



# 악성부하가 지중케이블에 미치는 영향

송일근 · 이병성 · 이재봉 <한전 전력연구원>

## 1 배선의 정의

배선이란 전기사용장소에서 고정하여 시설하는 전선을 말한다. 기계 기구 내에 그 일부분으로 시설하는 전선, 소세력 회로의 전선 등은 포함되지 않는다. 고조파 영향에 관해서 생각하는 경우에는 기계기구의 전로를 제외한 강전의 전송에 사용하는 전로의 문제로 파악해야 한다. 따라서 전선의 고조파 전류에 의한 허용전류의 변화, 배선방식에 의한 고조파 전류의 분포, 포설방법에 의한 유도장해가 문제가 된다.

고조파 회로의 계산은 그림 2-1과 같이 왜형파를 푸리에 급수에 의한 각 차수별 고조파로 분해하여, 각 차수별 고조파마다 회로계산을 실시하고, 이것을 중첩된 왜형파로서 전압, 전류의 관계를 구한다. 따라서 n차 고조파에 대한 식 (2)은

$$Z_n = R + jnX \quad (2)$$

가 된다.

그러나 식(2)에서 고조파에 의한 교류 도체저항의 변화는 고려되지 않는다.

## 2. 선로 임피던스와 고조파

단락전류나 전압강하 계산의 기초가 되는 선로 임피던스 Z는

$$Z = R + jX = R + j\omega L \quad (1)$$

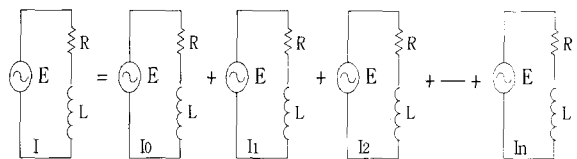
R : 1선의 교류 도체저항(Ω),

L : 1선의 인덕턴스(H),

$\omega$  :  $2\pi f$

f는 주파수(Hz)를 나타내고, 리액턴스(X)는 주파수에 비례한다.

고조파는 기본파 주파수의 n배 파형이기 때문에,



$$Z = \sqrt{\frac{E_0^2 + E_1^2 + E_2^2 + \dots + E_n^2}{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}}$$

$$Z_0 = R, \quad Z_1 = R + j\omega L, \quad Z_2 = R + j2\omega L, \quad Z_n = R + jn\omega L$$

$$I_0 = \frac{E_0}{Z_0}, \quad I_1 = \frac{E_1}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{E_2}{Z_2}, \quad I_n = \frac{E_n}{Z_n}$$

그림 2.1 고조파에 대한 선로 임피던스의 계산

### 3. 고조파를 함유한 전류의 실효치

고조파 전류에 의한 전선 허용전류의 변화를 고려할 경우 우선 기준이 되는 전류값에 고조파 함유량에 의한 전류 변화량을 알아야 한다. 일반적인 교류 전류계는 실효치를 지시한다. 이 실효치란 직류 전류치와 등가인 교류 전류치로 전류 파형 순시값에 대한 2승합의 평방근으로 나타낸다. 전류 파형이 정현파인 경우의 실효치는 최대치의 1/√2 로 된다. 전류파형에 고조파 성분이 함유되는 경우의 실효치는 직류분을 무시하면 식(3)과 같이 각 차수별 고조파 실효치 전류의 2승합의 평방근이 된다.

$$I = \sqrt{\sum I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2} \quad (3)$$

I : 고조파를 함유하는 전류의 실효치

I<sub>1</sub> : 기본파 전류의 실효치

I<sub>n</sub> : 각 차수별 고조파 전류의 실효치(직류분을 제외)

지금, 100[A]의 기본파 전류에 30%의 특정차수의 고조파 전류가 함유되면, 전류계 지시치는 104.4[A] 로 4.4% 만큼 증가하게 된다.

### 4. 고조파 전류에 의한 Cable의 전력 손실

Cable의 전력손실은 I<sup>2R</sup>로 표현된다. 여기서 I 값은 고조파 왜형률에 의해 증가되어질 수

있고, R 값은 dc 저항값과 ac 표피효과 및 근접효과에 의해 정해진다. 종합왜형률(Total Harmonic Distortion)은 식(6), 고조파 전류가 포함된 RMS 전류 값은 식(4)으로 표현된다.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (4)$$

$$I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots} \quad (5)$$

또한 식(4)과 식(5)을 조합하면 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = I_1 \sqrt{1 + THD^2} \quad (6)$$

주파수에 의한 효과들을 고려하여, ac 대 dc 저항비 K<sub>C</sub>는 식(7)와 같이 표현된다.

$$k_c = \frac{R_{ac}}{R_{dc}} = 1 + K_{SE} + K_{PE} \quad (7)$$

K<sub>SE</sub> : 표피효과에 의한 저항증가분

K<sub>PE</sub> : 근접효과에 의한 저항증가분

표피효과 계수 x 는 주파수와 dc 저항의 함수로서 식(8)으로 정의된다.

$$x = 0.027678 \sqrt{\frac{f \times u}{R_{dc}}} \quad (8)$$

f : 주파수[Hz],

u : 도체의 투자율(Magnetic Permeability)

R<sub>dc</sub> : dc 저항[Ω/1000ft]

표피효과 저항 증가분 K<sub>SE</sub>는 x 의 비선형 함수로서 Cable Handbook "Insulated Power Cable Engineers Associated Handbook, July 1959"에 의해 구할 수 있고, 식(9)과 같이 5차 방정식으로 계산될 수 있다.

x ≤ 2 일때

$$K_{SE}(x) = 10^{-3}(-1.04x^5 + 8.24x^4 - 3.24x^3 + 1.447x^2 - 0.2764x + 0.0166)$$

2 < x ≤ 10 일때

$$K_{SE}(x) = 10^{-3}(-0.2x^5 + 6.616x^4 - 83.345x^3 + 500x^2 - 1061.9x + 769.63) \quad (9)$$

또한, 근접효과 저항 증가분 KPE는 식(10)과 같다.

$$K_{PE} = K_{SE} \sigma^2 \left( \frac{1.18}{K_{SE} + 0.27} + 0.312\sigma^2 \right) \quad (10)$$

$\sigma$  : 도체의 직경(diameter)와 도체들 사이의 거리의 비

**[용어 설명]**

▪ **표피효과** : 주파수가 높아지거나 도전을 및 투자율이 클수록 도체내부에는 전류 및 자속이 존재하지 않는 현상

▪ **표피두께(Skin Depth)** : 모든 전류가 동일한 손실을 갖고 흘러야만 하는 도선에서 등가의 전류관통 깊이(Current Penetration Depth)를 말한다. Skin Depth 는 오직 주파수 및 도선 특성과 함수관계를 가진다

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (f : \text{주파수}, \mu : \text{투자율}, \sigma : \text{도전율})$$

▪ **근접효과(Proximity Effect)** : 두 개의 평행으로 위치한 원형 전선에 교류 전류가 흐를 때, 교류 전류는 도선(Conductors)의 주위를 균일하게 분포되어 흐르지 않는다. 각 전선의 자계(Magnetic Fields)는 다른 전선의 전류 흐름에 영향을 미치며, 이것은 전류의 흐름이 도선 내에서 균일하지 않게 만들 뿐만 아니라 도선의 저항을 증가시킨다. 평행하게 놓인 원형의 전선에서 나타나는 현상

**5. Cable의 허용전류에 대한 고조파 특성**

전선의 허용전류는 전선의 최고 허용온도와 기준 최저 온도와의 차인 온도상승한도와 이것에 대한 전선의 발열량과 방열계수의 비로 결정된다. 따라서 전

선의 굵기, 시공조건이 같은 경우는 방열계수가 동일하기 때문에 허용전류의 고조파 특성에 대한 도체의 온도 및 발열량이 일정하므로 교류 도체 저항의 변화만 고려하여 그 변화에 대한 허용전류를 보정하면 된다.

**5.1 고조파와 교류 도체 저항**

도체온도를 일정하게 할 경우 교류 도체 저항 RA는 식(11)과 같이 나타낸다.

$$R_A = R_D(1 + \lambda_s + \lambda_p) \quad (11)$$

$R_D$  : 특정온도에 있어서의 직류도체 저항[Ω]

$\lambda_s$  : 표피효과계수,  $\lambda_p$  : 근접효과계수

동일 온도조건에서 기본파 전류에 의한 교류 도체 저항  $R_{A1}$ 과 고조파 전류에 대한 교류 도체저항  $R_{An}$ 의 비를  $\beta_n$  이라 하면 식(12)가 된다.

$$\beta_n = \frac{R_{An}}{R_{A1}} = \frac{1 + \lambda_{sn} + \lambda_{pn}}{1 + \lambda_s + \lambda_p} \quad (12)$$

**5.2 고조파 전류에 의한 허용전류의 감소율**

기본파 전류에 의한 도체의 발열 W는  $I^2R$  로 나타낸다. 이 전류에 고조파 전류가 함유되면 식 (3)과 식 (12)에 의해서

$$W = \sum I_n^2 R_{An} = R_A (I_1^2 + \beta_2 I_2^2 + \beta_3 I_3^2 + \dots + \beta_n I_n^2) \quad (13)$$

이 된다. 그래서 각 차수별 고조파 전류성분의 기본파 전류치에 대한 함유율을  $x_n$  이라 하면 식(13)은 식 (14)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W = \sum I_n^2 R_{An} = I_1^2 R_A (1 + \beta_2 x_2^2 + \beta_3 x_3^2 + \dots + \beta_n x_n^2) \quad (14)$$

그래서 고조파 전류에 의한 교류 도체 저항  $R_A$ 가 변화하지 않는다고 가정할 경우 교류전류의 실효치가 같으면 도체의 발열  $W$ 는 고조파의 함유율에는 관계가 없기 때문에 식(15)은 다음과 같다.

$$W = \sum I_{sn}^2 R_A = I_{s1}^2 R_A (1 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \dots + \chi_n^2) \quad (15)$$

따라서 식(14)과 식(15)의 발열량이 같으면  $\frac{I_{s1} - I_1}{I_{s1}}$  이고, 이것이 고조파 성분을 함유하는 전선의 허용전류 감소율  $\gamma$ 의 일반식이 된다.

$$r = 1 - \frac{I_1}{I_{s1}} = 1 - \frac{\sqrt{1 + \chi_2^2 + \chi_3^2 + \dots + \chi_n^2}}{1 + \beta_2 \chi_2^2 + \beta_3 \chi_3^2 + \dots + \beta_n \chi_n^2} \quad (16)$$

표 5.1 고조파 전류에 대한 교류도체 저항비 ( $\beta_n$ )

| 도체종류   | 직류도체 저항 RD $\Omega/\text{km}$ 90°C | 기본파 (60Hz)                |                           |                                   | 3고조파 (180Hz)               |                            |                                     |                            | 5고조파 (300Hz)               |                            |                                     |                             |
|--|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
|  |                                    | 표피 효과 계수 $\lambda_s$ (60) | 근접 효과 계수 $\lambda_p$ (60) | 교류도체 저항 $\Omega/\text{km}$ RA(60) | 표피 효과 계수 $\lambda_s$ (180) | 근접 효과 계수 $\lambda_p$ (180) | 교류도체 저항 $\Omega/\text{km}$ RA (180) | RA (180)/RA (60) $\beta_3$ | 표피 효과 계수 $\lambda_s$ (300) | 근접 효과 계수 $\lambda_p$ (300) | 교류도체 저항 $\Omega/\text{km}$ RA (300) | RA (180)/RA (300) $\beta_5$ |
| 600(V), 6600(V) CV케이블 100mm <sup>2</sup> x1C | 0.233                              | 0.00217                   |                           | 0.234                             | 0.0193                     |                            | 0.237                               | 1.017                      | 0.0521                     |                            | 0.245                               | 1.05                        |
| 150mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.156                              | 0.00487                   |                           | 0.157                             | 0.0426                     |                            | 0.163                               | 1.04                       | 0.1115                     |                            | 0.173                               | 1.106                       |
| 200mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.117                              | 0.00864                   |                           | 0.118                             | 0.0737                     |                            | 0.126                               | 1.065                      | 0.1858                     |                            | 0.139                               | 1.176                       |
| 250mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.0942                             | 0.0132                    |                           | 0.095                             | 0.1096                     |                            | 0.105                               | 1.095                      | 0.2647                     |                            | 0.119                               | 1.248                       |
| 325mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.0742                             | 0.02218                   |                           | 0.074                             | 0.1752                     |                            | 0.085                               | 1.15                       | 0.3942                     |                            | 0.101                               | 1.364                       |
| 400mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.0589                             | 0.03322                   |                           | 0.061                             | 0.2478                     |                            | 0.073                               | 1.208                      | 0.5205                     |                            | 0.09                                | 1.472                       |
| 500mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.0471                             | 0.05131                   |                           | 0.05                              | 0.3513                     |                            | 0.064                               | 1.285                      | 0.679                      |                            | 0.079                               | 1.597                       |
| 600mm <sup>2</sup> x 1C                      | 0.0393                             | 0.07237                   |                           | 0.042                             | 0.4535                     |                            | 0.057                               | 1.335                      | 0.8194                     |                            | 0.072                               | 1.697                       |
| 600V CV 케이블 100mm <sup>2</sup> x 3C          | 0.238                              | 0.00208                   | 0.00221                   | 0.239                             | 0.0185                     | 0.0188                     | 0.247                               | 1.033                      | 0.05                       | 0.047                      | 0.262                               | 1.092                       |
| 150mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.158                              | 0.00472                   | 0.00553                   | 0.16                              | 0.0412                     | 0.044                      | 0.172                               | 1.074                      | 0.1083                     | 0.097                      | 0.191                               | 1.196                       |
| 250mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.0961                             | 0.01268                   | 0.01475                   | 0.099                             | 0.1057                     | 0.0992                     | 0.116                               | 1.173                      | 0.2563                     | 0.1855                     | 0.139                               | 1.403                       |
| 325mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.0738                             | 0.02136                   | 0.02561                   | 0.077                             | 0.1695                     | 0.1486                     | 0.097                               | 1.259                      | 0.3836                     | 0.2482                     | 0.12                                | 1.559                       |
| 6600V CV 케이블 100mm <sup>2</sup> x 3C         | 0.238                              | 0.00208                   | 0.00139                   | 0.239                             | 0.0185                     | 0.0118                     | 0.246                               | 1.022                      | 0.05                       | 0.0296                     | 0.257                               | 1.076                       |
| 150mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.158                              | 0.00472                   | 0.00365                   | 0.159                             | 0.0412                     | 0.0291                     | 0.169                               | 1.061                      | 0.1083                     | 0.0659                     | 0.186                               | 1.164                       |
| 250mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.0961                             | 0.01268                   | 0.01061                   | 0.098                             | 0.1057                     | 0.0713                     | 0.113                               | 1.15                       | 0.2563                     | 0.1334                     | 0.134                               | 1.358                       |
| 325mm <sup>2</sup> x 3C                      | 0.0738                             | 0.02136                   | 0.01899                   | 0.077                             | 0.1695                     | 0.1102                     | 0.094                               | 1.23                       | 0.3836                     | 0.1841                     | 0.116                               | 1.507                       |

n : 고조파 차수 (3, 5, 7차)

$\beta$  : 기본파에 대한 교류도체 저항 비율

$\chi$  : 기본파에 대한 고조파 함유율

$\gamma$  : 기본파에 대한 허용전류 감소율

### 5.3 감소율의 개략적인 수치

실제적인 고조파 전류성분에 의한 허용전류의 감소율의 개략적인 수치를 파악하기 위해서 일본전선공업회 규격 JCS-168-C(1973) “전력케이블의 허용전류”의 표피효과 계수 및 근접효과 계수의 계산식을 인용하였다.

3, 5, 7차 고조파에 의한 동도체 CV 600V 및 6,600V 케이블에 대해서  $\tau_{sn}$ ,  $\tau_{pn}$ 을 구한 다음 고조

파 차수의 영향을 정성적으로 나타내기 위해서 단일 고조파 성분만이 있다면 식(16)을 식(17)과 같이 간략하게 계산 할 수 있다.

$$\gamma_n = 1 - \frac{\sqrt{1 + \chi_n^2}}{1 + \beta_n \chi_n^2} \quad (17)$$

그 결과는 표5.1 과 표5.2와 같다.

표 5.2 고조파에 의한 허용전류의 감소율( $\tau_n$ ) 계산

| 도체 종류                                  | 3차 고조파(180Hz) $\tau_3(\%)$ |         |      |      |      |      | 5차 고조파(300Hz) $\tau_5(\%)$ |         |      |      |      |      |
|--|----------------------------|---------|------|------|------|------|----------------------------|---------|------|------|------|------|
|  | $\beta_3$                  | $x_3^2$ |      |      |      |      | $\beta_5$                  | $x_5^2$ |      |      |      |      |
|  |                            | 0.01    | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.25 |                            | 0.01    | 0.04 | 0.09 | 0.16 | 0.25 |
| 600V, 6600V<br>CV케이블 100mm $\times$ 1C | 1.017                      | 0.01    | 0.04 | 0.07 | 0.12 | 0.17 | 1.05                       | 0.03    | 0.1  | 0.21 | 0.34 | 0.5  |
| 150mm $\times$ 1C                      | 1.04                       | 0.02    | 0.08 | 0.16 | 0.27 | 0.41 | 1.106                      | 0.05    | 0.2  | 0.43 | 0.72 | 1.04 |
| 200mm $\times$ 1C                      | 1.065                      | 0.03    | 0.12 | 0.27 | 0.45 | 0.64 | 1.176                      | 0.09    | 0.34 | 0.72 | 1.19 | 1.71 |
| 250mm $\times$ 1C                      | 1.095                      | 0.05    | 0.18 | 0.39 | 0.65 | 0.94 | 1.248                      | 0.12    | 0.47 | 1.08 | 1.68 | 2.39 |
| 325mm $\times$ 1C                      | 1.15                       | 0.07    | 0.29 | 0.61 | 1.02 | 1.47 | 1.364                      | 0.18    | 0.69 | 1.47 | 2.42 | 3.45 |
| 400mm $\times$ 1C                      | 1.208                      | 0.1     | 0.4  | 0.85 | 1.4  | 2.02 | 1.472                      | 0.23    | 0.9  | 1.89 | 3.1  | 4.41 |
| 500mm $\times$ 1C                      | 1.285                      | 0.14    | 0.54 | 1.16 | 1.91 | 2.73 | 1.597                      | 0.29    | 1.13 | 2.38 | 3.88 | 5.48 |
| 600mm $\times$ 1C                      | 1.355                      | 0.18    | 0.68 | 1.43 | 2.36 | 3.37 | 1.697                      | 0.34    | 1.31 | 2.76 | 4.49 | 6.32 |
| 600V CV 케이블<br>100mm $\times$ 3C       | 1.033                      | 0.02    | 0.06 | 0.14 | 0.23 | 0.33 | 1.092                      | 0.05    | 0.19 | 0.38 | 0.63 | 0.91 |
| 150mm $\times$ 3C                      | 1.074                      | 0.04    | 0.14 | 0.3  | 0.51 | 0.73 | 1.196                      | 0.1     | .38  | 0.80 | 1.32 | 1.9  |
| 250mm $\times$ 3C                      | -1.173                     | 0.09    | 0.33 | 0.71 | 1.17 | 1.69 | 1.403                      | 0.2     | 0.77 | 1.62 | 2.67 | 3.8  |
| 325mm $\times$ 3C                      | 1.259                      | 0.13    | 0.49 | 1.05 | 1.74 | 2.49 | 1.559                      | 0.28    | 1.06 | 2.23 | 3.65 | 5.16 |
| 6600V CV 케이블<br>100mm $\times$ 3C      | 1.027                      | 0.01    | 0.05 | 0.11 | 0.19 | 0.27 | 1.076                      | 0.04    | 0.15 | 0.31 | 0.52 | 0.75 |
| 150mm $\times$ 3C                      | 1.061                      | 0.03    | 0.12 | 0.25 | 0.42 | 0.6  | 1.164                      | 0.08    | 0.31 | 0.67 | 1.11 | 1.6  |
| 250mm $\times$ 3C                      | 1.15                       | 0.07    | 0.29 | 0.61 | 1.02 | 1.47 | 1.358                      | 0.18    | 0.68 | 1.44 | 2.38 | 3.4  |
| 325mm $\times$ 3C                      | 1.23                       | 0.11    | 0.44 | 0.94 | 1.55 | 2.22 | 1.507                      | 0.25    | 0.96 | 2.03 | 3.32 | 4.71 |

n : 고조파 차수 (3, 5, 7차)  
 $\beta$  : 기본파에 대한 교류도체 저항 비율

x : 기본파에 대한 고조파 함유율  
 $\tau$  : 기본파에 대한 허용전류 감소율

### 6. 배선방식에 의한 고조파 전류의 분포

3상 교류에는 상회전 방향이 있고 기본파 상회전의 방향을 정상으로 하면 각 기수 고조파의 상회전의 방향은

정상 : 7, 13, 19, 25차... (6N+1) N은 정수

영상 : 3, 9, 15, 21차... (6N-3)

역상 : 5, 11, 17, 23차... (6N-1)

으로 된다. 3상 3선식 회로에서 영상분은 전류통로가 없는 것으로 선전류에는 함유되지 않지만, 3상4선식 회로의 중성선에는 각 상의 부하가 평형하고 있더라도 부하에 고조파 전류 발생원으로 있으면 그림 6.1에 표시한 바와 같이 (6N-3)의 영상분 고조파 전류의 3배의 전류가 흐르게 된다.

평형상태의 R, S, T 상은 120°의 위상차를 가지고 있어 그 중성선은 R, S, T 각 상의 벡터합 즉,

$I_R + I_S + I_T = 0$  이다. 그러나 그림 6.1 과 같이 R 상에 흐르는 제3고조파, S 상에 흐르는 제3고조파, T 상에 흐르는 제3고조파의 위상이 같기 때문에 중성선에는 벡터합이 아니고 각각의 합이 흐르게 된다. 이러한 이유로 중성선에 흐르는 전류는 0이 아니고 상전류보다 큰 값이 되어 전류가 확대된다.

$$I_{R1} = I_m \sin \omega t$$

$$I_{S1} = I_m \sin(\omega t - 120^\circ) \tag{18}$$

$$I_{T1} = I_m \sin(\omega t - 240^\circ)$$

로 표시되며, 전류의 합은

$$I_{R1} + I_{S1} + I_{T1}$$

$$= I_m \sin \omega t + I_m \sin(\omega t - 120^\circ) + I_m \sin(\omega t - 240^\circ) = 0 \tag{19}$$

이 되고, 동위상인 제3고조파 전류는

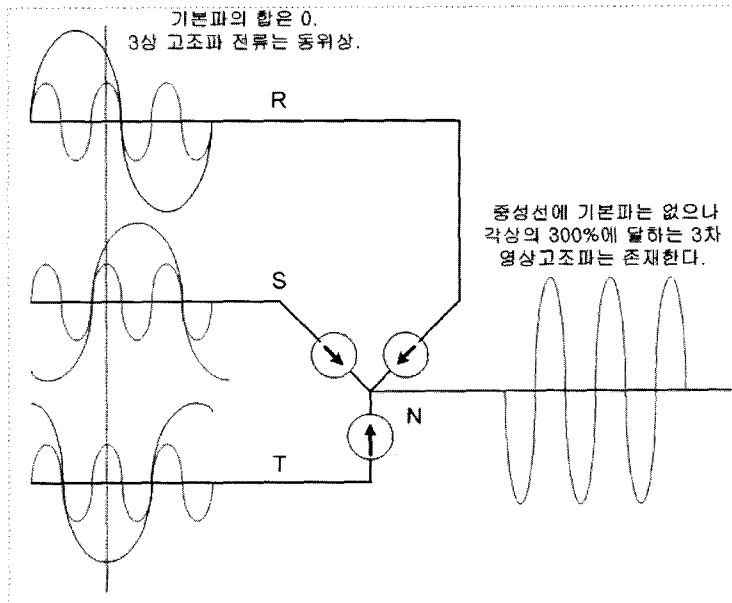


그림 6.1 3상4선식 회로의 영상분 고조파 전류 경로

기술해설

$$\begin{aligned}
 I_{R3} &= I_3 \sin 3\omega t \\
 I_{S3} &= I_3 \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_3 \sin 3\omega t \quad (20) \\
 I_{T3} &= I_3 \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_3 \sin 3\omega t
 \end{aligned}$$

로 표시되며, 전류의 합은

$$\begin{aligned}
 I_{R3} + I_{S3} + I_{T3} \\
 = I_3 \sin 3\omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_3 \sin 3\omega t = \\
 3 I_3 \sin 3\omega t \quad (21)
 \end{aligned}$$

가 된다.

이러한 중성선으로의 전류흐름을 가지는 3상4선식 배전계통에서 고조파 장애현상이 많이 발생한다.

6.1 중성선 영상 고조파에 의한 장애 현상

가. 변압기 과열 및 손실

비선형 부하에서 발생하는 고조파는 전원측으로 유출된다고 가정하면 그림 6.2 에서와 같이 유출되는 영상분 고조파는 변압기 1차로 유기되어  $\Delta$  권선 내를 순환하게 된다. 이 순환하는 전류가 열로 바뀌게 되어 열이 많이 발생하게 되는데 이는 변압기의 와전류 손실 및 표피효과에 의한 영향에 증폭되어 변압기의 열화를 촉진하게 된다.

나. 중성선 Cable 과열 및 손실

제3고조파는 기본파의 3배인 180(Hz)의 주파수 성분을 갖기 때문에 표피효과에 의해 케이블의 유효 단면적을 감소시켜 저항의 증가현상으로 과열현상은 더욱 크게 된다.

· 교류도체저항 증가  $\Rightarrow$  전류의 증가  $\Rightarrow$  케이블 과열

다. 중성선 대지전위 상승

중성선에 제3고조파 전류가 많이 흐르면 중성선과 대지간의 전위차는 중성선 전류와 중성선 리액턴스의

3배의 곱  $V_{N-G} = I_n \times (R + j 3X_L)$  이 되어 큰 전위차를 갖게 되며, 이 현상은 기기의 오동작 및 통신선의 유도장애를 발생시키게 된다.

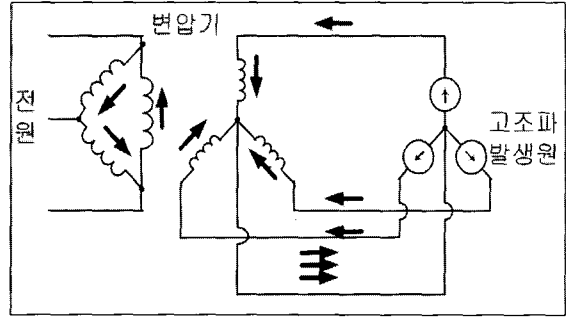


그림 6.2 변압기  $\Delta$  권선을 순환하는 영상분

라. 역률저하

역률이라 하면 일반적으로 그림 6.3(a) 선형부하인 경우와 같이 리액턴스 성분만 고려하여  $PF = \cos\phi$ 라 하고 있지만 비선형 부하에서는 고조파 전압과 고조파 전류에 의한 왜곡전력도 무효분으로 적용하여 그림 6.3(b) 비선형부하와과 같이 3차원적으로 해석을 하여야 한다. 즉 리액턴스 성분에 의한 무효분이 작더라도 왜곡전력이 크면 무효분이 크게 되어 역률이 저하하게 된다.

마. 변압기 출력감소

변압기에 고조파가 함유되면 전류파형의 끝이 뾰족한 첨부파형의 형태로 되거나 과열현상에 의하여 변압기 출력이 저하되고, THDF(Transformer Harmonic Derating Factor : 변압기 실 허용용량 계수) 로 3상 또는 단상일 때의 변압기 출력 감소를 계산할 수가 있다.

(1) 3상 정류기 부하가 몰드변압기 1000(kVA)에 연결되어 있는 경우에 PEC-R (와류손실)은 표 6.1, K-Factor는 표6.2에서의 값들을 식(22)에 대

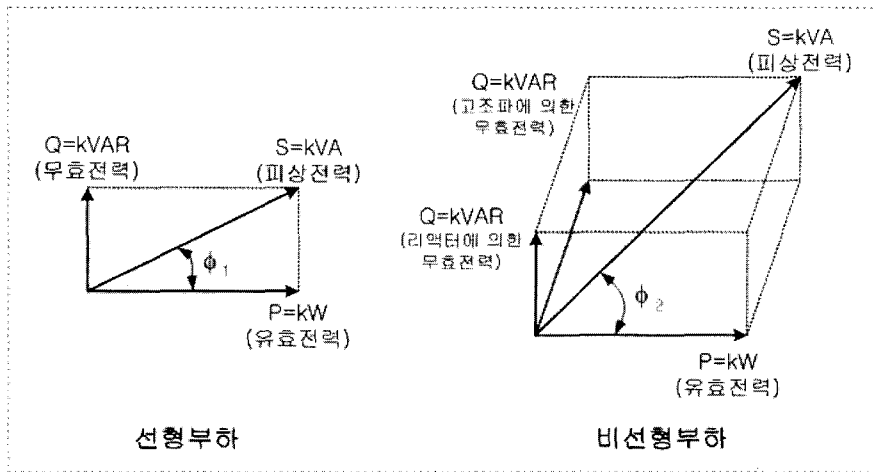


그림 6.3 중성선 영상고조파 전류에 의한 역을 저하 (cosφ1》cosφ2)

입하면 28.6%로 변압기 출력이 감소됨을 알 수 있다.

$$THDF = \sqrt{\frac{P_{LL-R(PU)}}{P_{LL(PU)}}} = \sqrt{\frac{1 + P_{EC-R(PU)}}{1 + K \cdot \text{Factor} \cdot P_{EC-R(PU)}}} \quad (22)$$

$$THDF = \sqrt{\frac{1+14}{1+13 \times 14}} = 28.6\%$$

\* 실제 변압기 용량 : 1000[kVA](정격용량)  
 × (100%-28.6%) = 714[kVA]

표 6.1 용량별 PEC-R(외류손실)

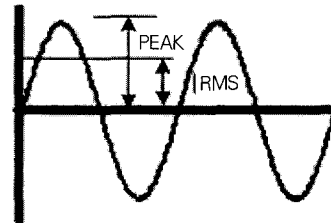
| Type   | MVA       | PEC-R(외류손실) |
|--------|-----------|-------------|
| 건설·물 드 | 1이하       | 5.5         |
|        | 1초과       | 14          |
| 유 입    | 2.5이하     | 1           |
|        | 2.5초과~5이하 | 2.5         |
|        | 5초과       | 12          |

표 6.2 부하특성에 따른 K-Factor

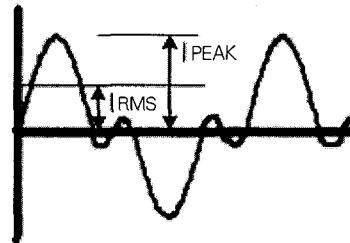
| K-Factor | 부하 특성                      |
|----------|----------------------------|
| 7        | 50% 3상 비선형부하, 50% 3상 선형부하  |
| 13       | 100% 3상 비선형부하              |
| 20       | 50% 1상 비선형부하, 50% 3상 비선형부하 |
| 30       | 100% 단상 비선형 부하             |

(2) 단상 고조파 부하인 경우

그림 6.4와 같이 기본파에 3고조파가 함유되어 있으며 끝이 뾰족한 왜형파가 나타나게 된다. 변압기에 정현파 전류가 흐를 때와 피크값이 높은 왜형파가 흐를 때 변압기에 미치는 영향은 다르게 나타나게 되고 다음과 같은 식으로 변압기 출력을 계산할 수 있다.



(a) 기본 정현파 파형



(b) 3차 고조파 합성 파형

그림 6.4 단상 고조파 부하의 파형



기술해설

$$THDF = \frac{\sqrt{2} I_{rms}}{I_{peak}} \quad (23)$$

그림 6.4(a) 과 같이 정현파 전류가 흐를 때

$$THDF = \frac{\sqrt{2} I_{rms}}{I_{peak}} = 1 \quad (24)$$

이 되어 변압기 출력 감쇄율은 적용되지 않는다. 그러나 제3고조파에 의한 왜형과 전류가 흐르면 40~60% 정도로 변압기 출력이 저하하게 된다.

$$THDF = \frac{\sqrt{2} I_{rms}(30\% \sim 40\%)}{I_{peak}} = 40 \sim 60\% \quad (25)$$

즉, 1000[KVA] 변압기라 하더라도 실제 출력은 400~600[KVA] 정도밖에 안되는 경우가 대부분이다.

## 6.2 중성선 영상 고조파에 대한 대책

위에서 언급한 중성선 전류의 문제를 해결하기 위한 실제 사용 중인 기존의 방식은 크게 수동방식과 능동방식이 있다.

### 가. 수동 방식

① L-C 필터방식(Third Harmonic Blocking Filter : 제작사-A.B.B)

이 방식은 그림 6.5와 같이 배전용 변압기의 접지점과 배전반의 중성점 사이에 3차 고조파에 동조된(Tuned) 리액터와 커패시터를 장착하여 3차 고조파만을 저지(Blocking)함으로써 중성선 전류를 저감하는 방식이다. 그러나, 이 방식은 높은 주파수(High Frequency) 대역에서 전원임피던스 또는 부하측 정류기 평활용 커패시터 등의 계통소자의 영향을 받기 쉬워 이 대역에서는 오히려 고조파가 증폭되는 등의 문제가 있으며, 또한 설치비용이 높은 단점이 있다

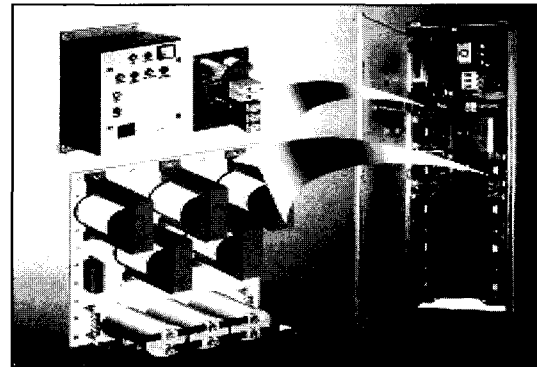
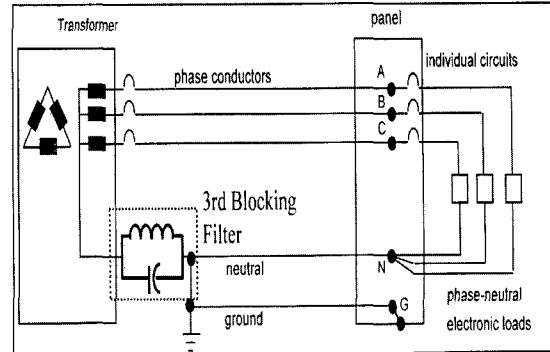


그림 6.5 L-C필터 방식

② 지그재그 필터(ZED-Zero harmonic Eliminating Device : 제작사-피에스디테크)

이 방식은 그림 6.6과 같이 배전반이나 중성선 전류가 심각한 부하측에 부하와 병렬로 영상임피던스가 낮은 지그재그변압기를 설치하여 영상성분 전류에 대한 경로를 제공함으로써 중성선에 흐르는 영상고조파(Triplen Harmonics)전류를 지그재그 변압기 쪽으로 흐르도록 하여 전원 측으로 유출되는 중성선 전류를 저감하는 방식이다. 이 방식은 3차 고조파뿐만 아니라 9차, 15차등의 3조파(영상분) 전류를 전원측 중성선에서 제거하며, 부하조건에 따라 다르지만 전원측 입력전류의 3조파 성분도 제거되어 고조파 종합 왜형율(THD)을 낮춰주는 부가적인 기능이 있다. 그러나 불평형이 심한 경우 기본파 전류의 영상성분이 필터쪽으로 유입되는데 이때 지그재그 변압기에

과부하가 걸리거나 전류의 과보상(Over-compensation)으로 오히려 입력전류의 THD가 나빠질 우려가 있다. 또한, 전원 임피던스나 권선(Conductor)의 기생(Parastic) 임피던스등의 계통소자의 값에 의해 필터 장치쪽으로 유입되는 전류와 전원측 중성선 전류의 비율이 결정되기 때문에 중성선 전류 제거 성능이 설치 위치에 따라 변동이 심하다.(저감율 50~85%)

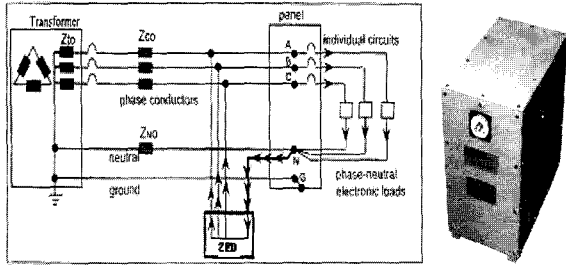


그림 6.6 지그재그 필터 방식

(ZED : Zero harmonic Eliminating Device)

나. 능동 필터

① 3상 4선식 능동필터(Active Filter : 제작사-ABB, Meidensha, 등)

이와 같은 수동방식의 문제점을 극복하기 위하여 그림 6.7과 같은 3상 4선식 능동필터의 도입이 이루어졌는데, 이 능동필터 방식으로 입력전류의 고조파를 제거함으로써 중성선 전류의 고조파가 보상된다. 이 방식은 계통임피던스 및 주파수의 변화에 의한 영향을 거의 받지 않으며 순시보상 특성 등의 성능면에서 우수하다. 그러나 많은 연산이 필요하고 제어가 복잡한 단점이 있다. 또한, PWM 동작에 의해 EMI 등이 발생 할 수 있으며, 부하용량 대비 능동전력 필터의 VA용량(출력용량의 30%이상)이 커져 장치의 가격이 높기 때문에 고조파에 민감한 중요 부하에만 제한적으로 사용되고 있고 일반 상업용, 공장용 및 주거

용 빌딩 등에는 사용되지 못하고 있는 실정이다.

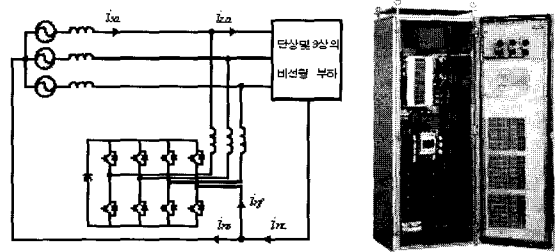


그림 6.7 8스위치 3상 4선식 능동필터

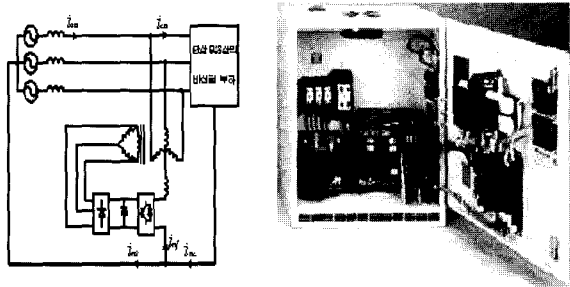


그림 6.8 중성선전류 제거를 위한 저가형 능동필터

② 중성선전류 제거를 위한 저가형 능동필터 방식 (제작사-Current Technology사 중)

이 필터장치는 배전반이나 중성선 전류가 심각한 부하측에 설치하며, 그림 6.8과 같이 단상 PWM 인버터, Y-△형 변압기 및 다이오드 정류기로 구성된다. 이는 전원측 중성선 전류 $i_{ns}$ 의 지령치(Command)를 0으로 하여 단상 PWM 인버터를 동작시켜 부하에서 발생한 중성선 전류  $i_{nL}$ 을 변압기의 Y측으로 유입시켜 전원측으로 가는 중성선 전류  $i_{ns}$ 를 제거하는 방식으로 부하 변동 시에도 빠른 응답으로 발생하는 중성선 전류를 제거할 수 있다. 또한 전원측 입력전류의 3조파 성분도 제거되어 입력전류의 고조파 종합왜형율(THD)을 낮춰주는 추가적인 기능이 있다. 이 방식의 가장 큰 장점은 연산이 간단하고 센서의 수도 적어 제어가 간단하고, 스위칭 소자의 수가 적어 필터장치의 가격이 낮다. Plant Engineering

Magazine에 의하면 이 제품은 "1998년도 최우수 5대 상품" 중 하나로 선정되었고 미국 내 상당한 매출의 신장이 진행되고 있다.

**참 고 문 헌**

[1] "고조파 억제용 수동필터의 현장 적용화 연구", 한국 전기안전공사, 1999.12.  
 [2] Thomas S. Key, Jih-Sheng Lai, "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No 5, September/October 1996.  
 [3] 정연해외, "케이블 중성선 과전류 원인 및 대책" 전력기술인 2002년 5월.  
 [4] 이재천외, "3상4선식 계통에서 중성선 영상고조파 저류 저감 대책", 조명설비학회지 2002년 4월호.  
 [5] 유상봉, 김세동, "전기설비의 고조파 장애 및 대책 기술", 한국전력기술인협회지, 1996.5.  
 [6] "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonics Control in Electrical Power Systems", IEEE Std.519-1992.  
 [7] 기술가이드 Series, PSD-Vol. C. 100, "전력설비 진단기술", (주)유일엔지니어링 2002.  
 [8] Thomas Key, Jih-Sheng Lai, "Analysis of Harmonic Mitigation Method for Building Wiring system," IEEE Trans. on Power System, vol. 13, no. 3, Aug. 1998, pp.890-897.  
 [9] Prem P. Khera, "Application of Zigzag Transformers for Reducing Harmonics in the Neutral Conductor of Low Voltage Distribution System," in IEEE IAS Conf. Rec, 1990.  
 [10] C. A. Quinn, N.Mohan, "Active Filtering of Harmonic Currents in Three-Phase, Four-Wire Systems with Three-Phase and Single-Phase Non-Linear Loads," in APEC 1992, pp. 829-835.

[11] P. N. Enjeti, W. Shiren, "Analysis and Design of a New Active Power Filter to Cancel Neutral Current Harmonics in Three-Phase Four-Wire Electric Distribution Systems," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 30, no. 6, Nov./Dec. 1994, pp. 1565-1572.  
 [12] P. N. Enjeti, W. Shiren, "Active Harmonic Power Filter Apparatus and Method," US Patent No. 5,568,371, Sep. 29, 1994.

◇ 저 자 소 개 ◇



**송 일 근(宋一根)**

1984년 숭실대 전기공학과 졸업(학사). 1986년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1985년-현재, 전력연구원 배전기술센터 확산진단팀 P/L. 관심분야: 배전설비 수명진단 및 열화진단기술. Tel : 042-865-5920. E-mail : iksong@kepri.re.kr.



**이 병 성(李丙成)**

1968년 8월 17일생. 1993년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995-현재 : 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원. 관심분야: 폴리머애자 및 절연재료의 열화 특성. Tel : 042-865-5924. E-mail : leebs@kepri.re.kr.



**이 재 봉(李載奉)**

1971년 1월 17일생. 1993년 전남대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995-현재 : 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임보연구원. 관심분야 : 폴리머애자 및 절연재료의 열화 특성. Tel : 042-865-5925. E-mail : jbonglee@kepri.re.kr.