

# 직류가선전압 모의장치를 적용한 지하철용 회생인버터 시스템 Regenerative Inverter System for Railway with DC Line Voltage Simulator

지용혁\*   조기현\*\*   장수진\*\*   원충연\*\*   김용기\*\*\*  
Ji, Young-Hyok   Cho, Ki-Hyun   Jang, Su-Jin   Won, Chung-Yuen   Kim, Yong-Ki

---

## ABSTRACT

In this paper, a unified regenerative inverter system for railway with DC line voltage simulator is proposed. In order to determine the operation characteristics of the regenerative inverter, the DC line voltage simulator is proposed. The DC line voltage simulator, which is based on the AC-DC PWM converter, varies the DC voltage according to the fluctuating voltage which is measured in the actual DC line. The suitable operating point of the regenerative inverter can be estimated from the simulation result. The regenerative inverter operates two modes. When the DC line voltage exceed the operating point, already set up, it works as regenerative inverter to return the excessive power of DC line to the grid. When the DC line voltage is under the operating point, it works as active power filter to compensate harmonic currents. In this paper, the control algorithm of the DC line voltage simulator and that of the regenerative inverter is proposed.

---

## 1. 서 론

현재 운용되고 있는 전동차는 3상 교류전원을 정류한 직류모선으로부터 전력을 공급받아 운행된다. 하지만 회생 제동 시에는 직류모선으로 잉여 전력을 회생하게 된다. 이때 직류모선의 전압은 상승하게 되고 과도한 전압의 상승은 변전소의 정류기 및 차량에 탑재된 전력변환기의 고장 원인이 되기도 한다.

따라서 직류 모선의 전압이 일정 범위 이상으로 높아지게 되면 전력을 강제로 소모시키는 장치가 필요하다. 기존에는 저항기를 통하여 열에너지로 소모시켰으나 교토의정서결의 이후 에너지의 효율적인 이용에 대한 관심이 증대됨에 따라 직류모선의 잉여 전력을 3상 교류 계통에 공급하는 회생인버터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 일본에서는 1980년대부터 회생인버터가 도입되어 실제 노선에서 운용 중인 반면 국내의 경우에는 부산 지하철에서만 일부 사용되고 있고 다른 철도 시스템에서는 회생에너지를 활용하지 않고 있다.

또한, 전동차 시스템에는 정상 시 전력변환 장치의 사용으로 고조파 전류 발생, 역을 지하, 불평형이 수반되어 전력기기의 상호교란, 온도상승 등의 문제가 발생된다.

이러한 문제점들을 해결하고자 본 논문에서 제안한 회생인버터 시스템은 회생전력이 발생하지 않는 경우에는 능동전력필터 기능을 함으로써 역률개선 및 고조파 저감 기능을 수행하고 회생전력이 발생할 시에는 잉여 전력을 계통으로 공급하는 기능을 수행한다.[1-5]

따라서 본 논문에서는 국내 직류 지하철 급전시스템에 적합한 회생인버터 특성을 확인하고자 가선전압 모의장치를 적용한 회생인버터 시스템과 제어알고리즘을 제안하였다.

---

\* 성균관대학교, 정보통신공학부 태양광시스템공학 석사과정, 학생회원

E-mail : huma81@skku.edu

TEL : (031)290-7164    FAX : (031)299-4623

\*\* 성균관대학교, 정보통신공학부

\*\*\* 철도기술연구원

## 2. 직류가선전압 모의장치

직류 전동차는 제동 시나 하강 경사로 주행 시 회생전력이 발생하여 부하가 아닌 전원으로 특성이 변하여 직류 가선 전압을 상승시키게 된다. 직류 가선전압이 상승하게 되면 직류 급전변전소의 다이오드 정류기는 역바이어스 되어 급전 변전소가 전동차와 분리된다.

반대로 전동차가 가속을 하는 구간이나 동일 변전소 구간에 역행차가 많은 경우에는 직류 가선 전압이 하강하게 된다.

시간에 따라 급변하는 지하철 급전시스템의 특성 상 부하에너지 분석과 급전 변전소의 시간에 따른 전압 프로파일이 요구된다. 본 논문에서는 지하철 2호선 실측 결과값을 이용하여 직류 가선전압 모의장치를 제안하였다.

### 2.1 가선전압 모의장치의 기본구성

그림 1은 본 논문에서 제안한 직류가선전압 모의장치의 구성도를 나타낸다. 제안한 직류가선전압 모의장치는 기본적으로 AC/DC PWM 컨버터 형태와 동일하다. 실측된 전압 프로파일을 바탕으로 AC/DC PWM 컨버터를 제어함으로써 DC 링크 전압을 실측된 전압 프로파일과 동일하게 변화시킬 수 있다.

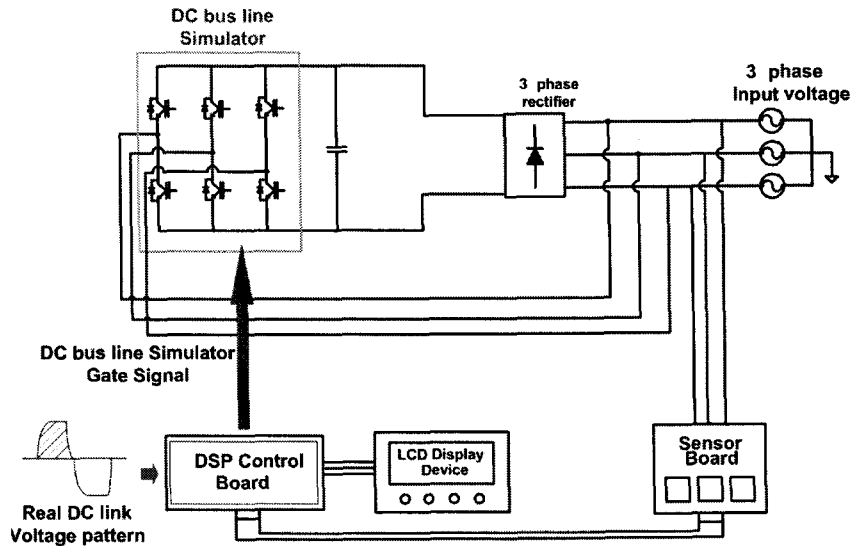


그림 1. 가선전압 모의장치의 구성도

### 2.2 가선전압 모의장치의 제어 알고리즘

그림 2는 본 논문에서 제안한 가선전압 모의장치 제어 알고리즘을 나타낸다. 기본적으로 AC/DC PWM 컨버터의 제어 알고리즘에서 전압 제어기를 제거하고 d-q 좌표변환을 적용하였다. 유효전력 변화량이 회생 전력에 의한 직류 가선전압 변화량이 되도록 제어하기 위해 무효전력 성분인 q축 성분은 0으로 제어하고 유효전력 성분인 d축 성분을 실제 측정으로 얻은 프로파일과 비교함으로써 d축 제어신호를 만든다. d-q 역변환을 통하여 삼각파와 비교함으로써 PWM 신호를 발생시킨다.

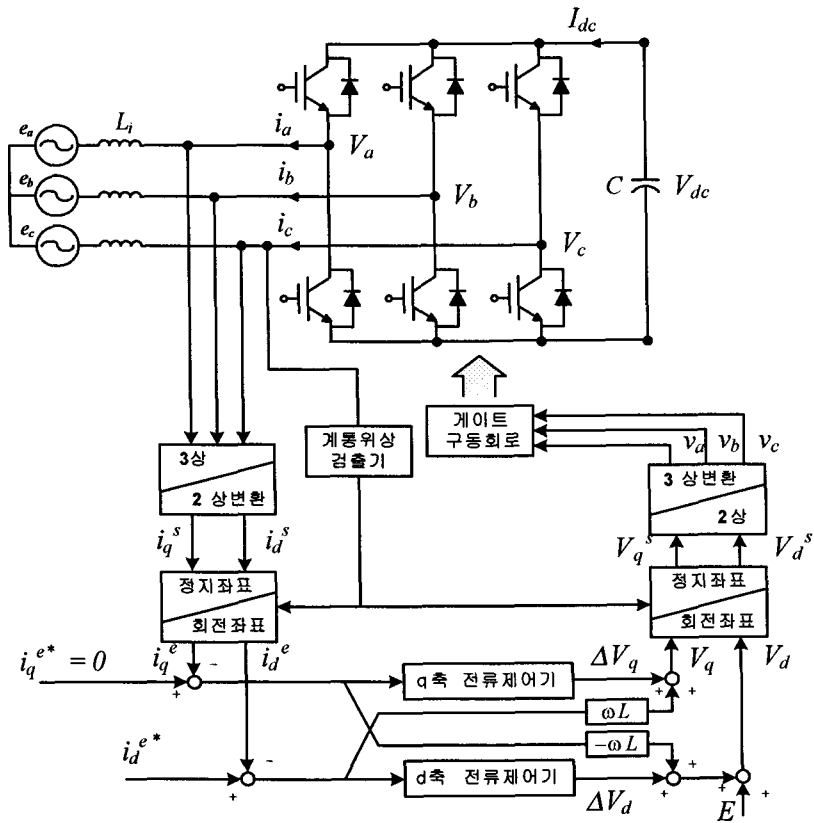


그림 2. 가선헌압 모의장치의 제어 블록도

### 3. 회생인버터 시스템

그림 3은 본 논문에서 제안한 회생인버터 시스템을 나타낸다. 스위치와 LCL 필터, 연계 변압기로 구성되어 있다. 전동차가 역행 시에는 능동전력 필터로 동작하고 회생 제동에 의해 직류 가선헌압이 상승하게 되면 회생인버터로 동작하여 회생전력을 계통에 공급하게 된다.

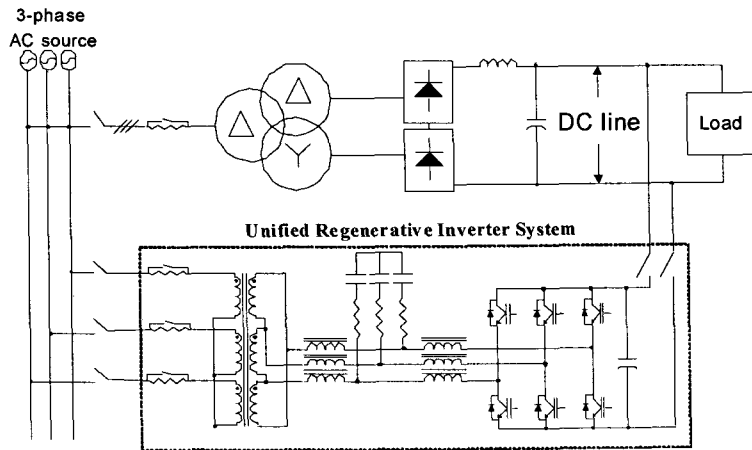


그림 3. 회생인버터 시스템

### 3.1 회생인버터의 능동전력필터 모드 동작

전동차가 역행 시에는 계통에서 정류기를 통하여 전동차에 전력을 공급하게 된다. 전력변환장치의 사용으로 인하여 계통전류는 왜곡되고 고조파를 함유하게 된다. 본 논문에서 제안한 회생인버터 시스템은 가선전압이 상승하지 않을 경우(전동차 역행) 능동전력필터로 동작하여 계통에 보상전류를 공급하게 된다.

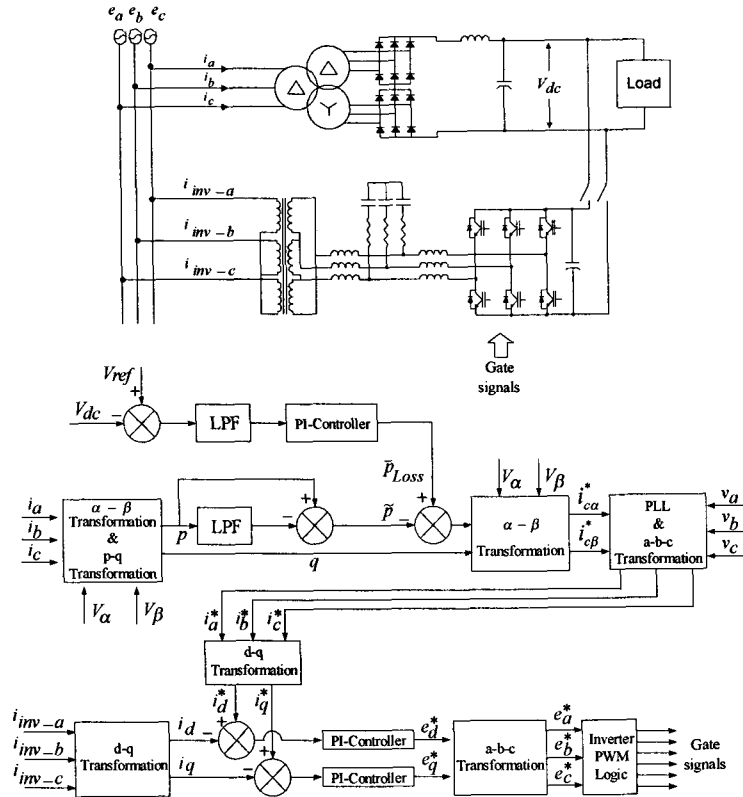


그림 4. 능동전력필터 모드 제어 블록도

그림 4는 제안한 회생인버터 시스템의 능동전력필터모드 제어 블록도를 나타낸다. 전압과 전류를 검출하여 2상 정좌표계로 변환하고  $V_\alpha, V_\beta$ 와  $I_\alpha, I_\beta$ 로 변환한다.  $V_\alpha, V_\beta$ 와  $I_\alpha, I_\beta$ 의 곱으로 순시유효전력  $p$ 와 순시무효전력  $q$ 를 구한다.  $p$ 값과  $q$ 값은 모두 기본파 성분인 직류성분과 고조파 성분인 교류성분을 포함하고 있다. 저역통과 필터와 연산기를 거쳐 고조파 성분인  $\tilde{p}$ 값을 구할 수 있고, 전압제어기를 통과한  $\bar{p}_{Loss}$ 의 오차를 구할 수 있다.

### 3.2 회생인버터의 회생 모드 동작

$q$ 축 동기좌표계에서의 전류는  $q$ 축 전류 기준값과 비교한 값을  $q$ 축 전류 제어기를 거쳐 기준 전압을 만든다. 또한  $d$ 축 동기좌표계에서의 전류는  $V_{dc}$ 단 전압을 검출한 값과  $V_{dc}$  기준 전압값을 비교한다. 전압 제어기를 거쳐서 만들어진  $d$ 축 전류 기준값과 비교한 값을  $d$ 축 전류 제어기를 거쳐 기준 전압을 만든다.

그리고 각각의 성분을 de-coupling 하게 되고 전류제어기의 응답성을 위해서  $E$ 가 추가된다. 이렇게 만들어진  $d, q$ 축 전압을 다시 역변환을 하여 게이트 구동회로에 기준값으로 들어가게 된다. 역률을 단위역류로 제어하기 위해 동기좌표계의 회전각  $\theta(= \omega t)$ 를  $E_q = 0$ 이 되도록 설정하고  $q$ 축 전류를 0으로 제어한다. 이는 곧 유효전력분 전류를 제어함으로써 DC link 전압을 제어하는 것과 동일하다.

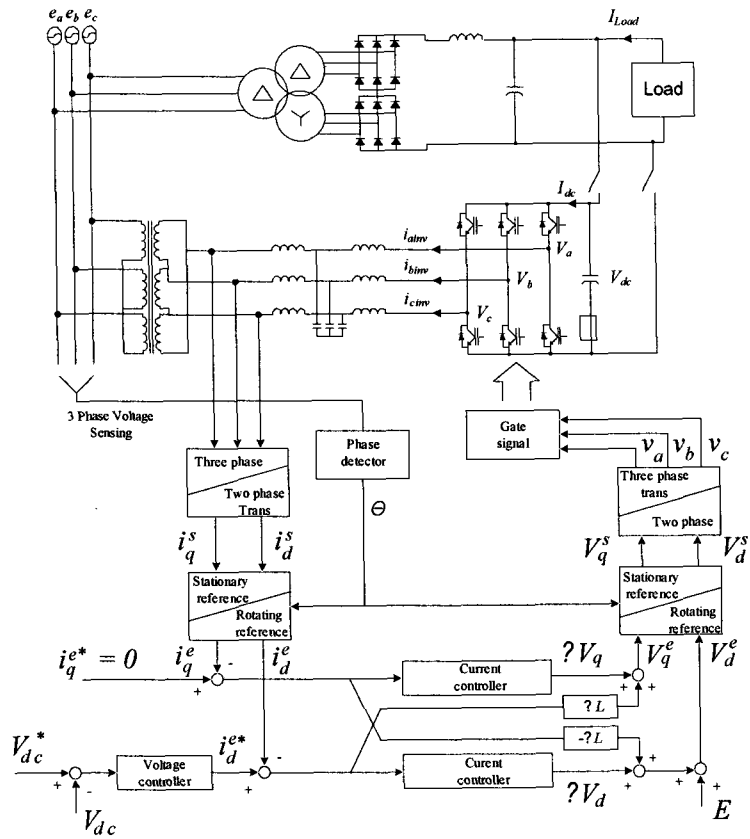


그림 5. 회생모드시 제어 블록도

#### 4. 가선전압 모의장치를 적용한 회생인버터 시스템

그림 6은 본 논문에서 제안한 회생인버터 시스템과 가선전압 모의장치를 나타낸다. 회생인버터 시스템과 가선전압 모의장치는 동일한 직류링크단에 구성되며 실측된 가선전압 기준값에 따라 가선전압 장치가 제어된다. 가선전압 장치의 제어에 의해 직류링크 전압이 변동되면 회생인버터 시스템은 회생모드와 능동전력필터 모드로 동작하게 된다.

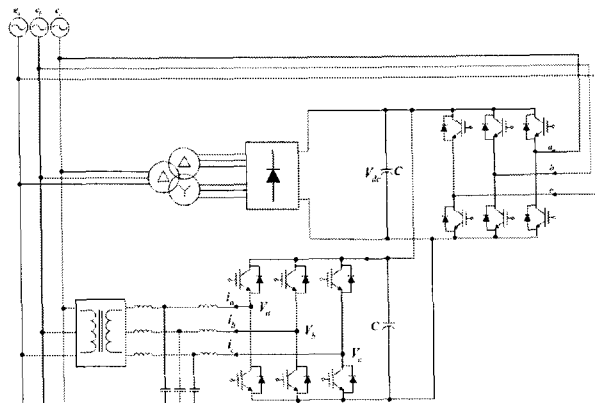


그림 6. 가선전압 모의장치를 적용한 회생인버터 시스템

따라서 본 논문에서 제안한 시스템은 가선전압 모의장치를 부하로 사용함으로써 실제 직류 전동차 시스템과 동일하게 회생에너지 장치를 적용할 수 있다.

## 5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 회생인버터 시스템을 PSIM 시뮬레이션을 통하여 검증하였다. 그림 7은 전체 시뮬레이션 회로도를 나타낸다.

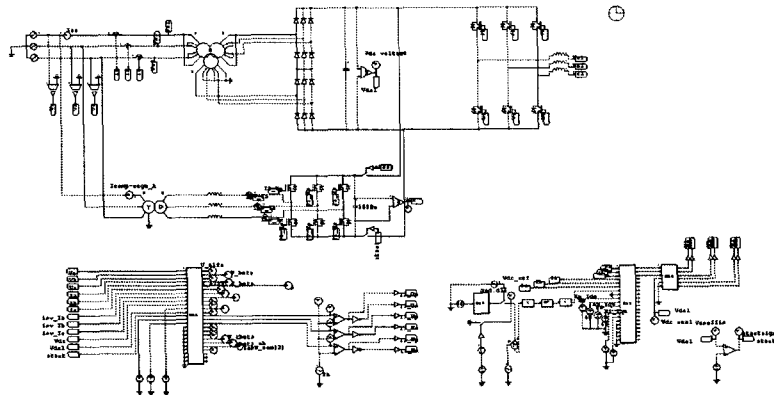
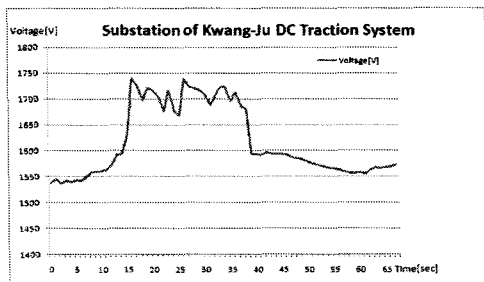
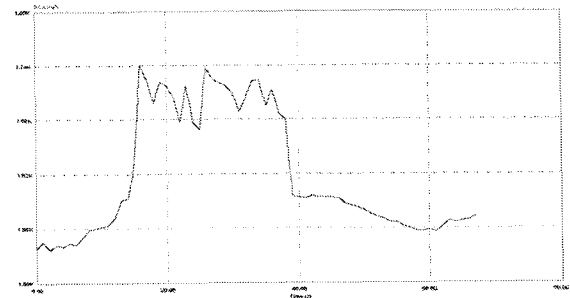


그림 7. 시뮬레이션 회로도

그림 8은 실측된 데이터 파형과 가선전압 모의장치 출력전압을 나타낸다. 실측된 가선전압 데이터에 따라 가선전압이 변동되는 것을 확인할 수 있다. 실측된 데이터는 광주 지하철 실측값을 사용하였다.



(a) 실측된 가선전압 모의장치 파형



(b) 가선전압 모의장치 시뮬레이션 출력파형

그림 8. 가선전압 모의장치 시뮬레이션 파형

그림 9는 인버터 출력전류(보상전류 및 회생전류)와 계통전류를 나타낸다. 0.4초에 직류 가선전압이 상승하게 되면 0.4초 이전에는 능동전력필터로 동작하여 고조파 보상전류를 공급하게 되고, 0.4초 이후에는 회생모드로 동작하여 계통에 회생전류를 출력한다.

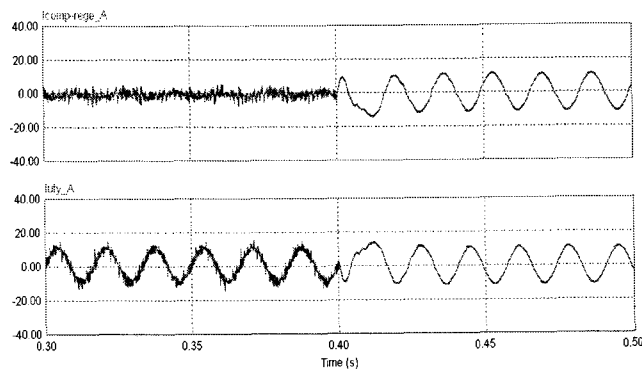


그림 9. 인버터 출력전류와 계통전류

## 6. 결 론

본 논문에서는 직류 지하철 시스템에 적용 가능한 회생인버터 시스템을 제안하였고 가선전압 모의장치를 설계하여 전체 시스템을 구성하였다. 가선전압 모의장치는 회생인버터 시스템의 부하로 적용하여 실제 가선전압을 출력하도록 제어하였다.

회생전력이 발생하면 제안된 회생인버터 시스템은 회생모드로 동작하고 회생전력이 발생하지 않는 구간에서는 능동전력필터 모드로 동작한다.

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

### 참고문헌

1. 김경원, 윤인식, 서영민, 윤덕용, 홍순찬(2001) “직류전력 회생시스템의 역률개선에 관한 연구”, 전력전자학회 논문집, 제6권, 제5호, pp.410-415.
2. 홍석진(2005) “전기철도의 고조파 발생원인 및 저감대책에 관한 연구”, 석사학위논문, 연세대학교.
3. P.J.Randewijk, and J.H.R.Enslin(1995), “Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated”, PESC of IEEE, Vol. 1, pp.360-366.
4. “국가교통핵심기술개발사업 차세대 에너지 회생장치 개발 보고서”, 한국철도기술연구원, 2004.
5. “대용량 직류전력 회생인버터 시스템 技術開發에 관한 최종보고서”, 산업자원부, 2001.10