

HVDC System 적용 Double-tuned 필터의 설계 방법 및 임피던스 특성 검토

이희진*, 손금태*, 남태식*, 백승택**, 이욱화**, 정용호**, 허건*, 박정욱*
연세대학교*, LS 산전**

Double-tuned Filter Design Applied to HVDC System and Assessment of Impedance Characteristic

Hee-Jin Lee*, Gumtae Son*, Tae-Sik Nam*, Seung-Taek Baek**, Uk-Wha Lee**, Yong-Ho Jung**, Kyeon Hur*, Jung-Wook Park*
Yonsei University*, LSIS Co. Ltd**

Abstract - 세계적으로 대용량 장거리 송전에 대한 요구가 증가함에 따라 HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템에 관심이 집중되고 있다. 대규모 전력전송이 가능한 전류형 HVDC 시스템은 무효전력 및 고조파를 발생시킨다. 따라서 이를 보상하기 위해 여러 종류의 AC필터가 사용된다. 본 논문에서는 HVDC 시스템에서 주로 사용되는 double-tuned 필터의 두 가지 설계방식을 검토한다. 또한 저항을 투입하여 공진을 줄이는 damped double-tuned 필터의 임피던스 특성을 살펴본다.

1. 서 론

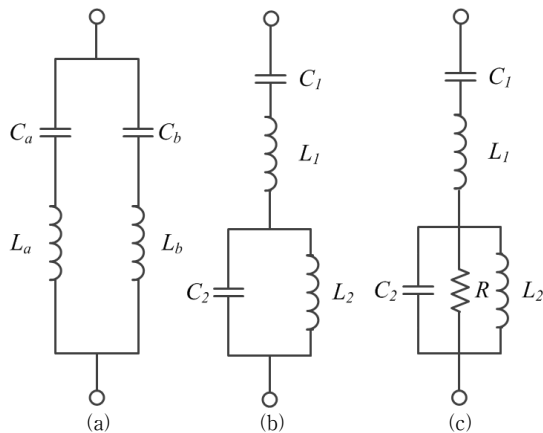
HVDC(High Voltage Direct Current) 시스템은 장거리 송전 및 해저 케이블 이용하여 전력을 전송할 때 기존 AC전송 방식에 비해 장점을 가지고 있다. 그러나 컨버터를 이용하여 전력을 변환할 때 무효전력과 고조파를 발생시키기 때문에 AC필터를 필요로 한다.

HVDC 시스템에서 주로 12 펄스 운전을 사용하므로 11, 13, 23, 25, 35, 37차 등의 특성고조파를 발생시킨다. 이를 보상하기 위해 HVDC 시스템에서는 경제적으로 장점을 가진 double-tuned 필터를 널리 사용한다. 본 논문에서는 double-tuned 필터의 두 가지 설계방식을 검토하였다. 첫 번째는 두 개의 single-tuned 필터를 이용하여 설계하는 방법이고, 두 번째는 필터의 공진주파수를 이용하여 설계하는 방법이다. 나아가 공진을 일으키는 주파수에 damping을 향상시키기 위해 저항을 투입하여 모의실험을 통해 시스템 특성을 분석하였다.

2. Double-tuned 필터의 설계

2.1 등가회로 방식을 이용한 double-tuned 필터의 설계

HVDC 시스템에서 교류필터를 설계할 때 고조파 왜형, 시스템 신뢰도, 비용을 고려하여야 한다. 필터는 하나의 bank당 비용이 소요되기 때문에 <그림 1>에서처럼 두 개의 필터를 하나의 필터 bank로 합치는 것이 경제적으로 유리하다. 등가회로방식을 이용한 필터의 설계를 위해서 먼저 총 보상해야할 무효전력량을 각각의 single-tuned 필터에 적절히 분배 후 파라미터 값을 선정한다[1].



<그림 1> Double-tuned 필터의 등가회로 (a) 두 개의 single-tuned 필터, (b) Double-tuned 필터, (c) Damped double-tuned 필터

<그림 1>의 (a)에서 보이는 두 개의 single-tuned 필터를 설계 후에 다음의 식을 이용하여 <그림 1>의 (b)에서 제시된 double-tuned filter의 파라미터 값을 선정한다.

$$C_1 = C_a + C_b \tag{1}$$

$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \tag{2}$$

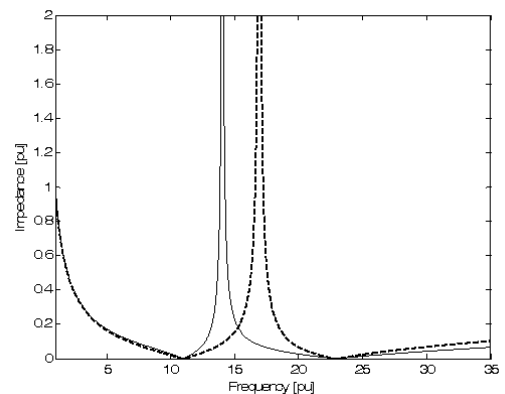
$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \tag{3}$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \tag{4}$$

위의 설계방법을 이용하여 22kV의 모선전압과 기본주파수 60Hz에서 200Mvar의 무효전력을 보상하고, 11차(660Hz)와 23차(1380Hz)의 필터링 주파수를 가지는 double-tuned 필터를 설계하였다. 설계의 기본이 되는 single-tuned 필터는 각각 200Mvar의 절반인 100Mvar의 무효전력 보상을 담당한다. 아래 <표 1>에 상세한 파라미터 값이 제시되어 있다.

<표 1> 등가회로방식의 11/23차 double-tuned 필터(14차공진)

	C_a [uF]	L_a [mH]	C_b [uF]	L_b [mH]
Single tuned	543.52	0.1070	547.02	0.0243
	C_1 [uF]	L_1 [mH]	C_2 [uF]	L_2 [mH]
Double tuned	1090.54	0.0198	2779.06	0.0129



<그림 2> Double-tuned 필터의 등가회로 임피던스 특성

<그림 2>는 앞에서 설계한 double-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다. 실선은 200Mvar의 용량을 11차, 23차에 각각 50%-50%로 분할한 것이고 점선은 75%-25%로 분할한 것이다. 분할하는 무효전력량에 따라 공진하는 주파수가 다음을 확인할 수 있다. 위의 경우 50%-50%는 14차에서, 75%-25%는 17차에서 공진한다.

2.2 공진주파수를 선택할 수 있는 double-tuned 필터의 설계

앞에서 설명한 등가회로 방식을 이용한 double-tuned 필터는 분할하는 무효전력의 비율을 달리함으로써 공진주파수를 변화시킬 수 있다. 그러나 특정 주파수에서 공진을 일으키기 위해 적절히 무효전력량을 분할

하는 것은 용이하지 않다. 따라서 필터링 주파수와 공진주파수의 값을 이용하여 필터를 설계하기 위해 다음과 같은 수식을 전개하였다.

<그림 1>의 (b)를 고려하여 필터를 설계할 때 수식 전개 편의성을 위해 저항성분은 없다고 가정을 한다. 우선 L_1 , C_1 으로 구성된 직렬 공진회로의 주파수 특성은 식(5)와 같고, L_2 , C_2 로 구성된 병렬 공진회로의 주파수 특성은 식(6)과 같다.

$$z_s(\omega) = j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right), \omega_s = 1/\sqrt{L_1 C_1} \quad (5)$$

$$z_p(\omega) = j\left(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2}\right)^{-1}, \omega_p = 1/\sqrt{L_2 C_2} \quad (6)$$

전체 회로의 임피던스는 식(7)과 같으며, 필터링 주파수 ω_1 , ω_2 에서 임피던스는 0의 값을 가져야 한다.

$$\begin{aligned} z(\omega) &= z_s(\omega) + z_p(\omega) \\ &= j\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) + j\left(\omega C_2 - \frac{1}{\omega L_2}\right)^{-1} = 0 \quad (7) \end{aligned}$$

위의 수식을 풀면 Veda's 이론에 의해 아래와 같은 관계식을 얻을 수 있다[2]. 여기서 ω_p 는 공진주파수이다.

$$\omega_1 \omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \times \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} = \omega_s \omega_p \quad (8)$$

수식 (5), (6), (8)을 이용하여 식(7)을 정리하면 다음과 같이 각 파라미터의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{C_1}{C_2} &= \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_p^2}{\omega_s^2} - 1 \\ L_1 &= \left(\frac{\omega_p}{\omega_1 \omega_2}\right)^2 \times \frac{1}{C_1}, L_2 = \frac{1}{\omega_p^2} \times \frac{1}{C_2} \quad (9) \end{aligned}$$

필터는 고조파성분을 제거하는 역할 뿐만 아니라 기본주파수에서 무효전력을 보상해 주어야 한다. 따라서 다음의 식(10)을 만족하여야 한다. 여기서 V 는 연결지점의 전압이고, Q 는 무효전력양이다.

$$z(\omega_F) = -jV/Q \quad (10)$$

이를 위의 식 (7)에 적용하면 아래와 같이 C_1 값을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} C_1 &= \left\{ \frac{1}{\omega_F} - \omega_F \left(\frac{\omega_p}{\omega_1 \omega_2} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \frac{\omega_F (\omega_1^2 + \omega_2^2 - \omega_p^2) \omega_p^2 - \omega_F \omega_1^2 \omega_2^2}{\omega_1^2 \omega_2^2 (\omega_p^2 - \omega_F^2)} \right\} \frac{Q}{V^2} \quad (11) \end{aligned}$$

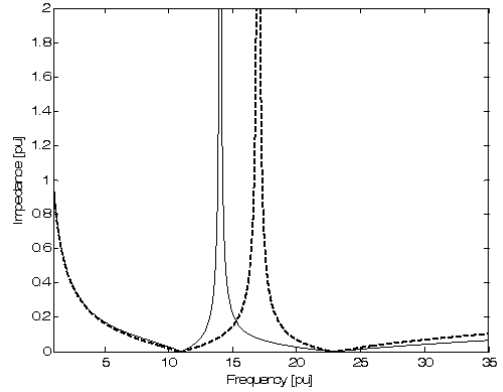
위의 설계방법을 이용하여 앞의 2.1에서 제시한 200Mvar의 11차(660Hz)와 23(1380Hz)의 두 가지 필터링 주파수를 가지는 필터를 설계하였다. 아래 <표 2>에 상세한 파라미터 값이 제시되어 있다.

<표 2> 11/23차 고조파 제거를 위한 double-tuned 필터

	C_1 [uF]	L_1 [mH]	C_2 [uF]	L_2 [mH]
공진주파수 (14차)	1094.95	0.0197	2806.26	0.0128
	C_1 [uF]	L_1 [mH]	C_2 [uF]	L_2 [mH]
공진주파수 (17차)	1093.56	0.0291	1736.05	0.0140

<그림 3>은 <표 2>에 제시된 double-tuned 필터의 임피던스 특성을 보여준다. 설계 목표에서 제시된 바와 같이 14, 17차에서 공진이 일어남을 확인할 수 있고 그 파라미터는 앞의 <표 1>과 <그림 2>와 유사함

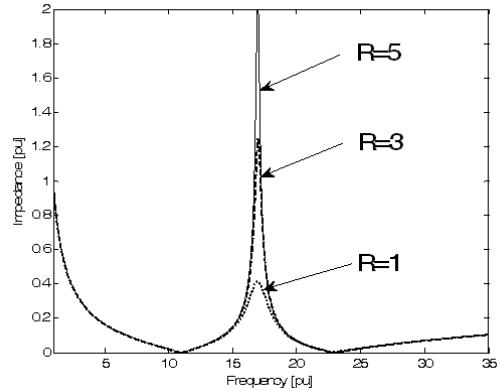
을 확인할 수 있다. 그러나 등가회로 방식에 비해 원하는 공진주파수를 직접적으로 선택하여 필터를 설계할 수 있는 장점이 있다.



<그림 3> Double-tuned 필터의 임피던스 특성

2.3 Damped double-tuned 필터의 설계

이론적으로 공진주파수에서 임피던스는 무한대의 값을 가진다. 따라서 앞의 <그림 1>의 (c)와 같이 저항을 삽입함으로써 필터 특성에 damping을 부여한다. 이는 아래 <그림 4>에 나타나 있다.



<그림 4> Damped double-tuned 필터의 저항 크기별 임피던스 특성

<그림 4>에서 보는바와 같이 저항값이 작아질수록 damping이 향상됨을 확인할 수 있다. 그러나 $R=1$, $R=3$, $R=5$ 일 때 저항에서 손실되는 전력은 각각 120MW, 40MW, 24MW로 damping이 향상될수록 손실되는 전력이 증가한다. 따라서 damping과 손실은 trade-off 관계임을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 double-tuned 필터를 설계하는 두 가지 방식과 각각의 임피던스 특성을 살펴보고 나아가 저항을 삽입하여 damping을 향상시키는 방법에 대해 검토하였다. 공진주파수를 이용한 설계방법이 single-tuned 필터를 이용하여 설계한 방법보다 필터링 및 공진주파수 조절을 용이하게 할 수 있다. 또한 저항으로 인해 damping이 향상될수록 전력손실 역시 증가하는 것을 모의실험을 통해 확인할 수 있었다.

[감사의 글]

본 연구는 LS산전-연세대 산학협동과제인 “전압형 HVDC Topology 및 스위칭/제어기법 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] S. Santoso, Fundamentals of Electric Power Quality: The University of Texas at Austin, 2009.
- [2] X. Yao “Algorithm for the Parameters of Double Tuned Filter,” 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power, 1998.