

# 단일동조 수동고조파필터 설계시의 동조계수( $\delta$ ) 및 양호도( $Q$ )값 연구

논 문
59P-1-11

## A Study on Tuning Factor( $\delta$ ) and Quality Factor( $Q$ ) Values in Design of Single-Tuned Passive Harmonic Filters

조영식\*·차한주†  
(Young-Sik Cho · Han-Ju Cha)

**Abstract** - This paper presents how to decide on tuning factor( $\delta$ ) and quality factor( $Q$ ) values in design of single-tuned passive harmonic filters. Tuning factor( $\delta$ ) and quality factor( $Q$ ) values have to consider before decision on circuit parameters of passive filters. A Study on these two value has not been scarcely performed and only experienced values has been used in passive harmonic filter design by far. As a experienced value, in cases of 5th and 7th filter, tuning factor( $\delta$ ) is about 0.94 and 0.96 respectively and quality factor( $Q$ ) is, in all cases of, 50. If Single-tuned passive harmonic filter will be off-tuned, performance of filter will be decreased steeply and occur to parallel resonance between system reactance and filter capacitance. Therefore During the operation, In order not to off-tuning, Filter must be tuned at former order than actual tuning order. This is the same that total impedance of filter must have a reactive impedance. In this paper, Tuning factor( $\delta$ ) is decided via example of real system and using the bode-plot and then performance of filters confirmed by filter current absorbtion rate. And Quality factor( $Q$ ) decided using the bode plot in example system and then performance of filters confirmed by filter current absorbtion rate also, which makes a calculated filter parameters to satisfy IEEE-519 distortion limits. Finally, Performance of the designed passive harmonic filter using the tuning factor( $\delta$ ) and quality factor( $Q$ ) values, decided in this paper is verified by experiment and shows that 5th, 7th, 9th, 11th and 13th current harmonic distortions are decreased within IEEE-519 distortion limits, respectively.

**Key Words** : Passive Filter, Harmonic, Passive Harmonic Filter, Tuning Factor, Quality Factor

### 1. 서 론

선형 네트워크에 정현파의 정전압이 인가되었을 때 정현파의 전류가 생기게 되는데, 이때 비선형적인 요소들이 유입되면 필연적으로 고조파가 발생한다. 이러한 고조파는 변압기의 손실증가로 인한 용량감소 및 소손, 유도전동기의 토크 및 회전수 감소, 3상 4선식 회로의 중성선 과열, 정류기 및 각종 제어장치의 제어신호 교란, 각종 전자부품의 고장 및 수명저하 등의 각종 부작용을 초래한다. 이때의 고조파 저감대책으로 널리 이용되는 방법 중 하나는 필터를 이용한 방법이며 수동필터(Passive filter)와 능동필터(Active filter)로 구분된다. 수동필터는 리액터( $L$ )와 콘덴서( $C$ )소자를 조합하여 특정 주파수에서 저 임피던스가 되는 분로를 구성하여 고조파 전류를 흡수하는 것으로서 동조필터, 고차필터 및 손실저감 형인 C-type 필터 등이 있다[1]. 능동필터는 보상 부하에 직렬 또는 병렬로 접속되어 변류기(CT)를 사용하여 부하전류를 검출하고, 부하전류에 포함된 고조파성분을 검출한 후 역위상의 전류를 능동필터에 흐르게 하여 고조파전류

를 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[2]. 그러나 필터를 이용한 고조파제거 방법은 설치된 고조파 필터가 해당 고조파의 흡수원으로 작용하여 고조파 필터를 설치한 수용가의 전기요금을 증가시키는 원인이 될 수도 있다. 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. 본 논문에서는 수동필터의 설계 시 필터 회로정수인  $R, L, C$ 를 결정하기 전에 미리 고려해야할 중요한 두 가지 변수인 동조계수( $\delta$ )와 양호도( $Q$ ) 값을 결정하는 방법을 제시한다. 이들 두 계수를 결정하는 데에는 실제 필터설계사례를 이용한 계수 값을 직접 결정하는 방법을 사용한다. 즉, 지금까지 통상적으로 사용되어 온 경험적인 값들을 실 계통에서 직접 결정하여 결정된 값에 대한 신뢰성을 높였으며, 결정된 값의 신뢰성 검증은 실험을 통해 확인한다. 지금까지 사용된 동조계수( $\delta$ ) 값은 모든 차수에서 동일한 값인 5차 필터인 경우는 4.7차, 7차 필터의 경우는 6.7차에 동조되도록 설계하여왔으나 본 논문

\* 정 회 원 : 한국원자력안전기술원 선임, 충남대학교 공대 전기공학과 박사과정

† 교신저자, 정 회 원 : 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수·공박  
E-mail : hjcha@cnu.ac.kr

접수일자 : 2009년 10월 19일

최종완료 : 2010년 1월 5일

을 통해 결정된 값은 보다 상세한 값을 제시한다. 양호도(Q) 값의 경우도 지금까지의 문헌에 의하면 저차 단일동조 필터의 경우는 30~60범위의 값을 가지는 것으로 나와 있지만 본 논문에서는 주파수 영역의 해석결과를 통해 보다 최적화 된 값을 제시한다. 즉, 동조계수(δ)의 값은 실 사례를 통해 최적의 값을 결정한 후 탈 동조(Off-tuning)시의 필터 전류 흡수효과 및 보드선도를 통해 필터의 효과를 확인하고, 양호도(Q)의 값은 보드선도를 통해 최적의 값을 결정한 후 값의 변동에 따른 필터효과를 확인한다. 이들 두 계수 값을 반영하여 설계한 필터는 최종적으로 사례연구 대상계통에 적용하여 필터효과를 검증하며, 필터효과를 검증할 위해 적용된 고조파 저감목표치는 IEEE-519의 전류고조파 왜형을 제한치를 기준으로 한다[2,3].

## 2. 단일동조 수동고조파 필터

### 2.1 수동고조파필터(Passive Harmonic Filters)

수동고조파필터는 교류필터, LC필터 또는 Passive 필터라고 부르며 저차의 단일고조파에 동조시키는 동조필터와 복수고조파의 흡수를 위한 고차필터 등이 있다. 수동필터의 기본 원리는 L과 C의 공진현상을 이용한 것으로 n차 고조파에서  $nX_L - X_C/n = 0$ 이 되게 함으로써 n차 고조파 전류는 대부분 여기에 흡수되고 유출전류를 저감시킬 수 있다. 그러나 수동필터는 계속적으로 변화하는 고조파는 제거할 수 없고 직·병렬공진으로 인해 전압을 왜곡시키기 때문에 보통은 능동필터(Active Filter)와 함께 사용된다. 이러한 단점에도 불구하고 수동필터는 가격이 저렴하고 구조가 간단하기 때문에 능동필터에 비해 널리 사용된다. 그림 1은 싸이리스터 변환기를 고조파발생원으로 한 수동필터의 구성도에이다. 등가회로에서 모선의 고조파 전압( $V_n$ ), 전류( $I_{sn}$ ) 및 필터 측의 고조파전류( $I_{fn}$ )를 다음과 같은 관계식으로 나타낼 수 있다.

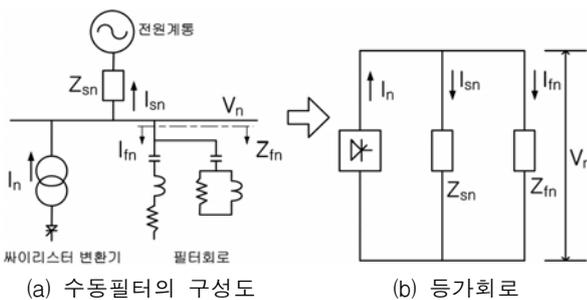


그림 1 고조파 분류등가회로

Fig. 1 Harmonic equivalent circuit

$$V_n = \frac{Z_{fn} \cdot Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \cdot I_n = \frac{1}{Y_{fn} + Y_{sn}} \cdot I_n \quad (1)$$

$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \cdot I_n = \frac{Y_{sn}}{Y_{fn} + Y_{sn}} \cdot I_n \quad (2)$$

$$I_{fn} = \frac{Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \cdot I_n = \frac{Y_{fn}}{Y_{fn} + Y_{sn}} \cdot I_n \quad (3)$$

### 2.2 단일동조필터(Single Tuned Filters)

R, L, C 직렬회로로 구성된 수동 고조파필터 가운데 단일 고조파차수에서 공진하는 즉, 공진주파수에서 저 저항특성을 가지도록 한 것이 단일동조필터이다. n차 고조파필터의 합성임피던스는 다음과 같다.

$$Z_n = R_n + j(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n}) \quad (4)$$

공진주파수에서  $\omega L_n = 1/\omega C_n$ 이므로  $Z_n = R_n$ 이 된다. 그림 2는 동조필터의 회로도 및 임피던스 특성을 보여주고 있으며 동조필터를 구성하는 R, L, C의 설계 값은 부하에 따라 정해진다. 즉, 제거하고자 하는 고조파 차수(h)에서 동조가 일어나도록 하면 된다.

$$h = \frac{1}{\omega_0 \sqrt{L_r C_r}} \quad (5)$$

여기서,  $\omega_0$ 는 시스템 각 주파수로서 377rad/s이다. 부하의 주파수가 동조주파수와 일치하면 동조필터의 임피던스는 저항(R)이 작을 경우 거의 영이 된다. 따라서 동조주파수의 전류는 동조필터로 유입(Sink)되는 원리이다. 즉, 고조파필터의 주된 목적이 하나 또는 다수의 고조파 전류·전압을 제거하는데 있으므로 특정 주파수가 설비나 계통에 유입하는 것을 방지하려는 경우 해당 주파수에 대해 낮은 임피던스 값을 갖는 리액터와 커패시터를 직렬회로로 구성된 필터를 이용하여 줄일 수 있다. 이러한 분기필터(Shunt filter)는 유도 및 용량리액턴스가 일치하는 주파수에서 동조된다. 그림 2에서 필터의 통과대역(PB)은 필터의 리액턴스와 저항이 일치하는 주파수에서 곡선이 꺾이는 부분이며, 임피던스 각이 45°이고 임피던스가  $\sqrt{2}R$ 인 경우이다[1,4].

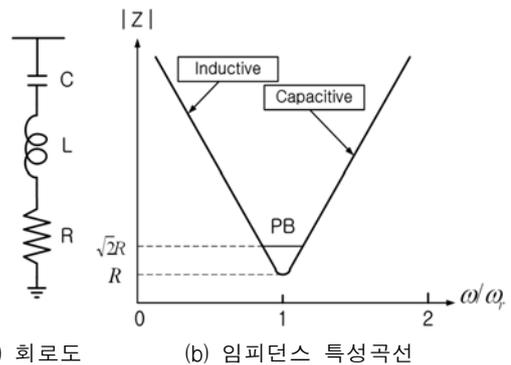


그림 2 단일동조필터

Fig. 2 Single-tuned filter

### 3. 동조계수(δ)와 양호도(Q) 값의 결정

필터 설계 시 필터회로정수 R, L, C값을 결정하기 전에 먼저 고려해야할 두 가지 중요한 계수가 있는데, 동조계수(δ)와 양호도(Q)가 그것이다. δ와 Q를 반영한 필터 임피던스를 구하기 위해서는 다음과 같은 관계식을 적용한다.

$$\omega = \omega_n(1 + \delta) \tag{6}$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \tag{7}$$

여기서,  $\omega_n$ 은 rad/sec 값으로 표시되는 동조 각 주파수이다. 동조주파수에서 음(Ohm)값으로 표시되는 리액터나 커패시터의 리액턴스는

$$X_0 = \omega_n L = \frac{1}{\omega_n C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \tag{8}$$

이고,  $Q = \frac{X_0}{R}$  이므로  $L = \frac{X_0}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n}$ ,  $C = \frac{1}{\omega_n X_0} = \frac{1}{\omega_n RQ}$  가 된다. 위의 식(8)을 식(7)에 대입하여 정리하면

$$\omega L = \omega_n(1 + \delta) \cdot \frac{RQ}{\omega_n} = (1 + \delta)RQ,$$

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega_n(1 + \delta) \cdot \frac{1}{\omega_n RQ}} = \frac{RQ}{(1 + \delta)} \text{ 가 되므로}$$

$$Z_f = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = R + j\left[RQ\left(\frac{\delta(2 + \delta)}{1 + \delta}\right)\right] \text{ 가 된다.}$$

그러므로

$$Z_f = R\left[1 + jQ\delta\left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta}\right)\right] \tag{9}$$

$\delta$ 가 1보다 상대적으로 작은 값으로 가정하면

$$Z_f \approx R(1 + j2\delta Q) = X_0(Q^{-1} + j2\delta) \tag{10}$$

필터임피던스의 크기  $|Z_f|$ 는 다음 식과 같이 된다[4].

$$|Z_f| \approx R(1 + 4\delta^2 Q^2)^{1/2} \tag{11}$$

### 3.1 동조계수( $\delta$ ) 값의 결정

단일동조필터는 제거하고자하는 주파수에서 리액턴스 값이 0이 되게 하여 해당 고조파 전류를 필터로 분류시켜 고조파를 제거하는 것이다. 그러나 실제로는 여러 가지 원인으로 필터리액턴스 값이 0이 아닌 값으로 되어 필터가 동조에서 벗어나게 되고 고조파 전류 흡수율에 영향을 미치게 된다. 즉, 경년열화, 주변 온도 등에 의한 특성변화로 합성임피던스 값이 0이 아닌 실효적인 저항으로 작용하게 되는 것이다. 이때 리액턴스는 회로 조건에 따라 용량 성(capacitive) 또는 유도 성(inductive)이 되기도 하는데 필터의 순기능을 수행하기 위해서는 합성 리액턴스가 유도성이 되도록 설계하여야 한다[1,5]. 따라서 필터설계 시는 운전 중 필터의 합성리액턴스 값이 용량 성 값을 가지지 않도록 사전에 이를 충분히 고려해야 하며 이를 위해서는 실제 공진주파수( $h_n$ )보다 약간 낮은 주파수( $h$ )에서 공진이 발생되도록 하는 것이 필요하며 이때 고려해주는 계수를 동조계수( $\delta$ )라 한다.

$$h = h_n + (\delta \times h_n) \tag{12}$$

### 3.1.1 실 사례를 통한 동조계수( $\delta$ ) 값의 결정

계통의 고조파전류는 계통내의 임피던스 조건에 따라서 분류되므로 필터 하더라도 동조차수에서 벗어나거나 다른 원인으로 임피던스에서 오차가 발생하면 그 효과는 저감된다. 따라서 필터의 검토 시에는 동조주파수에 대하여 임피던스가 잔류하고 있다는 전제조건으로 검토를 해야 한다. 리액터의 잔류임피던스와 계통 임피던스의 상호관계로 고조파 전류가 배분되며 필터의 고조파 흡수 능력이 결정된다. 동조계수( $\delta$ )는 식 (6)으로부터

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \tag{13}$$

가 되고, 더욱이  $L$  또는  $C$ 의 2%변동은 계통주파수를 1% 변동시키는 것과 같이 되어 동조계수  $\delta$ 는 다음 식으로 나타낼 수 있다[4].

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2}\left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n}\right) \tag{14}$$

필터를 동조주파수에서 이탈되게 하는 일반적인 원인은 다음과 같은 것들이다.

- 계통 기본주파수의 변동
- 열화와 온도에 기인하는 필터 커패시턴스와 인덕턴스 값의 변동
- 제작 시 발생하는 오차와 초기 값

식 (14)의 동조계수( $\delta$ )와 변동인자와의 관계식에서 실 사례의 값을 대입하여 동조계수 값( $\delta$ )을 계산하였다. 실제 사용된 값의 근거는 계통 기본주파수 변동 폭( $\Delta f$ )은 한전의 전기공급규정에서 규정한 값이고, 리액턴스의 변동 값( $\Delta L$ )은 국내 리액터 전문 제조사인 H사의 자체적용 오차 값을 적용하였으며, 커패시터의 변동값( $\Delta C$ )은 이탈리아의 유명 콘덴서 제조사인 A사의 제작기준을 적용하였다. 이들 변수들의 오차 값을 정리하면 표 1과 같다.

표 1 예상 오차 값  
Table 1 Anticipated errors

구분	예상 오차 범위
주파수	$\Delta f : \pm 2\%$
인덕턴스	$\Delta L : -10\% \sim +20\%$ [제작오차 : $-10\% \sim +20\%$ , Tolerance : $\pm 2\%$ ]
커패시턴스	$\Delta C : -4.5\% \sim +6.5\%$ [Aging : $-3\%$ , Temperature : $\pm 1.5\%$ , @25°C, Tolerance : $\pm 5\%$ ]

위의 오차 값들 중 실제 합성리액턴스를 용량 성으로 변화시키는데 기여하는 인자들은 커패시턴스( $C$ ) 값이 증가할 경우와 리액턴스( $L$ ) 값이 감소할 경우에 해당되므로 이들 값 중 가장 큰 값을 각각  $\Delta f = \pm 2\%$ ,  $\Delta L = -10\%$ ,  $\Delta C = +6.5\%$ 이다. 이 값들을 위의 식 (14)에 대입하여 계산하면  $\Delta f = +2\%$ ,  $\Delta L = -10\%$  및  $\Delta C = +6.5\%$ 인 경우  $\delta = +0.0025$ 이 되고,  $\Delta f = -2\%$ ,  $\Delta L = -10\%$  및

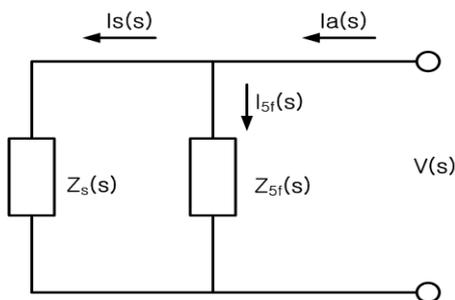
$\Delta C=+6.5\%$ 인 경우는  $\delta=-0.0375$ 가 된다. 계산된 두  $\delta$ 값 중 유도성의 임피던스 값을 갖도록 하는 값은  $-0.0375$ 가 되고, 이 값을 식 (12)에 대입하여 각 차수별로 필요한 동조차수 값을 구해보면 5고조파 필터의 경우는  $f_5=4.8125$ , 7고조파 필터의 경우는  $f_7=6.73375$ 가 된다. 나머지 차수의 경우에도 동일한 방법으로 계산하여 다음 표에 정리하였다.

**표 2** 동조계수( $\delta$ ) 적용시의 동조차수  
**Table 2** Tuning orders by tuning factor( $\delta$ )

차수	5차	7차	9차	11차	13차	15차	17차	19차
동조차수	4.813	6.734	8.663	10.59	12.51	14.44	16.36	18.29

**3.1.2 탈 동조(off-tuning) 시 필터의 전류흡수 효과**

위에서 결정한 동조계수 값( $\delta$ )의 적합성 확인을 위한 방법으로 필터의 고조파 흡수율 정도로서 평가하였다. 필터가 탈 동조(off tuning) 되었을 경우 5고조파 필터의 전류흡수 효과에 대해 사례연구 대상에 적용 후 확인하였다. 연구대상에 적용된 부하는 1.5 kW급 태양광발전용 제어시스템을 위한 3상 정류기이며 사용된 등가회로는 그림 3과 같고 양호도(Q) 값은 경험치인 50을 기준으로 하였다.



**그림 3** 등가 회로도  
**Fig. 3** Equivalent Circuit

필터가 5고조파에 완전 공진한 경우 5고조파필터에서의 전류흡수율은  $I_{5f}/I_a = 95.7\%$ 로서, 거의 모든 5고조파는 필터로 흡수된다. 그러나 커패시턴스 값이 +6.5% 증가하여 동조에서 벗어나게 되면 전류흡수율은 70.17%로 급격하게 감소하게 되고, 필터에서 흡수되지 않은 약 30%정도의 5고조파는 전원 측으로 확대되어 인접한 계통 및 설비에 영향을 주게 된다. 또한 커패시턴스 값이 -4.5%감소하여 동조에서 벗어나게 되면, 필터의 전류흡수율이 83.87%로 감소하게 되고 이 경우에도 약 20%정도는 역시 전원 측으로 확대되게 된다. 인덕턴스 값이 +20%증가하여 동조에서 벗어난 경우는 전류 흡수율은  $I_{5f}/I_a = 29.491\%$ 가 되어 필터의 전류흡수 능력은 거의 없는 상태가 되고, 인덕턴스 값이 -10% 감소한 경우도 전류흡수율이 51.95%로서 거의 절반의 고조파가 전원 측으로 확대됨을 알 수 있다. 7고조파 필터의 전류흡수 효과에 대해서도 동일한 방법으로 계산한 결과를 다음 표3에 정리하였다.

**표 3** 필터흡수 효과  
**Table 3** Filter absorption effects

구분	필터 임피던스 ( $Z_f$ ) [ $\Omega$ ]	필터흡수 전류( $I_f$ ) [A]	필터 흡수율(%)	
5th 필터	완전동조 시	0.359	4.785	95.7
	$X_C + 6.5\%$	1.129	3.509	70.17
	$X_C - 4.5\%$	0.722	4.194	83.87
	$X_L + 20\%$	3.603	1.475	29.49
	$X_L - 10\%$	1.829	2.598	51.95
7th 필터	완전동조 시	0.256	4.873	97.46
	$X_C + 6.5\%$	0.870	3.938	78.76
	$X_C - 4.5\%$	0.630	4.350	87.00
	$X_L + 20\%$	2.572	1.984	39.68
	$X_L - 10\%$	1.304	3.244	64.88

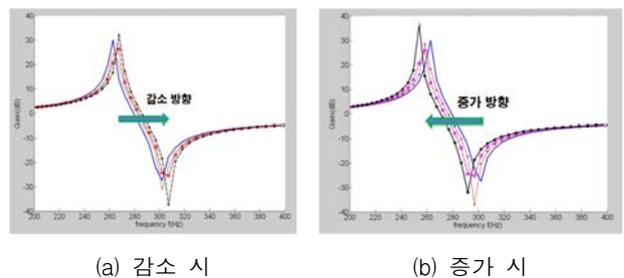
이상에서 알 수 있는 바와 같이 필터의 회로정수 값이 어떤 원인으로 인해 변하게 되면 필터의 합성임피던스에 영향을 주어 필터는 동조주파수에서 벗어나게 되고 필터 전류흡수율에 큰 변화를 주게 된다. 따라서 필터설계 시는 이러한 점을 사전에 고려해서 설계하여야 한다. 일반적으로 필터 효과를 높이려면 전원 측 고조파 임피던스에 대한 필터의 공진차수 임피던스를 충분히 작게 할 필요가 있고 이를 위한 구체적인 방법은 다음과 같다.

- 상용 주파수에서의 필터 유도리액턴스 값을 작게 한다. 즉, 콘덴서의 진상용량을 크게 한다.
- 콘덴서와 리액터간의 동조차수에서 공진이 벗어날 경우 필터의 합성리액턴스 값이 용량성이 되지 않도록 리액터의 %리액터를 공진점보다 크게 잡아야 한다.

**3.1.3 보드선도를 통한 필터성능의 해석**

1) 커패시터 값의 증감에 따른 동조계수의 거동

커패시터 값을 단계적으로 감소(-2%⇒-3%⇒-4.5%)시켰을 경우 필터의 주파수영역 성능곡선을 그림 4(a)에, 증가(+2%⇒+4%⇒+6.5%)시켰을 경우의 성능곡선을 그림 4(b)에 나타내었다. 그래프에서처럼 커패시터의 값이 감소 시는 그래프는 우측으로, 증가 시는 그래프가 좌측으로 이동하는 특성을 보였다.

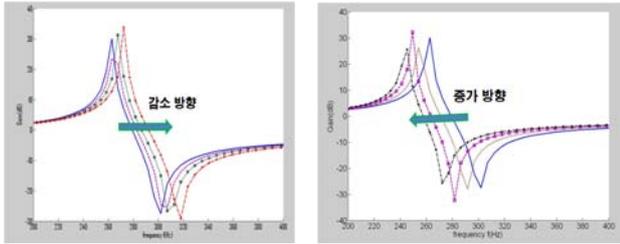


**그림 4** 커패시턴스 값의 증감에 따른 동조계수의 거동  
**Fig. 4** Behaviors of  $\delta$  by Capacitance

2) 리액터 값의 증감에 따른 동조계수의 거동

리액터 값을 단계별로 감소시켰을 경우의 필터의 주파수

영역의 성능곡선을 그림 5(a)에, 증가시의 성능곡선을 그림 5(b)에 나타내었다. 그래프에서 보듯이 리액터의 값을 감소 시는 그래프는 우측으로 이동하였으며, 반대로 증가 시는 그래프가 좌측으로 이동하는 특성을 보였다.



(a) 감소시 (b) 증가시

그림 5 리액턴스 값의 증감에 따른 동조계수의 거동  
Fig. 5 Behaviors of  $\delta$  by Reactance

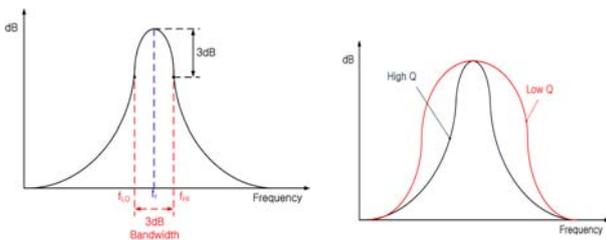
### 3.2 양호도(Q) 값의 결정

수동동조필터는 공진현상을 이용한 것이기 때문에 공진회로에서는 양호도(Quality factor, Q)값은 매우 중요한 값이다. 공진에서의 양호도는 주파수 선택 특성품질을 의미하며 그 정의는 아래와 같다[1~6].

$$Q = \frac{f_r}{f_{HI} - f_{LO}} = \frac{\text{공진주파수}}{3dB \text{ Band width}} \quad (15)$$

그림 6에서처럼 공진주파수점에서 양쪽으로 3dB 즉, 반으로 감쇄되는 지점의 주파수간의 차이를 소위 3dB 대역폭이라고 하는데, 공진주파수를 3dB 대역폭으로 나눈 것이 바로 Q값이다. 즉 공진특성이 샤프할수록 3dB 대역폭은 좁아지고, 결국 Q값은 커진다. 다시 말해 Q가 낮으면 대역이 넓다는 의미이고 높으면 협대역의 의미이다. 공진이란 것이 결국 특정 주파수의 선택특성을 말하는 것이기 때문에 얼마나 샤프하게 주파수를 선택해낼 수 있느냐를 의미하는 지표가 결국 Q값이다. Q값은 대체로 높아야 좋은 경우가 많지만, 역으로 낮아야 할 경우도 있기 때문에 단순히 어떤 값이 좋다고 말할 수는 없다. 위에서 정의했던 대역폭의 Q값은 공진기에서 아래와 같은 수식으로 표현되기도 한다.

$$Q = \omega \frac{\text{average energy stored}}{\text{energy loss/second}} \quad (16)$$



(a) 양호도(Q)의 정의 (b) 양호도(Q)의 크기

그림 6 양호도(Q)의 정의 및 크기  
Fig. 6 Definition and magnitude of quality factor(Q)

결국 저장되는 에너지와 손실되는 에너지의 비에 주파수 개념을 적용한 수식으로, 동일한 Q인데 표현만 다른 것이다. 대역폭의 Q값은 실제 측정을 통해 알아낼 수 있는 값이고, 아래의 수식은 공진기의 각종 조건을 통해 그 Q값을 미리 계산하기 위해 필요한 것이다.

$$Q(\text{series LC}) = \omega_0 \frac{2W_m}{P_{loss}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (17)$$

이상에서 살펴본 양호도 값과 필터의 관계를 정리하면 다음과 같다.

- Q값은 R에 대한 의존성을 가진다. 직렬회로에서는 높은 Q값을 가지려면 낮은 R값을 가져야 하고, 병렬회로에서는 높은 Q값을 가지려면 상대적으로 큰 R값을 가져야 한다.
- 대역폭(BW)은 Q값에 반비례한다. 따라서 필터회로의 주파수 선택성은 Q값에 의해 결정된다. Q값이 큰 회로는 작은 대역폭을 갖고 결과적으로 회로는 주파수 선택을 매우 정밀하게 할 수 있다.

#### 3.2.1 보드선도를 통한 양호도(Q)값 결정

수동필터 설계시의 양호도(Q)값은 저차 단일동조필터의 경우는 경험적으로 20~50정도의 값을 가지고, 고차필터의 경우는 5~10정도의 값을 가진다. 라고 알려져 있다. 다음 그림 7, 8, 9는 양호도 값의 변화에 따른 주파수 응답특성을 보드선도를 이용하여 확인한 결과이다.

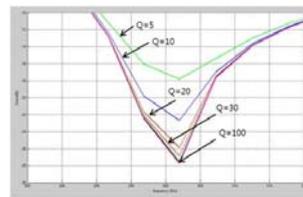


그림 7 5고조파 필터의 경우

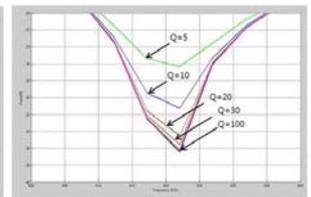


그림 8 7고조파 필터의 경우

Fig. 7 5th harmonic filter Fig. 8 7th harmonic filter

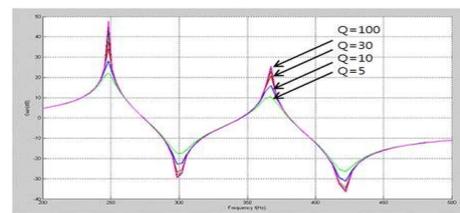


그림 9 5고조파 필터+7고조파 필터의 경우

Fig. 9 5th+7th harmonic filters

위 그림에서와 같이 양호도(Q)의 값이 클수록 뾰족한 형태의 곡선을 나타내어 해당차수의 고조파를 흡수하는 효과가 크지만, 너무 크게 되면 리액턴스의 값을 크게 하여 비경제적이 되고, Q값이 작을수록 넓은 범위의 고조파를 제거하는 효과는 있지만 저항 값의 증가로 인한 필터손실이 증가시키는 결과를 가져온다. 따라서 필터를 설계함에 있어서 요구되는 필터성능을 고려하여 최적의 값을 결정하는 것은

매우 중요하다 할 수 있다. 본 논문의 필터는 특정 고조파 차수에 동조하는 단일동조필터에 관한 것이므로 넓은 범위의 고조파 제거보다는 단일차수의 고조파를 제거하는 목적이 우선되어야 할 것이다. 따라서 그래프에서처럼 Q값의 경우 30~100이내에서는 비교적 동일한 리액턴스 값으로 동일한 Sharpness효과가 나타났다. 따라서 통상 수동필터 설계시의 경험치인 50은 적절한 값으로 확인되었으며, 본 논문에서도 양호도(Q)의 값을 최종적으로 50으로 결정하였다.

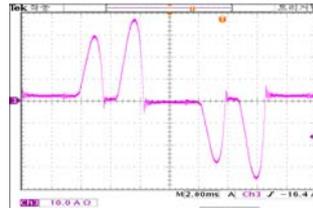


그림 10 전류 파형  
Fig. 10 Current waveform

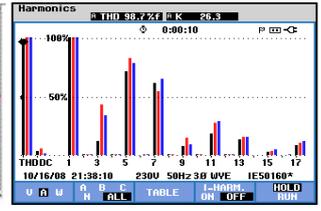


그림 11 전류 스펙트럼  
Fig. 11 Current spectrum

### 3.2.2 양호도 값의 변동에 따른 고조파 흡수효과

양호도(Q)값이 5, 10, 30, 50, 70, 100인 경우에 대해 5고조파필터의 전류흡수효과에 대해 알아보았다. 그림 3 등가 회로도에서 양호도 값은 필터의 첨예도(Sharpness)와 관련이 있으며, 필터임피던스의 저항(R) 값에 반비례하는 값을 가진다. 먼저, Q=5인 경우의 전류 흡수율은  $I_f/I_a = 28.6\%$ 로서 필터의 기능을 거의 못하는 수준이다. Q=10인 경우의 전류 흡수율은  $I_f/I_a = 51.2\%$ 로서 절반정도의 고조파만 필터로 흡수된다. Q=30인 경우는 87.28%로서 약 10%정도의 고조파는 전원 측으로 확대되며, Q=50인 경우는 94.48%, Q=70인 경우는 97.98%로서 거의 모든 고조파가 필터에 흡수됨을 알 수 있다. Q=100인 경우도 98.66%로서 Q=70인 경우와 유사하게 거의 모든 고조파가 필터로 흡수됨을 알 수 있다. 7고조파 필터의 경우도 동일한 방법으로 계산한 결과를 다음 표 4에 정리하였다.

표 4 Q값에 따른 고조파 필터의 전류흡수율 비교  
Table 4 Comparisons of current absorption factors

구분	Q <sub>5</sub> (%)	Q <sub>10</sub> (%)	Q <sub>30</sub> (%)	Q <sub>50</sub> (%)	Q <sub>70</sub> (%)	Q <sub>100</sub> (%)
5th 필터	28.6	51.2	87.28	94.48	97.98	98.66
7th 필터	38.54	64.12	92.90	97.98	98.58	99.38

## 4. 실험 결과

본 논문에서 결정한 동조계수  $\delta(-0.0375)$ 와 양호도 Q값(50)을 이용하여 사례 연구대상 계통에 5고조파 필터 및 7고조파 필터의 필터효과에 대해 실험하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

### 4.1 필터 설치 전

5고조파 및 7고조파 필터 설치 전에 측정된 전원 측 전류( $I_s$ ) 고조파 함유율, 전류 파형 및 전류 스펙트럼은 다음과 같으며, 측정된 전류고조파 값이 고조파에 관한 국제규제기준인 IEEE-519의 제한 값을 크게 초과하였다.

표 5 필터설치 전 고조파함유율  
Table 5 Current harmonic components without filter

구분	기본파	5고조파	7고조파	11고조파	13고조파
필터설치 전	100%	72.6%	61.8%	20.9%	13.2%
IEEE-519	-	≤12%	≤12%	≤5.5%	≤5.5%

## 4.2 필터 설치 후

### 4.2.1 5고조파 필터설치 후

5고조파 필터설치 후는 필터설치 전에 비해 5고조파의 함유율이 72.6%에서 16.5%로 감소하였다. 이 같은 결과는 IEEE-519의 규제목표치(≤12%)를 다소 상회하였으나, 이는 필터 회로정수 값의 설계 값과 실제 값 간의 차(差)에 의한 것으로 판단된다. 그러나 본 논문에서의 최종적인 구현 목표인 7고조파 필터와의 병렬설치 결과에서는 규제기준치를 만족한 것으로 나타났다.

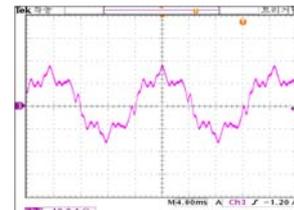


그림 12 전류 파형  
Fig. 12 Current waveform

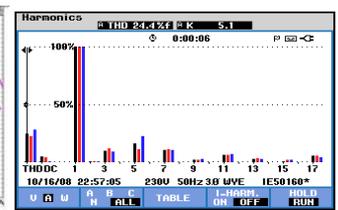


그림 13 전류 스펙트럼  
Fig. 13 Current spectrum

### 4.2.2 7고조파 필터설치 후

7고조파 필터설치 후는 필터설치 전에 비해 7고조파의 함유율이 61.8%에서 4.8%로 감소하였다. 이는 IEEE-519의 규제목표치(≤12%)를 만족한 값이다.

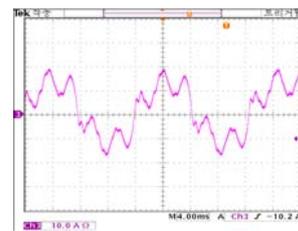


그림 14 전류 파형  
Fig. 14 Current waveform

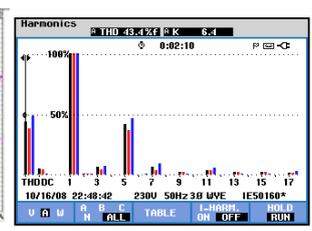


그림 15 전류 스펙트럼  
Fig. 15 Current spectrum

### 4.2.3 5고조파 필터와 7고조파 필터의 병렬설치 후

5고조파 및 7고조파 필터 설치 후의 전류고조파 함유율은 다음 표 6에 정리하였다.

실험결과, 5고조파 필터 단독설치 시는 5고조파 함유율이 16.5%, 7고조파 필터 단독설치 시는 7고조파 함유율이 4.8%로 각각 나타났으나, 5고조파 필터와 7고조파 필터의 병렬설치 후는 각각 5고조파는 7.9%로 감소되었고, 7고조파는 11.2%로 단독설치 시보다 다소 증가한 양상을 나타내었다. 이것은 두 가지 필터의 병렬설치 후의 효과는 두 필터의 회로정수 간

표 6 필터설치 후 고조파함유율

Table 6 Current harmonic components after filters

구분	기본파	5고조파	7고조파	11고조파	13고조파
Only 5th 필터	100%	16.5	10.5	6.6	3.0
Only 7th 필터	100%	39.9	4.8	4.9	2.5
5th&7th 필터	100%	7.9	11.2	4.5	2.9
IEEE-519	-	≤12%	≤12%	≤5.5%	≤5.5%

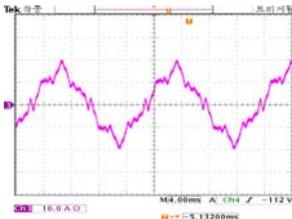


그림 16 전류 파형

Fig. 16 Current waveform

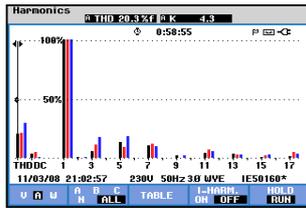


그림 17 전류 스펙트럼

Fig. 17 Current spectrum

상호작용으로 또 다른 결과를 나타낼 수 있음을 반증하는 결과이다. 최종적으로, 5고조파 필터 및 7고조파 필터를 병렬 설치 후는 표 6에서와 같이 제5고조파는 7.9%, 제7고조파는 11.2%, 11고조파는 4.5%, 제13고조파는 2.9%로 감소되어 모든 차수의 전류고조파 함유율이 본 논문에서 고조파 저감 목표로 정한 국제규제기준인 IEEE-519의 제한 값을 모두 만족하였다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 단일동조수동필터의 설계 시 필터 회로정수인  $R, L, C$ 를 결정하기 전에 미리 고려해야할 중요한 두 변수인 동조계수( $\delta$ )와 양호도( $Q$ ) 값의 결정방법에 관해 논하였다. 동조계수( $\delta$ )의 값은 실 사례를 통해 최적의 값을 결정 후 탈 동조(Off-tuning)시의 필터 전류 흡수효과 및 보드선도를 이용하여 필터의 효과를 확인하였으며, 양호도( $Q$ )의 값은 보드선도를 통해 최적의 값을 결정한 후 값의 변화에 따른 필터 효과를 확인하였다. 필터의 성능검증을 위한 고조파 저감목표치는 IEEE-519의 전류고조파 왜형률 제한치를 기준으로 하였으며, 최종적으로 본 논문에서 결정한 필터의 동조계수( $\delta$ )와 양호도( $Q$ ) 값의 적절성은 사례연구대상에 적용한 실험을 통하여 입증하였다. 그 결과 단일동조필터를 위한 동조계수  $\delta$ 는 5고조파 필터의 경우는 4.813차, 7고조파 필터의 경우는 6.734차, 양호도  $Q$ 값은 50을 적당한 값으로 결정하였다. 이들 결정된 값을 사례연구 대상계통에 적용시켜 필터효과를 실험한 결과 제5고조파는 72.6%에서 7.9%로, 제7고조파는 61.8%에서 11.2%로, 제11고조파는 20.9%에서 4.5%로, 제13고조파는 13.2%에서 2.9%로 현저하게 감소하였으며 국제고조파 규제기준인 IEEE-519의 규제요건을 모두 만족하였다. 따라서 본 논문에서 결정한 동조계수 값( $\delta=-0.0375$ )와 양호도 값( $Q=50$ )은 적절한 것으로 실험을 통해 확인되었다.

### 감사의 글

본 결과물은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지 자원인력양성사업의 연구결과입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. K. Phipps, A Transfer Function Approach to Harmonic Filter Design, IEEE Industry Applications Magazine, pp. 68~79, March/April 1997
- [2] 조영식 외, “3상 정류기부하에 대한 수동 고조파 필터의 해석 및 설계”, 전기학회논문지 58P-3-13, pp 316~322, September 2009
- [3] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, pp. 77~80, 1992
- [4] J. Arrillaga and N. R. Watson, “Power System Harmonics”, Second Edition, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, John Wiley & Sons, pp. 228~237, 2003
- [5] R. C. Dugan, Electrical Power Systems Quality, Second Edition, McGraw-Hill, pp. 264~273, 2002
- [6] H. L. Willis, Power System Capacitors, Taylor & Francis, pp. 389~414, 2005

### 저 자 소 개



#### 조 영 식 (曹英植)

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(공학박), 1990년~2001년 LG 산전 연구소 책임연구원, 2005년~현재 충남대학교 전기정보통신공학부 부교수