

Super-Capacitor의 고장진단을 위한 파라미터의 특성 해석

손 진근[†], 김 용혁[†], 김 동준^{*}, 이 상철^{**}
 경원대학교 전기공학과[†], 컴파이언 컨설팅^{*}, 동서울대학^{**}

Characteristic Analysis of Parameters for Super-Capacitor Diagnostic

Jin-Geun Shon[†], Young-Hyuk Kim[†], Dong-Joon Kim^{*}, Sang-Cheol Lee^{**}
 KyungWon University[†], Compion Consulting^{*}, Dong Seoul College^{**}

Abstract - 본 논문에서는 Super-Capacitor라 불리우는 EDLC(전기이중층콘덴서)의 고장진단을 위한 파라미터의 특성 해석에 관한 연구를 수행하였다. 에너지의 저장 및 전압연계를 위한 전력변환장치에는 납축전지 또는 전해커패시터를 사용하여 왔으나 환경문제 및 에너지밀도의 측면에서 불리하여 최근에는 Super-Capacitor의 사용이 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 이러한 EDLC의 내부 특성을 해석하기 위하여 EDLC의 등가직렬저항 및 정전용량을 측정하여 진단데이터에 활용이 가능하도록 하였으며, 또한 EDLC를 적용한 순단전압 보상장치의 응용 실험을 수행하여 그 결과를 제시하였다.

1. 서 론

배전계통에서 정전 및 순시적 전압강하의 영향을 보상하는 장치로써는 2차전지(납축전지)를 이용한 무정전전원장치(UPS)나, 알루미늄 전해커패시터를 이용한 순시적 전압강하 보상장치(동적전압보상장치)가 이용되고 있다. UPS는 납축전지의 고 에너지 밀도를 이용하여 정전 등 장시간(5-15분 정도)의 보상을 수행하는 경우에 유리하지만, 납축전지의 수명이 짧고, 재료의 환경적 악영향 및 유지보수의 문제점이 제기된다. 또한 알루미늄 전해커패시터를 이용한 동적전압보상장치(Dynamic Voltage Restorer ;DVR)에는 급속충방전이 가능하지만 커패시터의 에너지 밀도가 낮기 때문에 보상시간이 짧고 그 수명이 평균 5-6년 정도로 짧다는 단점이 있다[1-2].

따라서, 이러한 전력변환 보상장치에 전기이중층콘덴서 또는 Super-Capacitor를 이용하면, 전해 커패시터와 납축전지의 장점들은 그대로 유지하면서 에너지 축적용량, 수명 및 안전성 등 단점을 보완할 수 있기 때문에 전압보상장치 및 하이브리드 전기자동차, 태양광발전 시스템과 같은 일시적 전력저장장치에 널리 이용되리라 예상된다[3-4].

본 논문에서는 이와 같이 각종 전력변환장치에 이용 확대가 예상되는 Super-Capacitor EDLC에 대하여 내부의 등가직렬저항 ESR 및 정전용량의 측정기법과 실험결과를 제시하고자 한다. 측정된 실험결과와 전력변환시스템의 손실 및 보상시간의 결정에 활용할 수 있으며, 커패시터의 고장진단에 대한 기초 데이터로 활용가능하다. 또한 본 논문에서는 이러한 EDLC 를 이용하여 전압의 동적보상시스템(On-Line type UPS)에 활용할 실험 예를 제시하여 이의 활용성을 검토해 보기로 한다.

2. 에너지저장장치의 검토와 EDLC

2.1 기존 에너지 저장장치의 검토

전력에너지 저장장치로써 널리 이용되는 납축전지는 대용량 저장이 가능하기 때문에 매우 유용하게 사용되어 왔으나 환경에 취약하고 충·방전속도가 매우 느리며, 대전류 급속 충·방전이 불가능하며 수명이 매우 낮아 주기적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 또한 전해커패시터는 유전체의 두께가 대단히 얇아서 소형의 커패시터로도 상당한 용량의 에너지를 저장시킬 수 있기 때문에 대용량으로 사용이 가능하지만 에너지 저장능력이 매우 낮아 전압보상시간이 아주 짧고, 높은 리플전류에 의한 전력손실 및 온도상승으로 전해커패시터의 수명 및 폭발의 위험성에 노출되어 있다. 이러한 두 종류의 DC 전력저장장치의 문제점을 표 1에 나타내었다.

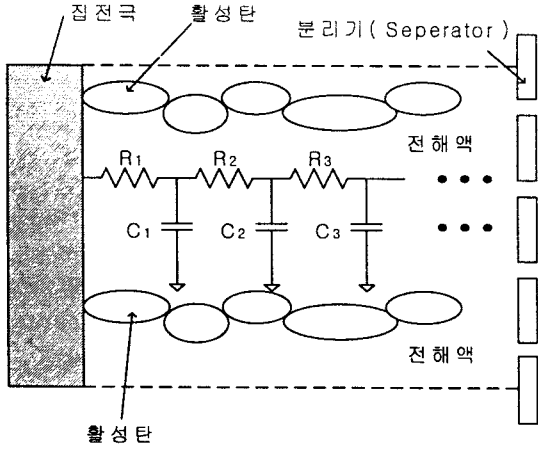
〈표 1〉 기존 에너지저장장치의 문제점

종류	문제점	내용설명
납축전지	수명 및 환경	<ul style="list-style-type: none"> • 충·방전 횟수에 따라 용량감소 • 대형화될수록 폐기물이 증가되어 환경문제에 영향
	신뢰성과 안전성	<ul style="list-style-type: none"> • 사용온도의 상한이 낮음 • 저온시 보호회로의 안전성 확보가 어려움
	충·방전 효율	<ul style="list-style-type: none"> • 균등충전 및 변환기 손실을 포함한 종합 효율 낮음
전해커패시터	온도 및 주파수특성	<ul style="list-style-type: none"> • 리플전류에 의한 전력손실
	고온에서 수명감소	<ul style="list-style-type: none"> • 온도가 높아지면 수명이 감소 • 등가직렬저항(ESR)이 증가하여 누설전류 커짐
	리플전류의 제한	<ul style="list-style-type: none"> • 고 리플 전류의 수명열화 현상
	전해액 분출 및 폭발	<ul style="list-style-type: none"> • 전기화학 반응에 의한 전도도 저하와 화학적 변질 및 증발현상 • 가연성 재료

2.2 Super-Capacitor EDLC의 검토

따라서 최근에는 기본적인 전력변환장치는 물론이고 하이브리드 전기자동차, 태양광발전 시스템 등의 에너지 저장장치에 EDLC의 사용이 점차 늘어나고 있는 추세에 있다. EDLC는 표면적(S)이 매우 큰 다공질 도체의 집전극 두 개 사이에 매우 약한 수준의 전해액이 가미되어 있는 구조이며 그림 1과 같이 등가구조를 표현할 수 있다. 현재까지 출시된 대부분의 EDLC는 주로 활성탄(活性炭)을 분극성 전극에 응용한 전기이중층커패시터이다.

전기이중층은 외부에서의 인가전압이 전해액에서 전기분해가 일어나는 전압보다 낮은 범위에서는 전류가 흐르지 않아 거의 완전 절연상태가 되므로, 이를 절연막으로 하여 +, -극을 가지는 커패시터 두 개가 직렬로 연결되어 있는 구조가 되며 이들 사이에 전해액이 덮여져 있는 상태를 얻는다. 이 절연막은 자연적으로 얻어진 것으로 막 두께는 한 개의 분자크기 정도로 얇으므로 이의 극한적인 두께(d)와 다공질에 의한 거대한 표면적에 대한 전극형성은 이론적 수식 ($C = \epsilon S/d$)과 같이 큰 정전용량의 커패시터 제작이 가능하게 된 것이다.



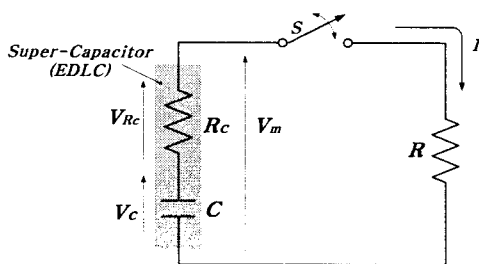
〈그림 1〉 Super-Capacitor EDLC의 등가구조

〈표 2〉 각 에너지 저장장치의 성능비교

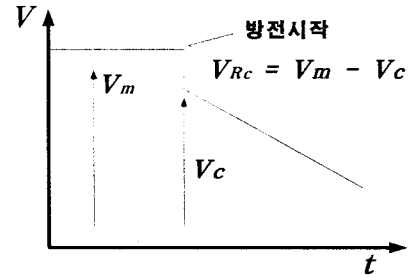
특징 \ 종류	전해커패시터	EDLC	납축전지
방전시간	수초	수초~수(십)분	수시간
충전시간	수초이내	수(십)초이내	수시간
에너지밀도 (Wh/kg)	~0.1	2~10	20~100
출력밀도(W/kg)	10,000이상	1,000~2,000	50~200
충·방전효율(%)	90~98	90~95	70~85
작동온도(℃)	-25~65	-40~90	-20~70
작동전압(VDC)	6.3~450	1~5.5	~2.5(3.0)
수명	2~10년	20년(이상)	3~5년 정도

3. Super-Capacitor EDLC의 파라미터산출

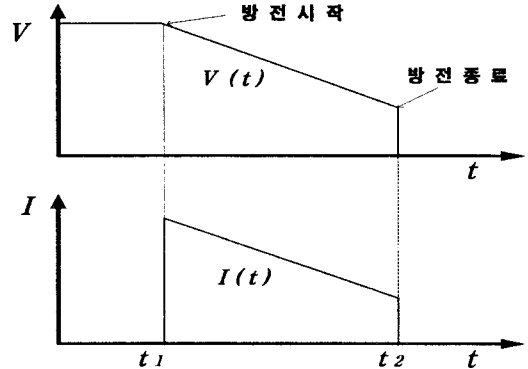
앞 장에서 설명한 Super-capacitor EDLC는 그림 1과 같이 RC회로로 간략하게 등가모델화 할 수 있다. 이때의 등가직렬저항 ESR 및 정전용량은 그림 2와 같은 회로구성으로 측정할 수 있다. 이러한 EDLC의 파라미터는 온도변화 및 열화의 정도에 따라 이의 동작 특성변화 및 전력변환기의 보상시간을 결정하므로 매우 중요한 내부 변수가 될 수 있다. 제작사에서 제시한 사양은 열화 정도에 따라 그 값이 변화하므로 별도로 이를 측정할 수 있는 것이 바람직하며, 이의 결과에 근거하여 전력변환기의 진단시스템에 적용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이들의 사양에 대한 내부 파라미터 측정기법을 제시하고자 하며, 이의 측정회로 및 전압측정의 파형예시를 그림 2에 나타내었다.



〈그림 2〉 EDLC의 등가 및 측정회로



〈그림 3〉 EDLC의 ESR측정을 위한 방전전압



〈그림 4〉 EDLC의 C값 측정을 위한 전압·전류

그림 2의 회로에서와 같이 EDLC 뱅크는 평상시 일정전압 V_m 을 충전하고 있다가 스위치 S 및 부하저항 R을 연결하여 스위치를 온 시키면 방전이 시작된다. 이때의 방전 스텝전압은 그림 3과 같이 표현할 수 있으며, EDLC의 등가직렬저항(ESR) R_C 는 EDLC의 하강전압 V_{Rc} 의 관계식 (1) 및 식(2)를 이용하여 얻을 수 있다. 이는 식 (1)의 관계, 즉 미리 충전된 EDLC전압 V_m 과 스위치 S를 닫는 후의 부하전압 V_C 를 측정하여 V_{Rc} 와 이때의 방전전류 I를 측정하는 것에 의하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$V_{Rc} = V_m - V_C \quad (1)$$

$$R_C = \frac{V_{Rc}}{I} \quad (2)$$

또한, EDLC의 정전용량 C[F]는 커패시터에 축적된 에너지 U의 관계에 의하여 방전시작 시간 t_1 및 방전 종료시간 t_2 에서의 전압/전류를 측정하여 식 (3)과 같이 축적에너지를 구하고 이를 식(4)와 같이 정리하여 C값을 구할 수 있다.

$$U = \int_{t_1}^{t_2} V(t) I(t) dt = \frac{1}{2} CV(t_1)^2 - \frac{1}{2} CV(t_2)^2 \quad (3)$$

$$C = \frac{2U}{V(t_1)^2 - V(t_2)^2} \quad (4)$$

4. EDLC의 측정실험 및 응용

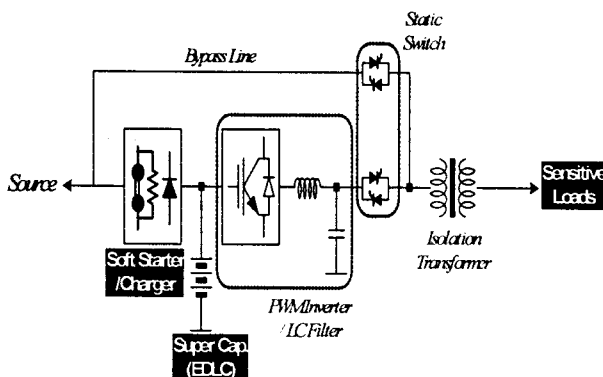
본 실험에서는 내압 2.3[V], 정전용량 6,000[F]인 M사의 EDLC 70개를 직렬로 접속하여 160[V], 85.7[F]으로 단위모듈화 시켰으며 이를 이용하여 실험을 수행하였으며, 이의 결과를 표 3 및 표 4에 나타내었다.

〈표 3〉 내부저항(R_c)의 측정결과

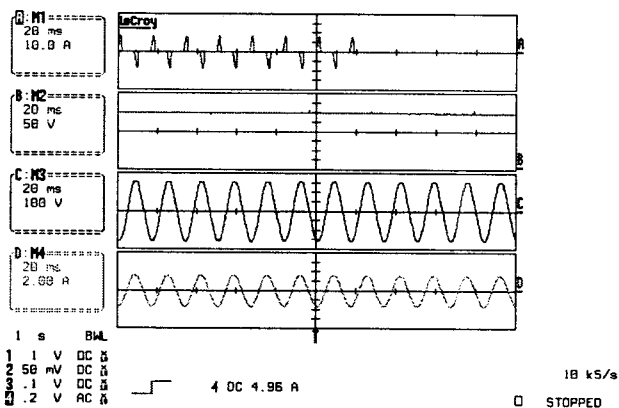
부하저항 $R[\Omega]$	내부저항 $R_c[m\Omega]$ (EDLC 합성저항)	1개당 내부저항 $R_{ca}[m\Omega]$
0.990	155.52	2.22
0.895	151.17	2.16
0.790	154.18	2.20
0.690	155.32	2.22
0.590	150.76	2.15
0.490	144.06	2.06
평균	151.84	2.17

〈표 4〉 정전용량 C의 측정결과

부하 $P[W]$	정전용량 $C[F]$	1개당 정전용량 $C_o[F]$
90	74.32	5202
180	73.69	5158
270	73.70	5160
360	73.97	5178
평균	73.92	5175



〈그림 5〉 EDLC를 이용한 On-Line type UPS구조



〈그림 6〉 입력차단시 On-Line type UPS실험파형

또한 본 실험에서는 그림 5와 같이 EDLC를 이용한 On-Line type UPS를 제작하여 실험을 수행하였다. 다이오드정류기의 입력전류가 차단될 경우(가동후 약 6[s])에는 EDLC를 적용한 On-Line type UPS가 동작하여 부하에 정상적인 전압이 공급됨을 확인하는 실험파형을 그림 6에 나타내었다.

5. 결 론

Super-Capacitor EDLC는 전해커패시터와 납축전지의 장점들을 그대로 유지하면서 에너지 축적용량, 수명, 환경성 및 안전성 등 두가지 저장장치의 단점을 보완한 에너지 저장장치이다. 이러한 장점 때문에 EDLC는 UPS와 같은 전압보상장치 및 하

이브리드 전기자동차, 태양광 발전시스템과 같은 전력변환 시스템에 널리 적용되리라 예상된다.

따라서 본 연구에서는 EDLC의 특성을 파악하기 위한 내부저항 및 정전용량 산출기법을 제시한 실험과 EDLC를 이용한 순시전압강하의 동적보상시스템(On-Line type UPS)에 활용한 실험 예를 제시하였다. 파라미터 특성실험에서는 부하(P) 변화에 따른 정전용량(C)변화가 부하저항(R) 변화에 대한 내부저항(R_c) 변화 보다 둔감하게 분석되었으나 평균적으로 큰 오차는 없었다. 따라서 이러한 파라미터 산출기법은 전력변환시스템의 고장진단 시스템 구축에 기초 자료로 활용가능하리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] A. Lahyani, P. Venet, G. Grellet, and P. Vierge, "Failure Prediction of Electrolytic Capacitors During Operation of a Switchmode Power Supply," IEEE Trans. Power Electronics, Vol 13, No. 6, Nov. 1998.
 [2] Youngho Kim, "Ultracapacitor technology power electronics circuits", Power Electronics Technology, Oct. 2003.
 [3] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-Husseini, and G. Rojat, "Realization of a smart electrolytic capacitor circuit," IEEE of Industry Applications Magazine, No. 1, pp. 16 - 20, 2002.
 [4] V. A. Sankaran, F. L. Rees, and C. S. Avant, "Electrolytic capacitor life testing and prediction," IEEE Industry Applications Conference, pp. 1058 - 1065, 1997.
 [5] Matsushita Electronic Components Co, "Technical guide of aluminum electrolytic capacitors," Mar. 2, 2000.