

계통 고조파 현상의 원인 및 대책

정 승 기

(광운대학교 전기공학과 교수)

1. 전력품질과 고조파

전력계통은 그림 1에 보이는 바와 같이 발전소를 나타내는 전원, 부하, 그리고 이들 사이를 연결시켜 주는 전송선로 세 요소로 단순화시켜 나타낼 수 있다. 현대의 발전 시스템 수준에서는 전원은 거의 이상적인 전압원으로 간주할 수 있다. 따라서 만일 전원전압이 그대로 부하에 전달된다면 기본적으로 전력품질의 문제는 나타나지 않을 것이다. 그러나 실제의 계통에서는 전력전달 과정에서 선로의 임피던스에 의한 전압강하가 필연적으로 나타날 수밖에 없다. 계통에 흐르는 전류가 정현파라 한다면 선로에서의 전압강하 역시 정현파가 될 것 이므로 부하에는 그 크기와 위상은 원래의 전원과 차이가 있다 해도 역시 정현파가 나타난다. 그러나 만일 선로에 흐르는 전류가 비정현파라 하면 전압강하가 비정현파의 모양을 띠게 되어 그림에 보이는 바와 같이 말단에 나타나는 전압이 비정현파가 될 수 있다. 이렇게 왜곡된 전압이 인가되면 부하가 원래 기대했던 것과는 다른 동작을 하여 문제를 일으킬 가능성이 있다.

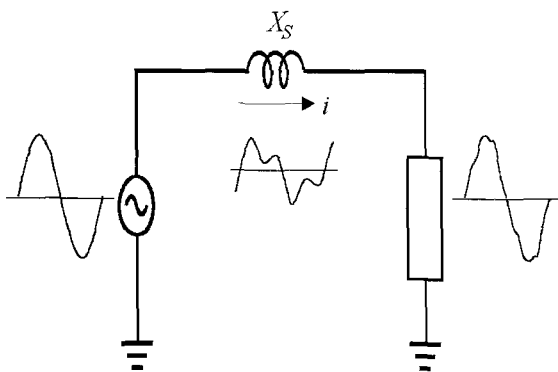


그림 1

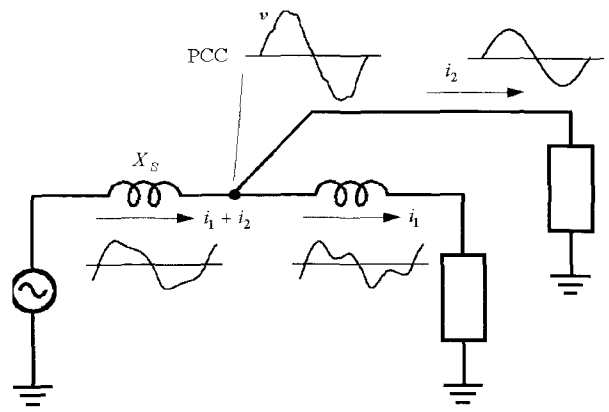


그림 2

비정현파 전류가 흐르는 주된 원인은 전원보다는 부하에 있는 경우가 대부분이다. 이러한 부하는 그 자신이 왜곡된 전류를 흐르게 하는 원인을 제공하여 스스로 문제가 되는 수도 있지만 인근에 있는 다른 기기에 문제를 파급시킬 수 있다. 그림 2는 그러한 양태를 나타내고 있다. 서로 다른 부하들이 선로상에서 공통으로 접속되는 지점을 '공통접속점' (point of common coupling, 통상 PCC라함)이라 하는데 그림에서와 같이 왜곡된 전류를 발생하는 기기와 인근 기기가 같은 급전 선로를 공유하고 있다고 하면 공통접속점 상위의 선로에 흐르는 전류는 왜곡된 부하전류를 포함하게 되므로 인근 기기에 왜곡된 전압이 공급된다. 이러한 현상은 공유하는 급전선의 비중이 클수록 크게 나타난다. 따라서 전류의 왜곡을 일으키는 부하가 인근 기기에 영향을 미치는 현상은 공통접속점의 위치에 따라 달라질 수 있으며 두 기기간의 거리가 가까울수록 그 영향은 크다.

비정현파의 전류는 푸리에 해석을 통해 계통의 공칭주파수 성분(기본파성분)과 공칭주파수의 정수배 주파수를 갖는 성

분, 즉 고조파 성분들의 조합으로 나타낼 수 있다. 그리고 원래의 파형에서 기본파성분만을 제외한 성분, 즉 고조파 성분들의 총합을 왜형전류라 부른다. 그림 3은 어떤 비정현파 전류 i 에 대한 기본파 성분 i_1 과 왜형전류 성분 i_D 를 보여주고 있다. 이들 각각에 대한 실효치 I_1, I_D 를 구하여 아래의 식 (1)과 같이 기본파에 비하여 왜형성분이 얼마나 되는지를 나타낸 것을 총왜형률, 혹은 THD(total harmonic distortion)라 부르며 파형의 왜곡 정도를 나타내는 지표로 사용한다.

$$THD = \frac{\text{왜형 성분의 실효치 } (I_D)}{\text{기본파 성분의 실효치 } (I_1)} \times 100 [\%] \quad (1)$$

이 정의는 전압에 대해서도 마찬가지로 적용된다. 참고로 그림 3에 보인 파형의 왜형률은 약 30% 정도이다.

왜형전류를 구성하는 고조파 성분들은 2차, 3차, 4차 등으로 구분되며 60Hz 계통에서 이들은 각각 120Hz, 180Hz, 240Hz 등의 주파수 성분을 나타낸다. 이들 고조파 성분이 전체 파형에서 얼마만큼의 비중을 차지하고 있는가를 나타내는 것이 고조파 스펙트럼으로서 그림 4는 그림 3의 파형이 갖는 고조파 스펙트럼을 보여주고 있다. 여기서 보다시피 파형 내에는 기본파 성분과 각 차수의 고조파 성분이 함께 존재하는데 일반적으로 계통 내에 흐르는 전류는 이 경우에서와 같이 저차수 성분이 크고 고차 성분이 차수에 반비례하여 감소하는 경향을 갖는다. 따라서 고조파가 전력품질과 관련하여 야기하는 문제는 대부분 저차고조파에 집중되어 있다고 볼 수 있다.

그리고 보통의 전력계통에서 짝수차 고조파는 거의 존재하지 않는다. 일반적으로 짝수차 조파는 양의 반주기 파형과 음의 반주기 파형이 대칭이면, 즉 양의 반주기 파형을 위아래로 뒤집었을 때 음의 반주기 파형과 같은 모양이 되면 발생하지 않는다. 고조파를 발생하는 부하라 하여도 대부분 전압의 극성에 대해서는 대칭으로 동작하기 때문에 실제의 전력계통에서 짝수고조파 전류가 문제가 되는 경우는 드물다.

그리고 3상 3선식 전력계통에서는 3상이 평형이라고 가정

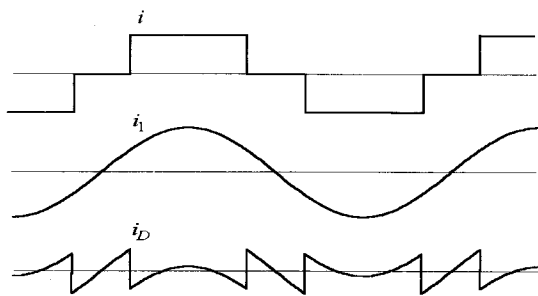


그림 3

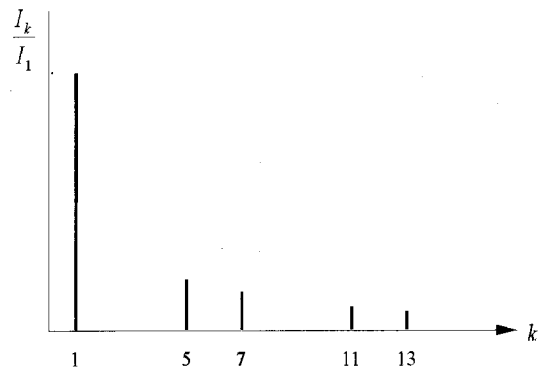


그림 4

하였을 때, 즉 3개 상 전류가 위 상차만 날 뿐 동일한 파형일 때는 3배수 고조파는 나타나지 않는다. 따라서 3상 3선식의 평형 전력계통에서는 홀수차 중에서도 5, 7, 11, 13차 등만이 나타나게 된다. 그러나 3상 4선식은 독립적인 단상 3개가 공통의 귀로선을 공유하고 있는 것에 해당하므로 단상에서와 마찬가지로 3배수 고조파가 존재할 수 있다. 이때 각 상의 3배수 고조파성분은 공통귀로선에서 합하여져 흐르게 되는데 경우에 따라서는 이 전류의 실효치가 각 상에 흐르는 전류의 실효치를 상회할 수도 있다. 실제 사무실 건물 등에서 3상 4선식으로 여러 개의 단상부하에 전력을 공급할 때 공통귀로선의 과열로 인한 문제가 발생할 수 있다.

2. 고조파 발생원의 유형

깨끗한 정현파의 전원에 어떤 부하를 연결하였을 때 부하로 흘러드는 전류 역시 정현파라면 이러한 부하를 '선형부하'라 한다. 순수한 저항, 커패시터 및 인덕터 요소만으로 이루어진 회로는 선형부하가 된다. 반면에 정현파 전원에 접속하였다 해도 정현파가 아닌, 찌그러진 전류가 흐르는 부하를 '비선형부하'라 부른다. 비선형부하라는 명칭은 내부에 전압-전류 특성이 비선형적인 관계를 갖는 회로요소를 포함하고 있다는 것을 뜻한다. 비선형 회로요소의 대표적인 예가 다이오드나 싸이리스터와 같은 반도체 소자들이다. 따라서 이러한 요소들로 이루어지는 각종 정지형 전력변환기들은 당연히 비선형부하에 속하며 계통 내에 고조파 전류가 흐르게 하는 주범이라 할 수 있다. 물론 이외에도 여러 가지 비선형부하가 있으나 고조파 장애의 측면에서 실제적으로 큰 비중을 차지하지는 않는다.

정지형 전력변환이 사용되는 모든 부하가 고조파 발생원이 될 수 있기 때문에 그 종류도 소형의 단상 가전기기에서 초대형 3상 전력변환장치까지 매우 다양하다. 그러나 이들 각종 기기가 전원계통과 연결되는 부위는 대부분 교류전원을 직류

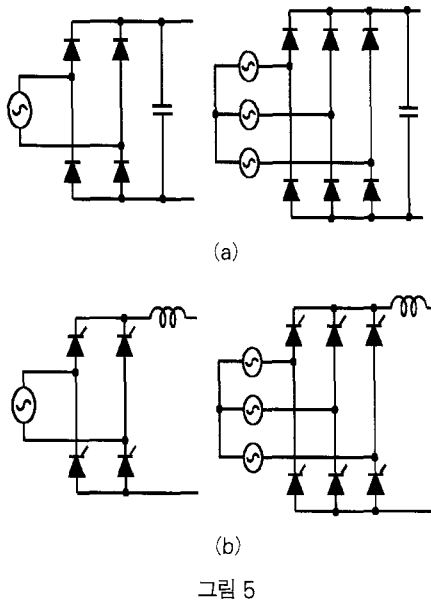


그림 5

로 변환시키는 정류회로라 할 수 있다. 실제적으로 많이 사용되는 정류회로는 대체로 다음과 같이 크게 두가지 형태로 나뉘어진다.

(1)다이오드 정류회로(그림 5(a)): 일정한 크기의 전압을 출력하기 위한 용도로 사용되며 보통 직류측에 큰 용량의 평활용 커패시터가 병렬로 접속되어 있다. 대부분의 범용인버터, UPS, 가전기기 등에 사용되며 소용량에서 중대용량까지 넓은 범위에서 적용된다.

(2)싸이리스터 정류회로(그림 5(b)): 출력단에서 전압을 가변하기 위한 용도로 사용되며 보통 직류측 전류를 평활화하기 위하여 직렬인덕터가 접속된다. 직류전동기의 구동장치, 대용량 인버터, HVDC(고압직류송전) 등에 사용되며 대체로 용량이 큰 3상 기기가 주종을 이룬다.

위의 두가지 형태는 같은 비선형 부하로서 작용하지만 이들이 갖는 고조파 전류의 특성은 매우 다르다. 그림 6은 3상 다이오드 정류회로의 대표적인 입력전류 파형을 나타내고 있는데 파고율이 큰, 펄스에 가까운 형상의 전류가 흐른다. 그리고 이 정류회로의 교류 입력단에 그림 6(b)와 같이 직렬리액터를 설치하면 파형이 크게 개선됨을 볼 수 있다. 즉 전류의 고조파 성분이 크게 줄어들는데 이때 기본파 성분에는 큰 변화가 없다. 반면에 그림 7은 3상 싸이리스터 정류회로에 대한 파형으로서 구형파에 가까운 모양을 띠고 있다. 이 경우에는 그림 7(b)에서와 같이 전원에 직렬리액터를 설치한다 하여도 그 파형에는 큰 변화가 없다. 즉 기본파 성분은 물론 고조파전류 성분도 크게 변화하지 않는다.

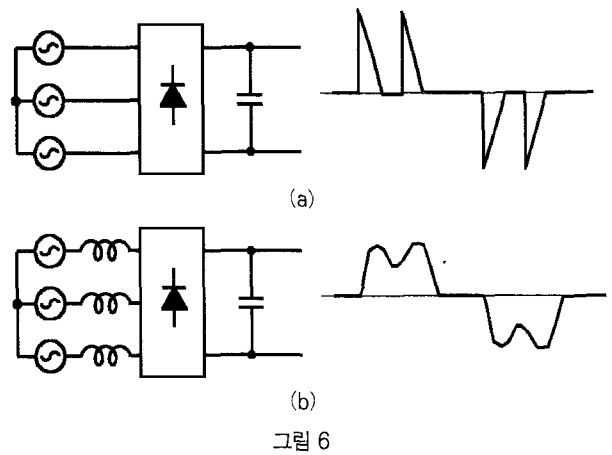


그림 6

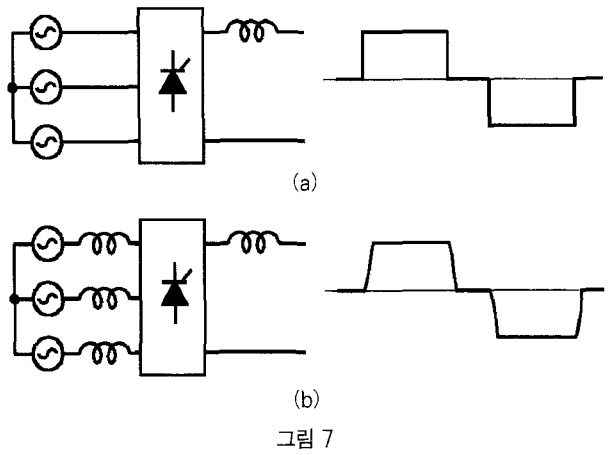


그림 7

전원측 리액터가 입력전류 파형에 미치는 영향은 이들 두 정류회로간의 중요한 차이점을 보여주고 있다. 즉 다이오드 정류회로는 전원 쪽에서 보았을 때 고조파 전압원에 가까운 특성을 가지며 싸이리스터 정류회로는 전원 쪽에서 보았을 때 고조파 전류원에 가까운 특성을 가진다. 이러한 특성의 차이는 직류측에 일정 전압을 유지하려는 특성을 지닌 병렬 커패시터가 접속되는지 아니면 일정 전류를 유지하려는 특성을 지닌 직렬 인덕터가 접속되는지에 따라 나타나는 것으로 볼 수 있다.

두가지 형태의 정류기가 갖는 이러한 특성의 차이는 고조파 전류를 억제하기 위해 사용되어야 할 방법에도 차이가 있어야 함을 시사하고 있다. 예컨대 다이오드 정류회로에 대해서는 전원측에 단순히 리액터만 적절히 삽입하여도 상당한 개선 효과를 볼 수 있지만 싸이리스터 정류회로는 리액터 삽입만으로 고조파 전류를 억제하는 것은 어렵다. 다시 말해서 고조파 발생원의 특성을 올바르게 파악하는 것이 적절한 대처 방안을 강구하는 데에 출발점이 된다.

기타 중요한 고조파 발생원으로서 정지형 무효전력보상기, 아이크로 등이 있으나 여기서는 생략하기로 한다.

3. 고조파가 왜 문제가 되는가?

고조파가 일으키는 문제는 다양하다. 먼저 위에서 설명한 바와 같이 비선형 부하 인근에 접속된 기기에 왜곡된 전압이 공급됨으로 해서 정현파 전원에서 동작하는 것을 전제로 하여 만들어진 기기의 오동작을 유발할 수 있다. 보통의 부하들은 전원전압이 어느 정도 왜곡되어도 큰 영향을 받지 않지만 많은 데이터를 처리해야 하는 정보화기기에 있어서는 데이터가 왜곡되거나 손실되어 심각한 결과를 유발할 수 있다.

한편 유효한 전력의 전달은 전류의 기본파 성분만 의해서만 이루어지기 때문에 고조파 전류는 전력전달과는 무관한 불필요한 성분이라 할 수 있다. 즉 같은 전력을 전달하는데 고조파성분이 존재하게 되면 기본파성분만 있을 경우에 비해 전류의 실효치가 증가하므로 무효 전력이 증가하게 된다. 이러한 측면에서 고조파 전류성분은 기본파의 무효전류 성분과 함께 계통상에서 역률을 저하시키는 무효전력 발생원의 하나로 작용한다. 계통의 역률이 저하한다 함은 전력전달과정에서 불필요한 손실을 증가시킬 뿐 아니라 변압기, 차단기 등 계통 요소들에 전류취급 부담을 가중시킴을 뜻한다. 그리고 고조파 성분은 높은 주파수 성분이므로 선로에 표피효과를 일으킴으로써 추가적인 손실을 야기한다. 따라서 고조파가 흐르는 계통상에서 각종 전력기기들은 이러한 효과를 고려하여 일반 부하에 전력을 공급할 경우에 비해 큰 용량으로 설계되어야 한다. 예컨대 변압기의 경우는 미국의 ANSI 표준 C57.110에 규정된 k-factor 방법을 적용할 수 있다.

전력계통의 각종 부대 설비들에 대해서도 고조파는 악영향을 끼칠 수 있다. 특히 높은 주파수 성분에 대하여 낮은 임피던스를 갖는 역률보상용 커패시터에 당초 고려에 넣지 않았던 고조파 전류가 집중하여 소손을 일으킬 수 있다. 또 특정 차수의 고조파 주파수가 전력계통에서의 공진주파수와 일치하면 고조파 전류 또는 전압이 특정 위치에서 증폭되어 문제를 야기할 수 있다. 기타 리액터의 과열, 진동 및 소음, 각종 보호기기의 오동작, 계측기의 지시오차, 전동기의 진동과 과열, 수명단축, 조명기기의 플리커와 수명단축, 통신선로와의 간섭 등 다양한 문제의 원인이 된다.

4. 고조파에 대한 규제

위에서와 같은 문제의 발생을 억제하기 위하여 고조파는 일정한 수준 이내로 제한되어야 한다. 대부분의 국가에서 고조파는 일종의 '전력환경오염' 과 같은 개념으로 취급되고 있으며 이에 따라 고조파 관리기준을 마련하고 있다. 대표적인

표 1 일반 배전계통에서의 전류왜형률 한계 (69kV 이하)

I_{sc}/I_L	I_h/I_L (h=홀수) %					TDD
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	
20 이하	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
1000 이상	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

표 2 공통접속점에서의 고조파전압왜형률

	69kV 이하	69~169kV	169kV 이상
각 차수의 최대치	3.0%	1.5%	1.0%
총왜형률	5.0%	2.5%	1.5%

예가 미국의 IEEE-519 Standard로서 표 1은 일반 배전계통에서의 고조파 전류제한 기준을, 표 2은 공통접속점에서의 전압 왜형률 기준을 보여주고 있다.

표 1에서 I_L 은 부하의 정격전류이고 I_{sc} 는 부하가 접속된 지점에서 단락이 일어났다고 가정했을 때의 전류이다. 이들 간의 비율 (I_{sc}/I_L) 이 크면 부하에서 본 전원의 등가임피던스가 작다는 뜻이 되고 이상적인 전압원에 가깝게 된다. 전원의 임피던스가 작을수록 같은 고조파전류에 의해 야기되는 전압의 왜곡 정도가 낮아지게 되므로 보다 큰 고조파 전류가 허용된다.

이러한 고조파 규제 기준은 우선 수용가에서 발생하는 고조파가 어느 이상 되어서는 안된다는 규정(표 1)과 수용가가 이러한 제한을 넘지 않고 전력을 사용하고 있을 때 전력회사에서는 전압의 왜형이 어느 이상이 되지 않도록 하여야 함(표 2)을 나타내고 있다. 즉 수용가와 전력회사간의 쌍무적인 관계를 규정하고 있다 할 수 있다.

이러한 고조파관리규정 이외에 IEC 규격이 있고 일본, 영국, 호주 등 각국에서는 조금씩 다를 규정을 적용하고 있다. 우리나라에서는 전압의 총왜형률이 154 kV 이상에서는 1.5%, 66kV 이상에서는 3% 이내가 되도록 하는 규정이 적용되고 있다.

5. 고조파를 줄이는 방법

비선형 부하가 발생하는 고조파가 위에서 설명한 고조파전류 제한치를 넘어서는 경우, 고조파를 줄여주기 위한 적절한 방법이 강구되어야 한다. 전력변환장치가 사용되는 계통에서 고조파를 저감하는 방법은 아래와 같이 몇가지 정도로 요약

할 수 있다.

- (1) 계통상에서 고조파의 파급효과를 낮추는 방법
- (2) 부하의 고조파 발생량을 낮추어주는 방법
- (3) 수동필터를 적용하는 방법
- (4) 능동필터를 적용하는 방법

계통상에서 고조파의 파급효과를 낮추는 데에는 고조파 발생원에 전용선로를 사용한다든가 하여 다른 기기와 접속되는 공통접속점을 고조파원으로부터 가급적 멀리 떨어지게 하는 방법이라든가 전원의 단락용량을 증대(즉 전원의 등가 임피던스를 감소)시키는 방법 등이 있다. 이러한 측면은 비선형부하를 포함하는 계통을 설계할 당시부터 고려되어야 할 사항이라 할 수 있다.

부하의 고조파 발생량을 낮추어주는 방법에는 매우 여러 가지가 있다. 단순하게는 계통의 적절한 위치에 리액터를 설치함으로써 고조파 전류의 경로에 큰 임피던스로 작용하게 한 다거나 역률개선용 커패시터가 고조파 필터의 역할을 겸하게 만드는 방법 등이 있다. 이러한 방법들은 특정 경우에는 비교적 간단히 고조파 억제 효과를 볼 수 있지만 일반적으로 항상 적용될 수 있는 방법은 아니다. 정류회로를 다중화하여 특정 차수의 고조파가 나타나지 않도록 하는 방법도 널리 사용되어 온 고전적인 방법 중의 하나로 대응량의 정류기를 필요로 할 때 효과적으로 적용할 수 있다. 근래에는 정류를 하는 데에 있어서 기존의 다이오드 혹은 사이리스터 정류회로를 사용하는 대신 능동적인 스위칭을 행하는 회로를 사용함으로써 직류출력을 제어함과 동시에 입력단 전류가 정현파에 가깝도록 유지하는 방식이 많이 등장하고 있다. 이는 처음부터 고조파가 발생하지 않도록 하는 것을 목적으로 만들어진다는 점에서 소위 '계통친화적 컨버터(line-friendly converter)' 기술이라 할 수 있다.

이러한 컨버터의 대표적인 예가 PWM 인버터와 같은 구조의 컨버터를 사용하는 시스템이다. 컨버터의 교류측 입력전류가 정현파가 되도록 제어함으로써 입력전류가 거의 고조파 성분을 갖지 않도록 하며 회로 자체가 회생운전이 가능하기 때문에 고성능 서보제어나 엘리베이터 구동 등에 많이 사용되고 있다. 또한 망상의 일반 전력계통과 달리 수상의 구조를 갖는 관계로 고조파의 오염에 취약한 전기철도 급전계통에 이러한 종류의 컨버터가 많이 적용되고 있다. 기타 소용량 정류회로에 입력전류를 정현파로 하는 다양한 종류의 컨버터 회로가 고안되어 실제 사용되고 있다.

수동필터를 적용하는 방법은 가장 고전적인 방법으로서 대응량의 단위부하에 전용의 필터를 적용하는 경우도 있고 고조파가 많이 발생하는 지역을 묶어서 하나의 필터 유닛으로 고조파를 흡수하게 할 수도 있다. 수동필터는 단순하고 가격이 비교적 저렴하며 고장이 날 염려가 없다는 점이 매력적이

지만 뒤에서 설명하는 바와 같이 그렇게 간단히 적용할 수 있는 것만은 아니다. 수동필터의 설치시 그 효과를 최대한으로 보장하고 문제가 발생할 소지를 없애기 위해서는 상당한 기술적 숙련이 요구된다.

능동필터 기술은 개념적으로 제안된 것은 꽤 오래 되었지만 본격적인 적용이 시도된 것은 10여년 전부터이다. 능동필터란 고조파를 발생하는 전력변환장치를 만드는 데에 사용되었던 기술을 고조파를 제거하는 용도에 적용한 것으로 근래에 무효전력 보상이나 순시전압강하 보상, 불평형 보상 등과 같이 전력기술 전반에 파급되고 있는 전력전자 기술의 한 예라 할 수 있다. 능동필터는 이론적으로는 매우 다양한 상황에 대처할 수 있기 때문에 이상적인 특성을 기대할 수 있지만 대체로 경제성이 낮고 전력계통 요소들에 대한 신뢰성의 일반적 기 대치에 부응할만큼 충분한 신뢰성을 확보하여야 할 과제를 지니고 있다.

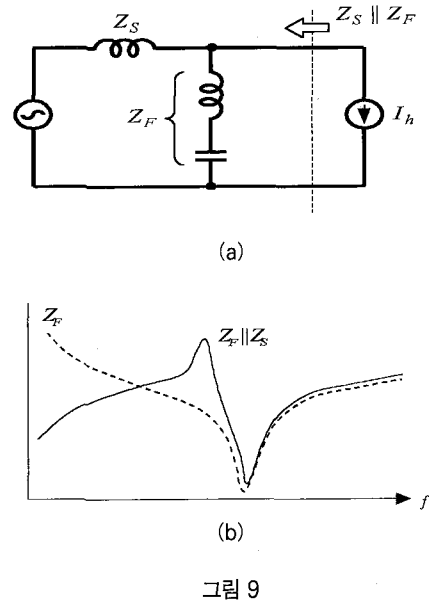
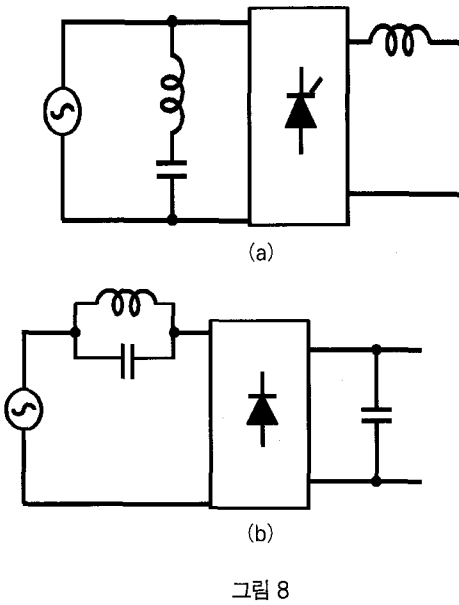
이하에서는 수동필터와 능동필터에 초점을 맞추어 고조파 저감기술에 대하여 설명하기로 한다.

6. 수동필터

수동필터는 고조파를 억제하기 위하여 가장 오래동안 사용되어 온 방식이며 현재에도 널리 사용되고 있다. 수동필터를 구성하는 주 요소는 인덕터와 커패시터이며 여기에 적절한 감쇄효과를 주기 위하여 저항이 사용된다. 인덕터는 고조파가 흐르는 회로 내에 직렬로 삽입되어 높은 주파수의 고조파에 대하여 큰 임피던스로 작용하여 고조파가 회로 내에 흐르는 것을 억제하는 역할을 하며 커패시터는 고조파성분에 대하여 낮은 임피던스를 가지므로 고조파 발생원 인근에 병렬로 삽입하여 고조파 전류를 바이패스하는 역할을 할 수 있다. 그러나 실제의 전력계통에서는 커패시터와 인덕터를 조합한 동조필터(tuned filter)의 형태로 사용되는 것이 일반적이다.

동조필터는 인덕터와 커패시터가 직렬로 접속되었을 때 특정 주파수에서 임피던스가 0에 가깝게 되는 직렬공진을 이용, 회로 내에 고조파발생원과 병렬로 접속되는 형태와 인덕터와 커패시터를 병렬로 접속하여 특정주파수에서 임피던스가 무한대에 가깝게 증가하는 병렬공진을 이용하여 회로 내 고조파발생원과 직렬로 접속되는 형태가 있다. 그림 8(a)에 보인 것과 같이 직렬공진 동조필터는 고조파전류원에 병렬로 접속되어 동조된 주파수의 고조파전류원에 대하여 낮은 임피던스의 순환경로를 제공함으로써 전원측으로 고조파가 유입되는 것을 막는 고조파 흡수의 역할을 한다. 반면에 병렬공진 동조필터는 그림 8(b)에 보인 것과 같이 고조파전류원에 직렬로 접속되어 고조파성분 전류의 흐름을 방해하는 고조파 차단역할을 한다.

직렬공진 동조필터는 대응량 3상 사이리스터 정류회로에



흔히 적용된다. 이 경우에 주로문제가 되는 것이 5, 7, 11, 13차 등의 저차수 고조파이므로 이들 각각의 고조파의 주파수에 동조된 동조필터들을 병렬로 설치한다. 저차고조파를 제거하고 남는 보다 높은 차수의 고조파성분들은 보통 하나의 고대역필터로 일괄적으로 흡수한다.

수동필터는 이론적으로는 매우 단순하지만 실제 시스템에 적용하는 데에 상당한 주의가 필요하다. 그 주된 이유는 수동필터가 계통 내에서 공진을 유발할 수 있다는 데에 있다. 그림 9(a)는 수동 동조필터가 설치된 회로를 단순화된 등가 회로로 표현한 것이다. 고조파 전류원으로 표현된 부하 입장에서 보았을 때 수동필터는 전원계통의 등가인덕턴스 L_s 와 병렬로 접속되어 있다. 이에 대한 합성 임피던스 특성을 살펴보면 그림 9(b)와 같이 된다. 여기서 점선으로 표시된 필터 자체의 임피던스 특성과 비교해 보면 합성임피던스 특성은 필터의 동조주파수보다 약간 낮은 주파수에서 병렬공진에 해당하는 높은 임피던스를 갖게 됨을 알 수 있다. 만일 필터의 커패시터나 인덕터의 값이 변화하여 필터의 동조주파수가 어떤 원인으로 원래의 공진주파수보다 높아져서 임피던스 특성이 전체적으로 오른쪽으로 이동하게 되면 병렬공진 주파수가 고조파 전류원의 주파수와 일치하게 될 가능성이 있다. 이러한 경우 필터가 설치된 위치에서 해당 주파수의 고조파 전압 성분이 크게 상승하여 필터의 설치가 고조파의 억제가 아니라 오히려 고조파를 증폭하는 결과를 낳을 수 있다.

이러한 문제 이외에도 수동필터는 전원측 임피던스의 크기에 따라 필터의 성능이 일정치 않다는 점, 따라서 상위 계통의 구조 변화에 따라 필터의 고조파 억제 능력이 변화한다는 점, 부피가 크다는 점 등의 문제를 지니고 있다.

7. 능동필터

근래에 전력계통이 복잡해지고 고조파 발생원도 나날이 대용량화, 광역화, 다양화되면서 기존의 수동필터기술만으로는 고조파문제의 경제적이고 효과적인 대응이 어렵게 되어가고 있다. 또한 기존의 수동필터가 갖는 성능상 제약을 극복하기 위한 대안으로서 능동필터에 관한 연구가 활발히 이루어져 왔다.

능동필터의 개념이 제시된 것은 비교적 오래 되었으나 이를 실현할만한 여건이 이루어져 실제적인 연구가 시작된 것은 70년대부터이다. 능동필터는 계통 내의 고조파성분 전압과 전류를 검출하여 이를 능동적으로 억제하는 데에 그 목적이 있으므로 제거대상이 되는 고조파 성분의 주파수보다 응답특성이 좋아야 하한다. 따라서 충분히 빠른 속도로 동작할 수 있는 대용량의 자기소호형 전력소자들이 보편화된 80년대 중반에 이르러서야 본격적인 실용화가 진척되었다. 능동필터의 실제적인 적용은 주로 일본에 의해 주도되었고 아직 국내에서는 상용화가 추진되고는 있으나 그다지 큰 진척을 보지는 못하고 있다.

능동필터는 그 자체가 시스템의 공진을 야기하거나 공진에 의해 성능상 영향을 받을 위험성을 갖지 않으며 적절한 제어를 통해 전원측의 구조상 변동이나 기타 운전조건의 변동에도 일정한 성능을 기대할 수 있다는 점, 그리고 고조파 억제 이외의 여타 부가적인 기능을 수행하기가 용이하다는 점 등이 장점으로 작용한다. 그러나 아직까지는 수동필터에 비하여 설비비가 높아 전반적인 경제성이 떨어진다고 볼 수 있다. 다만 고조파 억제의 필요성이 크면서도 수동필터만으로는

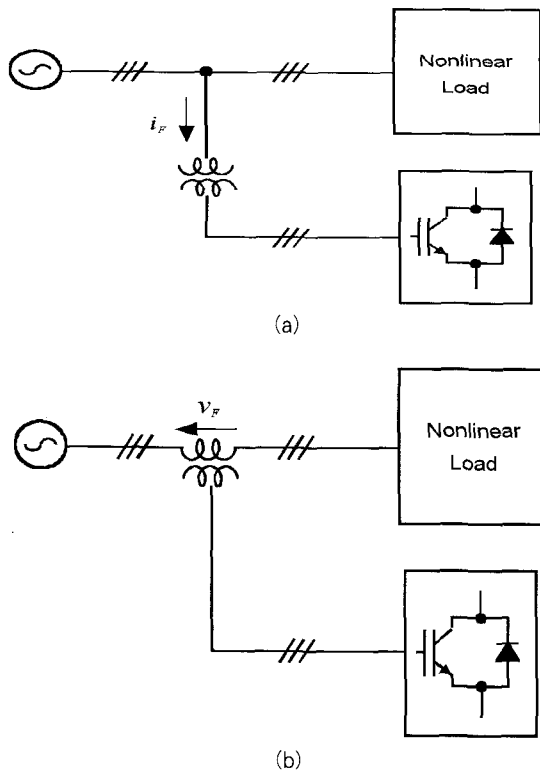


그림 10 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터

대응이 어려운 상황에서는 경제성의 한계를 뛰어넘어 적용될 수 있는 가능성은 충분하다. 특히 대규모 설비가 일괄 건립되는 경우에는 플랜트 설비의 기본요소로서 고려대상이 되며 실제로 이러한 경우에 국내에서 설치, 운전되고 있는 몇몇 사례가 있다.

능동필터에 사용되는 전력회로는 기본적으로 인버터와 같은 구조이다. 인버터구조에는 크게 전류형과 전압형 두 가지 형태가 존재한다. 이들 전력회로는 적절한 제어루우프를 통해 능동필터로 동작하도록 제어되는데 전압형이나 전류형 컨버터 어느 것이건 적절한 PWM기술과 결합하여 전압원 전류원 어느 쪽으로든 동작하게끔 제어하는 것이 가능하다. 따라서 제어상의 관점에서는 이들 컨버터의 구조상 차이점이 문제가 되지 않으나 효율의 문제 등으로 해서 현재 사용되고 있는 능동필터는 거의 대부분이 전압형 구조로 만들어지고 있다.

전압형컨버터에서 주로 사용되는 제어방식은 전류제어형 PWM으로서 교류측 입력전류가 임의의 파형을 추종하도록 만들어진다. 이에 따라 고조파를 포함한 임의의 전류파형을 생성하여 부하가 발생시키는 고조파전류를 상쇄할 수 있다. 이는 능동필터를 고조파전류원으로 사용할 경우에 해당한다. 한편 컨버터의 교류측 단자전압이 임의의 전압파형에 추종하도록 제어하면 고조파전압성분을 상쇄하는 고조파전압

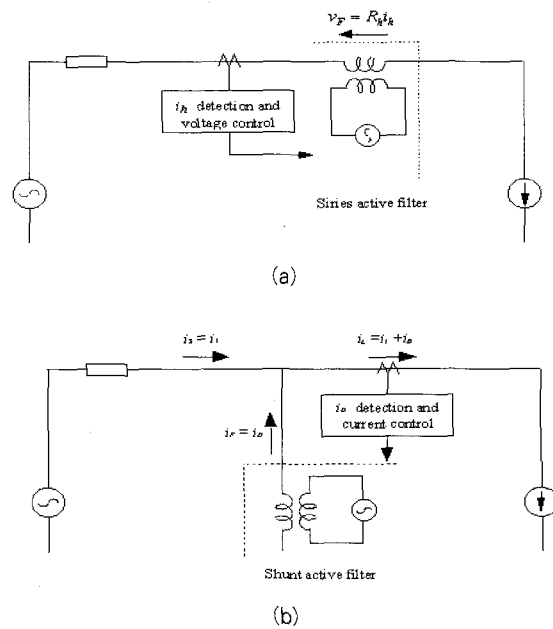


그림 11 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터의 제어

원으로서 기능하도록 할 수도 있다. 이들은 각각 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터의 기본 제어방식으로 그림 10은 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터에 기본 적용방식을 보여주고 있다.

그림 10(a)의 병렬형 능동필터는 부하에 흐르는 왜형전류 성분을 검출, 그에 해당하는 전류를 계통에 주입함으로써 전원측에는 기본파전류만을 흐르도록 한다. 그 제어의 개념도는 그림 11(a)에 보인 바와 같고 주로 싸이리스터 정류기 부하와 같이 고조파 전류원으로 동작하는 부하에 적용된다. 반면에 직렬형 능동필터는 전원측의 왜형전압을 검출하여 선로상에 해당 왜형전압을 직렬로 삽입, 상쇄함으로써 부하측에는 왜형전압이 나타나지 않도록 하는 역할을 한다. 실제 적용상에서는 다이오드 정류기 부하와 같이 고조파 전압원으로 동작하는 부하에 직렬로 삽입되어 고조파 전류에 대해서만 선택적으로 높은 임피던스로 작용하게끔 제어된다. 이를 개념적으로 도시하면 그림 13(b)와 같다.

최근에는 병렬형 능동필터와 직렬형 능동필터를 조합한 그림 12와 같은 방식도 적용이 시도되고 있다. 이는 마치 수동필터로서 병렬 커패시터와 직렬 인덕터를 동시에 사용한 것과 같은 기능을 수행하는 것으로 생각할 수 있다. 회로의 복잡성 때문에 의료기와 같이 경제성보다는 성능의 고도화가 주안점이 되는 용도에 적합하며 단순히 고조파를 제거하는 용도에서 벗어나 무효전력의 보상, 부하전류의 불평형 보상, 전원의 순시전압강하 보상 및 전원전압의 불평형 보상 등의 기능을 동시에 수행하는 종합적 전원품질개선장치(unified

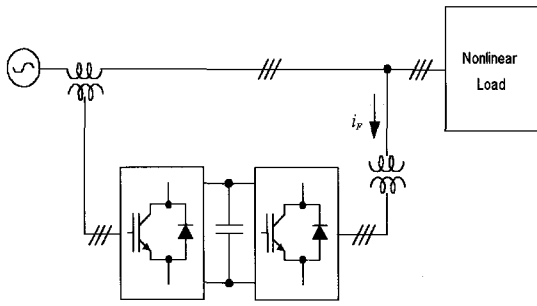


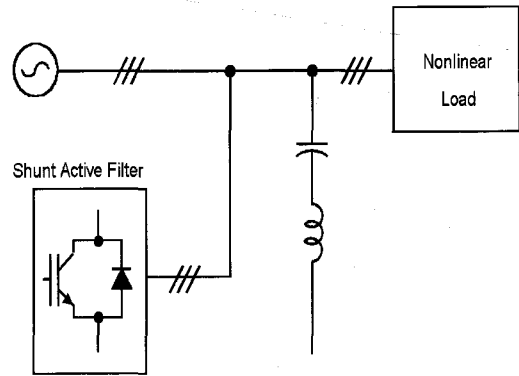
그림 12

power quality conditioner, 흔히 UPQC라 부름)로 동작하게 할 수 있다.

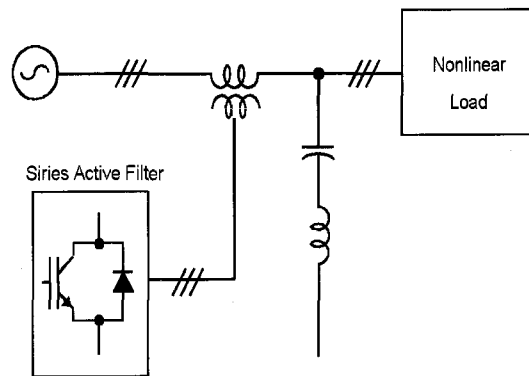
8. 능동필터와 수동필터의 결합

능동필터를 실제 회로에서 적용하는 데에 있어서 가장 큰 장애요인은 그 비용이 많이 든다는 데에 있다. 일례로 가변속 구동용 싸이리스터 컨버터의 입력단 고조파를 병렬형 능동필터만으로 제어한다면 능동필터의 용량이 싸이리스터 컨버터의 용량과 거의 같은 수준에 육박한다. 따라서 부하에서 발생하는 고조파 전부를 능동필터에서 취급하는 것은 적어도 현재로서는 비현실적인 해결방안이라 할 수 있다. 따라서 보다 실제적인 방법으로 근래에 능동필터를 수동필터와 조합하여 사용함으로써 비용상 절감을 꾀하는 방법들이 고안되어 왔다. 그림 13에 능동필터와 수동필터를 조합한 세가지의 방식을 도시하였다. 그림에서 수동필터는 하나의 단일 동조필터일 수도 있고 몇 개의 동조필터 및 고대역필터를 결합한 것일 수도 있다.

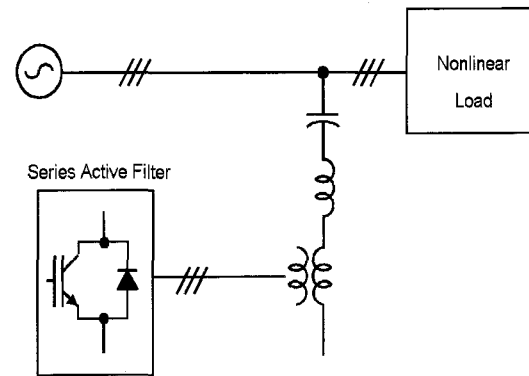
회로의 토폴로지상 수동필터는 능동필터에서 병렬형에 해당한다. 따라서 그림 13(a)에서와 같은 수동필터와 병렬형 능동필터의 결합에서는 각자 고조파 흡수량을 분담하는 기능을 한다. 한편 그림 13(b)의 형태로 직렬형과 수동필터가 결합되었을 때는 능동필터가 수동필터의 능력을 극대화하는 작용을 한다. 부하의 고조파전류 입장에서 보면 능동필터가 전원임피던스를 증가시키는 역할을 하기 때문에 고조파전류성분 전부가 수동필터로만 흐르게 된다. 전원측 등가임피던스를 상승시키는 이와 같은 역할은 앞에서 언급하였던 수동필터의 공진 위험성을 제거하여 준다. 이러한 공진억제기능은 그림 13(c)에서와 같이 수동필터에 직렬로 직렬형 능동필터를 삽입하는 형식으로 이루어질 수도 있다. 이들 세 방식 이외에도 수동필터와 결합하는 방식에 여러가지 변형이 있을 수 있으며 고조파를 발생하는 부하의 특성과 부가적인 기능, 경제성 등을 고려하여 선택할 수 있다.



(a)



(b)



(c)

그림 13 능동필터와 수동필터의 조합

9. 결 언

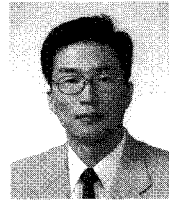
전력계통에서 고조파 문제는 그 중요성이 나날이 증대되고 있다. 본고에서는 고조파의 발생 원인과 특성, 그리고 고조파 보상의 주요한 방법을 기초적인 개념 위주로 개략적으로 살펴 보았다. 고조파와 관련된 문제로는 고조파를 포함한 전력

계통에서 전력의 정의에 관련된 이론적인 측면에서부터 고조파 발생원의 특성, 각종 고조파 제거장치의 토폴로지와 설계, 고조파의 검출, 능동전력필터의 제어방식 및 구현 등 매우 다양하다. 고조파와 관련된 실무에 직접 종사하는 엔지니어의 입장에서는 고조파의 원인과 특성을 먼저 파악하고 고조파 억제에 적절한 목표치를 설정한 다음 주어진 상황에서 현실적으로 가장 타당한 방안, 즉 비용대비 효과가 가장 높은 것으로 생각되는 방안을 선정하여 적용하고 그 결과를 검토하는 것이 주요한 업무가 될 것이다. 지면의 제약상 이러한 측면을 모두 다룰 수는 없으나 아래에 열거한 참고문헌이 보다 구체적인 정보를 얻는 데에 출발점이 될 수 있을 것이다. ㉠

참고 문헌

- [1] "IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems," IEEE Std 519-1992.
- [2] IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power system harmonics: An overview," IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol.PAS-102, pp.2455-2460, Aug. 1983.
- [3] James K. Phipps, "A transfer function approach to harmonic filter design," IEEE Industry Applications Magazine, vol.3, no.2, pp.68-82, March/April 1997.
- [4] J. Arrillaga, D.A. Bradley, P.S. Bodger, Power System Harmonics, John Wiley & Sons, New York, 1985.
- [5] F. Z. Peng, "Application issues of active power filters," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, no. 5, pp.21-30, Sep./Oct. 1998.
- [6] S. Bhattacharya, T.M.Frank, D.M.Divan, B.Banerjee, "Active filter system implementation," IEEE Industry Applications Magazine, vol. 4, no. 5, pp.21-30, Sep./Oct. 1998.
- [7] B. Singh, K. Al-Haddad, A. Chandra, "A review of active filters for power quality improvement," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.46, no.5, pp.960-971, Oct. 1999.

〈 저 자 소 개 〉



정승기(鄭勝基)

1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 미국 Texas A&M 대학교 방문연구. 1987년~현재 광운대 전기공학과 부교수.