

전기설비와 고조파

(Electrical Facilities and Higher Harmonics)

글/이 재 인(한양대학교 전기공학과 교수, 당 협회 출판위원)

1. 고조파 장애의 형태

일반적으로 배전망에 전기설비가 접속되어 있으므로 배전망의 전압 전류의 분포에 변화가 발생한다. 그러나 다소의 변화가 있어도 배전망에 접속된 콘덴서, 회전기 및 조명설비, 텔레비전 보호장치나 전력계측장치 등이 그 기능을 발휘할 수 있는 한 이것을 장애로 보지는 않는다. 그러나 배전망에서의 전압강하가 기기를 동작시키는 데 필요한 최소한의 전압하한치에 미치지 못하거나 배전전압의 변동이 심하여 조명장치에서 명멸(Flicker)이 발생하면 장애가 된다. 이와 같은 장애는 회로망에 흐르는 비정현파 전류, 즉 고조파 전류가 원인이 된다.

고조파가 부하기에 미치는 영향은 3가지 형태가 있다.

① 고조파 전류의 유입에 의한 기기의 과부하, 과열 손상

② 전자작용에 의한 유도장애

③ 고조파의 전압이 전압의 파형을 일그러뜨림에 따라 전압파형을 이용하는 제어장치에 미치는 영향

과거에는 고조파 발생 원인의 주요한 것이 변압기, 회전기 및 정류기 등이었으나 근년에 와서는 라디오, 텔레비전, 형광등이며, 최근에는 전력전자 분야의 다이리스터가 도입되어 정호각 위상제어를 하게 되면서부터, 이로 인한 고조파 문제가 관심사로 되었다.

기술정보①

각각의 기기설비에 고조파의 영향이 미치는 현상을 정리하면 <표 1> 과 같다.

2. 고조파를 발생하는 전기설비

배전망에 흐르는 고조파 전류의 발생원은

- ① 변압기, 회전기 등의 자기포화로 인한 것
- ② 아크로 등 비선형 기기에 의한 것
- ③ 정류기
- ④ 위상제어 회로를 갖는 전력전자기기 등이며,

고조파 발생 기구를 살펴보기로 한다.

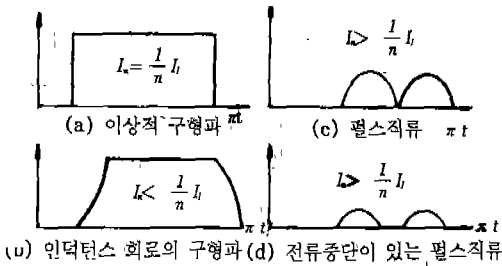
- i) 변압기나 회전기 등의 자기포화로 인한 것

은 히스테레시스 현상이 있는 경우 변압기 1차 단자에 정현파 전압을 인가하면 이 전압에 반항 기전력은 정현파이며, 이 정현파 자속의 변화에 의하여 반항기전력이 발생한다면, 정현파 자속을 발생시키기 위하여 여자전류 파형은 변하지 않으나 여자전류에는 여러가지 기수 고조파를 포함하고 있다. 변압기에서 발생하는 고조파 전류는 변압기의 용량, 전압 및 결선방법 등에 의하여 발생하는 비율이 다르나 부하전류의 0.6~1.7[%]정도가 된다. 또 변압기의 여자전류중에 포함되는 고조파 성분은 주로 제3 및 제5고조파 성분이 된다.

회전기에서는 계자철심이나 그 외의 철심의 포화

<표 1> 부하기에 미치는 영향

기 기 명	영 향 의 종 류
콘덴서 및 리액터	• 고조파 전류에 대한 회로의 임피던스가 공진현상 등으로 감소하며, 과대전류가 흘러서 과열, 소손 또는 진동이 발생
변 압 기	• 고조파 전류로 인하여 철심의 자외형상이 발생하며 소음 발생 • 고조파 전압 전류에 의한 철손, 동손의 증가로 변압기 용량의 감소
형 광 등	• 고조파 전류에 대한 임피던스가 감소하여 과대전류가 흘러서 역률개선용 콘덴서 및 안정기의 과열, 소손이 발생
케 이 블	• 3상4선식 회로의 중성선에 고조파 전류가 흘러서 중성선의 과열
통 신 선	• 전자유도에 의한 잡음 전압의 발생
유 도 전 동 기	• 고조파 전류에 의한 진동 토크로 인하여 회전수의 주기적 변동 • 철손 및 동손 등의 손실이 증가
계 기 용 변 성 기	• 계기용 변성기에 위상오차가 있는 경우 $\pm \delta \tan \varphi$ (φ 는 다이리스터 위상제어 등의 제어전류의 위상각)의 영향에 의하여 측정정도의 악화
적 산 전 력 계	• 전압·전류 유효 자속이 비선형 특성에 의하여 자속변화가 완전 대칭이 되지 못함으로써의 측정 오차 • 고조파 전류가 과대하게 흘러서 전류 코일의 소손
음 향 기 기 (TV, 라디오, 앰프)	• 고조파 전류, 전압에 의한 다이오드, 트랜지스터 및 콘덴서 등의 부품 고장 및 수명저하, 성능의 열화 • 잡음 및 영상의 이그러짐
전 자 계 산 기	• 계산기 동작에 악영향
정류기 등 각종 제어 장치	• 제어신호의 위상변화에 의한 오제어 등
부하집중 제어장치	• 제어 신호의 난맥으로 수신기의 오동작
계 전 기	• 고조파 전류 또는 전압에 의한 설정 레벨의 초과 또는 위상변화에 의한 오동작
전 력 퓨 즈	• 과대한 고조파 전류에 의한 용단
배선용 차단기(NFB)	• 과대한 고조파 전류에 의한 오동작



<그림 1> 전류파형과 고조파 함유율의 관계

에 의하여 저차의 고조파 전류가 발생하며, 스롯의 수나 자극의 형상에 따라서는 고차의 고조파 전류가 발생한다.

ii) 아크로에서 발생하는 고조파 전류는 아크로의 운전중 전극의 단락 개방이 반복되면서 아크 전류는 불규칙하게 동요되며, 아크로용 변압기 용량의 10~30[%]의 제3고조파를 주성분으로 하는 고조파 전류가 발생된다.

iii) 정류기에서 발생하는 고조파는 정류기가 이상적인 형태로 동작하여 구형과 전류가 흐르면 고조파 전류는

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

로 된다. 여기서 I_1 은 기본파 전류, I_n 은 n 차 고조파

<표 2> 기본파 I_1 과 고조파 I_n 의 비율

고조파의 차수	기본파와 n 차 고조파의 실측치 비율	
	구형과 전류	펄스 직류
5	0.2	0.478
7	0.143	0.171
11	0.09	0.087
13	0.077	0.053

<표 3> 저압회로망에서 예상되는 최고의 고조파 전류 산정을 위한 경험치

고조파 차수	3상브릿지 결선에서의 교류 실효치의 최고 고조파 전류[%]
5	30
7	12
11	6
13	5

전류이다. 실제로 전류파형은 <그림 1>과 같이 구형파로부터 변하여 간다.

회로의 인덕턴스가 크게 될수록 구형부분이 길게 되며 고조파 진폭은 작게 된다. 구형과 전류의 경우와 펄스형 전류의 경우 기본파 전류 I_1 에 대한 고조파 전류 I_n 의 비율은 <표 2>와 같다. 또 3상 브릿지 결선의 정류 회로에서 발생하는 고조파 전류의 실측치는 <표 3>과 같다.

공장의 동력회로에서는 제5, 7, 11, 13고조파 성분이 압도적으로 많다.

다이리터나 전력용 트랜지스터를 사용한 직류기 구동회로는 유도성 무효전력을 포함하고 있으므로 보상하기 위하여 콘덴서가 사용된다. 이 때 콘덴서의 용량이 작은 경우는 고차의 고조파로 인한 공진 현상이 발생할 수도 있다.

iv) 위상제어에서 회로를 포함하는 전력전자기 기인 조명의 광량조정, 전열기의 열량조정 등 전력 조정을 목적으로 하는 다이리터나 전력용 트랜지스터가 사용된다. 이것은 상용 주파수의 반파내에서 점호 위상을 제어(제어각 α)하여 전류 도통구간을 조정하는 방법이다.

이 때 부하로 저항을 사용하였을 경우에 출력전압, 전류 파형은 같으며 진폭만 달라진다. 여기서 점호각 α 라 하면 식 (1)과 같이 표현되며, 이 전류에 포함되는 각차 고조파는 정, 부 양방향으로 같은 제어각 α 가 적용되고 식 (2)와 같이 계산된다.

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq \omega t \leq \alpha, \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha \text{에서는} \\ i_t = 0 \\ \alpha \leq \omega t \leq \pi, \pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi \text{에서는} \\ i_t = i_m \sin \omega t \end{aligned} \right\} \dots(1)$$

이것을 폴리급수로 전개하면

$$\left. \begin{aligned} i = b_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \sin n \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \cos n \omega t \\ b_0 = 0 \\ a_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I [\cos(2\alpha - 1) + \sin 2\alpha] \\ b_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I (\cos 2\alpha - 1) \end{aligned} \right\} \dots(2)$$

$$a_n |_{n=1} = \frac{\sqrt{2} I}{\pi} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} - \frac{\cos(n-1)\alpha}{n-1} - \frac{1}{n+1} + \frac{1}{n-1}$$

$$b_n |_{n=1} = \frac{\sqrt{2} I}{\pi} \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1}$$

여기서 $n=3, 5, 7, \dots$, I 는 부하전류 i_L 의 실효치이다.

식 (2)를 사용하여 제어각 α 와 고조파 전류의 관계를 계산하면 제3, 5, 7 고조파분은 α 가 80도 부근에서 가장 크게 포함된다.

v) 최근 교류전동기의 주파수제어에 의한 자변속운전을 하게 되었다. 이 전동기에는 전압형 인버터가 많이 사용되며, 주파수제어와 연동하여 제어하는 전압제어에는 PWM이 사용된다.

이 때 캐리어 주파수는 수 KHz가 된다. 이와 같이 고차의 주파수가 전력계통의 정전용량을 통하게 되어 보호기나 계측기의 동작에 악영향을 미치기도 한다.

이상의 예는 수동적인 고조파 발생원이나 장래 광발전장치가 전력계통에 연계될 것이 예상되며, 이것은 능동적인 고조파 발생원으로 생각되므로 각 방면으로 이에 대한 대책점토가 되어야 할 것이다.

3. 배선용 차단기에 미치는 영향

배선용 차단기를 동작원리로 분류하면 열동 전자식과 완전 전자식으로 분류되며 대표적인 파형의 고조파가 미치는 영향을 동작원리로 고찰하고, 시험에 의한 데이터를 가지고 설명한다.

3.1 배선용 차단기의 동작원리

1) 열동 전자식

열동 전자식은 줄열에 의한 바이메탈의 구부러짐을 이용한 것으로 지연형의 특성은 다음과 같다. 바이메탈의 구부러지는 양을 D 라하면

$$D = \frac{KTL^2}{t}$$

로 표시된다. 여기서 K 는 정수, t 는 바이메탈의 두

께, L 은 바이메탈의 길이, T 는 온도상승치이다. 이때 K, L, t 를 일정한 값으로 보면 $D \propto T$ 가 된다. 또 온도와 줄열과의 관계는 $T \propto I^2 Rt$ 가 되므로 $D \propto I^2 Rt$ 가 된다. 또 비정현파에 의한 발열은 각각의 고조파 주파수 성분에 의하여 발열되며, 그 합계는

$$Rt (I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2) \dots \dots \dots (3)$$

가 되며 $I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_n^2 = I^2$ (비정현파의 실효치)로 표시되므로 식 (3)은 RtI^2 이 된다.

이상과 같이 실효치의 값이 같으므로 발생하는 줄열과 정현파나 비정현파의 경우도 같으므로 특성의 변화는 없다.

2) 완전 전자식

완전 전자식에서 동작시간의 이론식은 자기회로를 구성하는 철심의 흡인력과 철심의 스포링 및 기름의 점성저항에 의하여 결정되며, 다음과 같은 관계가 있다.

$$T = \frac{3}{4} \pi \mu l \left(\frac{d}{c} \right)^3 \int \frac{dx}{F}$$

여기서 T : 동작시간

x : 철심의 이동거리

M : 기름의 점성계수

l : 철심의 길이

d : 철심의 지름

c : 철심과 파이프의 공극

F : 철심에 인가되는 힘

만일 μ, l, c, d, x 를 일정하다고 하면 동작시간 T 는 F 에 의하여 변화하게 되며, 또 임의의 순간에 있어서 전자력을 생각하면

$$F = \frac{1}{2\mu} B^2 S$$

여기서 B : 자속밀도 S : 철심의 면적

또한 주파수라는 요소를 개입시키면

$$\phi_m = \frac{E_m}{2\pi f N}$$

$B_m = \phi_m / S$ 로 부터

$$B_m = \frac{E_m}{2\pi f N S}$$

으로 된다. ϕ_m : 최대자속수 따라서

$$F = \frac{10^7}{64\pi^3} \frac{E_m^2(1 - \cos 2\omega t)}{f^2 N^2 S} \text{가 된다.}$$

여기서 E_m : 역기전력 f : 주파수

N : 코일의 권수 M : 투자율

이상으로 부터 흡인력은 주파수의 2승에 반비례함을 알 수 있다. 또 주파수가 높아지면 다음 식으로 표현되는 손실도 증가하기 때문에 흡인력을 발생시키는 유효자속수가 감소하게 되며 동작시간도 길게 된다. 즉 최소동작전류값이 증가하게 된다. 와전류손을 P_0 라 하면

$$P_0 = K_1 f^2 B_m^2$$

가 되며, 히스테리시스손을 P_K 라하면

$$P_K = K_2 f$$

가 된다. K_1, K_2 는 비례정수이다.

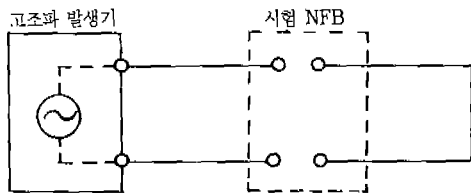
이상과 같이 일반적으로 고조파를 포함한 회로에서 배선용 차단기의 최소동작전류값은 증가하며 동작시간은 길어진다는 것을 알 수 있다. 실제로는 앞에서 설명한 손실로 인하여 온도가 상승하게 되므로 기름의 점성은 떨어지게 되며 동작시간은 짧게 된다. 또 파형에 따라서 파고치가 높게 되는 경우는 실효치 전류는 작아도 순시 흡인력은 크게 되기 때문에 동작은 된다고 생각된다. 따라서 완전 전자식 배선용 차단기인 경우 특성의 변화는 규정할 수가 없다.

3.2 동작원리로 본 고조파의 영향

<표 4>에서 2가지 배선용 차단기에 관한 동작원리 및 고조파의 영향에 관하여 고찰하였다.

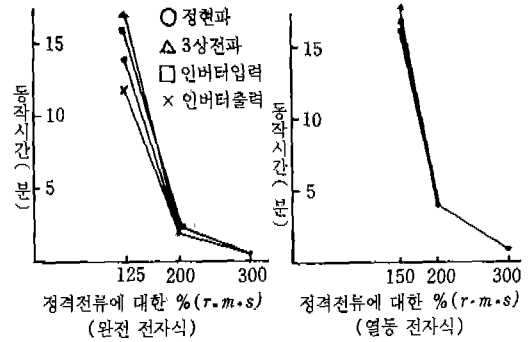
3.3 시험에 의한 고조파의 영향

1) 시험회로

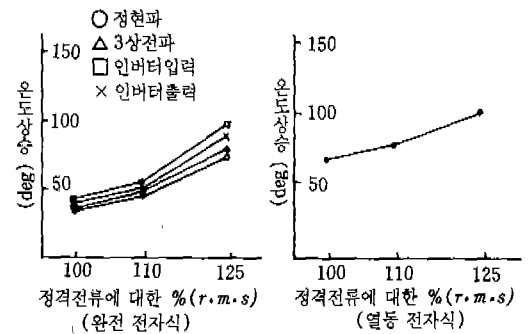


<그림 2> 시험회로

2) 시험결과



<그림 3> 100AF의 열동 전자식과 완전 전자식 배선차단기



<그림 4> 온도상승

시험결과에 의하면 열동 전자식은 온도상승에서 차이가 없으며 차단특성에도 변화가 없다. 이것은 동작원리상과도 별로 차이가 없는 결과이다.

완전 전자식 배선용 차단기에서는 온도상승에 있어서 각 파형의 차이가 있다. 이것은 고조파에 의한 철손의 영향 때문이며, 높은 외형율의 파형일수록 온도가 높게 된다. 또 지연 차단특성에서도 차단시간마다 각 파형간의 차이가 있다.

125[%] 전류의 차단시간은 3상 전파 및 인버터 입력파형쪽이 정현파에 비하여 길며 인버터 출력쪽이 짧게 된다. 입력측은 정현파에 비하여 파고치는 상당히 높으나 전류의 흐름이 중단되는 시간이 있으므로 파이프 내부의 철심에 온도상승은 지연되는 것으로 생각된다. 또 인버터의 출력측은 파고치 등의 영향이 있을 것으로 보인다. 다음은 각 형의 배선용

<표 4> 동작원리로 본 고조파의 영향

종 류	동 작 원 리	고조파가 각 특성에 미치는 영향(상용주파수 정현파와 비교)		
		지연차단특성	순시차단특성	온 도 상 승
열동 전자식	바이메탈의 저항에 의한 줄열을 이용하여 바이메탈을 구부러지게 하므로 특성은 줄열의 발생에 따라 결정된다.	고조파를 어느정도 포함한 회로라도 실효치가 같으면 특성의 큰 변화는 없다.	전자력을 이용하기 때문에 높은 주파수를 포함한 회로에서는 과전류에 의한 역자전류에 의하여 특성은 둔화되고, 차단 전류치는 상승하게 된다.	도체의 표피효과 등으로 약간 발열되나 그 값은 무시할 수 있으므로 온도상승은 거의 변하지 않는다.
완전 전자식	시한을 정하기 위하여 기름을 사용하고 파이프 내에는 임의의 기름의 점성과 과전류 코일에 의한 암페어턴의 전자력에 따라 특성이 결정된다.	고조파 함유율과 파형에 따라 특성이 변화하고 주파수가 높아지면 특성은 둔화하고 차단 전류치가 상승하는 경향이 있다.	위와 같음	외전류손이나 히스테리시스손이 고조파의 증가에 따라서 증가하므로 온도는 상승하게 된다.

차단기가 고조파에 의한 영향을 집약하였다.

가 떨어지며, 낮은 주파수 영역에서 약간 감도가 좋아지는 경향을 나타내므로 순시차단 전류의 선정에서 신중을 기할 필요가 있다.

4. 배선용 차단기의 선정

열동 전자식에서 지연차단 및 온도상승으로 인한 문제는 없으며 선정은 정현파와 같은 실효치 전류에 의하여 동작하므로 실용상 지장은 없다. 그러나 주파수가 높은 회로(400Hz정도)에서 사용하는 경우는 도체의 표피효과에 의한 발열이 수반되므로 약 20% 정도의 여유를 보아주는 것이 바람직하다. 또 순시차단 전류치에 관하여는 높은 주파수에서 감도

완전 전자식에서 차단 특성은 단순하게 고조파의 함유율에 의하여 결정되지 않으며, 파형 및 그 주파수의 성분에 따라서 예민하게 되거나 둔하게 된다. 또 온도상승에 관하여도 고조파 성분, 특히 고차의 고조파 성분에 의하여 증가하기 때문에 그 특성변화 및 온도상승 모두가 전자식의 구조에 따라서 제품개개의 차이가 있다. 그러므로 고조파의 함유율이 높아 파형이 정현파에 비하여 크게 차이가 나는 회로에 사용하는 경우 제작자에 문의하거나 협의하여 선정하는 것이 바람직하다.

<표 5> 배선용 차단기의 집약표

구 분	계 조 업 제(기 본 파)			
	A(60Hz)		B(60Hz)	
차 단 방식	열 동 전 자	완 전 전 자	완 전 전 자	완 전 전 자
MCCB의 정격전류	30AF/15A	30AF/15A	50A/5A	30A/10,20,30A
고조파의 차수와 고조파 함유율	제3고조파 25~50% 함유, 제6고조파 25~50% 함유	같 음	제3고조파 20, 33, 50% 함유, 제5고조파 20% 함유	제3,7,15 고조파 가 각각 20,50, 100% 함유
최소동작전류	—	—	—	수% 적게 된다.
지연차단동작시간 (200% 부하전류시)	별로 영향없음	같 음	—	저 고조파 함유율에서는 짧게 되고, 고 고조파 함유율에서는 길게 된다.
온 도 상 승 (전저극 및 부하측 단자)	—	—	약간 높아지나 별 영향이 없음	고조파의 차수가 높아짐에 따라 전저극의 온도가 높게 된다.

이상과 같은 열동 전자식과 완전 전자식 이외에 전자식(電子式)이 있으나 차단전류치는 간단히 실효치나 주파수 성분에 의하여 결정되지 않고, 검출방식과 파형의 영향을 받으며, 파고치가 높은 파형에서는 차단전류치를 실효치로 환산하여 비교하면 감소하게 되므로 극단적인 외형파의 회로에서 사용하는 경우는 제작사에 문의하여 선정하는 것이 바람직하다.

온도상승에 관하여는 문제가 없으나 주파수가 높은 영역 및 고조파의 함유율이 큰 회로에서 사용하는 경우는 열동 전자식과 같이 도체의 온도상승을 고려하여 약 20% 정도의 여유를 보아 선정할 필요가 있다.