DBpia

DCM 직렬 공진형 컨버터 기반의 필라멘트 전원 장치의 설계

Design of the Filament Power Supply based on the DCM Series Resonant Converter

저자 (Authors)
정우철, 심건우, 김정진, 유재은, 류홍제
Woo-Cheol Jeong, Geonu Shim, Jung-Jin Kim, Jae-Eun Yoo, Hong-Je Ryoo

출처 (Source)
조명·전기설비학회논문지 34(6), 2020.6, 28-33 (6 pages)
Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers 34(6), 2020.6, 28-33 (6 pages)

발행처 (Publisher)
한국조명·전기설비학회
The Korean Institute of Illuminating and electrical Installation Engineers

URL
http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE09357141

APA Style
정우철, 심건우, 김정진, 유재은, 류홍제 (2020). DCM 직렬 공진형 컨버터 기반의 필라멘트 전원 장치의 설계. 조명·전기설비학회논문지, 34(6), 28-33.

이용정보 (Accessed)
중앙대학교
165.***.103.27
2020/08/07 13:20 (KST)

저작권 안내
DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

Copyright Information
Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s)and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s)for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2020) 34(6) : 28～33
http://doi.org/10.5207/JIEIE.2020.34.6.028 ISSN 1229-4691(Print) ISSN 2287-5034(Online)
논문 34-6-4

DCM 직렬 공진형 컨버터 기반의 필라멘트 전원 장치의 설계

(Design of the Filament Power Supply based on the DCM Series Resonant Converter)

정우철* · 심건우** · 김정진** · 유재은** · 류홍제†
(Woo-Cheol Jeong · Geonu Shim · Jung-Jin Kim · Jae-Eun Yoo · Hong-Je Ryoo)

Abstract

For the magnetron, gyrotron and electron beam welder, which is the applications of the technology applying high voltage to thermal electrons, the power supply is required to heat filament for emission of thermal electrons. This paper describes the design of filament power supply, whose maximum output voltage is 17 V and maximum output current is 10 A based on the series resonant converter(SRC) operating in discontinuous conduction mode(DCM). The design and operating characteristics were verified by the PSPICE simulation and experimental results with resistor load. Also experimental results with a simulated load, which simulates characteristic of filament load whose impedance increases with increasing temperature, confirmed characteristics of the current source that has a constant output current on the fluctuated load condition.

Key Words : Filament Power Supply, Discontinuous conduction mode, Series resonant Converter, Current source characteristic

1. 서 론

도료 착색, 유해 가스 처리, 의료 기구 등에서 사용되는 마그네트론(Magnetron)이나 자이로트론(Gyrotron) [1-2] 혹은 항공, 원자력, 반도체 장비 등의 특수한 용접을 위한 전자 빔 용접기(Electron beam welder) [4-5]는 열전자에 고전압을 인가하여 사용하는 기술의 응용이다. 이 때 필요한 열전자를 얻기 위해서 필라멘트를 고열로 가열하며 일정 온도 이상 가열된 필라멘트에서 열전자가 방출된다.[5]

응용에 있어서, 일정한 구동을 위해서는 열전자 방출량의 정밀한 제어가 요구된다. 열전자의 방출량은 필라멘트의 가열에 공급되는 전원과 밀접한 관계가 있기 때문에 공급하는 전원을 정밀하게 제어할수록 정밀한 열전자 방출량의 제어가 가능하다. 반도체 스위치를 이용하여 전원을 제어하는 전력전자 기반의 전력 변환 장치는 필라멘트의 열적 시정수보다 빠른 속도로 제어가 이루어지므로 필라멘트 전원 장치로 적합하다.[6]

† Corresponding Author : Professor, Dept. of Energy System Engineering, Chung-Ang University
* Intergrated M.S. and Ph.D course, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University
** Undergraduate student, Department of Energy System Engineering, Chung-Ang University
Tel : 02-820-5178, Fax : 02-3280-5867
E-mail : hjryoo@cau.ac.kr
Received : February 14, 2020 / Revised : February 19, 2020
Accepted : April 21, 2020

Copyright ⓒ 2020 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.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)

이 중, 본 논문에서는 불연속 도전모드(Discontinuous Conduction Mode, DCM)로 동작하는 직렬 공진형 컨버터(Series Resonant Converter, SRC)를 이용하여 필라멘트 전원 장치를 구성한다. DCM-SRC는 공진을 적절히 활용하여 소프트 스위칭이 가능하며, 전류원 특성을 갖기 때문에 부하 측에서 발생한 아크 전류가 전원 장치에 영향을 주지 않는다는 장점이 있다[7].

본 논문에서는 최대 17 V / 10 A 출력이 가능한 DCM-SRC 를 설계하였으며, 설계한 파라미터를 토대로 만든 PSPICE 시뮬레이션을 통해 주요 파형들을 확인하고 소프트 스위칭 및 목표 출력이 가능함을 검증하였다. 또한, 실제 하드웨어를 제작하여 저항 부하 조건과 필라멘트의 특성을 모사한 모의 부하 조건에서의 실험들을 통해 DCM-SRC 기반의 필라멘트 가열용 전력 변환 장치의 구현 가능성 및 전류원 특성을 검증하였다.

2. DCM-SRC 토폴로지 분석

Fig. 1.은 DCM-SRC의 회로도이다. 입력 전원(V_d)은 하프 브릿지 구조의 스위치(S1,S2) 및 커패시터(C1,C2)와 연결되며 각 스위치들은 역병렬 다이오드(D1,D2)가 존재한다. 하프브릿지 회로와 변압기 사이에는 직렬 공진 커패시터(C_r)와 직렬 공진 인덕터(L_r)로 이루어진 공진 탱크가 위치하며 변압기와 부하 사이에는 풀브릿지 구조의 정류부와 필터 커패시터가 구성된다.

DCM-SRC 구동의 한 주기는 공진 전류의 상태에 따라 6 가지의 모드로 구분할 수 있으며, 한 주기동안의 공진 인덕터 전류($i_{L_r}(t)$)와 공진 커패시터 전압($v_{C_r}(t)$)의 그래프는 Fig. 2.와 같다[7]. 각 모드별 간략한 설명은 다음과 같다.

Mode 1

Mode 1은 S1이 켜짐과 함께 시작되며 이 때의 등가회로는 Fig. 3.(a)와 같다. 이 구간에서 공진 탱크의 양단에 걸리는 전압은 ($V_d/2 - V_o/n$) 이고 공진으로 인하여 i_{L_r}과 v_{C_r}은 점차 상승한다. 이 때, L_r에 걸리는 전압은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

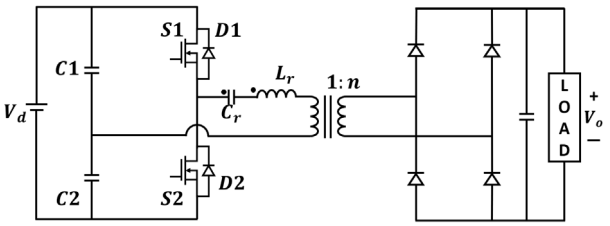

Fig. 1. Diagram of the DCM-SRC

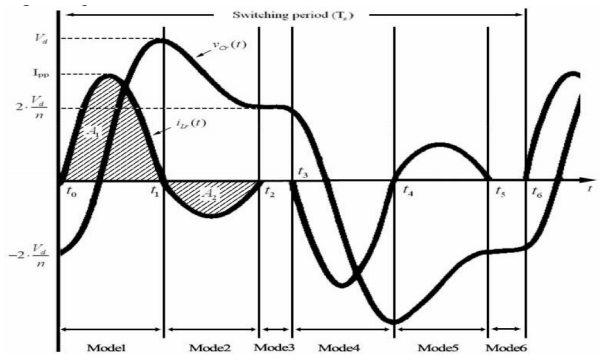

Fig. 2. Waveforms of the $i_{L_r}(t)$ and $v_{C_r}(t)$ [7]

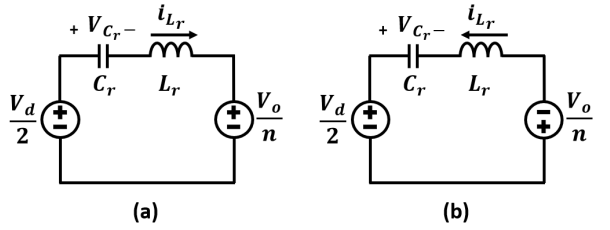

Fig. 3. Equivalent circuits of the DCM-SRC
(a) Mode 1 (b) Mode 2

$$v_{L_r} = L_r \frac{di}{dt} = \frac{V_d}{2} - v_{C_r} - \frac{V_o}{n} \quad (1)$$

공진으로 인하여 v_{C_r}이 상승을 거듭하면 v_{L_r} 가 0이 되며, 이 지점에서의 i_{L_r}이 최댓값을 갖는다. 이후에도 v_{C_r}는 점차 커지고 i_{L_r}은 점차 감소하며, 0이 될 때까지 Mode 1이 지속된다.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)

Mode 2

i_{L_r} 이 음의 값이 되면 Mode 2가 시작되며 이 때의 등가회로는 Fig. 3.(b)와 같다. 전류의 방향이 바뀌었기 때문에 2차측 풀브릿지 정류부 다이오드도 교번하여 도통되고 변압기 1차측에 걸리는 전압의 극성이 반대가 되며, 음전류 i_{L_r}이 C_r에 충전된 전하를 방전시키므로 v_{C_r}은 점차 감소한다. Mode 2에서는 전류가 S1의 역병렬 다이오드인 D1을 통해 흐르기 때문에 S1의 양단 전압은 0이고, 영전압 스위칭(Zero voltage switching, ZVS) 조건을 만족한다. 따라서 Mode 2 구간 내에서 S1가 턴-오프되도록 설계하면 소프트 턴-오프 스위칭이 가능하다.

Mode 3

Mode 2에서의 공진이 끝나면 DCM 특성상 스위칭 주기가 공진 주기보다 길기 때문에 공진 전류가 0인 Mode 3가 존재하며, 이 모드는 다음 스위칭 순간까지 지속된다.

Mode 4~6

S2가 턴-온되면 다시 공진이 발생하며, 이는 Mode 1~3에서의 동작 구조와 같기 때문에 설명은 생략한다.

3. 실험 구성 및 결과

본 논문에서 설계 목표로 설정한 필라멘트 전원 장치의 스펙은 표 1과 같다. 출력 전압과 출력 전류는 추후 정전류 및 정전압 제어(Constant Current Constant Voltage, CCCV)를 통해 17 V, 10 A 구간 안에서 동작할 예정이며, 이를 위해 최대 17 V, 최대 10 A 를 설계 목표로 삼는다. 또한, 수십-kV 전위에 대한 절연을 위하여 일반적으로 절연유에 함침하는 방식을 채택하지만, 본 회로는 추후 변압기 2차측 권선을 수십-kV 절연이 가능한 고전압 절연 케이블로 구성함으로서 무게와 부피를 줄이는 방식을 채택할 예정이다. 따라서 고전압 절연 케이블의 두께로 인한 변압기 턴수의 제약을 고려하여 2차측 턴수는 두 턴으로 설계한다.

DCM-SRC는 분석에 사용한 구성과는 다르게 총 4개의 스위치를 사용하는 풀브릿지 형태의 구성을 이용한다. 최대 스위칭 주파수는 100kHz로 설정하였으며, DCM 구동을 위해서 공진 주파수(f_o)는 스위칭 주파수(f_s)의 두 배보다 커야한다는 점을 고려하여 최대 스위칭 주파수의 2.5배인 250kHz로 설계되었다. 변압기의 턴수비(n)는 Mode 2와 5에서 스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 전류의 피크치와 관련 있으며, 시뮬레이션을 통한 분석을 통해 ZVS 턴-오프를 위한 충분한 전류 피크치 마진을 갖도록 턴수비를 1:1로 설계하였다. 마지막으로, 공진 탱크 파라미터는 출력 전류(I_o)와 관련하여 설계하며, 출력 전류는 변압기 2차측에서 정류된 전류의 평균값과 같으므로 식 (2)와 같이 표현된다.

$$
\begin{aligned}
I_o &= \frac{1}{T_s/2}\Big(\int_0^{t_1}\frac{1}{n}i_{L_r}(t)dt \\
&\quad + \int_{t_1}^{t_2}\frac{1}{n}i_{L_r}(t)dt \\
&\quad + \int_{t_2}^{t_3}\frac{1}{n}i_{L_r}(t)dt\Big) \\
&= \frac{2}{nT_s}\Big(\frac{2}{\pi}\times\frac{V_d+\frac{V_o}{n}}{Z_o}\times\frac{T_o}{2} \\
&\quad + \frac{2}{\pi}\times\frac{V_d-\frac{V_o}{n}}{Z_o}\times\frac{T_o}{2}+0\Big)
\end{aligned}
\tag{2}
$$

여기서 T_s와 T_o는 각각 스위칭 주기와 공진 주기를 나타내며 Z_o는 공진 파라미터의 특성 임피던스를 나타낸다. 위 식을 통해 구한 Z_o와 f_o 간의 관계식을 통해 L_r과 C_r을 구할 수 있으며, 표 2와 같다.

Table 1. Design specification of DCM-SRC

Input voltage	44 Vdc
Maximum Output Voltage	17 Vrms
Maximum Output Current	10 Arms

Table 2. Designed parameter of DCM-SRC

L_r	1.59 μH
C_r	256 nF
$f_{s,\max}$	100 kHz

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)

3.1 PSPICE 시뮬레이션 구성 및 결과

실제 하드웨어를 제작하기에 앞서, 설계한 파라미터를 이용하여 원하는 동작이 가능한지 확인하기 위해 PSPICE 시뮬레이션을 이용한 회로를 구성하였으며 Fig. 4.에 도시하였다. 목표한 최대 출력 조건을 확인하기 위하여 1.7옴의 저항을 부하로 이용하였다.

Fig. 5.는 시뮬레이션 결과 파형을 나타내며, 시뮬레이션 결과를 통해 설계한 파라미터를 이용하여 출력 전압, 전류 조건을 만족하며 공진 전류 파형과 게이트 시그널의 시점을 비교하여 전류가 스위치의 역병렬 다이오드로 흐르는 시점에 스위치가 턴-오프되는 소프트 스위칭 조건을 검증하였다.

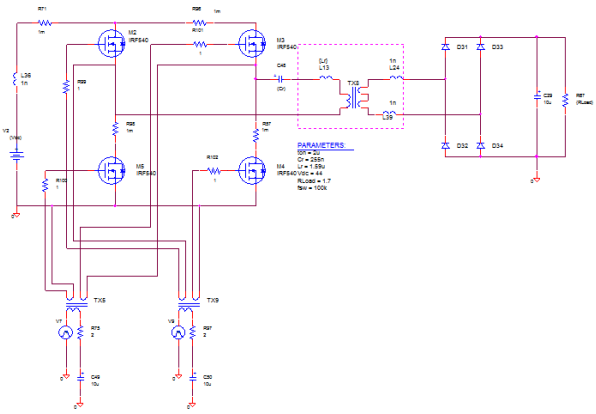

Fig. 4. Schematic diagram of PSPICE simulation

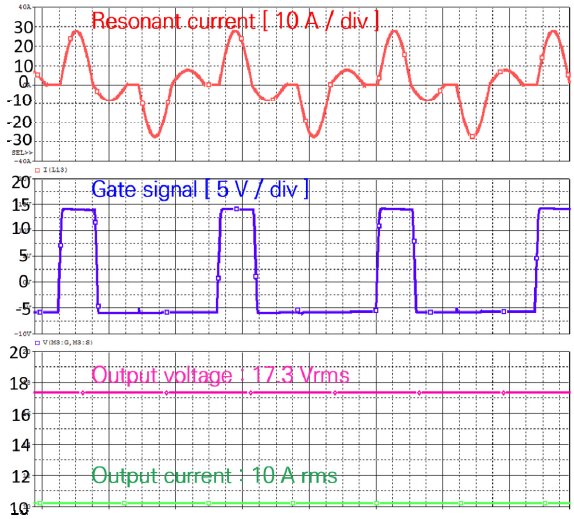

Fig. 5. PSPICE simulation results

3.2 하드웨어 구성 및 실험 결과

검증한 파라미터를 토대로 제작한 필라멘트 전원 장치의 전체 구성은 Fig. 6.에 도시하였다. 실험시 입력 전원으로 DC power supply를 이용하였지만 DC power supply의 출력과 필라멘트 전원 장치의 입력부까지의 도선 임피던스 등의 영향을 고려하여 100 uF의 입력 DC link 커패시터를 구성하였다. 또한, 적절한 설계를 통해 공진 인덕턴스는 별도의 인덕터의 추가 없이 변압기의 누설 인덕턴스만을 이용하여 구성하였다. 추후에는 고전압 절연을 위하여 2차측 권선에는 고전압 절연 튜브를 구성할 예정이지만 본 논문에서는 별도의 절연 관련 고전압 수축 튜브 처리 및 실증 실험은 수행되지 않았으며 향후 연구를 통해 수행될 예정이다. 실험에 이용하는 부하는 두 종류로, 첫째로 최대 출력 전압, 전류 조건 및 정상 동작을 확인하기 위해 1.7 옴 부하 저항을 이용하여 실험하였다. 또한 실제 응용에서의 부하인 필라멘트는 본래에는 매우 작은 임피던스를 갖지만 고열로 가열할수록 임피던스가 증가하는 특성이 있다. 따라서 변동하는 임피던스 조건에서도 정상적인 동작이 가능한지 검증하기 위해 유사한 특성을 갖는 12 V, 100 W 정격의 차량용 램프를 2직 2병으로 구성하여 모의 부하로 이용하였다.

부하 저항을 이용한 실험 파형은 Fig. 7. 에 도시하였다. 파형의 관찰을 통해 설계 및 제작한 필라멘트 파워 서플라이가 최대 출력 전압, 전류의 rms 값이 조건을 만족하면서도 스위치의 역병렬 다이오드로 전류가 흐르는 시점에 턴-오프되어 소프트 스위칭이 가능한 것을 검증하였다. 모의 부하 조건에서의 공진 전류, 게이트 시그널, 출력 전압도 Fig. 7. 과 유사하므로 생략한다.

Fig. 8.은 모의 부하 조건에서 스위칭 주파수를 100 kHz로 고정하고 동작하였을 때의 실험 파형이며, 파형의 관찰을 통해 초기에는 임피던스가 낮아 출력 전압이 비교적 작지만 온도가 상승함에 따라 임피던스가 증가하여 전압이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 부하 임피던스의 변동에도 출력 전류는 10 A로

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)

일정한 것을 확인할 수 있으며, DCM-SRC의 전류원

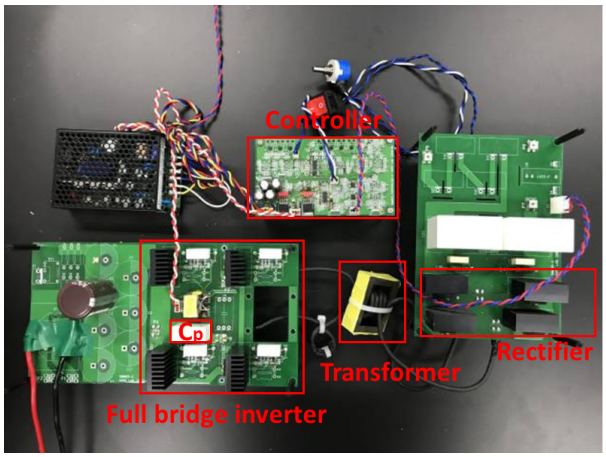

Fig. 6. Photographs of the filament power supply

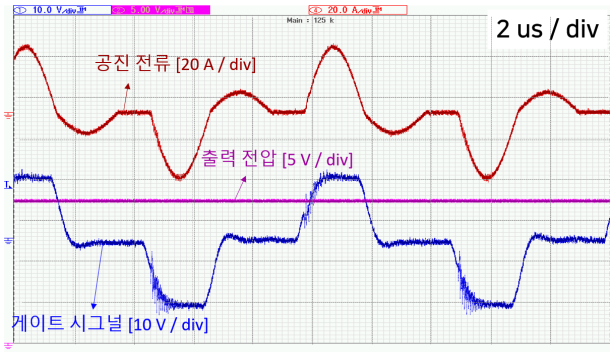

Fig. 7. Experimental results of the filament power supply with load resistor

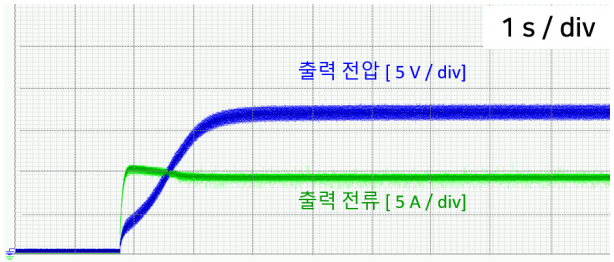

Fig. 8. Experimental results of the filament power supply with simulated load

특성을 검증하고 동작 주파수의 조절을 통해 전류의 크기 및 정상 상태에서의 출력 전압을 조절할 수 있음을 확인하였다.

4. 결 론

입력 전압 44 Vdc, 최대 출력 전압 17 V, 최대 출력 전류 10 A 조건의 필라멘트 전원 장치를 DCM-SRC 구성을 이용하여 설계 및 구현하였으며, PSPICE 시뮬레이션과 저항 부하를 이용한 실험 결과를 통해 설계한 전원 장치의 출력이나 소프트 턴-오프 스위칭 등의 동작 특성을 확인하였다. 또한, 필라멘트 부하 특성을 모의한 부하를 이용한 실험을 통해 온도에 따라 임피던스가 변동하는 부하 조건에서도 일정한 전류가 출력되는 DCM-SRC의 전류원 특성을 확인하였다.

Acknowledgements

이 성과는 2017년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No.NRF-2017R1A2B3004855)

References

[1] Swann. S, "Magnetron sputtering," in Physics in Technology, VOL. 19, NO. 2, 1988.
[2] Jin. H. S., Cho. C. G., Park. S. M., and Ryoo. H. J., "Study of Exhaust Air Treatment From a Ship Building Factory Painting Facility Using Pulse Plasma Technology," in IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, VOL. 46, NO. 10, OCTOBER 2018.
[3] Wilson A. Parejo Calvo, Celina L. Duarte, Luci Diva B. Machado, Jose E. Manzoli, Aurea Beatriz C. Geraldo, and et al., "Electron beam accelerators-trends in radiation processing technology for industrial and environmental applications in Latin America and the Caribbean," in Radiation Physics and Chemistry 81 (2012) pp. 1276 - 1281.
[4] Pedro J. Villegas, Juan Diaz, Alberto M. Pernia, Juan A. Martinez, Fernando Nuno, and Miguel J. Prieto, "Filament Power Supply for Electron Beam Welding Machine," in IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 62, NO. 3, MARCH 2015.
[5] Zhang. L., Yang. L., Yang. J., Huang. J., Liu. K., and Zuo. C., "Power Supply Design for the Filament of the High-voltage Electron Accelerator," in Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A804(2015) pp. 94 - 98.
[6] Jang. S. R., Ahn. S. H., Ryoo. H. J., and Kim. J. S., "Design of High-efficiency Soft-switching Converters for High-power Microwave Generation," in Journal of the Korean Physical Society, Vol. 59, No. 6, December 2011, pp. 3688~3693.
[7] Jang. S. R., Ryoo. H. J., Kim. J. S., and Ahn. S. H., "Design and Analysis of Series Resonant Converter for 30kW Industrial Magnetron," Proc. 36th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., pp. 415-420, 2010-Dec.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)

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 integrated M.S. and Ph.D degrees with the Department of Energy System Engineering. His current research interests include soft-switched resonant converter applications and high-voltage pulsed-power supply systems.



Geonu Shim

He is pursuing the B.S. degree in school of energy system engineering in Chung-Ang University, Seoul, South Korea, from 2014. His research interests include control of DC-DC converter, and its industrial applications.



Jung-Jin Kim

He received the B.S. Degree in energy systems engineering from Chung-Ang University, Seoul, South Korea, in 2020, and is currently a engineer at Samsung Electronics Company, Ltd., South Korea. His research interests are in the area of converter application.



Jae-Eun Yoo

She is pursuing the B.S. degree in school of energy system engineering in Chung-Ang University, Seoul, South Korea, from 2016. Her research interests are in the area of power electronics, and its industrial applications.



Hong-Je Ryoo (M' 17)

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. 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 senior member of the Korean Institute of Electrical Engineers, and the Vice President of the Korean Institute of Illuminations and Electrical Installation Engineers.

중앙대학교 | IP:165.***.103.27 | Accessed 2020/08/07 13:20(KST)