

2-레벨 인버터의 전도노이즈 저감을 위한 스위칭 기법

*윤환균, *김이훈, *김준호, *원충연, **최기수, **배정환
 *성균관대학교, **(주) 인텍 FA

A Switching Technique for Common Mode Voltage Reduction of 2-Level Inverter

*Yun Hwan-Kyun, *Kim Lee-Hun, *Kim Jun-Ho,
 *Won Chung-Yuen, **Choi Ki-Soo, **Bae Joung-Hwan
 *Sung Kyun Kwan University, **IN-TECH FA Co.

ABSTRACT

Much attention has given to EMI effects created by variable speed ac drive system. This paper focuses on the switching technique to mitigate common mode voltage.

Zero switching states of inverter control invoke large common mode voltage. Using inversed carrier wave, zero switching states are removed. In addition, proposed technique is easy to apply to existing 2-level inverter design.

Simulation results show that common mode voltages adapting proposed technique are reduced regarding conventional method.

1. 서 론

3상 인버터가 점점 더 많이 사용됨에 따라 펄스 폭 변조방식에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중 중요하게 대두되고 있는 주제는 커먼모드 전압의 저감이다. 교류전동기 구동회로에 사용되는 IGBT소자의 급속한 스위칭은 출력측에 높은 주파수를 포함하는 출력전압을 야기한다. 이때 고정자 권선과 철심 간의 기생 캐패시터를 따라 누설전류가 흐르게 된다.^[1]

누설전류는 전도성 전자파장해를 유발하는 중요한 원인이 된다. 이에따른 대책으로 고정자권선과 접지점 사이의 전압, 즉 커먼모드 전압을 저감하는 방법에 대한 연구가 진행되고있다.

본 논문에서는 정현파 PWM과 공간벡터PWM 인버터의 커먼모드 전압을 저감할 수 있는 스위칭 기법을 제안하고 시뮬레이션으로 스위칭 기법의 타당성을 확인하였다.

2. 기본 이론

2.1 PWM 인버터 시스템의 커먼모드 전압

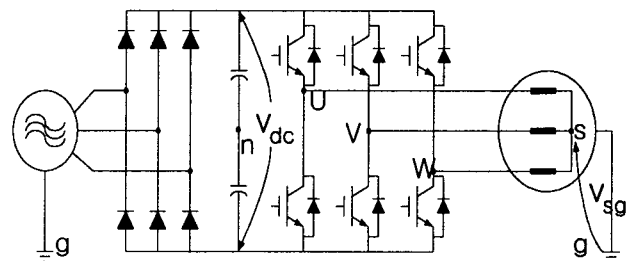


그림 1 인버터-유도전동기 구동시스템
 Fig. 1 Inverter-induction motor drive system

그림 1은 3상 전압형 인버터의 회로구성을 나타낸다. 본 논문에서 한 상의 권선에 $+1/2V_{dc}$ 가 인가된 스위칭 상태를 S_A , 두 상의 권선에 $+1/2V_{dc}$ 가 인가된 스위칭 상태를 S_B , 모든 상의 권선에 $+1/2V_{dc}$ 가 인가된 상태를 S_0 , 모든 상의 권선에 $-1/2V_{dc}$ 가 인가된 상태를 S_7 라 칭한다.

각 상의 스위칭 상태가 같다면(S_0, S_7) 각 상의 권선에 모두 $+1/2V_{dc}$ 혹은 $-1/2V_{dc}$ 의 전압이 인가되어, 하나 혹은 두 개의 상에 $+1/2V_{dc}$ 의 전압이 인가된 경우(S_A, S_B)에 비하여 절대값이 상당히 큰 커먼모드 전압을 유발한다. 그러므로 세 개의 상에 모두 같은 전압을 인가하지 않으면 커먼모드 전압을 저감시킬 수 있다.

2.1 기존 정현파 PWM의 구현

정현파 PWM에서는 120도의 위상차를 갖는 정현파 지령치가 삼각파형태의 반송파와 비교되어 스위칭 합수가 결정된다. 이에 따라 전압변조의 한 주기내에 평균적으로 폴 전압 지령치가 출력된다.^[2]

여기서 반송파의 한 주기를 자세히 보면 가장 높은 지령치보다 반송파가 높은 구간과 가장 낮은 지령치보다

반송파가 낮은 구간에서 각 상의 스위칭 상태가 같음을 볼 수 있다.

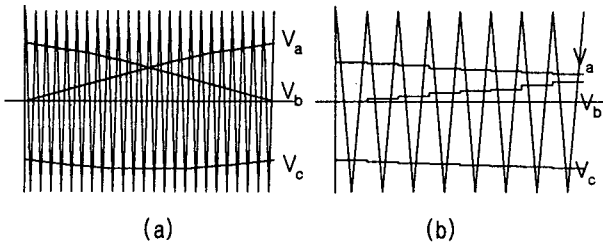


그림 2 정현파 PWM의 지령치와 반송파
Fig. 2 Reference and carrier wave of sine PWM
(a) 0° - 60° area (b) 0° - 30° area

2.2 기존 공간벡터 PWM의 구현

공간벡터 PWM에서는 한 주기 내에서 지령출력 전압이 주어지면 이 벡터와 동일한 전압을 영벡터 (S₀, S₇) 유효벡터 (S_A, S_B)를 이용하여 합성해낸다.

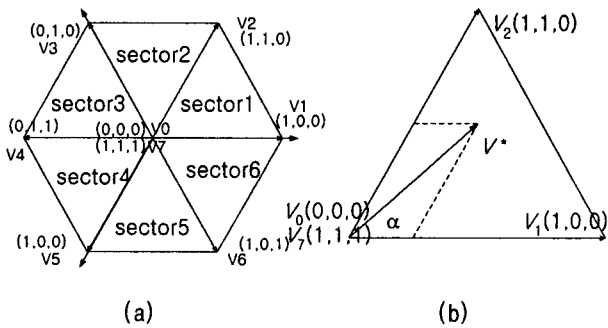


그림 3 공간전압 PWM의 기본개념
(a) 스위칭함수와 섹터 (b) 지령 전압 벡터

Fig. 3 Basic concept of SVM
(a) switching states and sector
(b) reference voltage vector

지령 전압 벡터와 인접한 두 개의 벡터로 나누어 게이팅 시간을 다음과 같이 계산한다.^[3]

$$\begin{aligned} T_A &= T_s \frac{|V^*|}{2V_{dc}/3} \cdot \frac{\sin(\pi/3 - \alpha)}{\sin(\pi/3)} \\ T_B &= T_s \frac{|V^*|}{2V_{dc}/3} \cdot \frac{\sin(\alpha)}{\sin(\pi/3)} \\ T_0 = T_7 &= 0.5(T_z - T_A - T_B) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)의 계산결과를 가지고 T_0 , T_0+T_A , $T_0+T_A+T_B$ 를 반송파와 비교해 각 상의 스위칭 함수를 만든다. 그 결과로 반송파의 하강주기 (Leading edge)에는 $S_0 \rightarrow S_A \rightarrow S_B \rightarrow S_7$ 의 순서로, 반송파의 상승주기 (Trailing edge)에는 $S_7' \rightarrow S_B' \rightarrow S_A' \rightarrow S_0'$ 의 순서로 스위칭을 하게된다. 이 때 반송파 하강주기의 S_0 , S_7 와 반송파 상승주기의 S_7' , S_0' 는 식(1)에 의해 모두 같은 구간을 갖는다.

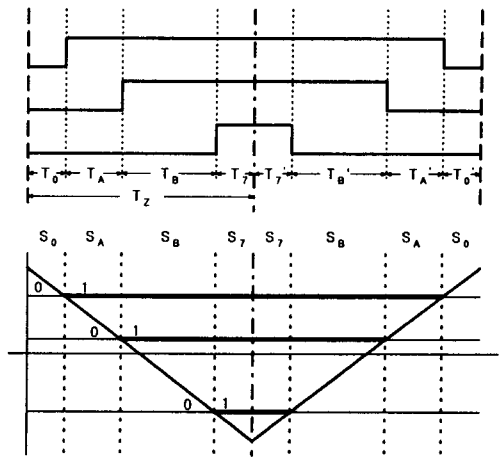


그림 4 PWM과 반송파 파형
Fig. 4 PWM waveform and carrier waveform

3. 커먼모드 전압의 저감

3.1 정현파 PWM의 커먼모드 전압 저감기법

반송파의 한 주기를 반으로 나누면 전반부와 후반부의 평균출력은 모두 전압 지령치가 된다. 이로부터 기존의 반송파인 삼각파를 반전시켜 사용해도 전압 지령치와 같은 평균출력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이를 응용하여 그림 5와 같이 세 상 중에서 지령 전압이 중간인 상의 반송파를 반전하여 사용하는 기법을 생각할 수 있다.

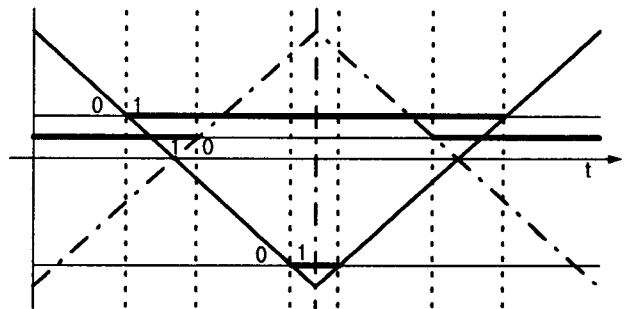


그림 5 제안된 정현파 PWM의 커먼모드 전압 저감기법
Fig. 5 Proposed switching technique for sine PWM

이 방법을 적용하면 반전된 반송파를 사용한 상의 스위칭 상태가 바뀌는 시점이 언제나 기존의 반송파를 사용한 상의 스위칭 상태가 바뀌는 시점의 사이에 위치하여 모든 상의 스위칭 상태가 같은 구간이 제거된다.

이러한 기법을 그림 6과 같은 회로로 구현할 수 있다. 해당 상의 전압 지령치가 가장 크거나 가장 작은 경우, 비반전회로를 거친 기존의 반송파가 스위치와 다이오드를 통해 반송파로 사용된다.

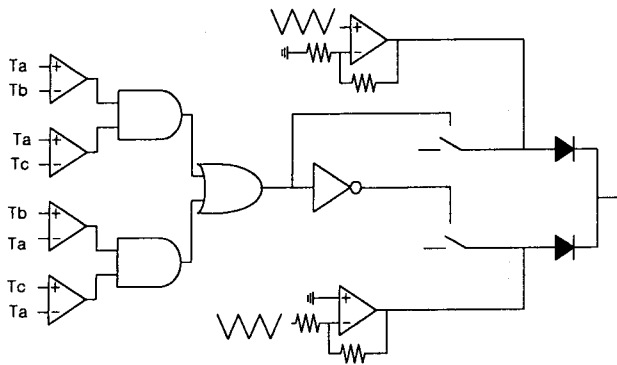


그림 6 반송파 반전/비반전 선택 회로도 (a상)
Fig. 6 Carrier wave selection circuit (Phase a)

위와 같은 회로를 각 상의 반송파에 추가함으로써 전도노이즈를 저감시킬 수 있다.

3.2 공간벡터 PWM의 커먼모드 전압 저감기법

그림 7(b)와 같이 무효 벡터스위칭 상태인 S_0, S_7 에 해당하는 기간에 대칭되는 두 개의 벡터를 각각 인가하여 커먼모드 전압을 저감하는 방법이 발표되었다.^[4]

이에 더하여 그림 7(c)와 같이 영벡터기간에 대칭되는 두 개의 벡터를 인가하고 유효벡터가 인가되는 순서를 바꾸는 방식을 생각할 수 있다. 이에 따라 무효벡터를 매우 간단하게 제거하는 방법을 제안한다.

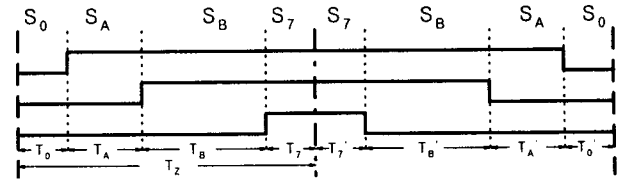
그림 7(b), 그림 7(c)에 표시된 방법은 어느 한 상의 스위칭 상태의 전반부와 후반부가 바뀐 형태를 보여준다. 기존에 알려진 커먼모드 전압을 저감하는 방법은 전압 지령치가 가장 높거나 가장 낮은 상의 스위칭 상태가, 유효벡터의 인가 순서까지 바뀐 방식은 전압 지령치가 나머지 전압 지령치의 사이에 있는 상의 스위칭 상태가 바뀌었다.

이 분석을 바탕으로 세 상 중 어느 한 상의 반송파를 반전시켜 사용함으로써 간단히 무효벡터를 모두 제거할 수 있는 방법이 도출된다.

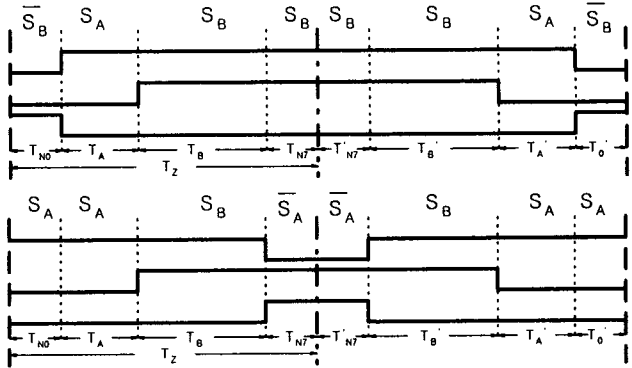
자세히 말하면, 각 상의 전압지령치의 대소로 각각의 섹터를 표 1과 같이 구분할 수 있다.

표 1 섹터별 지령전압치의 대소
Table 1 Highest/lowest reference voltage on sector

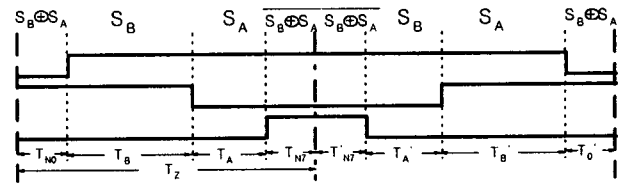
섹터번호	최대 전압지령치	중간 전압지령치	최소 전압지령치
sector 1	V_a	V_b	V_c
sector 2	V_b	V_a	V_c
sector 3	V_b	V_c	V_a
sector 4	V_c	V_b	V_a
sector 5	V_c	V_a	V_b
sector 6	V_a	V_b	V_c



(a)



(b)



(c)

그림 7 PWM 파형과 스위칭 패턴

- (a) 기존의 공간벡터 PWM
- (b) 영벡터 치환방식
- (c) 영벡터치환 + 유효벡터치환방식

Fig. 7 PWM waveform and switching pattern

- (a) conventional SVM
- (b) zero vector replaced SVM
- (c) zero vector and effective vector replaced SVM

a상의 반송파를 반전하여 사용하는 경우 a상의 전압지령치가 최대/최소인 1, 3, 4, 6번 섹터에서는 이미 알려진 영벡터 치환방식으로 동작하고 2, 5번 섹터에서는 유효벡터치환방식으로 동작한다.

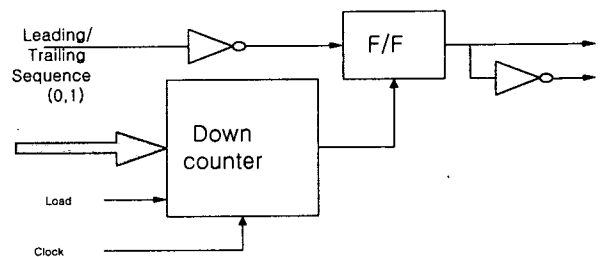


그림 8 카운터를 사용한 제안된 기법의 게이팅 출력회로
Fig. 8 Gating circuit using counter for proposed technique

제안된 스위칭 기법은 down counter를 사용하여 회로를 구성할 경우, 그림 8과 같이 어느 한 상의 게이팅 출력 회로에서 플립플롭의 Leading / Trailing Sequence 입력에 NOT-gate를 추가함으로써 간단히 구현될 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

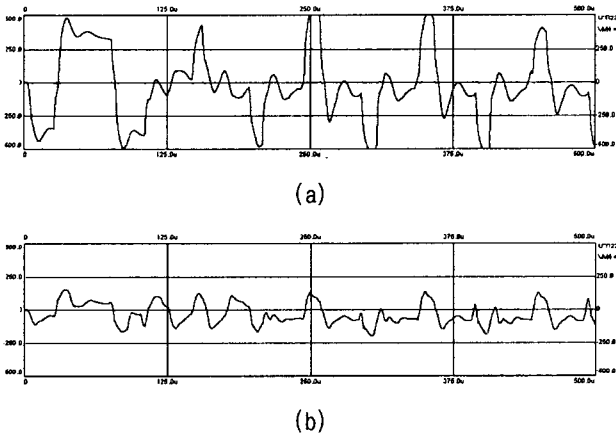


그림 9 고정자 권선 중성점-접지간 전압
(a) 기존의 공간벡터 PWM 적용시
(b) 제안된 스위칭 기법 적용시

Fig. 9 Voltage differential stator neutral-ground
(a) Conventional SVM
(b) Proposed inverted carrier SVM

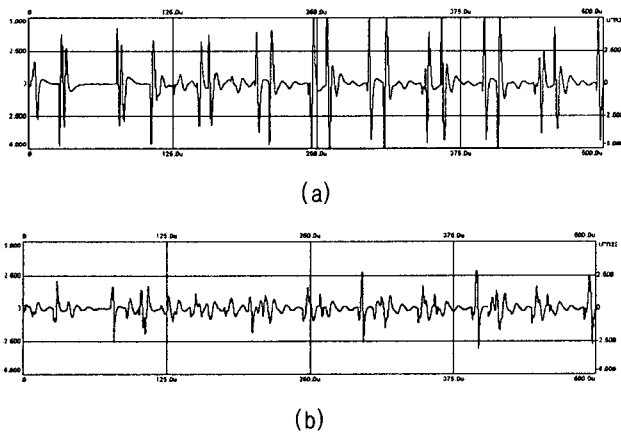


그림 10 커먼모드 노이즈 전압
(a) 기존의 공간벡터 PWM 적용시
(b) 제안된 스위칭 기법 적용시

Fig. 10 Common-mode noise voltage
(a) Conventional SVM
(b) Proposed inverted carrier SVM

본 논문에서 제안된 스위칭 기법을 확인하기 위해 기존의 스위칭 방식과 제안된 스위칭 방식을 Simplorer V4.2로 시뮬레이션 하였다.

제안된 스위칭 기법의 사용시 유도전동기 고정자의 세 권선에 같은 전압이 인가되는 영벡터 구간을 제거하여 고정자 권선의 중성점과 접지점간의 전압차가 크게 줄어든 결과를 보였다. 이에 따라 전원측에 연결된 라인 임피던스 안정화 회로(LISN)에 연결하여 측정된 커먼모드 전압도 크게 줄어든 것을 볼 수 있다.^[5]

5. 결 론

본 논문은 한 상의 게이팅신호 발생회로의 반송파를 고정적/선택적으로 반전하여 사용하면 전도노이즈가 저감되는 것을 시뮬레이션으로 확인하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 정현파 PWM방식에서도 모든 상의 스위칭 상태가 같은 구간을 제거하여 전도노이즈를 저감할 수 있다.
- 2) 공간벡터 PWM의 경우, 기존의 영벡터 치환방식보다 구현이 간단하고 기존의 영벡터 치환방식과 동일한 전도노이즈 저감특성을 나타낸다. 이에따라 마이크로프로세서의 추가의 연산부담 없이 전도노이즈를 줄일 수 있다.

향후 제안된 기법의 타당성을 실험으로 검증할 계획이다.

본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행되었음

참 고 문 헌

- [1] Gary L, Skibinski, Russel J, Kerkman, and Dave Schlegel, "EMI Emissions of Modern PWM ac Drives"
- [2] Sidney R. Bowes, Yen-Shin Lai "The Relationship Between Space-Vector Modulation and Regular-Sampled PWM", IEEE Trans. on Ind. Electronics, vol. 44, no. 5. pp. 670~679 Oct. 1997
- [3] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, and G. V. Stanke, "Analysis and Realization of a Pulsewidth Modulator Based on Voltage Space Vectors", IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 24, no. 1, pp. 142~150, Jan./Feb., 1988
- [4] LAI. Y. S, " New Random Space Vector Modulation Techniques for High Switching Inverter Control", Electron Lett., 1997, 33,(17), pp. 1425~1426
- [5] 이진환, 안정준, 원충연, 김영석, 최세완 "PWM 인버터-유도전동기 구동시스템의 전도노이즈 예측", 전력전자학회 논문지 제4권 6호, pp. 579~588, 1999.