

LLC 공진형 하프브릿지 dc-dc 컨버터의 전류구동형 동기정류기에 관한 연구

진기석*, 유경부*, 길용만*, 안태영*
 청주대학교 전자공학과*

A Study on Current Driven Synchronous Rectifier of LLC Resonant Half-bridge dc-dc Converter

Gi-Seok Jin*, Gyeong-Bu Yu*, Yong-Man Gil*, Tae-Young Ahn*
 the Department of Electronic Engineering, Cheongju University*

Abstract - 최근 고효율 전력변환을 위해 LLC 공진형 하프브릿지 컨버터의 동기정류기에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기존 일반적인 다이오드 정류기를 사용하는 경우 출력전류에 비례하는 전력손실이 커서 대전력용으로 사용하기에는 적합하지 않다. 따라서 스위치를 이용한 동기정류기가 검토되고 있는데 동기정류기의 스위치를 구동시키기 위해서는 스위치를 구동시킬 수 있는 구동용 IC가 이용되고 있다. 동기정류기 구동 IC의 단점으로는 약 50%의 중부하 이하에서는 동작되지 않는 단점이 있어 이를 보완하기 위하여 변압기 1차측 전류를 검출하여 게이트 전압을 만들어 스위치를 구동시키는 회로를 제안하였다. 본 논문의 실험 결과 저전력 지점에서 동기정류기가 구동되었고 따라서 전력변환 효율은 기존의 다이오드 정류기에 비해 우수하며 효율개선효과가 있다는 것을 실험으로 보였다.

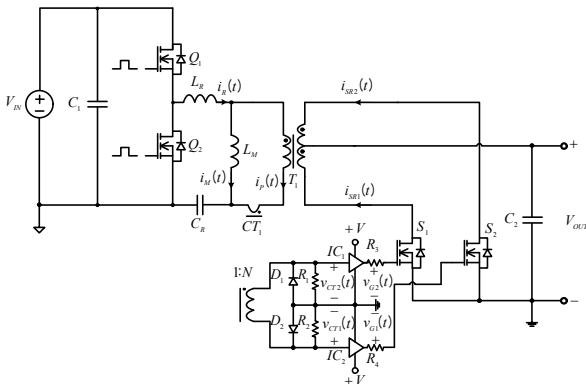
1. 서 론

최근 고효율 전원장치에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 고효율 dc-dc 컨버터에는 대표적으로 LLC 공진형 하프브릿지 컨버터가 있다. LLC 공진형 하프브릿지 컨버터는 스위칭 손실이 거의 없기 때문에 높은 효율을 낼 수 있다는 장점이 있다. 또한 높은 전력밀도를 요구하는 전원장치로써 대전력용으로도 용이하다. 이러한 LLC 공진형 하프브릿지 컨버터는 기존에는 2차측 정류를 다이오드를 이용하여 정류를 하였는데, 동기정류기를 적용해 정류를 하여 효율을 더 높일 수 있다. 현재의 동기정류기는 변압기 2차측 스위치의 드레인 전압과 소스 전압을 검출하여 구동시키는 IC를 사용한다. IC를 사용한 동기정류기의 문제점으로 낮은 전력에서는 완전히 구동이 되지 않는다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서 본 논문에서는 변압기 1차측으로 흐르는 전류를 검출하여 스위치를 구동시킬 수 있는 게이트 전압을 만들어주는 회로를 제안하여 실험을 수행하고 결과를 보고하였다^[4].

2. LLC 공진형 하프브릿지 컨버터의 동기정류기

2.1 기본회로 구성

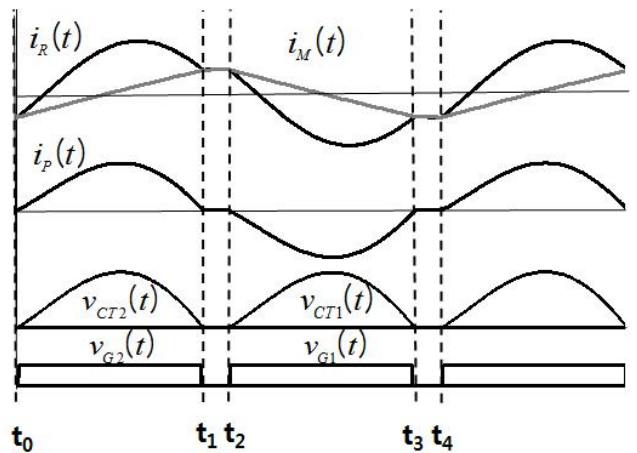
그림 1은 LLC 공진형 하프브릿지 dc-dc 컨버터의 전류구동형 동기정류기의 제안된 회로이다. 본 연구에서는 변압기 1차측에 흐르는 전류를 CT를 이용해서 검출하였다. 이 검출된 전류는 CT의 2차측에서 권선비에 의해 전압으로 나타나고, 전류의 (+), (-) 성분을 반파정류 전압으로 나타낸다. 반파정류 전압은 동기정류기의 스위치를 구동시키기 위해 스위치 구동 IC를 사용하여 게이트 전압을 만들어 준다. 만들어진 게이트 전압은 회로의 2차측 2개의 스위치에 각각 인가되어 동기정류기를 구동시킨다^{[1] [5]}.



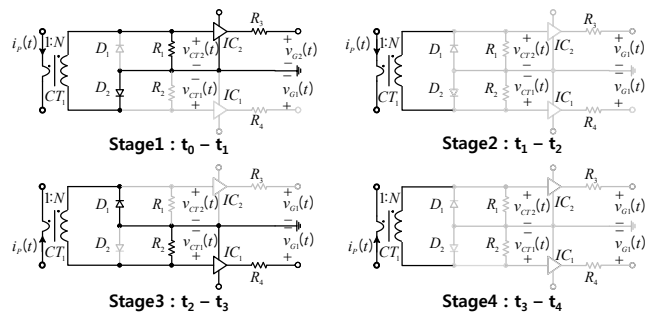
〈그림 1〉 제안된 전류구동 동기정류기 기본 회로

2.2 기본 동작 원리

그림 2는 기본 동작원리를 나타내었다. $i_R(t)$ 는 L_R 에 흐르는 공진전류로 L_M 에 흐르는 자화전류 $i_M(t)$ 를 빼면 변압기 1차측에 흐르는 전류 $i_P(t)$ 가 된다. $i_P(t)$ 전류를 검출하기 위해서 삽입된 CT에 동기정류기 구동회로를 구성하여 반파정류를 거치게 된다. 반파정류 전압 $v_{CT1}(t)$, $v_{CT2}(t)$ 는 스위치 구동 IC를 거쳐 게이트 전압 $v_{G1}(t)$, $v_{G2}(t)$ 를 만들어 동기정류기 스위치의 게이트에 들어간다. 그림 3은 단계별 동작 상태를 나타내었다. 단계1은 그림 2의 $t_0 - t_1$ 구간으로 변압기 1차측 전류가 (+)가 되어 CT의 2차측에서는 R_1 과 D_2 로 전류가 흐르게 된다. 이 때 R_1 에 걸리는 전압 $v_{CT2}(t)$ 는 스위치 구동 IC를 통해 게이트 저항 R_3 를 거쳐 $v_{G2}(t)$ 전압으로 2차측 S_2 를 구동시켜서 턴 온이 된다. 단계2는 $t_1 - t_2$ 구간으로 공진 데드타임 구간이다. 변압기 1차측 전류 $i_P(t)$ 가 0가 되어 CT 2차측에서도 전류가 흐르지 않는다. 따라서 2차측 스위치는 모두 오프가 되어 있는 상태가 된다. 단계3은 $t_2 - t_3$ 구간으로 변압기 1차측 전류 $i_P(t)$ 는 (-)로 흐르게 된다. CT 2차측에서는 R_2 와 D_1 을 통해 전류가 흘러 $v_{CT1}(t)$ 전압이 스위치 구동 IC를 통해 게이트 저항 R_4 를 거쳐 게이트 전압 $v_{G1}(t)$ 이 만들어진다. 따라서 2차측 S_1 이 턴 온이 된다. 마지막으로 단계4는 단계2와 마찬가지로 $t_3 - t_4$ 구간으로 다시 공진 데드타임이 된다. 공진 데드타임으로 인하여 2차측 스위치 S_1 , S_2 는 오프상태가 된다^{[2] [3]}.



〈그림 2〉 주요 동작 파형



〈그림 3〉 단계별 동작 상태 등가 회로

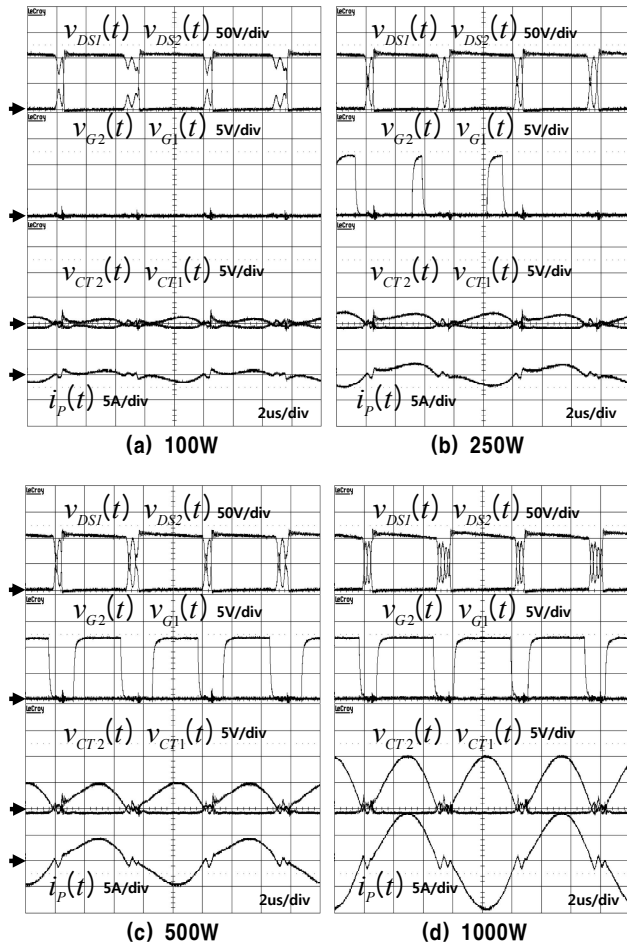
3. 실험

본 논문에서 제안하는 동기정류기 구동회로를 검증하기 위해 시제품을 제작하였다. 시제품은 입력전압이 360V - 420V로 넓은 입력전압을 갖는다. 출력전압은 54V에서 피드백이 되고, 출력전력은 1000W로 설계하였다. 표 1에서는 실험 회로에 쓰인 각 소자별 특성으로 공진 인덕터는 24 μ H, 자화 인덕터는 112 μ H, 공진 커패시터는 72nF을 사용하였다. 공진 주파수는 공진 인덕터스와 공진 커패시터스에 의해 120kHz가 된다. CT는 1 : 100의 권선 비를 갖는 제품을 사용하였고, 스위치 구동 IC는 이중 입력과 출력을 갖는 UC27324를 사용하였다. 동기정류기 스위치는 V_{DS} 를 고려하여 200V / 88A, 온 저항은 10m Ω 으로 낮은 제품을 사용하였다. 온 저항이 낮을수록 스위치에서 일어나는 전력 손실을 줄일 수 있기 때문에 효율을 더 올릴 수 있다.

그림 4는 출력별 파형을 나타낸 것이다. 각각 100W, 250W, 500W, 1000W에서의 파형이다. 100W와 250W에서는 변압기 1차측에 흐르는 전류 $i_p(t)$ 가 크게 흐르지 않아 $v_{CT1}(t)$, $v_{CT2}(t)$ 의 피크전압이 매우 작아서 스위치 구동 IC의 기준전압보다 작다. 이에 따라 게이트 전압 $v_{G1}(t)$, $v_{G2}(t)$ 은 완전히 턴 온이 되지 않는다. 하지만 300W를 지나서부터 완전히 턴 온되기 시작하여 500W와 1000W에서는 동기정류기로 동작을 하게 된다. 500W에서의 게이트 전압은 반파정류 전압 $v_{CT1}(t)$, $v_{CT2}(t)$ 에 의해 결정되기 때문에 1000W에서는 시비율이 50%에 가까워진다. 이 때 스위치의 드레인 - 소스 전압인 $v_{DS1}(t)$, $v_{DS2}(t)$ 전압은 각각의 게이트 전압에 따라 서로 반대로 턴 온, 턴 오프를 반복하게 된다.

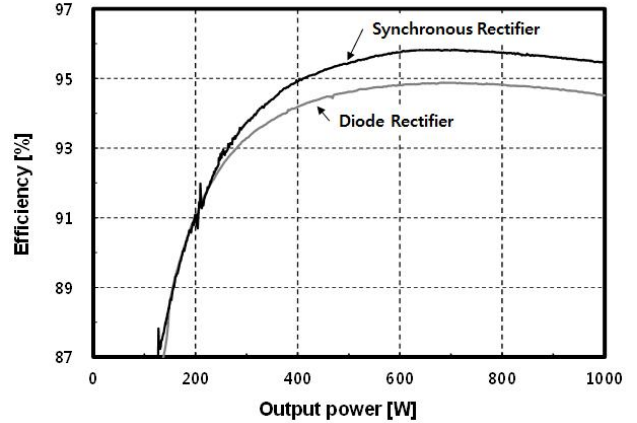
〈표 1〉 주요 소자의 전기적 사양

Name	Components	Specifications
Resonant Inductor	L_R	PQ2625 / 24 μ H
Magnetizing Inductor	L_M	PQ2625 / 112 μ H
Resonant Capacitor	C_R	18nF * 4 = 72nF
FIS115NL	CT	1 : 100
UC27324	Gate Driver IC	Dual Output
IPP110N20N3	SR MOSFET	$V_{DS} = 200V / R_{DS(ON)} = 10m\Omega$



〈그림 4〉 시험 파형

그림 5는 다이오드 정류기와 동기정류기의 효율 비교 그래프를 나타내었다. 다이오드 정류기를 사용하였을 경우에는 다이오드의 전압 강하와 그 때 흐르는 전류에 의해 전력손실이 일어나게 된다. 이와 달리 동기정류기를 사용하였을 경우에는 스위치의 온 저항과 그 때 흐르는 전류에 의해 전력손실이 일어나게 된다. 스위치의 온 저항에서 일어나는 전력손실은 온 저항이 낮으면 낮을수록 전력손실을 더욱 줄일 수 있다. 따라서 다이오드에서 일어나는 전력손실보다 약 10W 정도 저감시킬 수 있었다. 다이오드 정류기의 최대부하 효율은 94.6%, 최대 효율은 94.9%였다. 이에 반해 동기정류기의 최대부하 효율은 95.6%, 최대 효율은 96%였다. 동기정류기의 효율이 다이오드 정류기의 효율보다 약 1% 정도 더 높게 나타났다.



〈그림 5〉 전력변환 효율 그래프

4. 결론

본 논문에서는 LLC 공진형 하프브릿지 컨버터의 전류구동 방식의 동기정류기를 제안하고 1kW급 시제품을 제작하여 그 결과를 보고 하였다. 일반적으로 동기정류기 구동용 전용 IC를 사용하였을 때는 50%의 중부하 이하에서 동작을 멈추기 때문에 다이오드 정류기로 동작을 하게 된다. 반면에 본 논문에서 제안한 1차측 전류구동형 동기정류기는 저전력부하에서 동기정류기 동작이 시작되어 300W 이상의 전력에서부터 게이트 전압이 완전히 턴 온이 되어 동기정류기로 동작을 하였으며 따라서 전력변환 효율은 저전력 부하 지점부터 다이오드 정류기에 비해 효율개선 효과가 있었다. 1kW급 출력의 시제품 구성후 전력변환 효율 측정 결과 시제품의 최대 효율은 약 95.9%, 최대 부하 효율은 약 95.6%로 나타났고, 다이오드 정류 방식에 비해 최소 1% 이상의 효율 개선 효과가 있었다.

[참고 문헌]

- [1] Po-Yuan Chen, Masahito Jinno, and Yu-Min Shie, "Research on the Reverse Conduction of Synchronous Rectifiers", IEEE Trans. on I.E, Vol. 55, No. 4, APRIL 2008 PP 1570 - 1575
- [2] X. Wu, G. Hua, J. Zhang, Z. Qian, "A New Current-Driven Synchronous Rectifier for Series-Parallel Resonant(LLC) DC-DC Converter", IEEE Trans. on I.E, Volume 58, Issue 1, January 2011, Page(s) : 289 - 297
- [3] J. Zhang, J. Liao, J. Wang, Z. Qian, "A Current-Driving Synchronous Rectifier for an LLC Resonant Converter With Voltage-Doubler Rectifier Structure", IEEE Trans. on P.E, Volume 27, Issue 4, April 2012 Page(s) : 1894 - 1904
- [4] J. Zhang, J. Wang, G. Zhang, Z. Qian, "A Hybrid Driving Scheme for Full-Bridge Synchronous Rectifier in LLC Resonant Converter", IEEE Trans. on P.E, Volume 27, Issue 11, November 2012 Page(s) : 4549 - 4561
- [5] D. Fu, Y. Liu, Lee, F.C, M. Xu "A Nover Driving Scheme for Synchronous Rectifiers in LLC Resonant Converters", IEEE Trans. on P. E, Volume 24, Issue 5, May 2009, Page(s) : 1321 - 1329