Integrated Magnetics를 적용한 고속 스위칭 및 고전력밀도 3 레벨 LLC 공진형 컨버터

남경훈, 박철완, 배지훈, 지상근*, 류동균*, 최흥균*, 한상규†
국민대학교 POESLA, ㈜솔루엠*

High Switching Frequency and High Power Density Three-Level LLC Resonant Converter using Integrated Magnetics

Kyung Hoon Nam, Chul Wan Park, Ji Hun Bae, Sang Keun Ji*, Dong Kyun Ryu*, Heung Gyoon Choi*, Sang Kyoo Han†
Power Electronics System Laboratory, Kookmin Univ., SoluM Inc.*

ABSTRACT

본 논문은 Integrated Magnetics(IM)을 적용한 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 제안된 3 레벨 LLC 공진형 컨버터는 스위치 내압이 입력전압의 절반으로 보장되므로 스위칭 손실을 대폭 저감할 수 있어 고주파수 구동에 유리하다. 이에 따라 제안 회로는 리액티브 소자 저감에 유리하나, 회로 동작 상 2개의 공진 인덕터와 1개의 트랜스포머가 요구되는 단점이 있다. 이를 위해 본 논문에서는 자화 인덕터로 공진 인덕터를 대체하는 동시에 모든 자기 소자를 하나로 통합할 수 있는 새로운 IM을 제안하고 그 타당성 검증을 위해 인덕턴스 모델을 통한 이론적 분석과 350W 800kHz급 시작품 제작을 통한 실험결과를 제시한다.

1. 서론

최근 전자기기는 부하전력 증가 및 소형화 추세에 따라 고전력밀도 전원장치에 대한 요구가 급증하고 있으며 이를 위해 회로 내에서 가장 큰 부피를 차지하는 리액티브 소자의 크기 축소가 필수적이다. 상기 리액티브 소자는 스위칭 주파수를 높임으로써 변압기나 인덕터의 사이즈를 대폭 축소할 수 있으나 매 스위칭 시 발생하는 스위칭 손실로 인해 스위칭 주파수 상향에 한계가 존재하므로 최근에는 영전압 스위칭이 가능한 LLC 공진형 컨버터가 널리 사용되고 있다. 그러나 LLC 공진형 컨버터 역시 수백kHz~수MHz에 이르는 높은 주파수로 동작할 경우 스위치의 높은 내압으로 인해 턴 오프 손실이 과도해지는 단점이 존재한다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 그림 1과 같이 스위치 전압스트레스를 입력전압의 절반으로 보장함으로써 스위칭 손실을 저감하며, 고속스위칭에 용이한 3 레벨 LLC 공진형 컨버터를 제안한다. 이와 동시에 자기소자 사이즈 저감에 유리한 평판형 변압기(Planar transformer)를 적용한다. 그러나 높은 자기결합계수를 갖는 평판형 변압기의 특성상 공진동작에 관여하는 누설 인덕턴스 확보가 어려우므로 그림 1과 같이 1개의 변압기를 비롯하여 2개의 외부 공진 인덕터가 요구된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 자화 인덕터로 공진 인덕터를 대체하는 동시에 모든 자기 소자를 하나로 통합할 수 있는 새로운 IM을 제안하고 이를 적용한 3 레벨 LLC 공진형 컨버터[1]에 대해 그 타당성을 검증한다.

2. 제안 Integrated Magnetics 적용 3-레벨 LLC 공진형 컨버터

2.1 제안 3-레벨 LLC 공진형 컨버터 동작 원리

기존 3 레벨 공진형 컨버터는 4개의 적층한 스위치의 전압 불균형을 해결하기 위해 전력 반도체 및 추가적인 디지털 제어 회로의 추가가 불가피하였다.[2] 반면 본 논문에서 제안하는 3 레벨 LLC 공진형 컨버터의 경우, 커패시터 1개만을 이용하여 전압 평형을 보장할 수 있다. 제안 회로는 그림 1과 같다. C_{r1}~C_{r4}는 공진 커패시터, C_B는 전압 평형을 위한 커패시터이며, 각각에 인가되는 전압을 V_{Cr1}~V_{Cr4}, V_{CB}라 하면, 스위치 M_1, M_3가 on 될 경우, KVL에 의해 path A를 따라 $V_{CB} = V_{Cr1}+V_{Cr2}$를 만족하게 된다. 마찬가지로 스위치 M_2, M_4가 on될 경우, path B를 따라 $V_{CB} = V_{Cr3}+V_{Cr4}$를 만족하

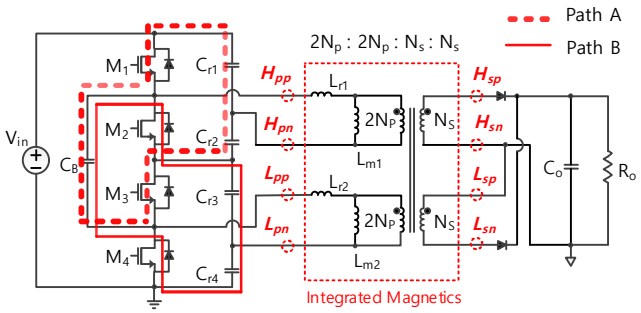


그림 1 제안 3-레벨 LLC 공진형 컨버터
Fig. 1 Proposed 3-Level LLC resonant converter

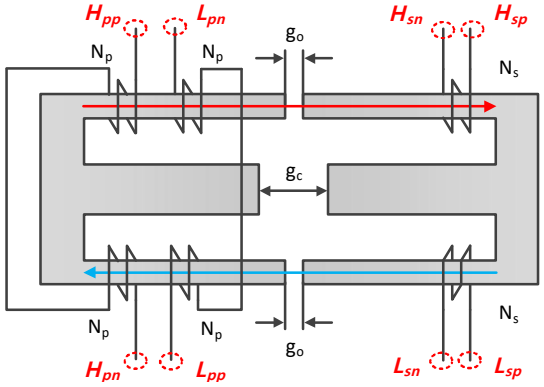
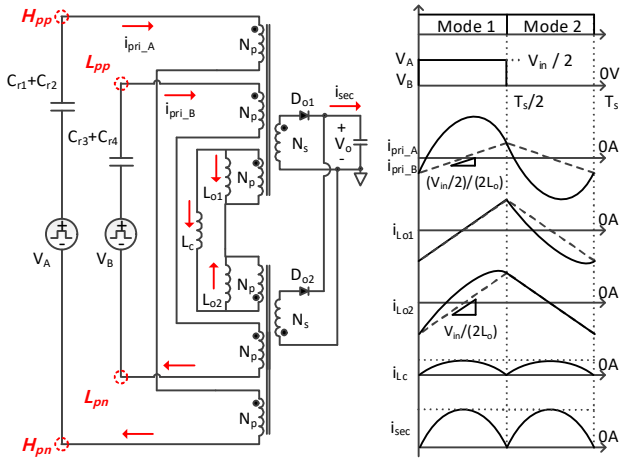


그림 2 제안 Integrated Magnetics 권선구조
Fig. 2 Proposed Integrated Magnetics winding structure

게 된다. 제안 회로가 정상상태라면 H_{pp} H_{pn}, L_{pp} L_{pn}에는 스위칭 동작에 따라 입력전압의 절반이 각각 인가되며 LLC 공진형 컨버터 2개를 적층한 구조가 된다. 그러므로 회로 동작에 있어 각각의 스위치 내압은 기존 LLC 공진형 컨버터와 비교하면 절반으로 줄어 들 수 있다. 결과적으로 스위칭 손실 저감에 따른 고속 스위칭 및 고효율을 성취 할 수 있다.

2.2 제안 Integrated Magnetics 권선 구조

기존 LLC 공진형 컨버터는 공진 동작을 위한 누설 인덕턴스 확보가 필수적이다. 또한 소형화를 위한 평판형 변압기를 적용하면 그 특성상 외부 인덕터가 필요하다. 뿐만 아니라 제안 3 레벨 LLC 공진형 컨버터의 구조상 공진 인덕터 2개, 변압기 1개가 요구된다. 반면에 본 논문에서는 상기 자기 소자를 하나로 통합할 수 있는 IM을 제안한다. 그림 2는 제안 IM의 권선 구조를 나타내고 있다. 이 권선 구조를 그림 1에 적용하면 그림 2의 H_{pp} H_{pn}, L_{pp} L_{pn}은 1차 측에 연결되며, H_{sp} H_{sn}, L_{sp} L_{sn}은 2차 측에 각각 연결된다.
그림 3 (a)는 3 레벨 LLC 공진형 컨버터 스위치 동작에 따라 제안 IM을 인덕턴스 모델로 변환하여 연결한 그림이다. 이 때, H_{pp}



(a) 제안IM의 인덕턴스 모델 (b) 주요 동작파형

그림 3 제안 IM 인덕턴스 모델 및 주요 동작파형

Fig. 3 Inductance model for proposed IM and Operational key waveforms

H_{pn}, L_{pp} L_{pn}의 양단에 인가되는 전압을 V_A, V_B라 하고, 양 외족의 인덕턴스 L_{o1}, L_{o2}, 중족의 인덕턴스 L_c에 흐르는 전류를 각각 i_{Lo1}, i_{Lo2}, i_{Lc}로 표현하고 이를 그림 3 (b)에 도시하였다.

M_1과 M_3가 on 되면 Mode 1이 시작되며, 1차 측 V_A와 V_B에는 $V_{in}/2$의 전압이 인가되고 i_{pri_A}, i_{pri_B}는 동일한 전류가 흐른다. 이 때 Dot 방향으로 전류가 흐르게 되어 2차 측 D_{o1}이 도통된다. 이에 따라 nV_o가 L_{o1}에 인가되어 자화 인덕턴스로 동작하며, 공진 전류는 L_c와 L_{o2}에 나뉘어 흐른다. 반면 Mode 2는 M_2와 M_4가 on 될 때 시작되며, IM 1차 측 V_A, V_B에 0V의 전압이 인가되어 L_{o2}가 자화 인덕터로. L_{o1}, L_c가 공진 인덕터로 동작하게 된다. 나머지 동작은 앞선 설명에 반대로 동작한다. 결과적으로 제안 IM은 Mode 1과 Mode 2에 따라 양 외족의 인덕턴스를 LLC 공진형 컨버터의 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스로 번갈아 사용함으로써 하나의 자성체로 제안 3 레벨 LLC 공진형 컨버터의 동일한 회로 동작을 할 수 있다.

2.3 제안 Integrated Magnetics 설계 파라미터

앞서 2.2에서 기술한 바와 같이 제안 IM은 공진 인덕터와 자화 인덕터의 역할을 번갈아 가며 수행하기 때문에 중족과 외족의 공극을 조절함으로써 자화 인덕턴스와 공진 인덕턴스의 최적 설계가 가능하다. 따라서 설계를 위한 외족의 인덕턴스 L_o, 중족의 인덕턴스 L_c, 공진 인덕턴스 L_r, 자화 인덕턴스 L_m, 권선 비 $n(N_p/N_s)$을 도출하면 다음과 같다. 이 때, 외족에 의한 인덕턴스 L_{o1}, L_{o2}는 L_o로 같은 값을 가지며, 외족의 공극과 단면적을 g_o, A_o, 중족의 공극과 단면적을 g_c, A_c라고 정의하고 자성체의 투자율 μ_c는 공기의 투자율 μ_0에 비해 매우 크다고 가정한다.

$$L_o \approx N_p^2\mu_0 A_o/g_o\,, \quad L_c \approx N_p^2\mu_0 A_c/g_c \tag{1}$$

$$L_r = 2(L_o \| L_c) \approx 2\{(N_p^2\mu_0 A_o/g_o)\|(N_p^2\mu_0 A_c/g_c)\} \tag{2}$$

$$L_m = 2L_o \approx 2(N_p^2\mu_0 A_o/g_o) \tag{3}$$

$$n = V_{in}/[4V_o\{1+(L_o/(L_o+L_c))\}] \tag{4}$$

3. 실험 결과

제안 IM 구조의 타당성 검증을 위해 350W/800kHz급 시작품을 제작하였으며, 입/출력 사양 및 공진 주파수 값은 V_{in} = 390V, V_o = 19.5V, I_o = 17.95A, P_o = 350W, f_r = 780kHz, n = 3, L_r = 3.2uH, L_m = 9.2uH, C_r = 13.2nF이다. 또한 1차 측 Main MOSFET은 Infineon 社의 BSC16DN25NS3을 사용하였다. 그림 4는 본 논문의 실험에서 사용된 시작품 및 그 크기를 나타낸 사진이다. 고효율 및 고속 스위칭으로 인한 부피 저감 결과 141.81W/in^{3}의 고전력밀도를 성취하였다. 그림 5는 전압 및 전류 평형 및 정상 상태시 각부 주요 파형을 나타낸 것이다. 그림 5 (a)는 시작품의 최대 부하에서의 정상상태 파형을 나타내며, 정상상태 스위칭 주파수 800kHz, 턴 오프 시 영전압 스위칭을 확인 할 수 있다. 그림 5 (b)는 3 레벨 동작에 따른 전

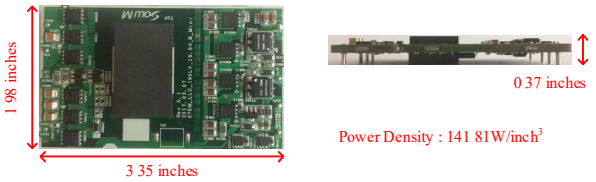
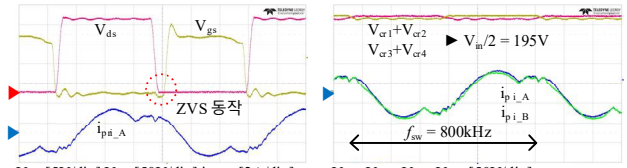


그림 4 제안 IM 방식을 적용한 3-레벨 LLC 공진형 컨버터의 크기 및 전력밀도

Fig. 4 Size and power density of 3-level LLC resonant converter with IM



Vgs: [5V/div] Vds: [50V/div] ipri_A: [2A/div] Time : 200ns/div

Vcr1+Vcr2 , Vcr3+Vcr4: [50V/div] ipri_A , ipri_B : [2A/div] Time : 200ns/div

(a) 정상상태 파형 (b) 전압 및 전류 평형 파형

그림 5 제안 IM을 적용한 3-레벨 LLC 공진형 컨버터 실험 파형

Fig. 5 Experimental waveforms for 3-Level LLC resonant converter with proposed IM

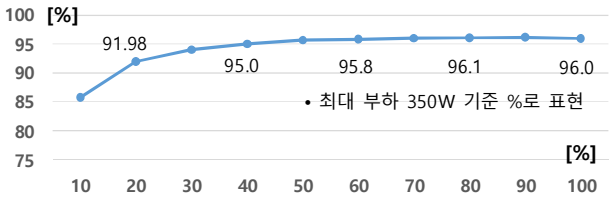


그림 6 제안 IM 방식을 적용한 3-레벨 LLC 공진형 컨버터의 출력 부하에 따른 효율 측정 결과

Fig. 6 The efficiency measurement results of the 3-level LLC resonant converter with proposed IM

압 평형 유지 파형이다. 회로 동작에 따라 $V_{cr1}+V_{cr2}$과 $V_{cr3}+V_{cr4}$이 $V_{in}/2$인 195V로, 전압 평형에 따라 1차 측으로 인가되는 i_{pri_A}와 i_{pri_B} 전류가 균등하게 유지되는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 그림 6의 효율 측정 결과 최대 효율 96.1%로 고효율을 획득함을 확인하였다.

4. 결론

본 논문에서는 고전력밀도를 위하여 3 레벨 LLC 공진형 컨버터와 회로의 자기 소자의 부피를 저감할 수 있는 IM을 제안하였다. 제안 3 레벨 공진형 컨버터는 스위치의 전압 스트레스를 저감하여 고주파수 구동에 유리한 장점이 있다. 또한 제안 IM 구조는 자성체 외족과 중족의 인덕턴스를 자화 인덕턴스와 공진 인덕터로 사용한 권선 구조로써 하나의 자성체로 구성하여 제안 3 레벨 LLC 공진형 컨버터에 사용되는 자기 소자를 하나로 통합하였다. 자성체 모델 분석을 통해 회로 동작을 이론적으로 분석하고 이론적 분석 결과를 바탕으로 350W급 시작품의 실험 결과를 제시하여 전력밀도가 증가함을 검증하였다. 따라서 본 논문은 고전력 밀도를 요구하는 제품에 널리 적용 될 것으로 기대된다.

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

참 고 문 헌

[1] B.Yang, F.C. Lee, A.J. Zhang, G. Huang, "LLC resonant converter for front end DC/DC conversion", in IEEE APEC , Vol 2, pp. 1108 1112, 2002

[2] Yilei Gu, Zhengyu Lu, Lijun Hang, Zhaoming Qian, Guisong Huang, "Three level LLC series resonant DC/DC converter", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol 20, pp. 1492 1503, 2005