

10kV 47kJ 에너지 저장용 고전압 캐패시터 개발

이병윤, 정진교, 이우영, 박경엽
한국전기연구원

Development of 10kV 47kJ High Voltage Energy Storage Capacitor

B.Y. Lee, J.K. Chong, W.Y. Lee, K.Y. Park
Korea Electro-technology Research Institute

Abstract - 본 논문에서는 현재, 국내에서 민수용 및 군수용 전원장치용으로 개발하고 있는 에너지 저장용 고전압 캐패시터 설계기술에 대하여 기술하고 금속증착기술을 이용하여 국내에서 처음으로 개발한 10kV 47kJ 에너지 저장용 고전압 캐패시터에 대하여 실시한 성능평가 시험 결과를 제시하고자 한다.

1. 서 론

에너지 저장용 캐패시터는 에너지의 대부분을 저장하는 유전체층과 전류를 충전하는 전극층 그리고, 이들 층 사이의 공간을 채우는 절연유로 구성되어 있으며 선진 제조업체들은 꾸준히 소재의 개발과 금속증착기술의 응용으로 고전압화, 고신뢰도화 및 고에너지밀도화를 꾀하여 왔다.

절연내력이 우수한 폴리프로필렌(PP) 필름, 폴리에틸렌 테레프탈레이트(PET) 필름 등과 같은 유전체의 개발은 에너지 저장용 캐패시터의 고전압화를 촉진시켰고, 유전체의 두께를 수 μm 까지 가능하게 한 박막 제조기술과 유전체 필름표면에 아연, 알루미늄 또는 이들의 합금을 진공상태에서 200~300 \AA 두께로 증착시켜 전극으로 이용하는 금속증착기술의 응용으로 고신뢰도화 및 고에너지밀도화를 달성하였다. 특히, 금속증착전극은 일반적으로 자기회복특성(Self Healing)[1-5]이 우수하여 수 백 혹은 수 천번의 절연파괴 및 소호과정을 거친 후에야 수 %의 커패시턴스 손실이 발생하여 수명이 다하게 되며 사고에 의한 폭발의 위험성도 크게 줄었다. 또한 수 μm 두께의 알루미늄 박막전극에 비하여 캐패시터의 증량을 크게 줄일 수 있어 에너지 저장용 고전압 캐패시터의 소형·경량화를 가능하게 하였다.

현재까지 외국의 선진 제조업체들에 의해 상업화된 것으로는 최대 0.7kJ/kg 정도의 고에너지밀도를 나타내고 있으며 연구으로는 1.0kJ/kg 이상의 것도 실현 가능한 것으로 보고되고 있다. 반면에 국내의 제조 업체들은 저압용 금속증착전극형 캐패시터를 생산하고 있으나 부가가치가 상대적으로 높은 고전압 캐패시터에는 여전히 박막전극구조를 적용하고 있는 실정이다. 따라서 외국제품에 비하여 에너지밀도, 크기, 가격 및 신뢰도 등에서 열세를 면치 못하고 있어 이미 경쟁력을 상실한 상태이다. 따라서 선진국과의 기술 격차를 극복하기 위해서는 금속증착기술을 이용한 고전압 캐패시터의 개발이 매우 시급한 실정이다.

본 논문에서는 최근 국내에서 금속증착기술을 이용하여 약 0.5kJ/kg의 에너지밀도를 목표로 개발에 착수한 10kV 47kJ 에너지 저장용 고전압 캐패시터에 대하여 그 설계기술과 성능평가 결과에 대하여 기술하고자 한다.

2. 10kV 47kJ 에너지 저장용 캐패시터 설계

2.1 정전용량 산정

일반적으로 캐패시터는 소요정전용량과 정격전압에

따라서 적당한 수의 단위 소체를 직렬 및 병렬로 접속하여 구성된다. 단위 소체의 정전용량을 C_e [F] 병렬 연결 수를 p , 직렬 연결수를 s 라 하면 캐패시터의 정전용량 C 는 다음과 같이 주어진다.

$$C = \frac{p}{s} C_e \text{ [F]} \quad (1)$$

여기에서 단위소체의 정전용량 C_e 는 유전체의 유전율을 ϵ , 유전체의 실효폭을 b [m], 유전체의 길이를 l [m], 유전체의 두께를 d [m]라고 하면 식(2)와 같이 주어진다.

$$C_e = \epsilon \frac{bl}{4\pi \times 10^3 d \lambda} \quad (2)$$

단, λ 는 금속증착필름을 감는 정도에 따라 결정되는 상수이다. 개발하고자하는 10kV 47kJ 에너지 저장용 캐패시터의 경우는 2직렬 72병렬로 총 단위소체의 수가 144개이며 단위소체의 정전용량은 약 26.0 μF 다.

2.2 전극구조 및 절연설계

그림 1에 금속증착전극형 캐패시터의 대표적인 전극구조를 도시하였다. 구조 (a)는 다른 구조와 달리 양면 증착형 전극을 이용하고 있는데, 특히 큰 전류가 요구되는 경우에 적당한 구조이다.

증착전극 재질로는 일반적으로 아연, 알루미늄 또는 이들의 합금이 이용되고 있다. 알루미늄은 자기회복성이 뛰어나 절연성능이 양호하지만 시간 경과에 따라 정전용량 감소가 크다는 단점이 있다. 아연은 시간경과에 따라 정전용량 감소는 작으나 자기회복작용시 클리어링성에 문제가 있다. 양자의 특성을 살리기 위해 이들의 합금을 이용하기도 하는데 캐패시터가 사용될 기기의 특성 및 요구조건에 따라 가장 효과적이라고 생각되는 금속을 선정하는 것이 바람직하다.

유전체로는 PP 필름 또는 PET 필름이 주로 이용되고 있으며 표 1에 이들의 특성을 정리하였다. 고전압·고용량·고에너지밀도가 요구되는 캐패시터의 경우에는 구조 (c)와 같이 유전율이 높은 절연지의 한쪽면에 금속을 증착시키고 절연내력이 우수한 PP 필름을 중첩시켜 각각의 장점을 살린 복합 유전체 구조가 이용되기도 한다. 또, 필름에는 절연유가 잘 스며들지 않으므로 냉각 특성 등을 향상시키기 위해 필름 표면을 거칠게 가공하여 사용하기도 한다. 제작한 10kV 47kJ 에너지저장용 캐패시터의 전극 구조로는 그림 3 (c)를 고려하였으나 재료 수급이 곤란하여 금속증착 PP필름과 절연지를 중첩한 방식을 택하였다.

캐패시터에 사용되는 절연유는 고유전율, 고절연내력, 비가연성 및 환경친화성 등의 특성을 가져야 하는데 여기에서는 식물유인 S-oil이 이용되었다.

캐패시터 설계시, 한 종류의 유전체만이 사용되는 경우는 문제가 없으나 복합유전체가 사용되는 경우에는 다음과 같이 설계를 하지 않으면 안된다. 특히, 에너지저장용의 경우 직류절연설계를 해야하는데 만약 복합유전체에 직류전압 V 가 인가되면 각 유전체에 걸리는 전계의

세기는 다음과 같이 결정된다.

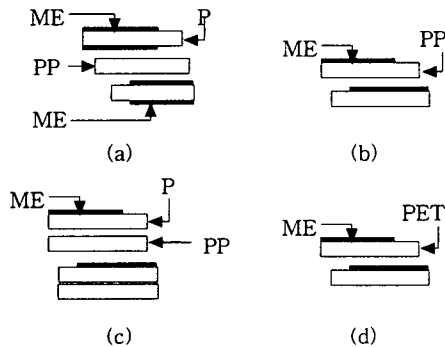
표 1. 대표적인 유전체 필름의 특성.

특성 필름	밀도 g/cm ³	유전율 (60Hz)	tan δ (60Hz)	저항률 10 ⁹ Ωcm	지류파괴전압 V/μm
절연지	1.03	6.6	≤0.5	14~18	-
PP	0.91	2.2	≤0.05	16~20	510~530
PET	1.4	3.2	0.1~0.5	17~19	-

$$E_1 = V_1 / d_1 = V \epsilon_2 d_1 / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1) \quad (3)$$

$$E_2 = V_2 / d_2 = V \epsilon_1 d_2 / (\epsilon_1 d_2 + \epsilon_2 d_1) \quad (4)$$

위의 관계식을 이용하여 각 유전체에 대한 절연설계치를 결정해주면 되며, 이외에도 연면절연내력을 유지하기 위해 필요한 여유도 및 엇갈림 등도 인가되는 연면전계치의 세기에 따라 알맞게 설정해 주어야 한다.



ME : 금속증착전극, PP : 폴리프로필렌
P : 절연지, PET : 폴리에틸렌테레프탈레이트
그림 1. 금속증착전극형 콘덴서의 전극구조

2.3 에너지 밀도

10kV 47kJ 에너지저장용 캐패시터는 정전용량이 약 26.0 μF인 144개의 소체를 2직렬 72병렬로 결선하여 제작하였다. 제작된 10kV 47kJ 에너지저장용 캐패시터의 전체적인 크기는 470mm×340mm×620mm(W×D×H)이며, 총중량은 115 kg이다. 따라서 10kV 47kJ 에너지저장용 캐패시터의 에너지밀도는 약 0.41 kJ/kg이다.

2.4 단말부 처리 기술

금속증착전극형 캐패시터의 경우 외부 전극부를 인출하기 위해 그림 2 (a)와 같이 두 금속증착필름을 배치하고 단면부에 아연 등의 금속을 스프레이 하는 방식을 취하고 있다. 최근에는 금속 증착막을 더욱 얇게 하여 자기회복 작용시의 방전에너지를 억제시켜 절연필름에 주는 손상을 극소화하고 단위 두께당의 내전압을 향상시키는 기술을 확립하여 캐패시터의 소형·경량화에 크게 기여하고 있다. 이것은 일반적으로 Heavy Edge 증착방식이라고 불리는데 그림 2(b)와 같이 외부전극 인출부의 전기적 집속성을 확보하기 위해 필름의 단면부만 금속증착 두께를 두껍게 하고 있다.

3. 충방전 수명시험

그림 3은 국내기술로 개발한 금속증착전극형 10kV 47kJ 에너지 저장용 캐패시터의 외관도이다. 그림 4는 충방전 시험설비의 주요 구성요소를 보인 것이고 그림 5

Sprayed metal terminal

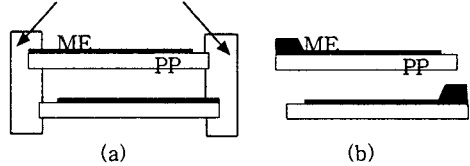


그림 2. Termination 기술

는 캐패시터의 충방전 시험회로를 도시한 것으로 충전시간은 약 38초, 충전유지시간은 7초, 방전시간은 1ms 이내로 설정하였으며 방전완료 60초후 재충전하는 방식으로 충방전시험을 수행하고 있다. 방전회로는 200mΩ의 부하저항과 40μH인덕터로 구성되어 있으며 짧은 시간에 큰 방전전류가 흐르므로 동부스바를 이용하여 결선하였으며 구갯트리거를 이용하여 방전을 개시하였다. 그림 6은 충방전 시험중에 측정된 방전전압 및 방전전류 파형으로 방전전압은 1000:1 고압 프루브를 이용하여 측정하였으며 방전전류는 1000:1 CT를 이용하여 측정하였다. 그림 7은 충방전수에 따라 측정된 정전용량의 변화 추이를 도시한 것으로 2000회의 충방전을 완료한 후에도 정전용량이 초기값에 대하여 5% 이내로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 일반적으로 금속증착전극형 고전압 캐패시터의 수명을 초기 정전용량에 대하여 5%이상 감소한 경우, 다한 것으로 정하고 있으므로 개발한 캐패시터에 대하여는 2000회 이상의 수명을 보증할 수 있게 되었다.

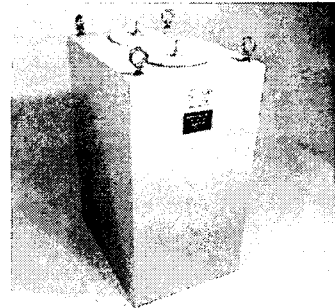
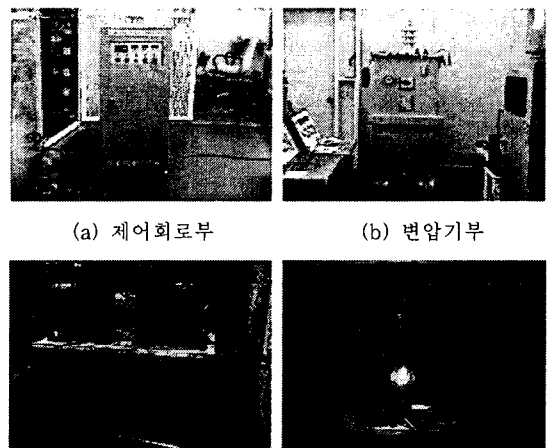


그림 3. 10kV 47kJ 에너지 저장용 고전압 캐패시터



(a) 제어회로부 (b) 변압기부
(c) 부하저항 및 부하인덕터 (d) 구갯

그림 4. 충방전 시험설비 주요 구성 요소

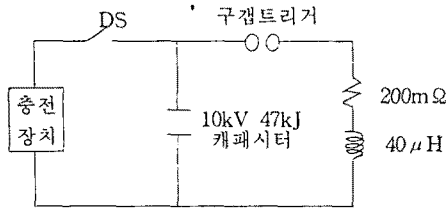
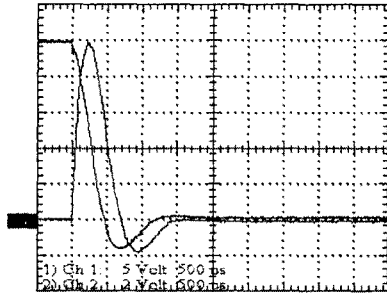


그림 5. 충방전 시험회로



Channel 1 : 방전전류 (1000 : 1 Pearson CT)
Channel 2 : 방전전압 (1000 : 1 고압 Probe)

그림 6. 충방전 측정 파형

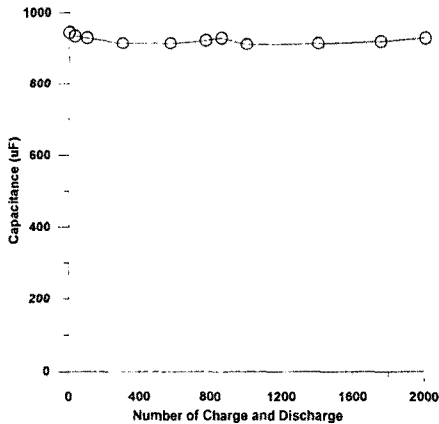


그림 7. 충방전수에 따른 정전용량 측정 결과

4. 결 론

본 논문에서는 개발중인 10kV 47kJ 에너지저장용 캐패시터의 설계기술과 관련 특성들에 대하여 기술하였다. 현재 금속증착기술의 적용으로 약 0.5kJ/kg의 에너지밀도를 달성할 수 있을 것으로 예상되는데 이것은 최대 0.7kJ/kg인 선진제품에 비하여 아직 개선의 여지가 있다. 또한 일차적으로 충방전 시험을 통해 2000회 이상의 수명을 확보했으나 충방전 시험중에 캐패시터 내부에서 상당한 양의 소음이 발생하고 있어 이에 대한 원인 규명과 대책을 강구하지 않으면 안된다. 또한, 향후 보다 고에너지밀도의 캐패시터를 개발하기 위해서는 설비투자, 신소재의 도입 및 전국구조 개선 등이 이루어져야 할 것이다.

본 연구는 과학기술부 지원 민군경용 과제인 "고전압/초고용량 커패시터 개발"로 수행한 연구 결과입니다.

(참 고 문 헌)

[1] 박경엽, 이병윤, "고전압 커패시터 개발", 제2회 전열추진세미나, 국방과학연구소, 1998
 [2] F.W. MacDougall, "The Development and Performance of High Reliability, High Energy Density Pulsed Discharge Capacitors", AeroVox, 1996
 [3] C.W.Reed, S.W.Cichanowski, "The Fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors", IEEE on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1 No. 5, Oct. pp.904 922 (1994)
 [4] W.J.Sarjeant, F.W.Macdougall and D.W. Larson, "Energy Storage in Polymer Laminate Structures Ageing and Diagnostic Approaches for Life Validation", IEEE Electrical Insulation Magazine, pp.20-24 (1997)
 [5] D. G. Shaw, S. W. Cichanowski and A. Yializis, "A Changing Capacitor Technology - Failure Mechanisms And Design Innovations", IEEE Trans. On EI Vol. EI-16 No.5, Oct., pp.399 413 (1981).