

# 전류분담에 의한 병렬운전동작 및 넓은 입·출력전압 범위에서 제어가능한 LLC 공진컨버터

오재성, 이강우, 이지철, 허예창, 김은수<sup>†</sup>, 국윤상\*  
전주대학교, (주)팩테크\*

## An LLC Resonant Converter with a Balanced Load Sharing Capacitor Operating with a Wide Input / Output Voltage Range

J.S Oh, G.W Lee, J.C Lee, Y.C Heo, E.S Kim<sup>†</sup>, Y.S Cook  
JeonJu University, PACTECH\*

### 1. 서론

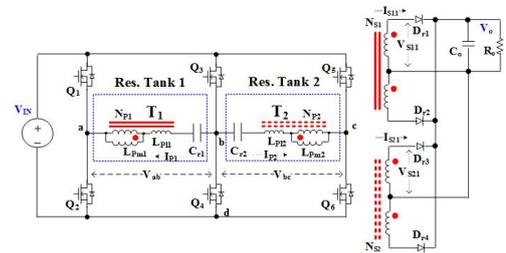
최근 E mobility 관련 전기골프카, 지게차, 전기자동차, 전 기버스 등에 다양한 종류의 배터리가 사용되고 있다. 따라서 충전시스템은 이와 같은 다양한 배터리팩을 충전할 수 있도록 2배 이상의 넓은 입·출력제어범위를 갖는 직류 직류(DC DC) 컨버터 전력변환장치가 요구되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 또한 고집적화와 고효율을 위해 고주파스위칭 동작 및 모든 출력전압과 부하조건에서 영진압스위칭(ZVS)이 가능한 LLC공진컨버터가 적용 검토되고 있다<sup>[3,4]</sup>. LLC 공진컨버터의 경우 모든 출력전압과 부하조건에서 영진압스위칭(ZVS)이 가능하나 넓은 출력전압 제어에 있어 한계성을 가진다. 따라서 본 논문에서는 전류분담에 의한 병렬운전동작 및 1차측 주회로동작모드변화에 따라 넓은 입력( $1/4V_{in} \sim V_{in}$ ) 및 출력( $V_o \sim 4V_o$ )전압 제어범위를 갖는 LLC 공진컨버터를 제안하였다.<sup>[5]</sup>

### 2. 전류분담 및 병렬운전동작 가능한 LLC 공진컨버터

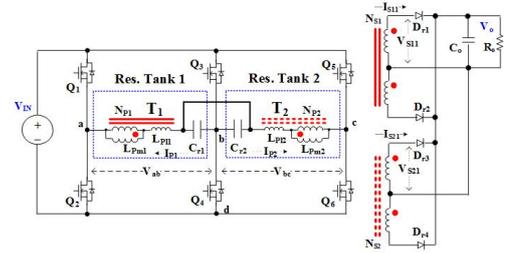
그림 1(a)은 6 스위치 LLC 공진컨버터의 주회로 이고, 그림 1(b)은 제안된 전류분담 및 병렬운전이 가능한 6 스위치 LLC 공진컨버터 주회로를 나타냈다. 6개의 스위칭소자와 공진회로부 1(Res. Tank 1)과 공진회로부 2(Res. Tank 2)가 포함되어 있는 6 스위치 LLC 공진컨버터 주회로에서 전류불평형을 억제하기 위해 공진커패시터  $C_{r1}$ 의 한쪽과 공진커패시터  $C_{r2}$ 의 한쪽이 주스위칭소자  $Q_3$ 의 소스(Source)와  $Q_4$ 의 드레인(Drain)에 연결되고, 공진커패시터  $C_{r1}$ 의 다른 한쪽이 변압기  $T_1$ 에 연결된다. 공진커패시터  $C_{r2}$ 의 다른 한쪽이 변압기  $T_2$ 에 연결되며 공진커패시터  $C_{r1}$ 의 다른 한쪽과 공진커패시터  $C_{r2}$ 의 다른 한쪽이 공통 연결되어 있다. 공진커패시터( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ )가 공통으로 연결되어 공진요소(변압기 누설인덕턴스( $L_{p1}$ ,  $L_{p2}$ ) 및 자화인덕턴스( $L_{pm1}$ ,  $L_{pm2}$ ), 공진커패시터( $C_{r1}$ ,  $C_{r2}$ )의 허용오차( $\pm 5\%$ ) 범위에 있더라도 큰 전류불평형 없이 전류분담 동작된다. 2차측 정류부는 각 변압기( $T_1$ ,  $T_2$ ) 2차측 권선을 통해 센터탭 정류방식으로 각각 병렬로 연결 된다. 그림 1(c)와 그림 1(d), 그림 1(e)에서와 같이 동작모드는 1차측 주회로 동작모드변환 및 가변스위칭주파수제어(FM: Frequency Modulation)에 따라 총 2가지로 나타낼 수 있으며, 넓은 입력( $1/4V_{in} \sim V_{in}$ )과 넓은 출력전압( $V_o \sim 4V_o$ ) 제어범위를 갖는다.

제안된 6 스위치 LLC 공진컨버터는 주회로 동작모드변환 및 가변스위칭주파수제어(FM)에 따라 동작모드는 Mode 1과 Mode 2로 나눌 수 있으며, 각 동작모드를 설명을 위해 그림 2와 그림 3과 같이 Mode 1에서 4개 구간( $t_0 \sim t_4$ ), Mode 2에서 4

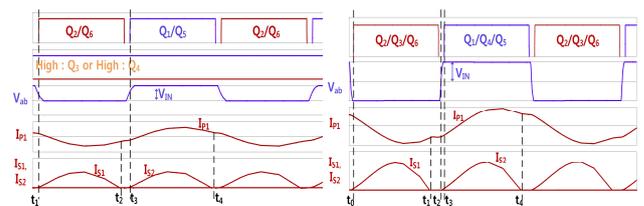
개구간( $t_0 \sim t_4$ )으로 나누어 설명하고자한다.



(a) 6-스위치 LLC 공진컨버터 주회로도

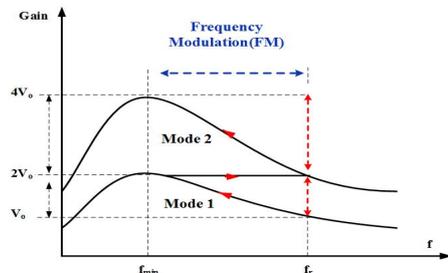


(b) 제안된 전류분담제어 가능한 6-스위치 LLC 공진컨버터 주회로도



(c) Mode 1 동작파형

(d) Mode 2 동작파형



(e) 제안된 LLC 공진컨버터의 FM제어 전압이득특성

그림 1. 6-스위치 LLC 공진컨버터 주회로(a)(b) 및 동작모드 (Mode1, Mode2) 동작파형(c)(d), 전압이득특성(e)

**동작모드 1 (Mode 1) :** 그림 1(c)과 그림 2에 나타난 것처럼 스위칭소자  $Q_2/Q_5$ 과  $Q_1/Q_6$ 는 50%듀티로 교번스위칭동작을

하고, 스위칭소자  $Q_3$ 는 턴 온,  $Q_4$ 는 턴 오프 상태에서 동작됨에 따라 1차측은 하프 브리지 스위칭 동작을 하고 그림 1(e)에 나타낸바와 같이 가변주파수제어(FM: Frequency Modulation)를 통해서 이득제어 할 수 있어 넓은 출력전압제어범위( $V_o \sim 2V_o$ )에서 동작 가능하다.

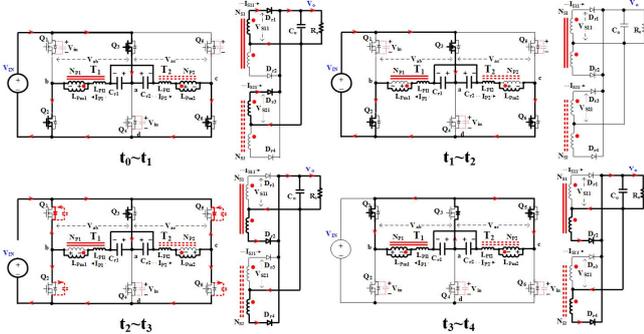


그림 2. Half-Bridge 동작모드 (Mode 1)

**동작모드 2 (Mode 2) :** 그림 1(d)와 그림 3에 나타낸 것처럼 1차측 주스위칭소자  $Q_3/Q_4/Q_6$ 과  $Q_1/Q_4/Q_5$ 는 50% 듀티로 교번스위칭동작을 하며 1차측은 풀 브리지 스위칭동작을 하고, 그림 1(e) 나타낸바와 같이 가변주파수제어(FM)를 통해서 이득제어 할 수 있어 출력전압제어( $2V_o \sim 4V_o$ )가 가능하다.

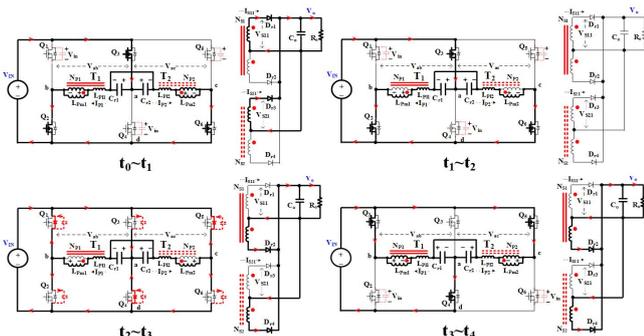
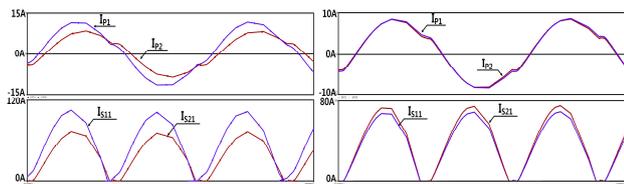


그림 3. Full-Bridge 동작모드 (Mode 2)

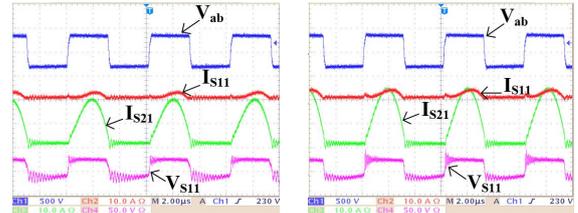
### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과



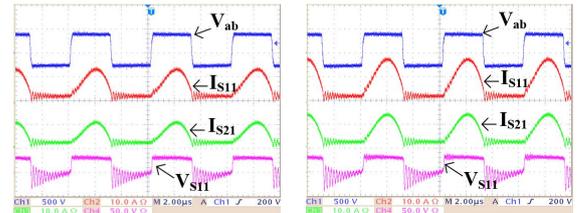
(a) 그림 1(a) 주회로 동작파형 (b) 그림 1(b) 주회로 동작파형  
[변압기( $T_1, T_2$ ) 자화인덕턴스 허용오차(5%) :  $L_{mp1} : 250\mu\text{H} / L_{mp2} : 262.5\mu\text{H}$ ]  
그림 4. Pspice 시뮬레이션 결과비교파형

그림 4는 변압기( $T_1, T_2$ ) 자화인덕턴스( $L_{mp1}, L_{mp2}$ ) 값 차이에 따른 전류불평형 검토를 위한 Pspice 시뮬레이션 결과로 그림 4에서는 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ ) 등의 공진요소는 동일조건으로 두고 변압기( $T_1, T_2$ ) 자화인덕턴스( $L_{mp1}, L_{mp2}$ )의 허용오차 최대범위를 5%( $L_{mp1} : 250\mu\text{H} / L_{mp2} : 262.5\mu\text{H}$ ) 두었을 때, 그림 1(a)의 주회로에서처럼 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ )를 공통으로 연결 하지 않았을 경우는 각 변압기  $T_1, T_2$ 의 공진이득특성이 달라지면서 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ )의 전압차에 의해 출력전류단에서 전류불평형( $I_{s11}, I_{s21}$ )이 나타남을 알 수 있다. 그림 1(b)의 주회로처럼 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ )를 공통으로 연

결 했을 시 그림 4(b) 시뮬레이션 결과처럼 전류분담으로 인해 전류불평형이 크게 나타나지 않음을 확인할 수 있다.



(a) 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ ) 공통으로 연결 안했을 시 전류불평형 파형



(b) 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2}$ ) 공통연결 시 부하전류분담 파형

그림 5. 변압기( $T_1, T_2$ ) 자화인덕턴스( $L_{mp1}, L_{mp2}$ ) 차이 [6% :  $L_{mp1} : 294\mu\text{H} / L_{mp2} : 312\mu\text{H}$ ]에 따른 실험결과 파형 [입력전압( $V_{in}$ ):  $330V_{in}$ , 출력전압( $V_o$ ):  $36V_o$ , 출력용량( $P_o$ ):  $500W/700W$ ]

그림 5는 동작모드 2(Mode 2)에서 동작실험 구현파형으로 공진회로부에 적용된 공진커패시터( $C_{r1}, C_{r2} : 6.6\text{nF}$ )는 동일한 값을 사용하였고, 스위칭주파수는  $163\text{kHz}$ , 변압기( $T_1, T_2$ )의 자화인덕턴스를 허용오차(Tolerance) 6% 차이를 두었을 때 전류분담 및 전류 불평형 여부를 확인 해 보았다. 그림 5(a)에서는 공진커패시터를 공통으로 연결하지 않았을 때의 실험 결과파형으로 각 변압기 자화인덕턴스 허용오차(6%)에 따라 공진회로부 1과 공진회로부 2의 공진이득특성이 달라져 공진커패시터 양단전압차에 의해 전류분담을 하지 못하고, 전류불평형 문제가 발생하는 것을 부하용량  $500W (V_o:36V, I_{s11}:3.16A, I_{s21}:10.7A)/700W (V_o:36V, I_{s11}:3.6A, I_{s21}:13A)$ 에서 확인하였다. 그림 5(b)는 공진커패시터를 공통으로 연결했을 때 실험파형으로 전류분담으로 인한 전류불평형이 저감됨을 부하용량  $500W (V_o:36V, I_{s11}:7.67A, I_{s21}:5.5A)/700W (V_o:36V, I_{s11}:9.85A, I_{s21}:7.2A)$ 에서 확인하였다.

향후 Pspice 시뮬레이션 및 실험결과와 추가적인 상세설계를 바탕으로 전류불평형 최소화와  $5\text{kW}$  용량증대 및 개선된 동작특성에 대해 지속적으로 연구를 수행하고자한다.

「본 연구는 2017년도 산업통상자원부의 지원  
한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한  
연구과제(NO.20172020108500)입니다.」

### 참고 문헌

- [1] Milan M. Jovanović, Fellow, IEEE, and Brian T. Irving, "On-the-Fly Topology-Morphing Control—Efficiency Optimization Method for LLC Resonant Converters Operating in Wide Input- and/or Output-Voltage Range", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 31, NO. 3, MARCH 2016
- [2] Hongliang Wang, Member, IEEE, Yang Chen, Yan-Fei Liu, Jahangir Afsharian and Zhihua (Alex) Yang, "A common inductor multi-phase LLC resonant converter", 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 548 - 555, 2015
- [3] 주종성, 허예창, 마리우스, 김은수, 국윤상 "넓은 입력 또는 출력전압 제어 LLC 공진컨버터", 2016년도 전력전자학술대회논문집, pp153-154, 2016.11
- [4] 김은수, "넓은 입력 전압 범위 또는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하는 LLC 공진 컨버터", 2016년 11월 특허출원(10-2016-0149290)
- [5] 김은수, "전류분담에 의한 병렬운전동작 및 넓은 입·출력전압범위에서 제어 가능한 LLC공진컨버터", 특허출원예정. 2017년 11/12월