

6.78MHz 저 왜율 Class E 증폭기의 설계

윤진, 정세교
경상대학교

Design of Low Distortion Class E Amplifier with Frequency of 6.78MHz

Jin Yun, Se-Kyo Chung
Gyeongsang National University

ABSTRACT

The design of a low distortion class E amplifier with a frequency of 6.78MHz for a wireless power transfer is presented. The amplifier with a differential out is designed to reduce the harmonics of the output current. The harmonic characteristics of various types of the class E amplifiers are compared through the simulation study.

1. 서론

최근 무선전력전송 기술의 적용범위가 넓어짐에 따라 원거리 전력전송에 대한 요구 또한 커지고 있다. 원거리 무선전력전송에는 AirFuel 기준 중의 하나로 6.78MHz의 주파수가 사용되며, 이를 위해 6.78MHz의 고주파 전원이 필요하다.

고주파 무선전력전송을 위한 전원으로서는 E급 증폭기가 많이 사용되며^{[1][2]}, 최근 GaN FET 등의 적용으로 높은 전력용량의 전력증폭기의 구현이 이루어지고 있다. 고주파를 사용하는 원거리 무선전력전송에서 큰 문제점 중에 하나는 EMI 문제이며 이를 저감하기 위해서는 저 왜율의 전력증폭기가 필요하다. 그러나 기존의 단일 출력단 E급 증폭기는 양과 음 전압 사이클의 비대칭성으로 고조파 전류가 크다는 문제점이 있다. 따라서 본 논문에서는 고조파 저감을 위해 차동 출력을 가지는 E급 증폭기를 설계하였으며, 기존 회로들과 고조파 특성을 비교 분석하였다.

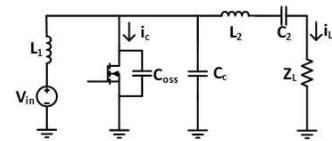
2. E급 증폭기의 설계

2.1 E급 증폭기 회로

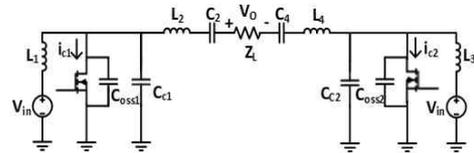
그림 1은 단일 출력단(single-ended) 및 차동 출력을 가지는 E급 증폭기를 나타내고 있다. E급 증폭기는 전류원을 생성하는 직렬 인덕터 L_1 , 주 스위치, 주 스위치에 병렬로 접속된 커패시터 C_1 , 그리고 공진 필터회로 L_2 와 C_2 로 구성된다. 여기서 병렬 커패시터 C_1 은 주 스위치의 출력 커패시턴스 C_{oss} 를 포함한다.

단일 출력단 E급 증폭기의 경우, 등가적인 공진 커패시턴스가 주 스위치가 ON 상태에서는 C_2 이며 OFF 상태에서는 $C_1||C_2$ 이므로 양과 음의 사이클에서 파형의 비대칭이 발생한다. 따라서 큰 고조파 전류가 발생한다. 이러한 파형의 비대칭성은 그림 1(b)와 같은 차동 출력 증폭기를 사용하여 저감할

수 있다. 두 회로가 각각 180° 의 위상차를 가지고 동작한다면 차동 출력에는 대칭인 전압을 얻을 수 있다.



(a) Single-ended



(b) Differential output

그림 1 E급 증폭기의 이상적인 회로도

Fig. 1 Ideal circuit of class E amplifier

2.2 E급 증폭기 설계^{[1][2]}

그림 1(a)에서 단일 출력단 E급 증폭기의 출력 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_o = \frac{V_{dc}^2}{R_L} \frac{8}{\pi^2 + 4} \quad (1)$$

직렬 인덕터 L_1 은 정전류원을 구성하기 위하여 충분히 크게 설계하여야 하며 최소값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_{1,min} = \frac{(\pi^2 + 4)R_L}{f_s} \quad (2)$$

여기서 f_s 는 스위칭 주파수 이다. 그리고 각 소자의 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{2\pi R_L} \frac{8}{\pi(\pi^2 + 4)} \quad (3)$$

$$L_2 = \frac{R_L Q_L}{2\pi f} \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_2} \left(1 + \frac{1.42}{Q_L - 2.08} \right) \quad (5)$$

여기서 Q_L 은 공진회로의 양호도(quality factor)를 나타낸다.

3. E급 증폭기 시뮬레이션

3.1 증폭기 설계 파라미터

위의 식을 이용하여 출력 30W, 입력 전압 30V, 주파수 6.78MHz의 단일 출력 증폭기를 설계하였고 이를 차동 출력 증폭기에 적용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다. 여기서 Q_L 값은 10으로 두었다. 시뮬레이션은 PSIM을 사용하여 수행하였다.

표 1 설계된 Class E 증폭기의 파라미터

Table 1 Parameters of the designed class E amplifier

R_L	17Ω
L_1	23μH
$C_1(C_{oss} + C_C)$	250pF
L_2	3.9μH
C_2	160pF

3.2 시뮬레이션 결과

그림 2는 단일 출력 E급 증폭기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 부하 값이 17Ω일 때 출력 전력 32.83W이며 출력 전류의 THD는 5.65%이다. 앞서 언급한 바와 같이 출력 전류의 파형이 비대칭이므로 큰 고조파 전류가 발생한다.

그림 3은 차동 출력을 가지는 E급 증폭기의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 앞서 설계된 단일 출력 증폭기를 180° 위상차로 동작하였으며 부하를 차동 출력에 인가하였다. 부하 값이 17Ω일 때 출력 전력은 51.49W이며 출력 전류의 THD는 1.5%로 단일 출력 E급 증폭기에 비해 매우 낮음을 알 수 있다.

그림 4는 단일 및 차동 출력 E급 증폭기의 부하에 대한 출력 전력을 비교한 결과이다. E급 증폭기는 전류원 특성을 가지므로 부하 저항이 커질수록 출력 전력이 커짐을 알 수 있으며 차동 출력의 경우 단일 출력에 비해 큰 출력을 얻을 수 있음을 볼 수 있다.

그림 5는 두 증폭기의 부하에 대한 왜율 특성을 비교한 것이다. 그림에서 차동 출력 증폭기가 상대적으로 매우 낮은 THD를 나타냄을 볼 수 있다.

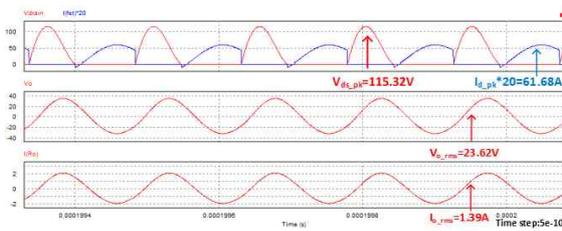


그림 2 Single-Ended(SE) E급 증폭기의 시뮬레이션
Fig. 2 Simulation of Single-Ended(SE) class E amplifier

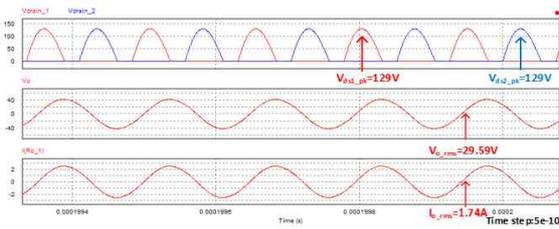


그림 3 Differential E급 증폭기의 시뮬레이션
Fig. 3 Simulation of Differential(D) class E amplifier

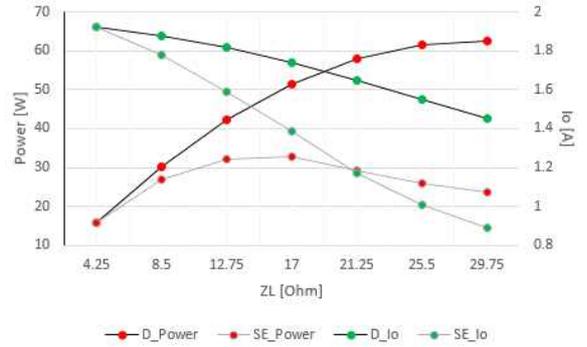


그림 4 E급 증폭기의 부하에 따른 출력 전력, 출력 전류 비교

Fig. 4 Comparison of output power, output current by load of class E amplifier

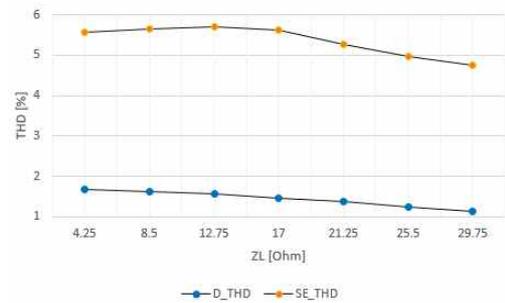


그림 5 E급 증폭기의 부하에 따른 THD 비교

Fig. 5 Comparison of THD by load of class E amplifier

4. 결론

본 논문에서는 6.78MHz 주파수를 가지는 저 왜율 E급 증폭기의 설계에 대하여 기술하였다. 출력 전력 30W급의 단일 출력 E급 증폭기를 설계하였으며 출력 전류의 고조파 저감을 위해 차동 출력을 가지는 E급 증폭기에 적용하고 출력 전류의 THD에 관하여 분석하였다. 이를 통해 차동 출력 E급 증폭기가 저 왜율을 가지며 높은 출력 전력 특성을 확인하였다. 추후 GaN FET를 이용해 증폭기를 구성하고 실험을 통해 검증할 계획이다.

이 논문은 한국연구재단의 2019년 기본연구사업의 지원을 받아 수행된 결과임(2019R1F1A1062892)

참고 문헌

- [1] Nathan O. Sokal, "Class E-A New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers", Proceedings of the IEEE, Vol. sc10, No. 3, 1975.
- [2] Peter B. Green, "Class-E amplifier design for wireless power transfer", AN_1803_PL16_1803_210431, Application Note, Infineon, 2018.
- [3] Yuanzhe Zhang, "eGaN FETs for Low Cost Resonant Wireless Power Applications", Application Note: AN021, EPC.