

# Dual Active Bridge 컨버터의 인덕터 설계

오영진, 김성민  
한양대학교

## Inductor design of Dual Active Bridge Converter

Young-Jin Oh, Sungmin Kim  
Hanyang University

### ABSTRACT

본 논문에서는 정격부하에서 효율이 가장 높으면서 동시에 Zero Voltage Switching(ZVS)를 만족하는 인덕터를 설계하는 방법을 제안한다. 제안하는 인덕터 설계 방법은 주어진 정격에서 스위치에 존재하는 스너버 캐패시터를 고려한 ZVS 식을 구하며, 스위치의 특성을 고려한 Dead-time을 설계하고 이를 통해 인덕턴스를 최소화 한다. 시뮬레이션을 통해 스너버 캐패시터의 전압 파형 및 스위치의 손실을 비교하였다

### 1. 서 론

Dual Active Bridge(DAB) 컨버터의 전력은 1/2차측 Full-Bridge 컨버터의 출력 전압 위상 차이에 의해 결정된다. 일반적으로 시스템의 1차측, 2차측 전압과 정격 출력, 스위칭 주파수와 변압기의 턴 비는 이미 정해져 있기 때문에 정격 출력에서의 위상 천이의 정도는 인덕턴스에 의해 결정된다. DAB 컨버터의 1,2차측 전압의 위상 천이가 작으면 Hard-switching 이 발생할 수 있다. 따라서 넓은 출력 영역에서 ZVS를 만족하기 위해서는 인덕터의 값을 크게 설계하여야 한다. 반면에 정격부하에서 고효율을 내기 위해서는 인덕터에 흐르는 전류의 실효값을 낮추어야 하고, 이를 위해서는 인덕턴스를 작게 설계하여야 한다. 인덕터가 작아지는 것은 컨버터의 경량화 측면에서도 강점을 갖는다.

본 논문에서는 정격 출력 조건에서 스너버 캐패시터를 고려한 Zero Voltage Switching(ZVS)영역을 계산한다. 스위치의 Turn-off 시간을 고려한 Dead-time을 구하며 이를 통해 최소의 인덕턴스를 제안한다. 시뮬레이션을 통해 Dead-time 동안의 스너버 캐패시터의 전압파형 및 스위치의 손실을 비교, 확인한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 DAB 컨버터의 특징

그림 1은 본 논문에서 다루는 DAB 컨버터의 회로도이다. DAB 컨버터의 전력은 1차측 Full-Bridge 컨버터가 합성하는 전압과 2차측 Full-Bridge 컨버터가 합성하는 전압의 위상차에 의해 전달된다.

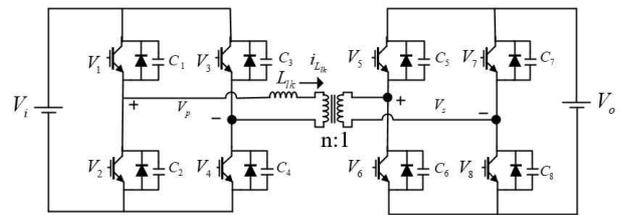


그림 1 DAB 컨버터 회로  
Fig. 1 Circuit of DAB converter

DAB의 출력(P)은 다음과 같이 계산된다.

$$P = \frac{TV_i^2}{L_{lk}} d(1-d) \tag{1}$$

T는 스위칭주기의 절반의 시간이며, M은 입력 전압에 대한 출력 전압의 비율을 나타내며, d는 위상천이 정도를 나타낸다. 또한 1차 측 전압이 양이 되는 순간의 인덕터 전류를 I<sub>1</sub>, 2차 측 전압이 양이 되는 순간의 인덕터 전류를 I<sub>2</sub> 라 할 때, 인덕터 전류는 각각 다음과 같이 표현된다.

$$I_1 = \frac{Tv_i}{2L_{lk}} (-2Md - 1 + M) \tag{2}$$

$$I_2 = \frac{Tv_i}{2L_{lk}} (2d - 1 + M) \tag{3}$$

ZVS를 만족하기 위해서는 I<sub>1</sub> 값은 0보다 작고, I<sub>2</sub>의 값은 0보다 커야한다.

#### 2.2 스너버 캐패시터를 고려한 ZVS식

그림1에서 C<sub>2</sub>에 걸리는 전압을 식으로 구하면 다음과 같이 정리 할 수 있다.<sup>[1]</sup>

$$V_2(t) = \frac{V_i - nV_o}{2} + \frac{\sqrt{(V_i - nV_o)^2 + (ZI_1)^2}}{2} \sin(\omega_0 t + \tan^{-1} \frac{nV_o - V_i}{ZI_1}) \tag{4}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{lk} C_2}} \quad Z = \sqrt{\frac{L_{lk}}{C_2}} \tag{5}$$

따라서 ZVS를 만족하기 위해서는 식(4)의 캐패시터 전압의 첨두 값이 입력전압보다 커야 하므로 이를 통해 ZVS영역 식을 구하면 다음과 같다.

$$|I_i| \geq \frac{2V_i\sqrt{M}}{Z} \quad (6)$$

식(1)과 식(6)을 통해 주어진 정격에서 ZVS를 만족하는 최소의 위상 천이 값을 식 (7)과 같이 구할 수 있다. 이를 통해 정격 출력에서 ZVS를 만족하는 최소 인덕턴스를 설계 할 수 있다. 표 1의 시스템 사양에 필요한 최소 인덕턴스는 0.3472mH 이다.

$$d \geq 2\sqrt{\frac{V_i^2}{PT}d(1-d)} \quad (7)$$

표 1 DAB 시뮬레이션 사양

Table 1 Specification of the DAB

Parameter	Value
Input Voltage	50V
Output Voltage	50V
Maximum power	600W
Switching frequency	10kHz
Turn ratio	1
snubber capacitances	0.5nF

### 2.3 Dead-time의 설계

식 (4)에서 알 수 있듯이 스너버 캐패시터의 전압 파형은 스너버 캐패시터와 인덕터에 의한 공진에 의해 결정된다. 인덕턴스와 스너버 캐패시턴스가 결정되면 공진 주기를 알 수 있고 Dead-time을 ( $T_d$ )을 공진 주기의 4분의 1만큼 하였을 때 스너버 캐패시터의 전압이 최대가 되므로 Dead-time을 다음과 같이 설계한다.<sup>[2]</sup>

$$T_d = \frac{\pi\sqrt{L_{lk}C_2}}{2} \quad (8)$$

시뮬레이션에 사용할 스위치소자(SCH2080KEC)의 꺼지는 시간이 98ns일 때  $T_d=98ns$ 을 만족하는 인덕턴스는 7.78μH 이다. 하지만 Turn-off 시간에 약 20%의 여유를 추가하여 Dead-time을 120ns으로 설계하였다. 스위치에 생기는 기생 캐패시터를 스너버 캐패시터라 고려하여 스너버 캐패시턴스를 0.5nF이라하면 최소 인덕터의 값은 11.67μH이다.

### 2.4 시뮬레이션 결과

위에서 설계한 인덕턴스를 적용하여 Dead-time이 120ns, 150ns일 때 스너버 캐패시터의 전압을 각각 비교하였다. 그리고 스너버 캐패시터의 영향을 비교하기 위해, 스너버 캐패시터를 포함하지 않은 모델과 포함한 모델에 대해서 DAB 컨버터의 손실을 비교하였다.

그림 2와 그림 3은 Dead-time이 120ns, 150ns 일 때 스너버 캐패시터의 전압 파형이다. 120ns는 공진주기의 4분의 1인 지점으로 Dead-time이 끝나는 지점에서의 전압이 입력전압과 동일한 반면 150ns에서는 입력전압보다 낮은 지점일 때 Dead-time이 끝나므로 ZVS를 만족하지 못하게 되며, 손실 값도 증가하게 된다. 따라서 적절한 Dead-time을 사용해야 효율에서 우수한 결과를 보인다는 것을 확인하였다.

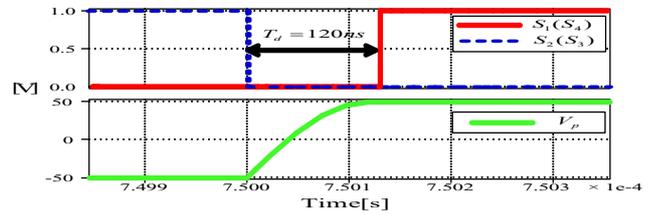


그림 2 Deadtime 120ns일 때 스너버 캐패시터 파형

Fig. 2 Snubber capacitor voltage waveform (Deadtim = 120ns)

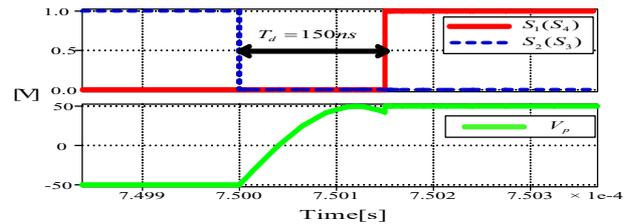


그림 3 Deadtime 150ns일 때 스너버 캐패시터 파형

Fig. 3 Snubber capacitor voltage waveform (Deadtim = 150ns)

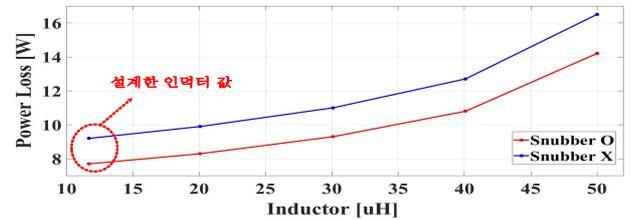


그림 4 스너버 캐패시터가 있는 DAB와 없는 DAB의 손실 비교

Fig. 4 Power Loss comparison of DAB with and without Snubber Capacitor

그림 4는 스너버 캐패시터가 있는 DAB와 없는 DAB의 손실을 비교한 것이다. 스너버 캐패시터로 인해 스위치의 Turn-off 손실이 줄어들어 Power Loss가 더 적게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 설계한 인덕터의 값에서 손실 가장 적게 난다.

## 3. 결론

본 논문에서는 정격에서 스너버 캐패시터를 고려하였을 때 ZVS를 만족하는 최소의 인덕터 값을 설계하였으며 시뮬레이션을 통해 ZVS를 만족함을 확인하였다.

## 참고 문헌

- [1] F.Yazdani, S. Haghbin, M. R. Zolghadri, T. Thiringer, "Accurate Analysis of a Single-Phase Dual Active Bridge Converter for ZVS and Deadband Conditions" in 2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe), Milan, 2017.
- [2] N. Tan, T. Abe, and H. Akagi, "Experimental discussions on operating frequencies of a bidirectional isolated dc-dc converter for a battery energy storage system," pp. 2333 - 2340, Sept 2013.