

현장 엔지니어 시리즈 ⑤

사이리스터 기기의 증가로 인한 고조파 대책

역/대한전기기사협회

머리말

사이리스터 기기는 전력, 철강 등의 산업·사회의 기간 분야로부터 가전기기에 이르기까지 여러가지 분야에서 이용되고 있으며, 부하가 요구하는 전압·주파수의 전압으로 변환함으로써 전력 절감과 성능 향상에 공헌하고 있다. 그러나 이 기기들은 사이리스터의 스위칭 작용을 전력 제어에 이용하고 있기 때문에 고조파 발생이나 역률 저하에 의해 교류측 전력의 질을 저하시키고 동일 모선에 연결되는 기기에 나쁜 영향을 준다.

여기서는 고조파에 의한 장애와 그 대책에 대해서 설명한다.

1. 고조파의 발생

사이리스터를 사용하여 전력을 변환 또는 조정하는 장치에는 다음과 같은 다섯 종류가 있다.

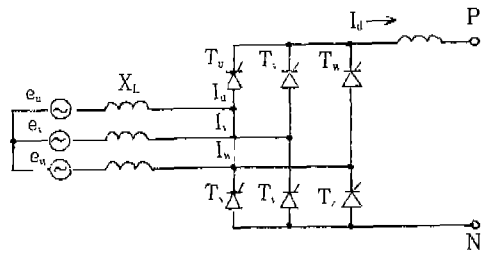
- (i) 교류를 직류로 변환하는 정류회로
 - (ii) 직류를 교류로 변환하는 역변환회로
 - (iii) 교류를 상이한 주파수의 교류로 직접 변환하는 사이크로컨버터
 - (iv) 직류를 강압 또는 승압한 직류로 변환하는 초퍼회로
 - (v) 교류전력을 조정하는 교류전력조정기
- 이 중에서 배전계통에의 고조파 유출이라는 점에

서는 (i),(iii),(v)가 직접 관계되지만 여기서는 가장 기본적인 (i)의 정류회로에 대해서 고조파의 발생을 설명한다.

(1) 정류회로

기본회로는 대별해서 센터 탭 회로와 브리지 회로로 분류되는데, 후자는 중성점이 불필요하고 변압기 이용률이 높으며 소자에 걸리는 역전압도 낮으므로 널리 이용된다.

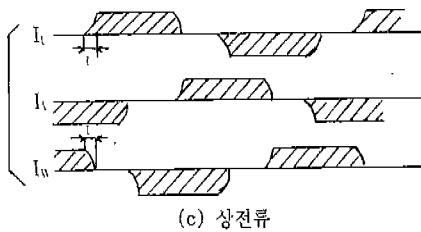
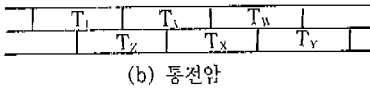
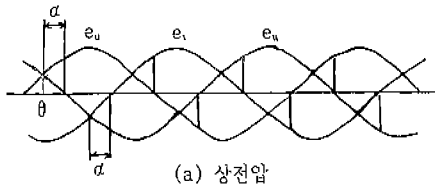
여기서는 가장 일반적인 3상 브리지 회로에 대해서 설명한다.



<그림 1> 삼상 순 브리지 회로

<그림 1>은 3상 브리지 정류회로이다. 지금 직류측 인덕턴스는 충분히 크고 직류전류 I_d 는 일정하다고 가정한다.<그림 2(a)>의 전압파형에서 상전압 e_u 가 다른 2상의 전압 e_v, e_w 보다 커지는 시점(<그림 2(a)>에서 0이라고 기입한 시점)으로부터 위상각 α 의 곳에서 사이리스터 T_u 에 신호를 가

하면 T_u 에는 I_{T_u} 가 흐르지만 전원 리액턴스 X_L 때문에 순간적으로 I_d 에 달하는 일은 없고 어느 시간 경과 후 $\alpha + \mu$ 의 시점에서 I_d 가 된다. 한편, I_d 는 일정하다고 가정하고 있으므로 d 부터 $\alpha + \mu$ 의 기간은 T_w 에도 $I_d - I_{T_u}$ 의 전류가 흐른다.

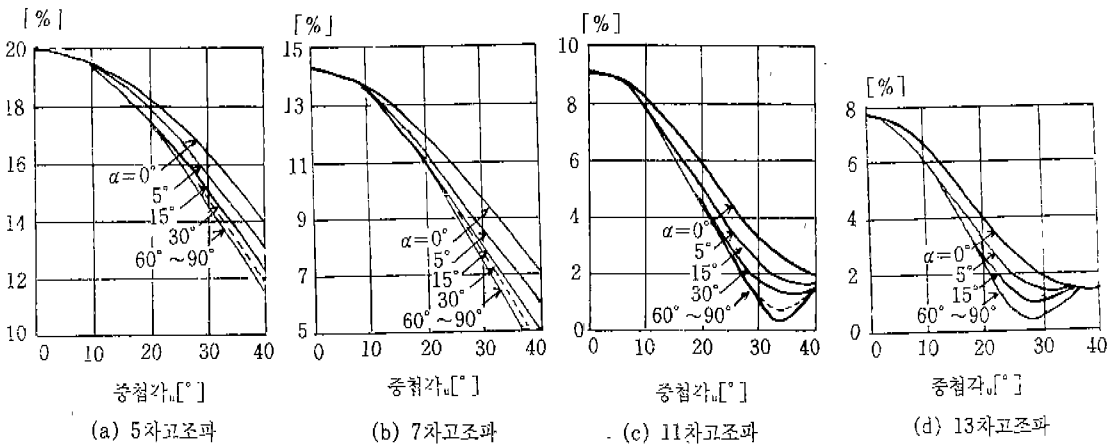


<그림 2> 삼상 브리지 회로의 각부 파형

다음에 $\pi/3$ 에서 e_w 가 제일 작아지므로 $(\pi/3) + d$ 의 시점에서 사이리스터 T_z 에 게이트 신호를 부여하면 동일하게 I_{T_z} 는 0부터 증가하여 $(\pi/3) + \alpha + \mu$ 의 시점에서 I_d 에 달한다. 여기서 μ 는 전류중첩각이라고 불린다. <그림 2(b), (c)>에 각 암의 사이리스터 도통구간과 교류측의 전류 파형을 나타낸다. $\mu = 0$ 의 경우 1상의 전류를 푸리에 급수 전개하면,

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d (\sin\omega t - \frac{1}{5}\sin 5\omega t - \frac{1}{7}\sin 7\omega t + \frac{1}{11}\sin 11\omega t + \frac{1}{13}\sin 13\omega t - \dots)$$

가 되고 3의 배수를 제외한 기수 차수의 고조파가 발생한다. <그림 3(a)~(d)>는 기본파에 대한 각 차 고조파의 실효값의 비를 제어각 α 를 파라미터로 하여 중첩각 μ 에 대한 변화를 나타낸 것이다. 여기서 μ 가 증가하면 고조파 전류의 크기는 감소하고 또 μ 가 일정하고 α 가 증가하더라도 고조파 전류는 약간 감소하는 것을 알 수 있다. 또 브리지에 따라서는 각 암의 소자를 전부 사이리스터가 아니고 하측 암의 소자를 다이오드로 구성된 브리지도 있는데, 이 경우의 고조파는 기수차만이 아니고 우수차도 포함된다.



<그림 3> 삼상 브리지 정류회로의 교류측 고조파 전류 함유율 I_n/I_1 [%]

(2) 특성 고조파와 비특성 고조파

사이리스터 변환장치가 발생하는 고조파는 (1)에서 기술한 바와 같은 출력상수에 따라 발생하는 특성 고조파 이외에 실제로는 배전설로나 변환장치 등의 약간의 불평형이 원인으로 이 이외의 차수의 고조파가 발생한다. 이것들을 비특성 고조파라고 한다. 비특성 고조파는 일반적으로 특성 고조파에 비하면 작으며 문제가 되는 일은 적지만 저차의 특성 고조파를 제거하기 위한 공진분포형의 필터가 있으면 반대로 확대되거나 해서 특성 고조파와 동일한 정도가 되어 문제가 되는 일이 있다.

2. 고조파가 파급하는 다른 기기への 영향

사이리스터 변환장치는 전원측에서 봤을 때 그 임피던스가 일반적으로 크기 때문에 고조파에 관해서는 정전류 고조파원이 된다. 그리고 배전계통에 흐른 고조파 전류는 계통의 임피던스에 의해 전압 파형을 왜곡시키고 동일한 모선에 연결되는 부하에 고조파 전류를 흘린다. 고조파에 의해 영향을 받기 쉬운 것으로서 (i)전원회로의 공진, (ii)콘덴서 리액터, (iii)발전기, (iv)조명장치, (v)지시계기, (vi)보호계전기 등을 들 수 있다.

(1) 전원회로의 공진

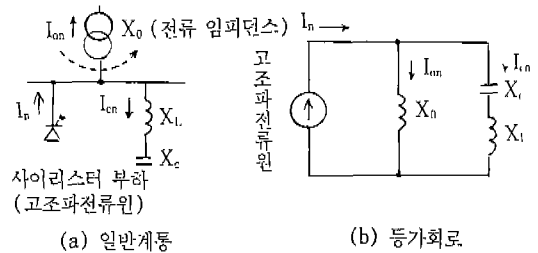
통상 변압기나 배전선의 캐퍼시턴스는 극히 작기 때문에 공진주파수는 사이리스터 장치 등에서 발생하는 고조파 전류의 주파수에 비해 높아서 공진이 그리 문제가 되지 않는다. 그러나 역률개선을 위한 전력용 콘덴서가 있으면 공진주파수가 내려가므로 주의를 요한다. <그림 4(a)>의 회로를 고조파에 관해서 등가회로를 그리면 <그림 4(b)>와 같이 된다. 여기서 I_{0n} , I_{cn} 은 다음 식으로 표시된다.

$$I_{0n} = \frac{nX_L - \frac{X_c}{n}}{nX_0 + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

$$I_{cn} = -\frac{nX_0}{nX_0 + (nX_L - \frac{X_c}{n})} \cdot I_n$$

단, n 은 고조파의 차수, X_0 , X_L , X_c 는 기본파 주파수에서의 리액턴스 값이다. 여기서 $nX_L - (X_c/n) = 0$ 의 경우는 $I_{0n} = 0$ 이 되고 전원측에 고조파 전류가 흐르지 않게 된다. 이것은 1의 (2)에서 기술한 공진분포형 필터에 상당한다.

다음에 $nX_0 + \{nX_L - (X_c/n)\} \approx 0$ 의 경우는 I_{0n} , I_{cn} 공히 I_n 에 대해서 대단히 커지므로 이 조건이 되지 않도록 주의를 하여야 한다.



<그림 4> 고조파분류

(2) 콘덴서, 직렬 리액터의 과열·과전압

콘덴서에 고조파 전류가 유입하면 유전체 손실의 증가에 의한 온도 상승이나 전류의 실효율 증가로 인한 부싱과 리드선의 과열로 유전체나 절연물의 열열화를 촉진하여 수명을 단축시킨다. 그리고 n 차의 고조파 전류가 유입했을 때 콘덴서에 인가되는 전압은 다음 식으로 표시된다.

$$V_c = I_0 X_c + \Sigma I_n \frac{X_c}{n} = V_0 (1 + \frac{1}{I_n} \Sigma \frac{I_n}{n})$$

단, I_0 는 콘덴서 정격전류, X_c 는 콘덴서 기본파 리액턴스, V_0 는 콘덴서 정격전압으로 $V_0 = I_0 \times X_c$ 이다. 위의 식에서 고조파의 유입이 없는 경우에 비해서 $(V_0/I_0) \cdot \Sigma (I_n/n)$ 분 만큼 인가전압이 증가한다. 이것이 과대해지면 유전체의 절연수명에 영향을

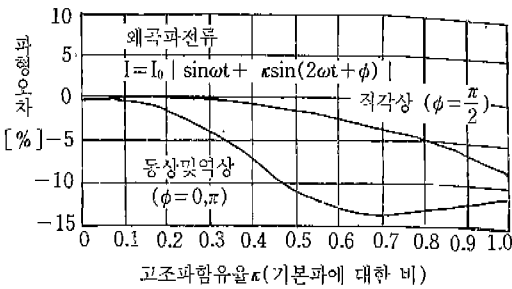
준다.

직렬 리액터는 계통에 일반적으로 존재하는 최저차로 또한 함유율이 큰 제5조파가 콘텐츠에 유입하는 것을 방지하기 위해 삽입한다. 통상 콘덴서 리액턴스의 6%이다. 고조파 전류가 과대해지면 철심의 과열, 권선이나 오일의 온도상승 등에 의해 절연물의 열화 등이 생겨 소손 등의 장애로 발전하는 일이 있다.

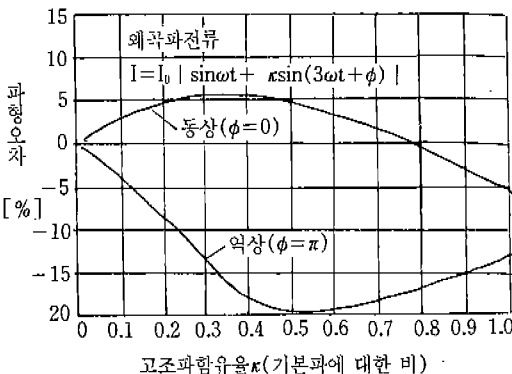
또한 철손은 주파수의 1~2승에 비례해서 증가하므로 고조파에 의한 손실은 주파수가 높으면 많이 증가한다.

(3) 발전기

고조파 발생원과 동일한 모선에 자가용 발전기가



(a) 제이조파만을 포함할때의 파형오차



(b) 제삼조파만을 포함할때의 파형오차

<그림 5> 정류형계기의 파형오차

연결되면 발전기의 임피던스가 낮기 때문에 고조파 전류가 유입하기 쉽다. 고조파 전류는 고정자 권선, 고정자 철심의 손실을 증가시킨다. 또한 3상 고정자 권선에 제5,7차의 고조파를 포함한 왜곡파 전류가 흐르면 제5차 전류에 대한 기자력이 기본파의 회전자계에 대해서 5배의 속도로 반대방향으로 회전하는 기자력이 되기 때문에 기본파와 동일 속도로 회전하고 있는 회전자에 대해서는 5+1=6배의 속도로 쇠교한다.

또, 제7고조파 전류에 대한 기자력은 기본파의 회전자계에 대해서는 7-1=6배의 속도로 쇠교한다. 결국 제5,7차의 고조파 전류는 회전자 회로에 대해서 기본파의 6배인 주파수 전압을 유기한다. 그리고 자극 두부에 댄퍼 권선이 설치되어 있는 경우 이 유기전압에 의해 댄퍼 권선에 전류가 흘러 댄퍼 권선 내의 손실을 증가시켜 고장의 원인이 되는 일이 있다.

(4) 조명장치

백열전구의 경우 필라멘트는 저항이 되기 때문에 전위전압의 변동이 직접 광의 변동으로서 나타난다. 따라서 저주파의 변동에서는 깜박임이 생기지만 고조파에 대해서는 영향이 없다. 한편, 형광등은 방전 현상을 이용한 조명기로서 전압·전류 특성은 부성 저항을 나타내기 때문에 이것을 안정시켜 점등시키기 위해서는 안정기가 필요하다. 안정기에 초크 코일을 사용한 방식은 고조파 전류가 흐르기 어렵게 되기 때문에 영향을 받기 어렵지만 초크 코일에 의한 역률 저하를 방지하기 위해 역률개선용 콘덴서를 삽입한 방식은 (2)에서 기술한 것과 같은 문제가 생기는 일이 있다.

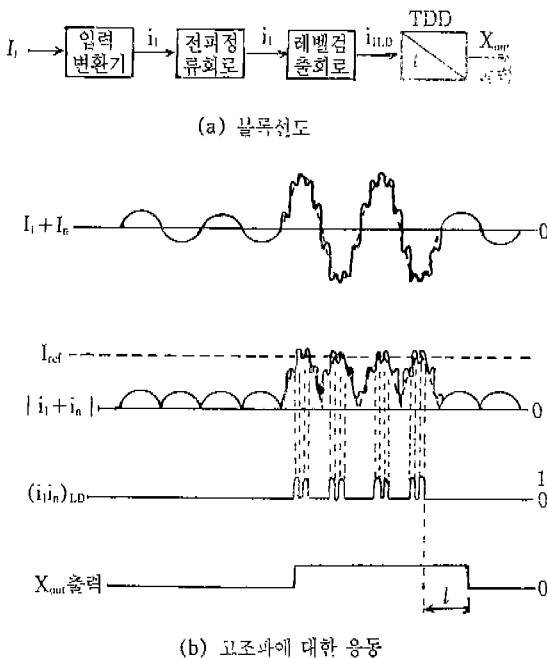
(5) 지시계기

지시계기는 평균값을 측정하는 가동 코일형, 정류형과 실효값을 측정하는 가동철편형, 전류역률형, 열전형 등으로 분류된다. 주파수 특성으로서는 열전형이 가장 우수하다. 정류형도 음성주파수까지의 측정

이 가능하지만 평균값 측정으로 눈금 결정을 정현파 교류의 실효값으로 하고 있기 때문에 왜곡파형의 교류를 측정하면 파형오차가 생긴다. <그림 5(a),(b)>는 제2, 제3조파를 포함하는 전류에 대한 파형오차이다.

(6) 보호계전기

계전기에는 전자기계형과 트랜지스터형 2종류가 있는데, 전자는 전자력에 의해 동작하므로 원리적으로 고조파에 대해서 강하지만 후자는 입력파형의 순시값에 응동하는 동작이 기본이 되기 때문에 고조파의 영향을 받기 쉽다. 트랜지스터 계전기에는 부족전압계전기나 과전류계전기와 같이 레벨 검출을 하는 타입과 방향계전기 등과 같이 위상비교를 하는 타입의 2종류가 있으며, 각각 고조파가 존재하면 동작값이 변화하거나 동작시간 뒤집이 발생하거나 한다.



<그림 6> 과전류계전기의 경우

<그림 6(a)>는 과전류계전기의 블록도, <그림 6(b)>는 고조파가 존재했기 때문에 본래 동작하지 않는 레벨의 기본파 입력에도 불구하고 동작해 버린 예를 나타낸다. 일반적으로 트랜지스터 계전기의 경우 고조파에 의한 오동작을 방지하기 위해 기본파 이외의 감쇄도가 크고 또한 과도특성이 우수한 액티브 필터를 입력 전단에 둔다.

3. 고조파를 저감시키기 위한 대책

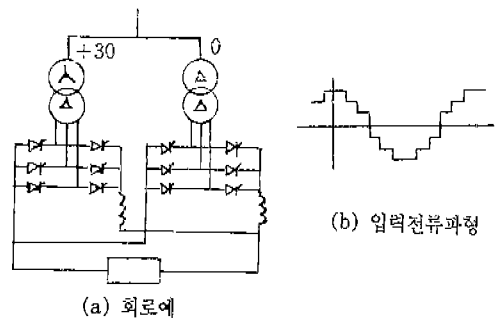
여기서는 고조파 발생원인 기기 자체에서 고조파를 저감시키는 방법과 발생한 고조파를 흡수하여 계통에 나가는 양을 저감시키는 방법의 두가지에 대해서 설명한다.

(1) 발생원에서의 대책

고조파 저감법으로서는 (i) 출력상수의 증가, (ii) PWM 제어방식의 도입 등이 제안되고 있다.

(a) 출력상수의 증가

<그림 7(a)>는 3상 브리지 정류회로를 그대로 사용해서 다상화한 일례이다. <그림 7(b)>의 입력 전류파형을 <그림 2(c)>의 파형과 비교해 보면 다상화에 의해 정현파형에 가까워지는 것을 알 수 있다. 일반적으로 출력상수를 P (그림 7의 경우는 $P=12$)로 하면 발생고조파의 차수는



<그림 7> 다상화에 의한 고조파대책

$$n = KP \pm 1$$

($K=1,2,\dots$)

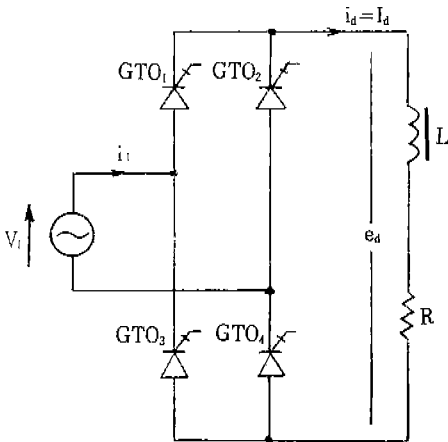
이 되며 출력상수를 증가할수록 최저차 고조파의 차수가 높아진다. 또, 1-(1)에서 나타낸 바와 같이 전류중첩각이 0인 경우의 n 차 고조파 전류 I_n 의 크기는

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

이 되어 출력상수가 높으면 작아진다. 이와같이 고조파의 저감에는 출력상수를 증가시키는 것이 효과적이다. 단, 제어 뒤집각에 상간의 불균형이 있으면 이론적으로 상쇄하여 없어질 고조파가 남는 일이 있으므로 출력상수를 증가시킨 효과가 저감되는 경우가 있다.

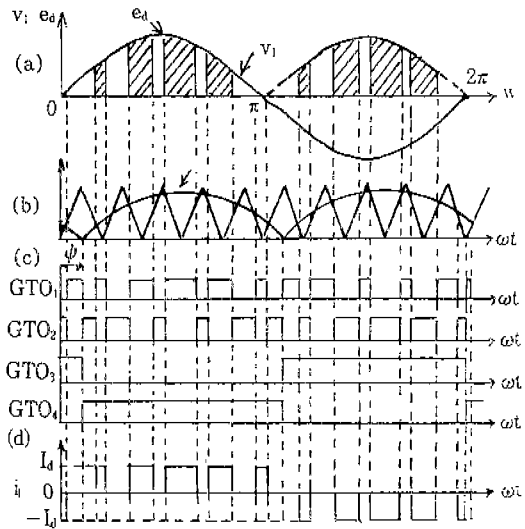
(b) PWM 제어를 사용한 정류회로

GTO나 파워 트랜지스터 등의 자기소호형 전력용 스위칭 소자가 대용량화되어 이것이 정류회로에 사용되고 있다. 자기소호형 소자를 사용하면 강제전류용(轉流用) 리액터나 콘덴서 없이 임의의 위상으로 전류를 차단하여 전류(轉流)시킬 수가 있으므로 1 주기에 다수회 온 오프 시킴으로써 발생 고조파의 최저차수를 높게 할 수가 있다.



<그림 8> GTO를 사용한 단상브리지 정류회로

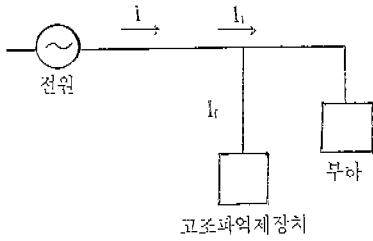
<그림 8>은 GTO를 사용한 단상 브리지 회로의 예로서, 이 스위칭 동작은 다음과 같이 하여 행한다. 우선 <그림 9(b)>와 같이 전원 V_1 과 ϕ 의 위상차가 있는 정현파 신호 e_s 에 대해서 GTO 1, 2는 e_s 와 삼각파의 교점에서, 또 GTO 3, 4는 e_s 의 0점과 동기해서 스위치 시킨다. 이때 입력전류 파형은 (d)와 같이 되며 고조파 성분은 기본파에 비해서 높은데 간단한 필터로 제거할 수 있다. 또한 ϕ 를 지연(遲進)으로 변화시켜서 입력역률도 자유롭게 설정할 수 있다.



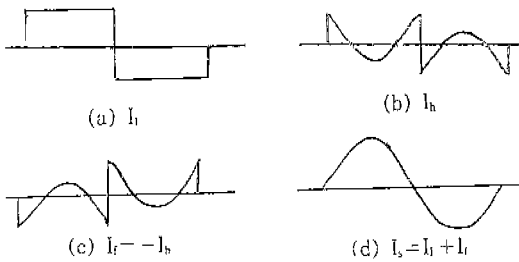
<그림 9> PWM를 사용한 경우의 동작파형

(2) 필터에 의한 고조파의 저감

발생한 고조파를 흡수하여 계통에 나가는 양을 감소시키기 위해서 교류 필터가 사용된다. 필터에는 (i)콘덴서와 리액터로 구성되는 수동형 LC 필터와 (ii)직류원과 스위칭 소자를 사용한 능동형 필터의 두 종류가 있다. LC 필터의 원리는 LC의 직렬 공진이지만 계통의 임피던스와 밀접하게 관계하기 때문에 설계·제작에는 고도의 기술이 필요하며 충분한 사전 검토가 있어야 한다. 그리고 고조파의 발생량이 증가하여 과부하가 되지 않도록 고조파 과전류계전기



<그림 10> 고조파억제장치의 접속법



<그림 11> 고조파전류 억제방법

가 많이 사용된다.

한편, 능동형 필터는 <그림 10>과 같이 전원과

병렬로 접속하며, 부하전류 I_c 에 포함되어 있는 고조파전류 I_n 와 크기가 같고 역위상의 전류 I_r 를 고조파억제장치에서 출력시킴으로써 전원측전류 I_s 의 고조파 성분을 상쇄하여 기본파 성분만 남긴다. <그림 11>에 I_r 이 방형파 전류인 경우의 예를 든다. <그림 11(c)>와 같은 전류파형을 출력시키는 회로와 원리는 <그림 8,9>에 표시한 PWM제어의 정류회로와 거의 동일하지만 이것은 부하에 상당하는 R 이 없고 I_r 가 피변조 신호 cs 대신이 된다. 정확히는 삼각파 주파수의 1/2 이하밖에 출력되지 않으므로 I_r 에 상당하는 피변조 신호는 로패스 필터를 통해서 고역을 커트하여 준다. 이러한 능동형 필터는 수동형 필터에 비해서 가격·치수의 점에서 개량하지 않으면 안되는 점도 있지만 범용성이 좋고 또 대용량 GTO의 개발도 진전되어 있어 많이 보급될 것으로 생각된다.

이상 사이리스터 응용기기의 증가에 따라 중요한 문제로 대두된 고조파 저감대책에 대해서 기술하였다. 본고가 약간이나마 독자들의 참고가 되었다면 다행이겠다. <연재 끝>

쉬어 갑시다

‘10분전 생활’을 생활화 합시다

‘10분전 생활’이란 모든 일을 함에 있어 시작하기 10분전에 모든 준비를 끝내고 정시에 일(업무) 시작하는 생활을 말합니다. ‘시작이 반’이라는 말이 있습니다. 이 말은 모든 일에 있어 그 일을 시작할 때의 마음의 준비와 자세가 일의 성패를 좌우하는 중요한 요인이라는 뜻입니다.

이런 의미에서 배사에 다른 사람보다 10분 먼저 생각하고, 준비하고, 계획하고, 실천하는 ‘10분전 생활’은 일의 진행과정에 있어 능률성과 일의 성패를 결정하는 중요한 요소가 됩니다.

남보다 10분 먼저 일어나 하루를 계획하고, 10분 먼저 출근해서 그날 업무를 계획·점검하며, 회의·교육·훈련에 남보다 10분 먼저 참석하여 마음의 준비와 자세를 가다듬어 봅시다.

자신의 발전을 들뜬 동료, 상사로 부터 유능한 직원, 실력있는 직원, 성장하는 직원으로 주목받을 것입니다.

우리 모두 ‘10분전 생활’을 생활화 합시다.