

# 새로운 평면변압기 구조를 갖는 LLC 공진형 컨버터의 EMI 저감 효과 분석

김건우, 김재상, 문건우  
한국과학기술원

## Analysis for EMI reduction of LLC resonant converter with new planar transformer structure

Keon-Woo Kim, Jae-Sang Kim, Gun-Woo Moon  
KAIST

### ABSTRACT

본 논문은 평면 변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈를 제거하기 위해 새로운 회로 구조 및 변압기의 와인딩 레이아웃을 제안한다. 제안하는 컨버터는 1차측의 병렬구조로 인하여 풀-브리지와 같은 구조를 갖고 있고, 높은 파워의 어플리케이션에 적합하게 사용되어질 수 있다. 2개의 하프-브리지 LLC 공진형 컨버터 변압기의 1차측은 한쪽 끝이 정전압 전위를 갖도록 연결되어 있다. 이에 따라 같은  $dv/dt$  특성을 갖는 1차측과 2차측 와인딩이 존재하게 되고, 이러한 와인딩을 인접하게 배치하는 구조를 통해 변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈를 크게 줄일 수 있다. 최종적으로 EMI 필터의 크기를 크게 줄일 수 있고, 높은 전력밀도를 달성할 수 있다.

### 1. 서론

풀-브리지 컨버터는 전기자동차, 서버용 전원장치 등 높은 파워의 어플리케이션에서 널리 사용되고 있다<sup>[1]-[2]</sup>. 이러한 분야에서 높은 전력 밀도는 중요한 이슈로 떠오르고 있다. 일반적으로 자성체의 크기를 줄이기 위해 높은 스위칭 주파수를 활용하는 방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있고, 스위칭 손실을 줄이기 위해 소프트 스위칭 기법들이 필수적으로 적용되고 있다. 다양항 소프트 스위칭이 가능한 컨버터들 중에 1차측 스위치의 영전압 스위칭이 가능하고 2차측 정류기 다이오드의 영전류 스위칭 특성을 가지고 있는 LLC 공진형 컨버터가 가장 적합한 컨버터로 사용되고 있다. 또한 높은 전력밀도를 달성하기 위해 낮은 높이와 작은 부피를 갖는 평면변압기가 많이 사용되고 있다. 평면 변압기는 기존 변압기에 비해 큰 기생 커패시턴스를 가진다는 특징이 있고 높은 스위칭 주파수로 인해 각 와인딩에 전압이 빠르게 변화하면서 큰  $dv/dt$  특성을 가지게 된다. 따라서 큰 공통모드 노이즈가 발생하게 되어 컨버터의 electromagnetic interference (EMI) 특성을 악화시키게 된다. EMI 기준을 만족하기 위해 EMI 필터가 필수적으로 사용되어야 하고, EMI 필터의 큰 공통모드 필터 인덕터로 인해 전력밀도를 크게 감소시킨다는 문제가 발생한다.

컨버터의 공통모드 노이즈를 줄이기 위해 많은 방법들이 제안되어졌다<sup>[3]-[5]</sup>. 첫 번째는 패시브 소자나 추가 와인딩을 추가하여 공통모드 노이즈를 줄이는 방법이다<sup>[3]-[4]</sup>. 이러한 방법들은 커패시터, 인덕터, 결합 인덕터 등을 추가하거나 션트 와인딩을 추가함으로써 EMI 특성을 개선한다. 하지만 추가 소자나

와인딩으로 인해 부피가 증가하고, 소자 값의 오차에 의한 영향을 크게 받는다는 단점을 갖고 있다. 다음으로 같은  $dv/dt$  특성을 갖는 변압기의 두 개의 레이어를 인접하게 배치시킴으로써 변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈를 줄인 방법이 연구되었다<sup>[5]</sup>. 이 연구는 변압기의 각 와인딩에 해당되는 레이어의 배치를 변경시키는 방법을 통해 간단하게 공통모드 노이즈를 줄일 수 있다는 장점을 가진다. 하지만 해당 연구는 낮은 파워의 어플리케이션에 국한되어 적용할 수 있다. 따라서 높은 파워의 어플리케이션에 적용할 경우 1차측 회로에 큰 도통손실로 인해 효율이 크게 감소한다는 한계점을 가진다.

본 논문은 풀-브리지 형태의 회로에 기반하여 새로운 회로 구조와 와인딩 레이아웃을 제안함으로써 높은 파워의 어플리케이션에 적합한 낮은 공통모드 노이즈를 갖는 회로를 제안한다. 제안하는 컨버터의 1차측은 2개의 하프-브리지 LLC 공진형 컨버터가 병렬로 연결된 형태를 갖고 있으며 변압기의 한쪽 끝이 정전압 전위를 갖는 회로 구조를 갖고 있다. 이러한 구조로 인해 1차측과 2차측에 같은  $dv/dt$  특성을 갖는 와인딩이 존재하게 되고, 이들을 인접하게 배치하는 구조를 적용함으로써 변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈를 크게 줄일 수 있다. 따라서 제안하는 컨버터는 낮은 공통모드 노이즈로 인해 작은 크기의 EMI 필터를 갖게 되고 높은 전력밀도를 달성할 수 있다.

### 2. 공통모드 노이즈 특성 분석

#### 2.1 평면 변압기의 공통모드 노이즈 특성 분석

평면 변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈의 경우 1차측과 2차측 사이에 발생하는 기생 커패시터를 통해 흐르는 공통모드 전류에 의해 발생하게 된다. 그림 1은 평면변압기에서 2개의 인접한 와인딩 사이에서 발생하는 기생 커패시터 모델을 나타내고 있다. 2개의 와인딩 사이에서 발생하는 공통모드 전류  $i_{CM}$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>[5]</sup>.

$$i_{CM} = C_{ac} \left( \frac{dv_a}{dt} - \frac{dv_c}{dt} \right) + C_{ad} \left( \frac{dv_a}{dt} - \frac{dv_d}{dt} \right) + C_{bc} \left( \frac{dv_b}{dt} - \frac{dv_c}{dt} \right) + C_{bd} \left( \frac{dv_b}{dt} - \frac{dv_d}{dt} \right) \quad (1)$$

여기서  $C_{ac}$ ,  $C_{ad}$ ,  $C_{bc}$ , 그리고  $C_{bd}$ 는 변압기의 인접한 1차측, 2차측 와인딩 사이에 발생하는 기생 커패시터이고  $v_a$ ,  $v_b$ ,  $v_c$ , 그리고  $v_d$ 는 각각 a, b, c, 그리고 d의 전압을 나타낸다.

인접한 2개의 와인딩의 전압 파형이 같다면  $v_a$ 와  $v_b$ 의 전압 슬로프가  $v_c$ 와  $v_d$ 의 전압 슬로프와 각각 동일하게 되어서  $dv_a/dt = dv_c/dt$  그리고  $dv_b/dt = dv_d/dt$ 를 만족하게 된다. 또한, 인

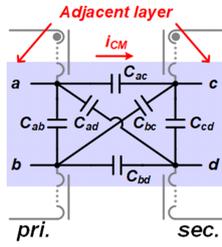


그림1. 평면 변압기의 기생 커패시터 모델

접하는 와인딩이 대칭적인 PCB 구조를 가지고 있다면  $C_{ad}$ 와  $C_{bc}$ 가 동일하고,  $C_{ac}$ 와  $C_{bd}$ 가 동일하게 된다. 따라서 앞선 2가지의 조건을 만족한다면 (1)을 통해  $i_{CM}$ 이 0이 되는 것을 알 수 있다. 따라서 인접한 2개의 1차측, 2차측 와인딩이 같은 전압 파형을 가지고 대칭적인 PCB 구조를 가진다면 그 사이에서 공통모드 전류가 발생하지 않는다.

## 2.2 제안하는 컨버터의 공통모드 노이즈 특성 분석

그림 2(a)는 제안하는 컨버터의 회로를 나타내고 있다. 1차측은 2개의 하프-브리지 LLC 공진형 컨버터가 병렬로 연결되어 있는 것을 확인할 수 있고, 2개의 변압기는 1차측은  $N_p$ 의 턴, 2차측은  $N_s$ 의 턴으로 턴 비  $n$ 이  $N_p/N_s$ 로 같게 구성되어 있다. 그림 2(b)에 나와있듯이  $T_1$  변압기의 1차측 non-dot쪽 끝은 그라운드로 연결되어 있고 2차측 non-dot쪽 끝은 출력전압  $V_o$  절반의 전압으로 정전압 전위를 갖는다. 또한 변압기의 각 턴 사이의 전압 차이는 1차측의 경우  $nV_o/N_p$  그리고 2차측의 경우  $V_o/N_s$ 의 값을 가지는데  $n=N_p/N_s$ 이므로 1차측과 2차측의 각 턴 사이의 전압 차이가 같다. 따라서 그림 2(c)처럼 1차측과 2차측의 non-dot쪽 끝을 기준으로 1차측과 2차측 턴을 한 턴씩 번갈아 가며 겹치게 배치하면 겹치는 두 개의 와인딩이 같은 전압 파형을 갖게 되어 공통모드 전류가 발생하지 않으면서 인터리빙 구조를 가질 수 있다.  $T_2$  변압기의 경우 1차측 dot쪽 끝은 입력전압  $V_{in}$ 으로 연결되어 있고 2차측 dot쪽 끝은  $0.5V_o$ 로 정전압 전위를 갖는다. 또한 변압기의 각 턴 사이의 전압 차이는  $T_1$ 과 마찬가지로 1차측과 2차측이 같다. 따라서 그림 2(c)처럼 1차측과 2차측의 dot쪽 끝을 기준으로 1차측과 2차측 턴을 한 턴씩 번갈아 가며 겹치게 배치하면 겹치는 두 개의 와인딩이 같은 전압 파형을 갖게 되고 공통모드 전류가 발생하지 않으면서 인터리빙 구조를 가질 수 있다. 일반적으로  $N_p$ 와  $N_s$ 가 다르기 때문에 짝이 없는 와인딩도 고려 해주어야 한다.  $N_p$ 가  $N_s$ 보다 크다고 가정하면 짝이 없는 1차측 와인딩이 생긴다. 이 때 같은 1차측 혹은 2차측 사이에서는 공통모드 노이즈가 발생하지 않기 때문에 그림 2(c)에 보이는 것처럼 짝이 없는 1차측 와인딩은 짝이 있는 1차측 와인딩 사이에 배치하게 된다.

## 3. 실험 결과

프로토타입 컨버터는 1.5 kW의 LLC 공진형 컨버터로 제작되었고, 자세한 디자인 스펙은 다음과 같다. 입력전압=400 V, 출력전압=270~420 V, 공진 주파수=500 kHz.

### 3.1 실험 파형

그림 3은 출력 전압이 420 V 일 때의 실험파형을 나타내고 있는데, 이는 변압기 와인딩에 큰 전압 변화를 보이며  $dv/dt$  특성이 최대가 되어 공통 모드 노이즈가 가장 크게 발생하는

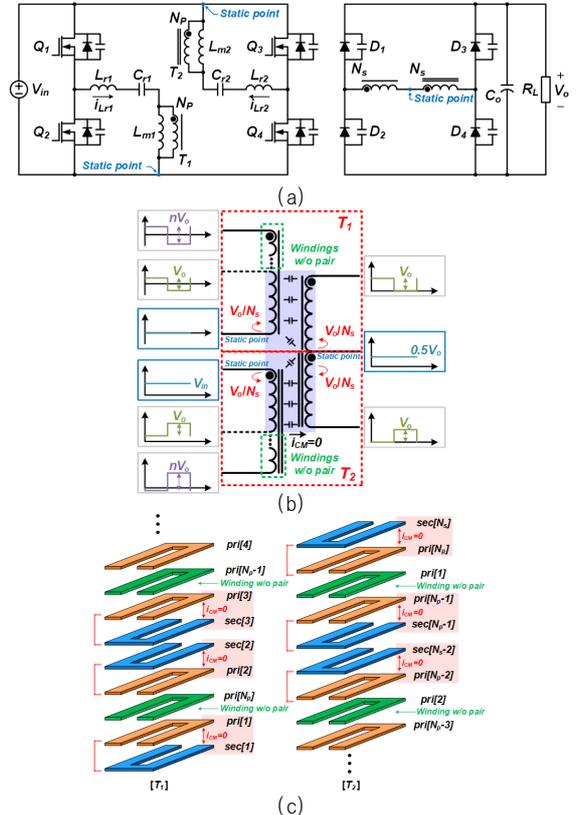


그림2. (a) 제안하는 컨버터의 회로. (b) 변압기 와인딩의 전압 파형. (c) 변압기의 1차측, 2차측 와인딩 간의 관계. (d) 변압기의 와인딩 구조.

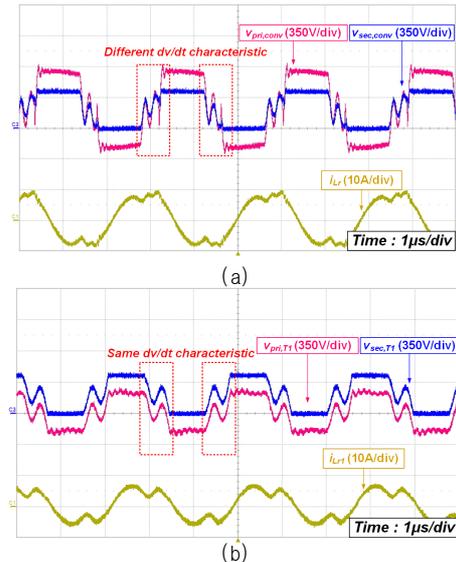


그림3. 출력전압이 420 V 일 때 실험 파형. (a) 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터. (b) 제안하는 컨버터.

동작 환경이다. 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터의 경우 1차측과 2차측의 인접한 와인딩이 서로 다른  $dv/dt$  특성을 가지는 것에 반해 제안하는 컨버터는 전압 파형이 동일하여  $dv/dt$  특성이 같기 때문에 기존 컨버터보다 더 낮은 공통 모드 노이즈를 갖게 된다.

### 3.2 공통모드 노이즈

일반적으로 DC/DC 컨버터에서는 1차측 스위치 기생 커패시터와 변압기의 기생 커패시터에서 공통 모드 노이즈가 발생하게 된다. 본 논문은 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터와

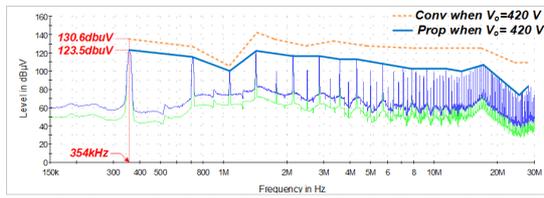


그림4. 측정된 공통모드 노이즈.

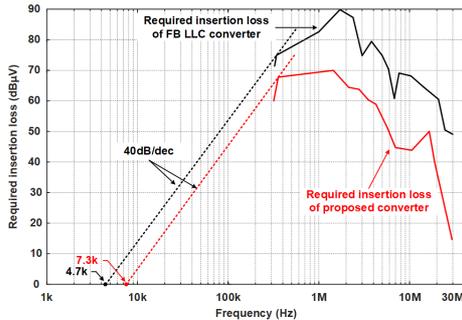


그림5. 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터와 제안하는 컨버터의  $V_{req,CM}$  제안하는 컨버터의 1차측 스위치 기생 커패시터로 인해 발생하는 공통 모드 노이즈는 같다고 가정한다. 1차측 스위치 기생 커패시터에서 발생하는 공통 모드 노이즈는 기생 커패시턴스 값과 그 사이에 걸리는 전압의  $dv/dt$  값에 비례한다. 기존 컨버터와 제안하는 컨버터는 1차측 회로가 같은 PCB 레이아웃을 가지고 같은 스위치를 사용하기 때문에 커패시턴스가 같다. 또한 1차측 양단의 전압은  $V_m$ 과 0 사이를 같은 주파수로 변화하기 때문에 같은  $dv/dt$  특성을 가진다. 따라서 1차측 스위치 기생 커패시터로 인해 발생하는 공통 모드 노이즈는 같다고 할 수 있고, 공통 모드 노이즈의 차이는 변압기의 기생 커패시터로부터 발생하는 것이라고 가정할 수 있다. 그림 4는 출력전압이 420 V일 때의 측정된 공통 모드 노이즈를 나타내고 있다. 앞서 설명했듯이 출력전압이 420 V일 때가 최악 조건이기 때문에 가장 큰 공통 모드 노이즈를 갖는다. 그림 4를 보면 알 수 있듯이 첫 번째 피크는 출력전압이 420 V일 때의 동작 스위칭 주파수 근처에서 생기고 대부분의 피크가 스위칭 주파수 배수의 주파수에 생성되는 것을 확인할 수 있다. 제안하는 컨버터의 공통모드 노이즈는 기존 컨버터에 비해 훨씬 낮은 수치를 가지므로 제안하는 컨버터의 변압기 1차측, 2차측 사이에서 더 적은 양의 공통모드 노이즈가 발생한다는 것을 알 수 있다.

### 3.3 EMI 필터 크기 비교

EMI 필터는 EMI 조건을 만족하기 위해서 필수적으로 사용된다. 본 논문에서는 EN55022B 조건을 기준으로 EMI 필터를 설계하였고, 공통모드 노이즈 필터에 초점을 맞추어 비교를 하겠다. 먼저 EMI 조건을 만족시키기 위해 줄여야 하는 공통모드 노이즈의 양  $V_{req,CM}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$(V_{req,CM})_{dB} = (V_{meas,CM})_{dB} - (V_{Lim})_{dB} + 3dB \quad (2)$$

여기서  $V_{meas,CM}$ 은 측정된 공통모드 노이즈,  $V_{Lim}$ 은 공통모드 노이즈의 한도, 그리고 3dB는 안전 목적의 마진이다.

그림 5는 출력전압이 420 V 일 때 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터와 제안하는 컨버터의  $V_{req,CM}$ 을 나타낸다. 공통모드 노이즈 필터로 많이 사용되는 LC 필터의 코너 주파수  $f_{R,CM}$ 은 다음과 같이 구해진다.

$$(V_{req,CM})_{dB} = 40 \log \left( \frac{f_{meas}}{f_{R,CM}} \right) \quad (3)$$

여기서  $f_{meas}$ 는  $V_{meas,CM}$ 을 측정할 때의 주파수이다.

(3)을 이용하여 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터와 제안하는 컨버터의  $f_{R,CM}$ 은 각각 7.3, 4.7 kHz로 구해진다. 이때 LC 필터는 공통모드 인덕터  $L_{CM}$ 과 Y커패시터  $C_Y$ 로 이루어져 있는데  $f_{R,CM}$ 과  $L_{CM}$ ,  $C_Y$ 의 관계는 다음과 같이 이루어진다.

$$f_{R,CM} = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{2L_{CM}C_Y}} \quad (4)$$

공통모드 인덕터의 크기는  $L_{CM}$ 에 비례하기 때문에  $f_{R,CM}$ 이 클수록 공통모드 인덕터의 크기가 줄어든다는 것을 알 수 있다. 같은  $C_Y$ 를 사용한다고 가정했을 때 제안하는 컨버터의 공통모드 노이즈 필터의 크기가 기존 풀-브리지 LLC 공진형 컨버터에 비해 36% 가량 작아질 것으로 분석할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문은 평면변압기에서 발생하는 공통모드 노이즈를 줄일 수 있는 새로운 회로와 변압기 와인딩 구조를 제안한다. 제안하는 컨버터는 변압기의 한쪽 끝이 정전압 전위를 가질 수 있도록 회로 구조를 구성함으로써 1차측과 2차측에 같은  $dv/dt$  특성을 갖는 와인딩이 생길 수 있다. 이러한 와인딩들을 인접하게 배치함으로써 인터리빙 구조를 가지면서도 공통모드 노이즈가 생기지 않는 새로운 변압기 와인딩 구조를 형성했다. 결과적으로 컨버터의 EMI 필터단의 부피를 크게 감소시킬 수 있었고 높은 전력밀도를 달성할 수 있다.

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-에너지클라우드기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019M3F2A1072469)

## 참고 문헌

- [1] J. W. Kim, D. Y. Kim, C. E. Kim, and G. W. Moon, "A simple switching control technique for improving light load efficiency in a phase-shifted full-bridge converter with a server power system," IEEE Trans. Power Electron., vol. 29, no. 4, pp. 1562-1566, Apr. 2014.
- [2] C. Y. Lim, Y. Jeong, and G. W. Moon, "Phase-shifted full-bridge DC-DC converter with high efficiency and high power density using center-tapped clamp circuit for battery charging in electric Vehicles," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 11, pp. 10945-10959, Nov. 2019.
- [3] K. Fu and W. Chen, "Evaluation method of flyback converter behaviors on common-mode noise," IEEE Access, vol. 7, pp. 28019-28030, Mar. 2019.
- [4] L. Pentti and O. Hyvonen, "Electrically decoupled integrated transformer having at least one grounded electric shield," U.S. Patent 7733205 B2, Jun. 8, 2010.
- [5] M. A. Saket, M. Ordenez, M. Craciun, and C. Botting, "Improving planar transformers for LLC resonant converters: paired layers interleaving," IEEE Trans. Power Electron., vol. 34, no. 12, pp. 11813-11832, Dec. 2019.