

직류급전시스템 회생용 인버터 개발 및 실계통 적용 방안

김주락*, 한문섭*, 창상훈* 김정훈**
한국철도기술연구원*, 홍익대학교**

A Scheme for Adoption of Regenerative Inverter in DC Transit System

Joorak Kim*, Moonseob Han*, Sanghoon Chang*, Jung-Hoon Kim**
Korea Railroad Research Institute*, Hongik University**

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 adoption of developed inverter in commercial railway line and the test result procedure 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 제시하는 회생용 인버터는 제어알고리즘 및 하드웨어 개발을 2003년부터 착수하여 2007년 시작품 개발을 완료하였다. 개발한 인버터는 축소형 모델 제작 및 테스트를 거쳐 kW급의 축소형 장치를 개발하여 제어알고리즘의 검증에 맞췄다. 이후 검증된 알고리즘과 하드웨어를 개발하여 2007년 피시품의 개발을 완료하였다. 본 개발품은 실제 영업중인 직류 도시철도에 적용을 목표로 개발되었기 때문에 축소형 설비의 테스트만으로는 신뢰성을 판단하기 어렵기 때문에 실제 노선 혹은 시험선로에 시작품을 적용하여 전반적인 시험 평가가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 부산교통공사의 노포차량기지 시험선에 투입 예정인 회생용 인버터의 시험계통 구성방안과 시험 방법 및 그 절차에 대하여 논의하고자 한다.

2. 회생용 인버터의 개발 및 공장시험

2.1 회생용 인버터 개발

본 논문에서는 도시철도 직류 급전시스템에 적용되는 회생용 인버터의 개발은 2003년부터 진행되어 2007년 시작품 제작을 완료하였다 [1]. 제작한 시작품은 750kVA×2 용량으로 회생인버터 모드와 능동전력필터 모드로 운전된다[2]. 개발한 회생용 인버터의 사양은 표 1과 같다.

2.2 회생용 인버터 공장시험 [2]

회생용 인버터의 시작품 제작후에는 시스템의 성능을 검증하기 위하여 시험설비를 구축하였다. 시험설비는 직류급전시스템을 모의하기 위한 발전기, 정류기 및 스위치 기어 등과 회생용 인버터 그리고 회생용 인버터의 출력인 교류 전력을 소비시키기 위한 저항기와 변압기 등으로

구성되어 있다. 이러한 설비를 통하여 개발한 인버터의 정상상태 출력 <표 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	3Ø 800 ~ 1000V AC
AC 정격 전류	500A (250A / 1대 x 2대)
AC 단시간 전류	800A (60초)
AC 정격 용량	1.5 MVA (750 kVA x 2)
효율	98% (정격 출력시)
동작 온도	0 ~ 40℃
동작 방식	IGBT PWM 방식
냉각 방식	수냉식
병렬 연계 운전	가능
크기	W 1,600mm x H 2,200mm x D 600mm

시험과 회생 개시 전압 변동 시험 및 고조파 저감 시험등을 수행하였다. 시험 결과는 모두 양호함을 알 수 있었다.

3. 회생용 인버터의 실계통 적용 방안

시작품 제작과 공장시험 단계를 마치고 개발단계의 마지막으로 영업 운전중인 실계통에 시작품을 적용하여 종합적인 성능을 검증하고자 실계통 적용 시험을 계획하였다. 실계통 적용 시험은 영업운전중인 실계통에서 시행함을 원칙으로 하여 적용 조건, 성능시험 및 시험 절차 등을 마련하였다.

3.1 실계통 적용 조건

회생용 인버터를 실계통에 적용하기 위해서는 아래와 같은 적용 조건이 필요하다.

- 영업운전에 지장을 주지 않고 시험할 수 있을 것
- 시험구간내 별도의 직류 1,500V 급전이 가능할 것
- 인버터 및 기타 시험장비의 설치장소가 충분할 것
- 필요시 시험용 전동차의 투입이 가능할 것
- 전동차의 속도를 시험에 적절하게 조절 가능할 것
- 최대의 회생을 발생할 수 있도록 선로가 적정할 것

3.2 실계통 적용 방안

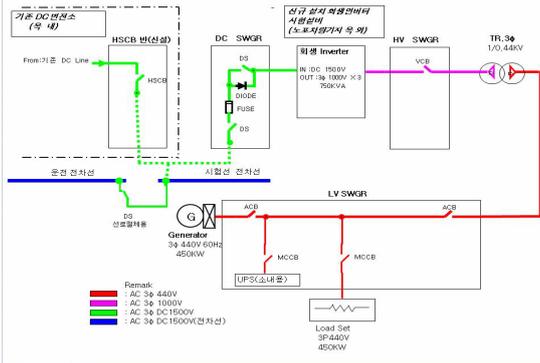
회생용 인버터를 실계통에 적용하기 위해서 그림 1과 같은 인버터 계통을 구성한다. 구성된 인버터 계통은 회생용 인버터 적용에 따른 사고에 대비하기 위하여, 인버터의 출력을 고압배전계통이나 수전계통과 연결하지 않고, 저항기를 이용하여 열에너지로 소비하는 형태를 선택하였다.

먼저, 인버터에 입력되는 직류 1,500V 전력은 최대한 계통을 구별하여 사고시 피해를 최소화하기 위하여 전철변전소의 직류 급전 모선에 별도의 고속도 차단기를 사용하여 회생용 인버터의 입력부와 연결한다. 또, 인버터출력은 변압기를 통하여 저항기(부하셋)에서 열에너지로 소비된다. 이때, 그림 1의 발전기는 저항기에 회생용 인버터와 동시에 전력을 공급하여 인버터 출력 파형의 기준을 제시하게 된다.

3.3 성능 시험

현장시험에 대한 위험성을 최대한 줄이기 위하여 표 2와 같이

단계별로 시험을 진행하는 방안으로 구성하였다.



〈그림 1〉 회생용 인버터 시험계통

〈표 2〉 성능시험 방안

단계	시험명	시험방법
1 단계	공장시험	회생용 인버터 정상동작시험 (교류발전기/정류기 이용) 가선전압변동에 따른 동작시험
	정류기 시험	무부하 상태의 싸이리스터 컨버터 전기적 특성 시험
	전동차 출력 특성 시험	전동차 견인 및 회생에 따른 전차선 전압 및 전류의 변동 특성 평가 시험 전동차 정상 운전 상태에서의 컨버터 전기적 특성 시험
2 단계	회생용 인버터 가압시험	회생용 인버터 시험설비의 가압 시험 및 각종 개폐장치의 재폐로를 통한 성능시험
	무부하시험	차량운전이 없는 상태에서 인버터 동작시험 (회생개시 전압 조정)
	부하시험	시운전전에 실제 차량을 투입하여 회생용 인버터 특성시험
3 단계	전압변동시험	가선전압의 변동/인버터 출력개시전압 변동 등의 시험
	연속동작시험	차량 운행을 지속적으로 모의하여 인버터의 성능 시험

3.4 성능 시험 절차

회생용 인버터의 실계통 적용은 상용화후에 계통에서 발생할 수 있는 문제점을 미리 파악하고, 계통에서의 응용 특성을 미리 확인하는데 목적이 있다. 본 절에서는 회생용 인버터의 실계통 적용 후에 시행될 시험들에 대한 절차에 대하여 논의하고자 한다. 단, 본 논문에서는 2단계시험과 3단계 시험의 절차에 대하여 언급한다.

2단계 시험

위 성능시험(안) 중 2단계 시험은 '회생용 인버터 가압시험', '무부하 시험' 및 '부하 시험'이다. 각 3개의 시험은 시험에 따라 전동차가 시험선로에 투입해야 하며, 시험 절차는 아래와 같다.

1) 계통 분리 및 구성

실제 운영 노선이라면 계통 구성이 따로 필요 없지만, 차량 기지 등의 선로라면 스위치 기어 등으로 계통을 구성한다.

2) 시험선 가압

시험선의 수전반 및 정류기를 투입한 후 계통의 회로 연결 상태를 확인한다.

3) 주 시험

가) 회생용 인버터 가압시험

1) 및 2)의 과정을 통하여 계통이 구성된 후에는 2단계 시험중 '회생용 인버터 가압시험'을 수행한다.

i) 회생용 인버터 배전반에 직류전압/전류 계측기를

설치한다.

ii) 회생용 인버터 계통을 투입(가압)하여, 과도상태 전기적 특성 계측

iii) 별도로 설치한 직류고속도차단기의 차단 및 재폐로 시행으로 회생용 인버터측 사고 혹은 오동작에 의한 계통 영향 검토

iv) 회생용 인버터를 계통에서 분리하며, 계측

나) 무부하 시험

1) 및 2)의 과정을 통하여 계통이 구성된 후에는 2단계 시험중 '무부하 시험'을 수행한다.

i) 시험선용 변전소에 직류 전압/전류 계측기 설치

ii) 회생용 인버터 입력측에 직류 전압/전류 계측기 설치 및 출력측과 시험용 발전기 출력측에 교류 전압/전류 계측기 설치

iii) 회생용 인버터 계통 투입

iv) 전차선 무부하 전압으로 회생용 인버터의 회생모드 운전 개시 및 일정 시간 유지.

v) 별도로 설치한 직류고속도차단기의 차단 및 재폐로 시행으로 회생용 인버터측 사고 혹은 오동작에 의한 계통 영향 검토

vi) 모든 계측기의 회로 분리(제거)

vii) 회생용 인버터 계통 분리

다) 부하 시험

1) 및 2)의 과정을 통하여 계통이 구성된 후에는 2단계 시험중 '부하 시험'을 수행한다.

i) 나)의 i) ~ iv) 과정을 수행하여 급전시스템 및 회생용 인버터의 정상동작을 확인한다.

ii) 회생용 인버터를 계통에서 분리하고 전동차를 시험선에 진입시킨다.

iii) 회생용 인버터를 계통에 투입한다.

iv) 전동차는 시험선로의 조건에 적합하게 회생 운전을 시행하며, 회생용 인버터는 회생모드 운전을 개시한다.

v) iv)의 상태에서 모든 전기량을 계측 기록 한다.

vi) iv) ~ v)의 시험을 4회 반복한다.

vii) 4회 시험 종료 후, 회생용 인버터를 계통에서 분리한다.

viii) 전동차를 시험선에서 출차시킨다.

4) 정류기 차단

시험 종료 후 시험선 계통을 다시 원위치로 분리하기 위하여, 컨버터를 OFF 한 후 계통에서 분리 한다.

5) 계통 분리

1)에서와 반대로 별도로 구성한 차단기와 기존의 차단기를 OPEN 한 후, 단로기를 CLOSE 상태로 하여 시험선 및 여타 선로를 급전한다.

6) 정상상태 확인

모든 계통이 원상태로 되돌려졌는지를 전압 및 전류 계측으로 확인한 후 종료 한다.

이상의 절차를 통하여 회생용 인버터의 실계통 현장시험을 수행한다. 단, 본 논문에서는 지면관계상 2단계 시험만 제시하였지만, 1단계와 3단계의 시험절차에 대해서도 이미 수립되었다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내에서 최초로 개발된 1500V 직류 급전시스템용 회생용 인버터의 실계통 적용 시험에 대하여 방법론 및 절차에 대하여 제시하였다.

현재 시작품 제작을 완료하고 실계통과 동일한 전압레벨에서 공장 시험을 마친 상태로써 마지막 신뢰성 검토로서 실계통 적용 시험을 준비하고 있다. 본 논문에서 제시한 시험 종류와 절차에 따라 실계통 시험을 완료하면 국내 도시철도에 적용하여 에너지 효율화 및 급전계통 안정화에 기여할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] 한국철도기술연구원, "차세대 전철시스템 에너지회생장치", 4차년도 보고서, 국토해양부, 2007.
 [2] 김주락, "직류급전시스템 회생용 인버터 및 시험 설비 개발", 대한전기학회 춘계학술대회, p91-p93, 2008.
 [3] 조용상, 박기원, "능동전력필터의 현장적용 보고", 포스콘, 2002
 [3] 김경원, 서영민, 홍순찬, "회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제7권, 제2호, 2002