

커패시터 커플링 무선 전력 전송을 위한 MHz LLC 공진형 컨버터

유영수¹, 문현원², 이강현[†]

High Frequency (MHz) LLC Resonant Converter for a Capacitor Coupling Wireless Power Transfer (CCWPT)

Young-Soo You¹, HyunWon Moon², and Kang-Hyun Yi[†]

Abstract

This paper proposes a high-frequency (MHz) LLC resonant converter for a capacitor coupling wireless power transfer (CCWPT). The CCWPT uses electric field in the coupling capacitor between the transmitter and receiver electrodes with a dielectric layer. Given that capacitance is very small and the impedance is large, transferring power with a simple series resonance is difficult. Therefore, the high frequency (MHz) and high Q factor LLC converter is proposed to reduce the impedance of the coupling capacitance and to obtain a high output voltage. This paper deals with the operation analysis of the proposed LLC converter and a theoretical capacitance estimation. The operation and features of the proposed CCWPT LLC converter is verified with a 4.2 W prototype for charging mobile devices.

Key words: CCWPT(Capacitor Coupling Wireless Power Transfer), High frequency LLC converter, Coupling capacitor, Glass dielectric layer

1. 서 론

최근 모바일 기기와 전기 자동차를 선 없이 충전하기 위하여 무선 전력 전송 기술에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 무선 전력 전송 기술은 자기장을 이용하는 인덕티브 커플링 방식과 자기 공진 방식이 있으며 전기장을 이용하는 커패시티브 커플링 방식으로 구분할 수 있다. 자기장을 이용하는 무선 전력 전송 방식은 그림 1과 같이 인덕터에서 발생하는 자기장의 커플링을 통하여 전력을 전달하는 방식으로, 동작주파수와 송수신 인덕터와 공진 커패시터 그리고 기생 저항에 의한 양호도의 크기에 따라 인덕티브 방식과 자기 공진 방식으로

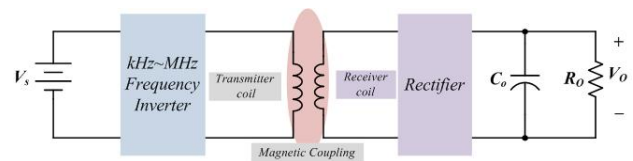


Fig. 1. Simple structure of the WPT system using magnetic coupling.

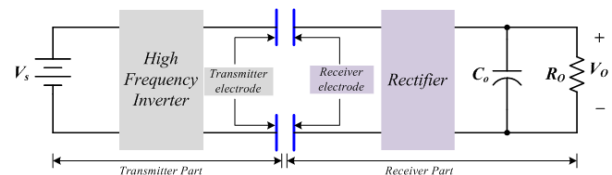


Fig. 2. Simple structure of the CCWPT system.

구분할 수 있다. 인덕티브 방식은 변압기의 원리와 유사하며, 현재 기술 완성도가 높아 상용화까지 되었다. 하지만, 송신 코일과 수신 코일이 정확하게 정합되어야 전력이 전송되는 단점을 가지고 있다^[1-2]. 자기 공진 방식은 송수신 코일간의 공명 현상을 이용하여 거리가 떨어

Paper number: TKPE-2016-21-2-3

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: khyi@daegu.ac.kr, School of Electronic and Electric Engineering, Daegu University
Tel: +82-53-850-6652 Fax: +82-53-850-6619

¹ Electronic Engineering, Graduate School, Daegu University

² School of Electronic and Electric Engineering, Daegu Univ.
Manuscript received Oct. 12, 2015; revised Nov. 3, 2015;
accepted Dec. 9, 2015

— 본 논문은 2015년 전력전자학술대회 우수추천논문임

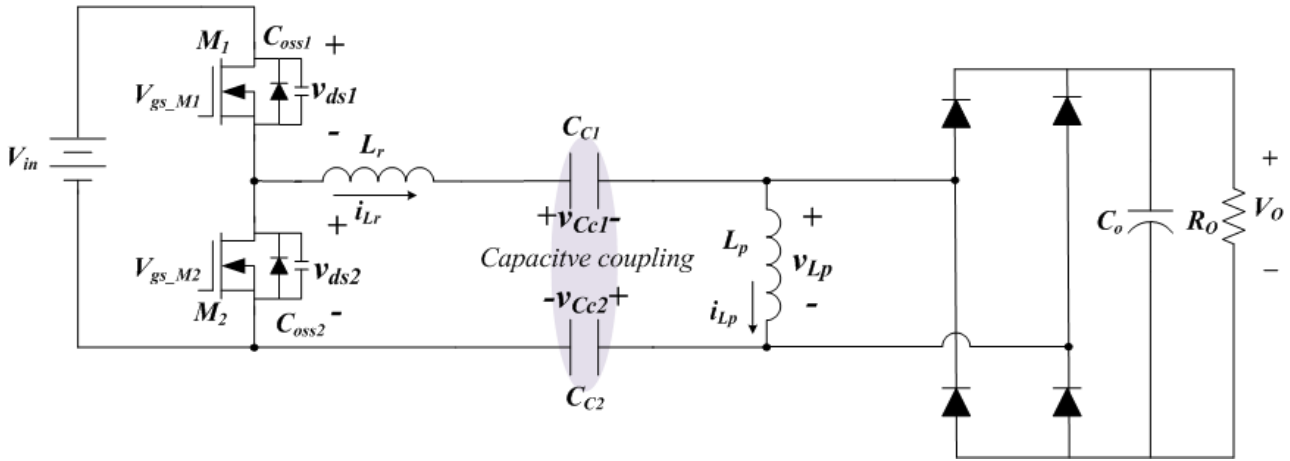


Fig. 3. Proposed high frequency LLC converter.

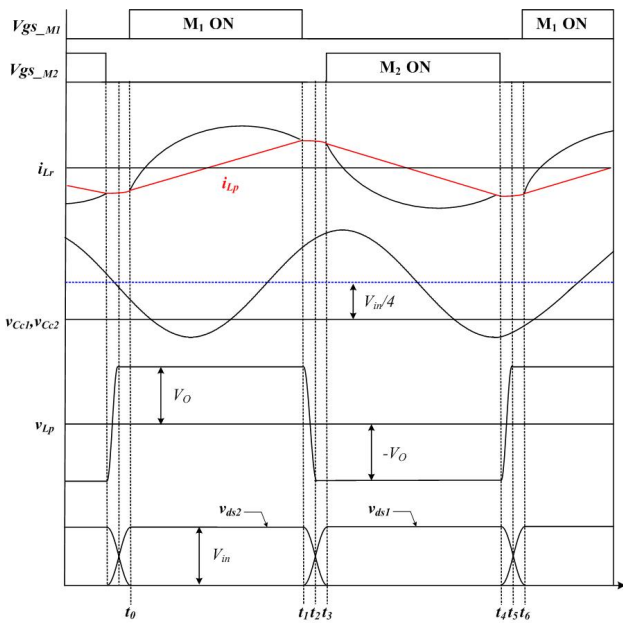


Fig. 4. Key waveform of the proposed circuit.

지거나 송수신 코일이 정확히 정합되지 않아도 전력이 전송되는 사용자 편의성이 우수하다. 하지만 인체 유해성에 대한 영향성 확인 필요, 낮은 효율, 전자파 방출 등의 단점을 가지고 있다^[3-4].

전기장을 이용하는 무선 전력 전송 방식은 그림 2에서와 같이 물리적으로 생성된 커패시터에 전계를 이용하여 변위 전류를 발생시켜 전력을 전달하는 방식으로 CCWPT(Capacitor Coupling Wireless Power Transfer)라고도 불리고 있다. CCWPT 방식은 전기장을 이용하기 때문에, 전자기파가 전력 전달 과정에서는 발생하지 않으며, 인덕티브 방식보다는 위치 정합에 대한 효율 저하도 심하지 않다. 또한 전극만 형성하게 되면 전력 전달이 이루어지므로 제품에 적용도 쉽다는 장점을 가지고 있다. 기본적인 전력 전달 과정은 그림 2에서 보는

바와 같이 송수신측에는 DC (Direct Current) 전압을 고주파 AC(Alternating Current) 전압으로 만드는 인버터 회로가 존재하고 수신측에는 정류기로 직류 전압을 만들어 내게 된다. 회로 동작은 공진형 DC/DC 컨버터와 거의 유사하다. 이로 인해 커패시티브 커플링 방식에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다^[5-10]. 물리적으로 생성된 커패시터는 송수신 기기간의 유전체 두께와 전극의 면적에 의해 결정되는데 그 값이 매우 작게 된다. 작은 커패시터는 큰 임피던스를 갖게 되어 전력 전달이 잘 안되게 된다^[5]. 이런 문제점을 극복하기 위하여 변압기를 사용하여 임피던스를 변화시키거나, 유전체의 두께를 아주 얇게 하여 커패시터를 크게 얻는 연구가 진행되었다^[6-10]. 하지만 기존 연구는 시스템의 부피나 소자를 증가시켜 자기장을 이용하는 방식보다 장점을 찾기가 어려우며, 유전체의 두께가 너무 얇게 되면 실제 적용은 어렵다는 단점을 가지고 있다.

따라서, 본 논문에서는 좀 더 큰 커패시터를 얻기 위하여 상대 유전율이 높은 유리 유전체를 사용하고, 고주파 동작을 하게 되면 임피던스를 작게 보이게 할 수 있다. 또한, 적은 커패시터로도 높은 출력 전압 이득을 얻을 수 있고, 송신회로의 턴-온 스위칭 손실을 최소화할 통해 고효율을 얻기 위한 높은 양호도를 갖는 고주파 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 스위칭 주파수는 현재 모바일 기기 자기 공진 방식의 표준 주파수인 6.78MHz를 이용하고, 모바일 기기 충전을 위한 설계 검증을 위하여, 일반적인 전력용 소자를 이용하고, 4.2W 모바일 기기 충전을 위한 6.78MHz LLC 컨버터를 구성하여 동작과 특성을 검증하였다.

2. 제안하는 CCWPT 고주파 LLC Converter

CCWPT를 위한 고주파 LLC 컨버터를 그림 3과 같이 제안한다. 유리 유전체를 통하여 얻어진 전력 전송용 커

패시터 2개와 공진을 위한 인덕터 그리고, 높은 출력 이득과 턴 손실을 감소시키기 위한 인덕터로 공진 탱크를 구성한다. 송신 측에는 일반적인 Half-bridge 컨버터를 이용하여 LLC 컨버터를 구성하였다. 동작은 변압기가 없는 LLC 컨버터와 유사하게 동작하고, 그림 4는 주요 동작을 나타낸다. 그림 4와 같이 커플링 커패시터와 공진 인덕터 사이에 공진을 통해 수신측에 전력을 전달하게 된다. 회로 동작은 6가지 모드로 구성된다. Mode 1~Mode 3과 Mode 4 ~ Mode 6은 일치하므로 앞선 Mode 1~Mode 3만 설명하도록 한다. 모든 소자는 이상적이면 MOSFET는 출력 커패시터만 존재하고 다이오드, 인덕터, 커패시터는 이상적이라고 가정한다.

Mode 1 [$t_0 \sim t_1$] : Mode 1은 M1 스위치의 v_{ds1} 양단 전압이 영전압으로 완전히 감소하여, 인덕터 L_p 양단 전압은 출력전압이 되었을 때 시작된다. 이때 공진 인덕터 전류와 L_p 인덕터 전류는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$i_{L_r} = I_{L_r}(t_0) \cos \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}(t-t_0) + \left(\frac{V_{in}}{2} - V_{C_{c1}}(t_0) - V_{C_{c2}}(t_0)\right) / \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \sin \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}}(t-t_0) \quad (1)$$

$$i_{L_p} = \frac{V_o}{L_p}(t-t_0) + I_{L_p}(t_0) \quad (2)$$

여기서, $C_r = C_{C1} // C_{C2}$ 이다. Mode 1은 공진 인덕터 전류와 커플링 커패시터의 반주기 공진이 끝나게 되면 종료되게 된다.

Mode2 [$t_1 \sim t_2$] : Mode 2는 M1 스위치가 꺼지게 되면 시작하게 된다. M1 스위치가 꺼지게 되면 M1 스위치와 M2 스위치의 아웃풋 커패시터와 L_r 과 L_p 전류가 공진으로 M1 스위치의 양단전압이 입력전압 V_{in} 에서 점점 감소하게 된다. 이 때, L_p 양단 전압은 V_o 전압에서 $-V_o$ 전압으로 감소되게 된다. 이 때 v_{ds2} 의 양단 전압은 아래와 같은 식으로 표현할 수 있다. 여기서, $C_{oss} = C_{oss1} + C_{oss2}$ 이다.

$$v_{ds2} = V_{ds2}(t_1) \cos \frac{1}{\sqrt{2(L_r + L_p)C_{oss}}}(t-t_1) - I_{L_p}(t_1) \sin \frac{1}{\sqrt{2(L_r + L_p)C_{oss}}}(t-t_1) \quad (3)$$

Mode3 [$t_2 \sim t_3$] : Mode 3는 L_p 양단 전압이 이미 $-V_o$ 전압이 되었을 때 시작된다. 이 모드에서는 MOSFET의 출력 커패시터가 L_p 를 제외한 L_r 과의 공진으로 영전압 스위칭을 이루게 된다. 이때, v_{ds2} 양단 전압과 L_p 전류를 다음과 같이 표현할 수 있다.

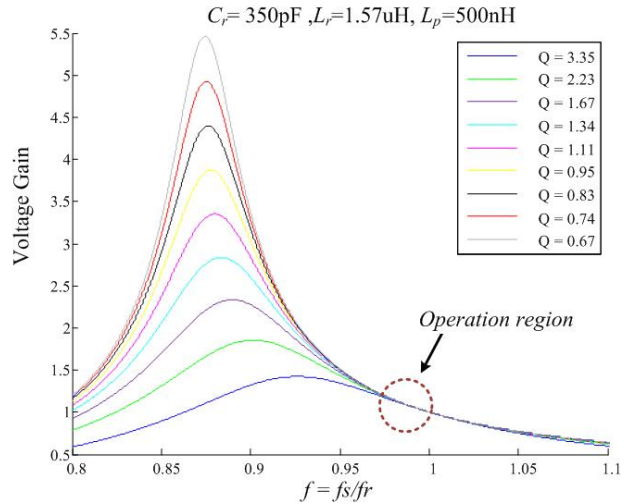


Fig. 5. DC voltage gain of the proposed converter.

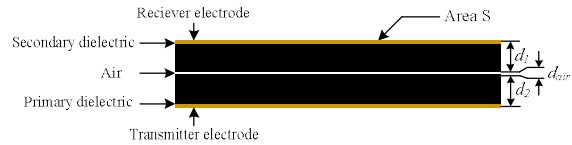


Fig. 6. Structure of capacitor between transmitter and receiver.

$$v_{ds2} = V_{ds2}(t_2) \cos \frac{1}{\sqrt{L_r C_{oss}}}(t-t_2) - I_{L_r}(t_2) \sin \frac{1}{\sqrt{L_r C_{oss}}}(t-t_2) \quad (4)$$

$$i_{L_p} = -\frac{V_o}{L_p}(t-t_2) + I_{L_p}(t_2) \quad (5)$$

Mode 4~Mode 6까지의 동작은 앞선 동작과 동일하게 동작하므로 생략하도록 한다. 제안한 컨버터의 동작은 전원용으로 사용되는 LLC 직렬 공진회로와 유사하다. 앞서 언급한 바와 같이 CCWPT에서는 얻어지는 커플링 커패시턴스가 작기 때문에 전력을 전달하기가 쉽지 않다. 따라서 동작 주파수를 높게 하여, 커플링 커패시턴스의 임피던스를 작게 보이게 할 수 있다. 하지만 단순 고주파 직렬 공진 동작으로는 높은 출력 전압을 얻을 수 없고, 효율도 낮아지게 된다. 따라서 본 논문에서는 L_p 를 통하여 좀 더 높은 출력을 얻을 수 있고, MOSFET의 턴 손실을 최소화 할 수 있는 장점을 가지게 된다.

3. 전압 이득 및 커패시턴스 추정

3.1 제안한 컨버터 전압 이득 설계 고려 사항

제안한 컨버터 전압 이득은 기존의 LLC 컨버터에서 변압기를 고려하지 않았을 때와 동일하다. 제안한 회로

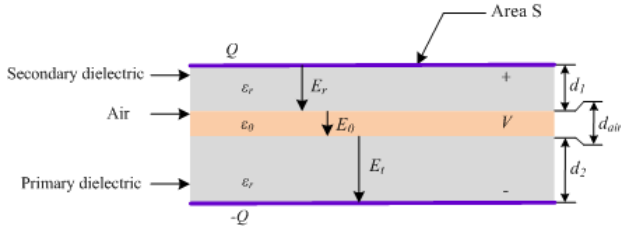


Fig. 7. Capacitance estimation by the Gauss' law.

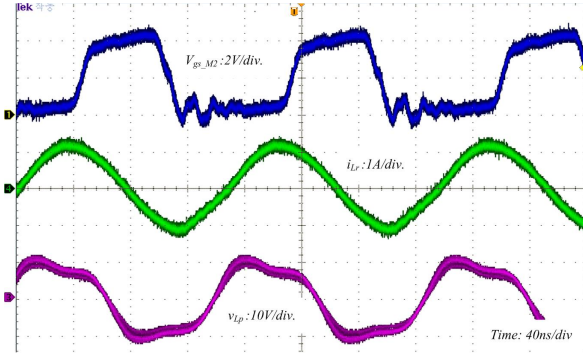


Fig. 8. Experimental waveform.

의 전압 이득은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \left| \frac{L_n f^2}{\{(L_n + 1)f^2\} - j\{Q(f^3 - f)L_n\}} \right| \quad (6)$$

여기서 $f = f_s/f_r$, $L_n = L_p/L_r$, $Q = \sqrt{L_r/(C_{C1}/C_{C2})}/R_{ac}$, $R_{ac} = 8R_o/\pi^2$ 이다. 제안한 시스템의 LLC 컨버터는 L_p 를 수신기에 장착해야 하므로, L_r 보다 큰 값을 설계하기에는 부피나 가격적인 측면에서 무리가 있다. 따라서 일반적인 전원용 LLC 컨버터와 다르게 설계가 되어야 한다. 즉 L_p 를 L_r 보다 작게 설계하고 또한 커플링 커패시턴스를 크게 얻을 수 없기 때문에 L_r 이 크게 되어 높은 양호도를 갖는 LLC 컨버터 설계가 필요하다. L_p 값은 MOSFET의 턴온 손실을 최소화하기 위하여 너무 작게 하게 되면, 동손실이 너무 커져서 출력 전압이 더 낮아지게 된다. 수신측에 부피가 최소인 공심 인덕터를 사용하기 위하여 L_p 를 500nH로 하여 전압 이득 곡선을 그림 5와 같이 얻을 수 있다. 공진주파수보다 낮은 동작주파수로 동작시키게 되면 이득이 1보다 크게 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

3.2 커패시터 추정

커플링 커패시턴스 값이 CCWPT에서 전력을 전달하기 위한 중요한 Factor이다. 송수신기 사이에 형성되는 커패시터는 그림 6과 같이 볼 수 있다. 이 때, 얻어지는 커패시턴스는 그림 7에서와 같이 Gauss 법칙을 이용하여 다음 식과 같이 얻을 수 있다^[11-12].

TABLE I
EXCREMENTAL SPECIFICATION

Parameter	Value
V_{in}	35 [V]
L_r	1.6[μ H]
C_{C1} and C_{C2}	695 [pF]
L_p	491[nH]
Electrode area	196 [cm^2]
d_1+d_2	2 [mm]
Operation frequency	6.78 [MHz]
Output power	4.2 [W]

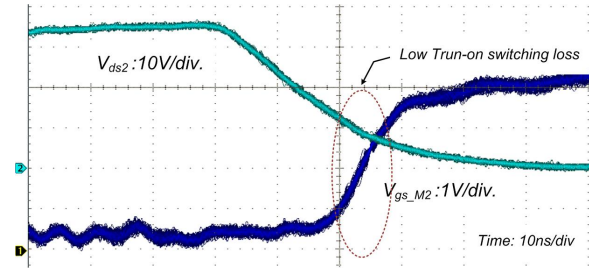


Fig. 9. Low turn-on switching loss waveform.

$$\begin{aligned} V &= E_r d_1 + E_0 d_{air} + E_r d_2 \\ &= \frac{Q/S}{\epsilon_r \epsilon_0} d_1 + \frac{Q/S}{\epsilon_0} d_{air} + \frac{Q/S}{\epsilon_r \epsilon_0} d_2 \end{aligned} \quad (7)$$

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{\epsilon_o S}{(d_1 + d_2)/\epsilon_r + d_{air}} \quad (8)$$

여기서, d_1+d_2 는 송수신사이에 존재하는 유전체이고, d_{air} 는 송수신 사이에 존재하는 공기의 두께이다. 하지만 송수신사이의 면이 정확하게 접하게 되므로 무시할 수 있다. 커패시턴스를 결정하는 주요한 Factor는 유전체의 유전상수와 두께 및 전극 면적으로 정해지게 된다. 일반적으로 전자제품을 구성하는 Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) 수지는 2~3의 상대 유전율을 갖기 때문에 이보다 더 높은 유리를 이용하면 더 큰 커패시턴스를 얻을 수 있다.

4. 실험 결과

제안된 컨버터의 동작과 특성을 검증하기 위하여, Table 1과 같은 실험 사양으로 Prototype을 제작하였다. 유전체는 유리를 사용하였고, L_p 는 공심 인덕터를 사용하였다. 동작 파형은 6.78MHz 구동 주파수로 그림 8과 같이 잘 동작함을 알 수 있다. 고주파 동작을 하더라도 MOSFET의 Gate-source 전압이 구형파로 잘 동작함을 확인할 수 있다. 그림 9에서 보는 바와 같이 L_p 인덕터의 역할로 MOSFET의 Trun-on 손실을 최소화 할 수

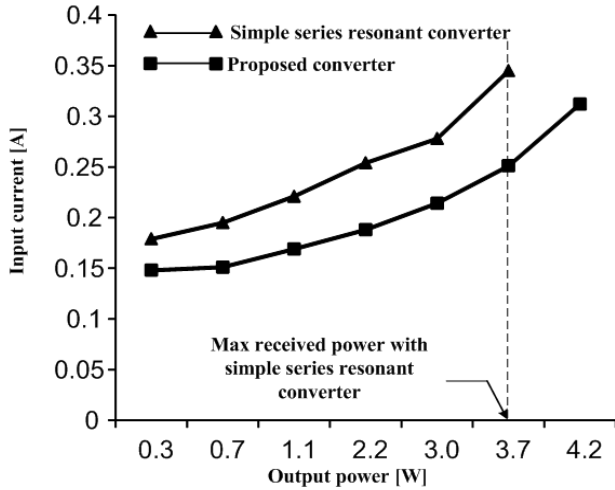


Fig. 10. Input current according to the received power.

있게 된다. L_p 선정은 송신회로의 턴온 손실과 L_p 전류로 인한 도통 손실이 커지지 않도록 식 9와 같은 기준으로 설정할 수 있다.

$$C_{oss} V_{ds}^2 f_s \geq R_{ser} I_{S,L}^2 \quad (9)$$

여기서, V_{ds} 는 턴온 되는 순간 MOSFET에 충전되어 있는 전압이고, f_s 는 동작 주파수, $I_{S,L}$ 은 송신회로에 흐르는 전류의 실효값, R_{ser} 은 송신회로의 기생 등가 저항을 나타낸다. 하지만, 6.78MHz에서는 정확한 반도체 소자의 손실 값을 구하기가 어렵기 때문에 실험적으로 L_r 과 L_p 의 비율은 0.3정도 설계하여, 최적의 실험 조건을 찾아내었다. 만약 완전한 영전압 스위칭을 위해서 L_p 값을 작게 설계하게 되면 도통 손실이 너무 커져서 오히려 출력 전압이 작아지게 되어 영전압 스위칭 했을 때보다 효율이 나빠지게 된다. 제안한 컨버터해서 해결하고자 하는 점을 실험결과에서 확인해보면, L_p 가 없는 단순 LC 공진회로를 이용한 CCWPT 시스템에서는 그림 10에서 보는 바와 같이 정류된 전압을 7V이상을 얻기 위한 최대 수신 전력도 3.7W로 작고, 그 때 사용하는 입력 전류도 크다. 하지만 제안한 컨버터를 이용한 시스템에서는 Open-Loop라 하더라도 최대 출력 4.2W를 전달할 수 있고 출력 전력에 따라 소비되는 전류도 작으므로 효율도 우수함을 확인할 수 있다. 또한 전압 이득을 확인해 보면, 동일한 전력 수신에 있어서도 제안된 컨버터는 예상과 같이 더 높은 출력 전압을 얻을 수 있음을 그림 11에서 확인할 수 있다. 실험 결과에 의하여 제안한 컨버터에서 해결하고자 한 높은 출력 전압과 효율을 증대가 검증되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 무선 전력 전송 방법 가운데, 인체유해

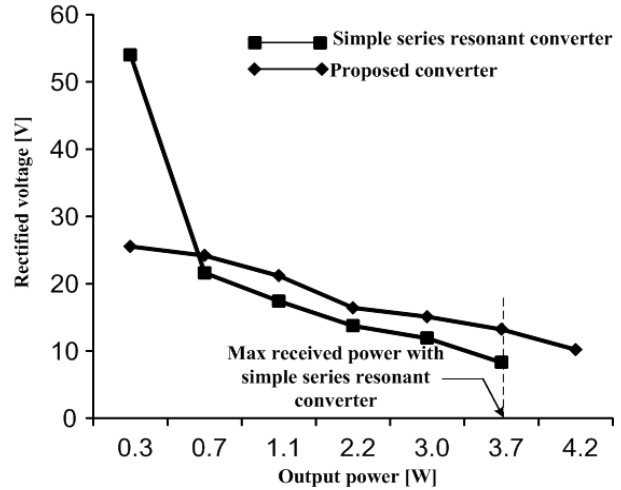


Fig. 11. Rectified output voltage according to the received power.

성과 전자파 방해가 없는 CCWPT에 적합한 고주파 LLC 컨버터를 제안하였다. CCWPT는 커플링 커패시턴스가 중요한 설계 요인이 되는데, 큰 커패시턴스를 얻기 위하여 유리 유전체를 사용하고 높은 출력 전압 이득과 송신 회로 반도체 소자의 턴온 스위칭 손실을 저감하기 위하여 높은 양호도를 갖는 고주파 LLC 컨버터를 제안하였다. 4.2W 전력 수신을 위한 시스템을 구성하여, 단순 직렬 공진형 시스템에 비하여 높은 전력 전달 효율과 큰 전압 이득을 확인하였다. 따라서 적은 부피를 요구하는 모바일 기기 무선 충전을 위한 시스템에 적용이 가능하다고 예상된다.

이 논문은 2015년 동일문화재단 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] R. Johari, J. V. Krogmeier, and D. J. Love, "Analysis and practical considerations in implementing multiple transmitters for wireless power transfer via coupled magnetic resonance," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 61, No. 4, pp. 1771-1783, Apr. 2014.
- [2] Z. N. Low, R. A. Chinga, R. Tseng, and J. Lin, "Compensate capacitor optimization for kilowatt-level magnetically resonant wireless charging system," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 61, No. 12, pp. 6758-6768, Dec. 2009.
- [3] S. A. Mirbozorgi, H. Bahrami, M. Sawan, and B. Gosselin, "A smart multi coil inductively coupled array for wireless power transmission," *IEEE Trans. Ind. Electronics*, Vol. 61, No. 11, pp. 6061-6070, Nov. 2014.

- [4] D. J. Ahn and S. C. Hong, "Optimal design of ICPT systems applied to electric vehicle battery charge," *Proceeding of Annual KIPE Conference*, pp. 623-624, July 2012.
- [5] A. P. Hu, C. Liu, and H. L. Li, "A novel contactless battery charging system for soccer playing robot," in *Proc. 15th IEEE Int. Conf. Mechatronics and Machine Vision in Practice, Auckland, New Zealand*, pp. 646-650, 2008.
- [6] A. Wahab, T. E. Chong, and L. K. Min, "Wireless pointing device using capacitive coupling," in *Proc. 1997 IEEE Int. Symp. Consumer Electronics, Singapore*, pp. 149-152, 1997.
- [7] H. Kobayashi, H. Funato, and Y. Chiku, "Enhancement of transfer power of capacitive power transfer system using cascaded one pulse switching active capacitor(C-OPSAC) with three-level operation," in *Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC), 2012 7th International*, pp. 884-888, 2012.
- [8] C. Liu, A. Hu, G. Covic, and N. C. Nair, "Comparative study of CCPT systems with two different inductor tuning positions," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 1, pp. 294 - 306, Jan. 2012.
- [9] C. Liu, A. Hu, B. Wang, and N. C. Nair, "A capacitively coupled contactless matrix charging platform with soft switched transformer control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 1, pp. 249 - 260, Jan. 2013.
- [10] J. Dai and D. C. Ludois, "Wireless electric vehicle charging via capacitive power transfer through a conformal bumper," in *Proc. IEEE 30th Annu. Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, 2015.
- [11] H. William and H. HAYT, "Engineering Electromagnetic 5th edition," McGrawHill, 1989.
- [12] K. H. Yi, "6.78MHz capacitive coupling wireless power transfer system," *Journal of Power Electronics*, Vol. 15, No. 4, pp. 987-993, July 2015.



유영수(劉永守)

1990년 6월 12일생. 2015년 대구대 전기전자공학부 졸업. 현재 동 대학원 석사과정.



문현원(文鉉元)

1974년 6월 15일생. 1997년 한양대 전파공학과 졸업. 1999년 한국과학기술원 전기 및 전자공학 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기 및 전자공학 졸업(공박). 2004년 삼성전자 시스템 LSI 사업부 책임연구원. 2012년 대구대 전자전기공학부 조교수.



이강현(李康鉉)

1978년 1월 20일생. 2003년 한양대 전자전기공학부 졸업. 2006년 한국과학기술원 전기 및 전자공학 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기 및 전자공학 졸업(공박). 2009년 삼성전자 영상디스플레이 사업부 책임연구원. 2012년 대구대 전자전기공학부 조교수. 현재 당 학회 편집위원 및 학술위원.