

# 고정된 주파수에서 넓은 입력전압과 부하범위를 갖는 고효율 LLC 공진형 컨버터

심치화, 정봉근, 사란, 품소피약, 김은수<sup>†</sup>, 원종섭

## High Efficiency LLC Resonant Converter with Wide Input Voltage and Load Range at Fixed Frequency

C.H Sim, B.G Chung, S. Phum, S. Mease E.S Kim<sup>†</sup>, J.S Won  
JeonJu University

### 2. 본 론

#### 1. 서론

일반적으로 일사량에 따라 출력 변화 폭이 큰 태양광 발전에서 일정한 출력전압을 얻기 위해서 사용되는 DC/DC 컨버터는 그림1의 비절연형 타입과 절연형 타입으로 구성할 수 있다. 비절연형 타입의 경우에는 높은 효율특성을 얻을 수 있으며 부품 수가 저감되는 장점을 가지게 되지만 계통연계를 위해 50/60Hz 큰 사이즈의 변압기를 사용하여 인버터를 구성하기 때문에 시스템의 부피 뿐만 아니라 무게가 증가되는 단점과 함께 제작 단가가 증가되는 문제점을 가지게 된다. 따라서 고집적화 고기능화를 위해서 절연형 타입의 DC/DC 컨버터를 적용한 PCS에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.<sup>[1]</sup> 절연형 타입의 DC/DC 컨버터는 비절연형 타입의 DC/DC 컨버터에 비해 구성 부품 수는 증가되지만 50/60 Hz의 저주파 변압기를 사용하지 않고 계통연계가 가능하기 때문에 전체 시스템의 부피는 감소되는 장점을 가지게 된다. 하지만 부품수의 증가와 넓은 입력전압 변화에도 일정한 출력전압을 얻기 위해서는 작은 값의 자화인덕턴스를 가지는 변압기를 사용하여 DC/DC 컨버터를 구성해야 하기 때문에 전체적인 효율이 감소되는 문제점을 가지게 된다. 절연형 DC/DC 컨버터의 경우 고집적화에 용이하며 높은 효율특성을 가지는 LLC 공진컨버터가 최근 적용되고 있다.<sup>[2]</sup> 하지만 LLC 공진컨버터인 경우 넓은 입력전압에서 일정한 출력전압을 얻기 위해 사용되는 작은 값의 자화인덕턴스에 의해 1차측 주스위치의 도통손실이 증가되며 입력전압이 높거나 출력부하가 경부하시에 일정한 출력전압을 얻기 위해서는 높은 주파수에서 동작을 하게 됨에 따라 순환전류가 증가하게 되어 낮은 효율 특성을 가지는 문제점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 1차측 주스위치는 고정된 스위칭 주파수에서 동작을 하며 2차측 보조 스위치의 턴-온 시간을 제어하여 일정 출력전압 제어를 하는 큰 값의 자화인덕턴스를 가지는 변압기를 적용한 LLC 공진형 컨버터를 제안하였고, 이에 대한 이론적 해석과 동작과형 및 시뮬레이션을 통해 1.2kW급 시제품을 제작하여 실험결과에 대해 서술하였다.

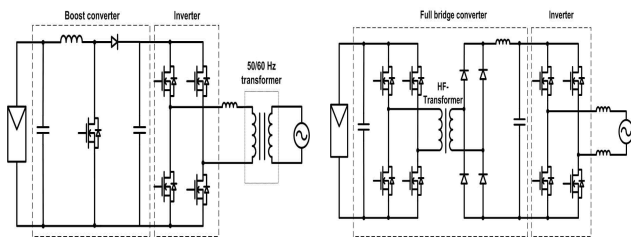
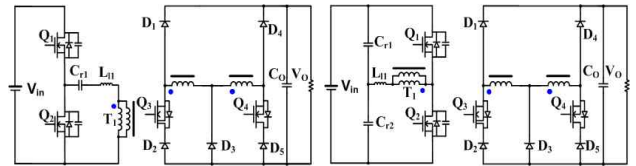


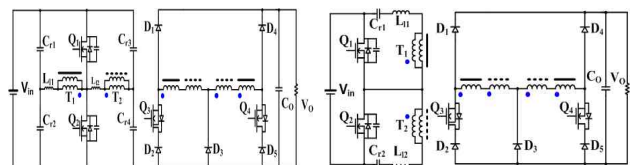
그림 1. 기존 태양광 발전 계통 연계 전원장치 회로도

#### 2.1 제안된 회로의 시스템 구성

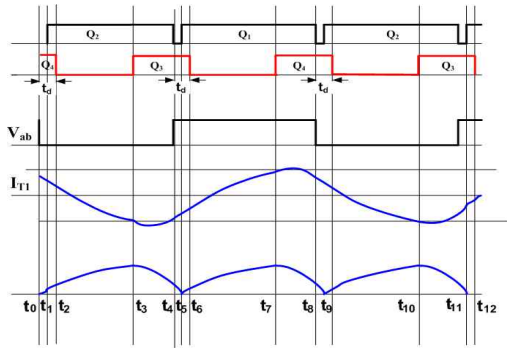
기존 2차측 보조 스위치의 턴-온 시간을 제어하여 출력전압을 제어하는 경우 정류부는 2개의 보조스위치와 6개의 정류 다이오드로 구성이 되어 정류 구조가 복잡하다.<sup>[3]</sup> 본 논문에서는 그림 2(a),(b)와 같이 2차측 전류 경로를 달리 하여 2개의 보조 스위치와 5개의 정류다이오드로 구성된 회로를 제안하였다. 제안된 그림2(a)는 하나의 변압기를 적용하기 때문에 높은 출력전압이 필요한 경우 2차측 권선의 턴 수가 증가됨에 따라 2차측 누설인덕턴스가 증가하게 되어 보조스위치의 턴-온 손실도 증가되는 문제점을 가지게 된다. 또한 출력용량에 따라 변압기 크기가 결정이 되기 때문에 큰 출력용량을 요구되는 시스템에서 하나의 변압기로만 구성할 경우 집적화를 하는데 한계를 가지기 때문에 낮은 출력전압과 출력용량에 적합한 회로이며, 그림2(b)는 2차측 권선이 상호 직렬로 연결되어 있어 작은 2차측 턴 수에도 높은 출력전압을 얻기에 용이하도록 하였으며 감소된 턴-수에 의해 보조스위치의 턴-온 손실도 저감시킬 수 있게 된다. 또한 두 개의 변압기가 출력용량에 대해 분담하여 감당하며 1차측 권선에 흐르는 전류 또한 분담하여 작은 코어를 사용하여 시스템을 구성할 수 있기 때문에 집적화에 용이할 뿐만 아니라, 공진 커패시터에 흐르는 전류를 감소시켜 작은 전류 내량을 가지는 커패시터 사용이 가능한 장점을 가지고 있기 때문에 높은 출력 용량이나 높은 출력전압에 적합한 구조를 가지고 있다. 그림2(a),(b)의 제안된 넓은 입력전압과 넓은 부하범위를 가지는 LLC 공진컨버터는 큰 값의 자화인덕턴스에 의해 1차측 실패전류를 감소시켜 높은 효율 특성을 가지며 입력전압 변화 또는 부하 변화에 상관없이 1차측 주 스위치는 고정된 주파수에서 지상전류가 흐르기 때문에 ZVS 동작을 할 수 있다. 또한 입력전압이 높거나 경부하시에도 일정한 주파수에서 동작하기 때문에 순환전류를 감소 시켜 높은 효율 특성을 가지도록 하였다.



(a) 하나의 공진탱크로 구성된 LLC 공진컨버터



(b) 두 개의 공진탱크로 구성된 LLC 공진컨버터



(c) LLC 공진형 컨버터의 동작파형

그림 2 제안된 넓은 입력전압을 가지는 LLC공진 컨버터

보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)의 턴-온 타이밍을 그림 2(c)에 나타난 t<sub>d</sub>만큼 지연시켜 2차측 누설인덕턴스에 저장된 에너지에 의해 흐르는 지연전류가 끝나는 시기까지 턴-온 시켜 보조스위치와 정류다이오드가 ZCS 턴-오프가 되는 장점을 가지고 있다. 또한 그림 2(a), 그림 2(b)와 같이 공진커패시터에 흐르는 전류를 분담하여 집적화에 용이하도록 하기 위해서 두 개의 공진커패시터(C<sub>r1</sub>,C<sub>r2</sub>)와 하나의 변압기(T<sub>1</sub>)로 구성된 LLC 공진컨버터와 네 개의 (C<sub>r1</sub>,C<sub>r2</sub>,C<sub>r3</sub>,C<sub>r4</sub>)의 공진 커패시터와 두 개의 변압기(T<sub>1</sub>,T<sub>2</sub>)로 구성된 LLC 공진컨버터를 제안하였다.

## 2.2. 단일변압기를 적용한 LLC 공진컨버터 이득특성

그림2(a)는 넓은 입력전압 변화 범위에서 일정한 출력전압을 얻는 하나의 공진탱크로 구성된 LLC 공진컨버터는 두 개의 2차측 권선을 가지며 같은 극성으로 서로 직렬로 연결된 형태를 가지게 된다. 따라서 입력전압 변화 또는 부하변화에 따른 2차측 보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)의 턴-온 시간 제어에 따라 2차측 흐르는 전류의 경로는 달리 동작을 하게 된다. 이에 따라 보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)가 동작하지 않았을 때 변압기와 보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)가 동작하였을 때 변압기가 달리 존재하며 이에 따른 전압이득 특성 또한 다르게 된다. 제작된 변압기의 파라미터를 Math-CAD의 시뮬레이션 결과 보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)가 동작하였을 때 전압이득(그림3 점선)과 보조스위치(Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>)가 동작하지 않을 때의 두 개의 전압이득(그림3 실선)에 대해 나타낼 수 있다. 제작한 변압기의 파라미터를 추출하여 등가누설인덕턴스(L<sub>eq</sub>)와 공진커패시터 (C<sub>r1</sub>)에 의해 결정된 기준주파수(f<sub>n</sub>)와 1차측누설인덕턴스(L<sub>l1</sub>)와 자화인덕턴스(L<sub>m</sub>)의 비율과 1차측으로 반영된 2차측누설인덕턴스(L<sub>l2</sub>)와 자화인덕턴스(L<sub>m</sub>)의 비율에 의해 얻어진 전압이득특성식 G는 식 1에서처럼 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{1}{N} \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{f_n}\right)^2 \cdot \left(A + \frac{B}{B+1}\right) + jQ \left(\frac{1}{N^2} + \frac{B}{N^2}\right) \left(f_n - \frac{1}{f_n}\right)} \right| \quad (1)$$

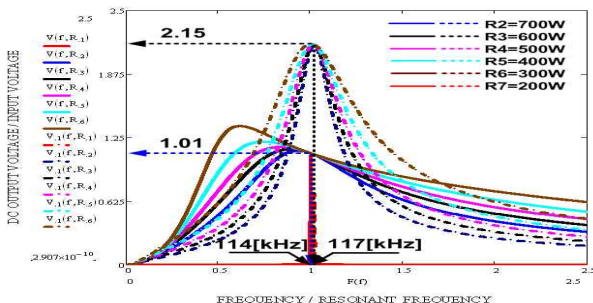


그림 3 하나의 공진탱크를 적용한 LLC공진 컨버터 시뮬레이션

## 2.3. Two Tank LLC 공진컨버터 적용 이득특성

출력전압이 높으며 큰 출력 용량이 필요한 경우 두 개의 공진탱크로 구성된 LLC 공진형 컨버터가 용이하다. 그림2(b)와 같이 두 개의 공진탱크로 구성함으로써<sup>[4]</sup> LLC 공진컨버터의 2차측은 상호 직렬로 연결되어 있기 때문에 적은 턴수로도 높은 출력전압을 얻을 수 있으며 적은 턴수로 인해 2차측 누설인덕턴스가 감소하게 되어 보조스위치의 턴-온 손실은 감소될 수 있다. 또한 1차측 권선에 흐르는 전류를 감소시켜 작은 직경을 가지는 권선을 사용하여 변압기를 구성 할 수 있기 때문에 작은 변압기를 사용하여 시스템을 구성할 수 있는 장점을 가진다. 하지만 1차측은 두 개의 공진커패시터와 두 개의 변압기 그리고 두 개의 전압원으로 구성되어 있으며 2차측 권선 상호 직렬로 연결되어 있어 각 공진탱크간에 서로 결합이 되는 상태를 가지기 때문에 이득특성에 중요한 영향을 미치게 된다. 따라서 제안된 회로를 해석하기 위해 중첩의 원리를 사용하여 회로 해석해야 한다. 중첩의 원리를 적용하여 등가회로를 구성하게 되어 얻어진 두 개의 입력단 V<sub>ab</sub>, V<sub>cd</sub>와 두 개의 출력단 V<sub>o1</sub>, V<sub>o2</sub>에 대한 임피던스 관계의 바탕으로 얻어진 입력단 V<sub>ab</sub>와 출력단 V<sub>o1</sub>에 대한 전압이득특성 G<sub>1</sub>은 식(2)과 같고, 입력단 V<sub>cd</sub>와 출력단 V<sub>o2</sub>에 대한 전압이득특성 G<sub>2</sub>는 식(3)과 같다. 따라서 두 개의 공진회로를 갖는 LLC 공진컨버터의 전압이득특성 G<sub>T</sub>은 G<sub>1</sub>과 G<sub>2</sub>의 합으로 식(4)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_1 = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{\left(1 + A_1 - \frac{1}{w^2 L_{m1} C_{r1}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac1}}\right) + j \frac{w L_{m2}}{N^2 R_{ac1}} \left[\left(1 + A_1 - \frac{1}{w^2 L_{m1} C_{r1}}\right) (B_1 + 1) - 1\right]} \right| \quad (2)$$

$$G_2 = \frac{1}{N} \cdot \left| \frac{1}{\left(1 + A_2 - \frac{1}{w^2 L_{m2} C_{r2}}\right) \left(1 + \frac{Z_{s21}}{N^2 R_{ac2}}\right) + j \frac{w L_{m2}}{N^2 R_{ac2}} \left[\left(1 + A_2 - \frac{1}{w^2 L_{m2} C_{r2}}\right) (B_2 + 1) - 1\right]} \right| \quad (3)$$

$$G_T = G_1 + G_2 \quad (4)$$

식(2)~(4)을 통해 얻은 부하변화에 따른 전압이득 특성은 그림 4에 나타내었다. 점선의 전압이득 특성은 보조스위치 Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>가 동작하지 않았을 때 전압이득이며 실선의 전압이득 특성은 보조스위치 Q<sub>3</sub>,Q<sub>4</sub>가 동작하였을 때 전압이득 특성이다. 전압이득 특성을 보면 알 수 있듯이 보조스위치가 완전 턴-온 되었을 때와 완전 턴-오프 되었을 때 등가누설 인덕턴스에 의한 공진 주파수는 거의 같은 지점에 존재하여 보조스위치의 동작에 상관없이 1차측 주스위치는 고정된 주파수에서 ZVS동작이 가능한 것을 확인할 수 있다.

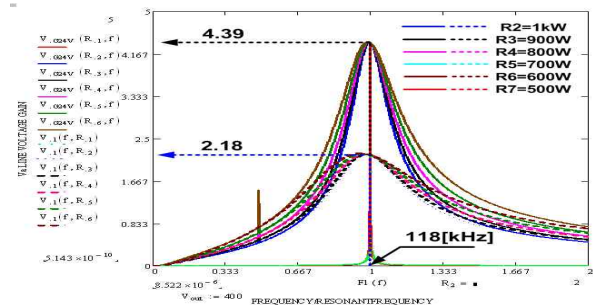
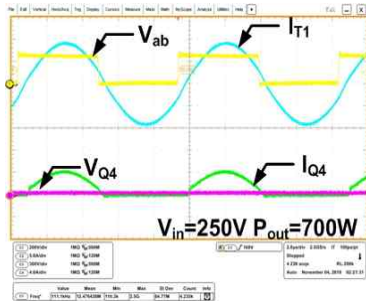


그림 4. 두 개의 공진탱크를 적용한 LLC공진컨버터 시뮬레이션

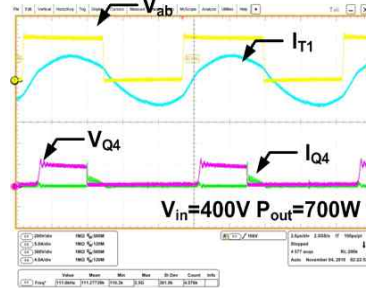
## 3. 실험 결과

본 논문에서 제안한 넓은 입력 전압 범위를 가지는 LLC 공진컨버터에 대한 실험을 하기 위해 입력전압 범위 (250VDC~400VDC)에 출력전압 250VDC, 출력용량 700W를 만족하는 그림 2(a)의 하나의 변압기로 구성된 회로에 대한 실험

파형을 그림5에 나타내었고, 입력전압 범위(220VDC~320VDC)에 출력전압 400VDC, 출력용량 1kW를 만족하는 그림2(b)의 두 개의 변압기를 적용한 공진컨버터에 대한 실험파형을 그림6에 나타내었다. 그림 5와 그림 6을 통해 알 수 있듯이 1차측 주스위치는 입력전압과 출력부하 대해 모두 ZVS 동작을 하는 것을 알 수 있으며 보조스위치의 양단 전압은 출력 전압만큼 제한되는 것을 확인 할 수 있다. 또한 보조스위치가 턴-오프시 공진커패시터의 리플 전압을 상승시켜 2차측으로 공진전류가 흐를 수 있도록 하기 위해 작은 공진 커패시터를 사용 하여야 하며 작은 공진 커패시터 사용에 따라 원하는 스위칭 주파수(100kHz) 대역에 맞추기 위해 등가 누설인덕턴스를 증가시켜야 한다. 따라서 변압기 권선 방법을 권선 분리식으로 하여 등가 누설인덕턴스를 증가 시키도록 하였다.

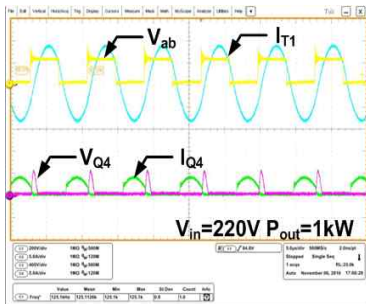


(a) 입력 250VDC, 출력 250VDC, 700W

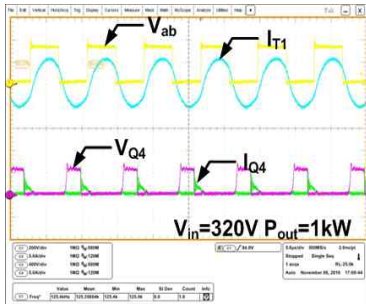


(b) 입력 400VDC, 출력 250VDC, 700W

그림 5. 하나의 변압기로 구성된 회로를 적용한 각 전압별 실험파형

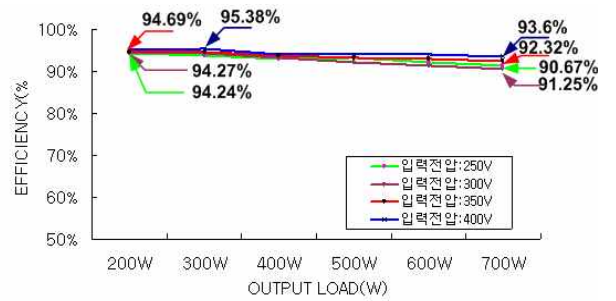


(a) 입력 220VDC, 출력 400VDC, 1kW

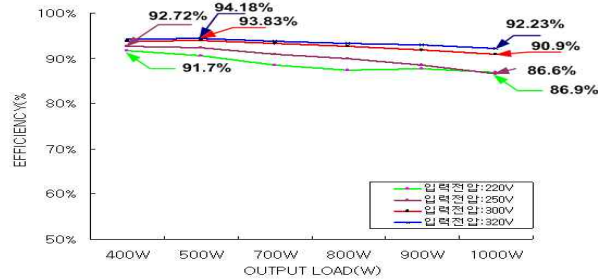


(b) 입력 320VDC, 출력 400VDC, 1kW

그림 6. 두 개의 변압기로 구성된 회로를 적용한 각 전압별 실험파형



(a) 하나의 변압기로 구성된 제한된 회로 효율특성



(b) 두개의 변압기로 구성된 제한된 회로 효율특성

그림 7. 입력전압에 따른 부하별 효율 측정결과

## 5. 결론

본 논문에서 제안된 회로는 1차측 주스위칭 소자는 고정된 주파수에서 동작을 하도록 하였고 2차측 보조스위치의 턴-온 시간 조절을 통해 출력전압을 제어하도록 하여 높은 효율특성을 가지는 LLC 공진형 컨버터를 제작하였고 실험 하였으며 전체적으로 높은 효율특성을 가지는 실험결과를 얻을 수 있었다.

이 논문은 한국연구재단(KRF-2008-313-D00369)주관으로 수행된 과제임

## 참고 문헌

- [1] Soeren Baekhoej Kjaer, Member, IEEE, John K. Pedersen, Senior Member, IEEE, and Frede Blaabjerg, Fellow, IEEE "A Review of Single-Phase Grid-Connected Inverters for Photovoltaic Modules" IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 41, NO. 5, 2005, pp.1292-1306
- [2] Christian P. Dick, Heinz van der Broeck, etc. "Design and Implementation of a Modular Interactive System as Teaching Project" PESC '06. 37th IEEE pp 1-7, 2006. 6
- [3] F.Canales, P. Barbosa and F. C.Lee, "A wide Input Voltage and Load Output Variations Fixed-Frequency ZVS DC/DC LLC Resonant Converter for High-Power Applications," in IEEE Proc.7th Annual Meeting of Industry Applications Conference, pp.2306-2313, Nov/Dec.200
- [4] 김주훈, 강성인, 김은수, 전용석, 이재삼, 허동영 "두개의 변압기와 공진 탱크로 구성된 LLC 공진 컨버터" 전력전자학회논문지 제14권 제5호. pp 406 ~ 414