

무선전력전송 및 에너지 하베스팅을 위한 고조파 억제 기반의 고효율 및 소형화 정류기 설계

A Design of Compact and High-Efficiency Rectifier Based on Harmonic Suppression for Wireless Power Transfer Application and Energy Harvesting

최유진 · 기아 탕 부이 · 남형석 · 서철헌

Yujin Choi · Gia Thang Bui · Hyungseok Nam · Chulhun Seo

요 약

본 논문은 고조파 억제를 기반으로 소형화 및 고효율의 2.45 GHz 정류기 설계를 제안한다. 제안된 정류기는 제2 고조파 및 제3 고조파를 억제하여 정류기의 RF-DC 효율을 향상시킨다. 또한 제2 고조파 억제 네트워크는 매칭에도 이용되어 추가적인 입력 임피던스 정합 네트워크가 필요하지 않으므로 작은 크기를 갖는다. 제작된 정류기는 12.5 dBm의 입력 전력에서 81.22 %의 매우 높은 PCE(power conversion efficiency) 측정 결과로 나타내며, 크기는 19 mm×15.5 mm이다.

Abstract

This paper proposes the design of a compact and highly efficient 2.45 GHz rectifier based on harmonic suppression. The proposed rectifier enhanced the RF - DC efficiency by suppressing the second and third harmonics. Additionally, a second harmonic suppression network was used for matching, thereby eliminating the need for an additional input impedance matching network and resulting in a smaller size. The fabricated rectifier demonstrated a very high power conversion efficiency (PCE) of 81.22 % at an input power of 12.5 dBm, with dimensions of 19 mm×15.5 mm.

Key words: Rectifier, Energy Harvesting, Harmonic Suppression, WPT

I. 서 론

최근 전자기기 무선전력전송 어플리케이션 증가로 인해 다양한 어플리케이션에서 사용할 수 있는 원격 충전 시스템이 요구되고 있으며, 이와 함께 무선전력전송 및 에너지 하베스팅과 관련된 마이크로파 정류기는 지속적

으로 많은 관심을 받고 있다^{[1]~[5]}. 무선전력전송 시스템에서 마이크로파 정류기는 수신된 RF 에너지를 DC 전력으로 변환하는 역할을 하며, 마이크로파 정류기의 PCE는 정류기를 설계 시 가장 고려해야 할 요소이다. 또한 무선 전력전송 시스템에서 마이크로파 정류기의 소형화 및 고효율은 반드시 고려되어야 한다.

「이 연구는 2017학년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초 연구 사업임 (No. NRF-2017R1A5A1015596).」
승실대학교 정보통신공학과 (School of Electronic Engineering, Soongsil University)

· Manuscript received October 20, 2023 ; Revised November 1, 2023 ; Accepted November 20, 2023. (ID No. 20231020-088)

· Corresponding Author: Chulhun Seo (e-mail: chulhun@ssu.ac.kr)

다이오드 기반 정류기는 비선형 소자로 인해 고조파가 발생하여 예상치 못한 손실을 가지며, 제안된 정류기는 PR(power recycling)^{[6]~[8]}을 위한 고조파 네트워크를 통해 제2 고조파 및 제3 고조파를 무한 임피던스를 갖도록 하여 제2 고조파 및 제3 고조파가 다이오드에 다시 반사될 때 PR 메커니즘에 의해 향상된 PCE를 가질 수 있다. 또한 제2 고조파 억제 네트워크는 기본 주파수 입력 매칭에 이용되어 최종적으로 작은 사이즈의 정류기 구현을 가능하게 한다.

본 논문에서는 제2 고조파 및 제3 고조파를 억제하는 고조파 네트워크를 이용하여 2.45 GHz에서 고효율 및 소형화를 갖는 정류기를 구현한다.

II. 고효율 및 소형화 정류기 설계 이론

그림 1은 제안된 정류기 도식도이며, 세 개의 주요 파트로 구성되어 있다. 세 개의 주요 파트 중 Part A는 제3 고조파 억제 역할을 하며, Part B는 제2 고조파 억제와 동시에 입력 매칭하는 역할을 한다. 마지막 파트는 DC pass filter와 로드 저항으로 구성된다. Part A와 Part B는 전송선로 $TL_1 \sim TL_3$ 로 구성되어 있으며, 각각의 임피던스와 전기적 길이는 Z_i , θ_i 이다.

2-1 고조파 제어 네트워크

Part A는 다이오드의 anode에 연결되어 제3 고조파를 억제하고, Part B는 다이오드의 cathode에 연결되어 제2

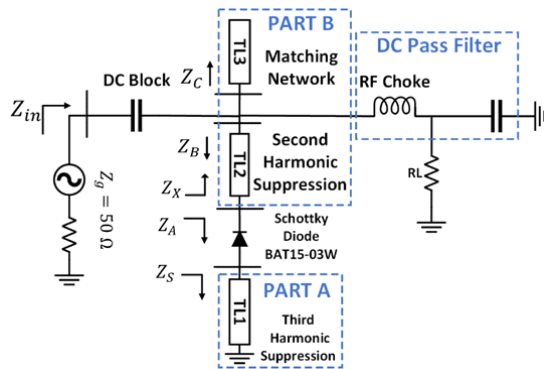


그림 1. 제안된 정류기 schematic
Fig. 1. Schematic of proposed rectifier.

고조파를 억제한다. 따라서 Part A와 Part B는 무한대의 임피던스를 가지며 power recycling 메커니즘에 의해 다이오드로 반사되어 결과적으로 효율을 상승시킨다. 고조파 제어 네트워크는 다음과 같이 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$Z_s^{2f} = \infty, Z_s^{3f} = \infty, \quad (1)$$

Z_s^{2f} 는 제2 고조파에서의 임피던스 쇼트 스텝 임피던스, Z_s^{3f} 는 제3 고조파에서의 쇼트 스텝 임피던스 값이다. Part A는 한 개의 전송선로 TL_1 로 나타내어지며, 전송선로 이론에 따라 식 (2)와 같이 계산될 수 있다.

$$Z_s^{3f} = jZ_3 \tan \theta_1^{3f}, \quad (2)$$

Z_s^{3f} 가 무한대 임피던스를 갖기 위해서 TL_1 의 전기적 길이가 식 (3)과 같이 계산된다.

$$\theta_1^{3f} = \frac{\lambda}{4}. \quad (3)$$

Part B는 접지와 직접 연결되어 있는 TL_1 과 달리, 소스 및 DC pass filter와 연결되어 있으며, 다른 부분과 독립적으로 2차 고조파 억제 작업을 하기 위해 TL_3 이 단락 포인트가 되어야 한다. TL_3 의 전기적 길이가 다음과 같을 때,는 2차 고조파에서 0이 된다.

$$Z_c^{2f} = j \frac{Z_3}{\tan \theta_3^{2f}}, \theta_3^{2f} = \frac{\lambda}{4}. \quad (4)$$

TL_3 에 의해 생성된 단락점에 의해 전송선로 TL_2 는 제2 고조파에서 단락 전송선로가 되며, 제3 고조파 억제 분석과 유사하게 제2 고조파에서 식 (1)의 무한 임피던스 Z_c 의 조건은 TL_2 의 전기적 길이로 달성될 수 있다.

$$\theta_2^{2f} = \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

따라서, 고조파 억제 네트워크는 전기적 길이에만 의존되며, 식 (3) 및 식 (5)를 통해 제2 고조파 및 제3 고조파 Z_c 에서 무한대의 임피던스를 가질 수 있다.

2-2 기본 매칭 네트워크

제안된 정류기에 기본 주파수 매칭을 위해서 고조파

네트워크 TL_1 , TL_2 , $TL_3(Z_1, Z_2, Z_3)$ 의 특성 임피던스를 이용하였다. 그림 1의 Z_A 임피던스를 소스 임피던스 $Z_g=50$ 과 일치시키기 위한 조건은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_A^f = Z_D^f + Z_S^f = R_A^f + jX_A^f \quad (6)$$

여기서 Z_D^f 는 다이오드 임피던스이며, 참고문헌 [9]의 이론 및 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 주파수 및 전력에 해당되는 값을 알 수 있다. Z_S^f 는 식 (2)에 의해 해당하는 전기적 길이 $\theta_1^f(\theta_1^f = \theta_1^{2f})$ 로 계산되며, R_A^f 와 X_A^f 는 각각 Z_D^f 의 실수 부분과 허수 부분이다. 따라서, 참고문헌 [10]의 전송선로 이론에 기초하여 다음과 같이 어드미턴스 $Y_B = \frac{1}{Z_B}$ 는 계산된다.

$$Y_B^f = \frac{1}{Z_2} \frac{Z_2 + jZ_A^f(\tan\theta_2^f)}{Z_2 Z_A^f + jZ_2}, \quad (7)$$

식 (7)에서 Y_B 의 실수 부분은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Re}(Y_B^f) = \frac{R_A^f + R_A^f(\tan\theta_2^f)^2}{(R_A^f)^2 + (X_A^f + Z_2^f(\tan\theta_2^f))^2}. \quad (8)$$

Z_A 와 Z_B 를 일치시키는 첫 번째 단계는 $\text{Re}(Y_B^f)$ 를 $\frac{1}{Z_g}$ 과 같게 조정하는 것이다. 식 (8)을 통해 Z_2 는 식 (9)와 같이 계산될 수 있다.

$$Z_2 = \frac{\sqrt{R_A^f(Z_g + Z_g(\tan\theta_2^f)^2 - R_A^f - X_A^f)}}{\tan\theta_2^f}. \quad (9)$$

또한 θ_2^f 는 식 (5)를 통해 계산된다.

$$\theta_2^f = \frac{\theta_2^{2f}}{3} = \frac{\lambda}{12}. \quad (10)$$

식 (9)를 통해 Z_2 를 계산한 뒤 Y_B 의 허수부는 식 (11)과 같이 계산될 수 있다.

$$\text{Im}(Y_B^f) = \frac{((R_A^f)^2 + (X_A^f)^2 + Z_2^2)\tan\theta_2^f + Z_2 X_A^f((\tan\theta_2^f)^2 - 1)}{Z_2(R_A^f)^2 + Z_2(X_A^f + Z_2^f(\tan\theta_2^f))^2}, \quad (11)$$

Y_B 의 허수부는 $Z_C^f = -1/(Y_B^f)$ 일 때 보상될 수 있다. 따

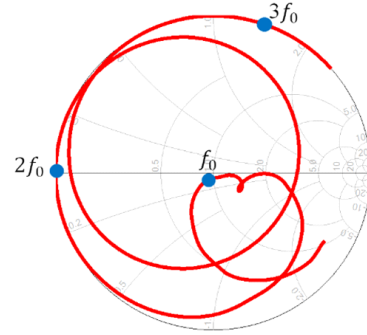


그림 2. 설계된 정류기의 기본주파수, 제2 고조파, 제3 고조파 주파수에서의 임피던스 시뮬레이션 결과

Fig. 2. Simulated impedance at the fundamental, second and third harmonic frequency in the designed rectifier.

라서 TL_3 의 특성 임피던스는 식 (12)와 같이 계산된다.

$$Z_3 = \frac{\tan\theta_3^f(Z_2(R_A^f)^2 + Z_2(X_A^f + Z_2^f(\tan\theta_2^f))^2)}{((R_A^f)^2 + (X_A^f)^2 + Z_2^2)\tan\theta_2^f + Z_2 X_A^f((\tan\theta_2^f)^2 - 1)} \quad (12)$$

TL_1 의 특성 임피던스 Z_1 는 임의의 값을 사용할 수 있으며, Z_1 에 따라 Z_2 , Z_3 가 결정된다. 즉 적절한 Z_1 을 선택하여 제작에 용이한 Z_2 , Z_3 를 구해야 함을 알 수 있다. 따라서, 별도의 소스 입력 매칭에 필요없이 고조파 네트워크를 이용하여 소형화된 정류기를 설계할 수 있다. 그림 2에 설계된 정류기의 기본주파수, 제2 고조파, 제3 고조파 주파수에서의 Z_{in} 시뮬레이션 결과를 스미스 차트에 나타내었다.

III. 실험 결과 및 측정 결과

제안된 정류기의 검증을 위해서 2.45 GHz에서 고조파 제어 기반의 정류기를 설계하였으며, 그림 3과 같다. 제작에 사용된 소자 및 기판은 쇼트키 다이오드 BAT15-03W, 최적의 효율을 갖는 로드 저항 $R_L=680 \Omega$, 0.8 mm 두께의 Taconic TLY-5($\epsilon_r=2.2$, $\tan\delta=0.0009$) 기판이다. 또한 고조파 억제 및 입력매칭을 위한 파라미터 값을 식 (4), 식 (5) 및 식 (10)을 Matlab 및 ADS(advanced design system) software를 사용하여 구하고 표 1 및 표 2에 정리

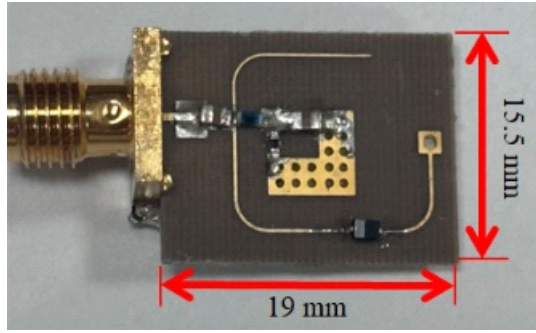


그림 3. 제작된 정류기 사진

Fig. 3. Photograph of the implemented rectifier.

표 1. 전송선로의 파라미터

Table 1. Parameters of transmission lines.

	TL_1	TL_2	TL_3
$Z_i(\Omega)$	140	140	150
$\theta_i(\text{degree})$	30	45	45
$f(\text{GHz})$	2.45	2.45	2.45

표 2. 이전에 발표된 연구들과의 비교

Table 2. Comparison with the previously reported work.

Ref	Fre. (GHz)	Max. PCE	P_{in} (dBm)	Diode	Size
[11]	2.45	74.9 %	10.1	HSMS2860	0.075
[12]	2.45	80.9 %	20	HSMS282	0.051
[13]	2.45	66.5 %	10	HSMS2860	0.053
This work	2.45	81.2 %	12.5	BAT15-03W	0.020

λ : Wavelength at the frequency.

하였다. 정리를 위해서 Agilent사의 신호 발생기 N5182A 및 디지털 전압계를 사용하였으며, 신호 발생기를 통해 생성된 RF 신호는 동축케이블을 통해 정류기로 전달되고 출력 전압은 디지털 전압계에 의해 부하 저항에서 측정된다. 그림 4는 입력 전력에 따른 PCE 및 출력 전압 시뮬레이션 및 측정 결과이다.

시뮬레이션 결과는 2.45 GHz, 11.5 dBm의 입력 전력에서 84.84 %의 최대 PCE를 가지며, 측정 결과는 2.38 GHz, 12.5 dBm에서 81.22 %의 최대 PCE를 달성함을 확인하였다. PCE는 식 (13)을 통해 계산되었다.

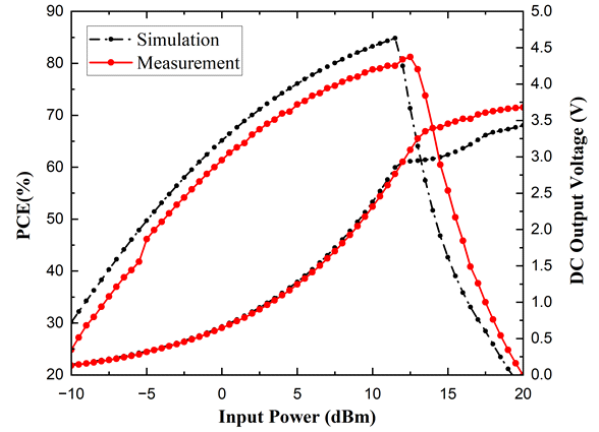


그림 4. 입력 전력에 따른 2.45 GHz에서의 시뮬레이션 결과 및 2.37 GHz에서 측정 결과

Fig. 4. Performance versus input power at 2.45 GHz for simulation and at 2.37 GHz for measurement. ($R_L=680 \Omega$).

$$PCE = \frac{V_{out}^2}{R_L P_{in}} \times 100 \%, \quad (13)$$

식 (13)에서 V_{out} 은 출력 전압, P_{in} 은 입력 전력이다.

그림 5는 주파수와 입력 전력에 따른 PCE 측정 결과이다. -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm 그리고 12 dBm의 입력 전력에서 각각 29.23 %, 55.62 %, 80.60 %, 80.15 %의 최대 PCE를 달성했음을 확인했다.

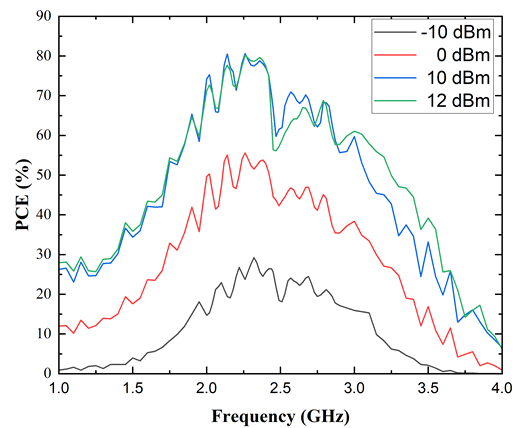


그림 5. 주파수와 입력 전력에 따른 PCE 측정 결과

Fig. 5. PCE versus frequency at -10 dBm, 0 dBm, 10 dBm, and 12 dBm for measurement.

IV. 결 론

본 논문에서는 고효율 및 소형화를 위한 정류기를 제안한다. 또한, 매칭 네트워크는 제안된 구조가 소형화된 크기를 가지면서도 고효율을 달성되도록 하는 제2 고조파 억제에서 조사된다. 검증을 위해서 제작된 정류기는 19 mm×15 mm의 크기를 갖는다. 또한 2.38 GHz, 12.5 dBm에서 최대 81.23 %의 PCE를 갖는 것을 확인함으로써 제안된 정류기의 효용성을 검증하였다.

References

- [1] D. A. Nguyen, C. Seo, "A compact and high-efficiency design of 0.915/2.45 GHz dual-band shunt-diode rectifier for wireless power transfer," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 32, no. 7, pp. 915-918, Jul. 2022
- [2] F. Zhao, D. Inerra, G. Wen, J. Li, and Y. Huang, "A high-efficiency inverse class-f microwave rectifier for wireless power transmission," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 29, no. 11, pp. 725-728, Nov. 2019.
- [3] GT. Bui, DA. Nguyen, and C. Seo, "A novel design of dual-band inverse class-F shunt-diode rectifier for energy harvesting," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II Express Briefs*, vol. 70, no. 7, pp. 2345-2349, Jul. 2023.
- [4] M. Roberg, T. Reveyrand, I. Ramos, E. A. Falkenstein and Z. Popovic, "High-efficiency harmonically terminated diode and transistor rectifiers," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 60, no. 12, pp. 4043-4052, Dec. 2012.
- [5] K. Bhatt, S. Kumar, P. Kumar, and C. C. Tripathi, "Highly efficient 2.4 and 5.8 GHz dual-band rectenna for energy harvesting applications," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 12, pp. 2637-2641, Dec. 2019.
- [6] X. Zhang, L. Larson, P. Asbeck, and R. Langridge, "Analysis of power recycling techniques for RF and microwave outphasing power amplifiers," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II, Analog Digit. Signal Process.*, vol. 49, no. 5, pp. 312 - 320, May 2002.
- [7] S. Ladan, K. Wu, "Nonlinear modeling and harmonic recycling of millimeter-wave rectifier circuit," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 63, no. 3, pp. 937-944, Mar. 2015.
- [8] T. Ngo, Y. X. Guo, "Harmonic-recycling rectifier for high-efficiency far-field wireless power transfer," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 67, no. 4, pp. 770-774, Apr. 2020.
- [9] J. O. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, "Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8 GHz rectenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 46, no. 12, pp.2053-2060, Dec. 1998.
- [10] X. Liu, Y. Liu, S. Li, F. Wu and Y. Wu, "A three-section dual-band transformer for frequency-dependent complex load impedance," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 19, no. 10, pp. 611-613, Oct. 2009.
- [11] H. Sun, "An enhanced rectenna using differentially-fed rectifier for wireless power transmission," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 15, pp. 32-35, Apr. 2016.
- [12] C. Liu, F. Tan, and Q. He, "A novel single-diode microwave rectifier with a series band-stop structure," *IEEE transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 2, pp 600-606, Feb. 2017.
- [13] D. Wang and N. Renato, "Design of a rectifier for 2.45 GHz wireless power transmission," in *Proceedings of the 8th Conference on Ph.D. Research in Microelectronics and Electronics(PRIME)*, Jul. 2012, pp. 1-4.

최 유 진 [숭실대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0001-5484-6453>



2021년 2월: 숭실대학교 전자정보공학부
전자공학전공 (공학사)
2022년~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석사과정
[주 관심분야] RF, RF 무선전력전송 기술,
RF Power Amplifier 등

남 형 석 [숭실대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5610-3437>



2017년 9월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2017년~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] RF 무선전력 전송 기술,
RF Power Amplifier 등

기아 탕 부이 [숭실대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0003-1628-2826>



2021년 3월 : 하노이 과학기술대학교 전자통신학과 (공학사)
2023년 3월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2023년 ~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 박사과정
[주 관심분야] RF 무선전력 전송 기술,
RF Power Amplifier 등

서 철 현 [숭실대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0002-6765-8734>

한국전자과학회논문지, 17(12) 참조