

바이폴라 스위칭을 적용한 인버터의 직류단 전해 커패시터 진단

윤장호

국방기술진흥연구소 획득연구부

Fault Diagnosis of DC Link Electrolytic Capacitors in Inverter Using Bipolar Switching

JangHo Yoon

Precedent Study Team, Korea Research Institute for defense Technology planning and advancement

요약 전해 커패시터는 제한된 수명과 높은 고장률을 가지고 있지만 저렴한 가격과 체적당 높은 성능을 가진 장점으로 인해 직류단 전압 평활용 소자로 사용되고 있다. 전해 커패시터는 다른 반도체 소자에 비하여 수명이 상대적으로 짧기 때문에 전해 커패시터에 의한 고장이 전체 인버터 고장의 60~72%에 이르는 것으로 조사되었다. 따라서 인버터를 진단하기 위해 직류단 전해 커패시터에 대한 진단이 요구되며, 본 연구에서는 인버터의 직류단 전해 커패시터를 진단하는 새로운 기법으로 바이폴라 스위칭을 적용한 기법을 제안한다. 전해 커패시터의 상태를 진단하기 위해 기존의 연구들이 진행되었으나, 추가적인 회로 및 센서가 필요하며, 이에 따른 비용이 요구된다. 추가 회로 및 센서가 필요하지 않은 방법으로 유니폴라 스위칭을 이용한 기법도 있으나, 단점으로 모터의 고정자 권선 저항이 작을 경우 큰 전류가 흐르기 때문에 짧은 시간에 측정하여야 하므로 측정의 어려움이 있다. 바이폴라 스위칭 진단 기법은 스위치 온 시간을 조절 가능하므로 전류량을 조절할 수 있고, 측정구간도 유니폴라 스위칭 방법에 비해 넓으므로 모터의 고정자 저항이 작은 경우에도 진단할 수 있다. 추가적인 하드웨어 및 센서가 필요하지 않으므로 회로 변경에 따른 비용이 요구되지 않으며, 커패시터의 등가저항과 커패시턴스를 정확히 진단이 가능함을 시뮬레이션과 실험을 통해 검증하였다.

Abstract Electrolytic capacitors have a limited lifespan and a high failure rate. However, they are used as DC link voltage smoothing devices due to their low price and high performance per volume. Because electrolytic capacitors have a relatively short lifespan compared to other semiconductor devices, failures caused by them were found to account for 60 to 72% of all inverter failures. Therefore, this paper proposes a new method for diagnosing the DC link electrolytic capacitor of an inverter. It is a technique that applies bipolar switching. Existing research has been conducted to diagnose the condition of electrolytic capacitors. However, additional circuits and sensors are required, resulting in increased costs. There is also a technique using unipolar switching that does not require additional circuits and sensors. However, the disadvantage is that if the resistance of the motor's stator winding is small, a large current flow makes measurement difficult, as it must be measured in a short period of time. The bipolar switching diagnosis technique allows the switch-on time to be adjusted. Thus, the amount of current can be adjusted, and the measurement period is wider than the unipolar switching method. Therefore, a diagnosis can be made correctly even when the stator resistance of the motor is small. The proposed bipolar switching diagnosis technique does not require additional hardware and sensors. Hence, there is no additional cost for circuit changes and it was verified through simulation and experiment that the equivalent resistance and capacitance of the capacitor can be accurately diagnosed.

Keywords : Electrolytic Capacitor, Fault Diagnosis, Inverter, DC link, Equivalent Series Resistance(ESR), Condition Monitoring

*Corresponding Author : JangHo Yoon(KRIT)

email: yjangho@krit.re.kr

Received February 19, 2024

Accepted May 3, 2024

Revised March 5, 2024

Published May 31, 2024

1. 서론

미국 국방부의 군용 장비에 사용되는 인버터에 대한 신뢰도 통계 조사자료에 따르면 전해 커패시터에 의한 고장이 인버터 전체 고장의 60%~72%에 이르는 것으로 조사되었다[1]. 저렴한 가격과 체적당 커패시턴스가 가장 크기 때문에 직류단 전압 평활용으로 전해 커패시터가 가장 많이 사용되며, 인버터 회로 내의 다른 소자들과는 달리 한정된 기대 수명을 가지고 있다. 인버터의 고장은 전동기의 가동중단으로 이어지며, 안전사고에 의한 인명 및 재산 피해를 초래하기 때문에 고장을 초기에 진단하여 방지하는 것은 매우 중요하다.

전해 커패시터의 상태를 진단하기 위해 기존의 연구들에서는 커패시터를 통해 흐르는 전류로부터 구한 등가직렬저항과 측정된 커패시터 내부 온도를 이용하는 방법 [2], 커패시터의 손실 전력과 커패시터 전류로부터 등가 직렬저항을 구하는 방법[3,4], 커패시터의 실효치 전압과 전류로부터 적절한 신호 처리를 통해 등가직렬저항을 구하는 방법[5] 등이 제안되어 왔으나, 추가 회로 및 센서가 필요하며, 이에 따른 비용에 필요하다. 추가 회로 및 센서가 필요하지 않은 방법으로는 유니폴라 스위칭을 이용한 진단 기법이 있으나, 측정 구간이 짧아 정확한 측정과 진단이 어렵다는 단점이 있으므로 본 논문에서는 바이폴라 스위칭 기법을 이용하여 단점을 보완한 새로운 진단 기법을 제안하고자 한다[6].

2. 본론

2.1 전해 커패시터의 구조 및 열화

전해 커패시터는 Fig. 1(a)와 같이 고순도 알루미늄박의 표면을 전기 화학적으로 에칭하여 전극 표면을 확대시킨 후 표면에 유전체로 산화알루미늄(Al_2O_3)을 양극 산화법으로 형성시킨 양극 전극과 에칭 알루미늄박을 음극으로 구성하여 Fig. 1(b)과 같이 양 전극 사이에 식물 섬유 전해질을 감아서 제조한다.

전해 커패시터의 수명은 온도와 리플전류에 의한 자기 발열에 크게 영향 받으며, 이는 커패시터의 전해액과 온도와의 반응관계에 따라 온도의 증가는 전해액의 가스화로 이어져 커패시터 용량의 감소와 등가직렬저항(ESR: Equivalent Series Resistance)의 증가를 초래하여 수명을 저하시키는 주요 원인이 된다. 전해 커패시터의 내

부 등가 모델은 Fig. 1(c)로 표현되지만 등가 직렬 인덕턴스는 저주파 영역에서 영향에 매우 작아 무시할 수 있으므로 Fig. 1(d)와 같이 간략화할 수 있다.

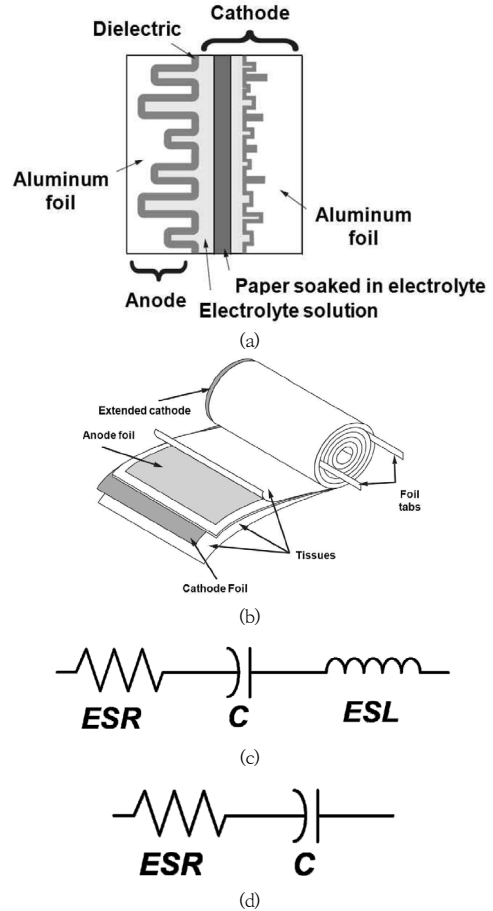


Fig. 1. Electrolytic Capacitors

(a) Schematic of dielectric structure (b) Construction (c) Equivalent circuit (d) Simplified equivalent circuit

2.2 전해 커패시터의 진단 기법

2.2.1 바이폴라 스위칭 진단 기법

커패시터 교체를 위해서는 인버터 오프라인 상태가 요구되며, 모터가 멈출때마다 측정할 경우 커패시터를 진단하여 고장에 대한 대비가 가능하므로 본 논문에서는 오프라인 상태에서 바이폴라 스위칭을 이용한 새로운 커패시터 진단 기법을 제안한다. RC 등가 커패시터 모델로 표현된 인버터 회로는 Fig. 2와 같다.

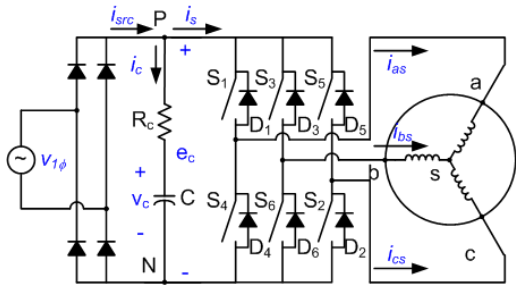


Fig. 2. Schematic of inverter circuit with DC link capacitor modeled as a RC series equivalent circuit

바이폴라로 스위칭을 하게 되면 다른 스위치는 전부 오프인 상태에서 스위치 S1과 스위치 S6를 함께 일정한 주기적으로 온과 오프를 반복하게 된다. 스위치 S1과 S6를 주기적으로 온과 오프를 반복하게 되면 모터의 인덕턴스 때문에 전류의 방향이 갑자기 바뀔 수 없으므로 스위치가 온인 동안과 스위치가 오프인 동안의 전류가 반대방향으로 흐르게 된다. 스위치가 온인 동안에는 S1과 S6를 통해 방전되는 방향(i_{as} 방향)으로 전류가 흐르고 스위치가 오프일 동안에는 D3과 D4를 통해 충전되는 방향(i_{bs} 방향)으로 전류가 흐르게 된다. 따라서 커패시터는 온일때 방전되고, 오프일때 충전하게 된다. 스위치 온 시간을 50%보다 높게 설정하면 방전 시간이 더 길어져 전압 차이가 발생한다. 전원 소스의 전압이 커패시터 전압 E_c 보다 크게 되면 스위치의 온/오프와 관계없이 커패시터는 충전된다. 따라서 전원소스의 주파수에 따라 커패시터가 충전이 일어난다. 일반적인 교류 전원 60Hz의 경우 양의 피크 값이 60Hz 마다 한번씩 있으나, 인버터에서는 전파(Full wave) 정류회로를 거치게 되기 때문에 120Hz마다 양의 피크값이 존재하게 되어 120Hz마다 커패시터가 충전하게 된다.

전원 소스로부터 전류를 공급받아 커패시터가 충전이 될 때의 등가회로는 Fig. 3과 같다. 전원 소스의 전압이 커패시터 전압(E_c) 보다 크게 되면 스위치가 온인 경우 (a)와 스위치가 오프일 경우(b) 모두 커패시터는 충전하게 된다. 하지만 스위치가 온과 오프일때 모터에 흐르는 전류의 방향은 반대임을 알 수 있다.

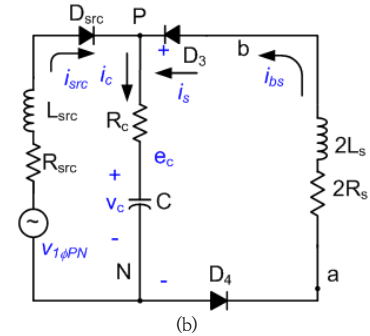
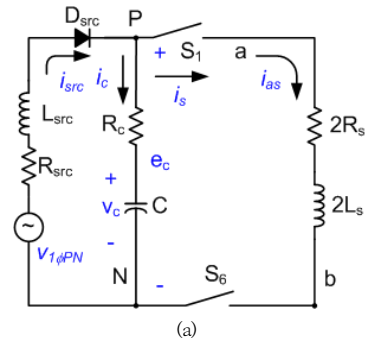
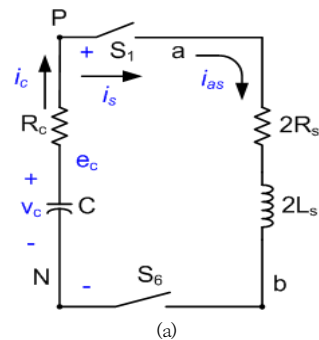


Fig. 3. Equivalent circuit of Charging mode
(a) Switch S1, S6 on, current flow through S1, S6
(b) Switch S1, S6 off, current flow through D1, D6

위의 경우 충전은 120Hz마다 한번 있게 되므로 바이폴라로 스위칭을 할때 240Hz 이상으로 스위칭을 해야 전원소스로부터 전류를 공급받지 않는 독립적인 상황이 발생한다. 240Hz 이상으로 스위칭을 하였을 경우 커패시터의 전압이 충분히 크게 되면 전파(Full wave) 정류회로의 전원소스로부터 회로가 독립적으로 동작한다.

본 논문에서는 제안하는 기법은 전원소스와 독립적인 상태에서 방전되는 파형으로부터 커패시터를 진단한다. 전원소스로부터 영향을 받지 않을 경우 등가회로는 Fig. 4와 같다.



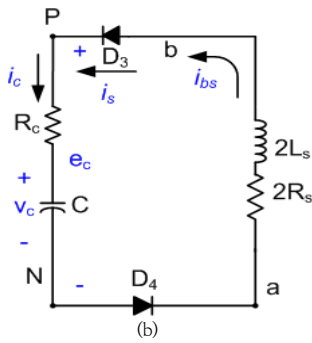


Fig. 4. Equivalent circuit of inverter operated under independent to source power
(a) Discharge mode(S1, S6 ON)
(b) Charging mode(D3, D4 ON)

전원소로부터 영향이 없는 경우도 스위치가 온일 때와 오프일 때 전류의 방향은 반대임을 알 수 있다. 스위치가 온일 때 커패시터는 방전되며, 스위치가 오프일 때 커패시터는 충전된다. 하지만 모터의 인덕턴스에 의해서 모터의 전류 흐름은 동일한 방향으로 흐른다. 이 두 경우의 충전방전에 대한 측정을 통해 커패시터 진단이 가능하다.

2.2.2 커패시턴스와 등가저항 추정

온 상태일 때는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$C \frac{d(e_c + R_c i_s)}{dt} = -i_s \quad (1)$$

오프 상태일 때는 다음과 같은 식을 만족한다.

$$C \frac{d(e_c - R_c i_s)}{dt} = i_s \quad (2)$$

Eq. (1)을 양변을 스위치 온 상태에서 시간 t_{1on} 부터 t_{2on} 까지 적분하면 다음 Eq. (3)과 같다.

$$\int_{t_{1on}}^{t_{2on}} C \frac{d(e_c + R_c i_s)}{dt} dt = \int_{t_{1on}}^{t_{2on}} -i_s dt \quad (3)$$

Eq. (2)을 양변을 스위치 오프시킨 상태에서 시간 t_{1off} 부터 t_{2off} 까지 적분하면 다음 Eq. (4)와 같다.

$$\int_{t_{1off}}^{t_{2off}} C \frac{d(e_c - R_c i_s)}{dt} dt = \int_{t_{1off}}^{t_{2off}} i_s dt \quad (4)$$

커패시턴스(C)와 등가저항과 커패시턴스의 곱($R_c \cdot C$)에 관한 행렬식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [e_c]_{t_{1on}}^{t_{2on}} & [i_s]_{t_{1on}}^{t_{2on}} \\ [e_c]_{t_{1off}}^{t_{2off}} & -[i_s]_{t_{1off}}^{t_{2off}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ CR_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -[i_s]_{t_{1on}}^{t_{2on}} \\ [i_s]_{t_{1off}}^{t_{2off}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} C \\ CR_c \end{bmatrix} = inverse \left(\begin{bmatrix} [e_c]_{t_{1on}}^{t_{2on}} & [i_s]_{t_{1on}}^{t_{2on}} \\ [e_c]_{t_{1off}}^{t_{2off}} & -[i_s]_{t_{1off}}^{t_{2off}} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} -[i_s]_{t_{1on}}^{t_{2on}} \\ [i_s]_{t_{1off}}^{t_{2off}} \end{bmatrix} \quad (6)$$

위 Eq. (6)부터 커패시턴스(C)와 등가저항(R_c)과 커패시턴스의 곱($R_c \times C$)을 알 수 있으므로 등가저항(R_c)과 커패시턴스(C)를 구할 수 있다. 따라서 위의 방법으로 커패시터를 진단하기 위해서는 온 상태일 때 커패시터 전압(E_c)과 전류(I_s) 그리고 오프상태일 때 커패시터 전압(E_c)과 전류(I_s) 값이 필요하다. 즉 스위칭 상태와 커패시터의 전압과 전류만으로 커패시터를 진단할 수 있다.

2.3 커패시터 진단 기법 검증

2.3.1 시뮬레이션을 통한 검증

시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 통해 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 조건은 60Hz 110v 교류전압과 10마력 유도전동기로 설정하였으며, 등가회로는 Fig. 5와 같다.

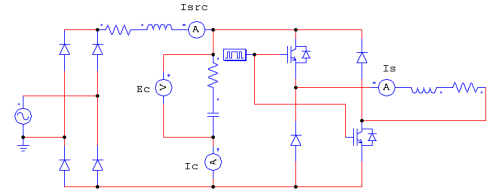


Fig. 5. Equivalent circuit of inverter in PSIM

시뮬레이션은 60Hz 110v 교류전압을 전파(Full wave) 정류하고 450uF, 0.4옴의 커패시터로 직류단 평활 및 스위칭은 500Hz 온 시간을 52%, 오프 48%로 설정하였다. 커패시터 방전 측정을 위해 스위치 온 시간은 50% 이상이 필요하다. 스위칭 주파수는 전원주파수에 영향을 받지 않는 파형이 두 부분 필요하기 때문에 240Hz 이상이 필요하다.

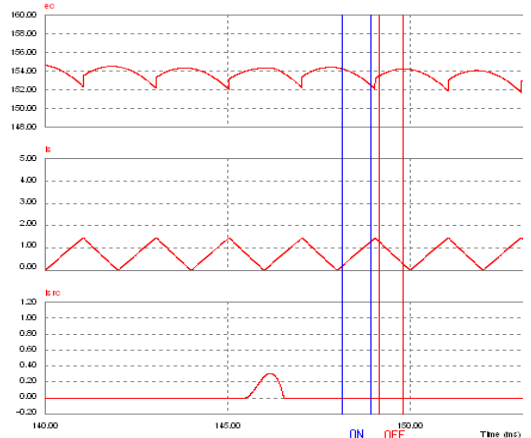


Fig. 6. PSIM simulation results at 500Hz

Eq. (6)을 적용하기 위해서는 커패시터 전압(E_c), 모터 고정자 권선에 흐르는 전류(I_s), 전원으로부터의 전류 공급(I_{src}) 측정값이 필요하다. 스위치가 온상태일 때 값들과 오프 상태일 때 값들을 연립하여 계산 시 커패시터에 대한 진단이 가능하다. 온 상태에서 2개 지점, 오프 상태에서 2개 지점을 측정하여 계산 시 Table 1과 같이 커패시턴스 447.98 μ F, 등가저항 0.389 Ω 을 구할 수 있으며, 시뮬레이션 조건인 450 μ F와 0.4 Ω 과 근사하므로 시뮬레이션을 통해 커패시터의 상태 진단이 가능함을 검증하였다.

Table 1. Simulation Result

Frequency	500Hz	
Parameter	C(μ F)	ESR(Ω)
Status	450.0	0.4
Estimated	447.98	0.389

2.3.2 실험 및 검증

2.3.2.1 실험환경 구성

DSP 2406 보드를 사용하여 PWM으로 스위칭하였다. 부하 전동기로는 효성 10마력짜리 유도전동기 사용하였고, 상용 전압 110V/60Hz를 이용하여 정류하였다. 삼화전기 200V, 680 μ F 알루미늄 전해 커패시터를 직류단 커패시터로 사용하였으며, 마이크로컨트롤러(MCU)는 TMS320LF2406A를 이용하여 제어, 연산, 아날로그디지털 변환(AD Conversion) 및 스위칭 신호를 발생, 온/오프 비율은 52%로 실험하였다. 측정은 오실로스코프를 사용하여 측정하였고, 파형을 저장하여 매트랩으로 역행렬을 이용해 등가 커패시턴스와 등가저항을 구하였다.

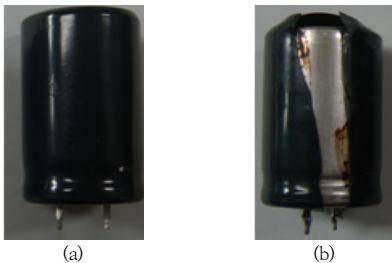


Fig. 7. Capacitor for experiment
(a) Healthy capacitor (b) Aged capacitor

Fig. 7과 같이 정상 커패시터와 열화 커패시터를 준비하였으며, 열화 커패시터는 가속 열화를 위해 정격 대비

1.5배 전압인 300V를 인가한 후 누설전류가 증가 되는 시점에서 80~100mA로 전류를 제어하고, 12시간 정도 동작시켰다. 커패시터의 측정을 위해서 Agilent 사의 임피던스 측정기(Impedance Analyzer) 4192A를 이용하여 측정하였다. 커패시터의 상태 측정결과 정상 커패시터 607.0 μ F, 0.071 Ω 이었으며, 열화 커패시터는 461.4 μ F, 0.5 Ω 으로 측정되었다.

2.3.2.2 실험결과

Fig. 8은 정상 커패시터를 이용하여 500Hz 52%로 바이폴라 스위칭 하여 실험 및 측정된 결과로 커패시터 전압(E_c), 모터 고정자 권선에 흐르는 전류(I_s), 전원으로부터 공급받는 전류(I_{src})에 대한 측정 파형이다. 제안된 방법은 전원으로부터 전류를 공급받지 않으며, 충전과 방전될 때의 측정값을 이용하므로 파형에서 I_{src} 가 0일 경우 측정하여 진단한다.

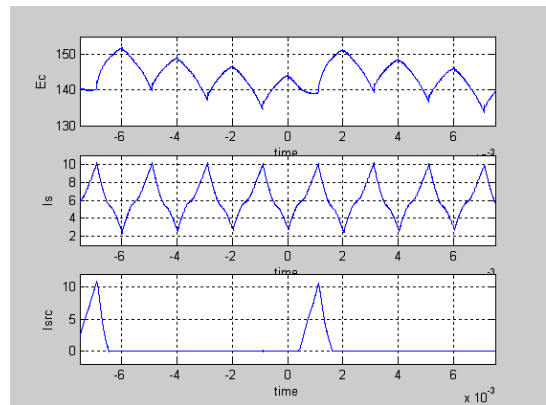


Fig. 8. Experimental measurement of healthy capacitor

전류 파형을 살펴보면 시뮬레이션과 비교 시 전류파형의 기울기가 일정하지 않은 것을 볼 수 있는데 전류파형의 굴곡은 커패시터의 특성에 따른 것으로 보인다. 제안된 진단 기법을 통해 커패시터의 특성값은 커패시턴스 612.0 μ F, 등가저항 0.054 Ω 으로 추정되었다.

Fig. 9는 열화 커패시터를 이용한 실험 파형이다. 열화 커패시터의 실험 파형을 살펴보면 정상 커패시터와 비교해서 전압파형의 굴곡이 심한 것을 볼 수 있다. 이것은 커패시터의 등가 저항이 크기 때문에 전류의 방향이 바뀌게 되면 전압과 전류의 곱만큼의 전압 차이가 발생하게 된다. 열화 커패시터의 실험결과로부터 제안된 진단 기법을 통해 456.1 μ F, 0.38 Ω 이라는 결과를 얻을 수 있었다.

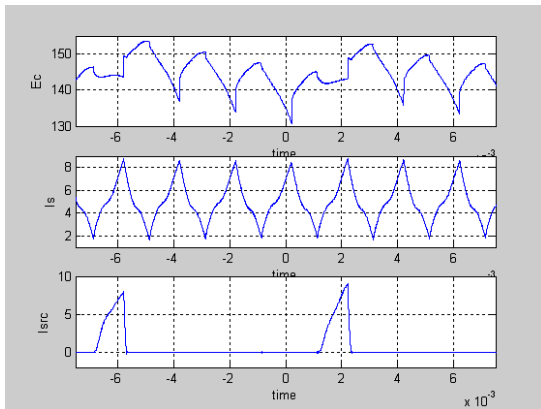


Fig. 9. Experimental measurement of aged capacitor

Table 2. Experimental Result

Status	Healthy Capacitor		Aged Capacitor		
	Parameter	C(μ F)	ESR(Ω)	C(μ F)	ESR(Ω)
Measured		607.0	0.071	461.4	0.50
Estimated		612.0	0.054	456.1	0.38

Table 2은 정상 커패시터와 열화 커패시터의 측정값과 추정값을 비교한 표이다. 정상 커패시터와 열화 커패시터의 상태를 제안된 기법으로 진단이 가능함을 검증하였다.

3. 결론

전해 커패시터는 다른 반도체 소자에 비하여 수명이 상대적으로 짧기 때문에 전체 인버터 고장의 60~72%가 전해 커패시터에 의한 고장으로 조사되었다. 인버터의 고장은 전동기의 가동중단으로 이어지며, 안전사고에 의한 인명 및 재산 피해를 초래하기 때문에 고장을 초기에 진단하여 방지하는 것은 매우 중요하다. 따라서 인버터를 진단하기 위해 직류단 전해 커패시터에 대한 진단이 요구되며, 본 논문에서는 인버터 직류단 전해 커패시터를 바이폴라 스위칭 방식으로 진단하는 새로운 기법을 제안한다.

전해 커패시터의 상태를 진단하기 위한 기존의 연구들이 진행되었으나, 추가적인 회로 및 센서가 필요하며, 이에 따른 비용이 요구된다. 추가적인 회로 및 센서가 필요하지 않은 방법으로 유니폴라 스위칭을 이용한 진단 기법도 있으나, 단점은 모터 고정자 권선의 저항이 작을 경

우 스위칭 시 큰 전류가 흐르기 때문에 짧은 시간에 측정이 요구되므로 측정의 어려움이 있다. 제안하는 바이폴라 스위칭 진단 기법은 스위치 온 시간을 조절 가능하므로 전류량을 조절할 수 있고, 측정구간도 유니폴라 스위칭 방법에 비해 넓으므로 모터의 고정자 저항이 작은 경우에도 진단할 수 있다. 바이폴라 스위칭 방식은 유니폴라 스위칭 방식에 비해 직류단 전압 차이도 크기 때문에 더욱 정확한 진단이 가능하다. 진단을 위한 추가적인 하드웨어 또는 센서가 필요하지 않으므로 회로 변경에 따른 비용이 요구되지 않는다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 바이폴라 스위칭을 통한 인버터 직류단 커패시터의 커패시턴스와 등가저항에 대해 정확한 진단이 가능함을 검증하였다.

References

- [1] Military Handbook 217 F, "Reliability prediction of electronic equipment", Revision F, Dec. 1991, Notice 1, 10 July 1992, Notice 2, Feb.28, 1995.
- [2] K. Lee, T.M. Jahns, G. Venkataramanan, W.E. Berkopec, "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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/IAS.2004.1348835>
- [3] 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/PESC.2005.1582040>
- [4] 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. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/APEX.2007.357646>
- [5] K-W. Lee, M. Kim, J. Yoon, S. B. Lee, J-Y. Yoo, Condition Monitoring of DC-Link Electrolytic Capacitors in Adjustable-Speed Drives, *IEEE transactions on industry applications*, Vol. 44, No. 5, 2008. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIA.2008.2002220>
- [6] M.L. Gasperi, "Life prediction modeling of bus capacitors in ac variable-frequency drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, pp. 1430-1435, Nov./Dec. 2005. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/TIA.2005.858258>

윤 장 호(Jangho Yoon)

[정회원]



- 2006년 2월 : 고려대학교 전기전자공학과의 학사
- 2009년 2월 : 고려대학교 전기전자공학과 (석사)
- 2009년 3월~2021년 1월 : 국방기술품질원 선임연구원
- 2021년 1월 ~ 현재 : 국방기술진흥연구소 선임연구원

<관심분야>

국방기술, 무기체계, 전기전자