



무선 전력 전송 시스템 회로 설계

1. 서론

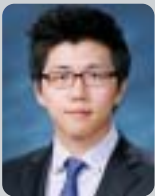
전 세계적으로 에너지 기술과 IT기술을 융합하는 에너지-IT 융합 기술에 대하여 관심이 높아지고 있다. 에너지-IT 융합기술이란 고도로 발전된 IT기술을 에너지 분야에 접목하는 것으로 그린 IT (Green IT)라는 개념으로도 소개되고 있다. 예를 들어 내부에 전원이 없는 수동태그에 수록되어 있는 정보를 리더기로 판독하기 위하여 무선으로 에너지를 공급하는 RFID (Radio Frequency Identification) 기술, 전원 선을 없애고 무선으로 가전기거나 전기 자동차에 전원을 공급하는 무선전력전송기술 (WPT : Wireless Power Transfer), LED를 이용하여 조명과 통신을 동시에 수행하는 가시광통신 기술 (VLC : Visual Light Communication), 무선 통신을 이용하여 사용자의 전력 사용량을 원격으로 검침하는 AMI (Advanced Metering Infrastructure) 기술, 전력공급처인 한국전력과 수요자가 전력 사용량에 대한 정보를 교환할 수 있도록 전력선 또는 무선통신을 이용한 스마트 그리드 (Smart Grid) 등이 그린 IT의 대표적인 서비스로 소개되고 있다.

이중 무선 전력 전송은 전력 에너지를 무선 전송에 유리한 전자기파로 변환시켜 에너지를 전달하는 새로운 개념의 전력 전송 방식으로 실제적인 전선이 없이도 전기에너지를 자유공간을 통해 보낼 수 있는 전파 전송의 원리로서 라디오나 무선 전화 등과 같이 무선 통신 방식에 이용하는 데이터 신호의 개념이 아닌, 전기적 에너지를 보내는 것으로 보통의 통신이 반송파 신호에 데이터를 실어 보내는 것이라면 무선 전력 전송은 반송파만 보내는 것이다.[1]

무선 전력 전송의 방식에는 크게 3가지 방식이 있는데, 전자기파 방사 방식, 자기 유도 방식, 자기 공명 방식이 있다. 위의 3가지 방



조 춘 식
한국 항공대학교



정 남 휘
한국 항공대학교

식은 각각 전송 방식에 차이가 있는 것으로 송신단과 수신단사이의 자유 공간에서 전파가 어떠한 형태로 어떠한 방법으로 전송되는 지에 따라 방식이 결정된다. 따라서 방식에 따라 안테나의 형태와 전송 거리에 대하여 차이가 있을 뿐이지 내부 회로에서는 큰 차이를 보이지 않는다.

본 고에서는 무선 전력 전송 방식의 일반적인 내부 회로에 대하여 각 부분별로 나눠 생각해 보도록 하겠다.

II. 본론

1. 무선 전력 전송 방식

무선 전력 전송 방식은 전자기파 방사 방식과 자기 유도 방식, 자기 공명 방식이 있다고 소개하였다. 각각의 방식은 전기적 에너지를 무선으로 전송하기 위한 방식에 따라 구분된다. 따라서 각 방식에 따라 전송에 직접적으로 관여가 되는 안테나 부분만 차이가 생기고, 나머지 내부 회로의 구조는 크게 차이가 나지 않는다

아래의 <그림 1>은 일반적인 무선 전력 전송의 송수신 블록이다. 그림에서도 확인 할 수 있듯이 안테나는 일반적으로 각 방식에 알맞은 안테나를 사용하게 되며, 그 외의 내부 회로(혹은 내부 시스템 블록)는 거의 동일함을 알 수 있다.

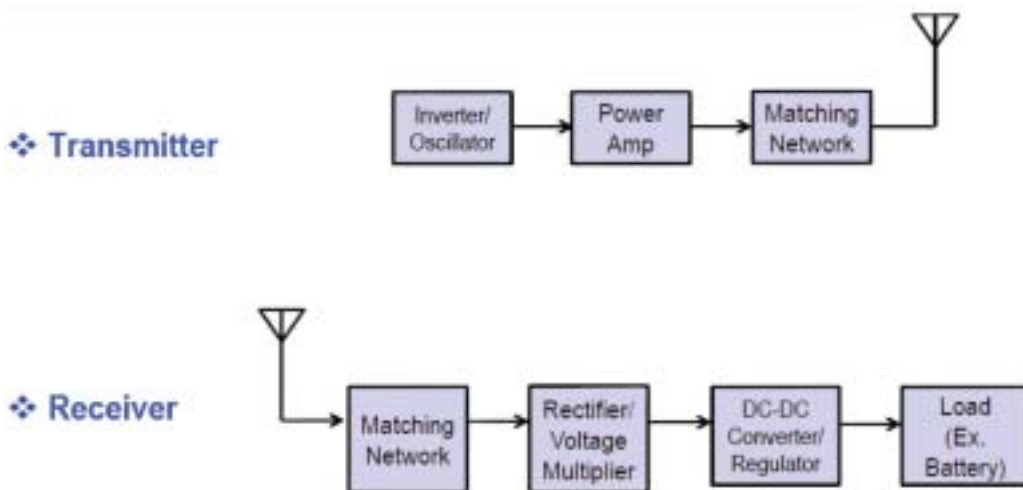
위와 같이 시스템 블록은 같게 구성되지만, 사용되는 무선 전력 전송 방식에 따라 내부 회로는 약간의 차이를 보이며, 이 차이는 크게 전송되는 전력의 크기, 무선으로 전력을 전송하기 위해 사용되는 반송파의 주파수에 영향을 받아 회로 구성을 하게 된다.

각 무선 전력 전송 방식에 따라 사용하는 주파수가 조금씩 다르기 때문에 그에 따른 회로의 구성이 달라질 수 있으며, 또한 전송되는 신호의 전력 크기에 따라 저 전력 회로의 설계를 요구 할 수 있다. 따라서 기본적으로 사용하려는 무선 전력 전송 방식을 먼저 선택을 하고, 저 전력인지 고 전력인지를 결정하여 그에 맞는 회로를 설계하는 것이 순서이다.

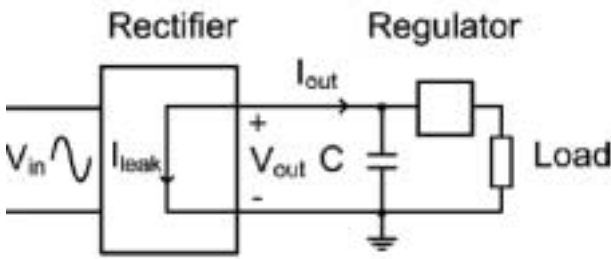
2. 무선 전력 송신단

무선 전력 전송의 송신단은 일반적인 통신 모듈의 송신단과 달리 반송파를 그대로 전송하기 때문에 많이 복잡하지 않다. 입력 DC 전압을 AC로 바꿔주는 Inverter 혹은 AC 신호를 생성할 수 있는 Oscillator를 통해 원하는 반송파 주파수로 만들어 주고, Power Amp를 통해 전력을 키워 전송하면 된다.

여기서 Power Amp에 대해 살펴보면 일반적인 통신을 위한 송신단의 Power Amp는 Linearity를 중점적으로 생각하여 설계가 되겠지만, 전력회로의 Power Amp는 효율이 주안점이 된다. 그런 차원에서 선형 증



<그림 1> 무선 전력 전송의 송수신 시스템 블록



〈그림 2〉 무선 전력 전송의 수신단

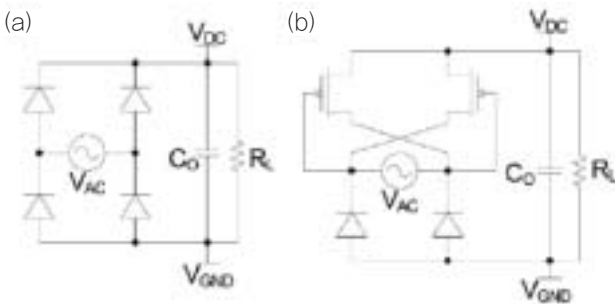
폭기는 적용이 어렵고, 스위칭 증폭기를 사용하게 되는데, BJT나 MOSFET를 고속 스위칭하는 것이 쉽지 않으므로, 고 전력, 고 효율의 무선 전력 전송 시스템을 위해서는 고주파수의 사용을 피하는 것이 좋다. 실질적으로 자기장을 이용하는 무선 전력 전송은 수백 kHz부터 수십 MHz사이의 주파수를 선택하여 사용하는 것이 이런 요인을 고려한 것이다.

3. 무선 전력 수신단

무선 전력 전송의 수신단은 크게 RF 신호를 DC로 변환하는 정류회로, 정류된 DC 전압을 원하는 일정한 크기로 유지 시켜주는 Regulator(혹은 DC-DC Converter)로 구성할 수 있다.

1) 정류회로

〈그림 3〉 (a)는 일반적인 Full wave bridge 다이오드 정류회로이다. 이와 같은 다이오드를 사용한



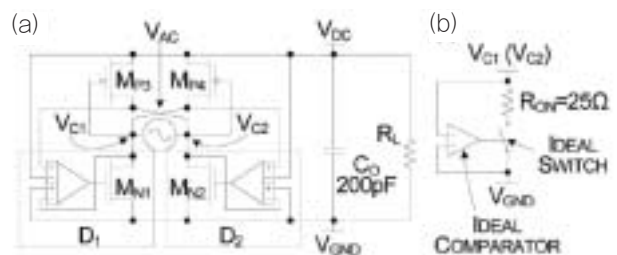
〈그림 3〉 정류회로 (a)다이오드 정류회로, (b)PMOS를 사용한 능동 정류회로

bridge 정류회로는 기본적인 정류회로로서 입력되는 V_{ac} 에 비해 V_{dc} 가 얼마나 되는지 비율로 나타내는 것이 conversion efficiency인데, 다이오드의 Threshold 전압 빼 나머지의 전압이 DC로 출력이 되게 될 것이다. 이러한 다이오드 정류회로는 회로 설계는 간단하지만, 집적회로로 설계하기엔 부적절하기에 〈그림 3〉 (b)와 같이 PMOS 트랜지스터를 이용한 능동 정류회로를 많이 설계한다. [2]

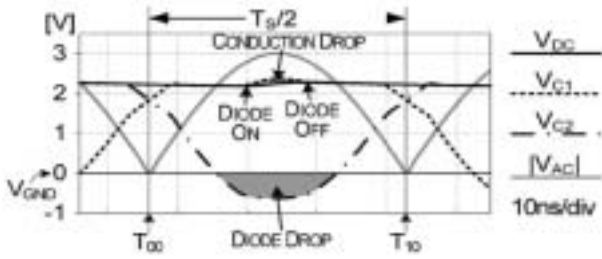
Cross coupled PMOS 는 Diode connected PMOS 보다 더 큰 전압 스윙으로 좀더 빠른 상태 변화로 손실되는 전력을 조금이나마 줄일 수 있다는 것이 장점이다. 아래쪽의 두 개의 다이오드는 Diode connected NMOS를 사용하여 역방향 전류를 막아주는 다이오드의 역할을 한다.

또한 최근 기술 동향으로 단순한 Cross Coupled CMOS Rectifier의 성능을 향상 시키기 위한 방법이 연구되고 있다. 첫 번째로 〈그림 4〉와 같이 NMOS에 comparator를 통한 입력을 사용하여 정류회로의 성능을 좀더 높이고자 한다. [2]

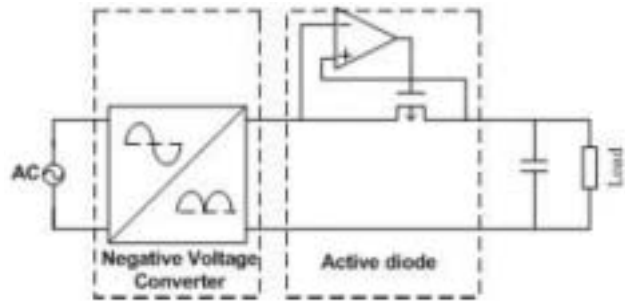
〈그림 4〉는 회로의 효율을 높이기 위하여, 다이오드 역할을 하는 NMOS를 Switching시키기 위하여 Comparator를 적용시킨 회로이다. 〈그림 4〉 (b)를 보면, 다이오드 양단 사이의 전압이 일정 수준 이상으로 올라가면 통하게 되는 것을 똑같이 구현하기 위하여, 다이오드의 ON 저항을 25옴 정도로 가정하고, 비교기를 통하여 V_{c1} 과 V_{c2} 를 비교하여 V_{c1} 이 높을 경우 스위치가 ON이 되고, 낮아지면 OFF가 되게 하는 구조이다. 실제 다이오드를 이런 구조를 모델링하여 〈그림



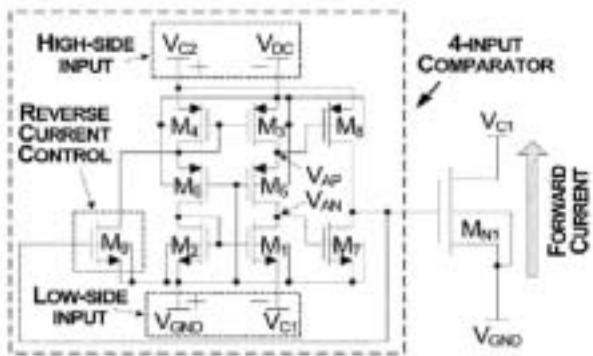
〈그림 4〉 (a)최적화된 능동 정류회로, (b)Comparator를 사용한 Switching의 기본구조



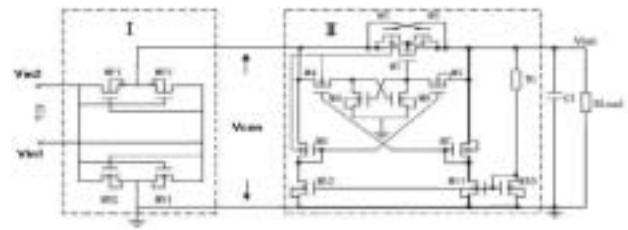
〈그림 5〉 Diode에 의한 Conduction Drop



〈그림 7〉 Low Operational Voltage Active Diode Rectifier



〈그림 6〉 빠른 스위칭을 위한 Reverse Current Control이 적용된 비교기



〈그림 8〉 Low Operational Voltage Active Diode Rectifier의 회로

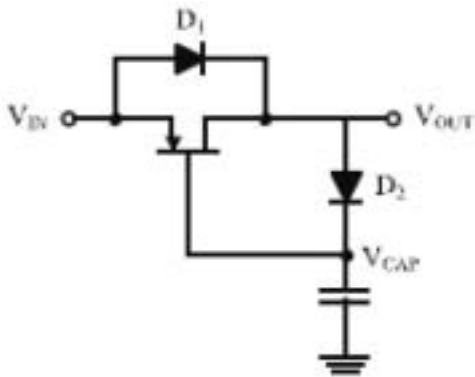
4) (a)와 같이 적용시킨다. 이 정류회로는 차분으로 동작하는 정류회로 이므로 D1의 경우 $V_{c2} - V_{dc} > V_{c1} - V_{gnd}$ 를 비교하여 D1을 컨트롤 하는데 이는 입력의 high side와 Low side를 비교하여 다이오드를 On시키는 역할을 한다. D2는 반대로 비교를 하게 된다.

여기서 Power loss를 생각해 볼 수 있는데, 〈그림 5〉의 Conduction drop과, 다이오드가 상태 변화를 할 때, 최대한 빨리 변화를 하여야 역방향 전류에 의한 손실을 줄일 수 있다. 이 역방향 전류를 줄이기 위한 방법으로 〈그림 6〉과 같이 비교기에 Reverse Current Control을 위한 트랜지스터를 추가하여 Diode역할을 하는 NMOS(MN1)와 같이 동작을 하면서 비교기 내에 흐르는 전류의 양을 컨트롤 하여 MN1의 게이트 바이어스 전압의 변화를 빠르게 바꿔줄 수 있도록 한다.

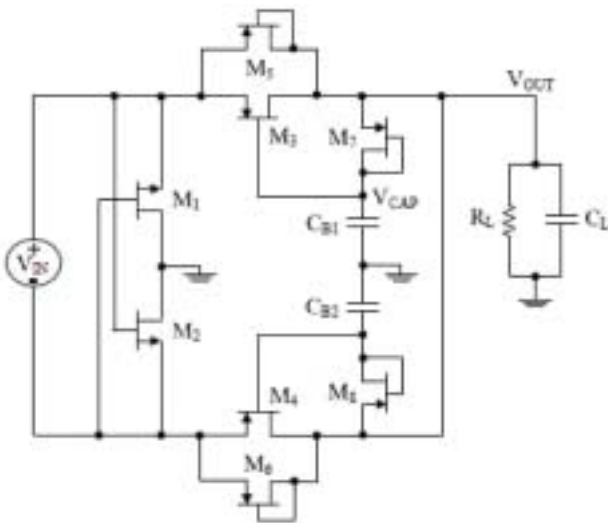
두 번째로 낮은 입력 전압에서도 동작 할 수 있게, 〈그림 7〉과 같이 먼저 정류를 전파 정류를 한 뒤, 입력과 출력의 비를 통한 Active Diode를 동작해 출력을 얻는 Low Operation Voltage Active Diode 회로가 있다. [3]

〈그림 8〉과 같이 I에 단순한 Cross Coupled CMOS Rectifier를 설계하고, II에 Low Operational Voltage Active Diode를 사용함으로써 역방향 전류를 막아 Load에서 손실 전력을 줄여 효율을 극대화 시킨 회로다. II에서는 Active Diode로 사용되는 M1의 Drain과 Source 양 단의 전압을 비교하여 그 전압 차이를 통해 Gate Bias를 만들고, Source 전압이 낮은 Drain 전압 일 경우 M1을 off시켜 역방향으로 전류가 새지 않게 하는 역할을 한다. 또한 M2와 M3는 M1의 Body Effect를 줄여 주며, 이를 통해 M1의 Threshold전압을 낮춰 낮은 전압에서도 충분히 동작 할 수 있다.

세 번째로 Bootstrapped Techniques을 사용하여 Threshold의 영향을 줄이는 방법이 있다.[4] 9는 Bootstrapped capacitor가 적용되어 Threshold의 영향을 줄이는 회로이다. 이 구조는 Rectifier의 PMOS pass-transistor 부분에 적용이 되고, 〈그림 9〉의 다이오드 D1과 D2는 Diode Connected PMOS로 바꿀 수 있다. 바뀌진 회로는 〈그림 10〉과 같다.



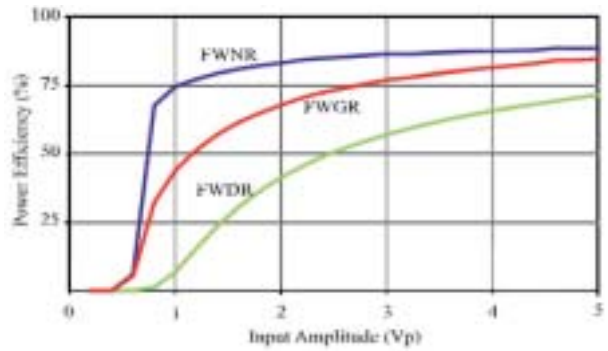
〈그림 9〉 Bootstrapping Technique



〈그림 10〉 Bootstrapping Technique가 적용된 CMOS Rectifier

〈그림 10〉의 회로는 회로 내의 Capacitor(CB)가 충전이 되면서, 낮은 입력 전압이 들어와도 기존에 다이오드(M5, M7)을 통해 충전을 해 두었던 CB가 M3를 동작시키게 되고, 그로 인해 낮은 입력에서도 출력에는 입력된 값이 나올 수 있다. 이 회로는 출력으로 PMOS pass-transistor와 Diode로 사용된 PMOS 두 개의 Threshold voltage만큼 소모된 $V_{out} = V_{in} - 2V_{thp}$ 가 출력이 되어 더 낮은 출력이 나오는 것처럼 보이지만 capacitor로 인해 입력 값에 대한 출력 범위가 넓다는 장점으로 인해 좀 더 나은 효율을 보인다.

다음 〈그림 11〉은 앞서 설명한 일반적인 다이오드 정류회로(FWDR), Cross Coupled CMOS 정류회로



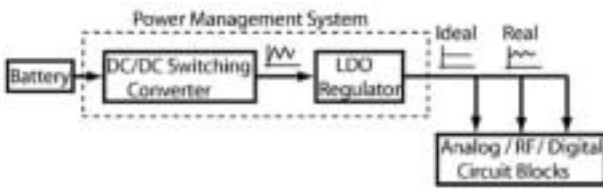
〈그림 11〉 정류 회로 입력 대비 출력 효율의 비교

(FWGR), Bootstrapping Technique이 적용된 CMOS 정류회로(FWNR)의 출력을 비교한 그래프 이다. [4]

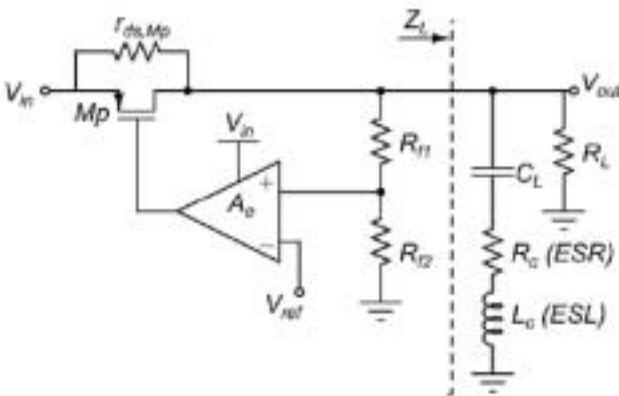
이와 같이 Cross Coupled PMOS와 Diode Connected NMOS의 바이어스를 최적화 하여 정류회로의 효율을 최적화 하는 거나 새로운 기술을 접목시켜 소모된 전력을 보상하는 방법을 사용하여 무선 전력 전송 수신단 정류회로의 효율을 높이는 방법이 꾸준히 연구되고 있다.

2) Voltage Regulator (LDO (Low DropOut Regulator))

Voltage Regulator는 일정한 DC 출력 전압을 내는 회로로 무선 전력 전송으로 수신 받은 신호는 Power를 예측할 수 없고, 상황에 따라 다르게 변하므로 일정한 전압을 얻기 위해서는 보통 DC-DC Converter와 함께 Voltage Regulator(LDO)를 사용함으로써 일정한 전압을 공급받을 수 있다. 여기서 Regulator는 출력 단자의 부하 전류가 바뀌어도 일정한 값을 내는 Load Regulation과 입력 전압이 바뀌어도 일정한 값을 내는 Line Regulation이 있다. 〈그림 12〉은 일반적인 Power Management System의 Block Diagram으로 무선 전력 전송에서는 그림의 Battery 부분이 수신된 신호가 정류된 신호로 입력이 바뀌게 되는 것이다. 여기서 Regulator는 앞 단의 DC-DC Converter가 Switching type의 Regulator이므로 ripple이 심하게 나타나므로 Linear type인 LDO Regulator를 사용하여 ripple을 줄이고 일정한 전압을 출력으로 얻게 되



〈그림 12〉 일반적인 Power Management System의 Block diagram



〈그림 13〉 일반적인 LDO Regulator의 구조

는 것이다. 단 〈그림 8〉은 일반적으로 충분한 공급원(전원 혹은 Battery)을 가지는 Power Management System일 경우의 Block Diagram이고, 무선 전력 전송은 일정한 전원을 공급받는 것이 아닌 무선으로 전력을 공급 받는 것이므로, 입력되는 전력의 양이 일정하지도 않고, 충분하지 못할 경우가 많을 것이다. 여기서 DC-DC Converter는 Switching type의 Regulator로 Rectangular Pulse를 사용하여 Switch를 Control하는 만큼 소비되는 전력량이 많을 것으로 예상된다. 따라서 DC-DC Converter를 통한 공급 전원의 전압을 조절하는 것도 좋은 방법이겠지만, DC-DC Converter를 사용하지 않고, Linear Regulator인 LDO만을 사용하여 무선 전력 전송을 사용하는 해당 system에 맞는 전원을 출력으로 가질 수 있게 설계하는 방법을 더 제안한다.

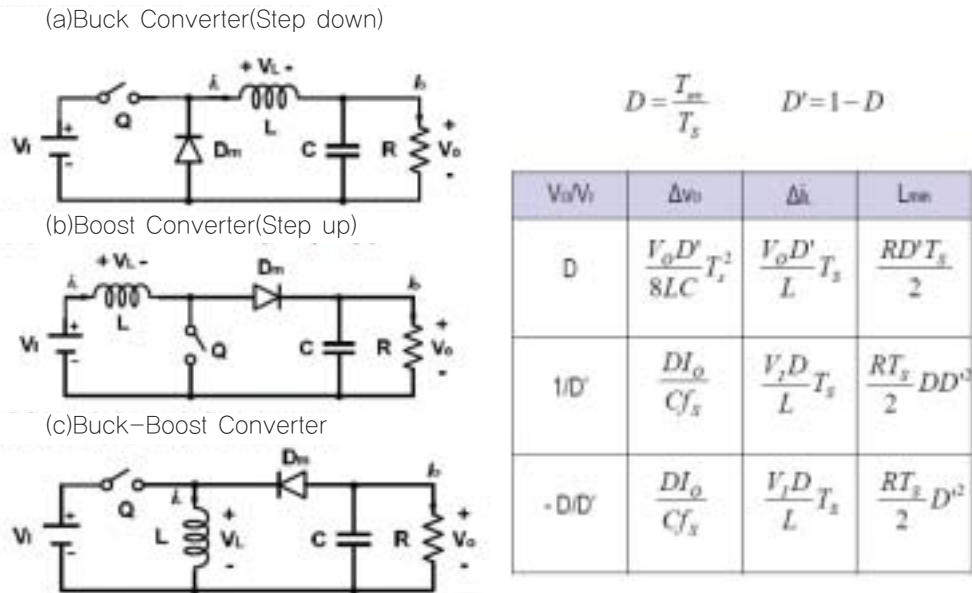
다음 〈그림 13〉은 일반적인 LDO Regulator의 구조이다. Pass Transistor로 사용되는 PMOS Mp가 있고, 출력으로부터 feedback을 받아 reference 전압과

의 error를 통해 Pass Transistor를 컨트롤하는 Error Amplifier가 있다. 또한 Error Amp에 reference로 사용되는 Vref는 Bandgap Reference Voltage를 주로 사용한다. [5]

여기서 입력되는 신호 이 외에 다른 전원에 의해 출력이 나오는 것을 측정하는 PSRR(Power Supply Rejection Ratio) 측면에서 살펴보면, 입력 신호가 통과하는 Pass 트랜지스터의 On 저항을 줄여야 하는데 On 저항을 줄이기 위해서는 트랜지스터의 크기(width)가 매우 커져야 하고, 그렇게 되면 기생 커패시턴스(Parasitic Capacitance)가 늘어나게 된다. 또한 트랜지스터의 크기가 커지게 되면 문턱 전압(Threshold voltage)이 커지게 된다. 그렇게 되면, PMOS 트랜지스터를 구동하는 Error Amp의 동작도 확인해 보아야 하는데, 일단 Error Amp의 공급되는 전원을 보면, 일반적인 Amp는 DC전원이 공급되지만, 무선 전력 전송의 Error Amp는 입력되는 Vin이 공급되며, 이는 입력되는 Vin의 크기가 작아지면 Error Amp의 동작이 그에 따라 작아지게 될 것이고, 전체적으로 LDO Regulator가 동작하지 않을 수 있게 된다. 따라서 자기 자신의 전원을 사용하여 자기 자신을 동작시켜야 하기 때문에 Error Amp의 PSRR이 좋아야 한다. 마지막으로 Bandgap Reference로 만들어 지는 Vref의 PSRR이 좋아야 Bandgap Reference를 통해 입력되는 Noise를 줄일 수 있을 것이다. 이와 같이 무선 전력 전송 회로는 외부에서 주어지는 전원이 없이 무선으로 공급받는 전력을 사용하여 동작하는 회로이므로, 그에 맞게 회로 설계가 이루어져야 하는 것이 가장 중요하다.

3) DC-DC Converter

DC-DC Converter는 크게 3가지 타입으로 나눌 수 있다. Buck(step down), Boost(step up), Buck-Boost로 3가지가 나뉘게 된다. Buck Converter는 입력전압보다 낮은 출력전압을 갖게 하는 것이고, Boost Converter는 입력전압보다 높은 출력전압을 갖게 하는 것이고, Buck-Boost Converter는 입력전압보다 높거나



〈그림 14〉 DC-DC Converter의 기본 구조와 각 타입의 출력 (a) Buck Converter, (b) Boost Converter, (c) Buck-Boost Converter

나 낮은 출력전압을 갖게 하는 것이다. 〈그림 14〉는 각 타입 별 DC-DC-Converter의 기본 회로이다.

각 타입의 입력전압 대비 출력전압의 비를 보면,

Buck Converter는 $\frac{V_o D'}{8LC} T_s^2$, Boost Converter는 $\frac{DI_o}{C f_s}$, Buck-Boost Converter는 $-\frac{DI_o}{C f_s}$ 가 나오는데, 여기서 $D = \frac{T_{on}}{T_s}$, $D' = 1 - D$ 로 D는 duty ratio다.

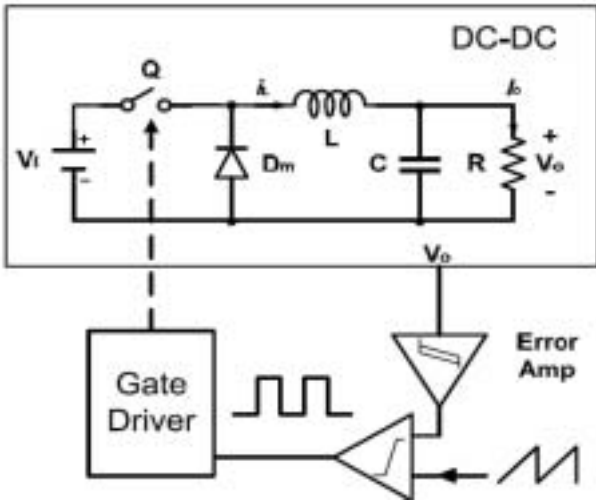
Buck-Boost Converter를 보면 출력이 반대로 뒤집혀 나오는 것을 알 수 있는데, 이는 칩으로 설계할 때 그라운드보다 낮은 음의 전압을 출력으로 가지는 부분을 고려하여야 할 것이다. 그리고 또 하나 알 수 있는 것은 L_{min} 이나 전류 리플 (i_L)을 보면, 스위칭 주기에 비례하는 것을 알 수 있다. 따라서 스위칭 주기의 반비례인 스위칭 주파수를 올리게 되면 출력의 리플도 줄어들게 되고, 필요한 인덕터의 크기도 줄어들 것이라고 생각을 할 수 있지만 마냥 올릴 수 있는 것이 아니다.

〈그림 15〉는 Gate Bias로 PWM신호를 사용한 기본적인 Buck Converter의 구조이다. 여기서 보면 스위치(Q)의 On 저항이 작으면 좋기 때문에 트랜지스터의 크기가 커지게 될 것이고, 그렇게 되면 앞서 LDO

Regulator에서도 언급하였듯이 Gate사이의 기생 커패시턴스가 커지게 된다. 그렇게 되면 그 트랜지스터를 구동할 Gate Driver도 엄청 커져야 하고 전류도 많이 써야만 한다. 따라서 스위칭 주파수를 올리는 데에 많은 제약을 받는 것이 이 부분들의 크기가 증가되어야 하는데, 칩으로 제작하는데 사이즈도 고려되어야 하는 것이기에 많은 연구와 노력이 필요하다. 또한 여기서 사용되는 Gate Driver와 Error Amp 모두 일반적인 시스템의 모듈이 아니고, 무선 전력 전송에 사용되는 모듈은 모두 공급전원이 따로 있는 것이 아닌 입력되는 신호로 생성된 전압 (V_{in})을 사용하기 때문에 정확한 공급전원을 가지지 못하기 때문에 주파수가 높아질수록 부하가 증가하게 되고, 그 안에서 생성되는 손실이 증가하고, 효율이 떨어지게 되는 것이다. 이러한 문제들 때문에 실제적으로 효율이 70%이상 나오기 힘들다.

III. 결론

무선 전력 수신부의 각 모듈은 일정한 공급전원을 가지는 것이 아닌 무선 전력 전송으로 공급받는 전원



(그림 15) PWM Gate bias를 사용한 기본적인 Buck Converter

을 바로 각 모듈에서 사용하기 때문에 일반적인 회로와는 다르게 안정성에서 많은 문제를 가져올 수 있다. 하지만 전체적인 선형성을 고려하기 보단 전력 효율을 고려하며 설계하므로 충분히 효율을 고려하여 설계하면 70%까지의 효율을 얻을 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Wireless Power Consortium, "System Description Wireless Power Transfer", Volume I: Low Power, Part 1: Interface Definition Version 1.0 July 2010.
- [2] Yat-Hei Lam et al. "Integrated Low-Loss CMOS Active Rectifier for Wireless Powered Devices", *IEEE TRANSACTION ON CIRCUIT AND SYSTEM_II: EXPRESS BRIEFS*, vol. 53, no. 12, Dec 2006.
- [3] Q. Li, R. Zhang, Z. Huang, Y. Inoue, "A Low Voltage CMOS Rectifier for Wirelessly Powered Devices", *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on*, PP. 873 - 876, May 2010.
- [4] S. Hashemi, M. Sawan, and Y. Savaria, "Fully-Integrated Low-Voltage High-Efficiency CMOS Rectifier for Wirelessly Powered Devices", *Circuits*

and Systems and TAISA Conference, 2009. NEWCAS-TAISA '09. Joint IEEE North-East Workshop on, pp. 1 - 4, Jun. 2009.

- [5] Mohamed EL-Nozahi et al., "High PSR Low Drop-Out Regulator With Feed-Forward Ripple Cancellation Technique", *IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUIT*, vol. 45, no. 3, Mar 2010.



조 춘 식

1887년 2월 서울대학교 제어계측공학과 (공학사)
 1998년 12월 University of Colorado at Boulder
 전기 및 컴퓨터공학과 (공학박사)
 1987년~1993년 LG 정보통신
 1999년~2003년 팬택엔지니어링
 2004년 3월~현재 한국항공대학교 항공전자 및 정보통신공학부 부교수

<관심분야>

Millimeter-wave IC 설계, Analog IC 설계, 바이오 시스템, 무선전력전송 회로 설계



정 남 휘

2005년 2월 서울 화곡고등학교 졸업
 2012년 8월 한국항공대학교 졸업 (학사)
 2012년 9월 한국항공대학교 정보통신공학과 대학원 재학 중

<관심분야>

아날로그 집적회로 설계, 무선 전력 전송 회로 설계