

넓은 입력 전력 및 주파수 범위 특성을 갖는 정합된 전압 체배기 기반 고효율 정류기

Highly Efficient Rectifier Based on a Matched Voltage Doubler with Wide Input Power and Frequency Range

김 빛 찬¹ · 이 다 주² · 오 준 택³

Bitchan Kim¹ · Daju Lee² · Juntaek Oh³

요 약

본 논문은 정합된 전압 체배기 기반 고효율 정류기를 제작한 결과를 제시한다. 제안한 정합된 전압 체배기는 2개의 다이오드로 구성된 전압 체배기와 각 다이오드에 연결되는 L-형 임피던스 정합단으로 구성된다. 적용된 L-형 임피던스 정합단은 각 다이오드의 리액턴스를 제어하여, 정류기가 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 높은 효율을 갖도록 한다. 제안한 정류기의 성능을 검증하기 위해 제작 및 측정을 진행하였다. 제작된 정류기는 1.5~2.6 GHz의 넓은 주파수 대역에서 50 % 이상의 정류 효율을 가졌으며, 2.4 GHz에서 10.9~31 dBm의 범위에서 50 % 이상의 정류 효율을 유지하였으며 최대 효율은 71.2 %를 얻었다.

Abstract

This study presents a highly efficient rectifier based on a matched voltage doubler. The proposed matched voltage doubler consists of a voltage doubler and L-type impedance matching networks connected to each diode. The L-type impedance matching stage can independently control the reactance of each diode, enabling the proposed rectifier to be highly efficient for a wide range of input power and frequency bands. For validation, the proposed rectifier was manufactured, and its performance was measured. The proposed rectifier achieved a power conversion efficiency (PCE) greater than 50 % in a wide frequency band of 1.5 to 2.6 GHz, and in a power range of 10.9 to 31 dBm at 2.4 GHz. The maximum PCE achieved was 71.2 % at 2.4 GHz.

Key words: Wideband, Wide Input Power Range, Wireless Power Transfer, Rectifier

I. 서 론

다양한 전자기기들의 휴대성 및 지속 사용성에 대한

향상 요구가 높아지게 되면서 이를 위한 다양한 무선 충전 기술이 개발되고 있다. 미래 무선 충전 기술 중 하나로써 RF 기반 무선전력 전송(wireless power transfer, WPT)

「이 논문은 과기정통부 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2019R1G1A1003865).」

승실대학교 전자정보공학부 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

1: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0001-7127-4234>), 2: 석사과정(<https://orcid.org/0000-0003-4614-4248>), 3: 조교수(<https://orcid.org/0000-0003-4694-8545>)

· Manuscript received November 23, 2021 ; Revised December 9, 2021 ; Accepted December 30, 2021. (ID No. 20211123-105)

· Corresponding Author: Juntaek Oh (e-mail: kingojt@ssu.ac.kr)

기술은 위치에 구애 받지 않고 전자 기기를 충전할 수 있는 기술로서 각광받고 있다^[1]. 정류기는 WPT 시스템에 수신되는 RF 신호를 DC 전력으로 변환하기 때문에 시스템의 충전 효율을 결정하는 가장 중요한 요소이다.

최근 이러한 WPT 시스템에 적용 가능한 다양한 동작 주파수 및 목표 입력전력을 갖는 정류기 연구가 진행되고 있다^{[1]~[6]}. 가장 간단한 정류기 설계 방법으로서, 다이오드 앞단에 이중 단 정합 네트워크를 적용하여 최적 입력 전력에서 70 % 이상의 고효율을 갖는 정류기를 발표하였다^[2]. 다양한 무선 전력 전송 어플리케이션에 적용하고 확대하기 위한 정류기 구현 방법으로서, 브랜치라인 커플러를 이용한 정류기 배열은 전력 재사용을 통해서 넓은 입력 전력 및 다양한 주파수 대역에서 높은 효율을 유지하였다^[3]. 또한 광대역 정합단을 다이오드 앞단에 구성한 정류기 연구 결과들이 제안되었다^{[4]~[6]}.

본 논문에서는 WPT에 적용 가능한 정합된 전압 체배기 기반의 정류기를 제안하였다. 정합된 전압 체배기는 전압 체배기와 전압 체배기의 각 다이오드의 뒷 단에 L-형 정합단이 구성되어 있으며, 이를 통해 기존 연구 대비 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 좋은 정합 특성을 가져 정류기의 고효율 특성을 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 달성하고자 했다.

II. 회로 설계

그림 1은 제안하는 정류기의 도식도이다. 먼저 전압 체배기 구성을 적용하여 최대 허용 가능한 출력 전압이 두 배로 높아짐에 따라서 높은 입력전력까지 정류를 가능하게 할뿐만 아니라, 입력 임피던스의 변화가 단일 다이오드에 비해 작도록 하였다^[3]. 그림 2(a)는 전압 체배기의 임

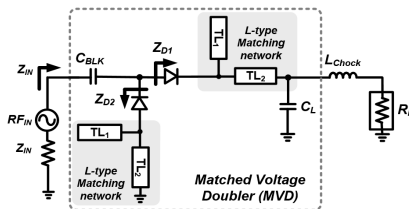


그림 1. 제안하는 정류기 도식도
Fig. 1. Schematic of proposed rectifier.

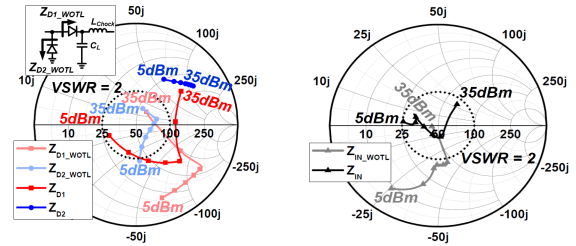


그림 2. 입력 전력에 따른 (a) 다이오드 D_1 , D_2 와 (b) 제안한 정류기의 입력 임피던스 시뮬레이션 결과 ($R_L=680 \Omega$)

Fig. 2. Simulated input impedance of (a) the diode D_1 and D_2 and (b) the proposed rectifier with input power at 2.4 GHz ($R_L=680 \Omega$).

피던스 특성을 확인한 그래프이며, 2.4 GHz에서 정합단이 존재하지 않을 때 다이오드 D_1 , D_2 의 입력 임피던스인 Z_{D1_WOTL} 과 Z_{D2_WOTL} 는 20~35 dBm의 입력 전력 범위에서 각각 49~59 Ω 와 60~66 Ω 의 실수부를 가지며 허수부는 $-j114 \sim -j15 \Omega$ 와 $-j6.3 \sim -j18 \Omega$ 를 갖는 것을 확인하였으며, 이 때 로드 커패시터의 유무에 따른 차이와 입력 전력에 따른 출력 DC 전압 변화에 의해서 각 다이오드에 걸리는 전압의 변화에 따라서 Z_{D1_WOTL} 과 Z_{D2_WOTL} 이 입력 전력에 따라서 차이를 보였다. Z_{D1} 과 Z_{D2} 의 허수부가 서로 상쇄되도록 정합단을 이용하여 허수부를 제어하면 이상적으로 넓은 입력 전력 범위에서 27~32음을 가지게 되면서 VSWR=2의 내부에 임피던스를 위치할 수 있다.

이번 설계에서는 그림 1과 같이 open stub과 shorted stub이 병렬 연결된 L-형 정합단을 이용하여 허수부를 제어하였으며, 그림 2(a)와 같이 Z_{D1} 과 Z_{D2} 의 허수부는 20~35 dBm의 입력 전력 범위에서 각각 $-j57 \sim -j79 \Omega$ 와 $j94 \sim j113 \Omega$ 으로 이동한 것을 확인하였으며, 매칭된 전압 체배기 앞의 DC 차단 커패시터를 포함하게 되면 그림 2(b)와 같이 기존 정합되지 않은 체배기의 임피던스 Z_{IN_WOTL} 비교하여 제안한 정류기의 입력 임피던스 Z_{IN} 이 5~35 dBm의 넓은 범위에서 VSWR=2 원 내부에 압축되어 좋은 정합 특성을 가졌다. 그림 3은 29 dBm의 고정 입력에서 제안된 정류기의 입력 임피던스 그래프이며, 2~2.7 GHz의 범위에서 VSWR=2 원 근처에서 임피던스를 유지되었으며 1.5~2 GHz의 범위에서도 약 VSWR=3.5 원 내부에서 임피던스를 유지하였다.

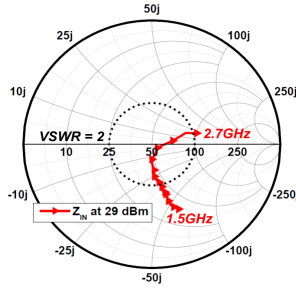


그림 3. 제안한 정류기의 29 dBm 전력 입력 시 주파수에 따른 입력 임피던스 시뮬레이션 결과 ($R_L=680 \Omega$)

Fig. 3. Simulated input impedance of the proposed rectifier with frequency at 29 dBm ($R_L=680 \Omega$).

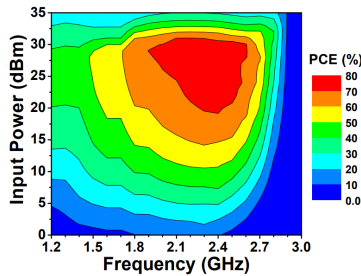


그림 4. 입력 전력 및 주파수에 따른 PCE 시뮬레이션 결과 ($R_L=680 \Omega$)

Fig. 4. Simulated PCE with frequency and input power ($R_L=680 \Omega$).

그림 4는 제안된 정류기의 입력 전력 및 주파수에 따른 PCE(power conversion efficiency, 전력변환효율) 시뮬레이션 결과를 나타낸 그래프이다. 입력전력이 15 dBm에서 31 dBm까지 변할 때 1.8~2.6 GHz 범위에서 50 %의 PCE를 유지하는 결과를 얻었으며, 제안된 정류기가 넓은 입력 전력 및 주파수 범위에서 고효율 동작이 가능함을 확인하였다.

III. 측정 결과

그림 5는 제작된 정류기의 레이아웃 및 사진이며, 제작된 회로의 크기는 $43 \times 22 \text{ mm}^2$ 이다. PCB는 3.2의 유전율과 0.813 mm의 두께를 가지는 Taconic사의 TLC-32기판을 사용하였다. 광대역 특성과 함께 높은 DC 전압이 출력 가능한 정류기의 특성을 위해서 Avago사의 HSMS-2822 쇼

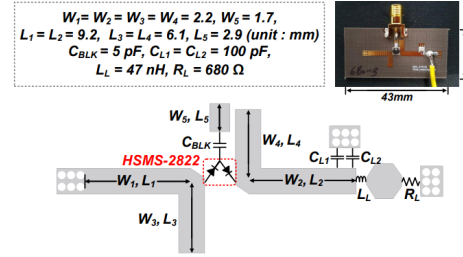


그림 5. 제작된 정류기의 레이아웃 및 사진

Fig. 5. Layout and photograph of the implemented rectifier.

트키 다이오드를 선택하였으며, DC 차단 커패시터 및 DC 통과 필터용 병렬 커패시터 5 pF, 100 pF를 각각 사용하였다. 로드 저항은 반복 시뮬레이션을 통해서 최적의 PCE를 갖는 680Ω 을 최종적으로 선택하였다. 제안한 회로를 측정하기 위해서 E8247C의 신호 발생기 및 AS0825-125의 전력 증폭기로 신호를 생성 및 인가하였으며, 전력 센서 및 디지털 멀티미터를 이용하여 입력 RF 전력 P_{in} 및 출력 DC 전압 V_{out} 을 측정하였다. 이를 기반으로 $V_{out}^2/P_{in}R_L$ 의 식을 통해 PCE의 값을 계산하였다.

그림 6은 제안한 정류기의 2.4 GHz에서의 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸 것이다. 2.4 GHz에서 10.9~31 dBm의 넓은 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 높은 PCE를 유지하였으며, 71.2 %의 최대 PCE를 얻었다. 그림 7은 주파수에 따른 최대 PCE에 대한 시뮬레이션 및 측정 결과를 나타낸 것이며, 1.5~2.6 GHz의 넓은 주파수 범위에서 50 % 이상의 최대 PCE를 가지는 것을 확인하였다. 측정과 시뮬레이션의 차이는 다이오드 소자의 모델의 부정

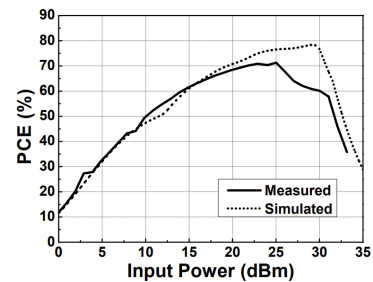


그림 6. 2.4 GHz에서 입력 전력에 따른 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과 ($R_L=680 \Omega$)

Fig. 6. Simulated and measured PCE versus input power at 2.4 GHz ($R_L=680 \Omega$).

넓은 입력 전력 및 주파수 범위 특성을 갖는 정합된 전압 체배기 기반 고효율 정류기

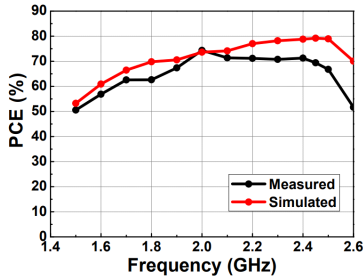


그림 7. 주파수에 따른 최대 PCE 시뮬레이션 및 측정 결과 ($R_L=680 \Omega$)

Fig. 7. Simulated and measured peak PCE versus frequency at 2.4 GHz ($R_L=680 \Omega$).

표 1. 이전 발표된 연구들과의 성능 비교

Table 1. Comparison with the previously reported works.

	Ref. [4]	Ref. [5]	Ref. [6]	This work
Power range for PCE>50 % (dB)	11	N/A	11.5*	20.1
Freq. range for PCE >50 % (GHz)	1~2.4	0.57~0.9	0.91~2.55	1.5~2.6
Peak eff.	Eff. (%)	71.5	76*	65
	Power (dBm)	8	16*	10
	Freq. (GHz)	2.0	0.7	1.8
Size [λ_g^2]	0.22×0.14	0.15×0.22	0.14×0.21	0.34×0.17
Structure	Voltage doubler	Single diode	Voltage doubler	Voltage doubler

*Graphically estimated.

확성과 PCB의 공정 오차에 의해서 발생하였다.

표 1은 기존 발표된 정류기와 제안한 정류기의 성능을 비교한 표이며, 기존의 논문과 비교하여 더 넓은 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 높은 PCE를 가지면서, 동시에 비슷한 대역폭 특성을 얻는 것을 확인하여 제안된 회로 기법을 이용해서 기존 연구 대비 향상된 결과를 얻음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 WPT 시스템에 적용 가능한 정합된 전압 체배기 기반 고효율 정류기를 제안하였다. 제안한 정

합된 전압 체배기는 각 다이오드에 L-형 정합단을 삽입하여 각 다이오드의 허수부를 독립적으로 제어함으로써 정류기가 넓은 입력 전력 및 주파수 범위 특성을 갖도록 하였다. 제작된 정류기는 2.4 GHz에서 10.9~31 dBm의 넓은 입력 전력 범위에서 50 % 이상의 PCE를 유지하였으며, 최대 효율은 71.2 %를 얻었다. 또한 1.5~2.6 GHz의 넓은 주파수 대역에서 50 % 이상의 PCE를 가지면서, 제안된 정류기의 효용성을 검증하였다.

References

- [1] H. Zhang, Y. X. Guo, Z. Zhong, and W. Wu, "Cooperative integration of RF energy harvesting and dedicated WPT for wireless sensor networks," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 4, pp. 291-293, Apr. 2019.
- [2] M. M. Mansour, S. Yamamoto, and H. Kanaya, "Reconfigurable multistage RF rectifier topology for 900 MHz ISM energy-harvesting applications," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1181-1184, Dec. 2020.
- [3] D. Lee, K. Kim, J. Park, and J. Oh, "Highly efficient rectifier array using a two-section branch-line coupler for simultaneous wireless information and power transfer (SWIPT)," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 7, pp. 670-673, Jul. 2021.
- [4] W. Liu, K. Huang, T. Wang, Z. Zhang, and J. Hou, "A broadband high-efficiency RF rectifier for ambient RF energy harvesting," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 30, no. 12, pp. 1185-1188, Dec. 2020.
- [5] Y. L. Lin, X. Y. Zhang, Z. X. Du, and Q. W. Lin, "High-efficiency microwave rectifier with extended operating bandwidth," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 65, no. 7, pp. 819-823, Jul. 2018.
- [6] S. D. Joseph, Y. Huang, and S. S. H. Hsu, "Transmission lines-based impedance matching technique for broadband rectifier," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 4665-4672, Dec. 2020.