

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN
ANALİZİ VE KISA DÖNEMLİ KESTİRİMİ

Müslüm KUZU

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2023

T.C.
BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN
ANALİZİ VE KISA DÖNEMLİ KESTİRİMİ

Müslüm KUZU

DANIŞMAN
Doç. Dr. Serhat Berat EFE

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Elektronik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2023

ONAY

Müslüm KUZU tarafından hazırlanan “**Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi Problemlerinin Analizi ve Kısa Dönemli Kestirimi**” adlı tez çalışması 05/09/2023 tarihinde yapılan sınavla aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serhat Berat EFE
(Danışman)

Doç. Dr. Serhat DUMAN
(Üye)

Doç. Dr. Mehmet Sait CENGİZ
(Üye)

İmza

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun .../.../...gün ve .../... sayılı kararı ile onaylanmıştır.

Doç. Dr. Abdullah YEŞİL

Enstitü Müdürü

BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS
ETİK BEYANI

Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre hazırlamış olduğum **“Güç Sistemlerinde Enerji Kalitesi Problemlerinin Analizi ve Kısa Dönemli Kestirimi”** adlı tezimin özgün bir çalışma olduğunu, tez hazırlanırken tüm aşamalarda bilimsel etik ilkelerine uygun davrandığımı, tez kapsamında sunulan tüm verileri bilimsel etik ilkelerine uygun elde ettiğimi, tezde faydalandığım tüm eserlere atıf yaptığımı ve kaynaklar kısmında bu eserleri gösterdiğimi beyan ederim. 05/09/2023

Müslüm KUZU

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması beraberinde daha verimli sistemlerin kullanımı gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte birçok alanda; yarı iletken malzemelerin kullanılması güç sistemlerinde doğrusal olmayan karakterli yüklerin artmasına neden olmuştur.

Bu çalışmada, MATLAB/Simulink platformunda bir güç sistemi tasarlanmış, bu sistemde ortaya çıkan harmonik bozulmalar Hızlı Fourier Dönüşümü aracılığıyla tespit edilmiştir. Analiz vasıtasıyla oluşturulan veri seti, NARX sinir ağı modeli ile işlenmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinden sistemin başarımı incelenmiş ve filtreleme önerileri sunulmuştur.

Bu tez çalışması sırasında, tez konusunun belirlenmesinden başlayarak son aşamaya kadar her konuda benden yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Serhat Berat EFE' ye sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde büyük emekleri olan canım annem ve babama şükranlarımı sunarım.

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE ENERJİ KALİTESİ PROBLEMLERİNİN ANALİZİ VE KISA DÖNEMLİ KESTİRİMİ

Müslüm KUZU

Bandırma Onyeddi Eylül Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Serhat Berat EFE

Eylül 2023, 39 sayfa

Teknolojinin ilerlemesiyle beraber yüklerin çeşitlenmesi, elektrik enerjisi kalitesinin bozulmasına neden olan çeşitli teçhizatların kullanıma girmesine yol açmıştır. Elektrik enerjisinin iletilmesi ve dağıtılmasında, enerjinin kesintisiz ve kaliteli bir şekilde son tüketiciye ulaşması amaçlanmaktadır. Kaliteli enerji kavramı ile enerjinin sabit frekanslı, sabit genlikli ve sinüzoidal yapıda olduğu anlatılmaktadır. Ancak sisteme bağlı çeşitli yükler nedeniyle talep edilen formda olması çoğunlukla mümkün olmamaktadır. Doğrusal olmayan sistem elemanları, harmonik olarak tanımlanan bozulmalara ve tüketiciye düşük kaliteli enerji ulaşmasına neden olur.

Bu tez çalışmasında, elektrik güç sistemlerinde enerji kalitesi üzerinde olumsuz etkileri bulunan akım harmoniklerinin kestirimi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda öncelikle gerçek bir güç sistemini temsil edecek bir model tasarlanmıştır. Bu tasarım MATLAB/Simulink platformu kullanılarak yapılmıştır. Sistemden elde edilen harmonik verileri NARX modeli ile işlenerek kestirim yapılmış, analiz sonuçları kullanılarak çözüm önerileri sunulmuştur. Bu öneriler sayesinde, tespit edilen harmonik bozulma kademesine göre filtreleme ve düzenleme alt yapısı planlanabilecektir.

Anahtar kelimeler: Güç Sistemlerinde Harmonikler, Kısa Dönemli Kestirim, NARX Modeli.

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

ANALYSIS AND SHORT-TERM FORECASTING OF ENERGY QUALITY PROBLEMS IN POWER SYSTEMS

Müslüm KUZU

Bandırma Onyedi Eylül University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronics Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serhat Berat EFE

September 2023, 39 pages

The diversification of loads with the advancement of technology has led to the introduction of various equipment that causes deterioration in the quality of electrical energy. In the transmission and distribution of electrical energy, it is aimed that the energy reaches the end consumer in an uninterrupted and high-quality manner. The concept of quality energy means that the energy has a constant frequency, constant amplitude and sinusoidal structure. However, due to various loads connected to the system, it is often not possible to be in the requested form. Non-linear system elements cause distortions defined as harmonics and low-quality energy reaching the consumer.

In this thesis, it is aimed to forecast current harmonics which have negative effects on energy quality in electrical power systems. In this context, firstly, a model is designed to represent a real power system. This design was made using MATLAB/Simulink platform. The harmonic data obtained from the system are processed with the NARX model and the harmonics are estimated, and solution suggestions are presented using the analysis results. Thanks to these recommendations, filtering and regulation infrastructure can be planned according to the detected harmonic distortion level.

Keywords: Power System Harmonics, Short-term Estimation, NARX Model.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	I
ABSTRACT	II
ŞEKİL LİSTESİ.....	IV
TABLO LİSTESİ.....	V
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	VI
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	3
3. HARMONİKLER	9
4. YAPAY SİNİR AĞLARI	13
4.1 NARX Yapay Sinir Ağları.....	15
4.2 MATLAB/Simulink Programı.....	16
4.3 Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Kestirim.....	16
4.4 Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme	17
5. YÖNTEM VE BULGULAR	18
5.1 Çalışma Sistemi- 1.....	18
5.2 Çalışma Sistemi- 2.....	24
5.3 Çalışma Sistemi- 3.....	28
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME	33
7. KAYNAKLAR	34
ÖZGEÇMİŞ	39

ŞEKİL LİSTESİ

Sekil

Sayfa

Şekil 1. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yüklerin Dalga Şekli	2
Şekil 2. Harmonikli Gerilim Dalgası	10
Şekil 3. Doğrusal Olmayan Yük ve Güç Sistemi Modeli.....	12
Şekil 4. İleri Beslemeli YSA Blok Şeması.....	14
Şekil 5. Kapalı Çevrim NARX Sinir Ağı Modeli.....	15
Şekil 6. Doğrusal olmayan bir yükü besleyen güç sistemi	18
Şekil 7. Sistem 1 için HFD Analiz sonuçları.....	19
Şekil 8. Oluşturulan döngüde giriş ve hedef verilerinin tanımlanması.....	20
Şekil 9. NARX modelinin eğitimi.....	20
Şekil 10. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği.....	21
Şekil 11. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği.....	22
Şekil 12. Zaman serisi hatalarının histogramı	22
Şekil 13. Hata Otokorelasyon Grafiği	23
Şekil 14. Sistem 1 kestirim ve gerçek değerler grafiği	23
Şekil 15. Endüktif karakterli yükü besleyen doğrultucu güç sistemi.....	24
Şekil 16. Sistem 2 için HFD Analiz sonuçları.....	24
Şekil 17. NARX modelinin eğitimi.....	25
Şekil 18. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği.....	26
Şekil 19. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği.....	26
Şekil 20. Zaman serisi hatalarının histogramı	27
Şekil 21. Hata Otokorelasyon Grafiği	27
Şekil 22. Sistem 2 kestirim ve gerçek değerler grafiği	28
Şekil 23. RLC yükü besleyen doğrultucu güç sistemi.....	28
Şekil 24. Sistem 3 için HFD Analiz sonuçları.....	29
Şekil 25. NARX modelinin eğitimi.....	29
Şekil 26. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği.....	30
Şekil 27. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği.....	30
Şekil 28. Zaman serisi hatalarının histogramı	31
Şekil 29. Hata Otokorelasyon Grafiği	31
Şekil 30. Sistem 3 kestirim ve gerçek değerler grafiği	32

TABLO LİSTESİ

Tablo

Sayfa

Tablo 1. Harmonik Frekans Değerleri	10
Tablo 2. Tüm sistem için NARX modelinin eğitim, doğrulama ve test değerleri	32



SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Amper
V	: Gerilim
I	: Akım
Q	: Reaktif Güç
Hz	: Frekans
MW	: MegaWatt
MVAr	: MegaVoltAmper reaktif
e(t)	: Hata sapma terimi
x(t)	: Tahmin değerler
f(t)	:Gerçek değer
V(m)	: Gerilimin tepe değeri
f	:Şebeke frekansı

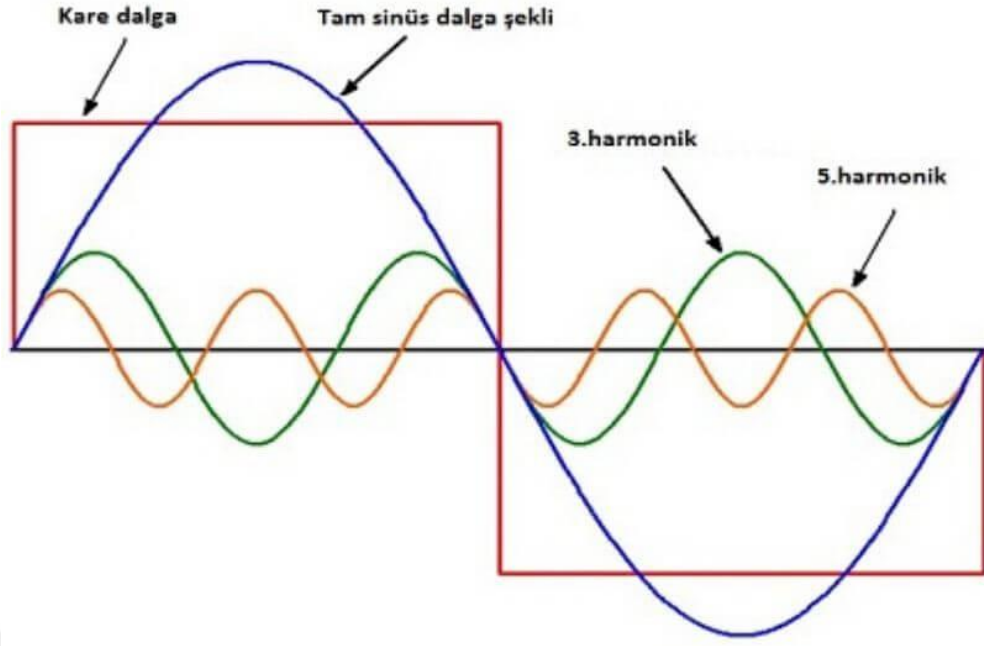
Kısaltmalar	Açıklama
HFD	: Hızlı Fourier Dönüşümü
THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
YSA	: Yapay Sinir Ağı
MSE	: Ortalama Hata Karesi
MAPE	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata Değeri
ENH	: Enerji Nakil Hattı
AG	: Alçak Gerilim
OG	: Orta Gerilim
YG	: Yüksek Gerilim
ÇYG	: Çok Yüksek Gerilim
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
TRP	: Trafo Postası

1. GİRİŞ

Günümüz dünyasında teknolojinin ilerlemesiyle güç sistemlerinde doğrusal olmayan yükler ile beraber güç elektroniğindeki elemanların ve devrelerinin çoğalması güç kalitesi problemlerin artmasına neden olmaktadır. Güç sistemlerindeki problemlerin başlıcası harmoniklerdir. Sinüzoidal dalganın bozulması ile oluşan gerilim ve akımlar harmonikli akım ve gerilimler olarak isimlendirilir. Yani harmonikler kısaca ifade edilecek olursa, doğrusal olmayan yükler ve sinüs biçiminde olmayan dalga şekilleri nedeniyle oluşan gerilim ve akım bozulmalarıdır. Harmonikler, sistemde enerji kayıplarına, arızalara, tüketiciye düşük kaliteli enerji verilmesine, ek enerji kayıplarına, ısınmalara, yalıtımın azalmasına hatta yalıtım özelliğinin tamamen yok olmasına neden olur. Bu nedenlerden dolayı harmonikler oluşmadan veya oluşuktan sonra harmoniklerin giderilmesi için gerekli tedbirlerin alınması önem arz etmektedir.

İletim sistemi, elektrik güç sisteminin olmazsa olmazıdır. Bir elektrik iletim sisteminde elektrik enerjisinin kalitesi; elektriğin devamlılığı gerilim ve frekansın belirli sınırlar içerisinde değişimi ve dalga biçiminin düzeni ile birlikte tanımlanır. Güç sistemlerinde elektrik enerjisinin güvenilir ve kaliteli bir şekilde iletilmesi için doğrusal olmayan yükler ile oluşan harmoniklerin giderilmesi için gerekli önlem alınmalıdır.

Harmoniklerin giderilmesi, güç sistemlerinde enerjinin kararlılığı için önem arz etmektedir. Elektrik enerji sistemlerinde gerilim, akım dalga şeklinin temel frekansı 50 Hz ve sinüzoidal şeklinde olmalıdır. Sistemin düzgün sinüzoidal kaynaklı olması ve doğrusal karakterli yüklerle beslenmesi gerekmektedir. Ancak bu sürekli mümkün olmamaktadır. Sisteme bağlanan güç dönüştürücüleri, ark fırınları, güç elektroniği elemanları gibi doğrusal olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüzoidal dalganın bozulmasına, harmoniklerin oluşmasına neden olmaktadır. Doğrusal olmayan yüklerin küçük değerlerde olması bile harmonik oluşumunu engelleyememektedir. Bu da sistemde enerji kayıplarına ve ısınmalara sebep olmakta, sistemdeki enerjinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Şekil 1’de doğrusal ve doğrusal olmayan yüklerin dalga şekli görülmektedir.



Şekil 1. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yüklerin Dalga Şekli

Günümüzün önemli bir alanı olarak ortaya çıkan enerji kavramı ve enerjinin daha verimli kullanımı, enerji üretimi ve iletimi açısından oldukça önemlidir. Harmonikler elektriksel anlamda bozulmayı ifade etmektedir. Toplam Harmonik Distorsiyon (THD), dalga şekillindeki harmonik bozulmayı anlatmakta kullanılan bir tanımdır ve belirtilen sınırı aşması elektriksel olumsuzluğa neden olmaktadır. Örneğin, akım harmoniklerinin yüksek olması kabloların ısınmasına, zedelenmesine ve zarar görmesine neden olmaktadır. Kapasitörlerde aşırı ısınmasına ve yalıtılan kısmının delinmesine neden olmaktadır. Elektrik şebekesinde enerji kayıplarının artmasına, nötr iletkeninde aşırı ısınma ve yangın çıkma ihtimaline sebebiyet vermektedir. Bu kapsamda, harmoniklerin giderilmesi için, güç sistemlerinde harmoniklerin analiz edilmesi önemlidir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Elektrik enerji kalitesi üzerine yapılan çalışmalar literatürde oldukça geniş bir yelpazede yer bulmaktadır. Bu çalışmalar temelde harmoniklerin filtrelenmesi üzerine yoğunlaşsa da özellikle son yıllarda akıllı sistemlerin gelişme göstermesi ile yapay zekâ uygulamalarının işleme katılmasını arttırmıştır.

Hussam ve ekibi, Güç Sistemlerinde Harmonik Kestirim yöntemlerinin karşılaştırılması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada harmoniklerin yok edilmesi esnasında oluşan zaman gecikmesinin tahmin edilmesi için En Küçük Ortalama Kare (LMS) ile En Küçük Kare (RLS) karşılaştırılmış ve bu algoritmaları kullanarak MSE (Ortalama Karesel Hata) sonuçları elde edilmiştir. Bu verilerden yola çıkarak RLS ve NLMS algoritmalarının performansının LMS den daha yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır [1].

Bir diğer çalışmada, Pajaron vd., akıllı sayaç verilerini kullanarak şebekelerde gerilim harmonik bozulmasını tahmin etmeyi amaçlayan bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, akıllı sayaçlardan elde ettikleri veriler kullanılarak alçak gerilim baralarındaki gerilimin THD değerini tahmin eden bir yöntem önermişlerdir. Çalışmanın sonucunda THD kestiriminde, otoregresif ve ileri beslemeli sinir ağlarının %98.2 performans sergilediği gözlemlenmiştir [2].

Başka bir çalışmada araştırmacılar, NARX sinir ağı kullanılarak doğrusal olmayan yüklerin harmonik akıma katkısını tahmini etmek için çalışmışlardır. Bu çalışmada NARX ağını test edebilmek için doğrusal olmayan yüklü indüksiyon motor kullanılmıştır. THD sonuçlarına bakarak NARX modelinin yük akım harmoniğinin kestiriminde başarılı bir sonuç verdiği ve güvenilirlik sağlandığı sonucuna varılmıştır [3].

Eslami ve ekibi yaptıkları çalışmada, harmonik analizinde yapay zekâ (AI) uygulamalarının etkisini incelemişlerdir. Çalışmada öncelikle spektrum analizi ve dalga biçiminin tahmin edilmesi, harmoniklere odaklanan AI ve PQ araştırma grafiği, harmonik kaynak katkısı, harmonik veri kümeleme gibi görevler belirlenmiş, daha sonra harmonik analizi için YSA, nöro-bulanık ve hibrit teknikler gibi yapay zekâ yöntemleri araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, YSA tabanlı yöntemlerin derin öğrenme ve esneklik gibi özelliklerinden dolayı daha çok tercih edildiği sonucuna varılmıştır [4].

Jamali ve araştırmacılar, harmoniklerin iletim kablolarında oluşturdukları aşırı ısınmayı engellemek için termal analiz yapmayı hedeflemişlerdir. Bu hedef doğrultusunda ortam koşullarını dikkate alarak kablo tünellerinin hava kanallarının havayla zorlamalı olacak şekilde havalandırılması durumundaki performansını incelemişler. Bu araştırmadan yola çıkarak

harmonik tabanlı termal analizi yöntemi uygulanarak gerekli olan soğutma, kabloların aşırı akım taşıma kapasitesi ve maksimum sıcaklığı hakkında farklı kararlar alınabileceği sonucuna varmışlardır [5].

Cavallini ekibiyle beraber yaptığı elektrik şebekelerindeki harmonik seviyelerinin istatistiksel indekslerle değerlendirilmesi çalışmasında, AA şebekelerde harmonik kirliliğin düzeyini değerlendirip kestirimini kolaylaştırmak ve parametrelerin tanımlanması için maksimum olabilirlik algoritmalarının uygulanması gerektiğini buna bağlı olarak belirli parametrelerden yola çıkıp denklemlerin elde edilmesini sağlamışlardır [6].

Filippo çalışma arkadaşlarıyla yaptığı bir çalışmada, deniz seviyesindeki değişimin kestirimi için YSA tabanlı HFD analizinden yola çıkmış ve bu kapsamda su seviyesini tahmin etmek için girdi olarak meteorolojik verilerden yararlanmışlardır. Çalışma sonucunda YSA algoritmasının yüksek kestirim performansına sahip olduğu gözlenmiştir [7].

Rahmani ve arkadaşlarının dalgacık analizi ve NARX kullanarak dağıtım şebekelerinde harmonik monitörlerinin azaltılması ile ilgili yaptığı çalışmada, güç sistemlerinde enerji verimliliğini arttırmak ve güç sistemleriyle ilgili arızaları minimuma indirmek için dışsal girdi tabanlı, gerilim harmoniğine duyarlı yükteki gerilim bozulmalarını belirlemek için harmonik monitörü olarak isimlendirilen bir algoritma önermiştir. Sonuç olarak bara dağıtım sisteminden alınan veriler ile yapılan kestirim sonucunun başarılı olduğu görülmüştür [8].

Yang Han ve arkadaşları tarafından yapılan makalede modern güç sistemlerindeki yaygın harmonik kaynak modelleri hakkında kapsamlı bir inceleme sunulmuş ve bu kaynakların devre mekanizmaları, matematiksel modelleri ve operasyonel süreçleri hakkında bilgi verilmiştir. Bu çalışma, modern güç sistemlerindeki harmonik bozulma anlayışını geliştirmek ve bunun güç kalitesi ve sistem kararlılığı üzerindeki olumsuz etkilerini azaltmak için yöntemler geliştirmek amacıyla çözüm önerileri sunmaktadır [9].

Abolfathi ve ekibi, harmonik koşullarda transformatörler için optimal pasif filtrelerin tasarlanması hakkında bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada harmonikleri önleme ve azaltma yöntemi olarak C tipi pasif filtreler kullanmayı önermişlerdir. Bu kapsamda, C-tipi pasif filtreler ile harmonik ve doygunluğun etkileri dikkate alınarak dağıtım trafosu modeli analiz edilmiştir. Model parametrelerinin optimizasyonunda farklı optimizasyon yöntemlerinin performansları birbiriyle karşılaştırılmıştır [10].

Ibarra ve ekibi yaptığı çalışmada, güç sistemindeki doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu sorunları araştırmak için harmonik analizi yapılmış olup, elde ettikleri verilere dayanarak 5. ve 7. harmonikler için filtrelemeler kullanılması gerektiği sonucuna varmışlardır [11].

Gouda ve Dein, yeni bir algoritma kullanarak yer altı alçak gerilim kabloları üzerindeki harmonik etkilerini araştırmışlardır. Önerilen algoritma ile harmoniklerin her faz için ayrı ele alınması ve kablo iletkenlerindeki ısınmanın gözlemlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır [12].

Busatto ve çalışma arkadaşları, alçak gerilim tesisatlarında yaygın olarak kullanılan model ile harmonik bozulma ölçümleri arasındaki sapmalar tespit etmek için birtakım çalışmalar yapmışlardır. Bu makale çalışmasında, yaygın olarak kullanılan modelden elde edilen sonuçlar ile düşük gerilimli bir kurulumda ölçülen gerçek harmonik bozulma arasındaki farkı ele almaktadır. Düşük harmonik etkilerinin daha çok harmonik faz açısı üzerinde olduğu sonucuna varmışlardır. Çalışma sonucunda %99 değerinde bir başarıya ulaşılmıştır [13].

Singh arkadaşlarıyla beraber güç sistemindeki harmonikleri tahmin etmek için yeni bir algoritma önermişlerdir. Önerilen bu algoritma ile başka bir algoritma karşılaştırılarak doğruluk ve hesaplama sonuçlarına bakmış, LET-KF algoritmasının daha iyi performansa sahip olduğunu doğrulamışlardır [14].

Skjong, Johansen ve Molinas, güç sistemlerinde harmonik azaltma için gerçek zamanlı model tahmine dayalı bir kontrol hiyerarşisi önermektedir. Önerilen sistem mimarisi, kaynak kullanımını en aza indirmek amacıyla hem döngüsel hem de olay tabanlı iş parçacıkları kullanır. Sonuçlar, harmonik azaltma uygulamasının gerçek zamanlı gereksinimleri kabul edilebilir bir seviyede olduğunu göstermektedir [15].

Taheri ve ekibi, harmonik koşullar altında transformatör yükleme kapasitesinin modellenmesi ve MATLAB benzetimi ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu makalede, transformatörün bileşenleri üzerindeki alan dağılımının belirlenmesi için harmonik koşullar altında gösterdiği performans analiz edilmiştir [16].

Kritsanasuwan ve arkadaşları pasif filtreler kullanılarak güç sistemlerinde harmoniklerin azaltılması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Bu araştırmada, gerilim ve akımın THD değerleri hesaplanarak trafo merkezindeki harmonik etkileri incelenmiştir. Filtre eğrisinin empedansına göre farklı özelliklerinin olduğu sonucuna varılmıştır [17].

Pandi ve arkadaşları birlikte yaptıkları araştırmada harmonik limitleri dikkate alınarak ve ayrıştırılmış harmonik güç akışı yöntemi kullanarak harmonik kestirimi yapılmıştır. Önerilen formülasyon bara ve radyal dağıtım sistemlerinde analiz edilmiş, dağıtık üretim kapasitesinin sırasıyla %66,67 ve %33,53'lük maksimum seviyesinin elde edilebileceği sonucuna ulaşılmıştır [18].

Geth ve Acker yaptığı araştırma makalesinde, transformatörlerin etki ettikleri harmonikleri ayrıntılı bir şekilde ele almışlardır. Sonuç olarak, aktif filtrelerin endüstriyel ağlarda harmonikleri kontrol altına almak için önemli bir teknoloji olduğu tespit edilmiştir [19].

Rubino ve ekibi, güç sistemindeki harmonik kayıpların modellenmesi ve araştırması ile ilgili bir çalışma yapmışlardır. Çalışma ile bir temel harmoniğin tam katı olması gerekmeyen frekansları çözmek için tekdüze olmayan zaman örnekleme için bir algoritma önermiştir. Bu yöntem, yarı-periyodik giriş çalışma koşullarına sahip bir süpersonik organik rankine döngüsü statorunun kararsız analizine uygulanarak, zamana duyarlı benzetimlere kıyasla yaklaşık bir derece daha düşük hesaplama maliyetini sağlamaktadır. Harmonik kayıplar baz alınarak yapılan değişikliklerde, toplam üretim geliri ile tüketim maliyeti arasındaki açığın arttığını ve dolayısıyla iletim tarafında genişleme olduğu sonucuna varılmıştır [20].

Duran ve ekibi yaptıkları değişkenlik gösteren üçüncü harmonik etkili asenkron motorun kararlılık durumunu gösteren bir çalışmada, sabit üçüncü harmonik etkili şemalarının aynı sağlamlığı gösteren ancak hafif yüklerde daha düşük yüzdelere izin veren bir değişken gösteren üçüncü harmonik kontrol şemasının kullanılmasını tavsiye etmektedirler. Sonuç olarak yaptıkları benzetimden ve analizden önerilen sürücünün diğerlerine kıyasla daha avantajlı olduğu değerlendirilmiştir [21].

Yazdi ve Hosseinian beraber yaptıkları çalışmada şebekedeki güç kalitesini iyileştirmek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Burada amaç, doğrusal kontrol sistemleri kullanılarak hassas kontrol çıkışının sağlanmasıdır. Yapılan çözüm önerilerinden biri olan seri trafonun kontrolü için FCS-MPC platformunun kullanılmasının, PCC’de yeteri kadar gerilim ve akım kalitesini sağladığını göstermiştir [22].

Huang ve Jiang, farklı yük kategorilerinin güç kalitesi üzerindeki etkisini değerlendirmek için güç kalitesi bozukluğunun şiddeti, gerilim dengesizliği yüzdeleri, harmonik bozulma oranları saha ölçümlerine dayalı verilerden yararlanarak tanımlanan güç kalitesi indeksinin hesaplanması üzerinde çalışmışlardır [23].

Sasidharan ve ekibi , yaptıkları çalışmayla 220 V, 50 Hz sistem üzerinde çalışan tipik bir ev aletleri setinin yük özelliklerine dayalı olarak yeni ve verimli bir hibrit AC/DC güneş enerjisiyle çalışan şebeke sistemi modeli önerilmiştir [24].

Racitti ekibiyle beraber yaptıkları çalışmada, LED lambanın eşdeğer bir elektrik devresini önermektedir. Bu devre yapısı, şebeke gerilimi değişkenliği durumunda akım dalga biçimini taklit etmeyi sağlamaktadır. Yapılan benzetimde, akım dalga biçimlerinin şebekedeki bozuk gerilimlerde de düzgün olduğu sonucuna varılmıştır [25].

Mahar ve ekibi yaptıkları bir araştırma çalışmasında güç kalitesindeki iyileştirme için özel bir güç cihazı olan DVR'yi önermektedir. Çalışma sonucunda kontrol devresi için DVR 'nin önemli olduğu ve yük noktasında sabit bir gerilimi ve büyüklüğünü muhafaza ettiğini gözlemlemişlerdir [26].

Ramirez ve ekibi, güç sistemindeki durum tahminindeki belirsizliklerin sebep olduğu rastgeleliği değerlendirmek için kullanılan deterministik olmayan algoritmaların bir incelenmesini araştırmışlardır. Kullanılan tahmin algoritmaları modelleme yöntemine bağlı olarak iletim sistemi ve dağıtım sistemleri için farklı bir statik ve dinamik deterministik olmayan tahmin durumunu elde ettiği sonucuna varılmıştır [27].

Elsayed, arkadaşlarıyla beraber DC mikro şebekelerdeki gerçek zamanlı bir üçüncül kontrol algoritması geliştirilmeyi ve uygulamayı amaçlamışlardır. Mikroşebekenin, ana şebekenin çalışmasını sağlamak için nasıl kullanılması gerektiğine dair önemli noktaların üzerinde durmuşlardır [28].

Qader yaptığı çalışmada güç kalitesinin düzeltilmesi için yeni bir denetleyici yöntem tasarlamıştır. STATCOM tabanlı yöntemden yararlanarak gerilim düşümleri ve harmonik gibi sorunları iyileştirmeye gidilmiştir. Sonuç olarak UPFC tabanlı kontrolör sistemlerinin yük akışını, gerilim düşümlerini ve harmonikleri ortadan kaldıracabileceği %95.5 oranla tespit edilmiştir [29].

Debouza ve çalışma arkadaşları, esnek sınırlara sahip mikro şebekeler üzerinde bir araştırma yapmışlardır. Makalede, mikro şebekelerin kullanılmasının önemli özellikleri ve potansiyelleri üzerinde daha çok durulmuştur. Makale, mikro şebekeler ile ilgili deneysel doğrulamalar, kaynakların ve öğelerinin çeşitliliği, kaynak optimizasyonu, test senaryoları, gelişmiş kontrol ve tasarım yöntemleri ve yardımcı hizmetler üzerinde daha fazla araştırma yapmaya yöneltilmektedir [30].

Muzhikyan ve ekibi güç sistemlerindeki dengesizlikleri iyileştirmek için bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada enerji depolama kaynaklarının ve yük takip rezervlerinin farklı çalışma performanslarını elde ettiklerini ve daha başarılı sonuçlar elde ettiğini göstermiştir [31].

Dong ve Sun zaman serisi ve kısa süreli bellek ağı kullanarak havai iletken hatlarda deşarj tespiti yapmak için bir çalışma yapmışlardır. Havai hatlı iletkenlerde kısmi deşarj tespiti için kapsamlı bir model tanıma yöntemi kullanılmıştır. Sonuç olarak önerilen örüntü tanıma yöntemi, kısmi deşarj tespiti için geleneksel sınıflandırma yöntemlerine göre üstün performans göstermiştir [32].

Teklic ve ekibi güç iletim sistemlerinde gerilim bozulmalarını tahmin etmek için farklı bir model çalışmışlardır. Sunulan model elektrik arkının doğrusal olmayan davranışını dikkate

almıştır. Elde ettikleri sonuç, önerilen modelin güç iletim sistemlerinde tahmin için kullanılabileceğini %90'lık bir oranla doğrulamıştır [33].

Swain ve Mala, akıllı dağıtım şebekelerinde yeni bir elektriksel yakınlık indeksi kullanarak gerilim kontrol yöntemli bir çalışma önermişlerdir. Bu yöntemde generatör barasının ve yük barasının elektriksel bağlantılarına göre gerilim bağımlılığına değinilmiştir. Çalışmaya göre, kontrol ünitelerinin seçiminde elektriksel yakınlığa bağlı olarak kontrol stratejisi geliştirilebilir ve daha hızlı bir sonuca varılabilir [34].

Jacobsen güç kalitesini iyileştirerek verimin artırılması için enerji sisteminin geçişi ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Elektrik enerjisinin arzı, iletimi ve kullanımının devamlılığı enerji sektörünün düzenlenmesi ve sürdürülebilirliğin etkileme gücüne ve sorumluluğuna sahip olduğu sonucuna varılmıştır [35].

Haben ve ekibi alçak gerilim yükünün tahmini için yöntem, uygulamalar ve öneriler ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Araştırmada, alçak gerilim yük tahmini bağlamında AI ve ML yöntemlerinin uygulanabilirliği için farklı yöntemler geliştirilebilir sonucuna varılmıştır [36].

Vagnoni ve arkadaşları elektrik güç sistemindeki gerilim regülasyonun davranışı hakkında bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, Francis türbini ile donatılmış hidroelektrik ünitelerde, sürtünme kayıplarını azaltmak için akış borusunun altındaki kuyruk suyu seviyesini azaltmak için çekiş borusuna basınçlı hava enjekte edilmiştir. Rotor ve stator etkileşimleri, üretim esnasında analiz edilip, RSI ile karşılaştırılmıştır [37].

Melo ve Mingorança dağıtım sistemlerinde harmonik analizi için yeni bir yöntem üzerinde çalışmışlardır. Çalışmada, üç fazlı akım enjeksiyon yönteminin denklemleri vasıtasıyla güç dağıtım sistemlerinde harmonik bozulmalarını tespit etmeyi amaçlamışlardır. Kullanılan yöntem harmonik gerilimleri tespit etmede Monte Carlo sistemiyle karşılaştırılmış ve başarılı sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [38].

Sanço arkadaşlarıyla beraber güç sistemlerindeki harmonik değişkenliğin güç kalitesine etkisinin istatistiksel kontrolü ve veri istatistiklerine bağlı olarak değerlendirilmesi amaçlı bir çalışma yapmışlardır. Kontrol çizelgeleri ve rasyonel alt grup kavramının, harmonikleri ortadan kaldırmada başarıyla kullanılabileceği sonucuna varılmıştır [39].

Becirovic ve ekibi, güç sisteminde harmonik durum tahmini yöntemine dayalı bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, güç sistemlerinde harmonik durum tahmini için yeni bir algoritma sunulmaktadır. Kullanılan algoritma, güç sisteminin izlenmeyen kısımdaki gerilim harmoniklerin RMS ve açısı değerlerini tahmin etmiştir. Çalışmada harmonik gerilim hatası için % 1.2 den daha düşük bir sonuç elde edilmiştir [40].

3. HARMONİKLER

Harmonikler, alternatif akım (AA) güç sistemlerinde belirli bir bölgeye bağlı olarak 50 Hz veya 60 Hz olan temel frekansın katları olan frekansta periyodik bir dalga formunun sinüzoidal bileşenleridir. Bu tür dalgaların sisteme girmesi, temel dalga şeklinin değişmesine neden olarak enerji kalitesi sorunlarına yol açabilir. Güç talebi ve güç sistemi harmonikleri, elektrik güç sistemleri bağlamında, özellikle güç kalitesi ve sistem performansı ile yakından ilişkilidir. Harmonik analizi, genellikle Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) kullanılarak gerçekleştirilir. Harmonik bozulma seviyesi ise toplam harmonik distorsiyon (THD) ile ifade edilir.

Elektrik şebekesinde gerilim ve akım dalgası sinüs şeklindedir. Gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüs şeklinden farklı bir duruma gelmesi halinde, dalga yapısının harmonik içermeye başladığı sonucuna varılır. Harmonik kavramı, Fourier teoremi kapsamında değerlendirilmektedir. Teoreme göre harmonik kavramı, periyodik yapıdaki dalga şeklinin temel frekansındaki bileşen ve temel bileşenin katlarındaki frekanslardaki bileşenlerin toplamı olarak ifade edilmektedir. Harmonikler, bileşenleri bozulmuş olan dalga biçimleridir. Elektrik şebekelerinde harmonikler çarpık gerilim veya akım dalga formunun yüksek frekans bileşenleridir.

Harmonik kaynaklarına örnek olarak doğrultucular ve eviriciler başta olmak üzere güç elektroniği uygulamalarındaki hemen hemen tüm devre yapıları, bilgisayarlar, transformatörler, kaynak makinaları gösterilebilir. Harmoniklerden kaynaklanan arızalar ise aşağıda verildiği gibi özetlenebilir:

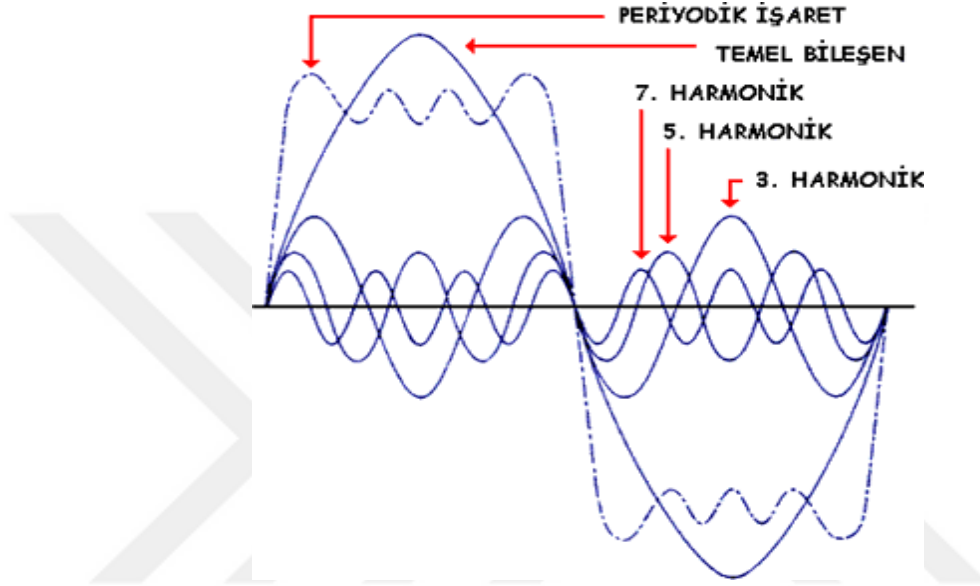
- Elektromekanik cihazlarda ve kablolarda ısınmalar
- Makinalarda mekanik titreşimler
- Elektronik kart arızaları
- Kesici ve şalterlerde açmalar
- Enerji kayıpları

Sinüzoidal gerilim temelli güç sistemlerinde, bazı lineer olmayan yükler, zaman içinde sinüzoidal dalga şeklinde olmayan akımları çekerler. Bu akımlar, ağıdaki seri empedanslar üzerinde sinüzoidal olmayan gerilim kayıplarına neden olur. Sonuç olarak, sinüzoidal kaynak gerilimi ile ağıdaki sinüzoidal olmayan gerilim kayıpları arasındaki fark nedeniyle alıcı uçlardaki gerilim de sinüzoidal olmayacaktır. [41].

Elektrik enerjisinin kaliteli olması, gerilimdeki genlik ve frekansının sabit değerlerde olması ve gerilim dalga şeklinin sinüzoidal olması şeklinde ifade edilir. 50 Hz temel frekans için bazı harmonik değerleri Tablo 1’de, harmonikli gerilim dalgası ise Şekil 2’de verilmiştir.

Tablo 1. Harmonik Frekans Değerleri

Temel frekans	50Hz
3.harmonik	150Hz
5.harmonik	250Hz
7.harmonik	350Hz



Şekil 2. Harmonikli Gerilim Dalgası

Şebekede bulunabilecek değişik frekans ve genlikli akım ve gerilimler, elektriksel kirliliği ifade etmektedir. Elektrik tesislerinin, elektrik güç sisteminin ve elektrikle çalışan tüm cihazların düzgün, verimli ve sorunsuz çalışmasını sağlamak için 50 Hz sinüzoidal dalga formu şeklinde normal gerilim üretmesi, iletmesi ve dağıtması gerekir. Bununla birlikte, sistemdeki bileşenlerden veya bağlı tüketicilerden kaynaklanan bazı bozukluklar, harmonikler olarak bilinen ve 50 Hz'lik temel frekanstaki saf sinüzoidal dalga biçiminden sapan, genellikle bu frekansın tam sayı katlarında meydana gelen istenmeyen dalga biçimlerine yol açabilir [42].

Harmoniklerin seviyesini belirli seviyelerde tutmak amacıyla bazı standart kuruluşlar tarafından bazı tedbirler, kısıtlamalar getirilmiştir. Harmonik büyüklüklerin sınırlamasını amaçlayan standartlarda çok kullanılan THD, gerilim ve akım için sırasıyla

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} (V_n)^2}{V_1^2}} \quad (1)$$

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

formülleri ile verilmektedir.

THD, ifadesinden de anlaşılacağı gibi harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranlamasıdır. THD özellikle yüzde ile ifade edilir. IEC standartlarına göre THD üst sınırı gerilimler için %3, akımlar için ise %6'dır[43].

Gerilim ve akımda oluşan harmonik bozunumlarının kaynağı doğrusal olmayan yüklerdir. Bu yükler arasında motor yol vericileri, motor sürücüleri, kişisel bilgisayarlar, elektronik aydınlatma sistemleri ve kaynak makineleri gösterilir. Ayrıca tüm güç elektroniği dönüştürücüleri şebekedeki harmonik bozunumu artırıcı etkisi vardır.

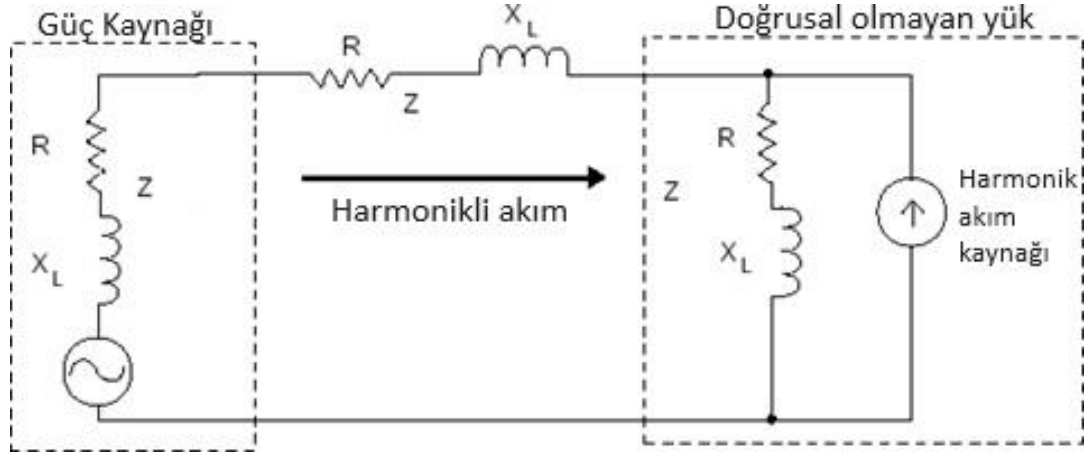
Akım harmoniğinin matematiksel gösterimi:

$$I_H = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2} \quad (3)$$

Toplam harmonik bozunumun matematiksel olarak yüzdelik ifadesi

$$THD (\%) = \frac{I_H}{I_F} \cdot 100 \text{ 'dür.} \quad (4)$$

Zamana bağlı olarak değişen ve sinüzoidal olmayan bu gerilimler harmonikli gerilimler olarak isimlendirilir. Kimi tüketiciler ve bağlantı elemanlarının doğrusal olmayan yük karakteristikleri dolayısıyla şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çekmesiyle oluşan akım ve gerilimler harmonikleri ifade eder. Kaynak kısmında var olan empedans, doğrusal olmayan yük tarafındaki harmonik akım ve gerilimlerinin dağıtım sistemine geri dönmesinde etkindir [44]. Doğrusal olmayan bir yükü beslen güç sistemi Şekil 3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.Doğrusal Olmayan Yük ve Güç Sistemi Modeli.

Harmoniklerin güç sistemleri ve güç talebi üzerindeki etkisini azaltmak için çeşitli tedbirler alınabilir. Harmonik akımlarını azaltmak için harmonik filtrelerin kurulması, güç faktörünü iyileştirmek amacıyla güç faktörü düzeltme kapasitörlerinin kullanılması, daha düşük harmonik emisyonlu ekipmanların seçilmesi ve tasarlanması, harmoniklerin etkisini değerlendirmek ve uygun düzeltici önlemleri almak amacıyla harmonik çalışmaları ve izleme yapmak gibi önlemler örnek olarak verilebilir.

4. YAPAY SİNİR AĞLARI

Yapay sinir ağı (YSA) insan beyni gibi bilgi işleyen bir sistemdir. YSA, öğrenme yönteminden yola çıkarak yeni bilgiler türetebilme, yeni bilgileri oluşturabilme ve yeniden keşfedebilme gibi kabiliyetlere sahip ve herhangi bir destek almadan amacı gerçekleştirmek maksadıyla geliştirilen bilgisayar sistemleridir. Başka bir ifadeyle YSA, biyolojik sinir ağlarına özenen bilgisayar programlarıdır. Biyolojik sinir hücrelerinin birbirleri arasındaki bağın dijital modellenmesidir. YSA'nın en temel özelliklerinden biri de bilgiyi bellekte saklamaktır. YSA'lar, bir insanın düşünme ve gözlemlemeye yönelik becerilene bağlı olarak problemlere çözüm üretmektedir. Genel olarak bir YSA modeli, n tane katman, her bir katmanda biyolojik nöron hücrelerine benzer bir görev yerine getiren ve farklı sayılarda olabilen hesaplama elemanları, katmanlardan itibaren hesaplama elemanları arasında sıkı bağlantılar oluşur. Farklı yapılan YSA modellerinde kullanılan hesaplama elemanları, yapay sinir hücresi, düğüm, birim veya işlem elemanı olarak adlandırılır [44].

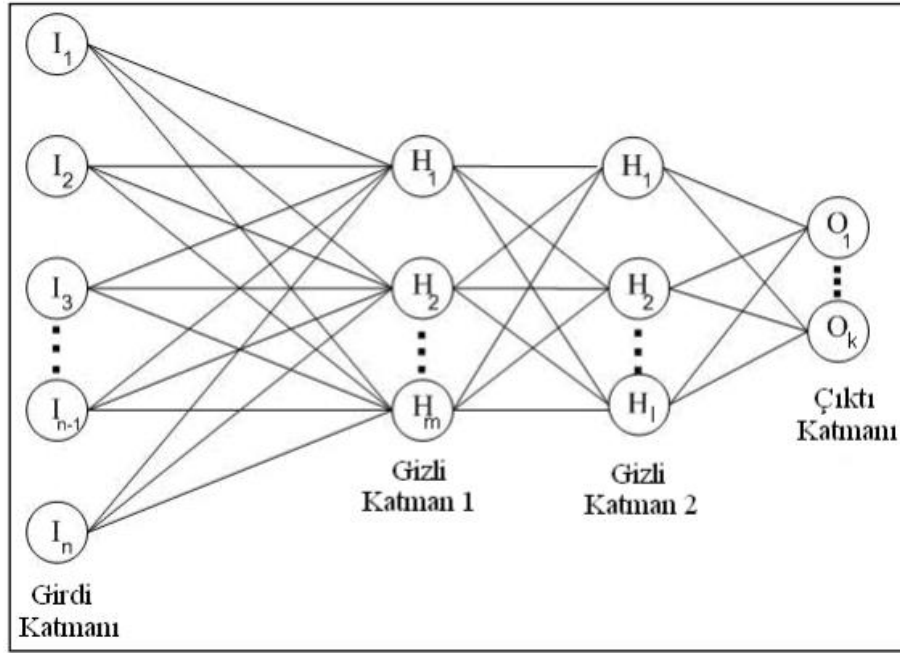
YSA'lar genel olarak üç katmandan oluşur. Bunlar giriş katmanı, ara katman ve çıkış katmanıdır. YSA'nın bir işlem birimi, bir girdiyi bir ağırlık kümesi ile ağırlıklandırıp, doğrusal olmayan bir şekilde dönüşümünü sağlar ve bir çıktı değeri oluşturur.

Giriş katmanı: Bu katmanlar, girdiler olan verilerdir. Nöronlar dış dünyadan bilgi alıp orta katmana aktarır. Bu girdilerden gelen veriler biyolojik sinir hücrelerindeki gibi toplanmak üzere nöron çekirdeğine aktarılır.

Gizli katman: Bu katmanda ağırlıklar, toplama fonksiyonu ve aktivasyon fonksiyonu mevcuttur. Ağırlıklar, girdilerin sinir hücresi üzerindeki etkisini belirleyen katsayılardır. Toplama fonksiyonu, yapay sinir hücresine gelen net girdileri hesaplama yapar. Aktivasyon fonksiyonu ise hücreye gelen net girdiyi hesaplayarak hücrenin bu girdiye karşılık üreteceği çıktıyı analiz eder. Gizli katmanlar, diğer nöronlarla bağlantılı olarak çok sayıda nöron bulundurur. Bir ağda, giriş ve çıkış bir katmandan oluşurken, gizli katmanda birden fazla katman bulunur.

Çıkış katmanı: Bu katmandaki nöronlar, gizli katmandan gelen bilgileri işler ve giriş katmanından sunulan örnek için ağın üretmesi gereken çıktıyı verir ve üretilen çıktıyı dış dünyaya gönderir. Aktivasyon fonksiyonundan gelen değer çıktı değeridir. Her hücrenin birden fazla girdi olmasına rağmen tek çıktısı olmaktadır.

Belirtilen katmanların da gösterildiği ileri beslemeli bir YSA'nın genel blok şeması Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. İleri Beslemeli YSA Blok Şeması

YSA'nın en önemli özellikleri farklı problemlere aktarılabilirliği, doğrusal olmayan yapıları modellemesi, paralel dağılmış yapısı, öğrenme ve genelleme yapma kabiliyeti, hata toleransına sahip olması olarak sıralanabilir. YSA'nın bu özelliklere sahip olması işletme, finans, mühendislik, tıp gibi farklı dallarda tercih edilmesinin sebepleridir [45].

Tek katmanlı YSA'lar, yalnızca girdi ve çıktı katmanlarından oluşmaktadır. Eğitilebilecek bir yapay sinir hücresinden oluşur. Çok katmanlı yapay sinir ağı günümüzde en yaygın kullanılan modeldir. Üç kısımdan oluşur: Girdi, gizli ve çıkış kısımları. Girdi kısmında data lar sunulur ve veriler alınarak gizli katmana yönlendirilir. Gizli kısım, girdi katmanından verilerden her biri işlenir. Tek katmandan bütün problemlere çözüm üretmek mümkündür. Bazı durumlarda birden fazla gizli katman kullanılır. Çıkış bölümünde ise işlenen bilgiler derlenerek çıktı olarak dışarı iletilir.

YSA, geleneksel yöntemlerin dışında daha etkili, alabileceğinden daha genel ve daha işlevsel etkiye sahiptir. Sıradan bir tahmin modeli, girdiler ile çıktılar arasındaki bağlantıyı bilinen veya bilinmeyen bir ilişki olarak tanımlar. Genellikle geleneksel tahmin modelleri, gerçek sistemin karışıklığından ötürü temel işlevi tahmin etmede kısıtlamalara sahiptir. YSA ise bu kısıtlamaları tanımlamak için en iyi yöntemdir [46].

YSA, etkili kullanmanın en önemlerinden biri de problemdeki girdi değişkenlerini seçmektir. Öncelikle problemi çok iyi bilmek gerekir. YSA'da temel eğitim için ağırlıkların

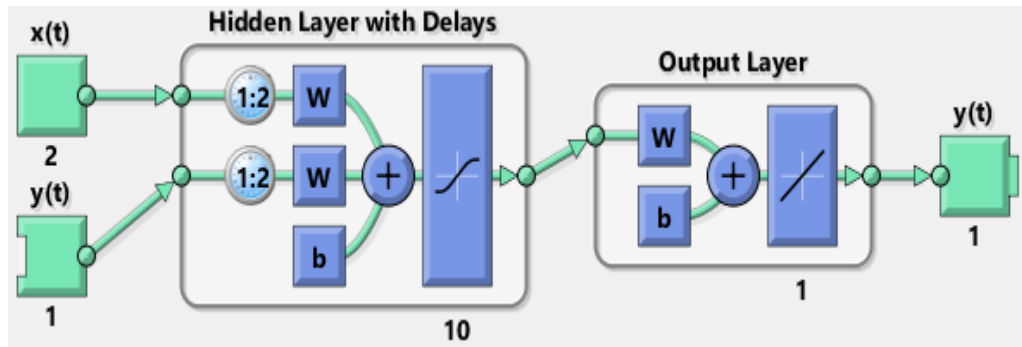
seçilmesi ve gereksiz parametrelerin kullanılmasından kaçınılmalıdır. Bunu gerçekleştirmek için de Duyarlılık Analizi yapılmalıdır [47].

4.1 NARX Yapay Sinir Ağları

Gelecekte yapılacak olan her türlü faaliyet için bir plan yapılmalıdır. Planlar belirli bir varsayım ve tahminlere dayanarak yapılır. Sonuçlar, zaman içinde bir dağılım sergiliyorsa, bu verilere zaman serileri denir. Zaman serileri, ürün üretimi, tüketimi, fiyat değişiklikleri, gelirler gibi gruplara dayalı olarak farklı zaman dönemlerine ait verilerin toplamını ifade eder. Bu şekilde, geçmişten öğrenerek geleceği tahmin etmek amaçlanır [48].

Zaman serisi analizine dayalı tahmin problemleri, bir değişkenin zaman alanındaki mevcut verilerini kullanarak gelecekteki değerlerinin tahmin edilmesi olarak bilinir. Zaman serisi tabanlı kestirimde amaç, harmonik verileri tanımlamak ve güç sistemlerindeki harmonikleri en az hata ile tespit etmek için ana faktörü belirlemektir.

NARX modeli, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin girdi-çıkı modellemesinde yaygın olarak kullanılan dinamik bir sinir yapısıdır [49]. Diğer sinir ağı türleriyle karşılaştırıldığında NARX ağları daha hızlı yakınsamakta, diğer ağlardan daha iyi genelleme yapabilmekte ve daha etkili bir öğrenme gerçekleştirebilmektedir [50]. Kapalı çevrim NARX sinir ağı modeli Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Kapalı Çevrim NARX Sinir Ağı Modeli

Şekil 4'teki döngüden görüldüğü üzere, NARX sinir ağı model örneği verilmiştir. Şekilde $x(t)$ ve $y(t)$ sistemin giriş verileri, W ağırlıkları, 10 ise nöron sayısını ifade etmektedir. YSA'nın asıl amacı girilen girdi değerine karşılık bir çıktı değeri bulmaktır. Bunu gerçekleştirebilmek için girilen girdi değerleri eğitim aşamasından geçirilerek, belirli bir hedefe gelmesi istenir. Yapay sinir

ağının öğrenmeyi gerçekleştirmesi için kullanılan öğrenme yöntemine bağlıdır. YSA'da öğrenme yöntemi, öğrenme kademesindeki model ile üretilen çıktı değeri ile gerçek çıktı değeri arasındaki hatanın minimuma indirmek için ağırlık ve sapma değerlerinin yeniden girilmesidir. İstenilen değer kabul edilebilir bir değere yaklaşıncaya kadar tekrar işlemi devam ettirilir. Öğrenme aşaması tamamlanınca ise ağırlık verileri belirlendikten sonra oluşan model hiç karşılaşmadığımız bir data seti ile test edilir. Oluşturulan model test dataları istenen değerleri elde ediyorsa kestirim başarılıdır. Eğer değerler uyuşmuyorsa öğrenme aşaması tekrar edilir.

4.2 MATLAB/Simulink Programı

MATLAB, model oluşturmada mühendislerin sık kullandığı bir programlama dilidir. MATLAB dilinin diğer dillerden ayıran en önemli özelliği ve avantajı iki çeşit programlama yönteminin uygulanabilmesidir. Bunlardan birincisi tüm programı derleyip çalıştırma ve çıktı alması, ikincisi ise MATLAB'ın interaktif programlama ara yüzü olan Command Window içerisine yazılan komutları anlık derleyip çalıştırabilir olmasıdır. MATLAB, içerisinde barındığı birçok komut ve matematiksel fonksiyonu sunar. Hesaplamaları hızlı yapar ve algoritmaları hızlı geliştirip, test etme imkânı sağlar. Simulink'te ise kod yazmadan blok diyagramlar uygulanarak benzetim yapılabilir.

MATLAB'ın en çok kullanıldığı alanlar arasında elektrik mühendisliği, sinyal işleme, haberleşme, görüntü ve video işleme, kontrol sistemleri, test ve ölçüm işlemleri ile hesaplamalı finans sayılabilir.

4.3 Yapay Sinir Ağları Yardımıyla Kestirim

YSA'larda kestirim işlemi belirli bir aşamalarda gerçekleşir. Öncelikle YSA'da modelin tasarımı yapılır, model eğitim ve test aşamalarına tabi tutulur ve modelin tahmin üretmesi için hata testleri yapılır. Tahminin doğruluğunu bulmak için kullanılabilen birçok yöntem vardır. Bunlardan biri $e(t)$ hata terimi, $x(t)$ tahmin edilen değer ve gerçek değer arasındaki farkı alınarak aşağıdaki eşitlik yardımıyla işlem yapılır[51].

$$E(t)=x(t)-f(t) \quad (5)$$

4.4 Yapay Sinir Ağlarında Öğrenme

YSA’larda öğrenme, bulunan gerçek değer ile istenen değer arasındaki farkı karşılaştırmaktır. Eğer istenen değere yakın bir sonuç elde edilmişse öğrenmenin başarılı olduğunu söylenebilir. Sinir hücresi bağlantılarla birbirine bağlanır. Bu bağlantı, girdi değerinin gücünü anlamlandıran sayısal bir ağırlığa sahiptir. Ağırlıklar, YSA’larda uzun süreli hafızanın temel kaynağıdır. Tek sinir ağı ağırlıkların yenilenerek ayarlanmasıyla öğrenme sağlanır [52].

Yapay sinir ağlarında nöronların bağlantılarının ağırlıklarının belirtilmesiyle ağı eğitilmesi gerçekleşir. İlk önce bu değerler rastgele belirlenir. Fakat sonradan çıktı değerlerine bağlı olarak ağırlık değerleri yeniden değiştirilerek gerçek duruma getirilir. Bu işleme de ağı eğitilmesi denir. Ağı eğitilmesi baz alınarak farklı öğrenme metotları vardır. En sık kullanılanlar arasında;

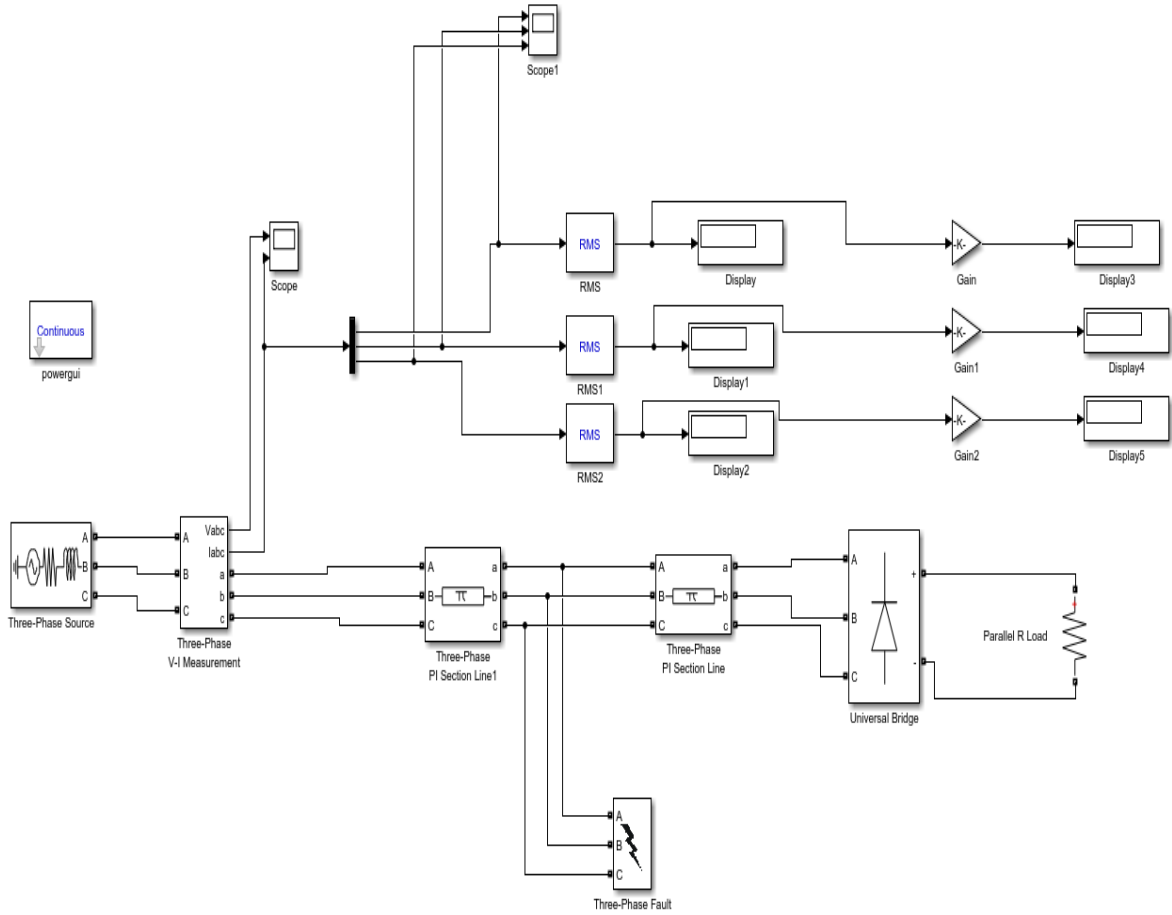
- Çok katmanlı Algılayıcılar
- Algılayıcılar, Adaline ve Perceptron
- Vektör Kuantizasyon Modelleri
- Hopfield Ağları
- Kendini organize eden model sıralanabilir [53].

5. YÖNTEM VE BULGULAR

Bu tez çalışmasının amacı olan güç sistemi harmoniklerinin kestiriminin yapılması amacıyla ihtiyaç duyulan veri setinin oluşturulması için, MATLAB/Simulink platformu altında üç farklı sistem tasarlanmıştır. Bu sistemler temelde doğrusal olmayan yükleri besleyecek şekilde tasarlanmıştır. Sisteme verilen giriş değerlerine göre eğitim ağındaki hedef değerleri, rastgele oluşturulmuştur. Veri seti oluşturulurken gerçek bir sisteme daha uygun olması ve olası veri tekrarlarından kaçınarak kestirim performansının daha doğru biçimde ortaya konabilmesi açısından sistemlerde arıza senaryoları planlanmış, bu durum farklı çalışma karakterlerinin incelenebilmesine olanak sağlamıştır.

5.1 Çalışma Sistemi- 1

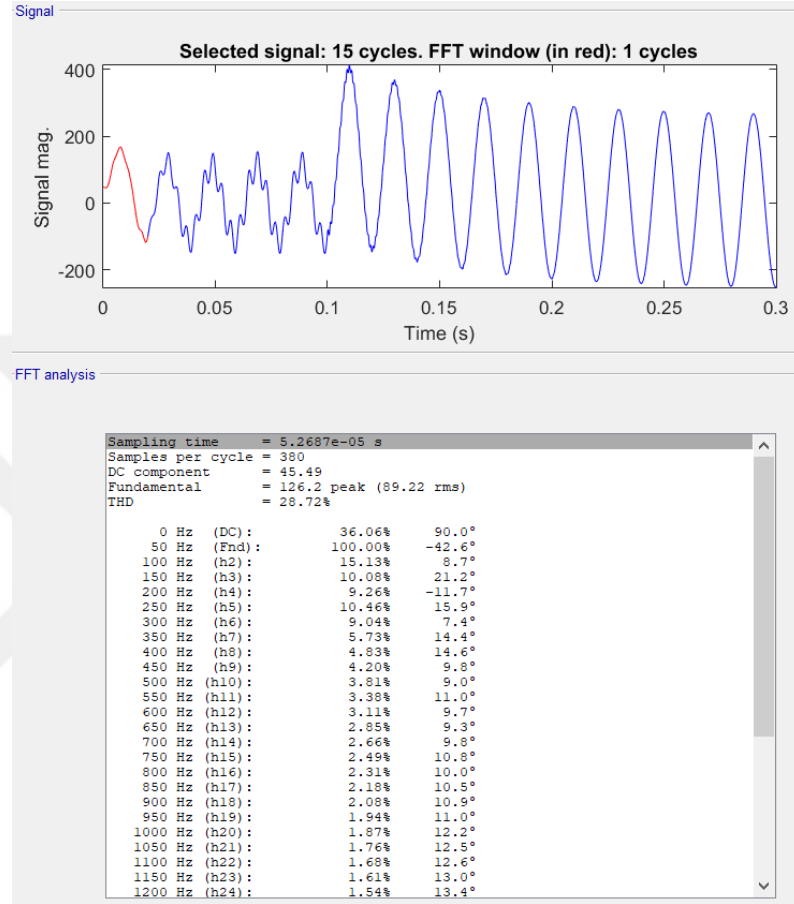
Şekil 6’da bir köprü doğrultucuyu besleyen örnek güç sistemi tasarımı verilmiştir.



Şekil 6. Doğrusal olmayan bir yükü besleyen güç sistemi

Sistem tasarlanırken frekans 50 Hz, kaynaktaki görünür güç 100MVA, yükteki görünür güç ise 25KVA olarak belirlenmiştir. Elektrik enerjisinin iletilmesinden dağıtılması ve üretilmesi aşamalarında akımın ve gerilimin dalga büyüklüklerinin sinüzoidal olması yani harmoniklerin

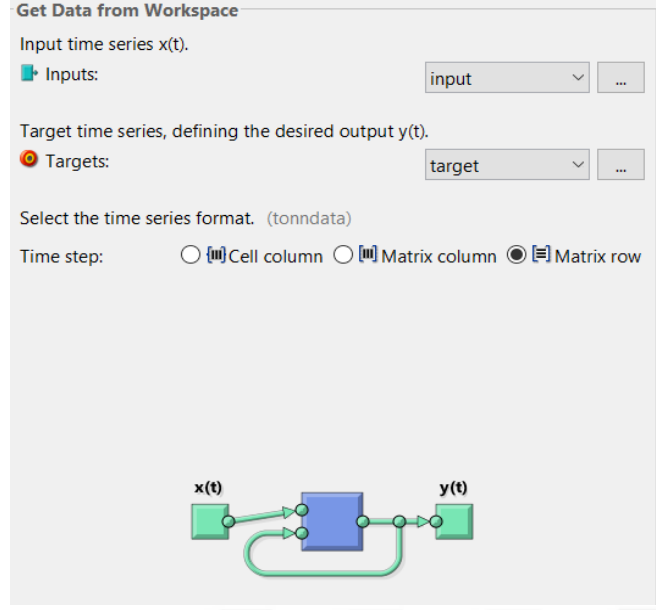
olmaması enerji kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Simulink platformu altında tasarlanan güç sisteminde doğrusal olmayan elemanların bağlanmasıyla harmoniklerin meydana geldiği gözlenmektedir. Bu güç sisteminin işletilmesi esnasında yapılan HFD analiz sonuçları Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Sistem 1 için HFD Analiz sonuçları

Şekil 7’de görüldüğü üzere, Sistem 1’in çalıştırılmasının ardından elde edilen gerilim dalgasına ait THD değeri %28,72 olarak elde edilmiştir. Elde edilen HFD analiz değerleri yapılacak olan kestirim işleminde YSA’nın giriş değerleri olarak kullanılmıştır.

YSA’nın eğitilmesi işlemi NARX modeli ile gerçekleştirilir. Command window penceresinden Ntstool yazılıp, NARX modeli seçilerek işleme devam edilir. Bu tez çalışmasında eğitim algoritması olarak, güç sistem analizi çalışmalarında başarılı sonuçlar veren ve literatürde kabul görmüş olan Levenberg Marquardt algoritması kullanılmıştır. Şekil 8’de oluşturulan döngüde giriş ve hedef verilerinin tanımlanması işleminin adımları gösterilmiştir.



Şekil 8. Oluşturulan döngüde giriş ve hedef verilerinin tanımlanması

Şekil 9’da gösterildiği üzere kestirim işleminde verilerin %70’i eğitim, %15 doğrulama ve %15 test için kullanılmıştır. Çalışmada 10 gizli nöron ve 2 gecikme uzunluğu ile sonuçlar elde edilmiştir. Gizli katmandaki nöron sayısının belirlenmesinde pek çok kez deneme yanılma yapılmış olup en iyi sonucu veren değerler baz alınmıştır.

Train Network
Train the network to fit the inputs and targets.

Train Network
Choose a training algorithm:
Levenberg-Marquardt

This algorithm typically requires more memory but less time. Training automatically stops when generalization stops improving, as indicated by an increase in the mean square error of the validation samples.

Train using Levenberg-Marquardt. (trainlm)

Retrain

Results

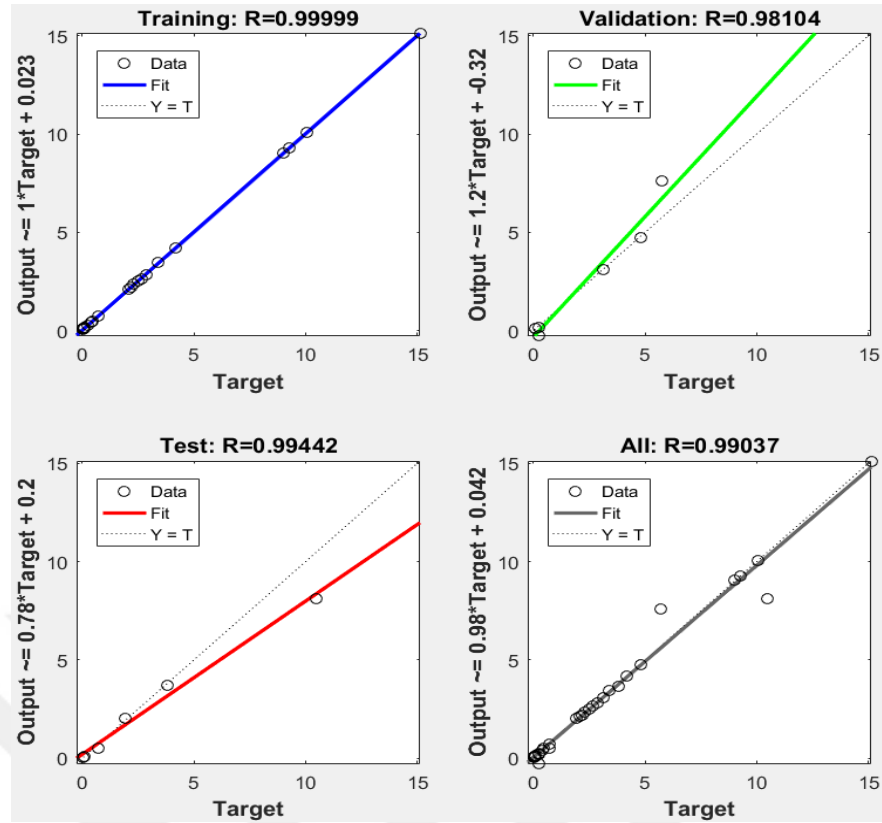
	Target Values	MSE	R
Training:	28	7.92006e-4	9.99987e-1
Validation:	6	6.27953e-1	9.81039e-1
Testing:	6	9.20968e-1	9.94422e-1

Plot Error Histogram Plot Response

Plot Error Autocorrelation Plot Input-Error Correlation

Şekil 9. NARX modelinin eğitimi

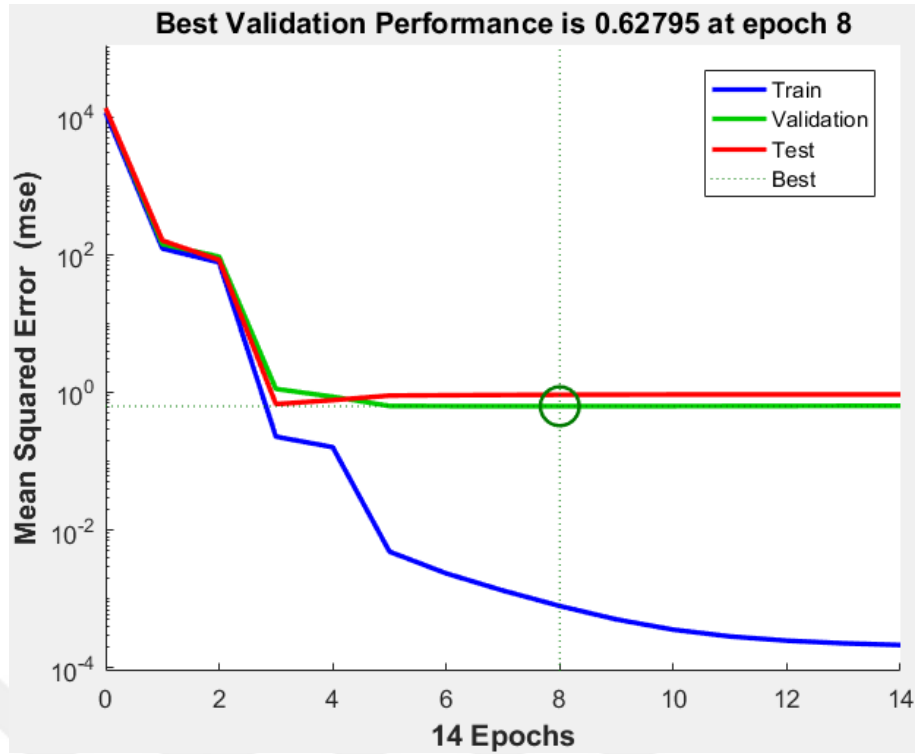
Şekil 10’da verilen grafikler incelendiğinde, onuncu iterasyonda eğitim regresyon değerinin 0.9999, doğrulama regresyon değerinin 0.98104, test regresyon değerinin ise 0.99442 olduğu görülecektir. Eğitim işleminin başarısını regresyon parametresi ve hata oranı belirler. Regresyon grafiğinde değerlerin 1’e yakınsaması, kestirim işleminin başarısının yüksek olduğu anlamını taşır. Bu durum ile elde edilen değerler birlikte değerlendirildiğinde başarılı bir kestirim performansına ulaşıldığı sonucuna ulaşılır.



Şekil 10. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği

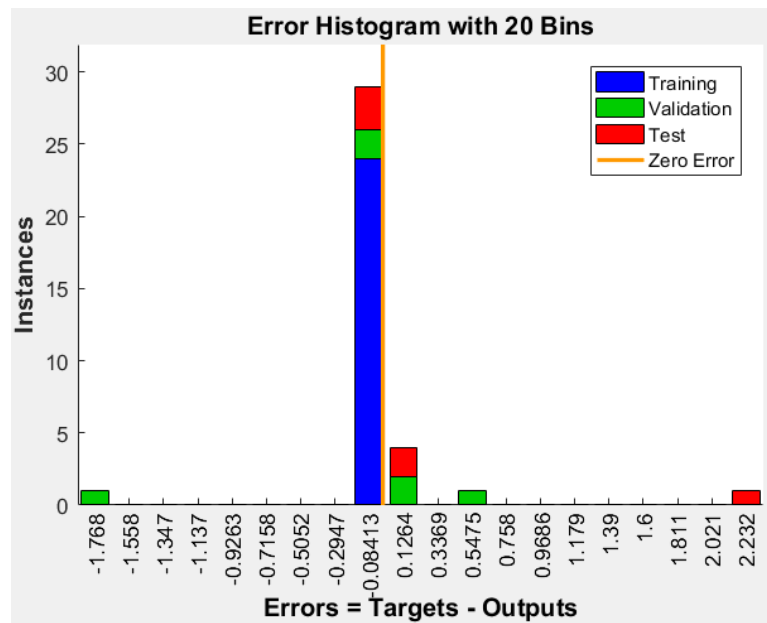
Şekil 11’de görüldüğü üzere eğitim 14 iterasyonda tamamlanmış ve 8. iterasyonda en düşük MSE değeri elde edilmiştir. En iyi doğrulama performansının 0.62795 olduğu görülmektedir. Eğitimin sonucuna bağlı olarak, her iterasyonda eğitim, doğrulama ve test işlemlerine bağlı olarak hata değerinin ne şekilde değiştiği gözlemlenmiştir. Test ve doğrulama değerlerinin belirli bir noktadan sonra birbirine yakın devam etmesi de eğitimin iyi bir doğrulama gerçekleştirdiğini ifade etmektedir.

MSE, hedefler ve çıktılar arasındaki ilişkiden ortalama kare farkını ifade eder. Düşük değerler daha başarılı olduğunu, sıfır ise hatanın hiç olmadığı anlamına gelmektedir. Eğitimin daima aşağı yönde ilerlemesi, sistemin iyi bir şekilde eğitildiğini göstermektedir. Beraberinde ise test ve doğrulama (validation) değerleri birbiriyle devamlı yakın bir şekilde hareket etmektedir.



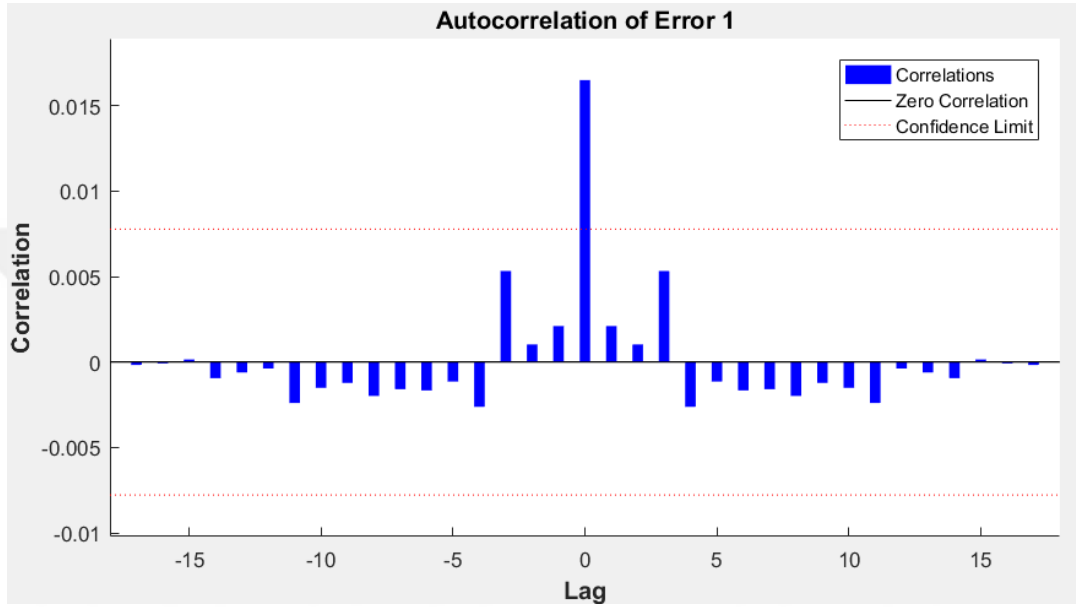
Şekil 11. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği

Şekil 12’de hata histogramı verilmiştir. Verilen şekil hatalar bakımından incelendiğinde, hedefler ile çıktılar arasındaki farkların tek bir noktada birleşmiş olduğu görülecektir. Bu da eğitimin başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Hatanın 0.08413 değerinde yoğunlaştığı, diğer değerlerin de düşük seviyede olduğu görülmektedir. Sistemin hata histogramının sıfır noktasına yakınsaması ve bu noktada yoğunlaşması, hatanın azaldığını ifade eder.



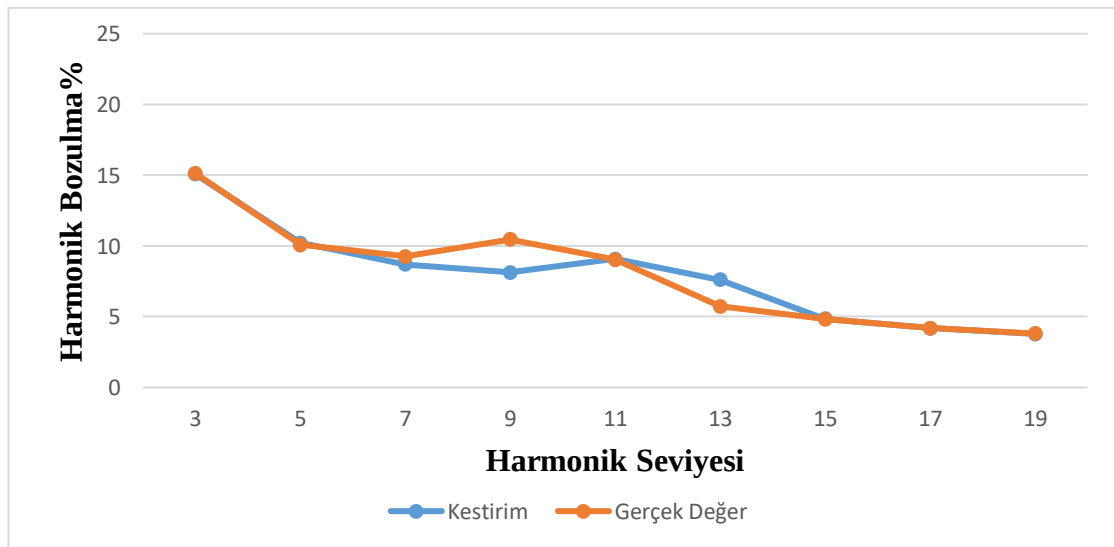
Şekil 12. Zaman serisi hatalarının histogramı

Hata otokorelasyon grafiği, herhangi bir verili zamanda ağı hatasının, farklı zaman gecikmelerinde kendisiyle nasıl ilişkili olduğunu gösterir. Çizim merkezde zirve yapmalı ve düşmelidir. Daha büyük gecikmelerle hızlı bir şekilde yapmazsa, daha fazla nöronun veya daha fazla dokunma gecikmesinin olabileceğinin bir göstergesi olacaktır. Merkez çubuğunun sıfır noktasında olması hatanın kendisiyle otomatik korelasyonudur. Bu açıklamalar bağlamında, Şekil 13'te verilen hata otokorelasyon grafiği incelendiğinde, sonuçların başarılı olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 13. Hata Otokorelasyon Grafiği

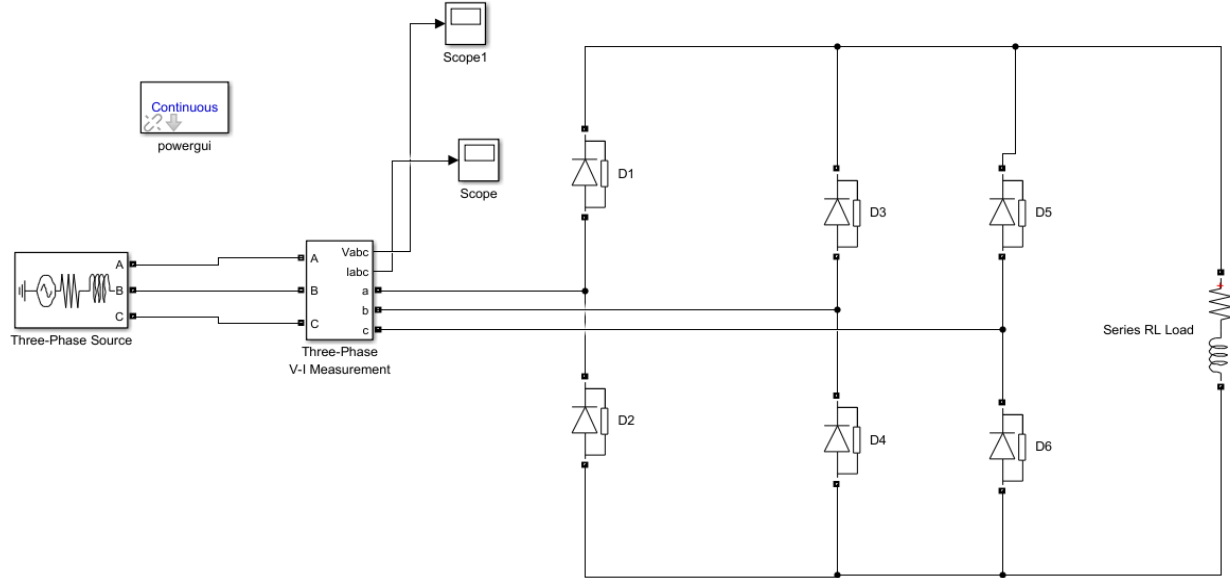
Eğitim ve test süreçlerinin sonunda elde edilen değerler, kestirim performansının daha iyi anlaşılması bakımından gerçek değerler ile karşılaştırmalı biçimde Şekil 14'te verilmiştir.



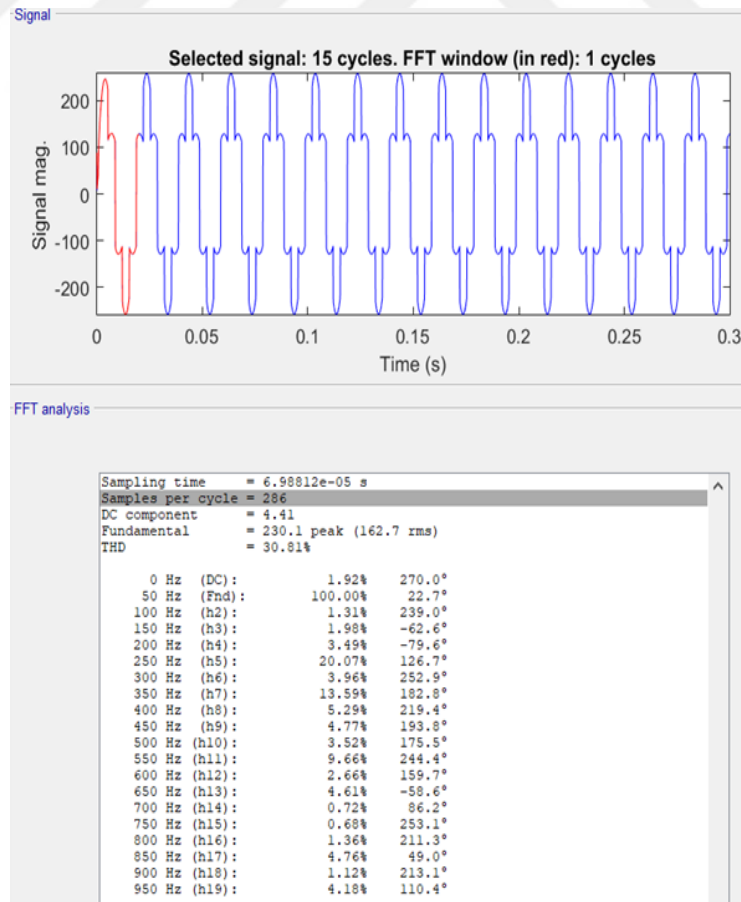
Şekil 14. Sistem 1 kestirim ve gerçek değerler grafiği

5.2 Çalışma Sistemi- 2

Şekil 15'te endüktif karakterli bir yükü besleyen bir doğrultucu içeren güç sistemi benzetim şeması, Şekil 16'da ise bu güç sisteminin işletilmesi esnasında yapılan HFD analiz sonuçları verilmiştir.

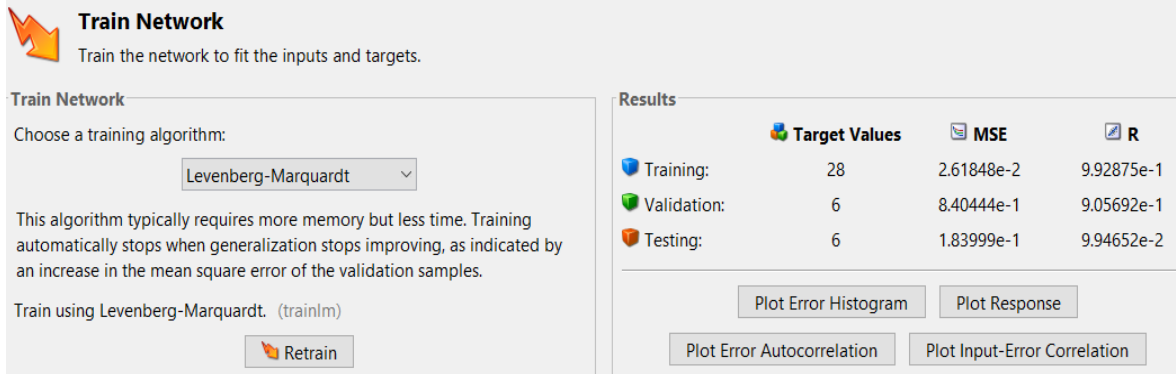


Şekil 15. Endüktif karakterli yükü besleyen doğrultuculu güç sistemi



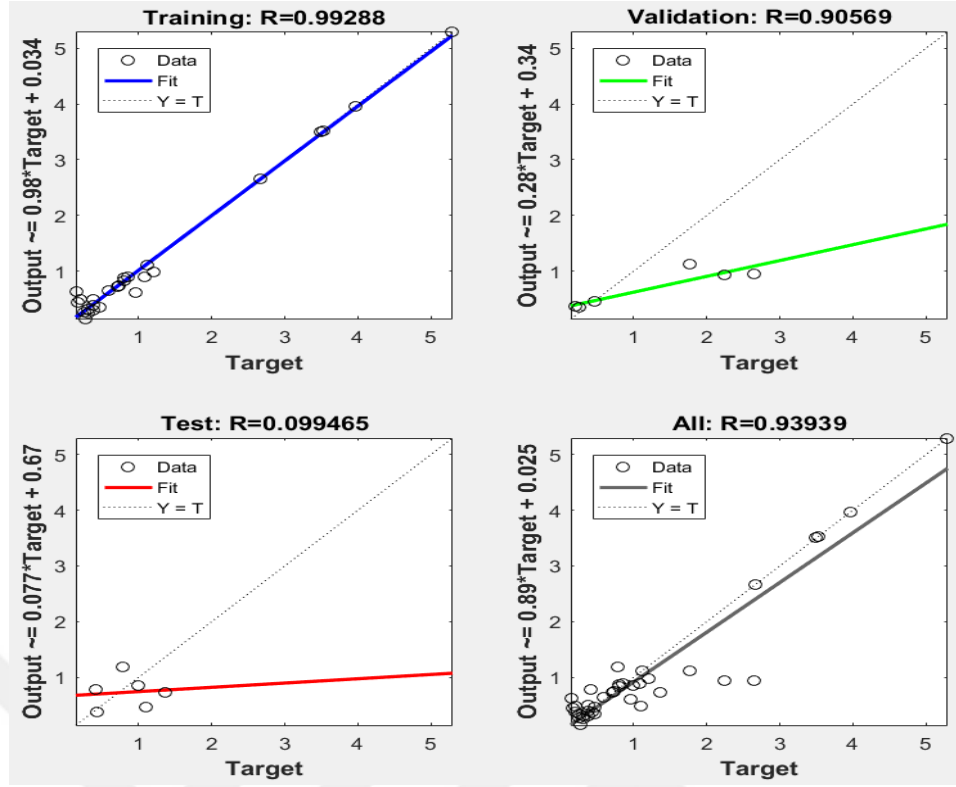
Şekil 16. Sistem 2 için HFD Analiz sonuçları

Şekil 17’de gösterildiği üzere kestirim işleminde verilerin %70’i eğitim, %15 doğrulama ve %15 test için kullanılmıştır. Çalışmada 10 gizli nöron ve 2 gecikme uzunluğu ile sonuçlar elde edilmiştir.



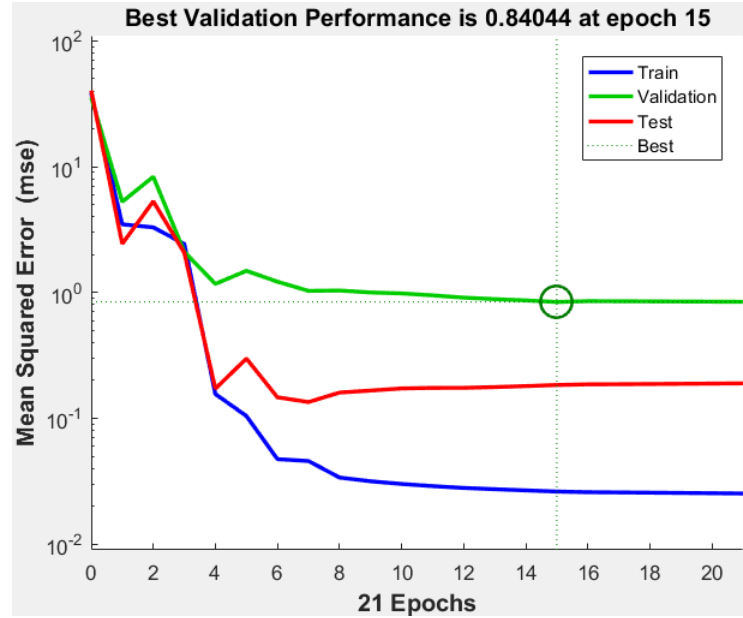
Şekil 17. NARX modelinin eğitimi

Çıktılar ve hedefler arasındaki ilişkiyi sonuçlandırmak için eğitim, test ve doğrulama analizi yapılır. Regresyon parametresi ve hata oranı, eğitim işleminin başarı seviyesini göstermektedir. Hedeflenen değerler için eğitim değeri 0.99288 ve test değerinin 0.0994652 olduğu, doğrulama değerinin 0.905692 olduğu ve bu değerlerin ise 1’e yakınsadığı tespit edilmiştir. Regresyon sonuçlarının genel olarak 0.9’a eşit ve büyük olması, değerler arasındaki bağlantının uygun ve sonucun başarılı olduğunu anlamını taşımaktadır. R değerleri 0.9’dan büyükse gerçek ve kestirim değerleri arasındaki uyuşmanın tam, 0.8 ile 0,9 arasındaki değerlerde olması durumunda uygun 0,65 ile 0,80 arasında ise kabul edilebilir, 0,65’in altında ise zayıf olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Şekil 18’de verilen regresyon grafiği incelendiğinde, eğitim için 0.99288, doğrulama için 0.90569 ve test için 0.099465 değerlerine ulaşıldığı görülecektir.



Şekil 18. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği

Şekil 19’da yapay sinir ağı performans grafiği verilmiştir.

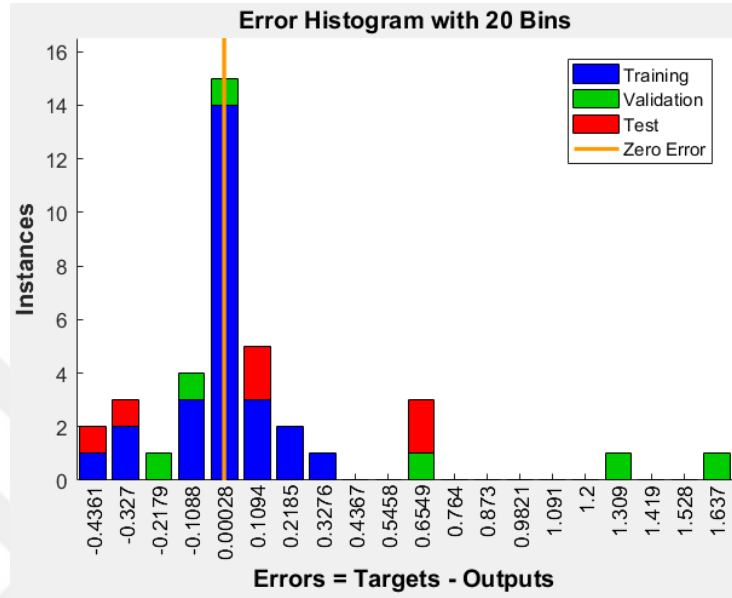


Şekil 19. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği

Grafik incelendiğinde, eğitimin 21 iterasyonda tamamlanmış olduğu ve 15. iterasyonda en düşük MSE değerinin elde edildiği görülecektir. En iyi doğrulama performansının 0.84044 olduğu

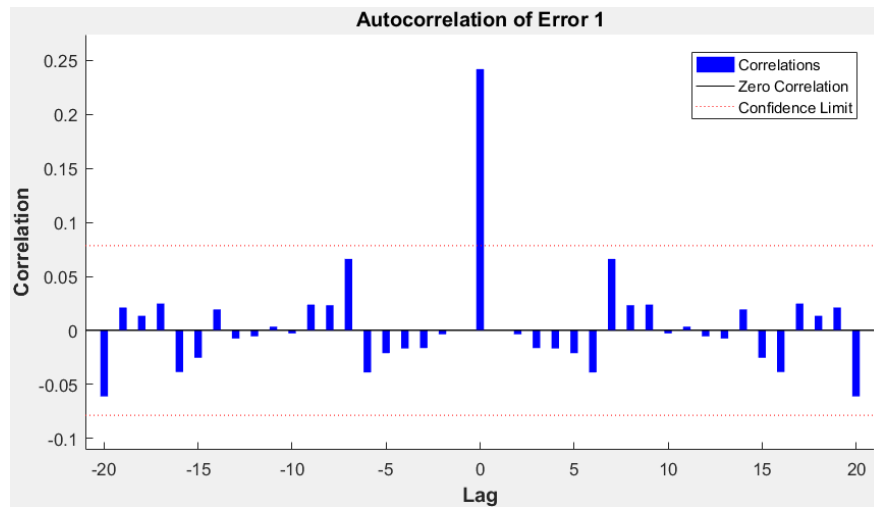
görülmektedir. Eğitimin daima aşağı yönde olması sistemin öğrenme performansının iyi olduğunu göstermektedir. Test ve doğrulama değerlerinin belirli bir noktadan sonra birbirine yakın devam etmesi de eğitimin iyi bir doğrulama gerçekleştirdiğini ifade etmektedir.

Şekil 20’de sistem 2 için hata histogramı verilmiştir.



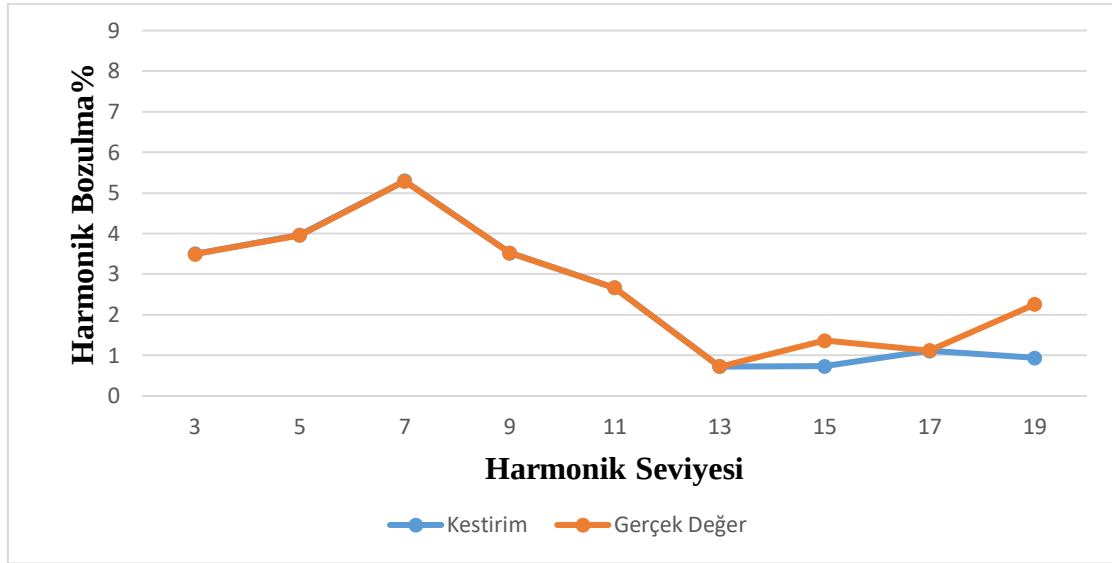
Şekil 20. Zaman serisi hatalarının histogramı

Grafik incelendiğinde, hatanın 0.00028 değerinde yoğunlaştığı, diğer değerlerin de düşük seviyede olduğu görülmektedir. Daha önceki bölümlerde de belirtildiği üzere, sistemin hata histogramının sıfır noktasında yoğunlaşması, hatanın azaldığını ifade etmektedir. Bu değerler bağlı olarak Sistem 2 için hata otokorelasyon grafiği de Şekil 21’de verilmiştir.



Şekil 21. Hata Otokorelasyon Grafiği

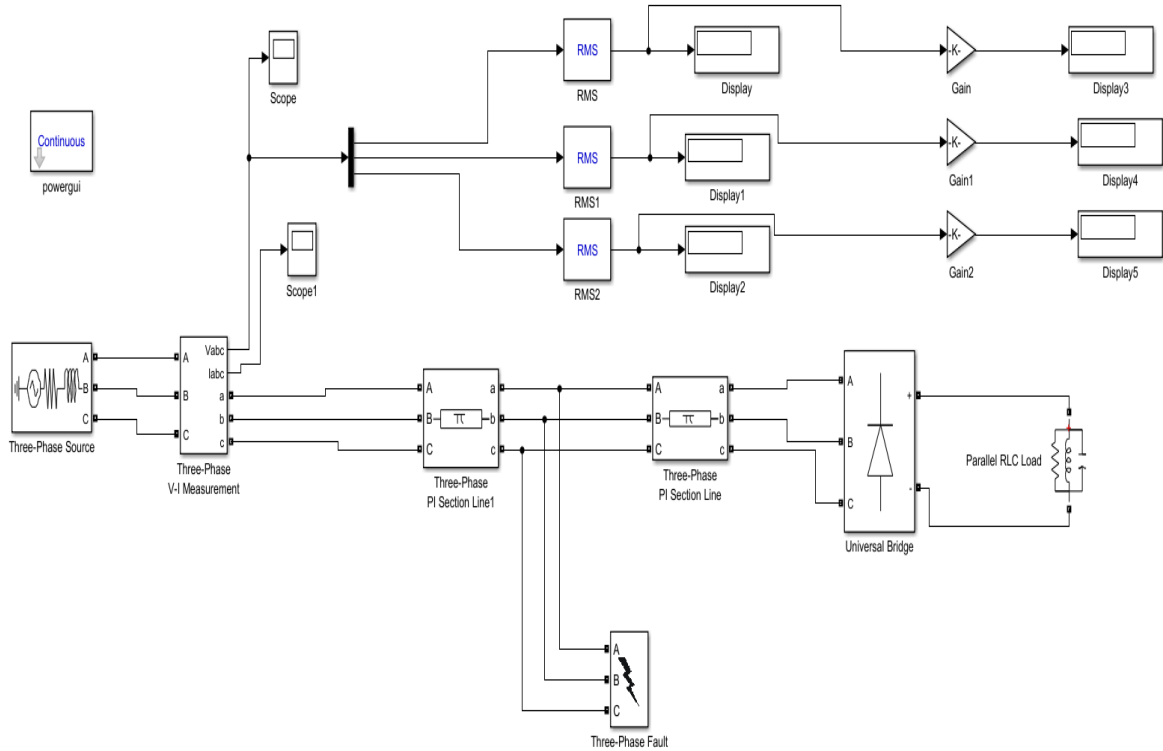
Kestirim performansının daha iyi anlaşılması bakımından gerçek ve kestirim değerleri karşılaştırmalı grafik biçiminde Şekil 22’de gösterilmiştir.



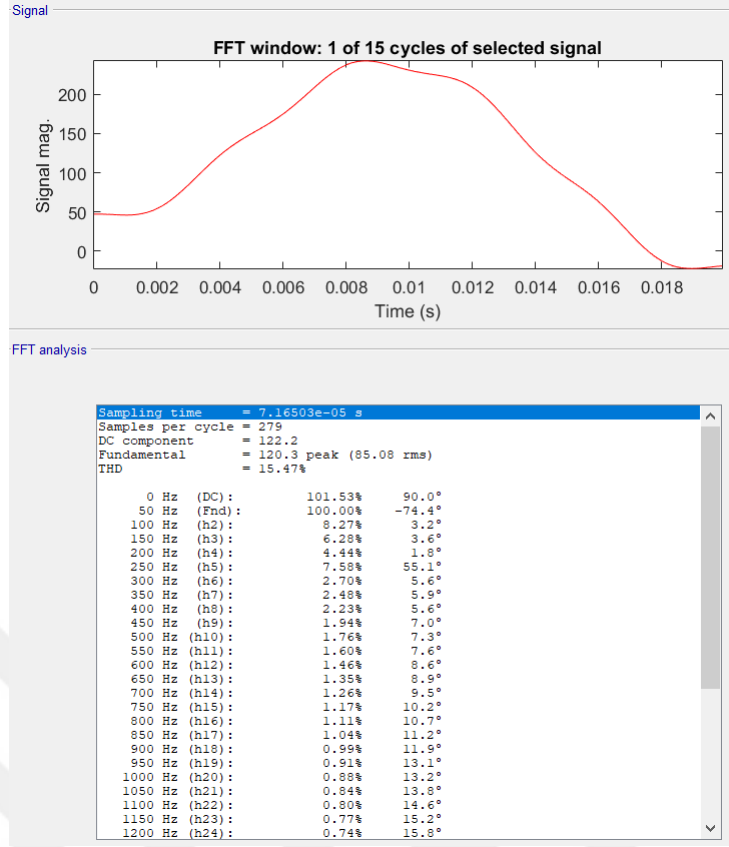
Şekil 22. Sistem 2 kestirim ve gerçek değerler grafiği

5.3 Çalışma Sistemi- 3

Şekil 23’te RLC yükü besleyen bir doğrultucu içeren güç sistemi benzetim şeması, Şekil 24’te ise bu güç sisteminin işletilmesi esnasında yapılan HFD analiz sonuçları verilmiştir.

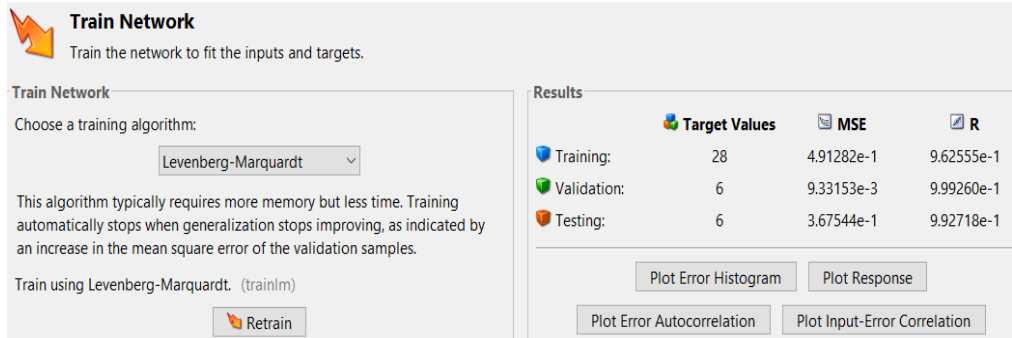


Şekil 23. RLC yükü besleyen doğrultuculu güç sistemi



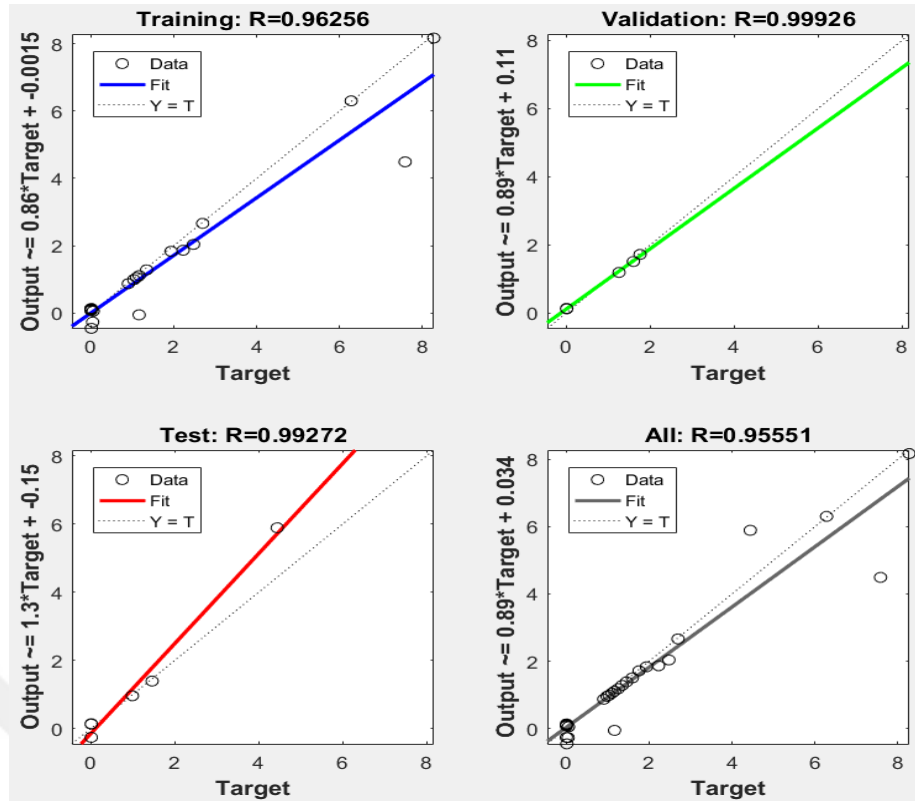
Şekil 24. Sistem 3 için HFD Analiz sonuçları.

Ağın eğitim işlemi Şekil 25'te verilmiştir. Önceki bölümlerde verilen sistemlerde olduğu gibi sistem 3 için de verilerin %70'i eğitim, %15 doğrulama ve %15 test için kullanılmıştır.



Şekil 25. NARX modelinin eğitimi

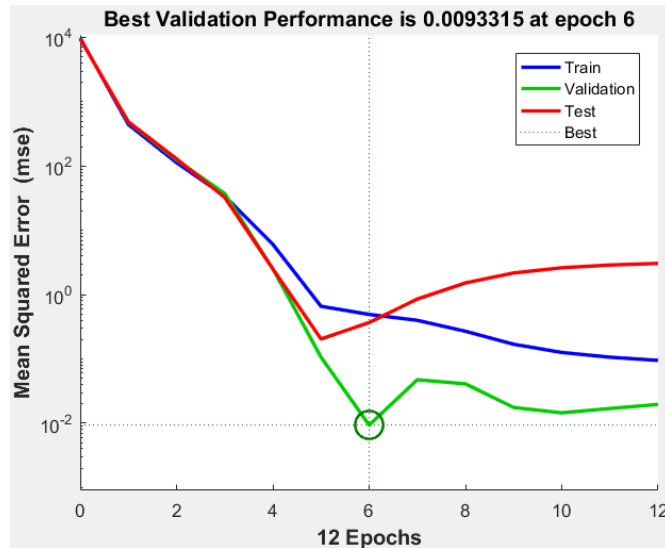
Şekil 26'da Sistem 3 için regresyon grafiği verilmiştir.



Şekil 26. Yapay Sinir Ağı Regresyon Grafiği

Regresyon grafiği incelendiğinde, eğitim değeri 0.96256 ve test değerinin 0.99272 olduğu, doğrulama değerinin 0.99926 olduğu ve bu değerlerin ise 1'e yakınsadığı tespit edilmiştir.

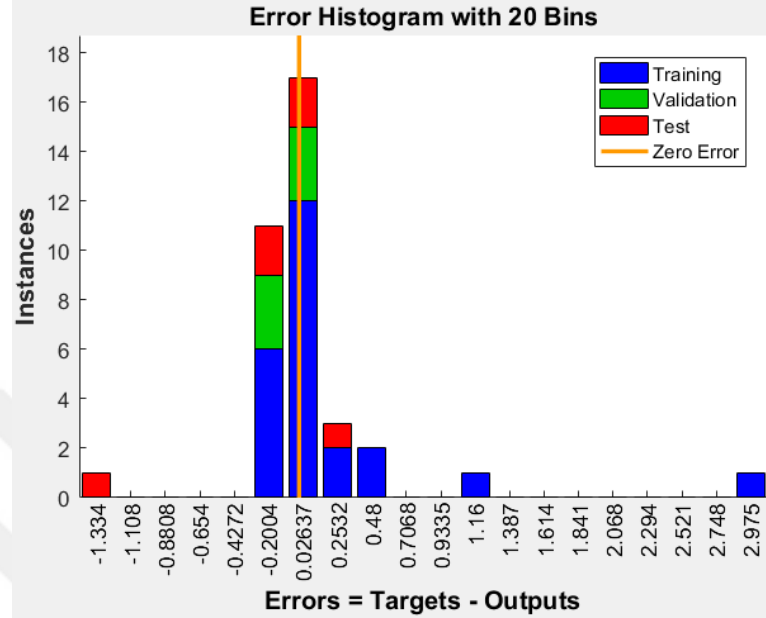
Şekil 27'de yapay sinir ağı performans grafiği gösterilmiştir.



Şekil 27. Yapay Sinir Ağı Performans Grafiği

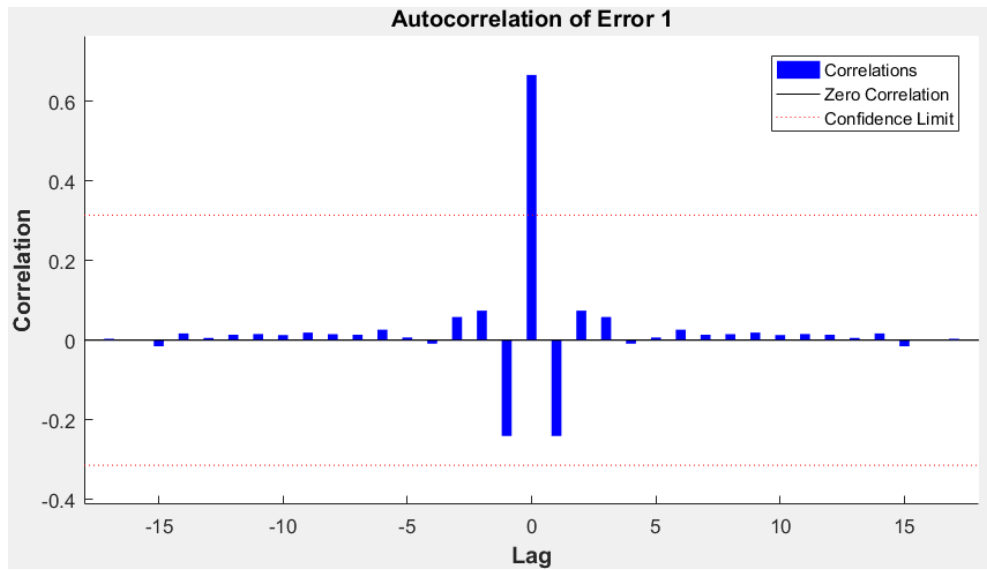
Grafikten, eğitimin 12 iterasyonda tamamlandığı ve 6. iterasyonda en düşük MSE değerinin elde edildiği görülmektedir.

En iyi doğrulama performansı ise 0.0093315 değerini vermiştir. Test ve doğrulama değerlerinin belirli bir noktadan sonra birbirine yakın devam etmesi de eğitimin iyi bir doğrulama gerçekleştirdiğini ifade eder. Şekil 28’de sistem 3 için zaman serisi hatalarının histogramı gösterilmiştir.



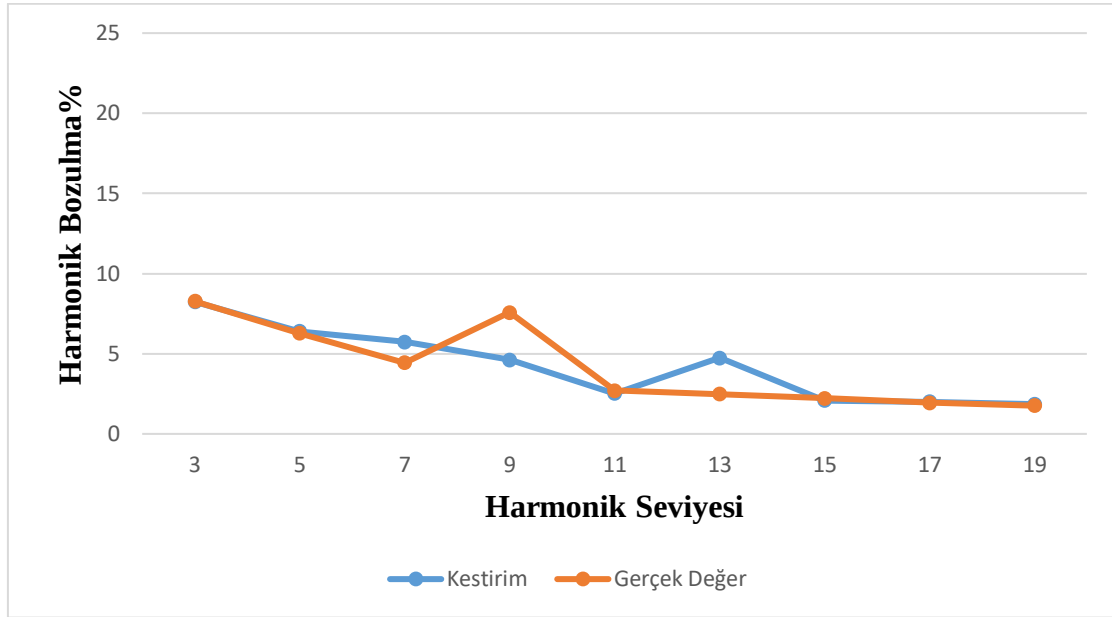
Şekil 28. Zaman serisi hatalarının histogramı

Hatanın 0.02637 değerinde yoğunlaştığı, diğer değerlerin de düşük seviyede olduğu görülmektedir. Sistemin hata histogramının sıfır noktasında yoğunlaşması, hatanın azaldığını ifade eder. Bu grafik ile bağlantılı olarak Şekil 29’da verilen hata otokorelasyon grafiğinden de kestirim performansının yüksek olduğu tespit edilebilmektedir.



Şekil 29. Hata Otokorelasyon Grafiği

Kestirim performansının daha iyi anlaşılması bakımından sistem 3 için gerçek ve kestirim değerleri Şekil 30’da verilmiştir.



Şekil 30. Sistem 3 kestirim ve gerçek değerler grafiği

Tüm sistemlerden elde edilen MSE ve Regresyon değerleri toplu halde Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Tüm sistem için NARX modelinin eğitim, doğrulama ve test değerleri

Sistem	Veri Seti	Nöron Sayısı	MSE	Regresyon
Sistem 1	%70 Eğitim	10	0.000792006	0.99999
	%15 Doğrulama		0.627953	0.98104
	%15 Test		0.920968	0.99442
Sistem 2	%70 Eğitim		0.0261848	0.99288
	%15 Doğrulama		0.840444	0.90569
	%15 Test		0.183999	0.09946
Sistem 3	%70 Eğitim		0.491282	0.96256
	%15 Doğrulama		0.00933153	0.99926
	%15 Test		0.367544	0.99272

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Modern dünyanın en önemli icadı olan ve hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelen elektrik enerjisinin belirli kalite standartlarını taşıması vazgeçilmez bir unsurdur. Dolayısıyla enerji kalitesi bozulmalarının başında gelen harmoniklerin doğru ve hızlı biçimde analiz edilmesi büyük önem arz etmektedir.

Bu tez çalışmasının temel motivasyonunu güç sistem harmoniklerinin önceden belirlenmesi, diğer bir anlamıyla kestirimi oluşturmaktadır. Çalışma için yapay zekâ algoritmalarından yararlanılmıştır. Bu kapsamda, öncelikle veri setlerinin elde edilebilmesi için MATLAB/Simulink platformu altında doğrusal olmayan yüklerin beslendiği 3 farklı sistem tasarlanmıştır. Sistemler tasarlanırken olası ezberleme ve sürekli hal analizlerinden kaçınmak amacıyla belirli aşamalarda arıza uygulanarak doğrusallığın olabildiğince bozulması, bu sayede önerilen modelin performansının daha detaylı incelenebilmesine olanak tanınması amaçlanmıştır. Daha sonra her bir sistemin HFD analizinden, oluşan harmonik değerleri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler ile oluşturulan veri setleri kullanılarak NARX modeli üzerinden kestirim yapılmış, algoritma olarak da Levenberg Marguardt kullanılmıştır.

Tasarlanan her bir sistem için test, eğitim ve doğrulama değerleri ile bunlara bağlı olarak ortaya çıkan grafikler ayrı ayrı incelenip başarı oranı test edilmiştir. Yapılan modelleme sonucunda her iterasyondaki eğitim, doğrulama ve test değerlerinin ne şekilde değiştiği grafikler üzerinden tartışılmıştır. Eğitim işlemi için belirli iterasyonla en düşük MSE değeri elde edilmiştir. NARX ağının performansı MSE ile ölçülüp bulunan değerler, 1'e yakınsadığı için kestirimde uygun bir sonuç elde edildiği gösterilmiştir.

Toplu halde verilen değerler incelendiğinde, güç sistemlerindeki enerji kalitesi problemlerinin belirlenmesi ve NARX modeli kullanılarak kestirim işleminin başarılı bir şekilde gerçekleştiği sonucuna ulaşılmaktadır. Sistemlerin daha kaliteli, kararlı ve verimlerinin yüksek olabilmesi için güç sistemlerinde oluşabilecek harmoniklerin giderilmesi oldukça önemlidir. Bu kapsamda alınabilecek önlemlerden biri olan harmonik kestiriminin güç sistemlerinde çalışma koşullarının iyileştirilmesinde faydalı bir yaklaşım olduğu değerlendirilmektedir. İleride yapılacak olan araştırmalarda farklı kestirim yaklaşımları kullanılarak daha hassas değerler elde edilmesiyle, harmoniklerin oluşturduğu kayıpları azaltmak için gerekli tedbirlerin alınmasının sağlanabileceği kestirilmektedir.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. F. A. Hussam, M. M. Alhaj, Nursyarizal Mohd Nor, Vijanth S. Asirvadam, "Comparison of Power System Harmonic Prediction," *Procedia Technol.*, vol. 11, no. ICEEI, pp. 628–634, 2013, doi: 10.1016/j.protcy.2013.12.238.
- [2] P. Rodríguez-Pajarón, A. Hernández Bayo, and J. V. Milanović, "Forecasting voltage harmonic distortion in residential distribution networks using smart meter data," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 136, 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107653.
- [3] A. Y. Hatata and M. Eladawy, "Prediction of the true harmonic current contribution of nonlinear loads using NARX neural network," *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 3, pp. 1509–1518, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.03.050.
- [4] S. L. Ahmadsreza Eslami, Michael Negnevitsky, Evan Franklin, "Review of AI applications in harmonic analysis in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 154, no. June 2021, p. 111897, 2022, doi: 10.1016/j.rser.2021.111897.
- [5] A. Jamali-Abnavi, H. Hashemi-Dezaki, A. Ahmadi, E. Mahdavianmanesh, and M. J. Tavakoli, "Harmonic-based thermal analysis of electric arc furnace's power cables considering even current harmonics, forced convection, operational scheduling, and environmental conditions," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 170, no. December 2020, p. 107135, 2021, doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2021.107135.
- [6] G. C. M. A. Cavallini, M. Cacciari, M. Loggini, "Evaluation of Harmonic Levels in Electrical Networks by Statistical Indexes," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 30, no. 4, pp. 1116–1126, 1994, doi: 10.1109/28.297930.
- [7] A. Filippo, A. Rebelo Torres, B. Kjerfve, and A. Monat, "Application of Artificial Neural Network (ANN) to improve forecasting of sea level," *Ocean Coast. Manag.*, vol. 55, pp. 101–110, 2012, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.09.007.
- [8] A. Rahmani and A. Deihimi, "Reduction of harmonic monitors and estimation of voltage harmonics in distribution networks using wavelet analysis and NARX," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 178, no. September 2019, p. 106046, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106046.
- [9] Z. Hu, Y. Han, A. S. Zalhaf, S. Zhou, E. Zhao, and P. Yang, "Harmonic Sources Modeling and Characterization in Modern Power Systems: A Comprehensive Overview," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 218, no. February, p. 109234, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109234.
- [10] K. Abolfathi, M. Babaei, and A. Ahmarinejad, "Designing Optimal Passive Filters for Transformers under Harmonic Conditions," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 411–417, 2017.

- [11] J. Jativa-Ibarra, G. Navarro-Mendez, F. L. Quilumba, and W. J. Lee, "Field measurements, modeling, and analysis of power system harmonics caused by industrial customers," *2014 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2014*, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1109/IAS.2014.6978488.
- [12] O. E. Gouda and A. Z. E. Dein, "Enhancement of the thermal analysis of harmonics impacts on low voltage underground power cables capacity," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 204, no. August 2021, p. 107719, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107719.
- [13] T. Busatto, V. Ravindran, A. Larsson, S. K. Rönnberg, M. H. J. Bollen, and J. Meyer, "Deviations between the commonly-used model and measurements of harmonic distortion in low-voltage installations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 180, no. October 2019, p. 106166, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2019.106166.
- [14] S. K. Singh, N. Sinha, A. K. Goswami, and N. Sinha, "Several variants of Kalman Filter algorithm for power system harmonic estimation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 78, pp. 793–800, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.12.028.
- [15] E. Skjong, T. A. Johansen, and M. Molinas, "Distributed control architecture for real-time model predictive control for system-level harmonic mitigation in power systems," *ISA Trans.*, vol. 93, pp. 231–243, 2019, doi: 10.1016/j.isatra.2019.01.043.
- [16] S. Taheri, A. Gholami, I. Fofana, and H. Taheri, "Modeling and simulation of transformer loading capability and hot spot temperature under harmonic conditions," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 86, pp. 68–75, 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2011.12.005.
- [17] K. Kritsanasuwan, U. Leeton, and T. Kulworawanichpong, "Harmonic mitigation of AC electric railway power feeding system by using single-tuned passive filters," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 1116–1124, 2022, doi: 10.1016/j.egypr.2022.05.276.
- [18] V. R. Pandi, H. H. Zeineldin, W. Xiao, and A. F. Zobaa, "Optimal penetration levels for inverter-based distributed generation considering harmonic limits," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 97, pp. 68–75, 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2012.12.003.
- [19] F. Geth and T. Van Acker, "Harmonic optimal power flow with transformer excitation," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 213, no. July, p. 108604, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108604.
- [20] A. Rubino, M. Pini, and P. Colonna, "Unsteady simulation of quasi-periodic flows in Organic Rankine Cycle cascades using a Harmonic Balance method," *Energy Procedia*, vol. 129, pp. 1101–1108, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.229.

- [21] M. R. Arahal, M. J. Duran, F. Barrero, and S. L. Toral, "Stability analysis of five-phase induction motor drives with variable third harmonic injection," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 12, pp. 1459–1468, 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2010.06.011.
- [22] F. Yazdi and S. H. Hosseini, "A novel 'Smart Branch' for power quality improvement in microgrids," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 110, no. February, pp. 161–170, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.026.
- [23] J. Huang and Z. Jiang, "Power Quality Assessment of Different Load Categories," *Energy Procedia*, vol. 141, pp. 345–351, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.11.041.
- [24] N. Sasidharan, N. Madhu M., J. G. Singh, and W. Ongsakul, "An approach for an efficient hybrid AC/DC solar powered Homegrid system based on the load characteristics of home appliances," *Energy Build.*, vol. 108, pp. 23–35, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.051.
- [25] A. Raciti, S. A. Rizzo, and G. Susinni, "Circuit model of LED light bulb suitable for typical voltage THD on LV distribution networks," *Energy Build.*, vol. 212, 2020, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109665.
- [26] A. H. Soomro, A. S. Larik, M. A. Mahar, A. A. Sahito, A. M. Soomro, and G. S. Kaloi, "Dynamic Voltage Restorer—A comprehensive review," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 6786–6805, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.09.004.
- [27] I. Lopez-Ramirez, J. E. Rodriguez-Seco, and I. Zamora, "Assessment on power systems non-deterministic state estimation algorithms," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 214, no. PA, p. 108880, 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2022.108880.
- [28] A. A. Mohamed, A. T. Elsayed, T. A. Youssef, and O. A. Mohammed, "Hierarchical control for DC microgrid clusters with high penetration of distributed energy resources," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 148, pp. 210–219, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.04.003.
- [29] M. R. Qader, "Design and simulation of a different innovation controller-based UPFC (unified power flow controller) for the enhancement of power quality," *Energy*, vol. 89, pp. 576–592, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.06.012.
- [30] M. Debouza, A. Al-Durra, T. H. M. EL-Fouly, and H. H. Zeineldin, "Survey on microgrids with flexible boundaries: Strategies, applications, and future trends," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 205, no. January, p. 107765, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107765.
- [31] A. Muzhikyan, A. M. Farid, and K. Youcef-Toumi, "Relative merits of load following reserves & energy storage market integration towards power system imbalances," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 74, pp. 222–229, 2016, doi: 10.1016/j.ijepes.2015.07.013.
- [32] M. Dong and J. Sun, "Partial discharge detection on aerial covered conductors using time-

- series decomposition and long short-term memory network,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 184, no. March, p. 106318, 2020, doi: 10.1016/j.epsr.2020.106318.
- [33] A. T. Teklić, B. Filipović-Grčić, and I. Pavić, “Modelling of three-phase electric arc furnace for estimation of voltage flicker in power transmission network,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 146, pp. 218–227, 2017, doi: 10.1016/j.epsr.2017.01.037.
- [34] K. P. Swain and M. De, “A novel electrical proximity index for voltage control in smart distribution system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 172, no. January, pp. 50–62, 2019, doi: 10.1016/j.epsr.2019.03.006.
- [35] B. Jacobsen, “Transition of energy system by regulating of Power Quality for efficiency improvements,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 507–512, 2022, doi: 10.1016/j.procir.2022.02.084.
- [36] S. Haben, S. Arora, G. Giasemidis, M. Voss, and D. Vukadinović Greetham, “Review of low voltage load forecasting: Methods, applications, and recommendations,” *Appl. Energy*, vol. 304, no. June, p. 117798, 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117798.
- [37] E. Vagnoni, D. Valentin, and F. Avellan, “Dynamic behaviour of a Francis turbine during voltage regulation in the electrical power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 125, no. September 2020, p. 106474, 2021, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.106474.
- [38] I. D. Melo and J. S. Mingorança, “Interval current injection method for harmonic analysis in distribution systems: An approach using the Krawczyk operator,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 208, no. November 2021, p. 107891, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2022.107891.
- [39] J. Sancho, J. J. Pastor, J. Martínez, and M. A. García, “Evaluation of harmonic variability in electrical power systems through statistical control of quality and functional data analysis,” *Procedia Eng.*, vol. 63, pp. 295–302, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.224.
- [40] V. Bećirović, I. Pavić, and B. Filipović-Grčić, “Sensitivity analysis of method for harmonic state estimation in the power system,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 154, pp. 515–527, 2018, doi: 10.1016/j.epsr.2017.07.029.
- [41] C. Simon Haykin, McMaster University, Hamilton, Ontario, “Neural Networks - A Comprehensive Foundation - Simon Haykin.pdf.” p. 823, 2005.
- [42] R. Taştaltın and K. Karadağ, “Elektrik Tesisinde Harmonik İncelemesi ve Harmonik Filtreli Kompanzasyon,” *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.*, vol. 3, no. 3, pp. 43–51, 2018.
- [43] S. Rüstemli, M. S. Cengiz, and F. Dinçer, “Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu,” vol. 2, no. 1, pp. 30–38, 2013.

- [44] H. Yıldırım and M. Karaatlı, “Yapay Sinir Ağları Narx Modeli ile Elma Üretim Miktarının Öngörülmesi,” Süleyman Demirel Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi Yıl: 2022/1, Sayı: 42, s. 1-29.
- [45] H. A. ES, F. Y. KALENDER, C. HAMZAÇEBİ, “Yapay Sinir Ağları ile Türkiye Net Enerji Talep Tahmini,” *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Derg.*, vol. 29, no. 3, pp. 495–504, 2014, doi: 10.17341/gummfd.41725.
- [46] B. Ataseven, “Yapay Sinir Ağları ile Öngörü Modellemesi,” *Öneri Derg.*, vol. 10, no. 39, pp. 101-115–115, 2013.
- [47] A. Arı and M. Erşen Berberler, “ACTA INFOLOGICA-2017-1 (2) Yapay Sinir Ağları ile Tahmin ve Sınıflandırma Problemlerinin Çözümü İçin Arayüz Tasarımı Information of Author(s),” *Acta Infologica*, vol. 1, no. 2, pp. 55–73, 2017, [Online]. Available: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/acin/335553>
- [48] I. Akgül, “Zaman Serisi Analizi ve Öngörü Modelleri,” *Öneri*. pp. 52–69, 1994.
- [49] N. ÖZCAN AKDAĞ, M. KARAATLI, and T. KOCABIYIK, “BIST Ulaştırma Endeksinin YSA NARX Modeli ile Öngörülmesi,” *Alanya Akad. Bakış*, vol. 6, no. 3, pp. 2721–2746, 2022, doi: 10.29023/alanyaakademik.1088404.
- [50] T. Lin, B. G. Horne, P. Tiño, and C. L. Giles, “Learning long-term dependencies in NARX recurrent neural networks,” *IEEE Trans. Neural Networks*, vol. 7, no. 6, pp. 1329–1338, 1996, doi: 10.1109/72.548162.
- [51] C. Paper and S. Koltan, “Yapay Sinir Ağlarıyla Yapılmış İşletme Uygulamaları,” no. October 2016, 2017.
- [52] M. Sarı, “Yapay Sinir Ağları ve Bir Otomotiv Firmasında Satış Talep Tahmini Uygulaması,” p. 114, 2016.
- [53] K. Kür and E. Dandil, “Yapay Sinir Ağları İçin Net Platformunda Görsel Bir Eğitim Yazılımının Geliştirilmesi,” pp. 19–28, 2012.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler		
Adı Soyadı	Müslüm KUZU	
Doğum Yeri		
Doğum Tarihi		
Uyruğu		
Telefon		
E-Posta Adresi		
Web Adresi		

	Eğitim Bilgileri
	Lisans
Üniversite	
Fakülte	
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

	Yüksek Lisans
Üniversite	BANDIRMA ONYEDİ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği
Programı	Elektrik – Elektronik Mühendisliği Tezli YL

Makale ve Bildiriler
Kuzu, M., Efe,S.B. (2023). Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Yapay Zeka Destekli Kısa Dönemli Kestirimi, Rahva Teknik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi (Kabul edildi).