

하이브리드 슈퍼커패시터를 이용한 50kW급 에너지 저장 장치 설계 및 전기적 특성

The Design and Electrical Characteristics of 50kW Energy Storage System Using Hybrid Supercapacitor

맹 주 철* · 조 문 태** · 윤 중 락*
(Ju-Cheul Mang · Moon-Taek Cho · Jung-Rag Yoon)

Abstract - This paper describes the characteristics of a hybrid supercapacitor module for power quality stabilization. Hybrid supercapacitor is an promising energy storage device that positioned between conventional EDLC and Li-ion battery. A cylindrical 7500F hybrid supercapacitor (60 × 138 mm) was assembled by using the $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ electrode as an anode and activated carbon as a cathode. Considering the ESR and efficiency has been designed to module with 41.6F 480V design results in 180 series combination. In order to determine the characteristics of the hybrid supercapacitor module for power system, hybrid supercapacitor cells were connected in series with active balancing circuit. As a result of measuring the 50kw UPS, it was discharged at the current of 104A~143A during the discharge in the voltage range of 350V~480V, and the compensation time at discharge was measured to be about 30s. These results can be used to stabilization of power quality by applying hybrid supercapacitor module.

Key Words : Hybrid supercapacitor, Super capacitor, Energy storage system, Module, Power system stabilizer

1. 서 론

다양한 산업분야에서 정보통신장비와 정밀한 제어가 요구되는 제어기기의 도입이 증가함에 따라 기기의 신뢰성을 확보하기 위해서 안정적인 전원 환경이 필요하다. 최근에는 IoT, 빅 데이터를 이용한 4차 산업의 중요성이 증가됨에 따라 안정적인 인터넷 서비스를 제공할 수 있는 인터넷 데이터 센터(IDC:Internet Data Center)의 중요성이 증가되고 있다. 특히 인터넷 데이터 센터는 24시간 운영하여 서비스를 제공하므로 자연 재해, 전력 설비 고장 및 전력 품질 장애 사고 등의 주요 장비의 셧다운을 미연에 방지하여, 막대한 경제적 손실 피해를 발생하지 않게 하기 위해 전력 품질 안정화 대책이 필요하다[1]. 인터넷 데이터 센터에서는 순시 전압 저하 및 정전으로부터 보호하기 위해 다양한 예비 시스템이 널리 사용되고 있다. 전원 이상을 감지하고 예비 시스템이 가동하기 위하여 부하에 전력을 공급할 수 있게 수십 초의 시간을 메울 수 있는 단기간 에너지 저장장치가 필요하다. 짧은 시간에 발생하는 전압전력 품질 안정화를 위한 에너지 저장 장치로서

이차 전지 및 일반 커패시터보다 에너지 밀도가 크고, 작은 내부 저항으로 출력 특성이 좋으며 긴 수명 특성을 가지는 전기이중층 커패시터를 사용한다[2,3].

초고용량 슈퍼커패시터의 종류에는 활성탄을 전기이중층 커패시터(EDLC : Electric Double Layer Capacitor), 의사 커패시터(Pseudo Super capacitor)와 하이브리드 슈퍼커패시터(Hybrid supercapacitor)가 있다. 전기 이중층 커패시터는 활성탄 표면에서 이온들의 물리적인 흡/탈착 반응을 이용하여 높은 출력 특성 및 긴 충/방전 사이클을 가지는 장점이 있지만 에너지 밀도가 낮은 단점이 있다. 의사 커패시터는 금속산화물 또는 폴리머 활물질에서의 redox 반응을 이용하는 것으로 사용전압이 낮은 단점이 있다. 하이브리드 슈퍼커패시터는 비대칭 구조를 갖는 커패시터로서 양극은 활성탄을 사용하고 음극에는 리튬 티탄산화물($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, LTO)을 적용하여 활성탄 전극에는 이온의 물리적 흡/탈착 반응에 의한 전기 이중층 반응에 의하여 전하를 저장하고, 양극에는 리튬의 삽입/탈리 반응(화학 반응)에 의하여 전하를 저장하는 메커니즘을 가진다. 이와 같은 결과로 슈퍼 커패시터 대비 동일 체적에서 에너지 밀도가 높은 장점을 가진다[4-7]. 따라서 본 연구에서는 인터넷 데이터 센터의 전력 품질 안정화를 위한 방법으로 물리적 전기 이중층을 형성하여 전기를 저장하여, 고출력 및 충/방전 효율이 우수한 하이브리드 슈퍼커패시터 사용하여 에너지 저장 장치를 설계하고, 전기적 특성을 평가하여 에너지 저장 장치로서의 가능성을 확인하고자 한다.

† Corresponding Author : Samwha Capacitor Co. Ltd, Korea.
E-mail: yoonjungrag@yahoo.co.kr

* Samwha Capacitor Co. Ltd, Korea.

** Daewon University College, Korea.

Received : March 17, 2018; Accepted : June 19, 2018

2. 실험방법

2.1 하이브리드 슈퍼커패시터 단셀 제작

하이브리드 슈퍼커패시터 단 셀을 제작하기 위해서 음극 소재는 과립 LTO와 Super-P (Timcal), PVdF (Arkema-HSV900)를 사용하였으며, 유기 용매로는 NMP를 사용하여 32%의 solid loading 을 가지는 slurry를 제조 한 후 집전체로 알루미늄 박을 이용하여 전극을 형성하였다. 양극은 활성탄을 이용하여 전극을 형성하였고 음극에는 LTO 전극을 적용한 전극으로 젤리 롤을 만들고 48시간 동안 진공 건조 후 1.5M LiBF₄ + ACN 전해액에 24시간 동안 함 침 후 조립하였다. 그림 1은 원통형 하이브리드 슈퍼커패시터 단 셀 제조 공정도이다.



그림 1 하이브리드 슈퍼커패시터 제조 공정도
Fig. 1 Hybrid supercapacitor manufacturing process

제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 단위 셀의 전압은 2.8V이고 용량은 7500F이며 무게는 600g이다. 단 셀의 kg당 에너지 밀도 (Wh/kg) 및 출력 밀도(W/kg)는 14.5Wh/kg 및 1900W/kg이다. 표 1에 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터의 단위 셀의 규격을 나타내었다.

표 1 하이브리드 슈퍼커패시터 단위 셀 규격
Table 1 Specification of hybrid supercapacitor cell

전압	2.8V
용량	7500F
AC ESR	0.4mΩ
DC ESR	0.8mΩ
무게	0.6kg
사이즈	Ø60×138.5mm

2.2 하이브리드 슈퍼커패시터 에너지 저장 장치 설계

하이브리드 슈퍼커패시터 에너지 저장 시스템은 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 및 양방향 인버터를 연계하여 구성하였다. 정상시에는 계통에서 전력을 입력 받아 인버터를 통하여 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈에 에너지를 저장하고 정전 및 전압 강하가 발생하게 되면 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 에너지를 인버터를 통하여 출력 측에 공급하여 전압을 보상해 주는 역할을 한다. 그림 2는 하이브리드 슈퍼커패시터 에너지 저장 시스템 구성도이다.

하이브리드 슈퍼커패시터 에너지 저장 시스템은 표 2와 같은 규격으로 동작하도록 설계하였다.

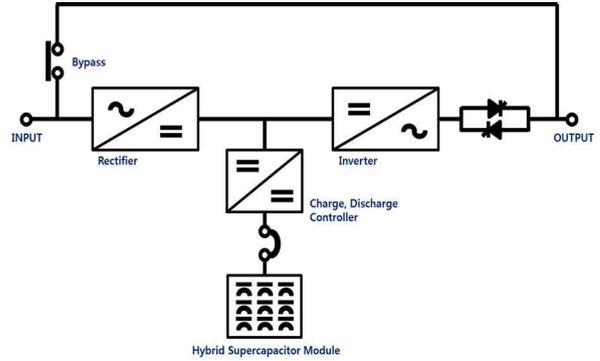


그림 2 하이브리드 슈퍼커패시터 에너지 저장 시스템 구성도
Fig. 2 Block diagram of energy storage system with hybrid supercapacitor

표 2 에너지 저장 시스템 규격
Table 2 Specification of energy storage system

정격 출력	50kW
보상 시간	<20sec
전압 범위	350V~480V
전류 범위	104A~143A

50kw급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작하기 위해 모듈 용량을 설계하였다. 이때 모듈의 최대 전압 $V_{max} = 480V$ 이고 최소 전압 $V_{min} = 350V$ 로 설정하였다. 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 동작 전압은 $\Delta V = V_{max} - V_{min} = 110V$ 이다. 평균 전류는 식 (1)로 구하였다.

$$I_{avg} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2} \tag{1}$$

하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 내부 저항인 ESR에 따른 전압 강하를 식 (2)와 같다.

$$V_{esrmax} = R_{esr} \times I_{max} = R_{esr} \times \frac{P}{V_{min} \times \eta} \tag{2}$$

하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 방전 특성을 고려한 실제 동작 전압 영역은 식 (3)과 같다.

$$\Delta V = i \times \frac{dt}{C} + (I_{max} \times R_{esr}) \tag{3}$$

식 (3)을 이용하여 전력 품질 안정화 장치가 20초 이상 동작 하는데 필요한 정전 용량 C는 식 (4)를 이용하여 구한다.

$$C = \frac{I_{avg} \times t}{\Delta V - (I_{max} \times R_{esr})} \tag{4}$$

충/방전 사이클을 고려하여 에이징 상수(K)를 적용하여 정전

용량 C_{final} 식 (5)를 이용하여 구한다.

$$C_{final} = \frac{C}{K} \tag{5}$$

이때 구해진 C_{final} 은 34.1F이다.

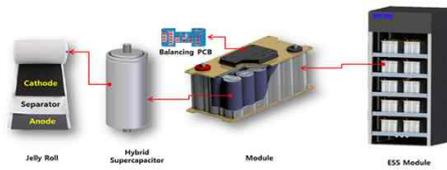
설계로부터 얻은 전압 및 용량을 고려하여 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈은 7500 F의 용량을 가지는 셀 180개를 직렬로 연결하여 제작하였다.

2.3 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 제작 및 평가

정격전압 2.8V, 용량 7500F을 가지는 axial type 하이브리드 슈퍼커패시터 셀을 이용하여 표 3의 규격과 같이 480V, 41.6F급의 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작하였다. 모듈은 총 에너지량은 2,244,320[J]이고 전압 사용구간은 350~480[V]이다. 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 설계 전압을 고려하여 2.8V, 7500F 하이브리드 슈퍼커패시터 셀 180개를 직렬로 연결하였다. 이와 같이 대용량 모듈을 구성하기 위해서 셀을 직렬로 연결하여 제작할 경우 개별 셀의 초기 충전용량, 방전율, ESR, 셀 위치별 발열량 등을 고려하여 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 제작하였다. 또한, 셀간 전압 불균형 문제를 해결하여 셀 간의 전압 편차를 줄이고, 총 방전시 과전압 방지를 위해서 active 밸런싱 회로를 설계하여 적용 하였다. 이를 통해서 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈에서 평균 셀 전압 보다 높은 셀은 저항을 통해 방전하여 셀 전압을 조정하였다. 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 전압 사용구간은 350V ~4 80V로 구성하였으며 충/방전시험기(Arbin 사)를 사용하여 제작된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 전기적 특성을 평가하였다.

표 3 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 사양

Table 3 Specification of hybrid supercapacitor module

구조	
개별 셀 사양	7500F / 2.8V
개별 셀 크기	138.5mm / Φ60
모듈 사양	41.6F / 480V (series 180EA)
모듈 사이즈	630 x 770 x 1430 mm
총 에너지 량(E)	2244320[J]
전압 사용 구간	480V~350V
밸런싱 방식	Active 밸런싱

3. 결과 및 고찰

하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 그림 3과 같이 30A(10 C-rate)의 전류 밀도로 350V~480V 구간에서 충/방전을 진행하

였다. 진행 결과 모듈의 방전 용량은 약 1.78Ah 이며 DC-ESR은 0.08Ω이 측정되었다. 방전 초기에 전압이 급격하게 감소하는 전압 drop을 확인할 수 있다. 이는 전극 활물질 내부 저항의 영향으로 LTO에서의 Li⁺ kinetics와 큰 연관성이 있는 것으로 알려져 있다[8-10].

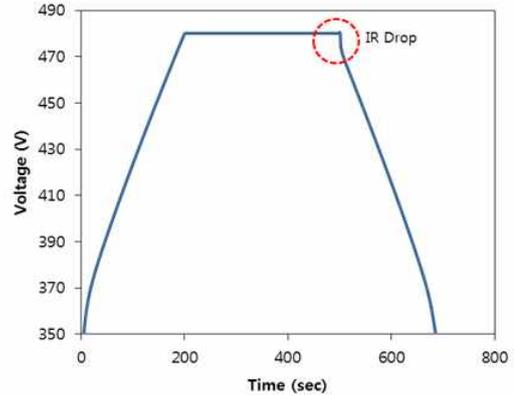


그림 3 30A, 350V~480V에서 측정된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 충/방전 곡선

Fig. 3 Charge and discharge curve of hybrid supercapacitor module at 30A, 350V~480V

하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 출력 특성을 알아보기 위해서 그림 4와 같이 30A, 50A, 60A, 90A, 100A, 120A, 150A, 180A, 200A의 전류에서 충/방전 시험을 진행하였다. 전류가 증가함에 따라 방전 용량이 감소하는 경향을 보이고 있으며 30A (10C) 대비 200A(66.6C) 방전 시에서 약 89.5%의 용량 유지율을 보였다.

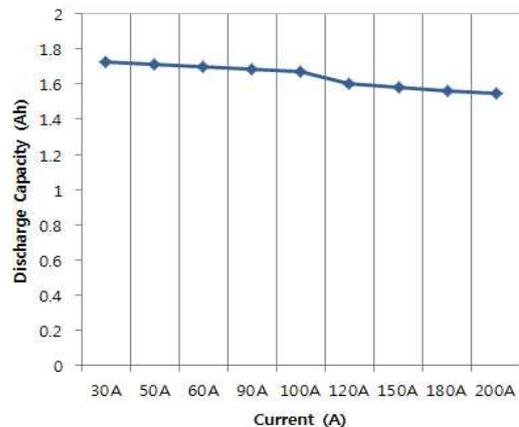


그림 4 30A~200A에서 측정된 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 C-rate 특성

Fig. 4 C-rate characteristics of hybrid supercapacitor module at 30A, 30A~200A

그림 5는 480V, 41.6F급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 300V~480V 전압 구간에서의 정 전류 방전 특성을 나타낸 그림이다. 하한 전압은 음극 전극인 LTO의 리튬 삽입 전위가 약1.5V에서 작동 전압을 나타내므로 cut-off 전압을 약 1.66V 설정하였다[11]. 하이브리드 슈퍼커패시터 설정 전압 구간에서 전류 값을 30A(10C), 60A(20C), 90A(30C), 120A(40C), 150A(50C), 180A(60C)로 증가시키면서 방전시간을 측정한 결과 선형적으로 감소하는 경향을 보였다.

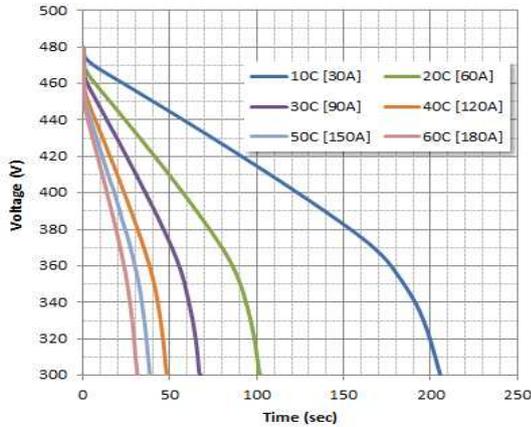


그림 5 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 정 전류 방전 곡선
Fig. 5 Constant current discharge curve of hybrid supercapacitor module

그림 6은 정 전류에 따른 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 DC-ESR을 측정한 결과로 전류 값이 증가하여도 모듈의 DC-ESR은 변화는 크게 나타나지 않지만 전압 강하는 전류 값의 증가함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다.

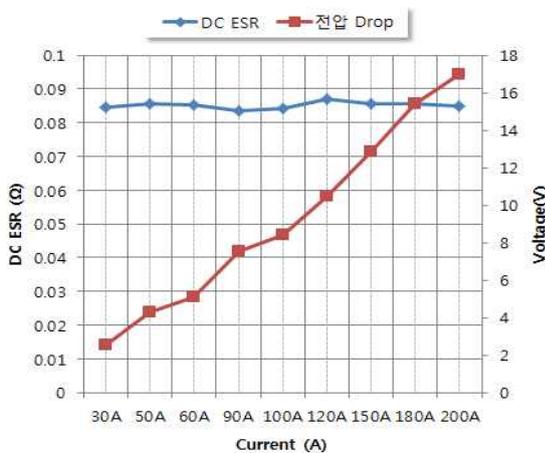


그림 6 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 C-rate에 따른 직류 직렬 등가 저항 및 전압 강하 특성
Fig. 6 The DC ESR and voltage drop characteristics according to C-rate of hybrid supercapacitor module

그림 7은 480V, 41.6F급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 300V~480V 전압 구간에서의 정 출력 방전 특성을 나타낸 그림이다. 정 출력 특성을 측정하기 위해서 10kW, 20kW, 30kW, 40kW, 50kW, 60kW의 조건에서 충/방전을 실시하였다. 이 결과 방전 출력이 증가할수록 방전 시간이 감소하였으며, 10kW 대비 60kW 일 때 약 6.8% 용량 감소율을 보였다. 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 전압 사용구간인 350V~480V에서의 방전 출력 50kW 일 때의 방전시간을 측정한 결과 약 39초가 측정되었다. 모듈의 방전 시간의 경우 이론적으로 44.8초지만 부족하게 측정된 원인은 모듈의 내부 저항에 의한 전압 강하 및 방전 효율의 영향으로 판단된다[12].

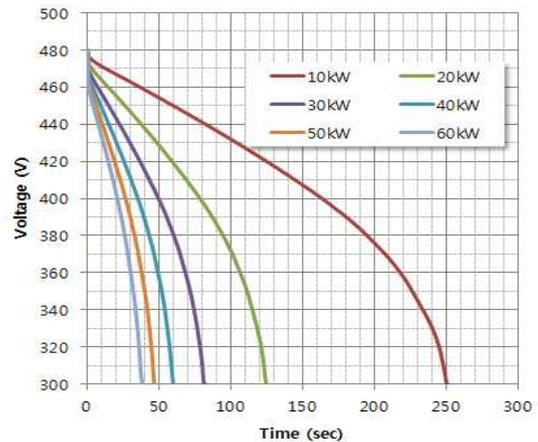


그림 7 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 정 출력 방전 특성
Fig. 7 Constant power discharge curve of hybrid supercapacitor module

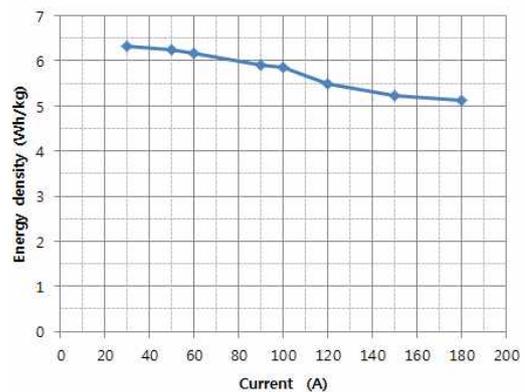


그림 8 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 C-rate에 따른 에너지 밀도
Fig. 8 Energy density characteristics according to C-rate of hybrid supercapacitor module

그림 8, 9는 480V, 41.6F 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 C-rate에 따른 에너지 밀도 및 출력 밀도를 나타낸 그림이다. 10C(30A)에서의 에너지 밀도는 약 6.3 wh/kg이며 10C(30A) 대

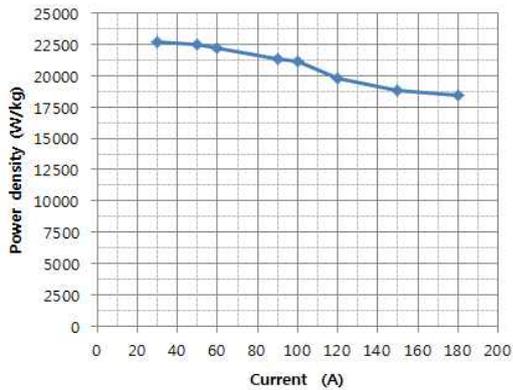


그림 9 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 C-rate에 따른 출력 밀도
Fig. 9 Power density characteristics according to C-rate of hybrid supercapacitor module

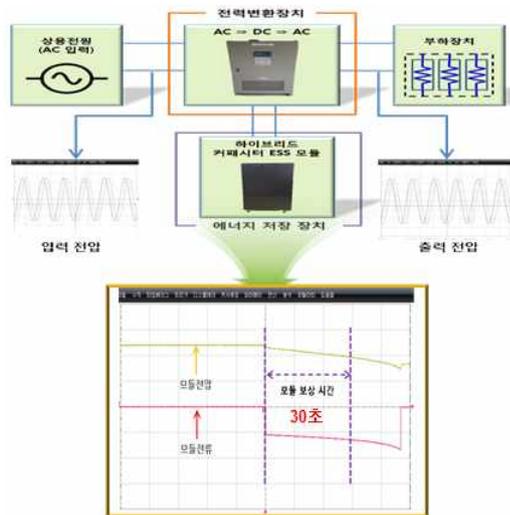


그림 10 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈 측정 결과
Fig. 10 Measurement results of hybrid supercapacitor module

비 50C(180A)일 때 18.8%의 에너지 밀도의 감소율을 보이고 출력 밀도는 10C(30A)일 때 약 22732W/kg으로 10C(30A)대비 50C(180A)일 때 약 81.1%의 용량 유지율을 보였다. 에너지 밀도와 출력 밀도가 C-rate 값이 증가할수록 감소하는 경향을 볼 수 있다.

그림 10은 50kw급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 전력 변환 장치에 적용하여 방전 시간을 측정하였다. 50kW급 전력 변환 장치를 구성하여 측정한 결과 350V~480V의 전압 구간에서 방전시 104A~143A의 전류로 방전 되었으며, 이때의 모듈의 보상 시간은 30초가 측정 되었다. 이와 같은 결과는 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈을 에너지 저장 장치로 적용이 가능함을 보여주는 결과이다. 충/방전기를 사용하여 정 출력 방전 시에 측정된 39초보다 적게 측정된 원인은 단자간의 접촉 저항 및 전력 변환 장치의 효율 등의 영향이라고 판단된다[12].

4. 결 론

본 연구에서는 단위 체적대비 슈퍼 커패시터 보다 약 2.5배의 고용량 특성을 구현할 수 있는 하이브리드 슈퍼커패시터를 적용하여 에너지 저장 장치를 설계 및 제작하여 모듈의 전기적 특성을 평가하였다. 제작된 480V, 41.6F급 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 전류별 충/방전 특성 결과 30A(10C) 대비 200A(66.6C)에서 약 89.5%의 용량 유지율을 나타내었으며, 정 출력 특성 결과 10kW 대비 60kW일 때 약 93.2% 용량 유지율을 보였다. 또한 하이브리드 슈퍼커패시터 모듈의 350V~480V의 전압 구간에서 50kW에서의 부하로 충/방전시 방전 시간은 30초로 측정되었다. 이와 같은 결과는 하이브리드 슈퍼커패시터를 에너지 저장 장치로 적용시 모듈의 전압 강하 및 방전 효율뿐만 아니라 단자간의 접촉 저항 및 전력 변환 장치의 효율 등을 고려하여 모듈을 설계하여야 함을 알 수 있었다. 하이브리드 슈퍼 커패시터 모듈을 적용하여 인터넷 데이터 센터의 정전 사고시 예비 시스템이 가동하여 전력을 공급할 수 있도록 단기간 에너지 저장 장치로 활용 가능할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 2018년도 에너지기술평가원에서 지원하는 산업 기술혁신사업(과제번호 : 20172420108590)으로 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다(과제명 : 표면개질 LTO 복합 소재를 적용한 15C급 급속 충방전 ESS용 배터리 커패시터 개발).

References

- [1] Sung-Yong Son, Hyung-Soo Mok, Kyung-Seok Park, Jun-Hee Hong "A Comparative Study on the Electric Power Efficiency of IDCs with AC and DC Distribution System", *Journal of the Korea Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, vol. 22, no. 8, pp. 38-44, (2008)
- [2] Min Young Cho, Mok Hwa Kim, Hyun Kyung Kim, Kwang Bum Kim, Jung Rag Yoon, Kwang Chul Roh, *Electrochemistry Communications*, vol. 47, 5, (2014)
- [3] Byung Gwan Lee, Jung Rag Yoon, *J. Electr. Eng. Technol.*, 7(2), 207 (2012)
- [4] Min-Geun Choi, Soo-Bin Kang, Jung Rag Yoon, Byung Gwan Lee and Dae-Yong Jeong, *J. Electr. Eng. Technol.*, 10(3), 1102 (2015)
- [5] Jung-Rag Yoon, Esther Baek, Hong-Ki Kim, Michael Pecht, Seung-Hwan Lee, *Carbon*, vol. 101, 9 (2016)
- [6] Abu Riduan, Md Foaisal and Gwiy-Sang Chung, *Trans. Electr. Electron. Mater.* 125, 13 (2012)

- [7] M. S. Hong, S. H. Lee, S. W. Kim, *Electrochem. Solid St.* 5, 227 (2002)
- [8] Min Geun Choi, Soo Bin Kang, Jung Rag Yoon, Byung Gwan Lee and Dae Yong Jeong, *J. Electr. Eng. Technol.*, 10(3), 1102 (2015)
- [9] Lee, Jong-Kyu, Yoon, Jung-Rag, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, vol. 15, no. 3, 2586 (2015)
- [10] Lee, Byung-Gwan; Maeng, Ju-Cheul; Lee, Joung-Kyu; Yoon, Jung-Rag, "The Characteristics of Asymmetric Hybrid Supercapacitor Cells and Modules for Power Quality Stabilization", *Trans. KIEE*, vol. 65, pp. 617-621, (2016)
- [11] D. Peramunage, K.M. Abraham, "Electrochemistry in Polyacrylonitrile Electrolyte-Based Lithium Cells", *J. Electrochem. Soc.* 145, 2609, (1998)
- [12] Ju Cheul Maeng, Jung Rag Yoon, *Trans. KIEE*, vol. 66, pp. 357-362 (2017)

저 자 소 개



맹 주 철 (Ju-Cheul Maeng)

2009년 성균관대학교 대학원 전기전자컴퓨터공학부 공학석사. 2013년 현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 책임연구원



조 문 택 (Moon-Taek Cho)

1990년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 1998년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학박사. 1996년~현재 대원대학교 전기전자과 교수.



윤 중 락 (Jung-Rag Yoon)

1993년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학석사. 1999년 명지대학교 대학원 전기공학과 공학박사. 1994년~1996년 한국쌍신전기(주) 선임연구원. 1996년~현재 삼화콘덴서공업(주) 연구소 연구소장