

높은 스위칭 주파수를 가지는 SiC 클램프 다이오드 3-레벨 인버터를 위한 스위칭 손실을 최소화하는 새로운 PWM 방법

구남준, 정홍주, 김래영, 현동석
한양대학교 전기공학부

A Novel Switching Loss Minimized PWM Method for a High Switching Frequency Three-Level Inverter with a SiC Clamp Diode

Nam Joon Ku, Hong Ju Jung, Rae Young Kim, Dong Suk Hyun
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

그 동안 스위칭 손실 저감을 위해 Si 다이오드를 SiC 다이오드로 대체한 인버터들이 많이 소개되었다. NPC 인버터에서도 마찬가지로 클램프 다이오드 소자를 SiC 다이오드로 대체함으로써 스위칭 손실을 저감시킬 수 있다. 하지만 IGBT의 스위칭 손실이 매우 크기 때문에 단지 클램프 다이오드 소자를 바꿈으로써 줄일 수 있는 스위칭 손실은 한계가 있다. 따라서 본 논문은 낮은 변조지수를 갖는 NPC 인버터에서 역회복 손실을 포함한 스위칭 손실을 최소화 시킬 수 있는 새로운 PWM 방법을 제시한다. 제한한 방법에 의해 역회복 현상은 거의 발생하지 않으며 스위칭 손실은 상당히 저감된다. 그러므로 전체 시스템 효율을 증가시킬 수 있고 인버터를 더 높은 스위칭 주파수에서 동작시킬 수 있다. 제한한 방법의 타당성은 각 소자의 성능평가와 수치해석적 방법을 적용해 검증하였다.

1. 서 론

최근 전력 반도체 소자분야에서, Si의 특성과 비교하여 매우 우수한 특성을 지닌 SiC에 대한 연구와 개발이 계속되고 있다^[1]. SiC 다이오드의 대표적인 특성으로는 빠른 스위칭 속도, 낮은 정방향 전압 강하, 고온 성능 그리고 특히 역회복 측면에서 무시할만큼 작은 스위칭 손실 등이 있다.^[2] 스위칭 손실 저감에 초점을 맞춰 Si 다이오드를 SiC 다이오드로 대체한 많은 인버터들이 있다^[3]. 클램프 다이오드를 SiC로 바꾼 NPC 인버터 역시 이미 사용되고 있다. NPC 인버터의 클램프 다이오드를 SiC 다이오드로 바꿈으로써 역회복 손실과 스위칭 손실을 부분적으로 줄일 수가 있지만 IGBT의 스위칭 손실이 너무 크고 IGBT의 역병렬 다이오드에서 역회복 손실도 발생하기 때문에 전체 시스템에서 스위칭 손실은 여전히 크다. 게다가 이 역회복 현상에 기인한 역회복 전류는 회로에서의 원하지 않는 EMI 현상을 일으키거나 시스템의 효율을 떨어뜨리는 원인이 되고 극단적인 경우에는 스위칭 소자를 파괴시킬 수 있다.

본 논문은 역회복 특성의 관점에서 SiC 클램프 다이오드 NPC 인버터와 Si 클램프 다이오드 NPC 인버터의 동작을 비교하고, 역회복 특성과 스위칭 손실 개선을 위해 NPC 인버터에서 SiC 다이오드의 장점을 적절히 적용시킴으로써 역회복 손실을 포함한 여전히 남아있는 스위칭손실을 최소화 시키는 PWM 방법을 제안한다. 제한한 PWM 방법의 효과는 각 소자의 성능평가를 기반으로 한 수치해석적 방법을 통해 증명한다.

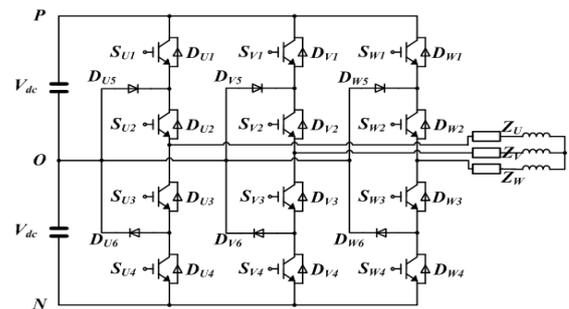


그림 1 3-레벨 NPC 인버터
Fig. 1 The NPC 3-level inverter

2. 제안한 스위칭 손실을 최소화 PWM 방법

그림 2는 NPC 인버터의 클램프 다이오드 종류와 PWM 방법에 따라 역회복 현상이 일어나는 구간 비교한 예이다.

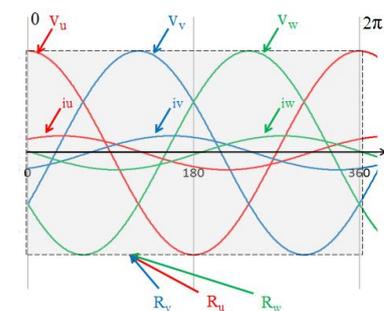
그림 2. (a)를 보면, Si 클램프 다이오드 NPC 인버터에 기존 SPWM 방법을 적용하면 한주기 내내 역회복 현상이 발생한다.

그림 2. (b)를 보면, 스위칭 상태가 O 상태에서 P나 N 상태로 바뀔 때에는 SiC 다이오드 특성으로 인하여 역회복 현상은 없다. SiC 클램프 다이오드일 때 SPWM을 적용한 조건에서 역회복 현상이 발생하는 각 구간은 약 36°가 된다.

그림 2. (c)를 보면, SiC 클램프 다이오드 NPC 인버터에 제안한 방법을 적용하면 역회복 현상이 발생하는 각 구간은 단지 6°가 된다. 게다가 이 구간에서의 부하 전류의 크기는 매우 작기 때문에 남아있는 손실 역시 매우 작다. 만약 역률각이 30°보다 작을 때 제안한 방법을 적용하면 전체 주기 내내 역회복 현상은 발생하지 않는다. 제안한 방법에서 오프셋 전압은 어느 한 상의 부하전류가 다른 상의 전류와 크기를 비교했을 때 가장 큰 전류를 가지는 구간과 역회복 구간이 중복되는 부분을 기준으로 정해진다. 조건에 따른 오프셋 전압은 표 1과 같다. 제안한 방법은 역회복 손실을 줄이며 스위칭 상태를 O 상태로 고정시킴으로써 스위칭 손실 역시 최소화시킨다.

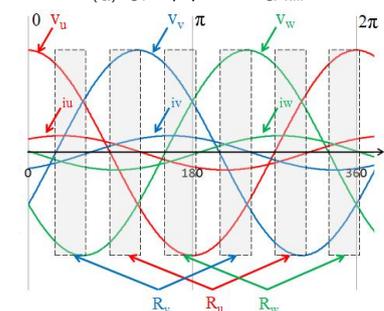
표 1 조건에 따른 오프셋 전압
Table 1 Offset voltage according to clamp diode and PWM method

오프셋 전압	조건
$V_{offset} = V_u$	$\max(i_u , i_v , i_w) = i_u $
$V_{offset} = V_v$	$\max(i_u , i_v , i_w) = i_v $
$V_{offset} = V_w$	$\max(i_u , i_v , i_w) = i_w $



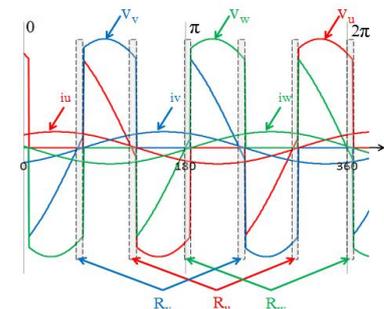
V_x : Reference voltage of each phase
 i_x : Load current of each phase
 R_x : Reverse recovery effect of each phase

(a) Si 다이오드 + SPWM



V_x : Reference voltage of each phase
 i_x : Load current of each phase
 R_x : Reverse recovery effect of each phase

(b) SiC 다이오드 + SPWM



V_x : Reference voltage of each phase
 i_x : Load current of each phase
 R_x : Reverse recovery effect of each phase

(c) SiC 다이오드 + 제안한 PWM 방법

그림 2 클램프 다이오드 종류와 PWM 방법에 따른 역회복 손실구간
 Fig. 2 The reverse recovery region according to clamp diode and PWM method

3. 성능평가 및 검증

실험을 통해 각 소자의 특성곡선을 얻고, (1) (4)를 이용하여 각 소자에서의 스위칭 손실을 계산하였다.

$$E_{on/off}(I_F[k]) = \int^{t_{on/off}} vi dt \quad (1)$$

$$E_{on/off}[k] = m(I_F[k])^n \quad (2)$$

$$p[k] = \frac{1}{T}(E_{on}[k] + E_{off}[k]) \quad (3)$$

$$p_{total} = \sum^* p[k] \quad (4)$$

(* : 한주기동안 각 소자에서 스위칭이 일어나는 구간에 해당하는 k 값만 적용)

위의 (1) (4)에서 $E_{on/off}$ 는 스위칭 온/오프 에너지 상수, $t_{on/off}$ 는 스위칭 온/오프 시간, $1/T$ 는 출력 주파수, I_F 는 정방향 전류, p 는 소자의 순시 스위칭 손실 평균값, p_{total} 는 한 주기동안 소자의 총 스위칭 손실값, k 는 스위칭 번호를 의미하는 정수이다. 예를 들어 출력 주파수가 60Hz이고 스위칭 주파수가 25kHz이라면, k 는 0부터 416 ($\approx 25k/60$)사이의 값을 갖는다.

조건에 따른 클램프 다이오드에서의 스위칭 손실은 표 2와 같다. NPC 인버터에서 클램프 다이오드를 SiC 다이오드로 대체했을 때 기존 SPWM 방법을 적용하면, 클램프 다이오드의 스위칭 손실 감소율은 약 35%이다. 그리고 SiC 클램프 다이오드 NPC 인버터에 제안한 방법을 적용하면, Si 클램프 다이오드 NPC 인버터에 SPWM 방법 적용한 경우와 비교했을 때 클램프 다이오드에서의 스위칭 손실 감소율은 약 57%이다.

총 스위칭 손실을 정리하면 표 3과 같다. 제안한 방법을 적용했을 때, Si 클램프 다이오드에 SPWM 방법을 적용한 경우와 비교하여 총 스위칭 손실이 약 68% 정도 감소한다. 계산된 결과값을 비교해보면 제안한 방법의 효과는 쉽게 입증된다.

표 2 클램프 다이오드에서의 스위칭 손실

Table 2 The switching loss in a clamp diode

조 건	스위칭 손실
Si 다이오드 + SPWM	0.2054W
SiC 다이오드 + SPWM	0.1343W
SiC 다이오드 + 제안한 PWM 방법	0.0876W

표 3 총 스위치 손실

Table 3 The total switching loss

조 건	스위칭 손실
Si 다이오드 + SPWM	10.44W
SiC 다이오드 + SPWM	10.30W
SiC 다이오드 + 제안한 PWM 방법	3.25W

4. 결론

본 논문은 낮은 변조지수를 갖는 NPC 인버터에서 역회복 손실을 포함한 스위칭 손실을 최소화하기 위한 방법을 제안한다. 제안한 방법을 사용함으로써 역회복 손실을 대부분 감소시키거나 완전히 제거할 수 있으며 스위칭 손실을 감소시킬 수 있다. 결과적으로 제안한 방법은 회로에서의 EMI 현상을 줄이고, 더 높은 스위칭 주파수에서 향상된 효율로 NPC 인버터를 동작시키는데 많은 도움이 될 것이다.

참고 문헌

- [1] B. Ozpineci, L. M. Tolbert, S. K. Islam, and F. Z. Peng, "Testing, characterization, and modeling of SiC diodes for transportation applications," in IEEE 2002 Power Electronics Specialists Conference, 2002, pp.1673-1678.
- [2] A. Agarwal, "600V, 1 40A, Schottky Diodes in SiC and Their Applications." [Online] Available: <http://www.cree.com/products/pdf/PWRTechnicalPaper1.pdf>
- [3] M. Chinthavali, Hui Zhang, L. M. Tolbert, B. Ozpineci, "Update on SiC based inverter technology," in IEEE 2009 Power Electronic Conference, 2009, pp.71-79.