

# 전기설비의 고조파 장애 및 대책기술 ②

글/ 유 상 봉(쌍용안전기술사업단 설비진단팀장 부장, 기술사)

김 세 동(한국건설기술연구원 선임연구원, 기술사)

## 목 차

1. 고조파 발생의 기본개념 .....
2. 왜형파와 푸리에 급수
3. 전압 찌그러짐 현상
4. 고조파 발생원
5. 직렬 및 병렬공진
6. 고조파 영향
7. 고조파 대책
8. 고조파 계산 실례
9. 결 론



## 6. 고조파 영향

고조파 전류의 증대는 진상 콘덴서 등에 장애를 야기시킬 뿐만아니라 다음과 같이 여러가지 기기에 나쁜 영향을 미친다.

- ① 콘덴서, 직렬리액터의 과열 · 과전압 발생
- ② 발전기나 회전기, 변압기의 손실 증대로 인한 과열

$$I = I_n \sqrt{1 + \sum \left(\frac{I_n}{I}\right)^2}$$

$$W = W_n \left[1 + \sum n^2 \left(\frac{I_n}{I}\right)^2\right] \text{ (단, } 1 < a < 2 \text{)}$$

- ③ 이상 공진에 의한 고조파 과전압의 기기에의 영향
- ④ 보호계전기의 오동작이나 기기류의 오차(특히 정지형 보호계전기)

<표 6-1> 고조파 장애의 예

영향을 받는 기기		건수(A)	건수(B)	
조 상 용 기 기	전력용 콘덴서	리액터부	11(24) 1(2)	
		리액터 없음	7(16) 29(71)	
	콘덴서용 리액터		14(31) 4(10)	
	소 계		32(71) 34(83)	
기 타 설 비	과전류 계전기		3(7) 1(2)	
	라디오 · 텔레비전 무선		3(7)	
	X선 마이크로 애널라이저		1(2)	
	전력용 퓨즈		2(5)	
	저주파 유도로		1(2)	
	전동기		1(2)	
	적산전력계		1(2)	
	포켓벨		1(2)	
	변압기			4(10)
	배전용 차단기			1(2)
	소 계		13(29)	7(17)
합 계		45(100)	41(100)	

- 주) 1. 건수(A)는 전기학회 배전장치 전문위원회의 조사결과이고, 건수(B)는 전기협동연구회 배전선 고조파대책 전문위원회의 조사결과임.  
 2. 영향을 받은 기기가 2종류 이상 있을 경우는 각각 1건으로 계산  
 3. 배전계통이 아닌 것은 제외  
 4. ( )내는 전체에 점하는 점유율(%)임.

- ⑤ 지시계기, 적산계기의 오차
- ⑥ 사이리스터 장치에의 제어 불안정
- ⑦ 통신회로에의 잡음 및 유도장해

참고로 일본의 배전계통에 있어서 고조파 장애의 조사결과의 예를 표 6-1에 표시하였다. 이 표



<표 6-2> 고조파가 기기에 미치는 영향

기 기 명	영 향 의 내 용
콘덴서 및 직렬 리액터	• 고조파 전류에 대한 회로의 임피던스가 감소하여 과대전류가 유입함에 따른 과열, 소손 또는 진동, 소음의 발생
케이블	• 3상4선식 회로의 중성선에 고조파 전류가 흐름에 따라 중성선의 과열
변압기	• 고조파 전류에 의한 철심의 자화현상에 의한 소음의 발생 • 고조파 전류·전압에 의한 철손·동손의 증가와 함께 용량의 감소
형광등	• 고조파 전류에 대한 임피던스가 감소하여 과대전류가 역률개선용 콘덴서나 초크코일 흐름에 따른 과열·소손
통신선	• 전자유도에 의한 잡음전압의 발생
유도 전동기	• 고조파 전류에 의한 정상 진동토크 발생에 의하여 회전수의 주기적 변동 • 철손·동손 등의 손실증가
음향기기(텔레비전 등의 각종 제어장치)	• 고조파 전류·전압에 의한 다이오드·트랜지스터·콘덴서 등의 고장, 수명의 저하, 성능의 열화 • 잡음, 영상의 어긋거림
정류기 등의 각종 제어장치	• 제어신호의 위상의 착오에 의한 오제어
부하질량 제어장치	• 제어신호의 혼란에 의한 수신기의 오동작·오부동작
계전기	• 고조파 전류 혹은 전압에 의한 설정레벨의 초과 혹은 위상변화에 의한 오동작·오부동작
전력용 퓨즈	• 과도한 고조파 전류에 의한 용단
노후즈 브레이크	• 과도한 고조파 전류에 의한 오동작

를 보면 전력용 콘덴서 등에서의 영향이 가장 큰 것으로 나와 있으며, 이것은 콘덴서가 고조파 전류의 흡수역할을 한다는 것을 나타낸다. 표 6-2에는 고조파가 각종 전기기기에 미치는 영향의 내용에 대해 나타나 있으며 다음과 같이 크게 5가지 형태로 영향을 주는 것으로 생각된다.

- ① 위상 제어기기의 순시 위상에의 영향
- ② 전원 전압파형의 왜곡화
- ③ 고조파 전류의 차수에 의한 영향
- ④ 고조파 전류의 파형왜곡 및 역상 및 영상성분에 의한 영향
- ⑤ 잡음 및 유도장해에 의한 영향

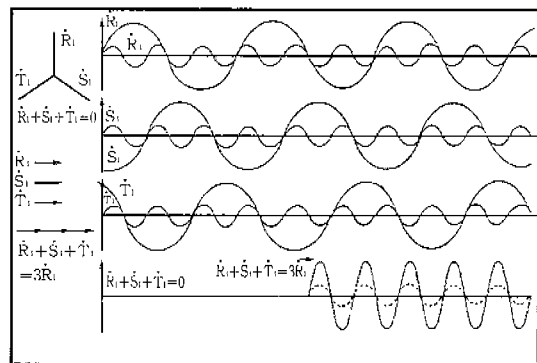
또한 중성선에서의 제5고조파 전류 흐름이 확대된 경우를 설명하면 그림 6-1과 같다. 예를 들어 3상 전원의 각상에 1상 SMPS 등 제3고조파 발생원 부하가 다수 연결되어 있는 경우 아주 흥미있는 현상이 발생한다. 즉, 3상평형이 맞았음에도 불구하고 중성선에 상전류보다 큰 전류흐름이 종종 관측된다. 이것은 3상의 경우 각상의 위상차는 120°이기 때문에 각상의 전류에 포함되어 있는 3배수 고조파 전류(3고조파, 9고조파, 15고조파... 등)가 중성선에서 서로 상쇄되지 않고 합쳐지기

때문이다.

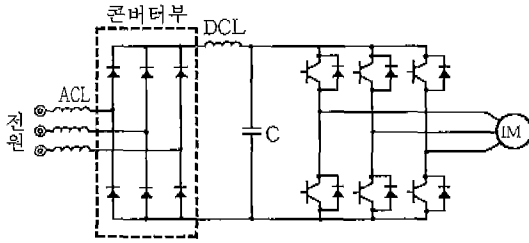
이것을 수식으로 설명하면 다음과 같다.

3상교류의 기본파는 상호 120°의 위상차를 가지고 있지만, 제3고조파는 기본파의 3배의 주파수를 가지고 있으므로 각 상에 흐르는 제3고조파 전류의 위상차는 120°×3=360°가 되어 동위상이 된다. 각 상의 전류에 위상차가 있는 경우 각 상의 기본파는

$$\begin{aligned}
 I_{R1} &= I_m \sin \omega t \\
 I_{S1} &= I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 I_{T1} &= I_m \sin(\omega t - 240^\circ)
 \end{aligned}$$



<그림 6-1> 중성선의 3고조파 전류 확대현상



<그림 7-1> ACL, DCL의 접속

<표 7-1> 3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파 전류 발생량 (단위 : %)

차 수	리액터 무	ACL 유	DCL 유
5	65.0	38.0	30.0
7	41.0	14.5	13.0
11	8.50	7.40	8.40
13	7.70	3.40	5.00
17	4.30	3.20	4.70
19	3.10	1.90	3.20
23	2.60	1.70	3.00
25	1.80	1.30	2.20

로 표시되며, 전류의 합은

$$I_{R1} + I_{S1} + I_{r1} = I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 0$$

이 되고, 동위상인 제3고조파 전류는

$$I_{R3} = I_m \sin 3\omega t$$

$$I_{S3} = I_m \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_m \sin 3\omega t$$

$$I_{r3} = I_m \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_m \sin 3\omega t$$

로 표시되며, 전류의 합은

$$I_{R3} + I_{S3} + I_{r3} = I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t + I_m \sin 3\omega t = 3I_m \sin 3\omega t$$

가 된다. 따라서 제3고조파 전류의 합은 0은 되지 않고  $3I_m \sin 3\omega t$ 가 남게 된다. 이러한 중성선에 흐르는 3배수 조파의 고조파 전류들로 인해 분전반과 배전선로에 실제로 문제가 발생한 예가 많이 있다. 예를 들어 각상 전류에 기본파의  $1/\sqrt{3}$ (약 57%)의 크기를 갖는 3고조파 전류가 포함된 경우 중성선에 흐르는 고조파 전류는 상전류의  $\sqrt{3}$ 배( $3 \times 1/\sqrt{3} = \sqrt{3}$ )의 크기를 갖으며 180Hz(60Hz×3)의 주파수를 갖기 때문에 표피효과에 의해 전선의 유효 단면적을 감소시켜 중성선의 발열을 초래하는 경우도 있다.

## 7. 고조파 대책

고조파 전류가 상한치를 초과하는 경우에는 고조파 유출전류를 저감하여 상한치 이내로 억제하기 위한 대책이 필요하다. 이러한 억제대책에는 기기로부터 발생하는 고조파 전류 등을 저감시키는 방법과 기기로부터 발생한 고조파 전류를 분류시켜 유출전류를 저감시키는 방법으로 크게 2종류로 대별할 수 있다. 일반적으로 고조파 대책은 다음과 같이 여러 방법을 고려할 수 있다.

- ① 리액터(ACL, DCL)의 설치
- ② 콘덴서 설치(고압측 또는 저압측)
- ③ 변환기의 다펄스화: 출력상수 증가(정류기의 다상화)
- ④ 필터 설치
  - 수동 필터
  - 능동 필터(Active Filter)
- ⑤ 계통분리, 고조파 내량증가, 단락용량의 증대
- ⑥ 기타

### 7-1. 리액터(ACL, DCL) 설치

그림 7-1과 같이 고조파 발생 부하장치의 1차 측에 ACL을 부착하여 전류 리액턴스를 크게하여 고조파 발생률을 저감하거나, 또는 DCL을 고조파 발생 부하장치의 직류회로에 삽입하여 직류파형의 리플을 작게하여 고조파 발생률을 저감할 수 있다.

3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파 전류 발생량은 표 7-1과 같으며, ACL이 있는 경우 고조파 발생률을 약 50% 저감하고 있고, 또한 DCL이 있는 경우는 없는 경우보다 고조파 발생률을 55% 이상 저감하고 있는 것을 알 수 있다.

### 7-2. 역률개선 콘덴서에 의한 억제대책

콘덴서는 역률개선의 목적으로 수변전설비에 설치되어 있는데 역률개선 콘덴서는 발생고조파 전류를 분류시켜 유출전류를 억제한다. 역률개선 콘덴서는 리액터와 콘덴서가 직렬로 접속되어 있기 때문에 수동 필터의 특성을 가지고 있다.



(1) 고압측 설치의 경우

그림 7-2에서 발생고조파 전류를 제5차 고조파 전류 : 20A라 하면

① 임피던스를 기준용량 10MVA PU로 변환

$$\text{임피던스} : Z_m = j20\% / 100\% = j0.2$$

② 기본파에 의한 계산

$$Z_{Ln} = -j10\text{MVA} / \text{SC-용량}$$

$$= -j10\text{MVA} / 0.2\text{MVA} = -j50$$

$$Z_{Ln} = Z_{Ln} \times \text{직렬 리액터의 리액턴스}$$

$$= j50 \times 0.06 = j3$$

③ 5차 유출전류의 계산

$$\text{유출전류} = \text{발생전류} \times (Z_{Ln} + Z_m) / (Z_{Ln} + Z_m + Z_m)$$

$$= 20\text{A} \times (j3 \times 5 - j50/5) / (j5 + j0.2 \times 5)$$

$$= 20\text{A} \times j5 / j6 = 16.6\text{A}$$

④ 효과

$$\text{억제율} : (20\text{A} - 16.6\text{A}) \times 100 / 20\text{A} = 17\%$$

가 된다.

(2) 저압측 설치의 경우

그림 7-3에서 발생고조파 전류를 제5차 고조파 전류 : 20A라 하면

① 임피던스를 기준용량 10MVA PU로 변환

$$\text{임피던스} : Z_m = j20\% / 100\% = j0.2$$

② 기본파에 의한 계산

$$Z_m = j10\text{MVA} \times 5\% / 0.5\text{MVA} \times 100\% = j1.0$$

$$Z_{Ln} = -j10\text{MVA} / 0.2\text{MVA} = -j50$$

$$Z_{Ln} = -j50 \times 0.06 = -j3$$

③ 5차 유출전류의 계산

유출전류

$$= \text{발생전류} \times (Z_{Ln} + Z_m) / (Z_{Ln} + Z_m + Z_m)$$

$$= 20\text{A} \times (j3 \times 5 - j50/5) / (j5 + j0.2 \times 5 + j1 \times 5)$$

$$= 20\text{A} \times j5 / j11 = 9.09\text{A}$$

④ 효과

$$\text{억제율} : (20\text{A} - 9.09\text{A}) \times 100 / 20\text{A} = 54.5\%$$

가 된다.

이상과 같이 역률개선 콘덴서를 저압측에 설치하면 5차 고조파를 50% 이상 억제가 가능하다.

7-3. 변환기의 다펄스화

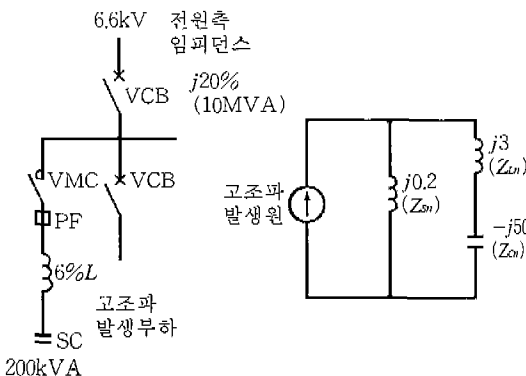
펄스수는 정류기 등의 변환장치에 있어서 「전원 전압의 1 사이클중에 독립하여 생기는 전류의 수」로 정의하고 있으며, 실제로는 직류전압에 포함되어 있는 맥동 펄스의 수와 같다. 예를 들면 3상 브리지 접속의 펄스 수는 6이 되고, 이 펄스의 수가 커지면 교류 전류에 포함되어 있는 고조파 차수가 높게 되고, 동시에 고조파 전류의 크기도 감소된다. 즉,

$$I_n = K_n \cdot \frac{I}{n} \text{에서 출력상수가 높으면 } I_n \text{이 작아진다.}$$

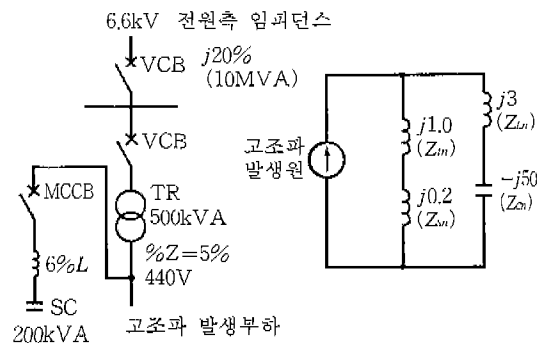
단,  $K_n$  : 고조파 저감계수

$n$  : 발생 고조파의 차수 ( $n = mP \pm 1, m = 1, 2 \dots$ , 출력상수 P가 증가할수록 최저차 고조파의 차수가 높아짐)

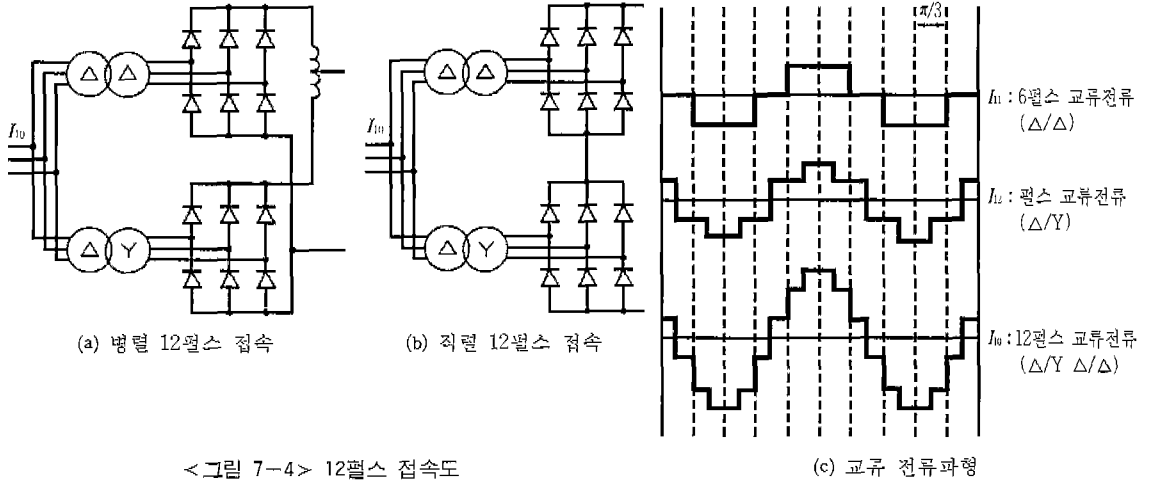
그림 7-4는 3상 브리지의 12펄스 접속을 나타낸 것으로, 전압의 위상을  $30^\circ$  차이나게 한 2대의 변환장치를 직류측에 직렬 또는 병렬로 접속하였다. 이 경우 전압 위상을  $30^\circ$  차이나게 하기 위해 변환기의  $\Delta - \Delta, \Delta - Y$ 결선을 사용하고 있다. 고



<그림 7-2> 고압측 콘덴서 설치 예



<그림 7-3> 저압측 콘덴서 설치 예



<그림 7-4> 12펄스 접속도

<표 7-2> 3상 브리지의 고조파 전류 발생량

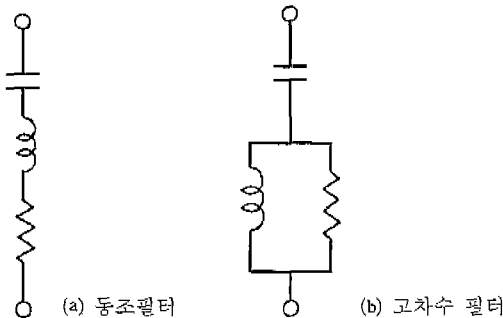
(단위: %)

차수	5	7	11	13	17	19	23	25
6펄스	17.5	11.0	4.50	3.00	1.50	1.25	0.75	0.75
12펄스	2.00	1.50	4.50	3.00	0.20	0.15	0.75	0.75

조파 발생차수는  $12m \pm 1$ 이 되고, 이론 고조파로서는 5, 7차 발생량은 0이 되나, 실제 고조파 측정시 어느정도 약간 발생하고 있다. 3상 브리지의 경우 고조파 발생량은 표 7-2와 같으며 펄스수가 커질수록 고조파 발생률이 현저하게 저감되는 것을 알 수 있다.

#### 7-4. 수동 필터에 대한 억제대책

수동 필터는 교류 필터, L-C 필터, Passive 필터라고 부르며 여기에는 그림 7-5와 같이 동조 필터



<그림 7-5> 고조파 필터

와 고차수 필터가 있다. L-C 필터의 기본적인 회로는 L과 C의 공진현상을 이용한 것으로 n차 고조파에서  $nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$ 로 함으로써 n차 고조파 전류는 대부분 여기에 흡수되고, 유출전류를 저감시킬 수 있다.

#### • 동조 필터(공진분로 필터)

R-L-C의 직렬회로에 의해 구성 단일 고조파에 공진, 공진 주파수에서 저저항 특성을 가지며 n차 고조파 필터의 임피던스는

$$Z_n = R_n + j(\omega L_n - \frac{1}{\omega C_n})$$

공진 주파수에서  $\omega^2_n \cdot L_n \cdot C_n = 1 \therefore Z_n = R_n$ 이 된다.

#### • High Pass Filter

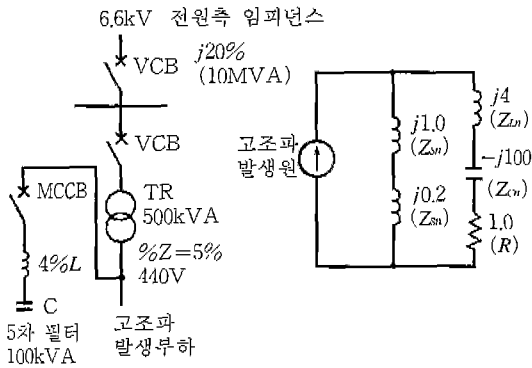
$$Z_n = \frac{1}{\omega C_n} + \frac{1}{\frac{1}{R_n} + \frac{1}{\omega L_n}}$$

공진이 발생하면 임피던스가 0이 되기 때문에 순저항을 집어넣어 회로 전류를 제한하고 있다. 이때 순저항의 저항치는

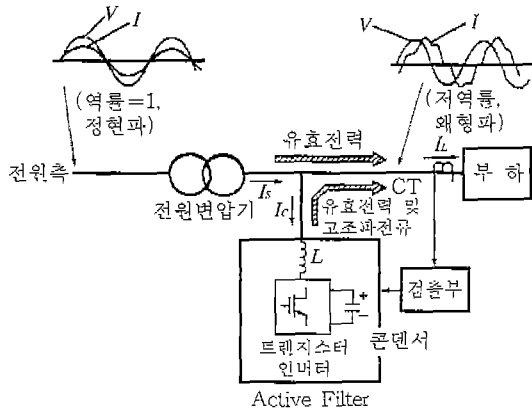
$$R = \frac{X_n}{Q} (\Omega)$$

단, Q: 공진의 첨예도로 통상 20~40로 구할 수 있다.

그림 7-6과 같은 수동 필터 설치시 수동 필터의 용량 및 설치효과를 계산하면 다음과 같다.



<그림 7-6> 수동 필터 설치 예



<그림 7-7> Active Filter 접속도

(1) 수동 필터의 용량선정

- 5차 고조파 전류의 상한치=3.5A
- 5차 고조파 발생전류=7.0A, 전압 6.6kV, 가동률 50%일 때
- 5차 필터의 용량

$$= \sqrt{3} \times (7A - 3.5A) \times 6.6kV \times \frac{1}{0.5}$$

$$= 80kVA \rightarrow 100kVA$$

(2) 설치효과

발생고조파 전류 : 제5차 고조파 전류를 7A라 하면

① 임피던스를 기준용량 10MVA PU로 변환

$$\text{임피던스} : Z_m = j20\% / 100\% = j0.2$$

② 기본파에 의한 계산

$$Z_m = j10MVA \times 5\% / 0.5MVA \times 100\% = j1.0$$

$$Z_{cn} = -j10MVA / 0.1MVA = -j100$$

$$Z_{Ln} = j100 \times 0.04 = -j4, R = 4 \times 5 / 20 = 1.0$$

③ 5차 유출전류의 계산

유출전류

$$= \text{발생전류} \times (Z_{Ln} + Z_{cn} + R) / (Z_{Ln} + Z_{cn} + R +$$

$$Z_m + Z_m)$$

$$= 7A \times 1.0 / (1.0 + j1 + j5)$$

$$= 7A \times 0.16 = 1.12A$$

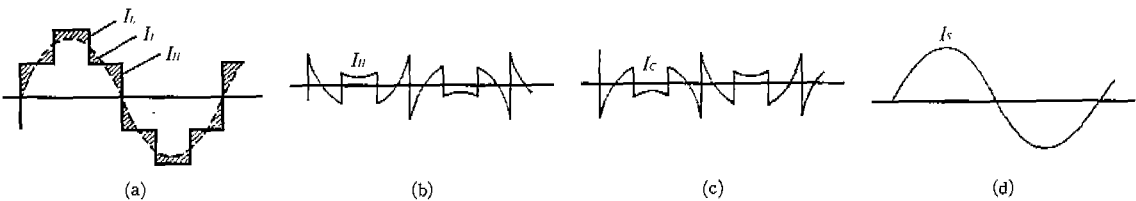
④ 효과

억제율 :  $(7A - 1.12A) \times 100 / 7A = 84.0\%$ 가 된다.

7-5. Active Filter(능동 필터)에 의한 억제대책

Active Filter는 수동 필터와 같이 공진특성을 사용하지 않고, 인버터 응용기술에 의하여 역위상의 고조파를 발생시켜 고조파를 소거하기 위한 이상적인 필터이다. 그림 7-7은 Active Filter의 접속도를 나타냈으며 그림 7-8에 동작파형을 그려 보았다.

그림과 같이 Active Filter는 고조파 발생부하와 병렬로 접속한 것으로, 부하전류  $I_L$ 를 CT에서 검출하고, 부하전류에 포함된 고조파 전류성분  $I_H$ 를 끄집어 낸다. 이  $I_H$ 를 전류제어의 기준 신호로써 인버터에 흐르는 전류를 제어하는 것으로,  $I_H$ 와 역위상의 전류  $I_c$ 를 Active Filter로 흐르게 함으로써 전원전류에 포함된 고조파 전류성분을 상쇄하기 때문에 전원 전류  $I_s$ 는 정현파가 되는 것이다.

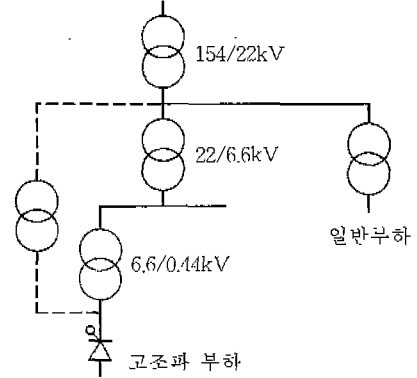
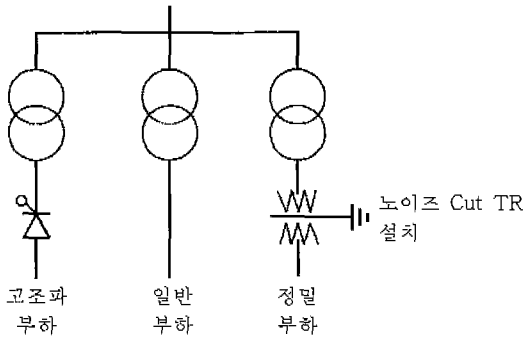


<그림 7-8> 동작파형



7-6. 계통분리

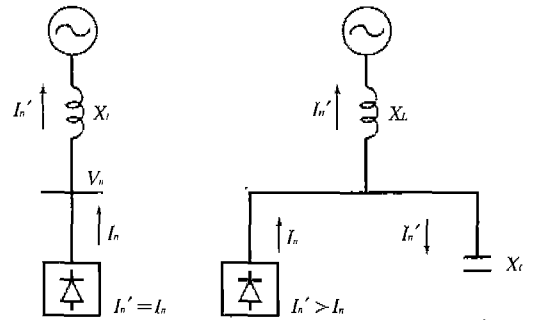
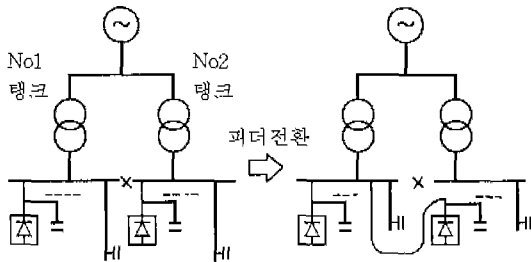
(1) 고조파 부하 분리



(2) 전원 단락 용량의 증대

부하의 고조파 발생량  $I_n$ 은 고조파 전압  $V_n$ 과 같이 비례( $V_n = n \cdot X_L \cdot I_n$ )하고 전원의 단락용량을 크게 하면 역비례하여 작아진다.

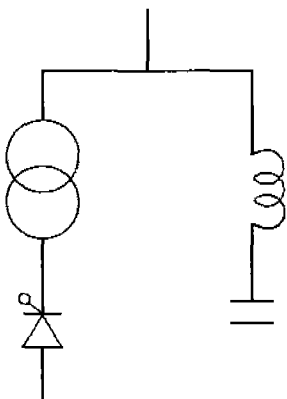
(2) 계통의 변경



(a) 공진이 안된 경우

(b) 공진이 된 경우

7-7. 고조파 내량증가



- TR, 케이블 : 고조파 분석 결과에 따라 150~250% 용량 증가
- 콘덴서용 리액터 : 13%
- 콘덴서 단자전압 : 120%

- 공진차수 =  $\sqrt{\frac{X_L}{X_C}} = \sqrt{\frac{\text{전원단락용량}(S_n)}{\text{콘덴서용량}(Q_C)}}$
- 전원 단락 용량증대 → 공진차수 상승
- 콘덴서 용량증대 → 공진차수 저하

7-8. 단락 용량 증대

(1) 고조파 부하를 단락용량이 큰 계통에 연결 (전원측 임피던스를 작게)

7-9. 기타

억제효과는 미미하지만, 선로 임피던스는 저항, 리액턴스, 정전용량으로 구성되어 있기 때문에 고조파 전류를 각각 분류시킬 수 있으며, 또한 고조파 발생부하와 유도전동기 부하가 동일 피더에 접속되어 있는 경우에 있어서는 고조파를 유도기 부하에 분류시켜 유출 고조파 전류를 억제하는 방법이 있다. 이 경우도 마찬가지로 전원측의 임피던스보다 유도기 부하의 임피던스가 매우 크기 때문에 고조파 억제효과는 매우 작다고 볼 수 있다.

☞ 다음호에 계속 ...