

소형 수신단 코일을 가지는 무선 전력 전송 시스템 설계

유자영, 설승기
서울대학교 전기·정보공학부

Wireless Power Transfer System Design with Small Receiver Coil

Jayeong Yu and Seung Ki Sul

Department of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 무선 전력 전송 시스템의 두가지 회로방식 (Topology)에 대해 분석하고 수신단 코일이 송신단 코일의 약 6.7%인 시스템을 설계한다. 또한 전원단 설계와 전원 저항, 부하 저항 설계방향을 제시한다

1. 서론

Jeff Lieberman의 2007년 작품 Light Bulb^[1]는 무선 전력 전송 기술을 응용한 예술 작품 중 하나이다. 이와 같이 전력 전자 기술을 응용한 예술 작품들이 늘어나고 있는 추세이다. 따라서 본 논문은 예술 작품을 제작하는데 응용할 수 있는 무선 전력 전송 시스템을 설계하고자 한다. 설계하고자 하는 시스템은 수신단 코일이 송신단 코일에 비해 10%미만이고 최소 20mA를 부하에 공급하는 시스템이다.

2. 시스템 분석

무선 전력 전송을 위한 시스템은 응용분야에 따라 여러 가지 회로방식회로방식이 있지만 각 회로방식은 크게 전원단, 수신단, 송신단, 부하단으로 구성된다. 본 절에서는 전원단은 교류 전류원으로 가정한 상태에서 그림 1의 두가지 회로방식을 분석한다.

2.1 외부 공진기가 없는 회로방식

외부 공진기가 없는 회로방식(회로방식 1)은 그림 1(a)와 같다. 송신단과 수신단에 각각 캐패시터가 연결되어 공진 (Resonance) 회로를 형성한다. 이 경우 송신단 코일과 수신단 코일은 결합 인덕터로 모델할 수 있다. 결합 인덕터를 T형 등가모델로 나타내어 KVL을 적용하면 식 (1)과 같다.

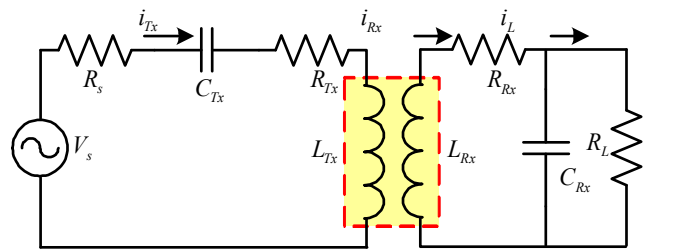
$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_{Tx} & -j\omega_0 M & 0 \\ -j\omega_0 M & R_{Rx} & j\omega_0 L_{Rx} \\ 0 & j\omega_0 L_{Rx} & R_L - j\omega_0 L_{Rx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Tx} \\ i_{Rx} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{Tx} C_{Tx}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{Rx} C_{Rx}}},$$

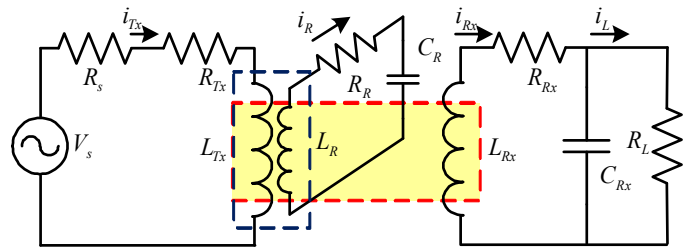
$$M = k\sqrt{L_{Tx} L_{Rx}}, \quad 0 \leq k \leq 1.$$

2.2 외부 공진기가 있는 회로방식

외부 공진기가 있는 회로방식(회로방식 2)은 그림 1(b)와 같다. 송신단과 수신단 사이에 송신단과 자기 유도



(a) 외부 공진기가 없는 회로방식



(b) 외부 공진기가 있는 회로방식

그림 1 무선 전력 전송 시스템 회로방식

Fig. 1 Wireless Power Transfer System Topology

방식으로 결합된 공진기(Resonator)가 있다. 송신단과 자기 유도 방식으로 결합된 공진기는 송신단과 가까이 위치하여 수신단에 비해 비교적 강하게 결합된다. 그리고 송신단의 영향으로 공진기에서의 등가 인덕턴스는 $L_{eq} = (1 - k_1^2)L_R$ 이다.^[2]

2.1결과 같이 송신단 코일, 공진기 코일과 수신단 코일은 결합 인덕터로 모델링하여 KVL를 적용하면 식 (2)와 같다. 이 때, 송신단 코일과 수신단 코일 사이의 결합은 무시한다.

$$\begin{bmatrix} V_s \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + R_{Tx} + j\omega_0 L_{Tx} & -j\omega_0 M_1 & 0 & 0 \\ -j\omega_0 M_1 & R_R + j\omega_0 k_1^2 L_R - j\omega_0 M_2 & 0 & 0 \\ 0 & -j\omega_0 M_2 & R_{Rx} & j\omega_0 L_{Rx} \\ 0 & 0 & j\omega_0 L_{Rx} & R_L - j\omega_0 L_{Rx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s \\ i_{Tx} \\ i_{Rx} \\ i_L \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{(1 - k_1^2)L_R C_R}} = \frac{1}{\sqrt{L_{Rx} C_{Rx}}},$$

$$M_1 = k_1 \sqrt{L_{Tx} L_R}, \quad M_2 = k_2 \sqrt{L_R L_{Rx}}, \quad 0 \leq k_1, k_2 \leq 1$$

3. 시스템 설계

3.1 전원단 설계

전원단은 일반적으로 Class E 컨버터로 구성한다. Class E

컨버터는 설계가 까다롭기 때문에, 본 논문에서는 간단한 하프 브릿지(Half bridge) DC AC 컨버터를 이용하여 전원단을 설계한다. 하프브릿지의 출력단에는 커패시터가 있어서 DC 성분은 필터링되고 AC 성분만 출력된다. 이 때, 출력 커패시터는 수신단 코일과 공진을 일으키지 않도록 해야 한다.

3.2 시뮬레이션 및 파라미터 선정

2절에서 분석한 두가지 회로방식에 대해 전자기장 해석 프로그램 중 하나인 Ansoft사의 Q3d를 이용하여 코일의 저항과 인덕턴스를 추출하였다. 그림 2는 회로방식 2의 코일이다. 회로방식 1은 그림 2에서 공진기 코일(청색)이 송신단 코일이고, 송신기 코일(황색)이 없는 경우이다. 송신단 코일과 공진기 코일의 도선 폭은 2mm이고, 반지름은 15cm이다. 수신단 코일의 도선폭은 1mm이고, 반지름은 1cm이다. 즉 수신단 코일의 크기는 송신단 코일의 약 6.7%이다. 결과는 표 1과 같다.

추출한 파라미터와 식 (1), (2)를 이용하여 부하 전류의 크기를 구하면 그림 3과 같다. 하프브릿지의 입력 전압은 10V이다. 그림 3에서 점선은 회로방식 1, 실선은 회로방식 2에 대한 결과 파형이다. k 는 회로방식 1에서 k_1 , 회로방식 2에서 k_2 이다. 회로방식 2에서 k_1 은 약 0.3이고 송신단 코일과 공진기 사이의 위치가 고정하므로 값이 일정하다. 그림 2와 같은 구조에서 수신단 코일의 물리적인 크기의 한계로 k 는 0.01~0.02이다. k 는 수신단 코일이 공진기 코일의 중심부에 있을 때 최소값을 외곽에 있을 때 최대 값을 가진다. 그림 3에서 위의 그림은 $R_L = Z_0$ 일 때에 전원 저항에 따른 부하 전류 크기 파형이다. Z_0 은 수신단의 특성 임피던스로 $(\omega_0 L_{Rx})^2$ 로 표시된다. 전원 저항의 크기가 부하 저항에 비해 작을수록 부하 전류의 크기가 크다. 그림 3의 아래 그림은 $R_s = 0.1R_L$ 일 때, 부하 저항의 크기에 따른 부하 전류의 크기이다. 특성 임피던스에 비해 부하 저항의 크기가 작을수록 부하 전류의 크기가 크다. 그리고 같은 조건에서 회로방식 2에 비해 회로방식 1에서 부하 전류의 크기가 크다.

표 1 각 코일의 저항과 인덕턴스

Table 1 Coil Resistances and Inductances

송신단 코일	R_{Tx}	63.68m Ω	L_{Tx}	966.8nH
송신단 코일 또는 공진기 코일	R_R	0.740 Ω	L_R	70.19 μ H
수신단 코일	R_{Rx}	98.55m Ω	L_{Rx}	1.474 μ H

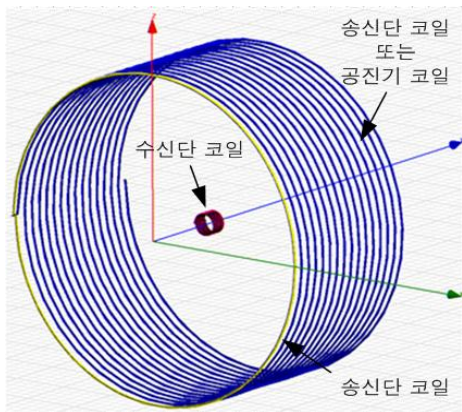


그림 2 송신단 코일(황색), 공진기 코일(청색), 수신단 코일(적색)

Fig. 2 Transceiver coil, Resonator Coil, Receiver Coil

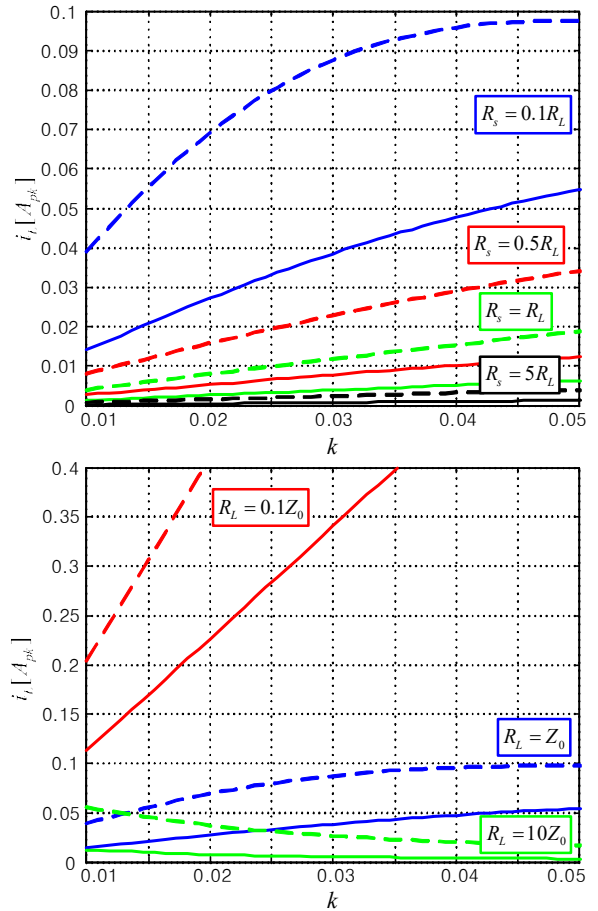


그림 3 k에 따른 부하 전류 크기

Fig. 3 Load Current with k

4. 결론

본 논문에서는 무선 전력 전송 시스템의 두가지 회로방식에 대해 분석하고 소형 수신단 코일을 가지는 무선 전력 전송 시스템을 설계하였다. 전원단은 간단한 하프브릿지 DC AC 컨버터 구조로 설계하였다. 코일의 저항과 인덕턴스는 전자기장 해석 프로그램을 이용하여 추출하였다. 같은 입력 전압에 대하여 부하 전류의 크기가 회로방식 2에 비해 회로방식 1에서 부하 전류의 크기가 크기 때문에 본 논문에서 설계하고자 하는 시스템은 회로방식 1의 구조로 설계하는 것이 적절하다. 또한 전원 저항은 부하 저항에 비해 작을수록, 부하 저항은 특성 임피던스보다 작을수록 부하 전류의 크기가 크므로 부하 저항은 특성 임피던스보다 작고 전원 저항은 부하 저항보다 작게 설계하여야 한다. 본 논문에서 설계한 파라미터는 실험을 통해 검증될 예정이다.

참고 문헌

[1] Jeff Lieberman, <http://bea.st/sight/>, 2007.
 [2] Ali Ghahary, and Bo H. Cho, "Design of a Transcutaneous Energy Transmission System Using a Series Resonant Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 7, No 2, pp 261 269, April. 1992.