

# 직류 지하철 급전시스템용 회생인버터 시스템

( Regeneration inverter system for DC traction system )

조기현\* · 장수진\* · 김종윤\* · 원충연\* · 김용기\*\*

(Kee-Hyun Cho · Su-jin Jang · Jong-Yoon Kim · Chung-Yuen Won · Yong-Ki Kim)

(성균관대학교\* · 한국철도기술연구원\*\*)

## Abstract

In this paper, a unified regenerative inverter and control algorithm are proposed in order to perform regenerative action and active power filter action. While the regenerative mode of traction, it works as regenerative inverter to reduce a excessive power of DC bus line and the powering mode of the traction, it works as active power filter to compensate ac current distortion, power factor, and voltage unbalance. In the paper, a regeneration inverter used PWM DC/AC inverter algorithm. And an active power filter used p-q theory. We are carrying out a mode analysis of DC traction system similar to actual system with MG-set and experimenting with prototype model. Through the simulation and experiment, we were proving the regeneration inverter operation which suggested in this paper.

## 1. 서론

전동차가 운행 중인 구간이 하구배 구간이거나 제동 시에는 전동차에서 에너지가 회생되어 많은 양의 전력이 발생한다. 이러한 에너지는 전동차를 가속하기 위해 투입된 에너지의 45~47% 정도이며 약 20% 정도는 타 역행 전동차에서 소모되거나 나머지 20~27%의 에너지가 잉여 전력으로 직류 가선 전압을 상승시킨다. 그림 1은 직류 전동차 에너지 사용도를 나타낸다.[1]

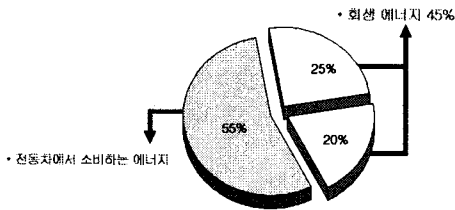


그림 1. 직류 지하철 에너지 사용도  
Fig 1. Energy utilization of DC traction

이 때 발생한 회생에너지는 직류가선 전압을 상승시키는 원인이 된다. 현재의 급전시스템은 회생 에너지를 타 역행 전동차에서 사용하거나 최대 전압까지 직류가선 전압이 상승하게 되면 정류기의 공급을 차단하는 방법을 사용하고 있다. 그림 2는 현재 직류 지하철 급전시스템을 나타내고 있다.

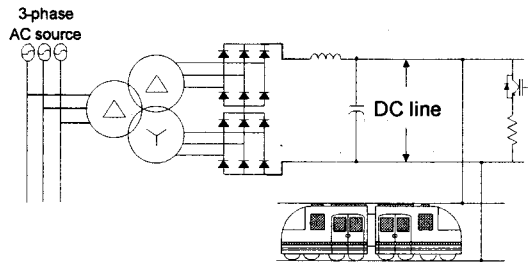


그림 2. 기존 직류 지하철 급전 시스템  
Fig 2. existing DC traction system

현재 전동차를 포함한 급전시스템은 전력변환 장치의 사용으로 고조파가 발생하여 역률저하, 전류의 왜곡, 전압의 불평형 등의 문제가 수반된다.

이러한 문제점으로 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생한다.[2][3]

본 논문에서는 회생된 에너지를 교류모션으로 배류하여 직류가선 전압 상승을 억제하고, 고조파 저감을 위한 능동전력필터 기능이 추가된 회생인버터를 제안하였다.

## 2. 능동전력필터 기능이 추가된 회생 인버터 시스템

직류 지하철 시스템에서 전동차가 회생 제동 및 하구배 구간을 운행 할 경우 많은 양의 에너지가 발생하게 된다. 이러한 회생에너지는 전력변환장치를 이용하여 가선전압의 상승분을 교류 모션으로

회생시킬 수 있다.

그림 3은 본 논문에서 제안한 인버터 시스템이 추가된 직류 지하철 급전시스템을 나타낸다. 현재 국내에서 개발한 회생인버터는 기존 지하철 급전 시스템에 적용가능하나 회생기능에만 국한 되어있다. 본 논문에서 제안한 시스템은 동일한 전력변환 장치로 회생 기능과 능동전력필터 기능을 수행할 수 있다.

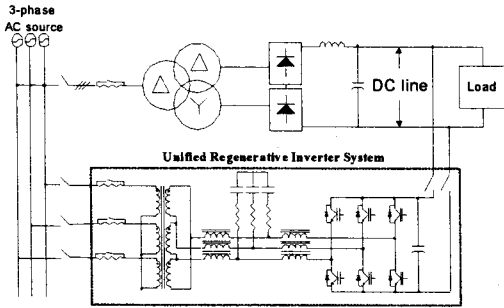


그림 3. 제안하는 회생인버터 시스템  
Fig 3. Proposed regenerative inverter system.

### 2.1. 회생인버터 모드 분석

가선전압이 일정 전압 이상 상승하는 경우 제안한 인버터 시스템은 회생모드로 동작하며, 회생에너지를 계통에 배류하여 역내 부하에 사용할 수 있다. 그림 4는 회생모드 동작 시 제어 블록도를 나타낸다.

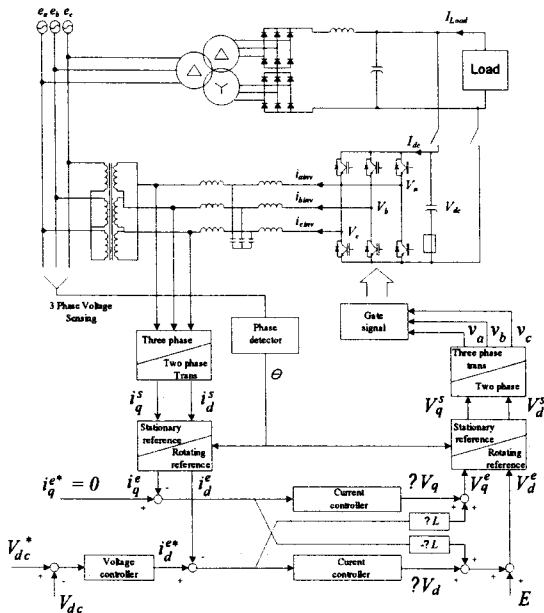


그림 4. 회생모드 시 제어 블록도  
Fig 4. Control block diagram of regenerative mode

### 2.2. 능동전력필터 모드분석

능동전력필터는 임의의 고조파를 폭 넓게 보상할 수 있으며 순시적으로 가변 제어할 수 있기 때문에 최적의 전력품질을 유지할 수 있는 전력변환장치이다.[4][5][6]

그림 5는 본 논문에서 제안한  $pq$ 이론에 의한 능동전력필터의 제어블록도를 나타내고 있다. 계통측 전압과 전류를 검출하고 2상 정직좌표계로 변환하여  $V_\alpha, V_\beta$ 와  $I_\alpha, I_\beta$ 로 변환한다.

이들의 연산을 통하여 순시유효전력  $p$ 와 순시무효전력  $q$ 를 계산하여 왜곡된 부하전류를 보상하기 위한 보상전류를 계통에 공급한다.

위상검출기를 통한 PLL회로를 통해서 리액터와 변압기로 인한 위상지연을 보상해 준다.[7]

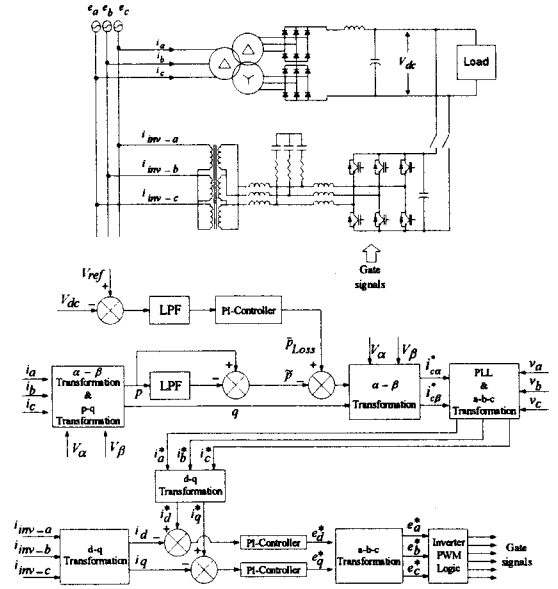


그림 5. 능동전력필터 제어 블록도  
Fig 5. The control block diagram of active power filter

### 3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 사용한 툴은 PSIM 소프트웨어를 사용하였다. 시뮬레이션 사용 소자는 이상적이고 축소 모델과 동일한 파라메타 값을 시스템에 적용하였다.

제어기는 C로 코딩한 후 DLL블록을 이용하여 구성하였다. 그림 6은 제안한 회생 인버터 시스템 시뮬레이션 회로도이다. 시스템 구성은 12펄스 정류기, 회생 인버터 시스템, MG-set, 제어기로 구

성하였다.

유도전동기와 직류전동기 MG-set을 이용하여 실제 전동차 추진 장치 및 전동기를 모의하였다. 시뮬레이션은 회생모드와 능동전력필터모드로 수행하였다.

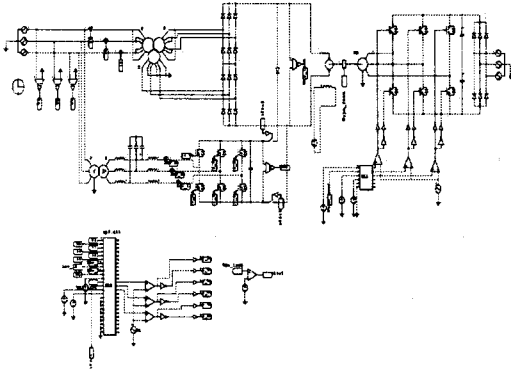


그림 6. 제안된 회생인버터 시스템  
Fig 6. The propose regenerative inverter system

그림 7은 회생전류와 보상전류를 나타낸다. 0.4 초 이전에는 능동전력필터로 동작하고 0.4초 이후 직류 가선전압 상승 시 회생인버터로 동작한다.

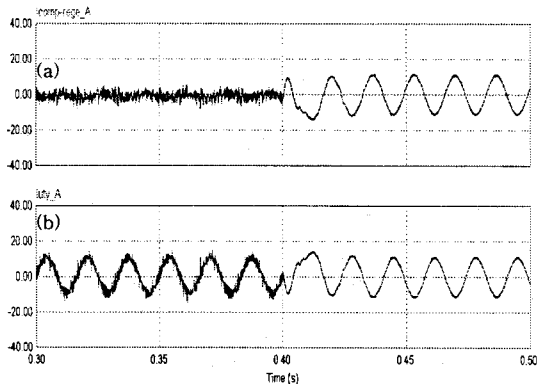


그림 7 (a)인버터 전류 (보상전류 및 회생전류), (b)계통 전류  
Fig 7. (a)Inverter current (compensation and regenerative current) (b) Utility current

그림 8은 회생모드 시 회생전류, 계통전류, 정류기 입력전류를 나타내고 있다. 직류 가선 전압이 상승하였으므로 정류기를 통해 흐르는 전류는 발생하지 않는다.

계통전류와 회생전류는 동일한 크기를 갖지만 위상이 반전되어 있다. 따라서 회생전류가 계통으로 공급되고 있음을 확인할 수 있다.

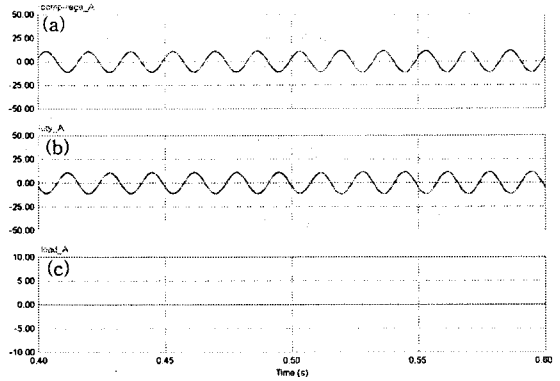


그림 8. 회생인버터 모드 시 (a)인버터 출력전류, (b)계통전류, (c)부하 전류  
Fig 8. Regenerative inverter mode. (a) Inverter output current, (b) Utility current, (c) Load current

그림 9는 능동전력필터 모드 시 보상전류와 계통전류를 나타내고 있다. 12펄스 정류기에 의해 왜곡되어진 부하전류가 보상전류에 의해 고조파가 보상되어졌음을 확인할 수 있다.

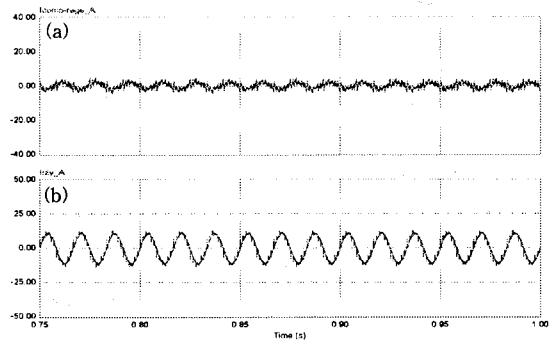


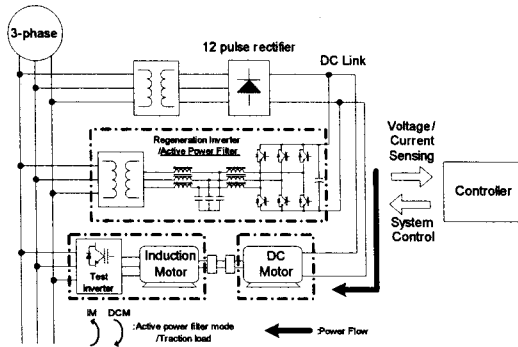
그림 9. 능동전력필터 동작 시 (a)보상전류, (b)계통전류  
Fig 9. Active power filter mode (a) Compensation current, (b) Utility current

#### 4. 실험 결과

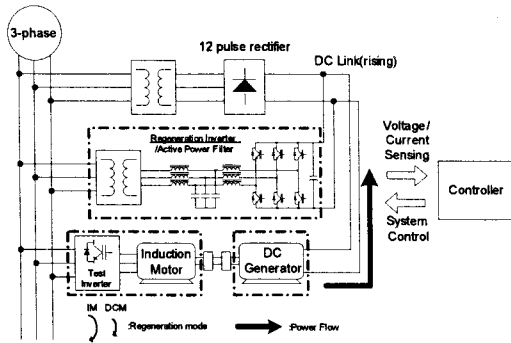
그림 10은 본 논문에서 제안한 직류 급전시스템 실험 구성도를 나타낸다. 직류 급전시스템을 모의하기 위해 유도전동기와 직류전동기로 구성된 MG-set을 부하 측에 구성 하였다.

회생모드일 때, 유도전동기를 직류전동기보다 같은 방향으로 더 빠르게 회전시키면 직류전동기는 발전기로 동작하여 가선전압을 상승시키게 된다. 제안한 인버터 시스템은 회생인버터로 동작하여 회생전력을 계통으로 공급한다.

유도전동기를 직류전동기와 반대 방향으로 회전시키면 MG-set은 부하로 동작한다. 이때 제안된 시스템은 능동전력필터로 동작하여 계통측에 포함된 고조파 성분을 보상한다.



(a) 능동전력필터 모드



(b) 회생인버터 모드

그림 10. 제안된 인버터 시스템 실험 구성도  
Fig 10. Experiment block diagram of the proposed inverter system



그림 11. 축소모델과 MG-set  
Fig. 11 Prototype and MG-set

그림 11은 축소모델과 MG-set의 실험사진을 나타낸다. 축소모델은 제어부, LCL필터, 정류기, 변압기 등으로 구성된다. 유도전동기와 직류전동기는 커플링 되어 있으며 유도전동기를 제어하기 위한 별도의 인버터로 구성되어 있다.

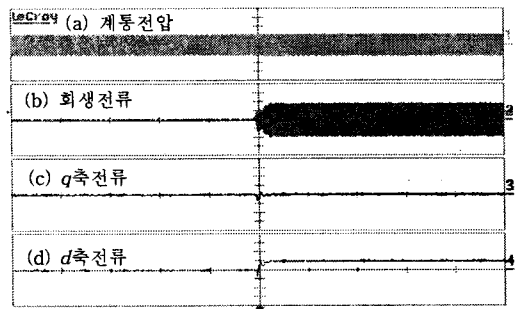


그림 12. 회생모드 동작 시 (a) 계통전압, (b) 회생전류, (c)  $q$ 축전류 (d)  $d$ 축전류  
Fig 12. Regeneration mode (a) Utility voltage, (b) Regeneration current, (c)  $q$  axis current, (d)  $d$  axis current (100V/div, 2A/div, 2V/div 0.5s/div)

그림 12는 직류 가선 전압이 상승하였을 경우 계통전압, 회생전류,  $d$ - $q$ 축 전류를 나타낸다.  $dq$ 제어를 통해서  $q$ 축 성분(무효전력성분)은 항상 0이 되도록 제어한다.

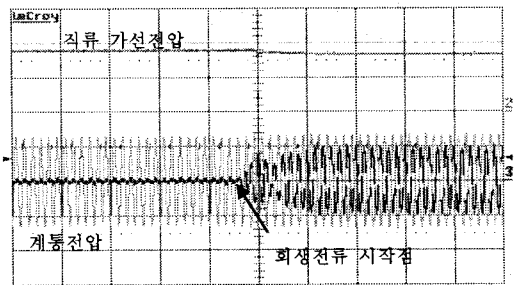


그림 13. 직류 가선 전압과 계통전압, 회생전류  
Fig 13. DC link voltage, Utility voltage and regenerative current (100V/div, 100V/div, 4A/div, 0.1s/div)

그림 13은 회생모드 시 가선 전압과 회생전류를 나타낸다. 회생제어가 수행되면 직류 가선 전압은 감소하게 된다.

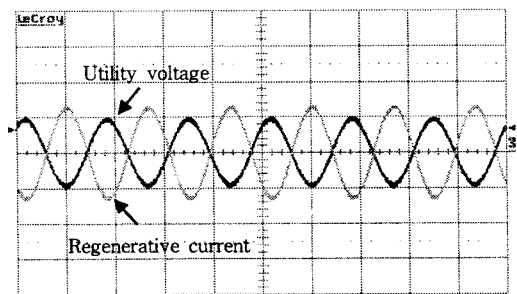


그림 14. 회생 전류 및 계통전압 파형  
Fig 14. Regenerative inverter output current and Utility voltage (100V/div, 4A/div, 10ms/div)

그림 14는 계통전압과 회생전류를 나타낸다. 전압과 전류가  $180^\circ$ 의 위상차를 가지며 계통으로 회생되고 있음을 확인할 수 있다.

그림 15는 능동전력필터 모드 시 각 부 전류 파형을 나타낸다. 제안된 인버터 시스템이 능동전력 필터로 동작하여 왜곡된 부하전류를 보상하게 된다.

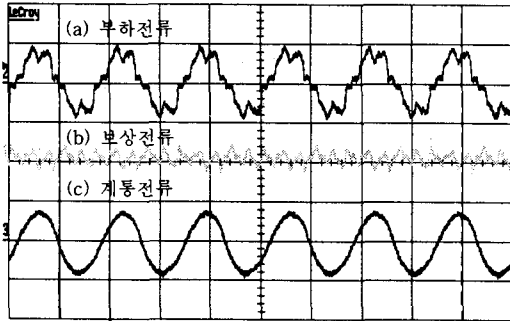


그림 15. 능동전력필터 모드 시 (a) 부하전류, (b) 보상전류, (c) 계통전류 파형  
Fig 15. Active power filter mode. (a) Load current, (b) Compensation current, (c) Utility current, (2V/div, 10ms/div)

## 5. 결론

본 논문에서는 유도전동기와 직류전동기로 구성된 MG-set를 이용하여 실제 직류 지하철 급전시스템 모의하였다.

회생전력이 발생하면 제안된 인버터 시스템은 회생인버터로 동작하고 회생전력이 발생하지 않는 구간에서는 능동전력필터로 동작한다.

제안된 시스템을 축소모델로 설계, 제작하였으며 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

본 연구는 미래철도기술개발사업에서 지원된 차세대 전철시스템 에너지회생장치 개발 과제 의 일환으로 수행되었으며 지원에 감사드립니다.

## 참고 문헌

- [1] 장수진, 김연충, 이병국 원충연, 배창한, 김용기 “ 능동전력 필터 기능이 추가된 지하철 회생전력 제어용 인버터”, 조명전기설비학회지, 제 20권 제 5호 pp25~32
- [2] A.Horn, R.H.Wilkinson, and T.H.R.Enslin, “Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations”, ISE of IEEE, Vol.2, pp.802-807, 1996.
- [3] P.J.Randewijk, and J.H.R.Enslin, “Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated”, PESC of IEEE, Vol.1, pp.360-366, 1995.
- [4] J.H.Marks, and T.C.Green, “Ratings analysis of active power filters”, PESC of IEEE, Vol.3, pp.1420-1425, 2001.
- [5] 조응상, 박기원, 권명기, 박창주, “능동전력필터의 현장적용 보고”, 포스콘기술보, 2002
- [6] 하요철, “UPQC의 제어시스템 설계와 성능해석에 관한 연구”, 명지대학교 석사학위논문, 2001.
- [7] 한국철도기술연구원, “도시철도표준화 연구개발사업 2003년도 연구중간보고서”, 2003.