



# 고조파(高調波)에 대한 의문점을 풀어본다 ①

글/ 유 상 봉 용인송담대학 전기설비과 교수·공학박사·기술사  
이 순 형 (주)선강엔지니어링 대표·기술사  
강 창 원 (주)피에스디테크 대표·기술사

## 목 차

1. 개요
2. 고조파 정의
3. 고조파 영향
4. 고조파 관리
5. 고조파 발생현상 해석
6. 고조파 억제대책
7. 고조파 부하에 따른 전력기기 용량 선정
8. 결론

### 1. 개요

최근 전력전자기술의 발전에 따라 Power Electronics 를 이용한 기술이 다양화 되고, 그 응용 범위가 확대되어 FA 및 OA용, 정보통신용 전원으로 무정전전원장치가 필수적으로 시설되고 있으며, 또한, 省에너지를 위한 전동기 가변속 구동장치가 많이 채택되고 있다.

이러한 무정전 전원공급장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력변환기인 인버터를 사용하게 되며, 이러한 인버터에는 교류를 직류로 변환하는 콘버터(정류장치)가 접속되어있다.

그런데, 이러한 콘버터는 고조파 전류의 발생원으로써 이 고조파 전류가 각 콘버터로부터 집적되어 그림 1에 나타난 바와 같이 계통을 따라 전원까지 역류하고 있다. 이러한 고조파 전류는 전원에서부터 부하단까지의 임피던스에 의하여 전압강하를 일으키고, 이 전압강하에 따라 비록 전원전압파형이 순정현파라 할지라도 부하단의 전압 파형은 왜형파가 된다.

이런 전압 찌그러짐은 각종 계전기 오동작, 정밀 전자기기의 동작 불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 될 수 있다(그림 1).

### 2. 고조파 정의

일반적으로 고주파(高周波, High Frequency)는 전력관계에서 상용 주파수보다 높은 주파수, 예를 들면 수백 Hz 이상인 주파수를 말하며, 고조파(高調波, Harmonics)는 기본파에 대하여 그의 정수배의 주파수를 말하는 것으로, 통상 왜형파는 그림 2와 같이 기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있다.

$$= \boxed{\text{왜형파}} = \boxed{\text{기본파}} + \boxed{\text{고조파(정수배의 주파수)}}$$

이러한 왜형파의 질을 나타내는 수치로는 통상, 종합 전압왜형을 및 고조파 함유율로 나타낼 수 있으며, 종합 전압왜형율은 기본파 성분 실효치에 대한 전체고조파 성분 실효치의 비율로

$$\frac{\sqrt{\sum V_n^2}}{V_1} \times 100 (\%)$$

$n \geq 2$

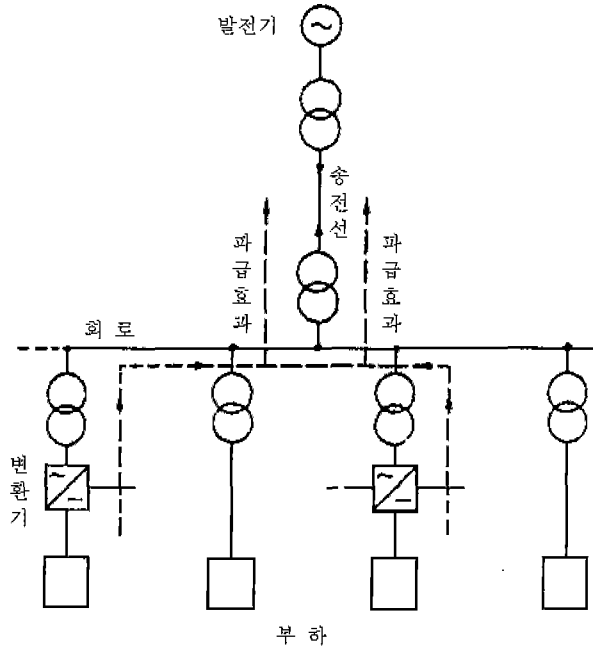
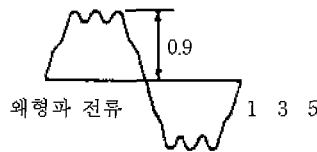
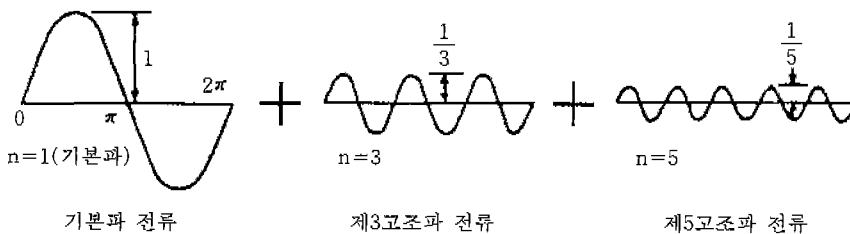


그림 1 고조파 유출경로

(a)



(b)



제n고조파: 크기 1/n, 주파수 n배

그림 2 왜형파(기본파+고조파)의 예



표 1. 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
케이 블	· 3상4선식 회로의 중성선에 고조파 전류가 흐름에 따라 중성선의 과열
변 압 기	· 고조파 전류에 의한 철심의 자화현상에 의한 소음의 발생 · 고조파 전류·전압에 의한 철손·동손의 증가와 함께 용량의 감소
형 광 등	· 고조파 전류에 대한 임피던스가 감소하여 과대전류가 역률개선용 콘덴서나 초크코일 흐름에 따른 과열·소손
통 신 선	· 전자유도에 의한 잡음전압의 발생
유도 전동기	· 고조파 전류에 의한 정상 전동토크 발생에 의하여 회전수의 주기적 변동 · 철손·동손 등의 증가
보호계전기	· 고조파 전류 혹은 전압에 의한 설정레벨의 초과 혹은 위상변화에 의한 오동작·오부동작
Power Fuse	· 과대한 고조파 전류에 의한 용단
MCCB	· 과대한 고조파 전류에 의한 오동작

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.

고조파 전류의 발생원은 대부분 전력전자소자 (Power Electronics: Diode, SCR 등)를 사용하는 기기에서 발생된다.

그 종류를 들어보면

- ① 변환장치(인버터, 컨버터, 무정전 전원장치, 정류기, 가변전압 가변주파수장치(VVVF) 등)
- ② 아크로, 전기로 등
- ③ 형광등
- ④ 회전기기
- ⑤ 변압기
- ⑥ 과도현상에 의한 것 등이다

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

### 3. 고조파 영향

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

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

$$I = I_1 \sqrt{1 + \sum \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}$$

$$W = W_1 \left[ 1 + \sum n^2 \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 \right] \text{ (단, } 1 < \alpha < 2 \text{)}$$

- ③ 이상 공진에 의한 고조파 과전압의 기기에 의 영향
- ④ 보호계전기의 오동작이나 기기류의 오차 (특히 정지형 보호계전기)
- ⑤ 지시계기, 적산계기의 오차
- ⑥ 사이리스터 장치에의 제어 불안정
- ⑦ 통신회로에의 잡음 및 유도장해

참고로 표 1은 고조파가 각종 전기기에 미치는 영향의 내용에 대해 나타나 있으며, 일본에서

고조파(高調波)에 대한 의문점을 풀어본다 ①

'91~'94년에 발생한 장애사례를 분석한 바에 의하면 발생 전수는 그림 3과 같이 압도적으로 콘덴서 및 직렬 리액터가 거의 90%를 차지하고 있다.

그리고 장애 내용은 소손, 이상음, 과열 등으로 되어 있다.

특히, 전력용콘덴서에서 중요한 것은 전원과 콘덴서회로의 임피던스가 고조파 전류에 의해 병렬 공진을 일으킬 수 있다는 것이다. 병렬공진을 일으키면 고조파전류의 증폭뿐 아니라 계통전체에 대해 전압 왜곡을 일으킨다.

이때 전력용콘덴서에 리액터가 설치되어 있지 않거나 리액터용량이 작으면 콘덴서에 많은 전류가 유입하게 되어 소손될 수 있다.

KSC 4802: 콘덴서는 그의 총전전류에 고조파를 포함할 때 합성전류가 정격 전류의 135%를 초과하지 않는 범위내에서 장기간 사용하여도 지장이 없어야 한다.

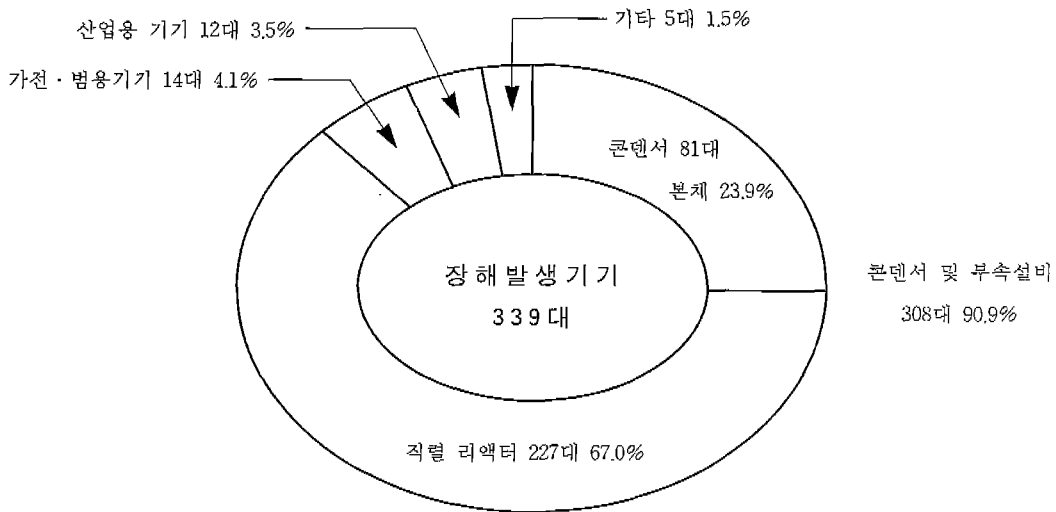


그림 3 고조파 장애를 받은 기기

표 2 전력용 콘덴서의 허용 최대 사용 전류

전압 구분	규 격	최대 사용 전류	
		직렬 리액터 무	직렬 리액터 유
저압 회로용	KSC 4806, 4801	130%이하	120%이하 제5고조파 35%이하
고압 회로용	KSC 4806, 4802	고조파포함 135% 이하	120%이하 제5고조파 35%이하
특별고압 회로용	KSC 4806, 4801	고조파포함 135% 이하	120%이하 제5고조파 35%이하



## 4. 고조파 관리

### 4-1. 고조파 관리 기준

#### 1) 종합 고조파 왜형률 (THD: Total Harmonics Distortion)

다음 식에서와 같이 고조파 전압 실효치와 기본파 전압 실효치의 비로서 나타내며 고조파 발생의 정도를 나타내는데 많이 사용된다.

$$THD = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100(\%)$$

여기서,  $V_1$ : 기본파 전압

$V_2, V_3, \dots, V_n$ : 각 차수별 고조파 전압

#### 2) 등가방해전류 (EDC: Equivalent Disturbing Current)

전력계통에서 발생한 고조파는 인접해 있는 통신선에 영향을 주며 통신선에 영향을 주는 고조파 전류의 한계를 등가방해전류(EDC)로서 규제하고 있다.

$$EDC = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (S_n^2 \times I_n^2)} \quad (A)$$

여기서,  $S_n$ : 통신 유도계수

$I_n$ : 영상 고조파 전류

### 4-2. 고조파 제한 규정

#### 1) 한전전기공급규정

(단위: %)

구분	지중선로가 있는 S/S에서 공급		가공선로만 있는 S/S에서 공급	
	전압 왜형률 (%)	등가방해 전류 (A)	전압 왜형률 (%)	등가방해 전류 (A)
66kV 이하	3	-	3	-
154kV 이하	1.5	3.8	1.5	-

#### 2) IEEE(IEEE 519) 기준

##### i) 고조파 전압 기준

(단위: %)

회로 전압	각 고조파 성분의 최대	최대 종합 왜형률 (THD)
69kV이하	3.0	5.0
115~161kV	1.5	2.5
161kV 이상	1.0	1.5

회로 전압	왜형률	각차 고조파 전압	
		기수 고조파	우수 고조파
415V	5	4	2
6.6kV	4	3	1.75
33kV	3	2	1
132kV	1.5	1	0.5

##### ii) 고조파 전류 기준

SCR =Isc/IL	h<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	TDD
20이하	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20~50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50~100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100~1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
1000이상	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

TDD: Total Demand Distortion

SCR: Short Circuit Ratio

#### 3) 일본기준

(단위: %)

고조파차수 구분	3	5	7	11	총합
배전계통	3.0	4.0	3.0	2.0	5.0
특고계통	2.0	2.5	1.5	1.5	3.0

## 5. 고조파 발생현상 해석

### 5-1. 인버터가 기수 고조파를 발생시키는 이유

인버터가 고조파를 발생시키는 이유는 그림 4와 같이 가장 단순한 단상 인버터를 예로들어 설명하면 다음과 같다.

인버터부는 직류를 교류로 역변환하기 때문에

출력전압 파형은 구형상의 파형이 된다.

그림 4(a)의 회로가 출력하는 출력전압 파형이 그림 4(b)가 된다. 이것을 푸리에 급수 전개하면 (1)식이 얻어진다.

$$\begin{aligned}
 v &= \frac{4}{\pi} E_d \left( \sin \frac{\theta}{2} \cdot \cos \omega t - \frac{1}{3} \sin \frac{3\theta}{2} \cdot \cos 3\omega t \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{5} \sin \frac{5\theta}{2} \cdot \cos 5\omega t \dots \right) \\
 &= \frac{4}{\pi} E_d \sum_{n=1, 3, 5 \dots} \frac{-1^{(n-1)/2}}{n} \sin \frac{n\theta}{2} \cdot \cos n\omega t
 \end{aligned} \tag{1}$$

(1)식에서 제n차 고조파의 순시값  $v_n$ 은 (2)식과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
 v_n &= \frac{4}{\pi} \cdot E_d \cdot \frac{-1^{(n-1)/2}}{n} \sin \frac{n\theta}{2} \cdot \cos n\omega t \\
 &= -1^{(n-1)/2} \cdot \frac{4}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\theta}{2} \cdot E_d \cdot \cos n\omega t
 \end{aligned} \tag{2}$$

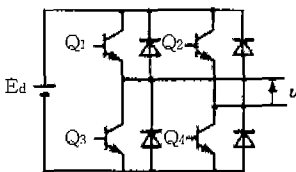
제n차 고조파의 실효값  $V_n$ 은 (3)식과 같이 된다.

$$V_n = \frac{2\sqrt{2}}{n\pi} \cdot E_d \cdot \sin \frac{n\theta}{2} \tag{3}$$

여기서, n은 홀수차

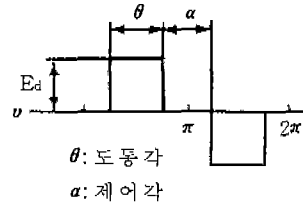
(3)식에서  $\theta$ 를 변화시켰을 때의 고조파 특성을 그림 4(c)에 나타낸다.

그림 4(b)에서는 출력전압 파형의 반주기내 펄스가 1개였지만 펄스를 여러개로 분할하여 개개의 펄스폭을 제어함으로써 출력전압의 저차 고조파를 저감하는 제어방법으로 PWM(Pulse Width Modulation)이 있다.

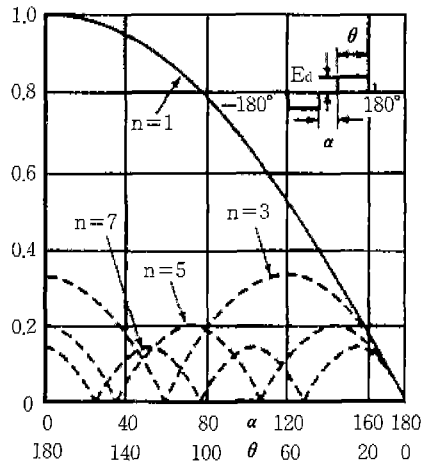


(a) 회로

그림 4 단상 인버터



(b) 출력전압 v의 파형



(c) 출력전압 v의 고조파 특성

그림 4 단상 인버터

### 5-2. 진상콘덴서 접속시 병렬공진 현상

전력변환장치 등의 고조파 발생기는 본질적으로 전류원으로 볼 수가 있고 발생한 고조파 전류는 전원측과 콘덴서 회로에 분류하게 된다. 여기서 n차 고조파의 경우 그 주파수가 n배이므로 각 속도도 n배가 된다. 따라서 유도성 리액턴스는  $j\omega L$  (L은 인덕턴스)로 구해지므로 n차 고조파에 대해서는 기본파에 대한 리액턴스의 n배되게 된다.

이것에 대해서 용량성 리액턴스는  $-j \frac{1}{\omega C}$  (C는 커패시턴스)이므로 n차 고조파에 대해서는 기본파에 대한 리액턴스의  $\frac{1}{n}$  배로 된다. 따라서, 고조파 전류의 분류회로는 그림 5와 같이 된다.

여기서, 전원측에 흐르는 n차 고조파전류  $I_{no}$  및 콘덴서 회로에 흐르는 n차 고조파전류  $I_{nc}$ 를

구하면 다음 식과 같이 된다.

$$I_{nc} = \frac{nX_o}{nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n \quad (1)$$

$$I_{no} = \frac{\frac{nX_L - X_c}{n}}{nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \quad (2)$$

이 때

$X_o$ : 전원의 기본파에 대한 리액턴스

$X_L$ : 직렬 리액턴스의 기본파에 대한 리액턴스

$X_c$ : 콘덴서의 기본파에 대한 리액턴스

이 식(1), (2)를  $n$ 차 조파에 대해서 생각하면 다음과 같다.

$$(1) \ nX_L - \frac{X_c}{n} > 0 \text{의 경우}$$

콘덴서 회로는 유도성 리액턴스가 되고  $n$ 차 고조파전류는 확대되지 않고

$|I_{nc}| < I_n, |I_{no}| < I_o$  이 된다.

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

콘덴서 회로는 직렬공진이 되고  $n$ 차 고조파전류는 전부 콘덴서 회로로 유입되며, 전원측에는 유출하지 않는다(다만 실제로는 회로의 저항이 있기 때문에 완전히 그렇게 되지는 않는다).

$$(3) \ nX_L - \frac{X_c}{n} \ll 0 \text{의 경우}$$

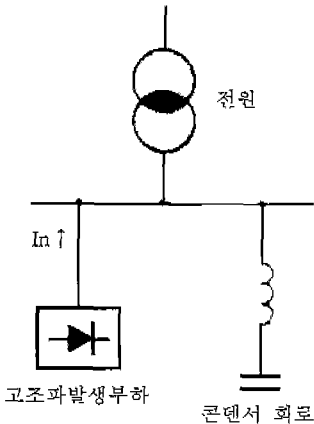
콘덴서 회로는 용량성으로서  $nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n})$ 는 음이 되어 이 전류가 전원계통에 유입,  $I_{no} > I_n$ 이 되고  $n$ 차 고조파전류는 확대된다.

$$(4) \ nX_o + (nX_L - \frac{X_c}{n}) = 0 \text{의 경우}$$

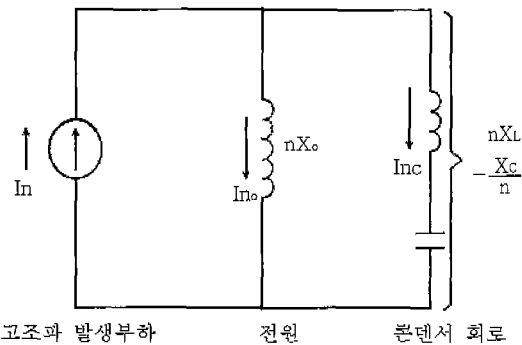
병렬공진에 즈음해서 고조파 전류의 이상확대를 일으켜 전압파형도 현저하게 일그러지며, 여러 가지 장애를 일으킨다.

여기서 고조파 전류의 분류 패턴에 대해서 정리하면 표 3과 같이 된다.

이와 같이 고조파의 확대를 억제하기 위해서 콘덴서 회로는 (1)의 패턴의 유도성 리액턴스로 해야 한다.



(a) 회로구성도



(b) 등가회로

그림 5 고조파 전류의 분류

### 5-3. 배전계통의 단락용량 증대시 고조파 발생이 억제되는 이유

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 과대한 전류가 흘러 기기의 과열, 소손이 발생할 우려가 있다.

그림 6은 공진현상을 일으키는 배전계통을 나타

표 3 고조파 전류의 분류 패턴

콘덴서 회로 패턴	콘덴서 회로의 리액턴스	전원의 상태	비 고
(1)	$nX_L - \frac{X_C}{n} > 0$	<p>발생원 전원 콘덴서 회로</p>	n차 조파에 대해서 콘덴서 회로는 유도성 리액턴스가 되며, 바람직한 패턴
(2)	$nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$	<p><math>I_{no} \approx 0</math></p>	콘덴서 회로는 직렬 공진회로가 되며, n차 조파전류는 전부 콘덴서 회로에 유입된다.
(3)	$nX_L - \frac{X_C}{n} < 0$		전원측에 유입하는 n차 조파전류가 확대되고, 모선증양의 왜곡이 증대된다.
(4)	$nX_o \approx  nX_L - \frac{X_C}{n} $		병렬공진이 되고, n차 조파는 극단적으로 확대되게 되므로, 절대로 피하지 않으면 안된다.

낸 것이다. 공진주파수  $f_r$ 은 단락회로의 인덕턴스를  $L_N$ 이라고 하면 (단락 리액턴스  $X_N = 2\pi f_r L_N$ )

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

여기서 배전전압을  $V$ 라고 하면 단락용량  $S_N$ 은

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

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

이므로

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

$$f_r = f_n \sqrt{\frac{S_N}{Q_N}} \text{로 구할 수 있다.}$$

따라서 전원의 단락용량이 증대하면 공진차수가 상승하여 부하의 고조파 발생량은 역비례하여 작아지고, 반대로 콘덴서 용량이 증대하면 공진차수

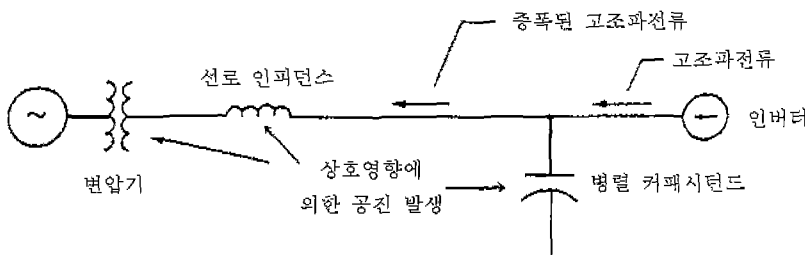


그림 6 배전계통의 공진현상



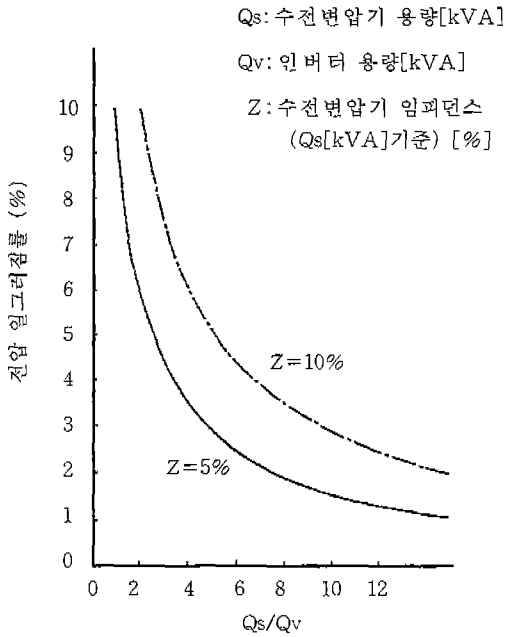


그림 7 단락용량과 고조파량과의 관계

가 저하하여 저차에서 고조파 발생량이 많아질 수 있다.

즉, 그림 7과 같이 단락용량과 고조파량과의 관계에서 보는 바와 같이 단락용량이 증대하면 전압 찌그러짐이 개선됨을 알 수 있다.

## 6. 고조파 억제대책

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 리액터의 (ACL, DCL)의 설치
- ② 콘덴서 설치 (고압측 또는 저압측)
- ③ 변환기의 다펄스화: 출력상수 증가 (정류기의 다상화)
- ④ PWM 컨버터 채용
- ⑤ 위상변위 : Phase Shift Tr. 설치
- ⑥ Filter 설치
  - 수동 Filter (Passive Filter)
  - 능동 Filter (Active Filter)
- ⑦ 계통분리, 고조파내량 증가, 단락용량의 증대
- ⑧ 기타

### 6-1. 리액터(ACL, DCL) 설치

그림 8과 같이 고조파 발생 부하장치의 1차측에 교류리액터(ACL)를 부착하여 전원의 Total 임피

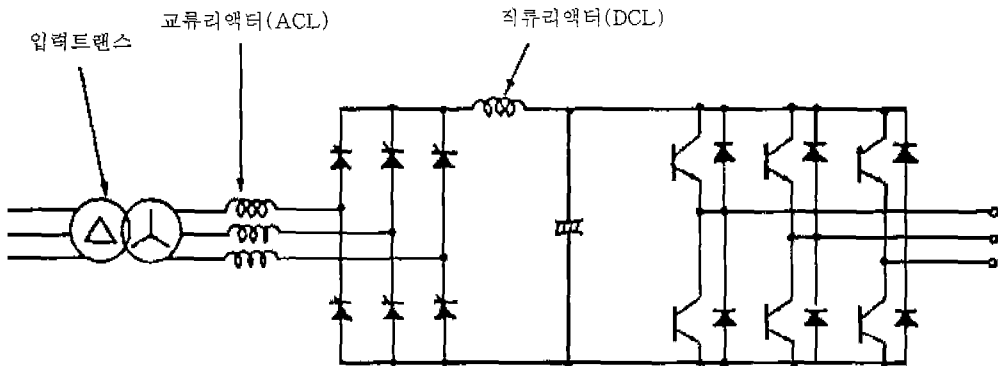


그림 8 ACL, DCL의 접속

던스를 크게 함으로써 전원 전류내에 포함되어있는 저차 고조파를 저감하거나, 또는 직류리액터(DCL)를 고조파 발생 부하장치의 직류회로에 삽입하여 직류파형의 리플을 작게하고, 리액터에 의한 한류작용으로 전류의 변화를 완만하게 하여 고조파를 저감시킬 수 있다. 3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파 전류 발생량은 표 4와 같으며, ACL이 있는 경우 고조파 발생량을 약 50% 저감하고 있고, 또한 DCL이 있는 경우는 없는 경우보다 고조파 발생량을 55% 이상 저감하고 있는 것을 알 수 있다.

표 4 3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파전류 발생량 (단 위 :%)

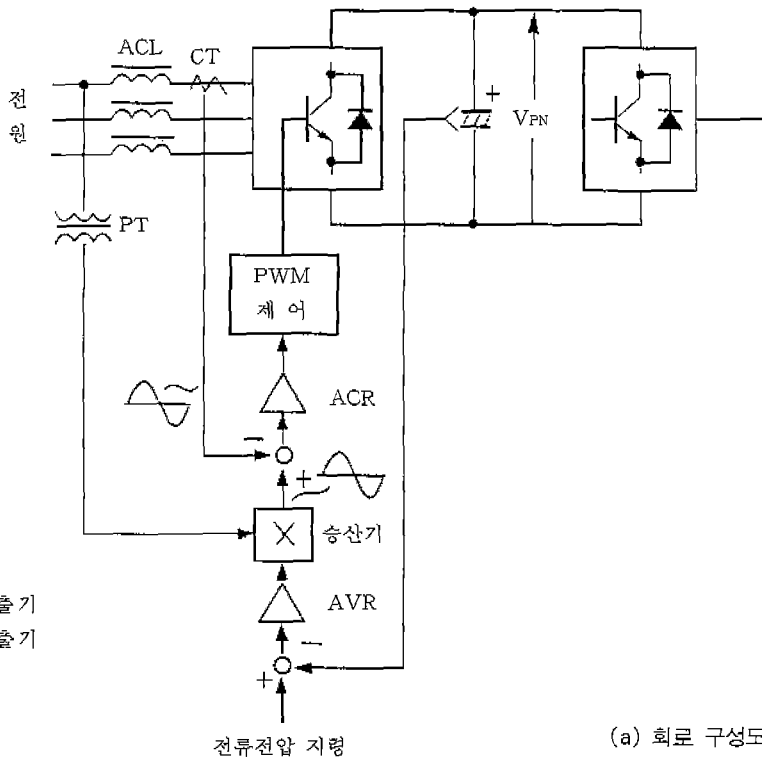
차 수	5	7	11
리액터없음	65	41	8.5
ACL	38	14.5	7.4
DCL	30	13	8.4
ACL,DCL	28	9.1	7.2

특히, 전원의 고조파를 왜형파 전류의 역률을 개선하는 데 스위칭 소자를 사용한 고역률 인버터(정현파 컨버터불이 인버터)가 있다. 그 주회로의 구성 예는 그림 9와 같으며, 컨버터의 주소자는 다이오드가 아니고 스위칭 소자이며 컨버터와 전원간에 교류 리액터 ACL이 접속된다.

컨버터 제어부는 크게 나누어 직류전압 제어부(AVR: 자동전압조정기)와 교류전류 제어부(ACR: 자동전류조정기) 및 PWM 제어부로 구성된다.

AVR에서는 직류전압 지령과 검출한 직류전압  $V_{FN}$ 이 모터의 역행, 회생 양 모드 어디서나 항상 일치하도록 전류지령을 보내고, 그 전류지령은 PT에서 검출한 전원전압과 곱해서 전원전압과 동 위상의 정현파상 순시전류 지령이 나온다. 그리고 컨버터의 입력전압이 지령전압이 되도록 스위칭 소자가 PWM 제어된다.

이상의 결과로 컨버터의 입력전류는 정현파상으로, 또한 전원전압과 동 위상, 즉 역률이 거의 1로



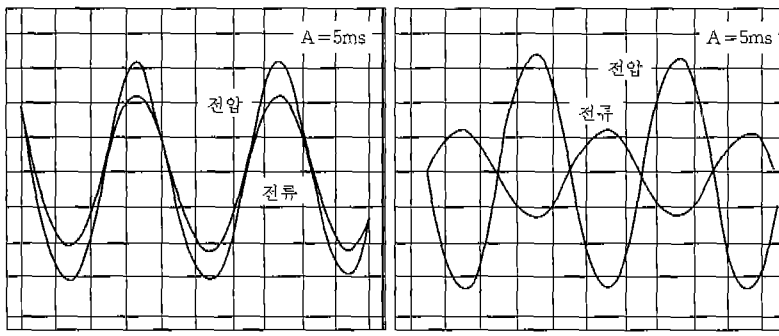
{ CT: 전류검출기  
PT: 저압검출기

그림 9 정현파 컨버터의 회로구성 예

제어되고, 또 그 입력전류의 크기는 직류전압이 일정해지도록 결정된다. 특히 회생운전시에는 직류전압이 상승하려 하기 때문에 그것을 일정하게 하는데 입력전류가 전원전압과는 역위상, 즉 역률이 -1로 제어되고 회생 에너지는 교류전원으로 되돌려진다. 이상과 같이 컨버터측을 PWM 제어함으로써 전원전류를 인버터의 출력전류 파형과 동일하게 정현파상으로 제어할 수 있다. 이 때문

에 전원전류의 저차 고조파를 대폭 저감할 수 있다. 이 저감효과는 입력측에 삽입되는 교류 리액터의 %임피던스에도 크게 좌우되지만 15~20%의 교류 리액터와 PWM 제어의 전류 리플 저감용 LC 필터를 삽입하면 전원전류의 저차 고조파를 전부 2% 이하로 억제할 수도 있다.<sup>45)</sup>

○ 다음호에 계속 됩니다

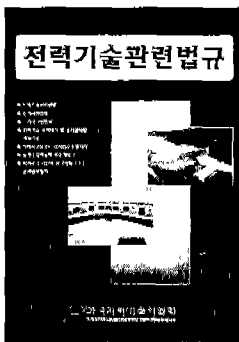


역행시의 전원전압 · 전류파형 예

회생시의 전원전압 · 전류파형 예

(b) 전원전압, 전류파형

그림 9 정현파 컨버터의 회로구성 예



최근 개정된 법령을 수록한 「전력기술관련법규」를 새롭게 재구성하여 12월말 예정으로 전국 각 지부와 본부에서 판매할 예정입니다.

- ▶ 정 가 : 18,000원
- ▶ 회원판매가(20% 할인) : 14,400원

▲ 위 사진은 개정전 책자임.