

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA KULLANILAN
DOĞRULTUCULARIN OLUŞTURDUĞU AKIM
HARMONİKLERİNİN ANALİZİ**

Elektrik Mühendisi Oğuzhan AKGEYİK

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU

İSTANBUL, 2005

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iii
KISALTMA LİSTESİ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	v
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
2. HARMONİK TEORİSİ	4
2.1 Giriş	4
2.2 Fourier Serileri ve Analizi	4
2.3 Fourier Serisi	4
2.4 Fourier Analizi	6
2.5 Fourier Dönüşümü	7
2.6 Ayırık Fourier Dönüşümü	7
3. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT TANIMLAR VE KAVRAMLAR	9
3.1 Nonsinüsoidal Durumda Elektrik Büyüklükleri	9
3.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)	11
3.3 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)	12
3.4 Şekil(form) Faktörü	12
3.5 Tepe (Crest) Faktörü	12
3.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)	13
3.7 Transformatör K – Faktörü	13
3.8 Distorsiyon Güç Faktörü	14
4. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR	20
4.1 Harmonik Kaynakları	20
4.1.1 Konverterler	21
4.1.2 Transformatörler	24
4.1.3 Generatörler	24
4.1.4 Ark Fırınları	25
4.1.5 Gaz Deşarjlı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları	26
4.1.6 Statik VAR Kompanzatorlar	27
4.1.7 Fotovoltaik Sistemler	29
4.1.8 Bilgisayarlar	29

4.1.9	Elektronik Balastlar	29
5.	HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER	31
5.1	Giriş	31
5.2	Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler	32
5.2.1	Hatlar Üzerindeki Etkisi	32
5.2.2	Direnç Üzerindeki Etkisi	34
5.2.3	Reaktanslar Üzerindeki Etkisi	35
5.2.4	Kondansatörler.....	36
5.2.5	Motorlar ve Generatörler	37
5.2.6	Transformatörler	38
5.2.7	Enerji İletişim Sistemi	40
5.2.8	Devre Kesiciler ve Sigortalar	40
5.2.9	Aydınlatma Elemanları	41
5.2.10	Güç Faktörü	41
5.2.11	Röleler	42
5.2.12	Ölçü Aletleri	43
5.2.13	Elektronik Elemanlar	43
6.	HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE HARMONİK STANDARTLARI.....	45
6.1	Giriş	45
6.2	Harmonikle Bozulmanın Ölçütü.....	46
6.3	Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları	48
6.3.1	Yaklaşık İnceleme	48
6.4	Harmonik Standartları	50
7.	KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA KULLANILAN DOĞRULTUCU TİPLERİ	58
7.1	6 Darbeli Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi	58
7.2	12 Darbeli Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi	69
7.2.1	Dengesiz Giriş Hat Gerilimleri İle Beslenen 12 Darbeli Doğrultucularla Harmonik Azaltımı	69
7.2.2	DC Bara Modülasyonunu Kullanarak 12 Darbeli Doğrultucularda Harmonik Yok Edilmesi	76
7.3	IGBT Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi.....	81
8.	FARKLI DOĞRULTUCU TASARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI	84
8.1	Doğrultucu Tiplerinin Karşılaştırılması.....	87
8.2	Fabrikalarda Yapılan Ölçüm Sonuçları	90
8.2.1	Fabrika-1’de Güç Harmonik Analizörü İle Yapılan Ölçüm Sonuçları.....	90
8.2.2	Fabrika-2’de Güç Harmonik Analizörü İle Yapılan Ölçüm Sonuçları.....	95
9.	SONUÇLAR.....	101
	KAYNAKLAR.....	102
	ÖZGEÇMİŞ.....	104

SİMGE LİSTESİ

D	Distorsiyon gücü
GF	Güç Faktörü
H	Harmonik büyüklüğü
HD ₁	n. Harmonik mertebesindeki akım distorsiyonu
HD _v	n. Harmonik mertebesindeki gerilim distorsiyonu
h _{ω₀}	Peryodik fonksiyonun h. Harmoniği
I _n	n. Harmonik mertebesi için akımın efektif değeri
I _{r1}	Temel bileşen akımı
K	Transformatör K faktörü
K _f	Şekil Faktörü
P(t)	Ani güç
P _{eH}	Gerilim harmoniklerine bağlı ilave kayıplar
P _{fe1}	Sinüsoidal gerilimin meydana getirdiği demir kaybı
P _{k1}	Sinüsoidal akımın meydana getirdiği kayıp değeri
P _{kH}	İlave olan kayıplar
Q	Reaktif güç
Q _c	Kondansatörlerin toplam gücü
Q _n	Gerilime ait faz açısı
Q _s	Sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücü
R	Omik direnç
S _n	Akıma ait faz açısı
T	Fonksiyonun periyodu
TEF	Telefon Etkileşim Faktörü
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
V _n	n. Harmonik mertebesi için gerilimin efektif değeri
W ₁	Temel frekansa ait açısal frekans
X _c	Kapasitif reaktans
X _L	Endüktif reaktans
X _r	Temel frekanstaki reaktörün reaktansı
α	Tetikleme açısı
σ	İletim açısı
φ _h	Faz açısı

KISALTMA LİSTESİ

D	Distorsiyon Gücü
DF	Distorsiyon Faktörü (Distortion Factor)
DFT	Ayrık Fourier Dönüşümü (Discrete Fourier Transform)
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu (Total Harmonic Distortion)
TTD	Toplam Harmonik Distorsiyonu
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu (Total Demand Distortion)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1 Yıldız Bağlı Transformatör.	17
Şekil 4.1 Harmonik Üreten Elemanlar.	20
Şekil 4.2 Üç fazlı 6-darbeleri konverter (yarı kontrollü doğrultucu), a) Bağlantı şeması, b) Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli, c) Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli...	23
Şekil 4.3 Üç fazlı 12 darbeleri konverter (yarı kontrollü doğrultucu), a) Bağlantı şeması, b) Hat akımı dalga şekli	24
Şekil 4.4 Tristör kontrollü reaktörün, a) Temel elemanları, b) Gerilim ve akım dalga şekli	27
Şekil 4.5 TKR’de harmonik akımların maksimum genlikleri	28
Şekil 4.6 Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması	29
Şekil 5.1. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi.	33
Şekil 5.2 Omik direnci R olan hattın kaybı, a) Sinüsoidal akımlı durum, b) Nonsinüsoidal akımlı durum.	33
Şekil 5.3 Omik direncin frekansla artması (skin-effect), a) sinüsoidal akımlı durum, b) nonsinüsoidal akımlı durum.	35
Şekil 5.4 Bir kondansatör elemanının, a) Sinüsoidal beslenme hali, b) Nonsinüsoidal beslenme hali.	36
Şekil 5.5 Magnetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları, a) Sinüsoidal gerilimde, b) Nonsinüsoidal gerilimde.	39
Şekil 5.6 Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünü değişimi, a) Lineer yük durumu, b) Nonlineer yük durumu.	41
Şekil 6.1 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I_1 =sabit).....	47
Şekil 6.2 Sistemdeki kayıp gücün harmonik distorsiyonu ile değişimi ($I_1 \cdot R$ =sabit).	47
Şekil 6.3 Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem.	50
Şekil 7.1 İdeal Diktörge akım biçimi. Şekil 7.2 6darbeleri doğrultucu devre şeması.	59
Şekil 7.3 V_a gerilim değişiminin grafiği.	60
Şekil 7.4 100 derece faz kayması ile A faz geriliminin 5 Harmonik grafiği.	62
Şekil 7.5 3. Akım Harmoniğinin tek faz gerilimindeki değişiminin etkileri.	63
Şekil 7.6 Toplam Harmonik Distorsiyonun tek faz gerilim değişimindeki etkileri.	64
Şekil 7.7 Deneysel Test Ayarları.	65
Şekil 7.8 Bozulmuş kaynak altındaki ölçülen akımın dalga biçimi.	67
Şekil 7.10 Seri bağlı 2 adet 6 darbeleri sistemden oluşan 12 darbeleri sistem.	72
Şekil 7.11 Seri köprü bağlantısı kullanılarak standart 6 darbeleri sürücü ve Δ / Δ -Y trafodan	

oluşan 12 darbeli sistem.....	73
Şekil 7.12 Dengesiz Gerilim altında yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.	74
Şekil 7.13 %5 Hat Reaktörü ile beslenen 6 darbeli doğrultucunun yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.	75
Şekil 7.14 12 darbeli ve 6darbeli + Matrix Harmonik Filtresine ait doğrultucuların yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.....	76
Şekil 7.15 12 darbeli doğrultucuya ait devre şeması.	77
Şekil 7.16 Histerisiz tabanlı PWM modülatörün akım kontrolü için blok diyagramı.....	78
Şekil 7.17 Paralel bağlı 12 darbeli sistemin devre şeması.....	79
Şekil 7.18 Seri bağlı 12 darbeli sistemin 4 seviyeli topolojisine ait devre şeması.	79
Şekil 7.19 12 darbeli doğrultuculu devreye ait devre şeması.	80
Şekil 7.20 IGBT doğrultucuya ait devre şeması.....	82
Şekil 7.21 IGBT doğrultuculu kesintisiz güç kaynağına ait devre şeması.	82
Şekil 7.22 IGBT doğrultuculu kesintisiz güç kaynağının giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.82	
Şekil 7.23 IGBT doğrultuculu topolojiye ilişkin blok diyagram.....	83
Şekil 8.1 Kesintisiz Güç Kaynağı Devre Şeması.	84
Şekil 8.2 6 darbeli redresörün devre şeması Şekil 8.3 12 darbeli redresörün devre şeması Şekil 8.4 Igbt’li redresörün devre şeması.....	84
Şekil 8.5 6 darbeli doğrultucu devre şeması.....	87
Şekil 8.6 Şebeke akımının grafiği.	87
Şekil 8.7 12 darbeli doğrultucu devre şeması.....	88
Şekil 8.8 Şebeke akımının grafiği.	88
Şekil 8.9 IGBT doğrultuculu devre şeması.	89
Şekil 8.10 Şebeke akımının grafiği.	89
Şekil 8.3 Fabrika -1 Şebeke Geriliminin Grafiği.....	90
Şekil 8.4 Fabrika-1 Şebeke Akımının Grafiği.....	91
Şekil 8.5 Fabrika-1 Giriş Akım Toplam Harmonik Distorsiyon Grafiği.	92

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 Örnek 3.1'e ait harmonik gerilimleri.....	15
Çizelge 3.2 Örnek 3.2'ye ait akım oranları	16
Çizelge 3.3 Transformatördeki yük akımına ait harmonik bileşenleri	18
Çizelge 4.1 Magnetik balastlı bir flüoresant lamba akımının harmonik spectrumu.....	26
Çizelge 5.1 6-Darbeli Bir Konverterin Döner Makine Üzerindeki Harmonik Etkinliği.....	38
Çizelge 6.1 Harmonik sınırlarına uygunluğun incelenmesinde kullanılan ağırlık faktörleri ...	49
Çizelge 6.2 çeşitli ülkelerin harmonik standartları.....	51
Çizelge 6.3 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri.....	52
Çizelge 6.4 endüstriyel santraller için IEC 61000–2–4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2.sınıf elmanları).....	52
Çizelge 6.5 Endüstriyel santraller için IEC 61000–2–4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3.sınıf elemanlar)	53
Çizelge 6.6 Konularla ilgili (a) alçak ve (b) orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri.....	54
Çizelge 6.7 D sınıfı donanım için IEC 61000–3-2'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları.....	54
Çizelge 6.8 IEEE'nin Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınırları	55
Çizelge 6.9 IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları.....	56
Çizelge 6.10 Örnek 6.1'deki doğrultucu için harmonik akım değerleri.....	56
Çizelge 7.1 İdeal gerilim kaynağından elde edilen harmonik akımların tablosu.	65
Çizelge 7.2 Gerilim kaynağı harmonikleri	66
Çizelge 7.3 Bozulmuş gerilim kaynağı kullanılarak elde edilen akım harmonikleri.	68
Çizelge 7.4 Bozulmuş gerilim kaynağı kullanılarak simüle edilen akım harmonikleri.	68
Çizelge 8.1 Kesintisiz Güç Kaynaklarında Doğrultucu Tiplerine Göre Şebekeye Basılan Harmonik Değerleri.	85
Çizelge 8.2 Nonlineer Dengesiz Yüklerde IGBT Doğrultucu cihazın Şebekeye Bastığı Harmonik Değerleri.	86
Çizelge 8.3 Şebekeden Çekilen Akım-Gerilim Tablosu.	93
Çizelge 8.4 Sistemin Yüke Göre Şebekeye Bastığı Akım Harmonik Tablosu.	94
Çizelge 8.5 Şebekeden Çekilen Akım-Gerilim Tablosu.	98
Çizelge 8.6 Sistemin Yüke Göre Şebekeye Bastığı Akım Harmonik Tablosu.	99

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin sürekli, verimli ve problemsiz kullanılmasını hedefleyen çalışmalarda harmonikler çok etkili olmaktadır. Kalitenin büyük bir önem kazandığı günümüzde, kalite kriterlerinin belki de en önemlisi olan harmonikler bu çalışmada ele alınmış ve Kesintisiz Güç Kaynaklarının girişinde oluşan akım harmonik distorsiyon değerleri ve bu değerlerin sisteme olan etkileri ayrıntılı bir biçimde ele alınmıştır.

Bu tez çalışmasında Elektrik Enerji Sistemlerinde oluşan harmonikler hakkında bilgi verilip, daha sonra Kesintisiz Güç Kaynaklarının girişinde oluşan Akım Harmonik Distorsiyon değerlerinin analizleri yapılmıştır.

Çalışmalarım sırasında yakın ilgilerini gördüğüm, çalışmalarımı yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Asım KASAPOĞLU'na, tez çalışmam da bana her türlü desteği veren İnform Elektronik A.Ş.'ye ve her zaman çalışmalarına sabır ve hoşgörü ile destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Yapılan bu çalışmada bir güç elektroniği düzeni olan Kesintisiz Güç Kaynağı (KGK)'nın girişinde oluşan ve şebekeye verdiği akım harmoniklerinin analizleri yapılmış ve oluşan bu harmonikleri yok etmek için kullanılan metotlar anlatılmıştır. Kullanılan metodların birbirleri ile karşılaştırılması yapıp üstünlükleri anlatılmaya çalışılmıştır.

Kitabın giriş bölümünde yapılan işlerin kısa bir özetinin anlatılmasını müteakip 2.bölümde harmoniklerin teorik olarak incelenmesi yapılmış, 3.bölümde harmonikler ile ilgili tanımlara yer verilmiştir. Harmonik üreten elemanlar 4. bölümde, harmoniklerin meydana getirdiği etkiler 5.bölümde anlatılmıştır. Harmonikler ile ilgili standartlar 6.bölümle anlatılmıştır.

7. bölümde; harmonikler ile ilgili bilgilerin verilmesinin ardından Kesintisiz Güç Kaynaklarında giriş akım harmonik distorsiyonunu azaltmak için kullanılan metotlar ayrıntılı bir şekilde anlatılmıştır.

8. bölümde; kullanılan doğrultucu tiplerine göre, giriş akım harmonik değerlerine göre karşılaştırılmaları yapılmıştır. Ayrıca fabrikalarda power analizör ile yapılan ölçüm sonuçları ve bu sonuçların analizine göre önerilen Kesintisiz Güç Kaynaklarının şebekeye bastığı harmoniklerin durumu tablolar halinde belirtildi.

9. ve son bölümde sonuçlar ve öneriler belirtilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, Kesintisiz Güç Kaynakları ve Giriş Akım Harmonik Distorsiyonu.

ABSTRACT

In this study, the harmonics which are formed in the input of an Uninterruptible Power Supply (UPS) and given to the network were analyzed and also explained the methods which are used to destroy these harmonics. These methods are compared with each other and their superiorities are explained.

In the introduction section the whole study is summarized. In chapter 2, the harmonics are analyzed theoretically and in chapter 3, the definitions which are related to harmonics are given place.

The elements that are caused to harmonics are discussed in chapter 4 and the effects that are revealed by harmonics are also discussed in chapter 5. The standards which are related to harmonics are explained in chapter 6.

In chapter 7, after giving the information about the harmonics, the methods which are used for decreasing the input current harmonic distortion in uninterruptible power supplies are explained in detail.

In chapter 8, input current harmonic values are compared according to rectifier types that are used in the uninterruptible power supplies. Besides, the measurement results that were obtained by power analyzer in factories and the situation of harmonics that are given to network by proposed uninterruptible power supplies which are proposed according to these results are explained as tables.

In chapter 9 and in the last chapter conclusions and proposals are discussed.

Key Words: Harmonics, Uninterruptible Power Supplies and Input Current Harmonic Distortion.

1. GİRİŞ

Enerji kalitesinin büyük bir önem kazandığı günümüzde elektrik enerjisinin kalite kriterlerinden biri olan harmonikler bu çalışmada ele alınmış ve incelenmiştir. Güncel hayatta ve sanayide uygulama alanı bulan çeşitli güç elektroniği aygıtlarının şebekeye verdiği harmonik akımlar, şebekeye gereksiz yüklenmelere, enerji hattının ısınmasına, verimlilik kaybına vb. istenmeyen durumlara yol açmaktadır. Bu harmonik akımların ne kadar düşük olması sistemin verimli ve güvenilir çalışması için o kadar iyi bir durum oluşturmaktadır.

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

Harmonik distorsiyonu, enerji sisteminde ve enerji sistemine bağlanan elemanlar üzerinde olumsuz etkiler meydana getirir. Nonlinear yüklerin oluşturduğu harmonik akım bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olurlar. Harmonik gerilimler ise bu sisteme bağlı lineer ve nonlinear yükler üzerinden harmonik akımlar akıtırlar. Böylece, kendileri harmonik üretmeyen elemanlar harmonik kirlenmeye maruz kalabilirler. Kendileri harmonik kaynağı olmadığı halde harmonikli gerilimle beslenen bu elemanlar, harmonikler nedeniyle güç kalitesinin bozulmasıyla çeşitli olumsuzluklar yaşarlar.

Literatürde geniş bir yer tutan, harmoniklerle ilgili çalışma konularından birisi de sinüsoidal olmayan elektriksel büyüklüklerin bulunduğu sistemlerde akım, gerilim, güç bağıntıları ve bunların tanımlanması, fiziksel anlamların ifade edilmesidir. Bununla ilgili olarak IEEE çalışma komisyonu tarafından akımın distorsiyon gücü, gerilimin distorsiyon gücü, nonaktif güç ve nonreaktif güç vb. tanımlar yapılmış ancak bu kavramlar üzerinde tam bir fikir birliği sağlanamamıştır. Bu konuda son çalışmalarda lineer ve nonlinear elektrik devrelerinde güç ifadelerinin zaman domeninde tanımlandığı, üç fazlı sistemler için diğer yaklaşımlardan farklı görünür güç ifade ve tanımlarının önerildiği görülmektedir.

Harmoniklerle ilgili yapılan çalışmanın tamamı neredeyse elektrik enerjisinin kullanımına

yakın bir tarihten bu yana söz konusudur. Harmoniklerin meydana getirdiği enerji kirliliği sonucu yaşanan olumsuz etkilerin önlenmesi ancak bu konudaki çalışmalarla mümkündür. Kullanılan enerjinin kalitesi aynı zamanda gelişmişliğin de bir ölçütüdür. Enerji kalitesi üretimdeki kaliteyi artıran bir etkidir, bu yönüyle verimi artırıcı ve çevre sağlığını da olumlu etkileyen bir faktördür.

Güç Elektroniğindeki gelişmelerin yanı sıra güç elektroniği kontrolünü hızlı ve yüksek doğrulukla sağlayan özel işlemcilerin de katkıları ile KGK çıkış tarafındaki davranışları hem mükemmelleşmiş hem de bu KGK çözümleri yaygınlaşarak ucuzlamıştır. Modern tüm KGK üreticileri, müşterilerine standartlardan daha iyi bir KGK çıkış davranışı sunmaya çalışmaktadır.

Çıkış tarafında gittikçe mükemmelleşen durum, giriş tarafındaki davranışı için söylenemez. Tüm modern kuruluşlarda KGK giriş gücü, şebeke veya bir trafo üzerinden sağlandığı gibi uzun süreli enerji kesintilerinde de jeneratörden sağlanır. Ayrıca KGK gibi aynı noktadan enerjilerini alan aydınlatma, havalandırma, motor ve sürücüler de KGK ile aynı güç hattını paylaşırlar. Burada oluşan Non-linear davranış, hem çekilen akımın harmonikli olmasını hem de reaktif bileşenlerin büyük olmasına sebep olur.

Kesintisiz Güç Kaynakları kritik yükler ile enerji kaynağının arasına konan bir sistemdir. Kritik yüklere kaliteli ve sürekli enerjiyi sağlama sorumluluğu kadar girişinde de aynı şekilde kaliteli enerjiyi sağlamakla yükümlüdür. Aksi halde aynı noktayı paylaşan sistem ve düzeneklerin bozulmasına, aşırı kayıplara, aşırı büyük jeneratör kullanılmasına sebep olacaktır. Bu da girişteki güvenilirliğin ve verimliliğin daima düşük olmasını sağlayacaktır.

Bu nedenle ups üreticileri değişik teknolojiler kullanarak harmonikleri dünyada kabul edilebilir standartların altında tutmaktadır.

Harmonikler, akımın kullanılmayan buna karşın önemli güç kaybına neden olan parçasıdır. Dolayısı ile tesisin enerji girişi ile KGK arasında yer alan tüm taşıyıcı ve aktarıcı ünitelerde gerilim ve güç kaybına neden olacaktır. Kaybın artması ile birlikte enerji girişi ile KGK arasında yer alan tüm taşıyıcı ve aktarıcı ünitelerin güvenli çalışması için gereğinden daha büyük olarak boyutlandırılması gerekmektedir. Daha büyük trafo, daha kalın kablo gibi... Bu yapılmazsa enerji akışını sağlayan bu ünitelerde ciddi arıza potansiyelleri oluşur. Kayıpların artması ile gereken soğutma sistemi ile ilgili masraflar da artacaktır. Aynı noktaya bağlı aktif ve pasif yükler ve filtreler harmonikli akımın dolaşması ile bozulma riski ve rezonans tehlikesini artırmaktadır.

Girişinde non-lineer doğrultucu bulunan motor sürücülerde güç kaynağının oluşturduğu harmonikler ters etkiye bulunarak aşırı güç çekmelerine ve devreden çıkmalarına sebep olacaktır. Jeneratör ile çalışma ise çok kritik problemleri ortaya çıkartır. Harmonikli akımların etkisi enerji kaynağının kısa devre kapasitesi ile orantılıdır. Çok küçük iç empedansa sahip şebeke arayan bir dağıtım trafosu kullandığında KGK'nin gördüğü iç empedans % 4'e, bir jeneratör kullanıldığında ise % 16'ya yükselir. Dolayısı ile şebekeden sorunsuz çalışan bir güç kaynağı, jeneratörden çalıştığında bozulma en az 4–5 kat daha büyür. Bu da aynı yere bağlı diğer yüklerin bozulma ve devreden çıkma riskini, osilasyon olasılığını ve daha da önemlisi jeneratörün yanlış sıfır geçişler yada gerilim algılayıp çıkışını regüle edemeyip susmasına kadar giden büyük sorunlar yaratabilir. Bu sorunları gidermek için jeneratör oldukça büyük boyutlandırılır ya da güç kaynağı için gerekli kapasite büyür.

Sonuç olarak KGK sistemlerinde harmoniklerin elimine edilebilmesi ve dünya standartlarına getirilmesi için ya 12 darbeli ya da IGBT doğrultuculu UPS teknolojisi'ne sahip sistemler kullanılmalıdır. Güvenli çalışma ve uzun vadeli profesyonel çözümler isteniyorsa harmoniklerin etkileri ve parasal kayıpları göz ardı edilmemelidir.

2. HARMONİK TEORİSİ

2.1 Giriş

Analizlerin çoğunda güç sistemi, sabit genlik ve frekansa sahip sinusoidal gerilim kaynakları tarafından beslenen ve pasif elemanlardan meydana gelen lineer bir sistem olarak modellenir. Günümüzde güç elektroniği elemanlarının yaygın bir biçimde kullanımıyla, harmonik akımlarının önemli miktarı güç sistemlerine enjekte edilmektedir. Harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda güç sistem elemanları üzerinde de olumsuz etkilere neden olabilir. Sonuç olarak, harmonik çalışmalarına ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Harmonikler, genellikle güç sistemlerinde gerilim ve/veya akım dalga şekillerinin periyodik sürekli hal bozulmaları olarak tanımlanır. Harmonik çevre kirliliğinde, harmonik büyüklüklerle ilgili teori, temel frekans için tanımlanan büyüklüklerden farklı olarak tanımlanması gerekir.

Bu bölümde, temel harmonik teorisi sunulmuştur. Öncelikle, Fourier serileri ve analiz metotları gözden geçirilmiştir. Aynı zamanda, günümüzün harmonik ölçüm tekniklerinde kullanılan bazı temel Fourier dönüşümleri tanıtılacaktır. Bunlardan sonra, genel harmoniklerin teorisi, harmonik büyüklüklerin temel tanımları ve kavramları ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

2.2 Fourier Serileri ve Analizi

Fourier serilerinin teorisi ilk olarak, Fransız fizikçi ve matematikçisi Joseph Fourier tarafından 1882'de yayınlanan 'Analytic Theory of Heat' isimli makalesinde tanıtılmıştır. Teori, trigonometrik serilerin belirli tiplerinde rasgele fonksiyonların açılımlarını içermektedir. Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak göstermek, bu teori sayesinde temin edilmektedir. Bu seriler, zaman ve frekans bağlı fonksiyonlar arasında ilişki kurmaktadır. Günümüzde Fourier serileri, mühendisler ve bilim adamlarının çoğu uygulamaları için çok önemli gereksinimlerinden biri olmuştur.

2.3 Fourier Serisi

Periyodik bir fonksiyon

$$f(t) = f(t + T) \quad (2.1)$$

İle bütün t'ler için tanımlanabilir. Burada T fonksiyonun periyodudur. Eşitlik (2.1)'in her periyot için açılımı

$$f(t) = f(t + hT), h = 0, \pm 1, \pm 2 \quad (2.2)$$

biçiminde yazılabilir. f(t)'yi T periyotlu bir fonksiyon olarak ele alırsak, bu fonksiyon trigonometrik seriler olarak da gösterilebilir:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega_0 t) + b_h \sin(h\omega_0 t)\} \quad (2.3)$$

Burada $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ dir. Eşitlik (2.3)'deki gibi bir seri, trigonometrik Fourier serisi olarak adlandırılır ve şu şekilde

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} c_h \sin(h\omega_0 t + \phi_h) \quad (2.4)$$

olarak yeniden yazılabilir. Burada $c_0 = \frac{a_0}{2}$, $c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}$ ve $\phi_h = \tan^{-1} \left(\frac{a_h}{b_h} \right)$ dır.

(2.4) eşitliği göz önüne alındığında, bir periyodik fonksiyonun farklı frekanslı sinusoidal bileşenlerin bir toplamı olarak gösterilebildiğini görürüz. Buradaki $h\omega_0$ 'ın bileşeni, periyodik fonksiyonun h. harmoniği olarak adlandırılır ve h = 1 olduğunda bu bileşen, temel bileşendir. h ve ϕ_h sırasıyla, h. Harmonik büyüklüğü (genliği) ve faz açısı olarak bilinir.

Her harmoniğin büyüklüğü ve faz açısı f(t)'nin dalga şeklinin sonucundan belirlenir. Eşitlik (2.3), aynı zamanda kompleks formda da gösterilebilir

$$f(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_h e^{jh\omega_0 t}, h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.5)$$

$$c_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jh\omega_0 t} dt \quad (2.6)$$

Bir f(t) fonksiyonu çift fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = f(t) \quad (2.7)$$

ve f(t) fonksiyonu tek fonksiyon özelliğine sahipse

$$f(-t) = -f(t) \quad (2.8)$$

olur. Bir fonksiyon, orijinde düşey eksene göre simetrikse çift fonksiyon ve düşey eksene göre simetrik değilse tek fonksiyondur. T periyotlu bir fonksiyon, yan dalga simetrisine sahipse

$$f(-t) = -f(t \pm T/2) \quad (2.9)$$

şartını sağlar. Eğer $f(t)$ yarı dalga simetrisine sahip ve aynı zamanda tek veya çift fonksiyonsa, $f(t)$ fonksiyonu tek veya çift çeyrek dalga simetrisine sahiptir. Simetrilerin kullanımı Fourier analizini basitleştirmektedir.

2.4 Fourier Analizi

Eğer herhangi iki fonksiyon olan $\varphi_i(t)$ ve $\varphi_j(t)$ 'nin bütün gruplarının $(\varphi_h(t))$ kümesinde karşılıkları var ise, $\{\varphi_h(t)\}$ fonksiyonlarının bir kümesi $\alpha < t < \beta$ aralığında ortogonal olarak adlandırılır

$$\int_{\alpha}^{\beta} \varphi_i(t) \varphi_j(t) dt = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ \gamma, & i = j \end{cases} \quad (2.10)$$

burada γ sıfırdan farklı bir değerdir ve $(1, \cos\omega_0 t, \dots, \cos(h\omega_0 t), \dots, \sin\omega_0 t, \sin(h\omega_0 t), \dots)$, $-T/2 < t < T/2$ aralığında sinusoidal fonksiyonun ortogonal bir kümesi olarak gösterilebilir. Ortogonal ilişkiler kullanılarak, eşitlik (2.3)'teki Fourier katsayıları a_0 , a_h ve b_h sırasıyla,

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (2.11)$$

$$a_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(h\omega_0 t) dt \quad (2.12)$$

$$b_h = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \sin(h\omega_0 t) dt \quad (2.13)$$

eşittiklerinden belirlenebilir ($h = 1, 2, \dots$).

$\{\varphi_h(t)\}$ kompleks değerli fonksiyonların serisi için, $\varphi_i(t)$ 'nin eşleniği $\omega_j(t)$ olduğu zaman, (2.10) eşitliğinin sağlandığı görülebilir.

2.5 Fourier Dönüşümü

Bir $f(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.14)$$

biçiminde tanımlanır ve $f(t)$, $F(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü,

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (2.15)$$

olarak tanımlanır. (2.14) ve (2.15) eşitlikleri, genellikle Fourier dönüşüm çifti olarak adlandırılır ve bu eşitlikler, zaman veya frekansa bağlı olarak $(-\infty, \infty)$ aralığındaki herhangi bir fonksiyonu, ters domende sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için kullanılır. Fourier dönüşümünün anahtar özelliği, hem zamana hem de frekansa bağlı bir fonksiyonu veya dalga şeklini inceleme kabiliyetidir. Verilen bir fonksiyon iki eşdeğer gösterime sahip olabilir: biri zamana bağlı olanıdır ki bu $f(t)$ olarak adlandırılır ve diğeri frekansa bağlı olanıdır ki bu da $F(\omega)$ olarak adlandırılır. Eşitlik (2.14) zaman fonksiyonunu, frekans spektrumuna dönüştürür ve eşitlik (2.15) frekans spektrumunu tekrar zaman fonksiyonuna dönüştürür (Chang, 1998).

2.6 Ayırık Fourier Dönüşümü

Frekansa bağlı spektrumun ve zamana bağlı fonksiyonunun her ikisi de her periyotta N örnekleme ile periyodik örneklenmiş fonksiyonlar olduğu zaman, (2.14) ve (2.15) eşitlikleri ayırık Fourier dönüşüm (DFT) çifti olarak adlandırılıp, aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$F(k\Delta\Omega) = \sum f(n\Delta T) e^{-j2\pi kn / N} \quad (2.16)$$

$$F(n\Delta T) = \sum f(k\Delta\Omega) e^{-j2\pi kn / N} \quad (2.17)$$

Burada $k, n = 0, 1, \dots, N-1$, $\Delta\Omega = \frac{2\pi}{N\Delta T}$ ve $\Delta T = \frac{T}{N}$ Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman

fonksiyonu formunda daima elde edilebildiği için, bu DFT sık sık harmonik ölçümlerinde kullanılır. Örnekleme zaman fonksiyonu, sınırlı sürekliliğin sabit zaman aralıklarına ayrılan büyüklüklerin bir zaman serisi olarak gösterilir.

Fourier analizi, DFT'ler tarafından yapılabilir. Bu DFT'ler, sık sık hızlı Fourier dönüşümü (FFT) algoritmalarının kullanımıyla hesaplanabilir (Oppenheim ve Schaffer, 1989). FFT

teknikleri, çok büyük sayıda fonksiyonlar içeren (2.16) ve (2.17) eşitliklerinin DFT Hesaplamalarını yapmak için çok hızlı metotlardır. Harmonik analizlerinde kullanılan pek çok sayıda FFT algoritmaları vardır.

3. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERE AİT TANIMLAR VE KAVRAMLAR

Nonsinüsoidal büyüklüklerin güç sistemlerine olumsuz etkilerin giderilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi bakımından harmoniklerin analizi ve harmonik büyüklüklerin seviyesinin belirlenmesi gereği vardır.

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerin daha da artacağı göz önüne alınarak, nonlinear yükler içeren tesisler bu bakımdan daha kuruluş ve tasarım aşamasında, önceden tanımlanmış ve standartlaştırılmış harmonik büyüklüklere göre incelenmiştir. Bu bölümde harmoniklerle ilgili standartlarda ölçül olarak ele alınan çeşitli tanımlamalar ve kavramlar verilmiştir.

Genellikle güç sistem çalışmaları için tanımlanan elektrik büyüklükleri, sinüsoidal sürekli hal işletim için tanımlanmıştır. Ancak nonlinear elemanlardan dolayı harmonikler söz konusu olduğunda bu elektrik büyüklüklerin yeniden tanımlanmasına ihtiyaç vardır.

3.1 Nonsinüsoidal Durumda Elektrik Büyüklükleri

Güç sisteminde harmonik bileşenleri bulunan gerilim ve akımın ani değerleri Fourier seriler ile aşağıdaki biçiminde ifade edilir

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \Theta_n) \quad (3.1)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (3.2)$$

Burada v_n ve i_n , n harmonik gerilimin ve akımının ani değerleri olup, DC terimleri basitleştirme amacıyla ihmal edilmiştir. V_n ve I_n sırasıyla, n . Harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 ise temel frekansa ait açısal frekanstır. Θ_n ve δ_n ise sırasıyla n . Harmonik için gerilim ve akıma ait faz açısıdır.

Ani güç,

$$p(t) = V(t) I(t)$$

olarak ifade edilir ve $p(t)$ 'nin T periyodunda aktif gücü

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (3.4)$$

olarak verilir. Yukarıdaki eşitliklerden aktif güç

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\Theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (3.5)$$

olarak elde edilir. Farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce katkısı yoktur.(örneğin 3. harmonik gerilimle 5. harmonik akımın çarpımı). Harmonikler tarafından üretilen aktif güç genellikle, temel aktif güce oranla çok küçüktür. Ortogonal özellikler uygulandığında 3.1 ve 3.2 eşitliklerinde verilen harmonikli gerilim ve harmonikli akımın elektif değerleri sırasıyla,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (3.6)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.7)$$

olarak bulunur. Harmonikli gerilim ve akımın tepe değerlerinin(V_{mn} , I_{mn}) kullanılmasıyla elektif gerilim ve akım

$$V = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{V_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3.8)$$

$$I = \left[\sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_{mn}^2}{2} \right]^{1/2} \quad (3.9)$$

ifadeleri ile belirlenir. Görünen güç

$$S = V \cdot I \quad (3.10)$$

Burada D distorsiyon gücü

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{0.5}$$

eşitliği ile ifade edilir. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup sinüsoidal işaretli lineer devrelerde sıfırdır.

Araştırmacılar ve bilim adamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında hala bir birliktelik söz konusu değildir.

Reaktif güç,

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (3.13)$$

olarak verilir. Harmonikler olmadığı zaman görünen güç (Eşitlik 3.10), temel frekanstaki alışıl gelmiş görünen güç ifadesi olan $V_1 I_1$ 'e eşittir. Sinüsoidal halde, ortalama (aktif) ve reaktif güç ile görünen güç arasında

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2$$

eşitliği vardır. Buradaki $Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta_1 - \delta_1)$, denklemi temel bileşen $n=1$ için tanımlanan temel reaktif güç değeridir.

Güç faktörü kavramı, AC güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gerekir. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan durumlarla ayırt etmeksizin toplam güç faktörü

$$GF = P/S$$

olarak tanımlanır ve burada P ile gösterilen aktif güç (Eşitlik 3.5'de gösterildiği gibi) temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlere ait güçlerin toplanmasıyla bulunur.

3.2 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonik büyüklüklerin sınırlandırılması amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akım için sırasıyla

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3.16)$$

ifadesinden yararlanarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Toplam harmonik distorsiyonunun (gerilim için) diğer ifadeleri şöyledir:

$$THD = [\sqrt{V^2 - V_1^2}]^{0.5} / V_1$$

veya

$$THD=[(V/V_1)^2 - 1]^{0.5}$$

Benzer şekilde, n. Harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$HD_v = V_n / V_1 \text{ ve } HD_i = I_n / I_1$$

olarak tanımlanır.

3.3 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (3.20)$$

Burada I_L yük tarafından beslenme sisteminin ortak bağlantı noktasından edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır. TTD kavramı IEEE Standard 519 uygulamasında özellikle belirtilmiştir.

3.4 Şekil (Form) Faktörü

Şekil faktörü nonsinüsoidal bir dalga için,

$$K_f = \text{Efektif Değer} / \text{Ortalama Değer}$$

Olarak tanımlanır. Bozulmuş sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü verecek olan bu faktör sinüsoidal bir dalga için 1.11 değerine eşittir.

3.5 Tepe (Crest) Faktörü

Bu faktör, nonsinüsoidal akım veya gerilim tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit bi biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör,

Tepe faktörü = Tepe değer / Temel bileşenin Efektif Değeri eşitliği ile hesaplanır. Sinüsoidal bir dalga için bu değer, $2^{0.5}$ ' dir.

3.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Telefon Etkileşim Faktörü, elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanstaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Söz konusu bu büyüklük gerilim ve akım için matematiksel olarak;

$$TEF_V = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n V_n)^2}{V_{ef}^2} \quad \text{ve} \quad TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (3.23)$$

bağıntıları ile hesaplanır. Burada w_n , n'inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini hesaplara dahil eden bir katsayıdır.

3.7 Transformatör K – Faktörü

Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken Transformatör K-faktörü diğer bir deyişle, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır.

Nonlineer yükleri besleyen bir transformatör için K-faktörü

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (3.24)$$

olarak tanımlanır.

Transformatörün efektif akımına göre normlaştırıldığında, K-faktör değeri,

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot I_n)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{\left(\frac{I}{I_1} \right)^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2}{1 + THD_I^2} \quad (3.25)$$

şeklinde alır. Burada, I efektif akımı I_n , n. Harmonik bileşen akımını belirtmektedir.

Standard transformatörün anma değerindeki düşümünün hesaplanmasında, IEEE C57.110-1986'DA

$D = 1,15/(1+0.15K)$ eşitliği verilmiştir. Burada D , transformatör gücündeki azalmayı belirtmektedir. Yani, harmonikli akımla yüklenen transformatörün verebileceği en büyük güç değeri,

3.8 Distorsiyon Güç Faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri şu şekilde de ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100} \right)^2} \quad (3.28)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (3.29)$$

Aynı biçimde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonu değeriyle

$$Pf_{\text{toplaml}} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2}} \quad (3.30)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik aynı zamanda,

$$pf_{\text{toplaml}} = \cos(\theta_1 - \delta_1) \cdot pf_{\text{dist}}$$

ile de verilir. Burada ilk terim ($\cos(\theta_1 - \delta_1)$), kayma güç faktörü ve ikinci terim (pf_{dist}), distorsiyon güç faktörü olarak bilinir. Kayma güç faktörü, 1'den büyük olamayacağından her zaman

$$pf_{\text{toplaml}} \leq pf_{\text{dist}}$$

olacaktır. Görüldüğü gibi, yüksek akım distorsiyonlu tek faz nonlineer yükleri için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonansa neden olma ihtimalinden dolayı bu gib yükler için güç faktörü düzeltici kondansatörler gereklidir. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu ise, nonlineer yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır.

ÖRNEKLER :

Örnek 3.1

Harmonik bileşenlerine ait efektif değerleri Çizelge 3.1'd verilen nonsinüsoidal gerilim dalgasının efektif değerini ve toplam harmonik distorsiyonunu hesaplayınız.

Çizelge 3.1 Örnek 3.1'e ait harmonik gerilimleri

Frekans	Harmonik Bileşeni	Gerilim(V)
50	1	280
250	5	30
350	7	17
550	11	7
650	13	3

Çözümü:

Nonsinüsoidal gerilim efektif değeri Eşitlik 3.6'ya göre,

$$V = [280^2 + 30^2 + 17^2 + 7^2 + 3^2]^{0.5} = 282.22 \text{ [V]}$$

Olarak hesaplanır. Toplam harmonik distorsiyonu Eşitlik 3.16'ya göre,

$$\%THD = [30^2 + 17^2 + 7^2 + 3^2]^{0.5} * 100 / 280 = \%12.6$$

olarak elde edilir. Eşitlik 3.17'nin kullanılmasıyla

$$\%THD = [V^2 - V_1^2]^{0.5} * 100 / V_1 = [282.22^2 - 280^2]^{0.5} * 100 / 280 = \%12.6$$

bulunur. Eşitlik 3.18 ifadesinden

$$\%THD = [(V / V_1)^2 - 1]^{0.5} * 100 = [(282.22 / 280)^2 - 1]^{0.5} * 100 = \%12.6$$

hesaplanır. Görüldüğü gibi distorsiyon değerleri aynıdır.

Örnek 3.2

500 kVA gücünde, 400 V gerilimli, 3 fazlı, 6 darbeli doğrultucuya ait akım oranları yüzde I_n/I_1 olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir. Bu doğrultucunun,

- Harmonik akım değerlerini,
- Akımın efektif değerini,
- Akımın THD'sini hesaplayınız.

Çizelge 3.2 Örnek 3.2'ye ait akım oranları

Harmonik derecesi (n)	%I _n /I ₁
1	100
5	20
7	14.2
11	9.0
13	7.6
17	5.7
19	5.1
23	4.2
25	4.0

Çözümü:

Hat akımının temel bileşeni

$$I_L = 500000 / (3^{0.5} * 400) = 721.7 \text{ [A]}$$

Olarak bulunur. Çizelgedaki oranlardan harmonik bileşen akımlar

$$I_1 = 721.7 \text{ [A]}$$

$$I_5 = 0.2 * 721.7 = 144.34 \text{ [A]}$$

$$I_7 = 0.142 * 721.7 = 102.48 \text{ [A]}$$

$$I_{11} = 0.09 * 721.7 = 64.95 \text{ [A]}$$

$$I_{13} = 0.076 * 721.7 = 54.85 \text{ [A]}$$

$$I_{17} = 0.057 * 721.7 = 41.1 \text{ [A]}$$

$$I_{19} = 0.051 * 721.7 = 36.8 \text{ [A]}$$

$$I_{23} = 0.042 * 721.7 = 30.3 \text{ [A]}$$

$$I_{25} = 0.04 * 721.7 = 28.87 \text{ [A]}$$

Akımın efektif değeri,

$$I = [721.7^2 + 144.34^2 + 102.48^2 + 64.95^2 + 54.85^2 + 41.1^2 + 36.8^2 + 30.3^2 + 28.87^2]^{0.5}$$

$I = 751.1[A]$ dir.

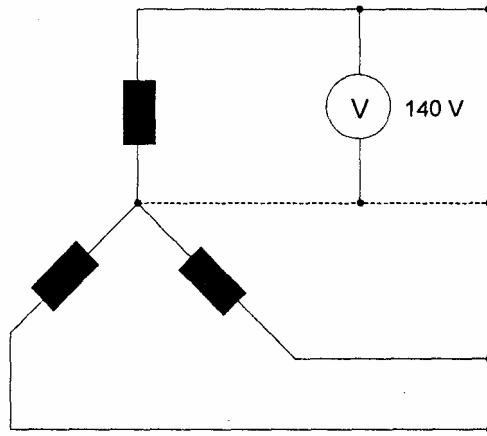
Toplam harmonik distorsiyonu,

$$\%THD = [721.7^2 + 144.34^2 + 102.48^2 + 64.95^2 + 54.85^2 + 41.1^2 + 36.8^2 + 30.3^2 +$$

$$28.87^2]^{0.5} / 721.7 * 100 = \%28.85 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Örnek:3.3

Yıldız bağlı bir transformatörün bir faz sargısına efektif temel bileşen değeri 135 V ve 3. harmonik içeren bir gerilim uygulanıyor. Uygulanan gerilimin değeri ölçüldüğünde efektif olarak 140 V olduğu görülmüştür. 3. harmonik geriliminin değerini bulunuz.



Şekil 3.1 Yıldız Bağlı Transformatör.

Çözüm: Eşitlik 3.8 kullanılarak,

$$V = 140 = [[135 \cdot \sqrt{2}]^{0.5} / 2 + V_{m3}^2 / 2]^{0.5} \Rightarrow V_{m3} = 52.44[V]$$

$$V_{3\text{eff}} = 52.44 / (2^{0.5}) = 37 [V] \text{ olarak hesaplanır.}$$

Örnek 3.4

$$v = 200 \cdot \sin(\alpha - 60^\circ) + 50 \cdot \sin(3\alpha - 30^\circ) + 30 \cos 5\alpha$$

$$i = 35 \cdot \sin(\alpha - 30^\circ) + 20 \cdot \sin(3\alpha - 90^\circ)$$

Gerilim ve akım eşitlikleri yukarıda verilen bir devre için aktif gücü ve güç faktörü hesaplayınız.

Çözüm:

$$P = (200 \cdot 35/2) \cdot \cos() + (50 \cdot 20/2) \cos()$$

$$P = 3500 \cdot \cos() + 500 \cdot \cos()$$

$$P = 3281 \quad [\text{W}]$$

Gerilim ve akım değerleri,

$$V = [200^2/2 + 50^2/2 + 30^2/2]^{0.5} = 147.3 \quad [\text{V}]$$

$$I = [35^2/2 + 20^2/2]^{0.5} = 28.5 \quad [\text{A}]$$

olup güç faktörü Eşitlik 3.15'ten

$$GF = 3281 / (147.3 \cdot 28.5) = 0.781 \text{ olarak hesaplanır.}$$

Örnek 3.5

Gücü MVA, gerilimi 154/0.4 kV olan transformatör nonlineer yüklerle yüklenmektedir. Harmonik bileşen oranları Çizelge 3.3' de verilmiştir. Bu transformatör en fazla ne kadar yüklenebilir? Tam yüklenmesi için ne yapılmalıdır?

Çizelge 3.3 Transformatördeki yük akımına ait harmonik bileşenleri

Harmonik derecesi(n)	%I _n /I ₁
1	100
5	18
7	13
11	8
13	5
17	3
19	2

Çözüm :

Akıma ait toplam harmonik distorsiyonu,

$$THD_I = \sqrt{\sum_{n=2} \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2} = 0,2439$$

$$\% THD_I = \% 24.39$$

Normalize edilmiş K-faktörü,

$$K = \frac{\sum_{n=1}^n \left(\frac{I_n}{I_1} \right)^2}{1 + THD_1^2} = 4,001$$

olarak hesaplanır.

Transformatör gücündeki azalma değeri,

$$D = 1.15 / (1 + 0.15K) = 0.7187$$

Yapılan hesaplardan Eşitlik 3.27'ye göre transformatörün yüklenebileceği en büyük güç,

$$S_H = D \cdot S_N = 0.7187 \cdot 2 = 1.4374 \text{ MVA dır.}$$

Transformatörün tam yüklenebilmesi için K=4 olan K-oranlı transformatörle mümkün olabilecektir.

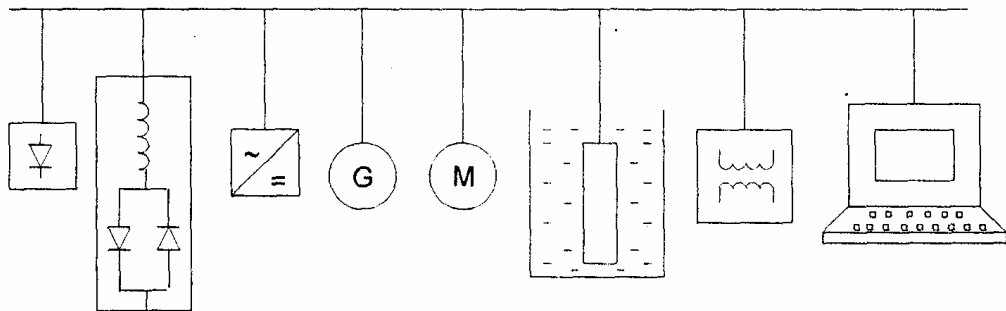
4. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR

4.1 Harmonik Kaynakları

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

- Konverterler,
- Yarı iletken elemanların kullanıldığı cihazlar,
- Generatörler,
- Motorlar,
- Senkron makinelerin uyarılması için kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler,
- Transformatörler,
- Gaz deşarj prensibiyle çalışan aydınlatma elemanı,
- Fotovoltaik sistemler,
- Bilgisayar,
- Elektronik balastlar,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Anahtarlama güç kaynakları,
- Kaynak makineleri,
- Kontrol devreleri,
- Frekans dönüştürücüleri,
- Statik VAR kompanzatörler,
- Ark fırınları,
- Yüksek gerilim ile enerji ileti (HVDC) sistemleri,
- Elektrikli ulaşım sistemleri.

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



Şekil 4.1 Harmonik Üreten Elemanlar.

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

- 1) Sistem içerisine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar,
- 2) Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlinear yükler,
- 3) Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri.

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumdaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarj 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 armasına neden olmaktadır. İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği yüksek gerilimli iletim şebekesine direkt olarak bağlanan anma gücü MW mertebesinde olan genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesi olup zamana göre rast gele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rast gele değişimine sebep olmakta ve modellemenin zorluğu nedeniyle simülasyonu güçleştirmektedir. Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği düzenlerin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca konverterin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır bu nedenle konverterin problemsiz çalışması için güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir.

4.1.1 Konverterler

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklardan biri, üç ve tek-fazlı hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri akü ve fotovoltaik sistemler, hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenir. Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demir yolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır genel olarak konverterlerin ürettikleri harmonik bileşenler $n=k.p \pm 1$ ile

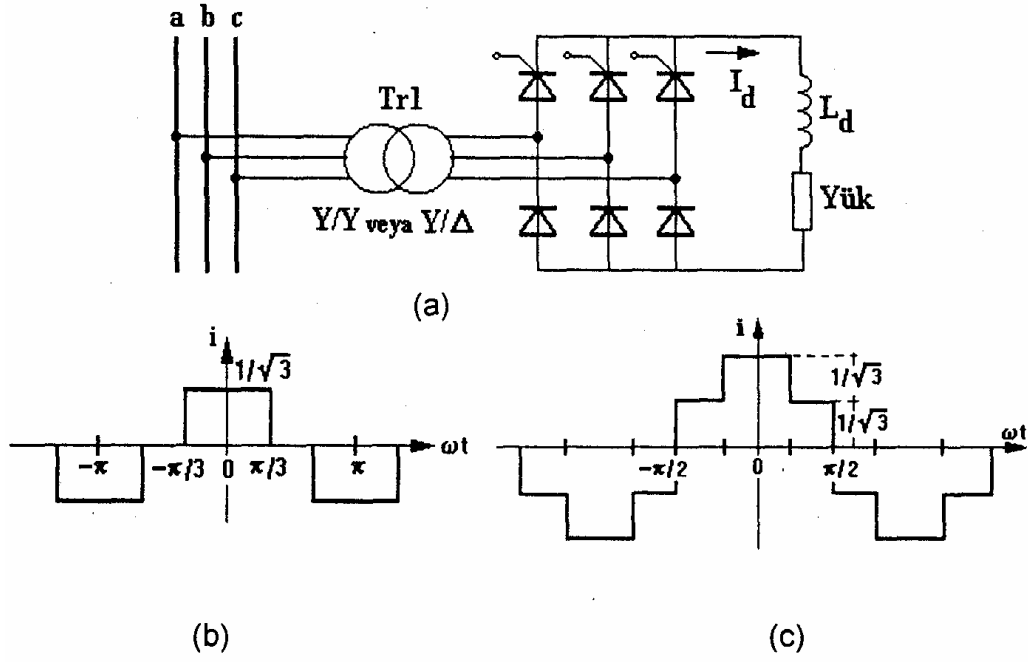
ifade edilir. Burada $k=1,2,3$ değerlerinde olup tam sayıları $p=6,12$, olmak üzere darbe sayısını belirtmektedir. Darbe sayısı artıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir. Şekil 4.2a'da 6 darbeleri bir konverterin bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konverterin Şekil 4.2b ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{17} \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (4.1)$$

olarak ifade edilebilir. Burada I_d doğrultucu tarafındaki akımı ifade etmektedir. Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması halinde, Şekil 4.1c ile gösterilen a-fazı hat akımı ani değeri;

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + \frac{1}{17} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (4.2)$$

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

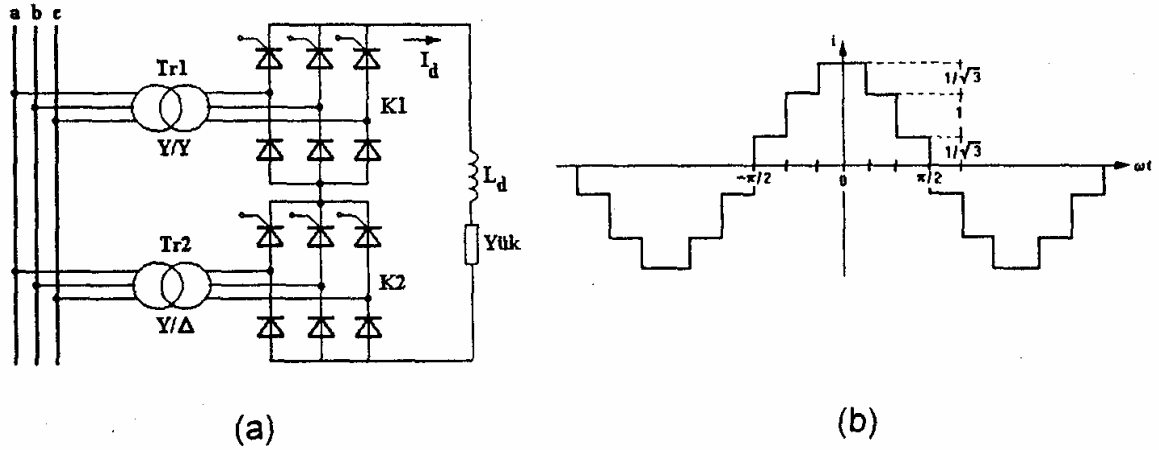


Şekil 4.2 Üç fazlı 6-darbeleri konverter (yarı kontrollü doğrultucu), a) Bağlantı şeması, b) Transformatörün yıldız/yıldız bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli, c) Transformatörün yıldız/üçgen bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli.

Yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip altı darbeleri konverterin d.c. çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeleri konverter ile şebekeye $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere sadece mertebesindeki harmonikler (11., 13., 23., 25., 35., 37., ...) enjekte edilir. 12 darbeleri konverter kullanılarak (5., 7., 17., 19., ...) mertebesindeki harmoniklerin a.c şebekeye geçmesi önlenabilir. Geçmesi engellenen harmonik bileşenler $k=1,3,5$ olmak üzere ile belirlenir. Şekil 4.3'de 12 darbeleri konverterin bağlantı şeması ve a-fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t - \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (4.3)$$

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



Şekil 4.3 Üç fazlı 12 darbeleri konverter (yarı kontrollü doğrultucu), a) Bağlantı şeması, b) Hat akımı dalga şekli

4.1.2 Transformatörler

Enerji sistemine bağlanan ve en önemli elemanlardan birisi olan transformatörler harmoniklere neden olurlar. Transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden kaynaklanan harmonik bileşenler transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının topraklanıp topraklanmamasına bağlı olarak değişmektedir. Transformatörlerin yük durumuna göre de harmonik genliklerinin değişimi söz konusu olmaktadır. Sürekli enerji altında bulunan bu elemanlar harmonik kaynağı olarak sistemde harmonik akımları dolaştırarak harmonik distorsiyonuna yol açarlar. Bu nedenle transformatörlerin harmonik özelliklerinin irdelenmesi, harmoniklerin etkileri bakımından önem kazanmaktadır.

4.1.3 Generatörler

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği 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 sinüsoidal olması sağlanır. Senkrom generatörlerin oluşturduğu harmonikler generatör gücü 1000 kVA dan büyük olmadığı Generatör bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar:

- Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunmakta olup fazlar arası gerilimlerde ise bulunmaz.
- Eğer yıldız bağlı generatörde 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 3 I_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, zigzag 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 suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir.

4.1.4 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir 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 gerilimi azalırken sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup zaman göre rast gele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rast gele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörler yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir.

Zaman zaman ark tutuşması veya sönmesi de harmonik akımların oluşmasına yol açmaktadır. Harmonikler en üst düzeye ergitme 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 çalışmalarda 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 tespit 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 tespit edilmiştir.

4.1.5 Gaz Deşarjlı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştiren 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.

Çizelge 4.1 Magnetik balastlı bir fluoresent lamba akımının harmonik spectrumu

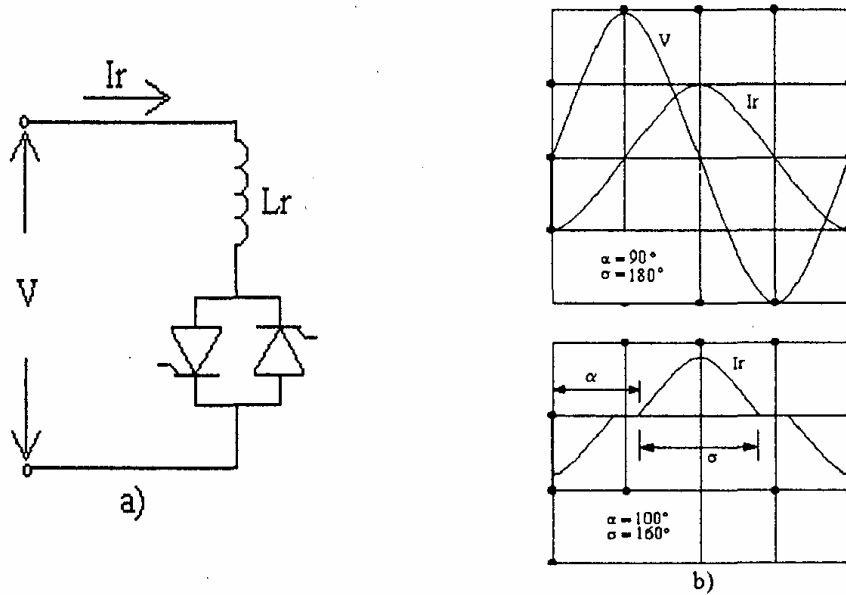
	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$(\%) \frac{I_n}{I_1}$	100	19.9	7.4	3.2	2.4	1.8	0.8	0.4	0.1	0.2	0.1

Ayrıca floresant lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devrelerin olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen anahtarlamalı güç kaynağı prensibiyle 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 fluoresent lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir.

4.1.6 Statik VAR Kompanzatörler

Tristör kontrollü reaktör (TKR) içeren statik VAR kompanzatörleri, 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 kompanzatörleri, içerdikleri nonlineer elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptirler. Statik VAR kompanzatörler bu sebeple bağlı oldukları güç sisteminde nonsinüsoidal büyüklüklere neden olurlar. Bu büyüklükler güç sisteminde bir takım olumsuz etkiler meydana getirdiklerinden, sistemin davranışı harmonik bileşenler göz önüne alınarak analiz edilmelidir.



Şekil 4.4 Tristör kontrollü reaktörün, a)Temel elemanları, b)Gerilim ve akım dalga şekli

Bir tristör kontrollü reaktörün temel elemanları şekil 4.4a'da görüldüğü gibi ters paralel bağlı iki tristör ile buna seri bağlı reaktörden oluşur bu iki ters paralel tristör yada iletim açısında bağlı olup dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerde iletimde olurlar. Tam iletim hali, tetikleme açısının 90° ye eşit olmasıyla elde edilir. Bu durumda akım, tam endüktif karakterde

ve sinüsoidaldır. Şekil 4.4b’de görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° ila 180° değerleri arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0° ila 90° değerleri arasında bağlı olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez.

Şekil 4.4a’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,

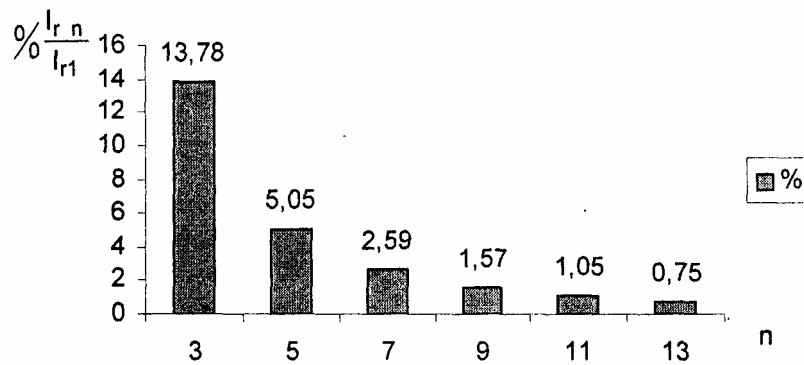
$$I_{r1}(\sigma) = \frac{V}{X_r} \left[\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right] \quad (4.4)$$

$$I_{rn} = \frac{4.V}{X_r \cdot \pi} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos \alpha \cdot \frac{\sin n\alpha}{n} \right] \quad (4.5)$$

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

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

eşitliği vardır. Akımın temel frekans bileşeni deikkate alındığında, tristör konntrollü reaktör, kontrol edilebilir bir süseptans olarak algılanır.



Şekil 4.5 TKR’de harmonik akımların maksimum genlikleri

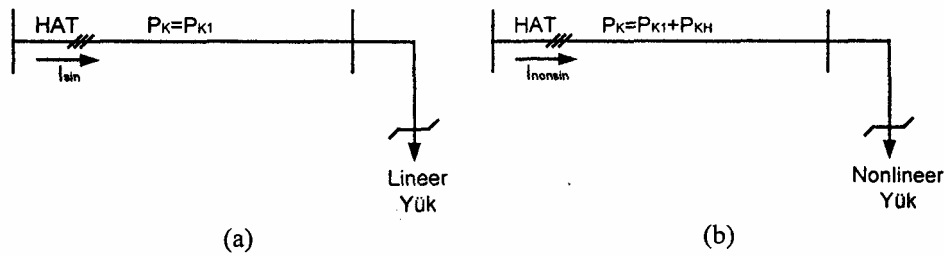
Dengeli yükleme koşulu altında TKR, tek dereceli harmonikleri üretir. Eğer TKR’de üçgen bağlantı yapılırsa 3. harmonik ile 3’ün katı olan harmonikler şebekeye verilmez ve bağlantı içinde elimine edilir. Bir TKR’ye bağlı harmonik akımların (I_{rn}) temel bileşen akımına (I_{r1})

oranı yüzde olarak Şekil 4.5'te verilmiştir.

Nonsünüsoidal büyüklerin içerdikleri harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir ve bu durumda karakterize edilmeyen harmonik bileşenler meydana gelir. Bu durumda,TKR içeren devrelerin rezonans sonucu etkin harmonik üretimine ve süreksizliğe sebep olacak çalışma noktalarında işletilmesine çok dikkat edilmesi gerekir.

4.1.7 Fotovoltaik Sistemler

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



Şekil 4.6 Fotovoltaik enerji üretimi blok şeması

4.1.8 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 iletkenlerin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim distorsiyonları gibi bozucu etkilere neden olabilmektedirler.

4.1.9 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her sınıfına daha belirgin bir şekilde giren elektronik sanayii, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan, elektronik balastlar da 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.,bileşenleridir.

Bir tüketim barasına bağılı bulunan az sayıdaki firtresiz elektronil balstın harmonik etkinliğı ihmal edilebilir. Ancak hipermarketler gibi çok sayıda elektronik balastın bulunduğı tesislerde harmonik seviyeleri sınır değerlerinin üzerine çıkabilmektedir.

Örneğın, bu konuda yapılan bir çalışmada magnetik balastlı floresantaydınlatma gerilim için $THD=3,6\%$ değesinde iken firtresiz elektronik balastlı aydınlatma yapıldığında bu değer artmakta ve gerilime ait $THD=7,41\%$ değesine ulaşmaktadır. Elektronik balastların firtreli olması halinde gerilim distoriyonu azalmakta ve $THD=0,74\%$ değesine inmektedir.

5. HARMONİKLERİN MEYDANA GETİRDİĞİ ETKİLER

5.1 Giriş

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. Günümüzde güç elektroniğe ve nonlineer elemanlarının yaygın bir biçimde kullanımıyla, güç sistemlerine giderek artan bir oranda harmonik akımları enjekte edilmektedir. 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 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. Bu bölümde, harmoniklerin elektrik enerji sistemine bağlanan elemanlar üzerinde etkileri incelenmiş ve güç sistemi üzerindeki etkileri genel olarak açıklanmıştır.

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 geriliminin 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,
- 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 kısalması,
- 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.

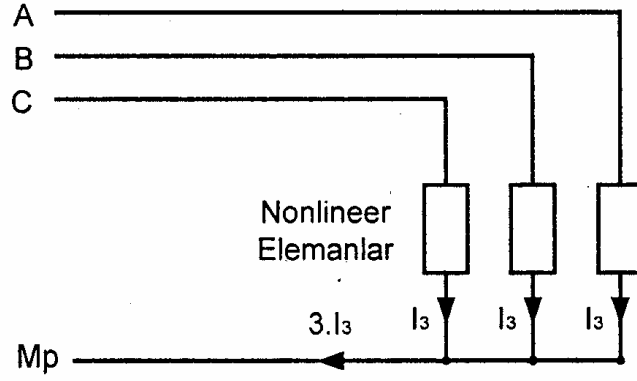
Boşta çalışmada ve düşük yüklerde harmoniklerin etkisi, şebekelerin tam yüklenmesi haline göre daha büyüktür.

5.2 Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

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 işletmedeki elemanlara önemli zararlar verecektir. Harmoniklerin bazı elemanlar üzerindeki etkileri aşağıdaki şekilde verilebilir.

5.2.1 Hatlar Üzerindeki Etkisi

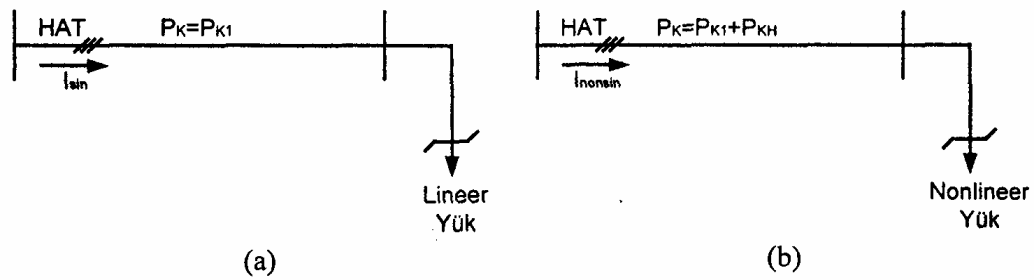
Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına sebep olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi, literatürde deri etkisi olarak bilinen “skin-effect” sonucudur. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak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



Şekil 5.1. Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi.

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

Şekil 5.1’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 5.2 Omik direnci R olan hattın kaybı, a) Sinüsoidal akımlı durum, b) Nonsinüsoidal akımlı durum.

Bir omik dirençte oluşacak kayıp güç, bu elemanlardan geçen akım ile ilgilidir. (Şekil 5.2) Omik direnci R olan bir iletkenin geçen ve N tane harmoniği içeren bir akımın ani değeri,

$$i(t) = \sum_{n=1}^N i(t)_n \quad (5.1)$$

olmak üzere efektif değerinin

$$I = \left(\sum_{n=1}^N I_n^2 \right)^{1/2} \quad (5.2)$$

olduğu bilinmektedir. Bu durumda n. harmonik için "akım harmoniği oranı"

$$\alpha_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (n = 2, 3, \dots, N) \quad (5.3)$$

olarak tanımlanırsa ve üç fazlı sistemde oluşacak toplam omik kayıplar için

$$P_K = 3 \sum_{n=1}^N R_n I_n^2 \quad (5.4)$$

yazılabilecektir. Bu arada I_{n1} n. harmonik akımın efektif değeri olup R_{n1} hattın n. Harmonik frekansındaki direnci gösterir. Direncin frekansla değerinin artması ihmal edilirse kayıp güç,

$$P_K = 3 R I_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} \left(1 + \sum_{n=2}^N \alpha_n^2 \right) = P_{K1} + P_{KH} \quad (5.5)$$

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

5.2.2 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. iletkenin doğru akımdaki direncinden daha büyük olan alternatif akımdaki direnci harmoniklerle daha da artış göstermektedir. iletkenin sinüsoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R) nonsinüsoidal akım akışı halinde harmonik bileşenlerin her biri için R direnci ilave olmaktadır. (Şekil 5.3). Böylelikle tüm bileşenlerle birlikte harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R = R + R$ olur. Analizlerin çoğunda harmonik bileşenlerden ilave olan direnç ihmal edilmekle birlikte, daha detaylı

analizlerde bunun etkisi de dahil edilmektedir. deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören Arnold 'un verdiği ampirik bir bağıntıya hesap edilir;

$$x = 1.585 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (5.6)$$

olmak üzere

$$0 \leq x \leq 3 \text{ için } R = R_0 \cdot K_1$$

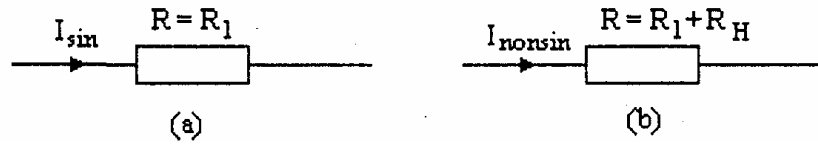
$$x > 3 \text{ için } R = R_0 \cdot K_2$$

dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (5.7)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2,828} + 0,26 \right] \quad (5.8)$$

Burada R doğru akım direnci ve R deri etkisi dahil direnç olarak tanımlanmıştır. harmoniklerle direnç değişimine ait diğer ifadeler modelleme ile ilgili 5. bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 5.3 Omik direncin frekansla artması (skin-effect), a) sinüsoidal akımlı durum, b) nonsinüsoidal akımlı durum.

5.2.3 Reaktanslar Üzerindeki Etkisi

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

$$X_{Ln} = n \cdot X_L$$

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

harmonikte

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n}$$

değerini alır. Her iki durum içinde, reaktansın lineer bir eleman olduğu kabul edilmektedir.

5.2.4 Kondansatörler

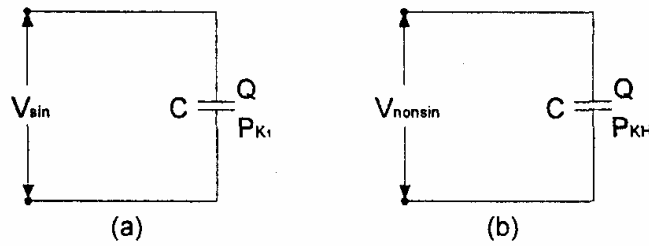
Güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bir kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri,

$$I_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot C \cdot V_n = n \cdot \omega_1 \cdot C \cdot V_n \quad (5.11)$$

ile belirlenir. Eşitlik 5.11'de görüldüğü gibi herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranı gerilimdeki oranından büyük olmaktadır. Harmonik bileşenler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa sebep olabilirler. Qs sistemin kondansatör grubunun bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Qc ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir açık gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi,

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (5.12)$$

Bir kondansatördeki reaktif güç ve kayıp güç, uygulanan gerilime bağlı olarak değişir. (Şekil 5.4)



Şekil 5.4 Bir kondansatör elemanın, a) Sinüsoidal beslenme hali, b) Nonsinüsoidal beslenme hali.

Harmonikler kondansatörlerde hem aşırı reaktif yüklenmeye hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucunda ısı artışına neden 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

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N \omega_n \cdot C \cdot V_n^2 \quad (5.13)$$

ile belirlenir. Kondansatörün ideal olmadığını, kayıp gücünü olduğunu ve eşdeğer devresinde paralel R omik direncinin bulunduğunu kabul edersek bu durumda kondansatörün aktif güç kaybı

$$P_K = \sum_{n=1}^N C(\tan \delta) \cdot \omega_n V_n^2 \quad (5.14)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada

$$\tan \delta = R(1/\omega C) \quad (5.15)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. $\omega_n = 2\pi \cdot f \cdot n$, n.harmonik için açısal frekans olup V_{n1} n.harmonik geriliminin efektif değeridir. IEEE Std 18-1992 standartları, kondansatör grupları için gerilim, akım ve reaktif güç ile ilgili sınırlamalar getirmektedir. Bu standartlar kullanılarak müsaade edilebilir maksimum harmonik seviyeleri belirlenebilir.

5.2.5 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 makinelerindeki 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 azaltmaktadırlar.

Çizelge 5.1 6-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

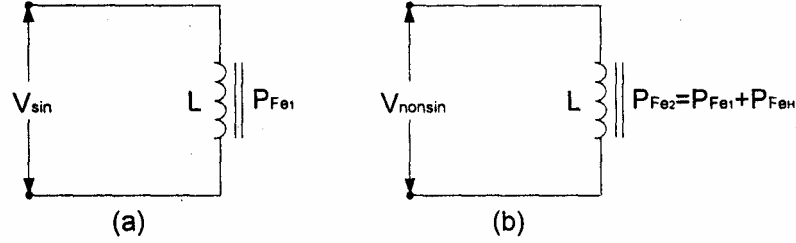
Çizelge 5.1’de 6-darbeli bir konverterin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makinaya etkileri gösterilmiştir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif veya negatif dizi simetrik bileşenidir. Her bir harmonik gerilimi (5,7,11,...) makinanın statorunda bir harmonik akım endükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinanın ısısı yükselecektir.

Genellikle, rotardaki harmonik akımların akışı daha da önemlidir. Statordaki herbir harmonik akım, makinanın rotorunda akım endükleyecek biçimde hava aralığındaki bir magnetomotor kuvvet (MMK) 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) rotorla bir harmonik akım endüklenenecektir. 7.harmonik ileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için,temel hava aralığı frekansı ve 7.harmonik frekansı arasında net dönme farkına karşılık gelen bir frekansına (7.harmonik frekansından 1 çıkarılarak yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım endüklenenecektir. Böylece rotor ısındığından, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6.harmonik akım bileşeni üretmek için birleşirler. 11. ve 13. harmonikler, rotorda 12.harmonik akımı üretmek için aynı biçimde etkili olurlar, daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum söz konusu olacaktır.

5.2.6 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 gürültü 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. Transformatörlerin harmonikler bakımından incelenmesi 8. bölümde detaylı olarak verilmiştir.



Şekil 5.5 Magnetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları, a) Sinüsoidal gerilimde, b) Nonsinüsoidal gerilimde.

Genel olarak, magnetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör vb) oluşacak demir (nüve) kayıplar bu elemana uygulanacak gerilim şekli ile ilgilidir (Şekil 5.5). Magnetik çekirdekli bir elemana uygulanan gerilim yani

$$v(t) = \sum_{n=1}^N V_n(t) \quad (5.16)$$

ve efektif değeri

$$V = \left(\sum_{n=1}^N V_n^2 \right)^{1/2} \quad (5.17)$$

olmak üzere bu elemanda oluşacak demir kayıpları

$$P_{Fe} \cong K_m V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (5.18)$$

ile ifade edilir. (Burada K_m makinenin yapısı ile ilgili bir sabittir.) Bu değer aynı şekilde n.harmonik için tanımlanan ‘gerilim harmoniği oranı’ ifadesi

$$\beta_n = V_n / V_1 \quad (n = 2, 3, \dots, N) \quad (5.19)$$

kullanılarak

$$P_{Fe} \cong K_m V_l^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2 \right) = P_{Fe1} + P_{FeH} \quad (5.20)$$

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

5.2.7 Enerji İletişim Sistemi

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

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (5.21)$$

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

$$|\Delta V_n| = |I_n| \cdot |Z_n|$$

olarak ifade edilir.

5.2.8 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 arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kaplanmasına 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.

5.2.9 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.

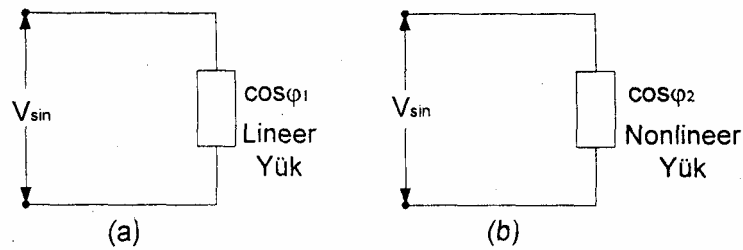
Akkor telli lambaların ömrü, distorsiyona maruz kalmış gerilimle çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum lambaların içerisindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim artışının küçük değerde olması durumunda dahi akkor flamanlı lambanın ömrü büyük değerde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

5.2.10 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,

$$GF=P/S$$

Güç değerine yaklaştırmaktır. Hatta birine eşit olması durumunda heriki güç aynı olacak ve güç faktörü de 1 değerini alacaktır.



Şekil 5.6 Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünü 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 değişimi ile ilgili pratik uygulama bakımından en çok karşılaşılan durum olan sinüsoidal bir şebekeye nonlineer eleman bağlanması durumudur (Şekil 5.6). Sinüsoidal bir şebekeye nonlineer eleman bağlanması

durumunda çekilecek harmonik akımlar sebebiyle güç faktörü,

$$GF = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \varphi}{V \cdot \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2}} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \varphi \quad (5.24)$$

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 durumdaki $\cos$ değerinden daha düşük bir değer alacaktır. Görüldüğü gibi harmoniklerin güç faktörünü düşürücü özelliği bulunmaktadır.

Harmonikli bir devrenin güç faktörü kompanzasyon 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.

5.2.11 Röleler

Büyükliklerinin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konuyla 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 gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Her bir röle harmoniklerinin sistemde bulunmasına 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 ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine bir işletme problemi oluşturmadığını gözleyen çalışmalar vardır. Fakat farklı bir çalışmada indüksiyon diskli aşırı akım rölesinin frekansı 3.harmonikten 9.harmonige 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 hali araştırılmıştır. Termik röle 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 kısalacağı açıktır.

5.2.12 Ölçü Aletleri

Harmonik bileşenlerinin (özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimleri sonucu) sistemi rezonansa sokması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun

Kullanılan enerji ölçen aletlerdir. Bu aletler frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlardan 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 edilmemesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının %0.1'den daha az olduğu tespit edilmiştir.

5.2.13 Elektronik Elemanlar

Bir güç elektroniği elemanı, harmonik bileşenleri bulunduğu bir sisteme bağlı olabilir. Bu elemanların doğru çalışması, gerilim sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlararası gerilim, diğer noktadaki fazlararası 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 işletimlerine yol açarlar. Örneğin, tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine de neden olabilir.

6. HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE HARMONİK STANDARTLARI

6.1 Giriş

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 çıkmaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelerce sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir.

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, nonlinear yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı nonlinear 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.

6.2 Harmonikle Bozulmanın Ölçütü

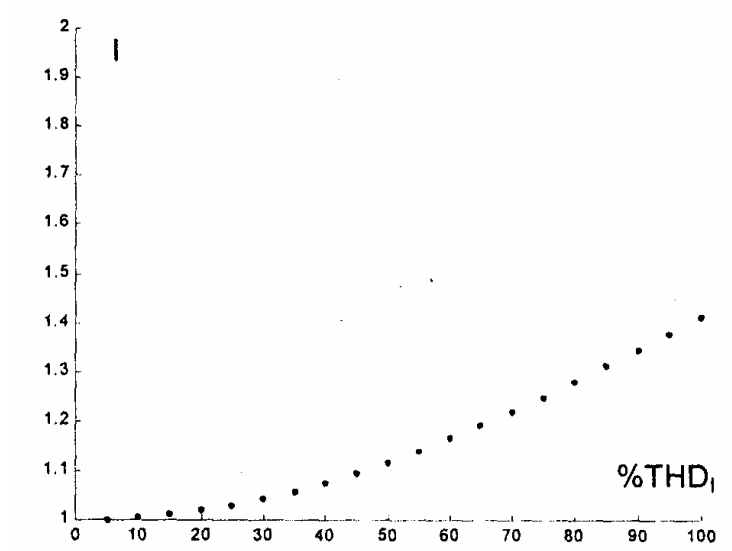
Standartlarda harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar; Toplam harmonik distorsiyonu (THD), tekil harmonik distorsiyonu (HD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD)'dur. THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade 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. Harmonik bozulma ile ilgili diğer bir kavram, çekilen yük akımları için tanımlanan ve "IEEE Standart 519" uygulamasında özellikle belirtilen "toplam talep distorsiyonu" kavramıdır.

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

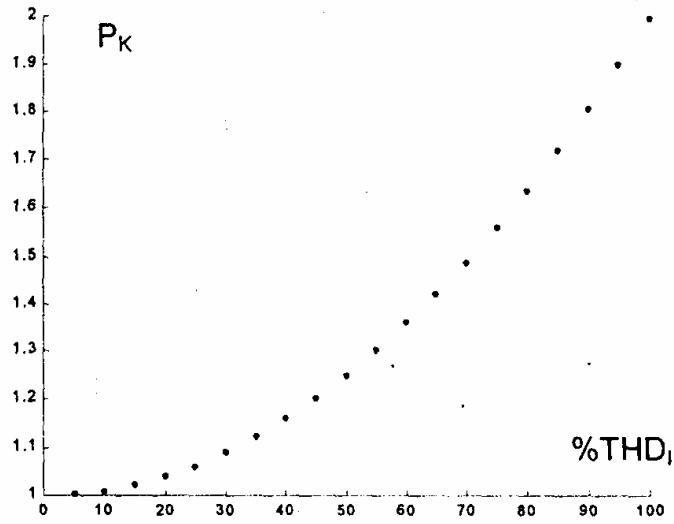
$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\text{THD}_V}{100} \right)^2} \quad (6.1)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{\text{THD}_I}{100} \right)^2} \quad (6.2)$$

Buradaki V_1 ve I_1 gerilim ve akımın efektif değer olarak temel bileşendir. Görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri harmonik bileşenlerin artması ile artış gösterecektir. 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 6.1 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi ($I_1=\text{sabit}$).



Şekil 6.2 Sistemdeki kayıp gücün harmonik distorsiyonu ile değişimi ($I_1 \cdot R = \text{sabit}$).

6.3 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.

6.3.1 Yaklaşık İnceleme

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

Daha önce de açıklandığı üzere, uygulamada tam bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç göstermeyen küçük güçlü tüketicilerin söz konusu olduğu pek çok durumla karşılaşmaktadır. Böyle bir durumda, tam ve detaylı bir harmonik analizin gerçekleştirilmesi zorunlu değildir. Küçük tüketiciler için genel olarak "yaklaşık inceleme" adı verilen kriter yeterli olmakta ve daha geniş kapsamlı bir analizin yapılması ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Böyle durumlarda, harmonik limitlerine uygunluk, ortak kuplaj noktasında (özel bir tüketiciyi besleyen ve bir başka tüketicinin bağlanması söz konusu olan beslenme 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 için takip edilmesi gereken dört temel adım özetlenmiştir:

- 1.Adım: Ortak dublaj noktasındaki kısa devre gücünün (S_k) belirlenmesi,
- 2.Adım: Beslenen nonlineer yükün türünün ve boyutunun belirtilmesi,

$$3.\text{Adım: } S_{DW} = \sum_i S_{Di} \cdot W_i \quad (6.3)$$

değerinin hesaplanması. Bu arada S 'inci nonlinear yükün görünür gücü ve W_1 ise ağırlık faktörüdür.

$$4.\text{Adım: } N = \frac{S_{DW}}{S_K} \times 100 \quad (6.4)$$

eşitliği sonucunda $N \leq 0.1$ şartı sağlanıyorsa harmonik limitlerine uygunluk yaklaşık olarak kabul edilebilir.

Çeşitli nonlinear yükler için W_1 ağırlık faktörleri Çizelge 6.1'de verilmiştir. Genelde, daha fazla distorsiyonlu harmonik akımları üreten nonlinear yükler için ağırlık faktörünün değeri daha büyük olmaktadır.

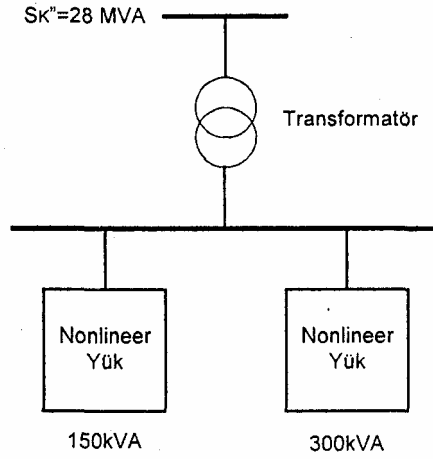
Çizelge 6.1 Harmonik sınırlarına uygunluğun incelenmesinde kullanılan ağırlık faktörleri

Yük Tipi	Ağırlık Faktörü (W_1)
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

Örneğin, Şekil 6.3'deki sistem için 150 kVA'lık 6 darbeli konverter (endüktanssız) ve 300kVA'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.



Şekil 6.3 Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem.

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 maksadıyla detaylı bir harmonik analizinin 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 olayların meydana gelmesi olasıdır.

6.4 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, nonlineer yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları harmonikleri için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartları elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşterileri için nonlineer 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 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2 çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim (kV)	THD _v (%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1.5
	115≤	8
	Özel	1.5
Almanya	2.4-69	8
	115≤	1.5
Almanya	Tüm Gerilimler (15. harmoniğe kadar)	10
Avustralya	Dağıtım	5
	33≥	3
	İletim	1.5
	22,33,66	1.5
Finlandiya	110≤	1.5
	1	5
	3-20	4
	30-45	3
Fransa	110	1.5
	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 sınıflandırılmış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri verilmiştir. IEC 61000-2-2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir (Çizelge 6.3). Yine IEC tarafından endüstri için 2.sınıf olarak verilen IEC 61000-2-4'deki sınır değerler Çizelge 6.4'de görülmektedir.

Çizelge 6.3 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 6.4 endüstriyel santraller için IEC 61000–2–4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2.sınıf elmanları)

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 6.5’de verilmiştir.

Çizelge 6.5 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 Çizelge 6.6a’da, orta gerilim şebekesi için Çizelge 6.6b’de görülmektedir.

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 vermiştir (Çizelge 6.7). Bu değerler 220 V’un altındaki gerilimli sistemler için henüz uygulanmaktadır. 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 gerilim 240 V’a kadar, tek fazlı, iki veya üç telli
- Nominal gerilimi 600 V’a kadar, üç fazlı, üç veya dört telli
- Nominal frekansı 50 Hz veya 60 Hz olan sistemler

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 6.8–6.9'da verilmiştir. Bu tablolarda: I_k , sisteminin kısa devre akımını, I_L , yüke ait maksimum talep akımının (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TDD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir. (TDD değeri, temel bileşen akımının yerine I_L akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır).

Çizelge 6.8 IEEE'nin Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınırları

Bara gerilimi (V_n)	Tekil harmonik büyüklüğü (%)	(Toplam Harmonik Distorsiyonu) THD_{V_n} (%)
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	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 beslenme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar' adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektrikselsel 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 beslenme sistemlerinde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metotları ile ilgilidir.

Çizelge 6.9 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

Örnek 6.1

Toplam harmonik distorsiyonu %95 olan, harmonik değerleri Çizelge 6.10'da verilen ve çektiği akım 13 A olan bir doğrultucunun, harmonik sınır değerleri aşıp aşmadığını IEC 61000-3-2'ye göre kontrol ediniz.

Çizelge 6.10 Örnek 6.1'deki doğrultucu için harmonik akım değerleri

n	1	5	7	11	13
$\%I_1/I_n$	100	70	50	30	15

Çözüm 3.8 kullanılarak temel bileşen akımı,

$$I_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}}} = \frac{13}{\sqrt{1 + 0,95}} = 9,309\text{A}$$

olur.

Harmonik bileşen akımları,

$$I_5=0,70.9,309=6,51 \text{ A}$$

$$I_7=0,50.9,309=4,65 \text{ A}$$

$$I_{11}=0,30.9,309=2,79 \text{ A}$$

$$I_{13}=0,15.9,309=1,39 \text{ A}$$

olarak hesaplanır. Bu akım değerleri, IEC 61000–3–2 ile karşılaştırıldığında her harmonik bileşeni için kabul edilebilir sınırının aşıldığı görülmektedir.

7. KESİNTİSİZ GÜÇ KAYNAKLARINDA KULLANILAN DOĞRULTUCU TİPLERİ

7.1 6 Darbeli Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi

Güç kalitesi sorunu birinci dereceden kaynak şebeke üzerindeki artan lineer olmayan yüklerin kullanımı ile ilgilidir. 1990 lı yıllardaki nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi, motor, trafo arızaları ve aşırı ısınmaları, kesicilerin sık sık trip vermesi ile ilgili merak ve sorular genellikle kabul edilemez cevaplar ve sınırlı çözümlerle karşılanırdı. Zayıf güç kalitesi problemi ile başa çıkmak için IEEE 519–1992 standardı takdim edilmiştir. Bu problem sürekli arttığından dolayı yeni ürünlerin bu probleme neden olduğu varsayılıyordu.

Endüstride doğrultucuların artan kullanımları, yukarıda anlatılan problemler ve doğrultucuların işletim dışı kalması ile ilgili şikâyetler, şebeke harmonik problemlerinin nedeni olarak doğrultucuların bir hedef haline gelmesi ile sonuçlandı. Doğrultucu niçin harmonik problemleri için suçlandığını anlamak çok kolaydır. Çünkü şebekeye yüksek genlikli harmonik akımlarını enjekte eden yüksek güçlü cihazlardır. Bununla birlikte, bilgisayar ve deşarj aydınlatmaları gibi diğer düşük güçlü cihazları da göz ardı edemeyiz. Çünkü bu cihazları birçoğu şebeke üzerinde benzer etkiye neden olabilirler. Akım harmonik kaynaklarının herhangi birisi diğer cihazlar üzerinde bir etkiye neden olabilirler.

Güç kalitesi problemi nedeniyle harmonik kapanları [4, 7] gibi filtreler doğrultucudan çekilen harmonik akımları azaltmak ve güç kalitesini arttırmak için tasarlanırlar. Filtrelerin tasarımı, doğrultucular[1, 2, 5, 6] tarafından enjekte edilen karakteristik harmonik akımlarına dayanır. Bu karakteristik akımlar genelleştirilir ve ideal kaynağa dayanır. Harmonik akımlarındaki değişim etkisi IEEE 519–1992 deki şartları karşılamayan yetersiz filtre performansına neden olabilir.

Bu bölümde, doğrultuculardan çekilen harmonik akımları ve ilgili şebeke arasındaki ilişkileri araştırılmıştır. İdeal şebeke koşulları altında, frekans konverterlerin karakteristik harmonik akımları gösterilecek ve daha sonra şebekenin (kaynağın) ideal olmadığı durumda normal harmonik akım varyasyonları 3. harmonik akımına vurgu yapılarak geliştirilecektir. Daha sonra bu harmonik akımların simulasyon ve deneysel sonuçları, distorsiyondan kaynaklanabilecek etkileri ile birlikte tartışılacaktır.

Şekil 7.1 de bir çok frekans konverteri için kullanılan dc hat endüktansını gösteren 6 darbeleri doğrultucu devresi görülmektedir. “p” darbeleri doğrultucu tarafından çekilen karakteristik harmonik akımları darbeleri sayısı ile ilişkilidir. Aşağıdaki denklem bu ilişkiyi gösterir.

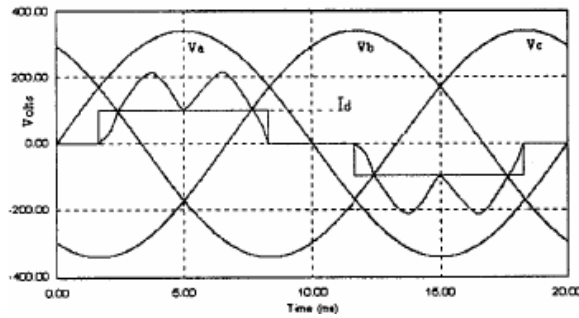
$$h=p*n\pm 1 \quad (7.1)$$

h: harmonik no

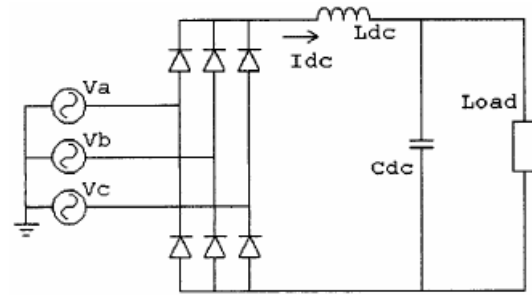
p: doğrultucuların darbeleri sayısı

n: 1,2,3 değeri alan tam sayılar

Bu formüle göre frekans konverterinin ön ucundaki 6 darbeleri doğrultucunun harmonik akımlarının sıralaması 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, ... şeklinde olacaktır. Harmonik akımlarının genlikleri teorik olarak harmonik sıra numarasının tersidir. Yani 5. harmoniğin %20 si, 7. harmoniğin %14 ü, 11. harmoniğin %9 u. Bu teorik olarak harmonik akım seviyeleri şebekeden çekilen dikdörtgen akım dalgasına dayanır.



Şekil 7.1 İdeal Diktörgen akım biçimi.



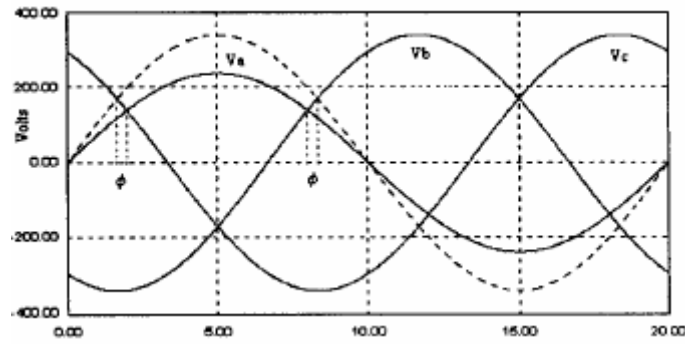
Şekil 7.2 6darbeleri doğrultucu devre şeması.

İdeal dikdörtgen akım biçimi Şekil 7.1 de görülmektedir. Bu ideal akım dalga biçimi için toplam harmonik akım distorsiyonu (THID), %29 dur. Bu distorsiyon seviyesi, şebeke geriliminin ideal olması; yani faz gerilimleri eşit genlikte ve her biri arasında 120 derece faz farkı olması esasına dayanır.

Şekil 7.2 den de görüldüğü üzere dc hat endüktanslı pratik bir doğrultucu iki yükselen tepe vasıtasıyla karakterize edilen bir akım dalga şekline sahip olacaktır. Pratik bir 6 darbeleri doğrultucu için THID, kaynak empedansının boyutuna ve dc hat endüktansına bağlı olarak %30 ila %50 arasındadır. İdealize edilmiş dikdörtgen dalga, şebeke gerilim dalga biçimlerindeki değişikliklerle birlikte iletim periyodunun nasıl değiştiğini gösterecek olan yararlı bir yaklaşımdır.

6 darbeleri bir doğrultucu için normal akım iletim periyodu 120 derecedir. Bu açı, örnek olarak A faz akımı için Vc den Va ya ve Va dan Vb ye faz gerilimlerinin geçiş noktaları vasıtasıyla belirlenir. A faz gerilimi için geçiş noktaları tipik olarak 30 ila 150 derecedir.

Triplen harmoniklerin üretimi, iletim periyodunun 120 dereceden sapması halinde gerçekleşir. Akım iletim periyodundaki değişiklikler iki nedenden dolayı olabilir. Birincisi, bir veya iki fazdaki gerilim azalması ve ikincisi ise şebeke gerilim distorsiyonudur. Maswood [3], 3. harmoniğin üretimini göstermek için dengesiz bir gerilim kullanır. Bu analiz, gerilim dengesizliği etkisini ve 3. harmonik akımının üretimini minimize etmek için her faz akımının iletim periyodunun 120 derecede kalmasını devam ettirmek için iletim açısının kontrol edilebildiği faz kontrollü doğrultucularla ilgilenir.



Şekil 7.3 Va gerilim değişiminin grafiği.

Şekil 3, Va geriliminin nominal değerden daha düşük bir değere düşürüldüğünü gösterir. A faz akımı için iletim açısı 2ϕ kadar değişimi ile sonuçlanır. Bu sonucu ve Fourier analizi kullanarak A fazındaki gerilim azalması tarafında üretilen 3. harmonik akım büyüklüğü bulunabilir. Aşağıdaki Fourier transformu, çeyrek dalga simetrisini göz önüne alarak kullanılır.

$$I_h = \frac{4}{\pi} \cdot \int_{\frac{\pi}{6} + \phi}^{\frac{\pi}{2}} I_d \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (7.2)$$

Ih= “h” harmonik akım büyüklüğü

Id= drive dc akım seviyesi

Bu eşitliği çözme, doğrultucunun akım harmonik genliklerinin sonuçlarını verir. Genişletildiğinde ise 6 darbeleri doğrultucunun akım spektrumunu verir.

$$I_h = \frac{4I_d}{h\pi} \cos \left[f \left(\frac{\pi}{6} + \phi \right) \right] \quad (7.3)$$

Özellikle 3. harmonik bileşeni aşağıdaki eşitlikle verilir.

$$I_3 = \frac{4I_d}{3\pi} \cos \left[3 \left(\frac{\pi}{6} + \phi \right) \right] \quad (7.4)$$

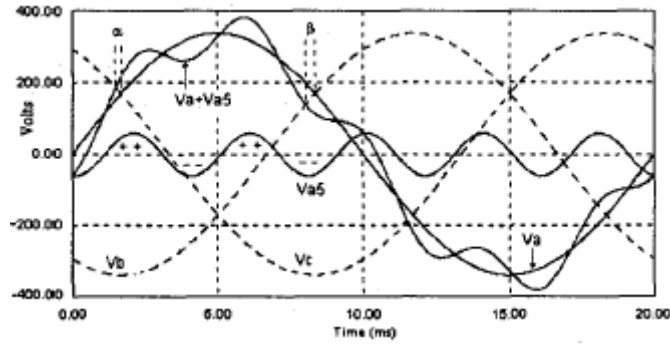
Denklem 7.3'den $h=3,9,15, \dots$ ve $\phi = 0$ olduğunda kosinüs değeri (triplen harmonik akımlarının olmadığı) 0 olacaktır. Bununla birlikte, iletim açısında bir değişiklik olduğunda (ϕ sıfırdan farklı bir değeri aldığı anda) kosinüs değeri artık sıfır olmayacak ve doğrultucudan dolayı triplen harmonik akımları üretilecektir. Dominant bileşen denklem 7.4'de verildiği gibi 3. harmoniktir fakat diğer tek (9. ve 15. gibi) harmonikler mevcut olacaktır fakat 3. harmonik kadar önemli bir genliğe sahip olmayacaktır. Bu yüksek mertebeli triplenler genlikleri 3. harmonikten 3 veya 5 kat daha küçüktür ve 9 ve 15 ile bölünürler.

Ayrıca h 'ın diğer değerlerinden ve ϕ nin sıfırdan farklı değerlerinden kaynaklanan karakteristik harmonik genliklerinde değişiklikler meydana gelecektir. Örnek olarak 5. harmonik için $\phi = 5$ derece ise 5. harmoniğin genliği yaklaşık olarak %5 artacaktır. Bu durum ideal bir akım dalga biçimi kullanarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, pratik doğrultucu çift yığınlı dalga biçimi nedeniyle daha büyük bir distorsiyon seviyesi verecektir. [8], dengesiz kaynak koşulları altındaki harmonik akım değişimlerini gösterir. Ayrıca, gerilim dengesizliği ile harmonik akım değişikliği olarak her fazdaki harmonik yayılmasını değerlendirmek için bir analiz tartışılır.

Şebekedeki gerilim distorsiyonunun etkileri gerilim azalmadaki etkilere benzer olacaktır. Tekrar akım iletim periyodu 120 dereceden sapacaktır. Şebekedeki mevcut baskın harmonik gerilimler 3., 5. ve 7. harmoniklerdir. Bu harmonik gerilimlerin seviyeleri ana değerin %4 ü kadar olabilirler. Bu değerler laboratuarda ölçülen değerlerden alınmıştır. Toplam harmonik gerilim distorsiyonu, şebeke yetkilileri tarafından bağlantı noktasında yaklaşık olarak %3 ila %5 arasındadır (maksimum %5). Harmonik gerilimler, bilgisayar ve frekans konverterleri gibi mevcut harmonik üreten kaynaklar nedeniyle oluştuğu söylenebilir.

Şekil 7.4, 100 derece faz kayması ile A faz geriliminin 5. harmonik etkisini gösterir. 5. harmonik gerilimi periyodik olarak ana gerilime eklenir ve çıkarılır. Bu durum daha sonra akım iletim periyodunu değiştirecektir. Bu durumda iletimin başlangıcı 30 dereceden daha az olacaktır ve iletimin sonu 150 derecen daha az olacaktır. Bu durum daha önceki Fourier

transformuna izin vermez ve çeyrek dalga simetrisi bozulur.



Şekil 7.4 100 derece faz kayması ile A faz geriliminin 5 Harmonik grafiği.

Bu durum yarım dalga simetrlili fourier transformu gerektirir (Formül 7.5 de verilmiştir.)

$$I_h = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{6}-\alpha}^{\frac{5\pi}{6}} I \sin(h\omega t) d(\omega t) \quad (7.5)$$

Bu eşitliği çözmek aşağıdaki sonucu verir.

$$I_h = \frac{-4I}{h\pi} \sin\left(\frac{h}{2}(\pi - \alpha - \beta)\right) \sin\left[\frac{h}{2}\left(\beta - \alpha - \frac{2\pi}{3}\right)\right] \quad (7.6)$$

Eşitlik 6 dan alfa ve betanın sıfırdan farklı ve $h=3$ olduğu durumda 3. harmonik akımının üretileceğini görebiliriz. Alfa ve betanın aynı olması gerekmez her iki değer harmonik gerilimin faz açısındaki değişikliklerle birlikte değişecektir. Ayrıca diğer harmonikler üretilecek fakat daha az genlikli olacaktır ve karakteristik harmonik akımlarının değişiklikleri meydana gelecektir.

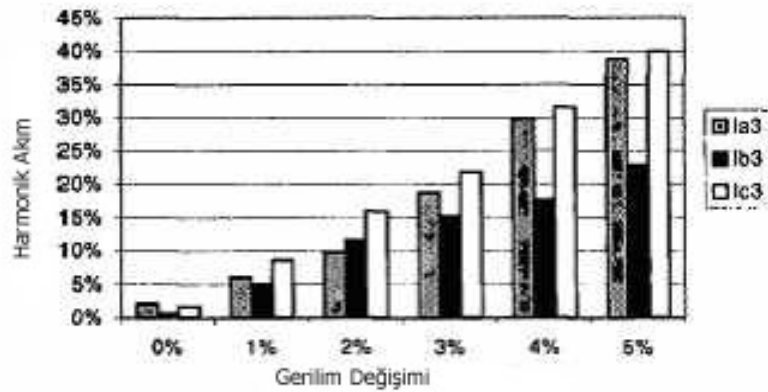
Şebekedeki harmonik gerilimlerin farklı faz açıları ve genlikleri için analizin önemli derecede değişeceği açıktır. Faz gerilimindeki gerilim harmonikleri ve/veya azalmalarla şebeke daha büyük oranda bozulma olduğunda, basit bir matematiksel çözüm kolaylıkla elde edilemez. THID belirlemenin en iyi metodu uygun bir yazılım simülasyon programının kullanılmasıdır.

Sistemdeki harmonik analizi gerçekleştirmenin nedeni sistemdeki lineer olmayan yüklerin genellikle IEEE 519–1992 ye dayandırılan yerel şebeke koşullarını karşılayıp karşılamadığını belirleme olabilir. Eğer bir sistem koşulları karşılamadığında harmonikleri azaltmak için önlemler in alınmasına gerek vardı (örnek olarak harmonik kapan filtreleri kullanmak). Toplam harmonik gerilim distorsiyonunu (THVD) bulmak için kullanılan tipik metotlar ideal

şebeke koşullarını kullanırlar. Şebeke distorsiyonun etkileri eğer ilk dizaynda dikkate alınmazsa yetersiz bir performansa yol açabilir.

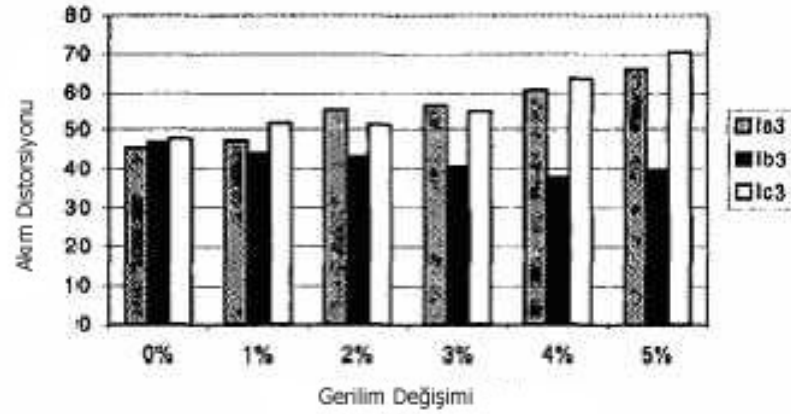
PSpice programı A fazını geriliminin azaltılması ile 6 darbeli doğrultucudan çekilen 3. harmonik akım seviyelerini belirlemek için kullanılmıştır. Model, bir devre simülasyon programı kullanarak simule edilir. Kullanılan devre, şekil 7.1 de görülen devrenin aynısıdır. A faz gerilimi, bir sistemde gerilim düşmesi için izin verilen değerle çakışması için nominal değerinin %5 ine kadar azaltılır.

Sonuçlar, şebeke gerilim dengesizliğinde hat akımlarında önemli bir değerde harmonik akımı üretilebileceğini gösterir. 3. harmonik akımının ilk değerleri, a ve c fazları için %2 ve b fazı için %1 dir. Daha sonra, bu değerler a fazı için %39, c fazı için %40 ve b fazı için %29 a ulaşır. Tolerans simülasyonu hızlandırmak için azaltılırken, %0 gerilim düşmesi için 3. harmoniğin ilk seviyeleri yazılımdaki hesaplama hataları nedeniyle. Ayrıca sonuçlar, üç faz akımının etkilendiğini fakat bu etkilenmenin aynı oranda olmadığını gösterir.



Şekil 7.5 3. Akım Harmoniğinin tek faz gerilimindeki değişiminin etkileri.

Ayrıca gerilim azalmasının etkisi, daha önceden belirtildiği gibi diğer harmonik akımları üzerinde bir etkiye sahiplerdir. Bu etki, a fazındaki bir değişiklik için her hat akımının toplam harmonik akım distorsiyonundaki değişikliği inceleyerek görülebilir. Bu sonuçlar şekil 7.6 da verilmiştir.

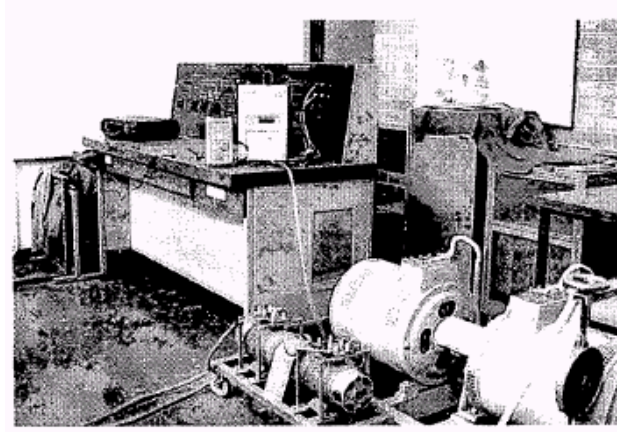


Şekil 7.6 Toplam Harmonik Distorsiyonun tek faz gerilim değişimindeki etkileri.

Bu sonuçlar, a ve c fazları için toplam harmonik akım distorsiyonunda bir artma ve b fazının toplam harmonik akım distorsiyonunda bir azalma olduğunu gösterir. Toplam harmonik akım distorsiyonundaki bir artma sadece 3. harmonik akımındaki bir artma ile ilgili değildir. A ve c fazının toplam harmonik akım distorsiyonu sırasıyla %21 ve %23 oranında artmıştır. Bu durum frekans konverterinden oluşan toplam harmonik akım distorsiyonunu azaltmak için tasarlanan kapan filtresinin performansında bir azalmaya neden olabilir.

Şebekedeki harmonik gerilimler nedeniyle hat gerilim distorsiyonu, iletim açısına benzer etkilere neden olacaktır. Harmonik gerilimlerin faz ve genliklerinin büyük değişimleri mümkündür ve bu yüzden basit bir örnekleme uygun değildir. Daha gerçekçi bir yaklaşım frekans konverterleri üzerindeki “gerçek dünya” gerilim distorsiyon etkisini görmektir. Şebekenin distorsiyon etkisini belirlemek için şebekenin harmonik analizini yapmak gereklidir. Bu analiz zamanı kaydeden harmonik analizörlerle kolayca yapılabilir. Ölçümler, bir zaman periyodu içinde alınabilir (saatler veya günler)

Laboratuvar testleri gerçek dünya koşulunda yukarıdaki teorik sonuçları teyit etmek için gerçekleştirilmiştir. İdeal durumla ideal olmayan durum karşılaştırılma amacı ile gözden geçirilecektir. İdeal bir gerilim kaynağı elde etmek için dc motora (ilk tahrikçi) bağlanmış küçük bir senkron alternatör kullanıldı. Bu kaynak, hala ideal bir kaynak değildir. Çünkü yüksüz durumda 3. harmonik geriliminin küçük bir miktarı (%1) mevcuttur. Bununla birlikte, tam yükte bu etki ihmal edilir. Bu test düzeneği şekil 7.7 de görülmektedir.



Şekil 7.7 Deneysel Test Ayarları.

Harmonik gerilim kaynağı veya bozulmuş kaynağın esas ana trafodan (ayrıca bu trafo üniversitedeki diğer yükleri de beslemektedir) beslenen laboratuvar güç kaynağıdır. Trafo yerel kullanımdan beslenmektedir. Mevcut bozulmuş kaynaktaki gerilim harmoniklerinin miktarı bir harmonik analizör kullanılarak ölçülmüştür. Kaynak tarafındaki harmoniklerin seviyesinin nedenleri, desanj aydınlatması, bilgisayar yükleri ve trafonun yüksek gerilim tarafındaki zaten mevcut herhangi bir distorsiyon olarak düşünülebilir.

Her iki kaynaktaki testler, 3 kW lık dc hat reaktörlü bir frekans konverteri kullanarak gerçekleştirilmiştir. Toplam harmonik akım distorsiyonu (THID) yük değişimi (yükü arttırarak veya azaltarak) ile değiştirken frekans konverteri tam yükte çalıştırılmıştır. Her iki kaynağın reaktansı değişir ve bu aynı zamanda toplam harmonik akım distorsiyonunu değiştirir (kaynak reaktansındaki bir artma ile azalarak). İdeal koşuldaki frekans konverteri için ölçülen sonuçlar Çizelge 7.1 de verilmiştir.

Çizelge 7.1 İdeal gerilim kaynağından elde edilen harmonik akımların tablosu.

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	0.5	29.4	8.0	0.0	6.5	31.5

Bu sonuçlar, triplen harmonik akımların olmadığını açıkça gösterir (3. harmonik akımının küçük bir miktarı ihmal edilebilir çünkü bu akım mevcut alternatör terminallerindeki 3. harmonik geriliminin oluşturduğu düşünülebilir). 5. harmonik akımı yaklaşık olarak 7. ve 11. harmoniklerden %10 daha büyüktür. Bununla birlikte toplam harmonik akım distorsiyonu ideal duruma yakındır.

Çizelge 7.2 Gerilim kaynağı harmonikleri

H No.	1	3	5	7	THVD
Voltage	236.1	4.6	2	2.7	2.4%
%f	100.0	1.9	0.8	1.1	
Açı	0	145	152	-56	

(a)

H No.	1	3	5	7	THVD
Voltage	239.3	2.9	4	3	2.4%
%f	100.0	1.2	1.7	1.3	
Açı	0	151	-170	-56	

(b)

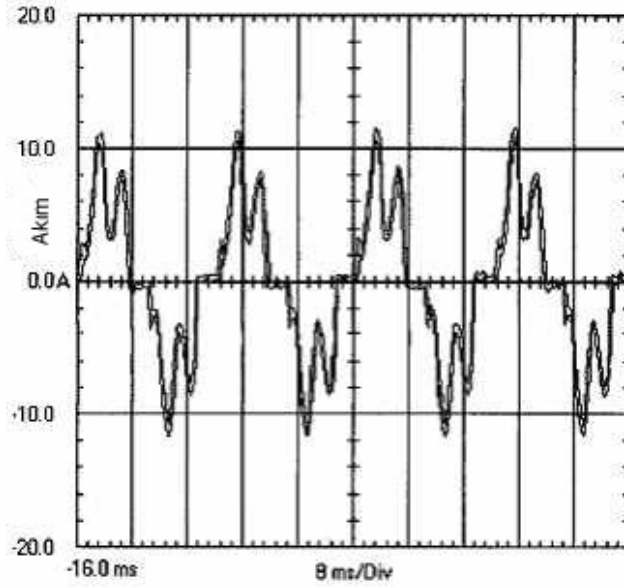
H No.	1	3	5	7	THVD
Voltage	239.1	3.5	2.2	2.8	2.1%
%f	100.0	1.5	0.9	1.2	
Açı	0	144	166	-54	

(c)

Laboratuar güç kaynağı ölçüldü ve mevcut harmoniklerin sonuçları Çizelge 7.2 de verilmiştir. Bu sonuçlar ortalama değildir ve anlık kaynak gerilimlerini temsil ederler. Aslında, harmonik gerilimlerin genlik ve fazı akım harmoniklerinin azalmasını gerilim kaynağı baskın harmonikleri ve a fazının gerilim azalmasını içerir.

Çizelge 7.3 de bozulmuş kaynağı kullanarak yapılan test için kaydedilen sonuçlar verilmiştir. Bu sonuçlar, 3. harmonik akım üretiminin olduğunu ve üç hat akımında 9. harmonik uzantısının daha az olduğunu gösterir. Ayrıca sonuçlar, diğer karakteristik harmoniklerin ideal test sonuçlarına göre %23 ila %35 arasında toplam harmonik akım distorsiyonunu arttırdığını göstermiştir. Bu artış, ideal durum için kullanılan senkron alternatör ile karşılaştırıldığında bu kaynağın reaktansında bir azalış olarak yorumlanabilir. Bu kaynak için ideal toplam harmonik distorsiyonu %40 mertebelerinde olabilir ancak bu sonucu teyit etmek için ölçülemez sadece simule edilebilir. Sonra bu durum toplam harmonik akım distorsiyonunun %8 ila %20 arasında bir artışını temsil eder.

Şekil 7.8, bozulmuş (dalga şekli) kaynak koşulu altındaki ölçülen akım dalga biçimini gösterir. Piklerin artık aynı yükseklikte olmadığı ve iletim periyodunun hafifçe değiştiği şekilden görülebilir.



Şekil 7.8 Bozulmuş kaynak altındaki ölçülen akımın dalga biçimi.

Pratik durum ile yazılım programının sonuçlarını karşılaştırmak için dalga şekli bozulmuş kaynak ve uygun bir frekans konverteri kullanarak bir simülasyon gerçekleştirilmiştir. Simülasyon için mikrosimin PSpice devre simülatörü kullanılmıştır. Harmonik akımlar için çıkış sonuçları Çizelge 7.4 de verilmiştir. Bu sonuçlar, toplam harmonik distorsiyonunun a ve b fazı için ölçülen değerler ile yakın olduğunu gösterir. Ancak c fazından elde edilen değer büyük bir hataya sahiptir ve toplam harmonik distorsiyonunda %15 lik azalma ve harmonik akımlarının ölçülen değerden %15 e kadar hatalı olduğunu gösterir.

Bu hatalar aşağıdaki nedenlere göre olabilir.

1. Doğru olmayan ölçümler kayıt altına alındı.
2. Test etme sırasında olan kaynak distorsiyonundaki büyük değişiklik.
3. Pratik frekans konverter modelinin doğru olmayan modellemesi/simülasyonu.

Hatanın ana nedeni büyük ihtimalle 2 nolu maddeden dolayıdır çünkü test sistemi açık ve dış etkiler kolaylıkla izlenemez. Ölçülen ve simule edilen testler arasındaki sonuçların doğruluğunu arttırmak için ölçülen pratik sonuçların tutarlılığından emin olmak için kullanılacak olan kapalı sisteme ihtiyaç duyulabilir böylelikle sistem simulasyon modeli doğru bir biçimde geliştirilebilir.

Çizelge 7.3 Bozulmuş gerilim kaynağı kullanılarak elde edilen akım harmonikleri.

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	11.7	44.1	36.8	4.2	12.5	60.7

(a)

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	11.2	40.9	30.8	1.2	7.7	53.5

(b)

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	18.1	48.5	37.2	3.1	12.0	65.6

(c)

Çizelge 7.4 Bozulmuş gerilim kaynağı kullanılarak simüle edilen akım harmonikleri.

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	13.8	49.2	31.5	3.5	9.3	61.6

(a)

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	6.2	41.1	32.7	3.7	8.0	54.8

(b)

H No.	1	3	5	7	9	11	THID
Akım (%)	100.0	13.1	42.2	23.3	3.6	6.9	51.1

(c)

6 darbeli frekans konverterlerin artan kullanımları, şebekede artmış bir harmonik akım seviyesine neden olacaktır. Bu harmonik akımlar, genellikle triplensiz tek numaralı harmonikler tarafından karakterize edilirler. Burada sunulan analiz, bu karakteristik akımların değişeceğini ve dengesiz, dalga şekli bozulmuş kaynakta triplen harmoniklerin oluşacağını göstermiştir. Ayrıca bu sonuçlardan da görüleceği üzere harmonik akımlarının dengesi bozulacaktır.

Bir veya birden çok sayıda frekans konverterinin bağlanacağı bir sistemin mevcut gerilim seviyesi ve distorsiyonları için detaylı bir çalışma yapılmalıdır. Çünkü bu frekans konverterinden kaynaklanan akım distorsiyonunu etkileyecektir. Burada sunulan analizin etkisi aşağıdakilere neden olabilir. Harmonik akım seviyeleri IEEE 519-1992 yi karşılamaması durumunda toplam harmonik akım distorsiyonu arttırılacaktır. IEEE 519-1992 yi karşılamak için harmonik kapan filtreleri kullanılırsa bu filtreler harmonik akım seviyesini yeterince azaltmayabilir.

Kaynağın distorsiyon seviyelerinin büyük değişimleri çok sayıda test yapmadan kolaylıkla gerçekleştirilemezken, toplam harmonik akım distorsiyon seviyesini belirleme uygun bir simülasyon paketi kullanarak kolaylıkla yapılabilir. Mikrosim PSpice yazılımı uygun doğrulukta gerçekleştirdiği halde güç elektroniği modellemesi için tasarlanmamıştır. Ancak pratik sonuçlarla karşılaştırıldığında hala bazı hatalar vardır. Gerilim distorsiyon koşulları altında modellemeye imkân veren güç elektroniği modellemesi için uygunluğu tespit etmek için bir yazılım paketi araştırılmalıdır.

7.2 12 Darbeli Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi

7.2.1 Dengesiz Giriş Hat Gerilimleri İle Beslenen 12 Darbeli Doğrultucularla Harmonik Azaltımı

12 darbeli doğrultucular genellikle harmonik akım distorsiyonlarını azaltmadaki teorik yeteneklerinden kullanılır. Bununla birlikte, gerçek işletme koşullarındaki dengesiz giriş hat gerilimleri ile 12 darbeli doğrultucuları nasıl bir performans sergilediğini gösteren çok az bir bilgi yayınlanmıştır. Bu makale, bir çok mühendisin beklediği gibi 12 darbeli doğrultucuların harmonik seviye azaltımını gerçekleştiremediğini ve pratik koşullar altındaki IEEE-519 gereksinimlerini karşılamayabileceğini ispat eden test datalarını sunar. 12 darbeli ve 6 darbeli doğrultucuların gerçek performansı bir matris harmonik filtresi vasıtasıyla beslenen 6 darbeli sürücünün performansı ile karşılaştırılıyor. Matris harmonik filtresi, düşük maliyette süper harmonik azaltımı sağlıyor.

1960 ların ortalarında güç yarı iletkenleri sadece sınırlı kapasitelerde mevcut iken, 12 darbeli doğrultucular güç yarı iletkenlerinin direkt paralel bağlanmalarına göre daha yüksek akım oranlarını gerçekleştirmede basit ve daha etkili bir yaklaşım sağlıyordu. Bu teknik bugün hala doğrultucu uygulamalarında kullanılmaktadır. 12 darbeli doğrultucunun tipik bir hali Şekil 7.9 da görülmektedir. Doğrultucu giriş devresi birbirine paralel çalışan 30 derecelik faz farkı olan iki 6 darbeli doğrultucudan oluşmaktadır. Şekil 7.9 daki devre basitçe primer üçgen birinci sekonder sargısı üçgen ve gerekli faz kaymasını elde etmek için ikinci sekonder sargısı yıldız bağlı bir izolasyon trafosu kullanır. Fazlar arası reaktör anlık doğrultucu çıkış gerilimlerindeki farklılığı desteklemek ve her bir doğrultucunun bağımsız olarak çalışmasına izin vermek için kullanılır. Çünkü her bir doğrultucunun anlık çıkışı eşit değildir. Trafodaki primer akımı her bir 6 darbeli doğrultucu akım toplamı veya 12 darbeli dalga biçimidir.

Doğrultucu devreleri için teorik giriş akım harmonikleri darbeli sayısının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$H=(np\pm 1) \quad n=1,2,3,\dots \text{ ve } p=\text{darbeli sayısı}$$

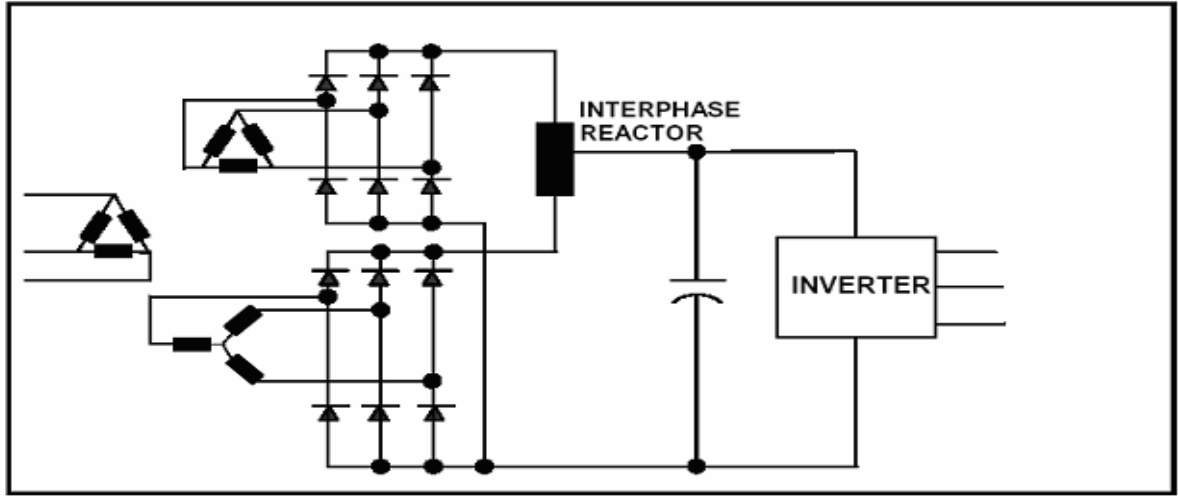
6 darbeli bir doğrultucu için, giriş akımı aşağıdaki temel frekansların katlarında harmonik bileşenlere sahip olacaklardır.

$$5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31,$$

Şekil 7.9'da görülen 12 darbeli sistemi için, giriş akımı aşağıdaki temel frekansların katlarında harmonik bileşenlere sahip olacaklardır.

$$11, 13, 23, 25, 35, 37,$$

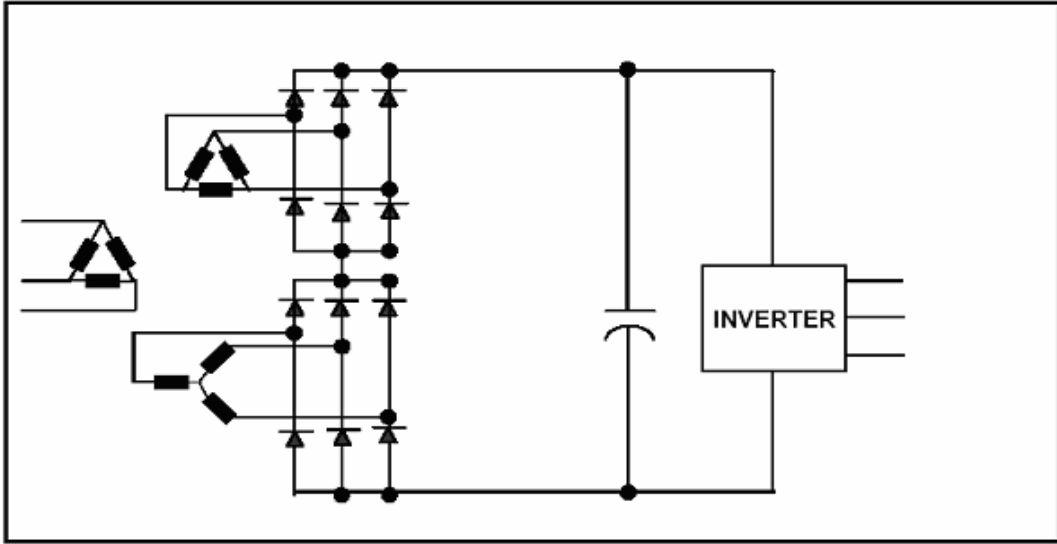
Not: 5. ve 7. harmonik 12 darbeli sistemde mevcut değildir. Her bir harmoniğin genliği, harmonik numarası ile ters orantılı olduğundan 12 darbeli sistemi daha az bir teorik harmonik akım distorsiyonuna sahiptir.



Şekil 7.9 12 darbeli doğrultucu devre şeması.

Şekil 7.9’da görülen devredeki problem, iki doğrultucu harmoniklerdeki azalmayı sağlamak için akımı paylaşmalıdırlar. Bu durum trafonun iki sekonder sargısının çıkış geriliminin tamamen eşit olmasını gerektirir. Trafonun sekonder empedansı ve açık devre çıkış gerilimindeki farklılıklar nedeniyle bu durum pratik olarak belirlenen bir yükte (tipik olarak nominal yükte) gerçekleştirilebilir ve yük değişimlerinde gerçekleştirilemez. Bu özellik paralel 12 darbeli konfigürasyonunun en önemli problemi.

Ayrıca 12 darbeli bir sistem, seri bağlı iki 6 darbeli sistemden oluşturulabilir. Bu konfigürasyonda her biri DC gerilimin yarısını üreten iki 6 darbeli doğrultucu seri bağlıdır (Şekil 7.10). Bu bağlantıda akı paylaşma ile ilgili problem ortadan kalkar ve fazlar arası bir reaktör gerektirmez. Yüksek akımlı uygulamalardan ziyade harmonikli uygulamalar için bu çözüm paralel bağlantıyı uygulamaktan daha basittir.



Şekil 7.10 Seri bağlı 2 adet 6 darbeli sistemden oluşan 12 darbeli sistem.

Seri doğrultucu bağlantısını kullanarak, 6 darbeli sürücü kendi DC bara terminallerine sahipse veya DC baranın bir tarafına ulaşmaya izin veriyorsa standart bir 6 darbeli sürücünden 12 darbeli bir sürücü oluşturmak çok kolaydır. Bir çok standart AC sürücü DC bara içine bir DC bara şok bobini yerleştirmek için terminallere sahiptir. Aynı terminaller sürücüyü 12 darbeli sisteme çevirmek için harici bir doğrultucu eklemek için kullanılabilir. Bu durumda ikinci doğrultucudaki ani deşarj akımını kontrol etmek için ek bir devreye gerek yoktur.

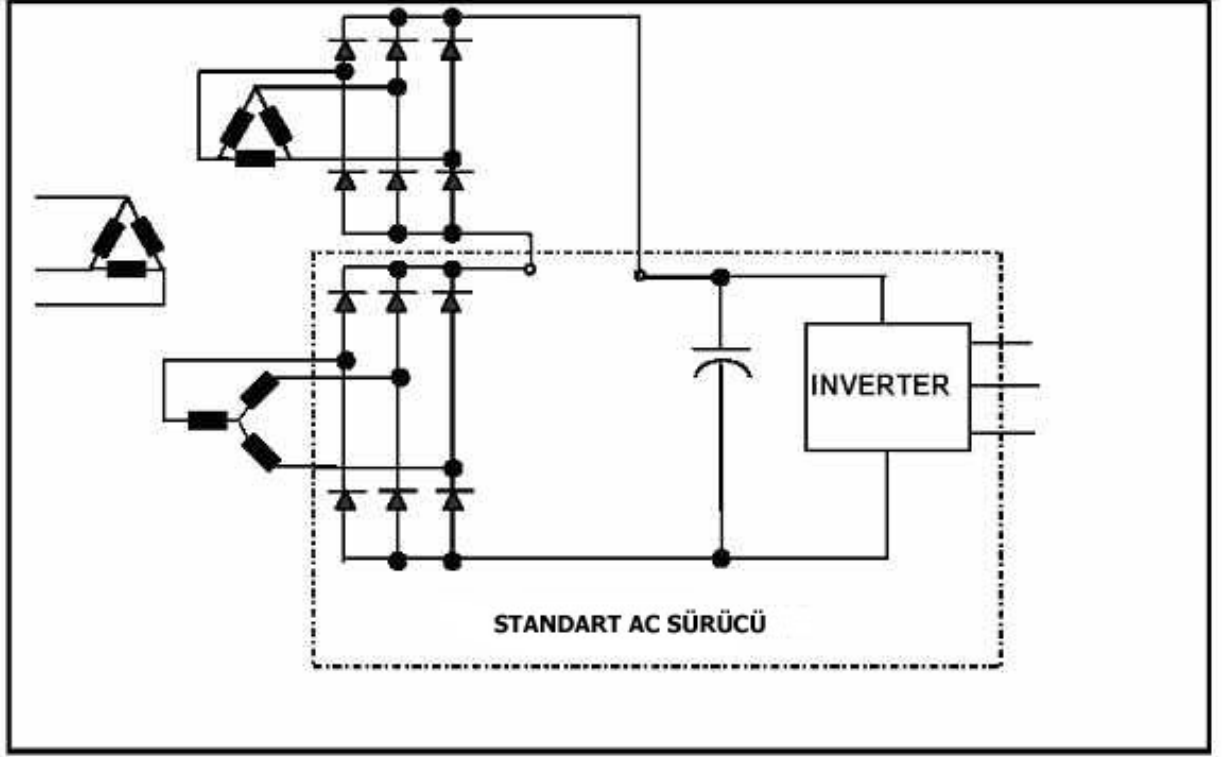
Doğrultucu devrelerin detaylı olarak incelendiği ve analiz edildiği çok sayıda iyi kitap ve makaleler mevcuttur. Bununla birlikte, analizlerin çoğu üç faz hat geriliminin dengeli olması varsayımı altında yapılır. Bizim pratik deneyimimiz, bu varsayımın çok sayıdaki endüstri ve ticari güç sistemleri (özellikle dengesiz yüklerde) için geçerli olmadığını gösterdi. Amerika birleşik devletlerinde çalışan sürücü uygulamaları için ziyaretlerimizdeki izlenimlerimiz bir çok güç sisteminin %1 ila %3 arasında bir dengesizlikle işletildiğidir.

ANSI C 84.1 –1995 yüzde gerilim dengesizliğini aşağıdaki gibi tanımlar.

$$100 * (\text{ortalama gerilimden maksimum sapma}) / (\text{ortalama gerilim})$$

Ayrıca yukarıdaki standart, saha araştırmalarına göre; güç sistemlerinin %98 i, %0 ila %3 arasında gerilim dengesizlik aralığında ve yine güç sistemlerinin %66 sı bağlantı noktasında %0 ila %1 arasında dengesizliktedir. Standart, yüksüz durumda ölçüldüğünde maksimum

gerilim dengesizliğini %3 ile sınırlamak için elektrik tedarik sistemlerinin tasarlanmasını önerir. Bina güç dağıtım sistemlerindeki yük dengesizliği kullanım noktasında kullanım dengesizliğine ilave olarak gelir.

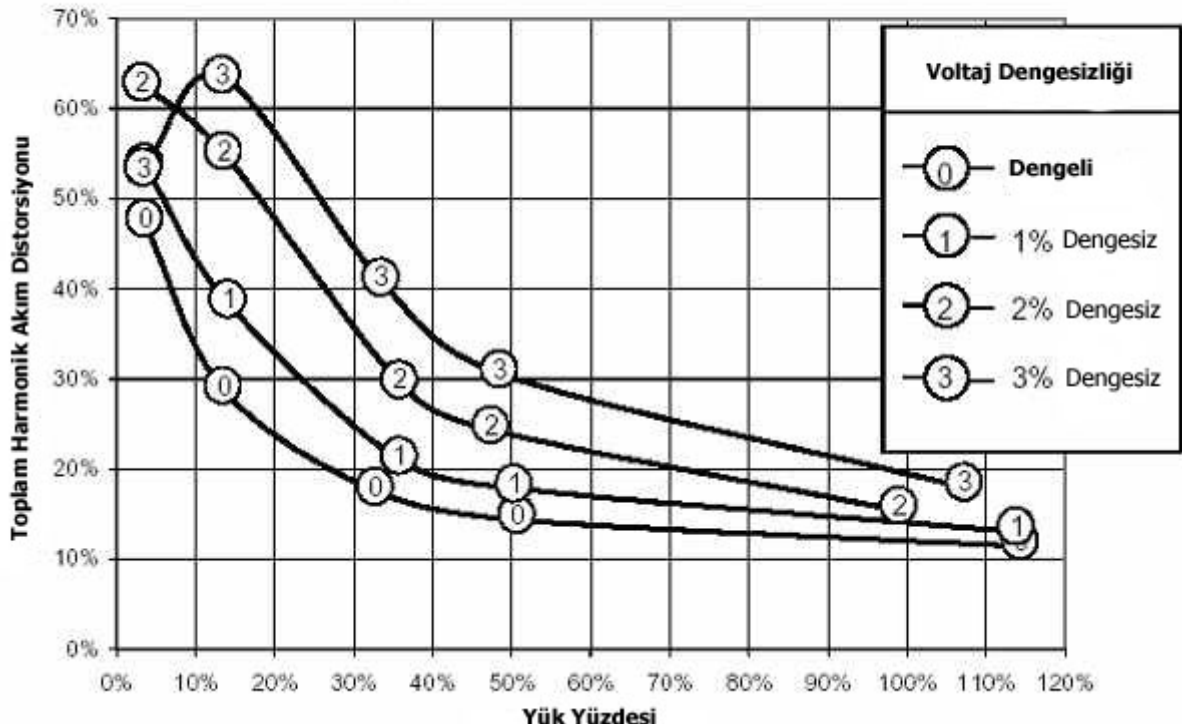


Şekil 7.11 Seri köprü bağlantısı kullanılarak standart 6 darbeli sürücü ve Δ/Δ -Y trafodan oluşan 12 darbeli sistem.

12 darbeli doğrultucu sisteminin dengesiz hat gerilimi koşulu altında nasıl çalıştığını öğrenmek için şekil 7.11 de görülen seri köprü bağlantısı kullanarak standart 6 darbeli sürücü ve standart bir üçgen/üçgen-yıldız izolasyon trafosundan 30 HP 12 darbeli bir doğrultucu oluşturduk. Bir oto trafosu izolasyon trafosunun yerine kullanılabilirdi. Oto trafosu daha az bir maliyete sahiptir ve daha az bir bakım gerektirir. Fakat izolasyon trafosu seçildi çünkü daha iyi performans sağlar ve stoklarda hazır olarak mevcuttur. Sistem %0 ila %3 arasında değişen gerilim dengesizliği ile ve %5 ila %110 arasında değişen yüklerde test edildi. Giriş toplam harmonik akım distorsiyonu şekil 7.12 de görülmektedir. Giriş toplam harmonik akım distorsiyonu, tam yükte dengeli hat geriliminde %12 ila %17 yükte %3 dengesiz hat geriliminde %65 arasında değişir. Veriler, 12 darbeli doğrultucunun harmonik performansının artan hat gerilim dengesizliği ile birlikte hızlıca azaldığını gösterir. Çok sayıdaki kullanıcı, toplam harmonik akım distorsiyonunun yüksüz durumdan tam yüklü duruma kadar değişen

aralıkta belirlenen sınırları aşmaması beklerler. Oysaki grafik, 12 darbeli doğrultucudaki toplam harmonik akım distorsiyonunun yükün bir fonksiyonu olduğunu ve iyi performansın dengeli bir hat gerilimi gerektirdiğini gösterir.

6 darbeli doğrultucu sisteminin dengesiz hat gerilimi koşulu altında nasıl çalıştığını öğrenmek için %1 empedanslı bir güç kaynağından beslenen %5 hat reaktörlü 30 HP lik bir doğrultucuyu test ettik. Bu sistem, %0 ila %3 arasında değişen dengesiz hat gerilimi ve %5 ila %110 arasında değişen yüklerde test edildi. Toplam harmonik akım distorsiyonu şekil 5 de görülüyor. Toplam harmonik akım distorsiyonu, dengeli hat geriliminde ve tam yükte %29 ila %3 dengesiz hat gerilimi- ve %5 yükte %95 arasında değişir. 12 darbeli doğrultucunun harmonik performansı tüm dengesiz hat koşulları altında 6 darbeli doğrultucuya göre daha iyidir.

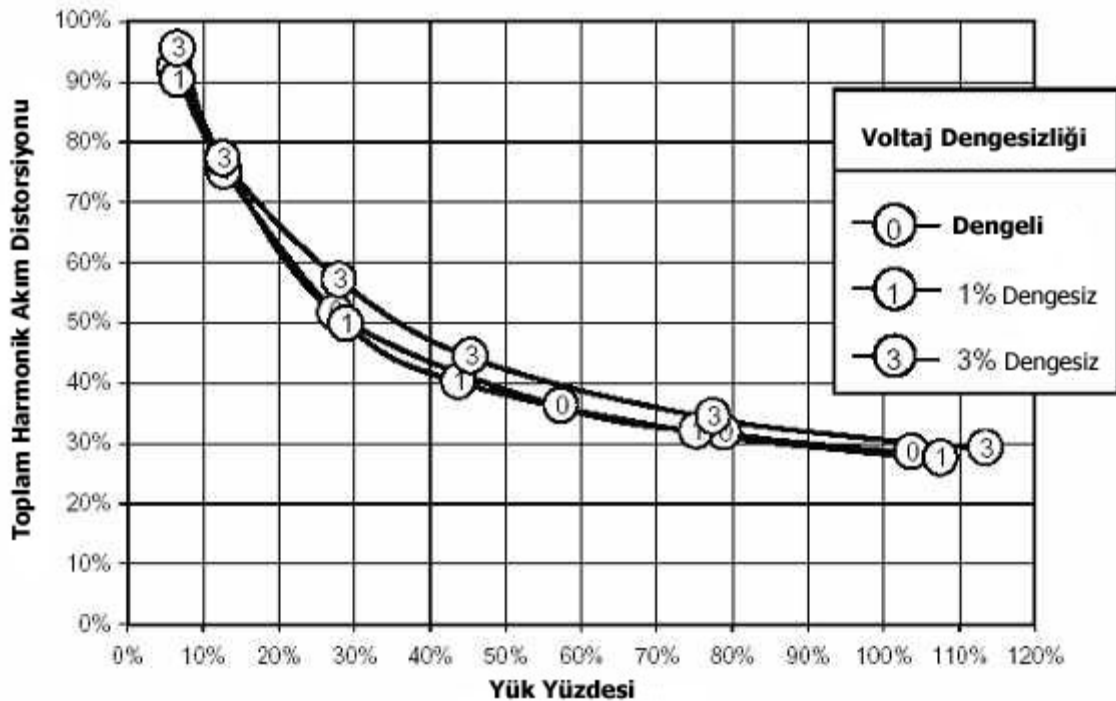


Şekil 7.12 Dengesiz Gerilim altında yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.

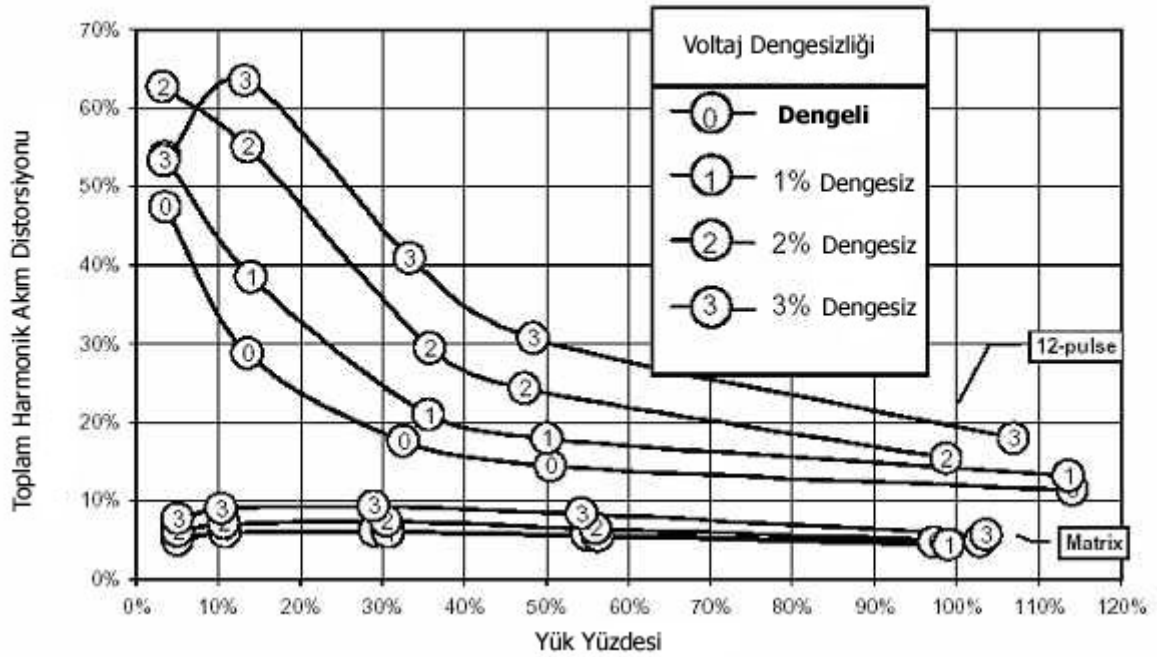
12 darbeli doğrultucuyu benzer dengesiz hat gerilim koşulları altında MTE matris harmonik filtreli standart bir 6 darbeli sürücü ile karşılaştırmak ilginçtir. Matris harmonik filtre, standart 6 darbeli doğrultucu ile çalışmak üzere tasarlanmış alçak geçirgen harmonik bir filtre türüdür. Matris harmonik filtre 30 HP gücündeki 6 darbeli doğrultucudan beslenirken test edildi. Bu

sistem 50 ila %3 arasında değişen dengesiz hat gerilimi ve %5 ila %110 arasında değişen yüklerle test edilmiştir. Toplam harmonik akım distorsiyonu, şekil 7.14 de görülmektedir. Toplam harmonik akım distorsiyonu tam yükte ve dengeli hat geriliminde %4.7 ila %25 yükte ve %3 dengesiz hat geriliminde %9 arasında değişir. Alçak geçirgen filtre yük aralığı boyunca 12 darbeli sistemden daha iyi bir harmonik performans sağlar ve gerilim dengesizliklerine daha az duyarlıdır. Aynı işletme koşulları altında, alçak geçirgen Matris harmonik filtreden beslenen 6 darbeli doğrultucu toplam harmonik akım distorsiyonunun %7 sine sahipken, %1 hat gerilim dengesizliğinde ve %25 yükte, 12 darbeli doğrultucu giriş toplam harmonik distorsiyonunun %29 una sahiptir.

Kullanım noktasındaki %1 ila %3 arasındaki hat gerilim dengesizliklerinde etkili olmayan harmonik azaltım teknikleri yararlı sonuçlar üretmek için pratik bir çözüm olmayacaktır. Bu makaledeki veriler, alçak geçirgen bir matris filtreden beslenen standart bir 6 darbeli sürücünün değişken yük uygulamalarında ve %0 ila %3 arasında değişen hat gerilim dengesizliklerinde 12 darbeli bir sürücüye göre daha iyi bir harmonik performans sağladığını gösterir.



Şekil 7.13 %5 Hat Reaktörü ile beslenen 6 darbeli doğrultucunun yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.



Şekil 7.14 12 darbeli ve 6darbeli + Matrix Harmonik Filtresine ait doğrultucuların yük durumuna göre Toplam Harmonik Distorsiyon değerleri.

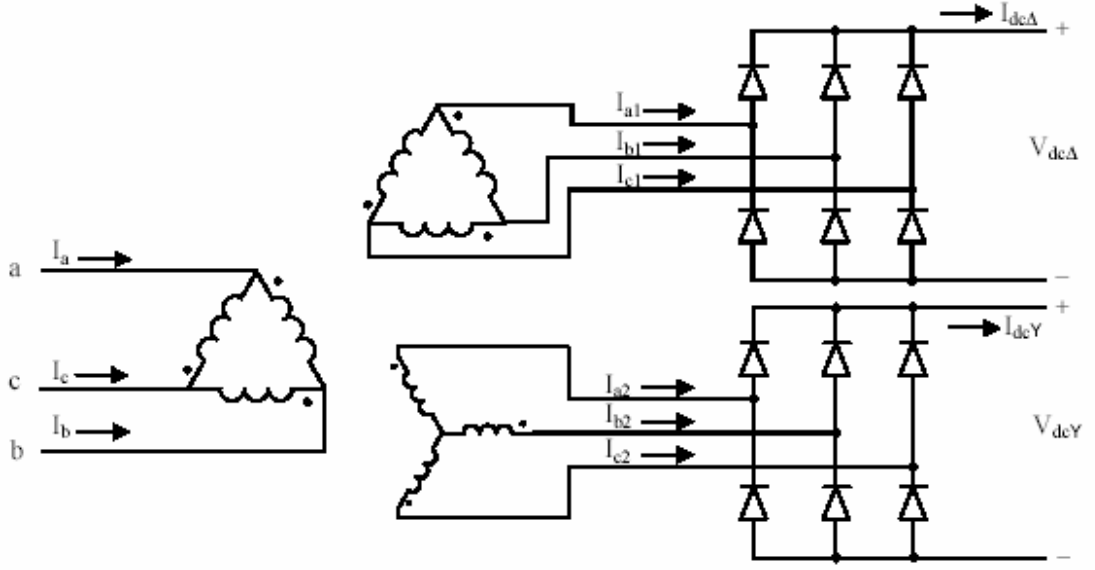
7.2.2 DC Bara Modülasyonunu Kullanarak 12 Darbeli Doğrultucularda Harmonik Yok Edilmesi

AC giriş akımlarındaki harmonik azaltımı; motor sürücüleri, güç sistemleri ve UPS sistemleri gibi güç elektroniği elemanları için artarak önemli hale gelmektedir. 12 darbeli doğrultucular, düşük giriş akım harmoniklerini gerçekleştirmek için orta ve yüksek güç uygulamalarında geniş çapta kullanılmaktadır. 12 darbeli konfigürasyonu Şekil 7.15 de görüldüğü üzere biri üçgen ve biri yıldız olan ayrı trafo sekonderinden beslenen iki diyot doğrultucu köprüleri kullanır. İki köprü faz arası reaktör vasıtası ile seri veya paralel bağlanabilir. Teoride, 12 darbeli doğrultucu, 6 darbeli köprüsünün çeyreği civarındaki giriş akımı toplam harmonik distorsiyonuna sahiptir.

Genellikle 12 darbeli doğrultucu ile gerçekleştirilenden daha iyi bir dalga biçimi gerekir. Bu durumda, harmonikleri azaltmak için ya 18 darbeli gibi daha yüksek bir darbeli konfigürasyonu ya da LC filtreler kullanılır. Ayrıca, PWM doğrultucular bir opsiyodur, fakat yüksek güç seviyelerindeki kullanımları genellikle rejeneratif sürücülerdeki gibi çift yönlü ve güç akışı gerektiren uygulamalarla sınırlandırılmıştır.

Literatürde, 12 darbeleri doğrultucuların performansı geliştirmek amacıyla çeşitli yaklaşımlar öne sürülmüştür. Bu metotlar genellikle hacimli (fazla yer kaplayan) ve tasarlanması zor olan bir faz arası reaktör gerektirir.

Şekil 7.15 de görülen 12 darbeleri doğrultucuyu referans alarak, hat akımları faz gerilimlerinin katları ile ölçeklendirildiğinde birim güç faktöründe sinüsoidal giriş akımları elde edilir.



Şekil 7.15 12 darbeleri doğrultucuya ait devre şeması.

$$I_a^* = k \cdot V_a ; I_b^* = k \cdot V_b ; I_c^* = k \cdot V_c \quad (7.7)$$

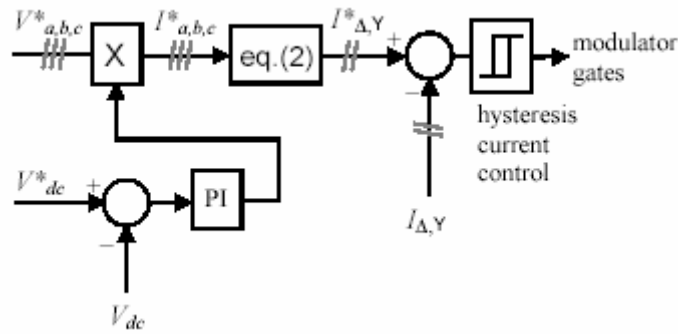
Şekil 7.15 deki üçgen-üçgen bağlı en pozitif ve en negatif anlık gerilimlere sahip fazlardan akımlar çeker ve 3. fazdan herhangi bir akım çekmez. Diğer taraftan üçgen-yıldız bağlı köprü, primer tarafta üç fazdan da akım çeker. DC taraftan çekilecek referans akımlar için aşağıdaki matematiksel ifadeler kullanılır. Referans kaynak akımları denklem 7.7 deki eşitliklere göre bulunur.

$$I_{dc,Y}^* = 3 \cdot \min(|I_a^*|, |I_b^*|, |I_c^*|) \quad (7.8)$$

$$I_{dc,\Delta}^* = \min(|I_a^* - I_b^*|, |I_b^* - I_c^*|, |I_c^* - I_a^*|) \quad (7.9)$$

Referans akımlar, köprü çıkışı ve dc bara kapasitesi arasında bir akım kontrollü PWM modülatör yerleştirilerek izlenebilir. Şekil 7.16, histeresiz tabanlı PWM modülatörün akım kontrolü için blok diyagramı gösterir. Modülatör ana dc baranın onda biri oranında bir gerilim oranına gerek vardır ve IGBT ler ve MOSFET ler kullanılarak oluşturulabilir.

Şekil 7.17, paralel bağlı 12 darbeli konfigürasyonu için önerilen yaklaşımın bir uygulamasını gösterir. DC hat PWM modülatörleri, kesici (chopper) modüller kullanılarak oluşturulabilir. DC baradaki reaktörler opsiyondur ve kaynak/trafo empedansı akım kontrollü modülatör için bir filtre olarak yeterli olabilir. PWM modülatörler, köprü çıkışları ve dc bara arasındaki voltaj farklılığına bağlı olduklarından, gerilim oranları düşük olabilir. Modülatörlerin dahili dc barası kendinden regüleli olabilir. Çünkü modülatörler herhangi bir net enerji transfer etmezler.

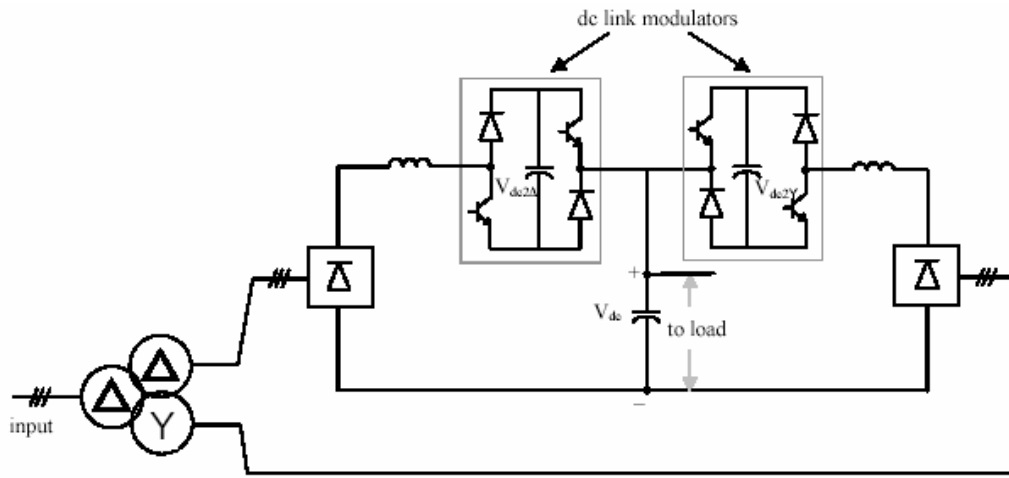


Şekil 7.16 Histerisiz tabanlı PWM modülatörün akım kontrolü için blok diyagramı.

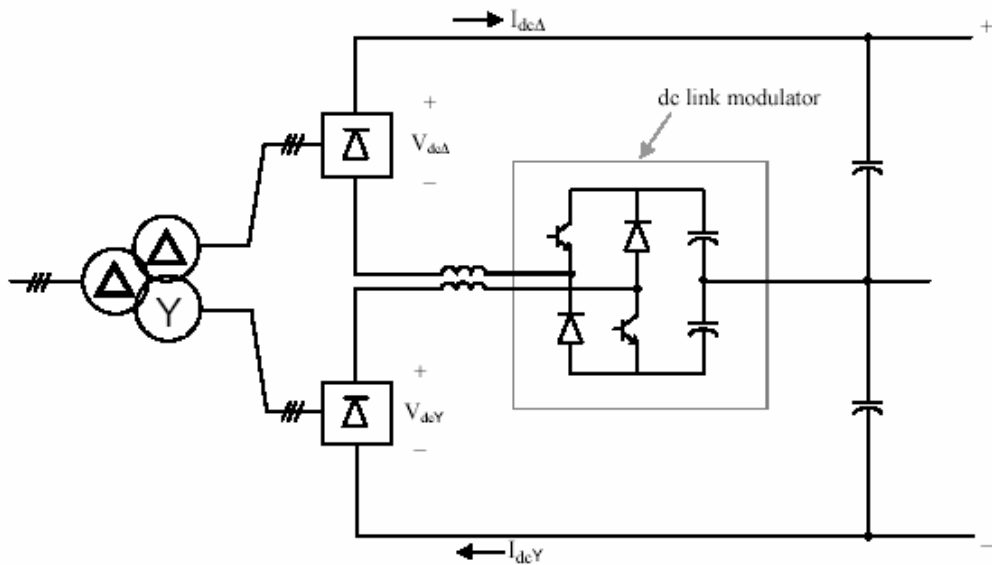
Şekil 7.18, seri bağlı 12 darbeli konfigürasyonu için önerilen yaklaşımın uygulamasını gösterir. DC hat modülatörü olarak kesici (chopper) H köprü kullanılabilir. Daha önceden gösterildiği gibi modülatörün dc barası kendinden regüleli olabilir. Şekil 7.17 deki doğrultucu konfigürasyonu, 3 seviyeli invertere giriş olarak kullanılabilir. Ayrıca PWM modülatör, ek kapasitör kullanmadan çok seviyeli inverterin dc bara taplarının bir fonksiyonu olarak konfigüre edilebilir. Şekil 7.18, 4 seviyeli topoloji için bir devreyi gösterir.

Önerilen metodun avantajları;

- Toplam harmonik kompanzasyonu
- İlave PWM modülatörün düşük voltaj gerilimi
- Faz arası reaktöre gerek olmaması. Trafo veya kaynak empedansı, PWM modülatör için filtre endüktansı olarak iş görebilir.
- Herhangi bir arıza durumunda normal 12 darbeli çalışmaya dönmek için PWM modülatör by-pass edilebilir.
- Diğer active front-ends gerektiği gibi hızlı recovery diyotlarının yerine ucuz doğrultucu diyotlar kullanılabilir.



Şekil 7.17 Paralel bağlı 12 darbeli sistemin devre şeması.



Şekil 7.18 Seri bağlı 12 darbeli sistemin 4 seviyeli topolojisine ait devre şeması.

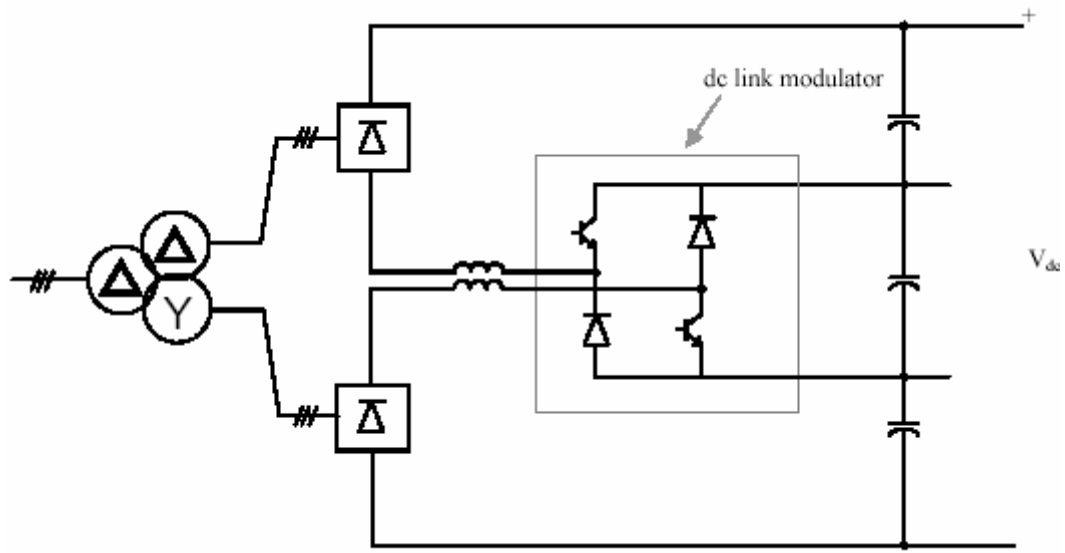
Artan eleman sayısına ilave olarak, köprü içindeki dalgalanma (ripple) akımı ve modölatör için kontrolör gereksinimi önerilen metodun dezavantajlarıdır.

Simölasyon Sonuqları

Önerilen metodun çalıştığını teyit etmek için bilgisayar simölasyonları gerçekleştirildi. Şekil 6 da şekil 4 deki devre için elde edilen sonuçlar görölmektedir. Kullanılan parametreler;

- Giriş gerilimi (hat-hat); 122 V
- DC bara gerilimi; 2*160V
- DC yük gerilimi: 40A
- PWM modölatör dc gerilimi; 2*15V
- Filtre endüktörü 100 mikrohenny
- PWM akım histeresiz bandı; +/- 3 A

PWM modölatör için histeresiz tabanlı akım kontrolör kullanılır. Dalga biçimlerinden de açıkça göröldüğü üzere, iki köprüden çekilen dc akımlar denklem 2 ye göre parça parça sinüsoidaldir. Giriş akımları PWM dalgalanmasını ihmal ederek tamamen sinüsoidaldir. Yaklaşık olarak sinüsoidal akımların olmasına neden olan [4,5] de kullanılan üçgensel dalgalarla zıttır.



Şekil 7.19 12 darbeli doğrultuculu devreye ait devre şeması.

Giriş akım harmoniklerinin yok edilmesi dc baradaki ilave modülatör masrafı ile elde edilir. Modülatör, iletim ve anahtarlama kayıpları ekleyecektir. Bununla birlikte, modülatör gerilimi anan doğrultucu köprülerinden daha düşük bir genlik kadar olacaktır ve düşük kayıplı IGBT/MOSFET ler kullanılabilir.

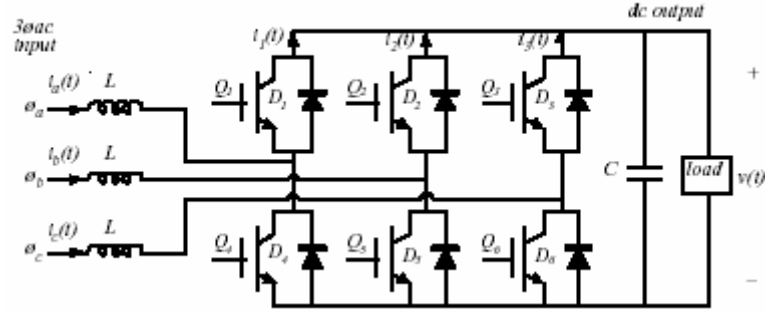
Tek köprüden çekilen akımlar, geleneksek 12 darbeli köprüden çekilen akımlardan farklı olan yaklaşık üçgensel dalga biçimlerine sahiptirler. Bu durum, bu makalede incelenmeyen diyot köprü ve giriş trafo dizaynı için belli bir fikir vermektedir.

Modülatör, sistemdeki diğer harmonik üreten yükler için aktif filtrelemeyi sağlamak amacı ile kontrol edilebilir.

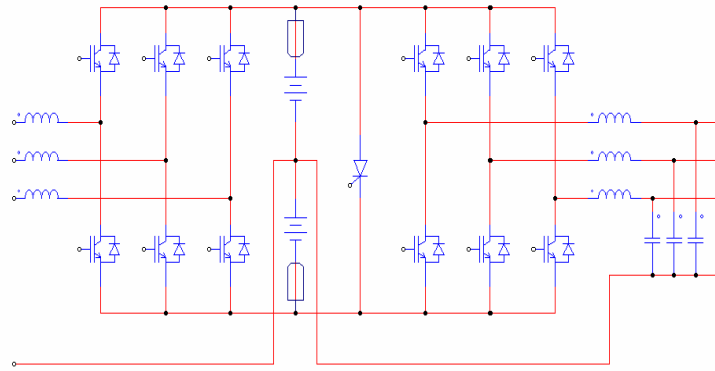
Bir DC hat modülatörü ekleyerek 12 darbeli modülatörün harmoniklerden bağımsız hale getiren yeni bir metot sunulmuştur. Modülatör düşük güç kapasitesine sahiptir ve tam bir PWM doğrultucu ile karşılaştırıldığında ucuz bir çözüm sağlayabilir. Kontrol metodunun özet bir tanımı ve ilk simulasyon sonuçları sunulmuştur. Diğer analiz ve deneysel teyitler, önerilen devreyi detaylıca karakterize etmek için inceleme gerektirir. [7] de önerilenle bağlantılı olan bu metot 12 darbeli inverterler, yüksek gerilim dc konverterler ve aktif filtreler gibi uygulamalarında içine alacak şekilde kapsamı genişletilebilir.

7.3 IGBT Doğrultuculardan Kaynaklanan Harmoniklerin İncelenmesi

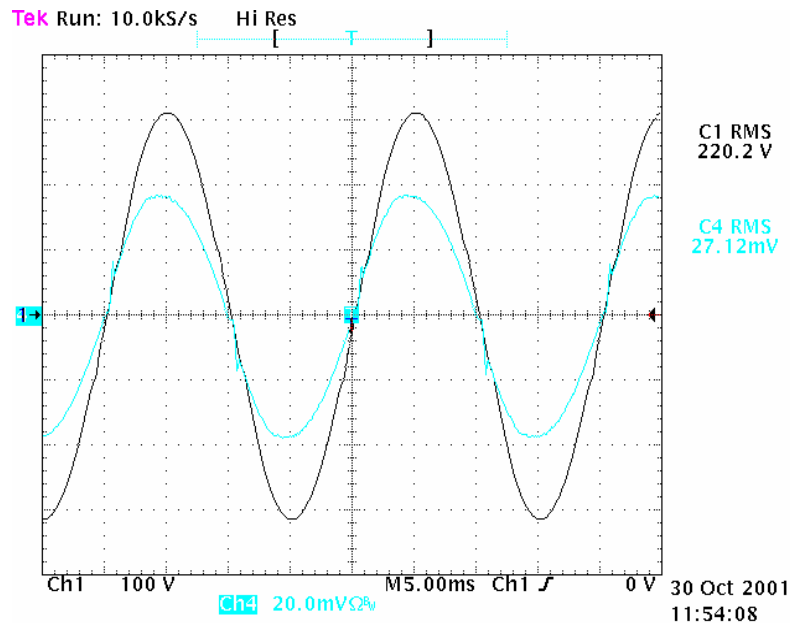
IGBT doğrultuculu cihaza ait topoloji şekil 7.20 de gösterilen üç faz ac den dc ye boost (artıran) doğrultuculardır. Bu konverter, 6 IGBT'li anahtarlar gerektirir. Endüktans ve kapasitörler yüksek frekans anahtarlama frekanslarını süzerler ve düşük frekans ac elemanların dalga biçimleri üzerinde küçük bir etkiye sahiptirler. Her fazın anahtarları, ya ortalama akım kontrolünü kullanan kontrolör düzeneğini çoğaltarak ya da diğer birkaç yaklaşımla giriş direnç benzeşimi elde etmek için kontrol edilir. Bozulmamış hat akım dalga biçimleri elde etmek için, dc çıkış gerilimi (V) giriş faz-faz geriliminin pik değerine eşit veya daha büyük olmalıdır. Tipik bir uygulamada, dc çıkış gerilimi giriş faz-faz geriliminin pik değerinden biraz fazla olmalıdır. Bu konverter, konverterin doğrultucu olarak çalıştırılması durumu dışında iyi bilinen gerilim kaynak inverterine benzer ve yüksek frekans darbe genişlik modülasyonu vasıtasıyla kontrol edilir.



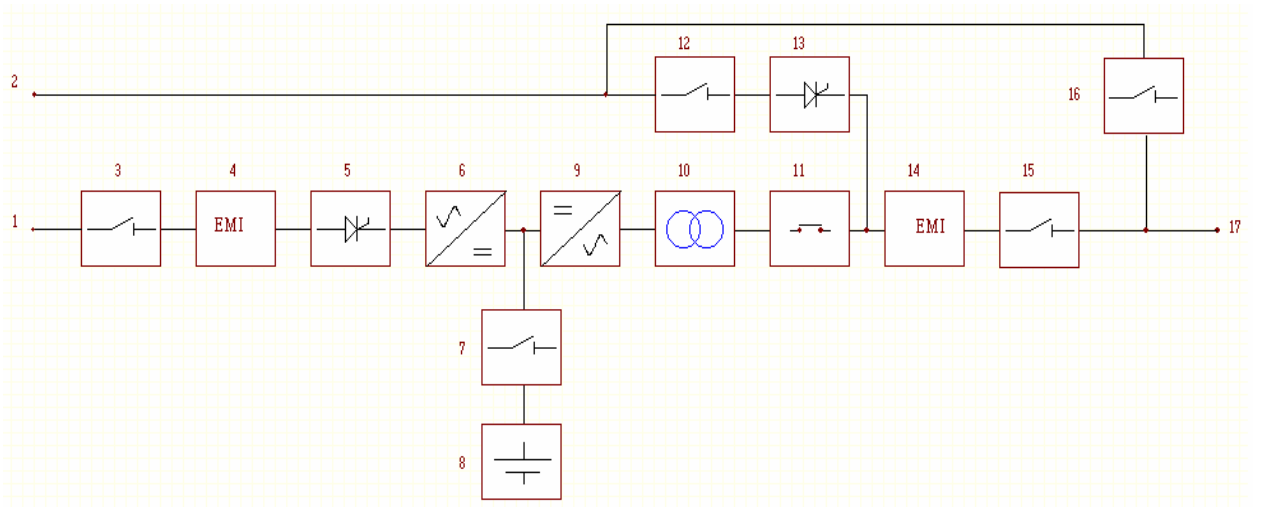
Şekil 7.20 IGBT doğrultucuya ait devre şeması.



Şekil 7.21 IGBT doğrultuculu kesintisiz güç kaynağına ait devre şeması.

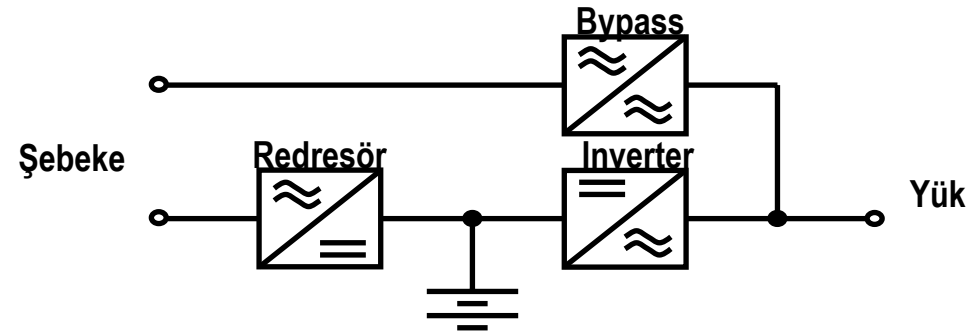


Şekil 7.22 IGBT doğrultuculu kesintisiz güç kaynağının giriş akım ve gerilim dalga şekilleri.



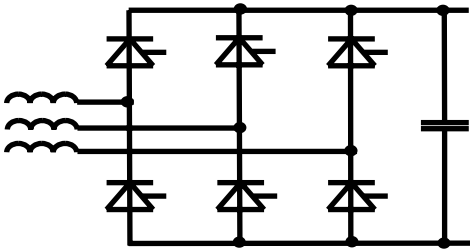
Şekil 7.23 IGBT doğrultucu topolojiye ilişkin blok diyagram.

8. FARKLI DOĞRULTUCU TASARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI



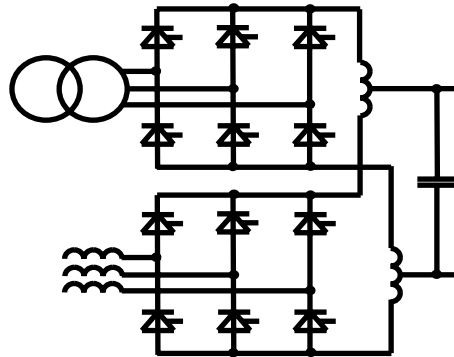
Şekil 8.1 Kesintisiz Güç Kaynağı Devre Şeması.

6 DARBELİ REDRESÖR



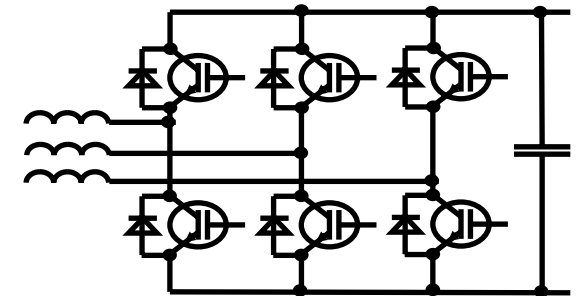
Şekil 8.2 6 darbeli redresörün devre şeması

12 DARBELİ REDRESÖR



Şekil 8.3 12 darbeli redresörün devre şeması

IGBT'Lİ REDRESÖR



Şekil 8.4 Igbt'li redresörün devre şeması

Çizelge 8.1 Kesintisiz Güç Kaynaklarında Doğrultucu Tiplerine Göre Şebekeye Basılan Harmonik Değerleri.

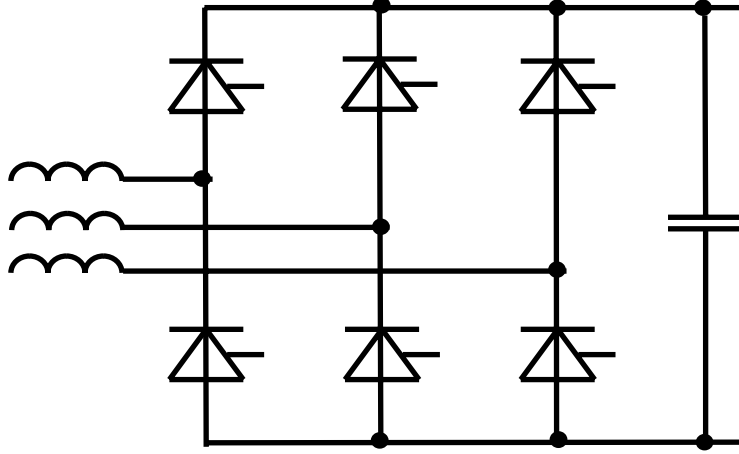
Harmonik	IEC61000-3-4standartları	IGBT Doğrultuculu	12 darbeli Doğrultuculu	6 darbeli Doğrultuculu
5	10,7%	1,2%	0,4%	28%
7	7,2%	0,8%	0,7%	8%
11	3,1%	0,3%	9%	7%
13	2%	0,5%	6%	5%
17	1,2%	0,4%	1%	4,7%
19	1,1%	0,2%	1%	2%
23	0,9%	0,3%	3,2%	3,2%
25	0,8%	0,4%	2,4%	3%
THD	<%8	2,3%	12%	32%

Çizelge 8.2 Nonlineer Dengesiz Yüklerde IGBT Doğrultucu cihazın Şebekeye Bastığı Harmonik Değerleri.

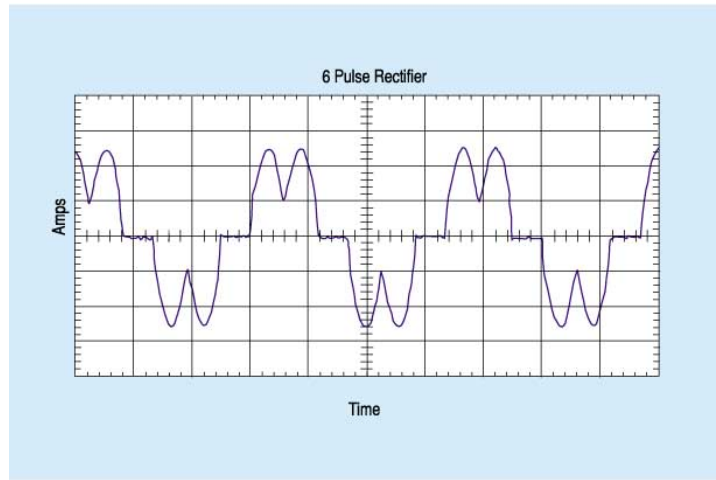
THDI	%25 yükte	%50 yükte	%75 yükte	%100 yükte
60KVA UPS	9,0%	6.4%	5.5. %	4.2%
80KVA UPS	7,0%	6,0%	4.3%	4,0%
100KVA UPS	10,0%	5.6%	4.5%	3.5%
120KVA UPS	7,0%	4.6%	4.2%	3,0%
160KVA UPS	8.5%	4.8%	3.5%	3,0%
200KVA UPS	7,0%	4,0%	3.2%	3.1%

8.1 Doğrultucu Tiplerinin Karşılaştırılması

6 DARBELİ DOĞRULTUCULAR



Şekil 8.5 6 darbeleri doğrultucu devre şeması.

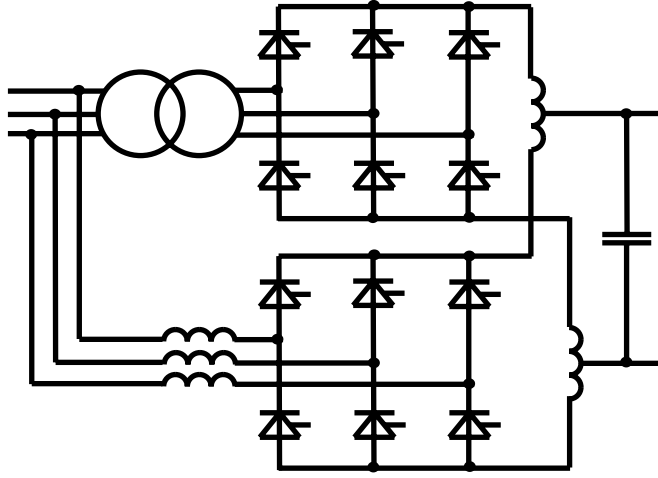


Şekil 8.6 Şebeke akımının grafiği.

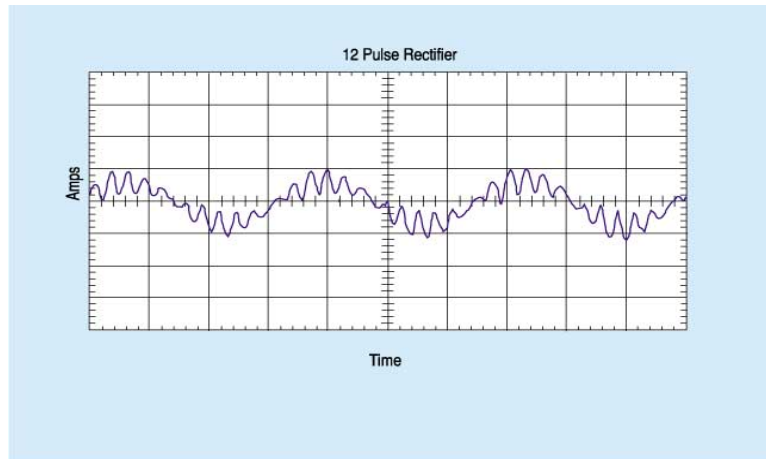
Güç Faktörü (p_f)=0,86

Giriş Akım Harmonik Distorsiyonu (THD_i) = %27

12 DARBELİ DOĞRULTUCULAR



Şekil 8.7 12 darbeleri doğrultucu devre şeması.

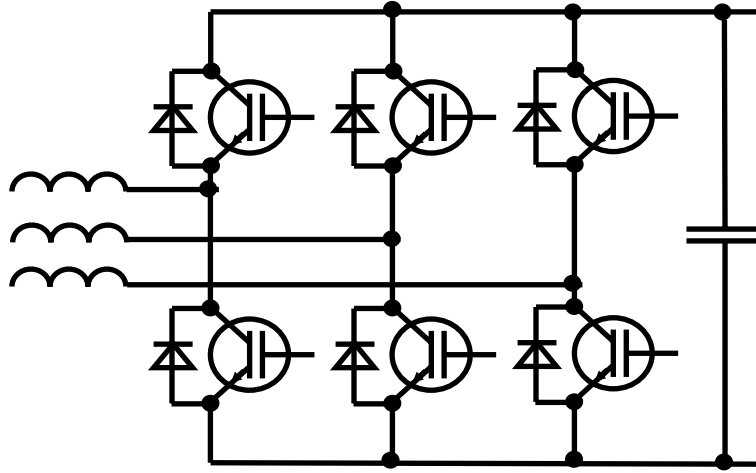


Şekil 8.8 Şebeke akımının grafiği.

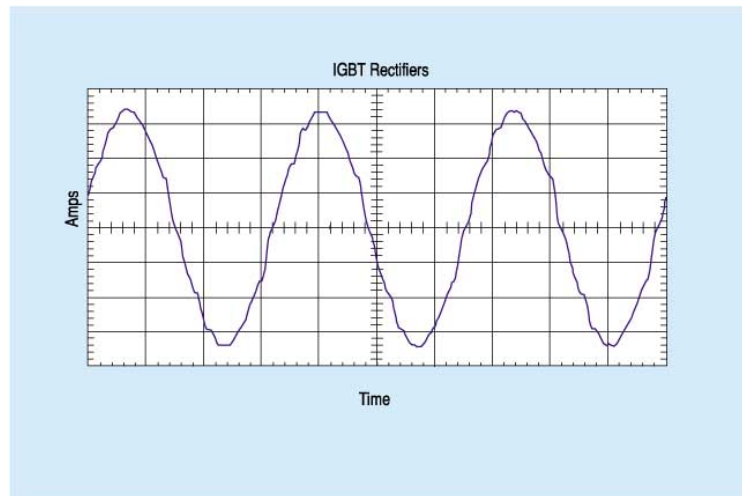
Güç Faktörü (p_f)=0,86

Giriş Akım Harmonik Distorsiyonu (THD_i) = %12

IGBT'Lİ DOĞRULTUCULAR



Şekil 8.9 IGBT doğrultuculu devre şeması.



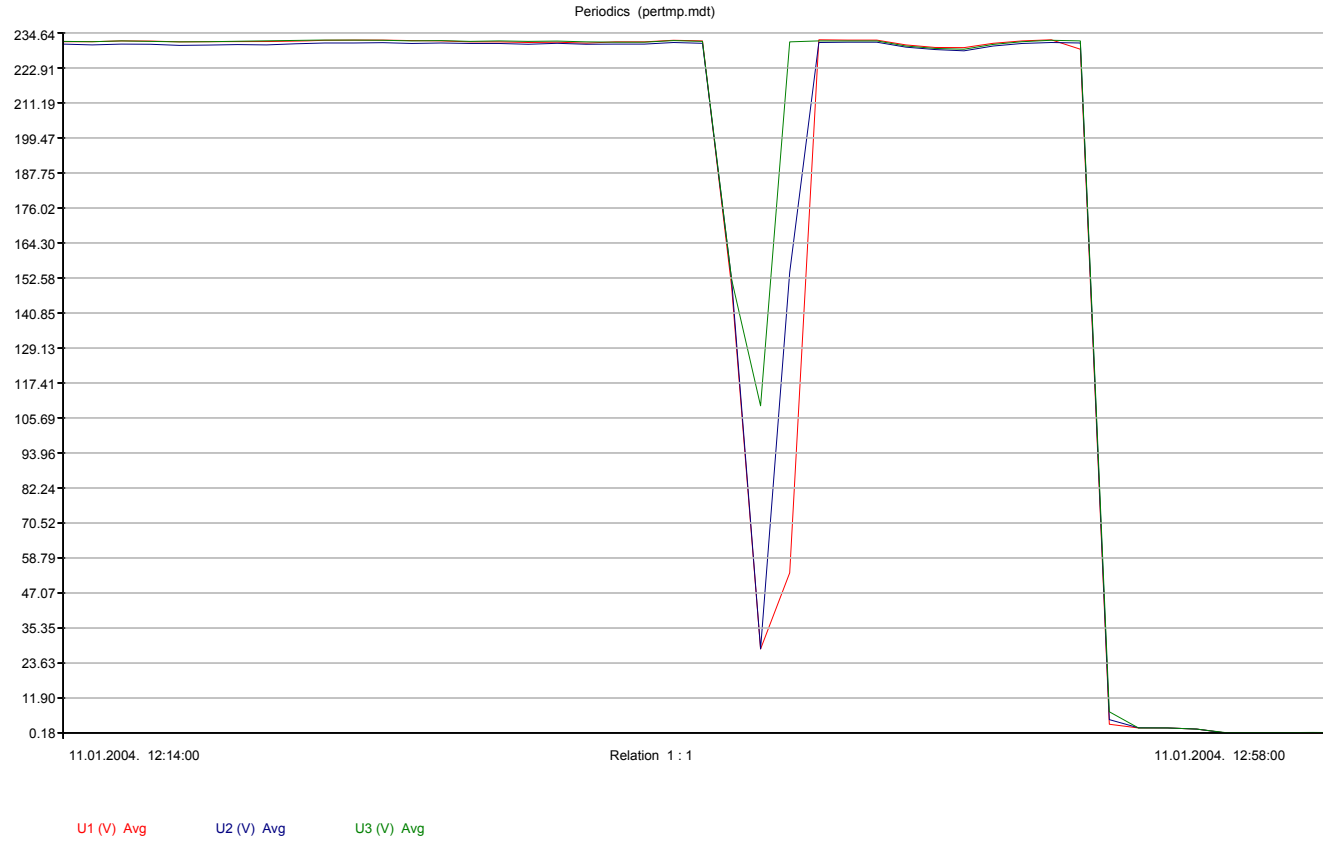
Şekil 8.10 Şebeke akımının grafiği.

Güç Faktörü (p_f)=0,99

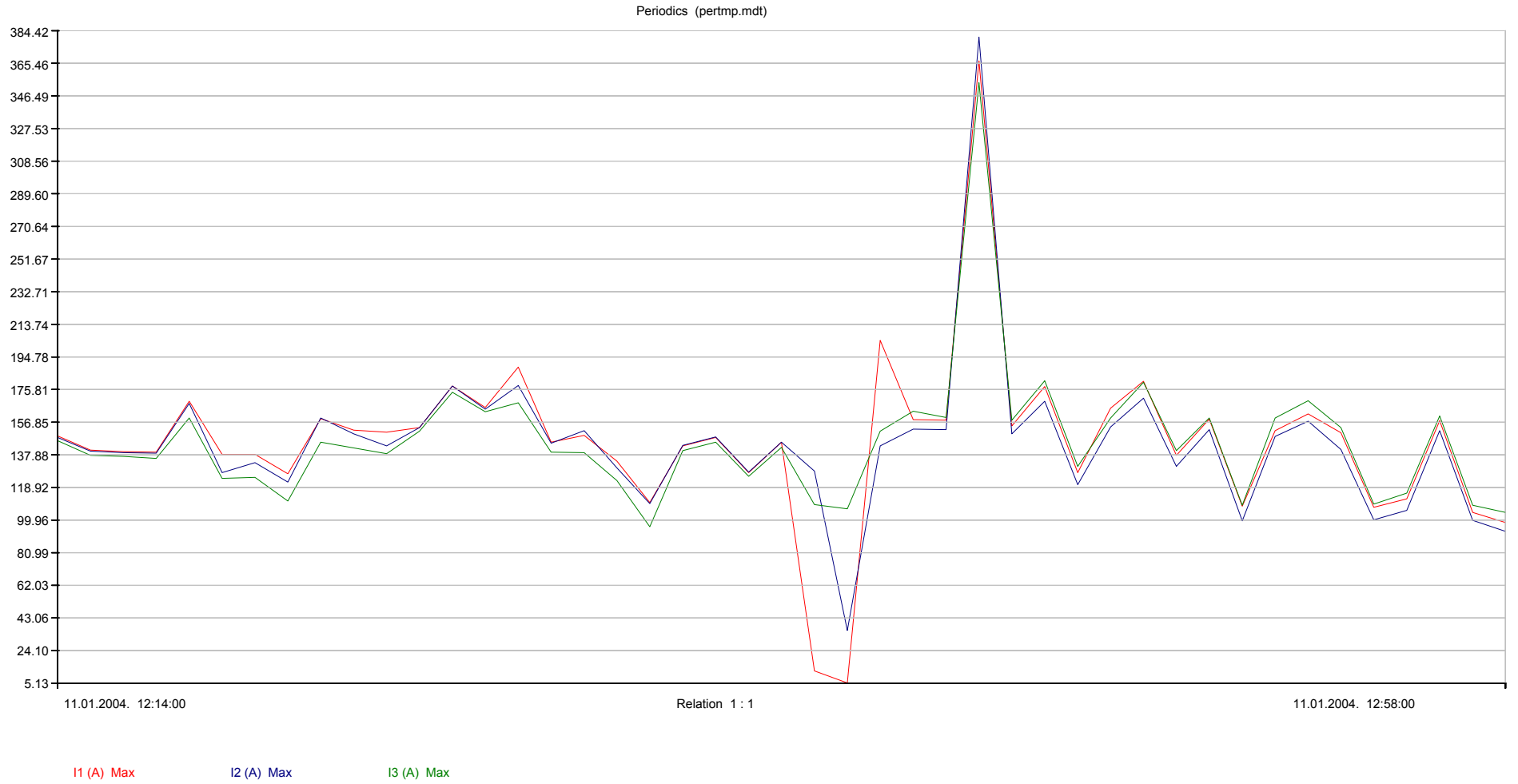
Giriş Akım Harmonik Distorsiyonu (THD_i) = %5

8.2 Fabrikalarda Yapılan Ölçüm Sonuçları

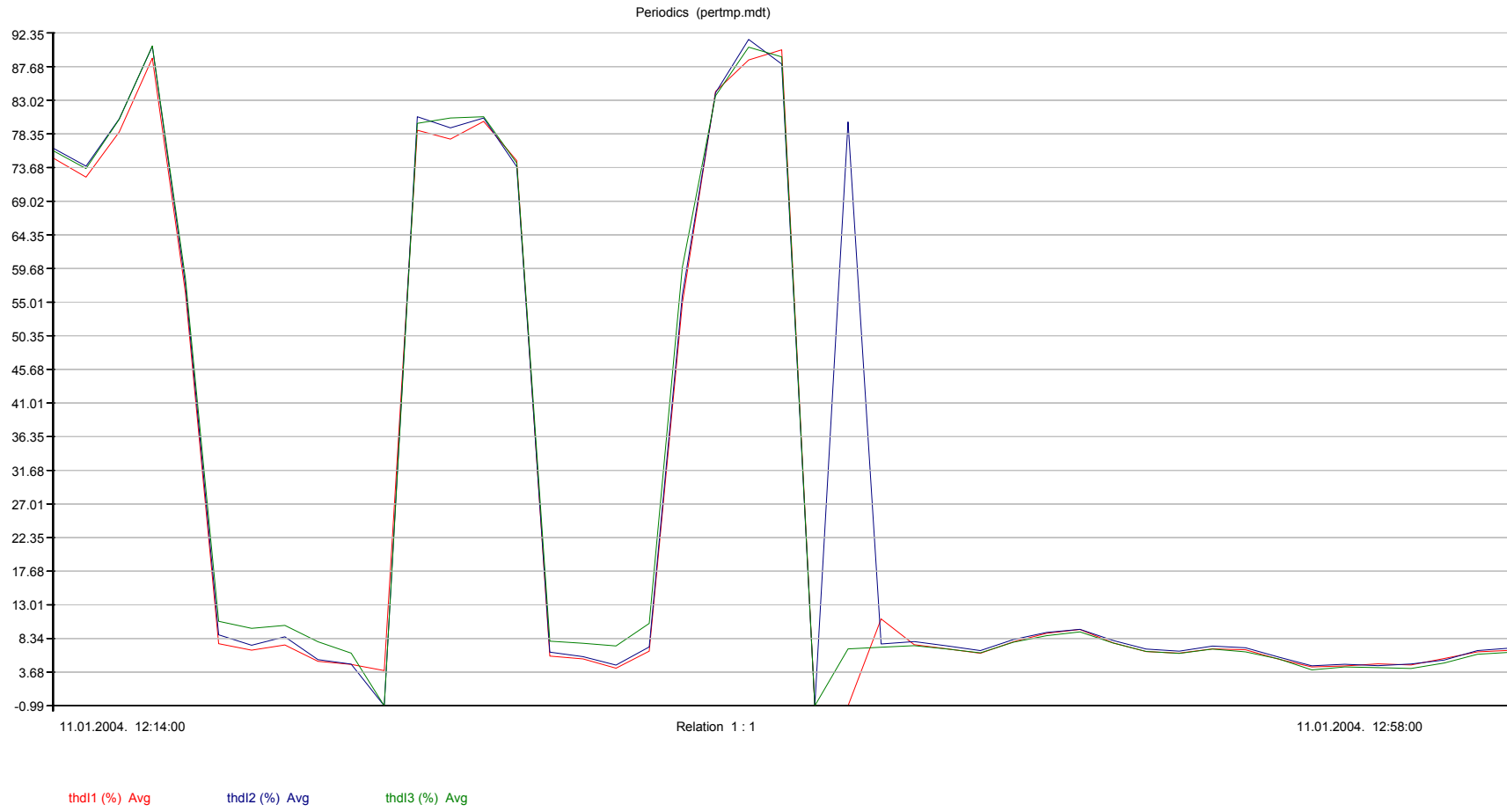
8.2.1 Fabrika-1'de Güç Harmonik Analizörü İle Yapılan Ölçüm Sonuçları



Şekil 8.3 Fabrika -1 Şebeke Geriliminin Grafiği.



Şekil 8.4 Fabrika-1 Şebeke Akımının Grafiği.



Şekil 8.5 Fabrika-1 Giriş Akım Toplam Harmonik Distorsiyon Grafiği.

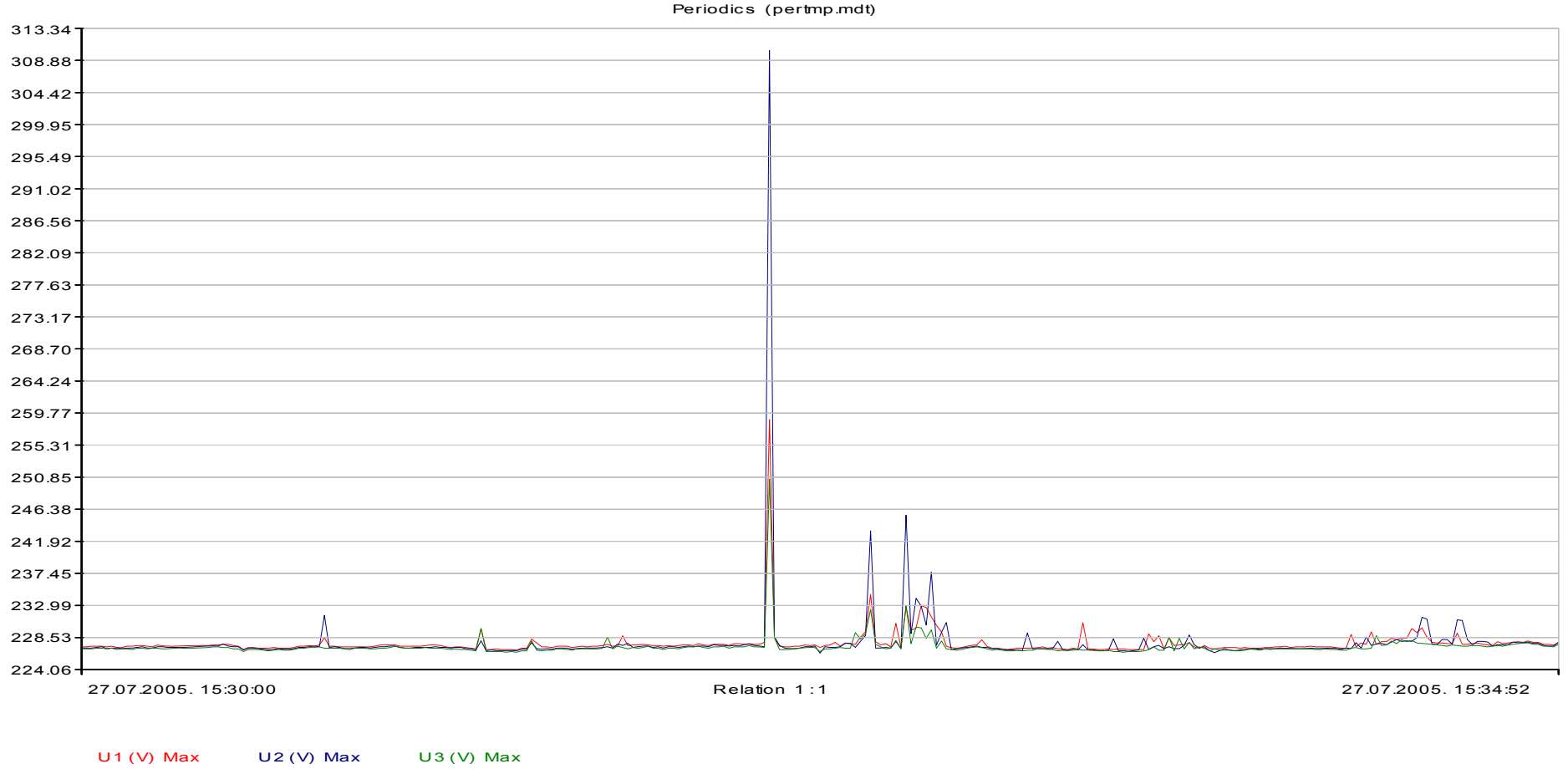
Çizelge 8.3 Şebekeden Çekilen Akım-Gerilim Tablosu.

Time	U1 (V)	I1 (A)	U2 (V)	I2 (A)	U3 (V)	I3 (A)	S	S	VA
11.01.2004 12:14:00	232	149	231	148	232	146	S =	102.492	VA
11.01.2004 12:15:00	232	141	231	140	232	138	S =	96.725	VA
11.01.2004 12:16:00	232	140	231	139	232	137	S =	96.270	VA
11.01.2004 12:17:00	232	139	231	139	232	136	S =	95.799	VA
11.01.2004 12:18:00	232	169	230	168	232	159	S =	114.648	VA
11.01.2004 12:19:00	232	138	231	127	232	124	S =	90.140	VA
11.01.2004 12:20:00	232	138	231	133	232	125	S =	91.691	VA
11.01.2004 12:21:00	232	127	231	122	232	111	S =	83.264	VA
11.01.2004 12:22:00	232	159	231	159	232	145	S =	107.309	VA
11.01.2004 12:23:00	232	152	231	150	232	142	S =	102.960	VA
11.01.2004 12:24:00	232	151	231	143	232	138	S =	100.289	VA
11.01.2004 12:25:00	232	154	231	154	232	152	S =	106.440	VA
11.01.2004 12:26:00	232	178	231	178	232	174	S =	122.731	VA
11.01.2004 12:27:00	232	165	231	164	232	163	S =	114.144	VA
11.01.2004 12:28:00	232	189	231	178	232	168	S =	123.818	VA
11.01.2004 12:29:00	232	145	231	145	232	139	S =	99.350	VA
11.01.2004 12:30:00	231	149	231	152	232	139	S =	101.796	VA
11.01.2004 12:31:00	231	134	231	130	232	123	S =	89.664	VA
11.01.2004 12:32:00	231	110	231	109	232	96	S =	72.974	VA
11.01.2004 12:33:00	232	143	231	143	231	140	S =	98.695	VA
11.01.2004 12:34:00	232	148	231	148	231	145	S =	102.082	VA
11.01.2004 12:35:00	232	127	231	128	232	125	S =	88.253	VA
11.01.2004 12:36:00	232	145	231	145	232	142	S =	100.167	VA
11.01.2004 12:37:00	150	12	152	128	152	109	S =	37.896	VA
11.01.2004 12:38:00	28	5	28	36	110	106	S =	12.837	VA
11.01.2004 12:39:00	54	204	154	143	232	152	S =	68.190	VA
11.01.2004 12:40:00	232	158	231	153	232	163	S =	109.977	VA
11.01.2004 12:41:00	232	158	232	152	232	160	S =	108.987	VA
11.01.2004 12:42:00	232	367	232	381	232	354	S =	255.449	VA
11.01.2004 12:43:00	231	155	230	150	230	158	S =	106.518	VA
11.01.2004 12:44:00	230	178	229	169	229	181	S =	120.971	VA
11.01.2004 12:45:00	230	127	229	120	229	131	S =	86.865	VA
11.01.2004 12:46:00	231	165	230	154	231	159	S =	110.333	VA
11.01.2004 12:47:00	232	181	231	171	232	180	S =	123.030	VA
11.01.2004 12:48:00	232	138	231	131	232	140	S =	94.869	VA
11.01.2004 12:49:00	229	159	231	152	232	159	S =	108.526	VA
11.01.2004 12:50:00	3	108	5	99	7	109	S =	1.590	VA
11.01.2004 12:51:00	2	152	2	149	2	159	S =	850	VA
11.01.2004 12:52:00	2	162	2	157	2	169	S =	889	VA
11.01.2004 12:53:00	1	151	1	141	1	154	S =	650	VA
11.01.2004 12:54:00	0	107	0	100	0	109	S =	67	VA
11.01.2004 12:55:00	0	112	0	106	0	116	S =	70	VA
11.01.2004 12:56:00	0	158	0	152	0	160	S =	99	VA
11.01.2004 12:57:00	0	104	0	100	0	109	S =	85	VA
11.01.2004 12:58:00	0	99	0	93	0	104	S =	71	VA

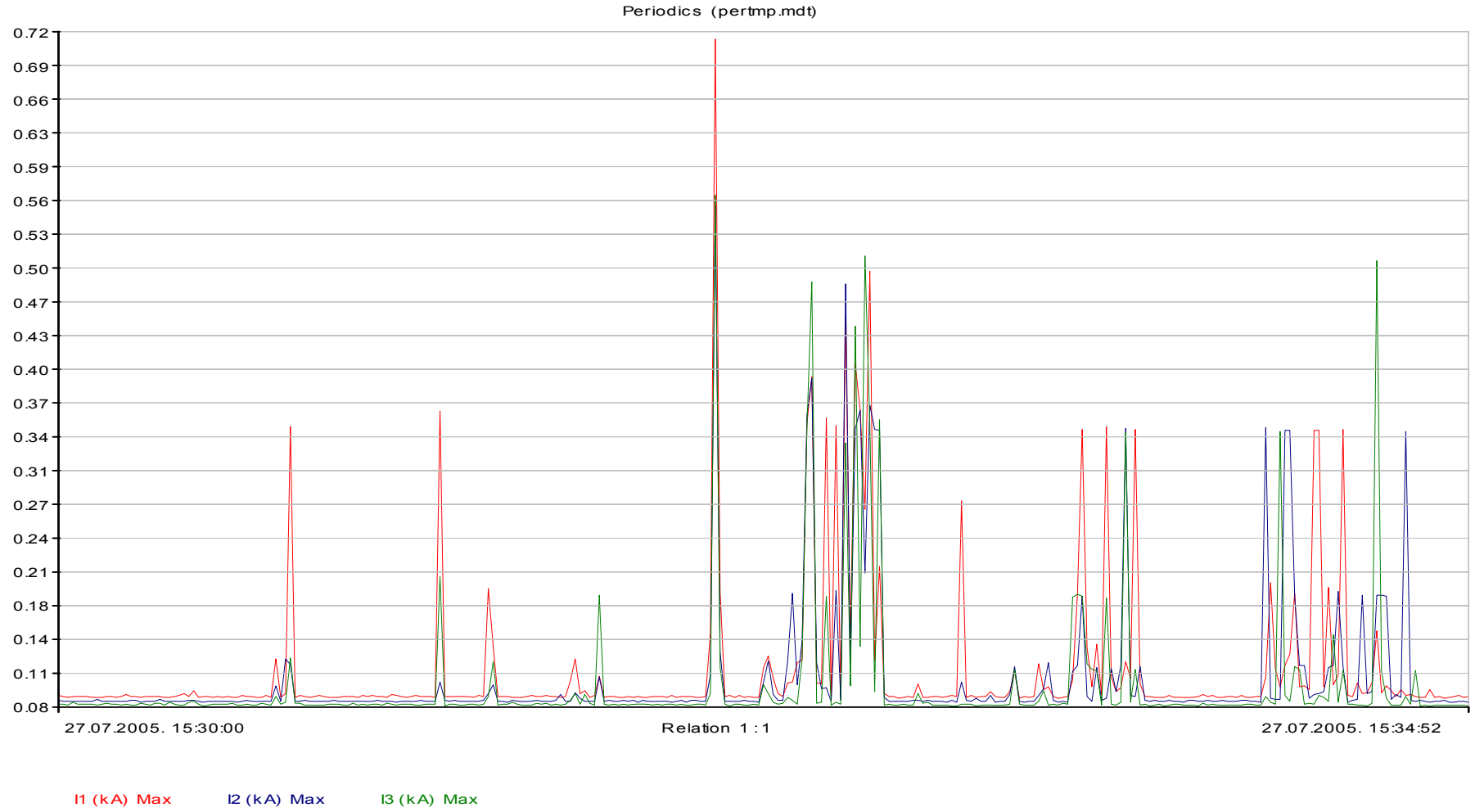
Çizelge 8.4 Sistemin Yüke Göre Şebekeye Bastığı Akım Harmonik Tablosu.

Time	thdI1 (%)	thdI2 (%)	thdI3 (%)
11.01.2004 12:14:00	75	76	76
11.01.2004 12:15:00	72	74	74
11.01.2004 12:16:00	79	80	80
11.01.2004 12:17:00	89	90	91
11.01.2004 12:18:00	56	57	58
11.01.2004 12:19:00	8	9	11
11.01.2004 12:20:00	7	7	10
11.01.2004 12:21:00	7	9	10
11.01.2004 12:22:00	5	5	8
11.01.2004 12:23:00	5	5	6
11.01.2004 12:24:00	4	-1	-1
11.01.2004 12:25:00	79	81	80
11.01.2004 12:26:00	78	79	81
11.01.2004 12:27:00	80	81	81
11.01.2004 12:28:00	75	74	74
11.01.2004 12:29:00	6	6	8
11.01.2004 12:30:00	6	6	8
11.01.2004 12:31:00	4	5	7
11.01.2004 12:32:00	7	7	10
11.01.2004 12:33:00	55	56	60
11.01.2004 12:34:00	84	84	84
11.01.2004 12:35:00	89	91	90
11.01.2004 12:36:00	90	88	89
11.01.2004 12:37:00	-1	-1	-1
11.01.2004 12:38:00	-1	80	7
11.01.2004 12:39:00	11	8	7
11.01.2004 12:40:00	7	8	7
11.01.2004 12:41:00	7	7	7
11.01.2004 12:42:00	6	7	6
11.01.2004 12:43:00	8	8	8
11.01.2004 12:44:00	9	9	9
11.01.2004 12:45:00	10	10	9
11.01.2004 12:46:00	8	8	8
11.01.2004 12:47:00	7	7	7
11.01.2004 12:48:00	6	7	6
11.01.2004 12:49:00	7	7	7
11.01.2004 12:50:00	7	7	6
11.01.2004 12:51:00	5	6	5
11.01.2004 12:52:00	4	5	4
11.01.2004 12:53:00	5	5	4
11.01.2004 12:54:00	5	5	4
11.01.2004 12:55:00	5	5	4
11.01.2004 12:56:00	6	5	5
11.01.2004 12:57:00	6	7	6
11.01.2004 12:58:00	7	7	6

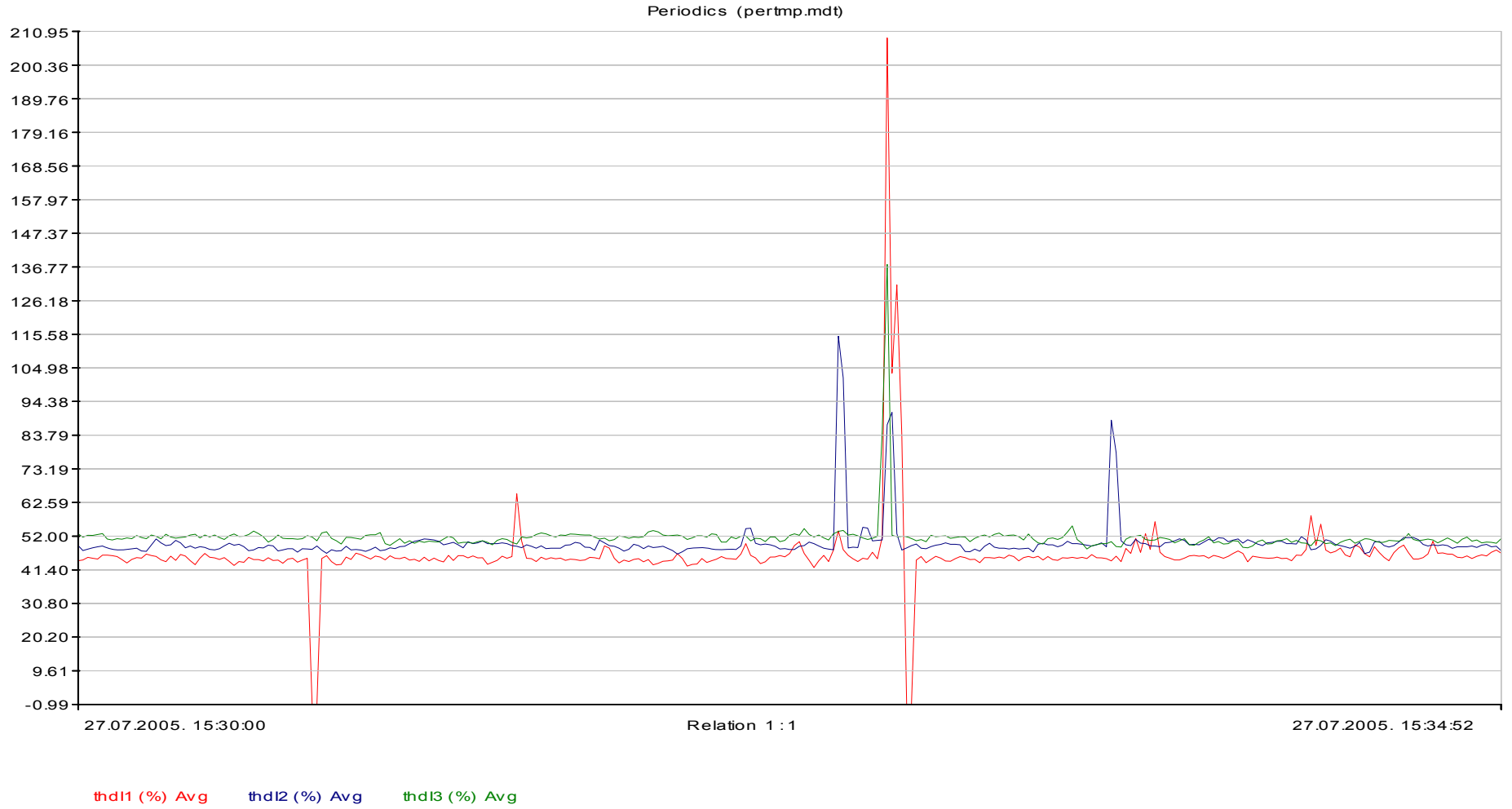
8.2.2 Fabrika-2'de Güç Harmonik Analizörü İle Yapılan Ölçüm Sonuçları



Fabrika -1 Şebeke Geriliminin Grafııı.



Fabrika-2 Şebeke Akımının Grafiği.



Fabrika-2 Giriş Akım Toplam Harmonik Distorsiyon Grafiği.

Çizelge 8.5 Şebekeden Çekilen Akım-Gerilim Tablosu.

Time	U1 (V)	I1 (kA)	U2 (V)	I2 (kA)	U3 (V)	I3 (kA)	S	S	VA
27.07.2005 15:30:00	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59038	VA
27.07.2005 15:30:05	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59030	VA
27.07.2005 15:30:10	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59039	VA
27.07.2005 15:30:15	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59086	VA
27.07.2005 15:30:20	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59062	VA
27.07.2005 15:30:25	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59094	VA
27.07.2005 15:30:30	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59071	VA
27.07.2005 15:30:35	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59005	VA
27.07.2005 15:30:40	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58990	VA
27.07.2005 15:30:45	227	0,13	227	0,10	227	0,09	S =	72726	VA
27.07.2005 15:30:50	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59070	VA
27.07.2005 15:30:55	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59054	VA
27.07.2005 15:31:00	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59086	VA
27.07.2005 15:31:05	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59053	VA
27.07.2005 15:31:10	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59086	VA
27.07.2005 15:31:11	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59070	VA
27.07.2005 15:31:12	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59047	VA
27.07.2005 15:31:13	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59023	VA
27.07.2005 15:31:14	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59047	VA
27.07.2005 15:31:15	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59040	VA
27.07.2005 15:31:20	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58943	VA
27.07.2005 15:31:25	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58943	VA
27.07.2005 15:31:30	228	0,14	227	0,10	227	0,12	S =	81791	VA
27.07.2005 15:31:35	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59046	VA
27.07.2005 15:31:40	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59038	VA
27.07.2005 15:31:45	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59046	VA
27.07.2005 15:31:50	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59086	VA
27.07.2005 15:31:55	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59039	VA
27.07.2005 15:32:00	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59110	VA
27.07.2005 15:32:05	228	0,09	228	0,09	227	0,08	S =	59134	VA
27.07.2005 15:32:10	228	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59126	VA
27.07.2005 15:32:15	228	0,15	227	0,11	227	0,09	S =	79613	VA
27.07.2005 15:32:20	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59023	VA
27.07.2005 15:32:25	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59103	VA
27.07.2005 15:32:30	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59078	VA
27.07.2005 15:32:35	229	0,35	229	0,36	229	0,35	S =	242780	VA
27.07.2005 15:32:40	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59045	VA
27.07.2005 15:32:45	230	0,41	234	0,34	230	0,44	S =	274965	VA
27.07.2005 15:32:50	229	0,21	229	0,34	228	0,35	S =	205905	VA
27.07.2005 15:32:55	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59062	VA
27.07.2005 15:33:00	227	0,09	227	0,09	227	0,09	S =	61266	VA
27.07.2005 15:33:05	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58982	VA
27.07.2005 15:33:10	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59030	VA
27.07.2005 15:33:15	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58958	VA
27.07.2005 15:33:20	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58974	VA
27.07.2005 15:33:25	227	0,10	227	0,12	227	0,08	S =	68021	VA
27.07.2005 15:33:30	227	0,11	228	0,11	227	0,18	S =	90877	VA
27.07.2005 15:33:35	228	0,14	227	0,12	229	0,12	S =	86684	VA
27.07.2005 15:33:40	227	0,10	228	0,12	227	0,09	S =	70446	VA

27.07.2005 15:33:45	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58974	VA
27.07.2005 15:33:50	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	58999	VA
27.07.2005 15:33:55	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59014	VA
27.07.2005 15:34:00	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59030	VA
27.07.2005 15:34:05	227	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59023	VA
27.07.2005 15:34:10	227	0,11	227	0,35	227	0,09	S =	124847	VA
27.07.2005 15:34:15	229	0,13	227	0,34	227	0,09	S =	127564	VA
27.07.2005 15:34:20	228	0,34	228	0,09	228	0,08	S =	116346	VA
27.07.2005 15:34:25	230	0,11	231	0,19	228	0,09	S =	89728	VA
27.07.2005 15:34:30	228	0,09	228	0,19	227	0,08	S =	82039	VA
27.07.2005 15:34:35	228	0,10	228	0,19	227	0,09	S =	86458	VA
27.07.2005 15:34:40	228	0,09	228	0,09	227	0,08	S =	59182	VA
27.07.2005 15:34:45	228	0,09	228	0,09	228	0,08	S =	59226	VA
27.07.2005 15:34:50	228	0,09	227	0,09	227	0,08	S =	59125	VA

Çizelge 8.6 Sistemin Yüke Göre Şebekeye Bastığı Akım Harmonik Tablosu.

Time	thdI1 (%)	thdI2 (%)	thdI3 (%)
27.07.2005 15:30:00	44	49	53
27.07.2005 15:30:05	46	49	53
27.07.2005 15:30:10	44	48	51
27.07.2005 15:30:15	46	49	52
27.07.2005 15:30:20	44	51	51
27.07.2005 15:30:25	45	49	51
27.07.2005 15:30:30	45	49	51
27.07.2005 15:30:35	45	47	52
27.07.2005 15:30:40	44	49	51
27.07.2005 15:30:45	44	47	51
27.07.2005 15:30:50	45	48	53
27.07.2005 15:30:55	45	49	52
27.07.2005 15:31:00	45	48	52
27.07.2005 15:31:05	45	48	50
27.07.2005 15:31:10	44	51	50
27.07.2005 15:31:15	44	49	51
27.07.2005 15:31:20	45	50	50
27.07.2005 15:31:25	44	50	49
27.07.2005 15:31:30	65	49	49
27.07.2005 15:31:35	45	49	53
27.07.2005 15:31:40	44	49	52
27.07.2005 15:31:45	45	48	52
27.07.2005 15:31:50	45	49	51
27.07.2005 15:31:55	45	49	52
27.07.2005 15:32:00	44	49	52
27.07.2005 15:32:05	43	48	51
27.07.2005 15:32:10	44	48	53
27.07.2005 15:32:15	45	48	51
27.07.2005 15:32:20	43	49	51
27.07.2005 15:32:25	45	48	51
27.07.2005 15:32:30	44	50	52
27.07.2005 15:32:35	48	48	53
27.07.2005 15:32:40	44	48	52

27.07.2005 15:32:45	52	51	85
27.07.2005 15:32:50	-1	48	52
27.07.2005 15:32:55	45	49	52
27.07.2005 15:33:00	45	49	52
27.07.2005 15:33:05	44	47	52
27.07.2005 15:33:10	45	48	52
27.07.2005 15:33:15	46	48	53
27.07.2005 15:33:20	45	49	51
27.07.2005 15:33:25	45	50	51
27.07.2005 15:33:30	45	50	50
27.07.2005 15:33:35	48	49	51
27.07.2005 15:33:40	48	49	51
27.07.2005 15:33:45	44	51	50
27.07.2005 15:33:50	46	49	50
27.07.2005 15:33:55	45	51	49
27.07.2005 15:34:00	44	51	48
27.07.2005 15:34:05	45	50	50
27.07.2005 15:34:10	46	50	51
27.07.2005 15:34:15	56	49	51
27.07.2005 15:34:20	46	49	51
27.07.2005 15:34:25	45	47	51
27.07.2005 15:34:30	47	49	51
27.07.2005 15:34:35	45	51	51
27.07.2005 15:34:40	47	49	51
27.07.2005 15:34:45	46	49	52
27.07.2005 15:34:50	47	49	50

9. SONUÇLAR

Bu çalışmada ilk önce harmonikler teorik olarak incelenip, detaylı bir şekilde anlatılmıştır. Daha sonra Kesintisiz Güç Kaynaklarında, kullanılan doğrultucu tiplerine göre, oluşan giriş akım harmonik distorsiyon değerlerinin analizleri yapılmıştır. Çalışmamın sonucu olarak aşağıdaki tespitler yapılmıştır.

Kesintisiz Güç Kaynaklarında genel olarak 3 farklı tipte doğrultucular kullanılmaktadır. Kullanılan doğrultucu tipleri 6 darbeli, 12 darbeli ve IGBT'li doğrultuculardır. Bu çalışmada doğrultucu tipleri giriş akım harmonik distorsiyon değerlerine göre analiz edilmiş ve birbirleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır.

1980'li yılların başından beri Kesintisiz Güç Kaynaklarında 6 darbeli doğrultucular kullanılmaktadır. 6 darbeli Kesintisiz Güç Kaynaklarında giriş akım harmonik distorsiyon değerlerinin %30-40'lar civarında olması ve bu değerlerin sistemlere etkilerinin son derece zararlı olması nedeniyle farklı yöntemler kullanılmaya başlanmıştır.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte 1990'lı yılların başlarından itibaren de 12 darbeli doğrultuculu Kesintisiz Güç Kaynaklarını tasarlanıp üretilmeye başlanmıştır. 12 darbeli doğrultucularda ise giriş akım harmonik distorsiyon değeri %10-15'lere kadar indirilmiştir.

Hem 6 darbeli hem 12 darbeli doğrultuculu Kesintisiz Güç Kaynaklarında doğrultucu kısmında transistör, inverter kısmında ise IGBT kullanılmaktadır. 2000'li yılların başlarından itibaren kullanılan teknolojilerin gelişmesi ile birlikte IGBT ler sadece Kesintisiz Güç Kaynaklarının inverter kısmında değil doğrultucu kısmında da kullanılmaya başlandı. Böylece giriş akım harmonik distorsiyon değerleri %5'in altına düşürülmüştür. Bu şekilde IGBT'li doğrultuculu Kesintisiz Güç Kaynakları kullanılan sistemlerde Kesintisiz Güç Kaynaklarının şebekeye bastığı harmonik distorsiyon minimum seviyelere indirilmiştir.

Bu çalışmada da IGBT'li doğrultucu ünitesine sahip Kesintisiz Güç Kaynaklarının üstünlükleri özellikle vurgulanıp bunlar hakkında ayrıntılı bilgi verilmiştir.

KAYNAKLAR

Ali I.Maswood, Geza Joos, "Problems and Solutions Associated with the Operation of Phase-Controlled Rectifiers under Unbalanced Input Voltage Conditions" IEEE Transaction on Industry Applications, vol.27, no. 4 July-Aug.1991, pp765-772.

Arrilaga,J., Smith,B.C., Watson,N.R ve Wood,A.R.,(1997) "Power System Harmonic Analysis", John Wiley&Sons.

Chang,G.,Harmonics Theory ,Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation,IEEE Power Engineering Society,1998.

Cyril W. Lander, Power Electronics,2nd Edition . LONDON;McGraw-Hill,1987,pp,259-274.

D.A.Paice,Power Electronic Converter Harmonics-Multidarbali Methods for Clean Power,New York:IEEE Pres,1996.

Demir,A.,Sinüsoidal Olmayan Büyüklükleri İçeren Güç Sistemlerinde Güç Kompanzasyonu,YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Dugan,R.C., McGranaghan,M.F.,Beaty,H.W.,Electrical Power Systems Quality,McGraw-Hill,1996.

Gary W. K.Chang, Wilsun Xu,"Modelling of Harmonic Sources;Power Electronic Converters" Tutorial on Harmonics Modelling and Simulation,IEEE Power Engineering Society. 98TP125-0,1998,pp28-34.

İnform Elektronik Arge Departmanı Eğitim Notları.

Karl M. Hink Harmonic Mitigation of 12 pulse rectifier with unbalanced input line voltages Harmonic Cancellation for a Twelve-Darbali Rectifier using DC Bus Modulation.

Kocatepe, C. Demir,A.,Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel Bakış,Kaynak Elektrik Dergisi 1998.

Kocatepe,C.,(1995) Nonlineer Yükler içeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Etkinliğin Analizi ve Simülasyonu,Doktora Tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi,İstanbul.

Kocatepe,C.,(1995) Sinüsoidal Olmayan Yükleri içeren Enerji Sistemlerinde Harmonik Etkinliğin Analizi ve Simülasyonu,Doktora Tezi,Yıldız Teknik Üniversitesi,İstanbul.

Kocatepe,C.,Karakaş,A., Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri, Electrotech Dergisi,2001.

Kocatepe,C.,Karakaş,A.,Nonlineer Elemanlar ve Harmonikli Devreler,Kaynak-Elektrik Dergisi 2002.

Kocatepe,C.,Uzunoğlu,M.,Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları,Kaynak Elektrik Dergisi, 2001.

Mark F.Mc Granaghan,David R.Mueller,"Designing Harmonic Filters for Adjustable-Speed Drives to Comply with IEEE-519 Harmonic Limits,"IEEE Transactions Industry Applications,vol.35,no.2.March/April 1999,pp 312-318.

Mohan,Undeland,Robbins,Power Electronics:Converters,Applications and Design,2nd Edition.New York:John Wiley&Sons INC.,1995,pp.103.

N.Mohan,T.M. Undeland,W.P.Robbins,Power Electronics-Converters,Applications and Design, 2nd ed. New York : John Wiley&Sons,1995.

N.R.Raju, "A dc link-modulated three-phase converter" IEEE IAS Annual Conference Record,2001,pp.2181-2185.

Robert W. Erickson : Some Topologies of High Quality Rectifiers,First International Conference on Energy,Power,and Motion Control May 5-6,1997, Tel Aviv,Israel.

S.Choi,P.N.Enjeti,H.Lee,and I.J.Pitel,"A new active interphase reactor for 12-pulse rectifiers provides clean power utility interface," IEEE Transactions on Industry Applications,vol.32,no.6,pp. 1304-1311,Nov./Dec.1996.

S.Miyairi,S.Iida,K.Nakata,and S.Masukawa,"New method for reducing harmonics involved in input and output of rectifier with interphase transformer "IEEE Transactions on Industry Applications,vol.IA-22,no.5,pp.790-797,Sep/Oct.1986.

Socomec-Sicon Eğitim Notları.

T.Habetler,"A space vector based rectifier regulator for ac/dc/ac converters,"IEEE Transactions on Power Electronics,vol.8,no.1, pp.30-36, Jan. 1993.

T.Tanaka,N.Koshio,H.Akagi,and A.Nabae,"A novel method of reducing the supply current harmonics of a 12-pulse thyristor rectifier with an interphase reactor,"IEEE IAS Annual Conference Record,1996,pp.1256-1262.

Tümel Elektronik Arge Departmanı Eğitim Notları.

Uzunoğlu,M.,Kocatepe,C. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Büyüklüklere ait Tanımlar ve Kavramlar,Kaynak Elektrik Dergisi,2001.

Uzunoğlu,M.,Nonlinear Yükler İçeren Elektrik Güç sistemlerinde Gerilim Kararlılık Analizi,YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü,doktora Tezi,2000.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 19.07.1978

Doğum yeri K1ğı

Lise 1991-1994 General Ali Rıza Ersin Lisesi

Lisans 1996-2000 Yıldız Teknik Üniversitesi Elk.-Elekt. Müh. Fak.
Elektrik Mühendisliğı Bölümü

Yüksek Lisans 2000- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliğı Anabilim Dalı

Çalıştığı kurumlar

2004-Devam ediyor İnform Elektronik A.Ş.
Satış ve Pazarlama Departmanı
Satış Mühendisi