

3상 멀티레벨 인버터 출력노이즈 저감에 관한 연구

김수홍, 진강환, 김윤호
 중앙대학교 전력전자연구소

A Study on the Output Noise Reduction of 3-Phase Multilevel Inverter

Soo-Hong Kim, Kang-Hwan Jin, Yoon-Ho Kim
 Power Electronics Laboratory in Chung-Ang University

ABSTRACT

Since they use the low switching frequency in multilevel inverter systems, they generate the high low frequency harmonic components. Generally, LC filter is used at the output terminal of inverter systems to solve this problem. But it causes a voltage drop at the output terminal by use of damping resistors, and causes the problem in which system efficiency decreases due to power loss of the damping resistor.

In this paper, we proposed an output filter design method for NPC three-level inverter systems with low switching frequency. And we analyzed the efficiency of the proposed filter system, and the effectiveness of the proposed system is verified by simulation and experimental results.

1. 서론

멀티레벨 시스템은 고전압/대전력 산업응용 분야에 주로 사용되고 있으며, 동일한 스위칭 주파수에서 기존의 2-레벨 인버터에 비해 많은 레벨의 출력파형을 가지므로 정현적인 출력파형을 얻을 수 있다. 이들 멀티레벨 시스템은 NPC, 플라잉 커패시터, H-bridge cascaded의 세 형태로 구분되며, 이 중에서 NPC인버터 시스템이 그 구조적인 특성으로 인해 주로 사용되었다^[1]. 멀티레벨 시스템은 스위치의 직렬연결로 인해 dv/dt 를 감소시켜 EMI노이즈를 저감시킬 수 있으나, 낮은 스위칭 주파수에서 구동될 경우 여전히 출력단에 많은 고조파 성분을 포함하게 된다. 본 논문은 3상 3-레벨 NPC인버터가 낮은 스위칭 주파수하에서 구동될 경우 발생하는 고조파를 감소시키기 위한 출력단 필터 설계 방법을 연구하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 이를 증명하였다.

2. 멀티레벨 인버터 시스템

2.1 3상 NPC 3-레벨 인버터

그림 1은 3상 NPC 3-레벨 인버터 시스템을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 NPC 3-레벨 인버터는 인버터 입력단에 두 개의 커패시터(C1, C2)를 가지며, 각상은 4개의 스위치와 2개의 다이오드로 구성된다. 인버터 출력단은 필터 시스템과 RL 부하로 구성되었다.

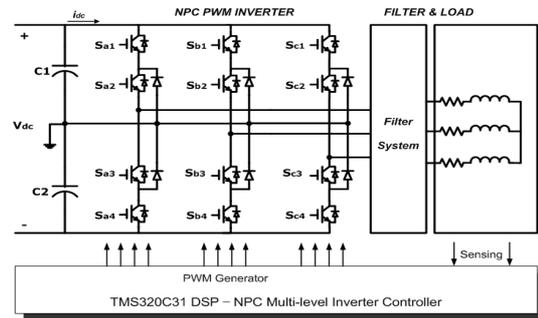


그림 1 3상 NPC 인버터 시스템
 Fig. 1 Three-phase NPC inverter system

2.2 인버터 출력단 필터설계

그림 2는 스위칭 노이즈 제거를 위한 LC트랩필터와 고조파 억제에 위한 LCR필터가 중속 접속된 필터 시스템을 보여주고 있다. 이 같은 회로 형태는 시스템의 노이즈 억제 및 제동저항 크기 감소에 의한 필터효율 증가, 필터 인덕터의 크기감소와 같은 효과를 얻을 수 있다^[2]. 그러나 차수가 증가하면 필터의 통과/저지 특성이 좋아지지만 삽입손실(Insertion loss)과 군지연(Group delay)이 발생하고 필터의 크기도 증가하게 되므로 필터 설계에 주의를 기울여야 한다.

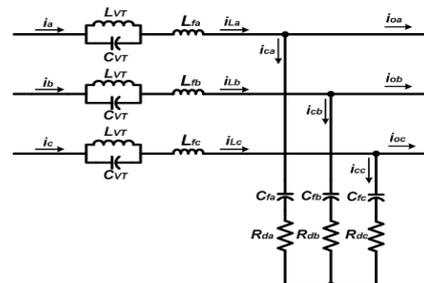


그림 2 인버터 출력 필터 회로
 Fig. 2 Inverter output filter circuit

LC트랩필터의 임피던스는 식(1)과 같이 표현된다.

$$Z_{TF} = \frac{(1/C_{VT})s}{s^2 + (1/L_{VT}C_{VT})} \quad (1)$$

LC트랩필터의 차단주파수 설정은 인버터 시스템의 차

단주파수와 동일한 값을 선택하면 되고, 원하는 차단주파수를 가진 적절한 LC값을 선택하여 스위칭주파수대역에서 무한대의 임피던스를 나타내도록 하면 된다. 다만 3레벨 인버터에서 차단주파수는 스위칭 주파수의 2배가 되므로 LC트랩필터의 차단주파수 값을 스위칭 주파수의 2배인 값이 되도록 LC값을 설정해 주어야 한다. LCR필터 시스템의 전달함수는 식(2)와 같이 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_a} = \frac{(R_d/L_f)s + (1/L_f C_f)}{s^2 + (R_d/L_f)s + (1/L_f C_f)} \quad (2)$$

여기서, 차단주파수 $\omega_o = 1/L_f C_f$ 이고, LC필터의 공진을 억제하기 위한 계동비 $\zeta = R_d/(2\sqrt{L_f/C_f})$ 로 나타낼 수 있다. LC트랩필터 및 LCR필터가 혼합되어 연결된 경우 식(3)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{C_{VT}} \int i_{CVT} dt + L_f \frac{di_{LVT}}{dt} \\ &+ \frac{1}{C_f} \int i_a dt + R_d i_a \\ \left(\because L_{VT} \frac{di_{LVT}}{dt} &= \frac{1}{C_{VT}} \int i_{CVT} dt \right) \\ V_o &= \frac{1}{C_f} \int i_a dt + R_d i_a \end{aligned} \quad (3)$$

LCR출력필터의 출력인덕터 임피던스는 기본주파수에서 부하단 임피던스의 비에 의해 결정되며, 부하단 임피던스의 5%보다 작아야 한다. 필터 커패시터는 기본주파수에서 커패시터를 통해 흐르는 전류가 정격 전류의 10%보다 작은 값을 갖도록 설계해야 한다^[3]. LC트랩필터의 경우, 스위칭 주파수에 의해 발생하는 부하 출력단 전압고조파를 감소시키기 위해 $Q_l \geq 10$ 의 근사적 기법을 이용하여 트랩필터의 파라미터를 구할 수 있다^[2].

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

V_{dc}	120 [Vdc]	$R_{d[a-c]}$	6 [Ω]
L_{VT}	2.8 [mH]	R_{load}	20 [Ω]
C_{VT}	0.4 [μF]	L_{load}	6 [mH]
$L_{f[a-c]}$	2 [mH]	f_{sw}	2.4 [kHz]
$C_{f[a-c]}$	16 [μF]	f_c	1.2 [kHz]

표 1은 앞에서 제시된 필터 설계방법과 식(1)~(3)을 이용하여 계산된 시스템 파라미터를 보여준다. 인버터 출력단은 RL부하로 구성된 경우를 가정하여 계산된 값이다. 차단주파수는 필터 인덕터의 크기와 제동저항에서 소비되는 전력을 감소시키기 위해 800Hz에서 1200Hz로 증가시켰다. LC트랩필터와 병렬 접속된 경우 출력단 전압 및 전류 고조파는 차단주파수를 증가 시에도 큰 변화가 없음을 확인하였

다.

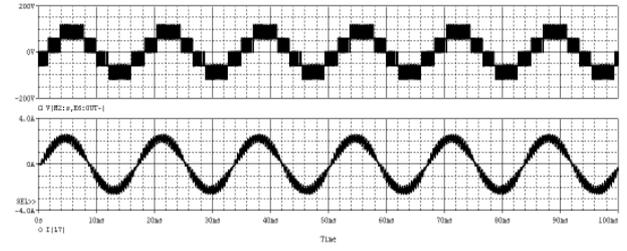


그림 3 인버터 선간전압과 상전류파형(Without filter)
Fig. 3 Line-to-line voltage and phase current waveform of the inverter(Without filter)

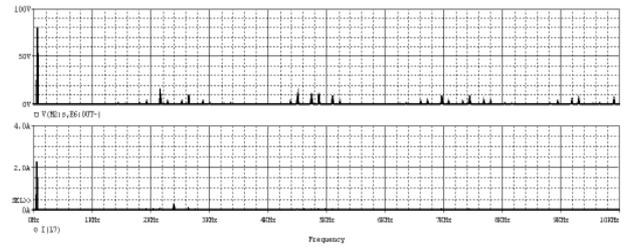


그림 4 FFT분석 (Without filter)
Fig. 4 FFT analysis (Without filter)

그림 3은 3상 NPC인버터 출력단에 필터를 연결하지 않은 경우의 출력 선간전압, 상전류를 보여주고 있다. 그림 4는 그림 3의 출력파형 FFT분석 결과를 보여준다. 멀티레벨 인버터를 사용한 경우 기존의 2레벨 인버터에 비해 고조파 파형이 다소 감소되나 그림 4의 FFT분석에서와 같이 여전히 많은 양의 고조파를 포함하고 있다.

그림 5와 그림 6은 필터를 연결한 경우 인버터 출력단 선간전압, 상전류 및 FFT분석 결과를 보여준다. 제안된 필터를 인버터 출력단에 연결한 경우 전압 및 전류 고조파가 현저히 감소됨을 알 수 있고, 인버터 스위칭 주파수에 의해 발생하는 고조파 또한 LC트랩필터를 연결함으로써 감소되었음을 확인할 수 있다.

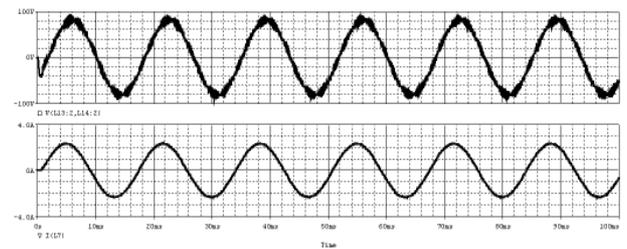


그림 5 인버터 선간전압과 상전류파형(With filter)
Fig. 5 Line-to-line voltage and phase current waveform of the inverter(With filter)

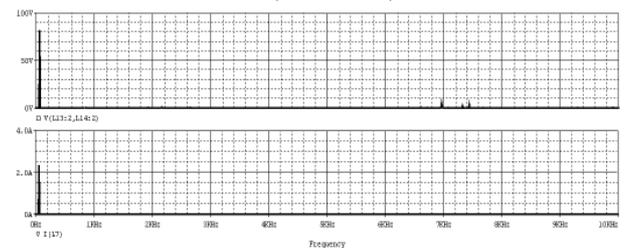


그림 6 FFT분석 (With filter)
Fig. 6 FFT analysis (With filter)

그림 7은 LC/LCR필터를 설치한 경우의 주파수 특성을 보여주고 있다. LCR필터의 차단주파수 $1.2kHz$ 와 LC트랩 필터의 공진주파수 $4.8kHz$ 대역에서 필터링 특성이 우수함을 알 수 있다.

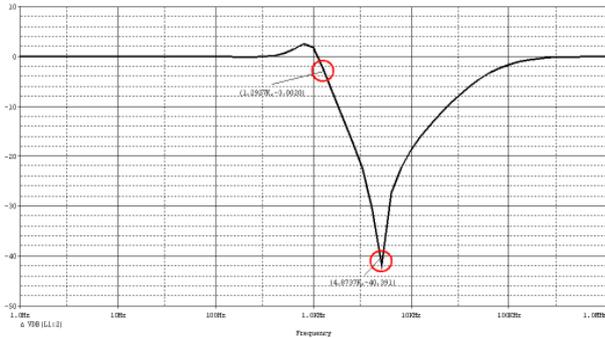


그림 7 LC/LCR필터 주파수 특성
Fig. 7 Frequency characteristic of the LC/LCR filter

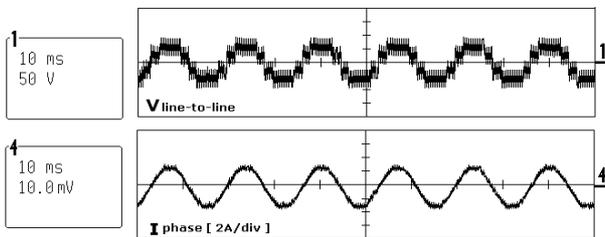


그림 8 인버터 선간전압과 상전류파형(Without filter)
Fig. 8 Line-to-line voltage and phase current waveform of the inverter(Without filter)

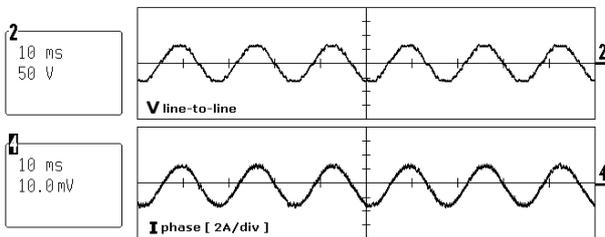


그림 9 인버터 선간전압과 상전류파형(With filter)
Fig. 9 Line-to-line voltage and Phase current waveform of the inverter(With filter)

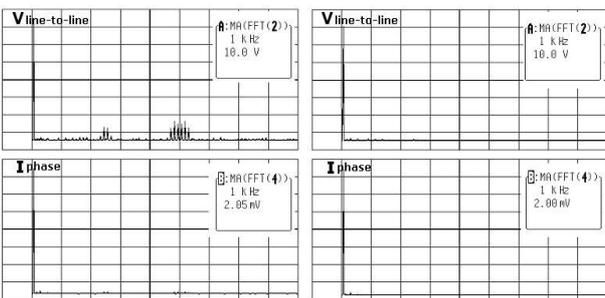


그림 10 FFT분석
Fig. 10 FFT analysis

그림 8은 인버터 출력단에 필터를 연결하지 않은 경우 인버터 출력선간전압 및 상전류를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과와 동일하게 많은 고조파 성분을 포함하고 있다. 그림 9는 인버터 출력단에 제안된 필터를 연결한 경우 출력파형을 보여준다. 필터를 연결하지 않은 경우와 비교하여 고조파 성분들이

필터를 연결해 줌으로써 감소된 것을 알 수 있다. 그림 10은 필터를 연결하지 않은 경우와 연결한 경우의 출력 선간전압 및 상전류 FFT분석 결과를 보여준다. FFT분석결과도 시뮬레이션 결과와형과 동일하게 고조파가 현저히 감소됨을 보여준다.

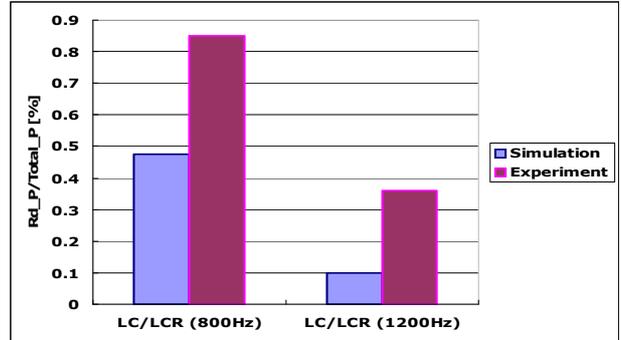


그림 11 CR단 제동저항의 소비전력
Fig. 11 Power loss of the damping resistor at CR side

그림 11은 [제동저항(R_d)의 소비전력/실효전력] $\times 100$ [%] 값을 보여준다. 일반적으로 $800Hz$ 대역에서 설정된 차단주파수인 경우에 비해 LC트랩필터를 설치하여 차단주파수를 $1.2kHz$ 대역으로 변경하여 제동저항값을 작게해 줌으로써 필터단에서 소비되는 전력을 감소시켜 전체 시스템 효율을 증가시킬 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 낮은 주파수로 구동되는 3상 NPC 3레벨 인버터에서 출력단 전압 및 전류 고조파 감소를 위한 출력단 필터 설계방법을 제시하였다. 그리고 제안된 방법을 통하여 필터단에 사용되는 제동저항값의 최적 설계를 통해 필터단에서 소비되는 전력을 감소시켜 시스템 효율을 증가시킬 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter", IEEE Trans. On Industrial Applications, Vol. 17, No. 5, pp. 518-523, 1981.
- [2] 김수홍, 김윤호, 이재학, "고조파 저감을 위한 단상 NPC 멀티레벨 PWM 인버터의 LC트랩 필터 설계" 전력전자학회 논문지 제11권 제4호, 2006. 8, pp. 313 ~ 320
- [3] Chen Xiyu, Yan Bin, Gao Yu, "The Engineering design and optimization of inverter output RLC filter in AC motor drive system", IECON 02, Vol. 1, 5-8 Nov. 2002 pp:175 - 180.