T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK BİLEŞENLER İÇEREN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ TANIMLARINA İLİŞKİN FARKLI YAKLAŞIMLARIN İNCELENMESİ

Necati Çağrı GÜRPINAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Temmuz, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK BİLEŞENLER İÇEREN ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÜÇ TANIMLARINA İLİŞKİN FARKLI YAKLAŞIMLARIN İNCELENMESİ

Necati Çağrı GÜRPINAR tarafından hazırlanan tez çalışması 10.07.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ercan İZGİ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Yaşar BİRBİR, Üye
Marmara Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Harmonik Bileşenler İçeren Güç Sistemlerinde Güç Tanımlarına İlişkin Farklı Yaklaşımların İncelenmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Necati Çağrı GÜRPINAR

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında, elektrik enerjisi iletim ile dağıtımında büyük bir sorun olarak göze çarpan harmonikler ele alınmış ve simülasyon, ölçüm gibi metotlarla harmonik içeren durumlarda literatürde farklı yazarlarca önerilen tanımların karşılaştırılması yapılmıştır.

Çalışmanın planlamasında, araştırılmasında, yürütülmesinde, yönetilmesinde tüm bilgi ve birikimini benden asla esirgemeyen, samimi ve babacan yaklaşımı ile her adımı daha da kolaylaştıran saygıdeğer tez danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya teşekkürlerimi en içten duygularımla sunarım.

Hayatım boyunca ve bu tezin yazım aşamasında yaşanan problemlerde her zaman yanımda olan sevgili annem Naciye GÜRPINAR ve en değerli meslektaşım babam Erhan GÜRPINAR'a özellikle anlayışları için teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıyeten bu süreçte bana epey destek olmuş canım arkadaşlarım Özden MECİT, Hüsne MECİT, Musa Erdem MECİT, Tunahan Çağlayan EKİCİ ve Emel SEVER'e en derin sevgilerimi sunarım.

Son olarak, bu çalışmada çok emeği geçen Dr. Öğr. Üyesi Bedri KEKEZOĞLU başta olmak üzere, Dr. Öğr. Üyesi Altuğ BOZKURT ve Dr. Öğr. Üyesi Kadir DOĞANŞAHİN'e de ayrıca teşekkür ederim.

Necati Çağrı GÜRPINAR

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ x
ŞEKİL LİSTESİ xii
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xv
ABSTRACT xvii
1 Giriş 1
1.1 Literatür Taraması 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 3
1.4 Tezin Bölümleri 4
2 Harmonikler 5
2.1 Harmoniklerin Tanımı, İlgili Kavramlar ve İndisler 5
2.1.1 Harmonik Teorisinin Temelleri 7
2.1.2 Harmonik Terimler 8
2.2 Harmonik Kaynaklarının İncelenmesi 12
2.2.1 Lineer Yükler 12
2.2.2 Lineer Olmayan Yükler 16
2.2.3 Harmonik Kaynakları 20
2.3 Harmoniklerin Etkileri 20
2.4 Harmonik Standartları 22
3 Sinüsoidal Durumda Güç Tanımları 32

4 Sinüsoidal Olmayan, Harmonik İçeren Sistemlerde Literatürde Verilen Güç Tanımlarının İncelenmesi, Karşılaştırılması ve Yorumlanması 34
4.1 Genel Güç Tanımları 34
4.2 Reaktif Güç ve Distorsiyon Gücü Tanımları 37
4.3 Constantin I. Budeanu'nun Önerdiği Tanım 38
4.4 Stanislaw Fryze'nin Önerdiği Tanım 39
4.5 Leszek Czarnecki'nin Önerdiği Tanım 40
4.6 Alexander Eigeles Emanuel'in Önerdiği Tanım 41
4.7 Metotların Karşılaştırılması ve Yorumlar 45
5 Sayısal Uygulama ve Simülasyon 48
6 Sonuç ve Öneriler 66
Kaynakça 68
Tezden Üretilmiş Yayınlar 71

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
B	Manyetik Akı Yoğunluğu, Süseptans
C	Kapasitör, Mesaj İndeksi
D	Distorsiyon Gücü
D_B	Budeanu'nun Tanımladığı Distorsiyon Gücü
D_I	Akımdan Kaynaklanan Distorsiyon Gücü
D_H	Harmonik Distorsiyon Gücü
D_S	Czarnecki'nin Tanımladığı Distorsiyon Gücü ya da Parçalanmış Güç
D_V	Gerilimden Kaynaklanan Distorsiyon Gücü
f	Frekans
F	Tamamlayıcı ya da Hayali Güç (Fictitious Power)
G	Kondüktans
h	Harmonik Frekans
H	Manyetik Alan Şiddeti
Hz	Hertz
I	Akım
I_1	Akımın Temel Bileşeni
I_a	Aktif Akım
I_A	Aktif Akım
I_K	Kısa Devre Akımı
I_L	Talep Akımı
I_r	Reaktif Akım
I_R	Reaktif Akım

I_{rms}	Akımın Etkin Değeri
I_S	Parçalanmış Akım ya da Dağılma Akımı (Shattered Current)
i(t)	Ani Akım
i_{toplam}	Toplam Akım
K	Transformatör Faktörü
L	Endüktans
mH	Mili Henry
n	Harmonik Mertebesi
N	Aktif Olmayan Güç
kV	Kilo Volt
P	Aktif Güç
P_1	Aktif Gücün Temel Bileşeni
P_C	Tamamlayıcı Güç (Complementary Power)
P_h	Harmonik Aktif Güç
p(t)	Ani Güç
Q	Reaktif Güç
Q_1	Reaktif Gücün Temel Bileşeni
Q_B	Budeanu'nun Tanımladığı Reaktif Güç
Q_F	Fryze'nin Tanımladığı Reaktif Güç
Q_h	Harmonik Reaktif Güç
R	Direnç
S	Görünür Güç
S_1	Görünür Gücün Temel Bileşeni
S_H	Harmonik Görünür Güç
S_N	Temel Olmayan Görünür Güç

S_S	Görünen Güç
S_V	Faz Başına Vektör Görünür Güç
t	Zaman
T	Periyot
V	Gerilim, Volt
V_1	Gerilimin Temel Bileşeni
VA	Volt Amper
VAr	Volt Amper Reaktif
V_{rms}	Gerilimin Etkin Değeri
v(t)	Ani Gerilim
W	Watt
w_h	Ağırlık Faktörü
Y	Admitans
Z	Empedans
α	Akımın Harmonik Bileşeninin Faz Açısı
β	Gerilimin Harmonik Bileşeninin Faz Açısı
θ	Gerilimin Faz Açısı
δ	Akımın Faz Açısı
φ	Akım ve Gerilim Arasındaki Faz Farkı Açısı
ω	Açısal Hız
Ω	Ohm

KISALTMA LİSTESİ

ABD	Amerika Birleşik Devletleri
AC	Alternatif Akım (Alternate Current)
CENELEC	Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (European Committee For Electrotechnical Standardization)
ÇYG	Çok Yüksek Gerilim
DC	Doğru Akım (Direct Current)
DG	Dağıtık Üretim (Distributed Generation)
DPF	Deplasman Güç Faktörü (Displacement Power Factor)
Dyn	Üçgen-Yıldız Noktası Topraklı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
GPF	Gerçek Güç Faktörü
HD	Tekil Harmonik Distorsiyonu
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IGBT	Yalıtılmış Çift Kutuplu Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
NEC	Ulusal Elektrik Kodu (National Electric Code)
OG	Orta Gerilim
PF	Güç Faktörü (Power Factor)
RMS	Karekök Ortalama (Root Mean Square)
TEF	Telefon Etkileşim Faktörü
THD	Toplam Harmonik Distorsiyonu

TTD	Toplam Talep Distorsiyonu
TV	Televizyon
UL	Underwriters Laboratories
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)
VCR	Video Kaset Kaydedici (Videocassette Recorder)
vd	ve diğerleri
YG	Yüksek Gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Sinüsoidal dalga formu ve bazı harmonikler.....7

Şekil 2.2 Üçüncü, beşinci ve yedinci harmoniklerle çarpılmış sinüsoidal dalga formu 8

Şekil 2.3 Tamamen dirençli bir devrede gerilim, akım ve güç değerleri arasındaki ilişki 15

Şekil 2.4 Akımın gerilimden geride olduğu (endüktif) devrelerdeki gerilim, akım ve bunların çarpımı arasındaki ilişki 15

Şekil 2.5 Akımın gerilimden ileride olduğu (kapasitif) devrelerdeki gerilim, akım ve bunların çarpımı arasındaki ilişki 15

Şekil 2.6 Tipik lineer olmayan güç kaynağındaki gerilim ve akım arasındaki ilişki.....18

Şekil 2.7 B=f(H) Transformatör histerezis karakteristiği 20

Şekil 5.1 Harmonik ölçümüne ilişkin devre şeması 49

Şekil 5.2 Simülasyon devresi.....55

Şekil 5.3 Yüke uygulanan gerilimin harmonik spektrumu (Spektrumda %100 olarak temel bileşen geriliminin (rms değeri 220V) tepe değeri (311,2V) gösterilmiştir.).....56

Şekil 5.4 Yüke uygulanan gerilimin MATLAB SIMULINK'ten elde edilen harmonik spektrumu (liste formatında).....56

Şekil 5.5 Simülasyon devresinin sadece temel bileşen içeren durumu.....57

Şekil 5.6 Simülasyon devresinin sadece beşinci harmonik bileşen içeren durumu 58

Şekil 5.7 Simülasyon devresinin sadece yedinci harmonik bileşen içeren durumu 58

Şekil 5.8 Simülasyon devresinin güç blokları ve tüm gerilim kaynakları dahil tümü.....59

Şekil 5.9 Simülasyon devresinde yüke uygulanan gerilimin zamana göre değişimi.....60

Şekil 5.10 Simülasyon devresinde yük akımının zamana göre değişimi.....61

Şekil 5.11 Simülasyon devresindeki akımın harmonik spektrumu (Spektrumda %100 olarak temel bileşen akımının (rms değeri 16,01A) tepe değeri (22,64 A) gösterilmiştir.).....62

Şekil 5.12 Yük akımının MATLAB Simulink'ten elde edilen harmonik spektrumu (liste formatında).....62

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Örnek lineer yükler....14

Tablo 2.2 Örnek lineer olmayan yükler....16

Tablo 2.3 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (k=0,2+12,5/n)....23

Tablo 2.4 Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) – (k=0,2+12,5/n)...24

Tablo 2.5 Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar için) – (m=5√11/n)....25

Tablo 2.6 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri....26

Tablo 2.7 Konutlarla ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri....26

Tablo 2.8 D sınıfı donanım için IEC 61000–3–2 'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları....27

Tablo 2.9 IEC 1000 – 3 – 2 'ye göre çeşitli sınıflardaki gereçlerin harmonik sınırları....27

Tablo 2.10 IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları....28

Tablo 2.11 IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları....28

Tablo 2.12 EPDK Şebeke Yönetmeliğine göre 20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri....29

Tablo 2.13 EPDK Şebeke Yönetmeliğine göre 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri....30

Tablo 2.14 EPDK Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğine göre kabul edilebilir harmonik akım seviyeleri....31

Tablo 5.1 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile yapılan ölçümlerdeki değerlerin ortalamaları....49

Tablo 5.2 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile her harmonik derecesi için yapılan hesaplamalar....51

Tablo 5.3 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile yapılan ölçümlerden yapılan hesaplamalarda diğer bilinmeyen değerler....51

Tablo 5.4 Ölçüm değerlerinin Budeanu'nun güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar....52

Tablo 5.5 Ölçüm değerlerinin Fryze'nin güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar 52
Tablo 5.6 Ölçüm değerlerinin Czarnecki'nin güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar.....53
Tablo 5.7 Ölçüm değerlerinin Emanuel'in güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar 54
Tablo 5.8 Simülasyon devresinden elde edilen değerler 63
Tablo 5.9 Simülasyon devresine Budeanu'nun güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar.....64
Tablo 5.10 Simülasyon devresine Fryze'nin güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar.....64
Tablo 5.11 Simülasyon devresine Czarnecki'nin güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar.....64
Tablo 5.12 Simülasyon devresine Emanuel'in güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar.....65

ÖZET

Harmonik Bileşenler İçeren Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Tanımlarına İlişkin Farklı Yaklaşımların İncelenmesi

Necati Çağrı GÜRPINAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

İdeal bir şebekede tüm tüketicilere uygulanan gerilimin efektif değerinin ve frekansının sabit olması, dalga şeklinin saf sinüsoidal biçimde olması, harmonik bileşenler içermemesi beklenir. Fakat ne yazık ki bu durum pratikte pek mümkün değildir.

Harmonik kavramı, elektrik enerjisi kalitesinde büyük bir öneme sahiptir. Yakın gelecekte yenilenebilir enerji kaynaklarından özellikle güneş santrallerinin ve ulaşımda elektrikli taşıtların yaygınlaşacak olması, harmoniklerin etkileri ve harmonikler içeren sistemlerde güç tanımı konusunun daha da güncel hale gelmesine neden olacaktır.

Bu tezde harmonikler hakkında kısa bir bilgi verilmiş, saf sinüsoidal durumda ve harmonikli durumda ayrı ayrı literatürde bugüne kadar verilen güç tanımları incelenmiştir. Literatürde verilen güç tanımları ile ilgili karşılaştırma ve

değerlendirmeler, MATLAB Simulink yardımıyla bir simülasyon devresi oluşturularak ve örnek bir devre kurularak FLUKE 435-II harmonik analizörü ile elde edilen ölçüm sonuçları desteği ile yapılmıştır. Sayısal uygulamada literatürde verilen farklı harmonikli güç tanımlarına göre güç değerleri hesaplanmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Böylece bu güç yaklaşımlarının hangilerinin hangi alanlarda kullanılıp kullanılamayacağı değerlendirilmiş, yorumlamaları yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler, harmonik distorsiyon, reaktif güç, distorsiyon gücü, harmonikli durumda güç tanımları.

ABSTRACT

Study of Different Approaches Relating to Power Definitions in Electrical Power Systems Containing Harmonic Components

Necati Çağrı GÜRPINAR

Department of Electrical Engineering

Electrical Power Systems MSc. Program

Master's Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Recep YUMURTACI

In an ideal network, it is expected that the effective value and frequency of the voltage applied to all consumers is constant, the waveform is in pure sinusoidal form and that it does not contain harmonic components. But unfortunately this is not possible in practice.

The concept of harmonics has a great importance in the quality of electrical energy. In the near future, the expansion of renewable energy sources, especially of solar power plants and electric vehicles in transportation will cause the definition of power in harmonic systems and harmonics to become more current.

In this thesis, a brief information about harmonics is given and in the case of pure sinusoidal state and harmonic state, the power definitions given so far in the literature are examined. The comparisons and evaluations of the power definitions given in the literature have been made with the help of the measurement results obtained by FLUKE 435-II harmonic analyzer by establishing a sample circuit and

were done by creating a simulation circuit with the help of MATLAB Simulink. In numerical application, power values are calculated and results are evaluated according to different harmonic power definitions given in the literature. Thus, which of these power approaches can be used in which areas and interpretations were made.

Keywords: Harmonics, harmonic distortion, reactive power, distortion power, power definitions in harmonic state.

1
Giriş

Günümüzde elektrik enerjisinin kaynaktan alıcıya güvenli ve mümkün olduğunca verimli iletilebilmesi hem teoride, hem de pratikte önem arz etmektedir. Dünya nüfusunun artması ve insanoğlunun daha konforlu, daha rahat bir yaşam isteğinin gün geçtikçe artmasıyla enerji arzı ve talebi de buna bağlı olarak artmaktadır. Bu durumda enerjinin mümkün olduğunca verimli ve kaliteli iletilmesi ile dağıtılması gerekmektedir (Akmaz, 2012).

İdeal olan bir şebekede tüketicilere uygulanan gerilimin efektif değerinin ve frekansının sabit olması, dalga şeklinin saf sinüsoidal biçimde olması ve harmonik bileşenler içermemesi beklenir. Ancak gerçekte bu ideal koşulların sağlanması oldukça zordur. Bu zorluğun başlıca nedeni, akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan, doğrultucu, evirici, motor hız sürücüleri, kesintisiz güç kaynakları, ark fırınları, kompakt floresanlar vb. lineer olmayan yüklerdir. Bu lineer olmayan yükler sebebiyle elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga şekli bozulmaktadır. Dalga şeklindeki bozulma, sinüsoidal biçimden sapma "harmonik distorsiyon" olarak ifade edilir (De La Rosa, 2006). Gerilim ve akım dalga biçimi distorsiyonunun varlığı genellikle üretilen frekansın tamsayı katları olan harmonik frekanslar cinsinden ifade edilir (Arrillaga, Smith, Watson ve Wood, 1997).

Daha kaliteli ve güvenli bir elektrik enerjisi için güç kalitesi kriterlerinin karşılanması gerekir. Harmoniklerin mümkün olduğunca azaltılması da bu kriterlerden biridir (Kocatepe, Uzunoğlu, Yumurtacı, Karakaş ve Arıkan, 2003).

1.1 Literatür Taraması

Harmonikler uzun senelerdir üzerinde araştırma yapılan, nasıl azaltılacağı hakkında çeşitli çalışmalara yol açmış bir konudur. Bu vesileyle çeşitli uygulama alanları da olmuştur. Örneğin, harmonikleri sönümlemek için yeni yaklaşım ve sistemler önerilmiştir. Şönt pasif ve seri aktif filtrelerin kombin olarak aynı

sistemde kullanılmaya başlanılması bunlardan biridir (Peng, Akagi ve Nabae, 1990).

Sinüsoidal durumda güç tanımları belliyken sinüsoidal olmayan durumda çeşitli görüşler ortaya atılmıştır. Bu konu üzerinde çeşitli bilim insanları çeşitli tanımlar ortaya koymuştur (Balcı ve Hocaoğlu, 2004). Ancak sinüsoidal olmayan durumda aktif güçte fikir birliği sağlanmışken reaktif güç ve distorsiyon gücü tanımlarında aynı görüş birliği sağlanamamıştır (Fernando, Claudio ve Santiago, 2011). Bu konu hakkında da halen çeşitli karşılaştırmalar yapılmaya devam edilmekte, tek fazlı ve üç fazlı durumda hangi görüşlerin daha uygulanabilir olduğu tartışılmaktadır (Coelho vd., 2018).

Harmonikli durumda farklı görüşlerden yola çıkılarak güç akışı analizleri yapılmıştır (Xia ve Heydt, 1982). Bunlar 34, 37 ve 123 baralı sistemlerde simüle edilip sonuçlar karşılaştırılmıştır (Arabsalmanabadi, Javadi ve Al-Haddad, 2017).

Dağıtık üretim kaynağı olan jeneratörler (DG'ler) akıllı dağıtım şebekesine erişim sağlar, harmonik akım enjeksiyonunu güç sistemine iletir. Burada enjekte edilen harmonik akımın dağılımı belirsizdir. Bunun için de olasılıklı harmonik güç akışı için nokta tahmini yöntemi kullanılarak harmonik akımın dağılımı bulunur (Yu ve Lin, 2016). Pasif güç filtreli dengesiz radyal dağıtım sistemleri için üç fazlı güç akışı için de ekstra bir yöntem geliştirilmiştir (Yang ve Le, 2016).

Yapılan araştırmalarda ve sunulan hipotezlerde aktif gücün kendi içinde çalışma gücü, yansıyan güç ve zararlı aktif güç olarak ayrıldığını savunan bir görüş bulunmaktadır (Czarnecki, 2011). Makalelerde sunulan yük üreten tek fazlı dirençli harmoniklerin güç özelliklerinin analizi, bu yüklerin ortak enerji sayaçları tarafından ölçülenden daha fazla enerji gerektirdiğini göstermektedir (Czarnecki ve Toups, 2013). Bunun yanında, çalışma aktif gücü ve yansıyan aktif güç kavramlarından yalnızca dengesiz lineer ve harmonik üreten yüklere sahip reaktif sistemlerde bahsedilebileceği belirtilmektedir (Czarnecki ve Toups, 2015).

Akımın fiziksel bileşenleri; üç faz bir nötr sinüsoidal olmayan gerilimli sistemde, üç fazlı dengesiz lineer yüklü sistemde, asimetrik ve simetrik sinüsoidal olmayan gerilimli hallerde, yarı periyodik gerilim ile akım sinyali verilen sistemlerde

incelenmiştir ve formüllerin sistem değişikliklerine göre nasıl genelleştirilebileceği gösterilmiştir (Czarnecki ve Haley, 2015; Czarnecki, 2015; Czarnecki ve Bhattarai, 2015).

Son olarak, harmonik kaynaklarından olan ark fırınları kullanılarak çeşitli uygulamalar yapılmıştır. Bu sistemlerde güç parametrelerine ve akımın fiziksel bileşenlerine nasıl ulaşılabilineceği gösterilmiştir (Czarnecki ve Bhattarai, 2016; Jagiela, Rak, Gala ve Kepinski, 2010). Hatta elektrikli araçlarda ve rüzgar türbinlerindeki toplam harmonik distorsiyonun azaltılması için de çalışmalar yapılmıştır (Misra ve Paudyal, 2015).

1.2 Tezin Amacı

Güç tanımları sinüsoidal ve sinüsoidal olmayan durumlarda farklılık göstermektedir. Bu konuda birçok yazar tarafından farklı görüşler öne sürülmüştür. Üç fazlı sistemlerde Akagi, Willems, Czarnecki gibi bilim insanları çalışma yaparken tek fazlı sistemlerde çalışma yapan isimler ise Emanuel, Budeanu, Fryze, Depenbrock ve yine Czarnecki olmuştur (Coelho, Lima, Junqueira, Pereira ve Medeiros, 2018; Emanuel, 2010). Bu tezin amacı ise harmonik bileşenlerin mevcut olması durumunda literatürde bugüne kadar verilmiş olan aktif güç, reaktif güç, distorsiyon gücü, görünen güç vb. güç tanımlarını ayrıntılı olarak incelemek, sayısal bir örnek ile bunları karşılaştırmak ve değerlendirmeler yapmaktır. Böylece yakın gelecekte elektrikli taşıtların, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha da yaygınlaşması nedeniyle daha da güncel sorun haline gelecek olan harmonikler ile ilgili güç tanımları için farkındalık oluşturulması hedeflenmektedir.

1.3 Hipotez

Bu çalışmanın çıkış noktası temelde harmonikli durumdaki güncel güç tanımlarının farklı yorumlarının Türkçe literatürde yer almayışıdır. Ayrıca hala literatürde bu konuda bir fikir birliğine sahip olunamamış olması, farklı yazarların bu yorumlarının karşılaştırılmasını gerektirmiştir. Buna göre; bu tanımlar incelenecek, değerlendirmeleri yapılacak, örnek bir devre kurularak ve MATLAB Simulink yardımıyla simülasyon yapılarak bu yöntemler karşılaştırılacaktır.

Böylece hangi durumlarda hangi tanımların kullanılması gerektiği, bilim insanlarınca literatürde verilen güç tanımlarının uygulanabilirliği değerlendirilecek ve farkları ortaya konulacaktır.

1.4 Tezin Bölümleri

Bu çalışmada harmonikli durumda literatürde farklı bilim insanlarınca verilmiş güç tanımları incelenmiştir. İlk bölümde konuya giriş yapılarak literatür taraması yapılmış ve konuyla ilgili çalışmalar özetlenmiştir.

İkinci bölümde harmonikler ile alakalı genel bir bilgi verilmiştir. Bu bölümde harmonik kaynaklarından, harmoniklerin etkilerinden ve harmonik standartlardan da bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde sinüsoidal durumda geçerli olan güç tanımları incelenmiştir.

Dördüncü bölümde sinüsoidal olmayan durumda literatürde verilen güç tanımları ve bunlar hakkındaki farklı yorumlar incelenmiştir. İncelenen bu yorumlar karşılaştırılmış, hangisinin hangi durumda daha efektif olduğu belirtilmiştir.

Beşinci bölümde verilen bu güç tanımları baz alınarak ve MATLAB Simulink programı kullanılarak sayısal uygulama ve simülasyon yapılmış, deneysel çalışmada harmonik analizörü ile ölçülen harmonik akım ve gerilim değerleri kullanılarak literatürde verilen güç tanımlarına göre güç değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar irdelenmiş ve yorumlanmıştır.

Tezin altıncı ve son bölümünde araştırma ve simülasyon sonuçları irdelenip karşılaştırılmış, yorumlanmış ve gelecek çalışmalar için öneriler yapılmıştır.

2
Harmonikler

Bu bölümde elektrik tesislerinde harmonikler hakkında genel bilgi verilip harmonik kaynakları, harmoniklerin etki ve standartları gibi konular açıklanacaktır.

2.1 Harmoniklerin Tanımı, İlgili Kavramlar ve İndisler

Bilindiği üzere, ideal bir şebekede gerilim ve akımın sinüsoidal olması beklenir. Fakat bu şartların oluşması ark fırınları, deşarj lambaları gibi akımları sinüsoidal olmayan yükler olduğundan zordur. Bunu zorlaştıran gerilim ve akım dalga şekillerindeki sapmalar ve bozulmalara harmonik distorsiyon adı verilir. Sinüsoidal özelliğini kaybeden akım veya gerilimin dalga şekli Fourier Serisi ile 50 Hz'in katlarındaki dalgaların toplamı olarak gösterilir (Kocatepe, Umurkan, Attar, Yumurtacı, Uzunoğlu, Karakaş, Arıkan ve Baysal, 2006).

Enerji endüstrisinde harmonik distorsiyon tanımı yeni bir kavram değildir. Günümüzdeki güç elektroniği devreleri, anahtarlamalı güç kaynakları vb. lineer olmadığı için harmonik üreten yüklerin geliştirilerek sisteme girmesinden önceki yıllarda da eski elektrik şebekelerinde harmonik distorsiyonun başlıca sebepleri; doyma bölgesinde çalışan transformatörler, endüstriyel ark fırınları ve büyük kaynak makineleri gibi diğer ark kaynaklarıydı. Elektrik makineleri üzerindeki harmonik distorsiyonun neden olduğu en önemli sorun telefon girişimi ve reaktif güç kondansatörleri üzerindeki yüksek gerilimden kaynaklanan arıza riskinin artmasıydı (De La Rosa, 2006).

Geçmişte harmonikler, güç ekipmanlarının geleneksel tasarımı ve dağıtım trafolarında üçgen-yıldız noktası topraklı (Dyn) sargı bağlantılarının yaygın kullanımı nedeniyle daha az problem ortaya çıkarmıştır (De La Rosa, 2015).

Günümüzde endüstrideki nonlineer (doğrusal olmayan) yüklerin kullanımının artması ile şebekelerde harmonik distorsiyon seviyesi yükselişe geçmiştir. Genelde en çok kullanılan nonlineer cihazlar çelik, kağıt, kumaş ve tekstil endüstrilerinde yaygın olarak kullanılan statik güç konverterleridir. Diğer uygulamalar ise çok amaçlı motor kontrolü, elektrikli raylı ulaşım sistemleri ve elektrikli ev aletleridir. 2000 yılına gelindiğinde, elektronik yüklerin ABD (Amerika Birleşik Devletleri)'deki elektrik enerjisi talebinin yaklaşık yarısını oluşturduğu ve elektronik yükteki büyümenin çoğunun konut sektörünü içerdiği tahmin ediliyordu (De La Rosa, 2006).

Dağıtım şebekelerinde dalga şekli bozulma seviyelerini daha da yükselten bir durum, endüstriyel tesislerde güç faktörü düzeltmesi için kullanılan kapasitör bankalarının ve dağıtım hatları boyunca gerilim profilinin iyileştirilmesi için güç elektroniği sistemlerinin uygulanmasıdır. Bunun sonucu olarak reaktif güç kondansatörlerinin kapasitesi ile sistemin eşdeğer endüktansı arasında bir paralel R-C (direnç-kapasitör) devresi oluşmakta, bu R-C devresinin rezonans frekansı eğer sistemde mevcut olan harmonik frekanslarından herhangi birine eşit ise oluşan paralel rezonans devresi sebebiyle L (bobin) ve C (kapasitör) elemanlarından çok yüksek akımlar geçmektedir. Bu durum, yalıtımı zorlayabilecek büyük salınımlı akımları ve gerilimleri tetiklemekte, elemanların hasar görmesine neden olmaktadır. Sistemde harmonikler sebebiyle rezonans olaylarının oluşması durumunda, sistemde çok sayıda harmonik üreten kaynağın bulunduğu, çok sayıda hassas elektronik cihazın bulunduğu sistemlerde harmonik distorsiyon seviyesini tespit etmek ve buna çözüm üretmek zorlaşmaktadır (De La Rosa, 2015).

Şüphesiz, planlamadan elektrik ve endüstriyel tesislerin tasarım aşamalarına kadar olan harmonik çalışmaların, bağlantıları ve ekipmanı kabul edilebilir çalışma koşullarında tutmanın ve doğrusal olmayan yüklerin kurulumu veya eklenmesiyle ilgili potansiyel problemleri tahmin etmenin etkili bir yolu olduğu kanıtlanacaktır (De La Rosa, 2015).

2.1.1 Harmonik Teorisinin Temelleri

Harmonikler terimi, bir telin ya da bir hava sütununun titreşimi veya baz frekansının katı olan bir frekansta ilişkili olan akustik alandan gelir. Bir AC güç sistemindeki harmonik bir bileşen, sistemin temel frekansının tam katına eşit bir frekansa sahip bir periyodik dalga formunun sinüsoidal bileşeni olarak tanımlanır (De La Rosa, 2015).

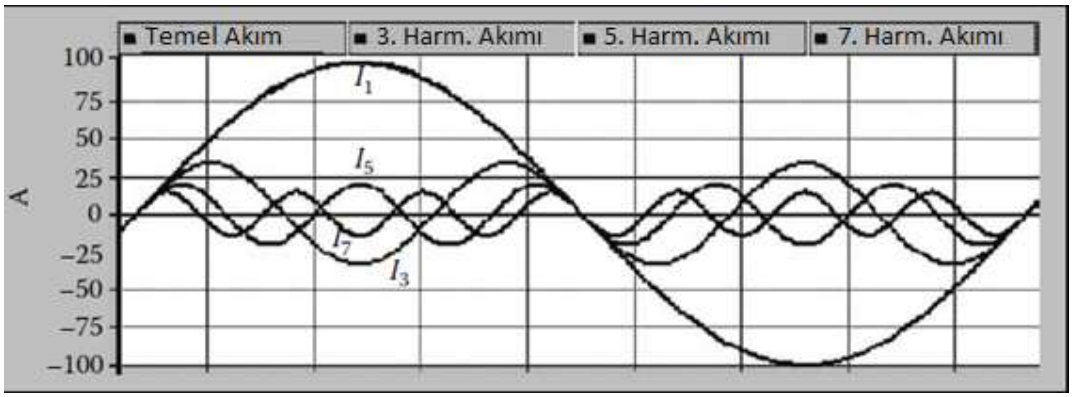
$$f_h = (\mathrm{h}) * (temel\ frekans) \tag{2.1}$$

(2.1)'de h bir tam sayıdır. Örneğin beşinci harmonik bize sırasıyla 60 ve 50 Hz'lik sistemlerde (2.2) ve (2.3)'deki gibi harmonik bileşenler verecektir:

$$f_h = (5) * (60) = 300\ Hz \tag{2.2}$$

$$f_h = (5) * (50) = 250\ Hz \tag{2.3}$$

Şekil 2.1, per unit (birim değer) olarak alınabilecek, yaklaşık 100 A değerinde tepe değeri olan ideal 60 Hz dalga şeklini göstermektedir. Aynı şekilde, genliklerin (1/7), (1/5) ve (1/3) per unit olarak dalga şekillerini ve temel frekansın sırasıyla yedi, beş ve üç katı frekanslarını göstermektedir. Genellikle harmonik sıra ile ters bir oranı takiben azalan genliğin harmonik bileşenlerini gösteren bu davranış güç sistemlerinde tipiktir (De La Rosa, 2006).



Şekil 2.1 Sinüsoidal dalga formu ve bazı harmonikler (De La Rosa, 2006)

$$i_5 = i_{m_5}\sin(5\omega t - \delta_5) \tag{2.4}$$

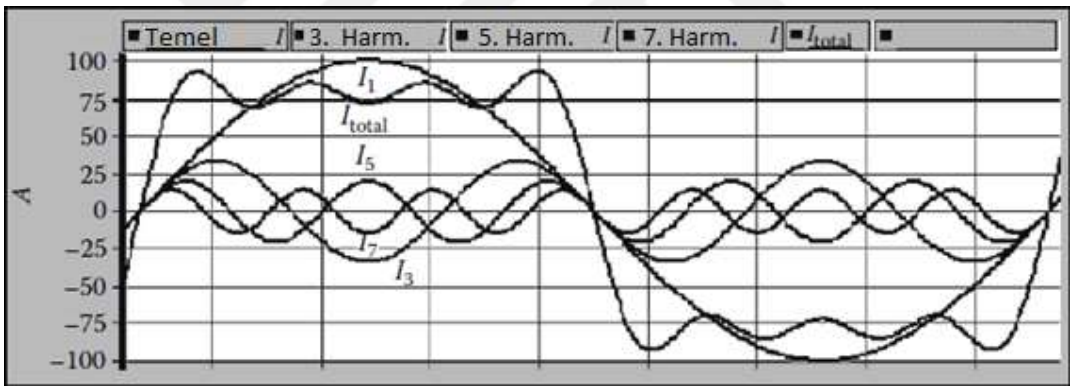
$$i_7 = i_{m_7}\sin(7\omega t - \delta_7) \tag{2.5}$$

(2.4) ve (2.5)'deki i_{mh} değeri, h harmonik akımı değerindeki tepe rms değeridir ve Şekil 2.2, Şekil 2.1'deki temel frekanstaki akımın üzerine yerleştirilen I_{total} (I_{toplam})ile aynı harmonik dalga şekillerini göstermektedir. Yalnızca ilk üç harmonik bileşeni ele alırsak, şekil altı darbeli bir dönüştürücünün bağlantı uçlarındaki çarpık bir akım dalga şeklinin nasıl olacağını gösterir. Tüm ek harmonikler daha fazla dalga şekli bozulmasına yol açacaktır (De La Rosa, 2006).

Ortaya çıkan çarpık dalga formu (2.6)'daki gibi ifade edilebilir:

$$i_{toplam} = i_{m_1} \sin wt + i_{m_3} \sin(3wt - \delta_3) + i_{m_5} \sin(5wt - \delta_5) + i_{m_7} \sin(7wt - \delta_7) \quad (2.6)$$

Kısacası, mükemmel sinüsoidal dalga formlarının bir toplamı çarpık bir dalga biçimine neden olabilir. Diğer taraftan, çarpıtılmış bir dalga biçimi, temel frekans dalga formunun farklı harmonik frekans ve genliklerin diğer dalga şekilleriyle üst üste gelmesi olarak temsil edilebilir (De La Rosa, 2015).



Şekil 2.2 Üçüncü, beşinci ve yedinci harmoniklerle çarpılmış sinüsoidal dalga formu (De La Rosa, 2015)

2.1.2 Harmonik Terimler

Bu bölümde harmoniklerle ilgili olan güç kalitesi indisleri hakkında bilgi verilecektir.

2.1.2.1 Toplam Harmonik Distorsiyonu (THD)

THD şeklinde kısaltılan toplam harmonik distorsiyonu (bozulması), iletim ve dağıtım sistemlerinde güç kalitesi sorunlarını tanımlamak için yaygın olarak kullanılan önemli bir endekstir. Bu, her bir harmonik bileşenin sinyal üzerindeki

katkısını göz önünde bulundurur. THD, sırasıyla, gerilim ve akım sinyalleri için (2.7) ve (2.8)'deki gibi tanımlanır:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \tag{2.7}$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h\neq 1}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \tag{2.8}$$

(2.7) ve (2.8), sadece temel frekansı dikkate alan harmonikler ve sinyaller dahil olmak üzere, sinyallerin rms değerleri arasındaki oranın, toplam harmonik bozulmayı tanımladığı anlamına gelir. Başka bir deyişle THD, tüm harmoniklerin bileşkesinin temel frekanslı bileşene göre büyüklüğü hakkında fikir vermektedir (Kocatepe vd., 2003).

2.1.2.2 Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Harmonik bozulma (distorsiyon), IEEE 519'da önerildiği gibi, genellikle 15 ila 30 dakika gibi maksimum müşteri talebini yansıtabilen bir süre boyunca ortak kuplaj noktasında -genellikle müşterinin ölçüm noktasında- izlendiğinde anlamlıdır. Anma akımına göre büyük bir talep akımına sahip zayıf kaynaklar, daha büyük dalga şekli bozulmalarını gösterme eğiliminde olacaktır. Tersine, düşük talep akımlarında çalışması için karakterize edilen kaynaklar azalan dalga şekli bozulmasını gösterir. Toplam talep distorsiyonu, (2.9)'da gösterildiği üzere izleme periyodu boyunca talep akımına (I_L) dayalıdır. Talep akımı (I_L) ölçüm periyodu boyunca çekilen temel bileşen akımının en yüksek değeridir. TTD kısaca tüm harmonik akımlarının bileşkesinin ölçüm periyodu boyunca tespit edilen en yüksek temel bileşen akımı olan talep akımına göre büyüklüğü hakkında fikir verir. (Dugan, McGranaghan, Santoso ve Beaty, 2004; Akmaz, 2012).

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \tag{2.9}$$

2.1.2.3 Tekil Harmonik Distorsiyonu (HD)

Gerilim ve akımın harmonik bileşeninin temel bileşene oranını bulmak için bu büyüklük tanımlanmıştır. n. harmonikteki gerilim ve akım için HD sırasıyla (2.10) ve (2.11)'deki şekilde tanımlanır (Kocatepe vd., 2006).

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \tag{2.10}$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \tag{2.11}$$

2.1.2.4 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Bu indis, IEEE 519'da elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin ürettiği ses devresi girişimi ölçüsü olarak bulunur. Bu nedenle bu değer insan kulağının farklı frekanslardan gelen gürültülere karşı duyarlılığına bağlıdır. w_h ağırlık faktörü olmak üzere TEF (2.12)'deki şekilde gösterilir (Kocatepe vd., 2003).

$$TEF = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} w_h^2 I_h^2}}{I_{rms}} \tag{2.12}$$

2.1.2.5 C Mesaj İndeksi

Bu indeks iletişim etkileşimi ile ilgilidir. (2.13)'teki gibi gösterilen indiste c_h, ağırlık faktörü w_h'nin beş kere harmonik sıra h'ye bölünmüş halidir (De La Rosa, 2015).

$$C_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} c_h^2 I_h^2}}{I_{rms}} \tag{2.13}$$

2.1.2.6 I * T ve V * T Çarpımları

Bu endeksler ses devrelerinde başka bir harmonik girişim ölçüsü olarak kullanılır. Toplam dalga şekli distorsiyonu ile yakın ilişkilerinden dolayı, I * T ve V * T de şönt kapasitör zorlanması ve gerilim bozulmalarının göstergesidir, sırasıyla (2.14) ve (2.15)'deki gibi gösterilirler (De La Rosa, 2006).

$$I * T = TEF * I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} w_h^2 I_h^2} \tag{2.14}$$

$$V * T = TEF * V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} w_h^2 V_h^2} \tag{2.15}$$

2.1.2.7 Transformatör K Faktörü

Bu endeks, Ulusal Elektrik Kodunun (NEC) ve Underwriters Laboratories'in (UL), endüstrideki dağıtım ve ve özel uygulama transformatörlerinin harmonik ortamlarda belirtilen termal sınırlar içinde çalışabilme kabiliyeti ile ilgili gerekliliklerini takip etmeyi amaçlayan faydalı bir endekstir. Büyük ölçüde üçüncü harmonik akımlar tarafından üretilen ek akıya izin vermek için geleneksel tasarımlardan daha düşük akı yoğunluklarında çalışmak üzere tasarlanmış transformatörler vardır. Ayrıca bunlarda çekirdek içindeki girdap veya dolaşımdaki akım kayıplarını azaltmak için, şerit sargıları, araya giren sargılar ve transpozisyon iletkenleri kullanılır. K faktörünü hesaplamak için kullanılan formül (IEEE Modelleme ve Simülasyonlar Öğreticisi'nde gösterildiği gibi) (2.16)'da verilmiştir (Kocatepe vd., 2006).

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (\frac{I_h}{I_1})^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (\frac{I_h}{I_1})^2} = \sum_{h=1}^{\infty} [I_h(p.u.)]^2 (h^2) \tag{2.16}$$

2.1.2.8 Deplasman (Distorsiyon) ve Toplam Güç Faktörü

Artan bir harmonik distorsiyon ortamı ile, temel frekans gerilimi ve akım arasındaki açının kosinüsü olarak güç faktörünün geleneksel tanımı, farklı frekanslardaki bileşenlerin katkısını oluşturan sinyalin rms değerlerini dikkate almaya başlamıştır. Bu nedenle, deplasman güç faktörü (DPF) güç frekans faktörünü karakterize etmeye devam ederken, distorsiyon (veya gerçek) güç faktörü (GPF), rms sinyal varyasyonlarını izleyen indeks olarak ortaya çıkar. Toplam güç faktörü (PF_{toplam}) böylece distorsiyon ve gerçek güç faktörlerinin çarpımı haline gelir (De La Rosa, 2006).

$$PF_{toplam} = DPF * GPF = \cos(\theta 1 - \delta 1) * \frac{Ptoplam}{Stoplam}$$

$$= \left(\frac{P_1}{V_1 I_1}\right) \left[\frac{\sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (V_h)^2} \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2}}\right] = \left(\frac{P_1}{V_1 I_1}\right) \sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{THD_1}{100}\right)^2}} \tag{2.17}$$

(2.17)'de görüldüğü gibi P_1, V_1 ile I_1 temel frekans nicelikleri ve V_h, I_h, θ_h ile δ_h ise frekansla ilgili olup sistem güç frekansının h katıdır.

Gerçek güç faktörü her zaman bütünden daha azdır, bu da (2.18)'deki durumu ortaya çıkarır (Kocatepe vd., 2003).

$$PF_{toplam} \leq DPF \tag{2.18}$$

Denklem (2.1)7'de deplasman faktörünün P_{toplam}/S_{toplam} veya $P_1/(V_1I_1)$ arasındaki oran olduğunun da unutulmaması gerekir.

2.1.2.9 Tepe (Crest), Şekil (Form), Dengesizlik ve Kırpışma (Flicker) Faktörü

Crest (Tepe) faktörü, şekil (form) faktörü, dengesizlik faktörü ve flicker (kırpışma) faktörü sırasıyla, yeterli gerilim regülasyonunu sağlama kabiliyetine göre dielektriksel zorlanmayı, sinüsoidal bir dalganın bozulma ölçütünü, üç fazlı devre dengesini ve kaynak sertliğini değerlendirmek için tasarlanmıştır. Bunlar da sırasıyla (2.19), (2.20), (2.21) ve (2.22)'de gösterilmiştir (De La Rosa, 2006; Kocatepe vd., 2006).

$$Tepe\ (Crest)\ Faktörü = \frac{V_{tepe}}{V_{rms}} \tag{2.19}$$

$$Şekil\ Faktörü = \frac{V_{rms}}{V_{ort}} \tag{2.20}$$

$$Dengesizlik\ Faktörü = \frac{|V_-|}{|V_+|} \tag{2.21}$$

$$Kırpışma\ (Flicker)\ Faktörü = \frac{\Delta V}{|V|} \tag{2.22}$$

2.2 Harmonik Kaynaklarının İncelenmesi

Bu bölümde lineer (doğrusal) ve lineer olmayan (doğrusal olmayan) yüklerden bahsedilip harmonik kaynakları verilecektir.

2.2.1 Lineer Yükler

Doğrusal yükler, gerilim ve akım sinyallerinin birbirini takip ettiği, tıpkı sabit bir direnç boyunca gelişen gerilim düşümü gibi, içinden geçen akımın doğrudan fonksiyonu olarak değişen yüklerdir. Bu ilişki Ohm Kanunu olarak bilinir ve değişken bir gerilim kaynağından beslenen bir dirençle akımın gerilim ve direnç

arasındaki ilişkiye eşit olduğunu belirtir, bu da denklem (2.23)'te şu şekilde ifade edilir (De La Rosa, 2015):

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} \tag{2.23}$$

Bu nedenle, lineer yüklere sahip elektrik devrelerinde gerilim ve akım dalga şekilleri benzer. Bundan dolayı kaynak temiz bir açık devre gerilimi ise, mevcut dalga şekli bozulmayacak şekilde aynı görünecektir. Böylece doğrusal yüklere sahip devreler gerilim ve akım dalga şekillerini hesaplamayı kolaylaştırır. Isıtma elemanları veya akkor lambalar gibi dirençli doğrusal yükler tarafından yaratılan ısı miktarları bile, akımın karesiyle orantılı oldukları için kolayca belirlenebilir. Alternatif olarak ilgili güç, iki büyüklük olarak gerilim ve akımın çarpımı olarak da belirlenebilir (De La Rosa, 2006).

Elektrikli motor tahrik fanları, su pompaları, yağ pompaları, vinçler, asansörler vb. gibi diğer lineer yükler, değişken frekanslı sürücüler gibi güç dönüştürme cihazları veya akımın düzeltilmesi/ters çevrilmesi, demir ve bakırın fiziksel özelliklerine bağlı manyetik çekirdek kayıplarını içeren diğer herhangi bir dalga şekli ile beslenmemektedir. Doygunluk bölgesinde ferromanyetik çekirdek cihazı çalıştırılırsa, örneğin ekipmanın nominal değerlerin üzerinde çalıştırıldığı durumlarda erişilebilen bir koşul olursa gerilim ve akım bozulması oluşabilir (De La Rosa, 2015).

Elektrik şirketleri ve sanayi kuruluşları tarafından güç faktörü düzeltmesi için kullanılan kondansatör bankları bir başka lineer yük tipidir. Tablo 2.1'de doğrusal yükler gösterilmiştir.

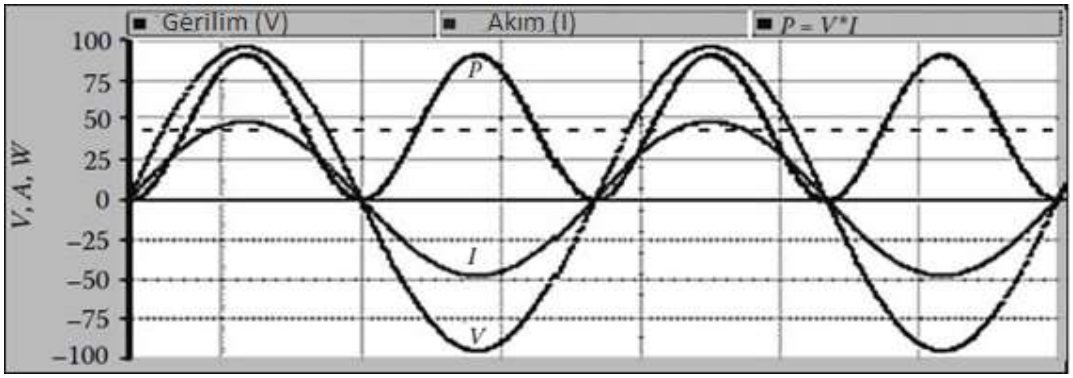
Doğrusal yüklere sahip bir devrede gerilim ve akım dalga şekli, iki dalga şeklini birbiriyle aynı faz halinde gösterir. Gerilim ve akım içeren indüktörlerde gerilim akımdan öndedir; güç faktörü kapasitörlerini içeren devrelerde ise akım gerilimden öndedir. Bu nedenle, her iki durumda da iki dalga formu birbirinden farklı fazda olacaktır. Ancak, hiçbir dalga şeklinde bozulma gerçekleşmeyecektir (De La Rosa, 2006).

Tablo 2.1 Örnek lineer yükler (De La Rosa, 2006)

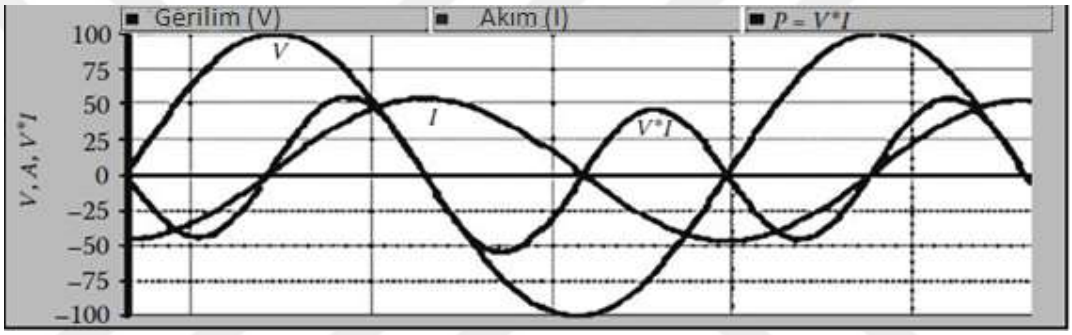
Rezistif Elemanlar	Endüktif Elemanlar	Kapasitif Elemanlar
• Akkor aydınlatma • Elektrikli ısıtıcılar	• İndüksiyon motorları • Akım sınırlayıcı reaktörler • İndüksiyon jeneratörleri • Harmonikleri zayıflatmak için kullanılan sönümleme reaktörleri • Harmonik filtrelerdeki ayar reaktörleri	• Güç faktörü düzeltme için kullanılan kapasitör bankaları • Yeraltı kabloları • İzoleli kablolar • Harmonik filtrelerde kullanılan kondansatörler

Şekil 2.3, tamamen dirençli bir devreyi besleyen bir AC kaynağından oluşan bir lineer devrede gerilim, akım ve güç arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Anlık güç P = V * I hiçbir zaman negatif olamaz, çünkü her iki dalga şekli de aynı fazdadır ve sonuç da her zaman pozitiftir. Aynı sonuç, güç, akımın karesi ile direncin çarpımı olarak elde edildiğinde de bulunur (De La Rosa, 2015).

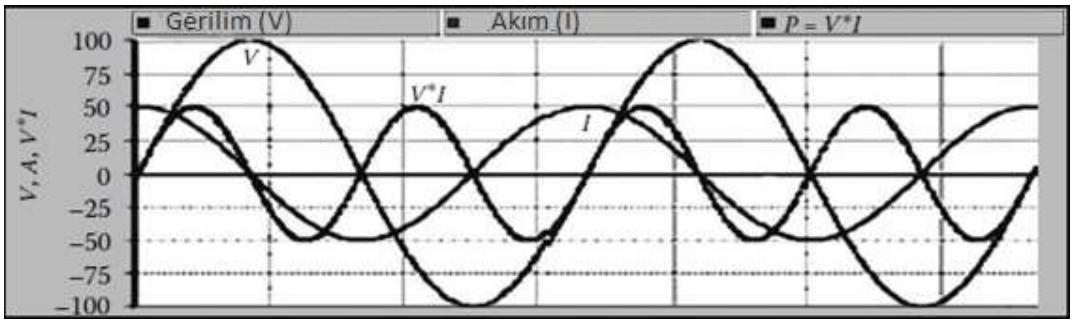
Şekil 2.4, akımın (I) bir endüktif yüke karşılık gelecek olan gerilimden (V) geciktiği durumda, aynı parametreler arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil 2.5 ise kapasitif yük durumunda olduğundan akımın gerilimden önden olduğu durumu göstermektedir. Negatif ve pozitif yer değiştirme güç faktörleri sırasıyla Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 ile ilgilidir. Bu durumlarda ise V * I sonucunun pozitif ve negatif değerlere sahip olduğunu unutmamak gerekir. Pozitif değerler akımın yük tarafından emilimine, negatif değerler ise akımın kaynağa doğru akışına karşılık gelir (De La Rosa, 2006).



Şekil 2.3 Tamamen dirençli bir devrede gerilim, akım ve güç değerleri arasındaki ilişki (De La Rosa, 2015)



Şekil 2.4 Akımın gerilimden geride olduğu (endüktif) devrelerdeki gerilim, akım ve bunların çarpımı arasındaki ilişki (De La Rosa, 2015)



Şekil 2.5 Akımın gerilimden ileride olduğu (kapasitif) devrelerdeki gerilim, akım ve bunların çarpımı arasındaki ilişki (De La Rosa, 2015)

Her durumda, tam olarak dirençli bir yükü içeren Şekil 2.3'te olduğu gibi, gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüsoidal yapısı korunur. Buradan V * I sonucunun eşit oranda pozitif ve negatif çevrimlere sahip olduğu gözlemlenebilir; V ve I aynı

polaritedeyken sonuç pozitif, farklı polaritedeyken ise negatif olacaktır (De La Rosa, 2015).

2.2.2 Lineer Olmayan Yükler

Doğrusal olmayan yükler, mevcut dalga şeklinin uygulanan gerilim dalga şekline bir dizi nedenden dolayı benzemediği yüklerdir. Buna örnek olarak yük akımını sadece güç frekansı periyodu sırasında gerçekleştiren elektronik anahtarların kullanımı verilebilir. Bu nedenle, doğrusal olmayan yükleri Ohm yasasının V ve I arasındaki ilişkiyi tanımlayamadıkları bir kavram olarak düşünebiliriz. Güç sistemlerinde en yaygın nonlineer yükler arasında, güç dönüştürücüler, güç kaynakları, kesintisiz güç kaynağı (UPS) birimleri gibi tüm düzeltme cihazları ve elektrik fırınları ile flüoresan lambalar gibi ark kaynakları bulunmaktadır. Tablo 2.2, bu kategorideki çeşitli cihazların daha kapsamlı bir listesini sunmaktadır. Doğrusal olmayan yükler, gerilim dalga şekli bozulması, transformatörlerde ve diğer güç cihazlarında aşırı ısınma, ekipman-nötr bağlantı uçlarında aşırı akım, telefon enterferansı ve mikroişlemci kontrol problemleri gibi bazı sorunlara neden olur (De La Rosa, 2006).

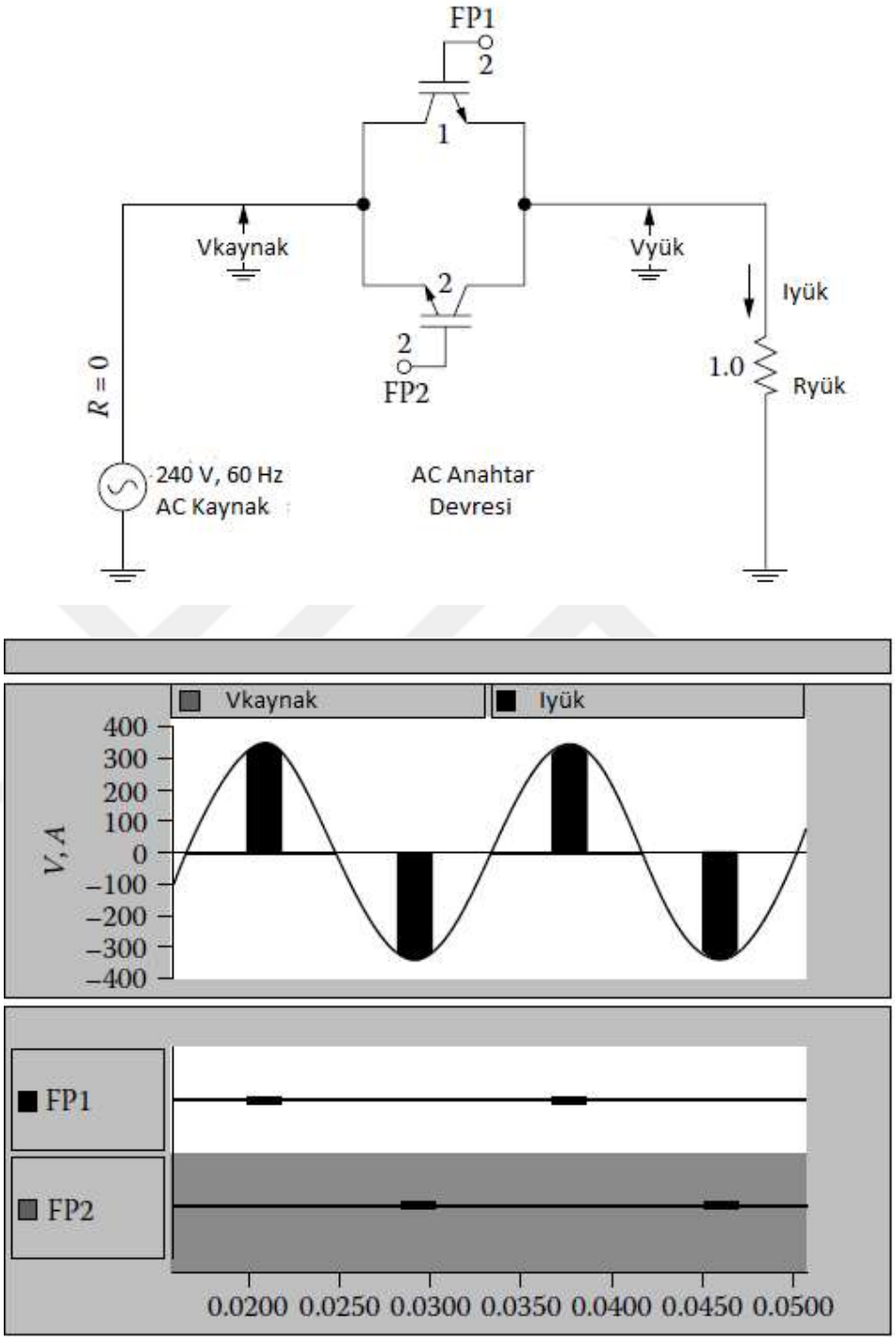
Tablo 2.2 Örnek lineer olmayan yükler (De La Rosa, 2006)

Güç Elektroniği	**Ark Cihazları**
• Güç dönüştürücüleri • Değişken frekanslı sürücüler • DC motor kontrol cihazları • Frekans dönüştürücüler • Vinçler • Asansörler • Çelik fabrikaları • Enerji kaynakları • UPS • Akü şarj cihazları • İnverterler	• Floresan aydınlatma • Ark fırınları • Kaynak makineleri

Şekil 2.6, bir ortak güç elektroniği katı hal cihazı olan bir yalıtılmış çift kutuplu transistörün (IGBT) anahtarlama eylemi sırasındaki gerilim ve akım dalga biçimlerini göstermektedir. Bu, darbenin FP1 ve FT2 (Şekil 2.6'da gösterildiği gibi) açık olduğu zaman haricinde, sinüsoidal kaynak gerilimi dalga formunu takip etmeyen nonlineer bir yükün performansını açıklamanın en basit yoludur. Bazı motor hız kontrol cihazları, TV setleri ve VCR'lar gibi ev aletleri ile çeşitli diğer konut ve ticari elektronik ekipmanlar bu tür gerilim kontrolünü kullanır. Aynı işlem üç fazlı teçhizatta gerçekleştiğinde ve yük miktarı önemli olduğunda, gerilim sinyalinde de buna karşılık gelen bir bozulma meydana gelebilir (De La Rosa, 2015).

Güç transformatörleri gibi doğrusal yükler bile doyum koşullarında lineer olmayan şekilde hareket edebilir. Bunun anlamı, bazı durumlarda, manyetik akı şiddetinin (H) büyümeye devam etmesiyle, transformatördeki manyetik akı yoğunluğunun (B) artmasıdır. Bu, transformatörün mıknatıslama eğrisinin doygunluk dizininin ötesinde meydana gelir. Transformatörün H pozitif ve negatif değerlerinin değişen döngüleri altındaki davranışı, Şekil 2.7'de gösterilmiştir ve histerezis eğrisi olarak bilinir (De La Rosa, 2006).

Tabii ki, bu nonlineer etki doyma koşulu hüküm sürdüğü sürece devam edecektir. Örneğin; birkaç saat sürebilen düşük yük koşulları altında transformatör yükseltilmiş bir gerilim ile beslenebilir, ancak büyük motorların çalıştırılması sırasında aşırı yüklenen bir trafo durumu veya birkaç saniye süren endüstriyel ortamlarda yüksek atalet yükleri sıklıkla gözlemlenebilir. Aynı durum pratikte diğer manyetik çekirdek cihazlarla da ortaya çıkabilir (De La Rosa, 2015).



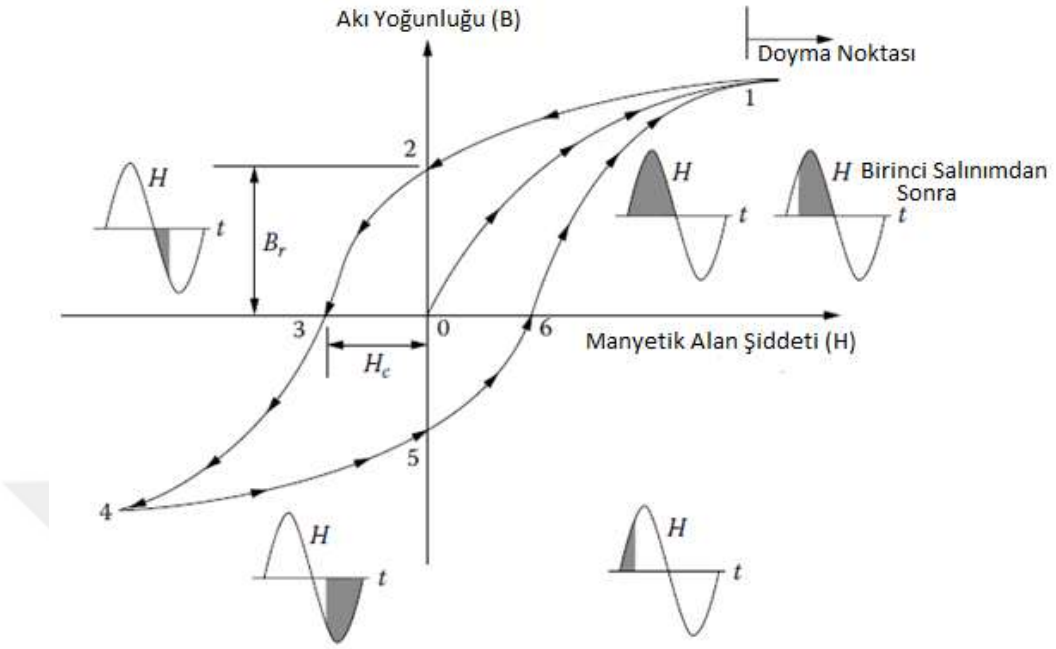
Şekil 2.6 Tipik lineer olmayan güç kaynağındaki gerilim ve akım arasındaki ilişki (De La Rosa, 2015)

Şekil 2.7'de, transformatörün transformatör mıknatıslanma eğrisi (eğri 0-1), manyetik alan şiddeti H'nin yükselmesiyle sıfır noktası H'den başlar ve manyetik akının düz bir davranışı gösterdiği tepe noktası 1'e ulaşır. Başka bir deyişle, B'de küçük bir artış olurken H'de büyük bir artış olur. Sonuç olarak, akım bozulmaya başlar ve böylece gerilim dalga formunda da harmonik bileşenleri gösterir. Nokta 1'den nokta 2'ye kadar, B-H karakteristiğinin farklı bir yol izlediğine dikkat edilirse manyetik alan şiddeti sıfıra düştüğünde, kalıcı mıknatıslanma ya da kalıntısı olarak adlandırılan bir arta kalan akı yoğunluğunun transformatör çekirdeğinde bırakıldığı görülür. Bu sadece elektrik alan şiddeti tersine döndüğünde geçersiz olur ve sözde manyetik alanı sıfırlayıcı kuvvet H_c'ye ulaşır. Nokta 4, negatif çevrim manyetik alan şiddeti zirvesine karşılık gelir. H, birinci döngünün sonunda sıfıra döndüğünde, B-H karakteristiği 5. noktada son bulur. Buradan, H noktası, nokta 1'e geri dönmek için tepe pozitif değerine ulaştığında, tam bir histerezis döngüsü tamamlanacaktır (De La Rosa, 2006).

Histerezis eğrisi tarafından kapsanan alan, transformatör nüvesi kayıpları ile orantılıdır. Kayıpları en aza indirmek için küçük bir zorlayıcı kuvvet sunan trafo çekirdeklerinin gerekli olduğuna dikkat etmek önemli bir husustur (De La Rosa, 2015).

Güç transformatörlerinin normal çalışmasının doyma bölgesinin altında olması gerektiği göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte, transformatör nominal gücünün üzerinde (yoğun talep saatlerinde) veya nominal geriliminin üzerinde çalıştırıldığında (özellikle güç faktörü kapasitör bankaları hafif yük koşullarında hatta bağlı kalıyorsa), transformatörler doyma altında çalışmaya eğilimlidir (De La Rosa, 2006).

Pratik olarak, tüm transformatörler enerjilendirme sırasında doyma bölgesine ulaşır ve büyük ani akımlar (mıknatıslanma akımları) oluşturur. Yine de bu sadece birkaç döngü süren bir durumdur. Güç transformatörünün doyma bölgesinde çalışabileceği diğer bir durum, dengesiz yük koşulları altındadır. Bu durumda fazlardan biri diğer fazlardan farklı bir akım taşır veya üç fazın hepsi birbirinden farklı akımlar taşır (De La Rosa, 2015).



Şekil 2.7 B=f(H) Transformatör histerezis karakteristiği (De La Rosa, 2006)

2.2.3 Harmonik Kaynakları

Bahsedilen kaynaklardan doğrusal (lineer) olmayanlar harmonik üreten kaynaklardır. Bunlar yeniden sıralanırsa; ark fırınları, transformatörler, güç elektroniği devreleri, generatörler, kompakt floresan lambalar, gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, fotovoltaik sistemler, bilgisayarlar, elektronik balastlar, kesintisiz güç kaynakları, kaynak makineleri, anahtarlamalı güç kaynakları, statik VAr kompanzatörleri, döner rotorlu makineler, değişken frekanslı motor sürücüleri şeklinde bir liste oluşturulabilir (Kocatepe vd., 2006; Akmaz, 2012; Şenyurt, 2005; Dugan vd., 2004).

2.3 Harmoniklerin Etkileri

Bir sistemde harmoniklerin olması o sistemin çalışmayacağı anlamına gelmeyecektir (Şenyurt, 2005). Ama haliyle akım ve gerilimin dalga şekillerinin bozulması sistemlerde birtakım problemleri de beraberinde getirmektedir.

Harmoniklerin etkilerinin bilincinde olunması hem enerji kalitesi hem de enerji ekonomisi açısından büyük fayda sağlayacaktır (Akmaz, 2012).

Harmonikler sistemde ek kayıplar oluşturur ve sistemdeki gerilim düşümünü artırır. Hem şebeke hem de generatör geriliminin dalga şeklini bozarak sistemde sıkıntılara yol açar. Kondansatörleri aşırı akıma maruz bırakarak ömürlerini kısaltır. Senkron ve asenkron motorlarda ısınma ve çalışırken fazla ses çıkarma problemlerine yol açar. Aynı zamanda koruma ve ölçmede verimi azaltır, doğru sonuçlar almayı imkansızlaştırır. Rezonansa sebep olup güç sistem elemanlarının üzerinden aşırı akım geçmesine veya aşırı gerilime maruz kalmalarına sebep olur (Kocatepe vd., 2006).

Harmonikler güç üretimi, iletimi ve dağıtımında ayrı ayrı verimi düşürür. Elektrikli cihazların ömrünü azaltır. Mikroişlemcilerin hatalı çalışmasına yol açar. Yalıtım malzemelerini zorlayarak onlara hasar verir ya da delinmesine neden olur. İletişim araçlarında parazit oluşturur. Ekranlarda titreşim meydana getirir (Şenyurt, 2005).

Frekans yüzünden iletken üzerinden geçen akımın homojen olarak dağılmaması durumundan dolayı deri etkisi adı verilen iletken direncinin değişmesi durumu söz konusu olur. Bunun da sebebi harmoniklerdir. Deri etkisi, iletkenin direncini artırır. Aynı şekilde, değerleri frekansa bağlı olan endüktif ve kapasitif reaktansların değerleri de harmoniklere bağlı olarak etkilenecektir. Harmonik mertebesi arttıkça frekans değeri artacağından dolayı endüktif reaktans artarken kapasitif reaktans azalacaktır (Kocaepe vd., 2006).

Güç faktörü düzeltme yöntemlerinde sıkça kullanılan kondansatörlerin ömürleri harmonikler yüzünden kısalmaktadır. Bunun sebebi de aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik kayıplarındaki artıştan dolayı aşırı ısınmadır (Şenyurt, 2005). Kondansatörlerde sigorta atmaları görülüyorsa harmoniklerin varlığından söz edilebilir (Dugan vd., 2004).

Transformatörlerin yük akımları üzerindeki harmonik bileşenler, ısınmalara yol açar. Bu da harmonikli akıma ve gerilime maruz kalan transformatörlerin

ömrünün azalacağı anlamına gelir. Bunun için özel transformatörler geliştirilmiş ve kullanılmaya başlanmıştır (Akmaz, 2012).

Fuko ve histeresiz kayıpları frekans ve gerilim ile doğru orantılı olarak artarlar. Bu yüzden harmonik mertebesi arttıkça bu kayıplar da artacaktır. Demir ve bakır kayıpları arttıkça makineler aşırı ısınır ve ömürleri kısalır (Kocatepe vd., 2006).

Akımdaki harmonik bileşenler, kesici ve sigortaların işerini yapamamasına sebep olabilir. Zamanında kesme yapamayan kesiciler, uzun vadede sistemlerde sorun yaratabilirler (Şenyurt, 2005).

Harmonikler, aydınlatma lambaları üzerinde de kötü etkilere sebep olur. Lambalar daha gürültülü çalışır, daha fazla ısınır ve ömürleri çabuk kısalır (Şenyurt, 2005).

Güç elektroniği elemanları hassas elemanlardır. Bundandır ki harmoniklerden fazla etkilenirler. Ani bir dalga değişikliği, tristörlerin tetiklenmesinde gecikmeler meydana getirebileceği gibi şiddetli bir darbe elemanları rahatça bozabilir (Akmaz, 2012).

Triplen harmonikler, telekomünikasyon sistemlerinde sorun oluştururlar. Telefon hatlarında parazite ve bozulmaya sebep olabilirler. Bu nedenle telefon sistemlerinin harmonikler göz önüne alınarak kurulması elzemdir (Dugan vd., 2004).

Daha önce de bahsedildiği üzere, güç faktörü kavramı, aktif gücün görünür güce oranıdır. Güç faktörünü 1'e yaklaştırmak esas amaçtır. Sistemde harmoniklerin bulunması durumunda bunu yapmak imkansız hale gelmektedir. Harmonik içeren bir sistemin reaktif güç kompanzasyonu bir yere kadar uygulanabilecektir. Bu durumda yetersiz kalan kompanzasyon için filtrelerin kullanılması gerekecektir. Hatta tüketici, kompanzasyon yapmış olsa dahi, harmonikler yüzünden kompanzasyon yetersiz kaldığı için elektrik dağıtım şirketine reaktif güç bedeli ödemek zorunda kalacaktır (Kocatepe vd., 2006; Şenyurt, 2005).

2.4 Harmonik Standartları

Harmoniklerin etkilerini azaltmak, elektrik enerjsinin en verimli şekilde kullanılabilmesini sağlamak adına akım ve gerilimin harmonik bileşenlerinin

sınırlandırılması gerekmektedir. Bu yüzden birçok standart belirlenmiş, bunlara harmonik standartları denilmiştir (Kocatepe vd., 2006).

Ülkemizde harmonik standartlarına yönelik çalışmaları Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) yapmaktadır (Kocatepe vd., 2006). İlk harmonik standartlar Avrupa'da 1969 European Committee For Electrotechnical Standardization (CENELEC) ve International Electrotechnical Commission (IEC) önderliğinde bir araya gelinerek oluşturulmuştur. İlk standart (EN 50006) 1975 yılında CENELEC tarafından yayınlanmış ve uygulanmıştır. Daha sonra 1982 yılında Almanya'da daha geniş kapsamlı olan IEC 555 standardı oluşturulmuştur. 1991'de CENELEC, IEC-555-2 standartlarını ortaya çıkarmıştır (EN 60555-2). Günümüzde, IEC standartları hala geliştirilmektedir (Akmaz, 2012).

Tablo 2.3 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC 61000–2–2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (k=0,2+12,5/n) (Şenyurt, 2005)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
n	$\%V_n$	N	$\%V_n$	N	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥29	k				

IEEE tarafından getirilen standart, 1992 yılında gelmiştir. IEEE 519-1992 numaralı standart özellikle harmonik akımla alakalı sınırlamaları göstermektedir. IEEE-519 standardında harmonik bileşenlerin temel bileşenlere oranları gösterilirken IEC-555'te ise elektrikli ev aletleriyle ilgili standartlar yer almaktadır (Şenyurt, 2005).

IEC 61000-2-2 konutlarla ilgili harmonik sınırlamaları verirken IEC 61000-2-4 ise endüstri için harmonik sınırlamaları içermektedir. Tablo 2.3, 2.4 ve 2.5'te bunların harmonik distorsiyon limitleri verilmiştir (Şenyurt, 2005).

Tablo 2.4 Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar için) – (k=0,2+12,5/n) (Şenyurt, 2005)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
n	$\%V_n$	N	$\%V_n$	N	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥29	k				

Tablo 2.5 Endüstriyel santraller için IEC 61000 – 2 – 4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar için) – (m=5√11/n) (Şenyurt, 2005)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
n	$\%V_n$	N	$\%V_n$	N	$\%V_n$
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	≥6	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			≥27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
≥29	m				

Avrupa standartları olan EN 50160'ta alçak ve orta gerilim şebekeleriyle ilgili değerler verilmiştir (Tablo 2.6 ve Tablo 2.7). Ayrıca IEC 61000-3-2'de ise D sınıfı donanım için kabul edilen en büyük harmonik değerleri verilmiştir (Tablo 2.8). Çeşitli sınıflardaki gereçlerin harmonik sınırları da eklenmiştir (Tablo 2.9) (Şenyurt, 2005).

Tablo 2.6 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri (Şenyurt, 2005)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
n	$\%V_n$	N	$\%V_n$	N	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6…24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tablo 2.7 Konutlarla ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri (Şenyurt, 2005)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
n	$\%V_n$	N	$\%V_n$	N	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6…24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tablo 2.8 D sınıfı donanım için IEC 61000–3–2 'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları (Şenyurt, 2005)

n	3	5	7	9	11	13	15…39
Maks. I_n	2.3	1.14	0.77	0.40	0.33	0.21	0.15…15/n
Faz başına donanım giriş akımı ≤ 16 A							

Tablo 2.9 IEC 1000 – 3 – 2 'ye göre çeşitli sınıflardaki gereçlerin harmonik sınırları (Şenyurt, 2005)

HARMONİK SIRASI (n)	**A SINIFI**	**B SINIFI**	**C SINIFI**	**D SINIFI**
Tek Harmonikler	İzin Verilebilir Harmonik Akımı (A)	İzin Verilebilir Harmonik Akımı (A)	Temel Frekanstaki Giriş Akımının Yüzdesi (%)	Her Watt Başına İzin Verilebilir En Büyük Harmonik Akımı (mA/W)
3	2.30	3.45	30*PF	3.4
5	1.14	1.71	10	1.9
7	0.77	1.16	7	1.0
9	0.40	0.60	5	0.5
11	0.33	0.50	3	0.35
13	0.21	0.32	3	3.85/n
15≤n≤49	0.15.15/n	0.23.15/n	3	3.85/n
Çift Harmonikler	**A SINIFI**	**B SINIFI**	**C SINIFI**	**D SINIFI**
2	1.08	1.62	2	
4	0.43	0.65		
6	0.30	0.45		
8≤n≤50	0.23.8/n	0.35.8/n		
PF = P/S, PF: Güç Faktörü, S: Görünür Güç				

Tablo 2.10 IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları (Şenyurt, 2005)

Bara Gerilimi (V_n)	**Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)**	**Toplam Harmonik Distorsiyonu THD_{Vn} (%)**
Vn ≤ 69 kV	3	5
69 < Vn ≤161 kV	1.5	2.5
Vn > 161 kV	1	1.5

Tablo 2.11 IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları (Şenyurt, 2005)

Vn ≤ 69 kV						
I_K/I_L	n<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	n≥35	TTD (%)
<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

IEEE de dağıtım sistemlerinde gerilim ve akım için ayrı ayrı harmonik distorsiyon sınırlarını belirlemiştir (Tablo 2.10 ve 2.11). Burada I_K kısa devre akımı, I_L ise maksimum talep akımını göstermektedir (Şenyurt, 2005).

Son olarak 03.01.2013'te güncellenen EPDK Şebeke Yönetmeliğine göre 20-154 kV arası Tablo 2.12'de ve 380 kV iletim sistemlerinde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri ise Tablo 2.13'te verilmiştir. Yine EPDK tarafından hazırlanan ve aynı tarihte son güncellemesi yapılan Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğine göre gerilim seviyesine ve şebekenin kısa devre gücüne bağlı olarak sınırlandırılan kabul edilebilir harmonik akım seviyeleri de Tablo 2.14'e eklenmiştir (Kocatepe vd., 2006).

Tablo 2.12 EPDK Şebeke Yönetmeliğine göre 20-154 kV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri (Kocatepe vd., 2006)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	2	1	3	1.5
7	1.5	4	0.8	9	0.75
11	1	6	0.5	15	0.3
13	1	8	0.4	21	0.2
17	0.75	10	0.4	>21	0.2
19	0.75	12	0.2		
23	0.5	>12	0.2		
25	0.5				
>25	0.2+0.3(25/h)				
Toplam Harmonik Bozulma Seviyesi %3					

Tablo 2.13 EPDK Şebeke Yönetmeliğine göre 380 kV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri (Kocatepe vd., 2006)

Tek Harmonikler		**Çift Harmonikler**		**3 ve 3'ün Katı Harmonikler**	
Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No (h)	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	2	0.75	3	1.0
7	1.0	4	0.6	9	0.4
11	0.7	6	0.4	15	0.2
13	0.7	8	0.4	21	0.2
17	0.4	10	0.4	>21	0.2
19	0.4	12	0.2		
23	0.4	>12	0.2		
25	0.4				
>25	0.2+0.2(25/h)				
Toplam Harmonik Bozulma Seviyesi %2					

Tablo 2.14 EPDK Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğine göre kabul edilebilir harmonik akım seviyeleri (Kocatepe vd., 2006)

Harmonik Sırası		OG 1<Un<34.5					YG 34.5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No.	I_K/I_L					I_K/I_L					I_K/I_L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	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.																
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5

Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.

I_K: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

I_L: Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

3
Sinüsoidal Durumda Güç Tanımları

Tam sinüsoidal durumda ani güç kavramının klasik tanımı (3.1)'deki gibidir.

$$p(t) = v(t) * i(t) \tag{3.1}$$

Denklem (3.1)'de p(t), v(t) ve i(t) sırasıyla ani güç, ani gerilim ve ani akımdır. Buradan sinüsoidal gerilim ve akım sinyallerini (3.2)'deki gibi düşünürsek denklemin yeni hali (3.3)'teki gibi olacaktır (Fernando vd., 2011).

$$v(t) = \sqrt{2} * V * \sin(\omega t) \text{ ve } i(t) = \sqrt{2} * I * \sin(\omega t - \boldsymbol{\varphi}) \tag{3.2}$$

$$p(t) = V * I * \cos(\boldsymbol{\varphi}) - V * I * \cos(\boldsymbol{\varphi}) * \cos(2 * \omega t) + V * I * \sin(\boldsymbol{\varphi}) * \sin(2 * \omega t) \tag{3.3}$$

Ani güç kavramı, aktif ve reaktif ani güçler olmak üzere ikiye ayrılıp (3.4)'teki gibi gösterilir.

$$p(t) = p_a(t) + p_r(t) \tag{3.4}$$

(3.4)'teki aktif ani güç ve reaktif ani güçler sırasıyla denklemden çıkarılırsa ortaya (3.5) ve (3.6)'daki eşitlikler çıkar (Balcı ve Hocaoğlu, 2004).

$$p_a(t) = V * I * \cos(\boldsymbol{\varphi}) * (1 - \cos(2 * \omega t)) \tag{3.5}$$

$$p_r(t) = V * I * \sin(\boldsymbol{\varphi}) * \sin(2 * \omega t) \tag{3.6}$$

Son olarak, (3.5) ve (3.6) denklemleri kullanılarak (3.4) eşitliği (3.7)'deki gibi bir şekilde ifade edilebilir.

$$p(t) = P * (1 - \cos(2 * \omega t)) + Q * \sin(2 * \omega t) \tag{3.7}$$

p(t) ifadesinin ortalama değeri olan ve aktif güç olarak bilinen P, (3.8)'deki şekilde gösterilebilir (Fernando vd., 2011).

$$P = V * I * \cos(\boldsymbol{\varphi}) \tag{3.8}$$

(3.8)'de V ve I sırasıyla gerilim ve akımın rms değerleri olup φ ise v(t) ve i(t) arasındaki faz kaymasını temsil eden açıdır.

Aynı şekilde, reaktif güç de (3.9)'daki gibi ifade edilir (Fernando vd., 2011).

$$Q = V * I * \sin(\boldsymbol{\varphi}) \tag{3.9}$$

P ve Q terimlerinin geometrik ortalaması ise görünür güç olarak bilinen S olarak tanımlanır. O da (3.10)'da gösterilmiştir.

$$S = V * I = \sqrt{P^2 + Q^2} \tag{3.10}$$

Güç tanımlarıyla ilgili olan başka bir önemli terim ise aktif gücün görünür güç ile ilişkisine bağlı olan sistem güç faktörü PF'dir ve (3.11)'deki gibi formüle edilir (Balcı ve Hocaoğlu, 2004):

$$PF = \frac{P}{S} = \cos\varphi \tag{3.11}$$

(3.1)'den (3.11)'e kadar denklemler analiz edilirse reaktif güçle ilgili çıkarımlar şöyle özetlenebilir: Q, V*I*sin(φ) gibi bir fonksiyon ile gösterilir ve bu bir reel sayıdır. Belirli bir barada tüm reaktif gücün cebirsel toplamı sıfırdır. Q, ani gücün yani p(t)'nin çift yönlü tamamlayıcı parçasıdır. Q'nun sıfır olması demek güç faktörünün bir olması anlamına gelir. Q, endüktif ya da kapasitif cihazlar ile kompanze edilebilir. P ve Q'nun geometrik ortalamaları görünür güç olan S'yi verir. İletim hatlarındaki gerilim düşümü çoğunlukla reaktif güçten kaynaklanır (Fernando vd., 2011).

Bu özellikler yalnızca saf sinüsoidal sinyallere uygulanabilir; bu nedenle sinüsoidal olmayan koşullar söz konusu olduğunda bu özelliklerin tümü uygulanamaz. Sonraki bölüm, bu amaç için önerilen farklı güç tanımlarını sunacak ve yukarıdaki özelliklerin hangi şartlara uyduğunu açıklamaya çalışacaktır (Fernando vd., 2011).

4

Sinüsoidal Olmayan, Harmonik İçeren Sistemlerde Literatürde Verilen Güç Tanımlarının İncelenmesi, Karşılaştırılması ve Yorumlanması

Bu bölümde sinüsoidal olmayan durumdaki güç tanımları verilmiş, literatürdeki farklı metotlar incelenmiştir. İncelenen bu metotlar, bölümün sonunda karşılaştırılıp yorumlanmıştır.

4.1 Genel Güç Tanımları

Sinüsoidal olmayan bir durumu temsil etmek için, harmonik bileşenli gerilim ve akım sinyalleri göz önünde bulundurulursa görünen güç denklem (4.1)'deki ifade ile temsil edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = \sum_{n=0}^{\infty} V_n^2 * \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 = V^2 * I^2 \tag{4.1}$$

Daha basitleştirilecek olursa, mevcut sinyaller içinde sadece akım harmonik sinyallerinin mevcut olduğu ve sadece temel bir bileşene sahip bir gerilim sinyali olduğu varsayılırsa yeni denklem (4.2)'deki gibi olacaktır.

$$S^2 = V_1^2 * \sum_{n=0}^{\infty} I_n^2 = V_1^2 * I_1^2 + V_1^2 * \sum_{n\neq 1}^{\infty} I_n^2 \tag{4.2}$$

Tanım olarak aktif ve reaktif güçler, (4.3) ve (4.4)'te verilmiştir (Fernando vd., 2011).

$$P = \frac{1}{T} * \int_0^T v(t) * i(t) * dt = V_1 * I_1 * \cos(\varphi_1) \tag{4.3}$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n * I_n * \sin(\varphi_n) = V_1 * I_1 * \sin(\varphi_1) \tag{4.4}$$

(4.3) ve (4.4) incelenir ve sinüsoidal durumdaki denklemlerle karşılaştırılırsa sinyallerin temel sinüsoidal bileşene (50 ya da 60 Hz) sahip olması halinde (4.5)'teki ifadeye uygun olduğu ortaya çıkar (Fernando vd., 2011):

$$P^2 + Q^2 = V_1^2 * I_1^2 \neq S^2 \tag{4.5}$$

(4.5)'teki eşitsizliğe göre, P ve Q terimlerinin kareleri toplamının S'nin karesinin sadece ilk terimini içerdiği görülecektir. Böylece önceki bölümde yapılan çıkarım olan "P ve Q'nun geometrik ortalamaları görünür güç olan S'yi verir." ifadesinin buraya uymadığı gözlemlenir. Bu nedenle, sinüsoidal koşullar için geçerli olan görünür güç ve reaktif güç tanımları harmoniklerin olması halinde geçerli değildir. Bundan dolayı, sinüsoidal olmayan koşullar için yeni tanımlara ihtiyaç duyulur. Sinüsoidal olmayan durumda görünür güç ve reaktif güç formülasyonları için çeşitli öneriler vardır; en çok kullanılanlar bu bölümde açıklanacaktır (Fernando vd., 2011).

Bu bölümde sinüsoidal olmayan durumlar altında Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü'nün (IEEE) tanımları da açıklanmaktadır. Buradaki tüm nicelikler trigonometrik Fourier serilerine dayanır. Bu büyüklükler, tek harmonik frekans bileşenlerinin katkısını açıklayacak şekilde ifade edilir. Bu bölümde f(t), zamanın bir fonksiyonu olarak anlık gerilimi veya akımı temsil eder; F_h ise harmonik frekans h'nin sinyal bileşeninin tepe değeridir. Daha sonra da ani güç, rms değerler, aktif ve reaktif güçlerin formülleri (4.6), (4.7), (4.8), (4.9) ve (4.10)'da verilmiştir (De La Rosa, 2006).

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} F_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \tag{4.6}$$

$$p(t) = v(t) * i(t) \tag{4.7}$$

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(t)dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_h^2} \tag{4.8}$$

(4.8)'de F_{rms} değeri, F fonksiyonunun karekök ortalama değeridir, ki bu durumda F değeri gerilim ya da akım olabilir (Dugan vd., 2004).

Her harmonik, ortalama güce pozitif veya negatif olabilecek şekilde bir katkı sağlar. Bununla birlikte, ortaya çıkan harmonik güç, temel frekanstaki aktif güce göre çok küçüktür (De La Rosa, 2006).

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \tag{4.9}$$

$$Q = \frac{1}{T}\int_0^T q(t)dt = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \delta_h) = \sum_{h=1}^{\infty} Q_h \tag{4.10}$$

Harmonik distorsiyon varlığı altında görünen gücü ifade etmenin en uygun yolu hakkında birçok seçenek sunulmuştur. Bazı seçenekler dalga formundaki distorsiyon altında reaktif güç miktarlarının belirlenmesinde tüm formülasyonların nasıl farklı sonuçlara yol açtığını gösterir. Ancak IEEE ve Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) tarafından genel olarak kabul edilen bir ifade, Budeanu'nun Antoniu'da önerdiği bir ifadedir (4.11) (De La Rosa, 2015):

$$S^2 = P^2 + \sum_{i=1}^{n} V_1 I_1 \sin(\varphi_1) + D^2 \tag{4.11}$$

Üç fazlı sistemler için faz başına (k) vektör görünür güç, S_V ise (4.12)'deki gibi ifade edilebilir.

$$S_v = \sqrt{\{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_{Bk})^2 + (\sum_k D_k)^2\}} \tag{4.12}$$

Bu durumda aritmetik görünür güç ise (4.13)'teki gibi S_a şeklinde gösterilebilir (De La Rosa, 2006).

$$S_a = \sum_k \sqrt{P_k^2 + Q_{Bk}^2 + D_k^2} \tag{4.13}$$

(4.12) ve (4.13)'te P, Q_B ve D sırasıyla aktif güç, reaktif güç ve distorsiyon ortogonal bileşeni olan deaktif güçtür.

Faz başına rms olarak görünür güç (S_e) ise (4.14)'teki şekilde formülize edilebilir:

$$S_e = \sum_k \sqrt{(P_k^2 + Q_{Fk}^2)} = \sum_k V_k I_k \tag{4.14}$$

Ayrıca üç fazlı sistemlerde zahiri güç (S_s) ise (4.15)'teki gibidir (De La Rosa, 2015):

$$S_s = V_{rms} * I_{rms} = \sqrt{P^2 + Qf^2} = \sqrt{\sum_k {V_k}^2} \sqrt{\sum_k {I_k}^2} \tag{4.15}$$

(4.15)'te Q_F reaktif gücü gösterir.

Görünür güç temel ve temel olmayan bileşenlerine ayrılırsa (4.16)'daki eşitlik ortaya çıkar (De La Rosa, 2006):

$$S = \sqrt{S_1^2 + S_n^2} \tag{4.16}$$

(4.16)'da S_1, görünür gücün temel bileşeni, S_n ise görünür gücün n. harmonik bileşenidir (De La Rosa, 2015).

4.2 Reaktif Güç ve Distorsiyon Gücü Tanımları

Harmonikleri içeren ilk güç tanımları 1927'de Budeanu tarafından verilmiştir. Buna göre aktif ve reaktif güçler (4.17) ve (4.18)'deki gibi formüle edilir (Fernando vd., 2011).

$$P = \sum_h V_h * I_h * \cos(\varphi_h) \tag{4.17}$$

$$Q_B = \sum_h V_h * I_h * \sin(\varphi_h) \tag{4.18}$$

(4.17) ve (4.18)'de h harmonik mertebeyi ifade eder. Aktif ve reaktif gücü temsil eden bu denklemler güç üçgeninin doğruluğuna uymayacaktır. Buna çözüm olarak Budenau, distorsiyon gücü olarak bilinecek yeni bir terim tanımlamıştır (Fernando vd., 2011):

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \tag{4.19}$$

(4.19)'da verilen distorsiyon gücüne dayanarak, (4.20)'deki gibi F ile gösterilen tamamlayıcı veya hayali bir güç de tanımlanır (Fernando vd., 2011):

$$F = \sqrt{S^2 - P^2} = Q_B^2 + D^2 \tag{4.20}$$

(4.20)'deki denklemin fiziksel anlamı, kaynak ile tüketici arasındaki güç salınımıdır, ancak bu yalnızca tüm elemanlar tamamen doğrusal ve reaktif olduğunda (kapasitörler ve indüktörler gibi) geçerlidir. Bu da denklemin reaktif kompanzasyonu tasarımı için kullanılamayacağı anlamına gelir (Fernando vd., 2011).

Bu ilk distorsiyon gücü tanımına dayanarak bazı diğer bilim insanları, rms gerilimi ve akımı harmonik sinyalleri ile bunların faz farklarının bir fonksiyonu olarak D'nin farklı tanımlarını önermişlerdir. Örneğin; 1990 yılında Emanuel (4.21)'deki tanımı önermiştir (Fernando vd., 2011):

$$D^2 = \sum_{\substack{m,n=1 \\ m \neq n}} V_m^2 * I_n^2 + V_n^2 * I_m^2 - 2 * V_m * V_n * I_m * I_n * \cos(\varphi_m - \varphi_n) \tag{4.21}$$

(4.21)'de V_m, V_n, I_m ve I_n harmonik bileşenlerin rms değerleridir. Harmonik açılar $\varphi_m = \alpha_m - \beta_m$, $\varphi_n = \alpha_n - \beta_n$ olacak şekilde α_m, β_m, α_n ve β_n akım ve gerilimin harmonik bileşenleri arasındaki açı kaymalarını temsil etmektedir (Fernando vd., 2011).

1984 yılında Filipski tarafından önerilen farklı bir tanım da (4.22)'deki gibidir (Fernando vd., 2011):

$$D = \sqrt{\sum_m \sum_n [V_m^2 * I_n^2 - V_m * V_n * I_m * I_n * \cos(\varphi_m - \varphi_n)]} \quad (4.22)$$

Bundan sonra ise 1993 yılında Czarnecki tarafından D için (4.23)'te gösterilen yeni bir formül önerilmiştir (Fernando vd., 2011).

$$D = \sqrt{\frac{1}{2}\sum_m \sum_n [V_m^2 * I_n^2 - 2 * V_m * V_n * I_m * I_n * \cos(\varphi_m - \varphi_n)]} \quad (4.23)$$

1996 yılında Filipski'nin tanımına IEEE tarafından benzer bir tanım teklif edilmiştir. Son zamanlarda farklı yazarlar bu tanımları karşılaştırıp uygulanabilirliklerini tartışmışlarıdır. 1999 yılında Yıldırım ve Fuchs, Emanuel'in ve Czarnecki'nin yaklaşımlarını karşılaştırmış ve aşağıdaki tanımı tavsiye ederek farklı gerilim ve akım bozulmalarını kullanarak deneysel ölçümler yapmışlardır (4.24) (Fernando vd., 2011):

$$D^2 = \sum_{m=0}^{h-1} \sum_{m\neq 1}^{h} [V_m^2 * I_n^2 + V_n^2 * I_m^2 - 2 * V_m * V_n * I_m * I_n * \cos(\varphi_m - \varphi_n)] \quad (4.24)$$

Bu ikilinin çalışmalarından elde edilen en önemli çıkarım, sunulan denklemin Emanuel'in denklemine göre pratik sonuçlarda önemli farklılıklar gösterdiğidir. Öte yandan Filipski, Czarnecki ve kendi denklemleri hemen hemen aynı ve deneysel sonuçlarla tutarlı olmuştur. Filipski (4.22) ve Czarnecki'nin denklemleri (4.23), değişkenleri aynı harmonik düzen ile çarpılan terimlere sahipken, Yıldırım ve Fuchs'a ait olan denklem (4.24) değişkenleri farklı harmonik sıra ile çarpılan terimlere sahiptir (Fernando vd., 2011).

4.3 Constantin I. Budeanu'nun Önerdiği Tanım

Budeanu, görünür gücün bileşenlerinin sadece aktif güç ve reaktif güçten ibaret olmadığını ifade eden ilk bilim insanıdır. 1927 yılında yaptığı çalışmada distorsiyon gücü kavramından bahsetmiştir. Zaten ilk olarak bu tanımı kullanan da bizzat kendisidir. (4.25) no.lu denklemde Budeanu'nun önerdiği güç tanımı verilmiştir (Emanuel, 2010).

$$S = \sqrt{P^2 + {Q_B}^2 + {D_B}^2} \tag{4.25}$$

(4.25)'te görüldüğü üzere Q_B Budeanu tarafından önerilen reaktif güç iken D_B de yine Budeanu tarafından önerilen distorsiyon gücünü göstermektedir.

4.4 Stanislaw Fryze'nin Önerdiği Tanım

Fryze tarafından önerilen reaktif güç tanımının temeli, akımın aktif terim ve reaktif terim olarak iki bileşene ayrılmasına dayanır (4.26) (Fernando vd., 2011).

$$i = i_a + i_r \tag{4.26}$$

Bu terimlerin ortogonal olduğu dikkate alınırsa (4.27)'deki gibi bir denklem ortaya çıkar (Fernando vd., 2011).

$$\frac{1}{T}\int_0^T i_a * i_b * dt = 0 \ (ortogonal) \tag{4.27}$$

i_a terimi, (4.28)'deki gibi aktif güç üzerinden hesaplanabilir (Fernando vd., 2011).

$$i_a(t) = \frac{P}{V^2} * v(t) \tag{4.28}$$

(4.28) durumunda reaktif akım da (4.29)'daki gibi olacaktır (Fernando vd., 2011).

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t) \tag{4.29}$$

(4.26), (4.27), (4.28) ve (4.29)'daki tanımlara göre Fryze, hayali güç tanımından da yola çıkarak (4.30)'daki gibi bir reaktif güç tanımı sunmuştur (Fernando vd., 2011).

$$Q_F = V * I_r = \sqrt{(V * I)^2 - (V * I_a)^2} = \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{Q_B^2 + D^2} \tag{4.30}$$

(4.30)'da görüldüğü üzere Fryze'nin tanımlamış olduğu reaktif güç olan Q_F ifadesi S ve P'ye bağlı bir fonksiyondur. Bu gösterimin avantajı ise reaktif gücün ayrıca hesaplanmasına gerek olmamasıdır. Bununla birlikte, Q_F her zaman pozitif bir büyüklük olacaktır. Bu da Q değerinin bir reel sayı olduğu çıkarımına uymamaktadır, böylece bu özellik uygulanamaz. Dolayısıyla bu, yük akışı analizinde kullanılamaz. Öte yandan, bu değer her zaman pozitif olduğu için bunu aktif filtre tasarımına uygun kılacak olan negatif bir akım ($-i_r$) enjekte edilerek kompanze edilebilir (Fernando vd., 2011).

4.5 Leszek Czarnecki'nin Önerdiği Tanım

Önceki tanımlara dayanarak Czarnecki, elektrik enerjisi iletiminin verimliliğini azaltan farklı olayları tanımlamaya izin veren bir ortogonal akım ayrılmasına dayanan yeni tanımlar önermiştir (Fernando vd., 2011).

Buna göre toplam akım (4.31)'deki gibi sırasıyla aktif akım, reaktif akım ve parçalanmış akım (dağılma akımı) olarak terimlere dağıtılır (Fernando vd., 2011).

$$I^2 = I_A^2 + I_R^2 + I_S^2 \tag{4.31}$$

(4.31)'deki son iki terim, efektif iletimin düşmesinden sorumlu olan terimlerdir. Reaktif terim (4.32)'deki şekilde verilebilir. Burada B süseptans değeridir (Fernando vd., 2011).

$$I_R = \sqrt{\sum_{n=N} B_n^2 * V_n^2} \tag{4.32}$$

Parçalanmış akım da (4.33)'teki şekilde gösterilebilir. Burada G kondüktans değeridir (Fernando vd., 2011).

$$I_S = \sqrt{\sum_{n=N} (G_n - G)^2 * V_n^2} \tag{4.33}$$

Burada eşdeğer yük kondüktansı (4.34)'teki gibi bulunur (Fernando vd., 2011):

$$G = \frac{P}{V^2} \tag{4.34}$$

Yükün n. harmonik bileşeni de (4.35)'teki formül ile bulunur. Burada Y değeri admitansı ifade eder (Fernando vd., 2011).

$$Y_n = G_n + jB_n \tag{4.35}$$

Aktif akım olan I_A değeri de (4.36)'daki gibi bulunur (Emanuel, 2010).

$$I_A = \frac{P}{V} = V * G = G * \sqrt{\sum_{n=N} * V_n^2} \tag{4.36}$$

(4.32), (4.33) ve (4.36)'daki denklemlerdeki ayrıştırmayı kullanarak, görünen güç (4.37)'deki şekilde ifade edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q_R^2 \tag{4.37}$$

(4.37)'deki bağıntıyı kullanarak sırasıyla reaktif güç ve distorsiyon gücü (parçalanmış güç) de (4.38) ve (4.39)'daki gibi formüle edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$Q_R = V * I_R \tag{4.38}$$

$$D_S = V * I_S \tag{4.39}$$

Bu tanımın temel özelliklerinden biri; gerilim, akım ve güç yerine kondüktans ve süseptansa dayanmasıdır. Büyük harmonik değerleri olan akımlar ve küçük harmonik değerleri olan gerilim içeren sistemler için, faz kayması belirsizliği ve bunun bir sonucu olarak B_N parametresinin büyük belirsizliği problemi ortaya çıkacaktır. Bu sorun reaktif akım tespitinde hatalara neden olabilir (Fernando vd., 2011). Ayrıca parçalanmış güçlerin temel ve harmonik bileşenleri tek tek çıkarılıp toplanırsa sonucun sıfır olduğu görülür, bu da farklı bir yaklaşımdır (Emanuel, 2010).

4.6 Alexander Eigeles Emanuel'in Önerdiği Tanım

Emanuel, çoğu durumda reaktif güce ana katkının, gerilim sinyalinin temel bileşeninden kaynaklandığını gözlemlemiştir. Sonra da reaktif güç tanımı için 1990 yılında (4.40)'taki tanımı önermiştir (Fernando vd., 2011).

$$Q_1 = V_1 * I_1 * \sin \varphi_1 \tag{4.40}$$

(4.40) tanımına dayanarak, tamamlayıcı güç (P_C) olarak adlandırılan ek bir terim (4.41)'deki gibi formüle edilebilir (Fernando vd., 2011):

$$P_C^2 = S^2 - P^2 - Q_1^2 \tag{4.41}$$

Son olarak hem aktif hem de reaktif terimler, temel bileşen ve harmonik bileşen olmak üzere iki terimle temsil edilebilir. Bu durumda görünür güç ifadesi (4.42)'deki gibi olur (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = (P_1 + P_h)^2 + Q_F^2 \tag{4.42}$$

Burada Q_F terimi, Fryze tarafından tanımlanan reaktif güçtür. Q_F, temel ve harmonik bileşenlerine ayrılırsa (4.43) gibi bir fonksiyon olarak ifade edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$Q_F^2 = Q_1^2 + Q_h^2 \tag{4.43}$$

(4.42) ve (4.43) denklemlerden yola çıkarak görünür güç (4.44) şeklinde formüle edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = (P_1 + P_h)^2 + Q_1^2 + Q_h^2 \tag{4.44}$$

Q_F, temel reaktif güç Q_1 ve harmonik reaktif güç Q_h olmak üzere iki farklı terim eklenerek tanımlandığından bu tanım, aktif filtrelerin kontrolü ve izlenmesi ile güç faktörü düzeltmesi tasarımı için etkili bir araç haline gelmiştir (Fernando vd., 2011).

Ayrıca Emanuel'in bu metodu, IEEE 1459-2010 standartlarında benimsenmiş olup kendisi hem akım hem de gerilim sinyallerinin (4.45) ve (4.46)'daki gibi temel ve harmonik terimlere ayrışmasını önermiştir (Fernando vd., 2011).

$$I^2 = I_1^2 + I_H^2 \tag{4.45}$$

$$V^2 = V_1^2 + V_H^2 \tag{4.46}$$

(4.45) ve (4.46)'daki harmonik bileşenler V_H ve I_H tüm harmonik terimler ile birlikte doğru akım bileşenlerini de içerir. Onlar da sırasıyla (4.47) ve (4.48)'de gösterilmiştir (Fernando vd., 2011).

$$V_H^2 = \sum_{h\neq 1}^{\infty} V_H^2 \tag{4.47}$$

$$I_H^2 = \sum_{h\neq 1}^{\infty} I_H^2 \tag{4.48}$$

Bu bilgilere dayanarak, aktif güç temel ve harmonik bileşenlerin toplamı olarak (4.49)'daki gibi gösterilebilir (Fernando vd., 2011).

$$P = P_1 + P_H \tag{4.49}$$

(4.49)'daki temel ve harmonik bileşenler sırasıyla (4.50) ve (4.51)'deki gibi olacaktır (Fernando vd., 2011).

$$P_1 = V_1 I_1 \cos\varphi_1 \tag{4.50}$$

$$P_H = \sum_{h\neq 1}^{\infty} V_h I_h \cos\varphi_h \tag{4.51}$$

Benzer şekilde, reaktif güç de (4.52)'deki gibi temsil edilebilir. Burada temel ve harmonik bileşenler sırasıyla (4.53) ve (4.54)'teki gibi olacaktır (Fernando vd., 2011).

$$Q = Q_1 + Q_H \tag{4.52}$$

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \tag{4.53}$$

$$Q_H = \sum_{h \neq 1}^{\infty} V_h I_h \sin \varphi_h \tag{4.54}$$

Görünen gücün karesinin gerilim ve akım terimlerinin bir fonksiyonu olarak temsil edilebileceği göz önüne alınırsa (4.55)'teki gibi bir ifade oluşacaktır (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 \tag{4.55}$$

Ayrıca görünür güç S, temel (S_1) ve temel olmayan (S_N) terimlerinin toplamı şeklinde gösterilecek olursa (4.56)'daki gibi bir denklem oluşur (Fernando vd., 2011).

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \tag{4.56}$$

(4.55) ve (4.56) karşılaştırılacak olursa, görünür gücün karesi olan ilk terimin temel bileşenlerin bir fonksiyonu olduğu, aynı zamanda temel aktif ve reaktif bileşenleri içeren bir fonksiyon olduğu sonucuna varılabilir. Bu terimler de (4.57)'deki gibi gösterilir. S_N terimi ise (4.55)'deki geri kalan terimlerden oluşur (4.58) (Fernando vd., 2011).

$$S_1^2 = (V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \tag{4.57}$$

$$S_N^2 = (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \tag{4.58}$$

(4.58)'de D_I ve D_V sırasıyla, harmonik akımdan ve harmonik gerilimden kaynaklanan distorsiyon güçleridir. S_H ise harmonik görünür güç olarak tanımlanır. Bu üçlü de sırasıyla (4.59), (4.60) ve (4.61)'de gösterilmiştir (Fernando vd., 2011).

$$D_I = V_1 I_H \tag{4.59}$$

$$D_V = V_H I_1 \tag{4.60}$$

$$S_H = V_H I_H \tag{4.61}$$

Harmonik akım ile temel akım bileşenleri arasındaki ilişki toplam harmonik akım distorsiyonu olarak tanımlanır ($I_H/I_1=THD_i$). Aynı şekilde gerilim için olana toplam harmonik gerilim distorsiyonu adı verilir ($V_H/V_1=THD_v$). Böylece akımdan kaynaklanan distorsiyon gücü, gerilimden kaynaklanan distorsiyon gücü ve harmonik görünür güç ifadeleri, distorsiyonun bir fonksiyonu olarak (4.62), (4.63) ve (4.64)'teki şekilde gösterilebilir (Fernando vd., 2011).

$$D_I = S_1 * THD_I \tag{4.62}$$

$$D_V = S_1 * THD_V \tag{4.63}$$

$$S_H = S_1 * THD_I * THD_V \tag{4.64}$$

Son olarak; görünür güç, (4.65)'te görüldüğü gibi aktif güç P ve aktif olmayan güç N olarak ayrıştırılabilir (Fernando vd., 2011):

$$S^2 = (VI)^2 = P^2 + N^2 \tag{4.65}$$

Harmonik güç terimi aktif bir bileşene sahip olabilen tek terim olduğundan, o da (4.66)'daki şekilde formüle edilebilir (Fernando vd., 2011).

$$S_H^2 = (V_H I_H)^2 = P_H^2 + N_H^2 \tag{4.66}$$

Tüm bu denklemlerden şu sonuçlar çıkarılabilir: (P_1+P_H) aktif güç, harmonik güç olan S_H ifadesi, $V_h*I_h*\cos\varphi_h$ formülünün (n-1) terimli bir fonksiyonudur. Eğer V_h veya I_h sıfırsa, ya da faz kayması 90° ise sonuç sıfırdır. Eğer V_h veya I_h sıfır değilse, faz kayması da $-90°<\varphi_h<90°$ şartını sağlıyorsa pozitiftir. Eğer V_h veya I_h sıfır değilse, faz kayması da $90°<\varphi_h<270°$ şartını sağlıyorsa negatiftir. Bazı harmonik bileşenler güç üretirken, bazıları da güç tüketir, genelde de P_H negatiftir. S_N/S_1 ilişkisi, harmonik distorsiyon için iyi bir göstergedir. Bu çıkarımlara göre (4.67)'deki eşitsizlik ortaya çıkar (Fernando vd., 2011):

$$S_N \geq S_H \geq P_H \tag{4.67}$$

Kayma güç faktörü olarak da bilinen ve temel bileşen nedeniyle olan güç faktörü de (4.68)'de gösterildiği gibi ifade edilir (Fernando vd., 2011).

$$PF_1 = \cos\varphi_1 = P_1/S_1 \tag{4.68}$$

Toplam güç faktörü ise (4.69)'daki denklemde verilmiştir (Fernando vd., 2011).

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{(P_1+P_H)}{S} = \frac{\left(\frac{P_1}{S_1}\right)*\left[1+\left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right]}{\sqrt{1+\left(\frac{S_N}{S_1}\right)^2}} = \frac{\left[1+\left(\frac{P_H}{P_1}\right)\right]*PF_1}{\sqrt{1+THD_I^2+THD_V^2+(THD_I*THD_V)^2}} \quad (4.69)$$

Dipnot olarak S_H ifadesi, harmonik aktif güç P_H ve harmonik distorsiyon gücü D_H cinsinden de (4.70)'deki gibi ifade edilebilir (Emanuel, 2010).

$$S_H = \sqrt{P_H^2 + D_H^2} \quad (4.70)$$

4.7 Metotların Karşılaştırılması ve Yorumlar

Görüldüğü üzere, her önerilen tanım ve her kullanılan metodun sonucunda ulaşılan değişkenler aynı olmayacaktır. Her yaklaşımın artıları ve eksileri, ayrıca kendi kullanım alanları mevcuttur.

Budeanu'nun güç tanımı en basit tanım olup diğer yaklaşımların atası olmuştur. İlk kez distorsiyon gücü gibi bir kavramdan bahsedilmiş olması, bu alandaki çalışmalar için önemli bir adım olmuştur. Ancak aktif ve reaktif güç bilinen güçler olmasına rağmen D ile gösterilen distorsiyon gücünün fiziksel olarak karşılığının açıklanmasında ve ölçümünde zorluklar bulunmaktadır. Buradaki reaktif güç tanımı, distorsiyon gücü içermesi sebebiyle kompanzasyon sistemi tasarımı için uygun olmamaktadır (Fernando vd., 2011). Yine de böyle başarılı bir matematiksel yaklaşımın mükemmel bir fiziksel modele sahip olamaması eksikliktir (Emanuel, 2010).

Fryze'nin tanımı yine basit bir yaklaşımdır. Bu gösterimin avantajı reaktif gücün ayrıca hesaplanmasına gerek olmamasıdır. Yalnız tanımlanan reaktif gücün değeri hep pozitif olacağından bu pratikte sıkıntı yaratır. Bu yüzden bu reaktif güç tanımı, yük akışı analizi yapılırken kullanılamaz. Sadece aktif filtre tasarımında uygun bir negatif akım enjekte edilirse kompanzasyon işlemi yapılabilir (Fernando vd., 2011). Fryze'nin modeli matematiksel olarak doğrudur ama sinüsoidal dalga formlarına sahip sistemler için kullanılan yaklaşımın doğrudan bir sonucu olmasına rağmen, anlık gücün tüm ayrıntılarını göstermeyen ve yüke gerçek enerji aktarım mekanizmasını temsil etmeyen, sadece basitleştirilmiş bir modeldir. Ama

yine de harmonik aktif güçlerin yönünü belirten bir yaklaşım yarattığından aktif akıma yönelen diğer yaklaşımların önünü açmıştır (Emanuel, 2010).

Czarnecki tanımının temel özelliklerinden biri; verilen tanımın gerilim, akım ve güç yerine süseptansa ve kondüktansa dayanmasıdır. Büyük harmonik bileşenli akımlar ve küçük harmonik bileşenli gerilim içeren sistemler için, faz kayması belirsizliği ve bunun bir sonucu olarak B_n parametresinin belirsizliği bu güç tanımının kullanımında zorluklar oluşturmaktadır. Bu sorun reaktif akım tespitinde hatalara neden olabilir (Fernando vd., 2011).

Czarnecki'nin metodunda, Budeanu'nun aksine, birbirlerini iptal etmeyen alt bileşenlerle kollektif bir reaktif güce sahip olan ve enerjinin gerçek salınımları için matematiksel olan Fryze'den kesinlikle daha üstün bir model görüyoruz. Dağınık (parçalanmış) güç D'nin mühendislik literatüründe emsali yoktur. $v*i_s$ çarpanı, her biri farklı bir frekansa sahip, her bir temel bileşeni ortalama bir değere sahip olan aktif anlık güçlerden oluşur, ancak ortalama güçlerin toplamı sıfırdır. Bu dağınık güç kesinlikle ustaca bir matematiksel tanımdır, bununla birlikte elektromanyetik alan teorisi bu tür bileşenler için kanıt veya destek sağlamaz. Bu yöntemin ve aktif akıma odaklanan tüm metotların en büyük dezavantajı, en önemli gücün, temel aktif gücün (P_1), S'nin belirgin, kolay tanımlanmış bir bileşeni olmamasıdır. Aslına bakarsanız, Fryze'nin yaklaşımına dayanan tüm modeller, fiili temel aktif gücü P_1 ölçme ihtiyacını kullanmaz veya savunmaz. (Emanuel, 2010).

Emanuel'in yaklaşımına göre reaktif güç, temel reaktif güç Q_1 ve harmonik reaktif güç Q_H olmak üzere iki farklı terime sadeleştirilerek tanımlandığından bu metot, aktif filtrelerin kontrolü ve izlenmesi ile güç faktörü düzeltmesi tasarımı için etkili bir araçtır. Aktif gücün harmonik yönünü göstermesi de yükün kirletici etkisinin ne kadar olduğunun anlaşılmasını sağlar. Harmonik kirliliğin günden güne artması, reaktif güç için belirlenen limitler üzerinden tüketicilere yaptırım uygulanması, limitlerin aşılması halinde faturalandırma yapılması gibi gelecekte benzer uygulamanın harmonik üreten tüketicilere de yapılabilmesi için harmonik akış yönünün bu tanımda gösterilme imkanı önemlidir (Fernando vd., 2011). IEEE 1459-2010 standartlarınca benimsenmiş olmasına karşın, bugünün VArmetreleri,

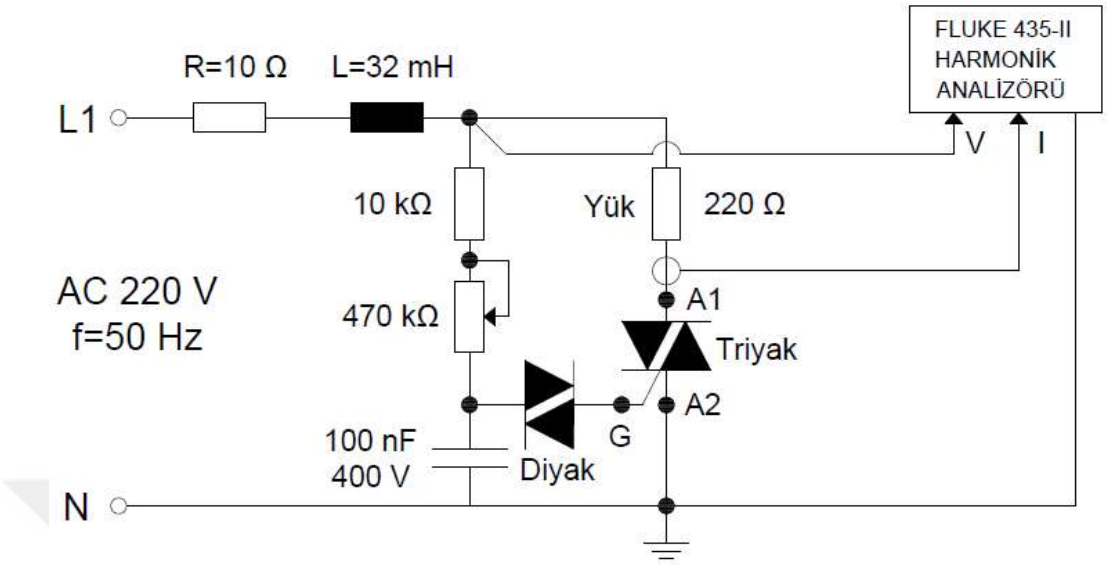
sinüsoidal olmayan dalga formlarına sahip devrelere bağlandığında, aktif olmayan dört gücün hiçbirine eşit olmayan değerler verir (Emanuel, 2010).

Özet olarak, farklı tanımlara ilişkin tartışma, özelliklerin hangisine uyduğu ve hangisine uymadığı üzerine odaklanmaktadır. Bununla birlikte, farklı ifadelerin anlamını yorumlayabilmek ve kompanzasyon, gerilim kontrolü, harmonik bozulmanın kaynağını belirlemek veya güç kayıplarının belirlenmesi gibi belirli bir uygulama için doğru endeksi seçmek de önemlidir (Balcı ve Hocaoğlu, 2004). Aynı tip analizler çok fazlı sistemler için genişletilebilir (Fernando vd., 2011).

5
Sayısal Uygulama ve Simülasyon

Bu bölümde sayısal uygulamanın birinci aşamasında öncelikle harmonikli akım elde etmek amacıyla tek fazlı AC kıyıcı devresinden yararlanılmıştır. Harmonik analizörü ile bu lineer olmayan yükün gerilim ve akım harmonikleri ölçülmüştür. Elde edilen harmonik ölçüm sonuçları yardımıyla harmonikli durumdaki güç değerleri hesaplanmış ve tezin önceki bölümlerinde, literatürde verilmiş olan güç tanımlarına göre hesaplanan güç değerleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Sayısal uygulamanın ikinci aşamasında MATLAB SIMULINK paket programında temel bileşen gerilimine ek olarak beşinci ve yedinci harmonik gerilim bileşenlerini de içeren gerilim kaynaklarına bağlı seri R-L yükünden oluşan bir simülasyon devresi oluşturulmuştur. Simülasyondan elde edilen harmonik analizi sonuçları yardımıyla harmonikli durumdaki güç değerleri hesaplanmış ve tezin önceki bölümlerinde, literatürde verilmiş olan güç tanımlarına göre hesaplanan güç değerleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır.

Sayısal uygulamanın birinci aşamasında, AC kıyıcı devresinde yük olarak nominal akımı 1 A olan 220 Ω değerinde rezistif yük kullanılmıştır. Şebekenin kısa devre empedansını arttırmak, şebeke geriliminin harmonik bileşenlerinin genliğini yükseltmek amacıyla AC kıyıcı devresi girişine seri bağlı olarak 10 Ω değerinde bir direnç ve 32 mH değerinde bir endüktanstan oluşan empedans bağlanmıştır. Şebeke geriliminin efektif değeri 220 V ve frekansı 50 Hz'dir. Devrede akım ve gerilim harmonikleri ile güçlerin ölçümü FLUKE 435-II harmonik analizörü ile yapılmıştır. Devre şeması Şekil 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.1 Harmonik ölçümüne ilişkin devre şeması

Devre Şekil 5.1'deki gibi kurulduktan sonra FLUKE 435-II harmonik analizörü ile ölçümler alınmıştır. AC kıyıcı devresinde triyak tetikleme açısı değiştirilerek farklı harmonik akım spektrumları elde edilebilmektedir. Deney devresinde triyak tetikleme açısı sabit tutularak, sabit bir yük karakteri (yük akımı harmonik spektrumu) için FLUKE 435-II harmonik analizörü ile bir dakika ölçüm yapılmış ve değerler Tablo 5.1'de verilmiştir.

Tablo 5.1 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile yapılan ölçümlerdeki değerlerin ortalamaları

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
$\mathbf{V_{rms}}$ (Volt)	209,77	$\mathbf{I_{rms}}$ (Amper)	0,602
$\mathbf{V_1}$ (Volt)	207,4248	$\mathbf{I_1}$ (Amper)	0,5
$\mathbf{THD_V}$ (%)	15,08	$\mathbf{THD_I}$ (%)	66,82
P (W)	79,2	$\mathbf{P_1}$ (W)	80,7
S (VA)	126,3	$\mathbf{S_1}$ (VA)	103,5
PF	0,63	**f** (Hz)	50
Harmonik Güç (VA)	72,3	**DPF** ($\cos \varphi_1$)	0,78

Tablo 5.1'de görüldüğü gibi, harmonik analizörü gerilim ve akımın rms değerini ölçtüğü gibi bir de temel bileşen değerlerini de ölçmüştür. V_{rms} ve I_{rms} gerilim ve akımın efektif (rms) değerleri iken V_1 ve I_1 ise temel bileşen değerleridir. THD_V ve THD_I olarak sırasıyla gerilim ve akım için toplam harmonik distorsiyonu (bozulmayı) ifade etmektedir. P aktif gücü temsil ederken, P_1 ise aktif gücün temel bileşenini temsil eder. Aynı şekilde, S görünür gücü temsil ederken, S_1 ise görünür gücün temel bileşenini temsil etmektedir. PF güç faktörü iken f ise frekansı göstermektedir. Harmonik güç, görünür gücün temel olmayan kısmına eşit iken DPF de deplasman güç faktörüne, yani gerilim ve akımın temel bileşenlerinin arasındaki açının kosinüsüne eşittir.

Harmonik analizöründe akım ve gerilimin harmonik bileşenlerinin genlikleri temel bileşen değerinin yüzdesi olarak verildiği için gerçek değerler hesaplama yoluyla bulunmuştur. Ayrıca her harmonik için akım ve gerilimin açıları harmonik analizöründen elde edilmiştir. Aktif gücün sadece bileşkesi ve temel bileşeni verildiğinden dolayı geri kalan harmoniklere ait tüm güç değerleri bu verilerle hesaplanmıştır. Verilen ve hesaplanan bu değerler her harmonik mertebesi için Tablo 5.2'de verilmiştir.

Tablo 5.2'deki verilerde n harmonik mertebesini göstermektedir. V gerilimi, I akımı, φ gerilim ve akım arasındaki açıyı, P aktif gücü ve Q reaktif gücü temsil etmektedir. Tablo 5.3'te ise bilinmeyen diğer değerler verilmiştir.

Tablo 5.3'te V_H, I_H, P_H ve Q_H sırasıyla gerilimin, akımın, aktif gücün ve reaktif gücün harmonik değerlerinin bileşkesini gösterir. Q reaktif gücün toplamını gösterirken S_N ise temel olmayan görünür gücü, yani ölçümlerdeki harmonik güç olarak tabir edilen büyüklüğü belirtir.

Tablo 5.2 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile her harmonik derecesi için yapılan hesaplamalar

Harmonik Mertebesi	V_n (V)	I_n (A)	φ_n (°)	P_n (W)	Q_n (Var)
n=1	207,4248	0,5	38,62	81	64,73
n=3	13,75	0,3	-109,8	-1,4	-3,88
n=5	10,744	0,1023	284,46	-0,2745	-1,0643
n=7	11,45	0,0765	104,64	-0,221	0,8475
n=9	8,442	0,045	267,56	-0,0162	-0,38
n=11	10	0,03	-112	-0,112	-0,278
n=13	7,944	0,0184	-98,96	-0,023	-0,144
n=15	8,9	0,0067	234	-0,035	-0,0482
n=17	7,4	0,00105	156,36	-0,0071	0,0031
n=19	7,218	0,00875	102,1	-0,0132	0,0617
n=21	5,621	0,01085	92,86	-0,003	0,061
n=23	5,206	0,0147	92,46	-0,0033	0,0764

Tablo 5.3 FLUKE 435-II harmonik analizörü ile yapılan ölçümlerden yapılan hesaplamalarda diğer bilinmeyen değerler

Büyüklük	Değer	Büyüklük	Değer
$\mathbf{V_H}$ (Volt)	31,28	$\mathbf{I_H}$ (Amper)	0,335
$\mathbf{P_H}$ (W)	-1,5	$\mathbf{Q_H}$ (VAr)	-4,7448
Q (VAr)	59,9852	$\mathbf{S_N}$ (VA)	72,3

Ölçüm ve hesaplamalarda yeterli veri elde edildiğine göre bundan sonraki aşamada Budeanu, Fryze, Czarnecki ve Emanuel'in güç tanımlarının karşılaştırılması yapılabilir.

Budeanu'nun güç tanımında görünür güç ve aktif güç biliniyor, reaktif güç ve distorsiyon gücü tanımları bilinmiyordu. Reaktif güç de Tablo 5.3'te 59,9852 VAr olarak bulunduğu için geriye bilinmeyen bir tek distorsiyon gücü kalmaktadır. (4.25) numaralı eşitlik kullanılarak bulunan değerler Tablo 5.4'te verilmiştir.

Tablo 5.4 Ölçüm değerlerinin Budeanu'nun güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	126,3	**P** (W)	79,2
$\mathbf{Q_B}$ (VAr)	59,9852	$\mathbf{D_B}$ (VAr)	77,98

Tablo 5.4'te verilmiş olan Q_B değeri Budeanu'nun kullandığı reaktif güç tanımı iken D_B de Budeanu'nun önerdiği distorsiyon gücü tanımını ifade eder.

Fryze'nin güç tanımında yine görünür güç ve aktif güç bilinirken Fryze'nin tanımladığı reaktif güç bilinmiyordu. (4.30)'daki eşitlik kullanılarak Q_F şeklinde gösterilen Fryze'nin tanımladığı reaktif güç de bulunmuş, sonuçlar da Tablo 5.5'te verilmiştir. Zaten bu değer de Budeanu'nun kullandığı reaktif güç ve distorsiyon gücünün kareleri toplamının karekökü eşit olacaktır.

Tablo 5.5 Ölçüm değerlerinin Fryze'nin güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	126,3	**P** (W)	79,2
$\mathbf{Q_F}$ (VAr)	98,382		

Czarnecki'nin güç tanımı, ilk iki güç tanımına göre biraz daha karmaşık bir yaklaşımdır. Yine bilinen görünür güç ve aktif güç iken bilinmeyenler ise D_S olarak gösterilen parçalanmış güç ve Q_R olarak bilinen kendi tanımladığı reaktif güçtür. Bunları bulmak için gerekli I_R ve I_S akımlarını bulmak için kullanılacak eşitsizlikler sırasıyla (5.1) ve (5.2)'de verilmiştir. Ondan sonra da (4.37), (4.38) ve (4.39)

numaralı denklemler kullanılarak D_S ve Q_R değerleri bulunmuş, bulunan değerler Tablo 5.6'da verilmiştir.

$$I_R = \sqrt{\sum_{n=N} {Q_n}^2 / {V_n}^2} \tag{5.1}$$

$$I_S = \sqrt{\sum_{n=N} (I_n \cos(\varphi_n) - \mathrm{I}_{a_n})^2} = \sqrt{\sum_{n=N} (I_n \cos(\varphi_n) - G * V_n)^2} \tag{5.2}$$

(5.2)'de I_a aktif akımdır. Aktif akımın bileşenleri bu şekilde iletkenlik, kondüktans (G) kullanılarak bulunabilir.

Tablo 5.6 Ölçüm değerlerinin Czarnecki'nin güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	126,3	**P** (W)	79,2
$\mathbf{I_R}$ (A)	0,4426	$\mathbf{I_S}$ (A)	0,141283
$\mathbf{Q_R}$ (VAr)	92,8476	$\mathbf{D_S}$ (VAr)	29,637

Emanuel'in güç tanımı en çok bilinmeyenin olduğu yaklaşımdır. Yine aktif güç ve görünür güç bilinirken bulunması gereken büyüklükler akımdan kaynaklanan distorsiyon gücü, gerilimden kaynaklanan distorsiyon gücü ve harmonik görünür güçtür. Bu üçü (4.62), (4.63) ve (4.64) numaralı denklemlerden bulunmuştur. Bunlara ek olarak P_C olarak gösterilen tamamlayıcı güç (4.41)'den, S_1, S_N, P_1, P_H, Q_1 gibi değerler de (4.49), (4.52) ve (4.56) numaralı denklemlerden bulunup Tablo 5.7'ye yerleştirilmiştir.

Tablo 5.7 Ölçüm değerlerinin Emanuel'in güç tanımına uygulanması ile elde edilen sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	126,3	**P** (W)	79,2
$\mathbf{P_C}$ (VAr)	74,09	$\mathbf{S_1}$ (VA)	103,5
$\mathbf{S_N}$ (VA)	72,3	$\mathbf{P_1}$ (W)	80,7
$\mathbf{P_H}$ (W)	-1,5	$\mathbf{Q_1}$ (VAr)	64,73
$\mathbf{Q_H}$ (VAr)	-4,7448	$\mathbf{D_V}$ (VAr)	15,61
$\mathbf{D_I}$ (VAr)	69,16	$\mathbf{S_H}$ (VAr)	10,43

Bu ölçümde kullanılan FLUKE 435-II harmonik analizörünün ölçümünün Emanuel'in yöntemi ile yani IEEE'nin benimsemiş olduğu yöntem ile aynı olduğu tespit edilmiştir. Harmonik güç olarak belirtilen büyüklüğün S_N şeklinde ifade edilen temel olmayan görünür güç olması ve harmonik aktif gücün yönlü olması bunun ispatıdır. Yapılan deneysel çalışmada analizör, sadece temel olmayan görünür gücü bulmuştur. Analizör, bu gücün bileşenleri olan akımdan gelen distorsiyon gücünü, gerilimden gelen distorsiyon gücünü ve harmonik görünür gücü doğrudan ölçmemektedir. Bu bir eksiklik olsa da bu deney en azından sahada kabul edilen yöntemin Emanuel'in yaklaşımı olduğunun saptanmasında yardımcı olmuştur. Böylece sayısal uygulamanın ilk aşaması tamamlanmıştır.

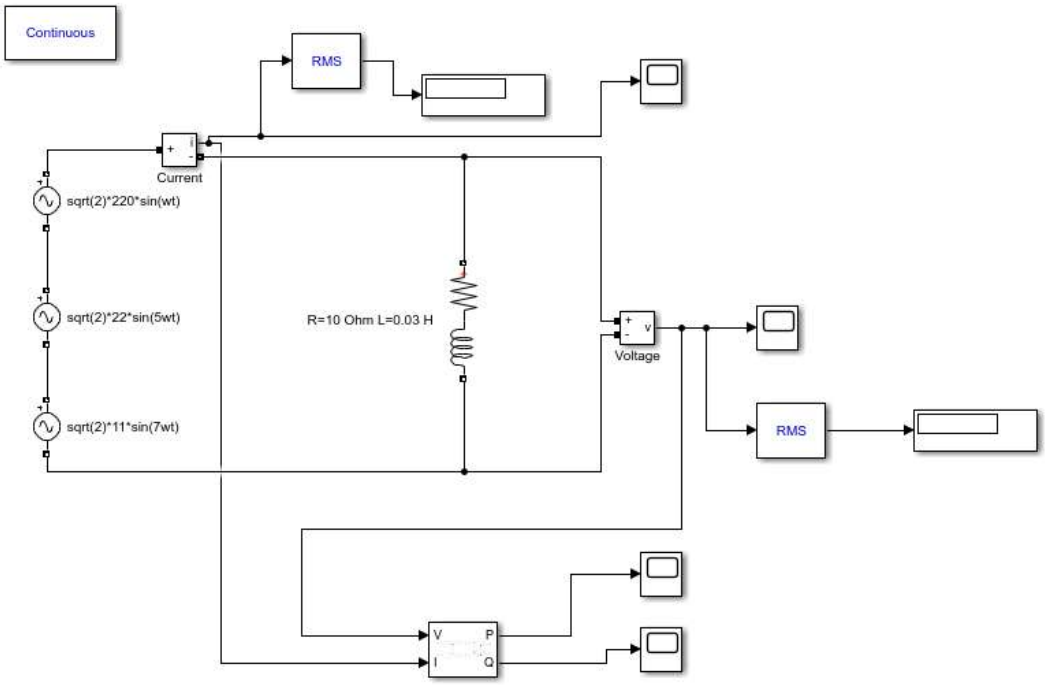
Sayısal uygulamanın ikinci aşamasındaki MATLAB SIMULINK paket programı yardımı ile kurulan devre sırasıyla efektif değeri 220 V olan 50 Hz frekanslı temel bileşen gerilim kaynağı, %10 oranında beşinci harmonik gerilimini temsil etmek üzere efektif değeri 22 V ve frekansı 250 Hz olan ikinci gerilim kaynağı ile %5 oranında yedinci harmonik gerilimini temsil etmek üzere efektif değeri 11 V ve frekansı 350 Hz olan üçüncü gerilim kaynağının seri bağlanmasından oluşan gerilim kaynakları ile bu gerilimlerin uygulandığı R=10 Ohm değerinde bir direnç ve L=0,03 H değerinde endüktanstan oluşan seri R-L yükünden meydana gelmektedir. Direncin deri etkisinin ihmal edildiği devrede gerilim kaynaklarının

gerilimlerinin ani değer bağıntıları (5.3)'te verilmiştir. Simülasyon devresinin şeması ve gerilimin harmonik spektrumu sırasıyla Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te verilmiştir.

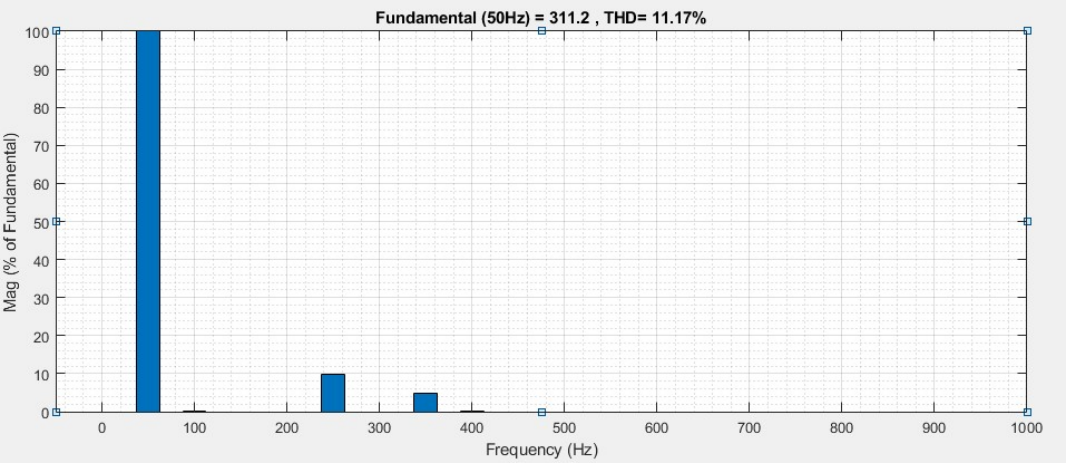
$$V_1(t) = \sqrt{2} * 220 * \sin(\omega t) \text{ [Volt]}$$

$$V_5(t) = \sqrt{2} * 22 * \sin(5\omega t) \text{ [Volt]}$$

$$V_7(t) = \sqrt{2} * 11 * \sin(7\omega t) \text{ [Volt]} \quad (5.3)$$



Şekil 5.2 Simülasyon devresi



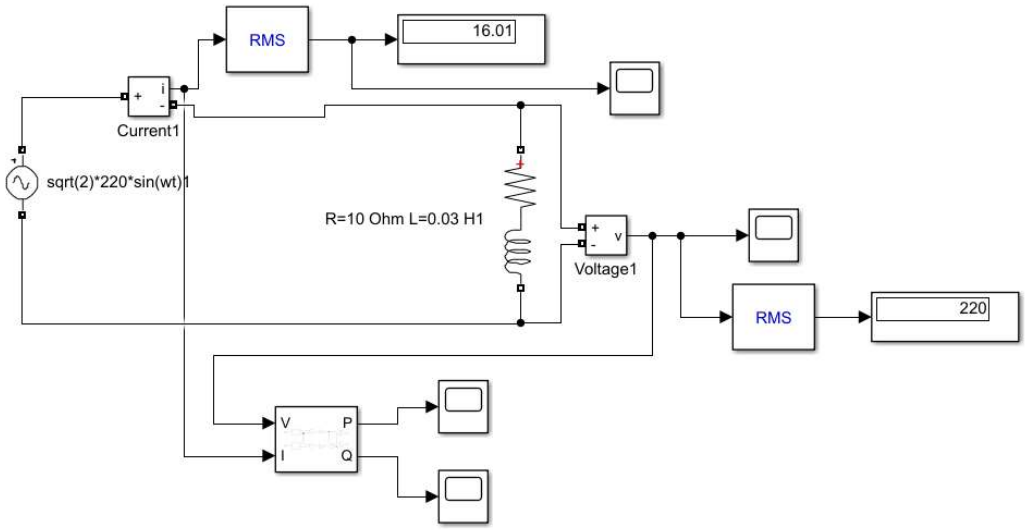
Şekil 5.3 Yüke uygulanan gerilimin harmonik spektrumu (Spektrumda %100 olarak temel bileşen geriliminin (rms değeri 220V) tepe değeri (311,2V) gösterilmiştir.)

```
Samples per cycle = 200
DC component      = 0.005994
Fundamental       = 311.2 peak (220 rms)
THD               = 11.17%

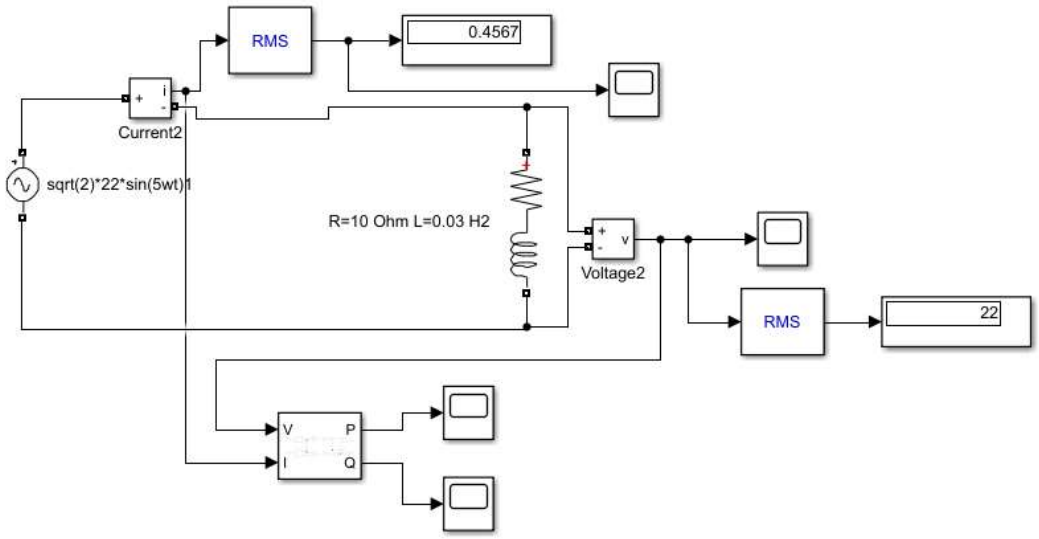
     0 Hz   (DC):          0.00%     90.0°
    50 Hz   (Fnd):       100.00%     -0.1°
   100 Hz   (h2):          0.05%      3.4°
   150 Hz   (h3):          0.02%      9.0°
   200 Hz   (h4):          0.00%     87.5°
   250 Hz   (h5):          9.99%     -0.3°
   300 Hz   (h6):          0.02%      6.2°
   350 Hz   (h7):          5.00%     -0.5°
   400 Hz   (h8):          0.03%      1.9°
   450 Hz   (h9):          0.02%      4.1°
   500 Hz  (h10):          0.02%      5.7°
   550 Hz  (h11):          0.02%      7.1°
   600 Hz  (h12):          0.01%      8.3°
   650 Hz  (h13):          0.01%      9.5°
   700 Hz  (h14):          0.01%     10.6°
   750 Hz  (h15):          0.01%     11.6°
   800 Hz  (h16):          0.01%     12.7°
   850 Hz  (h17):          0.01%     13.7°
   900 Hz  (h18):          0.01%     14.7°
   950 Hz  (h19):          0.01%     15.7°
```

Şekil 5.4 Yüke uygulanan gerilimin MATLAB SIMULINK'ten elde edilen harmonik spektrumu (liste formatında)

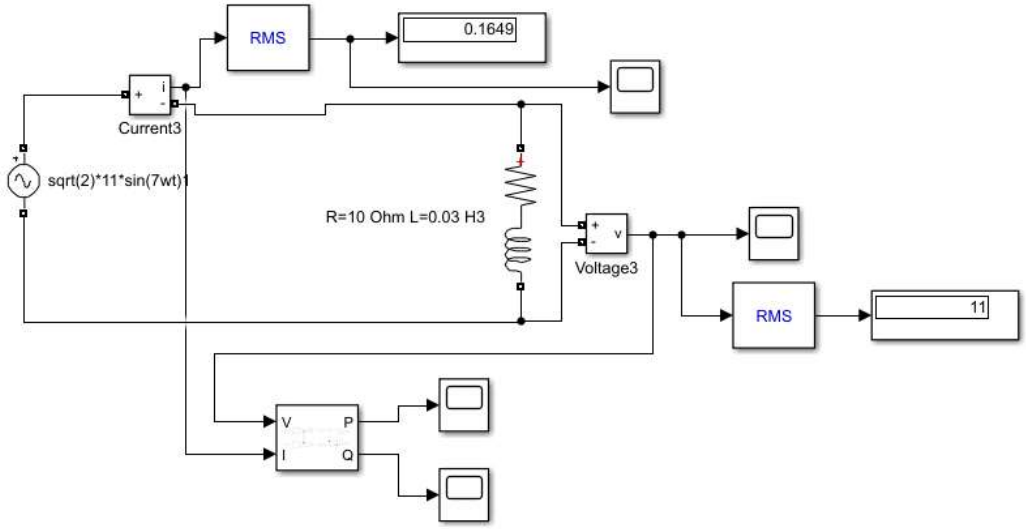
Şekil 5.4'te görüldüğü üzere devrede gerilimin temel bileşeni dışında sadece 250 Hz olan beşinci harmonik bileşeni ve 350 Hz olan yedinci harmonik bileşeni bulunmaktadır. Beşinci harmonik gerilim distorsiyonu %9,99 ve yedinci harmonik gerilim distorsiyonu %5'dir. Akımın temel, beşinci harmonik ve yedinci harmonik bileşenlerini bulmak için devreye Süperpozisyon Teoremi uygulamak gerekir. Frekans arttıkça devredeki direnç değişmeyeceğinden (deri etkisi ihmal edildiğinden dolayı) ve endüktif reaktans artacağı için her bir gerilim kaynağı için Süperpoziyon Teoremine göre çözüm yaparken yük empedansı ve dolayısıyla yük akımı değişecektir. Devre, Süperpozisyon Teoremi uygulanarak MATLAB SIMULINK yardımı ile her bir gerilim kaynağı için ayrı ayrı analiz edilmiş ve yük akımları bulunmuştur. Oluşturulan basit simülasyon devreleri aşağıda Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 Simülasyon devresinin sadece temel bileşen içeren durumu

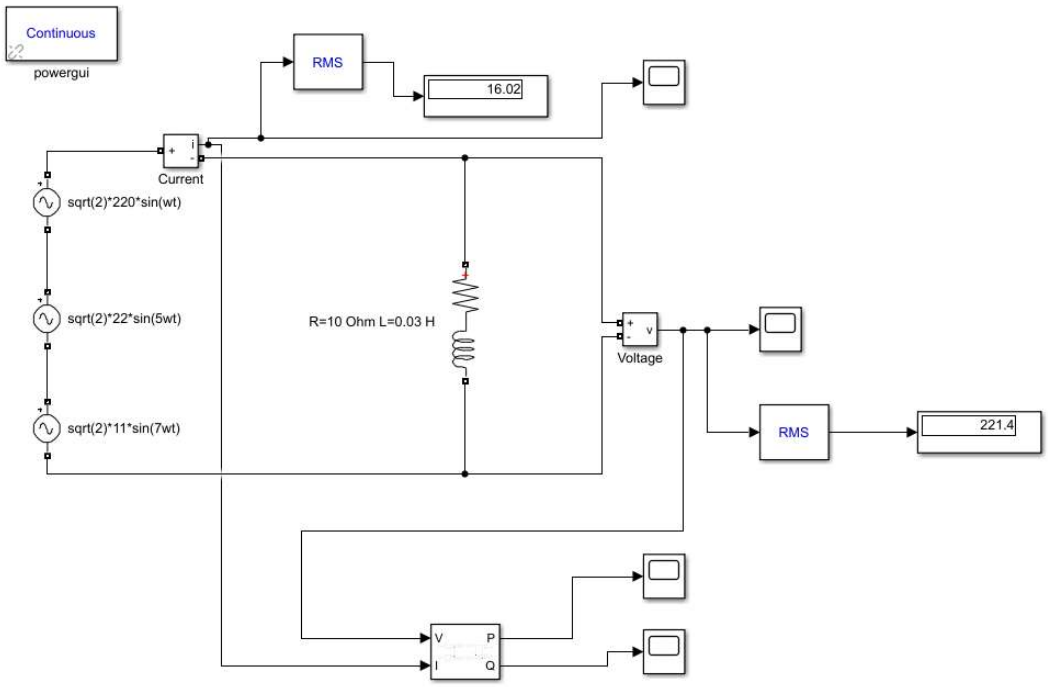


Şekil 5.6 Simülasyon devresinin sadece beşinci harmonik bileşen içeren durumu



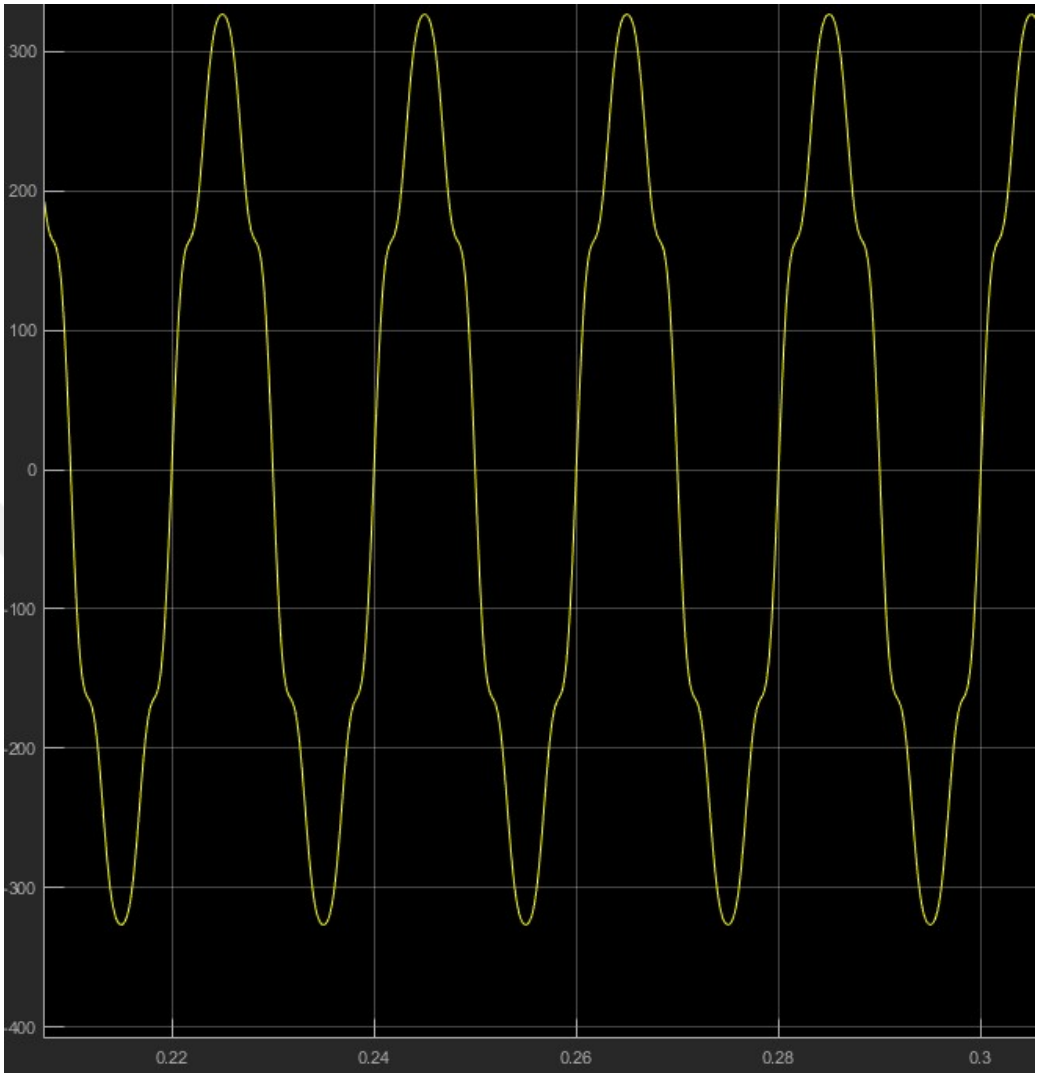
Şekil 5.7 Simülasyon devresinin sadece yedinci harmonik bileşen içeren durumu

Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de görüldüğü üzere simülasyon sonucu akım ve gerilim değerleri belirlenmiştir. Buna göre çözümü yapılmış olan eşdeğer devre de Şekil 5.8'de gösterilmiştir.

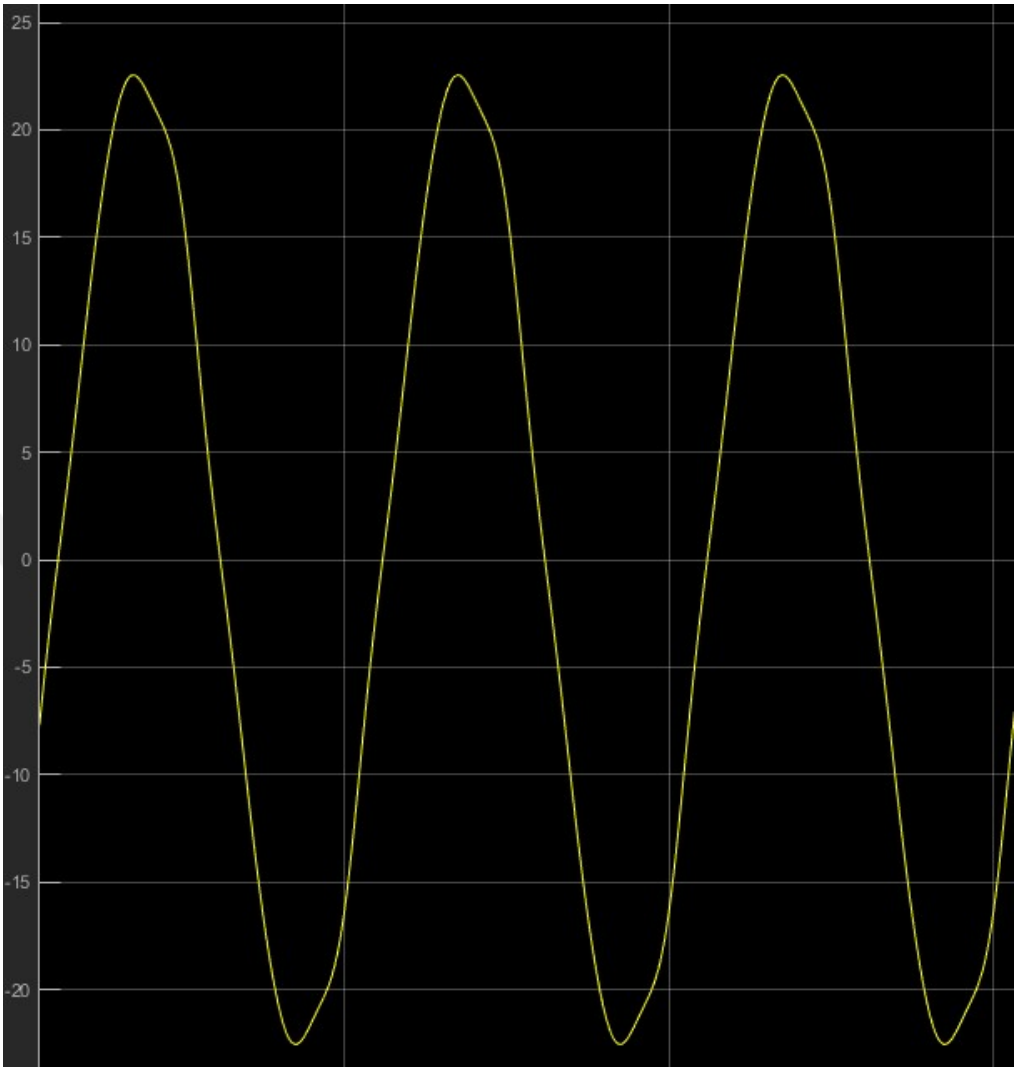


Şekil 5.8 Simülasyon devresinin güç blokları ve tüm gerilim kaynakları dahil tümü

Şekil 5.8'de görüldüğü üzere, simülasyon devresinde akımın rms değeri 16.02 A, gerilimin rms değeri ise 221.4 V çıkmıştır. Şekil 5.9'da yüke uygulanan gerilimin, Şekil 5.10'da ise yük akımının dalga şekilleri verilmiştir.

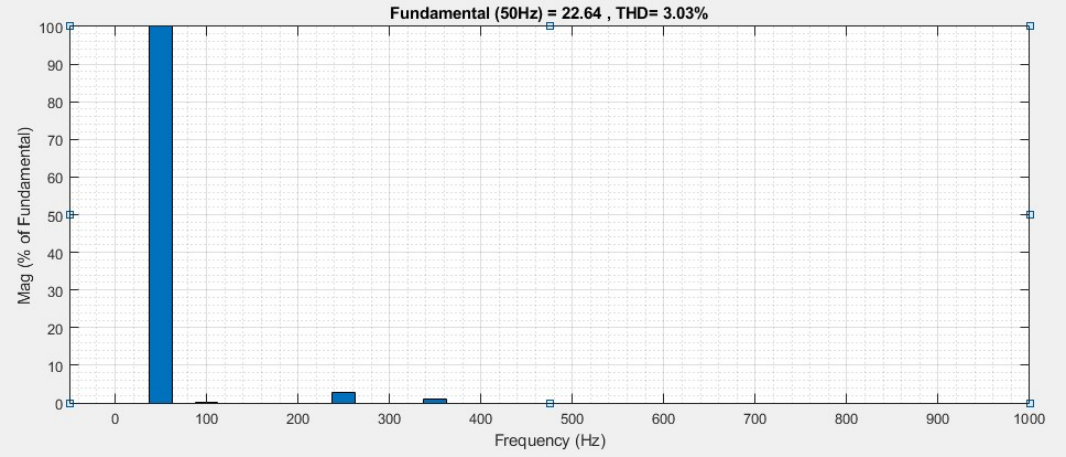


Şekil 5.9 Simülasyon devresinde yüke uygulanan gerilimin zamana göre değişimi



Şekil 5.10 Simülasyon devresinde yük akımının zamana göre değişimi

Simülasyondan elde edilen akıma ait harmonik spektrumu Şekil 5.11'de verilmiştir. Liste formatındaki hali ise Şekil 5.12'de mevcuttur.



Şekil 5.11 Simülasyon devresindeki akımın harmonik spektrumu (Spektrumda %100 olarak temel bileşen akımının (rms değeri 16,01A) tepe değeri (22,64 A) gösterilmiştir.)

```
Samples per cycle = 200
DC component      = 0.006714
Fundamental       = 22.64 peak (16.01 rms)
THD               = 3.03%

     0 Hz  (DC):          0.03%     90.0°
    50 Hz  (Fnd):       100.00%    -43.4°
   100 Hz  (h2):          0.04%    -20.3°
   150 Hz  (h3):          0.02%     -4.4°
   200 Hz  (h4):          0.02%     17.5°
   250 Hz  (h5):          2.85%    -78.1°
   300 Hz  (h6):          0.01%    -14.9°
   350 Hz  (h7):          1.03%    -81.4°
   400 Hz  (h8):          0.01%    -28.1°
   450 Hz  (h9):          0.01%    -17.5°
   500 Hz (h10):          0.01%    -12.1°
   550 Hz (h11):          0.01%     -8.5°
   600 Hz (h12):          0.01%     -5.6°
   650 Hz (h13):          0.00%     -3.3°
   700 Hz (h14):          0.00%     -1.3°
   750 Hz (h15):          0.00%      0.5°
   800 Hz (h16):          0.00%      2.1°
   850 Hz (h17):          0.00%      3.6°
   900 Hz (h18):          0.00%      5.0°
   950 Hz (h19):          0.00%      6.3°
```

Şekil 5.12 Yük akımının MATLAB SIMULINK'ten elde edilen harmonik spektrumu (liste formatında)

Bu veriler göz önüne alınarak devrenin ani akım denklemleri de çıkarılabilir. (5.4)'te verilen eşitlikler, devrenin ani akım denklemleridir.

$$i_1(t) = \sqrt{2} * 16{,}01 * \sin(\omega t - 43{,}304°) \quad [\text{Amper}]$$

$$i_5(t) = \sqrt{2} * 0{,}4567 * \sin(5\omega t - 78{,}02°) \quad [\text{Amper}]$$

$$i_7(t) = \sqrt{2} * 0{,}1649 * \sin(7\omega t - 81{,}381°) [\text{Amper}] \qquad (5.4)$$

Sadece (5.3) ve (5.4) denklemlerindeki bilgiler ile harmonikli durumdaki güç tanımlarına ilişkin farklı yaklaşımların incelenmesi kolaylıkla yapılabilir. Bu durumda simülasyon devresinden elde edilen veriler Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Simülasyon devresinden elde edilen değerler

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
$\mathbf{V_{rms}}$ (Volt)	221,4	$\mathbf{I_{rms}}$(Amper)	16,02
$\mathbf{V_1}$ (Volt)	220	$\mathbf{I_1}$ (Amper)	16,01
$\mathbf{V_5}$ (Volt)	22	$\mathbf{I_5}$ (Amper)	0,4567
$\mathbf{V_7}$ (Volt)	11	$\mathbf{I_7}$ (Amper)	0,1649
P (W)	2565,56	**Q** (W)	2427,393
$\mathbf{P_1}$ (W)	2563,2	$\mathbf{Q_1}$ (W)	2415,77
$\mathbf{P_5}$ (W)	2,08554	$\mathbf{Q_5}$ (W)	9,83
$\mathbf{P_7}$ (W)	0,27184	$\mathbf{Q_7}$ (W)	1,793
$\mathbf{P_H}$ (W)	2,3574	$\mathbf{Q_H}$ (W)	11,623
$\boldsymbol{\varphi_1}$ (°)	43,304	**S** (VA)	3546,828
$\boldsymbol{\varphi_5}$ (°)	78,02	$\mathbf{S_1}$ (VA)	3522,2
$\boldsymbol{\varphi_7}$ (°)	81,381	$\mathbf{S_N}$ (VA)	417,2481
$\mathbf{X_1}$ (Ω)	j9,4248	$\mathbf{Z_1}$ (Ω)	10+j9,4248
$\mathbf{X_5}$ (Ω)	j47,1239	$\mathbf{Z_5}$ (Ω)	10+j47,1239
$\mathbf{X_7}$ (Ω)	j65,97344	$\mathbf{Z_7}$ (Ω)	10+j65,97344
$\mathbf{THD_V}$ (%)	11,17	$\mathbf{THD_I}$ (%)	3,03

Tablo 5.8'deki değerler kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Hesaplamalar yapılırken yukarıdaki ölçüm yapılan ilk devredeki izlenen yöntemin aynısı adım adım simülasyon devresine de uygulanmıştır. Buna bağlı olarak simülasyon devresine Budeanu'nun yöntemi uygulanınca çıkan sonuçlar Tablo 5.9'da, Fryze'nin yöntemi uygulanınca çıkan sonuçlar Tablo 5.10'da, Czarnecki'nin yöntemi uygulanınca çıkan sonuçlar Tablo 5.11'de ve son olarak Emanuel'in yöntemi uygulanınca çıkan sonuçlar Tablo 5.12'de verilmiştir.

Tablo 5.9 Simülasyon devresine Budeanu'nun güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	3546,828	**P** (W)	2565,56
$\mathbf{Q_B}$ (VAr)	2427,393	$\mathbf{D_B}$ (VAr)	325,0445

Tablo 5.10 Simülasyon devresine Fryze'nin güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	3546,828	**P** (W)	2565,56
$\mathbf{Q_F}$ (VAr)	2449,06		

Tablo 5.11 Simülasyon devresine Czarnecki'nin güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	3546,828	**P** (W)	2565,56
$\mathbf{I_R}$ (A)	10,991	$\mathbf{I_S}$ (A)	1,21
$\mathbf{Q_R}$ (VAr)	2433,473	$\mathbf{D_S}$ (VAr)	267,894

Tablo 5.12 Simülasyon devresine Emanuel'in güç tanımı uygulanınca çıkan sonuçlar

Büyüklük	**Değer**	**Büyüklük**	**Değer**
S (VA)	3546,828	**P** (W)	2565,56
$\mathbf{P_C}$ (VAr)	402,425	$\mathbf{S_1}$ (VA)	3522,2
$\mathbf{S_N}$ (VA)	417,2481	$\mathbf{P_1}$ (W)	2563,2
$\mathbf{P_H}$ (W)	2,3574	$\mathbf{Q_1}$ (VAr)	2415,77
$\mathbf{Q_H}$ (VAr)	11,623	$\mathbf{D_V}$ (VAr)	393,42974
$\mathbf{D_I}$ (VAr)	106,72266	$\mathbf{S_H}$ (VAr)	11,921

Sonuç olarak simülasyon devresinde sonuca ulaşmak daha kolay olmuştur. İstenilen anda değerleri değiştirerek her yöntemi rahatça hesaplayabilme özelliği olması ve harmonik spektrum, akım ile gerilim değişimlerini grafikle göstermesi simülasyon sisteminin büyük bir artısıdır. MATLAB SIMULINK ile oluşturulan simülasyon devresinden harmonik akım ve gerilim spektrumları bar grafik veya liste şeklinde elde edilebilmektedir. Tablo 5.9, Tablo 5.10, Tablo 5.11 ve Tablo 5.12'de gösterildiği üzere simülasyon sonuçları yardımıyla literatürde verilmiş farklı güç tanımlarına göre harmonikli durumdaki güç değerleri hesaplanmıştır.

6
Sonuç ve Öneriler

Elektrik enerjisini kaliteli, güvenli, verimli ve kesintisiz bir biçimde üretip, iletip dağıtmak günümüzde olduğu gibi gelecekte de büyük önem taşıyacaktır. Bunu sağlayabilmenin en önemli yollarından biri sistemdeki harmonikleri mümkün olduğunca azaltmaktır. Gelecekte elektrikli taşıtların yaygınlaşacak olması, bu lineer olmayan yüklerin harmonik bileşenler içeren şarj akımları sebebiyle özellikle elektrik dağıtım sistemlerinde harmonik sorunlarının güncel olarak devam etmesine neden olacaktır. Bu nedenle harmonik bileşenlerin mevcut olması halindeki güç tanımları önemini korumaktadır.

Harmonikli durumda, sinüsoidal durumdan farklı olarak güç tanımları değişmektedir. Budeanu, Fryze, Czarnecki ve Emanuel gibi bilim insanları bu duruma farklı şekilde yaklaşmışlardır. Budeanu ilk olarak distorsiyon gücü kavramından bahsederek bir nevi bu tartışmaları başlatan isim olmuştur. Ardından Fryze, sonra Czarnecki, en son da Emanuel yaklaşımlarını sunmuş, konuya yeni bir perspektif getirmişlerdir. Günümüzde hala Czarnecki ve Emanuel bu konu hakkında araştırmalarını sürdürmekte, yeni tanımlar ve yaklaşımlar ile bu konudaki bilimsel çalışmalarını sürdürmektedirler.

Sunulan tez çalışmasının sayısal uygulama ve simülasyon bölümündeki ölçüm ve simülasyonlar sonucunda; literatürde verilen tüm güç tanımlarına göre aktif gücün (P) ve görünen gücün (S) aynı sayısal sonucu verdiği görülmektedir. Ancak reaktif güç (Q) ve distorsiyon gücü (D) sonuçlarında her tanım için birçok farklılıklar bulunmaktadır. Literatürde verilen tanımlar içinde Emanuel tarafından verilen aktif güç tanımında harmonik aktif gücünün yönünün gösterilebilir olması bir yenilik ve avantajdır. Buna ek olarak, diğer yöntemlere göre daha fazla veri bulunabilmesi ve görece daha efektif olması bu yaklaşımın IEEE tarafından benimsenmesine olanak sağlamıştır.

Günümüzde reaktif enerjinin ölçülüp belirlenen limit değerinden daha fazla reaktif enerji çeken aboneden reaktif ceza bedeli alınması gibi bir uygulamanın harmonikli akım çeken, şebekede harmonik kirliliğe sebep olan abonelere de uygulanması gerekmektedir. Bunun gerçekleştirilebilmesi için harmonik akım ve güç akış yönlerinin doğru belirlenmesi, buna imkan veren güç tanımlarının yapılması ve bu amaca uygun elektrik sayaçlarının gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Yapılan çalışmalar henüz istenen seviyeye ulaşmamıştır ve gelecekte bu konuya önem verilmelidir.

Literatürde verilen güç tanımlarına ilişkin tartışma, harmonikli durumdaki fiziksel gerçeklerin hangisine uyduğu ve hangisine uymadığı üzerine odaklanmalıdır. Bilim insanlarınca genel olarak aktif güç ve görünür güç kavramlarında fikir birliği sağlanmışken distorsiyon gücü ve reaktif güç gibi tanımlarda hala bir ayrılık söz konusudur. Bununla birlikte, farklı ifadelerin anlamını yorumlayabilmek ve kompanzasyon, gerilim kontrolü, harmonik bozulmanın kaynağını belirlemek veya güç kayıplarının belirlenmesi gibi uygulamalar için de doğru güç tanımlarını ortaya koyabilmek oldukça önemlidir. Aynı tip analizler çok fazlı sistemler için de geliştirilebilir. Günümüz itibariyle literatürde harmonikli durumda reaktif güç ve distorsiyon gücü için verilen tanımların henüz yeterli olmadığı, bu konuda bilimsel çalışmalara devam edilmesi gerektiği, yeni ve daha gerçekçi güç tanımlarına olan ihtiyacın devam ettiği görülmektedir.

Kaynakça

Akmaz, D. (2012). Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması İçin Aktif Güç Filtre Tasarımları. Yüksek Lisans Tezi. Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Tunceli.

Arabsalmanabadi, B., Javadi, A. ve Al-Haddad, K. (2017). Harmonic Power Flow in Unbalanced and Polluted Radial Distribution Systems. 2017 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 1504-1509.

Arrillaga, C., Smith, B. C., Watson, N. R. ve Wood, A. R. (1997). Power System Harmonic Analysis. John Wiley & Sons. Chichester. England.

Balcı, M. E. ve Hocaoğlu, M. H. (2004). Comparison of Power Definitions for Reactive Power Compensation in Nonsinusoidal Conditions. 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Lake Placid. New York. 519-524.

Coelho, R. D. A., Lima, E. M., Junqueira, C. M. S., Pereira, A. M. A., Medeiros, H. G. M. S., Brito, N. S. D. ve Lira, G. R. S. (2018). Comparative Analysis of Power Definitions in Nonsinusoidal Conditions – A Case Study. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). Niteroi. Brazil. 1-6.

Czarnecki, L. (2012). Working, reflected and detrimental active powers. IET Generation, Transmission & Distribution, 6(3): 233-239.

Czarnecki, L. ve Toups, T. N. (2013). Working and reflected active powers of harmonics generating single-phase loads. XI International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC 2013, Zielona Gora, Poland, 1-5.

Czarnecki, L. (2015). Currents' Physical Components (CPC) in systems with semi-periodic voltages and currents. 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), Lagow, 1-7.

Czarnecki, L. ve Bhattarai, P. D. (2015). Currents' Physical Components of Unbalanced Three-Phase LTI Loads at Asymmetrical Nonsinusoidal Supply Voltage. 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), Lagow, 1, 32-37.

Czarnecki, L. ve Toups, T. N. (2015). Working and Reflected Active Powers of Three-Phase Loads. 2015 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation (ISNCC), Lagow, 1-5.

Czarnecki, L. ve Haley, P. M. (2016). Power Properties of Four-Wire Systems at Nonsinusoidal Supply Voltage. IEEE Transactions on Power Delivery, 31(2): 513-521.

Czarnecki, L. ve Bhattarai, P. D. (2017). A Method of Calculation of LC Parameters of Balancing Compensators for AC Arc Furnaces. IEEE Transactions on Power Delivery, 32(2): 688-695.

De La Rosa, F. C. (2006). Harmonics and Power Systems. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton. FL.

De La Rosa, F. C. (2015). Harmonics, Power Systems, and Smart Grids. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Raton. FL.

Dugan, R. C., McGranaghan, M. F., Santoso, S. ve Beaty, H. W. (2012). Electrical Power Systems Quality. McGraw-Hill Education. India.

Emanuel, A. E. (2010). Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. John Wiley & Sons. Singapore.

Fernando, M., Claudio, R. ve Santiago, L. (2011). Power Quality Measurement Under Non-Sinusoidal Condition. DOI: 105772/16580. In book: Power Quality – Monitoring, Analysis and Enhancement. 37-60. https://www.intechopen.com/books/power-quality-monitoring-analysis-and-enhancement/power-quality-measurement-under-non-sinusoidal-condition (Erişim Tarihi: 17.06.19)

Jagiela, K., Rak, J., Gala, M. ve Kepinski, M. (2010). Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System. Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, Bergamo, 1-7.

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., Uzunoğlu, M., Karakaş, A., Arıkan, O. ve Baysal, M. (2006). Enerji Kalitesi ve Harmonikler. Kurs Notu. TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası. EG/2006/1. Ankara.

Misra, R., ve Paudyal, S. (2015). Analysis and Reduction of Total Harmonic Distortions in Distribution System with Electric Vehicles and Wind Generators. 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, 1-5.

Peng, F. Z., Akagi, H. ve Nabae, A. (1990). A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems-A Combined System of Shunt Passive and Series Active Filters. IEEE Transactions On Industry Applications, 26(6): 983-990.

Şenyurt, Ö. (2005). Elektrik Tesislerinde Harmonikler. Yüksek Lisans Semineri. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Ankara.

Xia, D. ve Heydt, G. T. (1982). Harmonic Power Flow Studies - Part II Implementation and Practical Application. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-101(6): 1266-1270.

Yang, N., ve Le, M. (2016). Three-phase harmonic power flow by direct Z_{BUS} method for unbalanced radial distribution systems with passive power filters. IET Gener. Transm. Distrib., 10(13): 3211-3219.

Yu, G., ve Lin, T. (2016). 2m+1 Point Estimate Method for Probabilistic Harmonic Power Flow. 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 1-5.

Tezden Üretilmiş Yayınlar

İletişim Bilgisi: necaticagrigurpinar@gmail.com

Konferans Bildirileri

1. **Gürpınar, N. ve Yumurtacı, R.**, Harmonik Bileşenler İçeren Elektrik Güç Sistemlerinde Güç Tanımlarına İlişkin Farklı Yaklaşımların İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Ereğli Uluslararası Bilim ve Akademi Kongresi'19, 2: 121-130. 9-10 Mart 2019, Ereğli, Konya.