

PWM 파형의 이론적 분석을 통한 정규화된 테이블을 이용한 L 필터 설계

한동엽, 김성민
한양대학교

L Filter Design using normalized table with Theoretical Analysis of the Harmonic Content of PWM Waveforms

Dong Yeop Han, Sungmin Kim
Hanyang University

ABSTRACT

계통의 전류 고조파는 전압 고조파에 의해 야기된다고 볼 수 있다. 따라서 전압 고조파에 해당하는 임피던스를 설계함으로써 전류 고조파를 원하는 크기로 제한할 수 있다. 전압 고조파는 직류단 전압, Modulation index 등에 의해서 결정되며, 허용되는 전류 고조파의 크기는 해당 시스템의 용량과 주파수에 따라 달라진다. 본 논문은 더블 푸리에 변환을 통해 전압 고조파를 식으로 풀어 주파수와 변조지수에 따른 정규화 된 전압 고조파 표를 이용해, 임의의 시스템에 적용할 수 있는 L 필터 설계 절차를 제안한다.

1. 서론

신재생 에너지로 사용되는 태양광, 연료전지, 풍력 시스템에서 계통으로 전력을 전달하기 위해서는 3상 Pulse Width Modulation(PWM) 전압형 인버터가 널리 사용된다. 계통 연계 인버터의 출력 전압은 기본파 성분 이외에 스위칭 주파수와 그 정수배인 고조파 성분이 포함되어 있다. 출력전압 고조파 성분에 의하여 전류 고조파 성분이 생기는데, 고조파 전류들이 계통에 그대로 흐르게 되면 계통 변압기의 손실을 증가시키고, 계통에 연결된 다른 능동형 전력 변환 장치의 동작에 문제를 야기할 수 있으며, 전력 계통 시스템 동작에 안정적인 운영에 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 전류 고조파의 부정적 영향을 줄이고자 산업분야에서는 IEEE 519:2014 그리고 IEC EN61000-3-2 등 과 같은 규제를 만족시키는 것을 요구받는다. 계통에 주입되는 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해서 여러 가지 방법이 있는데 그 방법들 중 대표적인 것들은 인버터의 스위칭 주파수를 높이거나 수동형 필터 혹은 능동형 필터 등을 사용하는 것이다.

기존 L 필터나 LCL 필터와 같은 수동형 필터의 설계방법으로 다양한 방법들을 제시하고 있다.^[1-3] 하지만 이런 논문들의 공통적인 단점은 설계 과정에서 파라미터 선정 시 시뮬레이션을 해야 하므로 설계해야할 시스템이 달라짐에 따라 설계 과정을 반복해야한다.

본 논문은 인버터의 출력 PWM 전압 파형을 더블 푸리에 변환을 이용해 미리 계산 한 뒤 설계하려는 목표 스위칭 주파수에 맞춰 보정치를 곱한 정규화된 표를 제안한다. 제안된 정규화된 표를 이용해서 전류 고조파의 크기를 제한하기 위해 필요한 L 필터를 쉽고 정확하게 설계할 수 있다. 제안된 표는 시

스템의 스위칭 주파수의 고조파 차수와 계통단 절반의 전압에 대한 계통의 상 전압 최대값인 MI(Modulation Index)에 따른 정규화된 테이블 값을 찾아 쉽게 필터를 설계 할 수 있다. 본 논문에서는 91kW급 2 level 인버터에 대해서 제안된 방법에 따라 L 필터를 설계하며, 시뮬레이션을 통해 계통에 주입되는 전류의 THD가 설계 목표를 만족함을 보임으로써 제안된 방법의 타당함을 보인다.

2. 2 Level PWM 파형의 이론적 분석 및 필터 설계과정

2.1 더블 푸리에 변환을 이용한 PWM 이론적 분석

Pulse Width Modulation(PWM)으로 생성되는 전압 고조파에 대한 이론적 분석을 위해서 더블 푸리에 변환을 사용했다.^[4] 식(1)과 같이 표현된 더블 푸리에 변환은 시간에 대한 이 변수 함수를 주파수로 변환하는 방법이다. 식 (1)로부터 기본파 주파수와 PWM 반송파 주파수에 대해 계산하면 PWM에 의한 전압 고조파를 나타낼 수 있다.

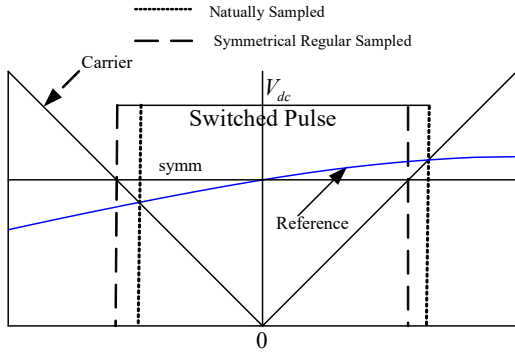
$$\begin{aligned}
 (t) = & \frac{A_{00}}{n=1} + A_{0n}c s(n \quad 0t+ \quad 0) + \quad 0nS \quad (n \quad 0t+ \quad 0) \\
 & + A_{m0}c s(n \quad t+ \quad) + \quad 0mS \quad (m \quad t+ \quad) \\
 & + A_{mn}c s(m \quad t+ \quad +n \quad t+ \quad) \\
 & + \quad m=1n= \quad (n \quad 0) \\
 & + \quad mmS \quad (m \quad t+ \quad +n \quad t+ \quad) \quad (1)
 \end{aligned}$$

식 (1)의 의미는 첫째항은 DC Offset을 의미하고, 둘째항은 기본파 성분과 Baseband 고조파 성분을 의미하며, 셋째항은 Carrier 주파수의 고조파를 의미하고, 넷째 항은 Sideband 고조파를 의미한다. 식 (1)의 푸리에 계수를 식 (2)와 같은 복소수 형태로 나타낼 수 있다. 따라서 식 (2)의 크기는 고조파의 크기 값을 의미한다.

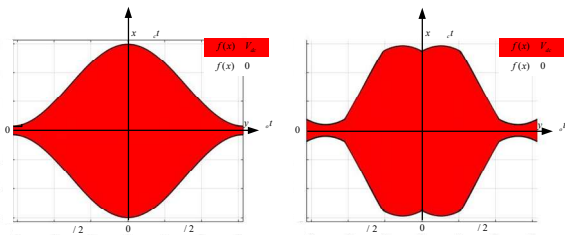
$$\overline{C_{mn}} = \frac{1}{(x \quad)e^{(mx+n \quad) \quad x}} \quad (2)$$

PWM의 스위칭 전압은 그림(1)처럼 반송파 파형과 기준 전

압 파형의 비교를 통해 스위치의 온/오프를 결정한다. 이상적인 기준전압 파형에 대해 반송파 파형과 비교를 하는 Naturally Sampled 방식과 스위칭 주파수 마다 지령 전압 파형을 받아 반송파 주파수와 비교하는 Symmetry Sampled (Single Sampling) 방식이 있다.



2 Level에서 Naturally Sampling 된 SPWM과 SVPWM의 반송파 파형과 기준 전압 파형의 관계를 그림(2)로 나타낼 수 있다. 색칠된 영역이 PWM 출력 전압이 V 이고 그 외의 부분의 전압은 0을 의미한다.



따라서 그림 2의 영역을 식(2)를 이용하여 Naturally Sampled 방식과 Single Sampled 방식에 대하여 전압 고조파 크기를 식(3)과 식(4)와 같이 각각 표현할 수 있다.

$$\overline{C_{mn}} = \frac{1}{-} \frac{-(1+ s)}{-(1+ s)} V e^{(mx+n)} x \quad (3)$$

$$\overline{C_{mn}} = \frac{1}{-} \frac{-(1+ s)}{-(1+ s)} V e^{(m+n - mx+n)} x \quad (4)$$

2.2 정규화된 표 설계

PWM에 의한 인버터 전압 고조파는 스위칭 주파수의 정수 배 주파수에서 나타나므로 필터 설계 시 스위칭 주파수의 정수 배 주변의 고조파 성분을 고려하는 것이 적절하다.^[4] 필터 설

계 할 시 전류 고조파 왜율(HD_i)는 식(5)로 정의한다.

$$HD_i = \frac{\overline{I + I + I_{i-1} + I_i}}{I_1} \quad (5)$$

(5) 식을 전압 고조파와 필터의 임피던스로 표현하면 식(6)과 같다.

$$HD_i = \frac{1}{I_1} \left(\frac{V}{-} + \left(\frac{V}{-} + \left(\frac{V_i}{i} \right) \right) \right) \quad (6)$$

또한 L필터의 특성상 주파수에 따른 선형적인 특성을 가지므로 식 (7)과 같은 식이 된다.

$$HD_i = \frac{1}{I_1} \left(\frac{V_i}{i} \right) = \frac{1}{I_1} \left(\frac{V_i}{i} \right) \quad (7)$$

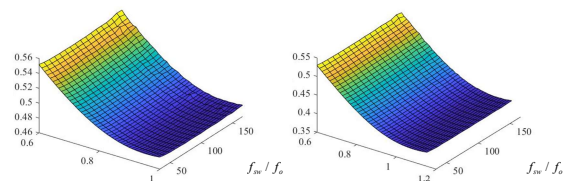
$$= \frac{1}{I_1} \left| \frac{V_i}{\frac{i}{s}} \right| \quad (8)$$

식 (8)을 인덕턴스에 대해 식을 정리 하면 다음 식(10)을 얻을 수 있다.

$$= \frac{V_1}{s I_1} \frac{1}{HD_i} \left(\frac{s}{i} \frac{V_i}{V_1} \right) \quad (9)$$

$$= \frac{ase}{s} \frac{1}{HD_i} \left(\frac{V_i}{i-1} \right) \quad (10)$$

MI와 고조파 주파수의 차수를 알고 있다면, 앞에서 유도한 PWM 전압 고조파의 이론식으로부터 $\left(\frac{V_i}{i-1} \right)$ 값을 계산할 수 있으므로, L 필터 설계를 위한 정규화된 전압 고조파 표를 설계할 수 있다. 이 때 계통에 연결되는 부하의 종류를 모르기 때문에 제어의 안정성을 위하여 전류 고조파는 스위칭 주파수의 2.5 배 주파수 까지를 고려한다. 식 (10)의 근호 부분을 MI와 스위칭 주파수에 맞춰 테이블을 만들 수 있다. 그러므로 설계하고자 하는 전류 고조파 왜율과 ase 과 s 는 시스템이 정해짐에 따라 주어지는 것이므로 L 필터를 손쉽게 설계할 수 있다. 그림 3은 SPWM과 SVPWM에 대하여 차수는 33.3 166.7 MI는 각각 0.6 1 그리고 0.6 1.1547에 대하여 정규화된 고조파 테이블이다.



2.3 L 필터 설계 과정

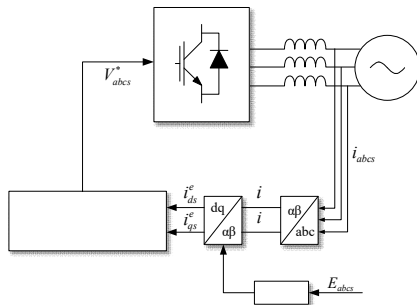
표 1에 대한 파라미터를 이용하여 정규화된 테이블을 이용하여 다음의 순서에 따라 L 필터를 설계하는 절차를 다음과 같이 제안한다.

- 1) 목표하려는 HD_f 를 정하고 ase [pu]를 계산한다.
- 2) 정규화된 전압 고조파 테이블에서 MI와 스위칭 주파수에 맞는 값을 찾는다.
- 3) 식 (5)를 이용하여 설계하려는 필터 인덕턴스를 구한다.

3. 시뮬레이션 결과

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

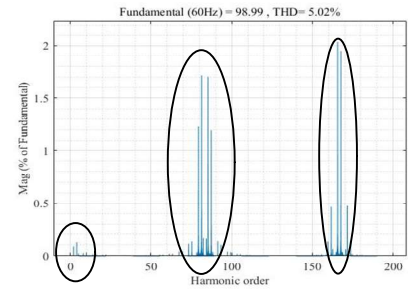
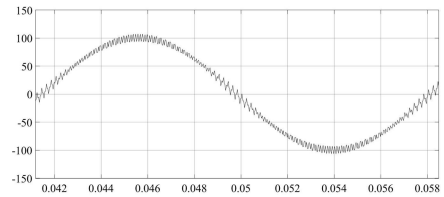
계통 선간 전압	380 [V]	직류 링크 전압	756 [V]
계통 주파수	60 [Hz]	전류 제어기 대역폭	200 [Hz]
계통 정격 전류	70 [Arms]	PLL 대역폭	1 [Hz]
데드 타임	0 [s]	스위칭 주파수	5 [kHz]
테이블 값	0.4295	MI	0.8193



2.3의 필터 설계 과정을 그대로 적용해 보면

- 1) $ase = 3.1$, 목표하는 전류 고조파 왜율 = 5%
- 2) 시스템 파라미터에 관한 테이블 값 = 0.4295
- 3)
$$= \frac{1}{0.00} \quad 0 \quad (\quad 000) = H$$

위 과정을 이용하여 L 필터를 선정하고 그림 4의 모델을 시뮬레이션 해보았다. 그림 (5)는 출력 전류 파형 및 전류 FFT 분석 시뮬레이션 결과이다. 그림 (5)의 b는 출력 전류를 FFT한 결과를 보면 HD_f 값이 5.02%인 것을 알 수 있으며 오차가 1% 미만이므로 목표하려는 THD 5%를 만족하는 것을 수 있다. 즉 본 논문에서 제안한 정규화된 표를 이용해서 L 필터 값을 설계하는 방법이 타당하다는 것을 확인하였다.



4. 결론

본 논문에서는 계통 연계형 인버터에서 계통으로 주입되는 전류의 고조파를 저감하기 위해 사용하는 필터 설계를 좀더 명확하게 풀어내고자 정규화된 테이블을 제안했다. 이와 같은 내용을 수동형 L 필터에 적용했고 MATLAB Simulation을 통하여 확인했다.

참고 문헌

- [1] M. Y. Park, M. H. Choi, J. H. Park, H. G. Kim, T. W. Chun, and E. C. Nho, "Power Electron. Conf. 2010, pp. 1688-1694.
- [2] Marco Liserre, Frede Blaabjerg, "Design and Control of an LCL- Filter-Based Three-Phase Active Rectifier", IEEE Trans. Ind. Application, Vol. 41, pp. 1281-1291, 2005, May.
- [3] M. A. Elsharty, H. A. Ashour, "Passive L and LCL Filter Design Method for Grid-Connected Inverters", IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia(IISGT ASIA), 2014
- [4] D. Grahame Holmes Thomas A. Lipo, Pulse Width Modulation For Power Converters: Principles and Practice, 1/E, Wiley-IEEE Press.