

AI Based Capacitor Aging Diagnosis for DC/DC Converters

인공지능 기반 DC/DC 컨버터 커패시터 노화 진단 기법

Jung-Won Sung · Eun-Gyu Lee · Sangshin Kwak

성정원* · 이은규* · 곽상신†

Abstract

As capacitors are under age, their performance degrade, which can lead to reduced reliability of the power converter. In this study, we propose a method for effectively analyzing capacitor's condition by combining a data preprocessing technique using Lissajous curves with an AI model. The experimental results confirmed that the proposed method accurately predict the aging state of the capacitor by using the proposed Lissajous curves based preprocessing approach, demonstrating performance even under duty conditions that had never been trained on.

Key Words

DC/DC converter, Output capacitor, Artificial intelligence

1. 서론

전력 변환 장치에서 커패시터는 스위칭 과정에서 발생하는 전압 변동을 흡수하고 부하에 안정적인 전압을 공급하는 핵심적인 부품이다. 특히, 높은 전력 처리가 필요한 DC/DC 컨버터에서는 전압 리플을 효과적으로 감소시키기 위해 대용량 커패시터의 사용이 필수적이다. 필름 커패시터는 얇은 플라스틱 필름을 전극으로 활용하여 롤 형태로 감거나 적층 구조로 제작된다. 이러한 구조 덕분에 필름 커패시터는 높은 절연 성능과 우수한 내열성을 가지며, 물리적 및 화학적으로 안정성이 뛰어나기 때문에 열화와 노화에 대한 저항성이 크다. 또한, 필름 커패시터는 등가 직렬 저항이 낮아 전류 리플과 발열 문제가 적어 높은 신뢰성을 유지할 수 있다. 그러나, 대용량을 처리하기 위해 Capacitance를 높이려면 필름 커패시터의 크기가 커지며, 이에 따라 제조 비용이 증가하는 단점이 있다. 반면, 전해 커패시터는 양극(알루미늄 또는 탄탈륨)과 음극(액체 전해질) 사이에 산화막을 유전체로 사용하는 구조를 가지고 있다. 이러한 설계 덕분에 필름 커패시터보다 훨씬 높은 Capacitance를 상대적으로 작은 크기와 낮은 비용으로 구현할 수 있는 장점을 갖는다. 하지만 전해 커패시터의 유전체인 산화막은 시간이 지남에 따라 화학적 변화와 열적 스트레스로 인해 열화가 진행되며, 내부 전해질이 증발하거나 누출되면서 노화가 발생한다. 이러한 노화 과정에서 Capacitance가 감소하고 ESR이 증가하며, 이는 전력 변환 장치의 전압 리플 증가,

발열 문제, 신뢰성 저하 등을 유발할 수 있다. 전해 커패시터의 등가모델은 정전용량을 나타내는 Capacitance와 등가 직렬 저항인 Equivalent Series Resistance(ESR)의 직렬 형태이다. Capacitance 성분의 영향이 저주파 대역에서 두드러지고 ESR 성분의 영향이 중주파 대역에서 두드러진다. 실제로 커패시터는 전력전자 시스템에서 발생하는 전체 고장의 약 30%를 차지할 만큼 주요한 고장 원인으로 꼽힌다[1]. 전기자동차와 같은 신뢰성이 중요한 시스템에서는 전력 변환기 구성 요소의 남은 유효 수명 예측과 진단이 중요한 연구 분야로 주목받고 있다[2]. 이에 따라, 전력 변환 장치의 신뢰성을 개선하기 위해 커패시터의 상태를 실시간으로 모니터링하고, 열화 및 노화를 조기에 감지하는 상태 진단 및 관리 기술이 필요하다. 이를 위해 출력 전압 리플 및 입력 전류 변화를 활용한 커패시터 상태 추정 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[3-8]. 일부 연구에서는 추가적인 센서를 사용하거나, 최근에는 인공지능을 활용한 커패시터 상태 진단 기법이 연구되면서, 기존의 신호 처리 방식보다 정밀한 분석이 가능해지고 있다[9].

본 연구는 전해 커패시터의 Capacitance 및 ESR 변화를 분석하고, 이를 기반으로 커패시터의 노화 상태를 진단하는 인공지능 기반 알고리즘을 개발하며 실험적으로 검증하는 것을 목표로 한다. 컨버터의 전압, 전류 데이터의 관계를 잘 나타내기 위해 추출한 데이터로 리사주 곡선(Lissajous curve)을 생성하였고, 이를 인공지능 입력으로 사용하였다. 특히, 한 번도 학습하지 않은 duty에서도 상태 추정이 가능함을 확인하였으

† Corresponding Author : School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, Republic of Korea.

E-mail : sskwak@cau.ac.kr <https://orcid.org/0000-0002-2890-906X>

* School of Electrical and Electronic Engineering, Chung-Ang University, Republic of Korea.

<https://orcid.org/0009-0000-1232-4692>

Received : Feb. 27, 2025 Revised : Mar. 11, 2025 Accepted : Mar. 19, 2025

Copyright © The Korean Institute of Electrical Engineers

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

며, 이는 DC/DC 컨버터의 특성상 duty가 지속적으로 변화하는 환경에서 리사주 곡선이 효과적인 상태 진단 도구로 활용될 수 있음을 시사한다. 이를 통해 전력 변환 장치의 신뢰성을 향상시키고, 전기자동차를 비롯한 다양한 전력 변환 시스템에서의 유지보수 효율성을 높이는 데 기여하고자 한다.

2. 실험 데이터 수집 및 데이터 전처리 과정

본 연구에서는 출력단 전해 커패시터의 상태를 추정하기 위해 전력 변환기로 부스트 컨버터(Boost Converter) 구조를 선택하였다. DC/DC 부스트 컨버터 회로도는 그림 1에 제시되어 있다. 스위치 소자로는 Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor(MOSFET)인 IRFP22N60K를 사용하였으며, 다이오드는 DHG30I1200HA를 적용하였다.

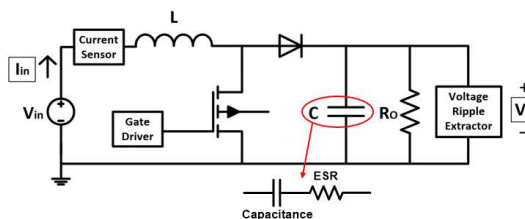


그림 1 DC/DC 부스트 컨버터 회로도

Fig. 1 DC/DC boost converter

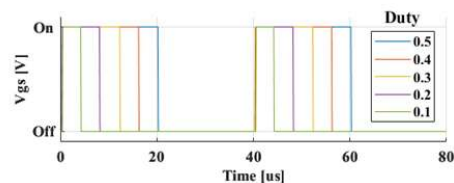
표 1 노화 진행 단계별 커패시터 파라미터

Table. 1 Capacitor parameters at each stage of aging progression

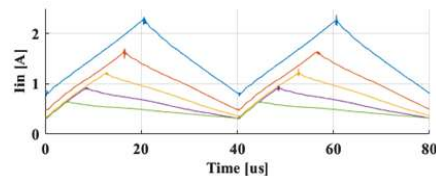
노화 레벨	측정 Capacitance 값 [μF]	측정 ESR 값 [Ω]	노화 정도 [%]
0	125.9	0.260	0
1	116.5	0.311	20
2	111.9	0.337	40
3	106.7	0.363	60
4	97.4	0.429	80
5	88	0.498	100

표 1에는 Capacitance가 125.9μF, ESR이 0.260 Ω인 커패시터가 88.1 μF, 0.520 Ω까지 변하는 과정을 포함한 커패시터의 노화 단계 및 특성 변화를 정리하였다. 본 연구에서는 노화 0 단계를 초기 상태로 정의하고, 1단계부터 5단계까지 점진적인 열화가 진행되는 조건으로 실험을 설계하였다. 또한, 다양한 Capacitance와 ESR 조합을 구성하기 위해 커패시터를 병렬 연결하는 방식을 적용하였다. 그림 2는 duty 별 실험 파형이다. 그림 2 (a)는 MOSFET을 제어하기 위한 Gate 단의 스위칭 신호, (b)는 입력 전류, (c)는 fresh 상태의 출력 전압 리플, (d)는 aged 상태의 출력 전압 리플을 나타낸다. duty에 따라서 전압과 전류 데이터가 변화함을 확인할 수 있다.

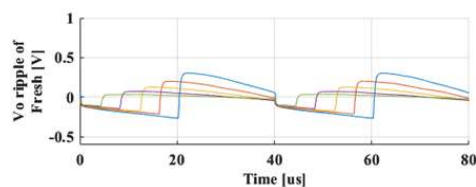
인공지능을 활용하여 Capacitance와 ESR을 추정하기 위해 리사주 곡선(Lissajous curve)을 생성하고, 이를 기반으로 전처리 과정을 수행하였다. 본 연구에서 적용한 리사주 곡선 기법은



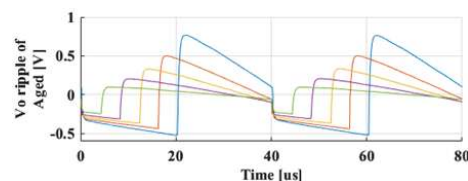
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2 Duty 별 실험 파형 (a) 스위칭 신호 (b) 입력 전류 (c) fresh 상태의 출력 전압 리플 (d) aged 상태의 출력 전압 리플

Fig. 2 Experimental waveform by duty (a) switching signal (b) input current (c) output voltage ripple in fresh state (d) output voltage ripple in aged state

비선형 신호 간의 관계를 분석하고 시스템의 상태를 진단하는 데 널리 활용되는 방식이다. 일반적으로 리사주 곡선과 유사한 형태로 전압과 전류의 관계를 시각화하는 순환 전압-전류 곡선(Cyclic-voltammetry curve)은 전기화학 분야에서 전극 표면의 반응을 직접 분석하는 방법으로 잘 알려져 있다.

커패시터의 노화 상태를 진단하기 위해서는 입력 전류와 출력 전압 리플 간의 관계를 분석하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 한 주기 동안의 입력 전류를 x축, 출력 전압을 y축으로 설정하여 리사주 곡선을 생성하였다. 그림 3은 이 과정을 도식화한 것으로, 하단면의 곡선은 스위치가 켜져 있는 구간을 나타내며 Capacitance 추정에 중요한 역할을 한다. 반면, 우변은 스위치가 꺼졌다가 켜지는 순간의 급격한 변화를 나타내며, 이때 출력 전압 리플이 급격히 변하는 특징이 나타나 ESR과 관련된 정보를 제공한다. 스위치 상태가 켜져 있을 때와 꺼지는 순간의 변화를 정확히 반영하기 위해, 스위칭 신호인 Vgs 데이터를 함께 수집하여 분석에 활용하였다. 수집된 스위칭

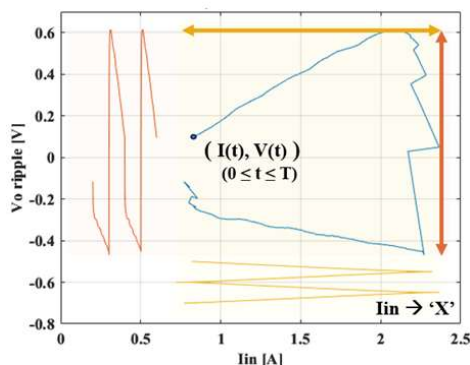


그림 3 컨버터 실험 데이터 기반 리사주 곡선 생성 과정

Fig. 3 Lissajous curve generation process based on converter experimental data

신호는 출력 전압 리플과 결합하여 리사주 곡선 기반의 전처리 과정을 거쳤다. 또한, Capacitance와 ESR 추정에 불필요한 부분은 0 값이 아닌 NaN(Not a Number) 값으로 대체하여, 최종적으로 생성된 곡선에 불필요한 데이터가 포함되지 않도록 하였다. 그림 4는 전처리 과정 전후의 리사주 곡선을 비교한 것으로, 그림 4 (b)에 나타난 형태가 최종적으로 인공지능 모델의 입력 데이터로 사용되었다. 그림 4 (c)는 리사주 전처리 기법을 이용하여 생성한 이미지 배열을 나타낸다. 해당 이미지 데이터는 256×256 의 형태로 구성되었다.

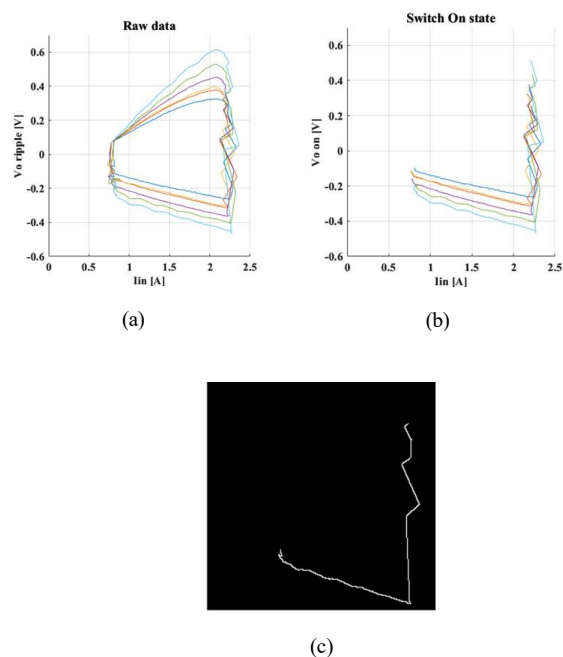


그림 4 전처리 전후 과정의 리사주 곡선 (a) 전처리 전 (b) 전처리 후 (c) 전처리 후(실제 입력 데이터)

Fig. 4 Lissajous curves before and after preprocessing (a) before preprocessing (b) after preprocessing (c) after preprocessing (actual input data)

3. Duty에 따른 노화 진단 결과

커패시터의 상태를 진단하기 위해 DC/DC 부스트 컨버터 회로에서 추출한 데이터를 활용하였다. 그림 5는 상태 추정 알

고리즘의 전체적인 개요와 사용한 인공지능 모델 구성도를 나타낸다. 본 연구에서는 컨버터의 센서를 통해 수집한 입력 전류와 출력 전압 신호를 사용하였다. 출력 전압 신호는 리플 추출 회로를 거쳐 출력 전압 리플을 추출한 후, 커패시터의 Capacitance와 ESR을 보다 정확히 분석하기 위해 스위칭 신호를 곱하는 전처리 과정을 수행하였다. 이 과정에서 스위칭 On 상태만을 선별하여 커패시터 상태 진단에 유의미한 데이터로 활용하였다. 이후, 추출된 데이터를 바탕으로 특징을 분석하고 인공지능 모델을 학습 및 테스트하여 최종 결과를 도출하였다. 이미지 기반 데이터 처리를 효과적으로 수행하기 위해 Convolution-Neural-Networks (CNN) 모델을 적용하였다. 일반적으로 인공지능을 활용한 연구에서는 동일한 조건에서 일부 데이터를 학습용으로 사용하고, 나머지 데이터를 테스트에 활용하는 방식이 주로 사용된다. 즉, 학습 과정에서 한 번도 사용되지 않은 데이터를 입력하면 예측 정확도가 저하될 가능성이 크다.

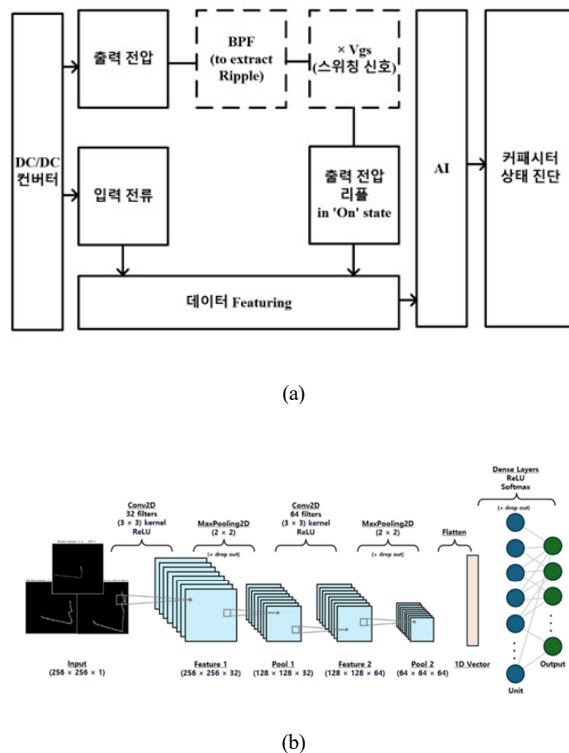


그림 5 커패시터 상태 진단 알고리즘 (a) 개요도 (b) 사용한 인공지능 CNN 모델 구성도

Fig. 5 Capacitor condition diagnosis algorithm (a) schematic diagram (b) configuration diagram of the AI CNN model used

전력 변환기의 경우, 커패시터의 Capacitance 변화나 인덕터의 인덕턴스 변화보다 입력 전압, 입력 전류, 그리고 duty의 변화가 더 빈번하게 발생한다. 기존 연구에서는 다양한 Capacitance 및 ESR 값을 고려하였으나, 실험 조건을 고정하는 경우가 많았다. 본 연구에서는 실제 전력 변환기에 적용할 수 있도록 다양한 동작 조건에서도 커패시터 상태를 정확히 진단하는 것을 목표로 하였다. DC/DC 컨버터의 특성상 duty

가 변할 때 입력 전류와 출력 전압 리플에도 변화가 발생하며, 리사주 곡선 또한 이와 함께 변화하는 특성을 가진다. Capacitance와 ESR의 영향 역시 입력 전류 및 출력 전압 리플 변화에 따라 달라지므로, 리사주 곡선의 이러한 특성을 활용하면 duty가 변하더라도 커패시터 상태를 효과적으로 진단할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 언급한 노화 6단계, duty 5가지, 총 30개의 데이터셋 중 그림 6과 같이 duty가 0.1, 0.3, 0.5인 18개의 데이터셋을 활용하여 리사주 곡선을 생성하였다. 각 데이터셋에서 80%를 랜덤으로 선별하여 학습에 사용하고, 나머지 20%를 검증 데이터로 활용하여 인공지능 모델을 생성하였다. 모델의 성능을 검증하기 위해 한 번도 학습하지 않은 duty 0.2와 0.4에 해당하는 12개의 데이터셋을 테스트 데이터로 사용하였다.

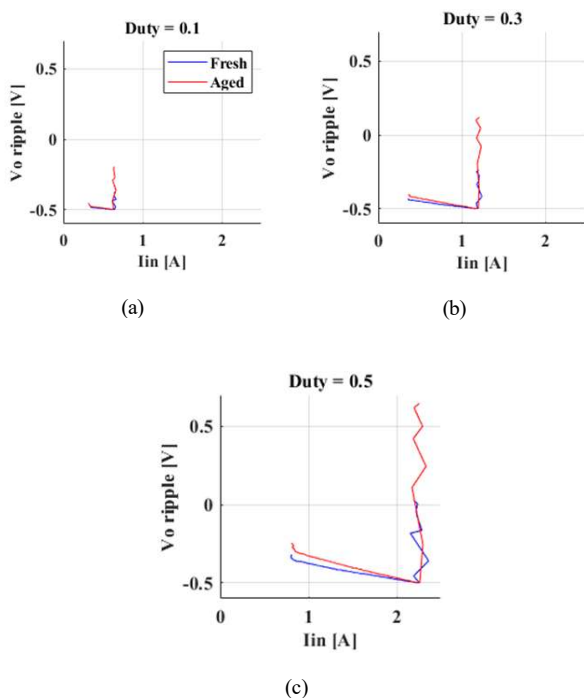


그림 6 학습에 사용한 duty에 따른 리사주 곡선 (a) duty = 0.1 (b) duty = 0.3 (c) duty = 0.5

Fig. 6 Lissajous curve according to the duty used in learning (a) duty = 0.1 (b) duty = 0.3 (c) duty = 0.5

그림 7은 리사주 곡선을 입력으로 하여 생성한 CNN 모델 테스트 결과이다. 학습 데이터에 포함되지 않은 새로운 조건에서도 80.12%의 정확도를 기록하였다. 이중에서도, 고장에 가까운 노화 4, 5 단계의 정확도는 각각 98.9%, 96.9%로 높은 정확도를 보였다. 커패시터 상태의 라벨링은 노화 진행도에 따라 구분되었다. 라벨 '0'은 노화가 진행되지 않은 상태, 라벨 '5'는 수명이 다한 상태를 나타낸다. 또한, 라벨 '0', '1'은 신제품에 가까운 상태, 라벨 '2', '3'은 중간 정도의 노화 상태, 라벨 '4', '5'는 고장 직전 상태로 구분할 수 있다. 커패시터 상태 진단 연구의 궁극적인 목적은 사전에 상태 변화를 감지하여 유지보수 및 사고 예방에 활용하는 것이므로, 본 연구

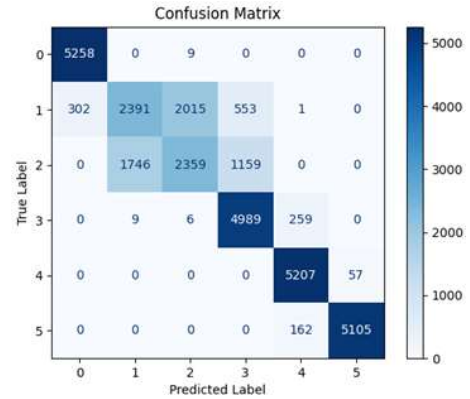


그림 7 리사주 곡선으로 생성한 CNN 모델 테스트 결과

Fig. 7 Test results of the CNN model generated using Lissajous curves

에서 개발한 모델을 통해 학습하지 않은 조건에서도 커패시터 노화 단계를 효과적으로 예측할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 DC/DC 부스트 컨버터의 출력 커패시터 상태를 효과적으로 진단하기 위해 리사주 곡선을 활용한 데이터 전처리 기법과 인공지능 모델을 결합한 방법을 제안하였다. 부스트 컨버터 기반의 실험을 통해 다양한 노화 단계와 duty 조건에서 데이터를 수집하였으며, 리사주 곡선을 생성하여 Capacitance 및 ESR 변화를 반영하는 특징을 추출하였다. 특히, duty가 지속적으로 변화하는 DC/DC 컨버터의 특성을 고려하여, 일부 duty(=0.1, 0.3, 0.5)만을 학습에 사용하고, 한 번도 학습하지 않은 duty(=0.2, 0.4)를 테스트에 활용하는 방식으로 모델의 일반화 성능을 검증하였다. 실험 결과, 학습된 데이터가 포함되지 않은 조건에서도 높은 예측 정확도를 기록하였다. 추가적으로, 원본 신호(Raw Data)를 직접 활용한 실험과 비교한 결과, 리사주 곡선을 적용한 방법이 변화하는 입력 전류 및 출력 전압 리플 속에서도 커패시터 상태를 더욱 정확하게 추정할 수 있음을 검증하였다.

Acknowledgements

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단(No. 2020R1A2C1013413) 및 2024년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원(P0012453, 2024년 산업혁신인재성장지원사업) 및 2025년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원(RS-2021-KP002504, 지능형 에너지산업융합대학원)의 지원을 받아 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] H. Wang, M. Liserre and F. Blaabjerg, "Toward reliable power electronics: Challenges design tools and

저자소개

opportunities,” IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 7, no. 2, pp. 17-26, 2013.

DOI:10.1109/MIE.2013.2252958

- [2] D. Astigarraga, F. Arizti, F. M. Ibañez and A. Galarza, “Online indirect measurement of ESR and capacity for PHM of capacitors,” 2014 IEEE 15th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), 2014.
DOI:10.1109/COMPEL.2014.6877185
- [3] L. Ren, C. Gong and Y. Zhao, “An Online ESR Estimation Method for Output Capacitor of Boost Converter,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 10, pp. 10153-10165, 2019.
DOI:10.1109/TPEL.2018.2890617
- [4] C. -H. Leong, C. -K. Wong, C. Gong and C. -S. Lam, “A Steady-state Operation Based Online Parameter Identification Method of Output Capacitor for DC-DC Buck Converters,” 2024 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1-5, 2024.
DOI:10.1109/ISCAS58744.2024.10558066
- [5] C. Li, Y. Yu, Z. Yang, Q. Liu and X. Peng, “ESR Estimation for Aluminum Electrolytic Capacitor of Power Electronic Converter Based on Compressed Sensing and Wavelet Transform,” in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 69, no. 2, pp. 1948-1957, 2022.
DOI:10.1109/TIE.2021.3055164
- [6] L. Ren and C. Gong, “Modified hybrid model of boost converters for parameter identification of passive components,” IET Power Electron., vol. 11, no. 4, pp. 764-771, 2017.
DOI:10.1049/iet-pel.2017.0528
- [7] K. Yao et al., “A Noninvasive Online Monitoring Method of Output Capacitor's C and ESR for DCM Flyback Converter,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 34, no. 6, pp. 5748-5763, 2019.
DOI:10.1109/TPEL.2018.2868564
- [8] K. Yao, W. Tang, X. Bi and J. Lyu, “An Online Monitoring Scheme of DC-Link Capacitor's ESR and C for a Boost PFC Converter,” in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 8, pp. 5944-5951, 2016.
DOI:10.1109/TPEL.2015.2496267
- [9] Z. Zhao, P. Davari, Y. Wang and F. Blaabjerg, “Online Capacitance Monitoring for DC/DC Boost Converters Based on Low-Sampling-Rate Approach,” in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 5, pp. 5192-5204, 2022.
DOI:10.1109/JESTPE.2021.3108420

성정원(Jung-Won Sung)

Jung-Won Sung received the M.S. degree in electrical and electronics engineering from Chung-Ang University, Seoul, Korea, in 2025. Her research interests in AI-based aging prediction technique for power converter components.

이은규(Eun-Gyu Lee)

Eun-Gyu Lee received the B.S. degree in electrical and electronics engineering from Chung-Ang University, Seoul, Korea, in 2024. He is currently pursuing the M.S degrees in electrical and electronics engineering in Chung-Ang University, Seoul, South Korea,. His research interests in AI-based aging prediction technique for power converter components.

곽상신(Sangshin Kwak)

Sang-Shin Kwak received his Ph.D. degree in Electrical Engineering from Texas A&M University, College Station, TX, USA, in 2005. From 2005 to 2007, he was a senior engineer in SAamsung SDI, Yongin, Korea. Since 2010, he has been working at Chung-Ang University, Seoul, Korea, where he is presently a Professor. His current research interests include the design, modeling, control, and analysis of power converters for electric vehicles and renewable energy systems as well as Artificial Intelligence (AI) based prognosis and fault tolerant control of power electronics systems.