

이중 전류 프로브 기반 블랙박스 임피던스 모델링을 활용한 EMI 필터 설계

EMI Filter Design Based on Black-Box Impedance Modeling Using Dual Current Probes

이 재 원 · 김 지 성 · 안 승 영

Jaewon Rhee · Jiseong Kim · Seungyoung Ahn

요 약

본 연구는 스위칭 모드 전원공급장치(SMPS)와 같은 전력전자 시스템에서의 EMI 문제를 해결하기 위해, 실시간 동작 조건에서도 안전하게 모드 임피던스를 추출할 수 있는 이중 전류 프로브(DCP) 기반 측정 기법을 제안하였다. 특히, 저주파 영역에서의 감도 문제를 해결하기 위해 주파수 대역에 따라 턴 수를 가변 적용하였으며, 이를 통해 고정확도의 임피던스 측정 결과를 확보하였다. 측정된 임피던스를 기반으로 단순한 수동소자(RLC) 조합의 블랙박스 모델을 구성하고, 삽입 손실 요구 조건에 따라 차단 주파수를 역산하여 LC 필터를 수식적으로 설계하였다. 필터 적용 전후의 임피던스 및 삽입 손실 비교 결과, 제안된 방법이 원하는 주파수 대역에서 효과적으로 전자파 노이즈를 차단함을 확인하였다. 본 방법은 회로 정보 없이도 필터를 설계할 수 있어 실무 적용 가능성이 크다.

Abstract

This paper presents a dual current probe-based method for extracting the mode impedance of power electronic systems under actual operating conditions. To overcome sensitivity degradation in the low-frequency region, variable turns were applied depending on the frequency. The measured impedance data were used to construct a simplified black-box model using passive RLC components. Based on the target insertion loss, the cutoff frequency was analytically calculated, and a first-order LC filter was designed. Simulation results comparing the impedance and insertion loss before and after filter insertion demonstrated that the proposed method effectively suppressed EMI noise at the desired frequency. This approach enables filter design without circuit knowledge and is highly applicable to practical systems.

Key words: Black-Box Modeling, Differential-Mode Impedance, Dual Current Probe, EMI Filter, Insertion Loss

I. 서 론

전력전자 시스템에서의 전자파 간섭(EMI, electro-

magnetic interference)은 고속 스위칭, 고전력, 고주파 동작이 일반화됨에 따라 설계 초기 단계부터 고려해야 할 핵심 요소가 되었다. 특히 스위칭 모드 전원공급장치

「이 연구는 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.RS-2020-II200839, 초연결 E-Vehicle 전력 및 신호 EMC 고도화 기술 개발)」

한국과학기술원 조천식모빌리티대학원(CCS Graduate School of Mobility, Korea Advanced Institute of Science and Technology)

· Manuscript received July 4, 2025 ; Revised July 29, 2025 ; Accepted August 11. (ID No. 20250704-019S)

· Corresponding Author: Seungyoung Ahn (e-mail: sanh@kaist.ac.kr)

(SMPS, switched-mode power supply)나 인버터 기반 시스템은 전도 및 방사 노이즈를 유발하며, 공진 주파수 대역에서의 공통 모드(CM, common-mode) 및 차동 모드(DM, differential-mode) 전류는 전자파 적합성 기준 인증 실패의 주요 원인이 된다^[1].

EMI 억제를 위한 대표적인 방법은 시스템 입·출력단에 필터를 삽입하는 것이며, 효과적인 필터링을 위해서는 노이즈 소스 임피던스에 대한 정보가 정확히 확보되어야 한다. 필터의 삽입 손실은 임피던스 불일치 정도에 따라 달라지기 때문에, 시스템의 모드 임피던스를 정확히 파악하는 것이 필수적이다. 하지만 대부분의 상용 시스템은 복잡하거나 회로 구조가 외부에 공개되지 않는 블랙박스 형태이며, 동작 중 고전력 조건에서의 임피던스 측정은 절연 안전성과 전기적 위험 때문에 직접적인 측정이 불가능하다. 기존에는 바이어스티나 커플러를 사용하는 방법이 활용되었으나, 이는 고전압 또는 고전류 환경에서 사용할 수 없어 정확한 임피던스 측정이 어렵다는 한계가 있다^[2].

이러한 배경을 바탕으로 본 연구에서는 이중 전류 프로브(DCP, dual current probe)를 이용한 비침습적 모드 임피던스 측정 기법을 활용하였다^[3]. 특히 기존 DCP 방식이 고주파 중심으로 제한되던 점을 보완하기 위해, 프로브의 턴 수를 주파수 대역에 따라 가변 적용함으로써 저주파 감도를 확보하였다. 이후, 측정된 임피던스를 바탕으로 수동소자 기반의 블랙박스 등가회로를 구성하고, 삽입 손실 수식 기반의 LC 필터를 설계하여 필터 전후 특성 변화를 시뮬레이션으로 검증하였다.

II. 모드 임피던스 측정 방법

본 장에서는 저주파 측정 성능이 개선된 DCP 방법을 이용하여 수동소자와 SMPS의 임피던스를 측정한다.

2-1 개선된 DCP 방법

제안된 DCP 기반 측정 방법은 고속 디지털 장비인 VNA(vector network analyzer)와 2개의 전류 프로브를 이용해 시스템 입력에 전파되는 전압 및 유도 전류의 주파

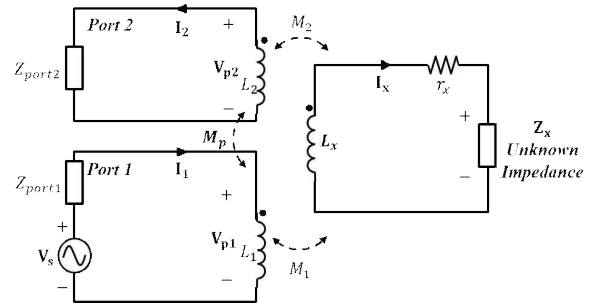


그림 1. 이중 전류 프로브 방법의 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit model of the DCP method.

수 응답을 측정하고, 이를 통해 공통 및 차동 모드 임피던스를 계산하는 방식이다. 이 방식은 장비와 시스템 간 직접적인 전기적 접촉이 없어 절연 안전성이 우수하고, 실시간 동작 중에도 시스템 특성을 확인할 수 있다는 장점이 있다^[3].

DCP 방법을 등가회로로 나타내면 그림 1과 같으며, 해당 방법은 프로브에 식 (1)과 같이 유도되는 전압의 관계를 이용하여 S-파라미터를 측정 후 식 (2)를 통해 동작 중 임피던스를 구할 수 있다.

$$\frac{V_{p1}}{V_{p2}} = \frac{S_{11} + 1}{S_{21}} \quad (1)$$

식 (1)의 관계를 이용하여 S-파라미터를 측정 후 식 (2)를 통해 구하고자 하는 동작 중 임피던스를 구할 수 있다.

$$Z_x = 50 \frac{\left(\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z=\infty} - \left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z=50}\right)\left(\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z_z} - \left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z=0}\right)}{\left(\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z_z=50} - \left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z=0}\right)\left(\left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z=\infty} - \left(\frac{V_{p1}}{V_{p2}}\right)_{Z_z}\right)} \quad (2)$$

그러나 이 방법은 프로브의 유도전압이 식 (3)과 같이 주파수 감소에 따라 작아지므로 저주파 측정이 불가능하다는 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해 저주파에서는 전류 프로브에 측정회로와 연결된 케이블의 턴 수를 늘려^[4] 상호 임피던스를 증가시킴으로써 저주파 민감도를 개선하였다.

$$V_{b2} = -j\omega L_2 I_2 - j\omega M_2 I_x + j\omega M_b I_1 \quad (3)$$

하지만 턴 수를 증가시키면 고주파에서는 공진이 발생하여 정확도가 오히려 감소하기 때문에 결과적으로 1 MHz

이하는 15턴, 이후 주파수에서는 기준과 같이 1턴으로 측정하였다. 이렇게 구성된 DCP는 측정 대상 시스템과 절연된 상태에서 다양한 주파수 대역의 모드 임피던스를 연속적으로 추출할 수 있다.

2-2 개선된 DCP 방법을 이용한 임피던스 측정 및 블랙박스 모델링

제안한 광대역 임피던스 측정 방법을 검증하기 위해 그림 2와 같은 셋업을 이용하여 수동소자(100 Ω 저항)에 대한 공통 모드와 차동 모드 임피던스를 측정하였다^[5]. 사용된 장비는 VNA(Keysight E5071C), LISN(line impedance stabilization network, EMCIS LN1-100S), 전류 프로브(FCC F-52B)이다. 100 Ω 저항에 대한 차동 및 공통 모드 임피던스 추출 결과는 그림 3과 같다. 저주파 감도를 증가시키기 위해 1턴, 15턴 셋업으로 각각 측정을 진행하였으며, 15턴으로 증가 시 약 20 kHz까지 측정 정확도가 보장됨을 확인할 수 있다.

검증된 방법으로 실제 노이즈 소스인 SMPS에 대한 임피던스 측정 및 블랙박스 모델링을 위해 플라이백 컨버터가 내장된 SMPS를 선정하였다. 동작 조건은 24 V, 1.5 A이며, 차동모드 임피던스 측정을 진행하였다. 측정 셋업은 그림 4와 같으며, SMPS 회로의 입력 전원단에 DCP 구조를 삽입하고 임피던스를 측정하였다.

측정된 결과는 그림 5의 붉은색 그래프와 같으며, 1 MHz를 기준으로 프로브에 연결된 턴 수를 변경하여 측정하였다. 저주파에서 더욱 정확한 임피던스가 측정되었으며, 따라서 기존 방법과 다르게 보다 넓은 주파수 대역에서 노이즈 소스에 대한 임피던스를 측정할 수 있다.

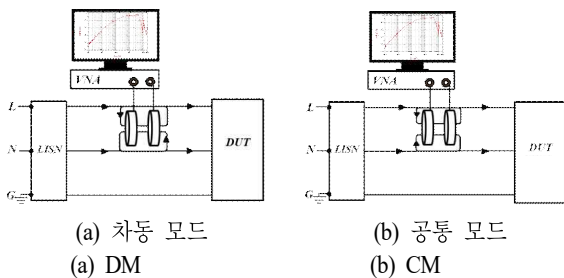
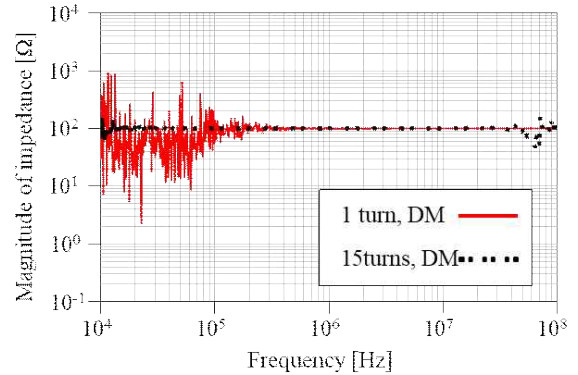
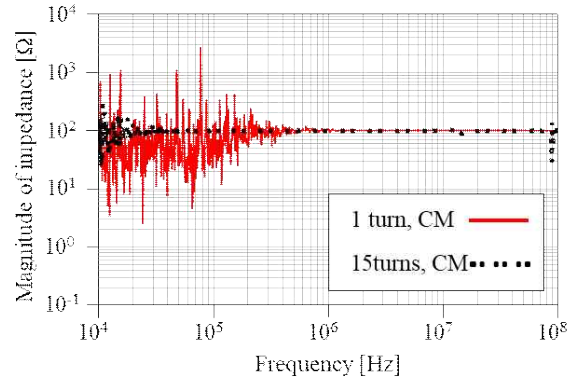


그림 2. 모드별 DCP 측정 셋업
Fig. 2. DCP measurement setup.



(a) 차동 모드
(a) DM



(b) 공통 모드
(b) CM

그림 3. 수동소자를 이용한 모드 임피던스 측정 결과
Fig. 3. Mode impedance measurement results using passive components.

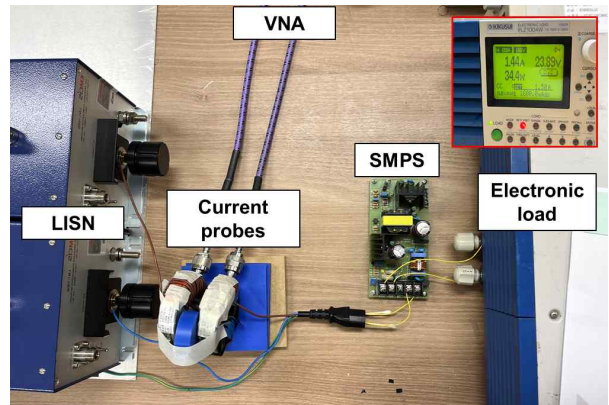


그림 4. SMPS의 모드 임피던스 측정 셋업
Fig. 4. Mode impedance measurement setup of SMPS.

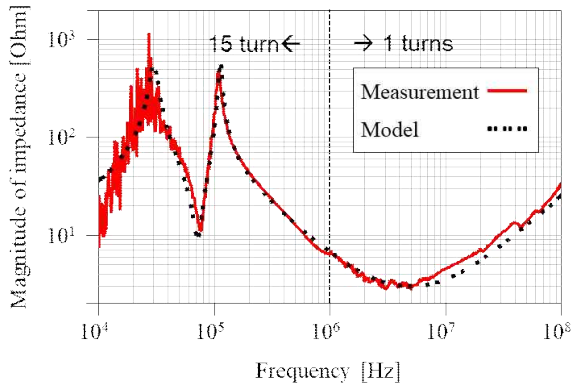


그림 5. 모드 임피던스 측정 및 블랙박스 모델링 결과
Fig. 5. Mode impedance measurement and black box modeling results.

측정 결과를 보면, 차동모드 임피던스는 수십 kHz에서 수 MHz 사이에서 공진 주파수에 해당하는 임피던스 저하 현상을 포함하고 있었으며, 이는 실제 회로 내 스위칭 소자 및 출력 콘덴서와의 상호작용에 따른 복합 공진 효과로 해석된다. 따라서 저주파를 포함한 대역에서 더욱 정확한 측정 기반의 임피던스 모델이 필요할 수 있다.

개선된 저주파에서의 임피던스 측정 결과를 포함한 블랙박스 모델은 그림 5의 측정 결과에서 나타난 두 개의 병렬 공진과 하나의 직렬 공진을 기반으로 그림 6과 같이 등가 회로로 구성하였다. 각 공진 주파수와 선형 구간의 리액턴스를 통해 커패시턴스 및 인덕턴스를 산출하고, 직렬 공진 주파수의 임피던스를 기준으로 저항을 결정하였다. 이러한 과정으로, 복잡한 내부 회로 해석 없이도 시스템의 주파수 응답을 근사할 수 있는 수동소자 기반 블랙박스 모델을 구성할 수 있다.

모델링 및 측정 결과의 차이는 표 1과 같으며, 여러 포인트의 정합성을 함께 보기 위해 MAE(mean absolute error)

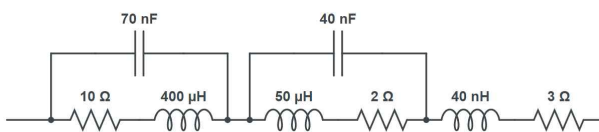


그림 6. 측정 기반 모드 임피던스 블랙박스 모델
Fig. 6. Measurement-based mode impedance black box model.

표 1. 측정 및 모델링 결과 차이 비교

Table 1. Comparison of measurement and modeling error.

Points	Max AE	Min AE	MAE
805	371 % (10.1 kHz)	0.027 % (1.58 MHz)	23.5 %

ror)로 평가를 진행하였다. 최대 AE(absolute error)가 발생한 10 kHz에서는 유도전압 감소에 따른 정확한 S-파라미터 측정이 불가하므로 큰 차이가 발생한다.

측정 결과, 차동모드 임피던스는 수십 kHz에서 수 MHz 사이에서 공진 주파수에 해당하는 임피던스 저하 현상을 포함하고 있었으며, 이는 실제 회로 내 스위칭 소자 및 출력 콘덴서와의 상호작용에 따른 복합 공진 효과로 해석된다. 이러한 데이터를 기반으로, 복잡한 내부 회로 해석 없이도 시스템의 주파수 응답을 근사할 수 있는 그림 6과 같은 수동소자 기반 블랙박스 모델을 구성하였다.

III. 블랙박스 모델 기반 EMI 필터 설계

본 장에서는 측정 결과를 이용하여 모드 임피던스의 블랙박스 모델링 기반 필터 설계를 진행하였다.

3-1 LC 필터 설계

제안된 모델을 기반으로 수식 기반 LC 필터를 설계하였다. 여기서 설계 조건은 특정 시스템의 노이즈 억제 요구 조건을 반영한 가상의 시나리오를 기반으로 설정되었다. 즉, 목표 주파수에서 원하는 삽입 손실 성능을 확보할 수 있도록 필터 차단 주파수를 역산하고 이에 따른 소자 값을 결정하는 방식이다. 이는 실제 회로 정보가 불명확하거나 제한된 상황에서도, 측정된 외부 응답만을 기반으로 정량적인 필터 설계가 가능함을 보여주는 사례로 볼 수 있다.

먼저 필터의 성능을 확인하기 위한 삽입 손실(IL, insertion loss)은 식 (4)로 표현된다.

$$IL(f) = 20\log_{10}(f/f_c)^n \quad (4)$$

여기서 f 는 목표 주파수, f_c 는 필터 차단 주파수, n 은 필

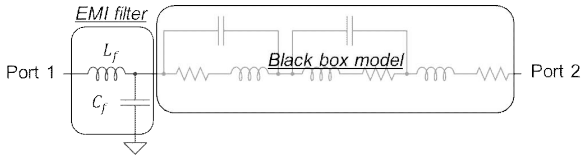


그림 7. EMI 필터가 포함된 블랙박스 모델
Fig. 7. Black box model with EMI filter.

터 차수이다. 1차 필터($n=1$) 기준으로, 1 MHz에서 30 dB 삽입 손실을 확보가 필요한 상황을 가정하면, 필요한 차단 주파수는 식 (5)와 같이 역산된다.

$$f_c = f/10^{(IL/20)} \approx 31.6 \text{ kHz} \quad (5)$$

해당 차단 주파수를 기반으로, 필터의 인덕턴스(L_f)와 커패시턴스(C_f)는 식 (6)과 같다.

$$L_f C_f = 1/2\pi f_c^2 \approx 2.53 \times 10^{-8} \quad (6)$$

이를 바탕으로 C_f 를 100 nF로 설정할 경우에 L_f 는 253 μ H로 도출되며, 그림 7과 같이 LC 필터를 구현할 수 있다.

3-2 필터 성능 분석

필터는 1 MHz를 기준으로 설계되었으므로, 그림 8의 임피던스 곡선에서 필터 삽입 시 1 MHz 이후부터 임피던스가 상승함을 확인할 수 있었다. 이는 필터에 전달 경로의 임피던스가 증가함을 의미한다. 그림 9의 삽입 손실은,

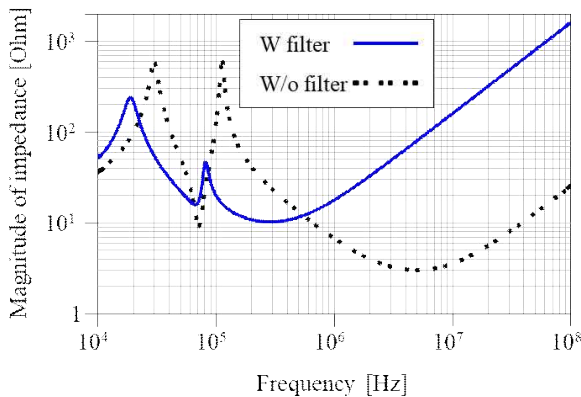


그림 8. 필터 적용에 따른 모드 임피던스 결과
Fig. 8. Mode impedance results considering EMI filter.

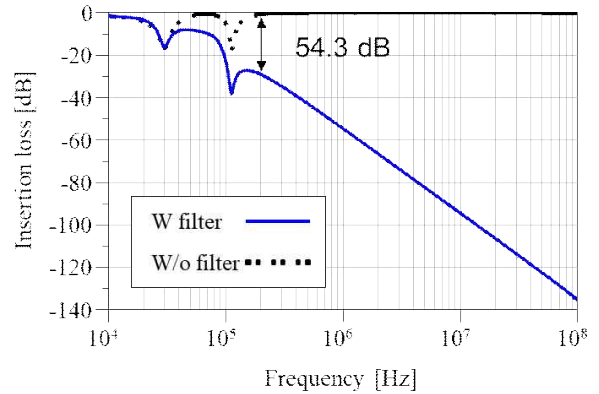


그림 9. 필터 적용에 따른 삽입손실 결과
Fig. 9. Insertion loss results considering EMI filter.

1 MHz 기준으로 필터 적용 후 약 54.3 B까지 감소되었다. 해당 결과는 수식 기반으로 도출한 설계가 실제 주파수 응답에 효과적으로 적용되었음을 보여준다.

설계 기준 주파수가 1 MHz이므로, 저주파 대역에서는 필터 적용에 따른 차이가 미미하다. 20 kHz에서 삽입 손실은 필터 제거 시 -4.38 dB, 필터 삽입 시 -3.45 dB로 약 1 dB 이내의 차이를 보인다. 즉 설계된 필터는 1 MHz 이후에서 우수한 성능을 보이나, 저주파에서도 1 dB 이내의 근소한 차이를 보인다. 따라서 필요시에는 차단 주파수를 낮추어 저주파 노이즈 저감을 위한 필터 설계도 가능하다.

IV. 결 론

본 논문에서는 비침습적인 방식으로 동작 중인 시스템의 공통 및 차동 모드 임피던스를 측정할 수 있는 DCP 기반 방법을 제안하였다. 특히 저주파 측정이 어려운 기존 DCP 방법의 보완을 위해 주파수에 따른 가변 턴수를 적용하였으며, 측정 데이터를 바탕으로 블랙박스 형태의 RLC 모델을 구성한 후 수식 기반의 1차 LC EMI 필터 설계를 수행하였다. 제안된 방법은 회로 정보가 제한된 블랙박스 시스템에도 적용 가능하여 실무적 활용도가 높다. 추후에는 다단 필터 확장, 필터 최적화 등의 방향으로 확장될 수 있다.

References

- [1] L. Illiano, X. Wu, F. Grassi, G. Spadacini, and S. A. Pignari, "Review of mode conversion and modal analysis in electromagnetic compatibility," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 65513-65529, May 2024.
- [2] H. Jie, Z. Zhao, F. Fei, K. Y. See, R. Simanjorang, and F. Sasongko, "A survey of impedance measurement methods in power electronics," in *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Ottawa, ON, 2022.
- [3] Z. Zhao, A. Weerasinghe, W. Wang, E. K. Chua, and K. Y. See, "Eliminating the effect of probe-to-probe coupling in inductive coupling method for in-circuit impedance measurement," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, p. 1000908, Aug. 2021.
- [4] J. Rhee, H. Kim, K. Chu, and S. Ahn, "Methodology for extracting low-frequency input impedance of personal computer during operation using dual current probes method," *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 66, no. 2, pp. 584-598, Apr. 2024.
- [5] V. Tarateeraseth, B. Hu, K. Y. See, and F. G. Canavero, "Accurate extraction of noise source impedance of an SMPS under operating conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 1, pp. 111-117, Jan. 2010.

이재원 [한국과학기술원/연구교수]

<https://orcid.org/0000-0001-5186-5395>



2020년 2월: 경북대학교 전기공학과 (공학사)

2022년 2월: 한국과학기술원 조천식녹색교통대학원 (공학석사)

2025년 8월: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 (공학박사)

2025년 9월~현재: 한국과학기술원 모빌리티 연구소 연구교수

[주 관심분야] EMC Design, Power EMC, High Power EMC 등

김지성 [한국과학기술원/초빙교수]

<https://orcid.org/0000-0001-7333-6427>



1993년 2월: 홍익대학교 전기제어공학과 (공학사)

1997년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학석사)

2000년 8월: The University of Texas at Austin, Electrical & Computer Engineering (공학박사)

2000년~2006년: 삼성전자 수석연구원
 2007년~2014년: 한국과학기술원 전기전자공학과 연구교수
 2015년~2022년: 수원과학대학교 전자정보통신공학과 교수
 2022년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 초빙교수
 [주 관심분야] EMI/EMC, Signal/Power Integrity, 고속신호 인터커넥트 및 시스템 설계, 무선전력전송

안승영 [한국과학기술원/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-0771-7050>



1998년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학사)

2000년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학석사)

2005년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)

2001년~2002년: Singapore Institute of Manufacturing Technology 방문연구원

2005년~2009년: 삼성전자 컴퓨터시스템사업부 책임연구원

2009년~2010년: 한국과학기술원 온라인전기자동차사업단 선임연구원

2010년~2011년: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 연구교수

2011년~현재: 한국과학기술원 조천식모빌리티대학원 교수

[주 관심분야] EMC, 무선전력전송, 전기자동차 시스템 등