

에너지 수확 시스템을 위한 고효율 렉테나 설계

정용채 (전북대학교)

I. 서론

근래에 들어 무선통신 시스템의 비약적인 발전으로 언제 어디서나 쉽게 무선으로 정보전달이 가능하게 되었다. 하지만 전자기기를 동작하기 위한 전원은 유선으로 공급하거나 전지를 충전하여 사용해야만 했다. 이로 인하여 무선기기 사용의 증가로 인한 무선전력전송에 대한 필요성이 최근 대두되고 있고, 무선으로 전원을 공급하기 위한 다양한 방식의 무선전력전송에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.^[1-2]

1890년대 N. Tesla에 의해 무선 전력전송의 개념이 처음으로 소개된 이후로, 무선으로 전원을 공급하기 위한 다양한 연구가 진행되어왔다.^[3-4] 이러한 무선 전력 전송 기술 중에서 자기 유도를 이용한 방식, 마이크로파 방식을 이용한 렉테나(rectenna) 방식 등이 대표적인데, 본 연구에서는 마이크로파 방식을 이용한 렉테나 방식에 중점을 두고자 한다. 마이크로파 방식을 이용한 무선 전력 전송 시스템에서 가장 중요한 요소인 렉테나는 W. C. Brown에 의해 처음 소개되었고, 태양광 우주발전 시스템(Space Solar Power System: SSPS)부터 RFID에 이르기까지 광범위하게 이용되고 있다.^[5-6] 고효율의 무선전력전송 시스템을 구현하기 위해서는 수신단의 렉테나가 높은 RF-DC 변환 효율을 갖도록 하는 것이 관건이다. 이를 위해 GaAs와 E-pHEMT^[5-6] 같은 다양한 화합물 반도체 다이오드를 이용한 여러 구조의 정류기 회로를 갖는 렉테나들이 제안되어 왔다.^[7-8] 그리고 기존 기저 대역(base-band) 회로에서 많이 이용하는 CMOS 공정을 이용한 집적회로 렉테나 연구도 이루어지고 있다.^[9]

마이크로파를 이용하는 통신 시스템은 지속적으로 전파(wave)의 전파(propagation)를 수반하므로, 사용되지 않는 전파는 렉테나를 이용하여 DC 전력으로 변환하는 사용하는

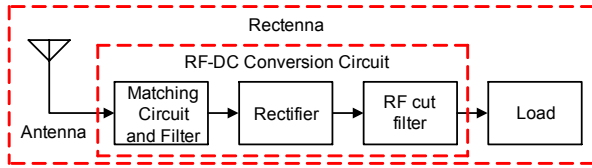
에너지 수확 시스템(energy harvesting system)에 사용될 수 있다. 기존 무선 전력전송이 의도적으로 전력을 무선이라는 매개체를 이용하여 전달하고 수신하는 과정을 밟는 반면, 에너지 수확 시스템은 다양한 통신기술의 발달에 따라 대기 중에 발생하는 불요 전자파를 에너지원으로 바꾼다는 측면에서 다르며, 지구 환경 보전적인 측면에서 매우 유용한 연구라고 할 수 있다.

본 연구에서는 마이크로파 방식을 이용한 여러 렉테나 방식의 구조들에 대해 소개하고, 이를 이용한 에너지 수확 기술의 동향에 대해 살펴보고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 마이크로파 렉테나에 대한 소개

렉테나는 정류기(rectifier)와 안테나(antenna)를 합성한 말로 두 회로를 조합한 구조로 되어 있다. 렉테나라고 불리는 이 회로에서 정류기는 동작 주파수에 따라 AC-DC 정류회로 또는 RF-DC 정류회로라 부른다. <그림 1>은 마이크로파 방식을 이용한 렉테나의 기본구조이다. 대기를 통해 안테나로 수신된 마이크로파 신호를 다이오드 및 여파기로 구성된 정류기를 통과하면 DC 전력을 얻을 수 있다. 기존 연구들에서는 고조파 제어를 통한 RF-DC 변환효율의 향상을 위해 다이오드의 입/출력단에 용도에 맞는 여파기를 각각 사용했다. 정류기의 입력단에 여파기를 사용하면 다이오드의 비선형 동작으로 인하여 발생한 고조파가 안테나로 재방사 되는 것을 방지하고, 여파기의 종단 임피던스로 안테나와 다이오드의 임피던스를 정합할 수 있어 회로 구현의 용이성과 효율향상을



〈그림 1〉 일반적인 렉테나의 블록도

기대할 수 있다. 또한 출력단의 여파기를 사용하면 다이오드에서 발생한 고조파 성분을 차단하여 출력 직류전력의 분산을 막아 RF-DC 변환효율향상을 기대할 수 있다. 하지만 여파기를 이용하면 여파기의 종단 임피던스가 임의의 임피던스를 갖기 때문에 회로 구현이 복잡해지며, 큰 삽입손실은 시스템 효율에 악영향을 끼칠 수 있다. 또한 수신된 RF 전력은 직류전압을 포함하지 않기 때문에 다이오드의 DC 출력은 정류된 신호로부터만 얻을 수 있다. 따라서 고조파 전류 성분이 부하에서 소비되는 전력을 차단하면 RF-DC 변환효율을 향상시킬 수 있다.

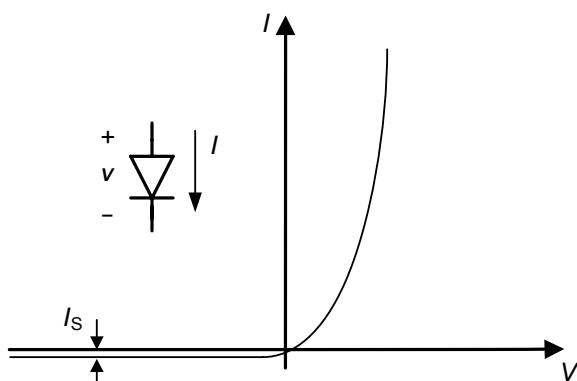
2. 다이오드의 비선형 특성

RF전력을 직류전력으로 변환하는 정류회로를 설계할 때 낮은 문턱전압과 작은 접합 커패시턴스를 가져 고주파 회로 설계에 적합한 쇼트키(Schottky)다이오드를 이용한다. 〈그림 2〉는 쇼트키 다이오드의 전압-전류 특성이며, 이는 식 (1)로 근사화할 수 있다.

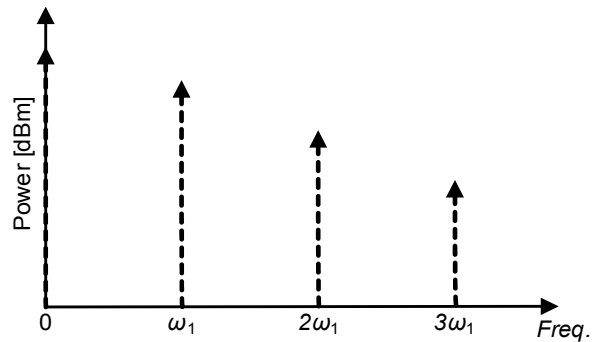
$$I(V) = I_S(e^{\alpha V} - 1) \quad (1)$$

식 (1)에서 다이오드 전압은 식 (2)와 같이 직류 바이어스 전압과 소신호 RF 전압으로 나타낼 수 있다.

$$V = V_0 + v_0 \cos \omega_0 t \quad (2)$$



〈그림 2〉 쇼트키 다이오드의 전압-전류 특성



〈그림 3〉 다이오드의 비선형 주파수 응답 특성

식 (1)을 Taylor 급수로 전개한 후 식 (2)를 대입하면 식 (3)과 같이 다이오드의 출력 전류를 나타낼 수 있다.

$$I(V) = I_0 + \frac{v_0^2}{4} G'_d + \left(v_0 G_d + \frac{v_0^3}{8} G''_d \right) \cos \omega_0 t + \frac{v_0^2}{4} G'_d \cos 2\omega_0 t + \frac{v_0^3}{24} G''_d \cos 3\omega_0 t \quad (3)$$

여기에서 G_d , G'_d , G''_d 각각 다이오드 전류의 1, 2, 3차도 함수이다. 식 (3)에서 다이오드의 정류작용으로부터 출력된 신호는 직류성분과 입력주파수 성분, 그리고 고조파 성분들이 동반됨을 확인할 수 있다. 다이오드의 비선형 동작으로 발생한 고조파 성분을 차단하기 위해 입력단에는 대역통과 여파기, 그리고 출력단에는 저역통과 여파기가 필요하다. 다이오드의 기생 성분에 의해 발생하는 고조파 성분들을 〈그림 3〉과 같이 나타낼 수 있는데, 다이오드 대신에 트랜지스터를 이용한 정류회로에서도 유사하게 고조파 성분들이 발생하며 시스템 효율 증대를 위해 고조파 차단이 필요하다.

3. 마이크로파 렉테나의 설계조건

높은 RF-DC 변환효율과 출력전압을 위한 마이크로파 렉테나용 정류기 설계방법들은 다음과 같다.

- 1) 마이크로파 전력 수집 능력을 향상하기 위한 복수의 안테나 또는 렉테나 배열
- 2) 다이오드의 문턱전압에 의한 손실을 최소화하기 위한 정류기 구조 선택 및 낮은 문턱전압을 갖는 소자(쇼트키 다이오드, 트랜지스터) 선택
- 3) 고조파가 안테나로 재방사 되는 것을 방지하기 위해 안테나와 정류기 사이에 대역통과여파기 설계
- 4) 부하저항에 다이오드의 비선형 성분에 의해 발생하는 고조파 성분을 차단하기 위한 저역통과여파기 설계

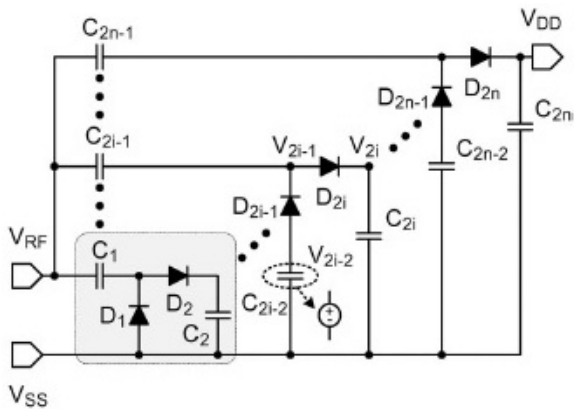
1)과 같이 복수의 안테나 또는 렉테나의 배열은 배열된 안테나와 정류기의 수만큼 큰 전압과 효율을 얻을 수 있지만, 센서나 수동형 RFID 태그와 같이 소형제작이 필요한 기기와 같이 공간제약이 생기는 회로에는 적합하지 않다. 2)는 RF 에너지 수확 시스템에서 수신 신호의 주파수가 높고 신호의 크기가 작기 때문에 시스템의 효율을 높이기 위해서는 낮은 문턱전압과 매우 빠른 스위칭 속도특성을 갖는 소자의 선택이 중요하다. 3)과 4)는 각각 동작주파수와 직류 성분만을 통과시키는 여파기를 사용해야 하는데, 여파기 종단 임피던스가 임의의 임피던스를 갖도록 설계해야하기 때문에 구현상의 복잡성 문제와 여파기의 삽입손실로 인하여 오히려 시스템 효율에 악영향을 미칠 수 있다. 따라서 이를 극복하기 위한 여러 연구들이 진행되었고, 이를 해결하기 위해 방법들을 다음 장에서 소개하고자 한다.

Ⅲ. 고효율 렉테나 설계기술

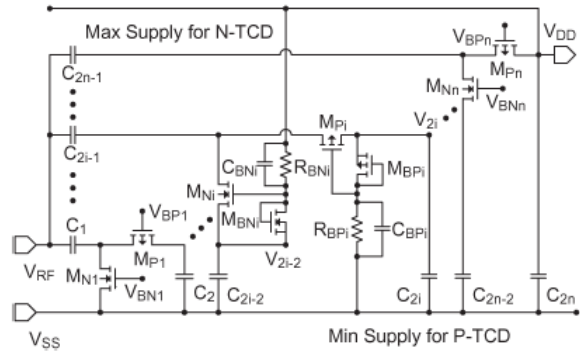
1. CMOS 기반의 다중 Villard 전압 정류기를 이용한 렉테나 설계

〈그림 4〉는 다단 Villard 전압 정류기 구조이다. Villard 전압 정류기는 높은 DC전압을 얻기 위한 구조로서, RF 신호로부터 얻을 수 있는 최대 전압을 단(stage) 수에 따라 체배하여 출력 직류 전압으로 변환하기 때문에 고효율 특성을 위한 적합한 구조이다. 에너지 수확 시스템에서는 작은 RF 입력 신호로 인해 RF-DC 변환 출력전압이 너무 작다. 따라서 작은 RF 신호로 큰 출력 전압을 얻기 위해 여러 단의 Villard 전압 체배기를 연결하였다.

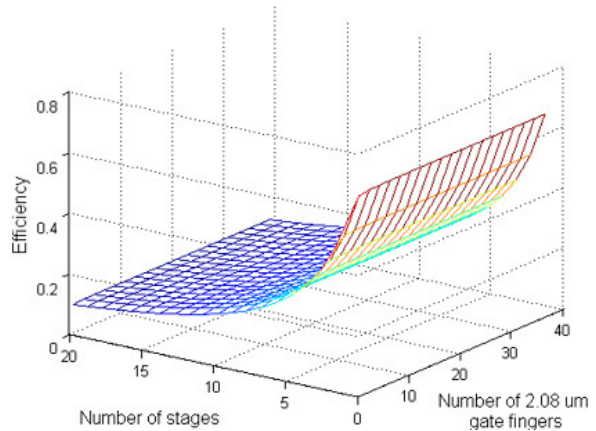
하지만 정류기의 단수를 높이면 회로의 크기는 커지기 때문에 단수를 무한정 늘릴 수 없다. 따라서 회로의 크기



〈그림 4〉 다단 Villard 전압 정류기



〈그림 5〉 CMOS를 이용한 다단 Villard 전압 정류기



〈그림 6〉 정류기의 단수와 게이트 핑거 개수에 따른 RF-DC 변환효율

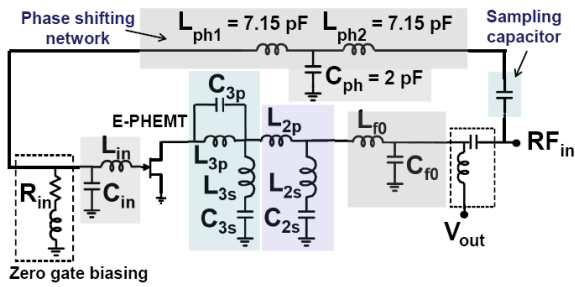
문제를 해결하기 위해 다중 전압 체배기는 일반적으로 CMOS 기반의 RF-DC 정류기 설계 시에 사용하게 된다. 〈그림 5〉는 CMOS 기반의 다중 Villard 전압 정류기의 회로도이다. MOSFET의 다이오드 특성을 이용하여 등가적으로 Villard 전압 정류기를 구현할 수 있다.^[10]

〈그림 6〉은 CMOS기반 Villard 전압 정류기의 단 수와 게이트 핑거 개수에 따른 RF-DC효율의 변화를 나타낸다. 정류기의 단수를 증가시키면 출력전압은 증가하게 되지만 효율이 급격하게 떨어지게 되므로, 적당한 출력전압과 효율의 trade-off가 단 수 설계 시에 고려되어야 한다.^[11]

2. E-pHEMT 기술을 적용한 렉테나 설계

RF 에너지 수확 시스템에서 해결해야 할 설계상의 문제점들은 다음과 같다.

- 1) 낮은 입력 전력 신호
- 2) 외부 바이어스를 사용할 수 없음
- 3) 높은 동작주파수에서 생기는 다이오드의 기생 커패시



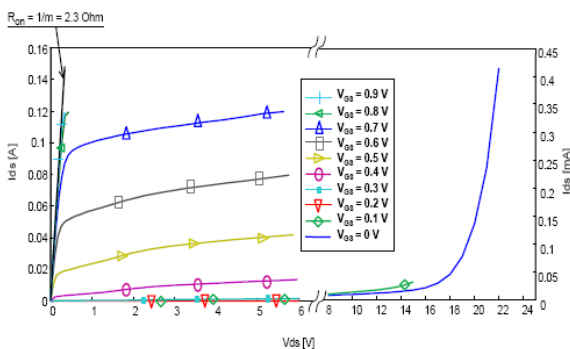
〈그림 7〉 E-pHEMT 기술을 적용한 정류기의 회로도

턴스에 의한 손실

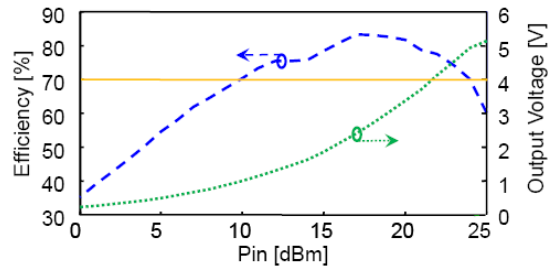
4) 전체 시스템 효율을 높이기 위한 최소한의 전력 소비

위의 문제들 때문에 정류기 설계 시에 높은 효율 및 출력 DC전압을 얻기 위해서는 적절한 다이오드의 선택이 매우 중요하다. RF 에너지 수확 시스템은 대기에 방사된 불요 전자 파들을 이용하여 DC 전압을 생성하는 시스템이기 때문에 신호의 크기가 매우 작고, 별도의 바이어스를 이용할 수 없다. 따라서 신호 레벨이 매우 작은 RF 신호들로부터 DC 전압을 얻기 위해서는 일반적으로 쇼트키 다이오드를 사용하는데, 쇼트키 다이오드는 문턱전압이 매우 낮기 때문에 별도의 바이어스 없이 작은 신호에 대해서도 DC 정류작용을 할 수 있다는 장점이 있다.^[8]

〈그림 7〉은 E-pHEMT 기술을 적용한 정류기 회로도이다. 낮은 문턱전압을 갖고, 작은 기생 커패시턴스를 갖는 쇼트키 다이오드를 사용하기 위하여 다양한 화합물 반도체공정을 이용한 쇼트키 다이오드의 사용 예이다. 최근 기술 개발된 E-pHEMT와 같은 공정을 이용하여 전자기동속도가 빠르고 동작주파수가 높은 트랜지스터를 사용함으로써 다이오드의 문제점들을 어느 정도 해결할 수 있다. 〈그림 8〉은 E-pHEMT의 I/V 특성 곡선으로 0.3V 정도의 문턱전압을 갖는 것을 알 수 있고, 기생저항성분 또한 매우 낮기 때문에, 전체 시스템 효율특성을 얻을 수 있다. 〈그림 9〉는 E-pHEMT를 적용한 정류기의 출력전압 및 효율특성을 나타낸다. E-pHEMT를 이용



〈그림 8〉 E-pHEMT(ATF54143)의 I/V 커브 특성



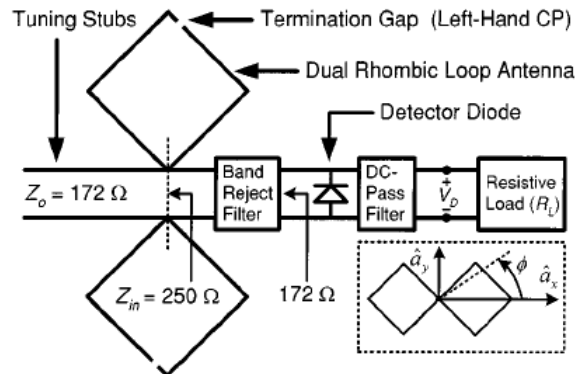
〈그림 9〉 E-pHEMT를 적용한 정류기의 출력전압 및 효율

한 정류기는 최대 효율이 80%이상, 25 dBm 입력 신호에 대해서 5 V 이상의 출력전압을 얻었다. 특히 0 dBm의 입력 신호에 대해서도 30 % 이상의 높은 효율을 얻었기 때문에, 낮은 문턱전압을 갖는 E-pHEMT 소자의 특성으로 인하여 낮은 입력 신호에 대해서도 좋은 효율 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

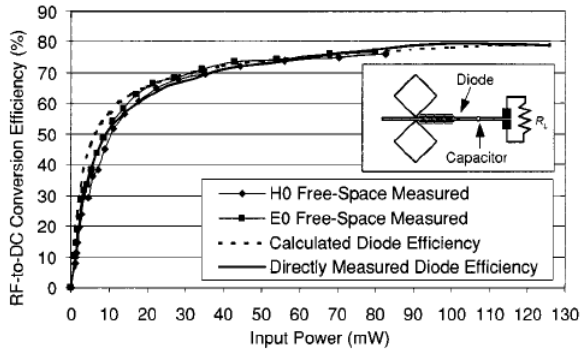
3. 높은 이득을 갖는 안테나를 이용한 렉테나 설계

기존에 렉테나에 사용되는 안테나들은 낮은 안테나 이득을 갖는 패치안테나 또는 다이폴안테나를 사용해왔다. 하지만 렉테나의 RF-DC 변환효율을 높이기 위해서는 높은 이득을 갖으면서 여러 대역을 수신할 수 있는 안테나가 필요하다.

〈그림 10〉은 마름모형 루프 안테나를 적용한 렉테나 회로도이다. 제안된 마름모형 루프 안테나는 이중대역을 통과하고 매우 높은 이득 특성을 얻는다. 이러한 높은 이득 특성을 갖는 안테나를 이용하면 같은 면적으로 더 높은 수신률을 갖게 되므로 회로 크기를 줄일 수 있다.^[12] 〈그림 11〉은 마름모형 루프 안테나를 적용한 렉테나의 효율 측정 결과이다. 높은 이득을 갖는 이중대역 안테나를 이용하여 자유공간 측정과 직접 측정, 계산된 값이 거의 일치하고, 높은 효율을 얻었음을 제시하였다.



〈그림 10〉 마름모형 루프 안테나를 적용한 렉테나 회로도

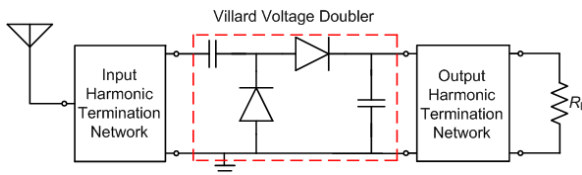


〈그림 11〉 마름모형 루프 안테나를 적용한 렉테나의 자유공간측정, 직접측정, 계산된 효율 결과

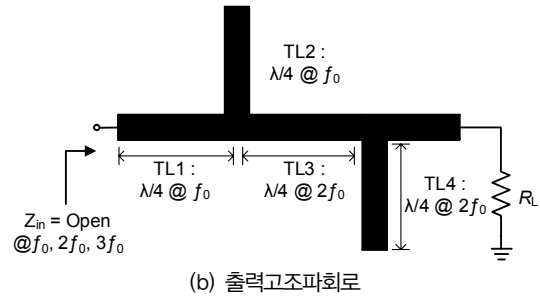
4. 고조파 차단회로를 이용한 렉테나 설계

〈그림 12〉는 입/출력 고조파 차단회로를 이용한 렉테나의 블럭도이다. 정류회로의 입출력단에 대역통과여파기와 저역 통과 여파기를 두는 대신에 다이오드에서 발생하는 기본파와 고조파를 차단하면서 입출력 정합 특성을 얻을 수 있는 고조파 차단 정합 회로를 둔 것이다. 정류회로의 출력 고조파 정합회로는 정류회로에서 발생하는 RF 입력 신호인 기본파와 고조파 성분들을 차단하고 부하에 직류 전력만을 전달하도록 한다. 그리고 입력 고조파 정합회로는 기본파에 대해서는 정합 특성을 제공하면서 정류회로에서 발생하는 고조파 성분이 안테나로 재방사되는 것을 막아 RF-DC 변환 효율을 높일 수 있다.^[13] 정류회로의 입력단 대역통과여파기와 출력단 저역 통과여파기를 제거함으로 전체 회로 크기의 소형화 변환효율의 증대 효과를 얻을 수 있다.

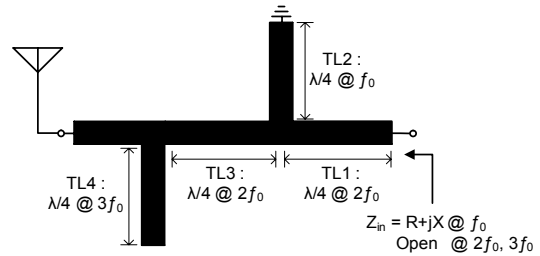
〈그림 13〉은 스텐브를 이용한 입/출력 고조파 차단회로도이다. 입력 고조파 차단회로의 경우에는 2차 및 3차 고조파에 대해서 개방 임피던스로 보이기 때문에 고조파 성분이 안테나로 재방사 되는 것을 막고, 동작 주파수 성분만을 통과시키도록 하였다. 또한 고조파 차단 회로를 이용하여 임피던스 정합을 할 수 있기 때문에 안테나와 정류기 사이의 임피던스 정합이 된다. 출력 고조파 차단회로의 경우는 기본파와 2 차 및 3차 고조파 주파수에서 모두 개방 임피던스로 보이도록 하기 때문에 부하에서는 순수하게 DC전압만을 얻을 수 있다. 이는 고조파 성분을 제거하여 에너지가 분산되는 것을 막음으로써



〈그림 12〉 입/출력 고조파 차단회로를 이용한 렉테나 블럭도

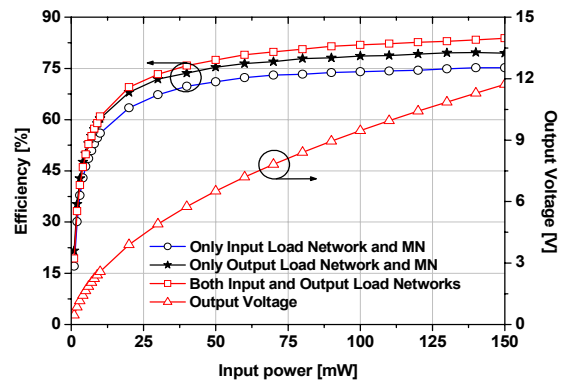


(b) 출력고조파회로



(a) 입력 고조파 회로

〈그림 13〉 스텐브를 이용한 입/출력 고조파 차단회로

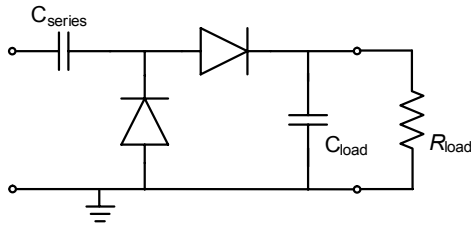


〈그림 14〉 입력단 고조파 차단 회로망의 EM시뮬레이션과 측정결과의 비교 (a) 전달 특성, (b) 입력 임피던스.

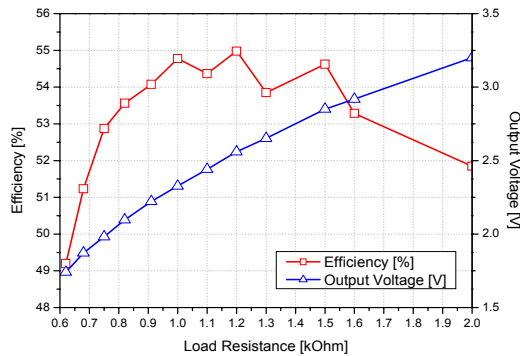
RF-DC 변환 효율을 높일 수 있다. 〈그림 14〉는 고조파 차단 회로를 이용한 정류기의 효율과 출력전압을 나타낸 것이다. 입/출력 고조파 차단회로가 있는 경우와 없는 경우의 효율 개선차이가 있음을 확인할 수 있다.

5. 최적의 소자 값에 따른 효율 및 출력전압

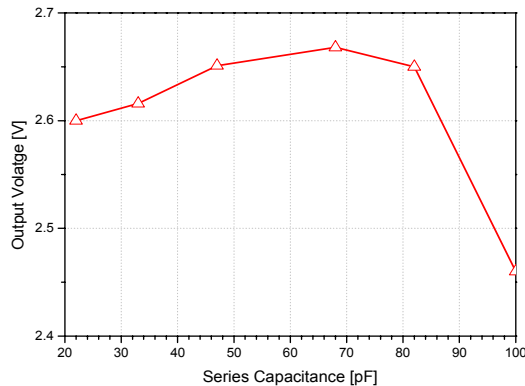
〈그림 15〉는 기본적인 Villard 전압 체배기의 구조이고, 〈그림 16〉은 부하저항 값에 따른 정류기의 변환 효율을 나타낸다. 부하 저항의 값에 따라서 정류기의 효율을 확인하여 최적의 부하저항을 선택할 수 있는데, 부하저항이 1 kΩ 까지는 효율이 지속적으로 증가하다가 1.1 kΩ 부터는 불안정하게 감소하는 모습을 보여주었다. 이를 통해 안정적으로 상승하는 1 kΩ 의 저항을 최적의 부하저항으로 선택할 수 있다. 또한 입력단 직렬 커패시턴스를 조정하면 얻을 수 있는 최적의 전



〈그림 15〉 기본적인 Villard 전압 체배기의 구조



〈그림 16〉 부하 저항 값에 따른 RF-DC 변환효율의 변화 (@Pin=10 dBm)



〈그림 17〉 부하 커패시턴스에 따른 RF-DC 변환효율의 변화 (@Pin=10 dBm)

압을 구할 수 있다. 〈그림 17〉은 약 68pF에서 최대의 전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 따라서 정류기에 포함되는 각 소자 값들을 조절함으로써 최적의 효율과 전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.^[13]

IV. 결론

본 연구에서는 렉테나 방식의 에너지 수확 시스템 기술에 대한 여러 가지 최근 연구 동향들에 설명하였다. 마이크로파 에너지 수확 시스템 기술을 이용하여 주변에서 버려지는 전파 에너지를 수확하여 새로운 에너지원으로 사용할 수 있는

렉테나는 작은 무선 전파 전력으로 소형 무선전자기기의 전원을 공급할 수 있다. 이를 위해서는 주요 부품인 낮은 문턱 전압을 갖는 다이오드의 소자개발하기 위해 E-pHEMT와 같은 새로운 반도체 공정기술의 개발이 필요하며, 고조파 정합 회로와 같은 회로기술들도 효율 개선을 위해 필요하다. 그리고 소형 무선전자기기에 적용하기 위해 CMOS 공정을 이용하여 에너지 수확 시스템을 기존 회로와 일체화한다면 여러 가지 파생 효과를 기대할 수 있을 것이다. 에너지 수확 시스템 기술을 통해 사무실, 학교, 공공장소 등에서 전원코드가 없이 자동적인 전원공급을 통해 무선 전자기기의 휴대성이 더욱더 커질 것이다.

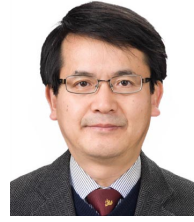
참고문헌

- [1] T. Sekitani, *et al.*, "A large-area wireless power transmission sheet using printed organic transistors and plastic MEMS switches," *Nat. Mater.*, Vol.6, pp.413-417, Jun., 2007.
- [2] W. Stewart, "The Power to Set You Free," *Science*, Vol.317, pp.55-56, Jul., 2007.
- [3] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer," *Ann. Phys.*, Vol.323, pp.34-48, Apr., 2007.
- [4] MIT, *Technology Review*, Mar./Apr., 2008.
- [5] P. E. Glaser, "Power from the Sun: Its Future," *Science*, Vol.162, pp.857-886, Nov., 1968.
- [6] J. U. M. Araiza, "Wireless transmission of power for sensors in context aware spaces," *Master of Science in Media Arts and Sciences at MIT*, Jun., 2002.
- [7] Y. H. Suh and K. Chang, "A Novel Low-Cost High-Conversion Efficiency Microwave Power Detector Using GaAs FET," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol.44, No.1, pp.29-31, Nov., 2004.
- [8] C. Gomez, *et al.*, "A High Efficiency Rectenna Element using E-pHEMT Technology," *Proc. of 12th GAAS Symposium*, pp.315-318, 2004.
- [9] H. Jabbar, *et al.*, "RF Energy Harvesting System and Circuis for Charging of Mobile Devices," *IEEE Trans. on Consumer Electronics*, Vol.56, No.1, Feb., 2010.
- [10] Hongcheng Xu, *et al.*, "A Temperature and Process Compensated Ultralow-Voltage Rectifier in Standard Threshold CMOS for Energy-Harvesting Applications," *IEEE Trans. on Circuit and Systems*, Vol.58, No.12, Dec., 2011.
- [11] T. S. Salter, "Low Power Smartdust Receiver with



Novel Applications and Improvement of an RF Power Harvesting Circuit," Ph.D Thesis, University of Maryland, USA, 2009.

- [12] B Strassner, "5.8-GHz Circularly Polarized Rectifying Antenna for Wireless Microwave Power Transmission," *IEEE Trans. on Microwave Theory and Techn.*, Vol.50, No.8, Aug., 2002.
- [13] Girdhari Chaudhary, Phirun Kim, Yongchae Jeong, and Jae-Hun Yoon, "Design of High Efficiency RF-DC Conversion Circuit Using Novel Termination Networks for RF Energy Harvesting System," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, Vol.54, No.10, pp.2330-2335, Oct., 2012.



정용채

1989년 2월 서강대학교 전자공학과(공학사).
 1991년 2월 서강대학교 전자공학과(공학석사).
 1996년 8월 서강대학교 전자공학과(공학박사).
 1991년 2월~1998년 2월 삼성전자(주) 정보통신본부 선임 연구원.
 1998년 3월~현재 전북대학교 전자공학부 교수.
 2006년 7월~2007년 12월 Georgia Institute of Technology 방문연구교수.
 2009년 3월~2010년 12월 전북대학교 반도체설계교육 (IDEC)지역센터 센터장.
 <관심분야> RF 및 Microwave 회로 해석 및 설계