

# 직류급전시스템 회생용 인버터의 시험설비 구축 및 특성시험 Development of Inverter for Regenerative Power and Test Equipment

김주락\*                  한문섭\*\*                  김용기\*\*\*                  김정훈\*\*\*\*  
Kim, Joorak              Han, Moonseob              Kim, Yong-Ki              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 test equipment. 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.

지금까지 국내에서는 회생전력 사용을 위한 인버터 개발이 전무하여 발생한 잉여 회생전력은 열에너지로 버려져왔다. 그러나 대부분의 직류 도시철도 운영기관에서는 잉여 회생전력의 사용의 필요성에 공감하고 있으며, 실제로, 서울 지하철 9호선에는 일본 제품이 적용될 예정이다. 따라서 회생에너지 이용을 위한 인버터 개발을 위한 시장의 성숙도는 매우 높다할 수 있다.

본 연구에서 언급하는 회생용 인버터는 2003년부터 착수하여 2007년 시제품 개발이 완료되었으며, 완료된 시제품의 성능 검증을 위하여 정상 상태 특성시험 설비를 개발하였다. 개발한 시험 설비를 통하여, 인버터 정상 동작 시험과 함께 전차선 전압 및 회생전력 변화에 따른 인버터의 출력 특성시험을 수행하였으며, 그 결과를 분석하였다.

---

\* 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 정회원

E-mail : jrkim@krri.re.kr

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

\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\* 한국철도기술연구원

\*\*\*\* 홍익대학교

## 2. 회생용 인버터 개발

개발한 회생용 인버터는 직류 급전시스템의 정류기 출력측인 직류 정급전부와 부급전부에 연결되어 회생인버터 운전 모드 및 능동전력필터 운전 모드로 운전된다.

회생인버터 운전 모드는 직류 선로에서 발생한 잉여 회생전력을 3상 교류 전력으로 변환하여 고압배전 계통으로 공급하는 모드이다. 반면, 능동전력필터 모드는 회생전력이 발생하지 않을 때 계통의 고조파 저감을 위하여 무효전력을 공급하는 모드이다.

### 2.1 회생용 인버터의 운전특성

#### 2.1.1 회생인버터 모드

개발한 인버터의 회생인버터 모드는 앞서 설명한바와 같이 선로에 운행중인 전동차가 전기 제동을 이용하여 감속을 할 때, 발생하는 잉여 회생 에너지를 그림 1에서 보듯이 직류 정/부급전선과 연결된 회생용 인버터를 통하여 일반 전력계통으로 송전하는 흐름이다. 그림 1은 회생용 인버터의 회생 모드 운전시의 동작 특성을 간략하게 도시하기 위하여 발생한 회생전력을 일반 전력계통으로 역송전하는 형태로 보였지만, 잉여 회생전력을 고압배전 계통으로 공급하여 조명, 공조 등의 역사 부하에 공급할 수 있다.

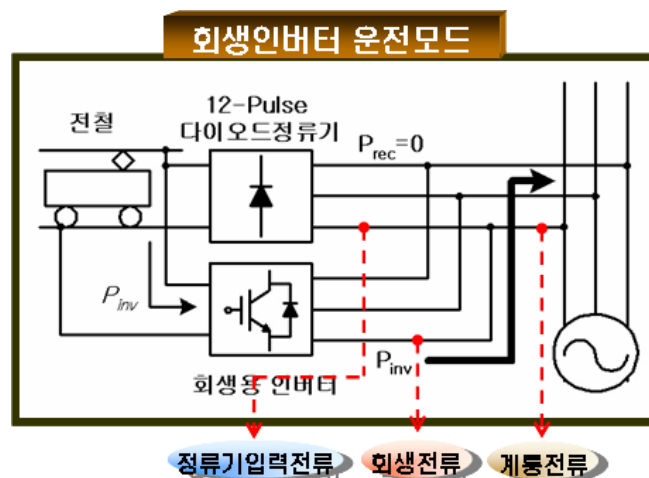


그림 1. 회생인버터 운전모드

#### 2.1.2 능동전력필터 모드

그림 2는 개발한 인버터가 능동전력필터 운전모드의 동작특성을 도식화한 것이다. 능동전력필터 운전 모드는 직류 선로에서 잉여 회생전력이 발생하지 않을 때 동작하며, 계통의 고조파 전류의 감쇠와 무효 전력 공급을 하게 된다. 그림에서 보듯이 인버터가 회생인버터 운전모드가 아닐 때, 직류 선로의 전력을 이용하여 인버터 출력측의 고조파 전류를 감쇠시키게 된다. 따라서 이 운전모드에서는 인버터가 직류급전시스템의 부하로 작용하게 된다.

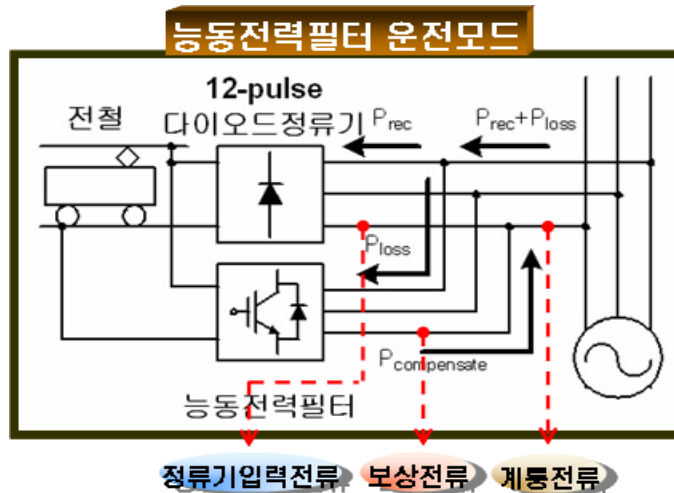


그림 2. 회생용 인버터 전류흐름

## 2.2 회생용 인버터 개발 사양

직류도시철도는 약 3~5km 마다 전철변전소에서 차량에 전력을 공급한다. 즉, 전철변전소마다 전력을 공급하는 거리에 차이가 있고, 해당 구간에 정거장 개수도 상이하야 각 전철변전소 공급구간에서 발생하는 잉여 회생전력도 당연히 차이가 있다. 따라서 회생용 인버터의 급전시스템 적용시에는 해당 전철변전소에 적절한 용량의 인버터가 구비되어야 한다. 이를 위해서는 연속 용량은 불가하지만 다수의 변전소 실측 혹은 시뮬레이션을 통하여 보편, 타당한 기본 용량을 선정하여 개발하는 것이 중요하다.

개발한 인버터의 기본 용량을 현재 설치 운영되고 있는 도시철도 노선의 회생량을 분석하여 가장 적합한 용량으로 선정하기 위해서, 전철구간에서 회생전력의 재사용을 위한 에너지 회생 시스템을 개발하고자 전철구간의 노선 구배도, 차량 운행시 가선전압 변동, 사용 전력량의 분석 및 에너지 회생률을 분석하였다. 그 결과 약 500~750 kVA용량의 전력 변환기를 개발하여 각 구간의 상황에 따라 1대에서 4대 까지 구분 설치하는 것이 경제성에 있어서 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다.[1]

위와 같은 과정을 통하여 750kV 용량의 회생용 인버터를 개발하였고, 그 세부 사양은 아래 도표 1과 같다.

## 3. 회생용 인버터 시험 설비

본 연구에서 개발한 회생용 인버터는 실제 도시철도 시스템의 적용이 최종 목표로서, 개발 후 성능 시험을 통하여 도시철도 운영기관에서 운영하는 실노선에 투입하는 것이다. 인버터 개발 후 실 노선에 바로 적용하여 특성시험을 수행할 수 있다면, 개발품의 성능 보완 등이 훨씬 수월하게 이루어지겠지만 영업운전 상태의 실제 노선 투입은 적용에 따른 안전성 문제에 상당히 신중하여야 한다. 이에 따라 개발한 회생용 인버터도 직류급전시스템을 실제와 가장 유사하게 모의할 수 있는 시험 설비를 구축하고, 개발한 회생용 인버터를 설치하여 직류급전시스템에서의 동작특성을 시험하였다.

그림 3은 회생용 인버터의 급전시스템 적용시험을 위하여 구축한 시험소의 외관을 보여준다. 또 그림 4는 시험소 내부의 회생용 인버터 배전반을 보여준다.

도표 1. 개발한 회생용 인버터 사양

항 목	사 양
용량	750kV
DC 허용 최고 전압	2000V DC
회생제동전압 조정 범위	1650 ~ 1850V DC
AC 출력전압 조정 범위	3 800 ~ 1000V AC
AC 정격 전류	500A ( 250A / 1대 x 2대)
AC 단시간 전류	800A (60초)
AC 정격 용량	1.5 MVA ( 750 kVA / 1대 x 2대)
효율	98% (정격 출력시)
동작 온도	0 ~ 40°C
동작 방식	IGBT PWM 방식
냉각 방식	수냉식
병렬 연계 운전	가능
크기	W 1,600mm x H 2,200mm x D 600mm

### 3.1 회생용 인버터 시험설비의 구성

그림 5는 시험설비의 전기적 단선도를 보여준다. 회생용 인버터의 성능시험은 직류 1,500V가 가압된 모선에 인버터를 연결하고 인버터에서 출력되는 회생 전력을 소비시키는 방법으로 진행하였다. 그림 5에서 보듯이 시험설비는 직류급전시스템부와 고압배전계통을 모의한 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 먼저, 3φ 440V 발전기로 교류 전력을 발생시키고, 다이오드 정류기를 통하여 직류 1,500V로 변환한다. 변환된 직류 1,500V를 이용하여 회생용 인버터를 가동하면 교류 출력이 발생하게 된다. 한편, 인버터에서 회생전력을 이용하여 변환시킨 교류 출력은 실 노선에서는 고압배전으로 전달하거나 한전계통으로 역송전 등을 고려하고 있으나, 시험설비에서 이와 같은 전력의 흐름은 불가하여 그림 5에서와 같이 375kW×3의 저항을 설치하여 인버터에서 변환된 전력을 소비시키도록 구성하였다. 또, 그림 좌측의 2번 발전기는 고압배전 계통의 변압기를 모의한 것으로 인버터에서 회생전력의 변환시 기준 위상의 역할을 하게 된다.

### 3.2 회생용 인버터 특성 시험

개발한 회생용 인버터의 동작 특성을 확인하기 위하여 구축한 시험설비를 이용하여 특성 시험을 수행하였으며, 시험은 설비의 발전기와 정류기를 통하여 직류 전압을 발생시킨 후 여기에 연결된 회생용 인버터의 운전을 통하여 그 출력 변화를 측정하는 방법으로 수행하였으며, 인버터의 입력측인 직류 모선과 출력측인 교류 모선에 전압과 전류 센서를 설치하여 그 변화를 관찰하였다. 또, 인버터가 전력을 공급하게 되는 저항의 양단에도 계측기를 설치하여 발전기와 인버터의 출력 변화도 살펴보았다. 이러한 과정을 통하여 수행한 시험은 다음 두 가지이다.

- 1) 인버터의 직류 개시전압 1,700V일 때의 동작 시험



그림 3. 회생용 인버터 시험소

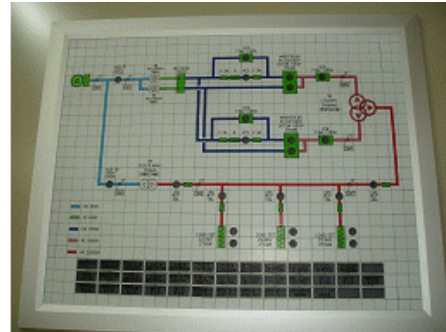


그림 4. 회생용 인버터 배전반

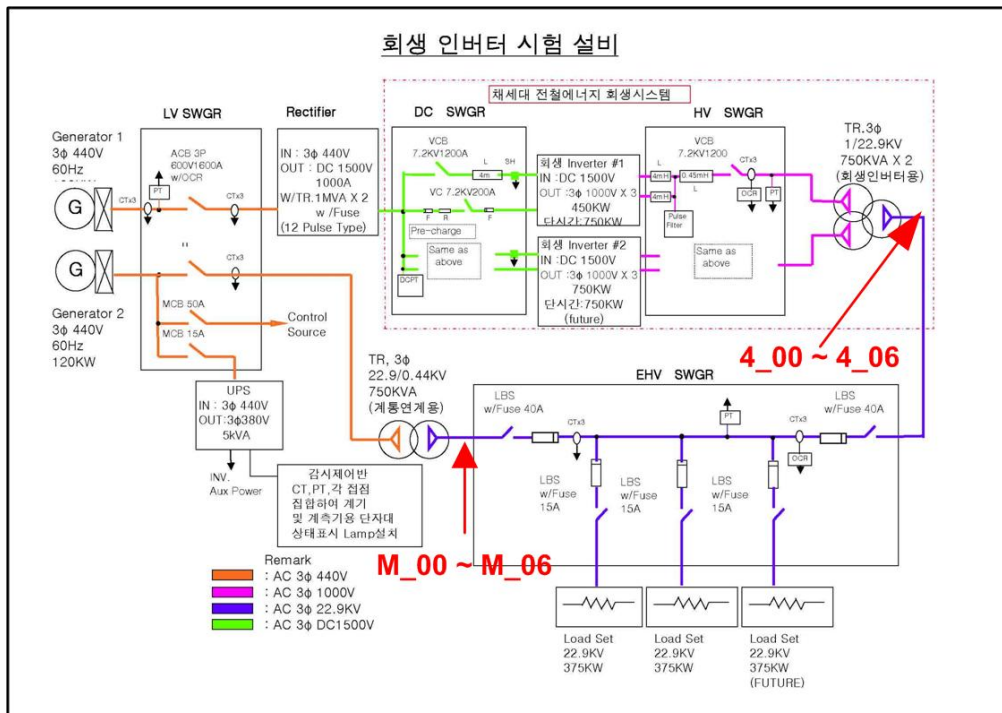


그림 5. 회생용 인버터 시험설비 단선도

직류 전차선에 연결된 회생용 인버터는 가선의 전압이 높아졌을 때, 즉 회생전압이 전동차로부터 전차선으로 유입될 때 동작을 개시한다. 대개 직류 전차선 전압 1,650~1,750V일 때가 회생전력이 발생한 경우이다. 또한, 개발한 인버터는 이 개시전압을 자유롭게 조정할 수 있어 1,700V에서 인버터가 동작하도록 설정한 경우의 시험을 수행한다.

## 2) 인버터의 출력 연속 변화 시험

이 시험은 계통에서 직류 전차선의 전압과 회생전력의 변화에 따라 인버터의 동작이 응동하는가를 테스트하기 위한 시험으로서 부하로 모의한 저항을 일정 전력 소비부하로 설정 후 발전기와 회생용 인버터의 출력 변화를 시험한다.

### 3.3 회생용 인버터 특성 시험 결과

개발한 회생용 인버터의 동작 특성을 확인하기 위하여 구축한 시험설비를 이용하여 특성 시험을 수행한 결과는 아래 그림들과 같다. 우선 첫 번째 시험으로 수행한 결과를 그림 6 ~ 그림 9에 보인다. 이 시험은 앞서 언급하였듯이, 회생전력의 인버팅 개시 전압을 1,700V로 설정하였을 때, 각 부분에서 계측한 전압, 전류 및 전력을 보인 것이다.

그림 6에서 보듯이 직류 전압 1,700V에서 인버터가 동작을 개시하였으며, 인버터의 LCL 필터로 인한 시정수 값에 따른 과도상태를 지나 그림 8과 그림 9에서 보듯이 교류 전력이 인버터에서 출력됨을 볼 수 있다. 그림 6의 직류전압은 인버터 동작전은 직류 전차선에서 회생 전력이 발생하여 1,700V로 전차선 전압이 상승된 상태로 볼 수 있으며, 회생용 인버터가 동작함으로써 발생한 회생전력은 다른 계통에 공급되어 인버터의 정상동작 후에는 그림과 같이 직류 전압이 1,620V 정도로 내려감을 알 수 있다. 또, 회생용 인버터에서 출력된 교류전력은 42kW정도였으며, 동시에 2번 발전기에서 공급한 전력은 15kW 정도였다. 시험 결과 회생용 인버터의 회생모드 운전 특성은 양호한 상태인 것으로 판단되었다.

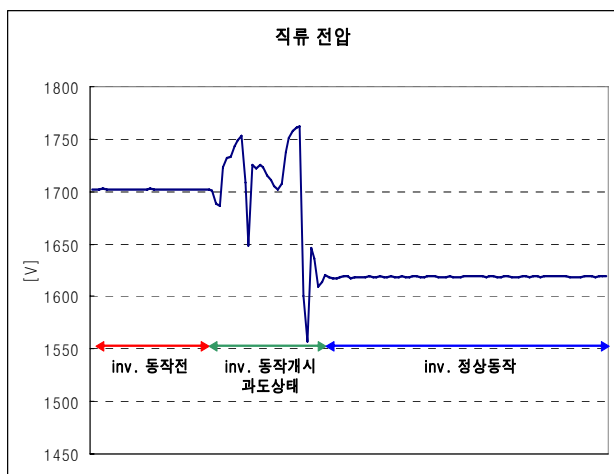


그림 6. 회생모드 운전 시험 결과-직류전압

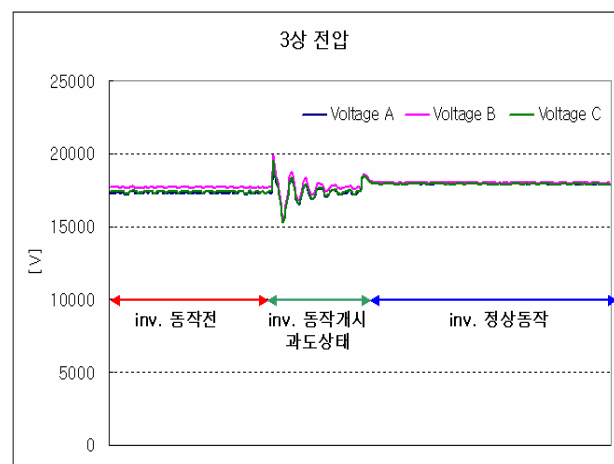


그림 7. 회생모드 운전 시험 결과-교류전압

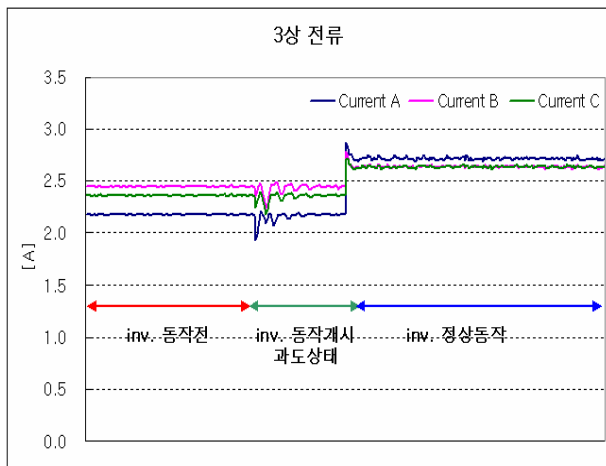


그림 8. 회생모드 운전 시험 결과-교류전류

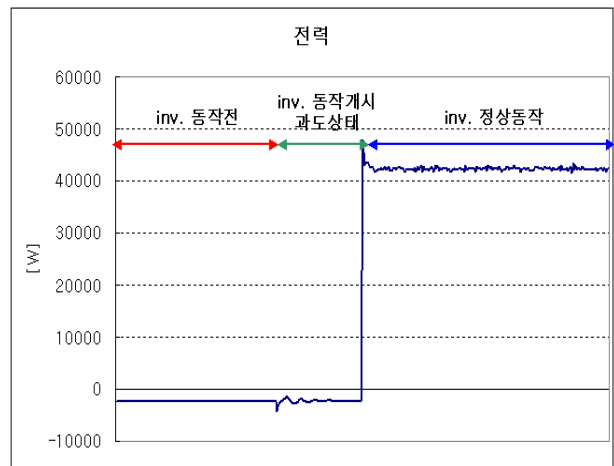


그림 9. 회생모드 운전 시험 결과-교류출력

그림 10과 11은 두 번째로 수행한 시험인 회생용 인버터의 출력 변화를 시험 한 결과를 보인 것이다. 그림 5의 시험설비 단면도에서 설명하였듯이 시험설비 내의 저항 부하는 2번 발전기와 회생용 인버터 출력측과 연결되어 있다. 회생용 인버터 동작시에는 일정한 저항부하에 회생용 인버터와 발전기가 전력을 공급하게 된다. 따라서, 회생용 인버터의 출력을 변화시키면 발전기의 출력에도 변화가 생기며, 저항에서는 일정한 전력을 계속 공급받게 된다.

그림 10은 위와 같은 인버터 연속 출력 변화 시험시 인버터의 입력측인 직류전압을 측정한 결과를 보여준다. 또, 그림 11은 연속 출력 변화에 따른 인버터 출력을 보인 것이다. 그림 11은 기술한 바와 같이 일정 부하에 발전기와 인버터가 출력 변화를 보이며 전력을 공급함을 보여준다. 본 시험의 결과에서 확인하려는 인버터의 운전 특성은 직류 전차선의 전압 변화와 전동차에서 발생하는 회생전력량의 변화에 인버터가 적응하며 운전하는 가를 확인한 시험이었다.

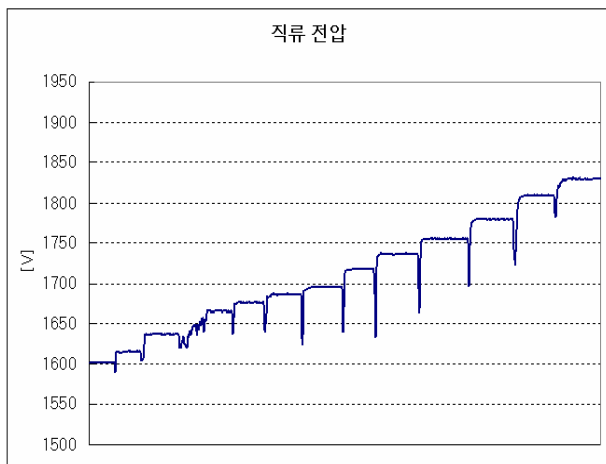


그림 10. 인버터 연속 출력 변화시험-직류전압

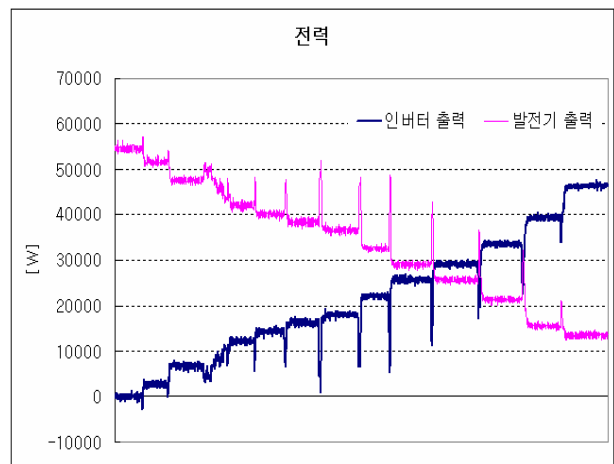


그림 11. 인버터 연속 출력 변화시험-교류출력

#### 4. 결론

본 논문은 5년에 걸쳐 개발한 회생용 인버터의 특성을 확인하기 위한 시험설비의 개발과 시험 결과를 제시

하였다. 개발한 인버터는 회생 운전 모드와 능동전력필터 모드로 운전되며, 본 논문에서 검증한 시험은 회생 운전 모드에 대한 동작 특성이다.

개발한 인버터 시험 설비는 1,500V 직류 급전시스템, 1.5MVA의 회생용 인버터, 고압배전 계통을 모의한 형태로 구축되었다. 1,500V 직류 급전시스템은 발전기와 정류기를 통하여 구성되었고, 고압배전 계통은 발전기와 저항기를 통하여 시설하였다. 모든 구성 요소는 실제 시스템과 동일한 전압 레벨로 구축하였다. 구축된 설비는 개발한 인버터의 정상 동작시험을 위한 것으로서, 본 논문에서는 동작 개시 전압에 따른 인버터 출력 시험과 동작 개시 전압 및 출력 변화에 따른 인버터 특성을 살펴보았다.

구축한 설비와 수행한 시험은 향후 수행할 실제 시스템 적용 시험의 전초 단계로서 다수의 시험과 결과의 분석은 실제 시스템 적용시 높은 신뢰성을 갖게 도움을 줄 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

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

#### 참고문헌

1. 한국철도기술연구원(2007), ‘차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발’ 4차년도 보고서, 국토해양부.
2. 한국철도기술연구원(2003), ‘도시철도표준화연구개발사업’ 3차년도 보고서, 국토해양부.
3. 조용상, 박기원, 권명기, 박창주(2002), ‘능동전력필터의 현장적용 보고’, 포스콘
4. 김경원, 서영민, 홍순찬, “회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구”, 전력전자학회 논문지, 제 7권, 제 2호, 2002.