

아날로그 IC를 적용한 PWM 방식의 공진형 컨버터에 관한 연구

이용철, 강민혁, 박상훈, 김종경, 윤남수, 강찬호
(주)이지트로닉스

A Study on PWM type Resonant Converter Employing Analog IC

Yong Chul Lee, Min Hyuck Kang, Sang Hun Park, Jong Kyeng Kim, Nam Su Yun,
Chan Ho Kang
EGTRONICS Co., Ltd.

ABSTRACT

기존의 위상천이 폴 브리지 DC/DC 컨버터의 경우 변압기의 누설 인덕턴스와 2차 측 정류 다이오드의 기생 출력 커패시턴스 사이의 공진으로 인하여 정류 다이오드 양단에 큰 공진 전압이 발생하며, 이는 소자의 신뢰성 저하 및 시스템의 전력 변환 효율을 감소시킨다. 반면 LLC 공진형 컨버터는 2차 측에서 발생하는 공진 에너지가 출력 커패시터로 흡수되지만 경 부하 시에 높은 스위칭 주파수로 인하여 효율이 저감되며, 출력 전압을 제어하기 위해 추가적인 부하저항이 요구된다. 따라서 최근에는 LLC 공진형 컨버터로 동작시키면서도 PWM 제어를 통해 출력전압을 제어하는 방법이 연구되고 있으나, 새로운 게이트 구동 방식을 위해 DSP 제어를 사용하고 있다. 따라서 본 논문에서는 산업에서 많이 사용되고 있는 아날로그 IC를 통해 동일한 동작 및 성능을 구현시킬 수 있는 방법에 대하여 제안한다. 본 논문에서는 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 이론적으로 분석하며, 6.6kW급 시작품을 제작하여 제안방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

일반적으로 중·대용량급 전원 시스템에서는 LLC 공진형 컨버터가 많이 사용되고 있다. LLC 공진형 컨버터는 1, 2차 측의 소프트 스위칭 동작 특성을 지니며, 구조가 단순하고 공진으로 에너지를 전달하므로 EMI 노이즈에 강한 특성을 지닌다. 또한 추가적인 스너버 회로 없이 2차 측 정류 다이오드 양단에 두 배의 출력 전압이 인가되므로 소자의 신뢰성 및 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.^[1] 그러나 주파수를 변화시켜 출력전압을 제어하기 때문에 높은 스위칭 주파수 동작으로 인한 효율 감소 및 Audible noise 그리고 무부하 시 출력 전압을 제어하기 어려운 문제점이 존재한다. 최근에는 이러한 문제를 해결하기 위하여 공진 네트워크를 가지면서도 PWM 제어를 통해 출력전압을 제어하는 기술이 제안되었다.^[2] 그러나 이러한 PWM 동작을 구현하기 위해서 DSP(Digital Signal Processor) 제어가 필요하며, 아날로그 IC를 사용할 경우 동일한 PWM 게이트 파형을 구현하기 위해 추가적인 논리 연산 소자들이 요구되며, 이는 복잡한 게이트 회로 구성 및 가격상승의 요인이 된다.

따라서 본 논문에서는 일반적으로 PSFB(Phase Shift Full Bridge) 컨버터를 위해 많이 사용되고 있는 Phase Shift PWM

Controller IC만을 사용하여 동일한 동작이 가능함을 분석하며, 그 원리에 대하여 설명한다.

2. PWM 제어를 사용한 LLC 공진형 컨버터

그림 1은 PWM 제어를 사용한 LLC 공진형 컨버터의 회로도를 나타내고 있다. 1차 측과 2차 측은 각각 입력 전류에 의한 도통손실 및 정류 다이오드의 전압 스트레스를 줄이기 위해 폴 브리지 구조로 이루어져 있으며, 전체적인 구조는 폴 브리지 인버터 부와 공진 네트워크, 폴 브리지 정류 단 그리고 출력 필터로 구성되어 있다. 또한 영 전압 스위칭을 위한 자화 전류 I_{Lm} 의 크기가 공진에 의해 감소되는 것을 방지하기 위하여 공진 인덕터와 공진 커패시터는 2차 측에 사용되었다.

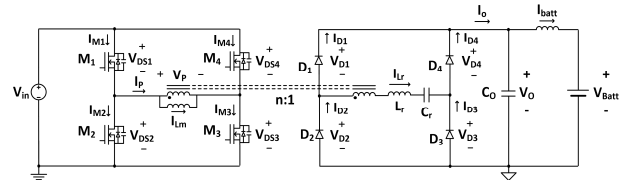


그림 1. PWM 제어를 사용한 폴 브리지 LLC 공진형 컨버터

2.1 기존 DSP 제어 방식의 PWM 파형 분석

그림 2는 기존의 DSP 제어를 사용한 PWM 방식의 LLC 공진형 컨버터 동작파형이다. 스위치 M_1 과 M_2 , M_3 와 M_4 는 고정된 주파수에서 서로 상보적으로 동작하며, 스위치 M_1 과 M_4 의 시 비율에 의해 부하로 전달되는 에너지를 조절하는 방식이다. 또한 각각의 Leg는 Interleaved 방식으로 동작된다. 상단의 스위치 M_1 과 M_4 는 턴 온 동작 시 자화 인덕턴스에 흐르는 전류 I_{Lm} 에 의해 영 전압 스위칭이 이루어지며, 공진 인덕터에 흐르는 전류 I_{Lr} 의 첨두치 지점에서 턴 오프 동작이 이루어지므로 스위칭 손실이 발생하게 된다. 반면에 하단의 스위치 M_2 와 M_3 는 턴 온 동작 시 공진 전류 I_{Lr} 에 의해 영 전압 스위칭이 이루어지며, 턴 오프 동작 시 자화 전류 I_{Lm} 의 첨두치 지점에서 턴 오프 동작이 이루어지므로 스위칭 손실은 적게 발생된다. 또한 2차 측 정류 다이오드는 턴 온 동작 시 영 전압 스위칭 및 턴 오프 동작 시 영 전류 스위칭이 이루어지므로 스위칭 손실은 발생되지 않는다. 추가적으로 2차 측 정류 다이오드 양단 전압은 추가적인 스너버 회로가 필요 없이 출력 전압으로 클램프 되므로 소자의 신뢰성 및 시스템의 효율을 향상시킬 수 있다.

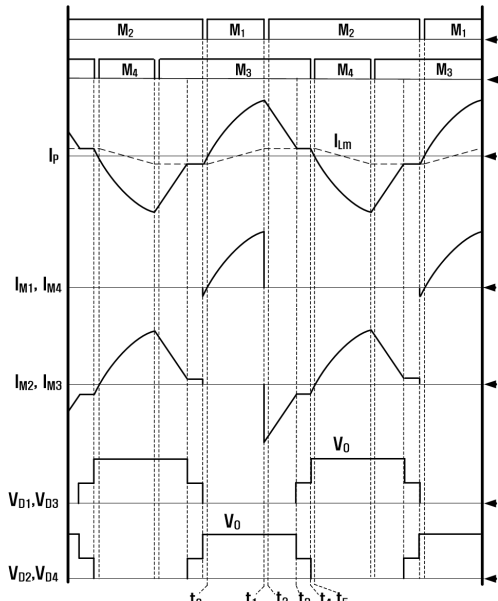


그림 2. DSP를 사용한 PWM 방식의 LLC 공진형 컨버터 동작파형

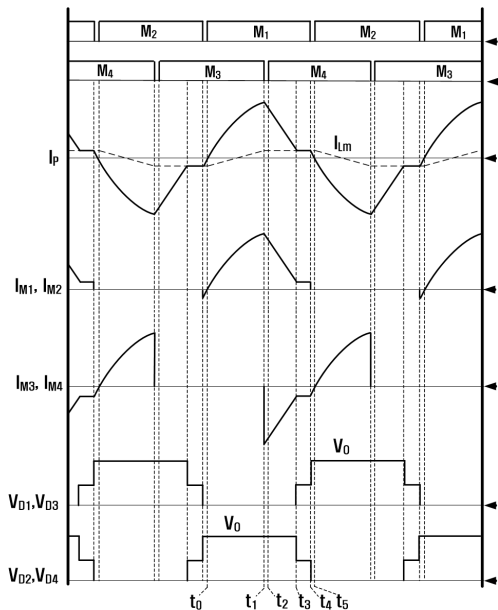


그림 3. 아날로그 IC를 사용한 Phase-Shift PWM 방식의 LLC 공진형 컨버터 동작파형

2.2 Phase-Shift PWM 제어 방식의 파형 분석

그림 3은 아날로그 IC를 사용한 Phase Shift PWM 방식의 LLC 공진형 컨버터 동작파형이다. 스위치 M_1 과 M_2 , M_3 와 M_4 는 고정된 주파수에서 50%의 시 비율을 가지고 상보적으로 동작하며, 각 레그의 위상을 천이하여 부하로 전달되는 에너지를 조절하는 방식이다. 스위치 M_1 과 M_2 는 턴 온 동작 시 자화 인덕턴스에 흐르는 전류 I_{Lm} 에 의해 영 전압 스위칭이 이루어지며, 턴 오프 동작 시 자화 전류 I_{Lm} 의 침두치 지점에서 턴 오프 동작이 이루어지므로 스위칭 손실은 적게 발생된다. 반면에 스위치 M_3 와 M_4 는 턴 온 동작 시 공진 전류 I_r 에 의해 영 전압 스위칭이 이루어지며, 공진 인덕턴스에 흐르는 전류 I_r 의 침두치 지점에서 턴 오프 동작이 이루어지므로 스위칭 손실이 발생하게 된다. 또한 2차 측 정류 다이오드의 턴 온, 턴 오프

손실은 발생되지 않으며, 출력전압으로 클램프 되므로 낮은 전압스트레스를 지니는 특징이 있다. 상기의 제어 방식은 DSP를 사용한 PWM 제어방식과 비교하여 동일하게 스위칭 손실이 발생하는 것을 알 수 있으며, 기존 공진형 컨버터와 유사한 구조를 지니지만 주파수 변화에 의해 야기되는 문제점은 발생되지 않는 장점이 있다.

3. 실험결과

동작원리 및 특성을 확인하기 위해 시작품을 제작하여 실험을 수행하였으며 실험사양은 표1과 같다. 그림4는 Phase Shift PWM 방식의 공진형 컨버터 동작 및 주요 파형을 나타내고 있으며, 각각 출력전류 I_o , 출력전압 V_o , 변압기 1차 측 전압 및 전류 V_p , I_p 를 나타내고 있다. 파형을 통해 확인할 수 있듯이, 위상천이 방식을 이용한 PWM 제어 방식의 경우도 기존의 DSP 제어를 사용한 PWM 방식과 동일한 동작이 이루어지는 것을 확인할 수 있다.

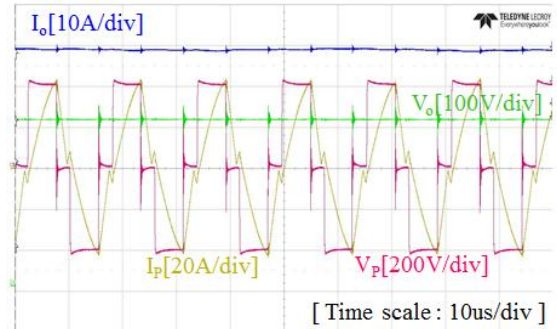


그림 4. PWM 방식의 공진형 컨버터 주요 동작 파형

표 1 실험 사양

입력 전압(V_{in})	400V	변압기 턴 비	12:16
출력 전압(V_o)	375~417V	자화인덕턴스(L_m)	190uH
최대출력전력(P_o)	6.6kW	공진 인덕턴스(L_r)	30uH
공진 커패시턴스(C_r)	400nF	스위칭 주파수	60kHz

4. 결 론

본 논문에서는 일반 산업에서 많이 사용되고 있는 Phase Shift Controller IC만을 사용하여 기존의 DSP를 이용해 공진형 컨버터를 PWM 방식으로 제어하는 기술과 동일한 특성으로 동작될 수 있는 방법을 제안한다. PWM 방식을 사용하므로 주파수 변화에 의해 발생하는 문제점을 해결하였으며, 복잡한 게이트 회로 구성이나 추가적인 소자의 비용 없이 아날로그 IC 하나만을 사용하여 PWM 공진형 컨버터의 성능을 구현하였다. 최종적으로 실험을 통해 회로해석 및 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Ren Ren, Fanghua Zhang, Zhiyuan Shen, Shuo Liu, "The third harmonics current injection scheme for LLC topology to reduce the RMS of the output current", in Proc. IEEE APEC Conference 2015, March, 2015
- [2] Byung Kwon Lee; Jong Pil Kim; Sam Gyun; Jun Young Lee, "An PWM SRT DC/DC Converter for 6.6kW EV On Board Charger" IEEE Trans. Industrial Electron., vol. 63, 2016, pp. 894 902