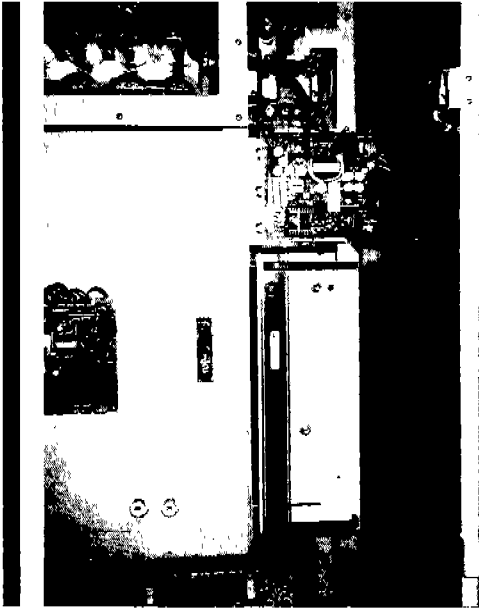


高調波 제거 를 위한 新開發 액티브 필터



△ Active Filter Main부

한전 기술연구원
신전학 · 박세웅 · 강영석
서울대학교
박종근 · 박상영

1. 서 론

최근에 파워 일렉트로닉스(Power Electronics) 기기의 급속한 보급으로 이러한 기기(고조파 발생원)로부터 발생하는 고조파의 영향이 심각한 문제로 대두되고 있다. 고조파에 대한 대책은 현재로서는 패시브 필터(Passive Filter)의 설치, 이상(移相)변압기의 운용에 의한 다(多)펄스화 방법 등이 이용되고 있으나, 원리적 우위성이 있는 액티브 필터(Active Filter)의 실용화를 통하여 기존의 고조파 대책방법을 더욱 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

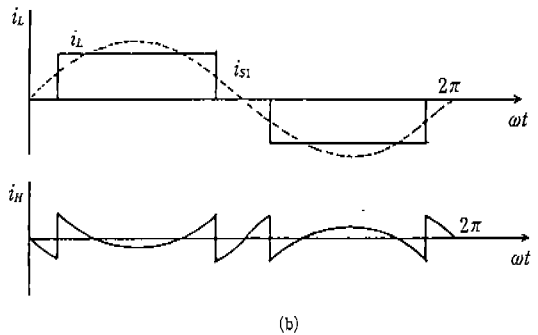
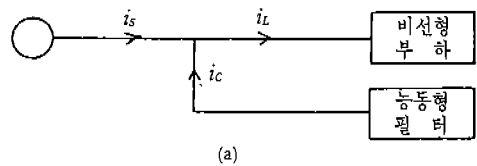
고조파 억제를 위한 액티브 필터는 아직 패시브 필터에 비해 제작가격이 비싸고 원천적으로 대용량 제작에 기술적 어려움이 있지만 무효전력 보상, 플리커 억제의 목적으로도 활용할 수 있는 효과적인 대책기기가 할 수 있겠다. 국내 처음으로 실용형 200kVA급 액티브 필터를 한전 기술연구원과 서울대학교 공동연구로 개발하고 국내업체(효성중공업)에 주문 제작하여 현장 적용한 바, 관련내용에 대해 간략히 소개하고자 한다.

2. 원리 및 이용

2.1 고조파 제거원리

그림2.1의 (a)에서 전원전류 i_s , 부하전류 i_L , 보상전류 i_c 의 관계는 식(2.1)로 표현된다.

$$i_s = i_L - i_c \quad (2.1)$$



<그림2.1> 고조파 제거원리

그림2·1에서 액티브 필터가 없을 때 전원측 전류 i_s 는 부하전류 i_L 과 같다. 이때 그림2·1(b)에 나타낸 것처럼 고조파 전류 i_H 는 부하전류 i_L 에서 기본파와 전류성분 i_{s1} 을 제외한 전류이며 식(2·2)로 표현된다.

$$i_H = i_L - i_{s1} \quad (2 \cdot 2)$$

이제 액티브 필터로부터 보상전류 i_c 를 전원측으로 주입하면 전원측 전류 i_s 는 식(2·1), 식(2·2)로부터 식(2·3)으로 된다.

$$i_s = i_{s1} + i_H - i_c \quad (2 \cdot 3)$$

식(2·3)에서 $i_c = i_H$ 일 때 전원전류 i_s 는 기본파만의 전류가 되고 고조파 성분은 보상전류 i_c 의 주입에 의해 완전 제거된 것을 뜻한다. 따라서 보상전류를 어떻게 잘 근사시키느냐 하는 점이 액티브 필터의 성능에 중요한 요건이 된다.

2·2 PWM(Pulse Width Modulation) 방식

전류주입식 액티브 필터에 있어서 전력변환기의 제어를 위한 PWM 방식은 성능 및 효율에 큰 영향을 미친다. 때문에 PWM 방식을 개선하기 위한 여러 가지 연구내용들이 발표되어 왔고, 주요한 선행 연구사항들을 열거해 보면 다음과 같다.

- 적응 전압제어법(Adaptive Voltage Control Method)
- 삼각파 변조법(Triangular Wave Modulation Method)
- 멀티 펄스 변조법(Multi-pulse PWM Method)
- 최적 주입법(Optimized Injection Method)
- 적응격자 최적 주입법(Adaptive Panel Optimized Injection Method)

처음 발표되었던 적응 전압제어법은 정현파 전압을 기준신호로 하여 펄스의 폭을 적응 제어하는 방법인데, 이 방법은 전원 임피던스가 작을 경우에 고조파 전류의 보상이 어렵다는 점이 지적되어 이후에는 고조파 전류를 기준신호로 하여 펄스의 폭을 변조하는 방법들이 주로 발표되었다.

삼각파 변조법은 삼각파의 반송신호와 기준 고조파 전류신호와의 교점을 가지고 펄스의 폭을 변

조하는 방법이다. 이 방법은 제어를 순시적으로 할 수 있다는 장점이 있으나 고조파 보상효과를 얻기 위해서는 상당히 많은 수의 펄스, 즉 스위칭이 소요된다는 점에서 고조파 제거의 효율이 좋지 않다고 지적되었다.

이에 고조파 제거의 효율을 높이기 위해 고조파 전류의 Fourier 해석을 통하여 펄스폭 변조를 하는 방법들이 발표되어 왔는데, 그 중에서 최적 주입법은 고조파 방정식이라 불리는 비선형 연립방정식의 풀이를 통해 펄스의 폭을 구함으로써 주기당의 펄스 수가 N 일 때 $N/2$ 차까지의 저차 고조파들을 제거하도록 하였다.

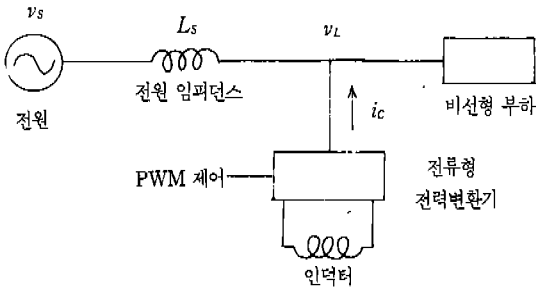
본 연구에서는 필터의 고조파 보상률을 더욱 개선할 수 있는 새로운 펄스폭 변조법을 연구하였다. 이 방법은 기본적으로는 최적 주입법을 기초로 한 것인데, 기존의 방법들과는 달리 펄스의 폭뿐만 아니라 펄스의 위치도 역시 제어변수로 하여 최적 주입법을 적용한다. 이렇게 함으로써 주기당의 펄스 수가 N 일 때 N 차까지의 고조파들을 제거할 수 있게 된다. 따라서 다른 방법들에 비해 고조파 보상의 효율면에서 우수하다고 할 수 있겠다. 아무튼 이러한 방법들에 의한 실용형 하드웨어의 빠른 실현이 기대된다.

2·3 액티브 필터의 구성방식

액티브 필터의 구성은 전력변환기의 형태에 따라 전류원형과 전압원형으로 분류된다. 또한 출력 전류 제어방식에 따라 직접 전류제어방식과 간접 전류제어방식으로 구분할 수 있다.

가. 전류원형

그림2·2에 전류원형 액티브 필터를 간략하게 나타냈다. 그림에서 보는 바와 같이 전류원형 액티브 필터는 인덕턴스가 큰 인덕터와 전류형 전력변환기로 구성된다. 인덕터는 직류전류원 역할을 하고 전류형 전력변환기는 직류전류원으로부터 보상 전류 i_c 를 발생시키는 고조파 전류형 인버터로서 동작한다. 한편 인덕터 및 스위칭 소자들의 전력손실을 보상하기 위해서는 고조파 전류형 인버터로서



<그림2·2> 전류원형 액티브 필터

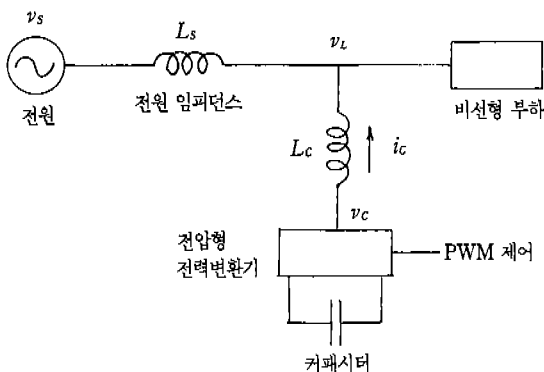
의 동작뿐만 아니라 전압정류기의 역할도 병행하여야 한다.

나. 전압원형

그림2·3은 전압원형 액티브 필터로서 용량이 큰 커패시터와 전압형 전력변환기, 인덕터 \$L_c\$로 구성된다. 커패시터는 직류전압원 역할을 하고 전압형 전력변환기는 직류전압원으로부터 보상전압 \$V_c\$를 발생하는 고조파 전압형 인버터로서 동작한다. 보상전류 \$i_c\$는 보상전압 \$V_c\$와 부하전압 \$V_L\$과의 전압차로 인덕터 \$L_c\$를 통해서 발생된다. 전류원형과 마찬가지로 커패시터 및 스위칭 소자들의 전력손실을 보상하기 위해서는 고조파 전압형 인버터로서의 동작뿐만 아니라 전류정류기의 역할도 병행해야 한다.

다. 전류원형과 전압원형 비교

표2·1과 같이 전류원형과 전압원형의 장단점을



<그림2·3> 전압원형 액티브 필터

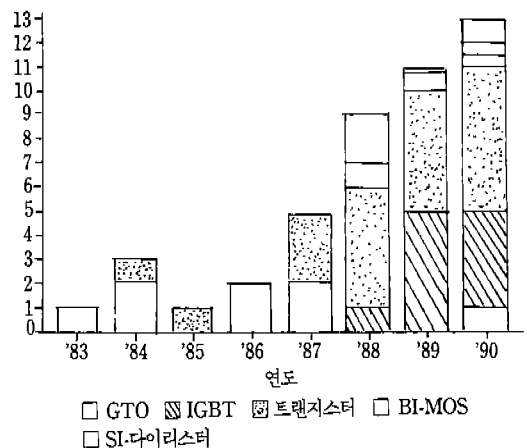
<표2·1> 전류원형과 전압원형의 비교

	전류형 액티브 필터	전압형 액티브 필터	
장점	<ul style="list-style-type: none"> 보상용량이 가변이다. (직류 전류가 가변이다) 보상율이 상대적이다. (전류 고조파를 발생량 대비 일정비율 이하로 억제한다) 고조파 차수에 관계없이 정격용량의 고조파를 보상한다. Dead-time 오차가 없다. (정밀한 제어가 쉽다) 	<ul style="list-style-type: none"> 보상용량이 고정된다. (직류 전압이 고정된다) 보상율이 절대적이다. (전류 고조파를 정격용량 대비 일정비율 이하로 억제한다) 고조파 차수에 반비례하여 정격대비 보상가능용량이 감소한다. Dead-time 오차가 있다. (정밀한 제어가 어렵다) 	단점
단점	<ul style="list-style-type: none"> 인덕터가 비경제적이다. (크고, 무겁고, 비싸고, 손실이 크다) 고차 고조파의 발생량이 크다. (반송파 필터의 용량이 크다) 	<ul style="list-style-type: none"> 커패시터가 경제적이다. (작고, 가볍고, 싸고, 손실이 적다) 고차 고조파의 발생량이 적다. (반송파 필터의 용량이 적다) 	장점

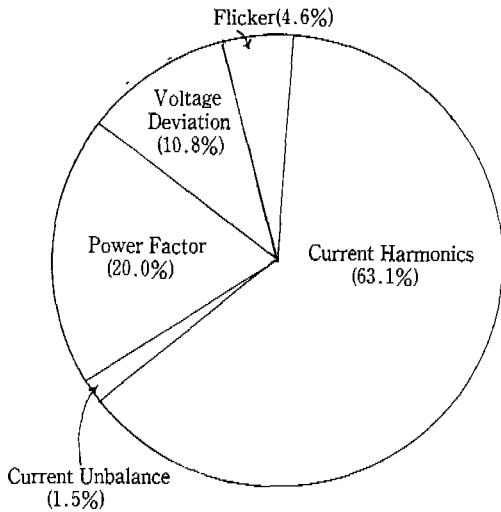
비교해 보았다.

2·4 적용현황(예)

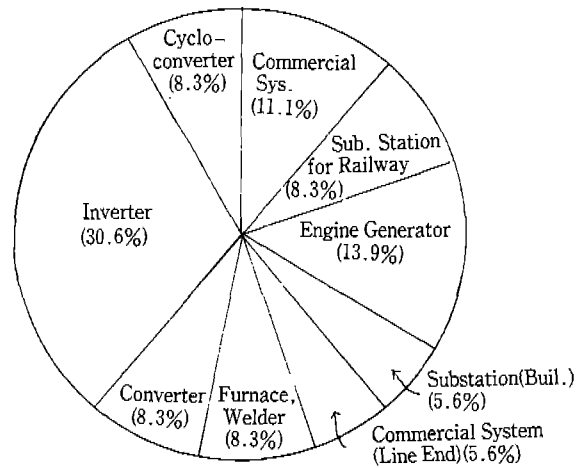
외국에서는 실용화단계를 거치면서 여러 메이커에서 액티브 필터 제작에 참여하고 있으며, 그 이용도 날로 증가추세에 있다. 참고로 그림 2·4~2·6을 통해 한 외국업체의 적용현황(적용 대수, 적용 예, 용도)을 소개하였다.



<그림2·4> 액티브 필터의 적용대수 ('90년은 3월까지)



<그림2·5> 액티브 필터의 적용



<그림2·6> 액티브 필터의 용도분류

3. 실제 Hardware 구성

3.1 제어방식

여러 방식이 연구 검토되었으나 개발하고자 하는 액티브 필터의 용량, 국내 제작기술 여건 등을 고려하여 전압원형 간접전류 제어방식을 채택하였으며, 이 방식은 출력 교류전압을 제어함으로써 출력측 인덕터에 흐르는 전류를 제어하기 때문에 간접전류 제어형이라고 부르고 출력교류전압은 삼각파 캐리어와의 교점으로부터 PWM을 구하였다. 임피던스가 해당 주파수에서 선형이라고 하면 출력전류의 예상 스펙트럼은

$$I_H[n] = V_H[n]/Z[n] \quad (3.1)$$

$$(n=2\sim\infty)$$

가 되고 전력변환기 등가손실 R 과 출력 리액터 L 로 나타내면

$$I_H[n] = V_H[n]/R + jn\omega L \quad (3.2)$$

$$(n=2\sim\infty)$$

이 되어 $V_H[n]$ 를 제어할 경우 $I_H[n]$ 이 제어 가능하게 된다.

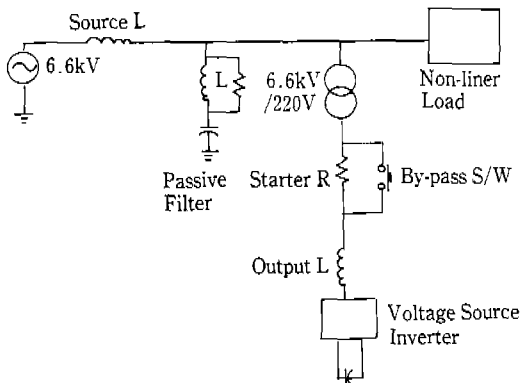
3.2 직류전압

전압원형 액티브 필터의 직류측 전압은 교류전압

의 선간전압 최대치보다 높아야 한다. 또한 교류측에서 에너지를 받아서 직류전압의 크기를 결정하고, 이 값을 유지시키는 것은 액티브 필터의 동작에서 가장 중요한 일의 하나라 할 수 있겠다. 액티브 필터의 전압원 전력변환기를 직류측이 승압되는 정류기로 해석하여 관련식을 유도하고 직류측 전압의 제어 및 유지를 무제한으로 실현하였다. 외국의 경우 레퍼런스를 갖고 입력유효전류의 양을 조절하여 직류전압을 유지하는데 비하여 직류측 전압의 검출없이 이루어지는 점이 본 기기의 특징이라 할 수 있겠다.

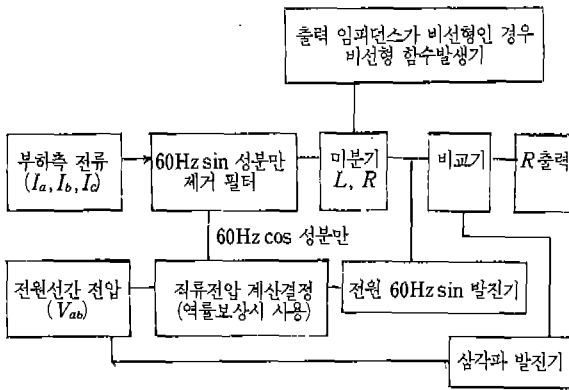
3.3 구성

그림3·1에서 6.6kV 부하측에 고조파 발생원이 연결되어 있고 액티브 필터는 220V의 저압으로 운용하여 변압기를 통해 고조파 전류를 보상하며 고압측 패시브 필터는 액티브 필터로부터 발생하는 고차 고조파 제어용 필터이다. 물론 액티브 필터는 저압측에 직접 연결 사용할 수 있으며 여기서는 복수 발생원에 대한 계통측 보상역할을 시도하는 목적으로 고압측에 연결 구성하였다. 액티브 필터 동작부에서는 부하측 전류파형을 주파수 영역에서 해석하고 전압원 전력변환기를 이용하여 주입하고



<그림3·1> 전체 구성도

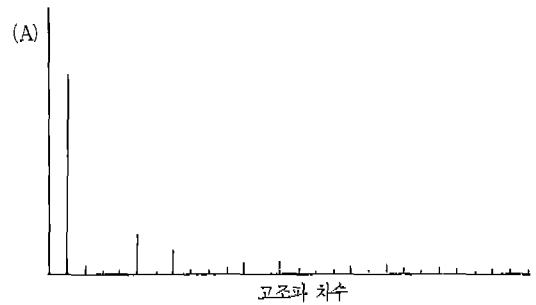
자 하는 전류로 변환시키며, 직류전압을 교류측 선간전압 최대치 이상으로 유지하는 제어기능을 갖는다(그림3·2 참조). 또한 액티브 필터의 사양은 표3·1과 같다.



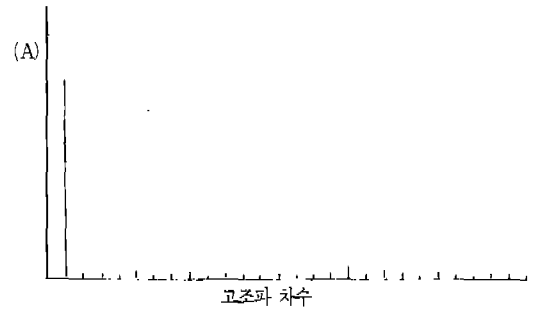
<그림3·2> 제어기 블록도

<표3·1>

용량	200kVA(순시 최대용량 250kVA)
전력변환기	전압원 인버터 단일구조
정격교류전압	220V 3상/6.6kV
보상차수	2-13차
저감률	정격출력대비 85% 이하 (I_{har}/I_{base})
직류전압	600V



(a) 보상전 전류파형 스펙트럼



(b) 보상후 전류파형 스펙트럼

<그림4·1>

4. 실험 결과

고압측(6.6kV)으로의 각 주파별 주입시험을 통해 양호한 고조파 발생특성을 얻었으며, 50kVA 고조파 발생원을 부하측에 연결하였을 때의 고조파 억제효과를 그림4·1에서 보여주고 있다.

5. 결론

액티브는 결국 인버터를 기본구조로 하기 때문에 인버터 제조기술과 밀접한 관련을 가지고 있다. 이번 연구를 통하여 최적 주입법과 같은 새로운 제어 알고리즘을 검토하였으나 이를 구현할 수 있는 국내기술의 뒷받침이 아쉬운 점도 없지 않았다. 한편으로 국내 처음으로 액티브 필터를 개발하여 고조파 대책기로서 활용할 수 있게 됨으로써, 양질의 전력 품질유지와 고조파 대책 활성화 측면에서 기대를 걸게 한다. 향후 제조기술의 향상(대용량화, 속도성, 새로운 알고리즘)을 위한 노력이 지속적으로 이루어져 상품화 가치를 높일 수 있는 계기가 되었으면 한다.