 커먼 모드 전압

그림 1과 같은 PWM 승압형 컨버터/인버터를 이용한 교류전동기 가변속 구동시스템에서의 커먼 모드 전압, v_{sg} 는 dc 버스 전압, V_{dc} ,와 컨버터와 인버터의 스위칭 함수, s_i ($i=A, B, C, U, V, W$)를 이용하여 (1)과 같이 표현될 수 있다[7].

$$v_{sg} = \frac{V_{dc}}{3} [(s_a + s_b + s_c) - (s_u + s_v + s_w)]. \quad (1)$$

커먼 모드 전압은 컨버터와 인버터의 스위칭 상태에 따라 $0, \pm V_{dc}/3, \pm 2V_{dc}/3, \pm V_{dc}$ 의 전위를 가지며, 기존의 3상 대칭 SVPWM을 사용할 경우 그 dv/dt 는 $\pm V_{dc}/3$ 에 해당한다.

2.2 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스 발생

컨버터와 인버터의 스위칭 주파수를 동일하게 설정하고 각각의 제어주기를 동기화시킨 경우에도 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스가 발생할 수 있다. 컨버터와 인버터가 발생시키는 전압벡터의 조합이 우수의 유효전압벡터-영전압벡터(000) 또는 기수의 유효전압벡터-영전압벡터(111)일 경우가 이에 해당하며, 이를 도시화하면 각각 그림 2(a)와 그림 2(b)와 같다. 그림 2(a)에서 전압의 스위칭 시점을 순차적으로 C-C-I-I-I-C이다. 여기서, 'C'는 컨버터의 스위칭이, 'I'는 인버터의 스위칭이 발생함을 의미한다. 이 때, $-2V_{dc}/3$ 라면, 그림 2(b)에서는 전압 스위칭 순서가 C-I-I-I-C이며, $2V_{dc}/3$ 의 커먼 모드 전압 펄스는 전동기의 지속 운전이나 경부하 조건시와 같이 컨버터와 인버터의 변조지수의 차이가 클수록 더욱 빈번하게 발생한다.

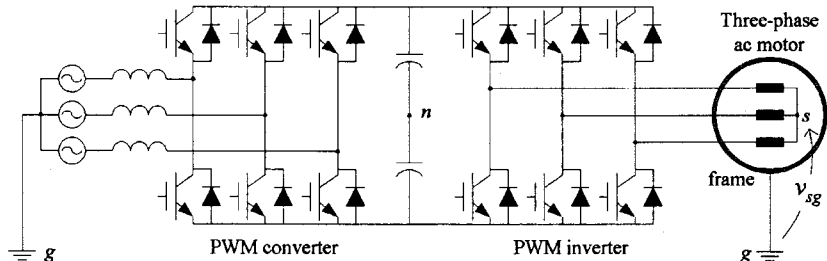


그림 1. 3상 승압형 PWM 컨버터/인버터 시스템.
(g:접지점, n:dc 버스, 중성점, s:전동기 고정자 권선 중성점)

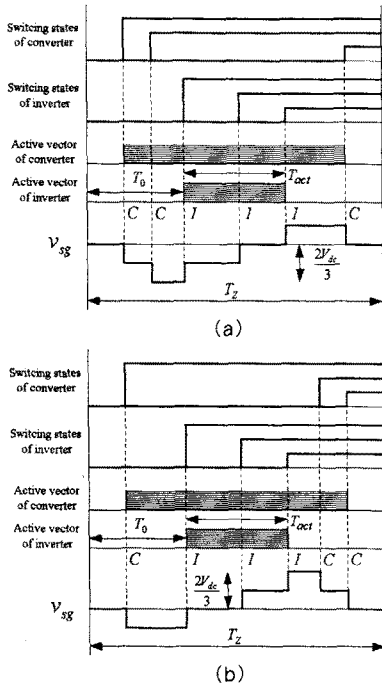


그림 2. 3상 대칭 SVPWM을 사용할 경우 크기가 $2V_{dc}/3$ 인 커먼 모드 전압 펄스의 발생.
(a) C-C-I-I-I-C 모드, (b) C-I-I-I-C 모드.

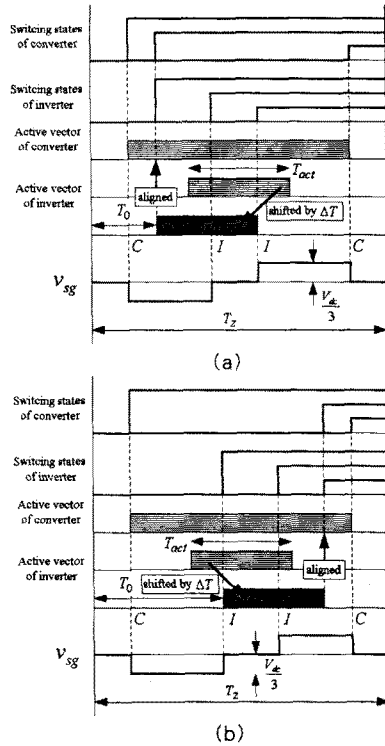


그림 4. $2V_{dc}/3$ 인 커먼 모드 전압 펄스의 제거. (a) 방법 LM (C-C-I-I-I-C 모드), (b) 방법 SM (C-I-I-I-C 모드).

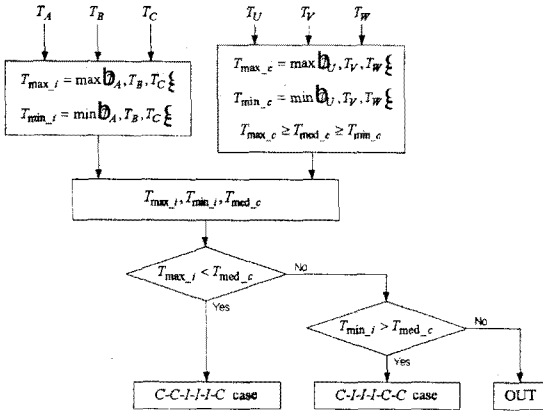


그림 3. C-C-I-I-I-C 모드와 C-I-I-I-C 모드의 판별.

$2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스의 발생여부와 발생하는 경우 C-C-I-I-I-C 모드와 C-I-I-I-C-C 모드의 판별은 컨버터와 인버터 각상 스위치의 점호시간의 상호 비교를 통해 구현될 수 있다. 컨버터 각상 스위치의 점호시간 중 중간값을 T_{med-c} 로, 인버터 각상 스위치의 점호시간 중 최대값과 최소값을 각각 T_{max-i} 와 T_{min-i} 로 정의하였을 때, 그림 2로부터 C-C-I-I-I-C 모드일 경우에는 T_{med-c} 가 T_{max-i} 보다 크음을 알 수 있고, C-I-I-I-C-C 모드일 경우에는 T_{min-i} 가 T_{med-c} 보다 크음을 알 수 있다. 이를 순서대로 정리하면 그림 3과 같다.

2.3 $2V_{dc}/3$ 크기의 전동기 커먼 모드 전압 펄스 제거를 위한 인버터 스위칭 시점의 이동

$2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스를 제거하기 위하여 C-C-I-I-I-C 모드와 C-I-I-I-C-C 모드에 대하여 각 다음과 같은 방법을 제안한다.

- C-C-I-I-I-C 모드
인버터의 극전압 지령이 가장 큰 상의 스위칭 시점을 이동시켜 컨버터의 극전압 지령이 중간인 상에 일치시킨다(방법 LM): 그림 4(a)
- C-C-I-I-I-C 모드
인버터의 극전압 지령이 가장 작은 상의 스위칭 시점을 이동시켜 컨버터의 극전압 지령이 중간인 상에 일치시킨다(방법 SM): 그림 4(b)

그림 4(a)에서 보듯이 C-C-I-I-I-C 모드에서는 방법 LM이 적용되어 인버터의 유효전압벡터가 왼쪽으로 ΔT 만큼 이동되어 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스가 발생하는 컨버터와 인버터의 출력전압벡터의 조합을 회피할 수 있다. 따라서 그림 2(a)의 경우와 비교해 볼 때, $-2V_{dc}/3$ 사의 커먼 모드 전압 펄스가 사라지게 됨을 알 수 있다. 한편, 그림 4(b)의 C-C-I-I-I-C 모드에서는 방법 SM이 적용되어 인버터의 유효전압벡터가 오른쪽으로 ΔT 만큼 이동되어 $2V_{dc}/3$ 의 커먼 모드 전압 펄스가 제거됨을 알 수 있다. 인버터 게이팅 시점의 이동시간, ΔT ,는 방법 LM과 SM의 경우 각각 (2)와 (3)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\Delta T = T_{med-c} - T_{max-i} \quad (2)$$

$$\Delta T = T_{min-i} - T_{med-c} \quad (3)$$

제안된 방법에서는 인버터가 출력하는 유효전압벡터의 크기를 유지시키기 것을 전제로 하고 있기 때문에 스위칭 시점의 일치를 위하여 이동되는 상뿐만 아니라 다른 두 상의 스위칭 시점 역시 동일한 시간만큼 이동시켜야 한다. 이는 3상 SVPWM에 있어서 인버터 제어주기의 처음과 끝에 배치되는 영전압벡터의 인가시간을 변경시키는 것과 같은 효과를 가져게 된다.

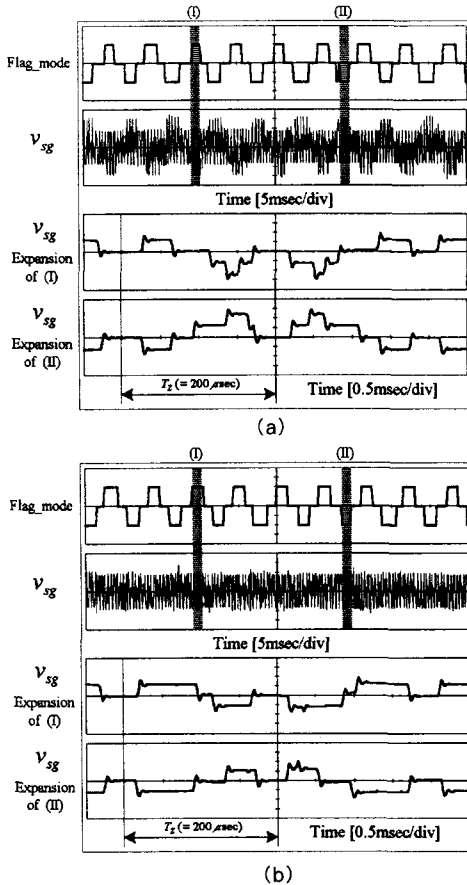


그림 5. 커먼 모드 전압의 파형.

(a) 3상 대칭 SVPWM. (b) 제안된 방법 LM과 SM.

3. 실험 결과

실험에서 PWM 컨버터는 dc 버스 전압을 380V로 제어하고 있으며 3.75kW 유도전동기는 1000r/min의 속도로 운전되고 있다. 컨버터와 인버터의 스위칭 주파수는 2.5kHz(제어주기=200μsec)이고 서로 동기화되어 있다.

그림 5(a)는 기존의 3상 대칭 SVPWM을 적용할 경우 커먼 모드 전압, v_{sg} 의 파형을 보이고 있다. 그림 5(a)의 Flag_mode는 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스의 발생 여부를 나타내고 있으며, Flag_mode=1의 경우에는 C-C-I-I-I-C 모드임을, Flag_mode=-1의 경우에는 C-I-I-I-C-C 모드임을 나타낸다. 그림 5(a)에서 $2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압 펄스를 볼 수 있으며, 이는 그림 2의 경우와 상용함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 제안된 방법을 적용할 경우의 커먼 모드 전압 파형을 보이고 있다. 3상 대칭 SVPWM이 사용될 경우와 비교해 보았을 때, C-C-I-I-I-C 모드에서는 제안된 방법 LM이 사용되어 $-2V_{dc}/3$ 의 커먼 모드 전압 펄스가 제거되고, C-I-I-I-C-C 모드에서는 제안된 방법 SM이 사용되어 $2V_{dc}/3$ 의 커먼 모드 전압 펄스가 제거됨을 볼 수 있다. 따라서, 제안된 방법을 사용함으로써 커먼 모드 전압의 크기를 $V_{dc}/3$ 이하로 제한시킬 수 있음을 알 수 있다.

전동기의 운전속도별로 커먼 모드 전압의 최고치와 실효치를 측정하여 각각 그림 6(a)와 그림 6(b)에 도시하였다. 전동기의 속도와 관계없이 커먼 모드 전압의 최고치는 거의 일정하였으며 3상 대칭 SVPWM을 적용할 경우에 비하여 제안된 방법을 사용할 경우 약 200V 정도의 커먼 모드 전압 저감효과를 얻을 수 있었다. 그림 6(b)에서 커먼 모드 전압의 실효치는 전동기 속도가 증가할수록 감소함을 볼 수 있는데 이는 저속 영역에서

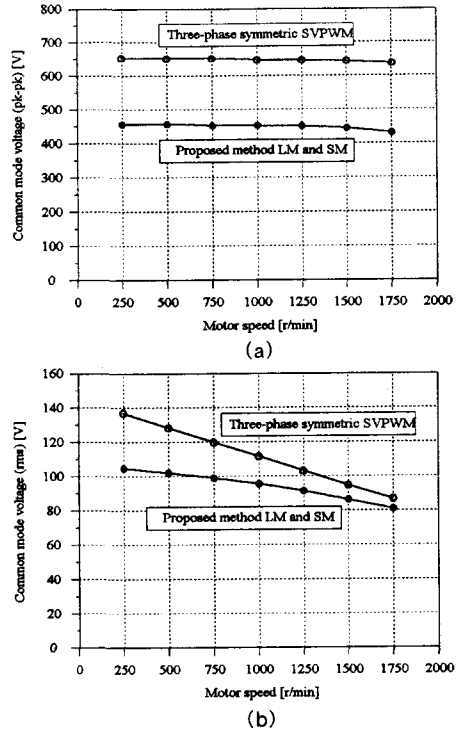


그림 6. 3상 대칭 SVPWM과 제안된 방법의 비교.
(a) 최고치의 비교. (b) 실효치의 비교.

$2V_{dc}/3$ 크기의 커먼 모드 전압이 발생할 확률이 더 크기 때문이다. 따라서, 제안된 방법을 사용할 경우의 커먼 모드 전압 실효치의 저감효과가 전동기 속도가 1750r/min일 때 약 8%, 전동기 속도가 250r/min일 때 약 24%로서 저속영역에서 더욱 커짐을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 동일 스위칭 주파수, 동기화된 제어주기를 갖는 PWM 승압형 컨버터/인버터 시스템에서 커먼 모드 전압의 크기를 dc 버스 전압 $1/3$ 이하로 제한시키는 새로운 공간전압 벡터 PWM 기법을 제안하였다. Dc 버스 전압의 $2/3$ 에 해당 하는 커먼 모드 전압 펄스가 발생하는 경우에 대하여 고찰하였고 각각의 경우에 대하여 이를 제거시키는 인버터 스위칭 시점의 이동 방법 LM과 SM을 제안하였다. 실험을 통하여 여러 가지 전동기 속도에 대한 제안된 방법의 커먼 모드 전압 최고치 및 실효치 저감효과를 실증하였다.

(참고 문헌)

- [1] M. J. Costello, "Shaft Voltages and Rotating Machinery," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 29, no. 2, pp. 419-426, Mar./Apr., 1993.
- [2] J. M. Erdman, R. J. Kerkman, D. W. Schlegel and G. L. Skibinski, "Effect of PWM Inverters on AC Motor Bearing Currents and Shaft Voltages," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 32, no. 2, pp. 250-259, Mar./Apr., 1996.
- [3] D. Rendusara and P. Enjeti, "New Inverter Output Filter Configuration Reduces Common and Differential dv/dt at the Motor Terminals in PDC Drive Systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 13, no. 6, pp. 1135-1143, Nov., 1998.
- [4] A. L. Julian, T. A. Lipo and G. Oriti, "Elimination of Common Mode Voltage in Three Phase Sinusoidal Power Converters," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp. 1968-1972, 1996.
- [5] M. Cacciato, A. Consoli, G. Scarella and A. Testa, "Continuous PWM to Square Wave Inverter Control with Low Common Mode Emissions," *IEEE PESC Conf. Rec.*, pp. 871-877, 1998.
- [6] A. M. De Broe, A. L. Julian, and T. A. Lipo, "Neutral-to-Ground Voltage Minimization in a PWM-Rectifier/Inverter Configuration," in *Proc. PEVD'96*, pp. 564-568, 1996.
- [7] 이현동, 이영민, 설승기, "공간전압벡터 PWM을 이용한 컨버터/인버터 시스템에서의 커먼 모드 전압 펄스 제거," 대한전기학회지, 48권, 2호, pp. 89-96, 1999.