

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE
HARMONİK ANALİZİ ALGORİTMALARI GELİŞTİRME**

KADİR EGEMEN GERMEÇ

DOKTORA TEZİ
2015

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE
HARMONİK ANALİZİ ALGORİTMALARI GELİŞTİRME**

**DEVELOPING HARMONIC ANALYSIS ALGORITHMS
IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS**

KADİR EGEMEN GERMEÇ

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ELEKTRİK-ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
DOKTORA TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2015

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

“Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi Algoritmaları Geliştirme”
başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından **ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**
ANABİLİM Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Üye (Danışman) : Doç. Dr. Hamit ERDEM

Üye : Doç. Dr. İbrahim SEFA

Üye : Doç. Dr. Mustafa DOĞAN

Üye : Yrd. Doç. Dr. Derya YILMAZ

ONAY

Bu tez 09/07/2015 tarihinde, yukarıdaki jüri üyeleri tarafından kabul edilmiştir.

.././2015

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŐEKKÖR

Yazar, bu çalışmanın gerçekleőmesindeki katkılarından, karşılaşılan gŸlŸklerin aőılmasında yardımcı ve yol gŸsterici olmasından dolayı tez danıőmanı Sayın Doç. Dr. Hamit ERDEM'e ve emeği geçen herkese teőekkŸr eder.

ÖZ

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZİ ALGORİTMALARI GELİŞTİRME

K. EGEMEN GERMEÇ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik güç sistemlerinde, enerji kalitesinin artırılması ve kayıpların azaltılması açısından harmonik bileşenlerin hızlı ve doğru olarak belirlenmesi önem taşımaktadır. Bu amaçla yapılan tez çalışmasında, elektrik güç sistemlerinde zamanla değişen sinyaller için, ADALINE (Uyarlamalı Doğrusal Eleman) tabanlı algoritmalar kullanılarak, temel frekans tespiti ile harmonik ve ara harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının kestirimini kapsayan çok işlevli bir sistem yapısı geliştirilmiştir. Bu algoritmalarından FADALINE (Fourier ADALINE) tabanlı algoritmalar sadece harmonik ve ara harmonik bileşenlerini kestirirken, geliştirilen GADALINE (Genişletilmiş ADALINE) algoritması ile sistemde olası temel frekans değişiklikleri de kestirebilmektedir. Çalışmada, geliştirilen bu algoritmaların matematiksel çözümlenmesi yapılmış ve başarımı, benzetim çalışmalarıyla ara harmonikli ve temel frekansı değişen gürültü içeren sinyaller uygulanarak denenmiştir.

MATLAB programı ile benzetim ortamında yapılan bu çalışmalar sistemin, akım ve gerilim dalga şekillerinin harmonik analizinde kullanışlı, etkin sonuçlar verdiğini göstermektedir. Elde edilen çıktılar, harmonik ve ara-harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının hangi değerlere sahip oldukları bilgisine ek olarak, bu bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini de sunmaktadır. Böylece, zamanla değişen harmonik ve ara harmoniklerin bireysel etkilerinin, zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu olarak izlenebilmesine olanak sağlanarak analiz yönteminin etkinliği artırılmaktadır. Ayrıca sistem, parametrelerinin dahil edildiği ortama uygun olarak seçilebilmesinden dolayı, uyarlanabilir özellik taşımaktadır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Güç sistemlerinde harmonik ve ara harmonikler, temel frekans, gerçek zamanlı harmonik tespiti, FADALINE, GADALINE, zaman-harmonik analizi.

Danışman: Doç. Dr. Hamit ERDEM, Başkent Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT
DEVELOPING HARMONIC ANALYSIS ALGORITHMS IN ELECTRICAL POWER
SYSTEMS

K. EGEMEN GERMEÇ

Institute of Science of Başkent University

The Department of Electrical and Electronics Engineering

In Electrical Power Systems, a rapid and accurate estimation of harmonic components in terms of reducing losses and increasing the quality of energy is an important concern. In this study, a multifunctional system structure which includes fundamental frequency detection, phase angle and amplitude estimation of harmonic and inter harmonic components is developed by using ADALINE (Adaptive Linear Element) based algorithms for time varying signals. Among these algorithms, FADALINE (Fourier ADALINE) estimates only harmonic and inter harmonic components, whereas EADALINE (Extended ADALINE) estimates probable values of the fundamental frequency variances. In this study, these algorithms are analyzed mathematically and the performance of these improved algorithms is tested in simulations by applying noisy signals including variable fundamental frequency and inter harmonic components.

The results of the experimental studies which are obtained by using MATLAB simulation environment demonstrate that this system is convenient and effective for the harmonic analysis of the current and voltage waveforms. In addition to the information of amplitude and phase angle values of harmonic and inter harmonic components, the results also provide information regarding in which time interval and at what ratio these components are efficient. Thus, the individual effects of this time-variant harmonic and inter harmonic components can be instantly detected in the 3D time-harmonic space, then the efficiency of the evaluation method can be increased. Moreover, the system is adaptive because its parameters can be chosen appropriate to the environment where it was integrated.

KEY WORDS: Harmonics and inter harmonics in power systems, fundamental frequency, real time harmonic detection FADALINE, EADALINE, time-harmonic analysis.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ	ii
ABSTRACT.....	iv
İÇİNDEKİLER LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGELER LİSTESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ	4
2.1 Harmonik Tanımı ve Genel Kavramlar	4
2.2 Harmonik Üreten Kaynaklar	9
2.2.1 Anahtarlabilir güç kaynakları.....	10
2.2.2 Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ve balastları	10
2.2.3 Transformatörler	11
2.2.4 Motorlar ve jeneratörler	11
2.2.5 Doğrultucular (Konvertörler)	11
2.2.6 Ark ocakları.....	12
2.2.7 İletkenler	13
2.2.8 Enerji iletim sistemi.....	13
2.2.9 Devre kesiciler ve sigortalar.....	14
2.2.10 Aydınlatma elemanları	14
2.2.11 Koruma röleleri	15
2.2.12 Diğer harmonik kaynaklar	15
2.3 Harmoniklerin Etkileri	16
2.4 Harmonik Büyüklüklerin Tanımı	18
2.4.1 Sinüzoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler	19

2.4.2 Toplam talep bozulması	21
2.4.3 Tepe faktörü	21
2.4.4 Transformatör faktörü	21
2.4.5 Harmonik faktörü	22
2.4.6 Şekil faktörü.....	22
2.4.7 Harmonik derecesi.....	22
2.4.8 Harmonik frekansı	23
2.4.9 Harmonik bileşenin RMS değeri	23
2.4.10 Harmonik grubun RMS değeri	23
2.4.11 Toplam Harmonik Bozulma	23
2.5 Harmonikleri Belirlemenin Önemi.....	24
3. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZ YÖNTEMLERİ	26
3.1 Harmonik Analiz Yöntemleri.....	27
3.2 Fourier Dönüşümü	30
3.3 Geleneksel YSA Kullanılarak Harmonik Analizi	34
3.4 ADALINE Yapısı ve ADALINE Tabanlı Harmonik Analizi.....	36
4. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER.....	39
4.1 Geleneksel ADALINE (FYSA ve FADLINE) Yapısıyla Harmonik Analizi	40
4.1.1 FADALINE yapısının matematiksel çözümlenmesi.....	41
4.1.2 Sistemin eğitilmesi ve harmonik bileşenlerin belirlenmesi	44
4.2 Genişletilmiş ADALINE Yapısı	48
4.2.1 Geliştirilen FADALINE yapısının matematiksel çözümlenmesi.....	49
4.2.2 Frekans sabitken, diğer harmonik bileşenlerin belirlenmesi	52
4.2.3 Diğer harmonik bileşenler sabitken, temel frekansın belirlenmesi	53
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI	55
5.1 FYSA ile harmonik kestirimi ve HFD yöntemi ile karşılaştırılması	56

5.2 FADALINE ile harmonik kestirimi ve HFD yöntemi ile karşılaştırılması ..	59
5.3 Ara Hamoniklerin Belirlenmesi için Yapılan Benzetim Çalışması	64
5.4 Temel Frekans Kestirimi için Yapılan Benzetim Çalışmaları	66
5.4.1 İstatistiksel yöntem ile yapılan benzetim çalışması.....	67
5.4.2 Zero-Crossing yöntemi ile yapılan benzetim çalışması.....	68
5.4.3 ADALINE yöntemi ile yapılan benzetim çalışması	68
5.4.4 Temel frekans kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması	68
5.5 Genişletilmiş ADALINE İle Yapılan Benzetim Çalışması-1	70
5.5.1 Başlangıç koşulları ve ilk-değer atama	72
5.5.2 Sistem işletimi, hesaplamalar ve hataya bağlı güncellemeler.....	72
5.5.3 Tekrarlı hesaplamalar, iyileştirmeler ve sonuçların görüntülenmesi	73
5.6 Geliştirilen Sistem ile Yapılan Benzetim Çalışması -2.....	78
5.6.1 Harmonik ve alt harmonik bileşenlerin kestirilmesi	80
5.6.2 Temel frekansın kestirilmesi ve izlenmesi.....	83
5.6.3 Sonuçların üç boyutlu uzayda görselleştirilmesi	83
5.7 Geliştirilen Sistem ile Yapılan Benzetim Çalışması-3.....	86
6. SONUÇ	100
KAYNAKLAR LİSTESİ	102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 Harmonik bileşenler	7
Şekil 2.2 Bozuk akım dalga şekli	8
Şekil 3.1 Harmonik belirleme yöntemleri	26
Şekil 3.2 ADALINE yapısı	37
Şekil 4.1 Harmoniklerin belirlenmesinde kullanılan FADALINE yapısı	41
Şekil 4.2 Harmonik güncelleme işleminde kullanılan açık sistem yapısı	47
Şekil 4.3 Temel frekans kestirimini kapsayan açık sistem yapısı	49
Şekil 5.1 Giriş sinyali, HFD ve FYSA yöntemleriyle elde edilen harmonikler	57
Şekil 5.2 Giriş sinyali	60
Şekil 5.3 HFD yöntemiyle kestirilen harmonik değerleri	60
Şekil 5.4 FADALINE yöntemiyle kestirilen harmonik değerleri	61
Şekil 5.5 FADALINE yöntemiyle geri çatılan sinyal	61
Şekil 5.6 Ara harmonik içeren giriş sinyali	65
Şekil 5.7 Sistem hata değerleri	65
Şekil 5.8 Harmonik ve ara harmonik değerleri	66
Şekil 5.9 İstatistiksel yöntem kullanılarak temel frekans tespiti	67
Şekil 5.10 Geliştirilen sistem yapısı	70
Şekil 5.11 Örnek giriş sinyali	75
Şekil 5.12 Zamanla değişen frekans kestirimi	76
Şekil 5.13 Kestirilen harmonik ve alt harmonik genliklerinin zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu gösterimi	77
Şekil 5.14 Kestirilen harmonik ve alt harmonik faz açılarının zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu gösterimi	77
Şekil 5.15 Örnek giriş sinyali	79
Şekil 5.16 Kestirilen sinyal	80
Şekil 5.17 Sistem kestirim hatası	82

Şekil 5.18 Temel frekans kestirimi.....	82
Şekil 5.19 Kestirilen harmonik genliklerinin 3 boyutlu gösterimi	84
Şekil 5.20 Kestirilen harmonik faz açılarının 3 boyutlu gösterimi.....	85
Şekil 5.21 Giriş Sinyali.....	87
Şekil 5.22 Zaman içinde Kestirilen Sinyal.....	87
Şekil 5.23 Giriş / çıkış sinyali	88
Şekil 5.24 Sistem hatasının zaman içinde değişimi	88
Şekil 5.25 DC bileşenin zaman içinde kestirilen değerleri	90
Şekil 5.26 1.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	90
Şekil 5.27 2.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	91
Şekil 5.28 3.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	91
Şekil 5.29 4.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	92
Şekil 5.30 5.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	92
Şekil 5.31 6.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	93
Şekil 5.32 7.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	93
Şekil 5.33 8.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	94
Şekil 5.34 9.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	94
Şekil 5.35 10.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	95
Şekil 5.36 11.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	95
Şekil 5.37 12.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	96
Şekil 5.38 13.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	96
Şekil 5.39 14.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	97
Şekil 5.40 15.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	97
Şekil 5.41 16.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri	98
Şekil 5.42 Kestirilen harmonik değerleri	98
Şekil 5.43 Kestirilen harmoniklerin zaman-frekans uzayında gösterimleri	99

ÇİZELGELER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 Harmonik bileşenler	9
Çizelge 5.1 HFD ve FADALINE yöntemleriyle elde edilen harmonik değerleri	62
Çizelge 5.2 İstatistiksel, Zero-Crossing, ADALINE ve FHDA Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	69
Çizelge 5.3 Örnek sinyalin modellenmesinde kullanılan değerler.....	74
Çizelge 5.4 DC ve harmonik bileşen değerleri: Örnek Sinyal, Kestirilen Değerler ve Ortalama Karese Hata	79
Çizelge 5. 5 HFD ve GADALINE yöntemleriyle elde edilen parametre değerleri..	89

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ADALINE	ADaptive LINear Element (Uyarlamalı Doğrusal Eleman)
ANOVA	Analysis of Variance
A_0	Sinyalin DC değeri (0.harmonik katsayısı)
A_k	k . harmoniğin genliği
b	Bias değeri
B_k	k . harmoniğin faz açısı
CS	Kolonyal Seçilim
d	İstenilen sinyal
D	Distorsiyon gücü
D_0	Ağın bağımsız bias değeri
DC	Doğru akım (sıfır frekans)
DE	Differential Evolution
DFT	Discrete Fourier Transform
DVM	Destek Vektör Makineleri
EADLINE	Extended ADLINE
e	Sistem hatası
$e(n)$	n . tekrardaki hata değeri
E	Ortalama karesel hata
∇E	E fonksiyonunun gradiyenti
ε	Hata tolerans değeri
f_n	Harmonik frekansı
f_1	Temel frekans
F	Frekans
F_k	k . harmoniğin faz açısı
FADLINE	Fourier ADaptive LINear Element
FHDA	Fourier Hata Düzeltme Algoritması
FFT	Fast Fourier Transform
FIR	Finite Impulsive Response
FYSA	Fourier Yapay Sinir Ağları
GA	Genetik Algoritma

GADLINE	Genişletilmiş ADLINE
G_k	k . harmoniğin genliği
HFD	Hızlı Fourier Dönüşümü
HF	Harmonik faktörü
HVDC	Yüksek gerilim ile enerji iletim
Hz	Hertz
I	İlgilenilen harmonik sayısı
I_0	Akımın DC bileşeni
I_1	Temel akım
IIR	Infinite Impulsive Response
I_L	Maksimum akımların ortalaması
I_n	n . harmonik akımının efektif değeri
i_n	n . harmonik akımının ani değeri
K	İlgilenilen harmonik sayısı
K	Transformatör faktörü
K_f	Şekil faktörü
KF	Kalman Filtresi
KFD	Kesikli Fourier Dönüşümü
LAV	Least Absolute Value
LMS	Least mean square
LS	Least Square (En Küçük Kareler)
LS	Last Square
MEMORY	Sistem belleği
N	Kesikli zaman indeksi
N	Zamanla değişen bileşik sinyal uzunluğu
P	Doğrusal olmayan elemanın uç denklemindeki katsayı indisi
PC	Personal Computer (Kişisel Bilgisayar)
P	Aktif güç
P_f	Güç faktörü
p.u.	per unit
PSO	Particle Swarm Optimization
Q	Reaktif güç
R_h	h . harmonik frekansındaki iletim sisteminin omik direnci

RMS	Root Mean Square
s	İstenen sinyal
S	Görünür güç
S_0	Sinyalin DC bileşeni
S_k	k . harmoniğin genliği
SNR	Sinyal Gürültü Oranı
STFT	Short Time Fourier Transform
t	Zaman
T	Periyot
t_n	n indeksine karşılık gelen zaman değeri
TTB	Toplam Talep Bozulması
TF	Tepe faktörü
Δt	Zaman aralığı değeri
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
THD_v	Gerilim Toplam Harmonik Bozulması
THD_I	Akım Toplam Harmonik Bozulması
V	Volt
V_1	Temel gerilim
V_n	n . harmonik geriliminin efektif değeri
V_0	Gerilimin DC (doğru akım) bileşeni
w	Ağırlık vektörü
W	Ağırlık matrisi
W_k	k . mertebeli ağırlık matrisi
WT	Wavelet Transform
w_i	i . ağırlık vektörü
Δw	Ağırlık değerlerindeki değişim
X	Giriş matrisi
x_i	i . Giriş
Y	Çıkış
YSA	Yapay Sinir Ağları
ω	Açısal frekans
ω_k	k mertebeli harmoniğin açısal frekansı

η	Öğrenme (güncelleme) katsayısı (integral sabiti)
η_{ω}	Temel frekans için güncelleme katsayısı
ϕ_k	k . harmoniğin faz açısı
θ_n	n . harmonik geriliminin faz açısı
δ_n	k . harmonik akımının faz açısı
°	Derece

1. GİRİŞ

Vazgeçilmez bir enerji kaynağı olan elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Elektrik güç sistemlerinde güç kalitesinin birincil ölçütü, sistemin güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasıdır. Elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilim şekillerini bozan etkenler harmonik olarak tanımlanmaktadır. Sistemin doğrusal olmayan nitelikteki elemanlarının oluşturdukları harmoniklerin, güç kalitesini olumsuz yönde etkilediği bilinen bir gerçektir [1; 2].

Günümüzde, güç elektroniği teknolojisindeki gelişmeler ile birlikte gerilim düzenleyiciler ile doğrultucu girişli cihazların kullanım oranı artmış böylece enerji sistemlerinde harmoniklerden kaynaklanan güç kalitesi problemleri oluşmuştur.

Elektrik güç sistemlerinde çok sayıda doğrusal olmayan yük bulunduğu düşünülürse ek kayıpların, harmonik bozulma değerlerinin yüksek seviyelere ulaşması kaçınılmazdır. Bu nedenle elektrik enerjisi iletim kaybının önlenmesi açısından harmonik seviyelerin belirlenmesi önem taşımaktadır [3; 4].

Diğer bir anlatımla elektrik güç sistemlerinin verimli çalışabilmesi için yükün üretebileceği tüm harmonik değerlerin doğru bir biçimde bilinmesi gereklidir. Doğrusal olmayan bir yükün akım ve gerilim dalga şekli içindeki harmonik bileşenlerin temel frekansı, genlikleri ve faz açıları ile ilgili bilgi, ancak gelişmiş harmonik belirleme yöntemleri ile mümkündür [1; 2; 4].

Uygulamada harmoniklerin genlik ve faz açılarının kestirimi için birçok yöntem önerilmiştir. Bunlardan Kesikli Fourier Dönüşümü (KFD) en çok tercih edilen frekans uzayı sinyal analiz yöntemlerinden biridir [5; 6]. Ancak bu periyodik yöntemde spektral sızıntı ve örtüşme gibi olumsuz etkiler gürültü miktarını artırmaktadır [5]. Bu nedenlerle bu yöntem, sinyalin gürültü içermesi durumunda tercih edilmemektedirler [7]. Diğer yandan, yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek açısından orijinal dalga formu ile harmoniklerin fazı arasındaki doğrusal olmayan bağlantıyı çözümlenmek gerekmektedir. Bu tür durumlarda harmonik kestirimi için Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılabilir. Yapısal kolaylıklarına rağmen

YSA'nın, ağırlık atamalarına bağılı olarak zamansız yakınsaması gibi nedenlerle başarımının değişebilmesi ve yakınsama hızlarının düşük olması gibi dezavantajları vardır [8; 9; 10; 11; 12; 13]. Ayrıca, zamanla değişen sinyaller söz konusu olduğunda, öz-yenilemeli dinamik analiz yöntemleri basit yapılarından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerdendir [14].

Ancak bu yöntemlerin, sinyalin gürültü ve ara-harmonik gibi bileşenler içerdığı durumlarda ön-filtreleme gibi işlemlerin getirdiğı ek hesap yükü ve nümerik kararsızlık gibi eksikleri de bulunmaktadır [8].

Harmonik bileşenlerin kestirimi için sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri de Uyarlamalı Doğrusal Eleman (ADALINE) yöntemidir [9].

Yapılan son çalışmalarda Dash ve arkadaşları tarafından ADALINE benzeri, ancak harmonik bileşenlerin yanı sıra temel frekans değişimini ve ara harmonikleri kestirebilen bir yapı geliştirilmiştir. Frekans kestirimini de kapsayan bu yapıda, Hessian Matrisi kullanılarak işleme ikinci türev de dahil edilmek suretiyle yapının başarısı geliştirilmiştir. Ancak ikinci türevden dolayı artan işlem maliyeti ve hesaplama karmaşıklığını azaltmak için varsayımlar eklenmiştir. Ayrıca bu yöntemler, temelde kapalı bir yapıya sahiptir ve anlık değil, belli bir zaman aralığındaki sinyal değerlerini işlemektedir [14].

Bu çalışmada, harmonik bileşenlerini hızlı ve az hata ile kestirme ve temel frekans değişimini izlemek için ADALINE tabanlı algoritmalar kullanılmıştır. Bu algoritmalar temel olarak, Fourier ADALINE (FADALINE) ve Genişletilmiş ADALINE (GADALINE) olarak adlandırılmıştır. FADALINE sadece harmonik ve ara harmonik bileşenlerini kestirirken GADALINE, sistemde olası temel frekans değişiklik ve değerlerini de kestirebilmektedir. GADALINE algoritmasında ilk aşamada, temel frekans belli iken, harmonik bileşen değerleri belirlenir, daha sonra sistem frekansının değişimi sürekli olarak izlenerek, bu frekansın değeri güncellenir ve böylece temel frekans değişimleri algılanmış olur. Bunların dışında bu algortmada kullanılan sistem parametrelerinin dahil edildiğı ortama uygun olarak seçilebilmesinden dolayı, GADALINE algoritmasının uyarlanabilir bir algoritma olduğu söylenebilir. Yapılan benzetim çalışmalarda, FADALINE ve GADALINE

algoritmaların matematiksel çözümlenmesi yapılmıştır ve gürültülü, ara harmonikli ve temel frekansı değişen sinyaller uygulanarak, bu algoritmaların başarısı ve etkinliği denenmiştir.

Ayrıca uyarlanabilen algoritma sayesinde, harmonik bileşenlerinin anlık değerleri 3 boyutlu olarak (genlik-frekans-zaman, faz açısı-frekans-zaman) izlenebilmektedir.

Çalışmanın 2. Bölümünde, güç sistem harmoniklerine ilişkin genel kavramlar, harmonik üreten kaynaklar ile harmoniklerin etkileri ve harmonikleri belirlemenin önemi özetlenmiştir.

Çalışmanın 3. Bölümünde, literatür taraması da yapılarak elektrik güç sistemlerinde harmonik analiz yöntemleri ve algoritmaları üzerinde durulmuştur.

Çalışmanın 4. Bölümünde, çalışmada kullanılan harmonik belirleme yöntemleri, Geleneksel FSYA ve FADALINE yapısıyla harmonik analizi, GADALINE yapısı ile geliştirilen algoritmalar ve matematiksel çözümlere yer verilmiştir.

Çalışmanın 5. Bölümünde, benzetim çalışmalarına, bu bağlamda FADALINE ile HFD yönteminin tamsayı harmonikleri kestiriminin karşılaştırılmasına yer verilmiş, ADALINE, FADALINE ve GADALINE yöntemleriyle temel frekans kestirimi ve harmonik bileşenlerin kestirimi yapılmıştır. Ayrıca geliştirilen algoritmanın etkinliğini test etmek için, çalışan gerçek sistemden alınan harmonik bileşenler içeren bir akım sinyali test verisi olarak kullanılmış ve harmonikler belirlenmiştir.

Çalışmanın 6. Bölümünde ise, sonuç ve değerlendirmeler yer almaktadır.

2. GÜÇ SİSTEM HARMONİKLERİ

2.1 Harmonik Tanımı ve Genel Kavramlar

Elektrik dağıtım şebekesinde gerilim sinüs biçimlidir. Şebekeden çekilen akımın da aynı şekilde sinüzoidal olması beklenir. Ancak günümüzde elektrik şebekelerindeki akım ve dalga şekillerinin saf sinüs şeklinde olması pek çok nedenden dolayı zorlaşmıştır. Bu yüzden, gerilim ve akım dalga şekilleri sinüs şeklinden farklı bir duruma gelmeye başlamıştır [1; 2; 3; 4].

Elektrik güç sistemlerinde akım ve gerilim şekillerini bozan faktörler, kısaca “harmonik” olarak tanımlanmaktadır. Harmonikler, genel olarak iki kaynaktan dolayı oluşurlar. Bunlardan birincisi, doğrusal olmayan elemanlardır. İkincisi ise tam sinüs biçimli olmayan kaynaklardır. Sistemde bu kaynaklardan herhangi biri veya her ikisinden dolayı harmonik oluşabilir. Doğrusal olmayan elemanların güç sistemine bağlanması ile sinüzoidal olmayan büyüklükler ortaya çıkmakta ve bunlar da harmonikleri doğurmaktadır [15].

Elektrik güç sistemindeki yükler/elemanlar doğrusal yükler ve doğrusal olmayan yükler olmak üzere ikiye ayrılır. Doğrusal yükler uygulanan gerilim karşısında sabit empedans özelliği gösterirler. Doğrusal olmayan yükler ise kesintili akım çekebilirler ya da AC geriliminin her periyodunda değişken empedans özelliği gösterebilirler [16].

Harmonikler, genelde güç kaynağının durumuna ve/veya devredeki elemanın özelliğine göre ortaya çıkarlar ve enerji sistemindeki sinüsel dalga biçimini bozarlar.

Bozulan bu sinüsel dalgalar, doğrusal olmayan dalgalar olarak ifade edilebilirler. Harmonikler, doğrusal olmayan yükler nedeniyle kaynak gerilimi ya da yük akımındaki periyodik sinüs formunun bozulması olarak tanımlanabilir.

Güç sisteminde genellikle doğrusal olmayan yüklerin varlığı durumunda meydana gelen akım ve gerilimler sinüzoidal olmayan periyodik büyüklüklerdir.

Sistemde bulunan bu yüklerin etkisiyle akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmaktadır ve temel sinüzoidal dalga ile genlik ve frekansı farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından oluşmaktadır.

Temel frekansın katları şeklinde olan periyodik büyüklükler, “harmonik bileşenler” olarak ifade edilir ve bu periyodik büyüklükler, güç sistemlerinde bozulmuş sinüs dalga şekilleri olarak tanımlanırlar [17; 18].

Elektrik enerjisinin temel frekansı 50 veya 60 Hz. olmaktadır. Bu temel frekansın dışında kalan frekanslar “elektriksel harmonik” olarak adlandırılır. Diğer bir deyişle, elektrik enerjisinin temel frekans (50 Hz.) dışındaki frekanslarına elektriksel harmonik denilmektedir [19].

Bir elektrik temini, her alıcı yerleşiminde ideal olarak, sürekli hatasız bir sinüzoidal gerilim sinyali göstermelidir. Bununla birlikte pek çok nedenden dolayı yardımcı birimlerin bu gerekli koşulları sağlaması zordur.

Harmoniklerin oluşması ile de sinüzoidal dalga şeklinden uzaklaşılacak, yani dalga şeklinde bir bozulma (distorsiyon) görülecektir. Sinüzoidal dalga biçiminden, gerilim ve akım dalga biçimi sapmaları “harmonik bozunma” olarak tanımlanırlar [24].

Temel dalga dışındaki ve temel frekansın tam katlarındaki frekanslarda görülen sinüsel dalga formlu harmonikler, sistemdeki elemanlarda ek enerji kayıplarına, ısınmalara, yalıtımlarının zorlanmasına neden olurlar. Hatta bazı durumlarda sistemin devre dışı kalmasına yol açarlar [20].

Harmonik oluşumuna neden olan faktörler aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

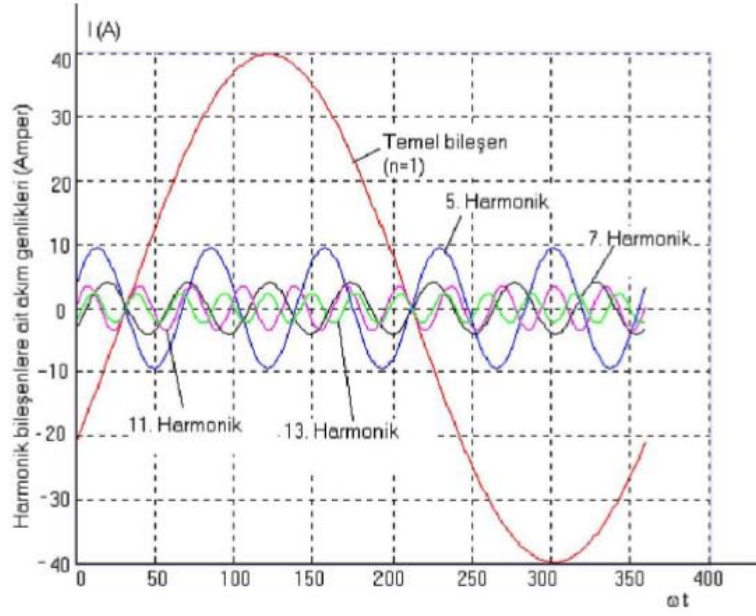
- Güç kontrol elemanları,
- Manyetik devrelerde oynama,
- İndüksiyon ısıtma,
- Doğrusal olmayan yükler,
- Doyma bölgesine çalışan transformatör mıknatıslanma akımları,
- Yarı iletken kontrollü cihazlar,

- Deşarj lambaları,
- Akü şarj sistemleri,
- Gaz deşarj lambaları ve elektronik balastlar,
- Elektrik makinelerindeki dişlerin ve olukların yol açtığı harmonikler,
- Aktif PFC içermeyen kesintisiz güç kaynakları,
- Bilgisayarlar,
- Güç elektroniği düzeneklerinin direkt frekans çevirici ile beslenmesi,
- Elektrikli taşıtların akü şarj devrelerinin etkileri,
- Enerji tasarrufu amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler,
- Statik VAR (Volt Amper Reaktif) jeneratörleri,
- Doğru akım ile enerji nakli HVDC (Yüksek Gerilim Doğru Akım),
- Şebekelerdeki doğrusal olmayan yükler; doğrultucular, eviriciler, kaynak makineleri, ark fırınları, gerilim regülatörleri, frekans çeviriciler,
- Motor hız kontrol düzenleri,
- Eş zamanlı makinelerinin hava aralığı döner alanının harmonikleri,
- Eş zamanlı makinelerde ani yük değişimlerinin manyetik akı dalga şekillerindeki bozulmalar,
- Çıkık kutuplu eşzamanlı makinelerde hava aralığındaki relüktans değişiminin oluşturduğu harmonikler.

AC güç sistemindeki bir harmonik bileşen periyodik bir dalga biçiminin sinüzoidal bileşeni olarak tanımlanır. Voltaj veya akım dalga biçimindeki harmonikler, temel frekansın çoklu frekanslarının hatasız sinüzoidal bileşenleri olarak ifade edilir:

$$f_n = nf_1 \quad (2.1)$$

Yukarıda belirtildiği üzere, güç sistemindeki sinüzoidal dalga simetrisi nedeniyle 3., 5., 7., 9., 11. gibi tek harmonik bileşenleri bulunur; çift harmonikli bileşenler bulunmaz. Şekil 2.1'de temel bileşen ve harmonik bileşenler gösterilmiştir [21].



Şekil 2.1 Harmonik bileşenler [21]

Elektrik sinyallerinde harmonik oranını ölçmek için, Toplam Harmonik Bozulma (Total Harmonic Distortion – THD) kriteri kullanılır. Bir dalga formu içerisinde yer alan tüm harmonik bileşenlerin toplamı THD olarak ifade edilir [22].

Tam katsayılı harmoniklerin yanı sıra elektrik güç sistemlerinde, ara harmonikler de mevcuttur. Bozulmuş gerilim veya akım dalga şekillerinin tam sayı olmayan katlarındaki frekans değerlerinde periyodik bozulmalar ara harmonikler olarak adlandırılır [23].

Elektrik sistemleri doğrusal ve doğrusal olmayan olarak ikiye ayrılır. Yükler, gerilim ve akım sinyallerinin bir diğerini yakın olarak takip ettiği yüklerdir. Örneğin; gerilim düştüğünde ona karşı akımın temel özelliğinin değiştiği sabit bir direnç oluşur. Bu ilişki Ohm kanunu olarak bilinir. Ohm kanununa göre bir dirençteki akım, gerilim ve direnç arasındaki ilişkiye eşittir.

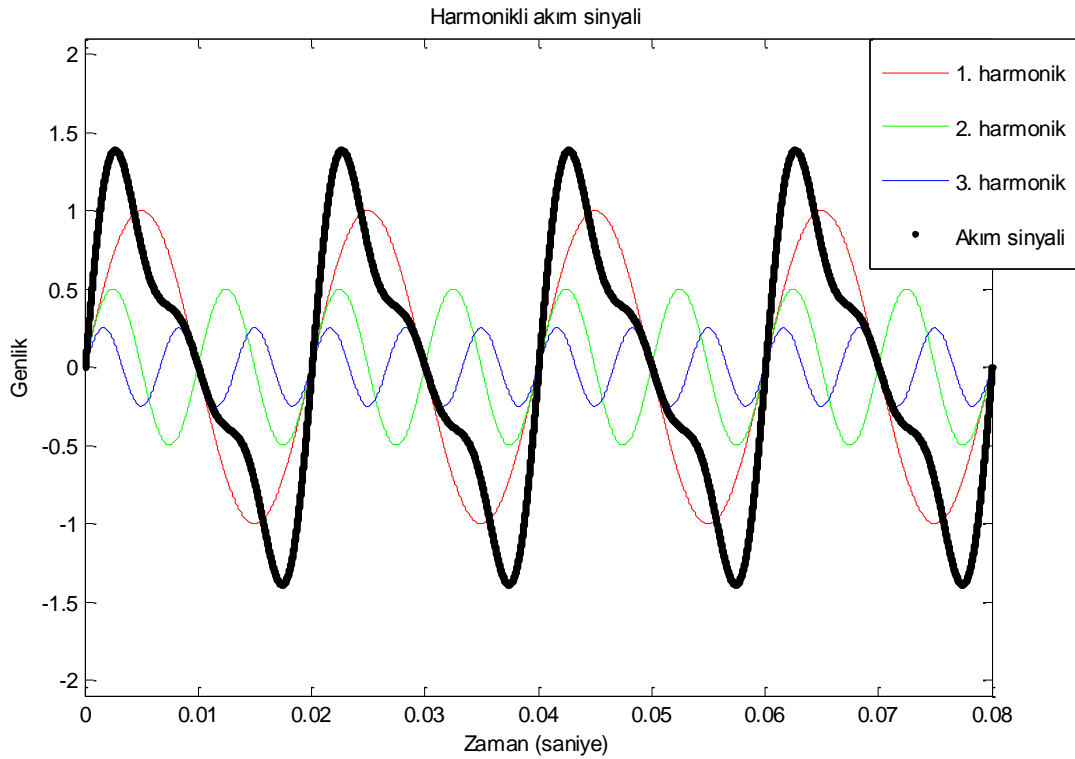
Doğrusal akım yüklü bir devredeki gerilim ve akım dalga biçimi, birbirleriyle uyum içerisinde olan iki çeşit dalga biçimi gösterir. Gerilim ve akım içeren indüktörler gerilimin yol açtığı akım ve akımın yol açtığı gerilim oluştururlar. Bununla birlikte her iki durumda da dalga biçiminde sapma gözlenmez.

Doğrusal olmayan yükler, birçok nedenden dolayı akım dalga biçiminin uygulanan gerilim dalga biçimine benzerlik göstermediği yüklerdir. Bu nedenle doğrusal olmayan yükler Ohm kanununa uymazlar. Doğrusal olmayan yükler gerilim dalga biçimi sapması, transformatörlerin fazla ısınması, gibi pek çok bozulmaya neden olur [24].

Doğrusal olmayan yükler, enerji sisteminin içine harmonik enjekte ederek enerji kalitesini düşürürler. Bunun sonucu olarak da düşük kaliteli enerjiye ve düşük güç katsayısına neden olurlar. Bu yüzden denilebilir ki enerji kalitesini bozan en büyük etkenlerden birisi harmoniklerdir.

Doğrusal olmayan yüklerin oluşturduğu harmonik bileşenleri, sistemde harmonik gerilimlerin doğmasına neden olur. Böylece, kendileri harmonik üretmeyen elemanlar (diğer tüketiciler) harmonik kirlenme ile karşı karşıya kalabilirler [25].

Harmonikler sonucu bozulmuş akım dalga şekli Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Bozuk akım dalga şekli

Elektrik şebekesi 50 Hz. olarak kabul edildiğinde, doğrusal ve doğrusal olmayan yük karakteristiğinde akımdaki değişim ve karşılaşılabilecek harmonikler aşağıda Çizelge 2.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1 Harmonik bileşenler

Bileşen	Frekans
Temel (1. Harmonik)	50 Hz
2. Harmonik	100 Hz
3. Harmonik	150 Hz
4. Harmonik	200 Hz
5. Harmonik	250 Hz
7. Harmonik	350 Hz
8. Harmonik	400 Hz
9. Harmonik	450 Hz
10. Harmonik	500 Hz

2.2 Harmonik Üreten Kaynaklar

Arızasız bir işletmede harmonikler pek çok nedenden dolayı oluşurlar. Bunların en önemlisi manyetik ve elektrik devrelerindeki doğrusal olmama durumudur. Örneğin; jeneratörler, transformatörler veya demir çekirdekleri olan bobinler gibi cihazlarda doymanın meydana gelmesi, manyetik açıdan doğrusal olmayan bir olaydır.

Redresörler ile tristörlerde olduğu gibi, sinüzoidal akım dalgasının kesilmesi ya da ark fırınlarında bir arkın oluşması da elektrik sistemlerinin doğrusal olmaktan uzaklaşmasına yol açar. Böylece gerilim ve akımın dalga şekli bozulur [26].

Harmonik üreten başlıca kaynaklar üç grup altında toplanabilir. Bunlar aşağıdaki gibidir:

- Çok sayıda küçük güçlü, doğrusal olmayan, sistem içerisine dağılmış elemanlar,
- Karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen, büyük güçlü, doğrusal olmayan yükler,
- İletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri ve büyük güçlü statik konvertörler.

Harmonik üreten elemanlar aşağıdaki gibi incelenebilir.

2.2.1 Anahtarlanabilir güç kaynakları

Günümüzde, elektronik sistemlerinin pek çoğunda anahtarlanabilir güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu sistemlerde indirici transformatör ve redresör bulunmamaktadır. Bunlar yerine bir kapasitör bataryasını doldurarak gerekli çıkış akım ve gerilim değerlerine uygun gücü üreten bir doğrultucu bulunmaktadır.

Bu sistemlerin kullanım alanı gittikçe artmaktadır. Çünkü maliyet ve de boyut düşürülmektedir. Bu sistemler, diğer sistemler gibi sürekli akım çekmeyip, çalışmalarının belli zamanlarında darbeler halinde 3. ve 5. harmonik içeren akımlar çekmektedirler [27].

2.2.2 Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları ve balastları

Cıva buharlı ve sodyum buharlı lambalar, floresan lambalar gibi aydınlatma elemanları bir tüpün içinde bulunan gazın boşaltılması ilkesine dayalı olarak geliştirilmiştir.

Aydınlatma elemanları, doğrusal olmayan akım-gerilim özelliğine sahip olduklarından dolayı harmonik üretirler.

Aslında aydınlatma elemanları küçük miktarda harmonik üretirler ama bina ve çevre aydınlatmasında çok miktarda kullanıldıklarından dolayı toplamda tek sayılı harmoniklerin seviyesi, sistemi önemli oranda etkiler [27].

2.2.3 Transformatörler

Transformatörler harmoniklerden iki yolla etkilenir. Bunlardan birincisi, akım harmonikleri sonucunda oluşan bakır kayıplarındaki artıştır. İkincisi ise gerilim harmonikleri sonucunda, demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma olarak görülmektedir.

Harmonikler transformatörlerde ayrıca gürültü artışına neden olurlar. Gerilim ve akım harmoniklerinin her ikisi de transformatör kayıplarına neden olur ve bu durum frekansa bağlıdır. Frekans artarsa kayıplar da artış gösterir. Bu yüzden, yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerinden daha etkin olabilmektedirler [28].

2.2.4 Motorlar ve jeneratörler

Harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artması, harmonik gerilim ve akımlarının en büyük etkilerindedir. Bu yüzden harmonik bileşenler döner makinelerin verimi ve momentinin düşmesine ve de daha gürültülü çalışmasına neden olurlar.

Aynı zamanda harmonikler endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretirler. Bu yüzden motorun kalkış yapamaması veya eş zamanlama sağlayamaması gibi sorunlar ortaya çıkabilir.

Motor sıcaklığı harmonikler nedeniyle artmakta ve bu da motor ömrünü kısaltmaktadır. Dolayısıyla harmonik bileşenler, motor performansını %5-10 arasında azaltmaktadırlar. Bu durumdan en fazla bir fazlı motorlar etkilenmektedir [28].

2.2.5 Doğrultucular (Konvertörler)

Akü ve fotovoltaiik sistemler, doğru akım iletim sistemleri şebeke denetimli çeviriciler üzerinden beslenirler. P darbeleri bir çeviricinin oluşturduğu akım harmoniklerinin mertebesi aşağıdaki eşitlikte belirtilmiştir.

$$n = k.p \pm 1 \quad (2.2)$$

$$k = 1, 2, 3, \dots \quad (2.3)$$

Burada, n harmonik seviyesini, k ise ilgilenilen harmonik sayısını belirtmektedir.

Sanayide genel olarak 6 darbeli doğrultucular kullanılır ve bu doğrultucularda 5., 7., 11., 13., 15. gibi harmonikler üretilir.

$$I_n / I_1 = I / n \quad (2.4)$$

Burada, I_n n. harmonik akımının efektif değerini, I_1 temel akım değerini belirtmektedir.

Harmonik mertebesi ile harmonik akımın efektif değeri ters orantılıdır. Harmonik akımın efektif değerini azaltmak için harmonik akımın mertebesi p darbe sayısı ile artırılabilir.

Elektrikli demiryolu ulaşım sistemleri, sistemdeki büyük güçlü kontrollü, bir fazlı doğrultucuların kullanım alanlarından birisidir. Üç fazlı ideal doğrultucular bir fazlı doğrultuculara göre daha avantajlı olup, üç ve üçün katı harmonikleri üretmemektedir. Konvertör transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen AC akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile üç fazlı konvertörler tanınır. Üç fazlı konvertörlerde, harmonik akımının efektif değeri azaltmak için harmonik akımının mertebesi p darbe sayısı ile artırılır [27].

2.2.6 Ark ocakları

Geniş spektrumlu harmoniklerin bir örneği olan ark ocakları, yüksek gerilim iletim şebekesine doğrudan bağlanırlar. Ark fırınlarının anma gücü MW mertebesindedir ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanır.

Elektrik arkının gerilim-akım özelliği doğrusal değildir. Ark direncinin doğrusal olmamasından dolayı harmonikler üretilir.

Ark olayının başladıktan sonra ark gerilimi azalırken ark akımı artar. Bu durumda ark olayında negatif direnç etkisi gözlemlenir.

Ark ocaklarının empedansı dengesizdir ve zamana göre rastgele değişim gösterir. Ark ocağının, sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının rastgele değişmesinden dolayı modellenmesi oldukça zordur.

Ark boyundaki ani değişimin sebep olduğu şebeke dalgalanmaları, frekansın 0,1'den 30 Hz.' e kadar geniş bir aralıkta dolaşmasına neden olur.

Tipik bir ark ocağında 2, 3 ve 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunur ve maksimum harmonik temel bileşenin %30'u kadardır [27].

2.2.7 İletkenler

İletkenlerde kayıpların artması harmonik akımlardan dolayı olmaktadır ve bu yüzden ısınmada da artış meydana gelebilir. İletkenlerde, harmonik akımları iki temel etkiden dolayı ek ısınma meydana getirirler. Birincisi, "skin-effect" yani deri etkisinin sonucudur. Harmonik frekansındaki artıştan dolayı akım, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşır ve bunun sonucunda etkin direnç artarak ek ısınma meydana gelir. Tek fazlı yükleri besleyen dört telli, üç fazlı sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile de ikinci etki görülmektedir [28].

2.2.8 Enerji iletim sistemi

Bir şebekede harmonik akımların akışından dolayı iki temel etki meydana gelmektedir. Birincisi, akım dalga biçiminin artan efektif değeri sonucu oluşan ek kayıplardır ve aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$P_n = \sum (R_h I_h^2) \quad (2.5)$$

Burada; R_h h. harmonik frekansındaki iletim sisteminin omik direncini, I_h ise h. harmonik bileşenin akımını belirtmektedir.

Harmonik akımların sebep olduğu ikinci etki ise, iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde ek gerilim düşümleri oluşturmaktadır [28].

2.2.9 Devre kesiciler ve sigortalar

Devre kesicilerinin akım kesme yetenekleri, akımda oluşan harmonik bozunmadan etkilenmektedir. Elektromanyetik endüksiyon bobininin harmoniklerin bulunduğu durumlarda doğru çalışmamasından dolayı devre kesicilerinin çalışmasında aksaklık meydana gelir. Açma sırasında oluşan ark, ark hücrelerine bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile iletilmektedir.

Arkın yeniden tutuşması ve kesicinin yeniden kapanması bobinin çalışmasındaki anormalliklerden dolayı meydana gelmektedir. Ayrıca; harmonik akımları ek ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma özellikleri değişir ve akım zamansız olarak kesilebilir.

Anahtarlama elemanlarında ısınma ve kayıplar yine harmonik akımlardan dolayı artmaktadır. Bu yüzden, bazı yalıtım malzemelerinin ömrü azalır ve sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır. Ayrıca harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinde, temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açar ve sonuçta akım kesme işlemini zorlaştırır [28].

2.2.10 Aydınlatma elemanları

Bölüm 2.2.2'de değinildiği üzere, floresan lambalar gibi aydınlatma elemanlarında kulağın duyabileceği gürültüler ve demir kayıplarının artışında, harmonikli bileşenleri bulunan gerilimlerin etkin bir rolü vardır. Tek dereceli harmoniklerin seviyesi, floresan aydınlatmada devreyi önemli oranda etkiler.

Bozunmaya maruz kalmış gerilimle çalıştırıldıklarında akkor telli lambaların ömrü kısalmaktadır. Bunun nedeni lambaların içerisindeki filamanın aşırı ısınmasıdır. Harmoniklerden dolayı oluşan gerilimdeki artış küçük miktarda olsa bile akkor telli lambanın ömrü büyük oranda azalmaktadır. Örneğin; normal gerilimin %5 üstünde

bir gerilimle kullanıldıkları zaman, akkor lambaların ömürleri ortalama %50 oranında kısalmaktadır.

2.2.11 Koruma röleleri

Koruma röleleri, gerilim ve akımın sıfır geçişlerine göre çalışmaktadır ve harmonik bozunmadan etkilenmektedir.

Koruma rölelerin performansı, akım ve gerilim dalga formlarının bozulmasından etkilenmektedir. Sistemde harmonik bulunması durumunda her bir röle farklı davranış biçimleri göstermektedir. Aynı tipte rölelerin farklı modelleri aynı bozunmaya değişik biçimde cevap verebilmektedir ve bu durum aynı modellerde de görülebilmektedir.

Rölelerin arıza koşullarında çalışmaması ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesinin nedeni yine harmonikler olabilir [28].

2.2.12 Diğer harmonik kaynaklar

Yukarıda açıklanan harmonik kaynaklarına ek olarak diğer harmonik kaynakları aşağıda belirtilmiştir.

- Elektrik makinelerindeki dişler, çıkık kutuplu eşzamanlı makinelerde hava aralığındaki relüktans değişimi,
- Eşzamanlı makinelerde hava aralığı döner alanı,
- Eşzamanlı makinelerde ani yük değişimlerinin meydana getirdiği manyetik akı dalga şeklindeki bozulmalar,
- Transformatörlerin ilk enerjilenmesi anında çekilen akım (inrush current) ve motorların kalkış akımları,
- Güç üretim tesislerinde pompa, ateşleyici ve fanları sürme işinde kullanılan elektronik kontrol düzenleri,

- Çimento ve maden sanayiinde doğrusal motorları sürmek için kullanılan frekans dönüştürücüler,
- İndüksiyonla ısıtmanın kullanıldığı çelik sanayi, haddehaneler ve kaynak makineleri,
- Yarı iletken kontrollü cihazlar,
- Teyp, portatif televizyon adaptörleri, ütü, tıraş makinesi ve uzun ömürlü tekrar dolabilen piller gibi şarjlı cihazlarda kullanan doğrultucu devreler,
- Reaktif gücün çok hızlı ve ani değiştiği sistemler,
- Kesintisiz güç kaynakları ve anahtarlama güç kaynakları,
- Bilgisayar sistemleri ve bunlarla yönetilen otomasyona dayalı üretim tesisleri,
- Doğru akım ile enerji iletimi kontrolü ve dönüştürücü istasyonlar,
- Elektrikli trenler ve tek raylı ulaşım araçlarında yüksek güçlü doğrultucular, universal ve üç fazlı motorları beslemek için kullanılan dönüştürücüler,
- Elektrikli taşıtlarda kullanılan akü şarj devreleri,
- Çamaşır ve bulaşık makineleri, çok ekranlı televizyonlar, akıllı fırınlar ve mikro dalga fırınları, otomatik ayarlı aspiratörler, klimalar,
- Elektrokimya teknolojisinde plakalara şekil verme, elektro kaplama işlemlerinde ve elektroforetik boya sprelerinde kullanılan statik dönüştürücüler,
- Alternatif enerji kaynaklarında kullanılan yarı iletken teknolojisi [28].

2.3 Harmoniklerin Etkileri

Daha önce de belirtildiği gibi harmonikler, güç sistemlerinde ek kayıplar oluşmasına neden olurlar. Güç sistem elemanlarının zarar görmesi veya devre dışı kalmaları yine harmonik kaynaklı olabilir. Ayrıca harmonikler nedeniyle sistemde

çeşitli frekanslar oluşacağından dolayı rezonans (tınlaşım) meydana gelebilir. Bu tınlaşım sonucu oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmedeki elemanlara büyük zararlar verebilir.

Harmonik etkilerinin görüldüğü tesislerde sıkça rastlanan sorunlar, iki çeşit olarak gözlemlenebilir. Birincisi, akım harmonikleridir. Akım harmonikleri, kullanılabilir güçte azalmaya, kayıplarda artışa, düşük güç faktörüne, üç faz sistemlerde aşırı akımların oluşumuna, trafo ve jeneratörlerde aşırı ısınmaya, akustik gürültüde artmaya, telefon hatlarında girişimin artmasına neden olurlar. İkincisi ise gerilim harmonikleridir. Gerilim harmonikleri trafoda, jeneratörlerde, kondansatörlerde, motorlarda aşırı ısınmaya, yalıtım sistemlerinde yalıtkan stresinin artmasına, tınlaşım oluşumuna, yüksek gerilim delinmesine, endüksiyon motorlarda problemler oluşmasına ve mekanik salınımlara neden olmaktadır.

Gerilim ve akım dalga şeklinde oluşan bozulmalar nedeniyle harmonik bileşenlerin güç sisteminde yarattığı olumsuz etkiler genel olarak aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Jeneratör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin bozulması,
- Elektrik güç sistemi elemanlarında ve yüklerde ek kayıpların oluşması,
- Güç üretiminde, iletiminde ve dağıtımında verimin düşmesi,
- Gerilim düşümünün artması,
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere yükselmesi,
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri nedeniyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması yüzünden hasar görmeleri,
- Eşzamanlı ve eşzamanlı olmayan motorlarda salınımların oluşması nedeniyle aşırı ısınmalar,
- Koruma sistemlerinin hatalı çalışmaları,

- Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi,
- Aydınlatma elemanlarında ve monitörde görüntü titreşimi meydana getirmesi,
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması,
- Yalıtım malzemesinin zorlanması ve delinmesi,
- Harmonik frekanslarında şebekede tınlaşım olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması,
- Elektrik cihazlarının ömrünün kısılması,
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması,
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması,
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi,
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması.

2.4 Harmonik Büyüklüklerin Tanımı

Harmoniklerin analizi ve harmonik büyüklüklerin belirlenmesi, güç kalitesinin iyileştirilmesi ve sinüzoidal olmayan büyüklüklerin güç sistemine olumsuz etkilerinin giderilmesi için gereklidir. Bu konuda yapılan çalışmaların tümünde temel hedef, gerilim ve akım harmonik bozulmalarının en aza indirgenmesidir [29].

İlk olarak Fransız fizikçisi ve matematikçisi Joseph Fourier, sinüsel olmayan dalgaların analizinde Fourier Serilerini kullanılır. Joseph Fourier, teorisini 1822'de yayımlanan "Théorie Analytique de la Chaleur" adlı kitabında tanıtmıştır. Bu teori, bir fonksiyonun belirli tipteki trigonometrik dizilere açılmasını içermektedir.

Temel ve bir dizi yüksek dereceden harmonik bileşenlerin temel bileşenin tam sayılı çarpanlarıyla, belli bir zaman aralığındaki herhangi bir periyodik fonksiyon bulunabilmektedir. Periyodik fonksiyonun zaman ve frekans uzayı arasındaki ilişki

bu diziler ile kurulmaktadır. Günümüzde bu teori pek çok mühendislik ve bilim dalında önemli bir inceleme aracı haline gelmiştir [25].

2.4.1 Sinüzoidal olmayan durumda elektriksel büyüklükler

Güç sisteminde harmonik bileşenleri bulunan gerilim ve akımın ani değerleri, Fourier Serisi ile aşağıdaki biçimde ifade edilebilir.

$$V(t) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n(t) = V_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (2.6)$$

Burada, $V(t)$ gerilimin ani değerini, V_0 gerilimin doğru akım bileşenini, V_n n . harmonik geriliminin efektif değerini, ω açısal frekansı, θ_n ise n . harmonik gerilimin faz açısını belirtmektedir.

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (2.7)$$

Burada, $i(t)$ akımın ani değerini, I_0 akımın doğru akım bileşenini, I_n n . harmonik akımın efektif değerini, δ_n ise n . harmonik akımının faz açısını göstermektedir.

Aktif güç, DC bileşenler ihmal edilerek yukarıdaki eşitlikler yardımıyla,

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2.8)$$

eşitliği ile elde edilir. Aktif güç eşitliği incelenirse farklı frekanslardaki akım ve gerilimlerin aktif güce etkisinin olmadığı gözlemlenmektedir.

2.6 ve 2.7 eşitliklerinde verilen ifadelerden harmonikli akım ve gerilimin efektif değerleri,

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} \quad (2.9)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2.10)$$

eşitliği ile elde edilir. Burada T periyodu belirtmektedir. Görünür güç ise,

$$S = V.I \quad (2.11)$$

eşitliği ile tanımlanır. Bu gücün, harmonikli durumda genel tanımı,

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.12)$$

eşitliği ile verilir. Denklemden, D distorsiyon gücüdür ve

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (2.13)$$

denklemler ile gösterilir. Görünür güç eşitliğindeki Q reaktif güçtür ve aşağıdaki şekilde tanımlanır.

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (2.14)$$

Güç faktörü kavramı ile AC güç sistemlerinde çekilen akımın ne kadar verimlilikle kullanıldığı tanımlanır.

Sinüzoidal durumlarda gerilim ve akım arasında sadece bir faz açısı vardır ve güç faktörü,

$$PF = \frac{P}{S} = \cos\theta \quad (2.15)$$

eşitliği ile belirlenir. Sinüsel olmayan durumlarda güç faktörü eşitlik 2.15'deki gibi faz açılarının kosinüsü şeklinde ifade edilemez.

Bu durumda güç faktörü,

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.16)$$

eşitliği ile belirlenir [25].

2.4.2 Toplam talep bozulması

Toplam talep bozulması yük ile ilgili bir değerdir. Toplam harmonik akım bozulması olarak tanımlanır ve bu değer aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (2.17)$$

Burada I_L , yıl boyunca talep edilen maksimum akımların ortalamasını; I_n ise, harmonik akımını gösterir [25].

2.4.3 Tepe faktörü

Tepe faktörü, doğrusal olmayan akım veya gerilimin maksimum değeri ile temel bileşenin etkin değerine oranıdır. Sinüzoidal olmayan dalgalar için bu değer aşağıdaki gibi tanımlanır [30].

$$TF = \text{Harmonikli dalganın tepe degeri} / \text{Temel bileşen etkin degeri} \quad (2.18)$$

2.4.4 Transformatör faktörü

Transformatör faktörü (K), anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için belirlenmiş bir faktördür. Anma gücü 500 kVA'nın altında olan yükler için tanımlanmıştır. Tepe faktörü, harmonik akımlar oluştuğunda standart trafoların yüklenme kapasitesindeki azalma miktarını hesaplamak için kullanılır.

Bu faktör aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$K = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 (p.u.) n^2 \quad (2.19)$$

Burada I_n , n. harmonik bileşen akımını ve p.u. ise per unit'i belirtmektedir [25].

2.4.5 Harmonik faktörü

Harmonik faktörü (HF), herhangi bir harmonik bileşenin temel bileşen içerisindeki seviyesini belirlemek için kullanılır.

Gerilim için,

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1} \quad (2.20)$$

şeklinde gösterilir.

Akım için ise,

$$HF_n = \frac{I_n}{I_1} \quad (2.21)$$

şeklinde gösterilir. Bu eşitliklerde V_n ve I_n , n . harmonik etkin değerlerini V_1 ve I_1 ise temel bileşen etkin değerlerini belirtir [25].

2.4.6 Şekil faktörü

Şekil faktörü (KF), düzgün doğrusal olmayan bir dalga için aşağıdaki şekilde ifade edilir [25].

$$K_f = \text{Etkin Değer} / \text{Ortalama Değer} \quad (2.22)$$

2.4.7 Harmonik derecesi

Harmonik derecesi (n), harmonik frekansının, temel frekansa oranı olarak ifade edilir.

$$n = \frac{f_n}{f_1} \quad (2.23)$$

Burada, f_n harmonik frekans, f_1 ise temel frekanstır [30].

2.4.8 Harmonik frekansı

Harmonik frekansı (f_n), temel frekansın tam sayı katı olan frekans değeridir [25].

$$f_n = n.f_1 \quad (2.24)$$

2.4.9 Harmonik bileşenin RMS değeri

Sinüzoidal olmayan bir dalga biçiminin analiz edilmesinde, harmonik bileşenin Root Mean Square (RMS) değeri, harmonik bir frekansa sahip bileşenlerden birinin RMS değeridir. Böyle bir bileşen, basitçe harmonik olarak adlandırılabilir [25].

2.4.10 Harmonik grubun RMS değeri

Zaman penceresinde bir harmoniğin ve bu harmoniğin yanındaki spektral bileşenlerin RMS değerleri, harmonik grubun RMS değeridir [25].

2.4.11 Toplam Harmonik Bozulma

Toplam harmonik bozulma, temel harmoniğe ilişkin olası ısınma değeridir. Dirençli bir yük boyunca oransız gerilim uygulandığında ne kadar ek ısı olacağını hesaplamada kullanılır [31].

THD, akım veya gerilim için harmonikli efektif değerlerin, esas bileşenin efektif değerine oranı olarak ifade edilir.

Harmonikli bileşenlerin, temel bileşene bakarak seviyelerinin belirlenmesinde dikkate alınan en önemli ölçüdür. Gerilim ve akım için bu değerler sırasıyla,

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (2.25)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (2.26)$$

eşitliklerinden faydalanılarak bulunur [30].

THD harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için THD kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga için THD sıfırdır [32].

2.5 Harmonikleri Belirlemenin Önemi

Günlük yaşamın olmazsa olmaz kaynaklarından biri olan elektrik enerjisinin güvenli ve kaliteli olması gerekir. Enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımında güvenli ve kaliteli olması mutlaka dikkate alınmalıdır.

Bir elektrik güç sisteminin güvenli ve arzu edilebilir bir şekilde çalışması için, sistemin tasarım ve işletim aşamasında bir takım etkenlerin yanında doğrusal olmayan özellikteki elemanların oluşturdukları harmoniklerin de göz önünde bulundurulması gerekir [33; 34].

Elektrik dağıtım şirketi ile tüketici arasında harmonik bozulma nedeniyle doğabilecek sıkıntıların önlenmesi için, elektrik enerjisi kaynaklı üretim kaybı ve arızalara önceden müdahale edilebilmesi, gerekli önlemlerin zamanında alınması için harmonik seviyelerin belirlenmesi gerekmektedir. Çünkü güç sistemlerindeki doğrusal olmayan elemanlar, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi bir harmonik kirliliğe neden olmakta ve tüketiciye verilen enerjinin kalitesini olumsuz yönde etkilemektedirler [35].

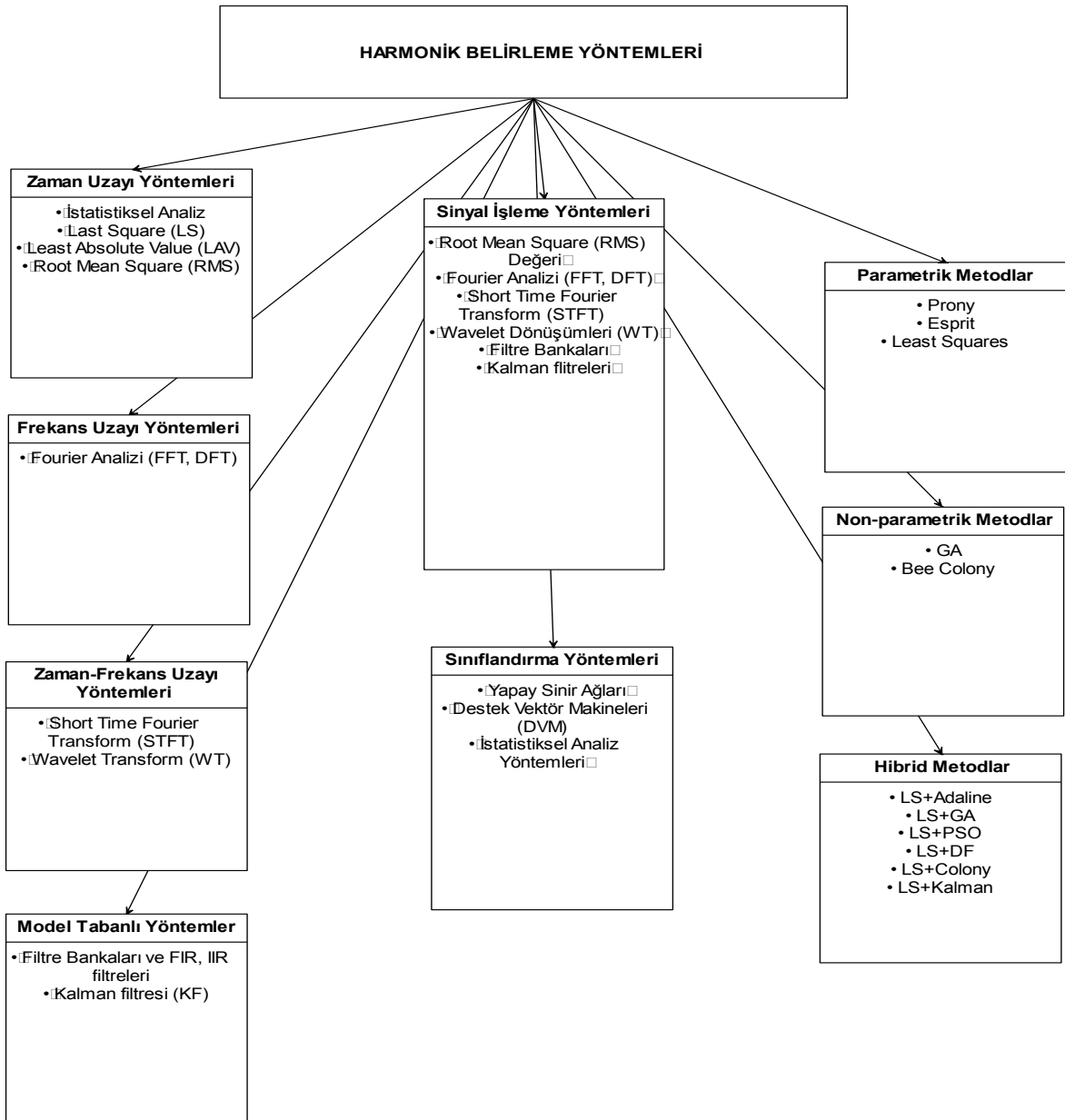
Doğrusal olmayan yüklerin güçleri düşük değerde olsa bile gerilimin dalga şeklini bozarlar. Enerji sistemlerinde çok sayıda düşük güçlü doğrusal olmayan yük bulunmaktadır. Bu yüzden ek kayıpların, harmonik gerilimlerin ve bozulma değerlerinin yüksek değerlere ulaşması kaçınılmazdır.

Sistemdeki elemanlarda harmonikler, ek enerji kayıplarına, ısınmalara, yalıtımlarının zorlanmasına, zarar görmelerine ve sistemlerin devre dışı kalmalarına yol açarlar. Harmoniklerin enerji sistemindeki olumsuz etkileri, teknik ve ekonomik sorunlar olarak ikiye ayrılabilir [36]. Birincisi, sistemin çalışmasını olumsuz yönde etkileyen ve tüketiciye kaliteli enerji sunulmasını engelleyen teknik sorunlardır. İkincisi ise harmoniklerin sistemde oluşturduğu ek enerji kayıpları, bunun sonucu olarak da güç katsayısının düşmesi ve enerji aktarımının verimsiz olması gibi ekonomik sorunlardır.

Harmoniklerin etkilerinin azaltılması ve dolayısıyla yarattığı sorunların giderilmesi konusunda geliştirilen yöntemler; cihazların tasarlanırken harmonik üretmeyecek ya da düşük seviyede üretecek biçimde tasarlanması ve de harmoniklerin filtreler yoluyla süzülerek sistemden uzaklaştırılmasıdır. Harmoniklerin filtrelenmesi veya kompanzasyonu için, çalışma koşullarında yükün üretebileceği tüm harmoniklerin yüksek doğrulukla ve diğer yandan hızlı bir biçimde bilinmesi gereklidir. Bu da ancak gelişmiş harmonik analizi yöntemleri ile mümkündür [28].

3. ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİK ANALİZ YÖNTEMLERİ

Elektrik güç sistemlerinde, harmonik bileşenlerin belirlenmesi, elektrik enerjisinin kalitesini yükseltme ve verimliliği artırma açısından önemlidir. Yapılan çalışmalarda, harmonik bileşenlerin hızlı ve doğru kestirilmesi için farklı yöntemler kullanılmıştır. Elektrik güç sistemlerinde, harmoniklerin parametrelerini belirlemek için sıklıkla kullanılan ve Bölüm 3.1'de tanıtilan bu yöntemler aşağıda Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1 Harmonik belirlleme yöntemleri [8]

Tez çalışmasında, elektrik güç sistemlerinde harmonik analizi yöntemlerine ilişkin literatür taraması yapılarak, öngörülen yöntemin önemini vurgulama açısından bir değerlendirme yapılmıştır.

3.1 Harmonik Analiz Yöntemleri

Elektrik güç sistemlerinde oluşan harmoniklerin analizi için zaman uzay, frekans uzay, zaman-frekans uzay yöntemleri, model tabanlı yöntemler, sinyal işleme, sınıflandırma, Kalman filtresi ve filtreleme yöntemleri, parametrik, non-parametrik, melez metotlar gibi farklı yöntemler uygulanmaktadır.

Bunlardan zaman uzayı yöntemleri; istatistiksel analiz, Least Square (LS), Least Absolute Value (LAV) ve Root Mean Square (RMS) olarak gruplandırılabilir. İstatistiksel analiz yöntemleri, işaret ettiği frekans değerinin daha önce belirlenmiş veri sınıfı içinde olması, yani tam (ondalıklı) bir değer verememesi nedeniyle pek tercih edilen bir yöntem değildir. LAV kestirimi, gelişmiş bir başlangıçla başlamak için gerekli olan tüm ön işlemeyi içerdiğinde daha hızlıdır ve bu yönüyle avantajlıdır [37]. RMS yöntemi genlik, sinüs eğrisi fazı ve harmonik kestirimini doğru şekilde yapabilen bir yöntemdir [38]. Dezavantajı ise yakınsama oranının yavaş olmasıdır [39]. RMS sinyal parametrelerini doğru şekilde kestirir, fakat harmonik kestirimi için her zaman aşamasında matris değişimi gerektirir [38]. Harmonik parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem de Destek Vektör Makineleridir. Destek Vektör Makineleri (DVM) pozitif ve negatif örnekleri bilinen bir uzayı ikiye bölen en iyi hiper düzlemi bulmaya çalışan, gözetimli bir öğrenme ve sınıflandırma yöntemidir ve sınıflandırma yöntemi olarak kullanılır [40]. Estimation Of Signal Parameters Via Rotation Invariance Technique (ESPRIT), Prony ve Least Squares (LS) yöntemleri parametrik yöntemlerdir. Prony, kısa süreli olaylar sırasında güç sinyallerinden alınan parçalanma oranı ve salınım frekansı hakkında bilgi veren bir yöntemdir [41]. Prony metodu sinyal bozulmalarının frekanslarının tahmininde etkilidir. ESPRIT yöntemi doğru frekans kestirimi yapabilir, fakat bu yöntemde nümerik kararlılık problemleri yaşanabilmektedir [42]. LS yöntemi doğrusal bir kestiricidir, ancak ara ve alt harmonik bileşenlerini doğru şekilde kestiremeyebilir [43]. Sinyalin gürültü içermesi

durumunda tercih edilen zaman uzayı yöntemleri, frekans uzayı yöntemlerine göre daha iyi performans gösterebilmektedir [7].

Frekans uzayı yöntemleri olan Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ve Discrete Fourier Transform (DFT) yöntemleri spektral sızıntı ve spektral örtüşme gibi nedenlerden dolayı doğru sonuçlar vermeyebilir [44].

Zaman-frekans uzayı yöntemleri; Short Time Fourier Transform (STFT) ve Wavelet Transform (WT) olarak iki çeşittir. STFT yöntemi durağan olmayan sinyalin takibini yapamaz ve spektral sızma yaşanır. WT zaman değişkenli güç sinyalini kesişen frekans şeritlerine böler. Harmonik ve ara harmonik genlik ve frekans kestirimini çok iyi yapamaz [45].

Harmonik analizinde ayrıca, deterministik ve stokastik harmoniklerin genlik ve fazlarının kestirimi için birçok algoritma önerilmiştir. Sinyalin gürültü içermesi durumunda bu öngörülen yöntemler arasında, zaman uzayı yöntemleri, frekans uzayı yöntemlerine göre daha iyi performanslar gösterebilmektedirler.

Uygulamada harmoniklerin genlik ve faz açılarının kestirimi için birçok yöntem kullanılmaktadır. Bunlardan Kesikli Fourier Dönüşümü (KFD) en çok tercih edilen frekans uzayı sinyal analiz yöntemlerinden biridir [6].

Kalman filtresi ve filtre yöntemleri model tabanlı yöntemlerdir. Filtre Bankaları ve Finite Impulsive Response (FIR) yöntemi, HFD yöntemindeki sınırlılıkları ortadan kaldırır ve doğru harmonik kestirimi yapabilir [44]. Infinite Impulsive Response (IIR) filtreler harmoniklerin yok edilmesinde kullanılır. Fakat yaşanabilecek olası gecikmeler bu yöntemin olumsuz yönleridir. Filtreleme yönteminin, gerçekleştirilmesi özel ve karmaşık bir donanım gerektirmektedir, ayrıca maliyeti oldukça yüksektir.

KF algoritması, sistem parametrelerinin belirlenmesinde en etkin yöntemlerden biridir. Optimal ölçme yerleşimlerine dayalı olarak harmonik enjeksiyonunun hata kovaryansının analizi Kalman denklemleri ile yapılır. Harmonik analizinde hata kovaryansı değeri izlenerek, hata kovaryansının minimum olduğu yerde harmonikler bulunabilmektedir. Doğru başlangıç parametrelerinin elde edilebildiği

durumlarda sistem durumu tahmini için gereken özyineleme sayısı azaltılabildiği için daha hızlı sonuç alınabilir [46]. Ayrıca Kalman Süzgeci'nde geçmiş saklama gereksinimi olmadığından bellek kullanımı açısından, Kalman Süzgeci daha avantajlıdır. Kalman Filtresi, harmonik bileşenlerin kestirimi için tekrarlı olarak uygulanır. Sinyaldeki beklenmeyen değişimleri izlemek amacıyla sabit KF yeteneğinin ötesinde değişken kazançlı adaptif KF kullanılabilir. Ancak bu serbest parametrelerin doğru bir biçimde ayarlanması için, ayrıca çeşitli önsel bilgiler gerekmektedir [46].

Kalman Filtresi yöntemi, tek bir harmoniği çıkarmada gayet doğru ve hızlı bir yöntemdir. Fakat birden çok harmonik bileşeni göz önüne alındığında, beklenen bütün frekans değerleri için formüle edilmesi gerekir ve hız ölçütünde önemli azalmalara yol açtığı için tercih edilen bir yöntem değildir. Yüksek doğrulukta sonuçlar elde etmek için orijinal dalga biçimi ile harmoniklerin fazı arasındaki doğrusal olmayan bağlantıyı çözümlenmek gerekmektedir. Bu tür durumlarda, harmonik kestirimi için Yapay Sinir Ağları (YSA) kullanılabilir [9;10].

Yapay Sinir Ağları (YSA), ağırlıklandırılmış şekilde birbirlerine bağlanmış birçok işlem elemanlarından (nöronlar) oluşan matematiksel sistemlerdir. YSA ek eğitim zamanı gerektirir ve kestirim için sınırlı bir aralığı vardır [16; 47]. Yapısal kolaylıklarına rağmen YSA'nın parametreleri uygun bir şekilde seçilmezse, kestirim işlemi zamansız (erken) yakınsayacak ve bu da doğruluktan uzak sonuçlara yol açabilecektir [7].

Ayrıca, zamanla değişen sinyaller göz önüne alındığında, öz-yenilemeli dinamik analiz yöntemleri basit yapılarından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerdendir [48]. Ancak sinyal gürültü ve ara harmonik gibi bileşenler içerdiği durumlarda, ön-filtreleme işlemlerinin getirdiği ek hesap yükü ve nümerik kararsızlık gibi eksiklikleri bulunmaktadır [11].

Yapay Sinir Ağları paralel çalışan bir yapı içerdiği için hız bakımından diğer algoritmalara göre daha hızlıdır. Sinir hücreleri sayısı, eğitim örnekleri sayısı, eğitim sayısı kullanıcıya bağımlı olduğundan, doğruluk bakımından ise diğer

sistemlere göre daha zayıftır. Ancak HFD ve YSA karşılaştırıldığında, YSA daha doğru sonuçlar üretmektedir [13].

Artificial bee colony - LS temel harmonik bileşen fazlarının kestirimi için kullanılır. Ara harmonik kestirimi yapmaz [49]. Genetik Algoritma (GA) tekniğinde bütün değişkenler (frekans bileşenlerindeki faz genlik bileşenleri) başlangıçta rastgele üretilir. Bunlar GA parametreleridir [12]. Kromozomlar güncellenir ve son yakınsama yapılır. Bunun dezavantajları hibrit GA - LS'de giderilmiştir. GA ve Bee Colony yöntemleri nonparametrik yöntemlerdir [50].

Son olarak hibrit yöntemleri ADALINE - LS, Particle Swarm Optimizer (PSO) - LS, CS-LS ve Fuzzy Bacterial Foraging (FBF) - LS'dir. ADALINE - LS ile sadece tam sayılı harmonikler kestirilebilir [10]. PSO pek çok doğrusal olmayan en uygun şekle sokma sorunlarını çözme kapasitesine sahip bir metottur. Çok fazla parametre ayarı gerektirir ve sayısal olarak karmaşıktır [51]. GA'ya nazaran PSO, daha basit bir yapıya sahiptir ve başlangıç popülasyonuna daha az bağımlıdır [52]. PSO, kolonyal seçilimin (CS) parametrelerini en uygun şekle sokmak için ek metotlar gerektirir [44]. FBF, E.coli bakterisi davranışları üzerine kurulmuş bir yöntemdir; ara harmonik ve frekans sapması kestirimi yapmaz [53].

Ayrıca, harmonik belirlemede yakın zamanlardaki çalışmalarda birden çok yöntemin avantajının birleştirilebildiği melez yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır [54]. Diğer yandan, zamanla değişen sinyaller söz konusu olduğunda öz-yenilemeli (adaptif) dinamik analiz yöntemleri, basit yapıda olduklarından dolayı en çok tercih edilen yöntemlerdendir [8;14]. Harmonik bileşenlerin kestirimi için sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri ADALINE yöntemidir [9].

3.2 Fourier Dönüşümü

Periyodik dalga biçimleri, Fourier serileri ile tanımlanabilirler. Periyodik olmayan işaretler ise Fourier dönüşümleri ile ifade edilebilir. Genel yaklaşımda, harmoniklerin belirlenmesi Hızlı Fourier dönüşümü (HFD) tekniğiyle yapılır veya uygun elektronik filtrelerle harmonikler bileşenlerine ayrılır. HFD yönteminde bir zaman penceresinden alınan örnekler önce dijitize edilir, daha sonra her bir

harmoniğe karşılık gelen parametreleri kestirmek için kullanılır. Ancak bu dönüşüm işlemi zaman almaktadır ve yüksek bir bellek kapasitesine ihtiyaç duyulmaktadır. Aynı zamanda çevrimiçi tahmin için, örneklem sayısı ve dijitalleştirme doğruluğu sınırlıdır. Bunun yanında bu iş için özel kartlar ve işlemciler gerektiği için bu yöntem pahalı hale gelmektedir.

Doğrusal devrelerin sinüzoidal olmayan devrelere tepkisi, toplamsallık ilkesinin yardımıyla belirlenir. Ancak bunun için periyodik bir işaret, sonlu ya da sonsuz sayıda sinüzoidal fonksiyonun toplamı biçiminde tanımlanmalıdır.

Fourier dönüşümünde temel prensip, belli koşulları sağlayan her sinyalin $s(t)$, belli frekansın tam katlarının ω , fonksiyonlarının $e^{-j\omega t}$ ağırlıklı toplamı olarak gösterilebilmesidir.

Bu durumda Fourier dönüşümü tanımlı olan bir $s(t)$ fonksiyonunun Fourier dönüşümü,

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanır ve $S(\omega)$ 'nin ters Fourier dönüşümü ise,

$$s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega)e^{j\omega t} dt \quad (3.2)$$

olarak ifade edilir.

Yukarıdaki eşitlikler genellikle Fourier dönüşüm çifti olarak tanımlanır ve bu eşitlikler, zaman veya frekans uzayının $(-\infty, +\infty)$ aralığındaki herhangi bir fonksiyonu, ters uzayda sürekli bir fonksiyona dönüştürmek için kullanılır. En genel anlamda bu uzaysal dönüşüm, sinyalin temel fonksiyonlara izdüşümlerinin ağırlıklı toplamları olarak ifade edilmektedir.

Bu dönüşümde, temel fonksiyonların $e^{-j\omega t}$ olarak seçilmesi, bu ana fonksiyonların ortonormal olmasından kaynaklanır. Bu da beraberinde, sağlanan bilginin teklüğünü getirmektedir [55].

Çeşitli Fourier analiz ve sentez denklemleri aşağıda gösterilmiştir:

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t)e^{-j\omega t} dt \text{ ve } s(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega)e^{-j\omega t} dt \quad (\text{CFT}) \quad (3.3)$$

$$a_k = \frac{1}{T} \int_T x(t)e^{jk\omega_0 t} dt \quad \text{ve} \quad s(t) = \sum_{k=1}^{\infty} a_k e^{jk\omega_0 t} \quad (\text{FS}) \quad (3.4)$$

$$S[k] = \sum_{n=1}^{\infty} x[n]e^{-j\omega_0 kn} \quad \text{ve} \quad s[n] = \sum_{k=1}^{\infty} S[k]e^{j\omega_0 kn} \quad (\text{DFT}) \quad (3.5)$$

$$D_N[k] = \sum_{n=1}^N d_N[n]e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad \text{ve} \quad d_K[n] = \sum_{k=1}^K D_K[k]e^{j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (\text{DFTN/DFTK}) \quad (3.6)$$

Fourier analizinde temel prensip aşağıdaki gibidir.

Farz edelim ki, ω temel açısal frekanstaki güç sistemi, genlik ve faz değerleri bilinmeyen yüksek mertebeli harmonikler ($\omega_k = k\omega$) tarafından bozulmuş olsun.

Bu sinyalin dalga şeklinin genel Fourier seri açılımı:

$$s(t) = D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.7)$$

şeklinde tanımlanır. Burada, sinyalin DC bileşeni (ofsetin) D_0 ile, k 'nci harmoniğin genliği S_k , fazı ise ϕ_k ile ifade edilmektedir. Bu sinyalin ilk k harmoniği göz önüne alındığında bu ifade,

$$d(t) = D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (3.8)$$

şekline dönüşmektedir.

$$S_k = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \phi_k = \arctan \frac{B_k}{A_k} \quad (3.9)$$

olarak alındığında,

A_k ve B_k bileşenleri k 'inci harmoniğinin genliğini (S_k) ve fazını (ϕ_k) belirtmektedir.

Aynı zamanda yukarıdaki sinyal vektörel bir ifadeyle aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$d = WX + D_0 \quad (3.10)$$

Burada, W ağırlık matrisini, D_0 ise ağırlık bağımsız bias değerini belirtmektedir.

Ayrıca pratikte Fourier dönüşüm tekniği Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) algoritması kullanılarak yapılabilmektedir. Bu algoritmanın en büyük dezavantajı, spektral sızıntıdır. HFD spektrumunda harmonikler tam olarak temel frekansın katlarında görünmezler. Yani temel frekansların çevrelerine kayarlar.

Ancak bu periyodik yöntemde örtüşme gibi olumsuz etkiler de gürültü miktarını artırmaktadır. Bu nedenlerle bu yöntemler, sinyalin gürültü içermesi durumunda tercih edilmemektedir [5; 6; 7]. Fourier dönüşümü ayrık ve hızlı olmak üzere iki şekilde incelenebilir.

Ayrık Fourier Dönüşümü (AFD) sayısal değerlendirmeye en uygun olan Fourier dönüşümüdür ve sonlu uzunluktaki dizilerin Fourier dönüşümü için kullanılır. Ölçüm bilgisi bir örnekleme zaman fonksiyonu formunda daima elde edilebildiği için, ayrık Fourier dönüşümü, harmonik ölçümlerinde çok kullanılır. Ayrık Fourier dönüşümleri, hızlı Fourier dönüşümü algoritmalarının kullanımıyla hesaplanabilir [5; 6].

Hızlı Fourier dönüşümü (HFD), ayrık Fourier dönüşümünü kolaylaştırmak için geliştirilmiştir.

$$W = e^{-2j\pi / N} \quad (3.11)$$

tanımı yapılarak elde edilen W matrisindeki elemanların benzerliğinden faydalanılmaktadır. Hızlı Fourier dönüşümünde, örneklerin sayıları ikinin tam katı olmalıdır, yani dalga'nın periyodu ikinin tam katı olduğu zaman kullanılabilir [56].

Harmonik ve ara harmonik kestirimi ve tüm bu algoritmaların doğruluğu için bazı HFD tabanlı pencereleli eklenti teknikleri pencereleme fonksiyonundan etkilenir. Ayrıca temel harmoniklerin kestiriminde gerilim ve akım sinyali elektrik sistem frekansının 50 ya da 60 Hz.'de sabit olduğu varsayımı yapılır. Fakat bir güç ağında temel sistem frekansı ani yük değişikliklerinden dolayı nadiren sabit kalır ve dolayısıyla çok küçük bir frekans çeşitli sinyal bileşenlerinin doğru kestirimini etkiler. Bu yüzden sinyalin ilk frekansı harmonik, ara harmonik şiddeti ve faz açılarının doğru kestirimi için iyi tahmin edilmelidir. Bir sinyalin, sinyal-gürültü oranı (SNR) düşük olduğunda ve frekans değişimi 50 ya da 60 Hz.'dekinden önemli olduğunda, tahmin edilen gürültü sinyalinin frekansı gerçek değerine eşit olmayabilir [34].

Fourier dönüşümünde, Nyquist Örnekleme Teoremi'ne göre bir sinyali tekrar doğru olarak geri elde edebilmek için o sinyalin en yüksek frekanslı bileşeninin en az iki katı frekansta örnekleme yapılması gerekmektedir. Örneklenen sinyalin her bir örnekleme anındaki genlik değerinin kaç farklı seviye ile belirleneceğini göstermek için kuantalama kullanılır. Örneğin 16 bit kuantalanmış bir sinyal $2^{16} = 65536$ farklı değer alabilecektir [5; 6].

3.3 Geleneksel YSA Kullanılarak Harmonik Analizi

Harmoniklerin belirlenmesinde, sistem yapısının iyi tanımlanması koşulu ile kesin çözümü sağlamak için akıllı yürütme metotları da kullanılabilir. Gerçek zamanlı hesaplama yapabilmek bakımından paralel bilgisayarların eş zamanlı olarak

çalışması gerekmektedir. Bu yüzden doğrusal olmayan modellerde iyi sonuçlara ulaşılabilmesi için Yapay Sinir Ağları kullanılabilir [57].

Günümüzde, güç sistemlerinde Yapay Sinir Ağları'nın (YSA) kullanılması yaygın hale gelmiştir. YSA'nın en iyi uygulama alanı, yaklaşık olarak durum değerlendirmesidir ve güç sistemlerindeki harmoniklerin belirlenmesi de tipik bir durum tahminidir. Ancak, Geleneksel Yapay Sinir Ağları yönteminin yakınsama hızı çok düşüktür ve kullanılan parametreler ne kadar çok olursa yakınsama için o kadar fazla kombinasyon olacaktır. Ayrıca yerel minimum problemleri içermesi bakımından doğruluğu nispeten azdır. Hesaplama maliyetleri ve yavaş yakınsama hızları nedeniyle çoğu YSA yöntemi çevrimiçi olarak kullanılamamaktadır [58].

Yapay Sinir Ağları (YSA), insan beyninin çalışma mekanizmasını taklit ederek beynin öğrenme, hatırlama, genelleme yapma yolu ile yeni çıkarımlar türetebilme gibi temel işlevlerini gerçekleştirmek üzere geliştirilen algoritmalarıdır [59].

YSA'da çıkışlar, girişlerin ağırlıklı toplamının bir fonksiyonu olarak gözlemlenmektedir. Bu fonksiyon genel olarak ağırlıklı giriş değerlerini doğrusal olmayan fonksiyon ile süzer [60]. Geleneksel yapıda giriş olarak sinyalin anlık değerleri, çıkış olarak da harmonikler gözlemlenir. Fakat YSA'da ilgilenilen harmoniklerle ilişkili girişler ve tek çıkış bulunmaktadır. Giriş-çıkış sayısında önemli oranda azalma olduğundan dolayı hız da artırılmış olur.

Güç sistemlerinde harmoniklerin belirlenmesindeki başlıca zorluk, harmonik oluşturan yüklerin dinamik doğasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle doğruluktan ödün vermeden, hızlı ve gerçek zamanlı yöntemlere gereksinim duyulmaktadır. Teorik açıdan, temel bileşenleri bolca kullanarak karmaşıklığı ortadan kaldırmak arzu edilse de pratik açıdan, ağın boyutunu azaltmak ve paralel işlem kapasitesini artırmak adına, daha güçlü hesaplama birimlerine, nöronlara, ihtiyaç olmaktadır. Dahası hesaplamalar, ağdaki bilginin doğru ifade edilebilmesini de beraberinde getirecektir. Aynı zamanda paralel sistemler, bilgiyi çok daha iyi ifade edebilir özelliktedirler.

YSA; fizik, matematik, elektrik elektronik ve bilgisayar mühendisliği gibi farklı bilim dallarında farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. YSA'nın pratikte kullanımı, genelde değişik formlarda ve yapılarda bulunan sistemleri modelleme, verileri sınıflandırma, tahmin etme ve kontrol üzerinedir. Aslında mühendislik uygulamalarında YSA'nın geniş çaplı kullanımının en önemli nedeni, klasik yöntemlerle çözümü zor olan problemlere daha kolay çözüm getirmesidir [61]. YSA yönteminde, geniş bir alana yayılmış bilim ve mühendislik problemlerinin çözümü için matematiksel modeller yerine, gözlem veya deneyler sonucu elde edilen verilere dayanan benzetimler kullanır [62].

Güç sistemlerinde meydana gelen olumsuzlukları mevcut verilerden öğrenerek, çözüme kavuşturmak için eğitilmiş olan sistemlerin tasarımına ek olarak, bunları en uygun şekilde sokma sorunlarına ve kontrol uygulamalarına kadar pek çok alanda YSA kullanılmaktadır [59, 63; 64].

YSA aynı zamanda çeşitli arıza analizleri ile doğrusal olmayan yükler içeren güç sistemlerindeki harmonik kaynaklarını izlemek ve tanımak için de kullanılmıştır [60; 65; 66]. Son yıllarda YSA, güç sistemlerinin incelemelerinde ve hesaplamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır. YSA yöntemlerinden, en çok kullanılan ve gerçek zamanlı uygulamalarda başarılı olan tek katmanlı ADALINE yapısıdır.

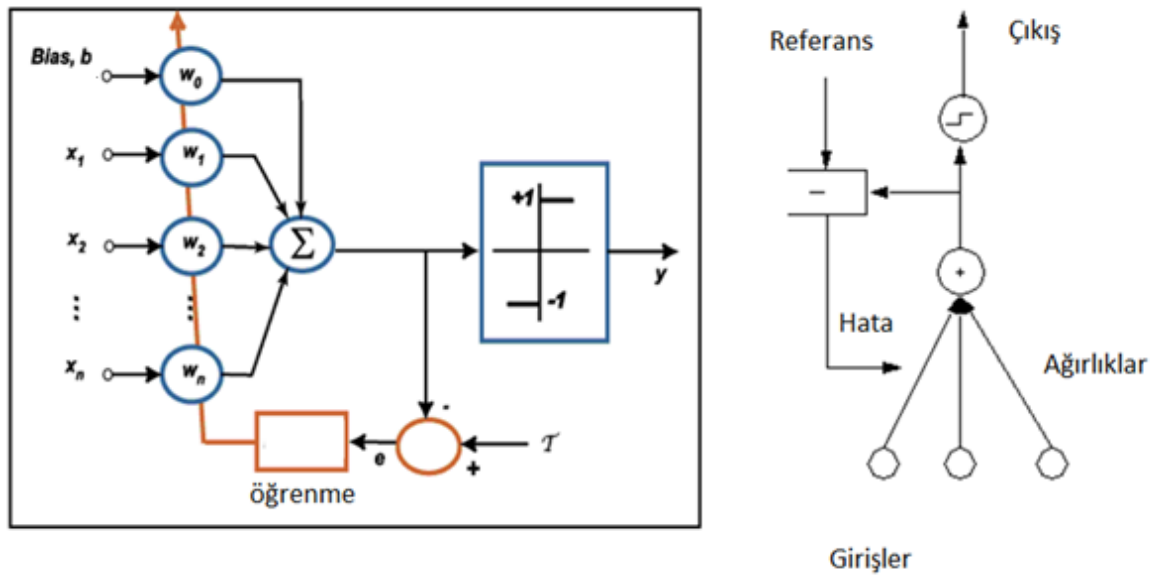
3.4 ADALINE Yapısı ve ADALINE Tabanlı Harmonik Analizi

ADALINE, tek nöron hücrelerinden oluşan basit bir YSA yapısıdır. YSA genel bir yöntemdir. ADALINE ise girişler benzer olarak seçilmek kaydıyla yapay sinir ağlarından en basit olanıdır. Özel bir YSA çeşidi olan tek nöronlu ADALINE yapısı özel olarak kullanılabilir. ADALINE ve bu ağların öğrenme algoritması olan the Least Mean Square (LMS) algoritması (Widrow-Hoff Algoritması veya Delta Kuralı) 1960'da Bernard Widrow ve öğrencisi Marcian Hoff tarafından geliştirilmiştir [67; 68].

Delta kuralı, ADALINE için kullanılan öğrenme algoritmasıdır [68]. Delta Kuralı'na göre, girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi yakalayabilmek için gerçek çıktı ve hedef çıktı arasındaki hatayı, bağlantı ağırlıklarına doğru geriye dağıtacak ya da giriş

bilgileri için ağın üreteceği hedef çıkış bilgisinin aynısı olmasını sağlayacak bir ağırlıklar kümesi bulunmaktadır [67]. Geri yayımlı ağ; giriş katmanı, gizli katman çıkış katmanı olmak üzere üç katmandan oluşur. Basit geri yayımlı ağ algoritması üç adım içermektedir. Ağın girdi katmanında girdi deseni sunulur. Bu girdiler, çıktı birimlerine ulaşıncaya kadar ağ yolu ile iletilir. Bu ileri doğru geçiş gerçek veya tahmin edilen çıktı desenini üretir. Çünkü geri yayılım denetimli bir öğrenme algoritmasıdır. İstenilen çıktılar öğrenme vektörünün bir parçası gibi verilir. Gerçek ağ çıktıları ve bir hata sinyalinden çıkarılır. Bu geri yayımlı adım için bir başlangıçtır.

ADALINE yönteminde hatayı azaltmak için ağırlıklar gradientin tersi yönünde değiştirilir. Sınıflandırma ve adaptif sinyal işlemlerinde kullanılan bir yapıdır. Şekil 3.2'de ADALINE yapısı ve öğrenme algoritması gösterilmiştir. Şekilde verildiği gibi, nöronun çıkışı olan sinyalin toplamı, örneklenmiş sinyal ile karşılaştırılarak, hata elde edilir ve hataya göre ağırlıklar güncellenir.



Şekil 3.2 ADALINE yapısı [67]

Eğer bu yapının girişlerine Fourier serisindeki sinüs ve kosinüslü bileşenler verilirse, bu yapı iki yapının özelliklerini birleştirmiş olur. Bu yapı literatürde adaptif sinyal işlemede kullanılmıştır [69]. Benzer şekilde, güç sistemlerinde harmonik parametrelerin belirlenmesinde de kullanılmıştır. Bu yapıda, nöronun ağırlıkları,

tam sayı harmoniklerin genliğini vermektedir [69]. Ayrıca bu yapı harmonik analizinde kullanıldığında, temel frekans sabit kabul edilir.

ADALINE'de en bilinen eğitim uygulaması LMS algoritmasıdır. Bu algoritma, steepest-descent gradient kullanılarak yürütülür ve sistemin ağırlık vektörü için rastgele bir giriş değeri ile başlar.

Anlık gradient ölçülür ve ağırlık vektörü, ölçülen negatif gradient yönüne karşılık gelecek şekilde değiştirilir. Bu işlem ortalama karesel hatayı azaltmak için tekrar edilir ve böylece ağırlık vektörü optimum değerine yaklaşır. Steepest descent metodu aşağıdaki eşitlikle tanımlanabilir:

$$W_{k+1} = W_k + \eta(-\nabla_k) = W_k - \eta \frac{\partial e_k^2}{\partial W_k} \quad (3.12)$$

ADALINE öğrenme yöntemi kullanır ve dolayısıyla eğitim sırasında istenen çıkış, her giriş için sağlanır. ADALINE'in başarıyla kullanıldığı uygulamalara; akım harmonikleri tespiti, dengelenmemiş üç fazlı bir sistemin gerilim ve akım bileşenlerini çıkarma, güç kalitesi bozunumunu belirleme, kontrol şekli örnek olarak verilebilir [70].

Frekans takibi ve harmonik tespiti gibi konularda yapılan çalışmaların sonuçlarına göre ADALINE ve onun algoritması güç kalitesinin tam analizini yapmak için kullanılabilir [71].

Pek çok uygulamada; örneğin harmonik denetlemede, en zararlı olan 5'inci ve 7'inci harmonikler gibi belirli sayıdaki harmoniklerin çıkarılması gerekebilir. ADALINE analizi ile harmonikler ayrı ayrı ve çevrimiçi tahmin edilebilir. ADALINE analizinin diğer bir avantajı da basit ve kolay kurulmasıdır [55].

4. TEZ ÇALIŞMASINDA KULLANILAN YÖNTEMLER

Harmoniklerin hiç olmaması enerji sistemleri için kuşkusuz büyük bir yarar sağlayacaktır. Bu nedenle harmoniklerin oluşmasının temelden önlenmesi ya da hiç değilse yarattığı olumsuz etkilerinin azaltılması gerekmektedir.

Günümüz şartlarında harmoniklerin tamamen önlenmesi sağlanamamış ise de etkilerinin olabildiğince azaltılması konusunda yöntemler geliştirilmiş ve birçoğu uygulamaya konulmuş bulunmaktadır. Harmoniklerin azaltılması için genel olarak iki yöntem vardır; birincisi cihaz tasarlanırken harmonik üretmeyecek veya düşük seviyede üretecek şekilde tasarlanması, diğeri ise harmoniklerin filtreler yoluyla süzülerek sistemden uzaklaştırılmasıdır.

Harmoniklerin filtrelenmesi veya kompanzasyonu için, çalışma şartlarında yükün üretebileceği tüm harmoniklerin yüksek doğrulukla ve diğeri taraftan hızlı bir şekilde bilinmesi gereklidir. Bu da ancak gelişmiş harmonik analizi yöntemleri ile mümkün olmaktadır [28]. Harmonik bileşenlerin doğru kestirilmesi, filtre tasarımının en önemli aşamasıdır. Önceki (3.) bölümde özetlendiği gibi, harmoniklerin kestirilmesinde farklı yöntemler kullanılmıştır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde, uyarlanabilir sinyal işlemede sıkça kullanılan ADALINE yapısı, güç sistemlerinde harmonik bileşenlerinin kestiriminde kullanılmaktadır. Bu çalışmada geliştirilen Genişletilmiş ADALINE (GADALINE) kullanılarak, harmonik bileşenlerinin kestirimi hedeflenmiştir.

Geliştirilmiş ADALINE yapısıyla harmoniklerle ilgili aşağıda belirlenen durumlar üzerinde çalışma yapılmıştır.

- Tamsayı harmoniklerin genlik ve fazlarının kestirilmesi
- Ara harmoniklerin kestirilmesi
- Temel frekansın kestirilmesi

Belirlenen hedefler doğrultusunda aşağıdaki çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

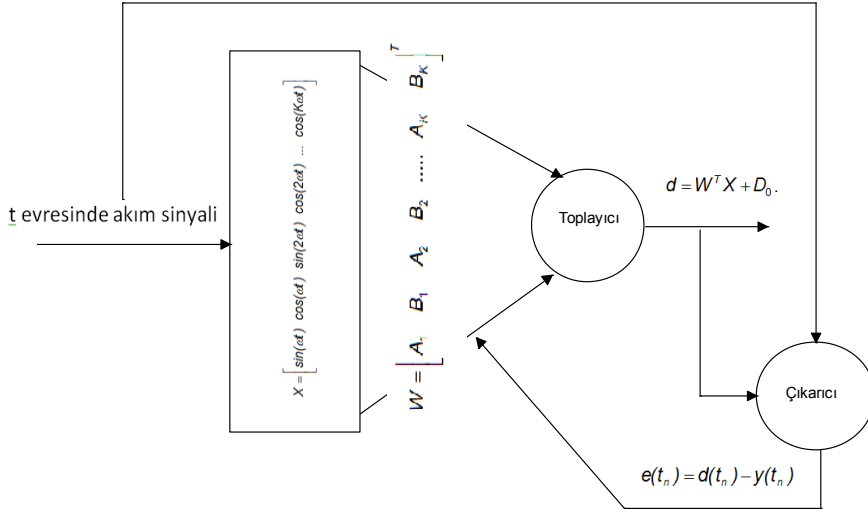
- Geleneksel ADALINE yapısıyla, temel frekans sabit kabul edilerek tamsayı harmoniklerin faz ve genliği belirlenmiştir.
- Genişletilmiş ADALINE yapısı kullanılarak, tam sayılı harmonik bileşenlerin yanı sıra, ara harmonikler ve temel frekansın kestirimi yapılmıştır.
- Genişletilmiş ADALINE yapısının başarısı gerçek sistemden alınan sinyal ile test edilmiştir.

4.1 Geleneksel ADALINE (FYSA ve FADLINE) Yapısıyla Harmonik Analizi

Geleneksel ADALINE yapısında, temel frekans sabit kabul edilerek, tam sayılı harmoniklerin genliği ve faz açıları tespit edilebilir. Bu yapı benzer çalışmalarda FYSA veya FADALINE olarak tanımlanmıştır. Bu yapının genel ifadesi Şekil 3.2’de verilmiştir. Sözü edilen yapı doğrusal modele uyarlanarak, Şekil 4.1’deki yapı oluşturulmuştur.

Bu yapı, FADALINE (Fourier Adaptive Linear Element) yapısını özetlemektedir. Şekilde görüldüğü gibi, burada harmonik değerlerin ağırlıklara karşı geldiği ve girişlerin Fourier temel bileşenleri olarak seçildiği, böylece giriş ve çıkış arası ilişkinin temel bir doğrusal denkleme dönüştüğü özel bir ağ yapısı olmuştur. Özetle FADALINE, yapısında girişlerin sinüs ve kosinüs bileşenler olarak seçildiği bir ADALINE yapısıdır. Harmoniklerin genlikleri ise ağırlık vektörü olarak gösterilebilir. İki vektörün çarpımı çıkış değeri oluşturur.

Öngörülen yapıda ağırlıkların belirlenmesi, bir doğrusal en uygun şekle sokma (optimizasyon) problemidir. Bu yapıda, ADALINE’nin çıkışı Fourier açılımı ile aynı matematiksel formda ifade edilebilir. Çıkış sinyalinin ağırlıklara göre türevi alınarak, en uygun ağırlık değerleri bulunabilir. En uygun değerler ise belli bir zaman aralığında ADALINE’nin çıkışından elde edilen sinyalin, zaman evresinde seçilmiş olan sinyale yaklaşmış olmasıdır. Bu işlemin matematiksel ifadesi, aşağıda (“4.1.1 FADALINE yapısının matematiksel çözümlenmesi” alt başlığı altında) verilmiştir.



Şekil 4.1 Harmoniklerin belirlenmesinde kullanılan FADALINE yapısı

4.1.1 FADALINE yapısının matematiksel çözümlemesi

FADALINE yapısında, sistemin girişi olan zaman değeri, ağın girişlerindeki bağımsız değişken değeri iken; sinyalin o andaki değeri ise ağın çıkışı ile karşılaştırılacak olan sinyalin istenen değeridir. Bu durum dikkate alınarak, en-küçültülmesiyle ayarlanan ağırlıklara karşılık gelen harmonik değerleri de sistemin çıkışını oluşturmaktadır. YSA ve Fourier serileri formülleri göz önünde tutularak, modelin çalışması detaylandırılmıştır. Varsayalım ki, ω temel açısal frekansındaki güç sistemi, genlik ve faz değerleri bilinmeyen yüksek mertebeli harmonikler ($\omega_k = k\omega$) tarafından bozulmuş olsun.

Bu sinyalin dalga şeklinin genel Fourier seri açılımı,

$$d(t) = D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} S_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (4.1)$$

şeklinindedir.

Burada, sinyalin DC bileşeni S_0 , k 'ıncı harmoniğin genliği S_k , fazı ise ϕ_k ile ifade edilmektedir. Bu sinyalin ilk k harmoniği göz önüne alındığında bu ifade,

$$d(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K S_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (4.2)$$

şekline dönüşmektedir. Burada,

$$A_k = S_k \cos(\phi_k) \quad (4.3)$$

$$B_k = S_k \sin(\phi_k) \quad (4.4)$$

olarak alındığında, A_k ve B_k bileşenleri k 'inci harmoniğinin genliğini ve fazını oluşturmaktadırlar.

$$S_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \quad (4.5)$$

$$\phi_k = \arctan \left(\frac{B_k}{A_k} \right) \quad (4.6)$$

Bu dalga denkleminin ulaşılmak istenilen amaca daha uygun diğer bir biçimi ise aşağıdaki gibidir.

$$d(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.7)$$

Diğer yandan, yukarıdaki sinyal vektörel bir ifadeyle aşağıdaki şekilde gösterilebilir.

$$d = W^T X + D_0 \quad (4.8)$$

Bu bilgiler ışığında modele geri dönersek, zamanın fonksiyonu olan sinüs ve kosinüs temel bileşenlerini aşağıdaki gibi ağımızın girişleri

$$X = \begin{bmatrix} \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & \sin(2\omega t) & \cos(2\omega t) & \dots & \cos(K\omega t) \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

olarak seçildiği takdirde, aşağıdaki ağırlıklar için

$$W = \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & A_2 & B_2 & \dots & A_K & B_K \end{bmatrix}^T \quad (4.10)$$

modelin çıkışı,

$$y(t) = W^T X + b = \sum_{k=1}^K W(k)X(k) + b \quad (4.11)$$

şeklinde olacaktır.

Bu ifadeye, X ve W^T değerleri yerine konulduğunda çıkış, aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$y(t) = b + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.12)$$

Burada ağın bias değeri,

$$b = D_0 \quad (4.13)$$

alındığında, çıkış

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.14)$$

şeklinde olacaktır. Diğer taraftan, ağın çıkışında olması istenilen sinyalin Fourier seri açılımını aşağıdaki gibidir.

$$d(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.15)$$

Yukarıdaki ifadelerden de görüldüğü gibi, ağın girişlerini (4.10) eşitliğindeki gibi seçmek suretiyle ağda, girişi çıkışa bağlayan doğrusal ilişki, Fourier seri açılımından başka bir şey olmayacaktır.

Bu durumda da ağın bias değeri, sinyalin ağırlıklı zaman ortalamasına, ağın ağırlıkları ise Fourier katsayılarına, yani harmonik bileşenlerine karşılık gelecektir.

Giriş çıkış arası ilişkinin Fourier serilenine benzediği bu yöntemde, girişlerin özel temel fonksiyonlar olarak seçimi performansını gözle görülür bir şekilde artırarak geleneksel sinir ağlarına göre büyük avantaj sağlamaktadır.

4.1.2 Sistemin eğitilmesi ve harmonik bileşenlerin belirlenmesi

ADALINE yapısında, bileşenlerin belirlenmesi için, hatanın minimize edilmesi gerekmektedir. Hatayı azaltmak için hatanın ortalama karesel formülü kullanılmıştır.

Burada ilgilenilen harmonik değerlerinin ağırlıklarda saklı olmasından hareketle ağırlık değerleri, t_n anındaki istenen sinyal $d(t_n)$ ile ağın çıkışı $y(t_n)$ arasındaki, hata olarak tanımlanan farkın,

$$e(t_n) = d(t_n) - y(t_n) \quad (4.16)$$

en-küçültülmesi ile güncellenmektedir.

Örneğin, özel bir $t_n = \Delta tn$ anında çıkışta beklenen (olması istenilen) değer $d(n)$ olsun ve diğer yandan bu an için ağın çıkışını da $y(n)$ ile gösterelim. Bu durumda bu iki değer arasındaki fark, diğer bir deyişle, n 'inci tekrardaki hata $n = 1, 2, 3, \dots, N$ için;

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (4.17)$$

gibi olacaktır.

Bu durumda, sinyalin temel açısal frekansı ω_k bilinirken ve zaman değerleri $t = [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n, \dots, t_N]$ sabitken, YSA kavramına uygun olarak tanımlanan, n 'inci tekrardaki ortalama karesel hata aşağıdaki gibi olacaktır.

$$E(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^2(n) \quad (4.18)$$

YSA yaklaşımıyla, ilgilenilen fonksiyon için optimum nokta durağan çözümü, η integral sabiti ve ∇E de E fonksiyonunun gradienti iken,

$$\frac{dW}{dt} = -\eta \nabla E \quad (4.19)$$

şeklindedir. Ağırlıkların $w(t_n)$ değeri, t_n anında bu yöntem ile güncellenmektedir ve bu durumda i 'inci ağırlıkta n 'inci tekrarda t_n anı için yapılan iyileştirme;

$$\Delta w_i(n) = -\eta \nabla_{w_i} E(n) \quad (4.20)$$

şeklinde olmaktadır. Burada η , öğrenme katsayısı olarak adlandırılan pozitif bir tamsayıdır.

Bu durumda, ağda ağırlık ayarlaması, geri besleme algoritması ile η 'ye bağlı olarak $i = 1, 2, 3, \dots, I$; $n = 1, 2, 3, \dots, N$ ve $0 < \eta < 1$ için, aşağıdaki gibi yapılır.

$$\Delta w_i(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_i} = \eta e(n) x_i(n) \quad (4.21)$$

Böylece, i 'inci ağırlık ve bias'ın, $n+1$ 'inci tekrardaki değeri aşağıdaki gibidir:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \Delta w_i(n) \quad (4.22)$$

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \eta (d(n) - y(n)) x_i(n) \quad (4.23)$$

$$b(n+1) = b_i(n) + \eta (d(n) - y(n)) \quad b(n+1) = b_i(n) + \eta (d(n) - y(n)) \quad (4.24)$$

Buna göre, girişlerin özel olarak seçildiği bu modelde ağırlık değerlerine karşılık gelen harmonik değerlerinin güncellenmesi de aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$A_0(n+1) = A_0(n) + \eta e(n) \quad (4.25)$$

$$A_k(n+1) = A_k(n) + \eta e(n) \sin(kwn\Delta t) \quad (4.26)$$

$$B_k(n+1) = B_k(n) + \eta e(n) \cos(k\omega n \Delta t) \quad (4.27)$$

Bu aşamada, (ağırlıkları ileri besleyerek elde edilen çıkış değerleriyle istenilen değerler arasındaki) hatayı geri yönde besleyerek ağırlık değerleri güncellenmektedir.

Bu yöntemde ağırlıkların harmonik değerlerine karşılık geldiği göz önüne alındığında; ilgilenilen bu harmonik değerleri eğitim aşamasında elde edilmekte, böylece durağan olmayan ve frekans özellikleri hızla değişen dinamik uygulamalara gerçek zamanlı çözümler sunulabilmektedir.

Öte yandan, sinyalin durağan olduğu öngörülen küçük zaman aralıklarında, elde edilen harmonik değerleri kullanılarak daha sonraki sinyal değerleri de öngörülebilmektedir. Bunun da geleneksel YSA'daki test aşamasına karşılık geldiği söylenebilir.

Çalışmada kullanılan sistemde t zamanı ve buna karşılık gelen o andaki sinyal değeri $s(t)$, olmak üzere iki giriş bulunmaktadır.

Sistem öncelikle, bu girişlerden t ve ilk değerleri atanmış harmonik değerleri A_k ve B_k değerleri kullanılarak sinyalin $y(t)$ değerini aşağıdaki gibi hesaplamaktadır.

$$y(t) = b + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.28)$$

Daha sonra da bu değer, sinyalin olması gereken sistemin ikinci girişi olan $s(t)$ ile karşılaştırılıp, bu fark değeri ise (o döngü için anlık) hata;

$$e(t) = s(t) - y(t) \quad (4.29)$$

değeri olarak tespit edilmektedir.

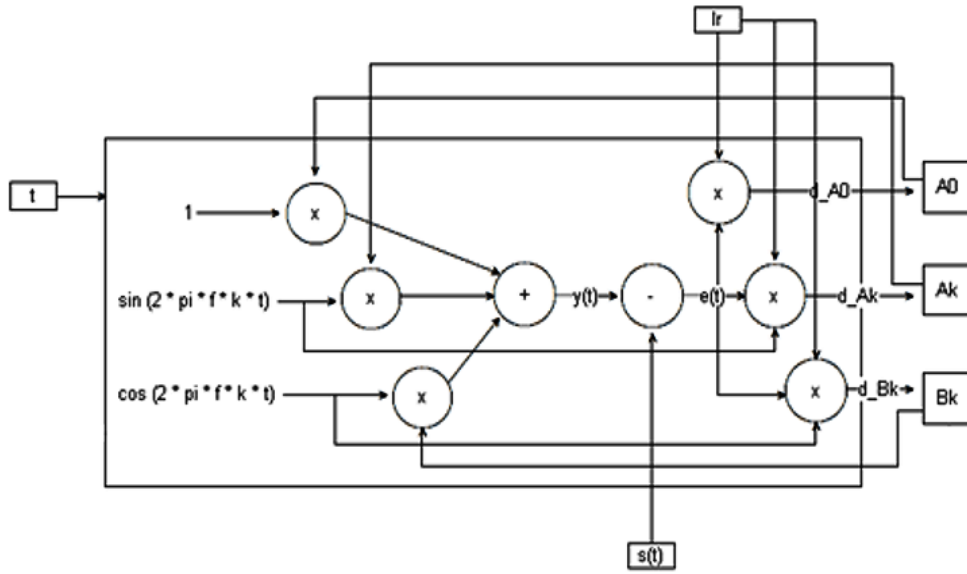
Çalışmada son olarak, elde edilen bu hata değeri kullanılarak, ağırlık değerlerine karşılık gelen harmonik değerlerini aşağıdaki şekilde güncellenmektedir.

$$A_0(t + \Delta t) = A_0(t) + \eta e(t) \quad (4.30)$$

$$A_k(t + \Delta t) = A_k(t) + \eta e(t) \sin(k\omega t) \quad (4.31)$$

$$B_k(t + \Delta t) = B_k(t) + \eta e(t) \cos(k\omega t) \quad (4.32)$$

FADALINE yapısı, yukarıda açıklanan denklemler dikkate alınarak, Şekil 4.2'de verilen blok yapıda detaylandırılmıştır.



Şekil 4.2 Harmonik güncelleme işleminde kullanılan açık sistem yapısı

Yapının eğitim algoritmasının basamakları aşağıda özetlenmiştir. Verilen eğitim algoritması kullanılarak ve ağıdaki bileşenler güncellenerek, harmoniklerin bileşenleri genlik ve faz açısı olarak elde edilir.

1. Harmoniklere ilk-değerler atamak.
2. Bu harmonik değerleri kullanarak, ağı ileri yönlü besleyip, ağın çıkışından anlık bir sinyal elde etmek.
3. Daha sonra bu çıkışı sinyalin o anki gerçek değeriyle karşılaştırmak ve bu farkı hata olarak tespit etmek.
4. Hataya bağlı olarak, ağı geri besleyerek, ağın ağırlıklarını yani harmonik

değerlerini güncellemek.

Eğer 3. aşamadaki hata sıfır veya kabul edilebilir küçüklükteyse, o anki bilgi kullanılarak harmonik değerleri elde edilmiş olur.

Aksi takdirde 4. aşamayı 2. aşama takip eder.

4.2 Genişletilmiş ADALINE Yapısı

Yukarıda açıklanan FADLINE yöntemiyle sadece tamsayıli harmoniklerin bileşenleri kestirilebilir.

Günümüzde uygulanan harmonik kestirim yöntemlerinden beklenen performans ise ara harmonikler ve temel frekansın kestirimiyle değerlendirilir.

Bu durum dikkate alınarak öngörülen yapının etkinliğini artırmak için ara harmoniklerin kestirimi ve temel frekans kestirim özelliği önceki sisteme ilave edilmiştir.

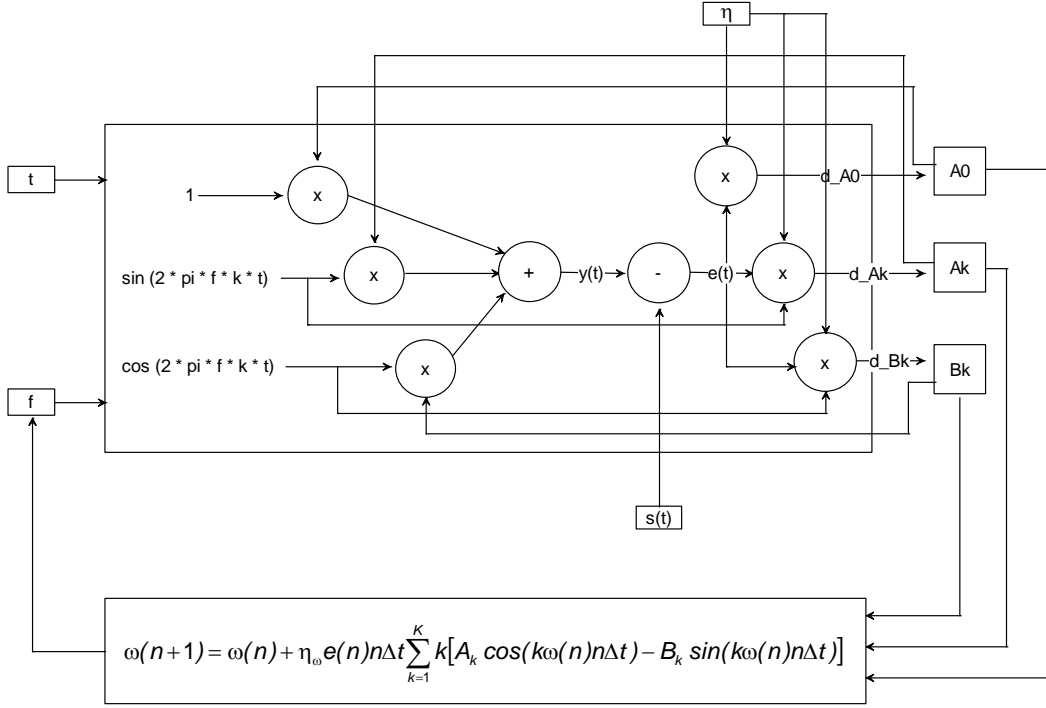
Bu yapı ise Genişletilmiş ADALINE yapısı olarak adlandırılmıştır. Bu yapı gerçek zamanlı kullanılarak, harmoniklerle ilgili aşağıdaki bileşenler kestirilebilecek veya izlenebilecektir.

- Tamsayı harmoniklerin belirlenmesi
- Ara harmoniklerin belirlenmesi
- Temel frekansın izlenmesi ve kestirilmesi

Öngörülen yapı kullanılarak, tüm sistem açık bir şekilde izlenebilecek ve sistemdeki her bir parametrenin hataya bağlı olarak güncellenmesi sağlanacaktır.

Genişletilmiş ADALINE yapısının blok ifadesi, ilgili eşitliklerle birlikte Şekil 4.3'te verilmiştir. Şekilde zaman değeri t , temel frekans değeri f , öğrenme katsayısı değeri l_r veya η , harmonik indeks değeri k , ve d_{Ak} değerleri ise harmonik bileşen değerlerindeki değişimi ifade etmektedir. Çalışmada, learning rate (l_r) olarak da adlandırılan öğrenme katsayısı değeri, sistemin ön-işletimi sonrası atanabileceği gibi, rastgele deneme yanılma ile ya da kullanıcı tercihi ön bilgiler kullanılarak da

atanabilmektedir. Şekilde görüldüğü gibi, sistem temel olarak, anlık sinyal değerlerini gerçek zamanda işleyerek, ortalama karesel hatanın en-küçüklenmesi prensibi ile harmonik değerlerini günceller.



Şekil 4.3 Temel frekans kestirimini kapsayan açık sistem yapısı

4.2.1 Geliştirilen FADALINE yapısının matematiksel çözümü

Güç sistemlerinde karşılaşılan voltaj ya da akımların dalga formülü, bilinen güç sistem frekansı için bilinmeyen genlik ve faz açılarına sahip harmonik bileşenlerin doğrusal toplamı olarak açıklanabilir.

Varsayalım ki temel açısal frekansındaki güç sistemi ω , genlik ve faz değerleri bilinmeyen harmonikler ($\omega_k = k\omega$) tarafından bozulmuş olsun.

Bu durumda sinyalin dalga şeklinin genel Fourier seri açılımı aşağıdaki gibidir.

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^{\infty} G_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (4.33)$$

Burada; D_0 sinyalin DC bileşenini, G_k k 'ıncı harmoniğin genliğini, ϕ_k ise fazı ifade etmektedir.

Bu sinyalin büyük dizinli harmonikleri dikkate alınmayıp ilk k harmoniği göz önünde tutulduğunda bu ifade aşağıdaki şekle dönüşmektedir.

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K G_k \sin(\omega_k t + \phi_k) \quad (4.34)$$

Burada; A_k ve B_k bileşenleri k 'ıncı harmoniğinin genliğini ve fazını oluşturmaktadırlar:

$$A_k = G_k \cos(\phi_k) \text{ ve } B_k = G_k \sin(\phi_k) \quad (4.35)$$

$$G_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2} \text{ ve } \phi_k = \arctan(B_k / A_k) \quad (4.36)$$

Bu dönüşümler ile denklemin amaçlanana uygun diğer bir biçimi ise aşağıdaki gibidir.

$$y(t) = D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \sum_{k=1}^K B_k \cos(k\omega t) \quad (4.37)$$

Bir diğer yandan, yukarıdaki sinyal vektörel bir ifadeyle,

$$y = Wx + b \quad (4.38)$$

şeklinde gösterilebilir.

Bu bilgiler ışığında, zamanın işlevi olan sinüs ve kosinüs temel bileşenlerini ağımızın giriş elemanları olarak seçtiğimiz takdirde,

$$x = [\sin(\omega t) \cos(\omega t) \sin(2\omega t) \cos(2\omega t) \dots \cos(K\omega t)] \quad (4.39)$$

$$W = [A_1 \ B_1 \ A_2 \ B_2 \ \dots \ A_K \ B_K]^T \quad (4.40)$$

ve DC bileşene karşılık gelen bias değeri $b = D_0$ alındığında, modelimizin çıkışı,

$$y(t) = \sum_{k=1}^K W_k x(t) + b = Wx + b \quad (4.41)$$

şeklinde olacaktır.

Bu çalışmada, ilgilenilen harmonik değerlerinin ağırlıklarda saklı olması gerçeğinden hareketle ağırlık değerleri, t_n anındaki istenen sinyal $s(t_n)$ ile ağırlık çıkışı $y(t_n)$ arasındaki hata $e(t_n)$ olarak tanımlanan farkın, en aza indirgenmesi ile güncellenmektedir.

Örneğin, özel bir $t_n = \Delta t \cdot n$ anında çıkışta beklenen değer $s(n)$ olsun, bu an için ağırlık çıkışını da $y(n)$ ile gösterelim.

Bu durumda bu iki değer arasındaki fark, diğer bir deyişle n 'inci tekrardaki hata $n = 1, 2, 3, \dots, N$ için,

$$e(n) = s(n) - y(n) \quad (4.42)$$

şeklinde olacaktır.

Bu durumda, sinyalin temel açısal frekansı ω_k bilinir ve zaman değerleri sabitken, n 'inci tekrardaki ortalama karesel hata,

$$E(n) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^2(n) \quad (4.43)$$

şeklinde olacaktır. Bu yaklaşımla, η integral sabiti ve ∇E de E 'nin gradienti iken, ilgilenilen işlev için en elverişli nokta durağan çözümler şeklindedir.

Gelişmiş FADALINE yapısının, önceki bölümde açıklanan FADALINE'dan farkı ise hata fonksiyonunun türeviyle ilgilidir. Önceki bölümde temel frekans sabit kabul edilerek, delta kuralına göre ağırlıklar güncellenmekte ve tam sayılı harmoniklerin genlik ve faz açısı belirlenebilmekteydi. Gelişmiş yapıda ise iki aşamalı parametre güncellenme işlemi yapılmaktadır.

İlk aşamada, temel frekans sabit kabul edilerek sistem hata fonksiyonunun her bir harmonik bileşene göre türevi ile bu harmonik bileşen değerlerine karşılık gelen ağırlıklar güncellenir.

İkinci aşamada ise diğer bileşenler sabit kabul edilerek sistem hata fonksiyonunun frekansa göre türevi ile sistem frekans güncelleme işlemi yapılır.

4.2.2 Frekans sabitken, diğer harmonik bileşenlerin belirlenmesi

Bu aşamada yapılan işlemler FADALINE yapısında verilen işlemlerin aynısıdır. Buna göre, harmonik bileşenleri ifade eden ağırlıkların değerleri, aşağıdaki formülle güncellenir.

$$dW / dt = -\eta \nabla E \quad (4.44)$$

Ağırlıkların değeri, t_n anında bu yöntemle güncellenmekte ve bu durumda i 'inci ağırlıkta, n 'inci tekrarda, t_n anı için yapılan iyileştirme,

$$\Delta w_i(n) = -\eta \nabla_{w_i} E(n) \quad (4.45)$$

şeklinde olmaktadır.

Burada η , öğrenme katsayısı olarak adlandırılan pozitif bir gerçel sayıdır.

Bu durumda, ağda ağırlık ayarlaması, geri besleme yöntemi ile η 'ye bağlı olarak aşağıdaki gibi yapılır:

$i = 1,2,3,\dots, I$, $n = 1,2,3,\dots, N$ ve $0 < \eta < 1$ için,

$$\Delta w_i(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_i} = \eta e(n) x_i(n) \quad (4.46)$$

Böylece, i 'inci ağırlık ve bias'ın, $n+1$ 'inci tekrardaki değeri aşağıdaki gibidir:

$$w_i(n+1) = w_i(n) + \Delta w_i(n) = w_i(n) + \eta e(n) x_i(n) \quad (4.47)$$

Bu durumda, ağı ileri besleyerek elde edilen çıkış değeri ile istenilen değer arasındaki hatayı geri yönde besleyerek, ağırlıklara karşılık gelen harmonik değerlerinin güncellenmesi işlemi de aşağıdaki şekilde olmaktadır.

$$b(n+1) = b(n) + \eta e(n) \quad (4.48)$$

$$A_k(n+1) = A_k(n) + \eta e(n) \sin(k\omega n \Delta t) \quad (4.49)$$

$$B_k(n+1) = B_k(n) + \eta e(n) \cos(k\omega n \Delta t) \quad (4.50)$$

4.2.3 Diğer harmonik bileşenler sabitken, temel frekansın belirlenmesi

Matematiksel açıdan temel frekansı güncellemek için veya temel frekansı kestirmek için, daha önce kestirilmiş olan bileşenlerin sabit kabul edilmesi gerekir. Bu parametreler sabit kabul edilebilirse, hata fonksiyonunun türevi frekansa göre alınabilir. Çalışmada, temel frekans kestirimi için kullanılan yöntem, Fourier Harmonik Düzeltme Algoritması (FHDA) olarak adlandırılmaktadır. Bu yöntemde kullanılan temel frekans güncellemesi aşağıdaki matematiksel ifadelerle verilmiştir.

Bu hata n . döngü için,

$$E(n) = \frac{1}{2} e^2(n) = \frac{1}{2} (s(n) - y(n))^2 \quad (4.51)$$

$$E(n) = \frac{1}{2} \left(s(n) - \left[D_0 + \sum_{k=1}^K A_k \sin(k\omega t) + \cos(k\omega t) \right] \right)^2 \quad (4.52)$$

şeklinde olacaktır.

Bu durumda, $t_n = \Delta t \cdot n$ anı için temel frekansta yapılan güncelleme,

$$\Delta \omega(n) = -\eta_\omega \frac{\partial E(n)}{\partial \omega} \quad (4.53)$$

$$\Delta\omega(n) = -\eta_{\omega} \frac{1}{2} 2(s(n) - y(n)) \left(- \sum_{k=1}^K (A_k \cos(k\omega t) k t_n - B_k \sin(k\omega t) k t_n) \right) \quad (4.54)$$

şeklindedir.

Bu durumda temel frekans güncelleme işlemi aşağıdaki gibi yapılmaktadır.

$$\omega(n+1) = \omega(n) + \eta_{\omega} e(n) n \Delta t \sum_{k=1}^K k [A_k \cos(k\omega(n) n \Delta t) - B_k \sin(k\omega(n) n \Delta t)] \quad (4.55)$$

Girişlerin Fourier temel bileşenleri olarak seçilmesi ile giriş ve çıkış arası ilişkiyi temel bir doğrusal denkleme dönüştüren bu en uygun duruma getirme problemi, FADALINE yöntemi kullanılarak çözülebilmektedir [72]. Ancak, bu doğrusal cebir problemi başka birden çok yöntemle çözülebilmektedir [8].

FADALINE tek bir sinir hücresinden oluşan basit yapısı nedeniyle tercih edilebilir özellikte olsa da kapalı bir yapıya sahiptir [73].

Bu yöntemin yukarıda belirtilen güncelleme işlemleri kullanılarak geliştirilen sistem, yapılan tüm işlemlerin görülebildiği, hesapsal karmaşıklık içermeyen, açık ve basit bir yapıya dönüştürülmüştür.

5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Önceki (4.) Bölümde matematiksel ifadelerle harmonik parametreleri belirleme yöntemlerine yer verilmiş; çalışması MATLAB ortamında geliştirilen yazılımla test edilmiştir.

Bu bölümde ise sentetik data yöntemiyle harmonikli ve gürültülü sinyaller kullanılarak, güç sinyalindeki harmonikler belirlenmiş; çalışmada öngörülen yöntemin başarısı, doğruluk ve hız ölçütlerine göre değerlendirilmiştir.

Yapılan benzetim çalışması, aşağıdaki yöntemler kullanılarak test edilmiştir.

- Geleneksel ADALINE yapısı (Tamsayı harmonikler için genlik ve faz hesabı)
- FADALINE yapısı (Tamsayı harmonikler için genlik ve faz hesabı)
- Geliştirilmiş FADALINE yapısı (Tamsayı harmonikler için genlik ve faz hesabı, ara harmonikler, temel frekansın izlenmesi ve kestirilmesi)
- Frekans kestirim yöntemi (FHDA)

Ayrıca, 4. Bölümde belirtildiği gibi geliştirilmiş FADALINE algoritması çalışırken, temel frekansı belirlemek için FHDA (Fourier Hata Düzeltme Algoritması) kullanılmıştır. Bu frekans kestirim algoritmasının başarısını test etmek için, sadece frekans kestirimi üzerinde benzetim çalışması yapılmış ve iki yöntemle karşılaştırılmıştır.

Geliştirilmiş FADALINE yönteminde, frekans kestirimi, en önemli aşamalardan biridir. HFD de olduğu gibi, temel frekansın belli olması, tamsayı harmoniklerin hangi frekanslarda oluşabileceği açısından önemlidir.

Çalışmada, temel frekansın belirlenmesi yanı sıra, bu frekansın sürekli izlenmesi öngörülmüştür. Belli frekans değişiminin sürekli izlenmesi ve en kısa zamanda yakalanması, uyarlanabilirlik özelliğini ifade etmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında, önerilen algoritmanın temel frekans izlemedeki uyarlanabilirliği test edilmiştir.

Benzetim çalışmalarında aşağıdaki parametreler kestirilecektir.

- Genlik (ilgilenilen sinyalin harmonik değerlerinin genlik bileşenleri),
- Faz (ilgilenilen sinyalin harmonik değerlerinin faz bileşenleri),
- Temel Frekans (ilgilenilen sinyalin temel frekansı),
- Ara Harmonikler (harmoniklere ek olarak ortaya çıkabilecek ara harmonik bileşenleri).

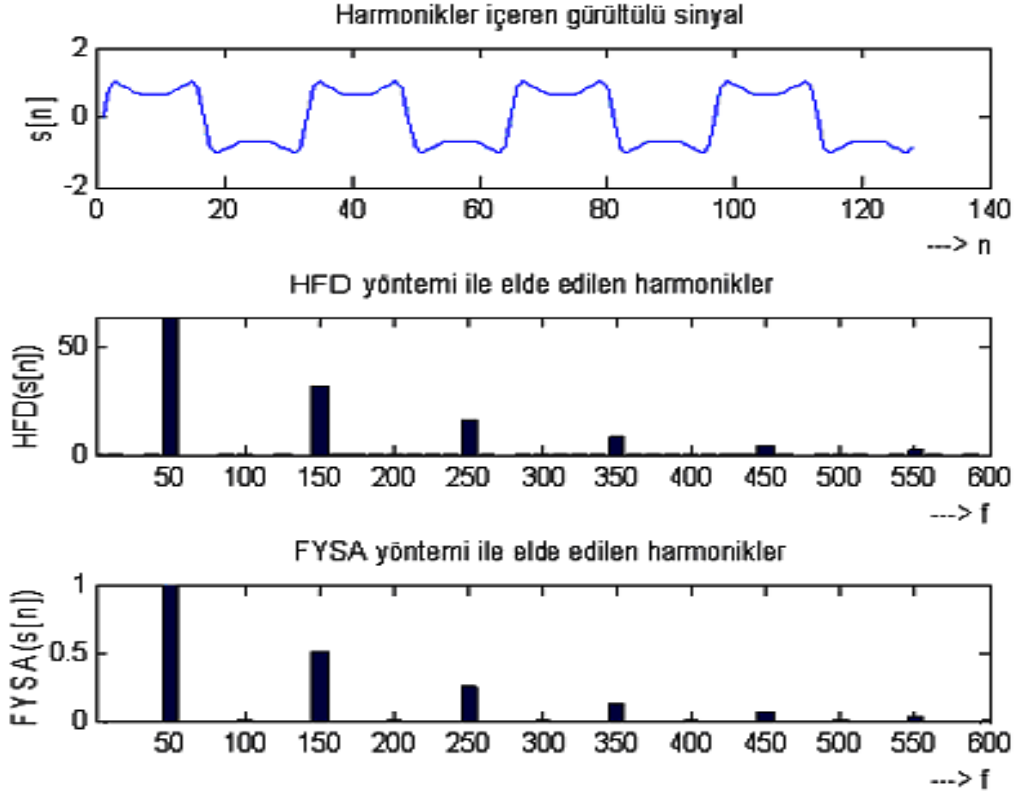
Gerçekleştirilen her benzetim çalışmasının sonucu, aşağıdaki ölçütlere göre belirlenecektir.

- Doğruluk,
- Hız,
- Uygulanabilirlik.

Gerçek koşullara benzer olması açısından, benzetim çalışmasında, gürültünün katkısını modellemek açısından sinyale, çeşitli SNR değerlerinde normal (Gaussian) dağılan sıfır ortalamalı (zero- mean) ve varyansı SNR değerine göre değişen gürültü eklenerek, model bu farklı değerler için test edilmiştir.

5.1 FYSA ile harmonik kestirimi ve HFD yöntemi ile karşılaştırılması

Yapılan nceki çalışmalarda olduğu gibi, benzetim çalışmasının ilk aşamasında, temel frekans sabit kabul edilerek diğer harmonik parametrelerin (faz, genlik) kestirimi için basit bir sinyal için FYSA ile HFD'nın performansı karşılaştırılmıştır. Aşağıda, Şekil 5.1'de, giriş sinyali ve her iki yöntemin ürettiği sonuçlar verilmiştir [72].



Şekil 5.1 Giriş sinyali, HFD ve FYSA yöntemleriyle elde edilen harmonikler [72]

HFD'de sonuçların olması gereken değerlerin çevresinde salınması problemi gözlenebilirken, bu tez çalışmasındaki yöntem kullanılarak elde edilen sonuçların olması gereken değerlere yakınsadığı görülmektedir (Şekil 5.1).

Hızlı Fourier Dönüşümünde, yüksek gürültü oranları için sonuçlar doğru değerlerden sapmaktadır. Ancak HFD'deki bu sapma, özellikle de faz açılarında, çalışmada öngörülen yöntemle göre çok daha fazla olmaktadır. Ayrıca, zamanda kayma faz açısını beraberinde getirmektedir. Çalışmalarda HFD'nin bunları tam olarak yakalayamadığı, FYSA'nın ise daha iyi bir adaptasyonla daha güçlü bir faz hesaplayıcı olduğu söylenebilir. FYSA ileri yönde çalışarak ters Fourier dönüşümü yaparken, eğitim aşamasında da ileri ve geri yönde çalışarak ağırlık değerlerini ayarlamak suretiyle Fourier dönüşümü yapmaktadır.

Fourier analizinde, sinyalin tek bir anlık değeri ile harmonik değerlerinin belirlenemediği bilinmektedir. Diğer yandan, ters Fourier dönüşümü ile belirlemek istenilen bu harmonik değerleri bilindiğinde, sinyalin o anlık değeri elde edilebilir.

Bu özelliğiyle çalışmada öngörülen yöntem, kısa zamanlı Fourier dönüşümünde kullanılan pencere boyutunun seçilmesi problemine de iyi bir çözüm getirmektedir.

Fourier serilerinde zaman ve sinyalin o andaki değeri arasında doğrusal bir ilişki olmamasına rağmen, FYSA'da giriş ile çıkış arasında doğrusal bir ilişki söz konusudur. FYSA, belli bir doğruluk ve iyi bir genelleştirme kapasitesiyle herhangi bir doğrusal olmayan eşleme ilişkisine yakınsar. Bu nedenle bu ağlar, doğrusal olmayan en-iyileme problemini doğrusala çevirerek yakınsama hızını yüksek oranda artırmaktadırlar.

Ayrıca HFD, özelliği gereği ikinin katları olmayan ayrık Fourier dönüşümü hesaplamalarında çok daha yavaş çalışmaktadır.

Diğer yandan, bu yöntemi bilgisayar ortamında kullanmadan önce ayrık zamana dönüşüm ve kullandıktan sonra frekans eksenine bir eşleme yapma gereksinimi vardır. Ayrıca ilgilenilen sinyalin Dirichlet gibi bazı koşulları sağlaması da bu dönüşüm için bir önkoşul olmaktadır.

FYSA tüm bu problemlere çözüm getirerek, günümüzdeki çeşitli ve ileride meydana gelecek çok farklı özellikler taşıyan sinyallerdeki harmonik bileşenlerinin eldesi için de kullanılabilir.

Elde edilen sonuçlar değerlendirilirken, tek katman ve tek nöronlu en basit YSA'ları yapısında olan ağ'da, yakınsama hızının yüksek olması ve zaman zaman gözlemlenen yerel minimum problemine büyük oranda çözüm olması açılarından, geleneksel sinir ağları ile de bir karşılaştırma söz konusudur.

Geleneksel YSA'lara göre çok daha hızlı olduğu görülen bu yöntemde, özel temel fonksiyonların da giriş olarak kullanılması çevrimiçi eğitime olanak sağlamaktadır.

Diğer yandan hız anlamında HDF ile yapılabilecek bir karşılaştırma, PC'den bağımsız paralel işlemciler üzerinde donanımsal olarak gerçekleştirildiğinde anlamlı olur.

Özel tasarım yardımcı işlemcileri gibi çok çeşitli HFD hesaplayıcıları olduğu göz önüne alındığında, bu karşılaştırmada yöntemin hızından öte gerçek zamanlı sonuçlar verebilmesini ve doğruluğunu ön plana çıkartmak daha uygun olacaktır [72].

Elektrik güç sistemlerindeki harmoniklerin daha etkin bir şekilde belirlenmesi amacıyla yönelik geliştirilen bu yöntem, etkinlik ölçütleri olarak hız ve doğruluk esas alınarak HFD ve geleneksel YSA yöntemleriyle karşılaştırmak suretiyle benzetim ortamında; doğruluk kontrolü yapabilmek adına harmonik değerlerini önceden tanımlanan çeşitli sinyaller üzerinden test edilmiştir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre, çevrimiçi kullanılabilen bu yöntemin, geleneksel YSA'ya göre daha hızlı ve doğru; diğer yandan da HFD'ye göre, gerçek zamanlı ve özellikle faz açısı hesaplamalarında daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür.

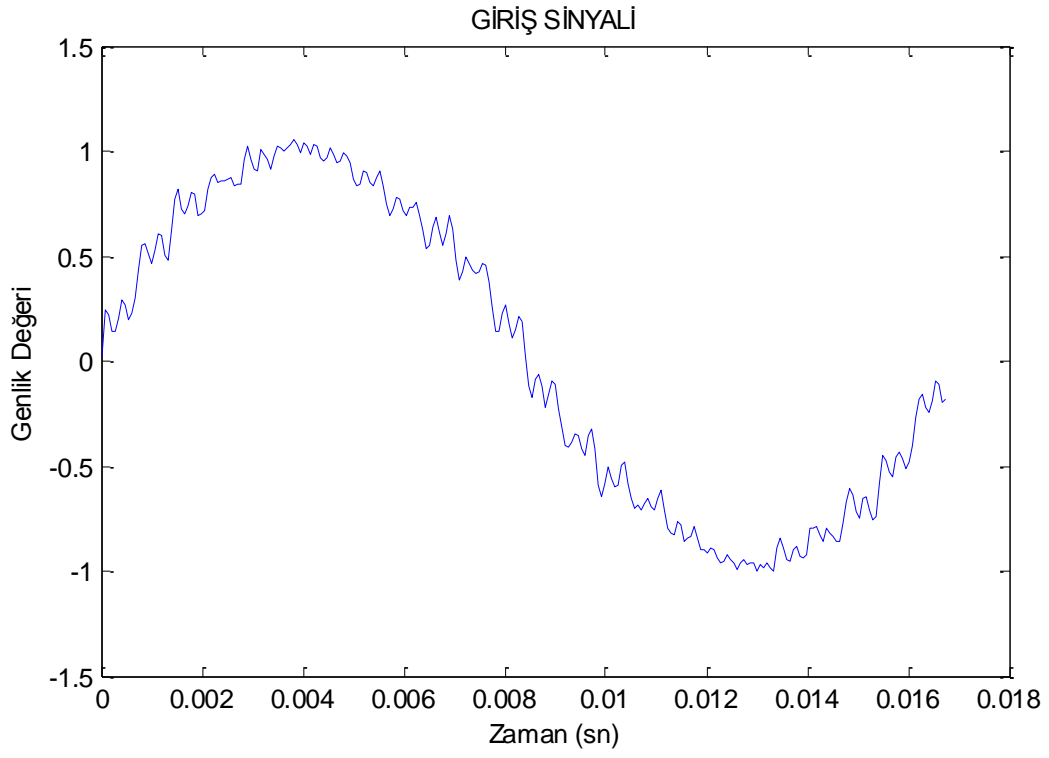
Çalışmada kullanılan bu yöntem bir yandan yapısı (giriş, çıkış ve ağırlıkların özelliği) itibarıyla yapay sinir ağlarına, diğer yandan gerçek zamanlı çözümler sunması ile sinyal analizine yeni bir bakış açısı getirmektedir.

Yöntem, bilgiyi paralel işleyerek ilgilenilen sonucu hızlı ve oldukça doğru bir şekilde, çevrimiçi olarak verebilmesinin yanında, yapısının basit ve kolay uyarlanabilir olması gibi özellikleriyle hızlı Fourier dönüşümüne karşı tercih edilebilir nitelik taşımaktadır [72].

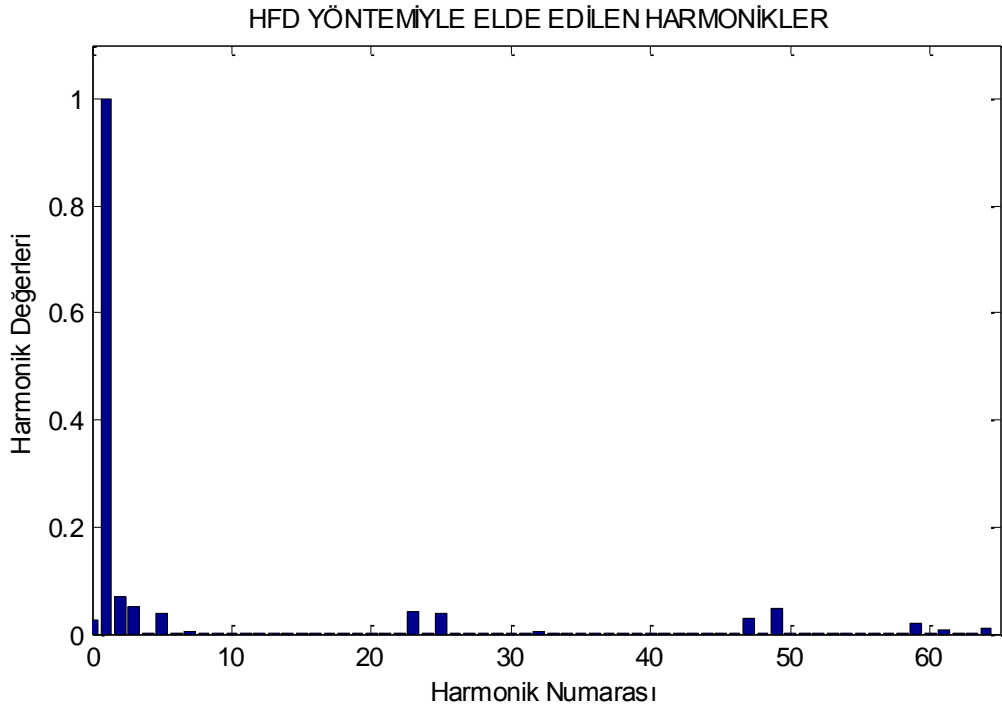
5.2 FADALINE ile harmonik kestirimi ve HFD yöntemi ile karşılaştırılması

Yapılan bu benzetim çalışmasında, sentetik sinyal değerleri kullanılmıştır. Buna göre harmonik değerleri verilen bir güç sinyali için benzetim çalışması yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan sinyalin özellikleri aşağıdaki gibi seçilmiştir.

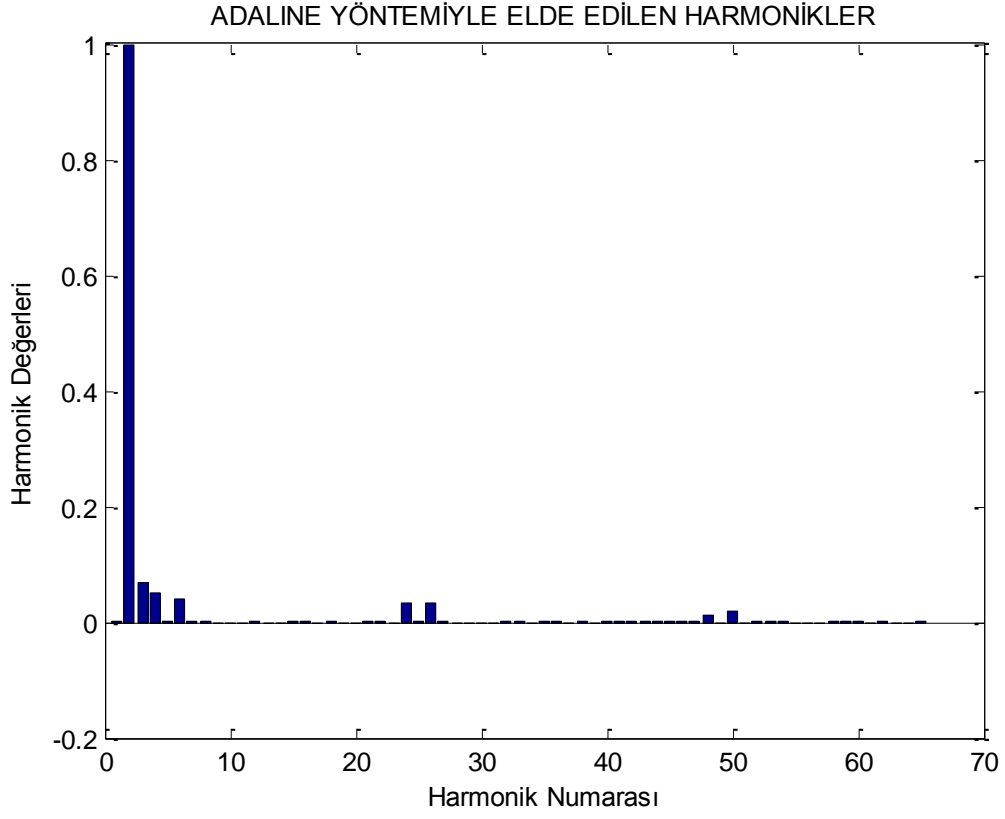
Çalışmada, "A New Method For Power Signal Harmonic Analysis" [74] adlı makaledeki harmonik verileri $\{A(1)=1; A(2)=0.07; A(3)=0.05; A(5)=0.04; A(7)=0.03; A(23)=0.02; A(25)=0.04; A(47)=0.03; A(49)=0.05; A(59)=0.02; A(61)=0.01; A(64)=0.01\}$ kullanılarak elde edilen sinyal için, Şekil 5.2 - Şekil 5.5'te görülen aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.



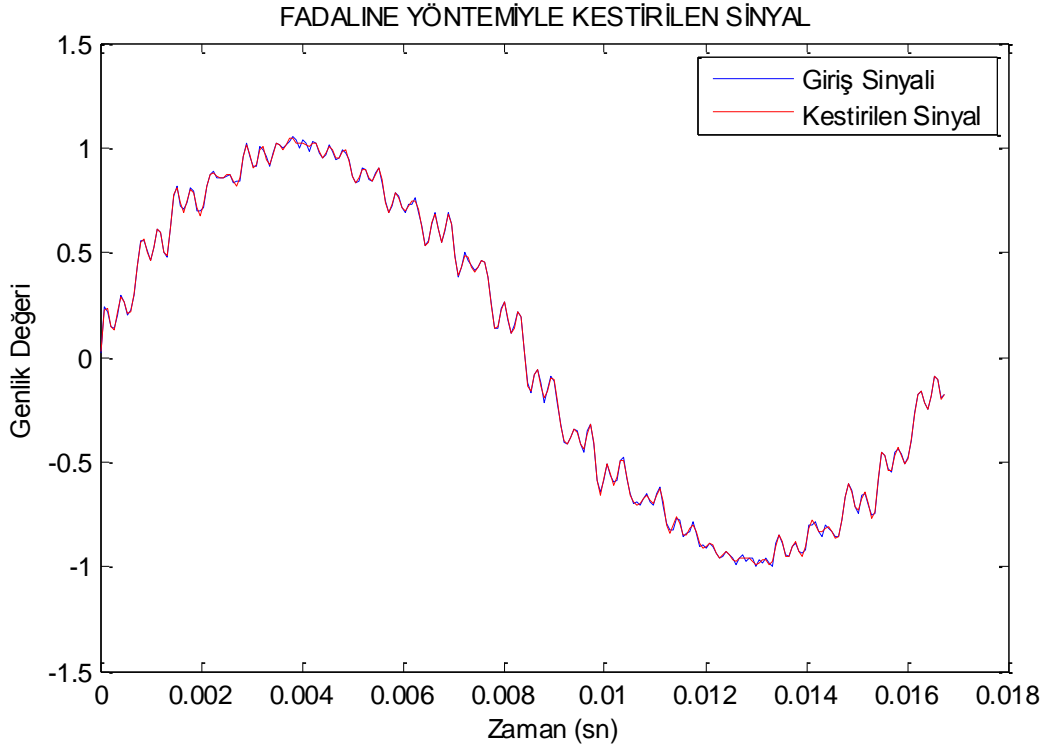
Şekil 5.2 Giriş sinyali [74]



Şekil 5.3 HFD yöntemiyle kestirilen harmonik değerleri



Şekil 5.4 FADALINE yöntemiyle kestirilen harmonik değerleri



Şekil 5.5 FADALINE yöntemiyle geri çatılan sinyal

Bu yöntemlerin benzetim çalışmaları sonucu elde edilen kestirilmiş harmonik değerlerini içeren çizelge, 5.1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.1 HFD ve FADALINE yöntemleriyle elde edilen harmonik değerleri

Harmonik Numarası	Harmonik Genlik Değeri (İstenilen)	Harmonik Genlik Değeri (HFD)	Harmonik Genlik Değeri (FADALINE)
0 (DC)	0,00	0,0256959630	0,0000000000
1	1,00	1,0027440693	0,9976567449
2	0,07	0,0700193370	0,0709710979
3	0,05	0,0501610464	0,0505847506
4	0,00	0,0001161341	0,0010663030
5	0,04	0,0415237542	0,0406471995
6	0,00	0,0039333775	0,0006998726
7	0,03	0,0013518925	0,0302489930
8	0,00	0,0008555621	0,0005817801
9	0,00	0,0023332385	0,0005283742
10	0,00	0,0007498258	0,0004898886
11	0,00	0,0026832001	0,0004217572
12	0,00	0,0007396226	0,0004194717
13	0,00	0,0016653778	0,0004013131
14	0,00	0,0025660913	0,0003778611
15	0,00	0,0006563185	0,0003658821
16	0,00	0,0005053462	0,0003253877
17	0,00	0,0026170071	0,0003326771
18	0,00	0,0010145622	0,0003013783
19	0,00	0,0013181590	0,0002999855
20	0,00	0,0017807624	0,0003047802
21	0,00	0,0001790633	0,0002604400
22	0,00	0,0011787819	0,0003025419
23	0,02	0,0402363996	0,0202954584
24	0,00	0,0007891769	0,0003047246
25	0,04	0,0427305271	0,0400524966
26	0,00	0,0012339654	0,0002597590
27	0,00	0,0003514683	0,0002238971
28	0,00	0,0030844183	0,0002201920
29	0,00	0,0005757904	0,0002223447

Çizelge 5.1 devam ediyor...

30	0,00	0,0021020853	0,0002437022
31	0,00	0,0021544507	0,0001930633
32	0,00	0,0028623860	0,0001937938
33	0,00	0,0005351033	0,0001653237
34	0,00	0,0004732039	0,0002108609
35	0,00	0,0012603330	0,0001725925
36	0,00	0,0003176862	0,0002120480
37	0,00	0,0014139084	0,0001373708
38	0,00	0,0007219555	0,0001897657
39	0,00	0,0024306899	0,0001256459
40	0,00	0,0006796094	0,0001774311
41	0,00	0,0011536314	0,0001775642
42	0,00	0,0020290663	0,0001418856
43	0,00	0,0011314505	0,0001261362
44	0,00	0,0015010266	0,0001391657
45	0,00	0,0016471542	0,0001254286
46	0,00	0,0014407318	0,0001666407
47	0,03	0,0297041935	0,0299915477
48	0,00	0,0019226780	0,0002061182
49	0,05	0,0496757396	0,0499111879
50	0,00	0,0005836074	0,0001444759
51	0,00	0,0006369602	0,0001419599
52	0,00	0,0028526059	0,0001183592
53	0,00	0,0011947427	0,0001168182
54	0,00	0,0025997148	0,0001621782
55	0,00	0,0008774262	0,0001133836
56	0,00	0,0017735928	0,0001564388
57	0,00	0,0010620679	0,0001095138
58	0,00	0,0007440429	0,0001074292
59	0,02	0,0208222108	0,0200084054
60	0,00	0,0015979131	0,0001263782
61	0,01	0,0119674067	0,0100473854
62	0,00	0,0023331752	0,0001357216
63	0,00	0,0018103295	0,0001352248
64	0,01	0,0090198210	0,0100842202
OKH	-	0,0000316866	0,00000190192

Bu sonuçlar ve yukarıdaki çizelgenin son satırında görülen Ortalama Karesel Hata (OKH) değerleri incelendiğinde, HFD'ye nazaran, FADALINE yöntemiyle elde edilen sonuçların olması gereken gerçek değerlere daha yakın olduğu gözlenmektedir.

5.3 Ara Harmoniklerin Belirlenmesi için Yapılan Benzetim Çalışması

Elektrik güç sistemlerinde, şebekeden gelen sinyallerde harmoniklerin yanında ara harmonikler de gözlenmektedir.

Temel frekansın tam katları olmayan frekanslarda ortaya çıkan harmonik bileşenler, genel olarak "ara harmonik" ve tamsayıya karşılık gelmeyen, bu değer 0 ile 1 aralığındaki özel durumu karşılayan bileşenler ise "alt harmonik" olarak adlandırılmaktadır [75].

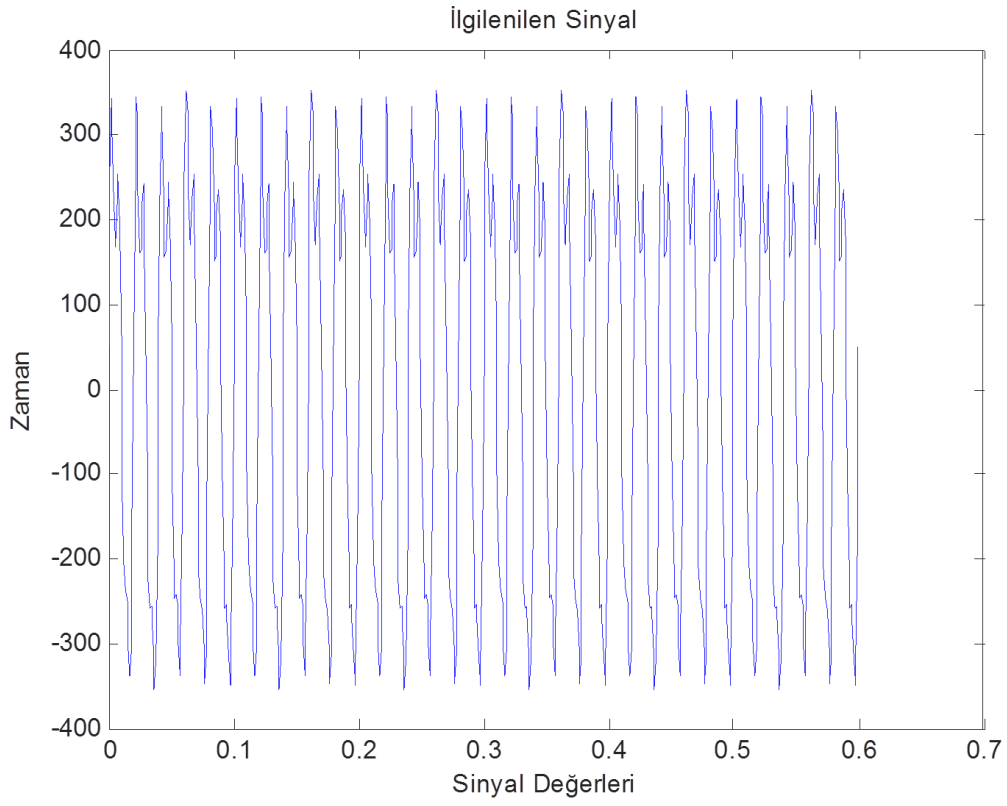
Statik sıklık dönüştürücüleri, çevrim çeviriciler, indüksiyon fırınları, ark fırınları ve kaynak makineleri ara harmonikleri oluşturan temel kaynaklardır.

Ayrıca güç sisteminde iletim hattı ile sıklık bindirmesi yoluyla taşınan işaretler de ara harmonikler olarak ele alınabilir [76].

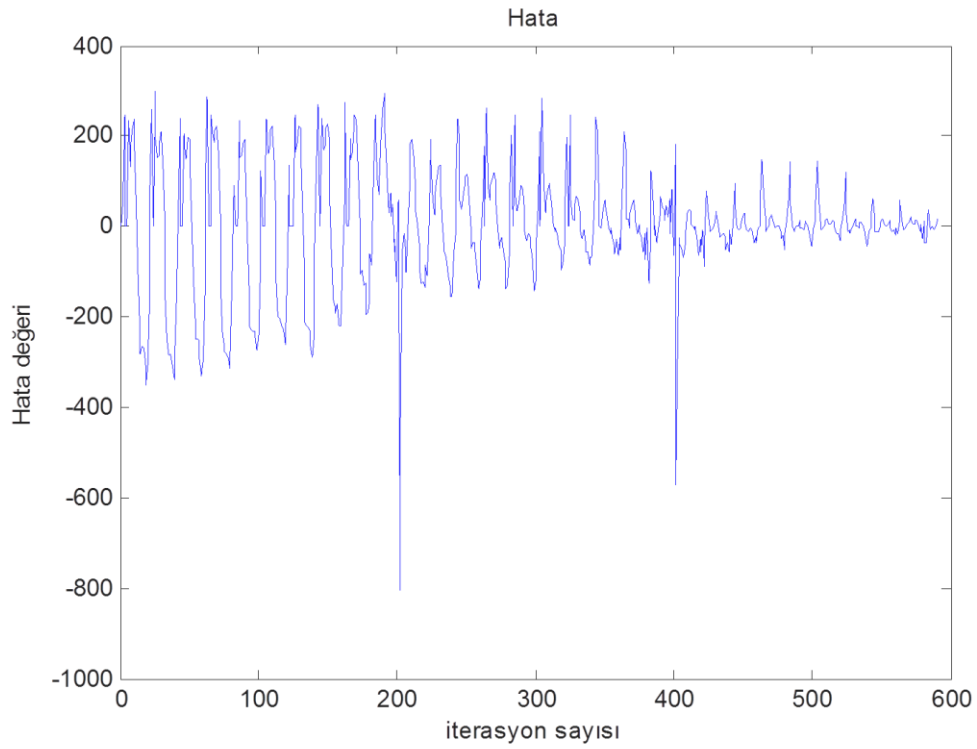
Harmonik kestiriminde, bu ara harmonik bileşenlerin de yakalanabilmesinin büyük avantajları bulunmaktadır.

Aşağıdaki harmoniklerin yanında ara harmonik değerlerini de içeren sinyale, çalışmadaki yöntem uygulanmıştır.

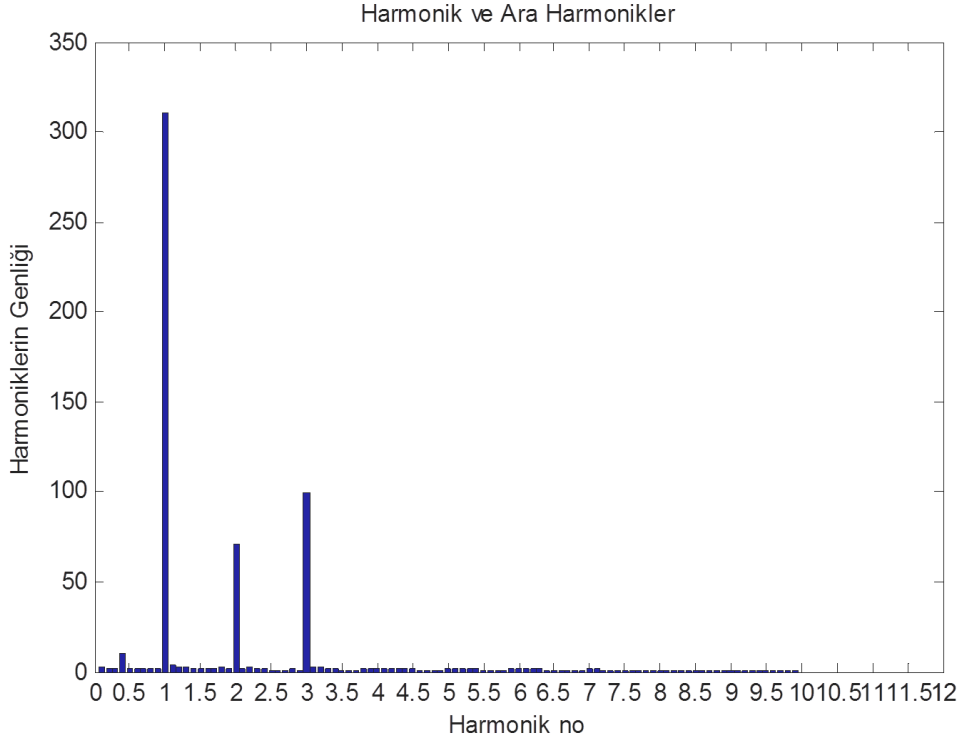
Aşağıdaki şekillerde (Şekil 5.6 – 5.7) görülebildiği gibi harmonik değerlerin yanında bu ara harmonik değerleri de yüksek bir doğrulukla yakalanmıştır.



Şekil 5.6 Ara harmonik içeren giriş sinyali



Şekil 5.7 Sistem hata değerleri



Şekil 5.8 Harmonik ve ara harmonik değerleri

5.4 Temel Frekans Kestirimi için Yapılan Benzetim Çalışmaları

Harmonik kestirim çalışmalarında en önemli aşamalarından birisi temel frekansın kestirimidir. Bu genişletilmiş algoritmada, diğer parametreler sabitken temel frekansın kestirilmesi gerekir. Bunun matematiksel ifadesi önceki bölümde verilmiştir. Burada ise öngörülen frekans kestirim algoritmasının etkinliği benzetim ortamında test edilecektir ve bu yöntem diğer iki yöntemle karşılaştırılacaktır.

Daha önceki çalışmalarda ilgilenilen sinyalin harmonik bileşenlerini bulurken temel frekans değeri sabit (örneğin 50 Hz.) olarak alınmakta ve bu öncül ile hesaplamalar yapılmaktaydı. Oysa bilindiği gibi gerçekte bu temel frekans değeri zamanla değişen sinyaller için 48 ila 52 Hz. aralığında anlık değişiklikler gösterebilmektedir. Bu olgudan hareketle temel frekansın belirlenmesi için kullanılan bazı yöntemleri inceleyerek, benzetim çalışmaları ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Temel frekans kestirimi için aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır.

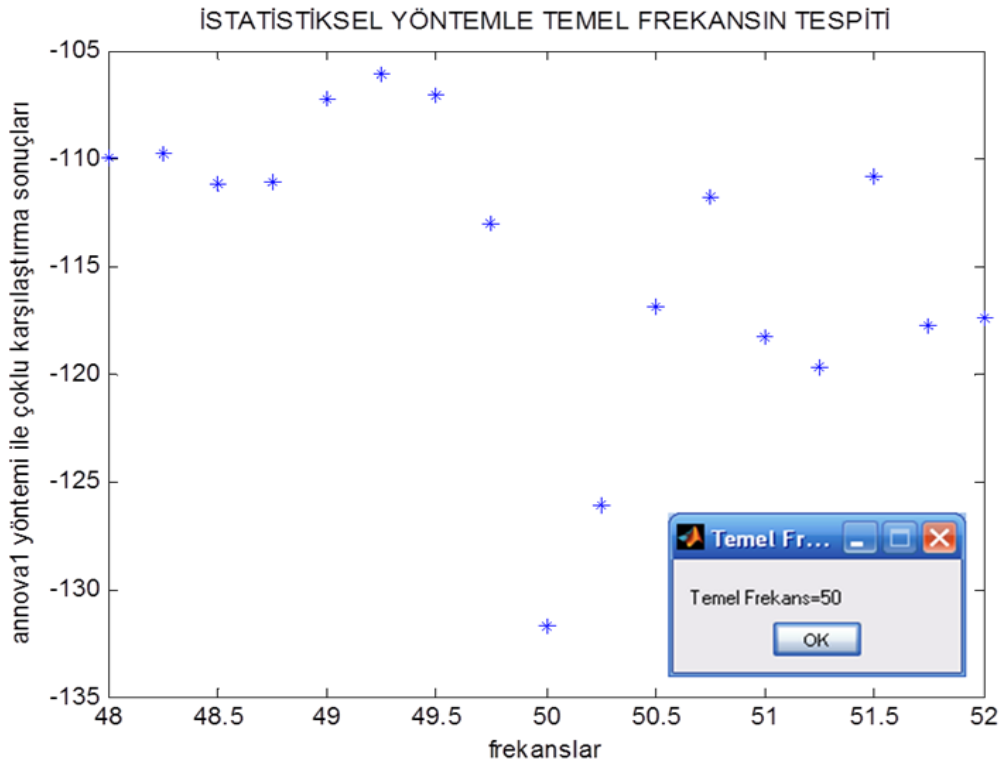
- İstatistiksel,

- Zero-Crossing,
- ADALINE
- FHDA Yöntemi (öngörülen yöntemde kullanılan frekans kestirim algoritması)

5.4.1 İstatistiksel yöntem ile yapılan benzetim çalışması

Frekans değerleri 48 ile 52 Hz. arasında değişen, önceden belirlenen (0.25 Hz.) aralıklarla oluşturulan sinyallerin, işlenerek elde edilen hata değerlerinin, istatistiksel yöntemlerden 'ANOVA1' fonksiyonu kullanılarak çoklu karşılaştırılması yapılmıştır.

İstatistiksel yöntem kullanarak MATLAB programı aracılığıyla gerçekleştirilen temel frekans kestirim işleminde elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekil 5.9'da gösterilmektedir. Bu yöntem, işaret ettiği frekans değerinin daha önce belirlenmiş veri sınıfı içinde olması, yani tam (ondalıklı) bir değer verememesi nedeniyle tercih edilebilir olmaktan uzaktır.



Şekil 5.9 İstatistiksel yöntem kullanılarak temel frekans tespiti

5.4.2 Zero-Crossing yöntemi ile yapılan benzetim çalışması

Bu yöntemde amaçlanan sinyalin sıfırdan geçtiği noktayı bulmaktır. Benzetim çalışması sonucunda yöntemin, DC değere karşılık gelen bias değeri veya diğer bir deyimle sıfır noktasının yakalanması için en azından yarım periyotluk (10ms) süre gerektirmesi, yani gerçek zamanlı temel frekans tespitinin olanaksızlığını beraberinde getirmesi başlıca dezavantajı olarak göze çarpmaktadır.

5.4.3 ADALINE yöntemi ile yapılan benzetim çalışması

ADALINE frekans kestirim yöntemine etki eden çeşitli özellik ve parametreler mevcuttur. Bunlar; örnekleme periyodu, seçilen sinyalin önceki değerleri, basamak genişliği, yapının özelliği ve yapının başlangıç değerleri olarak özetlenebilir. ADALINE yapısına bakılacak olursa, sinyalin örnekleme periyodu, seçilen sinyalin önceki değerleri, basamak genişliği, sistem yapısının özellikleri ve yapının başlangıç değerlerinin rastgele alınmasıdır. Bu parametreler, her kestirim için uygun bir şekilde seçilmelidir. ADALINE yönteminde eğitim katsayısı ilk olarak rastgele atandığı için her seferinde aynı temel frekans kestirimi elde edilmeyebilir. Sinyalin önceki değerlerini, sayısı ile frekans tahmininin doğru olma olasılığını doğru orantılı olarak değiştirmektedir. Sinyalin önceki değerleri, frekans kestirimini etkileyen bir diğer etkidir.

Seçilen sinyalin önceki değerlerinin bilinmesi bize frekans tahmininin daha doğru olmasını sağlar. Ancak doğruluk konusunda yapılabilecek en iyi iyileştirme, birden çok ADALINE yapısının paralel olarak kullanılmasıdır. Bunun dezavantajı ise daha fazla matematiksel işlem yapılacağı için sistemin hızının yavaşlamasıdır.

5.4.4 Temel frekans kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması

Matematiksel açıdan temel frekansı güncellemek için veya temel frekansı kestirmek için, daha önce kestirilmiş olan bileşenlerin sabit kabul edilmesi gerekir. Bu parametreler sabit kabul edilebilirse, hata fonksiyonunun türevi frekansa göre alınabilir. Bölüm 4.2.3'de, temel frekans kestirimi için kullanılan Fourier Harmonik Düzeltme Algoritması (FHDA) ile temel frekans güncellemesi için kullanılan matematiksel ifadeler yer verilmiştir. Bu çalışmada, temel frekans kestirimi için

ele alınan İstatistiksel, Zero-Crossing, ADALINE ve Fourier Hata Düzeltme Algoritması (FHDA) Yöntemleri karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları aşağıdaki çizelgede gösterilmektedir.

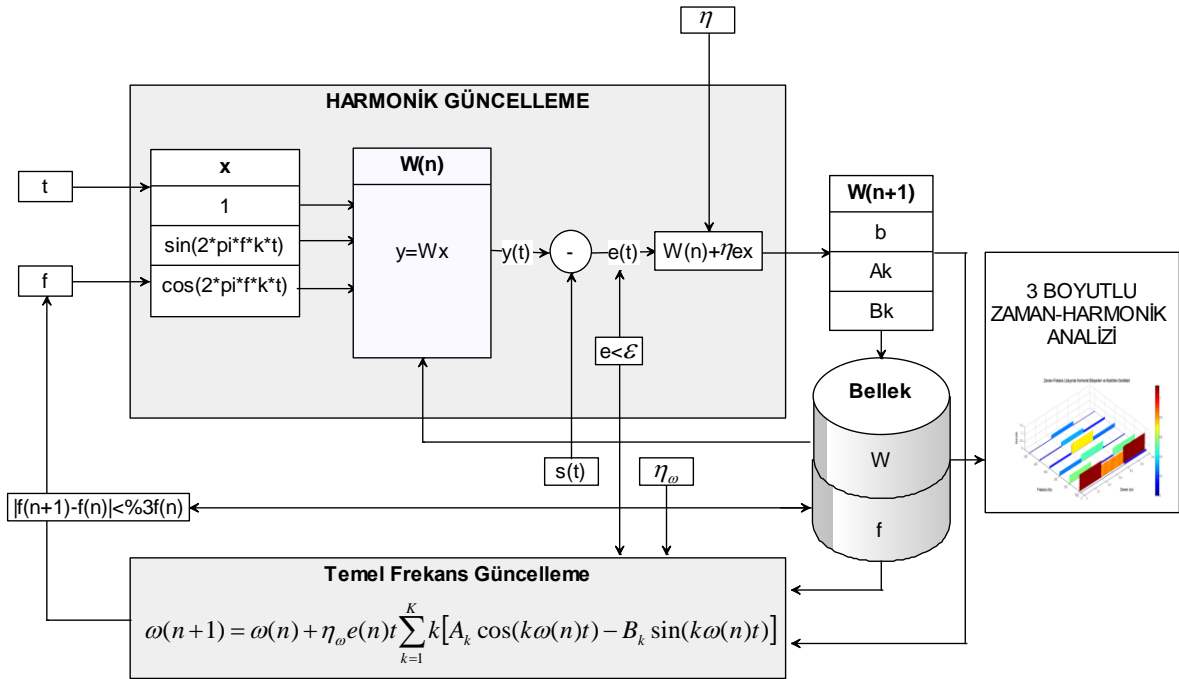
Çizelge 5.2 İstatistiksel, Zero-Crossing, ADALINE ve FHDA Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Temel Frekans	İstatistiksel	Zero Crossing	ADALINE	FHDA
39.0 Hz		39.0381 Hz	38.9298 Hz	38.9998 Hz
39.5 Hz		39.5386 Hz	39.6614 Hz	39.4998 Hz
40.0 Hz		40.0391 Hz	40.281 Hz	39.9999 Hz
40.5 Hz		40.5396 Hz	40.4233 Hz	40.4999 Hz
41.0Hz		41.0401 Hz	40.7200 Hz	41.0000 Hz
41.5 Hz		41.5406 Hz	41.4332 Hz	41.5000 Hz
42.0Hz		42.0411 Hz	42.1182 Hz	42.0002 Hz
42.5 Hz		42.5415 Hz	42.7195 Hz	42.5000 Hz
43.0 Hz		43.0420 Hz	43.1364 Hz	43.0000 Hz
43.5 Hz		43.5425 Hz	43.7661 Hz	43.5005 Hz
44.0 Hz		44.0430 Hz	44.0473 Hz	44.0005 Hz
44.5 Hz		44.5435 Hz	44.6449 Hz	44.5000 Hz
45.0 Hz		45.0440 Hz	45.1901 Hz	45.0000 Hz
45.5 Hz		45.5445 Hz	45.4072 Hz	45.5000 Hz
46.0 Hz		46.0450 Hz	45.8219 Hz	46.0000 Hz
46.5 Hz		46.5455 Hz	46.1751 Hz	46.5000 Hz
47.0 Hz		47.0459 Hz	47.2881 Hz	46.9995 Hz
47.5 Hz		47.5464 Hz	47.3195 Hz	47.4999 Hz
48.0 Hz		48.0469 Hz	48.0433 Hz	47.9999 Hz
48.5 Hz		48.5474 Hz	48.7205 Hz	48.4999 Hz
49.0 Hz		49.0479 Hz	49.2435 Hz	48.9987 Hz
49.5 Hz		49.5484 Hz	49.5242 Hz	49.4986 Hz
50.0 Hz	50.0000 Hz	50.0489 Hz	49.4418 Hz	49.9986 Hz
50.5 Hz		50.5494 Hz	50.3521 Hz	50.4986 Hz
51.0 Hz		51.0499 Hz	51.5663 Hz	50.9987 Hz

Çizelge 5.2'de görüldüğü gibi Zero Crossing, Adaline ve FHDA yöntemlerinin karşılaştırması sonucunda FHDA yöntemi ile temel harmonik tespitinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir.

5.5 Genişletilmiş ADALINE İle Yapılan Benzetim Çalışması-1

Bölüm 4.2'de tanıtilan GADALINE yapısı kullanılarak yapılan benzetim çalışması ile geliştirilen sistemin yapısı aşağıda Şekil 5.10'da gösterilmektedir.



Şekil 5.10 Geliştirilen sistem yapısı

Sistem, bir ana ve buna paralel çalışabilen bir alt düzenden oluşmaktadır. Ana sistem, sinyal girişini takiben anlık sinyal değerlerini gerçek zamanda işleyerek ortalama karesel hatanın en-küçüklenmesi yöntemi ile harmonik değerlerini döngüsel bir şekilde güncellemektedir.

Alt sistem ise istenilen an veya periyotlarda ana sisteme temel frekans bilgisini sağlamaktadır. Buna ek olarak sistem, başarımı artırıcı yönde kullanıcının seçeneklerine uygun koşul-karar süreçlerini kapsayan uyarlamalı işlemler ile

harmonik değerlerinin zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu olarak görüntülenmesi işlevini de yerine getirmektedir.

Bu yapıya uygun olarak MATLAB programı yardımıyla gerçekleştirilen sistemin temel çalışma algoritması aşağıda özetlenmiştir:

ANA SİSTEM

START

1. ASSIGN:

1.1. İlgilenilen harmonik sayısı değerini ata $\{ (DC \text{ bileşen } 0,6. 1. 3. 5. 7. 9. 11. \text{ harmonikler için}), l=8 \}$

1.2. Güncelleme katsayısı değerini ata $\{ \eta = 0.78 \}$

2. INIT:

2.1 Harmonik bileşen değerlerini ilk değerle $\{ W=zeros(1,l) \}$

2.2 Temel frekans değerini ilk değerle $\{ f(0)=50 \}$

2.3 Zamanı başlat $\{ n=0 \}$

3. **WHILE** (sistem kapatılana dek sinyal geldikçe) $\{ N:\text{zamanla değişen bileşik sinyal uzunluğu iken, } FOR(n=0 : \Delta t : N) \}$

3.1 READ:

3.1.1 Giriş sinyalini anlık değerini oku $\{ s(n) \}$

3.2 GET:

3.2.1 Harmonik bileşen değerlerini al $\{ W(n) \}$

3.2.2 Anlık temel frekans değerini al $\{ f(n) \}$

3.3 SET:

3.3.1 Çarpım giriş vektörünü oluştur $\{ x(n)=[1 \dots \sin(k2\pi fn\Delta t) \cos(k2\pi fn\Delta t) \dots] \}$

3.4 COMPUTE:

3.4.1 Anlık sinyalin kestirilen değerini hesapla $\{ y(n)=W(n)x(n) \}$

3.4.2 Sistemin anlık hata değerini hesapla $\{ e(n)=s(n)-y(n) \}$

3.4.3 Harmonik değerlerini hesapla (ve alt sisteme gönder) $\{ W(n)=W(n-1)+ \eta e(n-1)x(n-1) \}$

3.5. **IF** (Sistem hatası > Hata tolerans değeri) $\{ IF(e(n)) > \epsilon = 0.01 \}$

THEN Alt sisteme veri gönder ve 3.4'e dön $\{ [n\Delta t \ W(n) \ e(n)] \}$

ELSE Harmonik değerlerini belleğe gönder ve 3.6'ya devam et $\{ MEMORY=[MEMORY \ W(n) \ f(n)] \}$

ENDIF

3.6 INCREMENT:

3.6.1 Zamanı artır ve 3.1'e dön $\{ n=n+1 \}$

ENDWHILE

4. DISPLAY

4.1 Bellekteki harmonik değerlerini zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu görüntüle $\{ mesh(MEMORY) \}$

END

ALT SİSTEM

START

1. ASSIGN:

1.1 Temel frekans güncelleme katsayısı değerini ata $\{ \eta_{\omega} = 0.54 \}$

2. **WHILE** (ana sistemden veri geldiği sürece)

2.1. READ:

2.1.1 Zamanı al $\{ n\Delta t \}$

2.1.2 Harmonik bileşen değerlerini al $\{ W(n) \}$

2.1.3 Sistemin hatasını al $\{ e(n) \}$

2.2. COMPUTE:

2.2.1 Temel frekansını güncelle $\{ f(n+1) = f(n) + \eta_{\omega} e(n) n \Delta t \sum_{k=1}^K [A_k \cos(k\omega(n) n \Delta t) - B_k \sin(k\omega(n) n \Delta t)] / 2\pi \}$

2.3. **IF** (frekans farkı %3'ten büyükse [8]) $\{ f(n+1) - f(n) > 0.03f(n) \}$ **THEN** Ana sisteme frekans bilgisini gönder

ENDIF

END

5.5.1 Başlangıç koşulları ve ilk-değer atama

Harmonik değerleri ve öğrenme katsayılarını içeren her bir parametrenin ilk değerlendirme işlemi, sistemin başarımını doğruluk ve hız açısından yüksek oranda etkilediği için büyük önem taşımaktadır.

Bu işlem, sistemin ön-işletimi sonrası yapılabileceği gibi, rastgele deneme yanılma ile ya da kullanıcı tercihi ön bilgiler kullanılarak da yapılabilmektedir. Bütün bunlara ek olarak sistem, belli bir ön-zaman aralığında işletilip, bu değerler harmoniklerin ilk-değerlendirmesinde kullanılabilir.

5.5.2 Sistem işletimi, hesaplamalar ve hataya bağlı güncellemeler

Sistem işletimi, belirlenen parametrelere bağlı olarak sistem çıkışının hesaplanması ve daha sonra bu çıkışı, sinyalin o anki gerçek değeriyle karşılaştırıp bulunan farkın hata olarak tespit edilmesi ve bu yolla sistem parametrelerinin güncellenmesi aşamalarını içermektedir.

Harmonik bileşenlerin güncellenmesi, ortalama karesel hatanın en-azlanması ilkesine dayanarak sistem tarafından otomatik olarak yapılmaktayken, temel frekans ve güncelleme katsayısı gibi diğer parametre değerleri de saptanan hatanın belli bir tolerans değerini geçmesi durumunda tercihen güncellenebilmektedir.

Bunların dışında, elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan sinyallerin genlik ve faz açıları ile birlikte temel frekanslarının da durağan olmayıp zamanla değişmelerinden dolayı, harmonik analiz yöntemlerinde öncül olarak güç sistem frekansı ile kestirimde kullanılan yöntemin temel frekansı arası senkronizasyona gereksinim duyulmaktadır.

Bu nedenle güç sistemlerinde IEC 61000-4-7 [76] standardına göre, 48 ila 52 Hz. aralığında değişebilen temel frekans değerleri göz önüne alınarak, bu değişimi izlemek üzere çalışmada öngörülen sisteme paralel olarak çalışabilen uyarlamalı bir temel frekans kestirim aşaması eklenmiştir.

Bu işlem, yine kullanıcı seçimine bağlı olarak istenilen zamanda veya belli periyodlarla yapılabildiği gibi, koşul-karar işlemiyle sistem hatasının belli bir değerin üstüne çıktığı durumlarda da yapılabilmektedir.

Diğer yandan elektrik güç sistemlerinde harmoniklerin yanında gözlemlenen alt ve ara harmoniklerin de yakalanabilmesinin sistem başarımı açısından büyük avantajları bulunmaktadır.

Bu sistemde alt ve ara harmonik kestirimi için tercihen iki farklı yöntem kullanılabilir. Bunlardan birincisi, harmoniklerin belirlenip bu bileşenlerin etkileri sinyalden süzöldükten sonra ara ve alt harmonik bileşenler için kestirim işlemine devam edilebildiği çift aşamalı bir yöntemdir.

İkincisi ise, temel frekans değeri yerine IEC 61000-4-7 [76] standardına göre 5 Hz. olarak belirlenen frekans çözünürlüğü değeri olarak alınan bir referans frekansı kullanılıp, bu frekansın tam katlarındaki ara harmonik ve harmonik bileşenlerin kestirimi işlemi yapılmaktadır.

İkinci yöntem gerçek zamanlı sonuçlar vermesi açısından daha tercih edilir olsa da frekans çözünürlüğünün tam katları olmayan ara harmoniklerin tespitinde yetersiz olabilmektedir.

5.5.3 Tekrarlı hesaplamalar, iyileştirmeler ve sonuçların görüntülenmesi

Sistemin dinamik olması, bir karar mekanizmasının gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Daha önceden saptanmış sonlandırma koşulları sağlanana kadar sistem döngüsel olarak çalışmaya devam ederek, gerçek zamanlı sonuçlar vermektedir.

Bu tekrarlı hesaplamalar, amaç doğrultusunda en iyinin bulunmasına yönelik koşullara bağlı seçimler, sistemin yeniden oluşturulması, yeniden hesaplamalar, yenilemeler ve belirlenen yeterlilik veya sonlandırma koşullarına bağlı olarak alınan kararları ve iyileştirmeleri içermektedir.

Sistemde güncelleme işlemi devam ederken, çıkışta elde edilen harmoniklerin genlik ve faz açıları gibi sistem parametreleri bellekte tutularak, istenilen anda bu sonuçların zamanla değişimleri, zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu olarak görüntülenebilmektedir.

Yukarıda açıklanan sistemin performansını değerlendirmek üzere, MATLAB programı kullanılarak bir kullanıcı ara-yüzü ile örnek bir sinyal oluşturulmuştur (Şekil 5.10).

Zamanla değişen karakteristiğini ifade etmek için [0-0.2], [0.2-0.4] ve [0.4-0.6] olmak üzere 3 eşit zaman aralığında değişen, temel frekans f_{Temel} , ve DC_{temel} ve i 'inci harmonik bileşenin genlik ve faz açıları G_i / F_i eklenerek modellenmiştir.

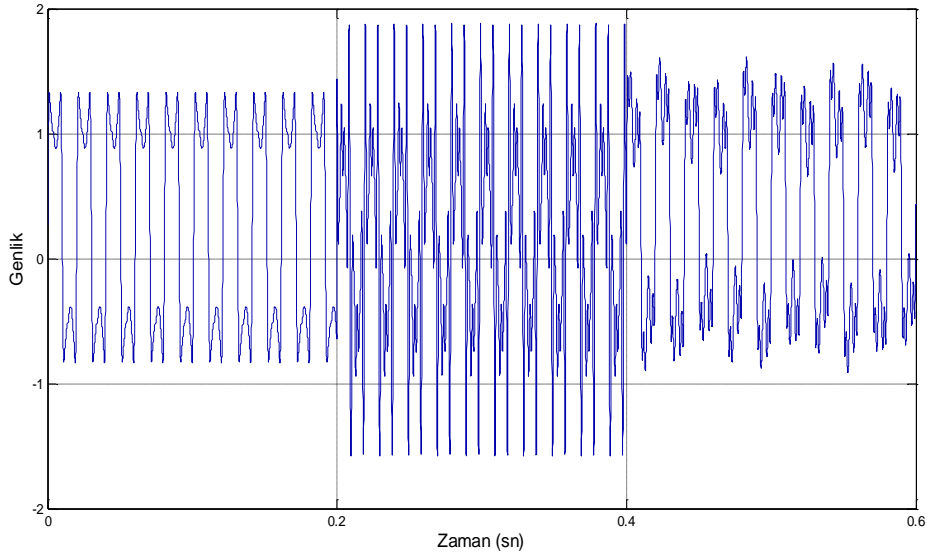
Ayrıca sinyale, ortama dahil olabilecek gürültünün etkisini modellemek için, değişik sinyal gürültü oranları (SNR)'nda beyaz Gauss gürültüsü ve buna ek olarak, ara harmonikleri modellemek için de 35 Hz. frekansta bir alt harmonik bileşen eklenmiştir.

Bu değerler Çizelge 5.3'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.3 Örnek sinyalin modellenmesinde kullanılan değerler

Zaman (sn)	f(Hz)	SNR (dB)	DC (V)	G_1/F_1 (V/°)	G_3/F_3 (V/°)	G_5/F_5 (V/°)	G_7/F_7 (V/°)	G_9/F_9 (V/°)	G_{11}/F_{11} (V/°)	$G_{0.7}/F_{0.7}$ (V/°)
[0 - 0.2]	49.5	20	0.25	1/10	0.5/-23	0.25/30	0.13/-15	0.06/50	0.03/60	-
[0.2-0.4]	50	10	0.15	0.75/20	0.1/-20	0.45/20	0.64/-20	0.3/45	0.25/65	-
[0.4-0.6]	50.25	5	0.35	1/30	0.48/-23	0.05/30	0.23/-15	0.13/35	0.02/50	0.12/15

Örnek sinyalin modellenmesinde kullanılan değerler ile oluşturulan ve aşağıda, Şekil 5.11'de görülen giriş sinyali esas alınarak yapılan benzetim çalışmasında, sistem parametrelerinin ilk-değerlenmesi ve güncelleme katsayılarının çeşitli akıllı algoritmalar yardımıyla ayarlanması işlemlerine bağlı olarak, yakınsama hızında gözle görülebilir oranda artış gözlenmiştir.



Şekil 5.11 Örnek giriş sinyali

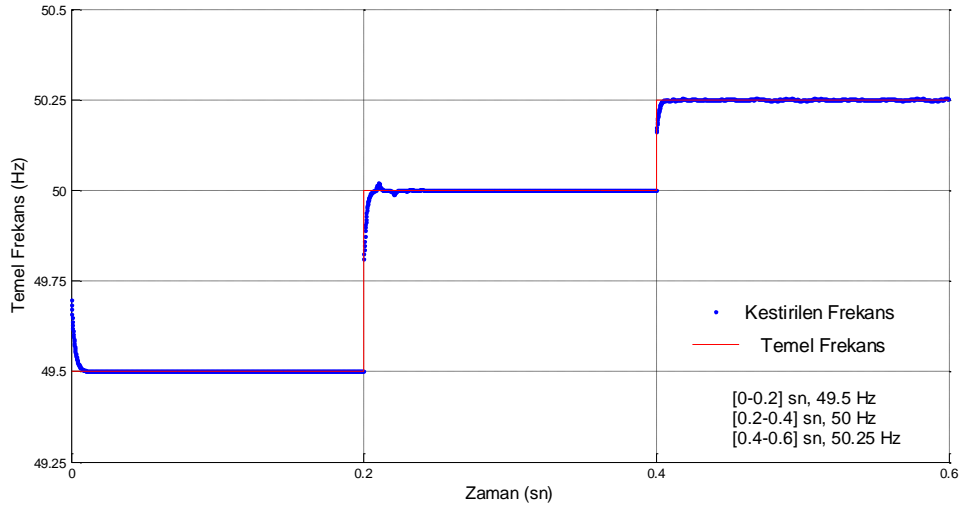
Diğer yandan, belli bir zaman aralığında, örnek sinyal ile kestirilen sinyal değerleri arasındaki ortalama karesel hata değerinin, belli bir tolerans seviyesinin üstüne çıkması durumu; bu zaman aralığında sinyalin durağan olmadığı ve bu kararsızlık halinin sinyalin temel frekansı ve/veya harmonik bileşenlerin genlik ve faz açısı değerlerindeki değişiklikten kaynaklandığı şeklinde yorumlanmaktadır.

Bu nedenle çalışmada, bu kararlılığa hızlı bir şekilde ulaşmak adına, güncelleme katsayıları hata değerine bağlı olarak ayarlanmış ve hata değerinin yüksek olduğu durumlarda döngü sayısı algoritmik olarak artırılmıştır.

Ayrıca, benzetim çalışmasında kullanılan giriş sinyali bir alt harmonik bileşen içermektedir. Daha önce belirtildiği gibi, alt ve ara harmonik bileşenlerin tespitinde birden çok yöntem kullanılabilir. Bu çalışmada, öncelikle alt ve ara harmonik bileşenlerin hangi frekanslarda ortaya çıktığı tespit edilmiş; daha sonra bu bileşenlerin genlik ve faz açısı değerleri kestirilmiştir.

Verilen örnekte, 35 Hz. frekansında var olan alt-harmonik bileşenin genlik ve faz açılarının kestirim değerlerinin, olması gereken değerlere hızlı bir şekilde yakınsadığı görülmektedir.

Çalışmada yapılan zamanla değişen frekans kestirim işlemi aşağıda Şekil 5.12’de görülmektedir.

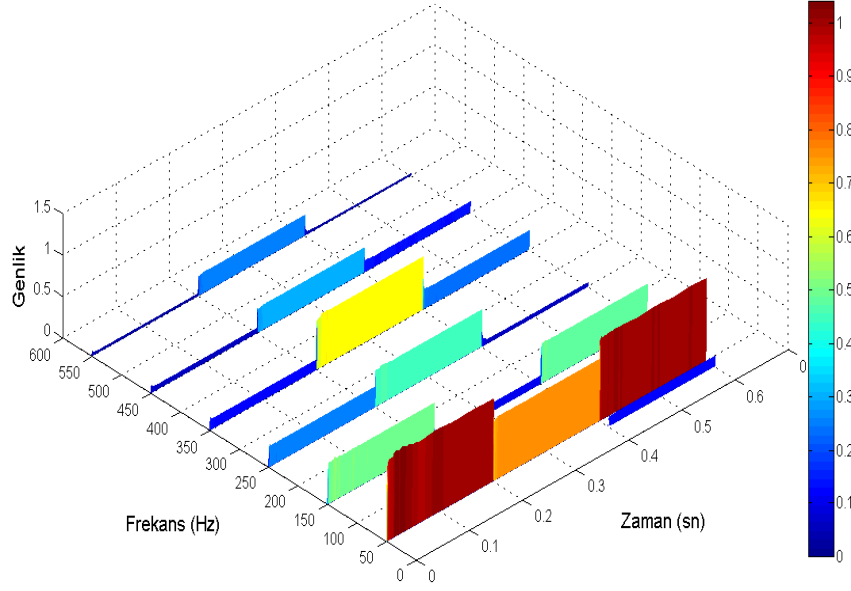


Şekil 5.12 Zamanla değişen frekans kestirimi

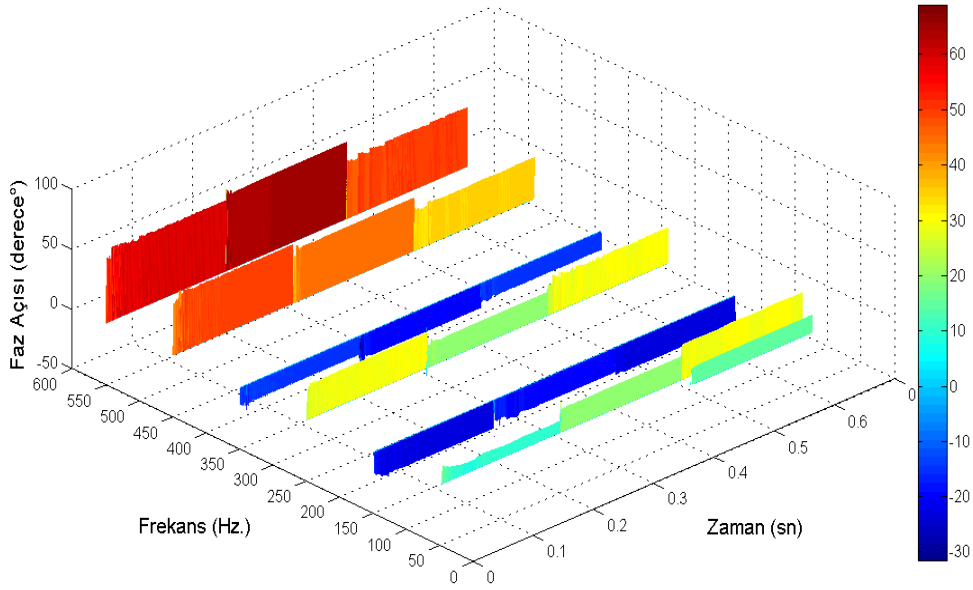
Şekil 5.12’deki sonuçlar incelendiğinde, harmonik bileşen değerlerinin değiştiği geçiş anlarında, ortalama karesel hata değeri, yine bir süre, tanımlanan tolerans seviyesinin üzerine çıkmakta; bu durumda sistem, algoritmik olarak döngü sayısını artırmak suretiyle daha hızlı bir şekilde kararlı duruma getirilmektedir.

Sistem, bu değişimi izlemek üzere, sisteme paralel olarak eklenmek suretiyle algoritmik frekans kestirim aşaması ile temel frekansı yakalayıp, kısa bir süre sonra kararlı duruma gelmektedir. Bu aşamadan sonra, yüksek gürültülü ortamlarda bile sistem hatasında dikkate değer azalma olup, bu değerlerin yüksek bir doğrulukla yakalandığı görülmektedir. Bu anlamda sistemin iyi bir senkronizasyon ve frekans adaptasyonu kabiliyetine sahip olduğu söylenebilmektedir.

Geliştirilen sistem kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları sonunda, ilgilenilen harmonik bileşen değerlerinin genlik ve faz açılarının zaman-frekans uzayında incelemesi aşağıda Şekil 5.13 ve Şekil 5.14’te görülmektedir.



Şekil 5.13 Kestirilen harmonik ve alt harmonik genliklerinin zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu gösterimi



Şekil 5.14 Kestirilen harmonik ve alt harmonik faz açılarının zaman-harmonik uzayında 3 boyutlu gösterimi

Yukarıda elde edilen sonuçlar, sistemin, harmonik ve ara-harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının hangi değerlere sahip oldukları bilgisinden öte, bu

bileşenlerin hangi zaman aralığında, ne oranda etkin olduklarının bilgisini de sunmaktadır. Böylece sistem, bu bileşenlerin zaman yörüngelerindeki bireysel etkilerinin, 3 boyutlu zaman-harmonik uzayında izlenebilmelerine olanak sağlamak suretiyle analiz yönteminin etkinliğini arttırdığını göstermektedir.

Çalışmada, elektrik güç sistemlerinde zamanla değişen sinyaller için, temel frekans ile harmonik ve ara harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının etkin bir şekilde kestirimini amaçlayan çok aşamalı melez bir sistem yapısı geliştirilmiştir. Etkinlik ölçütü olarak da hız, doğruluk, uyarlanabilirlik, hesaplama maliyeti ve nümerik kararlılık esas alınarak tasarlanan bu sistem, benzetim ortamında doğruluk denetimi yapabilmek açısından, harmonik değerleri önceden tanımlanan çeşitli örnek sinyaller üzerinden test edilmiştir. Bu yolla elde edilen deneysel sonuçlar, paralel işlem yapma kapasitesi ile çevrimiçi kullanılabilen bu yöntemin, düşük bir hesaplama yükü ile hızlı ve yüksek doğrulukta gerçek zamanlı sonuçlar verdiği göstermektedir.

Performansı arttıracak çözüm önerilerine yönelik geliştirilen, çeşitli sezgisel algoritmalar içeren, hız-doğruluk uyumsuzluğunda çoklu seçim olanağı barındıran, bu bağlamda kullanıcıya istediği harmonik parametreleri seçebilme olanağı sağlayan, dahil edilen ortama uyarlanabilen, düşük maliyetli ve esnek özellikteki bu sistem, frekans değişimlerine duyarlı, harmoniklerin ve ara-harmoniklerin bireysel etkilerinin hangi zaman aralığında ne oranda etkin olduğunu zaman-harmonik uzayında, 3 boyutlu olarak gösterebilme kapasitesine sahiptir.

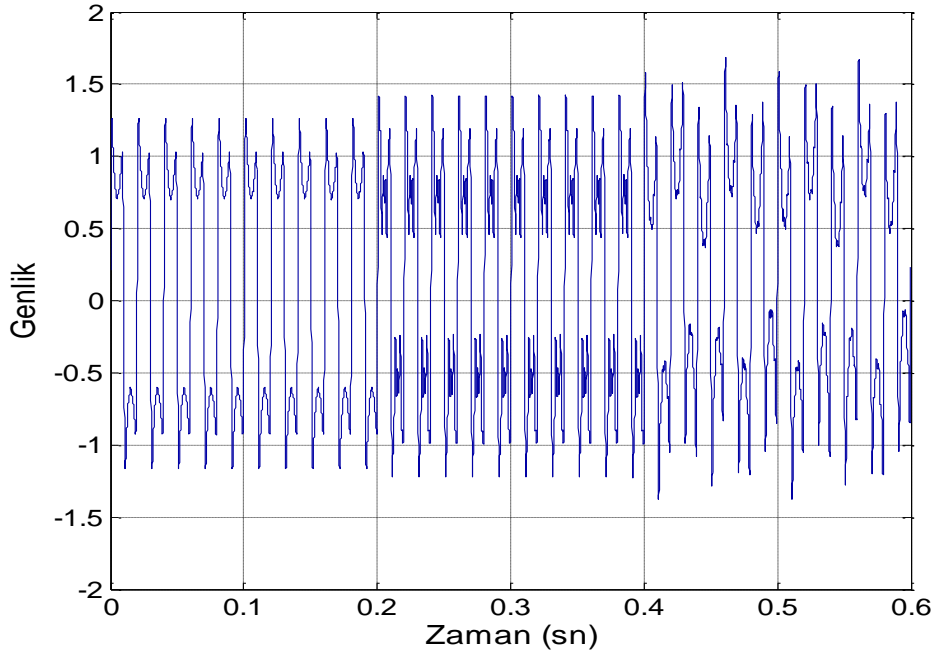
5.6 Geliştirilen Sistem ile Yapılan Benzetim Çalışması -2

Çalışmada, sistemin başarımını değerlendirmek açısından, MATLAB programı kullanılarak benzetim ortamına uyarlamak suretiyle yeni bir test sinyal oluşturulmuştur. Çizelge 5.4'te görüldüğü gibi bu sinyalin, zamanla değişen karakteristiğini belirtmek için, [0 - 0.2), [0.2-0.4) ve [0.4-0.6) olmak üzere üç zaman aralığı seçilmiştir. Sistem, sıfır frekans (*DC*) değeri ve 1., 3., 5., 7., 9. ve 11. harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları ($G_1;F_1$, $G_3;F_3$, $G_5;F_5$, $G_7;F_7$, $G_9;F_9$, $G_{11};F_{11}$) eklenerek modellenmiştir. Buna ek olarak üçüncü zaman aralığına 30 Hz. frekans değerinde bir alt harmonik bileşen ilave edilmiştir. Ayrıca, modellemede,

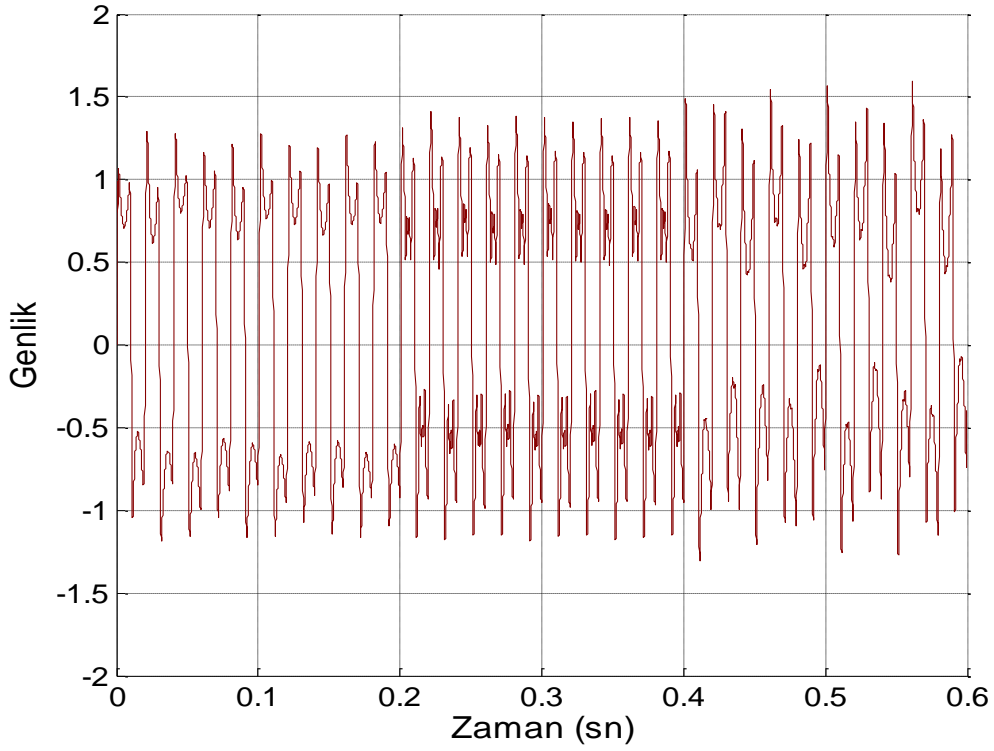
öngörülen üç zaman aralığında, sinyalin temel frekans değerleri sırasıyla 49.78, 49.92 ve 50 Hz. olarak alınmış ve ayrıca sinyale, 20, 10 ve 5 dB değerlerinde 3 farklı oranda gürültü (beyaz Gauss gürültüsü) eklenmiştir. Bu değerler Çizelge 5.4'te örnek sinyal kısmında gösterilmiştir. Şekil 5.15'de uygulanan ve Şekil 5.16'da ise kestirilen sinyal dalga şekilleri görülmektedir.

Çizelge 5.4 DC ve harmonik bileşen değerleri: Örnek Sinyal, Kestirilen Değerler ve Ortalama Karesel Hata

Zaman (sn)	DC (V)	$G_1; F_1$ (V; °)	$G_3; F_3$ (V; °)	$G_5; F_5$ (V; °)	$G_7; F_7$ (V; °)	$G_9; F_9$ (V; °)	$G_{11}; F_{11}$ (V; °)	$G_{13}; F_{13}$ (V; °)
Örnek Sinyal								
[0 - 0.2)	0.05	1;38	0.5;29	0.25;15	0.13;8	0.06;-5	0.03;-18	-
[0.2-0.4)	0.1	0.9;32	0.54;23	0.43;10	0.1;-8	0.03;-16	0.15;-25	-
[0.4-0.6)	0.15	0.8;27	0.58;17	0.32;4	0.19;-15	0.13;-24	0.02;-30	0.2;15
Kestirilen Değerler								
0.2	0.049	0.99;37.65	0.49;28.53	0.25;14.65	0.13;7.73	0.06;-5.03	0.03;-17.71	-
0.4	0.099	0.89;31.73	0.54;22.78	0.43;9.86	0.09;-	0.03;-15.83	0.15;-25.24	-
0.6	0.148	0.81;26.62	0.58;16.76	0.32;3.89	0.19;-	0.13;-23.88	0.02;-30.05	0.19;14.63
Ortalama Karesel Hata								
[0 - 0.2] aralığı için:0.0072			[0.2 - 0.4] aralığı için:0.0014			[0.4 - 0.6] aralığı için:0.0019		



Şekil 5.15 Örnek giriş sinyali



Şekil 5.16 Kestirilen sinyal

5.6.1 Harmonik ve alt harmonik bileşenlerin kestirilmesi

Harmonik parametrelerini kestirmek için yukarıdaki Çizelge 5.4'te örnek sinyal değerleri kullanılmış ve elde edilen harmonik bileşenlerin kestirilen değerleri bu çizelgenin ikinci bölümünde gösterilmiştir.

Ayrıca, aynı çizelgenin en alt kısmında uygulanan sinyalin her zaman aralığında ortalama karesel hata değeri verilmiştir. Burada en düşük ortalama karesel hata değeri 0.0014'dür ve bu değer 2. zaman aralığında bulunmaktadır.

30 Hz. frekansta belirlenen ve genliği 0.2, faz açısı 15 derece olan, alt harmoniği de kapsayan 3. zaman aralığında ise bu bileşenler 0.0019 hata ile kestirilmiştir.

Bu çalışmada, öncelikle harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi frekanslarda ortaya çıktığı tespit edilmiş, daha sonra bu bileşenlerin genlik ve faz açısı değerleri kestirilmiştir.

Ulaşılmak istenen etkinlik, kestirilen değerlerin gerçek değerlerine yakınsayıp, sistemin hızlı bir şekilde belli bir nümerik kararlılığa ulaşması ile ifade edilebilmektedir.

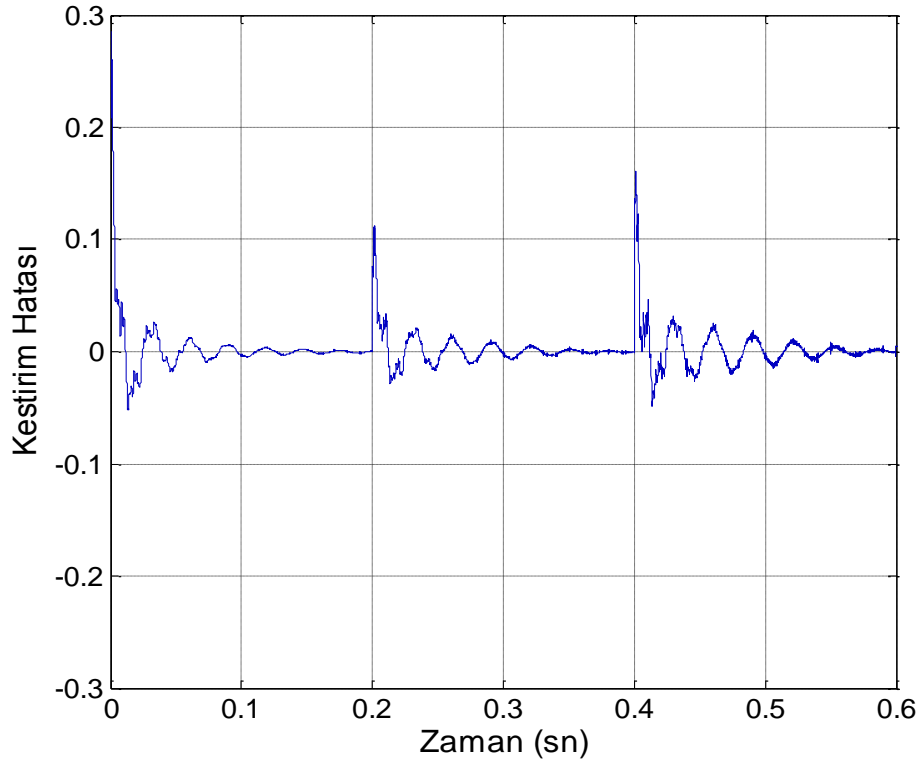
Burada kastedilen yöntemin hızı, istenilen doğruluğa yakınsama hızıdır. Diğer bir deyişle, hatanın ne kadar zamanda belirlenen toleransın değerinin altına düşüp, sistemin kaç periyotta kararlı hale geldiği önem taşımaktadır. IEC 61000-4-7 [76] standardına göre bu zaman, 10 periyotluk zaman dilimine karşılık gelen 0,2 sn dir.

Uygulanan sinyale göre seçilen hata tolerans değerine göre değişebilmekle birlikte sistem, yaklaşık olarak 6 periyotluk zaman diliminde kararlı duruma gelmektedir. Ancak, sistem parametrelerinin ilk-değerlenmesi ve güncelleme katsayılarının ayarlanması işlemlerine bağlı olarak, nümerik kararlılık ve yakınsama hızında büyük değişimler gözlemlenebilmektedir. Burada, dikkat edilmesi gereken bir başka husus da bir sonraki döngüye kadar güncelleme işleminin yapıp yapılmadığını ifade eden güncelleme zamanıdır.

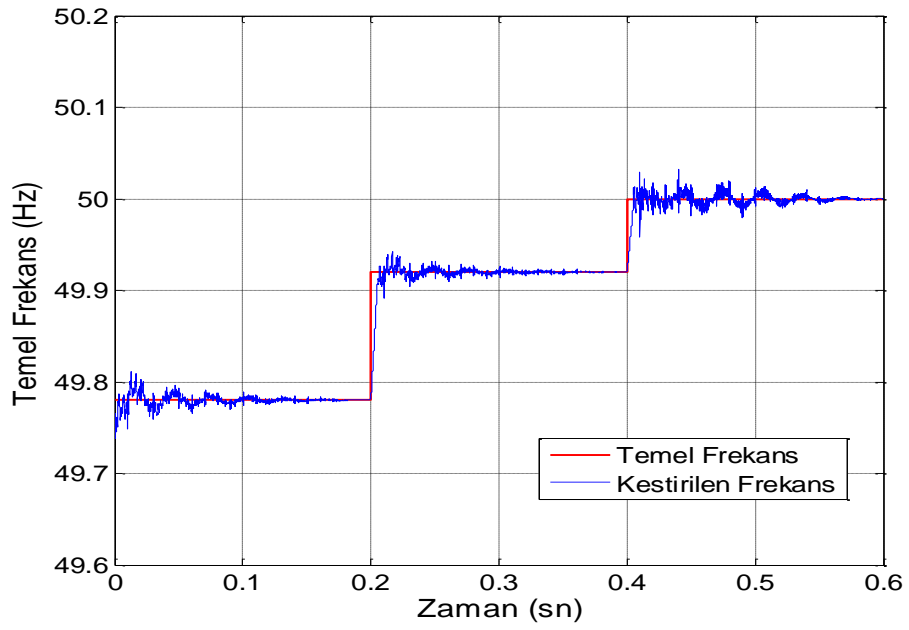
Uyarlandığı ortama göre parametrelerin seçilebilir olmasından hareketle çalışmada, örnekleme periyodu, güncelleme zamanından büyük herhangi bir değerde seçilerek bu problemten kaçınılmaktadır.

Bilindiği üzere zaman-harmonik analizinde, zamanla değişen sinyal parametrelerinin değişim anlarının tespiti önem taşımaktadır. Bu değişim anlarında ortalama karesel hata değeri belirlenen tolerans değerinin üstüne çıkarak bu değişimi haber vermektedir.

Şekil 5.16'daki sonuçlar incelendiğinde, harmonik bileşen değerlerinin değiştiği geçiş anlarından itibaren (0.2 ve 0.4. saniyeler) bu hata değeri, bir süre, tanımlanan tolerans seviyesinin üzerine çıkmaktadır. Bu anlamda tespit edilen bu geçiş anlarında sistem, döngü sayısını arttırmak suretiyle daha hızlı bir şekilde kararlı duruma getirilebilmektedir. Böylece yüksek gürültülü ortamlarda bile, sistem hatasında dikkate değer azalma görülerek, harmonik bileşen değerleri daha yüksek bir doğrulukla yakalanabilmektedir.



Şekil 5.17 Sistem kestirim hatası



Şekil 5.18 Temel frekans kestirimi

5.6.2 Temel frekansın kestirilmesi ve izlenmesi

Benzetim çalışmasında örnek alınan sinyal, üç aralıkta üç farklı temel frekans değerine sahiptir.

Çalışmada önce harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarını kestirerek, bu değerler üzerinden temel frekans kestirim işlemi gerçekleştirilmektedir.

Sistemde bu işlem, örnek sinyal ile kestirilen sinyal değerleri arasındaki hata değerinin belli bir zaman aralığında belirlenen hata tolerans seviyesinin üstüne çıkması durumunda gerçekleştirilmektedir. Aksi halde ise uygulamada mevcut frekans, temel frekans kabul edilerek bir sonraki döngüye geçilmekte ve harmonik güncelleme işlemine devam edilmektedir.

Şekil 5.17’de uygulanan giriş sinyal ile kestirilen sinyal arasındaki hata değerleri görülmektedir. Burada sistem hatası, Şekil 5.18’de görüldüğü gibi temel frekansın değiştiği geçiş anlarında kısa bir süre için yüksek değerlere çıkmaktadır. Sistemin temel frekans değeri, zamanla değişen sinyal parametrelerinin bu değişim anlarında, sisteme eklenmiş frekans kestirim aşaması ile güncellenmektedir.

Geliştirilen sistemde, IEC 61000-4-7 [76] standardına uygun olarak, temel frekans güncellemesi önceki ve sonraki temel frekans değerleri arasındaki farkın, önceki temel frekans değerinin %3’ünden büyük olduğu durumlarda yapılmaktadır [8].

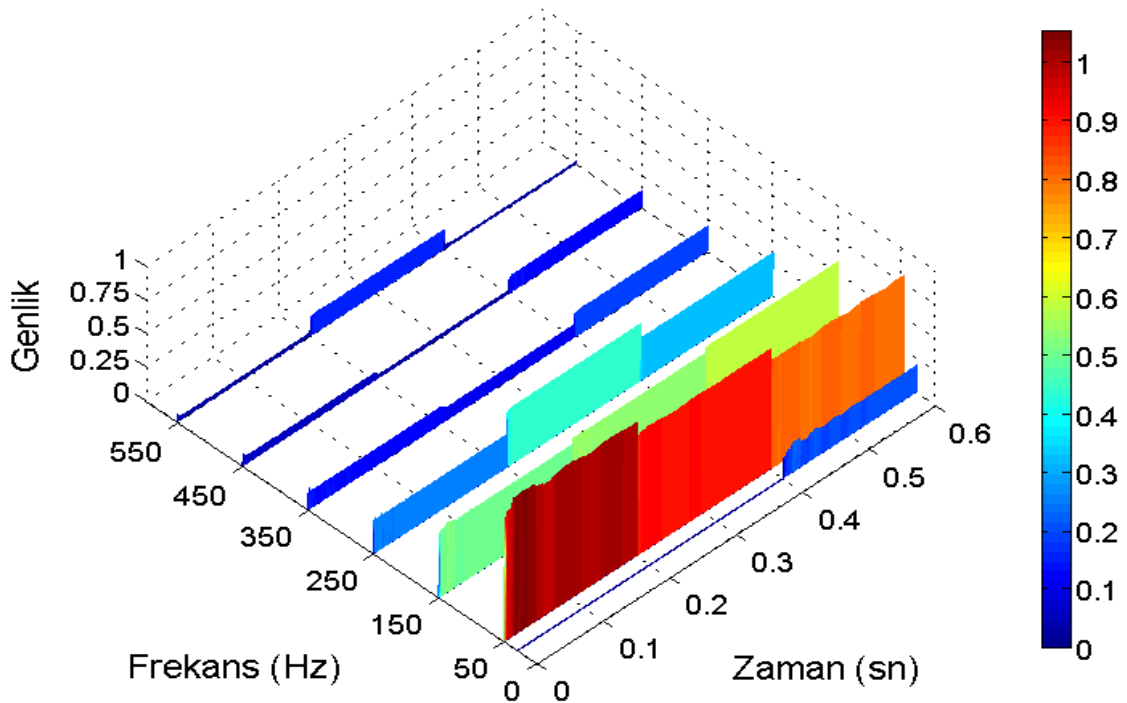
Çalışmada, temel frekans değişimi her üç zaman aralığında yaklaşık olarak 5-6 periyotluk zaman diliminde yakaladığı görülmekte ve bu anlamda sistemin iyi bir senkronizasyon ve frekans adaptasyonu kabiliyetine sahip olduğu söylenebilmektedir.

5.6.3 Sonuçların üç boyutlu uzayda görselleştirilmesi

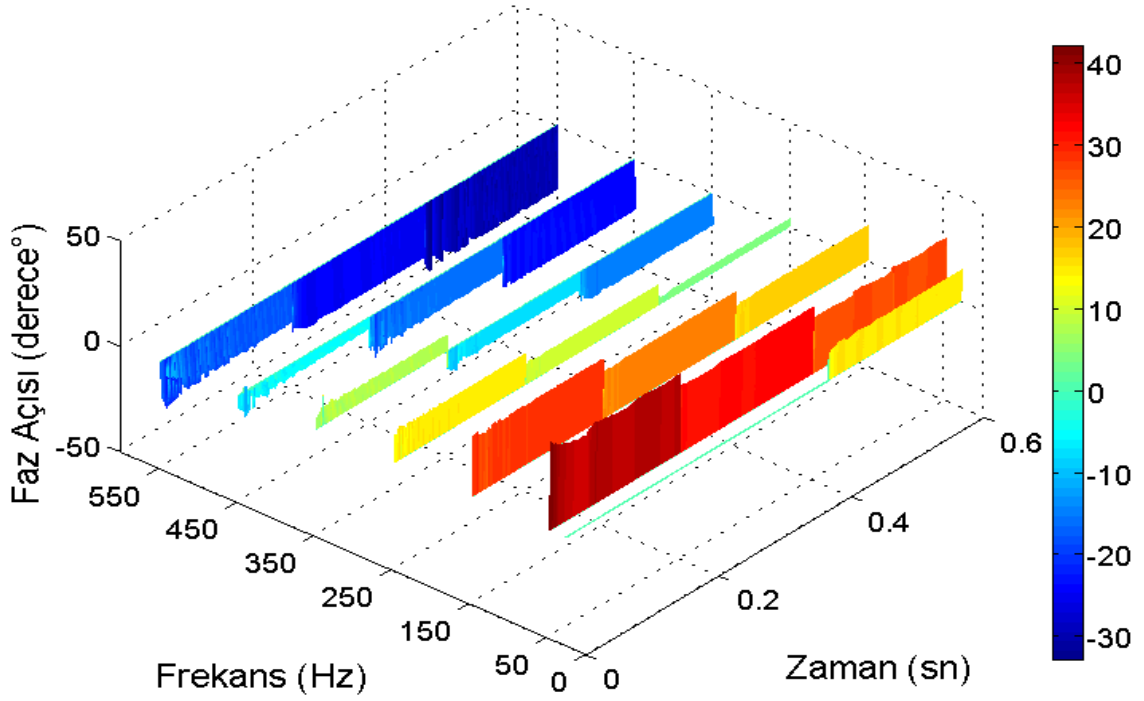
Daha önce belirtildiği üzere, sistemde güncelleme işlemi devam ederken, çıkışta elde edilen harmoniklerin genlik ve faz açıları gibi sistem parametreleri bellekte tutularak, istenilen anda bu sonuçların zamanla değişimleri, zaman-harmonik uzayında üç boyutlu olarak görüntülenebilmektedir. Çalışmada, güncelleme işlemi

için hem harmonik bileşenlerin hem de temel frekansın bir önceki değerlerinin elde bulunması gerekli ve yeterli iken bu sistemde, zaman harmonik uzayında değişimlerinin izlenebilmesi açısından önceki değerlerini de kapsayan tüm harmonik parametre değerlerinin bellekte tutulması gerekmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında, belleği temsilen bir veri matrisine, her döngüde güncellenen yeni temel frekans ve yeni harmonik değerleri atanmaktadır. Böylece sistem, harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini sunarak de sunmaktadır.

Çalışmada geliştirilen sistemin harmonik parametrelerinin anlık olarak izlenebilmesi ve görselleştirilmesi işlevi, MATLAB'ın görsel desteği kullanılarak ve 3 boyutlu olarak (genlik–frekans–zaman, faz açısı–frekans–zaman) görüntülenerek sağlanmaktadır. Yapılan benzetim çalışması sırasında kestirilen bu harmonik bileşenlerin genlik ve faz açısı değerleri 3 boyutlu gösterimi Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de görüntülenmektedir.



Şekil 5.19 Kestirilen harmonik genliklerinin 3 boyutlu gösterimi



Şekil 5.20 Kestirilen harmonik faz açılarının 3 boyutlu gösterimi

Özetle bu çalışmada, güç sistemlerinde, harmonik bileşenlerini kestirmek ve frekans değişimini izlemek için uyarlanabilir iki aşamalı bir sistem geliştirilmiştir.

Sistemde, ADALINE ve Fourier serisinin özellikleri temel alınarak genlik, faz açısı, ara harmonik ve frekans kestirimi yapabilen bir algoritma sunulmuştur.

Geliştirilen yöntemin başarımı, benzetim ortamında, gürültülü ve harmonik bileşenler içeren bir sinyal uygulanarak test edilmiştir. Kesitirilen genlik ve faz açısı değerleri kabul edilebilir sınırlar içerisinde hesaplanmıştır.

Ayrıca, harmonikli sinyaldeki temel frekans değişiminin yaklaşık 6 periyotluk sürede tespit edilebileceği gözlemlenmiştir.

Kesitirilen harmonik bileşenleri görselleştirilerek üç boyutlu harmonik-zaman çözümlemesi yapılmıştır.

Sistemin tasarlanmasında etkinlik ölçütü olarak nümerik kararlılık, yakınsama hızı, hesaplama maliyeti ve uyarlanabilirlik esas alınmıştır.

Bu sistem, benzetim ortamında doğruluk denetimi yapabilmek açısından, harmonik değerleri önceden tanımlanan örnek sinyaller üzerinden test edilmiştir.

Bu yolla elde edilen benzetim sonuçları, paralel işlem yapma kapasitesiyle çevrimiçi olarak kullanılabilen bu yöntemin, düşük bir hesaplama yükü ile gerçek zamanlı sonuçlar verdiğini göstermektedir.

Ayrıca sistem, harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini sunarak, bu bileşenlerin zaman yörüngelerindeki bireysel etkilerinin 3 boyutlu zaman-harmonik uzayında izlenmesi suretiyle kullanılan çözümlene yönteminin etkinliği artırılmaktadır.

Bu anlamda olası yük değişimlerinden dolayı değişen harmonik genlik değerleri ve ilgili faz açıları izlenebilecek, böylelikle hangi harmoniğin ne zaman ve ne oranda etkin olduğu anında tespit edilerek bu bileşenlerin verdiği zararlar asgariye indirilebilecektir.

5.7 Geliştirilen Sistem ile Yapılan Benzetim Çalışması-3

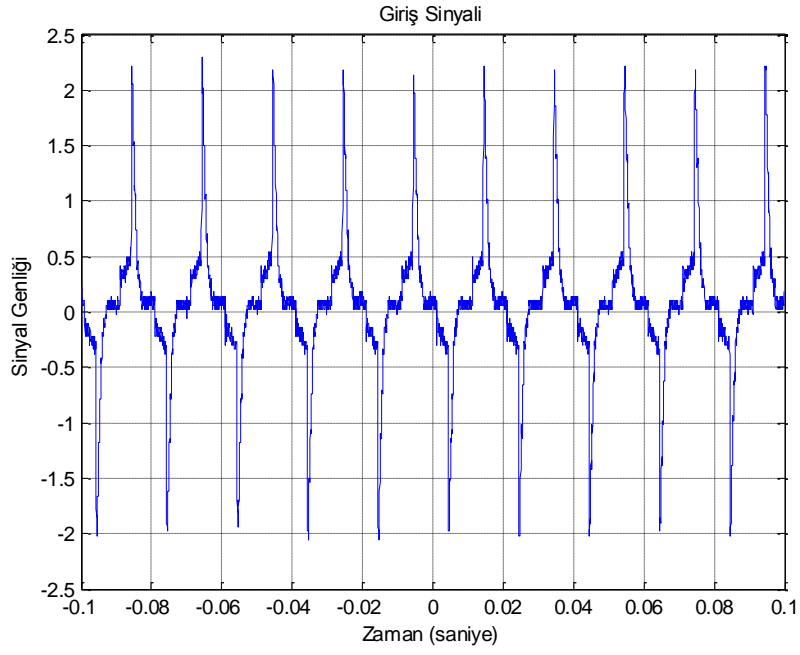
Bu çalışmada, geliştirilen sistemin başarımını değerlendirmek üzere, yine MATLAB programı kullanılarak benzetim ortamına uyarlamak suretiyle gerçek bir sistem üzerinden kaydedilmiş veriler kullanılmıştır.

Bu veriler kullanılarak yapılan benzetim çalışması, Şekil 5.21'de görünen harmonikli akım sinyali için geliştirilen algoritma kullanılarak yapılmıştır.

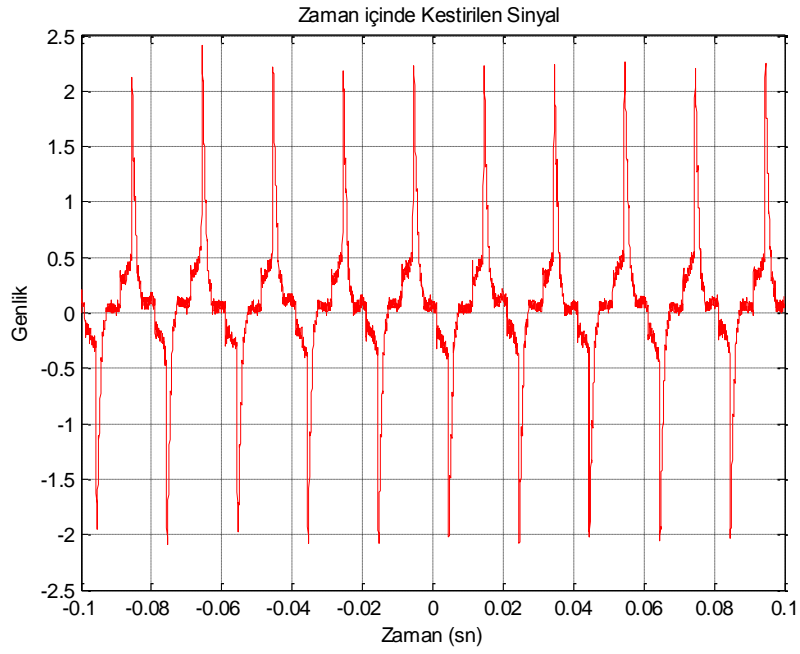
Geliştirilen sistem kullanılarak elde edilen zaman içinde kestirilen sinyal, Şekil 5.22'de ve Şekil 5.23'te (giriş ve çıkış sinyalleri) bir arada görülmektedir.

Ayrıca bu sinyaller arasındaki farkın bir göstergesi olan sistem hatasının zaman içinde değişimi Şekil 5.24'de görülmektedir.

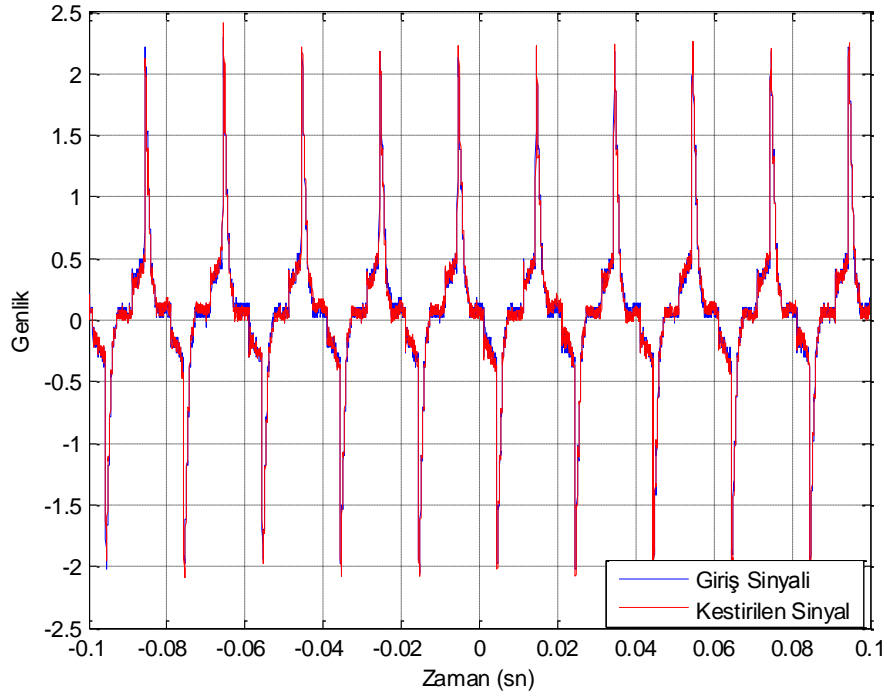
Bu çalışma sonuçları aşağıdaki şekillerde verilmiştir.



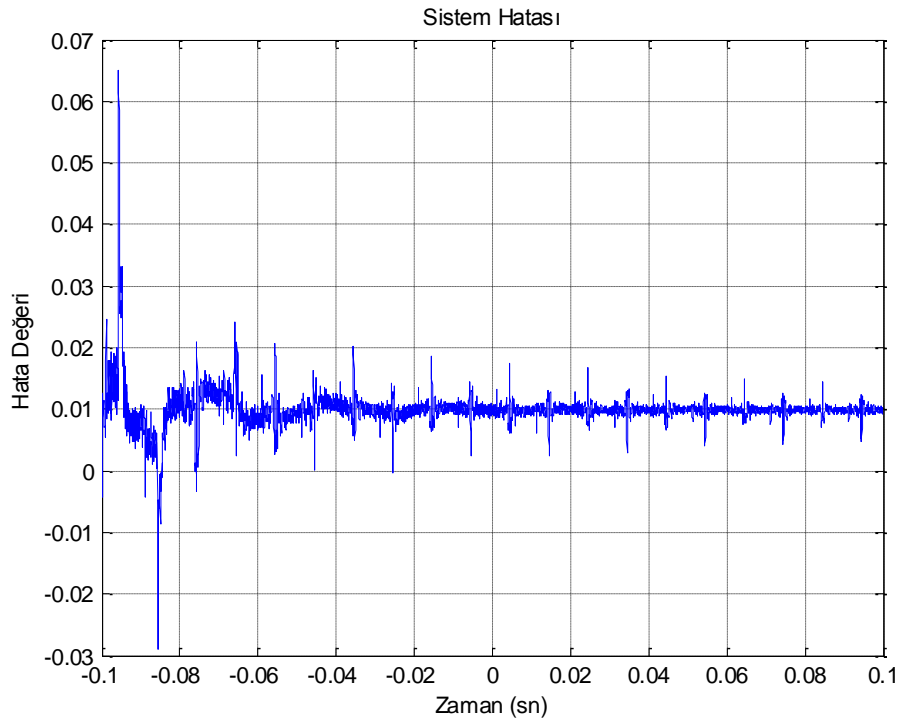
Şekil 5.21 Giriş Sinyali



Şekil 5.22 Zaman içinde Kestirilen Sinyal



Şekil 5.23 Giriş / çıkış sinyali

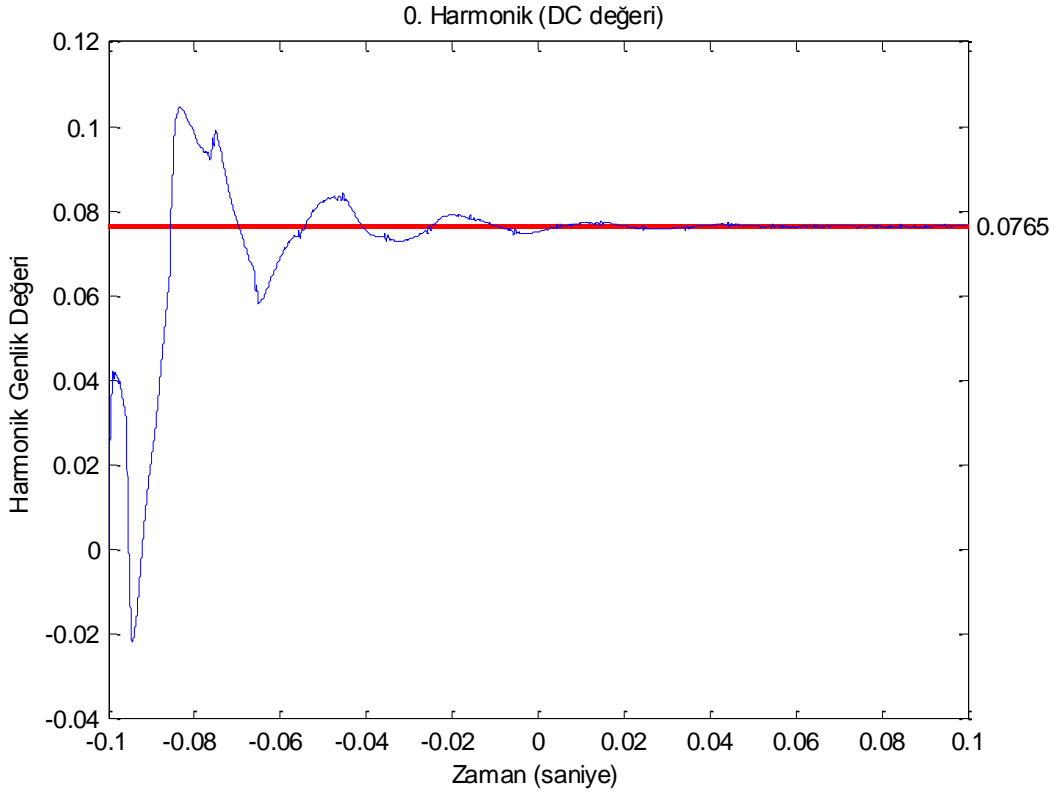


Şekil 5.24 Sistem hatasının zaman içinde değişimi

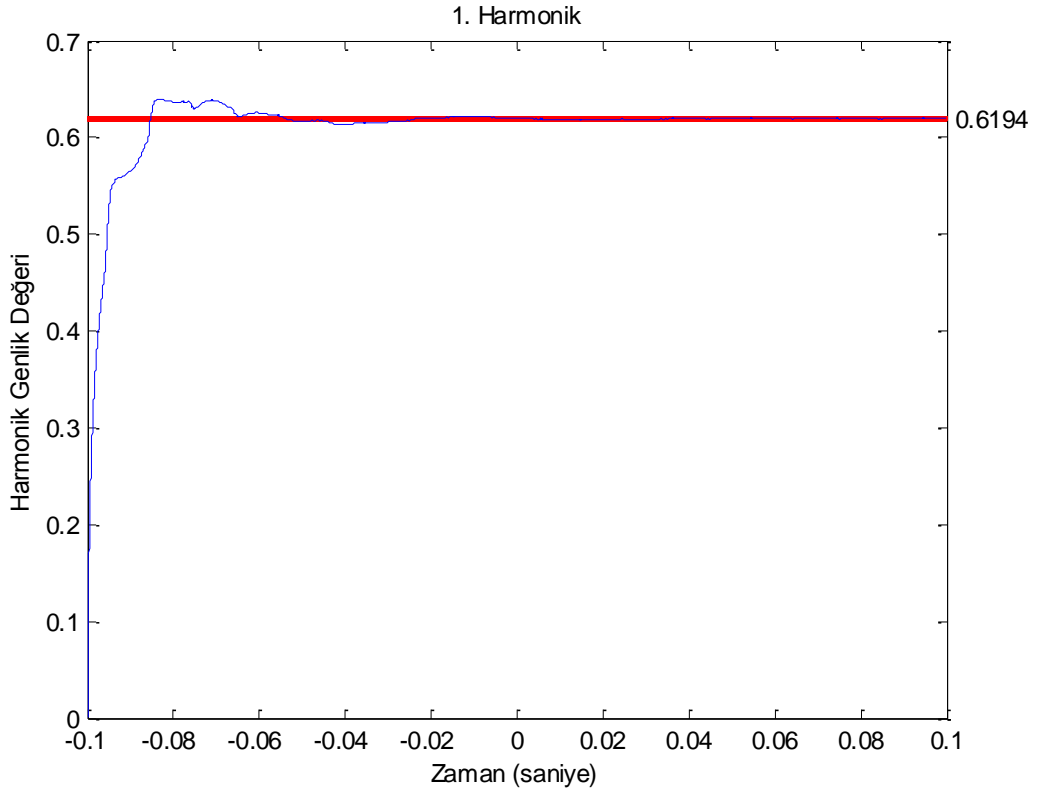
Çizelge 5.5'te sinyalin DC bileşeninin ve ilgilenilen ilk 16 harmonik için HFD ve GADALINE yöntemleriyle elde edilen genlik değerleri ve buna bağlı olarak sistemin ortalama karesel hata değeri (OKD), ayrıca toplam harmonik bozulma (THB) değerlerini de içeren parametre değerleri verilmiştir. Diğer yandan benzetim çalışmasında, Sistem çıkışında elde edilen DC ve ilk 16 harmonik için sistem işletimi boyunca zaman içinde elde edilen harmonik genlik değerleri aşağıda sırasıyla Şekil 5.25 – Şekil 5.41'de gösterilmiştir:

Çizelge 5. 5 HFD ve GADALINE yöntemleriyle elde edilen parametre değerleri

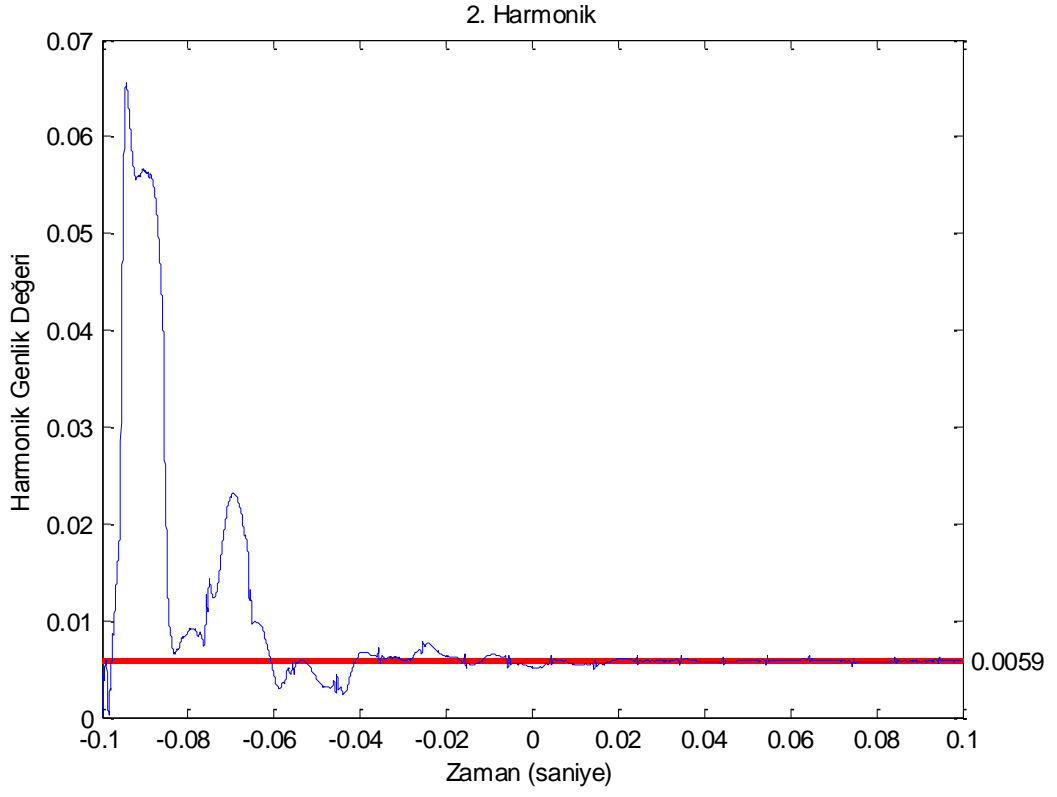
Harmonik Numarası	Genlik Değeri (HFD)	Genlik Değeri (GADALINE)
0 (DC)	0.0764	0.0765
1	0.6185	0.6194
2	0.0042	0.0059
3	0.3556	0.3563
4	0.0035	0.0016
5	0.2495	0.2484
6	0.0030	0.0020
7	0.2042	0.2013
8	0.0067	0.0049
9	0.1357	0.1327
10	0.0024	0.0006
11	0.1173	0.1141
12	0.0026	0.0017
13	0.0916	0.0895
14	0.0035	0.0021
15	0.0691	0.0658
16	0.0022	0.0015
OKH	0.0164	0.0154
THB	0.8492	0.8425



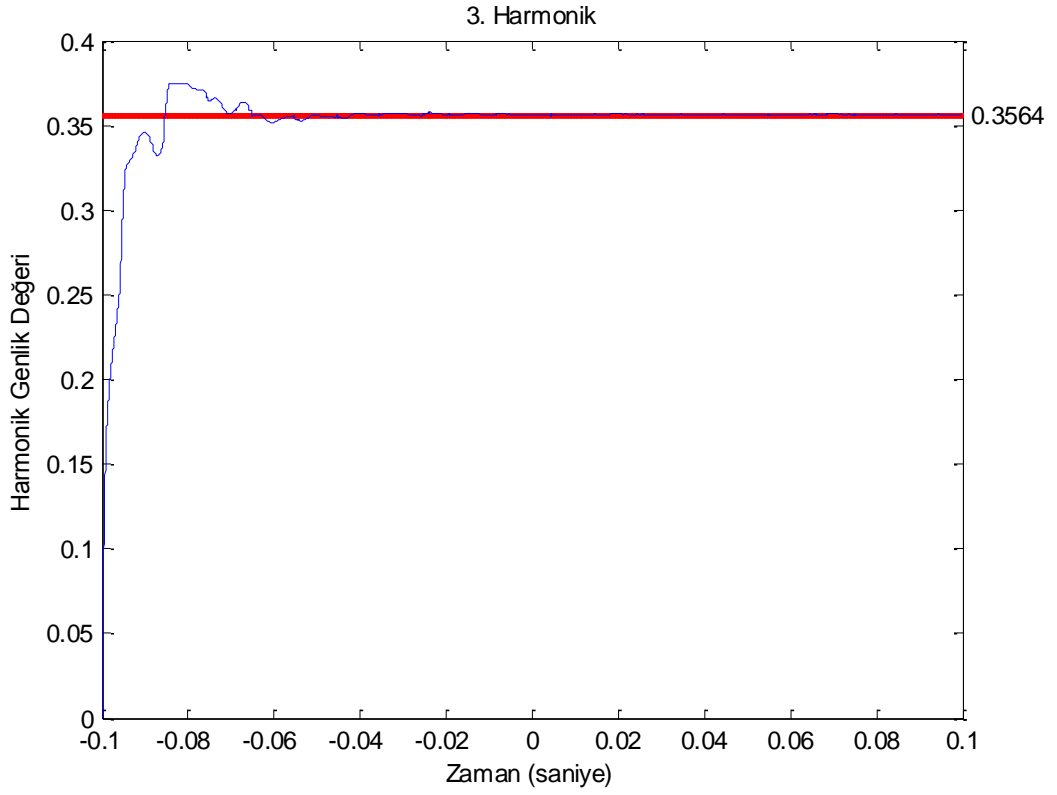
Şekil 5.25 DC bileşenin zaman içinde kestirilen değerleri



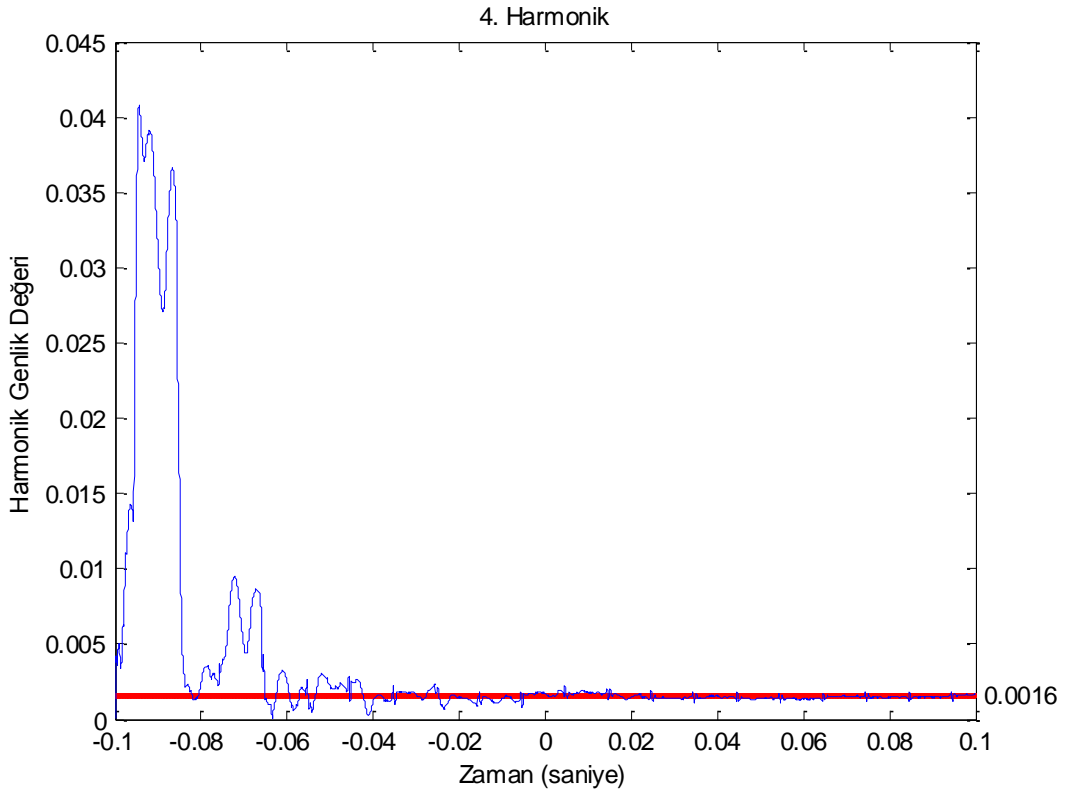
Şekil 5.26 1.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



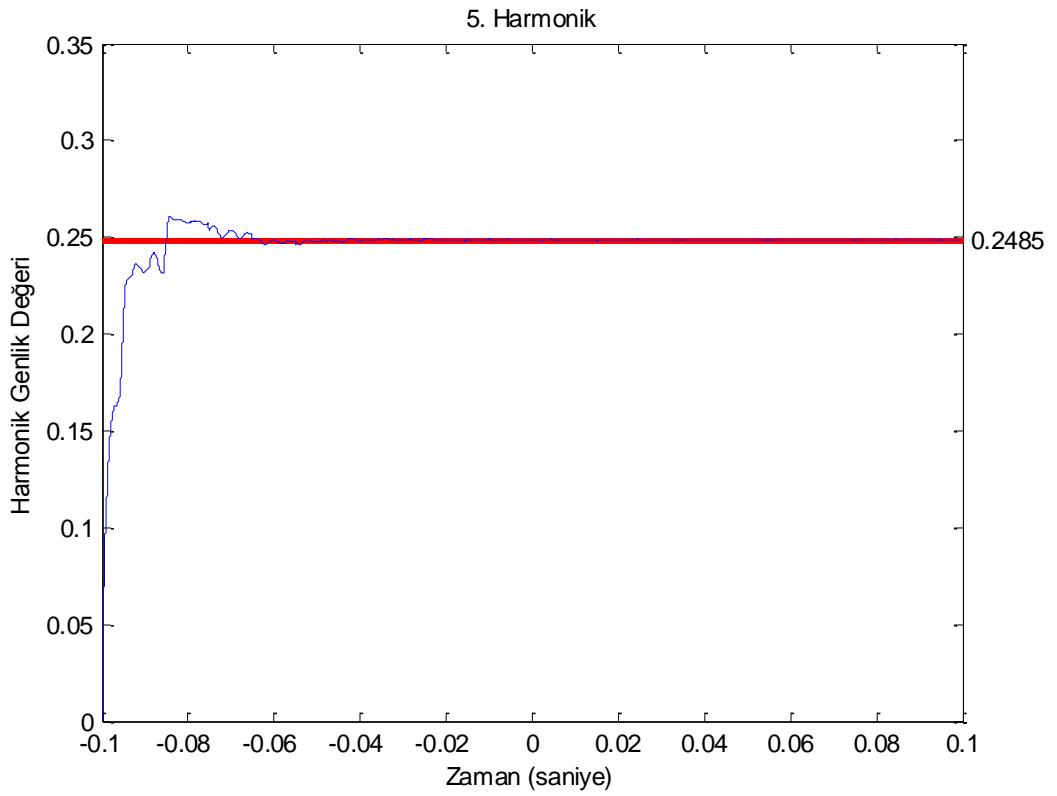
Şekil 5.27 2.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



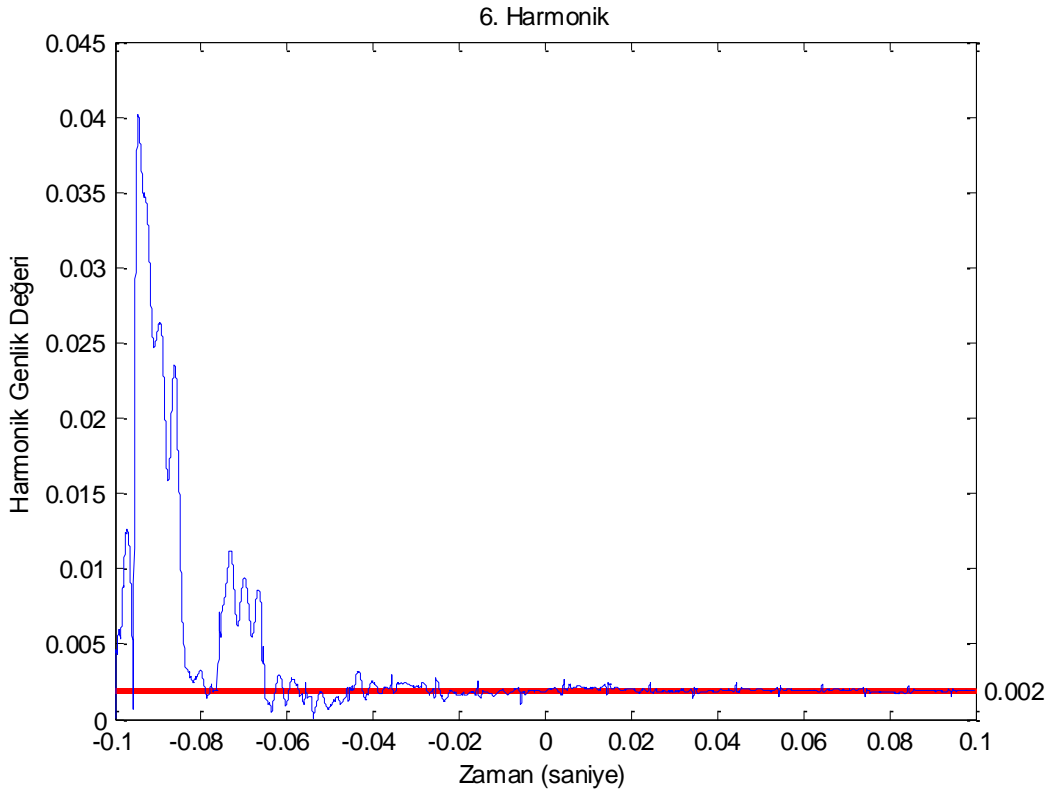
Şekil 5.28 3.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



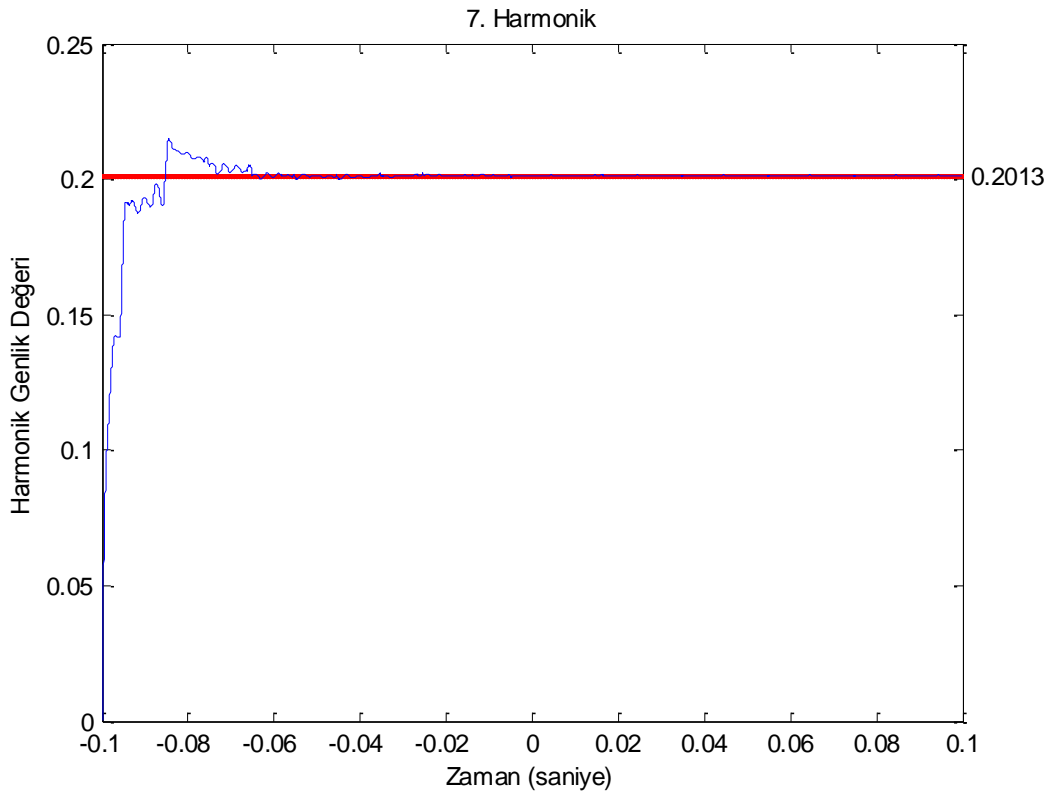
Şekil 5.29 4.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



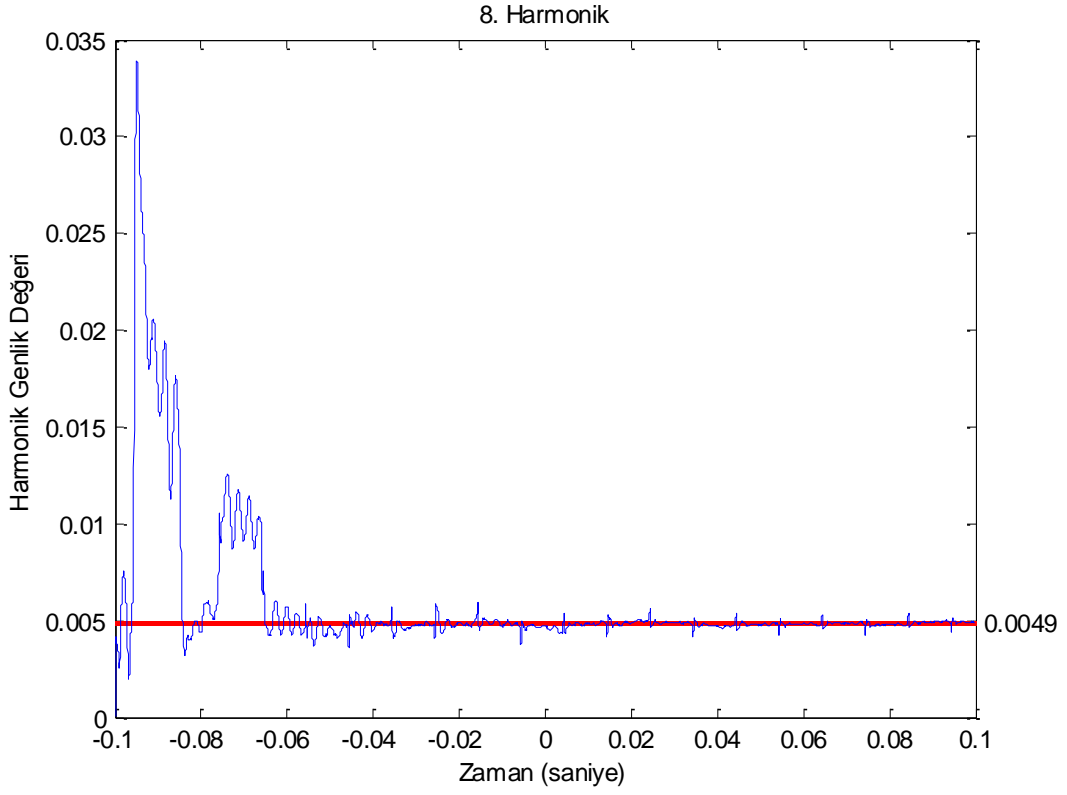
Şekil 5.30 5.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



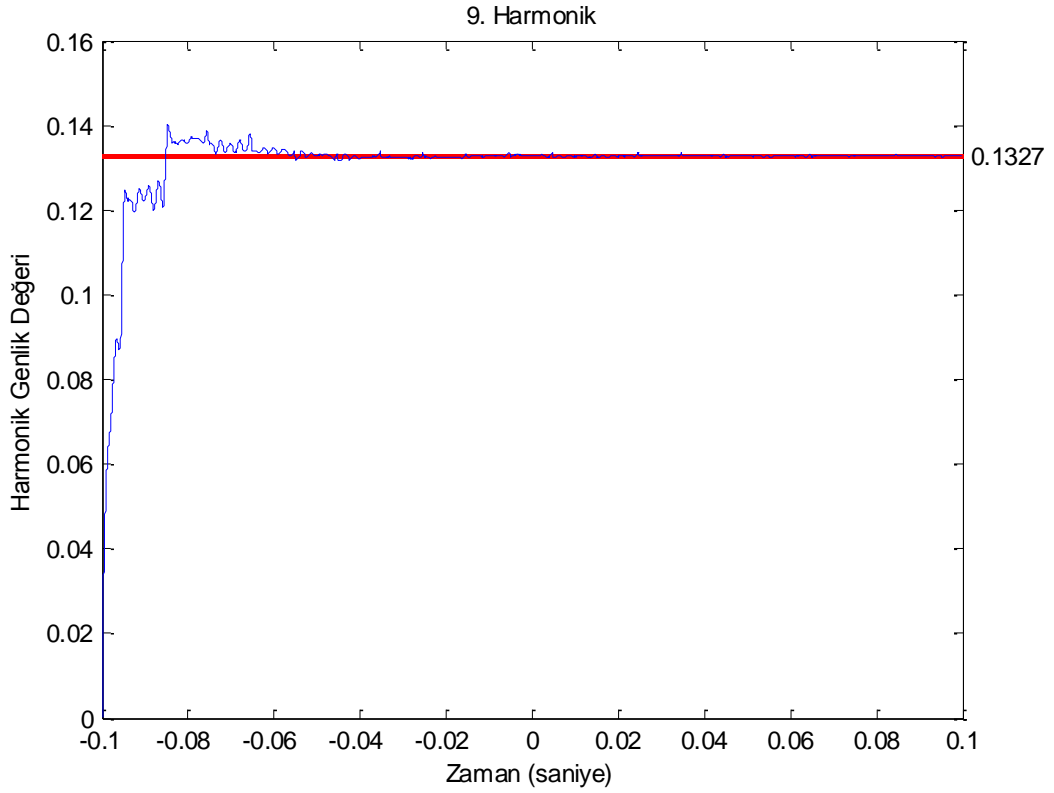
Şekil 5.31 6.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



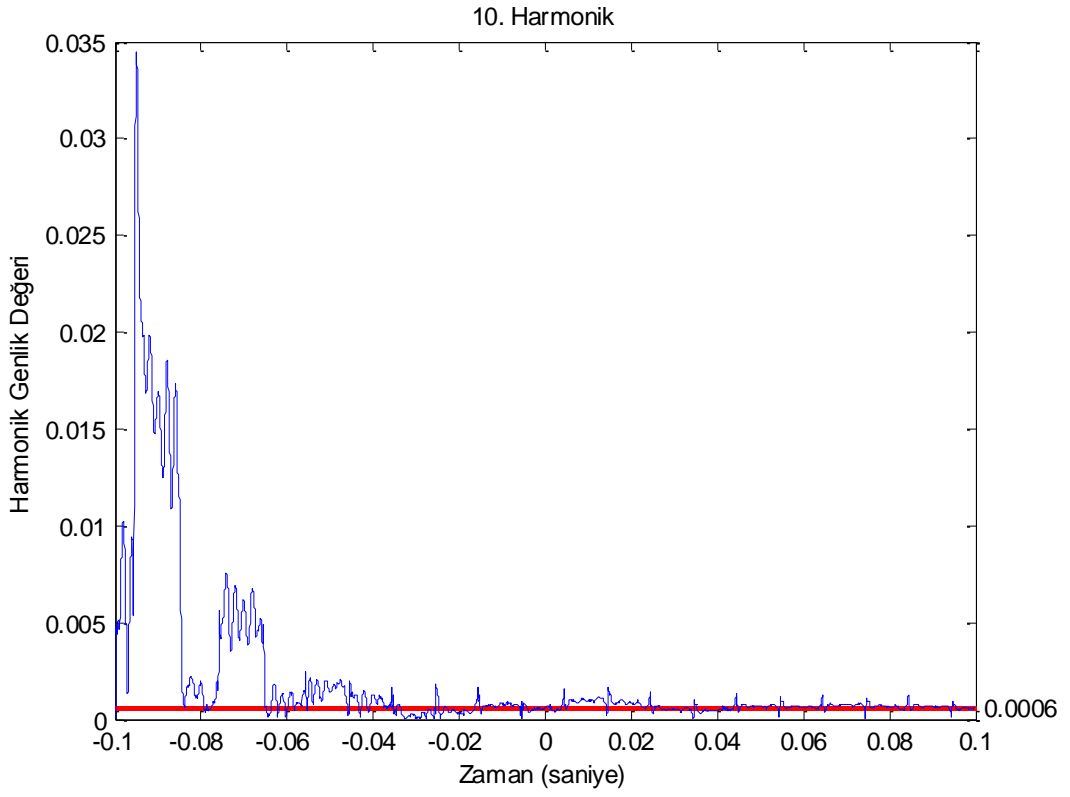
Şekil 5.32 7.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



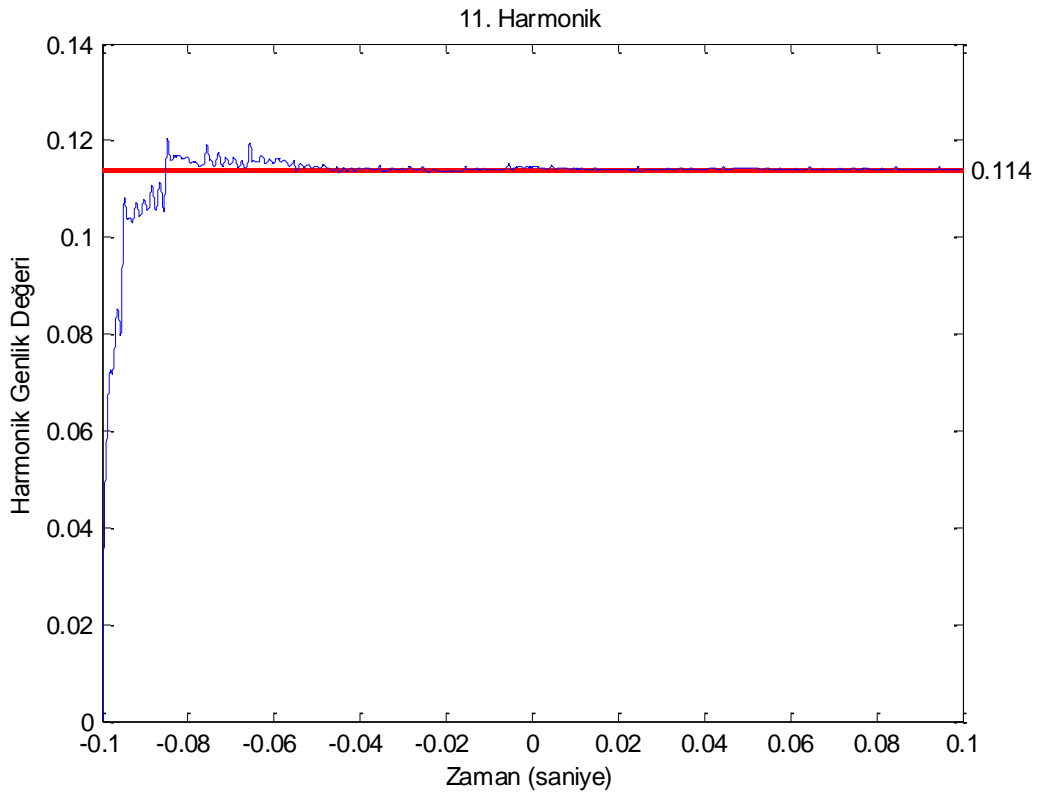
Şekil 5.33 8.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



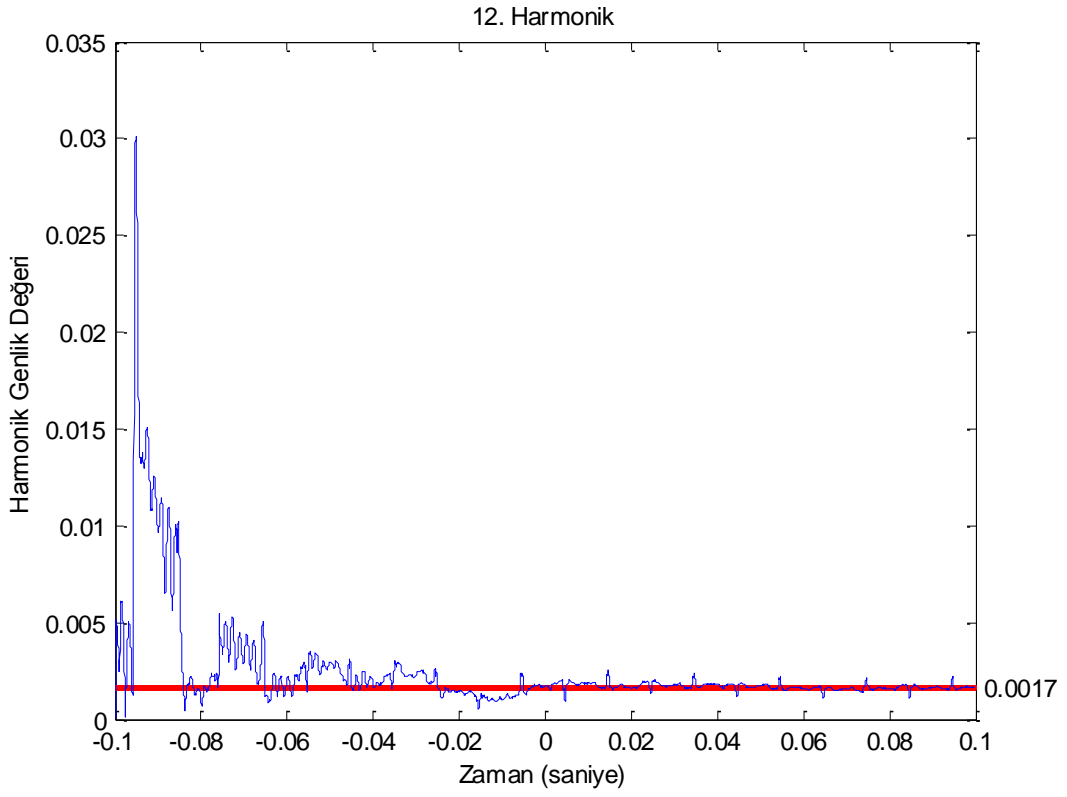
Şekil 5.34 9.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



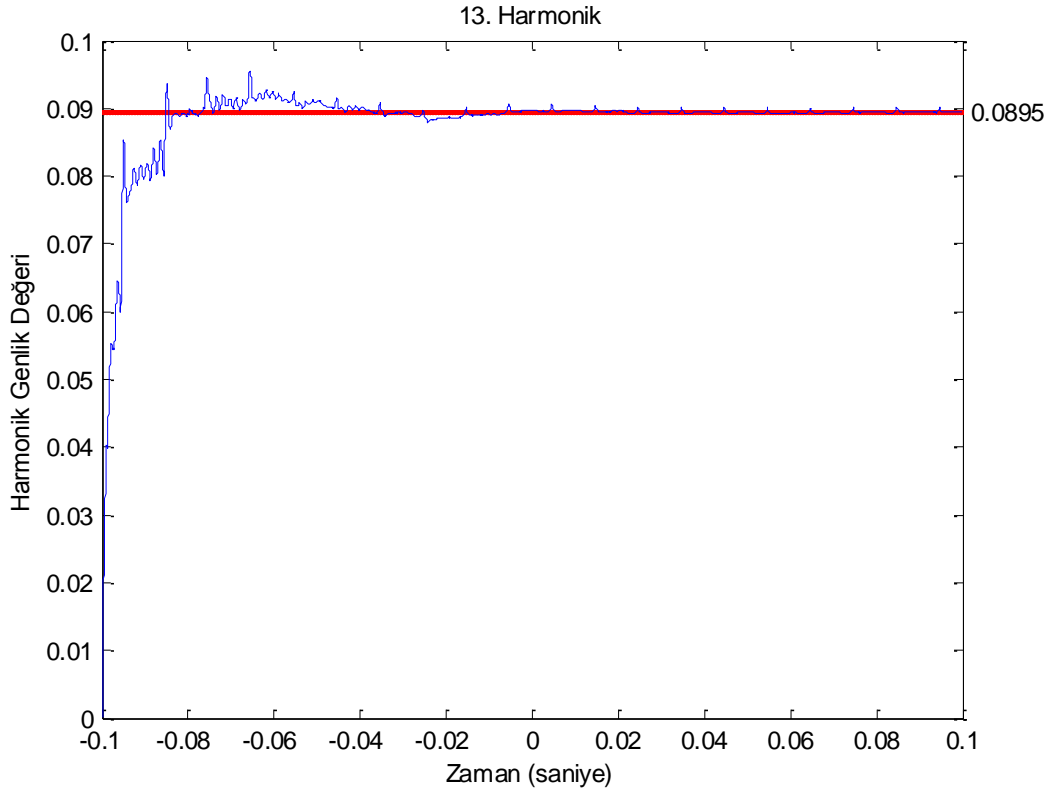
Şekil 5.35 10.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



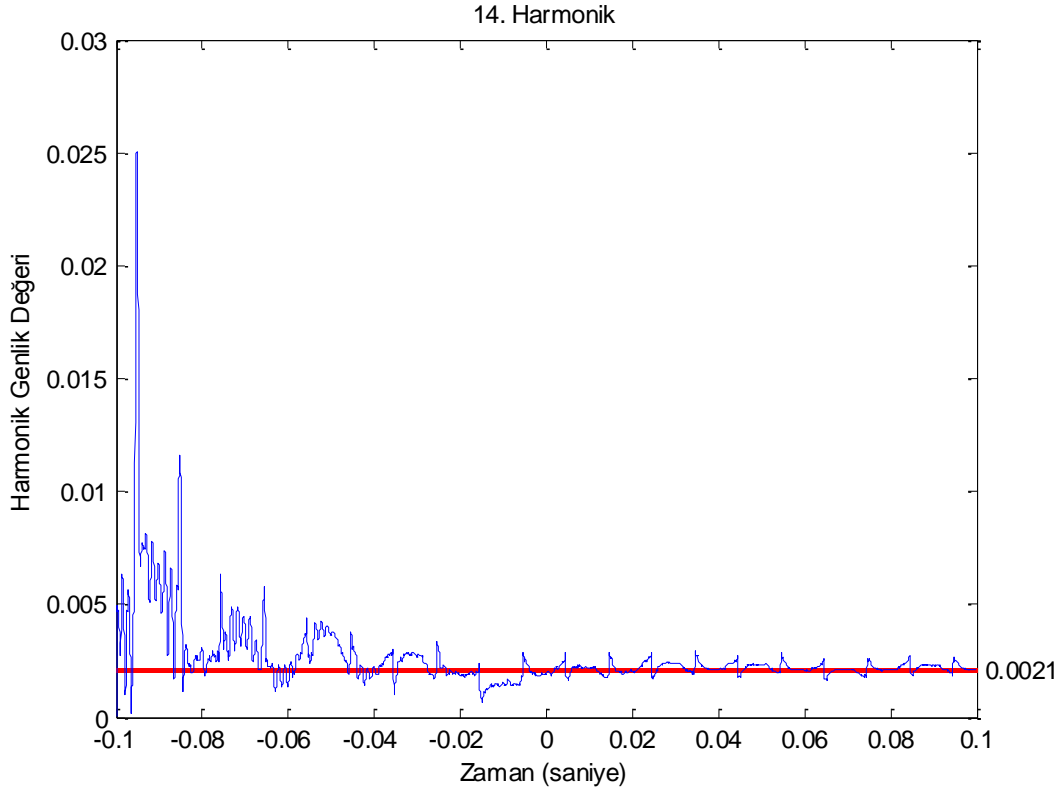
Şekil 5.36 11.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



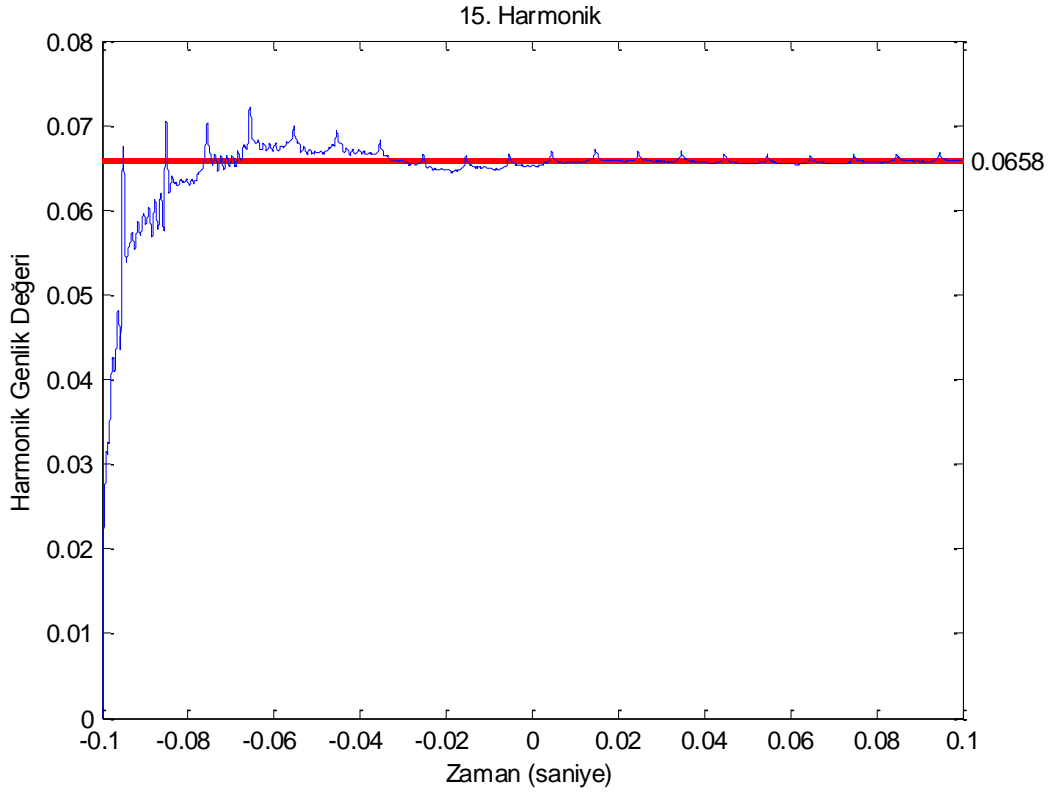
Şekil 5.37 12.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



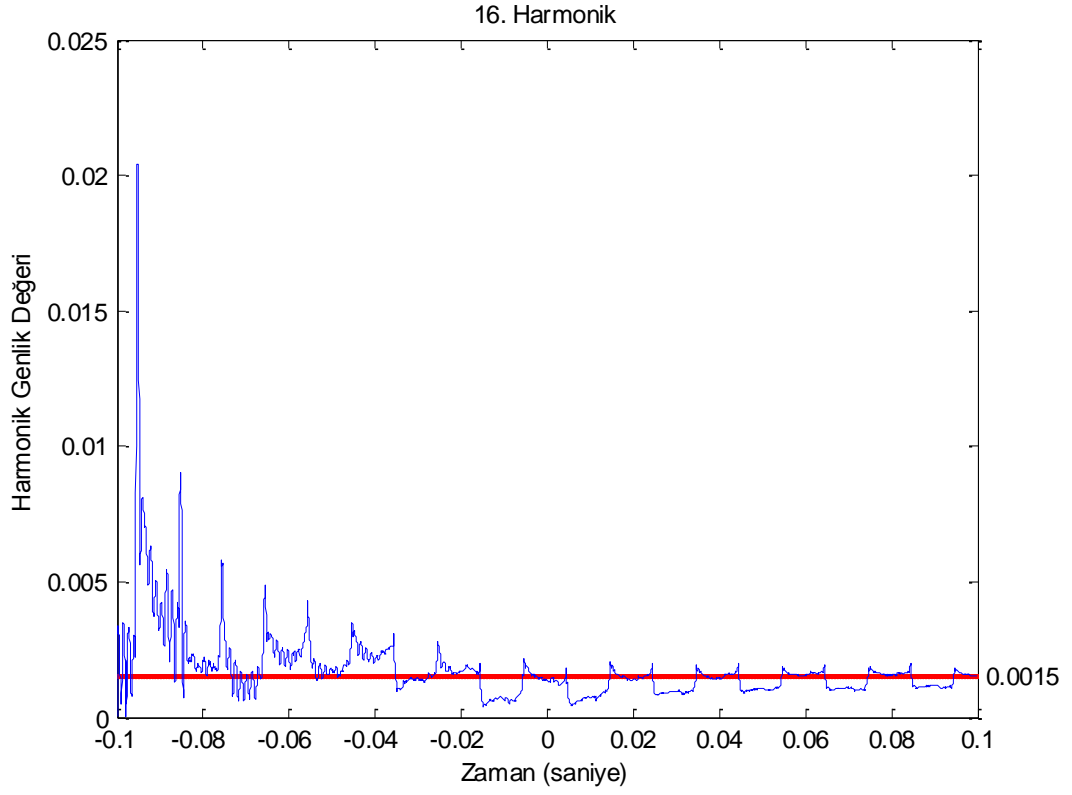
Şekil 5.38 13.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



Şekil 5.39 14.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri

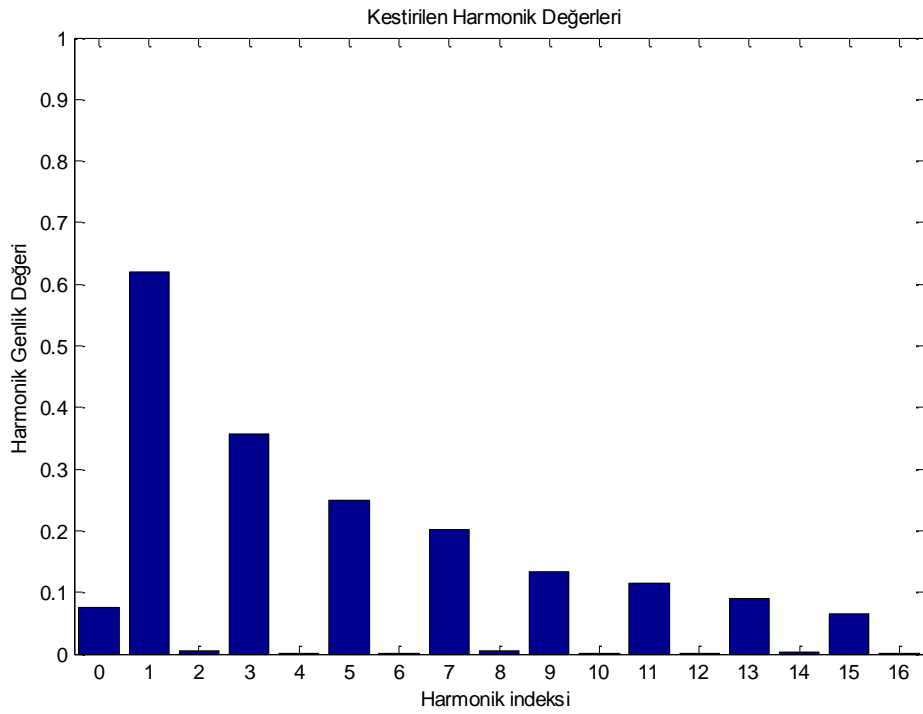


Şekil 5.40 15.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri



Şekil 5.41 16.Harmoniğin zaman içinde kestirilen değerleri

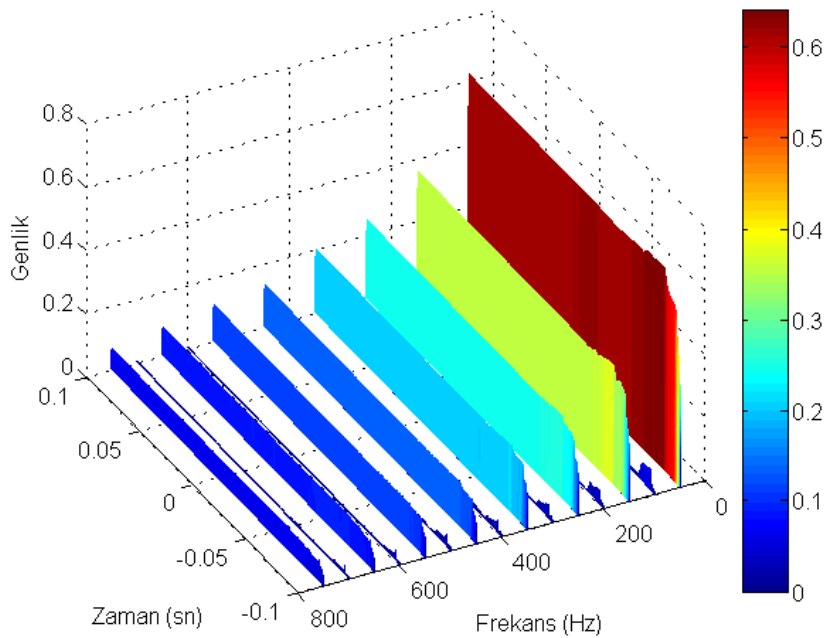
Aşağıdaki Şekil 5.42’de sistem işletimi sonucunda elde edilen harmonik genlik değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.42 Kestirilen harmonik değerleri

Çalışmada öngörülen sistem algoritması, örnekleme periyodunun altında kalan bir zaman diliminde güncelleme işlemi yapabilen herhangi bir sisteme dahil edilebilir niteliktedir. Sistemin, yaklaşık olarak 5-6 periyotluk zaman diliminde kararlı duruma geldiği görülmektedir. Bu değer, IEC 61000-4-7 [76] standardına göre belirlenen 10 periyotluk zaman dilimine karşılık gelen 0,2 saniyenin altında bulunmaktadır. Çalışmada, güncelleme işlemi için hem harmonik bileşenlerin hem de temel frekansın bir önceki değerlerinin elde bulunması gerekli ve yeterli iken bu sistemde, zaman harmonik uzayında değişimlerinin izlenebilmesi açısından önceki değerlerini de kapsayan tüm harmonik parametre değerlerinin bellekte tutulması gerekmektedir. Yapılan benzetim çalışmasında, belleği temsilen bir veri matrisine, her döngüde güncellenen yeni temel frekans ve yeni harmonik değerleri atanmaktadır. Temel frekans için alt sistemde çalışan döngü sayısı kadar, harmonikler için de ilgilenilen harmonik sayısı ile ana sistemin döngü sayısının çarpımı kadar bellek alanı kullanılmaktadır. Bu alanın bellek sığası, içerdiği sayısal veri bilgisinin kodlanma biçimine göre değişebilmektedir.

Şekil 5.43'te kestirilen harmoniklerin zaman-frekans uzayında gösterimi aşağıdaki şekilde görüntülenmektedir.



Şekil 5.43 Kestirilen harmoniklerin zaman-frekans uzayında gösterimleri

6. SONUÇ

Bu tez çalışmasında, ADALINE tabanlı algoritmalar geliştirilerek, elektrik güç sistemlerinde zamanla değişen sinyaller için temel frekans tespiti ile harmonik ve ara-harmonik bileşenlerin genlik ve faz açılarının kestirimini kapsayan çok işlevli bir sistem yapısı gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada öncelikle FADALINE yapısı kullanılarak, harmonik bileşenlerin genlik ve faz açıları kestirilmiş, daha sonra temel frekanstaki değişimleri izlemek üzere Genişletilmiş ADALINE (GADALINE) yapısı ve buna bağlı algoritmalar geliştirilmiştir.

Gerçekleştirilen bu sistem, basit ve açık yapısından dolayı başarımı arttıracak yönde, istenilen anda ve oranda gerekli müdahalelerde bulunulabilir niteliktedir.

Bu çalışmada, MATLAB yazılımı kullanılmıştır. Etkinlik ölçütü olarak da hız, doğruluk, uyarlanabilirlik, hesaplama maliyeti ve nümerik kararlılık esas alınarak tasarlanan bu sistem, benzetim ortamında çeşitli örnek sinyaller üzerinden test edilmiştir.

MATLAB programı ile benzetim ortamında elde edilen deneysel sonuçlar, paralel işlem yapma kapasitesi ile çevrimiçi kullanılabilen bu yapının, düşük bir hesaplama yükü ile akım ve gerilim dalga şekillerinin harmonik çözümlemesinde kullanışlı, hızlı, yüksek doğrulukta ve gerçek zamanlı sonuçlar verdiğini göstermektedir. Öngörülen yapı kullanılarak, tüm sistem açık bir şekilde izlenebilecek ve sistemdeki her bir parametrenin hataya bağlı olarak güncellenmesi sağlanabilecektir.

Diğer yandan sistem, harmonik ve ara harmonik bileşenlerin hangi zaman aralığında ve ne oranda etkin oldukları bilgisini sunarak, bu bileşenlerin zaman yörüngelerindeki bireysel etkilerinin üç boyutlu zaman-harmonik uzayında izlenmesi suretiyle kullanılan çözümleme yönteminin etkinliği artırılmaktadır. Bu anlamda olası yük değişimlerinden kaynaklı harmonik bileşenlerin genlik ve ilgili faz açısı değerlerindeki değişiklikler de izlenebilecek, böylelikle hangi harmoniğin

ne zaman ve ne oranda etkin olduğu anında tespit edilerek bu bileşenlerin verdiği zararlar asgariye indirilebilecektir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının temel katkısı, geliştirilen çok işlevli ve uyarlanabilir algoritmalar ile elektrik güç sistemlerindeki harmoniklerin genik ve faz açısı değerlerinin yanı sıra, temel frekas değişimlerinin de gerçek zamanlı olarak kestirilmesidir. Böylece tüm sistem parametre ve sonuçlarının ve harmonik bileşenlerin zaman yörüngelerindeki bireysel etkilerinin, üç boyutlu zaman-harmonik uzayında izlenebilmelerine olanak sağlamak suretiyle, analiz yönteminin etkinliği artırılmıştır. Diğer yandan, tezde gerçekleştirilen algoritmalar ileriki çalışmalarda daha hızlı işlemciler veya FPGA tabanlı devreler üzerinde uygulanabilir niteliktedir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] ARRILLAGA, J. and WATSON N.R., Power system harmonics, Wiley, NewYork, A.B.D., 2003.
- [2] GRADY, W.M. and SANTOSO S., Understanding power system harmonics, IEEE Power Engineering Review, vol.21, no.11, s.8–11, 2001.
- [3] KENNEDY B. W., Power quality primer, McGraw-Hill Comp., New York, 2000.
- [4] ARRILLAGA, J., WATSON, N. R.and CHEN, S., Power system quality assessment, John Wiley & Sons, West Sussex, 2000.
- [5] GIRGIS, A.A. and HAM, F.M., A quantitative study of pitfalls in FFT, IEEE Transaction on Aerospace Electron Systems, vol.16, no.4, pp. 434–439, 1980.
- [6] CHANG, Y.N., HSIEH Y.C. and MOO C.S., Truncation effects of FFT on estimation of dynamic harmonics on power system, International Conference on Power System Technology, Perth, Avustralya, pp. 1155–1160, 04-07 Aralık 2000.
- [7] MORAVEJ, Z. and ENAYATI, J., A Hybrid Least Squares-Clonal Selection based algorithm for harmonics estimation, International Transactions on Electrical Energy Systems, vol.24, no.1, pp. 1-15, 2014.
- [8] CHEN C.I. and CHEN Y.C., Comparative study of harmonic and interharmonic estimation methods for stationary and time-varying signals, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.61, no.1, pp. 397-404, 2014.
- [9] DASH, P.K., SWAIN, D.P., ROUTRAY, A. and LIEW A.C., Harmonic estimation in a power system using adaptive perceptrons, IEEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol.143, no.6, pp.565-574, 1996.
- [10] JOORABIAN, M., MORTAZAVI, S.S. and KHAYYAMI A.A., Harmonic estimation in a power system using a novel hybrid least squares–Adaline algorithm”, Electric Power Systems Research, vol.79, no.1, pp. 107–116, 2009.
- [11] FANG, C. and MU, C., An Embedded inter-harmonics estimation algorithm based on special approximate ARMA model, International Conference on Computer Science and Software Engineering, Wuhan, Çin, s.158–161, 12-14 Aralık 2008.
- [12] RODRIGUEZ, M. and TRONCOSO R., Detection and classification of single and combined power quality disturbances using Neural Networks, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.61, no.5, s. 2473-2482, Mayıs 2014.
- [13] CHANG, G.W., CHEN C. and TENG Y. F., Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection, IEEE Transactions On Industrial Electronics, vol.57, no.6, s.2171 - 2179, 2010.

- [14] DASH, P.K., NANDA, S. and BISWAL, M., Estimation of time varying signal parameters using an improved Adaline learning algorithm, AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol.68, no.2, s.115-129, Ocak 2014.
- [15] EFE, Serhat Berat, Güç sistemlerinde harmonikler ve harmoniklerin analizi, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 84s,2006.
- [16] PECHARANIN, N., MITSUI, H. and SONE, M., An application of neural network for harmonic detection in active filter, Proc. IEEE World Congr. Computational Intelligence, Int. Conf. Neural Network; 6: s.3756–3760, 1994.
- [17] LOMBARDI, M.A., Fundamentals of time and frequency, The Mechatronics Handbook, Editör: Bishop R.H., CRC Press, Florida, A.B.D.,2002.
- [18] KARAÇ, Evrim İtir, Model selection for multi-class support vector machines, Master of Science, Boğaziçi University, B.A. in Mathematics, İstanbul, 71p, 2005.
- [19] BROWN, Peter James, Computerized simulation and measurement of power system harmonics, Ph.D. Thesis, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, İstanbul, 243p, 1990.
- [20] ERGÜN, Ayşe, Güç sistemlerinde harmoniklerin incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, 137s, 1997.
- [21] ADAK, S., Enerji sistemlerinde harmonik yük akışı analizi ve simülasyonu, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul,2003.
- [22] LAUGHTON, M.A. and WARNE, D.F., Electrical engineer's reference book, STONES, J., Section H. Power Systems, 43. Power Quality, 2-9, Elsevier, 2003.
- [23] TESTA. A., AKRAM. M.F., BURCH, R., CARPINELLI, G., CHANG, G., et al, Interharmonics: Theory and Modeling, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.22, no.4, s.2335-2348, 2007.
- [24] ROSA, C., De La Francisco, Harmonics and Power Systems. CRC Press, 184s, 2006.
- [25] GÖKOZAN, Hayrettin, Endüstriyel tesislerde güç kalitesinin izlenmesi, analizi ve uygun harmonik filtre seçimi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Haziran 2011.
- [26] YEĞİN, Mustafa, Güç sistem harmonikleri analizi, Yüksek Lisans tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmit, 111s, 1996.
- [27] ŞAHİN, M., Oğuz, Y. ve TUĞCU, H. Z., Güç sistemlerinde enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin incelenmesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, vol.7,no.2, s.199-218, 2014

- [28] ACARKAN, B., Ofis donanımının harmonik etkinliğinin kestirimi ve harmonik analizi, Doktora tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 278s, 2006.
- [29] ASLANER, İlker, Güç kalitesinde harmonikler ve filtrelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 88s, 2006.
- [30] Türk Standardı, TS EN 61000-4-7, Elektromanyetik Uyumluluk(EMU)-Bölüm 4-7: Deneyler ve Ölçme Teknikleri- Güç Kaynağı Sistemlerinde ve Bunlara Bağlı Cihazlardaki Harmonik ve Ara Harmoniklerin Ölçmeleri
- [31] DUDAN, R. C., MCGRANGHTAN, M.F., SANTASO, S. and BEATY, H. W., Electrical power systems quality, McGraw-Hill Companies, 526s, 2003.
- [32] BAYSAL, Mustafa, Harmonik içeren güç sistemlerinin gerilim kararlılığının yük modellemeleri ve FACTS elemanları bakımından incelenmesi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul, 2008.
- [33] ÇOMAK, Emre, Destek vektör makineleri çoklu sınıf önerileri için çözüm önerileri, Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 51s, 2004.
- [34] HASAN, S., DASH, P. K. and SIKSHA, N., A signal processing adaptive algorithm for nonstationary power signal parameter estimation, International journal of adaptive control and signal processing, vol.27, s.166-181, 2012.
- [35] YANG, X., DAI, H. and SUN, Y., SIMO Fourier Neural Networks Research, 2003 IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems, Şangay, Çin, s.1606-1609, 12-15 Ekim 2003.
- [36] DEMİRBAŞ, Ş. ve BAYHAN, S., Güç sistemlerinde harmoniklerin gerçek zamanlı ölçüm ve analizi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol.24, no.3, s.461-468, 2009.
- [37] SCHLAR, M. G. and ARMSTRONG, R. D., Least Absolute Value and Chebychev Estimation utilizing Least Squares results, Mathematical Programming, vol.24, s.346-352, 1982.
- [38] DASH, P.K., A Fast Recursive Algorithm for the Estimation of Frequency Amplitude, and Phase of Noisy Sinusoid, IEEE transactions on industrial electronics, vol. 58, no.10, 2011.
- [39] Lİ, L., XIA, W., SHI, D. and LI, J., Frequency estimation on power system using recursive-least-squares approach, Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering, Berlin, Germany, s.11-18, 2012.
- [40] NAS, B., YSA ve DVM yöntemleri ile taşınmaz değerlendirme için bir yaklaşım geliştirme, Yüksek Lisans tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 88s, 2011.

- [41] CASTILLOA, R., RAMIREZA, J.R. and ALONSO, G., Prony's method application for BWR instabilities characterization, Nuclear Engineering and Design, vol.284, s.67-73, 2014.
- [42] HE, C. and SHU, Q., Separation and analyzing of and inter-harmonics based on single channel independent component analysis, International Transactions on Electrical Energy Systems, vol.25, s.169-179, 2013.
- [43] RAY, P. K. and SUBUDHI, B., Neuro-evolutionary approaches to power system harmonics estimation, Electrical Power and Energy Systems, vol.64,s.212-220, 2014.
- [44] BISWAS, S., CHATTERJEE, A. and GOSWAMI, S. K., An artificial bee colony-least square algorithm for solving harmonic estimation problems, ApplSoftComputing, vol.23, no.5, s.2343-2355, 2013.
- [45] PATRAJ, P. and DASH, P. K., Fast frequency and harmonic estimation in power systems using a new optimized adaptive filter, Electrical Engineering, vol.95, s.175-184, 2013.
- [46] LIU, S., An adaptive Kalman filter for dynamic estimation of harmonic signals 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power 1998; DOI:10.1109/ICHQP.1998.760120
- [47] LIN, H. C., Intelligent neural network-based fast power system harmonic detection, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol.54, no.1, s.43-52, 2007.
- [48] TARTAN, E.Ö. ve ERDEM, H., Harmonik kestirimi için en küçük kareler-farksal evrim tabanlı hibrit bir algoritma, 20th Signal Processing and Communications Applications Conference, Muğla, Türkiye, 1-4 Nisan 2012.
- [49] MISHRA, S., A hybrid least square-fuzzy bacterial foraging strategy for harmonic estimation, IEEE Trans. on Evolutionary Computation, vol.9, no.1, s. 61-73, 2005.
- [50] QIDWAI, U. and BETTAYEB, M. A., Hybrid least squares-GA-based algorithm for harmonic estimation, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.18, no.2, s.377-382, 2003. DOI: 10.1109/TPWRD.2002.807458
- [51] LU, T. Z., TANG, J.W. and WU, Q., Optimal harmonic estimation using a particle swarm optimizer, IEEE Trans. on Power Delivery, vol.23, no.2, s.1166-1174, 2008.
- [52] AL-OTHMAN, A. K. and ABDELHAMID, T. H., In multilevel inverters with non-equal DC sources using PSO. Energy Conversion and Management, vol.50, no.3, s.756-764, 2009.
- [53] STORN, R. and PRICE, K., Differential evolution: A simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces, Technical Report, 1995.

- [54] YACAMINI, R., Power system harmonics, IEEE Power Engineering Journal, Aug.1994, pp. 193-198.
- [55] MINGO, Luis, ASLANYAN, Levon, CASTELLANOS, Juan, DIAZ, Miguel and RIAZANOV Vladimir, Fourier Neural Networks: An approach with sinusoidal activation functions, International Journal "Information Theories & Applications", vol.11, no.1, s.52-55, 2004.
- [56] Robust Adaptive Fourier Neural Network Control for Unknown Nonlinear Systems (Lilong Cai - IEEE ICMA2006 Conference, Plenary Talk 7)
- [57] RUKONUZZAMAN, M., ZIN, A. M. and SHAIBON, H., An application of neural network in power system harmonic detection, IEEE World Congress on Computational Intelligence, vol.1, pp. 74-78, 4-9 May1998.
- [58] LAWRENCE, R., Using Neural Networks to Forecast Stock Market Prices, Department of Computer Science University of Manitoba, 1997.
- [59] KALOGIROU, S.A., Applications of artificial neural networks in energy systems: a review, Energy Conversion and Management, vol.40, no.10, s.1073-1087, 1999.
- [60] BAHGAT, A.B.G., HELWA, N.H., AHMAD, G.E. and EL SHENAWY, E.T., Maximum power point tracking controller for power systems using neural networks, Renewable Energy, vol.30, no.8, s.1257-1268, 2005.
- [61] HAYKIN, S., Neural Networks, Macmillan College Publishing Company, Inc.,New York, 1994.
- [62] İNAN, A., Yapay sinir ağlarının güç sistemlerinde kullanım alanları, Kaynak Elektrik, vol.119, s.104-114, 1999.
- [63] KALOGIROU, S.A., Applications of Artificial Neural-Networks for energy systems, Applied Energy, vol.67, s.17-35, 2000.
- [64] AYDIN, S., Mobil robotlarda evrimsel metotlar ile hareket planlama, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 85s, 2003.
- [65] DASH, P.K., LIEW, A.C. and RAHMAN, S., An adaptive linear combiner for on-line tracking of power system harmonics, IEEE Transactions on Power Systems, vol.11, no.4, s.1730-1735, 1996.
- [66] OCRAN, T. A., CAO, J., CAO, B. and SUN, X., Artificial Neural Network maximum power point tracker for solar electric vehicle, Tsinghua Science & Technology, vol.10, no.2, s.204-208, 2005.
- [67] SARKAR, A., CHOUDHURY, S. and SENGUPTA, R., A self-synchronized ADALINE network for online tracking of power system harmonics, Science Direct, vol.44, no.4, s.784-790, 2011.

- [68] GURNEY, K., Introduction to Neural Networks, CRC Press, New York, 234s,1997.
- [69] ARRILAGA, J., BRADLEY D. A., BODGER, P. S., Power system harmonics, Willey. New York, 1985.
- [70] SEDIKI, Hamid, BECHOUCHE, Ali, ABDESLAM, DJAFFAR, Ould and HADDAD, Salah, ADALINE approach for induction motor mechanical parameter identification, Mathematics and Computers in Simulation, vol.90, s.86-97, 2005.
- [71] MERABET, L., SAADA, S., OULD, D. A. and OMEIRIA A., A comparative study of harmonic currents extraction by simulation and implementation, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.53, s.507-514, 2013.
- [72] GERMEÇ, K.E., Fourier Yapay Sinir Ağları ile gerçek zamanlı harmonik analizi, 17th Signal Processing and Communications Applications Conference, Antalya, Türkiye, s.333-336, 9-11 Nisan 2009.
- [73] OSOWSKI, S., Neural Network for estimation of harmonic components in a power system, IEEE Proceedings-C, vol.139, no.2, pp. 129- 135, March 1992.
- [74] YANG, J. Z., YU, C. S. and LIU, C. W., A new method for power signal harmonic analysis, IEEE Transaction On Power Delivery, vol.20, no.2, 2005.
- [75] MORI, H., ITOU, K., UEMATSU, H. and TSUZUKI, S., An artificial neural- net based method for predicting power system voltage harmonics, IEEE Transactions on Power Delivery, vol.7, no.1, pp. 402-409. January 1992.
- [76] Testing and Measurement Techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto, IEC Std. 61000-4-7, 2002.