

# Solid State Transformer를 위한 양방향 Dual Active Bridge DC/DC 컨버터 최적 설계

최현준, 박화평, 정지훈  
울산과학기술대학교

## Design Optimization of Bi-directional Dual Active Bridge DC/DC Converter for Solid State Transformer

Hyun Jun Choi, Hwa Pyeong Park, Jee Hoon Jung  
Ulsan National Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문에서는 양방향 DC DC Dual Active Bridge (DAB) 컨버터의 수학적 모델로부터 컨버터의 변압기와 결합 인덕터의 최적 설계 방법을 제안한다. DAB컨버터는 1차 측과 2차 측이 동일한 구조를 가진 고효율 절연형 컨버터로써, Soft Switching이 쉽게 구현되고, 양방향으로 Power를 전달 할 수 있는 장점으로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서 제안하는 컨버터는 Solid State Transformer (SST) 용으로 변압기 1차 측과 2차 측의 턴 비가 동일한 구조로써, 최대의 ZVS영역을 확보하고, 전력 변환 효율을 극대화 할 수 있다. 3.3 kW급 시제품을 제작하여 제안하는 컨버터의 타당성을 검증하고자 한다.

### 1. 서론

최근 친환경 에너지의 요구가 증가함에 따라, 스마트 그리드와 배전시스템의 필수 기술인 Solid State Transformer (SST)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. SST란 양방향 전력 변환 장치로, 기존의 변압기의 대체방안으로 각광받고 있다. 기존의 변압기는 변압기의 부피와 무게의 한계로 활용성이 매우 제한적이다. SST는 위의 문제점을 해결하는 동시에 높은 전력 밀도를 가지고 전력의 품질을 향상시키며, 시스템을 보호할 수 있는 등 다양한 장점을 가지고 있다.

SST의 구성 요소로 양방향 전력 변환이 가능한 DC/DC 컨버터가 필수적이다. DAB 컨버터는 양단이 동일한 고효율의 절연형 양방향 DC/DC 컨버터로 양단의 스위치에 위상변위를 통해 전력을 양방향으로 쉽게 전달할 수 있고, Soft Switching으로 스위칭 손실을 줄일 수 있는 장점 때문에 대용량의 양방향 DC/DC 컨버터의 응용에 널리 사용되고 있다.

본 논문에서는 SST를 위한 DAB 컨버터의 최적화 설계 방법을 제안한다. DAB 컨버터는 스위치의 위상을 변화 시키면서 동작하고 결합 인덕터에 걸리는 전압 차에 따라서 출력을 제어한다. DAB 컨버터에서 최대의 ZVS 영역을 확보하기 위하여 전압 이득과, 위상 천이, Dead Time 등을 고려해야 하고, 상기 사항을 고려한 결합 인덕턴스의 설계가 필요하다. 뿐만 아니라 자화 인덕터의 포화로 발생하는 변압기 전류의 발산을 막기 위해 적절한 자화 인덕턴스를 설계하고, EE Core를 이용한 고주파 변압기의 설계 방법을 제시한다.

### 2. 제안한 컨버터의 동작원리

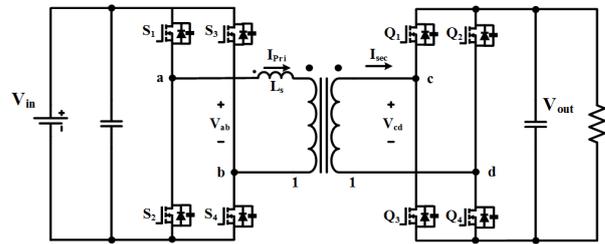


그림 1. Dual Active Bridge DC-DC 컨버터

제안된 DAB 컨버터는 SST용 양방향 DC DC 컨버터로 턴 비가 1:1로 고정되어 있고, 그림 1에서 보듯이 1차 측과 2차 측이 모두 Full Bridge 스위치단으로 구성되어 있다. DAB 컨버터는 스위치의 동작에 따라서 1차 측에서 2차 측으로 또는 2차 측에서 1차 측으로 전력의 전달 방향이 결정 된다. 특히 출력 전압은 두 양단의 브릿지 전압 차이에 의하여 제어된다. 두 양단의 전압 차이는 결합 인덕터를 통해서 나타나게 되고, 이는 인덕터 전류의 기울기를 변화시킨다.

### 2.1 결합 인덕턴스 전류 분석

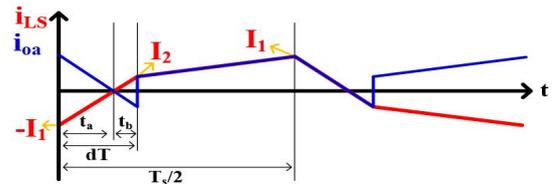


그림 2. 인덕터에 흐르는 전류( $i_{LS}$ )와 등가 출력전류( $i_{oa}$ )<sup>[1]</sup>

그림 2는 결합 인덕터에 흐르는 전류로 자화 인덕턴스 전류를 무시했을 때, 1차 측에서 관측되는 출력 전류의 파형을 나타내었다. 위의 파형을 토대로, 최대 ZVS 영역을 만족하는 Dead Time을 설계하고, 출력 측 전력을 고려하여 결합 인덕턴스 설계할 수 있다. 이 때,  $d$ 는 위상 천이 각도이고  $n$ 은 턴 비이다.

$$I_1 = \frac{T_s}{4 \times L_s} \{ (2d-1)v'_o + v_i \}, (v'_o = \frac{v_o}{n}) \quad (1)$$

$$I_2 = \frac{T_s}{4 \times L_s} \{ (2d-1)v_i + v'_o \} \quad (2)$$

### 2.2 DAB 평균값 Modeling

인덕터에 흐르는 전류를 수학적으로 분석하면 변곡점은 식 (1)과 식 (2)로 나타낼 수 있고, 이를 통해 평균 입력 전류와 평균 출력 전류를 구할 수 있다. DAB 컨버터의 평균화 모델을 유도하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

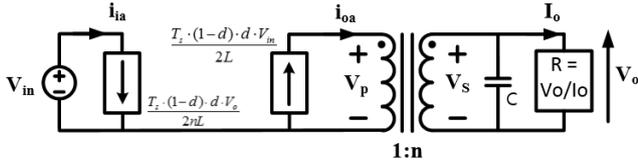


그림 3. DAB 컨버터의 평균값 모델<sup>[1]</sup>

위의 모델에서 전압 이득 공식을 유도하면 식 (3)과 같이 나타낼 수 있고, 50%의 위상 천이(90°)가 일어났을 때, 최대의 출력 전압을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

$$M = \frac{v_o}{n \times v_i} = \frac{d(1-d)T_s R}{2L_s n^2} = d(1-d) \times k \quad (3)$$

### 3. 제안한 컨버터의 최적화 설계 방법

#### 3.1 Dead Time 설계

DAB 컨버터의 ZVS 영역을 설정하기 위해서 스위치의 Output Capacitor가 모두 충·방전 할 수 있도록 Dead Time( $t_d$ )을 설계해 줘야한다. 이는 식 (4)로 나타낼 수 있고, ZVS가 가능하도록 만드는 Dead Time은 식 (5)와 같다.

$$4C_p V_{max} \leq i_c t_d \approx i_p t_d \quad (4)$$

$$t_d \geq 16C_p L_s \frac{f_s}{M(2d-1)+1} \quad (5)$$

#### 3.2 결합 인덕턴스 설계

출력전력을 고려하여 결합 인덕턴스( $L_s$ )의 최적화 설계를 진행하였다. 전압 이득을 위해 사용했던 식 (3)의 상수  $k$ 를 이용하여 전력의 최댓값을 나타내면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{max} = v_o v_i (1-d_{max}) d_{max} \frac{n}{R_{min}} \times k \quad (6)$$

식(3)과 식(6)을 조합하면  $L_s$ 를 식(7)로 정리할 수 있다.

$$L_s \leq \frac{v_i (1-d_{max}) d_{max} R_{min}}{2n v_o f_s} \quad (7)$$

#### 3.3 고주파 변압기 설계

패러데이 법칙을 통해, 1차 측의 권선수( $N_p$ )는 자기 밀도( $B$ ), Core의 유효 단면적( $A_c$ )의 식 (8)로 나타낼 수 있다. DAB 컨버터는 B H곡선의 1,4사분면을 지나기 때문에,  $\Delta B$ 는  $2 \times B_{sat}$ 으로 설정을 해야 한다. 하지만  $\Delta B$ 가 클수록 Core의 손실이 커지게 됨으로 적정한 여유 한계를 설정해줘야 한다.

$$N_p \leq \frac{v_p(t)DT_s}{\Delta B \times A_c}, (D = Duty\ cycle) \quad (8)$$

이상적인 변압기의 경우 자화 인덕턴스( $L_m$ )는 무한대라 가정한다. 하지만 실질적으로  $L_m$ 이 일정 크기 이상이 되면 작은 전류에도 변압기의 포화를 쉽게 야기하고, 양단의 전력 전달을 방해한다. 자화 인덕턴스를 설계하기 위해 우선 Air gap의 길이( $l_g$ )를 설계한다. 식 (9)를 통해  $l_g$ 를 구한 뒤,  $A_c$  Core의 유효 길이( $l_e$ )와 투자율( $\mu_e$ )의 관한 식 (10)을 통해  $L_m$ 을 구할 수 있다.

$$I_{pri\_peak} = \frac{B_{max} A_c}{N_p} (R_c + R_g) \quad (9)$$

$$L = L_m + L_{k1} + L_{k2} = N_p^2 A_c \mu_0 \left( \frac{\mu_e}{l_e} + \frac{1}{l_g} \right) \quad (10)$$

## 4. 시뮬레이션 및 실험 결과

표 1. 설계 사양

$V_{in} = V_{out}$	380 V	Power	3.3 kW
$f_s$	50 kHz	Duty	0.5 $t_d$
$d(\text{degree})/180^\circ$	$0.01 < \Phi < 0.48$	$L_s$	100 $\mu\text{H}$
$L_m$	474 $\mu\text{H}$	$N_p$	24 turn
Turn ratio(n)	1:1	$B_{sat}$	0.39 T

제안한 최적화 설계 방법을 토대로 표 1과 같이 3.3 kW급 시제품을 만들어 제안하는 컨버터의 타당성을 검증하였다. 설계 시 20~30%의 여유 한계를 두고 설계하였다.

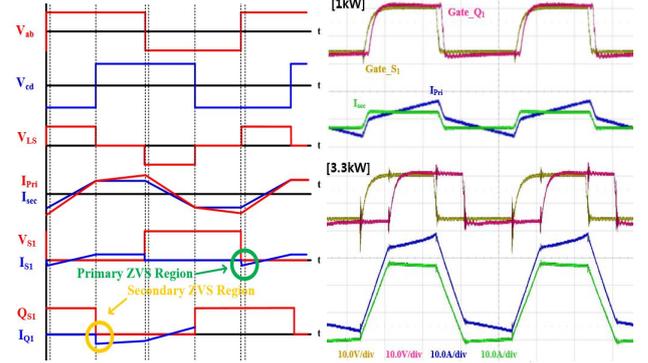


그림 4. DAB 컨버터 시뮬레이션(左)과 실제 실험(右) 파형

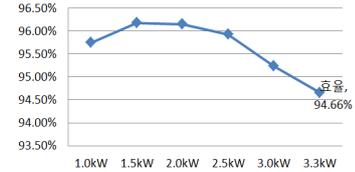


그림 5. 효율 측정 그래프 (N4L PPA5530 측정)

그림 4를 통해 시뮬레이션 파형과 실제 실험 파형이 동일하게 나온 것을 확인할 수 있다. 그림 5는 제안한 컨버터의 효율 그래프이다. 제안하는 컨버터는 전 부하에서 94.6% 이상의 효율을 보이며 1.5 kW에서 최고 효율 96.2%가 측정되었다.

## 5. 결론

본 논문에서 DAB 컨버터의 최적 설계 방법을 제시하였다. DAB 컨버터는 양방향 전력 변환이 가능한 토폴로지로서 고효율의 절연형 DC/DC 컨버터이다. DAB 컨버터는 ZVS가 가능하기 때문에 높은 효율을 얻을 수 있다. 최대의 ZVS 영역을 확보하고, 높은 전력 변환 효율을 얻기 위해 최적 설계 방법을 제시하였으며, 3.3 kW급 시제품을 제작하여 제안하는 컨버터의 성능을 확인하였다.

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (NRF 2013R1A1A1009632)

## 참고 문헌

- [1] A. Alonso, J. Sebastian, D. Lamar, M. Hernando, and A. Vazquez, "An overall study of a dual active bridge for bidirectional dc/dc conversion," in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, 2010, pp. 1129-1135