

# 도시철도직류변전소의 회생전력 흡수를 위한 회생인버터 시뮬레이션 Simulation study of a regenerative inverter for absorption of regenerative energy in a DC traction substation

배창한\*, 한문섭\*, 김용기\*\*, 권삼영\*\*, 박현준\*\*

Bae C. H., Han M.S., S., Kim Y. G., Kwon S. Y., and Park H. J.

---

## ABSTRACT

In DC traction substation with 12-pulse diode rectifiers, the DC line voltage tends to rise above no-load voltage because it can't absorb the regenerative power caused by electric brakes of train. To solve this problem, an IGBT regenerative inverter should be installed and recycles the surplus regenerative power by delivering it to the supply grid.

In this paper, the DC traction substation equipped with a IGBT regenerative inverter is studied using computer simulation. Matlab/simulink is used to simulate the operation of regenerative inverter which injects the regenerative power into the supply grid and stabilizes the DC line voltage. It is confirmed that the high quality regenerative power is delivered to the supply grid through computer simulation.

---

## 1. 서론

대부분의 직류전기철도시스템에서는 낮은 고조파와 시스템의 안정성을 위해 3상 다이오드 정류기를 사용하여 직류급전전압을 만든다. 직류급전변전소는 전동차의 전기제동으로 발생하는 회생전력 때문에 직류급전전압이 상승한다. 따라서 회생전력을 흡수하고 재이용하기 위한 부가 장치들이 많이 개발되고 있다[1-4]. 현재 우리나라의 도시철도 직류변전소에서는 회생전력으로 인한 직류급전전압의 상승을 막기 위해 차량에 저항기를 탑재하고 있다. 직류급전전압이 기준치 이상으로 상승하면 저항기에서 회생전력을 열로 소모시키고, 전동차는 회생제동을 제한하고 기계제동으로 전환시킨다. 최근에는 신설노선의 직류변전소에 회생인버터를 설치하여 회생전력을 고압배전단으로 재이용하도록 초기설계에 반영되기 시작했다. 이러한 방법은 잉여전력의 재사용으로 에너지 절감효과가 있고, 전체 노선의 회생흡수율을 높임으로서 전동차의 전기제동 및 ATO (Automatic Train Operation) 성능을 향상시킨다. 이뿐만 아니라 전동차의 브레이크슈 사용을 줄여 브레이크슈 교체주기를 연장시킬 수 있고 공기제동으로 인한 차량의 편마모를 줄일 수 있어 차량유지보수비용을 감소시킨다. 또한 지하공간에서는 제동슈 마모로 인한 미세먼지를 감소시키고 온도상승을 억제시키는 효과도 있다. 지금까지 개발된 회생인버터는 대부분이 SCR을 사용한 위상제어 방식을 사용하고 있기 때문에 역률제어가 불가능하고, 많은 고조파를 발생시켜 회생전력의 품질이 떨어지고 높은 효율을 기대하기 어렵다.

---

\* 한국철도기술연구원 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원 책임연구원

본 논문에서는 도시철도의 직류급전시스템에서 발생하는 잉여회생전력을 흡수하고, 가선 전압을 변동폭을 감소시키는 효과를 갖는 IGBT PWM 회생인버터의 제어알고리즘 및 동작 방식을 제시하였다. 회생인버터는 3상 PWM AC/DC 컨버터의 회생동작 제어알고리즘을 사용하였으며, 계통단에 회생인버터 출력을 계통연계 변압기를 사용하여 연결시킴으로서 계통과의 절연 및 직류성분을 제거하였다. Matlab/simulink를 사용하여 직류급전변전소의 가선 전압의 변화에 따른 회생인버터의 출력전력특성을 파악하고 성능을 검증하였다

## 2. 회생인버터

회생인버터는 직류가선전압의 상승을 검지하고 교류회생전력을 만들어 변전소 고압배전 계통으로 전달하여 소비시키도록 한다. 그림1은 전철변전소의 다이오드 정류기와 회생인버터의 동작 개념도를 보여준다. 12-펄스 다이오드 정류기는 1590V 직류전압을 만들고 IGBT 회생인버터는 잉여 회생전력을 흡수하고 고압배전단으로 전달시켜 소비하도록 한다.

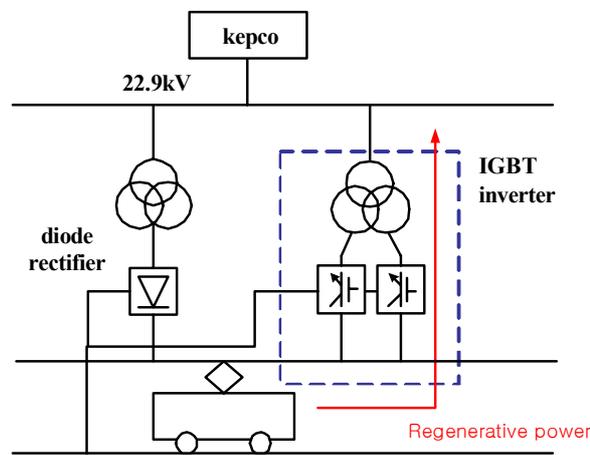


그림 1 회생인버터 구성도

직류급전변전소에 설치된 회생인버터의 동작 특성을 그림 2와 같으며 회생인버터를 채용한 직류급전변전소는 다음과 같은 3가지 모드로 동작한다.

- A 정류모드 : 정류기만 동작하는 영역으로, 전동차들의 가속으로 인한 소비전력의 증가로 직류가선전압이 무부하 전압보다 낮아진다.
- B 순환전류모드 : 정류기와 회생인버터 간에 순환전류를 흘리고 병렬운전함으로서 회생모드와 정류모드간 전환에 필요한 속응성 및 안전성을 향상시키기 위한 영역.
- C 회생모드 : 직류가선전압이 회생인버터 동작전압보다 높아 회생인버터가 회생전력을 생산하여 계통단으로 전달시키는 동작영역.

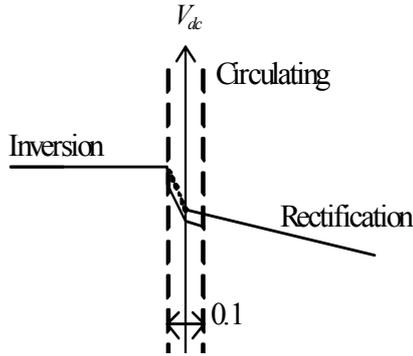


그림2, 직류급전변전소의 전압전류특성  $I_{dc}(pu)$

직류 전철 급전시스템을 위한 회생용 인버터의 제어알고리즘으로 기존의 3상 PWM AC/DC 컨버터의 회생동작 알고리즘을 사용한다. 그림 3은 3상 PWM AC/DC 컨버터를 나타내며 전압 방정식은 식(1)과 같다.

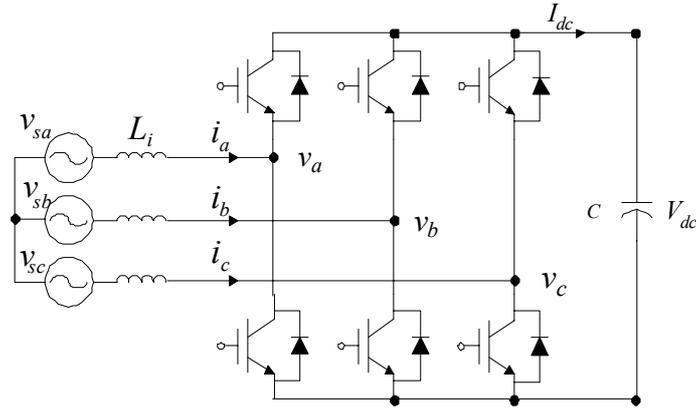


그림 3 3상 AC/DC 컨버터

$$[v_s]_{abc}^T = L_i \frac{d}{dt} [i]_{abc}^T + [v]_{abc}^T \quad (1)$$

여기서,  $[v_s]_{abc}^T$ 는 3상 전원 전압,  $[i]_{abc}^T$ 는 상전류,  $[v]_{abc}$ 는 제어 전압,  $L_i$ 는 인터페이스 인덕턴스이다. 식(1)을 a 상 전원전압에 동기된 d-q 좌표계로 표현하면 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} v_{sd}^e &= L_i \frac{di_d^e}{dt} - \omega L_i i_q^e + v_d^e \\ v_{sq}^e &= L_i \frac{di_q^e}{dt} + \omega L_i i_d^e + v_q^e \end{aligned} \quad (2)$$

a상 전원전압을 기준각으로 하여 3상 전원전압,  $[v_s]_{abc}$ 를 d-q 정지 및 동기 좌표계로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_{sd}^s &= V_m \cos \omega t \\ v_{sq}^s &= V_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_{sd}^e &= V_m \\ v_{sq}^e &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $V_m$ 은 3상 전원 상전압의 최고치이다. 식(4)를 식(2)에 적용하면 d-q동기좌표계에서의 전압방정식은 식(5)로 얻어진다.

$$\begin{aligned} V_m &= L_i \frac{di_d^e}{dt} - \omega L_i i_q^e + v_d^e \\ 0 &= L_i \frac{di_q^e}{dt} + \omega L_i i_d^e + v_q^e \end{aligned} \quad (5)$$

동기좌표계의 d축 전류를 제어함으로써 전원측에서 공급되는 입력유효전력을 제어할 수 있으며, 단위역률을 얻기 위해 무효전력성분인 q축 전류의 기준값을 0으로 한다. d축 전류제어기와 직류측 소비전력에 대한 보상이 완벽하다면, 전원측에서 공급하는 유효전력은 식(6)으로 얻어지며, 직류링크단에서의 전력을 식(7)과 같다.

$$P_{ac} = \frac{3}{2}(v_{sd}^e \cdot i_d^e + v_{sq}^e \cdot i_q^e) = \frac{3}{2} V_m i_d^e \quad (6)$$

$$\frac{C}{2} \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_{ac} - P_{load} \quad (7)$$

여기서  $P_{load}$ 는 직류단의 소비전력이다. 회생모드 시에는 직류단의 소비전력이 없다고 가정하고, 식(7)의 좌변항을 직류 동작전압인  $V_{dcB}$ 에서 테일러시리즈로 정리하면 식(6)과(7)로부터 아래 수식을 얻을 수 있다.

$$\frac{C}{2} V_{dcB} \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} V_m i_{dREF}^e \quad (8)$$

따라서 전압제어루프에서 발생하는 d축에 대한 기준전류값은 다음과 같다.

$$i_{dREF}^e = \frac{CV_{dcB}}{3V_m T_s} \cdot (V_{dcREF} - V_{dc}) \quad (9)$$

여기서  $T_s$ 는 전압제어루프의 샘플링주기이다. 전체 제어블럭도는 그림4와 같다.

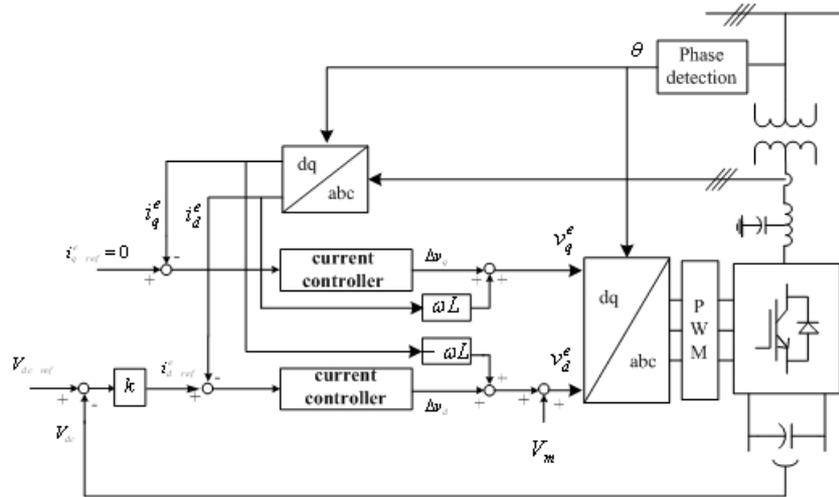


그림 4. 제어 블록도

### 3. 시뮬레이션

직류급전시스템의 회생인버터 동작특성을 파악하기 위해 직류변전소를 Matlab/ Simulink 로 시뮬레이션하였다. 5MVA용량의 다이오드정류기와 1.5MVA용량의 IGBT 회생인버터를 역병렬로 연결하였으며, 흡수된 회생전력은 전철변전소의 고압배전부하에서 소모되도록 하였다. 직류가선전압 상승을 모의하기위해 직류링크단에 전류원을 연결하여 차량으로부터 회생전력을 발생시켰다. 전체 시뮬레이션의 샘플링시간은 5us이며, 회생인버터의 전류제어루프의 샘플링주파수는 5kHz, 전압제어루프의 샘플링주파수는 500Hz, 스위칭 주파수는 3kHz 로 하였다. 시뮬레이션에 사용된 직류급전변전소의 조건을 표 1에 나타낸다.

표1. 시뮬레이션 사양

3상 다이오드 정류기	정 격
교류전압	3상 22.9kV, 5MVA
직류전압	1590V
변압기결선	$\Delta/\Delta Y$
회생인버터	정 격
직류전압	1650V, 1.5MW
교류전압	3상 480V/22.9kV
필터리액턴스	5mH
필터커패시턴스	12mF
변압기결선	$\Delta/Y$

그림5는 회생인버터의 출력 전류파형과 계통 전압파형을 보여준다. 회생인버터는 순환전류영역으로 동작하는 중에 가선전압의 상승을 감지하면 회생전력을 만들게 된다. 그림에서 보듯이 출력전류파형과 계통전압파형이 서로 180° 위상차를 갖으며 단위역률로 회생되는 것을 확인할 수 있다. 여기서 회생인버터의 출력전류파형은 PWM 스위칭으로 인한 고조파를 포함하고 있어 전류 고조파에 대한 대책으로 회생인버터의 출력단과 계통연계변압기 사이에 수동필터를 설치하면 개선시킬 수 있다. 그림 6은 회생인버터 d축 및 q축 전류의 응답특성을 보여주며 직류변전소의 직류단 전압과 회생인버터의 출력단 3상 전류 파형은 그림7과 같다.

그림8은 회생인버터 3가지 동작모드에 대해 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 순환전류영역에서 회생인버터의 기준전압을 측정된 직류가선전압보다 20V 낮은 값으로 설정하여 적은량의 순환전류를 흘리도록 하였다. 그림에서 보듯이 순환전류영역에서는 적은량의 순환전류를 흘리며, 직류가선전압이 회생인버터 동작전압인 1650V에 도달하면 회생인버터가 가선전압의 상승을 억제하며 가선전압 상승분만큼의 회생전력을 흡수한다.

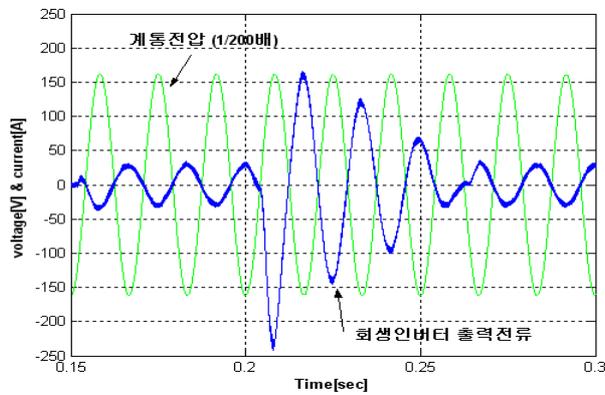


그림 5. 회생인버터의 a상 출력전류와 계통단 a상 전압파형(1/200배)

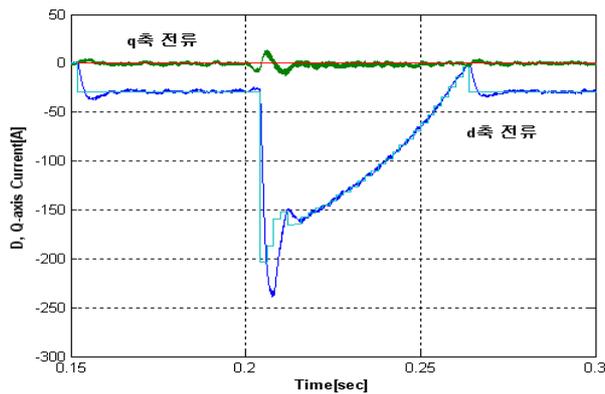


그림 6. 회생인버터의 d축 및 q축 전류파형

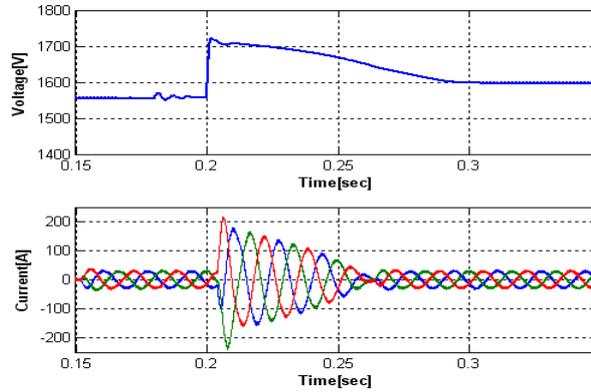


그림 7. 가선전압 및 회생인버터 3상 출력전류파형

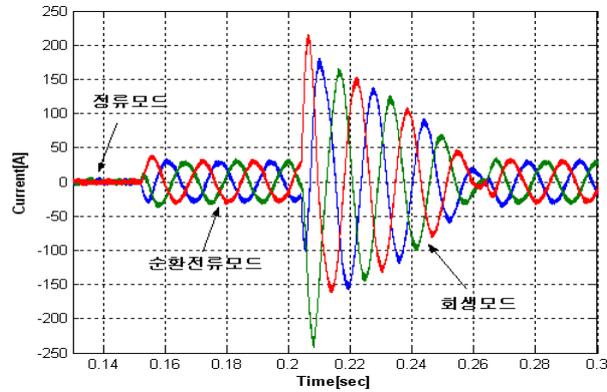


그림 8. 3상 출력전류파형

#### 4. 결론

직류 급전구간을 운행하는 전동차의 전기제동으로 인해 발생하는 회생전력을 흡수하는 장치인 회생인버터와 직류변전소에 대해 시뮬레이션 하였다. 12-펄스 다이오드 정류기를 사용하여 직류모선전압을 만드는 직류급전변전소에 IGBT 회생인버터를 설치하여 잉여 회생전력을 급전계통으로 전달해 재사용하도록 하였다. 회생인버터의 동작에 속응성과 안전성확보를 위해 정류모드와 회생전력 모드사이에서 순환전류영역을 만들어 적은 량의 순환전류를 흘리도록 하였다. 회생전력발생으로 인한 직류가선전압의 상승을 모의하고, 3상 PWM AC/DC 컨버터의 회생모드 제어알고리즘을 사용하여 회생전력을 전력계통으로 전달하고 가선전압을 안정화하였다. 앞으로 순환전류영역에서의 순환전류량을 감소시키고, 출력단 고조파 필터 설계에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. P.J. Randewijk and J.H.R. Enslin(1995), "Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated," IEEE-PESC Conf. Rec., vol. 1, pp.360-366
2. Y.S. Tzeng, R.N. Chen, and N. Chen(1998), "Electric network solutions of DC transit system with inverting substations," IEEE Trans. vehicular technology, vol. 47, no. 4, pp.1405-1412
3. T. Konishi and S. Hase(2004), "Energy storage system for DC electrified railway using EDLC," Quality report of RTRI, vol. 45, no. 2, pp.53-58
4. M.B. Richardson(2002), "Flywheel energy storage system for traction applications," Power Electronics Machines and Drives, pp.275-279