

LLC 공진형 컨버터의 동작 영역 별 손실 분석

이민지, 장푸름, 양형규, 황대연, 노용수, 박준성
한국전자기술연구원 전력제어시스템 연구센터

Loss Analysis of LLC Resonant Converter According to Operating Area

Minji Lee, Pooreum Jang, Hyoung-Kyu Yang, Dae Yeon Hwang, Young-Su Noh, Joon Sung Park
Power System Research Center, Korea Electronics Technology Institute (KETI)

ABSTRACT

LLC 공진형 컨버터는 고효율 및 고전력밀도가 요구되는 다양한 어플리케이션에 널리 적용되고 있다. 특히, 전기차 충전기는 넓은 출력 전압 범위를 가지므로, 최적 설계를 위해서는 각 동작 영역에 따른 전압/전류의 예측과 이를 이용한 손실 분석이 필요하다. 본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 손실을 분석하고 이를 15kW급 시제품 시험을 통해 검증한다.

1. 서론

2023년 국내 누적 전기차 등록 대수가 54만 대에 달하고 있고, 이에 따라 전기차 충전기 대수도 30만 대를 넘어서는 등 전기차 충전기 시장도 빠르게 성장하고 있다.^[1] 현재 급속충전기 토폴로지로는 LLC 공진형 컨버터 및 위상 천이 컨버터가 주로 적용되고 있으며, 고전력밀도 설계를 위해서 각 소자의 손실 예측이 필요하다.

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 열 해석을 위해 입/출력 전류 및 스위칭 전류 등 주요 파라미터 값을 예측하고 이를 통해 전력 반도체 스위치 및 수동 소자의 전력 손실 분석을 수행한다. 이를 검증하기 위해 15kW급 시제품 시험을 통해 계산값 및 실험값을 비교 및 분석한다.

2. LLC 공진형 컨버터 손실 분석

2.1 LLC 공진형 컨버터 설계

LLC 공진형 컨버터는 공진 주파수를 기준으로 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 작으면 출력 전압 승압이 가능한 Below 영역과 스위칭 주파수가 공진 주파수보다 크고 출력 전압 강압이 가능한 Above 영역으로 나뉜다. Below 영역에서는 변압기의 자화 인덕턴스가 공진에 참여할 수 있다. 또한, 모든 주파수

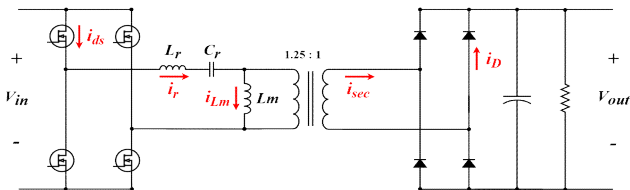
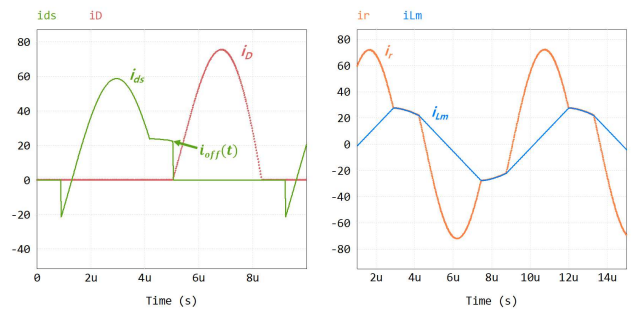


그림 1 LLC 공진형 컨버터 회로도
Fig. 1 Schematic of LLC resonant converter



(a) 스위치 전류 및 다이오드 전류 (b) 공진 전류 및 자화 전류

그림 2 손실 분석을 위한 주요 전류 파형

Fig. 2 Key current waveform for loss analysis

영역에서 Zero voltage switching 동작으로 스위칭 손실이 적고 고주파 스위칭이 가능하다는 장점이 있다.^[2]

LLC 공진형 컨버터에서는 1차 측 스위치, 공진 인덕터 및 커패시터, 변압기 및 2차 측 정류 다이오드에서 주요 전력 손실이 발생한다. 손실 분석을 위해서는 1차 측 공진 전류(i_r), 스위치 턴 오프 전류(i_{off}), 자화 전류(i_{lm}), 2차측 전류(i_{sec}) 및 출력전류(i_o)가 필요하다.

2.2 소자별 손실 분석

2.2.1 전력 반도체 손실

전력 반도체에서 발생하는 손실은 크게 도통 손실과 스위칭 손실로 나뉜다. 도통 손실은 소자가 켜졌을 때, 소자의 저항 성분으로 인해 발생하는 손실이며, 스위칭 손실은 스위칭 과정에서 일어나는 손실이다. 다이오드의 도통 손실($P_{D,cond}$)과 역회복 손실로 인한 스위칭 손실($P_{D,sw}$)은 식(1), (2)와 같이 나타낸다.

$$P_{D,cond} = i_F V_F \quad (1)$$

$$P_{D,sw} = 0.5 Q_c V_{out} f_{sw} \quad (2)$$

여기서 V_F 는 다이오드의 순방향 전압강하, i_F 는 다이오드의 도통 전류, f_{sw} 는 스위칭 주파수, Q_c 는 다이오드의 전하량이다.

스위치에서 발생하는 총 손실은 도통 손실($P_{FET,cond}$), 스위칭 손실($P_{FET,sw}$)과 게이트 구동손실(P_{gate})을 고려하여 계산한다. 스위칭 손실 중 턴 온 손실은 무시할 수 있어 턴 오프 손실만 고려해 식(4)와 같이 계산할 수 있다. 이때 턴 오프 시간(t_{off})은 스위치의 Datasheet를 참고하였다.

$$P_{FET.sw} = 0.5 V_{in} i_{off} t_{off} f_{sw} \quad (4)$$

$$P_{FET.cond} = i_r^2 R_{ds(ON)} \quad (5)$$

$$P_{gate} = Q_g V_g f_{sw} \quad (6)$$

이때, Q_g 는 게이트 전하량, V_g 는 게이트 구동 전압이며 $R_{ds(ON)}$ 은 스위치 도통 저항이다.

2.2.2 자성체 및 커패시터 손실

변압기와 인덕터에서는 코어에서 발생하는 손실인 철손과 권선에서 발생하는 동손이 발생한다. 각 동손은 식(8) 및 (9)와 같이 나타낸다. 자성체의 저항값은 각 코어의 Mean length turn과 사용한 권선의 단면적을 사용하여 계산하였다. 철손은 코어 재질 및 부피에 영향을 받으며 단위부피당 손실 P_{cu} 는 코어의 Datasheet를 참고했다. 커패시터의 손실은 식(11)과 같이 커패시터의 등가 직렬 저항(ESR)을 통해 나타낸다.

$$P_{trans.copper} = i_r^2 R_{cu1} + i_{sec}^2 R_{cu2} \quad (8)$$

$$P_{inductor.copper} = i_r^2 R_{cu} \quad (9)$$

$$P_{cu} = k f_{sw}^\beta B_m^\alpha \quad (10)$$

$$P_{cap} = i_r^2 ESR \quad (11)$$

여기서 R_{cu1} , R_{cu2} 는 변압기 1, 2차 측 권선의 직렬 저항, R_{cu} 는 인덕터 권선의 직렬 저항, B_m 은 최대 자속밀도이며 k 는 코어의 재질 및 크기에 따라 달라지는 계수이다.

3. 실험 결과

LLC 공진형 컨버터의 손실 분석을 검증하기 위해 15kW급 시작품을 제작하고 실험을 진행하였다. 본 논문에서 손실 분석을 진행한 LLC 컨버터의 주요 사양은 표 1과 같다. Below 및 Above 동작 영역을 포함한 손실 분석을 위해 그림 3과 같이 Case A - C로 나누어 부하별로 손실을 계산하였다.

표 1 LLC 공진형 컨버터 주요 설계 파라미터 값
Table 1 Design parameter value of LLC resonant converter

Parameters	Design value	Unit
L_r	14	μH
C_r	104	nF
L_m	57.4	μH
공진 인덕터	PQ4040 / 0.12x400 18T	-
변압기	PQ5050 / 0.06x900 10T / 0.06x1200 16T	-

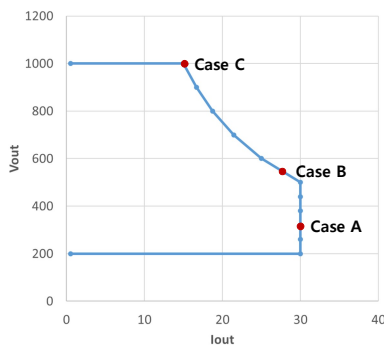


그림 3 LLC 공진형 컨버터 동작 조건
Fig. 3 Operating conditions of LLC resonant converter

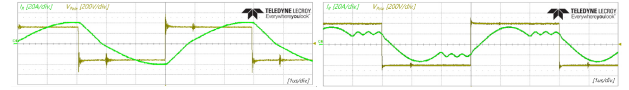


그림 4 주요 실험 파형
Fig. 4 Key experiment waveform

표 2 손실 분석을 위한 주요 파라미터 값

Table 2 Key parameter value for loss analysis

Parameters	Case A		Case C		Unit
	분석	실험 결과	분석	실험 결과	
I_r	26.79	27.50	24.07	22.50	A_{rms}
I_{cr}	33.77	40.00	22.39	20.00	A
I_D	15.00	15.00	7.50	7.50	A
f_{sw}	168.2	170.1	74.4	83.2	kHz

표 3 LLC 공진형 컨버터 손실 분석 결과

Table 3 Loss analysis result of LLC resonant converter

시험조건 / 부하	20%	40%	60%	80%	100%	
Case A (300V/30A)	계산효율[%]	94.47	95.35	95.49	95.39	95.17
	측정효율[%]	-	-	93.95	93.44	92.46
	차이	-	-	1.54	1.95	2.71
Case B (550V/27.27A)	계산효율[%]	97.26	97.82	97.86	97.78	97.65
	측정효율[%]	97.30	97.73	97.56	97.18	96.33
	차이	-0.04	0.09	0.29	0.60	1.31
Case C (1000V/15A)	계산효율[%]	95.20	97.17	97.80	98.08	98.21
	측정효율[%]	91.76	95.72	96.83	97.46	97.72
	차이	3.43	1.44	0.96	0.72	0.70

Case A와 C의 100% 부하 경우에서 실험 결과는 표 2와 같고, 실험 파형은 그림 4와 같다. Case A에서는 above 영역에서 동작하며 스위칭 주파수는 예상 주파수와 실제 주파수가 유사하게 나타난다. 두 경우 모두 전류 파라미터에서 2~20% 오차를 가진다. 표 3은 모든 시험 조건에서 손실 분석 결과를 나타내는데, Case A는 최대 2.71%, Case B는 최대 1.31%, Case C는 최대 3.43%의 오차가 발생했다. 구형파의 기본파 성분만 고려해 손실 분석을 진행했기 때문에 공진 주파수 근처에서 동작하는 Case B의 경우에 오차가 가장 적은 것을 알 수 있다. 절대 손실이 가장 큰 100% 부하에서는 Case C의 경우일 때 0.70%로 가장 작은 오차를 보였다. 또한, 계산 효율은 측정 효율과 유사하게 추종함을 확인 할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 최적 설계를 위해 각 소자별 손실 분석 후 15kW급 시작품 시험을 진행하였다. 설계의 타당성 검증을 위해 시작품을 제작하여 계산 효율과 실제 측정된 효율이 유사하게 추종함을 확인하였다.

이 논문은 2021년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술연구원 지원을 받아 수행된 연구임(20212020800020, 통합형최적설계 플랫폼 기반 초고효율전력변환시스템 개발)

참고 문헌

- [1] 환경부, “무공해차 보급 및 충전인프라 구축 현황,” 2024.
- [2] Q. Cao, Z. Li, and H. Wang, “Wide voltage gain range LLC DC/DC topologies: State-of-the-art,” in 2018 International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018-ECCE Asia), pp. 100 - 107, 2018.