

슈퍼커패시터를 이용한 전동차량 회생 에너지 저장 시스템의 제어기법

노세진, 이진목, 손경민, 최재호
충북대학교

A Control Method of Electric Railway Vehicle Recycle Energy Storage System Using Supercapacitor

Sejin Noh, Jinmok Lee, kyoung min son, Jaeho Choi
Chungbuk National University

ABSTRACT

It is possible to suppress voltage drops, power loading fluctuations and regeneration power lapses for DC railway systems by applying an energy storage system. Recently the electric double layer capacitor (EDLC) of the rapid charge/discharge type has been developed and used in wide ranges. The on board energy storage system with supercapacitor for railway vehicles presented in this paper seems to be a reliable technical solution with an enormous energy saving potential. In this paper, an efficient charge and discharge control method of a bidirectional DC-DC converter using the supercapacitor is proposed.

1. 서론

기존 국내 6,000량 이상의 전동차량이 운행되고 있다. 이중 95% 이상의 차량은 회생이 가능한 시스템이며 단일 전동차에서 발생하는 회생에너지의 양은 차량 추진시 소비되는 전력의 40~45%에 해당한다. 같은 회생에너지는 인접한 차량의 감속과 역행이 동시에 발생하는 경우에는 회생에너지를 활용할 수 있으나, 인접한 차량의 역행과 제동이 일치하지 않는 경우 또는 운행시각이 길어서 변전소의 가선구간에 에너지를 흡수할 차량이 존재하지 않는 경우, 가선의 전압을 상승시키는 요인이 된다.^{[1][2]}

본 논문에서는 전동차량에서 그림 1과 같은 경제적인 양방향 DC/DC 컨버터와 응용분야가 점차 확대 되어가는 슈퍼커패시터를 이용하여 전동차가 감속시 순간적으로 발생하는 회생에너지를 효율적으로 슈퍼커패시터에 저장하였다가 역행시 필요한 에너지를 공급해주는 전력 제어기를 제안하고 이를 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인한다.

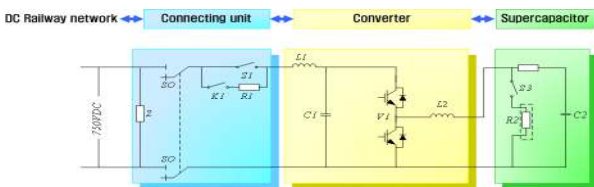
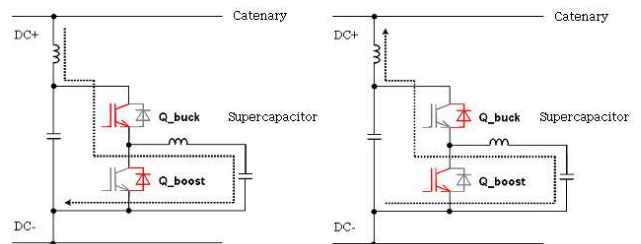


그림 1 양방향 DC/DC 컨버터
Fig. 1. Bidirectional DC/DC converter.

2. 에너지 저장장치 구성방식

2.1 양방향 DC/DC 컨버터

Supercapacitor 또는 Electrical Double-Layer Capacitor라 불리는 Supercapacitor는 재래식 전해콘덴서와 신형 2차 전지가 갖지 못하는 영역에서 고유한 성능 특성을 가지는 차세대 회생 에너지 저장시스템으로, 전극과 전해질 사이에 형성되는 단위셀에 전극의 양단에 수 볼트의 전압이 가해지면 전해액 내의 이온들이 전기장을 따라 이동하여 전극 표면에 흡착한 후 발생하는 전기 화학적 매커니즘에 의해 작동되는 에너지 저장 시스템이다. 그림1은 이러한 슈퍼커패시터와 양방향 DC/DC 컨버터를 이용한 에너지 저장 시스템을 나타내었다. 양방향 DC/DC 컨버터는 회생에너지에 의해서 가선 전압이 정격 가선 전압보다 높으면 그림 2(a)의 벡 컨버터가 동작하여 가선에서 슈퍼커패시터로 회생에너지가 전달되는 충전모드로 동작하게 된다. 이와 반대로 전동차가 역행을 하면 가선전압이 정격 가선 전압보다 낮아지면 양방향 DC/DC 컨버터는 그림 2(b)의 부스트 컨버터가 동작하여 슈퍼커패시터에 저장된 에너지를 가선에 공급하는 방전모드로 동작하게 된다.^{[3][4]}



(a) Buck mode (b) Boost mode

그림 2 양방향 DC/DC 컨버터 동작 모드

Fig. 2. Bidirectional DC/DC converter operation mode.

3. 양방향 DC/DC 컨버터의 제어기

전제 제어 시스템은 2개의 제어기로 구성 되어 있으며, 초기 슈퍼커패시터에 충전 전압이 10% 미만일 경우 충전모드로 초기 슈퍼커패시터의 전류를 일정하게 제어하는 충전모드와 가선 전력을 안정화하는 전력모드구성 되었다. 모드 선택은 가선에서 변동되는 회생에너지와 소모되는 에너지를 계산으로 모드가

결정된다. 그림 3은 제안하는 양방향 컨버터의 제어방법을 나타내는 블록선도이다.

3.1 충전모드

충전모드 제어기는 하나의 전류와 전압 제어 루프로 구성되었다. 전류제어기에 의해서 슈퍼커패시터 전류는 일정하게 유지하기 위해 필요한 전압지령이 만들어진다. 이때 소프트 스타트가 동작하게 되는데, 초기 슈퍼커패시터의 상태가 이론적으로 단락회로로 등가화 되기 때문에 전류는 무한대에 가까운 전류를 제한하기 위해 사용된다. 초기에 약 1-1.2초 정도 최소펄스로 시작하여 일정전압으로 충전된 후 지령전류로 충전하게 된다. 여기서 소프트 스타트 시간을 길게 두면 전류의 상승을 줄일 수 있지만 정 전류 충전 영역으로 가는 시간이 길어지게 된다. 반대로 소프트 스타트 시간을 줄이게 되면 전류의 상승이 커지지만 정 전류 충전영역으로 가는 시간은 짧아지게 된다.

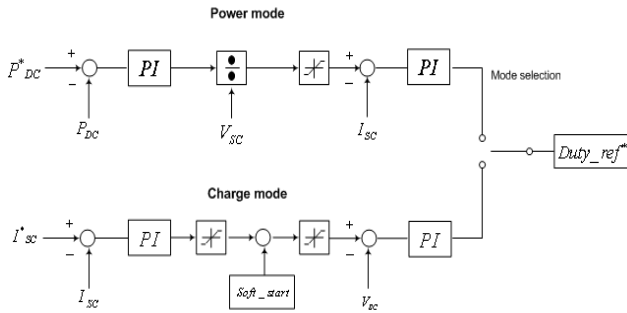


그림 3 제안하는 양방향 DC/DC 컨버터의 제어 블록선도
Fig. 3. Block diagram of proposed bidirectional DC/DC converter control scheme.

3.2 전력모드

전동차량에 의해서 순간적으로 발생한 회생에너지와 역행시 필요한 에너지를 전력제어기에 의해서 효과적인 제어가 가능하다. 이때, 슈퍼 커패시터의 충전전압이 정격의 50%이상인 경우로 전력제어는 가선의 전력계산을 바탕으로 일정 전력을 유지하는 것이 목적이다. 전력 제어기는 하나의 전력제어와 전압 제어 루프로 구성 되었으며, 가선 지령 전력과 실제 시스템의 전력 값을 비교하여 가선 전력을 일정하게 유지하기 위한 필요한 전압지령을 만든다. 전력제어기는 가선의 필터 커패시터의 용량과 가선 전압으로 전력을 계산하기 때문에 전력에 대한 에러 값은 공통항인 필터 커패시터의 용량을 제거하고 살펴보면 가선의 전압의 제공의 값을 가지게 된다. 따라서 전력제어기 동작시 가선은 일정한 DC 전압으로 유지된다.

4. 축소 모델 시뮬레이션 결과

축소 모델 시뮬레이션을 이용하여 전동차량에 의해서 순간적으로 변동하는 가선 전압을 슈퍼커패시터를 이용하여 가선 전압을 안정화 시키는 제어기법의 타당성을 검증하고자 한다. 그림 4는 PSiM 시뮬레이션 툴을 이용한 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼커패시터의 축소 모델 시뮬레이션이다. 축소 모델 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표1과 같다.

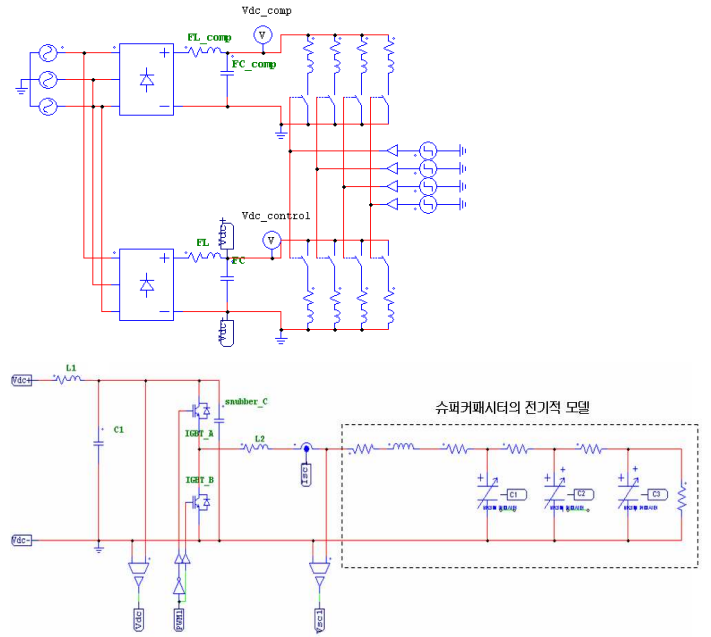


그림 4 축소 모델 시뮬레이션
Fig. 4. Reduction model for simulation.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters.

항 목	사 양
DC 가선 전압	750V
슈퍼커패시터 정격 전압	45.8V
인덕턴스	3mH
슈퍼커패시터 용량	165F
스위칭 주파수	5KHz

4.1 슈퍼커패시터의 전기적 모델

일반적인 커패시터는 직렬저항(ESR)과 병렬저항(ESP)으로 구성할 수 있다. 하지만 이는 실제 슈퍼커패시터의 전기적인 응답을 나타내지 못하며, 좀 더 정확한 슈퍼커패시터의 전기적 응답을 나타내기 위해서 전기 화학적 메커니즘을 기본으로, 슈퍼커패시터는 서로 다른 시정수를 가진 수많은 병렬 RC 전송라인으로 모델링 되어야 한다. 그림 5와 같이 3개의 전송라인의 커패시터는 전압 의존성을 반영하기 위해서, 고정 커패시터 C와 전압상승에 따라서 비선형적으로 증가하는 전압 의존 커패시터 C_v로 모델링 되었다. 슈퍼커패시터의 등가회로 모델을 이용하여 실제 슈퍼커패시터의 각각의 파라미터를 실험적인 방법으로 계산하여 축소 모델 시뮬레이션 하였다.

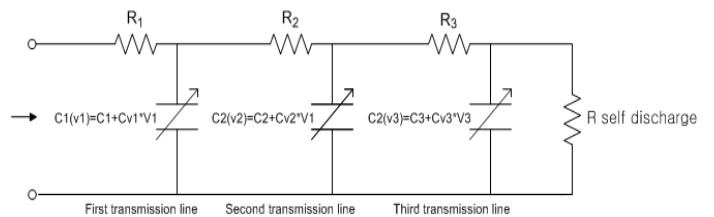


그림 5 슈퍼커패시터의 등가회로 모델
Fig. 5. Equivalent circuit model of supercapacitor.

4.2 시뮬레이션 결과

축소모델 시뮬레이션을 이용하여 그림 6과 같은 충전모드 시뮬레이션 하였다. 초기 1s는 소프트 스타트 제어를 통해 30A 정 전류 충전을 하지 못하지만 전류의 상승이 IGBT 사양의 범위에 있는 54A로 제어가 되는 모습을 볼 수 있다. 초기 소프트 스타트 충전을 완료 후 전류제어기를 동작시켜 전류 지령인 30A를 잘 추종하는 모습을 보여주고 있다. 그림 7은 가선전압을 변동하여 시뮬레이션 한 결과를 보여준다. 양방향 DC/DC 컨버터를 사용하지 않는 경우 가선 전압이 순간적으로 떨어지지만 양방향 DC/DC 컨버터 사용한 경우 DC 가선 전압이 일정하게 유지하고 있음을 볼 수 있다. 이때 슈퍼커패시터에서 DC 가선으로 방전하는 전류는 방전 전류 지령을 잘 추종하고 있음을 확인 할 수 있다.

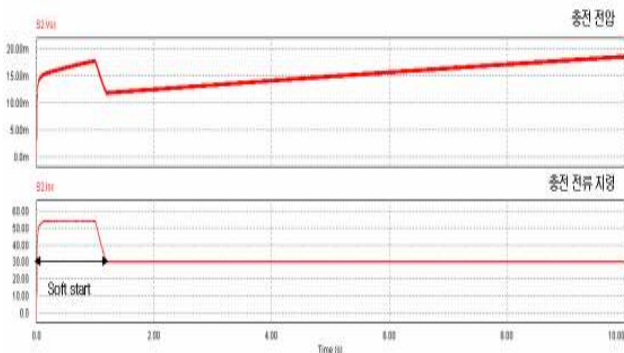


그림 6 충전모드 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation result in charge mode.

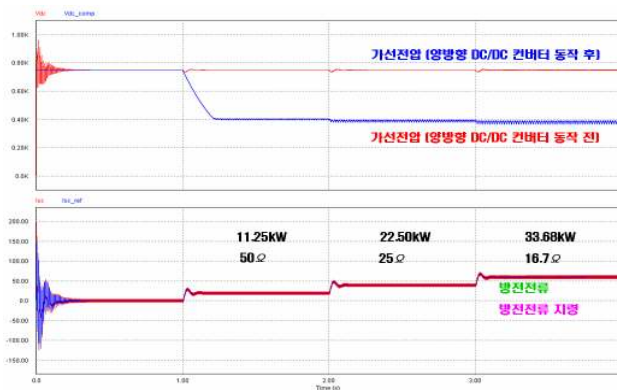


그림 7 전력모드 시뮬레이션 결과
Fig. 7. Simulation result in Power mode.

5. 실험결과

축소모델 모의실험으로 그림 8과9의 실험 결과를 얻었다. 충전모드 실험에서 초기에 약 1-1.2초 정도 최소펄스로 시작하여 일정한 전류 충전으로 일정한 전압으로 슈퍼커패시터 전압이 상승한 것을 알 수 있다. 전력모드 실험은 축소 모델 시뮬레이션과 동일하게 DC 가선 전압을 변동하여 실험 하였다. DC 가선 전압이 순간적으로 떨어지지만, 에너지 저장 장치에 저장된 회생에너지가 DC 가선전압에 공급되기 때문에 가선전압 변동이 적다는 것을 알 수 있다.

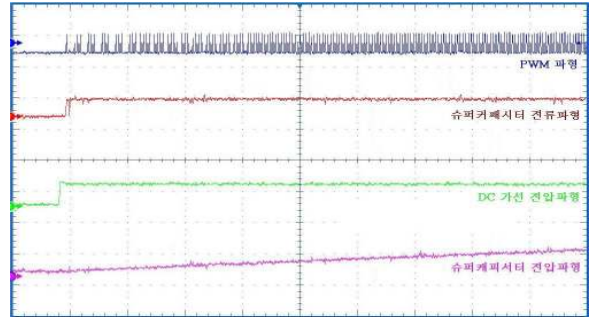


그림 8 충전모드 실험 결과
Fig. 8. Experimental result in charge mode.

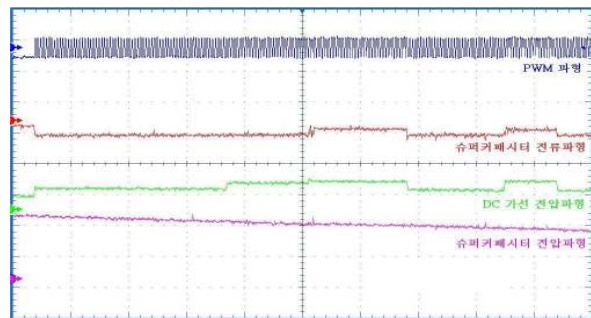


그림 9 전력모드 실험 결과
Fig. 9. Experimental result in power mode.

6. 결론

본 논문은 전동차량에서 발전제동으로 저항에서 열로 소비된 환경을 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼커패시터를 이용하여 회생 에너지를 저장하고 역행시 필요한 에너지를 다시 공급함으로써 경제적인 효과와 DC 가선 전압 안정화를 얻을 수 있고, 이를 효율적으로 제어하는 제어기법을 제안 하였다. 제안하는 방식은 양방향 DC/DC 컨버터와 슈퍼커패시터를 이용한 축소 모델 시뮬레이션 및 축소모델 모의실험으로 타당성을 입증하였다.

본 연구는 산업자원부와 한국산업기술재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과임

참고 문헌

- [1] 김길동, 김종대, 이한민 "전동차 회생 에너지 저장 시스템 개발에 관한 연구," 한국철도학회학술발표대회 논문집, pp. 24-28, 2005.
- [2] 김길동, 이한민 "전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술," 한국조명전기설비학회 논문집, 제20권, 제2호, pp. 10-15, 2006.
- [3] B.J. Arnet and L.P. Haines, "High power DC-to-DC converter for supercapacitors," Electric Machines and Drives Conference, pp. 985-990, 2001.
- [4] 박찬홍, 김중윤, 조기현, 장수진, 이병국, 원충연 "철도차량 시뮬레이터를 이용한 능동회생 양방향 DC-DC 컨버터 설계," 전력전자학술대회논문집, pp. 166-168, 2007.