

# Buck-Boost DC-DC Converter를 이용한 다중 대역 RF 에너지 수집 시스템

조춘식

## Multi-Band RF Energy Harvesting System Using Buck-Boost DC-DC Converter

Choon Sik Cho

### 요 약

본 논문은 Buck-Boost DC-DC 변환기를 이용하여 다중 대역으로 존재하는 RF 신호를 수집하여 에너지를 생성하는 에너지 수집 시스템에 대하여 소개한다. 수집된 전기에너지를 사용하는 부하의 저항이 지속적으로 변하는 환경에서는 부하 저항이 변하여도 DC-DC 변환기의 입력저항이 변하지 않는 Buck-Boost DC-DC 변환기를 사용하였다. 입력으로 들어오는 RF 신호의 주파수 대역이 다양하므로 다중대역을 다 처리 할 수 있도록 정류기를 대역별로 설계하고 정류기 앞에 각 대역별로 매칭 회로를 추가하였다. 크기가 매우 작은 RF 신호를 효과적으로 수집하기 위한 정류기를 위하여 각 대역에서 수집하여 발생시킨 전압을 계속 누적하여 축적하는 방법을 고안하여 매우 작은 크기의 입력 신호에도 일정한 전압이 출력되게끔 회로를 설계하였다. 입력이 -20 dBm의 크기를 가진 RF 신호에도 출력 효율이 20% 정도까지 낼 수 있음을 확인하였다.

**Key Words** : RF harvesting; rectifier; multi-band; DC-DC converter; buck-boost converter;

### ABSTRACT

This paper introduces an energy harvesting system that generates energy by collecting multi-band RF signals using buck-boost DC-DC converter. In an environment where the resistance of load using the collected electric energy is constantly changing, a buck-boost DC-DC converter is used in which the input resistance of the DC-DC converter does not change even if the load resistance changes. Since the frequency band of the input RF signal varies, the rectifier is designed for each band so that multiple bands can be processed, and a matching circuit is added to each band in front of the rectifier. For a rectifier to collect very small RF signals, a circuit is designed so that a constant voltage is obtained according to a very small input signal by devising a method of continuously accumulating the voltages collected and generated in each band. It is confirmed that the output efficiency can reach up to 20% even for the RF signal having the input of -20 dBm.

## I. 서 론

현재 우리가 사용하고 있는 다양한 무선 이동통신 또는 무선 장치는 서로 다른 RF 주파수를 일정한 대역폭으로 사용하고 있다. 이러한 RF 신호는 주변의 자유 공간에서 늘 송수신되고 있으며 무선 장치 및 시스템이 활성화되지 않은 시간에도 지속적으로 RF 신호가 송출되고 있으므로 현실적으로는 낭비되고 있다고도 볼 수 있는 이 무선 전파 에너지를 수집하여 별도의 전원장치를 부착할 수 없는 시스템에 사용하도록 하는 에너지 수집에 대한 연구가 활발히 진행되고 있

다. 물론 전원장치가 있는 시스템에도 이를 적용하여 배터리의 교환 없이 영구적으로 에너지 수집 기술을 이용하여 전기 에너지를 공급한다면 더욱 효율적이고 많은 장점을 가져다 줄 것이다. 지금까지 에너지 수집에 사용되는 에너지원은 주로 진동, 열, 태양열, 소리 등으로 현실 세계에서 실제로 낭비되고 있는 에너지를 수집하는 것을 목적으로 하여 개발되고 있으며 최근에는 우리 주변에 곳곳에 산재하고 있는 무선 RF 에너지를 수집하는 다양한 기술들이 등장하고 있음을 볼 수 있다. 본 논문에서는 다중대역의 RF 신호를 수집하기 위한 에너지 수집 시스템을 제안하며 수집된 에너지를 사용하

는 부하의 조건이 변하여도 효율이 악화되지 않도록 Buck-Boost DC-DC 변환기를 사용하였다. 그리고 입력되는 RF 신호의 크기가 매우 작으므로 작은 신호 크기에도 출력되는 전압의 크기를 확보할 수 있도록 정류기를 새롭게 고안하였다.

## II. RF 에너지 수집 시스템

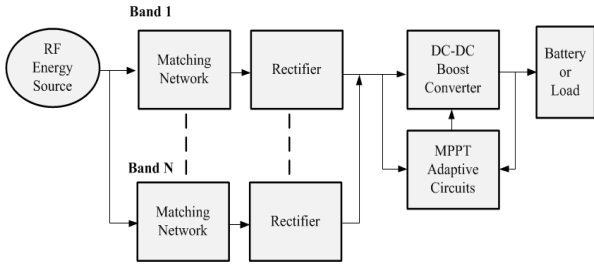


그림 1. 제안하는 RF 에너지 수집 시스템의 개요

RF 에너지를 수집하는 시스템의 성능을 결정하는 가장 큰 요인은 효율과 출력전압의 크기로 볼 수 있으며 그림 1에 나타난 것과 같이 다중대역의 RF 신호가 수신되는 환경에 적합한 에너지 수집 시스템은 각 대역마다 별도의 정류기를 보유하고 있으며 각각의 정류기에서는 각 대역의 RF 신호를 수집하여 전력을 생성하게 된다. 여기서는 4개의 대역 즉 2세대 이동통신 대역 (800 MHz 대역), ISM 대역 (2.4 GHz 대역), LTE1과 LTE2 대역 (2.535 GHz 및 2.575 GHz 대역)에 해당하는 정류기를 설계하였다. 전통적인 RF 대역 정류기는 그림 2에 나타난 것과 같이 Diode를 한 개 또는 두 개 사용하여 출력 전압을 검출하는 구조를 보이고 있다. 그러나 이 정류기들은 낮은 입력신호가 수신되는 경우에는 출력 전압의 크기가 매우 작아 전체 에너지 수집 시스템의 출력 전압을 생성하는 데 많은 한계를 보이고 있다. 그러므로 본 연구에서는 그림 3과 같이 Diode를 3개로 구성하여 보다 높은 전압을 생성하는 구조를 고안하였다. 이 정류기는 식 (1)과 같이 출력 전압  $V_{out}$ 을 생성한다.

$$V_{out} = 4V_{IN} - 3V_{th} \quad (1)$$

여기에서  $V_{in}$ 는 입력 신호의 전압 크기를  $V_{th}$ 는 다이오드의 문턱전압을 나타낸다. 여기서 사용한 다이오드는 HSMS-285x이며 Capacitance는 10 pF를 사용하였다.

제안하는 정류기를 사용하여 출력전압을 시뮬레이션한 결과는 그림 4에 나타내었으며 예상한 것과 같이 입력 전압에 비하여 높은 출력 전압을 만들을 알 수 있다.

한편 정류기의 입력 임피던스와 수신 안테나의 입력 임피던스가 정합되어 있지 않으므로 정합을 위한 회로를 그림 5와 같이 설계하였다. 본 연구에서는 4개의 대역으로 나누어서 정류기를 설계하여 사용하고 있으므로 각 대역별로 별도

의 정합회로를 설계하였으며 이는 그림 5와 같은 구조를 보이고 있으며 정합이 실제 이루어지는 절차를 스미스차트에 나타내었다.

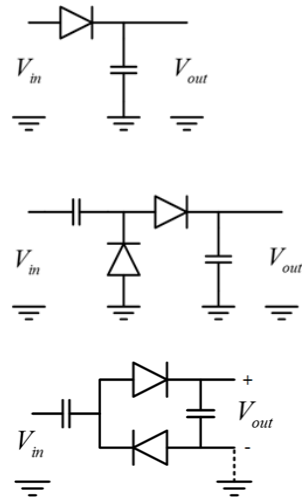


그림 2. 전통적인 RF 신호 정류기

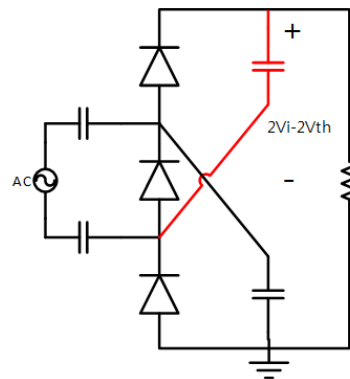


그림 3. 제안하는 RF 정류기의 구조

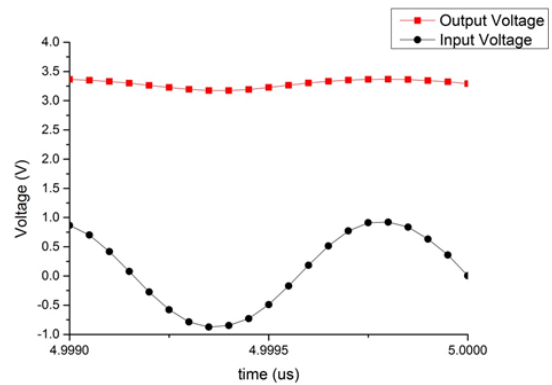


그림 4. 제안하는 RF 정류기의 설계 결과

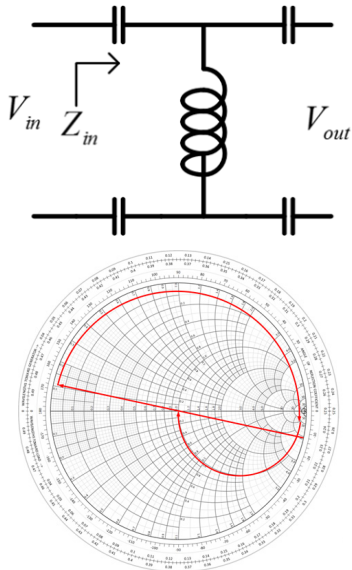


그림 5. 정합회로의 구조 및 시뮬레이션 결과

4개의 정류기에 수집한 전압을 축적하여 보다 높은 전압을 생성한 후에는 전압의 Ripple을 제거하고 부하의 변동에도 성능의 변화가 없도록 하는 DC-DC 변환기를 그림 6에 나타낸 것과 같이 설계하였다. 입력 전압 대비 출력 전압의 상승을 이루어 내는 Boost DC-DC 변환기가 그림 6(a)에 나타나 있는데, 부하 저항의 변동이 발생하면 회로의 인덕터로 인하여 입력 저항 값이 변하게 되어 에너지 수집 회로에는 적당하지 않으므로 그림 6(b)와 같이 Buck-boost DC-DC 변환기를 사용하면 부하의 변동에도 입력 저항이 크게 변하지 않게 되므로 앞 단에 위치한 정류기와 정합하는 경우 설계단계에서 많은 이점을 제공하고 있으며 이렇게 설계된 DC-DC 변환기는 전체 에너지 수집 시스템의 효율 향상 및 안정도 확보에 큰 영향을 미치고 있다.

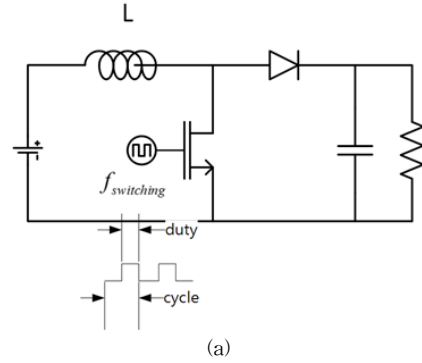
식 (2)에 Buck-boost DC-DC 변환기의 입력저항을 나타내었으며 부하 저항과는 아무런 관계가 없음을 볼 수 있다.

$$R_{IN} = \frac{2Lf_{sw}}{D^2} \quad (2)$$

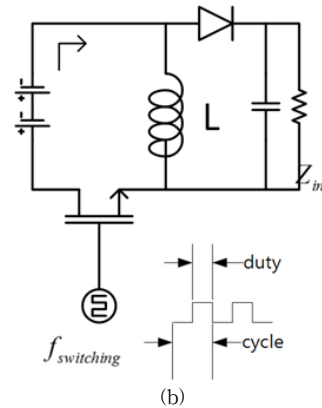
여기서  $f_{sw}$ 는 스위치의 스위칭 주파수를 나타내면 D는 듀티비를 나타낸다. 이 회로에서는  $L = 1 \text{ mH}$ 를,  $D = 0.5$ ,  $f_{sw} = 10 \text{ kHz}$ 를 적용하였다.

### III. 시뮬레이션 및 측정 결과

그림 1에 나타낸 제안하는 RF 에너지 수집 시스템의 요소 기능별 블록을 다 설계 한 후 전체 시스템을 통합한 후의 시뮬레이션 결과를 보면 우선 DC-DC 변환기의 파형은 그림 7과 같으며 부하저항이 변화해도 출력전압은 잘 유지됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6. DC-DC 변환기. (a) Boost 변환기, (b) Buck-Boost 변환기.

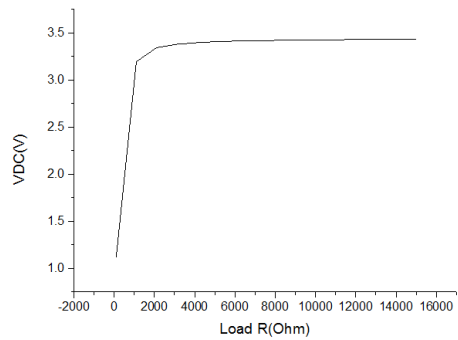


그림 7. Buck-Boost DC-DC 변환기의 출력 전압

그리고 정류기의 효율을 시뮬레이션한 결과는 그림 8과 같으며 입력신호의 크기에 따라 변하는 효율을 알 수 있으며 입력신호의 크기가 증가할수록 효율은 증가함을 볼 수 있다. 그림 9에는 대역 수의 증가에 따른 출력 전압의 추이를 시뮬레이션한 결과를 나타내었으며 예상했던 대로 사용하는 대역이 증가할수록 수집할 수 있는 전압의 크기는 증가함을 알 수 있다.

부하가 변동하는 경우를 가정하여 부하의 저항을 변화시킨 후에 DC-DC 변환기의 효율을 시뮬레이션한 결과를 보면 그림 10과 같이 되고, Buck-boost DC-DC 변환기의 특성에 따라 부하의 변동에도 불구하고 효율은 그대로 유지됨을 알 수 있다.

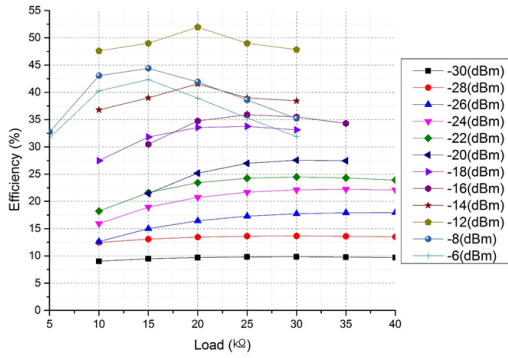


그림 8. 입력신호의 크기에 따른 정류기의 효율

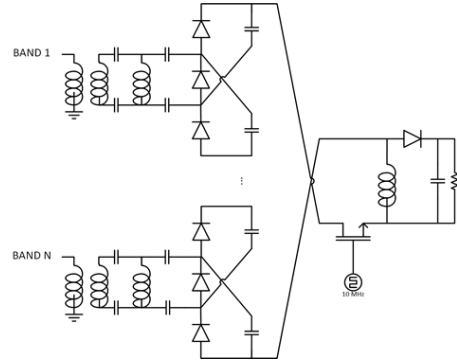


그림 11. 전체 에너지 수집 시스템의 회로도

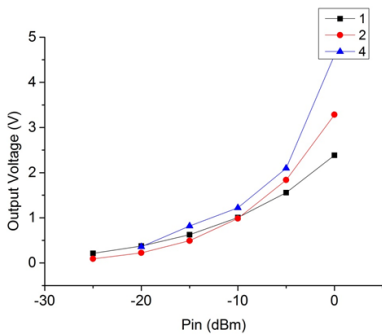


그림 9. 대역수의 증가에 따른 최종 출력 전압의 증가 추이

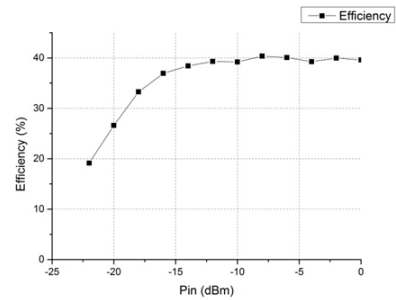


그림 12. 전체 시스템의 효율

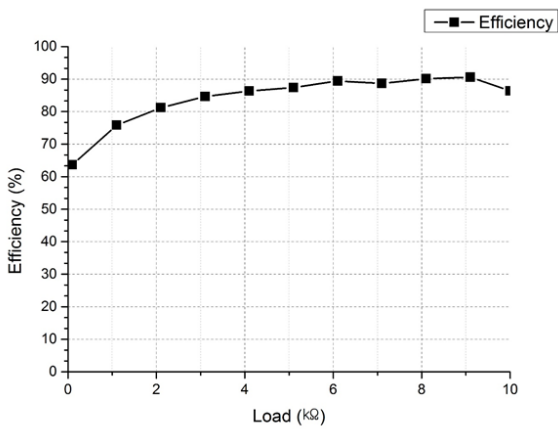


그림 10. 부하 변동에 따른 DC-DC 변환기의 효율

기능요소별 설계 결과를 이용하여 구성된 전체 시스템에 대한 회로도는 그림 11에 나타내었으며 앞에서부터 차레로 정합회로, 정류기 그리고 DC-DC 변환기로 구성되어 있음을 알 수 있다. 전체 시스템을 통합하여 수행한 효율 측정, 제작한 시스템의 사진 및 출력전압을 각각 그림 12, 13, 14에 나타내었다. 수신되는 RF 신호의 입력이 최소 -25 dBm의 경우에도 본 시스템은 출력전압을 생성함으로써 제안하는 시스템의 정류기 및 DC-DC 변환기가 훌륭하게 동작하고 있음을 알 수 있다.

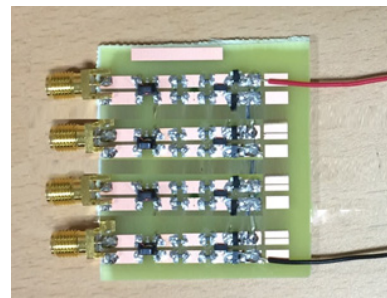


그림 13. 전체시스템의 제작 사진

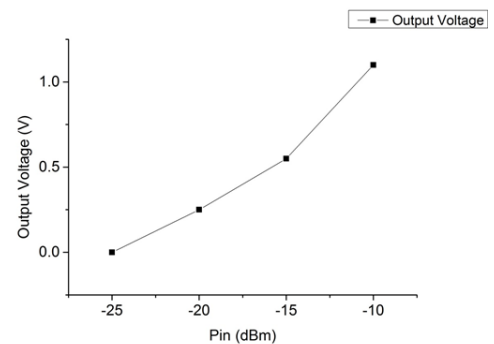


그림 14. 전체 시스템의 측정 출력 전압

#### IV. 결론

4개의 다중 대역을 사용한 RF 에너지 수집시스템을 설계 하였으며 대역별 정합회로 및 정류기를 효율을 극대화하는

목표에 맞게끔 설계를 수행하였다. 그리고 부하의 변동에도 크게 변하지 않는 효율 및 출력전압을 유지하기 위하여 DC-DC 변환기를 Buck-boost 형태로 구성하였다. 본 연구에서 제안한 시스템은 배터리가 사용될 수 없는 다양한 회로 및 장치에 그리고 배터리를 대체할 수 있는 시스템에 광범위하게 사용될 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] V. Kuhn, et. al., "A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester with RF-to-DC Efficiency up to 84%," IEEE T-MTT, vol. 63, no. 5, pp. 1768-1778, May 2015.
- [2] A. Collado, et. al., "Optimal waveforms for efficient wireless power transmission," IEEE MWCL, vol. 24, no. 5, pp. 354-356, May 2014.
- [3] A. Collado, et. al., "Conformal hybrid solar and electromagnetic (EM) energy harvesting rectenna," IEEE TCAS-I, vol. 60, no. 8, p. 10, Aug. 2013.
- [4] B. Li et. al., "An antenna co-design dual band RF energy harvester," IEEE TCAS-I, vol. 60, no. 12, pp. 3256-3266, Dec. 2013.

## 저자

### 조 춘 식 (Choon Sik Cho)



### 정회원

- 1987년 2월 : 서울대학교 제어계측 공학과 (공학사)
  - 1995년 12월 : 미국 University of South Carolina 전자공학과 (공학석사)
  - 1998년 12월 : 미국 University of Colorado at Boulder 전자공학과 (공학박사)
  - 2004년 3월~현재 : 한국항공대학교 항공전자정보공학부 교수
- <관심분야> : RFIC, 안테나, 아날로그집적회로, 레이더, 의료 기기