직류급전시스템의 에너지회생장치 적용을 위한 실계통 부설 시험

A Result of the Field Test for Regenerative Inverter

김주락* 한문섭** 장동욱*** 김정훈**** Kim, Joorak Han, Moonseob Jang, Dong-Uk Kim, Jung-Hoon

ABSTRACT

DC transit system has been adopted in the metropolitan area, Korea since 1974. EMU in this system always reiterates that acceleration and retardation. When EMU decelerates using electric breaking, regenerative power occurs. Regenerative power can be consumed in vicinity EMU on the same line or in resistor. If DC transit system has inverter for reusing regenerative power, Energy efficiency in DC transit system will be increased. This paper present the developed inverter for regenerative power and its field test. Test result of developed inverter is presented.

1. 서 론

도시철도 직류 급전시스템에서 발생하는 회생전력은 전동차 운행중 전기제동의 사용시 발생한다. 발생한 회생전력은 동일선로의 인근 타 전동차에 공급되어 소모된다. 그러나 인근 전동차에서 소모되지 못한 에너지는 전차선 전압의 상승으로 이어져 계통 운영에 어려움을 줄 수 있다. 따라서 잉여 회생전력은 회수하여 사용하면, 에너지 사용의 효율성을 높일 수 있고 계통의 안정화에도 기여할 수 있다. 이러한 회생전력의 사용방법은 직류로 발생한 에너지를 저장하거나, 교류로 바꾸어 일반 전력계통으로 역송전 하거나 고압배전 계통에서 사용하는 것이다.

이러한 회생 전력 재활용을 위한 에너지 회생장치를 2003년부터 연구 개발에 착수하여 2007년 시작품 개발이 완료되었으며, 완료된 시작품의 성능 검증을 위하여 정상 상태 특성시험을 공장시험을 통하여 수행하였다[1]. 공장 시험을 통하여 인버터의 입력인 직류 전압값에 따라 정상적으로 동작한다는 것을 알 수 있었다. 이 결과를 토대로 실계통 적용 시험에 대한 계획을 수립하였다.

회생용 인버터의 실계통 적용 시험은 아직 신뢰성 및 안정성이 아직 입증되지 않은 상태의 설비를 실제 계통에 적용하는 것이기 때문에 상업 운전중인 도시철도 급전시스템에 적용하기 위해서는 돌발적으로 발생할 수 있는 사고 또는 위험에 대하여 대비할 수 있는 선로에서 수행하는 것이 타당하다. 또한 전동차의 가감속을 시험 조건에 적정하게 조정할 수 있는 선로에서 수행하는 것이 사고 위험을 줄일 수 있을 것이다. 이러한 여러 조건들을 감안하여 선정한 시험 대상 선로는 부산교통공사의 노포차량기지내의 전동차 시험 선로이다. 선정한 시험 선로에 회생용 인버터 및 일련의 시험설비를 부설하고 다양한성능 시험 결과를 토대로 개발한 에너지 회생장치의 신뢰성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

E-mail : jrkim@krri.re.kr

TEL: (031)460-5411 FAX: (031)460-5459

^{*} 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 정회원

^{**} 한국철도기술연구원

^{***} 한국철도기술연구원

^{****} 홍익대학교

2. 회생용 인버터 시스템 실계통 적용 방안

직류급전시스템에 적용을 목표로 개발한 회생용 인버터는 750kVA 용량으로 개발하였으며, 개발완료와 함께 공장시험 형식의 시험설비에서의 성능시험을 통해 실계통 적용에 대한 안전성 및 신뢰성을 검토하였다[1-3]. 물론 개발품의 실계통 적용은 공장 수준의 시험으로 바로 이루어질 수 없으며, 이를 위해서 실계통 적용 시험 방안을 마련하였다.

본 연구에서는 개발한 회생용 인버터의 실계통 적용 시험을 위하여 부산교통공사의 노포차량기지내 시험선로에 적용하기로 하였으며, 구체적인 적용 시험 방안은 다음과 같다.

2.1 회생용 인버터 시스템 실계통 적용 개소 선정

개발품인 회생용 인버터를 실계통에 적용하기 위해서는 다음 과 같은 조건을 구비한 선로에서 시행하여야 발생할 수 있는 고장 및 돌발 사고에 대비하며, 시험을 수행할 수 있다.

- ① 영업운전에 지장을 주지 않고 시험할 수 있을 것
- ② 시험구간내 별도의 직류 1600V 급전이 가능할 것
- ③ 본선구간과 시험구간이 전기적으로 분리될 수 있을 것
- ④ 인버터 및 기타 시험장비의 설치장소가 충분하고
- ⑤ 필요시 시험용 전동차의 투입이 가능할 것
- ⑥ 전동차의 속도를 시험에 적절하게 조절 가능하여야 할 것
- ⑦ 최대의 회생을 발생할 수 있도록 할 것

부산교통공사의 노포차량기지는 1.6km의 시운전선을 보유하고 있어 80km/h까지 차량운행이 가능하고 기지내 주박선과 구분하여 급전이 가능하기 때문에 회생용 인버터를 시험하기에는 최적의 조건을 갖고 있으며, 위와 같은 조건을 모두 충족시킨다. 또한, 부산교통공사는 사이리스터 위상제어방식의 더블 컨버터를 계통에 적용하여 이미 잉여 회생전력을 사용하고 있으므로 회생전력의 재활용에 상당한 경험적 지식을 가지고 있기 때문에 실계통 적용 시험 장소로 선정하였다.

2.2 회생용 인버터 시스템 실계통 적용 계통

회생용 인버터의 현장적용은 부산교통공사의 노포기지내 시험선로계통에 연결하게 되며, 상세 부설계통의 단면도는 그림 1과 같다.

그림 1에서 보듯이 회생용 인버터가 설치되는 계통에는 예비용 사이리스터 컨버터(C2)가 급전을 담당하게 된다. 이 컨버터는 싱글 컨버터로서 본 실계통 적용 시험을 위하여 사용하므로 고속도차단기를 부설하여 사용한다. 이 컨버터는 노포기지내의 시험선로에 직류 1,600V의 전력을 공급하게 된다.

사이리스터 컨버터를 통하여 급전되는 시험선로에 본 연구에서 개발한 회생용 인버터를 적용하게 되고, 인버터에서 받아들인 회생전력은 교류로 변환되어 저항기로 구성된 부하에서 소비하게 된다. 이때, 회생용 인버터 출력의 추종을 위한 발전기도 설치한다.

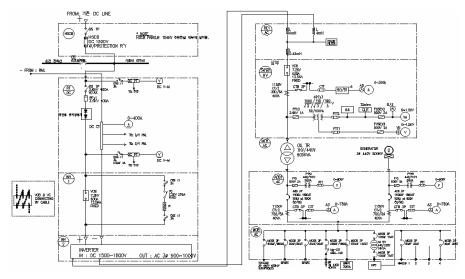


그림 1. 회생용 인버터의 실계통 적용 단선도

3. 회생용 인버터 시험 설비 실계통 적용 시험

3.1 실계통 적용 시험 방안

실계통 적용 시험은 부산교통공사의 노포차량기지내 시험에서는 회생용 인버터 자체의 동작 신뢰성에 주안하여 실제 직류 선로에서 발생한 회생전력의 변환이 아닌 인위적으로 만든 직류 전력을 입력으로 하여 시험하였기 때문에 실제 전동차에서 발생한 회생 전력의 형태에 인버터의 응동은 확인하지 못하였다. 따라서 실계통 적용 시험은 전동차의 회생제동에 인버터의 응답특성을 검토하는데 주력하기 위해 전동차 적용 시험과 연속동작 시험으로 구분하여 시행하였다. 전동차 적용 시험은 그림 2와 같이 구성한 시험계통에 전동차를 투입하여 일정한 속도에서 회생 제동을 하여 인버터의 응답특성을 확인하는 시험이다. 이때, 전동차의 운행은 가감속 1회로 제한하여 인버터에 무리되지 않도록 시행하였다.

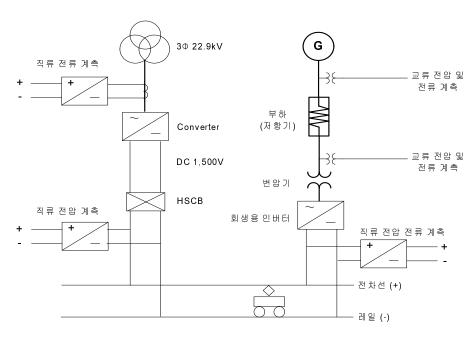


그림 2 실계통 시험 계통도

표 3.1 부하 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	컨버터 교/직류측 계측기 설치
③ 컨버터 투입	C2 컨버터 직류 급전
④ 계통 점검	컨버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 전동차 투입	전동차의 시험선로 투입 및 가선 전압 확인
⑦ 전동차 운행/ 인버터 가동/ 입출력 계측	전동차 20km/h 역행 및 회생제동
	전동차 40km/h 역행 및 회생제동
	전동차 50km/h 역행 및 회생제동
⑧ 인버터 정지	인버터 운전 중지
⑨ 전동차 출차	시험선로에서 전동차를 출차 혹은 전원 cut-off
⑩ 급전 중단	컨버터(C2)의 급전 중단
① 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

표 2 연속 동작 시험 절차

항 목	절 차
① 계통 분리	시험선로의 급전을 별도로 분리
② 계측기 설치	컨버터 교/직류측 계측기 설치
③ 컨버터 투입	C2 컨버터 직류 급전
④ 계통 점검	컨버터/전차선 전압상태 확인
⑤ 인버터 가압	회생인버터 계통 투입 및 상태 점검
⑥ 전동차 투입	전동차의 시험선로 투입 및 가선 전압 확인
⑦ 전동차 운행/인버터 가동입출력 계측	전동차 역행 및 회생제동 운행 지속, 인버터 회생모드 운전 및 계측
⑧ 인버터 정지	인버터 운전 중지
9 전동차 출차	시험선로에서 전동차를 출차 혹은 전원 cut-off
⑩ 급전 중단	컨버터(C2)의 급전 중단
① 계통 복구	단로기 조작으로 기지 급전계통의 원상복귀 및 상태 파악, 시험 종료

또한, 연속동작시험은 전동차 적용시험으로 회생용 인버터의 동작이 정상적이며, 신뢰할 수 있는 수준

이라고 판단되었을 때 시행한다. 부산교통공사는 싸이리스터 더블 컨버터/인버터 시스템으로 급전시스템을 운영하여 계통에서 발생한 회생전력을 변환하고 있다. 따라서 여타 도시철도 시스템과 달리 전동차에서 발생한 회생전력을 시험계통에 투입한 회생용 인버터가 되도록 모두 변환/소비하여야 안정적인 시험결과를 얻을 수 있다. 표 1과 2는 각각 전동차 적용 시험과 연속 동작 시험의 절차를 나타낸 것이다.

3.2 실계통 적용 시험 결과

3.2.1 전동차 적용 시험

전동차 적용 시험은 회생용 인버터 개발 후 처음이기 때문에 전동차의 최고 속도를 점진적으로 늘려가면서 시험을 수행하였다. 즉, 전동차 속도를 30km/h, 40km/h 및 50km/h로 증속하며 회생용 인버터의 동작을 살펴보았다.

먼저, 전동차의 속도를 30km/h로 증속한 후에 전기제동을 사용하여 회생전력을 발생시킨 후 가설한 회생용 인버터를 동작시킨 결과는 다음 그림 3과 같다. 그림 3은 상단부터 회생용 인버터의 입력부 전압, 전류, 전력을 차례로 보여주며, 두개의 그래프 중에서 아래 그림은 위 그래프를 확대한 것이다. 이때, 회생용 인버터의 동작개시 전압은 1,620[V] ~ 1,670[V]로 설정하였다. 결과 그림에서 보듯이 회생용 인버터는 설정한 전압 대역에서 운전하며, 운전시 차량에서 발생한 회생전력이 인버터를 통해 유입되고 있음을 알 수 있다. 또한, 전동차가 30km/h 속도 대역에서 3번의 회생 제동을 사용했음을 알수 있다. 그림 4는 전동차의 속도를 40km/h로 증속한 후에 전기제동을 사용하여 회생전력을 발생시킨

후 가설한 회생용 인버터를 동작시킨 결과이다. 30km/h 시험 때와 마찬가지로 동작개시전압을 설정하였고, 그림과 같이 인버터의 정상동작을 확인하였다. 또, 그림 5는 50km/h시험 결과를 보인 것이다.

한편, 전동차에서 발생한 회생 전력은 회새용 인버터를 통하여 유입되어, 고압배전 부하에서 소비되거나 상위 계통으로 전달되게 되지만, 본 연구의 실계통 시험에서는 저항 부하를 사용하여 회생용 인버터에서 출력된 전력을 소비하게 된다. 그림 6은 회생용 인버터의 출력측에 설치한 부하설비에서 소비한 전력을 나타낸 것이다. 회생용 인버터와 상관없이 항상 저항 부하에 전력을 공급하는 발전기와 동작 후에는 발전기와 부하를 분담하게 되는 인버터 출력을 비교한 그래프이다. 그림에서 보듯이 총 40kW 정도 크기의 부하에 발전기가 부하에 전력을 공급하다 선로에서 발생한 회생전력으로 회생용 인버터가 동작하여부하를 분담하는 형태를 나타낸다.

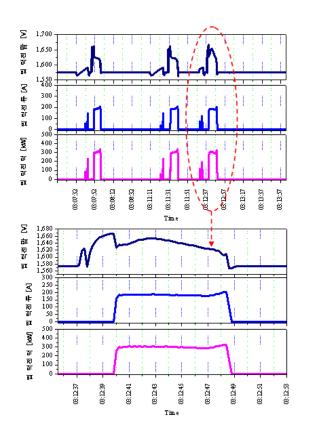


그림 3 부하시험 결과 (30km/h)

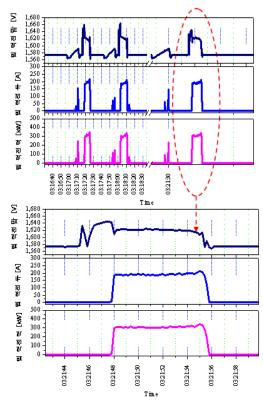


그림 4 부하시험 결과 (40km/h)

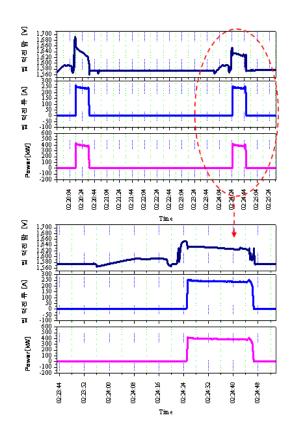


그림 5 부하시험 결과 (50km/h)



그림 6 발전기/인버터 출력 비교

3.2.2 연속동작 시험

현장에 부설한 각종 설비의 개별 성능확인 및 전동차 적용 시험을 통한 시스템 성능확인 후에는 연속 동작 시험을 수행하였다. 본 시험은 실계통에 적용한 회생용 인버터의 신뢰성 검증을 위하여 연속된 전 동차 운행 조건에서 회생용 인버터의 운전 상태를 검토하기 위한 것이다. 즉, 부하시험과 전압변동 시험 으로 회생용 인버터의 설정을 확정한 후 2시간 이상의 지속적인 계통 및 인버터의 운전을 모의하는 것 이다.

그림 7은 전체 시험 시간동안에 회생용 인버터 입력부에서 발생한 전압, 전류 및 전력을 보인 것이고, 그림 8은 전체 시간중 회생용 인버터가 동작한 일부분을 확대하여 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯 이 전 시험시간 동안 급전계통 및 회생용 인버터가 문제없이 동작한 결과를 볼 수 있다.

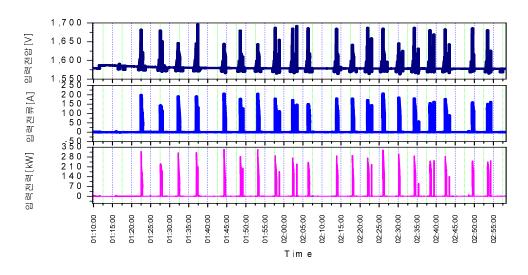


그림 7 연속동작 시험 결과

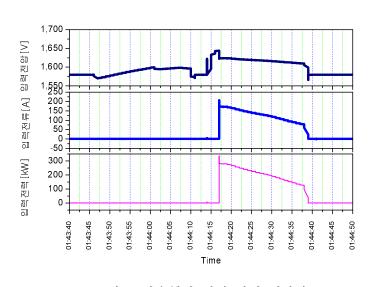


그림 8 연속동작 시험 결과 일부분

4. 결론

본 논문은 5년에 걸쳐 개발한 회생용 인버터의 특성을 확인하기 위한 실계통 적용 시험 방안 및 그 정차에 대하여 제시하였다. 실계통 적용 시험은 여러 가지 조건을 고려하여 부산교통공사의 노포기지 시험선에서 수행하였으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 부산교통공사 노포변전소에 회생용 인버터를 부설하고 현장시험을 수행
- 노포기지의 C2 컨버터, 신설한 직류고속도차단기, 회생용 인버터, 부하설비 등의 개별 성능확인 시험을 수행하여 정상동작 확인

- 무부하 시험부터 부하 시험까지 단계별로 회생용 인버터의 동작상태 검증
- 전동차 운행에 따라 발생한 회생전력으로 회생용 인버터가 동작하여 전력이 회수됨을 확인.
- 회생용 인버터의 최적 동작개시 전압 설정을 위하여 다양한 조건으로 시험 수행
- 연속동작시험을 통하여 회생용 인버터가 계통 및 차량에 문제없이 동작되고 있음을 확인

이상과 같은 결과를 얻을 수 있었던 현장 적용 시험을 계기로 향후 실제 직류도시철도의 변전소에 장기간 설치하여 더욱 유용한 결과를 얻도록 할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 국가교통핵심기술개발사업의 연구비지원(03교통핵심D01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 1. 한국철도기술연구원(2008), '차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발' 4차년도 보고서, 국토해양부.
- 2. 김주락, 한문섭, 김용기, 김정훈, "직류급전시스템 회생용 인버터의 시험설비 구축 및 특성시험", 한 국철도학회 춘계학술대회논문집, 2008
- 3. 김용기, 김주락, 한문섭, 김준구, 양영철, "DC전철구간의 회생인버터시스템 개발", 한국철도학회 춘 계학술대회논문집, 2008
- 4. 조응상, 박기원, 권명기, 박창주(2002), '능동전력필터의 현장적용 보고', 포스콘
- 4. 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구", 전력전자학회 논문 지, 제 7권, 제 2호, 2002.