

(上) 負荷電流, (下) 高調波電流

電力系統의 高調波對策

Harmonics in Power System

①

朴 鍾 根

서울대학교 電氣工學科·工學博士

1. 서 론

전력계통에서 고조파(高調波)에 의한 파형왜(波形歪)의 악화는 전력의 품질을 저하시키고 각종 사고 및 장애의 원인이 되고 있다. 최근 고조파 발생원인 Thyristor 응용기기 등의 증가 추세는 상기 문제를 더욱 가속화시킬 전망으로, 각 분야별 고조파 대책이 절실히 요구된다. 따라서 이러한 고조파 발생의 저감을 위하여는 발생기기 및 장애기기의 특성분석, 고조파 예측계산 프로그램을 이용한 계통의 고조파 분포현황 파악, 필터 설비 및 회로변경을 통한 발생량 저감, 고조파 허용 관리기준치의 적용으로 고조파 발생의 억제 등 적절한 대책이 필요하다.

예를 들면 계통의 부하에 정류기 등의 대용량 고조파 발생원이 신설될 경우, 설치후의 계통에 있어서 고조파 예측계산치가 기준치 이내인지를 관정하여 대책설비를 강구하는 방법 등이다. 본 장에서는 고조파에 대한 새로운 인식과 효과적인 대책을 위하여 서울대학교와 한전 기술연구

원이 공동 연구한 결과를 요약 수록하였다.

2. 고조파 발생원

2·1 고조파 발생원의 종류

고조파 발생원은 그 종류와 형태가 매우 다양한데, 현재까지 고조파 발생원으로 간주되고 있는 기기와 현재의 발전추세로 보아 장차 새로운 고조파 발생원으로 예상되는 기기중에서 대표적인 것을 열거하면 다음과 같다.

- ① 포화상태의 변압기
- ② 회전기의 슬롯, 공극(空隙) 등의 구조적인 불균일성
- ③ Arc 전기로 및 용접기
- ④ 콘버터, 사이클로콘버터 등의 정지형 전력 변환장치
- ⑤ 각종 전동기 제어장치 및 고효율 운전장치
- ⑥ 정지형 무효전력 보상기(S. V. C)
- ⑦ 직류고압송전(HVDC Transmission)

⑧ 직접 에너지 변환증가(태양열 발전, 연료전지 등)

⑨ TV 수상기의 다수분포

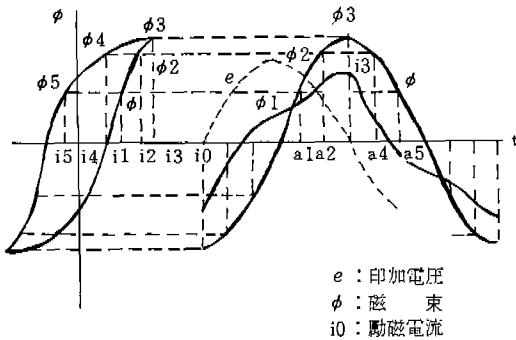
이러한 발생원은 크게 두가지로 이론 고조파와 비이론 고조파로 분류할 수 있는데, 이론 고조파는 Thyristor 등을 이용한 기기를 정상운전할 때 발생하는 고조파로서 대체로 ④~⑨의 기기가 해당된다. 비이론 고조파는 과도상태나 전원의 불평형 등으로 발생하는 이상(異常) 고조파로서 ①~③의 기기를 들 수 있다.

2.2 고조파 발생 메커니즘

2.2.1 변압기 회전기 등의 자기포화에 의한 발생

그림 2.1은 Hysteresis 현상이 있는 여자전류와 자속의 관계를 나타냈다. 여자전류는 변압기 등가회로의 여자 Admittance를 통하여 흐르는 전류인데, 철심여자전류의 비직선성과 Hysteresis 손(損), 전류손 때문에 파형은 찌그러지게 된다.

변압기의 여자전류는 기수차(奇數次)의 고조파를 함유하고 있으며 대부분 3, 5, 7 조파이다. 또한 고조파의 크기는 철심재료특성 및 운전시의 최대 자속밀도에 의해 결정된다. 실제 무부하시 전압변동에 따른 변압기 용량별 고조파 발생전류의 측정 시험결과는 표 2.1과 같았다.



<그림 2.1> Hysteresis 현상이 있는 여자전류와 자속

2.2.2 아크로에서 발생하는 고조파 전류

아크 로의 운전은 전극단의 단락 및 개방으로 전류는 불규칙한 동요를 반복하고 일반적으로 아크 로용 변압기 용량의 10~30% 정도의 제 3 조파를 주성분으로 한 고조파 전류가 발생한다.

2.2.3 정류기에서 발생하는 고조파

정류기가 이상적으로 동작하고 구형파 전류가 흐른다면 고조파전류는

$$I_n = \frac{1}{n} I_1$$

I_1 : 기본파전류
 I_n : n차 고조파 전류

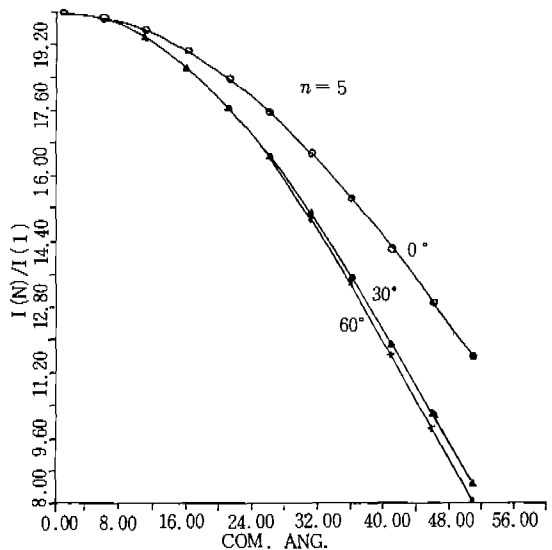
로 된다. 실제로는 제어각과 중복각이 변할 때 기본파에 대한 고조파 비율은 달라지게 되는데, 단상 Bridge Converter와 삼상 Bridge에 대하여 FFT(Fast Fourier Transform) Program 을 이용하여 구한 결과는 다음과 같다.

가. 단상 Bridge Converter

제어각(a)를 0°, 30°, 60°로 하고 중복각이 0°~50°까지 변할 때 각각의 경우에 대한 고조파 크기(7, 9조파)를 그래프로 나타낸 것이 그림 2.2, 2.3이다.

나. 삼상 Bridge Converter

제어각(a)를 0°, 10°, 60°로 하고 중복각이



<그림 2.2>

0°~50°까지 변할 때 각각의 경우에 대한 차수별 고조파 크기(7, 11조파)를 그림 2·4, 2·5에 나타냈다.

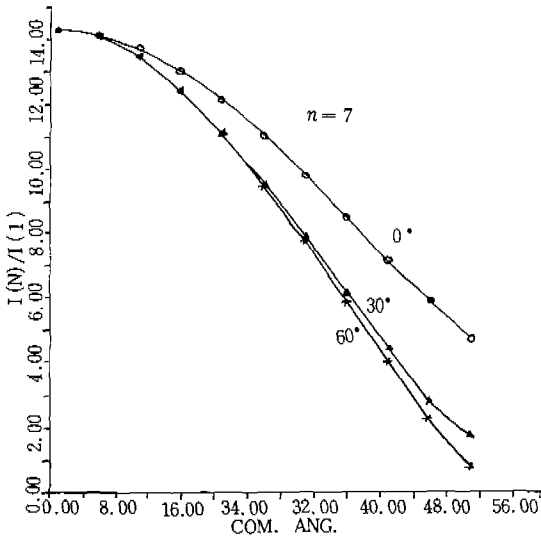
2·2·4 위상제어 회로를 갖는 Power Electronics

조명의 광량조정, 전열기의 열량조정 등 기타

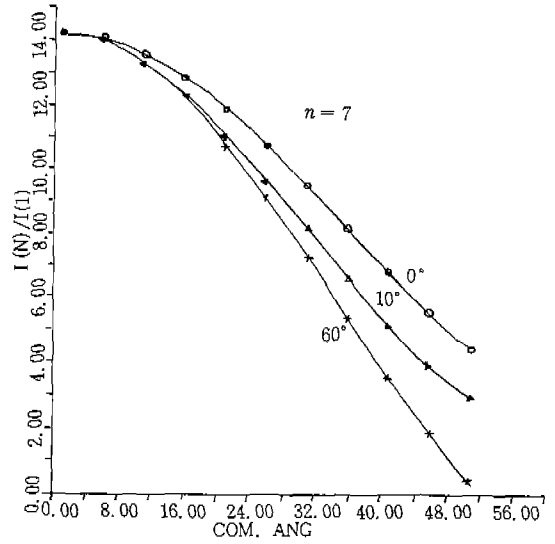
전력조정을 목적으로 Thyristor나 Power Transistor가 이용되는데, 이것은 위상제어를 하여 전류 도통구간을 조정하는 방법이다. 부하로서 저항을 이용한 경우의 출력전압, 전류파형과 제어각(a)와 고조파전류에 대한 계산결과를 그림 2·6에 나타냈다.

〈표 2·1〉 변압기의 고조파 발생 측정값

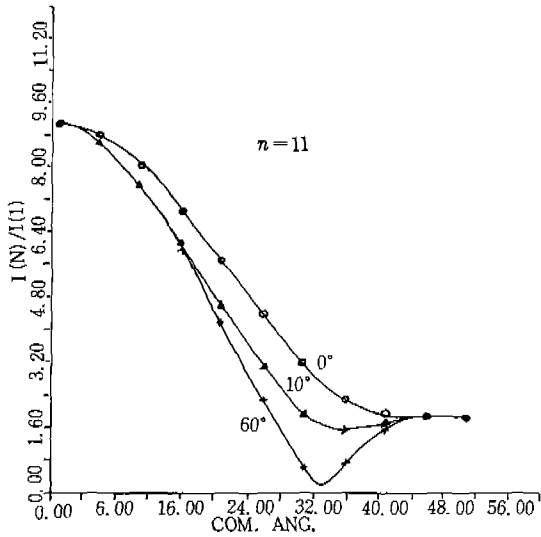
인가전압 정격전압	변압기종류 용량 차수	일 단 접 지 변 압 기 (22.9kV/230V)				특고절연변압기 (23kV/380V)
		20kVA	30kVA	50kVA	70kVA	200kVA
90%	기본파	0.271 (A)	0.331 (A)	0.509 (A)	0.661 (A)	5.21 (A)
	3	0.0616	0.062	0.0969	0.153	1.01
	5	0.0282	0.0197	0.035	0.0595	0.541
	7	0.0085	0.0059	0.0068	0.0136	0.195
95%	기본파	0.288	0.352	0.539	0.713	6.35
	3	0.0803	0.0824	0.126	0.213	1.15
	5	0.0379	0.0308	0.0454	0.0825	0.572
	7	0.0101	0.0096	0.0122	0.0307	0.188
100%	기본파	0.308	0.369	0.578	0.773	7.83
	3	0.107	0.103	0.166	0.286	1.34
	5	0.0533	0.043	0.0686	0.127	0.664
	7	0.0165	0.017	0.0211	0.0437	0.165
105%	기본파	0.334	0.392	0.624	0.865	10.2
	3	0.146	0.139	0.224	0.404	1.65
	5	0.0727	0.0604	0.0957	0.193	0.936
	7	0.0279	0.0211	0.0348	0.0791	0.143
110%	기본파	0.361	0.406	0.665	0.950	12.7
	3	0.184	0.166	0.278	0.510	1.78
	5	0.0996	0.0748	0.123	0.259	1.37
	7	0.0371	0.0319	0.0492	0.118	0.266
115%	기본파	0.427	0.460	0.749	0.21	16.5
	3	0.270	0.260	0.384	0.802	1.86
	5	0.147	0.132	0.189	0.446	2.17
	7	0.636	0.060	0.0816	0.225	0.438
120%	기본파	0.58	0.549	0.913	0.85	26.1
	3	0.437	0.385	0.573	0.43	2.24
	5	0.257	0.211	0.306	0.869	4.01
	7	0.126	0.105	0.150	0.479	0.549



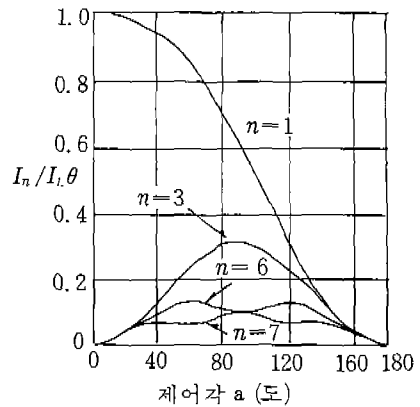
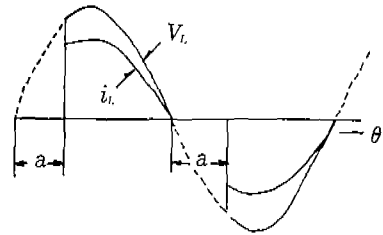
〈그림 2·3〉



〈그림 2·5〉



〈그림 2·4〉



〈그림 2·6〉 단상 전력조정기의 고조파 전류

악영향을 미치고 있다.

3. 고조파 장애를 받는 기기의 고조파 특성

2·2·5 기 타

최근 교류전동기의 주파수 제어에 의한 가변속 운전이 보급되어 전압형 인버터가 많이 이용되고 주파수 제어와 연동하여 행하여지는 전압 제어는 PWM 등이 이용되고 있다. 이때의 Carrier 주파수는 수 kHz이고 고차(高次)의 고조파가 계통으로 유입, 보조기나 계측기의 동작에

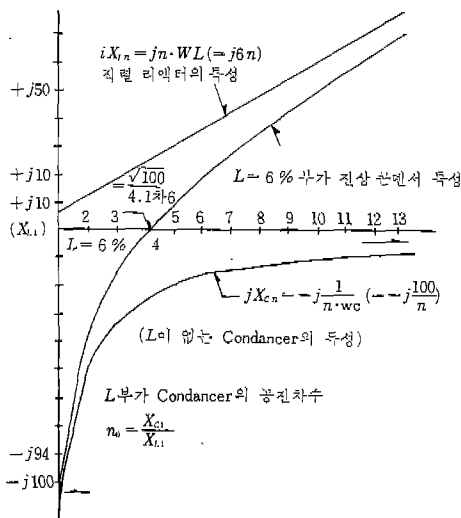
고조파전류의 영향을 받는 기기는 전력용 콘덴서설비, 제장설비, 계전설비, OA 기기 등 그 종류가 다양한데, 여기에서는 고조파 장애의 70% 이상을 차지하는 전력용 콘덴서 설비와 보호계전기의 고조파에 대한 특성을 살펴 본다.

3.1 진상 콘덴서의 Impedance 특성

진상 콘덴서는 기본파에 대하여는 용량성 Reactance이고 이 때문에 역률개선이 가능하지만 고조파에 대하여는 어떻게 되는가를 살펴 보기로 한다.

그림 3.1에서 C의 Reactance는 전주파수 영역에서 용량성(-)이고 직렬 리액터를 부가하면 L-C의 공진점(Reactance=0)을 경계로 공진점보다 고차(高次)에서는 유도성(+), 저차(低次)에서(-)의 Reactance로 된다. 한편 회로에(-)의 Impedance가 있으면 β (분류비) > 1로 고조파가 확대되고 해당회로의 Distortion이 확대되는데, 이것을 고조파 확대현상이라고 한다.

다시 말하면 L이 없는 콘덴서를 회로에 투입하면 Distortion은 투입전보다 크게 되고 L부가 콘덴서를 삽입하면 Distortion은 경감된다.



(그림 3.11) 진상 콘덴서의 Impedance 특성

이것을 직렬 리액터의 파형개선작용이라 한다. 진상 콘덴서가 L=6%의 리액터를 부가하는 것은 배전계통에 많이 존재하는 제 5조파에 대해 설비의 Reactance를 +로 하고 파형개선 효과를 얻기 위함이다. 또 교류 Filter는 제 5, 7조파 등의 주파수에서 Reactance=0로 될 수 있도록 직렬 리액터를 선정하는 것이고 (제 5조파 Filter는 L=4%, 제 7조파는 L=2.04), 아울러 역률개선 효과도 병행한다.

3.2 전력용 콘덴서의 운용상 유의점

전력용 콘덴서를 포함한 회로를 극히 단순화시켜 계통에서의 확대현상이 설명되지만 실제 계통은 매우 복잡하므로 여러가지 문제가 생길 위험이 있다.

고조파 검토시 고조파 저감책의 일환으로 콘덴서 설비상황을 포함한 계통조건의 변경에 대하여 고려해야 할 필요가 있고 이 경우 효과적인 저감책을 시행하기 위해서는 전력용 콘덴서 운용의 유의점을 잘 이해할 필요가 있다. 이하에서는 전력용 콘덴서 설비의 유의점과 회로조건 등에 대하여 기술하였다.

3.2.1 여러 개의 콘덴서를 병렬운전할 때

가. 유의점

직렬 리액터가 있는 콘덴서 설비와 직렬 리액터가 없는 콘덴서 설비가 섞여서 운전되고 있을 때는 직렬 리액터가 부가된 콘덴서 설비의 고조파 전류가 증가된다. 직렬 리액터가 부가된 콘덴서 설비를 증설하려면 직렬 리액터가 부가되지 않은 콘덴서 설비를 혼합설치하는 것이 좋다.

반대로 직렬 리액터가 부가되지 않은 콘덴서 설비를 증설하려면 직렬 리액터가 부가되어 이미 설치되어 있는 콘덴서 설비의 전류 한계량에 유의하여야 한다.

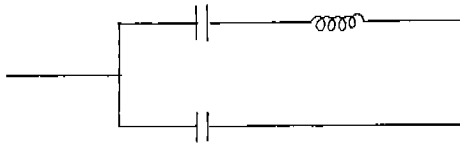
나. 회로의 조건

한 곳에 여러개의 콘덴서가 설치되어 있고 일부에만 직렬 리액터가 부가되어 있는 제 5조파의 임피던스는 다음과 같다.

$$Z_3 = \frac{-jX_L \left(5X_L - \frac{X_{CL}}{5} \right)}{5X_L - \left(\frac{X_{CL}}{5} + \frac{X_C}{5} \right)} \quad (3.1)$$

$$= \frac{-jX_C X_{CL} (\alpha - 4)}{5 \{ X_{CL} (\alpha - 4) - 4X_C \}}$$

$$\alpha = X_L / X_{CL} \times 100(\%)$$



(그림 3.2) 복수 콘덴서의 병렬운전

만약 다음의 경우를 만족하면 식 3.1은 유도성이 된다.

$$X_C / X_{CL} > (\alpha - 4) / 4 \rightarrow \frac{C}{C_L} < \frac{4}{\alpha - 4} \quad (3.2)$$

이 회로의 제 7 조파 임피던스를 구해 보면 식 3.3이 되고

$$Z_7 = \{ jX_C X_{CL} (\alpha - 100/49) / 7 \} / \{ X_{CL} (\alpha - 100/49) - 100/49 X_C \} \quad (3.3)$$

식 3.3이 식 3.4의 조건을 만족하면 식 3.1이 된다.

$$X_C / X_{CL} > (\alpha - 2.02) / 2.02$$

$$\therefore \frac{C}{C_L} < \frac{2.02}{\alpha - 2.02} \quad (3.4)$$

따라서 식 2.2, 2.4에서 6%의 직렬 리액터가 부가된 콘덴서 군에 직렬 리액터가 없는 콘덴서를 증설할 경우 $\alpha = 0.052$ (5.2%)가 되도록 콘덴서 설비를 설치하면 제 5 조파는 유도성이 되고 제 7 조파는 용량성이 되는데, 이 점을 검토할 필요가 있다.

3.2.2 콘덴서에 부가된 직렬 리액터의 용량을 변경할 때

가. 유의점

콘덴서 군의 일부가 제거되거나 다른 직렬 리액터와 조합하여 사용될 경우, 혹은 1대의 직

렬 리액터에 부가된 여러 개의 콘덴서 군을 가변 조정할 때 계통의 리액터와 예상밖의 공진현상을 일으킬 가능성이 있다.

나. 회로조건

(1) 콘덴서의 증설

6%의 직렬 리액터가 부가된 콘덴서에 콘덴서를 증설할 경우 상대적으로 콘덴서 부분의 리액턴스가 감소하고 리액터의 리액턴스가 증가한다.

(2) 콘덴서의 감소

리액터에 부가된 콘덴서의 용량이 감소하면 콘덴서 리액턴스의 %값이 증가한다. 따라서 6% 직렬 리액터가 부가된 콘덴서의 경우 계통에 존재하는 제 5 조파를 억제하는 능력을 잃는다. 직렬 리액터의 %치의 한계를 5%로 하면 변경가능한 용량은 식 3.6으로 주어진다.

$$X_L = \alpha X_{CL} = \alpha' X'_{CL}$$

$$\alpha = 6\%, \alpha' = 5\% \quad (3.5)$$

$$\frac{X_{CL}}{X'_{CL}} = \frac{Q'_{CL}}{Q_{CL}} = \frac{5}{6} = 0.83 \quad (3.6)$$

Q_{CL} : 처음의 용량

Q'_{CL} : 변경 가능한 용량

3.2.3 제 3 조파 발생원이 존재하는 경우

가. 유의점

6% 직렬 리액터를 부가한 커패시터에서도 제 3 조파에 대해서는 리액턴스가 용량성이기 때문에 계통정수에 의하면 3차에서 공진할 가능성이 있다. 따라서 아크로 등 제 3 조파 전류를 발생시키는 부하에 가까이 접속되어 있는 커패시터 설비는 커패시터 용량의 13%인 직렬 리액터를 설치해서 공진현상을 방지하는 대책이 필요하다.

나. 회로조건

제 3 조파에서 공진하는 직렬 리액터의 %는 $\sqrt{17}\alpha = 3.0$ 에서 $\alpha = 0.11$ (11%)이지만 일반적으로 여유를 두어 13% (공진주파수 2.8차)로 하고 있다.

(다음 호에 계속)