

직류 도시철도 시스템 에너지 효율 향상 및 안정화를 위한 슈퍼커패시터 에너지 저장장치 활용 방안 연구

Supercapacitor Applications for System Stabilization and Efficiency Improvement on DC Railway System

Jiyoung Song*, Kyebyung. Lee*, Hansang Lee*, Gilsoo Jang*, Sae-hyuk Kwon*,
Changmu Lee**, Hanmin Lee**, Gildong Kim**
송지영*, 이계병*, 이한상*, 장길수*, 권세혁*, 이장무**, 이한민**, 김길동**

Abstract

In this paper, a simulation for the stability of the catenary voltage through charging and discharging by introducing an energy storage system in the railway system and the efficient usage of restoration energy has been performed. In order for the simulation, a simple railway model with an appropriate control technique has been introduced. The catenary voltage area is divided into two areas with voltage control and an area with normal operation and current control is performed to satisfy current limit of the supercapacitor. We confirmed the energy absorption and emission through the simulation and observed energy efficiency through charging and discharging according to the operation state of the railway.

요 약

본 논문에서는 철도 시스템에 에너지 저장장치를 도입하여 충·방전을 통한 가선전압의 안정화와 회생에너지의 효율적인 사용을 모의 하였다. 이를 위해 간단한 철도 모델과 적절한 제어기법을 제시하였다. 가선전압의 영역을 제어가 필요한 두 영역과 정상운전 영역으로 구분하여 전압제어를 하고, 슈퍼커패시터의 전류제한을 충족시키기 위하여 전류제어를 병행하였다. 이를 바탕으로 에너지의 저장, 방출을 시뮬레이션을 통하여 확인하였고, 철도의 운전 상태에 따라 에너지 충·방전을 통한 에너지 효율을 살펴보았다.

Key words : Regeneration braking, Regeneration energy, Energy Storage, Supercapacitor, DC Railway

* 高麗大學校 電氣電子電波工學部
(School of Electrical Engineering, Korea University)

** 韓國鐵道技術研究院
(Korea Railroad Research Institute)

★ 교신저자 (Corresponding author)
장길수, 고려대학교 전기전자전파공학부 교수
E-mail : gjang@korea.ac.kr

※ 감사의 글
이 논문은 미래도시철도기술개발사업 차세대첨단도시철도
시스템 기술개발 과제의 지원으로 연구되었음
接受日:2009年 02月 04日, 修正完了日: 2009年 3月 30日

1. 서론

최근 세계적으로 유가 및 원자재 가격이 오르면서 에너지 절약 및 효율 향상에 많은 관심이 집중되고 있다. 이는 시스템 손실을 줄이거나, 효율을 향상시킴으로써 그 목표를 달성할 수 있다. 시스템 효율을 향상시키기 위한 방안으로 에너지 저장장치 도입에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 하이브리드 자동차, 전동차가 그 대표적인 예가 될 수 있겠다.

도시철도 시스템은 회생 가능한 에너지양이 상당한 부하중 하나이다. 발생한 회생에너지를 이용하여 감

속(제동)하는 차량으로부터 가속(기동)하는 인근차량에 잉여 에너지를 전달하여 에너지 효율을 높일 수 있다. 하지만 이때의 회생에너지는 소비에너지의 약 30%수준에 머물고 있어 그 효율이 미비한 수준이다 [1]. 이는 회생에너지가 발생한다고 해서 이를 모두 사용할 수 있는 것은 아님을 나타낸다. 인접한 차량의 운전상태가 역행(기동)중이어야하고, 차량 간 이격거리가 멀거나 시적이 길 경우 그때의 잉여 에너지는 차량 내부의 저항을 통하여 열로 소비되어 시스템 효율은 떨어지게 된다.

이와 같이 적절히 제어 되지 않은 회생에너지를 이용할 경우 회생에너지를 효율적으로 사용할 수 없고, 인근 열차로 회생된 에너지는 가선전압의 상승을 가져와 철도 시스템의 각종 기기에 스트레스를 주어 기기의 수명을 단축시킬 수 있다. 이는 에너지 저장장치의 도입을 통해 해결할 수 있다. 차량의 운전 상태에 따라 에너지 저장장치와 도시철도 시스템사이에 적절한 제어를 통하여 회생에너지를 효율적으로 사용할 수 있고, 가선전압을 일정한 범위로 유지시킴으로써 가선 전압의 안정화를 동시에 달성할 수 있다.

본 논문에서는 도시철도 시스템에 에너지 저장장치를 적용하여 회생에너지를 효율적으로 사용할 수 있음을 확인하고, 더불어 가선전압이 일정한 영역 안에서 유지될 수 있도록 제어기법을 소개할 것이다.

II. 본론

1. 에너지 저장장치 [2]

가. SMES

초전도 에너지 저장(Superconducting Magnetic Energy Storage : SMES)시스템은 그림 1과 같이 전기에너지를 코일에 자기에너지 형태로 저장하는 장치이다. 초전도 코일에 직류전류를 흘리게 되면 자기에너지 형태로 에너지를 저장할 수 있는데, 저장된 에너지는 초전도체의 전기저항이 0이기 때문에 영구전류가 흐르게 되고, 손실 없이 영구적으로 에너지를 저장할 수 있게 된다.

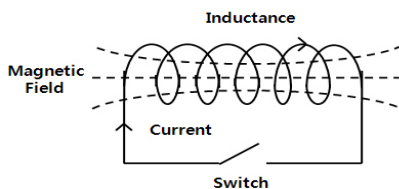


Fig. 1. Principle of SMES

그림 1. SMES의 원리

반복적인 충·방전에 의한 열화가 적어 2차 전지나 콘덴서 등에 비해 수명이 매우 길어 철도 등 사용빈도가 높은 변동부하를 보상하거나 태양광, 풍력 등 변동이 심한 불안정한 전원의 안정화에 기여할 수 있다 [8].

나. 플라이휠

플라이휠 에너지 저장 시스템은 입력되는 잉여 전기 에너지를 플라이휠의 관성을 이용, 회전 운동에너지로 변환하여 저장하고 필요시 전기에너지로 순시에 출력하는 장치로 배터리와 같은 화학적 에너지 저장장치에 대비되는 기계적 에너지 저장방식이다. 전기 화학 반응을 하는 2차 전지에 비하여 급속 충·방전을 반복해도 화학적 노화가 없으며 전기 이중층 커패시터(Supercapacitor)에 비교하여 에너지 밀도 및 전력밀도가 크고 긴 수명 및 야외의 온도환경에 따른 성능저하나 노화가 없는 장점이 있다. 반면 피로보수 부품이 많이 필요한 점, 고속 회전 시 공기저항이 크다는 점, 장시간 에너지 보존이 곤란한 점 등은 추후 개선이 필요한 부분이다.

다. 슈퍼커패시터

Ultracapacitor 또는 Double-Layer capacitor라 불리는 슈퍼커패시터는 재래식 전해콘덴서와 신형 2차 전지가 갖지 못하는 영역에서 고유한 성능 특성을 갖는 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 메커니즘에 의해 작동되는 에너지 저장 시스템이다. 급속 충·방전 및 사이클 수명이 반영구적이고, 폐기물이 거의 없어 환경 친화적이라 할 수 있는 반면 에너지 밀도가 낮은 것은 단점으로 꼽힌다.

2. 철도시스템 및 슈퍼커패시터 모델

가. 철도 모델

본 논문의 목적은 에너지 저장 장치의 적용으로부터 직류 도시철도 시스템의 에너지 효율 향상 및 가선전압의 안정화이다. 따라서 이를 위한 직류 도시철도 시스템 모델은 에너지 저장 장치가 에너지를 저장하거나 방출함에 따라 가선전압에 영향을 미칠 수 있는 모델이면 충분하다.

제동중인 차량에서 발생하는 회생에너지가 가선 측

으로 전달 될 때 그림 2와 같이 철도 차량의 운전 상태(기동-타행-제동-정지)에 따라 가선전압의 상승, 강하가 나타나게 된다. 이를 반영할 수 있도록 직류 도시철도 시스템 모델을 이상 전압원, 직렬저항, 병렬저항으로 구성하였다. 이상 전압원 모델은 일정 전압을 계속 유지하는 이상 전압원이기 때문에, 에너지 저장 장치의 적용으로부터 가선전압의 변화를 모의하기 위해 전압원에 직렬로 저항을 연결하였고, 철도의 부하는 병렬저항으로 구성하였다.

이와 같이 간단한 직류철도 시스템 모델은 실제 직류 철도 시스템을 정확히 반영하지는 못하지만 에너지 저장 장치의 적용에 따른 효과를 분석 및 평가하기 위해서는 충분하다.

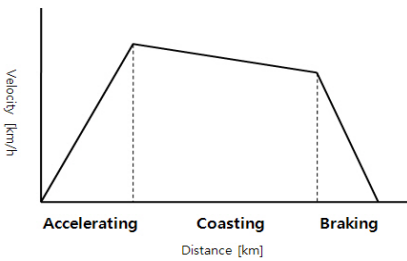


Fig. 2. Operating Characteristic Graph of Railroad
 그림 2. 철도차량의 운전특성 그래프

나. 슈퍼커패시터 사양 [3]

본 논문에서 적용한 슈퍼커패시터 사양은 (주)우진산전에서 개발한 슈퍼커패시터이고, 세부 사양은 표 1과 같다.

Table 1. Feature of supercapacitor

표 1. 슈퍼커패시터 사양

Super capacitor	V_{max}	1,100[V]
	I_{max}	1,600[A]
	C	57.36[F]
	E	26.03[MJ] (7.23[kwh])

다. 양방향 DC/DC 컨버터

양방향 DC/DC 컨버터는 강압 컨버터(buck-converter)와 승압 컨버터(boost-converter)로 구성되어 양방향으로 전력을 전송이 가능하다.

양방향 DC/DC 컨버터는 기본변환기인 강압변환기와 승압변환기 두 대를 직렬로 접속하면 얻을 수 있

다. 도시철도 시스템에 적용한 기본적인 컨버터 구성은 그림 3과 같다.

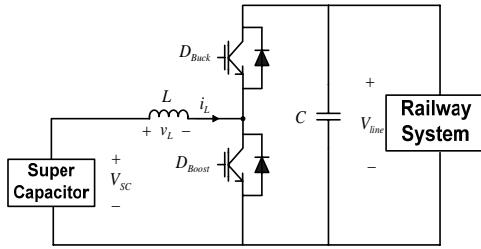


Fig. 3. Basic buck-boost converter circuit
 그림 3. 간략한 벅-부스트 컨버터 회로

강압변환기와 승압변환기 각각의 변환비는 식 (1), (2)와 같고, 최종적으로 강압변환기와 승압변환기를 직렬접속한 양방향 DC/DC 컨버터의 변환비는 두 변환기내의 스위치가 같은 듀티비로 동작한다고 가정하면 식 (3)과 같이 두 변환기 변환비의 곱으로 표현된다.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = D_{buck} \tag{1}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D_{boost}} \tag{2}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{D_{buck}}{1 - D_{boost}} \tag{3}$$

양방향 DC/DC 컨버터를 도시철도 시스템에 적용하면 슈퍼커패시터 단자를 입력으로 보고, 가선 전압측을 출력으로 보았을 때 적절한 듀티비에 따라서 입·출력비를 제어하여 가선전압을 일정범위 내로 유지시킬 수 있다.

특히 Boost 동작일 때 그림 4와 같이 실제 인덕터를 이상적인 인덕터와 동손을 표현하는 저항 R_L 의 직렬연결로 구성하게 되면 조금 더 현실적인 컨버터를 모델링 할 수 있다. 인덕터의 권선저항 R_L 을 반영함으로써 컨버터가 만들 수 있는 최대 전압을 제한한다는 것을 나타낸다.(그림 5)

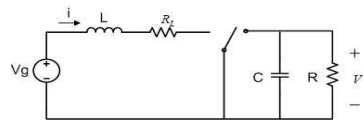


Fig. 4. Boost converter circuit including inductor copper loss R_L
 그림 4. 인덕터 동손 R_L 을 포함한 부스트 컨버터 회로

이는 듀티비를 높일수록 승압효과가 좋아지는 것만은 아니라는 것을 나타낸다. 추후 듀티 지정치(reference)를 출력으로 갖는 PI제어기의 최대값을 정할 때 고려해야할 부분이다 [7].

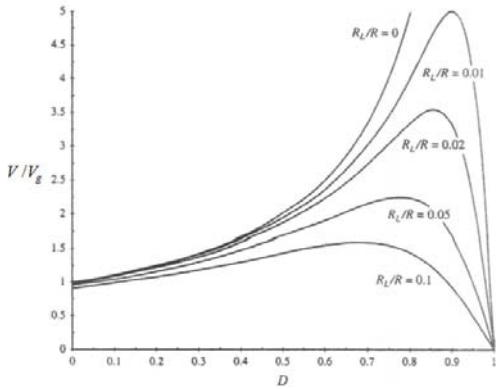


Fig. 5. Voltage gain of boost converter as resistance ratio and duty ratio

그림 5. 저항비와 듀티비에 따른 부스트의 전압 이득

라. 컨버터의 제어

에너지 저장 장치로 이용되는 슈퍼커패시터가 충전 및 방전함에 따라 철도 시스템의 가선전압이 변화될 것이다. 가선전압을 안전한 범위 내로 유지시키기 위해서는 슈퍼커패시터에서 저장 및 방출되어야 할 에너지의 적절한양이 결정되어야 하고, 이는 양방향 DC/DC 컨버터의 전류를 제어함으로써 가능하다. 이를 위해서 양방향 DC/DC 컨버터의 제어기를 그림 6과 같이 PI 제어기를 이용하여 구성하였다.

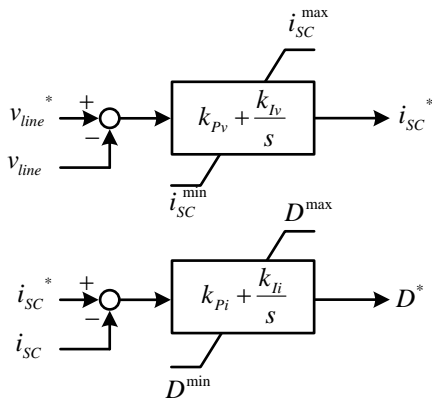


Fig. 6. PI controller block diagram
그림 6. PI 제어기 블록 다이어그램

그림 6에서의 각 PI 제어기는 가선전압을 일정하게 유지하기 위한 전압 제어기와 슈퍼커패시터의 전류를 제어하는 전류 제어기로 구분된다. 가선전압을 제어하는 전압 제어기는 슈퍼커패시터의 전압 지정치와 측정 전압의 차를 입력으로 받아 전류 지정치를 출력한다. 전류를 제한하기 위한 전류제어기는 앞서 출력된 전류 지정치와 측정된 슈퍼커패시터의 전류의 차를 입력받아 양방향 DC/DC 컨버터의 듀티비를 출력한다. 각 PI 제어 블록은 용량에 따른 출력의 한계를 가진다. 이로부터 슈퍼커패시터의 순시 용량에 따른 출력 전류를 제한 할 수 있다. 각 PI 제어기는 식 (4)와 (5)로 표현된다.

$$i_{SC}^* = \left(k_{Pv} + \frac{k_{Iv}}{s} \right) (v_{line}^* - v_{line}) \quad (4)$$

$$D^* = \left(k_{Pi} + \frac{k_{Ii}}{s} \right) (i_{SC}^* - i_{SC}) \quad (5)$$

여기서, i_{SC}^* 는 슈퍼커패시터의 출력전류 지정치, D^* 는 양방향 DC/DC 컨버터의 듀티비 지정치, v_{line}^* 과 v_{line} 은 각각 직류 철도 시스템의 가선전압 지정치와 측정치, i_{SC}^* 과 i_{SC} 는 각각 슈퍼커패시터의 전류 지정치와 측정치이고, k_{Pv} , k_{Iv} , k_{Pi} , k_{Ii} 는 각각 가선전압 및 전류 PI 제어기의 비례이득과 적분이득이다.

그림 6에서 PI 제어기의 입력 값들은 모두 단위값(per unit)으로 변환되어 입력되도록 구성하였다. 이는 시스템 파라미터가 변경되었을 때, PI 제어기들의 각 이득을 변경할 필요 없이 기준값(base)만을 변경함으로써 모델 변경에 쉽게 대응할 수 있는 장점을 가져다준다.

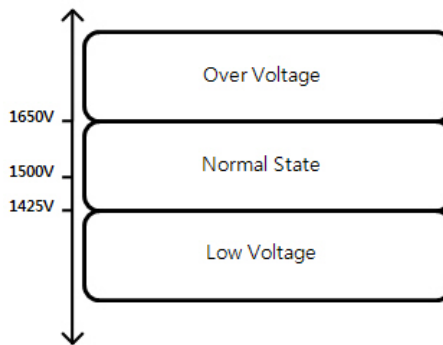


Fig. 7. Voltage division area
그림 7. 전압 구분영역

3. 충·방전 모의 알고리즘

가. 가선전압

본 논문에서 고려한 직류 철도 시스템의 가선전압은 1500V가 정격전압이다. 이로부터 가선전압의 안정적인 범위를 철도기술 연구원에서 제시한 상한10%(1650V), 하한5%(1425V)로 가정하여 그림 7과 같이 가선전압의 과전압, 정상운전, 저전압 영역을 구분하였다.

그림 7을 기준으로 슈퍼커패시터의 양방향 DC/DC 컨버터는 그림 6의 제어기를 통해 가선전압을 안정한 범위내로 제어한다.

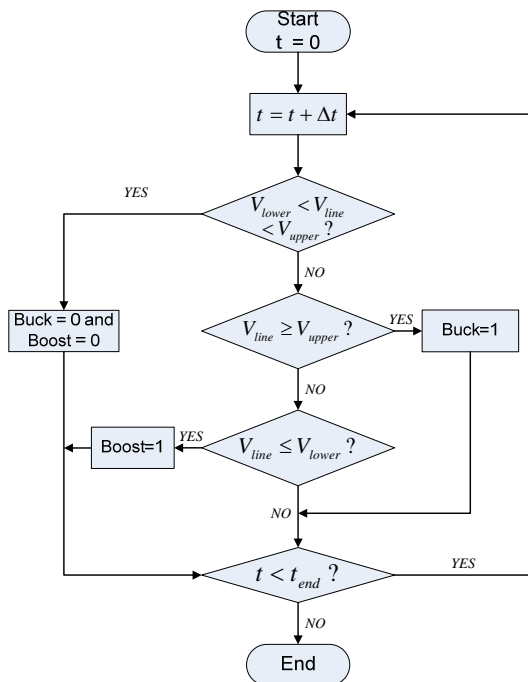


Fig. 8. Control flow chart
그림 8. 제어 순서도

나. 모드 제어신호

슈퍼커패시터는 가선전압이 안정적인 영역에서 운전될 수 있게 저장한 에너지를 충전 또는 방전한다. 이를 위해서는 양방향 DC/DC 컨버터의 운전모드가 결정되어야 한다. 즉, 에너지를 저장하기 위해서는 buck converter 모드로 운전되어야하고, 에너지를 방출하기 위해서는 boost converter 모드로 운전되어야한다.

에너지를 저장하거나 방출하는 기준은 그림 7을 기준으로 가선전압의 상태를 3가지 상태로 분류하고 각

상태에 따라 Buck(충전), Boost(방전), Normal mode의 제어 신호를 표 2와 같이 출력한다. 이에 따른 제어 순서도를 그림 8에 나타내었다. PSCAD/EMTDC (Electro-Magnetic Transients DC)에서는 그림 8과 같은 순서도를 구현할 수 있게 UDC(User Define Component) 환경을 제공한다. 이를 이용하여 3 Input Comparator(Mode Selector)를 개발하였다.

Table 2. Control signals of mode according to voltage state

표 2. 전압상태에 따른 모드의 제어신호

	Over Voltage	Normal State	Low Voltage
Buck	1	0	0
Boost	0	0	1

그림 8의 제어 순서도에 따라 가선전압의 상태에 따른 제어신호가 출력되면 해당 되는 PI 제어기가 동작되고, PI 제어기로부터 가선전압을 제어하기 위한 듀티비가 출력된다. 양방향 DC/DC 컨버터는 듀티비로부터 PWM(Pulse Width Modulation) 기법을 이용하여 IGBT에 점호신호(firing pulse)를 인가함으로써 슈퍼커패시터를 충전 또는 방전하여 가선전압을 제어한다. 이후 가선전압을 계속 모니터링하며 가선전압의 상태에 따라 알맞은 제어신호를 출력한다.

4. 사례연구

본 논문에서는 에너지 저장 장치(슈퍼커패시터)를 직류 도시철도 시스템에 적용하기 위해 각 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 개발하였다.

가. 가선전압 제어 결과

PSCAD/EMTDC에서 제공하는 컴포넌트 중 시간에 따라 출력을 선형적으로 변화시킬 수 있는 컴포넌트를 사용하여 가선전압을 임의로 결정할 수 있다. 가선전압이 안정적인 범위에서 크게 벗어나지 않는다는 가정 하에 최대 1,850V 최소 1,250V 안에서 임의로 변화하는 가선전압을 구성하였다. 에너지 저장장치의 충·방전 효과를 살펴 보기위해 그림 7에서 가정한 상한 10%(1,650V), 하한 5%(1,425V)로 동작영역을 설정하여 가선전압이 변하더라도 설정 영역 안에서 전압이 유지되도록 제어를 할 것이다.

그림 9의 시뮬레이션 결과 파형을 보면 전체 시뮬레이션 시간 4초 동안 변화하는 가선전압에 대해 제어된 전압은 상한(Upper)과 하한(Lower) 사이에서 유지 되는 것을 볼 수 있다.

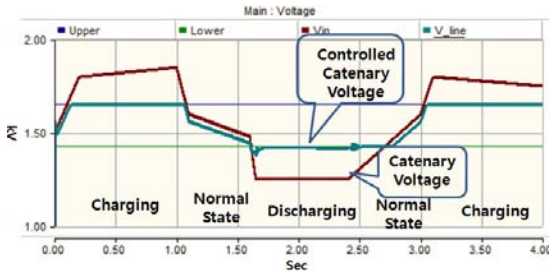


Fig. 9. Results of controlled voltage
그림 9. 전압제어 결과 파형

나. 슈퍼커패시터 전류 제어 결과

본 논문에서는 철도부하를 동력에 관련된 부하와 그렇지 않은 부하로 구분하였다. 동력과 관련된 부하 전류는 가선전류와 함께 표현하였고, 그렇지 않은 부하는 별도의 부하전류로 표현하였다.

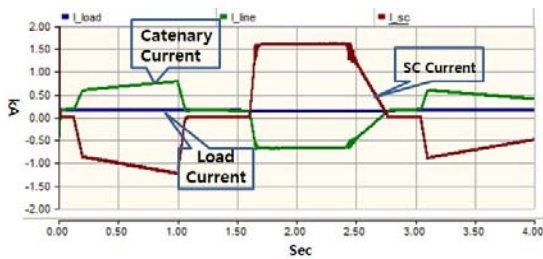


Fig. 10. Results of controlled current
그림 10. 전류제어 결과 파형

그림 10과 같이 슈퍼커패시터로 유입 또는 유출되는 전류에 따라 충·방전 모드를 확인할 수 있다. 또한 1.6초 - 2.5초 부근에서는 전류가 1.6kA로 일정하게 유지가 되는데, 이는 앞서 언급한 PI 제어 블록에서 슈퍼커패시터의 전류제한이 적절히 동작함을 의미한다.

다. 에너지 충·방전

슈퍼커패시터의 충·방전 상태와 함께 슈퍼커패시터 전력의 입·출 상태를 살펴보면 충전 구간에서는

음의 값, 정상운전 구간에서는 0, 방전 구간에서는 양의 값을 갖고 있다. 각각의 구간에서 에너지의 흡수와 방출을 확인할 수 있다.

또한 정상운전 상태에서 슈퍼커패시터의 전력소모는 0인 반면, 가선측의 전력량은 양의 값을 갖고 있다. 이는 철도의 운전상태가 기동 및 제동 구간이 아닌 타행구간에서 가선전압의 변동에 영향을 받지 않는 부하에 의한 전력소모라고 볼 수 있다.

그림 11의 아래 파형은 슈퍼커패시터의 전압을 나타낸다. 슈퍼커패시터의 최대전압은 1,100V로 초기에 약 75%수준으로 충전(800V)되어 있고, 슈퍼커패시터의 최대전압까지 충전되지 않는다는 가정을 한 후 시뮬레이션을 수행하였다.

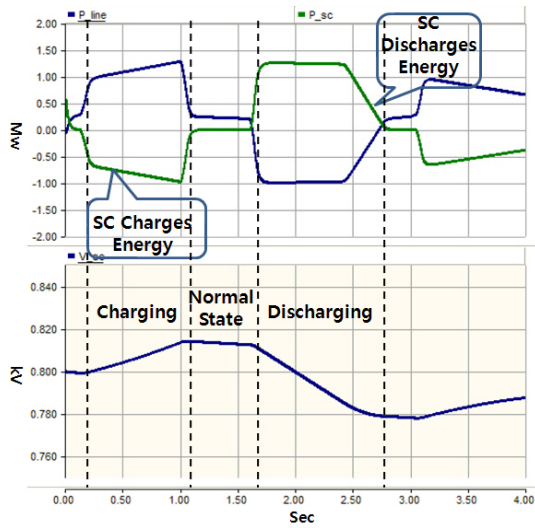


Fig. 11. Results of charging and discharging
그림 11. 에너지 충·방전 결과 파형

III 결론

본 논문은 PSCAD/EMTDC 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 슈퍼커패시터를 적용한 직류 도시철도 시스템의 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 슈퍼커패시터의 적용 효과를 살펴보기 위하여 간략한 철도 모델을 제시하고, 에너지 충·방전을 모의하기 위하여 양방향 DC/DC 컨버터의 제어기를 구성하였다. 이를 이용하여 가선전압이 안정한 범위대로 유지할 수 있도록 양방향 DC/DC 컨버터의 운전을 결정하는 제어 알고리즘을 나타내었다.

시뮬레이션 결과를 통해 에너지 저장장치를 이용하여 가선전압의 안정화와 회생에너지의 효율적인 사용이 가능함을 보였다.

향후 좀 더 정확한 철도모형을 개발 및 도입하여 에너지 저장장치 적용으로 인한 정량적인 이점을 살펴볼 수 있을 것이다. 그와 더불어 단순히 충·방전에 대한 제어뿐만 아니라 포괄적인 도시철도 시스템 제어를 위한 상위제어기 및 시나리오에 대한 연구가 수반되어야 하겠다.

참고문헌

- [1] 김길동, 이한민, 오세찬, “도시철도 회생 에너지 저장 시스템 설치 및 시험”, 대한전기학회 전력기술부문회 전력계통연구회 춘계학술대회 논문집, 2008
- [2] 김길동, 이한민 “전동차 회생에너지 활용을 위한 저장시스템 기술”
- [3] 철도기술연구원, “에너지 저장시스템 기술개발 최종 보고서”, 2008
- [4] D. Grahame Holmes, Thomas A. Lipo, “Pulse Width Modulation For Power Converters”, Wiley, 2003
- [5] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, “Power Electronics”, Wiley, 2003
- [6] E Acha, V.G.Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E.Miller, “Power Electronic Control in Electrical Systems”, Newnes, 2002
- [7] 신휘범, 정세교역, “전력전자공학의 기초I”, 인터비전, 2006
- [8] K.C.Seong, “Superconducting Magnetic Energy Storage System”, Superconductivity and Cryogenics, Vol. 8, No.2, 2006.

저 자 소 개

송 지 영 (학생회원)



2008년 : 한양대학교
전자전기컴퓨터공학부 (공학사)
2008년 2월~현재: 고려대학교
대학원 전자전기공학과
(석사과정)
<주 관심분야> 마이크로 그리드,
에너지 저장 시스템

이 계 병 (비회원)



2006년 : 동의대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
2008년 : 동의대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
2008년 3월~현재 : 고려대학교
대학원 전자전기공학과 (박사 과
정)
<주 관심분야> 에너지 저장 시스템, 마이크로그리드
시스템 모델링 및 제어

이 한 상 (비회원)



2003년 : 고려대학교 전기전자전
파공학부 졸업 (공학사)
2005년 : 고려대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
2005년 3월~현재 : 고려대학교
대학원 전기전자전파공학부 (박사
수료)
<주 관심분야> 전기철도 시스템 모델링, 에너지
저장 시스템

장길수 (비회원)

1991년 : 고려대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
1994년 : 고려대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
1997년 : Iowa State University
전기공학과 (공학박사)
2000년 3월~현재 : 고려대학교
대학원 전기전자전파공학부 교수

<주 관심분야> 분산전원, 에너지 저장 시스템,
전력품질

권세혁 (비회원)

1974년 : 서울대학교
공업교육학과 (공학사)
1976년 : 서울대학교 대학원
공업교육학과 (공학석사)
1980년 : Iowa State
University 전기공학과 (공학석사)
1984년 : Iowa State University
전기공학과 (공학박사)

전기공학과 (공학박사)

1985년 3월~현재 : 고려대학교 대학원

전기전자전파공학부 교수

<주 관심분야> 지역간 tie line 해석, 과도안정도

이장무 (비회원)

1991년 : 한양대학교 전자통신공
학과 졸업 (공학사)
1994년 : 한양대학교 대학원 전
자통신공학과 (공학석사)
2005년 : 고려대학교 대학원 전
기공학과 (박사 수료)
1997년 3월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<주 관심분야> 전기철도 급전계통 설계 및 해석관련
연구, 전기철도 전력품질 예측, 분석 및 대책관련
연구

이한민 (비회원)

1997년 : 중앙대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
2000년 : 고려대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
2006년 : 고려대학교 대학원 전기
공학과 (공학박사)
2000년 8월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<주 관심분야> 도시철도용 에너지저장시스템 개발
및 해석, 교류 전기철도 전력품질 해석

김길동 (비회원)

1986년 : 명지대학교 전기공학과
졸업 (공학사)
1991년 : 명지대학교 대학원 전기
공학과 (공학석사)
2003년 : 명지대학교 대학원 전기
공학과 (공학박사)
1995년 1월~현재 : 한국철도기술
연구원 책임연구원

<주 관심분야> 전동차추진제어 설계 및 해석,
전동차량성능해석