

Single Tuned Filter와 삼상 능동필터를 이용한 다차고조파의 제거기법

김찬기, 유병우, 박종광, 정길조, 류홍우
한국전력 전력연구원

Elimination method of multi order harmonics using single tuned filter and three phase active filter

Chan-Ki Kim, Byeong-Woo Ryu, Jong-Kwang Park, Gil-Jo Jung, Hong-Woo Ryew
KEPRI(Korea Electric Power Research Institute)

ABSTRACT

본 논문은 새로운 HVDC 필터의 구조에 대하여 제안한다. 제안된 방법은 수동필터와 능동필터로 구성된 필터이고, HVDC에서 발생하는 고조파 중에서 가장 우세한 고조파인 11차와 13차를 제거하기 위한 목적으로 설계를 하였다. 또한 11차와 13차 고조파 제거를 위하여 하나의 수동필터만을 사용하였으므로 기존의 시스템에 비하여 경제적 이점이 있다. 제안한 방법은 PSCAD/EMTDC를 사용하여 이를 입증하였다.

1. 서 론

고조파를 제거하기 위한 필터를 종류에 따라 분석해 보면 계통에 직렬로 삽입하는 직렬필터와 병렬로 삽입하는 병렬필터로 나눌 수 있다. 병렬필터는 특정고조파 전류에 대하여 임피던스가 영(零)에 가까워지기 때문에 고조파 흡수 필터라고 생각할 수 있고, 직렬필터는 특정고조파 전류에 대하여 임피던스가 무한대(∞)에 가까워지기 때문에 특정고조파 전류를 통과시키지 않고 차단하므로 고조파 차단 필터로 볼 수 있다. 그리고 필터를 구성하는 방법에 따라 분석해 보면, RLC 수동소자를 이용하여 만드는 수동필터와 전력변화장치인 인버터를 이용하여 만드는 능동필터(Active Filter)로 구분할 수 있는데 전력계통에서는 수동필터가 가격이 싸고 수동필터의 커패시터를 이용하여 전력계통의 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.^[1]

HVDC시스템에 적용되는 필터는 일반적으로 무효전력을 보상하고 고조파를 제거하는 기능을 가지

고 있다. 대부분 수동필터를 사용하고 있으며 HVDC transmission에서는 전압과 전류의 범위가 매우 크기 때문에 Active Power Filter의 도입이 늦어졌다. 처음에는 직류측에서의 필터링 목적으로 Active Power Filter가 적용되었다. 직류측에 smoothing reactance와 같은 요소가 고조파를 완화시키므로 고조파 양이 적고 필터를 통하여 흐르는 기본 주파수 전류가 없다는 사실 때문에 Active Power Filter의 도입이 비교적 쉽다.

그러나 HVDC 시스템에서 교류계통에 적용되는 것은 전압과 전류의 정격이 높기 때문에 어떠한 특별한 고려가 요구된다. IGBT와 같은 고주파 스위칭 소자는 전압 정격이 낮기 때문에 전압 범위가 초과되지 않도록 전력시스템에 변압기를 연결하여야 할 것이다. 또한 고려해야 할 사항은 스위칭 손실과 온도문제를 해결하기 위하여 소자의 스위칭 주파수를 제한하는 것이다.^[2]

HVDC 시스템에서 수동필터는 HVDC의 성능을 결정하는 요소로써 HVDC 시스템이 발생시키는 고조파를 제거하는 긍정적인 면 이외에 필터가 계통의 인덕턴스와 상호작용을 일으켜 공진을 일으키는 부정적인 면을 포함한다. HVDC 시스템에 있어서 수동필터를 설계하는 방법도 단순히 무효전력 보상과 특정고조파에 대한 필터링 능력 그리고 경제성을 고려한 70년대의 Double Tuned Filter 설계개념에서 80년대에 들어서는 계통의 과도현상을 고려하여 필터에 댐핑기능을 추가함으로써 계통을 안정화시키는 damped filter를 적용했고 90년대에는 3개의 고조파를 동시에 제거하는 Triple Tuned Filter를 적용하고 있다. HVDC 시스템에서 능동필터의 적용은 가격적인 면이 높기 때문에 많이 적용되고 있지 않지만, 능동필터가 가지고 있는 고조파에 대한 확실한 필터링능력은 수동필터만으로는 고조파에 대한 필터링 능력에 한계를 가지고 있는 곳에 적용되고 있다. 한편 수동필터의 장점과 능동필터

의 장점을 결합한 필터에 관한 연구는 HVDC 시스템의 필터를 설계하는 엔지니어에게 많은 가능성과 적응성을 주고 있다. 수동필터와 능동필터를 결합한 형태는 필터에 주입하는 전류량을 제어함으로써 수동필터의 성능을 극대화 시키는 원리를 가지고 있다. 캐나다 Manitoba 대학의 Gole는 2001년 IEEE 논문에서 능동필터가 수동필터의 detuning 문제와 능동필터의 가격문제를 해결할 수 있음을 보여주었다.^[3]

본 논문에서 사용되어지는 Active Power Filter의 구성은 HVDC시스템이 12펄스 시스템이라고 가정하는 경우에는 AC계통에 발생하는 고조파는 $12p \pm 1$ 이기 때문에 11차, 13차, 23차, 25차 ...이다.

본 논문에서는 HVDC시스템이라는 독특한 특성을 가지는 시스템에 Single Tuned Filter와 Active Power Filter를 설치하기 위한 설계과정과 보상능력 그리고 장점을 나열하였으며, 이를 시뮬레이션으로 확인하였다.

2. Active Power Filter의 설계

2.1 필터의 설계

본 논문에서의 필터는 순수한 능동 필터의 경제적인 문제와 순수한 수동 필터의 기술적인 한계를 극복하기 위해서 제안된 것이다. 그림 1은 HVDC의 교류계통에 연결되어 있는 수동필터와 능동필터의 조합을 보여 주고 있다. HVDC에서 발생하는 고조파 중에서 우세고조파인 11차와 13차를 제거하기 위하여 수동필터의 공진주파수를 11차와 13차로 조정하고 HVDC 시스템이 대용량이기 때문에 전압정격을 맞추기 위하여 능동필터의 연결은 변압기를 이용하였다. 그림 2는 11차 고조파의 예를 들어 필터 커패시터가 노화 등의 이유로 값이 변화하게 되면 발생하게 되는 detuning을 나타내고 있다. 11차 고조파 필터가 5% detuning된 경우의 임피던스 궤적을 보여주고 있는 것으로 필터가 Detuned 되었다는 의미는 필터의 특성이 시간이 경과함에 따라 변화했다는 의미로 해석될 수 있다. 필터가 작은 MVAR를 가지고 있다면 pass-band가 좁아지고 detuning 효과를 더욱더 민감하게 한다. on-line tuning의 메커니즘은 커패시터의 노화나 결핍으로 인하여 소자 값이 변화할 때나 혹은 주파수가 변화할 때 필터의 공진주파수를 tuning 하는데 있어서 필터를 유지하기 위하여 필요하다.^[4] 이러한 re-tuning은 시스템에서 고조파를 제거하기 위한 적합한 전압 혹은 전류 파형을 합성하기 위한 능동 소자를 사용한 active filter의 사용으로 실현할 수 있다. 이러한 필터를 설계하기 위한 고려하여야 할 사항은 다음과 같다.

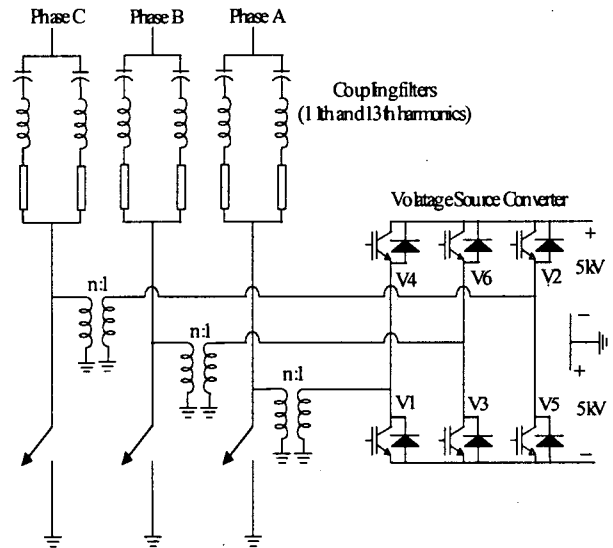


그림 1 수동필터와 능동필터의 구성

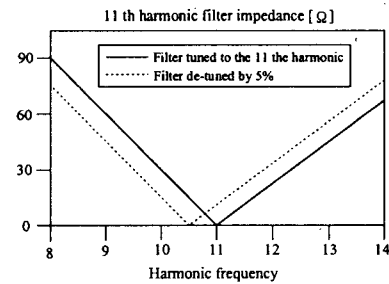


그림 2 Tuned 11차 고조파 필터와 Detuned 11차 고조파 필터

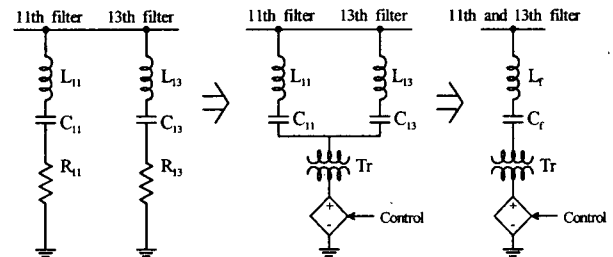


그림 3 제안된 single tuned filter와 능동필터

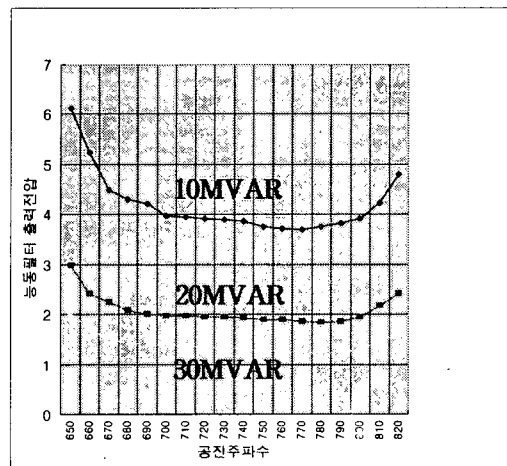


그림 4 무효전력당 공진주파수에서의 능동필터의 출력전압

- 수동필터의 무효전력보상을 위한 커패시터 용량 결정
- 수동필터의 공진주파수 결정(인덕터의 용량결정)
- 능동필터의 용량선정
- 능동필터의 제어방법 결정

2.2 수동필터의 설계

수동필터를 설계함에 있어서 무효전력에 따른 커패시터의 용량을 선정한다. 커패시터의 용량이 결정이 되면 공진주파수를 결정하여 인덕터의 용량을 결정할 수가 있다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 Active Filter의 Detuning 보상 능력을 이용하여 single tuned filter를 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 tuned filter와 Active filter의 조합을 제안하였다.

single tuned filter를 사용하므로 필터의 공진주파수를 찾기 위해 고려해야 할 점은 능동필터의 용량이다. 즉 각 공진주파수점중에서 가장 능동필터의 용량을 적게 요구하는 공진주파수점을 찾아야 한다.

그림 3에서 제안한 single tuned filter를 이용하여 필터를 설계하였을 경우에 일차적으로 고려하여야 할 사항은 single tuned filter의 공진주파수점을 찾아야 한다. 11차와 13차의 고조파를 제거하기 위한 수동필터를 하나만 사용하기 때문에 필터의 공진주파수를 어느 부분에 맞추어야 가장 안정된 필터링을 하는가가 관건이 된다. 물론 수동 필터를 11차와 13차의 공진주파수를 갖는 2개의 필터를 설계하고 이 두개의 필터를 병렬로 연결하면 가장 안정된 필터가 되겠지만, 2개의 필터가 사용되므로 설치비가 높아지고 보수유지비도 상대적으로 높아진다. 그러므로 수동필터를 하나를 사용하면서 능동필터를 이용하여 11차와 13차의 고조파를 제거하여야 한다. 대용량시스템에서 능동필터는 고주파수 스위칭 소자로 인하여 용량의 제한을 받는다. 그러므로 능동필터의 출력전압이 가장 낮은 수동필터의 공진주파수점을 선정하여 설계하여야 한다. 또한 이러한 시스템을 설계하는데 있어서 고려하여야 할 점은 HVDC와 같은 시스템에서는 수동필터에 사용되는 필터는 필터링과 무효전력을 보상하는 역할도 하여야 한다. 그러므로 무효전력을 보상하기 위하여 필터에 사용되는 커패시터의 크기도 결정하여야 한다. 그림 4에는 무효전력량(MVAR)당

각각 필터의 공진주파수에서의 능동필터의 출력전압을 나타내고 있다. 무효전력을 10MVAR, 20MVAR, 30MVAR에 대하여 각각의 공진주파수로 수동필터를 설계하였을 경우에 능동필터의 출력전압을 나타내었다. 그림 4에서 나타나듯이 능동필터의 출력전압은 수동필터의 공진주파수를 770Hz로 하는 것이 가장 낮은 값이 되므로 수동필터의 공진주파수를 770Hz로 선정하는 것이 가장 좋을 수 있다.

2.3 능동필터의 설계

그림 5는 HVDC 시스템에서 인버터 출력단과 교류계통 사이에 필터가 연결된 단상 등가 모델이다. 그림 5의 등가모델을 이용하여 다음과 같은 수식을 구할 수 있다.

$$V_{af} = -I_n [Z_{cf} + Z_{transf}] + V_n [1 + \frac{Z_{cf} + Z_{transf}}{Z_n}] \quad (1)$$

여기서 I_n : 인버터에서 발생하는 n차 고조파전류

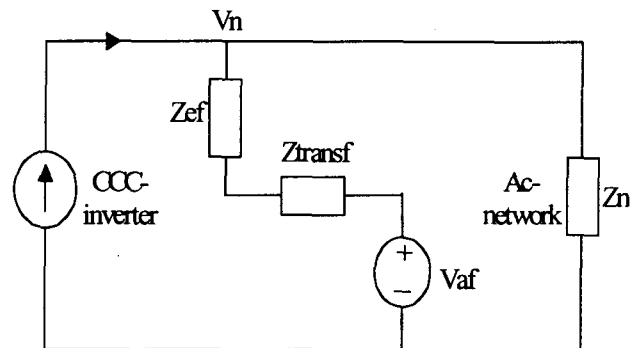


Fig. 5. HVDC 인버터와 교류계통에 연결된 수동필터와 능동필터의 등가모델

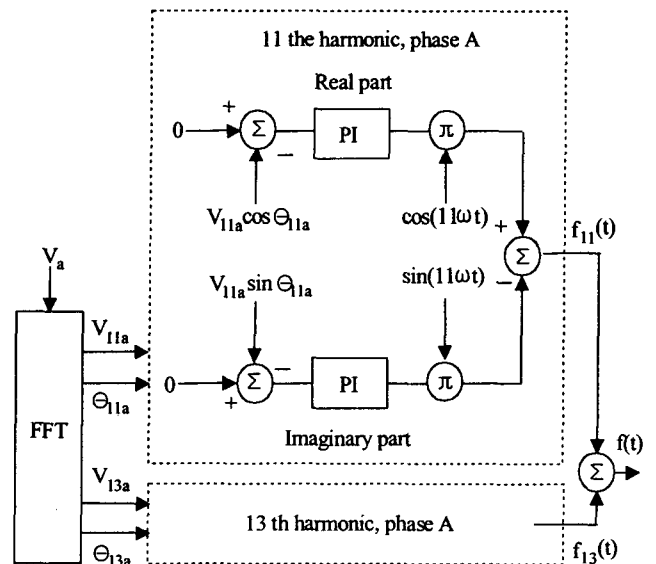


그림 6 Active Power Filter의 제어기

V_n 이 0이라는 것은 전체 고조파가 제거되었다는 의미가 되며 이때에 V_{af} 는 다음과 같이 된다.

$$V_{af} = -I_n [Z_{cf} + Z_{transf}] \quad (2)$$

그러므로 V_{af} 는 수동필터의 임피던스인 Z_{cf} 에 따라서 비례적으로 된다.

그림 6은 Active 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

3. 시뮬레이션 결과

그림 7은 시뮬레이션을 위한 모델이고, 시뮬레이션 툴은 PSCAD/EMTDC를 이용하였다. HVDC 시스템에서 교류부분은 12펄스 컨버터이므로 이 때 발생하는 고조파는 11차, 13차, 23차, 25차, 35차, 37차... 이므로, 이것을 고조파 소스로 하여 기본파 전류에 고조파전류를 삽입하여 고조파 전류원을 이용하였다. single tuned filter는 10MVAR의 무효전력을 보상하는 커패시터를 선정하고 공진주파수는 그림 4에서 나타나듯이 770Hz로 설정하였다.

그림 8은 능동필터의 출력전압을 나타내고 있다. 11차와 13차 고조파를 제거하기 때문에 능동필터의 출력전압은 11차와 13차 고조파의 조합으로 나타난다. 그림 9는 부하가 변동한 경우에 각 부분의 전압과 전류를 나타내어 동적응답을 살펴보았다. 출력결과에 나타나듯이 부하가 변동하였을 경우에도 능동필터의 동적응답이 매우 빠르므로 계통전류에는 영향을 미치지 않는다.

그림 10과 그림 11은 제어기법의 비교를 나타내고 있다. 기본파를 제외한 나머지 고조파를 모두 제거하는 기법과 가장 우세한 고조파인 11차와 13차 고조파만을 제거하는 기법을 비교한 것이다. 기본파를 제외한 고조파를 제거하기 위한 기법은 스위칭 주파수의 한계로 인하여 고조파제거를 위한 능동필터의 출력을 충분히 만들지 못하기 때문에 그림 10에서처럼 필터 후단의 전류에 왜형이 있는 것을 볼 수가 있다. 하지만 그림 11에서 나타나듯이 특정 고조파만을 제거하는 기법은 우세고조파인 11차와 13차의 고조파만을 제거하기 때문에 나머지 고차고조파 성분이 필터 후단에 존재하게 되지만, 이러한 고차고조파의 양이 매우 적기 때문에 그다

지 큰 영향을 주지 않는다. 그러므로 그림 11의 전류파형에는 왜형이 아주 작음을 알 수 있다.

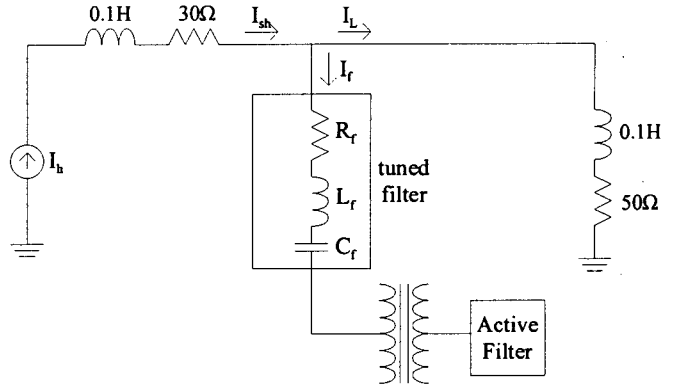


그림 7 시뮬레이션 모델링

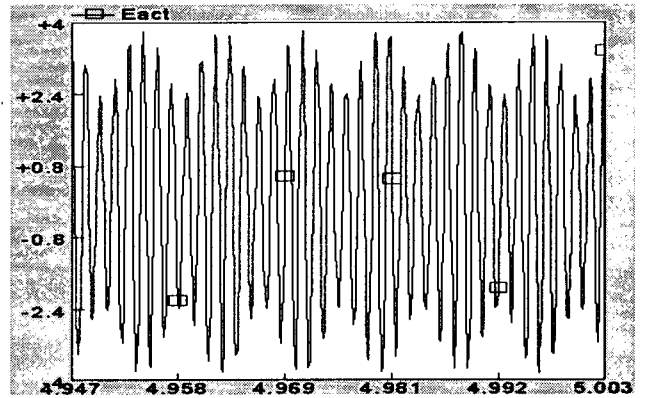
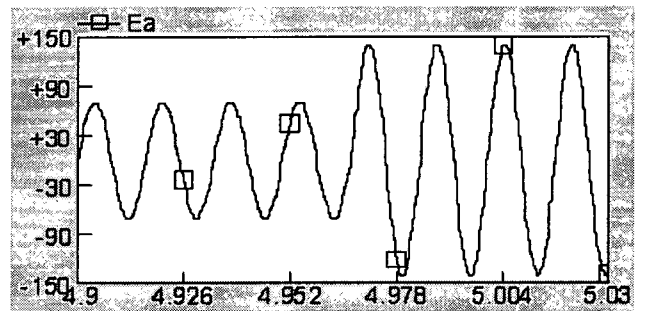
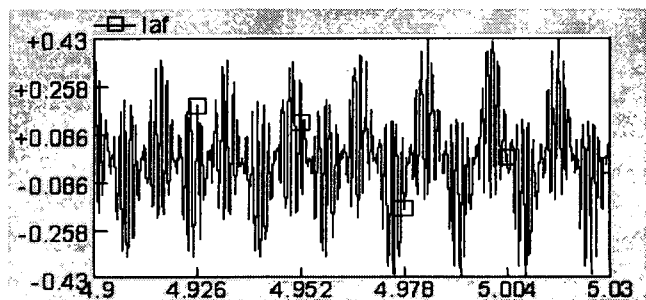


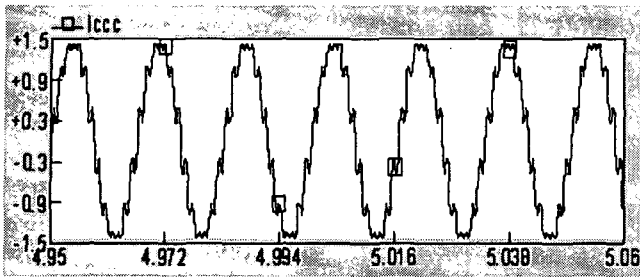
그림 8 Active Power Filter의 출력전압



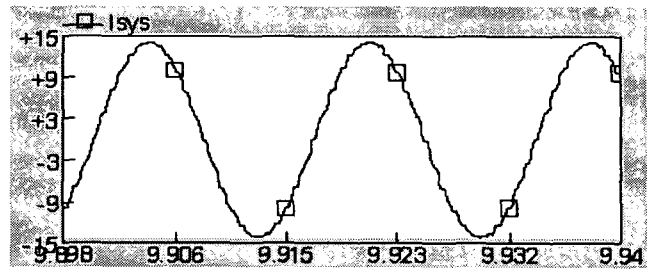
(a) 부하변동시의 계통전압



(b) 부하변동시의 필터전류

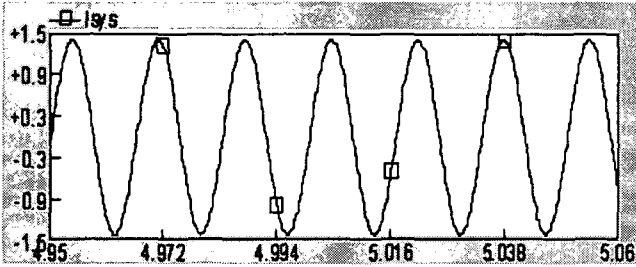


(c) 부하변동시의 고조파전류



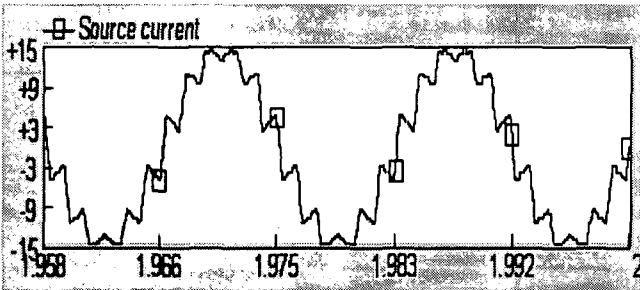
(b) 계통전류

그림 11 11차와 13차 고조파 제거기법

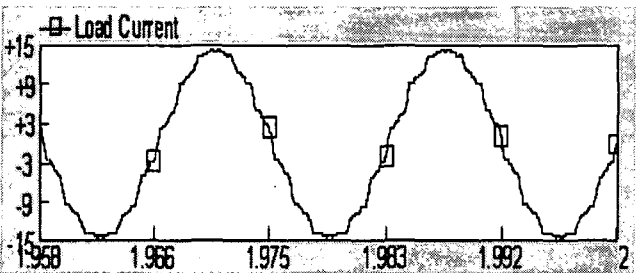


(d) 부하변동시의 계통전류

그림 9 부하변동시의 동적응답

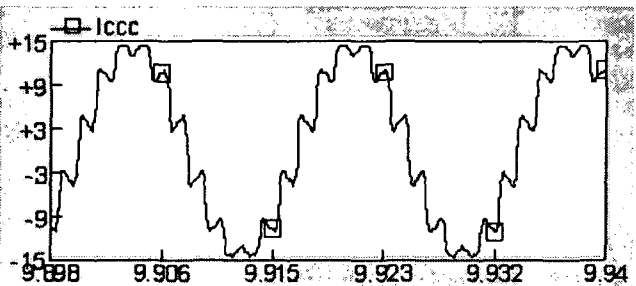


(a) 고조파 전류



(b) 계통전류

그림 10 기본파를 제외한 나머지 고조파 제거기법



(a) 고조파전류

4. 결론

HVDC 시스템에서 적용되는 필터는 고조파를 제거하는 기능과 무효전력을 보상하기 때문에 대부분 수동필터를 사용하고 있다. 하지만 커패시터의 노화 등으로 그 값이 변화하면 공진주파수점이 변화하기 때문에 detuning이 발생한다. 이런 경우에 능동필터의 존재는 detuning으로 인한 고조파제거에 대한 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서는 수동필터를 single tuned filter로 사용하고 능동필터와 조합하여 고조파 제거를 원활히 할 수 있는 시스템을 제안하고 이를 시뮬레이션으로 입증하였다.

참고 문헌

- [1] K. Sadek, "Capacitor Commutated Converter Circuit Configurations for DC Transmission", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.13, No.4, Oct. 1998, pp.1257~pp.1264.
- [2] *High-Voltage Direct Current Handbook*, EPRI TR-104166S, 1994.
- [3] *AC/DC Interaction Phenomena*, CIGRE Working Group Report, 1992.
- [4] C.V.Thio, "Commutation failures in HVDC Transmission Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.11, No.2, April 1996, pp.946~pp.957.
- [5] 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.