

DAB 컨버터의 PFM을 이용한 경부하 효율 개선

김권훈, 이성민, 최홍석, 조영훈
건국대학교 전력전자 연구실

Light Load Efficiency Improvement Using Pulse Frequency Modulation of DAB Converter

Kwonhoon Kim, Sungmin Lee, Hongseok Choi, Younghoon Cho
Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

DAB(Dual Active Bridge) 컨버터는 고주파 변압기를 중심으로 두 개의 풀 브리지가 대칭으로 구성되어 있는 DC-DC 컨버터이다. DAB 컨버터는 시비율이 고정하고 위상 차이만을 이용하여 때문에 제어가 간편하고, 영전압 스위칭이 가능하여 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있다. 하지만 경부하로 갈수록 영전압 스위칭이 되지 않아 효율이 낮아지는 현상이 발생한다. 본 논문에서는 이러한 현상을 개선하고자 PFM을 이용하여 효율을 개선하는 방법을 소개하고자 한다.

1. 서 론

최근 신재생에너지를 기반으로 한 에너지 저장 장치 시스템, DC 배전 시스템, 전기차 충전기 등 고효율 양방향 컨버터에 대한 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 양방향 전력 전달이 가능하고 입출력이 절연된 DAB 컨버터에 대한 관심 또한 증가하고 있다.

그림 1은 DAB 컨버터의 회로도이다. 기본적인 변조 방법은 각 스위치의 시비율을 0.5로 고정하고, 1차측의 극전압 v_1 과 2차측의 극전압 v_2 의 위상 차이를 이용하여 출력 전력을 제어하는 PSM(Phase Shift Modulation)이다. PSM 방식을 이용한 출력전력은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (1)에서 P_{out} 은 출력 전력, V_{in} 과 V_{out} 은 각각 입출력 전압, f_{sw} 는 스위칭 주파수, n 은 변압기의 턴 수비, L_k 는 변압기의 누설 인덕턴스, ϕ 는 극전압 사이의 위상 차이를 나타낸다.

$$P_{out} = \frac{V_{in}V_{out}}{2nL_k f_{sw}} \phi(1-\phi) \quad (1)$$

PSM 제어는 ϕ 로 출력을 제어하기 때문에 제어가 간단하다는 장점이 있지만, 부하 크기에 따라 영전압 스위칭이 달성되지 않는 구간이 생기고, 순환 전류가 높아져 효율이 감소하는 단점이 있다. 이를 개선하기 위해 DPS(Dual Phase Shift), TPS(Triple Phase Shift) 등 다양한 제어 방식이 있지만, 제어가 복잡하다는 단점이 있다. 본 논문에서는 PFM(Pulse Frequency Modulation)을 사용하여 경부하 조건일 때, 스위치에 흐르는 도통전류의 실효값을 낮추어 스위치 손실을 저감하는 방법을 제안하고자 한다. 제안하는 방법의 실효성을 모의실험을 통해 검증하였다.

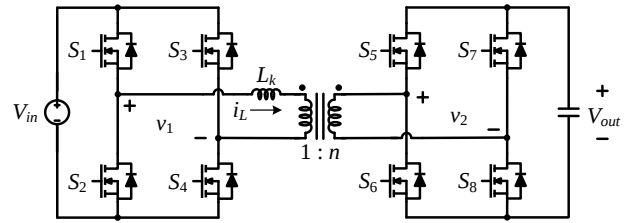


그림1 DAB 컨버터의 회로도
Fig.1 Circuit of DAB converter

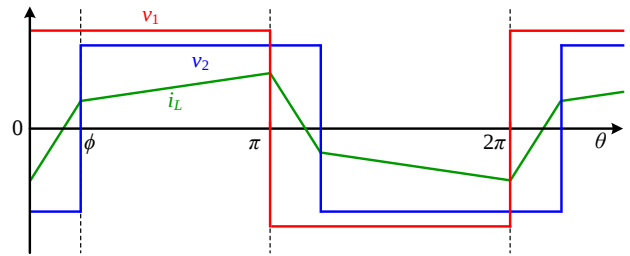


그림2 DAB 컨버터의 동작 시 파형
Fig.2 Typical waveform of DAB converter

2. DAB 컨버터의 PFM 제어

2.1 DAB 컨버터의 손실 분석

그림 2는 PSM으로 동작하는 DAB 컨버터의 동작 파형이다. v_1 은 1차측 극전압이며, v_2 는 2차측 극전압이다. i_L 은 전력이 1차측에서 2차측으로 전달되면서 발생하는 인덕턴스 전류이다. 이때, i_L 은 식 (2), (3)로 나타낼 수 있다.

$$i_L(\theta) = \frac{V_{in} + V_{out}}{2\pi f_{sw} L} \theta + i_L(0) \quad (0 < \theta < \phi) \quad (2)$$

$$i_L(\theta) = \frac{V_{in} + V_{out}}{2\pi f_{sw} L} (\theta - \phi) + i_L(\phi) \quad (\phi < \theta < \pi) \quad (3)$$

DAB의 컨버터의 손실 종류에는 스위칭 손실, 도통 손실, 그리고 코어 손실이 있다. 본 논문에서는 스위치에 대한 손실 분석만을 다루기 때문에, 자성체 손실은 고려하지 않았다.

SiC MOSFET의 스위칭 손실 P_{sw} , 스위치의 도통 손실 P_{sc} , 다이오드의 도통 손실 P_{dc} , 스위치의 총 손실은 각각 식 (4)~(4)과 같이 계산할 수 있다^[1]. V_{DS} , I_{DS} 는 각각

스위칭 순간의 전압과 전류, t_{on} , t_{off} 는 스위치가 ON, OFF 상태가 되는 시간, f_{sw} 는 스위칭 주파수, I_{Srms} 와 I_{Drms} 는 각각 스위치와 다이오드의 도통 전류 실효값, $R_{DS(on)}$ 과 V_f 는 각각 스위치의 on 상태 저항, 다이오드의 순방향 전압이다.

$$P_{sw} = 0.5V_{DS}I_{DS}t_{off}f_{sw} \quad (5)$$

$$P_{sc} = I_{Srms}^2 R_{DS(on)} \quad (6)$$

$$P_{dc} = I_{Drms} V_f \quad (7)$$

$$P_{sw_loss} = P_{sw} + P_{sc} + P_{dc} \quad (8)$$

2.2 영전압 스위칭 조건 분석

영전압 스위칭이 충족되기 위해서 데드타임 동안 스위치의 기생 커패시터의 전압이 방전된 뒤, 스위치가 턴 온 되어야 한다. 따라서 $t(0)$ 일 때 i_L 은 음의 값을 가져야 하고, $t(\phi)$ 와 $t(\pi)$ 일 때는 양의 값을 가져야 한다. 영전압 스위칭을 만족하는 조건식은 식 (8)와 같이 계산할 수 있다^[2]. 이 때, k 는 전압 전달비다. 입출력의 전압 전달비(nV_{in}/V_{out})와 부하의 크기에 따라 영전압 스위칭의 영역이 변화하는데, 영전압 스위칭 영역에서 벗어나게 된다면 (5)식에 t_{on} 만큼의 시간이 추가되어야 한다.

$$\phi \geq \frac{k-1}{2k}, k \geq 1 \quad (9)$$

표 1 모의 실험 조건

Table 1 Parameters of the simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{in} [V]	400	V_{out} [V]	250 ~ 375
L_k [μ H]	115	P_{out} [W]	1000 ~ 2000
N	750 / 800	f_{sw} [kHz]	30 ~ 54
V_f [V]	1.65	$R_{DS(on)}$ [m Ω]	40
t_{on} [ns]	66.8	t_{off} [ns]	60.8

2.3 모의실험 결과

식 (2), (3)에서 구한 인덕터 전류로 각각의 손실들을 구하였다. 그 후 식 (5)~(7)에 대입하여 경부하일 때, 주파수를 높여가며 각각의 결과와 비교하였다. 모의실험은 MATLAB 소프트웨어와 PLECS 프로그램의 thermal model 기능을 사용하여 진행하였으며, 모의 실험 조건은 표 1과 같다. 그림 3은 부하와 출력 전압 조건에 따라 스위칭 주파수별로 나타낸 총 손실 그래프이다. 또한, 그림 4의 (a), (b)는 특정 전압 조건에 따른 각각의 손실을 나타낸 파형이다. 1000W 조건에서 일정 전압 전달비보다 낮아질 경우, 스위칭 주파수를 증가시켰다. 이때, 스위치의 스위칭 손실은 증가하지만 도통 손실이 감소하였음을 확인할 수 있었다. 반대로, 전압 전달비가 1인 경우 영전압 스위칭 조건이 충족되어 주파수가 높아질수록 손실이 증가하는 것을 알 수 있다. 따라서, 경부하 조건에서 PFM을 사용하여 효율이 개선됨을 확인할 수 있었다.

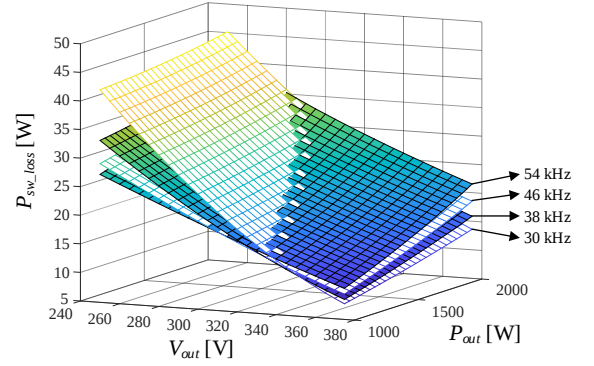


그림3 출력 전압과 부하에 따른 스위칭 주파수별 손실 파형

Fig.3 Loss waveform by switching frequency according to output voltage and load

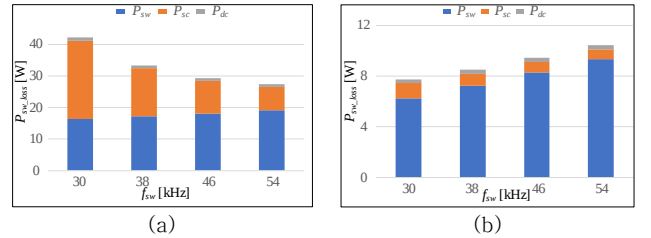


그림4 부하가 1000W 일 때, 스위칭 주파수에 따른 스위치 손실 파형

(a) $V_{ox}=250V$ (b) $V_{ox}=375V$

Fig.4 Switch loss waveform according to switching frequency when load is 1000W (a) $V_{ox}=250V$ (b) $V_{ox}=375V$

3. 결 론

본 논문에서는 DAB 컨버터의 PFM을 통한 경부하 조건의 효율 향상을 검증하였다. 먼저, SiC MOSFET 스위치 손실에 대한 수학적 모델링을 진행하였다. 이 후, 경부하 조건일 때 PFM을 적용시킴으로써 도통 손실이 감소한다는 것을 확인하였고, 모의실험을 통하여 일정 조건 하에 주파수가 높아짐에 따라 손실의 총합이 감소함을 확인하였다.

본 연구는 2023년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 [S3276794]

참 고 문 헌

- [1] Abraham, Yosief Hailemariam, et al. "Estimating power losses in Dual Active Bridge DC-DC converter." 2011 2nd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems (EPECS). IEEE, 2011.
- [2] Adam, A. H. A., Hou, S., & Chen, J. (2019, June). ZVS Operation Range Analysis and Deadband Conditions of A dual H-bridge Bidirectional DC-DC Converter with Phase Shift Control. In 2019 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2019 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe) (pp. 1-6). IEEE.22