

# 단일 권선 FEM 시뮬레이션을 통한 자기유도형 무선전력전송 코일의 효율 최적화 설계

류승하, 최성진

울산대학교 전기전자컴퓨터공학과

## Coil Design Scheme using Single-Turn Field Simulation for Efficiency Optimization of Inductive Power Transfer System

Seung-Ha Ryu, Sung-Jin Choi

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Ulsan

### ABSTRACT

자기유도형 무선전력전송에서 두 코일 간의 전력전송 효율을 높이는 것은 중요하다. 그 중 코일 형상에 따라서 효율이 달라지기 때문에 코일설계는 자기유도형 무선전력전송에서 주요한 문제이다. 코일 형상 파라미터를 결정하기 위해 FEM 시뮬레이션을 사용하여 형상 파라미터를 결정하는 연구가 진행되고 있다. 하지만 많은 계산량으로 인해 시뮬레이션 시간이 길어지는 단점이 있다. 본 논문에서는 FEM 시뮬레이션의 사용을 줄이고 Curve Fitting을 이용하여 효율의 근사식을 찾아 최적화 방법을 통해 주어진 조건에서 효율이 최대가 되는 지점의 코일 형상 파라미터를 추출하는 설계 기법을 제시한다. 본 논문을 증명하기 위해 100W 무선전력전송 시스템과 원형 코일을 가지고 실험하였으며 Matlab과 Ansys Maxwell을 사용하여 코일을 설계했다.

### 1. 서론

현재 스마트폰과 전기 자동차 시장이 크게 성장한 가운데 유선충전의 불편함을 해소하기 위해 무선충전 관련 기술들이 많이 나오고 있다. 그 중 자기유도형 무선전력전송은 코일에 전류가 인가되면 생기는 자속을 다른 코일에 쇄고 시켜 전력을 전송하는 기술이다. 그렇기에 이 무선전력전송 방식은 코일 설계에 따라 전력 시스템의 효율이 달라진다. 문헌 [1]에서는 단일 권선 FEM 시뮬레이션을 통해 코일 설계하는 방법을 제시하고 있다. 하지만, 이 방법은 FEM 의존도가 높아 시뮬레이션 시간이 많이 걸리는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하고자 본 논문에서는 FEM 시뮬레이션 의존도를 줄이고 Curve Fitting을 이용하여 효율의 근사식을 추출하고 최적화 방법을 적용하여 효율이 최대가 되는 코일 형상 파라미터를 추출하는 설계 기법을 제시한다. 제안 방법은 설계 예시를 보이고 Ansys Maxwell에서 실제 코일을 모델링 함으로써 타당성을 검증한다.

### 2. 제안하는 코일 설계 방법

#### 2.1 목표 무선전력전송 시스템 및 설계 제약조건 선정

코일 설계의 방향성을 잡기 위해 목표 무선전력전송 시스템 및 설계 제약조건을 결정해야한다. 그림 1은 직

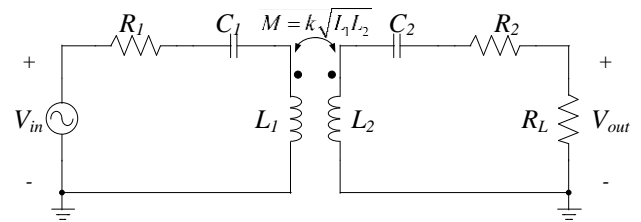


그림 1. 직렬-직렬 보상회로

렬-직렬 보상회로로 자기유도형 무선전력전송에서 많이 쓰이는 회로이다. 이 직렬-직렬 보상회로는 다른 보상회로보다 더 높은 효율을 가지고 회로 해석하는데 있어서 간단하기 때문에 이 보상회로를 채택하였다<sup>[2]</sup>. 문제를 간단하기 위해 코일 형상 및 회로 파라미터 값이 대칭일 경우를 고려하였다. 이 회로가 대칭일 경우 효율 식은 식(1)과 같이 구할 수 있다<sup>[3]</sup>.

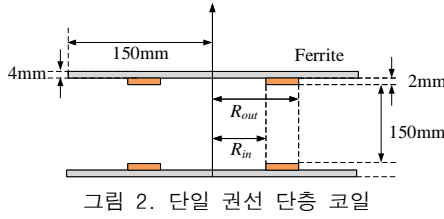
$$\eta = \frac{FOM^2 \cdot r_d}{(1+r_d)^2 + FOM^2 \cdot (1+r_d)} \quad (1)$$

여기서  $FOM = kQ = k\omega L/R$ ,  $r_d = R_L/R$ 이다. 또한 코일은 가장 기본적이고 비정렬 오차가 적은 원형 코일을 선택하였다.

설계 제한 조건으로 출력 전력은 100W, 작동 주파수 100kHz의 무선전력전송 시스템을 선정했다. 그리고 출력 전압은 40V로 설계하였고 출력 전력, 전압을 통해서 부하 저항은  $16\Omega$ 으로 계산되어진다. 그 다음 전압과 저항을 통해 전류를 구할 수 있고 도선 지름을 AWG표를 통해 2mm로 정해진다. 여기서 원형 코일을 단층으로 설계하기 때문에 도선 지름은 코일의 두께가 된다. 코일의 내경( $R_{in}$ ) 및 외경( $R_{out}$ ) 반지름을 최소 2mm에서 최대 100mm 내로 코일 간 사이 간격은 150mm로 설계했다.

#### 2.2 효율 최적화 설계 방법

문헌 [1]에서 그림 2와 같이 단일 권선을 통해 코일 설계 방법을 제시하고 있다. 코일의  $R_{in}$ ,  $R_{out}$ 이 정해지면 FEM 시뮬레이션을 통해 단일 권선에서의 코일 인덕턴스  $L_0$ 와 내부저항  $R_0$ 를 구할 수 있고 식(2)를 가지고 코일의 턴 수를 구할 수 있으며 턴 수를 고려한 인덕턴스 및 내부저항은 식(3)으로 구할 수 있다. 여기서 내부 저항은 표피 효과 및 근접 효과가 없다고 가정한다. 마



$$N = \frac{R_{out} - R_{in}}{D} \quad (2)$$

$$L = N^2 L_0 \quad R = N^2 R_0 \quad (3)$$

지막으로 (4)를 통해 양호도(Quality factor)를 구할 수 있다.

$$Q = \frac{\omega_o L}{R} = \frac{\omega_o N^2 L_0}{N^2 R_0} = \frac{\omega_o L_0}{R_0} \quad (4)$$

여기서  $\omega_o = 2\pi f_o$ 이다. 송신부와 수신부 두 코일간의 간격은 정해져 있으므로 FEM 시뮬레이션을 통해서 결합계수  $k$  값을 구할 수 있다. 그로 인해 FOM을 구할 수 있고 설계 제한조건에 있는 부하저항을 값을 통해  $r_d$  값을 구할 수 있어 식(1)을 통해 효율을 구할 수 있다.

FEM 시뮬레이션 계산량을 줄이기 위해 스텝 사이스를 키워 시뮬레이션 스윙량을 줄인 대신 FEM 시뮬레이션 데이터를 Matlab에서 식(1)을 가지고  $R_{in} < R_{out}$ 에 대해서 효율을 구한 후 Curve Fitting Toolbox를 통해 효율을  $R_{in}$ 과  $R_{out}$ 에 대한 식으로 추출한다. 또한 최적화 방법을 사용하여 효율이 최대가 되는  $R_{out}$ ,  $R_{in}$  값을 구할 수 있게 된다. 이 효율 식을 가지고 최적화 방법을 적용시키기 위해 목표 함수와 제한 조건을 아래 (5)와 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} && \eta(R_{in}, R_{out}) \\ & \text{subject to} && R_{out} - R_{in} \geq 2\text{mm} \\ & && 2\text{mm} \leq R_{in} \leq 100\text{mm} \\ & && 2\text{mm} \leq R_{out} \leq 100\text{mm} \end{aligned} \quad (5)$$

그 후 Matlab의 Optimization Toolbox를 통해 (5)의 목표 함수와 제한 조건을 넣으면 쉽게 효율이 최대가 되는 파라미터 값을 추출할 수 있다.

### 3. 설계 예시 및 시뮬레이션 검증

Ansys Maxwell을 이용하여 FEM 시뮬레이션을 진행하였다.  $R_{out}$ 과  $R_{in}$ 의 스윙 범위를 10mm부터 100mm까지 그리고 스텝 사이즈 10mm를 주어 단일 권선에서의 인덕턴스, 저항, 결합계수를 구하고 식(1),(2),(3),(4)를 이용하여 효율을 구한다. Curve Fitting Toolbox를 통해 설정을 '다항식'을 선택하고 차수를  $x$ 를 4차,  $y$ 를 2차 다항식으로 설정하게 되면  $R_{in}$ ,  $R_{out}$ 에 관한 효율의 근사식을 (6)과 같이 추출하게 된다. 마지막으로 Optimization Toolbox에서 (5)의 조건을 입력하여 효율이 최대가 되는 지점을 찾게 되면 (7)과 같이 코일 형상 파라미터 값을 추출할 수 있게 된다. 이 값을 가지고 Ansys Maxwell에서 그림 3(a)와 같이 모델링을 하였고 이 모델링의 시뮬레이션 값은 (8)과 같이 나오게 된다. 여기서 커패시턴스는  $1/(\omega_o^2 L)$ 로 구하게 된다. 그 후

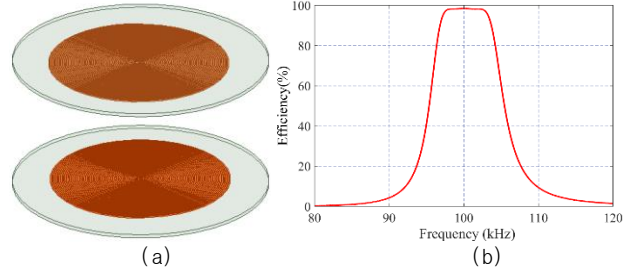


그림 3. 시뮬레이션 검증 (a) 실제 코일 모델링 (b) 실제 코일 모델링에 대한 효율 결과

$$\begin{aligned} \eta(x, y) = & p00 + p10x + p01y + p20x^2 + p11xy + p02y^2 + \\ & p30x^3 + p21x^2y + p12xy^2 + p40x^4 + p31x^3y + p22x^2y^2 \\ (x: R_{in}, y: R_{out}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{where } p00 = & -31.37, p10 = -2.811, p01 = 1.57, \\ p20 = & -0.08472, p11 = 0.1052, p02 = -0.001742, \\ p30 = & -0.001521, p21 = 0.00238, p12 = -0.0007407, \\ p40 = & -7.157 \times 10^{-6}, p31 = 2.623 \times 10^{-5}, p22 = -2.015 \times 10^{-5} \end{aligned} \quad (6)$$

$$R_{in} = 2\text{mm}, R_{out} = 100\text{mm} \quad (7)$$

$$L = 350\mu\text{H}, R = 146\text{m}\Omega, C = 7.237\text{nF}, k = 0.083 \quad (8)$$

LTspice를 통해 효율을 구하게 되면 그림 3(b)와 같이 작동 주파수 100kHz에서 효율이 98.4%이 나오게 된다. 이를 통해 제안 방법을 통해 주어진 제한 조건에서 효율이 최대가 되는 것을 볼 수 있었다.

### 4. 결론

이 논문에서는 FEM 시뮬레이션의 결과값을 통해 효율 근사식을 구하고 최적화 방법을 적용하여 효율이 최대가 되는 코일 형상 파라미터를 추출하는 방법을 제시한다. 이 방법을 통해 기존 FEM 시뮬레이션 코일 설계 방식보다 계산량을 줄여 더욱 빠른 코일 형상 파라미터 값을 추출할 수 있다. 설계 방법을 증명하기 위해 Matlab과 Ansys Maxwell를 통해 증명했다. 후속 연구에서는 원형 코일이 아닌 DD 코일과 같은 다른 코일 형상을 가지고 설계 방식을 적용할 것이다.

### 참고 문헌

- [1] H. Kim *et al.*, "Coil design and measurements of automotive magnetic resonant wireless charging system for high-efficiency and low magnetic field leakage," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 2, pp. 383-400, 2016.
- [2] K. Mude and K. Aditya, "Comprehensive review and analysis of two-element resonant compensation topologies for wireless inductive power transfer systems," *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 2, pp. 14-31, 2019.
- [3] C.-H. Jeong and S.-J. Choi, "Graphical Design Plane Analysis for Series-Compensated Resonant Energy Links of Inductive Wireless Power Transfer Systems," *Journal of Power Electronics*, vol. 19, no. 6, pp. 1440-1448, 2019.