

## 슈퍼 커패시터를 이용한 직류철도 회생에너지 저장장치

金鍾潤<sup>†</sup>, 鄭斗溶<sup>\*</sup>, 張水珍<sup>\*\*</sup>, 李秉國<sup>\*\*\*</sup>, 元忠淵<sup>\*\*\*\*</sup>

## DC Traction Regenerative Energy Storage Devices using Super-capacitor

Jong-Yoon Kim, Doo-Yong Jung, Su-Jin Jang, Byoung-Kuk Lee and Chung-Yuen Won

## 요 약

직류철도의 회생제동 시 발생하는 회생에너지는 급전선로의 직류가선전압의 상승에 의해 시스템의 오동작이나 차량 정류기의 파손, 또는 급전 시스템의 전력변환 장치의 고장을 일으키는 원인이 될 수 있다. 슈퍼 커패시터를 이용한 회생에너지 저장장치는 직류가선전압을 안정화 하게하는 방법이다. 본 논문에서는 슈퍼 커패시터 뱅크를 이용하여 직류철도 시스템의 에너지 저장장치를 구현하였고, 지하철 2호선 N역과 S역의 실측값을 이용하여 가선전압이 전동차에 의한 회생에너지 발생에 따른 동작 특성과 슈퍼 커패시터의 충·방전 특성을 확인하였다. 본 논문을 통하여 직류철도 시스템에 설치된 회생에너지 저장시스템용 슈퍼 커패시터 뱅크의 동작 특성을 알 수 있고, 향후 직류철도 모든 변전소의 직류 가선전압 실측 데이터를 이용한다면, 특정 직류철도 운행 구간에 대한 회생에너지 저장장치의 운전특성과 슈퍼커패시터의 용량 및 수명 예측으로 가격을 절감 할 수 있고 전체 시스템의 안정도와 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

## ABSTRACT

Regenerative energy generated by regenerative braking of DC traction can cause the system malfunction or damage to the rectifier, or malfunction of the power conversion device in power supply system by DC Line voltage rise in feeder line. Regenerative energy storage system using super capacitor is one of the ways to stabilize DC line voltage. In this paper, energy storage system of DC traction system using super-capacitor bank is implemented and using the field measurement data of the station N and the station S on the Line 2, the operation characteristics of line voltage caused by regenerative energy of electric trains are verified. Also, charge/discharge characteristics of super capacitor are verified as well. Thus, we can verify the operation characteristics of super-capacitor bank for regenerative energy storage system installed in DC Traction. And if we can use field measurement data of DC line voltage, we have obtained cost reduction. The stabilization of the system will be improved by measuring the operation characteristics of regenerative energy storage system in certain section operated by DC traction and predicting the capacity and lifetime of super-capacitor.

**Key Words** : DC line voltage, DC line voltage simulator, Super-capacitor, Regenerative energy storage system

## 1. 서 론

<sup>†</sup>교신저자 : 정희원, 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부 연구원

E-mail : jy9980.kim@samsung.com

<sup>\*</sup>학생회원, 태양광시스템공학 협동과정 석사 과정

<sup>\*\*</sup>정회원, 효성 중공업연구소 책임연구원

<sup>\*\*\*</sup>정회원, 성균관대 정보통신공학부 조교수

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원, 성균관대 정보통신공학부 교수

접수일자 : 2007. 12. 31

1차 심사 : 2008. 1. 27

2차 심사 : 2008. 3. 25

3차 심사 : 2008. 4. 13

심사완료 : 2008. 4. 16

전기자동차, 지하철전동차에서는 제동시 차량의 운동에너지를 전기에너지로 회수하여 2차 전지나 슈퍼 커패시터에 저장하여 연료를 절약하는 방법이 사용되고 있다. 특히 슈퍼 커패시터에 의해 회생에너지 저장 시스템을 구성할 경우에는 다음과 같은 장점을 갖는다.

첫째, 슈퍼 커패시터의 모듈을 조합함으로써 부하변동(회생 에너지의 변화량)에 따라 가변용량을 만들어 줄 수 있어 능동적인 대처가 가능하다. 둘째, 흡수한 회생에너지를 저장할 수 있으므로 다양한 용도로 활용이 가능하다. 셋째, 회생인버터나 플라이휠 방식 등의 다른 에너지 활용 방식들에 비해서 상대적으로 적은 공간을 차지하여 기존 전철변전소에 건설비 부담을 줄여준다.<sup>[1]</sup>

하지만 일반 커패시터와 달리 매우 큰 충전용량을 갖는 슈퍼 커패시터는 오작동이 발생할 경우 매우 위험하다. 그러므로 직류철도 운행구간에 따른 커패시터의 충·방전 특성을 고려한 수명산출과 용량 산정이 이루어지면 회생에너지 저장시스템의 원가절감과 신뢰성 향상을 할 수 있다.

본 논문에서는 슈퍼 커패시터를 이용한 직류철도 회생에너지 저장장치를 제안하여 각 설치개소마다 다르게 나타나는 직류가선전압에 따라 변화하는 동작특성 및 슈퍼 커패시터 충·방전 특성을 모의하고 에너지 저장장치의 충·방전 제어를 수행하여 각 역마다 다르게 나타나는 가선전압의 동작 특성을 분석하였다.

## 2. 슈퍼 커패시터를 이용한 회생에너지 저장시스템의 구현

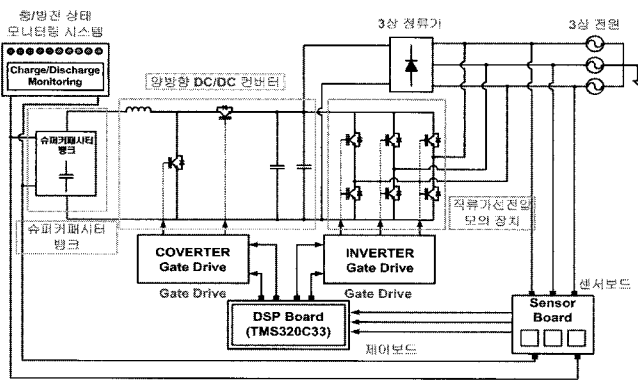


그림 1 회생에너지 저장시스템 구성도  
Fig. 1 Regenerative energy storage system

그림1은 회생에너지 저장시스템의 구성도를 나타내고 있다. 회생에너지 저장시스템은 크게 4부분으로 구성되어 있다. 첫 번째 부분은 직류가선전압 모의 장치이고 두 번째 부분은 슈퍼커패시터 뱅크의 충·방전을 제어하기 위하여 구현된 양방향 DC/DC 컨버터이다. 세 번째는 에너지 저장장치로 사용되는 슈퍼커패시터 뱅크이다. 마지막으로 국내지하철 급전시스템은 12펄

스 다이오드 정류기로 되어 있으므로 본 논문에서는 3상 다이오드 정류기로 표현하였다. 이 정류기는 직류 전동차를 대신하는 가선전압 모의 장치에 전력을 공급한다.

### 2.1 직류가선전압 모의장치

그림 2는 3상 PWM 컨버터로 구현된 직류가선전압 모의 장치의 구성을 나타낸다. 직류가선전압 모의 장치는 3상 전압형 PWM 컨버터로 구성되었으며 리액터, 전력용 스위칭소자, DC link 커패시터 등으로 이루어져 있다. 전원전압에 의해 공급되는 전력은 다이오드를 통해 DC link 측으로 공급되며, DC link 커패시터에 충전된 후 모든 다이오드는 역 바이어스 상태가 된다. 이때 각 스위치가 도통을 하기 시작하여 리액터 L에 역으로 전위차를 형성하고 출력 측에서 전원 측으로 전력 회생이 이루어진다. 직류가선전압 모의 장치의 전원측은 유도성이기 때문에 스위치의 역 병렬 다이오드를 통해 전류는 순간적으로 환류하며 도통하던 스위치를 오프 시킨다. 또한 스위칭 소자는 PWM 변조방식으로 전류의 크기와 위상을 제어하고 전원전류를 정현파에 가깝게 하여 고조파 성분을 제거하고 고 역률 운전이 되도록 한다. 직류가선전압 모의 장치의 DC link 전압이 실측된 가선 전압과 동일한 패턴으로 변동되도록 전원전류  $i_{abc}$ 를 제어한다.

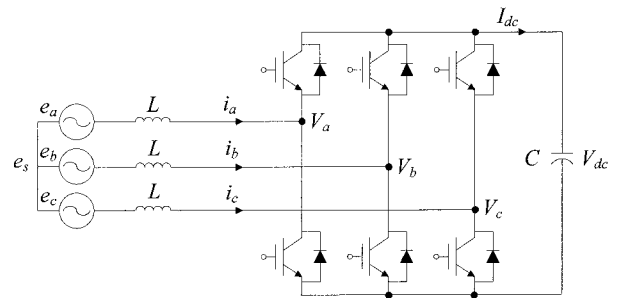


그림 2 직류가선전압 모의 장치  
Fig. 2 DC line voltage simulator

#### 2.1.1 직류가선전압 모의 장치 동작모드

직류철도 급전 시스템에서 전동차가 회생제동 할 경우 회생에너지가 가선전압 측으로 회생되어 가선전압을 상승시키게 된다. 실제 가선전압의 변화를 직류가선전압 모의 장치로 구현하기 위하여 병렬 연결된 DC link 커패시터를 기준으로 직류가선전압의 상승구간과 하강구간으로 동작 상황을 나누어 설명할 수 있다.

그림 3은 직류가선전압의 상승구간 동작모드를 나타

내며, 상승구간에서는 전동차의 회생제동에 의한 회생 에너지 발생으로 가선전압이 일정전압 이상으로 상승하게 된다. 이러한 직류가선전압의 상승구간을 모의하기 위하여 3상 PWM 컨버터는 전원 측의 전력을 이용한 스위칭 동작을 통하여 DC link를 충전시키며 실제 가선전압의 상승 값을 추종하여 실제와 같은 상승구간의 가선전압을 모의한다.

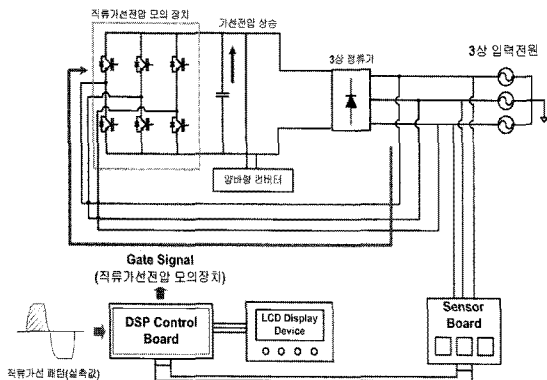


그림 3 직류가선전압 상승 시 동작모드  
Fig. 3 Operation mode when the DC line voltage rising

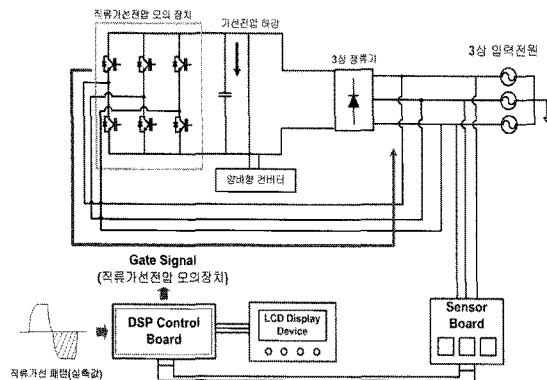


그림 4 직류가선전압 하강 시 동작모드  
Fig. 4 Operation mode when the DC line voltage falling

그림 4는 직류가선전압의 하강구간 동작모드를 나타내며, 동일 변전소 구간에서 역행차가 많아 전동차의 전력소모가 증가하게 되면 가선전압이 일정전압 이하로 하강하는 경우를 나타낸다. 가선전압의 하강구간을 모의하기 위하여 3상 PWM 컨버터는 스위칭 동작을 통하여 DC link에 축적된 에너지를 실제 가선전압의 하강 값에 따라 전원 측으로 돌려보내면 실제와 같은 하강구간의 가선전압을 모의한다.

### 2.2 직류가선전압 모의 장치 제어

직류가선전압 모의 장치의 제어기는 3상 전압형 PWM 컨버터에 공간벡터 PWM 기법과 무효성분 전류(d축전류)와 유효성분 전류(q축전류)를 각각 독립적으로 제어하였다. 또한 직류가선전압 모의장치 구동시 단위 역률을 유지하기 위한 d축 전류와 가변 직류가선 전압을 제어하기 위한 q축 전류제어를 위해 PI전류제어기를 사용하였다.<sup>[2]</sup> 그림 5는 본 논문에서 제안한 직류 가선전압 모의 장치의 제어 블록도이다.

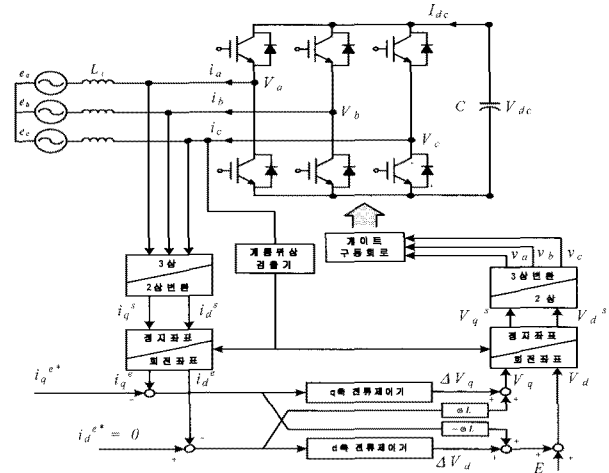


그림 5 직류가선전압 모의 장치 제어 블록도  
Fig. 5 Control block diagram of DC line voltage simulator

### 2.3 양방향 DC/DC 컨버터

가선전압 입력전압은 직류가선전압 모의 장치로부터 양방향 컨버터에 연결된 슈퍼 커패시터를 통하여 충·방전하여 제어된다. 그림6의 양방향 DC/DC 컨버터는 비절연형 하프브릿지 형이며, 가선전압이 상승하면 벡(Buck)동작으로 되며, 슈퍼 커패시터에 에너지를 저장한다. 가선전압 하강 시에는 부스트(Boost)동작을 통해 가선전압을 안정화 시켜주도록 설계하였다.

표 1 양방향 컨버터의 설계 사양

Table 1 Design specifications of bidirectional DC/DC converter

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

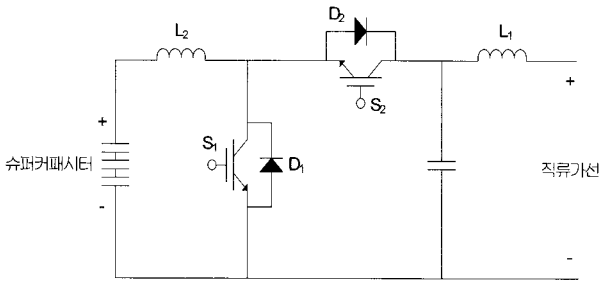


그림 6 제한된 양방향 DC/DC 컨버터  
Fig. 6 Bidirectional DC/DC converter

2.3.1 양방향 DC/DC 컨버터 방전 모드

회생전력이 슈퍼커패시터에 충전된 상태에서 직류가선 전압이 하강하거나 역행 전동차가 지나 가게 되면 슈퍼커패시터에 충전된 전력을 양방향 컨버터를 통하여 직류가선에 공급한다. 양방향 컨버터의 방전모드 동작은 그림 7과 같다.

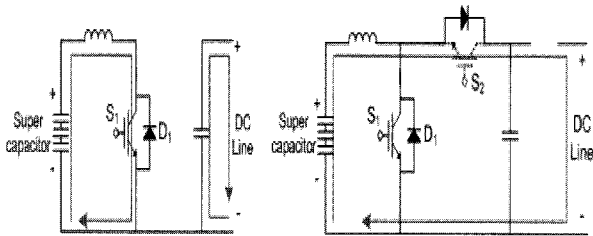


그림 7 양방향 DC/DC 컨버터의 방전모드 동작  
Fig. 7 Discharge mode of bidirectional DC/DC converter

스위치 S1이 도통될 때는 그림 7의 왼쪽 그림과 같이 인덕터에 에너지를 저장하게 되고, 인덕터 과전류는 상승한다. 이때의 인덕터에 인가되는 전압은 슈퍼커패시터전압과 같다. 또한 S1이 off 될 때는 그림 7의 오른쪽그림과 같이 인덕터에 저장된 에너지는 다이오드 D2를 통하여 방전을 하게 되고 인덕터 전류는 감소하게 되며, 이때 인덕터에 걸리는 전압은 슈퍼커패시터전압과 직류가선 전압의 차와 같으며, 인덕터 전압 (VL)의 Vol·sec 평형 조건을 구하면 식 (1)과 같다.

$$V_s \cdot DT_s = (V_o - V_s) \cdot (1-D) T_s \tag{1}$$

수식 (1)로부터 듀티비 관계식은 수식(2)가 된다.

$$D = \frac{V_o - V_s}{V_o} \tag{2}$$

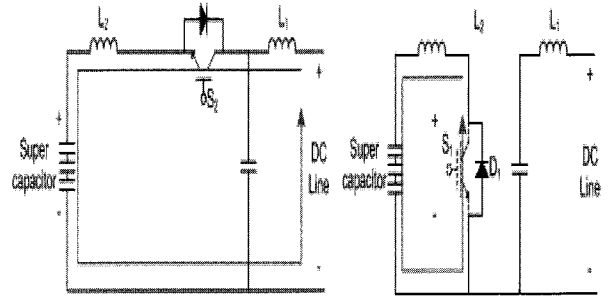


그림 8 양방향 DC/DC 컨버터의 충전모드 동작  
Fig. 8 Charge mode of bidirectional DC/DC converter

2.3.2 양방향 DC/DC 컨버터 충전 모드

회생전력 발생으로 직류가선 전압이 상승함에 따라 양방향 컨버터는 벡(Buck) 모드 동작을 통하여 직류가선 전압의 상승분을 슈퍼 커패시터로 충전하여야 한다. 그림 8은 충전모드의 양방향 컨버터를 나타낸다.

스위치 S2가 on 될 때는 인덕터에 슈퍼 커패시터 전압과 직류가선 전압의 차가 인가되어 인덕터 전류가 상승하고 동시에 슈퍼 커패시터에 회생에너지가 전달된다. 스위치 S2가 off 될 때는 인덕터에 슈퍼 커패시터전압이 역으로 인가되고 다이오드 D2를 통하여 환류하면서 인덕터 전류는 감소하며, 인덕터 전압의 Vol·sec 평형 조건을 구하면 식 (3)과 같다. 식 (3)으로부터 듀티비 관계식은 식 (4)가 된다.

$$(V_o - V_s)DT_s = V_s(1-D) T_s \tag{3}$$

$$D = \frac{V_s}{V_o} \tag{4}$$

2.4 슈퍼 커패시터 뱅크

슈퍼 커패시터 뱅크는 100[V]를 만들기 위하여 40개의 셀을 직렬로 연결하여 구성하였으며, 그림10에 나타내었다.

그림9는 등가 직렬저항성분을 측정하기 위한 실험 파형이며, 그림9와 식(5)을 이용하여 등가 직렬저항을 계산할 수 있다. 표2는 실험에 의한 슈퍼 커패시터 뱅크의 내부파라미터를 나타낸다.

$$ESR = \frac{\Delta V}{I} \tag{5}$$

ΔV : 초기 전압 강하 [V], I : 방전전류 [A]

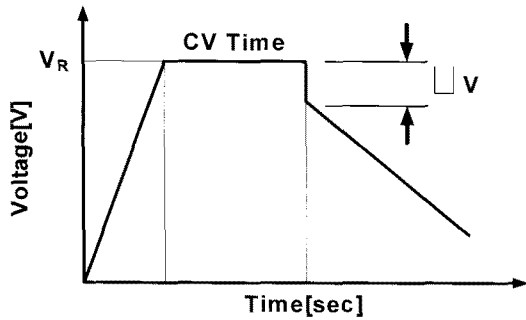


그림 9 슈퍼 커패시터 뱅크의 등가 직렬 저항 측정  
Fig. 9 ESR measurement of Super-Capacitor-bank

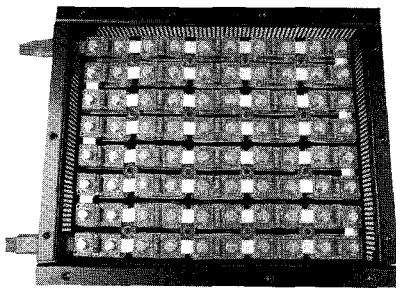


그림 10 슈퍼 커패시터 뱅크  
Fig. 10 Super-Capacitor bank

표 2 슈퍼 커패시터 뱅크의 내부 파라미터  
Table 2 Super-capacitor bank parameters

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

2.4.1 슈퍼 커패시터 뱅크의 수명산출

일반적으로 제조회사에서는 10만회의 사이클을 기준으로 내부저항 값이 두 배가 되고 커패시턴스의 값이 70%가 되었을 때를 수명이 다한 것으로 본다.<sup>[3]</sup>

예상수명시간  
= 규정 수명시간 × 온도계수 × 전압계수

$$\text{온도계수} = 2^{\frac{(T_1 - T_2)}{10}}$$

$T_1$ : 규정온도  
 $T_2$ : 동작온도

(6)

식 (6)은 슈퍼 커패시터의 제조사에서 일반적으로 사용하는 수명산출 식으로서 기대 수명은 전압요소와

온도요소의 영향으로 변화한다.

온도요소는 Arrhenius 방정식으로 표현되며, 이 방정식은 온도가 10°C 감소하면 수명은 2배로 증가한다.

내부 전력손실은 슈퍼 커패시터의 내부 온도상승의 원인이 된다. 직류철도 시스템의 회생에너지 저장장치에 슈퍼 커패시터를 사용하기 위해서는 주변온도 뿐만 아니라 충·방전 전류에 의한 내부 발생온도도 고려해야한다.

슈퍼 커패시터의 충·방전전류에 의한 내부 손실전력은 주울열의 손실이다. 그러므로 주울열 손실을 온도의 변화량으로 변환시켜주는 열전달 방정식이 필요하다.<sup>[4][6][7-9]</sup>

그림 11의 그래프는 슈퍼 커패시터 뱅크의 주울열 손실과 내부 발생온도인  $\Delta T$ 의 시간에 따른 변화를 MATLAB으로 구현하였다.

그림 11의 (a)는 시간에 따른 주울열 손실의 변화이고 (b)는 시간에 따른  $\Delta T$ 의 변화를 나타낸다.

실제 슈퍼 커패시터 뱅크의 내부 전력손실을 계산하여 그림 11의 (a)와 (b)의 교차점과 비교하면 내부 전력손실에 의한 내부 발생온도를 예측할 수 있다.<sup>[4]</sup>

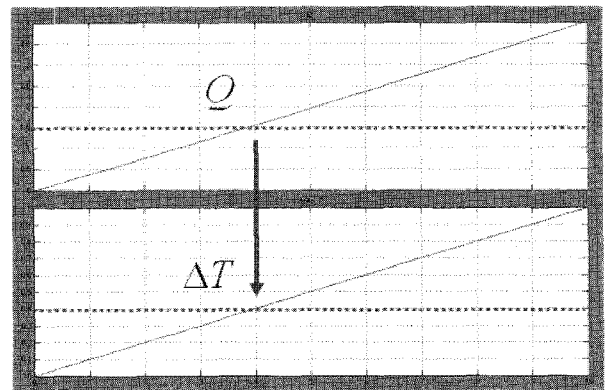


그림 11 대류와 복사에 의한 방열 손실과 내부온도의 변화  
Fig. 11 Radiant heat losses and variation of internal temperature by convection and radiation  
[그래프(a): 1W/div(1-4W) 1s/div(0-10s),  
그래프(b): 2.7°C/div(0-27°C) 1s/div(0-10s)]

3. 시뮬레이션

그림 12은 회생에너지 저장시스템의 구성을 보여준다. 소프트웨어는 PSIM을 사용하여 제안한 직류가선전압 모의 장치를 포함한 회생에너지 저장시스템을 구현하였고, N역과 S역의 가선전압 실측값을 이용하였다.

표 3 시뮬레이션 조건  
Table 3 Simulation conditions

3상 입력전압	선간전압 실효값 311[V]
충·방전 조건	가선전압 210[V] 이상 충전 가선전압 190[V] 이하 방전 (방전 전압 189[V])
저항기 동작 조건	가선전압 210[V] 이상이며, 슈퍼 커패시터 뱅크 전압이 100[V] 이상일 때 과충전 방지목적

표3은 실험실 레벨의 시뮬레이션 조건을 나타낸다.

그림 13를 통하여  $I_d$  전류기준 값은 0으로 제어되고 있고  $I_q$  전류기준 값에 의해 모의 직류 가선전압을 확인하였다.

그림 14는 회생에너지 저장시스템의 동작에 의한 N역의 슈퍼 커패시터 뱅크의 전압변화 파형과 슈퍼 커패시터 뱅크 충·방전 전류를 나타내고 있다.

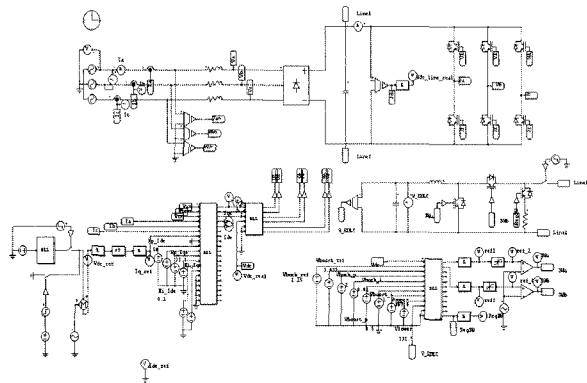


그림 12 회생에너지 저장시스템의 시뮬레이션 구성  
Fig. 12 Simulation of regenerative energy storage system

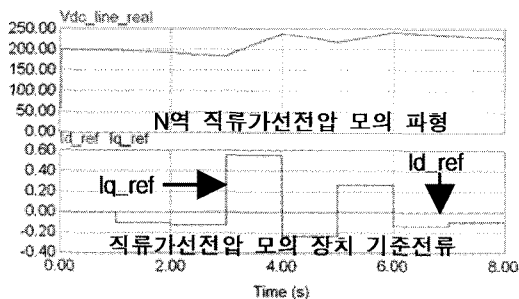


그림 13 N역의 가선전압과 기준전류  
Fig. 13 DC line voltage and current reference of N station

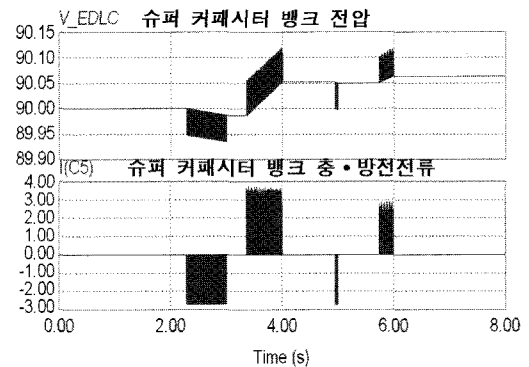


그림 14 N역의 슈퍼 커패시터 뱅크 전압파형과 충·방전 전류파형

Fig. 14 Super-capacitor bank voltage waveforms and charge/discharge current of N station

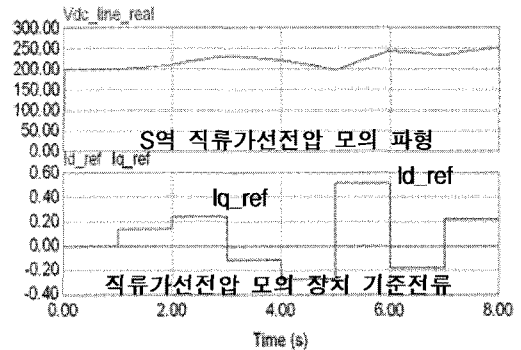


그림 15 S역의 가선전압과 기준전류

Fig. 15 DC line voltage and current reference of S station

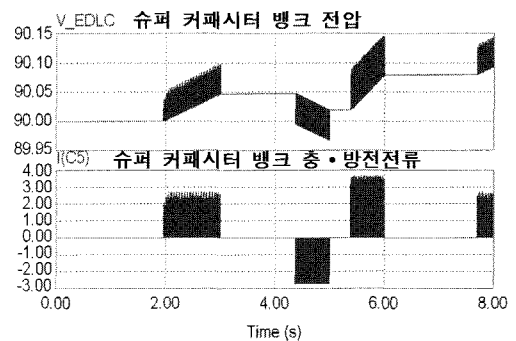


그림 16 S역의 슈퍼 커패시터 뱅크 전압파형과 충·방전 전류  
Fig. 16 Super-capacitor bank voltage waveforms and charge/discharge current of S station

그림 15과 16은 S역의 시뮬레이션 파형이며, 그림 18은 기준전류  $I_d$ 의 기준 값이 0으로 제어하여 상전압과 상전류의 위상이 동일하다.

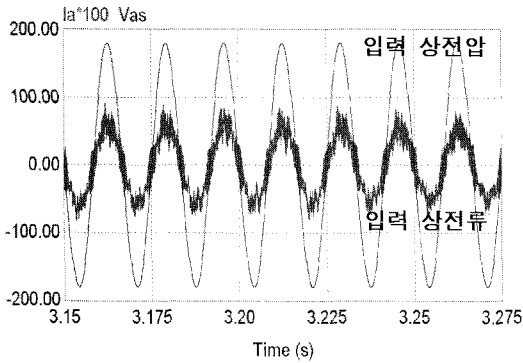


그림 17 입력 상전압과 상전류의 비교 파형  
 Fig. 17 Comparison waveforms of Input phase voltage and phase current

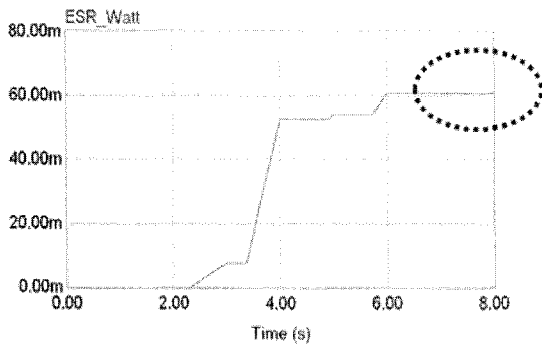


그림 18 N역 가선전압 축소 값을 이용한 슈퍼 커패시터  
 뱅크 내부 전력손실 변화  
 Fig. 18 Internal power losses variation of super-  
 capacitor bank using reduction value of  
 DC line voltage at N station

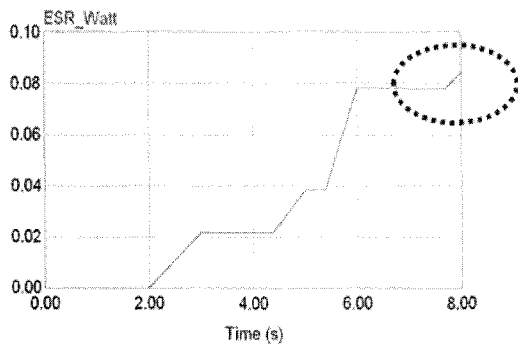


그림 19 S역 가선전압 축소 값을 이용한 슈퍼 커패시터  
 뱅크 내부 전력손실 변화  
 Fig. 19 Internal power loss variation of super-  
 capacitor bank using reduction value of  
 DC line voltage at S station

본 시뮬레이션에서는 슈퍼 커패시터 뱅크의 충·방전전류의 저주파 맥동성분에 의한 내부 전력손실량을 측정하였다. 또한 동일 시간동안 직류가선전압의 변화에 따라 서로 다르게 나타나는 전력손실을 통하여 슈퍼 커패시터의 내부 발생 온도 또한 서로 다르게 나타난다는 것을 확인하였다.

#### 4. 실험 결과

그림 20은 직류가선전압 모의 장치를 포함한 회생에너지 저장장치의 전체외관을 보여준다.

그림 21과 그림 22는 각각 직류가선전압 모의 장치를 통해 출력된 지하철 2호선 N역과 S역의 직류가선전압과 기준전류인  $I_d$ 와  $I_q$ 를 보여준다.

기준전류  $I_d$ 는 0으로 제어가 되고 있으며 기준전류  $I_q$ 에 따라 직류가선전압이 구현된다. 또한 시뮬레이션과 동일하게 직류가선전압 모의 장치의 출력값이 실측값에 추종함을 확인할 수 있다.

그림 23과 그림 24는 각각 지하철 2호선 N역과 S역의 안정화된 가선전압파형과 슈퍼 커패시터 뱅크의 충전된 에너지를 방전하여 가선전압을 안정화 시킨다. 직류 가선전압은 200[V]를 기준으로 회생에너지의 충·방전 범위를 5%로 선정하여 210[V]를 충전전압, 190[V]를 방전전압으로 설정하였다. 가선전압이 210[V] 이상일 때는 여분의 회생에너지를 슈퍼 커패시터 뱅크로 충전을 하여 직류 가선전압을 내려서 기준 직류가선전압으로 운전되도록 한다. 190[V] 이하일 때는 슈퍼 커패시터 뱅크의 충전된 에너지를 방전하여 가선전압을 높여서 기준 직류전압이 되도록 제어한다.

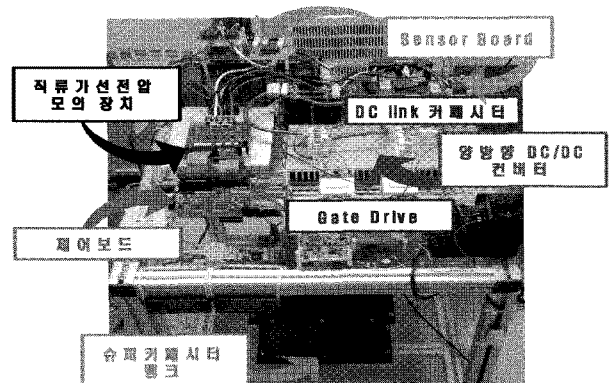


그림 20 회생에너지 저장시스템 축소모델 실험세트  
 Fig. 20 Prototype of regenerative energy storage system

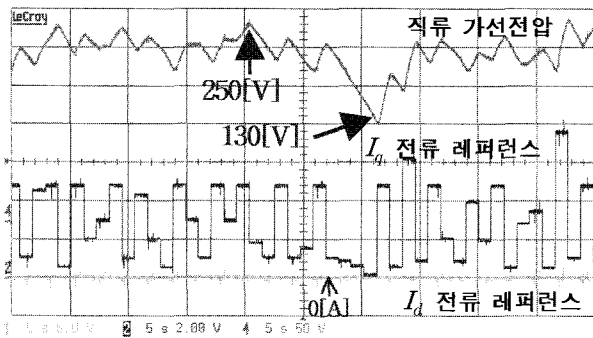


그림 21 N역 직류가선전압 출력파형  
 Fig. 21 DC line voltage waveform of N station  
 [50V/div 5s/div, 직류가선전압:(130 ~ 250[V]),  
 $I_q$ : 2A/div 5s/div (0 ~ 8A),  $I_d$ : 5A/div 5s/div  
 (-2 ~ 2A)]

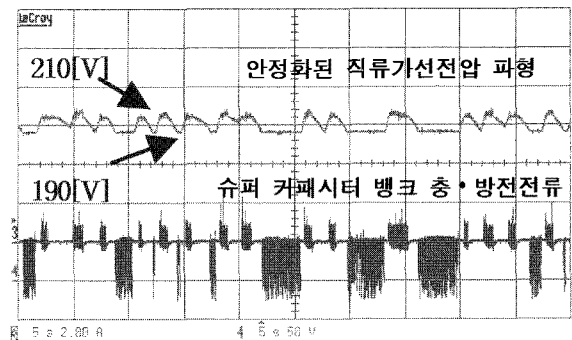


그림 24 S역의 안정화된 가선전압과 슈퍼 캐패시터 뱅크  
 충·방전 전류  
 Fig. 24 Stabilized DC line voltage of S station and  
 charge/discharge current of super-capacitor  
 bank[50V/div 5s/div, 2A/div 5s/div]

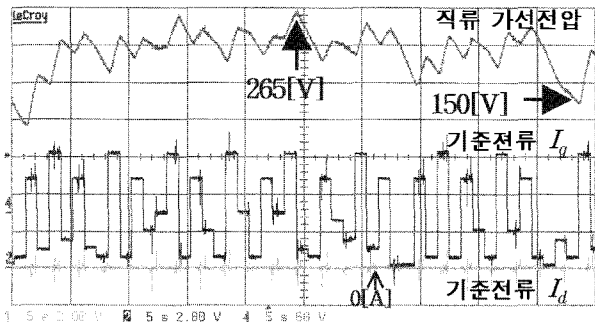


그림 22 S역 직류가선전압 출력파형  
 Fig. 22 DC line voltage waveform of S station  
 [50V/div 5s/div, 직류가선전압: 150 ~ 265[V],  $I_q$ :  
 2A/div 5s/div (0 ~ 8A),  $I_d$ : 5A/div 5s/div (-3 ~  
 3A)]

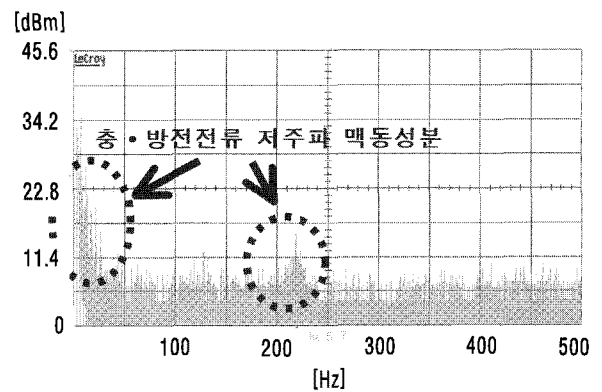


그림 25 N역 슈퍼 캐패시터 뱅크 충·방전 전류의 FFT 분석 파형  
 Fig. 25 FFT waveform of charge/discharge of super-  
 capacitor at N station[50Hz/div, 5.7dBm/div]

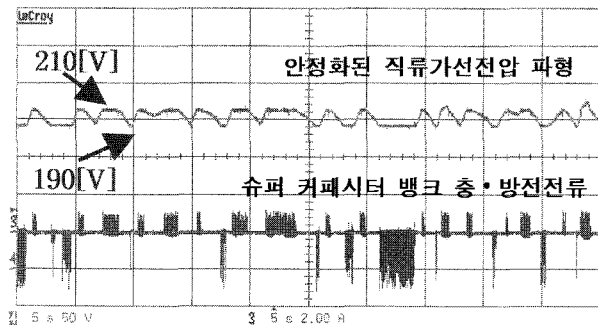


그림 23 N역의 안정화된 가선전압과 슈퍼 캐패시터 뱅크  
 충·방전 전류  
 Fig. 23 Stabilized DC line voltage of N station and  
 charge/discharge current of super-capacitor  
 bank[50V/div 5s/div, 2A/div 5s/div]

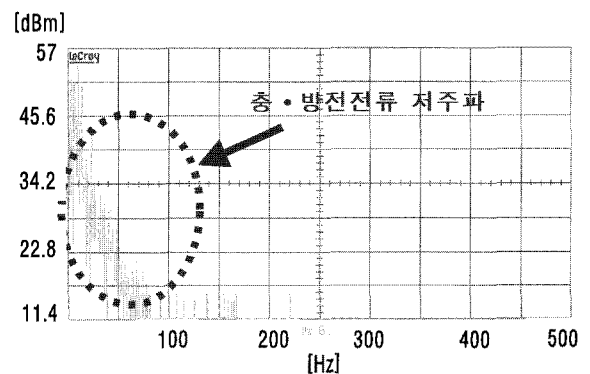


그림 26 S역 슈퍼 캐패시터 뱅크 충·방전 전류의 FFT 분석 파형  
 Fig. 26 FFT waveform of charge/discharge of super-capacitor  
 at S station[5.7dBm/div, 50Hz/div]



그림 25와 그림 26은 각각 그림 23과 그림 24에 나타난 지하철 2호선 N역과 S역의 충·방전전류에 대한 FFT 분석 파형을 나타내며, N역과 S역의 직류가선전압 패턴에 의한 충·방전전류의 저주파 맥동성분이 다르게 나타나고 있다. 그러므로 시뮬레이션의 결과와 같이 N역과 S역에서 슈퍼 커패시터 뱅크의 내부 전력 손실 및 내부 발생 온도가 다르다.

이러한 결과로부터 직류철도 전구간의 실측 데이터를 기반으로 각 구간마다 다르게 나타나는 슈퍼커패시터의 충·방전 특성의 분석을 통해 슈퍼 커패시터의 용량과 수명을 예측하고 직류철도 회생에너지 시스템 구연의 원가 절감과 안정도 향상에 기여할 수 있다.

## 5. 결 론

본 논문은 직류철도 구간에 따라 다르게 나타나는 직류가선전압을 모의하기 위하여 실제 직류철도 변전소의 가선전압 데이터를 이용하여 직류가선전압 모의 장치를 제안 하였다. 또한 이를 슈퍼 커패시터 뱅크를 활용한 직류철도 회생에너지 저장장치 구현을 통해 실제 직류철도 변전소의 데이터를 사용하여 슈퍼 커패시터의 충·방전 특성을 분석하였다.

가선전압 모의 장치를 회생에너지저장 장치에 연계하여 충·방전 제어를 수행하였다.

실험실 수준에서는 1500[V] 직류 가선전압을 200[V]의 기준으로 축소시킨 회생에너지 저장시스템 축소모델을 구현하여 두 개의 역에서 다르게 나타나는 충·방전 특성을 검증하였다.

이 논문은 한국철도기술연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

## 참 고 문 헌

- [1] 박찬홍, 장수진, 이병국, 원충연, "회생에너지와 운전특성을 고려한 직류지하철 시스템 모델링", 2007년 전력전자 학술대회 논문집, pp. 482-484, 2007. 7.
- [2] 한홍일, 함년근, 성낙규, 김길동, 김대균, 한정희, "3상 PWM 컨버터의 전류제어기 비교에 관한 연구", 대한전기학회 하계학술대회 논문지, pp. 1248-1250, 2000.
- [3] Lai. J. S, Levy. S, Rose. M.F, "High Energy Density Double-Layer Capacitors for Energy Storage Applications", *IEEE Aerospace and Electronics*

*System Magazine*, Vol. 7, pp. 14-19, 1992, April.

- [4] Yun Zhong, Jiancheng Zhang, Gengyin Li, Aiguo Liu, "Research on Energy Efficiency of Supercapacitor Energy Storage System", *PowerCon, Power System Technology*, 2006, Oct.
- [5] Spyker. R. L, Nelms. R. M, "Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor", *IEEE Tran.*, Vol. 36, pp. 829-836, 2000. July.
- [6] Dandan Zhang, Man Luo, Jin Li, Junjia He, "Surveying Into Some Aspects of Internal Resistance of Super Capacitor", CEIDP, Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp. 637-640, 2005, Oct.
- [7] Gasperi, M. L, "Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors", *IEEE IAS*, pp. 1347-1351, 1996, Oct.
- [8] Gasperi, M. L, "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors", *IEEE IAS*, pp. 1042-1047, 1997, Oct.
- [9] Gasperi, M. L, Gollhardt. N, "Heat Transfer Model for Capacitor Banks", *IEEE IAS*, Vol. 2, pp. 1199-1204, 1998.

## 저 자 소 개



### 김종운(金鍾潤)

1980년 10월 18일생. 2006년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2008년 성균관대 대학원 메카트로닉스공학 협동과정 졸업(석사). 2008년 현재 삼성전자 정보통신총괄 무선사업부 연구원.



### 정두용(鄭斗溶)

1981년 3월 22일생. 2007년 안양대 전기전자공학과 졸업. 2007년~현재 성균관대 대학원 태양광시스템 공학 협동과정 석사 과정.



### 장수진(張水珍)

1976년 12월 6일생. 2002년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2004년 성균관대 에너지시스템공학과 졸업(석사). 2008년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(공학박). 2008년 현재 효성 중공업연구소 책임연구원.



**이병국(李秉國)**

1968년 12월 25일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 미국 Texas A&M University 전기공학과 졸업(공학박). 2001년 ~2003년 미국 Texas A&M University Postdoctoral Research Associate. 2003년 ~2005년 한국전기연구원 전력전자그룹 선임연구원. 2005년 ~2006년 성균관대 연구조교수. 2006년 ~현재 성균관대 정보통신공학부 조교수. IEEE Senior Member.



**원충연(元忠淵)**

1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1991년 12월 ~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문 교수. 1998년 ~현재 한국철도기술연구원 심사위원. 2006년 ~2007년 한국조명전기설비학회 편수위원. 2006년 ~현재 한국전력공사 PQ심사위원. 2006년 ~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 2006년 ~현재 (주)로템 기술자문위원. 2007년 ~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년 ~현재 도시철도기술실무위원회 위원(건설교통부). 2007년 ~현재 월간 전기설비 편집자문위원. 2008년 ~2009년 한국조명·전기설비학회 평가위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수. 현재 당 학회 부회장.