

# 입력전압 가변 및 동작 모드 변화를 통해 넓은 출력전압 범위에서 동작하는 LLC 공진컨버터

이지철, 마리우스, 허예창, 주종성, 김은수<sup>†</sup>, 국윤상\*  
전주대학교, (¶)팩테크\*

## LLC resonant converter operating over a wide output voltage range by input voltage variation and operating mode changes

J.C Lee, Takongmo Marius, Y.C Heo, J.S Ju, E.S Kim<sup>†</sup>, Y.S Cook\*  
JeonJu University, PACTECH\*

### 1. 서론

최근 E mobility 관련 지게차, 전기자동차, 전기버스 등에 다양한 종류의 배터리가 사용되고 있고, 이와 같은 다양한 종류의 배터리팩을 충전할 수 있는 넓은 출력전압 제어범위(50V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>)를 갖는 충전시스템이 요구되고 있다. 또한 충전시스템의 전력변환장치는 넓은 출력전압 제어뿐만 아니라 고집적화와 고효율을 달성하기 위해 고주파 스위칭 동작 및 모든 출력전압과 부하조건에서 영전압스위칭(ZVS)이 가능한 LLC 공진컨버터가 검토되고 있으나 넓은 출력전압을 제어하기 위해 자화인덕턴스를 작게 설계해야하기 때문에 자화전류 및 도통손실 증가로 인해 효율개선에 어려움이 있다.

따라서 본 논문에서는 가변스위칭 동작주파수 제어(Structure 1)가 아닌 입력전압 가변 및 동작모드 변환을 통해 넓은 출력전압제어범위(50V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>)에서 동작하는 LLC공진컨버터를 제안하였고 [3], 3.3kW급 시제품제작 및 실험을 통해 적용 가능성을 검증하였으며, 가변스위칭 동작주파수제어와의 효율특성을 비교 검토하였다.

### 2. 입력전압 가변 및 동작 모드 변화를 통해 넓은 출력전압 범위에서 동작하는 LLC 공진컨버터

제안된 LLC 공진컨버터의 1차측은 주스위칭소자(Q<sub>1</sub>~Q<sub>6</sub>)가 6 브리지 형태로 연결되어 있고, 공진변압기(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) 1차권선(N<sub>P1</sub>, N<sub>P2</sub>)과 공진커패시터(C<sub>r1</sub>, C<sub>r2</sub>)로 구성되며, 2차측은 6 브리지 형태로 연결된 출력정류다이오드(D<sub>1</sub>~D<sub>6</sub>)에 공진변압기(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) 2차권선(N<sub>S1</sub>, N<sub>S2</sub>)이 연결되어 있다. 그리고 6 브리지 형태로 연결되어 있는 주스위칭소자의 동작모드변환방식에 의해 그림 1(b)와 같은 입출력전압이득특성을 갖게 된다.

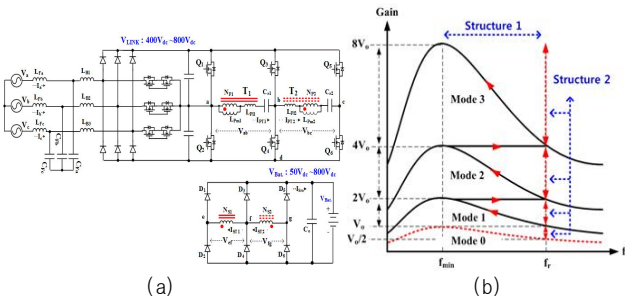


그림 1. 제안된 LLC 공진컨버터 (a) 및 입 출력전압이득특성 (b)

동작모드변환 및 가변스위칭 동작주파수 제어를 통해 넓은 출력전압(50V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>) 제어(Structure 1)가 가능하나 이와 같은 동작은 각각 동작모드에서 가변스위칭 동작주파수 제어를 통해 2배의 출력제어전압을 얻기 위해 변압기(T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) 자화인덕

턴스(L<sub>pm1</sub>, L<sub>pm2</sub>)를 작게 설계해야하는데 이는 도통손실증가 및 효율개선에 어려움을 준다. 본 논문에서는 그림 1(b) 제어방식(Structure 2)에 나타낸바와 같이 동작모드변환 및 LLC 공진컨버터 입력단 전압을 그림 1(a)에 나타낸 비연속 정류기를 통해 가변(400V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>)제어함으로써 제안된 LLC공진컨버터가 넓은 출력전압(50V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>) 제어가 가능하도록 구성하였다.

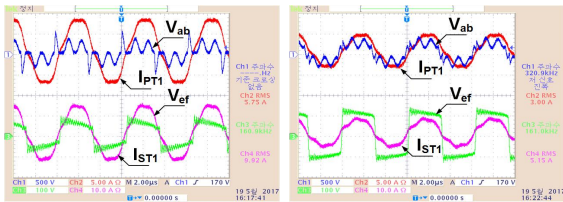
### 3. 실험 결과

본 논문에서는 가변스위칭 동작주파수 제어(Structure 1)를 통해 넓은 출력전압제어 특성을 갖는 LLC공진컨버터와 입력전압 가변제어동작(Structure 2)을 통해 넓은 출력전압 범위에서 동작하는 LLC공진컨버터를 비교 분석한 내용으로 3.3kW급 시제품 제작 및 실험을 통해 적용가능성을 검증하였다. 실험에 사용된 DC전원장치(2.2kW)용량제한에 따라 2kW까지 실험하였다. 표 1은 입력전압 가변 실험에 적용된 주요정격과 사양, 변압기파라미터를 나타내었다.

표. 1 입력전압 가변 시 주요 정격 및 변압기 파라미터

주요 정격	입력전압(V <sub>in</sub> )		
	400V <sub>DC</sub> ~ 800V <sub>DC</sub>		
	출력전압(V <sub>o</sub> )/출력전류(I <sub>o</sub> )		
	50V <sub>DC</sub> /20A ~ 800V <sub>DC</sub> /2.5A		
적용 소자	주 스위칭소자(Q <sub>1</sub> ~Q <sub>6</sub> )	SCT3030KL(1200V, 70A, R <sub>DS(on)</sub> :30mΩ, SiC)	
	역병렬 다이오드	SCS240KE2(1200V, 40A, V <sub>F</sub> :1.4V, SiC)	
	2차 출력정류다이오드	GP2D050A120B(1200V, 50A, V <sub>F</sub> :1.6V, SiC)	
파라미터	공진 커패시터(C <sub>r1</sub> , C <sub>r2</sub> )	15nF/1600V <sub>DC</sub>	
	공진주파수(f <sub>r</sub> )	158kHz	
변압기 (T <sub>1</sub> )	1차측자기인덕턴스	L <sub>P1</sub>	309.6uH
	2차측자기인덕턴스	L <sub>S1</sub>	64.83uH
	등가누설인덕턴스	L <sub>eq1</sub>	73.18uH
	권선비	n1(N <sub>P1</sub> /N <sub>S1</sub> )	2(24T/12T)
	변압기 (T <sub>2</sub> )	1차측자기인덕턴스	L <sub>P2</sub>
	2차측자기인덕턴스	L <sub>S2</sub>	61.59uH
	등가누설인덕턴스	L <sub>eq2</sub>	70.12uH
	권선비	n2(N <sub>P2</sub> /N <sub>S2</sub> )	2(24T/12T)

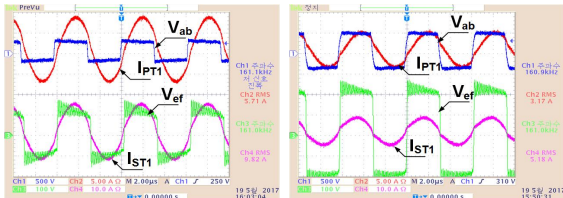
그림 2부터 그림 5는 입력전압 가변제어동작(Structure 1)에 따른 공진변압기 T<sub>1</sub>의 1차권선(N<sub>P1</sub>) 양단전압(V<sub>ab</sub>) 및 전류(I<sub>PT1</sub>)와 2차권선(N<sub>S1</sub>) 양단전압(V<sub>ef</sub>) 및 전류(I<sub>ST1</sub>)를 측정된 파형으로, 그림 2는 동작모드0일 때 출력전압 50V<sub>DC</sub>와 100V<sub>DC</sub>의 1kW 부하조건에서 측정된 파형이고, 그림 3은 동작모드1에서 출력전압 100V<sub>DC</sub>와 200V<sub>DC</sub>일 때 그림 4는 동작모드2에서 출력전압 200V<sub>DC</sub>와 400V<sub>DC</sub>, 그림 5는 동작모드3에서 출력전압 400V<sub>DC</sub>와 800V<sub>DC</sub>, 2kW 부하조건에서 각각 측정된 실험파형이다. 각 동작모드에서 입력전압을 가변하여 출력전압을 제어 하였으므로 자화인덕턴스(L<sub>pm1</sub>, L<sub>pm2</sub>)는 주스위칭소자(Q<sub>1</sub>~Q<sub>6</sub>)의 영전압스위칭(ZVS)을 위한 최소 자화인덕턴스(L<sub>pm1</sub>, L<sub>pm2</sub>)로 설계되어 적용 실험하였다.



(a) 출력전압 50V<sub>DC</sub>/1kW, (b) 출력전압 100V<sub>DC</sub>/1kW

(ch1:500V/Div, ch2:5A/Div, ch3:100V/Div, ch4:10A/Div, 2us/Div)

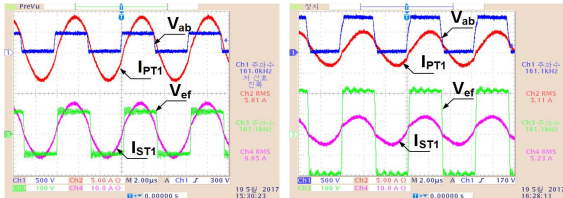
그림 2. 입력전압 가변 시 동작모드 0(Mode 0, 50V<sub>DC</sub>~100V<sub>DC</sub>) 실험파형



(a) 출력전압 100V<sub>DC</sub>/2kW, (b) 출력전압 200V<sub>DC</sub>/2kW

(ch1:500V/Div, ch2:5A/Div, ch3:100V/Div, ch4:10A/Div, 2us/Div)

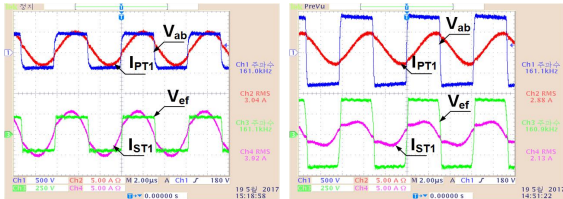
그림 3. 입력전압 가변 시 동작모드 1(Mode 1, 100V<sub>DC</sub>~200V<sub>DC</sub>) 실험파형



(a) 출력전압 200V<sub>DC</sub>/2kW, (b) 출력전압 400V<sub>DC</sub>/2kW

(ch1:500V/Div, ch2:5A/Div, ch3:100V/Div, ch4:10A/Div, 2us/Div)

그림 4. 입력전압 가변 시 동작모드 2(Mode 2, 200V<sub>DC</sub>~400V<sub>DC</sub>) 실험파형



(a) 출력전압 400V<sub>DC</sub>/2kW, (b) 출력전압 800V<sub>DC</sub>/2kW

(ch1:500V/Div, ch2:5A/Div, ch3:250V/Div, ch4:5A/Div, 2us/Div)

그림 5. 입력전압 가변 시 동작모드 3(Mode 3, 400V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>) 실험파형

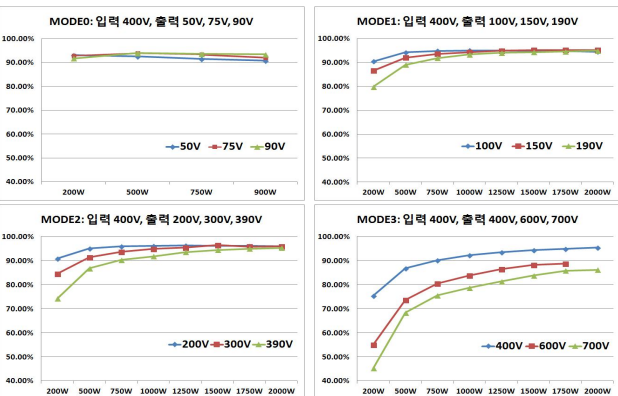


그림 6. 동작주파수 제어 시 동작모드 및 출력전압에 따른 효율특성

그림 6은 가변스위칭 동작주파수 제어(Structure 1)에서의 각각의 동작모드에 대한 효율특성을 나타낸 것으로 2kW 부하 조건에서 최소효율은 동작모드3에서 출력전압 700V<sub>DC</sub> 조건에서 86.21%로 측정되었고, 최대효율 동작모드2에서 출력전압 200V<sub>DC</sub>, 300V<sub>DC</sub> 조건에서 95.93%로 가장 높게 측정되었다. 그림 6의 효율특성에서 출력전압이 높아질수록 자화전류가 증가하여 효율개선에 있어 어려움이 있음을 확인할 수 있다.

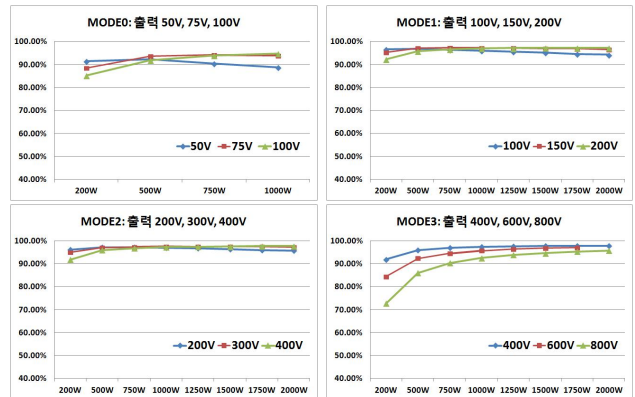


그림 7. 입력전압 가변 시 동작모드 및 출력전압에 따른 효율특성

그림 7은 입력전압 가변제어동작(Structure 2)에서 각각의 동작모드에 대한 효율특성을 나타내었다. 2kW 부하 조건에서 최소효율은 동작모드3에서 출력전압 800V<sub>DC</sub> 200W 부하 조건에서 72.79%로 가장 낮게 측정되었고, 최대효율은 동작모드3에서 출력전압 400V<sub>DC</sub> 조건에서 97.79%로 가장 높게 측정되었다. 또한 입력전압(V<sub>Link</sub>)의 가변 범위는 386V<sub>DC</sub>에서 830V<sub>DC</sub>로 동작함을 확인하였다.

이와 같이 가변스위칭 동작주파수 제어(Structure 1)와 입력전압 가변제어동작(Structure 2) 실험에 대하여 비교 분석한 결과 가변스위칭 동작주파수 제어에 비해 입력전압 가변동작이 자화전류에 의한 손실이 최소화되어 넓은 출력전압 제어 범위에서 동작하는데 있어 적합함을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 넓은 출력전압(50V<sub>DC</sub>~800V<sub>DC</sub>) 제어 범위에 대응할 수 있고 모든 출력전압 및 부하 범위에서 영진압스위칭(ZVS)가 가능한 LLC 공진컨버터를 제안하였다. 그리고 제안된 LLC 공진컨버터의 가변스위칭 동작주파수 제어(Structure 1)와 입력전압 가변제어(Structure 2)를 통한 넓은 출력전압 제어에 대하여 비교 실험하였다. 가변스위칭 동작주파수 제어는 각 동작모드에서 2배의 출력전압을 제어하기 위해 낮은 자화인덕턴스(L<sub>Pm1</sub>, L<sub>Pm2</sub>)로 설계되어 출력전압이 높아질수록 자화전류가 증가하여 높은 출력전압에서는 효율개선에 있어 어려움이 있었으나, 입력전압 가변동작은 주스위칭소자(Q<sub>1</sub>~Q<sub>6</sub>)의 영진압스위칭(ZVS)를 위한 최소 자화인덕턴스(L<sub>Pm1</sub>, L<sub>Pm2</sub>)로 설계되기 때문에 자화전류에 의한 도통손실을 최소화해 넓은 출력전압 제어 범위에서 동작하는데 있어 적합함을 확인할 수 있었다.

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

#### 참고 문헌

- [1] Zhengyang Liu, Bin Li, Fred C. Lee, and Qiang Li, "Design of CRM AC/DC Converter for Very High-Frequency High-Density WBG-Based 6.6kW Bidirectional On-Board Battery Charger", 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp1-8, 2016.9
- [2] 주중성, 허예창, 마리우스, 김은수, 국윤상 "넓은 입력 또는 출력전압 제어 LLC 공진컨버터", 2016년도 전력전자학술대회논문집, pp153-154, 2016.11
- [3] 김은수, "넓은 입력 전압 범위 또는 넓은 출력 전압 범위에서 동작하는 LLC 공진 컨버터", 2016년 11월 특허출원