

논문 2011-48TC-2-13

무선 에너지 전송을 위한 Class-E 전력증폭기 설계

(Design of Class-E Power Amplifier for Wireless Energy Transfer)

고 승 기*, 서 철 헌**

(Seungki Ko and Chulhun Seo)

요 약

본 논문에서는 메타구조를 이용하여 하나의 RF LDMOS로 새로운 Class-E 전력증폭기를 구현하였다. CRLH 구조는 Class-E 전력증폭기 특성을 갖는 메타물질 전송 선로를 만들 수 있다. CRLH 전송 선로는 전력증폭기의 정합 회로를 구현을 위하여 주파수 오프셋과 CRLH 전송 선로의 비선형 위상 기울기에 의해 얻을 수 있다. 또한, 제안된 전력증폭기의 효율을 향상 시키기 위하여 출력 정합 회로에 CRLH 구조를 이용하여 구현하였다. 동작 주파수는 13.56MHz로 정하였다. Class-E 전력증폭기의 측정된 출력 전력은 39.83dBm, 이득은 11.83 dB이다. 이 지점에서 얻은 전력효율(PAE)은 73%이다.

Abstract

In this paper, a novel Class-E power amplifier using metamaterials has been realized with one RF LDMOS diffusion metal-oxide-semiconductor field effect transistor. The CRLH structure can lead to metamaterial transmission line with the Class-E power amplifier tuning capability. The CRLH TL is achieved by the frequency offset and the nonlinear phase slope of the CRLH TL for the matching network of the power amplifier. Also, the proposed power amplifier has been realized by using the CRLH structure in the output matching network for better efficiency. Operating frequencies are chosen at 13.56 MHz in this work. The measured results show that the output power of 39.83 dBm and the gain of 11.83dB was obtained. At this point, we have obtained the power-added efficiency (PAE) of 73 % at operation frequency.

Keywords : Power Amplifier, Class-E, LDMOS, CRLH(Composite Right/Left-Handed), High Efficiency

I. 서 론

최근 전원선을 사용하지 않고 자유공간을 매질로 하여 전력을 전송하는 무선에너지전송(Wireless Energy Transfer)시스템에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히 휴대용 기기 및 가전용 전자제품이 다양해짐에 따라 수십 cm 정도의 거리에 대 전력으로 전력을 공급하는 시스템에 대한 수요가 증가하고 있다^[1]. 특히, 최근에 사용량이 급증하고 있는 스마트폰의 경우 배터리의 급격한

소모라는 문제가 하나의 해결해야 될 클 이슈로 대두되고 있다. 무선충전기술이 스마트폰에 보급될 경우 사용자가 인지하지 않는 상황에도 스마트폰의 배터리 잔여량에 따라 상시 충전 서비스를 제공하여 배터리 소모에 관한 문제를 해결할 수 있을 것으로 전망된다.

무선에너지전송은 크게 송신부, 공진부, 수신부로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 송신부의 핵심 부분인 고효율 전력증폭기를 구현하였다. HF 대역에서 동작하는 고효율 전력증폭기를 설계하는 부분에 있어서 많은 어려움이 있는데 이런 고효율 전력증폭기의 구현 어려움을 해결하기 위해서 스위칭 모드 전력증폭기에 CRLH 구조를 이용하여 기존 기술의 한계를 극복하고 고효율로 동작하도록 하는 기술이다.

전력증폭기의 효율 증대를 위한 연구가 활발하게 진행되어온 가운데 높은 효율을 얻을 수 있는 대표적인

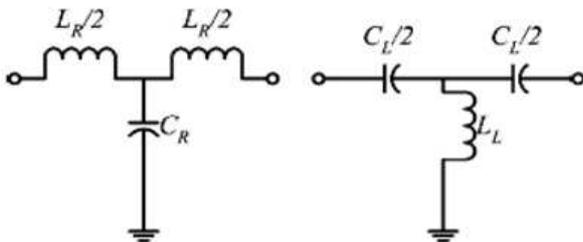
* 학생회원, ** 정회원, 송실대학교 정보통신전자공학부 (Information and Telecommunication Engineering, Soongsil University)

※ 본 연구는 지식경제부, 방송통신위원회 및 한국산업기술평가관리원의 산업원천기술개발사업(정보통신)의 일환으로 수행하였음.[KI002071, 메타전자파구조를 이용한 전파(RF)스펙트럼 특성 개선 기술 연구
접수일자: 2011년1월31일, 수정완료일: 2011년2월18일

방법으로 Class-F 전력증폭기가 있다. Class-F 전력증폭기는 전류와 전압 파형의 겹치지 않게 고조파 성분들을 조절하여 설계함으로써 매우 높은 효율 특성을 기대할 수 있다. 하지만, Class-F 전력증폭기는 수많은 고조파 성분들을 조절해야 높은 효율을 얻을 수 있기 때문에 전력증폭기의 회로가 복잡하고 사이즈가 커지게 된다^[2-4]. 따라서 Class-E 전력증폭기가 가장 간단한 구조이면서 높은 효율을 가질 수 있기 때문에 본 논문에서는 Class-E 전력증폭기를 설계하였다. 또한 이론적으로 class-E 전력증폭기는 100%의 효율을 얻을 수 있지만, 본 논문에서는 CRLH 구조를 이용하였다. HF대역에서 동작하는 전력증폭기를 구현할 때 전송선으로 구현하기 힘들기 때문에 lumped component인 L과 C를 이용하여 회로를 단순화 시키면서 고효율 특성을 얻도록 설계하였다. 또한, 더 좋은 효율을 특성을 얻기 위하여 출력 정합 회로에 CRLH 구조를 이용하여 HF대역에서 고효율을 얻을 수 있도록 구현하였다.

II. $\lambda/4$ CRLH 전송 선로

그림 1은 RH 전송 선로와 LH 전송 선로의 인위의 집중 정수 소자 구현을 위한 단위 셀들을 보여준다. C_R 과 L_R 은 각각 RH 전송 선로의 등가 집중 소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 커패시턴스이다. L_L 과 C_L 은 각각 LH 전송선로의 등가 집중 정수소자 모델의 단위 셀에서의 인덕턴스와 커패시턴스이다. 인위의 전송 선로들은 만약 무한소 근사 가정이 적용되면서 단위 셀에 의해 발생된 위상 편이가 보다 훨씬 작다면 N개의 단위 셀들을 연속으로 연결함으로써 얻어진다. LH 전송선로는 인덕터와 커패시터의 위치가 서로 바뀐 점



(a) RH 전송 선로

(b) LH 전송 선로

그림 1. 인공 RH와 LH 전송선로의 T-형태 단위 셀
Fig. 1. T-type unit cells of artificial RH and LH TLs (a) RH TL, (b) LH TL.

에서 RH 전송 선로의 전기적인 쌍대관계이다. 각 단위 셀의 전체 인덕턴스와 커패시턴스는 같다. 그림 1에서 인위의 RH 전송선로와 LH 전송 선로의 두 단위 셀의 위상 응답은 다음과 같다.

$$\varnothing_{Runit} = -\arctan \left[\frac{\omega \left(C_R Z_{OR} + \frac{L_R}{Z_{OR}} + \omega^2 \frac{C_R L_R^2}{4 Z_{OR}} \right)}{(2 - \omega^2 C_R L_R)} \right] < 0 \quad (1)$$

$$\varnothing_{Lunit} = -\arctan \left[\frac{\omega \left(C_L Z_{OL} + \frac{L_L}{Z_{OL}} - \frac{1}{\omega^2 4 C_L Z_{OL}} \right)}{(1 - 2\omega^2 C_L L_L)} \right] > 0 \quad (2)$$

여기서 R과 L은 각각 RH와 LH를 나타내며 Z_{OR} 과 Z_{OL} 은 다음과 같이 정의되는 특성 임피던스를 나타낸다.

$$Z_{OL} = \sqrt{\frac{L_L}{C_L}} \quad Z_{OR} = \sqrt{\frac{L_R}{C_R}} \quad (3)$$

인위의 전송 선로의 위상 응답은 다음과 같다.

$$\varnothing_R = N \varnothing_{Runit} \quad (4)$$

$$\varnothing_L = N \varnothing_{Lunit} \quad (5)$$

RH 전송 선로는 음의 위상응답을 갖는 반면, LH 전송 선로는 양의 위상 응답을 갖는다.

이상적인 CRLH 전송 선로는 이상적인 LH 전송 선로와 RH 전송 선로의 직렬 결합으로 이루어지며 차단 주파수를 갖지 않고, 다음과 같은 위상 응답을 갖는다.

$$\varnothing_C = \varnothing_R + \varnothing_L \quad (6)$$

여기서 C는 CRLH를 나타낸다^[5].

III. Class-E 전력증폭기 동작원리

Class-E 전력증폭기는 이론적으로 100%의 전력효율 특성을 가지는 전력증폭기이다. Class-E 전력증폭기는 다른 전력증폭기에 비해 높은 효율을 얻을 수 있는 특성을 가지고 있다. 같은 주파수, 같은 출력전력에서 동일한 트랜지스터를 이용한 Class-E 전력증폭기는 일반적인 Class-B 또는 Class-C 전력증폭기에 비해 적은 전력손실 특성을 갖고 동작한다. 그림 2는 Class-E 전력증폭기의 이상적인 회로도 및 이상적인 전압 및 전류

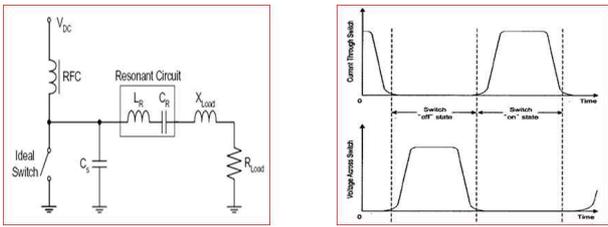


그림 2. Class-E 전력증폭기의 회로도와 이상적인 전압 / 전류파형

Fig. 2. Circuit of Class-E power amplifier and ideal voltage / current waveforms.

파형을 보여주고 있다^[6].

스위칭모드 전력증폭기에서 트랜지스터는 이상적인 스위치처럼 동작하게 된다. 트랜지스터의 전력소모를 최소화하기 위해 트랜지스터의 전압과 전류 파형이 겹치지 않도록 해야 하며, 이는 트랜지스터를 ON/OFF 시킴으로써 전력증폭기의 고효율 특성을 얻게 된다^[7].

그림 2에서와 같이 스위치로 동작하는 "ON" 상태 일 때는 트랜지스터가 낮은 임피던스를 갖는 것처럼 동작하여 전압이 0에 가까워지고, 전류는 높은 값을 가지며 흐르게 된다. 반면에 "OFF" 상태일 때는 트랜지스터가 높은 임피던스를 갖는 것처럼 동작하여 전압은 높은 값을 가지며 전류는 0에 가까워진다.

IV. 제안된 Class-E 전력증폭기 시뮬레이션 결과

Class-E 전력 증폭기는 그림 2에서 보는 바와 같이 전압과 전류 파형이 신호 주기 동안 overlap이 없이 동작한다. Class-E 전력증폭기 같은 경우 이상적일 때 100%의 효율을 얻을 수 있으며, 설계할 때 최대의 효율을 얻기 위하여 출력 정합단에 CRLH 구조를 적용하였다.

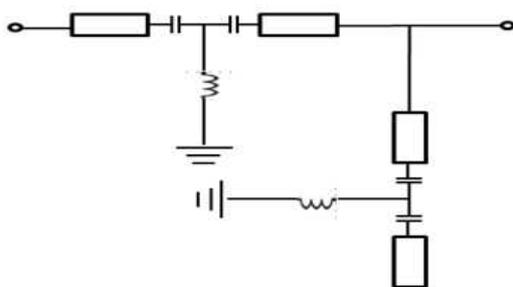


그림 3. 제안된 CRLH 구조
Fig. 3. Proposed CRLH structure.

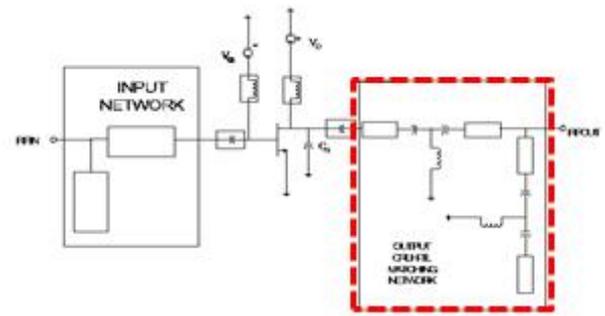
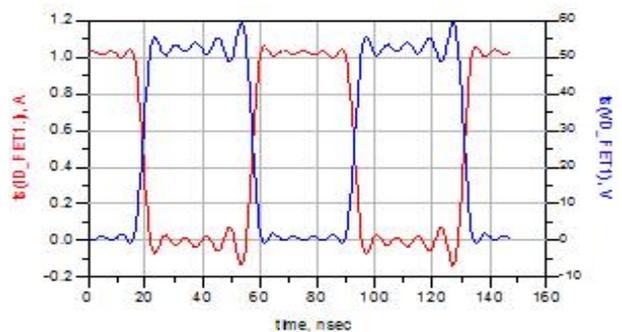


그림 4. 제안된 구조를 이용한 Class-E 전력증폭기
Fig. 4. Class-E amplifier using proposed structure.

Fundamental Frequency	Available Source Power dBm	Fundamental Output Power dBm	Transducer Power Gain	Power-Added Efficiency, %	DC Power Consumpt. Wats	High Supply Current	Thermal Dissipation Wats
13.56 MHz	27.000	39.939	12.939	77.117	12.783	0.457	1.195
	28.000	40.080	12.080	77.590	13.126	0.469	1.169
	29.000	40.485	11.485	78.143	13.561	0.477	1.137
	30.000	40.271	10.271	78.602	13.538	0.484	1.153
	31.000	40.259	9.259	78.729	13.792	0.493	1.223
	32.000	40.455	8.455	78.973	14.077	0.503	1.285
	33.000	40.563	7.563	78.690	14.463	0.517	1.413
	34.000	40.672	6.672	77.924	14.977	0.535	1.582
	35.000	40.773	5.773	76.673	15.578	0.556	1.806
	36.000	40.917	4.917	77.500	15.931	0.569	1.641
	37.000	41.032	4.032	75.664	16.755	0.596	1.886
	38.000	41.130	3.130	74.623	17.375	0.621	1.978

(a) 시뮬레이션 결과



(b) 제안된 구조의 전압과 전류파형

그림 5. 제안된 구조의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation result of proposed structure.

그림 3은 Class-E 전력증폭기에 사용된 CRLH 구조이다. 그림 4는 CRLH 구조를 전력증폭기에 적용하였을 때 회로도이다. 그림 4와 같이 Class-E 전력증폭기 출력 정합단에 CRLH 구조를 이용하여 기존의 Class-E 전력증폭기보다 좀 더 향상된 효율 특성을 얻을 수 있다.

그림 4와 같이 제안된 구조를 이용하면 좀 더 향상된 효율 특성을 얻을 수 있다. 그림 5는 제안된 구조를 이용한 시뮬레이션 결과이다. 입력 전력은 30dBm 일 때 출력전력은 40.271dBm이고, 10.271dB의 이득과 78.602%의 효율을 얻었다.

IV. 구현 및 측정결과

CRLH 구조를 이용한 Class-E 전력증폭기는 freescale사의 10W급 LDMOS를 이용하여 구현되었다. 또한 3.2의 유전율과 31mils의 두께를 갖는 Taconic TLC 기판을 이용하여 제작하였으며, 설계에 사용된 simulator는 Aglient사의 Advanced Design System (ADS)이다.

그림 6은 제안된 Class-E 전력증폭기의 구현모습을 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이, 정합회로는 그림 3에 나와 있는 형태의 CRLH 구조를 이용하여 구현되었다. 또한, 출력 정합 회로에 CRLH 구조를 적용하여 전력증폭기의 효율 특성을 개선하였다.

제안된 전력증폭기의 측정 결과 입력 전력 28dBm 기준에서 13.56MHz에서 39.83dBm의 출력 전력, 70.3%의 효율 및 11.83dB의 이득을 보여주고 있다. 집중 소자를 사용하여 정합단을 구현함으로써 시뮬레이션과 실

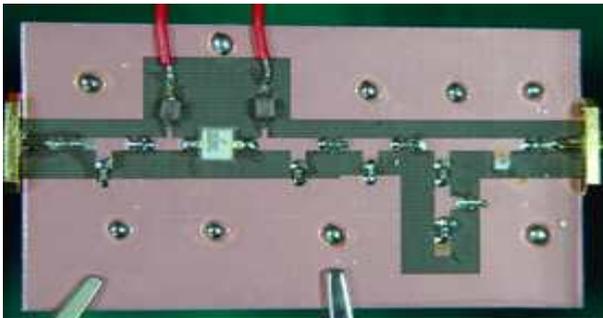


그림 6. CRLH를 이용한 Class-E 전력증폭기 구현 모습
 Fig. 6. Fabrication of the proposed Class-E power amplifier using CRLH.

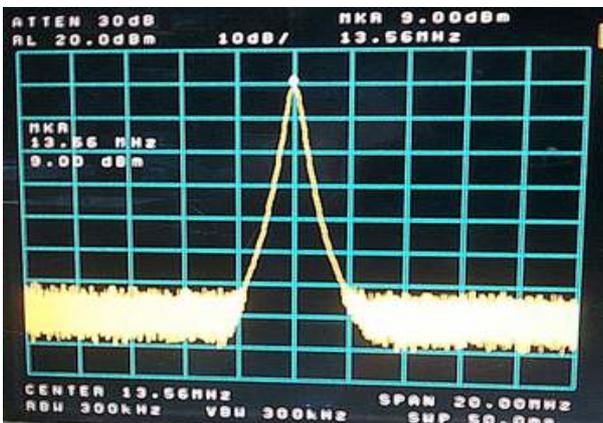


그림 7. 제안된 Class-E 전력증폭기의 출력 전력
 Fig. 7. Output power of the proposed Class-E power amplifier.

표 1. 제안된 Class-E 전력증폭기의 측정 결과
 Table 1. Measured results of the proposed Class-E power amplifier.

	Units	Measurement Results
Fundamental Frequency	MHz	13.56
Output Power	dBm	39.83
Gain	dB	11.83
PAE	%	73

제 제작 측정 결과 사이에 주파수 천이 현상이 발행하였다. 이는 설계 과정에서 주파수 천이 현상을 예상하고 미리 보상하여 원하는 대역에서 동작 가능하도록 수정하였다. 또한, 제안된 전력증폭기와 특성 비교를 위하여 일반적인 Class-E 전력증폭기를 제작하였다. 제안된 전력증폭기와 비교할 경우 기존의 전력증폭기보다 CRLH 구조를 이용한 Class-E 전력증폭기의 효율 특성이 개선됨을 확인하였다.

표 1은 제안된 Class-E 전력증폭기의 측정 결과를 나타낸다.

V. 결론

본 논문은 무선에너지 전송을 위한 13.56MHz에서 동작하는 Class-E 전력증폭기에 대해 연구 및 제작하였다. 기존의 Class-E 전력증폭기보다 제안된 구조인 CRLH 구조를 이용하여 Class-E 전력증폭기를 구현하였을 때 효율 특성을 개선됨을 확인할 수 있다. CRLH 구조를 사용함으로써 크기 문제를 해소하도록 하였고 CRLH 구조를 출력 정합단에 사용하여 보다 향상된 효율 특성을 얻었다. 동작주파수는 13.56MHz이며 전력증폭기의 측정된 출력전력은 39.83dBm 이다. 이 지점에서 얻은 전력효율(PAE)는 73%이며 11.83의 이득을 얻었다.

결과로 lumped components L과 C를 사용하여 제안된 구조의 Class-E 전력증폭기를 구현함으로써 복잡한 정합단의 크기 및 효율 개선에 기여할 수 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 강승열, 김용해, 이명래, 정태형, “무선 에너지 전송 기술.” ETRI 전자통신동향분석, 제23권, 제6호, pp. 59-69, Dec.2008
- [2] N. O. Sokal and A. D. Sokal, “Class-E a New Class of High-Efficiency Tuned Single-Ended Switching Power Amplifiers,” IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol SC-10, vo. 3, pp 168-176, June 1975.
- [3] N. O. Sokal and A. D. Sokal, “Class-E Class-E Switching-Mode RF Power Amplifiers-Low Power Dissipation, Low Sensitivity to Component Tolerances and Well Defined Operation,” Proceedings of the 1979 IEEE ELECTRO Conference, Session 23, New York, April 1979. Reprinted in RF Design, vol 3, no. 7, pp33-38, July/Aug 1980.
- [4] N. O. Sokal “Class-E High-Efficiency switching-Mode Power Amplifiers, from HF to Microwave,” 1998 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 1998.
- [5] A. Lai, C. Caloz, and T. Itoh, “Composite right/left-handed transmission line metamaterials,” IEEE Microwave Magazine, vol. 5, pp. 34-50, September 2004.
- [6] F. H. Raab, “Idealized operation of the class-E tuned power amplifier,” IEEE Trans. Circuits Syst, vol. CAS-25, pp. 725-735, Dec 1977.
- [7] D. M. Pozar, Microwave Engineering, Addison-Wesley, 1993.

저 자 소 개



고 승 기(학생회원)
 2009년 2월 숭실대학교 정보통신
 전자공학부 학사 졸업.
 2009년 2월~현재 숭실대학교
 전자공학과 석사과정.
 <주관심분야 : 초고주파 회로 설
 계, RF Power Amplifier, RFIC,
 VCO, 무선평에너지전송>



서 철 헌(정회원)
 1983년 3월 서울대학교
 전자공학과 (공학사)
 1985년 3월 서울대학교
 전자공학과(공학석사)
 1993년 3월 서울대학교
 전자공학과 (공학박사)
 1993년~1995년 MIT 연구원
 1993년~1997년 숭실대학교 정보통신학과 조교수
 1999년 8월~2001년 1월 MIT 방문교수
 1997년~2004년 숭실대학교 정보통신 전자공학부
 부교수
 2005년~현재 숭실대학교 정보통신전자공학부
 교수
 <주관심분야 : 이동 및 위성통신 Microwave 부
 품 및 시스템, PBG를 이용한 RF 부품>