

PLL을 이용한 무선 전력전송 장치의 공진 주파수의 계측 및 주파수 제어

최성욱[†] · 심은보^{*}

Measurement and Control of the Resonance Frequency for the Transcutaneous Energy Transmission System (TET) Using the Phase Locked Loop Circuit (PLL)

S. W. Choi, E. B. Shim

Key Words: PLL(phase locked loop), TET (Transcutaneous Energy Transmission)

Abstract

A Transcutaneous Energy Transmission System (TET) has been developed for the wireless energy transmission with two magnetically coupled coils. A resonance circuit is used to raise the induced voltage and current of the secondary coil. Its resonance frequency depends on the internal resistance of circuit and the transferred energy. Because the transferred energy usually changes in wide range, the output voltage is unstable and the energy transferring efficiency decrease. A push-pull class E amplifier is used to generate high frequency AC voltage. To maintain proper resonance frequency, the voltage output of the amplifier was continuously monitored and adjusted to the optimized resonance frequency. Because of its high frequency (370 kHz), a phase locked loop circuit and a comparator are used to monitor the output waveform. The results of experimental data show that the PLL circuit can increase the transmission efficiency and stabilize the output voltage of TET.

1. 서론

인공심장 이식형 심실제세동기와 같이 인체에 이식되는 전기기계식 인공장치의 개발에 있어서 무선으로 인체 내의 기기에 필요한 에너지를 전달해 주는 것은 매우 중요하고 선결해야 할 과제이다. 일부 제품은 피부를 뚫고 연결되는 전선을 사용하지만, 감염 등의 위험을 피하기 위해 코일 간의 유도결합이 발생하는 원리를 이용한 피부투과형 무선전력전송장치(Transcutaneous Energy Transmission System, TET)등이 개발된 바 있다. 무선전력전송장치의 코일은 피부의 안쪽과 바깥 쪽에 위치하여 5mm 이상 떨어져 있기 때

문에 송신 코일의 자기장이 수신코일에 완전히 전송되지 못하므로 출력전압이 감소하는 문제점을 지니고 있다. 출력전압을 증폭하기 위해 코일에 직렬, 병렬로 커패시터를 연결한 공진회로를 구성한다. 또한 이러한 공진 회로에 고주파, 고용량의 교류 전압을 공급해주어야 하는데, Push-Pull Class E Amp.를 이용하여 효율적이면서도 크기가 작은 교류 전압 발생장치를 제작하였다. 그러나 Push-pull class E amp.는 출력회로의 공진 특성에 의한 제약이 있는데, Push-pull class E amp.를 구동하는 주파수에서 최대의 임피던스를 가져야 안정된 출력과 고효율 전원을 공급할 수 있다. 보통 L-C 병렬 회로는 공진 주파수에서 임피던스 값이 매우 커지는 특징을 갖고 있으므로, 무선전력전송장치의 코일 공진회로가 구동주파수에서 L-C 병렬 공진을 하도록 만든다. 코일에 전원을 높여주기 위해 코일은 다시 부분적으로 L-C 직렬 회로를 포함한다.[1]

한편, 무선 전력전송장치를 전원으로 사용하는 이식형 의료기기는 동작 조건에 따라 소모하는

† 최성욱, 강원대학교

E-mail : swchoe@kangwon.ac.kr

TEL : (070)7019-0809 FAX : (033)242-6013

* 심은보, 강원대학교

전력량이 변하는데, 소모 전력이 변할 때는 L-C 병렬 회로의 공진 주파수가 달라지는 것이 관찰되었다. 예를 들어 한국형 인공심장의 경우는 박동형 혈액 펌프로써, 혈액 박출 시에 100 W 전력을 사용하며, 혈액을 박출하지 않는 경우는 0.4 W 이하로 전력이 떨어진다. 이것은 무선전력전송장치의 push-pull class E amp.가 공진점에서 동작하지 못하는 원인이 되며, 고주파 전력을 생산하는 Amp.의 가동 효율이 저하됨으로써 전체 무선전력시스템의 전송 효율이 낮아지는 결과를 초래한다. 이를 해결하기 위해서는 L-C 회로의 공진 상태를 감시하고, Push-pull class E amp.가 항상 적절한 공진주파수에서 구동하도록 제어해 주어야 한다.[2,3] 코일 회로가 적절한 공진 주파수에서 가동하고 있지를 확인하기 위한 방법은 push-pull class E amp.가 정상적인 출력 전압을 생산할 수 있는가를 확인하는 것이 가장 효과적이는데, push-pull class E amp.는 출력측의 공진조건이 변할 때, 출력전압과 효율이 크게 변동하기 때문이다. 이러한 출력전압의 변화 중에서도 특히 출력회로의 공진 주파수가 적어지면, Push pull class E amp.의 전력스위치가 off에서 on으로 전환 되는 시점에서의 출력전압이 +의 값을 가지며, 공진 주파수가 높아지면, 전력스위치가 off-on 시점의 전압이 -의 값을 갖는다. 공진회로에 고주파 전류를 공급하면 코일의 크기를 줄일 수 있으나 지나치게 높은 고주파 전류를 사용하는 경우 코일에서 심한 전력 손실이 발생할 수 있기 때문에 코일의 공진주파수를 370 kHz로 결정하였다. 따라서 Push pull class E amp.를 구동하는 교류 전류의 주파수도 370 kHz 이어야 하는데, 이렇게 높은 주파수에서는 마이크로 제어기와 ADC를 이용하여 출력파형을 분석, 제어하는 것이 매우 어렵다. 높은 주파수의 파형을 감시하기 위한 고성능 마이크로 제어기와 고주파의 ADC는 전력소모가 크고 부피도 크므로 무선전력 전송시스템의 효율을 향상하는데 부적절하지만, 공진 동작 여부를 관찰하기 위하여 간단한 comparator회로와 PLL 분석회로를 사용하여 공진 주파수의 변동을 측정하고 시스템의 효율을 향상한다.

본 논문에서는 공진회로에서 부하의 크기에 따라 공진회로 내부의 저항성에 의해 공진점이 어떻게 달라지는지를 계산한다. 그리고 공진점 변동으

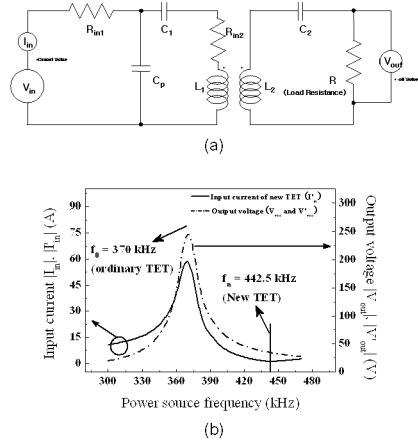


Figure 1. (a) Resonance circuit of TET (b) resonance characteristics

로 인해 발생하는 효율의 감소 정도를 예측한다. 이러한 회로에서 Push-pull Class E amp.를 구동할 때, PLL 측정법을 이용하여 공진 상태를 관찰함으로써 자동으로 공진 주파수를 찾아 구동하는 무선전력전송장치를 개발한다. 마지막으로 주파수 자동 조절에 의해 무선전력전송장치의 에너지 전송효율이 상승했음을 관찰한다.

2. 재료 및 방법

2.1 시스템의 구성

공진회로의 구성



Figure 2. External and Internal Coils which are made of Litz wire.

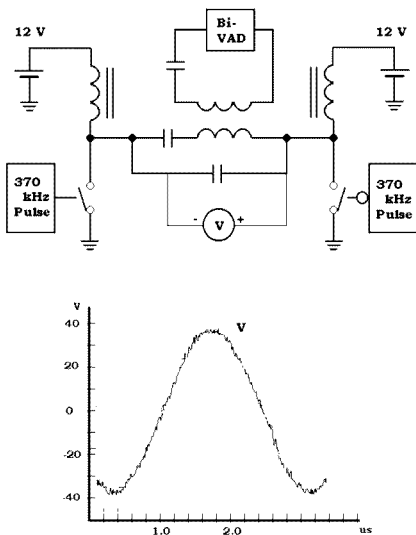


Figure 3. Design of Push-Pull Class E Amplifier

지름이 각각 5.5 cm, 5 cm인 송,수신코일의 공진회로를 해석한다. 지름 1.5mm 1.7m 가량의 Litz wire를 사용하였으며, 하나의 Litz wire는 PU코팅이 된 0.04mm 두께의 1725가닥의 구리선으로 구성되어 있다. 커패시터는 polypropylene capacitor를 사용했으며, 같은 크기의 커패시터를 병렬로 배열함으로써 저항 손실을 줄이도록 설계하였다. 코일 공진 회로의 내부 저항은 0.1 ohm 가량이며 송수신코일의 인덕턴스는 각각 6.6uH 5.6uH이다. 여기에 연결되는 부하는 인공심장으로써 소모하는 전력의 범위가 0.5~100W 이다. 코일의 공진회로는 내부 저항으로 인해 최적의 공진조건에서만 최대의 효율로 전력을 전송할 수 있는데, 출력의 크기가 커지면 이로 인해 공진점도 변화하게 된다. 내부 저항이 존재할 때, 코일의 공진점이 변화하는 원인을 회로를 해석함으로써 규명하였다.

Push pull Class E amp.를 이용하여 출력되는 전압을 증폭하고 zero voltage switching(ZVS) 동작을 유도함으로써 스위칭 손실을 억제하고 전송 효율을 증대하도록 한다. 공진점이 변함으로써 스위칭시의 전압이 어떻게 변화하고 이로 인한 전력 손실이 어떻게 나타나는지를 확인하였

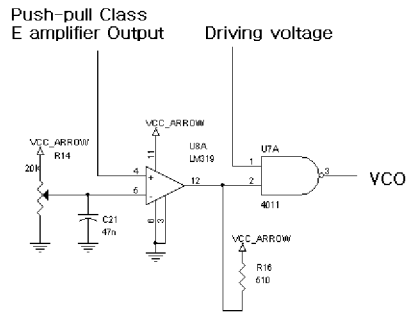


Figure 4. Design of PLL circuit

다.

PLL(Phase Locked Loop) 회로의 구성

그림3과 같이 PLL 회로를 구성한다. PLL 회로는 공진주파수의 변화에도 불구하고 동일한 공진 조건에서 구동하도록 만들기 위해 채택하였다. 우선 Push-pull class E Amplifier에서 발생하는 출력전압과 이 amplifier의 스위치를 제어하는 신호를 비교한다. 스위치를 제어하는 전압이 입력되었을 때, 출력신호는 0 V로 떨어지야 한다. 반대로 스위치를 제어하는 전압이 0V이면 amplifier의 전압은 0V에서 갑자기 증가하였다가 다시 0V로 돌아오는 데 0V-0V로 돌아오는 기간은 공진 주파수에 반비례하여 증가되거나 감소한다. 만일 다음 스위치가 on 되기 전에 전압이 0V로 돌아오면 그림 3에서 출력신호는 항상 high일 것이다. 이 신호는 VCO (Voltage Controlled Oscillator)로 이어지는데 출력전압이 높을수록 VCO의 출력주파수는 높아지는 특징이 있다. VCO의 출력은 다시 Push-pull Class E amp.의 스위치 입력으로 연결되는데, 스위치의 입력주파수가 높아질수록 스위칭 시간이 짧아져서 스위치가 on 되었을 때 미처 출력전압이 0V로 돌아오지 못할 수도 있다. 그러나 반대로 스위치가 on된 후에도 출력전압이 0V로 돌아오지 않으면, 이것은 스위치의 구동 주파수가 공진 주파수보다 짧은 것을 의미하며, VCO의 입력으로 low 신호가 전달된다. 이것은 DC 전압으로 바뀌어 Push-pull class E amplifier를 제어하는 VCO의 주파수를 낮추는 역할을 한다.

PLL 회로를 이용하였을 때, 출력 변화에 따라 주파수 변화량이 어떻게 변화하였는지를 측정하였다. 주파수 변화가 있었던 회로와 PLL을 사용하지 않고 주파수를 가변하지 않았던 회로에서의 전력전송효율을 측정하였다.

2.2 공진주파수의 변화

그림 2a.의 R_{in2} 와 같이 코일과 커패시터 회로에는 약간의 저항성이 존재하는데, 이 저항성이 0인 경우는 부하의 크기에 따라 공진주파수가 변한다.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \left(\frac{1}{C_1 + C_2} + \frac{R_{in2}^2}{4L^2} \right)}}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \left(\frac{1}{C_1 + C_2} + \frac{R_{in2}^2}{4L^2} \right)}}$$

3. 결 과

부하의 크기가 증가함에 따라 전송효율이 변화함을 확인할 수 있었다. 부하의 크기에 따라 일정하게 유지해야 할 공진주파수의 크기를 결정할 수 있었다. PLL 주파수 변환기를 이용한 실험 결과는 부하의 크기에 따라 공진 주파수를 일정하게 조절할 수 있었으므로 비교적 높은 에너지의 전송 효율을 유지할 수 있었음을 보여준다.

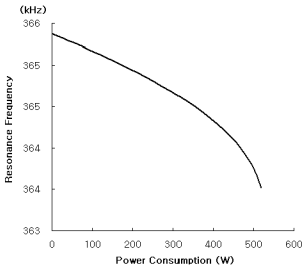


Figure 5. Resonance Frequency Change according to the Transmission Power

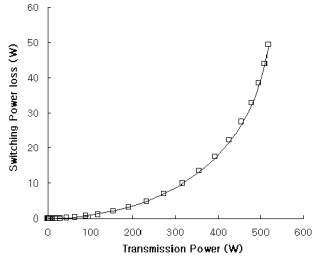


Figure 6. Switching Power Loss according to Transmission Power when $R_{0.5Q}$

참고문헌

- [1] C.G. Kim and B.H. Cho, "Transcutaneous Energy Transmission with Double Tuned Duty Cycle Control," *Proc. Energy Conversion Engineering Conference*, 1996, p. 587.
- [2] Koen D. Reesink, Loes D.C. sauren, et al, 2005, "Synchronously Counterpulsating Extracorporeal Life Support Enhances Myocardial Working Conditions Regardless of Systemic Perfusion Pressure," *ELSEVIER*, No. 28, pp. 790-796