

# 3상 NPC 3레벨 인버터 출력노이즈 저감에 관한 연구

金洙弘\*, 陳康煥\*\*, 金倫鎬†

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

Soo-Hong Kim, Kang-Hwan Jin and Yoon-Ho Kim

### 요 약

멀티레벨 인버터 시스템에 낮은 스위칭 주파수가 사용되면, 이들 멀티레벨 인버터 시스템은 큰 값의 저 주파수 고조파 성분을 발생한다. 일반적으로 이러한 문제를 해결하기 위해 LC필터가 인버터 시스템의 출력단에 사용되었다. 그러나 LC필터를 사용한 경우 제동저항의 사용에 의한 전압강하가 발생하고, 제동저항의 전력손실로 인해 시스템의 효율이 감소하는 문제를 야기하게 된다.

본 논문에서는 낮은 스위칭 주파수를 갖는 3상 NPC 3레벨 인버터를 위한 출력 필터 설계방법을 제안하였다. 그리고 제안된 필터 시스템의 효율을 분석하였고, 제안된 시스템의 효과는 시뮬레이션과 실험결과를 통하여 입증하였다.

### 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.

**Key Words** : NPC 3-level inverter, Output filter, Harmonic reduction

### 1. 서 론

멀티레벨 시스템은 고전압/대전력 산업응용 분야에 주로 사용되고 있으며, 동일한 스위칭 주파수에서 기존의 2-레벨 인버터에 비해 많은 레벨의 출력과형을 가지므로 정현적인 출력과형을 얻을 수 있다. 이들 멀

티레벨 시스템은 NPC(neutral point clamped), 플라잉 커패시터(flying capacitor), H-bridge cascaded의 세 형태로 구분되며, 이중에서 NPC컨버터 시스템이 그 구조적인 특성으로 인해 주로 사용되었다<sup>[1][2]</sup>. 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<sup>[3][4]</sup>.

본 논문은 낮은 스위칭 주파수를 갖는 3상 NPC 3레벨 인버터의 출력단에 LC트랩 및 LCR필터의 설계방법을 제안하였다. 제안된 LC트랩필터의 설치로 인해 스위칭주파수에 의한 고조파를 제거하였으며, LCR필

†교신저자 : 정회원, 중앙대 전자전기공학부 교수

E-mail : yhkim@cau.ac.kr

\*정회원, 중앙대 대학원 전자전기공학부 박사과정

\*\*학생회원, 중앙대 대학원 전자전기공학부 석사과정

접수일자 : 2007. 8. 16 1차 심사 : 2007. 10. 22

심사완료 : 2007. 11. 2

터의 차단주파수를 증가하여 제동 저항값 변화에 따른 필터 시스템의 소비전력을 분석하였다. 또한 제시된 필터의 설치 여부에 따른 출력전압 및 전류 고조파를 분석 및 차단주파수 변경에 따른 필터 시스템의 효율을 분석하였다. 제안된 시스템의 성능은 시뮬레이션과 실험결과를 통해 확인하였다.

## 2. 멀티레벨 PWM인버터 시스템

### 2.1 3상 NPC 3-레벨 인버터

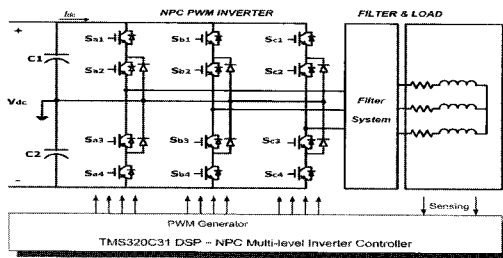


그림 1 3상 NPC 인버터 시스템  
Fig. 1 Three-phase NPC inverter system

그림 1은 필터 시스템을 갖는 3상 NPC 3레벨 인버터 시스템을 보여준다. NPC 3레벨 인버터는 입력단에 두 개의 커패시터( $C_1$ ,  $C_2$ )를 가지며, 각상은 4개의 스위치와 2개의 클램핑 다이오드로 구성되며, 출력단은 필터 시스템과  $RL$ 부하로 구성되었다. 입력전압은 직렬 연결된 두 개의 대용량 커패시터  $C_1$ ,  $C_2$ 에 의해 3레벨로 나타나게 되며, 두 개의 커패시터 사이의 중점은 중성점(neutral point)으로 정의된다. NPC 멀티레벨 인버터의 동작은  $a$ 상의 경우 스위치  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ 가 ON되고  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ 가 OFF되면  $1/2 V_{dc}$  전압, 스위치  $S_{a2}$ ,  $S_{a3}$ 가 ON되고  $S_{a1}$ ,  $S_{a4}$ 가 OFF되면 영전위의 전압이 인가된다. 또한 스위치  $S_{a3}$ ,  $S_{a4}$ 가 ON될 때  $S_{a1}$ ,  $S_{a2}$ 가 OFF되면 중성점에 대하여  $a$ 상에는  $-1/2 V_{dc}$ 의 전압이 인가된다<sup>[5]</sup>.

### 2.2 인버터 출력단 필터 설계

그림 2는 스위칭 노이즈 제거를 위한 LC트랩필터와 고조파 억제를 위한 LCR필터가 중속 접속된 필터 시스템을 보여준다. 제안된 시스템은 노이즈 억제 및 제동저항기 감소에 의한 필터효율 증가와 같은 효과를 얻을 수 있다. 그러나 효과적인 필터링을 위해 여러 개의 필터가 추가될 경우, 차수 증가에 따른 필터의 통과/저지 특성이 좋아지지만 삽입손실(Insertion loss)

과 군지연(Group delay)이 발생하고, 필터의 크기도 증가하게 되므로 필터 설계에 주의를 기울여야 한다.

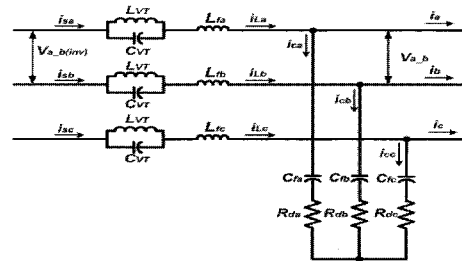


그림 2 인버터 출력 필터 회로  
Fig. 2 Inverter output filter circuit

일반적인 LCR필터 시스템의 전달함수는 식(1)과 같이 표현된다.

$$\frac{V_o}{V_a} = \frac{2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2}{s^2 + 2\zeta\omega_0 s + \omega_0^2} \quad (1)$$

여기서, 차단주파수  $\omega_o = 1/L_f C_f$ 이고, LC필터의 공진을 억제하기 위한 제동비  $\zeta = R_d / (2\sqrt{L_f / C_f})$ 로 나타낼 수 있다.

LCR필터 설계시, 차단주파수는 원하는 감쇄비를 얻기 위해 충분히 낮아야 하지만, 낮은 차단주파수는 필터 구성 요소의 큰 파라미터 값과 크기를 요구한다. 이것은 기본주파수에서 필터 커패시터 가치를 통하여 흐르는 전류 양의 증가와 제동저항의 소비전력 증가를 의미한다. LCR필터의 인덕터 임피던스는 기본주파수에서 부하단 임피던스의 비에 의해 결정되며, 필터 인덕터 양단의 전압강하를 고려하여 필터 인덕터의 임피던스는 부하단 임피던스의 5%보다 작은 값을 갖도록 설계하여야 한다. 필터 커패시터는 기본주파수에서 필터 커패시터를 통해 흐르는 전류가 정격 전류( $i_{o-rat}$ )의 10%보다 작은 값을 갖도록 설계한다<sup>[6]</sup>.  $RL$ 부하로 구성된 부하 임피던스( $Z_{load}$ )는 식(2)와 같다.

$$Z_{load} = \sqrt{\omega^2 L_o^2 + R_o^2} \quad (2)$$

기본주파수에서 인덕터 양단 전압강하를 고려하여 인덕터의 임피던스( $Z_{L_f}$ )가 부하 임피던스( $Z_{load}$ )의 5% 이내의 값을 갖도록 설계하면 식(3)~식(4)와 같다.

$$Z_{L_f} = \sqrt{\omega^2 L_f^2 + R_l^2} \quad (3)$$

$$V_{L_f} \leq 0.05 \cdot V_{o-rat} \quad (4)$$

여기서,  $V_{o-rat}$ 는 부하단 정격전압을 나타낸다. 설정된 차단주파수에 따른 필터 커패시터( $C_f$ )의 값은 식(5)를 이용하여 계산된다.

$$f_c = 1/(2\pi \sqrt{L_f C_f}) \quad (5)$$

또한 LCR필터의 CR단 임피던스( $Z_{C_f R_d}$ )를 구하여, 필터 커패시터를 통하여 흐르는 전류가 정격전류의 10%보다 작은 값을 갖도록 식(5)와 식(6), 식(7) 고려하여 필터 커패시터 값을 선택할 수 있다.

$$Z_{C_f R_d} = \sqrt{(1/(\omega^2 C_f^2)) + R_d^2} \quad (6)$$

$$i_c \leq 0.1 \cdot i_{o-rat} \quad (7)$$

식(2)~식(7)에 의해 얻어진 필터 커패시터와 필터 인덕터 파라미터에 의한 주파수 특성곡선을 이용하여 원하는 제동비( $\zeta$ )를 선택한 후 제동저항 값을 구한다.

제동비는 1보다 작은 값을 선택하여 높은 주파수에서도 일정한 감쇄비를 갖도록 한다. 제동비는 식(8)에 의해 계산된다.

$$\zeta = R_d / (2\sqrt{L_f / C_f}) \quad (8)$$

LCR필터의 각 파라미터를 선정된 후 스위칭 주파수에 의해 발생하는 전압고조파를 제거하기 위한 LC트랩필터의 파라미터를 결정하여야한다. 그림 2의 인덕터( $L_{VT}$ )와 커패시터( $C_{VT}$ )는 인버터 시스템의 스위칭에 의해 발생하는 전압고조파를 제거하기 위해 설치된 LC트랩필터를 나타낸다. 스위칭 주파수에서 무한대의 임피던스를 갖도록 적절한 필터 파라미터를 설정해 주어야 하며, 3레벨 인버터의 경우 코너주파수( $f_{tc}$ )는 캐리 주파수의 2배가 되는 값을 선택하여야 한다. LC트랩필터의 코너주파수는 식(9)에 의해 결정된다.

$$f_{tc} = 1/(2\pi \sqrt{L_{VT} C_{VT}}) \quad (9)$$

병렬공진회로에 대한 분석은 직렬공진회로의 경우에 비해 매우 복잡하므로<sup>[7]</sup>, 수식의 간략화와 분석의 단순화를 위해 LC병렬공진회로는 코일의 선택계수( $Q_l$ )를 이용한 근사적 기법을 적용하였다. LC탱크회로에서 인

덕터의 내부 저항( $R_l$ )을 고려하여  $Q_l \geq 10$ 의 근사적 기법을 적용하면 인덕터의 선택도는 식(10)과 같이 계산된다.

$$Q_l = X_L / R_l \quad (10)$$

식(9)와 식(10)을 이용하여 탱크회로 파라미터 선정시, 내부저항 값의 증가와 인덕터의 크기감소에 의해 공진임피던스의 크기가 변화되므로 원하는 대역폭에서 충분한 차단효과를 가질 수 있도록 필터 파라미터를 선정하여야 한다.

### 2.3 필터 설계 예시

2.2절에 제시된 필터 설계방법을 사용하여 각 시스템의 파라미터 성분을 구할 수 있다.

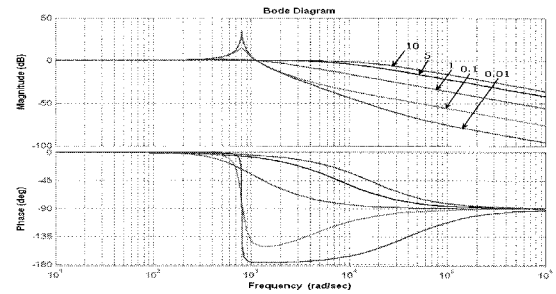


그림 3 LCR필터회로의 주파수 특성

Fig. 3 Frequency characteristics of LCR filter circuit

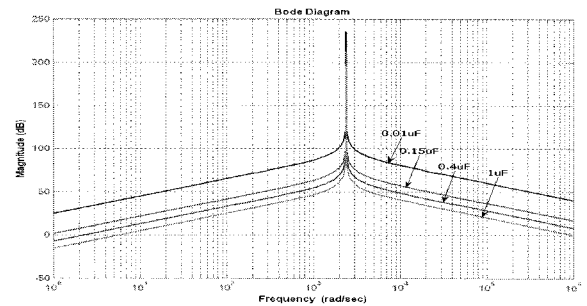


그림 4 LC트랩 필터회로의 주파수 특성

Fig. 4 Frequency characteristics of LC trap filter circuit

본 논문에서는 부하단 저항  $16\Omega$ , 인덕턴스 부하  $6mH$ 를 사용하였으므로 식(2)와 식(6)을 사용하여 기본 주파수  $60Hz$ 에서 합성 임피던스( $Z_T$ )를 구하면  $Z_T = 16\Omega$ 이다. 따라서 LCR필터의 인덕터 임피던스 최대값은 식(3)~(4)를 사용하여  $16 \times 5\% \approx 0.8\Omega$ 이고, 최대 인덕터 값은  $2mH$ 가 된다. LCR필터의 차단

주파수를 800Hz로 설정하면 커패시턴스는 식(5)를 사용하여 구할 수 있으며, 이때의 필터 커패시턴스 최대값은  $20\mu F$ 이다. 그림 3은 LCR필터회로의 파라미터와 식(8)에 의해 계산된 제동비에 따른 주파수 특성을 보여주며, 제동비가 증가하면 고주파수 영역에서 일정한 감쇄비를 갖게 되므로 원하는 차단주파수 대역에서 적절한 필터링 효과를 얻을 수 없게 된다. LC트랩필터 파라미터 설정의 경우, 트랩필터 인덕터는 식(10)을 사용하여 구할 수 있다. 본 논문에 사용된 인덕터의 등가저항이  $0.105\Omega$ 임을 감안하면 필터 인덕터 파라미터 값은  $2.8mH$ 임을 알 수 있다. 트랩필터의 공진주파수는 캐리어 주파수의 2배가 되는  $4.8kHz$ 이므로 식(9)를 사용하여 트랩필터의 커패시터 값을 얻을 수 있다<sup>[3]</sup>. 그림 4는 트랩필터의 필터 커패시터 값 변화에 따른 주파수 특성을 보여주고 있다. 이 경우 기본주파수와 코너주파수 주위에서 충분한 밴드폭을 갖도록 필터 커패시터 값을 선택하면 된다. 본 논문에서는 공진주파수와 밴드폭을 고려하여  $0.4\mu F$ 을 선택하였다. 그림 5는 설계된 필터 파라미터들을 이용하여 LC트랩과 LCR필터가 종속 연결된 시스템의 주파수 특성 곡선을 보여주고 있다. LCR필터의 차단주파수 800Hz와 LC트랩필터의 공진주파수 4.8kHz대역에서 필터링 특성이 우수함을 알 수 있다.

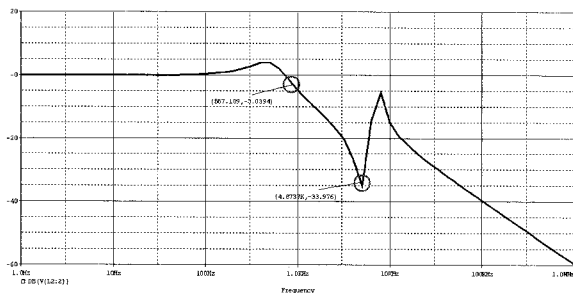


그림 5 LC/LCR필터의 주파수 특성곡선  
Fig. 5 Frequency characteristics of LC/LCR filter

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 6은 필터가 없는 경우의 부하 선간전압 및 상전류 파형을 보여주고 있다. 필터가 없는 경우 멀티레벨의 특성에 의해 계단파 출력파형으로 인해 정현파에 근접함을 확인할 수 있으나, 여전히 많은 고조파를 포함하고 있음을 알 수 있다. 그림 7은 LCR필터를 연결하였을 경우 부하 선간전압 및 상전류 출력파형을 보여준다. 그림 6과 비교하였을 때 전압 및 전류 고조파

가 다소 감소되었으나, 여전히 다수의 고조파 성분을 포함하고 있음을 알 수 있다.

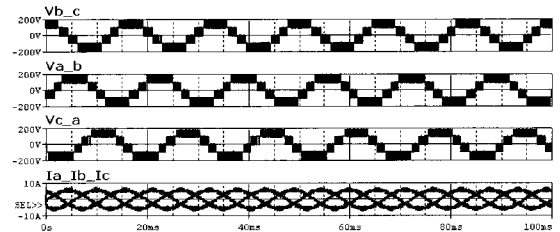


그림 6 부하 선간전압-상전류 출력파형(without filter)  
Fig. 6 Line-to-line voltage and phase current output waveforms of the load(without filter)

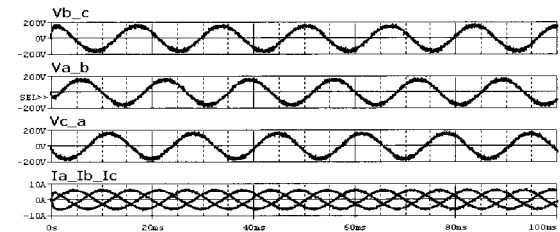


그림 7 부하 선간전압-상전류 출력파형(with LCR filter)  
Fig. 7 Line-to-line voltage and phase current output waveforms of the load(with LCR filter)

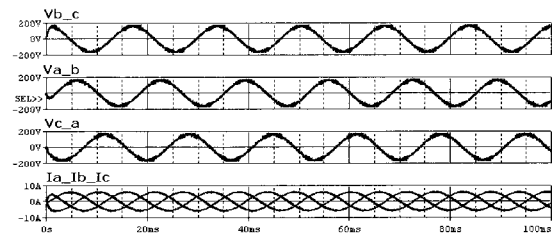


그림 8 부하 선간전압-상전류 출력파형(with LC/LCR filter)  
Fig. 8 Line-to-line voltage and phase current output waveforms of the load(with LC/LCR filter)

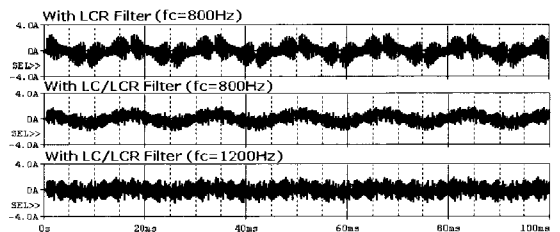


그림 9 LCR필터의 CR단 전류  
Fig. 9 Current through CR branch of LCR filter

그림 8은 LC트랩/LCR필터를 연결한 경우 인버터 선간전압 및 상전류 출력파형을 보여준다. 제안된 LC

트랩/LCR필터를 인버터 출력단에 연결한 경우 전압 및 전류 고조파가 현저히 감소함을 시뮬레이션 결과를 통해 확인하였다. 그림 9는 LCR필터, LC트랩/LCR필터( $f_c = 800Hz$ ), LC트랩/LCR필터를 설치한 경우( $f_c = 1200Hz$ )의 LCR필터 CR단을 통하여 흐르는 전류를 보여준다. 제안된 필터를 설치하고 차단주파수를 증가시킨 경우 제동저항을 통하여 흐르는 전류가 감소함을 알 수 있다.

#### 4. 실험 결과

그림 10과 그림 11은 각각 필터를 설치하지 않은 경우 부하 선간전압 및 상전류 출력파형과 인버터 출력 선간전압( $V_{a_b(inv)}$ ), 부하 출력 선간전압( $V_{a_b}$ ), 상전류( $I_a$ ) FFT분석결과를 보여준다. 시뮬레이션결과와 동일하게 많은 고조파를 포함하고 있음을 알 수 있다.

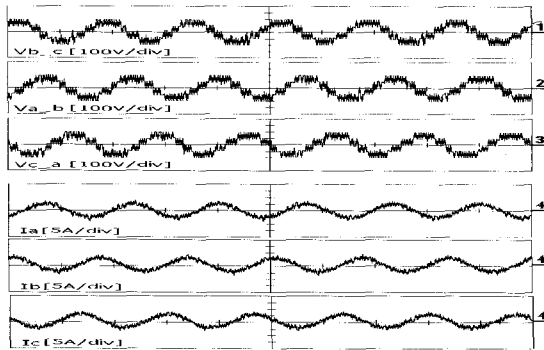


그림 10 부하 선간전압-상전류 출력파형(without filter)  
Fig. 10 Line-to-line voltage and phase current output waveforms of the load(without filter)

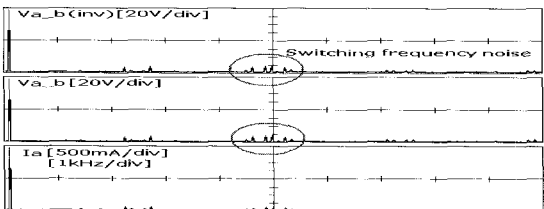


그림 11 FFT분석(without filter)  
Fig. 11 FFT analysis(without filter)

그림 12와 13은 각각 LCR필터를 사용한 인버터 출력 선간전압( $V_{a_b(inv)}$ ), 부하 출력 선간전압( $V_{a_b}$ ), 상전류( $I_a$ ) 출력파형과 FFT분석결과를 보여준다. 필터를 사용하지 않은 경우에 비해 전압 및 전류고조파 성분이 감소함을 보여준다. 그림 14는 제안된 LC트랩 및

LCR출력필터( $f_c = 800Hz$ )를 설치한 경우의 인버터 출력 선간전압( $V_{a_b(inv)}$ ), 부하 출력 선간전압( $V_{a_b}$ ), 상전류( $I_a$ ) FFT분석결과를 보여준다. 제안된 필터의 사용에 의해 부하 출력전압 및 전류 고조파가 현저히 감소됨을 알 수 있다.

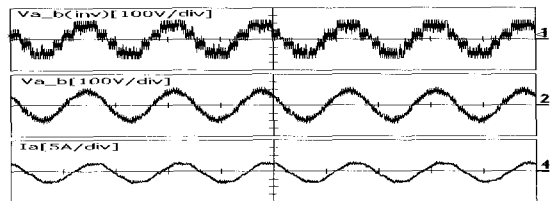


그림 12 선간전압 및 상전류 파형(with LCR filter)  
Fig. 12 Waveforms of line-to-line voltage, phase current(with LCR filter)

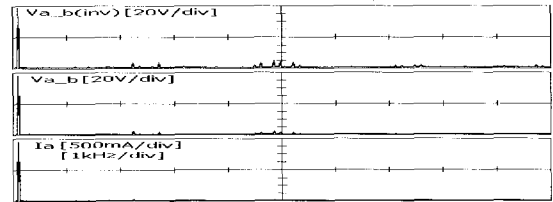


그림 13 FFT분석(with LCR filter)  
Fig. 13 FFT analysis(with LCR filter)

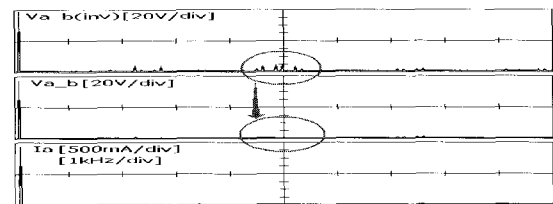


그림 14 FFT분석(with LC/LCR filter)[ $f_c = 800Hz$ ]  
Fig. 14 FFT analysis(with LC/LCR filter)

그림 15는 제안된 LC트랩 및 LCR출력필터( $f_c = 1200Hz$ )를 설치한 경우의 인버터 선간전압( $V_{a_b(inv)}$ ), 부하 선간전압( $V_{a_b}$ ), 상전류( $I_a$ ) FFT분석결과를 보여준다. 그림 14의 경우와 비교하여 필터링 성능에 큰 차이는 없음을 알 수 있다. 그림 16은 LCR필터 및 LC트랩/LCR필터를 설치한 경우 CR단을 통하여 흐르는 전류파형을 보여주고 있다. 제안된 필터를 설치하고 차단주파수를 증가함으로써 CR단 유입 전류를 감소시킬 수 있음을 알 수 있다. 그림 17은 LC/LCR필터를 연결하고 차단주파수 변화에 따른 제동저항 소비 전력비율을 보여주고 있다. 실제 설계된 저항값 LC트랩/LCR필터를 설치하고 차단주파수를 증

가하여 제동 저항값을 증가시킴으로써 필터시스템의 소비전력을 감소시킴을 알 수 있다.

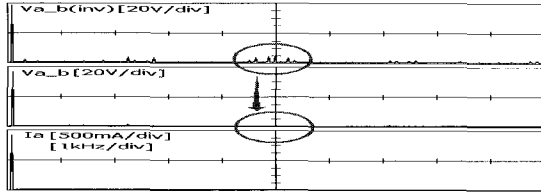


그림 15 FFT분석(with LC/LCR filter) [ $f_c = 1200Hz$ ]  
Fig. 15 FFT analysis (with LC/LCR filter)

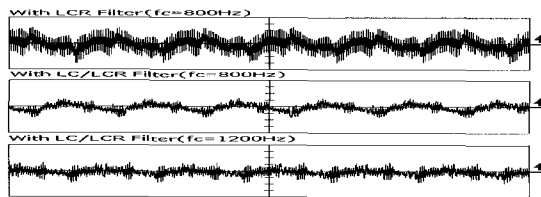


그림 16 LCR필터의 CR단 전류 [1A/div]  
Fig. 16 Current through CR branch of LCR filter

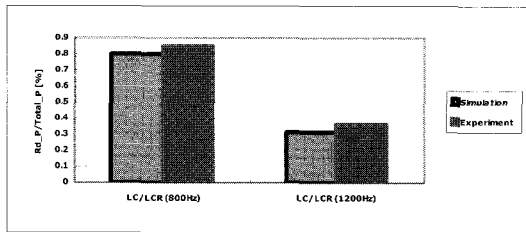


그림 17 CR단 제동저항의 소비전력  
Fig. 17 Power loss of the damping resistor at CR side

### 5. 결 론

본 논문은 낮은 스위칭 주파수로 구동되는 3상 NPC 3레벨 인버터의 출력필터 설계방법을 제안하였다. 또한, 각 필터 파라미터의 설계예시를 보였으며, 제안된 필터를 설치하고 LCR필터의 차단주파수 변화에 따른 필터 시스템 효율증가 방법을 시뮬레이션과 실험에 실제 적용하여 그 타당성을 입증하였다. LC트랩필터와 LCR필터를 종속 연결하여 사용함으로써 부하 출력단 전압 및 전류 고조파를 현저히 감소시켰고, 제동저항에서 소비되는 에너지를 감소시킴으로써 시스템의 효율을 증가시킬 수 있었다.

### 참 고 문 헌

[1] A. Nabae, I. Takahashi, H. Akagi, "A new neutral-

point-clamped PWM inverter", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 17, No. 5, pp. 518-523, 1981.

[2] Jose Rodriguez, Jih-Sheng Lai, Fang Zheng Peng, "Multilevel inverters: A survey of topologies, controls, and applications", *IEEE Trans. on Ind. Elec.*, vol. 49, pp. 724-738, 2002.

[3] 김수홍, 김윤호, 이재학, "고조파 저감을 위한 단상 NPC 멀티레벨 PWM 인버터의 LC트랩 필터 설계" *전력전자학회 논문지* 제11권 제4호, pp. 313-320, 2006.

[4] Hanigovszki. N., Poulsen. J., Blaabjerg. F., "A novel output filter topology to reduce motor overvoltage", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 40, pp. 845-852, 2004.

[5] Jih Sheng Lai, Fang Zheng Peng, "Multilevel converters: A new breed of power converters", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 32, pp. 509-517, 1996.

[6] 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, pp. 175- 180, 2002.

[7] Jung-Hui Cheng, Witulski. A.F., "Simple design of selected 3-element converters by scaling the solution of the LC parallel resonant converter", *APEC '96*, vol. 1, pp. 284-290, 1996.

### 저 자 소 개



#### 김수홍(金洙弘)

1976년 8월 11일생. 2002년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2004년 중앙대 전자전기공학부 대학원 졸업(석사). 현재 동 대학원 전자전기공학부 박사과정.



#### 진강환(陳康煥)

1979년 6월 29일생. 2006년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정.



#### 김윤호(金倫鎭)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(공학). 2003년 당 학회 회장 역임. 현재 중앙대 전자전기공학부 교수. 당 학회 교문.