

고효율 무선 전력 전송을 위한 고효율 E급 전력 증폭기 및 공진 코일 설계에 관한 연구

윤충모*

Study on the Design of High Efficient Class-E Power Amplifier and Resonant Coils for High Efficient Wireless Power Transfer System

Choong-Mo Youn*

요 약

최근 무선 전력 전송 시스템은 조명 분야뿐만 아니라 전기 자동차, 스마트폰 무선 충전 시스템 등 다양한 분야에서 기술이 점차 확대 적용되고 있다. 무선 전력 전송 시스템의 전력 전송 효율을 평가할 하는 가장 큰 두 가지 요소로는 전력을 무선으로 전달하는 매개체인 송, 수신 코일부와 전력을 증폭하는 전력 증폭기부가 해당된다. 본 논문에서는 고효율 무선 전력 전송 시스템을 구축하기 위해 6.78MHz에서 동작하는 고효율 전력 증폭기 설계 방안과 공진 코일 제작 방법에 대해 소개한다.

ABSTRACT

Recently, wireless power transmission system is gradually extended to technology in various fields such as lighting field, electric vehicles and smartphones wireless charging system. The largest of the two elements for high transmission efficiency of the wireless power transmission system are resonant coils and power amplifiers. In this paper, in order to build a high efficient wireless power transmission system, we introduce the resonance coil manufacturing method and high efficiency power amplifier design method that operates at 6.78MHz.

키워드

Power Amplifier, Resonant Coil, Simulation, Wireless Power Transfer System
전력 증폭기, 공진 코일, 시뮬레이션, 무선 전력 전송 시스템

1. 서 론

최근 무선 전력 전송 시스템에 관한 연구가 매우 활발하다. 무선 전력 전송 기술은 이미 100여 년 전 Tesla에 의해 구현되었다. 하지만 낮은 전력 전송 효율과 전파에 대한 유해성 문제 등으로 인해 실생활에 적용되기 위해서는 보완할 점이 많이 있었다. 또한 대

부분의 전기 전자 제품들은 기존의 유선으로 전력을 공급하는 방식을 적용하더라도 크게 불편하거나 어려운 점이 없었기 때문에 무선 전력 전송 기술은 우리 실생활에 접목되기에는 다소 거리가 있었다. 하지만 최근 전 세계적으로 스마트폰 기기의 보급화 및 전기 자동차에 대한 연구가 점차 확대됨에 따라 무선 전력 전송 기술에 대한 활용 가치가 다시 조명되고 있다.

* 교신저자 : 서일대학교 전자과
• 접수일 : 2016. 09. 23
• 수정완료일 : 2016. 10. 13
• 게재확정일 : 2016. 10. 24

• Received : Sep. 23, 2016, Revised : Oct. 13, 2016, Accepted : Oct. 24, 2016
• Corresponding Author : Choong-Mo Youn
Dept. of Electronics, Seoil University
Email : 5477choong@hanmail.net

특히 2007년 MIT의 Marin Soljagic 교수팀은 자기 공진 방식을 이용하여 2m 정도 떨어진 전구를 무선으로 작동시키는 것을 성공함에 따라 그 연구 분야가 크게 확장되고 있다[1-5].

이와 관련하여 Gartner 기업에서는 모바일 기기에 대한 무선 충전 기술은 향후 2~5년 후 시장이 안정화될 것으로 전망하고 있다. 또한 2018년 전후로 10억 달러 이상의 무선 충전 시장 규모가 형성될 것으로 전망하고 있다[6]. 따라서 앞으로 무선 전력 전송 기술에 대한 연구 및 제품 개발이 더욱 더 활성화 될 것으로 보인다.

무선 전력 전송 기술을 응용한 제품의 시장 선점을 위해서는 고효율 전력 전송에 대한 기술력이 매우 중요하다. 무선 전력 전송 시스템의 효율을 향상시키기 위해서는 송신부와 수신부에 위치하는 최적의 전력 전송 코일부가 중요하다. 다양한 어플리케이션에 적용하기 위해서는 각각의 제품의 형상 및 구조에 최적화된 송, 수신 코일을 설계해야 한다. 이는 코일의 크기, 재질, 형상에 따라 전력 전송 코일부의 효율이 크게 달라질 수 있기 때문이다. 공진 코일은 L-C 공진 기법을 적용하여 공진 주파수에서 최대의 전력을 송, 수신 할 수 있도록 제작 한다. 실제의 공진 코일은 수동 소자로만 구성이 되기 때문에 수학적 연산을 통한 예측 및 시뮬레이션 과정이 상대적으로 그리 복잡하지는 않다.

무선 전력 전송 시스템의 전체 효율에 크게 영향을 미치는 요소 중 또 다른 하나는 송신부에 위치하는 전력 증폭기이다. 대부분의 전력 증폭기는 트랜지스터를 이용하여 공급된 직류 전력을 미리 설정된 공진 주파수와 동일한 주파수를 갖은 교류 전력으로 변환하는 역할을 한다. 하지만 이 과정에서 전력 증폭기의 특성상 상당한 전력이 열로서 손실이 되고 있다.

고효율 전력 증폭기를 설계하기 위해서는 스위치 모드 전력 증폭기를 적용하는 것이 일반적이다. 선형 증폭기를 이용하여 전력을 변환하는 경우 상당한 전력이 열로서 손실될 수 있기 때문에, 이론적으로 100%의 전력 변환 효율을 구현할 수 있는 스위치 모드 전력 증폭기를 사용하는 것이 바람직하다. 스위치 모드 전력 증폭기는 부하 측의 회로 구성에 따라 그 성능 및 동작 원리가 달라지며 대표적으로 D급, E급, F급 등이 있다[7-13].

본 논문에서는 고효율 무선 전력 전송 시스템을 구축하기 위한 스위치 모드 전력 증폭기 설계 방안에 대해 소개하고자 한다. 그 중 E급 전력 증폭기는 다른 타입에 비해 회로 구성이 단순하고 성능이 우수하다. 따라서 본 논문에서는 E급 전력 증폭기 설계 방안에 대해 소개하고자 한다. 또한 공진 코일을 제작하기 위한 수학적 방법을 설명하고 실제 제작된 공진 코일과의 특성을 비교해본다.

II. 고효율 무선 전력 전송 시스템 설계

2.1 스위치 모드 전력 증폭기

앞에서 언급한 바와 같이 스위치 모드 전력 증폭기는 이론적으로 100%의 전력 변환 효율을 구현할 수 있다. 스위치 모드 전력 증폭기에는 D급, E급, F급 등이 있다. 일반적으로 D급 전력 증폭기는 두 개의 트랜지스터를 사용한다. 부하 측에 위치하는 공진부 구조에 따라 전압 모드 D급(VMCD: Voltage Mode Class-D)와 전류 모드 D급(Current Mode Class-D)로 나뉜다. 각각의 트랜지스터는 서로 번갈아 On/Off를 반복하며 전력을 증폭시킨다. 이 때 드레인단에 걸리는 전압과 전류의 파형은 서로 번갈아 가며 발생되기 때문에 이론적으로 100%의 효율 구현이 가능하다[10-13].

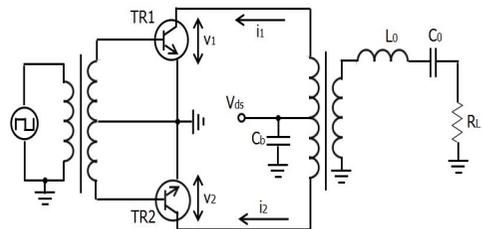


그림 1. D급 전력 증폭기 구조
Fig. 1 Schematic of class-D power amplifier

하지만 두 개의 트랜지스터를 D급 전력 증폭기로 구동시키기 위해서는 하나의 입력 신호를 두 개의 180° 위상차이가 나는 신호로 분리해야 하는 번거로움이 있다. 또한 아주 짧은 시간이라도 트랜지스터의 Rising/falling time에 의해 두 트랜지스터가 동시에

켜지는 구간이 발생하게 되면 Overshoot current로 인해 쉽게 고장이 발생할 수 있다.

E급 전력 증폭기는 한 개의 트랜지스터를 사용한다. 단일 트랜지스터를 스위치로 동작시키기 위해서는 트랜지스터 내부 및 회로 기판 등에 존재하는 기생 리액턴스 성분을 고려한 임피던스 매칭부가 필요하다. 일반적으로 E급 전력 증폭기의 부하 측 회로는 트랜지스터와 병렬로 위치하는 C_S (Shunt Capacitor)와 공진 주파수에 맞게 설정된 L_0 (Series Inductor), C_0 (Series Capacitor)의 소자들로 구성된다. 전압과 전류의 Overlap을 피하기 위해서는 C_S 의 역할이 매우 중요하다.

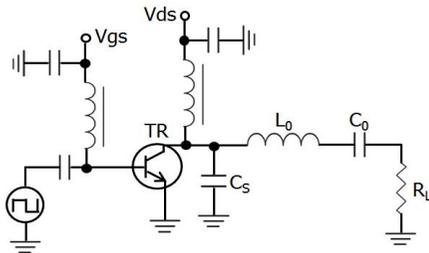


그림 2. E급 전력 증폭기 구조
Fig. 2 Schematic of class-E power amplifier

F급 전력 증폭기는 비선형 트랜지스터에서 발생하는 고조파를 제어하는 기법에 기반을 둔다. 고조파를 제어하기 위해 여러 개의 공진 필터를 직/병렬 구조로 사용한다. F급 전력 증폭기의 드레인 단의 전압 파형은 구형파로 관측되며 이 경우 홀 수차 고조파 성분이 포함되어 있다. 또한 정현파 형태의 전류 파형에는 짝수 차 고조파 성분이 포함되어 있다[13].

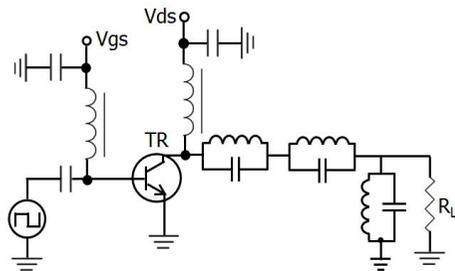


그림 3. F급 전력 증폭기 구조
Fig. 3 Schematic of class-F power amplifier

실제 F급 전력 증폭기를 구현함에 있어 사용할 수 있는 공진 필터의 개수에는 제한이 있기 때문에 실제로 100%의 효율을 구현하기는 어렵다. 또한 공진 필터의 개수가 많아질수록 회로 구성이 점점 더 복잡해지는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 회로의 구성이 간단하면서도 높은 효율을 구현할 수 있는 E급 전력 증폭기의 설계 방법을 소개하고자 한다.

2.2 E급 전력 증폭기 설계를 위한 주요 파라미터 계산 방법

E급 전력 증폭기는 1975년 Sokal에 의해 처음 제안되었다. 앞서 언급한 바와 같이 E급 전력 증폭기는 단일 트랜지스터를 사용하며, 부하 측에는 병렬 커패시터(C_S)와 직렬 공진 필터(L_0, C_0)등이 포함된다. 각각의 파라미터 값들은 Sokal에 의해 정의된 수식을 활용하여 쉽게 계산할 수 있다. E급 전력 증폭기 설계를 위한 부하 측의 파라미터 계산식은 다음과 같다 [10].

$$R_L = \frac{0.576801 \times V_{ds}^2}{P_{out}} \times \left(1.001245 - \frac{0.451759}{Q_L} - \frac{0.402444}{Q_L^2} \right) \quad (1)$$

$$C_S = \frac{1}{34.2219 \times Freq \times R_L} \times \left(0.99866 + \frac{0.91424}{Q_L} + \frac{1.03175}{Q_L^2} \right) + \frac{0.6}{(2\pi \times Freq)^2 L} \quad (2)$$

$$C_0 = \frac{1}{2\pi \times Freq \times R_L} \times \left(\frac{1}{Q_L - 0.104823} \right) \times \left(1.00121 + \frac{1.01468}{Q_L - 1.7879} \right) - \frac{0.2}{(2\pi \times Freq)^2 L} \quad (3)$$

여기서 P_{out} 은 출력 전력의 크기이며, V_{ds} 는 드레인 바이어스 전압이다. R_L 은 부하 값이며, $Freq$ 는 동작 주파수이다. 본 논문에서 동작 주파수는 6.78MHz이

다. 그 외에 Q_L 값은 Class-E 전력 증폭기 부하 측 공진 회로의 Quality factor(Q-factor) 값이다.

위 식에서 계산된 결과 값을 이용하여 E급 전력 증폭기의 부하 측 회로를 그림 4와 같이 구성하였다.

2.3 시뮬레이션을 이용한 회로 성능 검증

전력 증폭기를 제작함에 있어 시뮬레이션을 이용한 검증 단계는 설계자로 하여금 전체적인 설계 시간과 비용을 덜어줄 수 있다. 본 논문에서는 Linear Technology社의 LTspice IV를 이용하여 전력 증폭기를 설계하였다).

고효율 E급 전력 증폭기를 설계하기 위해 앞에서 언급한 식 (1), (2), (3)을 이용하여 각 파라미터 값을 계산한 후 시뮬레이션을 진행하였다. 본 연구에서 사용된 트랜지스터는 VISHAY社의 10W급 Power MOSFET 소자를 사용하였다.

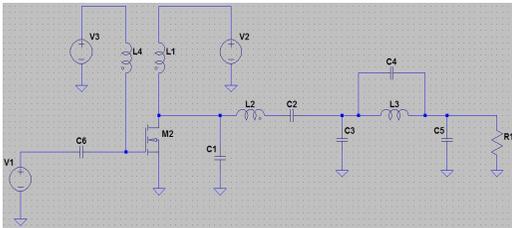


그림 4. E급 전력 증폭기 시뮬레이션 회로도
Fig. 4 Schematic of class-E power amplifier for simulation

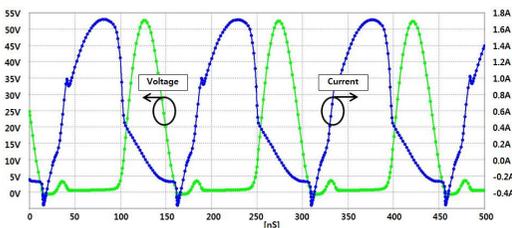


그림 5. E급 전력 증폭기 드레인단 전압, 전류 파형
Fig. 5 Voltage and current waveform of class-E power amplifier

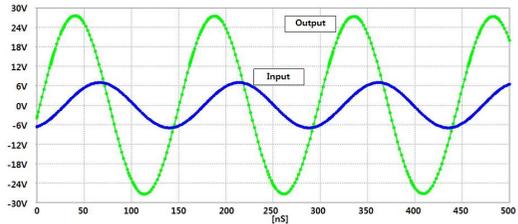


그림 6. E급 전력 증폭기의 입, 출력 전압 전류 파형
Fig. 6 Input and output voltage waveform of class-E power amplifier

시뮬레이션 결과 드레인 단의 전압 전류 파형은 그림 5와 같이 Zero voltage switching이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이때 출력 전력은 7.63W이며, 전력 변환 효율은 91.8%가 관측되었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 출력 전압의 파형은 왜곡 없는 깨끗한 정현파가 나오는 것을 확인할 수 있었다.

이를 토대로 실제 전력 증폭기를 제작하였다. 측정 결과 출력 전력은 7.5W, 효율은 89% 이상이 관측되었다.

2.4 공진 코일 제작

공진 코일을 제작하기 위해서는 코일의 재질, 형상, 감은 횟수 등을 고려해야 한다. 이러한 파라미터들은 공진 코일의 임피던스 값을 결정한다. 본 연구에서는 작은 면적을 차지하면서 높은 효율을 구현할 수 있는 Flat-spiral 타입을 그림 8과 같이 제작하였다. 그림 7은 Flat-spiral 타입의 공진 코일의 측면을 도시한 그림이다. 공진 주파수는 6.78MHz로 설정하였다.

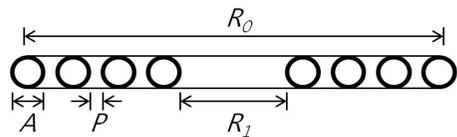


그림 7. 공진 코일 파라미터
Fig. 7 Parameters of resonant coil

공진 코일을 제작하기 위해 인덕턴스 값을 다음 식 (4)를 이용하여 예측할 수 있다²⁾.

1) <http://www.linear.com>

2) <http://deepfriedneon.com/>

$$L(\mu H) = \frac{N^2}{15R_1 + N(A+P) - 11R_0} \times \left(\frac{R_1 + N(A+P)}{2} \right)^2 \quad (4)$$

A는 전선의 단면적 지름, P는 전선 간의 간격, R0는 외부 직경, R1은 내부 직경, N은 코일의 감은 횟수이다. LCR 미터를 이용하여 제작된 코일의 인덕턴스를 측정하였다. 식 (4)를 이용한 계산 값과 LCR 미터를 이용한 측정치의 오차는 약 1% 미만으로 측정되었다.

표 1. 제작한 공진 코일 파라미터
Table 1. Parameters of fabricated resonant coils

Parameters	F ₀	R ₀	Turns	Calculated	Measured
Unit	MHz	mm	turn	μH	μH
Value	6.78	100	5	4.39	4.35

III. 시스템 성능 측정 분석

앞서 설계한 E급 전력 증폭기와 공진 코일을 이용하여 무선 전력 전송 효율을 그림 8과 같이 구축하였다.

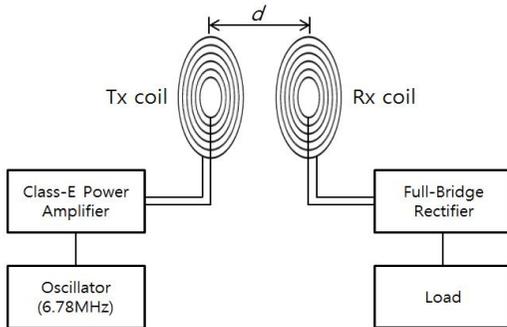


그림 8. 제작한 무선 전력 전송 시스템
Fig. 8 Fabricated wireless power transfer system

송, 수신 공진 코일 간의 거리 d 가 20mm일 때 측정된 무선 전력 전송 효율은 대략 77%가 관측되었다.

송, 수신 코일의 외부 직경을 더 크게 만들고 인덕턴스 값을 증가시킨다면 전력 전송 효율은 기존 보다 충분히 더 개선될 여지가 있다. 하지만 코일의 크기를 지나치게 크게 만든다면 실제 개발하고자 하는 제품에 적용하는데 구조상 어려움이 따르므로 제품의 한정된 크기와 효율을 고려한 공진 코일의 제작 기술이 중요하다고 볼 수 있다.

IV. 결론

본 논문에서는 6.78MHz 무선 전력 전송 시스템을 설계하기 위해 고효율 E급 전력 증폭기 설계 방법과 공진 코일 제작 방법에 대해 설명하였다. 소형 전자 제품의 크기를 염두에 두어 공진 코일 부는 Flat-spiral 타입으로 소형으로 제작하였다. 전체 무선 전력 전송 시스템의 효율은 약 77%가 관측되었다. 본 연구를 통하여 조명기기를 비롯한 다양한 전기, 전자 제품에 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 또한 무선 전력 전송 기술을 배우고자 하는 학생이나 실무 엔지니어들에게 도움이 될 수 있을 것이라 생각된다. 추후 본 연구를 기반으로 제품의 크기 및 형상을 고려한 다양한 공진 코일 제작 방법에 관한 연구가 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 2016년도 서일대학교 학술연구비 지원으로 수행되었음.

References

- [1] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. Joannopoulos, P. Fisher, and M. Soljacic, "Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances," *Science*, vol. 317, no. 6, July 2007 pp. 83-86.
- [2] A. Karalis, J. D. Joannopoulos, and M. Soljacic, "Efficient wireless non-radiative mid-range energy transfer," *Annals of Physics*, 323, 2008 pp. 34-48.
- [3] Z. Now, R. Chinga, R. Tseng, and J. Lin,

"Design and test of a high-power high-efficiency loosely coupled planar wireless power transfer system," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol.56, no.5, May, 2009, pp.1801-1812.

- [4] J. McSpadden and J. Mankins, "Space solar power programs and microwave wireless power transmission technology," *IEEE Microwave Magazine*, Dec., 2002, pp. 46~57.
- [5] J. Garnica, J. Casanova, and J. Lin, " High efficiency midrange wireless power transfer system" *IEEE MTT-S International*, pp.73-76, May, 2011.
- [6] ICT Brief, *Institute for Information & Communications Technology Promotion*, 2015.
- [7] J. Kim, I. Yoon, M. Go, and H. Park, "Design and implementation of broadband rf amplifier for microwave receiver," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 6, 2015, pp. 665-670.
- [8] E. Lim, G. Lee, and Y. Chee, "Load-pull measurement for high power, high efficiency pa design," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 8, 2015, pp. 945-952.
- [9] S. Choi, S. Lee, and Y. Rhee, "A design of wideband, high efficiency power amplifier using LDMOS," *J. of The Korea Institute of Electronic Communication Science*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 13-20.
- [10] A. Grebennikov and N. Sokal, *Switch-mode RF Power Amplifiers*. Elsevier, Burlington, 2007.
- [11] A. Laskovski and M. Ruce, "Class-e oscillators as wireless power transmitters for biomedical implants," *Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*. Nov., 2010, pp. 1-5.
- [12] W. Chen, R. Chinga, S. Yoshida, J. Lin, C. Chen, and W. Lo, "A 25.6W 13.56MHz wireless power transfer system with a 94% efficiency GaN class-e power amplifier," *IEEE Trans. MTT-S*, June, 2012, pp. 1-3.
- [13] F. Haab, "Maximum efficiency and output of class-F power amplifier," *IEEE Trans. MTT-S*, June, 2001, vol.49, no.6, pp. 1162-1166.

저자 소개



윤충모(Choong-Mo Youn)

1990년 단국대학교 대학원 졸업(공학석사)

2000년 청주대학교 대학원 졸업(공학박사)

1993년 ~ 현재 서일대학교 전자과 교수

※ 관심분야 : CAD알고리즘, 정보보안, 저전력 등