

단상 3-레벨 NPC 인버터의 고효율 스위칭 전략

송용규, 이승주, 이준석, 이교범
아주대학교

High Efficient Switching Strategy for Single Phase Three-level NPC Inverters

Yong Gyu Song, Seung Joo Lee, June Seok Lee and Kyo Beum Lee
Ajou University

초록

본 논문은 단상 3 레벨 NPC 인버터에서 스위칭 손실 저감을 위한 스위칭 방법을 제안한다. 기존의 유니폴라 스위칭 방법은 두 레그의 스위치가 독립적으로 제어되어 전압을 출력하며 모든 스위치가 계속해서 ON/OFF 동작을 수행 한다. 이는 스위치에서 발생하는 스위칭 손실을 증가 시킨다. 제안하는 스위칭 방법은 한 레그의 스위치의 동작을 고정시키고, 다른 한 레그의 스위치만을 ON/OFF 동작하여 전체적인 스위칭 손실을 감소 시킨다. PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안하는 스위칭 방법과 유니폴라 스위칭 방법을 비교 분석하고 타당성을 확인한다.

1. 서론

그림 1은 최근 전력전자분야에서 많은 관심을 받고 있는 단상 3 레벨 NPC 인버터를 보여주고 있다. 3 레벨 NPC 인버터는 3 레벨로 구성되어 기존의 2 레벨 인버터에 비해 스위칭 소자의 전압 스트레스를 낮추며, 출력의 고조파 성분을 감소시켜 주는 이점을 가지고 있다^[1]. 3 레벨 NPC 인버터에 기존 PWM 스위칭 방식 중 하나인 유니폴라 스위칭 방식을 적용하면, 그림 1에서 a레그, b레그의 8개 스위치가 ON/OFF 동작을 지속적으로 한다. 결국 모든 스위치의 동작으로 인해 스위치 소자의 손실이 증가하게 된다^[2].

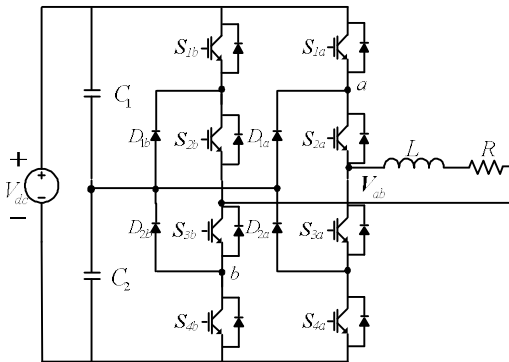


그림 1. 단상 3-레벨 NPC 인버터 회로도
Fig 1. Circuit diagram of single phase three-level NPC inverter

본 논문에서는 단상 3 레벨 인버터에서 사용되는 새로운 PWM 스위칭 방법을 제안한다. 제안하는 스위칭 방법은 양쪽 레그의 스위치 중 한 쪽을 ON상태로 고정시켜주고, 나머지 레그의 ON/OFF 동작을 통해 인버터의 출력전압을 생성한다. 기존의 유니폴라 스위칭에서 양쪽 레그의 각각의 4개의 스위치가 지속적으로 ON/OFF 동작을 하기 때문에 스위칭 손실이 큰 반면, 제안하는 스위칭 방식은 한 쪽 레그가 고정되어 있기 때문에 손실이 감소한다. 본 논문에서 제안하는 내용은 PSIM을 통해 동일 조건에서 기존의 유니폴라 방식과 제안하는 방식의 전도 상태 손실과 스위칭 손실을 비교 분석한다.

2. 손실 저감을 위한 스위칭 방법

NPC 인버터는 각각의 레그에서 스위칭 상태에 따라 출력 전압은 다음과 같이 3가지 상태로 구분된다. 상단 2개의 스위치 소자가 ON인 경우 'P'상태, 가운데 2개의 스위치 소자가 ON인 경우 'O'상태, 아래 2개의 스위치 소자가 ON인 경우 'N' 상태이며, 아래 표와 같이 정리된다.^[3]

표 1 3-레벨 NPC 인버터의 스위칭 상태
Table 1 The switching state for three level NPC inverter

스위칭 상태	각 스위치 동작				출력 전압
	S1x	S2x	S3x	S4x	
P	ON	ON	OFF	OFF	$V_{dc}/2$
O	OFF	ON	ON	OFF	0
N	OFF	OFF	ON	ON	$V_{dc}/2$

기존의 유니 폴라 스위칭 방식은 2개의 정현파 형태의 지령 전압이 삼각파와 비교되어 동작한다. 그 중 하나는 a레그의 스위칭을 결정하며, 나머지 하나는 b레그의 스위칭 상태를 결정한다. 따라서 a레그, b레그의 총 8개의 스위치가 계속해서 ON/OFF동작해 스위칭 손실 증가를 야기한다.

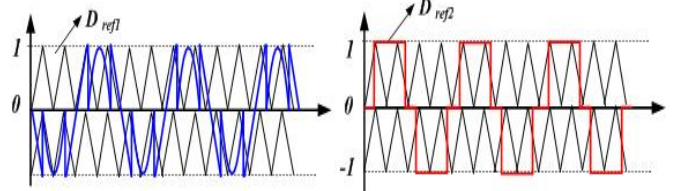


그림 2. 제안하는 기법의 지령 전압
Fig 2. Reference voltage for Proposed method

그림 2와 같이 삼각파와 비교되는 지령전압의 형태를 취하면, b레그의 스위치가 고정되어, 스위칭 손실이 줄어들게 된다. 스위치 소자의 손실은 전도 상태 손실과 스위칭 손실로 구성되며 IGBT의 손실은 식 (1)을 통해 구할 수 있다.

$$\begin{cases} P_{sw,IGBT} = f_{sw} \times (E_{on} + E_{off}) \\ P_{cond,IGBT} = V_{ce} \times I_c \times D_{IGBT} \end{cases} \quad (1)$$

식(1)에서 f_{sw} 는 스위칭 주파수, E_{on} 와 E_{off} 는 IGBT의 ON/OFF 에너지 손실, V_{ce} 는 콜렉터 에미터 전압, I_c 는 콜렉터 전류, D_{IGBT} 는 듀티 사이클을 의미한다.

다음으로 다이오드에서 손실은 식(2)를 통해 구할 수 있다.

$$\begin{cases} D_{sw,IGBT} = f_{sw} \times E_{rr} \\ D_{cond,IGBT} = V_d \times I_F \times D_{diode} \end{cases} \quad (2)$$

식(2)에서 E_{rr} 는 역 회복 에너지, V_d 는 다이오드 드랍 전압, I_F 는 포워드 전류, D_{diode} 는 듀티 사이클을 의미한다.

3. 시뮬레이션

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위해 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 파라미터를 나타낸다.

표 2 시뮬레이션 파라미터 정리
Table 2 Arrangement of simulation parameter

Parameters	Value
dc-link voltage	600 V
C_{dc}	2200 uF
L	3.5 mH
R	10 Ω
Switching frequency	10 kHz
Control period	100 uF
Fundamental frequency	60 Hz
Magnitude of D_{ref}	0.8

그림 3은 제안한 방법의 시뮬레이션 결과이다. 전압 변조 지수는 0.8이며, 선간 전압이 기존의 3 레벨과 같이 5단계로 출력되는 것을 확인할 수 있다, 출력 전류 또한 정현파 곡선으로 출력되는 것을 확인할 수 있다.

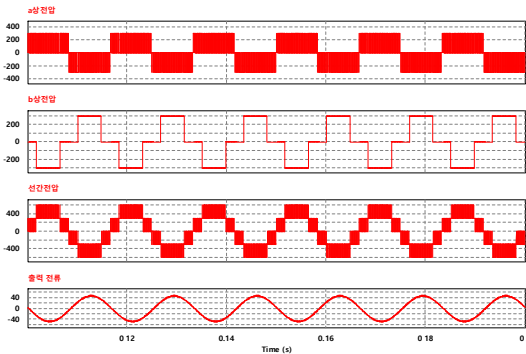


그림 3. 제안한 방법의 시뮬레이션 결과
Fig 3. Simulation result of proposed method

그림 4는 손실 비교 분석을 통해 기존의 유니폴라 방법보다 손실이 감소되는 것을 나타낸다.

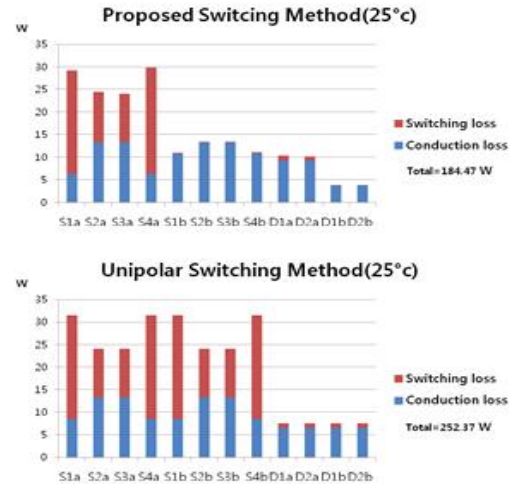


그림 4. 스위칭 손실 분석
Fig 4. Analyze switching loss

제안하는 스위칭 방법은 b레그의 스위치를 고정시켜주기 때문에 그림 4의 b1~b4까지의 스위치에서 스위칭 손실(붉은색)이 기존의 유니폴라 방법보다 감소되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단상 3 레벨 NPC 인버터에서 기존의 유니폴라 스위칭 방법을 적용했을 때 발생하는 스위치 소자의 손실을 줄이기 위한 새로운 스위칭 방법을 제안한다. 새롭게 제안하는 스위칭 방법은 인버터의 2개의 레그 중 한 쪽 스위치 상태를 고정시켜 줌으로써 ON/OFF 동작에 의해서 발생하는 손실을 감소시킨다. PSIM 시뮬레이션을 통하여 제안하는 스위칭 방법의 타당성을 검증하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2013R1A1A2A10006090)

참고 문헌

- [1] Choi, Ui Min, and Kyo Beum Lee. "Neutral point voltage balancing method for three level inverter systems with a time offset estimation scheme." J. Power Electron 13.2 (2013): 243-249.
- [2] Lee, June Seok, and Kyo Beum Lee. "Tolerance controls for open switch fault in a grid connected T type rectifier at low modulation index." Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty Ninth Annual IEEE. IEEE, 2014.
- [3] Seo, Jae Hyeong, Chang Ho Choi, and Dong Seok Hyun. "A new simplified space vector PWM method for three level inverters." Power Electronics, IEEE Transactions on 16.4 (2001).