

고속전철 보조전원 장치용 PWM컨버터의 4병렬 운전에 관한 연구

오근우\* , 김연충\* , 원충연\* , 최종목\*\* , 기상우\*\* , 배기훈\*\*  
 성균관대학교\* , 한국철도차량 주식회사\*\*

A Study on The 4-Parallel Operation of PWM Converter for High Speed Train Auxiliary Block

G.W.Oh\* , Y.C.Kim\* , C.Y.Won\* , J.M.Choi\*\* , S.W.Ki\*\* , K.H.Bae\*\*  
 Sung Kyun Kwan University\* , Korea Rolling Stock CORP.\*\*

**Abstract** - To reduce harmonics in the AC line and achieve a unit power factor, A 4 parallel single phase PWM AC/DC converter has been proposed. In this paper, the coupling components are derived analytically from PWM converter input transformer model and control scheme to solve this problem is proposed. Unit power factor was obtained and the AC-side current harmonics were reduced. Simulation results show the usefulness of the proposed method and applicability to PWM converter in auxiliary block of high speed train.

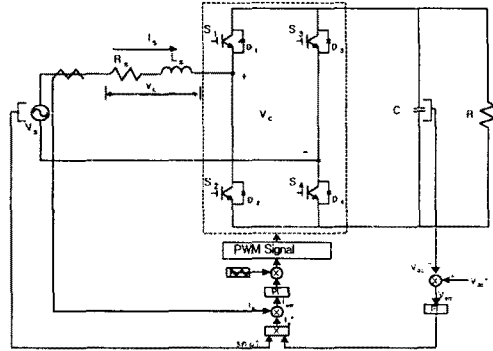


그림 1. PWM 컨버터의 전력회로

1. 서 론

경부 고속전철의 보조전원 장치에서 AC/DC컨버터로 사용되는 위상 제어 정류기는 자기소호능력이 없는 소자를 사용해서 출력전압의 크기만을 제어하므로 입력전류 파형에 고조파가 함유되어 전원측의 고조파가 커져서 주 전력 계통의 효율이 나빠지는 단점이 있다. 현재 국내의 적으로 컨버터의 스위칭 소자로 사이리스터 대신 자기소호 능력이 있는 GTO 나 IGBT 소자를 채용한 PWM 컨버터가 일반적이다.

입력측에서 문제시되는 고조파 및 전원측의 무효전력분담을 줄여 주기 위하여 역률이 1에 가까운 정현파 전류를 흐르도록 제어하고 있다.[1]

본 논문에서는 고주파 스위칭이 가능한 IGBT PWM 컨버터와, 입력 전원측의 고조파를 줄이기 위하여 3-레벨 스위칭 방식을 사용하였다.[2] 또한, 컨버터의 출력용량을 증가하기 위한 필요한 변압기의 모델링 및 제어 알고리즘을 제시하였다. 실 시스템(350[KVA], 4병렬 운전)을 대신하여 축소 시스템(20[KVA], 4병렬운전)을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 확인하였다.

2. 본 론

그림 1은 현재 추진되고 있는 고속전철 보조전원용 PWM 컨버터의 기본적 회로도이다. 동일한 컨버터4대가 병렬로 DC링크 커패시터에 연결되어 있다. 단상 PWM 컨버터는 입력측 전류와 전압이 동상이 되도록 제어하여 역행운전시 역률을 1로 운전하는 것이 가능하며, 회생시에도 전류와 전압의 위상을 역상으로 함으로써 고역률 운전이 가능하게 됨에 따라 전력계통의 효율을 증대할 수 있다.[3]

2.1 모드분석

그림 1의 컨버터 전력회로에서 스위칭 패턴에 따라 크게 동작모드를 3모드로 나눌 수 있다. 다음 표1은 입력 전압, 입력전류, 에너지의 흐름에 나타내고 있다. 상태에 따라 역행모드와 회생모드의 12개 모드로 나눌 수 있다.

표1. 모드분석

Vs	Is	Vc	도통소자	Is	에너지 전달관계
Vs>0	Is>0	0	D1 S3 or S2 D4	Is ↓	Vs→Ls
		Vdc	D1 D4	Is ↓	Vs+Ls→DCside
	Is<0	-Vdc	S2 S3	Is ↑	Vs+DCside→Ls
		0	S1 D3 or D2 S4	Is ↓	Ls→Vs
Vs<0	Is>0	Vdc	S1 S4	Is ↑	DCside→Vs+Ls
		-Vdc	D2 D3	Is ↓	Ls→Vs+DCside
	Is<0	0	D1 S3 or S2 D4	Is ↓	Ls→Vs
		Vdc	D1 D4	Is ↓	Ls→Vs+DCside
Is>0	-Vdc	S2 S3	Is ↑	DCside→Vs+Ls	
	0	S1 D3 or D2 S4	Is ↑	Vs→Ls	
Is<0	Vdc	S1 S4	Is ↑	Vs+DCside→Ls	
	-Vdc	D2 D3	Is ↓	Vs+Ls→DCside	

2.2 PWM 컨버터의 제어

4상한 IGBT 컨버터는 입력과 출력측 전압의 크기에 따라 변조파의 위상각을 제어함으로써 전원전류의 위상 및 역률을 제어할 수 있다. 역률제어 방법으로는 스위칭 한 주기 동안의 입력전류의 평균이 기준치를 추종하도록 하는 삼각파 비교 일정 주파수 전류 제어 방식을 이용하였다.[7]그림 2는 본 논문에서 적용된 제어 블록도를 나타내고 있다. 전류리미터의 위상을 이동시켜 병렬운전시 전원측의 전류리플을 감소시켜 전원측의 고조파를 줄일 수 있도록 하였다.

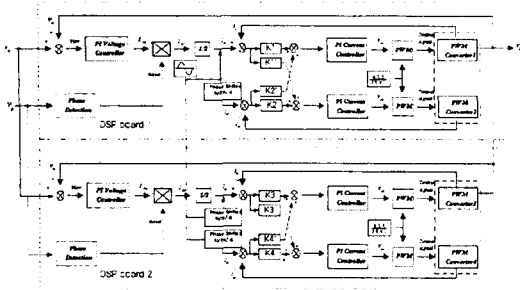


그림 2. 제어 블럭도

### 2.3 변압기를 포함한 4병렬 컨버터 모델링

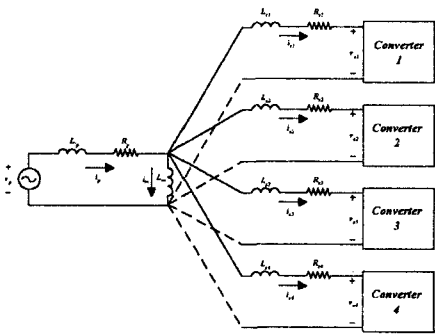


그림 3. 4병렬 시스템의 등가회로

변압기를 포함한 4병렬 시스템의 등가회로로서 2차측 상호간에 발생하는 상호인덕턴스 성분과 1, 2차측 등가 저항성분은 복잡성을 고려하여 무시하고, 각각의 상수값은 변압기 2차측 기준으로 변환하였다. 그림3의 등가회로에서 변압기 1차측과 2차측의 전압방정식을 각각 세우고  $L_{b1} = L_{b2} = L_{b3} = L_{b4} = L_b$  이라고 가정하면,

$$\frac{L_b + L_m}{L_m L_b} = A \text{ 로 치환하고, } L_b \cdot A = B \text{ 로 치환 하면,}$$

각 converter에 흐르는 전류에 대한 미분방정식은 다음과 같다.

$$\frac{di_{d1}}{dt} = \frac{1}{(4+B)L_b} (v_{e2} + v_{e3} + v_{e4}) - \frac{3+B}{(4+B)L_b} v_{e1} + \frac{AL_m - 1}{(4+B)L_m} v_p \quad (1)$$

$$\frac{di_{d2}}{dt} = \frac{1}{(4+B)L_b} (v_{e1} + v_{e3} + v_{e4}) - \frac{3+B}{(4+B)L_b} v_{e2} + \frac{AL_m - 1}{(4+B)L_m} v_p \quad (2)$$

$$\frac{di_{d3}}{dt} = \frac{1}{(4+B)L_b} (v_{e1} + v_{e2} + v_{e4}) - \frac{3+B}{(4+B)L_b} v_{e3} + \frac{AL_m - 1}{(4+B)L_m} v_p \quad (3)$$

$$\frac{di_{d4}}{dt} = \frac{1}{(4+B)L_b} (v_{e1} + v_{e2} + v_{e3}) - \frac{3+B}{(4+B)L_b} v_{e4} + \frac{AL_m - 1}{(4+B)L_m} v_p \quad (4)$$

이 식에서 보면 각각의 컨버터 전류는 각각의 컨버터에 대해 독립적이지 못하고 컨버터 상호간에 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 2.4 4병렬운전

고속 전철용 급전시스템에서 컨버터 한 대로 전력을 공급하기에는 역부족이므로 두 대 이상을 병렬로 연결하여 시스템의 용량을 대용량화 할 수 있다. 또한 시스템의 안정성을 높일 수 있고 단일운전시보다 입력측의 고조파를 저감시킬 수 있다.

컨버터 4대를 병렬운전할 경우, 각 컨버터를 스위칭 주기  $T_{sw}$  내에서  $T_{sw}/8$  만큼 위상차를 가지고 스위칭을 한다. 이와 같이 스위칭을 하면 전류의 기본파 성분은 서로 더해지고 전류의 리플성분은 서로 상쇄되어 전원측에서의 전류는 정현파에 가까게 된다.

그림 4는 실제 시스템의 4병렬운전 블럭도이다. 2군 2병렬로 모듈운전을 행함에 따라 컨버터 1군에 고장이 발생하면 정상운전 중인 다른 1군 2병렬회로로 운전하게 된다.

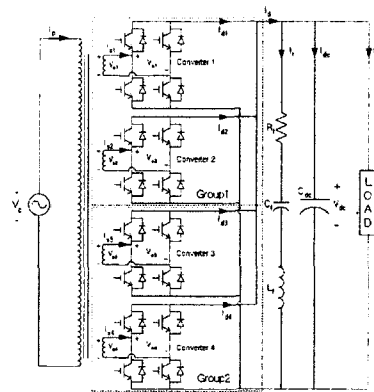


그림 4. 4병렬운전 블럭도

### 2.5 시뮬레이션

다음은 본 논문에서 사용한 시스템 파라미터이다.

컨버터 정격용량	: 20 [kVA]
입력전압	: 220 [V] ( $\pm 10\%$ )
출력전압	: 400 [V] ( $\pm 10\%$ )
정격부하	: 8 [ $\Omega$ ]
입력리액터	: 2 [mH]
출력커패시터	: 4700 [ $\mu F$ ]
스위칭주파수	: 1 [kHz]

컨버터의 4병렬 시뮬레이션은 단일운전시와 같은 사양의 컨버터 4대를 병렬연결하여 제어하였다. 변압기 상호간에 간섭현상은 없는 것으로 간주하였고, 컨버터의 스위칭 주파수가 1kHz 이므로 스위칭 주기의 1/8만큼 즉, 125( $\mu sec$ )의 위상차를 두고 제어하여 전원측 변압기 1차측의 입력전류의 고조파 성분을 감소시킬 수 있다.

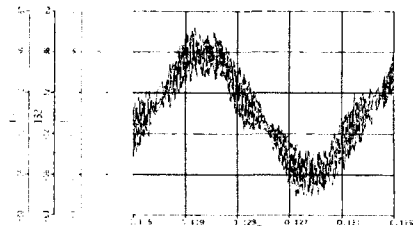


그림5. 변압기 1,2차측 전류

그림5는 변압기의 1차측 전류 2차측 전류로 각 컨버터의 전류리플이 서로 상쇄되는 것을 알 수 있다.

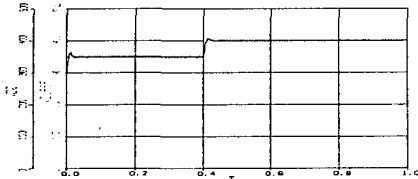


그림6. 무부하시 직류 링크전압

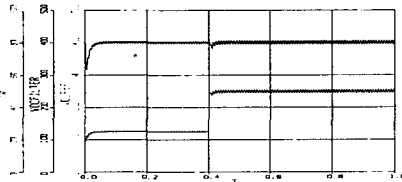


그림7. 부하스텝변화시 부하전류 및 직류 링크전압

그림 6은 무부하시 직류링크전압의 기준치를 350[V]에서 400[V]로 가변함에 따른 직류링크전압 파형을 나타내고 그림 7은 16Ω에서 8Ω으로 정격부하의 50% 스텝변화 되었을 때 부하전류 및 직류링크 전압 응답특성이다.

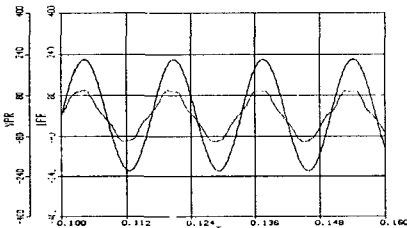
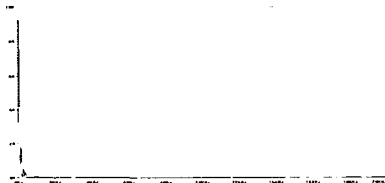
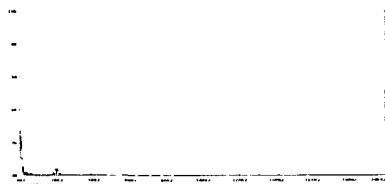


그림8. 변압기 1차측 전압, 전류

그림 8은 정격부하시 입력전압과 전류의 파형을 나타내고 입력전압과 전류가 동상을 이므로 역률제어가 되고 있음을 알 수 있다.



(a) 변압기 1차측의 FFT



(b) 변압기 2차측 FFT

그림9. 고조파 분석

그림 9는 변압기 1차측 및 2차측의 고조파 분석을 나타낸다. 변압기 1차측에서 기본파 성분과 고조파 성분은 변압기 2차측에서의 기본파 성분들은 서로 더해지고 고조파 성분들은 서로 상쇄된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 고속전철에서 보조전원장치로 사용되는 단상 PWM 컨버터의 4병렬 운전에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 변압기를 포함한 4병렬 컨버터를 모델링하여 시뮬레이션 하였다.

(2) 20 kVA 단상 PWM 컨버터로 직류링크전압이 기준치로 제어되고 입력전류가 입력전압과 동상이 됨을 확인하였고 부하의 스텝변화에 대해서도 정상상태에서 기준치로 제어되었다.

(3) 컨버터 4병렬운전시 단일운전보다 변압기 1차측에 흐르는 전류의 고조파 성분이 저감되는 것을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

본 연구는 고속전철 기술개발사업의 보조전원장치개발(2-2-3)과제의 1차년도 결과 (1999.11.1~2000.10.30)의 일부입니다.

### (참 고 문 헌)

- [1] A.I.Maswood, M. H. Rashid, "Input Current Harmonic Reduction in High Power AC/DC Rectifier", pp.593~599, IECON'91.
- [2] 송상훈, 성재원, 김연충, 원충연, 최중목, 이상우 "고속전철 보조전원장치용 PWM 컨버터의 병렬운전에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp.358~361, 1999.
- [3] Muhammad H. Rashid, Power Electronics, Prentice Hall, 1993.
- [4] L. J. J. Offringa and W. A. G. de Jager, "Modelling and Control of a 4-Quadrant Pulse Modulated Line-Side Converter for 25kV, 50Hz-Supplied Traction Equipment", EPE Proc., Firenze., pp.1-105~1-110, 1991.
- [5] J Shen and A D Mansell, "The Simplified Analysis and Design of a Converter System for a Three-Phase Traction Drive", RAILTECH C/478/6/043, 1994.
- [6] 이동춘, 최중우, 이현동, 실승기, "전철용 단상 GTO PWM 컨버터의 병렬운전", 대한전기학회 논문지, 제 44권 제6호, pp.756~761, 1995.
- [7] O.stihi and B.T.Ooi, "A Single-Phase Controlled-Current PWM Rectifier", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.3, No.4, pp.453~459, October, 1988.