



# 전기설비의 고조파 장애 및 대책기술

글/ 유 상 봉(쌍용안전기술사업단 설비진단팀장 부장, 기술사)  
김 세 동(한국건설기술연구원 선임연구원, 기술사)

## 목 차

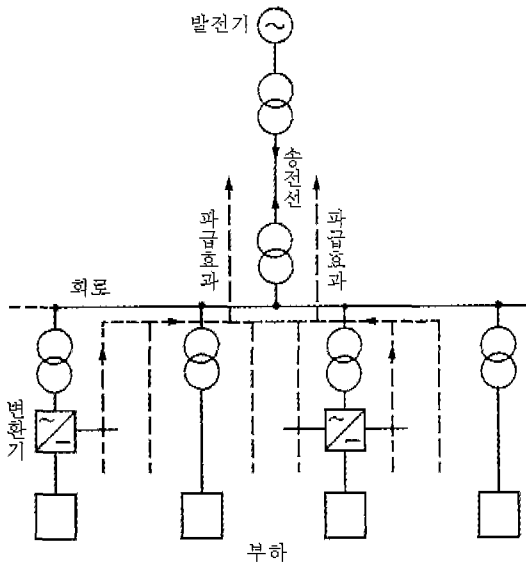
1. 고조파 발생의 기본개념	48
2. 왜형파와 푸리에 급수	48
3. 전압 찌그러짐 현상	49
4. 고조파 발생원	50
5. 직렬 및 병렬공진	51
6. 고조파 영향	
7. 고조파 대책	
8. 고조파 계산 실례	
9. 결 론	



## 1. 고조파 발생의 기본개념

전력전자기술(Power Electronics Technology)의 발전에 따라 최근의 전기설비에서는 FA 및 OA용 전원, 정보통신용 전원으로 무정전 전원장치가 필수적으로 시설되고 있다. 또한, 성에너지를 위한 전동기 가변속 구동장치가 많이 채택되고 있다. 이러한 무정전 전원공급장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력변환기인 인버터를 사용하게 되며, 인버터는 직류를 교류로 변환하는 장치로 그 전단에는 일반적으로 교류를 직류로 변환하는 콘버터(정류장치)가 접속되어 있다. 그런데 이러한 콘버터는 고조파 전류의 발생원으로써 이 고조파 전류가 각 콘버터로부터 집적되어 그림 1-1에 나타낸 바와 같이 계통을 따라 전원까지 역류하고 있다.

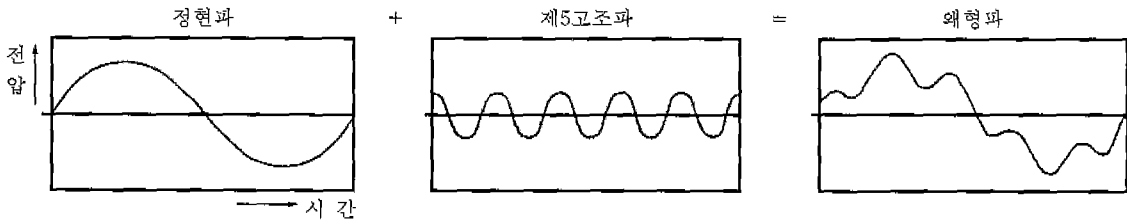
이러한 고조파 전류는 전원으로부터 부하단까지의 임피던스에 의하여 전압강하를 일으키고, 이 전압강하에 따라 비록 전원전압파형이 순정현파라 할지라도 부하단의 전압파형은 왜형파가 된다. 이런 전압 찌그러짐은 각종 계전기 오동작, 정밀 전자기기의 동작불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 될 수 있다. 따라서 전력 품질보증의 문제로서 양질의 전원 즉 주파수, 전압 등이 안정되어야 전기설비의 기능을 만족할 수 있으며, 또한 EMC의 문제로서 전자파장애 방지 측면에서도 만족하여야 한다.



<그림 1-1> 고조파 유출경로

## 2. 왜형파와 푸리에 급수

일반적으로 고주파(High Frequency)는 전력관계



<그림 2-1> 제5고조파를 함유한 왜형파 예

에서 상용 주파수보다 높은 주파수, 예를 들면 수 백 Hz 이상인 주파수를 말하며, 고조파(Harmonics)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수를 말하는 것으로, 통상 왜형파는 그림 2-1과 같이 기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있으며, 이것이 푸리에(Fourier) 급수의 개념이다.

즉, 주기적으로 반복하는 임의의 왜형파를 사인(Sine) 및 코사인(Cosine) 항을 갖는 기본파와 그의 충분한 수의 고조파의 합으로 표현하는 것이다.

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin n\omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n\omega t$$

$$= a_0 + a_1 \sin \omega t + a_2 \sin 2\omega t + a_3 \sin 3\omega t + \dots$$

$$+ b_1 \cos \omega t + b_2 \cos 2\omega t + b_3 \cos 3\omega t + \dots$$

여기서,  $a_n$ 는 왜형파 교류의 직류분을 나타내며,  $a_n \sin n\omega t$  및  $b_n \cos n\omega t$ 항은 왜형파  $f(t)$ 의 기본이 되는 것으로 기본파라고 한다. 이러한 왜형파의 질을 나타내는 수치로는 통상종합 전압왜형률 및 고조파 함유율로 나타낼 수 있으며, 종합 전압왜형률은 기본파 성분 실효치에 대한 전체고조파 성분 실효치의 비율로

$$\frac{\sqrt{\sum V_n^2}}{V_1}$$

$$\frac{n \geq 2}{V_1} \times 100(\%)$$

단,  $V_n$ : 제  $n$ 차 고조파 전압의 실효치  
 $V_1$ : 기본파 전압의 실효치

이며, 고조파 함유율은 어떤 차수의 고조파 성분 실효치의 기본파 성분 실효치에 대한 비율로

$$\frac{I_n}{I_1} \times 100(\%) \text{ 또는 } \frac{V_n}{V_1} \times 100(\%)$$

로 표시할 수 있다.

### 3. 전압 찌그러짐 현상

정현파 회로 전압을 찌그러뜨리는 원인은 주로

고조파를 함유한 교류회로 전류에 있다. 주파수  $f_n$ 의 고조파 전류  $I_n$ 에 의한 회로에는 동일 주파수의 고조파 전압  $U_n$ 가 발생한다. 즉, 순 인덕턴스  $L_s$ 만 있는 회로를 가정하면,

$$U_n = I_n 2\pi f_n L_s$$

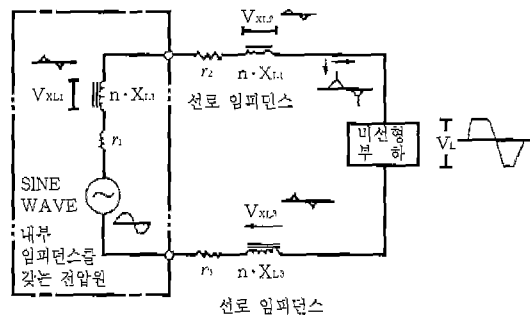
의 고조파가 발생하며, 상기 식으로부터 고조파 전압의 실효치는  $f_n$ 에 비례하여 증가한다. 회로 인덕턴스  $L_s$  대신에 단락 리액턴스  $X_s = 2\pi f L_s$ 가 주어지는 경우는

$$U_n = I_n X_s$$

여기서,  $X_s$ : 기본주파수에서의 단락 리액턴스  
 $I_n$ : 제  $n$ 차 고조파 전류  
 $n$ : 고조파 차수

가 되며, 따라서 단락 리액턴스가 크면 클수록 전압 찌그러짐도 커지게 된다.

이에 대한 설명을 그림으로 나타내면 그림 3-1과 같으며, 일반적으로 상용전원, 발전기 및 송전선로 등 모든 전력계통은 그 내부에 임피던스를 포함하고 있다. 그러나 이 임피던스는 주파수에 비례하기 때문에 60Hz 기본파 전류에 비하여 각 고조파에 대한 임피던스는 고조파수에 비례하여 증가한다. 예를 들어 제5고조파에 대한 임피던스는 기본파 성분에 대한 임피던스보다 5배 크다. 임피



<그림 3-1> 전력계통의 전압찌그러짐 현상



던스는 전류의 흐름을 저해하기 때문에 전원계통 임피던스 양단에 전압을 유지시킨다.

이러한 유기전압은 인가되는 전원전압과 반대방향의 크기를 가지며, 그래서 전원전압을 감소시킨다. 전원계통 임피던스가 클수록 비선형 부하인가 시 전압 찌그러짐이 심해진다. 이와 같은 이유로 전원전압이 순수 정현파형에서부터 왜곡된 정현파형으로 변화하기 때문에 고조파를 함유하게 되고, 이러한 현상은 비선형부하 그 자체에도 영향을 미치지만 그것보다 더욱 심각한 것은 동일계통에 연결된 다른 기기에 영향을 끼치는 것이다.

#### 4. 고조파 발생원

각종 전력변환 시스템은 비선형 부하이며, 여기에서 발생하는 고조파 전류는 전원 계통의 전압왜곡을 일으키며, 발생원의 내부 임피던스와 전기설비의 임피던스가 공진 조건을 만족하면 고조파 전류는 증폭되어 전자유도장해를 일으킨다. 고조파 전류의 발생원은 대부분 전력전자소자(Power Electronics : 다이오드, SCR 등)를 사용하는 기기에서 발생된다. 그 종류를 들어보면

① 변환장치 : 인버터, 컨버터, 무정전 전원장치, 정류기, 가변전압 가변주파수 장치(VVVF) 등, ② 아크로, 전기로 등, ③ 형광등, ④ 회전기기, ⑤ 변

번호	전원회로	전류파형	전류의 왜곡률(%)
1			20~40
2			40~110
3			0~110
4			약 10

<그림 4-1> 전원회로별 전류파형

<표 4-1> 정격부하전류에 대한 정류기의 고조파 전류 (단위 : %)

고조파 차수	6펄스 정류기	12펄스 정류기	24펄스 정류기
5차	17.5	2.0	2.0
7차	11.0	1.5	1.5
11차	4.5	4.5	1.0
13차	3.0	3.0	0.75
17차	1.5	0.2	0.2
19차	1.25	1.15	0.15
23차	0.75	0.75	0.75
25차	0.75	0.75	0.75

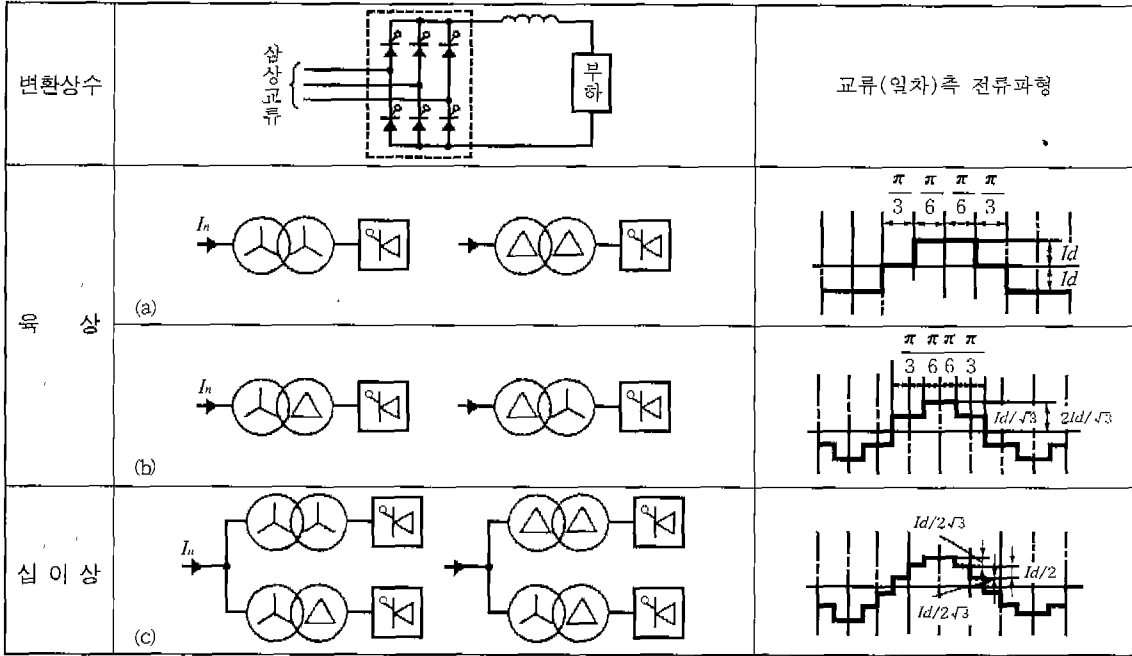
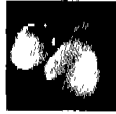
압기, ⑥ 과도현상에 의한 것 등이다.

③~⑥은 발생고조파 크기가 적고 순간적인 것이 많아 크게 문제가 되지 않는다. ①~②의 고조파 발생원은 지속적이고 고조파 전류성분이 크기 때문에 다른 기기나 선로에 미치는 영향이 대단히 크다.

전원회로에 반도체 정류소자를 이용한 경우나 변압기, 형광등 등의 기기는 정현파 전압을 인가한 경우에도 실제회로에 흐르는 전류는 왜형파형이 되는 경우가 많다. 그림 4-1은 저압회로에서 사용되는 주된 고조파 발생기기에 대하여 전원회로별로 각각의 전류파형을 표시한 것이다. 1번은 반파 정류회로로서 평활용 커패시터가 없는 경우이며 제2고조파, 제4고조파 등 우수조파 성분이 많다. 2번은 브리지 전파 정류회로로서 평활용 커패시터가 있으며 이로인해 전류파형은 피크 형태로 된다. 3번은 SCR 또는 TRIAC 등의 소자를 이용하여 교류 양방향의 위상을 제어하는 형태의 전류파형을 나타낸 것이다

이상과 같은 부하는 그 자체의 성질상 전원으로부터 왜형파 전류를 소모하므로 계통 전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 계통내를 순환하는 고조파 전류를 흘리거나 계통내의 전압 파형을 찌그러뜨려서 다른 기기에 영향을 준다. 고조파 전류가 유입하는 경우 상기와 같은 직접적인 영향 이외에도 각종 전기설비 및 기기의 온도상승이 높아지고 절연물의 수명도 저하하게 된다.

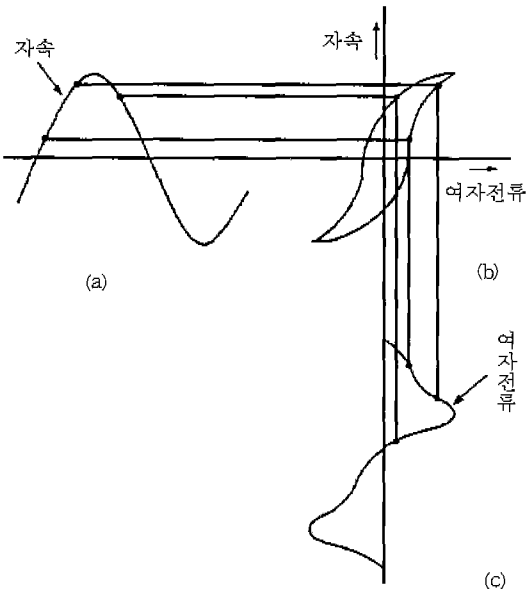
3상회로를 예를 들어 설명하면, 그림 4-2는 3상 정류기의 교류측 전류파형을 나타낸 것이며, 표 4-1은 3상 정류기의 고조파 성분을 분석한 결과



<그림 4-2> 3상 정류기의 교류측 전류파형

이다. 펄스수가 높아질수록 고조파가 현저하게 줄어들어 드는 것을 알 수 있다.

또한, 변압기의 경우 철심의 자화특성은 그림 4-3과 같이 대칭으로 비선형의 히스테리시스 특



<그림 4-2> 변압기의 히스테리시스 특성곡선

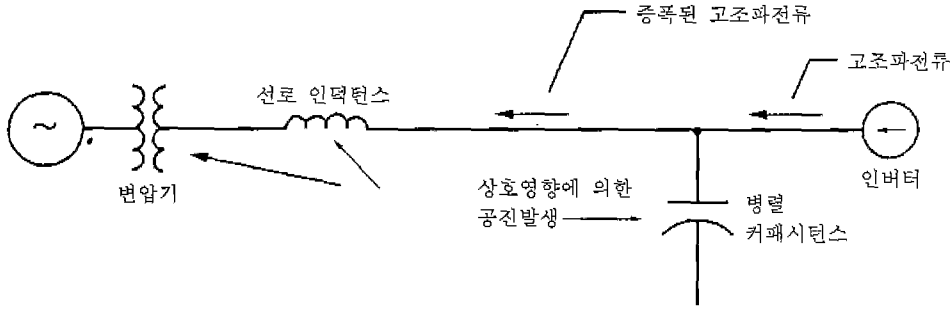
성이 있다. 그 때문에 (a)와 같은 정현파의 자속을 만들어내는 여자전류는 (c)와 같은 홀수 고조파를 포함한 대칭 왜형파 전류가 된다. 또한, 여자전류는 이 홀수 고조파 중에서도 저차의 제3고조파 성분의 비율이 크다. 정현파의 전압을 유지하기 위해서는 자속이 정현파가 될 필요가 있으므로 (c)와 같은 제3고조파를 포함한 여자전류가 필요해진다.

## 5. 직렬 및 병렬공진

### 5-1. 공진주파수

고조파 발생원에서 발생된 고조파 전류는 선로의 용량성 및 유도성 임피던스로 인하여 어떤 경우 공진현상이 발생하게 되는데, 공진현상이 발생하면 고조파 전류는 증폭되며 진상콘덴서, 변압기, 발전기, 전동기, 각종 조명설비에는 과도한 전류가 흘러 기기의 과열, 소손이 발생할 우려가 있다. 그림 5-1은 공진현상을 일으키는 배전계통을 나타낸 것이다.

공진주파수  $f$ 은 단락회로의 인덕턴스를  $L_n$ 이라고 하면 (단락 리액턴스  $X_n = 2\pi f L_n$ )



<그림 5-1>  
공진현상의 발생

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_N C}}$$

여기서 배전전압을  $V$ 라고 하면 단락용량  $S_N$ 은

$$S_N = \frac{V^2}{2\pi f_N L_N}$$

선로에 접속된 진상 콘덴서 용량  $Q_C = 2\pi f_N C V^2$  이므로

$$\frac{S_N}{Q_C} = \frac{1}{2\pi f_N L_N \cdot 2\pi f_N C}$$

$$f_r = f_N \sqrt{\frac{S_N}{Q_C}}$$

또한, 여기서 부하측의 변압기 용량을  $ST$ 라 하고 퍼센트 임피던스를  $\%Z$ 라 하면, 공진 주파수는

$$f_r = f_N \sqrt{\frac{100S}{Q_C \%Z}}$$

로 구할 수 있다.

### 5-2 직렬공진

그림 5-2의 경우 저압콘덴서와 변압기는 고압 모선에 대하여 제7고조파 필터를 구성하게 되며 동일 피더에 접속된 타 수용가의 제7고조파 전류가 과대하게 유입되어 저압 콘덴서나 변압기가 과

부하로 된다.

이런 경우 고압모선에 제7고조파 전압은 없어지는데 저압모선(저압콘덴서의 단자전압)의 제7고조파에 의한 전압왜곡은 확대되어 커진다. 직렬공진은 결국 필터 회로를 구성하게 되며, 이것이 문제가 되는 것은 이같은 필터 작용을 의도하지 않고 구성된 전력계통에 결과적으로 이상과 같은 직렬공진현상이 일어났을 경우이다.

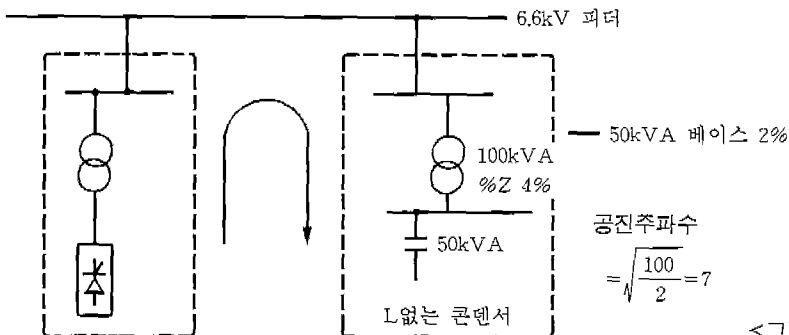
### 5-3. 고조파 전류의 확대 및 병렬공진

그림 5-3에서 고조파 발생원에서 발생하는 제  $n$ 차 고조파 전류를  $I_n$ , 전원의 기본파 리액턴스를  $X_0$ , 콘덴서의 기본파 리액턴스를  $X_c$ 라 하면, 전원측과 콘덴서에 흐르는 고조파 전류는

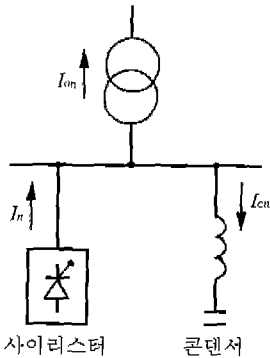
$$\bullet \text{ 전원측 : } I_{cn} = \frac{nX_L - \frac{X_c}{n}}{nX_0 - (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

$$\bullet \text{ 콘덴서측 : } I_{cn} = \frac{nX_0}{nX_0 + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

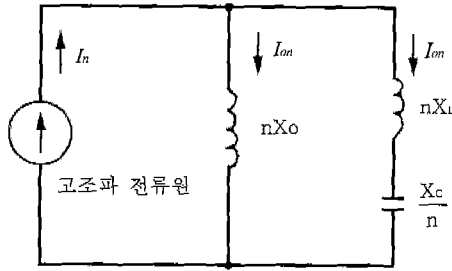
으로 나타낼 수 있다. 여기서



<그림 5-2> 직렬공진에 의한 장애 예

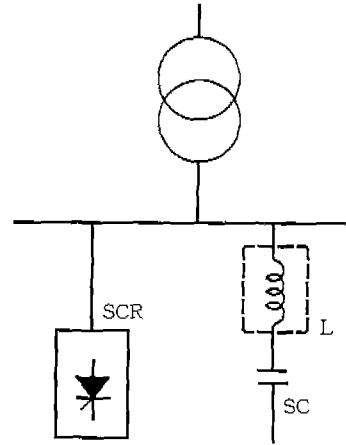


(a) 회로 구성도



(b) 동가회로

<그림 5-3> 고조파 전류의 분류



<그림 5-4>

1)  $nX_o - \frac{X_c}{n} \ll 0$ 의 경우

$nX_o - (nX_L - \frac{X_c}{n})$ 는 음이 되어 이 전류가 전원계통에 유입,  $I_m > I_n$ 이 되어 고조파 전류의 확대를 일으킨다.

2)  $nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n}) = 0$ 의 경우

병렬공진에 즈음해서 고조파 전류의 이상확대를 일으켜 전압과형도 현저하게 일그러지며, 여러가지 장해를 일으킨다.

이러한 고조파 전류에 의한 트러블 발생 사례를 몇가지 들어보면 다음과 같다.

[사 례 1]

진상 콘덴서에 직렬리액터가 없는 경우 콘덴서로부터 이상음이 발생→제11차 고조파의 함유 때문에 공진현상이 발생하고 고조파 전류가 증가한 것임(그림 5-4).

- 콘덴서에 직렬리액터를 추가시켜서 해결함.

[사 례 2]

6% 직렬리액터 붙이의 진상콘덴서를 증설하였을 때 리액터에서 이상음이 나고 콘덴서 과전류 릴레이가 동작 :→사이리스터 장치에 의한 제3고조파 전류가 공진하여 확대된 것으로서 리액터를 13%로 변경, 공진점을 비켜 해결함.

[사 례 3]

공진현상에 의한 과전압으로 사이리스터

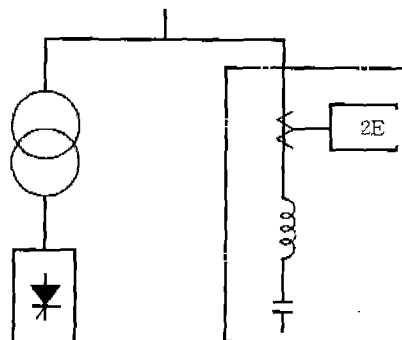
소자가 파손 :→사이리스터 레오너드는 속도를 저하시킨 경우에 제어각  $\alpha$ 의 변화에 따라 역률이 나빠진다. 이 역률개선을 시도하기 위해 사이리스터 장치에 병렬로 삽입한 콘덴서와의 공진때문에 과전압이 되어 소자가 파손됨.

- 전원계통을 충분히 검토하고 콘덴서, 리액터를 선정해야 함.

[사 례 4]

사이리스터 장치의 계통에 추가한 진상 콘덴서 회로의 보호용 2E 릴레이의 오동작 :→고조파 전류에 기인한 것으로 최근의 2E 릴레이 등은 파형 변형에 대해서는 개선되고 있지만 콘덴서 회로의 경우 선정에 주의가 필요함(그림 5-5).

☞ 다음호에 계속 ...



<그림 5-5>