

# 13.56 MHz, 300 Watt 고효율 Class E 전력 송신기 설계

## Highly Efficient 13.56 MHz, 300 Watt Class E Power Transmitter

전정배 · 서민철 · 김형철 · 김민수 · 정인오 · 최진성\* · 양영구

Jeongbae Jeon · Mincheol Seo · Hyungchul Kim · Minsu Kim ·  
Inoh Jung · Jinsung Choi\* · Youngoo Yang

### 요 약

본 논문에서는 220 V의 AC 전원을 공급받아 13.56 MHz의 RF 신호를 출력하는 고효율, 고출력 Class E 전력 송신기를 설계하였다. 송신기는 AC-DC 변환기와 class E 전력 증폭기로 구성된다. 설계된 AC-DC 변환기는 220 V/60 Hz의 가정용 전원을 공급 받아서 약 290 V의 DC 전압을 출력한다. 이때, AC-DC 변환기는 98.03 %의 매우 높은 변환 효율을 가진다. 변환 효율을 최대로 하기 위하여 별도의 DC-DC 변환기를 사용하지 않고, AC-DC 변환기의 출력 전압을 주 전력 증폭기의 드레인 바이어스 전압으로 사용하였다. 또한, class E 전력 증폭기의 전력 손실을 최소화하기 위해 high-Q 인덕터를 제작하였다. 측정 결과, 13.56 MHz에서 동작하는 class E 전력 증폭기는 최대 출력 전력 323.6 Watt에서 84.2 %의 PAE(Power-Added Efficiency)를 가진다. AC-DC 변환기를 포함한 class E 전력 송신기는 323.6 Watt에서 82.87 %의 매우 높은 효율 특성을 나타낸다.

### Abstract

This paper presents a design of high-efficiency and high-power class E power transmitter. The transmitter is composed of 300 Watt class E power amplifier and AC-DC converter. The AC-DC converter converts 220 V and 60 Hz AC to a 290 V DC. The generated DC voltage is directly applied to a bias of the class E power amplifier. Because the converter does not have DC-DC converter unit, it has very high conversion efficiency of about 98.03 %. To minimize the loss at the output of the power amplifier, high-Q inductor was implemented and deployed to the output resonant circuit. As a result, the 13.56 MHz class E power amplifier has a high power-added efficiency of 84.2 % at the peak output power of 323.6 W. The overall efficiency of class E power transmitter, including the AC-DC converter, is as high as 82.87 %.

Key words : Class E Amplifier, AC-DC Converter, High-Efficiency Transmitter, High-Q Inductor

### I. 서 론

RF 전력 송신기는 심각한 열 문제와 유지 비용 및 안정성 측면에서 점점 더 고효율 특성이 요구된다. 전력 송신기의 고효율 특성은 냉각 시스템의 비용을 절감할 수 있을 뿐만 아니라 송신기의 부피와 무게

를 줄일 수 있다는 장점이 있다<sup>[1]</sup>.

고주파에서도 높은 효율을 얻을 수 있는 증폭기로는 class E와 class F 전력증폭기가 대표적이다<sup>[1]~[3]</sup>. Class F 전력증폭기는 출력 파형의 오버랩을 없애기 위해 고조파를 제어하는 방식을 사용한다. 하지만 고조파를 제어할 위한 회로가 복잡하고 크기가

「본 논문은 삼성종합기술원의 연구비 지원으로 연구되었음.」

성균관대학교 정보통신공학부(School of Information & Communication Engineering, Sung Kyun Kwan University)

\*삼성종합기술원(Signal & Systems Lab, Radio Signal Processing Group, Samsung Advanced Institute of Technology)

· 논문 번호 : 20110630-063

· 교신저자 : 양영구(e-mail : yang09@skku.edu)

· 수정완료일자 : 2011년 8월 3일

커지는 단점이 있다. 반면, class E 전력증폭기는 트랜지스터의 출력 기생 커패시턴스를 포함하여 출력단이 구성되어 회로 구성이 간단하고 스위칭에서 발생하는 손실이 적어 실질적인 고효율 동작이 가능하다. 그러한 이유로 class E 전력증폭기는 주로 RF 가열 시스템과 플라즈마 발생 시스템 등에 많이 사용된다<sup>[1]~[3]</sup>.

본 논문에서는 AC-DC 변환기와 class E 전력증폭기를 상호 최적화하여 AC 220 V/ 60 Hz의 가정용 전원을 입력 받아 13.56 MHz의 고주파 RF 신호를 출력하는 고효율 및 고효율 전력송신기를 설계하였다.

고효율 특성을 얻기 위해 DC-DC 변환기를 채용하지 않고 AC-DC 변환기의 출력인 DC 290 V를 직접 전력증폭기의 드레인 바이어스로 인가하였다. 또한, high-Q 인덕터를 제작하여 출력 공진 회로에 채용함으로써 높은 효율 특성을 얻을 수 있었다.

## II. 송신기 설계

그림 1은 본 논문에서 설계한 AC-DC 변환기와 전력 증폭기로 구성된 송신기의 간략한 구성도이다. 전원 공급 부인 AC-DC 변환기는 AC 220 V를 DC 290 V로 변환하여 전력 증폭기의 드레인 바이어스 전압으로 직접 인가한다. 전력 증폭기는 드라이버단과 주 증폭단의 2단으로 구성된다.

### 2-1 AC-DC 변환기 설계

그림 2는 설계된 AC-DC 변환기의 구성도이다. AC-DC 변환기는 퓨즈, 배리스터, 써미스터로 구성된 보호 회로와 브릿지 정류 회로, 평활 회로로 구성된다. 보호 회로 중 퓨즈는 과전류에 의한 회로 손상을 방지해 주고, 배리스터는 갑작스런 전압의 찌지를 흡수하여 기기 손상을 방지한다. 써미스터는 전

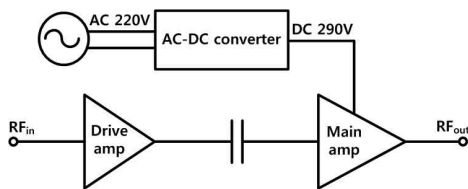


그림 1. 송신기의 구성도  
Fig. 1. Block diagram of the transmitter.

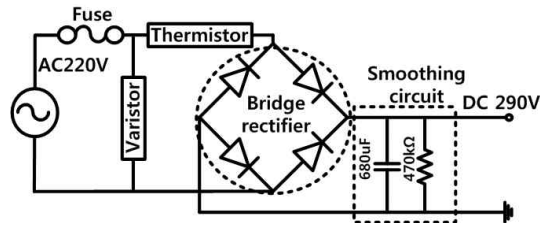


그림 2. 설계된 AC-DC 변환기 회로  
Fig. 2. Schematic diagram of the AC-DC converter.

원이 연결되는 순간에 발생할 수 있는 과도한 돌입 전류에 의한 회로 손상을 방지하는 역할을 한다. 위와 같은 보호 회로를 구성하여 안정성을 높였다. 다이오드 4개로 이루어진 브릿지 정류기를 통해 220 V의 AC 전압은 DC 전압으로 정류되며, 출력 단의 평활 회로로 사용된 커패시터를 통해 출력 전압의 리플이 제거된다.

본 논문에서 설계한 AC-DC 변환기는 220 V AC 전원을 입력받아서 290 V DC 전압을 출력한다. 생성된 290 V의 DC 전압을 주 전력증폭기의 드레인 바이어스로 사용하였다. 따라서 감압 혹은 증압을 위한 별도의 DC-DC 변환기를 추가하지 않은 간단한 구조를 가지며, 이로 인해 높은 변환 효율을 유지한다.

### 2-2 Class E 전력 증폭기 설계

그림 3은 주 증폭 단과 드라이브 단으로 구성된 300 watt class E 전력 증폭기를 나타낸다. 주 증폭 단과 드라이브 단은 인터스테이지 정합 회로를 통하여 연결된다. 주 증폭 단의 출력은 정합 회로와  $L_s$ ,  $C_s$ 로 이루어진 공진기, 그리고 2차 및 3차 고조파를 제거하기 위한 고조파 필터로 이루어져 있다.

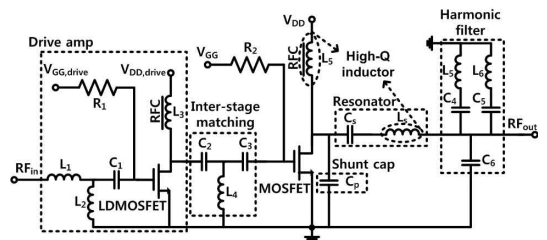
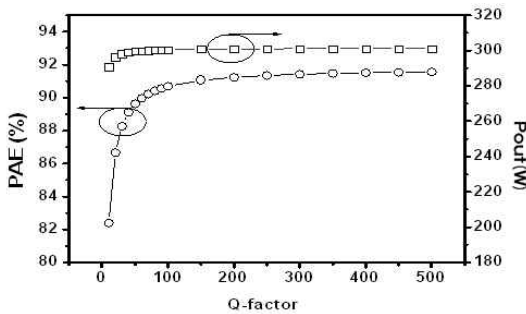


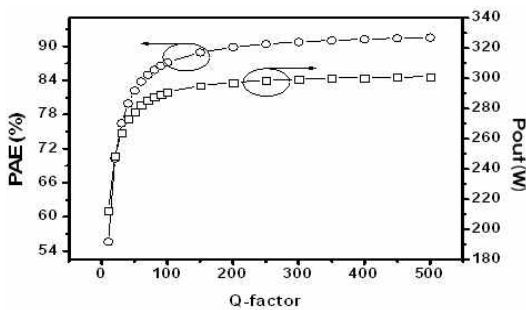
그림 3. 설계된 300 watt class E 전력 증폭기  
Fig. 3. Schematic diagram of the 300 watt class E power amplifier.

Class E 전력증폭기는 이상적으로 출력 전압과 전류가 오버랩 없이 스윙하는 zero voltage switching (ZVS) 특성을 가져 100 %의 효율을 가진다<sup>[1]</sup>. 그러나 트랜지스터의 비이상적인 스위칭 동작과 출력 정합 회로에 의한 삽입 손실 등에 의해 실질적인 효율은 감소하게 된다. 특히, 출력 공진단에 사용되는 인덕터의  $Q$ 값은 효율에 큰 영향을 미친다. 일반적으로 high- $Q$  인덕터는 회로나 시스템에서 RF 전력 손실, 신호 잡음 그리고 DC 전력 소모를 최소화시켜 준다<sup>[4]</sup>.

그림 4는 전력증폭기의 출력단에 사용될 직렬 인덕터와 바이어스 인가를 위한 RF 초크의  $Q$ 값에 따른 PAE와 출력 전력의 특성 변화를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 4(a)의 RF 초크는  $Q$ 값이 약 150 이하가 되면 출력 전력에는 영향이 크지 않지만 PAE에는 큰 영향을 준다. 그림 4(b)의 직렬 인덕터의 경우,



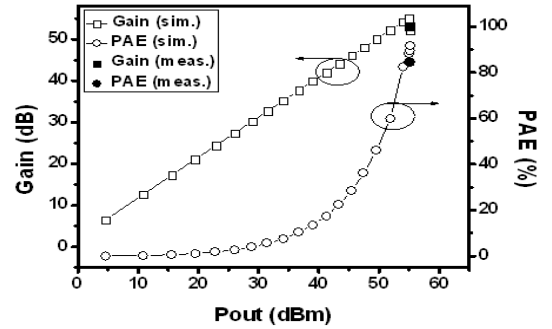
(a) RF 초크  
(a) RF choke



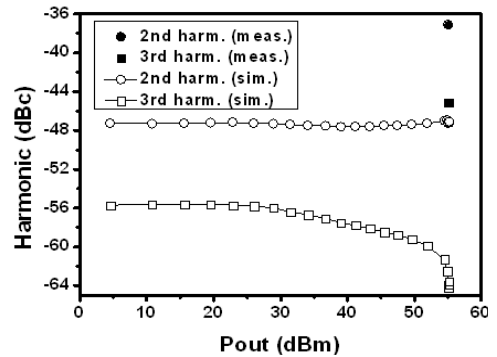
(b) 직렬 인덕터  
(b) Series inductor

그림 4. 인덕터의  $Q$ -factor에 따른 PAE와 출력 전력 특성 변화

Fig. 4. Simulated PAE and  $P_{out}$  according to  $Q$ -factor of the inductors.



(a) 시뮬레이션과 측정에서의 PAE 및 이득 특성  
(a) Simulation and measurement PAE and gain



(b) 시뮬레이션과 측정에서의 2차, 3차 고조파 특성  
(b) Simulation and measurement 2nd, 3rd harmonic distortion

그림 5. Class E 전력 증폭기 성능 결과

Fig. 5. Results of the class E power amplifier.

$Q$ 값이 200 이하가 되면 출력 전력과 PAE 모두 급격히 감소하게 된다. RF 초크의 낮은  $Q$ 값에 의한 영향보다 직렬 인덕터에 의한 영향이 더 큰 것을 확인할 수 있다. 하지만 고효율 전력증폭기를 위해서는 직렬 인덕터뿐 아니라 RF 초크도 높은  $Q$ 값을 갖도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 전력증폭기의 효율을 극대화하기 위하여 높은  $Q$ 값을 가지는 직렬 인덕터와 RF 초크를 직접 제작하였다. 제작된 인덕터는 Agilent사의 E4980A LCR meter로 측정하였다. RF 초크와 직렬 인덕터의 코어는 AMIDON 사의 T106-2와 T225-6를 사용하였다. RF 초크는 와이어를 16턴 감아서 측정 한 결과, 10  $\mu$ H의 인덕턴스, 0.09  $\Omega$ 의 직류 저항, 300 이상의 높은  $Q$ 값을 가졌다. 직렬 인덕터는 두 단의 페라이트 코어에 손실이 적고 전도성이 뛰어난 실버 코팅된 와이어를 5턴 감아서 측정 한 결과, 1.1  $\mu$ H의

인덕턴스, 0.09  $\Omega$ 의 직류 저항, 500 이상의 매우 높은  $Q$ 값을 가졌다.

그림 5는 제작된 직렬 인덕터와 RF 초크의  $Q$ 값을 측정하여 전력증폭기 시뮬레이션에 적용한 결과이다. 시뮬레이션 결과 최대 출력 전력 302 W에서 91.57 %의 높은 효율과 54.6 dB의 이득을 얻었다. 2차와 3차 고조파는 각각 -47.82와 -68.80 dBc를 나타내었다.

### III. 제작 및 측정 결과

그림 6은 실제 제작된 300 watt class E 전력 송신기의 사진이다. Class E 전력증폭기는 4.6의 비유전율과 1.6 mm의 기판 두께를 갖는 FR-4 기판을 사용하여 제작하였다. AC-DC 변환기를 포함한 송신기 전체의 크기는 236×212 mm<sup>2</sup>이다. AC-DC 변환기의 정류기는 DIODE사의 GBU806을 사용하였고, 드라이브 단과 주 증폭 단은 각각 Freescale사의 MRF-6V12500HR3과 IXYS사의 DE275-102N06A를 사용하였다.

설계된 AC-DC 변환기는 250  $\Omega$ 의 부하 저항이 연결된 상태에서 355.3 W의 전력을 인가 받아 348.3 W의 전력을 출력하여 98.03 %의 매우 높은 변환 효율을 가졌다. 높은 변환 효율을 위해 감압 혹은 승압을 위한 DC-DC 변환기를 추가하지 않은 간단한 구조로 제작되었다. 변환된 290 V의 DC 출력 전압은 전력 증폭기의 드레인 바이어스 전압으로 인가되었다.

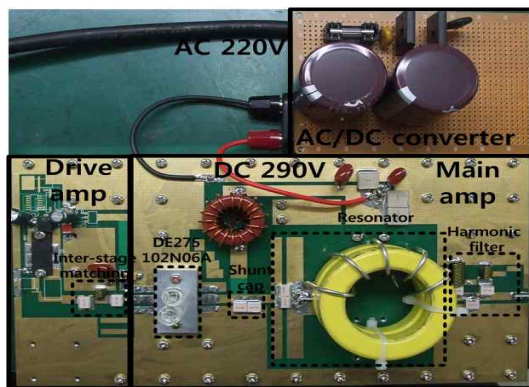


그림 6. High-Q 인덕터가 적용되어 제작된 300 watt 송신기

Fig. 6. A photograph of the implemented 300 watt transmitter including a high-Q inductor.

자체 제작한 high-Q 인덕터를 사용한 class E 전력증폭기는 최대 출력 전력 323.6 W에서 84.53 %의 높은 PAE를 가졌다. 2차 및 3차 고조파 역시 각각 -37.14와 -45.12 dBc로 우수한 선형성을 가짐을 확인하였다. AC-DC 변환기를 포함한 class E 전력 송신기는 출력 전력 323.6 W에서 82.87 %의 매우 높은 전체 효율 특성을 가졌다.

### IV. 결 론

본 논문에서는 220 V의 AC 전원을 공급 받아 13.56 MHz의 RF 신호를 출력하는 고효율 및 고출력 송신기를 설계 및 제작하였다. AC-DC 변환기는 98.03 %의 높은 변환 효율을 가지며, high-Q 인덕터를 적용한 class E 전력 증폭기는 좋은 고조파 특성을 유지하였다. 최대 출력 전력 323.6 W에서 84.53 %의 높은 PAE를 측정하였다.

AC-DC 변환기와 class E 전력 증폭기가 상호 최적화된 형태의 class E 전력 송신기는 출력 전력 323.6 W에서 82.87 %의 매우 높은 전체 효율 특성을 보였다. 제안하는 방식은 높은 효율을 통하여 추가로 발생하는 냉각 시스템으로 인한 비용을 절감할 뿐만 아니라 송신기의 부피와 무게를 줄일 수 있어 경쟁력 있는 송신기 설계에 응용될 수 있을 것이다.

### 참 고 문 헌

- [1] L. S. Tan, R. A. McMahon, "A study of the operation of a class E amplifier at 13.56 MHz", in *Proc. 6th Int. Conf. Power Electron. Variable Speed Drives*, pp. 168-172, Sep. 1996.
- [2] N. O. Sokal, A. D. Sokal, "Class E - A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 10, no. 3, pp. 168-176, Jun. 1975.
- [3] F. H. Raab, "Class-E, class-C, and class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics", *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 8, pp. 1462-1468, Aug. 2001.
- [4] N. Khalid, J. Singh, H. P. Le, J. Devlin, and Z. Sauli, "A very high Q-factor inductor using MEMS technology", *IEEE Microelectronics & Electronics*, pp. 77-80, Jan. 2009.