

전해콘덴서 수명 추정 방법

김 만고, 정 영석, 김 남호
부경대학교

Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation Method

Marn-Go Kim, Young-Seok Jung, and Nam-Ho Kim
Pukyong National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전해콘덴서의 수명 추정 방법에 대하여 기술한다.

1. 서론

알루미늄 전해콘덴서는 여러 가지 전자소자의 기능을 수행하는데 필수적인 부품이다. 향상된 효율에 대한 끊임없는 요구, 신재생 에너지의 활용 증대, 자동차 응용에서 전자 장치의 꾸준한 성장 등이 전해콘덴서의 사용을 견인해왔다.

많은 응용에서 전자 소자의 수명은 내부에 있는 전해콘덴서의 수명과 직접적으로 연결되어 있다. 정의된 기간동안 전자 소자의 신뢰성있는 동작을 보장하기 위하여 전해콘덴서의 생명유지와 관련된 성질의 완전한 지식은 필수적이다.

본 논문은 전해콘덴서의 구성을 대략적으로 서술하고 ESR(Equivalent series resistance), 리플 전류, 자기 가열, 화학적 안정성, 수명과 같은 관련된 용어를 설명한다. 전해콘덴서의 수명을 구하기 위한 추정 수단이 소개되고 예를 들어서 설명된다.

넓은 용량 범위를 동시에 가지고 있다. 매우 거칠게 된 알루미늄 아노드 박막은 얇은 부도체 층으로 덮여 있고 똑같은 표면적은 정확하게 맞는 캐소드와 전해액에 의해 접하고 있다. 전해액은 전해콘덴서의 구성을 특별하게 하고 전해액의 존재는 약간의 기술적인 결과를 낳고 있다.

- 전해질을 통한 전류의 흐름은 이온의 이동에 의해 매개된다. 그리하여 전해질 온도의 상승은 유체의 저항을 감소시켜 전기 저항 ESR을 낮춘다.
- 전해질의 비등점은 위쪽 범위의 온도를 결정하고 주변 온도와 결합한 리플 전류에 의한 최대의 허용가능한 자기 가열의 한계를 정한다.
- 절연체 층에서 전기기계적인 반응에 의한 전해질의 손실과 밀폐를 통한 확산은 전해콘덴서의 전기적인 파라메타의 변동을 일으키고 유한한 수명으로 귀결된다.

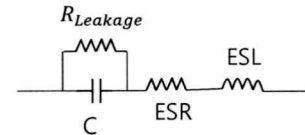


Fig. 2 Equivalent circuit of an electrolyte capacitor

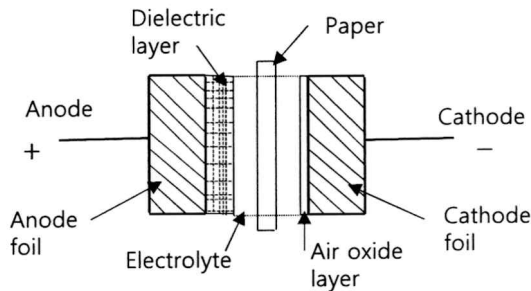


Fig. 1 Internal construction of an electrolytic capacitor

전해콘덴서의 구성

알루미늄 전해콘덴서는 수 V에서 약 700 V까지의 전압에 대한 저장 능력과 매우 작은 크기에서 1 μF에서 1 F 이상의

ESR (Equivalent series resistance)

리플 전압이 직류 옴셋 전압에 중첩하였을 때 전해콘덴서의 동작 동안에 발생하는 열적 손실의 계산은 ESR 값으로 허용될 수 있다. ESR은 근사적으로 상수인 부분과 주파수에 의존적인 부분, 온도에 의존적인 부분의 합이다:

$$ESR = R_o + R_d + R_e. \tag{1}$$

말단 탭납 연결 부위와 알루미늄 박막은 근사적으로 일정한 저항값 R_o 를 가진다. 절연체 층은 주파수에 의존적인 저항을 갖는다.

$$R_d(f) = \frac{D_{ox}}{2\pi fC} \tag{2}$$

여기서, D_{ox} 는 절연층의 유전 손실율, f 는 주파수, C 는 전해콘덴서의 정전 용량이다.

주파수 의존성은 전압이 인가되었을 때 산화막 안의 작은 쌍

극자의 정렬에 기인한 절연 손실로부터 온다. 이 부분의 ESR은 더 두꺼운 산화층 때문에 높은 정격의 전압을 갖는 전해콘덴서에 더 큰 영향을 갖는다. 전형적인 유전 손실율 D_{ox} 은 0.06~0.1 이다.

간격을 뛰우는 종이와 결합한 전해액의 온도 의존성 저항은 상온에서의 알려진 값에 기초하여 다음과 같이 계산된다.

$$R_e(T) = R_e(25^\circ C) \cdot 2^{-\left[\frac{T-25}{A}\right]^B} \quad (3)$$

전해질과 종이로 구성되는 시스템의 저항은 전해액의 저항값 자체보다 약 10배 크다. 비전도성 종이는 이전에 전도성 전해질에 의해 차지되었던 부피의 부분에 대체되며, 양쪽의 결합은 더 낮은 전도성을 갖는다. 글리콜에 기초한 전해액을 갖는 전형적인 전해콘덴서의 값은 $A=40, B=0.6$ 이다.

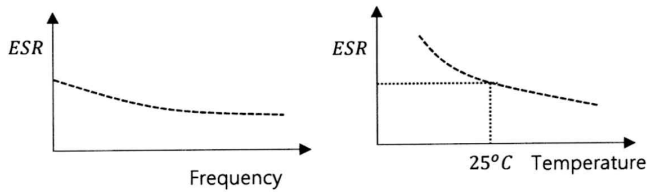


Fig. 3 ESR vs frequency and ESR vs temperature

리플 전류 (Ripple current)

대부분의 응용에서 리플 전압이 직류 전압 위에 존재하여 리플 전류와 전해콘덴서의 자기 가열을 일으킨다. 모든 주파수의 전류가 자기 가열을 일으키므로 정격 리플 전류의 실효값을 고려할 것이다.

동작 동안에 전해콘덴서의 온도는 주변 온도 이상으로 상승한다. 전해콘덴서의 내부에 있는 중심부 온도는 전해콘덴서의 표면 온도보다 더 상승한다. 정상 상태에서 인가된 전기적인 전력은 주변으로 소비되는 열 전력과 같다. 축 방향의 열 전도는 방사형 열전도보다 훨씬 커 방열판(Heatsink)는 콘덴서의 바닥에 부착한다. **전해콘덴서에 대한 주요 냉각 과정은 열 방사와 대류이다.** 대형 크기에 대해서 열 방사에 의한 냉각 과정은 대류에 의한 냉각 효과보다 더 효율적이다.

열 전도는 매우 작은 축형 전해콘덴서(Axial electrolytic capacitor)에 대해서만 적용된다. 리플 전류가 I일 때 표면적 S를 갖는 전해콘덴서의 온도상승 ΔT 는 다음과 같다.

$$\Delta T = I^2 \cdot ESR \cdot R_{th} \quad (4)$$

여기서 열저항 $R_{th} = \frac{1}{h}$ 그리고 h = 전체 열전도 계수(total heat transfer coefficient).

실제로는 지름 25 mm 이하의 소형 콘덴서 바닥의 표면 온도의 측정은 콘덴서 내부 중심부의 온도의 근사값이다. 대형 콘덴서에 대해 내부 중심부의 온도는 열전대(Thermocouple)를 이용한 직접 측정이 권장된다.

화학적 안정성(Chemical stability)

현대의 전해질 시스템은 다양한 복합 혼합물이고 전해콘덴서의 수명 동안에 그들의 화학적 안정성은 필수적이다. 화학적 안정성을 접근하는 좋은 지표는 보관 수명 (Shelf life)이다. 적정 온도에서 통상적인 저장과는 반대로 보관 수명 시험은 전압을 가하지 않고 최고 범주의 온도에 일정 기간동안 시험 대상물을 중속시키는 가속 수명 시험이다. 어떠한 전압도 인가하지 않았으므로 전해콘덴서는 이 시험 동안에 자기 치유의 혜택을 받을 수 없다. 이런 특수한 특징이 보관 수명 시험을 아주 혹독하게 한다. 이 시험 후에 누설 전류, 정전 용량, 그리고 유전 손실율이 정해진 한계 안에 머물러야 한다. 보관 수명의 높은 수치 값은 화학적 안정성에 대한 좋은 표시이다.

2. 전해콘덴서의 수명 모델

전해콘덴서의 수명 모델의 입력은 동작동안의 주변온도, 부하 리플 전류, 그리고 실제로 인가되는 전압과 함께 데이터시트로부터 얻는 전해콘덴서의 특정 파라메타이다. 수명 모델의 구조는 다음과 같다.

$$L_X = L_o \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_V \quad (5)$$

여기서 L_X =동작 조건에서 전해콘덴서의 수명, L_o =정격 전류와 전압, 최대 범위 온도에서 동작시 수명(테이타시트로부터 얻음), K_T =온도 보정 계수, K_R =리플 전류 보정 계수(자기 가열), K_V =전압 보정 계수(동작 전압).

온도 보정 계수 K_T : 전해콘덴서의 수명은 산업계에 널리 잘 확립된 10-켈빈 법칙을 따른다. 즉, 주변온도가 10 도 내려가면 수명은 두 배가 된다. K_T 에 대한 공식은 다음과 같다.

$$K_T = 2^{\frac{T_o - T_a}{10K}} \quad (6)$$

여기서 T_o =최대 범주 온도, T_a =응용에서 주변 온도.

리플 전류 보정 계수 K_R : 인가된 리플 전류는 콘덴서 내부에서 자기 가열에 영향을 준다. 리플 전류에 의한 수명의 영향은 다음 공식으로 나타내어진다.

$$K_R = K_i^A \cdot \frac{\Delta T_o}{10K} \quad (7)$$

여기서 $A = 1 - \left(\frac{I_a}{I_o}\right)^2$, I_a =응용에서 리플 전류, I_o =최대 범위 온도에서 정격 리플 전류, ΔT_o =전해콘덴서의 내부 온도 상승(전형적으로 $T_o = 105^\circ C$ 에서 5 K, $T_o = 85^\circ C$ 에서 10 K), K_i =안정 보정 계수(전형적으로 $T_o = 105^\circ C$ 에서 2 for $I_a \leq I_o$ or 4 for $I_a > I_o$, $T_o = 85^\circ C$ 에서 2). 콘덴서 내부의

온도 상승은 리플 전류의 제곱과 관계하며 식 (7)은 식 (6)과 연관된 식으로 볼 수 있다.

참 고 문 헌

전압 보정 계수 K_V : 100 V 이하 작은 크기의 방사형 전해 콘덴서에 대해 온도 의존성 전해질 손실이 수명을 결정한다. 따라서, 소형의 방사형 전해콘덴서에 대해 $K_V=1$ 이다.

중대형 크기의 스크루형 전해콘덴서에 대하여 실제로 인가된 전압은 수명에 영향을 준다. 정격 전압보다 낮은 동작 전압은 절연체 층에 적은 스트레스를 일으킨다. 동작 전압이 정격 전압에 가까울수록 더 많은 전해질이 절연층 내의 자기 회복을 위해 소모된다. 정격 전압보다 낮은 동작 전압은 중대형 전해콘덴서의 수명을 연장시킨다. 중대형 전해콘덴서 (Snap-in and screw terminal)의 인가된 전압이 수명에 미치는 영향은 다음과 같은 경험적인 공식으로 쓸 수 있다.

$$K_V = \left(\frac{V_r}{V_a}\right)^{-n} \quad (8)$$

여기서 V_r =정격 전압, V_a =인가된 동작 전압, n =지수

($0.5 < \frac{V_a}{V_r} < 0.8$ 에 대해 $n=3$, $0.8 < \frac{V_a}{V_r} < 1$ 에 대해 $n=5$).

위의 경험에 의한 식 (8)은 제조회사마다 다르며, 히타치 콘덴서의 경우 $n=2.5$ 로 제시하였다.

수명 예측의 예

390 μF , 400 V, 120 Hz에서 리플 전류 1.27 A, 105°C, snap-in 시리즈 전해콘덴서가 주변 온도 $T_a = 55^\circ C$, 20 kHz의 리플 전류 2.51 A에서 동작하고 있다. 실제 동작 전압은 정격 전압 400 V이다. 자연 대류와 방사에 의해 냉각된다고 한다. 데이터 쉬트에 주어진 수명은 정격 부하 조건에서 7000 h이다.

10 kHz 이상에서 주파수 보정 계수는 1.4이다. 식 (7)에 적용할 정격 리플 전류와 주파수와 연계된 실제 리플 전류의 비는 $I_a/I_o = (2.51/1.4)/1.27 = 1.41$ 이다. 수명 모델에 수명을 다음과 같이 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned} L_X &= L_o \cdot K_T \cdot K_R \cdot K_V \\ &= 7000 h \cdot 2^{\frac{105-55}{10K}} \cdot 4^{(1-1.41^2)} \cdot \frac{5K}{10K} \cdot 1^{-5} \\ &= 7000 h \cdot 32 \cdot 0.5 \cdot 1 = 112000 h \approx 13 \text{ 년.} \end{aligned}$$

3. 요약

알루미늄 전해콘덴서는 흔히 전자 장치의 수명을 결정한다. 전해콘덴서의 노화 개념을 완전히 이해하는 것은 예상 가능한 수명을 갖는 전자 장치의 신뢰성 확보를 위해 필요하다. 수명 예측 모델의 적용은 제품의 형태나 특정 응용에 의존하고 전해 콘덴서 공급자에 의해 제공되는 정보는 수명을 예측하는데 핵심이다.

- [1] S.G. Parler, Deriving Life Multiplier of Aluminum Electrolytic Capacitors, IEEE Power Electronics Society Newsletter, vol. 16, no. 1, pp. 11-12, Feb. 2004.