

E급 증폭기를 이용한 초음파발생장치

임종예*, 윤희상
호서대학교 정보통신공학과*

The ultrasonic generator using inverter with class-E amplifier

jong ye leem, hee sang youn
Dept. of Information Comm. Engineering, Hoseo. Univ.

Abstract

In this paper, the generation of the intensive ultrasonic waves depend mainly on the energy convention efficiency depending on high frequency oscillation of the generator and the control performance of stable output depending on iode variation. As a result, the ultrasonic generator obtained of 93% efficiency with 28khz.

1. 서론

사이리스터 인버터는 변도의 전류회로를 필요로 하고, 동작주파수에도 한계가 있어서 반도체 재조기술이 진보됨에 따라 모달코내압·대전류의 달링톤 트랜지스터가 실용화 단계에 들어섬에 따라 산업용 트랜지스터 인버터로 본격적으로 이용되었다. 현재 1000 - 1400V, 300A, 300kVA 이상의 고전압·전류는 물론, 수백kVA 이하의 중소용량에 대해서도 트랜지스터 인버터가 사이리스터 인버터를 대신하여 주류가되어 가고 있다.

그후 파워 MOSFET가 개발되어 고주파, 고출력 스위칭 동작이 가능하게 되면서 1975년 SOKAL에 의해 처음 소개된 E급 전력증폭기[1][2][3]의 이상적인 스위칭 소자로 사용하였다. E급 증폭기는 스위칭 소자가 펄스동작을 하기 때문에 스위칭모드에서 인가전압이 공진형태로 되며 최대 90%이상의 전력효율을 얻을 수 있다. 본 논문에서는 파워 MOSFET를 스위칭소자로 한 고주파 고효율 E급 증폭기를 설계하고 그 부하단에 진동자란 연결하고 초음파 진동자의 고유주파수와 E급 증폭기의 공진주파수를 일치시켜 최대의 출력을 얻는 초음파 발생장치를 구현하였다.

2. E급 전력 증폭기의 동작 원리 및 특성

E급 전력 증폭기는 스위치로 동작하는 스위칭 소자, 부하와 직렬로 결합된 LC 공진 회로, 스위치와 부하를 분류하는 캐패시터로 구성된다. 그림 1은 E급 전력 증폭기의 기본회로와 등가회로를 나타내었다.

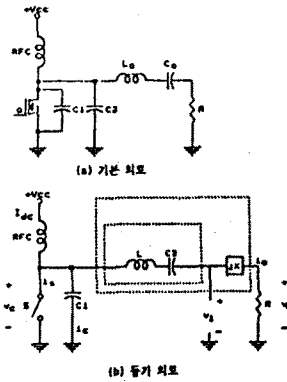


그림 1. E급 증폭기

E급 전력 증폭기의 동작은 회로에 대한 다음 4가지 가정에 의해 분석하였다.

- 1) 쇼크 코일 RFC 는 큰 리액턴스 성분을 갖고 있어 RFC를 통해 흐르는 전류 I_{dc} 를 일정하게 해준다.
- 2) 직렬 연결된 L_0C_0 의 Q가 충분히 높아서 출력 전류와 출력전압은 정현파의 형태를 유지한다.
- 3) 스위칭 소자 Q_1 은 ON 과 OFF 사이의 매우 짧은 시간을 제외하고 ON 상태나 OFF 상태를 유지하는 이상적인 스위치모드로 가정한다.
- 4) 캐패시터 C 는 전압에 의존하지 않는다.

그림 1에서 스위치가 ON 인데, 스위치 양단에 걸리는 전압 $V_s(\theta) = 0$ 이며 이때 C에 흐르는 전류 $i_c(\theta) = 0$ 이고, 스위치에 흐르는 전류 $i_s(\theta)$ 는 $i_s(\theta) = I_{dc} - I_0(\theta)$ 스위치가 OFF 인데, 스위치에 흐르는 전류 $i_s(\theta) = 0$ 이며, 이때 캐패시터 전류 $i_c(\theta)$ 는

$$i_c(\theta) = I_{dc} - i_o(\theta) \quad (1)$$

그러므로, 스위치에 걸리는 전압 파형은 캐패시터의 충전에 의해 생성된다. 스위치가 OFF에서 ON으로 변할때 캐패시터에 충전된 전압이 즉시 방전되며, 캐패시터의 방전전압에 의해 출력 에너지가 결정된다. DC 입력 전류 I_{dc} 의 양과 증폭된 $I_{om}(V_{om}/R)$, 출력전류의 위상 ϕ 는 스위치가 OFF 되었을때 스위치에 걸리는 전압 파형의 변수를 결정한다.

$$V_c(\theta) = \frac{I_{dc}}{B(y-\pi/2)} + \frac{V_{om}}{BR} \sin(\phi-y) + \frac{I_{dc}}{B} \theta + \frac{V_{om}}{BR} \cos(\theta+\phi) \quad (2)$$

y : 스위치의 OFF 시간 [rad]

B : 동적주파수에서 분류 캐패시턴스 C 의 차파음

$V_c(\theta)$ 의 주파수 변수는 출력 전류를 결정하기 위해 $R+ jX$ 에 적용된 $V_1(\theta)$ 이며, 스위치에 걸리는 전압 출력 파형의 dc 변수는 V_{cc} 이다. 이러한 제한에 의해 발생된 방정식의 해석은 주어진 회로 변수의 배치와 듀티 사이클을 갖는 E급 전력 증폭기의 성능을 결정한다. E급 증폭기 동작 회로의 모든 변수들은 이상적으로 손실이 없으나 스위치 OFF에서 ON으로 변할때 분류 캐패시터의 방전에 의한 유일한 손실이 존재한다. 만약 회로 변수들이 선택 되어지 스위치가 ON 될 때 스위치의 전압이 0로 되었다면 에너지 방전은 없으며, 이상적인 변수들인 경우 효율은 100%인 것이다.

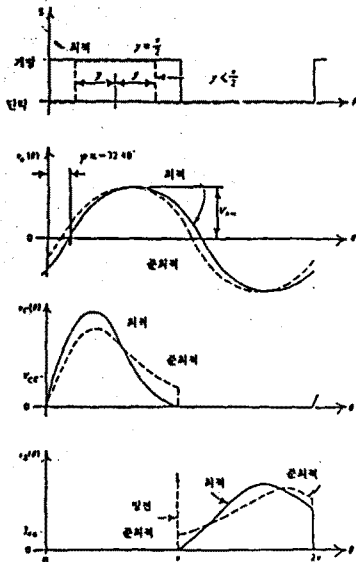


그림2 E급 증폭기의 특성파형

최적의 E급 증폭기의 동작은, 스위치가 OFF에서 ON으로 변할때 스위치의 전압 전류 모두가 0 이므로 그림 2와 같이 스위치 ON 바로 직후에 스위치의 전류파형의 기울기는 0을 의미하며, 스위치 OFF에서 ON으로의 전환에서 손실된 전

력은 무시할 정도로 작다.

$$V_{om} = \frac{2}{\sqrt{1+\pi^2/A}} V_{cc} \approx 1.074 V_{cc} \quad (3)$$

$$P_o = \frac{2}{1+\pi^2/A} \frac{V_{cc}^2}{R} \approx 0.557 \frac{V_{cc}^2}{R} \quad (4)$$

$$I_{dc} = \frac{V_{cc}}{1.731R} \quad (5)$$

$$X = 1.110 \frac{Q}{Q-0.67} R \quad (6)$$

$$B = \frac{0.1836}{R} (1 + \frac{0.81Q}{Q^2+1}) \quad (7)$$

E급 전력 증폭기의 주파수 변화의 효과는 다음 식에 의하여 결정된다.

$$S(\theta) = \frac{4}{\pi} (\sin \theta + \frac{1}{3} \sin 3\theta + \frac{1}{5} \sin 5\theta + \dots) \quad (8)$$

주파수 변화는 일반적으로 다른 전력 증폭기와 비슷하며, Q 의 높은 값을 변조하기 위하여 밴드 폭은 Q 와 반대로 변화한다. 주파수 변화뿐만 아니라 비동조나 B 의 변화는 RF 주기의 구간에서 음의 전압이나 전류를 생성한다. 이러한 음의 전류나 전압으로 부터 스위칭소자를 보호하기 위하여는 스위칭소자와 병렬로 다이오드를 삽입하여야 한다. 이러한 다이오드는 음의 전류가 일어나지 못하게 하므로 회로의 동작을 변화시키 100%의 이상화된 효율의 광대역 동작이 가능하게 된다.

3. 초음파 부하단의 구성

초음파 변환기는 민감한 공진특성을 가지고 있으므로 인버터부의 출력주파수가 초음파 변환기의 공진 주파수와 같지 않으면 변환기의 정상출력을 얻을수 없다. 따라서 변환기에 고주파 전력을 효율적으로 공급하기 위하여 다음과 같이 변환기의 공진 특성을 증가회로로 표시하여 부하와 변환기의 결합을 해석하였다.

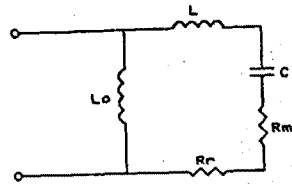


그림3. 변환기의 전기적인 증가회로

그림에서 R_m 은 부하에 대한 등가적인 표현이다. 그림3의 자체형 변환기의 구동점 임피던스 $Z(s)$ 는 다음식과 같이 표현된다.

$$Z(S) = K_1 L_0 S \frac{S^2 + \frac{R_T}{L} S + \frac{1}{CL}}{S^2 + \frac{R_T}{L_T} S + \frac{1}{CL_T}} \quad (9)$$

단, $L_T = L_0 + L$

$R_T = R_r + R_m$

$K_1 = \frac{1}{(L + L_0)}$

초음파 에너지 변환기의 최대효율을 얻기 위해서는 초음파 변환기의 고유 공진 주파수와 발전기의 주파수를 항상 일치 시키야 한다.

4. 실험 및 교환

지금까지 제시된 방법에 의해 E급 증폭기를 이용한 초음파 발생장치를 아래의 그림 4와 같이 설계하였다.

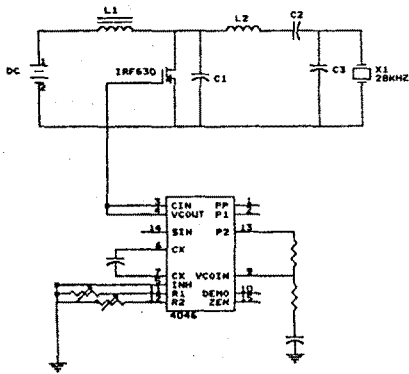


그림4. E급 증폭기를 이용한 초음파 발생장치

파워 MOSFET 스위칭 소자, RFC, LC공진회로, C_1 , C_2 , 부하네트워크로 구성하였다. E급 증폭기의 IRF 630를 스위칭 소자로 사용하였다. 이 증폭기의 전력손실은 스위치가 ON 일 경우에 존재하는 컬렉터 포화전압 및 OFF-ON 천이 기간 시에 일어나는 컬렉터전압의 하강시간 때문에 주로 일어난다.

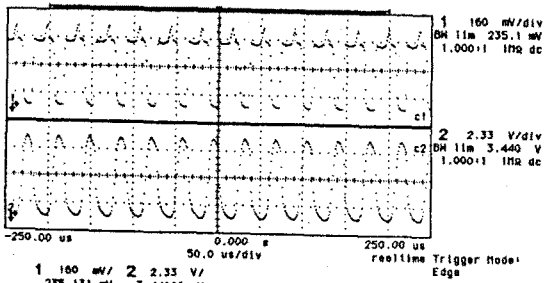


그림5. 입력펄스와 컬렉터전압파형

진동자와 적절로 연결된 LC 공진 탱크의 공진주파수는 초음파진동자의 공진주파수와 반공진주파수 사이에서 선택 된다. 부하에 연결된 진동자물 수량 1리터의 물속에서 가동시키 실험해 본 결과 동작주파수의 가변중 공진점 (27KHz)에 도달 하였을 때 초음파에 의한 물의 분무현상이 최대가 됨을 관찰 하였다.

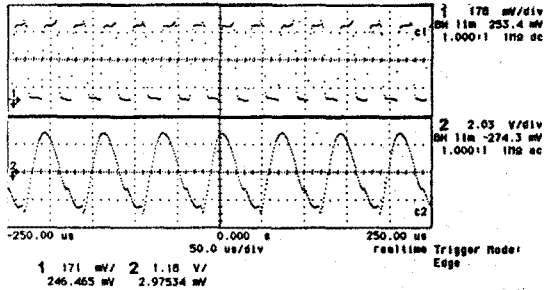


그림 6. 입력 전압파형과 초음파 부하단의 출력 전압파형

5. 결론

본 논문에서는 파워 MOSFET를 스위칭소자로 이용한 고주파 고효율 인버터를 설계 제작하였다. 부하단에 초음파 변환기를 구성하여 그 특성을 검토하였으며 초음파 진동자의 고유주파수와 발전기의 동작주파수를 공진회로를 통하여 출력 특성을 얻었다. 또한 인버터와 부하의 임피던스 매칭 조건을 최적화하기 위해 LC매칭회로를 초음파 변환기에 적절로 삽입하여 최대 공진출력을 얻었다. 그 결과 본 논문에서 설계 제작한 인버터는 28KHz대의 동작주파수를 가지며 고주파 발전 장치에 E급 증폭기를 적용하여 28KHz 진동자와 매칭하여 100%이상의 효율을 얻었다.

6. 참고문헌

- [1] N. O. Sokal and A. D. Sokal, "Class-E a new class of high-efficiency turned single-ended switching power amplifiers", IEEE J. Solid-state circuits, vol. SC-10, pp. 168-176, June 1975, reprinted in Japanese translation in nikkei electron., pp. 127-141, Mar. 22, 1976.
- [2] M. K. Kazimierzuk and X. T. Bui, "Class-E DC/DC Converters with a capacitive impedance inverter," IEEE transaction on industrial elec., Vol.36, no. 3, pp.448-463, Aug., 1989.
- [3] M. K. Kazimierzuk and X. T. Bui, "Class-E amplifier with an Inductive impedance inverter," IEEE transaction on industrial elec., Vol.37, no. 2, pp.124-135, Aug., 1989.
- [4] M. K. Kazimierzuk "High-speed driver for switching power MOSFET's" IEEE Trans. Circuit Syst., vol. 35, pp. 254-256, Feb. 1988.
- [5] F. H. Raab and N. O. Sokal, "Transistor power losses in the Class-E tuned power amplifiers," IEEE Solid-State Circuit, vol. SC-13, PP. 912-914, Dec. 1978.