Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2021) 35(2) : 16～21
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2021.35.2.016 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)

논문 35-2-3

강압형 LCC 공진형 컨버터의 기생 인덕턴스로 인한 주파수-출력 특성 변화 관찰

(Observation of the Variation of Frequency-Output Characteristic of Step-Down LCC Resonant Converter Caused by Parasitic Inductance)

정우철* · 박수미** · 류홍제†
(Woo-Cheol Jeong · Su-Mi Park · Hong-Je Ryoo)

Abstract

In the practical LCC resonant converter, the parasitic inductance between the parallel resonant capacitor and the output stage on the secondary side of the transformer is one of various parasitic components. The parasitic inductance induces relatively substantial influences in the step-down LCC resonant converter for which the rated output voltage is lower than the input voltage, and this cause additional resonance. In addition, when the parasitic is not affected, the switching frequency and output have a constant inverse relationship when switching frequency is above the resonant frequency, but the influence of the parasitic inductance cause a variation in the frequency-output characteristic. This paper describes the observations on the variations of major waveform and frequency-output characteristic with or without parasitic inductance using PSPICE simulation of the LCC resonant converter whose input voltage is 44V and rated output voltage is 17V.

Key Words : Additional resonance, Frequency-output characteristics, LCC resonant converter, Parasitic inductance

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
https://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* M.S. and Ph.D. joint degree course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University
https://orcid.org/0000-0002-5896-5353
** M.S. and Ph.D. joint degree course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University
https://orcid.org/0000-0002-3379-1182
Received : September 30, 2020
Revised : November 12, 2020., December 9, 2020., December 15, 2020
Accepted : December 16, 2020

1. 서 론

오늘날, 컨버터의 소프트 스위칭을 위한 다양한 방식의 기법이 이용되고 있다. 그 중 LCC 공진형 컨버터 토폴로지는 직렬 공진 인덕턴스, 직렬 공진 커패시턴스, 병렬 공진 커패시턴스 간의 공진을 통하여 스위치의 턴-온 시에 소프트 스위칭이 가능하도록 하는 컨버터 토폴로지다[1-4]. LCC 공진형 컨버터의 출력 전압을 결정하는 파라미터 중 하나는 변압기의 턴수비이며, 목표 출력 전압이 입력 전압보다 낮은 강압형 컨버터의 경우, 1차측 턴수가 2차측 턴수보다 많도록 설계한다.

Copyright ⓒ 2021 KIIEE All right's reserved
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

한편, 실제 컨버터 상에는 여러 기생 성분들이 존재하며, 병렬 공진 커패시턴스와 출력단 사이에 존재하는 기생 인덕턴스는 그 중 하나이다. 강압형 LCC 공진형 컨버터는 변압기 1차측 턴수가 2차측 턴수에 비해 더 크기 때문에 2차측에 존재하는 기생 인덕턴스가 승압형 LCC 공진형 컨버터에 비해 큰 영향을 끼친다.

이러한 기생 인덕턴스의 존재로 인하여 발생하는 현상 중 하나는 이상적인 LCC 공진형 컨버터 구동에서는 존재하지 않던 추가적인 공진의 발생이다. 또한, 추가적인 공진의 발생으로 인하여 컨버터의 동작 주파수와 출력 간의 관계에도 변화가 생기며, 이는 주파수 조절을 통한 출력 제어에 어려움을 야기한다.

본 논문에서는 44V 입력, 17V 출력 조건을 갖는 LCC 공진형 컨버터의 PSPICE 시뮬레이션을 통해 강압형 LCC 공진형 컨버터의 병렬 공진 커패시턴스와 출력단 사이에 존재하는 기생 인덕턴스로 인한 주요 파형의 변화와 주파수-출력 특성의 변화에 대해 관찰한 것에 대하여 기술한다.

2. 기생 인덕턴스로 인한 파형 변화

그림 1은 LCC 공진형 컨버터의 회로도이다. 입력 전원(V_{in})은 풀브릿지 구조의 스위치(S1~4)와 연결되며 각 스위치들에는 턴-오프 손실을 줄이기 위한 스너버 커패시터($C_{sn1\sim4}$)가 병렬로 구성된다. 풀브릿지 회로와 변압기 사이에는 직렬 공진 커패시터(C_s)와 직렬 공진 인덕터(L_s)가 위치하며 변압기 2차측에는 병렬 공진 커패시터(C_p)가 위치한다. 본 논문은 강압형 LCC 공진형 컨버터에 대해 다룰 예정이므로 n:1로 나타낸 변압기 턴수비에서 n은 1보다 큰 값이다. 부하에는 필터 커패시터가 병렬로 연결되어 있으며, 부하 단과 병렬 공진 커패시터 사이에는 정류 다이오드들로 구성하였다. 실제 컨버터 회로에서는 다양한 기생 성분들이 존재하며, 병렬 공진 커패시터와 부하 단 사이의 모든 기생 인덕턴스들은 L_{par}로 대표하여 나타내었다. 그림 2는 PSPICE를 통해 구현한 LCC 공진형 컨버터 회로이며, 표 1은 44V 입력, 17V 출력 기준으로 설계한 컨버터의 파라미터들을 나타낸다. 또

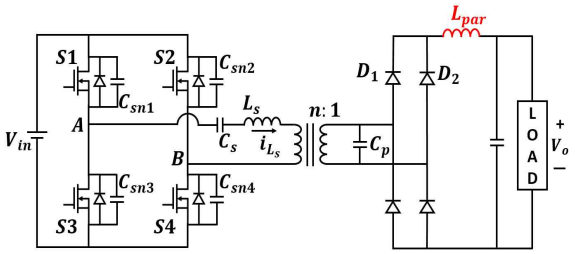

Fig. 1. Diagram of the LCC Resonant Converter

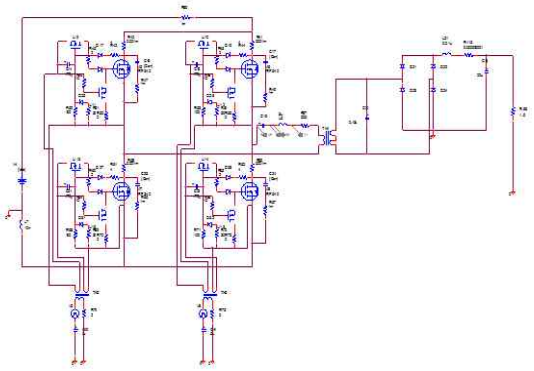

Fig. 2. Schematic circuit for simulation of the designed modified converter using PSPICE

한, $L_{par} = 0.15\,\mu F$ 으로 구성하여 시뮬레이션 하였다. $f_{s,rated}$, f_{os}, f_{op} 는 각각 정격 스위칭 주파수, 직렬 공진 주파수, 병렬 공진 주파수를 나타낸다.

그림 3은 기생 인덕턴스를 구성하지 않은 LCC 공진형 컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이며, 그림 4는 기생 인덕턴스를 포함한 LCC 공진형 컨버터의 시뮬레이션 결과 파형이다. 두 파형 간의 비교 및 분석을 위하여 각각의 반주기를 ①,②,③ 과 ⓐ,ⓑ,ⓒ 로 나누어 나타내었다.

먼저, 구간 ①과 ⓐ 는 공통적으로 공진 전류가 병렬 공진 커패시터를 충전하는 구간이며 병렬 공진 커패시터의 전압이 출력 전압과 같아져서 출력 정류 다이오드가 도통될 때까지 유지된다.

기생 인덕턴스를 포함하지 않는 경우, 출력 정류 다이오드가 도통되면 부하 단으로 전력이 전달되며, 부하 단과 병렬 공진 커패시터가 병렬로 연결되기 때문에 병렬 공진 커패시터의 전압은 출력 전압과 일정하게 유지된다. 따라서 변압기 2차 측은 병렬 공진 커패

Table 1. Designed specification of the modified LCC resonant converter for filament power supply

V_{in}	V_o	$N_1 : N_2$	L_s	C_s	C_p	L_{par}	$f_{s,rated}$	f_{os}	f_{op}
44 V	17 V	20 : 8	3.5 μF	1 μF	0.1 μF	0.15 uF	250 kHz	85 kHz	673 kHz

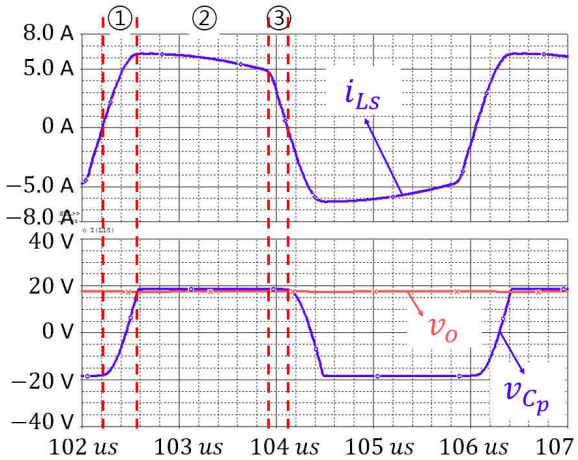

Fig. 3. Waveforms of the PSPICE simulation without parasitic inductance

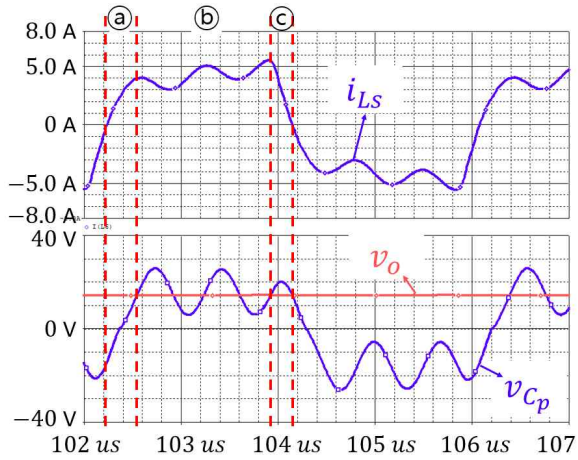

Fig. 4. Waveforms of the PSPICE simulation with parasitic inductance

시터를 포함하여 전압원으로 치환할 수 있으며, 2차 측 관점에서 1차 측을 등가하여 그림 5(a) 와 같은 등가 회로로 나타낼 수 있다. 이 때에 C_s와 L_s에 의한 공진은 공진 주기가 스위칭 주기에 비해 매우 길기 때문에 영향을 무시할 수 있다[1]. 반면에 기생 인덕턴스가 존재할 시에는 출력 정류 다이오드가 도통되면 도

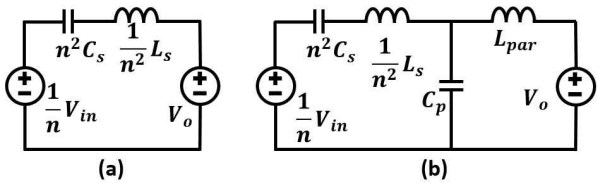

Fig. 5. Equivalent circuits of (a) section② (b) section ⓑ

통 시점에 전류가 기생 인덕턴스에 흐르게 되며, 전류 변화로 인하여 기생 인덕턴스 양단에는 식 (1)에 의한 전압이 유기된다.

$$v_{Lpar} = L_{par}\frac{di_{Lpar}}{dt} \tag{1}$$

또한, 유기되는 전압 v_{Lpar}에 의한 병렬 공진 커패시턴스의 전압은 식 (2) 으로 나타낼 수 있다.

$$v_{Cp} = v_{Lpar} + V_o \tag{2}$$

따라서 ⓑ에서는 ②와 달리 C_p를 전압원으로 치환하지 못하며, 기존의 공진 회로에 L_{par} 가 추가된 형태로 새로운 공진이 발생하게 된다. 또한, 1차 측의 공진 소자들의 임피던스는 2차 측 관점에서는 n^2으로 나눈 값과 같기 때문에, 기생 인덕턴스 값이 같다고 가정할 때 n이 1보다 클수록 기생 인덕턴스의 임피던스로 인한 영향이 커지게 된다. 따라서 기생 인덕턴스의 영향은 승압용 LCC 공진형 컨버터보다 강압형 LCC 공진형 컨버터에서 더 크게 작용한다.

③과 ⓒ는 스위치들의 ON, OFF 상태가 상보 동작하여 시작되며, 공진 회로의 양단에 걸리는 전압의 극성이 반대가 되어 공진 전류는 점차 감소한다. 하지만 공진 전류의 극성은 아직 바뀌지 않았기 때문에 ③에서 출력 정류 다이오드는 여전히 도통된 상태이며, 따

라서 v_{Cp} 또한 V_o 로 유지된다. 한편, ⓒ에서도 역시나 출력 다이오드가 도통된 상태이기 때문에 L_{par} 을 포함한 회로가 유지되어 공진이 발생된다.

3. 주파수-출력 특성 변화

그림 6은 기생 인덕턴스를 포함하지 않은 LCC 공진형 컨버터의 주파수별 출력을 나타낸 그래프이며, 공진 주파수 이상의 영역에서 동작할 때, 주파수가 커질수록 출력이 감소하는 특성을 갖는다. 이는 그림 7에서 볼 수 있듯이, 스위칭 주파수가 빨라질수록 그림 3에서의 ② 구간이 짧아지기 때문이다. 이 때, ① ,③ 구간의 병렬 공진 커패시턴스에 의한 공진 주파수는 동작 주파수에 비해 매우 빠르기 때문에 구간 길이가 일정하게 유지된다[1]. 앞서 보았듯이, 기생 인덕턴스가 존재하지 않을 때는 출력 정류 다이오드가 도통되는 ② ,③ 구간에서만 전력이 전달되기 때문에 ② 구간 길이만 짧아지게 되면 전체 주기 상에서 전력 전달 구간이 차지하는 부분이 감소하여 출력이 감소한다.

한편, 기생 인덕턴스가 존재할 때의 주파수-출력 곡선은 그림 8과 같이 변하게 된다. 기생 인덕턴스가 존재할 때는 주파수-출력 관계가 일부 구간에서는 기생 인덕턴스가 없을 때와 같은 반비례 관계이지만, 일부 구간에서는 비례 관계인 것을 확인할 수 있다. 따라서 기생 인덕턴스의 영향이 존재할 때는 기생 인덕턴스의 영향이 없을 때보다 컨버터의 제어 설계 시에 더 많은 고려 사항이 생기는 어려움이 있다. 반비례 구간과 비례 구간에 대한 관찰은 다음과 같다. 먼저, 기생 인덕턴스의 영향이 없을 때와 다른 특성을 갖는 비례 구간의 주요 파형은 그림 9와 같다. 그림 3에서 보았듯이, 기생 인덕턴스의 영향이 없을 때는 직렬 공진 인덕터 전류(i_{Ls}) 극성이 바뀌는 시점부터 병렬 공진 커패시터 전압이 출력 전압과 같아지는 시점까지는 출력 정류 다이오드가 도통되지 않아서 부하로 전력이 전달되지 않는다. 하지만 그림 9에서는 공진 전류의 극성이 바뀌는 시점에 기생 인덕턴스에 저장된 에너지로 인한 전류에 의하여 출력 정류 다이오드가 도통된 채로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 경우에는 스위

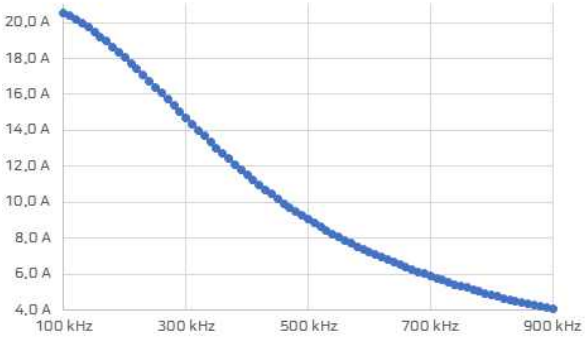

Fig. 6. Output current vs. Switching frequency curve without parasitic inductance

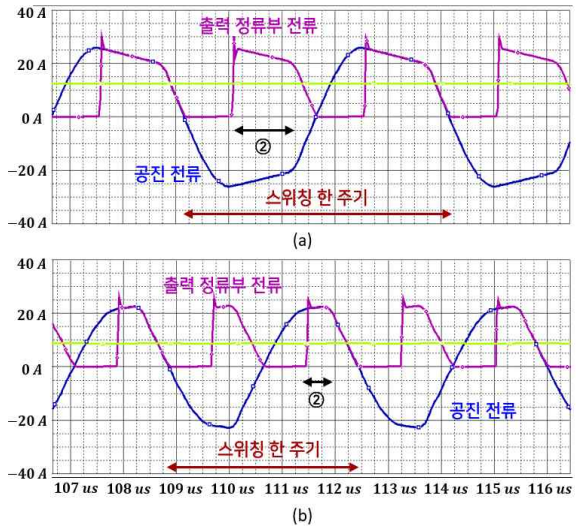

Fig. 7. Waveforms of the resonant current and current of the output rectifier
(a) Switching frequency : 200-kHz
(b): 300-kHz

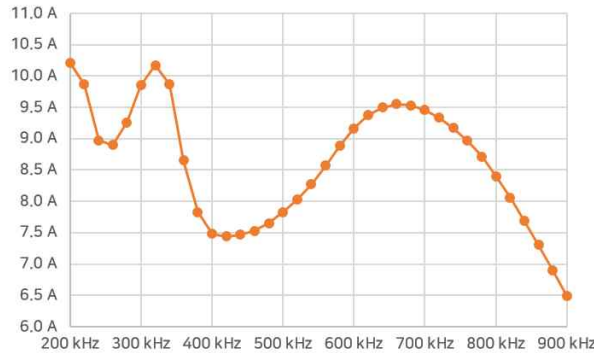

Fig. 8. Output current vs. Switching frequency curve with parasitic inductance

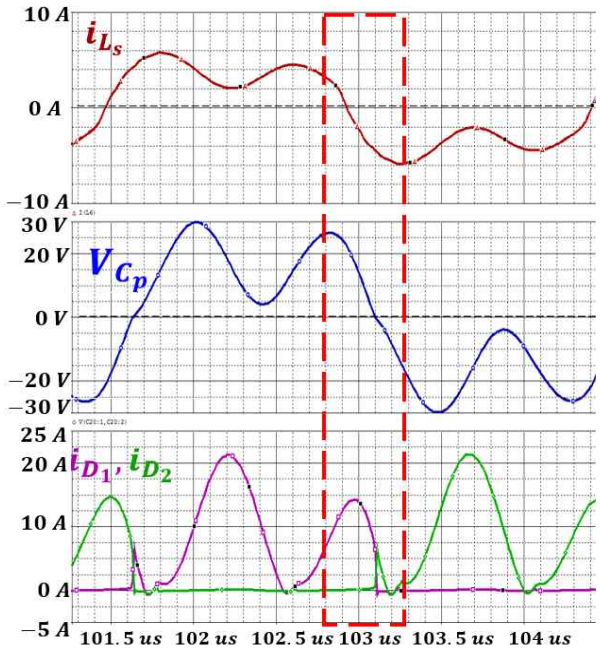

Fig. 9. Waveforms when switching frequency and output are in direct proportion

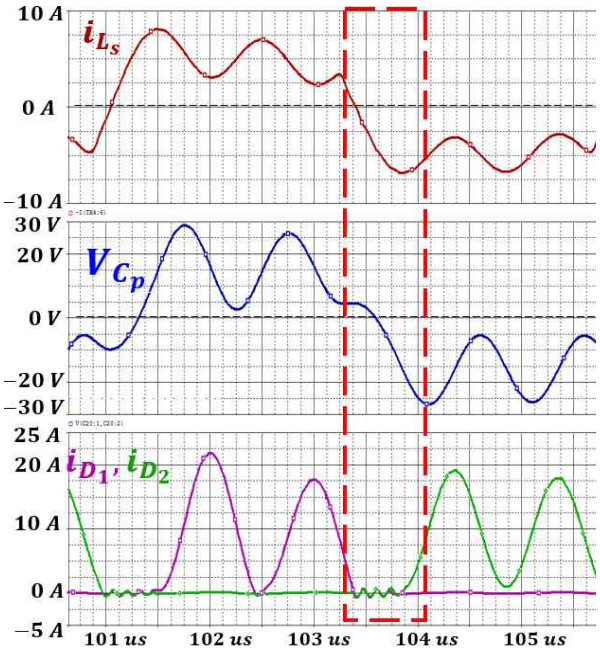

Fig. 10. Waveforms when switching frequency and output are in inverse proportion

칭 주기 전 구간이 전력 전달 구간에 포함되므로, 기생 인덕턴스의 영향이 없을 때와는 다른 주파수-출력 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다.

반면, 그림 10에서는 i_{Ls}의 극성이 바뀌는 시점에 기생 인덕턴스에 저장된 에너지를 모두 소진한 상태이기 때문에 출력 정류 다이오드가 도통되지 않으며, 전력이 부하 측으로 전달되지 않는 구간이 존재하게 된다. 따라서 기생 인덕턴스의 영향이 없을 때와 같은 이유로 주파수와 출력은 반비례 관계가 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 PSPICE 시뮬레이션을 통해 실제 LCC 공진형 컨버터의 병렬 공진 커패시터와 출력 단 사이에 존재하는 기생 인덕턴스의 영향에 대해 관찰 및 분석을 하였다. 이 기생 인덕턴스는 변압기의 1차측 턴수가 2차측 턴수보다 큰 강압형 LCC 공진형 컨버터에서 보다 큰 영향을 끼치며, 이상적인 LCC 공진형 컨버터에서는 존재하지 않는 추가적인 공진을 야기한다. 또한, 모든 주파수 범위에서 주파수와 출력이 반비례 관계를 갖는 이상적인 LCC 공진형 컨버터와는 다르게, 기생 인덕턴스가 존재할 시에는 주파수 범위에 따라 주파수와 출력 간의 관계가 비례인 구간과 반비례인 구간으로 상이하며, 이러한 현상은 기생 인덕턴스로 인한 추가적인 공진으로 인하여 LCC 공진형 컨버터의 직렬 공진 인덕턴스에 저장되는 에너지로 인한 출력 단 다이오드의 도통 여부 차이 때문인 것을 분석을 통해 밝혀내었다. 이러한 영향으로 인해 주파수 조절을 통한 출력 제어를 위한 제어 회로 구성 시에 주파수 구간에 따라 상이한 주파수-출력 관계에 대한 고려가 요구될 것으로 예상되며, 본 논문에서의 관찰과 분석을 바탕으로 수식을 이용한 일반화 및 해결 방법에 대해 향후 연구할 예정이다.

Acknowledgements

이 논문은 한국조명,전기설비학회 2020년도 학술대회에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원(No.20184030202270)과 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.NRF2020R1A2C2099663)을 받아 수행된 연구 과제입니다.

References

[1] S. R. Jang, C. H. Yu, H. J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of Multi-Stage Capacitor Charger for Solid-State Marx Modulator", Trans. on Power Electronics, VOL. 33, NO. 5, pp. 3816-3825, 2018.

[2] A. J. Gilbert, C. M. Bingham, D. A. Stone., and M. P. Foster, "Normalized Analysis and Design of LCC Resonant Converters", Trans. on Power Electronics, VOL. 22, No. 6, pp. 2386-2402, 2007.

[3] T. B. Soeirom J. M. Mühlethaler, J. Linnér, P. Ranstad., and J. W. Kolar, "Automated design of a high-power high-frequency LCC resonant converter for electrostatic precipitators," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 11, pp. 4805-4819, 2013.

[4] C. Loef, "Analysis of a full-bridge LCC-type parallel resonant converter with capacitive output filter", in 28th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Saint Louis, MO, USA, pp. 1402-1407, 1997.

Biography



Woo-Cheol Jeong

He received the B.S. degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2019, where he is currently pursuing the M.S. and Ph.D. joint degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include soft-switched resonant converter applications and high-voltage pulsed-power supply systems.



Su-Mi Park

She received the B.S. degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2017, where she is currently working toward the M.S. and Ph.D. joint degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul. Her research interests include high-voltage power converters, bi-directional dc/dc converters, and solid-state pulsed power modulators.



Hong-Je Ryoo

He received the B.S., M.S., and Ph.D. degrees in electrical engineering from Sungkyunkwan University, Seoul, South Korea, in 1991, 1995, and 2001, respectively. From 2004 to 2005, he was a Visiting Scholar with WEMPEC, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, USA. From 1996 to 2015, he joined the Electric Propulsion Research Division as a Principal Research Engineer, the Korea Electrotechnology Research Institute, Changwon, South Korea, where he was a Leader with the Pulsed Power World Class Laboratory, a director of Electric Propulsion Research Center. From 2005 to 2015, he was a Professor with the Department of Energy Conversion Technology, University of Science and Technology, Deajeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor in major of Electrical Energy Engineering. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. He is an Academic Director of the Korean Institute of Power Electronics, a planning director & editorial director of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.