

## 회생에너지 이용률 향상을 위한 새로운 DC 전기철도 급전시스템

**한성근, 유형준, 김학만, 박재세**  
국립인천대학교

### A DC Electric Railway System for Improving Regenerative Energy Utilization

Seong-Geun Han, Hyeong-Jun Yoo, Hak-Man Kim, Jae-Se Park  
Incheon National University

**Abstract** - In this paper, we proposed a DC electric railway system that composed of a 3-phase voltage source converter (VSC) and a bidirectional DC-DC converter. The proposed electric railway system is modeled and simulated to show the feasibility in MATLAB/Simulink.

#### 1. 서 론

전기철도의 회생에너지는 전동차의 하강경사로 주행이나 감속 운행시 발생하며, 이는 DC 가선전압을 상승시켜 차량이나 정류기에 설치된 전력 변환기의 파손이나 시스템의 오동작 등의 문제를 일으킨다[1-2]. 따라서 DC 전기철도 급전시스템에서 DC 가선전압을 일정하게 유지시키는 것이 중요하다.

한편 국내의 DC 전기철도 급전시스템의 대부분은 한전으로부터 AC 3상 22.9 [kV]를 송전 받아 다이오드 정류방식을 적용하여 전동차에 DC 1500 [V] 또는 750 [V]를 전동차에 급전하고 있다. 또한 현재 국내의 DC 전기철도 급전시스템의 경우 잉여 회생에너지는 저항기를 사용하여 강제적으로 소비하거나 공기제동으로 전환하여 과전압으로부터 시스템을 보호하고 있으나 이는 에너지 효율저감 문제를 야기시킨다[3].

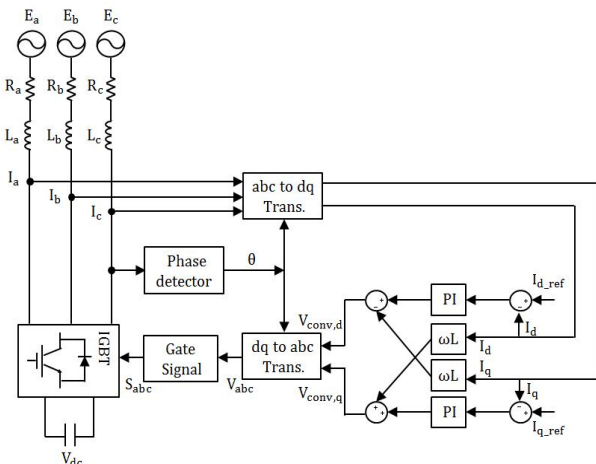
따라서 저항기를 사용하는 방법보다 회생에너지를 효율적으로 활용하기 위한 에너지 저장장치시스템의 적용 및 회생인버터를 설치하여 DC 가선전압의 상승 억제 및 회생에너지 이용률을 향상시키는 연구가 진행되고 있다[4-5].

본 논문에서는 전동차에서 발생하는 회생 에너지 이용률 향상을 위하여 3상 전압형 컨버터와 양방향 DC-DC 컨버터로 구성된 새로운 DC 전기철도 급전시스템을 제안하고자 한다. 그리고 MATLAB/Simulink를 이용하여 제안한 시스템을 모델링하고 시뮬레이션을 통하여 시스템의 효과를 검증하였다.

#### 2. 제안하는 DC 전기철도 급전시스템

##### 2.1 3상 전압형 컨버터

DC 전기철도 급전시스템에서 전력계통의 AC 전압을 DC 전압으로 변환하기 위하여 그림 1과 같이 양방향 전력변환이 가능한 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 기반의 3상 전압형 컨버터를 사용한다.



〈그림 1〉 3상 전압형 컨버터 제어구성도

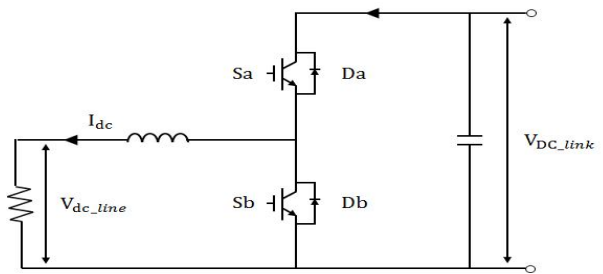
3상 전압형 컨버터의 전압방정식은 dq변환을 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있으며, 이를 이용하여 전압형 컨버터의 제어를 설계할 수 있다[6].

$$E_d(t) = R\dot{i}_d(t) - j\omega L i_q(t) - L \frac{d}{dt} i_d + V_d(t) \quad (1)$$

$$E_q(t) = R\dot{i}_q(t) + j\omega L i_d(t) - L \frac{d}{dt} i_q + V_q(t)$$

##### 2.2 양방향 DC-DC 컨버터

본 논문에서 사용하는 3상 전압형 컨버터는 입력 AC전압의 승압특성을 가지고 있어 AC 전력계통에서 22.9 [kV]를 수신하여 1500 [V]로 제어할 수 없다. 따라서 그림 2와 같이 양방향 DC-DC 컨버터를 사용하여 DC 전기철도 급전시스템의 가선전압을 1500 [V]로 제어한다.

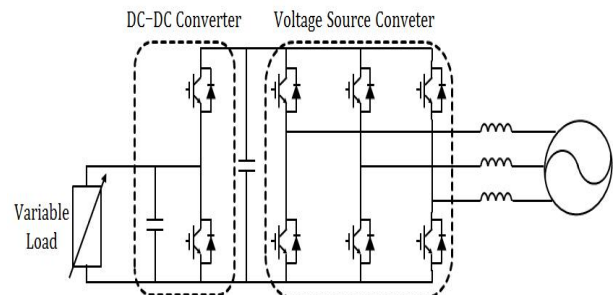


〈그림 2〉 양방향 DC-DC 컨버터

양방향 DC-DC 컨버터는 DC\_line 전압이 허용 정격전압보다 높아질 경우 벡컨버터 모드로 동작하여 강압시키고, 반대로 허용 정격전압보다 낮아질 경우 부스트 컨버터 모드로 동작하여 승압시켜 DC\_line 전압을 제어한다.

##### 2.3 제안하는 전기철도 급전시스템

본 논문에서 제안하는 DC 전기철도 급전시스템은 그림 3과 같이 3상 전압형 컨버터, 양방향 DC-DC 컨버터, 부하로 구성되어 있다.

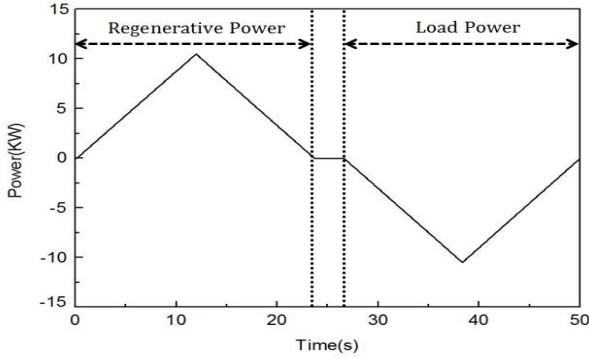


〈그림 3〉 제안하는 DC 전기철도 급전시스템 구성도

제안하는 전기철도 급전시스템은 전동차에서 회생에너지가 발생하여 DC 가선전압이 1500 [V]보다 상승하는 경우 양방향 DC-DC 컨버터와 전압형 컨버터를 통해 회생에너지를 AC 전력계통으로 회생시키게 되며, 반대로 전동차에서 부하전력을 소모하여 DC 가선전압이 1500 [V]이하로 떨어지는 경우 AC 전력계통으로부터 부족전력을 수신하여 가선전압이 1500 [V]로 유지하도록 모델링하였다.

### 3. 시뮬레이션

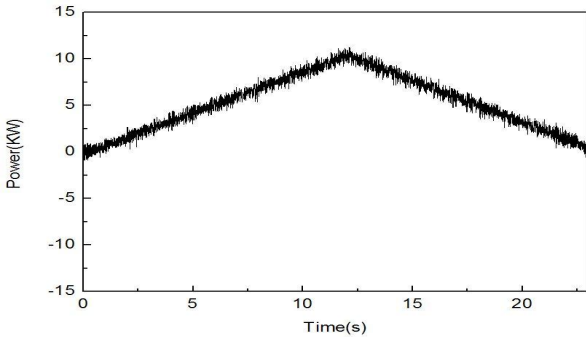
본 논문에서는 MATLAB/Simulink를 이용하여 제안하는 DC 전기철도 급전시스템을 그림 3과 같이 모델링하였고, DC 전기철도 급전시스템의 가선전압이 유지되는지를 테스트하기 위하여 가변부하를 이용하였다. 이때 DC 철도 급전시스템의 가선전압의 정격전압은 1500 [V]로 고려하였다. 또한 전동차의 운행 특성에 따라 그림 4와 같이 회생에너지가 발생하는 구간과 부하전력을 소모하는 두 가지 case를 고려하였다.



〈그림 4〉 전동차의 부하변동

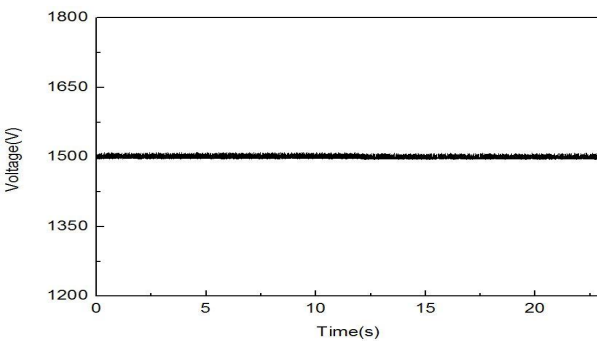
#### 3.1 Case 1 : 회생에너지 발생구간

Case 1의 전동차의 부하변동은 그림 4와 같이 0초부터 23초까지의 구간을 나타내며, 전동차에서 회생에너지가 발생하는 경우이다.



〈그림 5〉 컨버터 전력(회생에너지 발생 시)

전동차에서 회생에너지가 발생하면 양방향 DC-DC 컨버터와 3상 전압형 컨버터를 통해 AC 전력 계통으로 잉여전력을 송전하며, 그림 5를 통하여 AC 전력계통으로 송전하는 회생에너지 양은 전동차에서 발생하는 회생에너지양과 같은 것을 확인 할 수 있다.

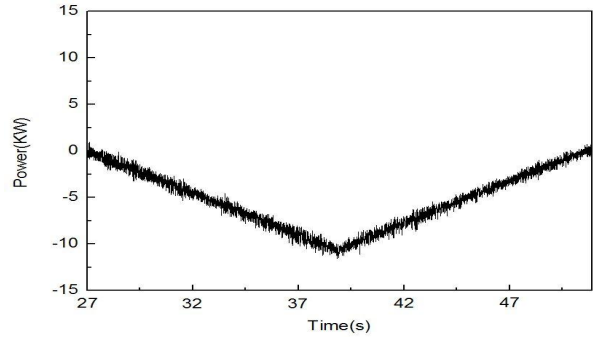


〈그림 6〉 가선전압

그림 6에서 확인할 수 있듯이 회생에너지 발생 시 그림 5와 같이 AC 계통으로 전력을 송전하여 가선전압이 허용범위 내에서 1500[V]로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

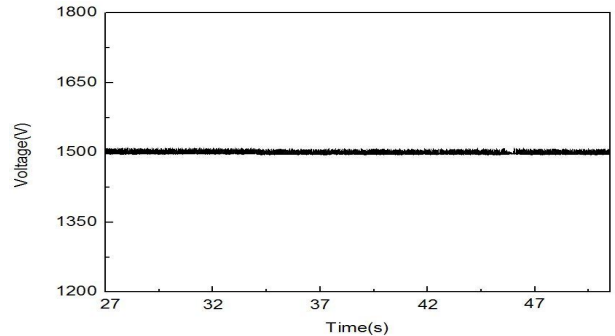
#### 3.2 Case 2 : 부하전력 소모 구간

Case 2는 전동차에서 부하전력을 소모하는 경우로 전동차의 부하변동은 그림 4와 같이 27초부터 50초까지의 구간을 나타낸다.



〈그림 7〉 컨버터 전력(부하전력 소모 시)

전동차에서 부하 전력을 소모하면 전동차에 필요한 부족량만큼 양방향 DC-DC 컨버터와 3상 전압형 컨버터를 통해 AC 전력 계통에서 수전하며, 그림 7을 통하여 AC 전력계통에서 수전하는 전력량은 전동차에서 소모하는 부하량과 같은 것을 확인 할 수 있다.



〈그림 8〉 가선전압

그림 8에서 확인할 수 있듯이 부하전력 소모 시 그림 7과 같이 부하에 전력을 공급함으로써 가선전압이 허용범위 내에서 1500[V]로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 회생에너지 이용률 향상을 위하여 3상 전압형 컨버터와 양방향 DC-DC 컨버터로 구성된 DC 전기철도 급전시스템을 제안하였으며, 제안한 DC 철도 급전시스템의 효과를 검증하기 위하여 MATLAB/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였다. 테스트 결과 전동차에서 회생에너지가 발생과 부하전력 소모 시 DC 전기철도 급전시스템의 가선전압이 1500 [V]로 유지하는 것을 확인 할 수 있었다.

추후 실제 전기철도의 용량과 부하패턴을 이용한 부하모델을 적용하는 연구를 수행할 계획이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] H. K. Jung, N. H. Guen, B. H. Kim, T. Y. Ha, and J. K. Lee, "A Study on measurement and analysis of regenerated energy according to operating electric train in urban railway," Proc. of KSR, pp. 372-375, 2014.
- [2] G. W. Jeon, H. J. Yoo, J. S. Park, "Improving Regenerative Break Energy Efficiency and Voltage Regulation Capability of DC Electric Railway by Coordination of VSC and EDLC," KIEE Trans. Vol. 64, No. 1, pp. 176-181, 2015.
- [3] J. R. Kim, J. Y. Lee, C. M. Lee, S. H. Chang and, A. H. Lee, "Comparison PWM Converter with Diode Rectifier," Proc. of KSR, pp. 946-951, 2012.
- [4] D. W. Chung, "Development of Regenerative Energy Storage System for An Electric Vehicle Using Super-Capacitors," KIEE Trans. Vol. 60, No. 3, pp. 544-551, 2011.
- [5] J. R. Kim, M. S. Han, Y. K. Kim, and J. H. Kim "Development of Regenerative Energy Storage System for An Electric Vehicle Using Super-Capacitors," KSR Trans. on Power Electronics, Vol. 12, No. 2, pp. 254-259, 2009.
- [6] A. Yazdani, and R. Irvani, Voltage-Sourced Converters in Power System, John Wiley and Sons, 2010.