

전력기기에 미치는 사이리스터 시스템의 영향

강 영 채

전인천대 교수

■ 머리말

사이리스터나 파워트랜지스터 등과 같은 전력용 반도체 소자의 응용제품은 전력을 이용하는 산업뿐만이 아니고 전력공급분야에 있어서도 널리 사용되는데 장치용량도 수백VA로부터 수십~수백MVA의 대용량장치에 이르기까지 여러 가지의 것이 제작되고 있으며 산업발전에 큰 공헌을 하고 있다.

이와 같은 사이리스터 응용기기의 보급은

첫째, 가동부가 없는 정지형 변환장치이며 제어하기 쉽고 고도의 기능을 가진 장치이다.

둘째, 효율이 높은 변환장치이며 수명이 반영구적이고 고장이 적다.

셋째, 소형, 콤팩트하여 설치상의 제약이 적고 운전보수가 용이하며 소자와 응용기술의 진보에 의하여 코스트 퍼포먼스가 향상된다

는 등의 장점을 갖고 있기 때문이다.

이상과 같은 우수한 특성을 갖고 있는 반면에 사이리스터 장치의 유일한 결점이라고 할 수 있는 고조파 발생에 대한 문제가 있으며 사이리스터 응용기기의 보급에 따라서 발생하는 고조파가 전력계통에 접속된 다른 부하나 주변의 전자기기 또는 통신과 신호선 등에 미치는 영향도

고려해야 할 것이다.

사이리스터 변환장치는 사이리스터의 스위칭 작용을 이용하여 전압, 전류, 전력 등을 조정하는 장치이기 때문에 일반적으로 입출력의 전압, 전류에는 고조파 성분이 포함된다.

고조파로 인한 장애의 예를 들면 전동기, 진상 콘덴서 등 병렬기기의 과열 또는 계통에서의 이상 고조파 전압의 발생 등과 같은 장애가 변환장치의 대용량화에 나타나고 있다.

따라서 사이리스터 변환장치 특히 대용량화의 장치에서 발생하는 고조파의 성질, 전원 계통의 임피던스 크기 및 분포상태 등을 면밀히 조사 검토하여 장애가 발생하지 않도록 변환장치 자체의 다상화, 고조파 흡수용 필터의 설치 또는 영향을 받는 기기측에서의 처리 등 적절한 대책을 세워야 할 것이다.

본고에서는 사이리스터 전력변환장치를 전원 계통에 접속하는 경우에 동기기, 터빈발전기 및 전원 계통에 미치는 영향과 대책에 대하여 설명하기로 한다.

1. 고조파의 발생과 유입

사이리스터의 전력변환장치에서 발생하는 고

류측 특성의 고조파 전류의 값은 사이리스터의 위상제어각 α 와 전류 중첩값 U 에 의해서 결정된다.

또한 사이리스터 장치의 용량이 큰 경우에는 여러 개의 정류회로를 조합해서 다상정류회로를 구성하는 경우가 많은데 이 경우에는 각각의 次高調波 전류값 I_n 과 조합시킨 다상전류회로의 교류측 기본파 전류 I_1 의 비 I_n/I_1 를 구할 수 있다.

한편 각각의 차고조파 전류는 변환장치에 접속되어 있는 전원 계통에 유입하는데 여기에 동기기, 진상 콘덴서 등이 접속되면 각각의 임피던스에 대응하는 전원 계통과 병렬부하로 분류된다.

전원 계통의 용량이 변환장치에 비해서 충분히 클 때는 고조파 전류는 대부분이 전원 계통측에 유입하고 또 임피던스가 작기 때문에 전원 전압의 왜곡도 작아지므로 고조파 전류는 병렬 부하에 유입하는 일이 없지만 만일 전원용량이 작은 경우에는 병렬부하에 유입한다.

다음에는 고조파의 영향을 받기 쉬운 기기 중에서 동기기와 콘덴서를 예로 들어서 설명한다.

2. 동기 발전기

자기발전(동기 발전기)에 병렬 운전되고 있는 계통에 변환장치가 접속되면 여기서 발생하는 고조파 전류가 전력 계통과 동기 발전기에 각각의 임피던스에 따라 분류된다.

배전 계통의 임피던스가 상대적으로 큰 경우에는 동기 발전기에 허용치 이상의 고조파 전류가 유입, 이로 인하여 댐퍼권선에 전류가 흘러 I^2R 손실로서 댐퍼권선이 과열된다.

일반 동기 발전기의 댐퍼권선 용량에 대해서는 역상 전류의 허용치 규격이 있으며 보통 突極機에서는 10~20%, 円筒機에서는 8% 정도이다.

그런데 발전기의 역상전류는 불평형부하에 의해서 회전자에서 발생하는 2배 주파수의 전류로 정의되므로 수많은 고조파성분이 포함되

는 경우에는 그대로 적용할 수 없다.

일반적으로 역상전류에 의한 손실과 고조파 전류에 의한 손실이 동등해진다는 조건에 의하여 등가역상전류를 정의하고 이것이 역상전류의 허용치를 초과하지 않도록 하고 있다.

等價逆相電流 I_{2eq} 는 다음 식으로 정의된다.

$$I_{2eq} = \sqrt{\sum_n \left[\sqrt{\frac{m}{2}} \cdot I_m \right]^2} \quad (1)$$

여기서 m : 댐퍼전류의 고조파 차수

I_m : n 차의 댐퍼전류 실효치

또한 동기기 고정자의 고조파 전류의 차수와 실효치를 각각 (5, 7, 11, 13, ...), ($I_5, I_7, I_{11}, I_{13}, \dots$)로 하면 $m=6, 12, \dots$, $I_m=(I_5+I_7), (I_{11}+I_{13}), \dots$ 이 된다.

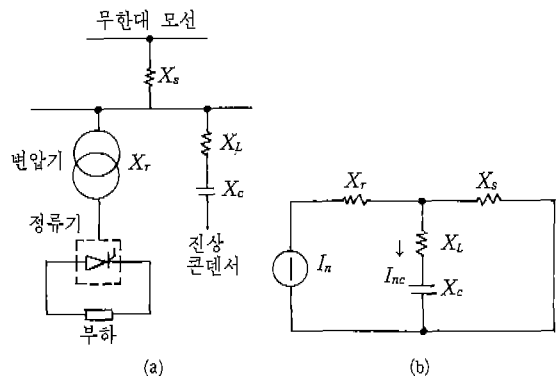
3. 진상 콘덴서

그림 1(a)와 같이 리액턴스 X_s 의 전원 계통에 변환장치와 진상 콘덴서가 접속되는 경우의 등가회로는 변환장치를 고조파 발생의 전류원으로 보고 그림 1(b)와 같이 생각할 수 있다.

등가회로에 의해 변환장치에서 발생하는 n 차의 고조파 전류 I_n 에 대한 콘덴서의 전류 I_{nc} 는 다음 식으로 표시된다.

$$I_{nc} = I_n \cdot \frac{nX_s}{n(X_s + X_L) - X_c/n} \quad (2)$$

여기서 X_s : 기본파 주파수에 대한 계통의 리액



<그림 1> 진상 콘덴서를 사용하는 등가회로

턴스

X_L : 기본파 주파수에 대한 직렬 리액터의 리액턴스

X_c : 기본파 주파수에 대한 진상 콘덴서의 리액턴스

상기 식에서 명확한 바와 같이 $n(X_s + X_L) = X_c/n$ 이 되는 차수의 고조파에 대해 병렬 공진하며 콘덴서에 비정상적인 고조파 전류가 유입하여 이를 과열하는 동시에 전원 계통에 비정상적인 고조파 전압을 발생시킨다.

한편 병렬공진을 일으키는 고조파 차수 n_0 은 다음 식으로 표시한다.

$$n_0(X_s + X_L) = X_c/n_0$$

윗 식으로부터

$$n_0 = \frac{1}{\sqrt{(X_s + X_L)/X_c}} \quad (3)$$

이러한 병렬공진현상을 피하기 위해서 일반적으로 X_L/X_c 값이 6%인 리액터를 진상 콘덴서와 직렬로 설치하여 공진주파수가 4차 이하가 되도록 하고 4차 이상의 고조파에 대해서는 진상 콘덴서부를 유도성으로 함으로써 콘덴서에 고조파 전류의 유입을 억제하고 있다.

그런데 변환장치의 구성에 따라서 저차인 고조파를 발생시키는 것이 있으며 예를 들면 혼합 브리지 정류기에서는 공진주파수가 더 저차가 되는 직렬 리액터를 선정해야 된다.

4. 전원 계통에서의 공진현상

통상 사이리스터 전력변환장치의 운전상태에 있어서 인덕턴스, 캐패시턴스, 저항 등의 회로 정수는 변환장치에서 유출하는 고조파 전류에 의하여 공진을 일으키도록 조합해서는 안된다.

이것이 변압기, 케이블이나 배전선의 캐패시턴스가 비교적 적으므로 이것을 통상의 변압기, 케이블이나 배전선의 인덕턴스와 조합한 회로의 공진주파수가 고조파 전류의 주파수에 비교하여 너무 높기 때문이다.

이와 같은 경우 전원은 kHz 정도로 공진을 한다.

그러나 전력용 콘덴서가 전원계에 접속되면 상황이 변하여 공진주파수는 사이리스터 전력 변환장치에서 통상 유출되는 고조파 전류의 주파수 영역까지 간다.

그림 2는 병렬공진회로로서 전원의 인덕턴스가 전력용 콘덴서와 병렬로 접속되어 있다.

이 경우 전원용량 $P[MVA]$, 콘덴서 용량을 $C[Mvar]$, 전원전압을 E 라고 하면

$$P[MVA] = \frac{E^2}{X_L} \quad (4)$$

$$C[Mvar] = \frac{E^2}{X_c} \quad (5)$$

이 되므로 기본 주파수를 f_1 으로 한 공진주파수 f_r 은

$$\begin{aligned} f_r &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{W^2 \cdot \frac{1}{WL} \cdot \frac{1}{WC}} \\ &= \frac{W}{2\pi} \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = f_1 \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} \end{aligned} \quad (6)$$

와 같이 되며 (6)식에 (4), (5)식을 대입하여

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{P[MVA]}{C[Mvar]}} \quad (7)$$

와 같이 구해진다.

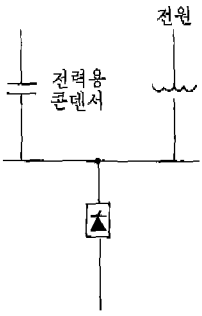
한편 그림 3은 강압 변압기의 인덕턴스와 콘덴서가 직렬로 연결되어 있는 예로서 변압기 2차측에서 변압기와 콘덴서를 본 경우는 그림 2의 경우와 동일한 조건이 성립되므로 변압기의 단락용량을 $P[MVA]$, 콘덴서 용량을 $C[Mvar]$ 라고 하면 이 경우에도 (7)식이 그대로 적용된다.

여기서 주의할 것은 그림 2에 있어서는 그림 3과 같이 콘덴서가 연결되어 있는 버스의 전압이 확정되어 있는 경우에만 (7)식이 적용된다는 것이며 한편 L, C 간의 전압이 확정되어 있지 않은 직렬접속의 경우는 (7)식이 적용되지 않는다.

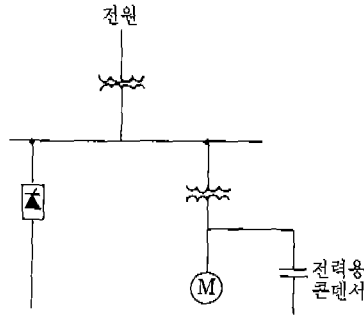
또한 인덕턴스의 등가용량을 $L[Mvar]$, 캐패시턴스의 등가용량을 $C[Mvar]$, 흐르는 전류를 I 라고 하면 각각의 값은 다음과 같이 된다.

$$L[Mvar] = 3X_L I^2 \quad (8)$$

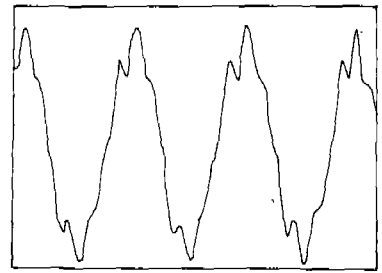
$$C[Mvar] = 3X_c I^2 \quad (9)$$



<그림 2> 병렬공진회로의 예



<그림 3> 직렬공진회로의 예



<그림 5> 13.2kV 버스에 있어서의 전압파형

(6)식에 (8), (9)식에서 구한 X_L , X_c 를 대입하면 이 경우의 공진주파수 f_r 은

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{C[\text{Mvar}]}{L[\text{Mvar}]}} \quad (10)$$

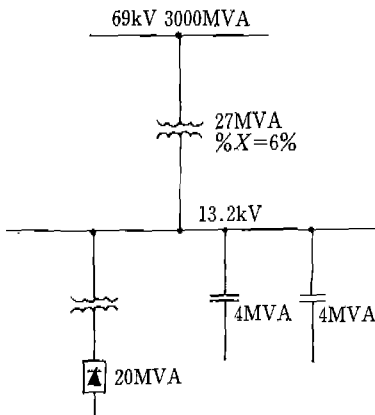
와 같이 얻어진다.

(10)식은 전력 계통에서는 RLC 직렬공진회로로 구성한 교류필터에 적용할 수 있다.

4·1 병렬공진의 일례

그림 4는 병렬공진회로의 한 예이고 그림 5는 20MW 사이리스터 전력변환장치를 운전한 경우의 13.2kV 버스에 대한 전압파형이다.

그림 5와 같이 제 7고조파 성분이 나타나고 있으며 전압왜곡은 약 15%로 되어 있다.



<그림 4> 병렬공진회로의 예

13.2kV 버스에서 전원측을 본 등가용량 P [MVA]는

$$P[\text{MVA}] = \frac{3,000 \times (27/0.06)}{3,000 + (27/0.06)} = 391.3[\text{MVA}]$$

가 되므로 공진주파수는 f_r 은

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{391.3}{8}} = 6.994f_1 \approx 7f_1$$

와 같이 되며 7차에서 공진함을 알 수 있다.

그림 4와 같은 병렬공진회로가 공진주파수를 갖는 고조파 전류에 의하여 야기되면 본래 고조파 전류의 약 Q배의 고조파 전류가 전원과 콘덴서간을 흐르며 사이리스터 전력변환기에서 보면 병렬회로의 제 7조파에 있어서 임피던스가 매우 높아지고 그림 5와 같이 전원전압이 변형된다.

이 문제를 해결하기 위하여 교류필터를 설치하면 되나 새로운 설비투자를 가능한 억제하기 위해서 4MVA 전력 콘덴서에 리액터를 직렬로 접속, 그림 6과 같이 제 5차 및 제 7차 필터를 구성하였다.

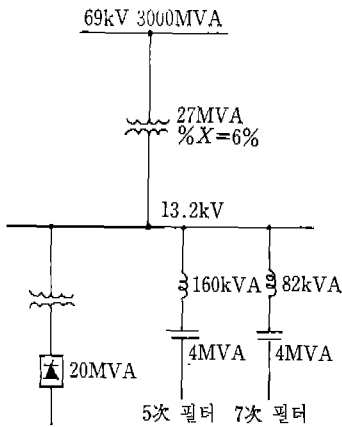
직렬 리액터의 용량은 (10)식에 의하여 구해지며

$$5\text{차 필터용} : L[\text{Mvar}] = \frac{4,000}{52} = 160[\text{kVA}]$$

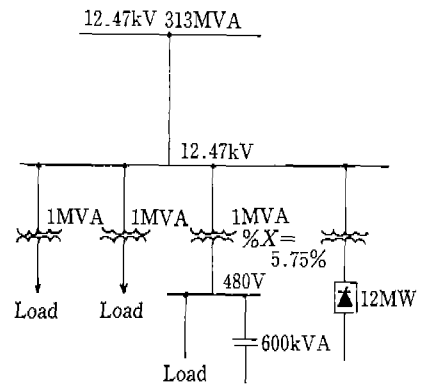
$$7\text{차 필터용} : L[\text{Mvar}] = \frac{4,000}{72} = 82[\text{kVA}]$$

와 같이 된다.

5차 필터를 설치한 것은 보다 안전면을 고려



<그림 6> 개선된 병렬공진회로

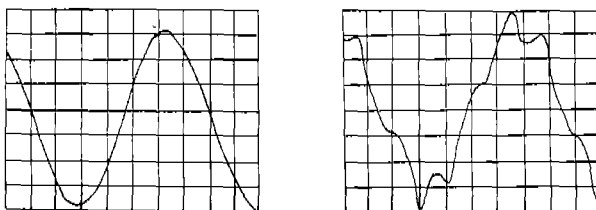


<그림 7> 직렬공진회로의 예

한 것이다. 또한 기존의 전력 콘덴서 설비를 이용하는 경우에 주의해야 할 것은 직렬필터를 추가한 후의 고조파 성분도 포함한 전력 콘덴서의 단자간 전압 및 유입전류가 콘덴서의 정격전압 또는 규격으로 정해진 전류치 이상이 되지 않는 것을 사전에 확인해 두는 일이며 만일 과대 전압전류가 예상되는 경우는 전력 콘덴서 자체도 다시 만들거나 또는 그림 4의 회로를 현상 그대로 하고 이것에 새롭게 제 7차의 AC 필터를 설치해야 한다.

4·2 직렬공진의 예

그림 7은 직렬공진회로의 한 예이고 그림 8은 12MW 사이리스터 전력변환장치를 운전할 때와 하지 않을 때의 12.47kV 버스의 전압파형으로서 이 계통이 제 5차 고조파에 있어서 공진현상을 일으키는 것을 나타낸다.



(a) 사이리스터 장치 정지중
(b) 사이리스터 장치 운전중
<그림 8> 12.4kV 버스에 있어서의 전압파형

그림 7에 있어서 사이리스터 전력변환장치가 접속되어 있는 12.47kV에서 강압 변압기를 통하여 480V측을 본 경우 변압기의 누설 인덕턴스와 전력용 콘덴서는 직렬 공진회로를 구성하며 공진주파수는 (7)식에 의해

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{(1,000/0.0575)}{600}} = 5.38f$$

이 된다.

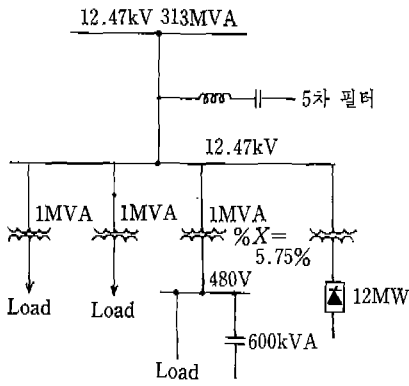
이 공진주파수는 제 5차에 매우 가깝기 때문에 제 5고조파에 대한 임피던스가 비교적 낮아지고 콘덴서에 과대한 고조파 전류가 유입한다.

그림 9는 600kVA 전력용 콘덴서에 유입하는 전류파형을 나타낸 것으로서 약 30%의 제 5고조파 전류가 유입하고 있다.

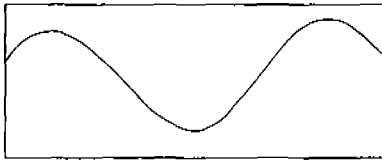
이 상태를 개선하려면 교류 필터를 설치하거나 콘덴서에 직렬 리액터를 접속하여 공진점을 바꾸는 방법을 생각할 수 있는데 그림 10과 같이 이 경우에는 제 5차 고조파 필터를 전원측에 설치한다.



<그림 9> 콘덴서를 통과하는 전류파형 (사이리스터 장치 운전중)



<그림10> 개선된 직렬공진회로



<그림11> 5차 필터를 접속한 경우
12.47kV 버스의 전압파형

그림11은 그림10에서 사이리스터 전력변환기를 운전했을 때 12.47kV 버스의 전압파형으로 그림 8의 상태가 대폭 개선된 것이다.

5. 발전기에 미치는 영향

전원 계통에 자가용 발전기가 접속되는 경우 일반적으로 발전기의 임피던스가 다른 기기의 것에 비해서 작기 때문에 사이리스터 전력변환기에서 유출한 고조파 전류가 발전기에 유입하기 쉽다.

5.1 고조파 전류에 의한 회전자계

고조파 전류가 동기기 또는 유도기의 심상 고정자권선에 유입한 경우 각상의 코일에서 생기는 기자력은 다음과 같이 구해진다.

지금 U 상에

$$i_v = \sqrt{2} (I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + I_5 \sin(5\omega t + \phi_5) + I_7 \sin(7\omega t + \phi_7) + \dots) \quad (11)$$

와 같은 왜곡과 전류가 흐르고 있다고 하면 이 전류에 의하여 U 상의 코일에 생기는 기자력은

$$M_U = \frac{2\sqrt{2}qN}{\pi} i_v \left(KW_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) - \frac{KW_3}{3} \cos\left(3\frac{\pi}{\tau} x\right) + \frac{KW_5}{5} \cos\left(5\frac{\pi}{\tau} x\right) - \frac{KW_7}{7} \cos\left(7\frac{\pi}{\tau} x\right) + \dots \right) \quad (12)$$

여기서 q : 每極每相의 슬롯수

N : 1슬롯당의 도체수

KW_m : m 차 조파에 대한 권선계수

τ : 극간격

이 된다.

V 상, W 상에 대해서도 동일하게 구하고 3상 권선의 기자력의 합을 구하면 KW_m 은 차수의 상승에 따라 저하하므로 각 차수에 대응하는 기자력은 각각

기본파 전류에 대해서

$$M_s(\omega t) = \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi} I_1 KW_1 \left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x \right)$$

제 5 고조파 전류에 대해서

$$M_s(5\omega t) = \frac{\sqrt{2}qN}{\pi} I_7 KW_5 \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right)$$

제 7 고조파 전류에 대해서

$$M_s(7\omega t) = \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi} I_7 KW_7 \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right)$$

제11고조파 전류에 대해서

$$M_s(11\omega t) = \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi} I_{11} KW_{11} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{\tau} x\right)$$

제13고조파 전류에 대해서

$$M_s(13\omega t) = \frac{3\sqrt{2}qN}{\pi} I_{13} KW_{13} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x\right)$$

가 된다.

$M_s(\omega t)$ 는 기본파 전류에 의한 통상의 회전 기자력인데 $M_s(5\omega t)$ 는 기본파의 회전자계에 대해서 반대방향으로 5배의 속도로 회전하는 회전기자력이며 이것은 기본파와 동일속도로 회전하고 있는 회전자에 대해서는 $(5+1)=6$ 배의 속도로 채교한다.

또한 $M_s(7\omega t)$ 는 기본파 회전자계와 동일방향으로 7배의 속도로 회전하고 있으며 회전자

에 대해서 (7-1)=6배의 속도로 쇄교하게 된다.

즉 $M_s(5wt)$ 도 $M_s(7wt)$ 도 회전자 회로에 대해서는 기본 주파수의 6배인 주파수의 전압을 유지시키게 된다.

$M_s(11wt)$ 와 $M_s(13wt)$ 도 동일원리로 회전자 회로에 대해서 기본 주파수의 12배인 주파수의 전압을 유지시킨다.

5·2 댐퍼권선에 대한 영향

통상적인 동기기는 磁極頭部에 댐퍼권선을 설치하고 있는 것이 보통이며 발전기에 사이리스터 전력변환장치와 같은 고조파 전류 발생원을 접속하면 회전 기지력에 의하여 유기된 기전력으로 댐퍼권선에 전류가 흐르며 이로 인하여 손상의 원인이 된다.

일반적으로 동기기에 불평형부하가 걸릴 경우 역상전류가 생겨 정상전류는 회전자와 함께 동일방향, 동일속도로 회전하는데 대해 역상전류에 의한 회전자계는 회전자와 반대방향으로 회전자와 동일속도로 회전하므로 회전자 회로에 2배 주파수의 전류를 흘리게 되어 댐퍼권선에는 슬립 $s=2$ 에 대응하여 손실 증가와 온도 상승을 초래한다.

한편 발전기의 댐퍼권선 설계에 있어서 주파수가 높더라도 저항이 크게 증가하지 않고 역상전류를 충분히 흡수할 수 있는 열용량을 갖도록 함과 동시에 전기 접촉부 등의 통전부에 주의하여야 한다.

현재 전원 계통에 있어서 발생하는 고조파 전압 및 계통에 유입하는 고조파 전류의 허용치에 관한 명확한 규격은 없으나 영국전력청에서 행한 기술권고사항을 보면 다음과 같다.

첫째, 공동 접합점에 유출하는 고조파 전류가 표 1의 수치 이하일 것.

둘째, 새로운 설비에 접속하기 전에 공동 결합점에 대한 고조파 전압 왜곡이 표 1의 75%를 초과하지 않을 것, 그리고 표 1의 전압 왜곡은 계통의 어떤 점에서도 초과해서는 안되는 값으로 되어 있다.

<표 1> 허용 고조파 전류

(a) 허용 고조파 전류

회로전압	고조파 차수의 전류치[A](실효치)																	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
415V	48	34	22	16	11	40	9	8	7	19	6	16	5	5	5	6	4	6
6.6, 11kV	13	8	6	10	4	8	3	3	3	7	2	6	2	2	2	2	1	1
33kV	11	7	5	9	4	6	3	2	2	6	2	5	2	1	1	2	1	1
132kV	5	4	3	4	2	3	1	1	1	2	1	3	1	1	1	1	1	1

(b) 허용 고조파 전압

회로전압	총합조파(%)	各次調波	왜곡률(%)
		기수조파	우수조파
415V	5	4	2
6.6, 11kV	4	3	1.75
33, 66kV	3	2	1
132kV	1.5	1	0.5

<표 2> 허용 고조파 전압·전류

(a) 허용 고조파 전압

회로전압	허용고조파 전압할유율	비 고
154kV 이상의 송전계통	0.5%	전압 총합 왜곡이 약 1.0% 된다.
66kV 이하의 송전계통	1.0%	전압 총합 왜곡이 약 1.0% 된다.

(b) 허용 고조파 전류

고조파 차 수	5	7	11	13	17	19	23	25
제한치	10.6A	5.0A	2.6A	2.2A	1.8A	1.7A	1.8A	1.9A

독일의 경우 병렬기기의 고조파 장애는 전압의 왜곡에 기인한다는 생각에서 고조파 전류에 대해서는 규정하지 않고 VDE 0610에서 다음과 같이 전압 왜곡을 준비하였다.

첫째, 계통전압의 기본파 성분이 99.5% 이상일 것,

둘째, 각 차고조파 전압의 실효치가 계통전압 실효치의 5%를 초과하지 않을 것,

셋째, 주기적으로 생기는 전압 陷沒의 크기가 기본파 첨두치의 20%를 초과하지 않을 것.

한편 일본에서는 표 2와 같이 고조파 전압 및 전류를 억제해야 한다고 모전력회사에서 규정을 제안하였다.