

특집 : 전기철도시스템의 전력전자기술

전기철도차량의 보조전원용 전력 변환장치 기술

이 은 규

(우진산전 연구소장)

철도차량에는 여러 형태의 전력 변환 장치들이 존재하고 운영되고 있다. 전기철도차량에서는 차량의 동력원을 제어하는 추진제어장치와 각종 콤프레서를 동작하는 인버터, 차량의 전원으로 사용되는 정지형 인버터 등이 주요 전력 변환장치라고 할 수 있으며 이 중에서 차량의 전원과 배터리 충전을 위한 장치인 전기 철도차량의 보조전원용 전력변환장치의 종류들과 변화 과정들을 소개 하고자 한다.

1. 서론

전기철도차량이 국내에 도입된 것은 불과 30여년 정도 밖에 되지 않지만 이미 반도체 기술의 발전과 전력전자기술의 발달을 기반으로 하여 다양하게 발전하고 있다. 철도는 대중교통수단으로 대량 수송을 담당하고 있기 때문에 산업용 인버터와는 그 구조와 제어 방식이 차이가 있다. 특히 산업체에서 전력 변환 기술이 나날이 발전해가는 상황에서 하이브리드 자동차나 전기 자동차와 같은 전력변환기술이 컴팩트해지는 시점과 비교해 볼때 대용량 소자를 활용하는 철도차량에서는 전력변환기술이 안정성과 대용량성을 중심으로 발전한 것은 응용성의 한 방면이라고 할 수 있다. 전기 철도에서 보조전원장치의 역사를 살펴보면 대용량 반도체 소자의 활용

이 어려웠던 시절에는 MA 또는 MG를 사용하여 모터를 구동하여 발전하는 전원을 사용하여 차량의 전원으로 사용하는 방식으로 아직도 국내 철도 중 국철 구간인 1호선과 지하철 구간에서 운영되며 디젤 기관차에서도 사용 중인 장치들이다. 이는 전기 에너지를 기계에너지로 변환하고 이를 다시 전기 에너지로 만들어 사용하여야 하기 때문에 효율과 빠른 응답성을 기대하기 어렵고 장치의 유지보수 또한 어렵기 때문에 현재는 에너지의 활용적인 면에서는 좋은 시스템이라고는 보기 어렵다. 보조전원장치는 1978년에 전동차를 처음 도입한 철도 차량 이후 인 1984년에서야 반도체 소자로 싸이리스터와 GTO를 사용한 보조전원장치가 도입되었고 이 당시에는 용량 또한 110KVA정도가 최대 용량으로 사용되었으며 출력의 고조파를 저감하는 용도로 변형천조결선인 트랜스포머를 사용하고 출력 필터를 사용하여 저감하는 형태의 방식을 사용하고 있었다. 이후로 현재 국내에서 사용되고 있는 보조전원장치는 IGBT를 사용하는 6상, 12상 인버터 제어방식과 3레벨 인버터 제어방식, 입력부에 더블쇼퍼를 사용하는 쇼퍼 제어 방식과 입력부를 단상 컨버터로 사용하는 방식들이 주로 사용되고 있다. 전력전자의 기술이 반도체 소자의 발전과 제어기술을 통하여 빠른 부하 추종성과 높은 효율, 낮은 왜율을 요구하고 있으며 특히 최근에는 경량화의 요구와 저

소음을 위하여 기술 개발을 진행해가고 있는 실정이다.

2. 보조전원 장치의 구성

현재 철도차량에서 적용되고 있는 보조 전원장치는 차량의 특성과 종류에 따라서 차이가 있고 용량 또한 차이를 가지고 있지만 크게 입력 필터부와 전력변환을 일으키는 인버터부 그리고 입·출력의 절연 및 출력필터를 갖춘 트랜스포머부로 구분될 수 있다. 그림 1은 일반적인 전기철도의 SIV 시스템의 주 회로도를 나타낸다.

가선 입력 측은 일반적으로 직류 구간에서는 DC 1500V 이고 교류 구간인 코레일 구간에는 메인 트랜스포머를 통하여 교류 전원을 전과 정류하는 (MRf) 출력을 사용한다. 이 경우 입력의 불안정 때문에 입력 쇼퍼를 사용하여 인버터 입력을

안정하기도 한다. DC Link 캐패시터의 초기 충전시 돌입전류를 방지하기 위한 FL(Filter reactor)와 RC 필터, 그리고 충전저항과 충전용 접촉기로 구성되어 있다.

그리고, 인버터부는 3레벨 인버터나 2군병렬 구동 인버터로 구성되기도 하지만 일반적으로는 전압형 인버터회로로 구성되며 국내의 철도차량의 대부분이 자연 냉각 방식으로 소자의 방열을 취하는 방식을 주로 채택하고 있다. 이는 소음 저감의 목적이 크며 자연 대류로 냉각 시키는 것이 일반적인 방법이다. 인버터의 스위칭 주파수 또한 저소음화를 위하여 최근에는 3~4kHz를 주로 사용한다. 출력부는 인버터의 스위칭으로 출력된 펄스파를 평활화시키기 위하여 리액터를 내장한 $\Delta - Y$ 트랜스포머나 일반적으로 리액터와 트랜스로 구성하고 3상 캐패시터로 출력 필터를 구성하는 것이 일반적이다.

그림 2는 전기철도용 보조전원장치의 외형을 보여주며, 표 1에는 보조전원장치의 제원을 나타내고 있다.

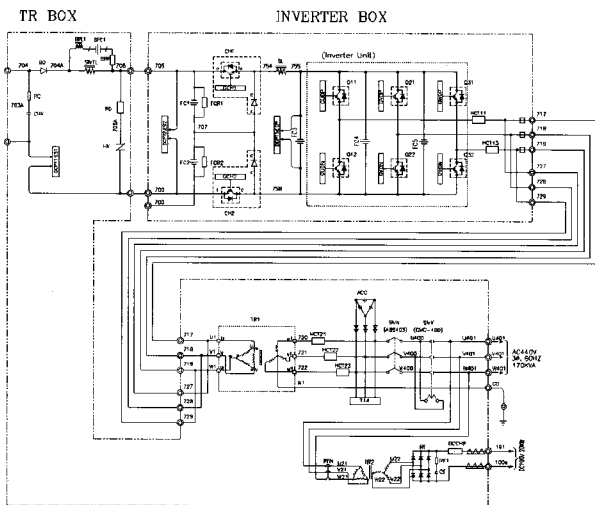
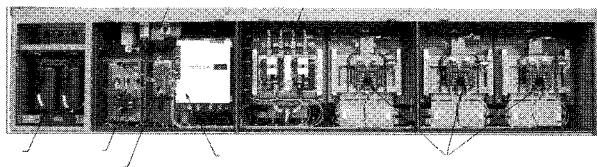
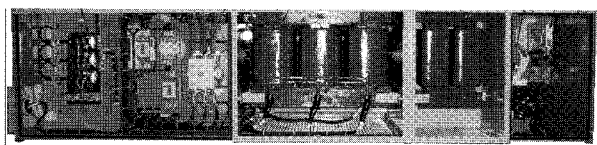


그림 1 보조전원장치 주회로도(더블 쇼퍼 장치)



< 더블쇼퍼 + 인버터 함 >



< 교류 필터 및 트랜스포머 함 >

그림 2 190kVA급 SIV 외형 사진

표 1 제원

항목		규격
회로 방식		6 펄스 전압형 인버터
제어 방식		PWM 제어
냉각 방식		자연 냉각
정격		190kVA 연속
입력	정격 전압	DC 1500V
	전압 변동 범위	DC 900V ~ DC 1900V
출력	용량	190kVA (직류 출력 20kW 포함)
	종류	3상 4선
	정격 전압	AC 440V
	정격 전류	AC 249A
	전압 변동 범위	정격 전압의 $\pm 3\%$
	부하 변동 (70% \leftrightarrow 100%)	$\pm 10\%$ (출력전압변동율)
	정격 주파수	60Hz $\pm 1\%$
	왜율	5% 이하
	부하 역률	0.85
	부하 변동 범위	0 ~ 100%
과부하 내량	200% 60초	
직류 출력 (DC100V)	정격 전압	DC 100V
	전압 변동 범위	정격 전압의 $\pm 5\%$
	정격 용량	20kW 연속
제어 전원	정격 전압	DC 100V
	허용 변동 범위	DC 70 ~ 110V
효율	90%이상	
소음	70dB 이하 (1m 주위)	
주위 온도	$-25^{\circ}\text{C} \sim +45^{\circ}\text{C}$	
통신방식	RS485 비동기 통신	

3. 보조전원 장치의 제어 방식

인버터의 출력전압을 제어하기 위해서 전압제어기와 전류제어기를 가지는 이중제어루프를 사용하였다. 그림 3에서와 같이 전압제어기는 출력전압의 기준치(V_c^*)와 피드백된 전압(V_c)를 비교하여 PI제어기를 통하여 제어한다. 이 제어값은 리액터 전류의 기준치(i_a^*)가 되며 전류제어기의 기준치로 입력되어 제어한다.

3.1 전압 제어

인버터의 출력전압 V_c^* 가 기준 전압 V_c 를 잘 추종하도록 전압제어기가 전류 제어기로 주는 i_{aqd}^* 는 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{aq}^* &= i_{Lq}^* + K_p(V_{cq}^* - V_{cq}) + \omega C_f v_{cd}^* \\ i_{ad}^* &= i_{Ld}^* + K_p(V_{cd}^* - V_{cd}) + \omega C_f v_{cq}^* \end{aligned} \quad (1)$$

단, k_p : PI 제어기의 Gain

즉, 전압제어기는 출력전압의 지령치와 피드백 값을 비교하여 PI제어기를 통해 보상하게 된다. 이 값과 부하전류의 예측

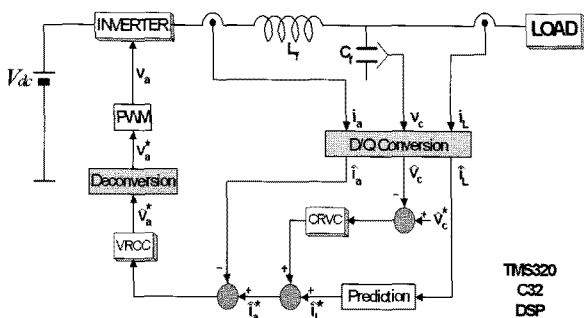


그림 3 SIV 제어기의 블록도

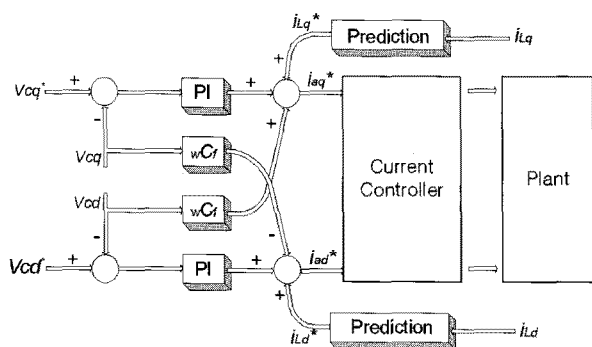


그림 4 전압 제어기

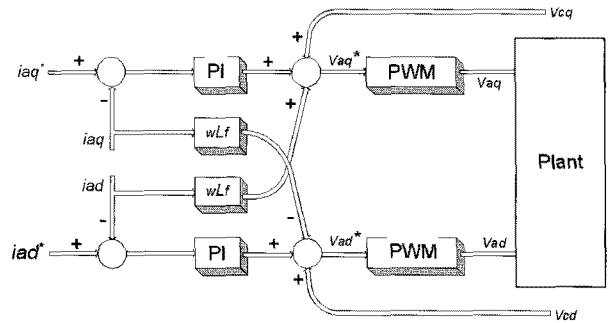


그림 5 전류 제어기

값을 더해 전류제어기의 입력을 만들어 내며 커플링 항을 제거하기 위해 $\omega C_f v_{cd}$ 와 $\omega C_f v_{cq}$ 의 피드포워드 항을 추가하였다.

그림 4는 PI 전압제어기를 구조를 보여준다.

3.2 전류 제어

전압형 인버터의 경우 전류의 변화율은 전압보다 훨씬 크다. 따라서 전류를 제어하면 그 제어의 속도는 전압보다 훨씬 빠르게 동작된다.

제어의 대상은 캐패시터 전류나 리액터 전류 둘 중 어느 것이라도 무방하지만, 부하전류가 포함된 리액터 전류를 제어하는 것이 부하변동에 따른 제어에 있어서는 더욱 효과적이다.

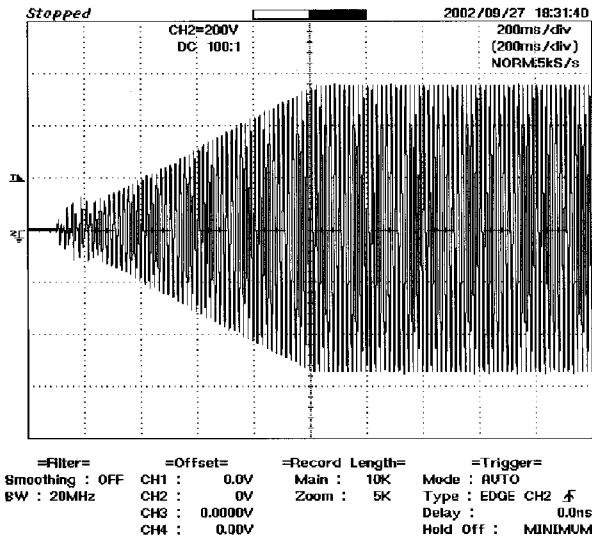
전압제어기로부터 지령치를 받는 전류제어기의 출력은 인버터의 출력 전압(L-C필터의 전단)이 된다. 인버터 출력전압을 V_a 라 하면 전류제어기는 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{aq}^* &= v_{cq}^* + K_p(i_{aq}^* - i_{aq}) + \omega L_f i_{ad}^* \\ v_{ad}^* &= v_{cd}^* + K_p(i_{ad}^* - i_{ad}) + \omega L_f i_{aq}^* \end{aligned} \quad (2)$$

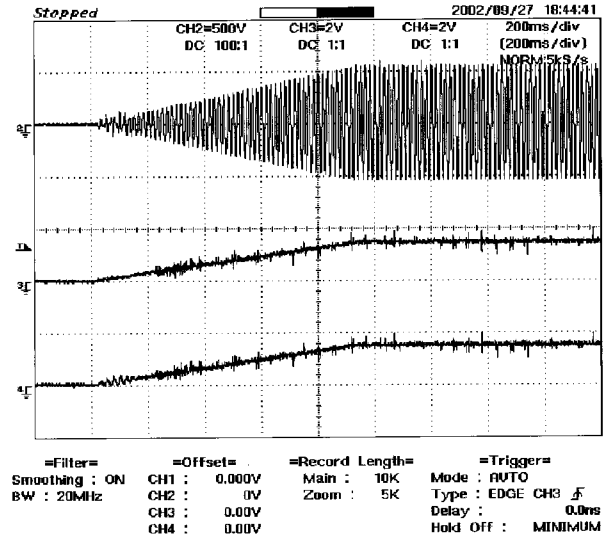
전압제어기와 마찬가지로 상간 간섭 항인 커플링 항을 제거하기 위해 전단에 $\omega L_f i_{ad}$ 와 $-\omega L_f i_{aq}$ 의 피드 포워드 항을 추가하였다. PI제어기를 이용한 전류제어기의 블록도는 그림 5와 같다.

4. 실험 결과

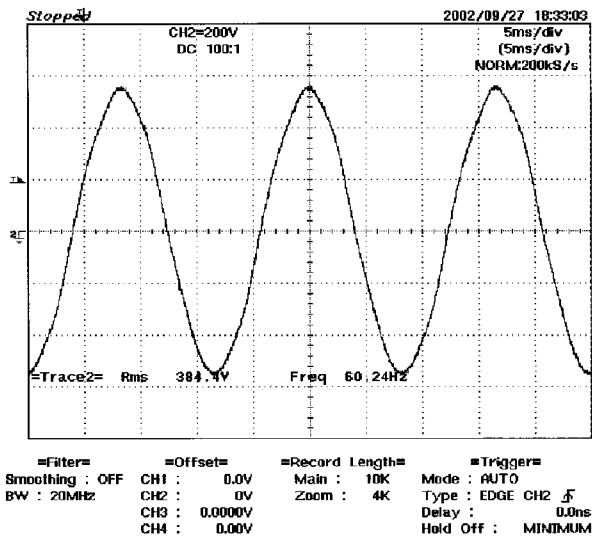
다음 그림 6~8은 그림 2에서 보인 SIV의 실험 파형이다. 시험시 가선전압은 750[Vdc]를 사용하였으며 출력전압 지령치는 선간 전압 380[Vrms], 60Hz이다. 그림 6은 무부하에서 초기 기동시와 정상상태의 선간 전압 파형을 보여준다. 초기 기동시는 소프트 스타팅으로 전압이 서서히 증가하는 모



(a) 초기 기동시(Initial start)

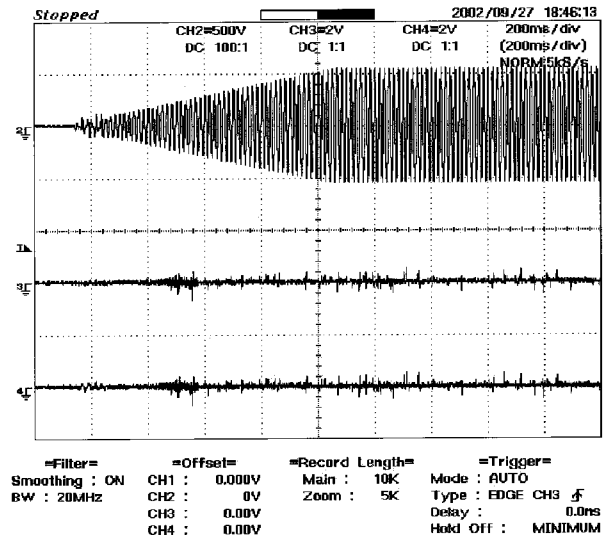


(a) 선간 전압, q축 전압지령치, q축 전압



(b) 정상상태 파형(Steady state)

그림 6 SIV 초기 기동시와 정상상태시의 선간전압(200V/div)



(b) 선간 전압, d축 전압지령치, d축 전압

그림 7 기동시 선간전압과 d,q축 전압지령치 및 d,q축 전압

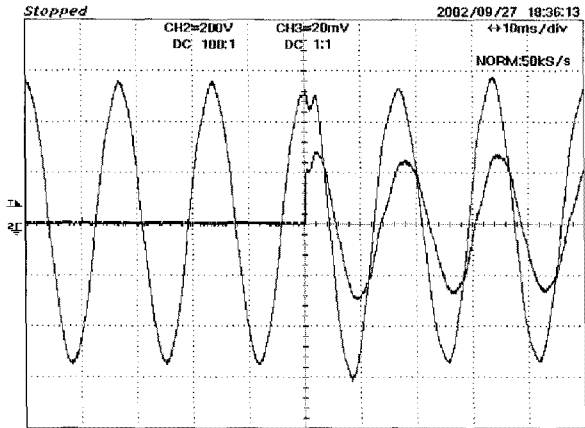
습을 볼 수 있으며, 정상상태에서 380V, 60Hz의 선간 전압이 출력되는 것을 볼 수 있다.

그림 7은 기동시 d, q축 전압 지령치와 d, q축 전압을 나타낸다. 이것은 제어기내에서 제어되는 제어량이며, d, q축 전압이 그 지령치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 부하 급변시의 선간 전압 파형을 보여준다. 투입 시나 차단시 1주기 내에서 큰 충격없이 지령치를 추종하고 있음을 알 수 있다.

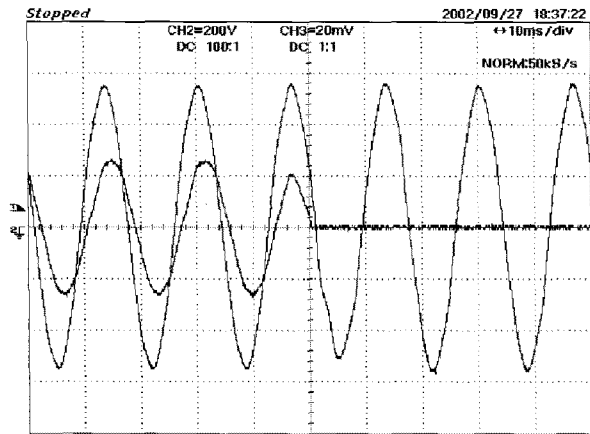
5. 결론

본 논문은 도시형 대량 교통 시스템인 전기철도의 보조전원 장치로 사용 중인 3상 전압형 PWM 인버터에 관한 연구이다. 여러 종류의 차량용 보조전원장치의 전력 변화장치에서 일반적으로 사용되는 전압형 인버터 장치에 대하여 정리 하였으며 그 적용 예와 제어방식에 대하여 정리 한 것이다. 3상 시스템인 보조 전원 장치를 회전 좌표계상으로 모델링하였으



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : NORMAL
 BW : 20MHz CH2 : 0V Zoom : 5K Type : EDGE CH3 \neq
 CH3 : 0.0000V Delay : 0.0ns
 CH4 : 0.00V Hold Off : MINIMUM

(a) 부하 투입시



=Filter= =Offset= =Record Length= =Trigger=
 Smoothing : OFF CH1 : 0.0V Main : 10K Mode : NORMAL
 BW : 20MHz CH2 : 0V Zoom : 5K Type : EDGE CH3 \neq
 CH3 : 0.0000V Delay : 0.0ns
 CH4 : 0.00V Hold Off : MINIMUM

(b) 부하 차단시

그림 8 부하 급변시 선간 전압(200V/div)과 상전류(50A/div)

며, 이를 바탕으로 제어기를 설계하고 시작품을 제작하여 부하변동에 대한 시스템의 동적 응답특성을 구함으로써 제안된 제어기의 우수성을 입증하였다.

또한, 상기의 시스템을 현차 (KORAIL 전동차)에 적용하여 시스템의 안정성을 입증하였으며, 현재 서울메트로 및 KORAIL에서 영업운전 중에 있다.

향후 보다 고효율, 고신뢰성, 저소음, 경량화, 유지보수의 간략화에 관한 신기술을 확대 적용하기 위하여 좀더 많은 시험과 알고리즘 개발이 필요할 것으로 보인다.

참고 문헌

- [1] S. Mine, Y. Yonehata, M. Shigenobu and M. Yano, "The Auxiliary Power Supply for Rolling Stock", IPEC-Tokyo, pp. 1309-1320, 1983.
- [2] Olle I. Elgerd, "Electric Energy Systems Theory" McGRAW-HILL, Inc., 1971.
- [3] S. Inarida, K. Nakamura and Y. Iwaji, "Study on Instantaneous Voltage Control Method for Auxiliary Power Supply Systems Used in Rolling Stocks", IEE Japan, pp. 1132-1139, 1996.

< 필 자 소 개 >



이은규(李恩圭)

1965년 6월 26일생. 1988년 아주대 전자공학과 졸업. 2005년 충북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년~현재 (주)우진산전 연구소장.