

객차용 BOOST형 보조전원장치에 관한 연구

Development of the Boost Type Auxiliary Coach Converter

김태완* 박건태* 정기찬* 이성목** 김두식***
Kim, Tae-Wan Park, Geon-Tae Jeong, Ki-Chan Lee, Seong-Mok Kim, Du-Sik

ABSTRACT

This paper is on the development of a auxiliary power supply for the coach of Indian Railways. The auxiliary power supply system supplies the power for air-conditioners, air-compressors, lighting equipments, controllers, etc. It converts the input voltage, DC 110V which is supplied from battery, to AC 3 ϕ 415V of 30kVA capacity. This is a low voltage-high current type converter system and largely consists of boost chopper and 3 phase inverter. Adopting a optimal control algorithm and simple power circuit, we realized the more reliable and competitive system for satisfaction of Indian Railway's strict requirement for vibration, temperature and dust.

We completed the design, the manufacture and the field test of the system successfully and proved the system performance and reliability as a result of those tests.

1. 서론

본 논문의 개발품은 현재 인도철도청에 수출된 보조전원장치로써 DC110V 직류전원을 승압형(Boost-up type) 컨버터(converter)와 3상 인버터(inverter)를 이용하여 교류상용의 3상 415V, 50Hz로 변환, 객차내의 각종 전원설비에 전원을 공급하는 전원장치이다. 그림 1에 제품의 사진을 보여주고 있다. 본 제품은 교류 단상 발전기로부터 정류기를 거쳐 배터리 백업이 된 DC 110V를 공급받아 DC 600V로 승압하는 승압형 초퍼(boost chopper, step-up chopper)와 DC 600V를 교류 3상 415V로 변환하여 냉, 난방장치 등에 교류전원을 공급하는 교류전원공급장치(Static Inverter, SIV)로 구성된다. 본 시스템은 주로 냉, 난방장치 등에 사용되는 모터가 부하의 대부분을 차지하고 있기 때문에 정현파의 3상 전원이 아닌 PWM파형의 공급이 가능하다. 본 시스템은 국내철도 차량에서 사용되는 보조전원장치와 유사하지만 가선이 없는 객차이기 때문에 입력조건이 가선으로부터의 DC 1500V가 아닌, 차축에 연결된 교류 발전기에 의해 생성되어 정류된 DC 110V전원이며, 정상조건에서는 90V에서 170V로 변동되는 전원형태를 갖는다. 또한 저압의 DC 110V전원이기 때문에 이를 교류 3상 415V로 변환하기 위해서는 필히 인버터가 변조할 수 있는 최소전압값 이상이 되어야 한다. 그러므로 승압형 초퍼를 사용하여 DC 110V의 저압을 587V이상으로 변환한다.

인도의 고온다습한 환경에 대응하는 신뢰성이 높은 제품을 개발하기 위하여 자연냉각방식을 도입하였다. 이는 강제냉각방식의 사용으로 생길 수 있는 습기, 먼지 등에 의한 fan의 고장을 근본적으로 제거하였으며, 이로써 시스템의 신뢰성 증대 효과를 가져왔다. 제어는 초퍼의 경우 전류제

* 현대중공업 기전연구소 연구원

** 현대중공업 기전연구소 선임연구원

***현대중공업 기전연구소 책임연구원

어와 전압제어의 이중루프제어를 적용하였으며 인버터는 무계환 전압제어에 순시 전류 제한제어를 적용하였다. 각 부분의 동작정보 저장, 시스템의 상태감시 및 제어변수의 변경 등을 RS232 통신으로 가능하도록 한 MMI(Man-Machine Interface)를 적용하여 기기의 유지보수의 편의성을 크게 향상시킨 것을 주요 특징으로 하고 있다.

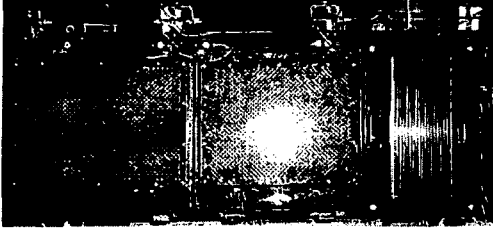


그림 2 인도 수출용 30kVA급 보조전원장치

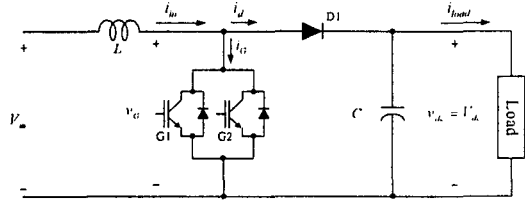


그림 1 승압형 초퍼 전력회로의 기본구성

2. 승압형 초퍼

2.1 구성 및 동작

본 시스템은 인도의 열악한 입력 및 환경조건에서 안정된 동작을 보충하기 위해 고속 스위칭이 가능한 IGBT를 사용하였으며 2개의 IGBT로 스위칭을 교번하는 초퍼방식을 적용하여 소자당 발열 부담을 줄였다. 초퍼의 전력회로는 그림 2와 같으며 IGBT의 Duty와 전압의 관계는 다음 식 (1)과 같다.

$$\text{Duty ratio} : D = \frac{T_{on}}{T_s} = \frac{V_{dc} - V_{in}}{V_{dc}} \quad (T_s : \text{switching period}) \quad (1)$$

일정한 Duty 비를 유지할 때 부하전류가 I_{load} 로 일정하다고 가정하면, 출력전압 v_{dc} 는 평균적으로 일정한 V_{dc} 가 되며, 역시 입력전류 i_{in} 도 평균적으로 일정한 I_{in} 이 된다. 만일 부하전류 I_{load} 가 증가한다면 과도 상태에서는 출력전압 v_{dc} 는 잠시 감소하지만 이전과 같은 Duty 비를 유지한다면 정상상태에서 출력전압은 다시 V_{dc} 가 되고 입력전류 i_{in} 은 부하전류가 증가한 만큼 증가하게 된다. 그림 3은 정상상태에서 각부의 파형을 보여주고 있다. 또한 식(2)와 같이 Duty비와 전류의 관계를 나타낼 수 있다.

$$V_{in}I_{in} \approx V_{dc}I_{load}, \quad \frac{I_{load}}{I_{in}} = 1 - \frac{T_{on}}{T_s} = 1 - D \quad (2)$$

실제 시스템에서는 입력단의 L에 선류가 많이 흐를수록 전압강하가 커지므로 전류의 크기에 따라 출력전압이 달라진다. 그러므로 일정한 출력전압을 유지하기 위해 출력전압에 따라 Duty 비를 조정할 수 있으며, 또한 전류의 크기에 따라서 Duty 비를 조정하여도 가능하다는 것을 알 수 있다.

2.2 초퍼의 제어

초퍼의 구조는 승압형 컨버터(Step-up Chopper)의 기본구조와 동일하므로 식(2)와 같이 입력전압(V_d)에 대한 출력전압(V_o)의 비율은 한 주기의 스위칭 시간(T_s)에 대한 Off시간($T_s - T_{on}$)

의 비율과 같다.

$$\frac{V_{dc}}{V_{in}} = \frac{T_s}{T_s - T_{on}} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 원하는 출력전압을 얻기 위한 IGBT의 On시간 T_{on} 이 계산되며, 이때의 부하 전류를 알고 있다면 식 (2)로부터 입력전류를 얻을 수 있다. 이는 역으로 일정 부하전류가 흐를 때 원하는 입력전류 값으로부터 T_{on} 을 계산할 수 있음을 나타낸다. 이로부터 초퍼의 제어는 원하는 출력전압을 얻기 위해서 실제 출력전압을 비례적분제어기(PI Controller)를 이용하여 입력전류의 지령치를 만들고 다시 실제 입력전류와 비교하여 그 오차로부터 T_{on} 을 구하는 이중 루프 전압전류제어기로 구성하였다. 특히 전류제어기는 입력전류제한 능력을 갖게되어 시스템이 더욱 안정되는 장점을 갖는다. 그림 4에 초퍼의 제어 블록도를 나타내었다.

실제 입력전류는 리플이 존재하며 이때 전류의 샘플링위치가 변동된다면 전류제어기 출력은 안정되지 않는다. 그러므로 그림 5에 나타내어진 것과 같이 PWM을 대칭으로 발생시키면 전류 샘플링 시점을 IGBT On시간의 정 중앙에 위치시킬 수 있게 되어 근사 평균값 $i_{in}[n]$ 을 얻을 수 있다. 이렇게 대칭 PWM을 이용한 순시평균 전류제어는 제어기의 응답특성을 향상시킨다.

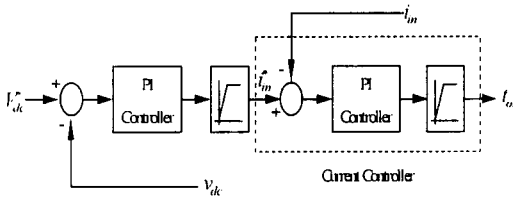


그림 4 초퍼의 제어 블록도

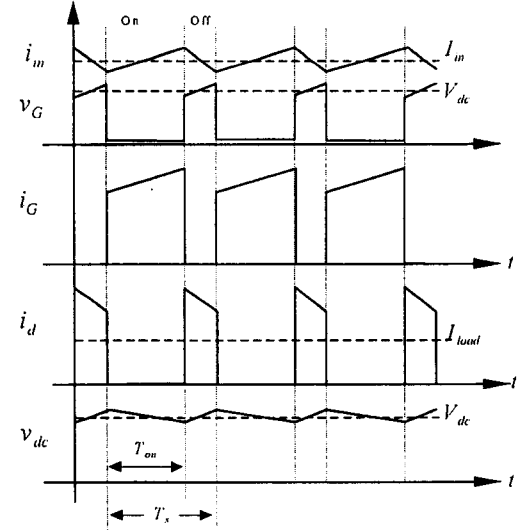


그림 3 정상상태에서의 초퍼 각부의 파형

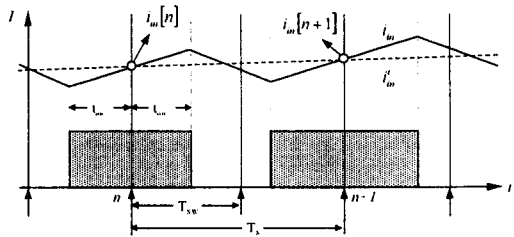


그림 5 초퍼 PWM 및 전류의 샘플링

초퍼는 스위칭 소자는 두 개의 IGBT로 구성되었으며 Gate신호를 교번하여 인가함으로써 IGBT 당 스위칭 주파수를 $1/(2T_s)$ 로 감소시켰다. 이때 실제 전류는 하나의 IGBT를 $1/T_s$ 의 스위칭 주파수로 동작했을 때와 같은 효과를 얻으므로 전류리플이 매우 감소하게 되어 입력 인덕턴스를 낮출 수 있게 한다.

3 인버터(Inverter)

DC입력을 변환하여 냉, 난방장치와 같은 각종 기기의 모터에 AC 415V 전원을 공급하는 장치로 그림 6에서 보는 바와 같이 초퍼 출력 DC 600V를 직접 3상 IGBT 인버터를 통해 50Hz의 AC 415V로 변환한다. 인버터는 일정주파수, 일정전압 출력으로 동작하며, 스위칭 주파수는 1.65 kHz로 공간벡터변조(Space Vector PWM) 방식을 사용하였다.

부하는 대부분 모터부하로 PWM파형의 출력전압이 바로 인가된다. 정현파 입력을 필요로 하는

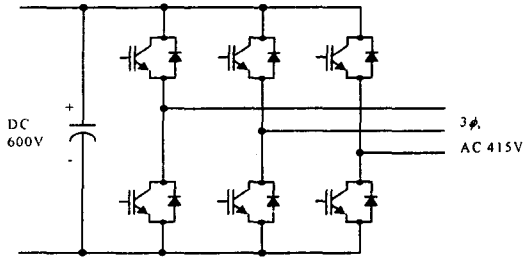


그림 6 인버터 회로의 기본구성

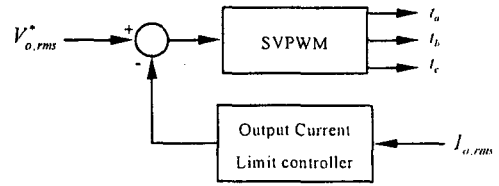


그림 7 인버터의 출력전압 제어 블록도

다른 부하는 부하측의 입력에 소형 필터를 사용하여 정현파로 변환한 후 사용하게 된다. 그림 7에 제어 블록다이어그램을 나타내었다. 출력전압은 Open-loop제어를 기본으로 하며, 컴프레서등의 모터부하 기동시의 과전류 제한을 위해 출력전류 제한제어를 추가하여 안정된 동작을 보장하였다.

전류제한제어는 순간적인 전류변동을 제한하기 위하여 대역통과 필터를 사용하여 일정 이득으로 전향보상하는 성분과 제한 기준치에 실제전류가 추종하도록 하는 적분제어기 성분으로 구성된다. 즉 모터 기동시의 순간적인 전류상승을 억제하고 기동시의 과전류를 일정제한치로 제한하여 안정적인 모터기동을 보장하며, 과전류로부터 발생하는 초과 및 인버터의 과도상태를 안정영역에서 제어함으로써 시스템의 보호 및 신뢰성을 향상시킨다.

4. 냉각

현지에 장착되어 있는 강제 냉각방식의 타사 제품을 자연 냉각방식의 당사제품으로 대체하는 이유로 크기가 한정되어 있으며, 현지 온도조건 또한 열악하여 시뮬레이션 및 모의방열 시험뿐만 아니라 실제 조건을 가상으로 구현하여 시험하여 제작하였다. 그림 8에는 스택의 구성 사진을 보이며 그림 9에 Pin-Fin Circular 방식의 방열판 구조를 나타내었다.



그림 8. 초퍼 스택 및 인버터 스택

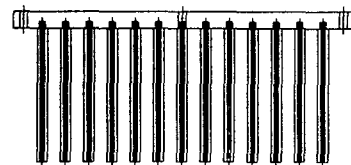


그림 9. 방열판의 구조

5. 실험 결과

그림 10은 초퍼부의 IGBT C-E간 전압 및 그 때의 입력전류를 보이고 있다. 그림 11은 90Vdc 입력 정격부하에서 기동특성을 보이고 있다. 우선 입력전압이 인가된 후 DC 링크단 캐패시터에 충전전압이 형성되어 85V이상 이 되면 초퍼가 동작하게된다. 이때 초퍼는 소프트 스타트(soft start)를 하고 DC링크전압이 상승하여 150V이상 이 되면 인버터가 동작하며 출력전압 역시 소프트 스타트를 한다. 그림에서 보듯이 DC 링크단 전압이 600Vdc 출력전압이 415Vrms로 원활하게 제어됨을 알 수 있다. 그림 12는 100Vdc 입력 정격부하에서의 기동특성을 보이고 있다.

그림 13은 부하 급차단 및 투입시 특성을 보여주고 있다. 부하의 급차단시 DC 링크단 전압이 상승하지만 출력은 약간의 과도상태만을 보이며, 부하의 급투입시 DC 링크단 전압이 감소하였다가 회복되나 출력은 역시 약간의 과도상태를 보이지만 신속히 회복됨을 볼 수 있다. 이 실험은 매우 열악한 조건을 인가한 것으로 실제 시스템은 기저부하가 항상 존재하여 부하변동에 더욱 빠른 제어 특성을 보인다.

그림 14에서 그림 17은 인도 현지 실제 객차에서 실제부하 시험파형이며, 그 부하로는 두 대의 컴프레서부하와 환기용 팬 및 응축기 그리고 기타 기저부하로 구성된다. 그림 14는 컴프레서를 제외한 기타부하의 투입파형이며, 그림 15는 단일 컴프레서 부하의 투입 파형이다. 그림 16는 두 대의 컴프레서 부하의 2단 기동시 파형이며, 그림 17은 두 대의 컴프레서 부하의 동시 기동파형이다.

5. 결론

당사에서 기 개발된 전동차용 보조전원장치를 인도 철도차량 및 전원설비에 적합한 형태로 수정 및 보완하였고, 회로가 간단한 승합형 쇼퍼를 적용하였으며, 한정된 공간에서 냉각팬을 사용하지 않는 자연냉각 방식을 적용한 제품을 개발하였다. 이는 인도의 높은 주위온도에서의 방열효과의 우수함과 노출에 의한 많은 분진 속에서도 유지보수성이 극대화됨을 실차시험을 통해 검증하였다. 또한 국내전동차의 전원장치 제어 경험을 바탕으로 인도 실차의 부하 특성에 적합한 제어 알고리즘을 적용하여 기존 외국제품에 비하여 안정성 및 신뢰성 향상에 큰 성과를 얻었다. 이는 국내의 전동차용 전장품 기술이 국외에 수출되는 발판이 되어 향후 국외 철도차량의 추진장치 등으로 그 영역이 확대될 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김태완, 서광덕, "전동차용 고성능 IGBT형 보조전원장치 개발" 전력전자학회, 1999, 12 v.4, n.6, pp. 500-506.
2. Ned Mohan, Tore M. Underland, William P. Robbins, Power Electronics : Converter, Applications, and Design, 2nd ed. JOHN WILEY & SONS, INC. 1995.

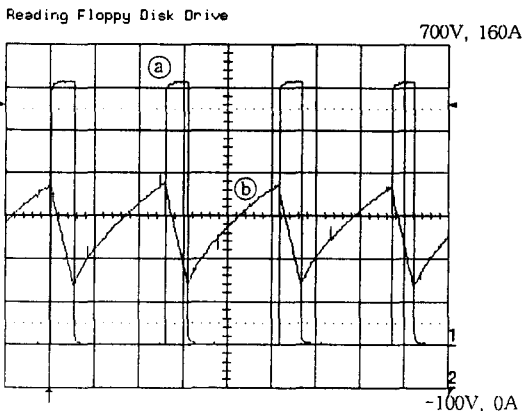


그림 10. 쇼퍼측 IGBT C-E간 ①전압과 ②입력전류의 실험파형

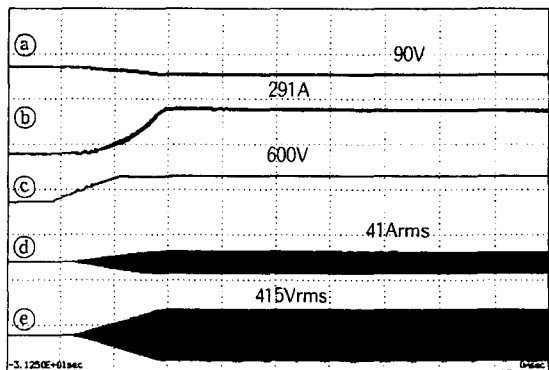


그림 11. 입력 90V 정격부하 기동시험 ①입력전압(25V/div), ②입력전류(306A/div), ③DC 링크전압(860V/div), ④출력전류(110A/div), ⑤출력전압(104V/div)

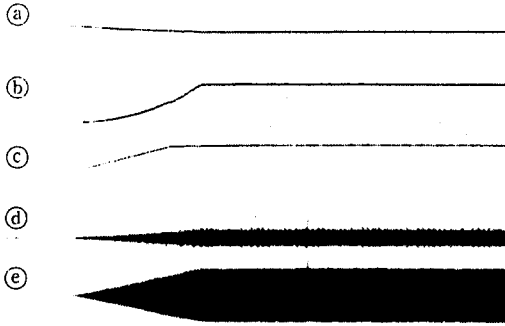


그림 12. 110V 입력 정격부하 시험과형

㉑입력전압(100V/div),㉒입력전류(122A/div),㉓DC링크전압(344V/div),㉔출력전류(110A/div),㉕출력전압(104V/div)

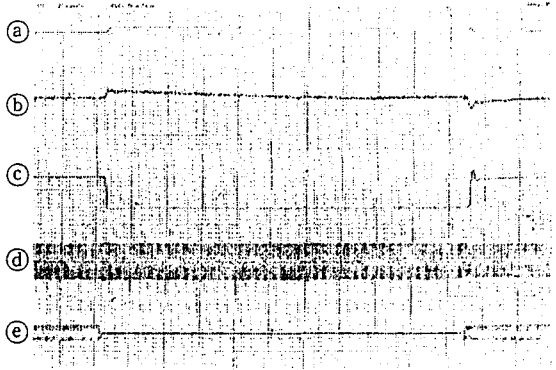


그림 13. 부하 차단 및 투입시험

㉑입력전압(100V/div),㉒DC링크전압(344V/div),㉓입력전류(122A/div),㉔출력전류(110A/div),㉕출력전압(104V/div)

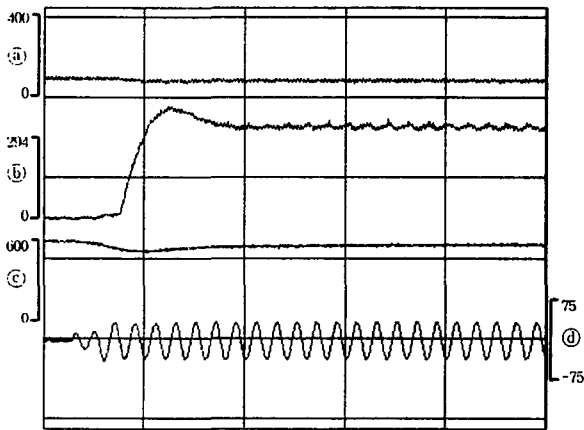


그림 14. 팬 부하 및 기저부하 투입 과형.

㉑입력전압,㉒입력전류,㉓DC링크전압,㉔출력전류

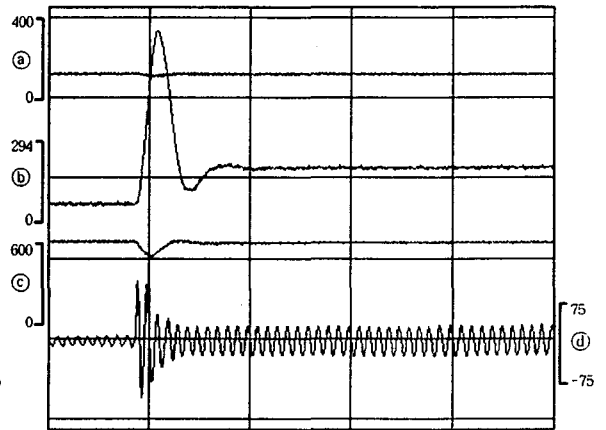


그림 15. 컴프레서 모터부하 단독 투입 과형.

㉑입력전압,㉒입력전류,㉓DC링크전압,㉔출력전류

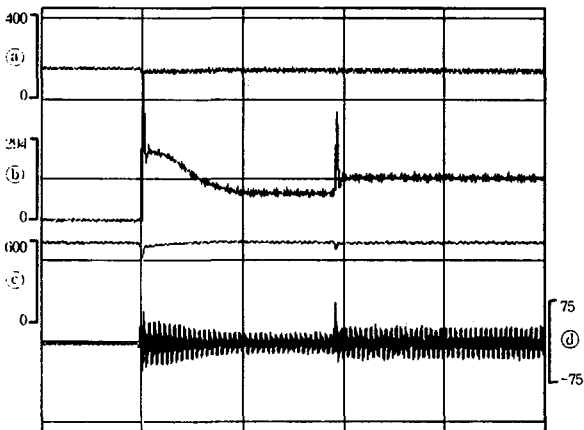


그림 16. 두 개의 컴프레서 부하 2단 기동.

㉑입력전압,㉒입력전류,㉓DC링크전압,㉔출력전류

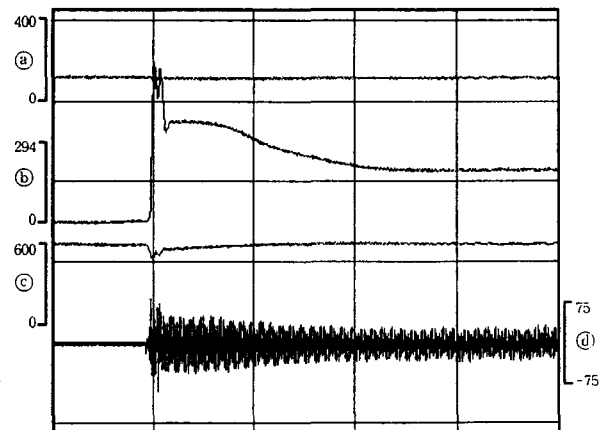


그림 17. 두 개의 컴프레서 부하 동시기동.

㉑입력전압,㉒입력전류,㉓DC링크전압,㉔출력전류