

고효율특성을 갖는 J급 증폭기 설계

(Design of J-Class Amplifier with High Efficiency)

노희정* · 이병선**

(Hee-Jung Roh · Byung Sun Lee)

Abstract

In this paper designed J-class amplifier that have high efficiency using parasitic of pHEMT. Measured results of the designed J-class amplifier is maximum output power of 31.5dBm and gain of 16.5dB, minimum output power of 29.8dBm. when input power 15dBm. Maximum drain efficiency is 76.2% at 2.95GHz, maximum drain efficiency is 61%. The J-class amplifier has average gain of 15.35dB and average efficiency of 35%.

Key Words : J-class Amplifier, High Efficiency, Parasitic Component

1. 서 론

최근에 휴대하기 간편한 전기통신시스템이 대거 등장하면서 배터리의 중요성이 대두되고 있다. 하지만 배터리 기술의 발전 문제로 배터리의 용량은 제한적이다. 이 문제를 해결하기 위하여 전기설비 시스템 구성 부품들의 전력소비량을 줄이기 위한 많은 노력을 하고 있다. 특히 전력소모가 많은 전력증폭기의 효율을 높여 배터리의 소모를 줄이고자 하는 연구가

많이 발표되고 있으며, 효율 향상을 위한 전력증폭기의 제안이 많이 있다. 특히 F급 증폭기는 홀수차 고조파를 출력단에서 개방시키고, 짝수차 고조파를 단락시켜서 드레인 전압 파형을 구형파로 만드는 증폭기이다. E급 증폭기의 효율 향상기법에서도 고조파 제어는 매우 중요한 내용이다. 그러나 트랜지스터의 출력단에 기생 커패시턴스의 존재로 인해 높은 고조파의 제어가 어렵게 되어 E급 증폭기나 F급 증폭기를 사용한 이상적인 고조파 제어가 어렵다. 따라서 E급 증폭기나 F급 증폭기의 이상적인 회로 설계에서 2차 고조파나 3차 고조파까지만 고려한 J급 증폭기가 제안되었다[1].

그림 1-1의 J급 증폭기의 블럭도로 트랜지스터의 출력 커패시턴스 C_{ds} [2]를 활용하여 출력단에 기본파와 2차 고조파 임피던스를 적용하고 3차 고조파는 단락 시키도록 설계한다. 기본파 및 2차 고조파에서의 임피던스를 식 (1-1)과 식 (1-2)로 표현할 수 있다[2].

* 주저자 : 김포대학교 유비쿼터스-IT과 교수
** 교신저자 : 김포대학교 유비쿼터스-IT과 교수
* Main author : Department of Ubiquitous- IT, KIMPO college
** Corresponding author : Department of Ubiquitous- IT, KIMPO college
Tel : 031-999-4208, Fax : 031-999-4775
E-mail : june@kimpo.ac.kr
접수일자 : 2012년 8월 17일
1차심사 : 2012년 8월 21일
심사완료 : 2012년 9월 26일

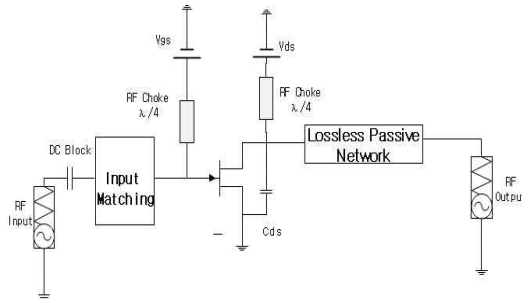


그림 1-1. J급 증폭기의 블록도
Fig. 1-1. Block diagram of J-class amplifier

$$Z_{f0} = R_L + jR_L \quad (1-1)$$

$$Z_{2f_0} = 0 - j\frac{3\pi}{8}R_L \quad (1-2)$$

파형에 직류, 기본 주파수와 2차 고조파만 포함하는 경우 드레인 전류는 다음과 같다[3].

$$I_{ds}(\theta) = I_{dc} + I_{fund} + I_{second} \quad (1-3)$$

$$= I_{dc}\left(1 + \frac{\pi}{2}\sin(\theta) - \frac{2}{3}\cos(2\theta)\right)$$

$I_{ds}(\theta)$ 는 드레인 전류, I_{dc} 는 직류 전류, I_{fund} 는 기본 주파수의 전류이며 I_{second} 는 2차 고조파의 전류이다. 모든 전류를 직류전류로 정규화 변환한다[3].

$$I_{dc} = 1 \quad (1-4)$$

$$I_{fund} = \frac{\pi}{2}\sin(\theta) \quad (1-5)$$

$$I_{second} = -\frac{2}{3}\cos(2\theta) \quad (1-6)$$

전압파와 전류파는 서로 반대 부호를 가지고 있다. 드레인 전압의 기본파는 드레인 전류와 180도 위상차를 가지고 있고 드레인 전압의 2차 고조파는 드레인 전류와 360도 위상차를 가지고 있다. 이것은 증폭기의 회로 구성에 의해 결정된 것이다. 전압파 전류에 대한 기존 연구에서 이 위상 반전은 아직 고려하지 않았다. 드레인 전압은 아래의 식 (1-7)로 표현한다.

$$V_{ds}(\theta) = 1 + A\sin(\theta) - B\cos(2\theta) \quad (1-7)$$

A는 기본파의 전압 크기이고, B는 2차 고조파의 전압 크기이다. 다음은 드레인 전류식이다.

$$I_{drain}(\theta) = \frac{I_{peak}}{\pi} + \left(\frac{I_{peak}}{2}\right)\sin(\theta) - \frac{2I_{peak}}{3\pi}\cos(2\theta)$$

$$I_{dc} = \frac{I_{peak}}{\pi} \quad (1-8)$$

$$I_{fund} = \frac{I_{peak}}{2}\sin(\theta) \quad (1-9)$$

$$I_{second} = -\frac{2I_{peak}}{3\pi}\cos(2\theta) \quad (1-10)$$

2차 고조파의 부하가 용량성 저항성분이면 2차 고조파의 전압파가 드레인 전류의 위상보다 90도 앞서야 한다.

$$V_{second} = -B\cos\left(2\theta + \pi - \frac{\pi}{2}\right) = -B\cos\left(2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right)\right) \quad (1-11)$$

B는 V_{second} 의 진폭이고, 수식중의 π 는 드레인 전압파와 전류파의 위상차 때문에 발생하는 것이다. 기본 주파수와 2차 고조파의 피크 전압이 동시에 발생하려면 기본파 부하에 기본 전압파가 드레인 전류의 위상보다 45도 늦도록 위상차를 만들어야 한다.

$$V_{fund} = A\sin\left(\theta + \pi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (1-12)$$

A는 V_{fund} 의 진폭이고 π 는 드레인 전압파와 전류파의 위상차 때문에 발생하는 것이다.

드레인 전류는 다음과 같다.

$$V_{out}(\theta) = V_{fund_out} + V_{second_out} \quad (1-13)$$

$$= AV_{dc}\sin\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) - BV_{dc}\cos\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right)$$

고효율특성을 갖는 J급 증폭기 설계

$$I_{out}(\theta) = I_{fund_out} + I_{second_out} \quad (1-14)$$

$$= \left(\frac{I_{peak}}{2}\right)\sin(\theta) - \frac{2I_{peak}}{3\pi}\cos(2\theta)$$

출력 전압과 전류는 동위상(in-phase)의 관계를 가지며 직류 성분을 갖지 않는다. 그래서 J급 증폭기의 출력 전력과 효율을 계산할 수 있다.

직류 전력의 손실은 드레인 전압과 전류의 직류 성분을 통하여 알 수 있다

$$P_{dc} = I_{dc}V_{dc} = \frac{I_{peak}}{\pi}V_{dc} \quad (1-15)$$

부하측의 출력 전압과 전류를 알면 출력 전력을 알 수 있다.

$$P_{out} = \frac{1}{2}Re[V_{fund_out}conj(I_{fund_out})] \quad (1-16)$$

$$= \frac{1}{2}Re[A V_{dc}e^{jw(\frac{\pi}{4})}\frac{I_{peak}}{2}]$$

$$= \frac{I_{peak}V_{dc}}{4}\cos(\frac{\pi}{4})A$$

드레인 효율은 다음과 같다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{dc}} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\sqrt{2}}A \quad (1-17)$$

A가 최대값이 되면 효율도 최대값이 된다. A의 최대값은 $\sqrt{2}$ 이기 때문에 최대 효율은 약 78.5%이다.

$$\eta_{max} = \frac{P_{out}}{P_{dc}} = \frac{\pi}{4} \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{2} = \frac{\pi}{4} \approx 78.5\% \quad (1-18)$$

따라서 J급 증폭기의 이론적인 최대 드레인 효율은 78.5% 이므로 이 최대값을 얻으려면 A는 $\sqrt{2}$, B는 1/2 이 되어야 한다.

드레인 전압은

$$V_{drain}(\theta) =$$

$$V_{dc} + \sqrt{2}V_{dc}\sin(\theta + \pi + \frac{\pi}{4}) - \frac{1}{2}V_{dc}\cos(2\theta + \pi - \frac{\pi}{2}) \quad (1-19)$$

$$V_{fund} = \sqrt{2}V_{dc}\sin(\theta + \pi + \frac{\pi}{4}) \quad (1-20)$$

$$V_{second} = -\frac{1}{2}V_{dc}\cos(2\theta + \pi - \frac{\pi}{2}) \quad (1-21)$$

수식의 π 는 회로에 의해 결정되므로 부하를 계산할 경우 π 를 제거한다. 식 (1-20)과 (1-21)을 통하여 기본파와 2차 고조파의 부하를 구할 수 있다.

$$Z_{load_fund} = \frac{2\sqrt{2}V_{dc}}{I_{peak}} \angle \frac{\pi}{4} \quad (1-22)$$

$$Z_{load_second} = \frac{3V_{dc}\pi}{4I_{peak}} \angle -\frac{\pi}{2} \quad (1-23)$$

또 한 가지 방법은 2차 고조파의 부하를 유도성 저항성분으로 선택해서 위와 같이 유도해 보면, J급 증폭기 동작의 두 가지 해법을 얻을 수 있다.

$$Z_{load_fund} = \frac{2\sqrt{2}V_{dc}}{I_{peak}} \angle \pm \frac{\pi}{4} \quad (1-24)$$

$$Z_{load_second} = \frac{3V_{dc}\pi}{4I_{peak}} \angle \mp \frac{\pi}{2} \quad (1-25)$$

$$P_{outpeak} = \frac{1}{4}V_{dc}I_{peak} \quad (1-26)$$

최대 전력에 관한 부하는 아래의 수식으로 계산할 수 있다.

$$Z_{fund} = \frac{V_{dc}^2}{\sqrt{2}P_{outpeak}} \angle \pm \frac{\pi}{4} = R_L \pm jR_L \quad (1-27)$$

$$Z_{second} = \frac{3\pi V_{dc}^2}{16P_{outpeak}} \angle \mp \frac{\pi}{2} = 0 \mp j\frac{3\pi}{8}R_L \quad (1-28)$$

J급 증폭기의 전압 파형 표현식은 다음과 같다.

$$V_j(\theta) = 1 - \cos\theta - \sin\theta + \frac{1}{2}\sin 2\theta \quad (1-29)$$

식 (1-29)를 정리 하면 다음과 같다.

$$V_j(\theta) = (1 - \cos\theta)(1 - \sin\theta) \quad (1-30)$$

따라서 J급 증폭기 전압 파형을 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$V_{(\theta)} = (1 - \cos\theta)(1 \pm \sin\theta) \quad (1-31)$$

J급 증폭기는 1차, 2차 고조파를 수식 (1-27), (1-28)으로 표현된다. 수식을 보면 증폭기의 동작 가능한 대역폭을 알 수 있다. 2차 고조파 임피던스는 저항 성분이 없이 순수한 유도성 저항성분만 있어야 한다[4].

2. J급 증폭기 설계

J급 증폭기의 기본 주파수와 2차 고조파의 요구 임피던스 값은 수식 (1-27), (1-28)에서 구할 수 있다[7].

그림 1-2는 수식 (1-27), (1-28)을 근거로 설계된 J급 증폭기의 레이아웃(layout)이다.

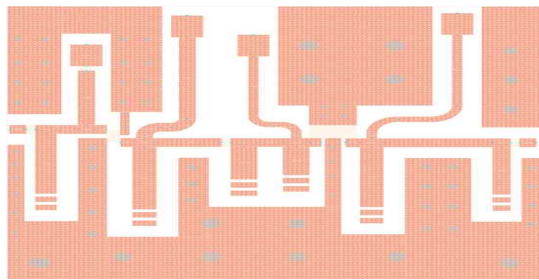


그림 1-2. J급 증폭기의 레이아웃
Fig. 1-2. layout of J-class amplifier

그림 1-3은 J급 증폭기 시뮬레이션의 이득이며, 15dBm 입력전력이 인가되었을 때 1.6GHz~3.0GHz 주파수 대역내에 최대 17.212dB 최소 14.87dB의 이득을 얻었다.

그림 1-4는 J급 증폭기의 드레인 효율 시뮬레이션 결과를 보여 주고 있다. 1.6GHz~3.0GHz 주파수 대

역에서 55.68%에서 75.49%이상의 드레인 효율을 얻었다.

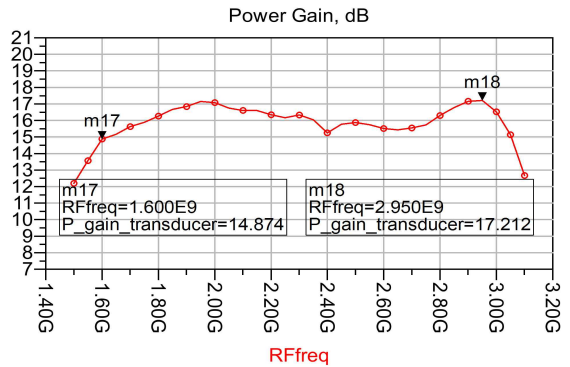


그림 1-3. J급 증폭기의 시뮬레이션된 이득 값
Fig. 1-3. Simulated gain of J-class amplifier

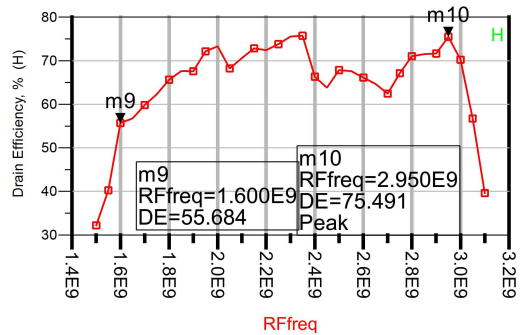


그림 1-4. J급 증폭기의 시뮬레이션된 드레인 효율 값
Fig. 1-4. Simulated Drain Efficiency of J-class amplifier

3. 측정결과 분석 및 종합

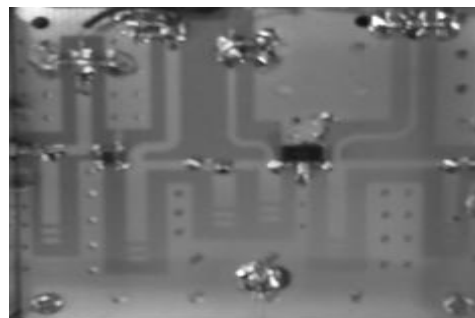


그림 1-5. 설계된 J급 증폭기
Fig. 1-5. Designed J-class amplifier

고효율특성을 갖는 J급 증폭기 설계

그림 1-5는 그림 1-1을 제작한 증폭기이며, 표 1은 제작한 J급 증폭기의 측정결과를 요약한 것이다.

설계된 J급 전력증폭기 최대 드레인 효율은 2.4GHz에서 70.8%이고 그림 1-6에서 평균 드레인 효율은 65.5%이며, 2단 전력증폭기 최대 드레인 효율은 2.9GHz에서 76.2%이고 평균 드레인 효율은 66%이다.

J급 증폭기의 측정결과와 3.0GHz에서 30dBm 출력 전력을 얻으려면 15dBm 입력전력을 인가해야 하고 드레인 효율도 61%로 나타났다.

표 1. 설계된 J급 증폭기의 측정값
Table 1. Measured results of the designed J-class amplifier

항목	증폭기	단위
주파수	1.6~3.0	GHz
이득	14.8~16.5	dB
드레인 효율	60.6~71	%

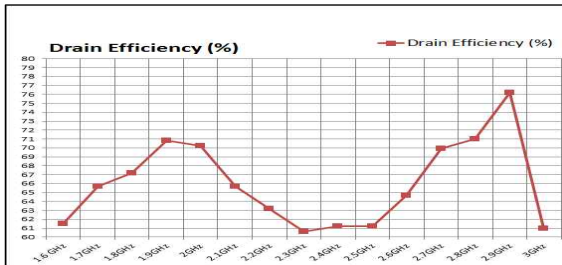


그림 1-6. 설계된 J급 증폭기의 측정된 드레인 효율
Fig. 1-6. Measured Drain Efficiency of J-class amplifier

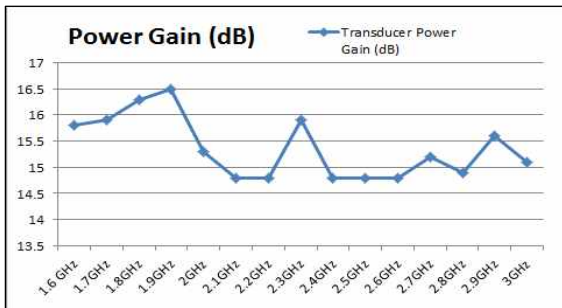


그림 1-7. 설계된 J급 증폭기의 측정된 이득
Fig. 1-7. Measured gain of J-class amplifier

증폭기의 측정결과와 시뮬레이션결과와의 차이점은 2.0GHz에서 2.5GHz까지 대역에서 출력전력 및 효율이 떨어지고 있음 그림 1-3, 1-4, 1-6, 1-7을 비교하면 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 1.6GHz에서 3.0GHz까지 주파수 대역에서 고조파 성분을 이용한 광대역 평탄 특성으로 동작하는 J급 전력 증폭기를 설계하였다. J급 증폭기는 사용 트랜지스터의 드레인-소스간 기생용량 성분(Cds)을 활용하여 출력단을 구성하는 방법으로 설계하였다. 기본파와 2차 고조파 임피던스를 조절하여 출력단을 구성하고, 3차 고조파는 단락을 시킨다.

설계된 증폭기의 측정 결과는 그림 1-7로부터 입력 전력이 15dBm일 때 2.9GHz에서 최대 출력 전력과 이득은 31.5dBm과 16.5dB이고, 2.2GHz와 2.4~2.6GHz에서 최소 출력 전력은 29.8dBm임을 그림 1-6에서 확인할 수 있다. 또한 최대 드레인 효율은 2.95GHz에서 76.2%이고 최소 드레인 효율은 61%이다.

입력주파수와 동작전압의 차이와 출력전력의 차이로 직접적인 비교는 어렵지만 참고논문[1]과 비교하면 참고논문에서는 1.4~2.2 GHz 주파수 대역 내에서는 65% 이상의 드레인 효율임을 비교하면 최대 10%이상의 드레인 효율이 향상되었음을 확인할 수 있었다.

본 논문의 결과, 설계된 J급 전력증폭기는 광대역 고효율특성을 갖는 것을 확인할 수 있다. 본 논문에서 제시한 J급 전력증폭기는 광대역에서 무난한 특성을 보임으로 기존의 3G 이동통신 대역과 4G 이동통신에도 유용하게 활용 가능할 것으로 보인다. 다만 증폭기가 스트립라인을 활용하여 설계되어 크기문제로 직접 소형시스템에 적용하기에는 여러 가지 어려움이 있다. 따라서 향후의 연구과제로 집중소자를 활용한 소형화 연구가 진행되어야 할 것이다.

본 논문은 2012학년도 김포대학 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] Design of High Efficiency Class-J mode Power Amplifier using GaN HEMT with Broad-band Characteristic.
- [2] Peter Wright et al., "A Methodology for Realizing High Efficiency Class J in a Linear and Broadband PA," IEEE Trans. MTT, Vol. 57, No. 12, pp. 3196-3204, December 2009.
- [3] .T. Zhang, Wideband Hybrid-Class Power Amplifier for Base Station Applications Using LDMOS with Envelope Tracking system, Delft University of Technology, July 2009.
- [4] Junghwan Moon, Jungjoon Kim, and Bumman Kim, "Investigation of a Class-J Power Amplifier With a Nonlinear C_{out} for Optimized Operation" IEEE Trans. MTT, Vol. 58, No. 11, pp. 2800-2811, NOVEMBER 2010.

◇ 저자소개 ◇



노희정 (盧熙正)

1961년 7월 7일생. 1985년 아주대학교 전자공학 졸업. 1995년 서울시립대학교 졸업(석사). 2010년 인천시립대학교 졸업(박사). 1989~1998년 (주)한국통신기술 근무. 1998년~현재 김포대학교 유비쿼터스-IT과 교수.



이병선 (李秉善)

1958년 8월 5일생. 1985년 서울과학기술대학교 전자공학 졸업. 1992년 건국대학교 전자공학 졸업(석사). 2000년 단국대학교 전자공학 졸업(박사). 1997년~현재 김포대학교 유비쿼터스-IT 교수.