

단일동조 수동고조파필터 설계시의 동조계수(δ) 및 양호도(Q) 값 연구

조영식\*, 차한주\*\*  
한국원자력안전기술원\*, 충남대\*\*

Study on tuning factor(δ) and quality factor(Q) for design of a single-tuned PHF

YoungSik Cho\*, HanJu Cha\*\*  
Korea Institute of Nuclear Safety\*, ChungNam National University\*\*

**Abstract** - 본 논문에서는 대표적인 고조파 저감기법인 단일동조 수동고조파필터(single-tuned Passive Harmonic Filter)의 설계 시에 반드시 고려해야 할 최적의 동조계수(δ)와 양호도(Q)값의 결정 방법을 제안하였다. 두 값들은 실 사례를 통하여 결정하였고, 결정된 값들은 보드선도를 이용한 주파수 영역 해석을 수행한 후 최종적으로 이 값들을 반영하여 설계된 수동고조파필터의 성능확인을 통하여 본 논문에서 결정된 두 값들의 적합성을 평가하였다.

1. 서 론

선형 네트워크에 비선형적인 요소들이 유입되었을 때 필연적으로 고조파가 발생한다. 이러한 고조파 저감기법으로 필터를 이용한 방법이 가장 널리 이용되고, R, L, C의 직렬공진 원리를 이용한 수동고조파 필터가 많이 사용된다. 수동고조파 필터는 저차의 단일 고조파에 동조하는 동조필터와 복수고조파의 흡수를 위한 고차필터가 있으며 이러한 필터설계 시는 필터 회로정수인 R, L, C값을 결정과 더불어 고려해야 할 중요한 두 변수가 있는데 동조계수(δ)와 양호도(Q) 값이다[1].

2. 동조계수(δ) 값의 결정

단일동조필터(single-tuned filter)는 제거하고자 하는 주파수에서 리액턴스 값이 0이 되게 하여 해당 고조파 전류를 필터로 분류시켜 고조파를 제거하는 것이다. 그러나 실제로는 여러 가지 원인으로 리액턴스 값이 0이 아닌 값으로 되어 필터가 동조에서 벗어나게 되고 필터의 고조파전류 흡수효과에 영향을 미치게 된다. 따라서 필터설계 시는 운전 중 이러한 탈 동조(off-tuning)현상에 대비하고자 리액턴스 값이 용량성이 되지 않도록 제거하고자 하는 고조파 차수(h<sub>n</sub>)보다 약간 앞선 주파수(h)에서 공진이 일어나도록 설계하여야 한다. 이때 고려해 주는 계수가 동조계수(δ)이며 주파수와와의 관계식은 다음과 같다[1-2].

$$h = h_n + (\delta \times h_n) \tag{1}$$

2.1 실제 사례를 통한 동조계수(δ) 값의 계산

위 식 (1)로부터 각 공칭 동조주파수의 전체 동조계수는

$$\delta = \frac{\omega - \omega_n}{\omega_n} \tag{2}$$

가 되고, 더욱이 L 또는 C의 2%변동은 계통주파수를 1%변동시키는 것과 같이 되므로 동조계수δ는 식 (3)과 같다[1][3].

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \tag{3}$$

필터가 동조에서 벗어나는 원인은 여러 가지가 있을 수 있으나 일반적으로

- 계통 기본과주파수의 변동
- 열화와 온도에 기인하는 필터 커패시턴스와 인덕턴스의 변동
- 제작 시 발생하는 오차와 초기 값에 의한 탈 동조(off-tuning) 등을 들 수 있다.

<표 1> 예상오차 값

<Table 1> Anticipated errors

구 분	오차 범위
주파수 변동	Δf : ±2%
L값 변동인자	ΔL : -10%~+20% 제작오차 : -10~+20%, Tolerance : ±2%
C값 변동인자	ΔC : -4.5%~+6.5% Aging : -3%, Temperature : ±1.5%@25℃, Tolerance : +5%

<Case 1> Δf = +2%, ΔL = -10%, ΔC = +6.5%인 경우

$$\delta = +0.02 + \frac{1}{2} \{(-0.1) + (+0.065)\} = +0.02 - 0.0175 = +0.0025$$

<Case 2> Δf = -2%, ΔL = -10%, ΔC = +6.5%인 경우

$$\delta = -0.02 + \frac{1}{2} \{(-0.1) + (+0.065)\} = -0.02 - 0.0175 = -0.0375$$

두 값 중 용량성 리액턴스 값을 갖도록 하는 값은 -0.0375이고, 해당차수 필터에 대한 계산결과는 표 2와 같다.

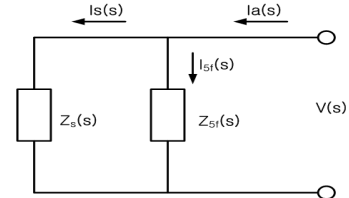
<표 2> 동조계수(δ) 적용시의 동조차수

<Table 2> Application of a tuning factor(δ)

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

2.2 탈 동조(off-tuning) 시 필터의 전류흡수 효과

필터가 탈 동조(off tuning) 되었을 경우 5고조파 필터의 흡수 효과에 대하여 알아본다. 사례 연구 대상은 1.5kW급 태양광발전 시스템을 위한 3상 정류기에 설치된 제5고조파 필터이며, 사용된 등가회로도는 그림 1과 같고 양호도(Q) 값은 50이다.



<그림 1> 등가회로도

<Fig 1> Circuit

$$Z_{sf} = 0.0717 + (j3.585 \times 5) - j \frac{89.644}{5} = 0.0717 [\Omega]$$

및 I<sub>a</sub>는 각각 Z<sub>s</sub> = j1.112 [Ω] 및 I<sub>a</sub>(s) = 5 [A]이다.

필터가 완전공진 시 전원측 전류(I<sub>s</sub>)는

$$I_s = \frac{0.0717}{0.0717 + (j1.112 \times 5)} \times 5 = 0.064 [A]$$

이므로 흡수율은 [(5 - 0.064) × 100] / 5 = 98.72%가 된다.

콘덴서 리액턴스가 +6.5%, 인덕터 리액턴스가 -10%오차가 발생한 경우의 전류흡수율을 정리하여 표 3에 나타내었다

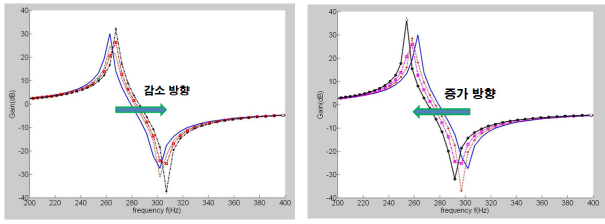
<표 3> 필터흡수 효과

<Table 3> Filter absorption effects

구 분	필터 임피던스 (Z <sub>sf</sub> ) [Ω]	전원측 유입 전류(I <sub>s</sub> ) [A]	필터 흡수율(%)
완전동조 시	0.0717	0.064	98.72
X <sub>C</sub> +6.5%	0.0717 - j1.169	1.333	73.34
X <sub>L</sub> -10%	0.0717 - j1.796	2.387	52.26

### 2.3 보드선도를 통한 필터성능의 해석

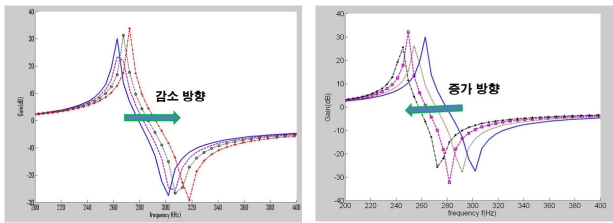
커패시터 및 인덕터 값이 단계별로 감소할 경우와 증가할 경우 필터의 주파수영역 성능곡선을 다음 그림 2와 그림 3에 나타내었다.



(a) 감소 시

(b) 증가 시

<그림 2> 커패시터 값의 증감에 따른 동조계수의 변동  
<Fig 2> Tuning factor variation by capacitor



(a) 감소시

(b) 증가시

<그림 3> 인덕터 값의 증감에 따른 동조계수의 변동  
<Fig 3> Tuning factor variation by inductor

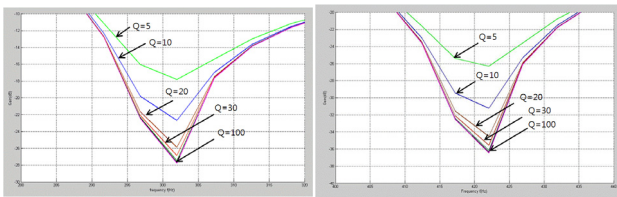
### 3. 양호도(Q) 값의 결정

단일동조 수동필터는 공진현상을 이용한 것이기 때문에 공진회로에서는 양호도(Quality factor, Q)값은 매우 중요한 값이다. 공진에서의 양호도는 주파수 선택 특성품질을 의미하기 때문이다.

$$Q(\text{series LC}) = \omega_0 \frac{2W_m}{P_{\text{loss}}} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} \quad (4)$$

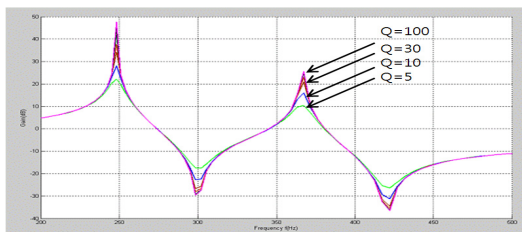
### 3.1 보드선도를 통한 양호도(Q)값 결정

본 연구의 사례에서 양호도 값의 변화에 따른 주파수 응답특성을 보드선도를 통하여 확인한 결과는 다음과 같다.



(a) 5차 필터

(b) 7차 필터



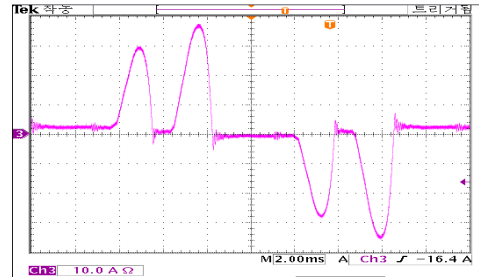
(c) 5차 및 7차 필터

<그림 4> 양호도 값의 변화에 따른 주파수 응답특성  
<Fig 4> Frequency response curve

위 그래프에서 본 계통에 적합한 수동필터의 양호도(Q) 값은 30~70정도의 값이 적당한 것으로 나타났다.

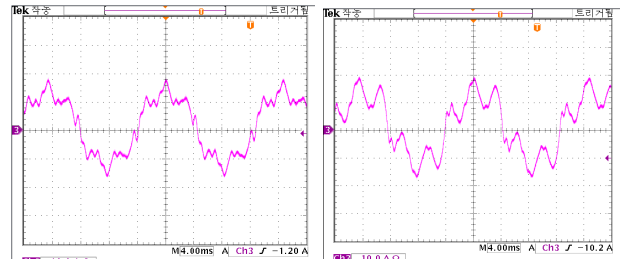
### 4. 실험결과

본 논문에서 결정한 동조계수( $\delta=-0.0375$ )와 양호도( $Q=50$ ) 값을 적용하여 사례연구 대상계통에 5고조파 필터 및 7고조파 필터의 필터효과에 관해 실험한 결과는 다음과 같다.



<그림 5> 필터설치 전 전원측 전류( $i_s$ )

<Fig 5> Before filter installation



(a) 5고조파 필터

(b) 7고조파 필터

<그림 6> 필터설치 후 전원전류( $i_a$ )파형

<Fig 6> Current( $i_a$ ) of power source side

### 5. 결론

본 논문에서는 단일동조 수동고조파 필터설계 시 필요한 동조계수  $\delta$ 와 양호도  $Q$ 값의 결정방법에 관해 알아보고 단일동조필터 설계에 필요한 최적의 값을 결정하였다. 그 결과 단일동조필터 위한 동조계수  $\delta$ 는 5고조파 필터의 경우는 4.8차, 7고조파 필터의 경우는 6.7차, 양호도  $Q$ 값은 30~70정도까지가 적당한 값으로 확인이 되었다. 이들 결정된 값은 사례연구 대상 계통에 적용시켜 필터링 효과를 통하여 적절성을 검증하였다. 확인결과 제 5고조파는 87%에서 25%로, 제7고조파의 경우는 65%에서 12%로 각각 저감되었으며 이 값들은 국제고조파 규제기준인 IEEE-519의 규제요건을 만족하였다[4]. 따라서 본 논문에서 결정한 동조계수( $\delta=-0.0375$ )와 양호도( $Q=50$ ) 값을 반영한 필터의 성능은 적합한 것으로 실험을 통해 확인되었으므로 결정된 두 값은 적절한 것으로 판단한다. 본 논문에서 결정한 두 계수의 값들은 수동고조파 필터를 설계함에 있어 운전 중 탈 동조(off-tuning)로 인한 필터성능의 저하를 사전에 대비하기 위한 중요한 솔루션을 제공할 수 있을 것으로 기대한다.

### [참고 문헌]

- [1] Jos Arrillaga and Neville R.Watson, "Power system harmonics", John Willy & Sons, Ltd pp219~230, 2003
- [2] IEEE 399, "IEEE Recommended Practices for Industrial and commercial Power Systems analysis", p305~307, 1997
- [3] 박한중 외, "고조파 억제용 수동필터의 현장 적용화 연구", 한국전기안전공사 전기안전시험연구원, p169~192, 1999
- [4] IEEE 519, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", p78, 1992