보조 커플드-인덕터를 이용한 ZVT 인터리브드 DC/DC 컨버터의 주파수 변조 기법

이종영*, 이순령*, 이강현*, 원충연*, 이제현**, 조보형**
성균관대학교*, 서울대학교**

Frequency Modulation Method of ZVT Interleaved DC/DC Converter Using Auxiliary Coupled-Inductor

Jong-Young Lee*, Soon-Ryung Lee*, Kang-Hyun Lee*, Chung-Yuen Won*, Je-Hyun Yi**, Bo-Hyung Cho**
Sungkyunkwan University*, Seoul National University**

ABSTRACT

This paper presents frequency modulation method of zero voltage transition interleaved DC/DC converter using auxiliary coupled inductor. In conventional ZVT interlaved converter without semi conductor devices in auxiliary circuit, the peak to peak value of coupled inductor current has fixed value despite the change of load current. Then, as the load is reduced, the efficiency is reduced because of the conduction loss. The proposed frequency modulation method can reduce the conduction loss by controlling the current of coupled inductor as the load condition using frequency modulation. The proposed method is verified by experimental results.

1. 서 론

인터리브드 DC/DC 컨버터는 출력 전류의 리플을 저감하고 도통 손실을 줄여 효율을 개선할 수 있는 장점으로 인해 대용량 컨버터에 많이 사용되고 있다. 또한 도통 손실 저감 효과, 양방향 구동 등의 목적으로 다이오드를 동기 스위치로 바꿔 사용하는 경우가 많다. 하지만, 스위칭 반도체 소자의 개수가 증가함에 따라 스위칭 손실이 증가하는 단점이 있다.

이러한 단점을 보완하고 신뢰성을 높이기 위해 병렬 구조에서 수동소자만을 이용하여 영 전압 스위칭 동작을 하는 컨버터가 제안되었다[1]. 제안된 컨버터[1]는 병렬 구조에서 다른 수동소자를 사용한 소프트 스위칭 컨버터보다 상대적으로 도통손실을 저감하는 효과가 있다. 하지만 전 부하 범위의 영 전압 스위칭 동작을 위해 최대 부하 전류를 기준으로 커플드 인덕터를 설계해야 한다. 따라서 부하 용량이 줄어도 보조 회로 전류는 최대 부하 기준 설계 값을 유지하게 되고, 부하가 낮아지면 여분의 순환 전류가 발생하게 된다. 따라서 이로 인한 도통 손실로 인해 컨버터의 전반적인 효율이 저하된다.

본 논문에서는 이러한 단점을 보완하여 [1]의 컨버터의 효율을 향상시키기 위한 주파수 변조 기법을 제안한다. 제안하는 주파수 변조 기법은 스위칭 주파수를 변조하여 영 전압 스위칭을 만족하는 범위 내에서 보조 회로의 전류를 최솟값으로 제어한다. 이를 통해 회로의 도통 손실을 최소화하고, 컨버터[1]의 전반적인 효율을 향상시킬 수 있다. 제안하는 주파수 변조 기법은 1kW급 실험을 통해 검증하였다.

2. 본 론

2.1 회로 구성

그림 1은 보조 커플드 인덕터를 이용한 ZVT 인터리브드 벅 컨버터의 회로 구성을 나타내며, 두 개의 동기식 벅 컨버터 모듈과 보조 회로로 구성된다.

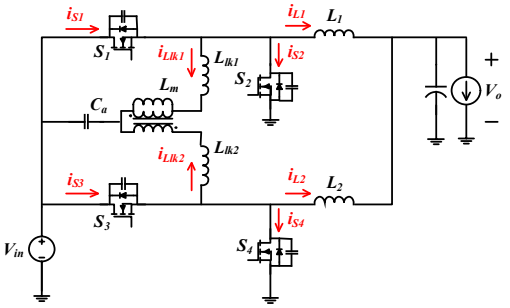


그림 1 보조 커플드-인덕터를 이용한 ZVT 인터리브드 벅-컨버터
Fig. 1 ZVT Interleaved buck-converter using auxiliary coupled-inductor

2.2 제안하는 주파수 변조 제어 기법

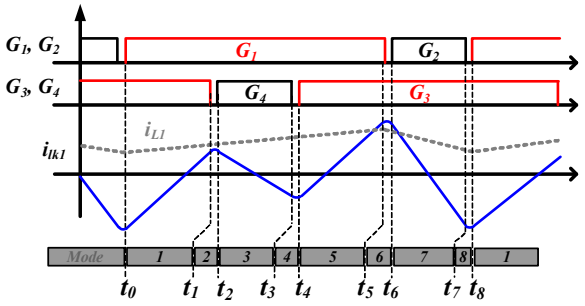
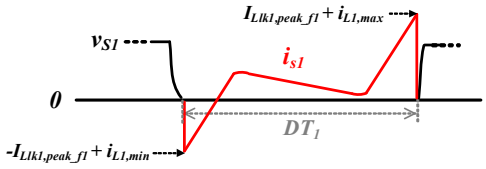


그림 2 컨버터[1]의 누설 인덕터 전류 파형
Fig. 2 The waveform of leakage inductor in the converter[1]

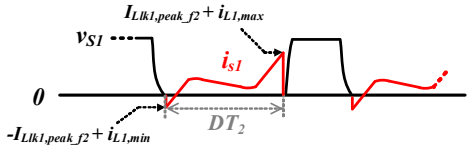
[1]의 컨버터의 영 전압 스위칭 동작을 위해서는 그림 2와 같이 스위칭 시점 t_0, t_4에서 누설 인덕터 L_{lk1}, L_{lk2} 전류의 절대값이 주 인덕터 L_1, L_2의 전류보다 각각 일정량만큼 커야한다. L_{lk1} 전류는 스위칭 시점 t_0에서 최솟값이므로, 식 (1)과 같이 $-I_{L_{lk1},peak}$ 으로 정의할 수 있다. 이때 α는 식 (2)와 같이 누설 인덕턴스 L_{lk}와 자화 인덕턴스 L_m의 비를 의미하며, 보조 회로 설계의 기준값이 된다.

$$I_{L_{lk1}}(t_0) = -I_{L_{lk1},peak} = -\frac{D-\alpha}{2L_{lk1}f}V_{in}(1-D) \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{L_m}{2L_m + L_{lk}} \quad (2)$$



(a) 최대 부하 기준 주파수 동작



(b) 주파수 변조 기법 적용

그림 3 경부하 조건의 주 스위치 파형

Fig. 3 Waveforms of the main switch at light load condition

[1]의 컨버터는 스위칭 순간에 스위치에 흐르는 전류의 에너지로 소프트 스위칭으로 동작하게 된다. 따라서 커플드 인덕터는 최대 부하에서 소프트 스위칭으로 동작할 수 있는 최소 전류를 만들어 주는 값으로 설계한다. 이때 소프트 스위칭으로 동작하기 위한 스위치 전류의 peak to peak 값은 식 (3)과 같으며, 부하 변동에 관계없이 같은 값을 유지하게 된다.

$$i_{S_1,peak-to-peak} = \left(\frac{D-\alpha}{L_{lk_1}} + \frac{D}{L_1}\right)(1-D)\frac{V_{in}}{f} \quad (3)$$

따라서 부하가 낮아지면 그림 3 (a)와 같이 스위칭 순간의 전류가 커지게 되고, 여분의 순환 전류가 발생하게 된다. 이때 부하에 따라 주파수를 변조하면 그림 3 (b)와 같이 어느 부하에서나 소프트 스위칭 동작에 필요한 최소 순환 전류로 회로를 구동할 수 있다. 변조하는 기준 주파수는 식 (4)와 같으며, $I_{\min}$은 영 전압 스위칭에 필요한 최소 전류이다. 따라서 해당 부하 및 시비율 조건에 따라 계산된 주파수를 인가하여 순환 전류를 최소화할 수 있다.

$$f^* = \frac{\left(\frac{D-\alpha}{L_{lk_1}} + \frac{D}{L_1}\right)(1-D)V_{in}}{2(I_L + I_{\min})} \quad (4)$$

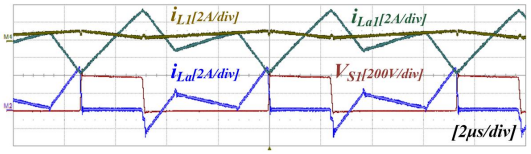
3. 실험 결과

표 1은 제안하는 주파수 변조 기법을 검증하기 위한 실험 제원을 나타낸다. 기존의 하드 스위칭 컨버터는 100kHz 고정 주파수 조건에서 실험하였다. [1]의 컨버터는 100kHz, 최대 부하 기준의 최소 순환 전류 동작 주파수인 136kHz, 그리고 주파수 변조 기법을 적용하여 각각 실험을 수행하였다. 그림 4 (a)는 136kHz, 그림 4 (b)는 주파수 변조 기법을 적용하여 500W 부하 조건에서 실험하였다. 그림 4 (b)를 통해 순환 전류의 peak to peak 값이 약 2.5[A] 감소함을 확인할 수 있었다. 그림 5는 각 실험에 대한 효율 측정 결과이며, 주파수 변조 기법을 통한 전반적인 효율의 향상을 확인할 수 있다.

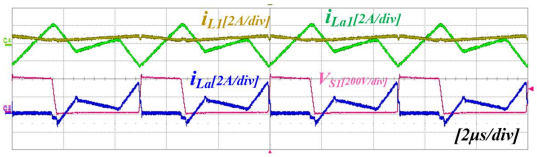
표 1 제안하는 회로의 검증을 위한 실험 제원

Table 1 parameters of proposed circuit

변수	값	변수	값
출력 전력	1 kW	입력 전압	380 V_{dc}
출력 전압	250 V_{dc}	인덕터	750 μH
출력 Cap.	20 μF	L_m	70 μH
주파수	100 kHz	L_{lk}	30 μH



(a)



(b)

그림 4 실험 결과 파형

Fig. 4 Waveforms of experimental results

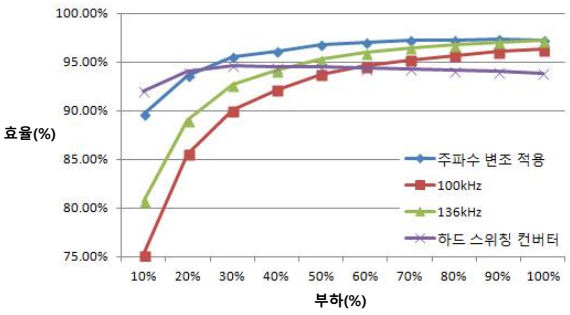


그림 5 효율 측정 결과

Fig. 5 Results of measured efficiency

4. 결 론

본 논문에서는 보조 커플드 인덕터를 사용한 영 전압 스위칭 인터리브드 벅 컨버터의 효율 향상을 위한 주파수 변조 기법을 제안하였다. 각 부하별로 영 전압 스위칭을 만족하는 범위 내에서 순환 전류가 최솟값이 되는 주파수를 도출하였고, 이를 적용하여 회로의 도통 손실을 최소화 하였다. 제안하는 주파수 변조 기법은 1kW 급 프로토 타입의 실험을 통해 효과를 검증하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임

참 고 문 헌

[1] 이제현, 조보형. "순환 전류를 저감 시킬 수 있는 보조 Coupled inductor를 사용한 영 전압 스위칭 interleaved 벅 컨버터." 전력전자학술대회논문집, (2016.7): 60 61.