

(上) 負荷電流, (下) 高調波電流

# 電力系統의 高調波對策

## Harmonics in Power System

②

박종근

서울대학교 전기공학과

신건학 · 이원빈 · 강영석

한전 기술연구원

### 3·2·4 혼합 브리지에 의한 회로의 경우

가. 유의점

이 회로방식은 우수차의 고조파 전류를 발생시키므로 약 6% 직렬 리액터가 부가된 커패시터에 공진현상을 일으키게 한다.

나. 회로조건

제 4 조파 전류 (6%의 직렬 리액터가 부가된 커패시터의 공진점은 4.1차)에 의한 과부하에 유의한다.

### 3·2·5 직렬 리액터 철심의 자기포화에 의한 영향

가. 유의점

직렬 리액터는 주로 경제성 등의 이유 때문에 철심이 들어 있도록 제작되는 것이 보통이다. 이 경우 고조파를 포함하는 유입전류가 허용한도를 넘어서면 철심의 자속밀도가 포화되며 직렬 리액터의 리액턴스가 저하되고 공진현상을 발생시킬 수 있다. 이는 소위 인입현상이라고 말하여지고 철심이 든 리액터의 비선형 특성때문에 일

어나는 현상이다.

나. 회로조건

6% 리액터의 공진차수는 4.1차이지만 직렬 리액터의 리액턴스가 감소하여 그 값의 65%가 되는 경우에는,

$$X'_L = 0.65X_L \text{ 이 되고}$$

$$n'X'_L = n' \times 0.65X_L = n' \times 0.65 \times 0.66X_C$$

$$= \frac{X_C}{n'^2} \quad (3 \cdot 7)$$

가 되는 공진조건으로부터

$$n' = \sqrt{\frac{1}{0.65 \times 0.66}} = 5.1 \text{ 차}$$

에서 공진하게 된다. 즉 제 5 조파에 대하여 유도성이었던 커패시터 설비가 용량성이 된다.

### 3·3 전력용 콘덴서 설비의 고조파 허용한도

연속 운전시 전력용 커패시터 설비의 고조파 허용한도에 대해서는 고차범위의 설계 및 검증 데이터가 부족하기 때문에 제품의 표준공업규격에 최대 사용전류, 최대 사용전압 및 온도상승 한도를 규정해야 할 필요가 있다. 그 한 예로 일

〈표 3·1〉 전력용 콘덴서 설비의 고조파 허용 한도

高調波次數	3	5	7	11	17	23	25	39	49
커패시터의 許容高調波含有率(%)	*1	*2							
許容電圧(%)	77	91	91	91	91	91	91	91	91
커패시터의 許容電圧(%)	*3					(3.1)	(2.8)	(1.8)	(1.4)
6% 直列 리액터의 許容高調波含有率(%)	*4								
許容電圧(%)	26	18	13	8.2	5.3	3.9	3.9	2.3	1.9
6% 直列 리액터의 許容電圧(%)	*5								
許容電圧(%)	8.9	3.5	6.9	9.1	9.6	1.0	1.0	1.0	1.1

( ) 안은 基本波 電流가 110%일 때의 計算結果이다.

표의 계산산출 근거

$$*1 \quad 1 + (I_n/I_n \frac{1}{n}) \leq 1.256 \quad \therefore I_3/I_1 \leq 77\%$$

$$*2 \quad \sqrt{1 + (I_n/I_1)^2} \leq 1.35 \quad \therefore I_5/I_1 \leq 91\%$$

$$*3 \quad V_{Dr} = V_n/V_1 = \frac{1}{n} \cdot \frac{I_n}{I_1} \quad \therefore V_{Dr} \approx 26\%$$

$$*4 \quad \sqrt{(\frac{n}{5} \cdot \frac{I_n}{I_1})^2} \leq 0.35 \quad I_n/I_1 \leq 0.35 \frac{5}{n}$$

$$*5 \quad V_n = (0.06n - \frac{1}{n}) X_c \cdot I_n$$

$$V_1 = X_c I_1$$

$$V_{Dr} = V_n/V_1 = (0.06n - \frac{1}{n}) \cdot \frac{I_n}{I_1} \quad \therefore V_{Dr} = 8.9\%$$

본 전력중양연구소에서 규정한 고조파 허용한도를 표 3·1에 나타냈다. 이 제안은 각 규격을 기본으로 고조파 차수를 제 5조파 이외에도 적용이 가능하도록 확장하고 유입한도의 표준을 고려한 것이다. 단일 고조파에 대한 전력용 콘덴서 설비의 고조파 허용한도 정격전압에서 3.3kV, 6.6kV인 콘덴서 및 직렬 리액터에 기본과 정격 전류가 흐르는 경우, 단일 고조파에 의한 고조파 허용한도 계산결과를 나타냈다.

### 3·4 지락 과전류 보호계전기(OCGR) 고조파 특성시험

#### 3·4·1 개요

현재 한전 전력소 구내에서 사용중에 있는 지락 과전류 보호계전기 가운데 널리 쓰이고 있는

3사 제품에 대하여 각종 고조파에 대한 동작특성시험을 실시하였다.

#### 3·4·2 시험방법

i) 시험 대상기기의 Tap/Lever가 0.5/5, 0.5/10, 1/5, 1/10인 각각의 위치에서 고조파 특성치를 읽음.

ii) 기기의 기본과 및 고조파에 대한 Minimum Pick Up 전류치를 알아보기 위하여 HRT-31과 TPR33N을 조합한 고조파 발생기의 출력단자를 계전기의 전류입력 단자와 전류계(MA-50)에 연결하고 고조파발생기의 Amplitude를 수동 조작하여 계전기 원판이 가동하는 점에서 전류계의 전류치를 읽음.

iii) 계전기의 고조파전류에 의한 한시 특성을

〈표 3·2〉 고조파 공급조건치

항 목	조 건 치
基本波	60Hz
高調波	180Hz, 300Hz, 420Hz, 540Hz
合成波	기본파 (100%) + 3調波 (40%, 20%, 10%)
	기본파 (100%) + 3調波 (30%, 20%, 10%) + 5調波 (30, 20, 10)
	기본파 (100%) + 5調波 (40%, 20%, 10%)

알아보기 위하여 고조파발생기의 Amplitude를 조정, Tap 전류의 200%, 300%, 500%, 700%로 계전기에 각각 공급해 줄 때 계전기 접점이 붙는 시간을 측정함. 이때 Millisecond Counter (MCS-5N)의 Start 단자는 계전기의 ICS (한시접점) 양단자에 연결하고 고조파발생기의 출력 전류 SW를 on과 동시에 계전기 원판 가동시점에서 Counting을 시작하여 계전기 접점이 붙는 순간의 시간을 측정함.

3·4·3 사용계측기

- i) 전류계 (MA-50)
- ii) Millisecond Counter (MCS - 5 N)
- iii) 고조파발생기
  - Distorted Wave Generator (HRT - 31)
  - Protective Relay Test Set
    - Operating Power Source Unit (TP R - 33AN)
    - Amplifier Unit (TPR - 33BN)

3·4·4 시험결과

기본파에서의 Min Pick up 전류치나 한시특성은 Tap이나 Lever 위치에 관계없이 3사 제품이 양호한 특성을 갖고 있었으나 고조파 전류별의 Min Pick Up 치와 Tap 전류치의 200%, 300%, 500%, 700%로 주입하였을 때의 한시동작 특성은 고조파에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있었다. 마찬가지로 기본파에 3조파를 합성 주입하였을 경우와 3조파, 5조파를 합성 주입하였을 경우의 한시특성도 위의 경우와 비슷하였다(표 3·3 참조. 지면상 1 case만 수록). 또한 5, 7, 9조파는 Tap 전류치의 500%, 700%

〈표 3·3〉

조건 : Tap (0.5) Lever (5)

Harmonic Freq	Min Pick Up (H)	Tap × [ ] % (sec)			
		200	300	500	700
기본파	0.519	7.802	3.109	1.361	0.990
3 조 파	0.383	3.852	1.667	0.745	0.499
5 조 파	0.374	3.446	1.514	0.664	0.439
7 조 파	0.349	3.498	1.508	0.661	-
9 조 파	0.361	3.766	1.608	-	-
기본 (100) + 3 조파 (40%)	0.488	6.759	2.826	1.307	0.941
" + " (20%)	0.497	7.431	3.013	1.345	0.972
" + " (10%)	0.496	7.752	3.087	1.754	0.984
기본 + 3 조파 (30%) + 5 조파 (30%)	0.473	6.521	2.776	1.301	0.936
" (20%) + " (20%)	0.499	7.086	2.933	1.328	0.962
" (10%) + " (10%)	0.510	7.544	3.042	1.347	0.984
기본 + 5 조파 (40%)	0.470	6.530	2.755	1.301	0.952
" (20%)	0.498	7.347	2.996	1.359	0.985
" (10%)	0.505	7.678	3.096	1.362	0.992

에서 계전기의 Burden이 크기 때문에 과전압이 걸려 측정이 불가능하였고 특히 국내 제품인 경우 고조파에 대한 오동작 특성이 더욱 심한 것을 상기 시험을 통해 알 수 있었다.

### 3·5 보호계전기 오동작 사고의 예

서울에 위치한 전력소의 중성선 전류 과다로 인한 #1 MTR 2차측 지락전류 계전기 오동작 사고는 경부하시 #1 MTR로 통합 운전하는 경우 (사고시간대 : 23:00~24:00)에 발생하였는데, 표 3·4에서 알 수 있듯이 #1, #2 MTR의 분리 운전시보다 기본과 불평형전류는 감소하였으나 3조파의 고조파량이 증가하여 사고시간대에 중성선전류가 가장 크게 나타났다.

이 사고는

- i) 통합운전을 함으로써 각 D/L에서 유입되는 3조파의 증가로 중성선전류 증대
- ii) MTR 1대의 부하전류는 사고시간대에 가장 높고 따라서 부하로부터 고조파발생량의 증가

〈표 3·4〉 #1 MTR 중성선 전류

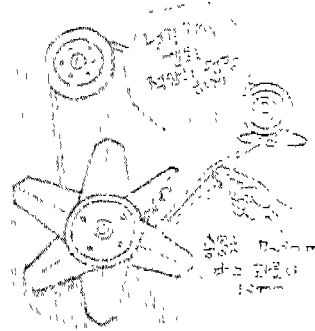
測定時間	基本波電流	3調波	備 考
1. 15			CT비
17:00	0.45(A)	0.33A	1000/5
18:00	0.52	0.41	
19:00	0.54	0.47	
20:00	0.50	0.54	
21:00	0.51	0.53	
22:00	0.47	0.53	
23:00	0.44	0.52	
23:10	0.35	0.92	통합운전 ↑
23:30	0.28	0.97	
12:00	0.28	0.84	
1. 16			
01:00	0.19	0.77	
02:00	0.17	0.69	
04:00	0.16	0.67	
06:00	0.20	0.63	
08:00	0.25	0.70	

## 自動車 에너지節約

에너지관리공단 제공

### 냉각 팬(Fan)의 벨트는 적당히 팽팽하게 합시다

- 팬 벨트의 상태가 나쁘면 엔진의 과열, 출력의 저하, 연료소비 증가의 원인이 됩니다.
- 팬 벨트가 손상되어 있거나 노후된 경우에는 교환하고, 너무 느슨하거나 지나치게 팽팽해도 안됩니다.



- iii) 각상 3조파전류의 합은 부하전류의 평형 상태에서 가장 큰 원인 등이었다.

## 4. 고조파 예측계산

### 4·1 필요성

수년전부터 에너지 절약형 기기로서 반도체를 이용한 전력제어기가 대폭적으로 증가하고 있으며, 이러한 기기는 다량의 고조파를 발생, 계통으로 유입시키고 이로 인한 각종 장애 및 사고를 일으키고 있는 실정이다. 이같이 고조파 발생기기가 계속 증가하고 고조파에 의한 장애발생의 빈도가 많이 됨은 충분히 예견되는 일이고 전력공급의 신뢰도 및 전력품질의 향상을 위하여는 효과적인 고조파 억제대책이 요구된다. 상기 대책을 위하여는 전력계통에 유입된 고조파

성분이 어느 정도 분포하고 동시에 각 Node 별로 전압왜율이 어느 정도의 크기로 되는가를 파악하는 일이 필요하다. 다시 말하면 전력계통에 있어서 고조파 성분의 크기 및 분포상태를 예측하는 프로그램이 필요하다.

#### 4.2 고조파 분포계산 이론

다이리스터 변환기에 투입한 전류  $I$ 에 고조파  $I_n$ 이 포함된 경우  $I$ 는 식 4.1로 나타낸다.

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dots + \dot{I}_n = \sum_{n=1}^n \dot{I}_n \quad (4.1)$$

한편 전원전압  $V$ 의 기본파를  $V_1$ 으로 하고 또  $n$ 차 고조파에 대한 회로 임피던스를  $Z_n$ 로 하면

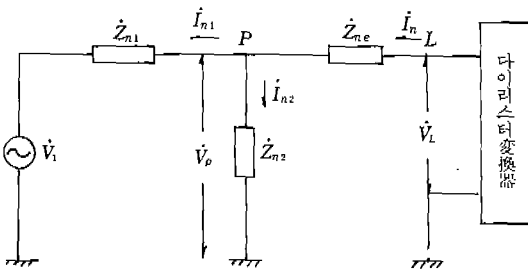
$$\begin{aligned} \dot{V}_L &= \dot{V}_1 - \sum_{n=1}^n \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_n \\ &= (\dot{V}_1 - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_1) - (\dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{Z}_3 \cdot \dot{I}_3 + \dots + \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_n) \end{aligned} \quad (4.2)$$

으로 된다.

따라서 변환기의 단자전압에는 고조파 전류  $I_n$ 에 대응한 전압강하 전원에 대하여 정방향으로 하면 식 4.2는

$$\dot{V}_L = (\dot{V}_1 - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_1) + \dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 + \dot{Z}_3 \cdot \dot{I}_3 + \dots + \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_n \quad (4.3)$$

로 되고 마치 다이리스터 변환기측에서 고조파 전류  $\dot{I}_n$ 이 발생하여 전원측으로 유입하는 회로로 간주할 수 있다. 발생원내부 임피던스는 일반적으로 크기 때문에 여기에서는 정전류 발생원으로서 해석한다. 그림 4.1에서 고조파전류  $\dot{I}_n$ 은 P점에 있어서  $\dot{I}_{n1}$ 과  $\dot{I}_{n2}$ 로 분류되는데, 그 크기는



〈그림 4.1〉 고조파 전류의 분류

$$\dot{I}_{n1} = \frac{\dot{Z}_{n2}}{\dot{Z}_{n1} + \dot{Z}_{n2}} \cdot \dot{I}_n \quad (4.4)$$

$$\dot{I}_{n2} = \frac{\dot{Z}_{n1}}{\dot{Z}_{n1} + \dot{Z}_{n2}} \cdot \dot{I}_n$$

로 된다. 지금  $\dot{Z}_{n1} = jn\omega L$ ,  $\dot{Z}_{n2} = -j\frac{1}{n\omega C}$ 로 하

고  $\dot{Z}_{n1} + \dot{Z}_{n2} = j(n\omega L - \frac{1}{n\omega C}) \approx 0$ 으로 되는 조건인 경우에는 제 3장에서 설명한 바와 같이  $\dot{I}_{n1}$ ,  $\dot{I}_{n2}$ 는  $\dot{I}_n$ 에 비해 대단히 크게 되고 P점에는 큰 고조파 전압이 발생한다.

#### 4.3 간략계산 수법

전력계통에 고조파 발생원인 부하기기를 접속할 때 그 접속점 고조파전압을 식 4.5로 구한다.

$$\dot{V}_n = \dot{Z}_n \cdot \dot{I}_n$$

이 방법은 유럽의 일부 국가에서 부하기기의 접속에 의한 전압왜가 규제치의 범위내인지 아닌지를 확인하기 위한 간략계산으로 사용하고 있다. 수계산에 의해 계산할 수 있는 이점은 있어도 접속점 이외의 지점에서 공진등에 의한 이상전압 왜율이 발생할 가능성이 있어도 그것을 예측할 수 없고  $Z_n$ 의 선정에 문제점이 있는 등의 이유로 제한된 범위밖에 이용할 수 없다.  $Z_n$ 은 유도성 리액턴스 분만을 나타내고 고조파차수에 비례하여 증가하나 실측결과나 상세한 계산결과에 의하면 계통 임피던스의 주파수 특성은 복잡하게 변화하고 식 4.5에 의한 예측계산은 개략적인 수법이라 하겠다.

#### 4.4 엄밀계산 수법

전력계통을 충실히 모의함으로써 계통에 유입한 고조파의 분포상태를 엄밀하게 계산할 수 있다. 계통의 모의방법으로서는 선로나 부하 등을 소형의 저항이나 리액터 등으로 구성하고 실제로 전류를 흐르게 하는 방법도 있으나 선로나 부하 등을 임피던스 값으로 수치화하여 프로그램을 이용한 계산방법이 최근 많이 이용되고 있다. 그 방법은 4.5항에서 자세히 설명하였다.

(다음 호에 계속)