

Three-level 의사공진형 PWM 컨버터

김재현, 이일운, 김영도, 김재국, 문건우
한국과학기술원

Three-level Quasi-Resonant PWM Converter

Jae-Hyun Kim, Il-Woon Lee, Young-Do Kim, Jae-kuk Kim, Gun-Woo Moon
Korea Advanced Institute of Science and Technology

ABSTRACT

본 논문에서 대전력, 고전압에 적합한 three-level 의사공진형 PWM 컨버터를 제안한다. 의사공진형으로 동작함으로써 넓은 ZVS 영역을 가지며, 고정 주파수를 사용하므로 자기 소자의 설계가 쉬워지는 장점을 가진다. 그리고, 변압기에 인가되는 전압 파형의 주파수가 스위칭 주파수의 2배가 되므로 변압기의 크기를 줄일 수 있고, 변압기 2차측에 출력 인덕터가 없는 전압배가기를 적용하여 정류기 양단에 전압리깅이 발생하지 않아 정류단의 전압 스트레스가 감소되는 장점 또한 가진다. 본 논문에서는 제안한 컨버터를 분석하고, 프로토타입을 통해 그 동작을 검증한다.

1. 서론

고전압 입력 응용에서 스위치의 전압 스트레스를 줄이기 위하여 three-level 컨버터가 제안되었다. [1] three-level 컨버터에서 스위치의 전압 스트레스는 입력전압의 반이 되어, 저렴하고 특성이 좋은 스위치를 사용할 수 있게 된다.

지금까지 제안된 많은 PWM three-level 컨버터 중에서 간단하고, 적은 소자수를 가진 컨버터가 [2]에서 제안되었다. 그러나, [2]에서 제안된 회로는 넓은 ZVS 범위를 가지지 못하고, 2차측에 출력 인덕터가 존재하여 정류단에 큰 전압 스트레스가 발생하는 문제를 안고 있다. 특히, 변압기의 2차측을 center-tap 형태로 할 경우 다이오드의 접합 커패시터와 변압기의 누설 인덕턴스의 공진에 의해 다이오드 양단 전압에 큰 리깅이 발생하게 된다. 그 결과로, 정격전압이 큰 다이오드를 사용하여야 한다. 그러면, 도통손실이 증가하고, 다이오드에 온도 스트레스가 증가하며 그 결과로 다이오드의 역회복 특성이 더욱 열화되어, 추가적인 스위칭 손실 증가, 전압 스트레스 증가로 정류단 다이오드가 파괴되는 심각한 문제를 야기하게 된다.

본 논문에서는 [2]의 회로가 가지는 문제점들을 극복할 수 있는 새로운 PWM 의사공진형 three-level 컨버터를 제안한다. 제안된 컨버터는 2차측에 출력 인덕터가 필요하지 않는 전압배가기 정류단을 사용하므로 정류 다이오드의 전압 스트레스가 리깅 없이 출력전압에 클램프된다. 또한, 의사 공진형으로 동작되므로써 넓은 ZVS 영역을 갖는다. 그리고, 1차측에 있는 4개 스위치의 게이트 신호를 적절히 구동하여, 변압기에 인가되는 전압 파형의 주파수가 스위칭 주파수의 2배가 된다. 따라서, 변압

기의 크기를 줄일 수 있는 장점도 가진다.

본 논문에서는 제안 회로의 동작원리를 설명하고 분석한 뒤 실험을 통해 그 동작을 검증한다.

2. 동작원리 및 회로특징

2.1 동작원리

그림 1은 제안한 PWM three-level 의사공진형 컨버터이다. 1차측에 있는 스위치 각각에는 내부 기생 다이오드와 기생 커패시터가 존재하며, 2차측 정류 다이오드는 접합커패시터를 가진다. 정상 상태 회로 분석을 입력단에 존재하는 커패시터들의 양단 전압은 입력 전압의 반으로 일정하고, 출력전압 V_o 또한 일정하다고 가정한다.

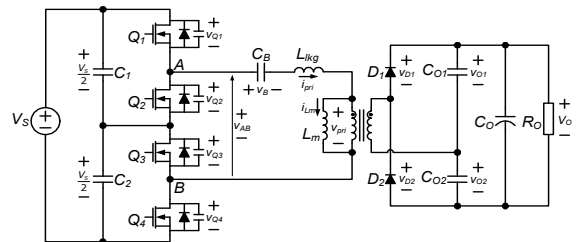


그림 1 제안하는 Three-level 의사공진형 컨버터

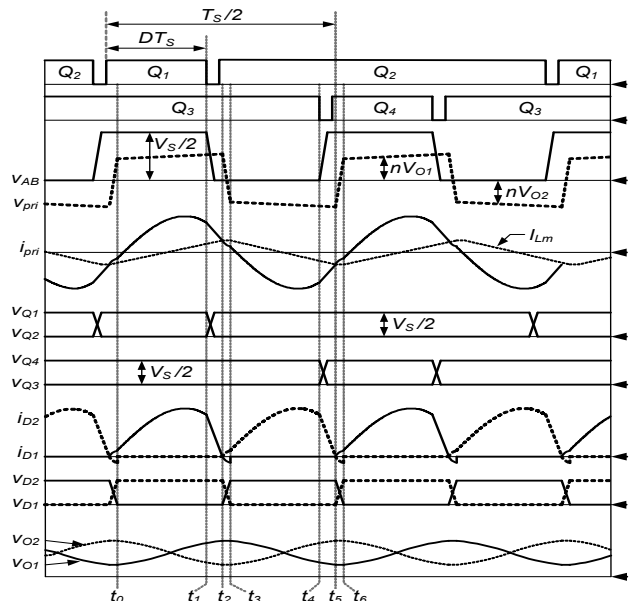


그림 2 제안하는 회로의 주요 파형

Mode 1($t_0 \sim t_1$) : Q1이 ZVS 턴 온되고 D1, D2의 commutation이 끝나는 시점에서 Mode 1이 시작된다. 이 모드 동안 누설 인덕터 L_{lk} 와 커패시터 C_r 의 공진으로 인해 1차측 전류 I_{pri} 가 증가한다.

Mode 2($t_1 \sim t_2$) : Mode2는 Q1이 꺼지면서 시작한다. 이 때, I_{pri} 가 Q1과 Q2의 기생 커패시터를 각각 충전, 방전시키고 V_{AB} 는 0으로 선형적으로 감소한다. D1에 여전히 도통되어 있으므로 V_{pri} 는 nV_{O1} 으로 유지된다. 따라서, V_{AB} 와 V_{pri} 의 차이만큼 누설 인덕터에 역방향으로 전압이 걸려 I_{pri} 가 급격히 감소하고, 다이오드 D1의 전류 I_{D1} 도 급격하게 감소하게 된다. Mode2 구간 동안 Q2의 기생 커패시터 완전히 방전되어 0V가 되면 Q2의 기생 다이오드가 도통되고 Q2는 ZVS 턴 온 된다.

Mode 3($t_2 \sim t_3$) : Mode2 구간 동안 I_{pri} 가 감소하여 자화전류 I_{Lm} 과 같아지는 순간(t_2)에 Mode 3이 시작된다. 이 때, I_{D1} 이 0A가 된다. 그리고, I_{pri} 가 I_{Lm} 보다 작아지는 순간에 2차측 전류가 반대로 흘러, D1과 D2의 접합커패시터를 각각 충전, 방전시킨다. 따라서, V_{D1} 은 V_0 가 되고 V_{D2} 는 0이 되면 이 mode는 끝난다. 이 때 V_{pri} 는 nV_{O2} 까지 감소한다.

Mode 4($t_3 \sim t_4$) : 누설 인덕터 L_{lk} 와 공진 커패시터 C_r 의 공진으로 인해 1차측 전류 I_{pri} 가 반대방향으로 증가한다.

Mode 5($t_4 \sim t_5$) : Mode2와 비슷하게 t_4 에서 Q3가 꺼지면서 I_{pri} 가 Q3와 Q4의 기생 커패시터를 각각 충전, 방전시킨다. 또한 I_{pri} 가 급격하게 증가한다. 게다가, Q4의 양단전압이 0이 된 후 영전압 스위칭을 한다.

Mode 6($t_5 \sim t_6$) : I_{pri} 가 증가하여 자화전류 I_{Lm} 과 같아지는 순간에 Mode 6이 시작한다. Mode 3과 마찬가지로 D1과 D2의 접합커패시터를 각각 충전, 방전시킨다.

2.2 전압 이득

한 주기 동안 다이오드의 평균전류는 출력전류와 같다는 사실로부터 전압 이득은 식(1)와 같이 구해진다.

$$\frac{V_o}{V_s} = \frac{1-2D}{\frac{T}{R_o} \left[\frac{1}{nC_r \{1 - \cos(\omega_r DT)\}} - \frac{n}{4C_{O1}} - \frac{1}{2nC_B} \right] + 2n(1-2D)} \quad (1)$$

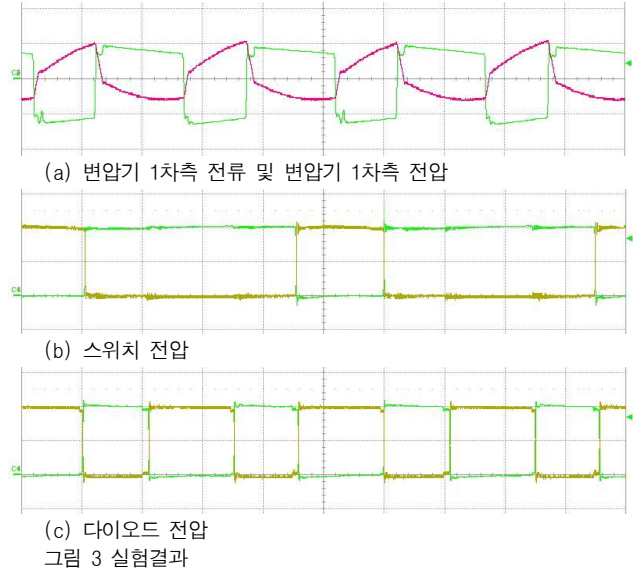
2.3 소자내압

입력 커패시터 C1, C2의 전압은 입력전압의 반이고 각 스위치 양단전압은 입력전압의 반으로 제한된다. 따라서, 소자내압이 입력전압인 컨버터들에 비해 온 저항이 작은 스위치를 사용할 수 있다. 그리고, 2차측 다이오드의 양단전압은 출력전압으로 제한되어 리깅이 발생하는 컨버터들에 비해 낮은 정격전압 및 순방향 전압강하를 가지는 다이오드가 선정될 수 있다.

3. 모의실험결과

제한한 회로의 입력전압은 380V, 출력전압은 200V, 그리고 출력전력은 400W이다. 스위칭 주파수는 100kHz이다.

그림 3은 제한한 회로의 모의실험 파형이다. Q1의 시비율을 1차측 누설 인덕터 전류가 대칭적으로 증감되도록 하였다. 각 스위치의 전압은 입력전압의 반으로 제한되고 다이오드 양단의 전압은 출력전압으로 제한됨을 알 수 있다.



4. 결론

본 논문에서는 Three-level 의사공진형 PWM 컨버터를 제안하였다. 제안한 회로는 스위치의 전압 스트레스가 입력전압의 반이며 2차측에 전압 배가기를 적용해 다이오드 양단의 전압이 출력전압으로 클램핑된다. 또한, 전류의 형태를 quasi-sinusoidal 형태로 하여 전류 스트레스를 줄였다. 제안된 회로는 고전압, 저전류 응용분야에 적합하다. 본 논문에서는 이론적 해석 및 실험을 통해 제안한 회로의 동작을 검증하였다.

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 20100009888)

참고 문헌

- [1] J. R. Pinheiro and I. Barbi, "The Three-Level ZVS-PWM DC-to-DC Converter", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 8 pp.486-492, Oct. 1993.
- [2] I. Barbi, R. Gules, R. Re이, and N. O. Sokal, " DC-DC Converter: Four Switches $V_{pk}=V_{in}/2$, Capacitive Turn-Off Snubbing, ZV Turn-On", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 19 pp. 918-927, July 2004.
- [3] W. J. Lee, S. W. Choi, C. E. Kim, and G. W. Moon, "A New PWM-Controlled Quasi-Resonant Converter for a High Efficiency PDP Sustaining Power Module", IEEE Trans. Power Electronics, vol. 23 pp. 1782-1790, July 2008.
- [4] W. J. Lee, C. E. Kim, G. W. Moon, and S. K. Han, "A New Phase-Shifted Full-Bridge Converter With Voltage-Doubler-Type Rectifier for High-Efficiency PDP Sustaining Power Module", IEEE Trans. Industrial Electronics, vol. 55 pp. 2450-2458, June 2008.