

# 비선형부하에 대한 전해 커패시터의 특성 해석과 커패시턴스 용량 추정 알고리즘

## A Characteristic Analysis and Capacitance Estimation Algorithm of Electrolytic Capacitor for Non-linear Loads

손진근\*  
(Jin-Geun Shon)

### 요약

DC/DC 컨버터 등의 전력변환장치와 같은 비선형부하에 대해 알루미늄 전해 커패시터는 에너지의 일시적 저장이나 전압 평활용으로 많이 사용되고 있다. 그러나 전해 커패시터는 사용 시간이 늘어나면서 온도 상승 및 전해액(electrolyte)의 증발 등으로 인하여 고장이 매우 빈번하게 나타난다. 따라서 본 논문에서는 이러한 사고에 대한 고장모드를 분류하고 이를 진단하기 위한 사전 단계로 전해 커패시터의 주파수 변화에 따른 특성 해석과 이를 바탕으로 한 커패시턴스 용량 추정 알고리즘을 제안하였다. 기본파에 해당하는 저주파의 주파수 분석 결과에 따른 모의 실험의 결과는 제안한 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

### Abstract

Due to the large capacity and low cost, electrolytic capacitors with of energy storage and voltage regulation are used for almost all types of non-linear load as the DC/DC converter. Electrolytic capacitor, which is the most of the time affected by the aging effect, plays very important role for the power converter system quality and reliability. Therefore, this paper proposes a new method to detect the changes the capacitance value of an electrolytic capacitor in order to analyze the internal characteristic and worn-out state of an electrolytic capacitor. Simulation results by frequency analysis show the validity of the proposed capacitance estimation algorithm.

**Key words:** Electrolytic capacitor, non-linear load(power converter system), capacitance value, frequency analysis

† 이 연구는 2009학년도 경원대학교 지원에 의한 결과이며 또한 지식경제부(에기평)의 2008/9년도 '전력산업연구개발사업'의 연구 지원에 의하여 연구 수행된 내용의 일부임.

\* 주저자 : 경원대학교 전기공학전공 부교수

† 논문접수일 : 2009년 11월 11일

† 논문심사일 : 2009년 12월 12일

† 게재확정일 : 2009년 12월 13일

## I. 서론

최근 전력전자 기술의 발달에 따라 컨버터/인버터 등 주문형 전력기기의 사용증대에 의한 비선형부하의 사용이 지속적으로 증가하고 있다. 전동기 드라이브 등의 인버터 사용 급증 및 스위칭 전원 등의 비선형 부하의 전력변환 시스템에서는 DC 에너지의 일시적 저장이나 전압 평활화를 위하여 비교적 대용량인면서 가격이 저렴한 알루미늄 전해 커패시터를 사용하는 추세이다. 그러나 이러한 전해 커패시터는 열화 및 손실의 증대에 따라 전해액의 증발이 가중되면서 폭발로 이어지는 사고가 빈번하게 발생하게 되며, 이는 전력변환장치의 구성요소 중에서 사고의 비율의 약 60[%]를 차지한다[1,2].

따라서 이러한 사고의 확대 방지와 사고 진단을 위해서는 커패시터 부품에 대한 특성해석 및 커패시턴스의 용량 추정, 커패시턴스의 내부 파라미터의 계측 등의 진단 기법이 필요하다. 본 논문에서는 이러한 진단시스템의 구성에 필요한 알루미늄 전해 커패시터의 고장모드를 분류하고, 이의 커패시터에 대한 주파수 변화에 따른 특성 해석 및 이를 바탕으로 한 커패시턴스의 용량 추정 알고리즘을 제안하였다.

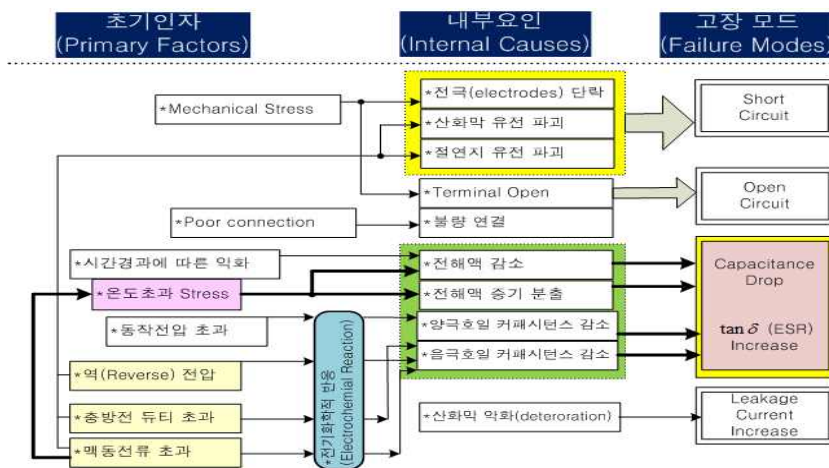
이의 추정 알고리즘은 전해 커패시터의 등가회로에 기반한 임피던스의 특성으로부터 저주파 영역에

서는 커패시터의 성분이 지배적(dominant)이며, 약수 십[kHz]에 해당하는 스위칭 주파수 영역에서는 등가 직렬저항(이하 ESR) 값이 지배적이다. 고주파 영역에서는 등가 직렬인덕턴스(이하 ESL) 값이 지배적임을 알 수 있다는 점을 기반한 것이다. 모의실험의 결과 커패시턴스의 용량 산정 식에 근거한 이의 추정 알고리즘이 타당성이 있음을 입증하였다.

## II. 전해 커패시터의 고장모드와 특성 해석

### 1. 전해 커패시터의 고장모드

각종 전력변환장치와 같은 비선형 부하에서 전해 커패시터는 에너지의 일시적 저장 및 전압 평활용으로 많이 사용되는데 이는 전도성 극판의 한쪽을 전도성 재료인 전해액(electrolyte)을 사용한다는 점이 다른 커패시터와는 다르다. 특히 알루미늄 전해커패시터의 양극판(anode foil)은 매우 높은 순도의 알루미늄 박 표면에 산화피막(AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)인 유전체(dielectric)로 형성되어 있으며, 전해액과 전해지(separator), 그리고 음극 알루미늄 박(cathode foil)으로 구성되어 있다. 이때 화학적 방법에 의하여 생성된 산화피막은 매우 얇은 유전체 코팅으로 정류성을 띄고 있으며, 음극에 이러한 산화피막을 채용하면 무극성 커패시



<그림 1> 전해 커패시터의 고장 모드 FTA

<Fig. 1> Failure mode fault tree analysis of electrolytic capacitor.

터의 구조를 가진다[3].

그러나 이러한 전해 커패시터는 사용시간의 증가에 따라 열화가 진행되어 전해액의 분출 및 온도 상승 등으로 인하여 많은 사고를 유발하게 된다. 이러한 커패시터의 사고를 확인하기 위하여 2002년도에 P.Venet[3]은 미국 MIL-HDBK 217F의 표준[4]에 의하여 SMPS회로를 구성하여 전력변환장치의 구성요소별 고장 실험을 수행하였으며, 그 결과 네 가지(전해 커패시터, 반도체 스위치, 인덕터, 다이오드)의 구성 요소에서 전해 커패시터의 사고가 약 60[%]를 차지하게 됨을 확인하였다. 따라서 SMPS 등의 전력변환 장치에서는 반도체 소자 등의 다른 구성 요소들이 수명을 보장하고 있는 대신에 상대적으로 전해 커패시터의 수명이 짧아서 시스템의 신뢰성을 매우 악화시키는 결과를 초래할 수 있다.

<그림 1>은 전해 커패시터의 고장 모드 및 그 요인에 대한 FTA(fault tree analysis)로 나타낸 것이다 [5-7]. 여기에서 전해 커패시터의 고장 모드는 크게 단락 및 개방회로, 그리고 커패시턴스의 감소 및 ESR의 증가와 누설전류의 증가 등 전기적 성능 악화를 나눌 수 있다. 단락 및 개방회로는 주로 기계적 스트레스에 의하여 단락 시에는 산화막의 유전 파괴가 있을 수 있으나 이는 산화막의 신속한 복구 성능 때문에 전류의 집중이 거의 일어나지 않아 단락회로의 형성은 매우 드물다.

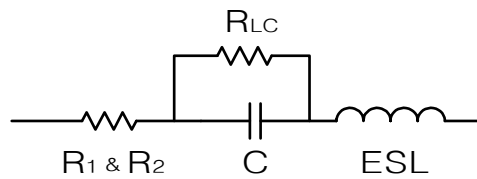
전해 커패시터의 고장 모드의 대부분은 전기화학적 반응에 의하여 나타나게 되는데 이는 전해액의 감소 및 전해액 증기분출(vaporization), 양극과 음극에서의 커패시턴스 감소로 나타나게 되며 이의 요인으로는 온도 및 전압 그리고 맥동전류 등의 초과에 의해서 발생된다. 특히 온도의 초과는 전해액 성능과 직접 관련이 있으며 기타 맥동 전류의 증가에 의하여 온도 상승을 가중시키고 있음을 알 수 있다.

따라서 전해 커패시터의 고장 및 열화의 메커니즘은 온도 상승에 따른 전해액의 증발(dry up)이 가장 큰 요인이며, 이에 따라 정전용량의 감소 및  $\tan \delta$ (또는 ESR)의 증가를 초래한다고 할 수 있으므로 커패시턴스의 정전용량 감소가 약 40[%]이상으로 이어질 경우에는 이를 수명 말기로 판단하여 고장에 대비하

게 된다[1,2].

## 2. 전해 커패시터의 특성해석

알루미늄 전해커패시터의 특성 해석 및 주파수 분석을 위한 등가회로는 <그림 2>와 같이 표현할 수 있다. 여기서 C는 커패시턴스를 나타내고  $R_1$ 은알루미늄 호일과 터미널 저항,  $R_2$ 는 전해질에 기인한 온도 민감 저항,  $R_{LC}$ 는 유전체의 누설전류(leakage current)에 의한 손실저항, ESL는 등가 직렬 인덕턴스를 각각 나타낸다.



<그림 2> 전해 커패시터의 등가회로  
<Fig. 2> Equivalent circuit of electrolytic capacitor.

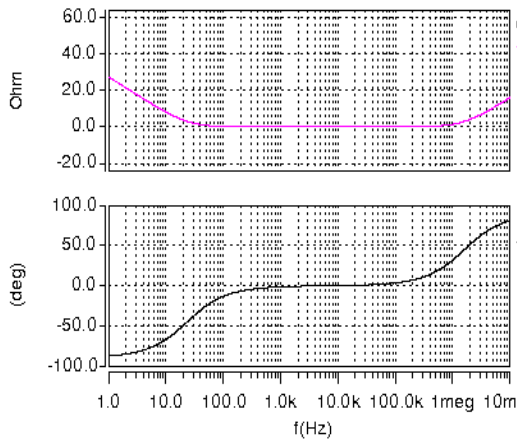
<그림 2>와 같은 전해 커패시터의 등가회로로부터 커패시터의 복소 임피던스( $Z_C$ )는 주파수  $f$ (Hz)와 함께 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z_C = \frac{1}{\frac{1}{R_{LC}} + j2\pi f C} + R_1 + R_2 + j2\pi f ESL \quad (1)$$

식 (1)을 정리하여 다시 쓰면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이 식을 이용하여 ESR의 값을 구하려면 이는 식 (2)의 좌측부 즉,  $Z_C$ 의 실수부라고 표현할 수 있고 커패시턴스의 용량은 식 (2)의 우측부와 같이 주파수의 함수 및  $R_{LC}$  유전체 누설전류에 의한 손실 저항과 관련이 있음을 확인할 수 있다.

$$Z_C = \left[ \frac{R_{LC}}{1 + (2\pi f)^2 C^2 R_{LC}^2} \right] + R_1 + R_2 + \frac{1}{j2\pi f C \left[ 1 + \frac{1}{(2\pi f)^2 C^2 R_{LC}^2} \right]} + j\omega ESL \quad (2)$$

식 (2)와 같은 임피던스의 특성식을 근거하여 주파수 변화에 따른 임피던스의 변화 특성을 시뮬레이션 한 결과는 <그림 3>과 같다. 이때의 ESR 및 ESL 값은 각각  $1[\Omega]$ ,  $100[\mu\text{H}]$ 로 선정하였고, 커패시턴스 값은  $6,800[\mu\text{F}]$ 로 선정하여 이의 변화 특성을 고찰하였다. 주파수 가변에 따른 위상변화(deg.)의 결과 그림에서 알 수 있듯이 커패시터의 임피던스 특성은  $120[\text{Hz}]$  등 저주파 영역에서는 커패시터의 성분이 지배적(dominant)이며, 수[kHz] 또는 수 십 [kHz] 등의 스위칭 주파수 영역에서는 ESR이 지배적이며, 고주파 영역에서는 ESL 값이 지배적임을 알 수 있다.



<그림 3> 커패시턴스 6800[uF]일 때의 주파수 특성  
<Fig. 3> Frequency Characteristic of electrolytic capacitor (6800[uF])

### III. 커패시턴스의 용량 추정 알고리즘과 모의실험

전해 커패시터의 복소 임피던스는 식 (2)와 같이 주파수 변동에 따라 그 크기가 달라지게 되며 ESR 값이 지배적이라 할 수 있다. 또한 커패시터 양단의 전압 및 전류( $V_{s,f}, I_{s,f}$ )파형은 임의의 형태(Arbitrary shape)의 맥동 성분 파형으로 간주할 수 있고 이는 각각 다른 정현파 성분(고조파)의 합으로 이루어진다. 따라서 주어진 어느 한 순간에 서로 다른 정현파 성분의 커패시터 전류 RMS 값과 전압 RMS 값의 비율은 특별한 주파수 성분에 대한 커패시터의 임피던스와 같다고 할 수 있다.

즉, <그림 4>와 같은 부스트(또는 벅)컨버터와 같은 전형적인 전력변환회로에서는 메인 스위치 S의 스위칭 주파수 영역에서 고조파의 관계가 집중되고 있음을 알 수 있다. 따라서 전해 커패시터의 ESR 값은 스위치 S의 스위칭 주파수 영역에서의 전류 RMS 값에 대한 전압 RMS 값의 비율이라고 할 수 있으며 이의 관계를 식 (3)과 같이 나타내어 구할 수 있다[8].

$$ESR = \frac{V_{s,f}}{I_{s,f}} \quad (3)$$

여기서,  $V_{s,f}, I_{s,f}$ 는 스위칭 주파수에서의 커패시터 맥동전압 및 전류의 RMS 값을 나타낸다.

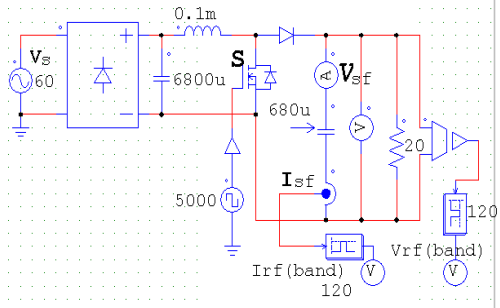
또한 <그림 4>와 같이 다이오드 정류기가 포함된 부스트 컨버터의 회로 구성에서 전원전압  $V_s$ 의 주파수가  $60[\text{Hz}]$ 일 때 정류된 직류전압의 맥동 전압/전류는 맥동 주파수  $120[\text{Hz}]$ 의 성분이 포함되어 메인 스위칭 주파수에 반영되는 이른바 부고조파(Sub-harmonics)의 형태로 나타나게 된다. 따라서 커패시턴스 값을 위한 임피던스( $Z_{C,rf}$ )의 추정은 <그림 3>에 기반하여 ESR 추정과 유사한 식의 임피던스 관계로 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$(Z_{C,rf}) = \sqrt{(X_{C,rf})^2 + ESR^2} = V_{rf}/I_{rf} \approx (X_{C,rf}) \quad (4)$$

여기서,  $rf = 120[\text{Hz}]$ 는 기본 맥동 주파수(ripple frequency)를 의미하며,  $(X_{C,rf}) = 1/2\pi(rf)C$  이다.

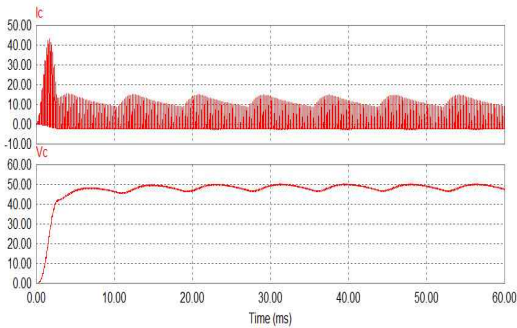
따라서 본 논문에서는 위의 알고리즘에 대한 타당성을 입증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 모의 실험에서는 <그림 4>과 같이 교류 입력전원을 바탕으로 한 부스트 컨버터의 동작을 PSIM 7.0 툴을 사용하였다. DC부하단의 맥동 전압과 전류의 계측은 저주파수의 대역통과필터(BPF)를 통과하여 FFT를 수행하도록 하였다. 이때의 시뮬레이션 조건은 다음과 같다.

- 전원  $V_s=20[\text{Vpeak}], 60[\text{Hz}]$ , 부하저항 :  $20[\Omega]$
- 듀티비 :0.5, MOSFET의 스위칭 주파수 : $5[\text{kHz}]$
- 정류기단 및 DC 출력부의 커패시터 :  $6,800[\mu\text{F}]$  및  $680[\mu\text{F}]/4,700[\mu\text{F}]$ 가변

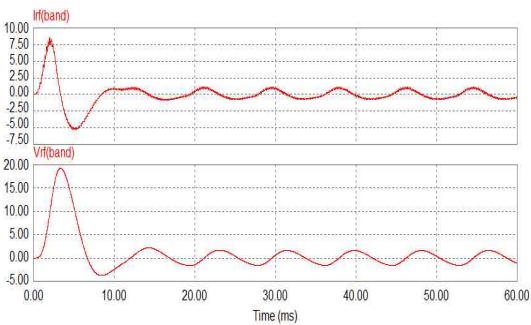


<그림 4> 부스트 컨버터의 시뮬레이션 회로  
<Fig. 4> Simulation circuit of boost converter

<그림 5>는 <그림 4>에 대한 부스트 컨버터의 성능을 검증하기 위하여 DC부하단의 커패시터 맥동 전압과 전류파형을 나타낸 것으로 BPF를 거치기 전의 파형을 나타내고 있다.



<그림 5> DC출력 커패시터의 맥동 전류/전압 파형  
<Fig. 5> Ripple current/voltage waveform of DC output capacitor



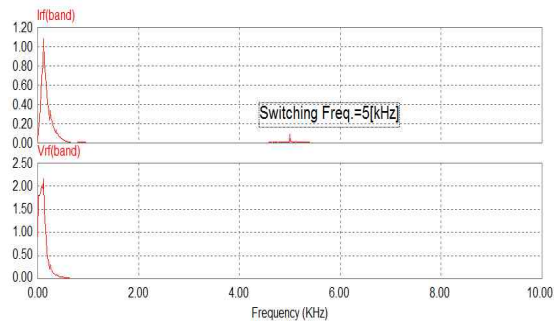
<그림 6> BPF 통과 후의 커패시터 전류/전압 파형  
<Fig. 6> Waveform of capacitor current/voltage after passing BPF(680[uF])

<그림 6>은 <그림 4>와 같이 다이오드 정류기가 포함된 AC/DC 및 DC/DC 부스트 컨버터의 시뮬레이션과 조건에서 커패시터의 용량 추정 알고리즘에 대한 결과이다. 이때의 커패시터는 680[uF]의 용량을 가졌을 때 120[Hz]의 저주파 대역통과 필터(BPF)를 거친 후의 커패시터 맥동 전류 및 전압파형을 각각 나타낸 것이며, 또한 <그림 7>은 <그림 6>의 주파수 분석 결과에 대한 파형이다.

이와 같은 시뮬레이션 결과에 대한 검증은 다음과 같다. 이미 알고 있는 680[uF]에 대한 임피던스는 120[Hz]의 주파수 성분을 대입하면 이는 식 (5)와 같이 1.95[Ω]의 값을 갖는다. 그리고 <그림 7>의 시뮬레이션 결과에 대한 FFT의 검증 결과는 식 (6)과 같이 2.00[Ω]으로 계산되어 이의 오차는 거의 없다고 판정할 수 있으며, 이의 알고리즘 개발에 의하여 전해 커패시터의 고장 진단시스템의 구성요소로 사용 가능하다고 할 수 있다.

$$(X_C)_{rf} = \frac{1}{2\pi f_{rf} C} = \frac{1}{2\pi \times 120 \times 680 \times 10^{-6}} = 1.95 [\Omega] \quad (5)$$

$$(X_C)_{rf} = \frac{V_{rf}}{I_{rf}} = \frac{2.12}{1.06} = 2.00 [\Omega] \quad (6)$$

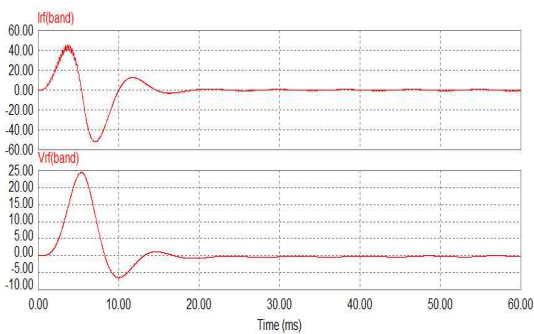


<그림 7> BPF 통과후 커패시터의 전류/전압 FFT  
<Fig. 7> FFT results of capacitor current/voltage waveform after passing BPF(680[uF])

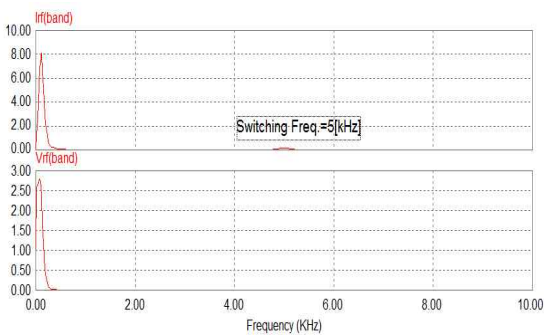
마찬가지로 <그림 8>은 앞에서의 조건과 동일하게 커패시터의 용량추정 알고리즘에 대한 결과이다. 이때의 커패시터는 4,700[uF]의 용량을 가졌을 때 120[Hz]의 저주파 대역통과 필터(BPF)를 거친 후의

커패시터 맥동 전류 및 전압파형을 각각 나타낸 것이며, 또한 <그림 9>는 <그림 8>의 주파수 분석 결과에 대한 파형이다.

이에 대한 임피던스의 계산치는 0.28[Ω]의 값을 갖으며 FFT의 검증 결과는 0.34[Ω]으로 계산되어 큰 오차는 거의 없다고 판정할 수 있다. 따라서 전해 커패시터의 열화 및 고장의 결과는 정전용량의 변화를 초래한다고 할 수 있으며, 커패시턴스의 정전용량 감소가 약 40[%]이상으로 이어질 경우에는 이를 수명 말기로 판단하는 고장 진단시스템에 도입할 수 있게 된다.



<그림 8> BPF 통과 후의 커패시터 전류/전압 파형  
<Fig. 8> Waveform of capacitor current/voltage after passing BPF(4,700[uF])



<그림 9> BPF 통과후 커패시터의 전류/전압 FFT  
<Fig. 9> FFT results of capacitor current/voltage waveform after passing BPF(4,700[uF])

#### IV. 결 론

컨버터 및 인버터 등의 비선형 부하장치에는 전압의 평활화를 위하여 거의 대부분은 가격이 저렴한 알루미늄 전해 커패시터를 채용한다. 그러나 전해 커패시터의 사용은 서서히 열화가 진행되면서 전해액이 증발되어 열화 가속 및 폭발 등을 일으키는 주요 위험 요인으로 작용하는 치명적 단점이 존재하고 있으며 이의 적절한 수명 보장을 위해서는 ESR 추정 및 커패시터의 용량 추정 등의 고장진단 알고리즘이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 이의 진단시스템 구성에 포함시킬 수 있는 전해 커패시터의 주파수 변화에 따른 특성 해석을 고찰하였고 이를 바탕으로 한 커패시턴스의 용량 추정 알고리즘을 제시하고 그 타당성을 입증하였다. 이는 전해 커패시터의 등가회로에 기반한 임피던스의 특성으로부터 저주파 영역에서 BPF를 통과시켜 이를 FFT로 분석하여 이의 결과로부터 커패시터 임피던스를 간단하게 계산할 수 있는 방식이다. 커패시턴스의 임피던스 용량 측정에 대한 모의실험의 결과는 이론적 계산치와 거의 일치하고 있음을 보여 주었으며, 이의 결과는 전해 커패시터의 고장진단 알고리즘에 적절히 사용 가능함을 보여 주었다.

#### 참 고 문 헌

- [1] A. M. Imam, T. G. Habetler, R. G. Harley, and D. M. Divan, "LMS based condition monitoring of electrolytic capacitor," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp.848-853, Nov. 2005.
- [2] M. L. Gasperi, "Life prediction modeling of bus capacitor in AC variable-frequency drives," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp.1430-1435, Nov./Dec. 2005.
- [3] P. Venet, F. Perisse, M. H. El-Hussein1, and G. Rojat, "Realization of a smart electrolytic capacitor circuit," *IEEE Industry Applications Magazine*, no. 1, pp. 16-20, 2002.

- [4]. United States Department of Defense, *US MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of electronics Equipment*, Version F, Notice 2, USA, 1995.
- [5] 기술표준원 신뢰성전문위원회, *알루미늄 전해 커패시터 해설서 RS C 0005*, 산업자원부, 2001. 11.
- [6] Matsushita Electronic Components Co, *Technical guide of aluminum electrolytic capacitors*, Mar. 2000.
- [7] <http://www.chemi-con.co.jp/e/catalog/aluminum.html>
- [8] 손진근, 김진식, “주파수 분석기법을 이용한 전압 평활용 전해 커패시터의 고장진단,” *전기학회논문지*, 제58P권, 제2호, pp. 207-213, 2009. 6.

#### 저자소개



손진근 (Shon, Jin-Geun)

1990년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학사  
1992년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학석사(전력전자전공)  
1997년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학박사(전력전자전공)  
2002년 2월 ~ 2003년 2월: 일본 가고시마대학 해외 Post-Doc.  
1997년 3월 ~ 현재 : 경원전문대학/경원대학교 전기공학과 교수  
관심분야 : 전기품질(Power Quality), 전동기제어, 능동전력필터