

에너지저장장치 연계용 회생에너지 컨버터 토폴로지 특성 분석

김대용*, 정호성*, 김형철*, 박가우**
한국철도기술연구원*, (주)지필로스**

Characteristics Analysis of Regenerative Energy Converter Topology associated with Energy Storage System

Daeyong KIM*, Hosung Jung*, Hyengchul Kim*, Gawoo Park**
Korea Railroad Research Institute*, G-Philos**

Abstract - 전동열차에서 생성된 회생에너지를 에너지저장장치(Energy Storage System)에 바로 저장하기에는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 Super Capacitor를 적용한 컨버터설계 및 시뮬레이션을 하였다. 분석 결과 각 토폴로지의 문제점으로 인해 Super Capacitor의 제거와 배터리의 용량을 증가하여야 한다는 결론을 얻었다.

1. 서 론

최근 화석에너지 채굴 기술이 발달함에 따라 기존에 활용하지 못하던 셰일가스 및 셰일오일의 채굴이 이뤄지고 있지만 한정된 자원임에는 변함이 없다[1]. 또한 원자력에너지마저 최근 후쿠시마 원전, 사고에 의해 위험성이 부각되면서 선진국들은 신재생에너지를 활용한 대체자원의 개발과 에너지절감, 효율적인 운용 등에 관심을 기울이고 있다.

국내에서도 에너지를 절감하기 위해 노력하고 있으며 그 일환으로 철도교통에서는 회생에너지를 활용한 에너지 절감에 관심을 두고 있다. 국내에서 운행되고 있는 대부분의 전동열차는 회생에너지를 발생시킬 수 있는 시스템 구조로 운행되고 있다. 회생에너지는 열차정차 시 발생하게 되며 문제점으로는 일시적인 전차선전압 상승으로 인한 장애발생과 전동차의 수명단축 등이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존에는 변전소 직접송전 방식과 에너지 단순저장 방식, 전동차량 내 충전방식을 사용하였으나 손실문제로 최근에는 에너지저장장치를 활용하여 전압상승 억제와 손실문제를 해결하고 있다[2]. 에너지저장장치의 종류는 배터리, 흐름전지, 수소기반, 초전도 자기, 슈퍼커패시터, 플라이휠 정도가 있으며 도시철도 역사 내에서 활용할 저장장치이기에 배터리 저장장치를 선택하였다. 배터리는 리튬이온과 납산, 니켈카드뮴, 나트륨 황 등이 있지만 본 논문에서는 리튬이온배터리를 대상으로 설계하였다[3]. 리튬이온배터리는 에너지 밀도와 효율이 높으며 폭넓게 적용되고 있다. 하지만 리튬이온배터리는 짧은 시간동안 발생하는 수백 kV의 대용량 전력을 충전하기 위한 저장매체로는 적합하지 않은 점이 있어 보완해줄 장치가 필요하다[4].

따라서 본 논문에서는 도시철도 역사의 회생에너지를 리튬이온배터리 저장장치에 저장하기 위해 기존의 문제를 보완하여 대용량 전력을 충전하기 위한 컨버터 토폴로지를 설계 및 시뮬레이션을 통하여 비교 분석 하려 한다.

2. 회생에너지 컨버터 설계 및 시뮬레이션

2.1 회생에너지 시스템 구성

그림 1은 회생에너지 시스템의 구성을 나타낸다. 회생에너지 시스템의 발전원은 전차이며 발생하는 회생에너지는 컨버터에서 강압하여 1차적으로 Super Capacitor에 충전을 하게 된다. Super Capacitor에서 충전이 완료된 후 방전을 하게 되며 방전되는 전류는 배터리에 저장하게 된다. 회생전력은 철도역사 1개소 배차간격 5분을 기준하였으며 발생하는 전력량은 10초간 최대 500[kW]로 회생제동 시 10초간 발생하게 되는 전력을 약 90초간 평활화하여 배터리에 저장하는 것을 목적으로 한다. 배터리의 용량은 200[kWh]로 설정하였기에 충전 전류가 정격 충전전류를 초과할 경우 반복적인 충전으로 인해 배터리의 수명감소가 일어날 수 있어 Super Capacitor를 통한 완충충전을 하였다. 표 1은 차량 회생에너지 용량 산정값을 나타낸다. 회생에너지 컨버터 토폴로지로는 Interleaved Buck Converter에 Super Capacitor를 결합하는 방식과 Isolated Full Bridge Converter에 Super Capacitor를 결합하는 방식으로 설계하였다.

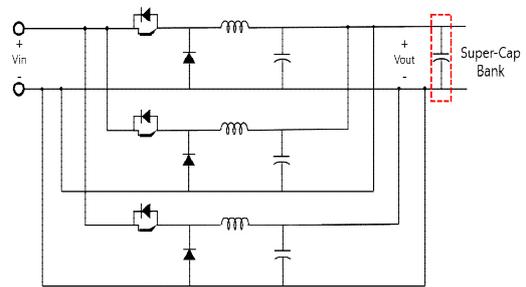


<그림 1> 회생에너지 시스템 구성

<표 1> 차량 회생에너지 용량 산정표

절감목표 용량	1,000[kWh/일]	회생컨버터 용량	500[kW]
정격전압	1500[Vdc]	Super Cap. 용량	2,079 [F]/125V
전압범위	900~1800[Vdc]	Super Cap. 수량	33개
회생전력량	55.6[kWh]	Cap. 방전기용량	90[kW]
회생전력 발생량	1,000[kWh/일]	18시간 가동 기준	

2.1.1 인터리브드 벅 컨버터 (Interleaved Buck converter)

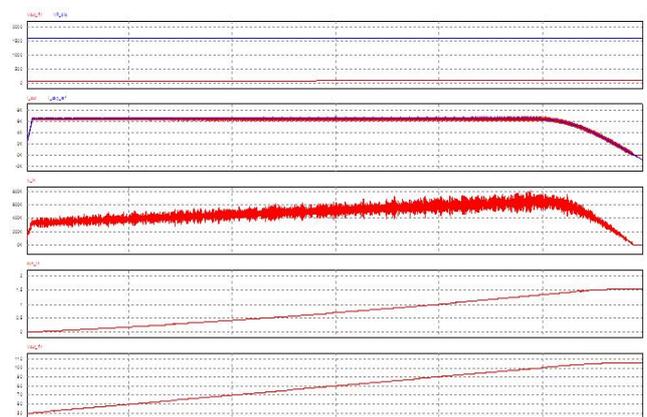


<그림 2> 인터리브드 벅 컨버터 전력 회로도

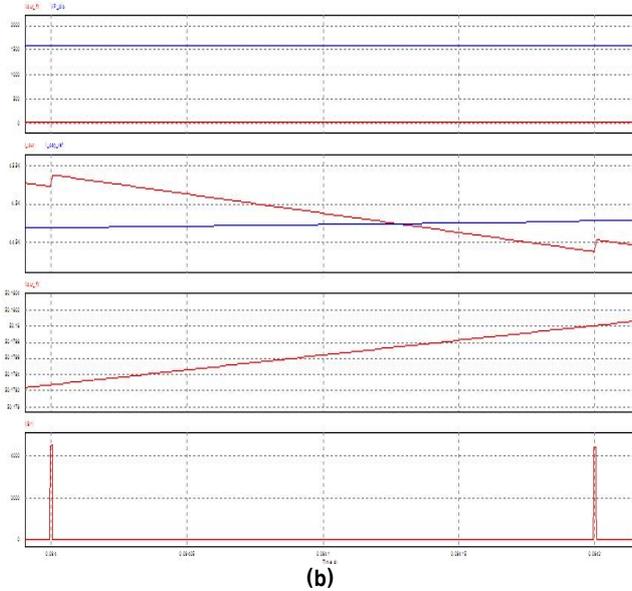
그림 2는 인터리브드 벅 컨버터의 전력 회로도이다. 인터리브드 컨버터는 배터리와 컨버터 사이의 입력 전류의 리플을 감소시켜 직류단의 전압 및 전류의 리플을 감소시켜 효율 상승을 유도하고, 능동 소자의 용량과 사이즈를 줄이기 위한 효과를 얻을 수 있다[5-6].

그림 3(a)는 시뮬레이션 결과이다. 초기에 Super Capacitor에 충전이 되며 후반부에 다시 방전이 되고 있다. 첫 번째 그래프를 보면 입력전압 1600[V]이며 출력되는 전압은 50~100[V]으로 나오는 것을 알 수 있다. 두 번째 그래프에서 충전전류 제한에 의해 출력전류는 6500[A]로 나오며 Super Capacitor에 충전되는 전류는 정류가 된 것을 나타낸다. 10초간 충전이 이루어지고 있으며 이후 방전을 하고 있다. 그림 3(b)는 확대된 파형이다.

시뮬레이션 결과 듀티 비가 매우 작은 범위(최대 2000[V] : 50[V] = 0.025)에서 운전이 요구되며 Super Capacitor와 비 절연 및 소자 단락 시 Capacitor에 고전압이 인가된다는 문제가 있다.

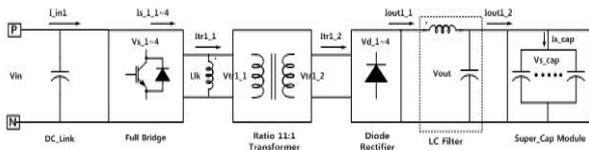


(a)



〈그림 3〉 벡 컨버터 시뮬레이션 결과

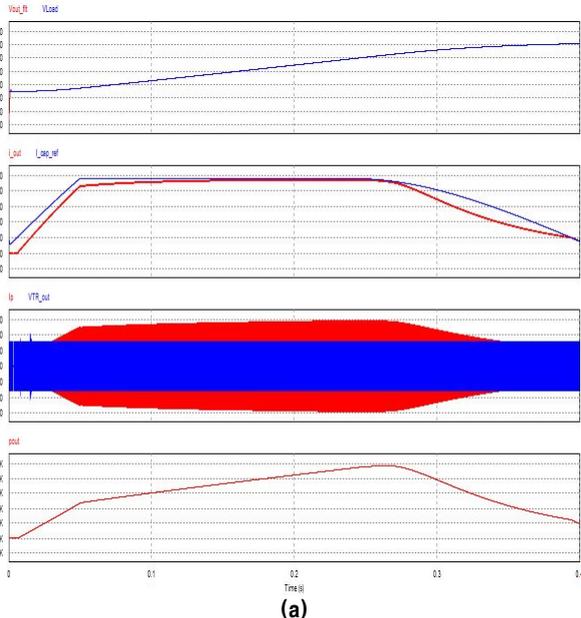
2.1.2 절연형 풀 브릿지 컨버터 (Isolated Full Bridge Converter)



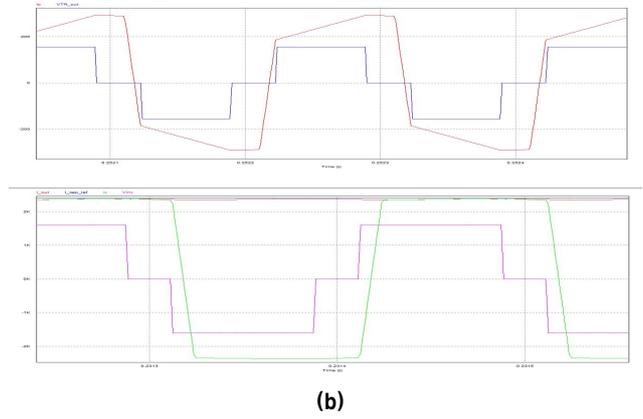
〈그림 4〉 절연형 풀 브릿지 컨버터 전력 회로도

제안한 컨버터의 경우 배터리의 용량이 200[kWh]인 상태에서 순간적으로 발생하는 500[kWh] 용량의 회생에너지를 곧바로 배터리에 충전시킬 경우 정격 충방전을 이상의 전류가 반복적으로 충전되게 되므로 배터리의 수명을 감소시킬 우려가 있다. 따라서 이를 완충시킬 수단으로 그림 4와 같이 3병렬 풀 브릿지 컨버터와 Super Capacitor를 통한 완충 충전 방식을 선택하였다.

전차선 가선과 Super Capacitor의 절연 방식으로 165[kWh]급 3병렬 구성이 필요하며 그림 5의 시뮬레이션 결과를 보면 입력전압은 1600[V]에 충전전류 제한에 의해 출력전류는 2400[A], 출력전압은 50~100[V]가 나오는 것을 알 수 있다. Super Capacitor 용량은 10[F]이며 충전시간은 0.3초이다. 그림 4(b)는 그림 4(a)를 확대한 파형이다.



(a)



(b)

〈그림 4〉 풀 브릿지 컨버터 시뮬레이션 결과

1,800[Vdc] 이상의 전차선 가선전압을 스위칭 제어방식을 통해 약 50[Vdc] 정도의 낮은 전압으로 변환하는 방식으로 상대적으로 효율이 높아 비용이 저렴하고 부피가 작은 장점이 있으나 전력변환 비율이 너무 높다는 문제가 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 Super Capacitor를 적용한 Interleaved Buck Converter와 Isolated Full Bridge Converter를 설계 및 시뮬레이션을 하였다. 정격 충방전을 넘지 않아 과전류 충전으로 인한 배터리 수명감소는 없을 것이다. 하지만 두 토폴로지는 듀티 비의 운전이 매우 작은 범위에서 요구된다는 점과 비 절연 및 소자 단락 시 Capacitor에 고전압이 인가된다는 문제, 전력변환 비율이 너무 높아 현실적으로 구현이 힘들다는 점이 있다. 따라서 배터리의 용량을 증가하여야 한다는 결론이 나왔다.

향후 배터리의 용량증가에 따른 컨버터 토폴로지를 비교하여 문제점을 개선 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박진경, “전기요금 절감을 위한 에너지 저장 시스템 적정 정격출력의 최적 충방전 제어에 관한 연구”, 2014 대한전기학회 전력기술부문회 추계학술대회 논문집, 102-104, 2014
- [2] 박가우, “ESS 연계형 회생에너지시스템”, 전기의 세계, 제 63권 제 3호, 26-29, 2014
- [3] 신성장동력산업정보기술연구회, “국내외 에너지저장장치(ESS) 산업 현황과 비즈니스 전략”, 산업경제리서치, 491p, 2014
- [4] 신철준, “배터리 수명 개선을 위한 슈퍼커패시터의 병렬 운전 시스템 개발”, 전력전자학회 2014년도 하계학술대회 논문집, 39-40, 2014
- [5] 이우중, “5kW 배터리 충전기용 양방향 3상 인터리브드 DC-DC 컨버터 설계 및 실험”, 전력전자학회 논문지, 제16권 제3호, 227-233, 2011
- [6] 서현욱, “3상 인터리브드 벡컨버터의 해석 및 설계”, 전력전자학회 2011년도 학술대회 논문집, 13-14, 2011