

전동차용 IGBT형 190kVA 보조전원장치 개발

김종규, 박건태*, 정기찬, 김두식, 서광덕
 현대중공업(주) 전력전자연구소

The Development of IGBT Type 190kVA Static Inverter for Electric Car

J.K. Kim, G.T. Park*, K.C. Jung, D.S. Kim, K.D. Seo
 Hyundai Heavy Industrial Co., Ltd. Power Electronics R&D Dept.

Abstract

This paper is on the research and development of new SIV(Static Inverter) using IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) semiconductor for a wide range of electric railway applications. For the simplification and higher controllability, the direct PWM control method with 3level inverter topology was adopted.

In the new SIV system, the cost as well as bulk and weight was appreciably reduced about 40% lower than those of conventional SIV, the electrical efficiency was increased above 95% and the audible noise level was less than 65dB. In addition, the THD(Total Harmonic Distortion) factor was below 5% and the voltage fluctuation on a transient state was below 10%.

1. 서론

최근 철도차량 특히 전철이 대중교통의 중요한 수단으로 발전함에 따라 승객편의의 향상, 에너지 절감, 차량의 자동화 등이 요구되고 있다. 이에 차량용 보조전원장치도 부하의 대용량화, 다양화에 대응하여 소형·경량화, 저소음·고효율화, 무부수화 등 신뢰성이 향상된 제품이 개발되고 있다.

처음 보조전원장치의 부하로는 주로 차내 조명장치 등 수 kVA정도의 용량을 갖는 단상부하가 사용되었으나 차량의 서비스 장치의 증대로 인하여 다양하고 큰 용량의 부하가 필요하게 되었다. 1958년 싸이리스터가 발표된 이래 1970년을 전후하여 철도차량에도 전력전자기술이 도입되어 싸이리스터를 사용한 정지형 보조전원장치(SIV:Static Inverter)가 실용화되기 시작하였으며 1990년대 중반까지 대표적으로 GTO 소자를 사용한 이중쇼퍼 + TR 인버터(Double Chopper + Transistor Inverter) 방식과 직접 12상 PWM 인버터 방식이 주로 사용되었다.

그러나 이러한 방식은 소형·경량화, 저소음·고효율화, 출력전압의 저왜율 및 전압변동을 감소화, 신뢰성 보장, 유지·보수의 용이성과 같은 최근의 요구를 만족하지 못하고 있다.

이로인해 최근에 들어 요구사항에 적합한 대용량 전력용 반도체 소자인 IGBT를 이용한 인버터를 개발하기 시작하였다. IGBT를 처음 적용할 당시에는 IGBT소자의 전압내량이 최대 1,200V정도인 관계로 GTO 이중 쇼퍼 + 3레벨 인버터(GTO Double Chopper+3Level Inverter)의 형태로 구성되었다. 그러나 1995년이후 IGBT 소자의 대용량화 제작기술이 급속히 발전하여

1700V, 3300V / 1200A급까지 상품화 됨에 따라 인버터 전단에 감압형 쇼퍼부가 없는 직접형 인버터(2레벨, 3레벨)가 가능하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 대용량 전력용 반도체 소자인 IGBT를 사용하여 새로운 개념의 보조전원장치를 연구 개발하였다. 구조 측면에서 간략, 소형·경량화, 유지보수성 향상을 추구하였고, 성능 측면에서 직접형 3레벨 PWM 인버터 방식을 적용하여 출력전압의 왜율 및 출력전류의 고조파 함유율을 크게 감소시키고, 출력제어 응답성을 높였다. 또한 RS232통신 및 VFD(Vacuum Fluorescent Display Module)를 이용한 시스템의 정보 및 상태 감시가 편리한 MMI 기능을 확장하였다.

2. 시스템의 구성

본 연구에서 개발된 전동차용 IGBT형 보조전원장치의 기본 사양은 표1과 같다. 시스템의 주회로는 1600V, 600A급의 대용량 IGBT 소자를 사용한 직접형 3레벨 인버터 방식으로 구성되었다. 전동차용 보조전원장치에 IGBT를 사용함으로써 기존의 방식에 비해 점유면적과 중량이 약 60% 이하로 소형 및 경량화 되었으며, 전체 시스템을 1개의 Box내에 구성하여 점검 및 시험이 용이하며, 인버터의 소자 냉각은 Heat Pipe를 사용한 자연냉각방식

표1. 개발제품 기본사양

항목	사양		
시스템	주회로 방식	IGBT형 3레벨 PWM 인버터	
	IGBT規格	1600V, 600A Dual Type	
	냉각 방식	Heat Pipe식 자연냉각방식	
	입력 전압 범위	DC 1000V ~ 1900V	
	출력1 (교류)	정격 전압	AC 380V +5%, -10%
		용량	190kVA(적류 출력 포함)
		정격 주파수	60Hz ±1%
	출력2 (직류)	왜율	5% 이하
		역율	0.85 (지상) ~ 1.0
		정격 전압	DC 100V, +5%, -10%
용량		20kW	
제어	실효 리플 전압	±10%이내(실효치)	
	가청 소음	65dB 이하	
	효율	94% 이상(정격 부하 조건)	
	제어기	32Bit비트 DSP TMS320C31	
	제어 방식	Direct Digital Control 방식	
제어 대상	입력전압 불평형 제어		
	출력전압 일점, 전류제한제어		
편리한 MMI		RS232, VFD에 의한 상태감시	

을 채택하여 매우 간단한 구성이 가능하게 되었다. 또한 3레벨 인버터 방식을 적용하여 시스템의 고조파분을 최소화 하였다. 이로써 변압기 및 기타 부품들의 손실저감, 동작점 변이저감으로 시스템을 최적 설계하였다. 소음은 약 65dB 이하로 저소음화가 가능하게 되었고, 효율은 94% 이상이 가능하게 되었다.

그리고 그림 1은 전동차용 IGBT형 보조전원장치의 구조를 보여주고 있다. 그림 2는 시스템에 적용된 IGBT와 본 연구에서 개발한 IGBT 구동회로의 사진을 보여주고 있으며 과전류, 저전압 보호기능을 가진다. 그림 3은 3레벨 방식으로 설계된 IGBT 인버터 스택(단상) 사진을 보여주고 있다. 그림 4는 Control Rack과 CPU Card의 사진이다. 그림 5는 본 연구에서 개발한 3레벨 IGBT형 보조전원장치의 Box 전면부를 보여주는 사진이다.

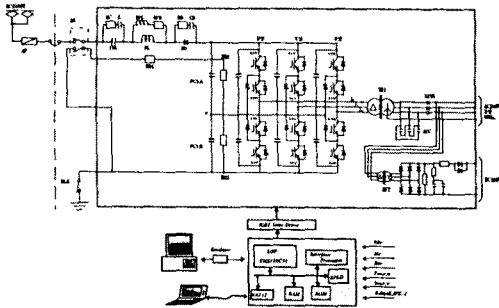


그림 1. 전동차용 IGBT형 보조전원장치의 구조

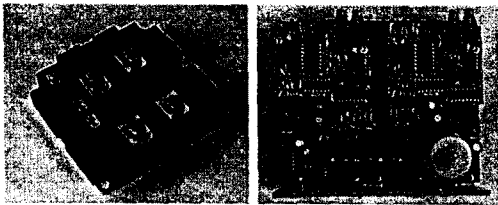


그림 2. 본 시스템에 적용된 IGBT와 구동회로의 사진

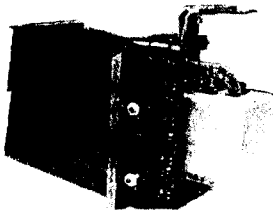


그림 3. 3레벨 IGBT 스택 사진(단상)

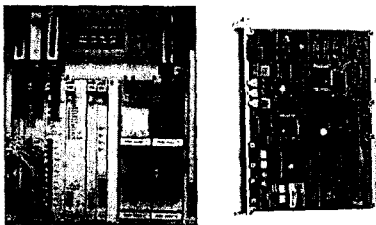


그림 4. Control Rack과 CPU Card



그림 5. 3레벨 IGBT 인버터 Box 전면부

3. 3레벨 PWM 방식과 고조파 분석

본 전동차량 시스템에서는 입력전압이 1000V~2000V까지 큰 폭으로 변하기 때문에 인버터의 변조지수(Modulation Index)의 동작 변화율이 다양하다. 따라서 인버터 출력측의 전류 리플의 크기가 증대하여 소음, 변압기 손실 및 출력전압 왜율이 커진다. 따라서 근원적으로 낮은 스위칭에 대해서나, 입력전압 변동에 대해서도 출력전압, 전류의 왜율 변동이 적은 3레벨 방식을 적용함으로써 시스템의 최적설계를 이루었다.

3.1 3레벨 PWM 방식

표2는 3레벨 인버터에서 제어할 수 있는 3가지 경우의 상전압 레벨에 대한 스위칭 상태를 표시한다. 게이트 S1U, S2U, S2V, S3V, S3W, S4W가 온 되고 나머지는 오프라고 가정하자. 이 때의 전류의 흐름에 따라 U, V, W상 상전압은 각각 +Vdc/2, 0, -Vdc/2이다. 그림 5에서는 이 경우의 스위칭 상태 및 전류 흐름에 대해 간단히 설명하고 있다.

표2. 3가지 경우의 상전압 레벨에 대한 스위칭 상태

스위칭 IGBT	U 상	V 상	W 상
S1 (U,V,W)	ON	OFF	OFF
S2 (U,V,W)	ON	ON	OFF
S3 (U,V,W)	OFF	ON	ON
S4 (U,V,W)	OFF	OFF	ON
출력 상전압	+Vdc/2	0	-Vdc/2

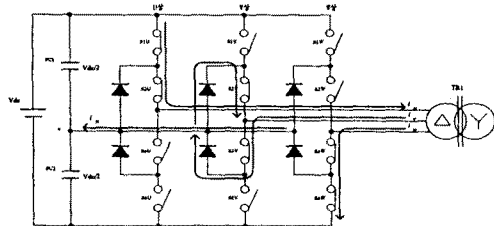


그림 6. 상전압 레벨에 대한 스위칭 상태 및 전류 흐름

3.2 2레벨과 3레벨 인버터의 고조파 비교 분석

PWM에서의 변조지수 M_f 와 전류 리플에 대한 THD는 식(1)과 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$M_f = V^* / (V_{dc} / 2) \quad (1)$$

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (2)$$

여기서 V^* 는 상전압 피크치이고 I_1 는 출력 전류이다.

그리고 그림 7은 Modulation Index에 대한 2레벨과 3레벨 인버터의 출력전압, 전류의 THD(100차까지의 고조파분)에 대한 비교 그림이다. 입력전압 변동으로 인해 변조지수가 변할 때 2레벨

인 경우 전압의 고조파 함유율이 큰 폭으로 증대하기 때문에 출력 필터의 크기는 전압 왜율이 가장 큰 경우에 맞추어 설계되어야 하지만, 3레벨인 경우에는 변조지수가 변하더라도 전압 왜율은 거의 일정하기 때문에 상대적으로 출력 필터의 설계가 용이하며 작은 값으로 설계 가능하다는 것을 알 수 있다. 변조지수는 DC1000V일 경우가 0.95정도이며 DC1800V일 경우는 0.55정도이다.

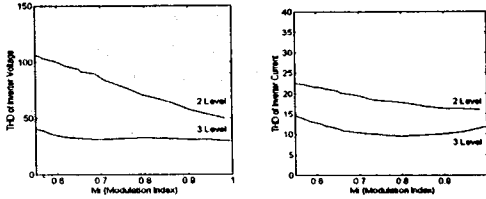


그림 7. 2레벨과 3레벨 방식의 출력전압, 전류 고조파 함유율 비교

4. 제어 알고리즘

일반적으로 전동차용 보조전원장치에서 요구되는 제어 특성들은 다음과 같다. 입력전압 변동이나 부하 변동시 출력전압의 일정제어, 부하단의 암쇼트나 이상시 출력전류 제한제어, 부하 불평형에 대한 출력전압 평형제어, 인버터 입력전압 불평형에 대한 평형제어 등이 필요하다.

그림 8은 이와 같은 제어 특성들로 구성되어진 제어 알고리즘 블럭도를 보이고 있다.

이는 가선 입력전압이 900V에서 1900V까지 변동하거나 부하가 변동하더라도 인버터 출력전압이 380V로 일정하게 유지되도록 제어하며, 입력전압 변동에 대한 입력필터 공진을 억제하면서

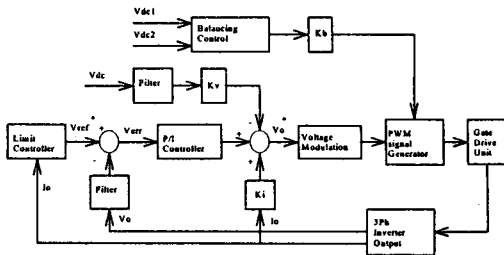


그림 8. 제어 알고리즘 블럭도

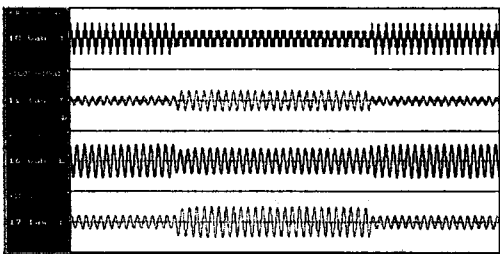


그림 9. 출력전류 제한 제어 시뮬레이션 파형

출력제어 속응성을 향상하기 위해 전압변동분 제어를 포함한다. 또한 입력 필터 콘덴서 전압의 평형제어와, 부하단에 이상이 발생하여 과전류가 흐를 때, 출력전류를 제한하여 시스템을 보호하고 부하단이 정상으로 복구되면 정상 상태의 전류가 흐를 수 있도록 제어하는 출력전류 제한부를 가진다.

그림 9는 출력전류 제한제어에 대한 시뮬레이션 결과를 보이고 있다. 그림 9에서 100kVA 부하 동작중 500kVA 정도의 부하 조건을 발생한 경우 출력전류 제한치로 제어가 충실히 수행됨을 볼 수 있다.

5. 실험결과

본 연구에서 개발한 전동차용 IGBT형 보조전원장치에 대해서 성능 시험 및 기능 시험을 수행하여 본 시스템의 우수성을 입증하였다. 부하 시험은 RL부하로 수행하였다.

그림 10은 본 시스템의 종합시험 환경을 보여주고 있다. 그림 11은 가선 입력전압이 DC1000V일 때의 정격부하 시험결과다. 그림 12는 입력전압이 DC1500V일 때의 정격부하 시험결과이다. 그림 13은 입력전압이 DC1800V일 때의 정격부하 시험결과이다. 이 그림 11, 12, 13에서 입력전압 변동 및 부하 변동과 같은 과도상태의 출력제어와 DC1000V~DC1900V에 대해 출력제어 특

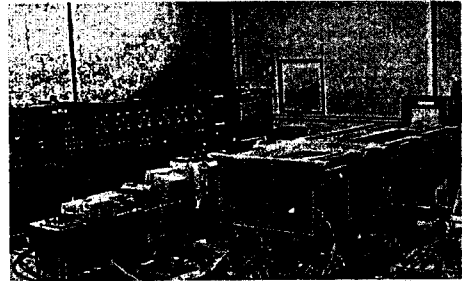
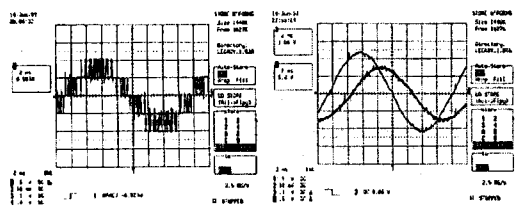
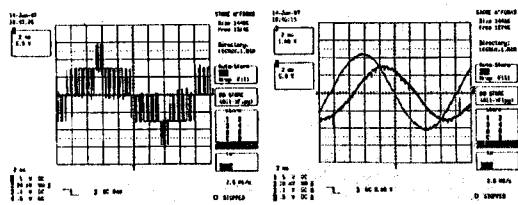


그림 13. 시스템 종합시험 환경



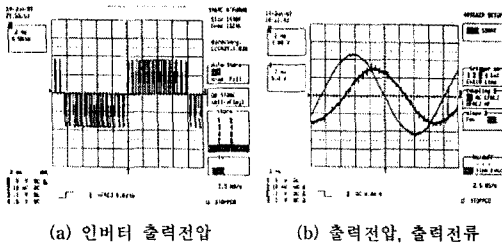
(a) 인버터 출력전압 (b) 출력전압, 출력전류

그림 14. 가선 입력전압이 DC1000V일 때 정격부하 시험



(a) 인버터 출력전압 (b) 출력전압, 출력전류

그림 15. 가선 입력전압이 DC1500V일 때 정격부하 시험



(a) 인버터 출력전압 (b) 출력전압, 출력전류
 그림 16. 가선 입력전압이 DC1900V일 때 정격부하 시험

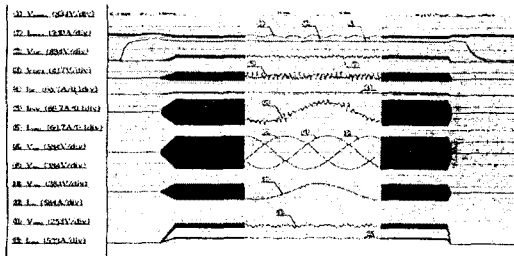


그림 17. DC1500V, 정격부하시 기동 시험

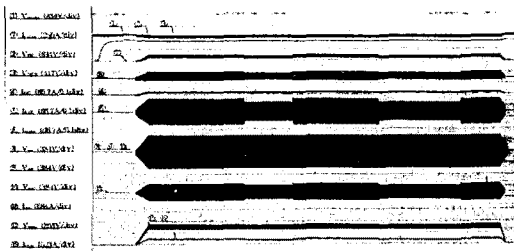


그림 18. DC1500V, 부하변동 시험

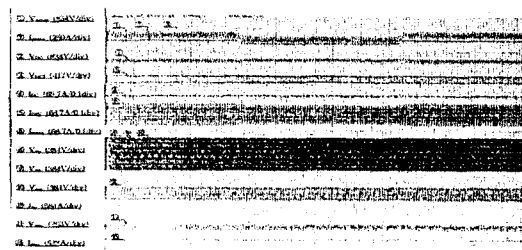


그림 19. 정격부하시 가선 입력전압 변동 시험

성이 아주 우수함과 출력측의 THD가 3%이하임을 알 수 있다. 그림 14는 입력전압이 DC1500V이고 정격부하일 경우의 기동 시험결과이다. 그림 15는 입력전압이 DC1500V일 때, 부하를 190kVA→130kVA로 변동 시험한 결과이다. 그림 16은 정격부하시 가선 입력전압 1800V→1500V로 변동 시험한 결과이다.

6. 결론

본 연구 개발된 시스템은 IGBT 대용량반도체소자와, 3 LEVEL 주회로 뿐 아니라 DSP(Digital Signal Processor)에 의한 최신제어기법을 적용함으로써 기존의 GTO와, Transistor를 사용한 시스템(CHOPPER + 12 PULSE INVERTER)에 비해 부피와 무게는 60%이하, 소음은 65dB이하, 효율은 95%이상, 가격은 70%이하의 놀라운 성능개선 결과를 얻었으며 전차선전압의 과도한 변동에 대한 출력 일정제어기술, 불평형부하 및 이상부하에 대한 출력 평형제어기술도 확보하였다. 또한 다양한 동작정보 저장, 장치의 동작상태 감시 및 제어변수 변경을 간단한 통신에 의해 가능하도록 한 맨-머신(Man-Machine) 인터페이스 기능을 도입함으로써 유지보수의 편의성을 크게 도모하였다.

참고문헌

- [1] 현대중공업(주) 마북리연구소 전력전자연구실, "전동차용 190kVA SIV(파천선) 연구개발 완료 보고서", 1993.3
- [2] 현대중공업(주) 마북리연구소 전력전자연구실, "부산지하철 1호선 140kVA SIV 교안", 1994.3
- [3] 현대중공업(주) 마북리연구소 전력전자연구실, "AC 구동 시스템 완료 보고서", 1996
- [4] 현대중공업(주) 마북리연구소 전력전자연구실, "자기부상열차용 VVVF 인버터 완료 보고서", 1996.
- [5] EUPEC, "IGBT-MODULES, Catalogue.", 1995.
- [6] Hyo L. Liu, Nam S. Choi, Gyu H. Cho, "DSP Based Space Vector PWM for Three-Level Inverter with DC-Link Voltage Balancing.", IECON. 1991.
- [7] B. Velaert's, P.Marthys, E.Tatakis, "A Novel Approach to The Generation and Optimization of Three-Level PWM Wave Forms.", PESC'88, RECORD.