고조파란 무엇인가?

김 세 동
두원공과대학 교수/공학박사, 기술사

1. 머리말

근래에 들어 첨단기술의 발전과 아울러 고조파 발생원이라고 할 수 있는 각종 사이리스터 및 반도체 응용기기, 전력전자기술 응용기기의 사용이 증가하고 있다. 특히 가정에서 사용하고 있는 개인용컴퓨터를 비롯하여 오디오, 세탁기, 텔레비전, 비디오, 팩스 등의 기기에 이르기까지 거의 모든 가전제품은 교류전력을 그대로 사용하지 않고 직류로 변환하여 사용하거나 정현파의 일부를 사용하게 된다. 이와 같이 교류를 직류로 바꾸어 사용하는 과정에서 입력측의 전류가 크게 일그러져 있음을 알게 된다.

이와 같이 고조파성분이 발생하더라도 전기적인 장해가 없으면 상관없는데, 특히 산업용의 인버터장치, 직류전동기 속도제어장치 등은 사용전력이 매우 크기 때문에 그 파급효과도 크고, 이로 인하여 전기수용설비 측에서 고조파에 의한 각종 사고 및 장해 요인이 크게 증가하고 있는 것으로 알려지고 있다.

이에 따라 1990년대 중반부터 IEC를 중심으로 고조파 관리기준을 제정, 적용하고 있고 일본에서도 고조파 유출억제를 위한 가이드라인을 설정하여 적극 보급하고 있다. 그러나 국내에서는 아직도 고조파에 대한 관리기준이 없는 실정으로 전기사용장소에서의 고조파 발생원을 규명하고 부하기기에 미치는 영향과 전력계통에 미치는 영향, 현장에서의 관리 기준 및 해결할 수 있는 다양한 접근 방법 등을 보다 체계적으로 연구하여야 한다고 사료된다.

본고에서는 현장에서 일하고 있는 전기기술자를 위해 사이리스터 변환장치의 결점과 고조파의 개념 및 발생원리 등 고조파에 관한 기초적인 사항에 대해서 알아보고자 한다.

2. 고조파의 개념

우리 나라에서 사용하고 있는 교류 주파수는 60Hz이나 유럽에서는 50Hz를 사용하고 있다. 이와 같이 기본이 되는 주파수를 기본파 또는 기본주파수라고 한다. 고조파는 기본주파수에 대해 2배, 3배, 4배와 같이 정수의 배에 해당하는 물리적 전기량을 말한다. 즉 우리 나라의 경우 제2고조파는 120Hz, 제3고조파는 180Hz의 주파수를 갖는다.

지금까지 우리는 교류회로에서 전압과 전류를 취급할 때 모두 정현파 60Hz 교류만을 취급해 왔으나, 실제 교류의 전압이나 전류의 파형은 반드시 정현파라고 할 수

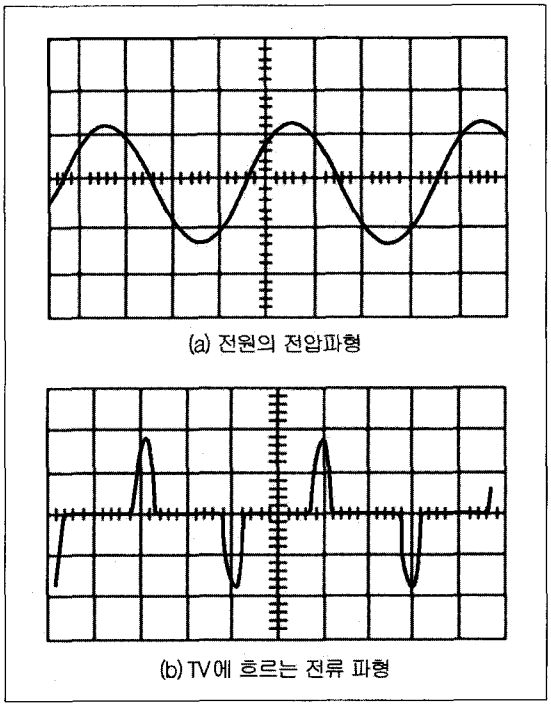
없다. 예를 들면 교류발전기의 파형은 될 수 있으면 정현파가 되도록 설계하지만 전기자반작용, 기타의 영향으로 정현파형에서 약간 벗어나고 있다.

또 공급되는 전압이 정현파형이라 하더라도 부하에서 소모되는 전류파형이 정현파가 아닌 경우도 있다. 예를 들면 변압기의 여자전류는 자기포화와 히스테리시스 현상에 의하여 비틀린 파형이 되며, 형광등의 관전압과 전류는 아크의 부특성에 의하여 파형이 일그러진다. 또 정류회로의 전류파형이나 전기통신에 있어서 신호파형도 찌그러지는 예가 있다. 이와 같이 정현파가 아닌 파형을 「왜형파(distorted wave) 또는 왜곡파형」이라 한다.

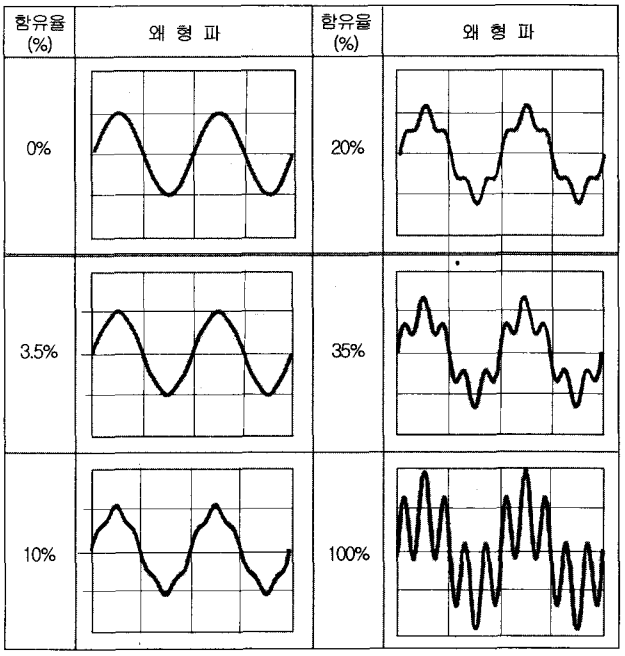
고조파를 영문으로 'Harmonic'이라고 하는데, 일반적 의미로는 '음악적인, 화합의' 뜻을 나타내는데 반해, 전기에서는 '조파'를 의미한다. 이 고조파는 안정된 정현파가 일그러진 것으로서 별로 반갑지 않은 느낌을 갖게 된다.

일본공업규격 JIS Z 8106에 의하면, 고조파는 '주기적 복합파의 각 합성 중, 기본파 이외의 것을 말하며, 제2고조파는 기본파의 2배의 주파수를 가지는 것'을 말하고 있는 것으로 규정하고 있다.

그림 1의 (a)는 전력회사가 공급하고 있는 전압파형(60Hz)을 나타낸 것이고, 그림 (b)는 그것에 접속된 TV에 흐르는 전류파형을 보여주고 있다. 우선 그림 (b)를 보면 전력회사가 공급하고 있는 사인파 전압과 다른 파형인 것을 알 수 있다. 이 파형을 왜형파 즉, 왜곡파형이라고 한다. 이와 같이 주기적으로 연속하고 있는 왜형파는 전력회사의 공급전압과 동일한 주파수 성분(60Hz)과 그 정수배의 주파수 성분(60Hz×nHz)의 합성으로 표현된다. 이 중 60Hz의 주파수 성분을 기본파, 그 이외의 주파수 성분을 고조파라고 한다. 고조파가 많으면 많을수록 파형은 사인파와 달라진다. 그림 (b)의 파형은 사인파와 형태가 상당히 다르기 때문에 많은 고조파를 포함하고 있는 것을 알 수 있다. 참고로 그림 2는 고조파의 함유율과 파형의 찌그러짐의 예를 보여주고 있다.



〈그림 1〉 전원 전압파형과 고조파를 함유한 전류파형



〈그림 2〉 고조파를 함유한 파형의 찌그러짐의 예

3. 왜형파의 표시법과 퓨리에 급수

그림 3에 왜형파 전압원의 등가회로 및 파형 합성 과정에 대한 원리를 보여준다. 각 고조파 전압원은 내부에 등가적으로 2개 이상의 전압원을 갖고 있으며 이는 모두 정현파 전압원이지만 서로 주파수가 다르며 직렬로 연결되어 있다. 기본파에 3배 및 5배 주파수를 갖는 고조파가 함유될 경우 그 합성 파형은 각각 그림 3과 같이 되며, 이는 정현파에서 크게 찌그러진 형태이다.

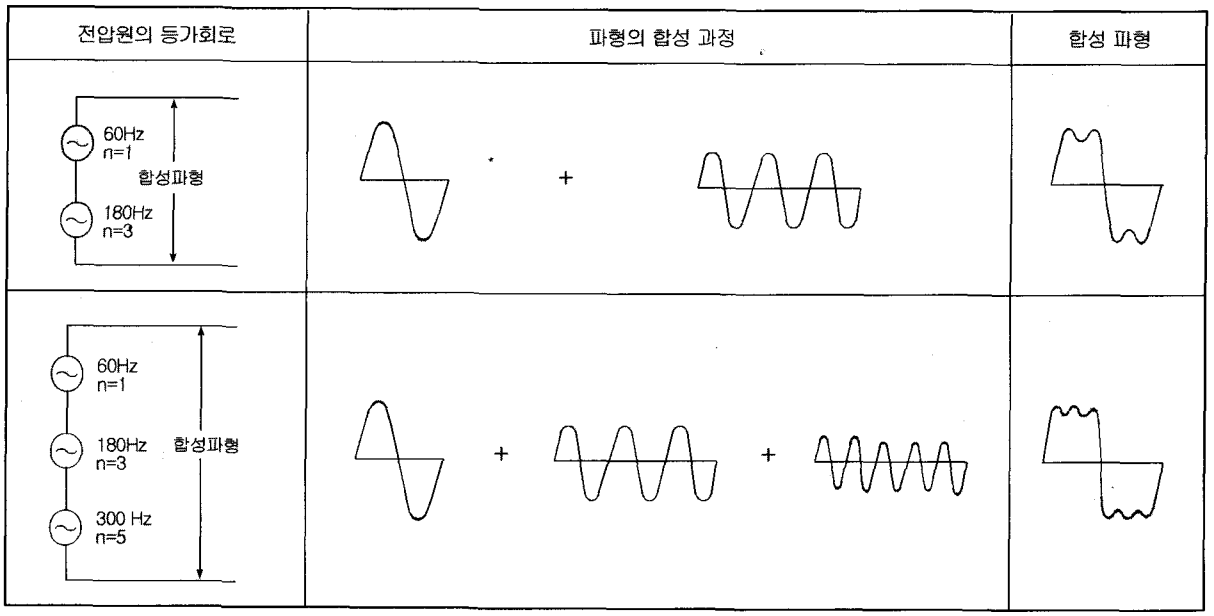
이를 다시 말하면, 왜형파는 하나의 기본파와 그 정수배의 주파수를 갖는 고조파로 분해할 수 있으며, 이것이 퓨리에(Fourier)급수의 기본 개념이다. 즉, 주기적으로 반복하는 임의의 왜형파를 sine 및 cosine항을 갖는 기본파와 그의 충분한 수의 고조파의 합으로 표현하는 것이다.

예를 들면, 구형파는 정현파에 비해서 파형은 전혀 다르지만, 이것도 기본파와 고조파의 합성에 의해서 얻을 수 있다. 파고치 A인 구형파를 퓨리에 급수로 전개하면 식(1)과 같다.

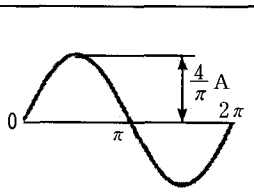
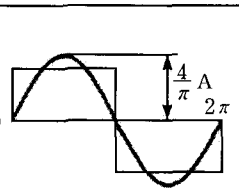
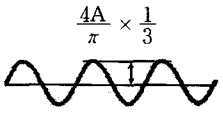
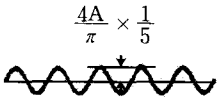
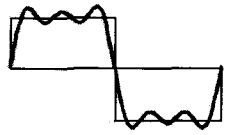
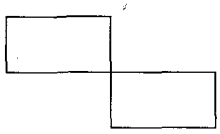
$$F=\frac{4A}{\pi}\left[\sin\omega t+\frac{1}{3}\sin 3\omega t+\frac{1}{5}\sin 5\omega t+\cdots\right]\cdots\cdots(1)$$

파고치가 $4A/\pi$ 인 기본파와 그리고 기본파에 대한 파고치가 1/3, 1/5, …인 기수배의 주파수를 갖는 고조파가 합성된 것임을 알 수 있다. 이것을 그림으로 나타내면 그림 4와 같다.

우리 나라의 송전계통은 60Hz의 상용주파수로서 운용하고 있으나 실제 전압, 전류파형은 정확한 정현파가 되지 않고 왜형파로 나타나고 있다. 이와 같은 파형도 하나의 기본파와 복수의 고조파가 합성된 것이다. 일반적으로 왜형파는 무한개의 고조파를 포함하고 있고, 고차일수록 그 함유율은 감소한다. 전력계통에 있어서 고조파의 대상이 되는 주파수 범위는 제40~50차(약 3kHz) 정도까지를 말한다.



〈그림 3〉 왜형파 전압원의 등가회로와 파형 합성

n	제 n차 고조파 성분	제 n차 까지의 합성파형	계산식
1			$\frac{4A}{\pi}\sin\omega t$
3		(1+3)	$\frac{4A}{\pi}(\sin\omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3})$
5		 (1+3+5)	$\frac{4A}{\pi}(\sin\omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5})$
∞		 (1+3+5+…)	$\frac{4A}{\pi}(\sin\omega t + \frac{\sin 3\omega t}{3} + \frac{\sin 5\omega t}{5} + \cdots)$

〈그림 4〉 구형파의 고조파 성분

4. 사이리스터 변환장치의 특성과 고조파 발생원리

사이리스터 및 전력전자 등과 같은 전력용 반도체 소자의 응용 제품은 전력을 이용하는 산업 뿐만이 아니고 전력공급 분야에 있어서도 널리 사용되는데, 장치용량도 수백 VA로부터 수십~수백 MVA의 대용량장치에 이르기까지 여러 가지의 것이 제작되고 있으며 산업발전에 큰 공헌을 하고 있다.

이와 같은 사이리스터 응용기기는 다음과 같은 장점을 가지고 있기 때문에 널리 사용되고 있다.

첫째, 가동부가 없는 정지형 변환장치이며 제어하기 쉽고 고도의 기능을 가진 장치이다.

둘째, 효율이 높은 변환장치이며 수명이 반영구적이고 고장이 적다.

셋째, 소형, 콤팩트하여 설치상의 제약이 적고 운전보수가 용이하며 소자와 응용기술의 진보에 의하여 가격이 저렴한 장점이 있다.

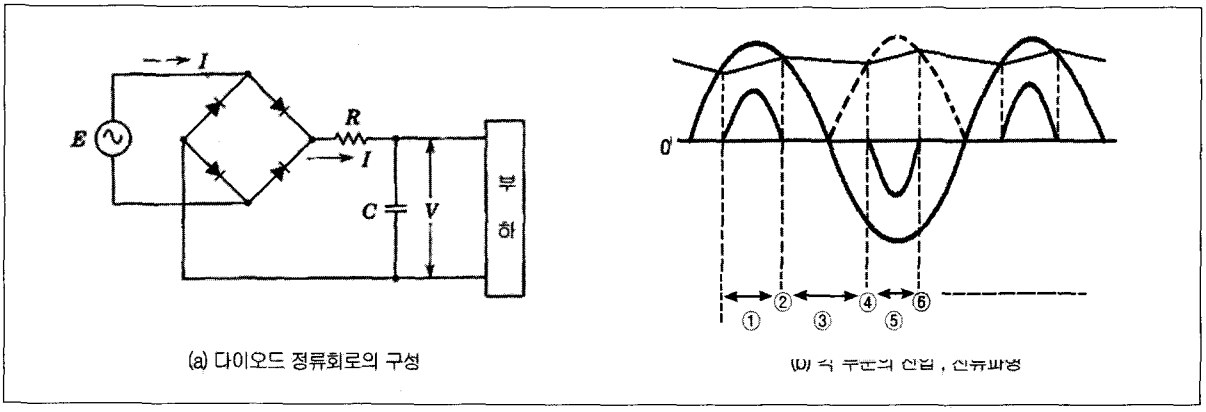
이상과 같이 사이리스터 응용기기는 종래의 기계적 장치에 비해서 제어가 용이하고 효율이 높을 뿐만 아니라 가격, 크기 및 보수유지 면에서 우수하기 때문에 직류를 사용하는 분야에서는 많이 사용되고 있다.

그러나 사이리스터 변환장치의 유일한 결점이라고 할 수 있는 고조파 발생에 대한 문제가 있으며, 이로 인해서 교류 전원 계통의 역률 저하가 문제된다.

사이리스터 변환장치는 사이리스터의 스위칭 작용을 이용하여 전압, 전류, 전력 등을 조정하는 장치이기 때문에 일반적으로 입출력의 전압, 전류에는 고조파 성분이 포함된다.

즉, 전원회로에 반도체 정류소자를 이용한 경우나 변압기, 형광램프 등의 기기는 정현파 전압을 인가한 경우에도 실제 회로에 흐르는 전류는 왜곡파형이 되는 경우가 많다.

그림 5에 TV 등에 주로 사용되고 있는 콘덴서 입력용



(a) 다이오드 정류회로의 구성

(b) 각 부분의 전압, 전류파형

〈그림 5〉 고조파전류의 발생 원리

다이오드 정류회로의 구성과 이 회로에 걸리는 전압, 전류 파형을 나타낸다. 이 회로의 사용목적은 간단히 교류를 직류로 변환할 수 있는 것이다. 즉, 그림 (a)와 같은 전파정류회로에서 정류 출력으로서 직류전압 V를 얻기 위해서는 전원전압 E의 피크 부분에서만 전류를 흘려서 콘덴서에 전하를 충전하기 때문에 전원전류 I는 그림 (b)에서와 같이 펄스 형태의 파형으로서 고조파 성분을 많이 함유한 파형이 된다.

그림 (b)의 회로의 동작은 다음과 같다.

① 전원전압이 회로에 가해지면 부하 및 평활콘덴서에 전류가 흐른다.

② 전원전압이 파고값 부분을 초과하여 작아지면 전원전압과 콘덴서 전압이 동등해지고 전류가 흐르지 않게 된다.

③ 콘덴서 전압이 전원전압을 초과하기 때문에 부하에는 전원이 아닌 콘덴서에서 전류가 흐른다(전원으로부터의 전류는 제로)

④ 콘덴서에서 전류를 공급하고 있기 때문에 콘덴서 전압이 내려간다. 한편, 전원전압은 점차 커지며 다시 콘덴서 전압과 동등해진다.

⑤ 전원전압은 다시 커지고 재차 부하 및 평활콘덴서로 전류가 흐른다(①과 동일)

⑥ ②와 동일하다.

이와 같이 전류가 흐르며, 부하측에는 거의 일정한 전압(직류전압)이 가해진다.

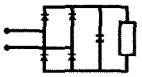
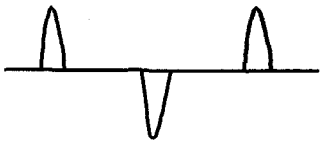
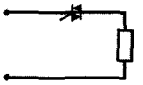
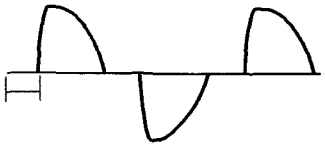
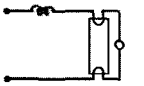
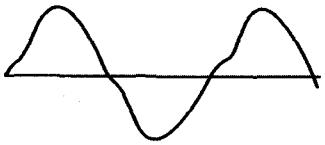
그래서 그림 5와 같이 전원전압의 위상에 따라 전원으로부터 전류가 흐르고 있는 상태와, 흐르고 있지 않은 상태가 반복된다.

이와 같은 전류파형에는 고조파 성분이 많이 포함되어 있고 부하기기에서 고조파 전류가 유출하고 있다고 볼 수 있다. 즉, 사이리스터의 전력변환장치에서 발생하는 교류측 특성의 고조파 전류의 값은 사이리스터의 위상제어각 α와 전류 중첩값 U에 의해서 결정된다.

또한 사이리스터 장치의 용량이 큰 경우에는 여러 개의 정류회로를 조합해서 다상정류회로를 구성하는 경우가 많은데, 이 경우에는 각각의 차고조파 전류값 I_n과 조합시킨 다상전류회로의 교류측 기본파 I_1의 비 I_n/I_1를 구할 수 있다.

반도체를 사용한 기기는 단상 · 3상에 관계없이 부하에 흐르는 전류를 제어한다. 즉, 고조파 발생원이다.

그림 6은 가정에서 사용하고 있는 가전기기의 전류 왜곡률 발생 현황을 나타낸 것이며, 일반적으로 반파 정류회로로서 평활용 캐패시터가 없는 경우(예, 전자오븐, 전자레인지)의 전류의 왜곡률은 20~40%, 브리지 전파정

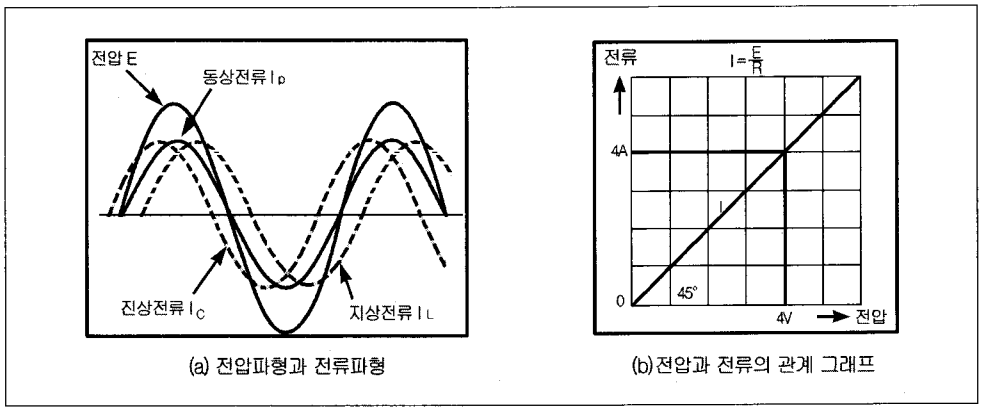
전원회로	전류파형	대표적 기기	전류의 왜곡률(%)
		전자오븐 전자레인지	20~40
		TV 수상기 라디오 카세트 스트레오 앰프	40~110
		전기담요 조광기 (백열등)	0~110
		형광등	약 10

〈그림 6〉 가전기기의 전류 왜곡률

류 회로로서 평활용 캐패시터가 있는 경우(TV수상기, 라디오, 카세트 등)의 전류 왜곡률은 40~110%, SCR 또는 TRIAC 등의 소자를 이용하여 교류 양방향의 위상을 제어하는 형태(예, 전기 담요, 조광기) 등의 전류 왜곡률이 0~110% 발생하고 있다.

이상과 같은 부하는 그 자체의 성질상 전원으로부터 왜형파 전류를 소모하므로 계통 전체에 대해서 고조파 전류원으로 동작하여 계통내를 순환하는 고조파전류를 흘리거나 계통내의 전압파형을 찌그러뜨려서 다른 기기에 영향을 준다.

즉, 이상과 같은 부하로부터 발생하는 고조파 전류는 수용가의 수변전설비에 흘러 전력계통에 유출하게 된다. 따라서, 사이리스터 응용기기의 보급에 따라서 발생되는 고조파가 전력계통에 접속된 다른 부하나 주변의 전자기기 또는 통신과 신호선 등에 미치는 영향도 고려해야 할 것이다.



(a) 전압파형과 전류파형 (b) 전압과 전류의 관계 그래프

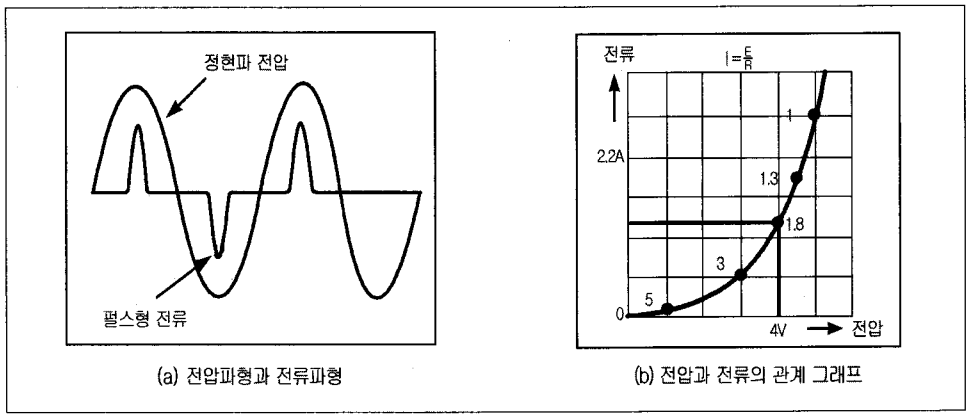
〈그림 7〉 선형부하의 특성

5. 고조파발생원인 비선형 부하의 특성

일반적으로 상용전압과 부하전류 파형 사이의 관계가 직선상인 경우의 부하를 선형부하(Linear Load)라 하며 그림 7과 같다. 즉 전류파형은 전압파형과 동일한 형태이다. 이러한 경우 정현파 전압은 정현파 전류를 만들며, R-L-C로 구성된 부하를 말한다.

반면에 상용전압과 전류파형 사이의 관계가 비직선상인 경우를 비선형 부하(Nonlinear Load)라 하며, 정류회로를 갖는 부하가 해당된다. 4항에서 설명한 바와 같이 정현파 전압과 이와 모양이 다른 전류파형 사이의 관계가 그림 8에 나타나 있다. 이로 인해 이 둘 사이의 관계는 직선상이 아니며, 이러한 모양은 그림 8과 같은 캐패시터 입력형 단상 전파정류 회로에서 주로 나타난다. 이의 대표적인 것으로는 TV, 음향기기 등의 가전제품을 비롯하여 복사기 등 각종 OA기기, PLC 등 각종 FA기기 및 컴퓨터에 내장된 SMPS(Switching Mode Power Supply) 등이 있으며, 이들 모두 그 보급이 날로 확대되는 추세이기 때문에 비선형 부하의 대표적인 예이다.

비선형 부하의 대표적인 부하인 Capacitor 입력형 정



(a) 전압파형과 전류파형 (b) 전압과 전류의 관계 그래프

〈그림 8〉 비선형부하의 특성

류회로는 그 입력측에 브리지 전파정류회로와 평활용 캐패시터를 갖는 구조이다. 캐패시터 단자전압은 회로의 R 또는 L 성분에 의해 전원 전압파형보다 다소 완만하게 상승하며, 전원전압이 캐패시터 단자전압보다 높은 구간 동안만 전원측에서 캐패시터로 피크형태의 충전전류가 흘러 들어간다.

이러한 형태의 전류파형은 왜형파이며, 이 파형은 기함수파이므로 기수차수의 성분만 존재하며, 중앙의 피크값이 크고 좌우의 값은 낮으므로 3, 5, 7, 9조파 등 낮은 차수의 고조파가 대부분이다.

6. 전류원으로서의 고조파

최근 문제가 되고 있는 전기사용장소의 고조파장해 현상을 쉽게 이해하는 방법은 고조파를 전류원으로서 보는 것이다.

전력변환기, 인버터, OA기기 등 반도체응용기기와 같이 비선형특성을 갖는 부하에 정현파 전압을 인가하면 흐르는 전류는 그림 1의 (b)와 같은 왜형파가 되며 정현파와는 많은 차이가 난다. 여기서 전류 파형을 식으로 나타내면 식 (2)와 같다.

$$I=\sqrt{2}I_1\sin(\omega t+\Phi_1)+\sum_3^n I_n\sin(n\omega t+\Phi_n) \quad \cdots\cdots\cdots (2)$$

여기서, n=3, …, 2m+1(m=1, 2, 3),

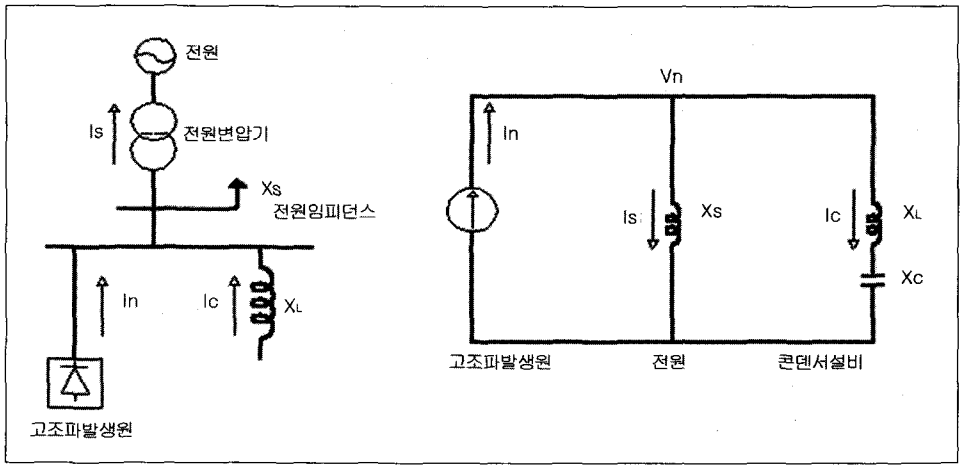
I_n : n차조파 전류, I_1 : 정격전류이다.

상용주파수 성분(I_1)과 그 정수배(상하대칭 파형인 경우 기수배만)의 주파수 성분(I_n)과 합성된 파형이다. 즉 왜형파 전류는 각 고조파 성분의 중첩으로서 표현할 수 있다.

이러한 고조파 발생원을 전류원으로서 다루면 고조파 전류는 다음과 같은 특성을 갖는다.

① 고조파전류원은 차수마다 존재하며, 발생한 전류는 그림 9와 같이 부하단에서 전력계통으로 유출한다. 일반적으로 전원임피던스가 콘덴서임피던스보다 크게 되면 고조파 전류는 콘덴서로 유입하게 되고, 전원임피던스가 콘덴서임피던스보다 작게 되면 고조파 전류는 전원으로 유출하게 된다.

② 고조파 전류는 임피던스에 반비례하여 분류되며, 전계통에 걸쳐서 흐른다. 그러나, 고조파 전류는 공급 전원파형과 부하전류파형 차이만큼 전원측으로 유출



〈그림 9〉 고조파전류의 유출과 분류

하게 된다.

③ 계통 임피던스는 주파수에 의해서 변하기 때문에 고조파 회로는 발생차수 만큼 존재한다.

④ 실제 회로의 파형은 기본파와 복수 고조파의 순시치가 합성된 것이다.

⑤ 배전계통의 고조파전압은 계통의 여러 곳에서 유입하는 고조파전류와 계통의 임피던스에 의해서 발생한다.

8. 맺음말

본고에서 고조파에 관한 여러 가지 기초적인 개념을 알아 보았으며, 실제 고조파로 인한 장해의 예를 들면 전동기, 진상 콘덴서 등 병렬기기의 과열 또는 계통에서의 이상 고조파 전압의 발생 등과 같은 장애가 변환장치의 대용량화에 나타나고 있다.

따라서, 사이리스터 변환장치 특히 대용량화의 장치에서 발생하는 고조파의 성질, 전원 계통의 임피던스 크기 및 부하상태 등을 면밀히 조사 검토하여 장해가 발생하지 않도록 변환장치 자체의 다상화, 고조파 흡수용 필터의 설치 또는 영향을 받는 기기측에서의 처리 등 적절한 대책을 세워야 할 것이다.

고조파 문제 해결의 기본 개념은 발생원과 계통 임피던스의 구성이 간단하다면 예측값과 실측값이 거의 일치하는 근사치를 구할 수 있지만, 실제 계통에서는 이처럼 단순하게 구하기 어렵다. 그 이유는 첫째, 수변전설비 계통에는 크고 작은 고조파 발생원이 있으며, 전체의 왜형은 이것들로부터 발생하는 고조파의 총합으로서 결정한다. 그러나 발생원이 폭넓게 분산되어 있고, 고조파 발생량이 시간적으로 변화하기 때문에 이러한 특성을 파악하는 것이 매우 어렵다. 둘째, 고조파의 전반 특성은 계통에 따라서 크게 다르며, 회로에 용량성 임피던스가 있으면 확대현상을 일으키고 파형의 왜형이 크게 달라지기도 한다. 보통 특별고압 계통에는 직렬리액터가 부착된 진상용 콘덴서가 설치되어 있으므로 장해 발생이 많이 발생하지 않으나 고저압 계통에서는 직렬리액터가 없이 진상용 콘덴서를 사용하는 경우가 많아 경부하시에도 직접 접속된 상태이기 때문에 계통의 고조파 전반 특성이 매우 나쁘다고 할 수 있다. 셋째, 고조파 장해를 받는 기기가 다양하다.

일반적으로 수변전설비 계통에서 고조파를 고려할 때는 다음의 세가지를 고려할 필요가 있다. ① 고조파 발생원, ② 회로의 임피던스, ③ 대상기기의 고조파 내량 등이다. 어떤 기기가 고조파 장해를 받는다고 하면 우선 ①, ②를 조사하여 고조파 분류계산을 하고, 해당 기기 접속점의 전압·전류를 구할 수 있다. 이 값과 ③ 기기의 허용기준을 비교하여 상한치를 초과하면 장해를 받고 있는 것으로 판단한다.

앞으로 고조파에 대한 억제 대책은 매우 중요한 문제이며, 자가용전기설비 뿐만 아니라 전기사업자도 적극적으로 고조파 발생량의 억제를 위한 가이드라인을 제시하여야 한다고 사료된다. ■

참고문헌

1. 강영채, 전력기기에 미치는 사이리스터 시스템의 영향, 대한전기협회지, No. 10, 1992
2. 신중린 외, 고조파 저감기술 현황과 전망, 대한전기학회, 1993
3. 고요, 고조파 장해대책에 관한 기술조사, 일우당, 1999
4. 박지현 외, 전기사용장소의 고조파 장해 분석 연구, 한국전기안전공사, 1995
5. 전기설비기술계산 핸드북, pp. I-203~235, 1995
6. 김승호, 고조파에 의한 장해 및 대책, 전기안전, No. 3, 1992
7. 강창원, 고조파SOLUTION, (주)피에스디테크, PSD-H12, 2000
8. 堀越俊夫, 高調波發生のメカニズムとその障害對策, 電氣と工事, 1994
9. 竹谷是幸, 高調波とは, 日本電氣設備學會誌, Vol. 16, No. 4, 1996