

인버터 직류링크 전압 평활용 전해 커패시터의 고장 진단

李光雲[†]

Fault Diagnosis of a Electrolytic Capacitor for Inverter DC-Link Voltage Smoothing

Kwang-Woon Lee

요 약

본 논문은 가변속 구동 장치에서 직류링크 전압 평활용으로 사용되는 전해 커패시터의 새로운 고장 진단 방법을 제안한다. 전해 커패시터의 등가직렬저항은 직류링크 전압과 부하 전류로부터 직접 추정되고, 추정된 등가직렬저항으로부터 전해 커패시터의 상태가 결정된다. 온도 변동에 따른 등가직렬저항 변동을 보상하기 위해, 커패시터 주변의 PCB에 다이오드를 부착하고 다이오드의 전압 강하로부터 커패시터의 온도를 간접적으로 검출한다. 시뮬레이션 및 실험은 제안된 방식의 효용성을 보인다.

ABSTRACT

This paper proposes a novel fault diagnosis method of a electrolytic capacitor used for DC-link voltage smoothing in adjustable speed drives. The equivalent series resistance (ESR) of the electrolytic capacitor is directly estimated from DC-link voltage and load currents and the status of the electrolytic capacitor is determined from the estimated ESR. To compensate the variation of the ESR owing to temperature variation, diodes are located on the same PCB near the capacitor and the temperature of the capacitor is sensed indirectly from the voltage drop of diodes. Simulation and experimental studies show the effectiveness of the proposed method.

Key Words : Electrolytic capacitor, Bus capacitor, Equivalent series resistance (ESR), Fault diagnosis

1. 서 론

전해 커패시터는 가변속 구동장치에서 직류링크 전압을 평활하기 위한 목적으로 널리 사용되고 있다. 전해 커패시터의 수명은 전력용 반도체 소자에 비해 상대적으로 짧기 때문에 전력 변환 장치의 고장을 유발하는 데 있어 가장 영향력 있는 인자로 밝혀져 있다.^[1-8]

전해 커패시터를 포함하는 전력 변환 장치의 신뢰성을 확보하기 위한 일반적인 방법은 커패시터 제조사에서 제공하는 데이터를 기반으로 실험을 통해 얻어진 커패시터 내부 온도 상승 값을 아레니우스 방정식에 대입하여 수명을 예측하고^[2-3], 예측된 수명이 규격 등에 명시된 제품 수명보다 큰 값을 가지도록 커패시터를 선정하는 것이다. 그러나, 이러한 방법으로는 생산되는 커패시터의 품질 산포, PCB 제조 과정에서의 오염, 과부하로 인한 맥동 전류 증가, 커패시터 주변의 온도 상승 등 예기치 못한 다양한 인자들의 영향을 배제할 수 없기 때문에 전력 변환 장치의 신뢰성 확보에 한계가 따른다.^[4] 그림 1은 PCB 제조 과정에서의 오염

[†]교신저자 : 정회원, 고려대 BK21정보기술사업단 연구교수
E-mail : kwlee89@korea.ac.kr
접수일자 : 2007. 7. 23 1차 심사 : 2007. 8. 17
심사완료 : 2007. 8. 27

으로 인해 전해 커패시터가 손상된 실제 예를 보인다.

전해 커패시터의 고장 매커니즘을 살펴보면, 열화가 진행되면서 발생하는 열 손실에 의해 커패시터의 전해액이 증발되고, 전해액 증발로 인해 등가직렬저항(Equivalent Series Resistance)이 증가하고 커패시터 용량은 감소하게 되며, 이로 인한 맥동 전류의 증가는 열 손실을 증폭하여 결과적으로 전해 커패시터의 열화를 가속시킨다.^[1-8] 열화된 커패시터가 고장으로 진행되는 과정에서 과도한 열이 발생하는 데, 이로 인해 커패시터 및 주변 부품에 고장 및 발화를 유발할 수 있다. 따라서, 전해 커패시터를 포함하는 전력 변환 장치의 신뢰성 확보를 위해서는 전해 커패시터의 열화 상태를 미리 판단하고, 고장으로 진행되기 이전에 그 상태를 사용자에게 알릴 수 있는 고장 진단 수단이 필수적으로 요구된다.

전해 커패시터의 상태를 진단하기 위한 기존의 연구들에서는 커패시터 양단의 맥동 전압과 커패시터를 통해 흐르는 전류로부터 구한 등가직렬저항과 측정된 커패시터 내부 온도를 이용하는 방법^[1], 커패시터의 용량을 측정하는 방법^[6], 커패시터의 손실 전력과 커패시터 전류로부터 등가직렬저항을 구하는 방법^[4,8], 커패시터의 실효치 전압과 전류로부터 적절한 신호 처리를 통해 등가직렬저항을 구하는 방법^[7] 등이 제안되어 왔다. 기존의 방식들은 커패시터 전류를 측정하기 위한 전류 센서가 추가적으로 필요하며, 복잡한 신호 처리 알고리즘을 필요로 하는 단점이 있다.

커패시터의 용량은 동일 규격에서도 산포로 인해 그 값에 차이가 있는 반면, 등가직렬저항은 열화가 진행되면서 정상 값 대비 2배 이상 증가되었을 때 고장으로 판정이 가능하기 때문에 전해 커패시터의 상태 진단에는 등가직렬저항을 사용하는 것이 유리하다.^[1,5]

따라서, 본 논문에서는 일반적인 전동기 가변속 구동장치에서 사용되고 있는 센서(인버터 직류링크 전압 및 상 전류 검출 센서)들만을 이용하여 직류링크 전압 평활용 커패시터의 등가직렬저항을 추정하고, 이를 기반으로 전해 커패시터의 고장을 예측 또는 진단할 수 있는 새로운 방법을 제안하고자 한다.

2. 전해 커패시터의 ESR 추정

전해 커패시터의 일반적인 등가회로는 그림 2 (a)와 같다. 60~1kHz 정도의 저주파 영역에서는 등가 직렬 인덕턴스 (ESL)의 영향을 무시할 수 있으므로, 저주파 영역에서의 전해 커패시터 등가회로는 그림 2 (b)와

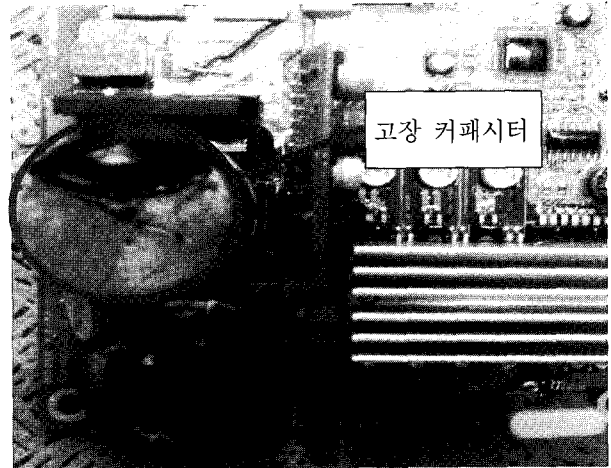


그림 1 PCB 제조 과정에서의 오염으로 인한 전해 커패시터의 고장 사례

Fig. 1 Fault example of electrolytic capacitor owing to contamination during PCB manufacturing

같이 표현할 수 있다. 그림 2(b)의 간략화 된 전해 커패시터 등가회로를 포함한 일반적인 가변속 구동장치의 구성은 그림 3과 같다.

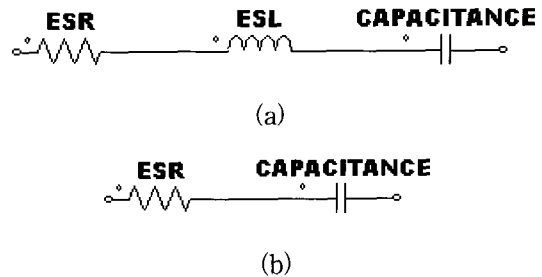


그림 2 전해 커패시터의 등가회로

Fig. 2 Equivalent circuit of an electrolytic capacitor

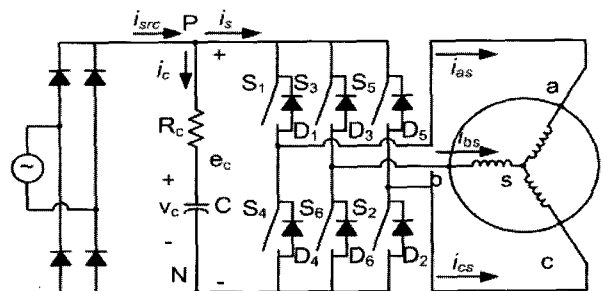


그림 3 가변속 구동장치의 일반적 구성

Fig. 3 General configuration of an adjustable speed drive

인버터를 통한 전동기 운전이 정지된 상태에서 유니폴라 PWM 방식을 사용하여 a,b 상에만 전류를 공급하는 경우 가변속 구동장치의 등가회로는 그림 4와 같다. 스위칭 소자 S6는 온 상태를 계속 유지하고, 스위칭 소자 S1만이 온-오프 스위칭 동작을 하게 된다. 커패시터가 충전되는 구간에서는 교류 전원으로부터 커패시터 충전 전류 및 부하 전류가 공급된다. 커패시터의 충전 전압이 교류 전원의 전압보다 큰 구간에서는 커패시터에 의해서만 부하에 전류가 공급되고, 이때 커패시터는 방전을 하게 된다. 커패시터 방전 구간에서 스위칭 소자 S1의 온/오프 상태에 따른 가변속 구동장치의 등가회로는 그림 5와 같다.

그림 5에서 S1의 온/오프 상태에 따른 인버터의 직류링크 전압(v_{PN})은 각각 식(1), (2)와 같다.

$$v_{PN} = v_c - R_c i_{as} \tag{1}$$

$$v_{PN} = v_c \tag{2}$$

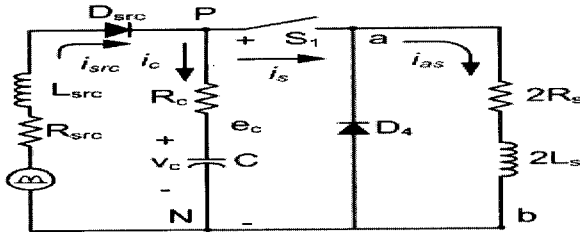


그림 4 가변속 구동장치의 등가회로
Fig. 4 Equivalent circuit of adjustable speed drive

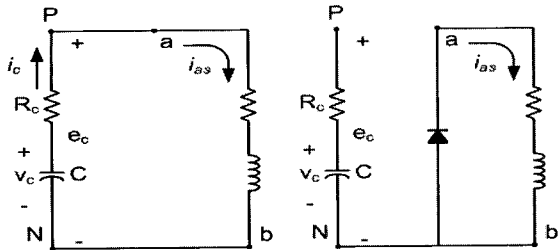


그림 5 방전 구간에서 S1의 온/오프 조건에 따른 등가회로
Fig. 5 Equivalent circuit according to the on/off condition of S1 during discharge

일반적인 가변속 구동장치에서는 인버터의 직류링크 전압 및 부하 전류를 검출하기 위한 센서를 기본적으로 포함하고 있다. 따라서, 식(1), (2)에서 v_{PN} 및 상전류 i_{as} 는 별도의 센서를 추가하지 않아도 측정이 가능하다. 스위칭 소자 S1의 통전 시점을 기준으로 인버

터의 직류링크 전압을 표현하면 다음과 같다.

$$v_{PN}(t_0) = v_c(t_0) \tag{3}$$

$$v_{PN}(t_0 + \frac{DT_s}{2}) = v_c(t_0 + \frac{DT_s}{2}) - R_c i_{as}(t_0 + \frac{DT_s}{2}) \tag{4}$$

상기 식들에서, t_0 는 스위칭 소자 S1이 통전되기 직전의 시간, D는 S1의 PWM 시비율, T_s 는 S1의 스위칭 주기, DT_s 는 S1이 통전되는 시간을 의미한다. 식(4)에서 상전류 i_{as} 의 측정 시점은 스위칭 소자 S1이 통전되는 구간의 중간 시점에 해당한다. 식(3), (4)로부터 스위칭 소자 S1의 통전 직전과 상전류 측정 시점간의 인버터 직류링크 전압 차는 다음과 같다.

$$\Delta v_{PN} = v_{PN}(t_0) - v_{PN}(t_0 + \frac{DT_s}{2}) \tag{5}$$

스위칭 소자 S1이 온-오프 동작을 수행하는 한 주기 동안 커패시터 방전에 따른 커패시터 전압(v_c) 변동이 무시할 만큼 작다고 가정하면, 커패시터의 등가 직렬저항(R_c)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$v_c(t_0) \approx v_c(t_0 + \frac{DT_s}{2}) \tag{6}$$

$$R_c = \frac{\Delta v_{PN}}{i_{as}(t_0 + \frac{DT_s}{2})} \tag{7}$$

스위칭 소자 S1이 온-오프 동작을 수행하는 한 주기 동안 커패시터 방전에 따른 커패시터 전압(v_c) 변동을 무시할 수 없는 경우, 방전 직전과 방전 직후의 인버터 직류링크 전압을 측정하여 방전으로 인한 커패시터 전압 변동(Δv_c)을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta v_c = v_{PN}(t_0) - v_{PN}(t_0 + DT_s) \tag{8}$$

스위칭 소자 S1이 통전되는 구간의 중간 시점에서 커패시터의 전압(v_c)은 다음과 같다.

$$v_c(t_0 + \frac{DT_s}{2}) = v_c(t_0) - \frac{\Delta v_c}{2} \tag{9}$$

상기 식들을 이용하여 전해커패시터의 등가직렬저항을 구하면 다음과 같다.

$$R_c = \frac{\Delta v_{PN} - \frac{\Delta v_c}{2}}{i_{as}(t_0 + \frac{DT_s}{2})} \quad (10)$$

3. 전해 커패시터의 온도 관측

전해 커패시터의 등가직렬저항은 온도 및 주파수에 따라 변화한다.^[1] 주파수의 영향은 등가직렬저항을 동일한 주파수에서 측정 및 비교함으로써 보상할 수 있다. 반면, 온도가 상승하게 되면 등가직렬저항은 감소하게 되므로 온도에 의한 영향을 고려하기 위해서는 커패시터 내부 온도를 측정 또는 관측할 필요가 있다.

커패시터의 내부 온도는 표면 온도로부터 추정이 가능하므로^[1], 커패시터 표면에 온도 센서를 부착하여 내부 온도를 관측할 수도 있다. 커패시터 표면에 센서를 부착하게 되면 제조 과정이 복잡해지므로, 본 논문에서는 제조성 및 비용을 고려하여 커패시터와 동일한 PCB에 다이오드를 장착하고, 온도에 따라 변화하는 다이오드의 전압 강하 특성으로부터 PCB 표면 온도를 관측하고, PCB 표면 온도와 커패시터 표면 온도 간의 상관 관계로부터 회귀(Regression) 식을 실험적으로 구하여 간접적으로 커패시터 온도를 관측하는 방식을 사용하였다.

그림 6은 다이오드를 이용한 온도 검출 회로의 예이다.^[9] 다이오드는 주위 온도에 따라 애노드와 캐소드간의 전압 강하가 선형적으로 변화하는 특성을 가진다. 그림 6에서 직렬로 연결된 다이오드에 바이어스 저항을 통해 전원을 공급하면 주위 온도 변화에 따라 다이오드의 전압 강하가 변동하므로, 다이오드의 출력 전압으로부터 간접적으로 온도 검출이 가능하다. 그림 7은 실험을 통해 얻은 다이오드 출력 전압과 커패시터 표면 온도간의 상관 관계를 나타낸 것으로, 정밀한 온도 측정은 어렵지만 대략적으로 커패시터의 표면 온도 관측이 가능함을 알 수 있다. 전해 커패시터의 등가직렬저항은 온도 상승에 따라 감소하므로, 고온 조건에서는 정상 및 고장 커패시터의 등가직렬저항의 값 차이가 크지 않아 커패시터의 고장 진단에 오류를 야기할 수도 있다.

따라서, 커패시터 고장 진단의 정확성을 높이기 위해서는 커패시터의 온도를 관측하여 온도가 상온의 정상 상태에 도달했을 때 등가직렬저항을 구하고, 그 값을 상온에서의 정상 커패시터 등가직렬저항 값과 비교하여야 한다.

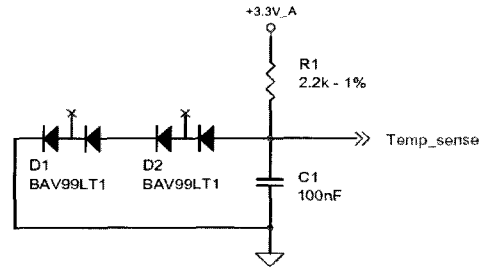


그림 6 온도 검출 회로
Fig. 6 Temperature sensing circuit

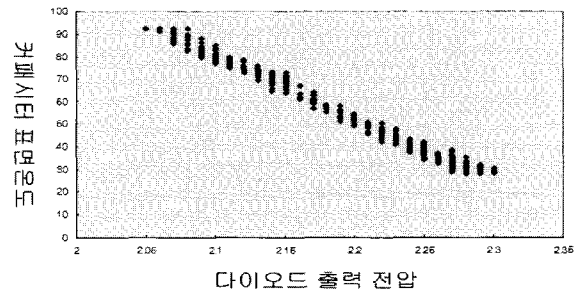


그림 7 커패시터 표면온도와 다이오드 출력 전압 관계
Fig. 7 Relation between the surface temperature of capacitor and diode output voltage

4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서 제안한 전해 커패시터 고장 진단 방법의 효과를 보이기 위해 표 1에 나타난 바와 같이 정상 및 열화 상태의 전해 커패시터(200[WV])를 사용하여 시뮬레이션 및 실험을 수행하였다. 비교 실험을 위한 열화 상태의 전해 커패시터를 얻기 위해 정상적인 전해 커패시터에 정격 전압의 1.5배를 인가하면서 누설 전류를 일정하게 제어하는 가속 열화 방법을 사용하였다.^[10]

표 1 전해 커패시터의 사양
Table 1 Specifications of electrolytic capacitors

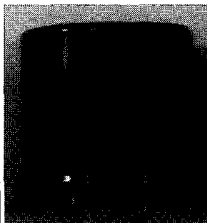
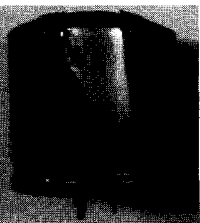
	정상	열화
외관		
ESR	0.148 [Ω]	2.43 [Ω]
Capacitance	628 [uF]	432 [uF]

그림 8과 그림 9는 각각 표 1의 정상 및 열화 커패시터에 대해 PSIM 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션한 결과를 나타낸다. 시뮬레이션에서 입력 교류 전원은 110V(실효치)의 단상 교류 전원으로 하였다. 스위칭 소자(S1)의 스위칭 주파수는 360[Hz], 시비율은 5[%]로 설정하였다. 그림 8, 9에서 v_{PN} 은 인버터 직류 링크 전압, i_c 는 커패시터를 통해 흐르는 전류, 그리고 i_{as} 는 a 상 전류를 의미한다. 정상 커패시터의 경우 등가직렬저항의 값이 작기 때문에 방전 구간에서 등가직렬저항과 커패시터의 방전 전류로 인한 전압 변동을 인버터의 직류링크 전압에서 검출하기가 힘들다. 반면, 열화 커패시터의 경우에는 정상 커패시터 대비 등가직렬저항의 값이 크기 때문에 인버터 직류링크 전압에서 등가직렬저항으로 인한 전압 변동을 쉽게 검출할 수 있다.

그림 10과 11은 시뮬레이션과 동일한 조건(110V 교류 전원, 360Hz 스위칭 주파수)으로 각각 정상 및 열화 커패시터에 대해 실험을 통해 얻은 파형들로, 실험에서도 시뮬레이션 결과와 동일한 결과가 나왔음을 확인할 수 있다. 상온 조건에서, 그림 10, 11로부터 식 (10)에 나타난 등가직렬저항 추정 방법을 사용하여 추정 한 전해커패시터의 등가직렬저항과 임피던스 측정기를 사용하여 측정한 등가직렬저항을 표 2에 나타내었다. 본 논문에서 제안한 등가직렬저항 추정 방법이 상당히 정확한 값을 추정해 낼 수 있음을 확인할 수 있다.

표 2 전해 커패시터의 등가직렬저항 측정/추정 결과
Table 2 Measured/estimated ESR of electrolytic capacitor

	정상 커패시터	열화 커패시터
측정 값	0.148 [Ω]	2.43 [Ω]
추정 값	0.147 [Ω]	2.48 [Ω]

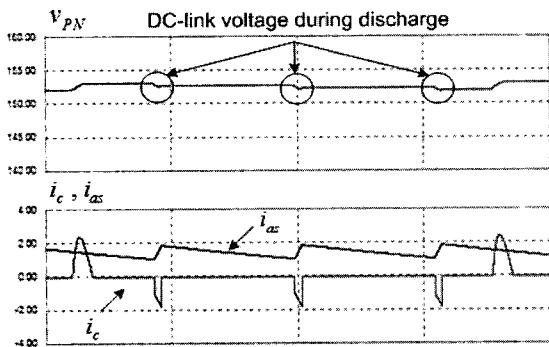


그림 8 시뮬레이션 결과(정상 커패시터)
Fig. 8 Simulation results(normal capacitor)

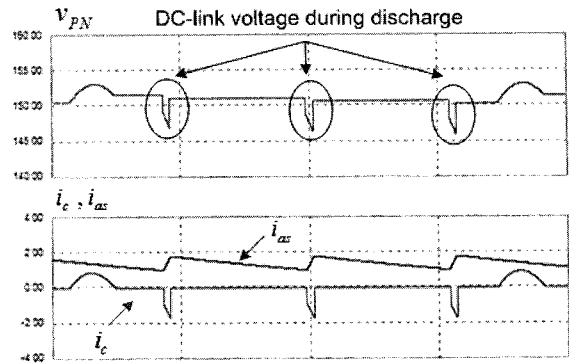


그림 9 시뮬레이션 결과(열화 커패시터)
Fig. 9 Simulation results(aged capacitor)

본 논문에서 제안한 등가직렬저항 추정 방식은 커패시터 방전 전류와 등가직렬저항의 곱에 비례하는 전압 변동을 인버터 직류 링크 전압으로부터 검출하고, 이 값을 상 전류로 나누어서 등가직렬저항을 구하는 방식이므로 가변속 구동장치가 운전 상태에 있을 때도 적용이 가능하다. 그러나, 스위칭 주파수가 높을 때는 스위칭으로 인한 잡음으로 인해 인버터 직류링크 전압에 등가직렬저항에 의한 전압 변동을 측정하는 데 어려움이 따를 수 있다. 또한, 커패시터의 열화가 고장으로 진행되기까지는 시간적 여유가 있으므로, 가변속 구동장치를 통한 전동기 운전이 정지된 상태에서 커패시터 표면 온도를 관측하고, 온도가 상온의 정상 상태에 도달했을 때 본 논문에서 제안한 방식을 사용하여 전해 커패시터의 등가직렬저항을 추정하여 고장 여부를 진단하는 것이 진단 오류를 줄이는 데 유리하다.

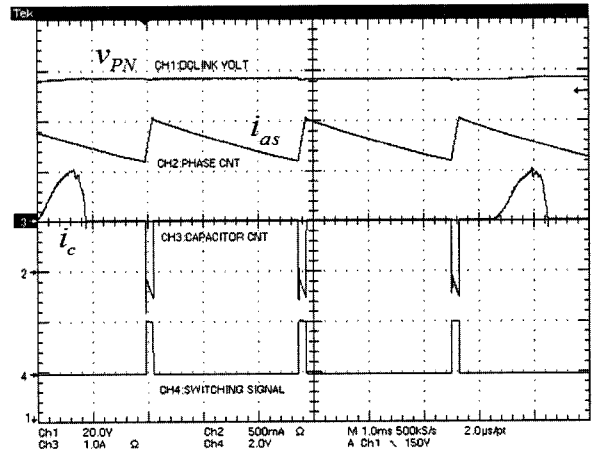


그림 10 실험 결과(정상 커패시터)
Fig. 10 Experimental results(normal capacitor)

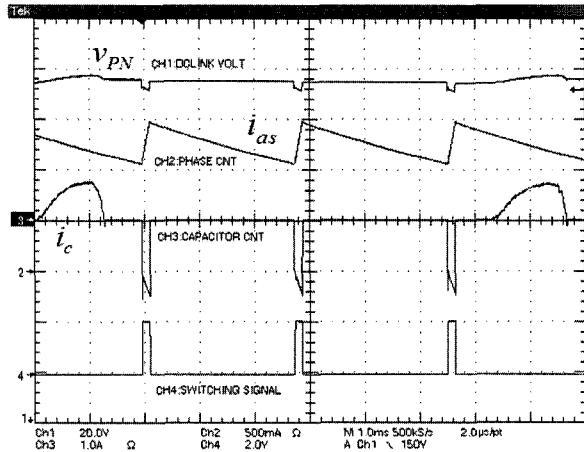


그림 11 실험 결과(열화 커패시터)
Fig. 11 Experimental results(aged capacitor)

5. 결 론

본 논문에서는 가변속 구동장치의 직류링크 전압 평활용으로 사용되는 전해 커패시터의 새로운 고장 진단 방법을 제안하였다. 제안된 방식은 커패시터의 방전 전류에 의한 직류링크의 전압 변동으로부터 등가직렬 저항을 추정하고, 추정된 등가직렬저항으로부터 커패시터의 고장을 예측 또는 진단할 수 있다. 제안된 방식은 가변속 구동장치에 일반적으로 사용되고 있는 전압 및 전류 센서만을 사용하므로 추가적인 비용 없이 소프트웨어의 수정만으로 기존의 가변속 구동장치에서 쉽게 구현할 수 있다. 다만, 병렬로 접속되는 전해 커패시터 뱅크의 경우에는 적용할 수 없기 때문에 향후 이에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

참 고 문 헌

[1] P. Venet, F. Perisse, M.H. EL-Husseini, and G. Rojat, "Realization of a Smart Electrolytic Capacitor Circuit," *IEEE Industry Application Magazine*, pp. 16-20, 2002, Jan./Feb.

[2] M.L. Gasperi, "Life Prediction Model for Aluminum Electrolytic Capacitors," in Conf. Rec. *IEEE 1997 IAS Annu. Meeting*, vol. 3, pp. 1347-1351.

[3] M.L. Gasperi, "Life Prediction Modeling of Bus Capacitors in AC Variable-Frequency Drives," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 41, no. 6, pp. 1430-1435, 2005, Nov./Dec.

[4] K. Lee, T.M. Jahns, G. Venkataramanan, W.E. Berkepec, "DC Bus Electrolytic Capacitor Stress in

Adjustable-Speed Drives under Input Voltage Unbalance and Sag Conditions," in Conf. Rec. *IEEE 2004 IAS Annu. Meeting*, pp. 2560-2567.

[5] K.Harada, A. Katsuki, M. Fujiwara, "Use of ESR for deterioration diagnosis of electrolytic capacitor," *IEEE Trans. on Power Elec.*, vol. 8, no. 4, pp. 355-361, 1993, Oct.

[6] 이강주, 이동춘, 석줄기, "입력전류 주입을 이용한 3상 AC/DC/AC PWM 컨버터의 직류링크 커패시터 용량 추정," *전력전자학회 논문지*, 제 8권, 제 2호, pp. 173-179, 2003.

[7] A.M. Imam, D.M. Divan, R.G. Harley, T.G. Habetler, "Real-Time Condition Monitoring of the Electrolytic Capacitors for Power Electronics Applications," in Conf. Rec. *IEEE 2007 APEC*, pp. 1057-1061.

[8] E.C. Aeloiza, J.H. Kim, P. Ruminot, P.N. Enjeti, "A Real Time Method to Estimate Electrolytic Capacitor Condition in PWM Adjustable Speed Drives and Uninterruptible Power Supplies," in Conf. Rec. *IEEE 2005 PESC*, pp. 2867-2872.

[9] J. Lepka, P. Stekl, "3-Phase AC Induction Motor Vector Control Using DSP56F80x," [On-line] available: <http://www.freescale.com/files/product/doc/ANI930.pdf>.

[10] 안치영, 김재중, 장석원, 신승중, 박계달, "알루미늄 전해 커패시터의 가속열화시험," *대한기계학회 추계학술대회 논문집*, pp. 1-6, 2006.

저 자 소 개



이광운(李光雲)

1971년 1월 16일생. 1993년 고려대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1999년~2000년 고려대 공학기술연구소(Post Doc.). 2000년~2002년 삼성종합기술원 MEMS Lab. 전문연구원. 2002년~2007년 삼성전자 생활가전총괄 책임연구원. 2007년 3월~현재 고려대 BK21정보 기술사업단 연구교수.