

인버터용 전해커패시터의 수명 추정

이 동 춘
영남대학교 전자정보공학부

Life Estimation of Electrolytic Capacitors in Inverters

Dong-Choon Lee

School of Electrical Engineering and Computer Science, Yeungnam University

Abstract

In general, aluminum electrolytic capacitors are used in the DC link of PWM inverters for ac motor drives. The capacitor usually has the shortest lifetime in the system, and then determines the lifetime of the inverter system. In this paper, a method of capacitor lifetime estimation is proposed by using an ESR (equivalent series resistance) model and a heat transfer model of capacitor, from which internal operating temperature is estimated. Then, the lifetime is predicted by Arrhenius's equation. A practical example is presented.

1. 서 론

직류를 교류로 변환하는데 사용되는 인버터에 출력 전압을 평활화하고 입력전압변동에 대한 에너지 버퍼의 역할로서 통상 전해커패시터가 사용된다. 이 전해커패시터는 수명이 짧아 전체 시스템의 수명을 결정하는 중요한 요소가 되므로 이에 대한 수명을 예측할 필요가 있다.

이를 위해 먼저 전력변환기의 직류링크 리플전류를 해석한다[1][2]. 다음, 전해커패시터의 등가직렬저항과 리플전류로부터 주열 손실을 계산하고 대류와 복사 에너지를 이용한 열전달방정식으로 커패시터 내부의 온도상승분을 추정한다[3][4]. 이 온도상승분을 Arrhenius 방정식에 대입함으로써 커패시터의 예상수명을 얻을 수 있다. 본 연구에서 커패시터의 수명을 추정하는 실례를 제시한다.

2. 3상 AC/DC/AC 컨버터의 직류링크 리플해석

그림 1은 가변속 교류 전동기구동 시스템을 나타낸다. 정류기와 인버터의 동작에 따라 직류링크에는 많은 리플전류 성분이 존재한다[1].

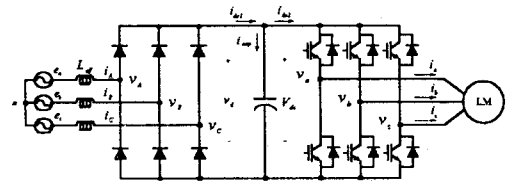


그림 22 AC/DC/AC 컨버터

링크양단의 리플전류의 스위칭 주파수대가 다르기 때문에 각각의 동작에 의해서 발생하는 리플전류는 두 시스템에 있어서 서로 독립적이다. 전체 리플전류는 다음과 같이 표시된다.

$$I_{cap} = \sqrt{I_{dc1, ripple}^2 + I_{d2, ripple}^2} \quad (1)$$

2.1 다이오드정류기의 리플전류

그림 2는 3상 다이오드정류기의 상당 등가회로를 나타낸다. 해석의 간략화를 위해 전류중복현상은 무시한다.

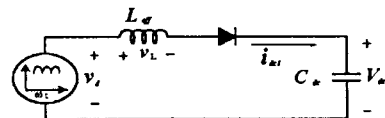


그림 23 3상 다이오드정류기의 상당 등가회로

출력리플전류 실효치는 다음과 같다.

$$I_{dc1, ripple} = \sqrt{(I_{dc1,6})^2 + (I_{dc1,12})^2} \quad (3)$$

2.2 PWM 인버터의 리플전류

3상 PWM 인버터의 회로를 그림 3에 나타낸다. 인버터의 입력전류 i_{dc2} 는 인버터의 스위칭함수와 부하상전류 i_{abc} 에 의해 구성된다.

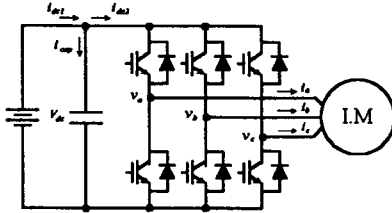


그림 24 3상 PWM 인버터

인버터 입력전류 리플성분을 구하면 다음과 같다.

$$I_{dc2, ripple} = \sqrt{I_{dc2,av}^2 - I_{dc}^2} \quad (4)$$

$$= I_M \cdot \sqrt{M_i \cdot \left\{ \frac{2\sqrt{3}}{3\pi} + \left(\frac{8\sqrt{3}}{3\pi} - 2M_i \right) \cdot \cos^2 \varphi_M \right\}}$$

3. 전해커패시터의 등가모델

알루미늄 전해커패시터의 구조와 등가모델을 그림 4에 나타낸다. 여기서 R_0 는 호일, 탭, 단자의 저항, R_1 은 전해질의 저항, R_2 는 유전손실저항, C_2 는 유전손실 커패시턴스, C_1 은 단자 커패시턴스를 나타낸다. ESR은 다음과 같이 표현된다.

$$ESR = \frac{R_2}{1 + (2\pi f)^2 (C_2 R_2)^2} + R_0 + R_1 [\Omega] \quad (5)$$

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. 실제 R_1, R_2 의 변화는 전체 임피던스를 나타내는 C_1 에 비해 작으므로 리플전류의 크기에는 큰 영향을 주지 않는다.

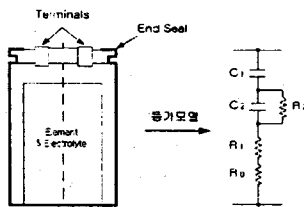


그림 4 전해커패시터와 등가모델

4. 열전달 방정식

주울열 에너지를 온도상승분으로 변환하기 위해서 열전달방정식이 필요하다. 시스템 동작에 의해서 발생되는 온도상승분으로부터 실제 커패시터 내부의 동작 온도를 예측할 수 있다.

알루미늄 전해커패시터에 적용되는 방열식은 (6)과 같다[3].

$$Q = Q_{conv} + Q_{rad} [W] \quad (6)$$

Q_{conv}, Q_{rad} 는 대류와 복사에 의한 방열손실이다

4.1 대류와 복사에 의한 방열

대류에 의한 열전달은 식(7)과 같다.

$$Q_{conv} = h \cdot S \cdot \Delta T [W] \quad (7)$$

h 는 열전달계수, S 는 커패시터의 표면적, ΔT 는 온도상승분이고 열전달계수는 식(8)과 같다[4].

$$h = G \cdot \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{0.25} \quad (8)$$

G 는 1.32이고 L 은 커패시터의 지름[m]이다.

복사에 의한 열전달은 식(9)와 같다[4].

$$Q_{rad} = e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) [W] \quad (9)$$

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

4.2 전해커패시터의 동작온도

ESR에 의한 주울열과 열전달 방정식에 의해 커패시터 표면의 온도를 계산할 수 있다. 전해질의 온도상승이 표면온도상승보다 더 크다고 가정하면 식(10)으로부터 전해질의 온도를 추정할 수 있다.

$$T_{element} = T_{amb} + \alpha \cdot \Delta T [K] \quad (10)$$

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

5. 수명추정

직류링크의 리플전류에 의해서 커패시터에 주울열이 발생하고 대류와 복사에 의해서 커패시터는 냉각된다. 발열되는 에너지와 방열되는 에너지는 동일하다고 가정하고 내부의 동작온도를 추정한다. 동작온도와 커패시터 사이의 수명관계는 Arrhenius 방정식으로

주어진다.

$$\frac{L_2}{L_1} = 2 \frac{T_1 - T_2}{10} \quad (11)$$

L_1, L_2 는 각각 T_1, T_2 에서의 수명이고 T_1, T_2 는 전해 질온도[K]이다. L_1, T_1 은 주어지는 값이다.

6. 수명추정 사례

수명추정을 위해 사용된 시스템과 커패시터 사양은 다음과 같다.

표 1 시스템과 커패시터 사양

입력전압	3상 220V	
입력인덕턴스	2.2[mH]	
스위칭 주파수	3.5[kHz]	
정격 부하	3Hp 유도전동기	
커패시터	정격	350[WV], 4700[μF]
	동작온도	85[°C]
	정격수명	2000[hour]
	허용리플	8.3[A]@120[Hz]

1) 리플전류에 의한 주열 발생

입력전압 220[V]를 인가할 경우 다이오드정류기 출력리플전류의 실효값, 인버터의 입력리플전류의 실효값, 각주파수대에서 ESR은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{dc1,6} &= 2.414[A] & ESR_{,6} &= 0.21[\Omega] \\ I_{dc1,12} &= 0.295[A] & ESR_{12} &= 0.2[\Omega] \\ I_{dc2,ripple} &= 1.957[A] & ESR_{1nv} &= 0.2[\Omega] \end{aligned}$$

식(1)로 주열 손실을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q &= I_{dc1,6}^2 \cdot ESR_6 + I_{dc1,12}^2 \cdot ESR_{12} + I_{dc2,ripple}^2 \cdot ESR_{1nv} [W] \\ &= 2.007 [W] \end{aligned}$$

2) 대류와 복사에너지

대류와 복사에 의한 방열손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_{conv} &= h \cdot S \cdot \Delta T \\ &= 1.32 \cdot \left(\frac{\Delta T}{63.5 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.25} \cdot 0.03 \cdot \Delta T [W] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{rad} &= e \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{surf}^4 - T_{amb}^4) \\ &= 0.85(5.669 \cdot 10^{-8}) \cdot 0.03((T_{surf})^4 - T_{amb}^4) [W] \end{aligned}$$

T_{surf} 는 커패시터의 표면온도, T_{amb} 는 주위온도.

3) 온도상승

주열열과 방열손실의 평형점을 찾아 온도상승 ΔT 를 구하면 다음과 같다.

$$\Delta T = 13 \text{ } ^\circ\text{C}$$

4) 동작온도

식(10)으로 커패시터 내부 동작온도를 추정한다.

$$\begin{aligned} T_{element} &= (273 + 27) + 1.5 \cdot 13 [K] \\ &= 319.5 [K] \end{aligned}$$

5) 수명계산

동작온도를 안다면 수명은 식(11)을 통하여 알 수 있다. 정격온도 85 °C에서 2000[hr]의 수명을 가지는 커패시터가 46.5 °C로 사용된다면 그 수명은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Estimated \ Life &= 2000[hr] \cdot 2^{\frac{358 - 319.5}{10}} \\ &= 28840 [hr] \\ &= 1200[day] \end{aligned}$$

7. 결 론

본 연구에서 정류기와 인버터의 리플전류를 해석하고 커패시터의 ESR에 발생하는 발열을 구하여 열전달방정식으로부터 내부 온도를 추정하였다. 추정된 온도를 이용하여 커패시터의 동작수명을 예측하였다.

8. 참고문헌

- [1] Pekik Argo Dahono, Yukihiko Sato and Teruo Kataoka, "Analysis of Ripple Components of the Input Current and Voltage of PWM Inverters," INT. J. Electronics, Vol. 80. No. 2, pp. 265 -276, 1996.
- [2] D. Rendusara, E. Cengelci, P. Enjeti, D.C. Lee, "An Evaluation of DC-Link Capacitor Heating in Adjustable Speed Drive Systems with Different Utility Interface Options," IEEE, APEC, Proc., pp. 781-787, 1991.
- [3] Gasperi, M.L., "A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors," IEEE IAS, Annual Meeting, pp. 1042-1047, 1997, October.
- [4] Gasperi, M.L., "Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors," IEEE IAS, Annual Meeting, pp. 1347-1351, 1996, October.