

한국형 고속열차 주전력변환장치의 상용화 기술 확보에 관한 연구

조성준, 이광주, 김태완, 우명호, 고영철, 김두식
현대중공업(주) 기계전기연구소

The Study of Commercial Technique for Korean High Speed Railway Main Power Conversion Equipment

Sung-Joon Cho, Kwang-Joo Lee, Tae-Wan Kim, Myung-Ho Woo, Young-Cheol Ko,
Du-Sik Kim

Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd.

ABSTRACT

KHSR(Korean High Speed Railway) had achieved the maximum speed of 350 km/h last year. And then, we have concentrated to improve the reliability of the overall system, in particular, motor block of the locomotive.

In this paper, simple technique for operating PWM converters under the voltage distortion is introduced. In addition, the electrical braking technique is also made to have the braking capability under the dead zone.

Test results revealed the verification of the proposed techniques.

1. 서 론

20세기 이후 산업구조의 분업화와 교역량의 양적인 증대로 인하여 물류 수송의 비중은 점점 더 증가하고 있으며, 대량수송과 수송수단의 고속화를 통한 경쟁력 제고를 위한 각국의 국가적 개발 노력도 매우 활발하게 이루어지고 있다.

G7 고속전철 기술개발 사업은 고속전철을 통한 경쟁력 향상을 도모하기 위해 산·학·연 공동으로 1996년 12월부터 2002년 10월까지 각 3년씩 2단계로 나누어 진행되었으며, 현재 3단계가 진행 중이며 최고속도 352.4 km/h까지 시험을 완료하였고 국내 전라선 상용화를 목표로 각종 시험이 진행되고 있다.

본 연구에서는 순수 국내기술로 개발된 한국형 고속열차의 최고시속 350 km 달성 이후 당사에 의해 확보된 주전력변환장치 관련 문제점 해결 및 상용화 기술을 소개하며, 특히 가선전압 왜곡에 의한 PWM 컨버터의 고장발생 억제기술 및 전기제동이

불가능한 사구간 조건시 인버터만에 의한 제동기술 확보 알고리즘을 제안한다.

제안된 상용화 기술의 검증을 위한 주행시험 결과를 통해 심각한 가선전압의 왜곡 조건시에도 PWM 컨버터가 안정적으로 제어됨을 확인하였다. 또한 제안된 저항 제동 알고리즘을 통해 사구간 조건하에서도 회생에너지의 양에 따른 제동 초퍼 통률제어로 전기 제동력을 확보할 수 있음을 확인하였다.

2. 주전력변환장치의 상용화 기술

2.1 가선왜곡 및 컨버터 안정화 대책

구간별로 설치된 변전소의 Scott 변압기에 의해 주전력변환장치에 공급되는 25 kV의 교류가선 전압은 여러 가지 요인에 의해 그 크기 및 파형이 매우 복잡하게 변동하는 것으로 알려져 있다.

그림 1에 시운전시 측정된 왜곡된 가선전압의 파형을 나타내었다.

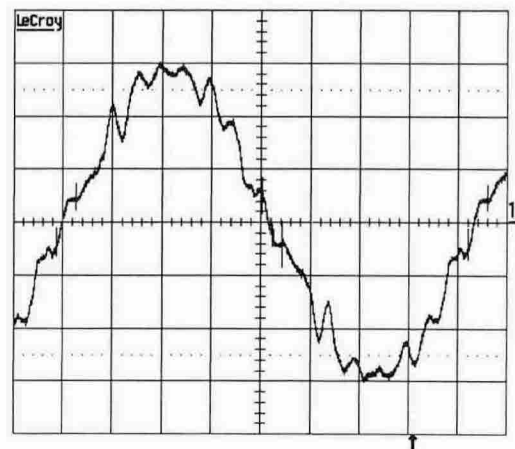


그림 1 측정된 가선전압 파형
Fig. 1 Measured pantograph voltage

이러한 파형 왜곡의 정도는 동일한 것이 아니라 구간별로 다르기 때문에, PWM 컨버터의 입장에서 볼 때 입력전압의 위상을 안정적으로 검출하기 어려워지는 문제가 발생하게 된다.

또한 부정확한 입력전압의 위상은 PWM 컨버터 제어시 입력 과전류 혹은 출력 전압의 변동 등과 같은 문제점을 발생시킬 수 있다

2.1.1 위상검출 오류에 의한 컨버터 문제

당사의 PWM 컨버터에서 사용하기 위해 개발된 PLL 방식은 PLL 인터럽트에서 센싱된 입력 전압 값이 가선전압 왜곡 형태의 급격한 변화로 인해 이전 주기값에 비해 크게 변화하는 경우, 다음 PLL 인터럽트 발생주기 뿐만 아니라 PWM 주기가 변동하게 된다.

시험 결과 PWM 주기가 변동될 경우, 입력전류의 위상변동 및 컨버터 출력전압의 상승을 초래하는 문제점을 발생시키고 있다. 특히, 당사 PWM 컨버터의 경우에는 전술한 이유로 인해 출력 과전압의 발생 빈도가 높은 경향이 있었다.

2.1.2 가선전압 왜곡 대책 및 시험

가선전압의 왜곡 성분은 기본파 주파수의 약 18 조파에 해당하는 것으로 조사되었다. 필터링 기법을 적용할 경우, 그림 1과 같이 왜곡성분이 매우 크기 때문에 필터의 차단주파수를 기본파 주파수 이하로 낮게 설정하지 않을 경우, 왜곡 성분을 거의 필터링하지 못하게 된다.

본 연구에서는 이를 위해 36Hz 차단주파수를 갖는 RC형 저역통과필터를 적용하였으며, 그림 2에 필터 전후 가선전압의 파형을 나타내었다. 그림과 같이 크기저감 및 위상지연이 매우 큰 단점이 있지만 소프트웨어를 통한 크기/위상 보정, 안정적인 필터링, 단순한 구조 등의 장점을 지니고 있다.

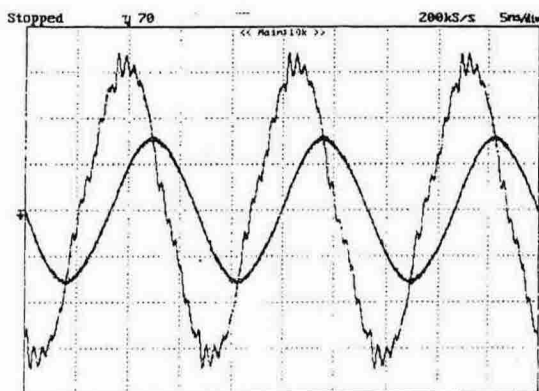


그림 2 RC 필터 전후 가선전압 파형
Fig. 2 Pantagraph voltage waveforms of RC filter input and output

그림 3과 그림 4에 하드웨어 필터 적용 전 및 후의 동대구-광명 구간의 주행시험 일부 결과를 각각 나타내었다. 그림과 같이 필터 적용 이후 출력 과전압 발생이 현저하게 감소하였을 뿐만 아니라, 거의 일정한 PWM 주기로 인해 IGCT 전력소자의 스위칭 소음저감 효과 등을 얻을 수 있었다.

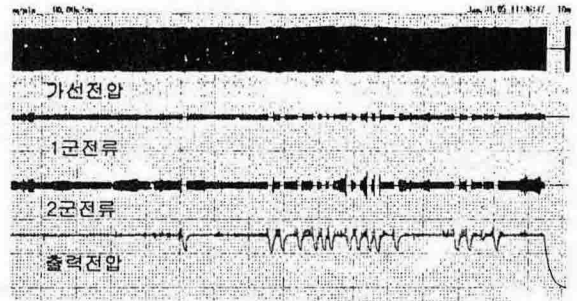


그림 3 RC 필터 사용 전 주행시험 결과
Fig. 3 Test result without RC filter

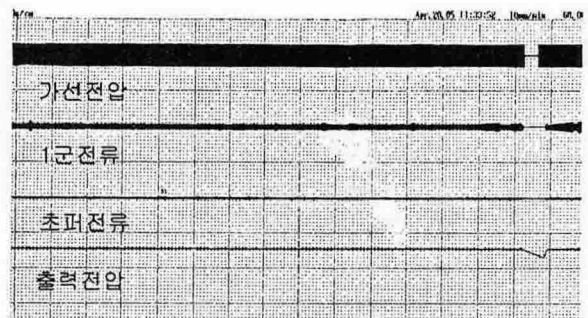


그림 4 RC 필터 적용 주행시험 결과
Fig. 4 Test result with RC filter

2.2 저항제동

고속으로 주행하는 고속열차의 제동력을 확보하는 방법에는 공기제동과 전기제동이 있다. 공기제동은 마찰력을 이용하여 기계적으로 제동력을 발생시키는 것으로 에너지의 손실이 크고 제동 디스크 교체 등 유지보수에 어려움이 있다. 이에 반해 전기제동은 에너지 효율을 증대시킬 수 있고 추가적인 유지보수가 필요 없는 장점을 가지고 있다.

전기제동은 회생제동과 저항제동으로 나눌 수 있으며 회생제동은 전동기에서 발생하는 에너지를 가선으로 회생하여 제동력을 발생시키는 것이다. 저항제동 모드는 가선이 없거나 주회로 차단기가 개방되었을 경우에 체결된다. 저항제동 모드에서는 회생 에너지를 제동 저항을 이용하여 소비시킨다.

2.2.1 저항제동 기능

한국형 고속 열차의 전원인 교류 가선은 변전 설비의 전력 공급 구간에 따라 필수적으로 사구간이

존재한다. 사구간에서는 가선 전압이 공급되지 않으므로 가선으로의 회생이 불가능하다. 이러한 사구간에서도 전기 제동력을 확보하려면 건인전동기로부터 발생하는 회생에너지를 저항을 이용하여 소비시키는 저항제동 기능이 필요하다.

저항제동 기능을 수행하기 위해 주전력 변환장치는 그림 5와 같이 저항제동 초퍼 회로를 가지고 있다. 저항제동 초퍼 회로는 저항제동과 초퍼 스위치(BCH)로 구성된다.

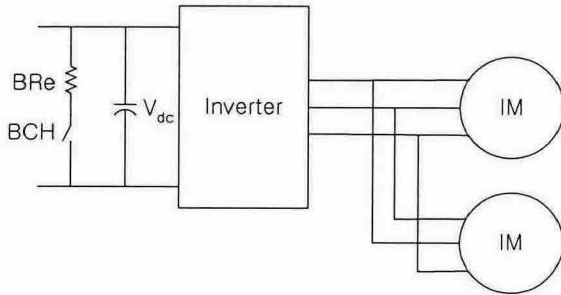


그림 5 주전력 변환장치의 제동초퍼와 제동저항 회로
Fig. 5 The circuit of braking chopper and resistor

2.2.2 저항제동 제어 알고리즘

제동 초퍼 Duty를 결정하는 알고리즘의 블록도는 그림 6과 같다. 컨버터의 동작이 중지된 상태에서 인버터에 의해 제동 토크가 발생하면 DC-link 전압은 회생에너지의 크기에 비례하여 상승하게 된다. DC-link 전압의 상승을 억제하기 위해 초퍼 동작 기준 전압을 설정하고 실제 전압과의 차이에 따라 초퍼의 duty를 결정한다. 그림 6의 $V_{chopref}$ 는 저항제동 모드에서 제동 초퍼가 제어하는 DC-link 전압의 기준값이다. 기준전압과 현재 DC-link 전압을 비교하여 V_{dcerr} 를 구하고 PI 제어기를 이용하여 제동 초퍼의 duty를 결정한다. PI 제어기의 출력은 회생에너지의 크기에 비례하여 제동 초퍼의 duty를 자동으로 결정한다.

2.2.3 저항제동 본선 시험

저항제동의 성능을 확인하기 위해 실시한 본선 시운전의 결과파형은 그림 7과 같다. 컨버터가 동작을 중지하면 DC-link 전압은 서서히 방전한다. 제동 명령에 의해 회생에너지가 발생하면 DC-link 전압은 충전되고 초퍼 동작 기준전압보다 커지면 PI제어기에 의해 결정된 duty로 제동 초퍼가 동작한다. 저항 제동의 최대 크기는 제동 저항의 용량을 고려하여 회생제동의 60%로 제한하였다. 가선 전압이 없는 사구간에서 저항제동 모드가 체결되어 회생에너지를 제동 저항으로 소모시킴으로써 전기 제동이 이루어지는 것을 알 수 있다.

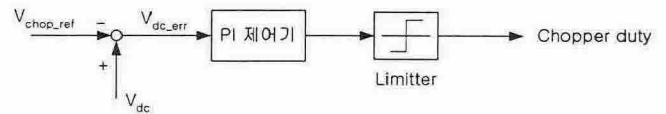


그림 6 저항제동 제어알고리즘 블록도
Fig. 6 Block diagram for resistor braking control

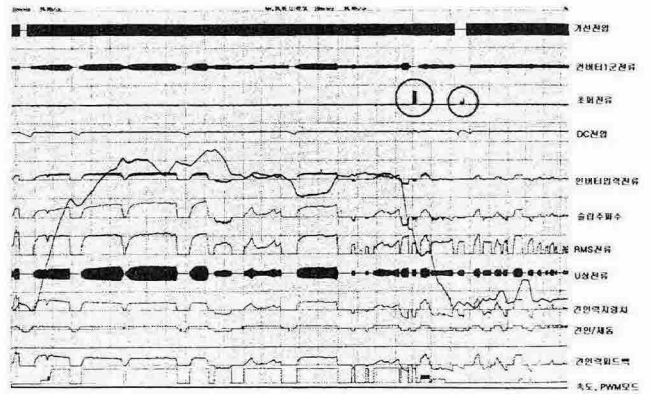


그림 7 저항제동 본선 시운전 시험 파형
Fig. 7 Test waveform of resistor braking

3. 결론

국책과제로 진행되고 있는 G7 한국형 고속열차는 단계적인 증속 시험을 통해 최고속도 350 km/h를 무사히 주행하였으며, 현재 광명-동대구, 광명-목포의 영업 주행선로에서의 안정성, 신뢰성 시험을 통해 안정적인 운행에 필요한 시스템 운영기술과 컨버터 인버터 제어 요소기술을 확보하고 있다.

본 연구에서는 간단한 구조의 RC 필터 적용을 통해 저차수의 매우 큰 가선과외 성분은 안정적으로 제거할 수 있을 뿐만 아니라 당사 PWM 컨버터의 출력과전압 문제를 완화시킬 수 있음을 시험을 통해 확인하였다. 또한 저항제동 알고리즘을 통해 사구간 조건하에서도 회생에너지의 양에 따른 제동 초퍼의 통률제어로 전기 제동력을 안정적으로 확보할 수 있음을 시험결과를 통해 확인하였다

이 논문은 건설교통부와 산업자원부 및 과학기술부에서 시행한 선도기술개발사업의 기술개발 결과임

참고 문헌

- [1] 이현원, 장성영, 김연준, 이광주, "IGCT를 이용한 단상 PWM 정류기 병렬운전", 전력전자학회 논문지, Vol. 5, No. 1, pp. 11~18, 2000, 2.
- [2] 이광주, 조성준, 우명호, 장성영, 김두식 "한국형 고속전철용 추진제어장치 개발", 전력전자학술대회 논문집, Vol 2, pp. 872-875, 2003.7