

전기설비에서의 고조파 대책 기술

유 상 봉 <용인송담대학 전기설비과 교수/
건축전기설비·발송배전·전기응용·
전기안전·소방설비기술사>

1. 머리말

최근 전력전자기술의 발전에 따라 Power Electronics를 이용한 기술이 다양화 되고, 그 응용 범위가 확대되어 FA 및 OA용, 정보통신용 전원으로 무정전 전원장치가 필수적으로 시설되고 있으며, 또한,省下 에너지를 위한 전동기 가변속 구동장치가 많이 채택되고 있다. 이러한 무정전 전원공급장치나 전동기 가변속 구동장치는 전력변환기인 인버터를 사용하게 되며, 이러한 인버터에는 교류를 직류로 변환하는 컨버터(정류장치)가 접속되어있다. 그런데, 이러한 컨버터는 고조파 전류의 발생원으로써 이 고조파 전류가 각 컨버터로부터 집적되어 그림1에 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 전압 파형은 왜형파가 된다. 이런 전압 찌그러짐은 각종 계전기 오동작, 정밀 전자기기의 동작 불량, 기기 손상 및 과열의 원인이 될 수 있다.

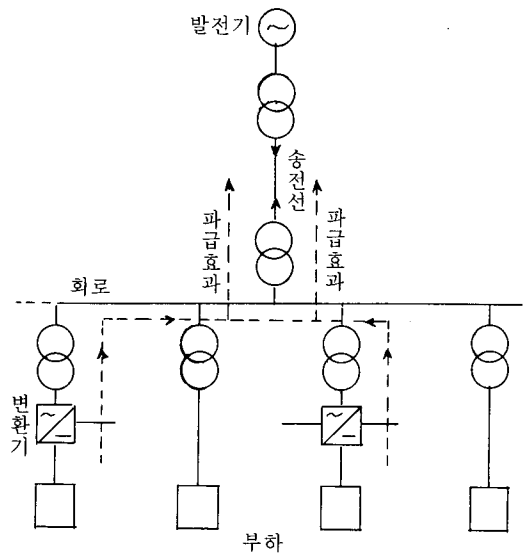


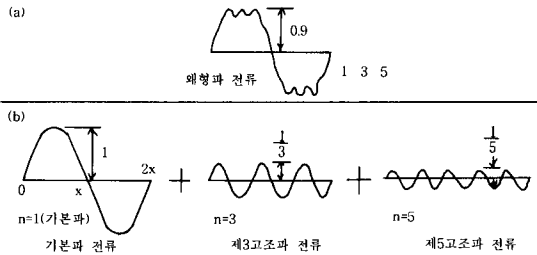
그림 1. 고조파 유출경로

2. 고조파의 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 2과 같이

기본파와 고조파로 분해해서 생각할 수 있다.

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



제 n 고조파 : 크기 1/n, 주파수 n배

그림 2. 왜형파 (기본파 + 고조파)의 예

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

$$\frac{\sqrt{\sum_{n \geq 2} V_n^2}}{V_1} \times 100 [\%]$$

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

$$\frac{I_n}{I_1} \times 100 [\%] \quad \text{또는} \quad \frac{V_n}{V_1} \times 100 [\%]$$

로 표시할 수 있다.

3. 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 전

자유도장해를 일으킨다. 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 가변주파수 장치 (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.

이상과 같은 고조파부하는 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.

특히 인버터가 고조파를 발생시키는 이유는 그림 3과 같이 가장 단순한 단상 인버터를 예를들어 설명하면 다음과 같다.

인버터부는 직류를 교류로 역변환하기 때문에 출력전압 파형은 구형상의 파형이 된다.

그림 3(a)의 회로가 출력하는 출력전압 파형이 그림 3(b)가 된다. 이것을 푸리에 급수 전개하면 (1)식이 얻어진다.

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

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

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

$$= -1^{(n-1)/2} \cdot \frac{4}{n\pi} \cdot \sin \frac{n\theta}{2} \cdot E_d \cdot \cos n\omega t \quad (2)$$

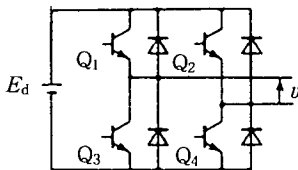
제n차 고조파의 실효값 V_n 은 (3)식과 같이 된다.

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

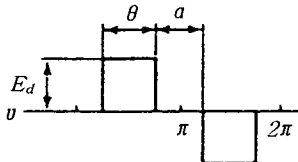
여기서, n은 홀수차

(3)식에서 θ 를 변화시켰을 때의 고조파 특성을 그림 3(c)에 나타낸다.

그림 3(b)에서는 출력전압 파형의 반주기내 펄스가 1개였지만 펄스를 여러개로 분할하여 개개의 펄스폭을 제어함으로써 출력전압의 저차 고조파를 저감하는 제어방법으로 PWM(Pulse Width Modulation)이 있다.

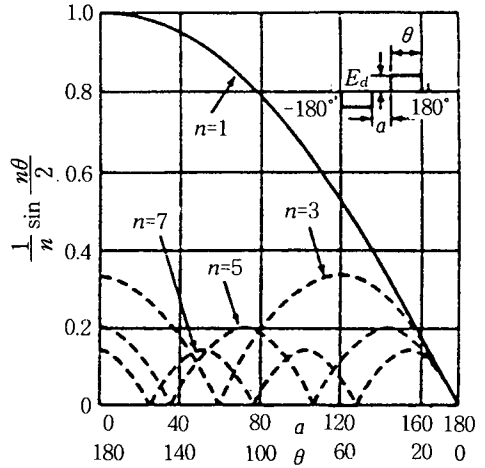


(a) 회로



θ : 도통각
a: 제어각

(b) 출력전압 v의 파형



(c) 출력전압 v의 고조파특성

그림 3. 단상인버터

4. 공진현상

4.1. 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 4는 공진현상을 일으키는 배전계통을 나타낸 것이다.

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

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

여기서 배전전압을 V라고 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

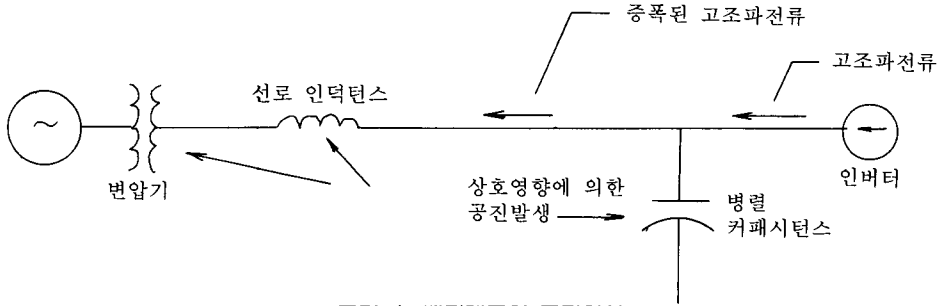


그림 4. 배전계통의 공진현상

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

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

로 구할 수 있다.

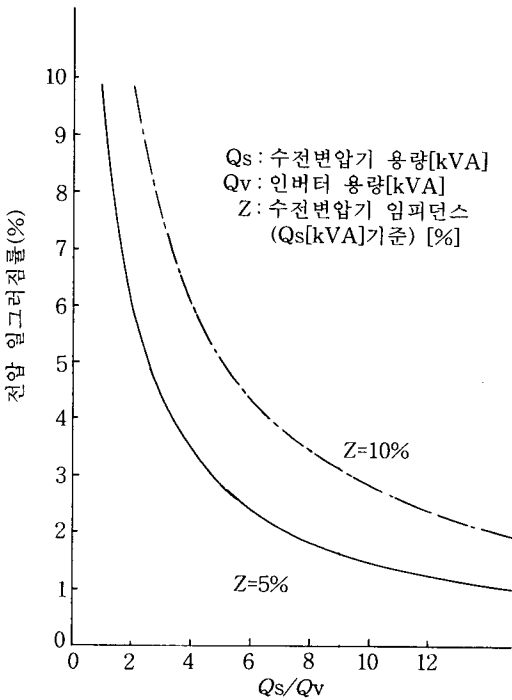


그림 5. 단락용량과 고조파량과의 관계

따라서 전원의 단락용량이 증대하면 공진차수가 상승하여 부하의 고조파 발생량은 역비례하여 작아

지고, 반대로 콘덴서 용량이 증대하면 공진차수가 저하하여 저차에서 고조파 발생량이 많아질 수 있다.

즉, 그림 5와 같이 단락용량과 고조파량과의 관계에서 보는 바와 같이 단락용량이 증대하면 전압 찌그러짐이 개선됨을 알 수 있다.

4.2. 병렬공진

전력변환장치 등의 고조파 발생기기는 본질적으로 전류원으로 볼 수가 있고 발생한 고조파 전류는 전원측과 콘덴서 회로에 분류하게 된다. 여기서 n차 고조파의 경우 그 주파수가 n배이므로 각속도도 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 6과 같이 된다.

여기서, 전원측에 흐르는 n차 고조파전류 I_{no} 및 콘덴서 회로에 흐르는 n차 고조파전류 I_{nc} 를 구하면 다음 식과 같이 된다.

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

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

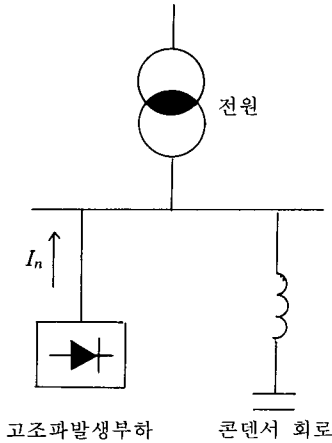
이때

X_O : 전원의 기본파에 대한 리액턴스

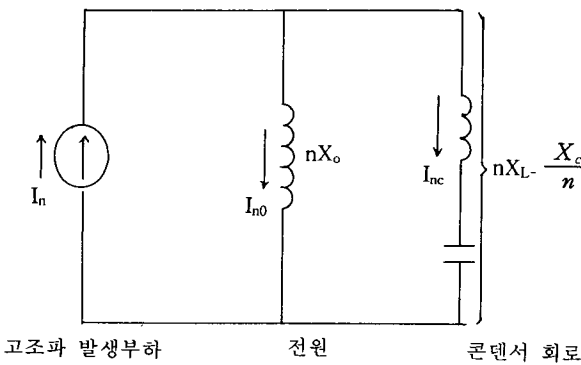
X_L : 직렬 리액턴스의 기본파에 대한 리액턴스

X_C : 콘덴서의 기본파에 대한 리액턴스

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



(a) 회로구성도



(b) 등가회로

그림 6. 고조파전류의 분류

(1) $nX_L - \frac{X_C}{n} > 0$ 의 경우

콘덴서 회로는 유도성 리액턴스가 되고 n 차 고조파전류는 확대되지 않고

$$|I_{nc}| < I_n, |I_{no}| < I_o$$

이 된다.

(2) $nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$ 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) $nX_L - \frac{X_C}{n} < 0$ 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) $nX_O + (nX_L - \frac{X_C}{n}) = 0$ 의 경우

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

여기서 고조파 전류의 분류 패턴에 대해서 정리하면 표1과 같이 된다.

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

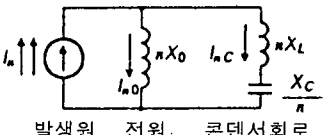
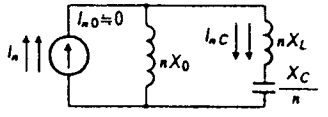
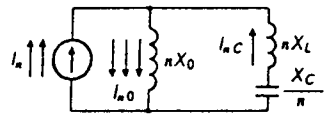
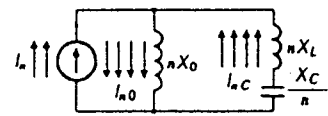
5. 고조파 영향

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

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

표 1. 고조파 전류의 분류 패턴

콘덴서 회로 패턴	콘덴서 회로의 리액턴스	전원회 상태	비 고
(1)	$nX_L - \frac{X_C}{n} > 0$	 발생원 전원. 콘덴서회로	n차 고조파에 대해서 콘덴서 회로는 유도성 리액턴스가 되며, 바람직한 패턴.
(2)	$nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$	 $I_{n0} = 0$	콘덴서 회로는 직렬 공진회로가 되며, n차 고조파전류는 전부 콘덴서 회로에 유입된다.
(3)	$nX_L - \frac{X_C}{n} < 0$		전원측에 유입하는 n차 고조파전류가 확대되고, 모선중상의 왜곡이 증대된다.
(4)	$nX_0 \approx nX_L - \frac{X_C}{n} $		병렬공진이 되고, n차 고조파는 극단적으로 확대되게 되므로 절대로 피하지 않으면 안된다.

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

다. 그리고 장해 내용은 소손, 이상음, 과열 등으로 되어 있다.

③ 이상 공진에 의한 고조파 과전압의 기기에의 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 2 는 고조파가 각종 전기기기에 미치는 영향의 내용에 대해 나타나 있으며,

일본에서 '91~'94년에 발생한 장해사례를 분석한 바에 의하면 발생 건수는 그림 7과 같이 압도적으로 콘덴서 및 직렬 리액터가 거의 90%를 차지하고 있

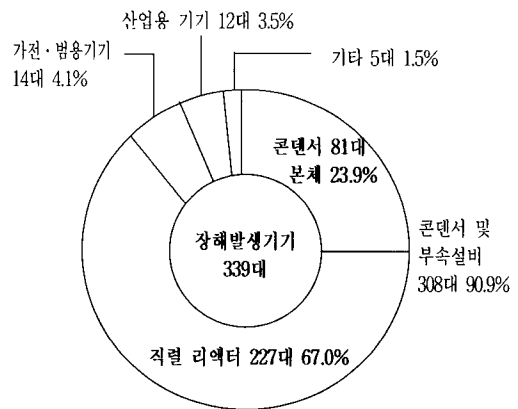


그림 7. 고조파 장해를 받은 기기

표 2. 고조파가 기기에 미치는 영향

가 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 역률개 선용 콘덴서나 초크코일 흐름에 따른 과열·소손
통신선	· 전자유도에 의한 잡음전압의 발생
유도 전동기	· 고조파 전류에 의한 정상 진동토크 발생에 의하여 회전수의 주기적변동 · 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

특히, 전력용콘덴서에서 중요한 것은 전원과 콘덴서회로의 임피던스가 고조파 전류에 의해 병렬공진을 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 충전전류에 고조파를 포함할 때 합성전류가 정격전류의 135%를 초과하지 않는 범위내에서 장기간 사용하여도 지장이 없어야 한다.

표 3. 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

6. 고조파 관리

6.1. 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 고조파전류의 한계를 등가방해전류(EDC)로서 규제하고 있다.

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

여기서, s_n : 통신 유도계수

i_n : 영상 고조파 전류

6.2. 고조파 제한 규정

1) 한전전기공급규정 (단위: %)

구 분	지중선로가 있는 S/S에서 공급		가공선로만 있는 S/S에서 공급	
	전압왜형률 [%]	등가방해전류 [A]	전압왜형률 [%]	등가방해전류 [A]
66KV이하	3	-	3	-
154KV이하	1.5	3.8	1.5	-

2) IEEE(IEEE 519) 기준

i) 고조파 전압 기준 (단위: %)

회 로 전 압	각 고조파성분의 최대	최대 종합왜형률 (THD)
69KV이하	3.0	5.0
115KV~161KV	1.5	2.5
161KV 이상	1.0	1.5

회 로 전 압	왜 형 율	각 차 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: %)

구 분	고조파차수	3	5	7	11	총 합
배 전 계 통 특 고 계 통	3	3.0	4.0	3.0	2.0	5.0
	5	2.0	2.5	1.5	1.5	3.0

7. 고조파 억제 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 2 종류로 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 위상변위 : Phase Shift Tr 설치
- ⑤ Filter 설치
 - 수동 Filter (Passive Filter)
 - 능동 Filter (Active Filter)
- ⑥ 계통분리, 고조파내량 증가, 단락용량의 증대
- ⑦ 기 타

7.1. 리액터(ACL, DCL) 설치

그림 8과 같이 고조파 발생 부하장치의 1차측에 ACL을 부착하여 전류 리액턴스를 크게하여 고조파 발생율을 저감하거나, 또는 DCL을 고조파 발생 부하 장치의 직류회로에 삽입하여 직류파형의 리플을 작게 하여 고조파 발생율을 저감할 수 있다. 3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파 전류 발생량은 표 3과 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.

7.2. 역률개선 콘덴서 설치

콘덴서는 역률개선의 목적으로 수변전설비에 설치되어 있는데 역률개선 콘덴서는 발생 고조파 전류를 분류시켜 유출전류를 억제한다. 역률개선 콘덴서는

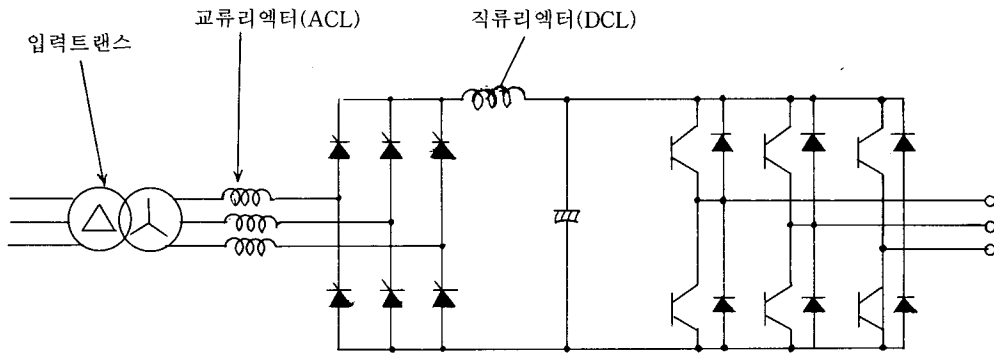


그림 8. ACL, DCL의 접속

리액터와 콘덴서가 직렬로 접속되어 있기 때문에 수동 필터의 특성을 가지고 있다.

특히, 고조파 발생 부하장치가 저압일 경우에는 고압측에 직렬리액터와 콘덴서를 설치하는 것보다 저압측에 직렬리액터와 콘덴서를 설치하는 경우가 효과가 크다.

표 3. 3상 브리지(콘덴서 평활)의 고조파전류 발생량

(단위 : %)

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

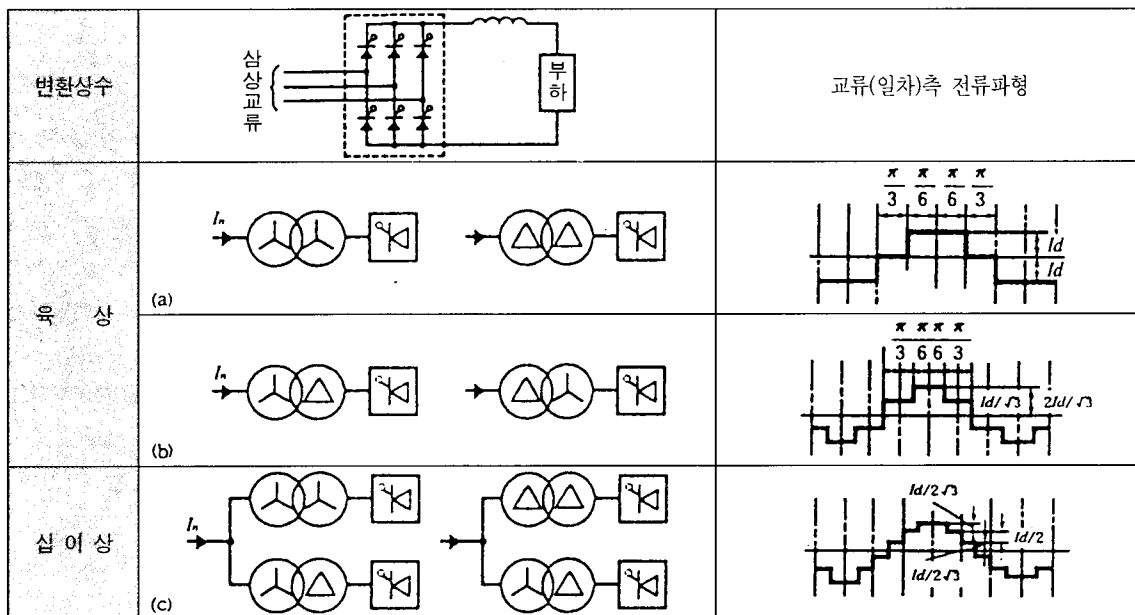


그림 9. 3상 정류기의 교류측 전류파형

7.3. 변환기의 다펄스화

펄스수는 정류기등의 변환장치에 있어서 「전원전압의 1 Cycle 중에 독립하여 생기는 전류(轉流: Commutation)의 수」로 정의하고 있으며, 실제에는 직류전압에 포함 되어있는 맥동 펄스의 수와 같다. 예를 들면 3상 브리지 접속의 펄스 수는 6이 되고, 이 펄스의 수가 커지면 교류 전류에 포함 되어있는 고조파 차수가 높게되고, 동시에 고조파 전류의 크기도 감소된다.

즉, $I_n = K_n \cdot \frac{I_1}{n}$ 에서 출력상수가 높으면 I_n 이

작아진다.

단, K_n : 고조파 저감계수

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

그림 9는 3상 브리지의 교류측 전류 파형을 나타낸 것으로 이중 12펄스 접속은 전압의 위상을 30° 차이하게 한 2대의 변환장치를 직류측에 직렬 또는 병렬로 접속 하였다. 이 경우 전압 위상을 30° 차이하게 하기 위해 변환기의 Δ-Δ, Δ-Y결선을 사용하고 있다. 고조파 발생차수는 $12m \pm 1$ 이 되고, 이론 고조파로서는 5, 7차 발생량은 0 이되나, 실제 고조파 측정시 어느 정도 약간 발생하고 있다. 3상 브리지의 경우 고조파 발생량은 표 4와 같으며 펄스수가 커질수록 고조파 발생율이 현저하게 저감되는 것을 알 수 있다.

표 4. 3상 브리지의 고조파전류 발생량

(단위 : %)

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

7.4. Phase Shift Tr. 설치

고조파는 불평형으로 나타나며 다음과 같이 불평형속에 포함된 고조파는 정상, 역상, 영상분으로 나뉘어진다.

Sequence	Harmonic Order					
정상	1	4	7	10	13
역상	2	5	8	11	14
영상	3	6	9	12	15

즉, 3고조파는 영상분고조파, 5고조파는 역상분고조파, 7고조파는 정상분고조파라 한다.

그림10은 전동기 속도제어(ASD : Adjust Speed Drive)의 예로서 Phase Shift Tr.을 설치하여 30° 위상차이를 주면 고조파도 고조파 차수와 상회전에 따라 변위된다. 이것을 Harmonic Shift라 한다. 제5고조파는 $5 \times 30^\circ = 150^\circ$ 고조파 변위(Harmonic Shift)되며 제7고조파는 $7 \times 30^\circ = 210^\circ$ 고조파 변위된다.

즉, 그림 11에서와 같이 제5고조파는 역상분고조파이므로 고조파변위 150° 에서 기본파 변위 30° 가 같은 상순이므로 합하여져서 180° 의 위상변위가 되며, 제 7고조파는 정상분고조파이므로 고조파변위 210° 에서 기본파변위 30° 가 반대방향이므로 그 차이가 180° 의 위상변위와 같은 값이 된다.

따라서, Phase Shift Tr.에 의하여 위상을 30° Shift시키면 5, 7고조파는 반대방향이 되어 서로 상쇄

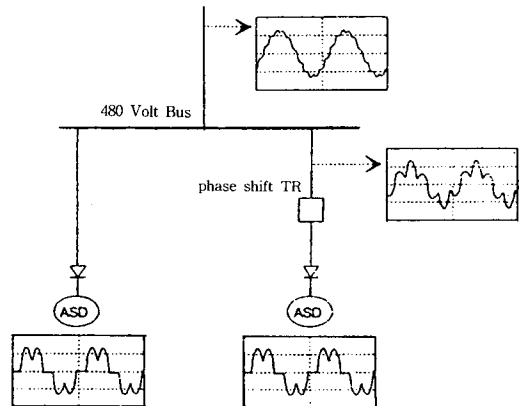
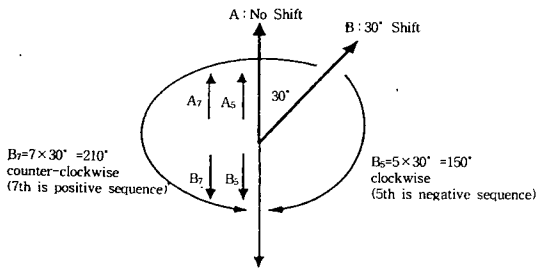


그림 10. 전동기 속도제어에 Phase Shift Tr 설치 예



RESULT: 5th harmonic in A opposes 5th in B
7th harmonic in A opposes 7th in B

그림 11. Phase Shift 개요

하게 된다. 기존의 계통은 새로 변압기를 교체하거나 삽입하는 것이 불가능하므로 Phase Shift Tr.을 삽입하여 인위적으로 위상변위를 줌으로써 고조파를 상쇄(Cancel)시킬 수 있다.

7.5. 수동 필터 설치

수동 Filter는 교류 Filter, L-C Filter, Passive Filter 라고 부르며 여기에는 그림 12 와 같이 동조 Filter와 고차수 Filter가 있다. L-C 필터의 기본적인 회로는 L과 C의 공진현상을 이용한 것으로 n차 고조파에서 $nX_L - \frac{X_C}{n} = 0$ 로 함으로서 n차 고조파

전류는 대부분 여기에 흡수되고, 유출전류를 저감시킬 수 있다.

- 동조 필터 (공진분로필터)

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

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

공진 주파수에서 $\omega_n^2 \cdot L_n \cdot C_n = 1$

$\therefore Z_n = R_n$ 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 0 이 되기때문에 순저항을 집어넣어 회로 전류를 제한하고 있다. 이때 순저항의 저항치는

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

단, Q : 공진의 첨예도로 통상 20~40로 구할 수 있다.

7.6. Active Filter (능동 필터) 설치

Active Filter는 수동 Filter와 같이 공진특성을 사용하지 않고, 인버터 응용기술에 의하여 역위상의 고조파를 발생시켜 고조파를 소거하기 위한 이상적인 Filter 이다. 그림 13 은 Active Filter의 접속도를 나타냈으며 그림 14 에 동작파형을 그려보았다.

그림과 같이 Active Filter는 고조파 발생부하와 병렬로 접속한 것으로, 부하전류 I_L 을 CT에서 검출하고, 부하전류에 포함된 고조파 전류성분 I_H 를 끄집

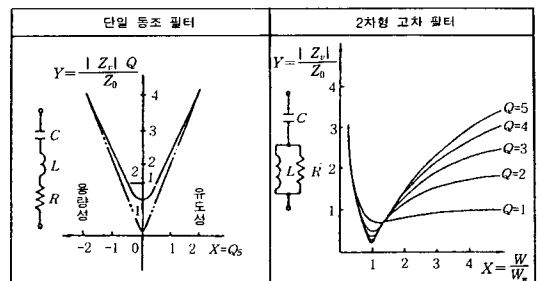
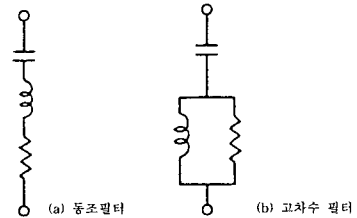


그림 12. 고조파 필터 특성

8. 고조파 부하에 따른 전력기기 용량 선정

8.1. 변압기 용량

그림 16과 같은 계통에서 고조파 부하가 많을 경우 고조파전류 중첩, 포피효과에 의한 저항 증가에 따라 I^2R 이 크게 증가하므로 용량을 크게 하거나 (2~2.5배) 발주시 "K-Factor"가 고려되도록 하여야 한다.

K-Factor란 비선형부하들에 의한 고조파의 영향에 대하여 변압기가 과열현상 없이 전원을 안정적으로 공급할 수 있는 능력으로 ANSI C57.110에 의하면 다음과 같다.

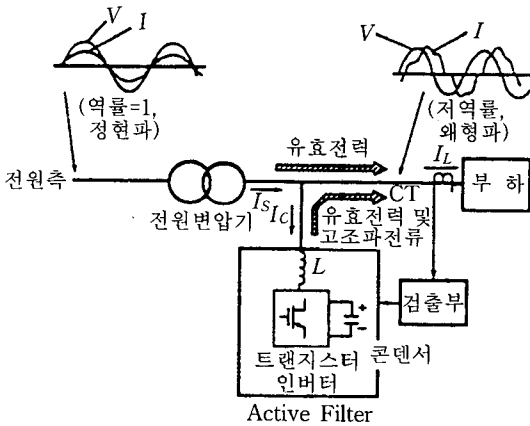


그림 13. Active Filter 접속도

어낸다. 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 전원전류 I_S 는 정현파가 되는 것이다.

7.7. 전원 단락 용량의 증대

부하의 고조파 발생량 I_n 은 고조파 전압 V_n 과 같이 비례하고 ($V_n = n \cdot X_L \cdot I_n$), 전원의 단락용량을 크게하면 역비례하여 작아진다.

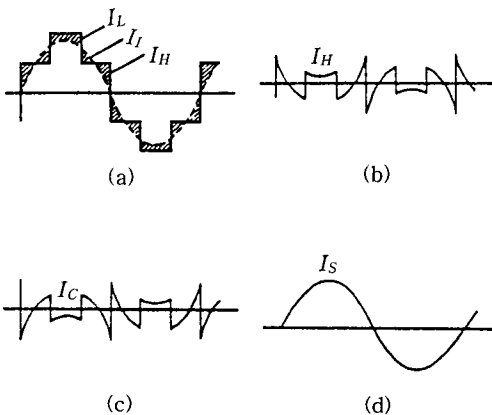
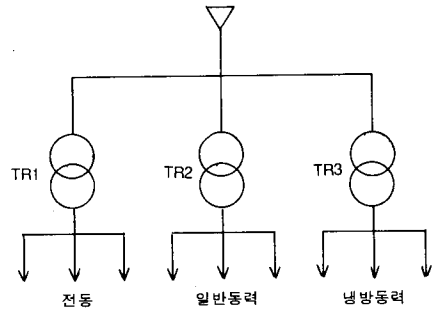


그림 14. 동작파형



각 변압기용량=각 설비용량의 합×수용률

그림 16. 수전계통

고조파 (h)	$I_h(\%)$	$I_h(\text{pu})$	$I_h(\text{pu})^2$	h^2	K-h factor = $I_h(\text{pu})^2 \cdot h^2$
1	100%	0.886	0.786	1	0.7855
3	37.6%	0.333	0.111	9	0.998
5	22.6%	0.200	0.040	25	1.000
7	16.1%	0.143	0.020	49	0.98
...
합 계	52.3%	52.3%	1.000		K-Factor 12.786

K	Typical Load Characteristics
1	Purely linear, no distortion
7	50% 3 phase nonlinear, 50% linear
13	3 phase nonlinear
20	Both single and 3 phase nonlinear
30	Purely single phase nonlinear

8.2. 발전기 용량

발전기에 고조파부하가 접속되면 발전기의 부하측에 고조파 전류원이 존재하는 것과 같기 때문에 발전기에 고조파 전류가 흐르고 고정자 권선, 제동권선 등의 손실을 증가시켜 전압파형을 왜곡시킨다.

발전기에 미치는 고조파의 영향은 고조파 전류에 의한 역상전류 때문에 발생하는 손실이 같다고 보고 등가역상전류(I_{2q})를 다음식과 같이 구할 수 있다.

역상전류가 15%를 초과한 경우는 정격출력을 얻을 수 없기 때문에 초과 출력에 선정하거나 필터 설치 등의 대책이 필요하다.

제작회사에 따라서는 등가역상전류 내량의 설계기준을 25%로 하는 경우도 있다.

등가역상전류 $I_{eq} =$

$$I_1 \times \sqrt{\{(I_{5f} + I_{7f}) \times 1.316\}^2 + \{(I_{11f} + I_{13f}) \times 1.56\}^2 + \dots}$$

여기서 I_1 : 기본파 전류, I_{5f} : 제5고조파 전류, I_{7f} : 제7고조파 전류

비상용 발전기에 고조파 부하가 있는 경우 필요용량 배수는 다음과 같다.

정류상수	IR : 정류회로 부하의 등가 역상전류(단, 정류회로 입력 KVA BASE)	IG : 발전기측 허용등가역상전류 (단, 발전기출력KVA BASE)		
		수소냉각 발전기 9%	공냉식 발전기 12%	다열발전기 15%~20%
		n=IR/IG : 고조파부하에 대응하는 최소 필요 발전기용량배수		
6	44.0 %	4.89	3.66	2.94~
12	19.6 %	2.17	1.63	1.3~1.0
18	13.4 %	1.49	1.11	1.0
24	10.3 %	1.14	1.0	1.0

9. 결 론

고조파 전류가 상한치를 초과하는 경우에는 고조파 유출 억제대책이 필요한데, 이러한 억제대책에는

- (1) 기기에서 고조파 전류 발생량을 억제
- (2) 고조파 발생원에서 다른 부하기기로 고조파 전류의 흐름억제

(3) 전력수용가 및 계통측에서의 대책 등 다각적인 고조파 대책이 필요하다.

특히, 반도체 응용기기, 아크로 등 특정설비를 가진 수용가는 전력계통측에 고조파전류가 방출되지 않도록 어떤 수준이하에서 관리하여야 할 필요가 있다.

또한, 고조파 유출전류의 저감효과는 크게 역률개선용 콘덴서 및 수동 Filter에 의한 흡수효과, Phase Shift Tr. 및 Active Filter에 의한 상쇄효과로 나눌 수 있다. 이러한 고조파 문제 해결은 기기제조사, 전력수용가, 전력회사의 상호 협력하에 종합적인 관리가 필요하며, 이런 측면에서 볼때 전력계통에서의 고조파 환경수준, 고조파 전류 억제목표값, 기기의 고조파 내량 수준등에 대한 목표값을 구체적으로 설정하여 엄격한 관리 및 지도, 개선이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

◆ 著 者 紹 介 ◆



유 상 봉 (庾相鳳)

1954년 10월 26일생. 1980년 부산대 전기공학과 졸업(학사). 1986년 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993년 ~ 1996년 기술사 5개부문 자격취득 (건축전기설비, 발송배전, 전기응용, 전기안전, 소방설비기술사). 1979년 ~ 1997년 쌍용양회공업(주), 쌍용엔지니어링(주) 근무. 1998년 ~ 현재 용인송담대학 산학협력처장·전기설비과 교수. 현재 당학회 편수위원.