

RF 에너지 하베스팅 무선전력전송시스템 수신기 설계 방안 연구

장 호 덕*

Study on Design Method of RF Energy Harvesting WPTS Receiver

Ho-deok Jang*

요 약

본 논문에서는 RF 에너지 하베스팅 WPTS (Wireless Power Transfer System: 무선전력전송시스템)의 수신기 설계 방안을 연구하였다. WPTS 시스템은 신호 손실과 안테나 크기를 고려하여 915MHz 주파수대역을 사용하고 출력은 3W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power)로 설정하였다. WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리에 따른 수신 전력 감소를 보상하기 위해 수신안테나 후단에 전력 증폭기를 사용하였고, 전력 증폭기 이득을 조정하여 무선 전력 전송 거리를 확장하였다.

Key Words : Energy Harvesting, RF, RF-DC Converter, WPT, WPTS

ABSTRACT

This paper investigated the design method of RF energy harvesting WPTS (Wireless Power Transfer System) receiver. The frequency of WPTS was chosen to 915MHz in the light of antenna size and transmission loss. The output power is 3W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power). The power amplifier following WPTS receiver antenna was used to compensate the transmission loss according to the distance between WPTS transmitter and receiver. The gain of power amplifier was controlled to extend the

energy transfer coverage of WPTS.

I. 서 론

무선전력전송 (WPT: Wireless Power Transfer)은 RF 무선신호를 에너지원으로 하여 필요한 전기에너지를 얻는 에너지 하베스팅 기술이다. 무선신호가 도달할 수 있는 곳이면 전원을 공급할 수 있어서 유선전원 사용으로 인한 전원공급부 설계 및 디바이스 형태의 제약에서 벗어날 수 있고, 사용자의 편의성을 높일 수 있다. 무선전력전송시스템은 송신기와 수신기 사이의 거리에 따라서 근거리 전송과 원거리 전송이 있으며, 기술 방식에 따라서 전기장 방식, 자기장 방식, 전자기파 방식으로 구분된다. 자기장 방식은 비교적 짧은 거리에서 효율이 유지되기 때문에 스마트폰 무선 충전 분야에 적용되고 있다. 원거리 무선전력전송을 위해 RF 신호, 적외선, 초음파 등을 활용한 연구가 진행되고 있지만, 전송 거리 및 효율의 한계를 극복해야 하는 과제를 해결해야 한다^[1-5]. 4차 산업혁명의 핵심 기술로 미래 정보통신기술 융합산업을 이끌어 갈 사물인터넷의 발전과 더불어 각종 센서를 비롯한 다양한 스마트 디바이스가 2020년에는 250억 개까지 증가할 것으로 예상되고 있다^[6]. 배터리로 동작하는 스마트 디바이스는 배터리 수명이 다하면 교체해야 하는 유지보수 이슈와 비용 발생 문제를 수반하고 있어서 전자기파를 이용한 원거리 무선전력전송 기술을 적용하는 연구가 진행되고 있고, 시제품이 출시되고 있다^[1-5,7]. 본 논문에서는 무선 RF 신호를 정류하여 DC 전원으로 변환하는 WPTS 수신기 기반의 전원공급부를 설계하고, 송신기와 수신기 사이의 거리를 확장할 수 있는 방안을 연구하였다.

II. WPTS 수신기 구성

WPTS 수신기는 그림 1과 같이 구성할 수 있다. 안테나, 1~930MHz 주파수 대역 신호를 증폭시켜주는 전력 증폭기 (PA: Power Amplifier)와 자동 이득 조정기 (AGC: Auto Gain Controller), 정류회로로 구성되는 RF-DC 변환기, 전력 관리를 위한 PMIC (Power Management IC), 그리고 축전을 위한 캐패시터로 구성된다. PMIC의 입력 전압 범위는 2.6~23V 이고,

* 본 연구는 2019학년도 동양미래대학교 교내 연구지원사업 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : (OCID:0000-0001-5552-4256)Dongyang Mirae University Department of Information & Communication Engineering, teri20@dongyang.ac.kr, 정희원

논문번호 : 201912-347-C-LU, Received December 27, 2019; Revised January 15, 2020; Accepted January 29, 2020

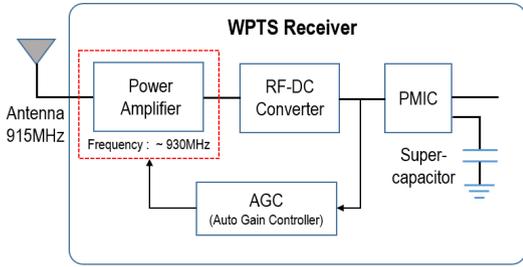


그림 1. WPTS 전력 수신기 구성도
Fig. 1. Schematic diagram of WPTS power receiver

출력 전압은 1.5~5V 범위에서 설정 가능하다. 출력 전압이 3.3V인 경우, PMIC는 입력 전압이 1.55V 이상이면 구동되며, 축전 캐패시터가 충전되기 시작한다. 축전 캐패시터의 전압이 3.27V가 되면 PMIC의 출력 핀과 축전 캐패시터 사이의 스위치가 닫혀서 연결되며, 축전 캐패시터가 방전되면서 출력 핀으로 전압이 공급된다. 축전 캐패시터는 220 μ F의 용량을 가지는 전해 캐패시터를 사용하였다. 축전 캐패시터를 사용할 경우, 캐패시터에 충전된 전하가 방전되면서 출력 전압이 공급되며, 임계치보다 낮아지면 다시 충전되기 때문에 일정한 전압을 유지할 수 있다¹⁸⁾.

무선전력전송을 위한 RF 주파수대역은 신호 손실과 안테나 크기를 고려하여 선택해야 한다. 무선 RF 신호의 주파수가 높아질수록 허용되는 최대 출력 전력이 낮아지고 전송 손실이 증가하기 때문에 1m 이상의 거리에서는 사용할 수 없다. 주파수대역이 낮을수록 전송 손실이 작지만, 안테나 크기가 작은 스마트 디바이스에 사용할 수 없을 정도로 커지게 된다. 따라서 사용할 수 있는 최대 송신기 전력, 무선 RF신호의 전송 손실, 안테나 크기를 고려하여 915MHz 주파수대역을 선택하였다.

WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리에 따른 전송 손실을 보상하기 위해 전력 증폭기를 수신 안테나 후단에 사용하였다. RF-DC 변환기 출력을 모니터링하여 AGC로 전력 증폭기의 구동 전압을 변화시켜 이득을 조정하였다.

III. 무선 전력 전송 커버리지 확장 방안

WPTS의 무선 전력 전송 커버리지는 송신기와 수신기 사이의 거리가 증가하면 급격하게 증가하는 신호 감쇄로 인해서 단거리로 제한되는 문제점이 있다. 이러한 제약을 해결하기 위해 WPTS 수신기의 수신 전력을 증폭하기 위해 전력 증폭기를 사용하였고, 구

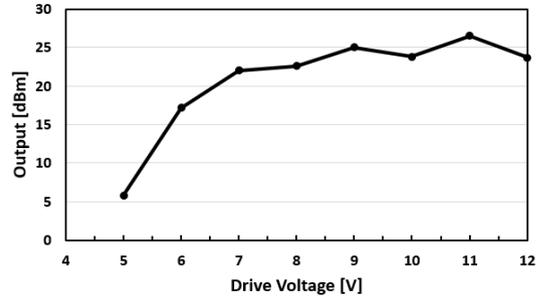
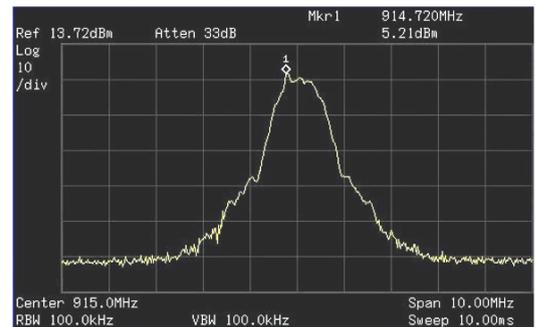


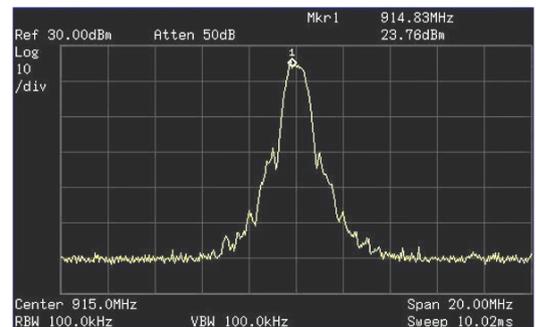
그림 2. 전력 증폭기 출력
Fig. 2. Output of power amplifier

동 전압에 따른 전력 증폭기의 이득 특성은 그림 2와 같다. WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리는 1m인 조건에서 구동 전압을 5V에서 12V로 증가시키면 이득이 0.6dB에서 19dB로 증가하면서 포화되는 것을 확인할 수 있다. 구동 전압이 10V일 때 전력 증폭기의 입력과 출력 RF 신호의 스펙트럼은 그림 3과 같다. 입력 및 출력 전력이 각각 5.21dBm, 23.76dBm 이므로, 증폭기 이득은 18.55dB 이다.

WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리에 따른 전력



(a) Antenna output



(b) Power amplifier output (drive voltage: 10V)

그림 3. RF 스펙트럼
Fig. 3. RF spectrum (transmission distance: 1m)

증폭기 구동 전압을 분석하기 위해 WPTS 수신기의 거리별 수신 전력은 Friis 방정식을 이용하여 수치 해석하였다. WPTS 송신기의 출력 P_t 와 송신 안테나 이득 G_t 의 곱은 3W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) 이며, 수신 안테나 이득 G_r 은 4.07dB, 915MHz RF 신호의 파장은 0.328m 이다.

$$P_r = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2 \quad (1)$$

WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리 R에 따른 수치 해석한 수신 RF 전력과 변환된 DC 전력은 그림 4와 같다. WPTS 수신기가 송신기에서 1m 떨어진 경우, 수신 RF 전력은 8.31mW 이고, 변환된 DC 전력은 5.46mW 이다. 하지만 거리가 3m로 증가하면 수신 RF 전력과 변환된 DC 전력이 각각 0.92mW, 0.54mW로 급격하게 감소하게 된다. 따라서 감소한 수신 RF 전력을 증폭시켜야 WPTS 커버리지를 증가시킬 수 있다.

표 1은 WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리별 WPTS 수신기의 수신 전력과 RF-DC 변환기의 출력단 충전 전류를 보여준다. 1m 거리에서의 수신 전력 기준으로 3m, 5m 거리에서 요구되는 전력 증폭기의 이득은 각각 9.55dB, 13.98dB 이다. 따라서 그림 2의 구동 전압별 전력 증폭기 이득을 측정한 결과에서 해당 이득을 얻기 위한 구동 전압은 각각 5.8V, 6.4V인 것을 확인할 수 있다. 표 2는 기존 WPTS 수신기의 RF-DC 컨버터 입력 전력과 전력 증폭기를 사용한 수신기의 전력 증폭기 구동 전압 및 RF-DC 컨버터 입력 전력을 측정한 결과이다. 전력 증폭기를 사용하면 WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리가 1.5m에서 5m로 증가하여도 수신 전력이 감소되지 않고 5.14~5.81dBm 범위에서 일정한 레벨을 유지할 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

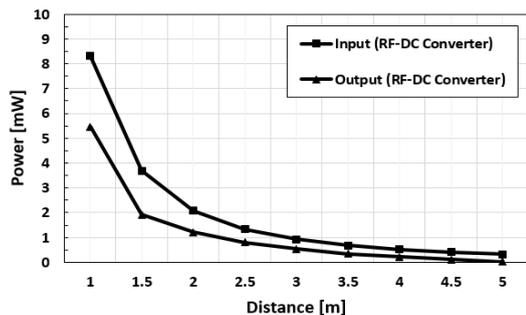


그림 4. RF-DC 컨버터의 입·출력 전력 (효율: 65.7%)
Fig. 4. Input and output power of RF-DC converter (efficiency: 65.7%)

표 1. WPTS 수신기의 수신 전력, 충전 전류
Table 1. Received power and charge current of WPTS receiver

| Distance [m] | Received power Pr [dBm] | Charge current Ic [mA] |
|--------------|-------------------------|------------------------|
| 1.0 | 9.20 | 1.818 |
| 1.5 | 5.67 | 0.637 |
| 2.0 | 3.17 | 0.493 |
| 2.5 | 1.24 | 0.270 |
| 3.0 | -0.35 | 0.180 |
| 3.5 | -1.69 | 0.116 |
| 4.0 | -2.85 | 0.072 |
| 4.5 | -3.87 | 0.037 |
| 5.0 | -4.78 | 0.010 |

표 2. RF-DC 컨버터 입력 전력
Table 2. Input power of RF-DC converter

| Distance [m] | Input Power [dBm] | |
|--------------|---------------------|---------------------------|
| | w/o power amplifier | with power amplifier (Vd) |
| 1.5 | 5.67 | 5.68 (5.3V) |
| 2.0 | 3.17 | 5.46 (5.5V) |
| 2.5 | 1.24 | 5.81 (5.7V) |
| 3.0 | -0.35 | 5.36 (5.8V) |
| 3.5 | -1.69 | 5.16 (5.9V) |
| 4.0 | -2.85 | 5.14 (6.0V) |
| 4.5 | -3.87 | 5.26 (6.2V) |
| 5.0 | -4.78 | 5.49 (6.4V) |

IV. 결 론

무선전력전송은 주변의 RF 무선신호를 에너지원으로 사용하여 정류해서 DC 전력을 얻는 기술로, 디바이스 디자인과 전원 연결에 대한 제약에서 벗어날 수 있다는 장점을 제공하는 에너지 하베스팅 기술이다. 하지만, WPTS 송신기에서 수신기가 멀어지면 급격하게 수신 전력이 감소하는 한계로 인해서 커버리지가 작다는 문제점을 가지고 있다. 본 논문에서는 WPTS 수신기의 안테나와 RF-DC 변환기 사이에 이득 조절이 가능한 전력 증폭기를 사용하여 설계하였고, 구동 전압별 이득을 측정하였다. WPTS 송신기와 수신기 사이의 거리별 수신 전력을 수치 해석한 결과, 1m 거리 기준의 성능을 제공하기 위해 5m 거리에서는 13.98dB의 전력 증폭기 이득이 요구되며, 구동 전압은 6.4V인 것을 확인하였다.

References

- [1] *WattUp Wireless Charging Ecosystem*, Retrieved Oct. 1, 2019, from <https://www.energous.com>.
- [2] *Wi-Charge*, Retrieved Nov. 1, 2019, from <https://wi-charge.com>.
- [3] *SonicEnergy*, Retrieved Nov. 3, 2019, from <https://sonicenergy.com>.
- [4] A. A. Aziz, D. Tribudi, L. Ginting, P. A. Rosyady, D. Setiawan, and K. W. Choi, "RF energy transfer testbed based on off-the-shelf components for IoT application," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1912-1921, Oct. 2015.
- [5] O. Galinina, K. Mikhaylov, S. Andreev, A. Turlikov, and Y. Koucheryavy "Smart home gateway system over bluetooth low energy with wireless energy transfer capability," *EURASIP J. Wireless Commun. and Netw.*, vol. 2015, no. 178, Jun. 2015.
- [6] *IoT*, Retrieved Dec. 3, 2019, from <https://www.gartner.com>.
- [7] S.-J. Lee, D.-D. Choe, and N.-Y. Kim, "A feasibility study on the energy harvesting technology for batteryless beacon system," in *KICS Winter Conf.*, pp. 1150-1151, High1 Resort, Korea, Jan. 2016.
- [8] H. Jang, "Study on design method of energy harvesting system for BLE beacon," *J. KICS*, vol. 42, no. 1, pp. 149-152, Jan. 2017.