

분산공극을 적용한 LLC 컨버터 변압기 설계 및 해석

김봉국, 홍이준, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Design and Analysis of an LLC Converter Transformer with Distributed Air Gap

Bonggook Kim, Ijun Hong, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

이 논문에서는 변압기 및 LLC 컨버터의 공진탱크를 설계하기 위한 절차와 실제 디자인에 고려해야 할 사항을 제시한다. 공진 탱크의 디자인 및 구성은 분산공극을 고려하여 코어의 Bmax와 코어 및 권선의 발열을 확인했다. 분산공극 코어 변압기 설계는 Ansys Maxwell 시뮬레이션 환경에서 검증되었으며, 6250W 400V LLC 컨버터에서 계산된 Bmax 값은 시뮬레이션 결과와 비교하여 검증되었다.

1. 서론

LLC 컨버터는 그림 1에서 보이듯이 다양한 응용 분야에서 사용되는 DC-DC 컨버터 토폴로지 중 하나이다. 이는 소프트 스위칭 특성과 적은 구성 요소수를 갖고 있다. 일반적으로 LLC 컨버터의 전압 이득은 변압기의 턴 비율에 의해 정격 입력 전압 조건에서 결정된다. 최근에는 LLC 컨버터 연구에서 넓은 출력 전압 범위를 대응해야 하는 중요성이 부각되고 있다. 이로 인해 자성체에서 발생하는 발열 문제를 해결하기 위해 분산 공극을 적용하여 열적 문제를 동일한 부피 내에서 해결하는 연구가 진행되고 있다.

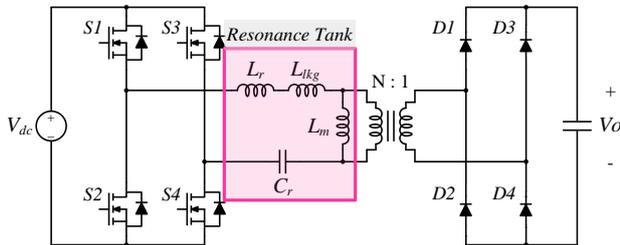


그림1 LLC 공진형 컨버터
 Fig.1 LLC Resonance Converter

2. 변압기 설계 절차

2.1 초기 변압기 설계 재정수

LLC에서 공진 요소의 설계는 소프트 스위칭을 달성하기 위해 매우 중요하다. 공진 탱크를 설계하는

가장 널리 사용되는 방법은 FHA(First Harmonic Approximation)이다. FHA 방법을 사용하여 L_m , L_r , C_r , 전압 이득(M), 그리고 스위칭 주파수 범위 값을 표현한다. 여기서 품질 계수(Q), 공진 주파수(f_o), 그리고 R_{ac} 는 AC 등가 부하 저항이다. 최대 스위칭 주파수를 제한하는 것은 정류기의 다이오드 접합 커패시턴스와 회로의 다른 기생 요소가 공진하는 주파수에서 변환기가 작동하는 것을 금지하는 접근 방식이다. 이로 인해 출력 전압이 원치 않게 증가하는 것을 제한한다. 결과적으로 최대 주파수가 공진 주파수의 2.5배로 제한되어야 한다. x는 회로 구조에 따라 값이 달라진다. 공진 주파수는 선택해야 하며, 식(1)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$N_n = \frac{V_{in(nom)}}{x \cdot V_{o(nom)}} \quad (1)$$

최소 공진인덕터는 단락 조건에서 최대 출력 전류를 제한하고 컨버터를 최대 스위칭 주파수로 제한하는 데 선택되어야 한다. 최소인덕턴스는 식(2)에 의해 주어진다.

$$L_r = \frac{N_n \cdot V_{in(nom)} \cdot V_{o(nom)}}{8 \cdot f_{sw_max} \cdot P_o} \quad (2)$$

공진인덕터의 값이 결정되면 공진커패시터 값은 (3)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$C_r = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_o)^2 \cdot L_r} \quad (3)$$

공진인덕터와 공진커패시터의 값을 결정한 후, 공진 네트워크의 특성 임피던스는 (4)로 주어진다.

$$Z_o = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} \quad (4)$$

최소 품질계수는 (5), (6)을 사용하여 계산할 수 있다.

$$Q_{min} = \frac{Z_o}{R_{ac_max}} \quad (5)$$

$$R_{ac_max} = \frac{8 \cdot N_n^2 \cdot V_{o_max}^2}{\pi^2 \cdot P_o} \quad (6)$$

여기서 Rac_max는 변압기의 최대 저항을 나타내며, 이는 변압기 설계에서 고려되는 중요한 요소이다. n은 변압기의 턴수를, Nn은 변압기의 비율을, Vo_max는 최대 출력 전압을, 그리고 Po는 출력 전력을 나타낸다. 최소 스위칭 주파수에서 필요한 최대 이득을 달성하기 위해 Lm_max는 식(7)에 의해 주어진다. 이 섹션에서는 자세한 설계 절차와 공진 탱크의 구성 요소 선택이 제공되었다.

$$L_{m(max)} = L_r \cdot \frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{\frac{f_o}{f_{s_min}} - 1}{1 - \frac{1}{M_{dc_max}}} \quad (7)$$

2.2 변압기 설계 고려사항

변압기 설계에 고려되는 중요한 권선 두께와 Bmax는 선정되어야 한다. 권선 두께는 전류 밀도와 전류 rms 값에 의해 결정된다. 전류 rms 값은 식(8), (9), (10), (11), (12), (13)에 의해 주어진다.

$$I_{Lm_peak} = \frac{N \cdot V_o}{4 \cdot f_o \cdot L_m} \quad (8)$$

$$I_{Lr_peak} = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot I_o \cdot f_o}{2 \cdot n \cdot f_s}\right)^2 + (L_m)^2} \quad (9)$$

$$I_{mosfet}(t) = \begin{cases} I_{Lr_peak} \cdot \left(\sin \frac{2\pi}{T_o} t - \theta\right), t \leq \frac{T_o}{2} \\ \frac{N_n \cdot V_o \cdot T_o}{4 \cdot L_m}, \frac{T_o}{2} \leq t \leq \frac{T_s}{2} \end{cases} \quad (10)$$

$$\theta = \text{Arcsin}\left(\frac{N_n \cdot V_o \cdot T_o}{4 \cdot L_m \cdot I_{Lm_peak}}\right) \quad (11)$$

$$I_{mosfet_rms_pri} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} (I_{mosfet}(t))^2 dt} \quad (12)$$

$$I_{mosfet_rms_sec} = \frac{\sqrt{2} \cdot \pi \cdot I_o}{4} \cdot \sqrt{\frac{f_o}{f_s}} \quad (13)$$

2.3 시뮬레이션 결과

표 1 자성체 설계 시트

Table 1 자성체 설계 시트

상태	재정수	설계	값
초기 자성체 설계	입력전압범위	$V_{in_min} \sim V_{in_max}$	700~800 [V]
	출력전압범위	$V_{o_min} \sim V_{o_max}$	150~500 [V]
	정격전력	P_o	12500 [W]
	스위칭 주파수	$f_{s_min} \sim f_{s_max}$	72~180 [kHz]
	공진주파수	f_o	94 [kHz]
공진탱크 설계	변압기 턴비	N_n	2:1
	공진인덕터	L_r	35.6 [μ H]
	공진커패시터	C_r	80 [nF]
	자화인덕턴스	L_m	140 [μ H]

그림 2는 스위칭 주파수가 단위 이득 공진주파수 아래에 있을 때, 턴온에서 공진전류를 시간함수로 나타낸다.

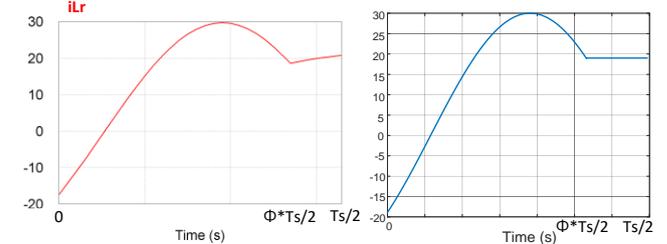


그림2 공진주파수 아래 구간에서의 공진전류 RMS 전류: (a) PSIM 결과 (b) MATLAB 결과

Fig.2 Resonant current RMS current in the region below the resonant frequency: (a) PSIM result (b) MATLAB result

3. 분산공극을 적용한 변압기

고주파 응용에서 코어에 공극을 사용하는 것은 매우 중요한데 이는 몇 가지 이유 때문이다. 첫째, 고주파에서는 신호의 변동이 빠르기 때문에 코어의 자속밀도가 급격하게 변할 수 있다. 이때 코어가 포화되지 않도록 유효 투자율을 낮추어 포화점을 조절하는 것이 필수적이다. 공극은 이 포화점을 조절하여 안정적인 작동을 가능하게 한다. 둘째, 권선을 통과하는 전류의 빠른 변화로 인해 권선과 코어에서 많은 양의 열이 발생할 수 있다. 공극은 자속의 경로를 길게 하여 자속밀도를 낮추고, 이로 인해 코어와 권선에서 발생하는 열을 줄일 수 있다. 이는 전체적인 열적 부하를 감소시키는 효과를 가지며, 장치의 수명을 연장하고 신뢰성을 높이는 데 도움이 된다. 셋째, 공극을 삽입함으로써 코어에 가해지는 기계적 스트레스가 줄어들 수 있다. 고주파 운영 중에는 진동과 같은 기계적 효과가 코어와 권선에 더 큰 영향을 미칠 수 있는데, 공극을 통해 이러한 스트레스를 효과적으로 분산시킬 수 있다. 그러나 공극을 넣으면 자속의 경로가 일부 변하게 된다. 이때 자속이 공극 주변의 코어 부분을 우회하여 다른 경로를 통과하는 경우가 생기는데 이를 '프린징 효과' 라고 한다. 프린징 효과는 공극을 통과하는 자속이 주변의 코어로 퍼지면서 누설 자속을

생성하고, 이는 공극을 통과하는 전체 자속의 양에 영향을 미친다. 이런 변화는 권선에 추가적인 전류가 흐를 수 있게 하여 권선 손실을 증가시킬 수 있다. 이로 인해 열 관리 및 설계가 더욱 중요해진다.

$$R_{eq} = R_g + \frac{1}{2}(R_{C1} + R_{C2} + R_{C3} + R_{C4}) \quad (14)$$

$$\phi = \frac{NI}{R_{eq}} \quad (15)$$

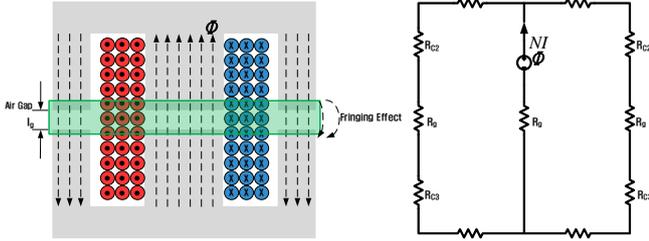


그림3 변압기 공극에서의 프링징효과와 변압기 등가회로
Fig.3 The Fringing Effect in Transformer Air Gap and Equivalent Circuit of Transformer

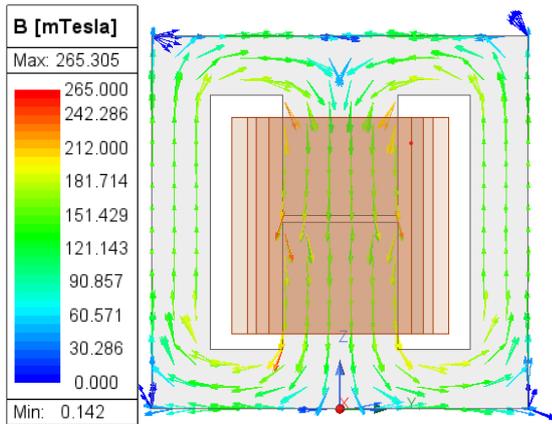


그림4 변압기 공극이 한 개 일 때 Bmax 분포도
Fig.4 Bmax distribution when there is one air gap in a transformer.

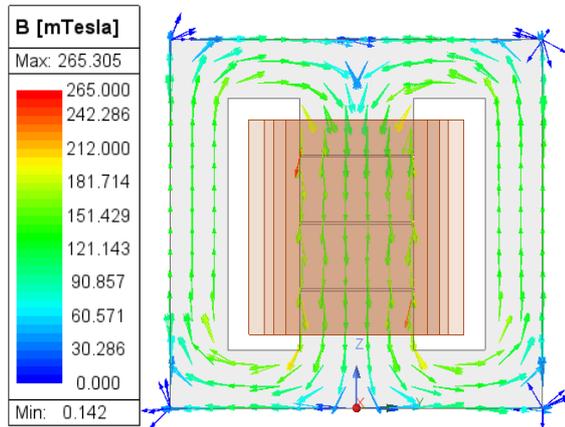


그림5 변압기 공극이 세개 일 때 Bmax 분포도
Fig.5 The Fringing Effect in Transformer Air Gap and Equivalent Circuit of Transformer

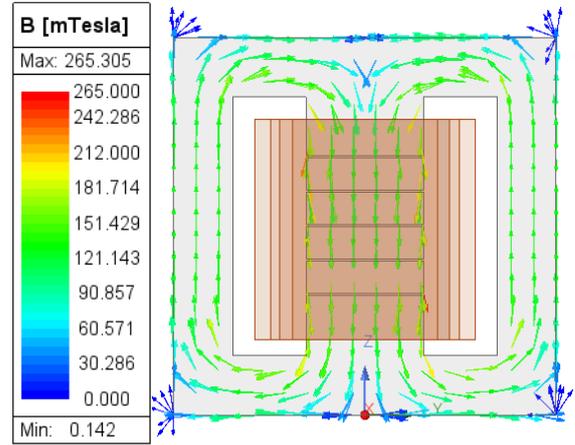


그림6 변압기 공극이 다섯개 일 때 Bmax 분포도
Fig.6 The Fringing Effect in Transformer Air Gap and Equivalent Circuit of Transformer

분산공극을 적용했을 때 누설 자속 손실은 동일한 공극의 수가 증가함에 따라 B²에 비례하여 감소한다.

4. 결론

LLC 컨버터의 공진 탱크 설계 공식을 사용하여 변압기 설계를 유도하였다. 공식으로 유도된 공진 전류 파형과 시뮬레이션 파형이 일치함을 확인했다. ANSYS MAXWELL 프로그램을 사용하여 변압기 모델링을 수행하고, 일반적인 변압기와 분산 공극을 적용하였을 때 분산공극 변압기의 공극 부근의 Bmax가 약 20% 저감되는 것을 확인했습니다. 분산 공극을 도입하는 것이 실제 시스템에서 열 관리에 효과적으로 작용하는 것으로 보인다. 그러나 4개 이상의 분산 공극을 적용하면 효과가 미비해지며 제작 및 단가 문제가 발생할 수 있다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원(20212020800020, 통합형 최적설계 플랫폼 기반 초고효율 전력변환시스템 개발)과 2023년도 산업통상자원부의 재원과 한국산업기술기평평가원의 지원을 받아 실시되었습니다. [RS-2023-00252883, 하이브리드 추진선박 10MW급 직류배전 기술 개발]

참고 문헌

[1] F. Musavi, M. Craciun, D. S. Gautam, W. Eberle and W. G. Dunford, "An LLC Resonant DC-DC Converter for Wide Output Voltage Range Battery Charging Applications," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 28, no. 12, pp. 5437-5445, Dec. 2013

[2] A. Lordoglu, M. O. Gulbahce, D. A. Kocabas and S. Dusmez, "A New Optimization Method for Gapped and Distributed Core Magnetics in LLC Converter," in IEEE Access, vol. 11, pp. 14061-14072, 2023