



전기설비의 고조파 발생 원인과 대책 (I)



글/송 언 빈(대림전문대 전기과교수/공학박사)

1. 머리말

전자기술의 발전에 따라 산업용 기기 및 가전 기기도 많은 반도체를 사용하고 있으며 이에 따른 비선형 부하들이 급증하고 있다. 배전계통에서 부하 임피던스에 따라 부하전류가 흐르기 때문에 비선형 부하들은 기본파 이외에 고조파들을 발생시키는 원인이 되고 있다.

최근의 인텔리전트 빌딩에서는 건물자동화, 사무 자동화, 정보통신용 전원으로 무정전 전원장치가 필수적으로 시설되고 있으며, 공장자동화용으로 전동기 가변속 구동용 인버터가 많이 채택되고 있다. 또한 사무자동화를 위한 컴퓨터 부하도 증대하고 있다. 무정전 전원공급장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력 변환기인 인버터를 사용하게 된다. 인버터는 전압 및 주파수를 바꿀 수 있는데, 이 경우 상용 전원인 60Hz 주파수 이외에 원하지 않는 고조파 성분이 포함되게 되어 다른 부하기에 영향을 주게 된다.

배전계통의 변압기나 대규모 배전선로 등은 유도성이 되며, 부하설비가 용량성이 되는 경우 공진 조건이 성립하면 이 고조파 전류는 더욱 증폭되어 각

종 계전기 오동작, 정밀 전자기기의 동작불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 될 수 있다. 전기설비는 그 규모가 커지게 되면서 고조파 전류, 전압맥동, 전계, 자계 등의 전자기 현상에 의한 교란을 받게 된다. 따라서 가급적 양질의 전원 즉 주파수, 파형, 전압 등이 안정되어야 정보화 사회에 대응한 전기설비의 기능을 만족할 수 있다.

따라서, 고조파 발생 원인들을 알아보고, 파형왜울의 해석과 고조파에 대한 효율적인 대책을 알아본다.

2. 고조파 발생요인

배전계통에 연결된 비선형 부하에 의하여 파형이 찌그러짐이 발생할 수 있으며 다른 부하에 영향을 미치게 된다. 사무자동화 기기, 무정전 전원공급장치, 형광등, 전동기 속도제어용 인버터 등의 부하들은 기본파인 60Hz 전원이외에 고조파를 함유한 부하전류를 흐르게 한다.

비선형 부하, 특히 전력변환 부하장치에서 발생되는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며, 발생원의 내부 임피던스와 전기설비의 임피던스가

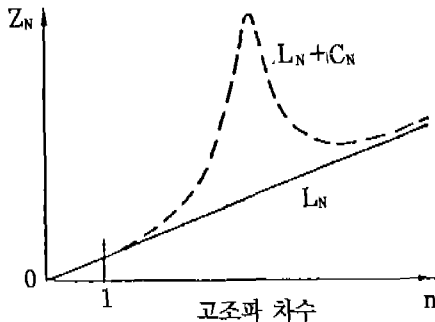
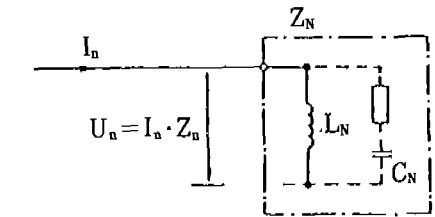
공진조건을 만족하면 고조파 전류는 증폭되어 전자 유도장애를 일으킨다. 전력 변환기를 이용한 부하기가 고조파 발생원이 될 수 있으므로, 수%에 가까운 전압왜형이 수전점에서 발생할 가능성이 있다. 공진을 일으키기 쉬운 병렬 콘덴서와 역상전류를 일으키는 유도 전동기 부하에서는 특히 주의를 요한다.

고조파 전류의 유입에 의하여 전기설비의 동작에 나타나는 세부적인 영향들은 다음과 같다.

- TV, 스테레오 등 전자기에 잡음 발생
- 전동기의 진동, 소음발생
- 차단기 제어기의 오동작
- 콘덴서, 리액터의 진동, 소음의 발생 및 소손
- 정보기기 및 제어 시스템의 정지 또는 오동작
- 승강기의 진동·정지
- 각종 사무자동화 기기의 동작불량

고조파 전류가 유입하는 경우 이러한 직접적인 영향 이외에도 각종 전기설비 및 기기의 온도상승이 높아지고 절연물의 수명도 저하하게 된다. 또한 전력선 반송방식의 통신을 행하는 경우 신호 주파수의 선택에도 제약이 따르게 된다.

따라서, 전력선에서 고조파 전류의 크기는 일정 레벨이하로 억제하여야 한다. 배전계통에서 발생한 고조파 전류는 전력 시스템의 내부 임피던스의 성질

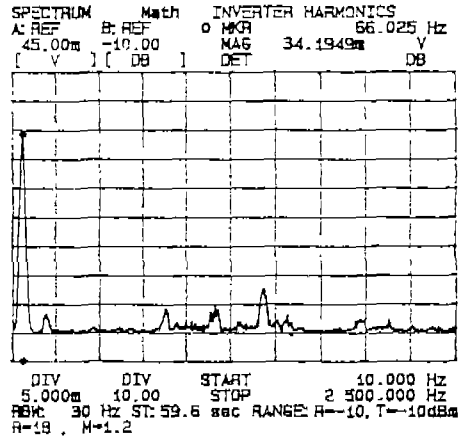


(그림 1) 회로 임피던스의 주파수 특성

에 따라 다른 계통의 전기설비로 전달되게 된다. 저차 고조파 성분이 다른 전력계통으로 파급되면 전압 맥동의 원인이 되기도 한다.

정현파 회로전압을 지그러뜨리는 물리적 원인은 고조파를 함유한 교류회로 전류에 있다. 주파수 f_n 의 고조파 전류 I_n 에 의한 회로에는 동일 주파수의 고조파 전압 U_n 이 발생한다. 즉, 순 인덕턴스 L_N 에서 이상상태의 회로를 가정하면 $U_n = I_n \cdot 2\pi f_n L_N$ 의 고조파 전압이 된다. 고조파 전압 U_n 의 실효치는 f_n 에 비례하여 증가한다. 회로 인덕턴스 L_N 에 대한 회로의 단락 리액턴스 $X_N = 2\pi f L_N$ 인 경우는 $U_n = I_n X_N$ 이 된다.

여기서, $n = f_n / f$, X_N 은 기본 주파수 f 에서의 단락 리액턴스, $I_n = n$ 차 고조파전류



(그림 2) 인버터의 주파수 스펙트럼

따라서, 단락 리액턴스가 커질수록 전압 왜형률은 커지게 된다. 동일한 정류기(고조파 전류 발생원)를 다른 회로에 접속하면 다른 고조파 전압이 발생하게 된다. 실제 회로의 단락 리액턴스는 여러 회로의 접속 도체 등에 따라 변동한다. 또한 변압기, 전선, 특히 용량성의 케이블 접속되어 있고, 더우기 역률개선을 위한 전력용 콘덴서도 접속되고 있다. 정류기 접속점에서 회로망 임피던스의 주파수 특성을 본 경우 그림 1과 같이 비직선성으로 변화한다.

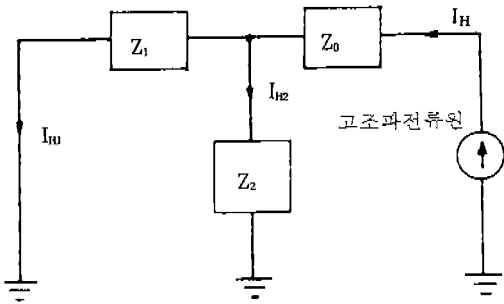
각 고조파 전류 발생원에서의 고조파 전류의 계산은 비교적 용이하게 구할 수 있으나 고조파 전압의 계산은 회로망 임피던스의 불명확하면 곤란하게 된다. 전동기 가변속 구동용 인버터의 출력파형의 주

파수 스펙트럼을 분석해보면 그림 2와 같이 기본파 성분 이외에 고조파 성분을 함유하게 된다.

3. 고조파 장애

일정 전압 및 일정 주파수의 전원을 다른 전압 및 다른 주파수로 바꾸려면 전력변환기인 인버터를 이용하여야 한다. 이 경우 원하는 주파수의 전원 이외에 고조파 성분을 포함하게 된다.

배전계통에서 다수의 고조파 전류원이 접속된 경우 고조파 전류의 위상에 따라 그 크기가 커지기도 하고 약해지기도 한다. 전력 변환기에서 발생하는 고조파 전류의 위상은 변환기의 위상 제어각에 의하여 결정되므로 부하조건에 따라 변화한다. 사무자동화용 컴퓨터들은 콘덴서 입력형 정류회로가 내장되어 있어 전류가 펄스형태로 되어 전원전압의 최대값과 상호 중첩되는 경우 고조파 성분이 커지는 경우도 있다.



(그림 3) 무정전 전원공급시스템의 등가회로

불특정 다수 기기에서 발생하는 고조파 전류는 내부 임피던스에 따라 달라지며 이 고조파 전류는 또 다른 부하계통에 영향을 주게 된다.

무정전 전원 공급 장치의 인버터는 직류전력을 교류전력으로 변환해야 하므로 스위치에 의한 출력력에 고조파가 필연적으로 함유하게 된다. 따라서 인버터는 고조파 전류원으로 작용하여 상용전원계통 및 부하계통에도 영향을 미치게 되는데 과도한 고조파 전류의 유입으로 계통에 연결된 콘덴서에 과전류로 인한 과열과 각종 전자제어장치의 오동작 원인이 된다. 그림 3은 무정전 전원 공급 시스템의 등가회로를 나타낸 것이다.

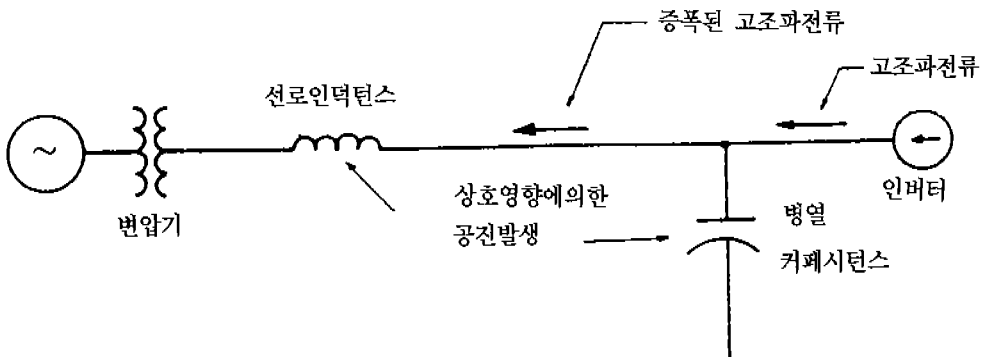
그림 3에서 고조파 전류원은 인버터가 된다. \$I_H\$은 전원측에 유입되는 고조파 전류이고 \$I_{H2}\$는 다른 부하측에 전달되는 고조파 전류이다.

$$I_H = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} I_H$$

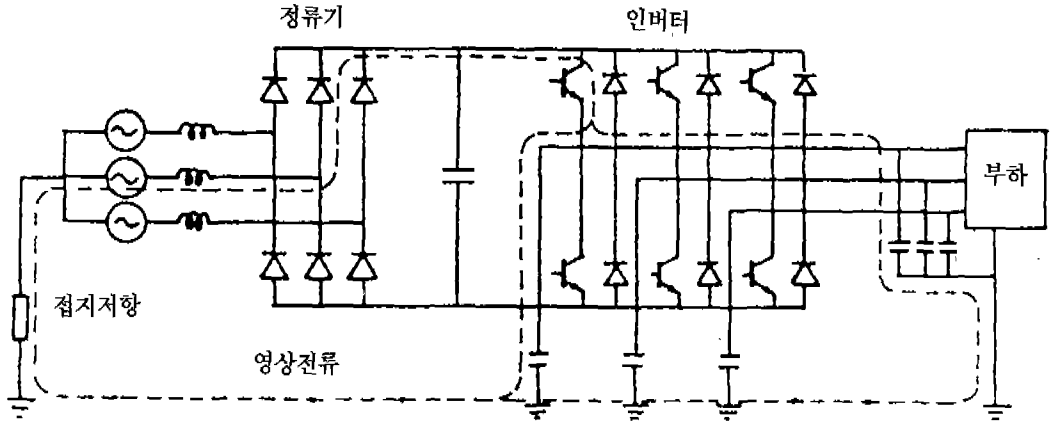
$$I_{H2} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} I_H$$

여기서, \$Z_1\$=선로임피던스, \$Z_2\$=다른 부하 임피던스, \$Z_0\$=무정전 전원 공급 장치의 임피던스, \$I_H\$=고조파 전류를 나타낸다.

무정전 전원 공급 시스템에서 발생한 고조파 전류는 선로의 용량성 및 유도성 임피던스로 인하여 공진현상이 발생하게 되는데 이렇게 되면 \$I_H\$, \$I_{H2}\$는 대단히 큰 값이 될 우려가 있다. 공진현상이 발생하면 고조파 전류는 증폭되며 전력용 콘덴서, 변압기, 발전기, 전동기, 각종 조명설비에는 과도한 전류가 흘러 기기의 과열, 소손이 발생할 우려가 있다. 그림 4



(그림 4) 공진현상의 발생



〈그림 5〉 영상전류의 흐름

는 공진현상을 일으키는 배전계통을 나타낸 것이다. 고조파 전류에 의한 공진현상의 억제 대책을 요약한 것은 다음과 같다.

- 콘덴서 용량의 변경, 직렬리액터의 추가설계
- 교류필터의 추가설계
- 발생 고조파 전류의 억제
- 전원계통 구성의 변경

무정전 전원 공급 장치의 인버터에서 발생하는 $\frac{dv}{dt}$

는 선로 및 기기의 대지정 전용량으로 인하여 $C \frac{dv}{dt}$ 의 전류를 흐르게 한다. 이 전류를 영상전류라 부른다.

인버터 있는 계통에 필터가 있게 되는데 이 필터용 콘덴서를 통하여 영상전류가 흐르기 때문에 누전 차단기와 같이 감도가 예민한 기기들은 오동작하게 된다. 고조파 영상전류는 고조파 잡음의 발생원이 되어 유도장애의 원인이 되고 있다. 그림 5에서 점선은 영상전류의 흐름통로를 나타낸다.

인텔리전트 빌딩의 증가와 함께 각종 사무자동화 기기, 정보통신 기기 등이 급속히 증가하고 있으므로 무정전 전원 공급 시스템에서 발생할 우려가 있는 전자유도 장애를 방지할 수 있도록 인버터 자체의 고조파 발생을 철저히 억제하지 않으면 안된다.

영상전류의 발생을 억제하기 위한 대책은 다음과 같다.

- 선로 및 기기의 대지정전용량 저감

- 영상 임피던스를 부가하여 영상전류 억제
- 영상전류의 경로 차단

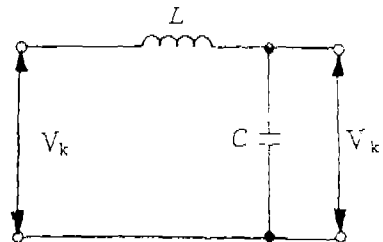
4. 파형 왜형을 분석 요점

유도 전동기의 가변속 제어에 이용하는 경우 인버터는 가변전압, 가변 주파수 전원을 공급하게 된다. 이 때 인버터의 성능 지표는 고조파 전류율(HCF: Harmonic Current Factor)에 의하여 표현한다. k 차 고조파 전압 V_k 에 의하여 교류기에서의 고조파 전류 I_h 는 다음과 같이 된다.

$$I_h = \frac{V_k}{2\pi k f L_c}$$

여기서 L_c 는 교류기의 상당 누설 인덕턴스이다. 상전압 V_{an} 의 기본파 성분을 V_1 이라 하면 원하지 않는 고조파 전류의 총합의 백분율은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_h(\text{rms}) = \frac{P_1}{2\pi L_c I_1} \cdot \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=5}^{\infty} \frac{V_k^2}{k}}$$



〈그림 6〉 한 상당 출력 필터

$$\text{여기서, } P = \frac{V_1}{f}$$

I_1 = 교류기의 정격전류

가변속 구동시 인버터의 성능지표인 HCF는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{HCF} = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=5}^{\infty} \frac{V_k^2}{k}}$$

따라서, 인버터의 출력 파형에 포함된 고조파 성분은 인버터 제어 기법에 따라 달라지게 되므로, HCF도 일정 범위내에서 제어할 수 있다.

인버터를 무정전 전원 공급 시스템에 이용하는 경우에는 THD(Total Harmonic Distortion)를 낮추어야 한다. THD를 요구조건에 맞추기 위하여 일반적인 인버터의 출력측에는 그림 6과 같은 L-C 출력 필터를 채택하게 된다.

〈표 1〉 IEC의 고조파 허용레벨

고조파 차수	고조파 전압 (%)
2	0.3
3	0.85
4	0.2
5	0.65
7	0.6
9	0.4
11	0.4
13	0.3
15	0.25

THD는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{THD} = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} (V_k)^2}$$

$$\text{필터공진주파수를 } \omega r = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

상수 $A = \frac{\omega r}{\omega}$ 이라고 하면 정의된 식과 그림 6에 의하여 THD는 다음과 같다.

$$\text{THD} = \frac{100(A^2 \cdot 1)}{A^2 V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} \frac{A^2 \cdot V_k^2}{k^2 \cdot A^2}}$$

$$\text{THD} = A^2 \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} \frac{V_k^2}{k^2}}$$

여기서, 파형 왜형률(DF:Distortion Factor)은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{DF} = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{k=3}^{\infty} \frac{V_k^2}{k^2}}$$

표 1은 IEC의 제 77기술훈위회에서 저압 배전계통에 적용하고 있는 고조파의 허용레벨을 나타낸 것이다.

따라서 저압 배전계통에서는 고조파에 의한 파형 왜율은 5% 이내로 억제하여야 한다. 이러한 조건은 6.6kV 배전계통까지는 5%, 특고압 계통에서는 3%로 억제하는 것이 바람직한 것으로 알려지고 있다.

계통전압 파형왜율의 억제 목표값은 표 2와 같다.

〈표 2〉 계통전압 파형왜율 억제 목표

(단위: %)

차 수	3	5	7	11	13	17	19	23	25~39	계
배전계통	3.0	4.0	3.0	2.0	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	5.0
특고계통	2.0	2.5	2.0	1.5	1.5	1.0	1.0	0.5	0.5	3.0

5. 고조파 억제 대책

고조파를 억제하기 위해서는 우선은 고조파 발생원 자체에서 최대한 억제하도록 하여야 한다. 그런데 최근 사무자동화 기기들이 다양화, 각종 전력변환기를 채택한 전기 설비가 급속히 증가함에 따라 개개의 설비에 의한 고조파 발생 가능성이 높아지고 있다. 따라서 어느 정도까지의 고조파에 대해서 동작 성능이 보장할 수 있는가 하는 허용레벨을 파악할 필요가 있다. 인텔리전트 빌딩에서는 각종 설비 및 기기들이 서로 기능적으로 결합되면서 집적화 되기 때문에 어떤 기기에서 발생한 고조파 전류가 전혀 관계가 없는 기기에 영향을 미치는 경우도 있다.

(1) 펄스 수의 증대

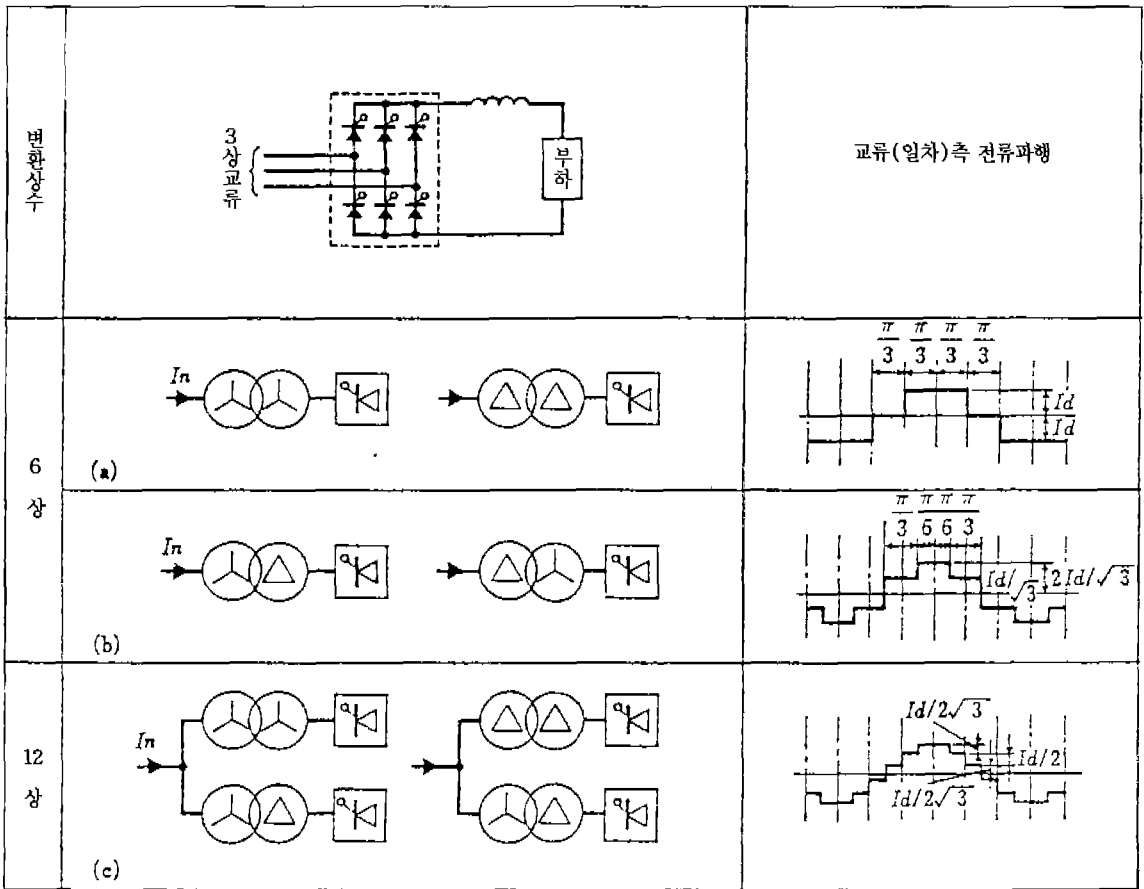
정류기로 사용되는 전력 변환기의 경우는 1차측 펄스 수(정류상수)를 증대시켜 저차 고조파 성분의 발생을 억제하는 것이다. 이러한 펄스 수를 증대시키려면 그림 7과 같이 서로 다른 결선방식의 변환기용 변압기를 조합하여야 한다.

(2) 입력측 교류 리액터 추가

콘덴서 입력형 전압원 인버터의 경우 전원측에 교류 리액터를 추가하여 전류파형을 개선하고 고조파 전류를 억제할 수 있다.

(3) PWM 방식 채택

무정전 전원공급장치의 인버터의 경우 펄스 폭 변조(PWM:Pulse Width Modulation) 제어 방식을 채



〈그림 7〉 펄스 수의 증대

택하여 고조파를 대폭 제거할 수 있고, 특정 고조파를 선택 제거할 수 있다.

(4) 강압 변압기에 의한 위상 이동

인버터와 같은 전력변환기에 공급하는 전압모션을 그룹으로 나누고 각각에 공급하는 강압용 변압기를 다른 결선방식의 조합으로 전체적으로 다 펄스화하여 정현파형에 가깝게 함으로써 고조파를 억제하는 효과를 얻을 수 있다.

(5) 단락 용량의 증대

정원칙으로 유출한 고조파 전류는 전원계통의 곳파 임피던스에 의한 전압강하로 발생할 수도 있다. 전압의 찌그러짐을 작게하려면 전원의 임피던스를

작게(단락용량을 크게)하여야 한다.

(6) 진상 콘덴서에 직렬 리액터의 추가

콘덴서 회로가 있으면 고조파 전류흐름을 좋게 하는 작용을 하게 된다. 용량성 리액턴스는 주파수에 반비례하여 변화한다. 콘덴서 회로에 직렬 리액터를 추가하여 고조파 전류의 확대를 방지함은 물론 흡수하는 효과도 얻을 수 있다.

(7) 교류필터의 설치

교류필터는 콘덴서, 리액터, 저항으로 분로를 설치하여 특정 고조파를 제거하는 수동형과 발생 고조파 전류에 대한 역위상의 전류를 주입하는 능동형으로 나누어 진다.

〈다음호에 계속...〉