

철도차량 시뮬레이터를 이용한 능동회생 양방향 DC-DC 컨버터 설계

박찬홍, 김종윤, 조기현, 장수진, 이병국, 원충연
성균관대학교

Design of Active Regenerative Bidirectional DC-DC Converter Using Electric Railway Simulator

Chan-Heung Park, Jong-Yoon Kim, Ki-Hyun Cho, Su-Jin Jang
Byoung-Kuk Lee, Chung-Yuen Won
SungKyunKwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 직류 지하철 급전시스템에서 발생하는 회생전력을 활용하기 위한 회생전력 제어용 양방향 DC-DC 컨버터 및 EDLC(Electric Double Layer Capacitor)를 이용한 양방향 DC-DC 컨버터의 효율적 충·방전 제어 알고리즘을 제안하였다. 가선전압의 변화에 따른 제어 방법을 제안함으로써 회생전력의 발생으로 인한 가선전압의 상승을 안정적으로 제어할 수 있도록 하였고, 실측된 가선전압과 동일한 직류 급전시스템의 모의가 가능한 가선전압 모의장치를 사용하여 철도차량용 양방향 DC-DC 컨버터의 효율성을 검증하였다.

1. 서론

1500[V] 직류철도 시스템은 전기에너지를 사용하는 대표적인 대중교통 수단으로 수많은 현대인들에게 편리함을 주는 유용한 이동수단이다. 근래에 직류 철도 시스템에서 에너지의 재활용에 관한 연구의 중요성이 증대되면서 직류철도의 회생제동 구간 시 발생하는 회생전력을 재활용하는 연구가 활발히 진행 중이다. 본 논문에서는 직류철도의 회생전력을 제어하는 방법 중 한 가지인 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장 시스템의 구현을 위하여 회생전력의 충/방전 제어를 담당하는 양방향 DC/DC 컨버터의 설계 및 제어 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 양방향 DC-DC 컨버터의 제어 알고리즘을 적용하고 직류가선 전압이 안정화 되어 직류철도 시스템의 안정도를 향상 시켰음을 확인하였다.^{[1][2]}

2. 양방향 DC-DC 컨버터의 설계

2.1 양방향 DC-DC 컨버터의 구성

기존의 다양한 양방향 컨버터의 토폴로지 중 본 논문에서는 Half-Bridge 타입의 비절연형 컨버터를 설계하였다.

Half-Bridge 타입의 컨버터는 인덕터와 커패시터를 1개만 사용하여 소자 수를 줄일 수 있고 스위치의 전압, 전류 정격이 다른 토폴로지에 비하여 작으며 인덕턴스 값을 작게 설계할 수 있다는 장점들을 갖는다. 그림 1은 본 논문에서 설계된 Half-Bridge 타입의 양방향 DC-DC 컨버터의 구성을 나타내고 있다.^{[3][4]}

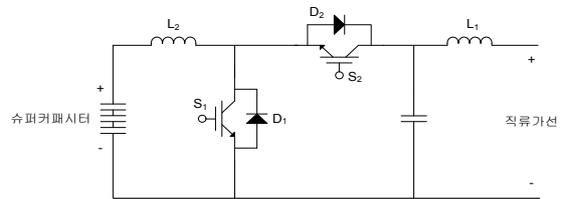


그림 1 Half-Bridge type 양방향 컨버터
Fig. 1 Half-Bridge type bidirectional converter

2.2 양방향 DC-DC 컨버터 동작모드

양방향 컨버터의 동작모드는 슈퍼커패시터의 충전모드와 방전모드로 나누어 그 동작을 살펴볼 수 있다.

2.2.1 충전모드

회생전력의 발생으로 인해 가선전압이 상승하게 되면 양방향 컨버터는 벡(Buck) 컨버터로 동작하여 상승된 과도 전력을 슈퍼커패시터에 저장한다. 그림 2는 충전모드일 때의 양방향 컨버터의 동작을 나타내고 그림 3은 충전모드 시의 전력 흐름도를 나타낸다. 그리고 식 (1)은 충전모드 동작시의 입출력 방정식을 나타낸다.

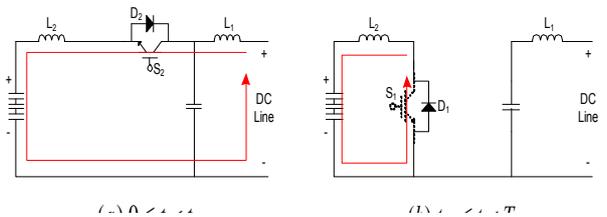


그림 2 양방향 DC-DC 컨버터의 충전모드 동작
Fig. 2 Charging operation of bidirectional converter

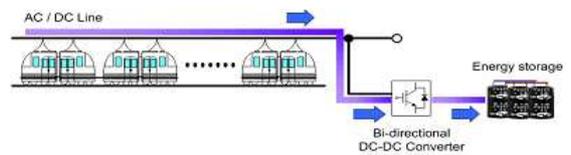


그림 3 충전모드에서의 전력흐름
Fig. 3 Power flow of charging mode

$$(V_o - V_s)DT_s = V_s(1-D)T_s \quad (1)$$

2.2.2 방전 모드

동일 시간대에 철도차량의 운행이 증가되면 직류가선전압은 하강하게 된다. 이 경우에는 슈퍼커패시터에 저장된 에너지를 직류가선으로 방전하여 가선전압을 유지하게 된다. 이 경우 양방향 컨버터는 부스트(Boost) 컨버터로 동작하여 에너지를 방전한다. 그림 4는 방전모드일 때의 양방향 컨버터의 동작을 나타내고 그림 5는 방전모드 시의 전력 흐름도를 나타낸다. 그리고 식 (2)는 방전모드 동작시의 입출력 방정식을 나타낸다.

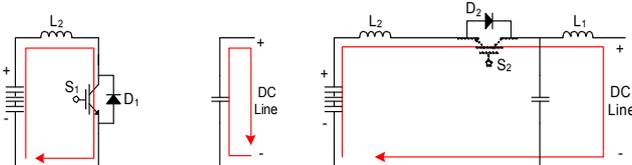


그림 4 양방향 DC-DC 컨버터의 방전모드 동작
Fig. 4 Discharging operation of bidirectional converter

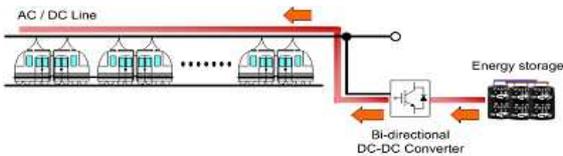


그림 5 방전모드에서의 전력흐름
Fig. 5 Power flow of discharging mode

$$V_s \cdot DT_s = (V_o - V_s) \cdot (1 - D) T_s \quad (2)$$

2.3 양방향 DC-DC 컨버터의 설계사양

본 시스템에서 설계한 양방향 컨버터의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 양방향 컨버터의 설계 사양
Table 1 Design specifications of bidirectional DC/DC converter

최대 방전전력	4 [kW]
슈퍼커패시터 뱅크의 전압범위	50~100 [V]
슈퍼커패시터 뱅크의 최대전류	50 [A]
양방향 컨버터의 입력전압	311 [V]
양방향 컨버터의 입력전류	10 [A]
스위칭 주파수	10 [kHz]

3. 양방향 DC-DC 컨버터 제어알고리즘

본 논문에서는 슈퍼커패시터의 특성을 이용한 양방향 컨버터의 제어알고리즘을 제안한다. 본 알고리즘에서는 슈퍼커패시터의 초기 충전시간을 고려하였다. 전철 변전소의 급전이 개시되고 가선전압이 기준전압보다 작은 구간 동안은 급전이 유지된다. 그리고 가선전압이 기준전압보다 상승을 하는 경우는 컨버터가 충전모드로 동작을 시작하여 슈퍼커패시터에 에너지를 저장하게 된다. 만약 슈퍼커패시터의 최고 허용전압 이상으로 가선전압이 상승한다면 충전모드는 종료되고 배류모드를 통하여 에너지를 소진한다. 반대로 가선전압이 기준전압보다 작아지는 경우에는 양방향 컨버터가 방전모드로 동작을 하여 슈퍼

커패시터에 저장된 에너지를 직류가선으로 방전한다. 그리고 다시 회생모드 동작으로 인하여 가선전압이 상승하게 되면 변전소 출력을 차단하고 충전모드로 돌입하며 이와 같은 동작이 가선전압의 변동에 따라 반복되게 된다. 그림 6은 논문에서 제안한 알고리즘에 대한 제어 블록도를 나타낸다.

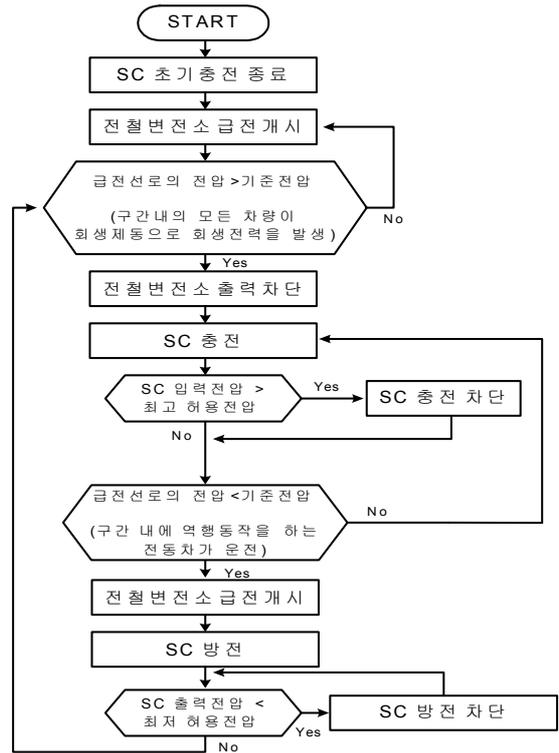


그림 6 양방향 컨버터 제어 블록도
Fig. 6 Control block diagram of bidirectional converter

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 Psim을 이용하여 양방향 컨버터를 포함한 회생에너지 저장시스템을 모의 하였다. 그림 7은 전체 블록도를 나타낸다.

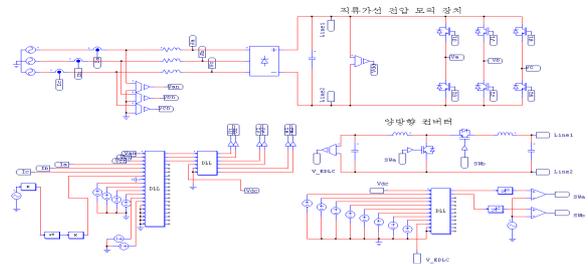


그림 7 시뮬레이션 구성도
Fig. 7 Configuration of simulation

표 2는 시뮬레이션 조건이며, 그림 8은 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 양방향 컨버터의 동작으로 인해 가선전압이 안정화되었고 슈퍼커패시터를 통하여 잉여 회생 에너지가 저장되었음을 확인할 수 있다.

표 2 시뮬레이션 조건
Table 2 Simulation conditions

3상 입력전압	선간전압 220[V _{rms}]
충/방전 조건	가선전압 365[V]이상 충전 가선전압 360[V]이하 방전 (방전 전압 359[V])
저항기 동작 조건	가선전압 365[V] 이상이며 EDLC 전압이 100[V]이상

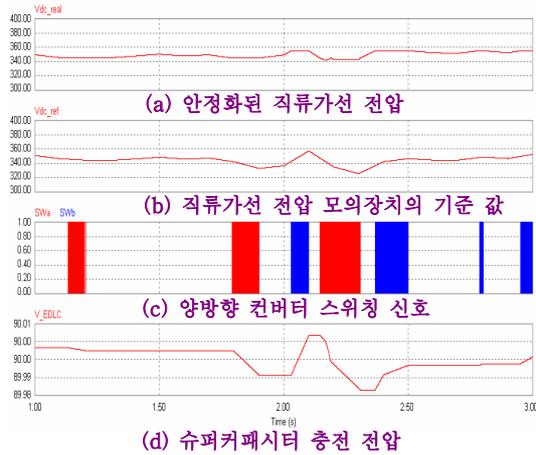


그림 8 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Simulation result

5. 실험결과

그림 9는 양방향 컨버터의 충전모드시 슈퍼커패시터 충전전압을 나타내고 그림 10은 방전모드의 결과를 나타내고 있다.

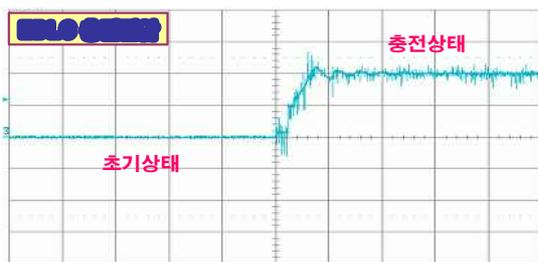


그림 9 충전모드 실험(I)
Fig. 9 Charging mode experiment(I)
(50V/div, 1s/div)

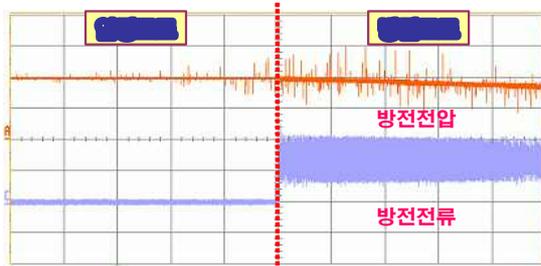


그림 10 방전모드 실험(II)
Fig. 10 Discharging mode experiment(II)
(50V/div, 20A/div, 2s/div)

그림 11은 본 시스템을 통하여 안정화된 가선전압의 파형을 나타낸다. 실험 결과를 통하여 충전모드에 의해 잉여 회생에너지로 인해 상승된 가선전압이 안정화됨을 확인하였다. 그리고 급격한 부하증가로 인한 가선전압의 하강시 양방향 컨버터의 방전모드 동작은 안정적인 전력공급을 수행하여 가선전압의 하강 현상을 제한할 수 있음을 확인하였다.

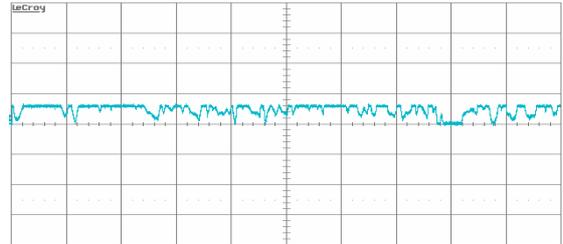


그림 11 안정화된 직류가선전압
Fig. 11 Stable DC line voltage
(15V/div, 10s/div)

6. 결론

본 논문에서는 직류철도의 회생에너지를 효율적으로 사용하고 가선전압의 안정화를 구현할 수 있는 양방향 DC-DC컨버터와 제어 알고리즘을 제안하였고, 시뮬레이션과 실험을 통하여 제안된 시스템의 동작을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 시스템이 실제 직류철도 시스템에 적용될 경우 효율적인 회생에너지의 활용이 기대된다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] MinChul Kim, "A study of utilizing regenerative energy in DC traction system by using energy storage equipment" A master's thesis for a degree in Sungkyunkwan University, Suwon, Korea, 2006
- [2] JinSang Jo, SangMin Jung,, JinHee Lee, SeWan Choi, and SooBin Han, "A Control Method of Bidirectional DC-DC Converter for Fuel Utilization and Durability Improvement in Fuel Cell Vehicles" The transactions of the Korean institute of power electronics, pp. 428-435, Korea, October, 2005
- [3] F. A. Himmelstoss, "Analysis and Comparison of half-bridge Bidirectional DC-DC Converters", IEEE PESC Conf. Rec., Vol. 2, pp. 922-928, 1994.
- [4] M. Cacciato, F. Caricchi, F. G. Capponi and E. Santini, "A Critical Evaluation and Design of Bidirectional DC/DC Converters for Super-Capacitors Interfacing in Fuel Cell Application", IEEE IA Conf. Rec., Vol. 2, pp. 1127-1133, 2004.