

고주파 공진형 컨버터에서 프린징 손실 저감을 위한 공진 인덕터의 코어 형상 비교 및 분석

정태준, 조철희, 강성욱, 김동희[†]
 전남대학교 전기공학과

Comparison and Analysis of the Core Shape of a Resonant Inductor to Reduce the Fringing Loss in a High Frequency Resonant Converter

Tae-Jun Jeong, Cheol-Hee Jo, Seong-Uk Kang, and Dong-Hee Kim[†]
 Department of Electrical Engineering, Chonnam National University

ABSTRACT

LLC 공진형 컨버터는 높은 전력밀도 및 소프트 스위칭 특성으로 인해 산업계에서 널리 사용되고 있다. 하지만 스위칭 주파수의 크기에 비례하여 표피효과 및 근접효과에 의한 자성체의 코어 및 권선 손실은 증가하고, 이는 LLC 공진형 컨버터의 구성요소 중 하나인 공진 인덕터의 성능을 제한한다. 더욱이 코어의 포화를 방지하기 위해 사용되는 공극은 프린징 효과를 증대시키고 이에 따라 인덕터의 권선 손실을 더욱이 증가한다. 따라서 본 논문에서는 FEM (Finite Element Method) 시뮬레이션을 통해 공극의 위치에 따른 세 가지 코어 형상을 분류하고 각 코어의 프린징 효과를 비교 및 분석한다.

1. 서론

최근 친환경정책에 따라 전기자동차에 대한 관심이 증가하면서 높은 전력밀도를 갖는 전력변환기에 대한 요구가 증가하고 있다. 높은 전력밀도는 스위칭 주파수를 증가시켜 달성할 수 있지만 이에 비례하여 스위칭 손실이 증가하는 단점을 갖는다. 한편 LLC 공진형 컨버터는 전부하 구간에서 Zero voltage switching을 할 수 있으므로 고속 스위칭에도 높은 효율을 달성할 수 있다.

하지만 스위칭 주파수의 크기에 비례하여 표피효과 및 근접효과에 의한 자성체의 코어 및 권선 손실은 증가하고, 이는 LLC 공진형 컨버터의 구성요소 중 하나인 공진 인덕터의 성능을 제한한다. 더욱이 그림 1과 같이 자성체의 포화를 방지하기 위해 사용되는 공극은 프린징 효과를 증대시키고 이에 따라 인덕터의 권선 손실을 더욱이 증가한다. 이러한 문제는 LLC 공진형 컨버터 토폴로지뿐만 아니라 높은 스위칭 주파수를 사용하는 다양한 토폴로지의 전력변환장치에 사용되는 인덕터 설계를 더욱 어렵게 만든다.^[1]

따라서 본 논문에서는 FEM (Finite element method) 시뮬레이션을 이용하여 공진 인덕터의 공극 배치에 따른 프린징 효과의 영향도를 비교 및 분석한다. 먼저 인덕터에서 발생하는 코어 손실 및 권선 손실, 프린징 효과에 의한 손실에 대해 소개한다. 또한 공진 인덕터의 공극 배치에 따라 세 가지 코어 형상을 FEM 시뮬레이션을 활용하여 자속 밀도 및 자계의 크기를 비교, 분석한다.^[1]

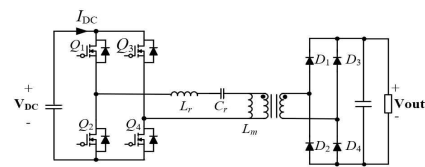


그림1 LLC 공진형 컨버터의 회로도
 Fig. 1 LLC Resonant converter circuit

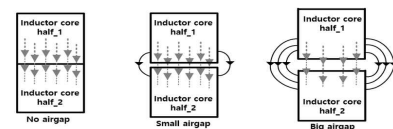


그림 2 코어의 공극에서 발생하는 프린징 효과
 Fig. 2 Fringing effect from airgap in the core

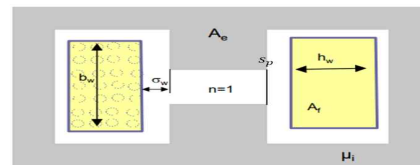


그림 3 인덕터의 단면
 Fig. 3 Cross section of Inductor

2. 인덕터의 공극 배치에 따른 프린징 효과 분석 및 FEM 시뮬레이션

2.1 인덕터의 손실인자

인덕터의 손실은 일반적으로 코어의 철손과 권선의 동손으로 구분될 수 있다. 먼저 코어의 철손은 식 (1)과 같이 표현되며 여기서 k, a 및 B 는 코어의 제조업체로부터 받는 상수이며, B 는 자속 밀도, f 는 동작 주파수를 의미한다. 보이는 바와 같이 코어의 철손은 주파수와 자속밀도에 비례하여 증가하는 것을 알 수 있다. 자속밀도의 경우 코어에 공극을 추가하여 전류 상승에 의한 자속밀도의 변화율을 저감시킬 수 있다. 이러한 이유로 인덕터 설계 시 공극은 필요하게 된다.^[2]

$$P_{core} = k_{core} f^a B_{peak}^b \quad (1)$$

인덕터의 동손은 dc 저항에 의한 손실과 ac 저항에 의한 손실로 구분되고 dc 저항은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다. 여기서 S 는 도체의 면적, l 은 길이, σ_c 은 도체의 도전율을 의미한다

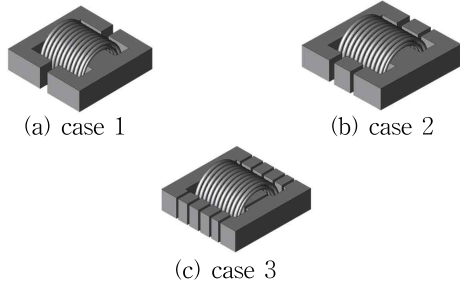


표 1 시뮬레이션 파라미터
Table. 1 Simulation parameter

Air Gap(mm)	L	N(turn)	Current(RMS)	f
5mm single	25μH	22	30	100kHz
2.5mm Distributed				
1mm Distributed				

$$R_{dc} = \frac{4l}{\sigma n \pi d^2} \quad (2)$$

ac 저항에 의한 손실은 식 (3)과 같이 표피효과에 의한 손실과 식 (4)와 같이 근접효과에 의한 손실로 구분될 수 있다. 여기서 $F(f)$ 와 $G(f)$ 는 표피 효과 및 근접효과에 대한 주파수의 함수이고 H는 외부의 최대 자계 크기를 의미한다. 표피효과 및 근접효과에 의한 손실은 모두 외부 주파수의 크기에 비례하여 증가하고 근접효과에 의한 손실은 외부 자계에 의해서도 증가하는 것을 알 수 있다.^[2]

$$P_{skin} = R_{dc} \cdot F_R(f) \cdot I^2 \quad (3)$$

$$P_{prox} = n \cdot R_{DC} \cdot G_R(f) \cdot \left(\hat{H}^2 + \frac{I^2}{2\pi^2 d} \right) \quad (4)$$

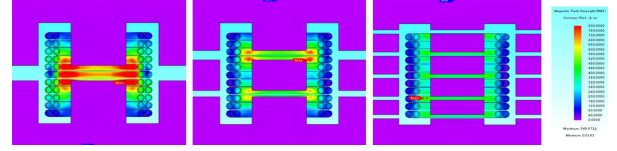
인덕터에 공극을 사용할 경우 인덕터의 ac 저항에 의한 손실은 표피 효과 및 근접 효과로 인한 손실뿐만 아니라 프링징 효과에 의한 손실이 발생한다. 식 (5)는 근접효과를 기반으로 한 프링징 손실을 보여준다. 여기서 b_w, h_w, n 은 그림 3과 같이 권선의 길이, 두께, 공극의 개수를 의미하고 k 는 식 (6)과 같이 공극의 개수 및 공극의 길이 s_p , 공극과 권선 간의 거리 σ 를 의미한다. 식 (6)과 같이 프링징에 의한 손실 P_{gap} 은 공극의 개수에 반비례하는 것을 알 수 있다. 반면 공극의 길이 s_p 가 증가하면 k 가 감소하여 P_{gap} 은 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, 권선과 공극간의 거리 σ 가 증가하면 k 가 감소하여 프링징 효과에 의한 손실 P_{gap} 이 감소하는 것을 알 수 있다.^[2]

$$\frac{P_{gap}}{P_{prox}} \approx \frac{3b_w}{2h_w n} k \quad (5)$$

$$with : k = \frac{1}{1 + \frac{2n\sigma}{s_p}} \quad (6)$$

2.2 FEM 시뮬레이션

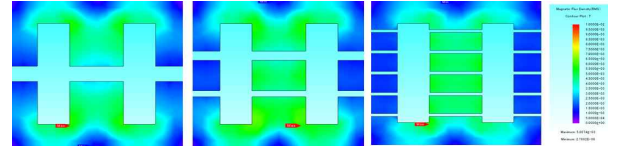
공극의 위치에 따라 변동하는 프링징 효과를 분석하기 위해 그림 4 와 같이 공극의 분포도가 다른 인덕터 세 종류를 선정하였다. 사용된 코어는 EE5049이며 코어의 형상을 제외한 파라미터는 표 1 과 같이 모두 동일한 조건에서 시뮬레이션을 진행하였다.



(a) case 1 (b) case 2 (c) case 3

그림 5 자계의 세기

fig. 5 Magnetic field strength



(d) case 1 (e) case 2 (f) case 3

그림 6 자속 밀도

fig. 6 Magnetic flux density

그림 5(a)-(c)의 결과를 통해 공극의 배치를 분산시킴에 따라 프링징효과에 의한 자계의 세기 최대값이 1225.262, 893.479, 549.073(A/m) 공극을 분포시킴으로써 작아지며 이는 공극을 분포에 따라 최대 44%의 자계의 세기 감소를 확인할 수 있다. 그림 6(d)-(f)을 통해 자속밀도의 최대값이 0.0108, 0.0091, 0.0072(T) 의 값을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 공극 분포에 의한 자속 밀도의 영향도가 변동하는 것을 확인하였다. 시뮬레이션 결과로 프링징효과에 의한 자속의 세기가 공극의 분포 구조를 통해 자속의 크기가 줄어들며 추가적인 동손 저감이 예상되고 이는 향후 실험을 통해 검증할 예정이다.

3. 결론

본 논문에서는 인덕터의 설계에 있어 코어의 포화를 방지하기 위해 추가하는 공극에서 발생하는 프링징효과가 동손에 추가적인 손실을 일으킬 수 있다는 점을 근거로 시뮬레이션을 진행하였으며 시뮬레이션 결과 공극의 분포도에 따라 동손에 영향을 미치는 자계의 세기가 감소한다는 것을 확인하였다.

이는 인덕터의 추가적인 동손을 감소시킬 수 있으며 향후 실험을 통해 검증 예정이다.

본 연구는 2024년도 한국산업기술평가관리원의 자동차산업기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.
(No. 20018829)

참고 문헌

[1] S. Mukherjee, Y. Gao and D. Maksimović, "Reduction of AC Winding Losses Due to Fringing-Field Effects in High-Frequency Inductors With Orthogonal Air Gaps," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 1, pp. 815-828, Jan. 2021

[2] C. Peng, G. Chen, J. Song and B. Wang, "Winding Loss Calculation in Gapped Inductor by Considering Relative Permeability of Core," 2023 IEEE 2nd International Power Electronics and Application Symposium (PEAS), Guangzhou, China, 2023, pp. 585-589,