

비동기식 능동형 클램프 회로를 적용한 위상천이 풀 브리지 컨버터 구현에 관한 연구

이용철, 김홍권, 김진호, 김희승, 홍성수
국민대학교 전력전자 연구소

A Study on Implementing Phase-Shift Full-Bridge Converter Employing an Asynchronous Active Clamp Circuit

Yong Chul Lee, Hong Kwon Kim, Jin Ho Kim, Hee Seung Kim, Sung Soo Hong
Kookmin University Power Electronics Center

ABSTRACT

기존의 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터의 경우 변압기의 누설 인덕턴스와 정류 스위치의 기생 출력 캐패시턴스 사이의 공진으로 인하여 정류 스위치에 스파이크 전압이 발생하며, 이는 시스템의 전력 변환 효율을 감소시킨다. 최근에 보조 DC/DC 컨버터를 사용하여 클램핑 캐패시터에서 흡수된 에너지를 부하로 회기시키는 방법이 연구되고 있으나, 보조 DC/DC 컨버터를 설계하기 위한 정확한 분석은 제시되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 2차 측 정류기의 공진 전압을 저감할 수 있는 비동기식 능동형 클램프 회로의 설계방법을 제안한다. 또한, 초기 기동 시에 발생하는 큰 공진에너지를 히스테리시스 회로를 이용하여 저항을 통해 소모시킴으로써 보조 DC/DC 컨버터의 자성소자를 최소화할 수 있다. 본 논문에서는 제안된 방식의 타당성을 검증하기 위하여 이론적으로 분석하며, 450W급 시작품을 제작하여 제안방식의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

일반적으로 대용량급 전력변환회로는 고 전력밀도, 고효율, EMI 특성이 좋은 영 전압 스위칭 위상천이 풀 브리지 컨버터^[1]가 많이 사용되고 있다. 그러나 기존 위상천이 풀 브리지 컨버터는 변압기의 누설 인덕턴스와 2차 측 정류기의 기생 출력 캐패시턴스 사이의 공진으로 인하여 2차 측 정류기의 공진 전압이 증가되며, 이는 EMI 문제 및 도통 손실 증가 등의 문제점이 존재한다. 최근에는 이러한 문제들을 해결하기 위하여 2차 측 정류기의 공진 에너지를 보조 DC/DC 컨버터를 사용하여 부하로 회기시키는 비동기식 능동형 클램프 회로^[2]가 제안 되었으나, 보조 DC/DC 컨버터를 설계하기 위한 정확한 분석은 제시 되지 않았다.

또한, 초기 기동 시에 출력 캐패시터의 전압을 정상상태로 충전시키는 전류로 인하여 공진에너지가 증가하게 된다. 이로 인하여, 초기에 보조 DC/DC 컨버터가 동작할 경우 보조 DC/DC 컨버터가 다루어야 할 공진에너지가 정상상태보다 커지기 때문에 보조 DC/DC 컨버터의 자성소자가 필요이상으로 커지게 된다.

따라서, 본 논문에서는 전류배출기 구조의 동기 정류기를 사용한 PSFB 컨버터에 대하여 정상상태에서 보조 DC/DC 컨버터가 다루어야 할 전력량을 구할 수 있는 수식을 유도함으로써 최적의 DC/DC 컨버터를 설계할 수 있는 근거를 제시한다. 또한, 기동시의 공진에너지를 저항부하로 소모시킴으로써 보조

DC/DC 컨버터의 자성소자를 최소화할 수 있는 방법을 제안한다.

2. 비동기식 능동형 클램프 회로를 사용한 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터

그림 1은 전류 배출기를 포함하는 비동기식 능동형 클램프 회로를 사용한 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터의 회로도를 나타내고 있다. 일반적으로 클램프 전압 V_{cl} 은 변압기 턴비에 의해 넘어온 전압인 $(N_s/N_p)V_{in}$ 보다 높게 설정하기 때문에 입력전압의 변화에 따라 클램프 전압을 제어하기 위해서는 입력전압에 대한 정보가 필요하다. 따라서, 그림1에서와 같이 절연형 DC/DC 컨버터를 사용하여 입력전압에 따라 E/A(Error Amplifier)의 V_{ref} 를 다르게 인가하면 입력전압의 변동에 따라서 클램프 전압을 변압기 턴비에 의해 넘어온 전압보다 높게 설정할 수 있다. 또한, 그림1에서와 같이 히스테리시스를 통해 동작하는 능동형 블리더(R_{Hy} , M_{Hy})를 사용하여 초기 기동 시에 발생하는 공진에너지를 저항 R_{Hy} 를 통해 소모시킴으로써 보조 DC/DC 컨버터의 자성소자를 최소화 할 수 있다.

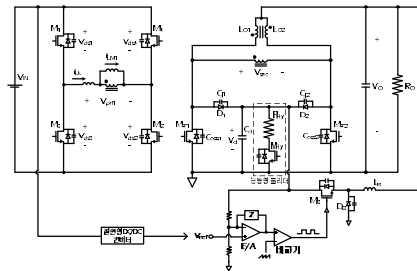


그림 1. 비동기식 능동형 클램프 회로를 사용한 전류배출기를 가진 위상천이 풀 브리지 DC/DC 컨버터

2.1 정상상태 모드분석

모드별 주요 동작 파형을 그림4에 나타내었다. 여기에서는 보조 DC/DC 컨버터가 다루어야 하는 전력량을 계산하기 위해 모드1과 모드2만을 분석한다.

모드 1 [$t_0 \sim t_1$]: M_1 , M_2 그리고 M_{sr2} 스위치가 도통되어 있는 구간이다. t_1 시점에서 M_{sr1} 스위치의 양단전압은 변압기의 누설 인덕턴스와 M_{sr1} 스위치의 기생 출력 캐패시턴스 사이의 공진으로 인하여 클램프 전압 V_{cl} 까지 상승한다. Mode1의 동작 회로는 그림 2에 나타내었으며, 다이오드 D_1 으로 흐르는 전류의 최대 크기는 식 (1)과 같다.

$$i_{D1pk}(t_1) = V_{IN} \sqrt{\frac{C_X}{L_k}} \sin \left[\cos^{-1} \left(1 - \frac{N_p}{N_s} \cdot \frac{V_{cl}}{V_{IN}} \right) \right], C_X = C_{j1} + C_{oss1} \quad (1)$$

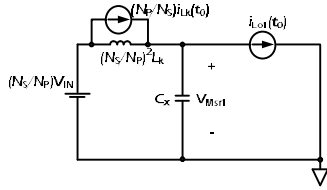


그림 2. Mode1 구간의 등가회로도

모드 2 $[t_1 \sim t_2]$: 스위치는 이전 모드와 같은 상태에서 다이오드 D_1 이 도통될 때 모드 2가 시작되며 모드 2 구간 동안 M_{sr1} 스위치의 양단전압은 V_{cl} 로 클램프 된다. 모드 2의 등가회로는 그림 3에 나타내었다. 변압기 턴 비에 의해서 넘어온 누설 인덕터와 출력 인덕터의 전류 차이만큼 다이오드 D_1 으로 흐르게 되며, 전류 기울기는 식(2)와 같다. 그리고 모드 2 구간 동안의 다이오드 D_1 의 전류파형이 삼각형이기 때문에 삼각형 넓이공식 $(1/2) * (\text{높이})^2 * (1/\text{기울기})$ 을 사용하여 다이오드의 평균 전류를 구하면 식(3)과 같다. 마지막으로 식(3)과 클램프 전압을 곱하면 보조 DC/DC 컨버터가 다루어야 하는 전력량을 식(4)와 같이 구할 수 있다. 이 경우, 다이오드 D_1 의 평균전류에 2가 곱해진 이유는 하나의 스위칭 주기 안에 다이오드 D_1, D_2 가 교번으로 동작하기 때문이다.

$$\frac{di_{D1}}{dt} = \frac{N_p}{N_s} \frac{V_{cl} - V_{IN}}{L_k} - \frac{V_{cl} - V_o}{L_{o1}} \quad (2)$$

$$\langle I_{D1} \rangle = \frac{1}{2} I_{D1pk}^2 \frac{dt}{di_{D1}} f_s \quad (3)$$

$$P_{cl} = 2 \langle I_{D1} \rangle \cdot V_{cl} \quad (4)$$

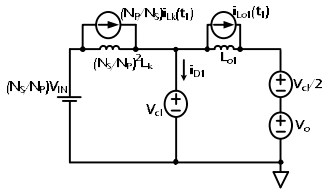


그림 3. Mode2 구간의 등가회로도

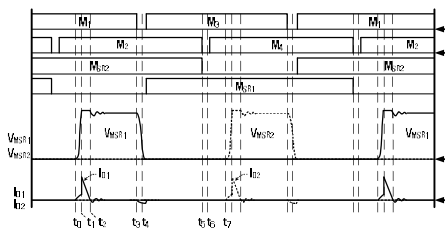


그림 4. 비동기식 능동형 클램프 회로를 사용한 위상전이 풀 브리지 DC/DC 컨버터의 동작파형

2.2 초기 스타트 구간 동안의 제어 기술

초기 기동 시 출력 전압을 정상상태로 충전시키는 전류로 인하여 공진에너지가 증가하게 된다. 이 경우, 보조 DC/DC 컨버터가 초기에 동작하게 되면 초기 기동 시의 큰 공진에너지를 보조 DC/DC 컨버터가 부담해야 하므로 보조 DC/DC 컨버터에서 사용되는 자성소자의 부피가 증가되는 문제점이 있다. 따라서, 초기 기동 시 히스테리시스 회로를 이용하여 클램프 캐패시터와 병렬로 연결되어 있는 스위치 M_{H1} 와 저항 R_{H1} 를 통해 공진 에너지를 소비함으로써 보조 DC/DC 컨버터의 자성소자를 최소화 시킬 수 있다.

3. 실험결과

동작원리 및 특성을 확인하기 위해 시작품을 제작하여 실험을 수행하였으며 실험사양은 표1과 같다. 그림5는 제안회로의 초기 스타트 구간 동안의 히스테리시스 동작 및 주요 파형을 나타내고 있으며, 각각 출력전압 V_o , 클램프 전압 V_{cl} , 보조 DC/DC 컨버터의 출력 전류 I_{Buck} , 출력전류 I_{o1} 을 나타내고 있다. 그림5와 같이 $V_{in}=40V$, $V_{cl}=87.5V$ 인 조건에서 모드분석을 통해 계산된 보조 DC/DC컨버터가 다루어야 할 전력량 $P_{cl}=10.65W$ 가 구해지며, 실험파형에서는 보조 DC/DC 컨버터의 최대전류가 0.9A에서 보조 DC/DC 컨버터의 출력전력은 9.78W이다. 이는 Buck 컨버터의 효율이 95%에서 오차율은 3.3%로 모드분석이 정확하다는 것을 알 수 있다. 또한, 초기 스타트 구간 시 히스테리시스 동작을 통해 클램프 전압이 제어됨을 확인 할 수 있으며, 출력전압이 정상상태에 도달되는 시점 이후에 보조 DC/DC 컨버터가 동작하는 것을 알 수 있다.

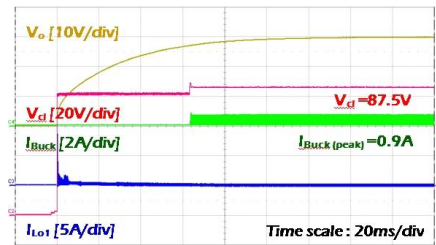


그림 5. 초기 스타트 구간 동안의 히스테리시스 동작 및 주요 파형

표 1 실험 사양

입력 전압(V_{in})	36~72V	변압기 턴 비	1:2
출력 전압(V_o)	30V	자화인덕턴스(L_m)	60uH
최대출력전력(P_o)	450W	누설인덕턴스(L_k)	400nH
출력인덕턴스(L_{o1}, L_{o2})	20uH	스위칭 주파수(PSFB)	150kHz
출력인덕턴스(L_B)	95uH	스위칭 주파수(Buck)	167kHz

4. 결 론

본 논문에서는 2차 측 정류기의 공진 전압을 저감할 수 있는 비동기식 능동형 스너버 회로의 설계방법을 제안한다. 비동기식 능동형 클램프 회로를 사용한 위상전이가 풀 브리지 DC/DC 컨버터의 정확한 분석을 통해서 보조 DC/DC 컨버터가 다루어야 하는 전력량을 계산하여 보조 DC/DC 컨버터를 설계할 수 있다. 또한, 초기 기동 시 발생하는 큰 공진 에너지를 히스테리시스 회로를 이용하여 저항을 통해 소모시킴으로써 보조 DC/DC 컨버터의 자성소자를 최소화 시킬 수 있다. 최종적으로 실험을 통해 회로해석 및 제안된 방식의 타당성을 검증하였다.

본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 대학IT 연구센터육성 지원사업의 연구결과와 2013년도 국민대학교 교내 연구비 지원 결과로 수행되었음(NIPA 2013 H0301 13 2007)

참 고 문 헌

- [1] J. G. Cho, J. A. Sabate, G. Hua and F. C. Lee, "Zero voltage and zero current switching full bridge PWM converter for high power applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, Jul. 1996, pp. 622 628
- [2] Windels, J. and Dautreloigne, J.: 'Active asynchronous secondary side voltage clamping', IEEE Power Electron. Lett., 2011, 47, (8), pp. 512 514