

# 자기공명형 무선전력송신을 위한 공진 주파수 설계에 관한 연구

안 준 선\*

## A Study On Design of Resonance Frequency for Wireless Power Transfer with Magnetic Resonance Type

\*

### 요 약

본 논문은 최근 주목받고 있는 무선 전력송신 방식 중 자기공명을 이용한 무선전력 송신에 관한 것으로 특히 자기 공명식 무선 전력 송신시 주파수 설계에 관한 것이다. 본 논문에서는 무선 전력 송신 주파수를 설계하기 위한 전력 송수신 시스템의 수학적 모델링을 개발 하였으며, 이를 검증하기 위한 시뮬레이션 모델을 개발하였다. 시뮬레이션은 수학적 모델에 기반한 방법과, 소자기반의 방법을 병용 함으로써 그 신뢰성을 확보하였으며, 시뮬레이션 결과에 대한 고찰을 기술 하였다.

### ABSTRACT

In this paper wireless power transmission is discussed. The concept of non-radiative magnetic coupled resonance type wireless power transmission was introduced by MIT team at 2007, non-radiative type has been focused by many researchers. Authors present design of circuit parameters including driving frequency and verify the design by computer simulation.

**Keywords:** Wireless, Power transmission, Magnetic resonance, Inductive coupling, Frequency

### 1. 서 론

2007년 MIT의 솔자치치 교수의 연구 발표 이래, 자기 공명식 무선전력송신에 관한 학계 및 산업계의 관심은 매우 고조되고 있으며, 기존의 무선 전력 송신 방식과의 비교 연구 또한 활발하게 이루어지고 있다. 무선전력 송신 방식은 크게 2가지로 구분되는데, 우선 전자파 방사에 의해 전력을 송출하고 이를 수신부 코일에서 수집하여 에너지

원으로 사용하는 방법과 비 방사형 자기공명현상에 의한 전력 송출 및 수신방식이다. 전자파 방사에 의한 무선전력송출방식은 그 전송 거리에 따라 세가지로 구분할 수 있는데, 첫째는 궤도 위성에서 지구와 같은 원거리 송신거리를 가지는 초고주파 방사형 방식, 둘째는 수 m급의 전송거리를 가지는 근거리 라디오파 방사형 방식, 마지막으로 수 mm의 전송 거리를 가지는 자기유도결합 방식이 있다. 그 중 초고주파를 이용한 전력 송수신 방식은, 태양에

\* 교신저자 : 오산대학교 전기시스템제어과 (jsahn@osan.ac.kr)

접수일자 : 2012년 10월 31일, 수정일자 : 2012년 11월 23일, 심사완료일자 : 2012년 12월 2일

너지를 우주 공간에서 지구로 송신하는 방식으로 검토된 바 있다. 마이크로의 파장을 갖는 극초단파를 이용하여 전력을 송신하는 방식인데, 극초단파가 갖는 인체에 대한 위험성 때문에 실제로 상용화된 예는 없으며, 그 응용 분야는 전자 레인지와 같은 매우 한정된 공간에서 사용되는 것이 대부분이다.[3]

두 번째 근거리 라디오파 방사형 방식은 수백 MHz대역의 라디오파를 전력 공급원으로 하고 이를 수신부에서 rectenna를 이용하여 수신하여 전원으로 이용하는 방식으로 필립스의 자회사인 파워캐스트가 2003년 이를 상용화하였다. 이 방식 역시 첫 번째 방식과 마찬가지로 안테나의 지향성에 의해 영향을 받고, 송신 출력을 높이면 인체에 미치는 영향이 커지게 되는 단점이 있다.

세 번째 자기유도 결합 방식의 경우 이제까지 널리 사용되어온 방식으로 송신 안테나의 유도 자기장에 의해 수신 안테나에 발생하는 기전력을 수신단의 전원으로 이용하는 방식으로, 비교적 짧은 거리에 적합한 방식이다. 그 이유는 두 코일간의 결합 계수가 거리에 비례하여 감소하기 때문에 코일간의 거리가 증가할수록 결합도가 감소하여 전송 효율이 감소하기 때문이다. 일반적으로 이러한 자기유도방식의 경우 수십 mm 이내의 간격을 갖는 응용 분야에 적합한 것으로 알려져 있다.[1] 이러한 자기유도방식 다양한 분야에서 사용되고 있으며, 그 분야를 넓혀가고 있다. 최근 몇 년전 부터는 이 방식을 이용하여 대전력을 전송하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있어 그 응용 분야의 범위가 더욱 확대될 전망이다.[2][3]

이와는 구별되는 비 방사형 자기공명형 전력전송방식의 경우, 비교적 최근에 고안된 방식으로, 2007년 MIT의 솔차치치 교수팀이 제안한 것이 그 시초이다. 본 방식은 자기유도 방식과 그 기본 원리는 유사하나, 자기유도방식의 단점인 송수신 안테나간의 이격에 따른 효율 저하를 어느 정도까지는 보완할 수 있는 방식이다. LC 공진회로에서 공진주파수 부근에서 임피던스가 급격히 낮아지는 점을 이용하여 송신 회로를 구성하고, 수신 회로의 공진 주파수를 송신회로에 맞게 조정함으로써 결합시의 릴랙턴스를 최소화하여 이격 거리에 따른 효율의 저하를 감소시켜 전체 전력 효율을 향상시

킨 방식이다. 또한 에너지의 결합이 방사되는 전자파가 아닌 자기장에 의한 것이기 때문에 방사된 전자파처럼 수신되지 않는 경우 에너지의 손실로 나타나는 것이 아니고 형성된 자기장 내부로 재흡수되기 때문에 효율면에서 매우 유리하다.

본 연구에서는 이러한 자기 공명방식의 전송 특성을 고찰하기 위해 시스템의 수학적 모델링을 수행하고 이를 고찰하며, 시뮬레이션을 통하여 그 특성을 확인한다. 또한 수학적 모델 외에, 전력변환회로가 포함된 시뮬레이션 모델을 별도로 개발하여 수학적 모델과 그 특성을 비교함으로써 모델의 타당성을 확보한다.

## II. 무선 전력 송신 모델링

그림 1에 본 연구의 대상인 자기공명형 무선전력송수신 장치의 블록도를 나타내었다. 도시한 대로 무선 전력 송수신 장치는 크게 급전단 공진회로부, 자기공명 전력전달부, 수신단 공진회로부의 3 부분으로 나눌 수 있다.

### 1. 공진회로부의 고찰

급전단 공진회로부는 공진주파수의 교류 구형파 내지는 정현파를 생성하는 전력변환부와 발생된 파형에 의해 공진하는 공진LC 회로부로 구성된다. 전력변환부는 통상의 브리지 혹은 푸시풀 방식의 전력증폭앰프로 구성되며 여기에 발진기에서 생성된 게이팅 파형을 인가하여 고주파 교류로의 전력 변환을 수행한다.

이렇게 변환된 교류 신호가 LC 직렬 혹은 병렬 회로에 인가되면 LC 회로정수에 따른 공진주파수의 공진을 일으키게 되며, 여기에 사용되는 인덕터는 자기장을 형성시켜 수신단의 인덕터로 전력을 급전하는 일종의 변압기의 역할을 수행한다. 통상적으로 LC 공진회로는 직렬회로로 구성하며, 회로의 정수는 공진주파수 및 변압기의 결합계수에 따라서 정하게 된다.

$$\omega_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} \quad (1)$$

이며,  $\omega_o$ 는 공진주파수,  $L_1$ 과  $C_1$ 은 1차측의

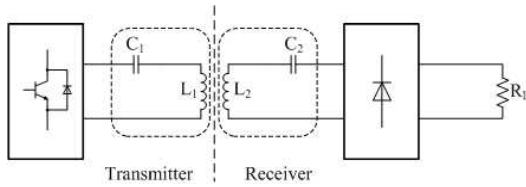


그림 1. 무선전력송신 시스템 블록도  
Fig. 1 Block Diagram of Wireless Power Transfer

공진소자이다. 이 공진 주파수는 등가적으로 공심형 변압기의 그것과 동일한 구조를 가지며, 변압기의 디멘전에 크게 의존하게 된다. Waffenschmidt의 연구에 따르면 급전단 코일과 수전단 코일간에는 그림 2와 같은 관계를 가지며, 수전 및 급전단의 코일의 직경과 코일간의 거리가 시스템 전체 효율에 미치는 영향이 크므로 이를 고려하여야 하며, 공진 주파수는 코일의 인덕턴스 및 커패시턴스 계산에 영향을 미치기 때문에 이 또한 시스템의 설계 시에 고려하여야 한다.

2. 회로 정수 설계

급전단 공진회로부는 공진주파수의 교류 구형파 내지는 정현파를 생성하는 전력변환부와 발생된 파형에 의해 공진하는 LC 공진 회로부로 구성된다. 전력변환부는 브리지 방식의 전력증폭앰프로 구성되며 여기에 발전기에서 생성된 게이팅 파형을 인가하여 고주파 교류로의 전력변환을 수행한다.

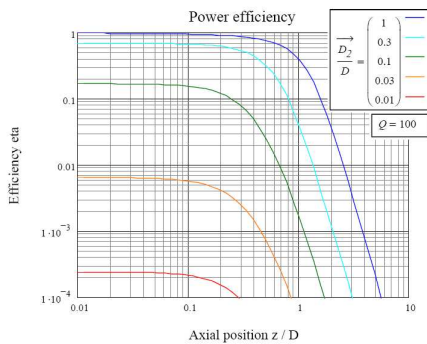


그림 2. Q가 100인 경우의 전력 효율과 코일의 치수와의 관계[3]  
Fig. 2 Power efficiency for an inductive power transfer system consisting of loop inductors in dependence on their axial distance z with size ratio as parameter. Calculated for a quality factor of Q = 100[3]

이렇게 변환된 교류 신호가 LC 직렬 회로에 인가되면 LC 회로정수에 따른 공진주파수의 공진을 일으키게 되며, 여기에 사용되는 인덕터는 자기장을 형성시켜 수전단의 인덕터로 전력을 급전하는 일종의 변압기의 역할을 수행한다. LC 공진회로는 직렬회로로 구성하며, 회로의 정수는 공진주파수 및 송전 전류량으로 정하게 된다. [4]

공진시의 임계조건은,

$$Q_1 Q_2 k^2 = Q_1 k = Q_2 k = 1 \quad (2)$$

이곳 여기서  $Q_1$ 은 급전단 코일의 Quality factor,  $Q_2$ 는 수전단 코일의 Quality factor이며  $k$ 는 결합계수이다. 이로부터  $Q_2$ 는,

$$Q_2 = \frac{1}{k} \quad (3)$$

으로 정해지며, 수전단 코일의 인덕턴스는,

$$L_2 = \frac{Q_2 R_L}{\omega} \quad (4)$$

로 정할 수 있다. 여기서  $R_L$ 은 수전단의 부하 저항,  $\omega$ 는 구동 각주파수이다.

또한 수전단의 공진 커패시턴스  $C_2$ 는,

$$C_2 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_2} \quad (5)$$

로부터 구할 수 있다.

급전회로의 인덕턴스는 임계결합조건임을 고려하면 결합 임피던스의 관계에서 구할 수 있다. 급전회로의 등가 저항을  $R_{11}$ 이라 하면,

$$R_{11} = \frac{(\omega M)^2}{R_L} \quad (6)$$

이 되고, 여기서  $M$ 은 상호 인덕턴스이며, 전원회로의 구성으로부터,

$$R_{11} = \frac{V_s/2}{8 \times P_{out}} \quad (7)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서  $V_s$ 는 급전단 전 원전압,  $P_{out}$ 은 급전단의 출력을 나타낸다.

따라서 급전단 인덕턴스  $L_1$ 은 식 (8)로부터 구할 수 있다.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (8)$$

또한 급전단 커패시턴스  $C_1$ 은 식 (9)에서 계산할 수 있다.

$$C_1 = \frac{1}{(2\pi f)^2 L_1} \quad (9)$$

식 (2)~(9)로 부터 급전단 및 수전단의 회로정수를 계산하면 표 1과 같다.

표 1. 계산된 회로 정수.  
Table 1. Circuit Parameters

Item	Unit	Value
Operating Frequency	kHz	200
Coupling Factor	-	0.01
Primary Inductance	$\mu\text{H}$	199
Primary Capacitance	nF	3.19
Quality Factor	-	100
Secondary Inductance	$\mu\text{H}$	398
Secondary Capacitance	nF	1.59
Secondary Load	$\Omega$	5

### III. 시뮬레이션

계산된 회로 정수를 이용하여 구성된 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 그림 3에 나타내었다. 시뮬레이션에 사용된 프로그램은 MATLAB Simulink를 이용하였으며, 그림 1의 블록도에 도시한 대로 전력변환 회로부와 급전단 및 수전단 회로부로 구성된다.

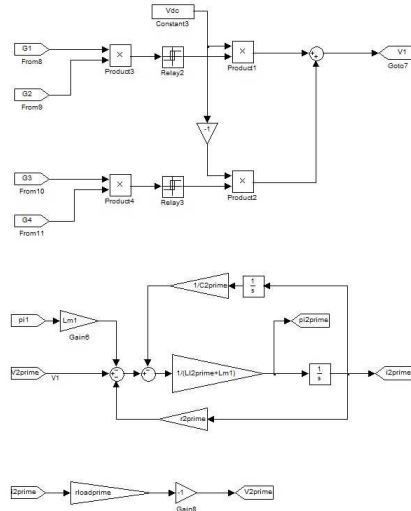
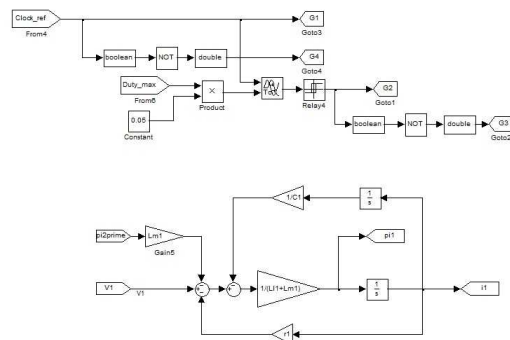


그림 3. 시뮬레이션 모델  
Fig. 3 Simulation Model using MATLAB Simulink

그림 4에는 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 설계 주파수에 근접한 주파수에서 2차측의 전압이 상승하고 있음을 볼 수 있으며 부하의 변동이 없으므로 최대의 전압이 발생하는 주파수에서 2차 측으로 최대의 전력이 송신됨을 알 수 있다.

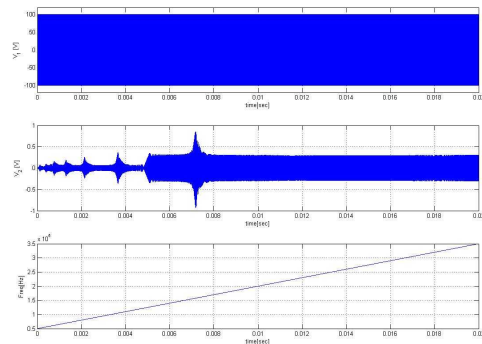


그림 4. 시뮬레이션 결과 (Ch1: 송전단 전압[V], Ch2: 수전단 전압[V], Ch3: 전원주파수[Hz])  
Fig. 4 Simulation Model using MATLAB Simulink (Ch1: Primary Voltage[V], Ch2: Secondary Voltage[V], Ch3: Test Frequency[Hz])

## V. 결론

본 논문에서는 자기공명방식의 무선전력송수신을 위한 회로정수의 산정 및 설계에 대하여 논하였으며 제시된 방법으로 계산된 회로정수의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 회로정수대로 전력송수신이 이루어짐을 확인하고 제시된 방법의 타당성을 검증하였다.

감사의 글

본 연구는 2010학년도 오산대학교 교내연구비 지원에 의하여 수행되었음.

## 참고 문헌

- [1] 강승렬 외, “무선 에너지 전송 기술”, 전자통신동향분석 제6호, 23권, pp.59-69, 2008
- [2] A. Kurs et al., “Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,” *Science*, Vol.317, 2007, pp.83-86.
- [3] Waffenschmidt, et al, “Limitation of Inductive Power Transfer for Consumer Applications,” 13th European Conference on Power Electronics and Applications, pp. 1-10, 2009.
- [4] 山内幸長 外, “長距離ワイヤレス給電の実験と研究,” No. 6, pp.52-93, *グリーンエレクトロニクス*, 2011
- [5] A. Karalis et al., “Efficient Wireless Non-radiative Mid-range Energy Transfer,” *Annals of Physics*, Vol.323, 2008, pp.34-48.
- [6] T. Sekitani et al., “A Large-area Wireless Power Transmission Sheet Using Printed Organic Transistors and Plastic MEMS Switches,” *Nature Materials*, Vol.6, 2007, pp.413-417.
- [7] Fernandez, J. M. and Borrás, J. A. “Contactless battery charger with wireless control link.” U.S. patent number 6,184,651, issued in February 2001.

- [8] Kathleen O’rian, “Inductively Coupled Radio Frequency Power Transmission System for Wireless Systems and Devices” PhD Thesis, TU Dresden, 5.12.2005, Shaker Verlag Aachen 2007, ISBN 978-3-8322-5775-0.

---

## 저자약력

---

### 안 준 선 (Joon-Seon Ahn)

### 정희원



1993년 한양대학교 전기공학과 졸업  
 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사)  
 1995년~2000년 LS산전 빌딩 설비사업부 연구소  
 2001년~2003년 (주) 저스텍 기술연구소  
 2008년~현재 오산대학 전기 시스템제어과 조교수

<관심분야> 전력전자, 전동기제어