

감쇠된 스위칭 주파수 변화를 가진 단상 H-브리지 인버터의 하이브리드 임계 전도 모드 기법

김연호, 김병주, 예재섭, 정일호, 한병철
경북대학교 전자전기공학부

Hybrid Boundary Conduction Modulation for a Single phase H-bridge inverter with reduced switching frequency variation

YeonHo Kim, ByeongJu Kim, JeSeob Yea, IlHo Jung, Byeongcheol Han
School of Electronic Engineering, Kyungpook National University, Daegu, Korea

ABSTRACT

본 논문에서는 H-브리지 인버터와 임계 전도모드(Boundary Conduction Modulation) 기반의 개선된 변조기법을 이용해 스위칭 주파수 변화와 전류 리플을 저감시킬 수 있는 태양광 인버터의 모듈레이션 방법을 제안한다. 제안하는 모듈레이션 기법은 본 모듈레이션 기법의 성능을 검증하기 위해 MATLAB SIMULINK를 통한 시뮬레이션을 구현하였다.

1. 서 론

임계 전도 모드(BCM)는 H-브리지 인버터의 인덕터 전류를 충분히 키워, 인버터가 영전압 스위칭을 가능하게 해, 낮은 스위칭 손실 및 EMI 저감의 장점을 가진다^[1]. BCM 기법 중 바이폴라 BCM 모듈레이션은 영교차 지점에서도 왜곡 없이 무효 전력의 공급이 가능하지만, 출력 전류가 낮아질수록 스위칭 주파수가 높아지며, 이로 인해 스위칭 손실 및 EMI 문제가 증가한다. 유니폴라 BCM 모듈레이션은 하나의 레그로만 동작함으로써 스위칭 손실이 낮지만, 영교차 왜곡으로 인해 THD에 악영향을 미치게 된다. 이에 기존의 연구에서는 다른 PWM 기법을 이용해 스위칭 주파수 변화를 줄이려는 시도가 있었으나, 전류 리플이 증가하는 문제점을 가지고 있다^[3]. 이러한 문제점을 해결하기 위해 Dual Trapezoidal Modulation (DTZM) 방식을 이용한 하이브리드 모듈레이션을 제안한다.

DTZM은 H-브리지 인버터의 두 레그를 비동기적으로 스위칭 시켜, 한 주기 내에 유니폴라 모듈레이션의 등가회로와 바이폴라 모듈레이션의 등가회로를 모두 가지게 되어 영교차 왜곡을 없앴과 동시에 영전압 근처에서 낮은 스위칭 주파수와 스위칭 주파수 대비 낮은 전류 리플을 가질 수 있다 제안된 하이브리드 모듈레이션의 성능을 평가하기 위해 1kW급 인버터 시뮬레이션을 통한 실험결과를 제시한다.

2. 본 론

2.1 제안한 DTZM의 동작 과정

본 논문에서는 영교차 지점에서의 스위칭 주파수 변화 및 왜곡을 줄이기 위하여 DTZM 방식을 제안한다. 제안하는 방식은 그림 1과 같은 H-브리지 인버터에서 두개의 레그가 비동기적으로 동작하도록 한다. 이를 통해 인버터는 한 주기 내 다른 전류 기울기를 이용해 스위칭 주파수 대비 낮은 전류 리플을 가질 수 있다. DTZM 방식을 이용한 인버터의 동작주요 파형은 그림 2와 같으며, $V_g > 0$ 일 때의 구간별 동작은 다음과 같다.

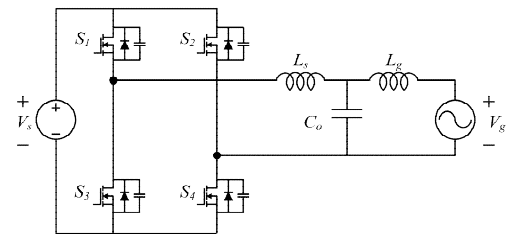


그림. 1. H-브리지 인버터의 회로도
Fig 1. Circuit Diagram of H-bridge inverter

Interval 1 : 스위치 S1과 S4가 도통되어 인버터의 출력 전압이 $+V_s$ 가 되며, 인덕터 전류는 $(V_s - V_g)/L$ 의 기울기로 증가하게 된다.

Interval 2 : 스위치 S1이 꺼지고, S2가 도통되어 인버터의 출력 전압이 0이 되며, 인덕터 전류는 $-V_g/L_s$ 의 낮은 기울기로 감소하게 된다.

Interval 3 : 스위치 S4가 꺼지고, S3가 도통되어 인버터의 출력 전압이 $-V_s$ 가 되며, 인덕터 전류는 $-(V_s + V_g)/L$ 의 높은 기울기로 감소하게 된다.

Interval 4 : 전류가 ZVS 조건에 도달하였을 때, S2가 꺼지고, S1이 도통되어 인버터의 출력 전압이 0이 되며, 인덕터 전류는 $-V_g/L_s$ 의 낮은 기울기로 감소하게 된다.

각 구간의 시간은 L_s 의 자속 평형 조건 및 C_o 의 전하 보존 조건을 이용해 계산이 가능하며, 각 구간에 걸리는 시간은 식 (1)~(4)과 같이 표현이 가능하다. m 은 무효전력 및 Interval 3를 키우기 위한 값으로, 식 (5)와 같다.

$$T_{on} = gT - T_{off2} \quad (1)$$

$$T_{off2} = (2I_b + m)L / ((1+g)V_s) \quad (2)$$

$$T_{off1} = (1-g)(0.5 + (I_o - m/2)/I_{pm})T - T_{off2} \quad (3)$$

$$T_{off3} = (1-g)(0.5 - (I_o - m/2)/I_{pm})T - T_{off2} \quad (4)$$

$$m = \begin{cases} I_o(\sin(\theta_I) - \sin(\theta_V)) + a & (|\sin\theta_I| > |\sin\theta_V|) \\ a & (|\sin\theta_I| < |\sin\theta_V|) \end{cases} \quad (5)$$

여기서 I_b 는 ZVS를 위한 임계전류 값, I_{pm} 은 원하는 스위칭

주파수에 의해 고정된 피크 투 피크 전류, T 는 스위칭 주기, a 는 Interval 3를 키우기 위한 마진 값이다. I_b 와 T 값을 고정함으로써, 각 구간에 걸리는 시간을 구할 수 있다.

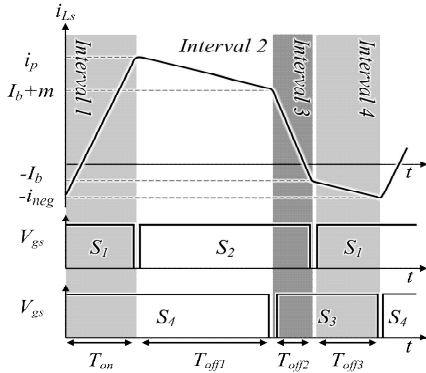


그림 2. DTZM의 주요 동작 파형들
Fig 2. Main waveform of DTZM

2.2 하이브리드 모듈레이션 설계

제안하는 하이브리드 모듈레이션 방법은 낮은 스위칭 손실을 가지는 유니폴라 모듈레이션과 제한한 DTZM을 이용해 낮은 스위칭 손실과 무효전력의 공급이 모두 가능하도록 하였다. 계통 전압이 0에 가깝거나, 스위칭 주파수가 높은 구간에서는 영교차 왜곡 문제를 피하기 위해 DTZM 기법을 이용해 낮은 전류 리플과 낮은 스위칭 주파수를 구현함으로써 전류 THD와 스위칭 손실을 낮출 수 있다. 나머지 구간에서는 스위칭 손실을 줄이기 위해 유니폴라 모듈레이션을 적용하였다.

3. 시뮬레이션 결과

제안하는 모듈레이션 방식을 비교하기 위해 MATLAB SIMULINK를 이용해 220V_{rms}, 1kW에서 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 3(a), (b)는 각각 지상역률 0°, 30° 일 때의 출력 전압, 전류, 인덕터 전류 그래프이며, 그림 4(a), (b)는 각각 0°, 30° 지상역률 일 때의 스위칭 주파수 변화이다. DTZM 구간 동안에는 스위칭 주파수가 일정함을 알 수 있다. 표 2는 각 모듈레이션 별 THD이며, 영교차 왜곡이 사라짐으로 인해 유니폴라 기법에 비해 THD가 감소하였음을 확인하였다.

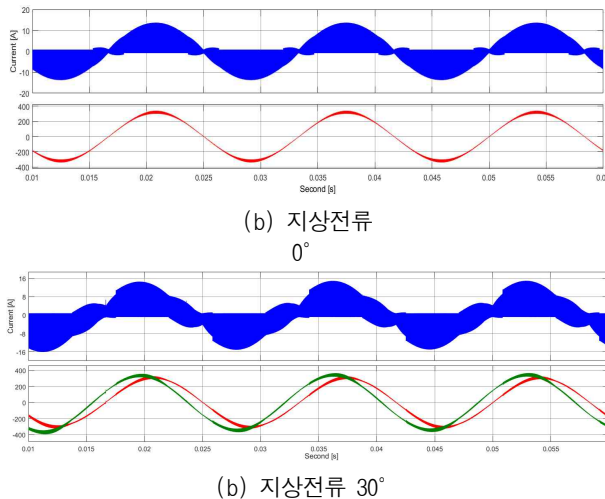


그림 3. 시뮬레이션 결과
Fig 3. Simulation Results

표 1 시스템 파라미터

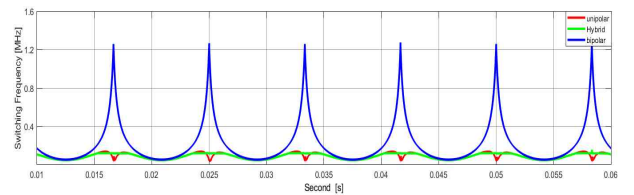
Table 1 System Parameter

V_s	400V	V_g	220V _{rms}
L_s	100uH	C_p	1uF
f_{sw} 최댓값	150kHz	$ I_b $	0.8A

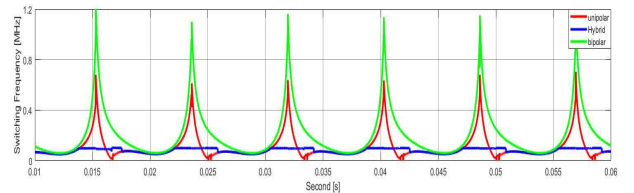
표 2 시뮬레이션의 모듈레이션 별 THD

Table 1 THD of each modulation from simulation

	Unipolar	Bipolar	Proposed
$\Delta \theta = 0^\circ$	3.64%	2.84%	3.54%
$\Delta \theta = 30^\circ$	4.9%	3.5%	4.0%



(b) 지상전류 0°



(b) 지상전류 30°

그림 4. 모듈레이션 방식 별 스위칭 주파수

Fig 4. Switching Frequency of each modulation method

4. 결론

BCM H-브리지 인버터는 소프트 스위칭을 통해 스위칭 손실을 낮출 수 있지만, 바이폴라 모듈레이션은 높은 스위칭 주파수 변화로 인해 턴 오프 손실의 증가와 EMI문제를 가지며, 유니폴라 모듈레이션을 영교차 왜곡 및 무효전력 공급의 문제를 가진다. 본 논문에서는 소프트 스위칭을 구현하면서 낮은 전류 리플과 스위칭 주파수를 가지고, 무효전력 보상이 가능한 새로운 모듈레이션 기법을 제안하였다. 또한 이를 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 이로 인해 기존의 BCM 방식에 비해 높은 전력 품질과 낮은 스위칭 손실이 가능 할 것이다.

참고 문헌

- [1] C. Marxgut, F. Krismer, D. Bortis and J. W. Kolar, "Ultraflat Interleaved Triangular Current Mode (TCM) Single-Phase PFC Rectifier," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 29, no. 2, pp. 873-882, Feb. 2014.
- [2] T. Liu, C. Chen, K. Xu, Y. Zhang and Y. Kang, "GaN-Based Megahertz Single-Phase Inverter With a Hybrid TCM Control Method for High Efficiency and High-Power Density," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 6, pp. 6797-6813, June 2021.