3상 정류기부하에 대한 수동 고조파필터의 해석 및 설계

논 문
58P-3-13

Analysis and Design of a Passive Harmonic Filter for a Three-Phase Rectifier

조 영 식* · 차 한 주†
(Young-Sik Cho · Han-Ju Cha)

Abstract - This paper presents an analytical design method of a passive harmonic filter for a three-phase diode rectifier and uses a new transfer function approach in the analysis and design. The transfer function approach derives an analytical formulation of an utility system including passive filters with a basis of Laplace transform and provides a graphical formulation so that a visualized insight into an interaction between individual filter and system response can be attainted. Harmonic impedance, voltage division and current division transfer function are used as a design tool, which makes a calculated filter parameters to satisfy IEEE-519 distortion limits. A simple five-step design procedure is introduced in the filter design, which consists of system analysis, selection of PCC(Point of Common Coupling), filter specification calculation, appropriate filter design for system and filter implementation. Philosophy governing the design procedure is based on a numerical/graphical iterative solution, trial and error with visualization feed-back based on "algebra on the graph". Finally, performance of the designed passive harmonic filter is verified by experiment and shows that 5th, 7th, 9th, 11th and 13th harmonics are decreased within IEEE-519 distortion limits, respectively.

Key Words : Passive Filter, Harmonic, Passive Harmonic Filter

1. 서 론

최근 반도체소자를 이용한 응용기기의 증가로 전력품질이 매우 중요한 이슈가 되고 있다. 전력품질의 질을 결정하는 인자로는 고조파, 전압강하, 순간정전 등 여러 가지가 있으나 그 중에서 고조파 장해는 전기기기의 수명과 효율에 직접적인 영향을 미치는 중요한 문제이다. 이러한 고조파에 관한 연구는 선진국의 경우 1980년대 중반부터 고조파 장해의 중요성을 인식하고 대책을 위한 규제기준을 마련하였으며 일본에서도 1990년 중반부터 산학연을 통한 연구가 진행되고 있다. 우리나라에서도 최근 고조파에 대한 관심을 가지고 연구를 진행하고는 있으나 사회적 인식부족으로 연구결과는 미흡한 실정이다. 고조파 저감대책으로 널리 이용되는 방법 중 하나는 필터를 이용한 방법이며 수동필터(Passive filter)와 능동필터(Active filter)로 구분된다. 수동필터는 콘덴서(C)와 리액터(L)소자를 조합하여 특정 주파수에서 저 임피던스가 되는 분로를 구성하여 고조파 전류를 흡수하는 것으로 동조필터, 고차필터 및 손실저감 형인 C-type 필터 등이 있다[1].

능동필터는 보상부하에 병렬 또는 직렬로 접속되어 변류기(CT)를 사용하여 부하전류를 검출하고, 부하전류에 포함된 고조파성분을 검출한 후 역위상의 전류를 능동필터에 흐르게 하여 고조파전류를 상쇄하는 방법이다. 두 방법 중 능동필터가 성능 상 우수한 특성을 가지고 있음은 명백하나 운전조건, 경제성, 유지관리 및 설치공간의 제약 등 여러 환경적인 제약조건을 가지고 있어 상대적으로 가격이 저렴하고 설치가 쉬운 수동필터가 산업 현장에서는 많이 사용되고 있다. 본 논문에서는 3상 정류기부하를 위한 수동필터에 대해 해석하고 설계 방법을 제시하였다. 사용된 필터형태는 구조적으로 가장 간단하고 효과적인 동조필터이며, 해석 및 설계과정은 각 필터와 계통인자들의 상호작용을 도식화하여 가시적으로 판단이 용이한 방식인 전달함수의 방법이 사용되었다. 전달함수가 제공하는 분석적 해석방법과 도식적 해석방법의 두 가지 방법을 이용하여 매우 쉽고 간단한 방법으로 필터의 효과를 확인하고, 수치와 도해의 시행착오를 통한 반복적인 방법으로 필터 설계 사양을 만족해 나가는 방식을 소개한다. 또한 고조파 저감목표치를 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치를 기준으로 하였다[2],[3]. 본 논문에서 해석하고 설계한 필터의 성능은 최종적으로 실험을 통하여, 각 고조파 성분이 규제기준인 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치 요건을 만족함을 입증한다.

* 정 회 원 : 한국원자력안전기술원 선임, 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정
† 교신저자, 정회원 : 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수 · 공박
E-mail : hjcha@cnu.ac.kr
접수일자 : 2009년 2월 27일
최종완료 : 2009년 5월 29일

2. 수동 고조파 필터의 해석

2.1 국내 · 외 고조파 관리기준

고조파를 포함한 전력품질의 저하를 규제할 수 있는 국내 근거는 전기사업법 제16조(전기의 공급약관) 및 제18조(전기품질의 유지) 등이며, 전기사업자인 한전은 기본공급 약관 시행세칙을 작성하여 시행하고 있다. 국제기준으로는 IEEE-519, IEC 61000 Series등이 있으며 각각 전압 및 전류 고조파 왜형률에 대한 제한 규정을 포함하고 있다. 본 논문에서는 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치를 기준으로 하였으며 세부 기준은 다음 표 1과 같다.

표 1 전류고조파 왜형률 제한치(120V~69000V)[3]
Table 1 Current distortion limits for 120V through 69000V[3]

I_{sc}/I_L	Individual harmonic order(odd harmonics) [%]					
	h<11	11≤h ≤17	17≤h ≤23	23≤h ≤35	35≤h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

2.2 전달함수 방법을 이용한 수동고조파 필터의 해석[2]

수동고조파 필터의 해석을 위하여 전달함수 방법을 이용하기 위해서는 다음과 같이 필터의 설치위치 선정 및 여러 종류의 전달함수 유도과정이 필요하다. 필터의 설치위치는 고조파 점감효과를 극대화하고 설치비용 및 계통손실을 최소화 할 수 있는 곳, 무엇보다 고조파 발생원에 가장 가까운 위치로 선정하는 것이 효과적이다. 그림 1은 전력계통에서의 전형적인 필터 설치위치 선정 예를 나타내었다.

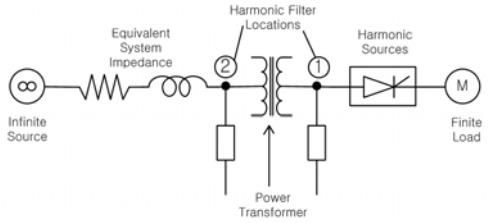


그림 1 필터위치 선정 예
Fig. 1 Practical filter locations

여기서, ①과 ②는 필터가 설치될 수 있는 위치이며, ①의 경우는 변압기 2차측 한 모선에 여러 부하가 동시에 접속된 경우, ②의 경우는 변압기 2차측에 단일부하가 설치된 경우에 적합하다. 또한 주파수영역의 필터시스템 등가회로도는 그림 2와 같이 나타낼 수 있고, 필터임피던스 전달함수($H_f(s)$)는 다음과 같다.

$$H_f(s) = Z_f(s) = \frac{V(s)}{I_f(s)} \tag{1}$$

여기서, $Z_f(s)$는 주파수영역 필터임피던스, $V(s)$는 주파수영역 단상 등가전압, $I_f(s)$는 주파수영역 필터전류이다.

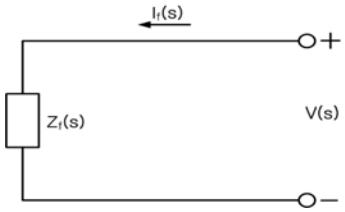


그림 2 필터임피던스 구성도
Fig. 2 Filter impedance representation

주파수영역의 필터 및 계통 등가회로도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있고 합성임피던스 전달함수($H_{fs}(s)$)는 다음과 같으며 이 식은 계통에 결합된 필터의 주파수응답해석을 위한 강력한 툴로 이용된다.

$$H_{fs}(s) = Z_{fs}(s) = \frac{V(s)}{I(s)} = \frac{V(s)}{I_f(s)+I_s(s)} = \frac{1}{\frac{1}{Z_f(s)}+\frac{1}{Z_s(s)}} \tag{2}$$

여기서, $Z_f(s)$는 주파수영역 필터임피던스, $Z_s(s)$는 주파수영역 계통임피던스, $Z_{fs}(s)$는 주파수영역 테브난등가 합성임피던스이다.

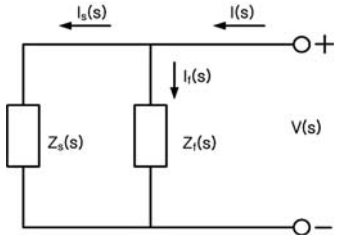


그림 3 필터 및 계통임피던스도
Fig. 3 Filter and system impedance representation

위 그림 3의 필터 및 계통 임피던스도에서 전원 측 및 필터 측으로 흐르는 각각의 전류에 대한 전류분배 전달함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_f(s)}{Z_f(s)+Z_s(s)} \tag{3}$$

$$H_{cdf}(s) = \frac{I_f(s)}{I(s)} = \frac{Z_s(s)}{Z_f(s)+Z_s(s)} \tag{4}$$

$$H_{cdf}(s) = \frac{Z_s(s)}{Z_f(s)} H_{cds}(s) \tag{5}$$

여기서, $H_{cds(s)}$는 계통에 흐르는 전류$I_s(s)$와 고조파 발생원으로부터 발생되는 전류$I(s)$와의 비로써 아래첨자는 current divider source의 의미이고, $H_{cdf}(s)$는 필터로 흐르는 전류$I_f(s)$와 고조파 발생원으로부터 발생되는 전류$I(s)$와의 비로써 current divider filter를 의미한다. 식(3)과 (4)를 식(2)에 대입하면

$H_{fs}(s) = \frac{1}{\frac{1}{Z_f(s)}+\frac{1}{Z_s(s)}} = \frac{Z_f(s) \cdot Z_s(s)}{Z_f(s)+Z_s(s)}$ 이므로

$$H_{fs}(s) = Z_s(s)H_{cds}(s) = Z_f(s)H_{cdf}(s) \tag{6}$$

$$H_{cds}(s) = \frac{1}{Z_s(s)} H_{fs}(s) \tag{7}$$

$$H_{cdf}(s) = \frac{1}{Z_f(s)} H_{fs}(s) \tag{8}$$

위 식(7)과 (8)은 두 가지 관점에서 매우 중요하다. 첫 번째는 필터를 설계할 때 전달함수의 임피던스가 전체계통의 성능을 평가하는데 사용되기 때문이고, 두 번째는 필터의 설치·운영 시 고조파 전류의 측정을 통한 전류분배 비율을 계산해서 설계시와 실제 측정시 간의 필터성능 비교를 위한 이득곡선 작도 시 유용하게 이용되기 때문이다. 특히 식(3)은 IEEE-519의 요건을 준수하기 위한 전류고조파 왜형률 제한치를 결정하거나 설계하는데 유용하게 이용된다.

3. 수동 고조파 필터의 설계[1-5]

본 논문에서는 수동필터를 설계하는데 시스템의 분석, PCC(Point of common coupling)의 선정, 필터설계 사양(Spec.) 계산, 시스템에 적합한 필터 설계, 필터 최적화수행의 5단계 과정을 적용하였다.

Step 1) 시스템의 분석

본 논문의 연구대상 계통은 3kW급 태양광발전용 제어시스템을 위한 3상 정류기부하 모델이며 시스템의 측정 및 분석결과는 다음과 같다.

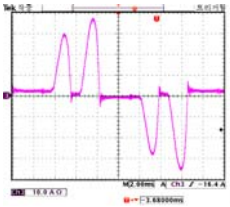


그림 4 전원측 전류파형
Fig. 4 Current waveform

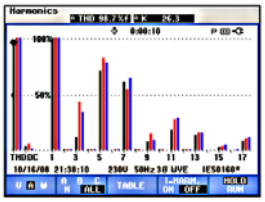


그림 5 전류고조파 함유량
Fig. 5 Current spectrum

표 2 각 차수별 전류고조파 함유량
Table 2 Current harmonic components

구 분	기본파	5th	7th	11th	13th
전류값(A)	9.8	8.0	5.49	2.58	1.57
함유율(%)	100	81.7	56.0	26.3	16.0

Step 2) PCC의 선정

PCC는 단락전류(I_{sc})의 크기를 계산하기 위한 기준점으로서 IEEE-519의 고조파 왜형률 제한치를 평가하기 위한 기준이 된다. 본 논문에서는 3상 정류기부하에서 전원측으로 유입되는 고조파 양을 제거하기 위함이 목적이므로 정류기 입력단을 PCC로 선정하였다. IEEE-519의 규제기준치의 적용을 위한 최대부하에 대한 단락전류의 비(I_{sc}/I_L)는 다음 식으로 구할 수 있다.

$$I_{SC}=\frac{V}{Z_s}=\frac{220/\sqrt{3}}{2\times\pi\times60\times0.1\times10^{-3}}=3.369\,kA$$이고,

$$I_L=\frac{4.038\times10^3\,VA}{220/\sqrt{3}}=31.79\,A$$가 된다.

왜냐하면, $P=3\,kW$, $3kW=3\times10^3(W)\div743(W/HP)=4.038\,HP$이고, 1마력($HP$)에 해당되는 부하량이 1 [$KVA$]이므로 $4.04\,HP=4.04\,KVA$이기 때문이다.
따라서 $I_{sc}/I_L=3{,}369/31.79=105.98$이 된다.

Step 3) 필터설계 사양(Spec.) 계산

IEEE-519의 전류왜형률 제한치를 기준으로 했을 경우 기준치를 초과한 차수의 감쇄비($H_{spec}=H_{cds}$) 및 이득(Gain) 값은 다음과 같다.

$H_{spec}=|I_{EEE-519}|/|I|=|H_{cds}|$이고, 이득$|G|_{dB}=20\log_{10}(|G|)$이므로

(1) 제5고조파의 경우, $H_{cds-5th}=12/81.7=0.147$,
$$|G|_{dB}=20\log_{10}(|0.147|)=-16.65[dB]$$

(2) 제7고조파의 경우, $H_{cds-7th}=12/56=0.214$,
$$|G|_{dB}=20\log_{10}(|0.214|)=-13.39[dB]$$

(3) 제11고조파의 경우, $H_{cds-11th}=5.5/26.3=0.209$,
$$|G|_{dB}=20\log_{10}(|0.209|)=-13.59[dB]$$

(4) 제13고조파의 경우, $H_{cds-13th}=5.5/16=0.344$,
$$|G|_{dB}=20\log_{10}(|0.344|)=-9.27[dB]$$

고조파 차수에 대한 필터설계 사양(H_{spec})을 그림으로 도시하면 그림 6과 같다.

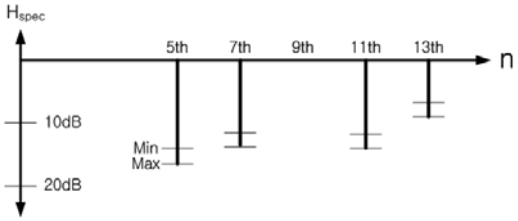


그림 6 고조파 차수별 H_{spec}
Fig. 6 Representation of H_{spec}

계산된 결과를 도시한 H_{spec}을 이용하여 다음단계에서 단일동조필터를 설계한다. 그림 7은 5고조파에 동조한 필터의 응답특성 곡선을 예로 나타낸 것이다.

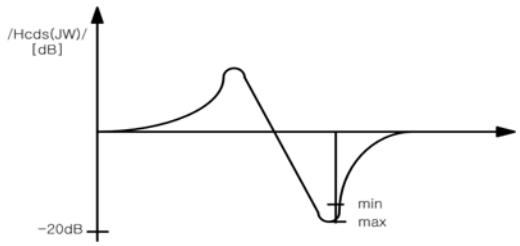
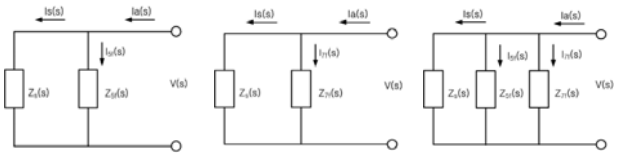


그림 7 5고조파에 동조한 필터의 이득곡선
Fig. 7 Fitting H_{cds} to H_{spec} for a 5th filter

Step 4) 시스템에 적합한 필터 설계

1차, 2차 및 3차 필터를 결합하여 필터임피던스 $H_f(s)$를 도출한 후 $H_{cds}(s)$의 결정 및 IEEE-519 표준에 준하는 H_{spec}을 결정한다. 이때 실제의 동작조건과 경제성을 고려하여 $H_f(s)$ 및 $H_{cds}(s)$를 반복적인 방법으로 최적화 작업을 수행한다. 본 논문에서 설계하고자 한 5고조파 필터 및 7고조파 필터의 계통임피던스 구성도는 그림 8과 같다.



(a) 5th 필터 (b) 7th 필터 (c) 5th+7th 필터

그림 8 각 차수 고조파 필터의 계통임피던스 구성도
Fig. 8 System impedance representation for each filter

또한 각 고조파 필터를 구현하기 위한 실제 회로정수(R, L, C)의 값은 다음의 과정으로 결정하였다. 먼저, 역률개선

(개선전 역율 0.7을 0.9로)을 위한 콘덴서의 용량을 다음 식에 의해 결정하여 필요한 커패시터(C)의 값을 구한다.

$$Q_c = P_L(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) = P_L(\frac{\sqrt{1-\cos\theta_1^2}}{\cos\theta_1} - \frac{\sqrt{1-\cos\theta_2^2}}{\cos\theta_2})\,[KVAR]$$

여기서, $\tan\theta_1$: 보상전의 역률 각, $\tan\theta_2$: 보상후의 역률 각

계통의 측정된 역률이 0.7이었으므로 역률을 0.9이상으로 하기위하여 필요한 콘덴서 용량을 다음 식에서 구할 수 있다.

$$Q_c = 3(\frac{\sqrt{1-0.7^2}}{0.7} - \frac{\sqrt{1-0.9^2}}{0.9}) = 3(\frac{\sqrt{0.51}}{0.7} - \frac{\sqrt{0.19}}{0.9}) = 1.62\,[KVAR]$$

따라서 C_5 및 $C_7 = 29.59\times10^{-6}\,[F]$이다.

다음으로 5고조파 및 7고조파에 공진하기 위한 인덕턴스(L)값은 다음의 관계식으로 구한다.

$$L_5 = \frac{1}{4\pi^2 C h^2 f^2} = \frac{1}{4\pi^2(29.59\times10^{-6})(4.7)^2(60)^2} = 10.76\times10^{-3}\,[H]$$

$$L_7 = \frac{1}{4\pi^2 C h^2 f^2} = \frac{1}{4\pi^2(29.59\times10^{-6})(6.7)^2(60)^2} = 5.297\times10^{-3}\,[H]$$

여기서, h는 공진차수이며 필터의 공진주파수 값을 4.7차 및 6.7차에 동조시킨 이유는 온도 및 경년열화 등으로 인한 커패시터 용량변경 부분을 사전에 고려한 값이며 경험적인 값이다. 마지막으로 필터 저항값을 구하는 절차이다. 필터 저항값은 필터의 선택도와 관련 된 값으로서 저차의 단일동조필터(Tuned Filter)의 경우 양호도(Q)는 경험적으로 30~60정도의 값을 가지게 되고 본 논문에서는 50을 선택하여 초기 값을 계산하였다. 하지만 실제 필터구성에서는 필터손실을 고려하여 저항(R)을 반영치 않았다.

$$Q = \frac{\omega L}{R} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$$ 이므로,

$$R_5 = \frac{2\pi\times(60\times4.7)\times(10.76\times10^{-3})}{50} = 381.3\times10^{-3}\,[\Omega]$$

$$R_7 = \frac{2\pi\times(60\times6.7)\times(5.297\times10^{-3})}{50} = 267.6\times10^{-3}\,[\Omega]$$

위의 과정으로 계산된 필터회로정수는 다음과 같다.

표 3 사용된 필터회로 정수

Table 3 Circuit constants for filters

구 분	필터회로 정수		
	저항(R)	인덕터(L)	커패시터(C)
5th 필터	381.3mΩ	10.76mH	29.59μF
7th 필터	267.6mΩ	5.297mH	29.59μF

그림 9는 전형적인 2차 절단함수의 이득곡선을 나타내며 표 3의 필터회로정수를 반영한 각 고조파에 동조된 단일동조 필터의 전달함수($H_{cds}(s)$)는 다음과 같다.

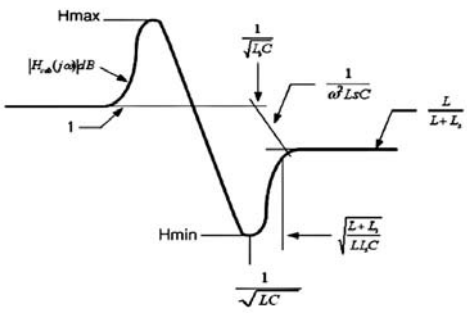


그림 9 전형적인 2차 전달함수의 이득 곡선

Fig. 9 Gain curve of typical 2nd-order transfer function

(1) 5고조파 필터 : $Z_s(s) = s(L_s + L_{ACL})$,

$Z_{5f}(s) = R_5 + sL_5 + \frac{1}{sC_5}$ 이므로 $H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_{5f}(s)}{Z_{5f}(s)+Z_s(s)}$

$$H_{cds}(s) = \frac{(3.184\times10^{-7})s^2 + (1.127\times10^{-5})s + 1}{(4.057\times10^{-7})s^2 + (1.127\times10^{-5})s + 1}$$

(2) 7고조파 필터 : $Z_s(s) = s(L_s + L_{ACL})$,

$Z_{7f}(s) = R_7 + sL_7 + \frac{1}{sC_7}$ 이므로 $H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_{7f}(s)}{Z_{7f}(s)+Z_s(s)}$

$$H_{cds}(s) = \frac{(1.567\times10^{-7})s^2 + (7.93\times10^{-5})s + 1}{(2.44\times10^{-7})s^2 + (7.93\times10^{-5})s + 1}$$

(3) 5 및 7고조파필터의 병렬 설치 : $Z_s(s) = s(L_s + L_{ACL})$,

$Z_{5f}(s) = R_5 + sL_5 + \frac{1}{sC_5}$, $Z_{7f}(s) = R_7 + sL_7 + \frac{1}{sC_7}$

이므로 $Z_{57f}(s) = 1/((1/Z_{5f}) + (1/Z_{7f}))$,

$H_{cds}(s) = \frac{I_s(s)}{I(s)} = \frac{Z_{57f}(s)}{Z_{57f}(s)+Z_s(s)}$

$$H_{cds}(s) = \frac{(4.99\times10^{-14})s^4 + (4.29\times10^{-12})s^3 + (4.75\times10^{-7})s^2 + (1.92\times10^{-5})s + 1}{(9.14\times10^{-14})s^4 + (5.97\times10^{-12})s^3 + (6.49\times10^{-7})s^2 + (1.92\times10^{-5})s + 1}$$

Step 5) 필터의 최적화수행

Step 4)에서 구해진 전달함수의 이득(dB) 곡선은 다음과 같으며, 위의 단계에서 구한 이득곡선과 일치하는 곡선을 구하는 단계이며, 최종적으로 구한 5고조파, 7고조파 및 5고조파와 7고조파에 동조하는 이득곡선은 다음과 같다. 본 이득곡선을 구하는 데는 Matlab 7.0 프로그램이 사용되었다.

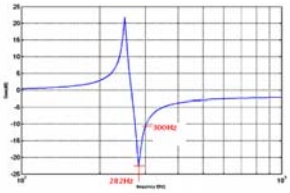


그림 10 5고조파 필터의 이득곡선

Fig. 10 Gain curve of a 5th filter

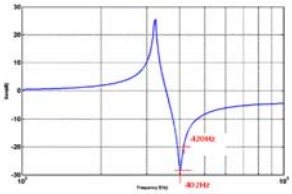


그림 11 7고조파 필터의 이득곡선

Fig. 11 Gain curve of a 7th filter

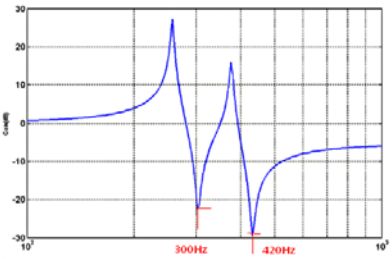


그림 12 5 및 7고조파 필터의 병렬연결 시 이득곡선

Fig. 12 Gain curve of a 5th and a 7th filter

4. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션에는 PSIM 6.0이 사용되었으며 사용된 회로도는 그림 13과 같다.

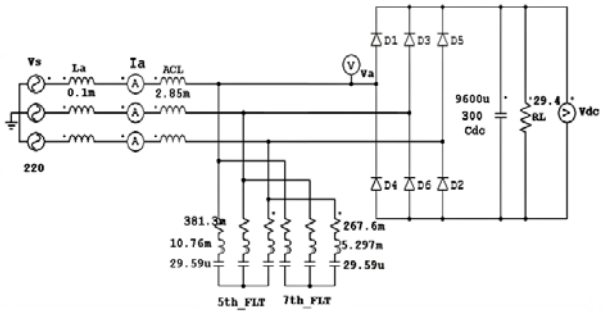


그림 13 시뮬레이션 회로도
Fig. 13 Circuit diagram for simulation

필터 설치전의 전원전압 및 전류파형을 그림 14에, 전류고조파 스펙트럼을 그림 15에, 전류고조파 함유율을 표 4에 나타내었다.

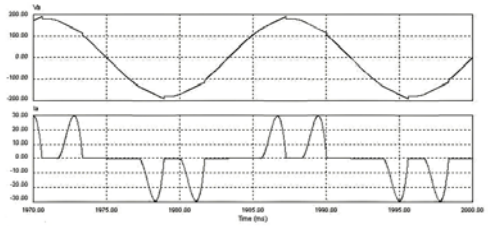


그림 14 필터설치 전 전원전압 및 전류파형
Fig. 14 Voltage and current waveform without filter

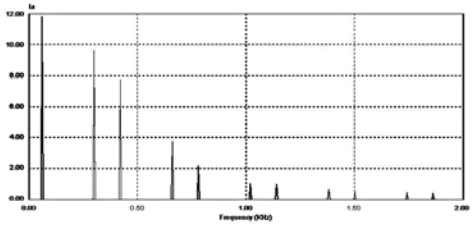


그림 15 전류고조파 스펙트럼
Fig. 15 Current spectrum without filter

표 4 필터설치 전 전류고조파 함유율
Table 4 Current harmonic components without filter

구 분	고조파 함유율(%)			
	5th	7th	11th	13th
필터설치 전	72.6	61.8	20.9	13.2

PCC에 5고조파 필터만 설치 시(그림 16), 7고조파 필터만 설치 시(그림 17), 5고조파 및 7고조파를 병렬설치 시(그림 18)의 시뮬레이션 결과 전류파형은 각각 다음 그림과 같으며 각 필터의 설치 전·후 고조파 전류왜형률은 표 5와 같다.

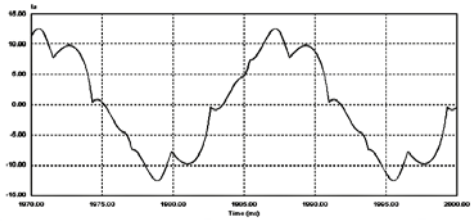


그림 16 5고조파 필터설치 후 전류파형
Fig. 16 Current waveform after 5th filter

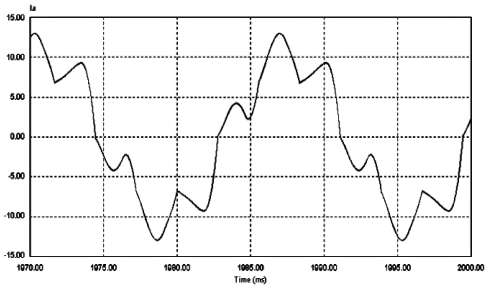


그림 17 7고조파 필터설치 후 전류파형
Fig. 17 Current waveform after 7th filter

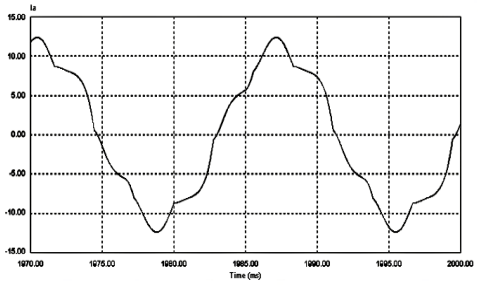


그림 18 5 및 7고조파 필터설치 후 전류파형
Fig. 18 Current waveform after 5th and 7th filters

표 5 필터설치 후 전류고조파 함유율
Table 5 Current harmonic components after filters

구 분	고조파 함유율(%)			
	5th	7th	11th	13th
5th필터설치시	5.55	12.94	3.26	2.02
7th필터설치시	27.91	3.48	4.32	3.00
5th&7th설치시	11.66	1.52	1.97	1.08

5. 실험결과 및 분석

실험은 5고조파 필터만 설치 시, 7고조파 필터만 설치 시, 5 및 7고조파 필터 설치 시의 순으로 수행하였으며 실험에 사용된 실험세트는 그림 19와 같다.

태양광발전용 제어시스템 | 3상 정류기 | 수동필터

그림 19 실험용 세트
Fig. 19 Sets for experimentation

또한, 실제 실험에 사용된 인덕턴스(L) 및 커패시턴스(C)의 값은 다음과 같다.

표 6 실험에 사용된 필터 파라미터 값
Table 6 Circuit constants for filter

구 분		인덕턴스(L)		커패시턴스(C)
ACL	설계값	2.85mH		-
	a상	1.18mH*	2.188mH#	-
	b상	1.32mH*	2.193mH#	-
	c상	1.29mH*	2.033mH#	-
5차 필터	설계값	10.76mH		29.59㎌
	a상	5.68mH*	9.162mH#	29.826㎌*
	b상	6.15mH*	9.705mH#	29.844㎌*
	c상	5.95mH*	9.521mH#	29.814㎌*
7차 필터	설계값	5.297mH		29.59㎌
	a상	2.63mH*	4.951mH#	29.923㎌*
	b상	2.81mH*	4.992mH#	30.080㎌*
	c상	2.44mH*	4.523mH#	29.863㎌*

주) * : 각 상별 LCR 미터 측정값
: 상호리액턴스가 고려된 측정값

필터설치 전 전류고조파 스펙트럼 및 전류파형 측정결과는 그림 20 및 그림 21과 같으며 표 7에서와 같이 5고조파, 7고조파, 11고조파 및 13고조파의 함유율이 IEEE-519의 규제기준치를 초과하였다.

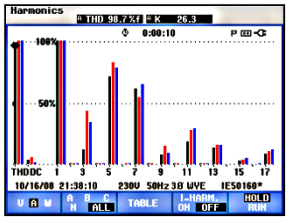


그림 20 전류고조파 스펙트럼
Fig. 20 Current spectrum

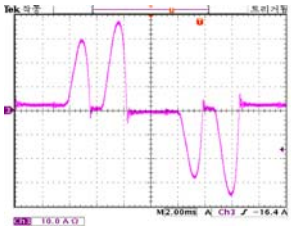


그림 21 전원측 전류파형
Fig. 21 Current waveform

표 7 필터설치 전 전류고조파 함유율
Table 7 Current harmonic components without filter

구 분	고조파 함유율(%)				
	기본파	5차	7차	11차	13차
필터설치 전	100	72.6	61.8	20.9	13.2
IEEE-519	-	≤12%	≤12%	≤5.5%	≤5.5%

PCC에 5고조파 필터만을 설치한 후의 전류고조파 스펙트럼 및 전류파형의 측정결과는 다음과 같으며 전류고조파 함유율은 표 8과 같이 5고조파 함유율이 현저히 감소하였음을 알 수 있었다.

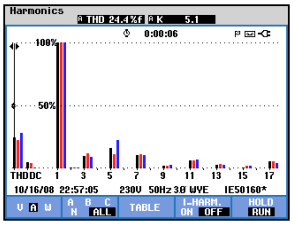


그림 22 전류고조파 스펙트럼
Fig. 22 Current spectrum

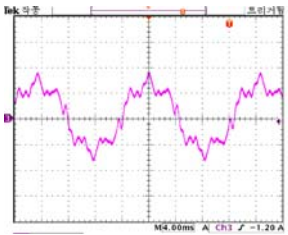


그림 23 전원측 전류파형
Fig. 23 Current waveform

표 8 5고조파 필터 설치후의 전류고조파 함유율
Table 8 Current harmonic components after 5th filter

구 분	고조파 함유율(%)				
	기본파	5차	7차	11차	13차
필터설치 전	100	72.6	61.8	20.9	13.2
5th필터설치후	100	16.5	10.5	6.6	3.0

PCC에 7고조파 필터만 설치한 후 전원측 전류고조파 스펙트럼 및 전류파형의 측정결과는 다음과 같으며 제7고조파는 현저히 줄어 규제기준치를 만족하였다. 다만, 제5고조파의 함유율이 다소 증가한 것은 제7고조파 필터의 커패시터와 선로 리액턴스와의 병렬공진에 의한 것으로 판단된다.

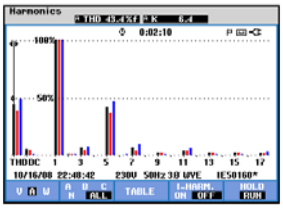


그림 24 전류고조파 스펙트럼
Fig. 24 Current spectrum

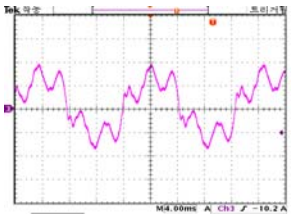


그림 25 전원측 전류파형
Fig. 25 Current waveform

표 9 7고조파 필터 설치후의 전류고조파 함유율
Table 9 Current harmonic components after 7th filter

구 분	고조파 함유율(%)				
	기본파	5차	7차	11차	13차
필터설치 전	100	72.6	61.8	20.9	13.2
7th필터설치후	100	39.9	4.8	4.9	2.5

PCC에 5고조파 및 7고조파 필터를 병렬설치한 후의 전류고조파 스펙트럼, 전원측 전류파형 및 전류고조파 함유율은 다음과 같으며 모든 차수의 고조파가 규제 제한치 이내로 현저하게 감소하였음을 알 수 있다. 즉, 실험결과는 시뮬레이션 결과와 유사하게 각 차수의 고조파 필터가 해당 차수의 고조파 함유율을 감소시켜 규제기준인 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치 요건을 만족하였으며, 각 차수별 전류고조파 함유율은 표 10과 같다. 다만 시뮬레이션 결과와 실험결과간의 차이발생은 리액터와 콘덴서의 제작오차 등에 기인한 것이며 오차는 허용범위(리액터: -10, +25%, 커패시터: -5, +15%) 이내였으므로 전체 필터 성능에는 큰 영향을 주지 않았다.

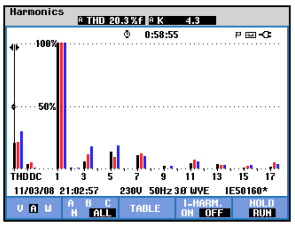


그림 26 전류고조파 스펙트럼
Fig. 26 Current spectrum

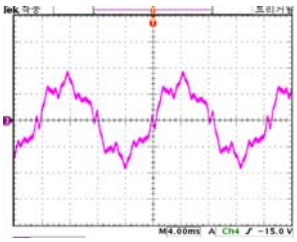


그림 27 전원측 전류파형
Fig. 27 Current waveform

표 10 5 및 7고조파 필터 설치후의 전류고조파 함유율

Table 10 Harmonic components after 5th and 7th filter

구 분	고조파 함유율(%)				
	기본파	5차	7차	11차	13차
필터설치 전	100	72.6	61.8	20.9	13.2
ACL+5th+7th	100	7.9	11.2	4.5	2.9
IEEE-519	-	≤12%	≤12%	≤5.5%	≤5.5%

6. 결 론

본 논문에서는 3상 정류기부하를 위한 수동 고조파필터를 해석하고 설계하는데 전달함수의 방법을 이용하였다. 이 방법은 지금까지 통용되어왔던 설계방법에 비해 두 가지 관점에서 매우 유용하다. 즉, 분석적 해석방법과 도식적 해석방법의 두 가지 방법을 이용하여 매우 쉽고 간단한 방법으로 필터의 효과를 확인할 수 있다는 점이다. 전자는 중첩의 원리를 이용한 선형미분방정식의 전달함수 해를 구하는 방식이고, 후자는 각 필터와 계통인자들의 상호작용을 도식화하여 가시적으로 판단이 용이한 방식이다. 지금까지 주로 사용된 라플라스방정식의 영점과 극점을 구하여 설계하는 방식은 많은 시간적 소모는 물론 대수적인 실수를 범할 수도 있었다. 하지만 전달함수의 방법은 지금까지의 방법보다 실용적이고, 효과적인 솔루션을 제공해 준다. 설계과정은 수치와 도해의 시행착오를 통한 반복적인 방법으로 그래픽의 수치를 수정해 나가는 방식이다. 본 논문에서 전달함수의 방법을 이용해서 해석하고 설계한 수동고조파필터는 실험적 방법으로 그 효과를 확인하였다. 실험결과 필터설치 후는 설치 전에 비하여 제5고조파는 72.6%에서 7.9%, 제7고조파는 61.8%에서 11.2%, 제11고조파는 20.9%에서 4.5%, 제13고조파는 13.2%에서 2.9%로 현저하게 저감시켜 규제기준인 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치 요건을 만족하였다. 따라서 본 논문에서 제안한 전달함수 방법에 의한 수동고조파필터의 해석 및 설계방법은 기존의 설계방법에 비해 전술한 장점 외에도 성능측면에서도 적합한 것으로 확인되었다.

감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

[1] J. Arrillaga and N. R. Watson, Power System Harmonics, Second Edition, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, pp. 228-237, 2003

[2] J. K. Phipps, "A Transfer Function Approach to Harmonic Filter Design", IEEE Industry Applications Magazine, pp. 68-79, March/April 1997

[3] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", pp. 77~80, 1992

[4] R. C. Dugan, Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill, pp. 264-273, 2002

[5] H. L. Willis, Power System Capacitors, Taylor & Francis, pp. 389-414, 2005

저 자 소 개

조 영 식 (曺 英 植)

1990년 창원대 전기공학과 졸업. 2009년 충남대 전기공학과 졸업(석사), 2009년~현재 동대학원 박사과정 중, 1992년~1999년 한국전력공사, 1999년~2005년 한국전기안전공사 부장, 2005~현재 한국원자력안전기술원 선임

차 한 주 (車 翰 周)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사), 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박), 1990년~2001년 LG 산전 연구소 책임연구원, 2005년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수