

무선 전력 전송 시스템을 위한 회로

I. 서론

최근 무선 전력 전송 시스템의 효율 및 전송 거리는 자기 공명 기술^[1]의 적용으로 크게 향상되었고 휴대폰, 착용 가능한 의료 기기, 전기 자동차 등에 널리 적용될 수 있다^[2]. 비록 자기 공명 기술의 적용으로 무선 전력 전송 시스템의 공진기(resonator) 효율이 향상되었지만 제한된 무선 전력 송신기 및 무선 전력 수신기의 효율은 전체 무선 전력 전송 시스템의 효율을 낮추게 된다. 따라서 무선 전력 송신기 및 무선 전력 수신기의 효율 향상을 위한 회로 기술이 연구되어야 한다.

무선 전력 전송 시스템의 기본 구조는 <그림 1>과 같다. 전력 공급원(power outlet)으로부터 전력을 공급받아 무선 전력 송신기(wireless power transmitter)에서 공진기로 전력을 전달하고 이는 무선 전력 수신기(wireless power receiver)로 공급된다. 수신된 전력은 배터리 충전기(battery charger)에 알맞는 전압으로 가변되어 전자기기의 배터리로 공급된다.

무선 전력 전송 기술의 지속적인 발전으로 최근 휴대폰, 착용 가능한 의료 기기, 전기 자동차 등에 널리 적용되고 있으며 향후 IoT 분야로의 확장이 기대된다.

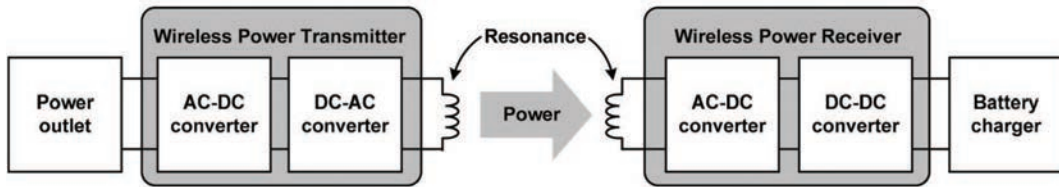
무선 전력 송신기는 전력 공급원의 전압을 받아 직류-교류 전압 변환기(DC-AC converter)에서 필요로 하는 직류 전압을 교류-직류 전압 변환기(AC-DC converter)에서 생성해 준다. 생성된 전압을 이용하여 직류-교류 전압 변환기는 무선 전력 전송 시스템에 맞는 주파수의 전력을 공진기로 내보내게 된다. 이때 직류-교류 전압 변환기를 전체 무선 전력 전송 시스템에 알맞



문 영 진
한양대학교
융합전자공학부



유 창 식
한양대학교
융합전자공학부



〈그림 1〉 무선 전력 전송 시스템의 기본 구조

은 구조를 선택하여 설계하는 것이 중요하다.

무선 전력 수신기는 교류-직류 전압 변환기에서 수신된 AC 전력을 받아 직류 전압으로 변환하여 직류-직류 전압 변환기 (DC-DC converter)로 공급한다. 이때 입력된 AC 전력의 주파수가 일반적인 전력 공급원의 50~60Hz 보다 훨씬 높기 때문에 교류-직류 전압 변환기의 높은 효율을 위한 기술을 필요로 한다. 변환된 직류 전압은 다시 직류-직류 전압 변환기로 공급된다. 직류-직류 전압 변환기는 배터리 충전기에 알맞은 안정된 전압을 생성하여 전달한다. 그리고 무선 전력 수신기의 추가적인 고려사항은 시스템의 크기 (form-factor) 이다. 무선 전력 수신기가 휴대폰 및 착용 가능한 의료 기기 등의 크기가 작은 시스템에 적용되기 위해서는 필수적으로 무선 전력 수신기의 크기가 작도록 설계해야 한다.

이뿐만 아니라 무선 전력 전송 시스템은 과전력, 발열 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 무선 전력 전송 시스템의 안정적인 동작을 위해 과전력, 발열 등의 상황에서 무선 전력 전송 시스템을 보호하기 위한 방법들에 대해 소개한다.

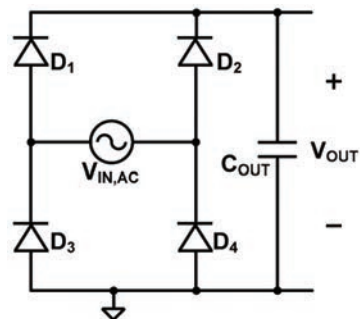
2장 1절에서는 무선 전력 송신기를 구성하는 블록들의 구조와 높은 효율을 얻기 위한 방법을 소개하고 2절에서는 무선 전력 수신기를 구성하는 블록들을 소개한다. 3절과 4절에서는 배터리 충전기와 안정된 무선 전력 송신기 및 수신기 동작을 위한 보호 회로에 대해서 설명한다. 3장에서는 무선 전력 수신기의 개발 사례를 소개하고 마지막으로 4장에서 결론으로 끝을 맺는다.

II. 무선 전력 전송 시스템 회로 연구

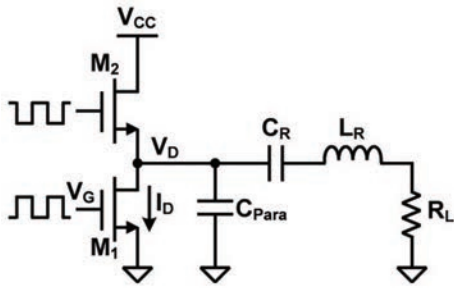
1. 무선 전력 송신기

일반적으로 직류-교류 전압 변환기의 출력 주파수, 즉 공진기의 주파수는 전력 공급원에서 공급하는 50~60Hz의 주파수보다 높고 사용 규제가 완화된 industrial, scientific, and medical (ISM) 대역의 주파수를 사용한다. 따라서 전력 공급원의 출력을 곧바로 공진기로 입력하지 않고 교류-직류 전압 변환기를 통해 무선 전력 송신기의 직류-교류 전압 변환기에서 필요로 하는 알맞은 직류 전압으로 가변 하여 공급한다.

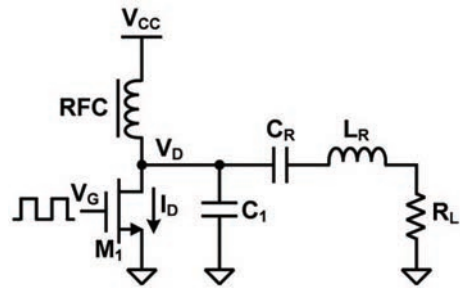
교류-직류 전압 변환기는 사용자의 안전을 위해서 전파 정류 회로 (full-wave rectifier)와 절연형 flyback 혹은 forward 컨버터로 구성할 수 있다. 향후 2절에서 설명할 교류-직류 전압 변환기와 달리 무선 전력 송신기의 교류-직류 전압 변환기는 입력 전압이 높고 주파수가 낮기 때문에 〈그림 2〉와 같이 4개의 다이오드와 1개의 캐패시터로 구성하는 전파 정류 회로를 적용하여 높은 효율을 기대 할 수 있다. 그리고 무선 전력 송신기는 무선 전력 수신기와 달리 크기의 제약이 비교적 작기 때문에 크기가 크고 좋은 성능을 갖는 트랜지스터와 flyback 혹은 forward 제어 집적 회



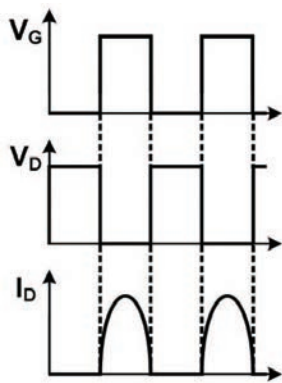
〈그림 2〉 전파 정류 회로



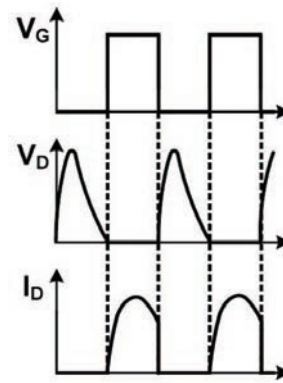
〈그림 3〉 Class-D 전력 증폭기 회로



〈그림 5〉 Class-E 전력 증폭기 회로



〈그림 4〉 Class-D 전력 증폭기의 동작 파형



〈그림 6〉 Class-E 전력 증폭기의 동작 파형

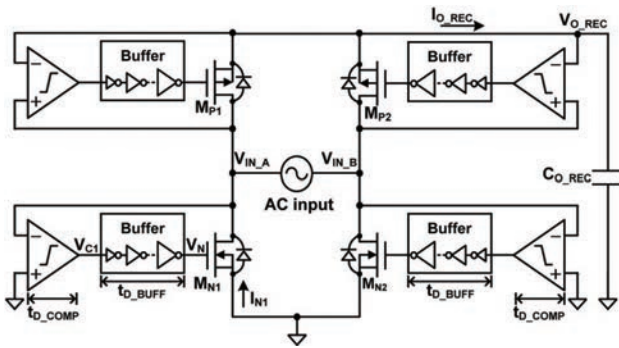
로를 적용하여 고효율의 교류-직류 전압 변환기를 구성할 수 있다.

이와 달리 직류-교류 전압 변환기는 구조 및 주파수 선택에 따라 상이한 효율을 가질 수 있기 때문에 다양한 연구를 필요로 한다. 직류-교류 전압 변환기는 직류 전압으로부터 전력을 공급받아 입력된 신호를 증폭하여 부하에 전력을 전달하므로 전력 증폭기 (power amplifier)라고도 표현한다. 일반적으로 알려진 전력 증폭기는 class-A, -B, -AB 등의 리니어 (linear) 전력 증폭기와 class-D, -E 등의 스위칭 (switching) 전력 증폭기로 구분된다. 리니어 전력 증폭기는 선형성이 좋아 진폭을 모듈레이션 하거나 진폭과 위상을 모듈레이션 하는 경우에 적용하기 좋지만 트랜지스터의 드레인-소스 전압과 트랜지스터에 흐르는 전류가 겹치는 구간만큼의 전력 손실이 발생하여 높은 효율을 얻기 어렵다. 일반적으로 무선으로 전력을 전송할 때는 진폭이나 위상을 모듈레이션하지 않고 높은 효율을 얻는 것이 가장 중요한 성능 지표이므로 높은 효율을 기대할 수

있는 스위칭 전력 증폭기를 무선 전력 송신기에 적용해야 한다.

〈그림 3〉과 〈그림 4〉는 각각 class-D 전력 증폭기의 회로와 동작 파형이다. 그리고 〈그림 5〉와 〈그림 6〉은 각각 class-E 전력 증폭기 회로와 동작 파형이다. Class-D 및 class-E 전력 증폭기 모두 트랜지스터의 드레인-소스 전압과 트랜지스터에 흐르는 전류가 겹치는 구간이 없기 때문에 이로 인한 전력 손실이 발생하지 않으므로 높은 효율을 얻을 수 있게 된다. Class-D 전력 증폭기는 class-E 전력 증폭기에 비해 트랜지스터의 드레인-소스 전압이 작게 인가되므로 트랜지스터 선택 시 유리할 수 있다. 일반적으로 높은 전압까지 견디는 트랜지스터의 경우 낮은 전압까지 견디는 트랜지스터보다 온 저항이 높기 때문에 트랜지스터의 드레인-소스 전압 부담이 작은 class-D 전력 증폭기가 온 저항 성분으로 인한 도통 전력 손실 면에서 유리할 수 있다.

하지만 class-D 전력 증폭기의 경우에는 트랜지스터

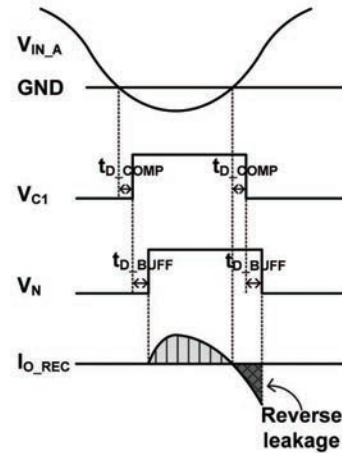


〈그림 7〉 능동형 정류기의 구조

M_1 과 M_2 가 동시에 닫혀 전원 전압 V_{CC} 와 그라운드 전압 GND가 short 되는 경우 발생할 수 있는 전력 누설을 방지하기 위해 (논-오버랩) non-overlap 신호 발생기를 필요로 한다. 또한 트랜지스터의 기생 캐패시터 C_{Para} 를 매 스위칭 주기마다 충전 및 방전 시켜야 하는데 이로 인해 스위칭 전력 손실이 발생하게 되어 효율을 감소시킨다. 이와 달리 class-E 전력 증폭기는 기생 캐패시터 성분을 이용할 수 있기 때문에 더 높은 효율을 기대할 수 있다. 그리고 class-D 전력 증폭기의 경우 2개의 트랜지스터를 구동해야 하기 때문에 2배의 구동 전력 손실이 발생한다. 앞서 설명한 class-D 전력 증폭기의 스위칭 및 구동 전력 손실은 주파수와 비례하기 때문에 낮은 주파수에서는 class-D 전력 증폭기가 더 높은 효율을 가질 수 있고 높은 주파수에서는 class-E 전력 증폭기로 직류-교류 전압 변환기를 구성하는 것이 높은 효율을 얻을 수 있다. 따라서 무선 전력 전송 시스템에서 목표로 하는 주파수 및 전압에 따라서 두 전력 증폭기의 효율을 비교하여 선정하는 것이 바람직하다.

2. 무선 전력 수신기

1절에서 설명한 바와 같이 교류-직류 전압 변환기는 〈그림 2〉와 같이 4개의 다이오드와 1개의 캐패시터로 구성된 전파 정류 회로를 고려할 수 있다. 하지만 무



〈그림 8〉 능동형 정류기의 파형

선 전력 송신기의 교류-직류 전압 변환기의 상황과 달리 입력되는 신호의 작은 전압과 높은 주파수가 효율에 큰 악영향을 끼치게 된다. 예를 들어 입력 교류 전압이 $100V_{PK-PK}$ 이고 다이오드의 전압 강하가 $0.7V$ 라면 98.6%의 전력 변환 효율을 얻을 수 있다. 하지만 입력 교류 전압이 $10V_{PK-PK}$ 라면 효율이 86%로 낮아지게 된다. 뿐만 아니라 다이오드의 역방향 회복 시간 (reverse recovery time)으로 인해 효율이 감소된다. 역방향 회복 시간은 다이오드가 순방향 도통 상태에서 역방향 차단 상태로 변했을 때 전류가 바로 0A로 되는 것이 아니라 소수 캐리어의 축적 전하 때문에 캐소드에서 애노드로

전류가 흐르는 상태를 말하는 것으로 일반적으로 P-N 다이오드의 경우 수십~수백 ns의 값을 갖기 때문에 수 MHz 이상으로 동작하는 무선 전력 전송 시스템에 적용하기 어렵다.

따라서 무선 전력 수신기의 교류-직류 전압 변환기는 다이오드의 전압 강하가 P-N 다이오드에 비해 작고 역방향 회복 시간이 수십~수백 ps로 빠른 쇼트키 (schottky) 다이오드를 적용하여 구성할 수 있다. 하지만 쇼트키 다이오드 역시 전압 강하가 있기 때문에 이를 제거하기 위해 온 저항이 거의 0Ω 에 가까운 트랜지스터를 이용하여 다이오드 동작을 수행하게 한다면

**최근 무선 전력 전송 시스템의
효율 및 전송 거리는 자기 공명 기술의
적용으로 크게 향상되고 있으며
하드웨어의 효율도 높아지고 있는
추세이다.**

0V의 전압 강하를 얻을 수 있게 되므로 교류-직류 전압 변환기의 효율을 극대화 할 수 있다. <그림 7>과 <그림 8>은 각각 능동형 정류기의 구조와 동작 파형이다. 트랜지스터를 다이오드처럼 동작시키기 위해서 비교기를 필요로 한다.

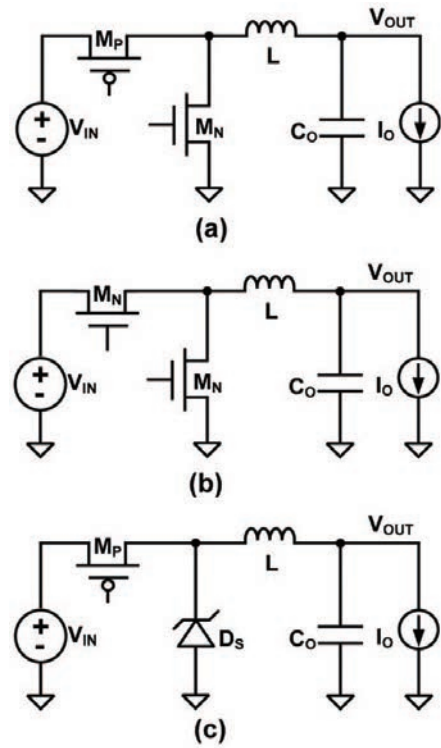
만약 노드 $V_{IN,A}$ 전압이 GND 전압보다 낮은 경우 비교기 (comparator)의 출력이 high가 되고 구동 버퍼 (buffer)를 통해 트랜지스터를 턴 온 (turn-on) 시키고, 반대로 노드 $V_{IN,A}$ 전압이 GND 전압보다 높은 경우에는 트랜지스터를 턴 오프 (turn-off) 시키는 동작을 수행하여 다이오드처럼 동작할 수 있도록 한다. 일반적으로 능동형 정류기의 효율을 높이기 위해 트랜지스터의 크기를 키워 온 저항을 낮추는데 이로 인해 트랜지스터가 큰 게이트 캐패시턴스를 갖기 때문에 비교기의 출력을 곧바로 트랜지스터의 게이트에 연결하지 않고 구동 버퍼를 사용하여 트랜지스터를 동작 시킨다. 능동형 정류기 효율은 다음과 같은 수식으로 정의할 수 있다.

$$Efficiency = \frac{V_{OUT} \cdot I_{OUT}}{V_{OUT} \cdot I_{OUT} + P_{LOSS,cond} + P_{LOSS,driv}} \quad (1)$$

$$P_{LOSS,cond} = 4I_{N1,RMS}^2 \cdot R_{ON} \quad (2)$$

$$P_{LOSS,driv} = 4C_{gate} \cdot V_{O,REC}^2 \cdot f_{RES} \quad (3)$$

위 수식에서 $P_{LOSS,cond}$ 는 도통 (conduction) 전력 손실, $P_{LOSS,driv}$ 는 구동 (driving) 전력 손실, R_{ON} 은 트랜지스터 M_{N1} 의 온저항, C_{gate} 는 트랜지스터의 게이트 캐패시턴스, f_{RES} 는 공진 주파수를 의미한다. 간략한 효율 분석을 위해 파워 트랜지스터의 드레인-소스 간의 기생 캐패시턴스로 인한 전력 손실, 인덕터의 직류 저항 (DC Resistance)으로 인한 전력 손실 등은 생략하였다. 도통 전력 손실 (conduction power loss)을 줄여서 능동형 정류기의 효율을 높이기 위해서는 트랜지스터의 온 저항을 줄여야 한다. 일반적으로 온 저항을 줄이는 방법은 트랜지스터의 폭 (width)을 키우는 방법이 존재한다. 하지만 이는 게이트 캐패시턴스를 키우고 이로 인해 구동 전력 손실이 증가하게 된다. 반대로 구동 전력 손실을 줄이기 위해 트랜지스터의 사이즈를 작게



<그림 9> 스위칭 직류-직류 전압 변환기의 파워 트랜지스터 구조

설계한다면 트랜지스터의 온 저항이 증가하고 이로 인해 도통 전력 손실이 증가하게 된다. 따라서 능동형 정류기의 최적 효율을 얻기 위해서는 다수의 시뮬레이션을 통해 도통 및 구동 전력 손실의 합이 최소가 되도록 설계를 해야 한다.

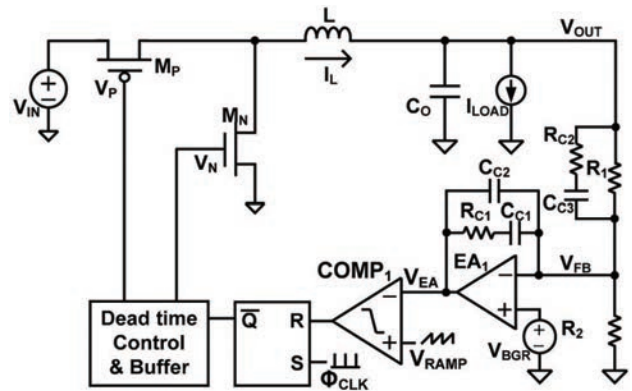
앞서 설명한 도통 및 구동 전력 손실 뿐만 아니라 비교기 및 구동 버퍼의 시간 지연 (time delay)로 인해 발생하는 역 누설 전류 (reverse leakage current)가 효율을 감소시키는 원인이 된다. <그림 8>의 파형에서 볼 수 있듯이 노드 $V_{IN,A}$ 전압이 GND 전압보다 낮아진 순간으로부터 $t_{D,COMP}$ 만큼의 시간 지연 이후 구동 버퍼로 입력되고 다시 $t_{D,BUFF}$ 만큼의 시간 지연 이후 트랜지스터가 켜지거나 꺼지는 동작이 수행된다. 여기서 늦게 꺼지는 동작으로 인해 역 누설 전류가 발생하게 된다. 역 누설 전류가 발생하면 능동형 정류기의 효율을 매우 악화시키기 때문에 역 누설 전류를 방지하기 위한 연구가 다수 발표되었다^[3-5].

만약 회로 기술을 적용하여 역 누설 전류를 방지하고 도통 및 구동 전력 손실의 합이 가장 낮은 상황일지라도 항상 능동형 정류기가 쇼트키 다이오드를 적용하여 구성한 정류기보다 높은 효율을 갖는 것은 아니다. 그 이유는 구동 전력 손실이 공진 주파수에 비례하기 때문이다. 만약 공진 주파수가 낮다면 능동형 정류기가 높은 효율을 가질 수 있지만 반대로 공진 주파수가 높은 상황에서는 쇼트키 다이오드로 구성된 정류기가 더 높은 효율을 가질 수 있다. 따라서 공진 주파수에 따라 적합한 정류기를 선택하여 최적의 효율을 얻어야 한다.

그리고 무선 전력 수신부는 직류-직류 전압 변환기를 필요로 한다. 교류-직류 전압 변환기의 출력이 곧바로 배터리 충전기에 입력되지 않는 이유는 일반적으로 배터리 충전기가 일정한 전압을 필요로 하는 반면 교류-직류 전압 변환기의 출력 전압은 무선 전력 송신기와 수신기의 거리 변화 등의 요인으로 달라질 수 있기 때문이다. 만약 무선 전력 송신기와 수신기의 거리가 증가하면 공진기의 효율 감소에 의해 교류-직류 전압 변환기의 입력 전압이 낮아지고 이로 인해 출력 직류 전압이 낮아지기 때문이다. 만약 교류-직류 전압 변환기의 출력을 가변 하는 기술이 적용된다면 해도 이는 교류-직류 전압 변환기의 효율을 감소시킬 수 있기 때문에 효율이 가장 우선시 되는 무선 전력 전송 시스템에 적합하지 않다. 따라서 안정된 출력 전압을 배터리 충전 회로에 공급하기 위해서 직류-직류 전압 변환기가 필요하게 된다.

직류-직류 전압 변환기는 일반적으로 저 전압 강하 (low-drop-out) 레귤레이터와 같은 리니어 직류-직류 전압 변환기와 스위칭 직류-직류 전압 변환기로 구분된다. 리니어 직류-직류 전압 변환기는 폼 팩터 (form-factor) 면에서 스위칭 직류-직류 전압 변환기보다 유리하지만 더 낮은 효율을 갖기 때문에 무선 전력 전송 시스템에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 높은 효율을 중점에 두고 스위칭 직류-직류 전압 변환기에 대하여 설명을 하고자 한다.

스위칭 직류-직류 전압 변환기 설계 시 가장 먼저 고려해야 할 사항은 파워 트랜지스터를 어떤 소자를 사용



〈그림 10〉 스위칭 직류-직류 전압 변환기의 기본 구조

하느냐가 중요하다. 일반적으로 pMOS 파워 트랜지스터의 온 저항은 nMOS 파워 트랜지스터보다 2배 이상 큰 온 저항을 갖는다. 따라서 〈그림 9(a)〉와 같이 입력 전압과 파워 인덕터 사이에 놓이는 high side 스위치 및 파워 인덕터와 그라운드 사이에 놓이는 low side 스위치 모두 nMOS 파워 트랜지스터를 사용하는 경우 가장 높은 효율을 얻을 수 있다. 하지만 high side 스위치로 사용되는 nMOS 파워 트랜지스터를 구동하기 위해서는 입력 전압보다 높은 전압이 필요하게 된다. 이를 위해서는 bootstrap 구동회로가 필요하게 된다. 하지만 일반적으로 bootstrap 구동회로는 최초 한번 이상의 low side 트랜지스터의 턴 온 동작을 필요로 하고 만약 입력되는 전압이 낮아 완전히 턴 온 동작을 필요할 때 bootstrap 구동회로의 캐패시터를 주기적으로 충전해줘야 하는 문제를 가질 수 있다. 그리고 bootstrap 회로의 경우 1개의 외부 캐패시터를 필요로 하므로 이로 인한 전체 시스템의 폼 팩터 증가를 줄이고 싶다면 〈그림 9(b)〉와 같이 high side 스위치를 pMOS 파워 트랜지스터로 대체 할 수 있다. 〈그림 9(c)〉와 같이 low side 스위치로 전압 강하가 작은 쇼트키 다이오드를 사용할 수도 있겠지만 무선 전력 전송 시스템의 공진 주파수를 직접 입력으로 받는 교류-직류 전압 변환기와 달리 직류-직류 전압 변환기는 내부 클럭에 동기화하여 동작하는데 이때 일반적으로 공진 주파수보다 낮은 주파수로 동작하기 때문에 구동 전력 손실이 크지 않아 nMOS 파워 트랜지스터를 사용하는 것이 유리하

다. 물론 교류-직류 전압 변환기와 마찬가지로 파워 인덕터의 사이즈를 줄이기 위해 직류-직류 전압 변환기의 스위칭 주파수를 높게 설정하는 경우 쇼트키 다이오드를 사용하는 것이 효율 측면에서 더 유리할 수 있다.

〈그림 10〉은 high side 스위치로 pMOS 트랜지스터를 적용하고 low side 스위치로 nMOS 트랜지스터를 적용하여 구성된 스위칭 직류-직류 전압 변환기의 기본 구조이다. 출력 전압을 저항 R_1 과 R_2 로 분배한 V_{FB} 전압과 기준 전압 V_{BGR} 의 차를 증폭하고 램프 신호 V_{RAMP} 와 비교하여 pMOS 및 nMOS 파워 트랜지스터가 턴 온 되는 듀티 (duty)를 조절하여 출력 전압 V_{OUT} 을 레귤레이션 시키는 동작을 수행한다. 이때 데드 타임 제어부 (dead time control)는 두 파워 트랜지스터가 동시에 턴 온 되어 입력 전압 V_{IN} 과 GND가 쇼트되는 현상을 방지하는 역할을 수행한다.

3. 배터리 충전기

무선 전력 전송을 적용하는 전자기기가 배터리로부터 전력을 공급받아 동작하는 시스템이라면 배터리를 충전하는 회로가 추가적으로 필요하게 된다. 배터리 충전 회로는 무선 전력 수신기의 직류-직류 전압 변환기와 마찬가지로 리니어 배터리 충전기와 스위칭 배터리 충전기가 존재한다. 최신 스마트폰 등의 휴대용 기기는 높은 전력 효율 및 발열 문제 완화를 위해 대다수 스위칭 배터리 충전기를 적용하고 있다. 무선 전력 수신기의 직류-직류 전압 변환기가 출력 전압을 기준 전압과 비교해서 동작한다면 배터리 충전기는 출력 전류를 기준 전압과 비교하는 원리로 동작한다. 이외의 다른 블록의 동작 원리는 동일하기 때문에 무선 전력 전송 시스템 설계 시 직류-직류 전압 변환기와 배터리 충전기를 하나의 블록으로 구성할 수 있고 이를 통해 전체 무선 전력 시스템의 효율을 개선할 수 있다.

4. 보호 회로

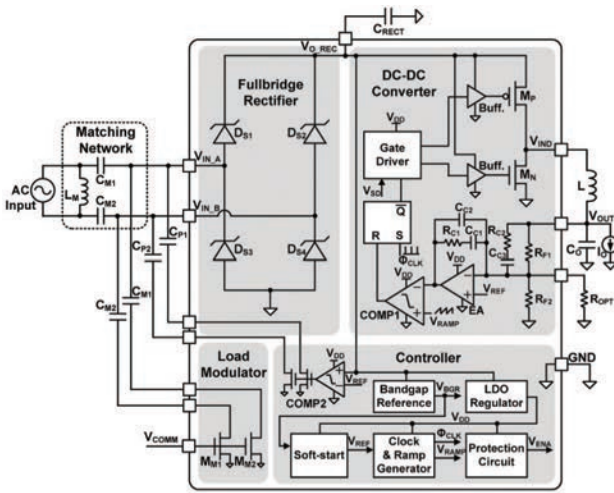
무선 전력 전송 시스템은 전력을 전달하며 전송받기 때문에 감전, 발열, 배터리 파괴 등의 위험성을 내포하고 있다. 이러한 문제들을 해결 및 보완하기 위하여 보호 회로들을 고려해야 한다.

가장 먼저 무선 전력 수신기로 과도한 전력이 입력 되는 경우 고려해야 한다. 무선 전력 전송 초기 환경을 가정하고 배터리로 전력이 원활히 공급되지 않은 상태라면 과도한 전력이 무선 전력 수신기로 공급될 수 있는 문제가 있다. 또한 멀티 충전에서 단일 충전으로 전환 시 과도한 전력이 무선 전력 수신기로 공급될 수 있다. 이는 교류-직류 전압 변환기의 쇼트키 다이오드 혹은 트랜지스터 등을 파괴시킬 수 있다. 이러한 문제를 해결 하기 위해서는 과도하게 전송된 파워를 제한하는 기법이 필요하게 된다. 이외에도 무선 전력 전송 시스템에서는 온도 보호 회로가 필요하다. 전력을 전달받거나 전송하는 상황에서 발생하는 전력 손실은 열을 발생시키고 높아진 온도는 회로 혹은 소자 등에 충격을 가하고 잘못된 동작을 야기할 수 있다. 무선 전력 수신기의 온도가 과도하게 상승했을 때 가장 좋은 방법은 무선 전력 송신기에서 전달하는 전력량을 줄이는 것이다. 따라서 이러한 기법을 적용하기 위해서는 무선 전력 수신기가 무선 전력 송신기와 통신할 수 있어야만 한다. 과 전압 및 온도 보호 회로 뿐만 아니라 회로의 전압 및 전류 허용 레벨을 넘지 않도록 과 전압 및 과 전류 회로가 필요하게 된다.

**무선 전력 전송 시스템은
무선 전력 송신기, 무선 전력 수신기,
배터리 충전기 및 보호 회로 등으로
이루어져 있다.**

Ⅲ. 무선 전력 수신기 개발 사례

〈그림 11〉은 집적회로로 개발된 무선 전력 수신기의 블록 다이어그램이다. 본 개발 사례는 2012년 european microwave conference에서 발표한 내용이며 일부를 소개하고자 한다^[6]. 교류-직류 전압 변환기는 4개의 쇼트키 다이오드와 1개의 외부 캐패시터로 구성하였다. 시뮬레이션 수행 결과 해당 공진 주파수에



〈그림 11〉 개발된 무선 전력 수신기의 블록 다이어그램

서 능동형 정류기보다 쏘트키 다이오드를 적용하였을 때 더 높은 효율을 얻을 수 있었다. 본 무선 전력 수신기의 공진 주파수는 13.56MHz의 ISM 대역의 주파수이고 2.8W의 최종 출력 전달 상황에서 시뮬레이션을 수행하였다. 교류-직류 전압 변환기에 의해 직류 전압으로 정류된 후에 직류-직류 전압 변환기를 통해 안정적인 전압을 배터리 충전기로 공급하게 된다.

직류-직류 전압 변환기는 high side 스위치로 pMOS 파워 트랜지스터를 적용하였고 low side 스위치로 nMOS 파워 트랜지스터를 적용하였다. High side 스위치로 nMOS 파워 트랜지스터를 사용하는 경우에 bootstrap 구동 회로를 구현하기 위해서 외부 캐패시터가 필요하기 때문에 폼 팩터를 증점으로 두어 pMOS 파워 트랜지스터를 사용하였다. 고속 응답 속도를 갖도록 캐패시터 3개와 저항 2개를 추가한 type-III 보상 회로를 적용하였다.

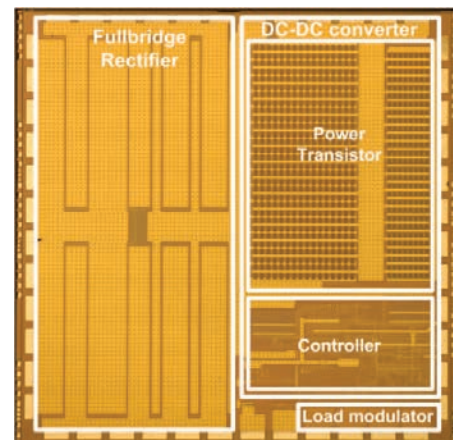
스위칭 직류-직류 전압 변환기의 내부 컨트롤 회로는 최대 공급 전압이 5V인데 반해 직류-직류 전압 변환기의 입력 전압은 5.5~12V를 갖기 때문에 내부에 저 전압 강하 레귤레이터를 두어 내부 컨트롤 회로를 위한 5V를 생성하여 공급한다. 그리고 안정된 출력 전압을 얻기 위해서 밴드갭 (bandgap) 회로를 포함하였다. 그리고 직류-직류 전압 변환기의 초기 동작 상황에서 파워 인덕터 혹은 파워 트랜지스터로 과도한 전류

가 흐를 수 있기 때문에 이를 방지하기 위한 soft-start 회로를 포함하였다.

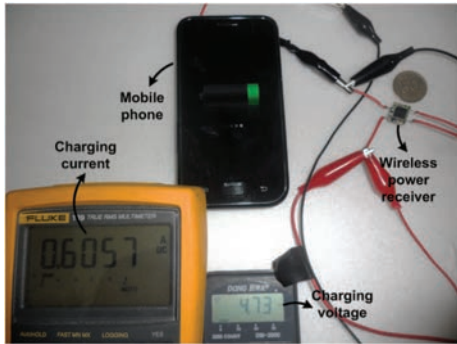
이 외에 과도한 전력이 입력되는 현상을 방지하기 위해 과 전력 보호 회로를 포함 하였다. 만약 과도한 전력이 공급되어 정류기의 출력 전압이 기준 전압보다 상승하는 경우에 비교기 COMP2의 출력이 high가 되고 이로 인해 입력 전압 $V_{IN,A}$, $V_{IN,B}$ 와 그라운드 사이에 캐패시터 C_{P1} , C_{P2} 가 각각 놓이게 된다. 이로 인해 공진기와 무선 전력 수신기 간의 임피던스 부정합이 발생하게 되고 따라서 수신된 전력이 줄어들게 된다. 이 외에도 과 온도, 과 전압, 과 전류 보호회로를 포함하여 집적 회로 내부 소자가 손상을 입지 않도록 하였다.

그리고 무선 전력 수신기가 무선 전력 송신기와 통신하기 위한 부하 (load) 모듈레이터를 포함 하였다. 통신을 위한 데이터가 V_{COMM} 노드로 입력됨에 따라서 캐패시터 C_{M1} 과 C_{M2} 가 공진기에 연결/비연결 되도록 하여 임피던스를 조절하게 된다. 이로 인해 무선 전력 송신기의 공진 코일과 무선 전력 수신기의 공진 코일의 임피던스 부정합/정합이 발생 하게 된다. 이는 무선 전력 수신기에서 envelop 검출기 등을 통해 복원할 수 있도록 하였다.

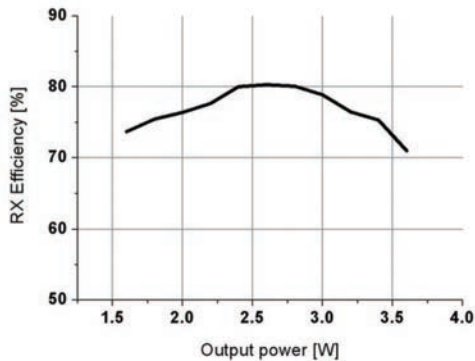
제작된 집적 회로의 칩 사진은 〈그림 12〉과 같고 측정 환경은 〈그림 13〉와 같다. 무선 전력 공진 주파수는 13.56MHz이고 직류-직류 전압 변환기의 출력 전압은 4.7V이고 충전 전류는 600mA인 상황에서 측정



〈그림 12〉 제작된 무선 전력 수신기의 칩 사진



〈그림 13〉 무선 전력 수신기의 측정 환경



〈그림 14〉 출력 전력에 따른 무선 전력 수신기의 측정 효율

을 진행하였다. 교류-직류 전압 변환기의 출력은 100 μ F를 갖는 캐패시터를 연결하였고 입력 전압은 4.0~8.0V_{AC,RMS}의 값을 가질 수 있다. 교류-직류 전압 변환기는 3.0W의 출력 전달 상황에서 87%의 효율을 갖는다.

스위칭 직류-직류 전압 변환기의 파워 인덕터는 10 μ H이며 100m Ω 의 직렬 저항을 갖는다. 스위칭 주파수는 1MHz이며 입력 전압은 5.5~12V의 값을 가질 수 있다. 스위칭 직류-직류 전압 변환기는 2.8W의 출력 전달 상황에서 92%의 효율로 측정 되었다. 전체 효율은 2.8W 출력 전달 상황에서 80%로 측정 되었고 출력 전력에 따른 무선 전력 수신기의 효율은 〈그림 14〉와 같다.

IV. 결론

지금까지 무선 전력 전송 시스템에 대한 연구 및 각각의 블록들에 대한 설계 방법을 살펴보았다. 무선 전

력 송신기는 교류-직류 전압 변환기와 직류-교류 전압 변환기로 구성되고 높은 효율을 갖는 직류-교류 전압 변환기를 설계 하는 것이 가장 중요하다. 그리고 무선 전력 수신기는 교류-직류 전압 변환기와 직류-직류 전압 변환기로 구성되며 높은 공진주파수에 적용가능한 구조로 교류-직류 전압 변환기를 설계 하는 것이 중요하다. 그리고 휴대폰 충전을 위한 무선 전력 수신기의 개발 사례를 소개하였다.

사 사 문

본 연구는 삼성전자의 지원을 받아 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonance," *Science*, vol. 317, pp. 83-86, Jul. 6, 2007.
- [2] <http://www.wirelesspowerconsortium.com>
- [3] Y. -H. Lam, W. -H. Ki, and C. -Y. Tsui, "Integrated Low-Loss CMOS Active Rectifier for Wirelessly Powered Devices," *IEEE Trans. Circuits and Systems-II*, vol. 53, no. 12, pp. 1378-1382, Dec. 2006.
- [4] S. Guo and H. Lee, "An Efficiency-Enhanced CMOS Rectifier with Unbalanced-Biased Comparators for Transcutaneous-Powered High-Current Implants," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 44, no. 6, pp. 1796-1804, Jun. 2009.
- [5] Y.-J. Moon, Y.-S.Roh, C.Yoo, and D.-Z. Kim, "A 3.0-W Wireless Power Receiver Circuit with 75-% Overall Efficiency," *IEEE Asian Solid-State Circuits Conf.* pp. 97-100, Nov. 2012.
- [6] D.-Z. Kim, K. Y. Kim, J. Choi, Y.-H. Ryu, Y.-K. Park, S. Kwon, Y.-J. Moon, and C. Yoo, "High Efficient Power Receiver IC with Load Modulator for Wireless Resonant Power Transfer," in *Proc. European Microwave Conference*, pp. 416-419, Oct. 2012.



문영진

- 2008년 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 학사 졸업
- 2008년~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석박사 통합 과정

〈관심분야〉
전력관리용 반도체 회로 설계



유창식

- 1992년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업
- 1994년 서울대학교 전자공학과 석사 졸업
- 1998년 서울대학교 전자공학과 박사 졸업
- 2002년~현재 한양대학교 융합전자공학부 교수

〈관심분야〉
혼성 신호 회로 설계