

무선전력전송용 정류회로의 변환효율 개선에 관한 연구

A study on Improvement of Conversion Efficiency of Rectifying circuit for Wireless Power Transmission

박동국*

Dong-Kook Park*

요 약

본 논문에서는 무선전력전송을 위한 정류회로의 RF-to-DC 변환효율 개선에 대해 연구하였다. 정류회로는 저역통과 필터, 다이오드 회로, 직류 통과필터로 구성되어 있는데, 이것들 모두가 변환 효율에 영향을 미친다. 시뮬레이션을 통해 이러한 부분들이 어떻게 변환효율에 영향을 주는지 조사를 하였고, 이러한 내용을 바탕으로 0dBm의 저전력에서 약 50%의 변환효율을 갖는 912MHz의 정류회로를 제작하여 특성을 측정하였다.

Abstract

This paper examines RF-to-DC conversion efficiency of rectifying circuit for wireless power transmission. The rectifying circuit consists of low pass filter, diode circuits and dc pass filter. All these components may be effect on the conversion efficiency. Using the simulation, we study these components how to effect on the conversion efficiency. On the basis of the simulation results, the 912MHz rectifying circuit with 50% efficiency at low input power such as 0dBm is fabricated and its characteristics are measured.

Key words : Rectenna, rectifying circuit, conversion efficiency, wireless power transmission

I. 서 론

전자기파를 이용하여 무선으로 전력을 공급하는 연구는 테슬라에 의해 제안된 이후 지금까지 일부 제한된 용도로만 사용되어 왔다[1]. 최근에 미국 MIT에서 발행하는 테크놀로지 리뷰에서 10대 유망기술 중 하나로 무선전력전송이 포함 될 정도로 미래 사회에 파급효과가 매우 클 것으로 예상됨에 따라 많은 연구가 진행 중에 있다[2]-[6].

무선전력 전송은 크게 송신부와 수신부로 구성이 되는데, 수신부의 경우 입력되는 RF 주파수 신호를

렉테나를 통해 DC로 변환하게 된다. 일반적으로 사용하는 주파수는 ISM 대역을 사용하고 있으며, 수신부 안테나로 입력되는 전력이 10dBm 이상에서 RF 전력을 DC로 변환하는 전력변환 효율이 60%~80% 정도이다[7],[8]. 즉 큰 입력전력에서 전력변환 효율이 좋게 나타나고 있다. 그러나 이를 위해 높은 전력을 무분별하게 방사할 경우 다른 기기의 장애 및 인체에도 해로운 영향을 끼칠 수 있어 국가별로 허용전력밀도에 대해 제한을 두고 있다[9].

그러므로 10dBm 이하의 미약한 입력 전력에서도 높은 효율을 갖는 전력변환 정류회로의 설계는 의미

* 한국해양대학교 전자통신공학과(Dept. of Electronics and Communication Eng., Korea Maritime University)

· 제1저자 (First Author) : 박동국

· 투고일자 : 2010년 8월 16일

· 심사(수정)일자 : 2010년 8월 17일 (수정일자 : 2010년 10월 11일)

· 게재일자 : 2010년 10월 30일

가 있으므로, 본 논문에서는 이러한 저전력에서 높은 변환효율을 갖는 정류회로를 개발한다. 이를 위해 렉테나의 정류회로를 구성하는 각 부분이 변환 효율에 미치는 영향을 설명하고, ISM 대역 중 912MHz 신호를 수신하여 DC 전력으로 효과적으로 변환하는 정류회로를 구현 한다.

II. 정류회로 설계

일반적으로 렉테나는 안테나, 저역통과필터, 다이오드 회로, DC통과 필터와 부하로 구성이 되며, 안테나와 부하저항을 제외한 나머지 부분을 정류회로(rectifying circuit)라 부른다. 그림 1에 배전압(voltage double) 구조의 렉테나의 기본적인 블록도를 나타내었다. 안테나는 마이크로파 신호를 수신하는 역할을 하며, 수신된 전력은 필터를 거쳐 다이오드 회로에 전달이 되는데, 다이오드 회로는 일반적으로 비선형 소자인 쇼트키 다이오드로 구성이 된다. 입력된 RF 신호는 다이오드에 의해 DC 전력 뿐 아니라 RF 수신 신호의 고차 모드 신호 성분을 발생시키므로, 이러한 고차 모드가 안테나로 재방사가 일어나지 못하도록 저역통과필터를 안테나와 다이오드 회로 사이에 두게 된다. 또한 RF 주파수의 신호가 부하에 전달되는 것을 차단하고 DC 성분만 부하에 전달되도록 하기 위해 DC 통과 필터를 다이오드 회로와 부하저항 사이에 두게 된다.

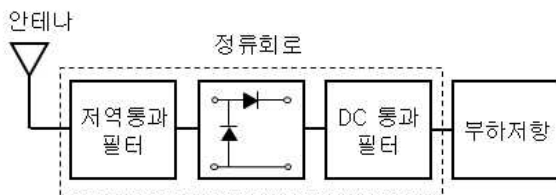


그림 1. 렉테나 블록도

Fig. 1. Rectenna block diagram

안테나에 입력된 RF 전력과 부하에 공급된 DC 전력의 비를 사용하여 렉테나의 변환 효율을 정의한다 [8]. 그러나 안테나는 일반적으로 수동소자로서 안테나에 의한 신호의 감쇄는 무시할 수 있으므로, 이런 경우 정류회로의 전력변환 효율 η 을

$$\eta = \frac{\text{부하에서 소모되는 DC 전력} \times 100}{\text{안테나에서 저역통과필터로 입력되는 RF 전력}} \quad (1)$$

으로 정의할 수 있다.

전력변환 효율을 높이기 위해 정류회로에서 전력 변환 효율에 영향을 미치는 설계 파라미터에 대해 조사 하였다. 그림 1을 참고하여 인가되는 입력 전력, 저역통과필터, 사용하는 다이오드의 종류, DC통과필터, 부하 저항 등이 변환 효율에 어떤 영향을 미치는지 시뮬레이션을 하였다.

2-1 입력 전력과 다이오드

렉테나의 정류회로에 사용되는 다이오드는 일반적으로 마이크로파에서 turn on 전압이 낮은 쇼트키 다이오드로서, 쇼트키 다이오드는 p형과 n형이 있다. 일반적으로 p형 쇼트키 다이오드는 n형 다이오드에 비해 매우 낮은 항복전압(breakdown voltage)과 높은 직렬 저항을 가지는 단점을 갖고 있지만, turn on 전압이 낮다. 그러므로 저전력 응용에는 문턱전압이 낮은 p형 다이오드가 유리하며, 높은 입력 전력이 인가되는 경우에는 항복전압이 높은 n형 다이오드가 유리함을 알 수 있다.

그림 2에서 p형 쇼트키 다이오드인 hsms2852와 n형 쇼트키 다이오드인 hsms8202와 hsms282C를 사용한 정류회로 시뮬레이션에서 상대적으로 저전력에서 p형 쇼트키 다이오드가 n형에 비해 변환 효율이 좋은 것을 볼 수 있다. 그림 2는 부하가 $1k\Omega$ 이고, 변환효율이 최대가 되는 입력전력에서 임피던스 정합을 한 경우의 시뮬레이션 결과이다.

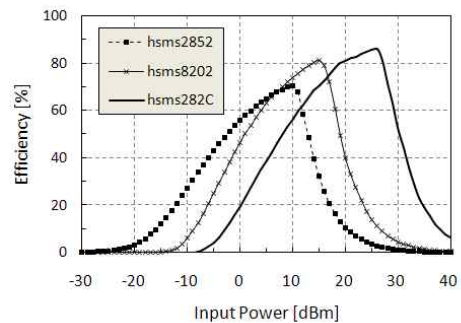


그림 2. 다이오드 종류에 따른 전력 변환효율
Fig. 2. Power conversion efficiency versus input power density for various diodes.

그리고 그림 2에서 입력 전력이 어떤 값에 도달할 때 까지 미약 전력에서 입력전력이 증가함에 따라 변환 효율이 증가하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 쇼트키 다이오드의 특성 상 인가되는 바이어스 전류가 증가하면 쇼트키 다이오드의 접합저항 R_j 의 값이 아래 식 (2)과 같이 작아져서 생기는 현상으로 판단된다. 일반적으로 쇼트키 다이오드의 접합저항 R_j 는

$$R_j = \frac{8.33 \times 10^{-5} nT}{I_b + I_s} \quad (2)$$

으로 표현된다[10]. 여기서 T 는 온도이며, I_b 는 외부에서 인가되는 바이어스 전류이며, I_s 는 포화전류로서 상수 n 과 더불어 다이오드의 물성에 의해 결정되는 값이다.

또한 그림 2에서 입력 전력이 어떤 값 이상 증가하면 변환 효율이 오히려 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이것은 다이오드의 항복전압에 가까운 큰 입력 전력이 인가가 되면서 발생하는 현상이다. 항복 전압이 3.6V인 hsm2852 다이오드의 경우 그림 3에서 볼 수 있듯이 입력 전력에 따라 출력 전압이 증가하다가 입력 전력이 11dBm 이후부터는 출력 전압이 3V를 넘어 3.6V에 가까워지면서 출력 전압의 증가 추세가 둔화되면서, 이후 입력 전력이 증가하더라도 3.6V 이상의 출력 전압이 나타나지 않게 된다. 이러한 원인으로 인하여 그림 2의 hsm2852 다이오드의 변환효율이 입력 전력이 약 10dBm이후부터 나빠지게 되는 것으로 판단된다.

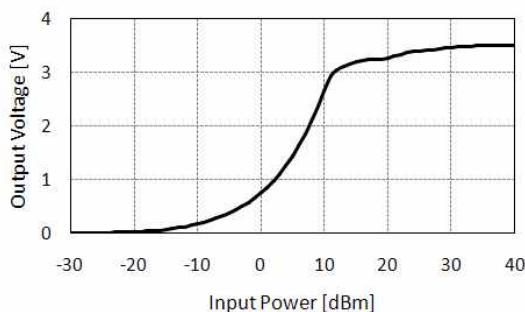


그림 3. 입력전력에 따른 부하에서의 전압
Fig. 3. Voltage of load versus input power density

따라서 높은 효율을 얻기 위해서는 렉테나 입력에 인가되는 전력의 세기를 고려하여 다이오드의 항복 전압과 turn on 전압 등 사양을 면밀히 살펴 다이오드를 선정하는 것이 중요함을 알 수 있다.

2-2 저역통과필터

그림 1의 저역통과 필터는 두 가지 기능을 수행해야 한다. 첫째는 입력된 RF 전력에 의해 다이오드에 DC 전력 뿐 아니라 RF 수신 신호의 고차 모드가 발생되므로 이러한 고차 모드가 안테나로 재방사가 일어나지 못하도록 하는 역할이다.

두번째는 안테나에서 수신된 RF 전력을 정류용 다이오드로 전력 전달을 최대화 하기 위해서는 안테나와 정류용 다이오드 입력단 사이에 임피던스 정합이 요구되는데, 이러한 임피던스 정합회로의 역할을 수행한다.

이러한 두 가지 기능을 동시에 수행하기 위해 직렬 L과 병렬 C 형태의 L 형(L-type) 회로를 설계하여, 임피던스 정합과 더불어 저역통과 필터의 기능을 동시에 수행하도록 하였다. 임피던스 정합회로 설계시 안테나 임피던스를 50Ω 으로 가정하여 다이오드 회로 입력 단을 50Ω 으로 정합하는 매칭 회로 설계를 하였다.

특히 임피던스 정합을 위해서는 정류용 다이오드의 입력 단에서의 임피던스를 정확히 알아야 하는데, 식 (2)에서 보듯이 입력전력에 따라 다이오드 임피던스가 변하게 되고, 부하저항에 따라서도 변하게 되므로 설계시 주의가 필요하다. 실제 상황에서는 전파 환경에 따라 입력전력이 수시로 변화할 수 있으므로 일정한 입력 전력이 인가된다고 볼 수 없다. 그러므로 임피던스 정합시 어디에 맞추어 임피던스 정합회로를 설계하여야 하는지가 중요한 관건이 된다.

임피던스 정합회로 설계시 어느 입력 전력에 준해 설계를 해야 하는지에 대한 문제를 고려하기 위해 -10dBm, 0dBm, 10dBm, 20dBm 의 4가지 경우를 가정하여, 먼저 각각의 입력전력에 대해 저역통과 형태의 임피던스 정합 회로를 설계하였다. 그리고 이렇게 일정한 입력전력에 대해 정합되어진 고정된 정합회로에 -30dBm ~ 30dBm 의 가변하는 입력 전력이 인가

된 경우, 변환 효율의 변화를 시뮬레이션하여 그림 4에 제시하였다.

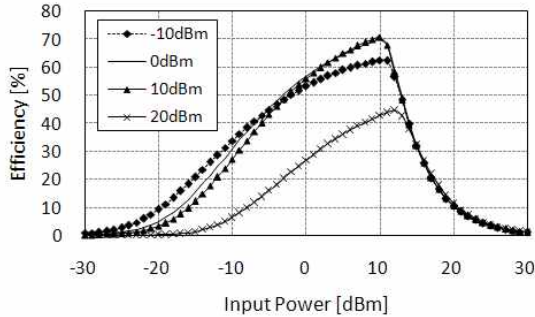


그림 4. 고정된 입력전력에 대해 설계한 임피던스 정합 회로를 갖는 정류회로의 변환효율
 Fig. 4. Conversion efficiency of rectifying circuits with impedance matching circuit designed at the constant input power

그림 4에서 -10dBm의 입력전력에 맞추어 임피던스 정합회로를 설계한 경우는 다른 입력전력에 맞추어 임피던스를 정합한 것에 비해 -10dBm에서 효율이 조금 높게 나타난다. 이러한 현상은 다른 임피던스 정합회로에서도 동일하게 나타나고 있다.

또한 0dBm ~ 10dBm 범위의 입력전력일 때 0dBm과 10dBm에서 임피던스 정합 회로를 설계한 것이 -10dBm과 20dBm의 경우에 비해 변환효율이 크게 나타나는 것을 볼 수 있다.

그러므로 입력전력의 변동에 대해 변환효율을 최대로 얻기 위해서는 변환 효율이 좋게 나타나는 입력전력에 맞추어 임피던스 정합회로를 설계하여야 함을 알 수 있다.

2-3 DC 통과 필터

RF 주파수의 신호가 부하에 전달되는 것을 차단하고 DC 성분만 부하에 전달되도록 하기 위해 DC 통과 필터가 다이오드와 부하저항 사이에 놓이게 된다. 일반적으로 DC 통과필터는 콘덴서를 부하와 병렬로 연결하여 구성 하는데, 이것은 입력 RF 전력의 한 주기(period) 내 일정시간 동안은 입력되는 RF 신호를 충전하고, 그 외 시간에 부하로 방전하면서, DC를 부하에 공급하는 역할을 한다.

이러한 의미에서 DC 통과 필터에 사용되는 콘덴

서를 충전용 콘덴서 혹은 가상 배터리(virtual battery)로 부르기도 한다. 이러한 충전용 콘덴서의 용량은 일정한 크기 이상의 값을 가지면 입력 임피던스의 변화는 미미하게 되어 변환 효율에는 영향은 미치지 않게 되며, 단지, 부하에서 요구하는 에너지 소모량을 고려하여 충전용 콘덴서의 용량을 결정하면 된다.

2-4 부하저항

동일한 입력전력에 대해 부하 임피던스가 변하는 경우 전력 변환 효율이 어떤 변화를 나타내는지 시뮬레이션하였다. 입력전력이 0dBm과 10dBm 일 때, 부하 저항의 값을 100Ω~4kΩ 까지 변화시키면서 전력변환 효율의 변화를 시뮬레이션하여 그림 5에 나타내었다.

그림 5와 같이 부하저항에 따라 전력 변환효율이 달라지는 것은 동일한 입력전력에 대해서도 부하저항에 따라 입력임피던스가 변하기 때문이다. 이를 확인하기 위해 0dBm과 10dBm의 입력 전력에 대해 부하 저항이 100Ω~4kΩ 까지 변화될 때 S11의 궤적을 시뮬레이션하여 그림 6에 나타내었다.

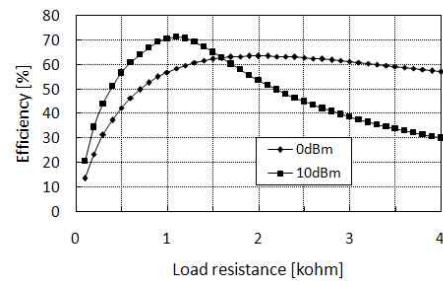
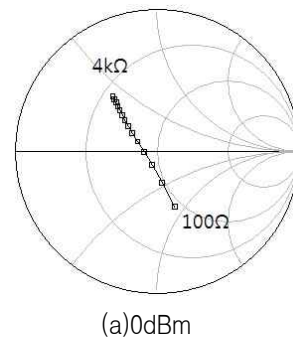
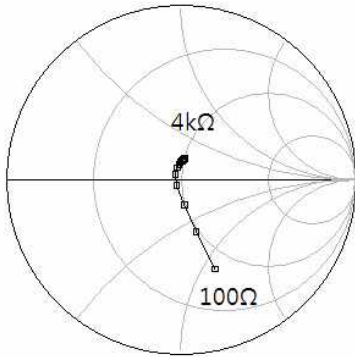


그림 5. 부하 저항에 따른 변환 효율
 Fig. 5 Conversion efficiency versus load resistance





(b) 10dBm

그림 6. 부하 저항에 따른 S11 변화
Fig. 6. S11 versus load resistance

그림 5와 6으로부터 입력전력에 따라 최대 효율을 갖는 부하 임피던스가 다르다는 것을 알 수 있으며, 입력 전력이 낮은 경우 부하 임피던스 변화에 따른 효율변화가 넓은 범위에 걸쳐 일정하게 나타나지만 입력 전력이 큰 경우 부하에 따른 효율의 변화가 크다는 것을 알 수 있다.

III. 측정 및 분석

0dBm 이하의 저전력에서 높은 전력 변환 효율을 갖는 정류회로를 설계하기 위해, 앞 절에서 설명한 내용을 바탕으로 정류회로를 설계하고 제작하여 시뮬레이션 결과들의 타당성을 검증하였다.

그림 7에 두께 1mm의 FR-4 기판으로 제작한 정류회로를 나타내었고, 그림 8에 측정된 변환 효율을 시뮬레이션 결과와 함께 나타내었다. 다이오드는 hsms2852와 hsms8202를 사용하였다. 입력 전력은 HP8648C의 신호발생기를 사용하여 직접 인가하였으며, 부하로는 1 kΩ의 저항을 연결하였고, 저항 양단의 전압을 측정하여 소모 전력을 계산하였다. 실험에 사용한 HP8648C의 신호발생기의 최대 출력 전력이 14dBm 이므로 더 높은 전력에 대해서는 측정을 할 수 없었고, 그 이하에서 측정된 효율을 시뮬레이션 결과와 비교하여 나타내었다. 그림 8에서 실험치와 시뮬레이션 값이 유사한 것을 볼 수 있다.

Hsms2852 다이오드를 사용한 정류회로의 경우 0dBm의 저전력에서 약 50%의 변환효율이 측정되었

으며, 이것은 hsms8202를 사용한 정류회로의 40% 효율에 비해 10%의 큰 효율을 갖는 것을 볼 수 있다.

또한 측정된 최대 효율이 약 60%로서 시뮬레이션의 70%와 차이가 생기고 있으나, 이것은 임피던스 정합용 인덕턴스와 커패시턴스의 값이 각각 15nH와 0.68pF으로 그 값이 매우 작아서 제작 및 부품의 오차에 의해 생긴 것으로 판단된다.



그림 7. 제작한 정류회로
Fig. 7. Fabricated rectifying circuit

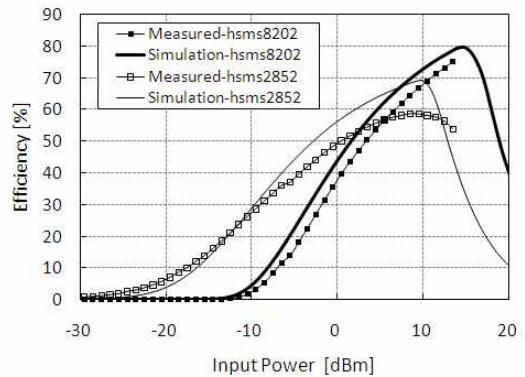


그림 8. 측정된 전력 변환효율
Fig. 8. Measured power conversion efficiency

IV. 결 론

본 논문에서는 무선전력전송에 필수적인 렉테나의 정류회로의 전력 변환효율을 최대로 하기 위해, 정류회로를 구성하는 각 부분이 변환 효율에 미치는 영향을 시뮬레이션 하였다. 이를 통해 변환 효율을 최대로 할 수 있는 설계 방법을 살펴보았다. 특히 0dBm 이하의 저전력에서 변환효율이 높은 정류회로를 구현하기 위해서는 입력전력과 다이오드의 관계를 고려한 다이오드의 선택, 임피던스 정합회로 설계 시 입력전력의 변동에 대한 고려, 입력 전력에 따라

최대 효율을 갖는 부하저항의 변화 등을 고려해야 함을 설명하였다. 또한 912MHz에서 동작하는 정류회로를 제작하고, 특성 측정을 통해 시뮬레이션 결과를 검증하였다.

이러한 결과를 바탕으로 저전력에서 변환 효율이 높은 렉테나 설계를 효과적으로 할 수 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, “무선에너지 전송기술,” *전자통신동향분석, 제23권 제6호*, pp. 59-69, 2008. 12.
- [2] MIT, Technology Review, March/April 2008.
- [3] William C. Brown, “The History of Power Transmission by Radio Waves”, *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-32, no. 9, pp. 1230-1242, Sept. 1984.
- [4] Tetsuo Nozawa, "Battery charging goes wireless," *Nikkei Electronics Asia*, pp. 16-24, June 2007.
- [5] J. O. McSpadden and J. C. Mankins, “Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology,” *IEEE Microwave Magazine*, pp. 46-57, Dec. 2002.
- [6] Alanson S. et al. “Experimental results with two wireless power transfer systems,” *IEEE Radio and Wireless Symp. 2009*, pp. 16-19, Jan. 2009.
- [7] J. McSpadden, L. Fan, and K. Chang, "Design and experiments of a high-conversion-efficiency 5.8GHz rectenna," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-46, no. 12, pp. 2053-2060, Dec. 1998.
- [8] Y. Suh and K. Chang, "A high efficiency dual frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. MTT-50, no. 7, pp. 1784-1789, July. 2002.
- [9] www.fcc.gov/oet/info/documents/bulletins/#65.
- [10] Agilent Technologies, "Surface mount zero bias schottky detector diodes", *Technical Data*.

박 동 국 (朴東國)



1987년 2월 : 부산대학교 전자공학과 (공학사)

1989년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)

1994년 8월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1994년 9월 ~ 1996년 3월 : LG전자

선임연구원

1996년 4월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전자통신공학과 교수

관심분야: 안테나, 초고주파 소자, 레이더 등