

## 11차/13차 고조파를 동시에 제거하는 Single Tuned 필터

김찬기, 양병모, 정길조, 안정식  
한전전력연구원

### A Study on the Performance Enhancement of HVDC System Using Hybrid Filter and Energy Recovery Filter

C.K. Kim, B.M. yang, G.J. Jeong, and J.S. Ahan  
KEPRI

#### ABSTRACT

Two non-conventional HVDC converter arrangements are compared. These include the Capacitor Commutated Converter (CCC) in which series capacitors are included between the converter transformer and the valves, and the Controller Series Capacitor Converter (CSCC), based on more conventional topology, in which series capacitors are inserted between the AC filter bus and the AC network. Results show that both options have comparable steady state and transient performance. Danger of ferroresonance with the CSCC option is eliminated by controlling the amount of series compensation. The dynamic performance simulations is performed by PSCAD/EMTDC

#### 1. 서 론

HVDC시스템에서 필터의 목적은 다음과 같이 크게 3가지로 나눌 수 있다.

- HVDC에서 발생하는 고조파 제거
- HVDC에서 소모하는 무효전력 보상
- HVDC의 과도 안정도 향상

이러한 필터를 종류에 따라 분석해 보면 계통에 직렬로 삽입하는 직렬필터와 병렬로 삽입하는 병렬필터로 나눌 수 있다. 첫 번째로, 병렬필터는 특정 고조파 전류에 대하여 임피던스가 영(零)에 가까워지기 때문에 고조파 흡수 필터라고 생각할 수 있다. 두 번째로, 직렬필터를 생각해 볼 수 있는데, 직렬필터는 특정고조파 전류에 대하여 임피던스가 무한대( $\infty$ )에 가까워지기 때문에 특정 고조파 전류를 통과시키지 않고 차단하기 때문에 고조파 차단필터로 생각해 볼 수 있다. 그리고 필터를 구성하는

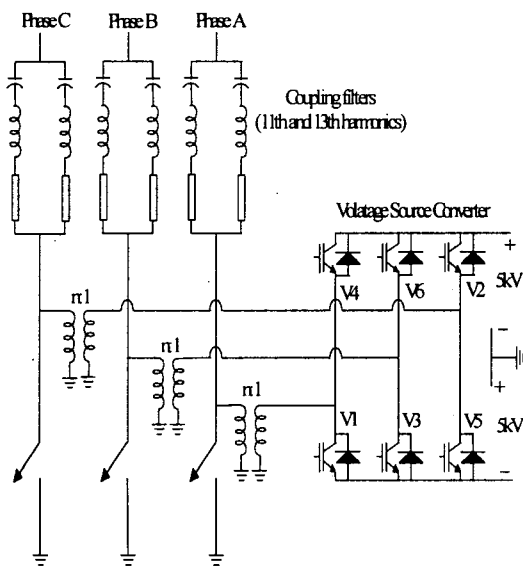
방법에 따라 분석해 보면, RLC 수동소자를 이용하여 만드는 수동필터(Passive Filter)와 전력변환 장치인버터를 이용하여 만드는 능동필터(Active Filter)로 구분할 수 있는데, 전력계통에서는 수동필터가 가격이 싸고, 수동필터의 콘덴서를 이용하여 전력 계통에 무효전력을 공급할 수 있다는 장점 때문에 많이 이용되고 있다. 반면에 능동필터는 가격이 비싸지만, 수동필터와 다르게 계통에 대한 적응성을 가지고 있고, 수동필터보다 더 정밀하게 고조파를 제거할 수 있다는 장점을 가지고 있다. HVDC 시스템에서 수동필터는 HVDC의 성능을 결정하는 요소로써, HVDC시스템이 발생시키는 고조파를 제거하는 긍정적인 면 이외에 필터가 계통의 인덕턴스와 상호작용을 일으켜 공진을 일으키는 부정적인 면을 포함한다. HVDC시스템에 있어서 수동필터를 설계하는 방법도 단순히 무효전력 보상과 특정고조파에 대한 필터링능력 그리고 경제성을 고려한 70년대의 Double Tuned Filter 설계개념에서 80년대에 들어서는 계통의 과도현상을 고려하여 필터에 댐핑 기능을 추가함으로써 계통을 안정화시키는 Damped Filter를 적용하고, 90년대에는 3개의 고조파를 동시에 제거하는 Triple Tuned Filter를 적용하고 있다. HVDC시스템에서 능동필터의 적용은 가격적인 면이 만만하지 않기 때문에 많이 적용되고 있지는 않지만, 능동필터가 가지고 있는 고조파에 대한 확실한 필터링능력은 수동필터만으로는 고조파에 대한 필터링능력에 한계를 가지고 있는 곳에 적용되고 있다. 한편, 수동필터의 장점과 능동필터의 장점을 결합한 Coupling Active Filter에 관한 연구는 HVDC시스템의 필터를 설계하는 엔지니어에게 많은 가능성과 적응성을 주고 있다. Coupling Active Filter는 수동필터와 능동필터를 결합한 형태로 필터에 주입하는 전류량을 제어함으로써 수동필터의 성능을 극대화 시키는 원리를 가지고 있다. 캐나다 Manitoba 대학의 Gole는 2001년 IEEE 논문에서 Coupling Active Filter가 수동필터의 Detuning 문제와

능동필터의 가격문제를 해결할 수 있음을 보여주었다. 본 논문에서는 수동필터와 능동필터를 합하여 Hybrid 필터를 기본으로 한 12차 Single Filter를 이용하여 11차와 13차 고조파를 동시에 제거하고, 과도특성이 우수한 Damped 필터를 이용하여 HVDC시스템의 성능을 개선한 HVDC 시스템의 필터 운영 Topology를 개발하였다.

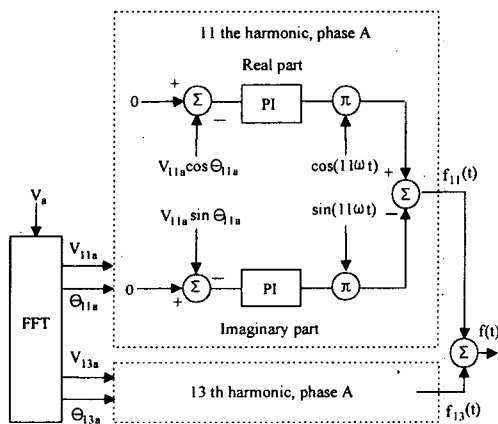
## 2. Coupling Filter와 Damped Filter

### 2.1 Coupling Active Filter

Coupling Active Filter는 순수한 능동 필터의 경제적인 문제와 순수한 수동 필터의 기술적인 한계를 극복하기 위해서 제안된 것이다. 그림 1은 11/13차 Coupling Active Filter의 상세 블록도와 제어기를 보여 주고 있다.



(a) Coupling Active Filter의 블록도



(b) Coupling Active Power Filter의 제어기

그림 1 Coupling Active Power Filter

그림 1 b)는 Coupling Filter의 제어기를 보여주고 있는 것으로 이 제어기의 알고리즘은 AC계통에서 11차 고조파와 13차 고조파를 FFT분석하여 11차/13차 고조파 값이 영(零)이 되도록 제어하는 것으로서 11차 고조파와 13차 고조파의 지령 값은 직류 값이기 때문에 Park's Equation을 이용하여 직류 값을 3상 교류로 변환하여 컨버터를 제어하는 방식이다. 그림 2는 11차 고조파 필터가 5% detuning된 경우의 임피던스 궤적을 보여주고 있는 것으로 필터가 Detuned 되었다는 의미는 필터의 Tuning을 여유 있게 했다는 의미와 필터의 특성이 시간이 경과함에 따라 변화했다는 의미로 해석될 수 있다. Coupling Active Filter는 이러한 Detuned된 경우에도 필터의 성능 변화 없이 11차 고조파를 충분히 필터링하는 능력을 가지고 있다.

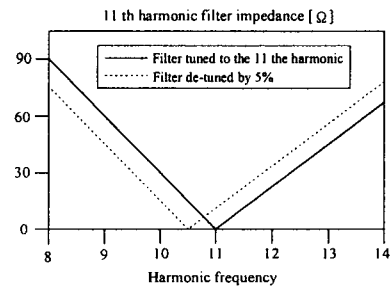
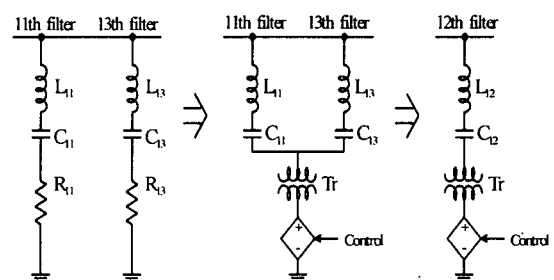


그림 2 Tuned 11차 고조파 필터와 Detuned 11차 고조파 필터

이러한 Detuning 특성에 대한 보상능력은 Coupling Active Filter를 다른 형태로 변형시키는 것이 가능한데, 본 논문에서는 그림 2와 같이 Coupling Active Filter의 Detuning 보상 능력을 이용하여 12차 Coupling 필터를 이용하여 11차와 13차 고조파를 제거하는 필터를 제안하였다. 그림 3에서 보여주는 필터는 11차와 13차 Single Tuned 필터에서 11차와 13차 Single tuned 필터를 Active 필터와 결합하여 Double Coupling Active 필터를 만든 것이고, Double Coupling Active 필터의 Detuning성을 이용하여 Single Coupling Active 필터를 제안하였다.



(a) Single Coupling Active Filter

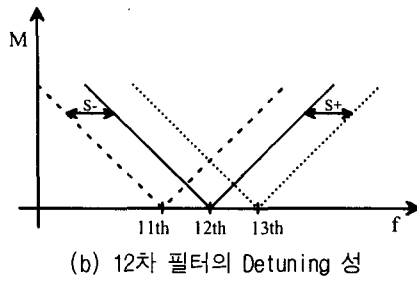
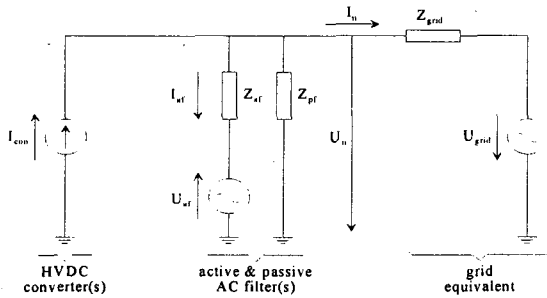


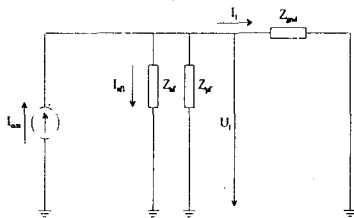
그림 3 Coupling Active Power Filter

## 2.2 Coupling Active Filter의 제어

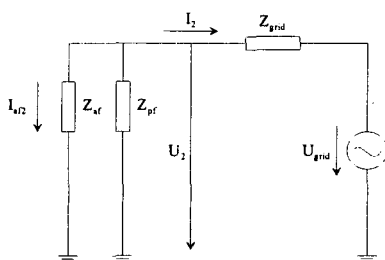
그림 4는 HVDC 시스템과 Coupling Active Filter 그리고 계통을 등가적으로 표현한 블록도이다. 그림 3에서 보여주는 등가 회로를 HVDC 시스템과 Active Filter 그리고 계통으로 각각 분리하여 수식적으로 표현하면 그림 4와 같다. 그림 4 a)에서 보여준 모델링에서 HVDC와 Coupling Active filter 그리고 계통에 관해 각각 모델링을 하면 그림 4와 같다.



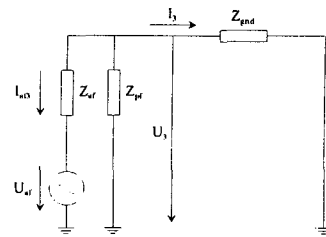
(a) 시스템 총 등가회로



(b) 컨버터 등가회로



(c) 계통 등가회로



(d) 능동필터 등가회로

그림 4 등가회로

$$Z_{ftot} = Z_{af} \parallel Z_{pf}$$

$$Z_1 = Z_{ftot} \parallel Z_{grid}$$

$$U_1 = Z_1 \cdot I_{con}$$

$$I_1 = \frac{Z_1}{Z_{grid}} \cdot I_{con} \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_{ftot} + Z_{grid}$$

$$U_2 = \frac{Z_{ftot}}{Z_2} \cdot U_{grid}$$

$$I_2 = \frac{1}{Z_2} \cdot U_{grid} \quad (2)$$

$$Z_3 = Z_{af} \parallel Z_{grid}$$

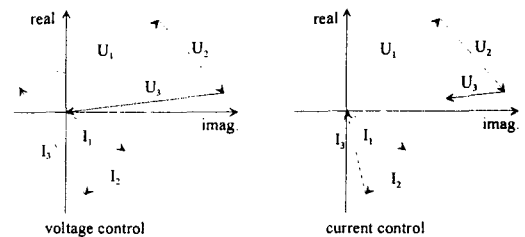
$$U_3 = -\frac{Z_3}{Z_{af} + Z_3} \cdot U_{af}$$

$$I_3 = -\frac{Z_3}{Z_{grid} \cdot (Z_{af} + Z_3)} \cdot U_{af} \quad (3)$$

Active Filter를 전압 제어하는 경우와 전류 제어하는 경우의 Phase 도를 표현하면 그림 5와 같고, 수학적 모델링은 식 (4)와 식(5)와 같다.

$$U_{af} = \frac{Z_{af} + Z_3}{Z_3} \cdot (U_1 + U_2) \quad (4)$$

$$U_{af} = \frac{Z_{af} + Z_3}{Z_3} \cdot Z_{grid} \cdot (I_1 + I_2) \quad (5)$$



(a) Voltage Control

(b) Current Control

그림 5 제어모드에 따른 등가회로의 페이저 도

### 2.3 Damping 필터

HVDC시스템에서 Damping 필터는 23차와 25차 고조파를 제거하는 High Pass 필터에 제동기능을 삽입한 형태를 가지고 있다. Damping 필터가 HVDC시스템에서 유용한 특성을 가지고 있는 것은 모든 주파수 영역에서 고조파가 발생하는 과도상태에서 필터링 특성이 우수하기 때문이다. Damped 필터를 설계하는 순서는 다음과 같다.

- 1) 무효전력을 공급하기 위한 커패시터 값을 설정한다.
- 2) 공진 점을 갖기 위한 인덕턴스 값을 설정한다.
- 3) Power Quality를 결정하기 위한 "Q"를 결정한다.

일반적으로, 낮은 Q는 정상상태에서 유리하고, 높은 Q는 과도상태에서 우수한 특성을 보이고 있다. 이러한 Damping 필터는 과도상태에서 우수한 특성을 가지고 있음에도 불구하고 Damping 기능을 수행하는 저항에 의한 손실이 최대의 단점으로 대두되고 있다. 따라서 이러한 Damping 필터의 단점을 해결하고자 그림 6과 같이 저항을 사이리스터나 IGBT와 같은 전력변환소자를 이용하여 저항이 가변되게 하면서 저항에서 소모되는 에너지를 계통에 다시 되돌리는 Energy Recovery Damping 필터를 제안하게 되었다.

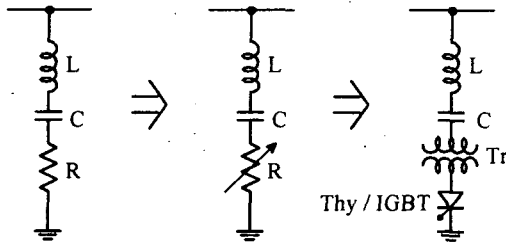


그림 6 Damped 필터의 구조

### 3. 시뮬레이션과 결과 검토

HVDC시스템에서 고조파 Instability는 AC계통의 인덕턴스와 HVDC시스템의 필터가 상호 작용을 일으켜 어느 주파수에서 직렬공진이나 병렬공진을 유발하는 것을 말한다. 이러한 고조파 Instability 주파수는 계통조건이 변하던가 아니면, 제어모드가 변하는 경우에도 발생할 수 있는 것으로 Damping 필터를 HVDC시스템에 인가한 경우에 고조파 Instability 현상을 줄일 수 있다. 이러한 현상을 확인하기 위해서 본 논문에서는 CIGRE모형을 이용하였으며, 표 1은 본 논문에서 사용한 CIGRE 모델의 파라미터를 보여 주고 있다. 그리고 그림 7

은 기존의 CIGRE모형을 보여주고 있으며, 그림 8는 Damping 필터와 Coupling Active Filter를 합하여 제안된 HVDC 필터를 보여주고 있다.

표 1. CIGRE모델의 파라미터

	RECTIFIER	INVERTER
SCR	$2.5 \angle -87^\circ$	$2.5 \angle -75^\circ$
ESCR	$1.88 \angle -86^\circ$	$1.9 \angle -70.04^\circ$
Bus Voltage (L-L)	345Kv	230Kv
Filter VAR Supply	625MVAR	625MVAR
Nominal Angle	$15^\circ$	$15^\circ$

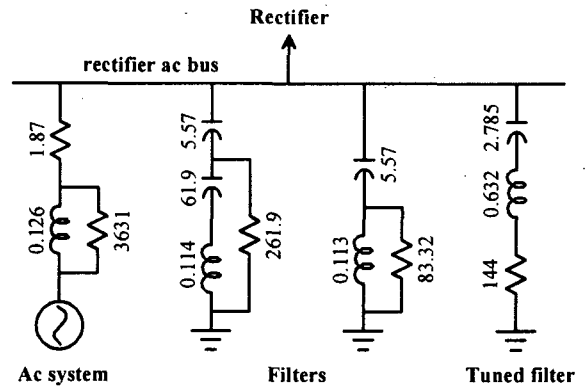


그림 7 정류기단에서 CIGRE 모델

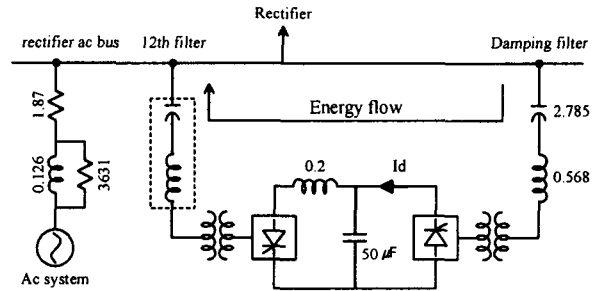
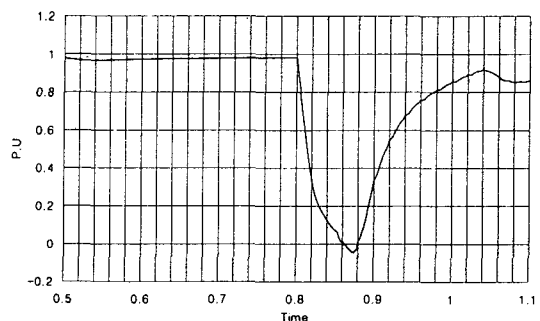
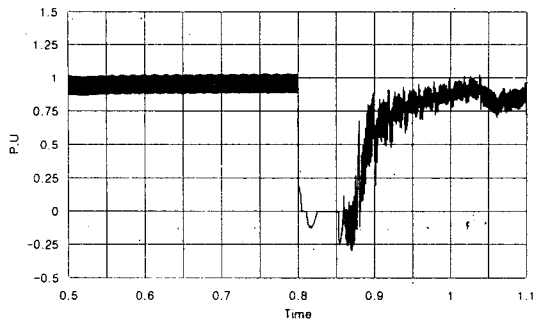


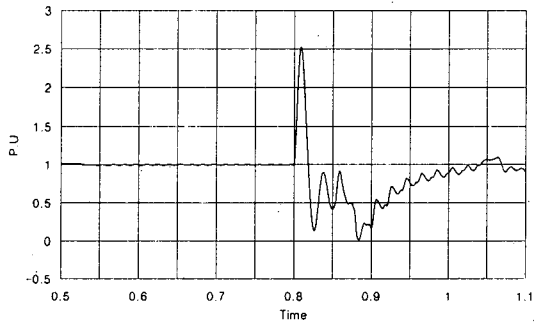
그림 8 수정된 CIGRE모델(정류기단에서)



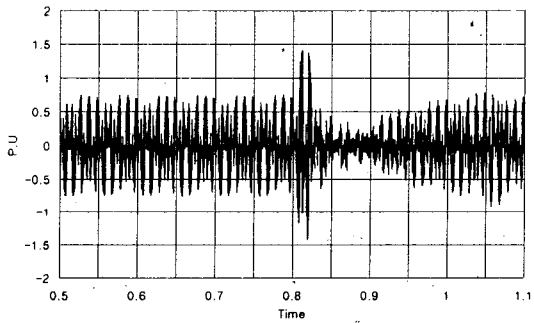
(a) AC 전압(RMS)



(b) DC 전압 (인버터단에서)



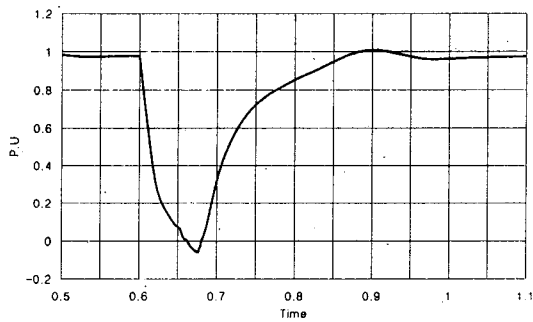
(c) DC 전류 (인버터 단에서)



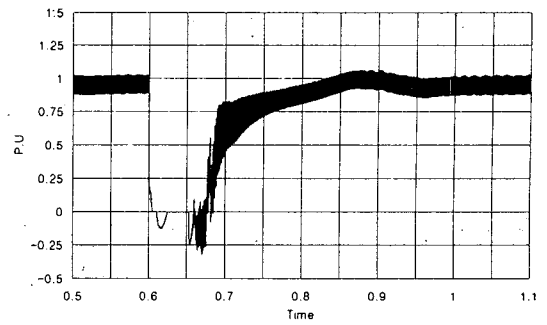
(d) 12차 능동 필터 출력

그림 9 일반적인 CIGRE모델의 시뮬레이션 결과

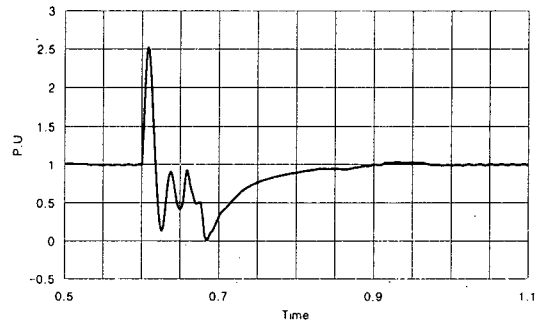
그림 9는 일반적인 CIGRE모델을 이용해서 시뮬레이션한 결과를 보여 주고 있으며, 그림 10은 제안된 방식을 이용한 CIGRE모델을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.



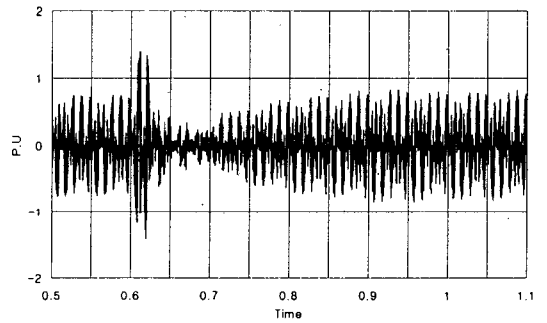
(a) AC 전압(RMS)



(b) DC 전압 (인버터 단에서)



(c) DC 전류 (인버터 단에서)



(d) 12차 능동 필터 출력

그림 10 수정된 CIGRE모델의 시뮬레이션 결과

## 참 고 문 헌

- [1] CIGRE working Group 14.30 "Guide to the specification and evaluation of AC filter for HVDCs"
- [2] San-Hoon Lee, Jun-Koo, Kang, Seung-Ki Sul, "A new phase detecting method for power conversion systems considering distorted conditions in power system, IEEE IAS conference, pp. 2167-2172, 1999.
- [3] "CIGRE model", HVDC Research centre, Canada, 1992.
- [4] Kimbark, "Direct Transmission" wiley-interscience, 1971.
- [5] "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, P. Kundur, 1994.