

Class E 기법을 이용한 소나용 고효율 전력증폭기 분석 및 설계

이영섭, 오경태, 구현철, *목형수, 허 정, 이강운
건국대학교 전자공학과, *건국대학교 전기공학과

Analysis and Design of Class E High Efficiency Power Amplifier for SONAR System

Y. S. Lee, K. T. Oh, H. C. Ku, H. S. Mok, J. Hur, K. Y. Lee
Dept. of Electronic Eng. Konkuk Univ., Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ.

ABSTRACT

본 논문에서는 소나용 고효율 전력증폭기의 효율을 향상시키기 위하여 Class E 설계 기법을 분석하고 소나 시스템의 송신기에 적용하였다. Class E 기법에 기반하여 전력소자를 스위칭 모드로 동작시켜서 Zero Voltage Switching(ZVS)이 발생하도록 회로를 설계함으로써 전력 소자의 전력 손실을 최소화하고 전력 증폭기의 효율을 최대화하여 주었다. 설계된 Class E 기법의 전력 증폭기의 동작 및 타당성을 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서 론

공기 중에서 무선 통신을 할 경우 전자파를 이용하여 통신을 하지만 공기보다 밀도가 높은 수중에서는 전자파의 감쇄가 심해 전달되지 않으므로 초음파를 이용하게 된다. 수중에서 물체를 탐지하거나 물체의 정확한 위치 정보를 알아내는데 사용되는 음향 표정 장치를 SONAR(Sound Navigation and Ranging)라 한다.

SONAR 시스템에서 이동하는 물체의 항적이나 난류를 측정하기 위해서는 수백 kHz~수 MHz 대역의 주기적이고 출력이 큰 사인 파형을 만들어 송신한다. 일반적인 SONAR 시스템에 비해 높은 주파수 대역을 가지는 시스템에서 전력 소자를 스위칭 모드로 동작시키고, 스위칭 모드에서의 전력 손실을 최소화하여 효율을 향상시킬 수 있다.

본 논문에서는 수백kHz~수MHz 대역에서 동작하는 소나용 고효율 전력 증폭기를 설계하기 위하여 Class E 기법을 사용하였으며, 시뮬레이션을 통하여 ZVS(Zero Voltage Switching), 효율 그리고 출력 특성 등을 확인하였다.

2. Class E 전력 증폭기 분석 및 설계

2.1 Class E 전력 증폭기

Class E 전력 증폭기는 1975년 Nathan O. Sokal에 의해 소개되었으며,^[1] 트랜지스터가 이상적인 스위치로 동작할 시에는 트랜지스터에서 소모되는 전력이 발생하지 않으며 이상적으로 100%의 전력 효율을 이룰 수 있다. Class E 전력 증폭기의 기본 회로는 그림1과 같다.

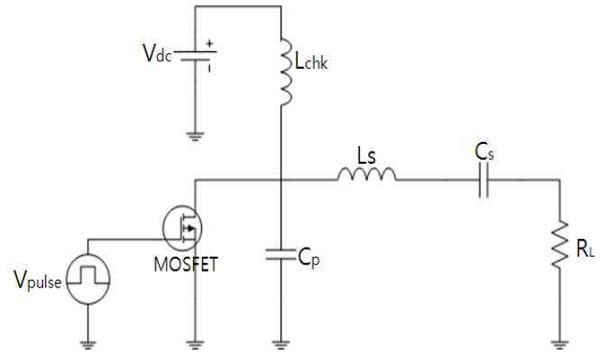


그림 1 Class E 전력 증폭기 기본 회로
Fig. 1 Basic Circuit Diagram of Class E Power Amplifier

Class E 전력 증폭기는 트랜지스터의 상태가 'ON' 상태로 변환되는 경우 높은 전류가 흐르는 것과 반대로 전압은 '0'에 가깝게 나타난다. 이러한 경우 트랜지스터는 작은 값을 갖는 저항과 같은 역할을 하여 닫힌 스위치로 동작하게 된다. 반면에 트랜지스터의 상태가 'OFF' 상태로 변화되는 경우 높은 전압이 강하 되는 것에 반해 '0'에 가까운 전류가 흐르게 되며 트랜지스터는 큰 값을 갖는 저항과 같은 역할을 하게 되고 열린 스위치로 동작하게 된다. 즉, 전압과 전류의 값을 순차적으로 0으로 만들어줌으로써 트랜지스터에서 소모되는 전력 값을 0으로 만들어 준다. Switching transition time에서의 전력 소모를 최소화하기 위하여 트랜지스터에 흐르는 전류의 값이 '0'이 될 때까지 전압 강하는 없어야 하며, 트랜지스터에 전압 강하가 이루어지는 경우 강하되는 전압 값이 '0'이 되기 전까지는 전류가 흐르지 않도록 하는 것을 ZVS라 하며, 이는 Class E 설계의 기본 내용이다.^{[2][3]}

2.2 Class E 전력 증폭기의 설계

Class E 전력 증폭기의 주요한 설계 요소값은 shunt capacitor C_p 와 series resonator L_s, C_s , 로드의 저항값 R_L 이 된다. Class E 증폭기 설계 시 설정값은 $V_{dc}, \alpha, \omega, I_{pk}$ 이며, 이 값들에 따라서 $I_{rf}, I_{dc}, \beta, C_p, R_L, L_s, C_s$ 값이 결정된다. 100%의 효율을 위한 ZVS가 일어나기 위해 가장 중요한 파라미터인 α 값과 β 값을 설정하게 되는데, α 는 turn OFF angle을 말하며 β 는 turn ON angle을 말한다. 각 값들을 구하는 수식은 다음과 같다^[4].

$$i(\theta) = I_{rf} \sin(\theta) + I_{dc} = 0 \quad (1)$$

$$\therefore \sin(\theta) = -\frac{I_{dc}}{I_{rf}}, \left(\frac{3}{2}\pi \leq \theta \leq 2\pi\right) \quad (2)$$

가 된다. 여기서

$$\begin{aligned} I_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_{\beta-2\pi}^{\beta} i(\theta) d\theta \quad (3) \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\beta-2\pi}^{\alpha} i(\theta) d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} i(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\beta-2\pi}^{\alpha} i(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_{\beta-2\pi}^{\alpha} [I_{dc} + I_{rf} \sin\theta] d\theta \end{aligned}$$

식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{I_{dc}}{I_{rf}} = \frac{\cos\alpha - \cos\beta}{\alpha - \beta} \quad (4)$$

$$\sin\beta = \frac{\cos\beta - \cos\alpha}{\alpha - \beta} \quad (5)$$

식 (5)의 비선형 방정식을 풀어서 주어진 α 값에 대한 β 를 구할 수 있게 된다. I_{dc} 와 I_{rf} 의 합은 다음의 관계식을 만족한다.

$$I_{pk} = I_{rf} + I_{dc} \quad (6)$$

여기서 I_{pk} 는 트랜지스터의 peak current이다. Current offset ratio인 ϵ 은 다음과 같다.

$$\epsilon = \frac{I_{dc}}{I_{rf}} = -\sin\beta \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)을 이용하면 I_{dc}, I_{rf} 를 구할 수 있다.

$$I_{dc} = \frac{I_{pk}}{\left(1 + \frac{1}{\epsilon}\right)} \quad (8)$$

$$I_{rf} = \frac{I_{pk}}{1 + \epsilon} \quad (9)$$

C_p 를 구하기 위해서 C_p 에 걸리는 전압과 전류를 먼저 구한다.

$$v_c(\theta) = \frac{1}{\omega C_p} \int_{(2\pi-\beta)}^{\theta} i_c(\theta) d\theta \quad (10)$$

여기에서 i_c 는 다음과 같다.

$$i_c(\theta) = \begin{cases} i(\theta) & \alpha \leq \theta \leq \beta \\ 0 & \beta - 2\pi < \theta < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$v_c(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\omega C_p} [I_{dc}(\theta - \alpha) + I_{rf}(\cos\alpha - \cos\beta)] & \alpha \leq \theta \leq \beta \\ 0 & \beta - 2\pi < \theta < 0 \end{cases} \quad (12)$$

식 (12)에서 C_p 값은 알지 못하는 값이다. C_p 를 구하기 위해서 다음과 같은 관계식을 이용한다.

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v_c(\theta) d\theta = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_c(\theta) d\theta \quad (13) \\ &= \frac{1}{2\pi\omega C_p} \left[(I_{rf} \cos\alpha - I_{dc} \alpha)(\beta - \alpha) + \frac{I_{dc}}{2} (\beta^2 + \alpha^2) \right] \end{aligned}$$

여기에서 α, β, V_{dc} 는 알고 있는 parameter이므로 식 (13)을 이용하여 C_p 값을 구할 수 있게 된다.

부하에 in-phase와 quadrature-phase voltage를 계산하기 위해서 RLC의 series의 load에 흐르는 전류와 전압을 알아야한다. 전류와 전압은 다음과 같다.

$$i_{rf}(\theta) = I_{rf} \sin(\theta) \quad (\theta = \omega t) \quad (14)$$

$$v_c(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{\omega C_p} [I_{dc}(\theta - \alpha) + I_{rf}(\cos\alpha - \cos\beta)] & \alpha \leq \theta \leq \beta \\ 0 & \beta - 2\pi < \theta < 0 \end{cases} \quad (15)$$

α 와 위에서 구한 β 와 shunt capacitor C_p 에 의해서 결정되는 식 (12)를 이용하여 in-phase와 quadrature-phase 전압의

Fundamental 항의 평균값을 구하면 다음과 같다.

$$V_{ci} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_c(\theta) \sin\theta d\theta \quad (16)$$

$$V_{cq} = \frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\beta} v_c(\theta) \cos\theta d\theta \quad (17)$$

식 (12)를 이용하여 식 (16)을 계산하면 다음과 같다.

$$V_{ci} = \frac{1}{\omega C_p} I_{pk} v_{ci}(\alpha) \quad (18)$$

여기서

$$v_{ci}(\alpha) = \frac{2\sin\beta}{2\pi(1-\sin\beta)} \left(\frac{1}{2}(\beta - \alpha)(\cos\beta + \cos\alpha) - \sin\beta + \sin\alpha \right) \quad (19)$$

식 (9), (18), (19)를 이용하여 다음과 같은 관계식을 가지는 부하의 저항값을 구할 수 있다.

$$R_L = \frac{V_{ci}}{I_{rf}} \quad (20)$$

한편, 식 (12)를 이용하여 식 (17)을 계산하면 다음과 같다.

$$V_{cq} = \frac{1}{\omega C_p} I_{pk} v_{cq}(\alpha) \quad (21)$$

여기서

$$v_{cq}(\alpha) = \frac{1}{\pi(1-\sin\beta)} \left(\sin\beta[\sin\beta(\beta - \alpha) + (\cos\beta - \cos\alpha)] + \frac{1}{4} [4\cos\alpha(\sin\beta - \sin\alpha) + 2(\alpha - \beta)] \right) \quad (22)$$

식 (9), (21), (22)를 이용하여 동작주파수에서 공진하는 L_s, C_s 값에 추가로 직렬로 추가되는 mistuning inductor ΔL 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta L = \frac{1}{\omega} \frac{V_{cq}}{I_{rf}} \quad (23)$$

마지막으로 L_s, C_s 값은 다음과 같이 동작주파수에서 공진점을 가지도록 설계된다.

$$L_s C_s = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (24)$$

Quality factor값 Q를 이용하여 표현하면 L_s, C_s 값은 다음식과 같다.

$$C_s = \frac{1}{Q\omega_0 R_L} \quad (25)$$

$$L_s = \frac{1}{\omega_0^2 C_s} \quad (26)$$

3. Class E 전력증폭기 설계 및 시뮬레이션

앞 절에서 기술된 수식들을 이용하여 그림2와 같이 회로를 설계하였으며, 각 소자에 해당하는 값은 표1과 같다.

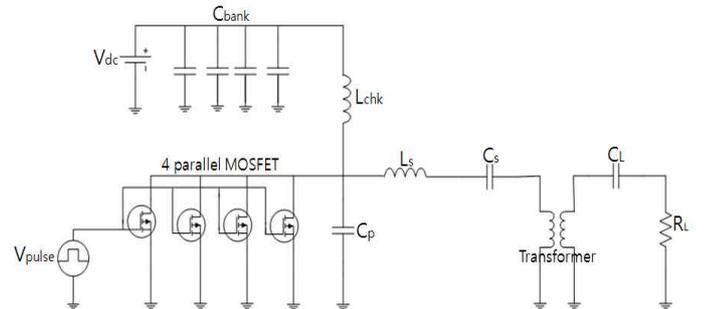


그림 2 SONAR용 Class E 전력 증폭기
Fig. 2 Class E Power Amplifier for SONAR

표 1 Class E 전력 증폭기 소자값
Table 1 Component Values for Class E Power Amplifier

Frequency [Hz]	400k
DC Input Voltage [V]	30
Sonar Impedance	150-j530
Quality Factor	20
Cp [nF]	89.5
Ls [uH]	7
Cs [nF]	24
Transformer Turn Ratio	1:25.7

출력을 500W급 이상으로 만들기 위해 트랜지스터 4개를 병렬로 사용하였고 DC 전압의 리플을 줄이기 위해 DC 전압원측에 커패시터를 병렬로 배치하였다. 소나 트랜스듀서와 Class E 전력 증폭기의 출력단간의 임피던스 보상을 위해 트랜스포머를 사용하였다. 또한 회로의 임피던스 매칭을 위한 보상 회로를 1차측의 Series C_s 값에 포함하였다. 그림 3에서 볼 수 있듯, 트랜지스터의 드레인에 인가되는 전압과 전류가 ZVS가 일어나는 것을 확인 할 수 있다. 또한 그림 4를 통해 출력단에서 전압과 전류 원하는 주파수 대역의 주기적인 사인파형이 출력되는 것을 확인 할 수 있다.

표 2 Class E 전력 증폭기 시뮬레이션 결과
Table 2 Result of Class E Power Amplifier

Simulation Result	
Efficiency [%]	97.422
DC Input Power [W]	591.355
Output Power [W]	576.107

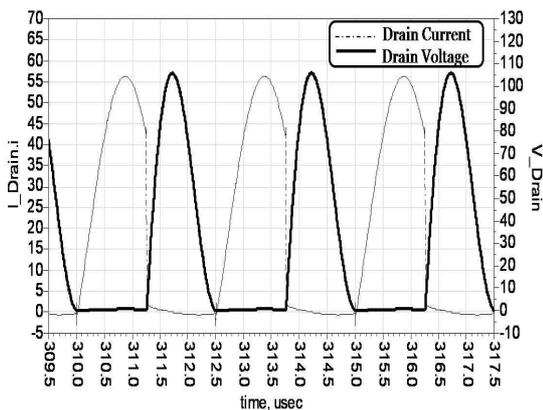


그림 3 드레인단의 전압과 전류 파형
Fig. 3 Voltage and Current of Drain

시뮬레이션 결과 DC 입력 파워가 591.4[W], 출력 파워가 576.1[W]가 나오는 것을 확인 할 수 있었으며, 이 회로의 효율은 97.4%로 계산되었다. 설계 변수 중 Q값을 5부터 20까지 5씩 증가하며 회로의 특성을 살펴보았다. Q 값이 증가 할수록 회로의 민감도가 증가하였으며, 임피던스의 허수분의 증가에 따라 출력 전력의 값이 줄어드는 반면 주파수 선택도를 향상할

수 있었다. 표 3은 각 Q값에 따라 ZVS가 일어나도록 소자값을 구하여 시뮬레이션을 한 결과이다.

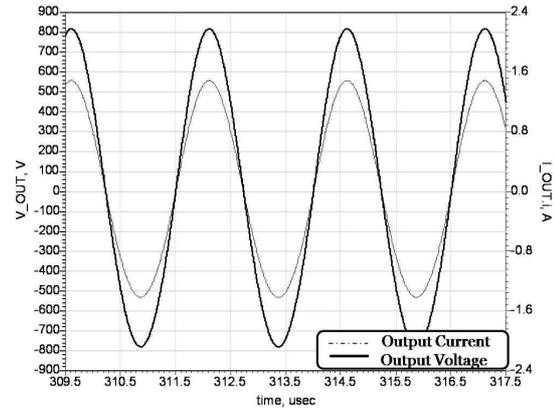


그림 4 출력단의 전압과 전류 파형
Fig. 4 Voltage and Current at Output

표 3 Q값의 변화에 따른 출력과 효율
Table 3 Output Power and Efficiency of Varying Q

Simulation Result			
Q	Efficiency [%]	DC Input Power [W]	Output Power [W]
5	97.1	713.3	692.8
10	97.3	632.4	615.7
15	97.6	542.2	529.6
20	97.4	591.3	576.1

4. 결론

본 논문에서는 수백 kHz~수 MHz 대역에서 동작하는 소나용 고출력 송신기의 효율을 향상시키기 위하여 Class E 설계 기법을 적용하여 전력증폭기를 설계하였다. 모의실험에서는 400kHz 주파수 신호에 대해서 500W급 이상의 Class E 전력증폭기를 설계하고 성능을 검증하였다. 전력 소자에서 ZVS가 일어나는 것을 확인 할 수 있었으며 DC 입력과 출력 신호의 비로 정의되는 효율은 97%가 됨을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] N.O. Sokal, "Class E - A New Class of High Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers", *IEEE J. Solid-State Circuits*, Vol. 10, SC-10, pp. 168-179, 1975, June.
- [2] N.O. Sokal, "Class E Power Amplifiers", *QEX*, pp. 8-20, 2001, Jan/Feb.
- [3] S.D. Kee, "The Class-E/F Family of ZVS Switching Amplifiers", *IEEE Trans.Microwave Theory Tech.*, Vol. 51, No.6, pp. 1677-1690, 2003, June.
- [4] Steve C. Cripps, *RF Power Amplifiers for Wireless Communications*, Artech House, pp. 156-177, 1998.