

LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터

이현관, 이기식, 정봉근, 공영수, 김은수, 차인수*, 윤정필*
 전주대학교, 동신대학교*

A Boost DC/DC converter using LLC series resonant converter

H.K Lee, G.S Lee, B.G Chung, Y.S Kong, E.S Kim, I.S Cha*, J.P Yoon*
 Jeonju University, Dongshin University*

Abstract - Recently, the high frequency boost DC-DC converter has been widely used for the PCS system because of its small size and low cost. In this paper, the experimental results of the boost DC/DC converter using LLC series resonant converter are verified on the simulation based on the theoretical analysis and the 1kW experimental prototype.

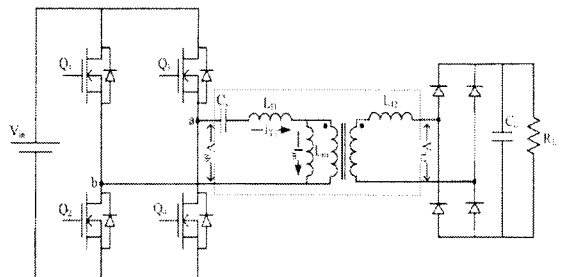
1. 서 론

최근 화석에너지 고갈과 세계적으로 국제 석유 값 상승 등으로 태양광 발전 및 연료전지를 이용한 대체에너지 발전시스템 기술개발이 요구되고 있다. 이러한 연료전지나 태양광을 이용한 계통연계형 발전 시스템은 일반적으로 대체에너지에서 발전된 직류전압을 비절연 승압형 DC/DC 컨버터(Boost converter)를 사용하여 높은 전압으로 승압시켜 고주파 인버터 입력전원으로 공급하고 고주파 인버터를 통해 고주파 AC 전압을 변환시킨 후 저주파 60Hz 절연형 변압기를 사용하여 계통 연계하는 시스템으로 구성되어 있다. 하지만 최근에 PCS(Power Conditioner System)는 고집적화 및 고기능화를 통해 소형화 및 단가 저감하는 추세에 있다. 따라서 PCS 시스템에 적용되는 승압형 DC/DC 컨버터 또한 소형화 및 단가저감을 위해서 고주파 승압형 DC/DC 컨버터가 꾸준히 증가되어 왔다. 낮은 입력전압(24V_{DC}~27V_{DC})에서 높은 출력전압(400VDC)으로 승압하는 고주파 승압 DC-DC 컨버터에 있어서 검토 될 수 있는 주회로는 일반적으로 전압형 컨버터(Voltage-fed Converter)와 전류형 컨버터(Current-fed converter)로 나눌 수 있다. 이러한 고주파 승압형 DC/DC 컨버터는 절연된 높은 전압으로 승압하기 위해서 변압기의 높은 턴수비가 필요하게 되고 이에 따라 변압기의 누설인덕턴스 증가로 순환전류에 따른 도통 손실 증가와 서지 전압 등으로 직류 승압 컨버터는 낮은 효율 특성을 갖게 된다. 따라서, 본 논문에서는 이를 보완한 새로운 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터를 제안하였다. 이에 대한 이론적 해석 및 시뮬레이션을 통해 1kW급 시제품을 제작하여 동작원리 및 실험한 결과에 대해 서술하고자 한다.

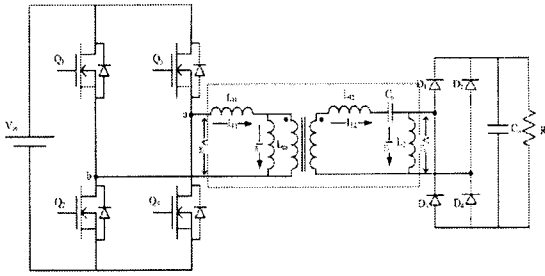
2. 제안된 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC-DC 컨버터

본 논문에서는 승압모드와 강압모드 둘 다 동작될 수 있고, 상대적으로 좁은 주파수 제어범위에서 넓은 범위의 입·출력 전압제어를 할 수 있으며, 스위칭 동작영역에서 모든 스

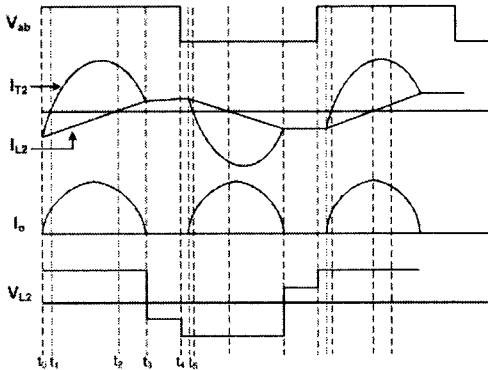
위칭소자들이 소프트 스위칭 할 수 있는 등의 여러 장점들을 갖고 있는 고효율 LLC 직렬 공진컨버터 적용 승압형 DC-DC 컨버터를 제안하였다. 이러한 LLC 직렬 공진 컨버터는 고주파 스위칭 동작에서 몇 가지 장점을 가지고 있는데 첫째는 크기와 부피를 줄일 수 있고, 두 번째는 스위칭 손실과 고조파 성분을 줄일 수 있으며, 세 번째는 높은 효율특성을 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 본 논문에서 적용하고자 하는 LLC 직렬공진컨버터가 낮은 입력전원(24V_{DC}~27V_{DC})에서 높은 출력전압(400VDC)으로 전압을 승압시켜 동작되므로 그림 1(a)에서와 같이 LLC 직렬공진컨버터의 공진요소인 직렬공진 커패시터를 1차측에 사용한다면 1차측에 흐르는 대전류로 인해 직렬공진 커패시터가 열화 되어 특성이 저하될 수 있고, 커패시터 크기 증가에 따른 고집적화의 어려움 및 적용 단가 상승 등에 따라 변압기 1차측에 사용하기에는 여러 문제점이 따른다. 따라서, 이러한 문제점을 개선하기 위해 본 논문에서는 그림 1(b)에서와 같이 LLC 직렬공진 컨버터의 공진요소를 변압기 2차측에 위치시켜 직렬공진을 위한 직렬커패시터(C_S) 크기 및 단가를 저감할 수 있었고, 변압기 자화인덕턴스(L_m : Magnetizing Inductance)를 가능한 크게 하기위해 변압기에 공극(Gap)을 두지 않았으며 1차측 누설인덕턴스(L₁₁)는 최소화하고 2차측 누설인덕턴스(L₂₂)를 증가시켜 직렬공진소로 이용하였다. 특히, 변압기 1차측 Bridge 주 스위칭 소자의 영전압 스위칭을 위해 필요로 하는 전류를 흐르도록 하기위해 변압기 2차측에 병렬인덕터(L₂)를 추가하여 LLC 직렬공진컨버터의 특성을 얻도록 하였다. 추가된 병렬 인덕터(L₂) 값 변화에 따라 높은 전압 이득특성을 갖게 되어 변압기의 적은 턴-수비에도 높은 출력전압을 얻을 수 있고 넓은 입력전압 범위와 모든 부하 범위에서 사용 가능한 장점을 가지게 되었다.



(a) 1차측에 직렬공진커패시터가 적용된 LLC 직렬공진컨버터



(b) 제안된 LLC 직렬공진 컨버터적용 승압기 주회로



(c) 동작파형

그림 1. 제안된 LLC 직렬공진 컨버터적용 승압기 주회로와 동작파형

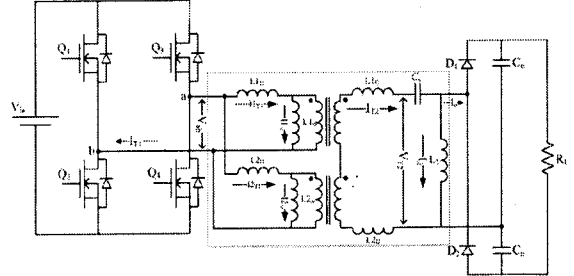
본 논문에서 실험 적용한 회로는 그림2(a)에서 보는 바와 같이 변압기의 손실저감과 고집적화를 위하여 주회로를 일부 수정하였다. 우선 변압기의 손실저감과 고집적화를 위해서 변압기 2대를 병렬로 연결하여 변압기의 크기 및 각 변압기 1차측에 흐르는 전류를 1/2로 줄였으며 변압기의 2차측을 직렬로 연결하여 변압기의 턴수비를 줄이고자 하였다. 또한 변압기 2차측 정류회로를 Voltage doubler를 사용하여 병렬 인덕터(L₂) 양단전압을 1/2로 줄여 병렬 인덕터에 흐르는 전류를 적게 흐르게 하였다. 그림 2(a)는 LLC 직렬공진컨버터에 대한 주회로이고, 그림 2(b)는 등가회로를 나타낸 것이다. 그림 2(b)의 V_{T2}는 주스위칭 소자(Q₁, Q₂, Q₃, Q₄)의 스위칭 동작에 의해서 얻어진 단자전압을 2차측에서 권선비를 고려하여 바라본 1차측 단자전압을 구형파 전원으로 등가화한 것이며, C_s과 L₁₂, L₂₂, $\frac{1}{N^2}(L_{11} + L_{21})$ 는 2차측의 공진을 위한 직렬 커패시터와 2차측 누설 인덕턴스 및 2차측에서 권선비를 고려한 1차측 누설인덕턴스이고, L₂는 병렬 인덕터, L_T는 2차측에서 권선비(N = n₁/n₂)를 고려하여 바라본 1차측 누설인덕턴스와 2차측 누설인덕턴스의 합인 전체누설인덕턴스이고 R_{eq}는 등가 부하저항으로 부하저항, 정류다이오드 그리고 커패시터 필터를 등가화한 값이다. 그리고 본 논문에서는 그림 2(a)를 등가화한 그림 2(b)의 등가회로로부터 등가 부하저항이 단락일 때의 주파수 즉 공진주파수와 개방일 때의 주파수 즉 코너 주파수(Conner frequency)를 식(3), (4)에 정의하였다.

$$R_{eq} = \frac{2}{\pi^2} R_L \quad (1)$$

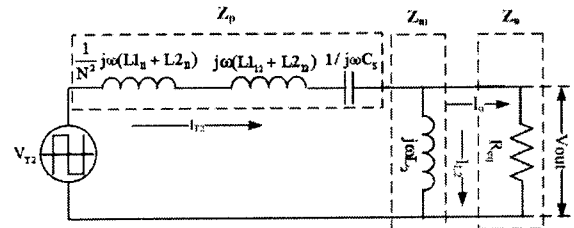
$$L_T = \frac{1}{N^2} \cdot (L_{11} + L_{21}) + L_{12} + L_{22} \quad (2)$$

$$f_r = 1/2\pi \sqrt{L_T \cdot C_s} \quad (3)$$

$$f_o = 1/2\pi \sqrt{(L_T + L_2) \cdot C_s} \quad (4)$$



(a) 제안된 LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC-DC 컨버터 주회로



(b) 등가회로

그림 2. LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC-DC 컨버터 주회로와 등가회로

규준화된 공진 주파수는 공진 주파수(f_r)와 스위칭 주파수(f_s)의 비이고, A는 병렬인덕턴스(L₂)와 전체누설인덕턴스(L_T)의 비이다. 그리고 Q는 Quality Factor이다.

$$f_n = \frac{f_s}{f_r} \quad (5)$$

$$A = \frac{L_T}{L_2} \quad (6)$$

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_r \cdot L_T}{R_{eq}} \quad (7)$$

그리고 임피던스 관계 및 위의 수식(1)-(7)를 바탕으로 얻어진 입·출력에 대한 전압이득(M) 특성은 식(8)과 같이 얻었다.

$$\begin{aligned} |M| &= \left| \frac{Z_o Z_m}{Z_o Z_p + Z_m Z_p + Z_o Z_m} \right| \\ &= \left| \frac{1}{1 + \frac{Z_p}{Z_m} + \frac{Z_p}{Z_o}} \right| \\ &= \left| \frac{1}{1 + A - \left(\frac{1}{\omega_n}\right)^2 \cdot A + jQ\left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n}\right)} \right| \end{aligned} \quad (8)$$

전압이득(M) 특성 식(8)으로부터 알 수 있듯이 전압이득은 등가 직렬공진인덕턴스와 2차측 병렬인덕턴스의 비(A) 및 부하 Quality factor(Q)와 기준화된 공진주파수(f_n) 값에 의존한다. 이러한 경우 기준화된 공진 주파수 및 Q 변화에 대해 전압이득 변화를 알아보기 위해 식(8)을 이용하여 시뮬레이션 한 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 등가 직렬공진인덕턴스와 2차 병렬인덕턴스 비인 A가 0.22일때 기준화된 주파수와 Q 변화에 대한 전압이득 특성 곡선이다. 등가직렬공진인덕턴스와 병렬인덕턴스 비(A)가 클수록 즉 병렬 인덕턴스가 작아질수록 전압이득이 높아지며 스위칭 동작을 하기 위한 기준화된 공진 주파수의 스위칭 범위가 협소해진다. 이러한 협소한 스위칭 주파수 범위와 높은 전압이득 특성은 병렬인덕턴스 값이 감소하여 병렬 인덕터에 흐르는 전류를 증가시켜 도통 손실을 증가시키는 원인이 된다. 따라서 중부하에서도 주어진 입력전압변동범위에 대한 1차측 스위칭소자가 영전압 스위칭을 이룰 수 있는 병렬인덕턴스와 병렬 인덕터 전류를 구하고 A와 Q 값을 적절하게 사용해야 한다. 또한 본 논문에서 제안된 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 그림 3에서 볼 수 있듯이 ZVS 영역 중에서도 스위칭 동작영역이 기준화된 주파수가 1보다 낮은 주파수에서 사용하고 있으며, 이러한 경우 주스위칭 소자의 영전압 스위칭(ZVS) 뿐만 아니라 변압기 2차측 정류 다이오드의 영전류 스위칭(ZCS)을 얻을 수 있다. 그리고 2차측 정류부의 voltage doubler를 사용하여 변압기의 2차측 턴수와 정류 다이오드의 수를 줄임으로 도통 손실을 저감하였다.

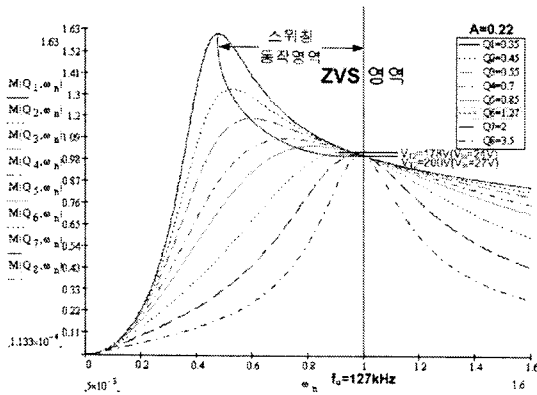


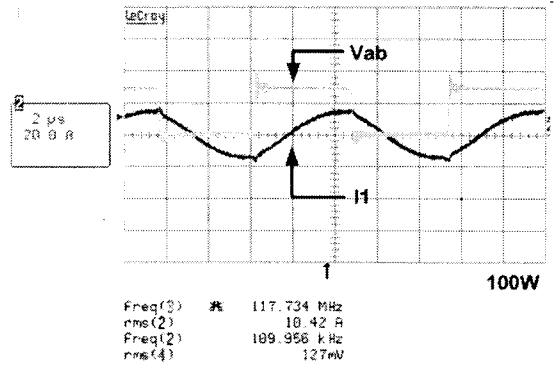
그림 3. LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC--DC 컨버터의 전압이득 특성곡선

3. 실험결과

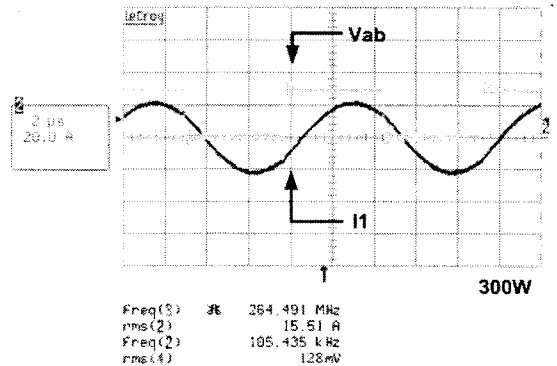
표1 LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC-DC 컨버터 주요정격

입력전압	24-27VDC
출력전압	400VDC
출력전류	2.5A
주스위칭 주파수	90kHz ~ 125kHz
직렬공진 주파수	106kHz
주스위칭 소자(Q ₁ ,Q ₂ ,Q ₃ ,Q ₄)	IRF1405Z (55V, 169A, 5.3mΩ)
출력 정류 다이오드(D ₁ ,D ₂)	DESP 9-06CR (600V, 9A, V _F =2.5V)

본 논문에서 제안한 LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC-DC 컨버터는 낮은 입력전압(24-27VDC)에서 높은 출력전압(400VDC)으로 승압시킬 수 있도록 1kW급으로 설계하였다. 또한 LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC/DC 컨버터에 대한 실험조건과 적용된 소자 등을 표 1에 나타내었다. 그림4(a), (b), (c), (d)는 일정 출력전압에 대해 100W, 300W, 500W, 700W에 대한 실험 파형이다. 그림 4(a)에서부터 그림 4(d)까지 볼 수 있듯이 중부하(700W)에서 경부하(100W)까지 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터는 모든 단자전류가 단자전압(Vab)에 대해 지연된 지상전류으로 흐르는 것을 볼 수 있으며, 모든 부하변화에 주스위칭 소자의 영전압 스위칭을 확인하였다. 또한 1차측 공진 전류가 불연속으로 흐르게 되므로 변압기 2차측 정류 다이오드의 역회복 손실을 줄일 수 있었다. 그림 5는 부하 변화에 대해 효율 특성을 나타낸 것이고, 그림 5에서 볼 수 있듯이 경부하(100W,200W)에서는 82%과 89%의 효율을 얻었으며 나머지 부하에서는 90-93%의 높은 효율 특성을 확인할 수 있었다. 그림 6는 LLC 직렬공진컨버터적용 승압형 DC-DC 컨버터의 시제품 사진이다.



(a) 100W



(b) 300W

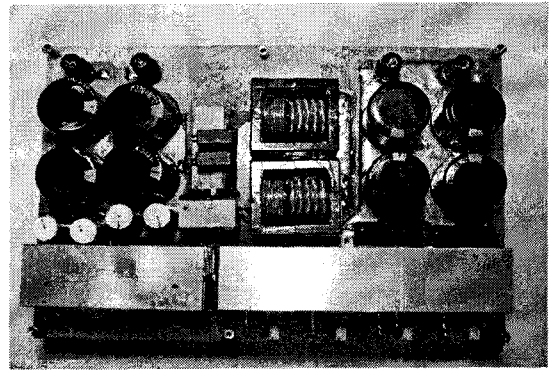
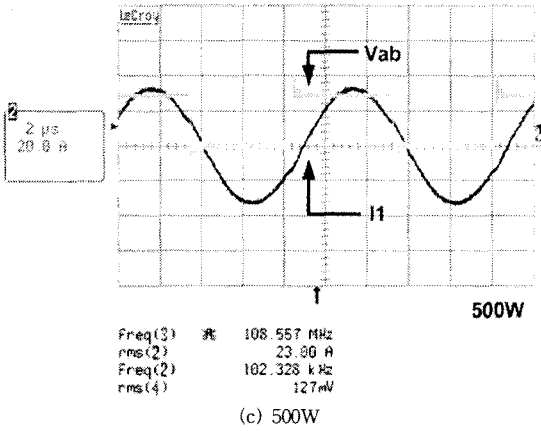


그림 6. LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터 시제품 사진

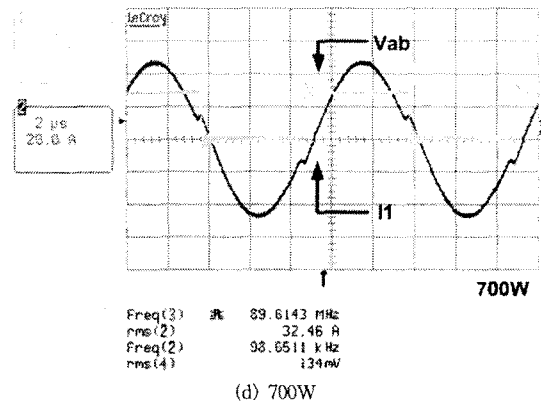


그림 4. LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터의 1차측 전압(V_{ab})과 전류(I_{T1}) 실험파형 (20V/div., 10A/div., 200V/div., 1us/div.)

6. 결 론

본 논문에서는 PCS 시스템 중 LLC 직렬공진컨버터 적용 승압형 DC/DC 컨버터를 제안하였으며, 전압이득 특성에 대해 이론적인 해석 및 시뮬레이션을 통해 1kW급 시제품을 제작하여 실험한 결과에 대해 나타내었다. 모든 부하 조건에서 스위칭 소자는 영전압 스위칭을 하였으며, 불연속 공진전류에 의해 2차측 정류다이오드의 역회복 손실을 줄일 수 있었으며, 스위칭 경부하(100W, 200W)에서는 83%, 89%의 효율특성을 얻었으며 경부하에서 중부하(300W~700W)에서는 91~93%의 효율 특성을 얻었다.

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-B-117) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] 김은수, 이현관, 송정민, 김병수, 차인수, "무손실 스너버적용 8kW급 직류 전압 승압기", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.67-70, 2005.
- [2] 공영수, 이현관, 김은수, "무점접 변압기 적용 Full-Bridge LLC 직렬 공진컨버터", 전력전자학회 추계학술대회 논문집, pp.131-133, 2005.
- [3] Bo Yang, F.C Lee, A.J. Zhang, "LLC Resonant converter for Front End DC/DC Conversion", IEEE-APEC2002, Vol. 2, pp.1108-1112, 2002.
- [4] M.K Kazimierzczuk, T. Nandakumar, "Class D voltage-switching inverter with tapped resonant inductor", IEE Proceeding on Electric Power Applications, Vol. 140, pp.172-182, 1988.

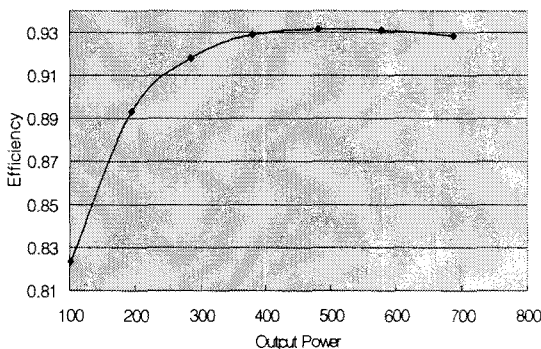


그림 5. 부하변화에 따른 효율특성