

공진회로의 임피던스를 고려한 무선 전력 전송 컨버터의 전력 손실 분석

김민아, 박화평, 정지훈
울산과학기술원(유니스트)

Power Loss Analysis of Wireless Power Transfer Converter Considering Resonant Circuit Impedance

Mina Kim, Hwa-Pyeong Park, and Jee-Hoon Jung
Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

본 논문에서는 무선 전력 전송 컨버터의 공진 회로 임피던스 구조를 분석하여 컨버터의 입출력 전압 이득 및 1, 2차 전류 값을 기술한다. 이 때 물리적으로 떨어진 1차 측과 2차 측의 전력 유실 현상을 무선 전력 전송 코일 네트워크 간 Scattering Parameter를 이용하여 계산한다. 또한, 수학적 계산 결과를 바탕으로 무선 전력 전송 컨버터 손실의 대부분을 차지하는 도통 손실 및 스위칭 손실을 수학적으로 계산하여 예측한다. 무선 전력 전송 컨버터의 손실 분석 결과를 토대로 주어진 컨버터 동작 상황에서의 효율을 예측하고 이를 실험적으로 검증하고자 한다.

1. 서론

무선 전력 전송 기술(Wireless Power Transfer; WPT)은 전력 규모에 따라 기술의 응용 분야가 달라진다. 주로 대전력의 무선 전력 전송 기술은 전기 차량 및 각종 수송 장치의 충전에 이용되고 소전력은 생체 이식 장치, 휴대폰 등의 각종 소형 전자 기기의 충전에 이용된다. 전력 규모에 따라 달라지는 무선 전력 전송 기술은 그 응용 분야뿐만 아니라 컨버터의 동작 원리, 설계 방법 및 해석 방법이 다르다. 따라서 컨버터의 전력 규모에 따라 적절한 분석 방법을 이용하는 것이 중요하다.

본 논문에서는 자기 유도 방식을 이용한 kW 급 이상의 대전력 무선 전력 전송 컨버터로 그 범위를 제한하였다. 임피던스의 수학적 분석 결과를 통해 컨버터의 입출력 전압 및 1, 2차 전류 값을 계산할 수 있다. 또한 무선 전력 전송 컨버터의 전력 전송 과정에서 발생하는 전력 유실 현상을 Scattering Parameter를 이용하여 계산하고 이를 컨버터의 임피던스 분석에 포함시켜 그 정확도를 높였다. 임피던스 분석을 통한 컨버터 전압 및 전류 계산 결과를 통해 무선 전력 전송 컨버터에서 발생하는 전력 손실을 도통 손실과 스위칭 손실로 나누어 비교적 높은 정밀도를 가지는 손실 예측 방법을 제안한다.

2. 자기 유도 방식의 무선 전력 전송 컨버터 손실 분석

2.1 무선 전력 전송 컨버터의 정류 방식

본 논문에서 사용한 자기 유도 방식의 kW급 하프 브릿지 인버터 (Half-Bridge Inverter) 타입 무선 전력 전송 컨버터의 회로도도 그림 1과 같이 나타내었다. 그림 1의 컨버터는 수동 소자를 이용하여 AC 입력을 정류하여 사용하였다. 본 정류 방식을 사용한 무선 전력 전송 컨버터는 입력 전압의 실효값 (Root Mean Square; RMS)을 이용하여 출력 전력을 계산할 수 있다. 출력 전력 계산 방법을 식 (1)-(2)를 통해 나타내었다.

$$v_{out}(\omega) = V_{in,rms} [G_v(\omega_s - \omega_{line}) - G_v(\omega_s + \omega_{line})] \quad (1)$$

$$P_{out}(\omega) = V_{in,rms}^2 \frac{1}{R_o} [G_v^2(\omega_s + \omega_{line}) + G_v^2(\omega_s - \omega_{line})] \quad (2)$$

$$\approx 2 V_{in,rms}^2 G_v^2(\omega_s) \frac{1}{R_o}$$

이 때, $V_{in,rms}$ 는 입력 전압의 실효치, $v_{out}(\omega)$ 는 각주파수에 대한 출력 전압, G_v 는 각주파수에 대한 입출력 전압 이득, R_o 는 출력 저항, ω_s 및 ω_{line} 은 인버터의 스위칭 주파수와 AC 입력의 주파수로 정의하며 인버터의 스위칭 주파수는 AC 입력의 주파수보다 매우 크다고 가정한다.

2.2 무선 전력 전송 컨버터의 입출력 전압 이득 및 1, 2차 전류값 계산

그림 1의 무선 전력 전송 컨버터의 전압 이득을 분석하기 위하여 컨버터의 공진 임피던스를 1차 고조파 근사 방법(First Harmonic Approximation; FHA)을 사용하여 그림 2에 나타내었다.

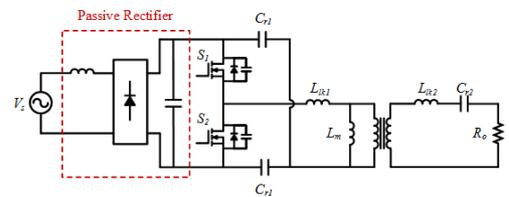


그림 1 무선 전력 전송 컨버터 회로도
Fig. 1 Schematic of Wireless Power Transfer Converter

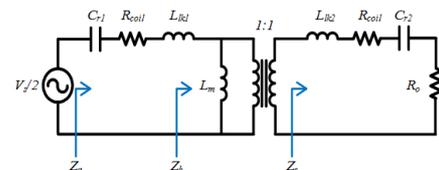


그림 2 무선 전력 전송 컨버터의 공진 임피던스 모델
Fig. 2 Impedance Model of WPT converter

컨버터의 공진 임피던스 모델을 이용하여 구한 전압 이득을 식 (3)로 나타내었다. 컨버터의 1차 측 전류는 코일의 자화에 필요한 자화 전류와 부하에 전달되는 2차 측 전류, 그리고 코일 간의 전력 전달 효율에 의해 누설되는 전류의 합으로 표현할 수 있다^[1]. 이 때 코일 간의 누설되는 전류는 Scattering Parameter를 이용하여 구할 수 있다. 컨버터의 자화 전류와 1차 및 2차 측 전류를 식 (4)-(8)로 나타내었다.

$$G_v(\omega) = \left[\left\{ 1 + \frac{2R_{coil}}{R_L} + \frac{1-k}{k} \left(1 + \frac{R_{coil}}{R_L} \right) \left(1 - \frac{1}{\omega^2} \right) \right\}^2 + \left\{ Q_{ac} \left(\omega - \frac{1}{\omega} \right) \left(1 + \frac{1-k}{2k} \left(1 - \frac{1}{\omega^2} \right) \right) \right\}^2 \right]^{-1/2} \quad (3)$$

$$S_{coil} = \frac{2j\omega L_m R_L}{\omega^2 L_m^2 + [(R_L + R_{coil}) + j(\omega L_{self} - \frac{1}{\omega C_{r1}})]^2} \quad (4)$$

$$n_{coil} = |S_{coil}|^2 \quad (5)$$

$$I_{Lm} = \frac{\pi V_{in}}{4\sqrt{3}L_m\omega_s} \left| \frac{Z_b}{Z_a} \right| \quad (6)$$

$$I_{tx} = \frac{I_{sec}}{n_{coil}} = \frac{G_v V_{in}}{2n_{coil}R_L} \quad (7)$$

$$I_{pri} = \sqrt{I_{Lm}^2 + I_{tx}^2} \quad (8)$$

이 때, ω 는 정규화된 각 주파수로 $\omega = \frac{\omega_s}{\omega_o}$ 로 정의한다.

Q_{ac} 는 컨버터의 첨예도이고 $Q_{ac} = \frac{\omega_o}{R_L}(L_{lk1} + L_{lk2})$ 로 정의한다. 또한 k 는 무선 전력 전송 코일의 커플링 계수를 의미하고, ω_s 및 ω_o 는 각각 스위칭 주파수와 공진 주파수를 의미하며 공진 주파수는 $\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{lk1}C_{r1}}} = \frac{1}{\sqrt{L_{lk2}C_{r2}}}$ 로 정의한다. n_{coil} 은 코일의 전력 전달 효율을 의미하고 I_{tx} 는 2차 측에 전력을 전달하기 위해 유실되는 전류값과 2차 측의 전류값의 합이고 I_{Lm} , I_{pri} , I_{sec} 는 각각 자화 전류, 1차 측 전류, 2차 측 전류를 의미한다.

2.3 무선 전력 전송 컨버터의 손실 계산

컨버터의 손실은 대표적으로 도통 손실과 스위칭 손실의 합으로 계산할 수 있다. 코일 저항의 도통 손실은 무선 전력 전송 컨버터의 도통 손실의 대부분을 차지하므로 컨버터의 도통 손실을 대표할 수 있다. 또한 컨버터의 스위칭 손실은 스위치의 입력 신호와 게이트-소스 (Gate-Source) 간의 캐패시턴스에 의한 드라이빙 손실 (Driving loss), 기생 다이오드에 의한 손실과 턴오프 손실 (Turn-off loss)로 나타낼 수 있다. 무선 전력 전송 컨버터의 도통 손실과 스위칭 손실을 식 (9)-(10)로 나타내고, 출력 전력과 전력 전달 효율을 식 (11)을 통해 나타내었다.

$$P_{con} = P_{coil} = R_{coil}(I_{pri}^2 + I_{sec}^2) \quad (9)$$

$$P_{sw} = P_{drive} + P_{diode} + P_{tf} \quad (10)$$

$$E = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{con} + P_{sw}} \quad (11)$$

이 때, P_{con} 은 코일의 도통 손실로 대표되는 컨버터의 도통 손실을 의미하고 P_{sw} 은 컨버터의 스위칭 손실을 의미한다. P_{drive} , P_{diode} , P_{tf} 는 각각 드라이빙 손실, 기생 다이오드에 의

한 손실, 턴오프 손실을 의미하며 P_{out} 은 출력 전력, E 는 컨버터의 전력 전달 효율을 의미한다.

3. 실험 결과

그림 3은 앞서 예측한 컨버터의 전력 전달 효율을 검증하기 위한 무선 전력 전송 컨버터의 정상 상태 실험 파형이다. AC 입력을 수동 소자를 통해 정류하였기 때문에 60 Hz의 포락선을 가지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4는 컨버터의 전력 전달 효율 계산 결과와 실험 결과의 비교 결과이다. 약 2%의 오차를 가지며 매우 유사한 결과를 가지는 것을 확인할 수 있다.

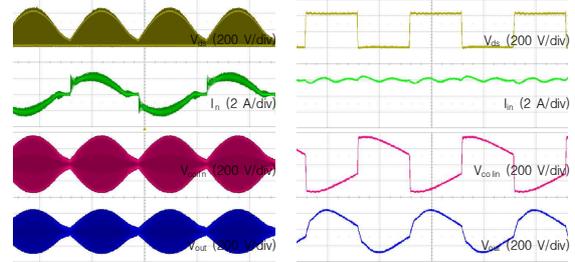


그림 3. 무선 전력 전송 컨버터의 정상 상태 실험
Fig. 3 Steady State Waveform of WPT converter

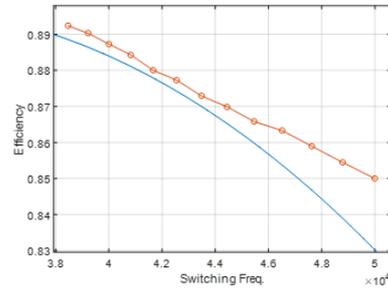


그림 4. 무선 전력 전송 컨버터의 효율 계산과 실험의 비교 결과
Fig. 4 Comparison of efficiency calculation and experimental results

4. 결론

본 논문은 무선 전력 전송 컨버터의 임피던스 모델을 통해 컨버터의 입출력 전압 이득 및 1, 2차 전류를 계산하였다. 컨버터의 분석 과정에서 1, 2차 간 전력 유실 현상을 계산하기 위해 Scattering parameter를 도입하여 분석의 정확도를 향상시켰다. 또한 임피던스 모델을 통한 분석 결과를 이용하여 컨버터의 도통 손실과 스위칭 손실을 계산하였고 이를 실험적으로 검증하였다.

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A1009632)

참고 문헌

- [1] Imura, Takehiro, and Yoichi H. "Maximizing air gap and efficiency of magnetic resonant coupling for wireless power transfer using equivalent circuit and Neumann formula." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* Vol. 58, No. 10, pp. 4746-4752, 2011.