

Yrd. Doç. Dr. Süleyman ADAK  
Elektrik Yüksek Mühendisi  
Mardin Artuklu Üniversitesi Meslek Yüksekokulu  
Teknik Programlar Bölüm Başkanı

## Elektrik Tesislerinde Oluşan Harmonikler

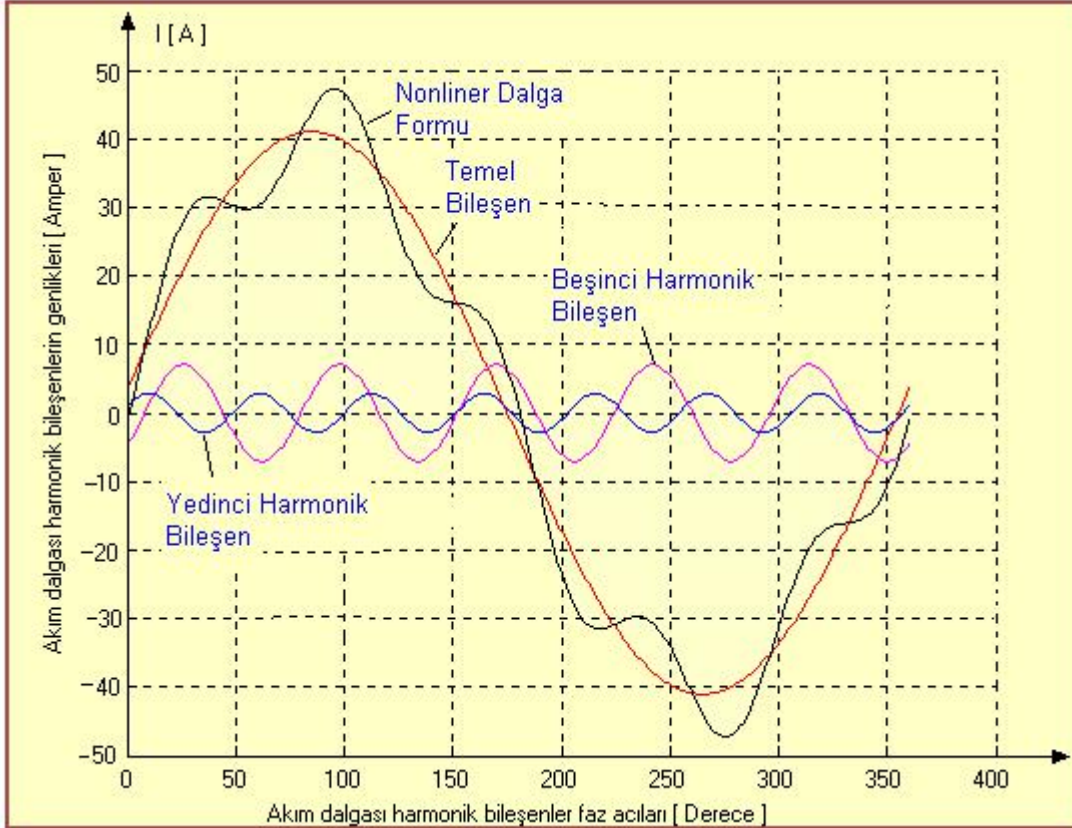
### Giriş

Harmonikler genel olarak nonlineer elemanlar ile nonsinüzoidal kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması sinüzoidal dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar nonsinüzoidal dalga olarak adlandırılır.

Gerilim dalga şeklinin bozulmasının en önemli nedeni, uç gerilimi ve akımı arasındaki bağıntısı lineer olmayan yükler ile nonsinüzoidal kaynaklardır. Nonlineer yüklerin ürettiği harmonik frekanslı akımlar devrelerini şebeke ve civar tüketiciler üzerinden kapatarak harmonik frekanslı gerilimler meydana getirirler. Nonlineer dalga formu, temel bileşen yanında harmonik bileşenlerden oluşur. Günümüzde güç elektroniğindeki hızlı gelişme harmoniklerin artmasına sebep olmuştur. Güç elektroniği düzenekli donanımlar önemli birer harmonik kaynağıdır. Genel anlamda doğrultucular, eviriciler, frekans çeviricileri kıyıcılar birer harmonik kaynağıdır. Bu cihazlar elektronik anahtarlama prensibiyle çalıştıklarından harmonik üretmektedirler.

$$i(\omega t) = \sqrt{2} [29 \cdot \sin(\omega t + 5^\circ) + 5 \cdot \sin(5\omega t - 40^\circ) + 2 \cdot \sin(7\omega t + 20^\circ)] \quad (1)$$

Nonlineer akım dalgasına ilişkin dalga formu Şekil.1'de verilmiştir.



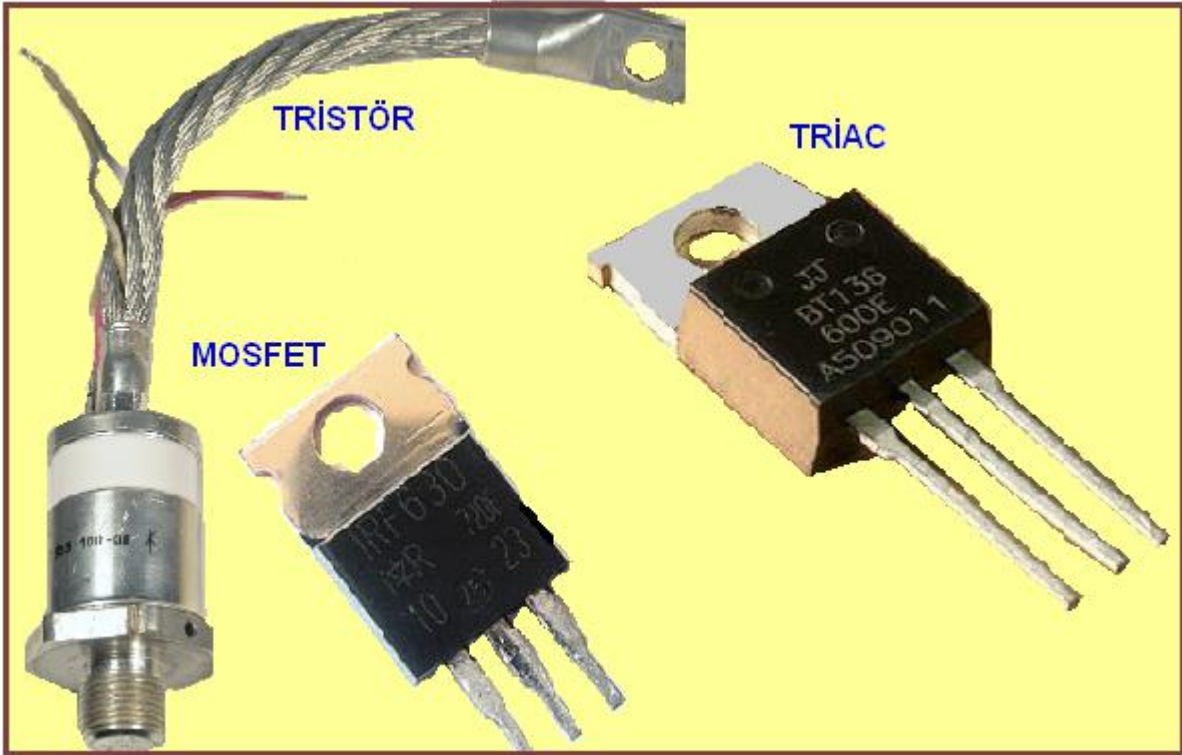
Şekil.1: Nonlineer akım dalgası ile harmonik bileşenleri

Harmoniklerin oluşmasının başlıca sebebi, elektrik devrelerinde kullanılan lineer olmayan devre elemanlarıdır. Bu devre

elemanlarının, gerilimi ile akımı arasındaki bağıntısının lineer olmayışından dolayı harmonikler oluşmaktadır. Manyetik devrelerin aşırı doyması, deşarj prensibine göre çalışan aydınlatma armatürlerinin arkları ve güç elektroniğindeki sinüzoidal gerilimin anahtarlanması ve kıyılması lineer olmayan olaylardır.

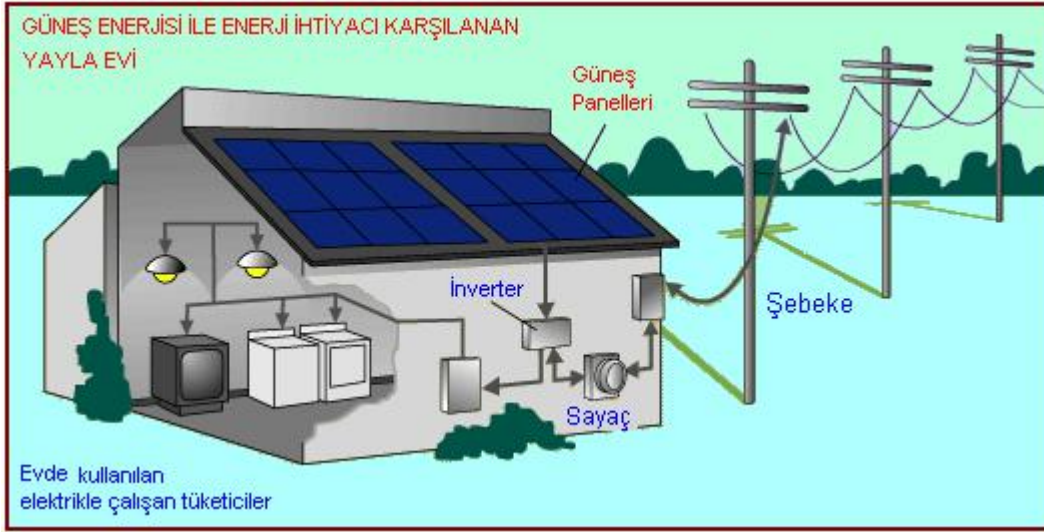
#### Harmonik Kaynakları

Lineer olmayan elemanlar ve lineer olmayan yükler AC güç sisteminin başlangıcından beri var olmuştur. Önceleri lineer olmayan yükler olarak sadece doğrultucular biliniyordu. Daha sonra transformatörler gibi diğer manyetik elemanlar da doyma sınırını aştığında lineer olmayan şebeke elemanı olarak davrandığı anlaşılmıştır. Bu gibi elemanların güç sistemine bağlanmasıyla sistemdeki lineer olmayan etki ve lineer olmayan eleman sayısı hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarıiletken elemanların talep edilen yüksek güçleri karşılamak için sıkça kullanılması ve onların DC çevirici, DC evirici ve çeşitli elektronik devrelerde ayar için uygulanmasıdır. DC çeviriciler, motor kontrol devreleri, statik VAR jeneratörleri, anahtarlamalı güç kaynakları vb.



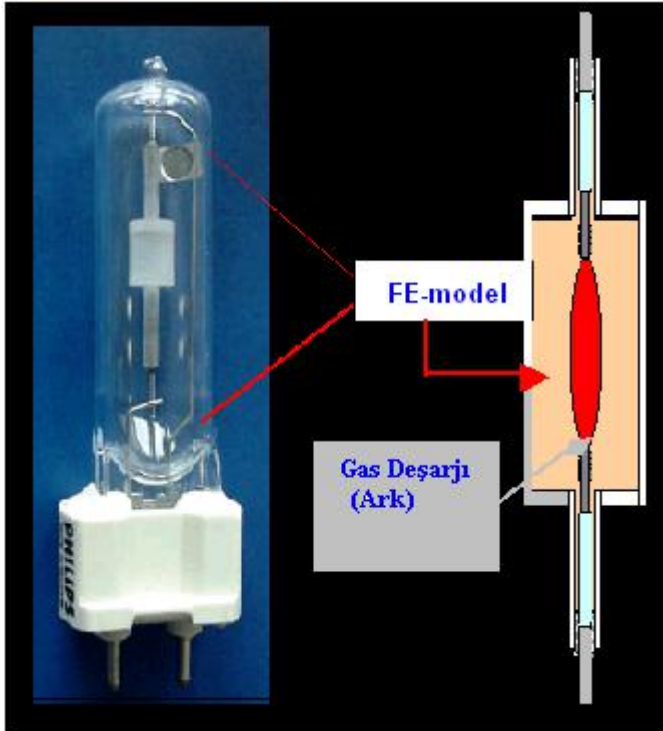
Şekil.2: Güç elektroniği devre elemanları (harmonik kaynağı)

Fotovoltaik sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konverterleri kullanırlar. Dolayısıyla harmoniklere yol açarlar. Reaktif güç her ne kadar faydalı güce dönüştürülemiyorsa bu güçten tamamen vazgeçilemez. Fotovoltaik sisteminden elde edilen elektrik enerjisi de harmonik bileşenler içermektedir.



Şekil.3: Fotovoltaik sistemle enerji ihtiyacı karşılanan yayla evi (harmonik kaynağı)

Transformatör, jeneratör ve bobin gibi cihazların normal çalışması için gerekli manyetik alan, reaktif akım tarafından meydana getirilir. Ayrıca gaz deşarjı aydınlatmanın flüoresan, cıva arki, cıva buharı, neon, ksenon ve yüksek basınçlı sodyum lambalar yaygınlaşması, akü ve fotovoltaik sistemlerin ve elektrikli vasıtaların kullanımının artması gibi tüm bu sayılan lineer olmayan yükler sisteme eklendiğinde şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinde bozulmalara yol açarlar. Şebekede harmonik distorsiyon bu tür yüklerden dolayı artmaktadır.



Şekil.4: Deşarj prensibine göre çalışan aydınlatma armatürler (harmonik kaynağı)

Belli başlı harmonik üreten devre elemanları şunlardır:

- Elektrik makinelerinin olukların meydana getirdiği harmonikler,
- Çıkık kutuplu senkron makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler,
- Senkron makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar,
- Jeneratörler,

Bilgisayarlar,  
Kesintisiz güç kaynakları,  
Elektrikli ulaşım sistemleri,  
Doyma bölgesinde çalışan transformatörlerin mıknatıslanma akımları oluşturduğu harmonikler,  
Gerilim regülatörleri,  
Frekans çeviriciler,  
Motor hız kontrol düzenleri (ASD),  
Doğru akım ile enerji nakli (HVDC),  
Statik dönüştürücüler (Konvektörler),  
Statik VAR kompanzatorleri,  
Kesintisiz güç kaynakları(UPS),  
Elektrikli taşıtların yaygınlaşması ve bunların akü şarj devrelerinin etkileri,  
Ark fırınları,  
Gaz deşarjlı Aydınlatma Armatürleri,  
Fotovoltaik sistemler,  
Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler,  
Direkt frekans çevirici ile beslenen momenti büyük hızı küçük motorlar,  
Kaynak makineleri,  
Doğru akım güç sistemler olarak sıralanabilir.  
İndüksiyon ile ısıtma ve metalleri eritmekte kullanılan ark fırınları birer harmonik kaynağıdır.



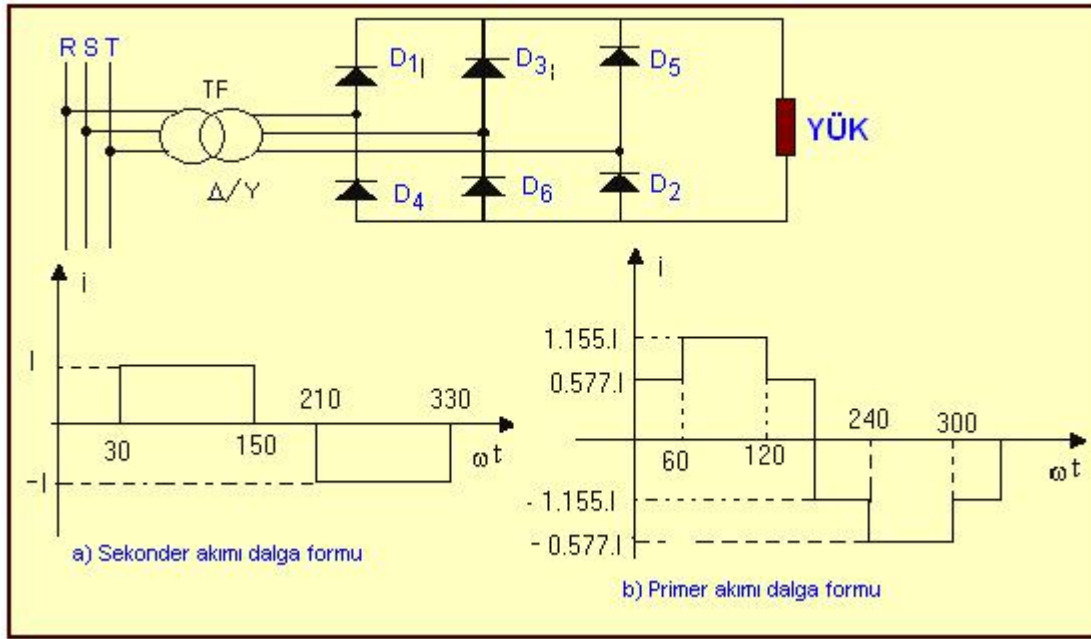
Şekil.5: Şebekede harmonik kaynağı durumundaki ark fırını

#### Şebekedeki Harmoniklerin Zararları

Tüketiciler elektrik enerjisinin iyi kalitede olmasını talep ederler. Enerji sistemindeki cihazların normal çalışması sırasında, harmonik üreten ve besleme geriliminde çeşitli düzensizliklere neden olabilen yükler özel bir önem taşımaktadır. Yük akımındaki hızlı değişimler, müşterilerin enerji sistemine bağlandığı noktada gerilim değişimlerine neden olur. Bu tip yüklere örnek olarak, çeviriciler, transformatörler, ark fırınları, kaynak makineleri, demiryolu cer işletmeleri, haddehaneler, kömür ocağı çıkırıkları, döner rotorlu makineler, indüksiyon fırınları verilebilir.

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

Şebeke geriliminin bozulması sonucunda harmonik distorsiyonunun artması  
Gerilim düşümünün artması ve bunun sonucunda cihazlarda arızaların baş göstermesi  
Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle kondansatörlerin delinmesi  
Harmonikler nedeniyle akımdaki artış sonucunda enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması  
Asenkron motorlarda ek momentlerin oluşması ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi  
Harmonik yük akışının empedansın az olduğu tarafa akmasından dolayı endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler  
Harmonik bileşenler şebekedeki kapasitif reaktanslarla rezonans oluşturabilir. Bunun sonucunda şebekede rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar dolaşır  
Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları baş gösterir. Üçüncü harmonik bileşene karşı duyarlı olan mesafe koruma rölesinde zamansız amcalar görülür  
Harmonikler sonucunda akımdaki artış neticesinde izolasyon malzemelerinde delinmeler oluşur  
Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazitlerin oluşması  
Otomasyon cihazlarında hatalı çalışma oluşur  
Elektromekanik cihazların ısınması  
Kondansatör kademelerinin sigortalarının atması  
Termik- manyetik şalter ve rölelerin anormal stop etmesi  
Ateşleme devrelerinin anormal çalışması  
Ölçme cihazlarının hatalı ölçmesi  
Enerji taşıma hatlarında dalgalanmalar meydana getirmesi  
Haberleşmede endüktif etkiler oluşturması  
Röle sinyallerinin bozulması ve anormal çalışması  
Kondansatör kademelerinin hatası  
Rezonans oluşturarak şebekede aşırı voltaj ve akımların oluşması  
Makinelerde mekanik titreşimler  
CAD/CAM terminallerinin hafızasının silinmesi  
Bilgisayarların beslemesindeki aşırı dalgalanmalardan dolayı kapasitelerin bunu dengeleyememesi  
Küçük devir kontrollü cihazların anormal çalışması  
Bilgisayar terminallerinde gürültü oluşması  
Az bilinen diğer bir etkisi ise; akım ve gerilim ölçü aletleri 50 Hz. Üzerinden örnekleme yaparlar (Doğru RMS ölçüm yapanlar hariç). Diğer bir deyişle 50 Hz'den çekilen akım ve gerilimleri gösterirler. Ancak farklı frekans seviyelerinden çekilen akım ve gerilimler ölçülemez. Bu yüzden tüketilen akım ve gerilim hakkında sağlıklı bilgi sahibi olunamaz. Ayrıca temel frekans dışında diğer frekans seviyelerinden çekilen akım ve gerilimler, gereksiz yere enerji tüketimini artırır. Doğrultucular alternatif gerilimi doğru gerilime çeviren cihazlardır. Eğer kullanılan elemanlar kontrol edilmeyen elemanlar ise böyle devreler kontrolsüz doğrultucu devrelerdir. Şekil.6'da 6 darbeli kontrolsüz doğrultucu ile giriş akımı değişimine ilişkin prensip şeması verilmiştir.



Şekil.6: Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucuya ait giriş akımı dalga formları

Üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucunun giriş akımına ait dalga formları Şekil.6'da verilmiştir. Bu doğrultucuya ait giriş akımlarının Fourier serisini elde ederek harmoniklerini görelim.

$$I = I_{\Sigma} + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t \quad (2)$$

şeklinde ifade edilecektir. Şekil.6'a'daki dalga formu  $f(t) = -f(-t)$  koşulunu sağladığından tek fonksiyondur. Yarı dalga simetrisine de sahiptir. Bu koşullardan dolayı doğrultucu akımı için Fourier serisini aşağıdaki gibi yazarız. ( $A_n = 0, I_{dc} = 0$ ) Diğer Fourier katsayısı,

$$B_n = \frac{4.1}{\pi} \int_0^{\pi} I \sin n\omega t d(\omega t) = \frac{4I}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \quad (3)$$

$$B_n = \frac{4I}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) \quad (4)$$

olarak elde edilir. Buradan doğrultucunun sekonder akımının ifadesi,

$$i = 1.103.I \left[ \sin(\omega t) - \frac{1}{5} \sin(5\omega t) - \frac{1}{7} \sin(7\omega t) + \frac{1}{11} \sin(11\omega t) + \frac{1}{13} \sin(13\omega t) - \frac{1}{17} \sin(17\omega t) \right] \quad (5)$$

şeklinde bulunur. Üç fazlı kontrolsüz doğrultucu harmonikli giriş akımı efektif değeri,

$$I_{EFF} = \sqrt{\frac{A_n^2 + B_n^2}{2}} \quad (6)$$

formülü kullanıldığında,

$$I_{EFF} = \sqrt{\frac{0^2 + \left(\frac{4I}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right)^2}{2}} \quad (7)$$

ifadesi sadeleştirildiğinde,

$$I_n = \left| \frac{4I_1 \sqrt{5}}{n\pi \sqrt{2.2}} \right|$$

(8)

şeklinde bulunur. Tablo.1'de konverterlere harmonik bileşenlere ilişkin akım değerleri verilmiştir.

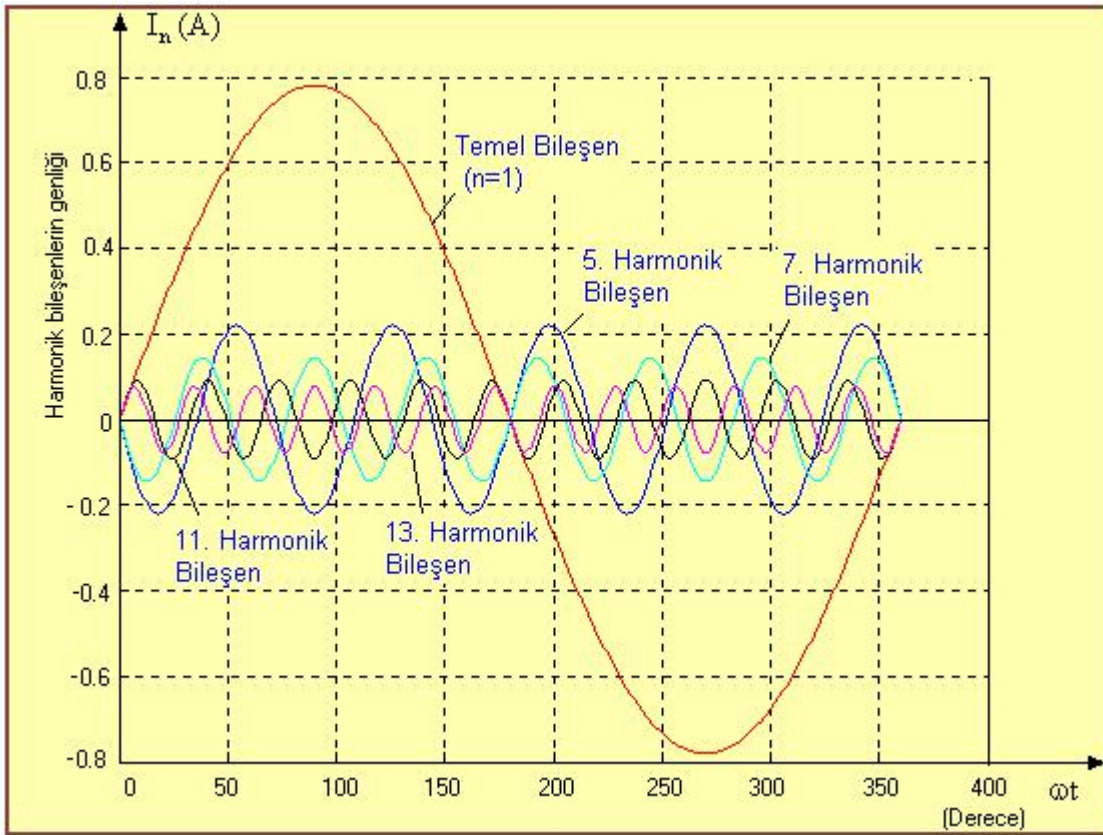
Harmonikbileşenler (n)	HARMONİKLERİN GENLİĞİ(6, 12, 18, 24 Darbeli doğrultucular için)			
	6 darbeli	12 darbeli	18 darbeli	24 darbeli
5	0.22	-	-	-
7	0.145	-	-	-
11	0.091	0.091	-	-
13	0.077	0.077	-	-
17	0.059	-	0.059	-
19	0.053	-	0.053	-
23	0.043	0.043	-	0.043
25	0.040	0.040	-	0.040

Tablo.1: Doğrultucu giriş harmonikli akım bileşen genlikleri

Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı  $P=6, 12, 18$  ve  $36$ 'dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n=k p \pm 1 \quad (9)$$

$P$ : Darbe sayısı,  $k:1$  den sonsuza herhangi bir sayı,  $n$ : harmonik mertebesini göstermektedir (Sundberg, 1976). Böylece, 3 darbeli doğrultucu üç ve üçün katları hariç tüm harmonikleri üretir. Altı darbeli bir doğrultucu, 5., 7., 13., 17., 19., 23., 25., v.s.harmonikleri üretir. 12 darbeli doğrultucu ise 11., 13., 23., 25., 35., 37., v.s.harmonikleri üretir. Şekil.7'de altı darbeli kontrolsüz doğrultucu giriş akımına ait harmonik bileşenler verilmiştir. Darbe sayısı arttıkça doğrultucu giriş akımı sinüs eğrisine daha yaklaşıyor. Böylece harmonik distorsiyonu daha da azalır.

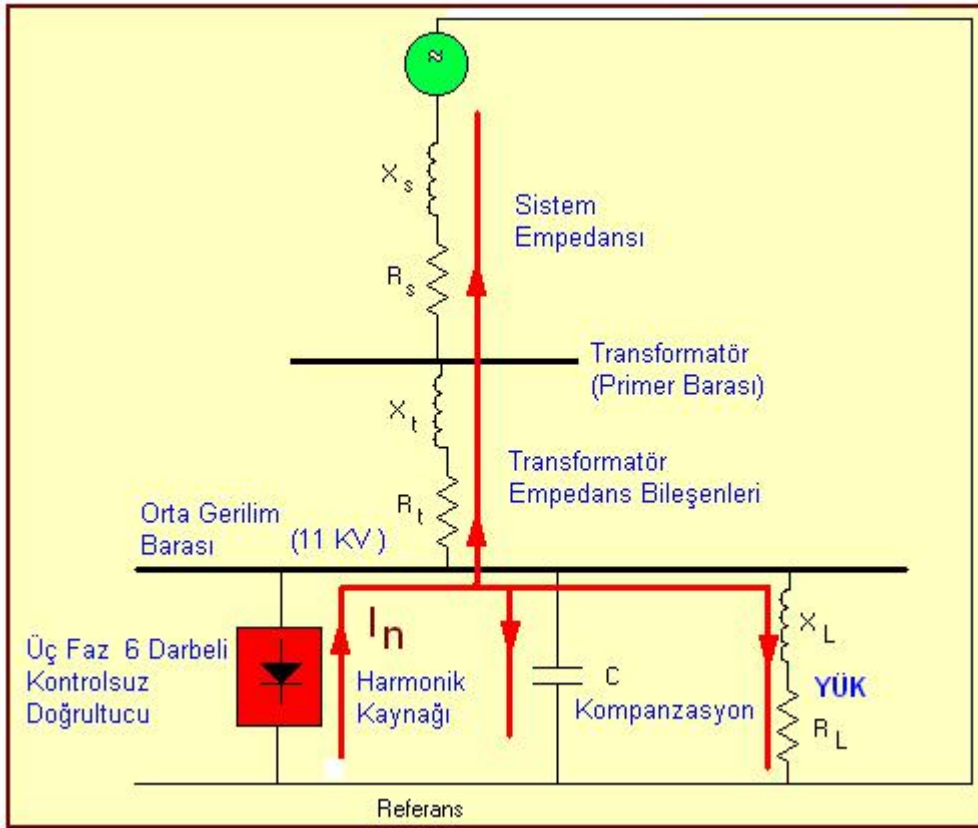


Şekil.7: Altı darbeli doğrultucu giriş akımı harmonik bileşenleri

#### Orta RTA GERİLİM TESİSLERİNDE HARMONİK ANALİZİ

Harmonik analizi yapılacak tesisin ilk olarak tek hat şeması tespit edilir. Bu tesiste harmonik kaynağı durumundaki devre elemanı yerine bağımsız akım kaynağı konur. Harmonik bileşenlerin her biri için çevre denklemleri veya düğüm denklemleri yardımı ile çözüme gidilir. Örnek aldığımız tesiste harmonik kaynağı üç fazlı tam dalga kontrolsüz doğrultucudur. Bu doğrultucuya bağlı kompanzasyonu amaçlı bir C kondansatörü ile endüktif karakter taşıyan L, R yükü bağlıdır. Şekil.8'de bu tesise ait tek hat şeması verilmiştir.





Şekil.8: Elektrik tesislerinde tek hat şeması ile harmonik akımını akış güzergâhı

Bu tesise ilişkin tek hat şemasının analizinden aşağıdaki denklemler elde edilir. Tesis için baz reaktans değeri,

$$X_s = \frac{V_s^2}{S_s} \quad (10)$$

Olarak bulunur. Transformörün empedans değeri;  
 $Z_T = X_s(R_t + jX_t)$  (11)

şeklinde bulunur. Sistem empedansının değeri;

$$Z_s = X_s(R_t + jX_t) \quad (12)$$

formülü ile hesaplanır. Yük endüktif reaktans değeri;

$$X_L = j\omega L \quad (13)$$

aynı şekilde kapasitif reaktansın değeri,

$$X_c = -j \frac{1}{\omega C} \quad (14)$$

olarak bulunur. n harmonik değeri için empedans değeri,

$$Z_1 = -j \frac{X_c}{n} \quad (15)$$

olarak bulunur. n harmonik için yük empedansının değeri,

$$Z_2 = R_L + jnX_L \quad (16)$$

formülünden bulunur. n harmonik için sistem empedansının değeri,

$$Z_3 = (R_s + R_L) + jn(X_s + X_L) \quad (17)$$

formülünden bulunur. Eşdeğer empedans değeri,

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} \quad (18)$$

formülünden bulunur. Beşinci harmonik bileşen için kapasitif akımın değeri,

$$I_c = I_{z1} = \frac{I_s Z}{Z_1} \quad (19)$$

olarak bulunur. 5., harmonik bileşen için yük akımı değeri,

$$I_L = \frac{I_s Z}{Z_2} \quad (20)$$

olarak bulunur. 5., harmonik bileşen için sistem akımının değeri,

$$I_s = \frac{I_s Z}{Z_3} \quad (21)$$

olarak bulunur. 11 (KV) barada beşinci harmonik akımı sonucu oluşan gerilim,

$$V_{s3} = I_c Z_1 \quad (22)$$

olarak hesaplanır. 132 (KV) barada beşinci harmonik akımı sonucu oluşan gerilim,

$$V_{s2} = I_s \sqrt{R_s^2 + (nX_s)^2} \cdot \frac{V_1}{V_2} \quad (23)$$

formülünden bulunur.

Sayısal Uygulama

Bir tesis üç fazlı sistem ile 132/ 11 (KV) ve 800 MVA görünür güce sahip bir transformatör üzerinden beslenmektedir. Üç faz tam dalga doğrultuculu bir sistemde bir diyot üzerindeki akım darbesi 10A'dır. Buna bağlı olarak yükün 11 kV'luk

baraya yıldız bağlı eşdeğeri 180Ω, 0.3 H/faz'dır. Güç faktörünün düzeltilmesi için 1.75 μF/faz değerli bir kapasite yıldız bağlıdır. 132 / 11 (KV) dönüştürme oranına sahip transformatörün direnç değeri 0.01 pu, reaktans değeri 0.06 pu'dur. 132 (KV)'luk sistemin kısa devre empedansı için direnç değeri 0.005 pu., reaktans değeri 0.02 pu'dur. Bu değerler 11 kV ve 800 kVA baz değerler için verilmiştir. Yirmiüçüncü harmoniğe kadar sistemin harmonik analizini yapalım.

(10) denklemden SB =800 kVA, VB = 11 kV değerleri için baz değeri bulalım,

$$X_s = \frac{11^2}{0.8} = 151.25 \Omega$$

olarak bulunur. (11) denklemden transformatör empedansı değeri,

$$Z_T = 151.25(0.01+j0.06) = 1.5125 + j9.075 \Omega$$

olarak bulunur. (12) denklemden sistem empedansı,

$$Z_S = 151.25(0.005 + j 0.02) = 0.75625 + j3.025 \Omega$$

şeklinde bulunur. (13) denklemden yük reaktansının değeri,

$$X_L = j94.25 (\Omega)$$

olarak hesaplanır. (14) denklemden kapasite reaktansı değeri,

$$X_C = -j1819 (\Omega)$$

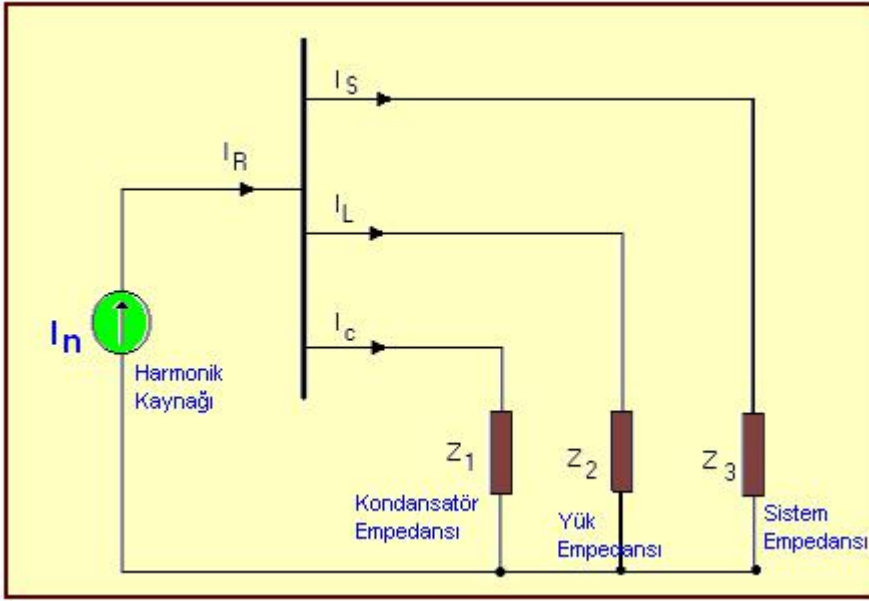
olarak bulunur. (8) denklemden üç fazlı altı darbeli kontrolsüz doğrultucu harmonikli efektif akım ifadesi,

$$I_a = \frac{4.10 \cdot \sqrt{3}}{n \cdot \pi \cdot \sqrt{2} \cdot 2} = \frac{7.8}{n} (A)$$

şeklinde bulunur.

Harmonik Bileşenler(n)	Doğrultucu harmonik bileşen akım değerleri (A)
1	7.8





Şekil.10: Tesisin beşinci harmonik için empedans eşdeğeri

Kollara ait empedans değerlerini beşinci harmonik bileşen için hesaplayalım. (15) denkleminde Z1 empedansının değeri,

$$Z_1 = -j363.8\Omega$$

Genlik ve faz açısı cinsinden aşağıdaki şekilde bulunur.

$$Z_1 = 363.8 \angle -90^\circ$$

olarak bulunur. (16) denkleminde beşinci harmonik bileşen için yük empedansı,

$$Z_2 = 180 + j5.(94.25)$$

Genlik ve faz açısı cinsinden aşağıdaki şekilde bulunur.

$$Z_2 = 504.46 \angle 69.09^\circ$$

(17) denkleminde besleme kolunun beşinci harmonik için empedans değeri,

$$Z_3 = (1.5125 + 0.75625) + j(9.075 + 3.025)$$

Genlik ve faz açısı cinsinden aşağıdaki şekilde bulunur.

$$Z_3 = 60.54 \angle 87.85^\circ$$

(18) denkleminde paralel kollardaki empedansların eşdeğeri,

$$Z = 63 \angle 85^\circ$$

olarak bulunur. (19) denkleminde kapasite akımının değeri,

$$I_c = \frac{1,56.63 \angle 85^\circ}{363,8 \angle -90^\circ} = 0.2701 \angle 175^\circ (\text{A})$$

olarak bulunur. (20) denkleminde yük akımının değeri,

$$I_L = \frac{1,56.63 \angle 85^\circ}{504,46 \angle 69,09^\circ} = 0.1973 \angle 16.01^\circ (\text{A})$$

şeklinde bulunur. (21) denkleminde sistem akımının değeri,

$$I_s = \frac{1,56.63 \angle 85^\circ}{60,54 \angle 87,85^\circ} = 1,6443 \angle -2,7^\circ (\text{A})$$

olarak bulunur. (22) denkleminde 11 (KV)'luk barada beşinci harmonik akım bileşeni sonucunda oluşan gerilim değeri,  
 $V_{s5} = 99,5 \text{ kV}$

şeklinde bulunur. (23) denkleminde 132 (KV)'luk barada beşinci harmonik akım bileşeni tarafından oluşturulan gerilim değeri,  
 $V_{s5} = 298.6 \text{ kV}$

Yirmiüçüncü harmoniğe kadar olan sistem değerleri Tablo.3'te verilmiştir.

Harmonik Bileşenler(n)	Frekans(Hz)	IR(A)	IC(A)	IL(A)	IS(A)	VB(V)	VS(V)
1	50	7.80	3.49	31.26	37.16	6351	78139
5	250	1.56	0.27	0.20	1.64	99	299
7	350	1.11	0.46	0.17	1.40	119	356
11	550	0.71	1.77	0.28	2.20	293	880
13	650	0.60	2.23	2.52	19.83	3120	9360
17	850	0.46	1.11	0.07	0.58	118	355
19	950	0.41	0.77	0.04	0.32	74	222
23	1150	0.34	0.50	0.02	0.14	39	118

Tablo.3: Sistem parametrelerinin yirmiüçüncü harmoniğe kadar aldığı değerler

### Sonuçlar ve Öneriler

Elektrik güç sistemlerinde harmonik distorsiyon sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Harmonikler güç sistemlerindeki kirliliktir. Günümüzde statik dönüştürücülerin kullanılmalarının arması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır. Güç elektroniği elemanları ve çeşitli nonlineer elemanların her geçen gün artış göstermesi, enerji sisteminde dolaşan nonsinüsoidal büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Bunun bir sonucu, akım ya da gerilim için harmonik distorsiyonu da artmaktadır. Elektrik tesislerinde harmoniklere yönelik bu çalışma ile yapılan yenilikler, elde edilen sonuçlar ve öneriler şu şekilde sıralanabilir:

Nonlineer elemanların akım-gerilim karakteristiği lineer değildir. Bu eleman tam sinüs biçimli bir gerilim kaynağına bağlandığında elemanın akımı, harmonik bileşenler içerecektir. Yani, doğrusal olmayan bir elemanın akım veya geriliminden herhangi birisi veya her ikisi birden harmonik bileşenler içerebilir, fakat her ikisi birden tam sinüs biçimli olamaz.

Nonlineer yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik distorsiyonunun giderilmesi enerjinin kalitesi açısından çok önemlidir. Nonlineer elemanlar, üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini düşürmektedirler.

Nonlineer yüklerin sebep olduğu harmoniklerin güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Rezonans şartları her harmonik bileşenler için ayrı, ayrı hesaplanmalıdır. Bir güç sistemine harmonik kaynaklarından enjekte edilen harmoniklerin olması durumunda, bunlar şebekeyi herhangi bir bileşeni ya da bileşenler için rezonanslar oluşturacak şekilde etkiler. Yüksek dereceli harmonikler, tüm sistemi etkileyebilir. Bu etkiler güç sistemi ve diğer ekipmanların da performansını azaltır.

Sistem kaynağının empedansı yük empedansına göre genelde çok daha düşük olduğundan, sistemdeki gerilim harmonik seviyeleri bazen izin verilebilir seviyeleri aşmasına rağmen genelde düşüktür. Sistemdeki akım dalga şekli yaklaşık olarak sabittir ve doğrusal olmayan yükler sabit harmonik akım kaynakları olarak düşünülebilirler. Sonuç olarak, doğrusal olmayan yüklerin etkisi, özellikle sistem empedansına olmak üzere sistem karakteristiklerine de bağlıdır.

Harmoniklerin şebekeye verecekleri zararların seviyesini THD (Toplam harmonik distorsiyonu) katsayısıyla tespit edebiliriz. Bu da şebekede kullanılan lineer olmayan yüklerin THD seviyesinin bilinmesi ile gerçekleşir. Bir sistemdeki harmonik seviyelerini tespit etmek için çeşitli analizatörler kullanıldığı gibi osilogramlardan elde edilen eğrilerin Fourier analizi sonucunda tespit edilebilir.

Harmoniklerin oluşturduğu teknik problemler sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen, tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen problemlerdir. Ekonomik problemler ise günümüzde son derece önem taşıyan optimal çalışmayı etkileyen problemlerdir.

Eğer enerji sisteminde yüksek mertebeli harmonikler filtrelenecekse her bir kol için birden fazla filtre gerekir. Bu durumda filtreleri aynı yere koymak uygun olmayabilir. Filtrelerin aynı yere konulması gerilim harmonikleri için çok etkili olurken harmonik akımlarının yoğunluğunun artması nedeni ile haberleşme devreleri için zararlı koşullar oluşabilir. Bu nedenle filtreler birbirlerinden belirli bir uzaklıkta konulmalıdır. Daha yüksek frekansa ayarlı filtreler daha uzağa yerleştirilmelidir.

Elektronik devre elemanlarından kaynaklanan harmonikler sinüzoidal dalganın anahtarlanması kısılması ve benzeri gibi olaylar sonucu oluşmaktadır. Özellikle güç elektroniği uygulamalarında kullanılan tristörler tarafından üretilmektedir. Güç elektroniği sistemlerinin ürettiği harmonikleri azaltmak için doğrultma evirme gerilim ve frekans kontrolü gibi uygulamalarda devrenin darbe sayısını 12, 36 gibi büyük değerlere çıkarılmalıdır.

Ark ocakları gibi olayların hızlı değiştiği yerlerde meydana gelen harmonikleri yok etmek için kondansatör filtreleri kullanılmalıdır. Ayrıca ark ocaklarında kompanzasyon statik VAR generatörlerinde içerisindeki elektrik aksam ve doymuş reaktörlerden dolayı harmonikler üretilmektedir. Kondansatörler harmonik filtresi olarak kullanıldığı gibi devrede bazen harmonik akımlarında dolayı şebekedeki diğer yüklerin endüktansı ile rezonansa gelebilirler. Bu gibi durumlarda değişken kapasiteli kondansatörler kullanılmalıdır.

Harmoniklerden tüm sistem elemanlarını etkilediğinden harmonikler şebekede istenmeyen büyüklüklerdir. Bu yüzden harmonikleri yok edecek filtre devrelerinin kurulmasına mutlak surette gerek vardır. Bunun için şebekelere filtreler yerleştirilir. Bant geçiren ile yüksek geçiren filtreler büyük sıklıkla kullanılmaktadır. Bu filtreler belirtilen harmonik frekansında rezonans oluşturarak, harmonikli dalgayı toprağa akıtırlar.

Öncelikle sistemde bulunan harmonik mertebelerinin belirtilmesi gerekir. Bunun içinde THD (Toplam harmonik distorsiyonu) değerinin bilinmesi gerekir. THD değeri tespit yöntemlerinden biri ile bulunur. Enerji sisteminde baralar ile toprak arasına bağlanacak şönt bobin ve kapasitelerin bara gerilimlerindeki THD (Toplam harmonik distorsiyonu) değerlerinin ne ölçüde değiştireceği, hat kayıplarına ve sistemdeki harmonik frekanslarında ortaya çıkabilecek olası rezonans problemlerine etkisinin ne olacağı önceden araştırılmalıdır.

Enerji sistemlerinde kompanzasyon amaçlı olarak kullanılan kondansatör elemanlarının uygun seçilmemesi durumunda

toplam harmonik distorsiyonu değerinde artış olabilecektir. Kompanzasyonu işleminde mutlaka harmoniklerin bulunduğu şartlar altında analiz yapılmalıdır.

Şu anda harmonik distorsiyonlar elektrik şebekeleri için ölümcül problemler yaratmamakla birlikte, nonlineer cihazların kullanımlarının daha da yoğunlaşmasıyla ileride problem yaratacaktır. Endüstride, ofislerde ve evlerde yoğun olarak kullanılan flüoresan armatörler en büyük harmonik kaynaklarıdır.

Büyük enerji tasarrufu sağladığı söylenen kompakt flüoresan lambalar, birere harmonik kaynağıdır. Bunun sebebi elektronik balastları tarafından üretilen harmoniklerdir. Harmonikler elektrik şebekelerindeki kirliliktir. THD (Toplam harmonik distorsiyonu) bu kirliliğin bir ölçüsüdür. Bir tüketici tarafından üretilip şebekeye verilen harmonikler şebekede dağılarak başka bir tüketiciye ulaşırlar. Eğer harmoniklerin ulaştığı tüketicinin yükü lineer ise zararlı tüketicinin hesabı ikinci tüketicinin üzerine biner.

Elektrik şebekelerimizde bulunan harmoniklerin öncelikle ele alınması ve bazı önleyici tedbirlerin getirilmesinde fayda ve zorunluluk bulunmaktadır. Cihazların sisteme bağlanmadan önce mutlaka gerekli testlerden geçirilmeleri ve yaydıkları harmonik mertebesi oranında bir ölçüt getirilmesi ve TSE ile meslek kuruluşlarının bu ölçütlere göre bir standart oluşturması gerekmektedir.

Ülkemizdeki sanayi kuruluşlarının harmonikler hakkında yeterli bilgileri yoktur. Üniversitelerin veya Meslek kuruluşlarının harmonikler konusunda tüketicileri bilgilendirmeleri gerekmektedir. Nonlineer yükler nedeniyle enerji sistemine harmonik akımı enjekte eden tüketiciler sebebiyle ortaya çıkan ek kayıp enerji maliyetinin karşılanması amacıyla bu gibi tüketicilerin şebekeden çektikleri akımın toplan harmonik distorsiyonu (THDI) değeri için bir alt sınır belirlenmelidir. Tüketicilerin bu sınır değeri aşmamaları sağlanmalıdır.

Sonuç olarak diyebiliriz ki, tüm elektrik sistemlerindeki elemanlar, sinüzoidal ve 50Hz frekansta salınan akım ve gerilimler için üretilmiştir. Bu yüzden akım ve gerilimdeki bozulmalar şebekedeki tüm elemanların hatalı çalışmasına ve hatta zarar görmesine neden olmaktadır. Bu yüzden işletmenin sağlıklı bir şekilde çalışması için mutlaka harmoniklerin standartlarca belirtilen seviyelerin altında tutulmaları veya tamamen yok edilmeleri gerekmektedir.

#### Kaynaklar

1. Arrillaga, J. VE Efthymiadis, A.E.,(1968), 'Simulation of convertor performance under unbalanced conditions'. Proc. IEE, 115, no.12, pp.1809-17.
2. Arifoğlu, U. ve Ayan, K., (2000), "Lineer Olmayan Devrelerin Kompanzasyonunda Optimum Kapasite Seçimi" ,Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, 2001/1, İstanbul.
3. Bird, B.M., Marsh, J.F. ve McLellan, P.R., (1969), "Harmonic Reduction in Multiplex Convertors by Triple-frequency Current Injection", Proc. IEE, 116:1730-1734
4. Erickson, W.R.,(1997), Fundamentals of Power Electronics, Kluwer Academic Publishers Boston / Dordrecht / London.
5. Grady, W.M ve Heydt, G.T., (1985), "Prediction of Power System Harmonics due to Gaseous Discharge Lighting", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104: 554-561
6. Herrick, P.R., (1980), "Mathematical Models for High Intensity Discharge Lamps", IEEE,
7. Kocatepe, C., Uzunoglu, M., Yumurtacı, R. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
8. Kim, S., Enjeti, P., Packebush, P. ve Pitel, I., (1994) "A new approach to improve power factor and reduce harmonics in a three-phase diode rectifier type utility interface," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 30, no. 6, pp. 1557–1564.
9. Lawrance, B.W. ve Mielczarski, W., (1992), "Harmonic current reduction in a three-phase diode bridge rectifier," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 39,pp. 571–576.
10. Mohan, N., Undeland. ve Robbins, P.W., (1987), Power Electronics, Willey, Toronto Singapore.



11. Prasad, A.R., Ziogas, P.D. ve Manias, S., (1989), "An Active Power Factor Correction Technique For Three-Phase Diode Rectifiers", İEEE, Rec. pp. 58-66.
12. Rashid, M.H., (1993), Power Electronics, Prentice Hall, New Jersey.
13. Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", İEEE Trans on industrial Application, Vol. IA-15, No 5: pp. 453-458.
14. Shipp, D.D., (1979), "Harmonics Analysis and Suppression for Electrical Systems Supplying Static Power Converters and Other Nonlinear Loads", İEEE Trans on industrial Application, Vol. IA-15, No 5: pp. 453-458.