

# 변압기 전류를 이용한 Dual Active Bridge 컨버터의 개방성 고장진단

오현우, 최동호, 방정율, 정신명\*, 이준석  
 단국대학교, 한국철도기술연구원\* (KRRI)

## Open-Circuit Fault Diagnosis of Dual Active Bridge Converter Using Transformer Current

Hyeon-Woo Oh, Dongho Choi, Jeong-Yul Bang, Shin-Myung Jeong\*, June-Seok Lee  
 Dankook University, Korea Railroad Research Institute\* (KRRI)

### ABSTRACT

본 논문은 변압기 전류를 이용한 Dual active bridge (DAB) 컨버터의 스위치 개방성 고장진단 기법을 제안한다. DAB 컨버터의 H-bridge를 구성하는 스위치에서 개방성 고장이 발생하면, 변압기 전류가 한쪽 극성으로 치우쳐져 변압기 포화를 유발한다. 이때는 안전을 위해 시스템을 정지해야 하므로 정확한 고장진단이 요구된다. 본 논문에서 제안하는 고장진단 기법은 다음과 같이 별도의 추가 장치 없이 개방성 고장 유무를 판별하고 고장 스위치의 위치를 검출한다. 우선, 더블 샘플링 된 변압기 전류의 평균값 및 크기를 통해 고장 유무를 판별하고, 고장이 발생한 스위치 쌍과 H-bridge의 위치를 구분한다. 다음으로, 고장 H-bridge에는 상단 영벡터를, 정상 H-bridge에는 작은 시비율의 유효 벡터를 인가한다. 이때, 영벡터의 스위칭 상태에 고장 스위치가 포함되어 있으면 전류 경로가 차단되지만, 반대의 경우 전류가 흐르므로 이 차이를 통해 고장 스위치의 위치 검출이 가능하다. 따라서 제안하는 기법을 사용하면 변압기 전류만을 이용하여 빠른 고장 진단을 할 수 있다. 본 논문이 제시하는 기법의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서론

Dual active bridge (DAB) 컨버터는 간단한 구조와 제어로 전기적 절연과 양방향 전력전달이 가능하며, 영전압 스위칭을 통해 높은 효율을 달성할 수 있어 널리 사용되는 토폴로지이다. DAB 컨버터는 그림 1과 같이 2개의 H-bridge와 고주파 변압기로 구성되어 8개의 스위치가 존재한다. 이 중 하나의 스위치라도 고장이 발생하면 전체 시스템의 고장으로 이어질 수 있어, 전력반도체 스위치 개방성 고장진단은 필수적이다.

전력반도체 스위치에 개방성 고장이 발생하는 경우 변압기 전류가 한쪽 극성으로 치우쳐 변압기 인덕턴스 포화를 유발한다. 따라서 인덕턴스 포화가 발생하기 전 고장진단 알고리즘을 통해 시스템을 정지시켜야 한다. 이를 위해서 최근 시스템의 신뢰성 향상을 위한 DAB 컨버터의 스위치 개방성 고장진단 알고리즘 연구가 진행되고 있다. [1], [2]에서 제안된 알고리즘은, 짧은 시간안에 고장진단이 가능하지만 전류 센서 외에 추가적인 회로와 전압 센서가 필요한 단점이 있다.

따라서, 본 논문은 변압기 전류를 이용한 위상 전이 변조 방식 기반 DAB 컨버터의 개방성 고장진단 기법을 제안한다.

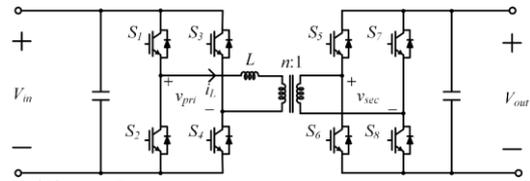


그림1 단상 DAB 컨버터 토폴로지

Fig.1 Topology configuration of single-phase DAB converter

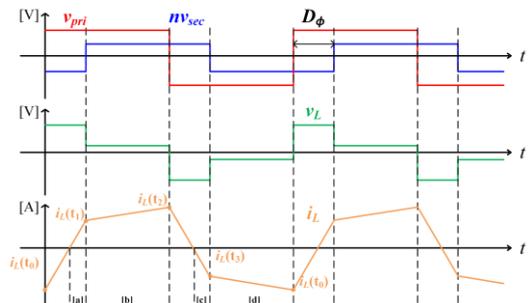


그림2 정상동작 시 DAB 컨버터 동작 파형

Fig.2 Normal operation waveform of DAB converter

제안하는 기법은 더블 샘플링 된 변압기 전류를 이용하여 고장 스위치 쌍과 H-bridge를 판단한다. 다음으로, 고장 H-bridge에는 상단 영벡터를, 정상 H-bridge에는 정격 전류를 고려한 위상차가 없는 작은 시비율의 유효 벡터를 인가하여 전류의 크기를 통해 고장 스위치의 위치를 구분한다. 제안하는 기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. DAB 컨버터 동작 및 전류 분석

#### 2.1 정상동작 시 동작 및 변압기 전류

그림 2는 정상 동작 시 DAB 컨버터 동작 파형을 나타낸다. 1차 측 극전압 ( $v_{pri}$ )과 2차 측 극전압 ( $v_{sec}$ )간의 위상 변이 ( $D_\phi$ )에 따라 인덕터 ( $L$ )양단에 전압 차이 ( $v_L$ )가 발생하고, 인덕터 전류 ( $i_L$ )를 통해 전력을 전달한다. 그림 3은 정상동작 시 [a] ~ [d] 구간의 전류 경로를 나타낸다. 나머지 구간의 경우 다이오드 전류 경로가 형성되어, 스위치 고장의 영향을 받지 않는다. (+) 전류는 1차 측 ( $S_1, S_4$ ), 2차 측 ( $S_6, S_7$ ) 스위치 쌍이, (-) 전류는 1차 측 ( $S_2, S_3$ ), 2차 측 ( $S_5, S_8$ ) 스위치 쌍이 전류 경로에 영향을 주는 것을 알 수 있다. 각 시점에서  $i_L$ 은 식 (1)과 같이 모델링할 수 있고  $T_s$ 는 스위칭 주기,  $i_{L,avg}$ 는 평균 변압기 전류를 나타낸다.

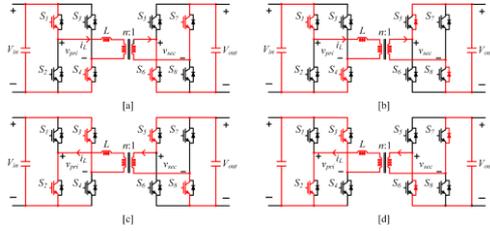


그림3 정상동작 시 DAB 컨버터 전류 경로  
Fig.3 Normal operation current paths of DAB converter

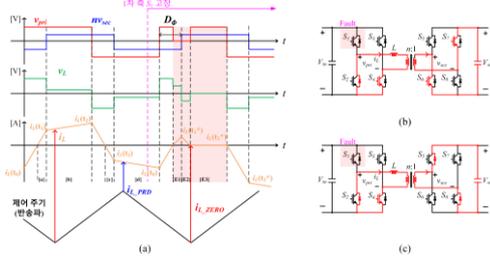


그림4 S<sub>1</sub> 고장 시 DAB 컨버터 동작, 전류 파형 (a) 동작 파형 (b) [E1] 구간 전류 경로 (c) [E2] 구간 전류 경로  
Fig.4 Operation waveform and current paths of DAB converter under S<sub>1</sub> fault (a) Operation waveform (b) current path of [E1] (c) current path of [E2]

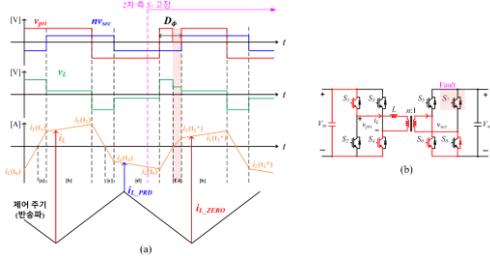


그림5 S<sub>7</sub> 고장 시 DAB 컨버터 동작, 전류 파형 (a) 동작 파형 (b) [E4] 구간 전류 경로  
Fig.4 Operation waveform and current paths of DAB converter under S<sub>7</sub> fault (a) Operation waveform (b) current path of [E4]

$$\begin{cases} i_L(t_1) = i_L(t_0) + (v_{pri} + nv_{sec}) / L \cdot 0.5T_s \cdot D_\phi, & (D_\phi = \theta / \pi) \\ i_L(t_2) = i_L(t_1) + (v_{pri} - nv_{sec}) / L \cdot 0.5T_s \cdot (1 - D_\phi) \\ i_L(t_0) = -i_L(t_2) \rightarrow i_L(t_1) = (v_{pri} + nv_{sec}) / (4L) \cdot T_s \cdot D_\phi \\ i_{L\_avg} = \{i_L(t_0) + i_L(t_2)\} / 2 = 0 \end{cases} \quad (1)$$

## 2.2 스위치 고장 시 동작 및 변압기 전류

그림 4는 S<sub>1</sub> 고장에 따른 DAB 컨버터의 동작 파형과 고장 구간에서의 전류 경로를 나타낸다. S<sub>1</sub> 고장이 발생하는 경우 [a], [b] 구간이 [E1], [E2], [E3] 구간으로 변경된다. [E1], [E2] 구간에서 전류 경로는 각각 그림 4(b), 4(c)와 같으며 [E3] 구간 동안에는 (+) 전류 경로가 형성되지 않는다.

그림 5는 S<sub>7</sub> 고장에 따른 DAB 컨버터의 동작 파형과 고장 구간에서의 전류 경로를 나타낸다. S<sub>7</sub> 고장이 발생하는 경우 [a] 구간이 [E4] 구간으로 변경되며, 전류 경로는 그림 5(b)와 같다.

## 3. 제안하는 DAB 컨버터 개방성 고장진단 기법

### 3.1 고장 스위치 쌍 판단

본 논문에서 DAB 컨버터는 그림 4와 같이 반송파의 ZERO와

PRD에서 더블 샘플링을 수행하며, 제어는 ZERO를 기준으로 수행된다. 제안하는 기법은 더블 샘플링 된 전류 ( $i_{L\_ZERO}, i_{L\_PRD}$ )를 이용한 변압기 전류 평균값 ( $i_{L\_avg}$ )을 통해 고장 스위치 쌍을 판단한다. 그림 4와 같이 S<sub>1</sub> 고장 시 각 시점에서  $i_L$ 은 식 (2)와 같이 모델링할 수 있다. 고장 발생 직후  $i_L(t_2^*)$ 은 0이므로,  $i_{L\_avg}$ 은 감소하며 다음 스위칭 주기부터  $i_{L\_avg}$ 는 더욱 감소한다. S<sub>4</sub>에 고장이 발생하는 경우 S<sub>4</sub>는 S<sub>1</sub>과 쌍으로 동작하므로 동일한 전류 양상이 나타난다.

$$\begin{cases} i_L(t_1^*) = i_L(t_1) \cdot \{nv_{sec} / (v_{pri} + nv_{sec})\} \\ i_L(t_2^*) = 0 \\ i_{L\_avg} = \{i_L(t_0) + i_L(t_2^*)\} / 2 = i_L(t_0) / 2 \end{cases} \quad (2)$$

그림 5와 같이 2차 측 S<sub>7</sub> 고장 시 각 시점에서  $i_L$ 은 식 (3)와 같이 나타낼 수 있다. 고장 발생 직후 [E4] 영역부터 구간에서만 전류 왜곡이 발생하므로,  $i_{L\_avg}$ 은  $i_L(t_0)$ 과  $i_L(t_1^*)$ 의 차를 이용하여 나타낼 수 있다. 다음 스위칭 주기부터  $i_{L\_avg}$ 는 더욱 감소하며, S<sub>6</sub>에 고장이 발생하는 경우 S<sub>6</sub>는 S<sub>7</sub>와 쌍으로 동작하므로 동일한 전류 양상이 나타난다.

$$\begin{cases} i_L(t_1^*) = i_L(t_1) \cdot \{v_{pri} / (v_{pri} + nv_{sec})\} \\ i_L(t_2^*) = i_L(t_2) - i_L(t_1) \cdot [1 - \{v_{pri} / (v_{pri} + nv_{sec})\}] \\ i_{L\_avg} = i_L(t_0) + i_L(t_2^*) / 2 = -i_L(t_1) \cdot [1 - \{v_{pri} / (v_{pri} + nv_{sec})\}] / 2 \end{cases} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)를 통해 (+) 전류에 영향을 주는 스위치 쌍에 고장이 발생하면 (-) 전류 offset이 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서, 고장 발생 직후  $i_{L\_avg}$ 를 임계값으로 하여 고장 스위치 쌍을 판단할 수 있다. 2차 측 스위치에 고장이 발생하는 경우 더 작은 offset이 발생하므로 2차 측 스위치 고장 발생 직후  $i_{L\_avg}$ 을 스위치 쌍 판단 임계값 ( $i_{L\_avg\_th}$ )으로 선정한다. (-) 전류 스위치 쌍에 고장이 발생하는 경우 전류 극성이 반대이므로 동일한 크기의 부호가 반대인 임계값을 사용하여 고장 스위치 쌍을 판단할 수 있다. 고장 스위치 쌍 판단 조건은 식 (4)와 같다.

$$\begin{cases} i_{L\_avg} \leq -i_L(t_1) \cdot [1 - \{v_{pri} / (v_{pri} + nv_{sec})\}] / 2 \rightarrow Fault\_pair = 1 \\ i_{L\_avg} \geq i_L(t_1) \cdot [1 - \{v_{pri} / (v_{pri} + nv_{sec})\}] / 2 \rightarrow Fault\_pair = 2 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.2 고장 H-bridge 판단

고장 스위치 쌍을 판단한 후 더블 샘플링 된 전류의 크기를 이용하여 고장 H-bridge를 판단한다. 1차 측 스위치에서 고장이 발생하는 경우 그림 4(a)와 같이 (+) 전류 경로가 차단되어 ZERO 시점에서 전류가 거의 흐르지 못한다. 반면에, 2차 측 스위치에서 고장이 발생하는 경우 그림 3의 [b] 경로가 형성될 수 있어 ZERO 시점에서  $i_L(t_1^*)$  이상의 전류가 흐른다. 고장 쌍 판단 이후 전류는 고장 발생 직후 전류 보다 감소하므로 H-bridge 판단 임계값 ( $i_{L\_side\_th}$ )은 식 (3)의 고장 발생 직후  $i_L(t_1^*)$ 의 0.2배로 선정한다. (-) 전류에 영향을 주는 스위치 쌍에 고장이 발생하는 경우 전류 극성이 반대이므로 동일한 방식으로 PRD 시점에서의 전류를 이용하여 고장 H-bridge를 판단할 수 있다. 고장 H-bridge 판단 조건은 식 (5)와 같다.

$$\begin{cases} Fault\_pair = 1 \& i_{L\_ZERO} < 0.2i_L(t_1^*) \rightarrow Fault\_side = 1 \text{ (Case 1)} \\ Fault\_pair = 2 \& i_{L\_PRD} > -0.2i_L(t_1^*) \rightarrow Fault\_side = 1 \text{ (Case 2)} \\ Fault\_pair = 1 \& i_{L\_ZERO} \geq 0.2i_L(t_1^*) \rightarrow Fault\_side = 2 \text{ (Case 3)} \\ Fault\_pair = 2 \& i_{L\_PRD} \leq -0.2i_L(t_1^*) \rightarrow Fault\_side = 2 \text{ (Case 4)} \end{cases} \quad (5)$$

표 1 고장 Case 별 H-bridge 스위칭 인가 방식

Table 1 Injected switching status of H-bridge by fault case

고장 Case	1차 측 H-bridge	2차 측 H-bridge
Case 1	상단 영벡터	(-) 전압 유효 벡터
Case 2	상단 영벡터	(+) 전압 유효 벡터
Case 3	(+) 전압 유효 벡터	상단 영벡터
Case 4	(-) 전압 유효 벡터	상단 영벡터

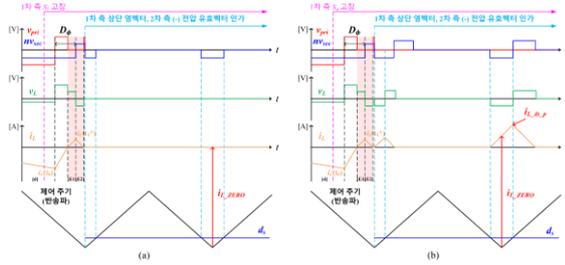


그림6 스위칭 인가에 따른 DAB 컨버터 동작 및 전류 (a)  $S_1$  고장 (b)  $S_4$  고장  
Fig.6 Operation waveform and current of DAB converter according to injected switching status (a)  $S_1$  fault (b)  $S_4$  fault

### 3.3 고장 스위치 구별

고장 H-bridge의 고장 스위치 쌍에서 고장 스위치를 구별하기 위해 고장 H-bridge는 상단 영벡터를 정상 H-bridge는 위상차가 없는 작은 시비율 ( $d_s$ )의 유효벡터를 인가한다. 그림 6은 1차 측 (+) 전류 스위치 쌍 고장 이후 1차 측 상단 영벡터 및 2차 측 (-) 전압 유효벡터 인가에 따른 전류 파형을 나타낸다. 그림 6(a)를 통해 영벡터에 고장 스위치가 포함되는 경우 전류 경로가 형성될 수 없어 전류가 흐르지 못하는 것을 알 수 있다. 반면, 그림 6(b)를 통해 영벡터에 고장 스위치가 포함되지 않는 경우 그림 4(b), (c) 경로가 형성될 수 있어  $d_s$  동안 전류가 흐를 수 있다. 이 때, 전류의 최대 값 ( $i_{L,ds,p}$ )은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{L,ds,p} = \frac{mv_{sec}}{L} \cdot d_s \cdot T_s \quad (6)$$

스위칭 인가 시 흐르는 전류의 크기를 제한하기 위해  $i_{L,ds,p}$ 가 식 (1)의 정상동작 시  $i_L(t)$ 과 같도록 식 (7)을 통해  $d_s$ 를 계산할 수 있다.

$$i_L(t_1) = i_{L,ds,p} \rightarrow d_s = \frac{i_L(t_1) \cdot L}{mv_{sec} \cdot T_s} \quad (7)$$

$i_{L,ZERO}$ 는  $0.5i_{L,ds,p}$ 와 같지만, 센싱 오차, 파라미터 오차 등을 고려하여 스위치 판단 임계값 ( $i_{L,sw,th}$ )을  $0.25i_{L,ds,p}$ 로 선정한다. 식 (5)의 총 4가지 Case에 대해서 표 1과 같은 방식으로 각 Case에 따라 스위칭 상태를 인가한다. 고장 H-bridge의 상단 영벡터에 고장 스위치가 포함되지 않은 경우 전류가 흐를 수 있기 때문에  $i_{L,ZERO}$ 를 통해 모든 Case에서 고장 스위치를 구별할 수 있다. 고장 스위치를 구별하는 조건은 식 (8)과 같다.

$$\begin{cases} \text{Case 1 \& } i_{L,ZERO} \geq 0.25i_{L,ds,p} \rightarrow S_4 \text{ fault} \\ \text{Case 2 \& } i_{L,ZERO} \leq -0.25i_{L,ds,p} \rightarrow S_3 \text{ fault} \\ \text{Case 3 \& } i_{L,ZERO} \geq 0.25i_{L,ds,p} \rightarrow S_7 \text{ fault} \\ \text{Case 4 \& } i_{L,ZERO} \leq -0.25i_{L,ds,p} \rightarrow S_8 \text{ fault} \end{cases} \quad (8)$$

### 3.4 시뮬레이션 결과

제안하는 고장진단 기법을 표 2의 파라미터를 기반으로 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 잘못된 고장진단을 방지하기 위해 모든 단계에서 카운터가 3번 쌓이면 해당 경우를 고장으로 판단하였다. 그림 7은  $S_4$  고장 시 제안하는 고장진단 기법을

표 2 DAB 컨버터 시뮬레이션 파라미터

Table 2 Simulation parameters of DAB converter

입력 전압 ( $V_m$ )	130 [V]	스위칭 주파수	10 [kHz]
출력 전압 ( $V_o$ )	130 [V]	제어 주기	100 [ $\mu$ s]
변압기 턴 비 ( $n$ )	1	샘플링 주기	50 [ $\mu$ s]
인덕턴스 ( $L$ )	56.25 [ $\mu$ H]	출력 전력	563.3 [W]

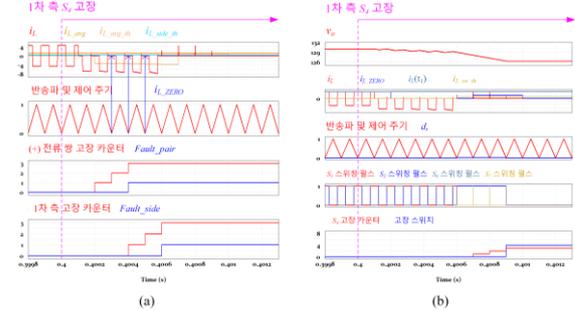


그림7  $S_4$  고장 시 고장진단 기법 적용 파형 (a) 고장 스위치 쌍, H-bridge 판단 (b) 고장 스위치 구별

Fig.7 Waveform of proposed method under  $S_4$  fault (a) Fault switch pair, H-bridge judgment (b) Fault switch distinction

적용한 파형이다. 그림 7(a)를 통해 고장 이후 (-) 전류 offset이 발생하며,  $i_{L,avg}$ 와  $i_{L,ZERO}$ 를 각각의 임계값과 비교를 통해 고장 스위치 쌍 및 고장 H-bridge를 판단하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)를 통해 1차 측에는 상단 영벡터, 2차 측에는 식 (7)을 통해 계산된  $d_s$ 만큼의 (-) 전압 유효 벡터를 인가하여  $i_{L,ZERO}$ 와 임계값 비교를 통해 고장 스위치 구별 후 스위칭을 정지시키는 것을 확인할 수 있다. 제안된 기법을 통해 고장 발생 후 스위칭 10주기 만에 빠르게 고장진단이 가능한 것을 확인할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문은 변압기 전류를 이용한 DAB 컨버터의 개방성 고장진단 기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 더블 샘플링 된 전류의 평균값 및 크기를 통해 고장 스위치 쌍 및 고장 H-bridge를 구별하고 고장 H-bridge에는 상단 영벡터를, 정상 H-bridge는 계산된 작은 시비율의 유효 벡터를 인가하여 고장 스위치를 구별한다. 이를 통해 변압기 전류 센서만을 이용하여 변압기 포화 발생 전 빠른 시간 안에 고장진단이 가능하다. 제안하는 기법의 타당성은 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본 연구는 국토교통부 및 국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 RS-2024-00417481).

### 참고 문헌

[1] S. Meikap, H. Malviya and C. Kumar, "Operation of a New Fault-Tolerant Dual Active Bridge Converter," *2023 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Nashville, TN, USA, 2023, pp. 2039-2045.

[2] D. Xie and X. Ge, "Open-Circuit Fault Diagnosis of Dual Active Bridge DC-DC Converter Based on Residual Analysis," *2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC)*, Shenzhen, China, 2018, pp. 1-6.