

# 2차측 Multiple-Winding 구조의 변압기를 갖는 LLC 공진형 컨버터의 Cross-regulation 특성 분석

김성재\*, 김영삼\*\*, 김종수\*†  
 대진대학교 전기전자공학부\*, 효성중공업\*\*

## Analysis of Cross-Regulation Characteristics for LLC Resonant Converter of Secondary Multi-winding Structure

Sung-Jae Kim\*, Yeong-Sam Kim\*\*, Jong-Soo Kim\*†  
 Department of Electrical Engineering, Daejin University\*, Hyosung Heavy Industries Co., Ltd.\*\*

### ABSTRACT

2차측 Multi-winding 구조의 LLC 공진형 컨버터는 교차조절 (Cross-regulation) 특성에 의해 각 출력의 부하의 변화에 따라 출력전압의 불균형 문제가 있다. 본 논문에서는 2차측 Multi-winding 구조의 LLC 공진형 컨버터에서 나타나는 교차조절 특성을 이론적으로 분석하고 240W급 LLC 공진형 컨버터를 이용하여 실험을 진행한다. 실험 결과를 통해 출력 채널 수의 증가에 따른 교차조절 특성에 대해 고찰한다.

### 1. 서 론

2차측 Multi-winding 구조의 LLC 공진형 컨버터는 다중출력을 낼 수 있어 비용절감 및 고밀도화를 실현할 수 있다. 2차측 Multi-winding 구조를 갖는 LLC 공진형 컨버터는 그림 1과 같이 구성된다. 위와 같이 구성된 다중출력 구조는 하나의 공진회로와 변압기를 공유하기 때문에 각 출력의 부하의 변화에 따라 출력 상호간 영향을 미치게 되고, 목표하고자 했던 출력전압 범위를 만족시키지 못하게 된다. 이러한 Cross-regulation 특성은 변압기의 누설인덕턴스의 변화, 2차측 정류 다이오드의 순방향 전압강하  $V_F$ 에 의한 도통손실, 스위칭 주파수의 변화 등 여러 요소들이 원인이 될 수 있다. 기존 문헌에서는 이러한 교차조절 특성의 원인을 다중출력 LLC 공진형 컨버터의 시뮬레이션의 변화와 2차측 정류 다이오드 구성의 변화에 대해서 분석하였다<sup>[1]</sup>.

본 논문에서는 2차측 Multi-winding 구조의 LLC 공진형 컨버터에서 나타나는 교차조절 특성의 원인을 출력 채널 수의 증가에 따라 나타나는 변압기의 자기적인 변화와 스위칭 주파수의 변화에 대해서 조사하였다. 또한, 240W급 LLC 공진형 컨버터를 이용하여 출력 채널 수의 증가에 따른 교차조절 특성을 파악하고 실험 결과를 통해 이에 대해 고찰하였다.

## 2. Cross-Regulation 특성 분석

### 2.1 다중권선 변압기 등가모델

2차측 Multi-winding 구조의 변압기를 갖는 LLC 공진형 컨버터에서는 각 채널의 부하변화에 따른 변압기 누설인덕턴스에 의해 출력특성이 달라진다. 2차측 Multi-winding 구조의 경우 각 채널의 부하 변화에 따라 변압기 1차측 권선뿐만 아니라 2차측 각 권선 상호간 영향을 미치게 된다. 이러한 영향에 의해 각 채널에 발생하는 변압기 누설인덕턴스를 변화시키며 각 채널의 출력 특성이

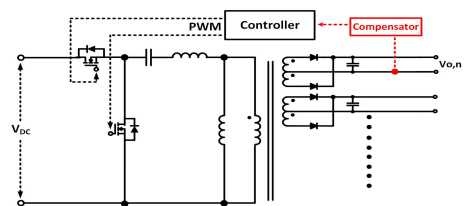


그림 1 다중권선 구조를 갖는 LLC 공진형 컨버터  
 Fig 1. LLC Resonant Converter of Multi-Winding

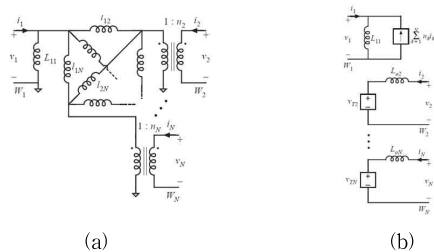


그림 2 다중권선 변압기 등가모델[2]  
 Fig 2. Equivalent model of Multi-winding Transformer

변화하게 된다. N개의 채널을 갖는 2차측 Multi-winding 변압기의 등가모델은 그림2(a)와 같이 각 권선 상호간에 발생하는 누설인덕턴스  $l_{kN}(k=1,2,3,...,N)$  이 직병렬로 연결된 회로로 나타낼 수 있다. 이는 그림2(b)와 같이 1차측 권선을 Norton 등가 변환을 통해 전류원으로 나타낼 수 있고, 2차측 각 권선을 Thevenin 등가 변환을 통해 전압원으로 나타낼 수 있다. 그림2(b)의  $L_{11}$ 은 1차측 권선의 자화 인덕턴스를 나타내고  $L_{0N}$ 은 누설인덕턴스  $l_{kN}$ 의 합성 임피던스를 나타낸다.  $L_{0N}$ 은 각 권선 상호간에 발생하는 누설인덕턴스에 의해 2차측의 N번째 권선  $W_N$ 에 반영되는 전체 누설인덕턴스를 의미한다.  $V_{TN}$ 은 2차측의 N번째 권선  $W_N$ 의 권선 전압을 나타내며 N번째 권선을 제외한 나머지 권선이 N번째 권선과 coupling되어 발생하는  $l_{kN}$ 에 의한 전압의 합으로 구할 수 있다. 그러므로 등가모델을 통해 출력 수의 증가에 따라  $V_{TN}$ 의 전압이 상승하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 변압기의 물리적인 권선 구조에 따라 각 권선의 누설인덕턴스의 크기는 변화하게 된다. 그림3(a)와 같이 Stack 방식의 권선 구조에서는 1차측 권선과 위치가 떨어진 권선의 누설 인덕턴스가 가장 크게 나타나며 출력전압이 다른 채널에 비해 작게 나타난다<sup>[3]</sup>.

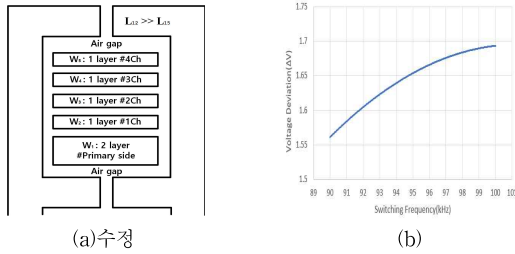


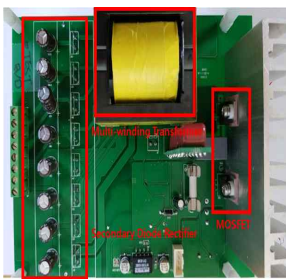
그림 3 (a)변압기 권선 구조 (b)스위칭 주파수에 따른 출력전압 편차  
Fig 3. (a)Winding Structure of Transformer (b)Voltage Deviation according to Variation of Switching Frequency

### 2.2 스위칭 주파수의 변화

그림 3은 스위칭 주파수 변화에 따른 두 채널의 출력전압 차이를 나타낸 것이다. 스위칭 주파수 증가할수록 전압의 차이 또한 상승하는 것을 확인할 수 있다. 이는 하나의 공진회로를 공유하기 때문에 각 채널의 부하조건에 따라 전압이득이 변화하게 되고 각 채널 권선의 누설인덕턴스의 크기 차이가 존재하기 때문에 스위칭 주파수가 증가할수록 인덕턴스에 의한 임피던스 성분이 증가하여 전압차이가 증가하게 된다.

### 3. 실험결과

실험은 240W급 LLC공진형 컨버터를 이용하여 진행하였으며, 제작된 컨버터 및 설계 파라미터는 그림 4에 나타내었다. 출력 채널 수의 증가에 따른 교차 조절 특성을 확인하기 위해 출력 채널 수를 2출력과 4출력 두 가지로 나누어 구성하고 표 1과 같이 총 4가지 Case의 부하 조건을 설정하였다. 부하는 풀부하 기준으로 1채널 출력 [8Ω], 2채널과 3채널 출력 [30Ω], 4채널 출력 [20Ω]으로 설정하였다. AC-DC컨버터와 Buck컨버터를 통해 200V<sub>DC</sub>의 link전압 생성하고 이를 사용하는 시스템으로 실험 결과 파형은 그림 5에 나타내었다. 2출력과 4출력의 4가지 Case의 부하 조건 별 출력전압은 그림 6에 나타내었다. 채널 수가 증가 할수록 출력전압의 크기가 상승하는 것을 그림 6에서 확인할 수 있다. 특히, 부하조건 Case2와 Case3에서 4출력의 출력전압이 크게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이러한 이유는 두 가지 이유로 보여 진다. 첫째로 1채널의 전류가 가장 크기 때문에 1채널의 풀부하 시 발생하는 누설인덕턴스  $L_{kN}$ 의 크기가 작게 되며 각 권선의 전압  $V_{TN}$ 의 크기가 증가하여 최종 출력전압이 상승하게 된다. 둘째로 다수개의 채널이 하나의 공진회로를 공유하기 때문에 각 채널의 전압이득 특성의 차이가 생기고 이는 곧 출력에 영향을 미치게 된다.



Parameter	Value
V <sub>in</sub>	200V <sub>DC</sub>
V <sub>o</sub>	32V(±10%)
Turn ratio (N <sub>p</sub> :N <sub>s1</sub> :N <sub>s2</sub> )	24:8:8
F <sub>sw</sub>	90-100kHz
Magnetizing Inductance	78uH
Primary Leakage Inductance	3.86uH
Resonant Inductor	39uH

그림 4 제작된 다중출력 LLC공진형 컨버터와 설계 파라미터  
Fig 4. Multi-Output LLC Resonant Converter and Design Parameter

표 1 실험 부하 조건

Table 1. Load Condition of Experiment

Load Condition	Dual-Output	Quad-Output
Case1	모든 채널 무부하	모든 채널 무부하
Case2	모든 채널 풀부하	모든 채널 풀부하
Case3	1채널 풀부하 / 2채널 무부하	1채널 풀부하 / 2,3,4채널 무부하
Case4	1채널 무부하 / 2채널 풀부하	1채널 무부하 / 2,3,4채널 풀부하

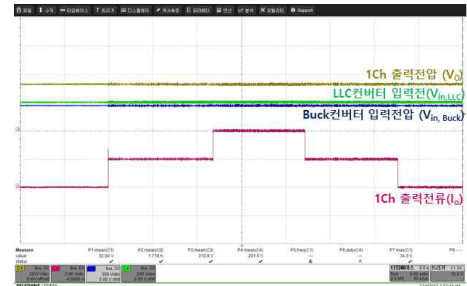


그림 5 실험 결과 파형

Fig 5. Waveform of Experimental Result

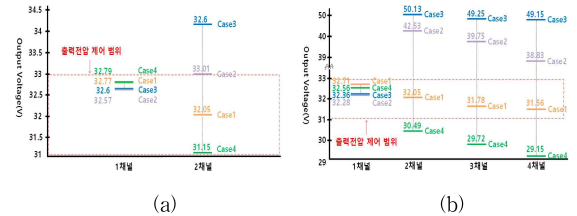


그림 6 부하 조건 별 출력전압 (a)2출력 (b)4출력

Fig 6. Output Voltage by Load Condition (a)Dual-Output (b)Quad Output

부하조건 Case2와 Case3에서 2출력의 출력전압은 4출력에 비해 출력전압 증가량이 현저히 적게 나오는데 이는 2차측의 채널 수가 감소할수록 누설인덕턴스  $L_{kN}$ 의 영향이 작게 되어 나타나는 현상으로 보여진다.

### 4. 결론

본 논문에서는 2차측 Multi-winding구조의 LLC공진형 컨버터의 교차조절 특성에 대해 분석하였다. 출력 채널 수가 증가할수록 교차조절 특성이 극명하게 나타나는 것을 이론적 배경과 실험을 통해 확인하였으며, 그 원인에 대해서 고찰하였다. 추후 이를 심층적으로 분석하고 교차조절 특성의 영향을 줄이기 위한 연구가 진행될 것이다.

### 참고 문헌

- [1] Jin-Woo Jeong, Se-Kyo Chung, "Analysis of Cross-Regulation Characteristics for Multi-Output LLC Resonant Converter", KIPE, 17(4), pp.281-290, 2018
- [2] Erickson R.W, Maksimovic D, "A multiple-winding magnetics model having directly measurable parameters", Power Electronics Specialists Conference(PESC98 Record), Vol.2, pp.1472-1478, 1998
- [3] Chalermyanont K, Sangampai P, Prasertsit, "High frequency transformer designs for improving cross regulation in multiple-output flyback converters", IEEE, pp.53-56, 2007