

경부하 손실 저감을 위한 트리플 액티브 브리지 컨버터의 DPWM 제어

이성민, 조영훈

건국대학교 전력전자 연구실

DPWM Control of Triple Active Bridge Converter for loss reduction at light load

Sungmin Lee, Younghoon Cho

Power Electronics Lab, Konkuk University

ABSTRACT

Triple Active Bridge 컨버터의 경부하 조건에서의 효율 개선을 위해 브리지의 듀티와 위상을 동시에 변경하는 Dual Pulse Width Modulation(DPWM)기법을 적용하였다. 기존의 위상천이기법은 제어가 단순한 장점이 있으나 경부하 조건에서 효율이 급격히 감소하는 단점이 존재한다. 따라서 본 논문에서는 DPWM 방식을 통해 경부하 조건의 효율 개선을 위한 각 브리지 듀티, 위상각을 분석하였고, 시뮬레이션을 통해 이를 검증하였다.

1. 서론

Triple Active Bridge(TAB)컨버터는 높은 효율과 전력밀도, 넓은 출력 전압을 가진 회로이다^[1]. 이러한 장점으로 반도체 변압기, On Board Charger, 직류배전 등의 다양한 분야에서 사용된다^[2]. 하지만, 입출력 전압비가 최적화 되지 않은 경우에는 부하가 작아짐에 따라 무효전력이 크게 증가하며, 전류의 실효값과 전도손실의 증가로 이어진다. 또한, 위와 같은 조건에서는 영전압 스위칭이 어려우며, 이는 스위칭 손실의 증가로 나타난다. 컨버터의 입력전압, 출력전압, 입력 권선수, 출력 권선 수를 각각 V_P, V_S, N_P, N_S 라고 할 때, 입출력 전압비 $m = N_P V_S / N_S V_P$ 이다. $m = 1$ 일 때 입출력 전압비가 최적화 되어있다고 하며, m 이 작을수록 경부하 조건에서의 손실은 더욱 증가한다^[1].

따라서 본 논문에서는 TAB 컨버터의 경부하 조건 손실 감소를 위해 브리지의 듀티와 위상을 동시에 제어하는 Dual Pulse Width Modulation(DPWM)기법을 적용하였다^[3]. 첫째로, TAB 컨버터의 등가모델을 이용해 TAB 컨버터의 각 H-브리지 전압, 인덕터 전류 파형을 모사하였다. 이를 통해, 영전압 스위칭을 하며 부하조건에 맞는 각 브리지의 듀티와 위상각을 계산하였다. 마지막으로, 전류 실효값을 고려하여 최적화된 듀티와 위상각을 선정하였다. DPWM의 동작을 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. TAB 컨버터의 DPWM 제어

2.1 TAB 컨버터 모델링

그림 1은 TAB 컨버터의 회로도이며, 세 개의 H-브리지 회로 HB_a, HB_b, HB_c 가 변압기를 통해 연결되어 있다. 이때, HB_a 는 입력, HB_b 와 HB_c 는 출력으로 사용된다. N_a, N_b, N_c 는 변압기의 권선비이며, $V_{a,dc}$ 는 TAB 컨버터의 입력전압, $V_{b,dc}$ 와 $V_{c,dc}$ 는 TAB 컨버터의 출력전압을 의미한다. v_a, v_b, v_c 는

각 H-브리지의 브리지 전압이며 L_a, L_b, L_c 는 변압기의 각 포트 누설 인덕턴스이다^[2]. 각 브리지 전압은 그림 2와 같이 나타나며, 각각의 듀티($0 < D_a, D_b, D_c < 0.5$)와 위상($0^\circ < \phi_{ab}, \phi_{ac} < 90^\circ$)을 가지며 동작한다. 이때 T_{sw} 는 스위칭 주기이다.

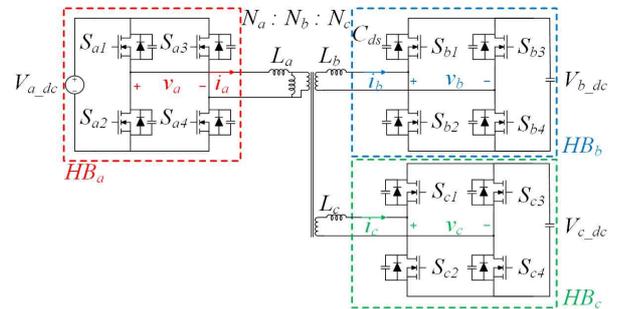


그림 1 TAB 컨버터의 회로도
Fig. 1 Circuit of TAB converter

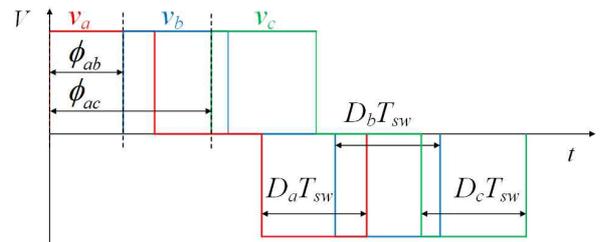


그림 2 TAB 컨버터의 동작시 브리지 전압 파형
Fig. 2 Bridge voltage waveforms during operation of the TAB converter

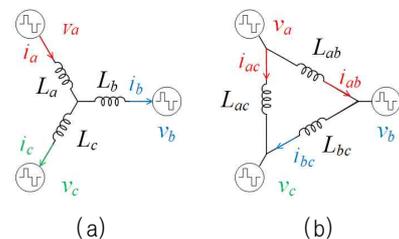


그림 3 TAB 컨버터의 등가모델 (a)Y 결선 모델 (b)Δ 결선 모델
Fig. 3 Equivalent models of TAB converter (a)Wye connected model (b)Delta connected model

그림 1의 회로도는 그림 3(a)의 회로와 같이 모델링 될 수 있으며, 그림 3(a)의 회로는 Y-Δ 변환을 통해 그림 3(b)로 등가화 할 수 있다.^[2] 이때 그림 3(a)와 3(b)의 전류 $i_a = i_{ab} + i_{ac}$, i_b

$=i_{ab} - i_{bc}$, $i_c = i_{ac} + i_{bc}$ 의 관계가 성립한다. 그림 3(b)로 등가화 된 컨버터의 전류 i_{ab} , i_{ac} , i_{bc} 는 L_{ab} , L_{ac} , L_{bc} 의 각 양단 전압과 인덕턴스에 의해 결정되며 그 식은 (1)-(3)과 같다.

$$di_{ab} = \frac{(v_a - v_b)}{L_{ab}} dt, \int_0^{T_{sw}} i_{ab}(t) dt = 0 \quad (1)$$

$$di_{ac} = \frac{(v_a - v_c)}{L_{ac}} dt, \int_0^{T_{sw}} i_{ac}(t) dt = 0 \quad (2)$$

$$di_{bc} = \frac{(v_b - v_c)}{L_{bc}} dt, \int_0^{T_{sw}} i_{bc}(t) dt = 0 \quad (3)$$

2.2 영전압 스위칭 조건 설정

영전압 스위칭 동작을 위해선 데드타임 동안 다음 턴 온 스위치의 역 방향으로 전류가 흘러 C_{ds} 의 전압이 방전된 뒤, 스위치가 턴 온 되어야 한다^[1]. 따라서 스위칭 턴 온 시, 전류의 극성을 통해 영전압 스위칭 확인이 가능하다. 브리지 전압이 영전압에서 양전압으로 바뀌는 구간을 $0 \rightarrow +$, 양전압에서 영전압으로 바뀌는 구간을 $+ \rightarrow 0$ 으로 표현 한다면, 영전압 스위칭을 달성하기 위한 각 브리지의 스위칭 상태에 따른 전류 조건은 표 1과 같다. TAB 컨버터의 전압 및 전류 파형은 반주기를 기준으로 대칭이며, 이 때문에 반주기의 분석으로 전체 주기의 영전압 스위칭이 확인이 가능하다.

표 1 영전압 스위칭을 위한 스위칭 상태에 따른 전류 조건

Table 1 Current conditions according to switching state for Zero voltage switching

	V_a	V_b	V_c
$0 \rightarrow +$	$i_a < 0$	$i_b > 0$	$i_c > 0$
$+ \rightarrow 0$	$i_a > 0$	$i_b < 0$	$i_c < 0$

2.3 듀티 및 위상각 선정 알고리즘

특정 듀티와 위상각에 대해 그림 3(b)의 델타 모델링과 식 (1)-(3)을 이용하여 TAB 컨버터 각 H-브리지의 전압, 전류 파형을 모사할 수 있다. $D_a = D_b = D_c = 0$, $\phi_{ab} = \phi_{ac} = 0$ 부터 값을 증가해 가며 모사한 파형을 통해 각 H-브리지의 영전압 스위칭과 전력을 계산하여 확인하였다. 두 조건을 만족할 시 전류 i_a , i_b , i_c 실효값의 합을 계산하였다. 듀티와 위상각이 최대값에 도달하면 전류 실효값의 합이 최소인 계산값을 선택한다. 그림 4는 위 과정을 순서도로 표현한 것이다.

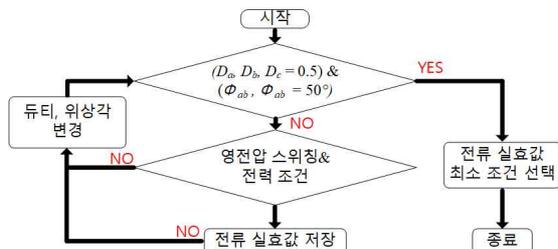


그림 4 TAB 컨버터의 손실 저감을 위한 듀티와 위상각 계산 순서도

Fig. 4 Flow chart of calculating duty and phase for loss reduction on TAB converter

3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용된 TAB 컨버터의 제정수는 $f_{sw} = 20$ kHz, $L_a = 26$ μ H, $L_b = L_c = 52$ μ H이며, $V_{a,dc} = 400$ V, $V_{b,dc} = V_{c,dc} = 200$ V으로 $m = 0.5$ 인 경우에 대해 6 kW 정격으로 가정하였다. HB_a 는 입력, 브리지 HB_b 와 HB_c 로 출력으로 사용하며, HB_b 와 HB_c 의 출력은 같게 하였다. 스위칭 손실과 전도 손실은 PLECS의 thermal model 기능을 이용하여, C2M0040120D 스위치를 기준으로 계산하였다. 그림 5는 2 kW 부하의 시뮬레이션

결과 파형이며, 그림 6에서 부하별 위상천이기법과 DPWM의 효율을 비교하였다. 결과를 살펴보면, 1 kW 부하에서 14.1%로 효율이 최대로 개선되었으며 5 kW 부하에서 1.1% 효율이 개선되었다.

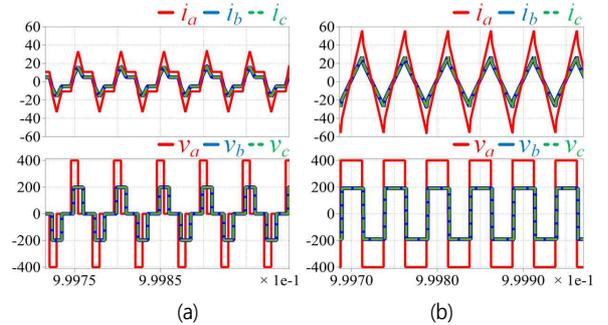


그림 5 2 kW 부하 시뮬레이션 파형 (a) DPWM (b) 위상천이기법
Fig. 5 Simulation waveform at 2 kW load (a) DPWM (b) phase shift modulation

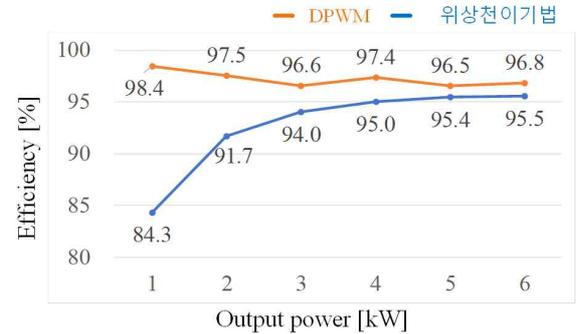


그림 6 DPWM과 위상천이기법의 효율 비교
Fig. 6 Efficiency comparison of DPWM and phase shift modulation

4. 결론

본 논문에서는 TAB 컨버터의 DPWM 제어를 통한 경부하 조건의 효율 향상을 검증하였다. 먼저, TAB 컨버터의 델타 결선 모델링을 통해 각 H-브리지의 전류와 전압 파형을 모사하였다. 또한 2.3절의 알고리즘을 통해 듀티와 위상각 조건을 선정하였다. 마지막으로 시뮬레이션을 통해 경부하에서의 효율이 최대 14.1% 개선됨을 확인하였다.

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20194030202370)

참고 문헌

- [1] A. K. Jain and R. Ayyanar, "Pwm control of dual active bridge: Comprehensive analysis and experimental verification," in *IEEE Trans*, vol. 26, no. 4, pp. 1215-1227
- [2] S. Zou, J. Lu and A. Khaligh, "Modelling and control of a triple-active-bridge converter," in *IET Power Electron*, vol. 13, no. 5, pp. 961-969, 8 4 2020
- [3] Byeng-Joo Byen, Chung-Hwan Ban, Young-Bae Lim, Gyu-Ha Choe. (2017). An Efficiency-Optimized Modulation Strategy for Dual-Active-Bridge DC-DC Converters Using Dual-Pulse-Width-Modulation in the Low Power Region. *JOURNAL OF POWER ELECTRON*, 17(6), 1413-1421.