

논문 2014-51-9-5

# 드레인 조절회로를 이용한 무선전력전송용 고이득 고효율 Class-E 전력증폭기 설계

## ( High Gain and High Efficiency Class-E Power Amplifier Using Controlling Drain Bias for WPT )

김 상 환\*, 서 철 현\*\*

( Sanghwan Kim and Chulhun Seo<sup>Ⓢ</sup> )

### 요 약

본 논문에서는 입력전력에 따라 드레인 바이어스를 조절하여 낮은 입력 전력에서도 고효율 동작이 가능한 무선전력전송용 고효율 class-E 전력증폭기를 설계하였다. 고효율 동작이 가능한 class-E 전력증폭기에 적응형 바이어스 조절회로를 추가하여 낮은 입력 전력에서 드레인 바이어스를 조절함으로써 전체적인 효율의 향상을 얻을 수 있다. 제안된 적응형 class-E 전력증폭기는 효율의 향상을 위해 직렬 공진회로와 입, 출력 정합회로를 이용하여 구현하였으며, 입력전력에 따라 드레인 바이어스를 조절하기 위해 방향성 결합기, 전력 검출기, 연산 증폭기를 이용하여 적응형 바이어스 조절회로를 구성하였다. 따라서 전력증폭기의 최대출력과 전력효율은 13.56 MHz에서 41.83 dBm, 85.67 %이고, 0 dBm ~ 6 dBm의 낮은 입력 전력에서 고정형 바이어스보다 평균 8 %의 효율의 증가를 확인하였다.

### Abstract

In this paper, a high-efficiency power amplifier is implemented by using a drain bias control circuit operated at low input power for WPT(Wireless Power Transfer). Adaptive bias control circuit was added to high-efficiency class-E amplifier. It was possible to obtain the overall improvement in efficiency by adjusting the drain bias at low input power. The proposed adaptive class-E amplifier is implemented by using the input and output matching network and serial resonant circuit for improvement in efficiency. Drain bias control circuit consists of a directional coupler, power detector, and operational amplifier for adjusting the drain bias according to the input power. The measured results show that output powers of 41.83 dBm were obtained at 13.56 MHz. At this frequency, we have obtained the power added efficiency(PAE) of 85.67 %. It was confirmed increase of PAE of an average of 8 % than the fixed bias from the low input power level of 0 dBm ~ 6 dBm.

**Keywords :** Class E 전력증폭기, 13.56 MHz, 고효율, 무선전력전송, 적응형 바이어스

\* 학생회원, \*\* 정회원, 숭실대학교 정보통신전자공학부  
(Information and Telecommunication Engineering,  
Soongsil University)

Ⓢ Corresponding Author(E-mail: chulhun@ssu.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단(NRF)의 지원을 받아 수행한 연구(No.2013056381)입니다.

※ 본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No.20124010203160)입니다.

접수일자: 2014년4월10일, 수정일자: 2014년8월07일

수정완료: 2014년9월03일

## I. 서 론

최근 전력선을 사용하지 않고 전력을 전송하는 무선 전력전송에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

따라서 무선전력전송에서 사용되는 송신부의 전력증폭기는 평소 사용 환경에서 일정한 고효율의 동작이 필수적으로 요구된다. 기본적으로 전력증폭기의 효율을 높이기 위해서는 class-E, class-F 등과 같은 switching

-mode의 전력증폭기를 사용한다. 하지만 class-F 모드의 증폭기의 경우 수많은 고조파 성분들을 조절해야 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에 상대적으로 회로가 복잡하고 사이즈가 커지게 된다. 따라서 가장 간단한 구조의 switching-mode의 전력증폭기인 class-E 전력증폭 구조를 적용하였다.<sup>[1~3]</sup>

무선전력전송 시스템에서 전체적인 동작 효율의 증가를 얻기 위해서는 수신부의 전력 수신 정도에 따라 송신 전력을 가변 해야 한다. 이를 무선전력 충전 시스템에 적용해 보면 배터리의 충전정도에 따라 무선으로 송신되는 전력을 낮춤으로써 전체적인 동작효율을 높일 수 있다. 따라서 이 같은 송신 전력 가변 시스템에서는 낮은 입력전력에서도 높은 효율로 동작하는 전력증폭기가 필수적이다.

고정형 바이어스를 사용하는 일반적인 전력증폭기에서 입력전력의 감소는 낮은 출력전력에서 트랜지스터의 전류소비를 동일하게 하여 동작 효율이 급격하게 떨어지는 가장 큰 원인이다. 따라서 입력전력에 따라 전압을 조절하여 낮은 입력전력에서도 트랜지스터의 전류 소비를 최소화 시켜 고효율의 전력증폭기가 되도록 설계하였다. 이 같은 적응형 바이어스 조절회로는 입력 RF 신호를 방향성 결합기를 통해 추출하여 전력 검출기로 보내고 이에 DC출력을 증폭하여 드레인 바이어스를 조절하도록 구성되어 있다.<sup>[4~5]</sup>

본 논문에서는 무선전력 전송 시스템에서 낮은 입력 전력에서도 송신부의 전력부가효율을 높이기 위해 입력전력에 따라 전압을 조절하는 class-E 전력증폭기를 설계하였다.

## II. 고효율 전력증폭기

### 1. 스위치 모드 전력증폭기

스위치 모드 전력증폭기는 트랜지스터를 포화영역에서 이상적인 스위치로 동작시키는 것이다. 따라서 트랜지스터에서 전류와 전압은 “ON” 또는 “OFF”로 교차 전환 되며 이 같은 동작은 전압과 전류의 파형을 겹치지 않게 하여 트랜지스터에서 소비되는 전력을 최소화 할 수 있다. 그림 1에서와 같이 트랜지스터가 스위치로 동작하는 “ON” 상태의 경우 낮은 임피던스를 가지게 되어 전압은 0 에 가까워지고, “OFF” 상태일 때는 높은 임피던스를 가지게 되어 전류가 0 에 가까워지는

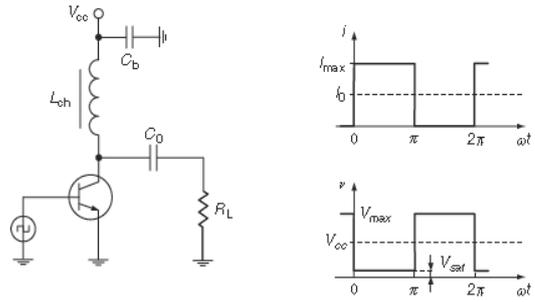


그림 1. 일반적인 스위치모드 전력증폭기  
(a) 회로 (b) 트랜지스터의 전압전류 파형  
Fig. 1. Typical switch mode power amplifier (a) circuit (b) voltage and current waveform of transistor.

스위치 동작을 하게 된다.<sup>[5]</sup>

### 2. Class-E 전력증폭기

Class-E 전력증폭기는 고효율의 동작과 간단한 설계의 이점을 가지고 있어 여러 고효율 전력증폭 시스템에 널리 사용된다. 그림 2와 같이 병렬 커패시터와 직렬 인덕터 그리고 동작주파수에 따른 직렬 공진회로로 구성되며 이는 고조파 성분을 제어하여 높은 효율을 구현한다. 또한 트랜지스터는 “ON” 과 “OFF”의 스위치 동작을 하여 전류와 전압의 파형이 서로 교차 하지 않게 함으로써 트랜지스터에서 소비되는 전력을 최소화 할 수 있다.<sup>[5][7]</sup>

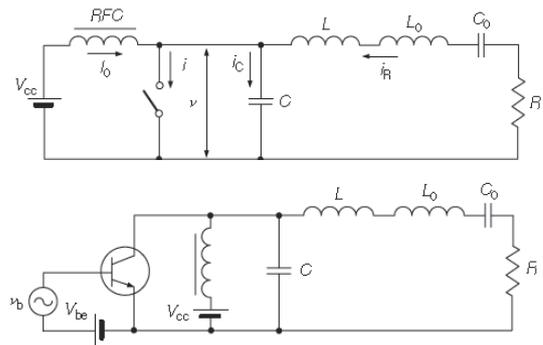


그림 2. Class-E 전력 증폭기 회로  
Fig. 2. Class-E power amplifier circuit.

### 3. 적응형 바이어스 조절회로

무선전력전송 시스템의 전체 동작범위에서 고효율의 전력증폭기를 얻기 위해서는 낮은 입력전력에서도 높은 효율을 구현해야 한다. 일반적으로 전력증폭기는 최대 출력에서 최대 효율을 갖지만 입력전력에 따라 최대 출



그림 3. 적응형 바이어스 조절회로 블록도  
Fig. 3. Block diagram of adaptive drain bias control circuit.

력이 감소하게 되면 효율은 급격히 떨어지는 특성을 가진다. 따라서 입력전력에 따라 드레인 바이어스를 조절하여 전체 동작범위에서 고효율을 가지는 적응형 바이어스 조절회로를 설계하였다.

그림 3은 적응형 바이어스 조절회로의 블록도이다. RF 입력신호는 방향성 결합기를 통해 추출되어지고 이를 전력검출기를 통해 DC 전압으로 변환 증폭하여 드레인 바이어스를 조절하게 된다.

### III. 실험

#### 1. 적응형 바이어스 조절회로 구현

그림 4와 같이 입력전력의 변화에 따라 드레인 바이어스를 조절하는 적응형 바이어스 회로를 구현하였다. 20 dB 방향성 결합기를 이용하여 RF 입력 전력을 추출하고, RF 전력 검출기인 LTC - 5507을 이용하여 변환

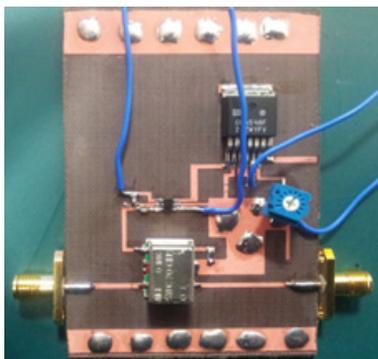


그림 4. 적응형 바이어스 조절회로  
Fig. 4. Adaptive drain bias control circuit.

표 1. 입력전력에 따른 전력 검출범위  
Table 1. Power detection range according to input power.

Input power	RF	0 ~ 10 (dBm)
Coupler	RF	-20 ~ -10 (dBm)
Power detector	DC	0.29 ~ 0.60 (V)
Shaping circuit	DC	15.05 ~ 21.57 (V)

된 DC 전압을 OP-amp로 증폭하여 드레인 바이어스를 조절하게 된다. OP-amp는 드레인 바이어스의 고 전류 동작으로 인해 낮은 가격과 고 전압, 고 전류의 출력 동작이 가능한 OPA-548을 이용하여 넓은 전류 범위에서 동작하도록 하였다.

#### 2. 제안된 class-E 전력증폭기

그림 5는 고효율 특성을 보이기 위해 제안된 class-E 전력 증폭기 회로도이다. 병렬 커패시터와 동작 주파수에 따른 직렬 공진회로를 이용하여 고효율의 동작을 보이도록 설계하였다.

그림 6과 그림 7은 제작된 적응형 바이어스 조절회로를 적용한 전력증폭기와 그에 따른 전력증폭기의 최대 출력동작에서의 출력 전력을 나타낸다.

최대 출력동작에서의 전력증폭단의 게이트 전압과 OP-amp의 입력 전압은 각각 3.8 V와 23 V로 설계하였다. 동작주파수 13.56 MHz에서 입력전력 10 dBm일 때 30.33 dB 감쇠기를 통한 측정 전력은 11.50 dBm이다. 따라서 입력전력 10 dBm에서 41.83 dBm의 출력 전력이 측정 되었고 773 mA의 드레인 전류가 흘러 85.67

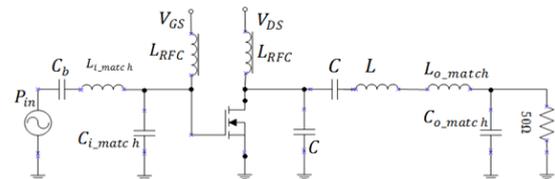


그림 5. Class-E 전력증폭기 회로도  
Fig. 5. Circuit of class-E power amplifier.

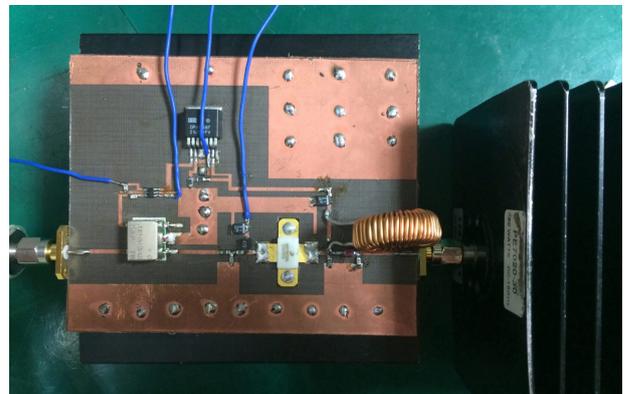


그림 6. 적응형 바이어스 조절회로를 적용한 고효율 전력증폭기  
Fig. 6. High efficient power amplifier using adaptive bias control circuit.

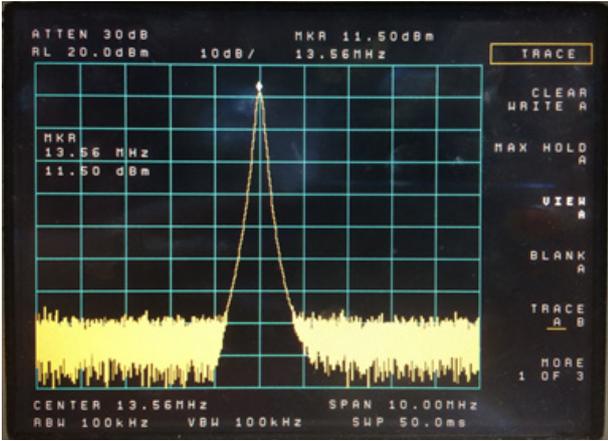


그림 7. 제안된 class-E 전력증폭기 출력 전력  
Fig. 7. Output power of the proposed class-E power amplifier.

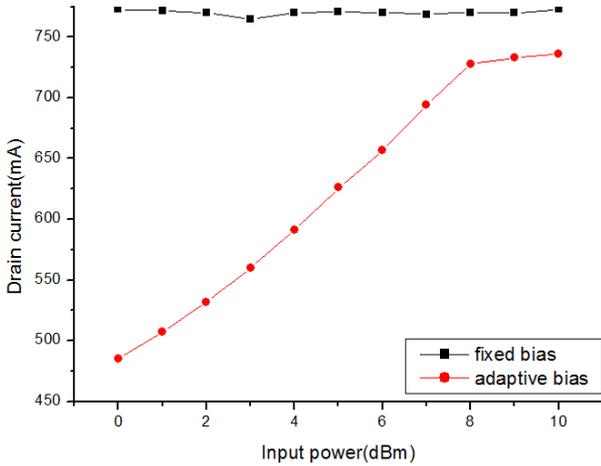


그림 8. 입력 전력에 따른 드레인 전류  
Fig. 8. Drain current corresponding to the input power.

%의 전력부가효율을 가진다.

제안된 class-E 전력증폭기의 입력전력을 변화시켜 입력전력의 따른 출력전력과 전력부가효율을 측정하였다. 적응형 바이어스를 포함하는 회로의 드레인 바이어스는 OP-amp의 입력전압인 23 V 보다 낮은 입력전압이 인가되기 때문에 그림 8과 같이 전류의 소비도 줄어든다.

이 같이 제안된 적응형 바이어스를 적용한 class-E 전력증폭기의 입력전력에 따른 출력전력과 전력부가효율은 그림 9와 그림 10에 그래프로 나타내었다. 낮은 입력 전력에서 고정된 바이어스의 출력 전력과 유사한 출력전력을 보이지만 0 dBm ~ 6 dBm 사이의 낮은 입력 전력에서 고정된 바이어스를 사용하였을 경우보다 평균 8 % 정도의 효율의 증가를 확인하였다.

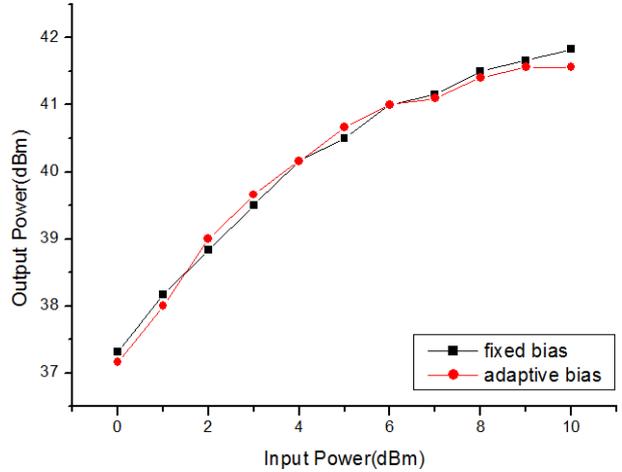


그림 9. 입력 전력에 따른 출력 전력  
Fig. 9. Output power corresponding to the input power.

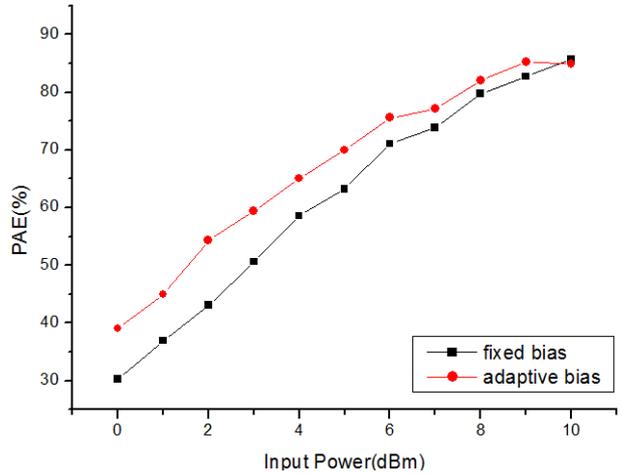


그림 10. 입력 전력에 따른 전력부가효율  
Fig. 10. PAE corresponding to the input power.

이 같은 낮은 입력전력에서의 효율의 증가는 적응형 바이어스를 사용함으로써 그림 8과 같이 전력증폭기의 소비전류가 급격히 줄어들어 식 (1)을 이용한 효율특성에서 효율의 개선을 나타낸다. 다음의 식은 제안된 적응형 class-E 전력증폭기에서 적응형 회로에 인가되는 전력을 포함한 전력부가효율 식이다.

$$PAE = \frac{P_{output} - P_{input}}{(V_{GS} \times I_{GS}) + (V_{OP-amp} \times I_{OP-amp})} \quad (1)$$

#### IV. 결 론

본 논문은 무선전력전송 시스템 송신부의 다양한 입력전력에서 기존의 전력증폭기보다 고효율 동작이 가능

한 적응형 바이어스 조절회로를 포함하는 class-E 고효율 전력증폭기를 설계 및 구현하였다. 낮은 입력전력에서 드레인 바이어스를 조절함으로써 낮은 전류소비를 가능케 하여 무선전력전송 시스템의 전체 동작 효율을 개선하였다. 무선전력전송 송신단의 효율의 변화는 전체적인 전송 시스템의 효율에 큰 영향을 끼치기 때문에 고효율 스위칭모드 전력증폭기인 class-E 전력증폭기를 이용하여 낮은 입력전력에서 드레인 바이어스를 조절하였다. 설계한 전력증폭기는 13.56 MHz에서 41.83 dBm의 출력 전력과 85.67 %의 전력부가효율을 갖고, 0 dBm ~ 6 dBm의 낮은 입력전력에서 고정된 바이어스보다 평균 8 %의 높은 효율을 갖는 것을 확인할 수 있다.

## REFERENCES

- [1] Matthew M. Radmanesh, Radio Frequency and Microwave electronics Illustrated. Prentice Hall PTR, 2001.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," Annals of Physics, vol. 323, no. 1, pp. 34-48, January 2008.
- [3] B. L. Cannon, J. F. Hoburg, D. D. Stancil, and S. C. Goldstein, "Magnetic resonant coupling as a potential means for wireless power transfer to multiple small receivers," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 24, no. 7, pp. 1819-1825, July 2009.
- [4] Y. S. Jeon J. K. Cha, S. W. Nam, "High-Efficiency power amplifier using novel dynamic bias switching", IEEE Transactions on Microwave Theory And Techniques, vol. 55, no. 4, April 2007.
- [5] S. C. Cripps, RF Power Amplifiers for Wireless Communications, Artech House, 1999.
- [6] A. Grebennikov, N. O. Sokal, Switchmode RF power Amplifiers, ewnes, 2007.
- [7] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class-E a new class of high efficiency tuned single-ended switching power amplifiers", IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 10, no. 3, pp. 168-176, Jun 1975.

## 저 자 소 개



김 상 환(학생회원)  
2013년 2월 숭실대학교 정보통신  
전자공학부 (공학사)  
2013년 3월~현재 숭실대학교  
정보통신공학과 석사과정  
<주관심분야 : 초고주파 회로설계,  
RF Power Amplifier, 무선전력전송>

서 철 현(정회원)  
대한전자공학회 논문지  
vol.31, no 6 참조