

# 소나용 1MHz급 LCC 공진형 전력증폭기의 설계

김병철, 목형수, 최규하, \*구현철, \*허 정, \*이강윤, 이정민\*\*  
 건국대학교 전기공학과, \*건국대학교 전자공학과, \*\*(주)효성

## Design of the 1MHz LCC Resonant Power Amplifier for SONAR

B. C. Kim, H. S. Mok, G. H. Choe, H. C. Ku\*, J. Hur\*, K. Y. Lee\*, J. M. Lee\*\*

Dept. of Electrical Eng. Konkuk Univ., \*Dept. of Electronic Eng. Konkuk Univ., \*HYOSUNG Co., Ltd.

### ABSTRACT

소나용 1MHz급 LCC 공진형 전력증폭기의 설계 방법을 연구하였고 소나와 LCC 전력증폭기에 대한 이해를 돕기 위해 관련 지식이 조사되었다.

전력증폭기는 높은 스위칭 주파수를 고려하여 ZVS 동작 조건을 만족하도록 설계되었으며 변압기를 이용하여 트랜스듀서와의 임피던스 매칭을 이루었다.

설계된 전력증폭기는 Simplorer를 이용한 시뮬레이션을 통하여 전력증폭기 설계 과정의 타당성을 확인하였다.

### 1. 서 론

공기 중에서는 빛이나 전파를 이용하여 물체를 탐지하지만 빛이나 전파는 수중에서의 전달 거리가 매우 짧아지기 때문에 수중에서의 물체 탐지시에는 원하는 결과를 얻을 수 없다. 따라서 수중에서는 빛이나 전파에 비해 전달 거리가 긴 음파를 이용한다. 이처럼 음파를 이용한 탐지 장치를 소나(SONAR : SOund Navigation And Ranging)라 한다.<sup>[1]</sup>

수중에서 이동 중인 물체는 물체의 이동으로 인해 생겨난 난류를 측정하여 탐지될 수 있다. 이런 난류를 측정하기 위해서는 수MHz로 동작되는 고주파 센서가 이용되어야 하며 이를 구동하기 위해서는 수MHz의 정현파를 공급할 수 있어야 한다.

수MHz의 높은 스위칭 주파수로 동작되는 전력증폭기는 높은 스위칭 주파수로 인해 스위칭 소자에서 많은 손실이 발생하게 된다. 그러므로 시스템의 손실을 줄이기 위해 스위칭 손실을 경감시키는 토폴로지가 적용되어야 한다.

본 논문에서는 1MHz로 동작되는 전력증폭기를 설계하였으며, 높은 스위칭 주파수를 고려하여 ZVS 영역에서 동작하도록 하여 스위칭 손실을 줄이는 토폴로지의 1MHz급 LCC 공진형 전력증폭기를 설계하였고 시뮬레이션으로 동작을 확인하였다.

### 2. 소나용 송신 시스템의 구성

소나용 LCC 공진형 전력증폭기는 전원부, 전력증폭부, LCC 공진회로, Matching Network, SONAR 트랜스듀서로 구성된다.

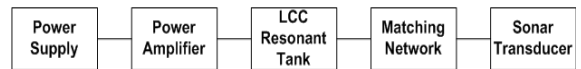


그림 1 LCC 공진회로의 구성  
 Fig. 1 LCC Resonant Circuit

소나 트랜스듀서는 2개의 압전 세라믹으로 구성되어 있으며, 전기적 등가회로는 그림 (2)와 같이 저항 성분과 리액턴스 성분으로 이루어진 임피던스로 구성된다.<sup>[2]</sup>

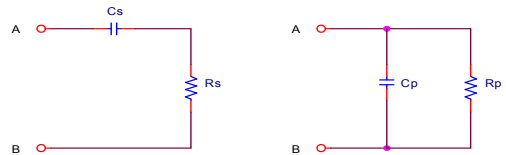


그림 2 소나 트랜스듀서의 직렬 등가회로 및 병렬 등가회로  
 Fig. 2 A equivalent circuit of SONAR transducer

### 3. LCC 공진 회로의 특징

공진형 인버터는 스위칭 손실을 낮출 수 있다는 장점을 가지며, 설계자의 의도에 따라 Zero-Current Switching(ZCS)과 Zero-Voltage Switching(ZVS)중에서 적절한 스위칭 방식을 선택하여 전력용 반도체를 스위칭 시킬 수 있다.

LCC 공진 회로는 그림 3과 같이 구성되며 주파수 변동에 따른 임피던스 변화는 그림 4에 나타나 있다.<sup>[3]</sup>

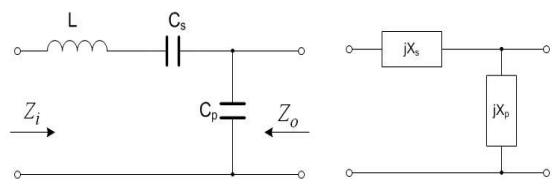


그림 3 LCC 공진회로의 구성  
 Fig. 3 Configuration of LCC Resonant Circuit

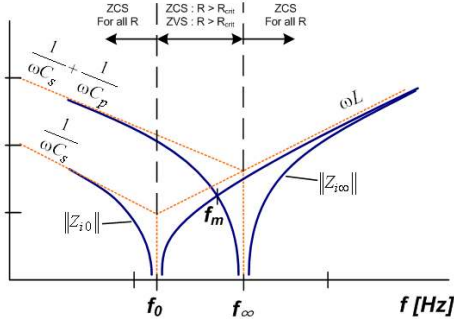


그림 4 주파수 변동에 따른 LCC 공진의 입력 임피던스 특성  
Fig. 4 Characteristic of LCC resonant circuit impedance

그림 (4)에서  $Z_{i0}$ 는 부하측 단락 후 입력측에서 바라본 임피던스 이고,  $Z_{i\infty}$ 는 부하측 개방 후 입력측에서 바라본 임피던스 이다.

LCC 공진 회로는 직렬 공진과 병렬 공진 각각의 장점을 가지고 있는 반면 회로가 복잡하고 운전 영역이 좁기 때문에 넓은 주파수 범위에서 운전하기 곤란한 단점을 가지고 있다.<sup>[3]</sup>

하지만 소나의 경우 동작 주파수가 좁은 범위에서 한정되기 때문에 LCC 공진회로가 적합하다.

#### 4. 전력증폭기의 설계

##### 4.1 인버터의 출력 특성<sup>[3]</sup>

스위칭 각주파수가  $\omega_s = 2\pi f_s$ 라 할 때, 인버터의 출력 전압과 출력 전류는 식 (1)와 같은 관계를 가진다.

$$\frac{\|v(j\omega_s)\|^2}{V_{oc}^2} + \frac{\|i(j\omega_s)\|^2}{I_{sc}^2} = 1 \quad (1)$$

이때  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ 는 각각 식 (2), 식 (3)와 같고 그때의 전압  $V_{mat}$ 와 전류  $I_{mat}$ 는 식 (4)와 같다.

$\|Z_{o0}(j\omega_s)\|$ 는 식 (5)로부터 구할 수 있다.

$$V_{oc} = \|H_{\infty}(j\omega_s)\| \|v_s(j\omega_s)\| \quad (2)$$

$$I_{sc} = \frac{\|H_{\infty}(j\omega_s)\| \|v_s(j\omega_s)\|}{\|Z_{o0}(j\omega_s)\|} = \frac{V_{oc}}{\|Z_{o0}(j\omega_s)\|} \quad (3)$$

$$V_{mat} = \frac{V_{oc}}{\sqrt{2}}, \quad I_{mat} = \frac{I_{sc}}{\sqrt{2}} \quad (4)$$

$$\|Z_{o0}(j\omega_s)\| = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \quad (5)$$

##### 4.2 LCC Parameter 설계<sup>[3]</sup>

그림 3의 (a)와 같은 LCC 공진 회로는 그림 (b)와 같이 등가화 된다. 이때의  $H_{\infty}(j\omega_s)$ 와  $Z_{o0}(j\omega_s)$ 는 각각 식 (6), 식 (7)과 같고, 직렬 리액턴스 성분과 병렬 리액턴스 성분은 각각 식 (8), 식(9)와 같다.

$$H_{\infty}(j\omega_s) = \frac{jX_p}{jX_s + jX_p} \quad (6)$$

$$Z_{o0}(j\omega_s) = jX_s \|jX_p\| = \frac{-X_s X_p}{j(X_s + X_p)} \quad (7)$$

$$jX_p = \frac{Z_{o0}(j\omega_s)}{1 - H_{\infty}(j\omega_s)} \quad (8)$$

$$X_s = X_p \frac{1 - H_{\infty}(j\omega_s)}{H_{\infty}(j\omega_s)} \quad (9)$$

식 (8)로부터 병렬 캐패시터  $C_p$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$C_p = -\frac{1}{2\pi \cdot f_s \cdot X_p} \quad (10)$$

$C_s = k \cdot C_p$ 로 선정하면  $f_0$ ,  $f_{\infty}$ 는 식(11), (12)와 같고,  $L$ 은 식 (13)와 같다.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_s}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_p} \sqrt{k}} \quad (11)$$

$$f_{\infty} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_s \|C_p\|}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L(k \cdot C_p \|C_p\|)}} \quad (12)$$

$$L = \frac{1}{\omega_s} \left( X_s + \frac{1}{\omega_s C_s} \right) \quad (13)$$

##### 4.3 SONAR Transducer의 임피던스 보상

LCC 공진형 인버터는 그림 (4)에 나타난 것과 같이 트랜스듀서의 저항 성분과 식 (14)의 임계저항  $R_{crit}$ 의 관계에 따라 ZCS 혹은 ZVS의 영역에서 동작 된다.

$$R_{crit} = \sqrt{Z_{o0}(j\omega_s) Z_{o\infty}(j\omega_s)} = \sqrt{\frac{Z_{o0}(j\omega_s)^2}{1 - H_{\infty}(j\omega_s)}} \quad (14)$$

하지만 트랜스듀서의 임피던스가 제품 특성으로 정해져 있기 때문에 ZVS 동작을 만족시키기 위해서는 임피던스를 보상해줄 필요가 있다.

임피던스 보상을 위해 그림 (5)의 (a) 트랜스듀서에 그림 (b)와 같이  $C_{s\_sen} + L_{com}$ 의 크기를 갖는 인덕턴스  $X_{s\_com}$ 를 추가하면 트랜스듀서는 그림 (c)와 같이 저항 성분  $R_{s\_sen}$ 과  $L_{com}$ 의 크기를 갖는 인덕턴스  $X_{com}$ 으로 나타낼 수 있다.

그림 (c)는 그림 (d)와 같이 저항 성분과 리액턴스 성분이 병렬 연결된 회로로 등가화 될 수 있다.

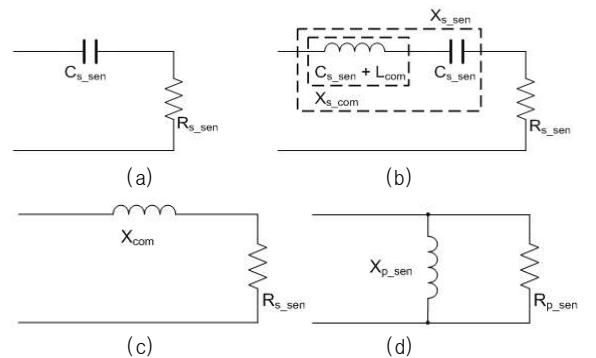


그림 5 ZVS 동작을 위한 소나 트랜스듀서의 임피던스 보상  
Fig. 5 Compensation of impedance for ZVS operation

병렬 연결된 회로에서의 저항 성분  $R_{p-sen}$ 과 리액턴스 성분  $X_{p-sen}$ 은 각각 식 (15), 식 (16)로부터 구할 수 있다.

$$R_{p-sen} = \frac{R_{s-sen}^2 + X_{com}^2}{R_{s-sen}} \quad (15)$$

$$X_{p-sen} = \frac{R_{s-sen}^2 + X_{com}^2}{X_{com}} \quad (16)$$

식 (15)에서 구한  $R_{p-sen}$ 을 변압기 1차 측으로 환산한 후 그 값이  $R_{crit}$ 보다 작아야 LCC 인버터가 ZVS로 동작하게 된다.

$R_{p-sen}$ 과  $X_{p-sen}$ 을 턴수비  $n$ 을 가지는 변압기 1차 측으로 환산한 값은 각각 식 (17)와 식(18)로부터 계산할 수 있다.

$$R_{p-sen} = \frac{R_{p-sen}}{n^2} \quad (17)$$

$$X_{p-sen} = \frac{X_{p-sen}}{n^2} \quad (18)$$

변압기 2차 측에 보상 임피던스가 추가되었기 때문에 이를 다시 제거하기 위해 변압기 1차 측에  $X_{s-com}$ 과 동일한 크기의 캐패시턴스를 추가해줘야 한다.

이 캐패시턴스는  $C_p$ 와 합성되어  $C_p'$ 의 크기를 가지게 되고 다음과 같이 구해진다.

$$C_p' = C_p + \frac{1}{X_{p-sen} \cdot 2\pi f_s} \quad (19)$$

## 5. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에 이용된 회로는 그림 (6)와 같으며 표 (1)과 같은 파라미터를 가지며 ZVS 영역에서 동작되도록 설계 되었다.

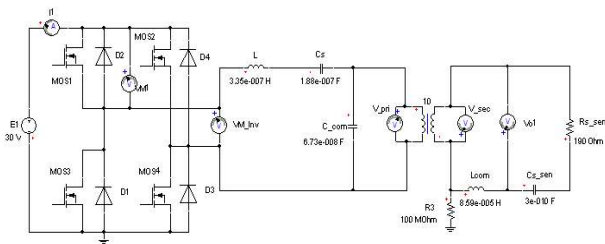


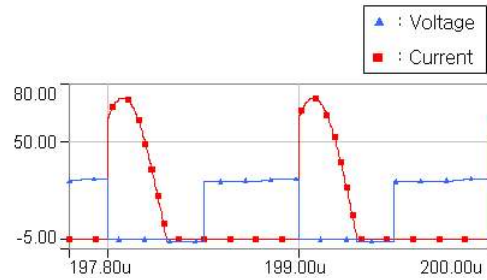
그림 6 시뮬레이션 회로도  
Fig. 6 Simulation Schematic

ZVS 동작을 위한 트랜스듀서의 임피던스 보상을 하지 않았을 때와 임피던스 보상을 하였을 때의 MOSFET의 전압-전류 파형이 그림 (7)에 나타나 있다.

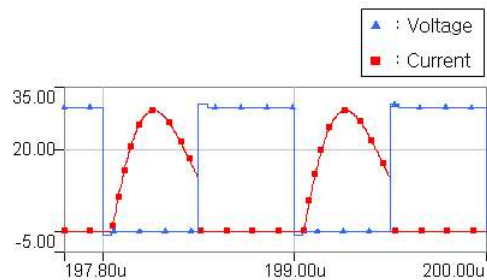
임피던스 보상을 하지 않았을 경우에는 ZCS 영역에서 동작함을 확인할 수 있고, 임피던스 보상을 한 경우에는 ZVS 영역에서 동작함을 확인할 수 있다.

표 1 LCC 공진형 인버터의 설계 파라미터  
Table 1 Parameter of LCC resonant inverter

Input DC Link Voltage	30 [V]
Operation Frequency	1 [MHz]
Output Power	500 [W]
Sonar Transducer Impedance	190 - j530
Ratio of $V_{sl}$ and $V_{oc}$	2
Ratio of $C_s$ and $C_p$	3
Turn Ratio of Transformer	10
$X_{s-sen}$	j540



(a) 임피던스 보상을 하지 않은 경우



(b) 임피던스 보상을 한 경우

그림 7 임피던스 보상에 따른 MOSFET 전압-전류 특성  
Fig. 7 I-V characteristic by impedance compensation

## 6. 결론

본 논문에서는 ZVS 영역에서 수MHz의 동작 주파수를 갖는 LCC 공진형 전력증폭기를 설계하였다.

트랜스듀서의 임피던스를 외부 요인에 의해 고정된 값으로 설정하고 그에 맞추어 트랜스듀서의 임피던스를 보상하여 ZVS 영역에서의 동작 조건을 만족시켰다.

Simplorer를 이용해 시뮬레이션 하여 설계된 전력증폭기의 동작 특성을 확인하고 설계 과정의 타당성을 검토하였다.

## 참고 문헌

- [1] 노정호, 유재하, 허용석, "SONAR의 응용 및 기술 동향", 전자공학회지, pp. 1230-1241, 1996. 10.
- [2] 김홍민, 이정민 외, "위상제어기법을 이용한 소나 시스템용 전력증폭기", 전력전자학술대회 논문집, pp. 129-132, 1999. 11.
- [3] Robert W. Erickson and Dragan Maksimovic, Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers, Inc. pp. 705-740.