



**DAĞITIM HATLARINDA YÜKSEK EMPEDANS ARIZASININ
SİMÜLASYONLU ANALİZİ**

Aynur KOÇAK

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Aynur KOÇAK

10/06/2021

DAĞITIM HATLARINDA YÜKSEK EMPEDANS ARIZASININ SİMÜLASYONLU ANALİZİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Aynur KOÇAK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

Akıllı şebekeler elektrik enerjisini daha verimli ve güvenli bir şekilde iletmek amacıyla geleneksel elektrik şebekelerine alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Geleneksel şebekelerden farklı olarak bir diğer avantajı ise çift yönlü iletim sağlayabilmesidir. Günümüzde akıllı şebeke uygulamaları hayatımızın farklı alanlarında yer almaktadır. Bu sebepten dolayı akıllı şebekelerde meydana gelebilecek çeşitli arızalar öngörülmesi ve bunlar için gerekli önlemler alınmalıdır. Akıllı şebekeler diğer haberleşme (ZigBee, Fiber optik) teknolojilerine ek olarak güç hattı haberleşmesinide kullanmaktadır. Literatürde güç hattı haberleşmesinde meydana gelebilecek farklı arızalar mevcuttur. Bu arızalara örnek olarak yüksek empedans arızası verilebilir. Dağıtım hatlarında meydana gelen yüksek empedans arızaları güvenlik tehlikelerine, ark olaylarına ve ortaya çıkabilecek yangınlar nedeniyle olası ekipman ve can kayıplarına neden olabilir. Bununla birlikte, yüksek empedans arızalarında yüksek genlikli arıza akımı meydana gelmediğinden geleneksel aşırı akım röleleri veya sigortalar ile bu arızayı tespit etmek oldukça zordur. Bu çalışmamızda, akıllı şebeke yapısına sahip dağıtım sistemlerinde güç hatları üzerinden yapılan haberleşmelerde meydana gelebilecek yüksek empedans arızalarının, dağıtım hattı uzunluğunun ana kol akımına ve yüksek empedans arızası akımına etkisi farklı modellerle MATLAB/Simulink tabanlı simülasyonlarda incelenerek yorumlanmıştır.

Bilim Kodu : 90545

Anahtar Kelimeler : Akıllı şebekeler, dağıtım hattı, haberleşme teknolojileri, güç hattı haberleşmesi, yüksek empedans arızası

Sayfa Adedi : 89

Danışman : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

SIMULATED ANALYSIS OF HIGH IMPEDANCE FAULT IN DISTRIBUTION LINES

(M. Sc. Thesis)

Aynur KOÇAK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

Smart grids have emerged as an alternative to traditional electricity grids in order to transmit electrical energy more efficiently and safely. Another advantage of the smart grids are that they can provide bidirectional transmission unlike the traditional network. Today, smart grid applications take place in different areas of our lives. For this reason, various malfunctions that may occur in smart grids should be foreseen and necessary precautions should be taken for them. Smart grids also use power line communication in addition to other communication technologies (ZigBee, Fiber optic). There are different faults that may occur in power line communication in the literature. An example of these faults is a high impedance fault. High impedance faults in distribution lines can cause safety hazards, arcing events and possible loss of equipment and lives due to fires. However, it is very difficult to detect this fault with conventional overcurrent relays or fuses, as high-amplitude fault current does not occur in high impedance faults. In this study, the effects of load impedance faults that may occur in communications made over power lines in distribution systems with smart grid structure, distribution line length on main branch current and high impedance fault current are analyzed and interpreted with different models in MATLAB/Simulink based simulations.

Science Code : 90545

Key Words : Smart grids, distribution line, communication technologies, power line communication, high impedance failure

Page Number : 89

Supervisor : Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOGLU

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde benden emeklerini esirgemeyen ve her zorluğumda yanımda olan danışmanın Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na, çalışmalarım sırasında yardımcı olan ve takıldığım yerlerde çözüm önerisi sunan Doç. Dr. Haluk GÖZDE'ye teşekkür ederim.

Görev yaptığım Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü asistanlarından Arş. Gör. Dr. Kayhan ÇELİK, Arş. Gör. Kezban KOÇ ve Öğr. Gör. Furkan BALCI arkadaşıma bu zorlu süreçte yanımda oldukları ve ellerinden gelenin fazlasını yaptıkları için onlara çok teşekkür ediyorum.

Ayrıca manevi olarak her zaman desteklerini hissettiğim ve tez süresi boyunca yanımda olup varlıklarıyla destek olan kardeşime, babama ve nişanlıma teşekkür ediyorum. En özelini en sona saklayarak bugüne kadar beni hep nazlayan ve hüznümde sevincimde bana hep kucağını açan değerli anneme tezimi armağan ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİK ENERJİSİ İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMLERİ	7
2.1. Klasik Dağıtım Şebekesi	7
2.1.1. Dallı (Radyal) şebekeler.....	8
2.1.2. Ağ (Gözlü) şebekeler	8
2.1.3. Ring şebekeler.....	9
2.1.4. Enterkonnekte şebekeler	9
2.2. Akıllı Şebeke	9
2.3. Akıllı Şebekelerde Kullanılan Haberleşme Teknolojileri	12
3. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİ	17
3.1. GHH Bant Genişlikleri.....	19
3.1.1. Ultra dar bant güç hattı haberleşmesi	20
3.1.2. Dar bant güç hattı haberleşmesi	22
3.1.3. Geniş bant güç hattı haberleşmesi.....	25
3.2. GHH Kanallarında Gürültüler	28
3.2.1. Renkli zemin gürültüsü.....	28

	Sayfa
3.2.2. Darbant gürültüsü.....	29
3.2.3. Dürtüsel gürültü	30
4. DAĞITIM HATTINDA YÜKSEK EMPEDANS ARIZASI	33
4.1. Yüksek Empedans Arızası	33
4.1.1. Yüksek empedans arızasının özellikleri	34
4.1.2 Yüksek empedans arıza algılamanın önemi	36
4.2. YEA Modellerinin İncelenmesi.....	37
4.3. YEA Algılama Tekniklerinin İncelenmesi	42
5. DAĞITIM HATTI UZUNLUĞUNUN YEA AKIMINA ETKİSİ.....	45
5.1. Basitleştirilmiş Emanuel Modeli.....	46
5.1.1. Seçilen devrenin parametre değerleri	47
5.1.2. YEA akımı incelenmesi.....	48
5.1.3. Hat uzunluğunun 10 km olması durumunda yea akımı.....	48
5.1.4. Hat uzunluğunun 20 km olması durumunda yea akımı.....	50
5.1.5. Hat uzunluğunun 30 km olması durumunda yea akımı.....	51
5.1.6. Hat uzunluğunun 60 km olması durumunda yea akımı.....	53
5.1.7. Basitleştirilmiş Emanuel modeli için total harmonik distorsiyon.....	55
5.1.8. Basitleştirilmiş Emanuel modeli için en küçük kareler yöntemi	57
5.2. Emanuel Modeli İçin YEA Akımı İncelenmesi.....	60
5.3. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modeli için YEA Akımı İncelenmesi	70
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	77
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	89

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Haberleşme teknolojilerinin bant genişlikleri ve veri hızları	16
Çizelge 5.1. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin parametre değerleri	47
Çizelge 5.2. Kaynak parametre değerleri.....	48
Çizelge 5.3. Dağıtım hattı parametre değerleri.....	48
Çizelge 5.4. Yük-I parametre değerleri.....	48
Çizelge 5.5. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki ana kol akım değerleri.....	58
Çizelge 5.6. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki formül çıktıları	58
Çizelge 5.7. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki bağıl hata oranları	59
Çizelge 5.8. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri.....	59
Çizelge 5.9. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki formül çıktıları	59
Çizelge 5.10. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki bağıl hata oranları	59
Çizelge 5.11. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri	69
Çizelge 5.12. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki formül çıktıları.....	70
Çizelge 5.13. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki bağıl hata oranları.....	70

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Türkiye'deki kurulu gücün değişimi	7
Şekil 3.1. GHH kanallarında bulunan farklı gürültü türleri	28
Şekil 4.1. Kum üzerinde YEA olayı	34
Şekil 4.2. Elektrik ark boyunca akım ve gerilim	35
Şekil 4.3. Elektrik ark boyunca akım-gerilim karakteristikleri.....	35
Şekil 4.4. Arıza akımının harmonik bileşenleri	36
Şekil 4.5. 1990'da önerilen Emanuel modeli	37
Şekil 4.6. 1993'de önerilen YEA modeli	38
Şekil 4.7. 1998'de önerilen YEA modeli.....	38
Şekil 4.8. 2001'de önerilen YEA modeli	39
Şekil 4.9. 2003'de önerilen basitleştirilmiş Emanuel modeli.....	40
Şekil 4.10. 2004'de önerilen YEA modeli	40
Şekil 4.11. 2005 yılında önerilen YEA modeli.....	41
Şekil 4.12. Birkaç Emanuel ark modeline dayanan yeni YEA modeli.....	41
Şekil 5.1. Kısa dağıtım hattı için örnek devre.....	45
Şekil 5.2. Basitleştirilmiş Emanuel Model için oluşturulan devre.....	47
Şekil 5.3. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km hat uzunluğu için ana kol akım grafiği	49
Şekil 5.4. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km hat uzunluğu için YEA akım grafiği.....	49
Şekil 5.5. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	50
Şekil 5.6. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	51
Şekil 5.7. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	52

Şekil	Sayfa
Şekil 5.8. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	52
Şekil 5.9. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	53
Şekil 5.10. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	54
Şekil 5.11. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2]sn ana kol akımı ve YEA akım grafiği.....	55
Şekil 5.12. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları.....	57
Şekil 5.13. Emanuel Modeli için oluşturulan devre.....	60
Şekil 5.14. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 10 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	61
Şekil 5.15. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 10 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	62
Şekil 5.16. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 20 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği.....	63
Şekil 5.17. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	64
Şekil 5.18. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği.....	64
Şekil 5.19. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	65
Şekil 5.20. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği.....	66
Şekil 5.21. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği	67
Şekil 5.22. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn ana kol akımı ve YEA akım grafiği değerleri.....	67
Şekil 5.23. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelin hat uzunluklarına göre [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri.....	68
Şekil 5.24. Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları.....	68

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin ve Emanuel Modelinin hat uzunluklarına göre [0.1-0.2]sn aralığındaki THD oranları	69
Şekil 5.26. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	71
Şekil 5.27. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği.....	72
Şekil 5.28. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	73
Şekil 5.29. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği.....	73
Şekil 5.30. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği	74
Şekil 5.31. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği.....	75
Şekil 5.32. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları.....	75

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

Açıklamalar

A	Amper
dB	Desibel
GHz	Giga Hertz
Hz	Hertz
bps	Bits per second
kbps	Kilo bits per second
kHz	Kilo Hertz
km	Kilometre
kV	Kilovolt
kVA	Kilo-volt amper
m	Metre
Mbps	Mega bits persecond
ms	Milisanıye
sn	Saniye
V	Volt

Kısaltmalar

Açıklamalar

AA	Alternatif Akım
ADSL	Asymmetrical Digital Subscriber Line
AEKF	Adaptive Extended Kalman Filter
AG	Alçak Gerilim
ATM	Asynchronous Transfer Mode
CC	Control Center
ComSoc	Communication Society
DA	Doğru Akım
DOE	United States Department of Energy

Kısaltmalar**Açıklamalar**

DSL	Digital Subscriber Line
DWT	Discrete Wavelet Transform
EMTP	Electromagnetic Transients Program
EPRI	Electric Power Research Institute
GB-GHH	Geniş Bant Güç Hattı Haberleşmesi
GHH	Güç Hattı Haberleşmesi
GSM	Global System Mobile
HDSL	High-bitrate Digital Subscriber Line
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
NETL	National Energy Technology Laboratory
NIST	National Institute of Standards and Technology
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OG	Orta Gerilim
OPERA	Open PLC European Research Alliance
OSI	Open Systems Interconnection
PLC	Power Line Communication
PMU	Phasor Measurement Unit
PRIME	Power-line Intelligent Metering Evolution
RCS	Ripple Control System
RF	Radio Frequency
SISO	Single Input-Single Output
TACS	Transient Analysis of the Control System
TEAİŞ	Türkiye Elektrik İletim A.Ş.
TVR	Time Varying Resistors
UDB-GHH	Ultra Dar Bantlı Güç Hattı Haberleşmesi
VDSL	Very-high-bitrate Digital Subscriber Line
WiMAX	World Interoperability for Microwave Access
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network
YEA	Yüksek Empedans Arızası
YG	Yüksek Gerilim

1. GİRİŞ

Günümüz elektrik altyapısı uzun zamandır değişmeden kalmıştır ve elektrik enerjisi dağıtımını için oldukça karmaşıktır. Bu karmaşıklık ihtiyaçlarımıza uygun değildir. Özellikle sanayi devrimi sonrası sürekli artan dünya nüfusu varlıklı bir toplum inşa etmeye ve küresel ölçekte hızla artan enerji talebini ortaya çıkarmıştır. Bu durum küresel çevreyi tehdit etmeye başlamış ve mevcut olan birincil enerji kaynaklarını sınır değerlerine ulaştırmaktadır. Ülkeler son 50 yılda temiz ve güvenli enerji üretimi için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımına ilgi göstermeye başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları özellikle elektrik enerji üretiminde ve kullanımında bazı zorlukları da getirmiştir. Yeni enerji kaynaklarının sebep olduğu zorlukların üstesinden gelebilmek için yeni bir elektrik şebeke altyapısı ihtiyacı doğmuştur. Yenilenebilir kaynakların yönetimi akıllı şebeke kavramını ortaya çıkarmıştır.

Akıllı şebekelerin, güvenilir olması, çift yönlü haberleşme ile sağlanan gerçek zamanlı izleme yoluyla enerji arzı ve talebi arasında denge sağlanması, otomatik kontrol ve modern haberleşme kontrolleri aracılığıyla yenilenebilir ve alternatif enerji kaynaklarının sorunsuz entegrasyonu ile gelişmiş verimlilik sağlanması modern elektrik şebekesi altyapısını oluşturmuştur. Farklı bireyler, ülkeler ve kurumlara göre akıllı şebekenin sahip olması gereken özellikler ve ihtiyaçları farklıdır. Akıllı şebekeler güvenilir, verimli ve yüksek performanslı olmalıdır [1].

ABD’de bulunan Ulusal Enerji Teknolojisi Laboratuvarı (NETL) [2] akıllı şebeke için yedi farklı özellik yayınlamıştır. Bu özellikler maliyet, elektrik üretim ve depolama seçenekleri, verimli elektrik, üretim ve verimlilik kayıplarının sağlanması, az ekipman arızası ve sistem güvenliği, şebeke bileşenlerini algılama ve analiz etme, dayanıklılık ve güvenlik gibi maddeleri kapsamaktadır. Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsüne (NIST) [3] göre ise akıllı şebekenin tanımı dijital bilgi işlemeden ve haberleşme teknolojilerinin altyapısından geçmektedir. Akıllı şebekeler çift yönlü enerji akışı sağladığından dolayı uygulamada sadece akıllı sayaçların kullanımının ötesine geçmektedir.

ABD Enerji Bakanlığı'nın (DOE) Modern Şebeke Girişimi [4] ise akıllı şebekeden farklı beklentiler içerisindedir. Bu beklentiler kendi kendini iyileştirmesi, tüketici dostu olması,

yüksek güvenilir ve güç kalitesine sahip olması, siber saldırılara karşı dayanıklı olması, çeşitli dağıtılmış üretim ve depolama seçeneklerini bulundurması ve varlık kullanımını optimize etmesidir. Bu 6 özelliğin bir araya gelmesiyle akıllı şebekenin tam anlamıyla var olmasını ifade etmişlerdir [4].

Akıllı şebeke kavramının geliştirilmesi için standartların yayınlanmasının yanında, farklı ülkeler tarafından değişik projelerde yapılmıştır [5]- [6]. Bu projeler akıllı şebekelerin beklentileri karşılması ve teknolojiye uyum sağlayarak daha verimli hale getirilmesi için yapılan uygulamalardır. Bu uygulamaların arasında International Electrotechnical Commission (IEC)'nin kurmuş olduğu SG3 projesi de yer almaktadır [5]. Bu proje akıllı şebekelerde güvenlik, haberleşme, kesinti önleme, dağıtım otomasyonu, gelişmiş sayaç altyapısı, talep yanıtı ve yük yönetimi gibi özellikleri içerisinde barındırmaktadır. EPRI IntelliGrid [6] ise toplumun gelecekteki ihtiyaçlarını desteklemek için, güç dağıtım altyapısının akıllı şebekeye dönüşümünü hızlandırmayı hedefleyen ve 50'den fazla şirket tarafından finanse edilen, 2001 yılında kurulmuş bir kuruluştur.

Akıllı şebekelerde haberleşme, kablolu ve kablosuz teknolojilerle gerçekleştirilmektedir. Bu haberleşme teknolojilerinin akıllı şebekeler için uygulama alanları, kapsama alanları ve veri hızları birbirinden farklıdır. Her haberleşme teknolojisi kendi avantajlarına göre akıllı şebekelere uygulanmakta ve gerekli durumlarda her iki teknoloji bir arada kullanılabilir.

Bu tez çalışmasında akıllı şebekelerde güç hattı haberleşme teknolojisi ele alınarak, bu teknolojiye meydana gelebilecek YEA (Yüksek Empedans Arızası) konusu detaylı incelenmiştir. Yüksek empedans arızası genellikle elektrik güç dağıtım sistemlerinde birincil şebeke seviyesinde, bir tepe iletkeni kırıldığında veya asfalt yol, kum, çimento veya ağaç gibi yüksek empedanslı bir yüzeye dokunduğunda meydana gelir. Arıza noktasındaki yüksek empedans nedeniyle akım değerinde aşırı bir değişikliğe neden olmaz, bu nedenle geleneksel aşırı akım rölesinin bunu tespit etmesi genellikle zordur. Bu koşullar altında, canlılara zarar veren yüksek gerilim değerleri ve YEA'larla ilişkili ortaya çıkabilecek elektrik arkı, canlı ve özellikle insan güvenliği için ciddi bir risk ve özellikle endüstriyel kurulumlarda endişe kaynağı durumundadır. Bu nedenle hem insan güvenliği hem de operasyonel güvenilirlik bakış açılarından önceden tespiti ve önlenmesi kritik öneme sahiptir.

Yüksek empedans arızasının, modellenmesi zordur, çoğu YEA çalışmaları, şimdiye kadar etkin bir şekilde modellenmemiş olan ark durumunu içermektedir. Bazı araştırmacılar, YEA'ların doğrusal olmayan ve asimetrik olduğunu ve modellenmenin rastgele ve dinamik ark özelliklerini içermesi gerektiği konusunda bir fikir birliğine varmışlardır [7]. [7]'de yer alan Emanuel modeli, laboratuvar ölçümlerine dayanmaktadır ve sıfır ark ve asimetri periyodunu simüle etmek için iki diyotla anti-paralel bağlanmış iki DA (Doğru Akım) kaynağı önermiştir [7]. Diğer bir çalışmada, toprak empedansındaki doğrusal olmama durumunun dikkate alınması için ark yüksek empedans arızası, bir direnç ve bir DA kaynağı ile seri halde iki diyot seti (pozitif ve negatif) olarak modellenmiştir [8]. Wai ve arkadaşları 1998 yılında ark teorisine dayanarak, doğrusal olmayan empedansı, zamanla değişen gerilim kaynaklarını ve Kontrol Sisteminin Geçici Analizini (TACS) kapsayan gerçekçi bir YEA modeli tanıtmıştır [9]. 2001 yılında ise TACS tarafından kontrol edilen iki seri zamanla değişen dirençler (Time Varying Resistors-TVR), YEA'i modellemek için kullanılmıştır [10]. Lai ve arkadaşları Basitleştirilmiş Emanuel Modeli tanıtmıştır. Bu modelde simetrik arıza akımlarını temsil eden iki eşit olmayan direnç vardır [11]. Asimetrik arıza akımlarının simüle edilmesi için farklı direnç değerleri seçilmiştir [11]. 2004 yılında tanıtılan model ise doğrusal olmayan bir direnç, iki diyot ve her yarım döngüde rastgele genlik değiştiren iki DA kaynağından oluşmaktadır [12]. Michalik ve arkadaşları doğru akım (DA) ve alternatif akım (AA) kaynakları, doğrusal direnç, doğrusal olmayan zamanla değişen direnç ve ark tutuşma anlarını kontrol etmek için iki diyot ve polarize edici rampa voltajları içeren YEA modeli önermişlerdir [13]. 2010 yılında ise Sedighi ve ark. Emanuel modeline dayanarak, birkaç yay modelini YEA akımı üretmek için paralel olarak bağlayarak bir YEA modeli önermişlerdir [14].

Birçok yazar YEA teorisi ve elektrik arkındaki akım ve gerilim dinamikleri üzerine çalışmaktadır [7]. Ancak önerilen YEA modellerinin çoğu 1990 yılında önerilen Emanuel modeline dayanmaktadır. Bazı çalışmalarda YEA modeli sunmanın yanında tespit yöntemleri de önerilmiştir [15,16].

Zoric ve arkadaşları havai hatlarda ark arızalarının tespiti için algılama algoritması sunmuşlardır [15]. Bu algoritma gerilim sinyallerinin harmonik analizine dayanmaktadır. Farklı bir algoritma ise ark arızasının tespiti için özelliklerini Ayrık Dalgacık Dönüşümüne (Discrete Wavelet Transform-DWT) dayandıran bir algoritmadır [17]. 2009 yılında Samantaray ve arkadaşları birleşik Uyarlanabilir Genişletilmiş Kalman Filtresi (Adaptive Extended Kalman Filter-AEKF) ve Olasılıksal Nötr Ağ (Probabilistic Neutral Network-

PNN) modellerini kullanarak doğrusal olmayan yükleme koşulunda bir HIT tespit tekniği sunmuştur [18]. 2012 yılında ise Fazör Ölçüm Birimi (Phasor Measurement Unit-PMU) kullanılarak, üçüncü harmonik akım fazörünün değiştirilmesine dayanan bir algılama algoritması önerilmiştir [19]. Torres ve arkadaşları 2014 yılında dalga formlarının harmonik analizlerine dayanan bir algılama algoritması önermiştir [20]. 2016 yılında ise Santos ve arkadaşları DWT yöntemiyle olayını, anahtarlama arızası gibi diğer oluşabilecek olaylardan ayırmak için ayrı bir algoritma önermiştir [21]. 2019 yılında Qiushi Cui ve ark. sınıflandırma yöntemine dayanan bir tasarım oluşturmuştur [16].

Yazarlar YEA'nın hem modellenmesi üzerine hem de algılama yöntemlerinde detaylı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalar çoğunlukla YEA olayının algılanmasını ve arıza yerinin belirlenmesine yönelik çalışmalardır. YEA olayı genellikle dağıtım hatlarında meydana gelmektedir. Akıllı şebekeler alçak gerilim ve orta gerilimden beslenmektedir. Bu sebepten akıllı şebekelerin bulunduğu yerlerde olayının meydana gelmesi çok yüksek ihtimaldir. Özellikle akıllı şebekelerin bulunduğu yerler insanların ve canlıların yoğun olduğu konumlar olduğundan dolayı akıllı şebekeler için oldukça önemlidir.

Bu çalışmada Matlab/Simulink'de örnek devreler kurulmuştur. Öncelikli olarak devreye Basitleştirilmiş Emanuel Modeli anahtarlama yardımıyla bağlanmıştır. Sonrasında ise farklı bir model olan Emanuel Modeli bağlanmış ve son olarak ise Basitleştirilmiş Emanuel Modeline harmonikli kaynak bağlanmıştır. Toplam simülasyon süresi 0.2 sn olup, 0.1'nci saniyede modeller devreye bağlanacaktır. Devrede bulunan dağıtım hattı uzunluğu değiştirilerek her bir uzunluk değerinin ana kol akımına ve YEA akımına etkisi incelenmiştir. Modellerde 4 farklı uzunluk değeri kullanılmıştır: 10 km, 20 km, 30 km ve 60 km. Dağıtım hattı uzunluğu 10 km'ye sahip devre ile diğer dağıtım uzunluklarına sahip devreler sırasıyla kıyaslanmıştır. Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinde hat uzunlukları için alınan akım dalgaları arasındaki faz farkları hesaplanmıştır. Sonraki aşama olarak her iki modelin akım değerleri için THD oranları bulunarak özet bir grafik oluşturulmuş ve sonrasında yine her iki modelin akım değerleri için en küçük kareler yöntemi metodu kullanılarak akım değerleri formülize edilmiş ve her bir akım değerinin ayrı ayrı hata oranları bulunmuştur. Son aşama olarak ise Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve harmonik kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin akım grafikleri kıyaslanmıştır.

Yapılan çalışmalar sonucunda YEA arızası için uygun model Basitleştirilmiş Emanuel Modeli olarak belirlenmiştir.

Geleneksel dağıtım ağlarının hem güç sağlayıcılarına hem de tüketicilere daha fazla yetenek sağlayacak akıllı şebekelere yükseltilmesine yönelik yoğun ilgi, belirli bir sorunu çözmek için yeni teknolojileri kullanma zorluğunu ortaya koymaktadır. Enerji hatları üzerinden bilgi aktarımından yararlanma imkânı, Güç Hattı Haberleşmesi (GHH) teknolojisini bunun için önemli bir aday haline getirmektedir. Güç sistem koruması hem güvenlik hem de işlevsellik nedenleriyle yüksek öneme sahip bir konudur. Kusursuz bir güç sistem koruma planı, hiçbir tehlikeli aşırı gerilimin insan hayatını veya ekipmanın çalışmasını her koşulda tehlikeye atmasını önlemelidir. Doğal olarak, böyle bir sistemin tasarımı ve geliştirilmesi ya çok pahalı ya da çoğu kez olanaksızdır.

Güç dağıtım ağları çeşitli türlerde hatalara tabidir. Geleneksel koruma konsepti, ölçülen akım değerine bağlı bir zaman yanıtını takiben, bir akım önceden belirlenmiş bir değeri aştığında fider akımlarının izlenmesine ve devre kesicilerin açılmasına dayanır. Bununla birlikte, bir arıza nedeniyle şebeke akımının yükselmesi esas olarak arıza empedans değerine bağlıdır. Sonuç olarak, bir arızanın yüksek bir empedans değeri göstermesi ve izlenen besleyici akımında sadece hafif bir artışa neden olması mümkündür. Böyle bir durumda, besleme devresi koruyucu ekipmanı, akım artışını şebeke yükündeki bir değişikliğe bağlayacağından arızayı algılayamayacak ve böylece artan kademe gerilimleri ve yangının başlama olasılığı gibi güvenlik sorunları yaratacaktır.

Çalışmamızda GHH'de meydana gelebilecek YEA durumu ele alınmış olup MATLAB/Simulink ortamında bir dağıtım devresi simülasyonu yapılmıştır. Dağıtım devresine ilk olarak Basitleştirilmiş Emanuel Modeli anahtarlama yoluyla bağlanmıştır. Simülasyon süresi 0.2 sn sürecek ve anahtar 0.1 sn'de açılacak şekilde ayarlanmıştır. Simülasyonda aşamalı olarak dağıtım hattı uzunlukları değiştirilmiştir ve uzunlukların ana kol akımına ve YEA akımına etkisi incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda dağıtım hattı uzunluğunun ana kol akımını ve YEA akımını etkilediği, uzunluk arttıkça 0.1 sn'ye kadar ana kol akım değerinin azaldığı ve 0.1 sn ve 0.2 sn aralığında, YEA modelinin devreye bağlanmasıyla, akım grafiğinin bozulmaya başladığı görüntülenmiştir. Ayrıca YEA akımı da 0.1 sn ve 0.2 sn aralığında azalmıştır.

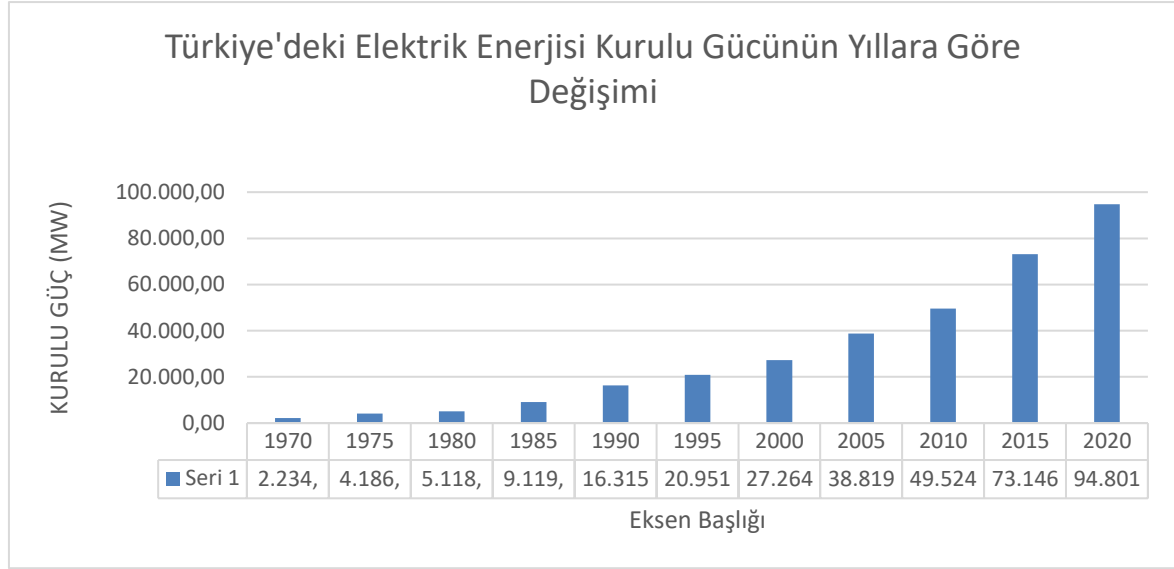
Sonrasında ise devreye Emanuel Modeli bağlanmış ve akım değerleri dağıtım hattı uzunluklarına göre kıyaslanmıştır. Son olarak ise Basitleştirilmiş Emanuel Modeline harmonikli kaynak bağlanmış ve akım değerleri analiz edilmiştir.

Mevcut çalışma sonucunda dağıtım hattı uzunluğunun YEA olayı üzerindeki etkisi analiz edilmiş ve ana kol akım grafiğinin değiştiği dikkate alındığında YEA olayının tespit edilebilmesini kolaylaştıracağı gösterilmiştir.

2. ELEKTRİK ENERJİSİ İLETİM VE DAĞITIM SİSTEMLERİ

Elektrik enerjisi ilk defa 1878 yılında günlük hayatta kullanılmaya başlamış, ilk elektrik santrali ise 1882'de Londra'da hizmete girmiştir. Ülkemizde ilk elektrik üretimi, 1902 yılında Tarsus'ta tesis edilen 2 kW gücündeki küçük bir su türbini ile gerçekleşmiştir.

İlk büyük santral ise 1913 yılında İstanbul Silahtarağa'da kurulan 15 MW güce sahip termik santral olmuştur. Nisan 2021 tarihi itibarıyla Türkiye'de 97.069 MW kurulu güç mevcuttur [22]. Türkiye'deki kurulu gücün yıllara göre değişimi Şekil 2.1.'de gösterilmektedir [22].



Şekil 2.1. Türkiye'deki kurulu gücün değişimi [22]

2.1. Klasik Dağıtım Şebekesi

Elektrik enerjisi üretim merkezleri ile tüketim yerleri genellikle birbirinden uzak yerlerde yer alır. Elektrik üretim santralinde üretilen elektriğin gerilim seviyesinin yükseltilerek iletilmesini, daha sonra bu gerilim seviyesinin kademeli olarak düşürülüp dağıtılmasını ve son kullanıcı olan tüketiciye ulaştırılmasını sağlayan ve bu aşamaların çoğunda otomasyon sistemlerinin kullanılmadığı şebekelere klasik şebeke adı verilir. Elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar kullanılan gerilim seviyeleri şu şekilde sıralanır:

- Alçak gerilim şebekeleri (0-1 kV arası)
- Orta gerilim şebekeleri (1- 35 kV arası)

- Yüksek gerilim şebekeleri (35 – 154 kV arası)
- Çok yüksek gerilim şebekeleri (154 kV ve üzeri)

Bu hatlar taşınan gücün gerilim seviyesine göre isimlendirilmektedir. Yüksek Gerilim (YG) hatları iletim şebekesini, Orta Gerilim (OG) ve Alçak Gerilim (AG) hatları ise dağıtım şebekesini oluşturmaktadır. Bu hatlar birbirlerine trafolar aracılığıyla bağlanmaktadır. İletim sırasında dikkat edilmesi gereken en önemli kriterlerden birisi kayıp miktarıdır. 50 Hz ya da 60 Hz elektrik frekansında iletim halindeyken enerji kaybı minimum yaşanmalıdır. Sözü geçen gerilim hatlarının farklı mesafelerde enerji taşıma sınırlaması vardır. Örneğin, OG hatları YG/OG arasında başlamakta ve AG hatlarına bağlanmaktadır. Enerji akışı YG seviyesinden başlayarak AG noktasına kadar gelir bu noktadan da kullanıcılara dağıtılır. Türkiye Elektrik İletim A.Ş. (TEİAŞ) tarafından işletilen elektrik iletim sistemi 70.034 km enerji iletim hattı uzunluğuna, 747 transformator merkezine, 141.2 TWh elektrik enerjisi üretimine ve 11 adet enterkonneksiyon bağlantısına sahiptir [22].

Elektrik enerjisi üretim merkezlerinden yüksek gerilimli iletim hatlarıyla tüketim bölgelerinin yakınlıklarına ulaştırılır ve buraki şalt sahalarında gerilimleri düşürülerek tüketicilere dağıtılır. Bu aşamalarda trafolar, direkler, kesiciler, ayırıcılar, bobinler, parafudurlar ve daha birçok şalt tesisi elemanları kullanılır. Bu elemanlar farklı şekillerde birbirlerine bağlanarak dağıtım şebekelerini oluşturur. Bu şebekeler dallı şebeke, ring şebeke, ağ şebeke ve enterkonnekte şebeke olmak üzere dört çeşittir.

2.1.1. Dallı (Radyal) şebekeler

Enerji beslemesinin tek bir kaynaktan yapıldığı ve şebekenin dağıtım şeklinin bir ağacın dallarına benzediği şebeke türüdür.

2.1.2. Ağ (Gözlü) şebekeler

Beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve alıcıları besleyen hatların bir ağ gibi örülerek gözlerin oluşturulduğu şebeke tipidir.

2.1.3. Ring şebekeler

Beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve bütün trafoların birbirine paralel şekilde kapalı bir sistemin oluşturduğu şebeke tipidir.

2.1.4. Enterkonnekte şebekeler

Elektrik enerjisinin kullanılacağı bölgelerin tamamını ya da belirli bölgelerinin ihtiyacını karşılamak için elektrik üretim ve tüketim merkezlerinin arasındaki bağlantıyı sağlayarak enerji iletimini gerçekleştiren sistemlere enterkonnekte sistemler adı verilir. Bu sistemde elektrik üretim ve tüketim araçlarının hepsi sisteme dâhil edilmektedir. Birbirlerine uzak yerlerde olan enerji üretim ve tüketim merkezleri arasındaki bağlantı enterkonnekte sistemlerle sağlanır. Yüksek gerilimde iletim sırasında kayıp miktarının minimum seviyede tutulması için bu sistemler sıklıkla kullanılır. Enterkonnekte sistemlerde enerjiden, alandan ve buna bağlı olarak harcamalardan tasarruf sağlanır.

2.2. Akıllı Şebeke

Günümüz elektrik enerjisi altyapısı, ihtiyaçları yaklaşık olarak bir asırdır hiç değişmeden başarıyla karşılamış ve hayatımızın her alanında devrim yaratmıştır. Bununla birlikte, mevcut altyapı yaşlandıkça daha az verimli hale gelmesi sebebiyle, çalışma sınırlamalarına karşı ve sürekli artan gereksinimlere ayak uydurmak için sürekli zorlanmaktadır. Bundan dolayı güvenilirlik, ölçeklenebilirlik, yönetilebilirlik, çevre dostu enerji üretimi ile birlikte çalışabilirlik ve maliyet etkinliği ihtiyaçları gibi işlevselliklere sahip, yeni, güvenilir, verimli ve esnek bir enerji alt yapısına geçiş yapılma zorunluluğu ortaya çıkmaktadır [23]. Geleneksel şebeke sadece elektrik enerjisi iletimi ve dağıtımını yaparken akıllı şebekeler depolama, haberleşme ve karar verme özelliklerine de sahiptir [24]. Akıllı şebeke, mevcut şebekeyi iş birliğine dayalı, daha duyarlı ve düzenli olarak çalışan bir şebekeye dönüştürmektedir [25], ayrıca akıllı şebekeler çoğu uygulamada beklenmedik koşullar altında güvenlik tehlikelerini veya olası arızaları önlemek için kendini tanıma ve kendini iyileştirme özelliğine de sahiptir [26].

Akıllı şebekenin tanımı aynı zamanda yerel koşullara da bağlı olup; farklı ülkeler akıllı şebekeye doğru ilerleme için çok farklı başlangıç noktalarına sahip olmuşlardır [1]- [2].

Akıllı şebeke, "saldırlara ve doğal olarak meydana gelen güç kesintilerine karşı güvenilirliği, kullanılabilirliği, verimliliği, ekonomik performansı ve daha yüksek güvenliği en üst düzeye çıkarmak için bir platform" sağlayabilmektedir [1]. 2007 yılında EISA07 bir akıllı şebekenin temel özelliklerini tanımlamıştır [27]. Bu özelliklerin arasında dijital bilgilerin kullanılması, şebeke operasyonlarının ve araştırmasının dinamik optimizasyonu, yenilenebilir kaynaklarının kullanımı gibi konular başta olmak üzere dağıtık enerji kaynaklarının geliştirilmesi, tüketicilere enerji alımlarının kontrolü için fiyatlandırma konusunda zamanında bilgi verilmesi, akıllı cihazların haberleşmesi ve ara bağlantısı için standartların geliştirilmesi vardır [27]. NETL ise akıllı şebeke için aşağıdaki yedi özelliği ortaya koymuştur [2]:

- "Tak ve çalıştır" bağlantılarıyla çeşitli kaynaklar, daha verimli ve daha temiz enerji için yeni fırsatlar da dâhil olmak üzere elektrik üretimi ve depolama seçeneklerini çoğaltır,
- Şebekenin erişime açık pazar haline gelmesiyle akıllı şebekeler, yeni nesil elektrikli araçlar gibi, yeni tüketici seçeneklerini arttırmış ve aynı zamanda daha verimli elektrik piyasası sağlar,
- İhtiyaç duyanlar için dijital düzeyde güç kalitesi sunarak, özellikle dijital cihaz ortamlarında üretim ve verimlilik kayıplarını ortadan kaldırır,
- Minimum maliyette istenen işlevsellik, operasyonlara rehberlik eder ve varlıkların daha eksiksiz şekilde kullanılmasını sağlar. Daha hedefli ve verimli şebeke bakım programları, daha az ekipman arızası ve daha güvenli operasyonlar sağlar,
- Akıllı şebeke, şebeke bileşenlerini veya ağ bölümlerini algılamak, analiz etmek, yanıtlamak ve gerektiğinde geri yüklemek için sürekli öz değerlendirmeler gerçekleştirir,
- Şebeke, fiziksel veya siber saldırıları engeller veya bunlara dayanıklılık gösterir ve kamu güvenliğini artırır,
- Tüketici tercihleri ve şebeke ile artan etkileşim hem şebekeye hem de çevreye somut faydalar sağlarken, müşteriye iletilen elektriğin maliyetini düşürür.

Kore'de yayımlanan Akıllı Şebeke Yol Haritası 2030 başlıklı çalışmada, bir akıllı şebekenin, tedarikçiler ve tüketiciler arasında gerçek zamanlı olarak iki yönlü elektrik bilgisi alışverişi yolu ile enerji verimliliğini optimize etmek için bilgi teknolojilerini mevcut elektrik şebekesine entegre eden yeni nesil bir ağ oluşturduğunu belirtilmiştir [28]. NIST'e göre ise akıllı şebeke, birçok çeşit dijital bilgi işlem ve haberleşme teknolojisi ve hizmetlerini güç

sistemi altyapısına entegre eden bir şebeke sistemidir. Çift yönlü enerji akışı ve iki yönlü haberleşme ve kontrol yetenekleri gibi yeni işlevler getirebildiğinden, evler ve işletmeler için akıllı sayaçların ötesine geçer [3]. DOE modern şebeke girişimine [4] göre, bir akıllı şebekenin aşağıdaki ana özellikleri ortaya çıkarması beklenmektedir:

- Arızayı hızla tespit etme, analiz etme, yanıt verme ve geri yükleme yeteneği,
- Bir tüketiciyi şebekeye dâhil etme yeteneği,
- Bir gücün kalitesi, tüketici ihtiyaçlarını karşılama yeteneği,
- Siber ve fiziksel saldırılara karşı bağışıklık yeteneği,
- Yenilenebilir enerji gibi yeni teknolojilere uyum sağlaması,
- Sermaye varlıklarının izlenmesi, optimizasyonu, işletme ve bakım maliyetlerini en aza indirmesi özelliği.

IEC, 2010 yılında Smart Grid Strategic Group (SG3) kurmuştur [5]. SG3'ün yayınladıkları belgelerde akıllı şebekeler “elektrik şebekelerinin modern kavramı” olarak tanımlamıştır [5]. Electric Power Research Institute (EPRI) IntelliGrid [6] projesi, güvenli, yüksek kaliteli, güvenilir elektrik ürünleri ve hizmetleri sağlamak için elektrik altyapısının uygun maliyetli bir şekilde dönüştürülmesini kolaylaştıracak teknolojilerin geliştirilmesini, entegrasyonunu ve uygulanmasını sağlamayı hedefleyen 2001 yılında oluşturulmuş bir projedir.

Akıllı şebeke, güç iletimi, dağıtım ve tüketimi sırasında neredeyse gerçek zamanlı olarak yakalanan verileri toplayan ve analiz eden, elektrik şebekesiyle entegre olan bir veri haberleşme ağıdır. Akıllı şebekelerin mimarilerinde haberleşme ihtiyacı, yakın-alan (Bina ve tesis içi) ve uzak-alan (Şehir içi ve şehirlerarası) haberleşmelerinin her ikisini de kapsamaktadır. Akıllı bir şebeke, iki yönlü dijital teknolojileri kullanarak tedarikçiler ve tüketiciler arasında elektrik sağlar. Enerji tasarrufu yapmak, maliyeti düşürmek ve güvenilirliği, verimliliği ve şeffaflığı artırmak için tüketicilerin evindeki veya binasındaki akıllı cihazları kontrol eder. Birbirine bağlı elemanların çalışmasının otomatik olarak izlenmesini, korunmasını ve optimize edilmesini sağlar. Akıllı bir şebeke, otomatik, geniş çapta dağıtılmış bir dağıtım ağı oluşturmak için elektrik ve bilgi akışlarının çift yönlü bağlantısı ile karakterize edilir. Gerçek zamanlı bilgi sağlamak ve neredeyse anlık arz ve talep yönetimi dengesini sağlamak için eski elektrik şebekesi ile modern haberleşmenin faydalarını birleştirir [29].

2.3. Akıllı Şebekelerde Kullanılan Haberleşme Teknolojileri

Elektrik şebekesinin haberleşme altyapısı “haberleşme ağı” olarak adlandırılır. Akıllı şebekelerde iletim, dağıtım ve müşteri alanlarında haberleşme için birçok haberleşme teknolojisi kullanılabilir de her problem için en uygun teknoloji olmayabilir. Ancak bir teknoloji veya bir teknoloji alt kümesi mevcuttur. Bu teknolojiler aynı etki alanında çalışan veya benzer haberleşme gereksinimleri olan güç sistemi uygulamaları gruplarıdır. Belirli bir güç sistemi uygulamasında bir haberleşme teknolojisi seçilmeden önce, uygulama gereksinimlerini teknoloji özellikleriyle eşleştirmek için kapsamlı bir analiz yapılması gerekir. Elektrik şebekesi, operasyonları desteklemek için bir haberleşme ağı kullanmaktadır. Bu haberleşme ağı, bakır kablolar, optik fiber, güç hattı taşıyıcısı gibi kabloludan kablosuz ağlara kadar çeşitli haberleşme teknolojilerden meydana gelmektedir. İletişim için en önemli bileşen, kontrol merkezleri ile bağımsız trafo merkezleri arasında olmalıdır. Bununla birlikte, mevcut haberleşme ağı yetersiz, esnek ve pahalıdır. Yetersiz olarak adlandırılmasının sebepleri:

- Mevcut haberleşme ağı yalnızca üretim ve iletim bölümlerini kapsamaktadır. Büyük değişikliklerin gerçekleşmesinin beklendiği dağıtım tarafını kapsamaz,
- Kurulu haberleşme ağının kapasitesi ve hızı, akıllı şebeke uygulamalarının gelecekteki kapasite artışı ve hız gereksinimlerini karşılamak için yetersizdir,
- Mevcut ağda değişiklik yapmak zor ve maliyetlidir. Yeni katılımcıların eklenmesi, ek haberleşme ağı kurulumlarını veya mevcut uygulamaların bu katılımcıları barındıracak şekilde değiştirilmesini gerektirebilir. Bu sadece tasarım, donanım ve programlama maliyetleri açısından pahalı değildir, aynı zamanda veri teslimi için gecikmeyi de artırabilir [30].

Akıllı şebekeler, farklı türde haberleşme ağları kullanmaktadır. Her hizmet birimi farklı topolojilere, düzenleyici rejimlere ve haberleşme sistemlerine sahip olacağından, akıllı şebekeler için tek bir çözüm veya temsili bir ağ yoktur. Akıllı şebekelerin, çeşitli ortamlarda [31] şebeke bileşenlerine verimli ve güvenilir erişim sağlamak için farklı haberleşme teknolojilerinden oluşan karma bir ağ tarafından desteklenen çok katmanlı bir ağ olması önerilmektedir. Temel olarak, kablolu ve kablosuz, lisanslı ve lisanssız, özel ve ticari, sabit ve mobil, dar bant ve geniş bant dahil olmak üzere çeşitli haberleşme ağları mevcuttur.

Kablosuz LAN, WiMAX, hücresele, ZigBee, mobil geniş bant kablosuz erişim, dijital mikrodalga teknolojisi ve bluetooth kablosuz haberleşme teknolojileride bunlara dahildir.

LAN teknolojisi IEEE 802.11 tabanlı kablosuz Yerel Alan Ağı (Local Area Network-LAN), sağlam, yüksek hızlı noktadan noktaya ve noktadan çok noktaya haberleşme sağlar. Wi-Fi olarak bilinen IEEE 802.11b, maksimum 11 Mbps veri hızı sunarken IEEE 802.11n 130 Mbps veri hızı sunar ve Doğrudan Sıralı Yayılı Spektrum (Direct Sequence Spread Spectrum-DSSS) modülasyon tekniği ile 2.4 GHz ve 5 GHz frekans bandında çalışır. Kablolulu LAN teknolojisi kurulum kolaylığı, cihazlara hareket imkânı ve uygunluğundan dolayı kablolu LAN teknolojisine göre daha avantajlıdır [32].

WiMAX teknolojisi Kablosuz Metropolitan Alan Ağı (Wireless Metropolitan Area Network-WMAN) için IEEE 802.16 serisi standartlarının bir parçasıdır [33]. Temel amacı, mikrodalga erişimi için dünya çapında birlikte çalışabilirliği sağlamaktır. Sabit haberleşme için 3,5 ve 5,8 GHz bantları ayrılmışken, mobil haberleşme için 2,3, 2,5 ve 3,5 GHz frekans bantları atanmıştır. 2,3, 2,5, 3,5 GHz spektrumları lisanslıdır; 5,8 GHz ise lisanssız spektrumdur. 70 Mbps'ye kadar veri hızı ve 48 km'ye kadar kapsama mesafesi sağlar [34].

GSM (Global System Mobile) tabanlı teknolojilerin temel avantajı, diğer kablosuz ağlara kıyasla daha geniş kapsama alanına sahip olmasıdır. 3G (3. Nesil) / 4G (4. Nesil) hücresele teknoloji, 824- 894 MHz / 1900 MHz spektrum aralığında çalışır. Bunlar lisanslı frekans bantlarıdır [35]. 1G teknolojisi 24 Kbps, 2G teknolojisi 64 Kbps veri hızı, 3G teknolojisi 144 Kbps-2Mbps veri hızı ve 4G teknolojisi 100 Mbps-1 Gbps veri hızı sunar. Hücresele modeme sahip mobil cihazların veri aktarımı hücreden hücreye değış tokuş edilir ve bu da kesintisiz veri akışını kolaylaştırır. Bu şekilde noktadan noktaya mimari oluşturur. Normalde kablolu bileşenlerin kablosuz hale gelmesini sağlamak için seri veya Ethernet arabirimi üzerinden veri alabilir ve hücresele ağ üzerinden ikinci bir arabirim üzerinden veri iletebilir. Bu teknoloji, geniş veri kapsama alanı sunar, bakım maliyeti yoktur ve ağ, taşıyıcı tarafından tamamen korunur [36].

ZigBee haberleşme teknolojisi genişletilmiş ağ yönetimi yetenekleri sayesinde hem endüstriyel hem de ticari uygulamalarda yaygın olarak benimsenmiştir ve IEEE 802.15.4 standardını temel alır. ZigBee, DSSS modülasyon tekniği ile 868 MHz, 915 MHz ve 2.4

GHz lisanssız frekans aralığında çalışır. 20-250 Kbps veri hızı sunar ve 10-100 m kapsama alanı sağlar [37].

Mobil Geniş Bant Kablosuz Erişim için IEEE 802.20 standardı, hem IEEE 802.11 Kablosuz Geniş Alan Ağı (Wireless Local Area Network-WLAN) hem de IEEE 802.16 WMAN'ların olumlu özelliklerini kullanarak 3,5 GHz'nin altındaki lisanslı frekans bantlarında yüksek bant genişliği, yüksek mobilite ve düşük gecikme sağlar. Ayrıca MobileFi olarak da bilinir. 1 Mbps ile 20 Mbps'lik veri hızları arasında gerçek zamanlı en yüksek veri hızı sunar. Bu standart, 250 km/sa araç hızına kadar tam hareketlilik için optimize edilmiştir [38].

Dijital mikrodalga, 2-40 GHz lisanslı frekans bandında çalışır ve 155 Mbps'ye kadar veri hızı sağlar. Mikrodalga teknolojisi, 60 kilometreye kadar çok uzun mesafelerde kapsama sağlar. Ethernet veya Eşzamansız İletim Modu (Asynchronous Transfer Mode-ATM) bağlantı noktasından veri alır ve diğerine mikrodalga radyo olarak iletir [39].

Bluetooth, kablosuz kişisel alan ağı standardı IEEE 802.15.1'in bir parçasıdır. Düşük güçlü, kısa menzilli radyo frekansı haberleşme standardıdır. 2.4-2.4835 GHz lisanssız endüstriyel, bilimsel ve tıbbi (Industrial, Scientific and Medical-ISM) bandında çalışır. 721 Kbps veri hızı sunar [37]. Böylece hem noktadan noktaya hem de çok noktalı haberleşme yapılandırmasına işaret etmeyi kolaylaştırır. İletişim konfigürasyonuna bağlı olarak 1m-100m arası mesafe kapsama alanı sunar.

Fiber optik, Dijital Abone Hattı (Digital Subscriber Line-DSL), koaksiyel kablo ve GHH kablolu haberleşme teknolojilerindedir [39].

Fiber optik haberleşmenin en önemli avantajları, Gbps veri paketlerini birkaç kilometreye iletme yeteneği ve elektromanyetik parazitlere karşı dayanıklılığıdır. Bu özellikler onu YG hatları için uygun hale getirir. Yüksek veri hızları (40 Gbps'a kadar) sunar ve böylece, uzun mesafelerde yüksek hızlı veri aktarımını kolayca destekler. Optik fiber tabanlı haberleşme, akıllı şebeke için uzun vadeli bir çözüm sağlar. Ancak, ön yatırım ve bakım maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle maliyetli olabilir [40].

DSL haberleşme teknolojisi, telefon hatlarını kullanarak dijital veri iletimi sağlar [41]. Dolayısıyla, bu altyapı, elektrik tesislerinin kontrol merkezlerine bağlı olması nedeniyle haberleşme ortamı için ek kurulum maliyetini önler. 3 çeşit DSL teknoloji türü vardır.

- Asimetrik DSL (Asymmetrical Digital Subscriber Line-ADSL), 8 Mbps'ye kadar indirme hızı ve 800 Kbps'ye kadar yükleme hızı olmak üzere iki yönde farklı veri hızları sağlar,
- Yüksek hızlı DSL (High-bitrate Digital Subscriber Line-HDSL) sistemleri, 3,6 km'lik bir mesafede 2,048 Mbps'ye kadar veri hızını destekler,
- Çok yüksek veri hızlı DSL (Very-high-bitrate Digital Subscriber Line-VDSL), daha hızlı veri aktarımı, yani 100 Mbps sağlayan bir DSL teknolojisidir [41].

Koaksiyel kablo, kablolu televizyon altyapılarına dayanan yüksek hızlı bir veri aktarım teknolojisidir. Koaksiyel kablo ağları, temel olarak yayın hizmetleri, yani televizyon ve radyo kanalları için tasarlanmıştır. Kablo üzerinden veri servis arayüzü spesifikasyonu, mevcut hibrit fiber koaksiyel altyapısı üzerinden yüksek hızlı veri aktarımı sağlayan uluslararası bir koaksiyel kablo haberleşme teknolojisidir [41]. Belirtilen haberleşme teknoloji özellikleri Çizelge 2.1.'de özet halinde verilmektedir.

Çizelge 2.1. Haberleşme teknolojilerinin bant genişlikleri ve veri hızları

HABERLEŞME TEKNOLOJİLERİ	BANT GENİŞLİĞİ	VERİ HIZI
Kablosuz LAN	2.4 GHz ve 5 GHz	130 Mbps
WiMAX	Sabit Haberleşme için 3.5 ve 5.8 GHz Mobil Haberleşme için 2.3-2.5-3.5 GHz	70 Mbps
GSM	824-894 MHz / 1900 MHz	1 Gbps
ZigBee	868 MHz-9.5 MHz-2.4 GHz	20-250 Kbps
Mobil Geniş Bant Kablosuz Erişim	<3.5 GHz	1 Mbps- 20Mbps
Dijital Mikrodalga	2-40 GHz	155 Mbps
Bluetooth	2.4-2.4835 GHz	721 Kbps
Fiber Optik	10^{14} hZ- 10^{15} hZ	40 Gbps
DSL	4 kHz-1100 kHz	100 Mbps
Koaksiyel Kablo	5 MHz-3GHz	10 Mbps

3. GÜÇ HATTI HABERLEŞMESİ

Güç hattı haberleşme teknolojileri, zaman ve maliyetleri azaltmak için bu önemli mevcut dallı ve birbirine bağlı altyapılardan yararlanarak, güç iletim, dağıtım ve tüketim ağlarında veya başka herhangi bir elektrikli ortamda kullanılan elektrik kabloları aracılığıyla haberleşme ağlarının kullanılmasını sağlayarak veri aktarımına izin verir. Bu tür veri iletimi, kapalı ortamlarda veya açık havada gerçekleştirilebilir.

Literatürde ilk kez 1838’de bilginin güç kabloları üzerinden iletilebileceği bir teknolojiden bahsedilmiştir [42]. O zamanlar, İngiliz bilim adamı Edward David (1806–55), “Elektrik Yenileme” olarak bilinen sinyal aralığını iyileştirmek için iletim hatlarına pillerin takıldığı bir sistem yaratmıştır [43], bu pillerin gerilim seviyesini uzaktan izlemek için, Londra-Liverpool telgraf sisteminin güç kaynağı hattı aracılığıyla bir haberleşme sistemi geliştirmiştir [44]. 1897’ de ise Joseph Routin ve C.E.Brown, günümüzde kamu hizmetleri tarafından uzaktan izlenen enerji sayaçlarının kullanılmasını sağlayan güç hattından elektrik tesisine gönderilen sinyallerle kontrol edilen güç ölçer patentini almıştır [44].

1918’de AT&T, telefon hatları üzerinden Ticari Taşıyıcı Frekans (Commercial Carrier Frequency-CaF) başlatmıştır. Geliştirilen CaF teknolojisi ile birden fazla telefon kanalının, her kanal kendi iletim frekansını kullanarak, bir telefon devresi üzerinden iletilmesine izin verilmiştir. Güç hatları telefon hatlarına göre daha sağlam ve mevcut olduğundan dolayı CaF aracılığıyla ses iletimi için kullanılmaya başlanmıştır. Yine 1918’de Japonya’da ilk test yapılmış ve telefon sinyalinin 144 km’lik elektrik hatları üzerinden ses iletimi gerçekleştirilmiştir [45].

1920’nin sonlarında ABD’de ve Avrupa’da var olan “kablosuz kablolu” olarak bilinen telefon sinyali 1929’da 50 ile 150 KHz arasındaki frekans aralığında çalışabilen sistemler kurulmuştur [45]. 1923’te CaF teknolojisi, ilk radyo sistemi için, Wired Radio Service Company tarafından test edilmiştir. Genlik modülasyonu frekans bandındaki radyo sinyalleri, abonelerin elektrik hatlarından yayılan sinyalleri alabilmeleri ve ayarlayabilmeleri için OG hatlarına yerleştirilmiştir. Taşıyıcı akım olarak bilinen bu sistem, daha hassas alıcılar ve antenler gerektiren geleneksel radyo sistemlerinden daha basit ve kolaydı bu sebepten dolayı kullanımı daha yaygın olmuştur. Bu sistem günümüzde arabalı

sinemalarda ve otobüs duraklarındaki yolcu bilgilendirme sistemlerinde halen kullanılmaktadır.

1930'larda Almanya'da düşük frekanslı tek yönlü haberleşme sistemleri (3 KHz'in altında) yük yönetimi uygulamaları için AG ve OG güç hatlarında kullanılmıştır [46]. Bu sistemler 1950'lerde ABB'nin öncül şirketlerinden Brown Boveri Electric'in diğer şirketlerle birlikte yüklerin elektrik şebekesine bağlanmasını veya kesilmesini yönetmek için bir güç hattı haberleşmesi sistemi geliştirmiştir. Dalgalanma kontrol sistemi (Ripple Control System-RCS) olarak bilinen bu sistem, birçok Avrupa ülkesinde konuşlandırılmıştır. Bu sistemde güç hizmeti, müşteri tesisindeki OG güç hattına bağlı alıcılar tarafından algılanan 3 KHz'in altındaki frekanslarda elektrik kontrol sinyalleri gönderir, bu sinyaller yüksek güçlü yükleri veya yük gruplarını uzaktan değiştirerek güç kuruluşunun tepe yükleri kontrol etmesine olanak tanımıştır [46]. Yüksek güce sahip bu düşük frekanslı sinyaller, AG güç hatlarına bağlı müşterilere ulaşmak için OG / AG transformatörlerini geçerek geniş bir alanı kapsayabilir [46].

1940'larda GHH teknolojisi ticari olarak bebek arabalarında kullanılsa da GHH'leri içeren ilk ticari proje, 1975 yılında bir İskoç şirketi olan Pico Electronics'in X10 ile ortaya çıkmıştır. X10 standardı ABD pazarına tanıtılmış ve ev otomasyon endüstrisini başlatmıştır [47]. X10 sistemlerinde, dijital veriler (bir adres ve bir komuttan oluşur), 120 KHz'lik bir taşıyıcıyı modüle ederek ve modüle edilmiş sinyali güç şebekesinin 50/60 Hz sinyalinin (geçiş başına bir bit) sıfır geçişi sırasında iletilerek bir kontrol cihazından kontrollü bir cihaza gönderilir [47]. Bu sistemler 20 Kbps'lik (kullanılabilir hız) veri hızlarına ulaşabilir [48].

Uluslararası GHH Sempozyumu ve Uygulamaları, GHH'nin zorlukları ve başarıları üzerine tartışmalar için Avrupa ve Asya'daki haberleşme araştırmacıları tarafından 1997'de düzenlenmiştir. 2006 itibarıyla, bu konferans Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü İletişim Topluluğu (Institute of Electrical and Electronics Engineers Communication Society-IEEE ComSoc) tarafından mali ve teknik olarak desteklenmektedir. 2000 yılında, Geniş Bant Güç Hattı İletişimi (GB-GHH) uygulamaları için standartlar oluşturmayı amaçlayan kâr amacı gütmeyen bir endüstri birliği olan HomePlug Power Alliance kurulmuştur [49]. 2001 yılında bu ittifak, iç mekân uygulamaları için uygun olan (örneğin, ev içinde geniş bant İnternet paylaşımı) ve 4,5-21 MHz frekans bandında çalışan ilk standardı olan HomePlug 1.0'ı piyasaya sürmüştür. Ortogonal Frekans Bölmeli Çoğullama

(Orthogonal Frequency Division Multiplexing-OFDM), çok taşıyıcılı bir modülasyon tekniğine ve çarpışma algılayıcıyla taşıyıcı dinleyen çoklu erişime dayanan bu standart, cihazlar arasındaki yaklaşık 300 m mesafe ile maksimum 1,3-5,3 Mbps veri hızları sunmaktadır [49].

2004 yılında, 35 katılımcıdan (kamu hizmetleri, üniversiteler, telekomünikasyon operatörleri ve GHH teknolojileri şirketleri) ve Avrupa Topluluğu'ndan araştırma fonundan oluşan Open GHH European Research Alliance (OPERA) projesi oluşturulmuştur. Bu projenin amacı, mevcut GHH teknolojilerinin iyileştirilmesi, standartlaştırılması ve GHH ağlarının omurgalara bağlanması için çözümlerin geliştirilmesiyle ve tüm Avrupa vatandaşlarına elektrik hatları aracılığıyla düşük maliyetli geniş bant erişim hizmeti sunmayı sağlamayı amaçlamıştır.

Şu anda, sırasıyla PRIME Alliance ve G3-PLC (Power Line Communication) Alliance tarafından önerilen güç hattı akıllı ölçüm evrimi (Power-line Intelligent Metering Evolution-PRIME) ve G3-GHH gibi 500 KHz'nin altında çalışan yeni Dar Bant Güç Hattı İletişimi (DB-GHH) teknolojileri, 150 Kbps ile 1 Mbps arasında teorik veri hızları sunabilir [50]. HomePlugAV2 gibi 100 MHz'e kadar frekanslarda çalışan yeni GB-GHH teknolojileri, kapalı ortamlarda 2 Gbps'ye kadar teorik veri hızlarına ulaşabilmektedir [51].

500 KHz'nin altında çalışan GHH teknolojileri, çok sayıda akıllı şebeke uygulamasının gerektirdiği veri oranlarını karşıladıklarından ve lisanslı radyo haberleşme bantlarında parazit seviyesini azaltmak için düşük frekansların gerekli olduğu dış ortamlarda kullanılabilirliğinden ve daha geniş bir kapsam sağladığından akıllı şebekelerde özellikle ilgi çekmiştir. GHH'de veri iletimi, birkaç KHz aralığına kadar dağıtım transformatörleri kullanılarak gerçekleştirilir [52]. [52]'de yapılan çalışmada GHH'nin dağıtım transformatörleri üzerinden kullanımını ele almaktadır.

3.1. GHH Bant Genişlikleri

GHH'de temel olarak, iletilecek veriler, uygun şekilde modüle edildikten sonra (ana bant veya bant geçişinde) bir bağlantı devresi vasıtasıyla elektrik kablolarına enjekte edilir. Elde edilen GHH sinyali (modüle edilmiş veriler), daha yüksek bir frekansta çalışarak 50/60-Hz

güç hattı sinyali dalga formu ile birlikte var olurlar. Ayrıca, GHH sinyalleri DA güç şebekelerine de enjekte edilebilir.

Vericide, kullanılan GHH standardı ile uyumlu olması gereken uygun bir veri arabirimi üzerinden, farklı iletişim protokollerine sahip çeşitli harici cihazlar GHH modeme bağlanabilir. İletilecek bilgi, ikili dijital formatta, bir İleri Hata Düzeltme (Forward Error Correction-FEC) şeması ile kodlanır ve bilgileri iletişim kanalının (yani, güç hatlarının) neden olduğu hatalara karşı korumak için araya eklenir. Modülatör daha sonra dijital (kodlanmış) bit akışını, enerji hattı kabloları üzerinden verimli bir şekilde iletmek üzere bir analog temel bant veya bant geçiş sinyaline eşler. Modüle edilmiş sinyal, genellikle analog bir temel bant veya bant geçiren filtre olan bir bağlantı devresi aracılığıyla elektrik kablolarına enjekte edilir.

Alıcıda, aynı zamanda bir temel bant veya bant geçiren filtre olan dekaplaj devresi, modüle edilmiş bilgi sinyalinin sadece frekans aralığını seçerek 50/60-Hz güç hattı sinyalini ve istenmeyen elektrik gürültülerini azaltabilir. Demodülatör, analog temel bant veya bant geçiş sinyalini dekaplaj devresinden ayıran (kodlanmış) bit akışına ayırır; bu, iletişim kanalı tarafından ve güç hattındaki farklı gürültü türleri tarafından ortaya konan hataları içerebilir. Son olarak, bit akışı serpiştirilmiş ve karşılaşılan hataları algılayan ve düzelten kod çözücüye yönlendirilir ve harici cihazlara doğru veri bilgisini sunar.

GHH sistemleri genellikle veri aktarım bant genişliğine göre sınıflandırılır ve üç ana gruba ayrılabilir [53]:

- Ultra Dar Bant GHH(UDB-GHH)
- Dar Bant GHH
- Geniş Bant GHH

3.1.1. Ultra dar bant güç hattı haberleşmesi

Süper Düşük Frekans (DF) (30–300 Hz) ve ultra DF (0,3-3 KHz) bantlarında çalışan GHH sistemleri UDB-GHH olarak sınıflandırılır. DF'leri nedeniyle bu sistemler, çoğu müşterinin sinyal tekrarlayıcılara ve / veya ek bağlantı devrelerine ihtiyaç duymadan AG / OG ağlarına bağlanmasına olanak tanıyan OG / AG transformatörleri aracılığıyla uzun menzilli iletişim

sağlar. UDB-GHH teknolojileri ağırlıklı olarak yük yönetimi için iletişim sistemleri olarak kullanılmaktadır. RCS olarak bilinen bu sistemlerde, güç hizmetleri, elektrik şebekesine uzaktan bağlanmak veya yükleri veya jeneratörleri şebekeden ayırmak için elektrik şebekesi aracılığıyla kontrol sinyalleri gönderir. Böylece elektrik enerjisi, esas olarak talebin yoğun olduğu zamanlarda yönetilebilir. RCS sinyalleri, 100 Hz ile 3 KHz (tipik olarak 150 ile 1,350 Hz arasında) arasındaki frekans bandını işgal eder ve güç hizmetleri tarafından kontrol merkezinin (Control Center-CC) bağlı olduğu OG güç hatlarına enjekte edilir. OG veya AG (trafoları geçerek) elektrik hatlarına bağlı endüstriyel ve konut tesislerinde, CC'den 150–200 km uzaklıkta bulunan müşterilere ulaşabilirler. Müşteri tarafında, elektrik tesisleri tarafından kurulan ve belirli yüklere veya yük gruplarına bağlı cihazlar (örn. sıcak su kazanları, elektrikli ısıtma, ev aletleri, sokak aydınlatması) ve jeneratörlerden alınan komutlara göre güç şebekesine bağlanmasını veya bağlantısını kesmeyi mümkün kılar.

RCS'ler elektrik sektöründeki şirketler için özel olarak üretilmiştir, bu nedenle bu tür hizmetler için standardizasyon veya lisans ücreti yoktur. RCS'ler için iki ana UDB-GHH standardı vardır: iki yönlü otomatik iletişim sistemi (TWACS) ve Turtle [49]. TWACS, 1982'de oluşturulan ve günümüzde yaygın olarak kullanılan elektrik hattı aracılığıyla bir iletişim standardıdır [49]. Otomatik Sayaç Okuma (Automatic Meter Reading-AMR) uygulamaları için, hizmet alanlarındaki elektrik tesislerinde çift yönlü haberleşme sağlamak için geliştirilmiştir. Ayrıca yük yönetimi amacıyla da kullanılabilir ve TWACS uzun menzilli iletişim sağladığından dolayı esas olarak konutların kentsel merkezlerden daha uzakta olduğu küçük kasabalarda ve kırsal alanlarda kullanılır (kırsal alanlarda 300 km'den fazla). TWACS sistemleri 60 Hz güç hatlarında 120 Bps'ye ve 50 Hz'de 100 Bps'ye (döngü başına 2 bit) kadar veri hızlarına ulaşabilir [54]. UDB-GHH diğer standart olan Turtle AMR uygulamaları için geliştirilmiştir. Bu teknoloji, güç hatları üzerinden tek yönlü haberleşme sağlar ve binlerce cihazın sürekli olarak dijital bilgi iletmesine olanak tanır. Her güç ölçer, 0,0015 Hz bant genişliği ile 5–10 Hz aralığında belirli bir frekans kullanır. Bu çok dar bant genişliği, yalnızca 0.0005 Bps'lik bir veri hızı sağlar, böylece bir sayacın basit okunması genellikle tam gün sürer, bu da mevcut sistemi yük yönetimi uygulamaları için uygunsuz hale getirir.

3.1.2. Dar bant güç hattı haberleşmesi

DB-GHH sistemleri, çok DF (3–30 KHz) ve DF (30–300 KHz) ve Orta Frekans (OF) bandının (300 KHz-3 MHz) bir kısmını kapsayan 3 ile 500 KHz arasındaki frekans bandında çalışır [53]. UDB-GHH sistemleri gibi, düşük frekansların kullanılması, DB-GHH teknolojilerinin harici uygulamalarda lisanslı telsiz haberleşme hizmetlerine müdahale riski olmadan kullanılmasına izin verir. İlk ilgili DB-GHH sistemi, 1978'de başlatılan ve bugün hala popüler olan X10 protokolüdür. 120 KHz'de çalışan ve 20 Bps kullanılabilir veri hızları sunan elektrik hatları aracılığıyla konut otomasyonu (ör. Işıklar ve cihaz kontrolü) için tasarlanmıştır [55]. Ev otomasyon uygulamasına ek olarak, DB-GHH sistemleri, evlerde enerji izleme, kontrol ve analizine adanmış ev enerji yönetim sistemlerinde de kullanılabilir. Bu kullanım ev aletlerinin izlenmesi ve kontrolü, ısıtma sistemi ve aydınlatma, fotovoltaik panellerin ve pillerin entegrasyonu ve hatta takılabilir elektrikli araçlarla iletişim ve güç şirketinden (enerji sayacı) alınan enerjinin izlenmesini sağlar. 1991 yılında, Avrupa'da elektroteknik mühendisliği alanında standardizasyondan sorumlu olan Avrupa Elektroteknik Standardizasyon Komitesi (CEN- European Committee for Standardization-CENELEC), AG güç hatlarında sinyalizasyon için 3 ile 148,5 KHz arasındaki frekans bandını düzenleyen EN50065-1 standardını yayınlamıştır. Bu frekans bandı, her biri farklı kullanıcılara ve uygulamalara ayrılmış olan CENELEC A, B, C ve D bantları olarak adlandırılan dört gruba ayrılmıştır [56]:

- CENELEC A (3–95 KHz), enerji sağlayıcıları ve bunların hizmetlerine ayrılmıştır,
- CENELEC B (95–125 KHz), herhangi bir erişim protokolüne ihtiyaç duymadan güç hizmetleri (tüm uygulamalar) müşterileri için ayrılmıştır,
- CENELEC C (125–140 KHz), ev ağı iletişimi amacıyla elektrik hizmetleri sunan müşteriler için ayrılmıştır. Bu bantta, çalışan farklı ve/veya uyumsuz sistemlerin bir arada bulunmasına izin veren erişim protokolünün, yani CSMA/CA'nın kullanılması zorunludur,
- CENELEC D (140-148,5 KHz), enerji hizmetlerinin (alarmlar ve güvenlik sistemleri, erişim protokolü olmadan) müşteri için ayrılmıştır.

DB-GHH sistemleri iki gruba ayrılabilir: Düşük Veri Hızlı (Low Data Rate-LDR) ve Yüksek Veri Hızlı (High Data Rate-HDR) [53].

LDR DB-GHH sistemleri tek taşıyıcı modülasyon tekniklerini kullanır ve 10 Kbps'ın altında veri hızları sunar. X10 standardından sonra yeni standartlar geliştirmiştir ve bu da daha yüksek veri hızlarına sahip daha güvenilir haberleşme sistemleri ile sonuçlanıp İnternet Protokolü (Internet Protocol-IP) operasyonunu mümkün kılmıştır. Popüler LDR DB-GHH'nin önemli birkaç standardı vardır.

LonWorks (ISO / IEC 14908), 1990 yılında Echelon Corporation tarafından tanıtılan LonWorks, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization-ISO) ve IEC tarafından 2008 yılında uluslararası bir standart olarak onaylanmıştır. ISO / IEC 14908, Açık Sistem Ara Bağlantısı (Open Systems Interconnection-OSI) modelinin yedi katmanının tümünü kapsar. LonWorks, CENELEC bantlarında (A ve C) çalışan diferansiyel Manchester kodlamasıyla ikili faz kaydırma anahtarlama modülasyonu kullanır. Güç hatlarına ek olarak, bükümlü çift kablolar ve kablosuz ortam üzerinden de çalışır. Güç hattı kabloları üzerinden, CENELEC A bandında, LonWorks 3,6 Kbps veri hızına sahiptir ve 75–86 KHz frekans bandında çalışır. CENELEC C bandında, veri hızı 115-132 KHz frekans bandında çalışan 5,4 Kbps'dir [57].

IEC 61334, uzaktan enerji ölçümü ve akıllı şebeke uygulamaları için güç hattı üzerinden LDR'ler sunan "dağıtım hattı taşıyıcı sistemleri kullanan dağıtım otomasyonu" olarak bilinen uluslararası bir standarttır. IEC 61334, OSI modelinin tüm yedi katmanını kapsar ve Fiziksel Katman (Physical-PHY), Yayılmış Frekans Kaymalı Anahtarlama (Spread Frequency Shift Keying-S FSK) modülasyonu ile 20-95 KHz frekans bandında çalışır ve FEC şemaları olmadan 2,4 Kbps'lik etkili bir veri hızı sağlar [58].

HomePlug C&C, OSI modelinin yedi katmanını kapsayan bu DB-GHH standardı, ev aletlerinde, ev otomasyonunda ve akıllı şebeke uygulamalarında komut ve kontrol amaçlı tasarlanmıştır. HomePlug C&C cihazları tak ve çalıştır özelliindedir, otomatik olarak güvenli bir ağ oluşturabilir (sadece cihazı güç hattına bağlayarak). HomePlug C&C, maksimum 7,5 Kbps veri hızı sunar [59].

HDR DB-GHH sistemleri 1 Mbps'ye kadar (PHY katmanında) teorik veri hızlarına ulaşabilir [60]. İlk HDR DB-GHH sistemleri olan PRIME ve G3-PLC, standart geliştirme kuruluşları tarafından oluşturulmamış, ancak daha sonra uluslararası standartlar olarak onaylanmıştır. IEEE ve ITU ayrıca HDR DB-GHH uluslararası standartlarını sırasıyla IEEE 1901.2 ve

ITU-T G.hnem standartları yayınlamıştır. Bu standartlar, OSI modelinin sadece iki alt katmanı olan PHY ve Medya Erişim Kontrolü (Media Access Control-MAC) belirtir [61].

PRIME, alt taşıyıcılar için Diferansiyel Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Phase Shift Switching-DPSK) (sembol başına bir, iki veya üç bit taşıyan) eşlemesini kullanan OFDM'ye dayanır. PRIME, bilgiyi korumak için evrişimli CONV (Convolutional) kodlamanın ve veri serpiştirmenin yanı sıra, veri çerçevesi içindeki bilgilerin dört kat tekrarlandığı, negatif SNR'li koşullarda bile çalışmasına izin veren isteğe bağlı bir sağlam işlem (ROBO) modu sunar. Bilginin OSI modelinin üst katmanlarıyla arayüzlenmesinden sorumlu olan PRIME MAC'ın yakınsama katmanı iki alt katmana bölünmüştür. Ortak Parça Yakınsama Alt Katmanı (Common Part Convergence Substrate-CPCS), farklı iletişim profilleri için özel hizmetler ile genel hizmetler (yalnızca veri bölümlenme ve yeniden birleştirme) ve Hizmete Özel Yakınsama Alt Katmanı (Service-Specific Convergence Substrate-SSCS) sağlar. SSCS, IPv4 ve IPv6 paketlerinin PRIME ağları üzerinden aktarılmasına izin verir. PRIME 41.992'den 471.679 KHz'e (farklı şekillerde seçilip birleştirilebilen sekiz frekans kanalına bölünmüş) frekans bandını kullanır ve CENELEC, Radyo Endüstrisi ve İşletmeleri Derneği (Association of Radio Industries and Businesses-ARIB) ve FCC bantlarında çalışabilir. PRIME 5,4 ila 1,028,8 Kbps arasında değişen teorik bir veri hızına ulaşır [62].

G3-PLC standardı, PHY ve MAC katmanlarını belirtir. G3-PLC ayrıca veri iletiminin sağlamlığını geliştirmek için sıralı bir şekilde bir Reed-Solomon (RS) kodlaması kullanır. G3-PLC, CENELEC, ARIB ve FCC bantlarında çalışır ve FCC bandında 300 Kbps'ye kadar teorik veri hızı sunar [63]. Sağlamlığı nedeniyle, G3-PLC sinyali, kuplaj devresine ihtiyaç duymadan OG / AG transformatörlerini geçme yeteneğine sahiptir.

IEEE 1901.2 standardı, benzer PHY katmanına ve IPv6 paketlerini destekleyen IEEE 802.15.4'e dayalı MAC'a sahip olan G3-PLC standardını temel alır. Güvenlik ve erişim mekanizması da G3-PLC'ye benzer. Alternatif ve DA güç hatları, iç ve dış mekân uygulamaları için uygun, OG / AG trafosunu geçme yeteneği ve 500 Kbps'ye kadar veri hızı ile 500 KHz altındaki akıllı şebeke uygulamalarında geçerli olan standarttır. CENELEC (A ve B), ARIB ve FCC bantlarında çalışır ve diğer DB-GHH teknolojileri ile birlikte kullanılabilir [64].

ITU-T G.hnem, 2010 yılında Uluslararası Telekomünikasyon Birliği (International Telecommunication Union-ITU), akıllı şebeke uygulamaları için, PRIME ve G3-PLC'nin özelliklerini, daha iyi bir performans için yeni işlevler ve iyileştirmelerle bir araya getiren dünya çapında DB-GHH standardı oluşturmak için G.hnem projesini başlatmıştır. 2011 yılında, ITU-T NB-PLC standardının PHY ve MAC spesifikasyonları onaylanmış ve yayınlanmıştır. G.hnem MAC katmanı, IPv4, IPv6 ve Ethernet dahil olmak üzere çoklu protokolleri destekler [65].

3.1.3. Geniş bant güç hattı haberleşmesi

GB-GHH sistemleri, OF (300 KHz-3 MHz), Yüksek Frekans YF (3-30 MHz) ve çok YF (30-300 MHz) bantlarının bir kısmını kapsayan 1.8 ile 250 MHz arasındaki frekans bandında çalışır [53]. GB-GHH yüksek frekanslarda çalıştığı için bu sistemler onlarca veya yüzlerce Mbps'lik veri hızlarını içeren uygulamalar için uygundur. GB-GHH sistemleri 2 Gbps'e kadar (PHY katmanı üzerinden) veri hızlarına ulaşabilir [51]. 2013'ten itibaren CENELEC EN 50561-1 standardı, GB-GHH sistemleri için 1,6-30 MHz frekans bandını düzenlemiştir.

2000'lerde ev içi uygulamalar için GB-GHH standartlarını geliştirmek amacıyla endüstri dernekleri oluşturulmuştur. Bu dernekler tarafından oluşturulan standartlar PHY ve MAC katmanlarını belirtir ve OFDM' ye dayanmaktadır.

HomePlug, HomePlug Power Alliance, ev elektrik hattı ağ ürünleri için standartlar geliştirmek amacıyla 2000 yılında kurulmuştur. İlk standardı olan HomePlug 1.0, 2001 yılında piyasaya sürülmüş ve 4,5-21 MHz frekans bandında çalışmaktadır. PHY katmanı Reed Solomon (RS) ve CONV kodlamasına, serpiştirmeye ve OFDM modülasyonuna dayanan birleştirilmiş Forward Error Correction (FEC) şeması kullanır. Taşıyıcı Algılama Çoklu Erişim / Çarpışmadan Kaçınma (CSMA / CA) mekanizmasına ve 56 bit Veri Şifreleme Standardına (56-bit Data Encryption Standard-DES) dayalı güvenlik şemasına sahip MAC katmanı, yaygın olarak kullanılan Ethernet standardıyla entegrasyona izin veren IEEE 802.3 çerçeve formatlarıyla çalışmak üzere geliştirilmiştir. PHY katmanı üzerinden teorik maksimum veri hızı 13.78 Mbps'dir ve tipik bir yerleşim ortamındaki saha testleri 1.6–5.3 Mbps veri hızları sunmuştur (OSI modelinin uygulama katmanında) [53]. 2005 yılında HomePlug AV (ses ve video) standardı başlatılmıştır. Ev ortamında geniş bant internet bağlantısını paylaşmak için tasarlanmış HomePlug 1.0'dan farklı olarak, yüksek

çözünürlüklü video ve ses dağıtmak için tasarlanmıştır. Bunun için PHY katmanı üzerinden 200 Mbps teorik veri hızı ve 2-30 MHz frekans bandında çalışan 150 Mbps bilgi hızı sağlar. PHY katmanındaki veriler, turbo evrişimli kodlama ve serpiştirme ile korunur; daha sonra, DPSK veya Karesel Genlik Modülasyonu (Quadrature Amplitude Modulation-QAM) sembollerine eşlenir ve 1,155 alt taşıyıcıyla OFDM modülasyonu aracılığıyla iletilir. 2010 yılında, ev alan ağlarında akıllı şebekeler ve enerji uygulamalarına uygun, düşük maliyetli ve düşük güçte bir çözüm sunmak için HomePlugAV'ın basitleştirilmiş bir sürümü tanıtılmıştır. HomePlug Green PHY olarak adlandırılan bu sürüm, HomePlug AV'nin aynı PHY katmanını kullanır, ancak yalnızca PHY katmanı üzerindeki veri hızını 10 Mbps ile sınırlayan Diferansiyel Kuaterner Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Differential Quaternary Phase Shift Switching-DQPSK) alt taşıyıcı eşlemesini destekler. Ayrıca, cihaz veri göndermediğinde veya almadığında enerji tasarrufu için bir güç tasarrufu moduna sahiptir. 2012 yılında, bir ev ortamında birçok işlevli cihazın entegrasyonu, ağ cihazlarından daha yüksek veri hızlarının talebini karşılaması için, 1012 Mbps teorik veri hızına ulaşabilen (PHY katmanında üzerinden) HomePlug AV2'yi piyasaya sürmüştür. HomePlug AV ve HomePlug Green ile aynı mimariyi kullanır ve aralarında birlikte çalışabilirliğe izin verir. Bununla birlikte, 3,455 alt taşıyıcının kullanımına ve dolayısıyla HomePlug AV'ye kıyasla daha yüksek bir veri hızına izin veren 1.8'den 86.16 MHz'e kadar genişletilmiş bir frekans bandına sahiptir [51].

HD-PLC, 2005 yılında oluşturulmuş bir GB-GHH standardıdır (MAC ve PHY katmanları). HD-PLC PHY katmanı, her bir alt taşıyıcıda Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation-PAM) eşlemesi ile Dalgacık OFDM tekniğine (W-OFDM) dayanır. Geleneksel Hızlı Fourier Dönüşümü OFDM (Fast Fourier Transform-FFT OFDM) ile karşılaştırıldığında, W-OFDM, OFDM sembolleri arasında koruma aralıkları gerektirmez. Bu özellik nedeniyle, W OFDM, HD-PLC PHY'nin 26 MHz bant genişliği üzerinden (frekans aralığı 2–28 MHz) 240 Mbps teorik veri hızına ulaşabilmesi için daha yüksek iletim verimliliği sağlar. Birleştirilmiş RS ve CONV FEC kodlama ve serpiştirme, sistemin sağlamlığını sağlamak ve iletişim kanalının neden olduğu iletim hatalarını azaltmak için kullanılır. İsteğe bağlı olarak, Düşük Yoğunluklu Parite Kontrolü CONV (Low Density Parity Check-LDPC-CONV) kodlaması da kullanılabilir [66].

2005 yılında IEEE ComSoc tarafından desteklenen ve 10 Mbps'nin üzerinde veri hızları (PHY katmanı üzerinden) ve 100 MHz'in altındaki frekanslarla uluslararası bir GB-GHH

standartı geliştirmeyi amaçlayan IEEE P1901 Working Group oluşturulmuştur [67]. 2010 yılının sonunda ise bu çalışma grubu tarafından oluşturulan standart, IEEE 1901, 2010 yılında yayınlanmıştır [68]. IEEE 1901-2010 BB-PLC standardı, biri HomePlug AV'ye, diğeri HD-PLC standartlarına dayalı olmak üzere iki PHY / MAC katmanını tanımlar. Katmanlardan birinin seçimi isteğe bağlıdır, ancak IEEE 1901-2010, her iki PHY katmanı (ancak birlikte çalışabilirlik yok) ve diğeri GB-GHH standartları arasında bir arada bulunmayı garanti eden zorunlu bir Sistemler Arası Protokolü (Intersystem Protocol-ISP) belirtir. HomePlugAV ve HD-PLC'nin (30 MHz'e kadar) frekans bandında çalışmaya ek olarak, IEEE 1901-2010 standardı isteğe bağlı olarak 30 MHz (1.8-50 MHz) üzerindeki frekanslarda çalışabilir ve bu da 500 Mbps'lik teorik veri hızı sağlar (PHY katmanı ve tüm frekans bandında çalışma) [69].

2006 yılında HomeGrid Forum tarafından desteklenen ITU, güç hatları, telefon hatları, koaksiyel ve Cat-5 kabloları üzerinden çalışabilen ev içi bir ortamda kablolu geniş bant haberleşme (1 Gbps'e kadar) sağlayabilecek uluslararası bir standart geliştirmek amacıyla G.hn projesini başlatmıştır. 2010 yılında, ITU-T G.hn'nin üç bileşeni, PHY katmanı (G.9960), MAC katmanı (G.9961) ve birlikte varoluş protokolü (G.9972), ITU tarafından tamamlanıp onaylanmıştır [70]. ITU-T G.hn PHY katmanı (G.9960) üç farklı profille çalışır. Bu profillerden biri akıllı şebeke uygulamaları için tasarlanmıştır ve 20 Mbps'ye kadar veri hızları, düşük karmaşıklık ve düşük güç tüketimi ile 2–25 MHz frekans bandında çalışır. Diğeri iki profil, 1 Gbps'ye kadar (PHY katmanı üzerinden) veri hızlarıyla 2–50 ve 2–100 MHz frekans bantlarında çalışır [65]. Yarı Döngüsel bir LDPC (Quasi-Cyclic-QC-LDPC) zorunlu kodlama, serpiştirme, uyumlu Faz Kaydırmalı Anahtarlama (Phase Shift Keying-PSK) veya QAM haritalama ve OFDM modülasyonu kullanır [71]. ITU-T G.9972, IEEE 1901-2010 ile ve dolayısıyla HomePlug ve HD-PLC cihazlarıyla bir arada bulunmasına izin veren G.hn standardı için ISP'yi tanımlar, çünkü tüm cihazlarda aynı ISP uygulanmaktadır. ISP, bu cihazların zaman bölmeli çoklama yoluyla aynı frekans bandını paylaşmasına izin verir, diğeri deyişle her cihaz aynı ortam ve frekans bandını farklı zamanlarda kullanır.

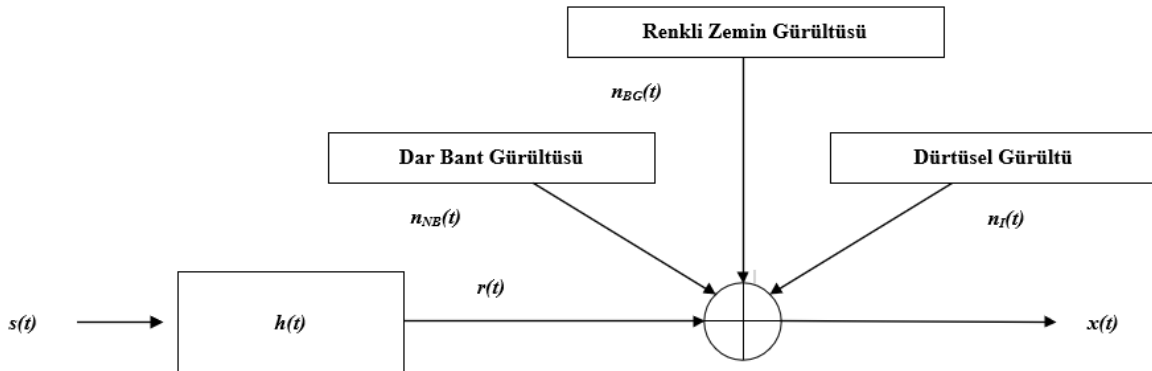
Bu bölümde GHH teknolojilerinin arkasındaki kavramlar, tarihçesi, sınıflandırması ve son olarak piyasada mevcut olan mevcut GHH standartlarına genel bir bakış sunulmuştur. Eski GHH teknolojileri hala RCS'lerde veya ev otomasyonu amaçlarıyla elektrik hizmetleri tarafından kullanılıyor olsa da modern GHH'ler, mevcut kablolu ve kablosuz iletişim

teknolojilerinin (dar bant veya geniş bant uygulamalarında) bir tamamlayıcısı veya hatta ikamesi olarak kullanılmasına izin veren avantajlara sahiptir.

3.2. GHH Kanallarında Gürültüler

GHH kanal modellemesinin önemli bir kısmı, benimsenecek gürültü modeli ile ilgilidir. Bu ortamdaki gürültü aslında elektrik motorları, dimmerler, tüketici elektroniği gibi ağa bağlı gürültü kaynakları ve radyo yayını gibi harici kaynaklardan oluşan bir bileşim olduğundan, tüm farklı kaynakların özelliklerini kapsayabilen tek bir model elde etmek kolay değildir.

GHH kanalında gözlemlenebilen üç yaygın gürültü tipi; ağa bağlı birkaç gürültü kaynağının üst üste binmesi sonucu anlaşılabilen renkli arka plan gürültüsü; genellikle radyo yayınlarıyla ilişkilendirilen dar bant gürültüsü ve örneğin ağıdaki elektrik ekipmanının bağlanması veya bağlantısının kesilmesinden kaynaklanan dürtüsel gürültü şeklindedir.



Şekil 3.1. GHH kanallarında bulunan farklı gürültü türleri

3.2.1. Renkli zemin gürültüsü

Çeşitli kaynakların katkısı nedeniyle, GHH sistemlerinde kullanılan frekans aralığındaki bozukluklar, frekansa göre değişen renkli bir arka plan gürültüsüne yol açar. Literatürde, arka plan gürültüsü için farklı modeller önerilmiştir. Ancak hemen hemen tüm frekans aralıklarında düşük yoğunluklu benzer bir güç spektral profilini paylaşır ve bu daha düşük frekanslar için önemli ölçüde artar. Bu tür özellikleri sergileyen basit bir model, arka plan gürültüsünün aşağıdaki güç spektral yoğunluğu ile bir Gauss dağılımına sahip olduğunu varsayar.

$$S_{Nbg}(f)=a+b \left| \frac{f}{1 \times 10^6} \right| \quad (3.1)$$

Burada a, b ve c ölçümlerden elde edilebilen parametrelerdir ve f Hz cinsinden verilir. Arka plan gürültüsü için başka bir model, GHH kanalının karakterizasyonuna çeşitli katkılarda bulunan OMEGA projesi bağlamında önerilmiştir. Deneysel ölçümlere dayanılarak önerilen model, arka plan gürültüsünün güç spektral yoğunluğunu şu şekilde ifade eder:

$$S_{nBGOMEGA}(f)=10 \log_{10} \left(\frac{1}{f^a + 10^b} \right) \quad (3.2)$$

a ve b model parametreleridir.

3.2.2. Darbant gürültüsü

Genel olarak, GHH sistemlerinde iki ana dar bant parazit kaynağı vardır. Öncelikle, dimmer cihazlarda 50 Hz kadar düşük olabilen, anahtarlama frekansı ile ilişkili bir gürültü oluşturan giriş akımını (dimmerler ve anahtarlama güç kaynakları gibi) anahtarlayarak çalışan güç ağına bağlı cihazlar. İkinci grup gürültü kaynakları, amatör radyonun yanı sıra uzun, orta ve kısa dalga aralığındaki radyo yayıncılarından radyo frekansı iletimi ile ilişkilidir. Kısa ve orta dalga bandında, iletimler, geniş bant OFDM iletişim şemalarında tek tonlu bir girişim olarak görülebilen 9 KHz civarında bant genişliğine sahip dar bant analog modülasyon tekniklerine dayanmaktadır [72].

Bu nedenlerden dolayı, simülasyonlarda, dar bant gürültüsü genellikle çoklu sinüzoidal terimlerin bir toplamı olarak modellenir.

$$n_{NB}(t)=\sum_{k=1}^{N_{interf}} A_k \sin(2\pi f_0, kt + \phi_k) \quad (3.3)$$

Burada N_{interf} , her biri farklı bir merkezi frekansı f_0, k , genliği A_k ve faz ϕ_k olan rahatsız edici sayısıdır. Olası rahatsız ediciler hakkında önceden bilgi bulunmadığında, alışlagelmiş bir yaklaşım, frekansların, genlikleri ve fazları için keyfi değerlerle, frekans spektrumunda rasgele dağıtıldığını düşünmektir.

3.2.3. Dürtüsel gürültü

GHH kanalındaki dürtüsel gürültü, temel olarak kısa bir süre içinde yüksek düzeyde parazit oluşturan parazitlerin meydana gelmesi ile ilişkilidir; bu, arka plan gürültüsünü temsil etmek için kullanılanlar gibi basit modeller tarafından kolayca yakalanamayan bir özelliktir. Sıralamada, en yaygın dürtüsel gürültü modellerinden bazıları: Bernoulli-Gauss modeli, Middleton Sınıf A modeli, α -kararlı modeli ve Markov-Gauss modeli.

Akıllı şebekelerin konuşlandırılmasının başarısı, şebekenin en önemli düğümlerini birbirine bağlamak için çift yönlü haberleşmenin kullanılmasını gerektirir. GHH teknolojileri, şebekenin tüm düğümlerinde yaygın iletişim kurmak için mevcut elektrik şebekesi altyapısından yararlanarak potansiyel olarak yatırım maliyetlerini azaltabildiğinden (kablolu çözümlerle karşılaştırılabilir dağıtım maliyetlerine sahip tek kablolu teknoloji) bu yeni güç modeline katkıda bulunabilir. Ayrıca, her yerde bulunan kapsama alanını hedeflerken mevcut teknolojileri tamamlamak için düşük maliyetli bir alternatif sağlayabilir. Ayrıca kablolu haberleşmeleri yaygın olarak bozan engellerle yüksek veri hızı iletişim kurabilir ve halihazırda diğer sektörlerde (örneğin İnternet erişimi) uygulanan GHH teknolojilerini kullanabilirler.

Dünya nüfusunun %84'ünün elektriğe erişimi olduğu için, elektrik şebekesinin dünyadaki en büyük fiziksel ağ olduğu sonucuna varmak mümkündür. Bundan dolayı, bilgi iletmek için yüksek kapasiteli altyapının kullanılması çok avantajlı görülmektedir. Güç hattı haberleşme teknolojisi diğer kablolu teknolojilerle karşılaştırıldığında, asıl avantaj yeni haberleşme altyapılarının yerleştirilmesine gerek olmadığı için zaman ve maliyetin az olmasıdır.

GHH teknolojilerinin temel avantajları aşağıdaki gibidir:

- Dünya nüfusunun çoğunluğuna ulaşan, binaların, evlerin ve endüstriyel tesislerin ve uzak elektrikli bölgelerin iç kısımları da dahil olmak üzere tüm ülkeleri kapsayan mevcut bir altyapının (yani elektrik şebekesi) kullanımı (zaman ve maliyette azalma haberleşme altyapısının kullanılabilmesi);
- Tüneller, bina ve evlerin bodrum katları, beton ve metal korumalı yapılar gibi kablolu sinyallerin zor olduğu yerlere girme yeteneği;

- Bilgi ve sistem güvenliğini artıran GHH sinyallerine erişmek için elektrik şebekesiyle fiziksel temas gerekliliği;
- Uzun menzilli haberleşme. UDB-GHH sistemleri, vericiden 200 km'ye kadar bulunan alıcılarla güç hatları üzerinden düşük veri haberleşme bağlantısı kurabilmesi [73];
- Yüksek veri hızlı haberleşme. GB GHH sistemleri, 1 Gbps'ye kadar maksimum (teorik) veri hızları, Tek Girişli-Tek Çıkışlı (Single Input-Single Output-SISO) modunda çalışan ve çok girişli çoklu çıkışlı (2 Gbps'ye kadar) çalışma oranları sunar [51].

Güç hattı tam anlamıyla uygun bir haberleşme kanalı olarak kabul edilemez. GHH teknolojilerinin dezavantajları temel olarak aşağıdaki gibi kanal özellikleriyle ilgilidir:

- İletişim kanalı olarak çalışan güç hattının parametreleri, şebekeye bağlı yüklerin konumu ve özelliklerine göre zaman içinde değişmektedir;
- Belirli koşullar altında, gürültü gücü GHH sinyalinin gücünden daha büyük olabilir ve bu da negatif sinyal-gürültü oranlarına neden olur. Ek olarak, AG güç hatlarında, güç hattındaki bir yükün bağlantısından dolayı aniden 10 dB düzeyinde bir sinyal-gürültü oranına değişimi olabilir [74].
- GHH sinyalleri ciddi zayıflamaya maruz kalabilir. Örneğin, bir AG güç hattı üzerinden tipik bir 200 m noktadan noktaya GHH bağlantısı, 30 dB'lik düzenin sinyal zayıflamalarına maruz kalabilir [73]. Ayrıca, kullanılan GHH teknolojisine bağlı olarak, ağdaki gerilim transformatörleri 50 dB veya daha yüksek düzeylerde sinyal zayıflamalarına neden olabilir [75].
- Güç hattı kabloları korumalı değildir, bu nedenle taşıdıkları RF enerjisinin bazı kısımları yayılabilir. Bu nedenle, 3,8–30 MHz aralığında çalışan GHH sistemleri, amatör radyo ve acil durum bantları gibi aynı frekansları kullanan lisanslı radyo haberleşme hizmetlerine müdahale edebilir.
- Elektrik şebekesinin topolojisi ve bileşenleri verileri yüksek frekansta iletmek için tasarlanmamıştır. Güç hattı, özellikle düşük voltajlı şebekelerde (1.000 V'a kadar), farklı özelliklere sahip birçok şubeye sahiptir (örneğin, farklı kablolar, yükler, elektrik bileşenleri, açık uçlar). Bu dallanmalar ve sonuçta ortaya çıkan empedans uyumsuzlukları, GHH sinyallerinin çeşitli noktalarda yansımalarına neden olur, bu çok yönlü yayılma olarak bilinen ve GHH'leri önemli ölçüde bozabilen bir etkidir.

- Güç hattı haberleşmesinde kullanılan kablolar büyümüş bitkiler, bina duvarları veya herhangi bir yüzeye fiziksel temasa eğilimlidir. Bu durum, çevredeki somut nesnelere elektrik potansiyelini yükseltir ve elektrik çarpması, ciddi elektrik yanıkları veya malzemelerin kıvılcımı ve ısınmasıyla tutuşan yangınlar nedeniyle can kaybıyla sonuçlanabilir. Böyle bir durumda oluşan istenmeyen elektriksel temas Yüksek Empedans Arızası (YEA) olarak adlandırılır.

YEA iletken olmayan cisimlerin, malzemelerinden dolayı akım akışına yüksek empedans göstermesi ve bu nedenle bu tür bir arıza koruma ekipmanına anormal bir durum olarak görülmemesini sağlamaktadır. Temas durumuna bakılmaksızın, bir kaçak akım, enerjili iletkenle ayrılır ve canlı ve başta insan hayatına tehdit oluşturan somut nesnelere aracılığıyla zemine akar.

4. DAĞITIM HATTINDA YÜKSEK EMPEDANS ARIZASI

Havai güç dağıtım ağları etraflarındaki komşu nesnelere fiziksel temas tabidir. Bu nesnelere düşük akım arızalarına neden olan yüksek empedans ile karakterize edilebilir. Bununla birlikte, geleneksel şebeke koruma konsepti, ölçülen akım değerine bağlı bir zaman yanıtını takiben, bir akım önceden belirlenmiş bir değeri aştığında fider akımlarının izlenmesine ve devre kesicilerin açılmasına dayanır. Bir arıza nedeniyle şebeke akımının yükselmesi esas olarak arıza empedans değerine bağlıdır. Sonuç olarak bir arızanın yüksek bir empedans değeri göstermesi ve izlenen besleyici akımında sadece hafif bir artışa neden olması mümkündür. Böyle bir durumda, besleyici koruyucu ekipman, akım artışını şebeke yükündeki bir değişikliğe bağlayacağından arıza algılanamayacak ve böylece artan kademe gerilimleri ve yangının başlama olasılığı gibi güvenlik sorunlara ortaya çıkacaktır [76-77]. Bundan dolayı etkili bir koruma ve arıza tespiti yöntemine ihtiyaç duyulmaktadır.

Akıllı şebekelerde haberleşme için GHH'nin kullanımı bu problemi daha da önemli hale getirmiştir. Bu problemin üstesinden gelmenin yeni yolları, geleneksel elektrik şebekelerinin operasyonlarında devrim yaratması beklenen akıllı şebekelere gelecek ve çok umut verici dönüşümü tarafından sunulabilir. Bu bağlamda, mümkün olduğunca çok sayıda görevin uygulanmasını birleştirmek için ekipman kullanarak genel sistem işlevselliğini iyileştirmeyi amaçlayan yeni teknolojiler bu bölümde tanıtılmaktadır. Bununla birlikte, aynı GHH cihazları güç ağlarında yüksek frekanslı sinyalleri üst üste bindirme yetenekleri sayesinde YEA tespiti için kullanılabilir.

4.1. Yüksek Empedans Arızası

Yüksek empedans arızası, enerjilendirilmiş bir birincil iletken ağaç, yapı veya ekipman gibi iletken olmayan bir nesneyle temas ettiğinde veya asfalt, beton, çimen, çim ve kum gibi toprak yüzeyine temas ettiğinde istenmeyen elektrik kontakları olarak tanımlanabilir. Bu yüzeyler bazen çok yüksek empedans gösterir ve arıza akımlarını çok küçük değerlerle sınırlar [78]. Yüksek empedans arızaları genellikle 15 kV ve altındaki dağıtım gerilimlerinde meydana gelmektedir ve bu arıza düşük gerilimlerde daha da fazla görülmektedir. 25 kV ve üzerinde de oluşabilir ancak daha az şiddetlidir [76]. Normalde birkaç mA ile 75 A arasında değişen akım büyüklüğüne sahiptir. Şekil 4.1. kum üzerindeki tipik bir YEA olayıdır [79].

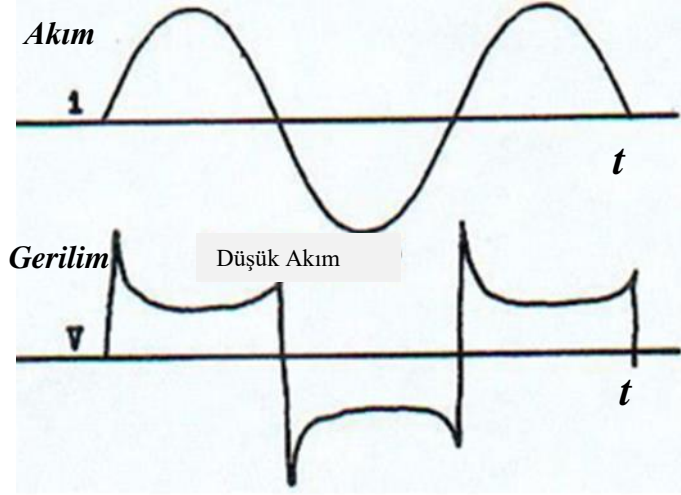


Şekil 4.1. Kum üzerinde YEA olayı [79].

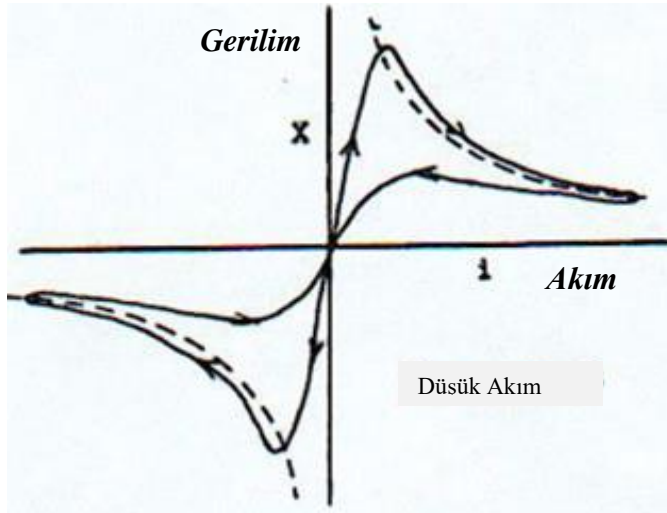
4.1.1. Yüksek empedans arızasının özellikleri

Yüksek empedans arızasının iki temel özelliği vardır. Bunlar düşük arıza akım değerleri ve ark olayıdır. Birinci özellik, bu arızaların, arıza akımlarını çok düşük değerlerle sınırlayan arıza yolunda yeterince yüksek bir empedansa sahip olmasından kaynaklanmaktadır. Bu özellik, YEA'ların geleneksel aşırı akım koruma röleleri tarafından tespit edilmesini zorlaştırmaktadır.

İkinci özellik olan ark olayı ise iletken ve yarı yalıtımlı bir nesne veya yer yüzeyleri arasında hava boşluğunun oluşması sonucu meydana gelmektedir. Oluşan hava boşluğu kısa bir mesafede büyük oranda elektrik potansiyel farkı yaratmaktadır. İletken üzerindeki gerilim her yarım döngüde belirli bir büyüklükte biriktiğinde, hava boşluğu bozulmaya başlar ve bir ark oluşur. [80]'de yapılan deneylerde, ark geriliminin hava boşluğu kırılma gerilimi seviyesine ulaştığında ark akımının akmaya başladığını ve ark gerilimi kırılma gerilim seviyesinden daha küçük hale geldikten sonra ve eşit alan kriterlerinin karşılanmasına kadar akmaya devam ettiğini gözlemlenmiştir. Ark akımı akarken ark üzerindeki gerilim sabit kalmaktadır. Gerilim, arıza gerilimi seviyesine tekrar ulaştığı sürece sonraki yarım döngüde yeniden alev alabilir. [81]'e göre arkın dinamik özellikleri Şekil 4.2. [80] ve Şekil 4.3. [80]'deki gibi gösterilebilir.

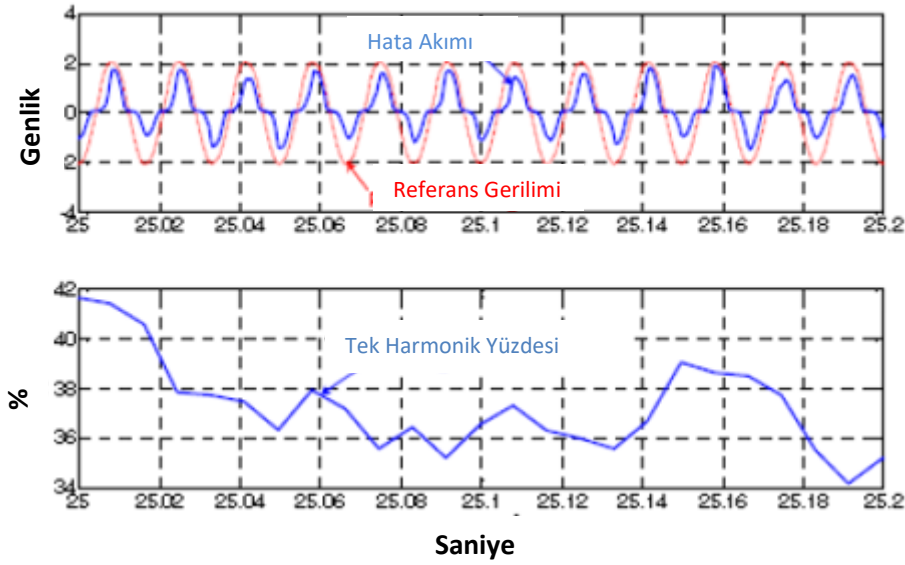


Şekil 4.2. Elektrik ark boyunca akım ve gerilim [80]



Şekil 4.3. Elektrik ark boyunca gerilim-akım karakteristikleri [80]

Ark olayı, harmonik içeriği bakımından zengin olan yüksek empedans arızalarına neden olmaktadır. [82]'e göre, Şekil 4.4.'ün üst grafiği, çıplak zeminde aşağı inen bir iletken den gelen bir arıza akımını göstermektedir. Altındaki grafik, ark faaliyetlerinden kaynaklanan büyük oranda tek harmoniklerin yüzdesini göstermektedir.



Şekil 4.4. Arıza akımının harmonik bileşenleri [82]

Yüksek empedanslı arızaların dinamik bir davranışı vardır. Ark arızası tarafından üretilen ısı, çoğu zemin yüzeyinde nemi giderme eğilimindedir. Hatadan kaynaklı oluşan yüksek sıcaklık, yüzey iletkenliğini değiştiren kimyasal reaksiyonlara neden olabilir. Yüzey iletkenliğinin değişmesi arıza akımının büyüklüğünü de değiştirmektedir. Farklı mevsimler ve günün farklı saatleri de zemin yüzeyinin iletkenliğini etkileyebilir. Yüksek empedanslı arızaların bu dinamik özellikleri, akımlarının seviyesini ve içeriğini değiştirir ve tespitini rastgele bir süreç haline getirir [82].

4.1.2. Yüksek empedans arıza algılanması

Arıza noktasındaki empedans son derece yüksek olduğundan, arıza akımı belirgin büyüklükte bir değişikliğe neden olmaz ve geleneksel aşırı akım rölesi tarafından tespitin başarısız olmasına yol açar. Yüksek empedans arızası meydana geldiğinde iletken personelin ulaşabileceği yere düşebilir ve insanların veya hayvanların can güvenliğini tehdit edebilir. Ayrıca, yüksek empedans arızaları genellikle temas noktasında arklanma ile ilişkilidir ve ciddi bir güvenlik tehlikesi ve yangınların ark tutuşması veya şalter kontaklarının erimesi, ekipman hasarı vb. durumlar hem kamu güvenliği hem de güç sistemi operasyonel güvenliği açısından, yüksek arızaların tespiti kritik bir öneme sahiptir.

Yüksek empedanslı arızaların yüksek güvenilirlikle tespiti elektrik şirketleri için zor bir durumdur. En popüler algılama tekniği aşırı akım koruma cihazlarının kullanılmasıdır [83].

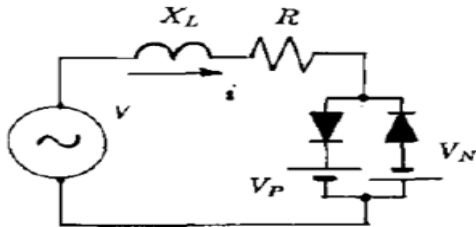
Fakat bu tasarımda, YEA'larından kaynaklanan elektrik akım seviyesi güç sistemindeki diğer arıza olmayan olaylardan ayırt edilemediği için birkaç beklenmedik hizmet kesintisine neden olmuştur [84].

4.2. YEA Modellerinin İncelenmesi

Elektrik dağıtım sistemindeki YEA algılama, enerji endüstrisi için uzun süredir devam eden bir zorluk olmuştur. Bu bölümde modellemeden algılama algoritmalarına kadar yapılan katkıları gözden geçirmektedir.

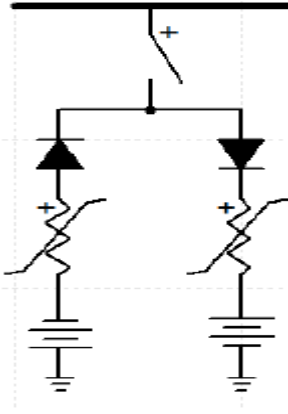
Etkili bir algılama algoritmalarının geliştirilmesi için doğru bir simülasyonu gereklidir. YEA modelinin verileri, YEA'sının doğrusal olmama, asimetri gibi karmaşık özelliklerini yansıtmalı ve ark olaylarının rastgele ve dinamik niteliklerini içermelidir.

[14]'e göre modeller 2 gruba ayrılabilir. İlk grup, iletken toprakla temas ettiğinde kıvılcım doğasına dayalı olarak 1990 yılında önerilen Emanuel modeline dayanmaktadır [7]. Diğer modeller ise ikinci grup olarak kabul edilmektedir.

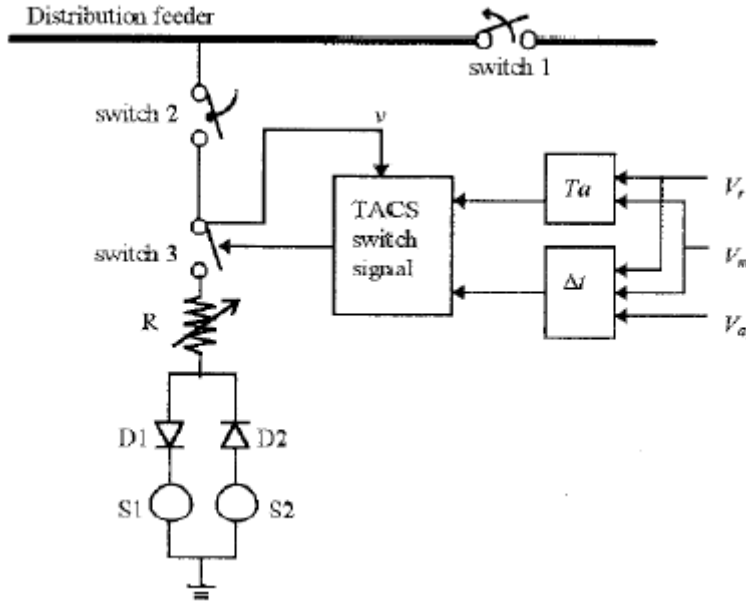


Şekil 4.5. 1990'da önerilen Emanuel modeli [7]

1990 yılında Emmanuel ve arkadaşları Şekil 4.5.'de [7] görüldüğü gibi sıfır ark ve asimetri periyodunu simüle etmek için iki diyotla anti-paralel bağlanmış iki DA kaynağı önermişlerdir. 1993 yılında bu model, toprak empedansındaki doğrusal olmama durumunu dikkate almak için ark yüksek empedans arızası, Şekil 4.6.'da görüldüğü gibi bir direnç ve bir DA kaynağı ile seri halde iki diyot seti (pozitif ve negatif) olarak modellenmiştir [8]. Bu model için FFT tabanlı aktarma şeması sunulmaktadır. Arıza sınıflandırıcı olarak ise çok katmanlı bir ileri besleme sinir ağını kullanılmıştır. Bu modelin Emanuel'de diğer bir farkı ise, sadece düşük dereceli harmonikleri (ikinci, üçüncü ve beşinci) kullanılmasıdır.



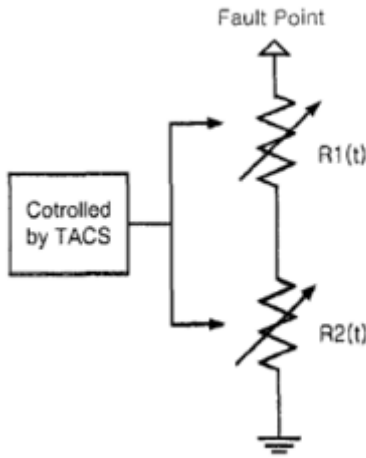
Şekil 4.6. 1993'de önerilen YEA modeli [8]



Şekil 4.7. 1998'de önerilen YEA modeli [9]

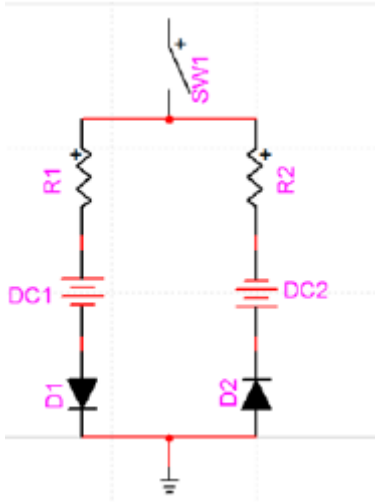
1998'de ise Chan ve ark. ark teorisine dayanan doğrusal olmayan empedans, zaman değişken voltajlı güç kaynakları ve TACS kontrollü anahtarlardan oluşan bir model önermiştir [9]. Şekil 4.7.'de [9] gösterildiği gibi, Anahtar 3, arkın yeniden ateşlenmesini ve sönmesini kontrol etmek için TACS kontrollü bir anahtardır ve Anahtar 1 ve 2 ise besleyiciyi yükten izole etmek ve arıza yoluna bağlamak için geleneksel zaman kontrollü anahtarlardır. Girişler için V_r ark yeniden ateşleme voltajı, V_m uygulanan voltajın tepe değeri ve V_a ark voltajıdır. T_a uygulanan gerilim sıfır geçişinden ark yeniden ateşleme noktasına kadar geçen süredir ve Δt bir yarım döngüdeki ark iletiminin süresidir.

2001'de Nam ve ark. YEA özelliklerini dikkate alan bir modelleme yöntemini sunmuştur. Önerilen YEA modeli, Şekil 4.8.'de [10] gösterilen Elektromanyetik Geçici Programda (EMTP) TACS tarafından kontrol edilen iki seri TVR'leri kullanır. TVR'lerden biri, bir arızasından sonra kararlı durumda bir döngü için gerilim-akım karakteristiğinden doğrusal olmama ve asimetri modellemek için kullanılırken, diğer TVR ise, YEA'dan sonra geçici durumdaki dalga formlarından birikme ve omuz karakteristiğini temsil etmek için kullanılır. İki TVR'nin toplamı YEA'dan sonra herhangi bir andaki arıza direncine karşılık gelmektedir [10].



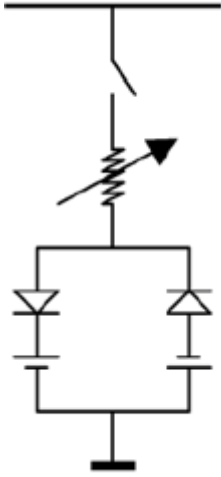
Şekil 4.8. 2001'de önerilen YEA modeli [10]

Lai vd. tarafından 2003 yılında önerilen model, kumlu toprakta ark oluşumuna dayanan YEA'nın basitleştirilmiş Emanuel modelidir [11]. Şekil 4.9.'da [11] gösterildiği gibi iki DA kaynağı, toprakta ve / veya ağaçlar ile dağıtım hattı arasındaki havanın başlangıç voltajını temsil eder. İki eşit olmayan direnç, R1 ve R2, arıza dirençlerini temsil eder ve eşit olmayan değerler asimetrik arıza akımları oluşturabilir. Faz voltajı, pozitif DA voltajı DA1'den daha yüksek olduğunda, arıza akımı toprağa doğru akar. Voltaj, DA2 negatif DA voltajından daha düşük olduğunda, arıza akımı tersine döner. DA1 ve DA2 arasındaki faz geriliminin değerleri için, hiçbir hata akımı akmaz.



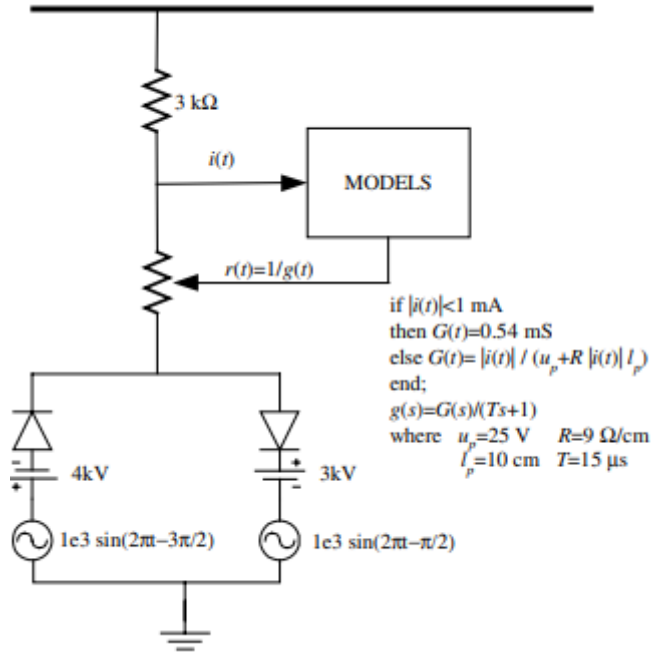
Şekil 4.9. 2003'de önerilen basitleştirilmiş Emanuel modeli [11]

2004 yılında, Şekil 4.10.'da gösterildiği gibi, daha dinamik bir YEA modeli Sheng ve Rovnyak tarafından sunulmuştur [12]. Model, doğrusal olmayan bir direnç, iki diyot ve her yarım döngüde rastgele genlikleri değiştiren iki DA kaynağından oluşur.



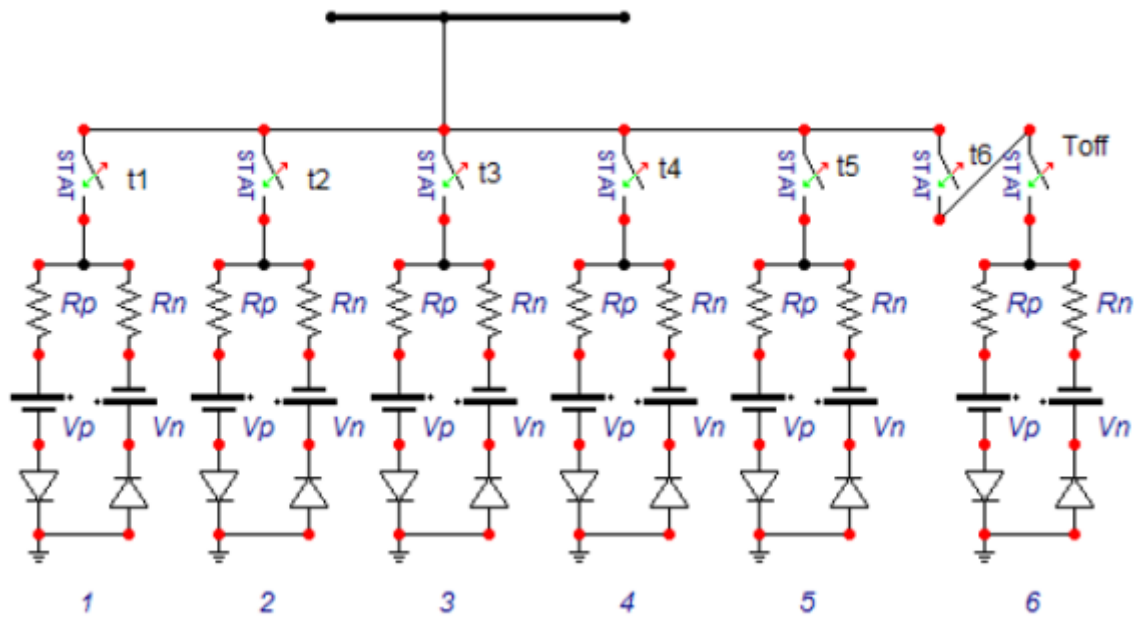
Şekil 4.10. 2004'de önerilen YEA modeli [12]

2005 yılında önerilen YEA modeli Şekil 4.11.'de sunulmuştur. Bu modelde ark ateşleme anlarını kontrol etmek için iki diyot ve polarize edici rampa voltajlarını içerir. Ark modeli, doğrusal direnç (toprak yolu direncini temsil eder), doğrusal olmayan zamanla değişen direnç $r(t)$ (dinamik yayı temsil eder) ve ayrıca DA ve AA kaynaklarından oluşur. Kaynaklar, ark akımının ve geriliminin (DA kaynakları) asimetrisini ve değişken ark ateşleme ve söndürme noktasını (AA kaynakları) sağlar [13].



Şekil 4.11. 2005 Yılında önerilen YEA modeli [13]

2010 yılında Sedighi vd. tarafından sunulan YEA modeli akımı üretmek için birkaç Emanuel ark modelinin paralel olarak kullanılmasından oluşmaktadır [14]. Bu model Şekil 4.12.'de gösterilmektedir. YEA'nın rastgele durumunu üretmek için EMTP'de STATISTIC anahtarı uygular. Ark üzerinde açma ve kapama durumu, altıncı yay modelinde Şekil 4.12.'de gösterilmektedir. Bu modeldeki ark parametreleri kaydedilen akım ve gerilim verilerine bağlıdır.



Şekil 4.12. Birkaç Emanuel ark modeline dayanan yeni YEA modeli [14]

4.3. YEA Algılama Tekniklerinin İncelenmesi

YEA tespiti problemi endüstri tarafından uzun süredir tanınmakta ve son yıllarda literatürde birçok tespit algoritması önerilmektedir.

1997'de Zori ve ark. havai hatlarda ark arızalarının tespiti için bir algoritma sunmuştur [15]. Bu algoritma veri yolu voltaj sinyallerinin harmonik analizine dayalıdır. Spektral analiz yoluyla ark voltajı en küçük kareler hata tekniği ile tahmin edilmiştir. Bu algoritmanın temel özelliği, yeterince hızlı olması ve sadeliğe sahip olmasıdır [15].

2005 yılında Sedighi ve ark. YEA tespiti için genetik algoritma ve sinir ağlarına dayalı iki yöntem sunmuştur. Her iki yöntemde de sinyallerin ayrıştırılması ve özelliklerin çıkarımı için dalgacık dönüşümü kullanılmıştır. Bu yöntemler YEA'ları izolatör kaçak akımından, kapasitör anahtarlama, yük anahtarlama, topraklama hatası gibi olaylardan ayırmak için kullanılmıştır [85].

2006'da GE Protection & Control Journal, Adamiak ve ark. yüksek empedanslı ark arızasında akımlar üzerindeki harmonik enerji seviyelerine uzman sistem örüntü tanıma uygulamıştır [86]. Daha sonra Hou, YEA'larının varlığını ortaya çıkaran bir SDI (Fark Akımının Toplamı) miktarını kullanan bir algılama algoritması sunarken, genel olarak dağıtım yüklerinden etkilenmeden elde etmiştir [87].

Akıllı şebekelerin kullanımının artmasıyla birlikte, izlenen dağıtım ağları (DN'ler) boyunca çeşitli noktalarda elektrik şebekesinin farklı parametrelerini ölçmenin mevcudiyeti, tespitinde dijital işleme tekniklerinin, örneğin hatayla ortaya çıkan geçici analize dayalı olanlar gibi, geliştirilmesini teşvik etmiştir. 2007'de, eğik bir ağaçtan kaynaklanan yüksek empedanslı bir ark arızasını tespit etmek için özelliklerinin DWT ile çıkarılmasına dayanan yeni bir teknik tanıtılmıştır [17]. 2009 yılında Samantaray ve ark. AEKF ve PNN kullanarak doğrusal olmayan yüklenme koşulu altında dağıtım ağında YEA tespiti için bir yaklaşım sunmuştur [18]. AEKF, doğrusal olmayan yüklenme altında karşılık gelen ve NF (hatasız) akım sinyallerinin harmonik bileşenlerini tahmin etmek için ve PNN'yi eğitmek ve test etmek için özellikler olarak kullanmaktadır [18].

2012 yılında PMU kullanan yeni bir YEA algılama algoritması önerilmiştir [19]. Algoritma, üçüncü harmonik akım fazörünün değiştirilmesine dayanır ve saptama indeksi, mevcut örnekler ile tahmini örnekler arasındaki hataların toplamı ile elde edilir [19]. Aynı yıl Suresh ve ark. matematiksel morfolojiye (MM) dayalı bir araç kullanarak YEA'larını tespit etmek için bir yöntem sunmuştur. Yöntem, bu rölenin YEA'larını tespit etme performansını artırmak için trafo merkezindeki geleneksel aşırı akım rölesinin yanında uygulanmaktadır [78].

2013 yılında Lopes ve ark. akıllı dağıtım ağlarında YEA'nı teşhis etmek için geçici bir yaklaşım sunmuştur. Bu yaklaşım, sistem boyunca besleyici verileri ve yükler hakkında herhangi bir bilgi gerektirmez ve DWT'yi, mevcut akıllı şebeke haberleşme kanallarından yararlanarak, güç sisteminin stratejik noktalarında arızadan kaynaklanan geçici akımları izlemek için kullanmaktadır. Detay dalgacık katsayılarının enerji spektrumunu sürekli olarak hesaplayarak arıza başlangıcından sonra besleyiciler boyunca yayılan sinyal yüksek frekans bileşenlerini analiz etmektedir [88].

2014 yılında, Torres ve ark. Dağıtım sistemindeki YEA'ları temsil etmek için yeni bir model ve mevcut dalga formlarının harmonik analizine ve YEA'ları dağıtım sistemindeki diğer fenomenlerden ayırmayı amaçlayan belirli mantığa dayanan yeni bir algılama algoritması önermiştir [20]. Ghaderi ve ark. 2014 yılında YEA algılama metodu önermişlerdir. Önerilen yöntem üç farklı malzeme üzerinde ve ıslak ve kuru ortamda test edilmiştir. Yöntem için zaman-frekans analizi kullanılmıştır [89].

2016 yılında Wang ve ark. Voltaj-Akım Karakteristik Profiline (VCCP) dayanan bir algoritma önermiştir. Bu algoritma için bir prototip geliştirilmiş ve gerçek zamanlı testler yapılmıştır [90]. Aynı yıl W. C. Santos ve ark. DWT kullanarak bir YEA algılama yöntemi sunmuştur [21]. Bu yöntemde paraziti tespit etmek ve bu paraziti diğer olaylardan (katı hatalar ve anahtarlama manevraları gibi) ayırmak ve YEA'nın muhtemelen meydana geldiği alanı tanımlamak için kaynaklı yüksek ve düşük frekanslı voltaj bileşenleri analiz edilir.

2018 yılında Gomes ve ark. sinyalin yüksek frekans içeriğine bağlı olarak YEA durumunu diğer arıza durumlarıyla kıyaslamıştır. Kıyaslanma sonucunda da arıza sınıflandırılması yapılmıştır [91]. Aynı yıl Silva ve ark. yaptıkları çalışmada YEA tespiti için bir örüntü tanıma yöntemi kullanmıştır. Sürekli öğrenme ve uyarlama özelliğinden dolayı SECoS

topolojisi kullanılmıştır. Deney olarak 13 düğümlü test besleyici ve iki adet YEA modeli kullanılmıştır [92]. Soham ve ark. tarafından önerilen yöntem ise akıllı sayaçlar tarafından ölçülen gerilim dalga formlarında mevcut olan harmoniklerin miktarına bağlı olarak YEA tespit etmektir. Harmonik ölçümleri için EDHI endeksi önerilmiştir. Yöntem performansı ise PSCAD ile değerlendirilmiştir [93].

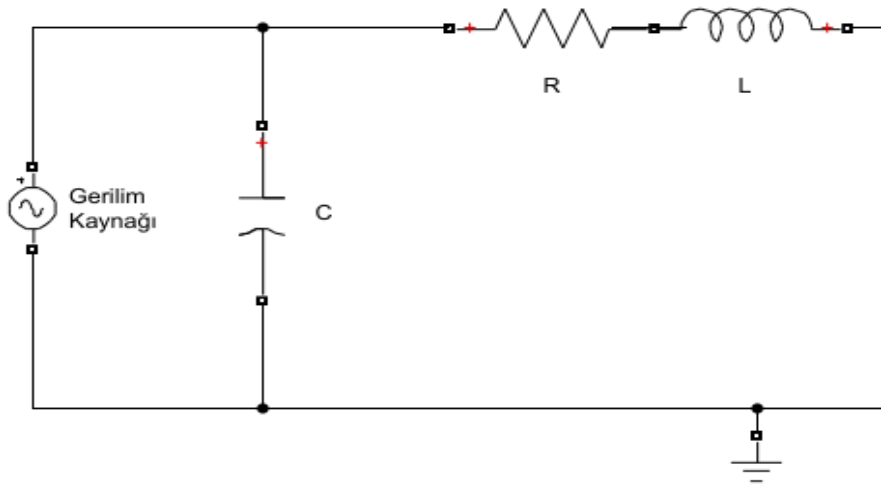
2019 yılında Cui ve ark. bir algılama ve sınıflandırma yöntemine dayanan, arıza olaylarının ne zaman ne kadar süreyle ve ne büyüklükte oluşturduğuna göre öznitelikler çıkaran bir tasarım oluşturmuştur. Sistemik olarak tasarlanmış özelliklerin bir havuzunu sıralamak için MDL tabanlı algoritma getirmiştir [16].

Çalışmamızın amacı, güç hattı haberleşmesi kullanan akıllı şebekeler için, dağıtım hattında meydana gelen YEA akımının incelenmesidir. Yapılan çalışmada dağıtım hattının uzunluğu değiştirilerek YEA akımının değişimi gözlemlenmektedir.

5. DAĞITIM HATTI UZUNLUĞUNUN YEA AKIMINA ETKİSİ

Güvenilir elektrik güç sistemleri, besleme geriliminde kesinti olmadan müşteri yüklerine hizmet etmektedir. Üretim tesislerinin, müşteri talebini ve kayıpları karşılamaya yetecek kadar enerji üretmesi gerekmektedir. İletim sistemleri, aşırı ısınmadan veya sistem kararlılığını tehlikeye atmadan uzun mesafelerde toplu güç taşıma kapasitesine sahip olmalıdır. Dağıtım sistemleri, her müşterinin hizmet girişine elektrik sağlamakla mükelleftir. Güvenilirlik bağlamında, üretim, iletim ve dağıtım işlevsel bölgeler olarak adlandırılır.

Dağıtım hattı uzunluğu, şebeke empedansını önemli derecede etkilemektedir. Dağıtım hattı uzunluğu arttıkça, uzunluğa bağlı olarak şebeke empedansı da artmaktadır. Örnek devrenin empedans formülü aşağı verilmektedir:



Şekil 5.1. Kısa dağıtım hattı örnek devresi

Seri RLC devresi empedansının hesaplanabilmesi için öncelikli olarak devre parametreleri ve frekans değeri belirlenmelidir.

$$\omega = 2\pi f \quad (5.1)$$

Bu denklemde π değeri irrasyonel matematik sabitidir ve değeri 3,14'dür, f , frekanstır ve değeri Hertz (Hz)dir, ω , açısal frekanstır ve birimi rad/sn'dir.

$$X_L = \omega \times L \quad (5.2)$$

Bu denklemde L , endüktans değeridir ve birimi Henry (H)dir, X_L ise endüktif reaktans değeridir ve birimi Ohm (Ω)dur.

$$X_C = \frac{1}{\omega \times C} \quad (5.3)$$

Eş. 5.3.'de C , kapasitans değeridir ve birimi Farad (F) dır, X_C ise kapasitif reaktans değeridir ve birimi Ohm (Ω)dur.

$$Z_{th} = (R \times l) + (X_L \times l) + (X_C \times l) \quad (5.4)$$

Eş. 5.4.'deki denklemde R değeri devrenin omik direnç değeridir ve birimi Ohm (Ω)dur, Z_{th} değeri Şekil 5.1.'deki devrenin toplam empedans değeridir ve birimi Ohm (Ω)dur, l ise hat uzunluğudur ve birimi "km"dir.

Tez çalışmasında kullanılan hatlar kısa dağıtım hatları olduğu için hattın kapasitesi iptal edilmiştir.

5.1. Basitleştirilmiş Emanuel Modeli

YEA algılamada önemli olan YEA modelinin seçilmesidir. Çalışmanın bu aşamasında seçilen model [11]'de önerilen Basitleştirilmiş Emanuel Modelidir. Model önceki modellerin birçok avantajını birleştirdiği ve basitlik ve doğruluğu koruduğu için birçok simülasyon deneyinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Modelin anahtarlama süresi 0.1 sn olarak ayarlanmıştır. Yani 0.1 sn'de YEA durumu gerçekleşmektedir.

Devre simülasyonu ve tasarımı için Matlab2018b programı kullanılmıştır. Besleyici devresi için [94]'de verilen örnek devre kullanılmıştır. Devrede kullanılan simülasyon zamanı, frekans, gerilim ve parametre değerleri bölüm içinde paylaşılmıştır.

Zaman penceresi uzunluğu T_w ve zaman adımı Δt , Matlab simülasyon yazılımında kullanıcılar tarafından belirlenebilen iki parametredir. $\Delta t = 0.2 \text{ ms}$, $T_w = 200 \text{ ms}$, $f = 50 \text{ Hz}$ 'dir.

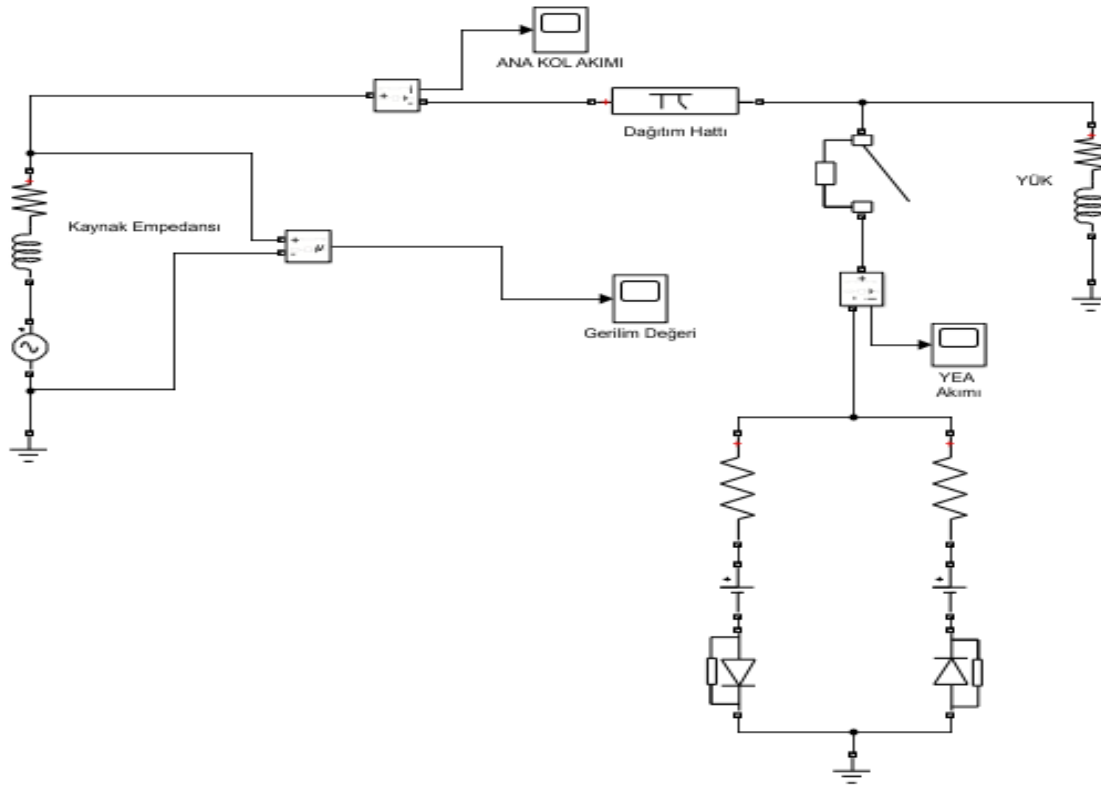
Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin parametre değerleri Çizelge 5.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.1. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin parametre değerleri

PARAMETRELER	DEĞERLER
R1	1.44 k Ω
R2	1.27 k Ω
DC1	6.092 kV
DC2	4.911 kV

5.1.1. Seçilen devrenin parametre değerleri

Çalışma için kullanılan devre ve devrenin parametre değerleri aşağıda verilmektedir. YEA için kullanılan devre Şekil 5.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Basitleştirilmiş Emanuel Modeli için oluşturulan devre

Yukarıda seçilen devrenin Kaynak parametre değerleri Çizelge 5.2.'de verilmektedir.

Çizelge 5.2. Kaynak parametre değerleri

R (ohm)	L (Henry)	Empedans Değeri (Ohm)
0,0072	$7,08 \times 10^{-3}$	2,22

Devrenin Dağıtım hattının parametre değerleri Çizelge 5.3.'de verilmektedir.

Çizelge 5.3. Dağıtım hattı parametre değerleri

R (ohm)	L (Henry)	C (Farad)
2,568	20×10^{-3}	$12,74 \times 10^{-9}$

Devrenin yük değerleri Çizelge 5.4.'de verilmektedir.

Çizelge 5.4. Yük-I parametre değerleri

R (ohm)	L (Henry)	Empedans Değeri (Ohm)
833×10^{-3}	10	$3,14 \times 10^{-3}$

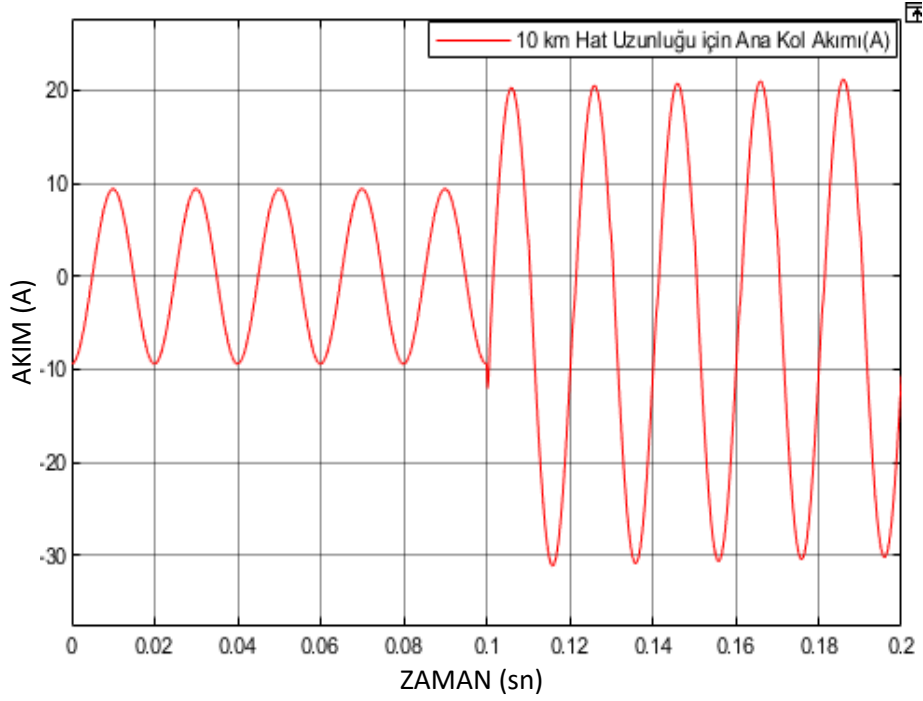
5.1.2. YEA akımı incelenmesi

Çalışmamızın ilk aşamasında Şekil 5.2. 'deki devre kullanılmıştır. Uygulama aşamalarında Dağıtım Hattı uzunluk değerleri değiştirilerek oluşacak YEA akımı gözlenmiştir. Uzunluklar sırasıyla 10 km, 20 km, 30 km ve 60 km olarak seçilmiştir. Her uzunluk değişiminde ana kol akım değerleri incelenmiş ve YEA akımı değerinin değişimi yorumlanmıştır.

5.1.3. Hat uzunluğunun 10 km olması durumunda yea akımı

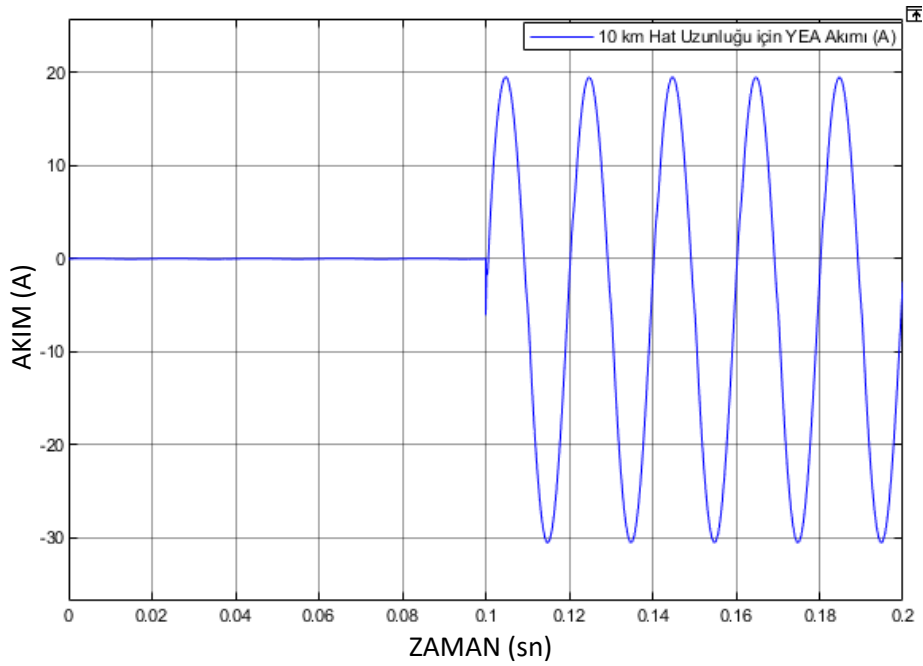
Uygulamada ilk aşama için dağıtım hattı uzunluğu 10 km seçilmiş ve Matlab/Simulink programında uzunluğu 10 km olarak ayarlanmıştır. Seçilen uzunluk için ana kol akım, YEA akım grafikleri ve değerleri aşağıda verilmiştir.

Şekil 5.3. dağıtım hattı uzunluğunun 10 km olması durumundaki ana kol akım grafiğini sunmaktadır.



Şekil 5.3. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km hat uzunluğu için ana kol akım grafiği

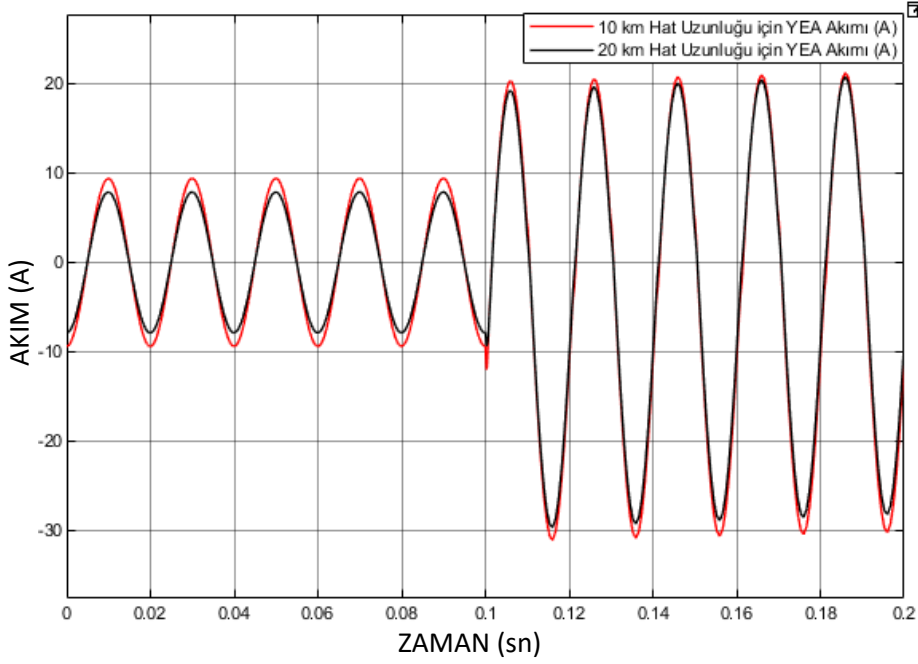
Şekil 5.4.'de 10 km dağıtım hattı uzunluğu için YEA akım grafiği gösterilmektedir.



Şekil 5.4. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km hat uzunluğu için YEA akım grafiği

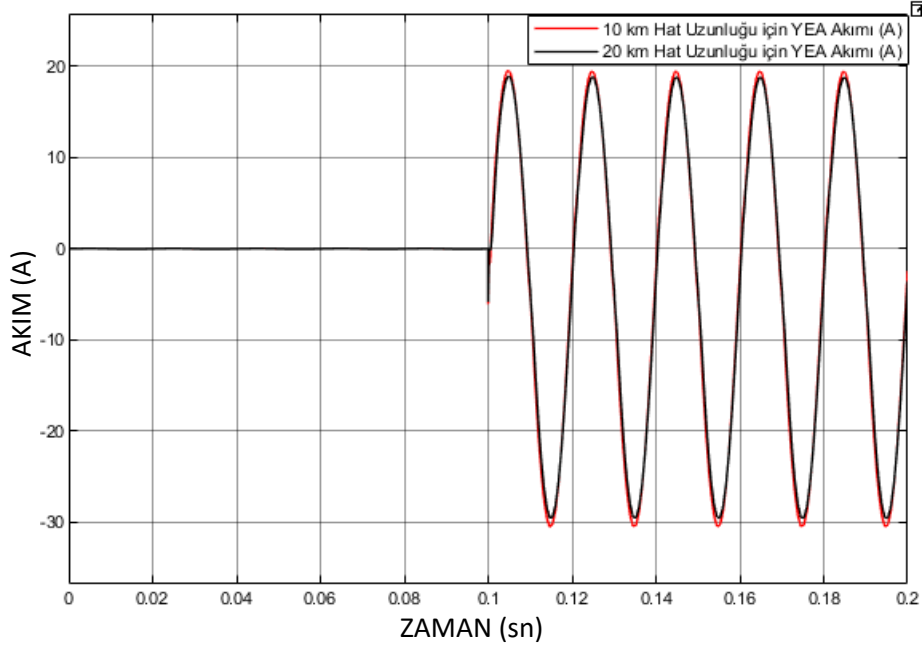
5.1.4. Hat uzunluğunun 20 km olması durumunda yea akımı

Şekil 5.2.'de verilen devrede dağıtım hattı uzunluğu 20 km olarak değiştirilmiştir. Bu bölümde 10 km ve 20 km hat uzunluğuna sahip devrelerin ana kol akım değerleri ve YEA akım değerleri gösterilmektedir.



Şekil 5.5. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için ana kol akım değerleri

Şekil 5.6.'da YEA akım grafiği verilmiştir.

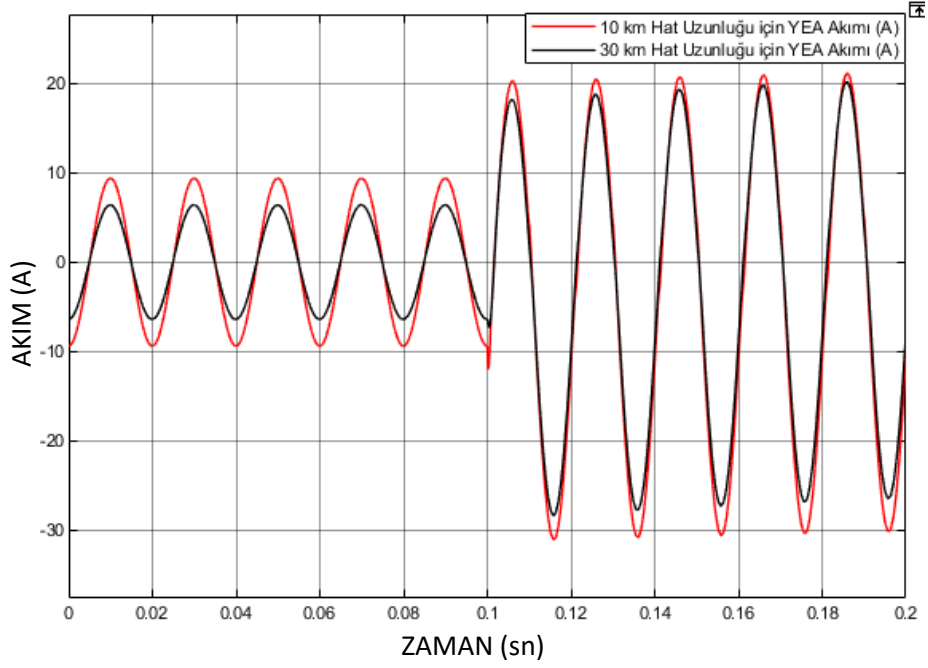


Şekil 5.6. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Şekil 5.5. ve Şekil 5.6'da görüldüğü gibi hattın uzunluğu arttıkça ana kol akım değerleri ve YEA akım değerleri değişmiştir.

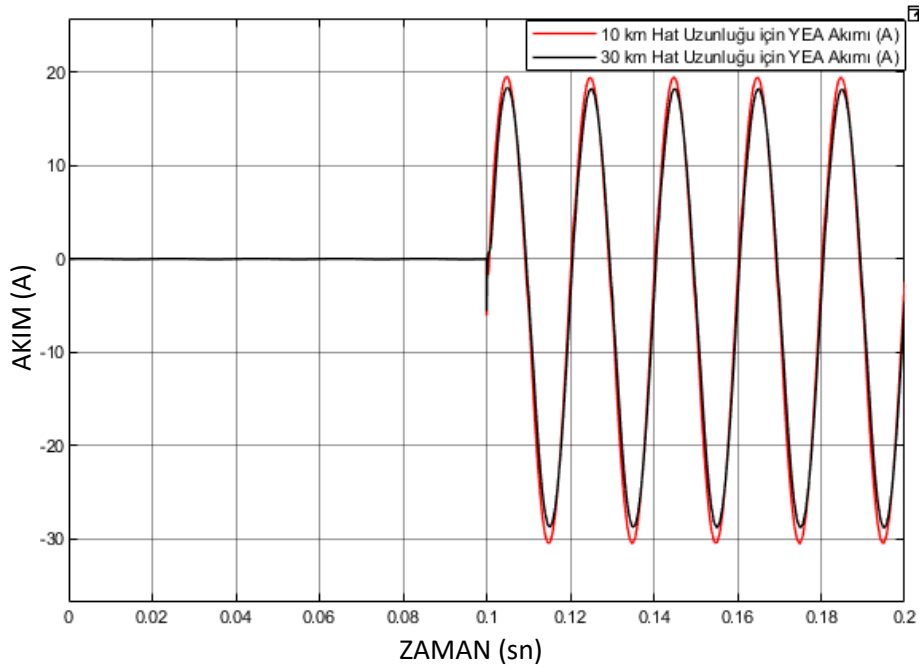
5.1.5. Hat uzunluğunun 30 km olması durumunda yea akımı

Bu bölümde dağıtım hattı uzunluğu 30 km'ye çıkarılmıştır. 10 km ve 30 km için akım değerlerinin kıyaslanması yapılacaktır. Şekil 5.7. 10 km ve 30 km için ana kol akım grafiğini sunmuştur.



Şekil 5.7. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

Şekil 5.8.'de 10 km 30 km hat uzunluğu için YEA akım grafiği sunulmaktadır.

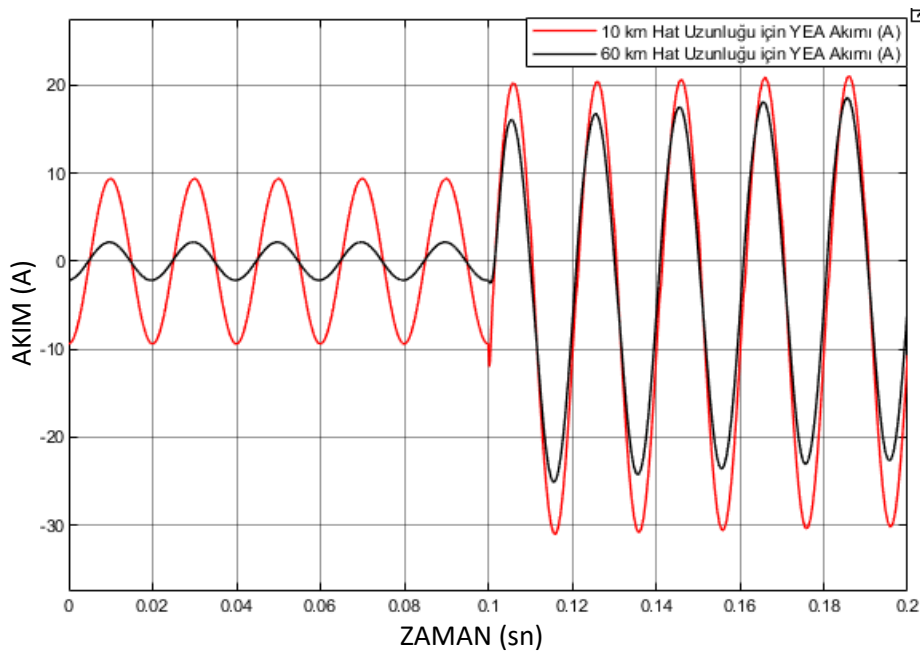


Şekil 5.8. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

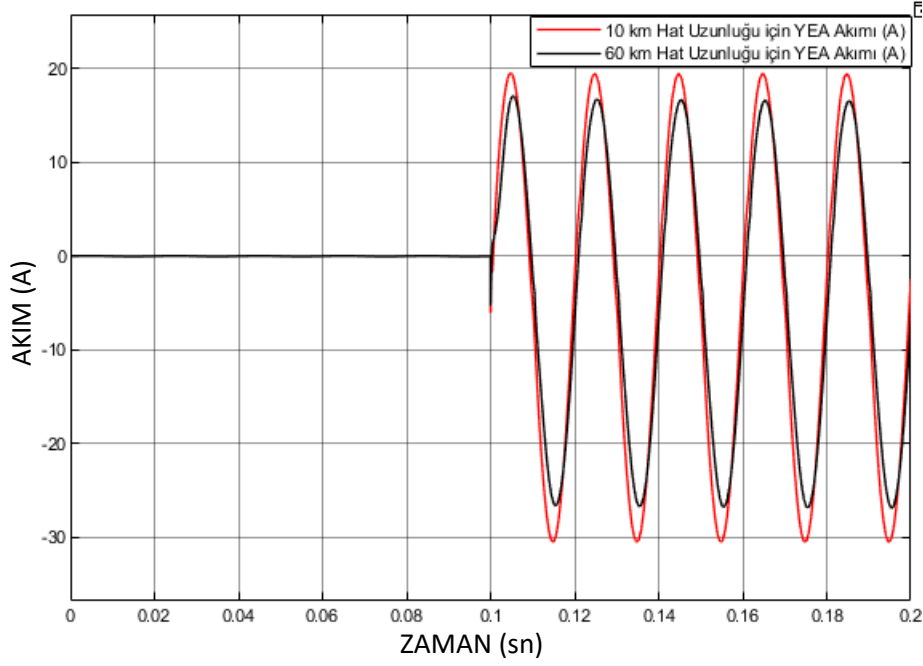
Şekil 5.7. ve Şekil 5.8.'de 10 km ve 30 km hat uzunluklarına sahip devrelerin akım değerleri verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı gibi hat uzunlukları arttıkça akım değerleri arasındaki farklar artmaktadır.

5.1.6. Hat uzunluğunun 60 km olması durumunda yea akımı

Son olarak hat uzunluğu 60 km olarak değiştirilmiştir. 10 km ve 60 km için akım değerleri kıyaslamaları yapılmıştır.



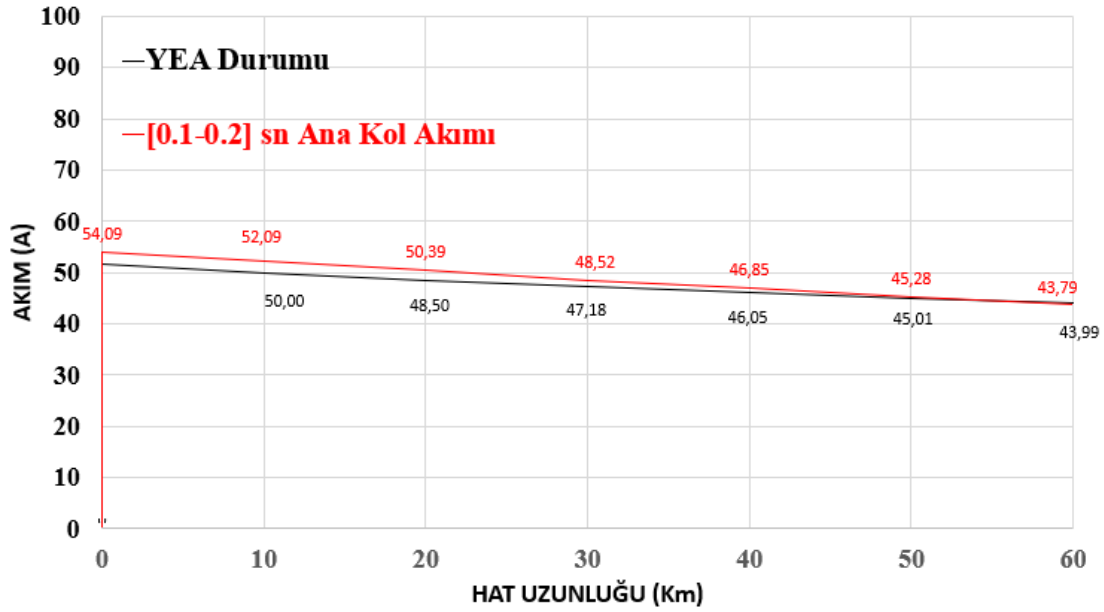
Şekil 5.9. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği



Şekil 5.10. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde, 4 farklı hat uzunluğunun ana kol akımına ve YEA akımına etkisi incelenmiştir. İncelemeler sonucunda hat uzunluğu arttıkça empedans değerine bağlı olarak, ana kol akım değerinin ve YEA akım değerinin azalmaya başladığı gözlemlenmiştir.

Farklı hat uzunluklarına ait [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri ve YEA akım değerleri Şekil 5.11.'de özetlenmiştir.



Şekil 5.11. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn ana kol akımı ve YEA akım grafiği

5.1.7. Basitleştirilmiş Emanuel modeli için toplam harmonik distorsiyon

Toplam harmonik distorsiyon bir gerilim veya akımdaki bozulmanın ne kadarının sinyaldeki harmoniklerden kaynaklandığını söyleyen bir ölçümdür.

Periyodik bir voltajın veya akımın harmonikleri veya harmonik frekansları, ana sinyalin frekansının tam sayı katlarında olan sinyaldeki frekans bileşenleridir. Bu, periyodik bir sinyalin Fourier analizinin gösterdiği temel sonuçtur. Harmonik bozulma, bu harmoniklerden dolayı sinyalin bozulmasıdır. Örnek olarak ana sinyal frekansı 50 Hz ise, 3. Harmonik 150 Hz'e karşılık gelecektir. Harmoniklerin bu şekilde adlandırılması harmonikleri daha kolay ifade edebilmek içindir. Harmonikler tek ve çift harmonikler olarak sınıflandırılmıştır. Tek harmonikler 3, 5, 7, 9, ... gibi devam ederken çift harmonikler 2, 4, 6, 8, ... olarak devam etmektedir. 0 nolu harmonik dalga şeklinin DA bileşeni olup, 1 nolu harmonik ise periyodik dalga şeklinin temel frekanstaki bileşenini tanımlar.

THD gerilim ve akım için sırasıyla,

$$\text{THD}_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (5.5)$$

$$\text{THD}_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (5.6)$$

formülleri ile bulunabilir. THD genellikle % olarak ifade edilmektedir. Yüzde olarak ifadesi ise,

$$\text{THD}(\%) = \text{THD}_v \times 100 \quad (5.7)$$

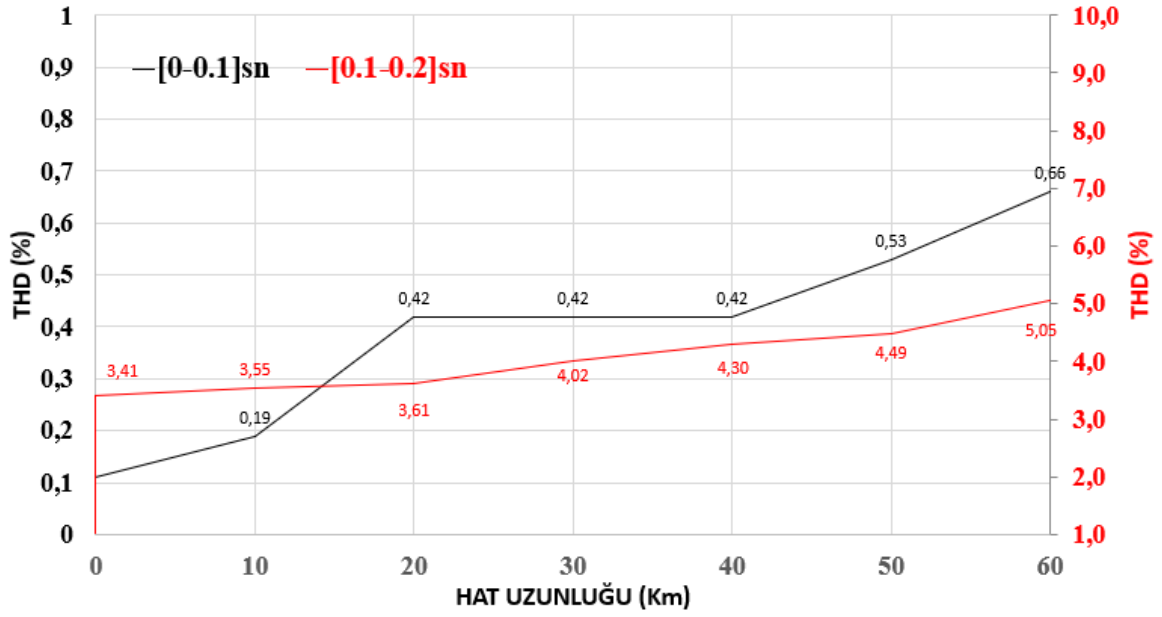
ya da

$$\text{THD}(\%) = \text{THD}_i \times 100 \quad (5.8)$$

olur.

Tamamen sinüzoidal olan bir voltaj veya akım, tek bir frekanstan oluşan bir sinyal olduğu için harmonik distorsiyona sahip değildir. Periyodik olan ancak tamamen sinüzoidal olmayan bir voltaj veya akım, sinyalin harmonik bozulmasına katkıda bulunan daha yüksek frekans bileşenlerine sahip olacaktır. Genel olarak, periyodik bir sinyal ne kadar az sinüs dalgası gibi görünürse, harmonik bileşenler o kadar güçlüdür ve daha fazla harmonik distorsiyona sahip olacaktır.

Yapılan çalışma sonucunda elde edilen akımların THD oranları Şekil 5.12.'de verilmiştir. Verilen grafikte yatay eksen kullanılan dağıtım hattı uzunlukları, dikey eksen ise THD oranlarıdır. Grafikte iki farklı oran yer almaktadır. Birisi [0-0.1] sn aralığındaki akım değerinin oranı diğeri ise [0.1-0.2] sn aralığındaki akım değerlerinin oranıdır.



Şekil 5.12. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları

Şekil 5.12.'de [0-0.1] sn aralığında, YEA durumu olmadan THD oranları gösterilmektedir. [0.1-0.2] sn aralığında ise YEA durumunun varlığındaki THD oranları gösterilmektedir. THD oranlarından da anlaşılacağı üzere [0.1-0.2] sn aralığında bir arıza durumu söz konusudur. THD olayı istenmeyen bir olaydır ve yüzde oranının olabildiğince az olması beklenmektedir.

5.1.8. En küçük kareler yöntemi

En küçük kareler yöntemi, çeşitli değişkenler arasındaki ilişkilerin en iyi şekilde belirlenmesini sağlayan bir yöntemdir. Bir başka deyişle bu yöntem, ölçüm sonucu elde edilmiş veri noktalarına "mümkün olduğu kadar yakın" geçecek bir fonksiyon eğrisi bulmaya yaramaktadır.

$$y = mx + b \quad (5.9)$$

$$m = \frac{n \cdot (\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k) - (\sum_{k=1}^n x_k) \cdot (\sum_{k=1}^n y_k)}{n \cdot (\sum_{k=1}^n x_k^2) - (\sum_{k=1}^n x_k)^2} \quad (5.10)$$

$$b = \frac{(\sum_{k=1}^n y_k) - m \cdot (\sum_{k=1}^n x_k)}{n} \quad (5.11)$$

$$\sum_{k=1}^n x_k \cdot y_k = (x_1 \cdot y_1) + (x_2 \cdot y_2) + \dots + (x_n \cdot y_n) \quad (5.12)$$

$$\sum_{k=1}^n x_k^2 = x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2 \quad (5.13)$$

$$\sum_{k=1}^n x_k = x_1 + x_2 + \dots + x_n \quad (5.14)$$

$$\sum_{k=1}^n y_k = y_1 + y_2 + \dots + y_n \quad (5.15)$$

En küçük kareler yöntemini çalışmamız için uygulayacak olursak; n değeri değişken sayısı, x değeri hat uzunlukları, y değeri ise hat uzunlukları karşısındaki akım değerleridir.

[0-0.1] sn aralığındaki ana kol akım değerleri Çizelge 5.5.'de gösterilmektedir;

Çizelge 5.5. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki ana kol akım değerleri

x_k	10	20	30	40	50	60
y_k	18	15	12	10	7	5

Çizelge 5.5.'de verilen değerlere göre;

$$m = -0,26,$$

$$b = 20,$$

$y = -0,26x + 20$ olarak bulunur. Bulunan denkleme göre akım değerleri ise Çizelge 5.6.'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.6. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki formül çıktıları

x_n	10	20	30	40	50	60
y_n	17,4	14,8	12,2	9,6	7	4,4

$$\text{Bağıl Hata Oranı} = \frac{\text{Mutlak Hata}}{\text{Gerçek Değer}} * 100 \quad (5.16)$$

Her bir hat uzunluğuna ait [0-0.1] sn aralığındaki akım değerlerinin bağıl hata oranları Çizelge 5.7.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.7. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0-0.1] sn aralığındaki bağıl hata oranları

Hat Uzunluğu	10	20	30	40	50	60
Bağıl Hata Oranı (%)	3,3	1,3	1,6	4	0	12

[0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri Çizelge 5.7.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.8. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri

x_k	10	20	30	40	50	60
y_k	52,09	50,39	48,52	46,85	45,28	43,79

Çizelge 5.8.'de verilen değerlere göre;

$$m = -4,8,$$

$$b = 215,$$

$y = -4,8x + 215$ olarak bulunur. Bulunan denkleme göre akım değerleri ise Çizelge 5.9.'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.9. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki formül çıktıları

x_n	10	20	30	40	50	60
y_n	167	119	71	23	25	55

Her bir hat uzunluğuna ait [0.1-0.2] sn aralığındaki akım değerlerinin bağıl hata oranları

Çizelge 5.10.'da gösterilmektedir.

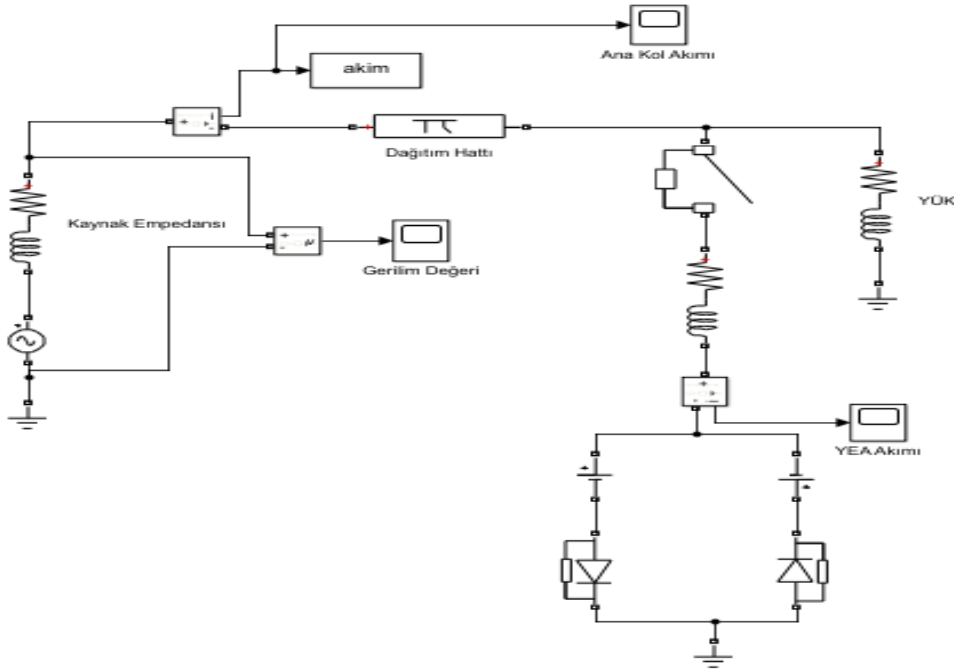
Çizelge 5.10. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki bağıl hata oranları

Hat Uzunluğu	10	20	30	40	50	60
Bağıl Hata Oranı (%)	215	136,1	46,3	50,9	44,8	25,6

Bağıl hata oranlarından da görüldüğü gibi YEA varlığında hata oranları artmıştır. [0-0.1] sn aralığındaki hata oranları yaklaşık olarak %1,5 iken [0.1-0.2] sn arasındaki hata oranları yaklaşık olarak %85'e kadar yükselmiştir.

5.2. Emanuel Modeli İçin YEA Akımı İncelenmesi

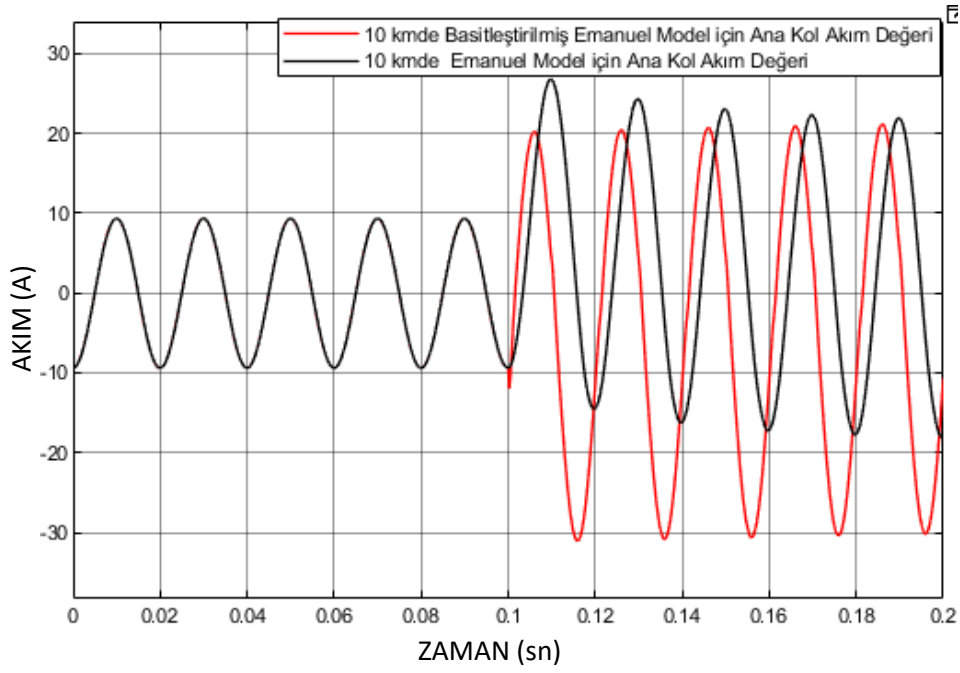
Bölüm 5.1.'de hat uzunluklarına bağlı olarak incelenen akım değerleri, bu bölümde Emanuel Model kullanılarak incelenecektir. Bu sayede YEA için Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelin kıyaslaması yapılacaktır. Emanuel model için devre yapısı Şekil 5.13.'de gösterilmektedir.



Şekil 5.13. Emanuel Modeli için oluşturulan devre

Bu bölümde ilk olarak Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelin dağıtım hattı uzunlukları 10 km olarak ayarlanmıştır.

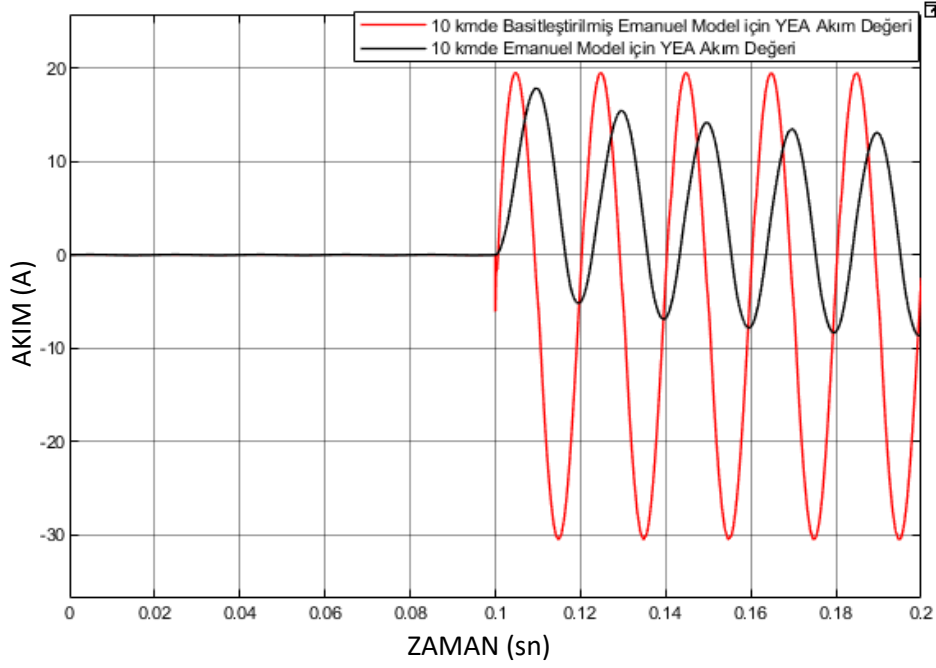
Şekil 5.14.'de 10 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği sunulmaktadır.



Şekil 5.14. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 10 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

Şekil 5.14.'de verilen 10 km hat uzunluklarına sahip Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinin ana kol akım grafiğinde iki dalga arasındaki faz farkı $68,04^\circ$ 'dir ve Basitleştirilmiş Emanuel Modeline ait akım grafiği $68,04^\circ$ ilerde hareket etmektedir.

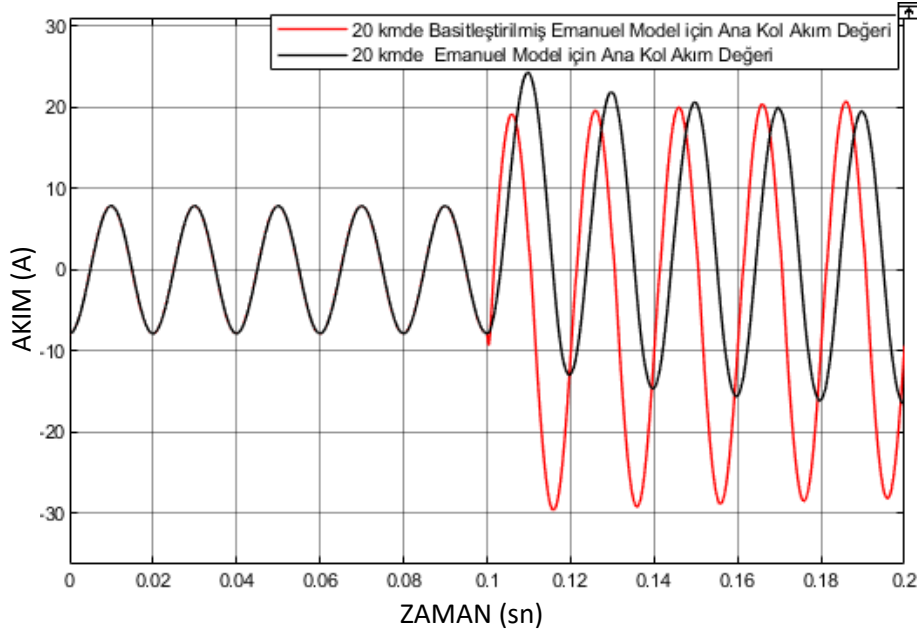
Şekil 5.15. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 10 km hat uzunlukları için YEA akım grafiğini göstermektedir.



Şekil 5.15. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 10 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'de iki farklı model olan Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinin 10 km hat uzunluğu için ana kol akım grafiği ve YEA akım grafiği gösterilmektedir. Şekil 5.14.'de anahtar kapanmadan yani YEA meydana gelmeden önceki akım değerleri aynı olup anahtar kapandıktan sonraki akım değerleri farklılık göstermektedir.

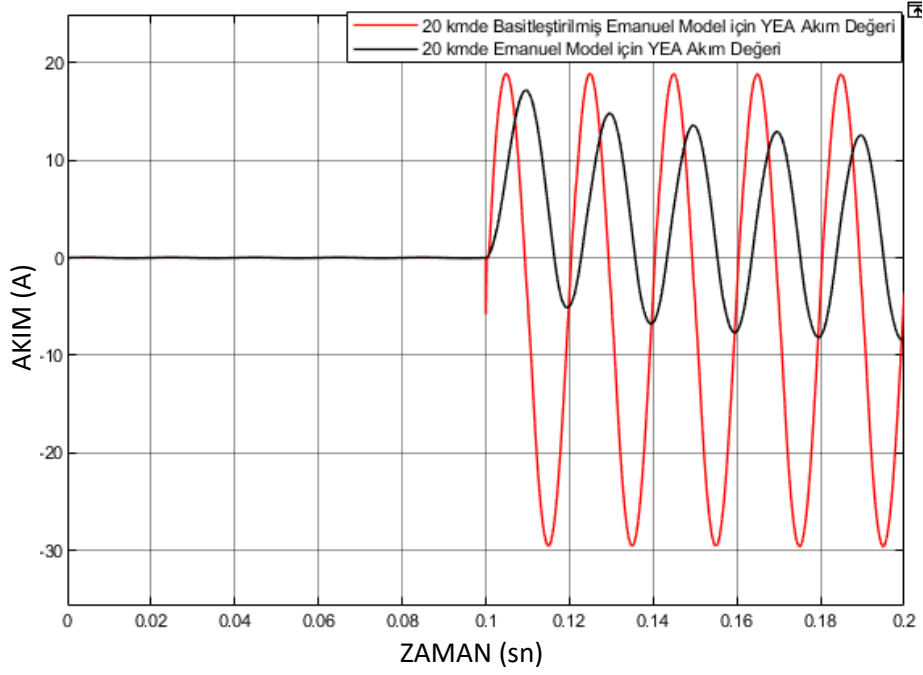
Şekil 5.16.'da 20 km hat uzunluklarına sahip dağıtım hatlarının ana kol akım değerleri verilmektedir.



Şekil 5.16. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 20 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

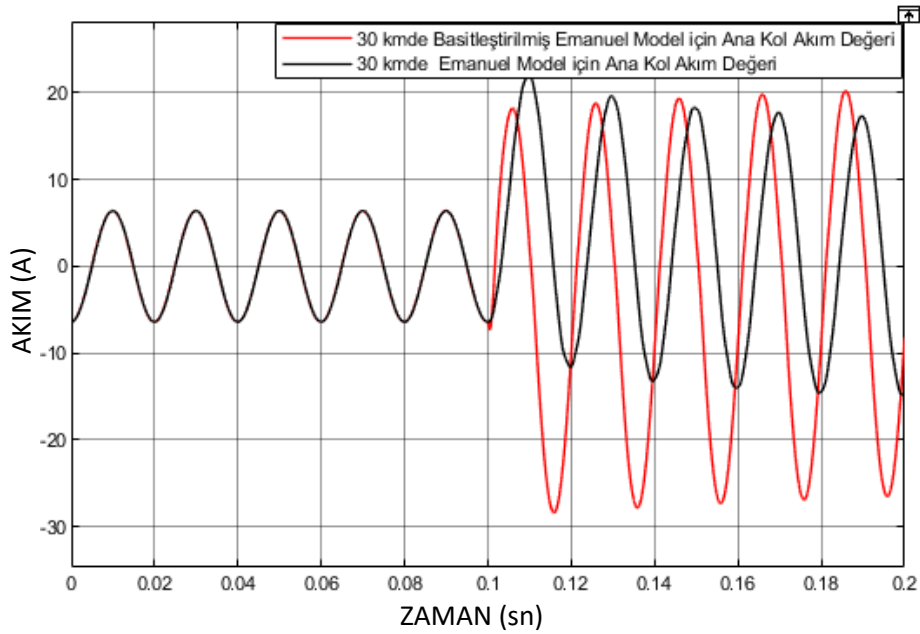
Şekil 5.16.'da verilen 20 km hat uzunluklarına sahip Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinin ana kol akım grafiğinde iki dalga arasındaki faz farkı $68,58^\circ$ 'dir ve Basitleştirilmiş Emanuel Modeline ait akım grafiği $68,58^\circ$ ilerde hareket etmektedir.

Şekil 5.17.'de 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği sunulmuştur.



Şekil 5.17. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

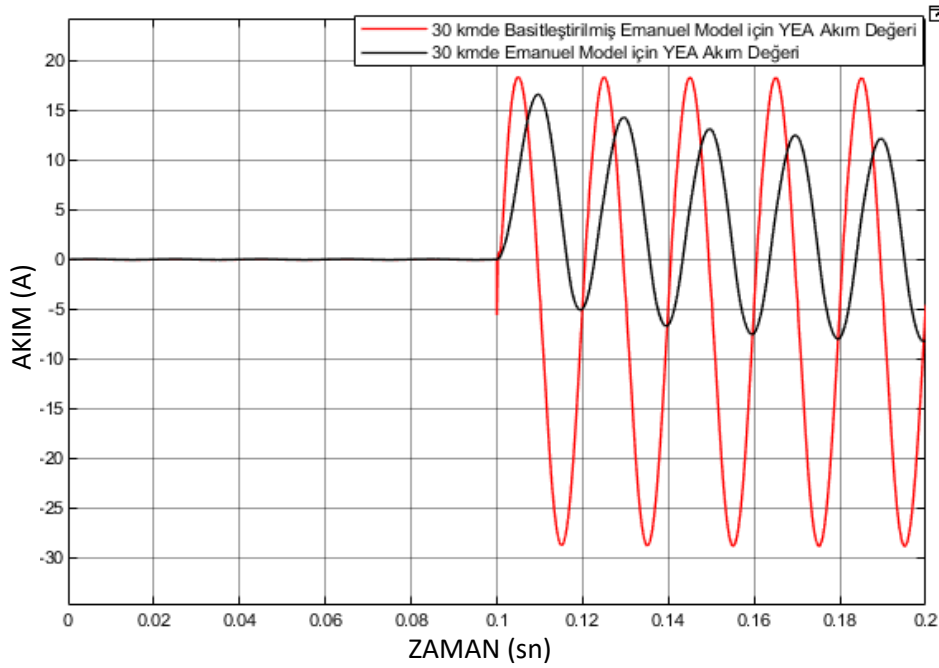
Şekil 5.18.'de ise 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği sunulmaktadır.



Şekil 5.18. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

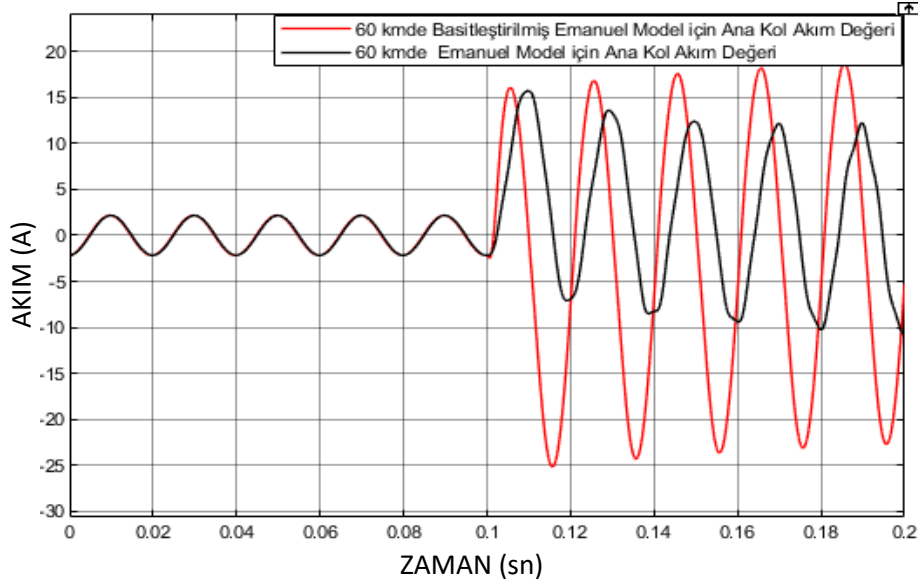
Şekil 5.18.'de verilen 30 km hat uzunluklarına sahip Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinin ana kol akım grafiğinde iki dalga arasındaki faz farkı 72° 'dir ve Basitleştirilmiş Emanuel Modeline ait akım grafiği 72° ilerde hareket etmektedir.

Şekil 5.19.'da ise 30 km uzunluğa sahip dağıtım hattı için YEA akım grafiği sunulmaktadır.



Şekil 5.19. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

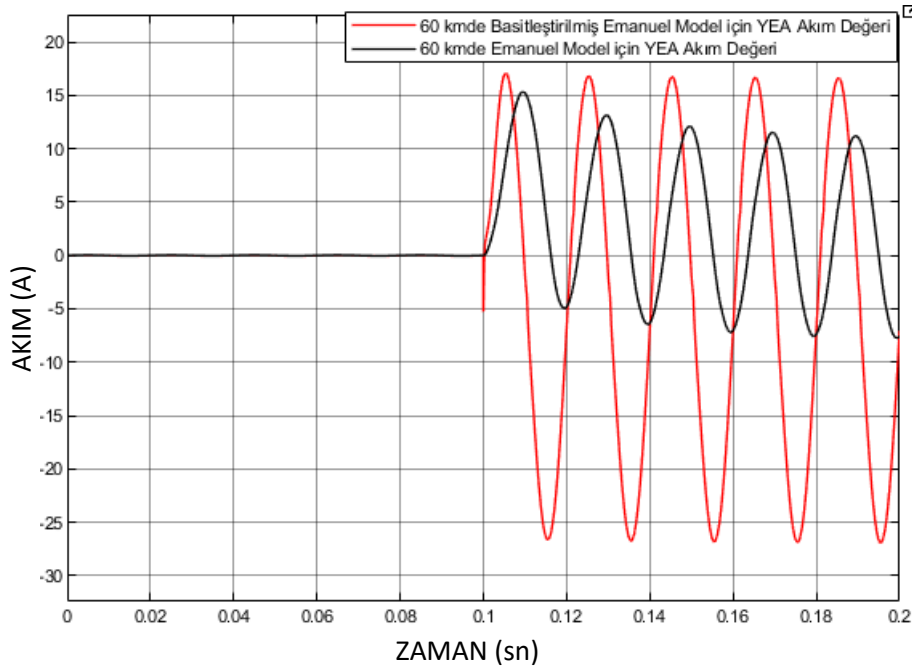
Son olarak ise 60 km hat uzunlukları için iki farklı modelin ana kol akım grafiği ile YEA akım grafiği kıyaslanmıştır.



Şekil 5.20. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

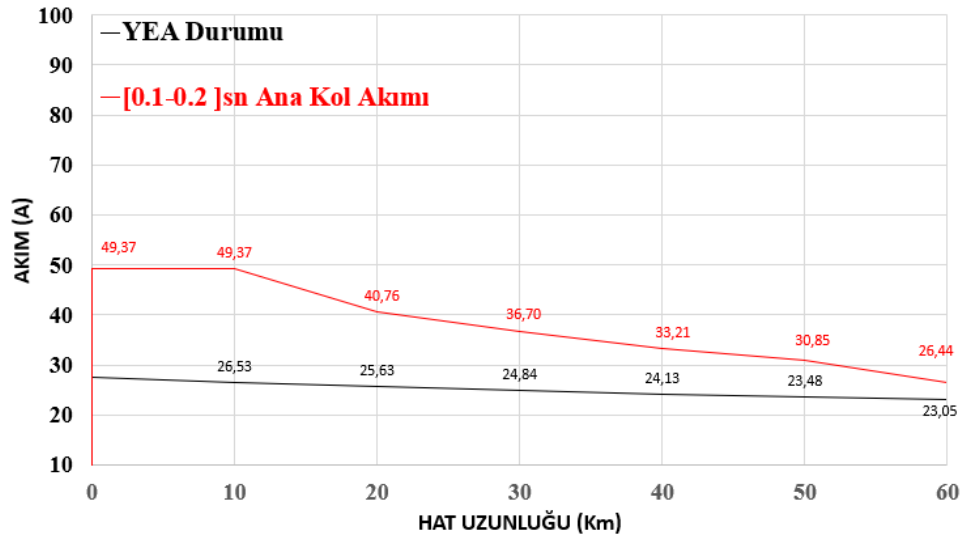
Şekil 5.20.'de verilen 60 km hat uzunluklarına sahip Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel Modelinin ana kol akım grafiğinde iki dalga arasındaki faz farkı $75,6^\circ$ 'dir ve Basitleştirilmiş Emanuel Modeline ait akım grafiği $75,6^\circ$ ilerde hareket etmektedir.

Şekil 5.20. 60 km hat uzunluğunda iki model için ana kol akım değerlerini sunmuştur. Şekil 5.21. ise YEA akım grafiklerini sunmaktadır.



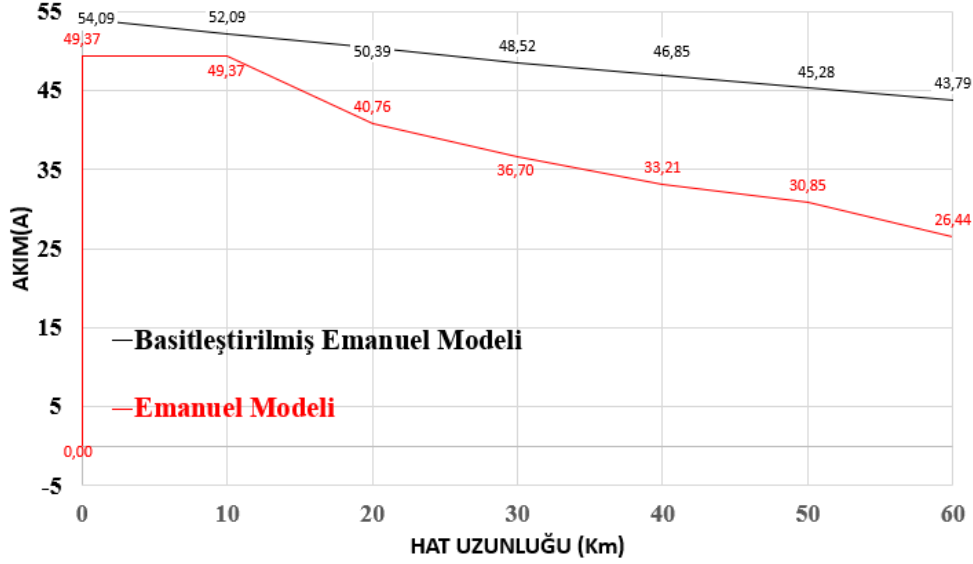
Şekil 5.21. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinde 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Bu bölümde Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Model için akım değerleri kıyaslanmıştır. Bunun yanı sıra akım dalga formları için faz farkları hesaplanmıştır. Hat uzunluklarına göre ortaya çıkan faz farkı ortalama olarak $71,05^\circ$ 'dir. Bunun değer bize Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin $71,05^\circ$ ilerde olduğunu göstermektedir.



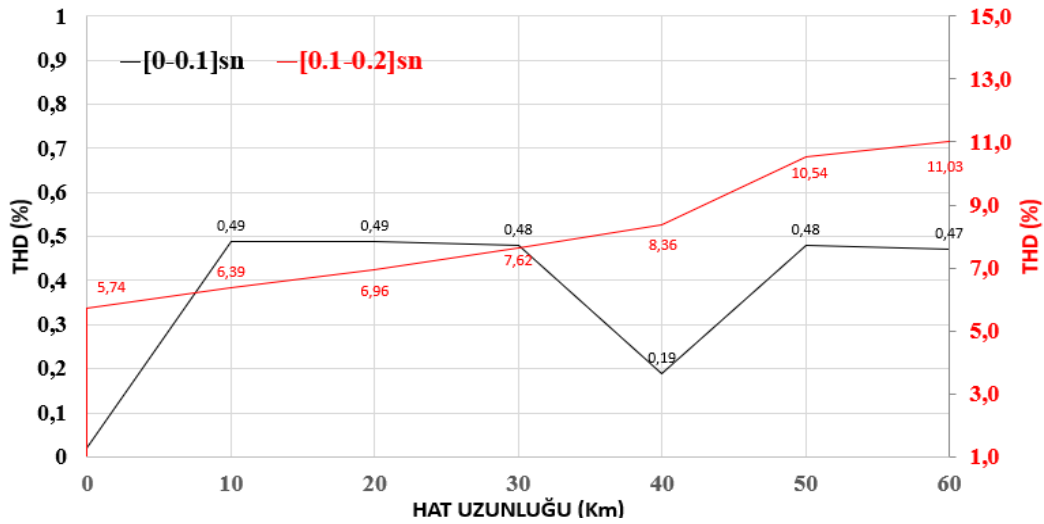
Şekil 5.22. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn ana kol akımı ve YEA akım grafiği değerleri

Şekil 5.22’de Emanuel Modelinin akım değerleri özetlenmiştir. Şekil 5.23.’de ise Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelin [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri hat uzunluklarına karşılaştırılarak özetlenmiştir.



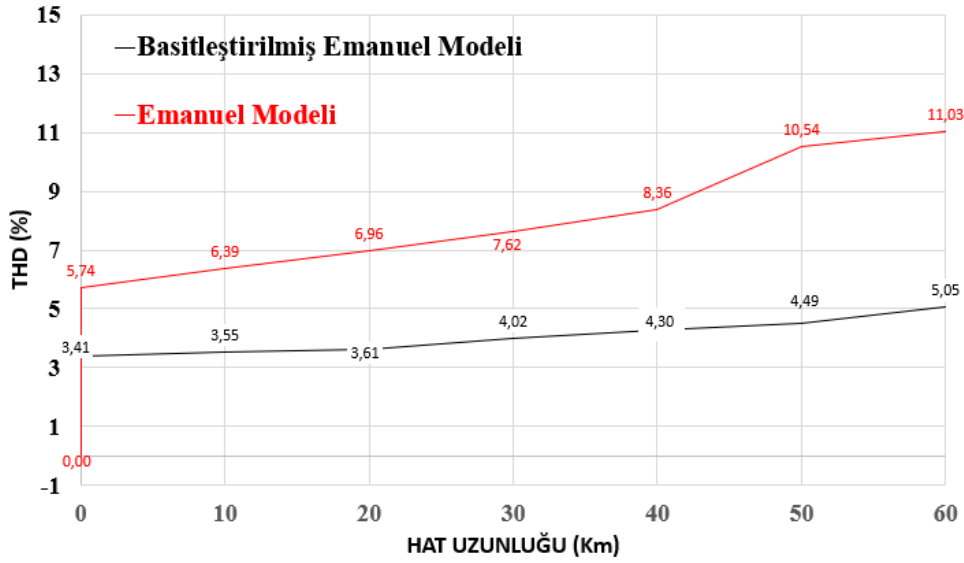
Şekil 5.23. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelin hat uzunluklarına göre [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri

Şekil 5.24.’de ise Emanuel Modeli akım değerlerinin THD gösterilmektedir.



Şekil 5.24. Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları

Şekil 5.25.’de ise Basitleştirilmiş Emanuel Model ve Emanuel Modelinin THD oranları kıyaslanmaktadır.



Şekil 5.25. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin ve Emanuel Modelinin hat uzunluklarına göre [0.1-0.2] sn aralığındaki THD oranları

Şekil 5.25.'den de görüldüğü gibi Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin THD oranları Emanuel Modelin THD oranlarına göre daha azdır. Bir sinyalde bozulma olayı istenmeyen bir durumdur. Bu sebepten dolayı iki modelin kıyaslanmasında Basitleştirilmiş Emanuel Modeli YEA için daha uygun bir modeldir.

Sonraki aşama olarak en küçük kareler yöntemi aracılığıyla [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerlerini formülize edip hata oranları kıyaslanacaktır. Emanuel Modeli için [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri Çizelge 5.11.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.11. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri

x_k	10	20	30	40	50	60
y_k	49,37	40,76	36,70	33,21	30,85	26,44

Çizelge 5.9.'da verilen değerlere göre;

$$m = -3,9,$$

$$b = 172,$$

$y = -3,9x + 172$ olarak bulunur. Bulunan denkleme göre akım değerleri ise Çizelge 5.10.'da gösterilmektedir.

Çizelge 5.12. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki formül çıktıları

x_n	10	20	30	40	50	60
y_n	133	94	55	16	23	62

Her bir hat uzunluğuna ait [0.1-0.2] sn aralığındaki akım değerlerinin bağıl hata oranları Çizelge 5.13.'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.13. Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki bağıl hata oranları

Hat Uzunluğu	10	20	30	40	50	60
Bağıl Hata Oranı (%)	169	130,6	49	51,8	25,4	134,5

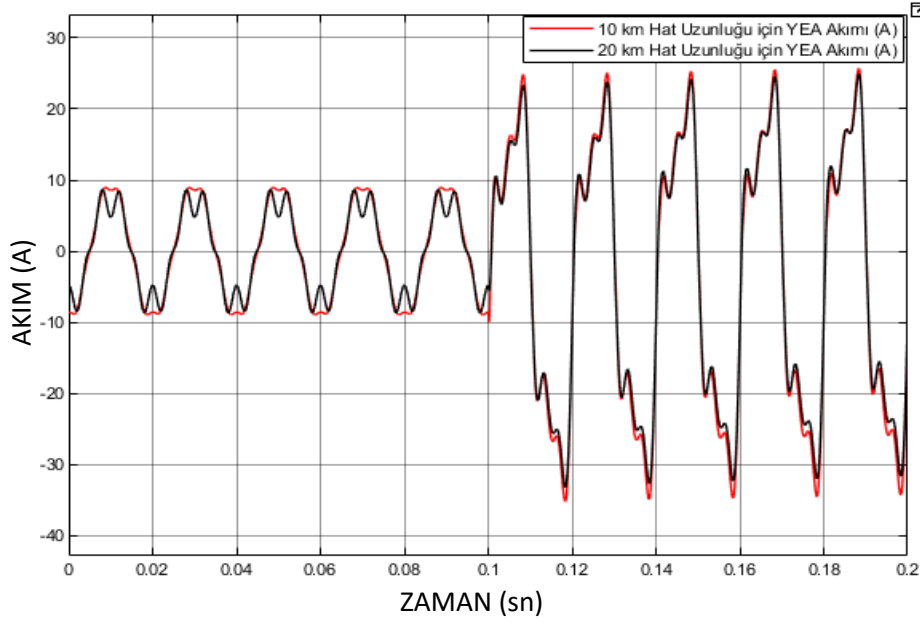
Emanuel Modelinde [0.1-0.2] sn aralığındaki ana kol akım değerleri en küçük kareler yöntemi ile formülize edilmiştir ve bağıl hata oranları bulunmuştur. Hata oranları her km uzunluğu için ayrı ayrı hesaplanmış ve ortalama olarak %93 oranında bir hata mevcuttur. Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde ise bu hata oranı %85'dir.

Bu bölümde YEA arızası için Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ve Emanuel modeli akım değerleri kıyaslanmıştır. THD oranları ve en küçük kareler yöntemi ile elde edilen bağıl hata oranları değerlendirildiğinde Basitleştirilmiş Emanuel Modelin YEA için daha uygun bir model olduğu düşünülmektedir.

5.3. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modeli İçin YEA Akımı İncelenmesi

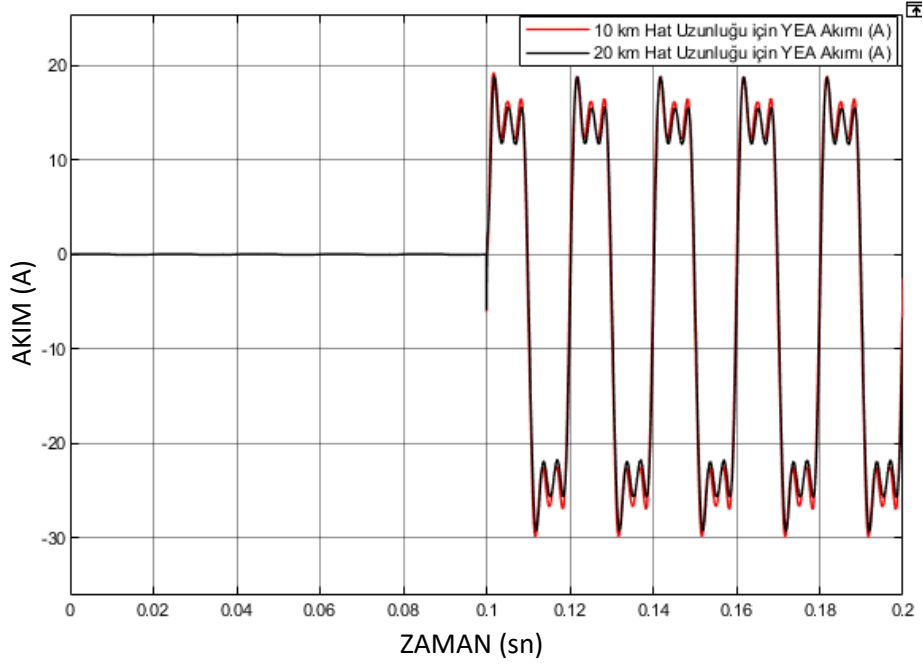
Dağıtım şebekelerinde gerilim 50 Hz (bazı ülkelerde 60 Hz) frekansında üretilmektedir ve sinüzoidal şeklindedir. Bu sistemden çekilen akımın da sinüs şeklinde olması beklenmektedir. Fakat günümüzde modern elektrikli ekipmanlar, yarı iletken teknolojilerinin kullanıldığı cihazlar, lineer olmayan yükler akımı sinüzoidal olmayan dalga formuna çeker. Bu sebepten dolayı çalışmamızın bu bölümünde Basitleştirilmiş Emanuel Modelindeki besleme kaynağını harmonik kaynakla değiştirerek ana gerilim kaynağına kaynağın 3. ve 5. harmoniği eklenmiştir.

Önceki bölümlerde olduğu gibi hat uzunlukları sırasıyla 10 km, 20 km, 30 km ve 60 km olarak değiştirilmiştir. Öncelikli olarak hat uzunlukları 10 km ve 20 km olarak ayarlanıp akım değerleri Şekil 5.26.'da gösterilmektedir.



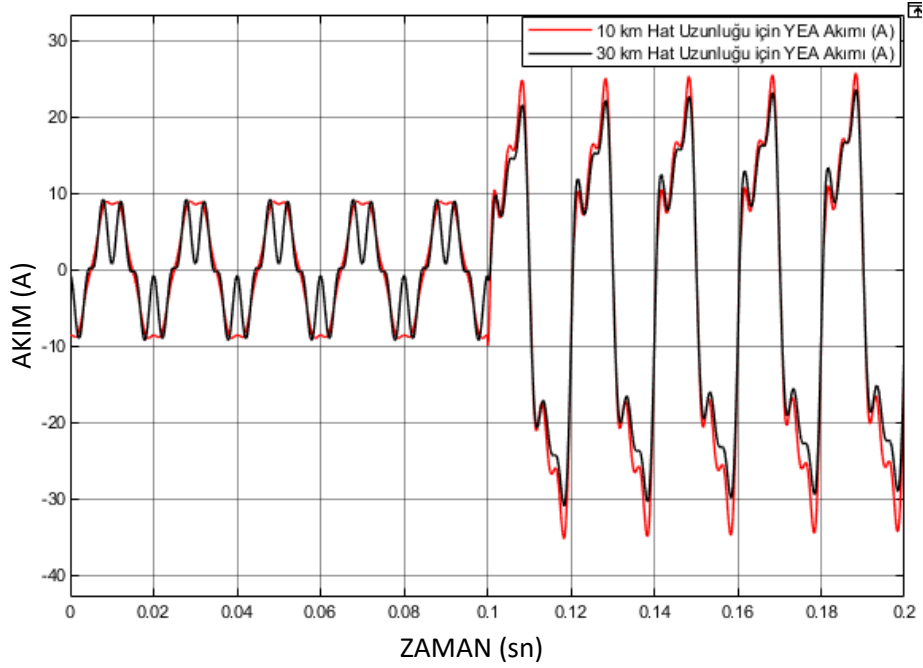
Şekil 5.26. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

Şekil 5.26.'da da gösterildiği gibi devreye harmonik kaynak bağlanmasından sonra elde edilen ana kol akım grafiği bozulmuştur. Bu bozulma kaynağın harmonikli kaynak olmasından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.27. ise YEA akımında meydana gelen değişiklikleri göstermektedir.



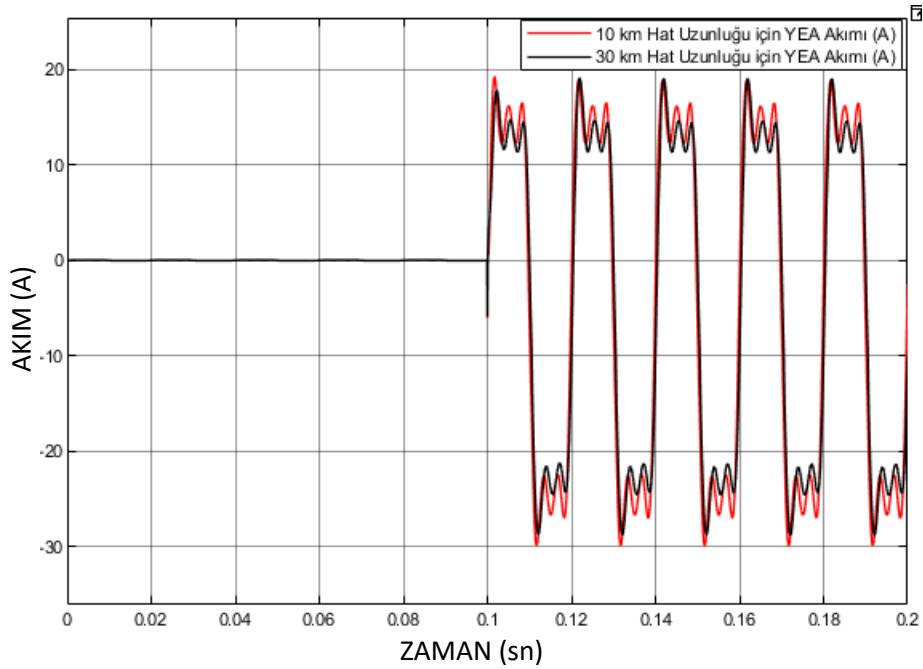
Şekil 5.27. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Şekil 5.27.'de 10 km ve 20 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği sunulmaktadır. Harmonik kaynak bağlanması YEA akımının da bozulmasına sebep olmuştur. Sonraki aşama olarak hat uzunluğu 30 km olarak değiştirilmiştir ve Şekil 5.28. 10 km ve 30 km hat uzunlukları için ana kol akım değerlerini göstermektedir.



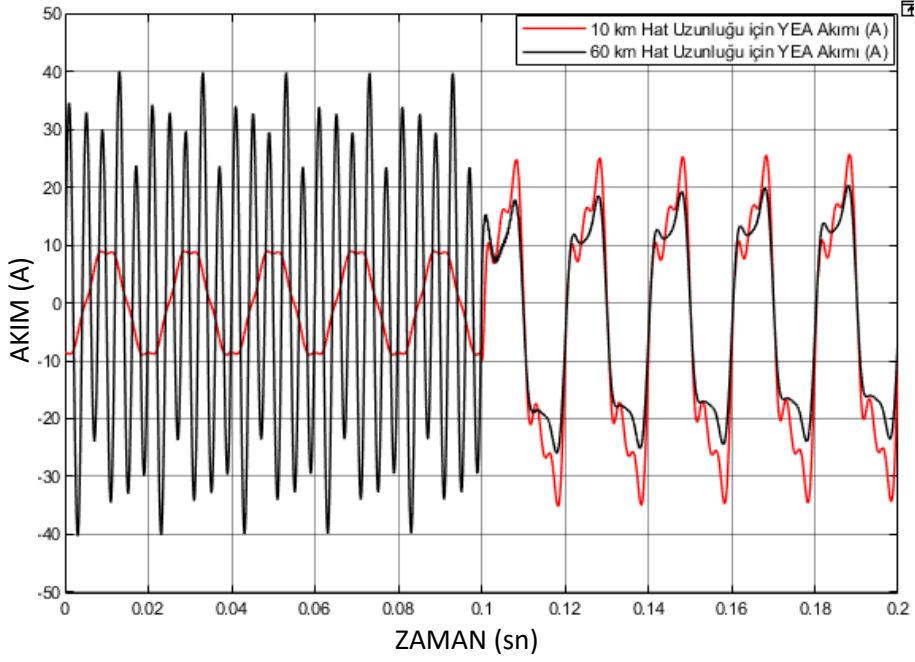
Şekil 5.28. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

Şekil 5.28. 10 km ve 30 km dağıtım hattı uzunlukları için ana kol akım değerlerini göstermektedir. Şekil 5.29. ise YEA akım grafiklerini sunmaktadır.



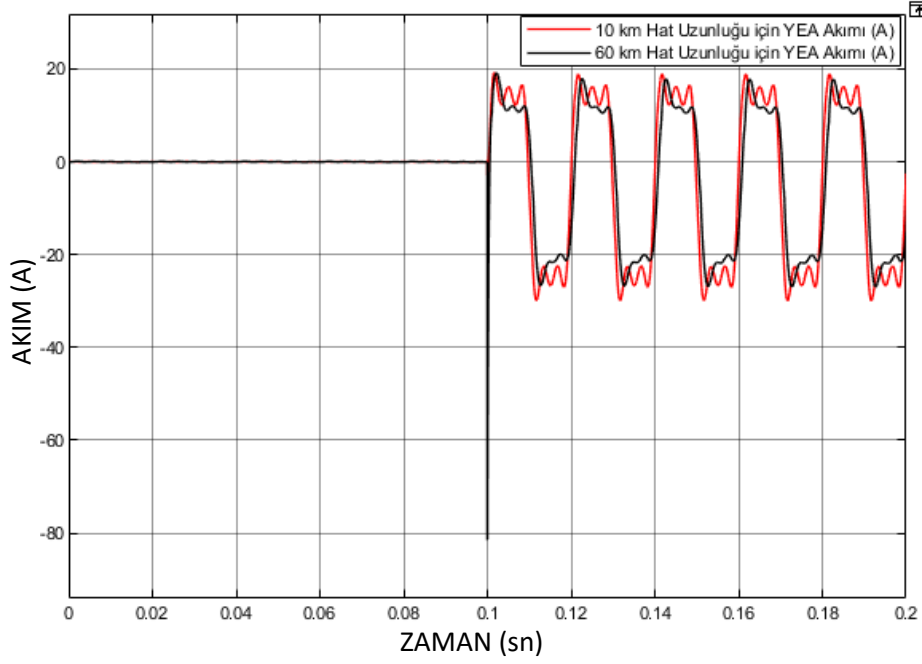
Şekil 5.29. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 30 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Son olarak ise 10 km ve 60 km hat uzunlukları için akım değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.30. ana kol akım değerlerini göstermektedir.



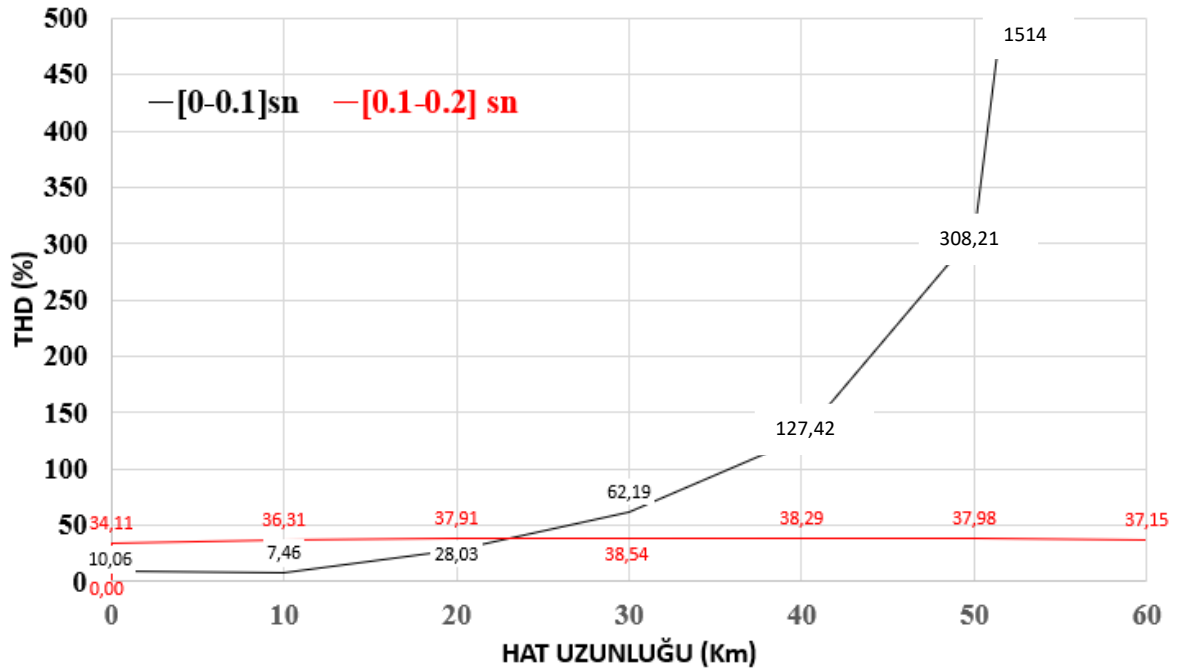
Şekil 5.30. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için ana kol akım grafiği

Şekil 5.30.'da görüldüğü gibi dağıtım hattı uzunluğunun artması akımdaki bozulmada oldukça etkilidir. Dağıtım hattı uzunluğu arttıkça temiz bir sinüs dalgası görmek oldukça zordur. Şekil 5.31. ise YEA akım değerlerini sunmuştur.



Şekil 5.31. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde 10 km ve 60 km hat uzunlukları için YEA akım grafiği

Hat uzunlukları arttıkça grafiklerdeki bozulmalar ciddi oranda artmıştır. Hat uzunluklarına göre bozulmaları özetlemek için ise Şekil 5.27.'de ana kol akım grafiklerinin THD oranları gösterilmektedir.



Şekil 5.32. Harmonik Kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Modelinde hat uzunluklarına göre THD oranları

Şekil 5.32. dağıtım hattı uzunlukları için total harmonik bozulma oranlarını göstermektedir. THD değerlerinden de anlaşılacağı gibi harmonikli kaynak bulunması durumunda hem YEA akımı oluşmadan önce hem de sonra THD değerleri artmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik enerji sistemlerinde kesintilere ve hasara neden olabilecek bu sistemdeki bir arıza, sistemdeki ana sorunlardan biridir. Arızanın izole edilebilmesi için sisteme yerleştirilmesi önemlidir. Arıza izole edilmezse, elektrikli ekipman ve sistemin diğer parçaları uzun vadede hasar görebilir. Bulunması en zor olan arızalar, genel sistem üzerinde daha az etkiye sahip olan daha yüksek empedanslı arızalardır.

Yüksek empedans arızaları genellikle dağıtım ağlarında meydana gelmekte ve çoğunlukla arıza noktasındaki yüksek empedans nedeniyle geleneksel koruma rölelerini etkinleştirememektedir. Bu arızalar genellikle bir tepe iletkeni bozulduğunda ve yüksek empedanslı yüzeylere dokunduğunda ve / veya iletkenlerin bir ağaç gibi yüksek empedanslı bir nesneyle temas ettiğinde ortaya çıkmaktadır. YEA tespitinde temel amaç, kısa devre arızalarının aksine, sistemi korumak değil, insan hayatını korumak ve ark olgusu nedeniyle yangın tehlikelerini önlemektir.

Bu tez çalışmasında, bugüne kadar yapılan YEA tespit modellemelerinden farklı olarak, dağıtım hattı uzunluğunun YEA'sına etkisi incelenmiştir. Bunun için öncelikli olarak MATLAB/Simulink programı kullanılmıştır. Programda bir dağıtım hattı devresi kurulmuştur. Akıllı şebekeler 34,5 kV ile beslendiğinden dolayı devrede gerilim kaynak değeri olarak 34,5 kV seçilmiştir. Devrede bir adet kaynak empedansı, bir adet dağıtım hattı ve bir adette yük empedansı kullanılmıştır. Ayrıca devreye 0.1'inci saniyede bağlanacak iki adet YEA modelleri kullanılmıştır. Başlangıçta Basitleştirilmiş Emanuel Modeli bağlanmış dağıtım hattı uzunluğu 10 km olarak seçilip devrenin ana kol akım grafiği ve YEA akım grafiği elde edilmiştir. Grafiklerin değerleri çıkarılmıştır. İkinci aşama olarak dağıtım hattı uzunluğu 20 km olarak değiştirilip ana kol akım grafiği ve YEA akım grafiği elde edilip, 10 km hat uzunluğuna sahip akım değerleri ile 20 km hat uzunluğuna sahip akım değerleri karşılaştırılmıştır. Sonraki aşamada dağıtım hattı uzunluğu 30 km olarak ayarlanmış ve önceki adımlar tekrarlanmıştır. 10 km hat uzunluğuna ait akım grafikleri ve değerleri 30 km hat uzunluğuna sahip akım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Son aşama olarak ise hat uzunluğu 60 km olarak ayarlanıp önceki adımlar tek tek uygulanmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda ise dağıtım hattı uzunluğu arttıkça YEA akım değeri azalmıştır. Ana kol akım değerleri ise azalmış ve akım grafiğinin bozulmuştur. Akım grafiğinin bozulması ve akım değerinin

değişmesi ile dağıtım hattı uzunluğunun YEA olayını etkilediği gözlemlenmiştir. Var olan akım bozulmalarından yola çıkılarak her bir akım grafiği için THD oranları incelenmiş ve karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda dağıtım hattı uzunluğu arttıkça THD oranı artmıştır. Son olarak ise akım değerleri için en küçük kareler yöntemi uygulanarak akım değerlerinin denklemleri elde edilmiş ve elde edilen denkleme göre her bir uzunluğa ait akım değerlerinin bağıl hata oranları bulunmuştur.

Basitleştirilmiş Emanuel Modeli için akım değerleri, bağıl hata oranları ve THD değerleri elde edildikten sonra devreye farklı bir model olan Emanuel Modeli bağlanmıştır ve her bir dağıtım hattı uzunluğu için Basitleştirilmiş Emanuel Modeli ile karşılaştırılmıştır. Her iki akım dalgaları için faz farkları çıkarılmıştır. Elde edilen faz farkına göre Basitleştirilmiş Emanuel Modeli, Emanuel Modelinden $75,6^\circ$ ileri fazdadır. Bir sonraki aşamada Emanuel Modeli için elde edilen akım değerlerinin THD oranları bulunmuş ve önceki model ile kıyaslanmıştır. Yapılan bu kıyaslama sonucunda ise Emanuel Modelinin ortalama THD oranı %8 iken Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin THD oranı ortalama olarak %4 bulunmuştur. Son aşama olarak ise Emanuel Modeli akım değerleri için en küçük kareler yöntemi ile formülize edilmiş ve bağıl hata oranları hesaplanmıştır. Basitleştirilmiş Emanuel Modelin ortalama bağıl hata oranı %85 iken Emanuel Modelin ortalama bağıl hata oranı %93 olarak bulunmuştur.

Son olarak ise, günlük hayatımızda kullandığımız besleme kaynağı harmonik içerdiğinden dolayı Basitleştirilmiş Emanuel Modeline harmonik kaynak bağlanmış ve harmonik kaynak üzerinden akım değerleri incelenmiştir.

Çalışma çıktıları değerlendirildiğinde öncelikli olarak akımdaki değişikliklere bakılarak bir arıza durumunun mevcut olduğuna dair yorum yapılabilir. Örnek devremizde yaşanacak arıza için iki farklı YEA modeli kıyaslandığında Basitleştirilmiş Emanuel Modelinin YEA için daha uygun bir model olduğu düşünülmektedir. Basitleştirilmiş Emanuel Model ve harmonik kaynaklı Basitleştirilmiş Emanuel Model karşılaştırıldığında ise, harmonik kaynağın varlığından dolayı akım dalga formunda bozulmalar meydana gelmiş distorsiyon oranları artmıştır.

İleriye dönük araştırma önerisi olarak YEA olayının tespitinin yanında arıza yerinin tespiti de önemli olup arıza yerinin bilinmesi durumunda arızaya müdahale süresi kısılacağından

dolayı olası bir yangın veya can tehlikesi durumuna engel olunacağından YEA olayı ile koordineli çalışmaların yapılması literatüre katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

1. Keyhani, A. (2011). *Design of Smart Power Grid Renewable Energy Systems*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley&Sons. 50-53.
2. İnternet: National Energy Technology Laboratory: Home Page, [URL:http://www.netl.doe.gov/smartgrid/refshelf.html#White%20Papers](http://www.netl.doe.gov/smartgrid/refshelf.html#White%20Papers), Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
3. İnternet: NIST frame work and road map for smart grid interoperability standards. URL: <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.1108r2.pdf>, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
4. İnternet: A Systems View of the Modern Grid. URL: https://netl.doe.gov/sites/default/files/Smartgrid/ASystemsViewoftheModernGrid_Final_v2_0.pdf, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
5. İnternet: Group, SMB Smart Grid Strategic, IEC, [URL:http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf](http://www.iec.ch/smartgrid/downloads/sg3_roadmap.pdf), Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
6. İnternet: Haase, P. Intelligrid: A smart network of power. URL: <https://silo.tips/download/the-story-in-brief-by-paul-haase>, Son Erişim Tarihi:27.06.2021.
7. Emanuel, A. E., Gulachenski, E. M. and Shiller, S. (1990). High Impedance Fault Arcing on Sandy Soil in 15kv Distribution Feeders: Contributions to the Evaluation of the Low Frequency Spectrum. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(2), 676-686.
8. Sharat, A. M., Snider, L. A., and Debnath, K. (1993). *A neural network based back error propagation relay algorithm for distribution system high impedance fault detection*. 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management. Hong Kong, Japan, 613-620.
9. Wai, D. T. C., and Yibin, X. (1998). A novel technique for high impedance fault identification. *IEEE Transactions on Power delivery*, 13(3), 738-744.
10. Nam, S. R., and Park, J. K. (2001). *Modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in EMTP*, Power Engineering Society Summer Meeting. Vancouver, Canada, 1175-1180.
11. Lai, T. M., Snider, L. A., and Lo, E. (2006). Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults. *Electric Power Systems Research*. 76(8), 626-633.
12. Sheng, Y., and Steven, M. R. (2004). Decision tree-based methodology for high impedance fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 19(2), 533-536.

13. Michalik, M., Rebizant, W., Lukowicz, M., Lee, S. J. and Kang, S. H. (2005). *Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV networks*. IEEE Russia Power Tech, St. Petersburg, Russia. 1-7.
14. Sedighi, A. R. and Haghifam, M.R. (2010). *Simulation of high impedance ground fault In electrical power distribution systems*. International Conference on Power System Technology. Hangzhou, China. 1-7.
15. Zoric, K. J., Djuric, M. B. and Terzija, V. V. (1997). Arcing faults detection on overhead lines from the voltage signals, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 19(5), 299-303.
16. Cui, Q., El-Arroudi, K. and Weng, Y. (2019). A feature selection method for high impedance fault detection. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 34(3), 1203-1215.
17. Elkalashy, N. I., Lehtonen, M., Darwish, H. A., Taalab, A. M. I., and Izzularab, M. A. (2008). A novel selectivity technique for high impedance arcing fault detection in compensated MV networks. *European Transactions on Electrical Power*, 18(4), 344-363.
18. Samantaray, S. R., Dash, P. K., and Upadhyay, S. K. (2009). Adaptive Kalman filter and neutral network based high impedance fault detection in power distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(4), 167-172.
19. Zanjani, M. G. M., Kargar, H. K., and Zanjani, M. G. M. (2012, Mayıs). *High impedance fault detection of distribution network by phasor measurement units*. 2012 proceedings of 17th Conference on Electrical Power Distribution. Tehran, Iran. 1-5.
20. Torres, V., Guardado, J. L., Ruiz, H. F., and Maximov, S. (2014). Modeling and detection of high impedance faults. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 163-172.
21. Santos, W. C., Lopes, F. V., Brito, N. S. D., and Souza, B. A. (2016). High-impedance fault identification on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 23-32.
22. İnternet: Türkiye elektrik kurulu güç grafiği, URL: <https://www.teias.gov.tr/>, Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
23. Huang, Y. F., Werner, S., Huang, J., Kashyap, N., ve Gupta, V. (2012). State Estimation in Electric Power Grids: Meeting New Challenges Presented by the Requirements of the Future Grid. *IEEE Signal Processing Magazine*. (5).33-43.
24. Tuballa, M. L., and Abundo, M. L. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 710-725.
25. İnternet: The smart grid: an introduction. URL: https://www.smartgrid.gov/document/smart_grid_introduction, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.

26. Vaziri, M., Vadhva, S., Oneal, T., vande Johnson, M. (2011). *Smart grid, Distributed Generation, and standarts*. IEEE Power and Energy Society General Meeting. Detroit, Michigan, USA, 1-8.
27. İnternet: Title XIII (Smart Grid) in Energy Independence and Security Act of 2007. URL:https://www.smartgrid.gov/document/title_xiii_energy_independence_and_security_act_2007_eisa, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
28. İnternet: Smart Grid Initiative of Korea. URL: https://microgrid-symposiums.org/wp-content/uploads/2014/12/jeju_yang.pdf, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
29. İnternet: A vision for the modern Grid. URL:<https://www.edockets.state.mn.us/EFiling/edockets/searchDocuments.do?method=showPoup&documentId={9AC207922CBE47028BCC7EAA8FB1F1A6}&documentTitle=5522178>, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
30. Hauser, C. H., Bakken, D. E., and Bose, A. (2005). A failure to communicate: next generation communication requirements, technologies, and architecture for the electric power grid. *IEEE Power and Energy Magazine*, 3(2), 47-55.
31. Ghassemi, A., Bavarian, S., and Lampe, L. (2010). *Cognitive radio for smart grid communications*. First IEEE International Conference on Smart Grid Communications. Gaithersburg, Maryland, USA, 297-302.
32. İnternet: Standard for Wireless Local Area Network. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_11e-2005.html, Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
33. İnternet: IEEE Standard for Local and metropolitan area. URL: <https://legal.vvv.enseirbmatmeca.fr/download/amichel/%5BStandard%20LDPC%5D%20802.16-2009.pdf>, Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
34. İnternet: Substations, Wireless Connectivity for Electric. URL: <https://www.epri.com/research/products/1016145>, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
35. İnternet: Wireless Connectivity for Electric Substations. URL: <https://www.epri.com/research/products/1016145>, Son Erişim Tarihi: 23.06.2021.
36. Lee, P. K., and Lai, L. L. (2007). *A practical approach to wireless GPRS on-line power quality monitoring system*. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, Florida, USA, 1-7.
37. İnternet: Standard for Information Technology-Local and metropolitan area networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2006.html, Son Erişim Tarihi: 18.05.2021.
38. İnternet: IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. URL: https://standards.ieee.org/standard/802_20-2008.html, Son Erişim Tarihi: 27.06.2021.

39. Kuzlu, M., Pipattanasomporn, M., and Rahman, S. (2014). Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN. *Computer Networks*, 67, 74-88.
40. Gungor, V. C., and Lambert, F. C. (2006). A survey on communication networks for electric system automation. *Computer Networks*, 877-897.
41. Kuzlu, M., and Pipattanasomporn, M. (2013). *Assessment of communication technologies and network requirements for different smart grid applications*. IEEE PES innovative smart grid technologies conference (ISGT), Copenhagen, Denmark, 1-6.
42. Ahola, J. (2003). *Applicability of power-line communications to data transfer of on-line condition monitoring of electrical drives*, PhD. Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finlande, 27-30.
43. Windelspecht, M. (2003). *Groundbreaking scientific experiments, inventions, and discoveries of the 19th century*, Greenwood, New York, Greenwood Publishing Group, 58-64.
44. Brown, P. A. (1996). *Power line communications-past, present, and future*. Proceedings of International Symposium on Power-line Communications and its Applications. California, USA, 1-8.
45. Schwartz, M. (2009). Carrier-wave telephony over power lines: Early history [history of communications]. *IEEE Communications Magazine*, 47(1), 14-18.
46. Dzung, D., Berganza, I., and Sendin, A. (2011). *Evolution of powerline communications for smart distribution: From ripple control to OFDM*. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Udine, Italy., 1-9.
47. Chundururu, V., and Subramanian, N. (2006). *Effects of power lines on performance of home control system*. International Conference on Power Electronic, Drives and Energy Systems, New Delhi, India, 1-6.
48. Vasseur, J. P., and Dunkels, A. (2010). *Interconnecting smart objects with ip: The next internet*, Morgan Kaufmann, 103-107.
49. Lee, M. K., Newman, R. E., Latchman, H. A., Katar, S., and Yonge, L. (2003). HomePlug 1.0 powerline communication LANs—protocol description and performance results. *International Journal of Communication Systems*, 16(5), 447-473.
50. Casella, I. R. S. and Anpalagan, A. (2019). *Power line communication systems for smart grids*, United Kingdom, Institution of Engineering & Technology, 224-231.
51. Yonge, L., Abad, J., Afkhamie, K., Guerrieri, L., Katar, S., Lioe, H., Pagani, P., Riva, R., Schneider, D. M. and Schwager, A. (2013). An overview of the HomePlug AV2 technology. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 1-20.

52. Ercan, S. U., Ozgonenel, O., and Thomas, D. W. (2018). *Power line communication channel for smart grid*. 6th International Istanbul Smart Grids and Cities Congress and Fair (ICSG) IEEE. Istanbul, Turkey, 208-212.
53. Galli, S., Scaglione, A., ve Wang, Z. (2011). For the grid and through the grid: The role of power line communications in the smart grid. *Proceedings of the IEEE*, 99(6), 998-1027.
54. İnternet: Rieken, D. W., Hessling Jr, J. B. TWACS transmitter and receiver. URL: <https://patentimages.storage.googleapis.com/0f/9e/f7/f7bbf749606e09/US9294147.pdf>, Son Erişim Tarihi: 4.06.2021.
55. İnternet: Fritz, R. (2017). Is X-10 an Obsolete Technology?. URL: <https://www.lifewire.com/is-x-10-obsolete->, Son Erişim Tarihi: 10.04.2021.
56. İnternet: Signalling on low-voltage electrical installations in the frequency range 3 kHz to 148.5 kHz. URL: <https://standards.globalspec.com/std/1379982/EN%2050065-1>, Son Erişim Tarihi: 31.05.2021.
57. İnternet: Introduction to the LonWorks Platform (Revision 2.0). URL: https://www.echelon.com/assets/blt893a8b319e8ec8c7/078018301B_Intro_to_LonWorks_Rev_2.pdf, Son Erişim Tarihi: 15.04.2021.
58. Sato, T., Kammen, D. M., Duan, B., Macuha, M., Zhou, Z., Wu, J., Tariq, M., and Asfaw, S. A. (2015). *Smart grid standards: specifications, requirements, and Technologies*, Chennai, India, John Wiley & Sons, 124-125.
59. İnternet: Bradbury S. HomePlug Command & Control (C&C) Overview White Paper. URL: <https://en.sekorm.com/doc/1048025.html>, Son Erişim Tarihi: 14.12.2020.
60. İnternet: PRIME v1.4 White Paper. URL: https://www.prime-alliance.org/wp-content/uploads/2020/04/PRIME-Spec_v1.4-20141031.pdf, Son Erişim Tarihi: 23.02.2021.
61. Berger, L. T., Schwager, A., Pagani, P., and Schneider, D. (Eds.). (2014). *MIMO Power Line Communications Narrow and Broadband Standards, EMC, and Advanced Processing*, Vancouver, Canada, CRC press. 51-57.
62. Sendin, A., Kim, I. H., Bois, S., Munoz, A., and Llano, A. (2014). *PRIME v1. 4 evolution: A future proof of reality beyond metering*. IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Venice, Italy, 332-337.
63. Razazian, K., Kamalizad, A., Umari, M., Qu, Q., Loginov, V., and Navid, M. (2011). *G3-PLC field trials in U.S. distribution grid: initial results and requirements*. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, Udine, Italy, 153-158.
64. Galli, S., and Lys, T. (2015). *Next generation narrowband (under 500 kHz) power line communications (PLC) standards*. China Communications, 12(3), 1-8.

65. Oksman, V., and Zhang, J. (2011). G. HNEM: the new ITU-T standard on narrowband PLC technology. *IEEE Communications Magazine*, 49(12), 36-44.
66. İnternet: HomePlug 1.0 Technology White Paper. URL: https://www.solwise.co.uk/downloads/files/hp_1.0_technicalwhitepaper_final.pdf, Son Erişim Tarihi: 27.06.2021.
67. Galli, S., and Logvinov, O. (2008). Recent developments in the standardization of power line communications within the IEEE. *IEEE Communications Magazine*, 46(7), 64-71.
68. Latchman, H. A., Katar, S., Yonge, L., and Gavette, S. (2013). In: *Homeplug AV and IEEE 1901: A Handbook for PLC Designers and Users*, Hoboken, NJ, Wiley-IEEE Press. 46-49.
69. İnternet: IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=5678772>, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
70. İnternet: United Nations ITU-T's G.hn Approved as Global Standard for Wired Home. URL: <http://www.marketwired.com/pressrelease/>, Son Erişim Tarihi: 10.04.2021.
71. Oksman, V., and Galli, S. (2009). G. hn: The new ITU-T home networking standard. *IEEE Communications Magazine*, 47(10), 138-145.
72. Galda, D., and Rohling, H. (2001). *Narrow band interference reduction in OFDM based power line communication systems*. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, NSW Australia, Sydney, 345-351.
73. Razazian, K., Umari, M., Kamalizad, A., Loginov, V., and Navid, M. (2010). *G3-PLC specification for powerline communication: Overview, system simulation and field trial results*, Rio de Janeiro, Brazil, 313-318.
74. Clark, D. (1998). Powerline communications: finally ready for prime time?. *IEEE Internet Computing*, 2(1), 10-11.
75. İnternet: Overcoming smart grid communications challenges with orthogonal frequency division multiplexing (ofdm) and ieee 1901.2. Smart Grid Solutions. URL: <https://www.maximintegrated.com/en/design/technicaldocuments/appnotes/5/5356.html>, Son Erişim Tarihi: 27.06.2021.
76. İnternet: Tengdin, J., Westfall, R. ve Stephan, K. High Impedance Fault Detection Technology Report. URL: https://www.pes-psrc.org/kb/published/reports/High_Impedance_Fault_Detection_Technology.pdf, Son Erişim Tarihi: 24.06.2021.
77. de Sa, J. L. P. P., and Louro, M. (2010). On human life risk-assessment and sensitive ground fault protection in MV distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25(4), 2319-2327.

78. Gautam, S., and Brahma, S. M. (2012). Detection of high impedance fault in power distribution systems using mathematical morphology. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1226-1234.
79. Das, R., and Bayoumi, D. (2007). *System for detection of high impedance fault*. In 19th International Conference on Electricity Distribution, Vienna, Austria, 876-880.
80. Kauffman, R. H. and Page, J. C. (1960). Arcing Fault Protection for Low-Voltage Power Distribution Systems-Nature or the Problem. *Power Apparatus and Systems (AIEE)*, 79(3), 160-165.
81. Slepian, J., Mason, R. C. and Denault C. L. (1933). *A Series of Lectures on Conduction of Electricity in Gases*. East Pittsburgh, Pa., Educational Dept., Westinghouse Electric & Manufacturing Co, 111-124.
82. Hou, D. (2009). *High-Impedance Fault Detection—Field Tests and Dependability Analysis*. Proceedings of the 36th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 1-9.
83. İnternet: Russell, B. D., Aucoin, M. (1989). Detection of Downed Conductors on Utility Distribution Systems. URL: <https://resourcecenter.ieee-pes.org/publications/tutorial-papers/PESTP266.html>, Son Erişim Tarihi: 01.03.2021.
84. Akorede, M. F., & Katende, J. (2010). Wavelet transform based algorithm for high-impedance faults detection in distribution feeders. *European Journal of Scientific Research*, 41(2), 237-247.
85. Sedighi, A. R., Haghifam, M. R., and Malik, O. P. (2005). Soft computing applications in high impedance fault detection in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, 76(1-3), 136-144.
86. Adamiak, M., Wester, C., Thakur, M., and Jensen, C. (2006). High impedance fault detection on distribution feeders. *General Electric Industrial solutions*, 24-36.
87. Hou, D. (2007). *Detection of high-impedance faults in power distribution systems*. Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, Clemson, South Carolina, 85-95.
88. Lopes, F. V., Santos, W. C., Fernandes, D., Neves, W. L. A., Brito, N. S. D., and Souza, B. A. (2013). *A transient based approach to diagnose high impedance faults on smart distribution networks*. IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America), São Paulo, Brazil, 1-8.
89. Ghaderi, A., Mohammadpour, H. A., Ginn, H. L., and Shin, Y. J. (2014). High-impedance fault detection in the distribution network using the time-frequency-based algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(3), 1260-1268.

90. Wang, B., Geng, J., and Dong, X. (2016). High-impedance fault detection based on nonlinear voltage–current characteristic profile identification. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(4), 3783-3791.
91. Gomes, D. P., Ozansoy, C., and Ulhaq, A. (2018). High-sensitivity vegetation high-impedance fault detection based on signal's high-frequency contents. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 33(3), 1398-1407.
92. Silva, S., Costa, P., Gouvea, M., Lacerda, A., Alves, F., and Leite, D. (2018). High impedance fault detection in power distribution systems using wavelet transform and evolving neural network. *Electric Power Systems Research*, 154, 474-483.
93. Chakraborty, S., and Das, S. (2018). Application of smart meters in high impedance fault detection on distribution systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(3), 3465-3473.
94. Samantaray, S. R., and Dash, P. K. (2010). High impedance fault detection in distribution feeders using extended kalman filter and support vector machine. *European Transactions on Electrical Power*, 20(3), 382-393.



GAZİ GELECEKTİR..