

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DAĞITIM SİSTEMLERİNİN ENERJİ KALİTESİ  
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

Elektrik Müh. Celal Fadıl KUMRU

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

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Tez danışmanı : Prof. Dr. Celal KOCATEPE**

**İSTANBUL, 2009**

# İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ .....	v
KISALTMA LİSTESİ .....	vi
ŞEKİL LİSTESİ .....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ .....	x
ÖNSÖZ.....	xi
ÖZET .....	xii
ABSTRACT .....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KALİTE .....	3
2.1 Elektrik Enerji Kalitesinin Tanımı.....	3
2.2 Elektrik Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar .....	5
2.2.1 Geçici Olaylar .....	5
2.2.1.1 Darbe Biçimindeki Geçici Olay.....	5
2.2.1.2 Salınım Biçimindeki Geçici Olay .....	6
2.2.1.3 Aşırı Gerilim .....	7
2.2.1.4 Düşük Gerilim .....	7
2.2.1.5 Kesinti.....	7
2.2.1.6 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi .....	7
2.2.1.7 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi .....	8
2.2.1.8 Gerilim Dengesizliği.....	9
2.2.1.9 Güç Frekansı Değişimleri .....	10
2.2.1.10 DC Bileşen.....	10
2.2.1.11 Çentik.....	10
2.2.1.12 Gürültü.....	11
2.2.1.13 Gerilim Dalgalanması (Fliker).....	11
2.2.1.14 Elektromagnetik Girişim (EMI) .....	12
2.2.1.15 CBEMA VE ITIC EĞRİSİ .....	13
3. HARMONİKLER.....	16
3.1 Harmoniklerin Tanımı .....	16
3.2 Magnetik Lineersizlik.....	18
3.3 Elektriksel Lineersizlik.....	19
3.4 Harmoniklere Ait Tanımlar .....	19
3.4.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD) .....	20
3.4.2 Distorsiyon Faktörü (DF) .....	20
3.4.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu .....	20

3.4.4	Toplam Talep Distorsiyonu (TTD).....	21
3.4.5	Tepe Faktörü (Crest Factor,CF).....	21
3.4.6	Transformatör K – Faktörü.....	21
3.4.7	Distorsiyon Güç Faktörü (GF).....	22
4.	HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR.....	24
4.1	Nonlinear Elemanlar.....	24
4.1.1	Transformatörler.....	25
4.1.2	Statik Dönüştürücüler (Konverterler).....	26
4.1.3	Generatörler.....	26
4.1.4	Ark Fırınları.....	27
4.1.5	Gaz Deşarj Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Armatürleri.....	27
4.1.6	Fotovoltaik Sistemler.....	29
4.1.7	Kesintisiz Güç Kaynakları (KGK).....	29
4.2	Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler.....	29
4.2.1	Endüktif Reaktans Üzerindeki Etkisi.....	32
4.2.2	Kapatif Reaktans Üzerindeki Etkisi.....	32
4.2.3	Transformatörler Üzerindeki Etkisi.....	33
4.2.4	İletim Hatları Üzerindeki Etkisi.....	34
4.2.5	Güç Faktörü Üzerine Etkisi.....	35
4.3	Harmonik Standartları.....	35
5.	HARMONİK BÜYÜKLÜKLERİN GİDERİLMESİ.....	37
5.1	Pasif Filtreler.....	37
5.1.1	Seri Filtreler.....	38
5.1.2	Paralel Filtreler.....	38
5.1.2.1	Tek Ayarlı Filtreler.....	39
5.1.2.2	Çift Ayarlı Filtreler.....	40
5.1.2.3	Sönümlü Filtre.....	40
5.1.3	Aktif Filtreler.....	41
5.1.3.1	Paralel Aktif Güç Filtresi.....	42
5.1.3.2	Seri Aktif Güç Filtresi.....	43
6.	HARMONİK FİLTRE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....	45
6.1	Giriş.....	45
6.2	Dağıtım Sisteminin Özellikleri.....	46
6.3	Pasif Filtre Simülasyon Modeli.....	55
6.3.1	Pasif Filtre Direnç Değerlerinin Simülasyona Dahil Edildiği Uygulama.....	61
6.3.2	Pasif Filtre Direnç Değerlerinin İhmal Edildiği Uygulama.....	63
6.4	Aktif Filtre Simülasyon Modeli.....	65
7.	SONUÇLAR.....	70
	KAYNAKLAR.....	73
	EKLER.....	74

Ek 1 Pasif güç filtresini oluşturan eleman değerlerinin hesaplanması için Matlab yazılımı.	74
Ek 2 Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Kabul Edilebilir Akım Harmonik Limitleri.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	76

## SİMGE LİSTESİ

$\cos\varphi$	Güç faktörü;
$f_l$	Temel frekans [Hz];
$f_p$	Paralel rezonans frekansı [Hz]
$f_s$	Seri rezonans frekansı [Hz];
$H$	Manyetik alan şiddeti [A/m];
$I_l$	Akım temel bileşeni [A];
$I_L$	Yük akımı [A];
$I_\mu$	Mıknatıslanma akımı [A];
$I_n$	n. harmonik akımı [A]
$i(t)$	Ani akım [A];
$I_{AF}$	Aktif filtre akımı;
$K$	Transformatör K faktörü;
$L$	Endüktans [H];
$n$	Harmonik mertebesi;
$P$	Aktif güç [W];
$Q$	Pasif filtre kalite faktörü;
$R_{FE}$	Transformatör demir kayıplarını gösteren direnç [ohm];
$S$	Görünür güç [VA];
$S_K$	Kısa devre gücü [VA];
$T$	Peryot [s];
$u_k$	Bağlı gerilim düşümü [V];
$V_l$	Gerilim temel bileşeni [V];
$v(t)$	Ani gerilim [V];
$\omega$	Açısal frekans [rad/s];
$X_C$	Kapasitif reaktans [ohm];
$X_L$	Endüktif reaktans [ohm];
$\theta$	Faz açısı;

## KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif gerilim (Alternating current)
AGF	Aktif güç filtresi
CF	Tepe faktörü (Crest Faktör)
DC	Doğru akım (Direct Current)
DF	Distorsiyon faktörü
EMI	Elektromagnetik girişim (Electromagnetic interference)
GF	Güç faktörü
HD	Harmonik distorsiyon
IGBT	İzole kapılı bipolar transistor (Integrated gate bipolar transistor)
KGK	Kesintisiz güç kaynağı
OG	Orta gerilim
PWM	Darbe genişlik modülasyonu (Pulse width modulation)
PAGF	Paralel aktif güç filtresi
RMS	Efektif değer (Root Mean Square)
THD <sub>v</sub>	Gerilim toplam harmonik distorsiyonu
THD <sub>i</sub>	Akım toplam harmonik distorsiyonu
TTD	Toplam talep distorsiyonu

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Sinüzoidal ve Nonsinüzoidal Dalga Şekli .....	3
Şekil 2.2. Klasik Güç Sistem Modeli .....	4
Şekil 2.3. Bir Motorun Yol Alma Anındaki Geçici Hal Gerilim Dalga Şekli.....	5
Şekil 2.4. Yıldırım Darbe Gerilimi .....	6
Şekil 2.5. Orta Gerilim (OG) Bir Sistemde 5 MVAR 'lık Bir Kondansatör Grubunun Devreye Alınması .....	6
Şekil 2.6. Süresi 4 Peryot Olan Gerilim Düşmesi .....	8
Şekil 2.7. Bir Faz Toprak Kısa Devre Arızasındaki Gerilim Düşmesi .....	8
Şekil 2.8. Gerilimin 2,5 Peryotluk Yükselmesi .....	9
Şekil 2.9. 12kV 'luk Bir Fiderde 3 Ay Boyunca Yapılan Ölçümler Sonucu Görülen Gerilim Dengesizliği .....	9
Şekil 2.10. Bir Konverter Tarafından Meydana Gelen Çentikler.....	11
Şekil 2.11. Fliker Frekansındaki Gerilim Dalgalanmasına Neden Olan Tipik Bir Ark Fırını Gerilim Karakteristiği .....	12
Şekil 2.12. Tipik Fliker Eğrileri.....	12
Şekil 2.13. CBEMA Eğrisi .....	14
Şekil 2.14. ITIC Eğrisi.....	15
Şekil 3.1. Zamanın (t) Fonksiyonu Olarak Akım ve Gerilim Dalga Şekli .....	17
Şekil 3.2. Bazı Malzemelerin Mıknatıslanma Eğrileri .....	18
Şekil 3.3. Nonlinear Yüke Bağlı Kapasite ile Güç Faktörünün Değişimi.....	23
Şekil 4.1. Nonlinear Yükler ve Harmonikli Akım Kaynakları.....	24
Şekil 4.2. Bir Floresant Tarafından Çekilen Nonlinear Akım.....	29
Şekil 4.3. Paralel Rezonans Devresi .....	30
Şekil 4.4. Seri Rezonans Devresi.....	31
Şekil 5.1. Seri Filtrenin Devreye Bağlanması .....	38
Şekil 5.2. Paralel Filtrelerin Devreye Bağlanması .....	39
Şekil 5.3. Tek Ayarlı Filtre ve Empedans Değişim.....	39
Şekil 5.4. Çift Ayarlı Filtre ve Empedans Değişimi.....	40
Şekil 5.5. Birinci, İkinci, Üçüncü Dereceden ve C Tipi Filtreler .....	41
Şekil 5.6. Yüksek Geçiren Sönümlü Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi .....	41
Şekil 5.7. Paralel Aktif Güç Filtresi Blok Şeması .....	43
Şekil 5.8. Seri Aktif Güç Filtresi Blok Şeması.....	43
Şekil 6.1. İÇDAŞ Transformator Merkezi Tek Hat Şeması .....	46
Şekil 6.2. İÇDAŞ Transformator Merkezi Transformator-B Sekonder Tarafından Çekilen	

Güçler.....	48
Şekil 6.3. İÇDAŞ Transformatör Merkezi Transformatör-B Sekonder Tarafı Fazlar Arası Gerilim Gerçek-RMS Değeri.....	48
Şekil 6.4. Transformatör-B Sekonder Akımı Gerçek-RMS Değeri .....	49
Şekil 6.5. Transformatör-B Sekonder Tarafında Meydana Gelen Gerilim Çukuru (Voltage Sag) Olayı .....	50
Şekil 6.6. Transformatör-B Sekonder Tarafında Oluşan Gerilim Çukuru Olayı Sonucunda Sekonder Akımındaki Değişim.....	50
Şekil 6.7. Transformatör-B Sekonder Akımı 2. Harmonik Bileşeni .....	51
Şekil 6.8. Transformatör-B Sekonder Akımı 4. Harmonik Bileşeni .....	51
Şekil 6.9. Transformatör-B Sekonder Akımı 6. Harmonik Bileşeni .....	52
Şekil 6.10. Transformatör-B Sekonder Akımı 8. Harmonik Bileşeni .....	52
Şekil 6.11. Transformatör-B Sekonder Akımı 3., 5., 7. ve 9. Harmonik Bileşeni .....	53
Şekil 6.12. Transformatör-B Sekonder Akımı 10., 12. ve 14. Harmonik Bileşeni .....	53
Şekil 6.13. Transformatör-B Sekonder Akımı 11., 12. ve 15. Harmonik Bileşeni .....	54
Şekil 6.14. Transformatör-B Sekonder Akımı Harmonik Spektrumu.....	55
Şekil 6.15. Örnek Dağıtım Sisteminin Simülasyon Modeli .....	56
Şekil 6.16. Örnek Sistemde Harmoniklerin Akım Kaynağı Olarak Modellenmesi .....	57
Şekil 6.17. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtresiz Halde Ölçümle Belirlenen Yük Akımı Dalga Şekli.....	58
Şekil 6.18. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtresiz Halde Ölçümle Belirlenen Yük Gerilimi Dalga Şekli .....	59
Şekil 6.19. Pasif Harmonik Güç Filtreleri .....	59
Şekil 6.20. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Akımı Dalga Şekli .....	61
Şekil 6.21. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Gerilimi Dalga Şekli.....	61
Şekil 6.22. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Sistem Empedansı Değişim .....	62
Şekil 6.23. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Akımı Dalga Şekli.....	63
Şekil 6.24. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Gerilimi Dalga Şekli.....	63
Şekil 6.25. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Sistem Empedansı Değişimi .....	64



Şekil 6.26. Örnek Dağıtım Sisteminde PAGF İle Yapılan Simülasyon Modeli.....	66
Şekil 6.27. PAGF Modeli .....	67
Şekil 6.28. Transformatör-B sekonder Tarafında PAGF Sonrası Yük Akımı Dalga Şekli.....	68
Şekil 6.29. Transformatör-B sekonder Tarafında PAGF Sonrası Yük Gerilim Dalga Şekli ...	68

## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Güç Sisteminde Elektromanyetik Olayların Kategori ve Karakteristikleri.....	13
Çizelge 3.1. Harmonik Bileşenler ve Frekansları.....	16
Çizelge 3.2. Nonlineer Bir Elemanın Gerilim ve Akım Değerleri .....	19
Çizelge 4.1. Bir Dağıtım Transformatörünün Harmonik Spektrumu.....	25
Çizelge 4.2. Bir Ark Fırınına Ait Harmonik Değerleri.....	27
Çizelge 4.3. Bir Floresant Lambanın Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Değerleri .....	28
Çizelge 4.4. Devre Elemanlarının Frekans Bağımlı Eşdeğerleri.....	33
Çizelge 4.5. IEEE Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınır Değerleri.....	36
Çizelge 4.6. Dağıtım Sistemleri İçin Akım Bozulma Sınırları.....	36
Çizelge 5.1. Paralel Aktif Filtre ile Seri Aktif Filtrenin Karşılaştırılması.....	44
Çizelge 6.1. Ölçümlerde Kullanılan Cihaz Bilgileri .....	45
Çizelge 6.2. Ölçümde Değerleri Okunan Güç, Akım ve Gerilim Transformatörü Özellikleri	47
Çizelge 6.3. Transformatör-B Sekonder Tarafta Gerilimde Meydana Gelen Olaylar.....	49
Çizelge 6.4. Transformatör-B Sekonder Tarafta Ölçümde Okunan Harmonik Akım Değerleri	54
Çizelge 6.5. Harmonik Akımlarının Faz Sıraları.....	58
Çizelge 6.6. Simülasyon İçin Hesaplanan Pasif Filtre Eleman Değerleri .....	60
Çizelge 6.7. Filtre Direnç Değerleri Mevcut İken Filtreleme Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri .....	62
Çizelge 6.8. Filtre Direnç Değerleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri .....	64
Çizelge 6.9. Pasif Filtre Simülasyonları Sonucunda Elde Edilen Akım ve Gerilim Harmonik Bozulma Değerleri .....	65
Çizelge 6.10. PAGF Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri .....	69

## ÖNSÖZ

Elektrik enerjisinin tüketimi son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. Bu artışı karşılamak için yeni ve alternatif enerji kaynaklarının aranmasıyla birlikte mevcut enerjinin kaliteli olarak kullanılması da gündeme gelmiştir. Enerji kalitesi, günümüzde çok yaygın olarak araştırılan ve üzerinde çalışılan güncel bir konudur. Bu çalışmalar yarı iletken teknolojisinin gelişmesiyle de hız kazanmış ve önemli hale gelmiştir. Tüketim noktalarında enerji kalitesinin sağlanabilmesi için iletilen ve dağıtılan enerjinin de kaliteli olması gerekmektedir. Bu nedenle dağıtım sistemlerinde harmoniklerin, gerilim dalgalanmalarının, gerilim kararlılığının ve bu sistemi oluşturan elemanların (transformatörler, koruma elemanları, iletim hatları vb.) iyi analiz edilmesi ve enerji kalitesi bakımından incelenmesi gerekmektedir. Harmonik üreten tüketiciler, ürettikleri harmonikleri şebekeye göndererek, bu şebekeden beslenen birçok kullanıcıyı da olumsuz anlamda etkilemektedir. Özellikle dağıtım sistemlerinde bu problemle çok sık karşılaşmaktadır ve ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır. Bu olumsuz etkileri azaltmak ve enerji kalitesini artırmak için pasif ve aktif harmonik filtre uygulamaları dağıtım sistemlerinde kullanılmaktadır. Yapılan uygulamalar ve araştırmalar sonucunda harmonik filtrelerin ileride yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje tarafından desteklenmektedir.

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle beni yönlendiren ve bu tezi hazırlayabilecek aşamaya gelmemde en büyük katkı sahibi olan sayın danışman hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye, çalışmamın çoğu aşamasında bana yol gösterici olup değerli vakitlerini ayıran sayın Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya, hiçbir zaman değerli yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Bedri KEKEZOĞLU'na, dostlukları ve sonsuz destekleri için Ozan ERDİNÇ ve Yavuz ATEŞ'e ve beni bugünlere getiren ve her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.

## ÖZET

Günümüzde sanayinin gelişmesi ve güç talebinin artmasıyla birlikte, iletim ve dağıtım sistemlerindeki enerji kalitesi önemini artırmıştır. Özellikle dağıtım sistemlerinden ortak olarak beslenen farklı sektörlerdeki kullanıcıların bulunduğu sistemlerde, harmonikler ciddi problemlere neden olmaktadır. Bu sorunları ortadan kaldırmak için pasif ve aktif harmonik filtreleri geliştirilmiştir. Yarı iletken teknolojisi gelişene kadar harmonik filtreleme yapmak için pasif filtreler yaygın olarak kullanılmıştır. Pasif filtreler, tasarımının kolay olması ve ekonomik olması nedeniyle de tercih edilmiştir ancak yine de bütün sorunları tam anlamıyla giderememektedirler. Yüklerin çok hızlı olarak değiştiği ve birçok harmoniğin bulunduğu sistemlerde pasif filtreler yeterli olamamaktadır. Ayrıca belli bir frekansa ve güce göre tasarlanan filtreler, ileride sisteme yeni tüketiciler eklendiği zaman filtre görevlerini yerine getirememektedirler ve yeniden tasarlanmaları gerekmektedir. Ancak, aktif filtreler pasif filtrelerin aksine sistemde yük değişimi olsa bile tasarlandıkları güç limitine kadar filtreleme yapabilmektedirler. Güç olarak yetersiz kaldığı durumlarda ise gerekli kontrol sistemi tasarlanıp ek aktif filtreler ilave edilebilmektedir ve paralel olarak çalışmaları sağlanabilmektedir. Bu nedenlerden dolayı dağıtım sistemlerinde, güç kalitesinin düzeltmek ve harmonik bozulmayı standartların altına düşürmek için öncelikle detaylı bir sistem analizi yapılması gerekmektedir. Uygulanacak olan filtre tipi, hem teknik hem de ekonomik kriterler göz önünde bulundurularak seçilmelidir. Özellikle yüksek güce sahip dağıtım sistemlerinde ekonomik kriterler daha da önemli olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, bir indirici transformatör merkezinde, sekonder tarafta ölçülen harmoniklerin giderilmesi için pasif filtre ve aktif filtre uygulaması gerçekleştirilmektedir. Yapılan simülasyon çalışmasında pasif filtreleme ve aktif filtreleme arasındaki farklılıkların ayrıştırılması sağlanmıştır. Bu sayede de yapılacak olan iki farklı filtreleme yönteminin, indirici bir transformatör merkezinde sağlayacağı enerji kalite standardı seviyesinin görülmesi amaçlanmaktadır. Gerilim ve akımdaki harmonik bozulma değerlerinin, tasarlanan filtrelerle standartların altına çekilmesi hedeflenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** enerji kalitesi; harmonikler; aktif güç filtresi; pasif güç filtresi.

## ABSTRACT

Along with the industrial development and the increase in power demand, the power quality in transmission and distribution systems has gained important recently. Especially in systems feeding cooperatively from distribution systems and having a variety of users from different sectors, harmonics cause vital problems. In order to overcome these drawbacks, passive and active harmonics have been developed. Passive filters have commonly been used to make harmonic filtration until semi-conductor technology is developed. Passive filters are preferred as they are economical and have an easy design, however, they are still unable to overcome all of the problems. In systems where loads change quickly and there are a lot of harmonics, passive filters are not sufficient. Also, the filters which are designed according to a specific frequency and power cannot perform their duties later on when new users are integrated to the system and therefore need to be designed again. However, unlike the passive filters, the active filters can do filtration up to the power extent for which they are designed even if there is a load change in the system. In the cases where they are not sufficient enough in terms of power, additional active filters can be provided when the needed control system is designed and their working in parallel is maintained. Because of these reasons in distribution systems, in order to enhance the power quality and decrease the harmonic disruption below the standard, the first thing to do is a detailed system analysis. The decision of which filter to choose must be done by considering both the technical and economical aspects. Especially in distribution systems which have a high power, economical aspects become more important.

In this thesis, implementation of passive and active filters is carried out in a step-down transformer station in order to remove the harmonics measured at the secondary side. In the simulation study conducted, the differences between the passive and active filtration are discerned. With the help of this, the realization of how two different filtration methods can result in a energy quality standart level in a step-down transformer station is aimed at. The harmonic distruption measures is intended to be lowered below the standards with the designed filters.

**Keywords:** energy quality; harmonics; active power filter; passive power filter.

## 1. GİRİŞ

Bütün teknolojik alanlarda olduğu gibi güç elektroniği alanında yaşanan gelişmeler; anahtarlamalı güç kaynakları, ark ve pota ocakları, motor sürücüleri, AC/DC dönüştürücüler ve çevirgeçler gibi doğrusal olmayan yüklerin kullanımını artırmıştır. Güç elektroniği dönüştürücüleri 1970 'lerin sonuna doğru yaygın olarak kullanılmaya başlandığında, birçok işletme mühendisi güç sistemlerinin harmonik bozulmayı bünyelerinde barındırma özelliğiyle oldukça ilgili hale geldi (Dugan vd., 1996). Bu yüklerin kullanımındaki artışı, iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesinde büyük ölçüde bozulmalara neden olmuştur. Doğrusal olmayan yüklerin kullanımındaki artışa paralel, enerji kalitesine duyarlı hassas yüklerin kullanımı da oldukça artmıştır ve artmaya devam etmektedir. Bu sebeple, akım harmonikleri ve akım harmoniklerinden kaynaklı gerilim harmonikleri bugün birçok ülkede ciddi bir problem haline gelmiştir. Güç sistemlerinde harmoniklerden kaynaklı olumsuz etkiler çoğunlukla tespit edilememekte ve bunun sonucu olarak güç kalitesindeki bozulma da giderek artmaktadır. Güç sistemlerinde akım harmoniklerinin bastırılması amacıyla filtreler kullanılmaktadır. Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini yani harmonik seviyesini azaltmak veya yok etmektir (Kocatepe vd., 2003). Filtreler yapıları itibariyle pasif ve aktif harmonik filtreler olarak iki ana başlıkta sınıflandırılmaktadır. Pasif harmonik filtreler, isminden de anlaşılacağı üzere direnç (R), endüktans (L) ve kapasite (C) gibi pasif elemanlardan oluşur (Sankaran, 2000). Pasif harmonik filtreler ekonomik bir çözüm olmakla birlikte, çok yer kaplamaları, sabit bir kompanzasyon imkânı sunmaları, performanslarının şebeke parametrelerine bağlı olması ve en önemlisi şebeke ve/veya yük ile rezonans devreleri oluşturmaları en belirgin dezavantajlarıdır. Özellikle ülkemizde reaktif güç kompanzasyonu amacıyla tesis edilen şönt bağlı yalın kondansatörler rezonans olaylarını (akım ve gerilim harmoniklerinin amplifikasyonu) artırmakta ve güç kalitesini bozucu etki yaratmaktadırlar.

Güç kalitesindeki bozulmanın giderek artması ve pasif filtrelerin bu olumsuz yönleri harmoniklerden kaynaklı problemlerin giderilmesinde aktif çözümlere olan ilgiyi artırmıştır. Aktif güç filtrelerinin (AGF) akım ve gerilim harmoniklerinin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanımı giderek artmaktadır.

AGF 'leri;

- Akım ve gerilim harmoniklerinin süzülmesi
- Şebeke ile yük arasında harmonik izolasyonun sağlanması
- Reaktif güç kompanzasyonu

- Nötr akımlarının kompanzasyonu
- Gerilim regülasyonu
- Fliker kompanzasyonu
- Rezonansların bastırılması

gibi güç kalitesini artıracak uygulamalara imkân sağlamaktadırlar.

AGF 'leri devre yapılarına göre akım veya gerilim kaynaklı, sisteme bağlantı şekillerine göre ise seri veya paralel filtreler olarak sınıflandırılmaktadırlar. Paralel aktif güç filtreleri (PAGF) çoğunlukla akım harmoniklerinin süzülmesi ve reaktif güç kompanzasyonu amacıyla; seri aktif güç filtreleri (SAGF) ise çoğunlukla gerilim harmoniklerinin süzülmesi, gerilim regülasyonu ve harmonik izolasyon amacıyla kullanılmaktadırlar. AGF 'lerinin çalışma prensibi, örneklenen yük akım ve/veya gerilim dalga şekillerinden bir takım kontrol teknikleriyle üretilen referans akım ve/veya gerilim dalga şekillerinin kontrollü yarı iletken güç anahtarları yardımıyla üretilmesi ve şebekeye iletilmesine dayanmaktadır. AGF 'lerinin yukarıda sıralanan yeteneklerinin yanı sıra diğer bir önemli özelliği ise performansının sistem parametrelerinden (şebeke empedansı gibi) neredeyse bağımsız olmasıdır.

AGF 'lerinin ilk yatırım maliyetleri pasif filtrelere göre oldukça fazladır. Bu sebeple aktif ve pasif harmonik filtreler beraber kullanılarak hem bu filtrelerin yetenekleri birleştirilmekte hem de ilk yatırım maliyetleri düşürülebilmektedir. Bu tip sistemler hibrid harmonik filtreler olarak adlandırılmaktadır.

Yapmış olduğumuz bu çalışmada, indirici bir transformatör merkezinin sekonder tarafındaki harmonikleri gidermek amacıyla pasif ve aktif güç filtrelerinin kullanılması önerilmiştir.

Yapılan çalışmanın düzeni şu şekildedir: 2. kısımda elektrik güç sistem kalitesi ile ilgili terimlerin tanıtılması ve bu tanımlara ait genel bilgiler yer almaktadır. 3. kısımda güç sistem harmonikleri ve harmoniklerle ilgili tanımlar anlatılmıştır. 4 bölümde ise harmonik üreten elemanlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. 5. bölümde harmonik filtreleme metotlarından bahsedilmiştir. 6. kısımda, mevcut bir sistem üzerindeki harmoniklerin giderilmesi için iki farklı filtre simülasyonu yapılması ve sonuçların yorumlanması yer alırken, 7. kısımda yapılan çalışmaya ait sonuçlar verilmektedir.

## 2. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE KALİTE

### 2.1 Elektrik Enerji Kalitesinin Tanımı

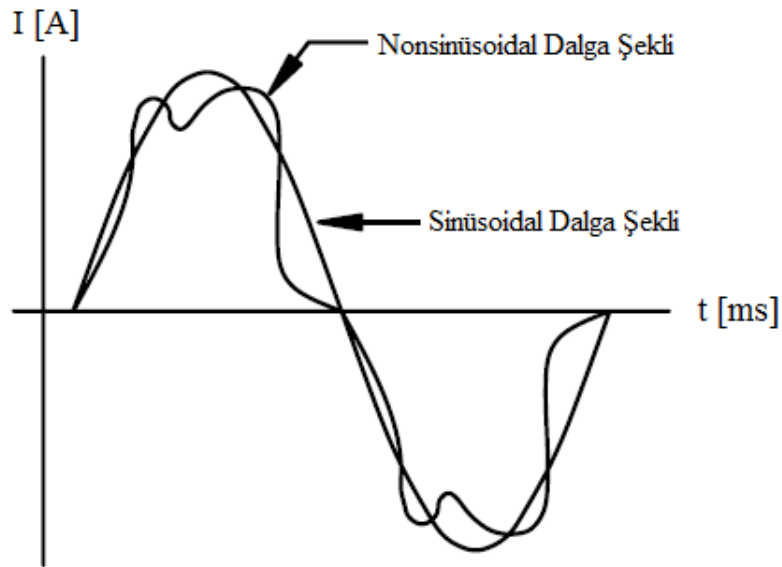
Günümüzde elektrik enerjisine olan talepteki artış, beraberinde daha kaliteli ve daha güvenilir bir enerjiye ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Burada enerji kalitesinden kastedilen nokta, gerilimin sürekli, sabit frekanslı ve dalga şeklinin sinüzoidal olmasıdır. Bu kriterler enerjinin kaliteli olabilmesi için, elektriğin üretildiği noktadan tüketildiği son kullanıcıya kadar sağlanabilmelidir.

Elektrik enerjisi bir sistem olarak düşünülmesi ve bir takım kalite standartlarını sağlayabilmelidir. Özellikle mevcut sistemleri maksimum kapasitede kullanabilmek için enerji kalitesi problemleri kaynağında çözümlenmelidir. Bozucu olan etkiler üretim, iletim, dağıtım ve tüketici bağlantı noktalarında kaydedilmeli ve analiz edildikten sonra sorunu giderecek uygulama yapılmalıdır.

Kaliteli bir elektrik enerjisi sağlayabilmek için;

- Enerjinin sürekliliği (kararlı hal),
- Gerilim ve frekansın sabitliği,
- Güç faktörünün birine yakınlığı,
- Faz gerilimlerinin dengeli olması,
- Akım ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde kalması

gibi birtakım kriterlerin göz önüne alınması gereklidir (Kocatepe vd., 2006).



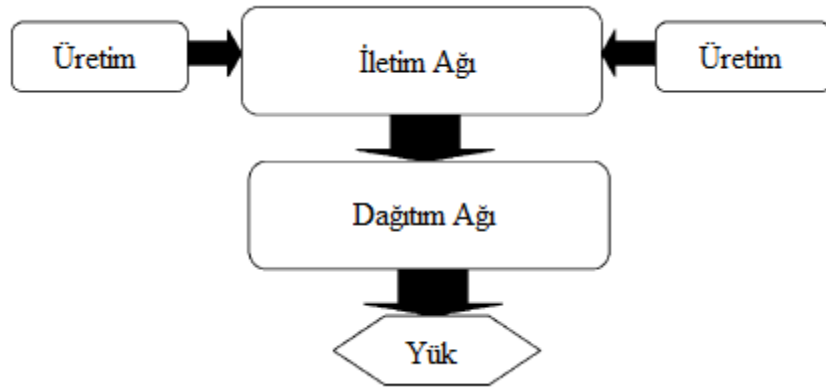
Şekil 2.1. Sinüzoidal ve Nonsinüsoidal Dalga Şekli



Enerji kalitesi, şebekenin tanımlanan bir noktasında, gerilimin genlik ve frekansının anma değerlerini koruması ve gerilim dalga şeklinin sinüs biçiminde bulunmasıdır. Bu tanımın tersi olarak, gerilimin genliğinin değişmesi, kesintiler, gerilim darbeleri, fliker, gerilimin doğru bileşen içermesi, dalga şeklinin sinüsten uzaklaşması, frekans değişimleri, üç faz dengesizlikleri enerji kalitesizliğidir. Enerji kalitesi çoklukla yük tarafından bozulur. V-I karakteristiği lineer olmayan yükler şebekeden sinüs olmayan akımlar çeker ve bu akımlar şebekede sinüs olmayan gerilim düşümleri oluşturarak besleme noktasındaki gerilimin dalga şeklini bozar (Akaigi, 1996).

Enerji kalitesinin birçok farklı tanımı bulunmaktadır. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibidir:

- **Gerilim kalitesi**, gerilimin idealden sapması olarak tanımlanır. İdeal gerilim, sabit genlik ve frekanstaki sinüs dalgasıdır.
- **Akım kalitesi**, gerilim kalitesiyle birbirini tamamlayan bir tanımdır ve dalga şeklinin idealden sapmasıdır. Benzer bir tanım olarak, akımın dalga şeklinin sabit genlikli ve sabit frekanslı olması ve de ek olarak gerilim dalga şekliyle aynı fazda olması demektir.
- **Güç kalitesi**, gerilim kalitesi ve akım kalitesinin bir kombinasyonudur.
- **Üretim kalitesi**, gerilim kalitesiyle, güç ağından müşteriye kadar olan teknik olmayan olayların kombinasyonudur.
- **Tüketim kalitesi**, üretim kalitesiyle birbirini tamamlayan bir terimdir (Bollen, 2003).

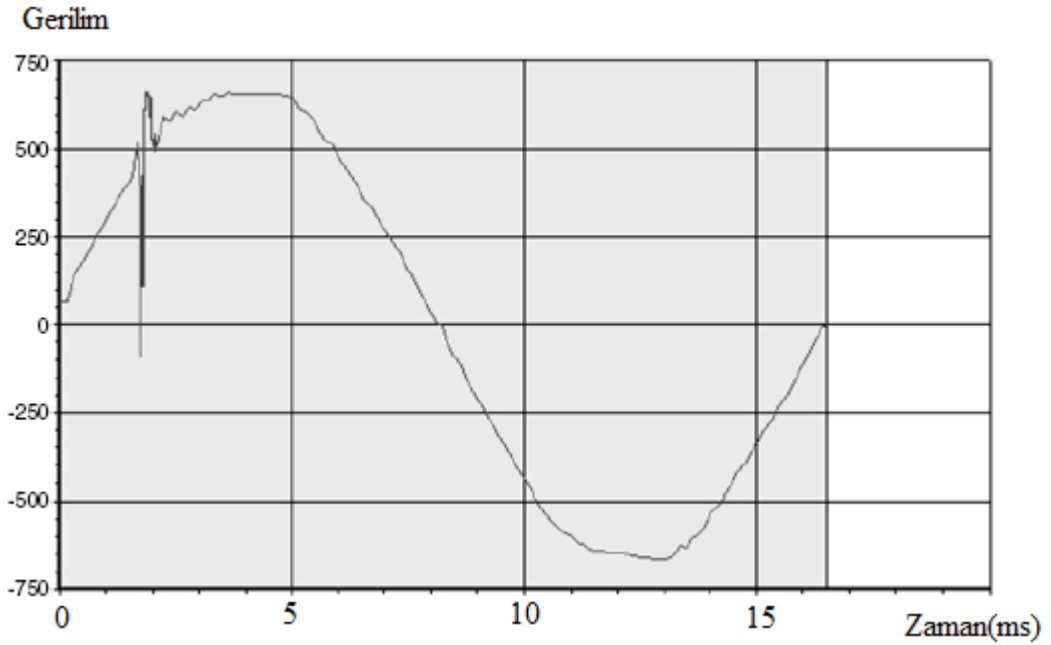


Şekil 2.2. Klasik Güç Sistem Modeli

## 2.2 Elektrik Enerji Kalitesi ile İlgili Kavramlar

### 2.2.1 Geçici Olaylar

Geçici olaylar, birkaç milisaniye mertebesinde olan gerilimdeki bozulmalardır. Ancak etki süreleri kısa olmalarına karşın, şiddetleri çok yüksektir ve yükselme çok hızlı olur. Bu nedenle sistem üzerinde olumsuz etkileri vardır. Geçici olaylar, güç sistemindeki akım ve gerilimde meydana gelen ani değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Bunlar kısa süreli olaylardır ve karakteristikleri ağırlıklı olarak güç sistem ağının direnç, endüktans ve kapasitans değerlerine göre belli olur. Bir geçici olayı tanımlayacak özellikler; tepe değeri, yükselme zamanı, düşme zamanı ve salınım frekansdır (Sankaran, 2000).



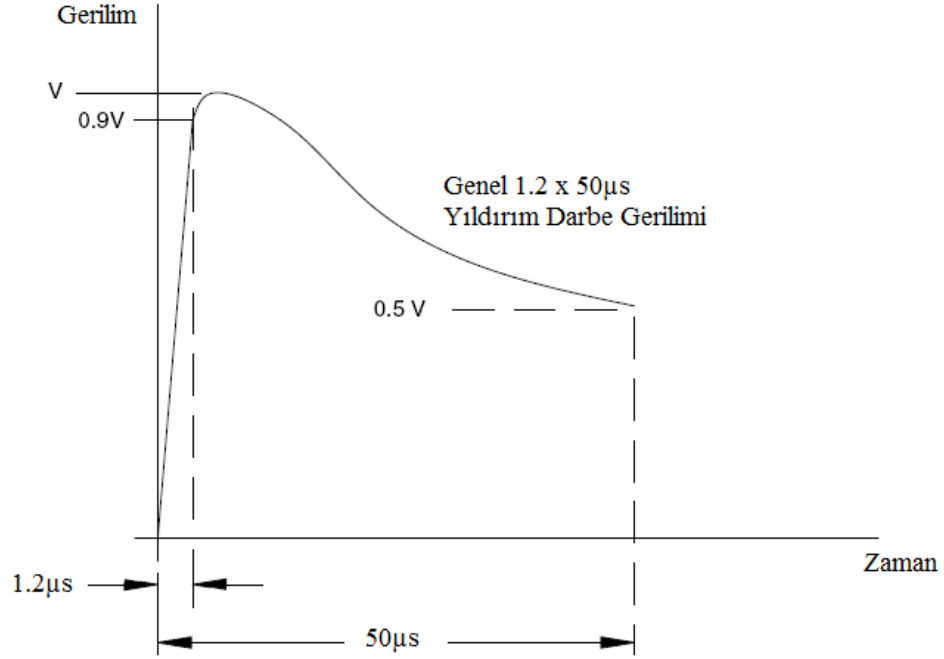
Şekil 2.3. Bir Motorun Yol Alma Anındaki Geçici Hal Gerilim Dalga Şekli

Geçici olaylara örnek olarak yıldırım darbesi, büyük yükteki güçlerin devreye girip çıkması ve reaktif yükler olarak gösterilebilir. Bunların süreleri dikkate alındığında, darbe biçimindeki geçici olaylar ve salınım biçimindeki geçici olaylar olarak ikiye bölünebilir. Darbe ve salınımlara karşı yüksek gerilimlerde parafudurlar ve ark boynuzları ile alçak gerilimde çığ diyotu kullanılarak koruma sağlanabilir (Arrillaaga vd., 2001).

#### 2.2.1.1 Darbe Biçimindeki Geçici Olay

Darbe biçimindeki geçici olay, polarite bakımından tek yönlü (pozitif veya negatif) olan gerilim ve akım parametrelerinin her ikisinde, sürekli hal koşulunda güç frekansında olmayan

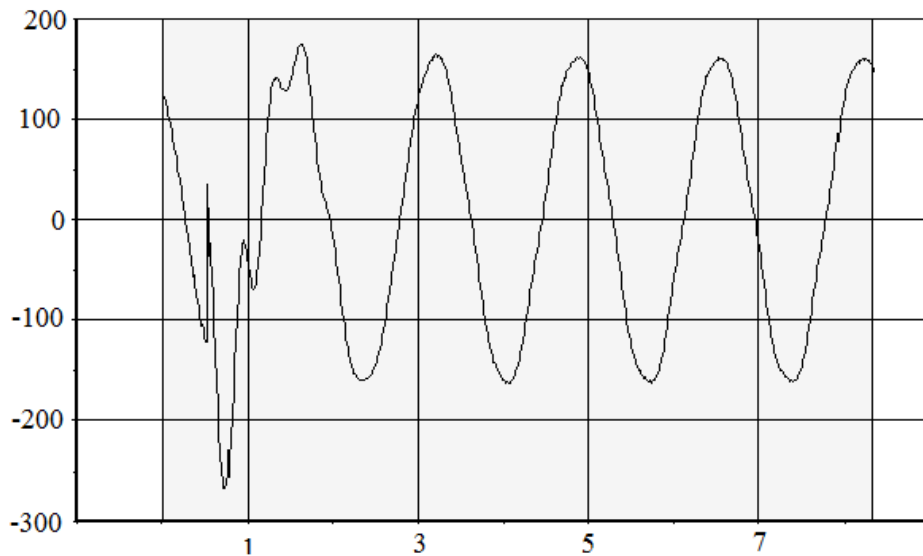
ani değişim olarak tanımlanır. Darbe biçiminde geçici haller, güç sistemleri devrelerinin doğal frekanslarını uyarıp salınım şeklinde geçici haller üretebilirler (Kocatepe vd., 2006).



Şekil 2.4. Yıldırım Darbe Gerilimi

### 2.2.1.2 Salınım Biçimindeki Geçici Olay

Tek yönlü olmayan pozitif ve negatif polariteli değerler içeren gerilim ve akım parametrelerinin her ikisinin sürekli hal durumunda temel frekansta olmayan ani değişim olarak tanımlanır.



Şekil 2.5. Orta Gerilim (OG) Bir Sistemde 5 MVAR 'lık Bir Kondansatör Grubunun Devreye Alınması

### **2.2.1.3 Aşırı Gerilim**

Gerilimin efektif değerinin 1 dakikadan daha uzun bir süre için %10 artması, aşırı gerilim olarak adlandırılır. Genellikle büyük yükler devreden çıkarıldığı zaman veya kondansatör grupları devreye alındığı zaman ortaya çıkmaktadır. Bu durumun oluşmasının temel sebebi gerilimin zayıf olması ve de gerilim kontrolünün yapılmıyor olmasıdır.

### **2.2.1.4 Düşük Gerilim**

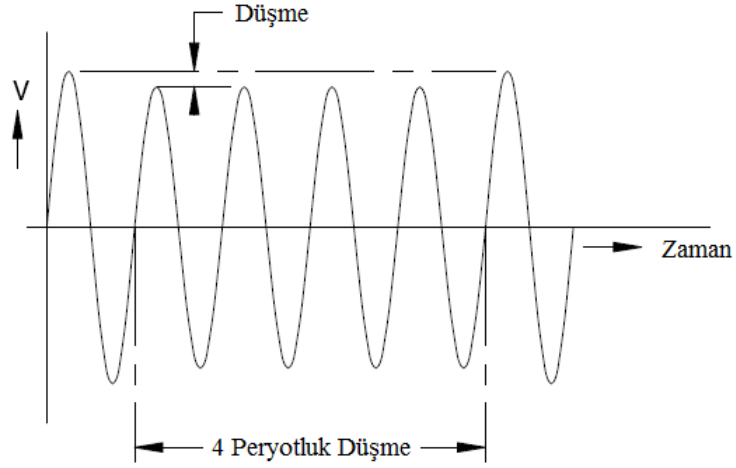
Aşırı gerilime tanımına benzer olarak, gerilimin bir dakika veya daha uzun bir süre için %10 azalmasına düşük gerilim denmektedir. Düşük gerilime neden olaylarda aşırı gerilimi meydana getiren olaylarla zıttır. Burada büyük bir yükün devreye alınması veya bir kondansatör grubunun devreden çıkarılmasıyla düşük gerilimler meydana gelebilir.

### **2.2.1.5 Kesinti**

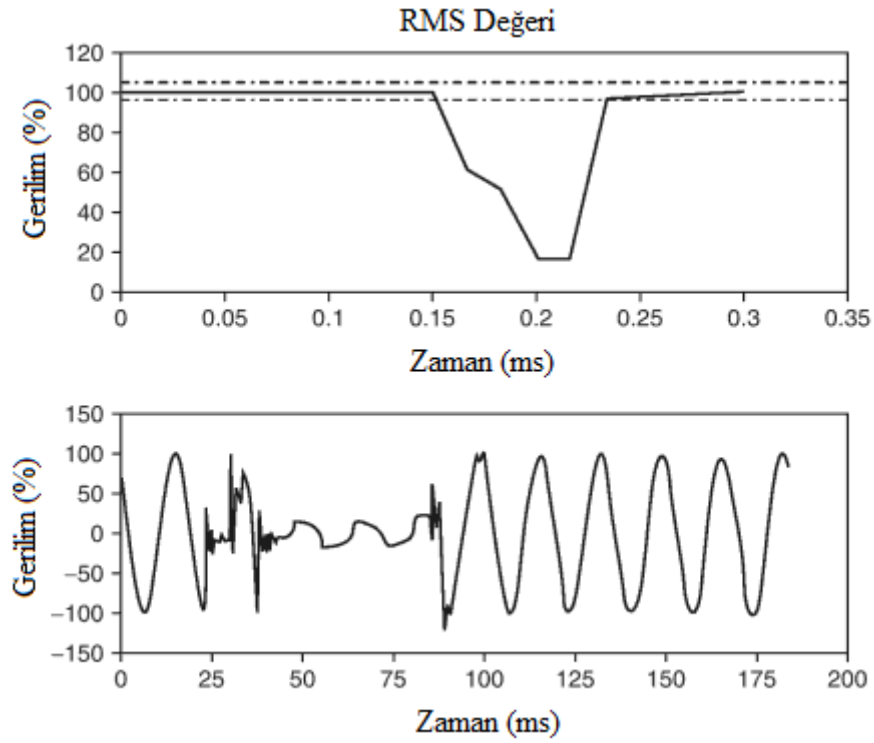
1 dakikayı aşmayan bir zaman periyodunda, kaynak geriliminin 0,1 pu'nun altına düşmesi halinde kesinti oluşur. Kesilmeler güç sistemindeki hataların, donanımdaki arızaların ve kontrol sistemlerindeki bozulmaların neticesinde oluşabilir. Kesintiler, gerilimin genliğinin nominal değerinin %10'dan daha az olduğu duruma ait sürelerde ölçülür. Sistemde bir hatadan dolayı meydana gelen kesilmenin süresi, koruma cihazının devreye girme zamanı ile belirlenir (Dugan vd., 1996).

### **2.2.1.6 Kısa Süreli Gerilim Düşmesi**

Gerilim değerinin, 0,5 peryot veya daha fazla bir süre için, %10 ile %90 arasındaki ani azalmasına gerilim düşmesi denir. Yarım peryottan daha az olan gerilim düşmelerine transient denir (Arrillaga vd., 2001). Gerilim düşmeleri genelde sistem arızaları ile ilişkilendirilir. Bununla birlikte büyük yüklerin devreye girmesi veya güçlü motorların yol almasıyla da oluşabilir.



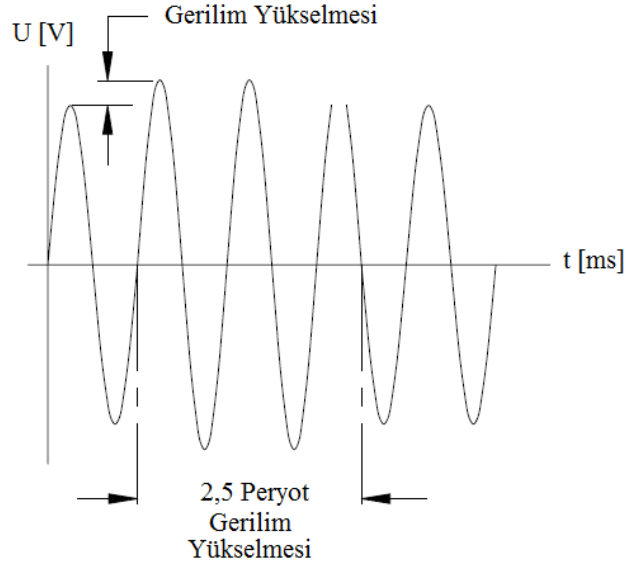
Şekil 2.6. Süresi 4 Peryot Olan Gerilim Düşmesi



Şekil 2.7. Bir Faz Toprak Kısa Devre Arızasındaki Gerilim Düşmesi

### 2.2.1.7 Kısa Süreli Gerilim Yükselmesi

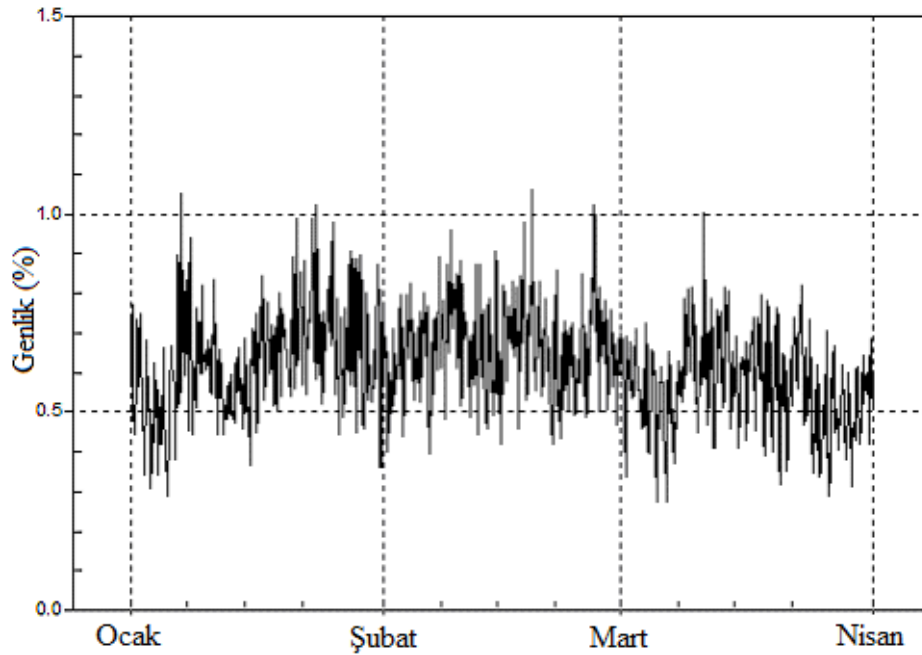
Gerilimin tepe değerinin %110 ile %180 arasında yükselmesine ve bunun yarım periyot ile bir dakika arasında sürmesine gerilim yükselmesi denir. Gerilim çökmelerine benzer olarak gerilim yükselmeleri de sistemdeki arıza durumlarından kaynaklanmaktadır. Ancak gerilim düşmeleri kadar yaygın değildir. Gerilim yükselmeleri genel olarak efektif değer cinsinden genliklerine ve de sürelerine bağlı olarak karakterize edilirler.



Şekil 2.8. Gerilimin 2,5 Peryotluk Yükselmesi

### 2.2.1.8 Gerilim Dengesizliği

Üç fazlı akım ve gerilimlerin yüzde cinsinden ortalamasından maksimum sapmaya gerilim dengesizliği denir. Simetrik bileşenlerin kullanılmasıyla da ifade edilebilmektedir. Negatif, sıfır ve pozitif dizi bileşenlerinin oranının kullanılması da yüzde olarak dengesizliği belirleyebilir. Örnek olarak, 3 fazlı bir kondansatör grubunun bir fazında sigortaların atması ile meydana gelebilir.



Şekil 2.9. 12kV 'luk Bir Fiderde 3 Ay Boyunca Yapılan Ölçümler Sonucu Görülen Gerilim Dengesizliği

Gerilim dengesizliği probleminin ortaya çıkmasının temel sebebi olarak dengesiz yüklenmiş tek fazlı yükler gösterilebilir. Bunlara rnek olarak elektrikli trenler ve transpoze edilmemiş havai iletim hatları gösterilebilir (Arrillaga vd., 2001). Ayrıca gerilim dengesizlikleri, 3 fazlı bir kondansatör grubunun tek fazının sigortasının atmasıyla da ortaya çıkabilir. %5 den daha fazla olan gerilim dengesizlikleri genellikle tek faz arızalarından kaynaklanmaktadır.

### **2.2.1.9 Güç Frekansı Değişimleri**

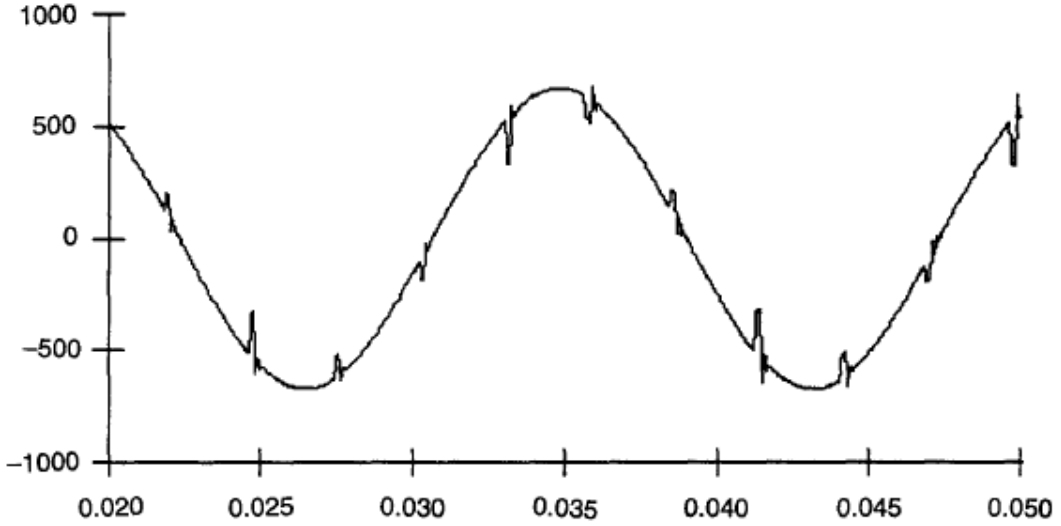
Güç frekans değişimleri, 50Hz veya 60Hz nominal değerleri ile belirlenen güç sisteminin temel frekansından sapma olarak ifade edilmektedir. Frekans sistemi besleyen generatörlerin açısal hızları ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Yük ile üretim arasındaki dinamik denge değiştiği zaman, g frekansında da ciddi değişiklikler olmaktadır. Frekanstaki sapma miktarı ise yk karakteristiği ve üretim kontrol sisteminin yük değişimlerine verdiği cevaba bağlıdır. Güç sisteminin kararlı hal durumunda kabul edilmiş değerler dışına çıkan frekans değişimleri, genel olarak büyük iletim hatlarından, devre dışı kalan büyük yüklerden ve büyük üretim kaynaklarının durmasından kaynaklanmaktadır (IEEE, 1995).

### **2.2.1.10 DC Bileşen**

Alternatif gerilimin pozitif ve negatif alternanstaki alanlarının birbirine eşit olmaması halidir. Bu problem genel olarak güç elektroniği konverterlerinin asimetrisi sonucunda oluşmaktadır. DC bileşenler, AC sistemlerdeki transformatörlerde doyamaya neden olmaktadırlar. Bu da transformatörlerin çevirme oranlarında bozulmalara, ısınmalara ve ömründe kısılmalara yol açmaktadır. DC bileşen ayrıca bağlantı elemanlarında ve topraklama elektrotlarında korozyona neden olmaktadırlar.

### **2.2.1.11 çentik**

Çentikler, her peryotta AC DC konverterlerdeki komutasyon işlemi nedeniyle oluşan faz-faz kısa devresinin sonucu olarak oluşan periyodik transientlerdir. Bunun periyodik olması demek, bu bozulmanın aynı zamanda gerilim dalga şeklinin harmonik spektrumu tarafından da karakterize edilebilmesi demektir. Buna rağmen, ani anahtarlamalardan kaynaklanan keskin kenarlar aynı zamanda üretim izolasyonunu etkileyen yüksek frekans salınımları içerirler ve yüksek bir elektromanyetik girişiminin artmasına neden olabilirler. Bu etkiler, anahtarlama elemanlarına göre snubber devreler tasarlanarak azaltılabilir (Arrillaga vd., 2001).



Şekil 2.10. Bir Konverter Tarafından Meydana Gelen Çentikler

### 2.2.1.12 Gürültü

Gürültü, faz iletkenlerinde güç sistem akım ve gerililerini 200kHz'den daha küçük spektral genişlik ile yükleyen veya nötr iletkenleri ile sinyal hatlarında bulunan istenmeyen elektriksel işaretler olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir anlamda gürültü, harmonik distorsiyon veya transiyentler gibi sınıflandırmalara girmeyen her türlü ,istenmeyen güç distorsiyonlu güç olarak tanımlanabilir. Meydana gelme sebeplerinden ise kontrol devreleri, ark makinesi, anahtarlamalı güç kaynakları örnek olarak gösterilebilir.

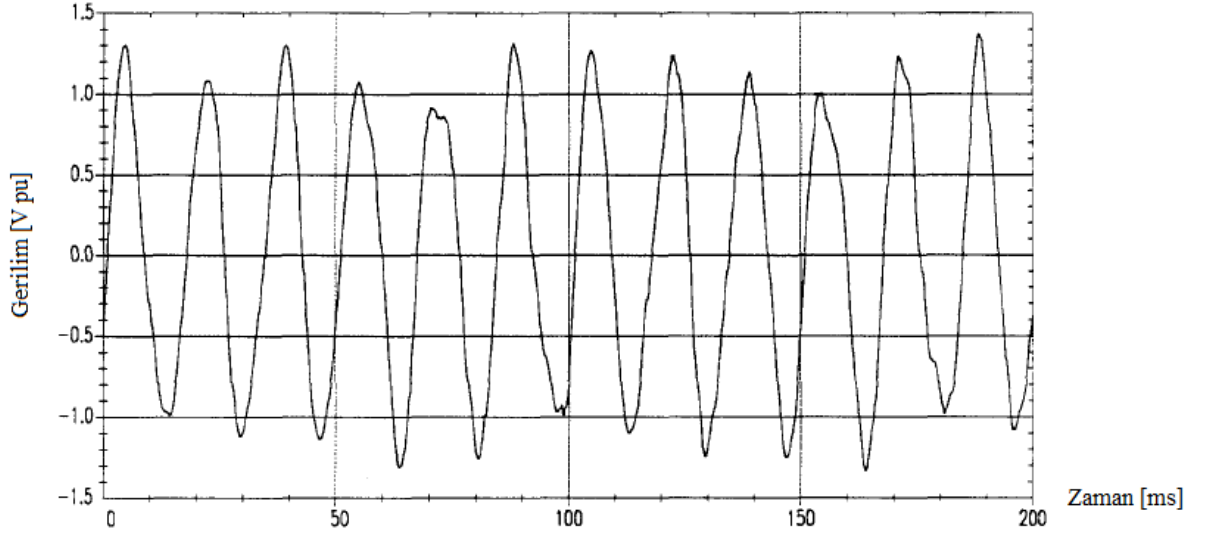
Gürültünün oluşmasının başlıca sebebi, işletmelerdeki topraklamanın doğru olarak yapılmamasıdır. Filtreler, izolasyon transformatörleri ve hat kompanzatorleri kullanılarak gürültü problemi ortadan kaldırılabilir.

### 2.2.1.13 Gerilim Dalgalanması (Fliker)

Gerilim dalgalanması, ANSI C84.1'e göre genliği belirlenen 0,9 ile 1,1 pu değerleri arasındaki gerilim bölgesinde kalan rastgele veya sistematik gerilim değişimleridir.

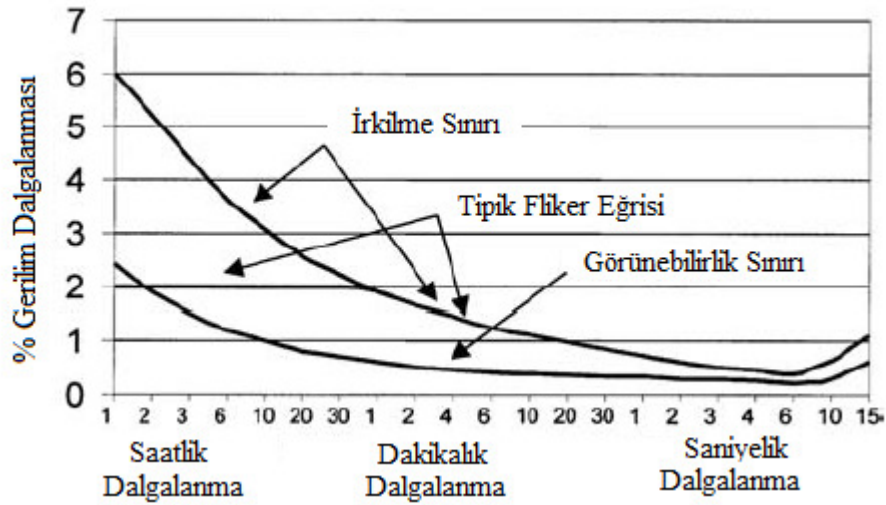
Yük akımının genliğinde sürekli ve hızlı değişimler gösteren yükler, kırışma olarak ifade edilen gerilim değişmelerine neden olurlar. Kırışma terimi, lambalarda oluşan gerilim dalgalanmasından dolayı insan gözünün kırışmasından gelmektedir.





Şekil 2.11. Fliker Frekansındaki Gerilim Dalgalanmasına Neden Olan Tipik Bir Ark Fırını Gerilim Karakteristiği

Şekil 2.12 'de bulunan "Görünebilirlik" sınır değeri fliker dalgalanmasının insan gözüyle görülebilecek olan sınır değerini göstermektedir. Aynı çizelgede bulunan "İrkilme Sınırı" ise flikerin rahatsız etme sınırını göstermektedir.



Şekil 2.12. Tipik Fliker Eğrileri

#### 2.2.1.14 Elektromagnetik Girişim (EMI)

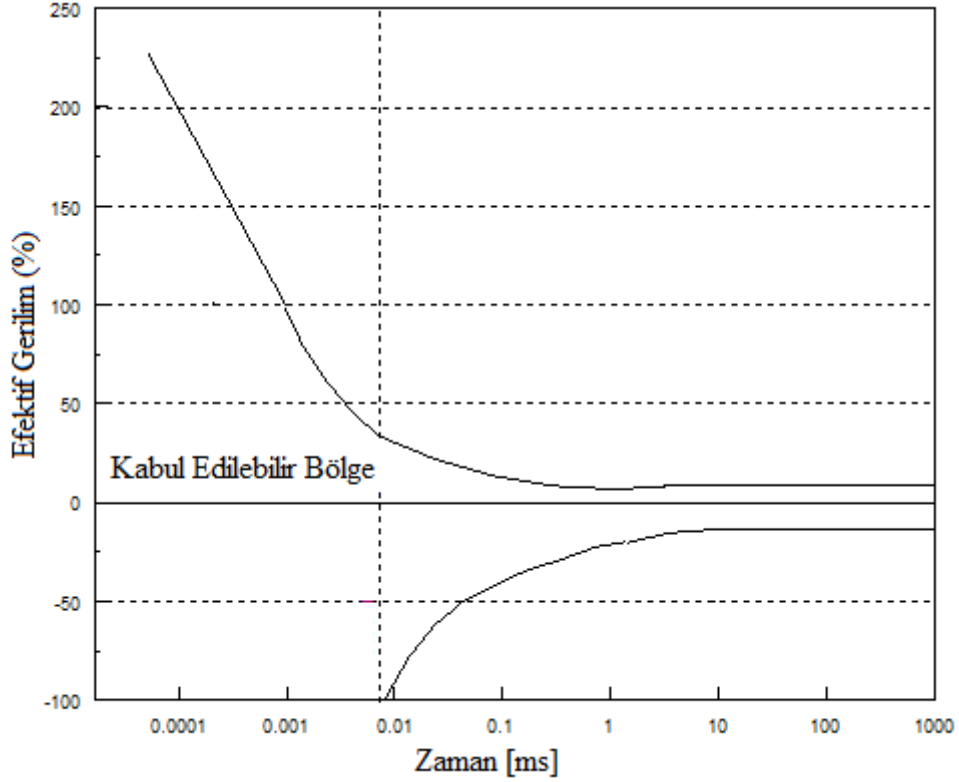
Genliği 100  $\mu$ V ile 100 V arasında, frekansı 10 kHz ile 1 GHz arasında olan küçük enerjili bozucu bir dalgadır. Anahtarlamalı güç kaynakları, motor devreleri, telsiz yayınları ve güç hatları üzerinde yapılan haberleşmeden kaynaklanmaktadır (Kocatepe vd., 2006).

Çizelge 2.1. Güç Sisteminde Elektromanyetik Olayların Kategori ve Karakteristikleri

NO	KATEGORİ	İÇERİK	SÜRE	GERİLİM GENLİĞİ
<b>1.0</b>	<b>Geçici Haller (Transientler)</b>			
1.1	Darbe Biçiminde			
1.1.1	Nano saniye	5 ns yükselme	< 50ns	
1.1.2	Mikro saniye	1µs yükselme	50ns - 1ms	
1.1.3	Mili saniye	0,1 ms yükselme	>1ms	
1.2	Salınım Biçiminde			
1.2.1	Düşük frekans	< 5kHz	0,3 - 50ms	0 - 4 pu
1.2.2	Orta frekans	5 - 500kHz	20µs	0 - 8 pu
1.2.3	Yüksek frekans	0,5 - 5MHz	5µs	0 - 4 pu
<b>2.0</b>	<b>Kısa Süreli Değişimler</b>			
2.1	Ani Değişimler			
2.1.1	Çökme (Sag)		0,5 - 30 periyot	0,1 - 0,9 pu
2.1.2	Yükselme (Swell)		0,5 - 30 periyot	1,1 - 1,8 pu
2.2	Kısa Süreli			
2.2.1	Kesinti		0,5 periyot - 3s	< 0.1 pu
2.2.2	Çökme (Sag)		30 periyot - 3s	0,1 - 0,9 pu
2.2.3	Yükselme (Swell)		30 periyot - 3s	1,1 - 1.4pu
2.3	Kalıcı			
2.3.1	Kesinti		3s - 1 dakika	< 0.1 pu
2.3.2	Çökme (Sag)		3s - 1 dakika	0,1 - 0,9 pu
2.3.3	Yükselme (Swell)		3s - 1 dakika	1,1 - 1,2 pu
<b>3.0</b>	<b>Uzun Süreli Değişimler</b>			
3.1	Kesinti, uzun süreli		> 1 dakika	0,0 pu
3.2	Düşük Gerilim (Under voltage)		> 1 dakika	0,8 - 0,9 pu
3.3	Aşırı Gerilim (Over voltage)		> 1 dakika	1,1 - 1,2 pu
<b>4.0</b>	<b>Gerilim Dengesizliği</b>		Kalıcı Hal	0,5 - 2%
<b>5.0</b>	<b>Dalga Şekli Distorsiyonu</b>			
5.1	DC Bileşen		Kalıcı Hal	0 - 0,1%
5.2	Harmonikler		Kalıcı Hal	0 - 20%
5.3	Ara Harmonikler		Kalıcı Hal	0 - 2%
5.4	Çentik		Kalıcı Hal	
5.5	Gürültü		Kalıcı Hal	0 - 1%
<b>6.0</b>	<b>Gerilim Dalgalanmaları</b>		Aralıklı	0,1 - 7%
<b>7.0</b>	<b>Güç Frekans Değişimleri</b>		< 10s	

### 2.2.1.15 CBEMA VE ITIC EĞRİSİ

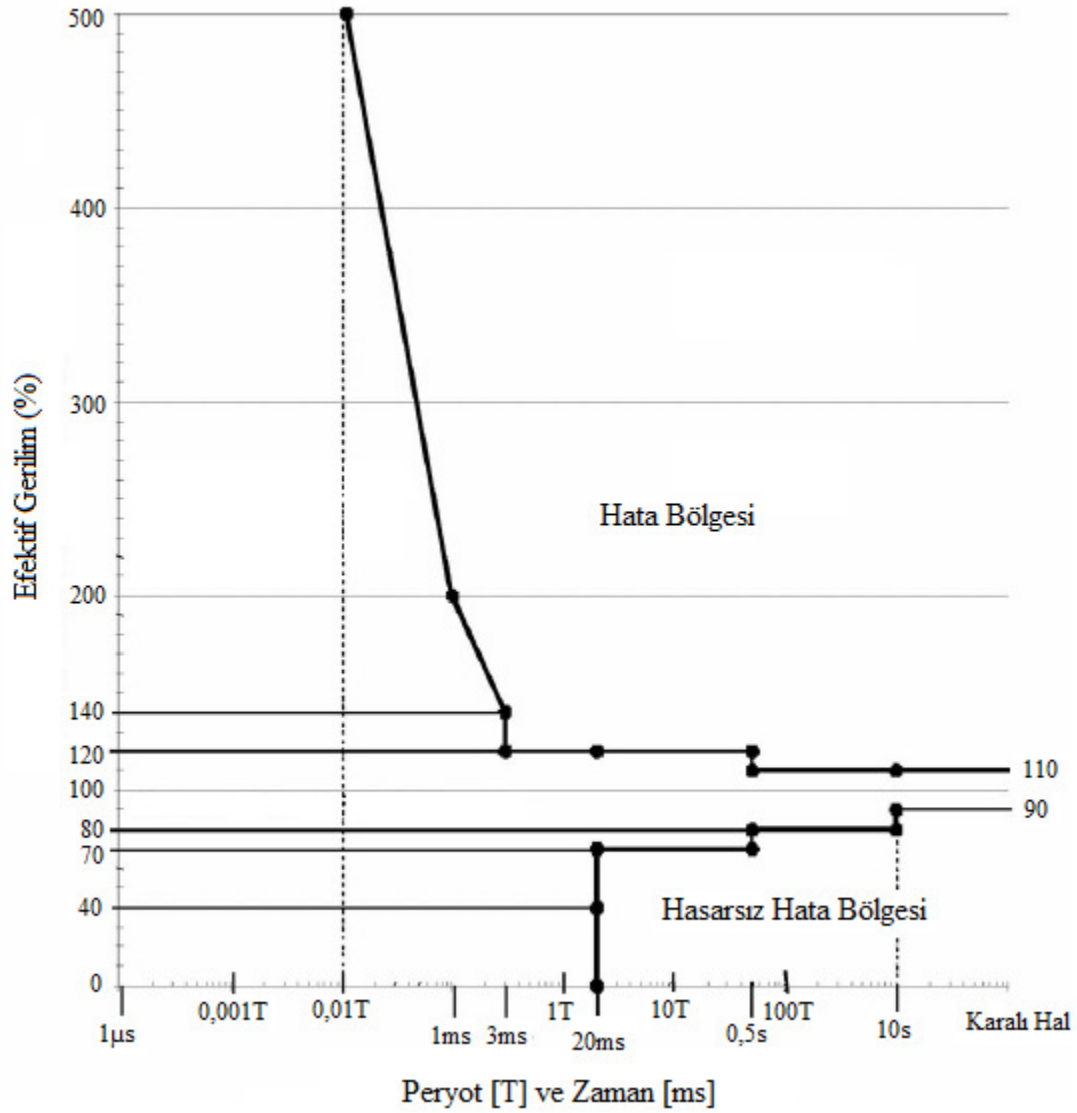
Enerji kalitesi problemleri, yazılım ve donanım problemlerinin de ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bilgisayar sistemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte birçok enerji kalitesi problemini ortaya çıkarmıştır. Bunun sonucunda “Computer and Business Equipment Manufacturer Association” (CBEMA) eğrisi geliştirilmiştir. Bu eğri temel olarak bilgisayarlardaki güç kaynakları ve elektronik ekipmanlar için geliştirilmiştir.



Şekil 2.13. CBEMA Eğrisi

CBEMA eğrisinde, geriliminin durum değerleri grafik üzerinde işaretlenerek, genel olarak güç sistemlerinde sıkça kullanılan elektronik ekipmanları besleyen kaynakların ne derece kullanışlı olduğunu görmek mümkündür (Arrillaga vd., 2000). Grafik üzerindeki kalın çizgilerle gösterilen bölüm elektronik ekipmana zarar vermeyecek sınır değerleri göstermektedir. Bu alan içerisinde kalan her bir olay cihaz için zararsızdır. Ancak gerilim veya süre nedeniyle bu çizginin dışında kalan olaylar, ekipman için zarar oluşturan ve istenmeyen durumlardır.

Bu çalışmaların devam etmesiyle birlikte “ Information Technology Industry Council” (ITIC) eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri ile üretim yapan kuruluşların ve kullanılan elektrik aygıtlarının enerji kalitesi ile ilgili uyması gereken değerlere ait sınırlar verilmiş olmaktadır. Elektrik enerjisi üreten kuruluşlar , ürettiği gerilim seviyesi ve süresi ile ilgili sınır değer verirken cihazlar için bu sınırlar içerisinde normal çalışmayı taahhüt etmeyi zorunlu kılar (Kocatepe vd., 2006).



Şekil 2.14. ITIC Eğrisi

ITIC eğrisi, sistemdeki gerilim değişimlerinin genliğine v süresine göre bilgi işlem merkezi donanımlarının göstereceği toleransı tanımlamaktadır. Yeni nesil bilgisayarların çoğu, bu değerlerden daha büyük toleransa sahiptirler ve bu eğri, güç sistemine uyarlanan hassas donanımlar için standart bir tasarım hedefi sağlamaktadır. Eğrilerdeki yatay eksen süreyi, dikey eksen ise gerilim genliğini göstermektedir. Sınır değerlerin altında kalan bölümlerin genellikle yükün devre dışı kalmasına neden olduğu, üstünde kalan bölümlerin ise yalıtım bozukluğuna ve aşırı gerilim açması gibi bozukluklara neden olduğu tahmin edilmektedir.

### 3. HARMONİKLER

#### 3.1 Harmoniklerin Tanımı

1800'lü yılların başında, Fransız matematikçi Jean Baptise Fourier,  $f$  frekansındaki periyodik bir nonsinüsoidal fonksiyonun, temel frekansın katları şeklindeki sinüzoidal dalgaların toplamları olarak ifade edilebileceğini formülize etmiştir (Sankaran, 2002). Bu matematiksel denklem günümüzde akım ve gerilim dalga şekillerinin enerji kalitesindeki önemini ortaya koymak için kullanılmasının yanı sıra termodinamik, statik ve iletişim gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Fourier teoreminin elektrik biliminde en çok kullanıldığı alan ise gerilimin veya akımın dalga şeklinin analizidir. Bu teorem kullanılarak gerilim veya akımda hangi harmoniklerin bulunduğu kolayca saptanabilmektedir.

Elektrik sistemlerinde kaynak geriliminin ve bu kaynaktan çekilen akımın sinüzoidal şekilde olması istenir. Ancak kaynak gerilimi sinüzoidal olmasına rağmen farklı yük karakteristikleri nedeniyle akım ve gerilimde bozulmalar meydana gelmektedir. Ark fırınları, deşarj prensibi ile çalışan lambalar ve yarı iletken elemanlarla çalışan bütün cihazların dalga şekilleri sinüzoidalden farklıdır. Akımın sinüzoidal olmaması da gerilim dalga şeklinin bozulmasına neden olmaktadır.

Harmonikler, IEC 61000-2-1 :1990 standardına göre, sinüzoidal gerilim ve akımların temel frekansın tam katları olan bileşenleri olarak tanımlanmaktadır. Temel bileşen haricindeki bu dalgaların oluşmasına nonlinear elemanlar sebep olmaktadır. Bu elemanlar magnetik ya da elektrik devre lineersizliğine sahip olup akım ile gerilim dalga şekilleri birbirlerinden farklılık göstermektedir (Kocatepe vd., 2003).

Çizelge 3.1. Harmonik Bileşenler ve Frekansları

Harmonik Mertebesi	Frekans	
	$f_n = n.f_1$	
(n)	Avrupa	Amerika
1	50 Hz	60 Hz
3	150 Hz	180 Hz
5	250 Hz	300 Hz
7	350 Hz	420 Hz
11	550 Hz	660 Hz
13	650 Hz	780 Hz

Sinüzoidal gerilim veya akımın zamana bağlı denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

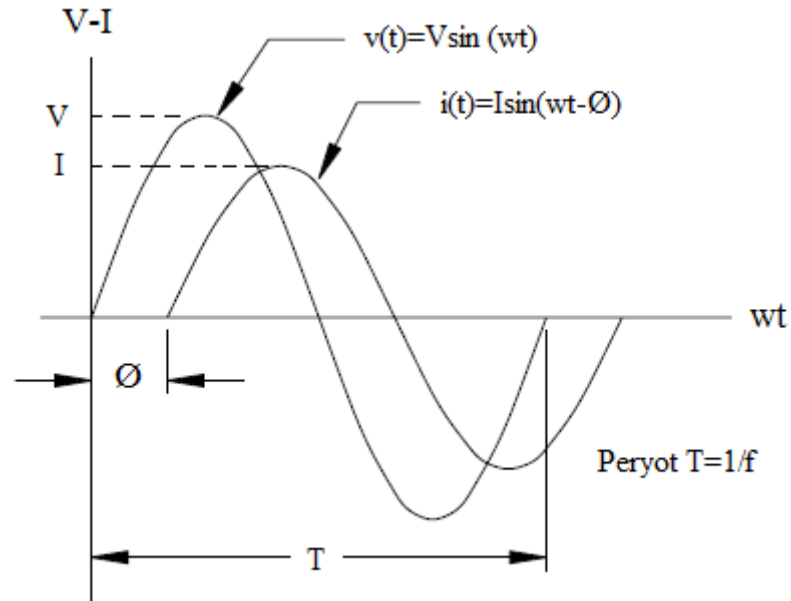
$$v(t) = V \cdot \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

$$i(t) = I \cdot \sin(\omega t \pm \theta) \quad (3.2)$$

Burada  $\omega = 2\pi f$  olarak bilinen periyodik dalga'nın açısal hızını ve  $\theta$  ise akım ve gerilim arasındaki faz farkını göstermektedir. Denklem 3.1 ve 3.2 dalga şekli sinüzoidal olan akım ve gerilimin ifadeleridir. Ancak nonsinüzoidal bir dalga'nın denklemi ise;

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) \quad (3.3)$$

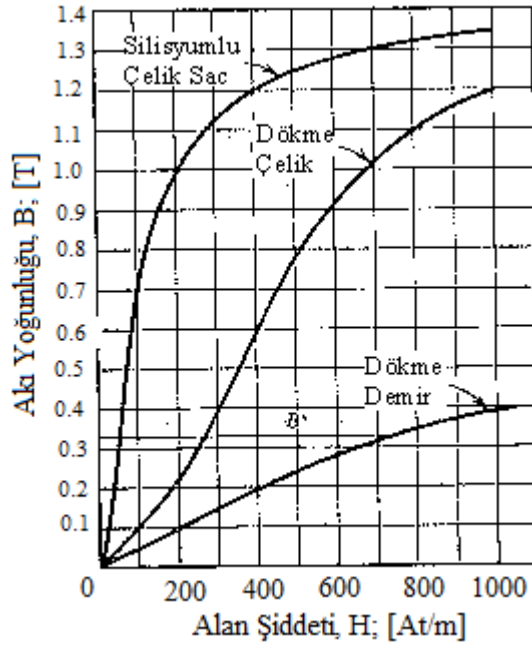
Denklem 3.3 de görüldüğü gibi Fourier açılımı sonsuz bir seridir. Bu denklemde  $V_0$  dalga şeklinin DC bileşenini göstermektedir.  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  ise dalga bileşenlerinin tepe değerlerini göstermektedir. Diğer bir deyişle periyodik dalga'nın harmoniklerini ifade etmektedirler.



Şekil 3.1. Zamanın (t) Fonksiyonu Olarak Akım ve Gerilim Dalga Şekli

### 3.2 Magnetik Lineersizlik

Magnetik devrede, devreden geçen akım ile oluşan magnetik akı arasında lineer bir bağıntı yoktur. Bunun sebebi ise manyetik devrenin doyuma gitmesidir. Akım bu devrede artırılrsa bile, akı artmayacaktır. Bu lineersizlik şekli genellikle transformatörlerde görülmektedir. Transformatörlerde bulunan demir nüvenin doyuma gitmesi nedeniyle mıknatıslanma akımı nonsinüsoidal olmaktadır.



Şekil 3.2. Bazı Malzemelerin Mıknatıslanma Eğrileri

Şekil 3.2. den görüldüğü üzere metallerin farklı doyuma karakteristikleri vardır. Silisyumlu çelik sac, diğer malzemelere göre daha geç doyuma ulaşan bir malzemedir. Bu yüzden de transformatörlerde bu malzeme tercih edilmektedir.

Mıknatıslanma akımı;

$$i_m = \frac{\sum H_i \cdot l_i}{W} \quad (3.4)$$

olarak ifade edilir. Burada i. kesite ait olmak üzere  $l_i$ , kuvvet çizgi yolunu;  $H_i$ , alan şiddetini belirtmektedir. Bu yüzden özellikle transformatörlerde doyuma bölgesinden uzakta çalışmak daha verimli olacaktır.

### 3.3 Elektriksel Lineersizlik

Elektrik devrelerinde gerilim ile akım aynı oranda değişmiyorsa, bu elektrik devresinin lineer olmaması anlamına gelir. Bu tür devrelerde harmonik akımlarına yüksek oranda rastlanmaktadır. Bunun nedeni ise devrede nonlineer elemanlar bulunmasıdır. Nonlineer elemanların uç karakteristikleri ohm kanununu gerçekleştirmezler. Bu yüzden gerilimde oluşan belli orandaki artma veya azalma karşı akımda olan değişme farklılık gösterir.

Nonlineer bir elemanın akımı ile gerilimi arasındaki ilişki;

$$i = x + y \cdot U + z \cdot U^2 + k \cdot U^3 + \dots \quad (3.5)$$

olarak ifade edilir.

Burada  $i$ , nonlineer elemanın akım değerini,  $U$  ise gerilim değerini göstermektedir. Denklemden de görüldüğü gibi akım değeri gerilimle doğru orantılı olarak değişmeyip, farklı katsayılarla göre değişim göstermektedir. Bu katsayıların değerleri ise her elemanda farklılık göstermektedir.

Çizelge 3.2. Nonlineer Bir Elemanın Gerilim ve Akım Değerleri

Uç Gerilimi (U)	Akım (A)
100	5,5
150	9
200	14,5
230	18

Çizelge 3.1 de nonlineer bir elemana uygulanan akım ve gerilim değerleri görülmektedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere akım ile gerilim arasında bir lineersizlik bulunmaktadır.

### 3.4 Harmoniklere Ait Tanımlar

Bahsedilecek büyüklükler harmoniklere ait tanımlamalar ve denklemlerden oluşmaktadır. Bu büyüklüklerin değerleri harmoniklerin, incelen sisteme enerji kalitesi açısından ne ölçüde etki ettiğini göstermektedir. Değerlerin azalması ve sifıra yaklaşması, sistemde harmoniklerin az olduğu anlamına gelmektedir ve bunun tersi ise harmoniklerin sistemde fazlaca olduğunu göstermektedir.



### 3.4.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

Harmonik bileşenlerin temel bileşene göre seviyesini belirlemede dikkate alınan en önemli ölçüttür. Sinüzoidalden uzaklaşmayı, distorsiyonu diğer bir deyişle bozulmanın derecesini belirtir. Hem gerilim, hem de akım için verilebilir (Adak, 2003).

THD akım veya gerilimin temel bileşeni ile harmoniklerin RMS değerleri arasındaki oranı göstermektedir ve genellikle yüzde olarak ifade edilir.

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1} \quad (3.6)$$

şeklinde ifade edilir. Akımın toplam harmonik distorsiyonu (akım bozulma faktörü) ise  $THD_I$ ,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (3.7)$$

şeklindedir.

### 3.4.2 Distorsiyon Faktörü (DF)

Akım ve gerilim için distorsiyon faktörü denklemleri,

$$DF_I = \frac{1}{I} \cdot \left( \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.8)$$

Gerilim değeri için ise

$$DF_V = \frac{1}{V} \cdot \left( \sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir.

### 3.4.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu

Standartlarda genellikle her bir harmonik bileşeni temel bileşen değerine göre sınırlandırılmıştır. Bu nedenle gerilim ve akım için HD değerleri tanımlanmıştır ve standartlarda yer almaktadır. n. Harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad (3.10)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (3.11)$$

#### 3.4.4 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu şeklinde tanımlanır.

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (3.12)$$

$I_L$  yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Bu akım 12 ay boyunca talep edilen akımların matematiksel ortalamasını göstermektedir. TTD kavramı IEEE ‘Standart 519’ uygulamasında özellikle belirtilmiştir.

#### 3.4.5 Tepe Faktörü (Crest Factor,CF)

Harmonik bileşenlerin en temel şekilde anlatımını sağlamaktadır. Nonsinüsoidal bir akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin RMS değeri arasındaki oranı göstermektedir. Bu nedenle içerisinde harmonik bileşen bulundurmayan bir dalganın tepe faktörü  $\sqrt{2}$ ’ dir.

$$CF = \frac{\text{Dalgaın Tepe Değeri}}{\text{Dalgaın Efektif Değeri}} \quad (3.13)$$

#### 3.4.6 Transformator K – Faktörü

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

Nonlinear yükleri besleyen bir transformatör için K-faktörü

$$K = \sum_{n=1} \left( n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (3.14)$$

olarak tanımlanır (Kocatepe vd., 2003).

### 3.4.7 Distorsiyon Güç Faktörü (GF)

Distorsiyon güç faktörü, akım ve gerilimde harmonikler bulunduğu güç faktörünü göstermektedir.

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (3.15)$$

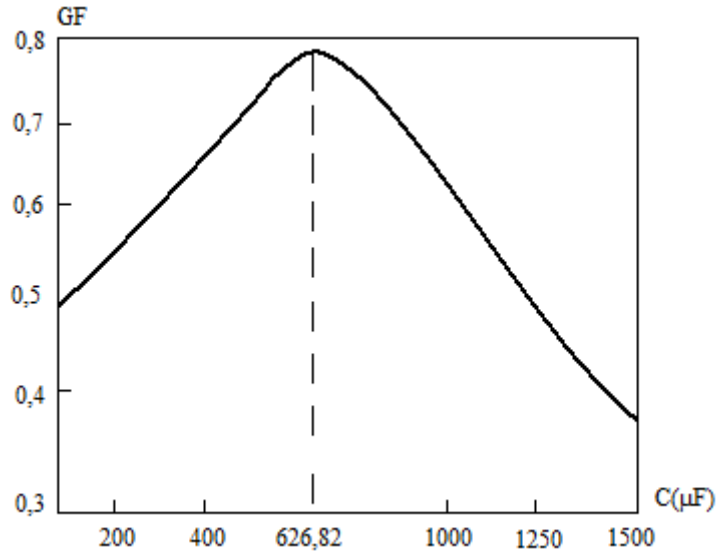
$$I = I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (3.16)$$

Gerilim ve akımda harmonikler olduğu zaman efektif değerlerin tanımları yukarıdaki şekilde değişmektedir. Bu durumda güç faktörü,

$$Pf_{toplam} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + \left( \frac{THD_V}{100} \right)^2} \sqrt{1 + \left( \frac{THD_I}{100} \right)^2}} \quad (3.17)$$

şeklinde ifade edilir.

3.17 nolu denklemden de görüldüğü üzere, sistemde harmonikler bulunduğu zaman THD değerleri sıfırdan büyük bir değer alacaktır ve buda güç faktörünün düşmesine neden olur. Bu nedenle harmonikli devrelerde güç faktörünü iyileştirmek için kompanzasyonla birlikte filtreleme işlemi de yapılmalıdır.

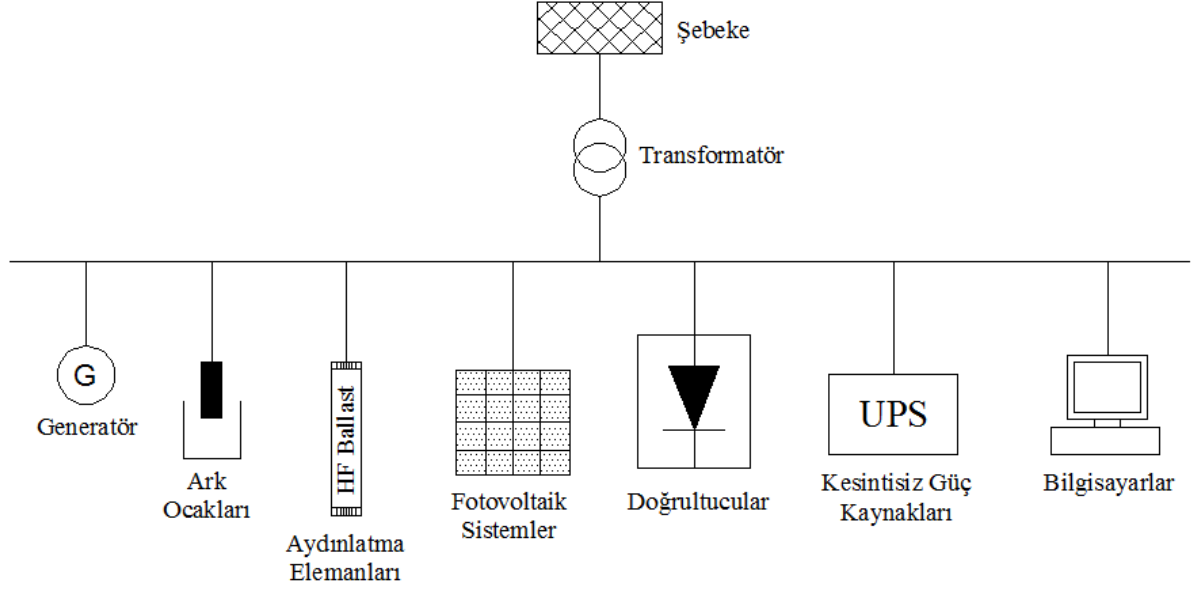


Şekil 3.3. Nonlineer Yüke Bağlı Kapasite ile Güç Faktörünün Değişimi

Şekil 3.3 'de görüldüğü gibi harmonikli durumda kondansatör kapasitesinin artırılmasıyla güç faktörü belli bir değere kadar çıkmaktadır. Bu değer devrenin içerdiği harmoniklere ve harmonik distorsiyonuna bağlı olarak farklılık gösterir. Belli bir değerden sonra kondansatör kapasitesinin artırılması güç faktörünü arttırmamakta, tersine düşmesine sebep olmaktadır.

#### 4. HARMONİK ÜRETEN ELEMANLAR

Elektrik enerjisinin kalitesinde özellikle tüketiciler etkilenmektedir. Enerjinin kaliteli olarak üretimi, iletimi ve dağıtımı günümüzde vazgeçilmez bir unsur olmuştur. Bununla birlikte enerjinin kaliteli bir şekilde tüketilmesi de gerekmektedir. Güç kalitesine etki eden faktörlerden biri de harmoniklerdir ve harmoniklerin oluşmasına nonlineer elemanlar neden olmaktadır.



Şekil 4.1. Nonlinear Yükler ve Harmonikli Akım Kaynakları

##### 4.1 Nonlinear Elemanlar

Harmoniklerin ortaya çıkmasının başlıca sebepleri arasında güç sisteminde kullanılan nonlineer elemanlar neden olmaktadır. Bu elemanların akımı ile gerilimi arasında doğrusal bir bağıntı olmadığı için harmonikler oluşmaktadır. Doyuma iden manyetik devreler, ark ocaklarının çektiği ani akımlar, güç elektroniği elemanlarının sinüzoidal dalgayı kıyması nonlineer olaylardır. Harmoniklerin ortaya çıkmasına neden olan başlıca elemanlar şunlardır:

- Transformatörler
- Statik dönüştürücüler
- Generatörler
- Ark fırınları
- Gaz deşarj prensibi ile çalışan aydınlatma armatürleri
- Statik VAR kompanzatorleri
- Fotovoltaik sistemler
- Bilgisayarlar

- Kesintisiz güç kaynakları (KGK)
- DC enerji iletimi
- Elektrikli ulaşım sistemleri

#### 4.1.1 Transformatörler

Güç sistemlerindeki en önemli eleman olan transformatörler, demir çekirdeği bulunan bobinden oluştuğu için harmoniklere yol açmaktadır (Dommel vd., 1986). Demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiği nonlinear olduğu için sistemde harmonikler oluşmaktadır.

Harmoniklerin oluşumunu önlemek için transformatörler genellikle lineer bölgede çalıştırılacak şekilde tasarlanırlar. Mıknatıslanma akımı harmonikleri genel olarak işletmelerin aktif olmadığı gündüz saatlerinde ortaya çıkarlar. Çünkü bu saatlerde sistemde bulunan yükler azdır ve gerilim artış gösterir. Bu nedenle 3., 5. ve 7. harmoniklere çok sık rastlanmaktadır. Oluşan harmoniklerin transformatörün primer reaktansı ve kaçak reaktansı üzerinden geçmesiyle gerilim düşümü meydana gelir. Bununla birlikte harmonik akımlarının sisteme geçip geçmemesinde transformatörün bağlantı şekilleri de önemli rol oynamaktadır. Üçgen bağlı sargılarda 3. harmonik akımları sargılar arasında dolaşır. 3. harmonikler aynı fazda oldukları için üçgen bağlantının her bir düğümünde toplamları sıfır olur ve şebekeye geçmezler. Ancak 3. harmonik akımlarının dengesiz olduğu durumlarda akımlar birbirlerini sıfırlamayacağından dolayı düşük genlikli harmonikler şebekeye geçebilirler. 3 ve 3'ün katı olan diğer bütün harmonikler transformatörün bağlantı grubu ne olursa olsun şebekeye geçerler.

Çizelge 4.1. Bir Dağıtım Transformatörünün Harmonik Spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	(%) $I_n/I_\mu$
3	50
5	20
7	5
9	2,6

Çizelge 4.1 'de bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu verilmiştir. Burada  $I_n$  sisteme verilen harmonik akımlarını,  $I_\mu$  ise transformatörün mıknatıslanma akımını göstermektedir. Mıknatıslanma akımının şebekeye geçmesi aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

- Transformatörlerde mıknatıslanmanın zorunlu veya serbest olması
- Transformatör sargılarının bağlantı grubuna
- Primerde yıldız bağlantı yapıldığında, yıldız noktasının nötr hattına bağlı olup olmadığına (Boduroğlu, 1988).

#### 4.1.2 Statik Dönüştürücüler (Konverterler)

Bünyesinde güç elektroniği bulunduran bütün elemanlar birer harmonik kaynağıdır. Doğrultucular, inverterler, frekans dönüştürücüler bu gruba girmektedir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaiik sistemler, hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir.

İdeal bir dönüştürücünün ürettiği harmonikler,

$$n = k \cdot p \pm 1 \quad (4.1)$$

ile ifade edilir.

Bu denklemde p darbe sayısını göstermektedir. Darbe sayısı arttıkça düşük mertebeli harmoniklerin ortaya çıkması önlenmektedir. Bu nedenle yüksek darbeli konverterlerin kullanımı harmoniklerin sistemde bozucu etki yapmasını engellemektedir.

#### 4.1.3 Generatörler

Dönen makineler endüvi oluk sayısına bağlı olarak harmonik üretirler (Arrillaga, 1985). Generatörler doğal harmonik üreticileridirler. Harmonik üretmelerinin sebepleri arasında,

- Magnetik direncin oluklara bağlı olması
- Temel devrenin doyuma ulaşması
- Generatör üzerindeki kaçak akımlar
- Sık aralıklarla simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargıları

gösterilir.

Generatörlerin oluşturduğu 3 ve 3'ün katı olan harmonikleri önlemek için ekstradan amortisman sargıları bulunur. Ayrıca endüvi olukları ve kutuplar uygun tasarlanabilirse 5. ve 7. harmonikleri de sınırlamak mümkündür.

#### 4.1.4 Ark Fırınları

Ark fırları, kaynak makineleri gibi normal işlemlerini ark ile sürdüren tesisler önemli harmonik kaynakları arasında sayılırlar. Harmoniğin üretilme nedeni, ark direncinin lineer olmaması yani ateşleyici elektrotlarının akım gerilim karakteristiğinin lineer olmayışdır (Arrillaga, 1985).

Tipik bir ark fırlarında 2., 3., ...9 mertebeli akım harmonikleri bulunur. En büyük harmonik bileşeni temel bileşenin %30'u kadardır. Çizelge 2.4'de bir ark fırlarına ait harmonik değerleri verilmiştir (Sundberg ,1976).

Çizelge 4.2. Bir Ark Fırırlarına Ait Harmonik Değerleri

Harmonik Mertebesi (n)	(% ) Genlik	
	Ortalama	Maksimum
2	4-9	30
3	6-10	20
4	2-6	15
5	2-10	12
6	2-3	10
7	3-6	8
9	2-5	7

#### 4.1.5 Gaz Deşarj Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Armatürleri

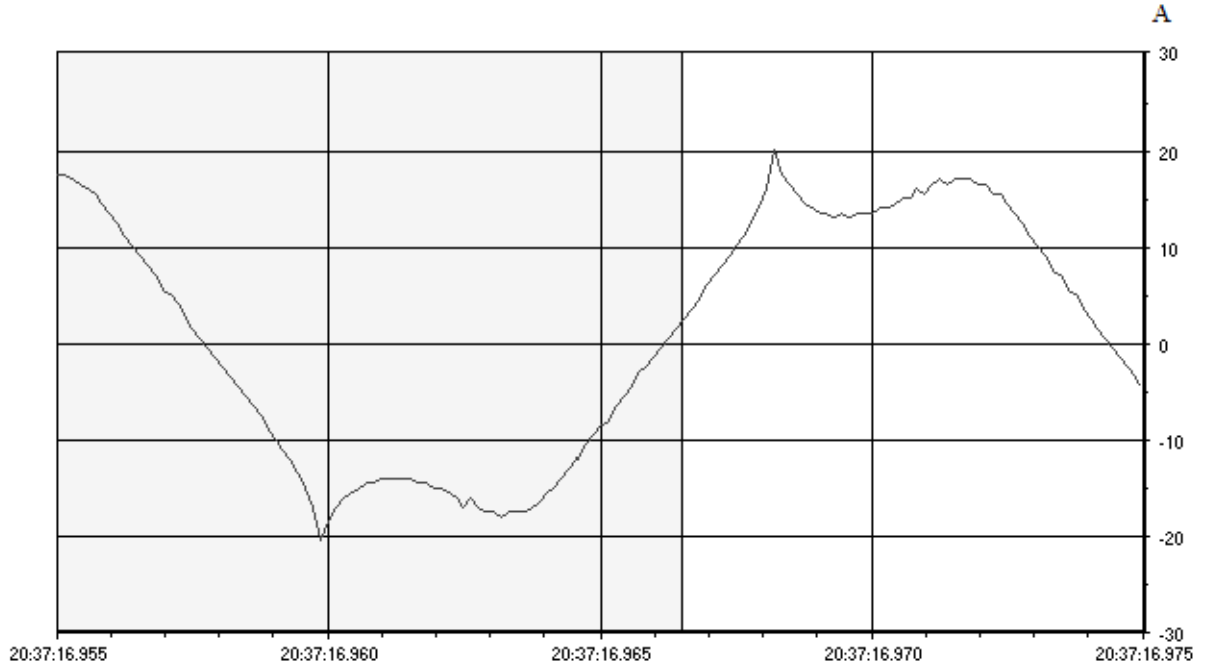
Cıva buharlı lambalar, floresant lambalar, sodyum buharlı lambalar nonlineer akım gerilim karakteristiğine sahip oldukları için harmonik üretirler. Bu lambalar çalışmaları esnasında özellikle 3 ve 3'ün katı olan harmonikler üretirler ve nötr iletkeninde ısınmaya neden olurlar. Ayrıca bu lambaların çalışması için gerekli olan balast elemanı da magnetik devre bulundurduğu için harmoniklerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ancak son yıllarda içerisinde güç elektroniği elemanları bulunan elektronik balastlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu elemanlar da harmoniklere neden olmaktadır ancak balast içerisinde monte edilen filtreler ile bu problemin çözümü mümkündür. Çizelge 4.3 'de floresant lambaya ait gerilim harmonik distorsiyon değerleri verilmiştir (Adak, 2003).



Çizelge 4.3. Bir Fluoresant Lambanın Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Değerleri

Harmonik bileşenler (n)	Magnetik Balast (THD <sub>v</sub> )		Elektronik Balast (THD <sub>v</sub> )	
	Faz	Nötr	Faz	Nötr
1	12.8	171.2	16.3	44.0
3	10.6	169.8	3.6	11.9
5	6.7	16.6	11.7	31.6
7	1.6	3.3	5.2	3.7
9	0.8	12.7	3.9	20.1
11	0.2	2.3	3.5	2.0

Çizelge 4.3. den de görüldüğü üzere filtreli elektronik balastlar magnetik balastlara göre daha az harmonik üretirler.



Şekil 4.2. Bir Fluoresant Tarafından Çekilen Nonlineer Akım

#### 4.1.6 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, bünyelerinde konverter barındırdıkları için birer harmonik kaynağıdır. Güneş enerjisiyle akülerde DC olarak depolanan enerji, konverterle yardımıyla AC'e dönüştürülmektedir. Bu dönüşüm esnasında yarı iletkenler kullanıldığı için harmonikler söz konusu olmaktadır.

#### 4.1.7 Kesintisiz Güç Kaynakları (KGK)

Kesintisiz güç kaynakları, şebeke enerjisini doğrultucu ile DC'e dönüştürüp depolarlar ve depolanmış olan bu enerji konverterler yardımıyla tekrar AC'e dönüştürülür. Bu dönüştürme işlemleri güç elektroniği elemanları ile yapıldığı için harmonikler ortaya çıkmaktadır.

### 4.2 Harmoniklerin Meydana Getirdiği Etkiler

Harmonik bozulma elektrik sistemleri üzerinde büyük etkilere neden olmaktadır. Harmoniklerin güç sistemleri üzerinde açtığı problemler genel olarak;

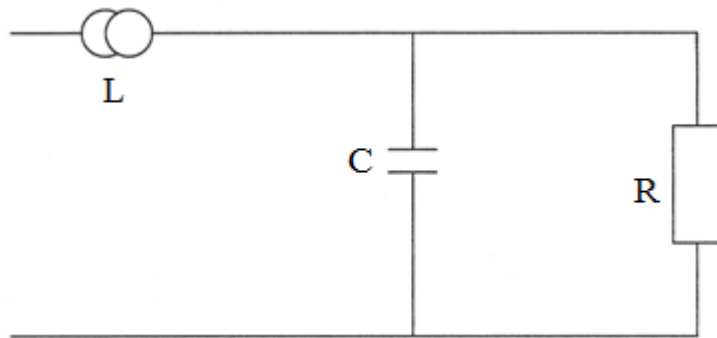
- Enerji sistemindeki elemanlarda kayıpların artması,
- Gerilim düşümünün artması,
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenmesi,
- Kontrol devrelerinde çalışma bozuklukları,

- Generatör ve şebeke gerilimi dalga şeklinin bozulması,
- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler,
- Dönen makinalarda moment salınımlarının oluşması
- Rezonans oluşması,
- Koruma elemanlarının yanlış çalışması,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Güç faktörünün bozulması,
- Sesli ve görüntülü iletişim cihazlarında parazit oluşumu,
- Transformatörlerin aşırı ısınması,
- Yalıtım malzemelerinin zorlanması ve delinmesi,

olarak sıralanabilir.

Bu etkilerin yanı sıra harmonikler, güç sisteminde rezonans olayına da neden olmaktadır. Bir güç sisteminin endüktif reaktans değeri, bu güç sisteminin frekansıyla doğru orantılıdır. Kapasitif reaktans değeri ise frekansla ters orantılıdır. Bu nedenle frekansın artmasıyla endüktif endüktif reaktans değerinde artış gözlenirken, kapasitif reaktans değeri düşmektedir. Bir  $f$  frekansında bu değerler birbirine eşit olduğu zaman sistem rezonansa girmektedir ve bu frekansa sistemin rezonans frekansı denmektedir.

Bu frekans harmonik frekanslarına yakın bir değerde olursa sistemde aşırı gerilim ve akımlar meydana gelmektedir. Paralel rezonansda sistemin empedansı sifıra yaklaşır ve akım buna bağlı olarak sonsuza gitme eğilimi gösterir ve sistemden yüksek akımlar geçer. Sistem tamamen endüktif olarak kabul edilirse paralel rezonans frekansı,



Şekil 4.3. Paralel Rezonans Devresi

$$f_p = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{S_c}} \quad (4.2)$$

şeklinde yazılabilir.

Burada,  $f_p$ : paralel rezonans frekansı,  $f_1$ : temel frekansı,  $S_k$ : kaynağın kısa devre gücüdür.

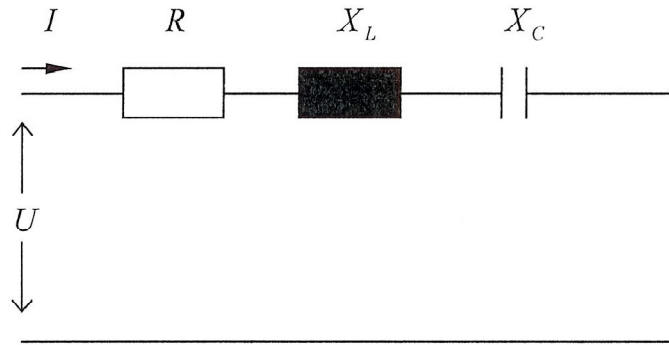
Paralel rezonans durumunda, sistem empedansı büyük değerler alır ve bu büyük empedans nedeniyle oluşan harmonik akımları gerilim harmoniklerine neden olurlar. Özellikle kondansatör elemanında yüksek harmonik akımlara neden olurlar ve bu yüzden nonlinear elemanın harmonik akımları da büyümüş olur.

Diğer bir rezonans türü olan seri rezonansa ise

$$f_s = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_t}{S_c \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_c^2}} \quad (4.3)$$

şeklindedir.

Burada,  $f_1$ : temel frekans,  $f_s$ : seri rezonans frekansı,  $S_t$ : transformatör gücü,  $S_c$ : kondansatör gücü,  $S_L$ : omik yükü,  $Z_t$ : transformatörün per-unit empedansını göstermektedir.



Şekil 4.4. Seri Rezonans Devresi

Seri rezonans, paralel rezonansa göre daha az rastlanan bir durumdur. Ancak oluşan düşük empedans nedeniyle sistemde aşırı akımlar dolaşmaya başlar ve sistem üzerindeki her bir bağlantı noktasında ısınmaya ve izolasyon delinmesine neden olurlar.

Rezonansın oluşacağı harmonik bileşeni ise,

$$n = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \quad (4.4)$$

olarak ifade edilir.

#### 4.2.1 Endüktif Reaktans Üzerindeki Etkisi

Temel bileşen frekansı  $f$  olmak üzere  $n$ . harmonik frekansı,

$$f_n = n \cdot f \quad (4.5)$$

olur.  $n$ . harmonik için açısal frekans ise,

$$\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot f = n \cdot \omega \quad (4.6)$$

değerini alır.

$n$ . harmonik frekansındaki endüktif reaktans  $X_{Ln}$ ,

$$X_{Ln} = n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (4.7)$$

olarak ifade edilir. Denklemden de görüleceği üzere harmonik mertebesinin artmasıyla endüktif reaktansta artmaktadır. Buda sistemde aşırı gerilimlere neden olmaktadır.

#### 4.2.2 Kapasitif Reaktans Üzerindeki Etkisi

Kapasitif reaktans bileşeni harmonik mertebesiyle ters orantılı olarak artma veya azalma gösterir.  $n$ . harmonik mertebesi için kapasitif reaktans değeri,

$$X_{Cn} = \frac{1}{n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{X_C}{n} \quad (4.8)$$

olarak ifade edilir.

Kondansatör elemanının reaktans değerinin azalması üzerinden yüksek akımlar geçmesine neden olmaktadır. Kondansatörler ise hassas elemanlar oldukları için bu akımlar elemanın ömrünü azaltmakta veya zarar verip ciddi kapasite kaybına uğratmaktadır. Bu tür durumlara özellikle reaktif güç kondansatörlerinde rastlanmaktadır.

Reaktif güç kondansatörleriyle ilgili olarak IEEE Standart 18-1992’de bir takım standartlar getirilmiştir. Bir reaktif güç kondansatörü sürekli olarak,

- Nominal reaktif gücünün 1,35 katına,
- Nominal efektif geriliminin 1,1 katına (harmonikler dahil, transientler hariç)
- Nominal akımının 1,8 katına (temel bileşen ve harmonik akımları dahil)
- Gerilim tepe değerinin 1,2 katına (harmonikler dahil)

dayanabilmelidir.

Genel olarak devre elemanlarının temel frekansta ve n. frekanstaki değerleri,

Çizelge 4.4. Devre Elemanlarının Frekans Bağımlı Eşdeğerleri

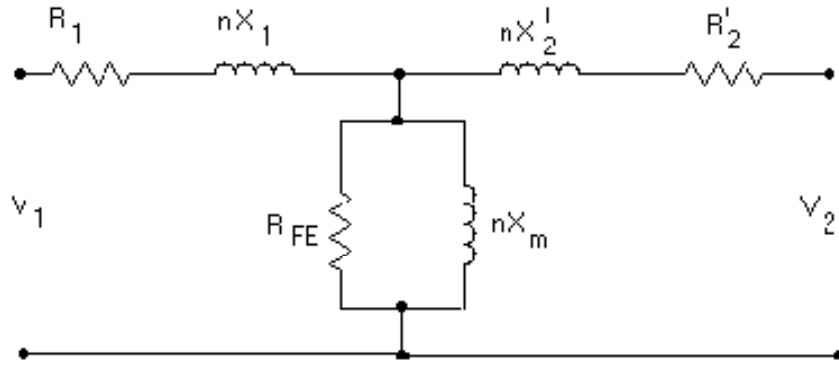
Devre Elemanı	Model	Parametre	Temel Bileşen Değeri	Harmonik Değeri
Direnç (R)	Empedans	R	R	$R + R_n$
	Admitans	G	1/R	$1/(R + R_n)$
Endüktans (L)	Empedans	$X_L$	$X_L$	$nX_L$
	Admitans	$Y_L$	$Y_L$	$Y_L/n$
Kapasite (C)	Empedans	$X_C$	$X_C$	$X_C/n$
	Admitans	$Y_C$	$Y_C$	$nY_C$

olarak ifade edilebilir (Kocatepe vd., 2003).

#### 4.2.3 Transformatörler Üzerindeki Etkisi

Transformatörler, temel frekansta minimum kayıplarla yüklere gerekli gücü iletmek için dizayn edilirler (Dugan vd., 1996). Bu nedenle transformatör veriminin düşmemesi için harmoniklere dikkat etmek gerekir. Harmonikler transformatörler üzerinde bakır ve demir kayıplarına neden olurlar. Ayrıca hem akım hem de gerilim harmonikleri olduğu zaman, yüksek frekanslarda magnetik alanın hızlı yön değiştirmesi nedeniyle çekirdekdeki histerezis kayıpları artar. Zamana göre değişim gösteren manyetik akı, transformatör saclarının kestikçe girdap akımları oluşur. Dolayısıyla transformatörlerde yüksek mertebeli harmonikler, düşük mertebeli harmoniklere göre daha tehlikelidirler ve ısı kaybına neden olurlar.

Transformatörlerin harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmayışından ileri gelir (Bayram, 1984).



Şekil 4.5. n mertebeli Harmonik İçin Transformatör Eşdeğer Devresi

$R_1$  primer sargı direncini,  $X_1$  primer sargı kaçak reaktansını,  $R_2'$  primere indirgenmiş sekonder omik direncini,  $X_2'$  primere indirgenmiş sekonder kaçak reaktansını,  $R_{FE}$  demir kayıplarını gösteren direnci,  $X_m$  mıknatıslanma reaktansını göstermektedir.

Transformatörlerin yük altındaki gerilimleri için, IEEE bir sınır değer belirlemiştir. Bu standarda göre, THDI sınırı %5 'tir. THDV sınırı ise yüksüz durumda %10, anma yükünde %5' tir. (Freud, 1988). Transformatörlerin nominal değerinin dışında çalışması nüvede daha çok doymaya ve harmonik akımlarının seviyesinde hızla artmaya sebep olabilir (Szabados ve Lee, 1981).

#### 4.2.4 İletim Hatları Üzerindeki Etkisi

Harmonikler enerji iletim hatlarının empedansının artmasına neden olurlar. Harmonik bileşen değerleri için hat empedansı,

$$Z_n = R_n + jX_n \quad (4.9)$$

şeklindedir. Temel frekanstaki empedansın yanında harmonikli durumdaki empedans daha büyük olacağı için hat kayıpları da,

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n \quad (4.10)$$

şeklinde olacak ve artacaktır.

Burada  $I_n$  n. harmonik bileşenin akımını,  $R_n$  ise n. harmonik frekansını göstermektedir. Harmonik akımlarına bağlı gerilim düşümü ise,

$$V_n = I_n \cdot R_n + jX_n \quad (4.11)$$

şeklinde olacaktır.

#### 4.2.5 Güç Faktörü Üzerine Etkisi

Harmoniklerin olduğu bir sistemde güç faktörü,

$$PF = \frac{V_1 I_1 \cos \varphi_1}{V_1 I_{ef}} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cos \varphi_1 \quad (4.12)$$

şeklinde dir.  $V_1$  ve  $I_1$  temel bileşene ait gerilim ve akım değerini göstermektedir. Eşitlik 4.12 den de görüldüğü gibi temel bileşene ait güç faktörü bir katsayıyla çarpılmaktadır.  $I_1/I_{ef}$  oranı harmonikli durumda daima birden küçük bir sayı olacağından, güç faktörü değeri de düşük olacaktır.

#### 4.3 Harmonik Standartları

IEEE (International Electrical Electronics Engineers) tarafından getirilen sınırlamalar hem akım hem de gerilim harmoniklerini kapsamı nedeniyle daha etkin ve sınırlayıcı olmaktadır. Ayrıca IEEE sınırlamasında yüklere tek tek değil, toplu olarak sınırlama getirilmektedir. IEEE-519 standardında, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim bozulumu, müşteriler içinse doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamalar getirilmiştir.

Üretici firmanın sorumluluğunda olan gerilim harmonik bozulum değeri, IEEE tarafından aşağıdaki şekilde sınırlandırılmıştır. Burada her bir harmonik için ve toplamda harmonik bozulumu için ayrı ayrı iki sınırlama verilmiştir (Adak, 2003).



Çizelge 4.5. IEEE Gerilim İçin Harmonik Distorsiyon Sınır Değerleri

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THB Vn (%)
Vn<69 kV	3	5
69<Vn<161 kV	1.5	2.5
Vn>16 kV	1	1.5

Akım harmoniklerinin telafi edici kullanıcının sorumluluğundadır. Aşağıda uluslararası IEEE kuruluşunun, izin verdiği maksimum toplam harmonik bozulma değerleri verilmiştir. Tabloda ise  $I_n$  sistemin devre akımını,  $I_1$  temel bileşeni ve n harmonik mertebesini göstermektedir.

Çizelge 4.6. Dağıtım Sistemleri İçin Akım Bozulma Sınırları

Vn < 69 kV						
$I_n/I_1$	n < 11	11 ≤ n < 17	17 ≤ n < 23	23 ≤ n < 35	n ≤ 35	THB
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20
69 < Vn < 161 Kv						
<20	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4
50-100	5	2.25	2	0.75	0.35	6
100-1000	6	2.75	2.5	1	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3	1.25	0.7	10
Vn > 161 Kv						
<50	2	1	0.75	0.3	0.15	2.5
>50	3	1.5	1.15	0.5	0.22	4

## 5. HARMONİK BÜYÜKLÜKLERİN GİDERİLMESİ

Harmonik akımlarının şebekeye geçmesini engellemek için tasarım aşamasında bir takım tedbirler alınmalıdır. Ancak bu tedbirler de ileriye dönük düşünüldüğü zaman yeterli olmayacaktır. Bunun için sisteme ek devreler ilave edilmesi gerekmektedir. Sisteme yerleştirilen ve harmonik bozulmaları azaltan bu devrelere harmonik filtresi adı verilir.

Harmonik filtrelerinin görevi, bir ya da daha fazla frekanstaki harmonik akım veya gerilimlerin etkisini azaltmak veya yok etmektir. Genelde harmonik filtreleri en etkin harmonik bileşeni yok etmek için tasarlanırlar. Sisteme etkisi az olan harmonik bileşenler için ise bu etkiyi zayıflatıcı filtreler tasarlanabilir. Filtrelerin kullanılmasıyla ekonomik ve teknik sorunların üstesinden gelmek mümkündür.

### 5.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler isminden de anlaşılacağı üzere pasif devre elemanları olan R, L ve C elemanlarından oluşurlar. Bu elemanlarla meydana getirilen bir harmonik filtresi, belli bir frekansta, dizayn edilen filtre türüne göre düşük veya yüksek empedans gösterir. Pasif filtreler devreye bağlanış şekillerine göre paralel filtreler ve seri filtreler olarak ikiye ayrılırlar. Paralel filtreler devreye paralel bağlanan bir rezonans devresidir ve ayarlandığı frekansta düşük empedans gösterirler. Seri filtreler ise devreye seri bağlanırlar ve ayarlandığı frekansta yüksek empedans göstererek harmoniklerin sisteme girmesine engel olurlar.

Filtrelerin ayar keskinliğini tanımlamak için bir Q faktörü belirlenmiştir. Buna göre filtreler yüksek Q ya da düşük Q tipindedir. Yüksek Q filtreleri genelde düşük harmonik frekanslarından birine ayarlanırlar. Düşük Q filtreleri ise geniş bir frekans aralığında yüksek empedansa sahiptir (Sankaran, 2002).

Kalite faktörü,

$$Q = \frac{X_R}{R} \quad (5.1)$$

Olarak tanımlanır. Bu ifadede  $X_R$  rezonans frekansındaki reaktansı ve R ise filtrenin direncini göstermektedir.

Yüksek geçiren sönümlü filtre için ise ayar keskinliği ifadesi,

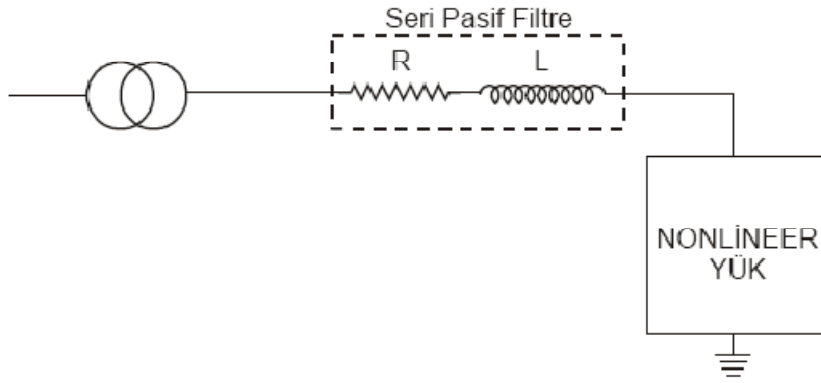
$$Q = \frac{R}{X_R} \quad (5.2)$$

şeklindedir.

### 5.1.1 Seri Filtreler

Seri filtreler, harmonik kaynağıyla şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır.

Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için, sadece o frekans bileşenine yüksek empedans, temel frekansta düşük empedans gösterirler. Seri filtrelerin en büyük dezavantajları devreye seri olarak bağlandıklarından tam yük akımını taşımak ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Bununla birlikte rezonansa yol açmaları en büyük avantajlarıdır.

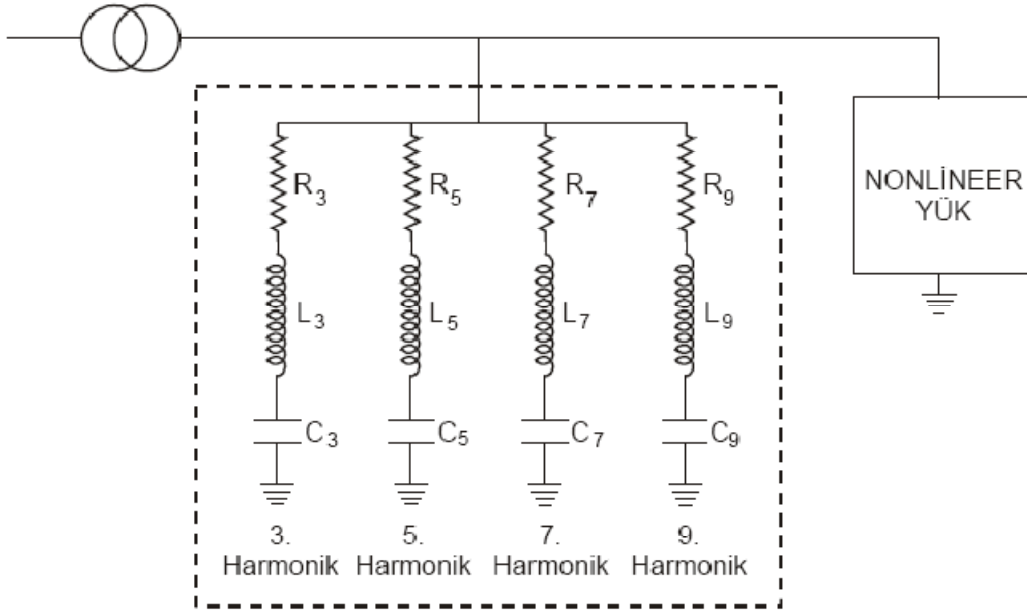


Şekil 5.1. Seri Filtrenin Devreye Bağlanması

Seri filtreler genel olarak özel bir frekanstaki güç işaretini elemine etmek için kullanılırlar. Örnek olarak bir fazlı sistemlerde 3. harmoniklerin baskın olduğu durumlar gösterilebilir.

### 5.1.2 Paralel Filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir paralel yol yardımıyla toprağa aktararak sistemde dolaşmaları engellenebilir. Harmonik kaynağıyla şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerde amaç, düşük bir şönt empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımlarının filtre üzerinden geçmesinin sağlanmasıdır. Ayrıca temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılırlar. Tasarımları kolaydır. Ancak paralel filtre bileşenleri mevcut şebeke empedanslarıyla birbirini etkileyerek rezonansa neden olurlar. Paralel filtrelere örnek olarak tek ayarlı filtreler, çift ayarlı filtreler ve sönümlü filtreler verilebilir.



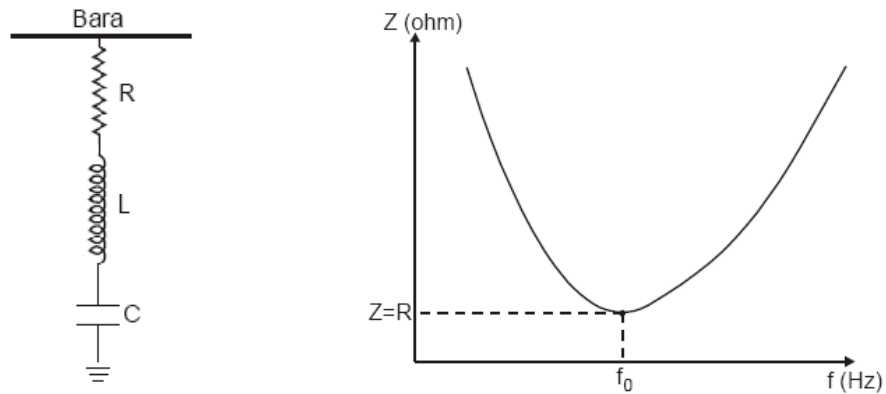
Şekil 5.2. Paralel Filtrelerin Devreye Bağlanması

### 5.1.2.1 Tek Ayarlı Filtreler

Tek ayarlı filtreler, düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanstaki harmonik akımının bastırılmasını sağlarlar. Tek ayarlı filtre için  $\omega$  açısal frekansındaki filtre empedansı  $Z_f$ ,

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.3)$$

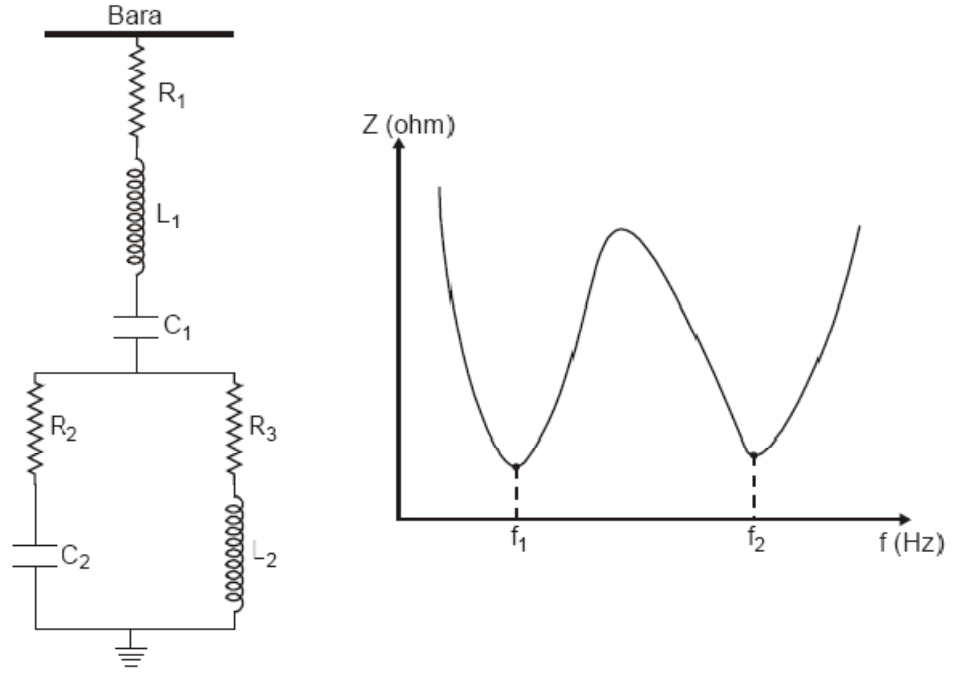
şeklinde ifade edilir.



Şekil 5.3. Tek Ayarlı Filtre ve Empedans Değişim

### 5.1.2.2 Çift Ayarlı Filtreler

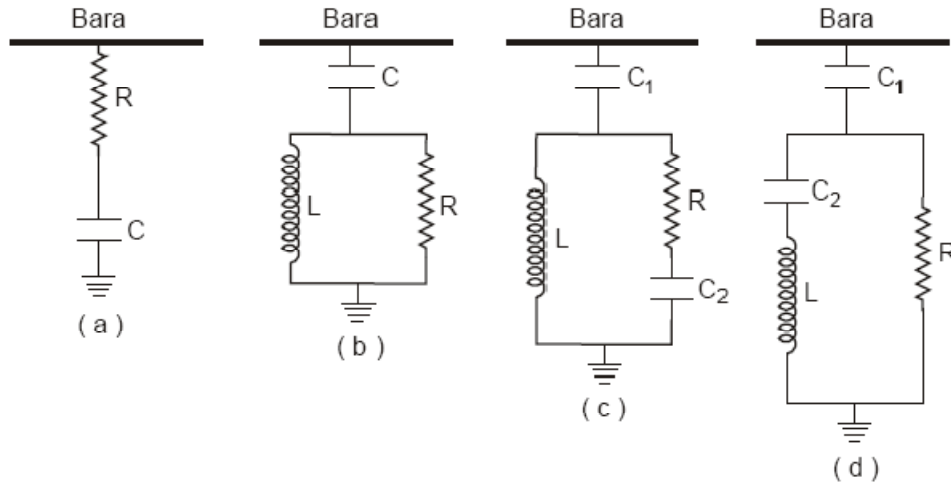
Adından da anlaşılacağı gibi iki ayrı frekansa ayarlı olup ayarlandıkları bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu frekanstaki harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlarlar. En önemli özelliği temel frekansta güç kaybının az olmasıdır. Ayrıca endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün darbe gerilimlerini denetim altına alırlar. Örnek bir çift ayarlı filtre ve filtrenin empedans değişimi Şekil 5.4' de gösterilmiştir.



Şekil 5.4. Çift Ayarlı Filtre ve Empedans Değişimi

### 5.1.2.3 Sönümlü Filtre

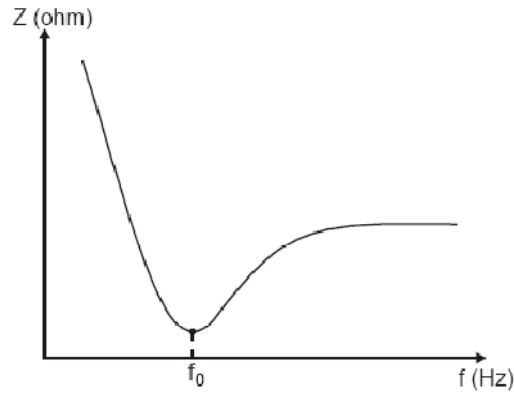
Sönümlü filtreler, yüksek dereceli (örneğin 17 ve üzeri) harmonikleri filtrelemek için kullanılır. Bu nedenle yüksek geçiren filtre olarak adlandırılırlar. Buna göre, bu filtreler yüksek frekansa küçük empedans, düşük frekansa da yüksek empedans gösterirler. Şekil 5.5' de birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi sönümlü filtreler gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Birinci, İkinci, Üçüncü Dereceden ve C Tipi Filtreler

Bu filtreler karşılaştırıldığında, her filtrenin farklı özellikleri vardır. Örneğin birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansta aşırı kayıplara sahiptirler ve bu sebeple yaygın olarak kullanılmazlar. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlamakla beraber temel frekans kayıpları gösterirler.

Üçüncü dereceden filtrelerin en temel özelliği temel frekans kayıplarının olmamasıdır. C tipi filtrenin performansı, ikinci ve üçüncü dereceden filtreler arasında olup temel frekans kayıplarının azlığı önemli bir avantajdır. Şekil 5.6 'da yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.6. Yüksek Geçiren Sönümlü Paralel Pasif Filtre İçin Frekans-Empedans İlişkisi

### 5.1.3 Aktif Filtreler

Bugüne kadar harmonikleri yok etmek için pasif LC elemanlarından yararlanılmıştır. Ancak pasif filtre, uygulama esnasında birtakım problemleri beraberinde getirmektedir.

- Filtre karakteristiği kaynak empedansından önemli derecede etkilenir,
- Filtre kondansatörü akımın hem temel hem de harmonikli bileşenlerine göre boyutlandırılır,
- Harmonikli akım bileşenleri arttığı zaman filtre aşırı yüklenebilir,
- Güç sistemi ile filtre bileşenleri arasında belirli bir frekansta paralel rezonans oluşarak kaynak tarafında harmonikli akımların yükselmesine sebep olabilir,
- Pasif filtre güç sistemi ile seri rezonansa da düşebilir.

Bu problemleri çözmek adına aktif güç filtreleri geliştirilmiştir. Günümüzde kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan aktif güç filtresi düşüncesinin temelleri Bird (1969) tarafından atılmış, daha sonra Ametani (1972) tarafından geliştirilmiştir (Kocatepe vd., 2003).

Elektronik devre elemanlarından oluşan aktif güç filtrelerinin bütün harmonikleri süzmesi ve ayrı kontrol devrelerine ihtiyaç göstermemesi, verimlerinin yüksek oluşu, doğrusal olmayan yüklerde kullanılabilmesi gibi üstünlükleri vardır. Genel yapı olarak aktif güç filtreleri, dijital kontrol birimi olan PWM inverterden ibarettir. Aktif güç filtreleri yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederler ve uygun bir fazda yüke aynı harmoniği ters fazda enjekte ederek harmoniği yok ederler.

Sonuç olarak, istenilen noktada harmonik akımlar veya gerilimler sıfırlanır. Bu da harmoniklerin şebekeden çekilmemesi demektir. Güç elektroniği uygulamaları geliştikçe ve bilgisayar desteğiyle bu konu da ilerleme göstermiştir. Harmonik akımların önemli etkisi ise, iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde gerilim düşümleri oluşturmasıdır.

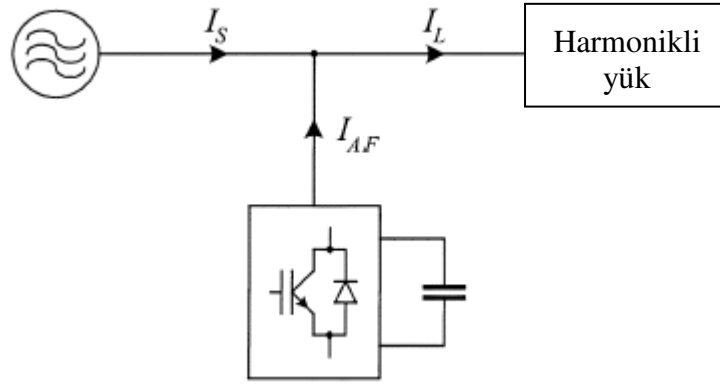
Aktif filtreler harmonik giderme işlemini devreye iki şekilde bağlanarak sağlarlar. Bu nedenler aktif filtreler paralel ve seri olmak üzere ikiye ayrılırlar.

### **5.1.3.1 Paralel Aktif Güç Filtresi**

Oldukça iyi sonuçlar veren aktif filtre topolojilerinden biri de paralel aktif filtrelerdir. Bu filtreler, lineer olmayan yüklerin ürettiği harmonikli akımları bastırmak ve/veya reaktif gücü kompanze etmek üzere kullanılırlar. Sonuç olarak, paralel aktif güç filtresi kaynak akımlarını neredeyse sinüzoidal ve faz gerilimleri ile aynı fazda olmaya zorlar.

Paralel aktif güç filtresinin (PAGF) temel çalışması şekil 5.7 'de gösterildiği gibi sinüzoidal kaynağa bağlı bir lineer olmayan yüke paralel bağlı gerilim beslemeli altı izole kapılı bipolar

transistörden (IGBT) oluşmuş PWM dönüştürücü olarak tanımlanır. Burada “ $C_{dc}$ ” DC kapasite PWM dönüştürücünün DC besleme kaynağıdır (Erdoğan, 1996).

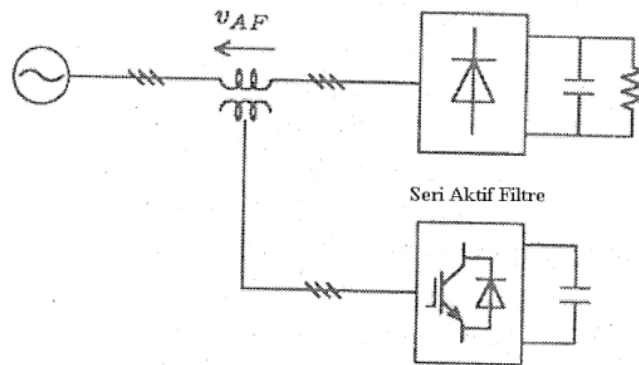


Şekil 5.7. Paralel Aktif Güç Filtresi Blok Şeması

### 5.1.3.2 Seri Aktif Güç Filtresi

Seri filtre şebekeye bir transformatör ile bağlanır. Seri aktif filtre ile gerilim harmonikleri elemine edilir ve hat veya yük gerilim regülasyonu yapılır. Üç fazlı sistemlerde negatif-sekuens gerilimini azaltmak için de kullanılmaktadır. Seri filtre şebekenin başlangıç noktasına kurulur.

Seri filtre yük akımını ( $i_s$ ) algılar ve daha sonra yük akımının temel bileşenine sıfır direnç ve harmonik bileşenlerine yüksek bir direnç ( $G[0]$ ) gibi davranacak şekilde kontrol edilir.



Şekil 5.8. Seri Aktif Güç Filtresi Blok Şeması



Çizelge 5.1. Paralel Aktif Filtre ile Seri Aktif Filtrenin Karşılaştırılması

	<b>Paralel Aktif Filtre</b>	<b>Seri Aktif Filtre</b>
<b>Temel Çalışma Prensibi</b>	Akım kaynağı olarak çalışır.	Gerilim kaynağı olarak çalışır.
<b>Uygulanabileceği Yükler</b>	Endüktif ya da akım kaynağı tipi yükler ya da akım kaynakları (faz kontrollü tristörlü doğrultucu gibi).	Kapasitif ya da gerilim kaynağı tipi yüklerde ya da harmonik gerilim kaynaklarında (kondansatörlü- diyotlu doğrultucu gibi).
<b>Kompanzasyon Karakteristiği</b>	Kaynak empedansından bağımsız (Harmonik akım kaynağı tipi yükler için). Harmonik gerilim kaynağı tipi yüklerde ise yük empedansı düşük olduğunda kaynak empedansına bağımlı	Harmonik gerilim kaynakları için kaynak ve yük empedansından bağımsız. Harmonik akım kaynaklarında yük empedansına bağımlı.
<b>İlave İşlevi</b>	Reaktif güç kompanzasyonu.	AC gerilim regülasyonu.
<b>Uygulamadaki Olumsuzluklar</b>	Kapasitif ya da harmonik gerilim kaynağı tipi yüklerde yüke doğru akan aşırı akımlar meydana gelebilir.	Endüktif ya da harmonik akım kaynağı tipi yüklerde paralel pasif filtre ya da güç faktörü düzeltici kapasite grubu gerekir.

## 6. HARMONİK FİLTRE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

### 6.1 Giriş

Bu çalışmada, TÜBİTAK tarafından desteklenen 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje kapsamındaki ölçüm değerleri kullanılmıştır. Öncelikle harmoniklerin giderilmesi için dağıtım sistemi üzerinde Matlab paket programı ile pasif ve aktif filtre simülasyon uygulaması yapılmıştır ve sonuçlar birbiriyle karşılaştırılmıştır.

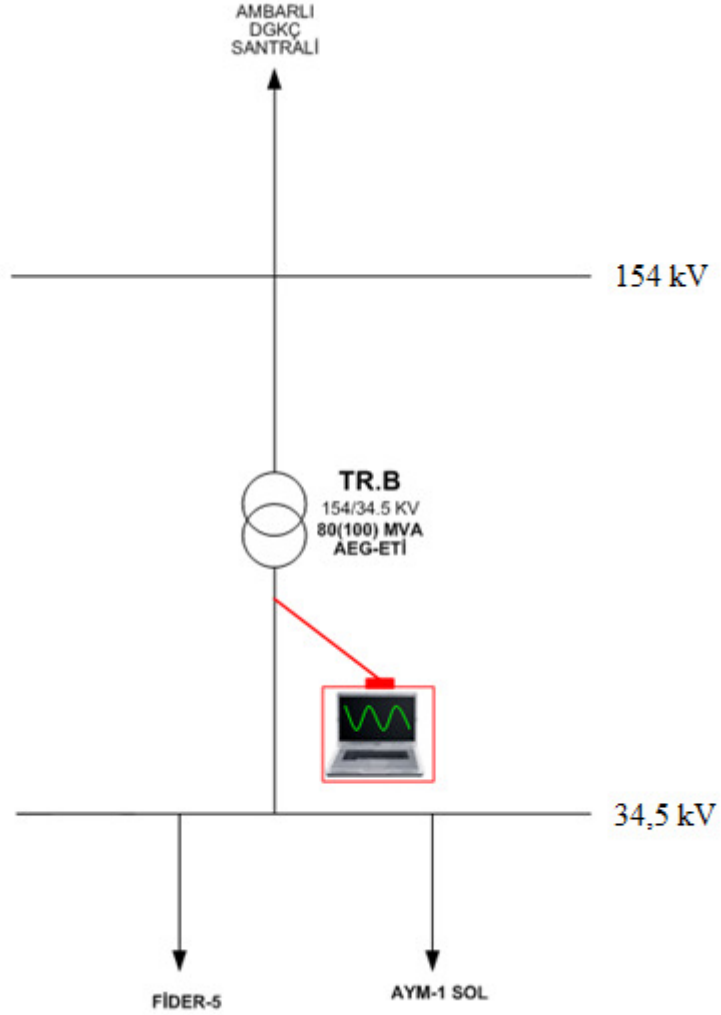
İÇDAŞ TM’ de yapılan ölçümde 3 faz gerilim ve 3 faz akıma ait dalga şekilleri, her bir elektriksel büyüklük için 3200 S/s (S:sample) örnekleme hızında örnekleyerek, dizüstü bilgisayarlarda yüklü bulunan Labview tabanlı gerçek zamanlı ölçüm ve analiz yazılımı ile analiz edilmiştir.

Çizelge 6.1. Ölçümlerde Kullanılan Cihaz Bilgileri

Ölçümde Kullanılan Ekipman Listesi				
Ekipman Türü	Markası	Modeli	Ekipman No	Adet
1. Veri Toplama Kartı (Data Acquisition Card)	National Instruments	DAQCard 6036E	-	3
2. Veri Örnekleme Kartı	National Instruments	SC-2040 S/H Card	-	3
3. Veri İşleme Yazılımı	National Instruments	NI Labview 8.0	-	3
4. Dizüstü Bilgisayar(NI Labview Yüklenmiş Halde)	HP Pavillion,	DV5000 3000 N100		2
	Lenovo		-	1
5. Gerilim bölücü kablo	-	100V/3,8 V oranında rezistif	-	9
6. Aktif akım probu	CIE CA60	60 A AC/DC (10mA/1 mV)	-	9
7. Akım Probu Akü Şarj Devresi	-	-	-	3
8. İzolasyon Transformatörü	-	-	-	3
9. Uzatma Kablosu	-	-	-	9

## 6.2 Dağıtım Sisteminin Özellikleri

Uygulama yapılacak sistem olarak, TÜBİTAK Kamu Kurumları Araştırma Projeleri Destekleme Programının, Proje No 105G129 kapsamında TEİAŞ İÇDAŞ transformatör merkezindeki transformatörlerin, ‘Güç Kalitesi Milli Projesi’ mobil ölçüm ekibi tarafından sekonder tarafından alınan güç kalitesiyle ilgili ölçümler kullanılmıştır. Şekil 6.1 ‘de İÇDAŞ transformatör merkezindeki bir transformatörün tek hat şeması görülmektedir.



Şekil 6.1. İÇDAŞ Transformatör Merkezi Tek Hat Şeması

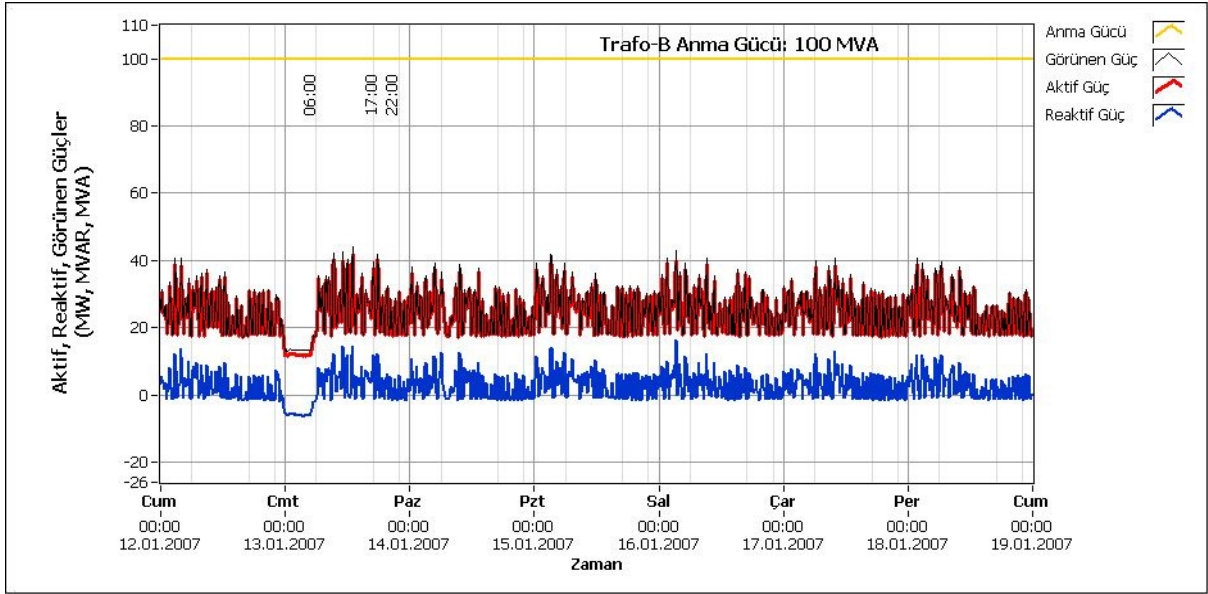
Şekilden de görüldüğü üzere 154/34,5 kV luk bir indirici transformatör bulunmaktadır ve bu transformatörün sekonder tarafından ölçümler alınmıştır. Transformatörün teknik değerleri aşağıdaki gibidir.

Çizelge 6.2. Ölçümde Değerleri Okunan Güç, Akım ve Gerilim Transformatörü Özellikleri

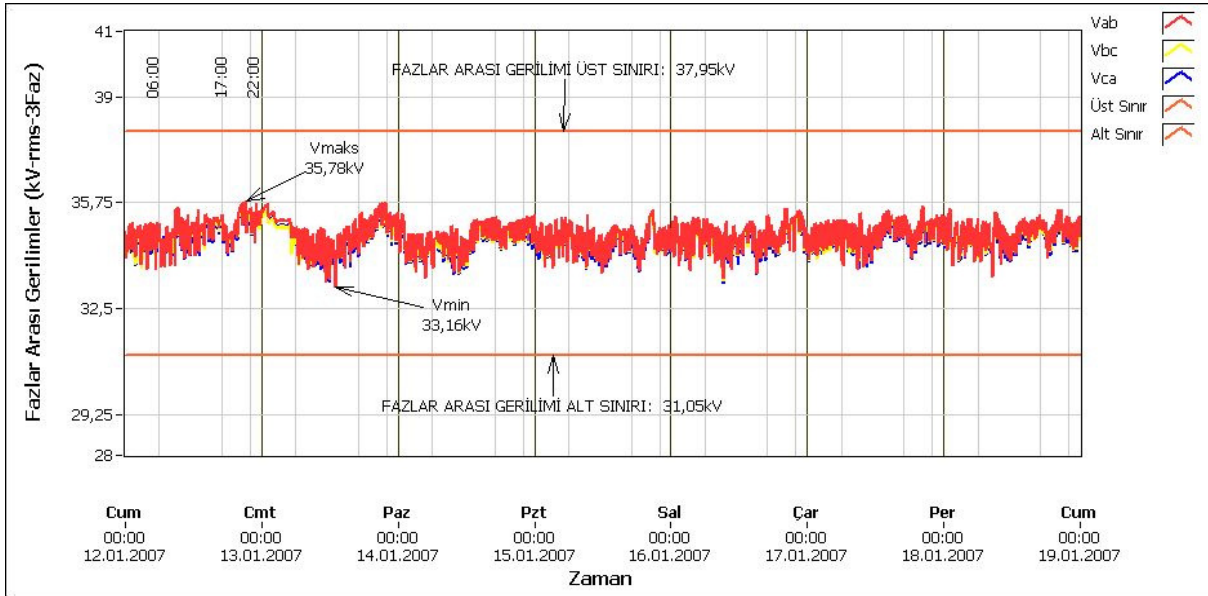
Ölçüm Yapılan Noktalar	Marka	Seri No	Güç (MVA)	%Uk	Bağlantı Grubu	Soğutma Tipi	Çevirme Oranı
1. Transformatör B Güç Transformatörü	AEG-ETİ	309940-01	80/100	12	YNyn0	ONAN/ONAF	154/ 34.5 kV
2. Transformatör B Sekonder Tarafı Akım Transformatörü	-	-	-	-	-	-	2000/5 A
3. Transformatör B Sekonder Tarafı Gerilim Transformatörü	-	-	-	-	ARON	-	34500/100
4. 154 kV Bara Gerilim Transformatörü	-	-	-	-	-	-	154000/100 V

Çizelge 6.2 'de ölçüm yapılacak olan sistem üzerindeki ölçü ve güç transformatörlerinin özellikleri ve bazı etiket değerleri bulunmaktadır.

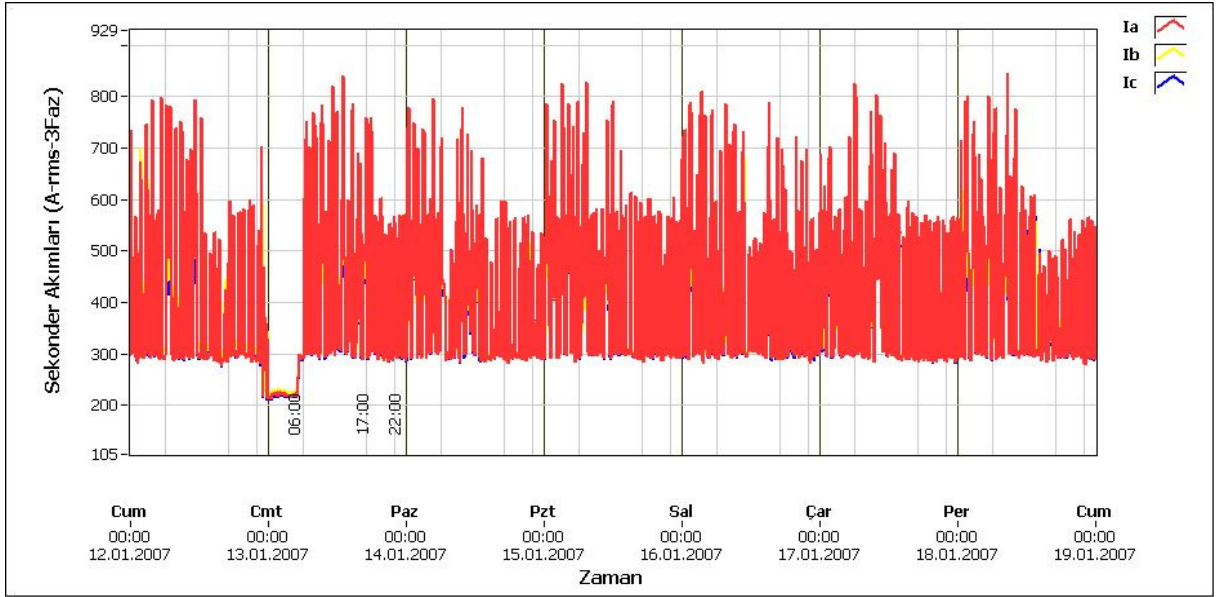
Transformatör-B sekonder tarafında yapılan ölçümler sonucunda, bir hafta süreyle çekilen aktif, reaktif ve görünür güçler kaydedilmiştir. Burada Transformatör-B nin nominal gücü 100 MVA dır. Bir hafta sonunda elde edilen ölçüm sonuçları aşağıda verilmiştir.



Şekil 6.2. İÇDAŞ Transformatör Merkezi Transformatör-B Sekonder Tarafından Çekilen Güçler



Şekil 6.3. İÇDAŞ Transformatör Merkezi Transformatör-B Sekonder Tarafı Fazlar Arası Gerilim Gerçek-RMS Değeri



Şekil 6.4. Transformator-B Sekonder Akımı Gerçek-RMS Değeri

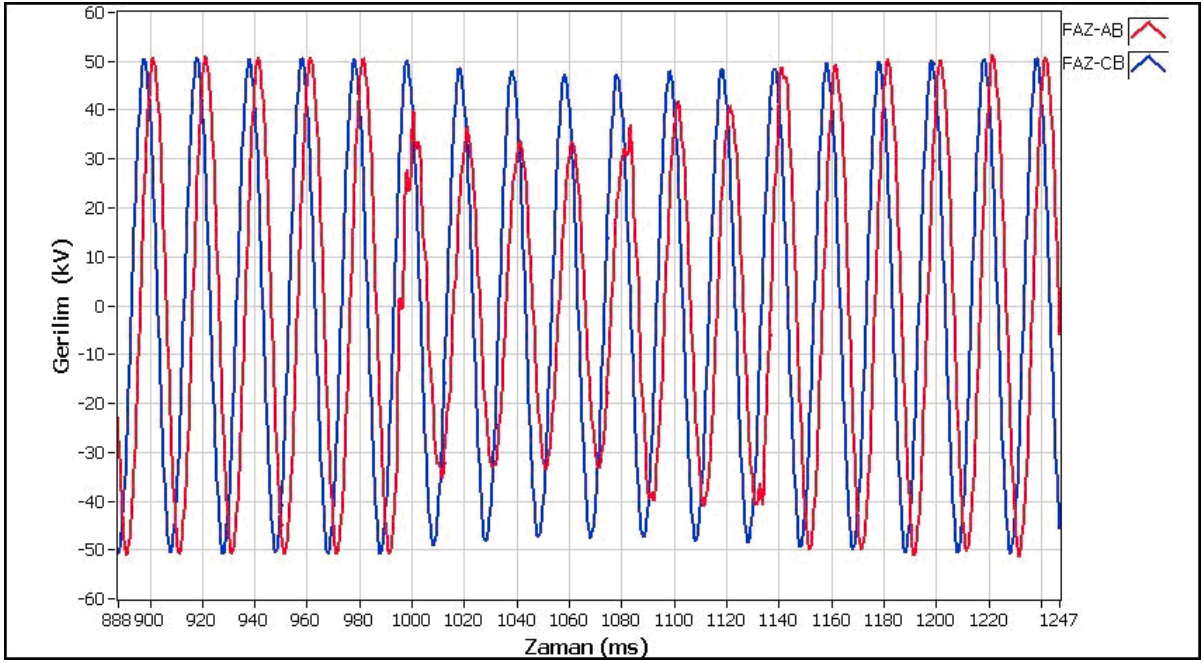
Bir hafta süreyle gerçek zamanlı olarak ölçülen ve analizi yine gerçek zamanlı olarak yapılan ölçüm boyunca aşağıda liste olarak verilen olaylar meydana gelmiştir. Ölçümlerde kullanılan bilgisayarlar arasında tam anlamıyla bir senkronizasyon söz konusu olmadığından, farklı ölçüm noktaları arasındaki karşılaştırma ve değerlendirmelerde bu durumun göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Gerilimde meydana gelen; anlık gerilim çukurları (Voltage-Sag), anlık gerilim tepeleri (Voltage-Swell) ve anlık gerilim dengesizlikleri (Voltage-Unbalance), olayın meydana geldiği andan 1 saniye önceki veriler ve olayın bitiminden 1 saniye sonraki veriler ile birlikte gösterilmektedir.

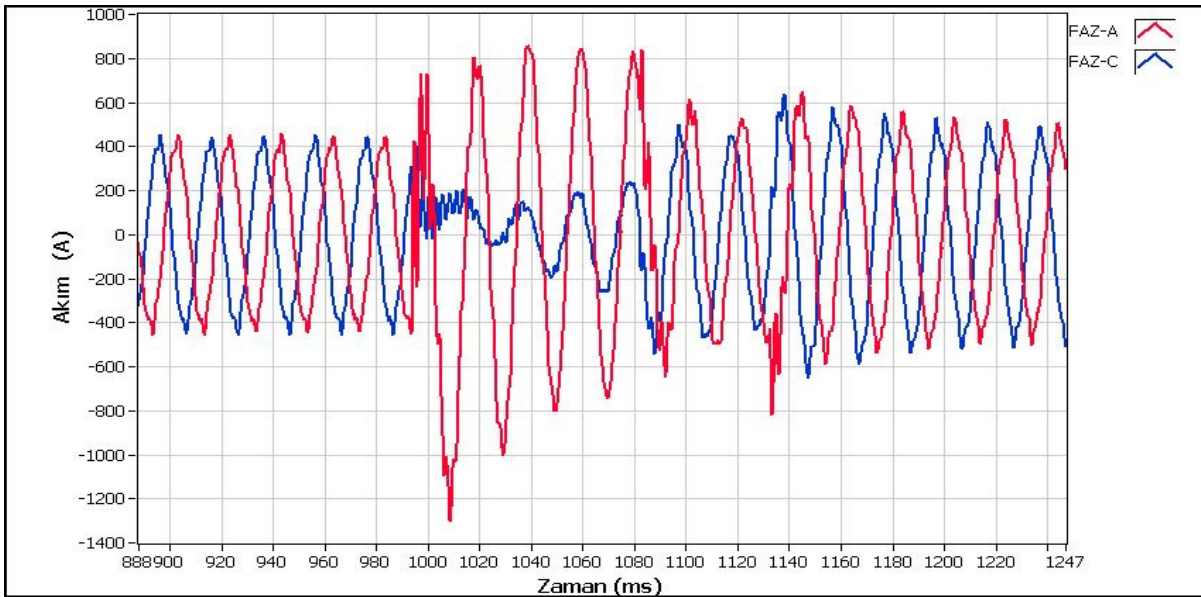
Çizelge 6.3. Transformator-B Sekonder Tarafında Gerilimde Meydana Gelen Olaylar

S. No	Olayın Tipi	Tarih	Başlangıç Anı	Bitiş Anı
1	Gerilim Çukuru	12.01.2007	20:57:24	20:57:24
2	Gerilim Çukuru	13.01.2007	16:42:26	16:42:26

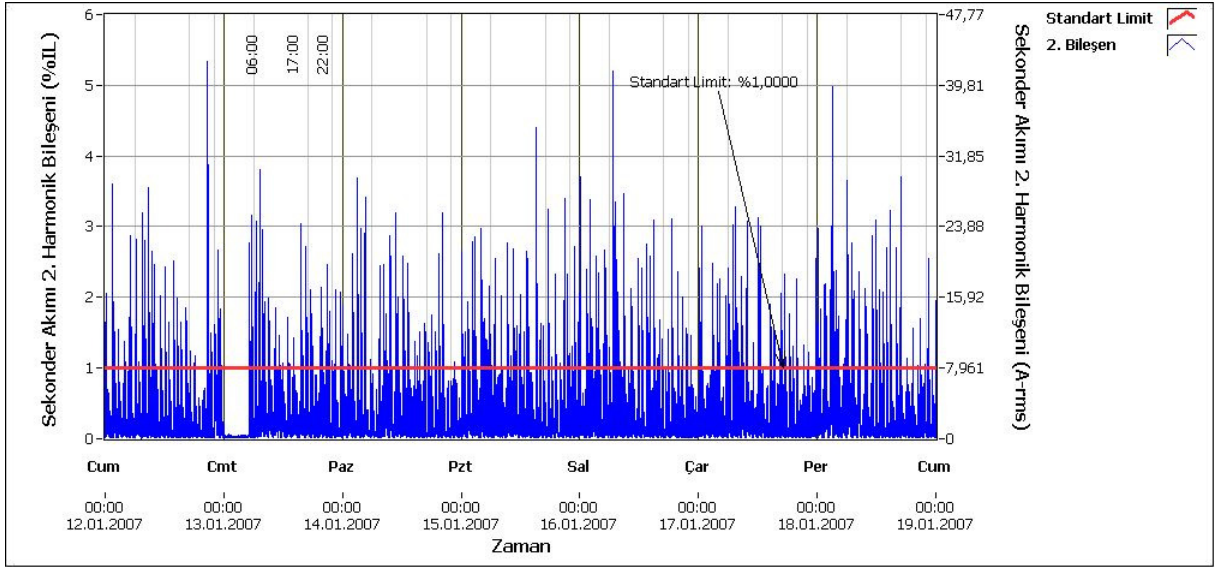
Ölçüm süresince meydana gelmiş olan olay listesindeki; bir gerilim çukuru (voltage sag) grafiği aşağıda yer almaktadır. Bu grafikler saniyede 3200 örnekleme hızında örneklenerek çizilmektedir.



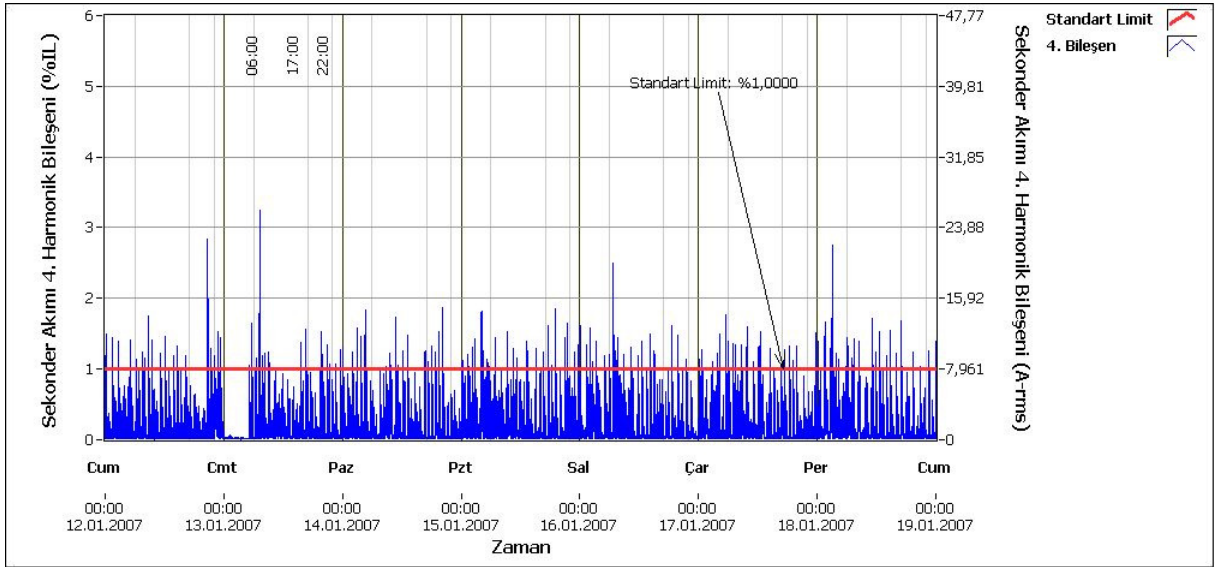
Şekil 6.5. Transformatör-B Sekonder Tarafında Meydana Gelen Gerilim Çukuru (Voltage Sag) Olayı



Şekil 6.6. Transformatör-B Sekonder Tarafında Oluşan Gerilim Çukuru Olayı Sonucunda Sekonder Akımındaki Değişim

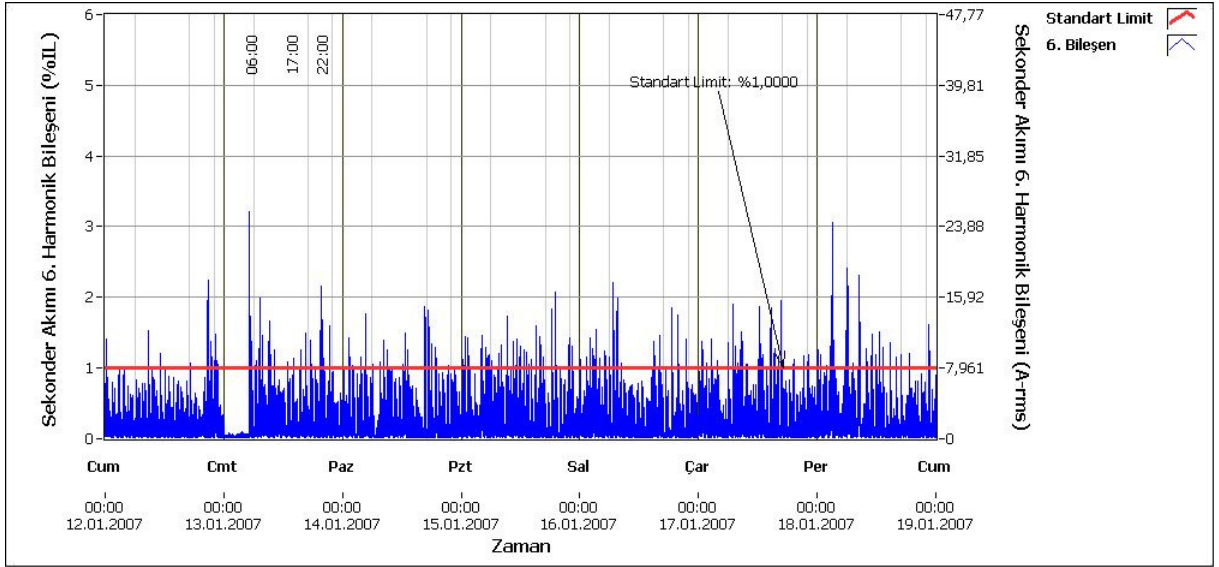


Şekil 6.7. Transformator-B Sekonder Akımı 2. Harmonik Bileşeni

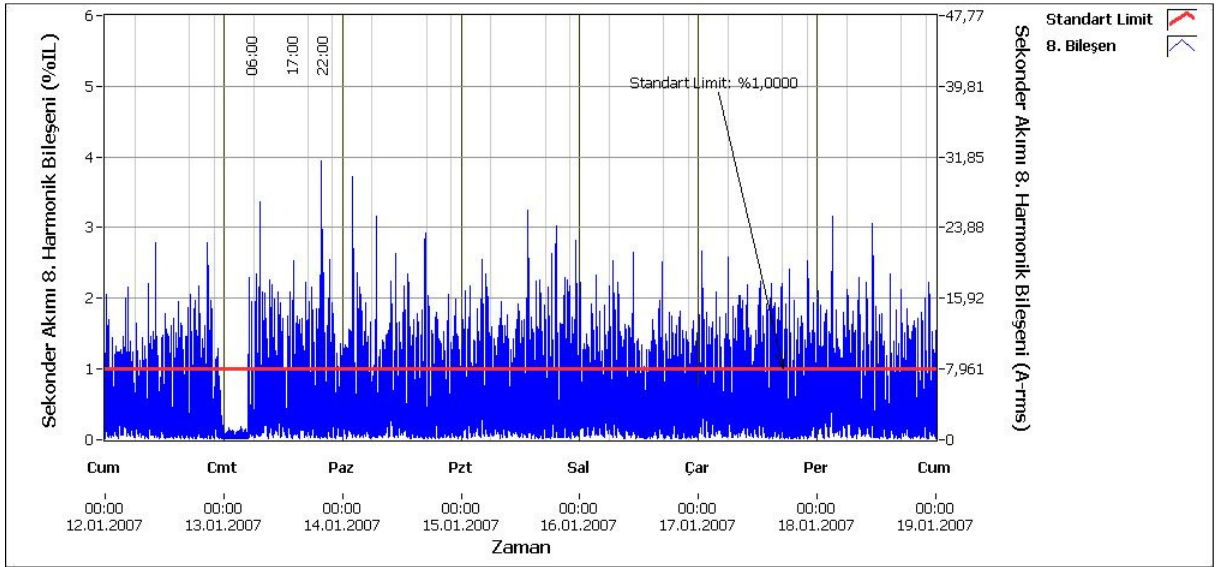


Şekil 6.8. Transformator-B Sekonder Akımı 4. Harmonik Bileşeni

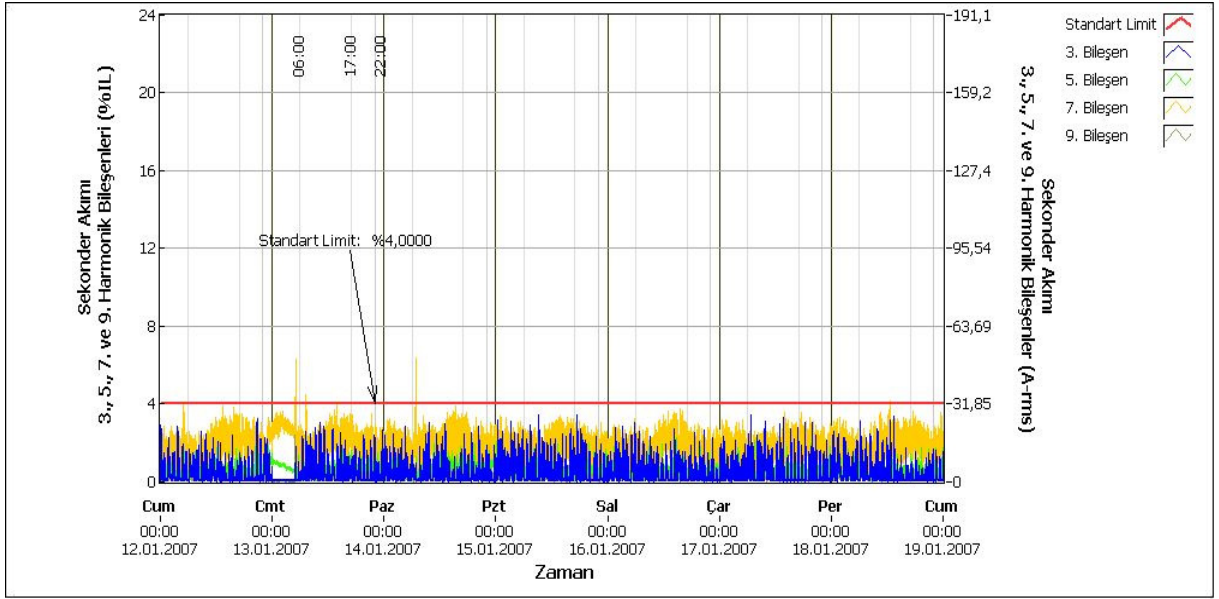




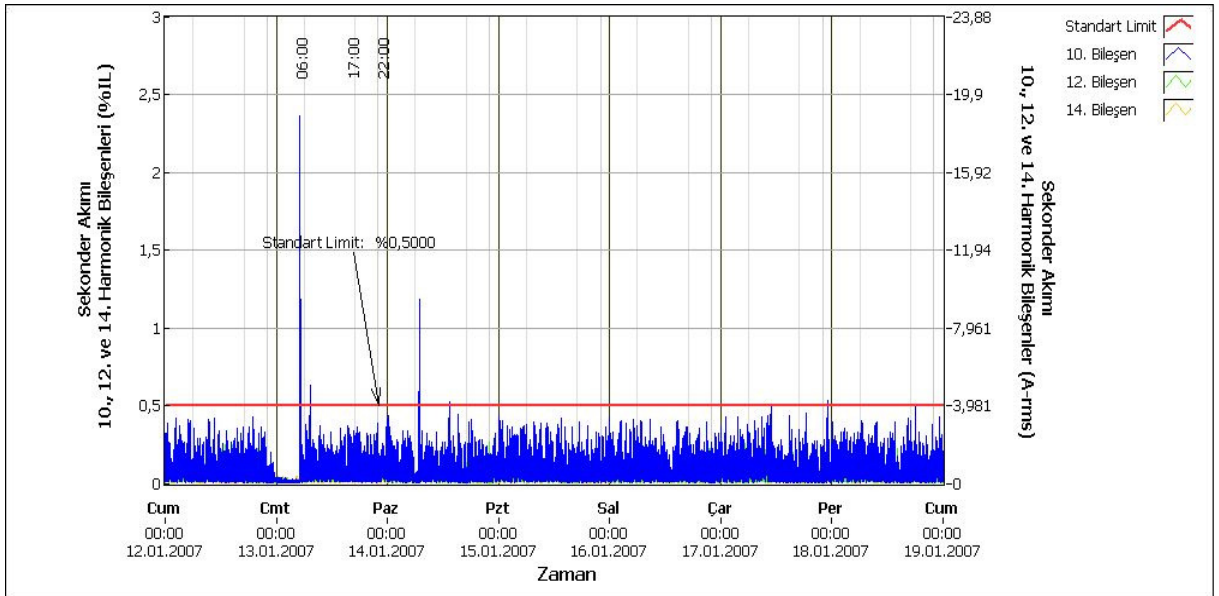
Şekil 6.9. Transformör-B Sekonder Akımı 6. Harmonik Bileşeni



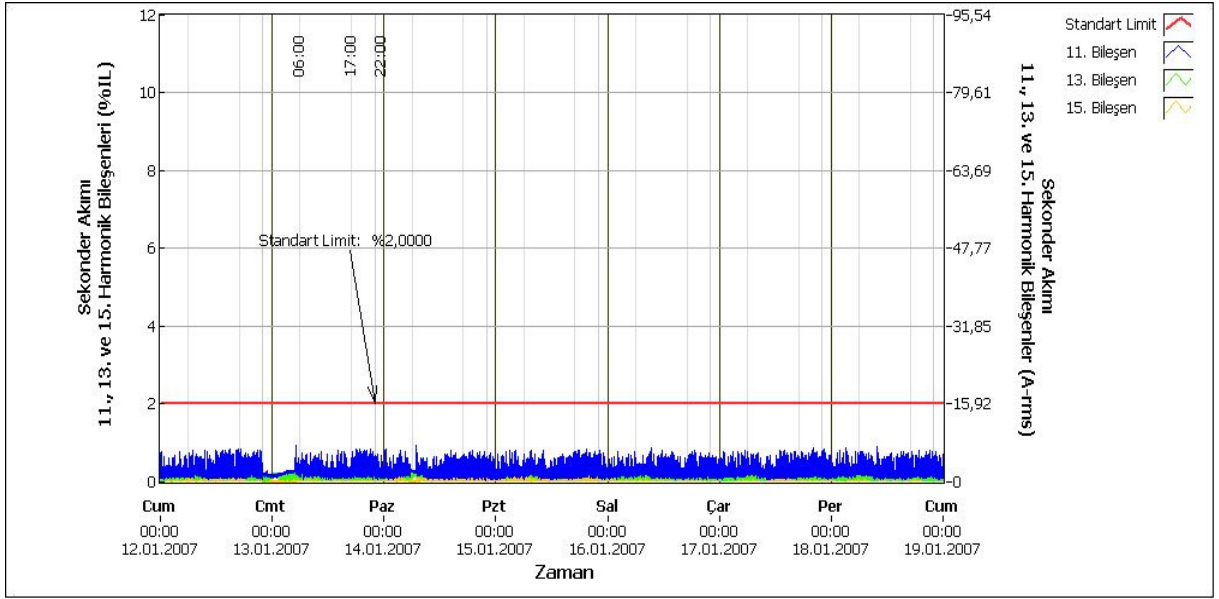
Şekil 6.10. Transformör-B Sekonder Akımı 8. Harmonik Bileşeni



Şekil 6.11. Transformatör-B Sekonder Akımı 3., 5., 7. ve 9. Harmonik Bileşeni



Şekil 6.12. Transformatör-B Sekonder Akımı 10., 12. ve 14. Harmonik Bileşeni



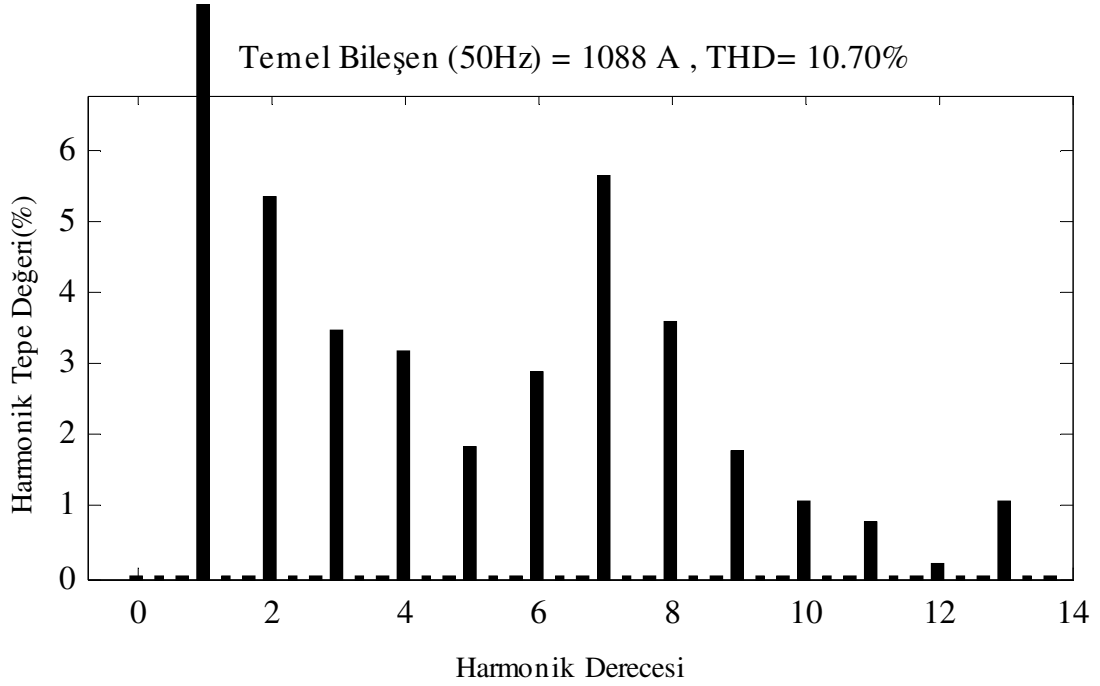
Şekil 6.13. Transformator-B Sekonder Akımı 11., 12. ve 15. Harmonik Bileşeni

Transformator-B yaklaşık %40'lık bir kapasiteyle çalışmaktadır. Transformatörler, nominal güçlerine yakın bir değerde yüklenmedikleri zaman gerilim yükselmelerine bağlı olarak harmonikler oluşmaktadır. Ayrıca bu transformatör merkezi, demir-çelik sanayisini beslemektedir ve buna bağlı olarak da sistemde harmonikler bulunmaktadır. Yapılan ölçümler sonucunda sistemde bulunan harmoniklerin değerleri çizelge 6.3 'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Transformator-B Sekonder Tarafta Ölçümde Okunan Harmonik Akım Değerleri

Harmonik Mertebesi(n)	Harmonik Standart Sınır Değerleri	Ölçülen Harmonik Akımları (A)	Harmonik Akım Yüzdeleri $I_n / I_1$	Akım Transformatörü Çevirme Oranı
2	% 1	42,81	% 5,3	2000/5
3	% 4	28,27	% 3,55	
4	% 1	25,88	% 3,25	
5	% 4	15,22	% 1,91	
6	% 1	24,56	% 3,2	
7	% 4	48,64	% 6,1	
8	% 1	31,6	% 3,98	
9	% 4	10,92	% 1,37	
10	% 0,5	9,96	% 1,25	
11	% 2	7,42	% 0,93	
12	% 0,5	1,72	% 0,21	
13	% 2	3,46	% 0,43	

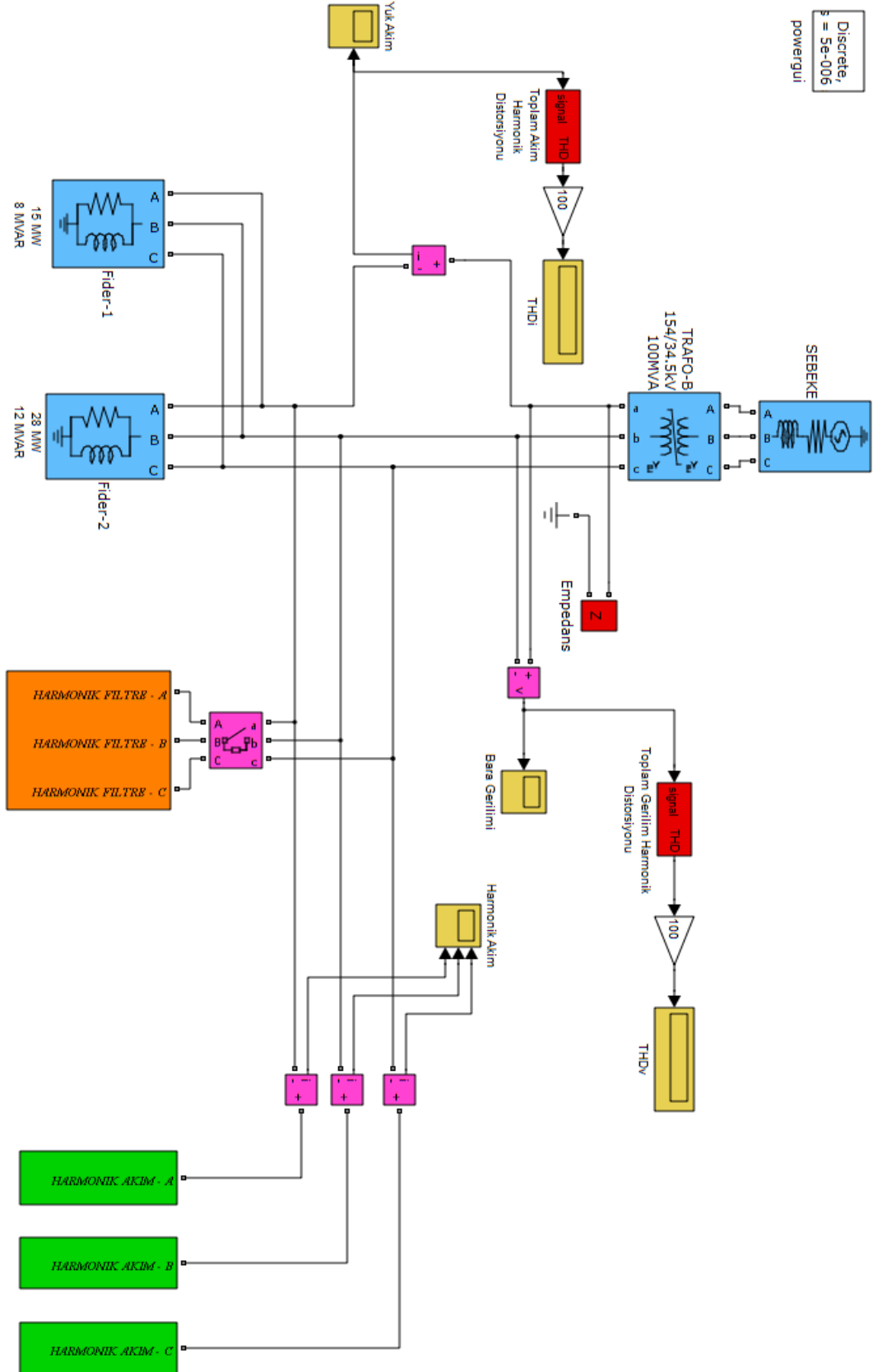
Çizelge 6.4 'den de görüleceği üzere sistemde çift harmonikler bulunmaktadır ve tek harmoniklere göre daha baskındırlar. Çift harmoniklerin fazla bulunmasının sebepleri arasında, transformatör merkezinin haddeleme, ark fırını, kaynak gibi işlemlerin fazlaca bulunduğu demir-çelik sektöründe çalışan işletmeleri beslemesi olarak gösterilebilir.



Şekil 6.14. Transformatör-B Sekonder Akımı Harmonik Spektrumu

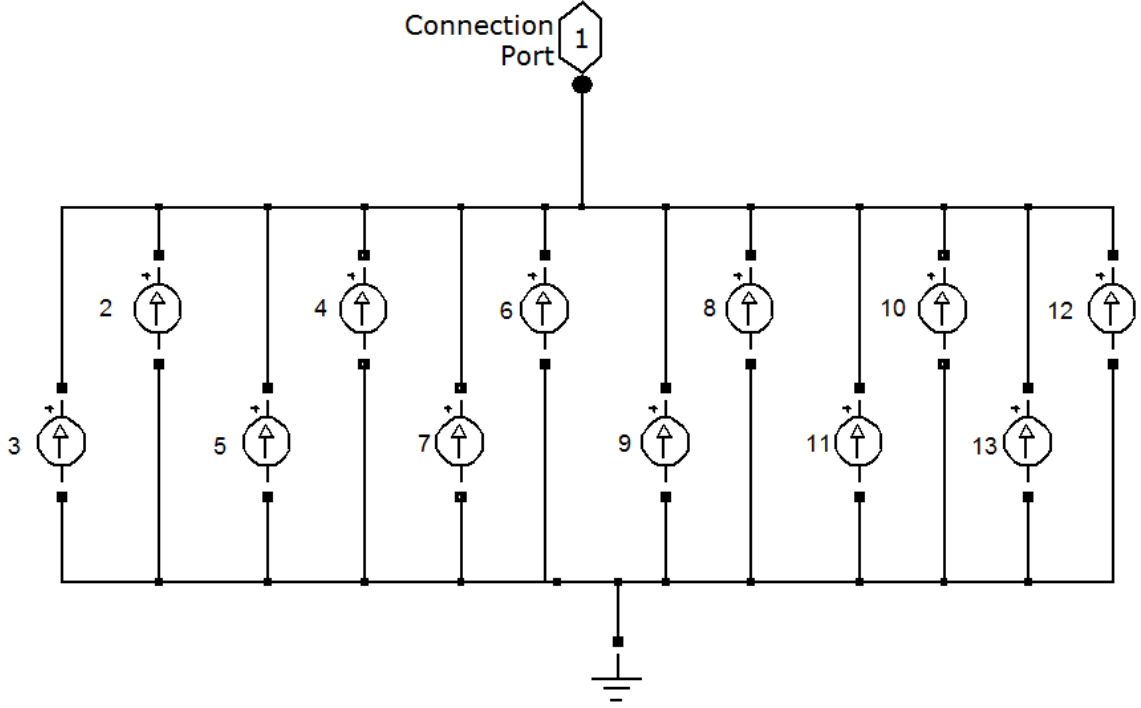
### 6.3 Pasif Filtre Simülasyon Modeli

Bu transformatör merkezinin tek hat şeması ve ölçüm raporlarında verilen teknik değerler dikkate alınarak aşağıdaki simülasyon modeli oluşturulmuştur.



Şekil 6.15. Örnek Dağıtım Sisteminin Simülasyon Modeli

Simülasyon modelinde ölçümlerden güç değerleri referans alınarak Yük-1 ve Yük-2 belirlenmiştir. Sistemde OG tarafında bulunan harmonikler, birer akım kaynağı olarak modellenip sisteme enjekte edilmiştir. Sistem üzerinde harmonik akımlarının, yük akımlarının, yük gerilimlerinin dalga şekilleri görülebilmektedir. Ayrıca  $THD_V$  ve  $THD_I$  değerleri de okunabilmektedir.

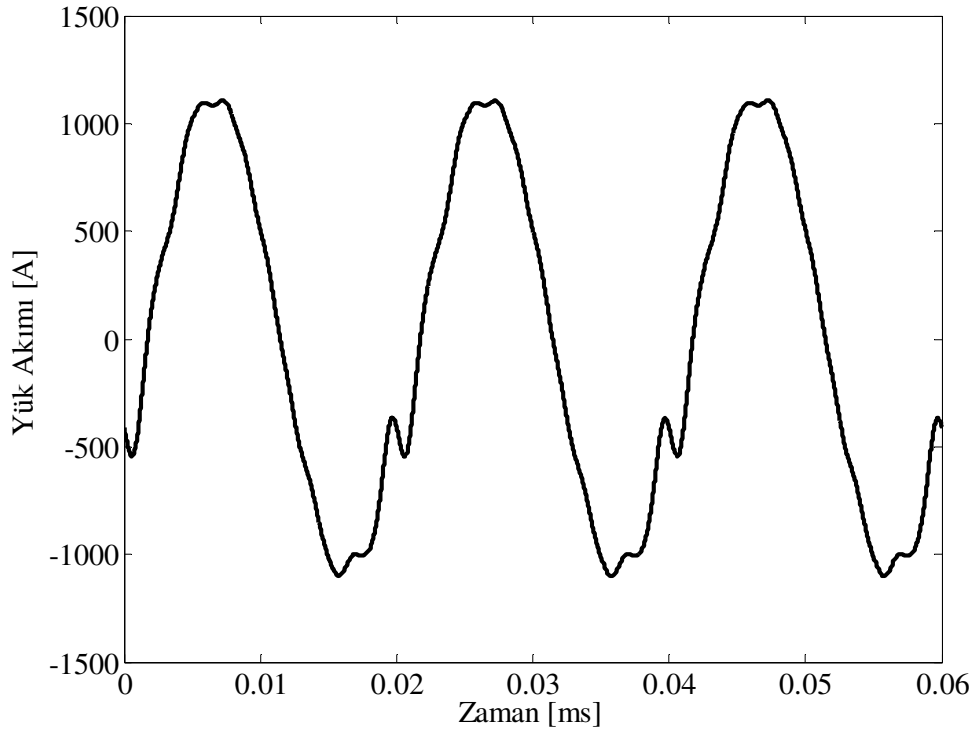


Şekil 6.16. Örnek Sistemde Harmoniklerin Akım Kaynağı Olarak Modellenmesi

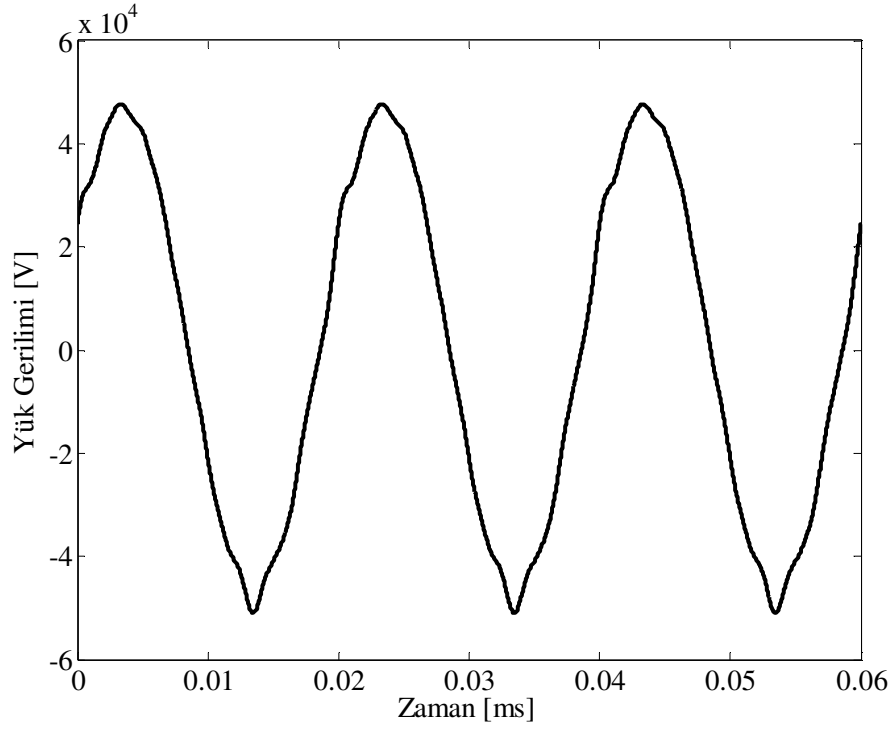
Simülasyon devresi çalıştırıldığı zaman  $THD_I$  değeri %10.7 değerini,  $THD_V$  ise %3.78 değerini göstermektedir. Akım ve gerilimin dalga şekilleri ise 3 periyot için Şekil 6.17 'da ve 6.18 'de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Harmonik Akımlarının Faz Sıraları

HARMONİK BİLEŞEN	A FAZI	B FAZI	C FAZI
Temel Bileşen	0°	+120°	-120°
2. Harmonik	0°	-120°	+120°
3. Harmonik	0°	0°	0°
4. Harmonik	0°	+120°	-120°
5. Harmonik	0°	-120°	+120°
6. Harmonik	0°	0°	0°
7. Harmonik	0°	+120°	-120°
8. Harmonik	0°	-120°	+120°
9. Harmonik	0°	0°	0°
10. Harmonik	0°	+120°	-120°
11. Harmonik	0°	-120°	+120°
12. Harmonik	0°	0°	0°
13. Harmonik	0°	+120°	-120°

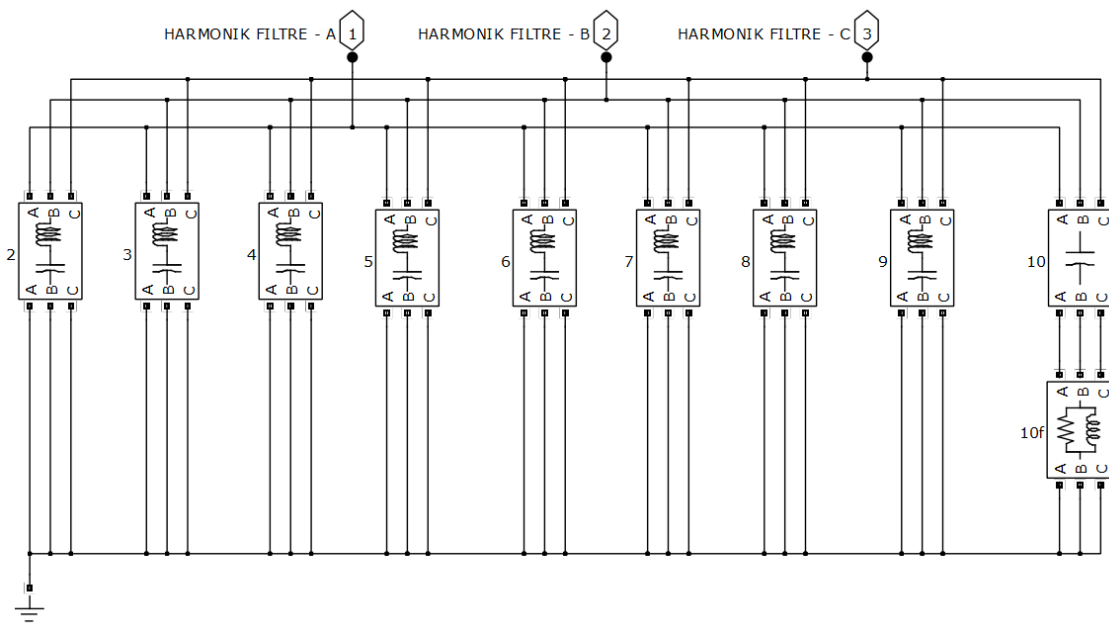


Şekil 6.17. Transformator-B Sekonder Tarafında Filtresiz Halde Ölçümle Belirlenen Yük Akımı Dalga Şekli



Şekil 6.18. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtresiz Halde Ölçümle Belirlenen Yük Gerilimi Dalga Şekli

Sistemdeki harmonikler akım ve gerilimde ciddi bozulmalara neden olduklarından dolayı filtrelenmeleri gerekmektedir. Çalışmanın bu bölümünde harmoniklerin bozulma etkisini azaltmak için pasif filtre tasarlanacaktır.. Bunun için filtrelerin R, L ve C elemanlarının hesaplanması gerekmektedir. 10. ve üzeri harmonikler için ise sönümlü filtre tasarlanacaktır.



Şekil 6.19. Pasif Harmonik Güç Filtreleri



Şekil 6.19 'de görüldüğü üzere sistemdeki harmonikleri süzmek için dokuz adet filtre tasarlanmıştır. 2. harmonikten 9. harmoniğe kadar olan harmonik akımları yüksek değerlerde oldukları için, her bir harmonik mertebesi için bir adet tek ayarlı filtre tasarlanmıştır. 10. ve üzeri harmonikler için ise harmonik akım değerleri düşük olduğundan dolayı sönümlü filtre kullanılmıştır. Tek ayarlı filtreler yüksek harmonik akımlarına karşı ayarlandıkları frekanslarda düşük empedans göstermektedirler. Böylece harmonik akımlar sisteme ulaşmadan bu düşük empedans üzerinden devrelerini tamamlamaktadırlar. Sönümlü filtre ise isminden de anlaşılacağı üzere, ayarlandığı frekansta ve üzeri frekanslarda yüksek empedans göstererek harmoniklerin sisteme geçmesini engellemektedirler.

Ek 1 'de filtre elemanlarının değerlerini hesaplayan bir matlab yazılımı bulunmaktadır. Bu yazılım ile tek ayarlı filtrelerin ve sönümlü filtrenin eleman değerleri hesaplanmış olup çizelge 6.6 'de verilmiştir.

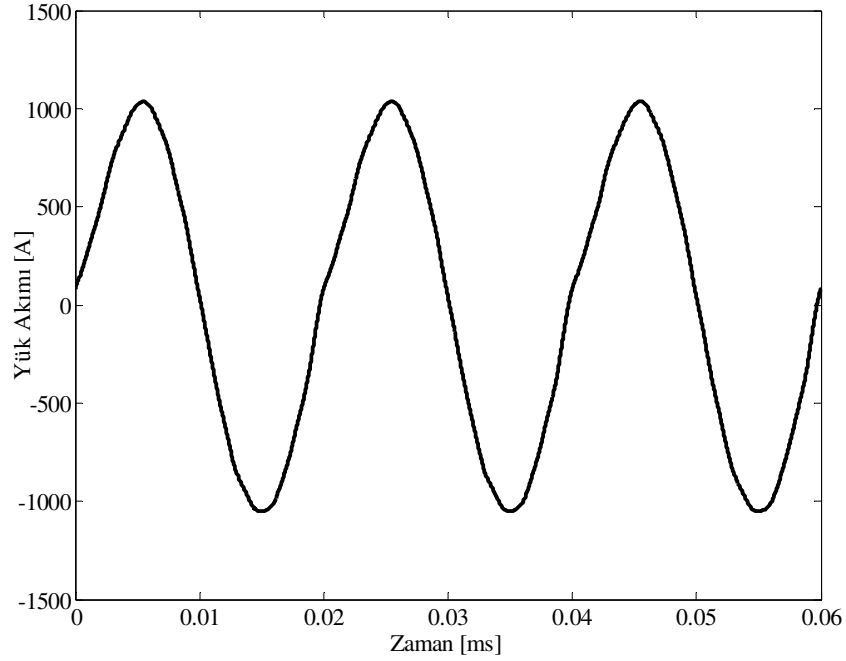
Çizelge 6.6. Simülasyon İçin Hesaplanan Pasif Filtre Eleman Değerleri

Harmonik Mertebesi (n)	Filtre Tipi	Filtre Reaktansı (Xr) [ohm]	Direnç (R) [ohm]	Endüktans (L) [H]	Kapasite (C) [µF]
2.	Tek Ayarlı Filtre	267,8063	7,6516	0,4262	5,9429
3.	Tek Ayarlı Filtre	178,5375	5,1011	0,1894	5,9429
4.	Tek Ayarlı Filtre	133,9031	3,8258	0,1066	5,9429
5.	Tek Ayarlı Filtre	107,1225	3,0606	0,0682	5,9429
6.	Tek Ayarlı Filtre	89,2688	2,5505	0,0474	5,9429
7.	Tek Ayarlı Filtre	76,5161	2,1862	0,0348	5,9429
8.	Tek Ayarlı Filtre	66,9516	1,9129	0,0266	5,9429
9.	Tek Ayarlı Filtre	59,5125	1,7004	0,021	5,9429
10.	İkinci Derece Sönümlü Filtre		53,5613	0,017	5,9429

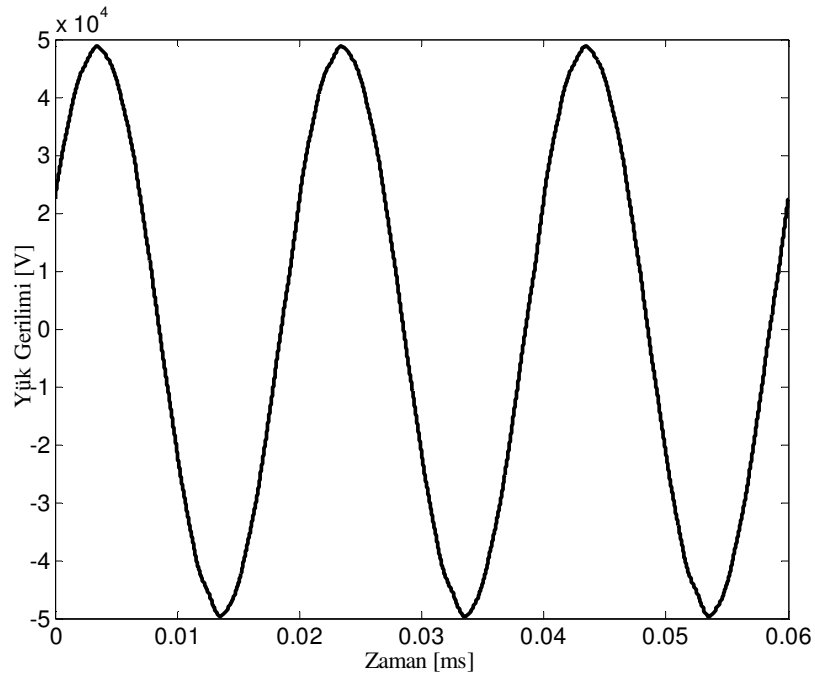
Pasif güç filtresi ile iki farklı simülasyon uygulaması yapılacaktır. İlk uygulamada filtrelerin hesaplanan direnç değerleri simülasyona dahil edilecektir. İkinci uygulamada ise filtrelerin direnç değerleri çok küçük tutularak ihmal edilecektir. Bu iki farklı uygulama yapılarak filtrelerdeki sargı dirençlerinin toplam harmonik bozulmaya ne derece etki ettiğinin görülmesi amaçlanmaktadır.

### 6.3.1 Pasif Filtre Direnç Değerlerinin Simülasyona Dahil Edildiği Uygulama

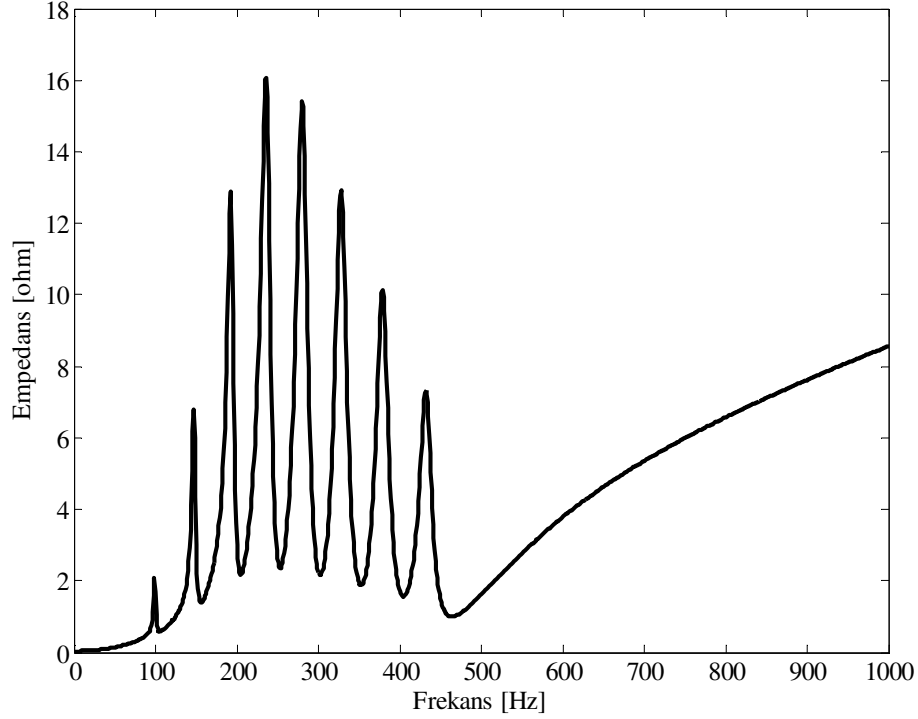
Bu simülasyon modelinde filtre elemanlarının değerleri çizelge 6.6 'da verildiği gibi seçilmiştir.



Şekil 6.20. Transformör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Akımı Dalga Şekli



Şekil 6.21. Transformör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Gerilimi Dalga Şekli



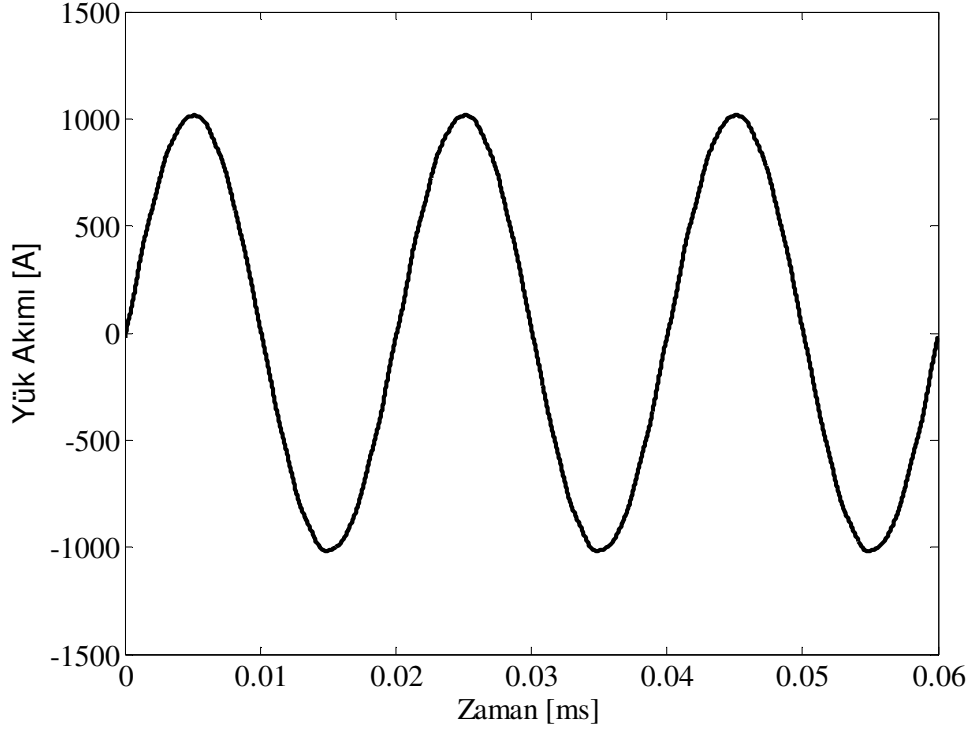
Şekil 6.22. Transformator-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri Mevcut İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Sistem Empedansı Değişim

Çizelge 6.7. Filtre Direnç Değerleri Mevcut İken Filtreleme Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri

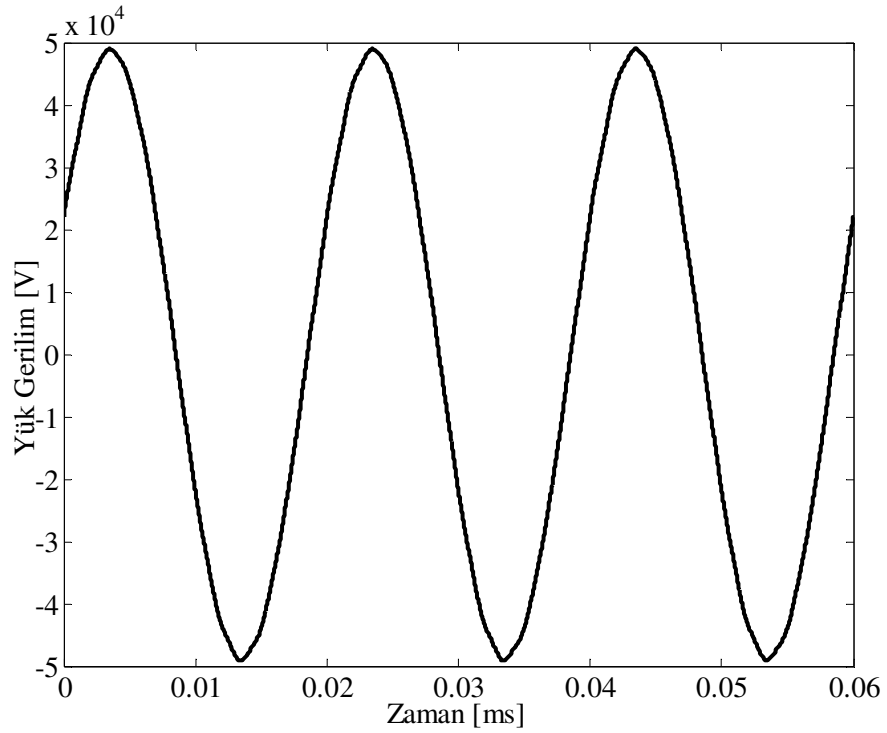
SİSTEM	AKIM (%)	GERİLİM (%)
Harmonik Filtresiz	10,7	3,78
Pasif Harmonik Filtreli	6,65	1,14

Şekil 6.22 'de filtre direnç değerleri mevcut iken yapılan filtreleme sonucundaki sistemin empedans değişimi gösterilmiştir. Tasarlanan filtreler harmonik bozulmayı belli bir oranda düzeltebilmişlerdir. Elde edilen değerlerden de anlaşılacağı üzere dirençler ihmal edilmediği zaman pasif filtre görevini tam olarak yerine getirememektedir. Filtre üzerinden akan harmonik akımları, filtre dirençleri üzerinde ek harmonik bozulmalara neden olmaktadır. Gerilim harmonik distorsiyonu sınır değer olan %2 'nin altında kalırken, akım harmonik distorsiyonu sınır değer olan %3 'ün üzerinde kalmıştır. Bu nedenle filtreler tasarlanırken filtre kalite faktörü Q değerine dikkat edilmelidir.

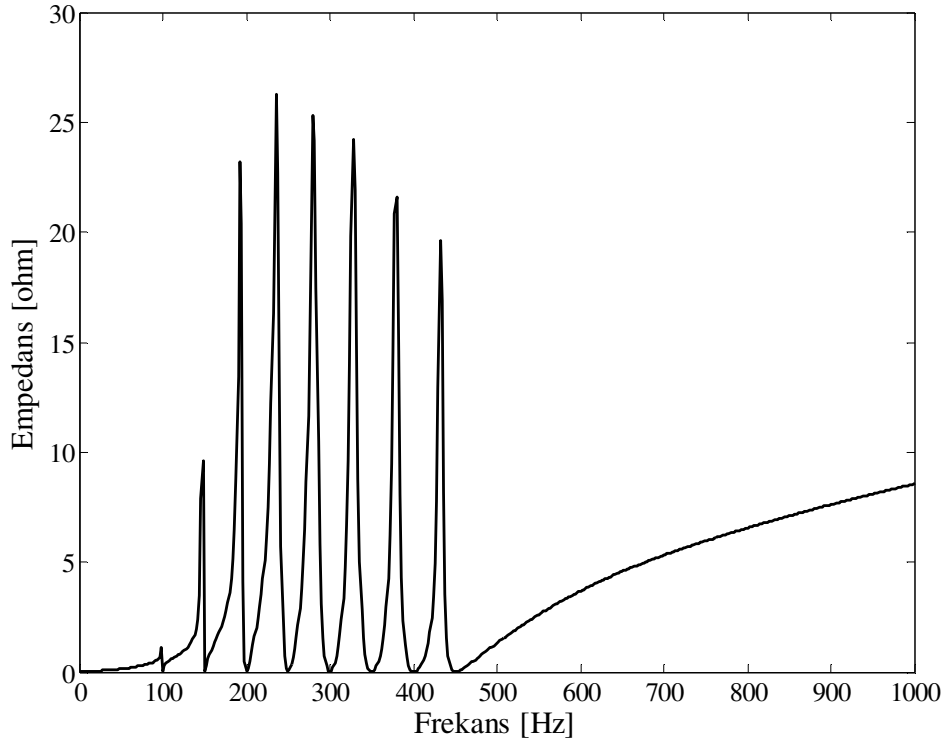
### 6.3.2 Pasif Filtre Direnç Değerlerinin İhmal Edildiği Uygulama



Şekil 6.23. Transformator-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Akımı Dalga Şekli



Şekil 6.24. Transformator-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Yük Gerilimi Dalga Şekli



Şekil 6.25. Transformatör-B Sekonder Tarafında Filtre Dirençleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Yapıldıktan Sonraki Sistem Empedansı Değişimi

Çizelge 6.8. Filtre Direnç Değerleri İhmal Edilmiş İken Filtreleme Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri

SİSTEM	AKIM (%)	GERİLİM (%)
Harmonik Filtresiz	10,7	3,78
Pasif Harmonik Filtreli	0,82	0,59

Şekil 6.25 'de filtre direnç değerleri ihmal edilmiş iken yapılan filtreleme sonucundaki empedans grafiği gözükmemektedir. Tasarlanan filtreler yardımıyla, harmonik frekanslarındaki sistem empedansları sıfıra yaklaşmaktadır. Buda harmonik akımlarının sisteme geçmeden, filtreler üzerinden akacağına bir göstergesidir. Bu tasarım yapıldıktan sonra  $THD_V$  değeri %0,59 ve  $THD_I$  değeri %0,82 değerini almaktadır. Bu değerler sistemdeki harmonik akımlarının önemli ölçüde filtrelendiğinin bir göstergesidir ve yapılan bu tasarımla harmonik akım ve gerilim bozulma değerleri standartların altına düşmüştür. Her bir harmonik mertebesi için tasarlanan filtreler, ayarlandıkları frekanslarda düşük empedans göstermişlerdir. 10. harmonik mertebesi için tasarlanan sönümlü filtre ise 1000 Hz in üstünde yüksek empedans göstererek harmonik akımların sisteme geçmesine engel olmaktadır. Filtrelerdeki direnç

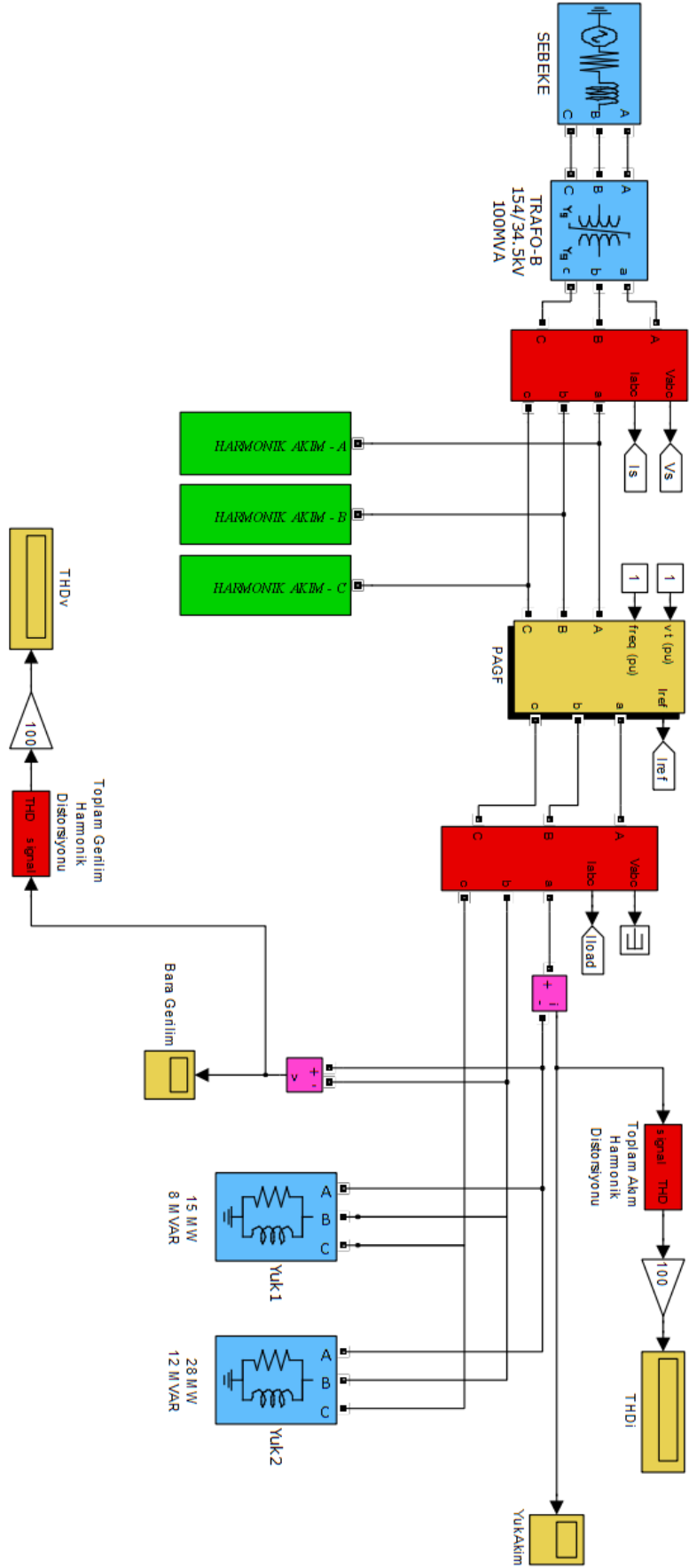
değerleri ihmal edildiği ve edilmediği durumlardaki harmonik bozulma değerleri arasında ciddi farklar oluşmaktadır. Bu nedenle filtreler tasarlanırken direnç değerlerinin harmonik bozulmaya ne derece etki edeceğine dikkat edilmeli ve buna göre tasarım yapılmalıdır.

Çizelge 6.9. Pasif Filtre Simülasyonları Sonucunda Elde Edilen Akım ve Gerilim Harmonik Bozulma Değerleri

<b>SİSTEM</b>	<b>THD<sub>I</sub> (%)</b>	<b>THD<sub>V</sub> (%)</b>
Filtresiz Durum	10,7	3,78
Filtre Dirençlerinin Mevcut Olduğu Durum	6,65	1,14
Filtre Dirençlerinin İhmal Eildiği durum	0,82	0,59

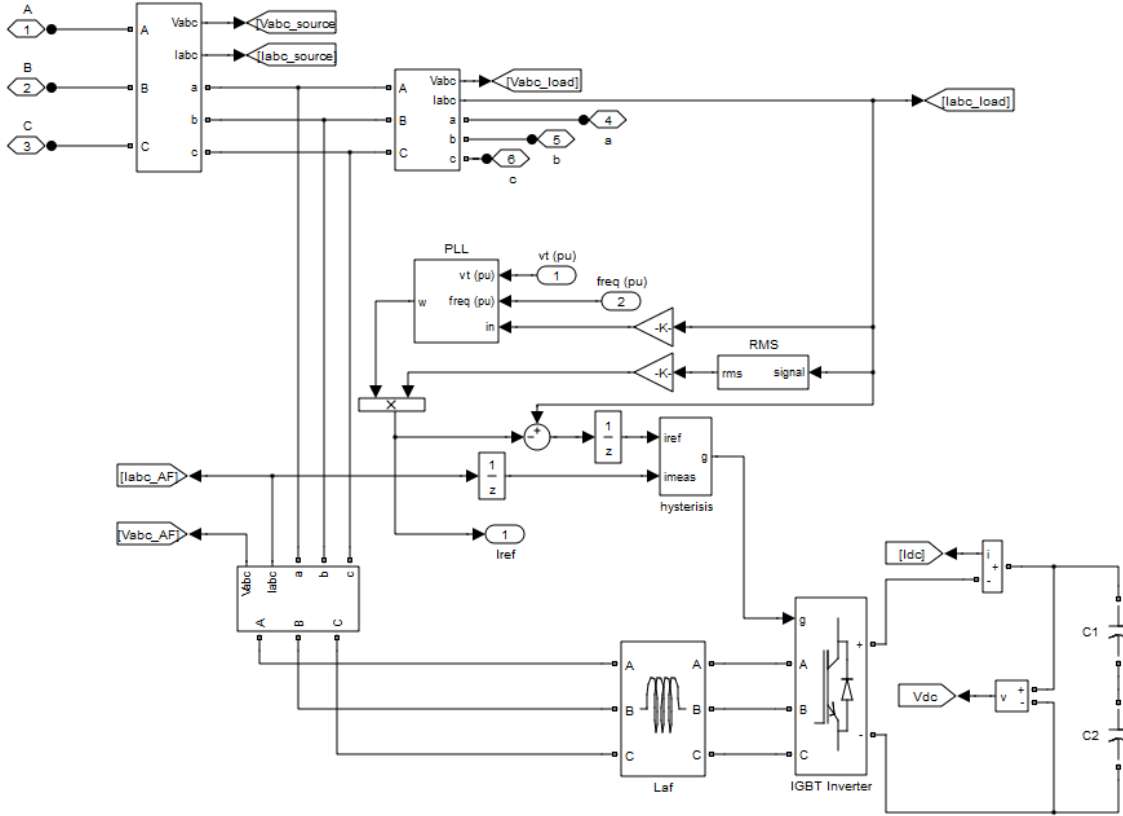
#### 6.4 Aktif Filtre Simülasyon Modeli

Şekil 6.26 'da, verilen sistemdeki harmonikleri gidermek için PAGF kullanılacaktır. Sistemdeki harmonik akım değerleri aynı kalmak şartıyla, transformatörün sekonder tarafından sonra bir PAGF bulunmaktadır. Harmonik akım kaynağı modelleri ise AGF' nin doğru analiz yapabilmesi için AGF ile transformatör çıkışı arasına bağlanmıştır. PAGF' nin sisteme enjekte edilen harmonik akımları analiz edip, bu akımlarla aynı fazda ancak ters yöndeki akımları sisteme enjekte etmesiyle THD<sub>V</sub> ve THD<sub>I</sub> değerlerinin azalması beklenmektedir.



Şekil 6.26. Örnek Dağıtım Sisteminde PAGF İle Yapılan Simülasyon Modeli

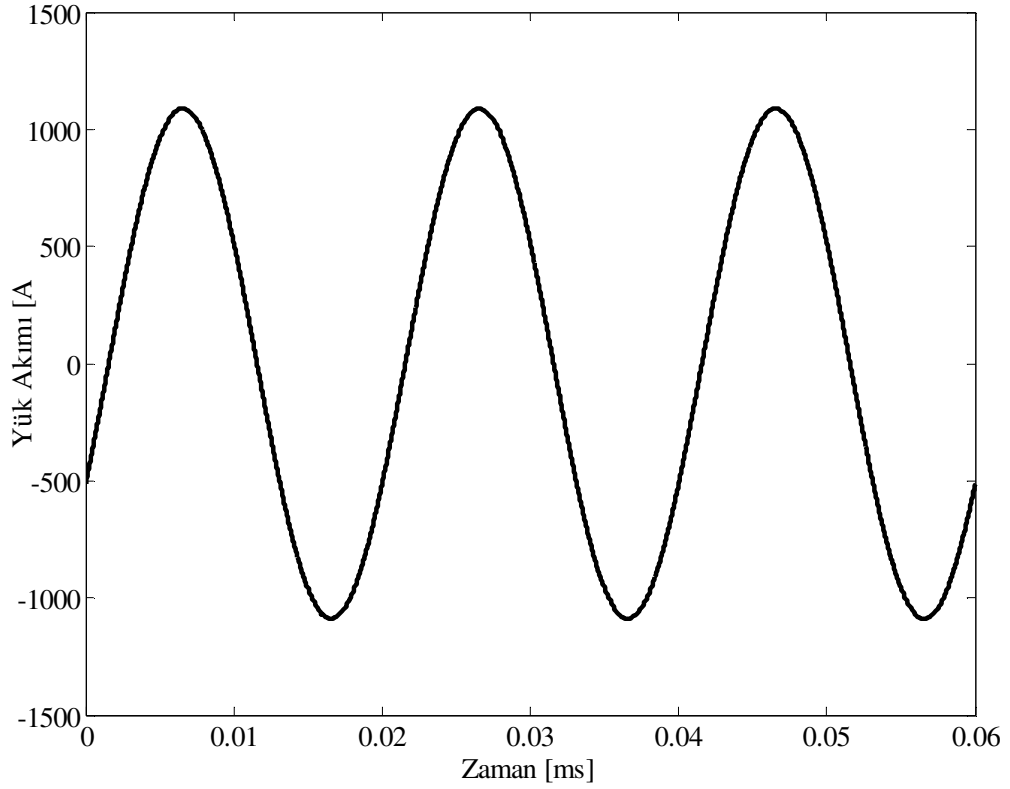
İlk uygulanan pasif filtre simülasyonunun sonuçları ile AGF simülasyonunun sonuçlarının karşılaştırılabilmesi için sistemdeki yük ve harmonik akım değerleri sabit tutulmuştur. PAGF modeli olarak da MATLAB paket programında bulunan “Three Phase Active Harmonik Filter” simülasyonundaki aktif filtre kullanılmıştır.



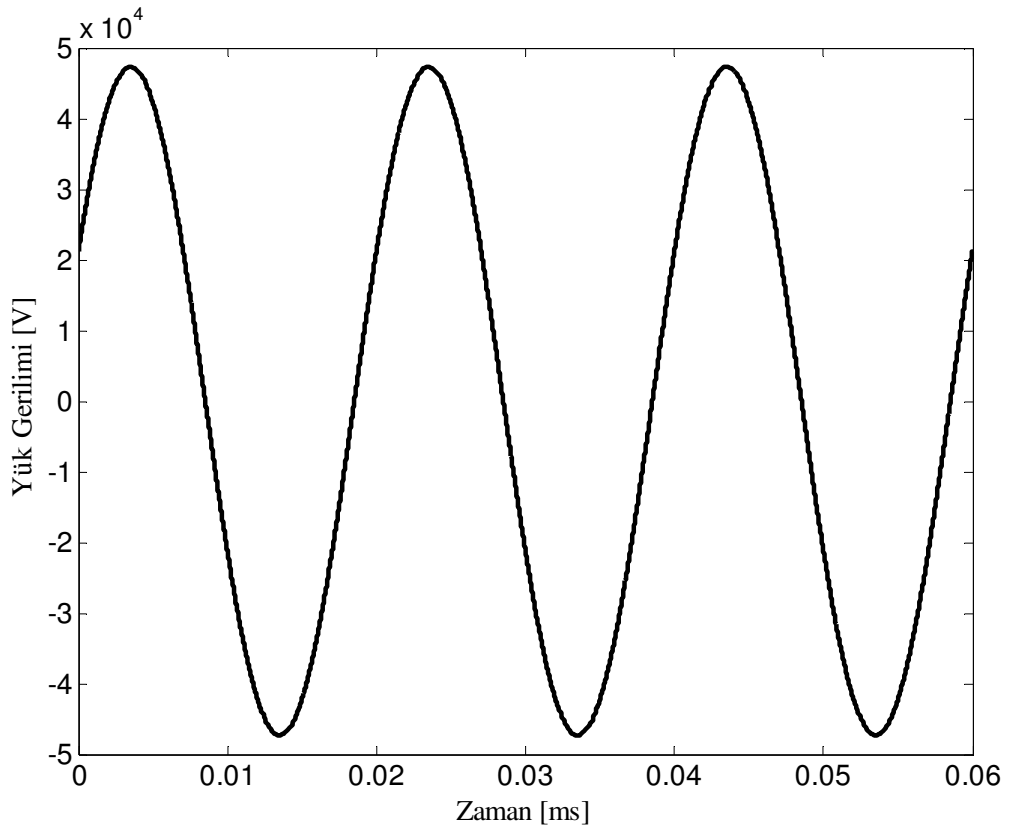
Şekil 6.27. PAGF Modeli

Şekil 6.27 'deki PAGF modelinde akım kaynağı olarak gerilim beslemeli bir inverter kullanılmıştır.  $L_{af}$  PAGF' sinin çıkış empedansını göstermektedir. PLL olarak gösterilen blok ise faz kilitlemeli döngü frekans sentezleyicidir. Bu kontrol sistemi, giriş sinyalinin frekansına ve fazına senkron bir şekilde cevap verebilmektedir. Kontrollü bir osilatör devresinin frekansını otomatik olarak azaltıp artırarak, referans sinyal ile aynı frekans ve faza ulaşmayı sağlamaktadır. Harmoniklerin genlikleri ve frekansları birbirlerinden farklı olduğu için AGF' lerinde bu kontrol metodu yaygın olarak kullanılmaktadır.





Şekil 6.28. Transformator-B sekonder Tarafında PAGF Sonrası Yük Akımı Dalga Şekli



Şekil 6.29. Transformator-B sekonder Tarafında PAGF Sonrası Yük Gerilim Dalga Şekli

PAGF ile yapılan simülasyon sonucunda Şekil 6.28 ve Şekil 6.29 'dan da görüldüğü üzere akım ve gerilim dalga şekilleri sinüsoidale daha yakın bir hal almıştır. Yapılan uygulama sonucunda  $THD_V$  değeri % 0,08,  $THD_I$  değeri ise %0,1 seviyesine düşürülmüştür. Sonuçlardan da görüleceği üzere AGF 'si, pasif filtreye göre daha iyi ve kaliteli bir filtreleme performansı sergilemektedir.

Çizelge 6.10. PAGF Sonrası Akım ve Gerilim THD Değerleri

<b>SİSTEM</b>	<b>AKIM (%)</b>	<b>GERİLİM (%)</b>
Harmonik Filtresiz	10,7	3,78
Aktif Harmonik Filtreli	0,1	0,08

Harmoniklerin filtrelenmesi için, PGF 'lerinin uygulanmasında karşılaşılan en önemli problemlerden biri, mevcut dağıtım sistemine özel olmaları sebebiyle, ek yükler geldiğinde yetersiz kalmalarıdır. AGF 'leri ise pasif filtrelere göre pahalı olmakla birlikte aynı anda birden fazla harmonik frekans için filtreleme yapabilirler ve enerji kalitesini etkileyen problemleri ortadan kaldırabilirler. Yine aktif filtreler mevcut dağıtımda değişiklik yapıldığı zaman bile etkili harmonik kompanzasyonuna devam ederler ki bu onların en önemli üstünlükleridir. Ayrıca aktif güç filtrelerinde rezonans olayı olma ihtimalide yoktur. Bu da sistemin güvenilirliği açısından önemlidir. PAG 'leri bağlandıkları sistemlerde temel frekansta bazı değişimlere neden olurken, AGF 'si sistemde böyle bir etki oluşturmaz. Ayrıca devamlı olarak harmonik değerleri değişen sistemlerde, PGF 'lerinde ayar yapmak oldukça zordur ve tam anlamıyla yapılamamaktadır. AGF 'sinde ise hangi harmonik bileşenlerin süzüleceğini ayarlamak mümkündür. AGF 'lerinin bütün bu avantajlarının yanı sıra yüksek maliyetli olmaları ve işletiminin zor olması birer dezavantajdır.

## 7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında enerji kalitesi ile ilgili genel bilgiler verilerek enerji kalitesine ait terimler, harmonik büyüklüklere ait tanımlar, harmonik üreten elemanlar ve harmonik büyüklüklerin giderilmesi için pasif ve aktif güç filtreleri konuları detaylı biçimde incelenmiştir.

Çalışmanın teorik bilgiler yanında, uygulama açısından da önemini ortaya koymak bakımından gerçek ölçüm sonuçları ile simülasyon yapılmıştır.

Yapılan çalışmada enerji kalitesi içerisinde önemli yer tutan harmonik bileşenlerin giderilmesi çalışması, gerçek bir sistem üzerinde gerçekleştirilen simülasyon çalışması ile ortaya konmuştur.

Bu çalışmada, indirici bir transformatör merkezindeki bir transformatörün sekonder tarafından alınan harmonik ölçüm değerleri kullanılarak, bu harmonikleri azaltmak amacıyla aktif ve pasif güç filtresi tasarlanan bir uygulama yapılmıştır. Yapılan uygulamada kullanılan veriler gerçek ölçüm sonuçlarından oluşmaktadır.

Bilindiği gibi elektrik enerji sistemlerinin, sabit frekanslı (50Hz), akım ve gerilim dalga şekillerinin ise sinüsoidal olması istenmektedir. Bu kriterlerin dışında kalan bir enerji şekli ile kullanıcılara, maalesef kaliteli bir enerji sunulamamaktadır. İlerleyen teknolojiyle birlikte, kullanılan birçok elektrikli cihaz, gerilim ve akım üzerinde harmonik bozulmalara neden olmaktadır.

Aktif güç filtreleri, nonlineer yüklerin oluşturduğu harmonik akımları süzerek güç kalitesini yükseltmektedir. Bu yöntem, diğer harmonik filtreleme metotlarına nazaran daha yüksek performans sergilemekte ve tüm harmonik değerleri için etkili olmaktadır. Ayrıca, güç sistemine yeni yükler eklendiği durumlarda bile çok hızlı cevap vermekte, gerilim regülasyonu ve güç kompanzasyonu görevlerini sağlamaktadır.

Aktif güç filtreleri, yük akımında çok hızlı değişimler meydana gelmediği sürece aktif çalışmasını verimli olarak sürdürebilmektedir. Bütün bu avantajlarının yanı sıra kurulum ve işletme maliyetinin yüksek olması, bağlanacak olan sistemin gücü arttıkça maliyetinin artması ve işletiminin zorlaşması daha tasarım aşamasında iken göz ardı edilmemelidir. Çünkü aktif güç filtreleri, yarı iletken elemanlardan ve hassas elektronik kontrol devrelerinden oluşmaktadır. Meydana gelebilecek herhangi bir arızada, özellikle yüksek güç tüketen sanayilerde ciddi ekonomik kayıplara neden olmaktadır.

Pasif güç filtreleri yüksek ise harmonik akımlara sahip sistemlerde etkili olarak kullanılmaktadır. Elemanları daha basit olan bu filtre temel frekansta kapasitif özellik göstermesi nedeniyle, güç kompanzasyonu görevini de gerçekleştirmektedir. Pasif filtreler, kurulum ve işletme maliyeti bakımından aktif filtrelere göre daha ekonomiktir. Ancak sistemde meydana gelecek herhangi bir yük değişiminde cevap verme kabiliyetleri yoktur. Bu nedenle güç bakımından genişleme ve büyüme ihtimali olan tesislerde pasif filtre kullanılması ekonomik olmamakla beraber değişen sistemle birlikte rezonans olayının meydana gelme ihtimali de artmaktadır.

Yapılan çalışma ile aktif ve pasif filtrenin harmonik giderilmesindeki performansı ortaya konmuştur.

Sayısal uygulamalardan, aktif filtre ile yapılan çalışmada daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. Pasif filtre ile yapılan çalışmalarda da filtreleme yapılmış ancak daha büyük distorsiyon değeri görülmüştür.

Filtre direnç değerlerinin ihmal edilmediği simülasyon çalışması hariç, yapılan diğer çalışmalarda harmonik bozulmaların standart değerlerin altına düştüğü gözlemlenmiştir. Pasif filtrelerin doğru tasarlandıkları takdirde, harmonik akımlarını süzme görevini düzgün bir şekilde yerine getirdiği görülmüştür. Ancak tasarım aşamasında filtre reaktansına ve direncine dikkat edilmelidir. Filtrenin direnç değeri arttıkça, filtre üzerinden geçen harmonik akımlar sistemde ek harmonik bozulmalara neden olmaktadır. Bu nedenle pasif güç filtreleri tasarlanırken, filtre empedansı olabildiğince küçük tutulmalıdır. Aktif filtrenin ise pasif filtreye göre daha temiz ve kaliteli bir enerji sağladığı, daha düzgün bir filtreleme yaptığı da bilinmektedir. Bu nedenle iki filtre modelinin de birbirine karşı farklı üstünlükleri olmasına rağmen, filtreleme metodu seçilmeden önce teknik ve ekonomik kriterler göz önünde bulundurularak tercih yapılmalıdır.

Yapılan çalışmada, yüksek ancak az sayıda harmonik akımların bulunduğu, yüklerin çok hızlı ve ani olarak değişmediği, büyüme ve genişleme ihtimali zayıf olan işletmelerde pasif güç filtresi kullanılması önerilmektedir. Ancak bu şartlar altında pasif filtre uygulaması optimum bir filtreleme sağlamaktadır. Ayrıca kurulum ve işletme maliyetinin de düşük olması nedeniyle de pasif güç filtreleri birçok kullanıcı tarafından tercih edilmektedir. Ancak pasif güç filtreleri tercih edilmeden önce, sistemde oluşabilecek rezonans riski, harmonik mertebelerinin değişme ihtimali ve yükte meydana gelebilecek artış durumları, filtre empedans değerleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Çok fazla sayıda harmoniğin bulunduğu, ileriye dönük büyüme ihtimali olan ve hassas elektronik cihazların ve kontrol devrelerinin bulunduğu işletmelerde aktif güç filtrelerinin kullanılması önerilmektedir. Özellikle yük akımındaki harmonik bileşenlerin genliğinin ve frekanslarının sabit olmadığı veya çok sık değişim gösterdiği durumlarda aktif güç filtresi kullanmak en verimli çözüm olmaktadır. Yapısındaki güç elektroniği elemanlarının yüksek frekansta çalışmasından dolayı aktif güç filtreleri, ani yük değişimlerine ve değişim gösteren harmonik akımlarına karşı oldukça duyarlıdır ve harmoniklerin az da olsa kabul edilemeyeceği işletmelerde kullanılmalıdır. Ancak aktif güç filtreleri, yapısındaki elektronik ve yarı iletken elemanlar nedeniyle yüksek güçteki işletmelerde kullanılması ve kontrol edilmesi zorlaşmaktadır. Bu durumlarda aktif güç filtreleri paralel olarak işletilebilmektedir ancak pahalı bir sistem olması ve işletiminin zor olması nedeniyle tercih edilmemektedir.

**KAYNAKLAR**

Adak, S., (2003), “Enerji Sistemlerinde Harmonik Distorsiyonunun Azaltılması”, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Akaigi, H. ve Hideaki, F., (1994), “Trends in Active Power Line Conditioners”, IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 9, No 3.

Akaigi, H., (2000), “New Trends in Active Filter For Power Conditioning”, IEEE Trans., 32(8): 1312.

Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (1985), Power System Harmonics, John Wiley&Sons ,Norwich, New York.

Arrillaga, J., Watson, N. R., ve Chen, S., (2001), Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, Chicester.

Bayram, M., (2000), Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Boduroğlu, T., (1988), Elektrik Makinaları Dersleri, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul.

Bollen, M. H. J., (2003), “What is Power Quality”, Electric Power System Research, 66 5-14.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. ve Beaty, H. W., (1996), Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, New York.

Dommel, H.V., Yan, A. ve Wei, S., (1986), “Harmonics from Transformer Saturation”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRD-1, No.2: 209-215.

Erdoğan, N., (1996), “Aktif Güç Filtrelerinin İncelenmesi ve Matlab İle Bir Simülasyon Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, (1995).

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O, (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.

Kocatepe, C., Umurkan, N., Attar, F., Yumurtacı, R. ve Uzunoğlu, M., (2006), Enerji Kalitesi ve Harmonikler, EMO Kurs Notu, Ankara.

Kusko, A. ve Thompson, M. T., (2007), Power Quality in Electrical Systems, McGraw-Hill, New York.

Sankaran, C., Power Quality, (2002), CRC Press, Florida.

Sundberg, Y., (1980), “The Arc Furnace as a Load on the Network”, ASEA Journal, Vol.49: pp.75-87.

Szabados, B., ve Lee, J., (1981), “Harmonic Impedance Measurements on Transformers”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100: pp.5020-5026.

**EKLER****Ek 1 Pasif güç filtresini oluşturan eleman değerlerinin hesaplanması için Matlab yazılımı**

```

clear all;
clc
f=50; % Frekans [Hz]
w=2*pi*f; % Açısal Frekans [rad/s]
v=34.5e3; % Gerilim [V]
Qc=20e6; % Filtre Gücü [VAR]
Q=35; % Kalite Faktörü
n=[2 3 4 5 6 7 8 9 10];
Ct=Qc/(w*v^2); % Toplam Kapasite Değeri [F]
C=Ct/9; % Her bir Paralel Koldaki Kondansatör Kapasite Değeri [F]
for i=1:8

Xr(i)=1/(n(i)*w*C); % Rezonanstaki Reaktans Değeri

R(i)=Xr(i)/Q %Filtredeki Direnç Değeri

L(i)=Xr(i)/(n(i)*w) % Filtredeki Endüktans Değeri
end
f0=n(9)*50;
R10=1/(2*pi*C*f0);
m=1;
L10=m*R10^2*C;

```

**Ek 2 Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Kabul Edilebilir Akım Harmonik Limitleri**

Harmonik Sırası		OG 1<Un≤34.5					YG 34.5<Un≤154					ÇYG Un>154				
Grup	No	I <sub>k</sub> /I <sub>L</sub>					I <sub>k</sub> /I <sub>L</sub>					I <sub>k</sub> /I <sub>L</sub>				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
T E K  H A R M O N İ K L E R	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35	
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
<b>Toplam Talep</b>	<b>5</b>	8	12	15	20	2,5	<b>4</b>	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5	
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

**I<sub>k</sub>**: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

**I<sub>L</sub>**: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

Tablo üzerinde koyu renkle belirtilen sütunlar, bu çalışmada kullanılan I<sub>k</sub>/I<sub>L</sub> değerlerini göstermektedir.



**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 05.04.1985

Doğum yeri İstanbul

Lise 1999–2003 Habire Yahşi Lisesi (YDA)

Lisans 2003–2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak.  
Elektrik Mühendisliği Bölümü