

# 고전압 대전력 응용을 위한 3레벨 인터리브드 양방향 벡-부스트 컨버터의 비교

성민재, 문동옥  
다원시스

## Comparison of 3-Level Interleaved Bi-directional Buck-Boost Converters for High Voltage High Power Applications

Min-Jae Sung, Dong-Ok Moon  
Dawonsys

### ABSTRACT

고전압 응용에서 효율을 높이기 위해서는 소프트 스위칭 또는 스위칭 손실이 작은 소자를 사용해야 한다. 스위치는 일반적으로 전압이 높아 질수록 특성이 안 좋아 지는 경향이 있어서, 3레벨 형태로 스위치의 전압 정격을 낮추면 특성이 좋은 스위치를 사용할 수 있다. 대용량 응용으로 확장 시, 모듈화 및 인터리빙 기법은 전류 정격을 낮춰 시스템의 경제성 및 유지 보수성이 증가하는 장점이 있다. 본 논문에서는 3레벨 인터리브드 양방향 벡-부스트 컨버터의 구조 분석을 통해 고전압, 대용량 응용에 적합한 최적 구조를 제안한다.

### 1. 서론

DC 그리드가 미래의 전력망으로써 연구됨에 따라 고전압, 대용량의 DC-DC 컨버터 구조 또한 연구되고 있다. 이러한 DC 그리드는 에너지의 흐름이 자유로운 양방향 구조가 필요하며, 높은 효율을 필요로 하고 있다<sup>[1]</sup>.

스위치는 일반적으로 전압 정격이 높을수록 스위칭 특성이 안 좋아지는 경향이 있어서 고전압 응용에서 스위칭 손실을 줄이기 위해서는 스위치의 전압 정격을 낮추는 것이 중요하다. 이때 3레벨 구조를 사용한다면, 2레벨에 비해 스위치 전압 정격이 1/2이 되기 때문에 고전압 응용에서 스위칭 특성이 좋은 소자를 사용할 수 있다.

대용량으로의 확장 시 시스템에는 큰 전류가 흘러 각 소자의 전류 정격이 증가하는데 전류 정격이 높아지면 시스템의 부피가 커지고 비용이 증가하는 문제점이 있다. 이를 위해 모듈화 및 인터리빙 기법을 사용할 수 있다. 이는 시스템의 전류 정격을 낮출 수 있고, 인터리빙 기법을 통해선 전류의 리플 주파수를 스위칭 주파수보다 높일 수 있어서 시스템 구성을 위한 수동 소자의 부피를 크게 줄일 수 있다는 장점이 있다<sup>[1][2]</sup>.

본 논문에서는 위와 같은 장점을 가지는 3레벨 인터리브드 구조를 가지는 고전압, 대용량 양방향 벡-부스트 컨버터의 최적 구조를 제안한다.

### 2. 본론

#### 2.1 시스템의 구조

그림 1은 두 가지의 3레벨 인터리브드 양방향 벡-부스트 컨버터이다. 그림 1(a)는 DC링크 중성점을 이용한 3레벨 인터리브드 벡-부스트 컨버터이며 이를 구조A이라 한다.  $V_H$ 의 DC 링크 전압을 3레벨로 구성했으며, 중성점  $O$ 를 기준으로

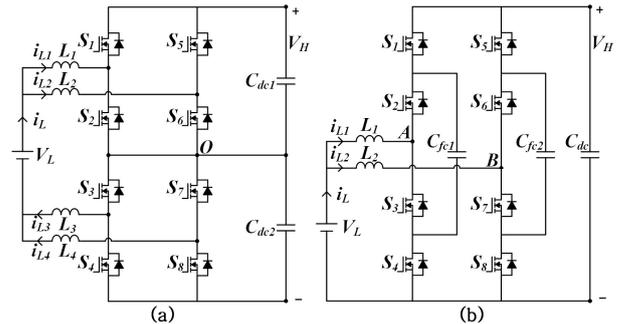


그림 1. 3레벨 인터리브드 벡-부스트 컨버터  
(a)DC링크 중성점 사용 (b)플라이 커패시터 사용

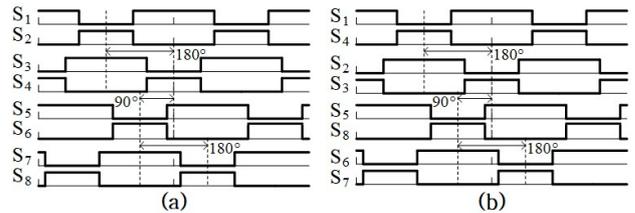


그림 2. 게이트 신호 타이밍도 (a)구조A (b)구조B

벡-부스트 구조를 배치하여 스위치에 걸리는 최대 전압이  $0.5V_H$ 가 된다. 그림 1(b)는 플라이 커패시터를 이용한 3레벨 인터리브드 벡-부스트 컨버터이며 이를 구조B라 한다.  $0.5V_H$ 의 전압이 충전된 플라이 커패시터는 각 스위치의 전압 정격을  $0.5V_H$ 로 고정시킨다. 이러한 두 3레벨 구조는 인덕터의 양단 전압도 반으로 줄여 인덕터 전류 리플을 감소 시킨다.

두 구조는 모듈화 되어서 모듈에 흐르는 최대 전류는  $0.5i_L$ 이 된다. 그림 2는 구조A와 B의 게이트 신호 타이밍을 보여준다. 그림 2와 같이 위상 차이를 이용해 인터리빙 기법을 적용한다면, 각 모듈에 흐르는 인덕터 전류의 리플을 서로 상쇄 시켜서 합해진 전류의 리플을 크게 줄일 수 있다.

즉, 3레벨과 인터리빙은 소자의 정격을 낮출 수 있을 뿐만 아니라 전류의 리플을 크게 감소시킬 수 있어서 수동 소자의 값을 크게 감소시킬 수 있다.

#### 2.2 인덕터의 구성

그림 1의 두 구조는 각각 4개와 2개의 벡-부스트 동작을 위한 인덕터를 포함하고 있으며, 구조A에서는 단락 회로 방지를 위해서 반드시 4개의 인덕터를 사용해야한다.

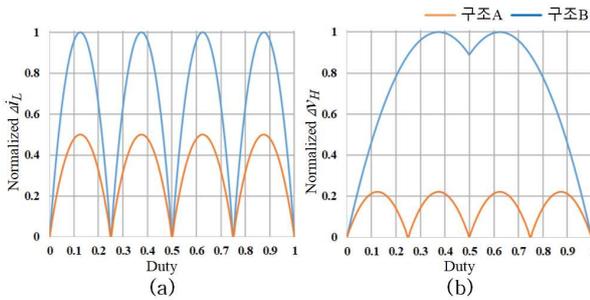


그림 3. 듀티에 따라 정규화된 (a)  $i_L$  전류 리플 (b)  $V_H$  전압 리플

그림 3은 듀티에 따른 정규화된 전류 리플과 전압 리플을 나타낸다. 그림 3(a)에서, 동일 인덕턴스에서  $\Delta i_L$ 이 2배 차이가 나기 때문에 구조B가 2배의 인덕턴스가 필요하지만, 2개의 인덕터로 구성이 가능하다는 장점이 있다.

구조A는 낮은 인덕턴스로 구성이 가능하지만, 인터리빙 시 인덕터 간의 순환 전류가 흐르는 문제점이 있다. 이는 인덕터 전류 리플을 크게 해 인덕터의 코어 손실이 크게 발생한다.

### 2.2.1 인덕터의 전류 제어

구조A는 시스템의 전류 제어를 위해선 모든 인덕터의 전류 제어가 필요하기 때문에 4개의 전류 센서가 필요하다. 반면에 구조B는 2개의 전류 센서만으로 시스템의 전류 제어가 가능하다.

### 2.3 커패시터의 구성

구조A는 3레벨의 DC 링크 구성을 위해 2개의 커패시터가 직렬로 구성되며, 인터리빙에 의해 각각의 전압 리플이 상쇄되어 DC 링크 전압의 리플이 크게 감소하는 장점이 있다. 2개의 커패시터가 필요하지만 구조B 보다 낮은 커패시턴스로 같은 전압 리플 조건을 만족할 수 있다.

구조B는 2개의 플라잉 커패시터가 추가로 필요하지만 DC 링크보다 낮은 커패시턴스로 구성이 가능하다.

#### 2.3.1 커패시터의 전압 제어

3레벨 동작을 위해서 구조A는 DC 링크 각 커패시터가, 구조B는 플라잉 커패시터가 모두 전압이  $0.5V_H$ 의 전압으로 유지되어야 한다. 하지만 데드 타임, 게이트 신호의 불일치 및 기생 성분 등에 의한 오차로 인해 커패시터의 전압이  $0.5V_H$ 로 유지 되지 않는다.

이를 위해서 구조A에서는 DC 링크 커패시터들의 전압을 측정하고 제어할 필요가 있다. 하지만 구조B에서는 스위치의 양단의 기생 커패시터가 플라잉 커패시터의 전압 밸런스를 유지시켜주는 역할을 해주기 때문에 추가적인 제어 없이 플라잉 커패시터의 전압을  $0.5V_H$ 로 유지시킬 수 있다.

### 2.4 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 표 1과 같은 사양으로 수행하였으며 이 때의 결과를 그림 4와 표 2에서 볼 수 있다. 표 3은 수동 소자와 센서의 개수를 나타내며 제어를 위해서는 표 3과 같은 신호의 개수를 사용하였다.

동일한 인덕턴스 일 때, 전류 리플  $\Delta i_L$ 은 2배 차이가 나지만 순환 전류로 인해 각각의 인덕터 전류 리플의 크기는 구조A가 더 큰 것을 확인 할 수 있다. 또한 동일한 커패시턴스 일 때 전압 리플  $\Delta V_H$ 의 크기는 구조A가 더 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

$L_{L-4}$	$C_{dc(L,2)}$	$C_{fc,L2}$	$f_{sw}$
156uH	50uF	8.4uF	40kHz
$V_L$	$I_L$	$V_H$	$D$
1250V	100A	2000V	0.375

표 1. 시뮬레이션 파라미터

	구조A	구조B
$\Delta i_L$	5.08A	10.38A
$f_{iL}$	160kHz	160kHz
$\Delta i_{L1-4}$	21.5A	13.7A
$f_{iL1-4}$	40kHz	80kHz
$\Delta v_H$	1.95V	7V
$f_{vH}$	160kHz	40kHz

표 2. 시뮬레이션 결과

	구조A	구조B
커패시터	Link capacitor 2개	Flying capacitor 2개 Link capacitor 1개
인덕터	4개	2개
센서	전류 센서 4개 전압 센서 2개	전류 센서 2개 전압 센서 1개

표 3. 수동 소자 및 측정 센서 개수

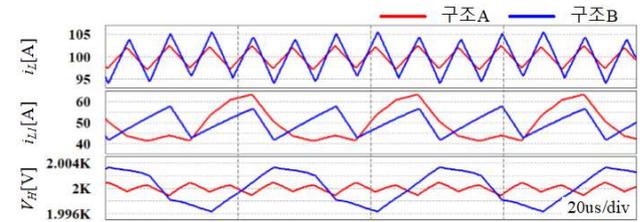


그림 4.  $i_{L1}$ 과  $i_{L2}$ 의 전류 리플과  $V_H$  전압 리플 시뮬레이션 파형

## 3. 결론

본 논문에서는 고전압 대용량 응용을 위한 3레벨 인터리브드 양방향 벡-부스트 컨버터의 최적 구조 분석을 진행하였다. 구조A와 구조B가 같은 저전압측의 전류 리플을 얻기 위한 합성 인덕턴스는 동일하다. 합성 인덕턴스 측면에서는 구조A와 B가 큰 차이가 없지만 구조A는 반드시 4개의 인덕터가 필요하고 전류를 모두 측정해야 한다. 고전압측 전압 리플의 경우 구조A가 인터리빙의 효과로 장점이 있지만, 중성점 연결로 인한 커패시터의 전압 불균형을 제어해야 하는 단점이 있다. 반면 구조B는 스위치의 기생 커패시터로 인해 플라잉 커패시터의 전압을 별도의 제어 없이  $0.5V_H$ 로 유지할 수 있는 장점이 있다.

앞서 언급한 내용들을 종합하여, 고전압 대용량 응용을 위한 3레벨 인터리브드 양방향 벡-부스트 컨버터의 최적 구조로 플라잉 커패시터를 적용한 구조 B를 제안한다.

## 참고 문헌

- [1] S. Lu, M. Mu, Y. Jiao, F. C. Lee and Z. Zhao, "Coupled Inductors in Interleaved Multiphase Three-Level DC-DC Converter for High-Power Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 1, pp. 120-134, Jan. 2016.
- [2] X. Liu, P. K. T. Mok, J. Jiang and W. Ki, "Analysis and Design Considerations of Integrated 3-Level Buck Converters," in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 63, no. 5, pp. 671-682, May 2016.