

HVDC시스템 적용을 위한 Triple-tuned 필터 설계방법 연구

A Study on the Design of Triple-tuned Filter for Line Commutated Converter HVDC

이 성 두* · 최 순 호* · 김 찬 기* · 차 한 주**
(Seong-Doo Lee · Soon-Ho Choi · Chan-Ki Kim · HanJu Cha)

Abstract - The ac side current of a line commutated converter(LCC) high voltage direct current (HVDC) is characterized by highly non-sinusoidal waveform. If the harmonic current is allowed to flow in the connected ac network, it may cause unacceptable levels of distortion. Therefore, ac side filters are required as part of the total HVDC converter station, in order to reduce the harmonic distortion of the ac side current and voltage to acceptably low levels. The ac filters are also employed to compensate the requested reactive power because LCC HVDC also consume substantial reactive power. Among different types of filters, triple-tuned filters have been widely utilized for HVDC system. This paper presents two design methods of triple-tuned filter; equivalent method and parametric method. Using a parametric method, in particular this paper proposes a design algorithm for a triple tuned filter. Finally, the performance of the design algorithm is evaluated for a 250kV HVDC system in Jeju island. The results clearly demonstrate the effectiveness of proposed design method in harmonics reduction.

Key Words : LCC, HVDC, Harmonic, Tuned filter

1. 서 론

전류형 직류송전시스템(이하 LCC HVDC, Line Commutated Converter HVDC)은 장거리 송전 및 해저케이블을 이용하여 전력을 전송할 때 기존 교류전송방식에 비해 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 사이리스터 컨버터를 이용하여 전력을 변환할 때 무효전력을 소모하고 고조파를 발생시키기 때문에 이를 보상하기 위해 교류필터가 필요하게 된다. 교류필터는 특정 고조파에서 낮은 임피던스를 제공하는 동시에 컨버터에서 소모하는 무효전력을 공급하는 역할도 하게 된다. 교류필터에는 여러 종류가 있는데 가장 간단한 구조로 직렬 RLC 필터로서 하나의 고조파만을 제거하기 위한 single-tuned 필터가 사용된다. 경제성을 확보하기 위해서 2개 주파수에서 고조파를 제거하기 위한 double-tuned 필터가 사용되어오고 있다[1]. 하지만 제거하기 위한 고조파 차수가 많은 경우에는 동시에 3개 주파수의 필터링이 가능한 triple-tuned 필터가 최근들어 여러 프로젝트에서 적용되고 있는 실정이다[2].

본 논문에서는 이러한 triple-tuned 필터의 설계방법을 제안하

며 모의실험을 통해 성능을 평가한다. 먼저 널리 쓰이는 두 가지 방법을 통해 triple-tuned 필터의 설계방법을 검토한다. 첫 번째는 3개의 single-tuned 필터를 각각 설계 한 후 이를 triple-tuned 필터로 등가화 하는 방법으로 3개 필터의 무효전력 배분량을 이용해 설계하는 방법이다. 두 번째는 triple-tuned 필터의 직렬 임피던스 특성을 이용하여 필터의 파라미터를 선정하는 방법이다. 두 방법의 특징을 분석하고 후자의 방법을 이용하여 triple-tuned 필터를 설계하는 방법을 제안한다. 최종적으로 실제 프로젝트 사례를 이용하여 계통으로 유입되는 고조파 분석을 통해 설계방법의 타당성을 검토한다.

2. 본 론

2.1 필터설계 필요항목

2.1.1 고조파 필터링

필터는 기본적으로 LCC HVDC에서 발생하여 계통으로 유입되는 고조파를 최소화하도록 설계되어야 한다. 이를 위해서 발생하는 고조파를 평가하는 성능지표가 있는데, 대표적으로 개별 고조파에 대한 왜곡율과 전체 고조파에 대한 왜곡율, DC선로 주변의 통신선에 대한 영향을 나타내는 식 (1)~식 (3)의 지표로 나타낼 수 있다.

$$D_n = \frac{U_n}{U_1} \times 100\% \quad (1)$$

* Corresponding Author : Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

E-mail : joyful@kepeco.co.kr

* Power Transmission Laboratory, KEPCO Research Institute, Korea

** Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

Received : October 22, 2014; Accepted : January 5, 2015

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_n}{U_1} \right)^2} \times 100\% \quad (2)$$

$$TIF = \sqrt{\sum_{n=2}^{50} \left(\frac{U_n P_n}{U_1} \right)^2} \quad (3)$$

여기서, U_n 은 컨버터에서 발생된 고조파 전류로 인한 n 차 고조파 상-대지전압 실효값, U_1 은 상-대지 기본파 전압 실효값, P_n 은 평가점용 가중치이다.

일반적인 성능지표 제한값은 $D_n < 1.0\%$, $THD < 2.0\%$, $TIF < 30$ 이다.

2.1.2 무효전력 공급 및 전압변동률

LCC HVDC의 특징은 사이리스터 밸브의 점화각 제어를 통해 전압제어를 수행함으로써 유효전력 증가와 함께 컨버터가 무효전력을 흡수한다는 것이다. 그래서, 이러한 컨버터의 무효전력 수요를 공급하기 위해서 커패시터로 구성된 고조파 필터를 사용하게 된다. 일반적으로 HVDC 컨버터에서 필요로 하는 무효전력량은 정류기와 인버터에 대하여 식 (4)과 식 (5)으로 나타낼 수 있다.

$$Q_{rect} = 6(V_{v_{rect}})^2 \left(\frac{\sin(2\alpha + 2\mu_{rect}) - \sin(2\alpha) - 2\mu_{rect}}{4\pi X_{c_{rect}}} \right) \quad (4)$$

$$Q_{inv} = 6(V_{v_{inv}})^2 \left(\frac{\sin(2\gamma + 2\mu_{inv}) - \sin(2\gamma) - 2\mu_{inv}}{4\pi X_{c_{inv}}} \right) \quad (5)$$

여기서 α , γ 는 각각 정류기와 인버터의 점화각이고, μ 는 중첩각이며, $V_{v_{rect}}$ 와 $V_{v_{inv}}$ 는 정류기와 인버터의 밸브 2차측 전압이며, $X_{c_{rect}}$ 와 $X_{c_{inv}}$ 는 정류기와 인버터측의 정류 리액턴스는 나타낸다[6].

산출된 무효전력량은 필터를 통해 공급되는데 AC계통의 단락용량 크기에 따라 필터 투입시나 차단시에 AC계통의 전압변동률이 달라질 수 있기 때문에 식 (6)을 통해 최소단위의 필터뱅크를 검토하게 된다. 일반적으로 전압변동률은 정격전압의 0.03~0.05 [p.u.]에서 제한이 된다.

$$\Delta V = \frac{Q_{switch}}{SCL_{min} - Q_{Total}} \quad (6)$$

여기서 ΔV 는 AC계통전압의 변동률 [p.u.], SCL_{min} 는 필터 스위칭이 되는 지점의 AC계통 최소단락용량 [MVA], Q_{switch} 는 AC계통에 주입되는 단위 무효전력량 [Mvar], Q_{total} 는 스위칭으로 투입된 무효전력을 포함하여 컨버터 모션에 연결된 총 무효전력 [Mvar]

2.1.3 저차고조파 공진

일반적인 12펄스 전류형 컨버터는 Y-Y와 Y- Δ 로 구성된 2개의 6펄스 컨버터를 이용하기 때문에 이상적인 컨버터 상태에서는 12n \pm 1차의 고조파만이 발생된다. 그러나, HVDC시스템의 실제운

전 상황에서는 특성고조파 뿐만이 아니라 비특성 고조파가 발생된다. 비특성 고조파 중에서도 저차고조파는 특히 문제가 될 수 있다. 약한 AC계통에 연결된 용량이 큰 HVDC의 경우, 저차고조파에서의 공진문제가 발생될 수 있다. AC필터의 일부나 모두를 연결후에, AC계통 임피던스와 병렬로 연결된 Q[MVar]의 무효전력원이 있다면, 병렬 공진주파수는 식 (7)과 같이 평가될 수 있다[5]. 만약 공진주파수가 $n \leq 3 \sim 3.3$ 이라면, 3차 고조파 필터가 계통에 필요하게 된다.

$$n = \sqrt{\frac{S_{kmin}}{Q}} \quad (7)$$

여기서, S_{kmin} 은 AC계통의 최소단락용량 [MVA], Q 는 설치된 최대 무효전력설비용량 [MVar]

2.2 등가회로 방식을 이용한 Triple-tuned 필터설계

LCC HVDC에서 AC필터는뱅크당 비용이 소요되기 때문에 그림 2와 같이 3개의 고조파를 제거하기 위해 세 개의 single-tuned 필터를 사용하는 것보다 하나의 필터뱅크로 합치는 것이 공간을 적게 차지하기 때문에 경제적으로 유리하다. 등가회로 방식은 triple-tuned 필터를 설계할 때 비교적 쉽게 접근할 수 있는 방법이다[3]. 그림 3은 3개의 single-tuned 필터와 1개의 triple-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다.

Triple-tuned 필터설계를 위해서 먼저 필터에서 보상되어야 할 무효전력량을 각각의 single-tuned 필터에 적절히 분배한 후 각 single-tuned 필터의 파라미터값을 선정한다. 식 (8)은 기본 주파수에서 single-tuned 필터의 전압과 보상 무효전력량 및 필터 임피던스의 관계를 나타낸다.

$$X_{filter} = \frac{V_n^2}{Q_{filter}} = X_C - X_L \quad (8)$$

여기서, V_n 은 필터에 걸리는 전압의 크기 [kV], Q_{filter} 는 필터가 보상하여야 할 무효전력 [MVar]이다.

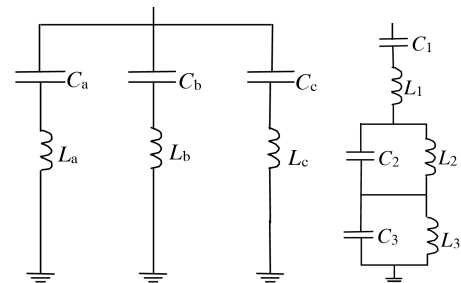


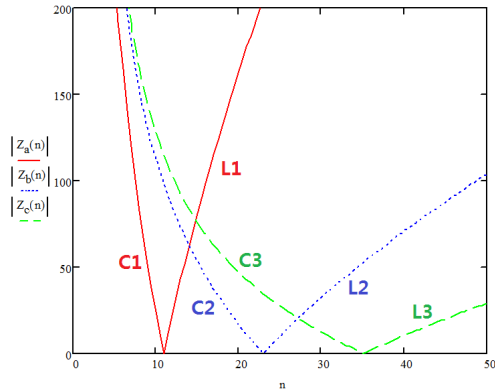
그림 1 Single-tuned필터와 triple-tuned 필터 등가회로

Fig. 1 Equivalent Circuit of single-tuned and triple-tuned filter

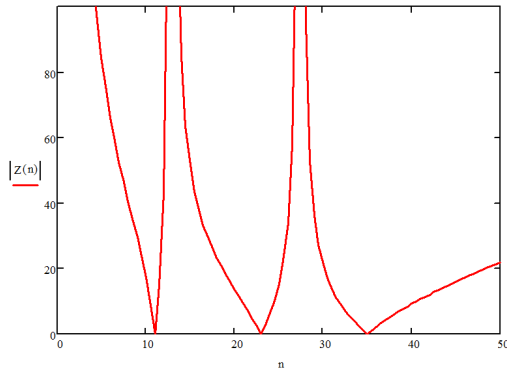
직렬 LC 필터에서 커패시터와 인덕터가 직렬로 연결되어 있으므로 필터링 되어야 할 h 차 고조파에서 필터 전체의 임피던스는 0의 값을 가져야 하며, 식 (9)과 식 (10)을 만족하여야 한다.

$$hX_L = \frac{1}{h} X_C \tag{9}$$

$$X_C = h^2 X_L \tag{10}$$



(a) 3개의 Single-tuned 필터



(b) Triple-tuned 필터

그림 2 3개 Single-tuned 및 1개 Triple-tuned 필터 임피던스
Fig. 2 Impedance of three single-tuned and triple-tuned filter

식 (9)과 식 (10)을 식 (8)에 대입하여 정리하면 single-tuned 필터의 파라미터 값을 식 (11)과 식 (12)로 얻을 수 있다.

$$X_C = h^2 / (h^2 - 1) \cdot V_n^2 / Q_{filter} \tag{11}$$

$$X_L = 1 / (h^2 - 1) \cdot V_n^2 / Q_{filter} \tag{12}$$

3개의 single-tuned 필터의 전체 임피던스는 기본주파수에서 식 (13)과 같이 되며, triple-tuned 필터는 LC 필터의 직렬 회로를 이용하여 계산하면 식 (14)과 같이 된다. 이 두 식이 동일하다고 가정하여 해를 구하면 triple-tuned 필터의 파라미터를 식 (15)와 식 (16)과 같이 구할 수 있다. 여기서, 리액터의 내부 저항과 커패시터의 유전손실을 무시한다.

$$Z_1(\omega) = \left[\frac{1}{j(\omega L_a - \frac{1}{\omega C_a})} + \frac{1}{j(\omega C_b - \frac{1}{\omega L_b})} + \frac{1}{j(\omega C_c - \frac{1}{\omega L_c})} \right]^{-1} \tag{13}$$

$$Z_2(\omega) = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) + \frac{1}{j(\omega C_2 - 1/\omega L_2)} + \frac{1}{j(\omega C_3 - 1/\omega L_3)} \tag{14}$$

$$C_1 = C_a + C_b + C_c, \quad L_1 = L_a L_b L_c / (L_a L_b + L_b L_c + L_a L_c) \tag{15}$$

$$C_2 = \frac{Z_4(Z_3 - Z_4)}{Z_3 Z_4 Z_2 - Z_1 Z_4}, \quad L_2 = \frac{Z_3(Z_3 - Z_4)}{Z_1 Z_3 - Z_3 Z_4 Z_2}$$

$$C_3 = \frac{Z_3(Z_3 - Z_4)}{Z_1 Z_3 - Z_3 Z_4 Z_2}, \quad L_3 = \frac{Z_1 Z_3 - Z_3 Z_4 Z_2}{Z_3 - Z_4} \tag{16}$$

여기서, 수식을 간략화를 위해서 중간변수를 $Z_1 \sim Z_4$ 를 도입하였다.

$$Z_1 = \frac{(C_a L_a^2 L_b + C_b L_b^2 L_c + C_c L_c^2 L_a)}{C_1 \cdot A} - \frac{L_a L_b L_c}{A} - \frac{B}{C_1^2} \tag{17}$$

$$Z_2 = \frac{C_a C_b L_a^2 L_b^2 + C_a C_c L_a^2 L_c^2 + C_b C_c L_b^2 L_c^2}{C_a C_b C_c \cdot A^2} - \frac{1}{C_1} \tag{18}$$

$$Z_3 = \frac{B}{2C_1} + \left[\left(\frac{B}{2C_1} \right)^2 - \frac{C_a C_b C_c \cdot A}{C_1} \right]^{1/2}$$

$$Z_4 = \frac{B}{2C_1} - \left[\left(\frac{B}{2C_1} \right)^2 - \frac{C_a C_b C_c \cdot A}{C_1} \right]^{1/2} \tag{19}$$

여기서, $A = L_a L_b + L_b L_c + L_a L_c$

$$B = C_a (C_b L_b + C_c L_c) + C_b (C_a L_a + C_c L_c) + C_c (C_b L_b + C_a L_a)$$

등가회로 방식을 이용하여 모선전압 154[kV]과 기본주파수 60[Hz]에서 51[MVA]의 무효전력을 보상하고, 3차(180Hz), 25차(1500Hz)와 35차(2100Hz)의 필터링 주파수를 가지는 triple-tuned 필터를 검토하였다. single-tuned 필터에 배분되는 무효전력은 4가지 경우에 대하여 검토하였으며, 표 1은 4가지 무효전력

표 1 등가회로방식의 3차/25차/35차 triple-tuned 필터

Table 1 3/25/35 triple-tuned filter using equivalent circuit method

| 종류 | 무효전력 배분율 | 필터 파라미터 | | | | | |
|--------------|-------------|---------|------|------|------|-------|------|
| | | Ca | Cb | Cc | La | Lb | Lc |
| Single-tuned | 33%-33%-33% | 1.69 | 1.89 | 1.90 | 463 | 5.93 | 3.0 |
| | 80%-10%-10% | 4.05 | 56.9 | 57.0 | 193 | 20 | 10 |
| | 10%-80%-10% | 5.07 | 4.55 | 57 | 1542 | 2.47 | 10 |
| | 10%-10%-80% | 5.07 | 56.9 | 4.56 | 1542 | 20 | 1.26 |
| Triple-tuned | 무효전력 배분율 | 필터 파라미터 | | | | | |
| | | C1 | C2 | C3 | L1 | L2 | L3 |
| | 33%-33%-33% | 5.48 | 1.27 | 36.0 | 1.99 | 42.7 | 23.5 |
| | 80%-10%-10% | 5.19 | 1.61 | 107. | 6.45 | 110.5 | 78.7 |
| | 10%-80%-10% | 5.63 | 58.6 | 69.0 | 1.98 | 12.1 | 92.1 |
| 10%-10%-80% | 5.63 | 58.0 | 19.3 | 1.18 | 12.2 | 55.0 | |

배분비율에 대해 설계된 single-tuned 필터의 파라미터와 triple-tuned 필터로 등가화된 파라미터를 나타내고 있다. 그림 3은 표 1에서 구한 triple-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다.

그림에서 실선은 51[Mvar] 용량을 균등분할(33%-33%-33%)한 것이며, 점선은 각각 80%-10%-10%, 10%-80%-10%, 10%-10%-80%로 분할한 것이다. 분할하는 무효전력량에 따라 병렬 공진주파수가 달라짐을 확인할 수 있으며, 표 2에 병렬공진주파수를 정리한 것이다.

표 2 등가회로방식 Triple-tuned 필터의 병렬공진차수
Table 2 triple-tuned filter using equivalent circuit method

| 무효전력 배분 | 병렬공진 주파수 차수 | |
|-------------|-------------|--------|
| | 1차 공진 | 2차 공진 |
| 33%-33%-33% | 3.597 | 28.775 |
| 80%-10%-10% | 6.285 | 28.827 |
| 10%-80%-10% | 3.143 | 33.270 |
| 10%-10%-80% | 3.144 | 25.709 |

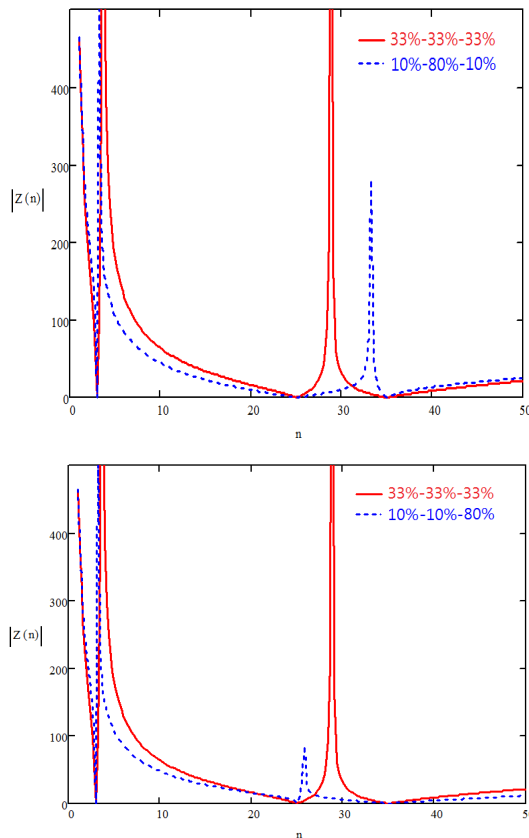


그림 3 무효전력 배분에 따른 Triple-tuned 필터의 임피던스 특성 변화

Fig. 3 Impedance profiles of triple-tuned filter for changing reactive power share

2.3 공진주파수를 이용한 triple-tuned 필터설계

앞에서 설명한 등가회로 방식을 이용한 triple-tuned 필터 설계방식은 분할하는 무효전력의 비율을 달리함으로써 병렬공진주파수를 변화시킬 수 있다. 그러나 특정주파수에서 공진을 일으키기 위해 적절히 무효전력량을 분할하는 것은 병렬공진주파수가 입력 파라미터로 들어가지 않기 때문에 수식적으로 용이하지 않다. 따라서 필터링 주파수와 병렬공진주파수의 값을 이용하여 필터를 설계하기 위해 공진주파수를 이용한 설계방법을 검토하였다[4].

그림 4는 triple tuned 필터회로와 3개의 개별루프 임피던스, triple-tuned 필터의 임피던스 특성을 나타내고 있다.

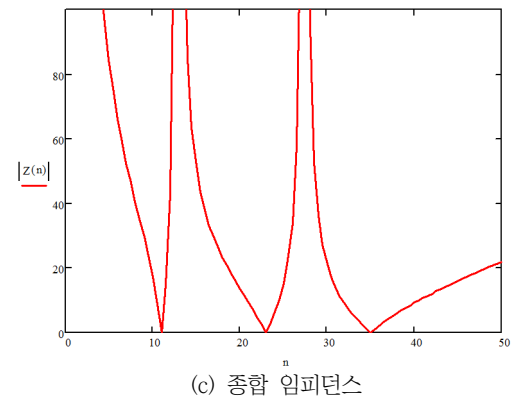
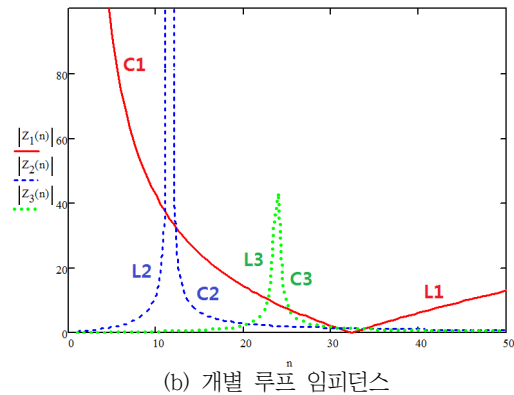
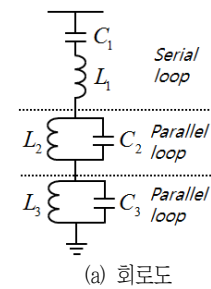


그림 4 Triple-tuned 필터와 공진주파수

Fig. 4 Tuning frequency and circuit of triple-tuned filter

그림 4(a)를 고려하여 필터를 설계할 때 수식 전개에 편의성을 위해 저항성분은 없다고 가정을 한다. 각각의 직렬 및 병렬 루프의 임피던스 특성은 그림 4(b)와 같으며, 식 (20)~식 (22)과 같이 나타낼 수 있다. L_1, C_1 로 구성된 직렬공진 루프는 고조파 차수 n 이 $n \langle n_s \rangle$ 일 때 커패시터의 성질을 가지며, $\langle n \rangle n_s$ 일 때 인덕터의 성질을 가진다. 반면에 L_2, C_2 와 L_3, C_3 로 구성된 병렬공진 루프는 고조파 차수 n 이 $n \langle n_{p1} \rangle$ 또는 $n \langle n_{p2} \rangle$ 일 때 인덕터의 성질을 가지며, $n \langle n_{p1} \rangle$ 또는 $n \langle n_{p2} \rangle$ 일 때 커패시터의 성질을 가지게 된다. 그림 4(c)는 이러한 세 개의 루프를 직렬로 연결함으로써 새로운 3개의 필터링 차수 n_1, n_2, n_3 가 생성되는 triple-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다.

$$Z_s(\omega) = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right), \quad n_s = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{L_1 C_1}},$$

$$k_1 = \omega_s^2 = (2\pi f_0 n_s)^2 = 1/L_1 C_1 \quad (20)$$

$$Z_{p1}(\omega) = j\left(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2}\right)^{-1}, \quad n_{p1} = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{L_2 C_2}},$$

$$k_2 = \omega_{p1}^2 = (2\pi f_0 n_{p1})^2 = 1/L_2 C_2 \quad (21)$$

$$Z_{p2}(\omega) = j\left(\omega C_3 - \frac{1}{\omega L_3}\right)^{-1}, \quad n_{p2} = \frac{1}{2\pi f_0 \sqrt{L_3 C_3}},$$

$$k_3 = \omega_{p2}^2 = (2\pi f_0 n_{p2})^2 = 1/L_3 C_3 \quad (22)$$

Triple-tuned 필터에서 필터링 주파수 차수를 각각 n_1, n_2, n_3 로 가정하고, 식 (23)~식 (25)로 표현한다.

$$x_1 = \omega_1^2 = (2\pi f_0 n_1)^2 \quad (23)$$

$$x_2 = \omega_2^2 = (2\pi f_0 n_2)^2 \quad (24)$$

$$x_3 = \omega_3^2 = (2\pi f_0 n_3)^2 \quad (25)$$

필터링 차수 n_1, n_2, n_3 에서 필터 임피던스값이 0이 되어야 하기 때문에 $Z(n_1)=0, Z(n_2)=0, Z(n_3)=0$ 의 특성을 이용하여 식 (20)~식 (25)을 풀면 Vid'a's이론에 의해 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다[3].

$$n_1 \cdot n_2 \cdot n_3 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \frac{1}{\sqrt{L_3 C_3}} = n_s \cdot n_{p1} \cdot n_{p2} \quad (26)$$

식 (20)~식 (26)을 이용하여 정리하면 식 (27)을 얻을 수 있다. 3개의 필터링 차수와 2개의 병렬공진 차수를 이용하여 나머지 1개의 직렬공진 차수를 얻을 수 있게 된다.

$$k_1 = \frac{x_1 x_2 x_3}{k_1 k_2} = \frac{\omega_1^2 \omega_2^2 \omega_3^2}{\omega_{p1}^2 \omega_{p2}^2} = \omega_s^2 \quad (27)$$

3개의 필터링 주파수와 2개의 병렬공진 주파수를 이용해 필터 파라미터를 구하기 위해서 triple-tuned 필터의 임피던스를 식 (28)과 같이 표현할 수 있다.

$$Z(\omega) = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + \frac{1}{j(\omega C_2 - 1/\omega L_2)} + \frac{1}{j(\omega C_3 - 1/\omega L_3)} \quad (28)$$

Triple-tuned 필터가 공진주파수에서 튜닝이 된 경우, $Z(\omega) = 0$ 이 된다. 식 (28)은 다음과 같이 정리된다.

$$\omega^6 L_1 C_1 L_2 C_2 L_3 C_3 - \omega^4 (L_1 C_1 L_2 C_2 + L_1 C_1 L_3 C_3 + L_2 C_2 L_3 C_3 + L_2 C_1 L_3 C_3 + L_3 C_1 L_2 C_2) + \omega^2 (L_1 C_1 + L_2 C_2 + L_3 C_3 + L_2 C_1 + L_3 C_1) - 1 = 0 \quad (29)$$

식 (29)에서 $\omega^2 = z$ 로 치환하면, 식 (30)과 같이 정리된다.

$$z^3 - z^2 \frac{C_1 L_1 \omega_{p1}^2 + C_1 L_1 \omega_{p2}^2 + C_1 L_2 \omega_{p1}^2 + C_1 L_3 \omega_{p2}^2 + 1}{C_1 L_1} + z \frac{C_1 L_1 \omega_{p1}^2 \omega_{p2}^2 + C_1 L_2 \omega_{p1}^2 \omega_{p2}^2 + C_1 L_3 \omega_{p1}^2 \omega_{p2}^2 + \omega_{p1}^2 + \omega_{p2}^2}{C_1 L_1} + \frac{\omega_{p1}^2 \omega_{p2}^2}{C_1 L_1} = 0 \quad (30)$$

이상적인 무손실 필터를 가정하면, 3개의 필터링 주파수 차수인 n_1, n_2, n_3 에서 필터 임피던스가 0이 되며, 식 (31)과 식 (32)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(z - x_1)(z - x_2)(z - x_3) = 0 \quad (31)$$

$$z^3 - z^2(x_1 + x_2 + x_3) + z(x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_1 x_3) - x_1 x_2 x_3 = 0 \quad (32)$$

식 (32), 식 (29), 식 (27)의 관계를 이용하여 정리하면 식 (33)~식 (35)과 같이 C_2, L_2, C_3, L_3 을 유도할 수 있다.

$$L_2 = \frac{x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_3 x_1 - x_1 k_2 - x_2 k_3 - x_3 k_2 - k_3 k_1 + k_2^2}{k_1 k_2 C_1 (k_3 - k_2)} \quad (33)$$

$$L_3 = \frac{x_1 x_2 + x_2 x_3 + x_3 x_1 - x_1 k_3 - x_2 k_3 - x_3 k_3 - k_2 k_1 + k_3^2}{k_1 k_3 C_1 (k_2 - k_3)} \quad (34)$$

$$C_2 = 1/k_2 L_2, \quad C_3 = 1/k_3 L_3 \quad (35)$$

필터 파라미터 C_1, L_1 을 유도하기 위해서 필터의 또 다른 기능인 기본주파수에서 무효전력 보상특성을 이용한다. 그림 5는 기본주파수에서의 triple-tuned 필터의 등가회로를 보여준다. 기본주파수에서 병렬루프 회로의 커패시터 영향은 무시할 수 있을 정도로 작게 된다. 결과적으로 고압 커패시터인 C_1 과 세 개의 리액터 L_1, L_2, L_3 로 구성된 회로로 등가화가 된다. 그림에서 임피던스를 계산하면 식 (36)과 같이 된다.

$$Z(\omega_0) = -\frac{1}{\omega_0 C_1} + \omega_0 L_1 + \omega_0 L_2 + \omega_0 L_3 \quad (36)$$

식 (33)~식 (35)을 이용해 C_1 과 다섯 개의 주파수 차수 $n_1,$

n_2, n_3, n_{p1}, n_{p2} 에 대하여 정리하면 식 (37)과 같이 정리된다. 전압과 무효전력량으로부터 식 (38)과 같이 C_1 을 얻을 수 있으며, 식 (39)의 관계를 통해 L_1 을 구할 수 있다.

$$Q_0 = \frac{U^2}{Z_{F\omega_0}} = U^2 C_1 \omega_0 \cdot \frac{1}{1 - \left(\frac{1}{n_1^2} + \frac{1}{n_2^2} + \frac{1}{n_3^2} - \frac{1}{n_{p1}^2} - \frac{1}{n_{p2}^2} \right)} \quad (37)$$

$$C_1 = \frac{Q_0}{U^2 \omega_0} \cdot \left(1 - \left(\frac{1}{n_{s1}^2} + \frac{1}{n_{s2}^2} + \frac{1}{n_{s3}^2} - \frac{1}{n_{p1}^2} - \frac{1}{n_{p2}^2} \right) \right) \quad (38)$$

$$L_1 = 1/k_1 C_1 \quad (39)$$

여기서, Q_0 은 기본주파수에서 필터가 계통으로 공급하는 무효 전력량[Mvar], U 는 AC계통전압[kV]이다.

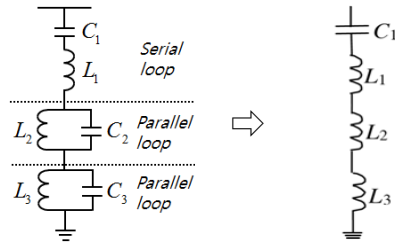


그림 5 기본주파수에서의 triple-tuned 필터 등가회로

Fig. 5 Equivalent circuit of triple-tuned filter in fundamental frequency

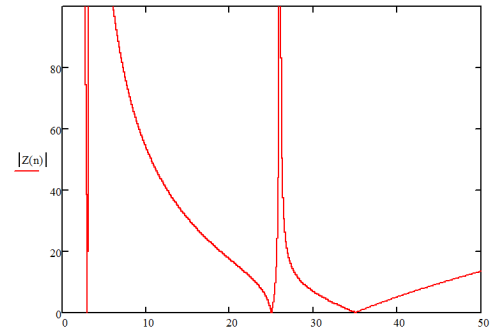
이상에서 언급한 과정을 통해 3개의 필터링 주파수 n_1, n_2, n_3 과 2개의 병렬공진주파수 n_{p1}, n_{p2} 를 이용해 triple-tuned 필터의 6개 파라미터($C_1, L_1, C_2, L_2, C_3, L_3$)를 구할 수 있다.

병렬 공진주파수 방법을 이용하여 51[Mvar] 무효전력을 공급하면서 3차(180Hz), 25차(1500Hz)와 35차(2100Hz)의 필터링 주파수를 가지는 triple-tuned 필터를 검토하였다. 표 3은 병렬공진주파수 변화에 따른 필터 파라미터값의 변화를 보여준다. 그림 6은 표 3에 제시된 triple-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다. 병렬공진주파수 변경에 따른 영향을 분석하면 주파수간의 관계는 식 (40)과 같이 정리할 수 있다. Triple-tuned 필터의 2개

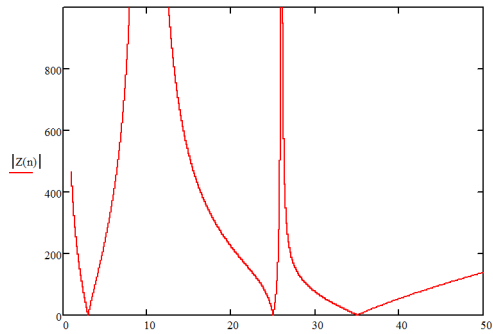
표 3 등가회로방식 3/25/35차 Triple-tuned 필터설계값

Table 3 Filter parameters of 3/25/35 triple-tuned filter using equivalent method

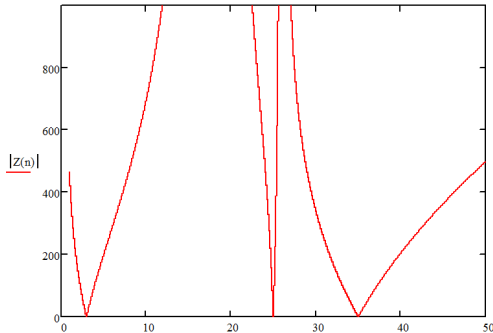
| 병렬공진 차수 n_{p1}/n_{p2} | C1 [μF] | L1 [mH] | C2 [μF] | L2 [mH] | C3 [μF] | L3 [mH] |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 3.32차/28.77차 | 5.58 | 1.66 | 25.1 | 25.3 | 43.2 | 19.6 |
| 18차/28.77차 | 5.08 | 54.0 | 24.9 | 87.0 | 82.5 | 10.0 |
| 3.321차/26차 | 5.50 | 1.62 | 12.74 | 42.7 | 10.4 | 999.8 |
| 3.321차/34.5차 | 5.50 | 2.85 | 128.4 | 42.3 | 14.8 | 397.6 |
| 22차/26차 | 5.07 | 66.0 | 20.0 | 72.6 | 74.3 | 14.0 |
| 22차/34.5차 | 5.07 | 116.0 | 41.8 | 34.7 | 2.19 | 2.68 |



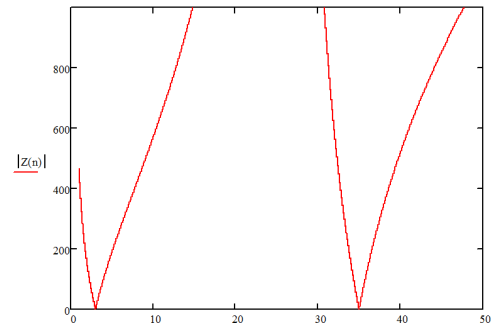
(a) $n_{p1}=3.32$ 차, $n_{p2}=26$ 차



(b) $n_{p1}=10$ 차, $n_{p2}=26$ 차



(c) $n_{p1}=18$ 차, $n_{p2}=26$ 차



(d) $n_{p1}=25$ 차, $n_{p2}=26$ 차

그림 6 병렬공진 주파수 변동에 따라 3차/25차/35차 triple-tuned 필터의 임피던스 특성

Fig. 6 Impedance profile of triple-tuned filter changing parallel resonance frequency

의 병렬공진주파수는 각각 3개의 필터링 주파수 사이에 존재해야 하며, 이 주파수 범위를 벗어날 경우, triple-tuned 필터 특성이 없어지면서 그림 6(d)과 같이 double-tuned 필터와 같은 특성을 나타내게 된다.

$$\omega_1 < \omega_b < \omega_2 < \omega_c < \omega_3 \quad (40)$$

그러나, 병렬공진주파수를 이용한 방법은 앞에서 설명한 등가 회로 방식과 달리 필터설계의 입력 파라미터를 선택할 수 있기 때문에 필터링 및 공진주파수 조절을 용이하게 할 수 있는 장점이 있다. 따라서 이후에서는 병렬공진주파수 방식의 triple-tuned 필터 설계방법을 이용하여 HVDC 시스템에 적용하는 방법을 제시하였다.

2.4 Triple-tuned 필터설계의 HVDC시스템 적용

2.4.1 필터설계 알고리즘

앞 절에서 검토한 공진주파수를 이용한 설계방법을 요약하여 HVDC 시스템에 적용하기 위한 triple tuned 필터 설계 알고리즘을 아래와 같이 정리할 수 있다.

- ① 고조파 저감이 필요한 triple-tuned 필터 고조파 차수 3개 n_1, n_2, n_3 를 결정한다.
- ② C_2, L_2 와 C_3, L_3 회로의 공진주파수 n_{p1}, n_{p2} 는 AC계통과 병렬공진을 일으킬 수 있는 주파수는 피한다.
- ③ n_{p1} 과 n_{p2} 는 $n_1 < n_{p1} < n_2, n_2 < n_{p2} < n_3$ 범위에 있도록 설정하며, 필터 튜닝점에서 떨어져 있어야 한다.
- ④ n_1, n_2, n_3 과 n_{p1}, n_{p2} 를 결정하면 n_s 가 결정된다.
- ⑤ 무효전력 필요량(Q), 계통전압(U), $n_1, n_2, n_3, n_{p1}, n_{p2}$ 를 통해 $C_1, L_1, C_2, L_2, C_3, L_3$ 을 순차적으로 구한다.
- ⑥ 파라미터($C_1 \sim L_3$)로 구성된 필터와 고조파 전류원, 계통임피던스로 구성된 회로에서 고조파 필터성능 기준(D_n, THD, TIF) 만족여부를 확인한다.
- ⑦ 성능기준 미달시 ③단계로 돌아가 과정을 반복한다.

HVDC 컨버터는 직류측에서는 정전압 고조파 전원으로, 교류측에서는 정전류 고조파 전원으로 모델링 할 수 있다[1]. HVDC 컨버터에서 발생하는 고조파가 계통으로 유입되는 것을 막는 것이 필터의 역할이기 때문에 교류측에서 고조파 분석을 위한 모델링이 필요하다. 간단한 등가모델은 그림 7과 같다. 여기서 필터는 임피던스 Z_{fn} 으로 표현되며 전력계통의 고조파 임피던스는 Z_{sn} 으로 모델링 된다. 그림 7의 모델을 이용하여 컨버터에서 발생하는 고조파 전류가 계통으로 흘러 들어가는 정도와 이로 인한 전압의 고조파 특성을 식 (41)을 통해 파악할 수 있다.

$$I_{sn} = \frac{Z_{fn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n, \quad V_{sn} = \frac{Z_{fn} \times Z_{sn}}{Z_{fn} + Z_{sn}} \times I_n \quad (41)$$

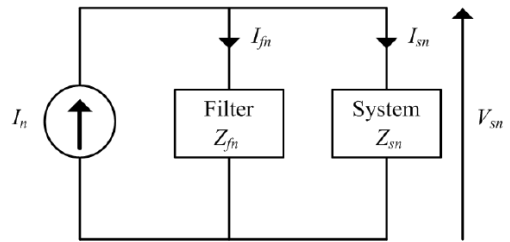


그림 7 필터성능 평가를 위한 등가회로

Fig. 7 Equivalent circuit for filter performance estimation

2.4.2 필터 설계를 위한 HVDC시스템 모델링

실제 프로젝트 적용 사례를 통해 triple-tuned 필터의 설계방법에 대한 검증을 위해 표 4와 같이 제주~진도 250kV HVDC 시스템의 파라미터를 이용해 고조파 필터 사례를 검토하였다. 검증의 편리성을 위해서 인버터측에 대해서만 검토하기로 한다.

시스템 운전조건과 특성에 따른 비특성 고조파 발생을 함께 고려하기 위해 아래와 같은 조건을 상정하여 고조파 전류를 계산하였으며, 그림 8은 HVDC 바이폴 운전조건에서 인버터측 AC모선에서의 고조파 계산결과를 보여준다.

표 4의 인버터측 소호각, 중첩각, 정류리액턴스값을 이용해 식 (5)을 통해 무효전력량을 구하면, 204[Mvar]가 된다.

표 4 진도-제주 HVDC 시스템 파라미터

Table 4 System parameters of Jeju-Jindo HVDC

| 파라미터 | 정류기측 | 인버터측 | 단위 |
|-----------|----------------|----------------|--------|
| 점호각 범위 | 10 ~ 16 | 21 ~ 25 | Degree |
| 중첩각 범위 | 4.08 ~ 23.49 | 2.45 ~ 17.58 | Degree |
| 정류임피던스 | 14.16 ~ 17.98 | 14.16 ~ 16.21 | Ω |
| 변압기 2차 전압 | 111 | 111 | kVrms |
| 변압기 1차 전압 | 154 | 154 | kVrms |
| 변압기 탭 범위 | -12.63 ~ 18.23 | -12.63 ~ 18.23 | % |

- 직류전력 송전량 : 20 ~ 200MW (Monopole기준)
- 변환용 변압기의 제작 오차 : 2.5%
- AC계통의 역상분 전압/점호각 오차 : 1% / ±1°
- AC전압 변동범위 : 139kV ~ 164kV

인버터 AC계통인 진도계통의 최소단락용량을 대해 5%의 전압 변동율을 고려하여 식 (6)을 통해 필터의 단위용량은 51[Mvar]로 분할하게 된다.

그림 8에서 주요 발생 고조파는 3차, 5차, 11차, 13차, 23차, 25차, 35차 등이 되는 것을 알 수 있다. 이러한 차수의 고조파를 제거하기 위해서 아래와 같이 두 종류의 triple-tuned 필터를 선택하였다.

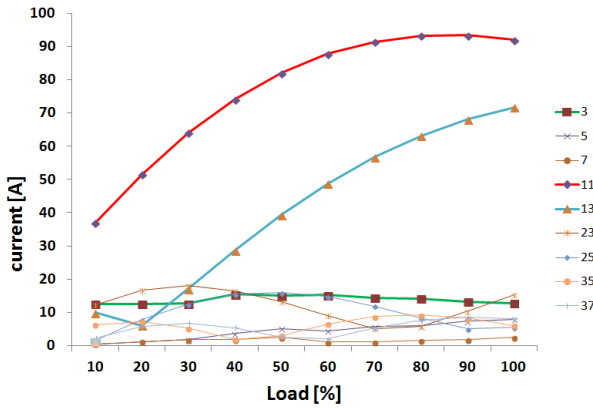


그림 8 Bipole 운전시 부하증가에 따른 고조파 전류 변화
Fig. 8 Harmonic current according to HVDC power increase

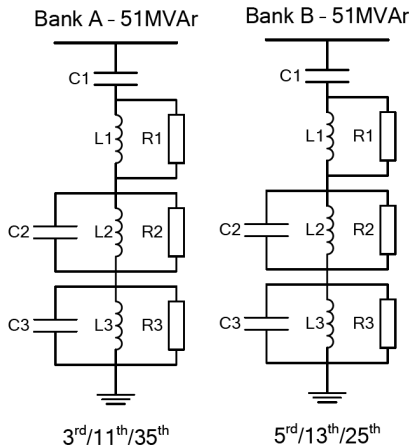


그림 9 진도변환소 HVDC 교류필터 구성
Fig. 9 Configuration of HVDC AC Filter in Jindo C/S

2.4.3 필터 성능평가

필터의 파라미터는 병렬 공진주파수를 이용한 필터설계 알고리즘에 따라 검토하였으며, 최종적으로 표 5와 같은 4가지 경우를 선정하여 그 특성을 검토하였다. 각 조건별 필터의 임피던스

표 5 병렬공진주파수 방식 3/11/35차 triple-tuned 필터설계값

Table 5 Filter parameters of 3/11/35 triple-tuned filter using parametric method

| Case | 공진주파수 차수 | C1 | C2 | C3 | L1 | L2 | L3 |
|------|----------------------------|------|-------|------|------|-------|------|
| A | $n_{p1}=4, n_{p2}=19$ | 5.39 | 7.73 | 2.12 | 5.65 | 56.86 | 9.17 |
| B | $n_{p1}=3.35, n_{p2}=19$ | 5.54 | 24.19 | 3.15 | 3.85 | 25.92 | 6.17 |
| C | $n_{p1}=3.35, n_{p2}=24.5$ | 5.53 | 24.47 | 2.19 | 6.42 | 25.62 | 5.35 |
| D | $n_{p1}=3.35, n_{p2}=32$ | 5.53 | 24.65 | 3.61 | 11.0 | 25.44 | 1.90 |

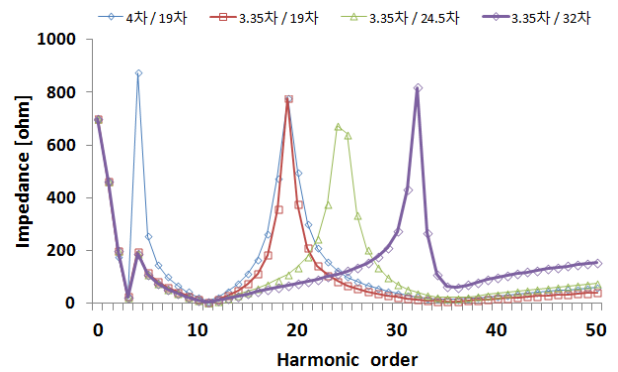


그림 10 제주-진도 HVDC 교류필터 구성
Fig. 10 Configuration of Jeju-Jindo HVDC AC Filter

표 6 송전량 변동에 따른 3/11/35차 Triple-tuned 필터의 고조파 전압 왜곡율[%]

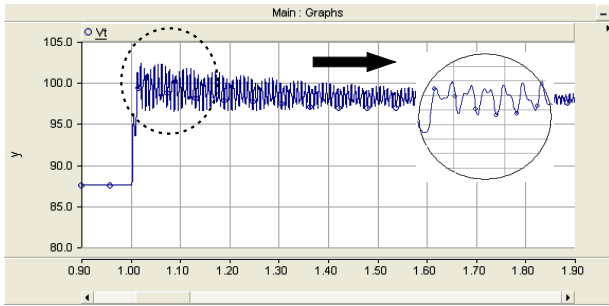
Table 6 Harmonic voltage distortion of 3/11/35 triple-tuned filter according to dc power change

| 지 표 | 차 수 | HVDC전력 송전량 [%] | | | | | | | | | | | |
|----------------|--------|----------------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|
| | | Case A | | | Case B | | | Case C | | | Case D | | |
| | | 10 | 50 | 100 | 10 | 50 | 100 | 10 | 50 | 100 | 10 | 50 | 100 |
| D _n | 3 | 0.35 | 0.44 | 0.38 | 0.35 | 0.44 | 0.38 | 0.35 | 0.43 | 0.37 | 0.35 | 0.43 | 0.37 |
| | 5 | 0.03 | 0.23 | 0.52 | 0.02 | 0.18 | 0.42 | 0.02 | 0.18 | 0.42 | 0.02 | 0.18 | 0.41 |
| | 7 | 0.02 | 0.06 | 0.09 | 0.01 | 0.04 | 0.07 | 0.01 | 0.04 | 0.07 | 0.01 | 0.04 | 0.07 |
| | 11 | 0.21 | 0.48 | 0.55 | 0.1 | 0.22 | 0.25 | 0.1 | 0.22 | 0.26 | 0.16 | 0.36 | 0.42 |
| | 13 | 0.03 | 0.13 | 0.23 | 0.03 | 0.12 | 0.23 | 0.03 | 0.12 | 0.22 | 0.03 | 0.12 | 0.21 |
| | 23 | 0.12 | 0.13 | 0.16 | 0.12 | 0.13 | 0.16 | 0.13 | 0.14 | 0.17 | 0.12 | 0.13 | 0.16 |
| | 25 | 0.01 | 0.11 | 0.04 | 0.01 | 0.11 | 0.04 | 0.01 | 0.12 | 0.04 | 0.01 | 0.11 | 0.04 |
| | 35 | 0.07 | 0.04 | 0.07 | 0.04 | 0.02 | 0.04 | 0.08 | 0.04 | 0.08 | 0.12 | 0.06 | 0.12 |
| 37 | 0.03 | 0.03 | 0.1 | 0.02 | 0.02 | 0.07 | 0.04 | 0.03 | 0.12 | 0.05 | 0.05 | 0.18 | |
| THD | | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.7 | 0.4 | 0.6 | 0.8 |
| TIF | | 11.3 | 16.8 | 21.3 | 9.0 | 13.1 | 15.8 | 11.5 | 14.4 | 19.6 | 14.4 | 16.3 | 25.4 |

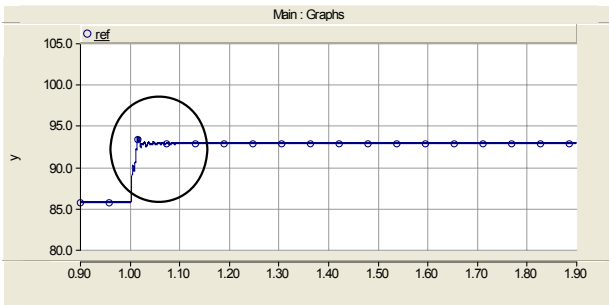
특성은 그림 10과 같다.

표 6은 표 5의 각 경우에 대하여 필터 성능 등가회로를 통해 계산한 D_n, THD, TIF값을 보여준다. 개별 고조파 왜곡율 D_n과 종합 고조파 왜곡율 THD는 모두 1% 이하로 큰 차이를 보이지 않지만 TIF를 고려하면 C Case가 가장 적절한 것을 확인할 수 있다.

그림 11은 triple-tuned 필터설계에서 고려된 3차 고조파 필터 영향을 보기 위해 HVDC 컨버터의 블로킹시의 AC모선 과전압을 모의한 것이다. 그림 11(a)는 3차 고조파 필터가 없는 경우이며, 그림 11(b)는 3/11/35필터와 같이 3차 고조파 필터가 추가된 triple-tuned 필터가 투입된 경우이다. 그림에서 알 수 있듯이 저주파수의 진동성분이 필터에 의해 제거된 것을 알 수 있다. 이를 통해 정상상태 고조파 왜곡을 뿐만 아니라 과도상태에서의 저주파수 성분에 대한 댐핑효과를 확인할 수 있었다.



(a) 3차 고조파 필터가 투입되지 않은 경우



(b) 3차 고조파 필터가 투입된 경우

그림 11 Triple-tuned 필터에 의한 저차 고조파 공진제거
Fig. 11 Elimination of low harmonic by triple-tuned filter

3. 결 론

본 논문에서는 triple-tuned 필터의 설계방법을 제안하였으며, 수식과 시뮬레이션을 통해 적정성을 검토하였다. 먼저 널리 쓰이는 triple-tuned 필터의 두 가지 설계방법을 검토하고, 공진주파수를 이용한 필터의 설계방법을 이용하여 시스템에 맞는 필터를 설계하는 방법을 제안하였다. 검증은 위해 제주~진도 250kV HVDC컨버터의 고조파 모델을 사용하고 HVDC 등가회로를 이용해 필터의 파라미터를 선정하고 선정된 파라미터를 이용해 고조파 전압 왜곡률 특성을 분석하였다. 아울러 저차고조파 필터가 포함된 triple-tuned 필터를 통해 과도상태의 특성이 개선됨을 확인할 수 있었다.

References

[1] R. J. Piwko, D. J. Leonard, J. J. Nolan, and J. B. Thorpe, High-voltage direct current handbook: First edition, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, USA, Dec. 1994.

[2] C. Bartzsch, H. Huang, R. Roessel, K. Sadek, "Triple Tuned Harmonic Filters-Design Principle and Operating Experience", Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on Vol. 1 pp.542-546

[3] Kun-Ping Lin, Ming-Hoon Lin, and Tung-Ping Lin,

"An Advanced Computer Code for Single-Tuned Harmonic Filter Design", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 34, no. 4, pp.640-648, July/Aug. 1998.

[4] M. A. Zamani and M. Mohseni, "Damped-Type Double Tuned Filters Design for HVDC Systems", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilization, Barcelona, Oct. 2007.

[5] HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems, Chan-Ki Kim, John Wiley & Sons, 2009

[6] Jindo-Jeju HVDC Bipole Cable Link "Harmonic Filtering Report", Alstom Report P0135/10040/XREP, 2009

저 자 소 개



이 성 두 (Seong-Doo Lee)

1996년 경상대 전기공학과 졸업. 1998년 부산대 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 한전 전력연구원. 선임연구원



최 순 호 (Soon-Ho Choi)

2007년 충남대 전기공학과 졸업. 2009년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 한전 전력연구원 선임보조연구원.



김 찬 기 (Chan-Ki Kim)

1991년 서울산업대 전기공학과 졸업. 1993년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업 (석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학). 1996년~현재 한전 전력연구원 책임연구원.



차 한 주 (HanJu Cha)

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공학). 1990년~2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국. United Technology Research Center 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기 공학과 교수.