

인버터의 전압 평활용 전해 커패시터 진단 기법

양진규, 이경주, 변성훈, 김정빈

(주)LS 산전 자동차 제품 연구소

Diagnosis of DC Link Electrolytic Capacitor in Inverter

Jinkyu Yang, Kyung Joo Lee, Sung Hoon Byun, Jeong Bin Kim

LSIS R&D Center, LSIS

Abstract

전해 커패시터는 인버터 등을 포함하는 전력 변환 장치에 직류 전압 평활용으로 사용되며, 다른 구성 요소와 비교하여 고장 발생률이 가장 높다. 본 논문은 이러한 전해 커패시터의 상태를 진단하는 방법에 대한 것으로 커패시터 전압의 충, 방전을 이용한다. 전해 커패시터가 충전된 상태에서 전동기에 전류를 인가함으로써 커패시터에 충전된 에너지를 방전 시키고, 방전된 에너지로부터 커패시턴스를 추정한다. 정상 상태의 커패시터와 열화된 상태의 커패시터의 용량 변화로부터 커패시터의 상태를 판별한다. 본 논문에서 제안된 기법은 상용 인버터에 적용하는 데 추가의 하드웨어가 필요하지 않아 저가로 구현할 수 있으며, 커패시터 용량의 변화를 신뢰성 있게 추정할 수 있기 때문에 커패시터 고장 진단에 효과적이다.

1. 서 론

전해 커패시터는 그 특성으로 인해 전압 평활을 목적으로 전력 변환 장치에 널리 사용되고 있지만, 그 수명은 다른 전력용 반도체 소자에 비하여 상대적으로 짧기 때문에 고장을 유발시키는 가장 주요한 요소이다. 따라서 전해 커패시터의 수명을 정확히 측정하는 것은 커패시터가 포함된 시스템 전체의 신뢰성을 확보하는 데 있어서 매우 중요하다. [1]

전해 커패시터의 수명은 커패시터 제조사에서 제공하는 datasheet에 명시된 인자로부터 수식적으로 예측할 수 있지만, 생산되는 커패시터의 용량 산포, 사용 환경에서의 리플 전류, 주위 온도 변화 등의 요인에 의하여 변화하기 때문에 수명 추정의 정확도에는 한계가 있다. 따라서 커패시터의 신뢰성 확보를 위하여 전해 커패시터의 열화 상태를 미리 판단하고, 고장으로 진행되기 이전에 그 상태를 미리 사용자에게 알리기 위하여, 현재의 커패시터 상태를 직접 관찰하는 고장 진단 수단이 필수적으로 요구된다.

전해 커패시터의 상태를 진단하기 위한 기존의 연구들에서는 커패시터의 용량이나 등가 직렬 저항 (ESR, Equivalent Series Resistance)을 추정하여 그 변화를 이용하는 방법이 주로 사용되었으나, 커패시터에 흐르는 전류를 측정하기 위하여 전류 센서나, 인버터 스위칭 주기 동안 전압의 급격한 충, 방전 변화를 측정하기 위하여 해상도가 높은 전압 센서가 추가적으로 요구되는 단점이 있다. [2]

따라서 본 논문에서는 일반적인 전동기 구동장치에서 사용되고 있는 센서(직류 링크 전압 및 상 전류 센서)만을 이용하여 직류 링크 전압 평활용 커패시터의 용량을

추정하고, 커패시터 용량의 변화로부터 전해 커패시터의 고장을 예측 혹은 진단할 수 있는 알고리즘을 제안한다.

2. 커패시턴스 추정 알고리즘

2.1 전해 커패시터의 등가회로 및 열화

전해 커패시터의 등가 모델은 그림 1 (a)와 같이 나타낼 수 있으며 저주파에서는 인덕턴스 성분을 무시할 수 있기 때문에 그림 1(b)와 같이 나타낼 수 있다.

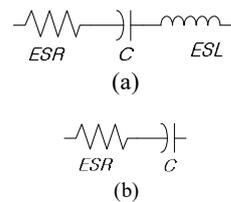


그림 1 전해 커패시터의 등가회로
Fig. 1 Equivalent circuit of Electrolytic Capacitor

전력변환 장치는 수kHz~수십kHz의 주파수로 스위칭을 하며 전해 커패시터는 회로적으로 ESR이 존재하므로, 커패시터에는 리플 전류가 존재하게 된다. 이러한 리플 전류는 커패시터가 발열하는 원인이 되고, 온도 상승으로 인하여 커패시터의 전해액이 증발을 야기한다. 전해액의 양이 감소하면 전해질의 단면적이 감소하는 것과 같은 영향을 나타내며 이로 인하여 커패시터의 용량은 감소하고 ESR은 증가하게 된다. IEC 60384-4에 의하면 정격 전압이 160V 이상인 일반 등급의 전해 커패시터는 용량이 15% 이상 감소, ESR이 3배 이상 증가하면 고장이라고 판별한다. [3] 따라서 커패시턴스와 ESR의 변화를 통하여 커패시터의 열화 정도를 파악할 수 있다.

2.2 커패시턴스 추정 알고리즘

상용 인버터로부터 측정이 가능한 것은 DC Link 전압과 상 전류이다. 전해 커패시터의 용량을 직접 추정하기 위해서는 커패시터로 흐르는 전류를 알아야 하지만 일반적으로 상 전류는 커패시터로 흐르는 전류와 입력 전류의 합으로 나타난다. 따라서 상 전류가 커패시터 전류와 같도록 하기 위하여 커패시터 측정 시에는 입력 전원을 분리한다. 또한 커패시터 용량 추정을 위하여 충전된 전압을 방전시켜야 하므로 연결된 전동기를 통하여 에너지를 소모시킨다. 추정을 용이하게 하기 위하여 직류 전류를 전동기에 인가함으로써 고정자 저항을 통하여 에너지를 소모하며, 이 때 회전자계가 형성되지 않으므로 전동기가 정지된 상태를 유지할 수 있다. 상위 스위치가 ON되면 1, OFF되면 0으로 표시하여

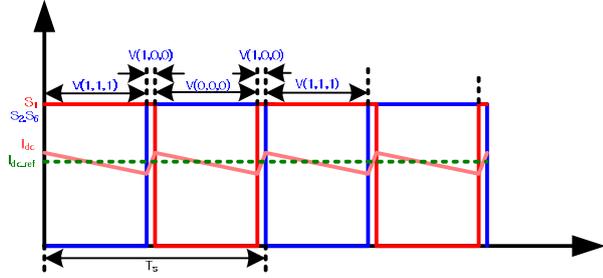


그림 2 스위치 상태 및 인가 전류 파형
Fig. 2 switch states and Injected Current waveforms

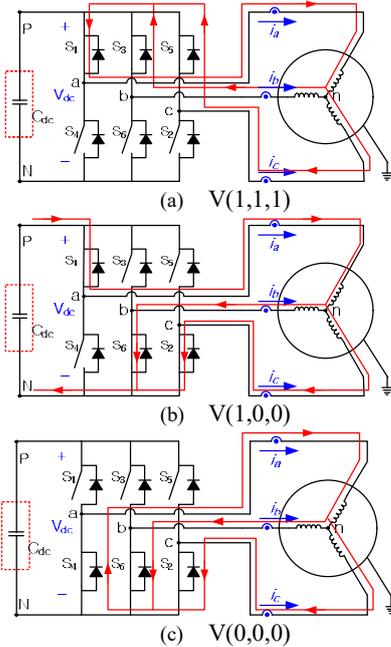


그림 3 스위치 상태에 따른 전류 흐름
Fig. 3 Current path under specific states of switch

총 6개의 스위치 상태를 $V(S_a, S_b, S_c)$ 로 표현하여, 스위치 상태와 각각의 경우에 전류 파형을 그림 2에 나타내었다. 또한, 스위치 상태에 따른 전류의 흐름을 그림 3에 나타내었다. 그림 2, 3으로부터 부하로 흐르는 전류와 커패시터에서 흘러 나가는 전류가 다른 것을 확인할 수 있고 커패시터 소모 에너지의 고려 시에 이를 고려해야 한다. 그림 3과 같이 커패시터의 에너지가 전동기를 통하여 방전되면 DC Link 전압은 하강하게 되고, 커패시터에서 방전된 에너지는 전동기 부하로 소모된 에너지와 같기 때문에, 다음 수식과 같이 방전 시작, 방전 종료 전압, 직류 전류, 방전 시간으로부터 커패시터의 용량을 추정할 수 있다.

$$C = \frac{2 \cdot P_R \cdot (t_2 - t_1)}{(V_1^2 - V_2^2)} \quad (1)$$

식 (1)에서 C는 커패시터 용량, V_1 은 방전 시작 전압, V_2 는 방전 종료 전압, P_R 은 소모 전력, t_1 은 방전 시작 시간, t_2 는 방전 종료 시간을 나타낸다. 소모 전력은 전동기에 인가되는 지령전압과 직류 전류의 곱으로 구할 수 있으므로, 결과적으로 커패시터의 용량을 직접 추정할 수 있다. 따라서, 정상상태와 열화된 상태의 커패시터의 용량 비율로부터 커패시터의 고장 상태를 파악할 수 있다.

3. 실험 결과



그림 4 커패시터가 방전되는 동안 DC Link 전압 및 부하전류
Fig. 4 DC Link voltage and load current during capacitor discharge

표 1. 다양한 상태에서의 DC Link 커패시터 용량 및 변화를 추정

Table 1 Estimation of capacity and variation of DC Link capacitor under variable conditions

C _{est} (uF)	3.7kW			7.5kw			15kW		
	2000	1500	2000	2000	1500	2000	2000	1500	2000
C _{est} (uF)	1809	1336	1809	1821	1356	1821	1634	1213	1634
C _{est} (uF)	1500	1000	1000	1500	1000	1000	1500	1000	1000
C _{est} (uF)	1336	892	892	1356	898	898	1213	812	812
C _{est} /C _{est} (%)	75.0	66.7	50.0	75.0	66.7	50.0	75.0	66.7	50.0
C _{est} /C _{est} (%)	73.8	66.8	49.3	74.4	66.2	49.3	74.2	66.9	49.7

본 논문에서는 7.5kW의 인버터를 이용하여, 3.7kW, 7.5kW, 15kW의 전동기에 대하여 실험을 진행하였고, 커패시터 용량은 2000, 1500, 1000uF으로 변화시키며 커패시턴스를 추정하였다. 그림 4에는 방전 시 DC Link 전압, 전류의 파형을 나타내었으며 이로부터 직류 전류가 전동기에 인가되며 전동기에서 에너지를 소모함에 따라 DC Link 전압이 감소하는 것을 관측할 수 있다. 각각의 경우에 따라 추정된 커패시턴스 값 및 그 변화율 추정 값을 표 1에 나타내었으며, 추정된 커패시턴스 값들은 인버터 내부 스위칭 손실이나 SMPS 소모 전력 등에 의하여 실제 커패시터 용량보다 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 하지만 초기 커패시턴스 대비 열화된 후의 커패시턴스인, 커패시턴스 변화율은 작은 오차 범위에서 측정되는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 인버터의 전해 커패시터의 고장 진단을 위하여 인버터에 적용된 센서만을 사용하여 커패시터의 열화 상태를 파악하는 방법을 제안하였다. 입력 전원을 차단함으로써 커패시터에 충전, 방전되는 전류를 부하로 흐르는 전류와 같도록 하였으며, 전동기에 전류를 흘림으로써 에너지를 소모시켰다. 부하로 소모되는 에너지를 측정함으로써 커패시터의 용량을 추정할 수 있고 그 변화로부터 커패시터의 상태를 판단하였다. 본 논문에서 제안된 기법은 하드웨어의 추가나 교체가 전혀 요구되지 않으므로 저가로 구현할 수 있으며, 기존에 개발된 상용 인버터에 적용될 수 있기 때문에 범용성이 확보된 기술이라고 할 수 있다.

Reference

[1] United States Department of Defense, "U8S MIL-HDBK-217F Reliability Prediction of electronics Equipment," Version F, Notice 2, USA, 1995.
[2] K. Lee, M. Kim, J. Yoon, S.B. Lee, and J. Yoo, "Condition Monitoring of DC Link Electrolytic Capacitors in Adjustable Speed Drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 5, pp. 1606-1613, Sept./Oct. 2008.
[3] International Electrotechnical Commission, "Fixed capacitors for use in electronic equipment," IEC 60384 Ed. 3.0, 2007