500 W급 무선 전력 전송용 컨버터의 최적설계 방법에 관한 연구

김민아, 김예린(Katherine A.Kim), 정지훈
UNIST(울산과학기술대학교)

Optimal Design Methodology of a 500 W Wireless Power Transfer Converter

Mina Kim, Katherine A. Kim, Jeehoon Jung
UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology)

ABSTRACT

본 논문은 동작 주파수에 따른 임피던스 분석을 통해 무선 전력 전송 컨버터의 최적 설계 방법을 제안한다. 기존의 무선 전력 전송에는 크게 4가지의 토폴로지가 있는데 본 논문은 SS 토폴로지에 대한 최적 설계 방법을 제시한다. 무선 전력 전송이 가지는 근본적인 특징인 코일 간의 낮은 커플링 계수로 인해 컨버터 설계 시 많은 제약 사항들을 고려해야 한다. 일반적인 변압기와 달리 코일 간의 커플링 계수가 0.2 안팎이므로 충분한 자화 인덕턴스를 가지기 위해서는 코일의 턴 수를 늘리는 방안이 있으나 턴 수에 따라 코일 저항이 늘어나, 도통 손실이 증가하는 문제가 있다. 또한 낮은 자화 인덕턴스는 높은 자화 전류에 의한 컨버터의 1차 측 전류의 상승을 야기하며, 도통 손실을 증가시킨다. 따라서 본 논문에서는 무선 전력 전송용 컨버터의 최적 설계를 임피던스 변화의 관점에서 수학적인 분석을 통해 제안하고, 그에 따른 시뮬레이션으로 검증하고자 한다.

1. 서 론

최근 전기 차 시장이 늘어남에 따라, 산업계에서는 전기 차량의 무선 전력 전송에 대한 관심이 늘어나고 있다. 무선 전력 전송 기술은 종전의 충전 방식보다 편리하고 강건하며, 케이블이 필요하지 않다는 장점이 있다. 이러한 장점으로 무선 전력 전송은 휴대폰 충전, 전기 차량 충전, 생체 이식 장치 충전, 아울러 조명 장치에 이용되고 있다[1].

무선 전력 전송 기술 시스템의 효율을 높이기 위해서는 컨버터의 효율성 증대가 주요한 고려 사항이다. 무선 전력 전송 컨버터는 기존의 공진형 컨버터와 달리 자화 인덕턴스가 크기 때문에 높은 입력 전압을 인가하면 무효 전력이 증가하게 된다. 또한 코일간의 커플링 계수가 작기 때문에 자화 인덕턴스를 증가시키기 위해서는 턴 수를 높이는 방법이 유일하다. 따라서 코일의 저항이 증가하게 된다. 증가한 코일의 저항이 도통 손실을 유발하기 때문에 컨버터 효율이 감소하게 된다. 따라서 무선 전력 전송 컨버터의 효율성은 컨버터의 무효 전력과 도통 손실로 평가 할 수 있다. 본 논문에서는 500 W 급 무선 전력 전송 컨버터의 적정한 입력 전압과 자화 인덕턴스 값을 디자인하는 최적 설계 방법을 제안하고 이를 적정한 시뮬레이션으로 검증하였다.

2. 본 론

2.1 무선 전력 전송 컨버터 분석

무선 전력 전송 컨버터는 그림 1과 같이 높은 누설 인덕턴스를 상쇄하기 위해 공진 커패시터를 직렬로 연결하는 토폴로지를 사용하였다. 무선 전력 전송 컨버터는 커플링 계수가 낮기 때문에 자화 인덕턴스가 작다[2]. 이를 증가시키기 위해 턴 수를 높이는 방법이 있고 이에 비례하여 코일의 저항이 커지게 된다. 증가한 코일의 저항은 도통 손실의 주요한 요인이 되며 이를 고려한 컨버터의 단순화 모델이 그림 2에 나타나 있다. 또한 동작 주파수와 임피던스 분석 결과가 식 (1) (4)에 나타나 있다.

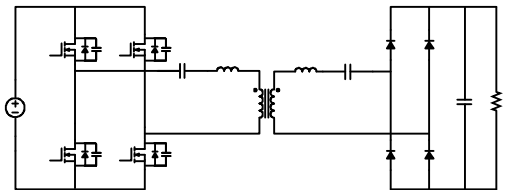

그림 1 SS 타입의 무선 전력 전송 토폴로지
Fig. 1 SS topologies of Wireless Power Transfer converter.

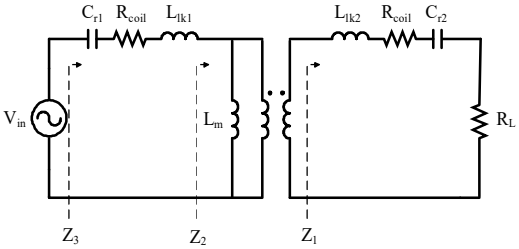

그림 2 무선 전력 전송 컨버터의 단순화 모델
Fig. 2 Simplified circuit model of WPT converter.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{lk1}C_{r1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{lk2}C_{r2}}} = 2\pi f_o \quad (1)$$

$$Z_1 = j\omega_o L_{lk2} + R_{coil} + \frac{1}{j\omega C_{cr2}} + R_L \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{j\omega_o L_m Z_1}{j\omega_o L_m + Z_1} \quad (3)$$

$$Z_3 = j\omega_o L_{lk1} + \frac{1}{j\omega_o C_{cr1}} + Z_2 \quad (4)$$

출력 전력을 500 W로 조정하기 위한 부하 저항의 표현이 식 (5) (7)에 나타나 있다. 도통 손실의 경우 1차 측 코일의 도통 손실이 가장 주요하므로 1차 측 코일 도통 손실로 대표된다. 피상 전력, 1차 측 도통 손실은 식 (8) (10)에 나타나 있다.

$$V_{out,rms} = \frac{j\omega_o L_m}{j\omega_o L_m + R_{coil}} \frac{R_L}{R_{coil}+R_L} V_{in,rms} \quad (5)$$

$$P = \frac{|V_{out,rms}|^2}{R_L} = \frac{(\omega_o L_m)^2}{(\omega_o L_m)^2 + R_{coil}^2} \frac{R_L}{(R_{coil}+R_L)^2} V_{in,rms}^2 \quad (6)$$

$$R_L = \frac{-4PR_{coil} + X + \sqrt{(-4PR_{coil}+X)^2 - 16P^2 R_{coil}^2}}{2P} \quad (7)$$

이 때, $X = V_{in,rms}^2 \frac{(\omega_o L_m)^2}{(\omega_o L_m)^2 + R_{coil}^2}$ 로 정의한다.

$$I_{pri,rms} = \frac{V_{in,rms}}{Z_3} \quad (8)$$

$$S = V_{in,rms} I_{in,rms}^* \quad (9)$$

$$P_{conductionloss} = |I_{pri,rms}|^2 R_{coil} \quad (10)$$

무선 전력 전송 컨버터의 최적 설계를 위해 피상 전력과 도통 손실을 동시에 고려하여야 한다. 따라서 컨버터의 성능 상수를 식 (11)과 같이 제안한다. 대체로 피상 전력은 도통 손실의 약 10배의 크기를 가지기 때문에 이와 같이 제시하였다.

$$(Figure\ of\ merit) = P_{conductionloss} + 0.1 P_{Apparentpower} \quad (11)$$

2.2 분석 결과 및 시뮬레이션 결과

실제의 컨버터 동작을 시뮬레이션으로 구현하기 위해 그림 1에 나타난 회로도를 모든 기생 성분들을 포함하여 시뮬레이션 하였다. 분석 결과에 따른 그래프와 시뮬레이션 검증 결과가 그림 3에 나타나 있다. 각각의 시뮬레이션 결과는 10% 이내의 오차 범위로 계산 결과에 수렴하였음을 알 수 있다.

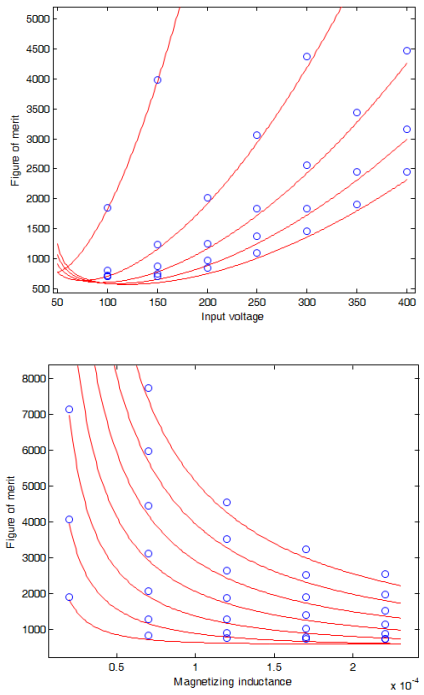

그림 3 입력 전압과 자화 인덕턴스에 따른 성능 상수
Fig. 3 The figure of merit against input voltage and magnetizing inductance.

컨버터의 성능 상수에 따르면 500 W 급 무선 전력 전송 컨버터는 입력 전압 130 V, 자화 인덕턴스 230 uH의 상황에서 최적의 동작 점을 가진다. 그림 4는 500 W 급의 무선 전력 전송 컨버터의 시제품과 정상 상태 실험 결과이다. 추후 시제품으로 설계 방법을 실험적으로 검증할 예정이다.

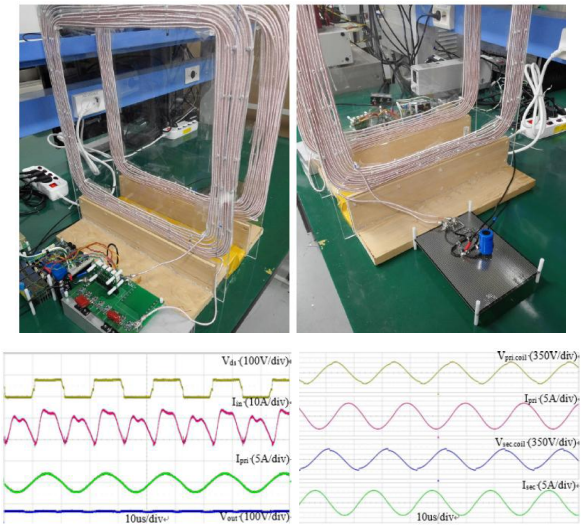

그림 4 무선 전력 전송 컨버터 시제품과 정상 상태 실험 결과
Fig. 4 A prototype of 500 W WPT converter and experimental result.

3. 결 론

본 논문에서는 500 W 급의 무선 전력 전송 컨버터의 최적 설계 방법을 제안하였다. 무선 전력 전송의 경우 낮은 커플링 계수 때문에 충분한 자화 인덕턴스를 확보하기 위해 턴 수를 늘려야 한다. 그에 따른 코일 저항으로 도통 손실이 증가하는 특성을 분석 하였다. 따라서 입력 전압과 자화 인덕턴스에 따른 컨버터의 무효 전력과 도통 손실을 수학적으로 분석하였고, 컨버터 설계 시 두 가지의 사항을 모두 고려하기 위한 성능 상수를 제안하였다. 또한 본 설계 방법을 시뮬레이션을 이용하여 검증하였다. 아울러 발표 시 본 설계 방법을 실험적으로 검증한 결과를 보일 것이다.

This work was supported by the 2015 Creativity & Innovation Research Fund 1.150027.01 of UNIST(Ulsan National Institute of Science and Technology).

참 고 문 헌

[1] A. Moradewicz and M. Kazmierkowski, “High frequency contactless energy transfer system with power electronic resonant converter,” *Bulletin of the Polish Academy of Science: Technical Sciences*, vol. 57, no. 4, pp. 375 381, Dec. 2010

[2] Y. Cheng, and Y. Shu, “A New Analytical Calculation of the Mutual Inductance of the Coaxial Spiral Rectangular Coils,” *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 50, no. 4, pp. 1 6, Apr. 2014