

직류급전시스템의 회생 전력 활용을 위한 인버터 시험설비 개발 및 성능시험

Development and Test of Inverter for Regenerative Power of DC Traction Power Supply System

김주락[†] · 한문섭* · 김용기* · 김정훈**

Joorak Kim · Moonseob Han · Yong-Ki Kim · Jung-Hoon Kim

Abstract DC transit system has been adopted in the metropolitan area, Korea since 1974. Electric multiple unit (EMU) in this system always reiterates that acceleration and retardation. When EMU decelerates using electric braking, 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 and the replacement cycle of brake shoe in EMU will be increased and dust due to mechanical braking decreased. This paper present the developed inverter for regenerative power and its test equipment. Test for developed inverter is performed at test equipment and is divided into three items, which are regeneration mode, active filter mode, and system link test.

Keywords : DC traction power supply system, regenerative power, regenerative inverter, performance test

요 지 국내 도시철도시스템에서 채용한 직류급전시스템에서 다이오드 정류시스템을 사용하여 역방향 조류가 불가능하다. 이에 따라 전동차의 감속 또는 제동시에 발생하는 회생 전력을 재활용 하지 못하고 열에너지로 소비하게 된다. 잉여 회생 전력의 재활용은 에너지 이용의 극대화, 전동차의 제동 성능 향상 및 분진 감소 등의 환경 친화적인 효과를 얻을 수 있으며, 정류기와 역병렬로 인버터를 설치하여 타 계통으로 전달하거나 저장하는 형태로 가능하다. 본 논문에서는 발생한 잉여 회생 전력을 교류 전력으로 변환하여 고압배전계통이나 한전계통으로 역송전이 가능한 회생용 인버터의 시험 설비 개발 및 성능시험에 대하여 제안하였다. 회생용 인버터 개발 후 개발품의 성능 시험을 위하여 직류급전시스템을 모의할 수 있는 교/직류 전원 설비 및 부하설비를 이용하여 회생용 인버터의 고유 성능을 시험 및 분석하였다.

주 요 어 : 직류급전시스템, 회생 전력, 회생용 인버터, 성능시험

1. 서 론

대도시의 교통 수요 분담을 위하여 1974년 서울 1호선의 개통이후 6개의 대도시 권역에서 도시철도 시스템이 건설 및 운영 중에 있다. 이러한 도시철도 시스템은 직류 1,500V의 급전시스템을 채용하여 열차 운행에 활용하고 있다.

교류 전력을 수전 받아 직류로 변환하고 이 전력을 전동

차에 공급하기 때문에 모든 직류 급전시스템은 정류시스템을 채용하고 있으며, 국내 도시철도 대부분은 다이오드를 이용한 정류기를 운영하고 있다. 다이오드 정류기는 그 특성상 단방향 전류 흐름만이 가능하므로 전동차의 역행시에는 직류 전력을 공급하지만 회생제동시에는 역방향의 전류 흐름이 불가능하다. 따라서, 회생제동으로 발생하는 전력은 인근의 역행중인 전동차에서 소비하고 남은 전력은 저항기를 이용하여 강제 소비하고 있다.

이렇게 버려지는 회생전력은 다이오드 정류기와 역병렬로 연결한 인버터를 설치하면, 교류전력으로 변환하여 역사 등에 전기를 공급하는 고압배전계통에 공급할 수 있으며, 여건에 따라 계통으로의 역송전도 가능할 것이다. 이러

[†] 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 집전전력연구실, 선임
E-mail : jrkim@krii.re.kr

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

* 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

** 정회원, 홍익대학교, 교수

한 회생전력의 사용은 열로 발산하여 버려지는 에너지의 이용으로 이용 효율을 높일 수 있고, 전차선의 회생전력흡수율을 높임으로서 전동차의 제동 및 ATO 성능을 향상시킬 뿐만 아니라 브레이크슈의 사용회수를 줄여 교체주기를 연장시킬 수 있다. 더불어, 브레이크슈를 이용한 기계 제동의 사용 감소는 마모에 의한 미세먼지 감소 및 온도상승을 억제하는 효과가 있다.

상기한 바와 같이 직 · 간접적인 다양한 효과를 얻을 수 있는 회생용 인버터는 기술적 성숙도 및 경제성을 이유로 개발과 적용이 미루어져 왔었다. 그러나 본 연구의 연구진에 의하여 2003년부터 연구개발에 착수하여 축소형 모델을 통한 제어 알고리즘 개발과 직류급전시스템의 현황을 고려한 개발 목표 용량의 선정 등을 통하여 시작품 개발을 완료하였다[1-3].

개발한 회생용 인버터는 도시철도 급전시스템에서 발생하는 잉여 회생전력의 재활용에 이용된다. 회생용 인버터가 적용되지 않은 기존의 계통에서는 발생한 잉여 회생전력을 저항기를 이용하여 열에너지로 소비하고 있다. 이러한 계통 구조에 개발한 회생용 인버터를 적용하기 위해서는 개발품의 신뢰성은 필연적으로 요구된다. 즉, 개발한 시작품을 이용하여 다양한 성능시험이 필연적인 것이다. 본 논문에서는 개발한 회생용 인버터 시작품의 성능 검증을 위한 시험방법을 고안하고 그에 따른 시험설비를 설계 및 건설한 주요 내용에 대하여 설명 한다. 또한, 개발한 시험소 및 시험방법에 따라 시작품을 시험하고 그 결과를 제시한다.

2. 회생용 인버터 시험설비

2.1 회생용 인버터 시작품 개발

개발한 회생용 인버터는 직류 급전시스템의 정류기 출력측인 직류 정급전부와 부급전부에 설치하여 시스템에서 발생하는 잉여 회생전력의 재활용을 위하여 흡수하는 것이 주요 기능이다. 급전시스템에서 발생하는 잉여 회생전력은 계통의 상태에 따라 그 양과 발생 시점이 달라진다. 따라서, 회생용 인버터의 용량 및 동작 성능에 따라 급전시스템이 얻는 효과에 차이가 있을 수 있다.

본 연구에서 개발, 제작한 인버터는 국내 도시철도 구간의 실측 및 시뮬레이션을 통하여 적절한 용량을 찾아 제작하였으며, 동작 성능은 잉여 회생전력의 발생에 따라 2가지의 운전 상태를 갖도록 개발하였다.

2.1.1 회생용 인버터 개발 사양

도시철도시스템은 약 3~5km 마다 설치된 전철변전소에서 전력을 공급한다. 전철변전소마다 전력을 공급하는 거

리에 차이가 있고, 해당 급전구간에 정저장 수도 상이하여 각 전철변전소 공급구간에서 발생하는 잉여 회생전력도 당연히 차이가 있다. 따라서 회생용 인버터의 급전시스템 적용시에는 해당 전철변전소에 적절한 용량의 인버터를 선정하여야 한다. 이를 위해서는 연속 용량은 불가하지만 다수의 변전소 실측 혹은 시뮬레이션을 통하여 보편, 타당한 기본 용량을 선정하여 개발하는 것이 중요하다.

회생용 인버터의 개발에 앞서 기본 용량을 결정하기 위하여 현재 설치 운영되고 있는 도시철도 노선의 회생 전력량 분석이 필요하며, 상업운행구간의 노선 구배도, 전동차 운행시 전차선전압의 변동, 사용 전력량 및 에너지 회생률을 분석하였다. 그 결과 약 500~750[kVA]용량의 인버터를 개발하여 각 구간의 상황에 따라 1대에서 4대 까지 구분 설치하는 것이 경제성에 있어서 적합하다는 결론을 얻을 수 있었다[4].

위와 같은 과정을 통하여 750[kVA] 용량의 회생용 인버터를 개발하였고, 그 세부 사양은 아래 Table 1과 같다.

Table 1. Specification of the developed inverter

항 목	사 양
용량	750kVA
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×2대)
AC 단시간 전류	800A (60초)
AC 정격 용량	1.5 MVA (750kVA×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×H 2,200mm×D 600mm

2.1.2 운전모드

개발한 회생용 인버터는 다음 두 가지의 모드로 동작하며, 각각의 회생인버터 모드와 능동전력필터 모드이다.

2.1.2.1 회생인버터 운전모드

회생인버터 운전모드는 선로에 운행중인 전동차가 전기 제동을 이용하여 감속을 할 때, 발생하는 잉여 회생 에너지를 직류 정/부급전선과 연결된 회생용 인버터를 통하여 고압배전계통으로 전달하는 모드이다. Fig. 1은 회생용 인버터의 회생 모드 운전시의 동작 특성을 간략하게 도시한 것으로서, 발생한 회생전력을 일반 전력계통으로 전달하는 형태로 보였지만, 잉여 회생전력을 고압배전 계통으로 공

급하여 조명, 공조 등의 역사 부하에 공급할 수도 있다. 이 회생 모드는 설정한 동작개시 및 중지 전압에 따라 동작한다. 인버터가 설치된 계통의 직류 전압이 회생 전력 발생에 따라 상승하여 설정한 동작개시 전압보다 높아지면 회생 모드가 동작하며, 회생 전력의 흡수 또는 견인 전력이 소요되어 전차선 전압이 강하하여 중지전압 이하가 되면 이 모드의 운전은 정지하게 되며, 능동전력필터 모드로 전환된다.

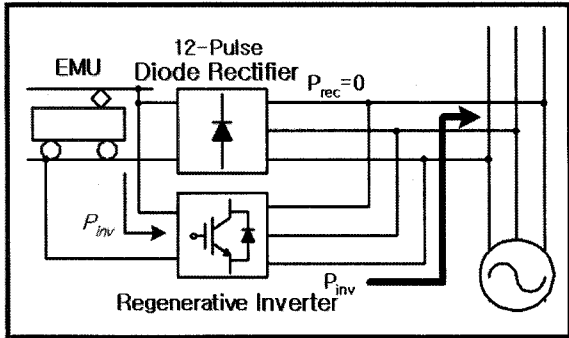


Fig. 1. Inverter operation mode - regeneration mode

2.1.2.2 능동전력필터 운전모드

Fig. 2는 개발한 인버터가 능동전력필터 운전모드의 동작특성을 도식화한 것이다. 능동전력필터 운전모드는 직류 급전시스템에서 잉여 회생전력이 발생하지 않을 때 (전차선 전압이 설정한 동작개시전압보다 낮을 때) 동작하며, 계통의 고조파 전류의 감쇠와 무효전력을 보상하게 된다 [5-6]. Fig. 2에서 보듯이 인버터가 회생인버터 운전모드가 아닐 때, 직류 선로의 전력을 이용하여 인버터 출력단의 고조파 전류를 감쇠시키게 된다. 따라서 이 운전모드에서는 인버터가 직류급전시스템의 부하로 작용하게 된다.

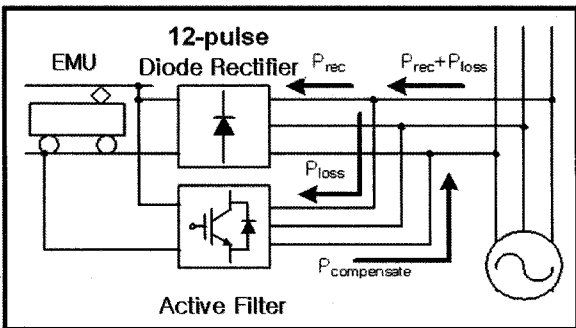


Fig. 2. Inverter operation mode - power filter mode

2.2 회생용 인버터 시험설비 구축

본 연구에서는 개발한 회생용 인버터의 성능 검증을 위하여 성능 시험 설비를 고안하여 구축하였다. Fig. 3은 시험설비의 간략한 단선도를 보여준다. 시험설비는 앞에서

서술한 회생용 인버터의 운전 모드의 성능 시험을 위한 것으로서 인버터를 기준으로 입력단인 발전 설비와 출력단의 부하설비로 구성된다. 즉, 시험 설비 계통의 전력 흐름은 ‘교류 전력 발전 → 직류 전력으로 변환 → 교류 전력으로 변환 후 소비 혹은 순환’으로 구성된다.

회생용 인버터의 성능시험은 직류 1,500[V]가 가압된 모선에 인버터를 연결하고 인버터에서 출력되는 회생 전력을 소비시키는 방법으로 진행하였다. Fig. 3에서 보듯이 시험 설비는 직류급전시스템부와 고압배전계통을 모의한 두 부분으로 나누어 볼 수 있다. 먼저, 발전기로 3φ 440[V] 전력을 발생시키고, 다이오드 정류기를 통하여 직류 1,500[V]로 변환한다.

변환된 직류 1,500[V]를 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 Fig. 3에서와 같이 375[kW]×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.

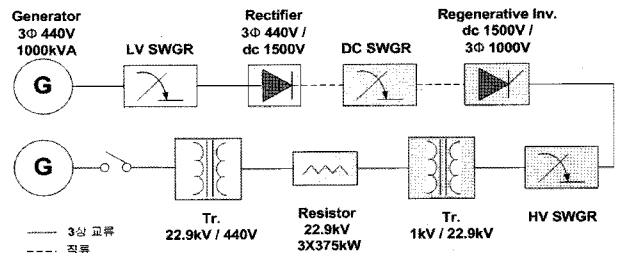


Fig. 3. Simple diagram of test equipment : double generator

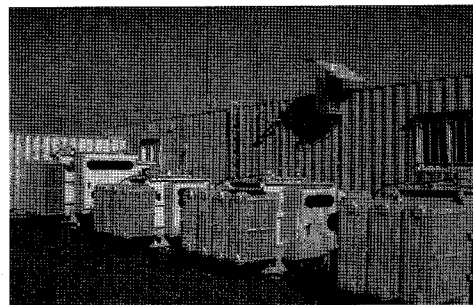


Fig. 4. Test equipment

3. 회생용 인버터 특성시험

개발한 회생용 인버터의 현장적용 시험을 위한 신뢰성 검

증을 위하여 상기한 바와 같이 시험설비를 구축하였으며, 인버터의 운전 모드에 따른 시험과 계통 연계 시험을 구축한 시험설비에서 수행하였으며, 그 방법과 결과는 다음과 같다.

3.1 회생 모드 시험

개발한 인버터의 목적인 회생전력의 변환 성능을 확인하기 위하여 구축한 시험설비에서 Fig. 5와 같은 시험회로를 구성하였다. 이때, 인버터의 회생모드 동작은 개시전압 1,600[V]로 설정한다. 시험은 설정한 동작 제어 전압에 따라 회생용 인버터의 운전이 정상적으로 되는 지를 검토하기 위하여 Fig 5와 같은 시험 회로를 구성하였다. 이 인버터의 입력인 직류 전압을 가변하기 위하여 교류 발전기의 출력 전압을 전압 조정기를 이용하였다. 또, 회생용 인버터에서 변환된 교류 출력은 시험 회로도에서와 같이 375[kW] × 2 용량의 저항기로 부하 변화를 상정하며 인버터의 출력을 소모시키는 형태로 시험하였다. 시험 순서는 먼저, 발전기 및 회생용 인버터를 기동한 후 375[kW]의 저항기를 투입한다. 이때, 회생용 인버터의 출력상태를 확인하고 안정되면 375[kW]의 저항기를 더 투입하여 총 750[kW]의 인버터 출력을 확인하는 절차로 하였다.

Fig. 6~Fig. 8은 회생 모드 시험 결과인 회생용 인버터의 전압, 전류 및 전력을 차례로 보인 것이다. 먼저, Fig. 6의 출력 전압은 회생용 인버터의 출력 전류 및 전력 그래프에서 보듯이 회생용 인버터는 1,000[V]의 전압으로 시험시간 약 10분 동안 부하 크기에 합당한 출력을 내보내고 있다. 또한, 시험 시작 300초 동안은 375[kW] 정도의 출력을 보이다가 301초 이후부터 종료까지는 750[kW] 정도의 출력을 보임을 알 수 있다. 이때, 출력 전류는 IGBT 정격 전류 490[A]에 근접한 450[A]까지 계측되었다. 이것은 회생용 인버터 1대의 용량이 750[kVA]로 무효 전력을 고려하였을 때 최대 출력으로 운전되었기 때문이다. Table 2는 인버터의 부하로 375[kW]의 저항기 1개를 투입하였을 때의 전압, 전류, 전력 및 역률의 측정값을 보여준다.

이 시험으로서 개발한 회생용 인버터는 설정한 제어 전압값에 따라 정상적으로 동작한다는 것을 알 수 있었으며, 회생용 인버터의 부하 변동에도 정상적인 출력을 낼 수 있어 실계통 적용에 무리가 없을 것으로 판단된다.

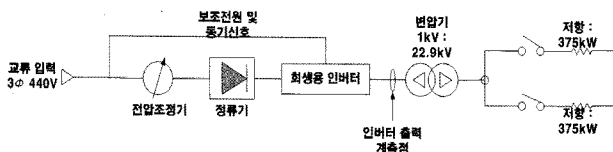


Fig. 5. Simple diagram of test equipment : double generator

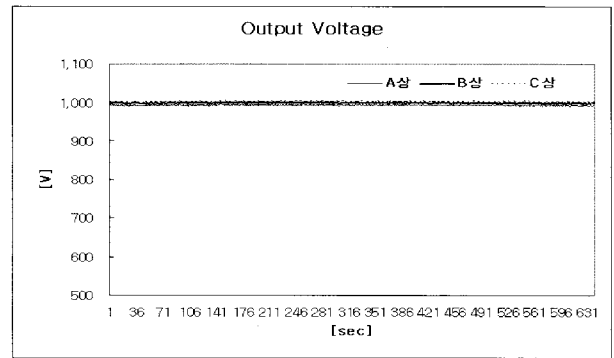


Fig. 6. The result of regeneration mode test - output voltage

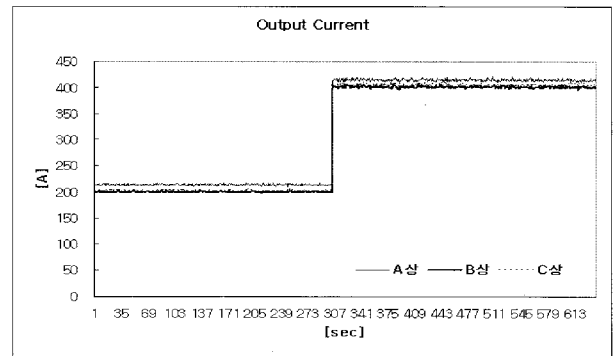


Fig. 7. The result of regeneration mode test - output current

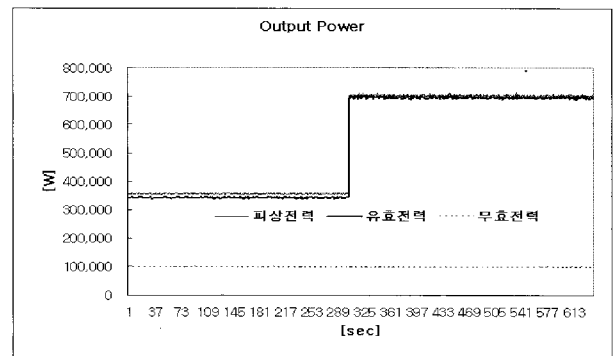


Fig. 8. The result of regeneration mode test - output power

Table 2. Test result at regeneration mode with a resistor

	Voltage[V]			Current[A]			Complex Power [kVA]	Real power [kW]	Power Factor
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic			
Avg.	992	997	1001	219	215	217	375.6	363.0	0.9665
Min.	988	994	998	210	212	213	370.2	357.4	0.9651
Max.	995	1000	1005	222	218	221	380.5	368.1	0.9678

3.2 고조파 보상 시험

개발한 회생용 인버터는 직류 급전시스템에서 회생전력

이 발생하지 않을 때(전차선 전압이 인버터의 동작 개시 전압보다 낮을 때)에는 기술하였듯이 능동전력필터 모드로 전환되어 급전시스템의 고조파를 감쇠시킨다. 능동전력필터 운전모드의 성능을 평가하기 위하여 구축한 시험설비에서 Fig. 5와 같은 상태로 시험을 진행하였다.

고조파 감쇠 성능 시험은 시험설비에서 발생한 고조파 성분을 개발한 회생용 인버터를 능동전력필터 모드로 운영하여 감쇠시키는 방법을 사용하였고, 시험설비 계통에서 발생한 고조파 전류는 Fig. 9와 같다. 인버터 동작 전에는 3차 및 5차 고조파가 5~7[A] 정도 함유하고 있었지만 인버터의 능동전력필터 모드가 동작된 후에는 고조파가 감소한 것을 Fig. 10에서와 같이 볼 수 있었다. 실제 직류급전시스템에서도 정류시스템으로 인한 고조파 저감에 유용할 것으로 판단된다.

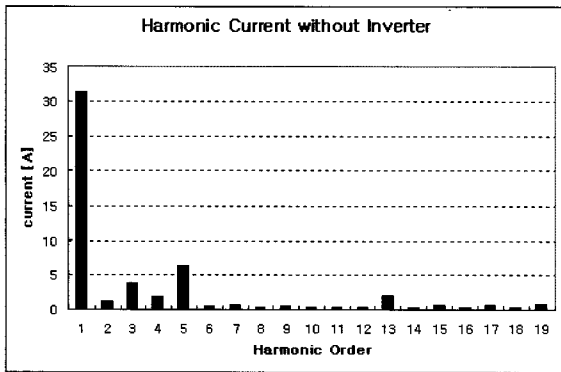


Fig. 9. FFT result of current without inverter

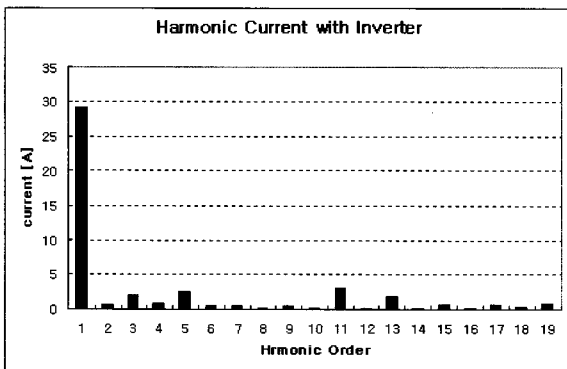


Fig. 10. FFT result of current with inverter

3.3 계통 연계 시험

개발한 회생용 인버터가 가지고 있는 두가지의 운전 모드에 대한 특성시험을 수행하여 단순 입/출력 회로에서 정상적으로 동작한다는 것을 확인하였다. 직류 급전시스템에 회생용 인버터를 적용할 때에는 입력부인 직류 모선

과 출력부인 고압배전 또는 수전측에 연결되기 때문에 직류 선로에서 발생한 회생 전력을 출력부 계통에 적절한 전력을 전달하는 것이 무엇보다 중요하다. 주파수와 위상이 없는 직류 전력을 입력 받아 교류 계통으로 전달하기 위해서는 교류 전력으로 변환할 때 전달할 계통의 위상을 추종해야한다. 계통 연계 시험은 회생용 인버터의 출력 계통과의 연계성을 시험하는 것으로 회생인버터 모드에서 시험한다.

시험을 위한 회로 구성은 Fig. 3의 시험설비의 모든 설비를 이용한다. 즉, 두개의 발전기를 이용하여 하나는 회생용 인버터의 입력인 직류 전력을 발생시키는데 사용하고, 다른 하나는 인버터 출력부 부하(저항)에 전력을 공급하며 인버터 출력의 기준 전력이 되도록 구성한다.

계통 연계 시험의 결과는 Fig. 11~ Fig. 15와 같다. 각 그래프는 회생용 인버터의 입력인 직류 전압, 출력 전압, 출력 전류, 인버터 출력 및 발전기 출력 등이다. Fig. 11의 직류 전압이 회생용 인버터에 입력되어 동작개시 전압인 1,700[V] 이상이 되면 인버터가 동작하여 Fig. 12, 13과 같은 출력을 내보내어 Fig. 14의 전력을 부하설비에서 소비하게 되는 흐름을 보인 것이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 회생용 인버터의 출력이 54[kW]로 일정하게 유지되어 출력 전압 및 전류도 안정적인 것을 볼 수 있다. 이에 따라 회생 전력에 의해 상승한 전차선 전압을 모의한 직류 전압도 약 1,620[V]로 안정되는 것을 볼 수 있다. Fig. 15는 인버터가 동작된 상태에서 인버터의 출력 크기를 단계적으로 늘려가며 부하에 전력을 공급하는 발전기와 부하 배분 상황을 본 것이다. 그래프에서 보듯이, 처음에는 발전기에서 부하에 전력을 공급하다가 회생용 인버터가 동작하고 그 출력을 높임에 따라 인버터의 부하 부담이 커져 가는 것을 볼 수 있다.

이러한 인버터의 입·출력 특성으로 회생용 인버터가 실 계통에 적용되었을 때 안정적인 잉여 회생 전력의 변환 및 전송이 가능하리라 판단된다.

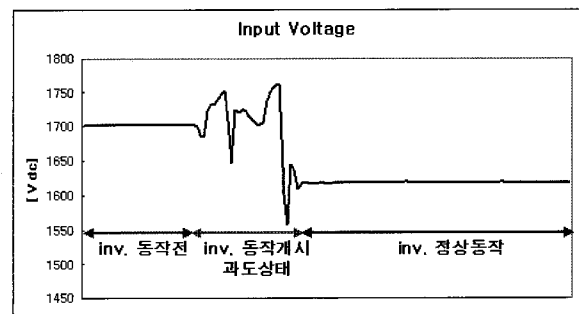


Fig. 11. Test result of system link test - input voltage

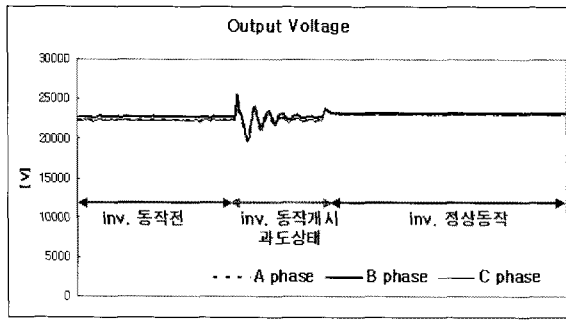


Fig. 12. The result of system link test - output voltage

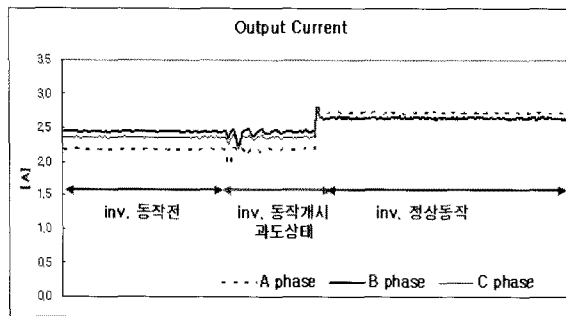


Fig. 13. The result of system link test - output current

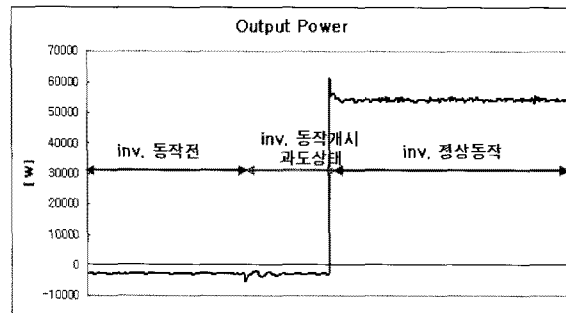


Fig. 14. The result of system link test - real power

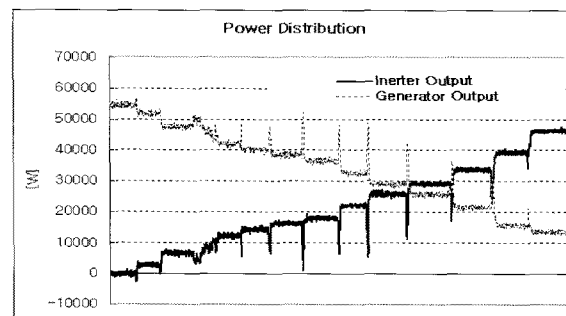


Fig. 15. The result of system link test - demand power

4. 결론

본 논문은 직류급전시스템의 에너지 이용효율을 높이기

위하여 개발한 회생용 인버터의 동작 특성을 확인하기 위한 시험설비의 개발과 시험 결과를 제시하였다. 개발한 인버터는 회생 운전 모드와 능동전력필터 모드로 운전되며, 750[kVA]의 용량으로 개발하였다.

개발한 인버터 시험 설비는 1,500V 직류 급전시스템, 750×2[kVA]의 회생용 인버터, 고압배전 계통을 모의한 형태로 구축되었다. 1,500V 직류 급전시스템은 발전기와 정류기를 통하여 구성하였고, 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 회생 모드 및 능동전력필터 모드에서의 정상 동작 여부를 판단하기 위한 시험과 함께 실제 적용을 위하여 계통 연계 시험을 수행하였으며, 세 가지 시험 모두 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

시험설비 구축 및 시험으로 얻어진 결과는 회생용 인버터의 알고리즘 보완 및 상업운전중인 실제 선로에서의 적용 시험에 적극 활용될 것이다.

참고문헌

1. 김용기 외. (2007). “DC전철구간의 에너지회생장치 개발방향,” 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회
2. 최창렬 외. (2005). “능동전력필터 기능이 추가된 지하철 회생 전력 제어용 인버터에 관한 연구,” 전력전자학회 학술대회 논문집, 한국철도학회, pp.463-465
3. 배창한 외. (2007). “직류 1500V 전철변전소의 회생전력량 측정 및 분석,” 한국철도학회 논문집 제 10권, 제 6호, 한국철도학회, pp.1-6
4. 한국철도기술연구원. (2006) “차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발,” 건설교통부 한국건설교통기술평가원
5. Rndewijk, P.J. and Enslin, J.H.R. (1995). “Inverting DC traction substation with active power filtering Incorporated,” IEEE-PESC Conf. Rec., Vol.1, pp.360-366.
6. Rndewijk, P.J., Putter C. and Enslin, J.H.R. (1996). “DC-Side Harmonic Compensation in DC Traction Applications,” IEEE-AFRICON., pp.827-832.
7. 김주락 외.(2007). “직류급전시스템 회생용 인버터의 시험설비 구축 및 특성시험”, 한국철도학회 춘계학술대회 논문집, 한국철도학회
8. 김경원 외.(2002). “회생전력 제어용 인버터 시스템의 구현에 관한 연구”, 전력전자학회 논문지, 제 7권, 제 2호, 전력전자학회
9. Tzeng, Y.S., Wu, R.N. and Chen, N. (1998). “Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations,” IEEE Trans. Vehicular Technology, Vol.47, No.4, Nov., pp. 1405-1412.

접수일(2008년 10월 10일), 수정일(2009년 2월 9일),
게재확정일(2009년 4월 13일)