

특집 : 에너지 저장장치 기술동향

# 슈퍼커패시터를 이용한 에너지 저장시스템

정재현\*, 노의철\*\*, 김흥근\*\*\*, 전태원\*\*\*\*

(부경대 전기공학과 \*박사과정, \*\*교수, \*\*\*경북대 IT대학 전기공학과 교수,

\*\*\*\*울산대 전기전자정보시스템공학부 교수)

## 1. 서론

슈퍼커패시터는 1995년 일본, 러시아, 미국 등에서 상품화되기 시작하여 소형에서 대형에 이르기 까지 그 응용분야가 다양하게 확대되고 있는데, 최근 신재생에너지 발전의 획기적 증대와 더불어 주요 에너지 저장장치로서 주목을 받고 있다.

연료전지발전, 태양광발전, 풍력발전 등의 신재생에너지 발전은 에너지원이나 부하의 변동에 민감하게 반응을 하므로 단독으로 사용될 경우 출력전압의 변동을 포함한 전력품질의 저하를 피할 수 없다. 슈퍼커패시터는 전력밀도가 높고, 충방전 속도가 빠르며, 충방전 사이클 수명이 50만 사이클 이상으로 매우 길다는 특징이 있다. 따라서 부하응답 특성이 느린 신재생에너지 발전 시스템에 슈퍼커패시터를 사용하면 발전된 전력과 부하전력 사이의 차이를 슈퍼커패시터가 흡수 또는 방출함으로써 전력품질을 확보하는데 기여할 수 있다. 특히 마이크로그리드와 같이 전력품질을 고려한 시스템 구성에는 배터리와 함께 필수적으로 사용되는데, 충전시에는 슈퍼커패시터를 먼저 충전하고 나서 연이어 배터리를 충전하고, 방전시에도 슈퍼커패시터를 먼저 방전하고 이어서 배터리를 방전하는 알고리즘으로 동작을 함으로써 전력품질 향상에 기여하고 있다<sup>[1,2]}</sup>. 또한 배터리와 함께 사용하는 경우에도 배터리의 느린 충방전 특성을 보상하며 아울러 배터리의 수명연장에도 기여한다. 출력밀도가 높은 슈퍼커패시터는 피크부하를 담당하는데 탁월한 능력이 있으므로 기중기, 전철 등의 철두부하 저감에도 큰 역할을 할 수 있다. 전동차 제동시 차량의 운동에너지를 전기에너지로 변환하면서 회수하여 2차전지나 슈퍼커패시터에 저장함으로써 에너지를 절약하는 방법도

사용되고 있다<sup>[3]}</sup>.

슈퍼커패시터는 온도와 충전상태에 따라서 정전용량 값이 상당히 달라지므로 사용시에는 정전용량의 실제값에 대한 정보가 중요하여 슈퍼커패시터의 모델링에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다<sup>[4]}</sup>. 해외에서는 MAXWELL, Ness, ELNA, Panasonic 등의 기업체에서 슈퍼커패시터를 공급하고 있고 국내 주요 공급처로는 Korchip, LSmtron, Nesscap, Samwha, Vinatech 등이 있다. 본 고에서는 이러한 슈퍼커패시터에 대한 이해를 돕기 위하여 슈퍼커패시터의 응용 예와 특징 및 상세한 응용분야를 소개하고자 한다.

## 2. 슈퍼커패시터의 특징 및 구조

슈퍼커패시터는 울트라커패시터(ultracapacitor)라고도 하며 매우 큰 용량을 갖는 커패시터라고 보면 된다. 슈퍼커패시터의 작동전압은 비록 낮지만 전지보다 고밀도 전력을 제공할 수 있으며, 전극의 고속전용량 때문에 일반 커패시터보다 고에너지 밀도를 제공할 수 있다.

표 1은 2차전지, 일반 커패시터 및 슈퍼커패시터의 특성을 비교하여 정리한 것이다. 슈퍼커패시터는 2차전지에 비해 높은 전력 밀도, 장수명, 높은 충방전효율, 충전 상태 검출의 용이함, 비메모리효과, 우수한 저온특성, 저가 및 좋은 안정성과 같은 많은 장점들을 가지고 있다.

슈퍼커패시터의 기본 구조는 그림 1에서 보는 바와 같이 다공성전극(electrode), 전해질(electrolyte), 집전체(current collector), 격리막(separator)으로 이루어져 있으며, 단위 셀 전극의 양단에 수 볼트의 전압을 가해 전해액 내의 이온들이 전기장울 따라 이동하여 전극표면에 흡착되어 발생하는 전기

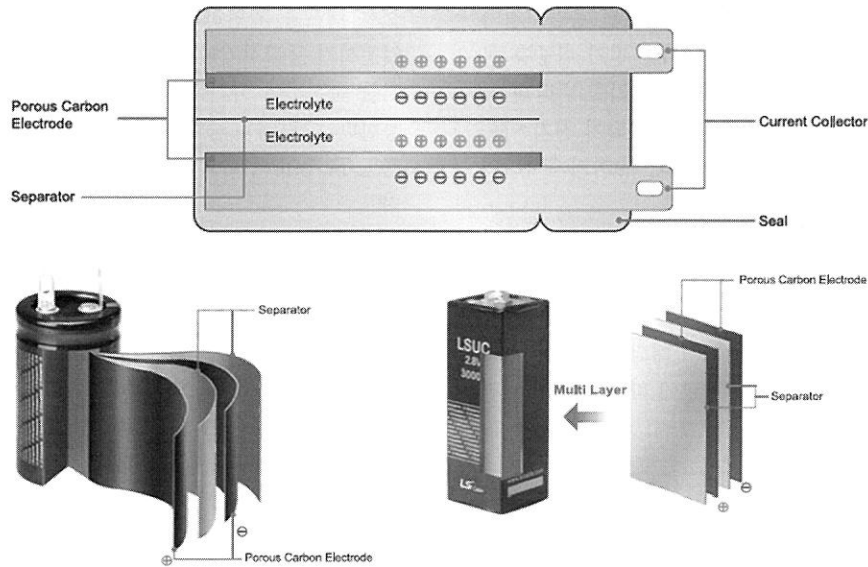


그림 1 슈퍼커패시터의 기본구조

표 1 2차전지, 일반 커패시터 및 슈퍼커패시터의 특성 비교

파라미터	2차전지	슈퍼커패시터	일반 커패시터
충전시간	0.5~5 hrs	1~30 sec	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec
방전시간	0.3~4 hrs	1~30 sec	$10^{-6} \sim 10^{-3}$ sec
에너지밀도 (Wh/Kg)	30~100	1~10	<0.1
전력 밀도 (W/Kg)	50~200	1,000~2,000	<100,000
충·방전 효율	0.7~0.85	0.9~0.95	>0.95
수명 (Cycle)	500~2,000	>500,000	>50,000

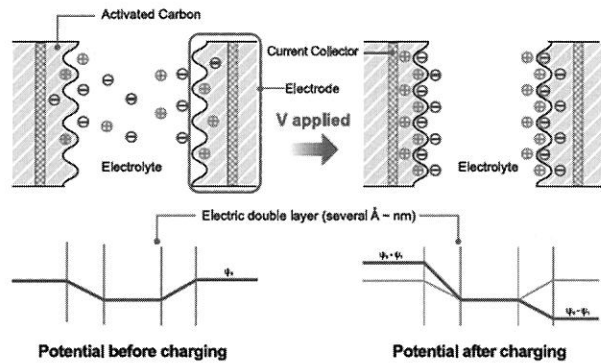


그림 2 EDLC의 충·방전 메커니즘

화학적 메커니즘을 통해서 작동된다<sup>[5]</sup>.

슈퍼커패시터는 전극 및 메커니즘에 따라 크게 3가지로 구분되는데, 활성탄소를 전극으로 사용하고 전기이중층 전하흡착 메커니즘을 갖는 전기이중층 슈퍼커패시터(Electric Double-Layer Capacitor), 금속산화물과 전도성 고분자를 전극재료로 사용하고 유사용량을 메커니즘으로 갖는 유사 슈퍼커패시터(pseudo-supercapacitor 또는 redox 슈퍼커패시터) 및 EDLC와 전해커패시터의 중간적인 특성을 지닌 하이브리드 슈퍼커패시터로 나뉘어진다. 유사 또는 산화환원 커패시터는 EDLC에 비해 축전용량이 3~4배 정도 크지만 고가의 금속산화물을 전극활성물질로 사용한다는 단점과 제조상의 난이도 및 높은 ESR(equivalent series resistance)등의 문제점이 있다. 따라서 하이브리드 커패시터는 에너지 밀도는 EDLC 보다 높으나 충·방전의 특성이 이상적이지 않고 비선

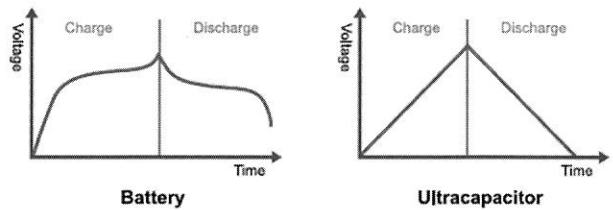


그림 3 전지와 슈퍼커패시터의 충·방전 동작 특성

형성으로 인해 보편화되지 못하기 때문에, 활성탄소를 전극으로 사용하여 친환경적일 뿐만 아니라 충·방전이 용이하고 제조상의 이점을 가진 EDLC가 주류를 이루고 있다.

EDLC(Electric Double-Layer Capacitor)는 유전체를 사용하는 콘덴서와는 달리 고체와 액체의 다른 2층이 접한 그 계면에 정(+)과 부(-)의 전하가 매우 짧은 거리를 두고 분포

됨으로써 콘덴서를 형성한다. 이 계면에 분포된 층을 '전기 이중층'이라 부르며 이것을 이용한 콘덴서를 전기 이중층 콘덴서로 분류한다. 그림 2는 전기 이중층의 원리를 나타낸 것으로, 외부 전원을 인가하였을 때 이온이 정렬되어 전기 이중층이 형성된 모습이며 그림 3은 배터리와 슈퍼커패시터의 충·방전 동작 특성을 보여준다.

### 3. 슈퍼커패시터의 종류 및 응용분야

슈퍼커패시터의 응용 범위는 나날이 확대되어 가고 있으며 슈퍼커패시터의 종류와 응용분야를 용량에 따라 분류해 보면 다음과 같다.

#### 3.1 소형 슈퍼커패시터

전류용량이 1 $\mu$ A~100mA이고 커패시터 용량이 0.01~1F 정도인 것을 소형 슈퍼커패시터라 한다. 소형 슈퍼커패시터는 휴대폰, MP3플레이어, 오디오, VCR 등의 전원공급 중단 시 데이터 저장 및 RTC(Real Time Clock)를 유지해 주는 보조전원 역할을 하는데 주로 사용된다.

그림 4는 소형 슈퍼커패시터의 일례를 나타내며 표 2는 이에 대한 주요 사양을 보이고 있다<sup>6)</sup>.

#### 3.2 중형 슈퍼커패시터

전류용량이 100mA~1A이고 정전용량이 1~100F 정도인 것을 중형 슈퍼커패시터로 분류한다. 중형 슈퍼커패시터는

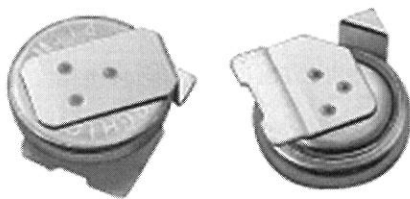


그림 4 소형 슈퍼커패시터 (3.3V, 0.07F)

표 2 소형 슈퍼커패시터(0.07F)의 주요사양

셀크기	φ4.8×1.4mm
동작온도	-25 ~ +60℃
정격전압	3.3Vdc
정격용량	0.07F
방전용량	22 $\mu$ Ah (3.3V-2.0V)
정전용량 변동범위	-20 ~ 80%
ESR (at 1kHz)	100 $\Omega$ 이하
누설전류	100 $\mu$ A 이하

소형 램프를 완만하게 소등하거나 전자코일 또는 전동기를 일정시간 동작시키게 사용되며 태양전지에 의해 발전된 에너지를 축적하여 야간에 LED 조명등을 점등하는 경우에도 사용한다. 그림 5는 중형 슈퍼커패시터의 일례를 나타내며 표 3은 2.7V 50F의 슈퍼커패시터에 대한 주요 사양을 보이고 있다<sup>7)</sup>.

#### 3.3 대형 슈퍼커패시터

전류용량이 10~100A이고 정전용량이 100F 이상인 것을 대형 슈퍼커패시터라 한다. 대형 슈퍼커패시터는 하이브리드 자동차, 연료전지자동차, 풍력발전, 태양광발전, UPS, 전동차 등의 순간 고출력이 필요한 시스템의 전원으로 사용된다.

그림 6은 LSmtron에서 공급하는 슈퍼커패시터 중에서 용량이 가장 작은 셀과 가장 큰 셀을 나타낸다. 각각의 주요 사양은 표 4와 같다.

이러한 셀들을 직렬연결하여 모듈단위로 제작하기도 하는데 표 5는 LSmtron에서 공급하는 모듈을 보이고 있다. 이들 표준 모듈은 각각 정격전압이 3000F, 2.8 V인 셀들을 직렬 연결하여 구성된다. 표준 모듈은 각각의 셀에 대한 전압 밸런싱 기능과 과전압 보조 장치가 내장되어 있으므로 여러 개의 단위 셀을 구입하여 시스템 사양에 맞도록 직렬 연결하는 것보다 사용하기가 간편하고 신뢰도가 높다.

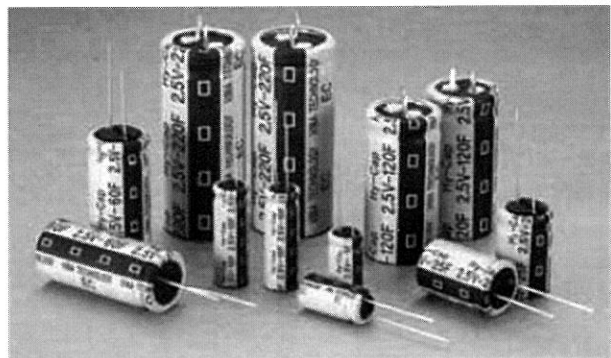


그림 5 중형 슈퍼커패시터

표 3 중형 슈퍼커패시터(50F)의 주요사양

셀크기	φ18×40mm
동작온도	-40 ~ +65℃
정격전압	2.7Vdc
정격용량	50F
정전용량 변동범위	-10 ~ +30%
ESR (at 1kHz)	10m $\Omega$
누설전류	105 $\mu$ A

그림 7은 3000[F], 2.8[V]의 셀과 표준모듈의 외형을 보이고 있는데 모듈의 크기는 셀의 개수에 따라 결정된다.

NESSCAP에서도 단위 셀들을 적층하여 대용량 에너지를 저장할 수 있는 모듈을 공급하고 있는데 전압은 5, 16, 48, 64, 86, 125V로 구분되어 있으며 정전용량은 1.5 - 500F 급이 있다. 그림 8은 NESSCAP의 125V, 62F 모듈을 나타낸다. 이 모듈의 주요 사양은 표 6과 같다<sup>[8]</sup>.



그림 6 대형 슈퍼커패시터

표 4 대형 슈퍼커패시터의 주요 사양

항목	사양	
	(a)	(b)
정격전압 [V]	2.8	2.5
정격 정전용량 [F]	100	5,400
정전용량변동범위 [%]	±10	±10
직류 내부 저항 [mΩ]	9	0.5
최대전류 [A]	74	1,824
누설전류 [mA]	0.3 이하	10 이하
최대저장에너지 [Wh]	0.11	4.67
동작온도범위 [°C]	-40 ~ +65	-25 +60
크기 [mm]	∅: 22, H: 46	55×55×155

표 5 슈퍼커패시터 표준 모델 (LSmtron)

항목	series				
	6	12	18	24	30
정격용량 [F]	500	250	166	125	100
최대전압 [V]	16.8	33.6	50.4	67.2	84
ESR, DC [mΩ]	3	6	9	12	15
가로 [mm]	130	130	130	130	130
세로 [mm]	180	355	530	700	870
높이 [mm]	220	220	220	220	220

### 3.4 용도별 응용분야

슈퍼커패시터의 용도에 따른 응용분야를 정리하면 아래와 같다.

1) 피크파워 보조: 평상시 기존 상시 전원으로부터 전력을 공급받다가 피크전력이 필요한 경우 슈퍼커패시터로부터 전력을 공급함으로써 엔진이나 배터리 등의 다른 전원장치의 부하나 크기를 줄일 수 있다. 크레인, 스마트미터, 중장비차량, 무선단말기, 카오디오, 전동차, 하이브리드버스, 연료전지 전기자동차, 하이브리드 전기자동차, 연료전지, 의료기 등



그림 7 3000F 2.8V 셀과 슈퍼커패시터 모듈외형

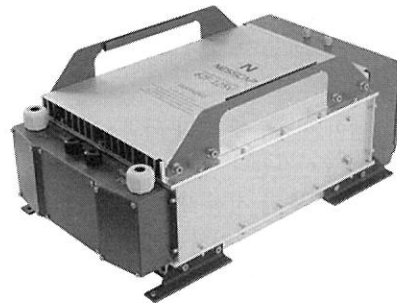


그림 8 NESSCAP 125V, 62F 슈퍼커패시터 모듈

표 6 125V 62F 모듈의 주요사양

항목	사양
정격전압 [V]	125
정격 정전용량 [F]	62
정전용량변동범위 [%]	+20
직류 내부 저항 [mΩ]	15
최대전류 [A]	1850
누설전류 [mA]	5.2 이하
최대저장에너지 [Wh]	134.5
동작온도범위 [°C]	-40 ~ +65
크기 [mm]	D: 560, W: 425, H: 308

에 사용된다.

2) 백업파워: 슈퍼커패시터의 빠른 충방전 특성으로 짧은 시간의 주전원 공백을 완벽하게 상시 백업 가능하도록 한다. UPS, 스마트미터, 로봇메모리, 풍차, 전동차, 하이브리드버스, 연료전지 전기자동차. 하이브리드 전기자동차, 의료기 등에 사용된다.

3) 재생에너지 저장: 일반적으로 높은 에너지를 짧은 시간에 반복적으로 충방전해야 하는 경우, 50만 사이클 이상의 수명과 높은 파워특성을 보유한 슈퍼커패시터를 사용하는 것이 효과적이다. 크레인, 중장비차량, 전동차, 하이브리드버스, 연료전지 전기자동차. 하이브리드 전기자동차, 군사용 등에 사용된다.

4) 배터리 대응: UPS나 짧은 시간 에너지를 백업하기 위한 용도로 리모트 컨트롤러와 같은 응용제품에서 슈퍼커패시터를 배터리 대안으로 사용할 수 있다. UPS, 로봇, 풍차, 장난감, 전동공구, 태양광발전 등에 사용된다.

#### 4. 결론

이상으로 슈퍼커패시터의 특징과 구조 및 응용분야에 대하여 알아보았다. 특히 에너지 확보와 관련하여 풍력과 태양광 및 연료전지를 이용한 발전에 슈퍼커패시터를 사용함으로써 안정화된 전기에너지를 사용할 수 있음을 살펴보았는데 그 뿐 아니라 전력 시스템과 수용가에 고품질의 전력을 제공하는 데에도 슈퍼커패시터가 사용된다. 신재생에너지를 활용한 분산전원 시스템이 확대됨에 따라 낙뢰, 강풍, 폭설 등의 자연현상에 민감한 분산전원의 사고 및 분산전원의 전력공급계통망 고장으로 인한 순간 정전 또는 순간 전압 강하 발생시 슈퍼커패시터를 이용한 에너지저장시스템을 계통에 연계하여 필요시 충전과 방전을 함으로써 전력품질을 확보하는 데에도 사용된다. 또한 IT 산업의 발전과 더불어 산업분야의 생산 현장에서 뿐만 아니라 일반 수용가에도 민감한 부하들이 널리 보급되어 있으므로 이러한 민감 부하에 대한 순시전원 보상에 대한 필요성도 급증하고 있는데 이 역시 슈퍼커패시터 에너지 저장시스템을 기반으로 한 솔루션이 제공되고 있다. 향후 전기에너지의 효과적인 사용을 위한 슈퍼커패시터의 역할은 꾸준히 증가할 것으로 기대된다. ■

#### 참 고 문 헌

- [1] 이지현, 김원용, 김종원, 한병문, "DC 마이크로그리드의 동작 분석을 위한 하드웨어 시뮬레이터 개발," 전력전자학회논문지 16권 6호, 2011, pp. 577-586
- [2] 송용협, 정재현, 김진영, 노의철, 김인동, 김홍근, 전태원, "연료전지 응답특성 보상용 슈퍼커패시터 에너지 저장 시

스템," 전력전자학회논문지 16권 5호, 2011, pp. 440-447

- [3] 김종윤, 정두용, 장수진, 이병국, 원충연, "슈퍼커패시터를 이용한 직류철도 회생에너지 저장장치," 전력전자학회 논문지 13권 4호, 2008, pp. 247-256
- [4] 김상현, 이교번, 최세완, 최우진, "자연방전을 고려한 개선된 슈퍼커패시터의 동특성 모델 개발," 전력전자학회 논문지 14권 3호, 2009, pp. 188-196
- [5] LS mtron, <http://www.ultracapacitor.co.kr/ko/application>
- [6] Korchip, <http://www.korchip.com/>
- [7] VINAtech, [http://www.vina.co.kr/New\\_html/product/product\\_led\\_main.asp](http://www.vina.co.kr/New_html/product/product_led_main.asp)
- [8] Nesscap, <http://www.nesscap.com/product/overview.jsp>

#### 〈 필 자 소 개 〉



##### 정재현(鄭在憲)

1981년 10월 19일생. 2007년 부경대 공대 전기 제어공학부 졸업. 2009년 부경대 대학원 전기 공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 박사과정.



##### 노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기 공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원장.



##### 김홍근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2006년~2007년 미국 Michigan State University 방문교수. 경북대 IT대학 전기공학과 교수. 당 학회 부회장.



##### 전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 2005년~2006년 버지니아공대 방문교수. 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 부회장.