

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
ELEKTRİK ENERJİSİNDE
KALİTENİN YÜKSELTİLMESİ**
ŞULE NİLHAN YILDIZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
2006

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE
ELEKTRİK ENERJİSİNDE
KALİTENİN YÜKSELTİLMESİ**

ŞULE NİLHAN YILDIZ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİMDALI
2006**

DOÇ.DR.RAFAEL HÜSEYİNOV

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ'NE

Bu çalışma, jürimiz tarafından, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV.....

Üye: Doç. Dr. Rafael HUSEYNOV.....

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mustafa HOŞTUT.....

ONAY

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım.

.../.../2006

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRÜ

Prof. Dr. Halil GÜRSOY

Bu tez, Cumhuriyet Üniversitesi Senatosunun 05.01.1984 tarihli toplantısında kabul edilen ve daha sonra 30.12.1993 tarihinde C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğünce hazırlanan ve yayınlanan “Yüksek Lisans ve Doktora tez yazım Kılavuzu” adlı yönergeye göre hazırlanmıştır.

İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	İ
ÖZET	İİİ
SUMMARY	İV
TEŞEKKÜR	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VI
ÇİZELGELER DİZİNİ	Vİİİ
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRİK ENERJİSİNİN ÖNEMİ	2
3. ELEKTRİK TESİSLERİNDE ARIZALAR VE ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİ	3
4. ELEKTRİK ENERJİSİNİN KALİTESİ VE HARMONİKLER	3
5. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR	6
5.1 Harmonik Kaynakları	6
5.1.1 Konvertörler.....	8
5.1.2 Transformatörler.....	9
5.1.3 Generatörler.....	11
5.1.4 Ark Fırımları.....	11
5.1.5 Gaz Deşarjı Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları.....	12
5.1.6 Statik VAR Konpanzatörler.....	13
5.1.7 Fotovoltaik Sistemler.....	14
5.1.8 Bilgisayarlar.....	15
5.1.9 Elektronik Balastlar.....	15
6. HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER	16
6.1 İletkenler.....	17
6.2 Direnç Üzerindeki Etkisi.....	18
6.3 Reaktanslar Üzerindeki Etkisi.....	19
6.4 Kondansatörler.....	19
6.5 Motorlar ve Generatörler.....	20
6.6 Transformatörler.....	21
6.7 Enerji İletim Sistemleri.....	22
6.8 Devre Kesiciler ve Sigortalar.....	22
6.9 Aydınlatma Elemanları.....	23
6.10 Güç Faktörü.....	23
6.11 Röleler.....	24
6.12 Ölçü Aletleri.....	25
6.13 Elektronik Elemanlar.....	25

7. HARMONİKLERİN ETKİSİNİ AZALTMAK İÇİN YAPILACAK İŞLEMLER.....	26
7.1 Rezonansın Önlenmesi.....	26
7.2 Anti-Harmonik Reaktör Kullanılması.....	27
7.2.1 Anti-Harmonik Reaktörlü Kondansatör Bankı Seçiminde Dikkat Edilecek	
Noktalar.....	29
7.3 Hat Reaktörleri (LINE REACTORS).....	29
8. HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE HARMONİK STANDARTLARI.....	32
8.1 Harmonikle Bozulmanın Ölçütü.....	32
8.2 Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları.....	33
8.3 Yaklaşık İnceleme.....	34
8.4 Harmonik Standartları.....	36
9. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ VE FİLTRE TASARIMI.....	41
9.1 Filtrelerin Görevi.....	41
9.2 Filtrelerin Çeşitleri.....	41
9.2.1 Pasif Filtreler.....	41
9.2.1.1 Seri Filtreler.....	43
9.2.1.2 Şönt Filtreler.....	43
9.2.1.2.1 Tek Ayarlı Filtreler.....	44
9.2.1.2.2 Çift Ayarlı Filtreler.....	45
9.2.1.2.3 Sönümlü Filtreler.....	45
9.2.2 Aktif Filtreler.....	46
10. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	49
10.1 Yapılan Harmonik Ölçümü.....	49
10.2 Harmoniklerin Varlığının Tespiti.....	51
10.3 SONUÇLAR.....	57

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİNDE ELEKTRİK ENERJİSİNDE
KALİTENİN YÜKSELTİLMESİ**

ŞULE NİLHAN YILDIZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ
CUMHURİYET ÜNİVERSİTESİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI
HAZİRAN 2006

Danışman : Doç.Dr.Rafael HÜSEYİNOV

Elektrik Enerjisinin kalitesinin yükseltilmesi üzerinde çalışıldı. Harmonik üreten elemanlar, harmoniklerin meydana getirdiği etkiler ve bu etkileri azaltmak için yapılacak işlemler araştırıldı. Harmonik standartları hakkında bilgi edinildi. Harmonikleri yok etmek için kullanılması gereken filtreler incelendi. Harmonik bulunan bir sistemde harmonik ölçümleri yapıldı. Sistemdeki harmonikler tespit edildi. İncelenen sistemde oluşan harmonikleri yok etmek için hangi sistemin kullanılması gerektiği belirlendi.

ANAHTAR KELİMELELER : Elektrik enerjisinin kalitesi, harmonikler, harmoniklerin etkileri, harmonik filtreleri, harmonik ölçümü

SUMMARY

MSc Thesis

**IMPROVEMENT OF QUALITY IN ELECTRICAL ENERGY
IN POWER DISTRIBUTION SYSTEMS**

ŞULE NİLHAN YILDIZ

Cumhuriyet University

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Electrical and Electronics Engineering

2006

Supervisor : Doç.Dr.Rafael HÜSEYİNOV

It was worked about to improve the quality of the electricity energy. The appliances (for example power electronic devices , diode , transistor or triac e.t.c) which caused harmonics , the effects which occurred by harmonics and to increase these effects were investigated. Knowledge was learned about standards of harmonics. The filters which used to destroy the harmonics were analyzed. The system which included harmonic was measured. The harmonics were determined in the system. The technique was defined to destroy the harmonics which occurred at the system.

KEYWORDS : The quality of the electricity energy , harmonics , harmonic effects, the filters which used to destroy the harmonics were analyzed

TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmamda yardımlarını esirgemeyen ve çalışmamın şekillenmesinde her türlü öneriyi sunan, değerli danışmanım Doç.Dr. Rafael HÜSEYİNOV hocama teşekkürü bir borç bilirim.

Tez savunmama üye olarak katılan Prof.Dr. Arif MEMMEDOV hocama verdiği bilgilerden dolayı teşekkür ederim.

Ayrıca bu tez konusunu bana öneren Elektrik-Elektronik Mühendisi Ali ÇAŞKURLU meslektaşına, bilgi deneyim ve olanaklarını benden esirgemeyen Elektrik Mühendisi Metin ŞEN ve Elektrik Mühendisi N.Cahit GENCER'e, tez yazım aşamasında bana yardımcı olan Cengiz KUZUCUOĞLU , Levent EROĞLU, Talat KAN ve Erkan İPEK mesai arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Sonuç bölümünde ölçümleri yapabilmem için gerekli cihazı ve ortamı hazırlayan Elektrik Mühendisi arkadaşım Günel ASLANBOĞAN ve ölçümü yaptığım birimdeki Elektrik Mühendisi Adnan FIRAT'a teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her aşamada bana maddi manevi desteklerini esirgemeyen, her zaman ve her koşulda bana güven duyan ve benim bugünlere gelmem için en büyük desteği sunan Aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1-	Harmonik üreten elemanlar ve harmonik üreten bazı cihazların dalga şekilleri ve harmonik spektrumu.....	7
Şekil 2-	Üç fazlı 6-darbeleri konvertör (yarı kontrollü doğrultucu).....	9
Şekil 3-	Üç fazlı 12 darbeleri konvertör (yarı kontrollü doğrultucu).....	9
Şekil 4-	Sinüsoidal şebeke gerilimi ile beslenen bir transformatörün şebekeden çektiği mıknatıslanma akımı.....	10
Şekil 5-	Tristör kontrollü reaktörün temel elemanları ve dalga şekilleri.....	13
Şekil 6-	TKR’de harmonik akımların maksimum genlikleri.....	14
Şekil 7-	Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması.....	14
Şekil 8-	Nötr hattının 3.harmonik bileşenlerle yüklenmesi.....	17
Şekil 9-	Omik direnci R olan bir hattın kaybı	17
Şekil 10-	Omik direncin frekansla artması (skin effect).....	19
Şekil 11-	Bir kondansatör elemanının besleme halleri.....	19
Şekil 12-	Magnetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları	21
Şekil 13-	Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünün değişimi	23
Şekil 14-	Kompanzasyon kondansatörü ve rezonans.....	26
Şekil 15-	Paralel rezonans eğrisi.....	26
Şekil 16-	Anti harmonik reaktörlü kondansatör bankı.....	27
Şekil 17-	Detuned LC filtre, kondansatör ve şebeke empedans- frekans eğrisi.....	27
Şekil 18-	Detuned LC filtre kondansatör harmonik akımları.....	29
Şekil 19-	Komutasyon çentiği (commutation notching).....	29
Şekil 20-	Hat reaktörü bağlantısı.....	30
Şekil 21-	Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 =sabit)	33
Şekil 22-	Sistemdeki kayıp gücün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi.....	33
Şekil 23-	Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem.....	35
Şekil 24-	Tek ayarlı filtre devresi.....	42
Şekil 25-	İkinci mertebe sönümlü filtre devresi.....	42
Şekil 26-	Devrede seri filtrenin kullanımı.....	43
Şekil 27-	Devrede şönt filtrenin kullanımı.....	44

Şekil 28- Tek ayarlı filtre devresi.....	44
Şekil 29- Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi.....	45
Şekil 30- Çift ayarlı filtre.....	45
Şekil 31- Sönümlü filtreler.....	46
Şekil 32- Sönümlü filtrenin frekans-empedans değişimi.....	46
Şekil 33- Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi.....	47
Şekil 34- Aktif filtrenin şematik gösterimi.....	47
Şekil 35- Bakü Tiflis Ceyhan ham petrol boru hattı Ceyhan deniz terminali sisteminde yükleme iskelesinde bulunan alçak gerilim transformatör dağıtım merkezi.....	50
Şekil 36- Harmonik için paralel titreşim devresi.....	53
Şekil 37- Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans.....	53
Şekil 38- 7.harmonik için paralel titreşim devresi.....	54
Şekil 39- 11.harmonik paralel titreşim devresi.....	55
Şekil 40- 13. harmonik için paralel titreşim devresi.....	56

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1 OECD ve Avrupa Birliği ülkelerinde kurulu güç ve tüketim değerleri[2002 yılı verileri ile] (IEA(International Energy Agency) Statics, Electricity information 2004).....	2
Çizelge 2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonikspektrumu.....	12
Çizelge 3 Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği.....	20
Çizelge 4 %P ve rezonans frekansı.....	28
Çizelge 5 5nci harmonikte çeşitli %p değerleri için hesaplanmış olan X değerleri.....	28
Çizelge 6 Komutasyon çentikleri ve AG gerilim distorsiyonu sınırları.....	28
Çizelge 7 Hat reaktörü empedansı ve THD-I.....	31
Çizelge 8 Harmonik sınırlarına uygunluğun yaklaşık incelemesinde kullanılan ağırlık faktörleri.....	35
Çizelge 9 Çeşitli Ülkelerin Harmonik Standartları.....	36
Çizelge 10 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	37
Çizelge 11 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2.sınıf elemanlar).....	37
Çizelge 12 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf elemanlar).....	38
Çizelge 13 Konutlarla ilgili (a) alçak ve (b) orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri.....	38
Çizelge 14 Dsınıfı donanım için IEC61000-3-2'e izin verilen maksimum harmonik akımları.....	39
Çizelge 15 IEEE'nin Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınırları.....	39
Çizelge 16 IEEE'nin Genel Dağıtım Sistemlerine ait akım için Harmonik Distorsiyon Sınırları.....	40
Çizelge 17 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması.....	48
Çizelge 18 50 Hz frekansta transformatörün faz başına endüktansı.....	52

1. GİRİŞ

Elektrik sisteminde normal olarak gerilimin 50 Hz frekanslı tam sinüs eğrisi şeklinde üretilmesi, iletilmesi, dağıtılması ve tüketime sunulması, elektrik sisteminin ve elektrikle çalıştırılan her türlü cihazın doğru, düzenli, verimli ve sorunsuz çalıştırılması açısından önemlidir.

Ancak tesisat elemanlarının bazılarında yada sisteme bağlı tüketicilerden kaynaklanan yan etkiler, bozucu olaylar yüzünden akı, akım, gerilim gibi temel elektriksel büyüklüklerin sinüsoidal dalga şekli bozularak temel frekans olan 50 Hz'in tam sayı katlarıyla orantılı, harmonik ihtiva eden istenmeyen dalga şekillerine dönüşür.

Harmonik içeren elektriksel büyüklükler tesisat elemanları ile sisteme bağlı tüketiciler üzerinde olumsuz, genelde aşırı akım ve aşırı gerilim olaylarına neden olduğu gibi önemli rezonans olaylarını da oluşturur. Rezonans olayı çeşitli harmonik frekansları içeren şebekelerde daha kolay oluşarak tesisat elemanlarının aşırı akımla veya aşırı gerilimle zorlanmalarına ve sonuçta tahrip olmalarına neden olur. Bu tür olayların önlenmesi temel frekanstaki kadar kolay değildir, ancak devre sabitlerinde değişiklik yaparak, temel frekansın dışındaki bölgelere girmeden belirli harmonik rezonanslarından uzak kalınabilir, yada oluşan harmonikler filtreler kullanılarak zararsız hale getirilebilir. Yaklaşık tüm modern elektrik ve elektronik donanımlar, anahtarlanabilir güç kaynağı (SMPS) veya belirli bir güç kontrol ünitesi ve dolayısıyla da doğrusal olmayan bir yük ihtiva ederler. Doğrusal yükler nispeten azdır ve akkor flemanlı ampüller ile kontrolsüz ısıtıcılar ifade edilebilecek belli başlı örneklerdir.

Yatırımlar ile desteklenmiş güçlü standartlar olmadan kullanımları gittikçe yaygınlaşan bu cihazların yarattığı harmonik kirlenmeler de artmaya devam edecektir. Sanayi, ticaret ve elektrik enerjisi kullanan her türlü cihaz ve sistem için risk kaynağı olan bu konunun ;

- Yüksek tasarım uygulamaları yapılarak,
- Doğru seçilmiş elektrik cihazları kullanarak,
- Uygun bakım prosedürleri geliştirilerek,
- Gerekli yatırımlar yapılarak

kontrol altında tutulması ve iyileştirilmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada enerji kirliliğindeki parametrelerden biri olan harmoniklerin çok yönlü olarak tanınması amaçlanmıştır.

2. ELEKTRİK ENERJİSİNİN ÖNEMİ :

Elektrik enerjisi bugünkü sosyal ve ekonomik yaşamın en başta gelen temel gereksinimlerinden biridir. Gelişen teknoloji, yükselen yaşam düzeyi ve artan nüfusla birlikte bu enerjiye olan gereksinme her geçen gün büyük ölçüde artmaktadır. Bu önemli talebin istenen miktar ve kalitede, ekonomik olarak karşılanabilmesi için yapılan/yapılacak faaliyetler ekonomik sorunların yanında çevresel etkiler de oluşturmaktadır. Ancak üretim, iletim ve dağıtım tesislerinin kurulması, işletilmesi, kumandası, izlenmesi ve kontrol edilmesindeki kolaylıkların yanında temiz oluşu ve istenen enerji şekline istenen yerde, istenilen miktarda dönüştürülebilme imkânlarından dolayı her zaman tercih edilir olmuştur ve rahatlıkla söylenebilir ki gelecekte de tercih edilir olacaktır. Bu özelliklerinin yanında bu enerjiden faydalanmak için geliştirilen/üretilen elektrikli makine, alet ve cihazların ucuz, işletilmelerinin kolay ve pratik olması da elektrik enerjisinin önemini bir kat daha arttırmıştır.

Bir ülkenin sosyal ve ekonomik olarak kalkınmasında en önemli destek unsurlarından biri hiç şüphesiz elektrik enerjisidir. Gelişmiş ülkelerin sosyal ve ekonomik kalkınmasında bu enerji çeşidinin katkısı çok büyük olmuştur. **Çizelge 1**'de kişi başına kurulu güç ve tüketim değerlerinin, ülkelerin gelişmişliği ile paralel olarak arttığı rahatlıkla görülmektedir.

Bu ülkeler gelişmişliklerini, kaynaklarını (ister yerli isterse Japonya'da olduğu gibi ithal ederek) verimli ve doğru kullanarak ürettikleri bol ve ucuz elektrik enerjisinden faydalanmalarına borçludurlar.

Çizelge 1 OECD ve Avrupa Birliği ülkelerinde kurulu güç ve tüketim değerleri[2002 yılı verileri ile] (IEA(International Energy Agency) Statics, Electricity information 2004)

ÜLKELER	Kurulu Güç		Tüketim	
	[GW]	Kişi Başına [kW/kişi]	Net Tüketim [TWh]	Kişi Başına [kWh/kişi]
ABD	979.59	3408	3609.9	12558
Almanya	126.26	1531	514.2	6234
Avustralya	48.62	2462	193.6	9803
Çek Cumhuriyeti	16.31	1597	53.5	5240
Danimarka	13.30	2472	33	6134
Fransa	116.32	1900	419.3	6848
Hollanda	20.89	1293	104.1	5446
İngiltere	77.05	1301	343.7	5805
İspanya	60.40	1490	212.9	5250
İsveç	33.22	3720	133.5	14950
İtalya	76.49	1318	290.9	5013
Japonya	265.99	2087	995.2	7809
Kanada	114.98	3661	512.7	16323
Kore	58.95	1237	295.8	6209
Lüksemburg	1.6	3556	5.7	12667
Macaristan	8.51	838	33.4	3287
Polonya	30.82	806	108	2826
TÜRKİYE	31.85	457	103	1479
Yunanistan	11.58	1058	48.6	4438
Avrupa Birliği	603.93	1584	2387.2	6262

3. ELEKTRİK TESİSLERİNDE ARIZALAR VE ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİ

Elektrik dağıtım sistemlerinde meydana gelebilecek bir arızadan dolayı tüketicilerin etkilenmesi, üretim ve iletim sistemlerinde meydana gelebilecek arızalardan daha fazladır.

Elektrik sisteminde varlığı daha önceden bilinen, ancak etkileri dolayısıyla dikkate alınmayan harmonikler, son yıllarda yarıiletken teknolojisinin elektrikle çalışan cihazlarda yaygın bir şekilde kullanılmasıyla diğer bir arıza kaynağı olmuştur. Harmonik içeren devrelerde akı, akım ve gerilim gibi temel elektriksel büyüklüklerin sinüs eğrisi şeklindeki yapısı bozularak, temel frekansın tam sayı katlarıyla orantılı istenmeyen dalga şekilleri oluşur. Harmonik içeren devrelerde genelde aşırı akım, aşırı gerilim gibi olaylar meydana gelerek tesisat elemanları ile tüketicilerin arızalanarak bozulmalarına neden olur.

Elektrik sisteminde çeşitli nedenlerden dolayı meydana gelen kısa devreler, dengesizlikler, aşırı gerilimler, harmonikler gibi istenmeyen olayların önceden saptanması, hesaplanması, tesisat elemanlarının ve tüketicilerin seçimi, sistemin emniyetli bir şekilde çalıştırılabilmesi açısından önemlidir.

Bu şekilde hesaplara uygun olarak tesis edilmiş bir elektrik sisteminde meydana gelebilecek bir arızada, dengesizlikte veya aşırı gerilimde tesisat elemanları arızanın olumsuz etkilerine rahatlıkla dayanabilecek ve arıza en kısa sürede sistemden izole edilecektir.

Klasik enerji kalitesi problemlerini aşağıdaki gibi sıralayabiliriz ;

- Bozukluklar (Gerilim Düşümü, Gerilim Yükselmesi, Kesintiler)
- Dengesizlikler
- **Harmonik bozulmalar (Akım Distorsiyonu, Gerilim Distorsiyonu)**
- Gerilim dalgalanmaları
- Kırpışma

4. ELEKTRİK ENERJİSİNİN KALİTESİ VE HARMONİKLER

İnsanoğlunun yaşamında enerji gereksinimi her zaman var olmuştur. Çok çeşitli enerji türleri içinde bugüne kadar en çok kullanılanı insan yaşamına sağladığı katkılar nedeniyle elektrik enerjisidir. Yaşamın önemli bir parçası haline gelen elektrik enerjisine olan talep sürekli artmış ve kişi başına tüketilen enerji miktarı ülkelerin gelişmişlik düzeyinin bir göstergesi olmuştur. Talepteki bu artış daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ortaya çıkarmıştır. Bu konu elektrik mühendisliğinde “**Güç Kalitesi**” olarak yerini almış ve üzerinde yapılan çalışmalarla öneminden söz ettirmiştir. Kaliteli bir elektrik enerjisi sağlayabilmek için; enerjinin sürekliliği, gerilim ve frekansın sabitliği, güç faktörünün bire yakınlığı, faz gerilimlerinin dengeli olması ve gerilimdeki harmonik miktarının belirli değerde kalması gibi bir takım kriterlerin göz önüne alınması gereklidir. Ayrıca kaliteli enerji deyince aklımıza “enerjinin her zaman kullanıma hazır,

gerilim ve frekans değerleri standartların öngördüğü limitler dahilinde ve sinüs eğrisi şeklindeki dalga formuna sahip kaynak” gelmelidir.

Daha güvenli ve daha kaliteli bir elektrik enerjisi için gerekli olan bu kriterler, elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında, mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bir elektrik güç sisteminin, güvenli ve arzu edilebilir bir biçimde çalışması için, sistemin tasarım ve işletim aşamasında bir takım etkilerin göz önüne alınması gerekir. Bu etkenlerden biri de güç kalitesini belirleyen parametrelerden olan nonlinear karakteristikli elemanların meydana getirdikleri harmoniklerdir.

Elektrik güç sistemindeki nonlinear elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz etkilemektedir. İşletmeler sistemdeki kalitesizlikten çok etkileniyorlarsa bağımsız olarak kendi enerjilerini üretebilir, sistemle paralel çalışabilir yada bir arıza halinde sisteme bağlanabilirler. Düşük güçlü ve çok hassas tüketiciler, elektriksel büyüklükleri filtre eden kesintisiz güç kaynakları (UPS- Uninterruptable Power Supply) üzerinden beslenebilir. Bu cihazlar sürekli olarak şebekeye bağlıdır ve bir taraftan filtre edilmiş gerilimi tüketiciye verirken, bir taraftan da bir enerji kesintisi halinde devreye girecek aküleri besler.

Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüsoidal bir değişime sahip olmalıdır. Bu değişim için sistemin sinüsoidal kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gereklidir. Ancak, güç sistemine bağlanan ve sayıları gittikçe artan konverterler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları, statik Var kompanzatorleri gibi nonlinear yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin nonsinüsoidal olmasına, yani harmonik distorsiyonuna neden olabilirler. Nonlinear yüklerin güçleri düşük değerde olsalar bile, yine de gerilimin dalga şeklini bozarlar. Enerji sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü nonlinear yük bulunduğu düşünülürse, ek kayıpların, harmonik gerilimlerin ve distorsiyon değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmaz bir gerçektir.

Son yıllarda yarı-iletken elemanların ve büyük güçlü nonlinear elemanların kullanımının yaygınlaşması, harmonik bileşenlerin hem sayısının hem de büyüklüklerinin artmasına neden olmaktadır.

Harmonik distorsiyonu, enerji sisteminde ve enerji sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirir.

Teknik ve ekonomik pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması hem enerji kalitesi açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir.

Harmonikler, motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekansta akım ve gerilim bileşenleri bulunacağından, rezonans olayının

meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler, işletmelerdeki elemanlara büyük zararlar verecektir.

Nonlineer yüklerin oluşturduğu harmonik akım bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik gerilimler ise bu sisteme bağlı lineer ve nonlineer yükler üzerinden harmonik akımlar akıtırlar. Böylece, kendileri harmonik üretmeyen elemanlar (tüketiciler) harmonik kirlenmeye (distorsiyona) maruz kalabilirler. Kendileri harmonik kaynağı olmadığı halde harmonikli gerilimle beslenen bu elemanlar, harmonikler nedeniyle güç kalitesinin bozulmasıyla çeşitli olumsuzluklar yaşarlar. Sinüsoidal olmayan akım çeken yüklerin (nonlineer yükler) bulunması halinde çekilen harmonikli akımlarla, beslenme noktası ile bu tip yükleri birbirine bağlayan baralar üzerinde “harmonik gerilim düşümleri” oluşacaktır.

Harmoniklerin meydana getirdiği enerji kirliliği sonucu yaşanan olumsuz etkilerinin önlenmesi ancak bu konudaki çalışmalarla mümkündür. Kullanılan enerjinin güvenilirliği ve kalitesi aynı zamanda gelişmişliğin de bir ölçütüdür. Çevre kirliliğinin etkilerini inkar etmemiz nasıl mümkün değilse enerji kirliliğini de aynı şekilde inkar edemeyiz. Enerjinin kalitesi üretimdeki kaliteyi arttıran bir etkidir, bu yönüyle verimi arttırıcı ve çevre sağlığını da olumlu etkileyen bir role sahiptir.

Sonuç olarak elektrik enerjisinde kalitenin garanti altına alınması, başlangıç aşamasında iyi bir tasarım, etkin ve uygun besleme kaynağı, cihaz seçimi, enerjiyi sunan kuruluşlarla sürekli işbirliği, sürekli kontrol ve dikkatli bakım gerektirmektedir.

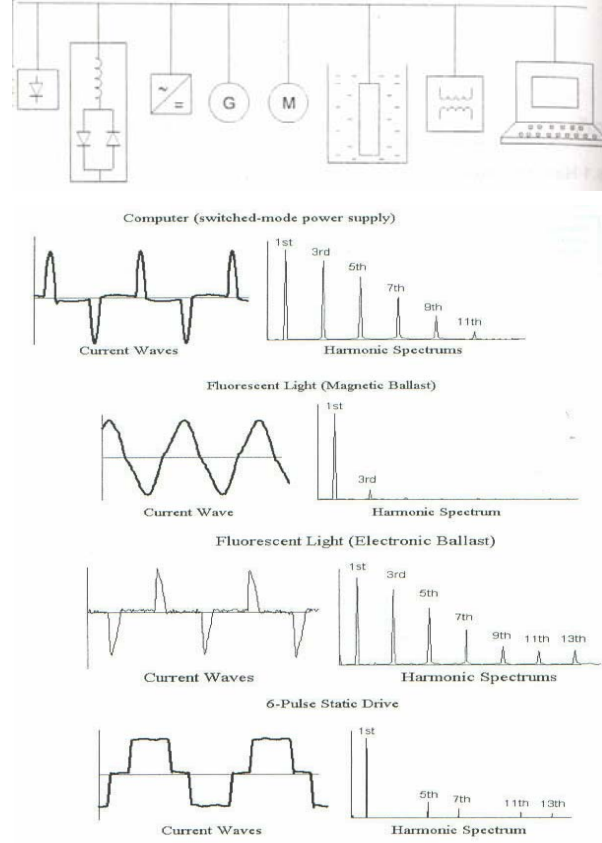
5. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR

5.1 Harmonik Kaynakları

Bilindiği gibi elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs biçiminden sapmasına neden olan harmonik bileşenleri harmonik kaynağı olarak nitelendiren ve akım gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonikleri meydana getiren elemanlar şu şekilde verilebilir :

- Konvertörler
- Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar
- Generatörler
- Motorlar
- Senkron makinelerin uyartılması için kullanılan diyotlu ve tristörlü dönüştürücüler
- Transformatörler
- Gaz deşarj prensibiyle çalışan aydınlatma elemanları ve flüoresan aydınlatma balastları
- Fotovoltaik sistemler
- Bilgisayarlar
- Elektronik balastlar
- Kesintisiz güç kaynakları (UPS)
- Anahtarlama güç kaynakları
- Kaynak makineleri
- Kontrol devreleri
- Frekans dönüştürücüleri
- Statik VAR kompanzasyonlar
- Yumuşak yol vericiler
- Rüzgar, güneş enerjisi gibi kaynakların dağıtım sistemlerine bağlantısı
- Gelecekte yaygınlaşması beklenen elektrikli otomobillerin bataryalarının şarjı
- Ark fırınları
- Elektroliz üniteleri
- Magnetohidrodinamik (MHD) ve yakıt hücreleri gibi sistemlerden üretilen dc enerjisinin dönüştürülmesi
- Döner rotorlu makineler
- İndüksiyon fırınları
- Tristör kontrollü elektrikli ısıtıcılar
- Kömür ocağı çıkırımları
- Yüksek gerilim ile enerji iletim(HVDC) sistemleri
- Elektrikli ulaşım sistemleri
- Redresörler

Şüphesiz enerji sisteminde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzluklarının giderilmesi bakımından tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir.



Şekil 1 Harmonik üreten elemanlar, harmonik üreten bazı cihazların dalga şekilleri ve harmonik spekturumu

Bir güç sisteminin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından sistemdeki harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir.

1. Sistem içerisine dağılmış çok sayıda küçük güçlü nonlineer elemanlar,
2. Büyük güçlü karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlineer yükler,
3. Büyük güçlü statik konvertörler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar v.b) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları sebebiyle bu gruba dahil edilebilir. Tek tek ele alındığı zaman her birinin gücünün düşük olmasına rağmen bu tip elemanların bir fazlı olması ve sistemde çok sayıda olmaları göz önüne alındığında tümünün harmonik etkisi önemli olabilmekte ve harmonik distorsiyonunun artmasına neden olmaktadır. İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği ; yüksek gerilimli iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, ancak gücü MW mertebesinde olan genellikle yeterli bir filtre sistemi ile

donatılmamış bulunan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz olup, zamana göre rasgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rasgele değişimine sebep olmakta ve modellemenin zorluğu nedeniyle simülasyonu güçleşmektedir. Üçüncü gruptaki büyük güçlü konvertörlerin ve güç elektroniği düzenlerinin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca konvertörün çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle konvertörün problemsiz çalışabilmesi için güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir.

Yukarıda sıralanan harmonik kaynaklarından bazılarını inceleyelim:

5.1.1 Konvertörler

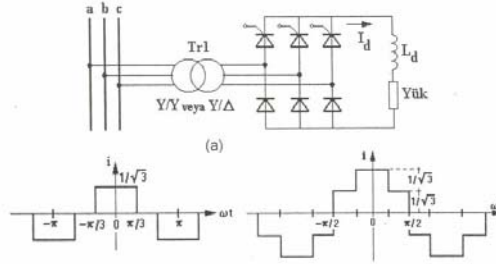
Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri, üç ve tek fazlı komütasyonlu konvertörlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovolatik sistemler, hat komütasyonlu konvertörler üzerinden beslenir. Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konvertörlerin (kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından biriside elektrikli demir yolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konvertörlerin bir fazlı konvertörlere göre avantajı, üç fazlı konvertörlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı konvertörler, konvertör transformatörün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Genel olarak konvertörlerin ürettikleri harmonik bileşenler $n=k.p \pm 1$ ile ifade edilir. Burada $k=1,2,3, \dots$ değerlerinde olup tam sayıları, $p=6,12, \dots$ olmak üzere darbe sayısını belirlemektedir. Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir. Şekil 2a'da 6 darbeleri bir konvertörün bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konvertörün Şekil 2b ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada I_d , doğrultucu tarafındaki akımı ifade etmektedir. Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması halinde Şekil 2c ile gösterilen a-fazı hat akımı ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (2)$$

olarak ifade edilebilir. 6 darbeleri konvertörde 5.,7.,11.,13.,17.,19.,...harmonik bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Harmonik mertebesi arttıkça her bir harmonik bileşeninin genliği azalmaktadır. Yine görüldüğü gibi bu durumda 5.,17.,19.,mertebesindeki harmonikler yıldız/yıldız bağlı transformatörlü konvertörlü ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır. (ters işaretli olan harmonik bileşenler $k=1,3,5$ olmak üzere $6k \pm 1$ ile belirlenir).



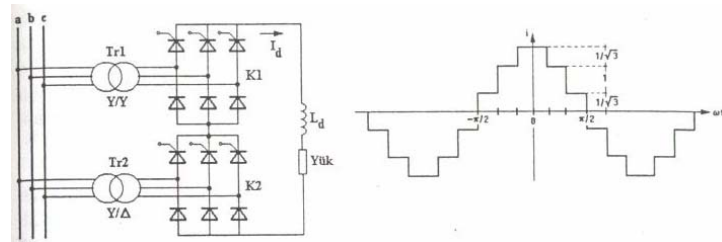
Şekil 2 Üç fazlı 6-darbeleri konvertör (yarı kontrollü doğrultucu)

- bağlantı şeması
- transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması için hat akımı dalga şekli
- transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması için hat akımı dalga şekli

yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip 6 darbeleri konvertörün DC çıkışları seri bağlanarak 12 darbeleri konvertör ile şebekeye $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere sadece $12k\pm 1$ mertebesindeki harmonikler (11.,13.,23.,25.,35.,37.,...) enjekte edilir. 12 darbeleri konvertör kullanılarak (5.,7.,17.,19.,...) engellenen harmonik bileşenler $k=1,3,5$ olmak üzere $6k\pm 1$ ile belirlenir. Şekil 3'de 12 darbeleri konvertörün bağlantı şeması ve a-fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right) \quad (3)$$

olarak ifade edilebilir. (bu kısımda verilen konvertör devrelerinde ve eşitliklerinde transformatörlerin çevirme oranı 1:1 olarak alınmıştır)



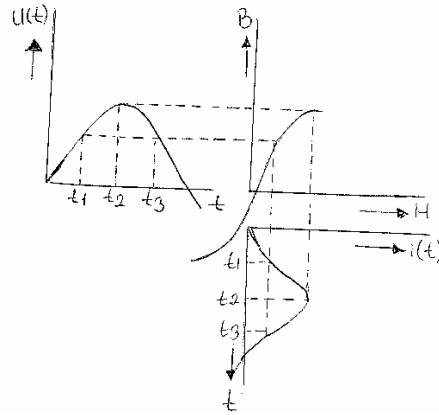
Şekil 3 üç fazlı 12 darbeleri konvertör (yarı kontrollü doğrultucu)

- bağlantı şeması
- hat akımı dalga şekli

5.1.2 Transformatörler

Elektrik tesislerinde önemli harmonik üreticisi olarak transformatör ve reaktans bobini gibi demir çekirdeği olan tesisat elemanları söylenebilir. Bunlarda harmonikler, transformatörün demir çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması dolayısıyla meydana gelir.

Sağlıklı çalışan bir elektrik sisteminde transformatörler normal olarak sinüsoidal bir gerilimle beslenirken, ister yükte ister boşta olsun nominal akımın %1 ila %10'u oranında mıknatıslanma akımı çekerler. Demir çekirdeğin magnetik karakteristiği Şekil 4'de de görüldüğü gibi lineer olmadığından mıknatıslanma akımı sinüsoidal değildir.



Şekil 4 Sinüsoidal şebeke gerilimi ile beslenen bir transformatörün şebekeden çektiği mıknatıslanma akımı

- $u(t)$; Şebeke gerilimi
- $B(t)$; Transformatörün mıknatıslanma karakteristiği
- $i(t)$; Mıknatıslanma akımı

Sistem geriliminin gerek yükün düşük olduğu saatlerde gerekse aşırı kompanzasyonun (ilk tesis nedeniyle ya da sabit kompanzasyonun olduğu şebekelerde reaktif gücün azalması halinde) olduğu hallerde nominal değerinin üzerine çıkması halinde, transformatör doyma bölgesine girerek mertebesi 1.,3.,5.,7.,9.,11.,13.,... gibi tek mertebeli harmonikler içeren mıknatıslanma akımları çeker. Bu harmonik akımları içinde 5. ve 7. harmonikler kendilerini daha şiddetli olarak hissettirirler de akım şiddeti olarak en yüksek olan 3. harmoniktir.

Meydana gelen harmonik akımlarının tepe değeri, temel frekanstaki akım dalgasının tepe değerinden oldukça küçüktür. Ancak devrede seri olarak bulunabilecek generatör, hat ve transformatör gibi tesisat elemanlarından yüksek frekanslı harmonik akımlarının geçmesi nedeniyle bunların reaktanslarında, özellikle düşük yüklerde büyük gerilim düşümleri oluşturarak harmonik gerilimlerinin meydana gelmesine neden olurlar. Transformatörlerin mıknatıslanma akımlarından kaynaklanan harmonik akımlarının şebekeye geçmesi

- Transformatör sargılarının bağlantı şekline,
- Yıldız bağlı primer sargının, yıldız noktasının şebekenin nötr noktasına bağlı olmasına, bağlıdır.

9. ve 15. Harmoniklerin şebekeye geçişini transformatörün primer ya da sekonder sargılarından birini üçgen yaparak, ya da büyük transformatörlerde olduğu gibi transformatörü üçüncü bir sargı olan ve genelde üçgen olarak düzenlenen tersiyer sargı ile donatarak önlemek mümkündür. 5. ve 7. harmonik akımlarının şebekeye geçişini tamamen önlemek ise bugünkü teknoloji ile pek mümkün değildir. Ancak soğuk haddelenmiş ve kristalleri yönlendirilmiş sac kullanılması halinde, magnetik akı ve dolayısıyla mıknatıslanma akımı küçüleceğinden, harmonik akımlarının etkisi de önemli oranda düşecektir.

5.1.3 Generatörler

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özellikleri çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sünisoidal olması sağlanır. Senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler generatör gücü 1000kVA'dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmazlar. Generatör bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar:

- Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmış ise, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunmakta olup fazlararası gerilimlerinde ise bulunmazlar.
- Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3'ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3'ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.
- Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda 3'ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir, generatörün dört iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zig zag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak sureti ile bloke edilir. kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir.

5.1.4 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumaları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırınlardır. Ark fırınları, elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonik üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilim azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rasgele değişim gösterir. bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rasgele değişimine sebep olduğu için ark

fırınının modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca ark olayında akım ile gerilimin, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörleri yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir.

Zaman zaman ark tutuşması veya sönmesin de harmonik akımların oluşmasına yol açmaktadır. Harmonikler en üst düzeye, ertirme safhasında ulaşırlar. Arıtma safhasında ise tamamen erimiş, metal karşısında her yarım dalgada tutuşan ark her seferinde bir öncekine benzer bir durum gösterir. bu nedenle, akım harmonikleri daha düşük düzeyde ve istikrarlıdır. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne, çalışma safhasına, ocaktaki malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişir.

Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan çeşitli değerler elde edilmiştir. Örneğin, tipik bir ark fırınında 2,3,.....,9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşenin temel bileşenin %30'u kadar olduğu tesbit edilmiştir. Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,....,10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'ü ile %1.3'ü arasında dağılım gösterdiği de tesbit edilmiştir.

5.1.5 Gaz Deşarjı Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayalı olarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlinear akım-gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve çevre aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresant lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üçüncü harmonik ve üçüncü harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur.

Ayrıca floresant lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini gidermek mümkündür. Aşağıdaki çizelgede magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir.

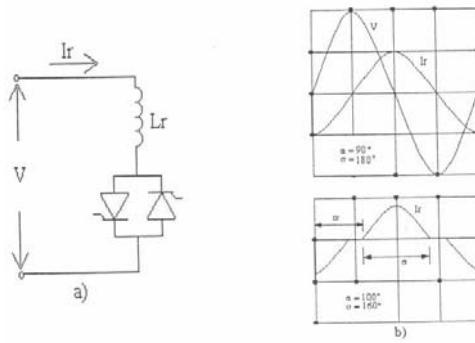
Çizelge 2 Magnetik balastlı bir floresant lamba akımının harmonik spektrumu

	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
(%) $\frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

5.1.6 Statik VAR Kompanzatorlar

Tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatorları, ilk olarak 1970'li yıllarda kullanılmaya başlanmış olup günümüzde de iletim hatlarında yaygın kullanıma sahiptirler. Sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri sebebiyle tristör kontrollü reaktörler, güç sisteminin performansını pek çok yönden geliştirebilirler. Bunlar, güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımlarının önlenmesi olarak sıralanabilir.

Güç sistemlerinde reaktif güç kontrolü maksadıyla kullanılan tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatorları, içerdikleri nonlineer elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptirler. Statik VAR kompanzatorlar bu sebeple bağlı oldukları güç sisteminde nonsinüsoidal büyüklere neden olurlar. Bu büyüklükler güç sisteminde bir atkım olumsuz etkiler meydana getirdiklerinden, sistemin davranışı harmonik bileşenler göz önüne alınarak analiz edilmelidir.



Şekil 5 Tristör kontrollü reaktörün;
a) Temel elemanlar
b) Gerilim ve akım dalga şekli

Bir tristör kontrollü reaktörün temel elemanları Şekil 5a'da görüldüğü gibi ters paralel bağlı iki tristör ile buna seri bağlı reaktörden oluşur. Bu iki ters paralel tristör simetrik bir biçimde tetiklenmektedir. Buradaki tristörler zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder. Tristörlerin her biri uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına (α) yada iletim açısına (σ) bağlı olup dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerle iletimde olurlar. Tam iletim hali, tetikleme açısının 90° 'ye eşit olmasıyla elde edilir. Bu durumda akım, tam endüktif karakterde ve sinüsoidaldir. Şekil 5b'de görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° ila 180° değerleri arasında olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez.

Şekil 5a'da görülen tristörlerin α tetikleme açıları yada σ iletim açıları uygun seçilmek şartıyla, reaktör akımının efektif değeri, istenilen sınırlar içinde ayarlanabilir. Akım dalga şeklinin Fourier analizi sonucu temel bileşen reaktör akımı ve harmonikli bileşen reaktör akımı sırasıyla,

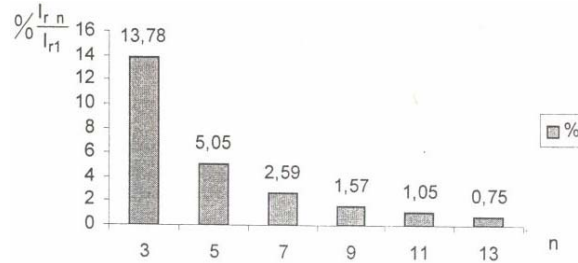
$$I_{r1}(\sigma) = \frac{V}{X_r} \left[\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right] \quad (4)$$

$$I_{r n} = \frac{4 \cdot V}{X_r \cdot \pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \cdot \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (5)$$

olarak elde edilir ($n=3,5,7,\dots$). Burada, X_r temel frekanstaki reaktörün reaktansdır. Tetikleme açısı α 'nın artması (σ iletim açısının azalması) sonucu, temel bileşen akımının (I_{r1}) değeri düşecektir. Tetikleme açısıyla iletim açısı arasında,

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (6)$$

eşitliği vardır. Akımın temel frekans bileşeni dikkate alındığında, tristör kontrollü reaktör, kontrol edilebilir bir süseptans elemanı olarak algılanabilir.



Şekil 6 TKR'de harmonik akımların maksimum genlikleri

Dengeli yüklenme koşulu altında tristör kontrollü reaktör, tek dereceli harmonikleri üretir. Eğer tristör kontrollü reaktör'de üçgen bağlantı yapılırsa 3.harmonik ile 3'ün katları olan harmonikler şebekeye verilmez ve bağlantı içinde elimine edilir. Bir tristör kontrollü reaktör'e ait olan harmonik akımların (I_{rn}) temel bileşen akımına (I_{r1}) oranı yüzde olarak Şekil 6'da verilmiştir.

Nonsinusoidal büyüklüklerin içerdikleri harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir ve durumda karakterize edilemeyen harmonik bileşenler meydana gelebilir. Bu durumda, tristör kontrollü reaktör içeren devrelerin rezonans sonucu etkin harmonik üretimine ve süreksizliğe sebep olacak çalışma noktalarında işletilmemesine çok dikkat edilmesi gerekir.

5.1.7 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak konvertörlerden kaynaklı harmonik etkinliğe sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için konvertörleri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yarı-iletken elemanların sebep olduğu harmonikler söz konusu olmaktadır.



Şekil 7 Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması

5.1.8 Bilgisayarlar

Hassas yüklerden biri olan bilgisayar sistemleri, yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer etki kaynağıdır. Bilgisayarların nonlineer yük karakteristikleri, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedirler.

5.1.9 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir şekilde giren elektronik sanayi, şebeke de harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan, elektronik balastlarda harmonik üreticisidirler. Filtreli ve filtresiz olarak imal edilen bu balastlar eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3.,5.,7., ve 9. bileşenlerdir. 13. harmonikten sonra temel bileşenin 1/3'ünden daha küçük değerlerde harmonik bileşene sahiptir.

Bir tüketim barasına bağlı bulunan az sayıdaki filtresiz elektronik balastın harmonik etkinliği ihmal edilebilir. Ancak hiper marketler gibi çok sayıda elektronik balastın bulunduğu testlerde harmonik seviyeleri sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir.

Örneğin, bu konuda yapılan bir çalışmada magnetik balastlı floresant aydınlatmada gerilim için THD= %3,6 değerinde iken, filtresiz elektronik balastlı aydınlatma yapıldığında bu değer artmakta ve gerilime ait THD= %7,41 değerine ulaşmaktadır. Elektronik balastların filtreli olması halinde gerilim distorsiyonu azalmakta ve THD=%0,74 değerine inmektedir.

6. HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER

Sinüsoidal yada harmoniksiz akım ve gerilimlerin bulunduğu bir elektrik enerji sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistemdir. Harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirmektedirler. Teknik ve ekonomik bakımdan pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması hem enerji kalitesi açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir.

Elektrik güç sistemlerinde harmoniklerden dolayı gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Harmoniklerin güç sistemlerinde yol açtığı problemler ;

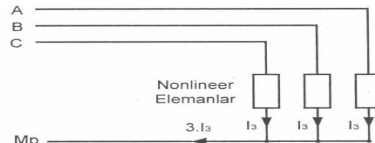
- Generatör ve şebeke gerilimlerinin dalga şeklinin bozulması,
- Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi,
- Gerilim düşümünün artması,
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere yükselmesi,
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeniyle hasar görmeleri,
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların oluşması nedeniyle aşırı ısınmalar,
- Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,
- Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi,
- Aydınlatma elemanlarında ve monitörde görüntü titreşimi meydana getirmesi,
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
- Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi,
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,
- Elektrik cihazlarının ömrünün azalması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması gibi özetlenebilir.

Boşta çalışmada ve düşük yüklerde harmoniklerin etkisi, şebekelerin tam yüklenmesi haline göre daha büyüktür.

Harmonikler güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirirler. Harmonikler, motorlar, generatörler, kondansatörler, transformatörler ve enerji iletim hatlarında ilave kayıplara neden olurlar. Bazı durumlarda da harmonikler, güç sistem elemanlarının zarar görmesine veya devre dışı kalmalarına yol açabilirler. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde çeşitli frekanslar bulunacağından, rezonans meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmelerdeki elemanlara önemli zararlar verecektir. Harmoniklerin bazı elemanlar üzerindeki etkileri aşağıdaki şekilde verilebilir:

6.1 İletkenler

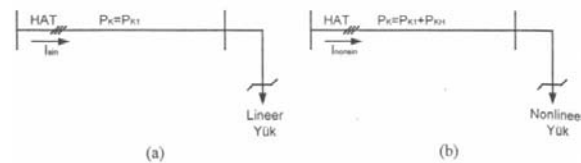
Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına sebep olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi, literatürde deri etkisi olarak bilinen ‘skin-effect’ sonucudur. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artmasıyla meydana gelen ek artıştır.



Şekil 8 Nötr hattının 3.harmonik bileşenlerle yüklenmesi

İkinci etki ise, tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile karşımıza çıkar. Bazı nonlineer elemanlar büyük değerlerde 3 ve 3'ün katları harmonik bileşenleri üretirler. Temel frekanstaki dengeli 3-fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3-fazlı sistemelerde üçüncü mertebeden (3.,9.,15.,....) harmonikler nötr iletkeninde birbirlerini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirirler. Harmonik mertebesi “n” için fazlar arasında $n.120^\circ$ lik faz farkı olduğundan 3 ve 3'ün katı harmoniklerin her biri 360° lik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olurlar.

Şekil 8’de sadece 3. harmonik bileşenlerin nötrde toplanması ile bu hattı aşırı yüklemesi gösterilmiştir. Bu nedenle nötr akımının değeri, faz akımının değerinin 1,7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı kesitte olsa bile bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu sorun en çok, 3-fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı alınan en yaygın önlem, nötr iletkenini faz iletkenlerinin iki katı büyüklüğündeki kesitlerde yapmaktır.



Şekil 9 Omik direnci R olan bir hattın kaybı

- Sinüsoidal akımlı durum
- Nonsinüsoidal akımlı durum

Bir omik dirençte oluşacak kayıp güç, bu elemanlardan geçen akım ile ilgilidir.(Şekil 9) Omik direnci R olan bir iletkenin geçen ve N tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri,

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i(t)_n \quad (7)$$

olmak üzere efektif değerinin;

$$I = \left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)^{1/2} \quad (8)$$

olduğu bilinmektedir. Bu durumda n.harmonik için “akım harmoniği oranı”

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (n = 2,3,\dots, N) \quad (9)$$

olarak tanımlanırsa ve üç fazlı sistemde oluşacak toplam omik kayıplar için

$$P_K = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 \quad (10)$$

yazılabilecektir. Burada I_n , n.harmonik akımın efektif değeri olup R_n , hattın n.harmonik frekansındaki direncini gösterir. Direncin frekansla değerinin artması ihmal edilirse kayıp güç,

$$P_K = 3RI^2 = 3RI_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} + P_{KH} \quad (11)$$

şeklini alır. Formülden de görüldüğü gibi sinüsoidal akımın meydana getirdiği kayıp değerine (P_{K1}) ilave olan kayıplar (P_{KH}) akım harmoniği arttıkça daha etkin olmaktadır.

6.2 Direnç Üzerindeki Etkisi

Bilindiği gibi, harmonik bileşenlerin mertebesi arttıkça frekans değeri de aynı oranda artmaktadır. Harmoniklerin frekansının artmasıyla oluşan deri etkisi (skin-effect) sonucu, iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin doğru akımdaki direncinden daha büyük olan alternatif akımdaki direnci harmoniklerle daha da artış göstermektedir. İletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüsoidal akım akışı halinde harmonik bileşenlerin her biri için R_n direnci ilave olmaktadır (Şekil 10). Böylelikle, tüm bileşenlerle birlikte harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R=R_1+R_H$ olur. Analizlerin çoğunda harmonik bileşenlerden ilave olan direnç ihmal edilmekle birlikte, daha detaylı analizlerde bunun etkisi de dahil edilmektedir. Deri etkisiyle oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören Arnoldun verdiği ampirik bir bağıntıyla hesap edilir.

$$x = 1.585 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (12)$$

olmak üzere

$$\begin{array}{ll} 0 \leq x \leq 3 & \text{için} \quad R = R_0 \cdot K_1 \\ x > 3 & \text{için} \quad R = R_0 \cdot K_2 \end{array} \quad (13)$$

dir. Burada

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (14)$$

$$K_2 = \left[\frac{X}{2,828} + 0,26 \right] \quad (15)$$

Burada, R_0 , doğru akım direnci ve R , deri etkisi dahil direnç olarak tanımlanmıştır.



Şekil 10 Omik direncin frekansla artması (skin effect)

- a-) Sinüsoidal akımlı durum
- b-) Nonsinüsoidal akımlı durum

6.3 Reaktanslar üzerindeki etkisi

Elektrik şebekelerinin ve diğer elemanlarının (hatların, motorların, generatörlerin, transformatörlerin vb.) modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel bileşendeki değeri, X_L olan bir endüktif reaktans, n .harmonikte

$$X_{L_n} = n.X_L \quad (16)$$

değerini alır. Benzer şekilde, temel harmonikteki değeri X_C olan bir kapasitif reaktans, n .harmonikte

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (17)$$

değerini alır. Her iki durum için de reaktansın lineer bir eleman olduğu kabul edilmektedir.

6.4 Kondansatörler :

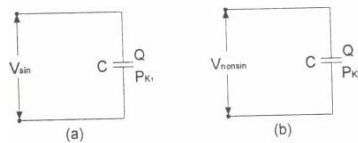
Güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler. Ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bir kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün n .harmonik için akım değeri,

$$I_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C \cdot V_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n \quad (18)$$

ile belirlenir. Eşitlik (18) de görüldüğü gibi herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranı gerilimdeki oranından büyük olmaktadır. Harmonik bileşenler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa sebep olabilirler. Q_s sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_c ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi,

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (19)$$

bağıntısı ile bulunur. Bir kondansatördeki reaktif güç ile kayıp güç, uygulanan gerilime bağlı olarak değişir.



Şekil 11 Bir kondansatör elemanının

- a -) sinüsoidal beslemeli hali
- b -) nonsinüsoidal beslemeli hali

Harmonikler kondansatörler de hem aşırı reaktif yüklemeye, hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucunda ısı artışına sebep olurlar. Harmoniklerin yol açtığı ısı artışı ve aşırı yüklenme sonucu kondansatörlerin ömrü kısalmır. Nominal olarak, Q reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan bir harmonikli gerilim durumunda reaktif güç

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n \cdot C \cdot V_n^2 \quad (20)$$

belirlenir. Kondansatörün ideal olmadığını, kayıp gücünün olduğunu ve eş değer devresinde paralel R omik direncinin bulunduğunu kabul edersek bu durumda kondansatörün aktif güç kaybı

$$P_K = \sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (21)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada

$$\tan \delta = R(1/\omega C) \quad (22)$$

ifade edilen kayıp faktörüdür. $\omega_n = 2 \cdot \Pi \cdot f \cdot n$, n. Harmonik için açısal frekans olup V_n , n. Harmonik gerilimin efektif değeridir. IEEE Std 18-1992 standartları, kondansatör grupları için gerilim, akım ve reaktif güç ile ilgili sınırlamalar gerekmektedir. Bu standartlar kullanılarak müsaade edilebilir maksimum harmonik seviyeleri belirlenebilir.

6.5 Motorlar ve Generatörler :

Harmonik gerilim ve akımlarının en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinelerin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması veya senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar da görülebilir.

Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan birisidir. Elektrik makinelerinde kayıplar, uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebiyle motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Harmonik bileşenler, motor performansını %5 ile %10 arasında azaltmaktadır.

Çizelge 3 Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği

Harmonik mertebesi	Frekans (Hz)	Faz dizi bileşeni	Stator harmoniği	Harmonik dönüş yönü	Rotor harmoniği
1	60	+	1	İleri	-
5	300	-	5	Geri	6
7	420	+	7	İleri	6
11	660	-	11	Geri	12
13	780	+	13	İleri	12
17	1020	-	17	Geri	18
19	1140	+	19	İleri	18
23	1380	-	23	Geri	24
25	1500	+	25	İleri	24

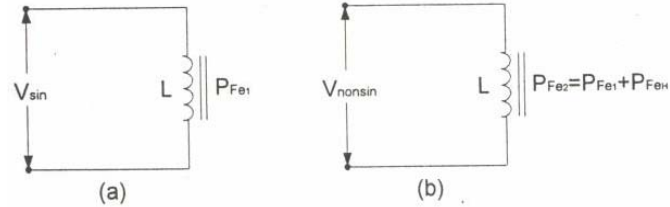
Çizelge 3'de, 6 darbeleri bir konverterin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makineye etkileri gösterilmiştir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif veya negatif dizi simetrik bileşenidir. Her bir harmonik gerilimi (5.,7.,11.,...) makinenin statorunda bir harmonik akım indükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin frekansı neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısı yükselecektir.

Genellikle, rotordaki harmonik akımların akışı daha da önemlidir. Statordaki her bir akım, makinenin rotorunda akım indükleyecek biçimde hava aralığında bir magnetomotor kuvvet (MMK) üretecektir. Her bir karakteristik harmonik, pozitif veya negatif dizi bileşen olarak tanımlanabilirken, harmoniklerin dönüş yönüne göre ya ileri yada geri olacaktır. 5. harmonik geri yönde (negatif dizi bileşeni) dönecektir. Bundan dolayı temel hava aralığı frekansı ve 5. harmonik bileşeni arasındaki net dönme farkına karşılık gelen frekansla (5. harmonik frekansına 1 ilave edilerek yani 6. harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım indükleneyecektir. 7. harmonik ileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için, temel hava aralığı frekansı ve 7. harmonik arasında net dönme farkına karşılık gelen bir frekansla (7.harmonik frekansından 1 çıkarılarak yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım indükleneyecektir. Böylece rotor ısındığından, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6.harmonik akım bileşeni üretmek için aynı biçimde etkili olurlar, daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum söz konusu olacaktır.

6.6 Transformatörler

Aynı zamanda harmonik üreticisi de olan transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, akım harmonikleri sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki artıştır. İkincisi ise, gerilim harmonikleri sonucunda, demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma olarak görülecektir. Ayrıca harmonikler, transformatörlerde gürültülü artışı da meydana getirirler.

Harmonik gerilim ve akımlarının her ikisinin de sebep olduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekansın artmasıyla kayıplar artmaktadır ve bu nedenle yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerinden daha etkin olabilmektedirler.



Şekil 12 Magnetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları

- a-) Sinüsoidal gerilimde
- b-) Nonsinüsoidal gerilimde

Genel olarak, magnetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör vb.) oluşacak demir (nüve) kayıpları, bu elemana uygulanacak gerilim şekil ile ilgilidir (Şekil 12). Magnetik çekirdekli bir elemana uygulanan gerilimin yani harmonikli gerilimin N tane harmonik bileşen içermesi durumunda ani değeri

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (23)$$

ve efektif değeri

$$V = \left(\sum_{n=1}^N V_n^2 \right)^{1/2} \quad (24)$$

olmak üzere bu elemanda oluşacak demir kayıpları

$$P_{Fe} \cong K_m V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (25)$$

ile ifade edilebilir (Burada K_m , makinenin yapısı ile ilgili bir sabittir). Bu değer aynı şekilde n. Harmonik için tanımlanan “gerilim harmoniği oranı” ifadesi

$$\beta_n = V_n/V_1 \quad (n = 2,3,\dots,N) \quad (26)$$

kullanılarak

$$P_{Fe} \cong K_m V_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2 \right) = P_{Fe1} + P_{FeH} \quad (27)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi sinüsoidal gerilim meydana getirdiği demir kaybına (P_{Fe1}) ilave kayıplar (P_{FeH}) gerilim harmoniklerine bağlı olarak söz konusu olmaktadır.

6.7 Enerji İletim Sistemleri

Bir şebekedeki harmonik akımların akışı, iki temel etkiyi meydana getirmektedir. Birincisi, akım dalga şeklinin artan efektif değerinin sebep olduğu,

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (28)$$

ile hesaplanan ek kayıplardır. Burada I_n , n.harmonik bileşeninin akımı ile R_n ise n.harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direncidir. Harmonik akımların ikinci etkisi ise, iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde gerilim düşümleri oluşturmasıdır. Akımın n.harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \quad (29)$$

olarak ifade edilir.

6.8 Devre Kesiciler ve Sigortalar :

Akımda meydana gelen harmonik distorsiyon, devre kesicilerinin akım kesme yeteneklerini etkilemektedir. Devre kesicilerinin çalışmasındaki aksaklık, elektromagnetik endüksiyon bobininin, harmoniklerin bulunduğu durumlarda doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır.

Bilindiği gibi, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan magnetik alan ile ark hücrelerine sürülmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkin yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır.

Harmonik akımları ayrıca ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesi ile akımı zamansız kesmeler söz konusu olur.

Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Ayrıca, harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinde temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmekte, bu da sonuçta akım kesme işlevini zorlaştırabilmektedir.

6.9 Aydınlatma Elemanları :

Harmonikli bileşenleri bulunan gerilimlerin, floresant lambalar üzerinde kulağın duyabileceği gürültülerle birlikte demir kayıplarının da artışında etkin bir rolü vardır. Floresant aydınlatmada tek dereceli harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler.

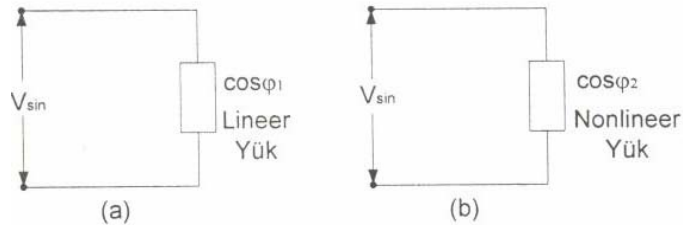
Akkor telli lambaların ömrü, distorsiyona maruz kalmış gerilime çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum lambaların içerisindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim artışının küçük değerlerde olması durumunda dahi akkor fleanlı lambanın ömrü büyük değerlerde azalmaktadır, örneğin normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimle kullanıldıklarında akkor lambaların ömürlerinin ortalama olarak %50 oranında kısalmaktadır.

6.10 Güç Faktörü :

Güç faktörü genel anlamda gücü kullanabilme mertebesi olarak tarif edilebilir. Bilindiği gibi güç faktörü devredeki aktif güç (P) ile görünür güç (S) arasında,

$$GF = P/S \quad (30)$$

ile ifade edilen değerdir. Güç faktörü düzeltilmesinde amaç, devreden çekilen aktif gücün devredeki elemanların yüklenmesine esas olan görünür güç değerine yaklaştırmaktır. Hatta birbirine eşit olması durumunda her iki güç aynı olacak ve güç faktörü de 1 değerini alacaktır.



Şekil 13 Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünün değişimi

- a-) Lineer yük durumu
- b-) Nonlineer yük durumu

Genel olarak harmonikli akım ve gerilimlerin devrede dolaşması durumunda güç faktörü harmoniksiz duruma göre değişecektir. Güç faktörü değişim ile ilgili pratik uygulama bakımından en çok karşılaşılan durum olan sinüsoidal bir şebekeye nonlinear eleman bağlanması durumudur (Şekil 30). Sinüsoidal bir şebekeye nonlinear eleman bağlanması durumunda çekilecek harmonik akımlar sebebiyle güç faktörü,

$$GF = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{V \cdot \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2}} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi \quad (31)$$

olarak elde edilir. Burada birinci; terim akımın distorsiyon faktörü olarak, ikinci terim ise, kayma faktörü olarak adlandırılır. Birinci terimin daima 1'den küçük olması sebebiyle güç faktörü sinüsoidal durumundaki $\cos \varphi$ değerinden daha düşük bir değer alacaktır. Görüldüğü gibi harmoniklerin güç faktörünü düşürücü özelliği bulunmaktadır.

Harmonikli bir devrenin güç faktörü kompanzasyonu belirli sınırlar içinde mümkün olabilmektedir. Devreye bağlanacak kondansatör kapasitelerinin artırılması ile güç faktörü belli bir değere kadar artacak, daha sonra ise artış değil azalma görülecektir. Bu durumda yeterli kompanzasyon için filtre devreleri kullanılması gerekecektir.

6.11 Röleler

Güç sistemlerinin korumasında, koruma sisteminin temel elemanı yada "beyni" olarak kabul edilen "koruma röleleri" üzerinde nonsinüsoidal büyüklüklerin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bazı çalışmalar vardır fakat bunların yeterli olduğu söylenemez. Güç sisteminde dalga bozulması (harmonikli akım veya gerilimin bulunması) durumunda koruma elemanları ile ilgili ortaya çıkan sorunlar tam olarak tanımlanamamıştır. Bu yönde tüm koruma elemanları için kesin bir biçimde sonuçlar verebilecek yeterince çalışma yoktur. Bütün bunların yanında literatürde bulunan teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok kısa olarak şöyle özetlenebilir.

Akım ve gerilim sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Her bir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimleri göstermektedir. Aynı tipte rölelerin farklı modelleri bile aynı distorsiyona değişik biçimde cevap verdiği gibi, bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına yada sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar bir işletme problemi oluşturmadığını gözleyen çalışmalar vardır. Fakat farklı bir çalışmada indüksiyon diskli aşırı akım rölesinin frekansı 3.harmonikten 9.harmoniğe kadar artırıldığında çalışma değeri artış göstermiştir.

Harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin; rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün magnetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir.

Termik aşırı akım rölesi için yapılan bir deneyde sinüsoidal ve nonsinüsoidal besleme durumunda aynı zamanda açmıştır. Termik rölenin çalışması, içindeki bimetal elemanın ısınmasına bağlı olduğundan, sinüsoidal durumdaki besleme akımı ile, aynı efektif değere sahip nonsinüsoidal besleme akımının etkisi aynı olmuştur. Akımın efektif değerinin harmoniklerle artış göstermesi durumunda açma zamanının daha da kısalaacağı açıktır.

6.12 Ölçü Aletleri

Harmonik bileşenlerin (özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimleri sonucu) sistemi rezonansa sokması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilenmektedir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatlar olabileceğini göstermiştir. Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçen aletlerdir. Bu aletler frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalı çalışmaktadır. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %20'lere varan hatalara sebep olmuşlardır.

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve ampermetreler harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir. Örneğin, 45°lik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini bu tip aletler, %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer söz konusu alet ampermetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilememesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilim elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan atalarının %0,1'den daha az olduğu tespit edilmiştir.

6.13 Elektronik Elemanlar

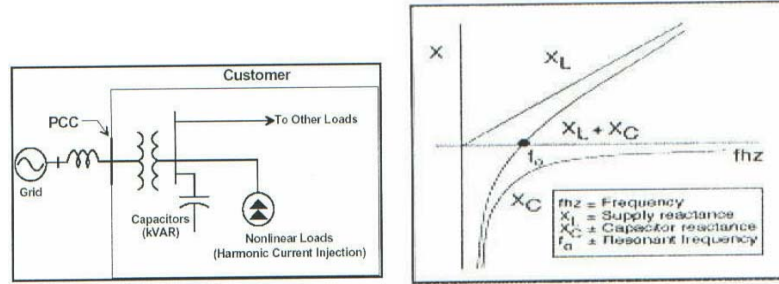
Bir güç elektroniği elemanı, harmonik bileşenlerin bulunduğu bir sisteme bağlı olabilir. Bu elemanların doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlar arası gerilim, diğer noktadaki fazlar arası gerilimden daha büyük olması sonucunu doğurabilir. Elektronik kontrol devrelerinin pek çok çeşidi için bu iki durum kritik noktalar oluştururlar ve bu kayma nedeniyle oluşan komutasyon hatalarıyla yanlış işlemlere yol açarlar. Örneğin, tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine de neden olabilir.

7. HARMONİKLERİN ETKİSİNİ AZALTMAK İÇİN YAPILACAK İŞLEMLER

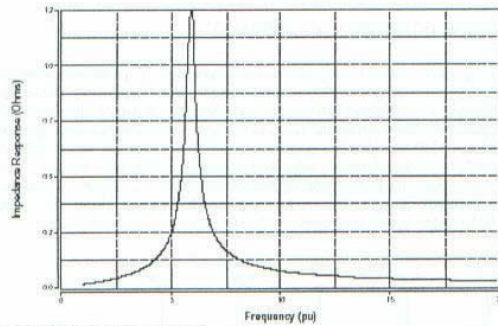
Harmoniklerin etkilerini azaltmak ve rezonansı önlemek için aşağıda belirtilmiş olan önlemler alınır :

- Rezonansın önlenmesi/kondansatör güçlerinin ve yerlerinin değiştirilmesi
- Antiharmonik reaktörlü kondansatör (Detuned LC filitre)
- Hat reaktörleri (Line reactors)
- Pasif harmonik filtre
- K faktörlü transformatör ve/veya değişik bağlantı gruplarında transformatörler
- Aktif harmonik filtre

7.1 Rezonansın Önlenmesi



Şekil 14 Kompanzasyon kondansatörü ve rezonans



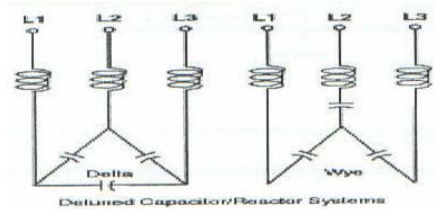
Şekil 15 Paralel rezonans eğrisi

Kompanzasyon kondansatörlerinin rezonansa neden olmasını önlemek için aşağıdaki işlemler yapılır :

1. Büyük güçlü sistemlerde, toplam kondansatör gücü parçalara ayrılarak kondansatörlerin ayrı ayrı yerlere yerleştirilmesi
2. Mevcut kondansatör güçlerinin azaltılması
3. Otomatik kompanzasyonda, kademe güçlerinin değiştirilmesi
4. Otomatik kompanzasyonda, kademe kombinasyonlarından biri rezonansa neden olabilecek ise, kademelendirme işleminde bu kademelerin bulundurulmaması

7.2 Anti-Harmonik Reaktör Kullanılması

Şebekede mevcut kondansatörleri harmoniklere karşı korumak ve şebeke reaktansı ile kondansatörün rezonans devresi oluşturmasını önlemek için kondansatöre seri bağlı reaktörler kullanılır, bu reaktörlere Anti-harmonik reaktörler adı verilir. Kondansatör ve reaktörden oluşan filtre devresine Rejection veya Detuned filtre adı verilir. Kompanzasyon yapılacak baradaki şebeke gerilimi Toplam Gerilim Distorsiyonu $THD_V = \%2.5-\%3$ değerini geçtiği (veya 5nci harmonik gerilimi $\Rightarrow \%2$, 7nci harmonik gerilimi $\Rightarrow \%1.5$ olduğu zaman) veya kompanzasyon yapılacak baradan beslenen harmonik üreten yüklerin toplam gücü, dağıtım trafosu gücünün $\%25$ den büyük olduğu zaman kondansatörlerin önüne anti-harmonik reaktör bağlanması gerekir. Harmonik üreten yüklerin toplam gücü dağıtım trafosu gücünün $\%60$ indan büyük ise harmonik filtre kullanılması gerekir.



Şekil 16 Anti-harmonik reaktörlü kondansatör bankı (detuned LC filtre)

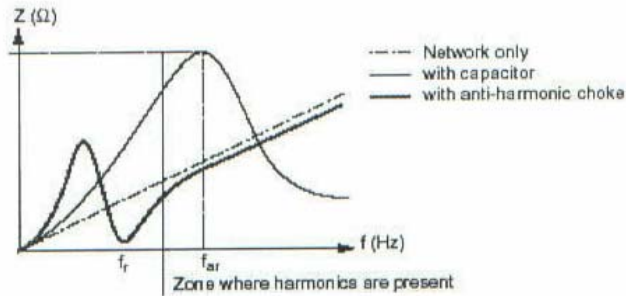
5nci harmonikten korunmak için anti-harmonik reaktör ve kondansatörün oluşturduğu seri devrenin rezonans frekansı f_r , genellikle, 189Hz'e akort edilir. Reaktörün seçimi aşırı gerilim faktörü adı verilen $\%p$ ile belirlenir.

$$\%p = 100 \cdot U_L / U_C = 100 \cdot X_L / X_C \quad (32)$$

$$X_C = U^2 / Q_C \quad (33)$$

Q_C ; Kondansatör bankı gücü , X_L ; Reaktör reaktansı

$f_r = 189\text{Hz}$ için $\%p = 7$, $f_r = 177\text{Hz}$ için $\%p = 8$ alınır.



Şekil 17 Detuned LC filtre, kondansatör ve şebeke empedans- frekans eğrisi

Şekil 17'den görüleceği üzere, LC devrenin seri rezonans ve paralel rezonans frekansları mevcut harmonik frekanslardan daha küçüktür yani rezonans noktaları harmoniksiz bölgede seçilmişlerdir. Anti-harmonik reaktörlü sistemde seri rezonans frekansı seçimi, $\pm \%10$ ve $\pm \%10$ toleransı ile, şebekede mevcut hakim harmonik frekansına denk gelmeyecek şekilde yapılır.

Yaygın olarak kullanılan anti-harmonik reaktör değerleri ve bunlara karşılık olan seri rezonans frekansları aşağıda verilmiştir. P%=7 reaktörlü sistem en yaygın kullanılan sistemdir.

Çizelge 4 %P ve rezonans frekansı

Detuned filtre seri rezonans frekansı $f_r = f_1 / \sqrt{p}$, $f_1=50\text{Hz}$	Aşırı Gerilim Faktörü
$f_R = 134 \text{ Hz}$ (p = %13-%14 reaktörü, 3ncü harmonikten korunmak için kullanılır)	p = %14
$f_R = 189 \text{ Hz}$	p = %7
$f_R = 210 \text{ Hz}$	p = %5.67

Şebeke hatları üzerinden, ses frekanslı (166-1350Hz) uzaktan kumanda (ripple kontrol) yapılıyor ise, haberleşme frekansı ile rezonans oluşturmayacak şekilde %p seçilmelidir. Haberleşme frekansı :

- < 250 Hz ise p =%14
- > 250 Hz ise p =>%7
- > 350 Hz ise p =>%5 reaktörler kullanılır.

Anti-harmonik reaktör kullanılması halinde, kondansatör üzerindeki gerilim %p kadar artar. Örneğin %p =7 ise, kondansatör üzerindeki gerilim %7 artar. Bu nedenle kondansatör nominal gerilimi şebeke geriliminden en az %10 büyük olmalıdır. Kondansatör üzerindeki gerilim arttığı için kondansatörün sağladığı reaktif güç Q_1 değerinden Q_2 değerine yükselecektir :

$$Q_2 = Q_1 \cdot n^2 / (n^2 - 1) \quad (34)$$

$$\text{veya } Q_2 = Q_1 / (1 - p) \quad (35)$$

$$p = X_L / X_C \quad (36)$$

Q_1 = İşletme gerilimindeki kondansatör bankı gücü

$$n = f_r / f_1 = 1 / \sqrt{p} \quad (37)$$

$$f_r = f_1 / \sqrt{p} \quad (38)$$

f_r ; Seri rezonans frekansı , f_1 = Temel frekans

herhangi bir harmonikte anti-harmonik reaktörlü devrenin empedansı $Z_{LCn} = n \cdot X_{L1} - X_{C1} / n$ ve aynı harmonikte reaktörsüz kondansatörün empedansı ise $Z_{Cn} = X_C / n$ olacaktır. Z_{Cn} / Z_{LCn} oranı X ile gösterilir ise ;

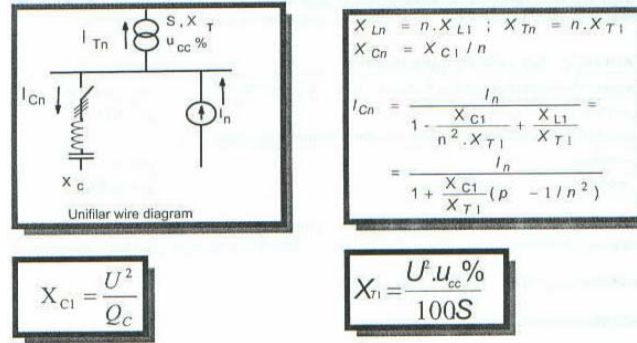
X > 1 için LC devre harmonik süzen filtre

X < 1 için LC devre harmonik geçirmeyen filtre olarak çalışacaktır.

Çizelge 5 5nci harmonikte çeşitli %p değerleri için hesaplanmış olan X değerleri aşağıda verilmiştir :

p = %5,67	X = 2.4
p = %7	X = 1.33
p = %8	X = 1
p = %13.5	X = 0.42

Yukarıda açıklandığı üzere detuned (rejection) filtre, rezonansı önleme ve kondansatörü koruma görevlerine ilave olarak aynı zamanda bir miktar da harmonik akım süzmektedir. Filtrenin ne miktarda harmonik akım süzdüğü Şekil 5.5 gösterildiği şekilde hesaplanır :



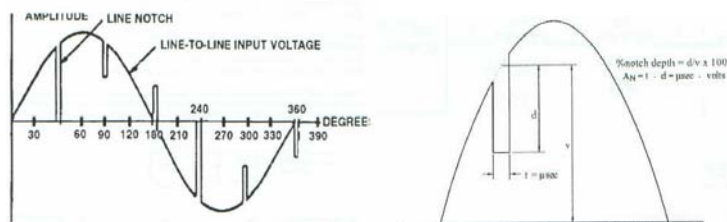
Şekil 18 Detuned LC filtre kondansatör harmonik akımları

7.2.1 Anti-harmonik Reaktörlü Kondansatör Bankı Seçiminde Dikkat Edilecek Noktalar :

- OG/AG transformatörün beslediği AG barada anti-harmonik reaktörlü kondansatör bankı ile reaktörsüz kondansatör bankı birlikte kullanılmamalıdır.
- %p değerleri farklı olan kondansatör bankları, simülasyon yapılmadan aynı barada kullanılmamalıdır.
- Bara gerilimi 5nci harmonik gerilim yüzdesi %5 den büyük ise anti-harmonik reaktörlü sistemdeki reaktör fazla yüklenir, bu durumda harmonik filtre kullanılmalıdır.
- Kondansatör bankı nominal gerilimi işletme geriliminden yüksek seçilmelidir.
- Bara gerilimi 5nci harmonik gerilim yüzdesi %4 den büyük değil ise ve fazla harmonik akım süzmek isteniyor ise $p = \%7$ reaktör yerine $p = \%5.67$ reaktör seçilmelidir.

7.3 Hat Reaktörleri (Line Reactors)

Alternatif akımı doğru akıma çeviren 6 darbeli redresörler ve motor hız kontrol cihazları gibi diyot ve tristör kullanan cihazlarda, bir diyot (veya tristör) çiftinin devreden çıkıp diğer diyot (veya tristör) çiftinin devreye girmesi sırasında şebekenin iki fazı kısa devre edilir. bu esnada gerilim sıfıra doğru düşer. Gerilimin tam sıfıra düşmesini engelleyen şebeke kısa devre reaktansdır. Aşağıdaki şekilde görüldüğü üzere, gerilimin sıfıra doğru düşmesine komutasyon çentiği (commutation notching) adı verilir.



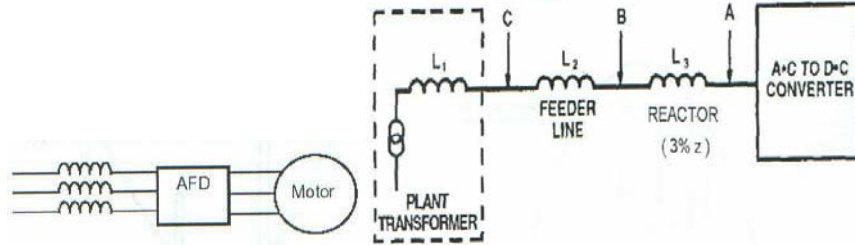
Şekil 19 Komutasyon çentiği (commutation notching)

Bu durum şebeke açısından istenmeyen durumdur ve IEEE 519-1992 standardı bu konuda Çizelge 6 'da gösterilen sınırları belirlemiştir.

Çizelge 6 Komutasyon çentikleri ve AG gerilim distorsiyonu sınırları

Komutasyon çentikleri (Commutation Notches) Alçak Gerilim sistem sınıfları ve distorsiyon sınırları				
	Özel Uygulamalar	Genel Sistemler	Tahsisli (Dedicated) Sistemler	Düşünceler
THD-V %	3%	5%	10%	
Notch Derinliği(100Xd/v)	10%	20%	50%	
Notch Alanı (AN=txd)	16400	22800	36500	Volts.µsec
Notch(çentik) alanı : 480 Volt için yukardaki değerler 400/480 değeri ile çarpılmalıdır Özel uygulamalar : Hastaneler ve hava alanları Tahsisli (Dedicated) Sistemler : Münhasıran konvertör yüklerine tahsis edilmiş sistemler				

Yukarıda belirtilen notching sorununu standartların belirlediği sınırlar içerisinde tutabilmek için motor hız kontrol cihazlarının (ASD, AFD, VFD gibi) şebeke bağlantısı hat reaktörleri ile büyük konvertör yüklerinin şebeke bağlantısı ise hat reaktörü ve/veya tahsisli transformatör ile yapılır.



Şekil 20 Hat reaktörü bağlantısı

Bu reaktörler kendi üzerindeki gerilim düşümü yüzdesi ile anılırlar, %3 empedanslı reaktör, %5 empedanslı reaktör gibi. Yaygın olarak %3, %4, %5 reaktörleri kullanılır. Reaktörler basit bir gerilim bölücü olarak görev yaparlar. Şekil 5.7'de A-B noktası arasında bağlanmış olan bu hat reaktörü sayesinde komutasyon çentikleri empedanslar üzerinde bölünecektir. Çentik derinliği

$$\text{Çentik derinliği} = (L_1 + L_2) / (L_1 + L_2 + L_3) \text{ olacaktır.} \quad (39)$$

L_3 Hat reaktörü empedansı, $L_1 + L_2$ empedansları toplamına eşit olur ise komutasyon çentikleri %50 azalacaktır. Hat reaktör empedansı büyük ise, çentik genişliği artacaktır. Çentik genişliğinin artması istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle azami %5 reaktör kullanılır. Tecrübeler göstermiştir ki, en optimum çözüm %3 reaktörle sağlanmalıdır. % olara reaktör empedansı aşağıdaki formül ile hesaplanır :

$$\% \text{ Reaktör empedansı} = 100X \sqrt{3} X 2\pi f L x I_1 / U_n \quad (40)$$

I_1 = Temel frekans akımı

U_n = Nominal gerilim

Bu reaktörler, komutasyon darbelerinin (notches) şebekeye geçişini azaltmaya ve ani darbe akımlarını sınırlandırmaya ilave olarak toplam akım distorsiyonunda da azaltma sağlarlar. Çizelge 7 de 6 darbeli redresör yük için çeşitli reaktör empedanslarında sağlanan distorsiyon oranları gösterilmiştir :

Çizelge 7 Hat reaktörü empedansı ve THD-I

Harmonik No	INPUT IMPEDANCE						
	0.50%	1%	1.5%	2%	2.5%	3%	5%
5th	0.8	0.6	0.5	0.46	0.42	0.4	0.32
7th	0.6	0.37	0.3	0.22	0.2	0.16	0.12
11th	0.18	0.12	0.1	0.09	0.08	0.073	0.058
13th	0.1	0.075	0.06	0.058	0.05	0.049	0.039
17th	0.073	0.052	0.04	0.036	0.032	0.03	0.022
19th	0.06	0.042	0.03	0.028	0.025	0.022	0.008
%THD-I	102.5	72.2	59.6	52.3	47.6	44.13	34.96

8. HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE HARMONİK STANDARTLARI

Harmonik distorsiyonu olarak anılan ve enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile giderek artış göstermektedir. Bu distorsiyonun sonucu oluşan olumsuzlukların giderilmesi bakımından harmonik sınırlamanın yapılması gereği ortaya çıkmıştır. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelere sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir. [11], [15]

Son yıllarda ülkemizde yarı-iletken kontrol elemanlarının hızla yaygınlaşması ark fırınlarının kullanıldığı demir-çelik tesislerindeki kapasite artırımları vb. dikkate alındığında, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, gerek akımlar ve gerekse gerilimler için THD, TTD ve HD değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerleri standartlaştırmak önemli yararlar sağlar. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması, sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması, sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi bakımından son derece gereklidir.

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin daha da artacağı göz önüne alınarak, nonlineer yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı nonlineer yük, bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece üç ve üçün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca mümkün olduğu kadar tüketicilerin konverter kullanımında ekonomik kriterler de dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren yüksek darbe sayılı konverterleri tercih etmesi teşvik edilmelidir.

8.1 Harmonikle Bozulmanın Ölçütü

Standartlarda harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar: Toplam harmonik distorsiyonu (THD), tekil harmonik distorsiyonu (HD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD)'dur. Toplam harmonik distorsiyonuna ait ifade eşitlik 6.1'de verilmiştir. THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu büyüklük, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun mükemmel bir sinüs dalga formundan sapmasını tespit etmek için kullanılır. Temel frekansta saf sinüs dalga formu için THD sıfırdır. Benzer şekilde, tekil harmonik distorsiyonu, eşitlik (41)'de tanımlanmıştır. Harmonik bozulma ile ilgili diğer bir kavram, çekilen yük akımları için tanımlanan ve "IEEE Standart 519" uygulamasında özellikle belirtilen "toplam talep distorsiyonu" kavramıdır. Buna ait ifade eşitlik (41)'de verilmiştir.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (41)$$

Elektrik devrelerinin temel büyüklükleri olan gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri harmonik distorsiyona bağlı olarak şu şekilde ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100}\right)^2} \quad (42)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100}\right)^2} \quad (43)$$

Buradaki V_1 ve I_1 , gerilimin ve akımın efektif değer olarak temel bileşenidir. Görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri harmonik bileşenlerin artması ile artış göstermektedir. Akımın artışı ile sistemdeki kayıp güç değeri de artış gösterecektir. Şekil 6.1'de akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi, Şekil 6.2'de ise kayıp gücün (P_K) toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi görülmektedir.

Şekil 21 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 =sabit)

Şekil 22 Sistemdeki kayıp gücün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 , R =sabit)

8.2 Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak maksadıyla iki ayrı yöntem vardır: Bunlardan birincisi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission, IEC) tarafından da tercih edilen herhangi bir nonlineer yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise (IEEE tarafından benimsenen) birden fazla nonlineer yükün beslendiği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

IEC tarafından ön görülen sınırlamanın mantığında, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de

sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlama için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça farklı olmaktadır. IEEE tarafından ön görülen değerler, hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görünmektedir.

8.3 Yaklaşık İnceleme

Halpin ve Burch harmonik sınırlandırma çalışmalarını ve harmonik seviyelerinin yaklaşık incelenmesini şu şekilde vermişlerdir.

Uygulamada tam bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç göstermeyen küçük güçlü tüketicilerin söz konusu olduğu pek çok durumda karşılaşılmaktadır. Böyle bir durumda, tam ve detaylı bir harmonik analiz gerçekleştirilmesi zorunlu değildir. Küçük tüketiciler için genel olarak “yaklaşık inceleme” adı verilen kriter yeterli olmakta ve daha geniş kapsamlı bir analiz yapılması ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Böyle durumlarda, harmonik limitlerine uygunluk, ortak kuplaj noktasında (özel bir tüketiciyi besleyen ve bir başka tüketicinin bağlanması söz konusu olan besleme sistemindeki bir nokta) detaylı analizlerin yapılmasına gerek olmaksızın kontrol edilebilir. Bunun için gerek ve yeter koşul, kısa devre gücünün ortak kuplaj noktasından beslenen nonlineer yüklerin, görünür güçlerinin toplamından çok daha büyük olmasıdır. Aşağıda harmonik limitlerine uygunluğun yaklaşık olarak kabul edilmesi gereken dört temel adım özetlenmiştir:

1.Adım: Ortak kuplaj noktasındaki kısa devre gücünün (S_K) belirlenmesi,

2.Adım: Beslenen nonlineer yükün türünün ve boyutunun belirlenmesi,

3.Adım: $S_{DW} = \sum_i S_{Di} \cdot W_i$

değerinin hesaplanması. Burada, SD_i İ'inci nonlineer yükün görünür gücü ve W_i ise ağırlık faktörüdür.

4.Adım: $N = \frac{S_{DW}}{S_K} \times 100$

Eşitliği sonucunda $N < 0.1$ şartı sağlanıyorsa harmonik limitlerine uygunluk yaklaşık olarak kabul edilebilir.

Çeşitli nonlineer yükler için W_i ağırlık faktörleri Tablo 6.1'de verilmiştir. Genelde, daha fazla distorsiyonlu harmonik akımları üreten nonlineer yükler için ağırlık faktörünün değeri daha büyük olmalıdır.

Çizelge 8 Harmonik sınırlarına uygunluğun yaklaşık incelemesinde kullanılan ağırlık faktörleri

Yük Tipi	Ağırlık Faktörü (W_i)
Tek fazlı güç kaynağı	2.5

Yarı kontrollü doğrultucu	2.5
6 darbeli konverter (kondansatörle filtre edilmiş ve seri endüktans yok)	2.0
6 darbeli konverter (kondansatörle filtre edilmiş ve seri endüktans >%3 veya DC sürücülü)	1.0
6 darbeli konverter (akımı filtrelemek için büyük endüktans kullanılması durumunda)	0.8
12 darbeli konverter	0.5
AC Gerilim Regülatörü	0.7
Flouresant Lamba	0.5

Şekil 23 Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem

Örneğin, Şekil 23'deki sistem için 150 kVA'lık 6 darbeli konverter (endüktanssız) ve 300 kVA'lık 6 darbeli konverter (%3 endüktanslı) ve $S_K''=28000$ Kva için N değeri hesaplanacak olursa,

$$N = \frac{S_{DW}}{S_K''} = \frac{(150 \times 2) + (300 \times 1)}{28000} \times 100 = \% 2.14$$

elde edilir. Hesaplanmış olan % 2.14 değerinin sınır değer olan % 0.1 değerinden büyük olması harmonik limitlerine uygunluğun tamamen olanaksız olduğu anlamına gelmez. Bununla birlikte, % 2.14 değerinin yaklaşık uygunluk kabulü kriterinin sağlanması için yeterince küçük olmaması, harmonik limitlerinin aşılabacağı olasılığını güçlendirmektedir. Bu limitin aşılabacağını kesin olarak söylemeden önce, ortak kuplaj noktasındaki harmonik akım ve gerilimlerinin gerçek karakteristiklerinin belirlenmesi amacıyla detaylı bir harmonik analizin yapılması zorunludur. % 0.1 sınır değerine çok yakın değerler için bile harmonik limitlerin aşılması söz konusu olabilmektedir. Bu durumda ele alınan yük veya yükler tarafından üretilen harmonik frekanslarında, sistemde rezonans olaylarının meydana gelmesi olasıdır.

8.4 Harmonik Standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlinear yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadırlar.

IEEE-519 ve VDE-0839'da endüstriyel kullanıcılarla birlikte elektrik üretim ve dağıtımıyla ilgili harmonik standartlar içermektedir. Bu standartlarda, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşene oranları verilmiştir.

Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlanmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9 Çeşitli Ülkelerin Harmonik Standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1.5
	115≤ Özel	8
	2.4-69 115≤	1.5
Almanya	Tüm Gerilimler (15.harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım 33≥	5
	İletim 22,33,66	3
	110≤	1.5
Finlandiya	1	5
	3-20	4
	30-45	3
	110	1.5
Fransa	Tüm Gerilimler	1.6
İngiltere	0.415	5
	6.6-11	4
	33-66	3
	132	1.5
İsveç	0.43/0.25	4
	3.3-24	3
	84≥	1

IEC-555, elektronik ev aletleri donanımı ile ilgili harmonik standartları içerir. Bu standartta, cihazların sınıflandırılmasına göre akım harmoniklerinin kabul edilebilir seviyesi verilmiştir.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınıflandırmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000-2-2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir (Tablo 6.3). Yine IEC tarafından endüstri için 2.sınıf olarak verilen IEC 61000-2-4'deki sınır değerler Tablo 6.4'de görülmektedir.

Çizelge 10 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥29	k				

$$(k=0,2+12,5/n)$$

Çizelge 11 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2.sınıf elemanlar)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
N	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥29	k				

$$(k=0,2+12,5/n)$$

IEC 61000-2-4, 3.sınıf olarak endüstriyel tesislere ait iç alan bağlantı noktalarındaki harmonik gerilim yüzdelerinin sınır değerleri Çizelge 12 'de verilmiştir.

Çizelge 12 Endüstriyel santraller için IEC 61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf elemanlar)

Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
N	%V _n	n	%V _n	N	%V _n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥27	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥29	m				

$$(m=5\sqrt{11/n})$$

Avrupa standartları EN 50160'da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir, bu değerler alçak gerilim şebekesi için Çizelge13a'da orta gerilim şebekesi için Çizelge13 b'de görülmektedir.

Çizelge 13 Konutlarla ilgili (a) alçak ve (b) orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

(a)

Alçak Gerilim Şebekesi (≤1 kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

(b)

Orta Gerilim Şebekesi (1 kV < V < 35 kV)					
Tek Harmonikler		Çift Harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	%V _n	n	%V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

IEC tarafından cihaz giriş akımı faz başına 16 A ve altında olan alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlar için belirtilen D sınıfı cihazlar için kabul edilebilen en büyük harmonik akım değerleri IEC 61000-3-2 (1905-03)'de verilmiştir (Çizelge 14). Bu değerler 220 V'un altındaki gerilimli sistemler için henüz uygulanmamaktadır. Ayrıca IEC/TS 61000-3-4 (1998-10)'daki teknik rapor, 16 A'in üstündeki akım değerlerine sahip alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanacak şu donanımlarla ilgilidir:

- Nominal gerilimi 240 V'a kadar, tek fazlı, iki veya üç telli
- Nominal gerilimi 600 V'a kadar, üç fazlı, üç veya dört telli
- Nominal freansı 50 Hz veya 60Hz olan sistemler

Çizelge 14 D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları

N	3	5	7	9	11	13	15...39
Max I _n	2,3	1,14	0,77	0,40	0,33	0,21	0,15..15/n
Faz başına donanım giriş akımı ≤ 16 A							

IEC –1000-2.2 ise alçak gerilim şebekeleriyle ilgilidir. Gerilimde bulunan harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları için sınır değerler oluşturulmuştur.

IEEE'nin harmonik sınır standartları Çizelge 15-16'da verilmiştir. Bu tablolarda; I_k, sistemin kısa devre akımını, I_L, yüke ait maksimum talep akımını (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TTD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir (TTD değeri, temel bileşen akımının yerine I_L akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır).

Çizelge 15 IEEE'nin Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınırları

Bara gerilimi (V _n)	Tekil harmonik Büyüklüğü (%)	(Toplam Harmonik Distorsiyonu) THD _{V_n} (%)
V _n ≤ 69 kV	3.0	5.0
69 < V _n ≤ 161 kV	1.5	2.5
V _n > 161 kV	1.0	1.5

Transformatör akımındaki harmonikler IEEE C 57.1200-1987 tarafından %5 olarak sınırlandırılmıştır.

Ülkemiz açısından harmonik standart değerlerine bakıldığında bu konuda sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş TS 9882 nolu "Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar" adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektriksel donanımlar, pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir (portatif) aletler, ışık kısıcılar ile radyo ve televizyon alıcılarıdır. TS 9882 standardı, ev ve benzeri yerlerdeki bu elektrik donanımının besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metodları ile ilgilidir.

Çizelge 16 IEEE'nin Genel Dağıtım Sistemlerine ait akım için Harmonik Distorsiyon Sınırları

$V_n \leq 69 \text{ Kv}$						
I_k''/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TTD (%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.5	0.22	4.0

9. HARMONİKLERİN FİLTRELENMESİ VE FİLTRE TASARIMI

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarıma yönelik alınacak tedbirler yeterli değildir. Bu tedbirlere ilave olarak harmonik akımların şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “Harmonik Filtresi” adı verilir. [5]

9.1 Filtrelerin Görevi

Harmonik filtrelerin amacı bir yada daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini yani harmonik seviyesini azaltmak veya yok etmektir. Genelde en etkin harmonik bileşenler için tasarım yapılır. Etkisi az olan harmonik bileşenler için zayıflatan bir filtre devresi düşünülebilir. Gerçekte filtre kullanımının nedeni hem teknik ve hem de ekonomiktir. Filtrelerle, harmoniklerin meydana getirdikleri etkiler sonucu karşımıza çıkan teknik ve ekonomik olumsuzlukların giderilmesi hedeflenir. Harmonik filtrelerin görevi,

- Harmonik üreten bir cihazdan (örneğin bir redresörden veya inverterden) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek,
- AC sistemine enjekte edilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek,
- Radyo frekans girişimlerini elimine etmek, şeklinde özetlenebilir.

9.2 Filtrelerin Çeşitleri

İşlevi bakımından filtreler ikiye ayrılır:

1. Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu “pasif filtreler”.
2. Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu “aktif filtreler”.

Devreye bağlanması bakımından da seri ve paralel filtreler olmak üzere ikiye ayrılır.

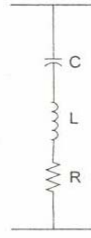
9.2.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör (C) ve endüktansın (L) bileşimidir. Bazı durumlarda omik direnç (R) de ilave edilebilir.

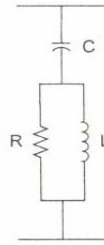
Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gereklidir.

Pasif filtreler endüktif ve kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan frekansa ayarlanabilir. Kalite faktörü Q, ayar keskinliğini belirlemektedir. Q faktörüne bağlı olarak; filtreler ya yüksek Q ya da düşük Q tipindedirler. Q değeri, yüksek Q tipi filtrelerde 30 ile 60 arasında değerler alırken, düşük Q tipi filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler almaktadır.

Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek mertebeli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25’de verilmiştir.



Şekil 24 Tek ayarlı filtre devresi



Şekil 25 İkinci mertebe sönümlü filtre devresi

Q kalite faktörü,
$$Q = X_r / R \quad (46)$$
 olarak tanımlanır. Bu ifade de, X_r rezonans frekansındaki reaktansı (kondansatörün veya endüktansın) ve R filtrenin direncini göstermektedir.

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde ise ayar keskinliği ifadesi,

$$Q = R / X_r \quad (47)$$

şeklinde dir. Arrillaga tarafından, bir filtrenin anma ayar frekansından uzaklaşması, ayar sapma faktörü δ ile tanımlanır ve filtrenin ayarlandığı açılal frekansı ω_n olmak üzere;

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (48)$$

olarak belirlenir. Bu faktör, temel frekanstaki değişimlere, filtre ömrü ve sıcaklığının neden olduğu kondansatör kapasitesi ve endüktansdaki değişimlere, yapım toleransı ve Q için öngörülen ayar aralığının neden olduğu etkilere göre değişmektedir.

Yukarıda belirtilen (48) ifadesi,

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (49)$$

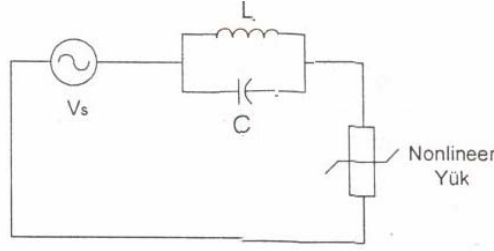
olarak da yazılabilir. Burada, Δf , AC şebeke frekansındaki sapmayı, ΔL ve ΔC ise, ayarlı filtrenin L (bobin) ve C (kondansatör) değerindeki sapmayı (örneğin çevre sıcaklığından dolayı değerlerinin değişmesi gibi) gösterir. Arrillaga tarafından bobin sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.01, kondansatör sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.05, frekans toleransı \pm %1 ve çevre sıcaklığı \pm 20 $^{\circ}\text{C}$ alınması durumunda δ , 0.016 olarak elde edilmiştir.

9.2.1.1 Seri Filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımlarının akması engellenebilir. Amaç sadece özel bir frekanstaki işareti güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girmesini önlemek olduğunda, seri filtre kullanılır.

Seri filtreler, harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler (Şekil 7.3). Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için, sadece o ayarlı frekans bileşenine yüksek empedans gösterir.

Seri filtreler, bir fazlı sistemde 3. harmoniğin baskın olduğu 1 fazlı uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük dezavantajı, devrede seri olarak bulduklarından tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur. Bu da şönt filtreye nazaran avantajıdır.



Şekil 26 Devrede seri filtrenin kullanımı

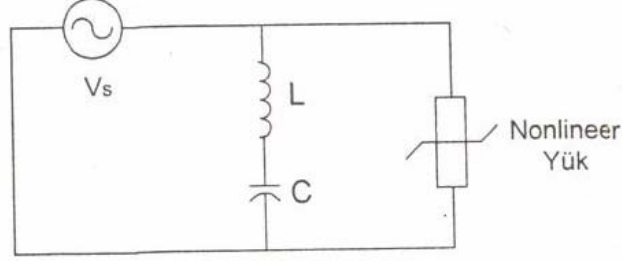
9.2.1.2 Şönt Filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir paralel (şönt) yol yardımıyla toprak seviyesine akıtılarak sistem içinde dolaşımı engellenebilir.

Seri filtrelerin maliyetinin yüksek olması ve şönt filtrelerin temel frekansta reaktif güç ihtiyacını karşılaması, şönt filtrelerin tercih edilmesine neden olur. En yaygın şönt filtreler, tek ayarlı ve yüksek geçiren filtrelerdir. Bu iki özellikli filtre tasarımı en kolay ve en ucuz olandır.

Şönt filtreler harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerle amaç, düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların filtre üzerinden geçmesini sağlamaktır. Bu nedenle şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanırlar. Ayrıca şönt filtreler temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılırlar. Bu yönüyle ekonomiklik sağlarken buna karşılık paralel filtreler, hangi anma değeri gerekiyorsa ona göre tasarlanabilirler. Ayrıca paralel filtreler, temel frekansta reaktif güç üretebilirler ve daha ekonomiktirler. En önemli özellikleri de tasarımlarının kolay olmasıdır. Bu yüzden güç sistemlerinde harmonik frekanslı akımlara düşük empedanslı bir yol sağlayan paralel filtreler kullanılır. Tek tek veya birleştirilmiş seri veya paralel filtreler, her frekans için ayrı bir filtre devresi gerektirmesi nedeniyle oldukça pahalıdır. Şönt filtre de, seri filtre gibi sadece ayarlı frekansında veya ayarlı frekans civarında etkilidir.

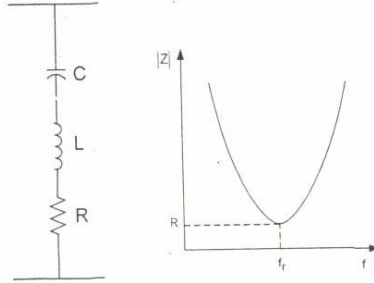
Şönt filtre kullanımının en büyük sakıncası güç sistemiyle rezonansa girmesidir. Filtre bileşenleri mevcut şebeke empedansı ile birbirini etkileyerek rezonansı gerçekleştirirler. Bundan dolayı, ayarlı bir şönt filtrenin dizaynı ve uygulaması için bu filtrenin uygulanacağı mevcut güç sistem şebekesinin ayrıntılı bir analizi gerekmektedir. Şönt filtrelerin yerleşimi de çok önemlidir. Merkezi bir yerleşim, rezonans durumunda daha büyük bir zarara sebep olur. Her ne kadar rezonans problemi dikkate alınarak şönt filtrenin tasarımı yapılsa da, gelecekte elektrik şebekesinde olabilecek herhangi bir büyüme ve değişme sistemin değerlerini değiştirecek ve yeni bir yerleşim ve tasarımı gerektirecektir.



Şekil 27 Devrede şönt filtrenin kullanımı

9.2.1.2.1 Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtreler, düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanstaki harmonik akımının bastırılmasını sağlarlar. Bu işlemi genellikle tek bir frekans değeri için yaparlar. Tek ayarlı filtreler, seri RLC devresinden meydana gelmektedir (Şekil 28).



Şekil 28 Tek ayarlı filtre devresi

Tek ayarlı filtre için ω açılal frekansındaki filtre empedansı Z_f şu şekilde verilir.

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (50)$$

filtre empedansını filtre parametrelerine bağlı olarak elde etmede aşağıdaki bağlantılardan yararlanılarak bu bağıntılarda X_r rezonans anındaki reaktans değerini göstermektedir.

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (51)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (52)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_r} = \frac{1}{\omega_n RQ} \quad (53)$$

$$L = \frac{X_r}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n} \quad (54)$$

kullanılarak Arrillaga tarafından empedans için

$$Z_f = R \cdot \left[1 + jQ\delta \cdot \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right] \quad (55)$$

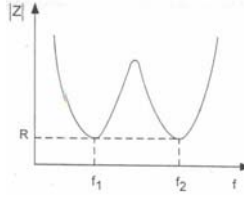
eşitliği verilmiş olup δ 'nin değerinin 1'e göre çok küçük olmasından sonuçta,

$$Z_f = R (1 + j2Q\delta) = X_r(Q^{-1} + j2\delta) \quad (56)$$

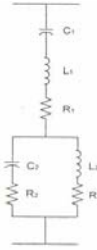
şeklinde verilmiştir. Burada X_r rezonans anındaki reaktansı göstermektedir.

9.2.1.2.2 Çift Ayarlı Filtre

Çift Ayarlı Filtreler adından da anlaşılacağı gibi iki ayrı frekansa ayarlı olup ayarlandıkları bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu frekanstaki harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlarlar (Şekil 29). Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının azlığı, bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Bundan başka endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün darbe gerilimlerini denetim altına alırlar.



Şekil 29 Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi

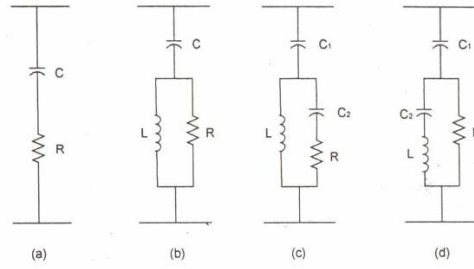


Şekil 30 Çift ayarlı filtre

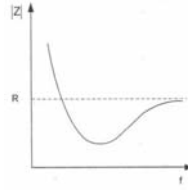
9.2.1.2.3 Sönümlü Filtreler

Yüksek mertebeli harmoniklerin süzülmesinde belirli frekanstan sonra empedansı düşük değerler gösteren filtrelerin kullanımı uygun olmaktadır. Bu nedenle gösterdikleri özellikler nedeniyle filtreler kendi aralarında sınıflandırılabilir.

Sönümlü filtreler yüksek dereceli harmonik bileşenlerini (örneğin 17 ve üzeri) filtrelemek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak anılırlar, bu durumda yüksek frekansa küçük empedans gösterirken düşük frekanslara yüksek empedans gösterirler. Sönümlü filtrelerin kalite faktörleri 0,5 ile 5 aralığında olup düşük değerdedir. Genellikle ayarlandıkları frekans, rezonans frekansından düşüktür. Örneğin, 11 yerine 10.7, 17 yerine 16.5 gibi seçilir. Şekil 31'de sönümlü birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri verilmiştir.



Şekil 31 Sönümlü filtreler a)birinci derece b)ikinci derece c)üçüncü derece d) tipi



Şekil 32 Sönümlü filtrenin frekans-empedans değişimi

Karşılaştırıldığında her filtrenin avantajı farklılıklar göstermektedir. Birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansta aşırı kayıplara sahip olup büyük bir kapasite gerektirdiklerinden yaygın olarak kullanılmaz. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlar, fakat üçüncü dereceden filtrelere göre daha yüksek temel frekans kayıpları gösterirler. Üçüncü dereceden sönümlü filtrelerin ikinci dereceye göre temel üstünlüğü, C_2 kapasitesinin neden olduğu frekansta empedans artmasından dolayı, temel frekans kaybına neden olmasıdır. C tipi filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü dereceden filtrelerin arasında yer almakta olup, temel frekans kayıplarının azlığı önemli bir avantaj sağlar.

Düşük mertebeli harmonikler için sönümlü filtrelerin kullanımı ekonomik olmamakla beraber bu filtrelerin başlıca üstünlükleri şu şekilde ifade edilebilir:

- Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme sırasında ısı değişimine daha az duyarlıdır. Frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır.
- Artan anahtarlama ve bakım sorunları bakımından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.
- İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada tek ayarlı bir filtreden daha etkilidir.

9.2.2 Aktif Filtreler

Aktif filtreler, harmoniklerin ortadan kaldırılması için geliştirilmiş elemanlardır. Günümüzde kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan aktif filtre düşüncesinin temelleri Bird vd. (1969) tarafından atılmış, daha sonra Ametani (1972) tarafından geliştirilmiştir. Gelişen güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 1980'li yılların başlarından itibaren kullanımı pratik bir değer kazanmış ve endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu filtreler, ileri güç elektroniği temellerine dayanırlar ve pasif filtrelerden çok daha pahalıdırlar.

Harmoniklerin filtrenmesi için pasif filtrelerin kullanılmasında karşılaşılan en önemli iki problem, bunların mevcut dağıtım şemasına özel olması sebebiyle mevcut dağıtıma ekler gelmesi veya yüklerin artması durumunda ilk yatırımı geçersiz kılması ve sisteme montajlarının oldukça zor olmasıdır. Aktif filtreler ise pasif filtreler göre pahalı olmakla birlikte aynı anda birden fazla harmonik frekansı için adreslenebilir ve enerjinin kalitesini etkileyen problemleri ortadan kaldıracırlar. Yine aktif filtreler mevcut dağıtımda değişiklikler yapıldığı zaman bile etkili harmonik kompanzasyonuna devam ederler ki bu onların en önemli üstünlükleridir.

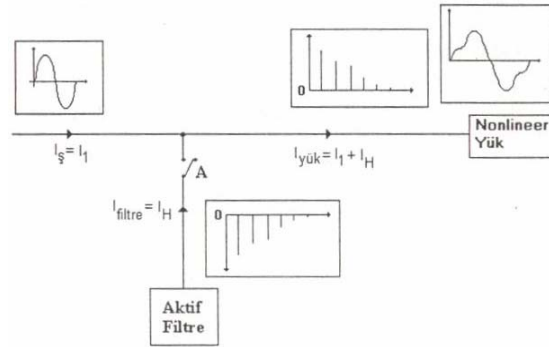
Aktif filtrenin çalışma prensibi nonlineer yükün çekeceği, temel bileşen dışındaki akımı karşılamaktır. Buna göre aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederek harmonik bileşenleri uygun bir fazda yüke enjekte ederler.

Nonlineer yük şebekeye bağlandığında I_s şebeke akımını çeker. Nonsinüsoidal olan bu akımın içerisinde temel bileşen yanında harmonik bileşen akımları da vardır.

$$I_s = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H \quad (57)$$

harmonik bileşen akımlarını sağlayan bir eleman olması durumunda şebekeden sadece temel bileşen akımı çekilir. Aktif filtreler nonlineer yükün çektiği harmonik akımları sağlarlar. Aktif

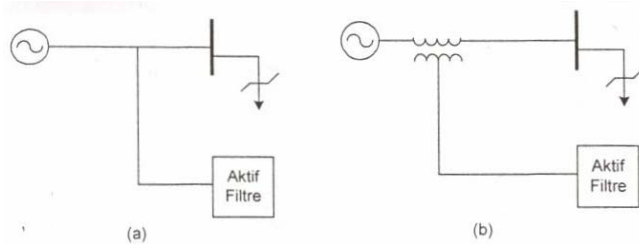
filtre akımı için $I_f = I_H$ yazılabilir. Böylece şebeke akımı sinüsoidal bir akım olur (Şekil 33).



Şekil 33 Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi.

Sonuç olarak, aktif filtreler harmonik bileşenlerin şebekeden çekilmemesine neden olurlar.

Aktif filtreleri harmonik giderme işlemi devreye iki şekilde bağlanarak sağlarlar. Bu bakımdan aktif filtreler şönt (Şekil 34a) ve seri (Şekil 34b) olarak ikiye ayrılabilir. Günümüzde yaygın kullanılan, şönt tipi aktif filtredir. Şönt aktif filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak da çalışabilmektedir. Ancak bu durumda frekans domeninde kompanzasyon paylaşımı konusunda problem çıkabilmektedir.



Şekil 34 Aktif filtrenin şematik gösterimi a) Şönt b) Seri

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli değişimlerdeki davranışı Çizelge 17’de verilmiştir.

Çizelge 17 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Filtrenin ayarlandığı Frekans	Bir veya iki frekansa Ayarlıdır	Birden fazla frekansa ayarlanabilir
Harmonik değerlerinde Değişme	Yeni filtre gerektirir	Problem çıkarmaz
Empedansın etkisi	Rezonans meydana gelebilir	Etkilemez
Temel frekans değişmesi	Etkinliğini azaltır	Etkilemez
Akım yükselmesi	Problem çıkabilir	Aşırı yüklenme yaşanmaz
Harmonik sırasının Kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün

10. TARTIŞMA VE SONUÇ

10.1 Yapılan Harmonik Ölçümü

Tez çalışmasında yapılan araştırmalar sonucunda konu ile ilgili Adana Fruko Meşrubat Sanayi LTD. ŞTİ Üretim Tesislerinde ve Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hattı Ceyhan deniz terminali sisteminde yükleme iskelesinde bulunan alçak gerilim transformatör dağıtım merkezinde aşağıdaki ölçümler elde edilmiştir.

YER : Fruko Meşrubat Sanayi LTD. ŞTİ Üretim Tesisleri ADANA

FABRİKADAKİ TOPLAM TRAFÖ GÜCÜ : 3 ADET 31,5 kV / 2500 kVA ve 31,5 kV/1250 kVA

TOPLAM : 9750 kVA TRAFÖ GÜCÜ

ÖLÇÜM YAPILAN TRAFÖ : 31,5/0,4-0,231 kV/1250 kVA TRAFÖ

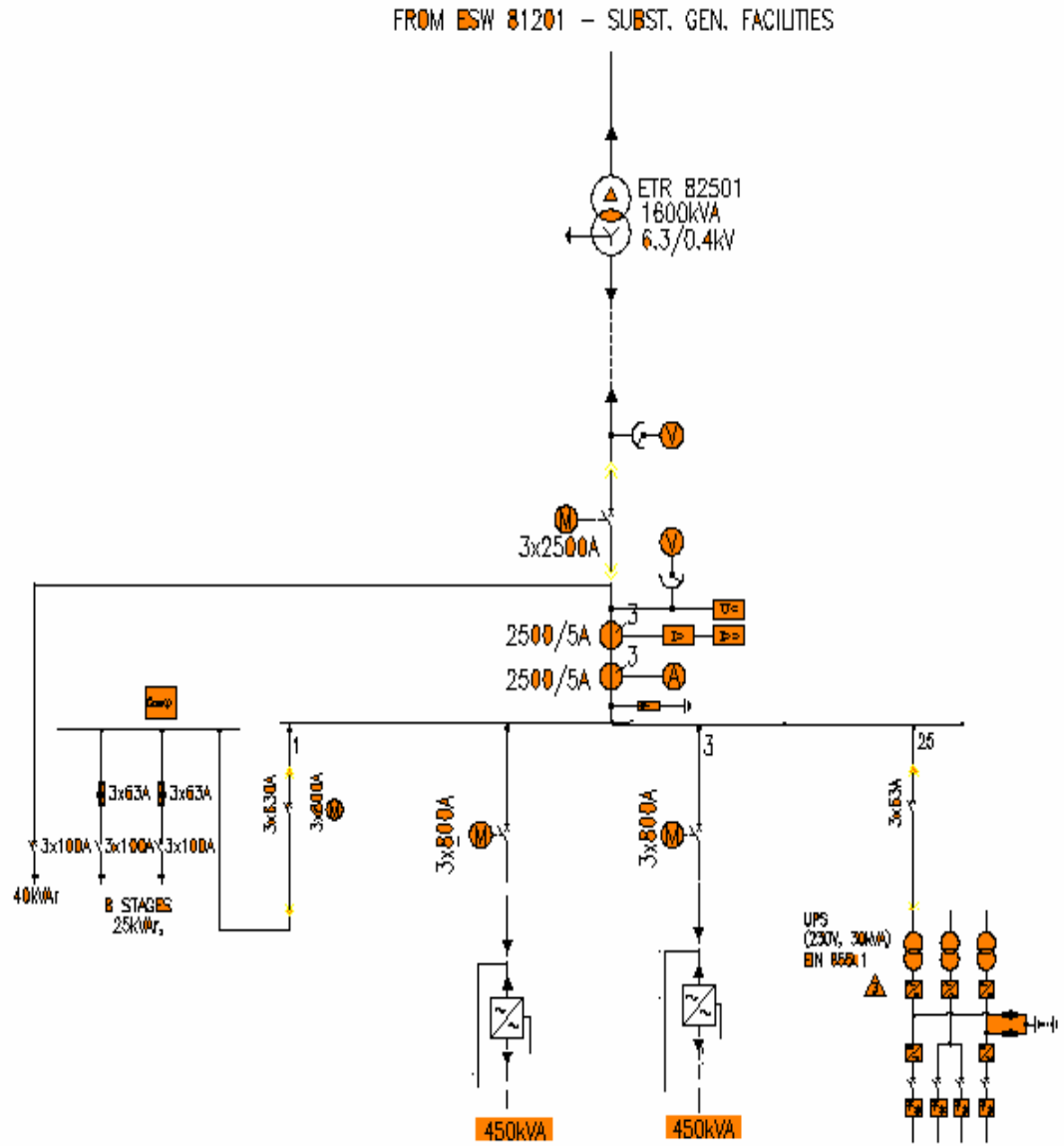
YÜKLER : 315 kW Kompresör motoru , 400kW Pet Şişe makinesi, 25 kW Bilgisayar Sistemi Beslemeleri

KULLANILAN ÖLÇÜM CİHAZI : ENTES MPR63 ŞEBEKE ANALİZÖRÜ

TESBİTLERİM :

- 1- Harmonik ürettiği bilinen bilgisayar ve UPS'ler için ölçüm yapılarak öncelikle durum tespiti yapılmıştır.
- 2- Trafonun ana çıkış panosunun baralarına 3 adet 400V 200/5A değerinde akım trafosu bağlanarak MPR63 cihazı bağlanmıştır.
- 3- Cihazın ayarları sisteme uygun olarak yapılarak daha sonra sistem enerjilendirilmiş ve Harmonik menüsünden (Cihaz 31. Harmoniğe kadar okuma yapabilmektedir) kaçınıcı harmoniğin oluştuğunu ve değeri okunarak tespit yapılmıştır.
- 4- MPR63 cihazının harmonik menüsünden 5.harmonik oluştuğu tespit edilmiş ve bunun toplam değerinin akım için %0,75 , gerilim için %1 mertebesinde olduğu okunmuştur. Bu ölçümler yapılırken kompanzasyon sistemi devre dışı bırakılmıştır.
- 5- Varlığı daha önce tespit edilen bu durum için kompanzasyon sisteminde önlem olarak reaktörlü kondansatörlerin kullanıldığı tespit edilmiştir.
- 6- Reaktörlü kompanzasyon sistemi devreye alındıktan sonra tekrar MPR63cihazından yapılan okumada harmoniklere rastlanmamıştır.

10.2 Harmoniklerin varlığının tespiti



Şekil 35 Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hattı Ceyhan deniz terminali sisteminde yükleme iskelesinde bulunan alçak gerilim transformator dağıtım merkezi

Şekil 35’de görülen sistem Bakü-Tiflis-Ceyhan ham petrol boru hattı Ceyhan deniz terminali sisteminde yükleme iskelesinde bulunan alçak gerilim transformator dağıtım merkezidir.

Sistemde V.O.C sisteminde bulunan kompresörlerin tahriki için 450kVA gücünde frekans konvertörleri ile 30 kVA gücünde UPS kullanılacaktır.

Freakans konvertörleri ile UPS e ait inverterlerin 6, 12 ,24 darbeleri kullanımına göre harmoniklerin sistem üzerinde etkileri incelenecektir

10.2.1 Harmoniklerin varlığının tespiti

Söz konusu sistemlere ait harmonik miktarları(a harmonik katsayıları)

6 darbeleri harmonik bastırıcı bobinsiz

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	63%	54%	10%	6,1%	6,7%	4,8%

6 darbeleri harmonik bastırıcı bobinli

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	30%	12%	8,9%	5,6%	4,4%	4,1%

12 darbeleri polikon transformatorlu

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	11%	5,8%	6,2%	4,7%	1,7%	1,4%

12 darbeleri çift toroidal transformator

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	3,6%	2,6%	7,5%	5,2%	1,2%	1,3%

24 darbeleri 2 adet 3 sargılı transformatorlu

Temel frekans	5 th	7 th	11 th	13 th	17 th	19 th
100%	4,0%	2,7%	1,0%	0,7%	1,4%	1,4%

İncelemede frekans konvertörü ile UPS in inverterinin 6 darbeleri ve harmonik bastırıcı bobinsiz olduğu ele alınarak sistemdeki harmonik etkileri incelenecektir.

1. 6 darbeleri reaktör bobinsiz sistemin devre de olması durumunda kompanzasyon sistemi incelenecektir

Harmonik üreten sistemlerin toplam gücü

$$S = S_F + S_{UPS} = 450kVA + 30kVA = 480kVA$$

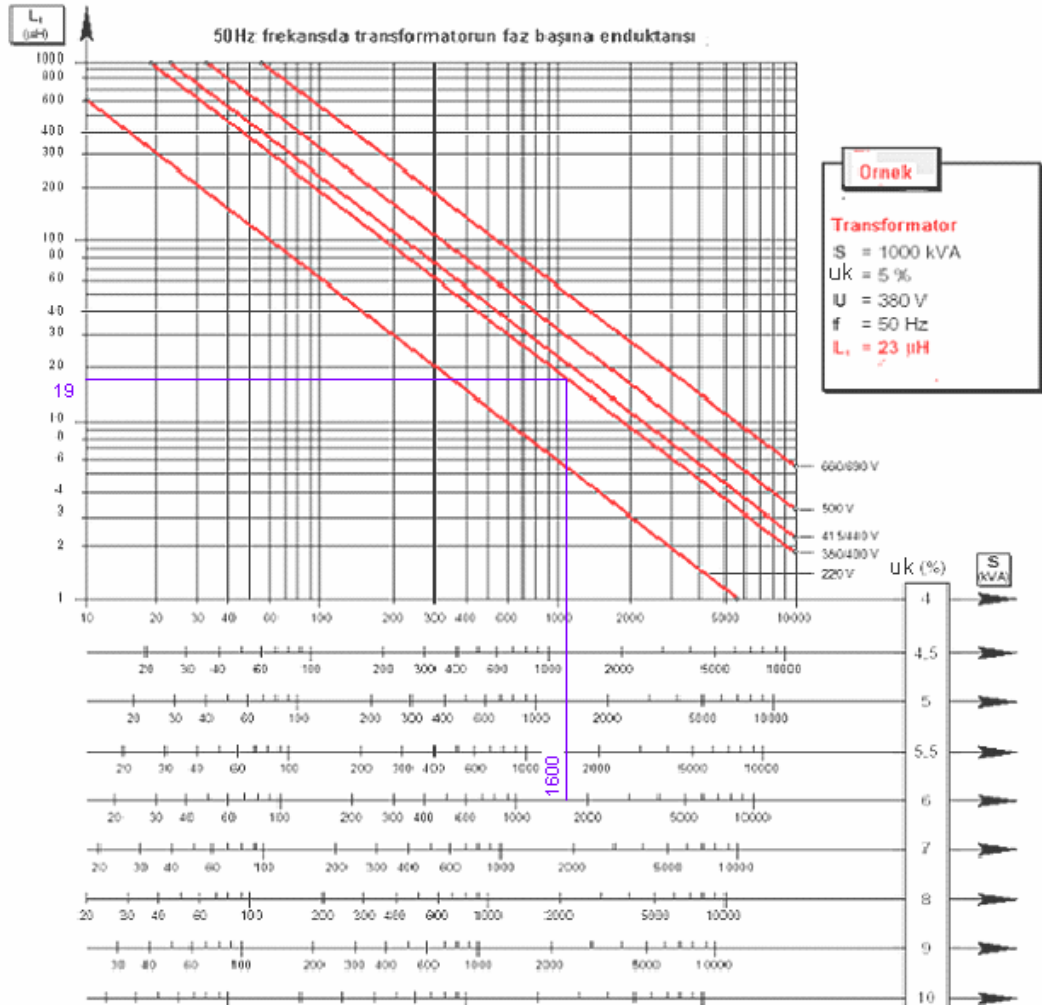
Çekilen akım

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{480 \cdot 1000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 693A$$

400 V baralardaki kısa devre gücü 1600 kVA transformatorun kısa devre gücüne eşittir.

$$S_k'' = \frac{S_T}{u_k} = \frac{1600}{0,06} = 26666kVA$$

Transformatorun endüktansı Çizelge 18 den $L_t=19$ mikro Henry



Çizelge 18 50 Hz şebeke frekansında transformatörün faz başına endüktansı

Transformatorun 50 Hz şebeke frekansında reaktansı

$$X_T = 2\pi f L_t = 314.19 \times 19 = 5966 \mu\Omega \approx 6m\Omega$$

95 mm² ana bağlantı iletkeninin endüktansı $0,47 \mu H / m$ hat uzunluğu 5m olduğu kabul edilirse bağlantı iletkeninin 50Hz frekansında reaktansı

$$X_H = 314.5 \times 0,47 = 738 \mu\Omega = 0,74m\Omega$$

Kompanzasyon tesisine ait Kesicinin endüktansı Şekil 11 ve 12 den $0,5 \mu H$

50 Hz de kesicinin reaktansı $X_K = 314.0,5 = 157 \mu\Omega = 0,157m\Omega$

$$I_{C1} = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} \approx 345A$$

Kompanzasyon tesisine kadar toplam şebeke reaktansı $X_{L1} = 6 + 0,74 + 0,15 \approx 6,9m\Omega$

Kompanzasyon grubunun kapasitif reaktansı $X_{C1} = \frac{U_N}{Q_C} = \frac{(0,4)^2}{0,240} \approx 0,67\Omega$

Kompanzasyon grubunun çektiği akım

$$I_{C1} = \frac{Q_C}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{U_N}{\sqrt{3} \cdot X_C} \approx 345A$$

Harmonik akımları

$$5.\text{harmonik akımı } I_5 = \frac{I}{\nu} \cdot a = \frac{693}{5} \cdot 0,63 \approx 87A$$

$$7.\text{harmonik akımı } I_7 = \frac{693}{7} \cdot 0,54 \approx 53A$$

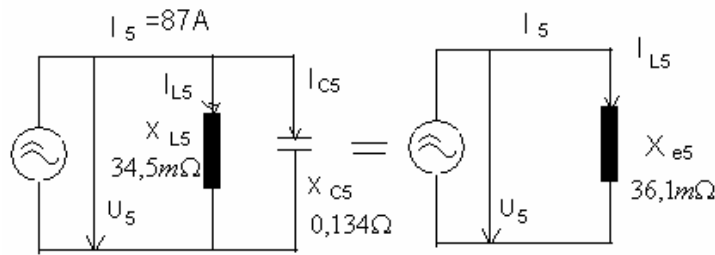
$$11.\text{harmonik akımı } I_{11} = \frac{693}{11} \cdot 0,1 \approx 6A$$

$$13.\text{harmonik akımı } I_{13} = \frac{693}{13} \cdot 0,061 \approx 4A$$

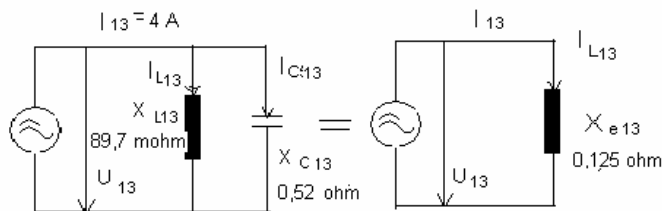
Diğer harmonik etkileri kayda değer bir büyüklük veremeyeceğinden göz ardı edilecektir

5.harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı $X_{L5} = \nu \cdot X_L = 5 \cdot 6,9 = 34,5m\Omega$

5. harmonikte kapasitif reaktans $X_{C5} = \frac{X_C}{\nu} = \frac{0,67}{5} = 0,134\Omega$



Şekil 36. harmonik için paralel titreşim devresi



Şekil 37 Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e5} = \frac{1}{\frac{1}{34,5 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,134}} \approx 36, m\Omega$$

Gerilimin 5. harmoniğinin efektif değeri $U_5 = I_5 \cdot X_{e5} = 87,0,0465 \approx 4,04V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{\frac{U_N}{\sqrt{3}}} = \frac{4,04}{400/\sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,6 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 5.harmonik akım

$$I_{C5} = \frac{U_5}{X_{C5}} = \frac{4,04}{0,134} \approx 30,4A$$

$$\text{ve şebekeye verilen akım } I_{L5} = \frac{U_5}{X_{L5}} = \frac{4,04}{34,5 \cdot 10^{-3}} \approx 117A$$

$$I_5 = I_{L5} - I_{C5} = 117 - 30 = 87A$$

$X_{L5} \neq X_{C5}$ olduğundan 5. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 25 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3} = 0,1725\Omega \text{ olursa , veya}$$

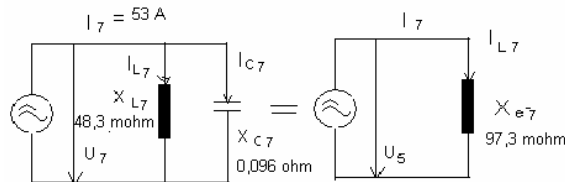
$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{0,1725} \approx 0,927MVAR = 927kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 5. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

$$7.\text{harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı } X_{L7} = v \cdot X_L = 7 \cdot 6,9 = 48,3m\Omega$$

$$7.\text{ harmonikte kapasitif reaktans } X_{C7} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{7} = 0,096 \Omega$$



Şekil 38 7. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e7} = \frac{1}{\frac{1}{48,3 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,096}} \approx 97,3m\Omega$$

Gerilimin 7. harmoniğinin efektif değeri $U_7 = I_7 \cdot X_{e7} = 53.0,0973 \approx 5,16V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_7 = \frac{U_7}{\frac{U_N}{\sqrt{3}}} = \frac{5,16}{400/\sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%2,23 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 7.harmonik akım

$$I_{C7} = \frac{U_7}{X_{C7}} = \frac{5,16}{0,096} \approx 53,8A$$

$$\text{ve şebekeye verilen akım } I_{L5} = \frac{U_5}{X_{L5}} = \frac{5,16}{48,3 \cdot 10^{-3}} \approx 106,8A$$

$$I_7 = I_{L7} - I_{C7} = 106,8 - 53,8 = 53A$$

$X_{L7} \neq X_{C7}$ olduğundan 7. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 121.6,9 \cdot 10^{-3} = 0,835\Omega \text{ olursa , veya}$$

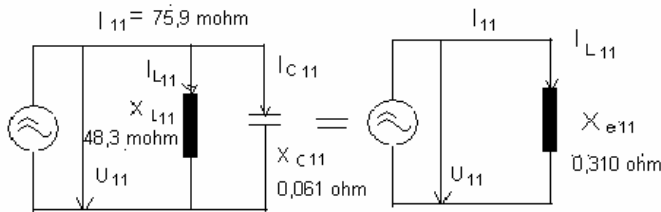
$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{Cr}} = \frac{(0,4)^2}{0,835} \approx 0,192MVAR = 192kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 11. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

$$11.\text{harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı } X_{L11} = v \cdot X_L = 11.6,9 = 75,9m\Omega$$

$$11. \text{ harmonikte kapasitif reaktans } X_{C11} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{11} = 0,061\Omega$$



Şekil 39: 11. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e11} = \frac{1}{\frac{1}{75,9 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,061}} \approx -0,310\Omega$$

Gerilimin 11. harmoniğinin efektif değeri $U_{11} = I_{11} \cdot X_{e11} = 6.0,310 \approx 1,86V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{U_N / \sqrt{3}} = \frac{1,86}{400 / \sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,81 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 11.harmonik akım

$$I_{C11} = \frac{U_{11}}{X_{C11}} = \frac{1,86}{0,061} \approx 30,5A$$

ve şebekeye verilen akım $I_{L11} = \frac{U_{11}}{X_{L11}} = \frac{1,86}{75,9 \cdot 10^{-3}} \approx 24,5A$

$$I_{11} = I_{L11} - I_{C11} = 30,5 - 24,5 = 6A$$

$X_{L11} \neq X_{C11}$ olduğundan 11. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = v^2 \cdot X_{L1} = 25 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3} = 0,1725\Omega \text{ olursa , veya}$$

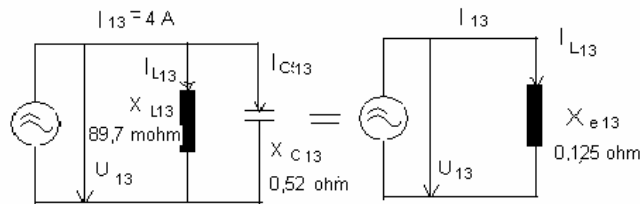
$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{0,1725} \approx 0,927MVAR = 927kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda meydana}$$

gelir.

Sonuç 11. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

13.harmonik mertebesinde şebekenin reaktansı $X_{L13} = v \cdot X_L = 13 \cdot 6,9 = 89,7m\Omega$

13. harmonikte kapasitif reaktans $X_{C13} = \frac{X_C}{v} = \frac{0,67}{13} = 0,052\Omega$



Şekil 40: 13. harmonik için paralel titreşim devresi

Paralel reaktansla kapasitif reaktansa ait eşdeğer reaktans

$$X_{e11} = \frac{1}{\frac{1}{89,7 \cdot 10^{-3}} - \frac{1}{0,052}} \approx -0,125\Omega$$

Gerilimin 13. harmoniğinin efektif değeri $U_{13} = I_{13} \cdot X_{e13} = 4.0,125 \approx 0,51V$ olacaktır bu ise bara geriliminin

$$u_5 = \frac{U_5}{\frac{U_N}{\sqrt{3}}} = \frac{0,5}{400/\sqrt{3}} \cdot 100 \approx \%0,22 \text{ olacaktır}$$

Kondansatörün 13.harmonik akım

$$I_{C13} = \frac{U_{B3}}{X_{C13}} = \frac{0,5}{0,125} \approx 40A$$

ve şebekeye verilen akım $I_{L13} = \frac{U_{13}}{X_{L13}} = \frac{4,04}{89,7 \cdot 10^{-3}} \approx 44A$

$$I_{13} = I_{L13} - I_{C13} = 44 - 40 = 4A$$

$X_{L5} \neq X_{C5}$ olduğundan 13. harmonikte rezonans söz konusu değildir.

Burada

$$X_{C1} = \nu^2 \cdot X_{L1} = 169 \cdot 6,9 \cdot 10^{-3} = 1,166\Omega \text{ olursa , veya}$$

$$Q_{Cr} = \frac{U_N^2}{X_{C1r}} = \frac{(0,4)^2}{1,166} \approx 0,137MVAR = 137kVAR \text{ gücündeki kompanzasyonda}$$

meydana gelir.

Sonuç 13. harmonikte rezonans olayı meydana gelmez.

Kondansatörün çektiği toplam akım

$$I_C = \sqrt{\sum I_{Cv}^2} = \sqrt{345^2 + 30^2 + 54^2 + 30^2 + 40^2} \approx 354 = 1,03 \cdot I_{C1}$$

Bulunan değer uygundur.

Transformatorun söz konusu harmonik üretici cihazlar tarafından yüklenmesi

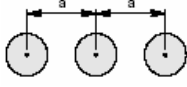
$$I_L = \sqrt{693^2 + 87^2 + 53^2 + 6^2 + 4^2} = 700A$$

10.3 SONUÇLAR

Sistemde oluşan harmoniklerin tespitine göre seçilen filtreye göre Kompanzasyon Guruplarının devbreye alınması halinde Sistemde 40 kVAR sabit grup 25 kVAR gücünden oluşan 8 ayrı kademe vardır. En fazla devreye girme akımının meydana geleceği son kadememin devreye girme anındaki darbe akımını 3000 A değerinde olması istenmektedir. Buna göre devreye sokulması gereken endüktansın değeri ve gerekli bobinin sarım sayısı bulunacaktır.Olması gereken en düşük endüktans

$$L_{\min} = \left(\frac{k_1^2 \cdot (n-1)^2}{I^2 \cdot n^2} \cdot Q_n \right) - L_t = \left(\frac{1475^2 \cdot (9-1)^2}{3000^2 \cdot 9^2} \cdot 240 \right) - 19 \approx 40 \mu H$$

bulunur. Kondansatörlerin kademelerinin bağlantısı için 16mm² kesitinde iletken kullanıldığında



iletken tertibinde a=10cm ve kablo dış çapı d=1,05 cm (tablo2)

Şekilden 40 mikro henry değerinde ilave endüktans elde edebilmek için kablo dış çapının 20 katı büyüklüğünde silindir üzerine 15 sarım yapılacağı bulunur

Devreye girme akımları (40kVAR sabit grubun üzerine sıra ile 25 kVAR grupların sıra ile devreye girmesi halinde)

$$I_1 = 1475 \cdot \frac{2-1}{2} \cdot \sqrt{\frac{65}{40+6,9}} \approx 867 A$$

$$I_2 = 1475 \cdot \frac{3-1}{3} \cdot \sqrt{\frac{90}{40+6,9}} \approx 1360 A$$

$$I_3 = 1475 \cdot \frac{4-1}{4} \cdot \sqrt{\frac{115}{40+6,9}} \approx 1730 A$$

$$I_4 = 1475 \cdot \frac{5-1}{5} \cdot \sqrt{\frac{140}{40+6,9}} \approx 2036 A$$

$$I_5 = 1475 \cdot \frac{6-1}{6} \cdot \sqrt{\frac{165}{40+6,9}} \approx 2303 A$$

$$I_6 = 1475 \cdot \frac{7-1}{7} \cdot \sqrt{\frac{190}{40+6,9}} \approx 2542 A$$

$$I_7 = 1475 \cdot \frac{8-1}{8} \cdot \sqrt{\frac{215}{40+6,9}} \approx 2760 A$$

$$I_8 = 1475 \cdot \frac{9-1}{9} \cdot \sqrt{\frac{240}{40+6,9}} \approx 2963 A$$

Alçak gerilim kesicilerinin magnetik ani açtırma eşik değerleri 3000 A üzerine ayarlanacaktır.

$$\text{Devrenin zaman sabitesi } T = \frac{L}{R} = \frac{46,9 \cdot 10^{-6}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 0,0345 sn$$

T=6T süresinde akım başlangıç değerinin %5 ine(2963x0,05=148A) düştüğünden sönme olayının süresi 207 msn dir.

İlave reaktans olmadığında songrubun devreye girmesi halinde

$$I_8 = 1475 \cdot \frac{9-1}{9} \cdot \sqrt{\frac{240}{6,9}} \approx 7732 A \text{ olacaktır}$$

$$\text{Devrenin zaman sabitesi } T = \frac{L}{R} = \frac{6,9 \cdot 10^{-6}}{1,36 \cdot 10^{-3}} = 0,0046 sn$$

T=6T süresinde akım başlangıç değerinin %5 ine(7732x0,05=386 A) düştüğünden sönme olayının süresi 28 msn dir.

Sonuç olarak bu sistemde harmonik oluşumunu engellemek için 6 darbeli reaktör bobinsiz harmonik filtresi kullanılmalıdır.

KAYNAKLAR

- 1- Prof.Dr.Celal Kocatepe, Yrd.Doç.Dr.Recep Yumurtacı, Arş.Gör.Yük.Müh.Arif Karataş ve Arş.Gör.Yük.Müh. Oktay Arıkan ,2003, Elektrik Tesislerinde HARmonikler, 1, İstanbul
- 2- Doç.Dr.Selahattin Küçük, 2005, Elektrik Tesislerinde Arızalar,1, İzmit
- 3- Elektrik Mühendisi Salih Çırık,2004, Elektrik Dağıtım sistemlerinde HARmonikler Elektrovar Seminer Notları, Ankara
- 4- Prof.Dr.Celal Kocatepe, Yrd.Doç.Dr.Nurettin Umurkan, Yrd.Doç.Dr. Ferit Atar, Yrd.Doç.Dr. Mehmet Uzunoğlu, Yrd.Doç.Dr. Recep Yumurtacı, Arş.Gör.Yük.Müh.Arif Karataş ve Arş.Gör.Yük.Müh. Oktay Arıkan,2006, Enerji Kslitesi ve Harmonikler Kurs Notları, İstanbul
- 5- Argın,M., Güç Sistem HARmonik Filtreleri, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi,2000
- 6- Chang,G.,Harmonics Theory, Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation, IEEE Power Engineering Society,1998
- 7- IEEE Standard 519-1992, Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, The Institute of Electical and Electronics Engineers,1993
- 8- Kocatepe, C., Karataş, A., Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki Etkileri, 1.Bölüm, 3e ELECTROTECH Dergisi, Sayı 86, Temmuz, s80-83,2001
- 9- Kocatepe, C., Karataş, A., Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki Etkileri, 2.Bölüm, 3e ELECTROTECH Dergisi, Sayı 87, Temmuz, s90-92,2001
- 10- Kocatepe, C.,Uzunoğlu, M., Elektrik Enerji Sistemlerinde HARmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler, KAYNAK Elektrik Dergisi, Sayı 148, Temmuz /Ağustos, s.126-131, 2001
- 11- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Elektrik Enerji Sistemlerinde Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları, KAYNAK Elektrik Dergisi, Sayı 150 , Ekim, s. 104-108, 2001
- 12- Yıldırım, d., Fuchs, E.F., (1999) , Mesarued Transformer Dreating and Comparision with Harmonic Loss Factor Approach, PE-084-PWRD-0-03-1999, IEEE
- 13- Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., Yumurtacı, R., ve Tanrıöven, M., Harmonics and Resonance Conditions in Thristor Controlled Reactors, ELECO'99, International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 1-5 December, 1999, Bursa
- 14- Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., Tristör Kontrollü Reaktör İçeren Statik VAR Kompanzatörler ve HARmonik Etkinliği, OTOMASYON Dergisi, Sayı 2001/9, s.96-100 , 2001

- 15- Uzunoglu, M., Kocatepe, C., Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Büyüklüklere Ait Tanımlar ve Kavramlar, KAYNAK Elektrik Dergisi, Sayı 145, s.108-110, 2001
- 16- DUGan, R.C., McGranaghan, M.F.; Beaty, H.W., Electrical Power Systems Qulaity, McGraw-Hill, 1996
- 17- Simens - Electrical Installation Handbook, John Willey & Sons Limited, Executive Editor : Günter G. Seip, 3rd Edition, Germany, 2000

ÖZGEÇMİŞ

1981 Yılında Sivas'ta doğdu. 2000 yılında Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik- Elektronik Mühendisliği Bölümünde Lisans Eğitimine başladı. 2003 yılında İkindilikle mezun oldu. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Eğitimine başladı. 2004 yılında TEDAŞ Yüklenicisi Baranlar Elektrik LTD. ŞTİ. Ve 2005 yılında Tedaş Yüklenicisi Elif Mühendislik A.Ş.'de Sorumlu Müdür Koordinatör Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak göreve başladı ve halen bu görevi sürdürmektedir.