DBpia

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2022) 36(6) : 52～57
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2022.36.6.052 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 36-6-7

1kV, 1kA, 12kW 펄스 출력을 위한 Discharge Closing Switch의 스너버 회로 설계

(Snubber Circuit Design of Discharge Closing Switch for Pulse of 1kV, 1kA, 12kW)

최민규* · 송승호** · 류홍제†
(Min-Kyu Choi · Seung-Ho Song · Hong-Je Ryoo)

Abstract

This paper deals with the overall structure of 1kV, 1kA, and 12kW pulse modulator and the snubber circuit design of the discharge closing switch for pulse. This high-voltage, high-current pulse modulator is used in various fields such as the field of printed electronics. However, overshoot and noise are unavoidable considerations due to the features of pulse power that instantaneously outputs high voltage and current. To reduce such overshoot and noise, a snubber circuit has been proposed. The snubber circuit consists of a resistance, capacitor, diode(RCD) and is additionally equipped with one more capacitor. Therefore, in this paper, we analyze the operational principles of the proposed snubber circuit. Finally, a waveform without overshoot and malfunction was confirmed through a pulse output experiment.

Key Words : Discharging closing switch, Noise, Overshoot, Pulse modulator, Snubber circuit

1. 서 론

펄스 파워 기술은 커패시터나 인덕터와 같은 에너지 저장 장치를 장시간 충전한 후 단시간 내에 부하 측으로 높은 에너지를 방전시키는 것이며, 펄스 모듈레이터는 이를 출력하는 장치를 뜻한다. 이러한 펄스 파워는 국방, 의료, 농업, 환경 그리고 인쇄 전자 등 다양한 응용 분야에 활용되고 있다[1, 2].

인쇄 전자 응용 분야에서 사용되는 제논 램프는 가스 방전 램프의 한 종류로서 유리 튜브 안의 이온화된 고압 제논 가스에 전기를 흘려 빛을 낼 수 있다. 이러한 빛은 매우 짧은 시간으로 강하게 조사하여 전도성 패턴이나 기판을 경화 및 소결할 수 있다. 특히, 빛 에너지를 만들어주는 전기 에너지를 공급하기 위해 수 kV, 수 kA를 출력할 수 있는 펄스 모듈레이터에 관한 연구가 진행되고 있다[3, 4].

이러한 펄스 모듈레이터 설계 시 고려해야 할 펄스의 특성으로는 전압, 전류, 두릅, 펄스폭, 반복률 그리고 오버슈트 등이 있다. 특히, 일반적인 전력변환장치 대비 고전압 펄스 모듈레이터 설계 시 오버슈트와 노

† Corresponding Author : Professor, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
Tel : 02-820-5178
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
http://orcid.org/0000-0001-8657-7350
* M.S course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University, Korea
https://orcid.org/0000-0003-3916-6457
** Senior Researcher, Smart Electrical & Signaling Division, Korea Railroad Research Institute (KRRI), Korea
https://orcid.org/0000-0003-1893-1674
Received : May 31, 2022
Revised : June 13, 2022
Accepted : June 16, 2022

Copyright ⓒ 2022 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.

www.dbpia.co.kr

이즈에 대한 대책을 마련해야 한다. 펄스의 오버슈트는 정격 전압을 초과하여 소자를 손상시키는 경우가 빈번하다. 또한, 일반적인 전력변환장치에 비해 높은 전압, 전류의 변화율로 인한 노이즈가 발생하여 스위치의 오동작을 초래할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 펄스의 오버슈트와 오동작을 감소시키며 제어할 수 있는 펄스를 출력할 수 있는 스너버 회로 설계에 대해서 다룬다.

2. 펄스 모듈레이터 구성 개요

본 논문에서 다루는 펄스 모듈레이터 구조는 크게 충전부와 방전부로 나눌 수 있으며 이를 Fig. 1에 나타내었다. 고효율과 제논 램프의 부하 특성 변화에 대응하기 위한 전류원 특성이 요구되기 때문에 충전부의 토폴로지는 공진 전류의 모양을 사다리꼴로 근사한 개선된 LCC 공진형 컨버터 토폴로지가 사용되었다[5]. 제안된 충전부는 스토리지 커패시터($C_{Storage}$)의 센싱을 통해 스토리지 커패시터를 일정한 전압까지 충전시켜주고 일정하게 유지 시켜준다.

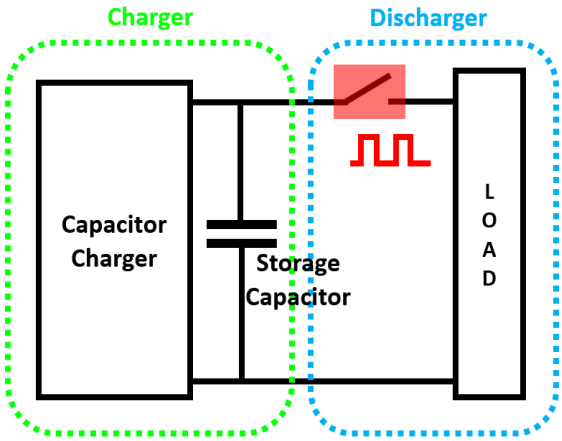

Fig. 1. Overall schematic of pulse modulator

커패시터에 저장된 에너지를 방전하기 위해 사용된 방전부 토폴로지는 Discharge Closing Switch이다. 스위치가 온이 되면서 짧은 시간 동안 커패시터에 저장된 에너지가 부하에 인가되는 이 토폴로지의 특징이다. 이에 더해, 순간적으로 높은 전압을 부하에 인가할 수 있으므로 구형파에 가까운 전압을 출력할 수 있다. 하지만 높은 전압 전류의 변화량은 오버슈트와 노이즈를 유발하여 소자의 손상이나 원하는 전압 파형을 출력하는데 어려움을 줄 수 있다. 따라서 본 논문에서는 C와 RCD 스너버를 함께 적용하여 Discharge Closing Switch 단점을 보완했다[6].

본 논문에는 펄스 모듈레이터의 출력이 1kV, 1kA의 펄스를 0.6ms에서 20ms의 펄스폭과 20Hz 이하의 반복률을 가변할 수 있도록 설계되며 이를 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Design specification of pulse modulator

변수	값
입력 전압	$380\,V_{ac} \pm 10\%$
최대 출력 전압	$1\,kV$
최대 출력 전류	$1\,kA$
펄스폭	$0.6\,ms \sim 20\,ms$
반복률	$\leq 20Hz$
펄스 상승 시간	$10\mu s$
펄스 하강 시간	$30\mu s$
최대 평균 전력	$12\,kW$

3. 스너버 회로 동작 모드 분석

충전부를 통해 커패시터에 충전된 에너지는 짧은 시간 동안 방전되어 펄스 전압의 형태로 부하저항에 인가된다. 순간적으로 높은 전압, 전류의 변화량으로 인해 기생 인덕턴스에 의한 오버슈트와 노이즈가 발생하며 스너버 회로는 필수적이다. 스너버 회로의 동작 모드는 방전 스위치(SW_1)에 게이트 신호의 형태에 따라 나뉠 수 있으며 이를 Fig. 2와 Fig. 3에 나타내었다[6].

모드 ① ($t_0 \sim t_1$)

먼저, 모드 ①은 게이트 신호를 인가하기 전의 구간이다. 방전 스위치는 꺼져있는 상태이므로 스너버 커패시터에는 Vin만큼의 에너지가 저장되어 있으며 이를 식(1)에 나타내었다.

$$E = \frac{1}{2} C_2 V_o^2 \tag{1}$$

www.dbpia.co.kr

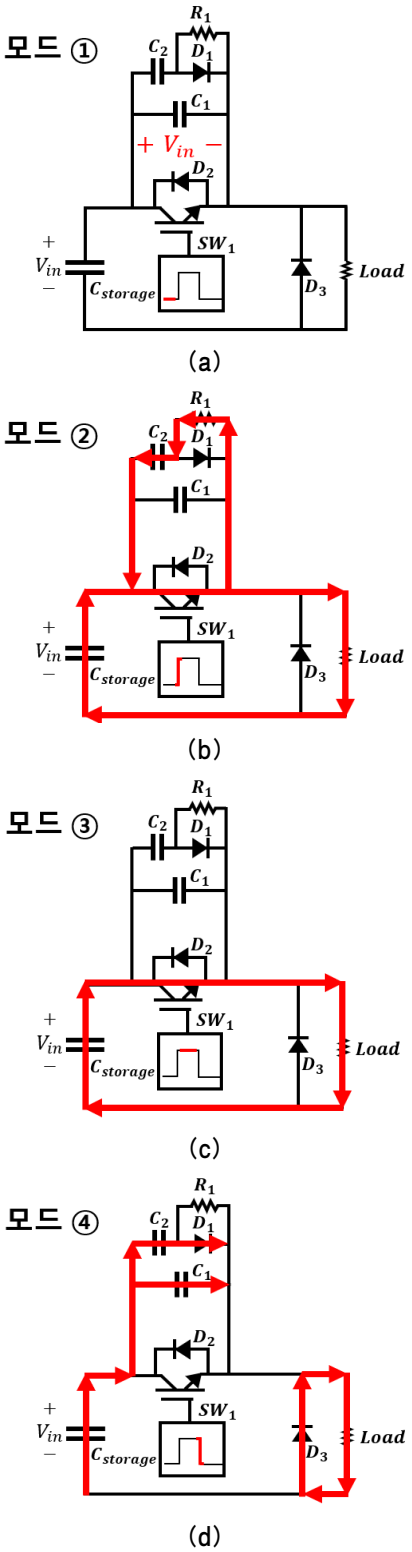

Fig. 2. Operation principle of snubber circuit (a) mode 1 (b) mode 2 (c) mode 3 (d) mode 4

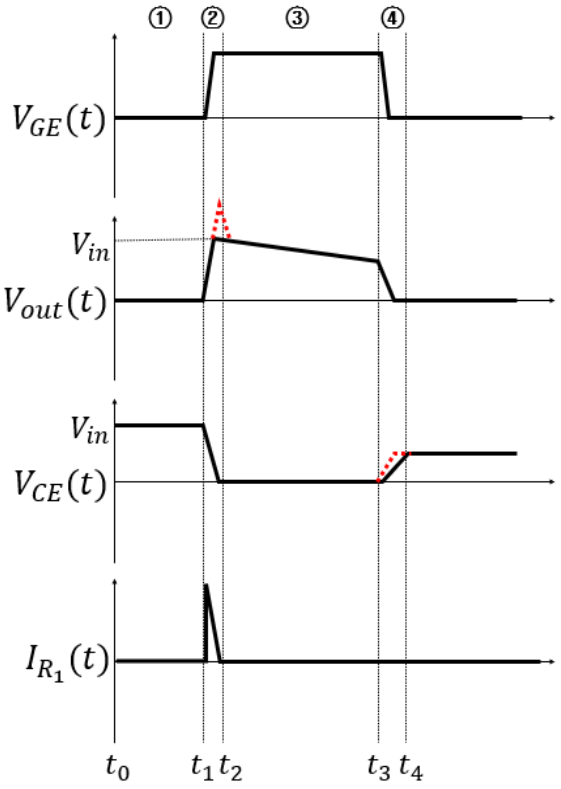

Fig. 3. Waveforms of $V_{GE}(t)$, $V_{out}(t)$, $V_{CE}(t)$ and $I_{R_1}(t)$

모드 ② ($t_1 \sim t_2$)

모드 ②는 게이트 신호의 인가가 시작되는 구간이며 스위치 양단 전압과 부하 저항의 전압은 Fig. 3의 파형처럼 변화한다.

이 구간에서는 전류가 흐르지 않다가 순간적으로 흐르기 때문에 기생 인덕턴스에 의한 오버슈트가 생겨난다. 따라서 스너버 회로를 통해 전류와 전압의 변화량을 감쇄시켜주며 오버슈트를 감소시킨다.

또한, 스너버 커패시터에 저장된 에너지가 저항을 통해 방전되기 때문에 제한된 전류가 흐르게 된다. 이때, R_1은 저항 발열에 의한 손상을 방지하기 위해 커패시터에 저장된 에너지(E)와 펄스의 반복률을 곱한 값보다 큰 정격 전력 사양을 갖는 저항으로 선정한다.

또한, 스너버 커패시터의 커패시턴스 값을 너무 높이면 모드 ② 동안 커패시터에 충전된 에너지가 방전되지 않을 수 있으므로 적당한 커패시턴스 값 선정이 중요하다.

www.dbpia.co.kr

모드 ③ ($t_2 \sim t_3$)

모드 ③은 게이트 신호가 완전히 인가되었을 때의 구간이다. 스너버 커패시터에 저장된 에너지가 모두 방전되어 저항에 흐르는 전류는 없다. 이때, 부하에 인가되는 전압은 드룹을 가지면서 펄스의 형태로 출력된다.

모드 ④ ($t_3 \sim t_4$)

마지막 구간, 모드 ④는 게이트 신호가 인가되지 않는 구간이다. 이 구간 역시 모드 ②와 마찬가지로 전류의 변화량이 크기 때문에 순간적으로 기생 인덕턴스에 의한 노이즈가 발생한다. 이는 게이트 드라이버에 영향을 주며 스위치 오동작에 원인이 된다.

따라서 출력 전류와 출력 전압의 변화를 감소시켜주는 스너버 회로를 통해 노이즈를 최소화하였다. 또한, 스너버 회로는 스위치 양단의 전압의 변화량까지 감소시키며 이를 Fig. 3에 나타내었다. 하지만 이때 역시 스너버 커패시터의 커패시턴스 값을 너무 높이면 펄스 전압의 하강 시간이 너무 길어지는 이를 고려한 설계가 적용된다.

4. 스너버 회로 설계 및 제작

본 논문에서 제어하는 펄스는 Table 1에 나타낸 것과 같이 1kV, 1kA의 고전압 대전류를 출력한다. 따라서 높은 전압 내력과 전류 내량의 IGBT를 사용하였다. 하지만 높은 전류를 스위칭하게 되면 라인의 기생 인덕턴스와 커패시턴스에 공진으로 높은 오버슈트 발생하여 순간적으로 스위치의 정격 전압을 초과할 수 있으며 스위치가 손상될 수 있다. 따라서 30μF의 스너버 커패시터를 장착하여 전압의 상승률을 제한하였다.

또한, 높은 전류의 스위칭을 하게 되면 추가로 생성되는 문제인 노이즈에 의해 게이트 드라이버에 전압이 유기되고 스위치가 오동작하게 된다. 따라서 RCD 스너버를 추가로 장착하여 전류 변화량에 의한 전압의 상승을 제한해주었다. 하지만 너무 큰 커패시턴스를 선정하게 되면 펄스의 하강 시간이 너무 길어지기 때문에 적절한 커패시턴스를 선정하였다. 따라서 이러한 고려사항들을 바탕으로 선정된 방전부 사용 소자 사양을 Table 2에 정리하였다.

선정된 소자들을 기반으로 방전부를 제작하였으며 이를 Fig. 4에 나타내었다. 스너버 회로와 방전 스위치 사이의 기생 인덕턴스를 최소화시키기 위해 소자 간의 거리를 최소화하였다. RCD 스너버 커패시터는 정격 전압이 1000V인 점을 고려하여 700V 커패시터를 2개 직렬로 연결하였다. 저항은 정격 전력을 50W로 설계하여 발열을 방지하였다.

Table 2. Specification of discharge element

파라미터	모델명	사양
SW_1	$FZ900R12KE4$	$1200\,V/900A$
D_3	$MEO45012\text{-}DA$	$1200\,V/453A$
C_2	$DCB\,30\mu F$ $(2\,series)$	$700\,V$
C_1	$PMS\,2.2\mu F$	$1200\,V$
D_1	$RHRG75120$	$1200\,V/75A$
R_1	$RHT\,2ohm$ $(2\,parallel)$	$25\,W$

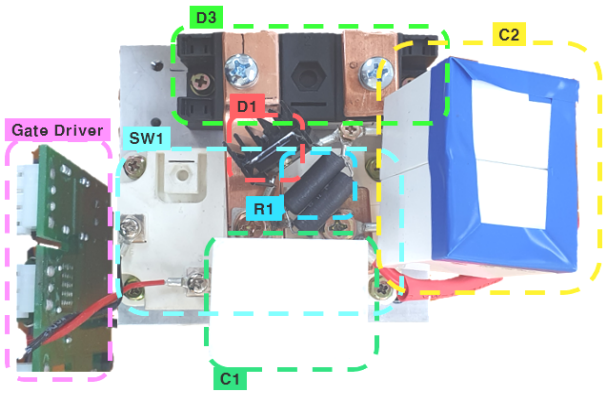

Fig. 4. Photograph of implemented discharger

5. 실험 결과

스토리지 커패시터의 충전을 위한 충전부의 신뢰성 검증을 위해 저항을 부하로 이용한 정격 출력 실험 파형을 Fig. 5에 나타내었다. 실험 시 입력 전원은 3상 전원을 정류하여 사용하였으며 부하 저항은 83Ω을 사용하였다. 실험 결과, 공진 전류가 사다리꼴로 나오는 것을 검증하였으며 510V 입력일 때 목표 출력 전압인 1000V가 출력되는 것을 확인하였다.

www.dbpia.co.kr

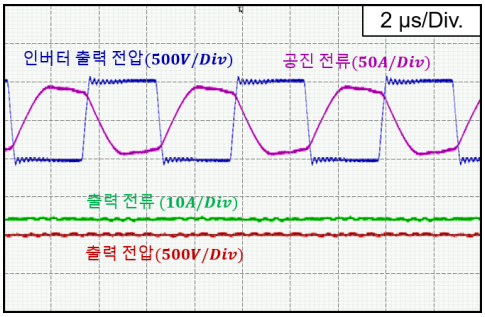

Fig. 5. Experimental result of rated output

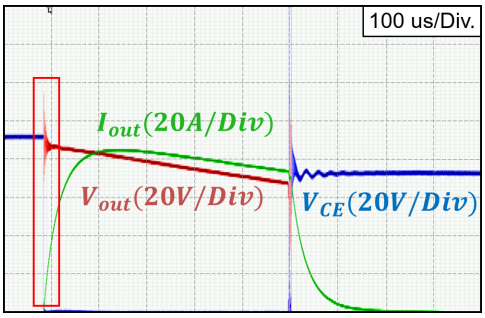

Fig. 6. Waveforms of pulse output experiment without snubber circuit

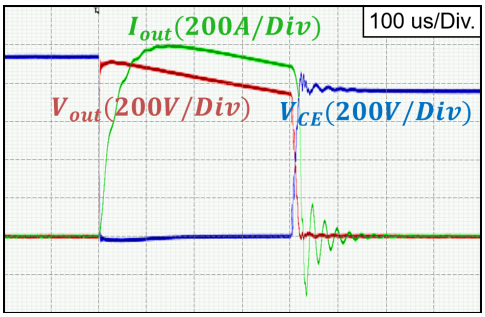

Fig. 7. Waveforms of pulse output experiment with snubber circuit

충전부가 정상적으로 스토리지 커패시터를 정상적으로 충전한 후 방전 스위치에 게이트 신호를 인가하여 방전 실험을 진행하였다. 이때, 설계된 스너버 회로의 검증은 실험을 통해 이루어졌으며 Fig. 6과 Fig. 7은 각각 스너버 회로의 장착 여부를 비교한 파형이다. Fig. 6에서 출력 전압과 전류는 각각 100V, 100A이며 펄스 방전 초기에 오버슈트가 20 %가 생성되는 것을 확인할 수 있다. 이는 1kV 출력 시 스위치 정격 전압을 초과할 수 있기에 스위치 손상으로 연결될 수 있다. 또한, 게이트 신호에 오프 신호가 인가될 때 생성되는 노이즈에 의해 스위치가 오동작하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이러한 문제점들을 방지하기 위해 스너버 회로를 스위치 양단에 장착하였으며 1kV, 1kA 펄스 출력 실험을 한 결과, Fig. 7과 같이 오버슈트가 없고 스위치의 오동작이 없는 안정적인 동작을 확인할 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 1kV, 1kA, 12kW 급 펄스 모듈레이터의 전체적인 개요와 펄스 출력을 위한 Discharge Closing Swtich의 스너버 회로 설계에 대해서 다루었다. 순간적으로 높은 전압과 전류를 출력하는 펄스 파워의 특성상 오버슈트와 노이즈는 피할 수 없는 고려사항이다. 오버슈트는 스위치와 같이 정격의 한계가 있는 소자의 손상을 유발할 수 있으며 노이즈는 오동작을 일으킬 수 있다. 따라서 오버슈트를 감소시키기 위해 스너버 커패시터를 스위치 양단에 장착하였고 노이즈를 저감하기 위해서 RDC 스너버를 장착하였다. 따라서 정격 출력 실험을 통해 충전부를 검증하였으며, 펄스 출력 실험을 통해 오버슈트 감소와 오동작이 없는 펄스 출력 파형을 확인하였다. 향후, 인쇄전자 분야에 사용되는 제논램프를 부하로 사용하여 실험할 예정이다.

이 논문은 한국조명 전기설비학회 2022년도 춘계학술대회에서 발표하고 우수추천 논문으로 선정된 논문임.

Acknowledgement

본 연구는 2020년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임[S2862711].

References

[1] H. Akiyama, et al., "Industrial Applications of Pulsed Power Technology," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 14, No. 5, pp. 1051-1064, 2007.

www.dbpia.co.kr

[2] G. H. Rim, et al., "Status of KERI's Pulsed Power Research and Development," IEEETrans. Plasma Sci., Vol. 41, No. 10, pp. 2584-2592, 2013.
[3] C. G. Cho, et al., "Development of a 1.5kV, 1.2kA Pulsed- power Supply for Light Sintering," IEEE Trans. Plasma Sci., vol. 45, no. 10, pp. 2683-2690, 2017.
[4] C. G. Cho, et al., "A Novel Series-connected Xenon Lamp Power Supply System Using a Pulse Trigger with Simmer Circuits for Pulsed Light Sintering Application," IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 66, No. 1, pp. 233-244, 2019.
[5] S.-R. Jang, C.-H. Yu, and H.-J. Ryoo, "Trapezoidal Approximation of LCC Resonant Converter and Design of a Multistage Capacitor Charger for a Solid-state Marx Modulator," IEEE Trans. Power Electron., Vol. 33, No. 5, pp. 3816-3825, 2018. doi: 10.1109/TPEL.2017.2716975.
[6] R. Severns, "Design of Snubbers for Power Circuits," https://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf, 2013.

Biography



Min-Kyu Choi

He received the B.S. degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2022, where he is currently pursuing the M.S. and degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul. His current research interests include high-voltage pulsed-power supply systems and resonant converter applications for light sintering systems.



Seung-Ho Song

He received his B.S. degree in electrical engineering from the Kwang-Woon University, Seoul, South Korea, in 2016 and his M.S. and Ph.D. degrees at the Department of Energy Engineering, Chung-Ang University, Seoul, in 2021. He worked as a postdoctoral Researcher in Chung-Ang University. Since 2022, he has been with the Korea Railroad Research Institute (KRRI), Uiwang, South Korea, as a Senior Researcher in the Smart Electrical & Signaling Division. His research interests include soft-switched resonant converter applications and high-voltage solid state transformer.



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, Daejeon, South Korea. In 2015, he joined the School of Energy Systems Engineering, Chung-Ang University, Seoul, where he is currently a Professor. His current research interests include pulsed-power systems and their applications, as well as high-power and high-voltage conversions. Prof. Ryoo 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.

www.dbpia.co.kr