

직류 링크 전해 커패시터의 수명 추정

김형진, 이동춘
영남대학교 전자정보공학부

Life Estimation of DC Link Electrolytic Capacitors

Hyung-Jin Kim, Dong-Choon Lee
School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University

ABSTRACT

An aluminum electrolytic capacitor is used in DC Link of ac motor drive system. In this case, it usually has the shortest lifetime in the system, and then determines the system lifetime. Therefore, life estimation of the electrolytic capacitor is needed for maintenance of the circuit. In this paper, a method for life estimation is presented with a ESR(equivalent series resistance) model and a heat transfer model of capacitor that can be used to estimate operating temperature. it is investigated through a simple example using ESR and heat transfer.

1. 서론

교류전동기 구동을 위해 다이오드 정류기 PWM 인버터가 사용되는데 직류링크에 연결된 전해커패시터는 스위칭 동작에 의한 리플전류로 인하여 수명이 짧다. 전력변환장치의 반도체 스위칭 소자의 수명은 반영구적인 반면, 전해커패시터의 수명은 2~3년 정도 밖에 되지 않아 전력변환장치의 수명은 전해커패시터에 의해 좌우된다고 해도 과언이 아니다. 전해커패시터의 중요도에 비추어 그 동안 전력변환장치에 사용되는 전해커패시터에 관한 연구는 그리 많지 않았고 수명 예측을 위하여 ESR의 특성과 온도특성을 연구한 결과는 소수 발표^[1,2]된 바 있으나 국내적으로는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 알루미늄 전해커패시터의 등가직렬저항모델을 세우고 리플전류에 의한 주열 손실과 열전달에 의한 방열에너지를 이용하여 수명을 예측하고자 한다. 실제 시스템에 적용하여 수명을 추정하고, 동작온도가 커패시터의 수명에 미치는 영향을 고찰한다.

2. 전해 커패시터 모델링

그림 1은 알루미늄 전해커패시터의 구조와 등가모델을 나타낸다. 여기서, R_0 는 호일, 탭, 단자의 저항, R_1 은 전해질의 저항, R_2 는 유전손실 저항, C_2 는 유전손실 커패시턴스, C_1 은 단자 커패시턴스를 나타낸다. 커패시터 모델에서 등가직렬저항(ESR)이 방열에 관계되는데 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$ESR = \frac{R_2}{1 + (2\pi f)^2 (C_2 R_2)^2} + R_0 + R_1 [\Omega] \quad (1)$$

ESR은 주파수의 함수이고 온도에 따라 변하므로 수명계산에 이들의 영향이 고려되어야 한다. 산화 유전체 저항 R_2 는 주파수에 민감하고 전해질 저항 R_1 은 온도에 민감하다. 식(2)는 R_1 을 온도의 함수로^[1] 나타낸 것이다.

$$R_1 = R_{1base} \cdot e^{\frac{(T_{temp} - T)}{F}} [\Omega] \quad (2)$$

그림 2는 주파수가 증가할수록 ESR은 감소하고 일정 주파수대에서는 거의 변화가 없음을 나타낸다. 그림 3은 온도가 증가할수록 전해질 저항 R_1 의 전도성이 증가하여 식(2)에 의해 ESR값이 감소함을 나타낸다. 그러나 실제 R_1, R_2 의 변화는 전체 임피던스를 나타내는 C_1 에 비해 작으므로 리플전류에는 큰 영향을 주지 않는다.

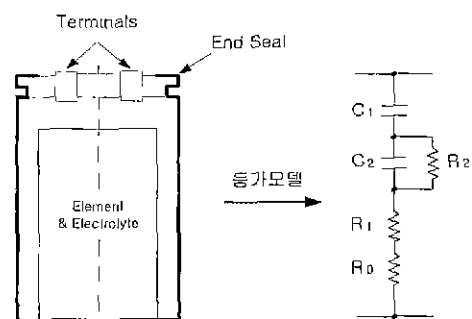


그림 1. 전해커패시터와 등가모델
Fig. 1 Electrolytic capacitor model

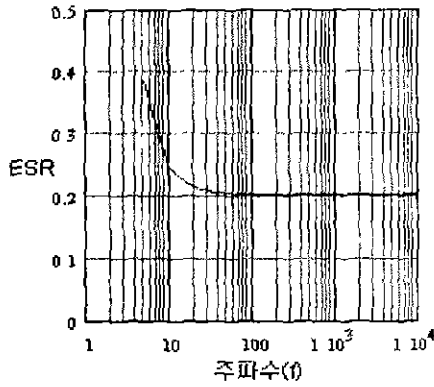


그림 2 주파수 변화에 따른 ESR
Fig. 2 Effect of Frequency on ESR

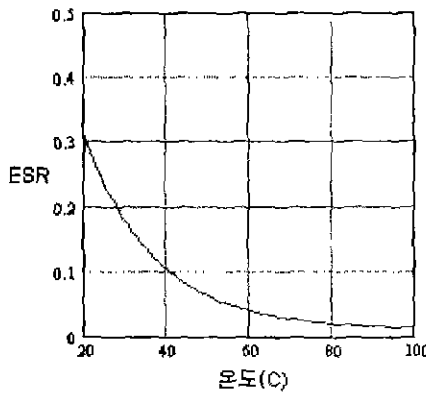


그림 3 온도 변화에 따른 ESR
Fig. 3 Effect of Temperature on ESR

리플전류 인가시 커패시터 내부의 발열은 식(3)과 같다.

$$Q = I_{ripple}^2 \cdot ESR + V_{dc} \cdot I_{lkg} \quad (3)$$

$$\approx I_{ripple}^2 \cdot ESR [W]$$

여기서 V_{dc} 는 직류링크전압, I_{lkg} 는 누설전류이다. 누설전류는 작은 값이므로 식(3)의 2항은 무시할 수 있다. 리플전류의 고조파 차수가 크다면 ($\geq 2kHz$) 식(3)을 적용할 수 있다.

다이오드 정류기에 의해서 발생하는 전류 리플은 저차 성분이 많이 포함되어 있으므로 식(3)은 다음과 같이 수정된다.

$$Q = I_{ripple}^2 \cdot ESR$$

$$\Rightarrow I_{6,rms}^2 \cdot ESR_{6th} + I_{12,rms}^2 \cdot ESR_{12th} \quad (4)$$

$$+ I_{18,rms}^2 \cdot ESR_{18th} + I_{inv,rms}^2 \cdot ESR_{inv} [W]$$

직류링크 리플전류를 FFT분석하면 다이오드정류기에 의한 6, 12, 18차 고조파와 인버터의 스위칭주파수대의 고조파로 나눌 수 있다. 식(4)는 다이오드 정류기와

PWM 인버터 시스템에서 직류링크 전해커패시터의 주울열 손실이다. 등가직렬저항도 주파수에 의해 영향을 받으므로 각 고조파에 대한 ESR값도 그 주파수에 대한 값으로 표시된다. PWM컨버터, PWM인버터의 경우는 리플전류의 실효값과 ESR값만으로 구할 수 있다.

3. 열전달 방정식

주울열 손실에너지를 온도상승으로 변환하기 위해서 열전달 조건이 필요하게 된다. 시스템의 동작에 의해 발생하는 온도상승분으로부터 실제 커패시터 내부의 동작 온도를 예측할 수 있다. 커패시터는 주로 대류와 복사에 의해서 냉각되고 방열에너지는 식(5)와 같다.

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} [W] \quad (5)$$

3.1 대류와 복사에 의한 방열

대류에 의한 열전달은 식(6)과 같다.

$$Q_{conv} = h \cdot S \cdot \Delta T [W] \quad (6)$$

h 는 열전달계수, S 는 커패시터의 표면적이고 ΔT 는 온도상승분이고 열전달계수는^[2] 식(7)과 같다.

$$h = G \cdot \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad (7)$$

G 는 상수로 1.32이고 $L(m)$ 은 전해커패시터의 지름이다.

복사에 의한 열전달은 식(8)과 같다.

$$Q_{rad} = e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) [W] \quad (8)$$

여기서 e 는 방사율(0.85로 가정), σ 는 스테판-볼츠만의 상수 ($5.669 \cdot 10^{-8} W/m^2K^4$), T_{surf} 는 커패시터의 표면온도이고 T_{amb} 는 주위온도이다.

그림 4는 대류와 복사에너지가 온도상승에 따라 변하는 추이를 보여주고 있다.

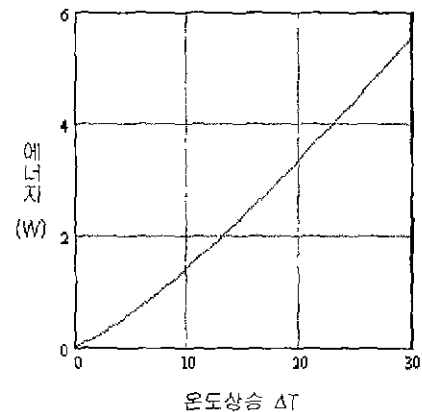


그림 4 대류와 복사 에너지
(주위온도 27 °C)

Fig. 4 Heat dissipation

그림 4와 주울열 에너지가 만나는 평형점이 실제 커패시터 외부에 발생하는 온도상승분을 결정한다.

3.2 전해커패시터의 동작온도

ESR에 의한 주울열과 열전달 방정식에 의하여 커패시터 외부의 온도를 계산할 수 있다. 그러나, 그림 1의 구조의 element 온도 즉, 전해질 온도로부터 커패시터의 수명을 예측하여야 한다.

전해질의 온도상승이 표면온도상승보다 더 크다고 가정하면 식(9)로부터 전해질의 온도상승을 추정할 수 있다.

$$T_{element} = T_{amb} + \alpha \cdot \Delta T [K] \quad (9)$$

여기서 α 는 온도상승계수(=1.5)이고 $T_{element}$ 는 전해질 온도이다.

4. 수명추정

커패시터의 수명추정식은 Arrhenius's 방정식에 의해서 설명된다.

$$\frac{L_2}{L_1} = 2^{\frac{T_1 - T_2}{10}} \quad (10)$$

여기서 L_1, L_2 는 T_1, T_2 에서의 수명이고 T_1, T_2 는 전해질온도로 절대온도를 나타낸다. 커패시터의 동작온도를 추정하고 식(10)을 이용하면 수명을 예측할 수 있다^[1]. 커패시터의 수명은 정격온도에 비해 매 10 °C 감소할 때마다 2배수로 증가한다.

5. 수명예측 예

앞에 전개된 이론을 바탕으로 실제 시스템에서 커패시터의 수명을 추정하고자 한다. 수명예측을 위한 파라미터 값은 표 1과 같다.

표 1 시스템과 커패시터 특성
Table 1 System and capacitor characteristic

| System | | 3상 다이오드정류기 PWM인버터 |
|--------|------|---------------------------|
| 커패시터 | 정격 | 350 [WV], 4700 [μ F] |
| | 동작온도 | 85 [°C] |
| 시 | 정격수명 | 1000 [hour] |
| | 허용리플 | 8.3 [A] @120 [Hz] |

1) 리플전류에 의한 주울열 손실

다이오드정류기와 PWM 인버터를 이용한 전동기 구동 시스템에서 직류링크단의 리플전류는 그림 5와 같다. I_c 는 직류링크 리플전류이고 I_2 는 유전

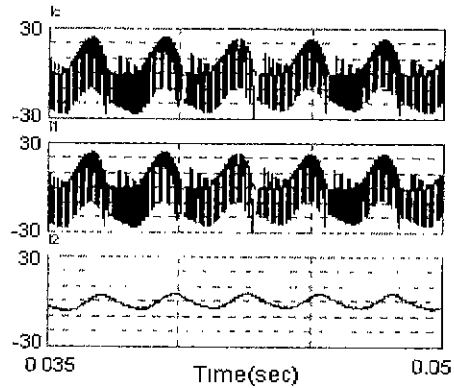


그림 5 DC Link 리플전류
Fig. 5 DC Link ripple current

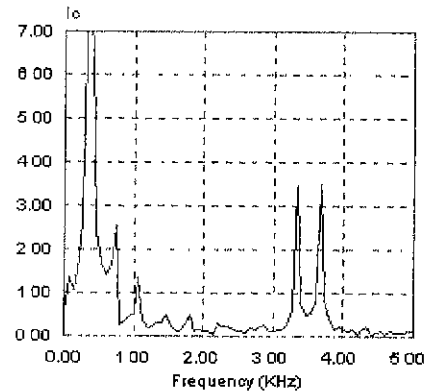


그림 6 커패시터 리플전류 FFT 분석
Fig. 6 Ripple current spectrum

손실저항 R_2 로 흐르는 리플전류이고 I_1 은 R_0 와 R_1 통하여 흐르는 리플전류이다. I_2 의 리플성분이 C_2 에 의하여 많이 줄어들었음을 알 수 있다.

그림 6은 전해커패시터에 흐르는 리플전류를 FFT분석한 결과이다. 다이오드 정류기에 기인한 6, 12, 18차 고조파와 인버터의 PWM에 기인한 스위칭 주파수대(3.5 kHz) 부근의 고조파 성분이 크게 나타난다.

2) 대류와 복사에너지

식(6)으로부터 대류에 의한 방열에너지는 다음과 같다. 표면적은 0.03 [m^2], 지름은 63.5 [mm]이다.

$$Q_{conv} = h \cdot S \cdot \Delta T$$

$$= 1.32 \cdot \left(\frac{\Delta T}{63.5 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.25} \cdot 0.03 \cdot \Delta T [W]$$

식(8)로부터 복사에 의한 방열에너지는 다음과 같다. T_{surf} 는 커패시터의 표면온도이고 T_{amb} 는 주위온도이다.

$$Q_{rad} = e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{surf}^4 - T_{amb}^4)$$

$$= 0.85 \cdot (5.669 \cdot 10^{-8}) \cdot 0.03$$

$$\cdot ((\Delta T + T_{amb})^4 - T_{amb}^4) [W]$$

방사율 e 는 표면의 성질에 의존한다. 0~1사이의 무차원수이고 흑체일 경우 0.9로 둔다.

3) 온도상승분

주울열과 대류와 복사에 의한 평형점이 온도상승분이므로 1),2)를 같게 두면 평형온도 즉, 온도상승분 ΔT 를 구할 수 있다.

식(4)를 이용하여 주울열 손실을 구하면 2.5(W)의 에너지 손실이 발생한다^[7]. ESR값의 변화가 리플전류의 크기에 큰 영향을 미치지 않는다고 가정하면 그림 4에서 온도상승에 따라 2.5(W)로 일정한 직선을 나타낸다. 평형점을 찾아 온도상승 ΔT 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta T = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4) 커패시터 전해질 온도

온도상승분이 $\Delta T = 15 \text{ } ^\circ\text{C}$ 이므로 식(9)에 대입하면 커패시터 내부의 동작온도를 추정할 수 있다.

$$T_{element} = (273 + 27) + 1.5 \cdot 15 [K]$$

$$= 322.5 [K]$$

5) 수명 계산

동작온도를 안다면 수명은 식(10)을 통하여 알 수 있다. 표 1에서 정격온도 85 $^\circ\text{C}$ 에서 1000[hr]의 수명을 가지는 커패시터가 49.5 $^\circ\text{C}$ 로 사용된다면 그 수명은 다음과 같다.

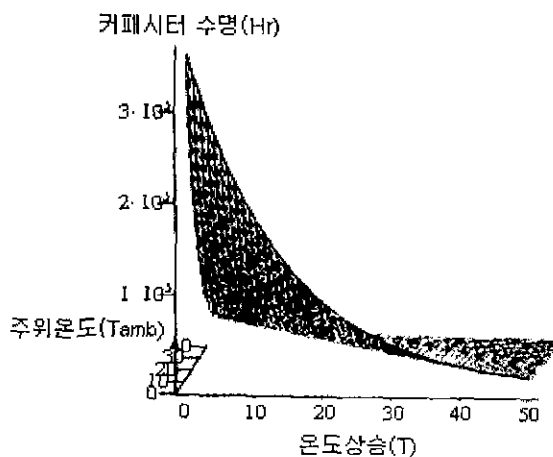


그림 7 온도상승과 주위온도에 의한 수명
Fig. 7 Effect of temperature on lifetime

$$Estimated\ Life = 1000[hr] \cdot 2^{\frac{358-322.5}{10}}$$

$$= 11,710[hr]$$

정격온도 (85 $^\circ\text{C}$)보다 35 $^\circ\text{C}$ 낮은 온도로 커패시터가 동작되므로 수명이 약 12배로 증가하였다.

그림 7은 리플전류에 의한 발열이 증가하면 수명은 줄어들고 주위온도가 증가하면 전해커패시터의 예상수명이 현저히 줄어드는 것을 보여 준다.

6. 결 론

본 논문에서는 전동기 구동 시스템의 직류링크 전해커패시터의 등가직렬저항과 열전달 방정식을 이용하여 수명추정 알고리즘을 전개하고 수명을 예측하였다. 등가직렬저항이 주파수와 온도에 따라 변화함을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 주울열에 의한 에너지 소비와 방열에너지가 일치하는 온도 평형점을 이용하여 발열에 의한 온도상승분을 추정한다. 수명을 결정하는 요소는 커패시터의 외부온도가 아니고 전해질의 온도이다.

실제 커패시터의 수명은 동작주파수와 동작온도에 민감하기 때문에 수명을 정확히 예측하기는 매우 어려우나 본 논문의 알고리즘은 수명추정에 관한 하나의 지침이 될 수 있다. 또한 다른 형태의 전력변환장치에 사용되는 전해커패시터의 수명예측에 그대로 응용될 수 있다.

이 논문은 기초전력공학공동연구소의 연구비 지원으로 수행되었음 (과제번호:99-026)

참 고 문 헌

- [1] Gasperi, M.L., "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors," *IEEE IAS, Annual Meeting*, pp. 1042-1047, 1997, October.
- [2] Gasperi, M.L., "Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors," *IEEE IAS, Annual Meeting*, pp. 1347-1351, 1996, October.
- [3] McAdams, W. H., *Heat Transmission*, McGraw-Hill Book Company, Inc., NY, pp.175, 1954.
- [4] Nichicon Corporation, "Technical Notes on Aluminum Electrolytic Capacitors," Kyoto, Japan, 1999, June.
- [5] Hitachi AIC Inc., "Technical Report Aluminum Electrolytic Capacitors," Tokyo, Japan, 1998, August.
- [6] 삼화전기., "Capacitors," Seoul, Korea, 1997.
- [7] 김형진, 이동춘, 'AC/DC/AC 컨버터의 직류링크 리플 전류 해석,' 대한전기학회 춘계학술발표회 논문집, Section III-A 6~10, 2000.