

## 견인전동기 구동용 인버터의 PWM 패턴 해석

차·민\* 박영진\*\* 홍순찬\*

\*단국대학교 전기공학과 \*\*원주전문대학 전기과

### Analysis of PWM Patterns of Inverter fed Traction Motor Drives

Min Cha\* Young-Jaen Park\*\* Soon-Chan Hong\*  
 \*Dept. of Electrical Engineering Dankook University  
 \*\*Dept. of Electrical Engineering Wonju National College

Abstract - This paper presents a optimal PWM patterns, applied to voltage source inverter fed traction motor drives.

To derive a PWM patterns of low harmonic characteristic, the analysis and simulations of several PWM techniques are carried out. The acquired PWM patterns can reduce the harmonics and switch the GTOs with low frequency.

#### 1. 서론

최근 산업화와 교역량의 양적인 증대로 인하여 여객의 고속화 및 대량수송을 위해서 고속전철과 같은 전기철도에 선진 각국은 많은 노력을 기울여 왔다. 전기철도의 구동방식은 직류구동방식과 교류구동방식으로 분류되는데 유지, 보수 및 최대점착력을 얻을 수 있다는 장점때문에 교류전동기를 인버터로 가변전압 가변주파수(VVVF: Variable Voltage Variable Frequency) 제어를 수행하는 교류구동방식을 채택하고 있다. 소자용량의 제약으로 현재로서는 전력용스위칭 소자로 사이리스터나 GTO(Gate Turn-Off)를 사용하며 근래에는 사이리스터를 사용한 동기전동기보다는 GTO를 사용한 유도전동기를 많이 채택하고 있다.[1]

인버터로 견인용 유도전동기에 공급되는 전압과 주파수를 제어하려면 펄스폭 변조 방식을 이용하여 직류전압을 교류전압으로 변환시켜주어야 하는데, 변환된 교류전압은 펄스형태가 되므로 기본파 이외의 고조파를 포함하고 있다. 견인용 인버터의 경우에는 전력용 스위칭소자로 GTO를 사용하게 되는데 GTO는 커스 턴온, 턴오프 시간의 제약 때문에 스위칭주파수가 100~500Hz로 제한된다.[2] 그러므로 견인용 인버터의 출력은 많은 고조파를 포함하며 이 고조파는 전동기나 제어기에 악영향을 미치므로 고조파를 저감시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 고조파를 저감시키는 PWM 패턴을 유도하기 위해 인버터의 출력에 영향을 주는 인버터의 구조와 PWM 방식에 따라 변화하는 인버터 출력 특성에 대해 분석한다. 인버터의 출력특성은 출력전압, 출력전류와 토크에 대해서 비교, 분석하였고, 그 결과를 토대로 고조파를 저감시킬 수 있는 절환주파수와 PWM 패턴을 유도하였다. 이러한 결과를 견인전동기용 인버터에 적용하면 제한된 스위칭주파수를 넘지 않으면서 고조파가 저감

된 운전특성을 얻을 수 있을 것이다.

#### 2. 인버터의 구조와 PWM 방식

##### 2.1 인버터의 구조

인버터는 스위칭 소자의 구조와 출력전압에 따라 2레벨 인버터와 3레벨 인버터로 나눌 수 있다. 2레벨 인버터는 가장 일반적인 인버터 구조로서 출력상전압의 전압레벨이 양(positive)과 음(negative)의 2레벨로 구성되고, 3레벨 인버터는 2레벨 인버터의 출력상전압에 영전위를 추가하여 3레벨로 구성된다.

##### 2.1.1 2레벨 인버터

그림 1은 3상 전압형 2레벨 인버터의 기본적인 구성도이다. 각 암은 GTO 소자 2개와 환류 다이오드 2개로 구성되어 있다. 각 암의 스위치를  $T_A(T_{A+}, T_{A-})$ ,  $T_B(T_{B+}, T_{B-})$ ,  $T_C(T_{C+}, T_{C-})$ 라 하고, 각 암의 스위칭 상태는 각각 상보형(complementary)으로 동작시키면 각 스위치의 스위칭 상태에 따라 8개의 전압벡터를 출력할 수 있다. 인버터에 의한 가변전압 가변주파수(VVVF)의 원리는 전압지령치 벡터의 회전수로부터 주파수를 가변하고, 전압벡터의 크기를 조절하여 가변전압을 구현하는데, 인버터에서 출력가능한 8개의 전압벡터를 적절히 조합하여 얻을 수 있다.

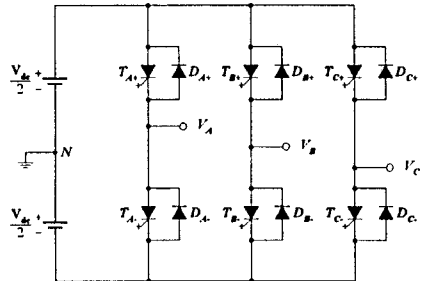


그림 1. 2레벨 인버터 회로

##### 2.1.2 3레벨 인버터

그림 3은 3상 전압형 3레벨 인버터의 기본적인 구성도이다. 한 암에 4개의 GTO, 4개의 환류 다이오드와 2개의 다이오드로 구

성되어 있다.  $(T_{A1}, T_{A4}), (T_{B1}, T_{B4}), (T_{C1}, T_{C4})$ 는 PWM을 하기 위한 스위칭 소자이고,  $(T_{A2}, T_{A3}), (T_{B2}, T_{B3}), (T_{C2}, T_{C3})$ 는 보조적인 스위칭 소자로서  $(D_{11}, D_{12}), (D_{21}, D_{22}), (D_{31}, D_{32})$ 와 함께 동작하여 출력상전압을 증성점 전위로 제한하는 역할을 한다.

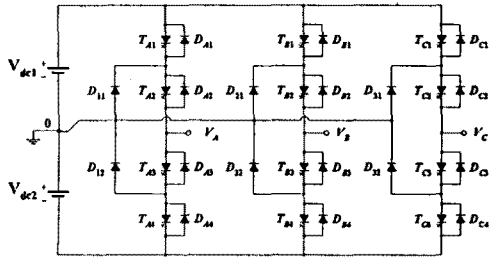


그림 2. 3레벨 인버터 회로

표 1. 3레벨 인버터의 스위치 상태와 출력전압

출력전압	스위칭 상태	$T_{N1}$	$T_{N2}$	$T_{N3}$	$T_{N4}$
$+V_{dc}$	+1	ON	ON	OFF	OFF
0	0	OFF	ON	ON	OFF
$-V_{dc}$	-1	OFF	OFF	ON	ON

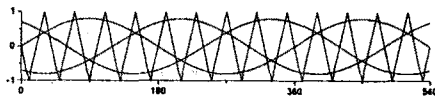
표 1은 한 암에서 스위치의 상태에 따른 출력전압을 나타낸 것이며, 각 암의 스위칭 상태에 따라 3레벨 인버터는 27개의 전압배터를 출력할 수 있다.

## 2.2 PWM 방식

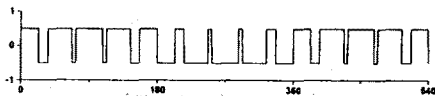
PWM 방식에는 여러가지 방식이 있으나 견인전동기용 인버터의 특성상 인버터의 운전 주파수에 대해서 GTO의 스위칭주파수를 정확하게 계산할 수 있는 방식으로는 SPWM(Sinusoidal PWM)과 SHE PWM(Selected Harmonics Elimination PWM)이 있다.

### 2.2.1 SPWM

2레벨 SPWM은 그림 3의 (a)에서와 같이 -1과 +1의 첨두값을 가지고 변화하는 삼각파와 정현파를 비교하여 스위칭각을 결정하며, 그림 3의 (b)는 출력상전압의 파형이다. 여기서  $m_f$ 는 정현파의 주기와 삼각파의 주기의 비율로 펄스수를 의미하며,  $m_c$ 는 인버터의 최대출력전압을 기준으로 정규화시킨 기본파의 크기이다.



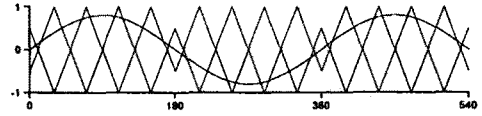
(a) 제어신호와 반송파의 파형



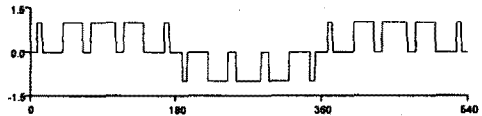
(b) 상전압  $V_{AN}$

그림 3. 2레벨 SPWM의 전압 파형( $m_f=9, m_c=0.8$ )

그림 4는 3레벨 SPWM의 전압파형을 나타낸 것으로 2레벨의 경우와 달리 반송파를 하나만 사용하지 않고 -1~0에서 변화하는 삼각파와 0~1에서 변화하는 삼각파 두개를 이용하여 정현파와 비교하게 된다. 그림 4의 (b)는 출력상전압의 파형이다.



(a) a상의 제어신호와 반송파

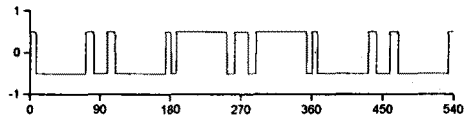


(b) 상전압  $V_{AN}$

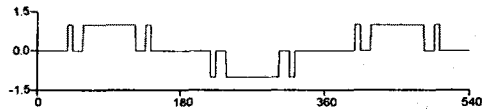
그림 4. 3레벨 SPWM의 파형( $m_f=9, m_c=0.8$ )

### 2.2.2 SHE PWM

SHE PWM은 기본파의 크기를 제어하고 특정 고조파 성분을 제거하는 스위칭각을 미리 계산하여 그 결과를 이용하여 스위칭하는 방식으로 그림 5는 2레벨과 3레벨의 SHE PWM 상전압파형이다.



(a) 2레벨 SHE PWM의 상전압  $V_{AN}$



(b) 3레벨 SHE PWM의 상전압  $V_{AN}$

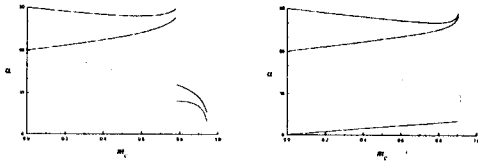
그림 5. SHE PWM의 상전압 파형

2레벨 SHE PWM의 푸리에 계수는 식(1)과 같고, 3레벨 SHE PWM의 푸리에 계수는 식(2)와 같다.

$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[ 1 + 2 \sum_{i=1}^{N_s} (-1)^i \cos(na_i) \right] \quad (1)$$

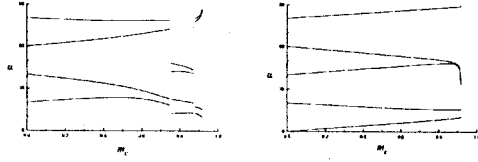
$$a_n = \frac{4}{n\pi} \left[ \sum_{i=1}^{N_s} (-1)^{i+1} \cos(na_i) \right] \quad (2)$$

여기서,  $N_s$ 는  $90^\circ$  이내의 스위칭각의 갯수를 나타낸다.  $N_s$ 의 수에 따라 식(1)과 식(2)에 대해서 연립방정식을 세울 수 있고, Newton Rapson 방법으로 풀면 스위칭각을 계산할 수 있다.[3][4] 그림 6은 2레벨 SHE PWM의 스위칭각을 나타낸 것이고, 그림 7은 3레벨 SHE PWM의 스위칭각을 나타낸 것이다.



(a)  $N_s = 2$

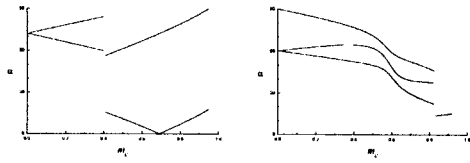
(b)  $N_s = 3$



(c)  $N_s = 4$

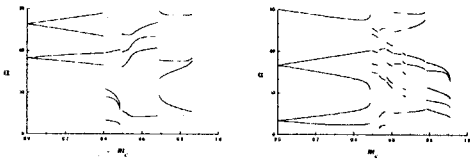
(d)  $N_s = 5$

그림 6. 2레벨 SHE PWM의 스위칭  $N_s = 2, 3, 4, 5$



(a)  $N_s = 2$

(b)  $N_s = 3$



(c)  $N_s = 4$

(d)  $N_s = 5$

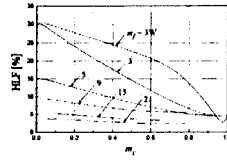
그림 7. 3레벨 SHE PWM의 스위칭 각( $N_s = 2, 3, 4, 5$ )

### 3. 출력전압의 고조파 특성

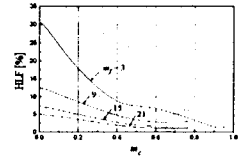
인버터의 출력전압은 인버터의 구조와 PWM 방식에 따라 4가지의 경우로 나누어지고, 출력전압의 특성도 달라지게 된다. 그러므로 각각의 PWM에 대해서 출력전압의 고조파특성을 파악해야 한다. 각각의 PWM 방식을 비교할 수 있는 평가함수를 정의할 필요가 있는데, PWM 방식마다 출력이 가능한 전압의 전체영역에서 고조파특성을 비교하기 위해 기본파에 대한 고조파 성분을 나타내는 HLF(Harmonic Loss Factor)를 정의하면 다음과 같다.

$$HLF = \frac{100}{V_{LI}} \sqrt{\sum_{n=2,3,\dots} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (3)$$

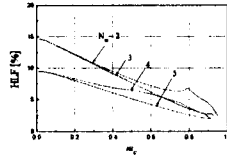
그림 8은 각각의 PWM에 대해 HLF를 나타낸 것이다. SPWM과 SHE PWM을 비교하면  $m_f = 2N_s + 1$ 의 관계가 있다. 같은 펄스수에서 PWM의 특성을 비교하기 위해  $m_f = 9$ ,  $N_s = 4$ 인 경우를 비교하여 보면 2레벨보다 3레벨의 HLF가 더 급격하게 감소하는 것을 알 수 있고, SPWM보다 SHE PWM이 대체적으로 고조파가 적게 존재한다는 것을 알 수 있다.



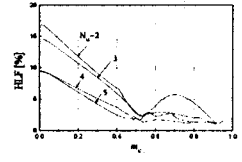
(a) 2레벨 SPWM



(b) 3레벨 SPWM



(c) 2레벨 SHE PWM



(d) 3레벨 SHE PWM

그림 8. PWM 방식에 대한 HLF[%]

### 4. 운전특성과 PWM 패턴의 결정

인버터의 출력전류와 토크특성을 분석하기 위하여 건인유도전동기의 등가모델과 전동기 상수가 필요하며, 표 2는 G7 고속전철용 유도전동기의 사양과 전동기 상수를 나타내었다.

표 2. G7 고속전철용 유도전동기의 사양과 상수

항 목	G7 건인 유도전동기
극수	4극
최대주파수	143[Hz]
정출력 시작 회전수	1279[rpm] (105.5[km/h])
정출력 시작 주파수	43.4[Hz]
최대회전수및 토크	4240[rpm], 2669[N·m]
최고속도	350[km/h]
전압및 전류	2200[V], 379[A]
고정자측 저항	0.0447[Ω]
고정자측 누설 인덕턴스	0.8 [mH]
회전자측 저항	0.0384 [Ω]
회전자측 누설 인덕턴스	0.768 [mH]
자화 인덕턴스	31.3 [mH]

표 2에서 나타난 전동기의 사양과 상수를 이용하여 각각의 PWM에 대해 시뮬레이션을 수행하였다. 정출력 영역이 시작되기 전의 운전주파수인 43.4Hz까지 시뮬레이션을 하였고, 운전주파수에 따른 출력전압의 지령치를 계산한 결과를 이용하여 PWM의 출력전압을 결정하였다. 그림 9는 각각의 PWM에 대한 운전특성을 나타낸 것으로, 2레벨보다 3레벨의 토크특성과 전류특성이 더 좋은 것을 알 수 있다.

앞에서 기술한 전압과 전류의 고조파특성과 스위칭주파수를 고려하여 각각의 PWM에 대해 구간별 펄스패턴과 절환주파수를 결정하여야 한다. 최대 스위칭주파수는 GTO의 내압을 고려하여 300Hz로 제한하였다. 그리고 절환주파수는 전압과 전류의 고조파 성분과 출력이 가능한 기본파 성분의 최대값을 고려하고, GTO의 최소 온 펄스폭(minimum on pulse width)과 최소 오프 펄스폭(minimum off pulse width)도 고려하여 결정하였다. 그림 10은 구간별 펄스패턴의 스위칭주파수를 인버터의 운전주파수에 대해 나타낸 것이다.

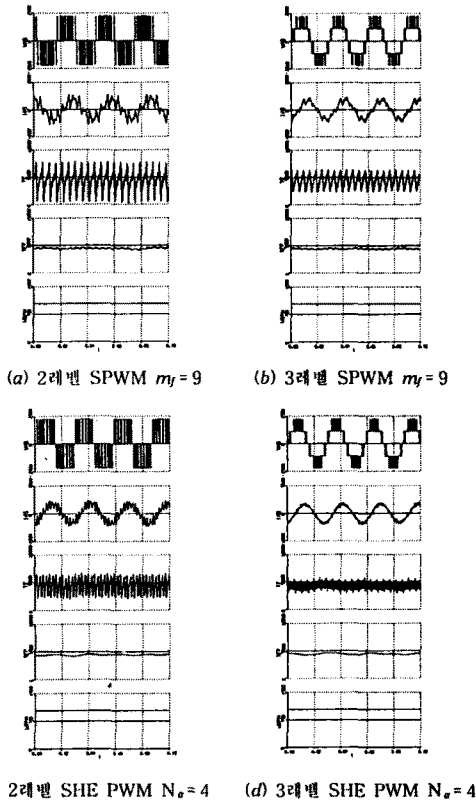


그림 9. 견인 유도전동기의 운전특성  
(전압, 전류, 토크, 토크(filtering), 속도)

### 5. 결 론

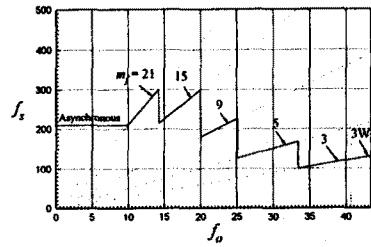
본 논문에서는 견인전동기용 인버터에 적용할 때 발생하는 고조파를 저감시키는 PWM 패턴을 유도하기 위해 인버터의 출력전압, 출력전류와 토크특성을 비교, 분석하였다. 인버터의 구조와 PWM 방식에 대해 2레벨 SPWM, 3레벨 SPWM, 2레벨 SHE PWM, 3레벨 SHE PWM으로 분류하여 각각의 특성을 분석하였고, 2레벨 방식보다는 3레벨 방식이 출력전압, 출력전류의 고조파특성과 토크특성이 우수함을 확인하였다.

이러한 결과와 최대 스위칭주파수 등을 고려하여 각 구간별 펄스패턴과 전환주파수를 결정하였다. 이러한 펄스패턴을 견인전동기를 구동하기 위한 인버터에 사용하면 고조파가 저감된 운전특성을 얻을 수 있을 것이다.

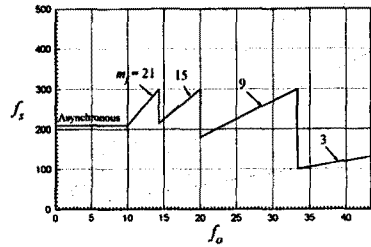
향후 연구과제는 약계자영역을 포함한 전체 운전영역에 대해서 컨버터까지 포함된 전체 견인시스템을 안정적으로 운전할 수 있는 제어 알고리즘을 도출하는 것이다.

### 참 고 문 헌

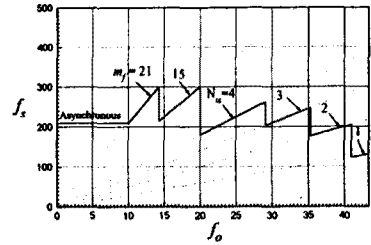
[1] H. Stemmler, "Power Electronics in Electric Traction Applications", IEEE IECON Proceedings, pp. 707~713, 1993.



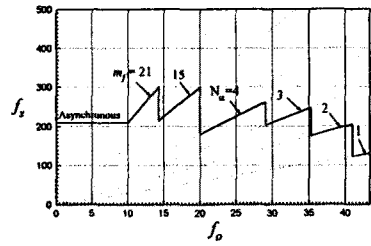
(a) 2레벨 SPWM



(b) 3레벨 SPWM



(c) 2레벨 SHE PWM



(d) 3레벨 SHE PWM

그림 10. 구간별 펄스패턴과 스위칭 주파수

[2] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives", IEEE Press, 1996.  
 [3] B. Velaerts, P. Mathys, and Z. F. Zondaoui, "Study of 2- and 3-level Precalculation Modulations", EPE Proceedings, pp. 3-228~3-234, 1991.  
 [4] Prasad N. Enjeti, Phoivos D. Ziogas, and James F. Lindsay, "Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics : A Critical Evaluation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 26, No. 2, pp. 302~316, March/April 1990.