

무선 LAN용 저전압 고효율 E급 증폭기 설계

박찬혁^o, 구경현
인천대학교 전자공학과
e-mail : laiken@incheon.ac.kr

Design of A Low Voltage High Efficiency Class-E Amplifier for Wireless LAN

Chan Hyuck Park, Kyung Heon Koo
Dept. of Electronics Engineering, University of Incheon

Abstract

High-efficiency switched-mode circuits such as the class-E amplifier are well-known in the MHz frequency range. The class-E amplifier is a type of switching mode amplifier offering very high efficiency approaching 100%. In this paper of the class-E amplifier by using pHEMT device, the design has been done theoretically and experimentally, with simulation by using the harmonic balance method using circuit simulator. The amplifier using microstrip circuit and the pHEMT demonstrate 66% power-added- efficiency (PAE) at 2.4GHz with 17.6dBm of output power.

Key words : class-E amplifier, pHEMT, switched-mode, high efficiency

I. 서 론

최근 무선통신 시스템이 다양한 서비스를 제공함에 따라 무선통신 시스템은 더욱 많은 기능을 포함하며 크기는 작고 작은 소모전력으로 오랜 배터리 수명을 가지는 송수신기를 필요로 할 것이다. 이 중 시스템에서 가장 큰 전력소모를 가지는 전력증폭기는 낮은 동작 전압에서 고효율을 가지도록 설계를 해야 한다.

고효율 특성을 갖는 증폭기설계를 위해 pHEMT를 이용하여 1.8V의 동작전압을 갖는 E급 전력증폭기를 설계하였다. E급 전력증폭기는 Sokal이 처음 원리를 제시하였고 Raab은 이상적인 기본개념을 이용하여 설계 수식을 정의하였다^{[1][2][3]}. E급 전력증폭기는 다른 급의 전력증폭기 보다 낮은 전력소모를 갖는

이점이 있어 최근 이동통신단말기용으로도 큰 관심을 끌고 있다.

본 논문의 2장에서는 E급 전력증폭기의 기본적인 개념과 특징에 대해서, 3장과 4장에서는 설계과정과 시뮬레이션, 측정 결과에 대해 서술하겠다.

II. E 급 전력증폭기의 동작원리

일반적인 시스템에서 효율은 작은 전력소모에 의해 최대치를 얻을 수 있다. 무선 시스템 전력증폭기에서는 트랜지스터의 전력소모가 가장 크기 때문에 트랜지스터가 스위칭 동작을 하여 트랜지스터에 흐르는 높은 전압과 높은 전류를 on/off 시킴으로써 고효율 특성을 얻을 수 있다^[1].

그림 1 은 고효율 특성을 얻기 위한 트랜지스터의 전압과 전류의 이상적인 파형이다. 트랜지스터가 "on" 상태일 때 낮은 저항 값을 갖는 것처럼 동작을 하게 되어 높은 전류가 흐르는 반면에 전압은 0에 가까운 값을 가지게 되고 "off" 상태일 때 스위치가 개방되어 높은 전압이 걸리는 반면에 전류가 0인 값을 가지게 된다^[2].

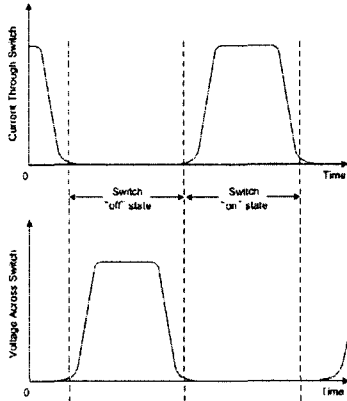


그림 1. 고효율 특성을 위한 트랜지스터의 이상적인 전압과 전류 파형^[1].

Fig. 1. Conceptual target waveforms of transistor voltage and current for high efficiency^[1].

그림 2 는 E급 전력증폭기의 기본 등가회로이다. 이 회로는 능동소자인 스위치와 트랜지스터의 내부 커패시턴스 값과 외부 커패시터 값을 포함한 Cp, 인덕터 Ldc, 동작주파수에서 이상적인 직렬 필터역할을 하는 Lo와 Co, 리액턴스 L1, 부하저항 RL 로 구성되어있다. 트랜지스터가 이상적인 스위칭 동작을 한다고 가정한다면 스위치가 개방될 때 스위치에 흐르는 전류는 0이 되고 스위치가 단락이 될 때 전압은 0이 된다. 이러한 스위칭 동작으로 트랜지스터에서 소모되는 전력은 0이 된다. 리액턴스 L1 은 출력 파형의 위상천이를 함으로써 효율을 증가시키는 역할을 한다^[4].

스위치가 단락상태일 때 트랜지스터의 내부 커패시턴스 값과 외부 커패시턴스 값을 포함한 Cp는 처음에 충전되어있었던 전력을 트랜지스터의 온 저항으로 방전시키고 스위치가 개방될 때 Cp는 $(CpV_{dc}^2)/2$ 로 충전할 것이다. E급 전력 증폭기를 설계를 위해 설계수식에 맞게 그 소자 값들을 다음과 같이 정해주어 최적의 값을 계산할 수 있다^[1].

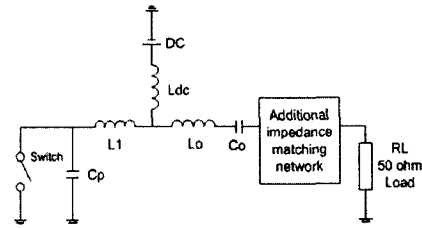


그림 2. E급 전력 증폭기의 이상적인 등가회로
Fig. 2. The equivalent circuit diagram of class E amplifier with ideal switch.

$$P_o = \frac{V_{dc}^2}{R_{dc}} \quad (1)$$

$$R_{dc} = 1.7337R \quad (2)$$

$$Z = R + jX \quad (3)$$

$$X = 1.152R \quad (4)$$

$$V_{s \max} = 3.56 V_{dc} \quad (5)$$

$$i_{s \max} = 2.84 I_{dc} \quad (6)$$

주어진 출력전력 Po 와 공급전원 Vdc 값으로 스위치의 커패시턴스 값 Cp 와 부하저항 값 RL 을 구할 수 있다. Vdc=1 이고 Po=1 일 때 이상적인 파형을 그림 3에서 보여주고 있다^[5].

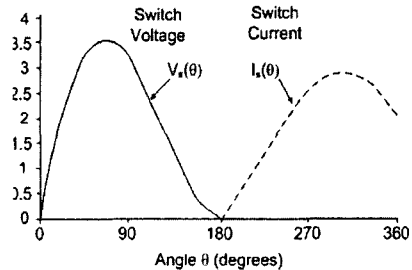


그림 3. E급 전력증폭기의 스위치 전압, 전류 파형

Fig. 3. Class E amplifier switch waveform.

III. 증폭기 설계 및 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 E급 전력 증폭기는 무선 랜 주파수인 2.4GHz 대역에서 동작하고, Agilent 사의 PHEMT AFT-34143을 사용하여 single-ended 구조로 설계하였고, 그림 4는 제안한 E급 전력증폭기의 회로도이다.

우선 집중정수 소자로 회로를 설계하고 직렬 인덕턴스는 고 임피던스의 직렬 전송선로로 변환하고 병렬 커패시턴스는 병렬 개방전송선로로

변환하고 병렬 커패시턴스는 병렬 개방전송선로로 변환하여 설계하였고 시뮬레이션을 통해 길이를 최적화 하였다^[5]. 또한 스위치 모델에서 고효율이 구현되도록 상대적으로 작은 값의 트랜지스터 내부 커패시턴스에 부가적으로 외부 커패시턴스 Cp를 적용하여 시뮬레이션을 통해 그 값을 최적화 하였다.

$$L = \frac{Z_0 \times EL}{f \times 360}, C = \frac{EL}{Z_0 \times f \times 360} \quad (7)$$

회로설계 시뮬레이터에서의 하모닉 밸런스 방법을 이용하여 E급 전력증폭기의 전력부가 효율, 출력전력, 이득, 스위칭 파형을 시뮬레이션하여 원하는 결과를 얻었다.

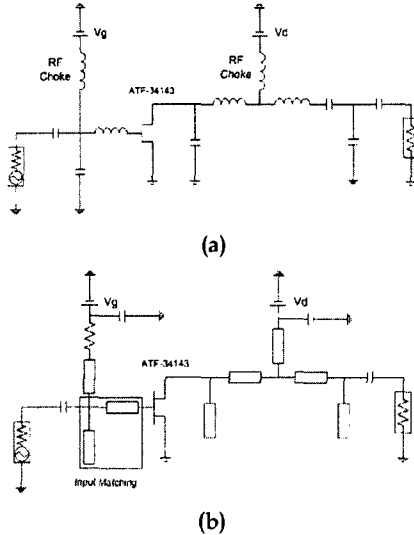


그림 4. E급 전력증폭기 회로도
(a) 집중정수소자 (b) 전송선로
Fig. 4. Schematic of the class E amplifier with (a) lumped elements (b) transmission line.

그림 5는 Vds=1.8V에서 스위칭 현상이 일어나는 입력전력 6dBm을 인가하였을 때, E급 전력증폭기의 드레인 전압과 전류 Vds와 Ids의 시뮬레이션된 출력 파형이다. 그림 6은 Vds=1.5V일 때, 전력 증폭기의 출력과 전력부가 효율의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 증폭기의 전압 파형과 전류 파형을 비교하여 보면 트랜지스터가 완벽하지는 않지만 스위치 동작을 하는 것을 확인할 수 있다. 증폭기의 전압 파형과 전류 파형을 비교하여 보면 트랜지스터가 완벽하지는 않지만 스위치 동작을 하는 것을 확인할 수 있다.

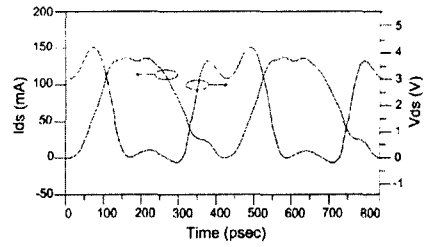


그림 5. E급 전력증폭기의 드레인 전압과 전류 파형
Fig. 5. Simulated drain voltage and current waveform of class E amplifier.

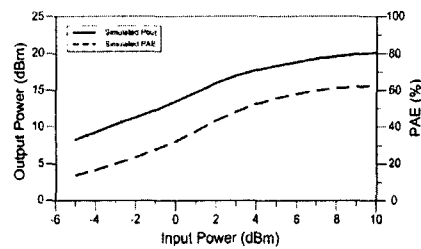


그림 6. 출력전력과 전력부가 효율 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulated result of the power added efficiency and output power of the class E power amplifier.

그림 6은 Vds=1.8V일 때, 전력증폭기의 출력과 전력부가 효율의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 입력 P1dB는 6dBm이며 이때의 출력전력은 18.7dBm 이고 전력부가효율은 약 58% 를 나타내고 있다.

IV. 전력증폭기의 제작 및 측정

설계된 전력증폭기는 유전율 3.48, 두께 1.016mm 인 기판에 제작하였으며, 그림 7은 제작된 E급 증폭기의 실물도이다.

그림 8은 E급 전력증폭기의 출력전력과 전력부가 효율을 측정된 결과이다. 입력전력이 낮을 때는 선형적 출력특성을 가지며 동작하고 전력부가 효율은 입력전력에 따라 증가하여 P1dB

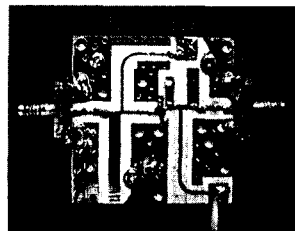


그림 7. E급 전력증폭기의 실물사진
Fig. 7. Photograph of the class E amplifier.

지점인 17.6dBm에서는 66%의 고효율 특성을 보이는 스위칭 모드 증폭기로 동작하는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 입력전력이 6dBm일 때 출력전력과 고조파를 측정한 스펙트럼 결과이다. 2차 고조파의 크기는 -26.7dBc이며 3차 고조파의 크기는 -47.4dBc이다.

그림 10은 입력전력이 6dBm일 때 주파수에 따른 출력전력 및 전력부가효율을 나타낸 그림이다. 2.3GHz에서부터 2.6GHz까지 전력부가효율 50%이상의 특성을 보이고 2.45GHz에서 최대 66%의 전력부가효율을 나타내고 있다.

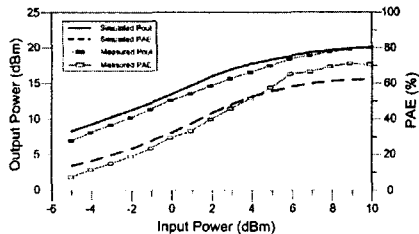


그림 8. 출력전력과 전력부가효율 측정 결과
Fig. 8. Measured result of the power added efficiency and output power of the class E power amplifier.

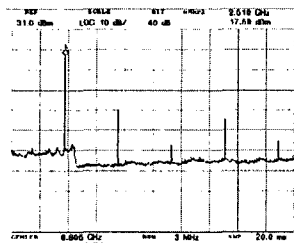


그림 9. P_{1dB}에서의 출력 스펙트럼 결과
Fig. 9. Measured result of output spectrum at P_{1dB} (input power=6dBm).

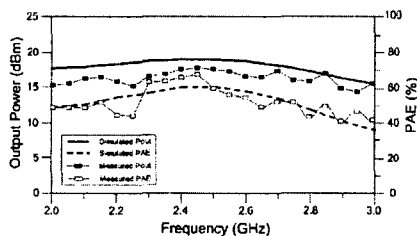


그림 10. 입력전력 6dBm에서의 주파수에 따른 출력전력과 전력부가효율
Fig. 10. Output power and efficiency as a function of frequency for the class-E amplifie with input power of 6dBm.

V. 결 론

본 논문에서는 pHEMT 모델을 사용하고 하모닉 밸런스 시뮬레이션을 이용하고 집중정수 소자로 E급 증폭기를 설계하고 회로를 전송선로로 변환하여 최종 증폭기 회로를 설계 및 제작하였다. 제작된 E급 전력증폭기는 2.4GHz에서 출력전력이 17.6dBm일 때 66%의 전력부가효율을 나타내었다. 향후 높은 효율 특성을 갖는 소형의 전력증폭기의 활용으로 무선 수신기에서의 전력효율을 개선할 수 있을 것이라 사료된다.

참고문헌

- [1] F. H. Raab, "Idealized operation of the class E tuned power amplifier," *IEEE Trans. Circuits Syst.*, vol. CAS-25, pp. 725-735, Dec. 1977.
- [2] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class-E-A new class of high-efficiency tuned single-ended switching power amplifiers," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-10, pp. 168-176, June 1975.
- [3] F. H. Raab, "Effects of circuit variations on the class E tuned power amplifier," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. SC-13, pp. 239-247, Apr. 1978.
- [4] Y. Qin, S. Gao, A. Sambell, "Design of low cost broadband class-E power amplifier using low voltage supply," *High Frequency Postgraduate Student Colloquium*, pp. 101-106, Sept. 2004.
- [5] A. J. Wilkinson, J. K. A. Everard, "Transmission-line load-network topology for class-E power amplifiers," *IEEE Trans. MTT*, vol. 49, pp. 1202-1212, Jun. 2001.
- [6] T. Mader and Z. Popovic, "The transmission-line high-efficiency class-E amplifier," *IEEE Microwave Guided Wave Lett.*, vol. , pp. 290-292, Sept. 1995.