

# 철도차량용 PWM 컨버터방식 비교

이현원 김남해  
현대중공업(주) 마북리연구소

## The Comparison of PWM Converter's Topology in Electric Train

H.W.LEE N.H.KIM  
HYUNDAI HEAVY INDUSTRIES CO.,LTD MABOOKRI RESEARCH INSTITUTE

### Abstract

AC to DC single phase PWM converter for traction application requires rated high power and voltage. Therefore, series or parallel operation of converters are necessary with considering the limitation of the power device specification.

This paper compares the characteristic between two parallel operation of conventional PWM converter and Single phase three level converter about comparison of power circuit, cooling system control method and harmonic current by computer simulation.

### 1.서론

철도차량용 교류/직류변환장치인 PWM컨버터의 경우 차종에 따라 약1000 kVA ~ 3000kVA 정도의 용량을 갖도록 설계된다. 이러한 대용량 PWM컨버터는 2대이상의 컨버터모듈을 병렬 운전하여 전력소자의 부담을 줄이고 전력소자의 스위칭주파수 제한에 따르는 단점을 보완하고 있다. 병렬운전의 경우 GTO싸이리스터를 전력소자로 사용하면 스위칭주파수의 한계를 540Hz 정도로 할 수 있는데 이 정도의 스위칭주파수에선 전원측 전류에 포함되는 고조파성분을 제거하기가 쉽지 않으므로 고조파성분을 줄이기 위한 제어방식이 필요하다.

한편 직렬회로 구성을 사용할 경우 전력소자에 대한 전압분담을 줄일 수 있는 장점이 있지만 직렬 연결된 컨버터를 정확하게 동시에 제어해야하는 어려움이 있기 때문에 실제 시스템에 있어서는 직렬회로 구성의 한 형태인 3레벨회로구성이 주로 사용되고 있다. 대표적인 3레벨회로 형태인 중성점유지방식을 사용하면 전력소자에 대한 전압분담이 줄어들고 전원 전류에 포함되는 고조파성분을 크게 줄일 수 있는 반면 전력소자수의 증가(클램핑 다이오드)와 스위칭부

가 보다 복잡해지는 단점이 생긴다. 본 논문에선 철도차량용 교류/직류변환용 PWM컨버터의 보다 유용한 회로구성을 위해 동일용량의 시스템을 각각 2레벨회로 구성의 PWM컨버터 병렬운전 경우와 3레벨 PWM컨버터 단독운전 경우를 컴퓨터시뮬레이션을 통해 동작특성을 비교해 보았다.

### 2. 2레벨방식 PWM컨버터 병렬운전

그림1과 같은 단상 2레벨PWM컨버터를 병렬 운전할 경우 각컨버터모듈의 부하분담율이 1/2로 되어 전

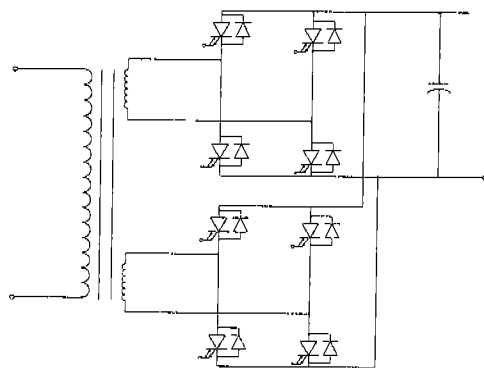


그림 1 2레벨 방식 PWM컨버터

력 소자의 전류정격을 줄일 수 있으나 병렬 운전의 경우 2대의 컨버터가 동일하게 부하를 분담할 수 있도록 제어되어야 하며 스위칭

주파수 제한에 따른 고조파 특성을 개선하기 위한 기법이 필요하다. 이러한 기법중 가장 널리 사용되는 방법은 먼저 유효스위칭수를 늘리기 위해 각단상컨버터의 2개 leg를 별도로 스위칭 하는 유니폴라방식 스위칭을 구현해 유효스위칭수를 2배로 증가시키는 방법이며 여기에 병렬 운전되는 각각의 컨버터 게이팅 각에 위상차를 주어 컨버터입력전류의 맥동분이 입력 변압기를 통해 서로 상쇄되어 전원측 전류에 포함되는 고조파의 크기를 줄이도록 하는 방법이 추가로 사용된다. 그림2와 그림3은 각각 컨버터leg전압과 선간 전압을 고속푸리에변환을 통해 분석한 그림으로 고조파 스펙트럼분포를 통해 유효스위칭수가 2배로 증가

했음을 알 수 있다. 또한 병렬운전시 각각 컨버터 입력전류는 상대방 컨버터스위칭에도 영향을 받게 되므로 제어부에 비간섭보상항을 추가하거나 승압용 리액터를 포함한 변압기1,2차간 임피던스 분포를 최적으로 해야한다.

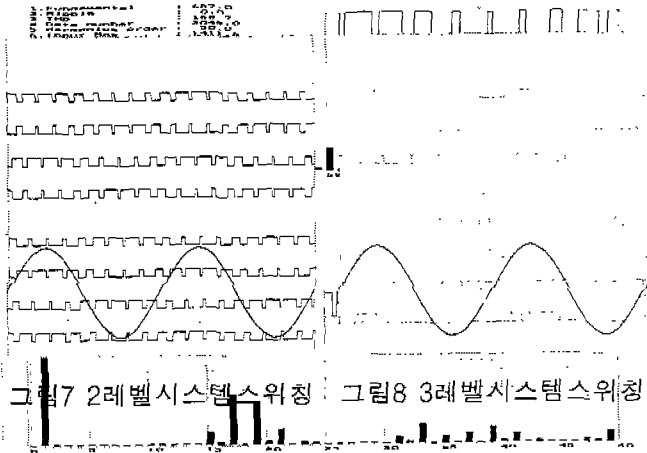


그림 3 선간전압 FFT

### 3. 3레벨 PWM컨버터 단독운전

철도차량용 PWM컨버터에 적합한 3레벨시스템으로는 이미 신뢰성이 입증된 그림4와 같은 중성점 유

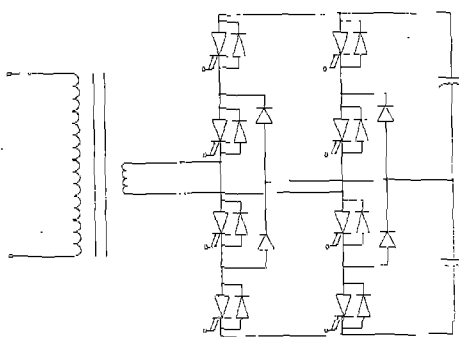


그림4 3레벨방식 PWM컨버터

지방식의 회로구성을 사용한다. 이 회로방식은 컨버터 모듈을 직렬 연결하는 방식중의 한 형태이므로 사용되는데 전력소자의

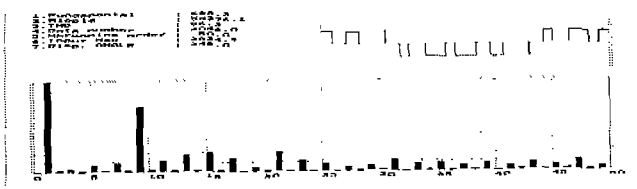


그림 5 leg 전압 FFT

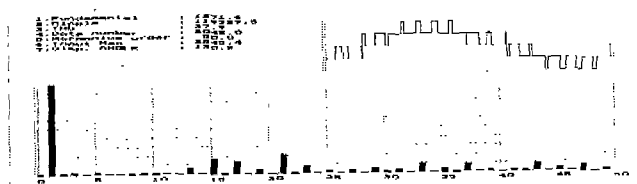


그림 6 선간전압 FFT

전압정격을 2레벨방식에 비해 1/2로 줄일 수 있으며 또한 PWM 방식은 2레벨방식과 유사하게 각 leg 별 unipolar 스위칭을 사용하며 소자별 반주기스위칭방식으로 시스템전체의 스위칭손실을 줄인다.

## 4. 특성비교

### 4.1 전력회로구성

그림1과 그림4의 전력회로 구성을 비교해보면 일단 3레벨방식이 전력용 반도체소자수가 2레벨방식에 비해 많으나(클램핑용 다이오드2개) 변압기 및 동작 시퀀스를 위한 컨택터류를 포함한 전력회로구성은 3레벨방식이 간편하며 변압기의 부피 및 중량감소를 위하여 승압용 리액터를 변압기 누설임피던스를 이용하여 처리할 경우 변압기의 설계 및 제작에 있어 3레벨방식의 회로구성이 더욱 유리하다. 여기에 철도차량의 전력변환장치가 송전선로에 미치는 영향을 고려하면 즉, 자기소호형 전력용 반도체를 사용하여 주기적인 주파수에서 스위칭을 할 경우 송전선로에서 전기적 불연속을 만들고 특정주파수에서 선로상 공진을 일으키며 이러한 공진 전류가 커지면 선로 상에 설치되어 있는 전화선이나 신호선 등이 전자장애를 받을 수 있으며 추진장치에 VVVF인버터 시스템을 사용할 경우 특히 그렇다. 이의 해결책으로 차량의 고압부어수동필터를 사용해 고조파크기를 줄이는 방법이 이용되고 있지만 변압기의 부피 및 중량을 증가시키는 문제가 생기며 그림4의 전력구조로 시스템을 구성하면 2레벨PWM컨버터병렬구성에 비해 위와 같은 문제점을 완화시킬 수 있다.

### 4.2 고조파해석 및 스위칭특성

2레벨 PWM컨버터 병렬운전과 3레벨 PWM컨버터 단독운전의 성능을 비교하기 위해 두시스템의 컴퓨터 시뮬레이션 조건을 표1과 같이 하였다.

항목	2레벨 병렬	3레벨 단독
1.입력전압	1차:25000V 2차:1400V	1차:25000V 2차:1400V
2.입력리액턴스	1.2mH	1.2mH
3.출력제어전압	2800VDC	2800VDC
4.직류측커패시터	8000 $\mu$ F $\times$ 1	16000 $\mu$ F $\times$ 2P
5.부하형태	인버터+R,L	인버터+R,L
6.부하용량	0~2.5MVA	0~2.5MVA
7.전원1주기당 스위칭회수	9회(540Hz)	9회(540Hz)

표 1 시뮬레이션 조건

입, 출력전압이나 부하형태 및 부하용량은 동일하게 하였으며 성능해석의 중요한 요소인 스위칭 주파수는 두시스템의 스위칭방식이 다소 차이가 나므로 그림7과 그림8과 같이 전력용 스위치 1개당 입력전원 전압의 한주기내에서 동일한 스위칭 수를 갖도록 설정하여 비교하였다.

2레벨 PWM컨버터 병렬운전방식은 전원 측의 고조파성분감소를 위해 컨버터1,2군의 전류 맥동이 서로 상쇄될 수 있도록 그림9와 같이 운전하며 이 결과 전원측(변압기 1차측)에 흐르는 전류는 그림10과 같다. 동일한 형태의 시뮬레이션을 3레벨 PWM컨버터 구성에서 실시하면 그림11과 그림12의 결과를 얻을 수 있으며 입력전류에 대한 고조파 특성을 부하량에 따라 비교한 그림13을 참조하면 3레벨 PWM컨버터 단독운전의 특성이 보다 양호함을 알 수 있다.

그러나 그림7과 그림8을 다시 비교하여 보면 3레벨 시스템의 경우 반주기만 스위칭 하는 방식이기 때문에 시스템에 GTO싸이리스터를 사용할 경우 반드시 확보하여야 하는 최소-온, 최소-오프 시간이 100 $\mu$ s 이상 되어 3레벨 시스템이 2레벨시스템에 비해 저변조 영역에서 왜형이 커지는 단점이 발생하며 이러한 단점은 최근에 상용화된 IGCT(최소-온, 최소-오프시간:20 $\mu$ s~30 $\mu$ s)를 사용하여 해결할 수 있을 것이다.

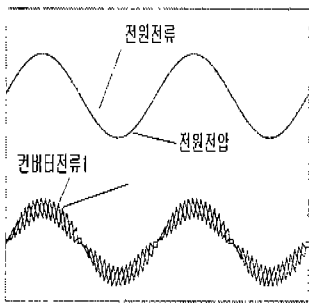


그림9 2레벨시스템 전압,전류

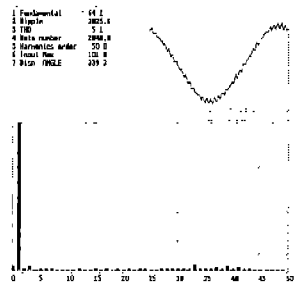


그림10 2레벨시스템 입력전류 FFT

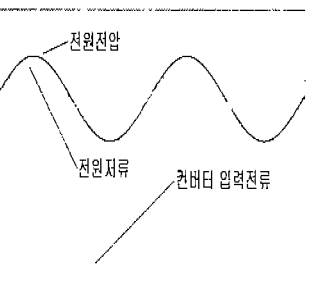


그림11 3레벨시스템 전압,전류

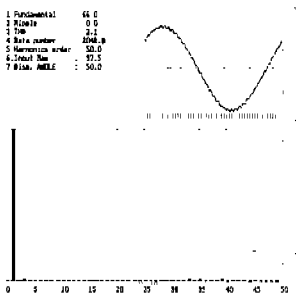


그림12 3레벨시스템 입력전류 FFT

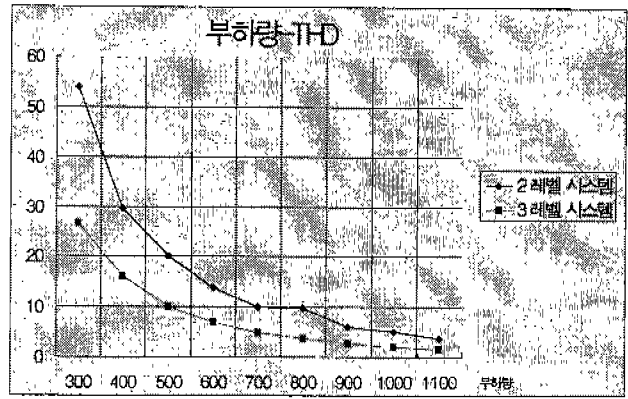


그림 9 고조파 크기비교

#### 4.3 시스템 냉각

전력변환시스템의 냉각을 위해선 먼저 발열량을 계산해야 하는데 발열량은 자기소호형 스위칭소자와 프리휠링다이오드 각각에 대해 conduction loss와 switching loss를 계산하여 합산하면 된다. 자기소호형 소자의 conduction loss는 식4.1과 같고 프리휠링 다이오드의 conduction loss는 식 4.2와 같다.

$$I_{cp} \cdot V_T \cdot \left[ \frac{1}{8} + \frac{D}{3\pi} \times \cos \phi \right] \quad \text{-----(4.1)}$$

----- $\rightarrow$  ( $\cos \phi = 1$ 로제어.)

$I_{cp}$  = 컨버터최대입력전류

$V_T$  = On State Voltage

$D$  = PWM Modulation  $\in$  dex

$$I_{cp} \cdot V_T \cdot \left[ \frac{1}{8} - \frac{D}{3\pi} \times \cos \phi \right] \quad \text{-----(4.2)}$$

----- $\rightarrow$  ( $\cos \phi = 1$ 로제어.)

또한 자기소호형 소자와 프리휠링 다이오드의 스위칭손실은 각각 식4.3 식4.4와 같다.

$$(E_{sw(on)} + E_{sw(off)}) \times f_{sw} \times \frac{1}{\pi} \quad \text{-----(4.3)}$$

$E_{sw(on)}$  = 소자 on손실

$E_{sw(off)}$  = 소자 off손실

$f_{sw}$  = 소자 스위칭주파수

$$\frac{1}{8} \times (I_{rr} \times V_{cc} \times t_{rr} \times f_{sw}) \quad \text{-----(4.4)}$$

$I_{rr}$  = Reverse Recovery Current

$T_{rr}$  = Reverse Recovery Time

2레벨 PWM컨버터 병렬운전과 3레벨 PWM컨버터 단독운전 회로구성에서 자기소호형 소자와 프리휠링

다이오드의 개수 및 1주기당 전체 스위칭 회수는 같으므로 스위칭손실에 따른 발열량은 같으며 Conduction loss의 경우 3레벨 스위칭이 2레벨스위칭과는 달리 반주기 스위칭 형태이나 동일 변조율 (Modulation Index)을 갖는 1주기에서 소자 전체의 On 시간을 합산하면 2레벨 스위칭의 온 시간과 같으므로 Conduction loss에 의한 발열량도 동일하다. 그러므로 2레벨컨버터 병렬시스템과 3레벨PWM 시스템의 발열량의 차이와 오직 3레벨시스템의 클램핑 다이오드2개에 의한 것인데 그 차이는 전체 발열량에 비해 그다지 크지 않으므로 냉각시스템의 용량을 결정하는데 크게 부담을 주지 않는다.

## 5.결론

현재 PWM컨버터를 AC/DC변환장치로 이용하는 대부분의 철도차량에서는 2레벨회로의 PWM컨버터를 2대이상 병렬 운전하는 방식으로 사용하고 있으며 이는 전력소자로서 GTO싸이리스터를 주로 사용하는 데 이유가 있을 것이다. 하지만 IGCT나 IGBT를 이용하여 3레벨회로 구성을 할 경우 위에서 언급한 것과 같은 많은 장점이 있으므로 이에 따른 시스템의 개발 및 실제 각종 시험을 통한 비교 분석이 요구되며 특히 IGBT소자를 사용할 경우, 아직 GTO나 IGCT에 비해 자체 정격용량이 적어 3레벨PWM 컨버터를 다시 병렬로 운전하는 형태 또는 IGBT소자 자체를 직.병렬로 사용하여야 하는 형태에서 오는 구조상의 불편함이나 전체 발열량이 커지는 단점이 있지만 소자 자체가 절연구조로 되어 있어 시스템 구성의 자유도가 뛰어난 장점과 유효스위칭회수의 증가에 따른 고조파 특성이 크게 개선될 수 있는 장점이 있다. 이에 따라 아직 철도차량에 PWM컨버터를 본격적으로 채용하지 않고 있는 우리나라 철도차량분야의 실정에선 시급히 여러 가지 형태의 PWM컨버터를 제작, 시험하여 시스템 가격, 부피, 중량, 제작편의성, 성능등 여러 가지 항목의 상호 비교를 통해 최선의 시스템을 사용할 수 있도록 하는 것이 중요하며 계속 발달되는 전력용 반도체를 효과적으로 이용할 수 있는 연구, 개발 시스템을 갖추기 위한 환경을 조성하는 것도 반드시 필요할 것이다.

## 참고문헌

- [1] M. Meyer, et al. "A Hysteresis Current Control for Parallel Connected Line-Side Converters of an Inverter Locomotive", EPE conf. Rec., pp. 102-109 1993.
- [2] J.-Onno.Krah, et al. "Total Compensation of

- Line-Side Converter=Fed AC Locomotives", IEEE Trans. on I.A. vol. 31, no. 6, pp. 1264-1273, 1995.
- [3] S. Inarida, et al "Development of Three Level Phase Power Converter System using IGBT for Shinkansen Trains", EPE conf. Rec., pp. 1.216-1.220, 1997.
- [4] N. Schbli, et al "Single and Three-Phase Multilevel converters for Traction Systems 50Hz / 16 2/3Hz", EPE Conf. Rec., pp. 4.210-4.215 1997.
- [5] 三菱電氣(株) "IGBT Module の 使用法"