

Integrated Magnetics를 적용한 고 전력밀도 LLC 공진형 컨버터

박철완, 지상근*, 류동균*, 최홍균*, 한상규†
국민대학교 PEOSLA, (주)솔루엠*

High Power Density LLC Resonant Converter using Integrated Magnetics

Chul Wan Park, Sang Keun Ji*, Dong Kyun Ryu*, Heung Gyoon Choi*, Sang Kyoo Han†
Power Electronic Laboratory, Kookmin University, SoluM Inc.*

ABSTRACT

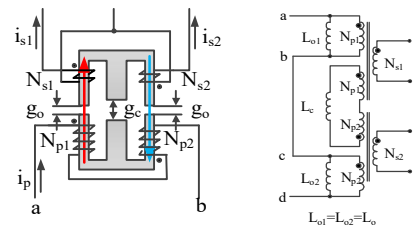
본 논문은 LLC 공진형 컨버터의 고전력밀도를 위한 IM(Integrated Magnetics)을 제안한다. 일반적으로 컨버터의 전력밀도는 사용되는 변압기, 인덕터와 같은 자기소자에 의해 결정되므로, 평판형 자기소자(Planar Magnetics)는 고 전력밀도화에 매우 적합하다. 하지만 LLC 공진형 컨버터에 평판형 자기소자를 적용할 경우 높은 자기 결합도에 의해 공진을 위한 충분한 누설 인덕턴스를 얻을 수 없다. 따라서 공진동작을 위한 추가적인 인덕터의 사용이 필수적이며, 전력밀도는 감소하게 된다. 반면, 제안방식은 자기소자 내부에 형성되는 두 개의 자화 인덕터를 공진 인덕터로 사용하기 때문에 공진동작에 필요한 누설 인덕터가 필요하지 않다. 또한, 이러한 두 개의 자화 인덕터는 하나의 자기소자에 집적화 할 수 있으므로 고 전력밀도에 유리한 구조를 갖는다. 더불어, 공진동작에 필요한 모든 파라미터가 설계자의 의도대로 설계가능하기 때문에 컨버터 최적설계가 매우 유리하다. 제안방식의 타당성을 확인하기 위하여 자기소자 모델을 통한 효율분석 및 350W 800kHz 시작품에 대한 실험결과를 제시한다.

1. 서론

최근 전자제품은 기능 및 디자인요소가 제품기술을 주도함에 따라 그 효과를 극대화하기 위하여 고 전력밀도를 갖는 전원회로에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서 전원회로에서 가장 많은 부피를 차지하는 자기소자의 부피절감이 필수적이다.^{[1],[2]} 최근 고주파수 구동을 통한 리액티브 소자 소형화와 더불어 PCB 패턴을 이용한 평판형 자기소자 적용을 통한 고 전력밀도 전원회로가 대두되고 있다. 하지만 LLC 공진형 컨버터의 경우 평판형 자기소자의 높은 결합계수로 인해 공진동작에 필요한 충분한 누설인덕턴스를 얻을 수 없어 별도의 자기소자가 추가되어야 하는 한계점을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 추가적인 자기소자 사용 없이 하나의 자기소자만으로 공진동작이 가능한 IM(Integrated Magnetics)을 제안한다. 제안방식은 두 개의 자화 인덕턴스를 공진 인덕터로 사용하여 누설 인덕턴스가 필요하지 않으며, 모두 하나의 자기코어에 집적화 할 수 있으므로 고 전력밀도화가 가능하다. 또한, 모든 공진파라미터가 설계 가능하여 최적설계에 매우 유리하다.

2. Integrated Magnetics 권선구조

그림 1은 제안 IM의 권선구조와 전기적 등가모델을 보이고 있다. 본 제안방식의 경우 그림 1(a)와 같이 1차측 권선 2개 (N_{p1} , N_{p2})와 2차측 권선 2개 (N_{s1} , N_{s2})로 구성되어 있으며, 각각 1개씩 1개조를 이루어 자기코어의 외측에 감겨진다. 또한 1차측 권선 N_{p1} 과 N_{p2} 는 서로 연결되어 LLC 공진형 컨버터의 1차측을 형성하게 되며, 여기서 N_{p1} 과 N_{p2} 는 N_p 로 N_{s1} 과 N_{s2} 는 N_s 로 동일하다. 제안된 IM의 회로 동작을 고려하기 위한 전기적



(a) IM 권선구조 (b) 등가 인덕턴스 모델
그림 1 제안 Integrated Magnetics의 등가 인덕턴스 모델
Fig. 1 Equivalent model of proposed Integrated Magnetics

등가모델은 그림 1(b)와 같다.^[3] 평면변압기의 높은 자기 결합도에 의하여 발생하는 누설인덕턴스가 무시할 만큼 작다고 가정할 때 인덕턴스 모델에서 나타나는 각 인덕턴스는 다음과 같이 결정된다.

$$L_{o1} = L_{o2} = L_o = \mu \frac{A_o N_p^2}{g_o} \quad (1)$$

$$L_c = \mu \frac{A_c N_p^2}{g_c} \quad (2)$$

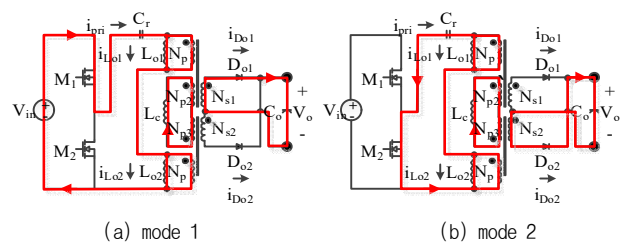
여기서, A_c 와 A_o 는 각각 자기코어 외측의 단면적을 나타내며 g_o 와 g_c 는 중측과 외측의 공극, μ 는 공기의 투자율을 나타낸다.

2.1 모드 별 동작

제안 방식을 적용한 LLC 공진형 컨버터의 동작은 그림 2와 같으며 등가회로 및 주요동작파형은 그림 3에 나타내었다. 모드 1에서는 M1스위치가 턴온되며, 트랜스포머 dot에 전압이 인가되고 N_{s1} 을 통해 출력으로 전력전달이 이루어진다. 따라서, L_{o1} 은 자화 인덕터(L_p)역할을 하며, 동시에 L_{o2} 와 L_c 은 병렬로써 공진 인덕터(L_s)역할을 수행한다. 반대로, 모드 2는 M2스위치가 턴온되며, 모드 1과 반대로 동작한다. 따라서, non dot에 전압이 인가되고 L_{o2} 는 자화인덕터 L_{o1} 은 L_c 와 함께 공진인덕터 역할을 수행한다. 따라서 공진파라미터는 다음과 같다.

$$L_p = L_o \quad (3)$$

$$L_s = L_o // L_c = \frac{L_o \times L_c}{L_o + L_c} \quad (4)$$



(a) mode 1 (b) mode 2
그림 2 제안 IM이 적용된 LLC 공진형 컨버터의 모드별 주요 동작
Fig. 2 Mode Operations of LLC Resonant converter using proposed IM

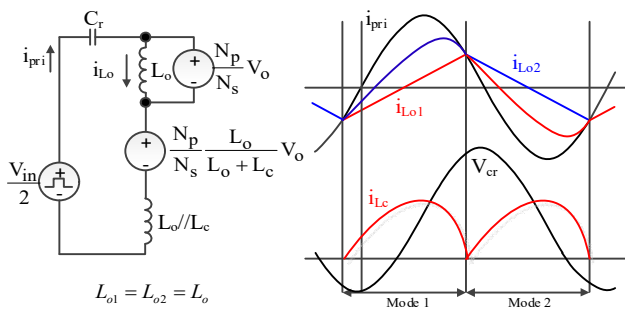


그림 3 모드1 등가회로 및 주요 동작파형
Fig. 3 Equivalent Circuit of Mode1 and key-waveforms

2.2 효율분석 및 스위칭 주파수 선정

그림 4는 스위칭 주파수에 따른 이론적인 효율분석 그래프를 나타내었으며, $L_n(L_n=L_p/L_s)$ 의 변화에 따른 효율을 비교하였다. 제안방식의 경우 낮은 L_n 값을 가질수록 더욱 높은 효율을 가지며 가장 높은 효율을 갖는 800kHz~900kHz대역을 스위칭 주파수로 선정하였다. 이론적 분석을 통해 스위칭 주파수 800kHz에서 최고효율 96.04%를 갖는 공진탱크 파라미터 $L_p=19\mu\text{H}$, $L_s=8.9\mu\text{H}$, $C_r=6.6\text{nF}$, $N_{p1}:N_{p2}:N_{s1}:N_{s2}=3:3:1:1$ 를 선정하였다.

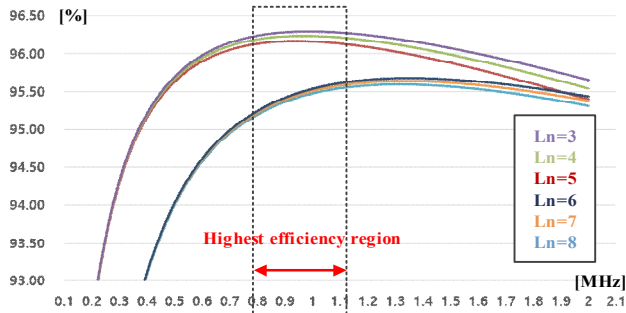
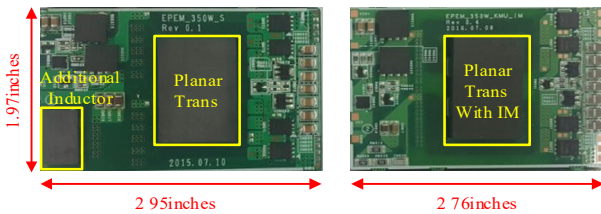


그림 4 L_n 에 따른 이론적 효율분석 그래프
Fig. 4 Theoretical Efficiency Comparison according to $L_n(L_n=L_p/L_s)$

3. 제안회로 실험 결과

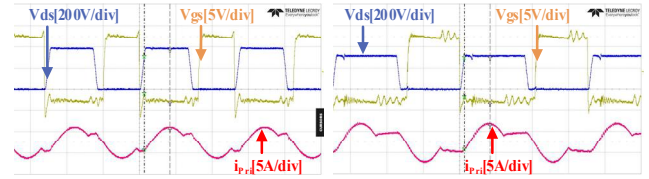
제안 IM을 적용한 LLC 공진형 컨버터의 이론적 분석 결과의 타당성을 검증하기 위한 시작품은 그림 5와 같다.



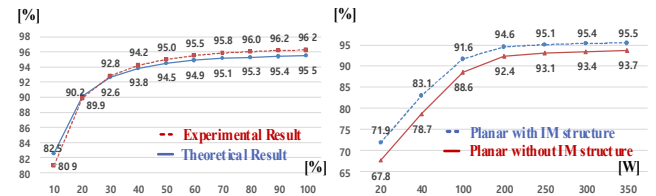
(a) 추가 인덕터 사용 (b) 제안방식 적용
그림 5 제안 IM방식이 적용된 350W급 LLC 공진형 컨버터 Prototype
Fig. 5 350W prototype of proposed IM LLC resonant converter

$P_o = 350\text{W}$ $V_{in} = 390\text{V}\sim 320\text{V}$ $V_{out} = 19.5\text{V}$ $L_o/L_s = 18\mu\text{H}/8.9\mu\text{H}$

평면변압기의 높은 자기결합도에 의해 별도의 자기소자를 사용하는 종래방식에 비해 제안방식은 추가적인 인덕터 사용 없이 평면변압기 한 개만으로 LLC 공진형 컨버터 동작이 가능하며, 전력밀도는 122W/inch³에서 131W/inch³로 증가하였다.



(a) $V_{in}=390$, $f_{sw}=794\text{kHz}$ (b) $V_{in}=320$, $f_{sw}=567\text{kHz}$
그림 6 제안방식을 적용한 LLC 공진형 컨버터 주요파형 ($P_o=350\text{W}$)
Fig. 6 Key waveforms of proposed IM LLC Resonant Converter ($P_o=350\text{W}$)



(a) 이론분석과 실험결과 (b) 제안방식과 기존방식
그림 7 제안방식을 적용한 LLC 공진형 컨버터 효율비교
Fig. 7 Efficiency Comparisons of proposed IM LLC Resonant Converter

그림 6은 최대출력 350W에서 입력전압 변화에 따른 주요 동작파형을 나타내었으며, 스위칭 주파수는 794kHz에서 로 변화하고, 출력부하 변동에 따른 주파수 변동 폭은 794kHz에서 769kHz로 매우 작다.

그림 7은 제안방식을 적용한 LLC 공진형 컨버터의 출력부하에 따른 효율을 나타내었다. 제안방식의 경우 최대출력 350W에서 95.53%의 효율을 가지며, 이론적 분석과 전 출력부하 범위에서 1%의 오차로 앞선 이론적 분석이 타당함을 확인할 수 있다. 또한, 추가적인 소자사용을 줄임으로써 종래방식보다 전 부하영역에서 더 높은 효율을 갖는다. 따라서 제안방식은 고 효율 및 고 전력밀도 구현에 매우 적합하다.

4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 컨버터의 고 전력밀도를 위한 평면변압기의 적용방안으로 IM LLC 공진형 컨버터를 제안하였다. 제안방식은 2개의 자화인덕터를 공진인덕터로 사용함으로써 누설인덕터 없이 하나의 자성체만으로 동작이 가능하다. 따라서 추가적인 소자사용 없이 390V입력 350W출력에서 95.53%의 높은 효율을 가질 수 있으며 이론적 분석 및 실험을 통하여 이를 증명하였다. 따라서 본 제안방식은 고 효율 및 고 전력밀도화에 매우 적합하다.

본 논문은 SoluM Inc.의 Module Power 개발사업과 2017년 국민대학교 교내 연구비 지원에 의하여 연구되었음을 밝힙니다.

참고 문헌

- [1] Bing Lu, Wenduo Liu, Yan Liang, Fred C.Lee, Jacobus D. van Wyk, "Optimal Design Methodology for LLC Resonant Converter" in IEEE-APEC 2006, pp. 533-538
- [2] B.Yang, F.C. Lee, A.J. Zhang, G. Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion," in IEEE-APEC 2002, pp. 1108-1112
- [3] Valdivia, V., et al. "Improving the design of integrated magnetics for power electronics systems." Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008. IEEE. IEEE, 2008.