

# 직류지하철 회생에너지 저장장치의 충/방전 제어를 위한 가선전압 모의장치

조한진, 김종윤, 조기현, 유동환, 원충연, 이병국  
성균관대학교

## DC line voltage simulator for charging/discharging control of regenerative energy storage system in DC railway

Han-Jin Cho, Jong-Yoon Kim, Kee-Hyun Cho, Chung-Yuen Won, Byoung-Kuk Lee  
Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 회생에너지 저장시스템의 충/방전 제어를 위한 가선전압 모의 장치를 제안한다. 제안된 시뮬레이터는 실측된 가선전압 데이터를 입력으로 받아 실측 가선전압과 동일한 전압패턴으로 모사한다. 이러한 전압패턴은 회생에너지가 포함된 가선전압이며 이를 토대로 에너지 저장시스템에 연계시켜 충/방전 제어를 좀 더 효율적으로 수행할 수 있다.

제안된 시뮬레이터는 AC/DC 컨버터 타입으로 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 시스템의 타당성을 확인하였다.

### 1. 서론

세계적으로 한정된 에너지자원의 활용 및 개발에 의하여 환경이 파괴되고 있다. 이 때문에 환경에 대한 관심이 지속적으로 높아져서 환경오염 및 파괴에 대한 대책의 중요성이 절실히 요구되어지고 있다. 따라서 에너지의 효율적인 사용 및 재활용에 대한 연구는 전 세계적으로 중요한 문제가 되고 있다.

모든 에너지 소비부하 중 에너지의 사용이 많고 회생에너지 발생량이 많은 부하는 직류지하철 시스템이다. 따라서 지하철 시스템에서 효과적인 에너지 사용대책은 가장 절실하다고 볼 수 있다.

직류지하철 시스템은 대 전력을 소비하며 전동차의 운행구간에 따라 회생에너지가 발생하게 된다. 즉 전동차의 운행구간이 하구배구간이거나 제동구간일 경우 입력에너지의 45%가 회생에너지로 발생된다. 그림1은 직류지하철 시스템의 에너지 회생 에너지 분포도이다. 입력에너지 중 55%는 전동차에서 소비하게 된다.

회생에너지로 발생되는 45%에너지의 25%는 인접 차량의 기동 및 가속에 사용하게 되며, 20%에너지는 회생에너지로 활용 가능한 에너지로 볼 수 있다.<sup>[1]</sup>

이러한 회생에너지는 직류지하철 시스템에서 가선전압을 상승시켜 지하철 시스템의 보호 장치 및 권선의 소손 등 중대한 문제점을 일으키는 주요 원인이 된다. 하지만 현재 직류 지하철 시스템에서는 회생에너지를 저장하거나 활용하는 장치들이 없기 때문에 가선전압이 일정 값 이상으로 상승되면 저항 부하를 사용하여 에너지를 소모하고 있다.

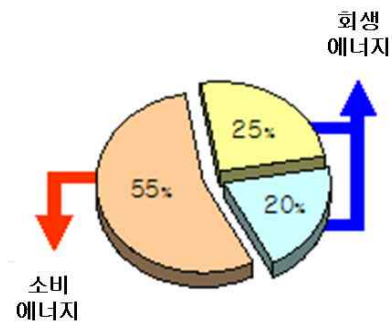


그림 1. 직류지하철 시스템의 회생에너지  
Fig 1. Regenerative energy of DC railway system

따라서 가선전압의 상승으로 인한 문제점을 해결하고 회생에너지의 활용을 높이기 위해서 현재 에너지 저장장치 및 회생인버터 등이 연구되어지고 있다.

그림 2는 지하철 시스템에서의 회생에너지 저장장치를 나타낸다. 본 논문에서는 가선전압의 상승으로 야기되는 문제점을 해결하고, 에너지 저장장치의 효율적인 제어를 위해 능동 시뮬레이터를 제안 하고, 양방향 DC/DC 컨버터를 제어하여 회생에너지 저장장치에 활용하였다.

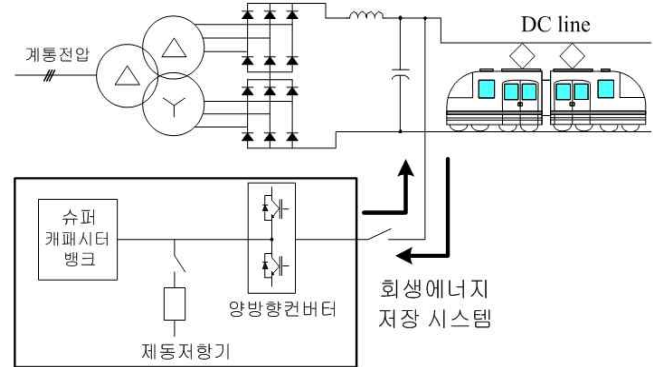


그림 2. 회생에너지 저장장치  
Fig 2. Energy storage system

## 2. 가선전압 모의장치

본 논문에서 제안하는 시뮬레이터는 4상한 운전이 가능한 양방향 AC/DC 컨버터 형태이다. 그림 3은 가선전압 모의장치 시뮬레이터로 사용한 AC/DC 컨버터를 나타낸다.<sup>[2]</sup>

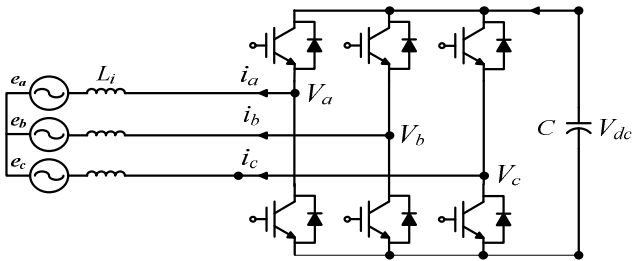


그림 3. 가선전압모의장치  
Fig 3. DC line voltage simulator

그림 4는 가선전압 모의장치 알고리즘을 나타낸다. 가선전압 모의장치는 유효성분만 추종하고 무효성분을 0으로 제어하여 가선전압을 실측값과 동일하게 제어한다.

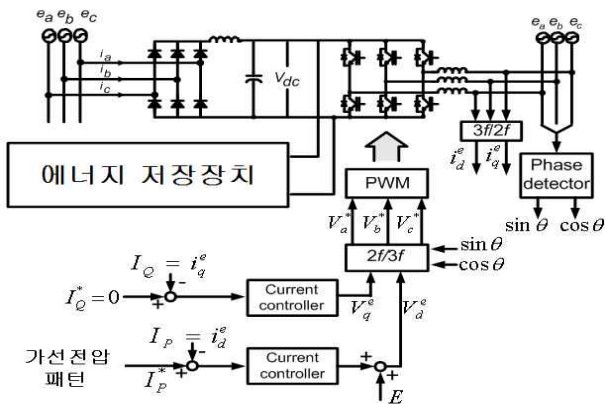


그림 4. 가선전압 모의장치 제어 알고리즘  
Fig 4. control algorithm of DC line voltage simulator

그림 5는 본 논문에서 제안하는 시스템 구성도이다. 가선전압 모의장치는 정류기 출력과 연결되어 일정한 가선전압을 회생 에너지가 포함된 형태로 제어한다. 시뮬레이터의 레퍼런스는 실제 측정된 가선전압으로 전압과 전류를 센싱 받아 비교하여 오차를 보상하며 추종 하게 된다.

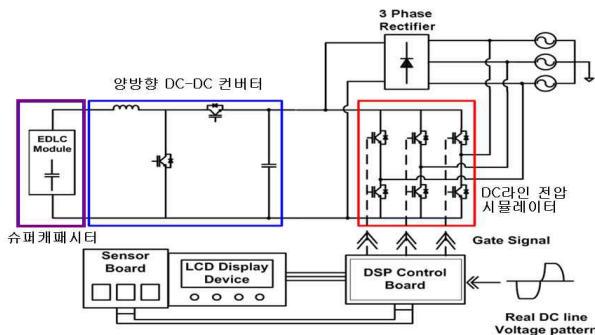
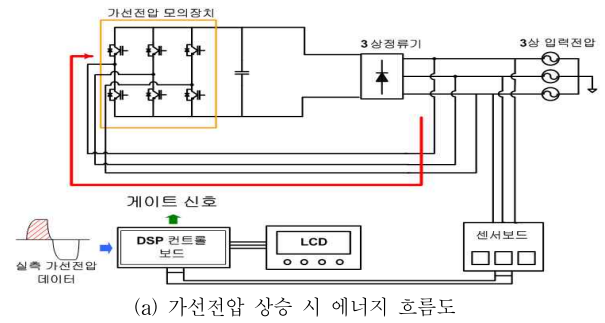
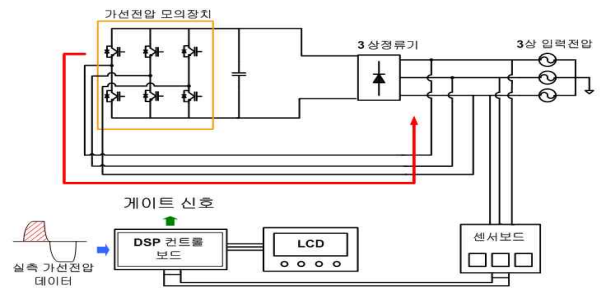


그림 5. 제안하는 시스템  
Fig 5. Proposed circuit diagram



(a) 가선전압 상승 시 에너지 흐름도



(b) 가선전압 하강 시 에너지 흐름도

그림 6. 에너지 흐름도

Fig 6. Energy flow of simulator

회생에너지 발생으로 인한 시뮬레이터의 에너지 흐름은 그림 6과 같이 표현할 수 있다. 전동차의 운행구간이 하구배구간이나 제동구간일 경우 회생에너지 발생으로 가선전압이 상승된다. 그림 6(a)는 가선전압의 상승을 모의하는 전력 흐름 도를 나타내고 있다. 반면 전동차가 출발하거나 가속할 경우 전력 사용으로 인한 가선전압의 하강은 그림 6(b)와 같은 에너지 흐름으로 모의할 수 있다.

## 3. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제안하는 시스템은 회생에너지 시스템에 가선전압 모의장치를 접목시켜 시뮬레이션 하였다. 가선전압 모의장치는 정류기의 출력과 연결되어 있어 가선전압을 실측값과 동일하게 모의한다. 그림 7은 본 논문에서 제안하는 시스템 회로도를 나타낸다.

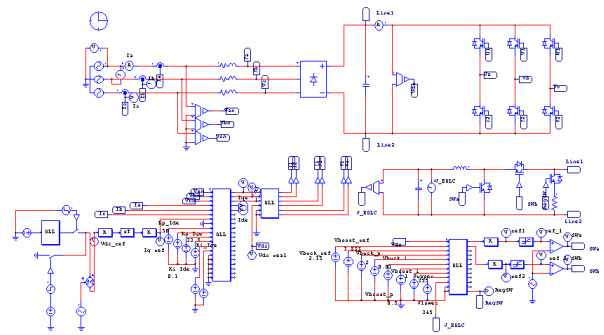


그림 7. 시뮬레이션 회로도  
Fig 7. Circuit diagram of simulation

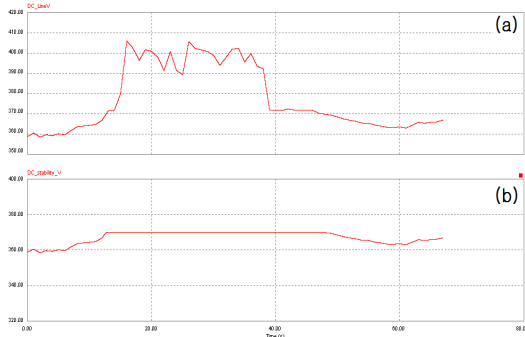


그림 8. (a)가선전압 모의장치 출력 (b)안정화 파형  
Fig 8. (a)output of DC line voltage simulator  
(b)stability of DC line voltage

그림 8(a)는 가선전압 모의장치의 출력파형을 나타낸다. 실제 측정값을 기준값으로 입력하여 가선전압을 실측값과 동일하게 모의하였고 8(b)는 회생에너지 저장장치의 충/방전 제어를 통해 안정화된 파형을 나타낸다.

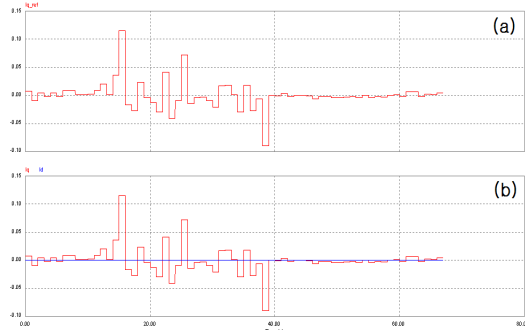


그림 9. (a)  $i_{q-ref}$  전류 (b)  $i_q, i_d$  전류  
Fig 9. (a)  $i_{q-ref}$  current (b)  $i_q, i_d$  current

그림 9는 가선전압모의장치 레퍼런스 전류와 이를 추종하는 유효전류, 0으로 제어되는 무효전류를 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 가선전압 모의장치는 실측 가선전압으로부터 q축 레퍼런스전류를 얻고 이를 추종하여 실측값과 동일한 가선전압으로 제어한다.

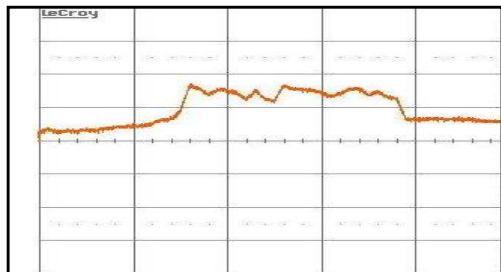


그림 10. 가선전압 모의장치 출력파형  
Fig 10. Output of DC line voltage simulator  
(30V/div, 20s/div)

그림 10은 가선전압 모의장치의 출력파형을 나타낸다. 가선전압은 시뮬레이터에 의해서 실제 가선전압 패턴과 동일하게 모사 하였다.

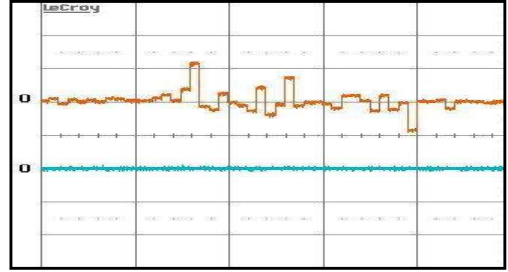


그림 11. (a)  $i_q$  전류 (b)  $i_d$  전류  
Fig 11. (a)  $i_q$  current (b)  $i_d$  current (10A/div, 20s/div)

그림 11은 실측가선전압을 모의하기 위한  $i_q, i_d$  전류파형을 나타낸다.  $i_q$  전류는 유효 성분을 나타내며  $i_d$ 전류는 무효전류 성분을 나타낸다. 실측가선전압을 모의하기 위해  $i_d$ 는 0으로 제어하였고  $i_q$  전류성분으로만 가선전압을 제어 한다.

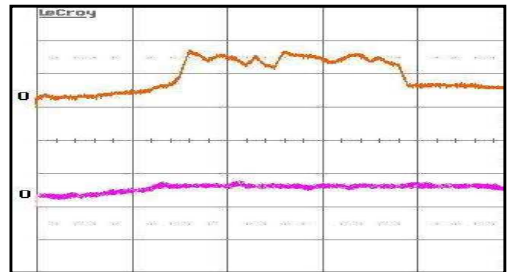


그림 12. (a) 가선전압 (b)안정화된 가선전압  
Fig 12. (a) practical DC line voltage  
(b)stability of DC line voltage (30v/div, 20s/div)

그림 12(a)는 가선전압 모의장치 출력 값을 나타내며 12(b)는 회생에너지 저장장치 충/방전 제어로 안정화된 가선전압을 나타낸다. 실측값과 동일하게 가선전압을 모의할 수 있으므로 회생에너지 저장장치의 충/방전 제어를 효율적으로 설계할 수 있다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 직류를 전원으로 하는 전철 시스템의 회생에너지에 영향을 받은 가선전압을 모의하였다. 에너지 저장장치의 충/방전 제어를 효율적으로 하기 위해 가선전압 모의장치를 제안하였으며 가선전압 모의장치를 에너지 저장장치에 연계하여 충/방전 제어를 수행하였다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참고 문헌

- [1] 장수진, 김연중, 이병국 원충연, 배창한, 김용기, “ 능동전력 필터 기능이 추가된 지하철 회생전력 제어용 인버터”, 조명전기설비학회지, 제 20권 제 5호 pp25~32
- [2] 한진욱, “Active Power Filter 를 이용한 전력계통의 고조파 제거”, 포항공대 석사 학위논문 1997