

# 전철시스템의 에너지절약 회생인버터시스템 개발 현황

## Development Status of the Regeneration Inverter System for Energy Saving in DC Electric Railway

김용기\* 한문섭\*\* 양영철\*\*\* 장수진\*\*\*\*  
Kim, Yong-Ki Han, Moon-Seob Yang, Young-Chul Jang, Su-Jin

### ABSTRACT

In the respect of energy saving and reusing, it is necessary to reduce greenhouse gases emission and to enhance the operation efficiency in electric railway system. Recently, as the power electronics technologies are advanced, some countries have focused on the regenerative inverter to use regeneration energy on each line. When the electric tractions are stopped or slowed down, it is useful to supply the surplus energy to the power source by regenerative system, which increases its energy efficiency. Also, the generated energy can be supplied to other tractions or equipments inside traction. Thus, it may help reduce construction cost of additional power plants. The purpose of this study is to describe the development status of the regenerative inverter system which suppress extra DC-line voltage and regenerate the energy instead of using a resistor.

### 1. 서 론

전철화의 발전으로 전기철도에서 사용되는 에너지의 효율화 및 대량의 전기에너지를 사용하게 될 전철시스템에서의 에너지 절약대책과 에너지 재사용을 위한 온실가스저감 및 운용효율화 방안 마련이 시급한 실정이다. 세계적으로 전기철도에서는 기존에 주로 사용하던 기계적인 제동방식을 보완하여 차량 제동시 또는 하구배 운행시 견인전동기를 이용한 전기적 제동을 병용하여 사용하고 있다. 전기제동 시에는 견인전동기를 발전기로 사용하기 때문에 제동 중 에너지가 생성되며 회생에너지를 급전시스템에 공급하게 되면 에너지의 효율을 높일 수 있다. DC 전철구간에서 전동차 발전제동시 발생되는 잉여전력을 직류 가선 전압을 일정 전압 이상으로 상승시킬 경우 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력 변환기의 장애를 일으킬 수 있기 때문에 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하다. 이때 소모되는 전력이 전체 공급전력의 약 25% 정도로 추정되며, 에너지 손실을 막기 위해 잉여 전력을 흡수할 수 있는 장치를 통해서 에너지 절약을 기대할 수 있다. 잉여에너지 손실을 막기 위해서 잉여전력을 PWM 회생인버터 시스템을 이용하여 회생제동에 발생하는 가선전압의 상승분을 3상 교류 모션으로 보낼 경우, 차량 저항기로 소비했던 회생에너지를 3상 교류측으로 보내어 전기철도 고압배전에서 소비할 수 있어 직류전기철도 에너지 절감을 기대할 수 있다. 차량견인시에는 능동전력필터 기능을 수행하여 기존에 필요했던 고조파 필터등을 제거할 수 있을 뿐만 아니라 제동슈의 절약 및 저항기의 온도상승에 따른 지하환경에도 크게 기여할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 1.5MVA 에너지 회생장치 개발을 통해 직류 1500V 전압을 사용하는 도시철도시스템에서 하강 경사로 주행이나 감속 운행 시 발생되는 잉여분의 회생전력을 대용량 전력변환장치를

\* 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 정회원

E-mail : ykkim@krri.re.kr

TEL : (031)460-5382 FAX : (031)460-5319

\*\* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부, 정회원

\*\*\* (주)시엔에이전기, 비회원

\*\*\*\* 성균관대학교, 정회원

사용하여 교류모션으로 회생시켜 직류 가선 전압의 상승을 억제하여 전철시스템의 안정성을 확보하고, 잉여 에너지 재이용을 통해 에너지를 절약방안에도 기여하고자 한다. 또한 회생인버터 시스템의 적용으로 가선전압이 안정된 범위에 있을 때에는 능동전력필터의 기능을 수행하여 계통상의 고조파 전류보상, 역률저하, 전압의 왜형이나 불평형 등의 전력품질을 보상하는 기능을 갖는 장치이다. 본 시스템개발은 DC전철구간에서의 전압 상승을 억제하면서 회생에너지를 흡수하기 위한 방안으로 1.5MVA회생인버터시스템 개발을 미래철도기술의 확보차원에서 수행하고 있으며 지금까지의 시작품 제작 및 조합시험 등의 주요 연구개발 현황에 관한 내용이다.

## 2. 연구내용

지금까지의 연차별 주요 연구 및 향후 추진내용을 살펴보면, 1차년도에는 PWM컨버터 제어방식 인버터 설치시 고조파 영향 분석과 회생 능동전력필터 기능 시뮬레이션을 이용한 알고리즘 구현과 이를 수행하기 위한 디지털 제어기 개발 및 축소모형 설계를 통해 기본모델을 개발하였다. 2차년도에는 직류 전력을 교류 모션으로 회생하면서 고조파를 저감할 수 있는 직류 전력 회생용 인버터 시스템을 구성하고 이를 고효율로 제어할 수 있는 제어기법과 에너지 회생 요소기술 개발을 통해 축소형 회생인버터시스템을 개발하였다. 3차년도에는 회생에너지 시스템엔지니어링, 회생인버터 인터페이스 기술, 급전계통 연계시스템 설계, 전력품질 평가 및 향상기술, 능동전력필터기능을 위한 제어알고리즘에 관한 연구를 진행하고, 1.5MVA급 회생인버터 시작품의 H/W 인버터반을 제작하고 시험을 수행하였다. 4차년도에는 회생인버터의 시험평가방법 및 절차서등을 작성하였고 회생인버터 시작품 제작의 완료와 더불어 시험장치의 통합시스템을 구성하여 성능평가를 수행하였다. 5차년도(‘07)에는 시제품을 제작하여 실계통 설치 적용 및 신뢰성시험 평가를 통해 표준화 방(안)도 제시할 예정이다.

## 3. 연구목표

회생인버터의 연구개발 목표 주요사항을 표 1에 나타내었다.

표 1. 연구개발 목표사항

항목	제작사양
DC 허용 최고 전압	2000V DC
캐리어주파수	회생모드시 1kHz, AHF모드시 3kHz
JGBT 정격	3kV 400A
회생제동전압 조정 범위	1650 ~ 1850V DC
AC 출력전압 조정 범위	3 800 ~ 1000V AC
AC 정격 전류	500A ( 250A x 2 )
AC 단시간 전류	800A(60초)
AC 정격 용량	1.5 MVA ( 750 kVA x 2 )
효율	98 % (정격 출력 시)
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 능동전력필터 제어기법 개발

회생전력의 제어방안에 대해서는 기존의 무효전력보상은 정상상태에서 무효전력의 기본파 성분만을 보상하여 역류 보상한다. 그 결과 과도상태에서는 정상상태에서 스위칭에 의한 고조파 성분의 무효전력

과 유효전력을 완전히 제어할 수 없었다. 유동장해, 전력가기의 과열 등을 제거하기 위하여 순수무효전력을 정의하여 이전의 무효전력보상 이론보다 일반화되어진 무효전력보상에 pq이론을 도입하였다. 회생용 인버터 제어알고리즘개발과 관련하여 내용을 간략하게 요약하면 3상 회생용 인버터의 전체 제어 블록도를 그림 1에 나타내었다. 그림 2는 dq이론을 바탕으로 한 능동전력필터의 블록도이다.  $i_{de}$ ,  $i_{qe}$ 로 변환되어진 계통 측 전류를 저역필터(low pass filter)를 통과함으로써 기본파 성분과 고조파 성분으로 나눈 후 순시유효전류에 해당하는  $i_{de}$ 의 AC성분과 순시무효전류에 해당하는  $i_{qe}$ 를 구한 후 역변환을 거쳐 보상 전류지령치인  $i_{fw}, i_{fb}, i_{fc}$ 를 구한다. 이때  $i_{qe}$ 는 0으로 제어함으로써 무효전력을 보상하게 된다.

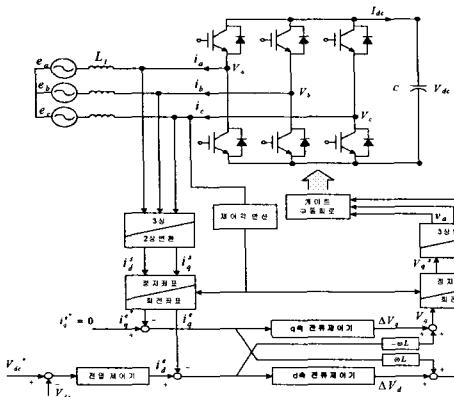


그림 1. PWM 인버터 전체 제어 블록도

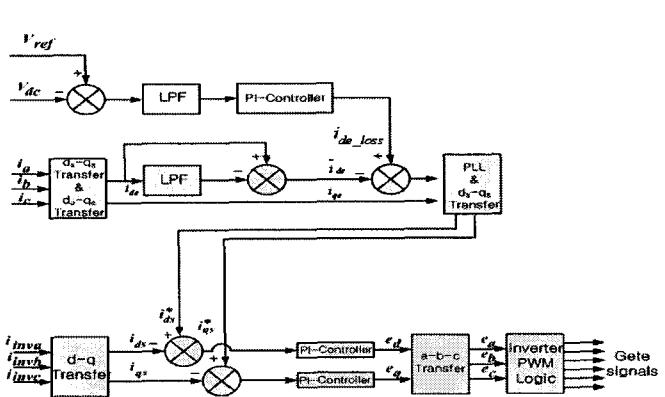
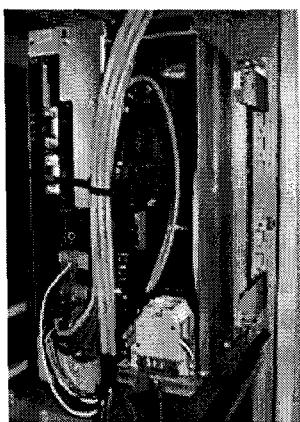


그림 2. 능동전력필터 제어알고리ズム 블록도

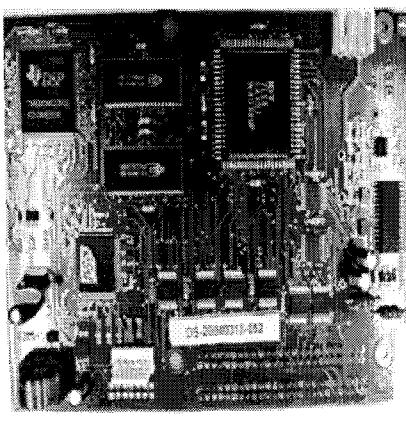
### 3.2 회생인버터 시작품 제작

#### 가. 제어기 설계제작

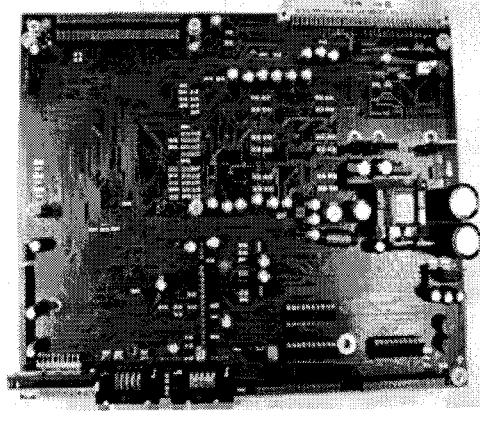
제어부는 전체 시스템을 제어하는 부분으로서 출력 전압 제어와 교류모션과의 위상제어 등을 위해 각종 입력 데이터 및 출력 데이터를 바탕으로 연산을 수행하고 연산 결과에 따라 컨버터에 제어 신호를 출력해야 한다. 회생제동 인버터 제어기는 32Bit의 DSP(Digital Signal Processor)보드(TMS320F28335-150), 16Bit C167 Control보드, 제어기와 IGBT에 전원을 공급해주는 POWER보드, VSI(IGBT)로 크게 나눌 수 있다.



(a) 제어기



(b) DSP 보드



(c) Control 보드

그림 3 제어기 제작

#### 나. 병렬 PWM 인버터 제작

주회로 방식은 IGBT 이중 컨버터를 적용하여 병렬 운전 모드로 사용하였다. 제어방식은 PWM 스위칭 방식을 채용하였으며 캐리어 주파수는 회생모드시 1[kHz], APF 모드시 3[kHz]로 스위칭한다. 입력전

원은 직류전압 1500~1850[V]이고 병렬 PWM 컨버터의 출력 용량은 750[kVA], 60[Hz], AC출력전압은 1000[V] 출력전류는 250[A]로 제작하였다. IGBT의 전압 전류 정격은 3kV 400A이며, 주회로 캐패시터는 1500uF x 6, 2.4kV를 병렬 조합하여 사용하도록 하였다.

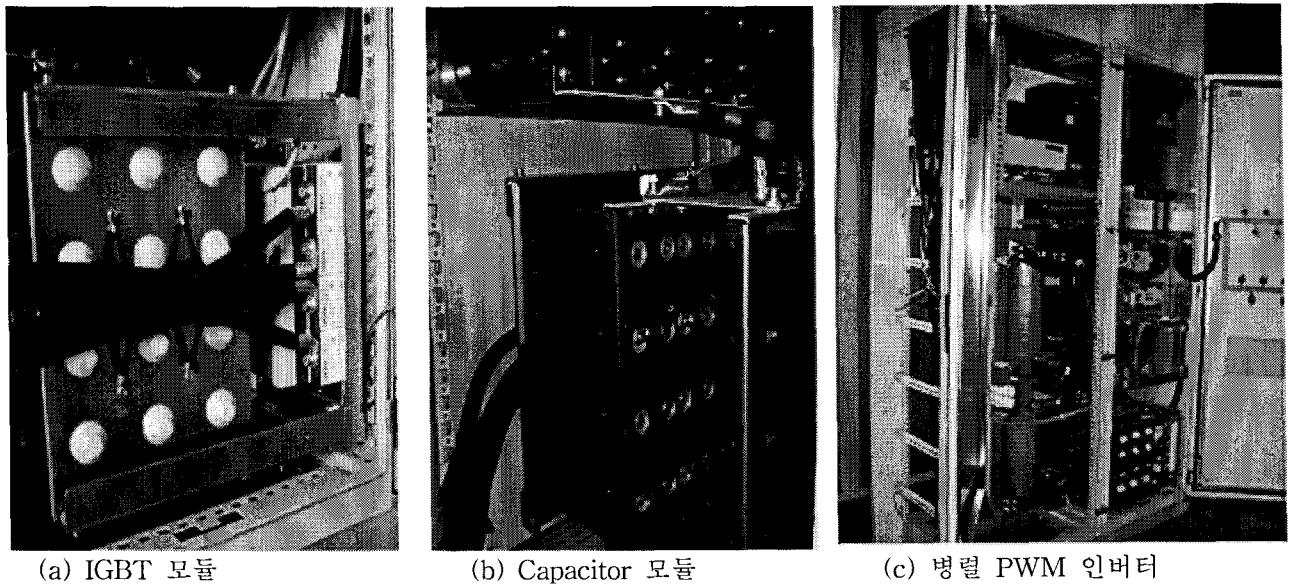


그림 4. 병렬 PWM 인버터 제작

#### 다. 파워회로 구성도

전력 변환기는 3상 컨버터 두 대가 병렬로 DC전압을 공유하고 있으며 이를 구동시키기 위한 게이트 드라이버와 검출회로, 제어 및 보호 회로로 구성된다. 검출회로는 시스템의 제어와 보호를 목적으로 시스템의 현재 상태 즉, 3상의 전압 및 전류를 그리고 DC LINK 전압을 검출한다. 제어기는 검출된 신호들을 적절한 신호처리와 연산 과정을 통하여 게이트 드라이버의 스위칭 신호를 발생하는데 이용한다. 그림 5에 파워회로 구성도를 나타내었으며 전력 계통과 컨버터의 절연을 목적으로 3상 변압기를 결선하여 계통연계를 하며, 컨버터의 출력 스위칭에 따른 고조파 성분을 제거하기 위해 직렬로 리액터를 연결하였으며, 또한 교류 캐패시터와 저항을 Delta 결선으로 연결하였다.

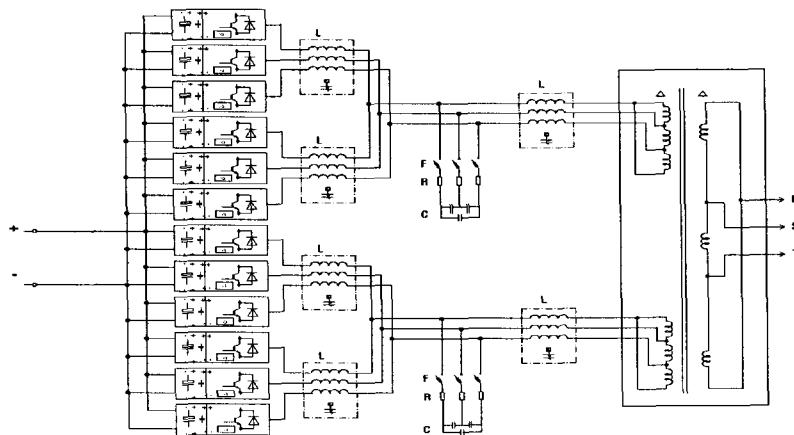


그림 5. 파워회로도 구성

#### 다. LCL 필터부

PWM 컨버터의 1~3[kHz]의 스위칭 주파수에 따른 스위칭 고조파 전류는 동일 계통전원에 접속된 회로에 EMI로 인해 민감한 타 부하나 장비의 전원장애를 일으키는 요인이 되고 있으며 특히 정격이 수십 kVA에서 수백 kVA의 시스템 설계시에는 스위칭 고조파 전류에 의한 THD가 매우 중요하게 고려되는 사항이다. LC 필터에 의

해 커패시터측이 스위칭 고조파전류만 억제하고 기본파전류에 대해서는 크기나 위상의 영향을 미치지 않는다면 설계사양을 만족하는 범위 내에서 PWM 컨버터의 기본적인 동작인 직류 출력전압 제어와 단위역률 제어 이외에 스위칭 고조파 전류 억제도 가능하도록 하였다.

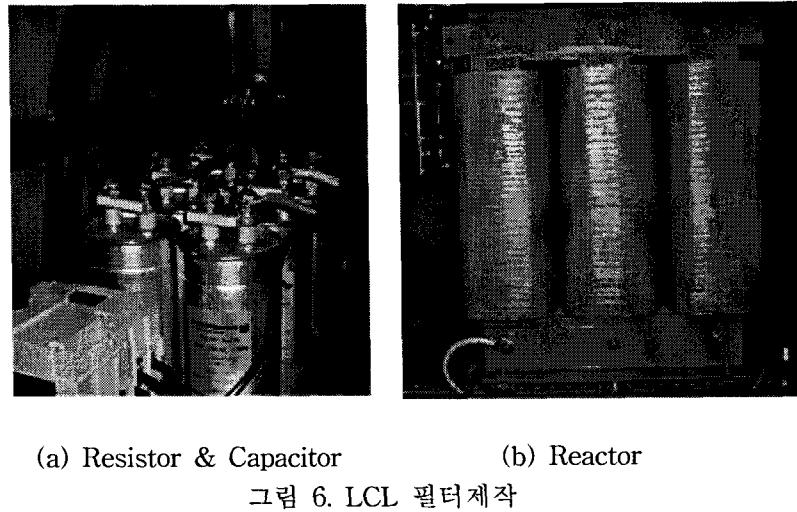


그림 6. LCL 필터제작

### 3.3 회생인버터 조합 부하시험

회생 인버터 동작시험은 직류 입력 전압 변동 시에 회생 인버터의 교류 출력전압의 변동 사항을 확인하고자 회생동작 성능을 부하변동시 ( $10kW, 5kW, 0kW$ )의 결과를 살펴보면 회생 인버터 동작은 직류 입력에 회생 인버터 동작 개시 전압(480VDC) 이상에서 동작 되어지고 회생 인버터 동작중지 전압(450VDC)에서 동작이 중지되어 아주 정상적으로 동작됨을 알 수 있다.

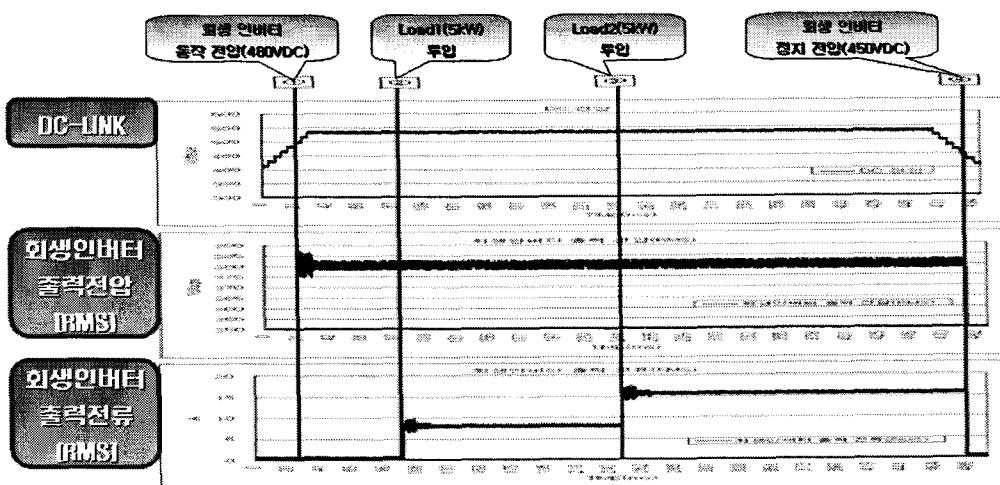


그림 7. 회생인버터 부하시험

### 4. 향후개발계획

5차년도에는 시제품을 제작하여 운영기관의 협의를 통해 최적의 설치지역을 선정하여 회생인버터를 설계통 부설 후 시험평가를 통해 신뢰성을 확보하고자 한다. 제어알고리즘 구현을 위한 회생인버터 통합제어기능평가를 수행하고, 시험지역에서의 계통운영에 따라 회생전력 품질평가 및 급전전력 품질평가를 실시할 계획이다. 또한 시험에 따라 회생인버터 시스템 신뢰성평가로 운영에 따른 FMS 운영방안과 회생인버터의 경제적 효과 분석을 제시 하고자 한다.

## 5. 맷은말

회생 제동으로 발생하는 회생 전력은 계통에서 회수하여 활용이 가능한 잉여 전력이고 이를 계통에서 활용함으로서 직류 변전소의 전력 부담을 줄일 수 있어 많은 이점이 있다. 수도권 및 지자체의 기존 및 신선로의 건설시 전철시스템에 도입하므로써 회생에너지 활용으로 직류 변전소 자체의 에너지 효율, 유지 보수 비용, 환경, 제동 효율 등에 기여할 수 있는 장점을 갖는다. 본 과제를 통해 개발된 전력변환장치의 경우 별도의 장치를 추가하지 않고 전철 분야가 아닌 다른 산업 분야에 적용할 수 있다.

본 연구에서 개발하는 회생인버터는 직류급전시스템의 3상 다이오드 정류기에 역병렬로 설치되며, 회생전력을 흡수 할 수 있을 뿐만 아니라 능동전력필터로도 동작할 수 있는데 두가지의 동작모드를 갖게 된다. 첫째 회생인버터가 가선전압을 겸지하여 잉여회생전력으로 일정 전압이상 상승하면 회생인버터로 동작되어 잉여회생전력을 고배단에서 소비하도록 한다. 둘째 모드에서는 잉여회생전력이 없을 경우로서 회생인버터가 능동전력필터로 동작되어 3상 다이오드 정류회로로부터 발생되는 계통상의 전류고조파를 보상하게 된다. 따라서 잉여회생전력을 흡수하여 고배단에서 재사용할 수 있을 뿐만 아니라 직류급전시스템의 계통전류의 고조파를 저감시켜 고역률과 고효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

본 개발품이 5차년도에 현장시험을 통하여 신뢰성이 확보를 통한 실용화 개발이 완료되면 현장에서의 설치 운용이 가능하여 DC전철시스템에서의 가선전압의 안정화 및 잉여 전류의 활용으로 에너지 저감방안으로 에너지를 절약할 수 있고 온실가스저감에도 기여할 수 있을 것으로 기대되며, 더불어 운영기관에서의 회생인버터 활용을 위한 지원 및 제도적인 검토가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 건설교통부 미래철도기술개발사업의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 布施德彦, 連續句配區間に おける回生電力吸收裝置の導入, 電氣評論(2001.12)
2. 김용기, 배창한, 한문섭, 양영철, 장수진 “DC전철구간의 에너지회생장치 개발 방향”, 2007춘계철도학회논문집
3. 한국철도기술연구원, 차세대 전철시스템 에너지 회생장치 개발(2006)
4. マノ タスヤイイジマ・ヒロヤツ, 回生電力の 有效活用. R&m(2005.3)