

# 직류단 커패시터의 수명을 고려한 NPC 인버터의 불연속 펄스폭 변조 방법

김나연, 조연주, 최의민  
서울과학기술대학교

## Discontinuous Pulse Width Modulation Strategy for NPC Inverter considering Lifetime of DC-link Capacitors

Na-Yeon Kim, Yeon-Ju Cho, and Ui-Min Choi  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

불연속 펄스폭 변조 방법은 NPC 인버터 직류단 커패시터의 열부하를 증가시켜 수명을 저하시킨다. 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 기존 불연속 펄스폭 변조 방법의 의한 직류단 커패시터의 신뢰성 저하를 완화시키는 새로운 불연속 펄스폭 변조 방식을 제안하며 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서 론

불연속 변조 방식(Discontinuous Pulse Width Modulation, DPWM)은 일정 구간 동안 스위칭 상태를 유지하여 인버터의 효율을 향상시키는 방법이다. 일반적인 DPWM은 스위치의 전력 손실이 큰 상전류의 피크 부근에서 클램핑을 하여 스위칭 손실을 줄인다. 하지만 기존 연구에 따르면 불연속 펄스폭 변조 방법은 출력 전류의 전고조파왜율을 증가시킬 뿐만 아니라 직류단 커패시터의 손실을 증가시킨다. 이는 동작온도를 증가를 야기하며 결과적으로 커패시터의 수명을 단축시켜 NPC 인버터의 신뢰성을 저하시킨다.<sup>[1]</sup> 이를 개선하기 위해 본 논문에서는 스위칭 불연속 구간의 배치를 조정하여 기존 불연속 펄스폭 변조 방법의 의한 직류단 커패시터의 신뢰성 저하를 완화시키는 불연속 펄스폭 변조 방식을 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 제안한 방법의 타당성 및 유효성을 검증하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1. 제안하는 NPC 인버터의 불연속 펄스폭 변조 방법

3-레벨 NPC 인버터는 그림 1과 같이 12개의 IGBT 스위치 및 6개의 클램핑 다이오드로 구성된다. 세 레그의 27개 스위칭 조합을 전환하여 +Vdc/2, 0, -Vdc/2의 3가지 출력전압 상태를 가지게 되며 이러한 전압 변조 방식을 공간 벡터 전압 변조 방법(Space Vector Pulse Width Modulation, SVM)이라 하며 지령전압은 그림 2 (a)와 같다.

DPWM 방법은 일반적으로 상전압 및 전류가 최대가 되는 곳에 적용하며 이 구간 동안 스위칭이 발생하지 않아 스위칭 손실이 감소한다. 그림 2(b) DPWM 방법이 30° 동안 적용되었을 때의 지령전압을 보여준다. 하지만 DPWM 이 적용된 구간에서는 한 종류의 작은 전압 벡터만이 존재하므로 커패시터

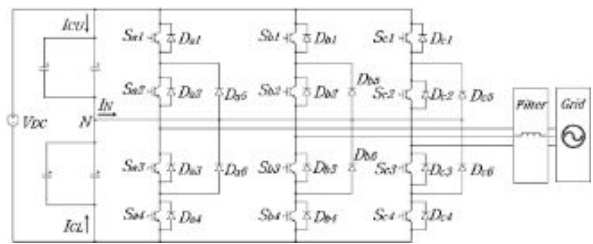


그림 1 3-레벨 NPC 인버터  
Fig. 1 3-level NPC inverter

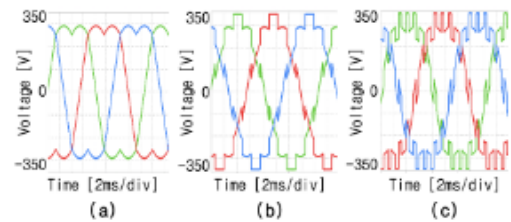


그림 2 지령 전압 비교 (a)SVPWM (b)DPWM30 (c)DPWM10d\_3  
Fig. 2 Comparison of reference voltages (a)SVPWM (b)DPWM30 (c)DPWM10d\_3

전류의 극성이 바뀌지 않는다. 따라서 저주파 대역에서 직류단 커패시터 리플 전류가 증가하게 되며 저주파 대역에서 상대적으로 큰 값을 갖는 커패시터의 등가직렬저항 (Equivalent series resistance, ESR)의 특성으로 인해 DPWM 적용 시 커패시터의 손실이 증가하게 되며 이는 커패시터의 동작온도를 증가시켜 수명을 감소시킨다.

제안하는 DPMW 방법은 기존 DPWM 방법과는 다르게 각 상의 지령전압이 최대값을 갖는 구간 내에서 DPWM 적용 구간을 불연속적으로 적용하며 불연속 구간의 배치를 조정함으로써 기존 DPWM 방법에 비해 직류단 커패시터 리플 전류의 주파수를 증가시킬 수 있다. 그림 2(c) 제안하는 DPWM 방법이 적용되었을 때의 지령전압을 보여준다. 총 DPWM 적용 구간은 기존 방법과 같이 30°를 유지하였지만 DPWM 적용 구간과 비적용 구간을 불연속적으로 각 10° 나누어 적용하였다.

#### 2.2. DC-Link 커패시터의 열 모델 및 수명 모델

커패시터의 수명(L)은 동작 온도( $T_{hot}$ )에 영향을 받으며, 수명 모델은 다음과 같다.<sup>[2]</sup>

$$L = L_0 \cdot \left(\frac{V}{V_0}\right)^{-n} \cdot 2^{\frac{T_0 - T_{hot}}{10}} \quad (1)$$

위와 같이 동작 온도가 높을수록 커패시터의 수명은 저하된다.

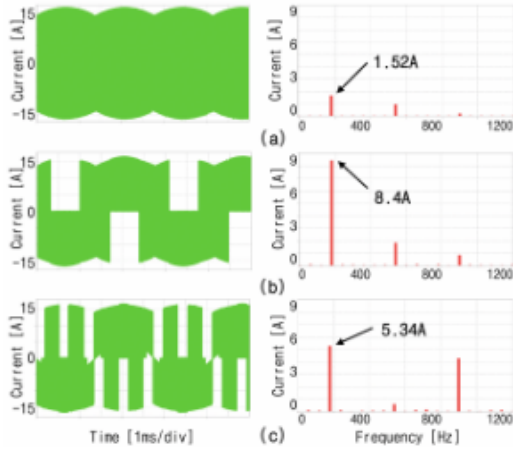


그림 3 직류단 커패시터 전류 및 FFT 분석 (a)SVPWM (b)DPWM30 (c)DPWM10d\_3  
 Fig. 3 DC-link capacitor current and FFT analysis (a)SVPWM (b)DPWM30 (c)DPWM10d\_3

이때 커패시터의 동작 온도( $T_{hot}$ )는 다음과 같이 정의된다.

$$T_{hot} = T_a + R_{ha} \cdot P_{loss} \quad (2)$$

여기서 커패시터의 동작 온도는 전력 손실( $P_{loss}$ )에 영향을 받으며, 커패시터의 전력 손실은 커패시터에 흐르는 전류와 커패시터의 등가 직렬 저항(Equivalent Serial Resistance, ESR)을 통해 식(2)와 같이 얻어진다.

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^m [ESR(f_i, T_{hot}) \cdot I^2(f_i)] \quad (3)$$

이때 ESR 값은 커패시터 전류의 저주파 대역에서 증가한다. 따라서 커패시터의 전력 손실은 저주파 대역의 전류 성분에 큰 영향을 받게 된다.

### 2.3 시뮬레이션 결과

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 파라미터는 다음과 같다.  $f_{sw} = 20\text{kHz}$ ,  $V_{DC} = 650\text{V}$ ,  $L_{filter} = 0.5\text{mH}$ ,  $f_{grid} = 60\text{Hz}$ ,  $V_{grid} = 220\text{Vrms}$ ,  $P_{rated} = 30\text{kW}$ , 직류단 커패시터로 TDK B43510 모델을 사용하였으며, 직류단 커패시터의 구조는 상단과 하단에 각각 1200 $\mu\text{F}$  커패시터를 2개 병렬 연결한 구조를 고려하였다.

그림 3은 SVM, 기존의 30° 불연속 전압 변조 방법(DPWM30) 및 제안하는 DPWM 방법(DPWM10d\_3)이 적용되었을 때 직류단 커패시터 전류 및 이의 FFT 분석결과를 보여준다. DPWM30 적용 시 SVPWM에 비해, 540 Hz에서의 리플 전류는 감소하였지만 180Hz에서 직류단 커패시터의 리플 전류가 1.52A에서 8.4A로 크게 증가한 것을 알 수 있다. 저주파에서 높은 값을 갖는 ESR의 특성으로 인해 결과적으로 DPWM 적용 시 커패시터의 손실과 동작온도가 증가하며 이는 수명을 저하시키는 요인이 된다. 제안하는 DPWM10d\_3 방법이 적용되었을 때 커패시터 전류와 FFT 분석결과는 그림 3(c)와 같다.

기존 DPWM30 방법 대비 제안하는 DPWM10d\_3 방법이 적용되었을 때 900 Hz 대역의 리플 전류는 증가하였지만 180 Hz와 540 Hz에서의 리플전류는 각 5.34A 및 0.67A로 DPWM30 대비 약 37% 및 65% 감소하였다.

표 1은 전압변조방법에 따른 커패시터의 전력 손실, 동작 온도 및 기대수명을 보여주며 1일 8시간 운전을 가정하였다.

DC-link capacitors		PWM		
		SVM	DPWM30	DPWM10d_3
1200 [ $\mu\text{F}$ ]	Power Loss[W]	3.8	5.1	4.2
	Hot-spot Temp.[ $^{\circ}\text{C}$ ]	73.25	85.35	78.49
	Lifetime [years]	13.4	6.08	9.87

표 1 전압변조방법에 따른 직류단 커패시터의 동작 온도와 기대수명  
 Table 1 Hot-spot temperature and lifetime of DC-link capacitors under different PWM methods

새로 제안한 DPWM10d\_3의 동작 온도는 78.49 $^{\circ}\text{C}$ 로 상전류의 주기당 클램핑 구간의 총합이 같은 DPWM30보다 6.86 $^{\circ}\text{C}$  감소했다. 그에 따른 기대수명도 3.79년 증가하여, DPWM30에 비해 38%의 수명 개선이 이루어진 것을 확인할 수 있다.

제안하는 DPWM10d\_3 방법과 기존 DPWM30이 적용되었을 때 전력반도체에 의한 NPC 인버터의 총 전력손실은 각 427.35W와 427.3W로 DPWM 적용에 따른 전력손실 감소 효과는 큰 차이가 없는 것을 알 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 NPC 인버터의 직류단 커패시터의 수명을 고려한 불연속 펄스폭 변조 방법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성 및 효율성을 검증하였다. DPWM이 적용되는 클램핑 구간의 길이가 동일한 조건에서, DPWM 적용 구간을 지령전압의 최대값 부근에서 연속적으로 적용하는 방법 보다 구간을 나누어 불연속적으로 클램핑 구간을 적용하는 것이 직류단 커패시터의 저역대 리플 전류를 감소시켜 손실을 감소시킨다. 이는 커패시터의 동작온도를 기존 DPWM 방법 대비 감소시켜 DPWM 적용에 따른 커패시터의 신뢰성 저하를 완화시킬 수 있으며 전력반도체에 의한 손실에는 유의미한 차이는 없다. 하지만 빈번한 DPWM 적용 및 비적용 구간의 교차는 전력반도체 소자의 스위칭 손실을 증가시킬 수 있으므로 논문을 바탕으로 이를 적절히 선정하는 것이 필요하다.

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과 교육부와 한국연구재단의 재원으로 지원을 받아 수행된 3단계 산학협력 선도대학 육성사업(LINC 3.0)의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A2C1091791, No.1345370639)

### 참고 문헌

[1] Ga-Hyeon Yeo, Jae-Heon Choi, and Ui-Min Choi, "Reliability Analysis of DC-link Capacitor of Photovoltaic NPC Inverter by Application Angle of Discontinuous PWM, The Transactions on the Korean Institute of Power Electronics, vol. 28, no. 3, pp. 195-201, June 2023.

[2] Haoran Wang, C. Li, G. Zhu, Y. Liu and Huai Wang, "Model-Based Design and Optimization of Hybrid DC-Link Capacitor Banks", IEEE Trans. Power Electron., Vol.35, no.9, pp. 8910-8925, Sep. 2020.