

# Loss map을 통한 DAB 컨버터 Double Phase Shift 변조 기법 분석

박정배, 송지호, 왕쿤, 박기범  
한국과학기술원

## Analysis of Double Phase Shift Modulation Technique in DAB Converter Using a Loss Map

Jung-Bae Park, Jiho Song, Kun Wang, Ki-Bum Park  
Korea Advanced Institute of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문에서는 Loss map을 통하여 Dual-Active-Bridge (DAB) 컨버터 Double Phase Shift (DPS) 변조 방식을 분석한다. DAB 컨버터의 제어 방식 중 1차측과 2차측 사이의 위상만을 제어하는 Single Phase Shift (SPS)가 가장 널리 사용되지만 전달되는 전력만 제어가 가능하다는 단점이 있다. 따라서 전력을 전달하면서 전류에 대한 특성 또한 제어가 가능한 Double Phase Shift (DPS)가 연구되고 있지만 모두 간접적인 파라미터를 통하여 효율을 최대화하는 방식이다. 따라서 본 논문에서는 Loss map을 통하여 DPS의 효율을 직접적으로 확인하며 제어 변수의 변화에 따른 스위칭 소자에서 발생할 수 있는 손실을 분석하였다.

### 1. 서론

Dual Active Bridge(DAB)는 양방향으로 전력 전송이 가능하다는 특징을 가지고 있다. 또한 ZVS를 통한 높은 효율성과 높은 전력 밀도, 전기적 절연특성 등의 장점으로 Solid-State Transformer(SST), 전기 및 하이브리드 자동차, 전원 분배 계통 등에 폭넓게 사용되고 있다.

DAB를 제어하는 방식 중 하나인 SPS는 그림 1과 같이 Inner phase shift ratio(D1)을 1로 유지한 채 Outer phase shift ratio(D2)를 이용하여 전력을 제어한다. 이러한 SPS는 간단히 구현할 수 있다는 장점이 있지만 제어 변수가 1차측과 2차측 사이의 위상 차이로 국한됨에 따라 필요 이상의 전류가 손실 및 변압기 용량이 불필요하게 증가한다. 또한 전압 이득 ( $M = V_1/nV_2$ )이 1에서 멀어지게 되면  $i_L(t_1) > 0$  및  $i_L(t_3) < 0$ 를 만족하지 못하므로 2차측 내의 ZVS가 발생하지 못하게 된다. 마찬가지로  $i_L(t_2) > 0$  및  $i_L(t_4) < 0$  조건을 만족하지 못하게 되면 1차측 내의 ZVS가 발생하지 못하게 된다. 즉, 하드 스위칭이 발생하여 손실이 커지게 된다.<sup>[1]</sup>

이에 따라 D1, D2를 제어 변수로 두는 DPS를 통하여 ZVS 범위 확장, 피크 전류 최소화 및 스위칭 소자의 스트레스 감소<sup>[2]</sup>, 피상전력 최소화 및 무효전력 최소화, 회로에 흐르는 전류 최소화 등 효율 최적화를 위한 연구가 진행되고 있다. 하지만 이들은 효율에 연관된 간접적인 파라미터를 통한 방식들이다.

따라서 본 논문에서는 직접적인 효율의 확인을 위해 DPS의 스위칭 소자에서 발생하는 전체 손실에 대하여 Loss map을 작성하고 분석하였다.

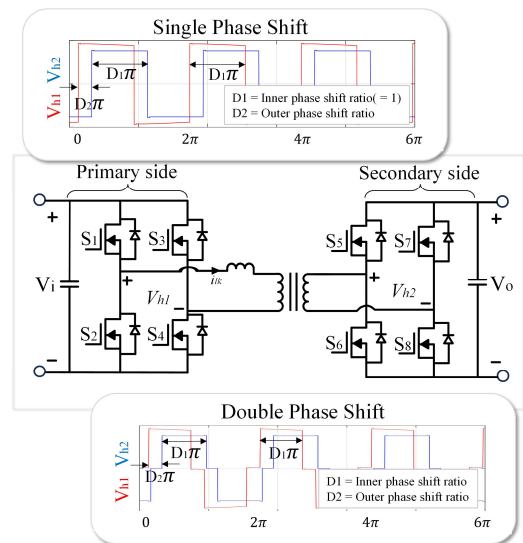


그림 1 DAB DC-DC 컨버터 간략화 회로  
Fig. 1 The simplified circuit of a DAB DC-DC Converter

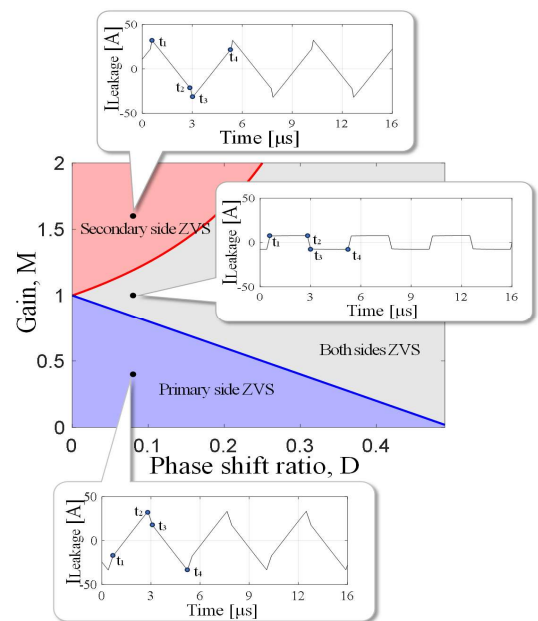


그림 2 SPS에서의 ZVS 범위별 누설 인덕터 전류 파형  
Fig. 2 Leakage inductor current waveforms by ZVS Range under SPS

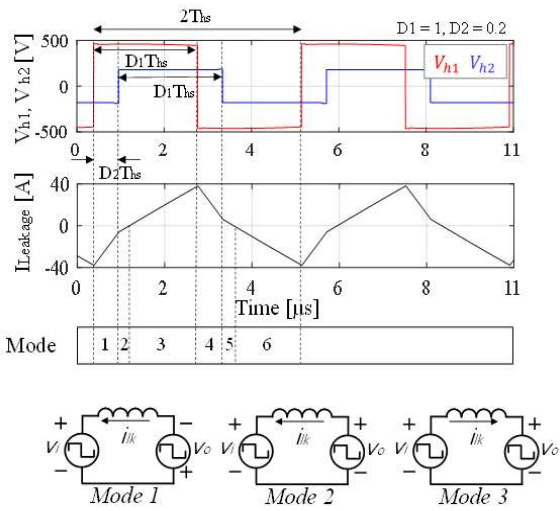


그림 3 SPS에서의 DAB 컨버터 파형 ( $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$ ,  $I_{ik}$ ) 및 Mode 1~3 별 간략화 회로 (각 모드별 왼쪽 전압원 =  $V_{h1}$ , 오른쪽 전압원 =  $V_{h2}$ )  
 Fig. 3 Waveforms of DAB under SPS ( $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$ ,  $I_{ik}$ ) & Mode 1~3 simplified circuit (Left voltage source =  $V_{h1}$ , Right voltage source =  $V_{h2}$ )

## 2. SPS, DPS 파형 비교

그림 3, 4는 각각 같은 유효전력을 내는 SPS, DPS의 파형이다. 상세한 파라미터는 표 1에 기술되어있다. 그림 1의  $V_o$ 로 유효전력이 전송되는 Powering 동작은 그림 3의  $V_{h2}$ 단을 기준으로  $P > 0$ 이어야 한다. 즉, SPS에서 Mode 2, 5는 전력을 반환하고 있는 Regenerating 동작이며 이는 회로 내의 전력 전송과 관계없는 전류를 증가시킨다. 또한  $V_{h1}$ 단 기준  $P > 0$ 인 Mode 1, 2, 4, 5에선 전력이 입력측으로 들어가게 되는데 원하는 출력 전력을 내기 위해선  $V_{h1}$ 단으로 들어간 만큼의 전력을 다시 내보내야 하므로 회로 내의 전류를 증가시킨다.

이에 반해 그림 4의 DPS의 경우 Regenerating 동작의 Mode는 1, 6이며 SPS에 비해 비교적 짧은 시간 동안만 존재한다. 또한  $V_{h1}$ 단으로 전력이 들어가는 Mode 1, 2, 6, 7도 SPS에 비해 짧은 시간 존재하는 것을 확인할 수 있으며 이로 인하여 회로 내의 전류 값이 SPS 보다 작아지게 된다.

SPS의 Mode 1~3과 Mode 4~6, DPS의 Mode 1~5와 Mode 6~10는 각각 반파대칭이므로 Mode별 간략화 회로는 각각 한 주기의 절반만 표시하였다.

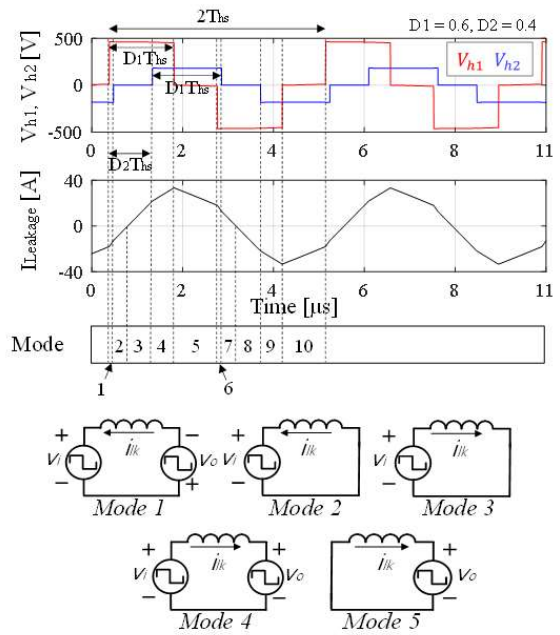


그림 4 DPS에서의 DAB 컨버터 파형 ( $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$ ,  $I_{ik}$ ) 및 Mode 1~5 별 간략화 회로 (각 모드별 왼쪽 전압원 =  $V_{h1}$ , 오른쪽 전압원 =  $V_{h2}$ )  
 Fig. 4 Waveforms of DAB under DPS ( $V_{h1}$ ,  $V_{h2}$ ,  $I_{ik}$ ) & Mode 1~5 simplified circuit (Left voltage source =  $V_{h1}$ , Right voltage source =  $V_{h2}$ )

표 1 주요 시뮬레이션 파라미터값  
 Table 1 Main simulation parameter values

기호	파라미터	값	기호	파라미터	값
$V_i$	입력전압	450 V	$n$	턴 비	1
$V_o$	출력전압	180 V	$L_{lk}$	누설 인덕턴스	12 $\mu$ H
$f_{sw}$	스위칭주파수	200 kHz			

## 3. 스위칭 소자 Loss map

### 3.1 Total Loss map

먼저 스위칭 소자에서 발생하는 손실은 식 (1)과 같이 크게 전도 손실과 스위칭 손실 두 가지로 나눌 수 있다.

$$P_{loss} = P_{cond} + P_{sw} \quad (1)$$

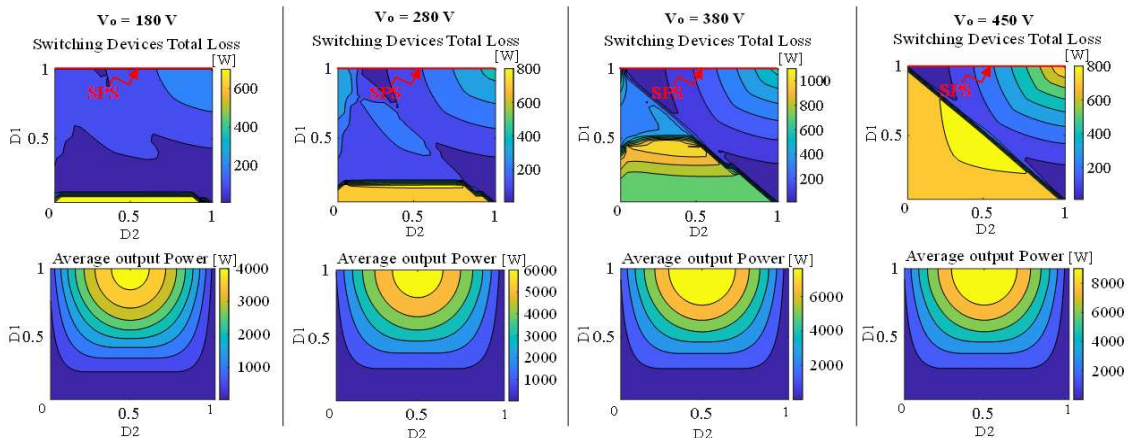


그림 5  $D1$ ,  $D2$ 에 따른 스위칭 소자에서 발생하는 전체 Loss map 및 평균 출력 전력 (180 V, 280 V, 380 V, 450 V)  
 Fig. 5 Total Loss map of switching devices as a function of  $D1$ ,  $D2$  & Average output power (180 V, 280 V, 380 V, 450 V)

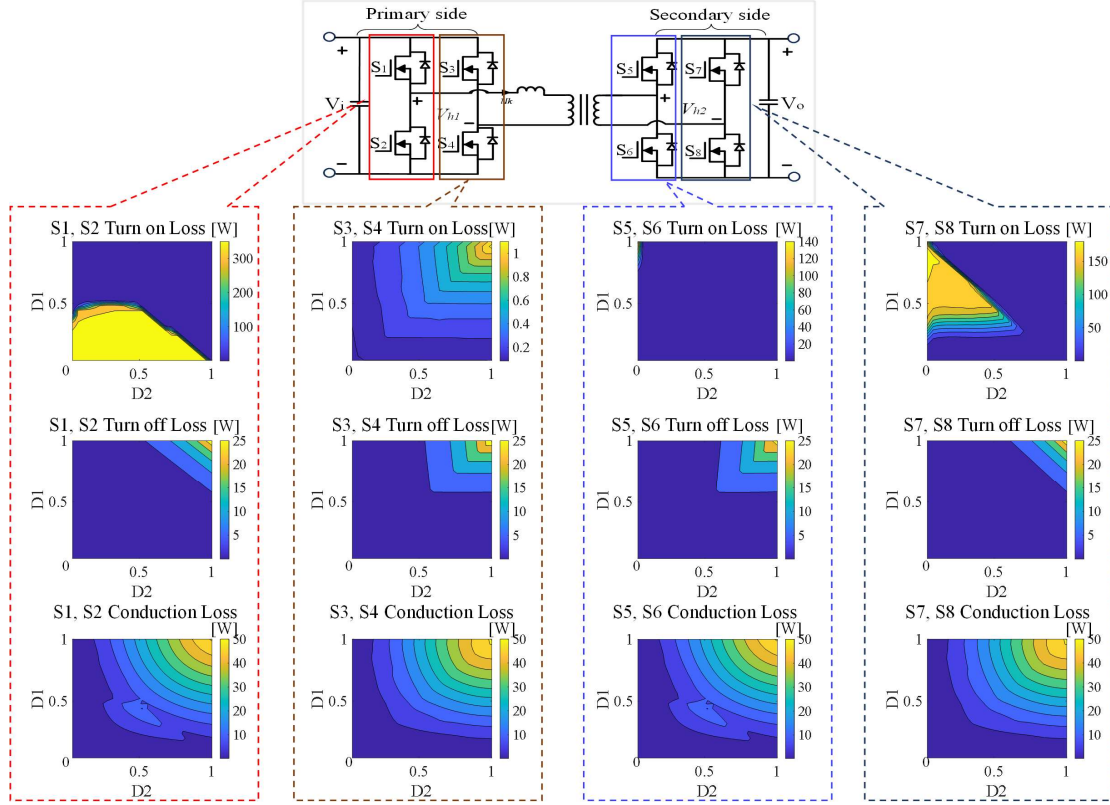


그림 6 D1, D2에 따른 스위칭 소자별 Turn on 시, Turn off 시 Conduction 시 발생하는 Loss map (380 V)  
Fig. 6 Loss map of turn on, turn off, conduction losses in switching devices as a function of D1, D2 (380 V)

그 중 Conduction loss는 식 (2)를 통하여 계산할 수 있으며  $i_{sw}$ 는 스위치 전류,  $T_{jc}$ 는 스위칭 소자 접합온도,  $dt$ 는 샘플링 시간,  $T$ 는 기본 주파수의 주기 그리고  $V_{on}$ 은 스위치 전류가 흐를 때의 스위칭 소자에 걸리는 양단 전압을 의미한다.  $V_{on}$ 은 스위칭 소자의 데이터시트에서 구할 수 있다.

또한 Switching loss는 식 (3)을 통하여 계산할 수 있으며 여기서  $i_{sw@on/off}$ 는 turn on/off 시의 스위치에 흐르는 전류,  $v_{sw@on/off}$ 는 turn on/off 시의 스위치에 걸리는 전압이며  $E_{sw@on/off}$ 와  $v_{test}$ 는 데이터시트로부터 구할 수 있는 스위칭 손실 에너지 및 테스트 전압이다.<sup>[3]</sup>

$$P_{cond} = \frac{1}{T} \sum V_{on}(i_{sw}, T_{jc}) \times i_{sw} dt \quad (2)$$

$$P_{sw} = \frac{1}{T} \times E_{sw@on/off}(i_{sw@on/off}, T_{jc}) \times \frac{V_{sw@on/off}}{V_{test}} \quad (3)$$

이를 이용하여 180 ~ 450 V 사이의 D1, D2에 따른 Loss map을 작성했다. 그림 5는 출력전압을 제외한 파라미터는 표 1을 따르며 출력 전압  $V_o$ 은 각각 180V, 280V, 380V, 450V이다.

### 3.2 Switch on Loss map

그림 6은  $V_o$ 가 380 V일 때의 스위칭 소자별 Loss map이다. 같은 leg의 스위칭 소자는 같은 손실 양상을 보인다. Switch on loss의 경우 전류 크기에 비례하는 Switch off loss나 Conduction loss와 달리 ZVS의 영향이 지배적이다. ZVS는 누설 인덕턴스에 흐르는 전류의 방향과 기생 커패시터와 누설 인덕터 사이의 에너지 크기에 의해서 결정된다. 전류의 방향이 기생 커패시터를 방전시키는 방향이며 기생 커패시터와 누설 인덕터에너지 관계 식인 식 (4)을 성립해야 ZVS가 발생한다.

$$T_{dead} \geq \frac{C_{parasitic} V_i}{i_{leak}(t_{sw})} \quad (4)$$

$C_{parasitic}$ 는 등가 기생 커패시터이고  $i_{leak}(t_{sw})$ 는 스위칭 시 누설 인덕터에 흐르는 전류이다.

### 4. 결론

본 논문에서는 Loss map을 통하여 스위칭 소자에서 발생하는 손실을 분석하였다. 같은 출력 전력을 내는 SPS와 DPS를 비교했을 때 DPS를 사용하면 손실을 감소시킬 수 있음을 확인하였으며 DPS에서 D1과 D2가 1에 가까워질수록 손실이 증가한다. 단, Switch on loss의 경우 ZVS에 의해 전류의 조건에 따라서 손실의 경향이 바뀌는 것을 확인하였다.

이 논문은 2024년도 정부(산업통장자원부)의 재원으로 한국에너지기술 평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (20225500000100, 특고압 직류수전용 2MW급 모듈형 컨버터스테이션 기술개발)

### 참고 문헌

- [1] S. Shao, H. Chen, X. Wu, J. Zhang and K. Sheng, "Circulating Current and ZVS-on of a Dual Active Bridge DC-DC Converter: A Review," in IEEE Access, vol. 7, pp. 50561-50572, 2019, April
- [2] S. Chaurasiya and B. Singh, "A Load Adaptive DPS Control for DAB with Reduced Current Stress for Wide Load and Voltage Range," 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), Jaipur, India, 2020, pp. 1-6
- [3] J. Song, K.B. Park, "Comparative analysis of switching devices for optimal design of on-board charger DC-DC stage in 800-V electric vehicle" Power Electronics Conference, 2020, November