

# 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4-leg 인버터의 필터 커패시터 결선방식에 따른 특성 비교 분석

허성준, 변종은, 안효민, 이병국<sup>†</sup>  
성균관대학교 전자기기컴퓨터공학과

## Analysis and Comparison of 3-phase 4-wire 4-leg Inverter with Non-linear Load According to Configuration of Filter Capacitor

Sung Jun Heo, Jongeun Byun, Hyo Min Ahn, and Byoung Kuk Lee<sup>†</sup>  
Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University

### ABSTRACT

본 논문에서는 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4 leg 인버터의 LC 필터 커패시터 결선방식에 따른 특성을 비교·분석 한다. 특성 비교·분석을 위해 동일한 인덕턴스 조건에서 각 결선방식에 따른 커패시턴스를 설계하고 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션을 통해 각 결선방식에 따른 특성 및 손실을 비교하여 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4 leg 인버터에 적합한 설계 방식을 제시한다.

### 1. 서 론

3상 4선식 4 leg 인버터에 사용되는 LC필터 중 커패시터의 결선방식은 그 시스템의 부하 및 출력 특성에 따라 Y결선, N상과 연결된 Y결선, Delta결선 등 다양한 결선방식을 적용할 수 있다. 이러한 결선방식의 적용은 일반적인 선형 부하에 대해서는 연구가 많이 되었지만 비선형부하를 갖는 시스템에 대해서는 연구가 부족하다. 특히 선형부하와 달리 비선형 부하는 고조파 성분이 크게 발생하여 3상 출력을 위해 추가적인 제어가 필요하다<sup>[1]</sup>. 이러한 고조파 성분들은 결선방식에 따라 전류의 흐름과 크기가 달라지기 때문에 각 소자에서 발생하는 손실의 차이를 발생시킬 수 있다. 따라서 비선형 부하에 적합한 필터 커패시터 결선이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 비선형 부하를 가지는 3상 4선식 4 leg 인버터에 적합한 필터 커패시터 결선방식을 제안하고자 한다. 적합한 필터 커패시터 결선방식을 제안하기 위해 각 커패시터 결선에 따라 필터를 설계한다. 설계된 필터를 적용하여 시뮬레이션을 진행하고 커패시터 결선방식 차이로 발생하는 시스템 특성 및 필터 커패시터와 N상에서 발생하는 손실 등을 비교·분석 한다.

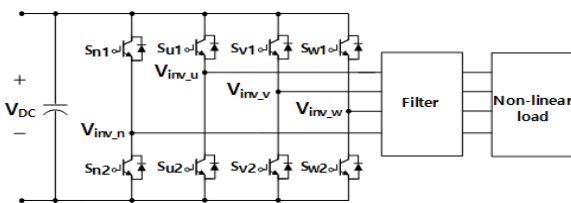


그림 1 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4-leg 인버터  
Fig. 1 3 phase 4 wire 4-leg inverter with Non-linear load.

표 1 3상 4선식 4-leg 인버터 시스템 사양  
Table 1 Specifications of the 3 phase 4 wire 4-leg inverter

시스템 사양			
입력전압	850 [V]	상전류	17~19 [Arms]
3상 부하 정격	10 [kW]	단상 부하 정격	1 [kW]
스위칭 주파수	10 [kHz]	$m_a$	0.8

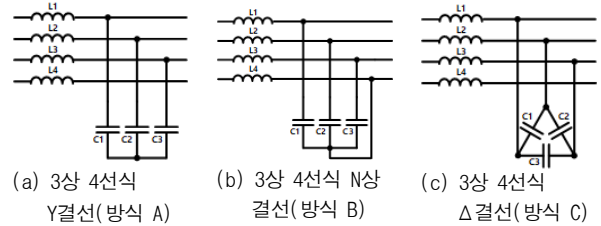


그림 2 필터 커패시터 결선방식  
Fig. 2 Configuration of filter capacitor.

### 2. 필터 커패시터 결선방식에 따른 비교·분석

#### 2.1 필터 커패시터 설계

그림 1은 3상 4선식 4 leg를 갖는 인버터 회로이며 시스템 사양은 표 1과 같다. 부하 조건은 3상 다이오드 정류기부하 10 kW, 220 V의 단상 다이오드 정류기부하 1 kW이다. 그림 2는 LC 필터에서 커패시터의 결선방식들을 나타낸다. (a)와 (c)는 커패시터가 각 상과 Y, Δ모양으로 결선된 방식이고 (b)는 (a)에서 커패시터의 중성점이 N상과 연결된 방식이다. 동일한 조건에서의 필터 설계를 위해 인덕턴스를 0.6 mH, 차단주파수는 1 kHz로 선정하고 필터 커패시터를 설계한다. 결선방식 A와 B의 필터 커패시터는 각 결선방식에 따른 등가회로를 통하여 설계하고, 방식 C의 커패시턴스는 방식 A에서 Y Δ 등가변환을 통하여 계산한다. 커패시턴스를 계산하기 위한 식은 (1), (2)와 같다.

$$C_Y = \frac{1}{L \cdot \omega_0^2} \quad (1)$$

$$C_\Delta = \frac{1}{3} C_Y \quad (2)$$

이때 L은 인덕턴스,  $\omega_0$ 는 차단주파수,  $C_\Delta$ 는 Delta

표 2 결선 방식에 따른 필터 커패시터  
Table 2 Filter capacitor for each method

필터 커패시터 선정			
필터 커패시터	Pilkor 社 Metallized Polypropylene Film Capacitor		
	방식 A	방식 B	방식 C
커패시턴스	45 [uF]	22 [uF]	15 [uF]
ESR	7.07 [mΩ]	10.85 [mΩ]	15.92 [mΩ]

표 3 N 상전류에 따른 코어  
Table 3 Core according to N-phase current

N 상 Core 선정			
	방식 A, C		방식 B
Core	Changsung 社 High flux core		
결선 방식	내경 [mm]	외경 [mm]	높이 [mm]
방식 A, C	24.13	39.88	14.48
방식 B	35.56	57.15	13.97

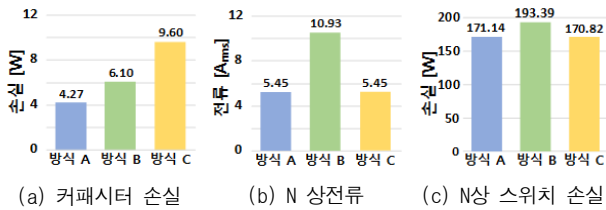


그림 3 필터 커패시터 결선 방식에 따른 차이  
Fig 3. Differences in types of filter capacitor connection.

결선에서의 커패시턴스, 그리고  $C_Y$ 는 Y결선에서의 커패시턴스를 의미한다.

위 수식을 통해 설계한 커패시턴스 값은 방식 A, B, C 순서로 42.2 uF, 21.2 uF, 14.1 uF이며 이를 실제 적용한 커패시터는 Pilkor 社 PCPW 255로 커패시턴스와 ESR (Equivalent series resistance)을 표 2에 나타내었다.

## 2.2 시뮬레이션 분석

각 결선 방식에 따라 나타나는 특성을 분석하기 위해 3상 4선식 4 leg 인버터 시스템에서 각 필터 커패시터 결선방식을 적용한 시뮬레이션을 진행 하였다. 동일한 조건의 비교를 위해 비선형 부하 제어는 적용하지 않았으며, 필터 커패시터에서 발생하는 손실을 비교하기 위해 식 (3)을 사용하였다<sup>[2]</sup>.

$$P_{Losses} = I_{ripple}^2 \cdot ESR \quad (3)$$

식 (3)을 이용하여 계산한 각 결선방식 별 커패시터 손실을 그림 3(a)에 나타내었다. 그림에 나타나듯이 방식 C의 손실이 가장 크게 나타나게 되는데, 방식 C는 방식 A와 같은 크기의 전류를 갖지만 방식 A보다 커패시터가 갖는 더 큰 ESR에 의해 손실이 많이 발생한다. 커패시터 결선 방식에 따른 추가적인 특성 분석을 위해 N상 전류의 크기를 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 각 결선방식에 따른 전류의 크기를 그림 3(b)에 나타내었으며, 전류의 파형은 그림 4와 같다. 방식 B에서 N 상 전류가 큰 이유는 방식 B의 필터 커패시터의 중성점을 N상과 직접 연결 함 으으로써 N상으로 필터링 된 고조파가 흘러들어가기 때문이다. 반면에 방식 A, C는 단상 부하에 의한 전류만 흘

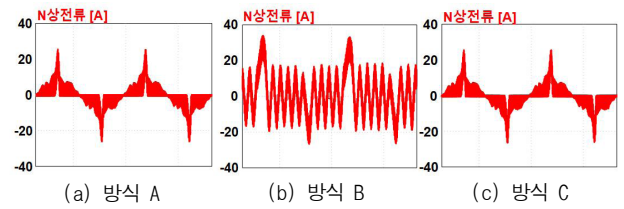


그림 4 방식에 따른 N 상전류  
Fig 4. N-phase current Waveforms according to method.

러 그림 4(a), (c)와 같은 파형이 생긴다.

앞서 측정된 N 상전류를 통해 N상 인덕터 필터의 코어를 설계하였으며 표 3에 각 결선방식에 따라 설계한 코어를 나타내었다. 표에서 나타나듯이 결선방식에 따라 N상 인덕터의 코어 설계가 달라지는데 이는 인덕터에 저장되는 에너지가 전류의 크기에 비례하여 증가하기 때문이다. 따라서 가장 큰 전류가 흐르는 방식 B의 코어가 가장 크게 설계 되며 방식 A, C는 전류 크기 차이가 크지 않아 동일한 크기의 코어로 설계된다.

N상의 전류 크기 차이는 N상의 스위치 손실 또한 달라지게 한다. 이를 비교하기 위해 결선방식에 따른 N상 스위치의 손실을 그림 3(c)에 나타내었다. 그림에서와 같이 방식 A, C의 N상으로 흐르는 전류는 비슷한 크기를 갖기 때문에 스위치 손실의 차이가 크지 않지만 방식 B의 고조파가 함유된 전류는 전류 크기를 증가시키기 때문에 스위치 손실이 다른 방식에 비해 높게 나타난다. 그림 3의 (c)는 스위치 손실을 나타낸다.

위의 분석 결과 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4 leg 인버터에서 방식 A가 커패시터의 용량 증가로 인해 부피가 커지는 단점을 갖지만 커패시터와 스위치에서 발생하는 손실과 N상 인덕터의 사이즈가 작게 설계되는 유리함을 확인할 수 있었다.

## 3. 결론

본 논문에서는 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4 leg 인버터에서 필터 커패시터의 결선방식에 따른 특성을 비교·분석 하였다. 비교·분석을 위해 동일한 인덕턴스를 가질 때, 각 결선방식에 따라 LC필터를 설계하여 커패시턴스용량을 비교하였다. 설계된 필터를 시스템에 적용하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였고 결과를 통해 커패시터의 손실과 N상 인덕터의 크기 및 스위치 손실을 분석하여 비선형 부하를 갖는 3상 4선식 4 leg 인버터에 적합한 결선방식을 제안하였다.

본 연구는 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원 받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20164030200980)

## 참고 문헌

[1] A. Skjellnes, "A UPS Inverter Specially Designed for Nonlinear Load," 1987 INTELEC 9th Int. IEEE Trans. Energy Convers., Stockholm, Sweden, Jun. 1987.  
[2] Texas Instruments, [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/an/slaa701a/slaa701a.pdf>