

# 직류철도 회생에너지 저장시스템용 슈퍼커패시터 수명예측

김종윤, 박찬홍, 조기현, 장수진, 이병국, 원충연  
성균관대학교

## Predicting the Lifetime of Super-capacitor for DC Traction Regenerative Energy Storage System

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

### ABSTRACT

Regenerative energy which is generated during brake periods of DC traction might cause malfunction or destruction of rectifier or any other power conversion devices caused the increment of DC line voltage. Regenerative energy storage system using super-capacitor is one of the method to control the DC line voltage safely. And super-capacitor is very important device as energy storage device. Therefore, In this paper, we designed the regenerative energy storage system using super-capacitor and propose the method about predicting the lifetime of super-capacitor established in storage system. According to the this research, we can estimate the proper replacement moment for the existed super-capacitor due to the safety of the system. And improve the reliability of regenerative energy storage system using super-capacitor.

### 1. 서론

슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템은 철도차량에 의해 발생하는 회생전력을 제어하여 에너지 효율을 높이고 가선전압을 안정화 할 수 있는 방법들 중 한 가지로서 슈퍼커패시터의 빠른 충/방전 특성과 높은 기대수명으로 인하여 급변하는 회생전력을 제어할 수 있는 차세대 방법으로 각광을 받고 있다. 본 논문에서는 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템을 구현하고 충전전류에 의한 슈퍼커패시터 बैं크의 내부 발생 열량을 고려하여 에너지 저장장치인 슈퍼커패시터 बैं크의 수명을 보다 정확하게 예측할 수 있는 방법을 제시하고 실험 결과를 통하여 제안된 방법의 타당성을 입증하였다.<sup>[1][2]</sup>

### 2. 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템의 구현

#### 2.1 직류가선전압 모의장치

가선전압의 상승과 하강은 철도차량의 운전곡선에 의한 회생에너지 패턴에 따라 발생된다. 그림 1은 직류철도차량의 일반적인 운전곡선으로서 그림에서 확인할 수 있듯이 기동구간에는 차량이 에너지를 소모하므로 직류가선전압이 하강하고 연

속제동 구간에는 전기적 제동으로 회생에너지가 발생되어 가선전압을 상승시킨다.

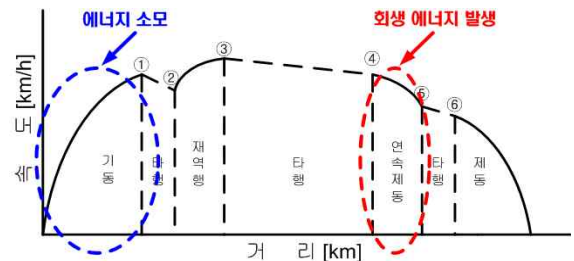


그림 1 직류철도 차량의 일반적인 운전곡선  
Fig. 1 Operating pattern of DC railway vehicles

기동구간과 연속제동 구간은 운전자의 운전패턴이나 각 역의 구배 등의 지역적 조건에 따라 각 호선마다 그리고 각 역마다 다르게 나타난다. 그림 2는 지하철 2호선의 낙성대역의 가선전압의 변화를 측정된 실측 데이터 값이다.

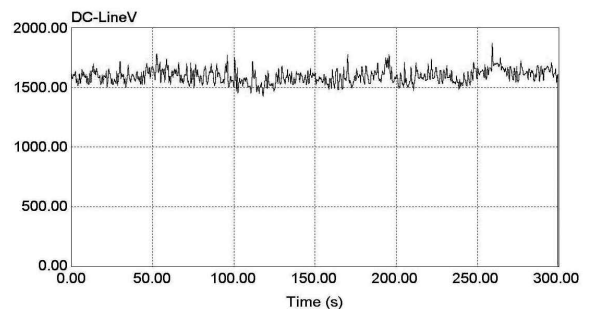


그림 2 지하철 2호선 낙성대역의 가선전압 실측값  
Fig. 2 Real estimated DC line voltage value of Nakseongdae station in line No.2

직류가선전압의 실측 데이터를 시스템에 적용하기 위해서는 별도의 장치가 필요하다. 본 논문에서는 3상 인버터를 이용한 직류가선전압 모의 장치를 구현하여 실측 데이터를 이용하여 회생에너지 저장시스템을 실험할 수 있도록 하였다. 실제 가선전압 무부하 상태 1500V를 350V로 축소하여 모의하였고 3상 220V 교류 입력을 사용하여 축소모형을 구현하였다. 그림 3은 본 논문에서 제안된 직류가선전압 모의 장치를 나타낸다.

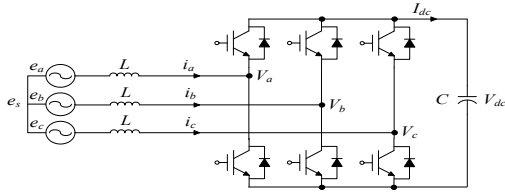


그림 3 직류가선 전압 모의 장치  
Fig. 3 DC line voltage simulator

## 2.2 양방향 DC/DC 컨버터

직류가선전압 모의 장치를 통한 가선전압 입력을 슈퍼커패시터를 통하여 충/방전함으로써 제어할 수 있도록 양방향 전력 수급이 가능한 양방향 컨버터를 설계하였다. 본 시스템에는 비절연형 half-bridge 타입을 사용하였으며 가선전압의 상승 시 벡(Buck)동작으로 슈퍼커패시터에 에너지를 저장하고 가선전압 하강 시에는 부스트(Boost)동작을 통해 가선전압을 안정화 시켜주도록 설계하였다. 그림 4는 양방향 컨버터를 나타낸다.

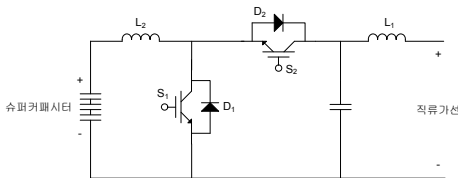


그림 4 제한된 양방향 DC/DC 컨버터  
Fig. 4 Bidirectional DC/DC converter

## 2.3 슈퍼커패시터 뱅크

그림 5는 슈퍼커패시터 뱅크를 나타낸다. 슈퍼커패시터 뱅크는 100[V]를 만들기 위하여 40개의 셀을 직렬로 구성하였고 9[F]의 용량으로 설계되었다. 이는 식 (1)~(2)를 통하여 확인할 수 있다. 표 1은 슈퍼커패시터 뱅크의 파라미터를 나타낸다.

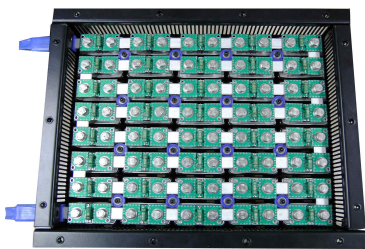


그림 5 EDLC 뱅크  
Fig. 5 EDLC bank

$$\frac{100[V]}{2.5[V]} = 40[ea] \quad (1)$$

$$C = \frac{dt}{\left(\frac{dv}{i} - R\right)} = \frac{15[A] \times 30\text{sec}}{100[V] - 50[V]} = 9[F] \quad (2)$$

표 1 슈퍼커패시터 뱅크의 내부 파라미터  
Table 1 Super-capacitor bank parameters

커패시턴스	16.4 [F]
DC-ESR	19.2 [ $m\Omega$ ]
자기 방전 전압	77.31 [V]

## 2.4 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템

그림 6은 회생에너지 저장시스템의 전체 구성을 나타낸다. 그리고 표 2는 시스템 설계 사양을 나타낸다.

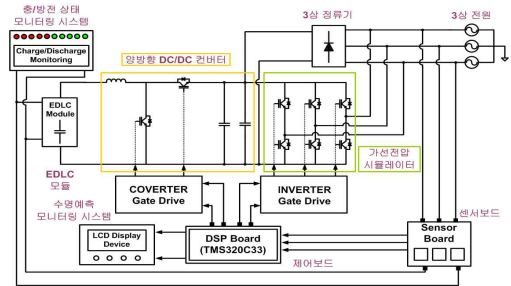


그림 6 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템  
Fig. 6 Regenerative energy storage system using super-capacitor

표 2 양방향 컨버터의 설계 사양

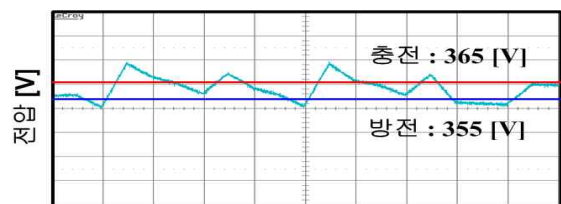
Table 2 Design specifications of bidirectional DC/DC converter

최대 방전전력	4 [kW]
슈퍼커패시터 뱅크의 전압범위	50 ~ 100 [V]
슈퍼커패시터 뱅크의 최대전류	15 [A]
양방향 컨버터의 입력전압	311 [V]
양방향 컨버터의 입력전류	10 [A]
스위칭 주파수	10 [kHz]

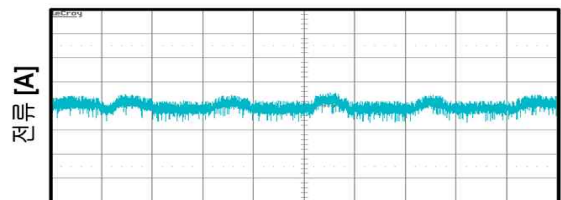
## 3. 슈퍼커패시터 뱅크의 수명예측

### 3.1 실험을 통한 수명예측

그림 7의 (a)는 낙성대역의 가선전압 실측 데이터에 대한 직류가선전압 모의 장치의 출력의 일부분을 나타내고 (b)는 동일 구간의 슈퍼커패시터의 충전전류를 나타낸다. 그림 8은 그림 7 (b)의 FFT 분석을 나타낸다. 충전모드는 가선전압 365[V] 이상인 경우, 방전모드는 355[V]이하인 경우로 실험을 진행하였다.



시간 [s]  
(a) 1s/div, 15V/div



시간 [s]  
(b) 1s/div, 10A/div

그림 7 (a) 직류가선전압 모의장치 출력 확대파형(낙성대역)  
(b) 동일 구간에 대한 슈퍼커패시터 충전전류

Fig. 7 (a) Enlargement waveform of output of DC line voltage simulator(Nakseongdae station)

(b) Charge current of super-capacitor in same period

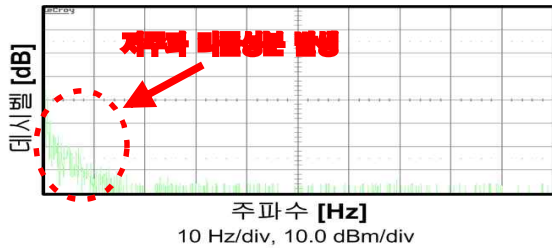


그림 8 충전전류의 FFT 분석  
Fig. 8 FFT analysis of charge current

충전전류에 포함된 저주파 리플성분은 슈퍼커패시터 내부의 온도상승을 초래하므로 저주파 리플 성분에 의한 슈퍼커패시터 내부 온도상승도 고려해야 함을 알 수 있다. 그림 9는 충전전류에 의한 내부 온도변화를 측정하는 실험의 개략도이다.

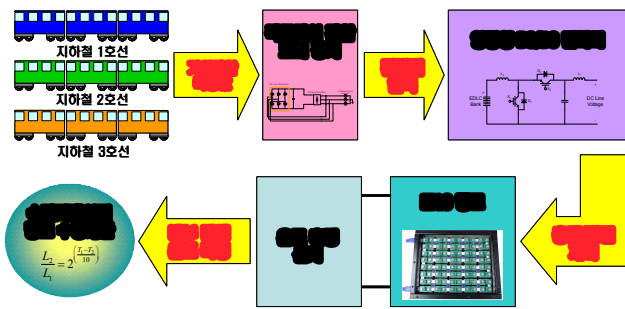


그림 9 수명예측 실험과정  
Fig. 9 Experiment procedure of predicting the lifetime

각 호선의 실측 데이터를 이용하여 슈퍼커패시터 내부의 온도를 측정한 뒤 Arrhenius 방정식을 이용하여 설치 개소에 알맞은 슈퍼커패시터 बैं크의 수명을 계산할 수 있다.

### 3.2 열전달 방정식을 이용한 수명예측

충전전류의 저주파 리플성분에 의한 내부 전력손실을 계산하면 열전달 방정식을 이용하여 수식적 계산을 할 수 있다. 열전달 방정식은 슈퍼커패시터 내부 발생 온도를 외부의 대류와 복사 방열손실을 측정함으로써 유추할 수 있도록 해준다. 식 (3)은 열전달 방정식을 나타내고 식(4)는 대류에 의한 열전달을 나타낸다.<sup>[3][4][5]</sup>

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} [W] \quad (3)$$

$$Q_{conv} = h \cdot S \cdot \Delta T [W] \quad (4)$$

식 (4)에서  $h$ 는 열전달계수,  $S$ 는 커패시터 बैं크의 표면적,  $\Delta T$ 는 온도상승분을 나타낸다. 식 (5)는 복사에 의한 열전달을 나타낸다.

$$Q_{rad} = e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) \quad (5)$$

식 (5)에서  $e$ 는 방사율 (0.85로 가정),  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만의 상수,  $T_{surf}$ 는 슈퍼커패시터 표면온도,  $T_{amb}$ 는 주위온도를 나타낸다. 식 (3)~(5)를 통하여 슈퍼커패시터의 내부온도 변화를 계산할 수 있고 식 (6)을 통하여 최종온도를 계산할 수

있다.

$$T_{element} = T_{amb} + \alpha \cdot \Delta T [K] \quad (6)$$

식 (6)에서  $\alpha$ 는 온도상승계수로서 1.5의 값을 가진다.

최종온도  $T_{element}$ 는 슈퍼커패시터가 설치되는 주변의 온도와 내부의 발생온도의 합으로서  $T_{element}$ 를 식 (7)에 보여진 온도와 수명의 관계식인 Arrhenius 방정식에 대입하여 슈퍼커패시터의 수명을 보다 정확하게 계산할 수 있다.

$$\frac{L_2}{L_1} = 2^{\frac{T_1 - T_2}{10}} \quad (7)$$

## 4. 결론

본 논문은 슈퍼커패시터를 이용한 회생에너지 저장 시스템의 신뢰성을 높이고 슈퍼커패시터 बैं크의 적절한 교체시기를 예측하여 직류철도 시스템의 안전도를 상승시키기 위하여 슈퍼커패시터 बैं크의 수명을 예측하는 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 실제 실험세트를 이용하여 내부 발생온도를 측정하는 방법과 열전달 방정식을 이용하여 내부 온도를 계산하는 방법을 각각 제안하였다. 향후 국내 모든 직류철도 역에 대한 가선 전압 데이터를 이용한다면 본 논문에서 제안한 시스템과 방법을 이용하여 각각의 역에 설치될 슈퍼커패시터 बैं크의 수명을 예측할 수 있을 것으로 예상된다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참고 문헌

- [1] Lai, J.S, Levy, S, Rose, M.F "High Energy Density Double-Layer Capacitors for Energy Storage Applications" Aerospace and Electronics System Magazine, IEEE Volume 7, Issue 4, April 1992 Page(s):14-19.
- [2] Y.H, Kim Director of Product Development, NESSCAP Co. Ltd, Korea "Ultracapacitor Technology Powers Electronic Circuits" Oct 1 2003. Power Electronics Technology Magazine pp 34~39
- [3] 이동춘 "인버터용 전해커패시터의 수명 추정" 최종보고서 영남대학교 전자정보공학부 2000. 9. 기초전력공학공동연구소
- [4] M.L. Gasperi, "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors," IEEE IAS, Annual Meeting, pp. 1042-1047, 1997 October.
- [5] Gasperi, M.L, Gollhardt, N "Heat Transfer Model for Capacitor Banks" Industry Application Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting. The 1998 IEEE Volume 2, 12-15 Oct. 1998 Page(s): 1199-1204 vol.2