

# 최소손실 불연속 변조 기법에 따른 2레벨 3상 전압원 인버터의 DC 링크 전압 리플 분석

이준혁, 양형규, 김명원, 최장혁, 박정욱  
연세대학교

## DC Link Voltage Ripple Analysis of Minimum Loss Discontinuous PWM Strategy in Two-Level Three-Phase Voltage Source Inverters

Junhyuk Lee, Hyoung-Kyu Yang, Myeong-Won Kim, Jang-Hyeok Choe, Jung-Wook Park  
Yonsei University

### ABSTRACT

본 논문에서는 최소손실 불연속 변조 기법에 따른 2레벨 3상 전압원 인버터의 DC 링크 전압 리플을 분석하고 이를 통해 DC 링크 커패시터 전기 용량을 선정하는 방법을 제시하였다. 커패시터 전기 용량은 클수록 전압 리플을 제한하는 데 유리하지만, 이는 인버터 제작비용을 증가시키고 전력 밀도를 낮춘다. 따라서 DC 링크 커패시터 전기 용량을 적절히 선정하는 것이 중요하다. PSIM을 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 모의실험으로 제시한 분석 방법의 타당성을 검증하였다.

### 1. 서론

DC 전원으로 구동되는 2레벨 3상 전압원 인버터에서 DC 링크 커패시터는 인버터 입력단에 고주파 전류를 공급하기 위해 필요한 주요 부품이며, 주로 필름 커패시터로 구성된다. 이때 DC 링크 전압 리플은 DC 링크 커패시터에 흐르는 고주파 전류로 인해 필연적으로 발생하며, 리플이 클수록 인버터 출력 품질 또한 나빠진다. DC 링크 커패시터의 전기 용량이 클수록 이 전압 리플은 줄어들지만, 이는 인버터의 제작비용을 증가시키고 전력 밀도를 낮춘다. 따라서 인버터 최적 설계를 위해서는 DC 링크 전압 리플을 분석하여 이를 허용 가능한 범위 내로 제한하는 DC 링크 커패시터의 전기 용량을 선정해야 한다.

최소손실 불연속 변조 기법<sup>[1]</sup>은 삼각 반송파 주기마다 스위칭 손실을 최소화하는 오프셋 전압을 선택하여 부하 역률에 상관없이 스위칭 손실을 최소화하는 불연속 변조 기법의 일종이다. 본 논문에서는 이 최소손실 불연속 변조 기법으로 인버터를 운전할 때 발생하는 DC 링크 전압 리플을 분석하고, 이를 통해 DC 링크 커패시터의 전기 용량을 선정하는 방법을 제시한다. 또한, PSIM을 이용한 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 모의실험으로 제시하는 방법의 타당성을 검증한다.

## 2. DC 링크 전압 리플 분석

### 2.1 인버터 입력단 전류

DC 전원으로 구동되는 인버터는 통상적으로 그림 1과 같이 구성된다. 여기서  $V_{DC}$ 는 DC 전원 전압,  $v_{in}$ 은 DC 링크 전압,  $r_{DC}$ 와  $L_{DC}$ 는 각각 DC 전원 및 케이블의 저항과 인덕턴스이다. 한편, 그림 1에서 볼 수 있듯이 인버터 입력단 전류에는 인버터 입력 전류  $i_{in}$ 과 DC 전원 전류  $i_{DC}$  그리고 DC 링크 커패시

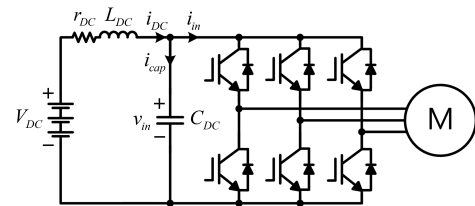


그림 1 DC 전원으로 구동되는 2레벨 3상 인버터  
Fig. 1 DC source powered two-level three-phase inverter

터  $i_{cap}$ 으로 구분되는 세 가지 전류가 있다. 우선, 최소손실 불연속 변조 기법의 3상 변조 신호를 크기순으로  $v_{max}$ ,  $v_{med}$ ,  $v_{min}$ 이라 하고 해당 상전류와 스위칭 신호를 각각  $i_{max}$ ,  $i_{med}$ ,  $i_{min}$  그리고  $S_{max}$ ,  $S_{med}$ ,  $S_{min}$ 이라 할 때,  $i_{in}$ 은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.  $i_{DC}$ 는 통상적으로  $L_{DC}$ 에 의해 정상 상태에서 순수 직류로 간주되며, 식 (2)와 같이 계산할 수 있다. 또한,  $i_{cap}$ 은 키르히호프의 법칙에 따라 식 (3)과 같이 계산할 수 있다. 즉,  $i_{cap}$ 은  $i_{in}$ 에서 직류 성분인  $i_{DC}$ 를 제외한 나머지 고주파 전류 성분이며, 이 전류에 의해 DC 링크 전압 리플이 발생한다.

$$i_{in} = S_{max} i_{max} + S_{med} i_{med} + S_{min} i_{min} \quad (1)$$

$$i_{DC} = i_{max} \left( \frac{v_{max} + 1}{2} \right) + i_{med} \left( \frac{v_{med} + 1}{2} \right) + i_{min} \left( \frac{v_{min} + 1}{2} \right) \quad (2)$$

$$i_{cap} = i_{DC} - i_{in} \quad (3)$$

### 2.2 DC 링크 전압 리플

그림 2에는 삼각 반송파 주기  $T_c$  동안 스위칭 신호에 따른 인버터 입력단 전류와 그에 따른 DC 링크 전압 리플  $\Delta v_{in}$ 의 파형이 여섯 가지 Case로 나타나 있다. 여기서 중요하게 고려해야 할 값은 Case에 따른  $\Delta v_{in}$ 의 첨두치  $\Delta v_{pp}$ 이다. DC 링크 커패시터 전기 용량을  $C_{DC}$ 라 할 때,  $\Delta v_{pp}$ 는 커패시터의 전압과 전류의 관계에 따라 표 1과 같이 계산할 수 있다.

그림 3에는 부하 역률각  $\phi$ 가  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ 일 때 전압 변조 지수  $m$ 에 따른  $\Delta v_{pp}$ 의 최댓값  $\Delta v_{pp,max}$ 가 나타나 있다. 여기서  $\Delta v_{pp,max}$ 는  $I_{A,max} T_c / C_{DC}$ 로 표준화되었으며,  $I_{A,max}$ 는 상전류의 최대 진폭이다. 결론적으로,  $\Delta v_{pp,max}$ 는  $m$ 과  $\phi$ 의 함수이며, 각각이 0.667,  $0^\circ$  또는 1.155,  $90^\circ$ 일 때 0.25로 최대이다.

### 2.3 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 모의실험

검증을 위해 PSIM을 사용하여 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 모의실험을 진행했으며, 시스템 사양은 표 2와 같다.

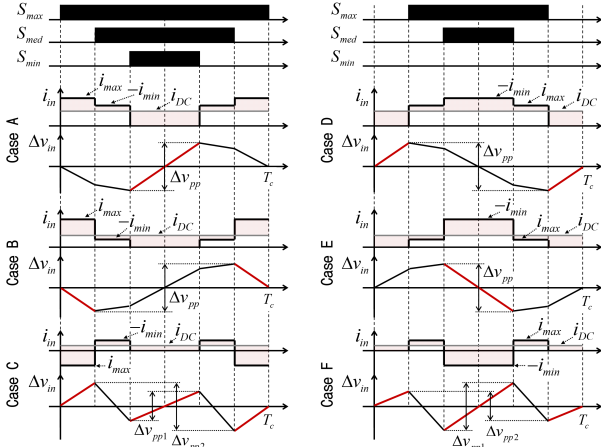


그림 2 스위칭 신호에 따른 인버터 입력단 전류와 DC 링크 전압 리플 파형

Fig. 2 Waveforms of the inverter input side currents and DC link voltage ripple according to the switching signals

표 1 DC 링크 전압 리플첨두치

Table 1 Peak-to-peak value of the DC link voltage ripple

Case A	$\Delta v_{pp} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot i_{DC} \cdot \left( \frac{v_{min} + 1}{2} \right)$
Case B	$\Delta v_{pp} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot (i_{max} - i_{DC}) \cdot \left( 1 - \frac{v_{med} + 1}{2} \right)$
Case C	$\Delta v_{pp1} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot i_{DC} \cdot \left( \frac{v_{min} + 1}{2} \right)$
	$\Delta v_{pp2} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot (i_{DC} - i_{max}) \cdot \left( 1 - \frac{v_{med} + 1}{2} \right)$
	$\Delta v_{pp} = \max\{\Delta v_{pp1}, \Delta v_{pp2}\}$
Case D	$\Delta v_{pp} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot i_{DC} \cdot \left( 1 - \frac{v_{max} + 1}{2} \right)$
Case E	$\Delta v_{pp} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot (-i_{min} - i_{DC}) \cdot \left( \frac{v_{med} + 1}{2} \right)$
Case F	$\Delta v_{pp1} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot (i_{DC} + i_{min}) \cdot \left( \frac{v_{med} + 1}{2} \right)$
	$\Delta v_{pp2} = \frac{T_c}{C_{DC}} \cdot i_{DC} \cdot \left( 1 - \frac{v_{max} + 1}{2} \right)$
	$\Delta v_{pp} = \max\{\Delta v_{pp1}, \Delta v_{pp2}\}$

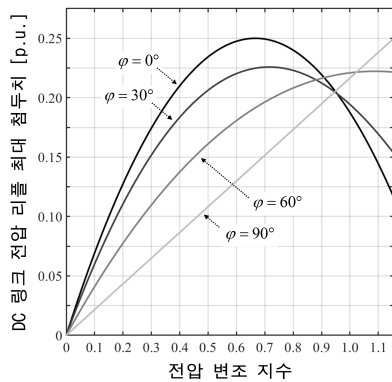


그림 3 DC 링크 전압 리플 최대 첨두치

Fig. 3 Maximum peak-to-peak DC link voltage ripple

표 2 모의실험 시스템 사양

Table 2 System specification in simulation

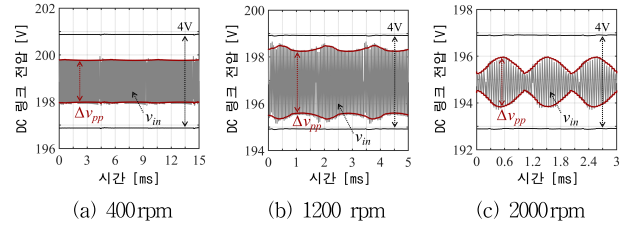
$V_{DC}$	200V	정격 속도, 토크	2000rpm, 9.55N·m
$r_{DC}, L_{DC}$	0.5Ω, 50μH	$L_{ch}, L_{q}$	1.867mH, 3.051mH
$T_c$	50μs	$R_s$	0.27Ω
$I_{A,max}$	14A	극수	10

본 모의실험에서는  $\Delta v_{pp,max}$ 를  $V_{DC}$ 의 2% 내로 제한하는 것을 목표로 하였으며, 이를 위해서는 식 (4)를 만족해야 한다.

$$\Delta v_{pp,max} = \frac{I_{A,max} T_c}{C_{DC}} \cdot 0.25 < V_{DC} \cdot 0.02 = 4V \quad (4)$$

따라서, 본 모의실험 시스템에 적합한 최소  $C_{DC}$ 는 43.75μF이며,  $C_{DC}$ 를 50μF로 선정하여 모의실험을 진행하였다.

그림 4에는 정격 토크 부근에서 전동기 속도에 따른  $v_m$ 의 파형이 나타나 있다.  $\Delta v_{pp}$ 는 본 논문에서 제시한 방법에 따라 잘 추정되고 있으며,  $\Delta v_{pp,max}$ 가  $V_{DC}$ 의 2% 범위를 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있다.



(a) 400rpm (m=0.238, φ=14.64°) (b) 1200 rpm (m=0.669, φ=20.16°) (c) 2000rpm (m=1.102, φ=24.74°)

그림 4 모의실험의 DC 링크 전압 파형

Fig. 4 Waveform of the DC link voltage in simulation

### 3. 결론

본 논문에서는 DC 전원으로 구동되는 2레벨 3상 전압원 인버터를 최소손실 불연속 변조 기법으로 운전할 때 발생하는 DC 링크 전압 리플을 분석하여 적절한 DC 링크 커패시터의 전기 용량을 선정하는 방법을 제시하였으며, 매입형 영구자석 동기 전동기 구동 모의실험으로 제시한 방법의 타당성을 검증하였다. 결론적으로, 시스템의 삼각 반송파 주파수와 상전류 최대값이 결정될 때 DC 링크 전압 리플의 최대 첨두치는 전압 변조 지수와 부하 역률각에 의해 결정되며, 각각이 0.667, 0° 또는 1.155, 90°일 때 최대임을 확인하였다. 이는 인버터 설계 시 DC 링크 커패시터의 전기 용량을 선정하는 데 도움이 된다.

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2020R1A3B2079407).

### 참고 문헌

- [1] T. D. Nguyen, J. Hobraiche, N. Patin, G. Friedrich, and J.-P. Vilain, "A direct digital technique implementation of general discontinuous pulse width modulation strategy," IEEE Transaction on Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 4445-4454, September 2011.