

Photovoltaic Power Generating System

전력계통 고조파 대책과 역률개선 기술

전력용 콘덴서는 무효전력을 보상하여 역률을 개선하기 위해 전력계통에 없어서는 안 될 기기이다. 콘덴서는 본래 절연 신뢰성이 높은 기기인데, 고조파 발생부하로 사이리스터 응용기기가 광범위하고 다양하게 사용됨에 따라 콘덴서 설치와 운용을 잘못하면 전력계통에 과대한 고조파 왜곡을 발생시켜, 다른 기기에 영향을 줄 뿐 아니라, 콘덴서 자체도 성능열화 또는 과열손상을 초래한다. 따라서 고조파 발생원을 갖는 계통에서는 콘덴서 설치·운용에 있어서 충분한 검토가 필요하다. 본론의 구성은 전력계통에서 이해하기 어려운 고조파 관련 기술을 학습한 후, 무효전력제어와 역률개선 기술을 해설하고자 한다.

글 _ 이성우 | 파워세븐엔지니어링 대표
 임종필 | 파워세븐엔지니어링 차장
 박선봉 | 롯데건설 부장
 최진성 | (주)동양티피티 이사

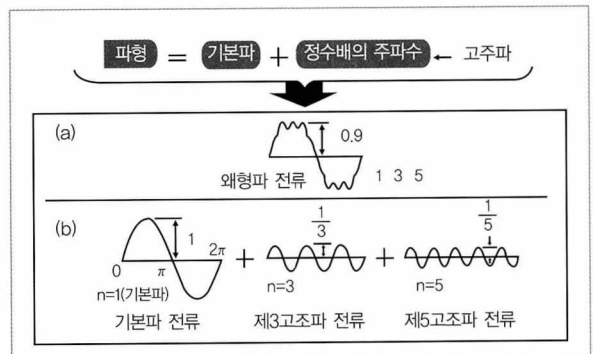
1. 고조파의 개요

1.1 고조파 정의

전력계통에서의 파형왜곡의 원인이 되는 것으로서는 다음의 것을 들 수가 있다.

- 1) 변환장치
- 2) 아아크로, 전기로
- 3) 형광등
- 4) 회전기
- 5) 변압기
- 6) 과도현상에 의한 것

특히 고조파의 발생량이 크고 계통에 영향을 주는 것은 대형 아크로, 대용량 전력변환장치(정류기, 싸이리스터) 등이 대표적이다. 변환장치는 교류측이나 직류측이나 모두 고조파 성분을 함유하고 어느 측에도 고조파 장애가 발생



【그림 1】 고조파 정의

하지만, 특수한 경우를 제외하면 직류부하에 근접해서 설치하기 때문에 교류계통의 영향이 광범위하게 미치는 것이 보통이다. 고조파란 그림 1과 같이 전력계통의 60Hz를 기본파로 하고, 기본파의 정수배 주파수를 갖는 것으로 정의하고 있다. 일반적으로 고조파 해석은 50차수까지 해석할 수 있으나 전력계통에 미치는 고조파는 주로 저차 고조파인 제3, 5, 7, 11... 고조파 등이 해당되고, 통신선로에 미치는 고조파는 가칭주파수 대역에 영향을 주는 40차수 부근의 고차 고조파



가 해당한다. 고조파에 대한 기본 적인 이론은 관련서적을 참고하기 바라며, 본론에서는 전력계통 실무에서 필요한 내용을 주로 해설하기로 한다.

【표 1】 변압기 여자전류 속의 고조파 전류 함유율

차수	열간압연규소강판	냉간압연규소강판
기본파	1	1
3차	0.15~0.55	0.14~0.5
5차	0.03~0.25	0.1~0.25
7차	0.02~0.1	0.05~0.1
9차	0.005~0.02	0.03~0.06
11차	0.01 이하	0.01~0.03

가. 변압기에서 발생하는 고조파 전류

변압기 철심의 자화특성은 직선적이 아니고, 히스테리시스 현상이 있기 때문에 변압기의 여자전류는 표 1과 같이 홀수 고조파를 내포한 왜곡파형이 된다.

나. 회전기에서 발생하는 고조파 전류

회전기에서 발생하는 고조파 전류는 홀수의 자극형상 등에 의해 주로 고차의 홀고조파가 발생하지만 철심의 포화에 의한 저차의 고조파 전류가 발생하는 경우도 있다.

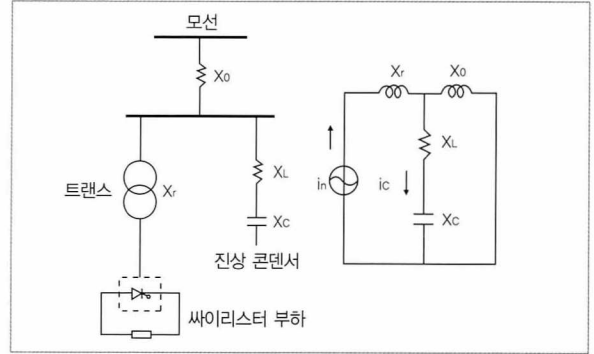
다. 아크로에서 발생하는 고조파 전류

아크로가 운전되는 동안, 전극판에서의 단락·개방이 반복되기 때문에 제3고조파를 주성분으로 하는 고조파 전류가 주로 발생한다.

라. 전력변환기에 의한 고조파 전류

변환장치에는 여러 가지 결선 방법이 있고 6, 12, 18, 24 Pulse의 출력을 얻기 위해 기본적으로 6Pulse의 것을 조합해서 사용하고 있으며 변환장치의 고조파 발생차수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

고조파 발생원에서 나타난 고조파 전류는 그림 2와 같이 전원계통의 임피던스가 작을 때, 즉 전원용량이 클 때는 대부분의 고조파 전류는 전원측으로 유입하므로 동기기나 콘덴서 등의 병렬부하에 주는 영향은 적지만 임피던스가 크면 (전원 용량이 작음) 고조파 전류는 병렬부하에 유입하여 이



【그림 2】 진상 콘덴서를 포함한 계통

것들을 과열시킨다. 이에 대한 현상은 이후에 상세히 설명하기로 한다.

1.2 변환장치의 고조파 발생차수

변환장치의 결선방식이 결정되면, 고조파 발생차수는 수식(1)를 이용하여 알 수가 있다.

$$n = mP \pm 1 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, n : 고조파 발생차수
 m : 자연수 1, 2, 3, 4...
 P : Pulse 수

따라서 6펄스 결선방식을 사용하는 경우, 고조파 차수는 5, 7, 11, 13... 와 같이 발생한다.

1.3 고조파 함유율

1) 고조파 전류 함유율

수식(1)과 같이 고조파 발생차수를 구하고, 기본파 전류에 대하여 각 차수의 고조파 전류 함유율은 수식(2)를 이용하여 추정할 수가 있다.

$$I_n = \frac{I_1}{n} \dots\dots\dots (2)$$

따라서 6펄스 결선방식을 사용하는 경우, 차수별 고조파 전

류 함유율은 표 2와 같이 유사한 함유율을 나타낸다. 12펄스 방식을 사용하면 제 5, 7 고조파 전류발생을 억제할 수 있으므로 제 11, 13, 23, 25 고조파 전류가 주로 발생하게 되나, 함유율이 매우 감소되므로, 실질적인 고조파 억제대책이 가능한 것이다. 이러한 원리를 고조파 억제 대책 중에 변환장치의 다상화라고 한다.

【표 2】 차수별 고조파 전류 함유율 예

n차 고조파 전류	고조파 전류 함유율(%)
I_5	20
I_7	14
I_{11}	9
I_{13}	7

고조파 전류 관리기준은 표 3과 같이 차수별 함유율로 관리할 수 있으며, 종합 왜형율(THD) 이하 값이 되도록 고조파 전류를 억제하여야 한다. 고조파 전류를 측정하는 경우, 부하 운전 조건에 따라 변화될 수 있으므로, 일반적으로 15분 또는 30분 정도의 부하조건(Total Demand Distortion)을 고려하여 측정하면, 정확한 측정값을 얻을 수 있다.

【표 3】 고조파 전류 관리기준 IEEE Std. 519 (120V~69,000V, 단위:%)

$SCR=I_{sc}/I_L$	Individual Harmonic Order(Odd Harmonics)					
	<11	11<h<17	17<h<23	23<h<35	35<h	THD
<20	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	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

주) I_{sc} : 고조파 전류 측정 Point의 3상 단락전류, I_L : 기본파 전류, h : 고조파 차수

즉, 전류 THD는 수식(3)에서와 같이 고조파 전류 실효치와 기본파 전류 실효치의 비로서 나타내며, 고조파 발생의 정도를 나타내는데 사용된다.

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \times 100\% \dots\dots (3)$$

여기서, I_1 : 기본파전류, I_2, I_3, \dots, I_n : 각 차수별 고조파전류

2) 고조파 전압 함유율

고조파 전류가 발생하면, 계통의 임피던스 특성 때문에 전압의 파형이 왜곡된다. 특히 저압측의 전압 파형 왜곡(찌그러짐 정도나 Plat topping 현상 등)은 위상제어기기에 미치는 영향이 크므로, 5% 이내로 관리할 필요가 있다. 고조파 차수에 대한 전압은 수식(4)와 같이 표현된다.

$$V_n = 2 \cdot \pi \cdot I_n \cdot f_n \cdot L_N \dots\dots (4)$$

따라서 기본파 전압에 대한 고조파 함유율은 수식(5)로 나타내며,

$$\mu_n = \frac{V_n}{V_1} \dots\dots (5)$$

고조파 전압의 적합성은 표 4와 같다.

【표 4】 IEC-Publication 1000-2-2, 고조파 전압의 적합성

n	Compatibility	n	Compatibility	n	Compatibility	n	Compatibility
2	2.0	14	0.2	26	0.2	38	0.2
3	5.0	15	0.3	27	0.2	39	0.2
4	1.0	16	0.2	28	0.2	40	0.2
5	6.0	17	2.0	29	0.6	41	0.5
6	0.5	18	0.2	30	0.2	42	0.2
7	5.0	19	1.5	31	0.6	43	0.5
8	0.5	20	0.2	32	0.2	44	0.2
9	1.5	21	0.2	33	0.2	45	0.2
10	0.5	22	0.2	34	0.2	46	0.2
11	3.5	23	1.5	35	0.6	47	0.5
12	0.2	24	0.2	36	0.2	48	0.2
13	3.0	25	1.5	37	0.5	49	0.5

주) 전압 THD = $\sqrt{\sum \mu_n^2}$ with $\mu_n = \frac{V_n}{V_1} \cdot 100\%$

즉, 전압 THD는 수식(6)에서와 같이 고조파 전압 실효치와 기본파 전압 실효치의 비로서 나타내며, 고조파 발생의 정도를 나타내는데 사용된다.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \times 100\% \dots\dots (6)$$

여기서, V_1 : 기본파전압, V_2, V_3, \dots, V_n : 각 차수별 고조파전압



1.4 고조파전류에 의한 무효전력

대다수의 전력기술인에게 고조파 무효전력이란 용어는 생소하게 들릴 수 있을 것 같아서 이에 대하여 간략히 해설하고자 한다. 기본파 전류의 무효전력을 Q_1 이라고 하고, 변환장치에서 발생하는 고조파 전류의 무효전력을 HQ 라 하면,

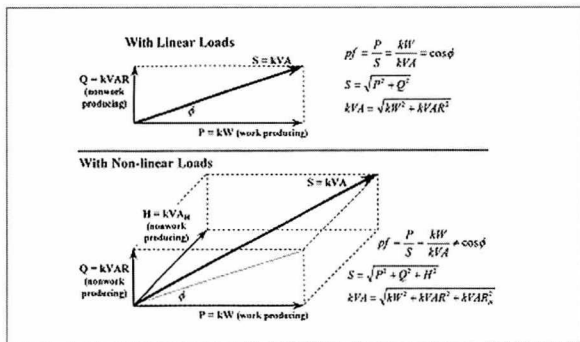
기본파 전류에 대한 피상전력은 수식(7)과 같이 나타내고

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \dots\dots\dots (7)$$

고조파 전류에 의한 무효전력을 벡터합성하면 전체 피상전력은 수식(8)과 같이 표현된다.

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + HQ^2} \dots\dots\dots (8)$$

따라서 수식(8)을 벡터도로 표현하면, 그림 3과 같이 3차원적으로 해석되며, 결국 고조파 전류를 억제하여, 고조파 무효분을 줄이면 역률이 상승된다는 것을 알 수 있다.



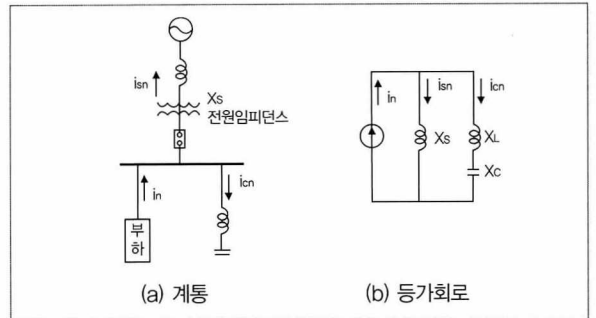
【그림 3】 유효, 무효, 피상전력의 벡터도

2. 전력계통 공진 현상

2.1 계통공진

고조파 전류가 콘덴서에 유입하여 가열하느냐의 여부는 발생고조파의 차수와 크기에 좌우된다. 그림 4와 같이 고조파

부하가 있는 계통에서 어떠한 상태일 때 콘덴서에 고조파전류가 해로운지 살펴본다. 고조파 발생부하의 고조파 임피던스는 전원측 및 콘덴서 회로의 고조파 임피던스에 비해 충분히 크므로, 고조파 발생부하는 고조파의 전류원으로 취급할 수 있으므로 그림 4의 (b)와 같은 등가회로를 생각할 수 있다.



【그림 4】 고조파 발생 계통

따라서 고조파 전류 i_n 은 전원계통, 콘덴서로 임피던스의 역수에 비례해서 분류하므로 수식(9)와 (10)과 같이 나타낸다.

$$i_{sn} = \frac{(nX_L - X_C/n)}{nX_s + (nX_L - X_C/n)} \times i_n \dots\dots (9)$$

$$i_{cn} = \frac{nX_s}{nX_s + (nX_L - X_C/n)} \times i_n \dots\dots (10)$$

단, i_n : 전류원의 차 고조파 전류

i_{cn} : 콘덴서에 유입하는 n 차 고조파 전류

i_{sn} : 전원측에 유입하는 n 차 고조파 전류

X_s : 전원계통의 기본파 리액턴스

X_L : 직렬리액터의 기본파 리액턴스

X_C : 콘덴서의 기본파 리액턴스

수식(9) 및 (10)에서 n 차 고조파 임피던스 $nX_L - X_C/n$ 가 양 또는 음의 값이냐에 따라, i_{cn} , i_{sn} 의 값은 달라진다.

계속