

출력 전압 고조파 저감을 위한 LC 필터설계

한동엽, 김성민
한양대학교

LC filter design for reducing output voltage harmonics

Dong Yeob Han, Sungmin Kim
Hanyang University

ABSTRACT

본 논문은 PWM에 의한 전압 고조파를 분석하여 LC 필터를 설계하는 방안을 제안한다.

전압형 인버터는 PWM 방식을 이용하여 출력전압을 합성하며, PWM에 의한 전압 고조파는 직류단 전압, Modulation index, Deadtime 등에 의해서 결정된다. 출력 전압 고조파와 PWM 전압고조파와의 관계를 풀어 LC 필터를 설계한다. 제안된 방법으로 설계된 LC 필터는 시뮬레이션을 통해 설계의 타당성을 확인하였다.

1. 서론

태양광, 풍력과 같은 신재생 에너지 시스템에서 전력을 제어하기 위하여 전압형 인버터가 주로 사용된다. 전압형 인버터는 PWM을 이용하여 전압을 합성하며, PWM에 의한 전압 고조파는 직류단 전압, Modulation index, Deadtime 등에 의해서 결정된다. PWM에 의한 전압고조파는 스위칭 주파수의 정수배 주변으로 전압 고조파가 나타난다.^[1-2]

출력필터에는 주로 LC나 LCL 수동형 필터를 주로 사용한다. 본 논문은 PWM에 의한 전압 고조파를 분석하여 LC 필터를 설계하는 방법을 제안한다. 시뮬레이션을 통해 목표로 하는 전압고조파가 설계되는지 확인한다.

2. PWM 전압 고조파의 분석 및 필터 설계과정

2.1 데드타임의 영향을 고려한 인덕터 계산

부하에 걸리는 전압은 LC필터의 커패시터에 걸리는 전압과 같다. PWM에 의한 전압고조파는 스위칭 주파수에서 나타나는 영향과 데드타임에 의한 영향으로 결정된다. PWM 전압고조파로 인하여 인덕터에 흐르는 전류에는 전압고조파의 같은 주파수의 전류고조파가 나타나게 된다. 5차와 7차와 같은 낮은 주파수 영역에서 커패시터의 임피던스가 부하에 비해 작다면 낮은 주파수의 전류 고조파들은 커패시터로 흐르게 되므로 이 영향들은 전압으로 보이게 된다. 즉 인덕터에 전류 고조파를 조절하여 커패시터에서 나타나는 전압 고조파 크기를 조절할 수 있다. 데드타임에 의한 영향은 5차, 7차, 11차, 13차 등의 전압고조파에서 나타난다. 여러 주파수에 대한 고조파 계산을 간

단히 하기 위해 5차와 7차 주파수를 6차 주파수로 변환하여 하나의 식으로 인덕턴스를 설계하고자 한다. 전류 고조파 왜율 (THD)는 아래 식으로 정의된다. 또한 전류를 전압에 관한 식으로 나타낼 수 있다.

$$I_{THD_{5,7}} = \frac{1}{I_1} \sqrt{I_5^2 + I_7^2} = \frac{1}{I_1} \sqrt{\left(\frac{V_5}{\omega_5 L}\right)^2 + \left(\frac{V_7}{\omega_7 L}\right)^2} \quad (1)$$

식 (1)을 인덕턴스에 대해 식을 정리 하면 다음 식 (2)을 얻을 수 있다.

$$L = \frac{V_1}{I_1 \omega_6 I_{THD_{5,7}}} \sqrt{\left(\frac{V_5}{\omega_5 L}\right)^2 + \left(\frac{V_7}{\omega_7 L}\right)^2} \quad (2)$$

위 식을 통하여 시스템의 사양과 5,7차 전압 고조파 크기로 5,7차 전류고조파를 만족하기 위한 인덕턴스를 설계할 수 있다.

2.2 PWM 전압 고조파 크기 계산

데드타임의 영향 있는 PWM 전압 고조파를 구하기 위하여 영전류에 대한 가정을 할 필요가 있다. 데드타임에 의하여 영전류가 스위칭 주기 동안 방향이 한번만 변화된다고 가정해야 데드타임에 의한 전압고조파 크기를 정확히 측정할 수 있다. 아래 그림 1은 3 Level Inverter 조건에서 MATLAB 시뮬레이션을 이용하여 MI 0.9, 스위칭 주파수가 6 [kHz] 그리고 데드타임을 4 [usec] 조건의 PWM에 의한 전압 고조파이다.

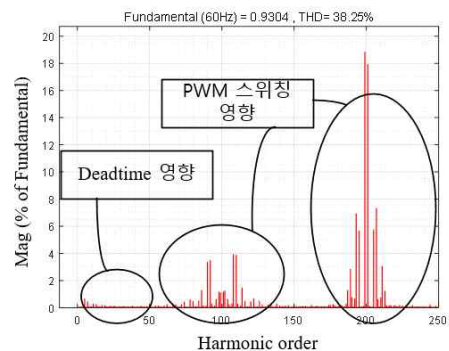


그림 1 PWM 전압 파형의 FFT 결과
Fig. 1 FFT result of PWM voltage waveform

PWM 전압 파형은 스위칭 주파수의 정수배 주변으로 전압 고조파가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 데드타임에 의한 영향으로 5, 7차 부근에서도 전압고조파가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.3 커패시터 값 설계

인덕터와 커패시터의 전압 분배를 통하여 인버터측 전압과 부하측 전압의 관계를 구할 수 있다. LC필터는 아래 와 같이 도시할 수 있으며, LC 필터의 전달함수는 아래의 식과 같다.

$$H(\omega) = \frac{V_{ho}}{V_h} = \frac{1}{s^2LC+1} \quad (3)$$

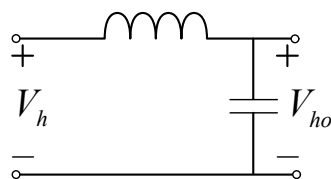


그림 2 LC 필터 스케메틱
Fig. 2 Schematic of LC filter

출력전압의 고조파왜율을 아래 식과 같이 결정할 수 있다.

$$Z_C = \frac{V_{ho}}{V_h - V_{ho}} Z_L \quad (4)$$

V_{ho} 는 스위칭 주파수에서의 부하단 전압 고조파값, V_h 는 스위칭 주파수에서의 인버터단의 전압 고조파값, Z_L 는 인덕터의 pu 값 그리고 Z_C 는 구하고자하는 커패시터의 pu값이다.

식 (4)를 계산하기 위하여 주파수에 따라 분포하는 전압고조파 값들을 스위칭 주파수를 기준으로 한 전압 고조파 크기를 구할 필요가 있다. 스위칭 주파수에 의해 나타나는 전압 고조파 크기를 스위칭 주파수에 영역으로 모은 크기를 V_{h1} 라하고, 두배의 스위칭 주파수에 의해 나타나는 전압 고조파 크기를 스위칭 주파수에 영역으로 모은 크기를 V_{h2} 라 하면

V_{h1} 과 V_{h2} 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{h1} = \sqrt{\sum_{i=1} \left(V_{hi} \frac{H(\omega_{hi})}{H(\omega_{Fs})} \right)^2} \quad (5)$$

$$V_{h2} = \sqrt{\sum_{i=1} \left(V_{h2i} \frac{H(\omega_{h2i})}{H(\omega_{2Fs})} \right)^2} \quad (6)$$

부하에서의 출력 전압의 목표 전압고조파왜율의 값을 X라 하면 X는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$X = \sqrt{(H(\omega_{Fs}) V_{h1})^2 + (H(\omega_{2Fs}) V_{h2})^2} \quad (7)$$

(5), (6), (7) 식을 이용하여 커패시터에 대하여 풀면 아래 식으로 나타낼 수 있다.

$$C = \frac{1}{\omega_{Fs}^2 L} \left(\frac{1}{\sqrt{V_{h1}^2 + \frac{1}{4} V_{h2}^2}} (X_{pu} V_{base})^2 - 1 \right) \quad (8)$$

3. 시뮬레이션 결과

표 1의 파라미터를 이용하여 그림 4의 모델에 대하여 본 논문에서 제안된 방법으로 LC필터 설계를 하였고 이를 검증하기 위해 설계 시뮬레이션을 수행했다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

계통 선간 전압	220 [V]	직류 링크 전압	400 [V]
계통 주파수	60 [Hz]	전류 제어기 대역폭	200 [Hz]
계통 정격 전류	11.1 [Arms]	PLL 대역폭	1 [Hz]
데드 타임	4 [μ s]	스위칭 주파수	6 [kHz]
목표 전압 고조파	3 %	MI	0.9

제안된 필터 설계 과정을 적영하여 결정한 LC 필터의 제정수는 다음과 같다.

- 1) $Z_{base} = 16.14$ 목표하는 전압 고조파 왜율 = 3%
- 2) 2% 전류 고조파왜율을 갖는 인덕터 = 2.17 [mH]
- 3) 1% 전압 고조파왜율을 갖는 커패시터 = 4.46 [μ F]

출력전압의 시뮬레이션 결과를 그림 3에 도시하였다. 50차 이하의 전압고조파 왜율은 1.82%, 스위칭 영역에서의 전압고조파 왜율은 0.87%의 결과를 나타냈다.

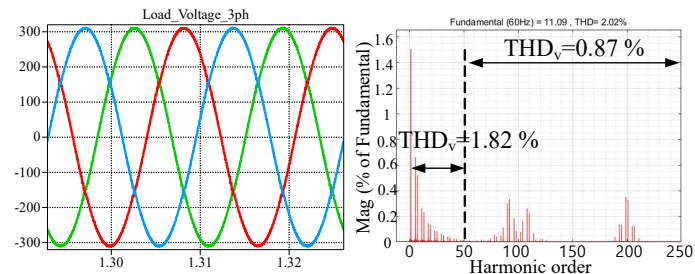


그림 3 출력전압 파형 및 FFT 결과
Fig. 3 Output Voltage waveform and FFT Result

4. 결론

본 논문에서는 PWM 전압고조파를 이용하여 LC 필터를 설계하였으며 시뮬레이션을 통해 제안된 방법이 타당함을 확인하였다.

참고 문헌

[1] D. Grahame Holmes Thomas A. Lipo, Pulse Width Modulation For Power Converters: Principles and Practice, 1/E, Wiley-IEEE Press.
[2] 한동엽, 김성민, PWM 파형의 이론적 분석을 통한 정규화된 테이블을 이용한 L 필터 설계. 전력전 자학회 학술대회 논문집, 2019, (3 pages), 227-229.