

# 고조파가 전력케이블에 미치는 영향 및 굽기 산정시 고려사항

김세동 | 두원공과대학 교수 · 공학박사, 기술사

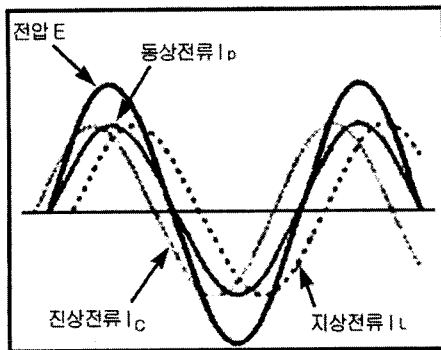
## 1. 고조파발생원인 비선형 부하의 특성

일반적으로 상용전압과 부하전류 파형 사이의 관계가 직선상인 경우의 부하를 선형부하(linear load)라 하며 그림 1과 같다. 즉 전류파형은 전압파형과 동일한 형태이다. 이러한 경우 정현파 전압은 정현파 전류를 만들며, R-L-C로 구성된 부하를 말한다.

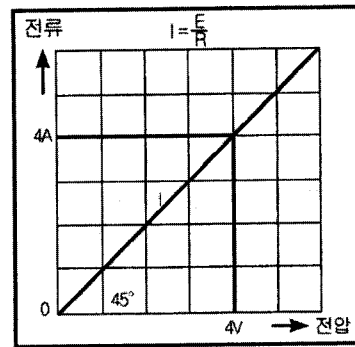
반면에 상용전압과 전류 파형 사이의 관계가 비직선상인 경우를 비선형 부하(nonlinear load)라 하며, 정류회로를 갖는 부하가 해당된다. 앞에서 설명한 바와 같이 정현

파 전압과 이와 모양이 다른 전류파형 사이의 관계를 그림 2에 나타내었다. 이로 인하여 이 둘 사이의 관계는 직선상이 아니며, 이러한 모양은 그림 2와 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 정류



(a) 전압파형과 전류파형



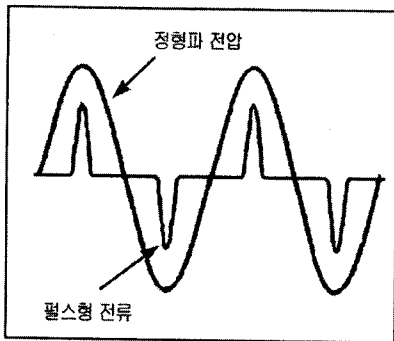
(b) 전압과 전류의 관계 그래프

〈그림 1〉 선형부하의 특성

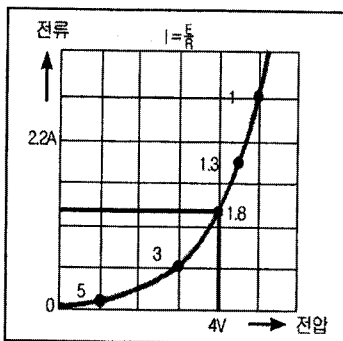


회로는 그 입력측에 브리지 전파정류회로와 평활용 캐패시터를 갖는 구조이다. 캐패시터 단자전압은 회로의 R 또는 L 성분에 의해 전원 전압파형 보다 다소 완만하게 상승하며, 전원전압이 캐패시터 단자전압보다 높은 구간 동안만 전원측에서 캐패시터로 피크형태의 충전전류가 흘러들어간다.

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.



(a) 전압파형과 전류파형



(b) 전압과 전류의 관계 그래프

<그림 2> 비선형부하의 특성

## 2. 비선형 부하가 전력케이블에 미치는 영향

### 2.1 케이블의 전력손실 증가

케이블의 전력손실은 로 표현된다. 여기서, 전류 I는 고조파 왜형률에 의해 증가되어질 수 있고, 저항 R은 직류 저항값과 교류 표피효과 및 근접효과의 합에 의해서 결정된다.

#### ① 고조파전류에 의한 케이블의 전력손실

고조파전류에 의한 전선 허용전류의 변화를 고려할 경우 우선 기준이 되는 전류값에 고조파 함유량에 의한 전류 변화량을 알아야 한다. 전류 파형에 고조파 성분이 함유되는 경우의 실효치는 식 (1)과 같다.

$$I = \sqrt{\sum I^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}$$

따라서, 고조파 전류 성분으로 인해서 케이블의 허용 전류가 감소하게 된다.

#### ② 교류 도체 저항

도체 온도를 일정하게 할 경우 교류 도체 저항은 식 (2)와 같이 나타낸다.

$$\text{교류저항: } R_{AN} = R_D \times (1 + \lambda_S + \lambda_P)$$

여기서, : 특정 온도에 있어서의 직류 도체 저항, : 표피효과 계수, : 근접효과 계수를 나타낸다.

동일 온도 조건에서 기본과 전류에 의한 교류 도체 저항 과 고조파 전류에 의한 도체 저항 의 비를 이라 하면, 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$\beta_n = \frac{R_{An}}{R_{A1}} = \frac{1 + \lambda_{Sn} + \lambda_{Pn}}{1 + \lambda_S + \lambda_P}$$

표 1. 고조파 전류에 대한 교류 도체 저항비

도체 종류	직류 도체 저항	기본파(60Hz)			제3조파(180Hz)			제5조파(3000Hz)		
		표피효과 계수	근접효과 계수	교류도 체저항	표피효과 계수	근접효과 계수	교류도 체저항	표피효과 계수	근접효과 계수	교류도 체저항
600V CV 100mm <sup>2</sup> 1C	0.233	0.00217		0.234	0.0193		0.237	0.0521		0.245
600V CV 100mm <sup>2</sup> 3C	0.238	0.00208	0.0022	0.239	0.0185	0.0188	0.247	0.05	0.047	0.262

따라서, 고조파 성분으로 인해서 케이블의 저항값이 조금 커지기 때문에 케이블의 허용전류가 감소하게 된다. 표 1은 고조파 전류에 대한 교류 도체 저항비를 나타낸 것이다.

▶▶▶ 알아보기

1) 표피 효과 (skin effect)

전선에 교류가 흐를 경우에는 전선 내의 전류밀도의 분포는 균일하지 않고 중심부는 작고 주변부에 가까워질수록 전류밀도가 커지고 있다. 이것은 전선의 중앙부를 흐르는 전류가 만드는 전자속과 쇄교하므로 전선 단면내의 중심부일수록 자력 선 쇄교수가 커져서 인덕턴스가 커지기 때문이다. 그 결과 전선의 중심부일수록 리액턴스가 커져서 전류가 흐르기 어렵고, 전선 표면으로 갈수록 전류가 많이 흐르게 되는 경향을 지니게 된다. 이것을 '표피효과'라 한다. 표피효과는 주파수가 높을수록, 전선의 단면적이 클수록, 도전율이 클수록 그리고 비투자율이 클수록 커진다.

2) 근접 효과 (proximity effect)

두 개의 평행으로 위치한 원형 전선에 교류 전류가 흐를 때, 교류 전류는 도선의 주위를 균일하게 분포되어 흐르지 않는다. 각 전선의 자계는 다른 전선의 전류 흐름에 영향을 미치며, 이것은 전류의 흐름이 도선 내에서 균일하지 않게 만들 뿐만 아니라 도선의 저항을 증가시킨다. 평행하게 놓인 원형의 전선에서 나타나는 현상이다.

2.2 고조파로 인한 역률 저하로 손실 증가

역률이란 교류회로에서 전원에서 공급된 전력이 부하에서 유효하게 이용되는 비율을 말하며, 리액턴스 성분이 포함된 경우에는 전압 와 전류 사이에는 위상차가 생기어 저항 R만인 회로의 전력에 를 곱한 만큼의 전력이 소비된다. 그러나, 과거에는 비선형 특성을 지니는 부하들이 많지 않아 고조파에 의한 역률 저하가 그다지 문제시 되지 않았지만 근래에 와서 전력계통 내에 중요한 문제 중의 하나로 부각되었다.

다시말해서, 비선형 부하가 있는 경우에는 고조파율로 인하여 역률이 저하되고 있으며, 고조파로 인한 역률 계산은 식 (4)와 같이 계산한다.

$$\cos\theta = \frac{1}{\sqrt{1 + THD^2}} \times \cos\theta_1$$

따라서, 고조파에 의한 전류 파형이 왜곡되면, 시스템의 역률이 저하함을 알 수 있고, 고조파 왜율이 100%인 경우에 역률은 기본파 성분만 있을 경우에 비해 70% 수준이 된다.

2.3 중성선의 영상고조파전류로 인한 손실 증가

중성선(N)이란 Y결선하는 경우 그 중성점에 접속되는 전선(인출한 선)을 말하고, 3상 4선식 회로의 중성선에는



각 상의 부하가 평형하고 있더라도 부하에 고조파 전류 발생원이 있으면, 6N-3의 영상분 고조파 전류의 3배의 전류가 흐르게 된다. 이러한 현상으로 인하여 중성선의 과열을 초래하게 된다.

내선규정 제205-9절(간선의 굵기 및 기구의 용량)에 의하면, 중성선의 굵기에 대하여 고조파가 발생하는 장소에서는 중성선의 굵기는 전압선과 동일하게 하도록 하고 있다.

### 3. 3상 평형배선의 4심 및 5심 케이블에서 고조파전류에 대한 환산계수

#### 3.1 고조파전류에 대한 환산계수

IEC 60364에 의하면, 중성도체에 부하 감소 없이 전류가 흐르는 경우에는 회로의 허용전류 결정시 이 전류를 다음과 같이 고려하도록 하고 있다.

(1) 3상 평형 배선의 중성점에 전류가 흐르는 것은 고조파 성분을 가지는 상전류 때문이다. 중성선 전류에서 상쇄되지 않는 가장 큰 고조파 성분은 제3고조파 성분이다. 제3고조파 성분에 의한 중성선 전류의 진폭은 전력주파수 상전류의 진폭보다 클 수도 있다. 이 경우, 중성선 전류는 회로 내 케이블의 허용전류에 상당한 영향을 미치게 된다.

(2) 여기에서 제시하는 환산계수는 3상 평형회로에 적용된다. 3상 중 2상에만 부하가 걸린 경우에는 부담이 더 커지게 된다. 이 경우 중성선 도체에는 불평형 전류와 더불어 고조파 전류가 흐르게 되며, 이로 인해 중성선 도체에 과부하가 걸릴 수 있다.

(3) 컴퓨터 등의 적류전원 등은 상당한 고조파 전류를 발생시킬 수 있는 장치이다. 고조파 간섭에 관한 보다 상세한 내용은 IEC 61000을 참조한다.

(4) 표 2에서 제시된 환산계수는 4심 또는 5심 케이블의 중성선 도체로서 상도체와 단면적이 동일한 경우에만

적용된다. 환산계수는 제3고조파 전류를 기준으로 계산한 것이다. 제9고조파, 제12고조파 등의 상위 고조파 성분이 유효(10% 이상)한 경우, 낮은 환산계수가 적용된다. 상사이에 50% 이상의 불평형이 있는 경우, 낮은 환산계수가 적용될 수 있다.

표 2. 4심 및 5심 케이블 고조파 전류의 환산계수

상전류의 제3고조파 성분	환산계수	
	상전류를 고려한 규격 결정	중성선 전류를 고려한 규격 결정
0 ~ 15 [%]	1.0	-
15 ~ 33 [%]	0.86	-
33 ~ 45 [%]	-	0.86
> 45 [%]	-	1.0

(5) 표 2에 제시된 환산계수를 이용하여, 4개의 부하 도체를 갖는 케이블의 허용전류(4번째 도체 전류는 고조파 성분에 의한 것)를 구할 수 있다. 환산계수는 상도체의 고조파 전류에 의한 가열효과도 고려한 것이다.

(6) 중성선 전류가 상전류보다 높을 것으로 생각되는 경우, 중성선 전류를 고려하여 케이블의 규격을 정해야 한다.

(7) 중성선 전류가 상전류보다 크지 않을 경우, 표 2에서 제시된 3 부하도체의 허용전류를 낮출 필요가 있다.

(8) 중성선 전류가 상전류의 135%를 초과하고, 중성선 전류를 고려하여 케이블의 규격을 정한 경우, 3상 도체는 완전히 부하가 걸리지는 않는다. 상도체에서 발생하는 열이 감소하여 중성선 도체에서 발생하는 열을 상쇄하므로, 3상 도체의 허용전류에 환산계수를 적용하지 않아도 된다.

#### 3.2 고조파 전류에 대한 환산계수의 적용 사례

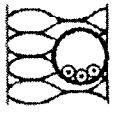
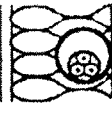

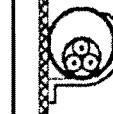
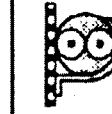
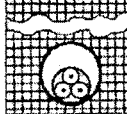
표 3은 IEC 60364에서 정하고 있는 공사방법에 따른 허용전류 표이며, 목재벽면의 단심 및 다심케이블(공사 방

법 C)에서, 39A의 부하가 걸리도록 설계된 3상 회로를 4심 PVC 절연 케이블을 이용하여 벽에 설치한다고 가정하였을 때, 표 3에 따라 6mm<sup>2</sup> 케이블(동)의 허용전류는 41A이며, 회로에 고조파 성분이 없다면 이 케이블로 충분하다.

그러나, 고조파 성분이 다음과 같이 포함된 경우에는 환산계수를 고려하여 케이블을 선정하여야 한다.

(1) 제3고조파 성분이 20% 포함하고 있다면, 환산계수 0.86이 적용되므로 설계 부하는 다음과 같다.

표 3. 공사방법에 따른 허용전류(A) [PVC 절연, 3개 부하도체, 동 또는 알루미늄, 도체온도: 70℃, 주위온도: 기중 30℃, 지중 20℃]

동 도체의 공칭단면적 [mm <sup>2</sup> ]	공 사 방 법					
	A1	A2	B1	B2	C	D
						
1	2	3	4	5	6	7
1.5	13.5	13	15.5	15	17.5	18
2.5	18	17.5	21	20	24	24
4	24	23	28	27	32	31
6	31	29	36	34	41	39
10	42	39	50	46	57	52
16	56	52	68	62	76	67
25	73	68	89	80	96	86
35	89	83	110	99	119	103
50	108	99	134	118	144	122
70	136	125	171	149	184	151
95	164	150	207	179	223	179
120	188	172	239	206	259	203
150	216	196	-	-	299	230
185	245	223	-	-	341	258
240	286	261	-	-	403	297
300	328	298	-	-	464	336



$$\frac{39}{0.86} = 45A$$

따라서, 케이블의 굵기는 10mm<sup>2</sup>를 사용하여야 한다.

(2) 제3고조파 성분이 40% 포함하고 있다면, 중성선 전류는 다음과 같이 계산한다.

$$39 \times 0.4 \times 3 = 54.4A$$

환산 계수 0.86이 적용되므로 설계 부하는 다음과 같다.

$$\frac{46.8}{0.86} = 54.4A$$

따라서, 케이블의 굵기는 10mm<sup>2</sup>를 사용하여야 한다.

(3) 제3고조파 성분이 50% 포함하고 있다면, 중성선 전류는 다음과 같이 계산한다.

$$39 \times 0.5 \times 3 = 58.5A$$

환산계수 1이 적용되므로, 케이블의 굵기는 16mm<sup>2</sup>를 사용하여야 한다.

이상의 케이블 규격은 모두 케이블의 허용전류를 기준으로 결정한 것이며, 전압강하 및 그밖의 설계 관련 사항은 고려하지 않은 것이다.

#### 4. 맺음말

전력케이블의 규격 선정시에 고려할 사항으로는 허용 전류, 전압강하, 기계적 강도, 고조파전류, 수용률 등에 의해 결정된다. 특히, 전선의 고조파 전류에 의한 허용 전류의 변화, 배선 방식에 의한 고조파 전류의 분포, 포설 방법에 의한 유도장해가 문제시 되고 있으므로 관심을 가져야 한다.

근래에 들어 첨단기술의 발전과 아울러 고조파 발생원

이라고 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. 이와같이 교류를 직류로 바꾸어 사용하는 과정에서 입력측의 전류가 크게 일그러져 있음을 알게 된다.

이와같이 고조파성분이 발생하더라도 전기적인 장해가 없으면 상관없는데, 특히 산업용의 인버터장치, 직류 전동기 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 유출 억제제를 위한 가이드라인을 설정하여 적극 보급하고 있다. 국내에서도 고조파에 대한 관리기준을 구체적으로 제정하고 보급하여 고조파로 인한 여러 안전사고 발생을 최소화하여야 한다.

#### ▶▶▶ 참고문헌

1. 김세동, 비선형부하가 역률관리에 미치는 영향, 전기저널, 2003
2. 이광섭 외, 저압다중선로의 중성선 굵기 선정기준 개선에 관한 연구, 산업자원부, 2004
3. IEC 60364, 2005
4. 내선규정, 대한전기협회, 2005
5. 장진, 전력시스템의 배전손실, 전력기술인, 2000
6. 堀越俊夫, 高調波發生のメカニズムとその障害対策, 電氣と工事, 1994