

T.C
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK ARK FIRINLARININ ELEKTRİK ŞEBEKESİNE
ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE BİLGİSAYAR
DESTEKLİ MODELLENMESİ

MUSTAFA ŞEKER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI

MALATYA
Mayıs 2017

Tezin Başlığı : Elektrik Ark Fırınlarının Elektrik Şebekesine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi ve Bilgisayar Destekli Modellenmesi

Tezi Hazırlayan : Mustafa ŞEKER

Sınav Tarihi : 26/05/2017

Yukarıda adı geçen tez jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jüri Üyeleri

Tez Danışmanı Prof.Dr.Arif MEMMEDOV

Prof.Dr.Mehmet Salih MAMIŞ

Prof.Dr. Saadettin HERDEM

Doç.Dr. Asım KAYGUSUZ

Yrd.Doç.Dr. Yavuz TÜRKAY

Cumhuriyet Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof.Dr. Halil İbrahim ADIGÜZEL

Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Elektrik Ark Fırınlarının Elektrik Şebekesine Etkilerinin Deneysel İncelenmesi ve Bilgisayar Destekli Modellenmesi**” başlıklı bu çalışmanın bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Mustafa ŞEKER



ÖZET

Doktora Tezi

ELEKTRİK ARK FIRINLARININ ELEKTRİK ŞEBEKESİNE ETKİLERİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ VE BİLGİSAYAR DESTEKLİ MODELLENMESİ

MUSTAFA ŞEKER

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

137 + XII Sayfa
2017

Danışman: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV

Türkiye son yıllarda artan çelik üretimi ile demir çelik üretiminde en büyük on ülke arasına girmeyi başarmıştır. Günümüzde Türkiye’de üretilen çeliğin yaklaşık %71,3’ü Elektrik Ark Fırın (EAF) tesisleri yardımıyla üretilmektedir. EAF’ler yüksek eritme ve düşük üretim maliyetleri gibi önemli avantajlara sahiptir. Fakat lineer olmayan karakteristik yapısından dolayı elektrik şebekelerinde önemli güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır.

Bu çalışmada Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SİDEMİR) tesisinde bulunan 60 MVA güce sahip Elektrik Ark Fırının elektrik şebekesinde neden olduğu güç kalitesi problemleri deneysel olarak incelenmiştir. EAF’ını besleyen elektrik sistemin bir faz eşdeğeri kullanılarak Elektromanyetik Transient Program (EMTP) yardımı ile harmonik etkiler değerlendirilmiştir. Deneysel ölçüm sonuçları ve EMTP analizleri karşılaştırılarak 60 MVA EAF ının neden olduğu güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi için çözüm önerileri sunulmuştur. Deneysel verilerden elde edilen ark karakteristiği ve Matlab Curve Fitting Toolbox kullanılarak eğri uydurma yöntemleri ile literatürde sunulan zaman domenli ark modellerinin elektriksel arki tanımlamadaki uygunluğu incelenmiştir ve EAF’larında elektrik arkını tanımlamak için yeni bir zaman domenli modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen yeni zaman domenli modelinin EAF fırınlarının çalışma karakteristiklerini literatürde sunulan modellere göre daha iyi tanımladığı belirlenmiştir. Bu ark modeli kullanılarak gerçekleştirilen üç faz benzetim modelinin EAF’ının neden olduğu güç kalitesi problemlerinin tanımlamada yüksek doğrulukta kullanılabileceği gösterilmiştir.

Sonuç olarak deneysel incelemeler ve benzetim çalışmaları neticesinde, SVC sistemlerinin çift harmoniklerin artmasına neden olduğu ve seri reaktör uygulamasının mevcut sistem için elverişli bir uygulama olmadığı belirlenmiştir. Diferansiyel fark rölesi ile trafolar mutlaka korunmalıdır ve senkron kompanzasyon ile SVC kompanzasyonun birlikte kullanılması durumunda eritme başlangıcında oluşan gerilim harmoniklerinin azaltılabileceği belirlenmiştir. Olasılık teorisine göre gerçekleştirilen incelemelerde mevcut tesiste akım ve gerilim sapmalarının % 5’den küçük alındığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrik Ark Fırını, Güç Kalitesi, Statik Var Kompanzasyon, Matlab/Simulink, EMTP, Harmonik, Kırpışma.

ABSTRACT

PhD. Thesis

EXPERIMENTAL STUDY OF EFFECTS OF ELECTRICAL ARC FURNACE ON ELECTRIC NETWORK AND COMPUTER AIDED MODELING

MUSTAFA ŞEKER

**İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

137 + XII Pages

2017

Supervisor: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV

During the recent years, with its increasing steel production, Turkey has succeeded becoming one of the ten biggest steel producer countries in the world. In Turkey, approximately 71.3% of the steel produced in Turkey is producing with the help of Electric Arc Furnace (EAF) facilities. EAF's have significant advantages such as high melting and low production costs. However, due to their nonlinear characteristics, they cause significant power quality problems in electrical networks.

In this study, the power quality problems caused by 60 MVA EAF load, which is located in SİDEMİR facility, have been experimentally investigated. Harmonic effects have been evaluated with the help of the Electromagnetic Transient Program (EMTP) using a phase equivalent of the electrical system feeding the EAF load. Suggestions to improve of the power quality problems caused by EAF 60 have been presented by comparing experimental measurement results and EMTP analyzes. Suitability of the time-domain arc models which has been presented in literature for the definition of electrical arc have been examined with the arc characterization obtained from the experimental data and the curve fitting methods using Matlab Curve Fitting Toolbox and a new time domain arc model have been developed to identify the electrical arc for EAF's.

It is seen that the developed new time domain model describes the operating characteristics of EAF furnaces better than the models presented in the literature. It has been shown that the three-phase simulation model using this arc model can be used with high accuracy to identify power quality problems caused by the EAF.

As a result of the experimental studies carried out and the simulation done it has been identified that SVC systems cause even harmonics, and serial reactor application is not suitable for the current system. The transformers must be protected with differential differential relay and It has been determined that when synchronous compensation and SVC compensation are used together, voltage harmonics occurring at the beginning of melting can be reduced. According to the probability theory, current and voltage deviations smaller than 5% in the present network.

KEYWORDS: Electric Arc Furnace, Power Quality, Static Var Compensator, Matlab/Simulink, EMTP, Harmonic, Flicker.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmaya beni yönlendiren ve her zaman bana destek olan danışmanım sayın Prof. Dr. Arif MEMMEDOV hocama,

Tez çalışmam sürecinde her türlü desteği sunan Tez izleme komitesi üyeleri sayın Prof. Dr. Salih MAMİŞ hocam ve sayın Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ hocama;

Doktora eğitimim sürecinde destek ve katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü tüm öğretim üyelerine ve çalışmalarım bana destek olan sayın Prof. Dr. Teymuraz ABBASOV hocam ile sayın Arş. Gör. Cemal KELEŞ'e,

Destek ve katkılarından dolayı İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (İÜBAP) birimine, deneysel çalışmalarda gerekli ölçümlerin alınmasında destek veren TEİAŞ 11. Bölge Müdürlüğü'ne ve özellikle bu birimde değerli vaktini bana ayıran Nahit YAĞCIYA, DEÇEKO trafo merkezinde çalışan TEAİŞ personellerine, Gereklili ölçümlerin sağlanmasında verdiği desteklerden dolayı Sivas Demir Çelik İşletmelerine (SİDEMİR) ve SİDEMİR çalışanlarından Aydoğan OK ve Murat KARABULUT'a,

Çalışmalarım bana destek veren değerli arkadaşım Arş. Gör. Murat ÇIKAN'a, değerli hocalarım Doç. Dr. Rafael HÜSEYİNOV ve Yrd. Doç. Dr. Serdar KOÇKANAT' a,

Ayrıca doktora çalışmam sürecinde yaşadığım tüm sıkıntılarda yanımda olan ve bu çalışmayı tamamlamam da en önemli faktör olan değerli eşim Nilüfer'e teşekkür ederim.

Mustafa ŞEKER

İçindekiler

ÖZET	I
ABSTRACT	II
TEŞEKKÜR	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	XI
SİMGE VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ	1
1.1. Türkiye’de Demir Çelik Sektörüne Genel Bakış ve Ark Fırınlarının Önemi	3
1.2. Tez Çalışmasının Güncelliği ve Amacı	4
1.3. Tez çalışmasının Yeniliği ve Bilime Katkısı	6
2. KURAMSAL TEMELLER	7
2.1. Elektrik Ark Fırınları	7
2.1.1. EAF’nin Temel Elektriksel Devre Elemanları	8
2.1.2. Elektrik Arkı	10
2.1.2. EAF’lerde Güç Hesaplamaları	11
2.1.3. EAF’de Operasyon Direncine Bağlı Olarak Güç Hesaplamaları	14
2.1.3. Güç Kalitesinin Tanımı	15
2.2. EAF’lerin Elektrik Şebekesine Etkileri	19
2.2.1. Harmonikler	19
2.2.2. Kırpışma Etkisi	25
2.2.3. Ark Fırınlarında Kompanzasyon	26
3. SİDEMİR TESİSİNDE ELEKTRİKSEL GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL ÖLÇÜMÜ	30
3.1. EAF’nin Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçümü	30
3.1.1. EAF girişi 34,5 kV bara Ölçüm Sonuçları	31
3.1.1.1. 34,5 kV barada EAF yükünün neden olduğu Akım ve Gerilim Harmonikleri	34
a) Akım Harmoniklerinin İncelenmesi	34
b) Gerilim Harmoniklerinin İncelenmesi	38
3.1.1.2. EAF’nin neden olduğu Kırpışma etkisinin incelenmesi	40
3.1.1.3. 34,5 kV barada akım ve gerilim dalgalanmaları	42
3.2. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	45
4. 60 MVA EAF’DE AKIM VE GERİLİM DALGALANMALARININ OLASILIK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ	46

4.1.	Olasılık Yöntemleri Kullanılarak EAF' larının Şebekelerde Gerilim ve Akım Kaynağı gibi İncelenmesi	46
4.1.1.	EAF'lerde Akım Dalgalanmalarının Keyfi Prosesinin Türünün Belirlenmesi	47
4.1.2.	Orta İstatistiksel Akımın ve Korelasyon Fonksiyonunun Belirlenmesi.....	49
4.1.3.	Elektrik Ark Fırınlarında Keyfi Dalgalanmaların Spektrumu.....	52
4.1.4.	Akım Dalgalanmalarının Yayılımının Olasılık Kuramının Belirlenmesi	55
4.1.5.	EAF-60 Fırınının Ayır-Ayır Faz Akımlarının Karşılıklı Korelasyon Fonksiyonları	57
4.2.	EAF'lerde Akım Dalgalanma Sapmalarının Genlikleri.....	59
4.3.	EAF'nin Bağlanmış Olduğu Şebeke Noktasında Gerilim Dalgalanmaları.....	64
5.	EAF'Yİ BESLEYEN SİSTEMİN VE ELEKTRİK ARKININ MODELLENMESİ	68
5.1.	EAF'nin bir faz eşdeğer devresinin hesaplanması	68
5.2.	EAF'nin bir faz eşdeğer devre modeli kullanılarak EMTP ile harmonik analizi....	69
5.3.	Elektrik Arkının Modellenmesi	72
5.3.1.	Elektrik Arkın Modellenmesi ve Matlab Benzetimi	74
5.3.2.	Kırpışma Etkisinin Modellenmesi	77
5.4.	EAF Sisteminin Bir Faz Benzetim Sonuçları.....	78
5.4.1.	Ark Modellerinin Statik V-I karakteristiklerinin İncelenmesi	79
5.4.2.	Elektrik Arkının Dinamik Olarak Modellenmesi.....	81
5.4.3.	Model 4: Elektrik Arkının Modelelenmesi için Yeni Zaman Domeni Modeli	88
5.4.4.	Bir Faz Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	94
5.4.	EAF'nin 3 FAZ BENZETİM MODELİ	97
5.4.1.	TKR Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi.....	98
5.4.2.	Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi.....	99
5.4.3.	EAF'yi Besleyen Sistemin 3 Faz Benzetim Modeli Sonuçları	100
5.4.4.	İndirici Transformatorün Korunması için Diferansiyel Fark Rölesinin Matlab/Simulink Benzetimi.....	110
5.4.5.	Senkron Kompanzasyon Uygulaması	117
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	119
6.1.	Bu Tez Çalışmasından Elde Edilen Sonuçlar	119
7.	KAYNAKLAR.....	122
8.	EKLER.....	131
9.	ÖZGEÇMİŞ	134

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1.	Türkiye’de demir çelik üretim haritası	4
Şekil 2.1.	EAF’lerde enerji kullanımı ve enerji kayıpları.	8
Şekil 2.2.	EAF'nin farklı çalışma süreçlerindeki elektrot pozisyonu ve bir ergitme işlemi süresindeki görünür gücün değişimi.	8
Şekil 2.3.	EAF'nin temel elektriksel sistem elemanları.....	9
Şekil 2.4.	Elektrik arkının gerilim akım (V-I) karakteristik eğrisi.....	11
Şekil 2.5.	a) Elektrik ark fırınının prensip tek hat şeması, b) Bir elektrik ark fırınının temel bir faz elektrik eşdeğer devresi.	12
Şekil 2.6.	EAF’yi besleyen iletim hattının basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.	13
Şekil 2.7.	EAF’de ark direncine (R_a) bağlı olarak güç değişimi.....	13
Şekil 2.8.	60 MVA EAF’ nin, a) 719 volt kademesi için güç eğrileri, b) 12 kademe için aktif güç eğrisinin değişimi.....	15
Şekil 2.9.	Pasif tek ayarlı pasif filtre, a) prensip devre şeması, b) Tek ayarlı filtrenin frekans-empedans grafiği.....	21
Şekil 2.10.	Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler, (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece, (d) C Tipi	22
Şekil 2.11.	Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi.....	23
Şekil 2.12.	Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama durumu prensip devre şeması.	23
Şekil 2.13.	Kırpışma eğrisi [77].....	25
Şekil 2.14.	Modüle edilmiş sinyal dalga formu.	26
Şekil 2.15.	a) Tristör Kontrollü Reaktör genel devre şeması, b) Tristör kontrollü reaktörün akım ve gerilim dalga şekilleri.	28
Şekil 2.16.	Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) genel devre şeması.....	28
Şekil 2.17.	Statik Var Kompanzasyon sisteminin yapısal yapısı.....	29
Şekil 3.1.	Sivas Demir Çelik İşletmeleri (SİDEMİR) tesisinin kirli bara tek hat şeması.	30
Şekil 3.2.	HIOKI 3197 güç analizörü ile 34,5 kV EAF girişinden ölçülen A fazına ait aktif gücün haftalık değişimi (5 dakikalık ortalamalar ile).....	31
Şekil 3.3.	HIOKI 3197 güç analizörü ile 34,5 kV EAF girişinden ölçülen A fazına ait reaktif gücün haftalık değişimi (5 dakikalık ortalamalar ile).....	31
Şekil 3.4.	60 MVA güce sahip EAF’ nin SVC sistem ve harmonik filtrelerin devrede olduğu durumda 87 dakikalık çalışma süresinde CA 8332B güç kalitesi analizörü ile ölçülen toplam aktif ve reaktif güç değişimleri.	33
Şekil 3.5.	60 MVA güce sahip EAF’ nin SVC sistem ve harmonik filtrelerin devrede olduğu durumda 87 dakikalık çalışma süresinde CA 8332 güç kalitesi analizörü ile A fazına ait ölçülen güç faktörünün değişimi.	33
Şekil 3.6.	EAF’ ni besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık çalışma sürecinde ölçülen üç faza ait Akım toplam harmonik bozulunu (harmonik bozulma sınırı değeri % 5’ dir).....	35
Şekil 3.7.	EAF’ ni besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık ölçüm sürecinde A fazına ait tek akım harmoniklerinin sınır değerleri ile karşılaştırılması.	36
Şekil 3.8.	EAF’ ni besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık ölçüm sürecinde A fazına ait çift akım harmoniklerinin sınır değerleri ile karşılaştırılması.....	37

Şekil 3.9.	Bir ergitme periyodunda sondaj, ergitme ve rafine süreçlerinde A fazına ait akım harmoniklerinin RMS değişimi. a) Temel akım harmoniği, b) 2, 3, 4 ve 5. harmonik akımları (10 çevrimlik ortalamalar ile elde edilen 20 s'lik ortalama değerler grafiksel olarak gösterilmiştir).....	38
Şekil 3.10.	Yaklaşık 10 saatlik ölçüm periyodunda 34,5 kV barada CA 8332 Güç kalitesi analizörü yardımı ile ölçülen A,B,C fazlarında toplam gerilim harmonik bozulma değerleri (%).	39
Şekil 3.11.	Yaklaşık 10 saatlik ölçüm periyodunda EAF'yi besleyen 34,5 kV ana barada A fazına ait gerilim harmoniklerinin sınır değerler ile karşılaştırılması.	39
Şekil 3.12.	34,5 kV barada kısa süreli kırpışma etkisinin (Pst) değişimi	41
Şekil 3.13.	34,5 kV barada 05.07.2012-07.07.2012 tarihinde ve 2 saatlik ortalamalar ile yaklaşık 36 saatlik ölçüm süresinde ölçülen uzun süreli kırpışma şiddeti (Plt) değişimi.....	41
Şekil 3.14.	EAF'yi besleyen 34,5 kV barada üç faz akım dalgalanmalarının RMS değeri.	42
Şekil 3.15.	EAF'yi besleyen 34,5 kV barada üç faz gerilim dalgalanmalarının RMS değeri.	42
Şekil 3.16.	34,5 kV barada EAF'nin ergitme sürecinde ölçülen üç faz akım dalga formu değişimi.....	43
Şekil 3.17.	34,5 kV barada EAF'nin ergitme sürecinde ölçülen üç faz gerilim dalga formu değişimi.....	43
Şekil 3.18.	EAF'nin Şarj ve Sondaj süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.	44
Şekil 3.19.	EAF'nin Ergitme süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.	44
Şekil 3.20.	EAF'nin Rafine süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.	45
Şekil 4.1.	60 MVA EAF'nin eritme zamanında faz akımlarının korelasyon fonksiyonları.	48
Şekil 4.2.	Kuyuların eritilmesinde A, B, ve C fazlarındaki akım dalgalanmalarının spektral sıklığı.....	53
Şekil 4.3.	EAF-60 akım fazları dalgalanmalarının deneysel spektral sıklıklarının yaklaşımı.	55
Şekil 4.4.	Kuyuların eritilmesi zamanı fazların akım dalgalanmalarının istatistiksel ve teorik yayılımı, a) A Fazı, b) B Fazı, c) C Fazı.....	57
Şekil 4.5.	Ergitmenin sonunda EAF-60'ın faz akım dalgalanmalarının korelasyon fonksiyonu.	59
Şekil 4.6.	EAF-60 çalışma güç karakteristikleri.	60
Şekil 4.7.	Akım dalgalanmalarının histogramı.	62
Şekil 5.1.	EAF'yi besleyen elektrik sisteminin temel bir faz gösterimi.....	68
Şekil 5.2.	Harmonik analizi için kullanılan EMTP programı ile oluşturulmuş devre şeması.	69
Şekil 5.3.	Sidemir 34,5 kirli bara sisteminin şebeke tarafındaki harmonik emisyonu.	70

Şekil 5.4.	Seri reaktör uygulaması ile harmonik emisyonunun değişimi.....	71
Şekil 5.5.	60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının ergitme prosesinde elde edilen gerilim dalga formu.....	73
Şekil 5.6.	60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının ergitme prosesinde elde edilen akım dalga formu.	73
Şekil 5.7.	60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının dinamik gerilim-akım (V-I) karakteristiği.	74
Şekil 5.8.	Üstel bir fonksiyon olarak lineerleştirilmiş elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.	75
Şekil 5.9.	Hiperbolik bir fonksiyon olarak elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.....	76
Şekil 5.10.	Üstel-Hiperbolik fonksiyon olarak elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.....	77
Şekil 5.11.	Matematiksel kırpışma ifadelerini tanımlamada kullanılan Matlab/Simulink sistem modeli, a) Sinüzoidal kırpışma etkisi, b) Rastgele (random) kırpışma etkisi.	78
Şekil 5.12.	SİDEMİR tesisinde 60 MVA EAF'yi besleyen elektriksel sistemin bir faz eşdeğer Matlab/Simulink devre modeli, a) Üstel Model, b) Hiperbolik ve üstel hiperbolik model.	79
Şekil 5.13.	$V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda üstel model ile elde edilen elektrik arkının gerilim ve akım dalgaformu değişimi.....	80
Şekil 5.14.	$V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda hiperbolik model ile elde edilen elektrik arkının gerilim ve akım dalga formu değişimi.....	80
Şekil 5.15.	$V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda üstel-hiperbolik model ile elde edilen elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu değişimi.....	81
Şekil 5.16.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.	82
Şekil 5.17.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.	82
Şekil 5.18.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.....	83
Şekil 5.19.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.	83
Şekil 5.20.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.....	84
Şekil 5.21.	$V_{at}=200$ volt ve $m=0,5$ seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektriksel akım ve gerilim dalga formu.....	84
Şekil 5.22.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.	85
Şekil 5.23.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.	85
Şekil 5.24.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.....	86
Şekil 5.25.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.	86

Şekil 5.26.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.	87
Şekil 5.27.	$V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.	87
Şekil 5.28.	$(di/dt)>0$, $i>0$ ve $V_a>0$ koşulunu sağlayan akım ve gerilim ölçüm değerleri ve uydurulan 9. Dereceden polinom eğrisi.	89
Şekil 5.29.	$(di/dt)<0$, $i>0$ ve $V_a>0$ koşulunu sağlayan akım ve gerilim ölçüm değerleri ve uydurulan 5. Dereceden polinom polinom eğrisi.	89
Şekil 5.30.	EAF'yi besleyen sistemin Matlab/Simulink ile oluşturulmuş bir faz eşdeğer sistem modeli.	90
Şekil 5.31.	Elektrik Arkının modellenmesinde kullanılan EAF yükünün Matlab/Simulink ile oluşturulan nolineer direnç modeli.	90
Şekil 5.32.	Elektrik arkını tanımlamak için kullanılan transfer fonksiyon bloğu.	91
Şekil 5.33.	Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın dinamik V-I karakteristik eğrisi.	91
Şekil 5.34.	Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın dinamik akım ve geriliminin değişimi(Akım değeri ölçekli olarak gösterilebilmek için 1/400 oranında küçültülmüştür).	92
Şekil 5.35.	Rastgele kırpışma etkisi ile Model 4' ün V-I karakteristiği.	93
Şekil 5.36.	Model 4'ün rastgele kırpışma etkisi ile gerilim ve akım dalga formu değişimi.	93
Şekil 5.37.	Model 4 kullanılarak benzetim sonucunda elde edilen ark gerilimi ile gerçek zamanlı ölçüm sonuçlarından elde edilen ark gerilimin zaman ekseninde karşılaştırılması.	94
Şekil 5.38.	Üstel model kullanılarak OBN'de elde edilen gerilimin sinüzoidal kırpışma ve rastgele kırpışma etkisi ile değişimi.	95
Şekil 5.39.	Yeni zaman domeni model ile (model 4) benzetim sonucunda elde edilen ark direncinin değişimi.	96
Şekil 5.40.	EAF'yi besleyen sistemin üç faz Matlab/Simulink sistem modeli.	97
Şekil 5.41.	60 MVA EAF fırınının kompanzasyonu için kullanılan TKR devre modeli.	98
Şekil 5.42.	EAF girişinden ölçülen reaktif güce göre tetikleme açısını hesaplayan kontrol bloğu.	99
Şekil 5.43.	3 Faz devre modelinde harmonik filtre gruplarının modellenmesi.	99
Şekil 5.44.	Tristör Kontrollü Reaktör ile reaktif güç kompanzasyonu.	100
Şekil 5.45.	Reaktif güç değişimine bağlı olarak tristör tetikleme faz açılarının değişimi.	101
Şekil 5.46.	Model 4 ile Üç faz çalışma durumunda A, B, C fazlarına ait elektrik arkının V-I karakteristik eğrileri (a- A Fazı, b- B Fazı, c- C Fazı)	103
Şekil 5.47.	Model 4 ile EAF girişinde benzetim sonucunda elde edilen aktif gücün değişimi.	103
Şekil 5.48.	Model 4 ile EAF girişinde benzetim sonucunda elde edilen üç faz reaktif gücün değişimi.	104
Şekil 5.49.	Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz akım RMS değişimi.	104

Şekil 5.50.	Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz gerilimin RMS değeri (bir faz- toprak olarak gösterilmiştir).....	105
Şekil 5.51.	Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz toplam gerilim harmonik bozunumu.....	105
Şekil 5.52.	İndirici transformatörün sokonder barasından benzetim ile elde edilen üç faz akım dalga formu.	106
Şekil 5.53.	İndirici transformatörün sokonder barasından benzetim ile elde edilen üç faz gerilim dalga formu.....	106
Şekil 5.54.	15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen üç faz akım RMS değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).....	107
Şekil 5.55.	15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen gerilimin RMS değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).....	107
Şekil 5.56.	15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen aktif güç değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).....	108
Şekil 5.57.	15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen reaktif güç değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).....	108
Şekil 5.58.	Diferansiyel rolenin bağlantı şeması.....	110
Şekil 5.59.	Diferansiyel rölenin çalışma karakteristiği	112
Şekil 5.60.	Diferansiyel röle genel algoritması.....	113
Şekil 5.61.	Diferansiyel rölenin karar verme şeması	114
Şekil 5.62.	Diferansiyel röle Matlab/Simulink sistem modeli.	115
Şekil 5.63.	Diferansiyel Röle karar blok yapısı.	115
Şekil 5.64.	Diferansiyel rölenin koruma bölgesinde 1. saniyede üç faz toprak arızası oluşması durumuna primer ve sekonder akım ve gerilim dalga formları. ...	116
Şekil 5.65.	Diferansiyel rölenin koruma bölgesinde dışında 1. saniyede üç faz toprak arızası oluşması durumuna primer ve sekonder akım ve gerilim dalga formları.	116
Şekil 5.66.	Benzetim Sonucunda elde edilen 1-4. gerilim harmoniklerin 5 MVA senkron jeneratör ile hesaplanması durumundaki değişimlerinin karşılaştırılması (mavi-normal çalışma durumu, kırmızı- Senkron kompanzasyon ile çalışma durumu).....	117
Şekil 5.67.	Benzetim Sonucunda elde edilen 5-8. gerilim harmoniklerin 5 MVA senkron jeneratör ile hesaplanması durumundaki değişimlerinin karşılaştırılması (mavi-normal çalışma durumu, kırmızı- Senkron kompanzasyon ile çalışma durumu).....	118

TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Güç Sistemlerinin Elektromanyetik Bozunum Karakteristikleri ve Katagorileri (pu-Per Unit birim sistemi).....	18
Tablo 3.1.	EAF'nin 87 dakikalık eritme periyodu sürecinde çalışma faz süreleri.....	32
Tablo 3.2.	87 dakikalık çalışma sürecindeki enerji değerleri.....	32
Tablo 4.1.	EAF' larda $i(t)$ reelleştirme zaman sonuçları.....	50
Tablo 4.2.	İstatistiksel parametrelerin hesaplama sonuçları.	52
Tablo 4.3.	Paylaşım fonksiyonunun oransal hatası.....	56
Tablo 4.4.	Denemeler sonucunda elde edilen kısa devre akımları.....	60
Tablo 4.5.	Yüksek gerilimde ölçülen parametrelerin alçak gerilime indirgenmesi.	61
Tablo 4.6.	Farklı fırınlar için Akım sapma parametrelerinin karşılaştırılması.....	63
Tablo 5.1.	EAF'yi besleyen sistemin bir faz eşdeğer devresinin hesaplanmasında kullanılan devre parametreleri.	68
Tablo 5.2.	SİDEMİR tesisinde 60 MVA EAF'yi besleyen sistemin 719 V referans gerilimi için bir faz eşdeğer devre parametreleri.	69
Tablo 5.3.	Elektriksel arkın karakteristiğinin tanımlanabilmesi için karakteristik bölgelerin tanımlanması.....	88
Tablo 5.4.	Deney ve benzetimler sonucunda elde edilen gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması.....	95
Tablo 5.5.	15 dakikalık eritme süresinde deneysel ölçümler ve benzetimler sonucunda elde edile toplam akım harmonik bozunumunun karşılaştırılması.....	109
Tablo 5.6.	15 dakikalık eritme süresinde deneysel ölçümler ve benzetimler sonucunda elde edile gerilim harmonik bozunumunun karşılaştırılması....	109

SİMGE VE KISALTMALAR

EAF	Elektrik Ark Fırını
SVC	Statik Var Kompanzasyon
TKR	Tristör Kontrollü Reaktör
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
THD	Toplam Harmonik Bozunumu
THDI	Toplam Akım Harmonik Bozunumu
THDV	Toplam Gerilim Harmonik Bozunumu
P_{st}	Kısa Süreli Kırpışma Etkisi
P_{lt}	Uzun Süreli Kırpışma Etkisi
P	Aktif Güç
Q	Reaktif Güç
S	Görünür Güç
OBN	Ortak Bağlantı Noktası (Common Cumpling Point)
S_k	Kısa Devre Gücü
AG	Alçak Gerilim
OG	Orta Gerilim
YG	Yüksek Gerilim
I_n	Nominal Akım

1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik enerjisi her geçen gün gereksinimine daha fazla ihtiyaç duyulan vazgeçilmez bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Elektrik enerjisinin tüketicilere ulaştırılmasında, elektrik enerjisinin kesintisiz, kaliteli bir hizmet sağlanarak ve daha ucuz bir şekilde iletilmesi gereklidir. Elektrik enerjisinin kalitesinden kasıt, elektriğin iletilirken sabit şebeke frekansında, sabit genlikli ve sinüzoidal şekilde bir yük gerilimine sahip olmasıdır. Fakat güç sistemlerinde meydana gelen arızalar ve dinamik durumlar nedeniyle veya lineer olmayan yüklerin etkisiyle gerilim dalga şekilleri genellikle saf sinüs şeklinden uzaklaşır. Gerilim ve akım değerlerinin şebeke frekansında arzu edilen değerlerin dışına çıkması güç kalitesi problemleri veya güç kalitesi bozunumları olarak tanımlanır [1]. Güç kalitesi bozunumları gerilim dalga şekli ile ilişkili olduğundan güç kalitesi kavramı yerine gerilim kalitesi kavramı da kullanılmaktadır.

Elektrik güç kalitesindeki bozulmalara neden olan etki çoğunlukla şebekedeki yüklerdir. Özellikle lineer olmayan akım gerilim karakteristiğine sahip yükler şebekeden sinüzoidal olmayan akım çekerler ve bu akımlar şebekelerde sinüzoidal olmayan gerilim düşümlerine neden olarak gerilim dalga şeklinde bozulmalara neden olurlar [1, 2].

Demir çelik üretim tesislerinde yaygın olarak kullanılan Elektrik Ark Fırınları (EAF) elektriksel şebekelerde güç kalitesi problemlerine neden olan en büyük güce sahip lineer olmayan elektriksel sistem elemanlarıdır. Elektrik ark fırınlarının alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) çalışma yapısına sahip olan farklı tipleri bulunmakla birlikte en yaygın olarak kullanılanı AC EAF'lerdir.

EAF alanındaki gelişmeler özellikle II. Dünya savaşıdan sonra başlamıştır ve Elektrik, Metalürji ve Mekanik alanındaki teknolojik gelişmeler ile birlikte hızlı bir ilerleme göstermiştir. Başlangıçta düşük eritme kapasitelerine sahip olan EAF'ler teknolojik gelişmelere bağlı olarak artan eritme kapasiteleri ve düşük üretim maliyetleri nedeniyle diğer fırınlara göre daha popüler olmuşlardır. Günümüzde metale olan talebin artması ile birlikte EAF'lerin eritme kapasitelerinde artma ihtiyacına gerek duyulmuştur. Bu nedenle EAF'lerin üretim kapasitelerini arttırmak için güç transformatörlerinin gücü büyümekte ve kullanılan enerjinin miktarı da artmaktadır [3]. EAF'lerin kapasitelerinin artması ile fırınlarda bazı yeni teknolojilerin

kullanılma ihtiyacı da ortaya çıkmıştır. Bu nedenle EAF tesislerinde ocak astarlarında soğutma sistemlerinin kullanılmasına [4], hızlı eritme için O₂ brülörlerin kullanılmasına [5], elektrotların otomatik kontrol sistemleri ile denetlenmesine [6, 7] ve diğer teknolojik süreçlerin kontrolünde bilgisayar sistemlerinin kullanılmasına gerek duyulmaktadır. Günümüzde dünyada üretilen çeliğin yaklaşık % 40'ı EAF'ler yardımı ile üretilmekte olup bu oranın 2020 yılında % 50 civarına ulaşması beklenmektedir [8, 9].

Elektrik ark fırınlarının temel çalışma prensibi elektrotlar yardımı ile termal enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek metallerin eritilmesi sağlamaktır. Özellikle elektrik ark fırınlarının çalışması sırasında açık devre ve kısa devre durumlarında meydana gelen kritik ark durumunda ve eritme işleminin başlangıcında akım ve gerilim dalga formu hızlı bir şekilde değişmektedir. Bu nedenle EAF'ler lineer olmayan akım ve gerilim karakteristiğine sahiptir ve elektriksel sistemlerde güç kalitesi problemlerine neden olurlar.

EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemleri birçok araştırmacı tarafından önemli bir inceleme konusu olmuştur. Issouribehere ve çalışma arkadaşları EAF yüklerinin sondaj, eritme ve rafine süreçlerindeki farklı çalışma koşullarını dikkate alarak EAF tesisleri için tek faz eşdeğer devresini tanımlamışlardır [10]. Bu çalışmaya ilave olarak Issouribehere vd. Arjantin' de EAF'ler için uygulanan yönetmelikler ile EAF'lerin neden olduğu güç kalitesinde ortaya çıkan sınır değerler arasındaki ilişkiyi incelemişlerdir [11]. Mayardomo vd. gerçekleştirmiş oldukları çalışmada elektrik ark fırını tesisinin güç kalitesi problemlerini IEC 61000-4-30 standardına göre belirlemişlerdir [12]. Mayardomo ve Hernandez bu çalışmalarına ilave olarak EAF'lerin neden olduğu araharmonikleri inceleyerek, araharmoniklerin neden olduğu kırpışma yayılımını tanımlamışlardır. Deacanu vd. ise 100 ton eritme kapasitesine sahip EAF sisteminin modernizasyonu için deneysel analizler ve modelleme çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir [13]. Donsion ise deneysel ölçümler ve analizler kullanılarak EAF'lerin neden olduğu harmonik, kırpışma ve gerilim dengesizliklerinde Statik Var Kompanzasyon (SVC) sistemlerinin etkisini incelemişlerdir [14]. Boulet vd. gerçekleştirmiş oldukları çalışmada Elektrik ark fırınlarında güç kalitesi ölçümlerinde ölçüm sistemlerinin doğruluk etkisini araştırmışlardır ve filtre gruplarının ölçüm sırasında kullanılmadığı durumda %2 hatalı ölçüm yapıldığını belirlemişlerdir [15]. Türkiye'de gerçekleştirilen çalışmalarda ise Güç Kalitesi Milli Projesi kapsamında ulusal şebekedeki güç kalitesi problemleri

uzaktan izleme sistemleri ile sürekli olarak takip edilmektedir ve EAF sistemlerinde kompanzasyon için SVC kompanzasyon sistemlerinin kullanılması durumunda 2. harmonik değerlerinde yükselmelere neden olduğunu belirlenmiştir [16, 17].

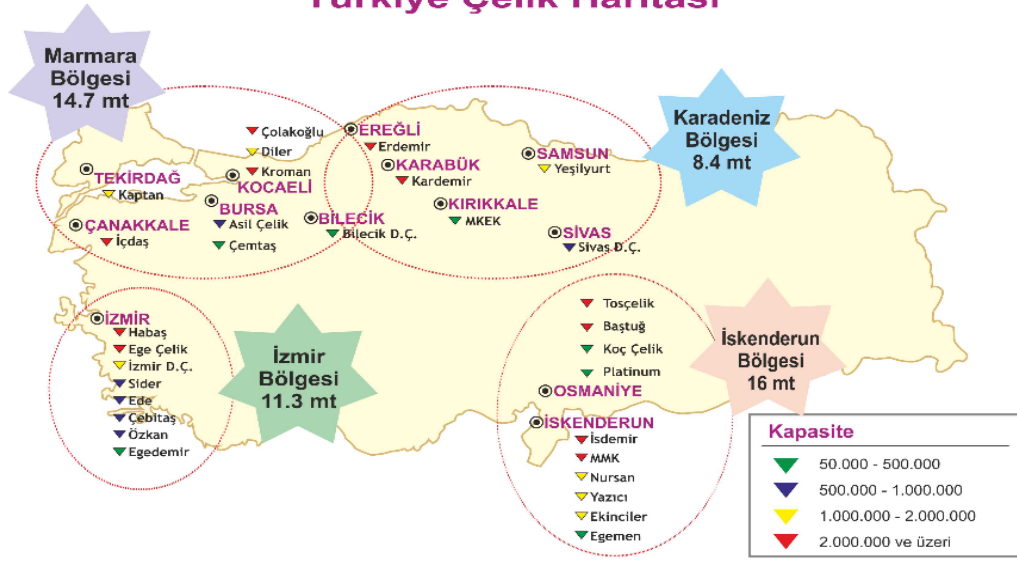
Enerjinin günden güne pahalandığı ve enerji verimliliğinin oldukça önemli olduğu günümüzde EAF'lerin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesinde elde edilecek çok küçük iyileştirmeler bile ülke ekonomisi ve enerjinin verimli kullanılması açısından büyük önem arz etmektedir.

1.1. Türkiye’de Demir Çelik Sektörüne Genel Bakış ve Ark Fırınlarının Önemi

Demir çelik sektörü dünya ekonomisinde önemli bir konuma sahiptir ve başta otomotiv ve inşaat sektörü olmak üzere birçok sektörün hammadde ihtiyacını sağlamaktadır. Son yıllarda Çin, İspanya ve Japonya’da demir çelik üretimi gerilerken; ABD, Hindistan, Rusya, Almanya, Ukrayna ve Fransa üretim ortalamasının altında kalmıştır. Türkiye ise artan çelik üretimi ile bu alanda ciddi bir gelişim göstererek önemli bir büyüme kaydetmiştir ve dünya çelik üretiminde en büyük on ülke arasına girmeyi başararak ülke ekonomisinde önemli bir lokomotif halini almıştır [18].

Türkiye’de demir çelik sektöründe 3 Entegre Tesis ve 27 Elektrik Ark Fırın tesisi faaliyet göstermekte olup yeni planlanacak olan tesislerinde EAF’ler içeren tesisler olması düşünülmektedir. 2016 yılı itibari ile Türkiye’de üretilen çeliğin yaklaşık %71,3’ü EAF tesisleri yardımı ile üretilmiştir ve bu tesislerin toplam elektrik ihtiyacı Türkiye’deki üretim talep gücünün yaklaşık onda biri kadardır [19]. Bu nedenle EAF’ler Türkiye ekonomisinde önemli bir konuma sahiptir. Ayrıca demir çelik sektörü Türkiye ekonomisinde iç ve dış açığının kapatılmasında önemli bir ekonomik rol oynamaktadır. Türkiye’deki demir çelik üretim tesislerinin bölgesel dağılımı Şekil 1.1’de sunulmuştur (Demir Çelik üreticileri derneği, (<http://www.dcud.org/> 14 Ekim 2011) [20].

Türkiye Çelik Haritası



Şekil 1.1. Türkiye’de demir çelik üretim haritası.

1.2. Tez Çalışmasının Güncelliği ve Amacı

Son yıllarda artan çelik üretimi ile Türkiye dünya çelik endüstrisinde önemli bir konuma ulaşmıştır. Türkiye’deki tüketilen enerji miktarının yaklaşık %10’u demir çelik üretiminde kullanılmaktadır. Demir çelik üretiminin %73’nün elektrik ark fırınları yardımı ile üretildiği düşünüldüğünde EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin incelenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin incelenmesi ve güç kalitesini iyileştirmek için analizler sonucunda elde edilecek çözümler ile elektrik enerjisinin daha verimli olarak kullanılması gereklidir. Yüksek güce sahip olan EAF’lerde gerçekleştirilecek küçük iyileştirmeler bile toplamda büyük kazançlar elde edilmesini sağlayacaktır.

Bu tez çalışmasında, 60 MVA güce sahip EAF transformatörü ile üretim yapan Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SİDEMİR) tesisinde EAF’nin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin deneysel olarak incelenmiştir. Bu gerçek zamanlı deneysel verilerden faydalanılarak EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi için benzetim modeli oluşturmak ve çözüm önerileri sunmak tez çalışmasının asıl amacını oluşturmaktadır.

Bu amaçla TEİAŞ 11. Bölge Müdürlüğü ve SİDEMİR işletmesinin izni ile elektrik ark fırını besleyen indirici trafo merkezinden ve EAF transformatöründen HIOKI 3197 ve Chauvin Arnoux 8332B model güç analizörleri kullanılarak güç kalitesi

parametreleri ölçülmüştür. Ölçümlere ilave olarak EAF'yi besleyen elektriksel sistemin ve EAF'nin Matlab/Simulink programı kullanılarak benzetim modeli oluşturulmuştur. Modelleme sonucunda elde edilen benzetim sonuçları ve gerçek zamanlı sonuçlar karşılaştırılarak gerçekleştirilen modelin uygunluğu test edilmiş ve EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin bilgisayar ortamında analiz edilebilmesi için benzetim modeli tanımlanmıştır. Ayrıca deneysel veriler ve olasılık teoremi kullanılarak harmoniklerin incelenmesi de gerçekleştirilmiştir. Tez çalışmasında amaca ulaşmak için aşağıda belirtilen çalışmaların yapılması amaçlanmıştır.

- Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SİDEMİR) tesisinin güç kalitesi problemlerinin HIOKI 3197 ve Chauvin Arnoux (CA) 8332B güç kalitesi analizörleri yardımı ile belirlenmesi.
- 60 MVA EAF tesisini besleyen elektriksel sistemin bir faz eşdeğer devresinin modellenmesi ve harmonik filtrelerin EMTP yazılımı yardımı ile performanslarının incelenmesi.
- Deneysel sonuçlar kullanılarak harmonik ve gerilim dalgalanmalarının olasılık teorisi ile analizi.
- Elektrik ark fırın yükünün bir faz ve üç faz devre modelinden faydalanılarak EAF yükünün statik ve dinamik V-I karakteristiklerinin modellenmesi,
- EAF yükünü besleyen tesisin benzetim modelinin MATLAB Simulink ortamında modellenmesi ve benzetim sonuçlarını elde edilen deneysel sonuçlarla karşılaştırarak tasarlanan modelin test edilmesi.
- EAF yükünün kompanzasyonu için Statik VAR Kompanzasyonun tasarımı ve harmonik etkilerin azaltılabilmesi için harmonik filtre tasarımı.
- EAF yükünün neden olduğu güç kalitesi problemlerinin iyileştirilebilmesi için çözüm önerileri geliştirilmesi.
- Sistemin korunması sağlamak için ilave koruma yöntemlerinin geliştirilmesi.

Tez çalışmasının içeriğini oluşturmaktadır.

1.3. Tez çalışmasının Yeniliği ve Bilime Katkısı

Türkiye’de demir çelik üretiminin de EAF tesisleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Mevcut tesislerin yanı sıra yeni planlanacak olan tesislerinde elektrik ark fırınları ile üretim yapmasının amaçlanmaktadır. EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemleri için gerçekleştirilecek uygulamalar hem zaman alıcı hem de maliyetli olmaktadır. Bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel ölçümler ile elektrik ark fırınlarının Türkiye elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde neden olabileceği etkiler belirlenmiştir. EAF’yi besleyen sistemin ve elektriksel arkın dinamik davranışı deneysel veriler ile modellenerek EAF yüklerinin çalışma karakteristiğini tanımlayan matematiksel modeller EMTP ve Matlab gibi gelişmiş benzetim programları ile oluşturulmuştur. Böylece EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi için gerçekleştirilmesi planlanan uygulamaların maliyet gerektirmeksizin ve zaman harcamadan bilgisayar ortamında uygulama imkânı oluşturulması sağlanmıştır. Gerçekleştirilecek bu çalışmalarda elde edilecek sonuçlar mevcut EAF tesisleri ve yeni planlanan tesislerde güç kalitesi problemlerinin iyileştirilmesi için bir referans olacağı gibi hazırlanacak bu doküman ile EAF yüklerinin incelenmesi alanında ihtiyaç duyulan kaynak eksikliğini giderilmesi ve güç kalitesinin iyileştirilmesi için alternatif çözüm önerileri geliştirilmesi tez çalışmasının katkısını içermektedir.

2. KURAMSAL TEMELLER

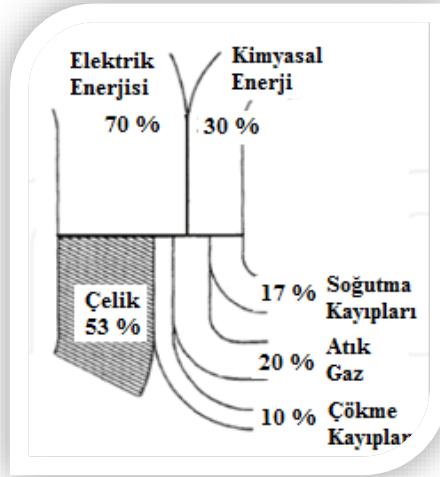
EAF'lerin temel çalışma prensibi elektrotlar yardımı ile elektrik enerjisini termal enerjiye dönüştürerek metallerin eritilmesini sağlamaktır [21]. Bu işlem sırasında elektrotlar ile hurda arasında oluşan elektriksel arkın oluşturduğu ısı 1500-3000 C⁰, ye kadar ulaşmaktadır. Ergitme işlemi sırasında eritilen metal ile elektrotlar arasındaki mesafe sürekli olarak değiştiği için elektrik arkı hızlı değişimlere sahip akım ve gerilim ile karakterize edilir [2, 3]. Bu nedenle EAF'ler lineer olmayan çalışma karakteristiği sahiptir.

EAF'lerin lineer olmayan karakteristik davranışı elektrik sistemine bağlı olan diğer kullanıcıları da ciddi olarak etkileyen harmonik, kırpışma ve gerilim dengesizlikleri gibi güç kalitesi problemlerine neden olmaktadır [4-7]. EAF'lerde güç kalitesi parametrelerinin sınır değerlerinin belirlenmesinde kullanılan standartlar dikkate alınarak özellikle toplam harmonik bozulma (THD), kısa süreli kırpışma şiddeti (P_{st}) ve uzun süreli kırpışma şiddeti (P_{lt}) değerleri gibi güç kalitesi problemleri detaylı bir şekilde incelenir.

2.1. Elektrik Ark Fırımları

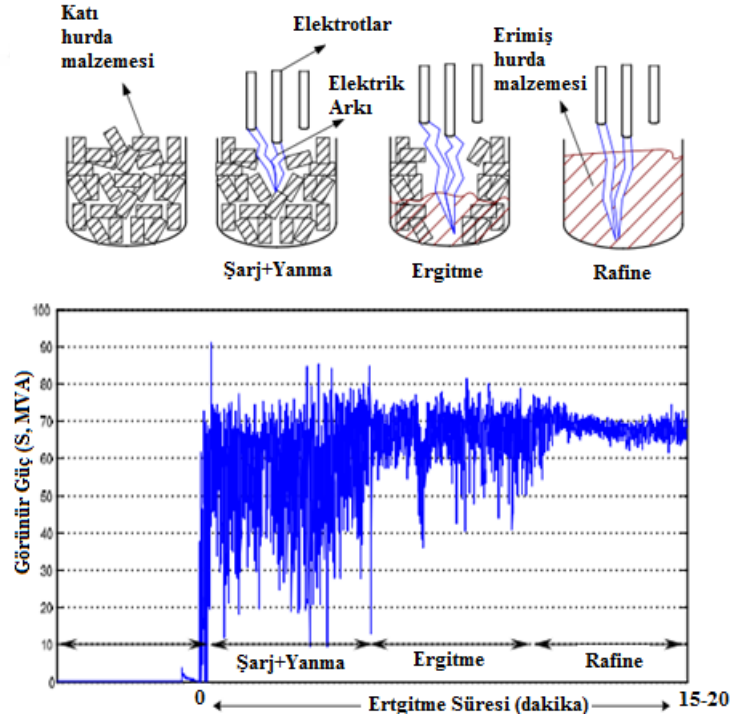
EAF'ler alanındaki çalışmalar 19. yy. da başlamıştır. İlk olarak Humphry Davy elektriksel arkın tanımlanması için deneysel çalışmalar gerçekleştirmiştir. EAF'ler için ilk patent çalışmaları ise 1876-1879 yıllarında William Siemens tarafından gerçekleştirilmiştir. Fransız Paul Heroult ise ilk ticari amaçlı EAF'yi kullanılmıştır [8].

Gelişen teknolojiye paralel olarak EAF'lerde elektrot ve elektrik enerji tüketimlerinin azalması ile üretim maliyetlerinde ciddi iyileştirmeler olmuştur. Böylece daha az maliyet ile daha fazla üretim yapabilen EAF'ler demir çelik sektöründe önemli bir konuma gelmiştir. Bu nedenle yeni kurulması planlanan çelik üretim tesislerinin EAF'ler ile üretim yapması planlanmaktadır. Teorik olarak en uygun koşullarda bir ton metali eritmek için gerekli olan enerji 300 kWh'dir. Pratikte ise bir ton çelik üretimi için yaklaşık 440 kWh'lik elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır. EAF'lerde enerjinin kullanımı ve enerji kayıpları Şekil 2.1'de sunulmuştur [9].



Şekil 2.1. EAF'lerde enerji kullanımı ve enerji kayıpları.

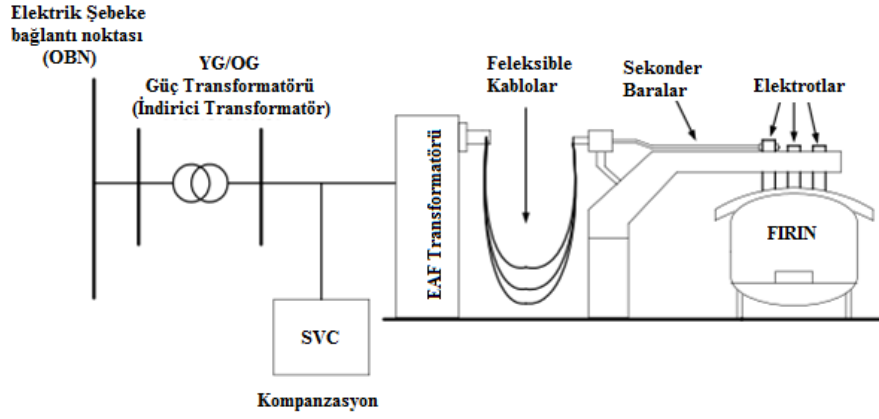
EAF'ler şarj (charge), yanma (burning), ergitme (melting) ve arıtma (refining) olmak üzere dört farklı çalışma sürecine sahiptir. Bu çalışma süreçlerine ait ergitme işlemleri sırasındaki elektrot pozisyonları ve bir ergitme işlemi süresinde deneysel olarak ölçülen 120 tonluk elektrik ark fırınının görünür güç değişimi Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2. EAF'nin farklı çalışma süreçlerindeki elektrot pozisyonu ve bir ergitme işlemi süresindeki görünür gücün değişimi.

2.1.1.EAF'nin Temel Elektriksel Devre Elemanları

EAF'yi besleyen elektriksel sistemin temel elemanları Şekil 2.3'deki gibidir.



Şekil 2.3. EAF'nin temel elektriksel sistem elemanları.

EAF'ler kirli bara olarak adlandırılan ayrı bir hatla elektrik sistemine bağlanırlar. EAF'lerin şebekeye bağlandıkları bu nokta ortak bağlantı noktası (OBN- Common Coupling Point) olarak adlandırılır. EAF'lerin şebekeye bağlanacağı bağlantı noktasının planlanmasında ortak bağlantı noktasındaki kısa devre gücü (S_k) ve bu bölgede oluşabilecek diğer yüklerin talep tahmin analizleri dikkate alınmalıdır.

İndirici Transformatör EAF'lerin neden olduğu darbeli çalışma koşullarına uygun olarak tasarlanmalıdır. Ayrıca yük altında iken EAF transformatörünün kademe ayarı değiştirilebildiğinden, indirici transformatörün bu koşullara uygun olarak çalışması istenir. EAF'yi besleyen indirici transformatörler ark fırınlarının neden olduğu harmonik etkilerin şebeke tarafına iletilmesini azaltmak için Y/Y veya Y/ Δ olarak tasarlanırlar [29, 30]. İndirici transformatör birden fazla EAF'yi besleyebilir fakat bu durumda toplam beslenecek EAF gücünün transformatör gücünün % 80'inden büyük olmaması gereklidir [31].

EAF transformatörlerinin primer gerilimleri genellikle orta gerilim (OG) seviyesi olan 35,5 kV seviyelerinde seçilmektedir. Fakat çıkış gerilimleri alçak gerilim (AG) seviyesindedir ve genellikle orta büyüklükteki bir fırınının sekonder gerilimi 415-719 volt aralığında kademeli olarak değiştirilebilecek şekilde ayarlanır. EAF'nin sekonder çıkışında akım hızlı bir değişim karakteristiğine sahiptir ve büyük güçlü fırınlarda bu akım değeri 120 kA'e kadar ulaşabilmektedir. Bu nedenle EAF'ler yüksek akımların neden olduğu yüksek güçlere ve aşırı yüklerle dayanabilir özellikte olmalıdır.

Fleksible kablolar, sekonder baralar ve elektrot tutucular EAF'nin sekonder çıkışına bağlı olduğu için sekonder devre bileşenleri olarak adlandırılırlar. Fleksible kablolar yük akımlarını taşıdıkları için akım taşıma kapasitelerini arttırmak amacıyla kauçuktan yapılmış bir hortum içerisinde su soğutma yapıları ile birlikte kullanılır.

Elektrot tutucular belli bir kuvvet ile elektrotları tutmayı sağlarlar. EAF’lerde grafit elektrotlar yaygın olarak kullanılmaktadır ve ergitme işlemi bu elektrotlar ile hurda arasındaki elektrik arkı ile sağlanır. Genel olarak elektrotların yerleşimi için eşdüzlemsel ve üçgensel olmak üzere iki farklı yerleşim yapısı kullanılmaktadır. Üçgensel yerleşim fırın içerisinde ergimiş metalin dönerek ergitmesini hızlandırdığı için daha fazla tercih edilmektedir. Her iki durum içinde elektrotların self ve karşılıklı endüktans değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$L_{self} = 2.S. \left(\ln. \frac{2.S}{d_s} . l \right) . 10^{-9} \text{ H} \quad (2.1)$$

$$L_{Karşılıklı} = 2.S. \left(\ln. \frac{2.S}{d_s} . l + \frac{d}{S} \right) . 10^{-9} \text{ H} \quad (2.2)$$

Bu denklemlerde;

S : İletkenin uzunluğu

d_s : Geometrik ortalama yarıçap (santimetre)

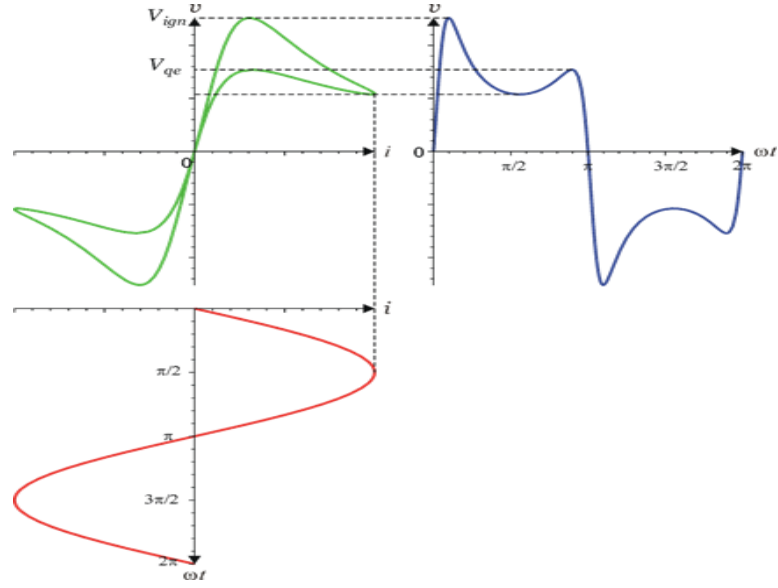
d : İletkenler arasındaki geometrik ortalama yarıçaptır (santimetre)

2.1.2. Elektrik Arkı

EAF’lerde enerji dönüşümü elektrotlar ile hurda arasında oluşan elektrik arkının termal ısı ile sağlanır [32]. EAF’lerin lineer olmayan özelliğe sahip olmasına neden olan yapı elektriksel arkın yüksek akım ve düşük gerilim ile karakterize edilen lineer olmayan davranışdır. Elektrik arkının akım ve gerilim karakteristiği hızlı değişime sahip ve stokastik yapıda olduğu için matematiksel modelinin oluşturulması oldukça zordur. Bu nedenle elektriksel arkın dinamik gerilim akım (V-I) karakteristiğini tanımlamada gerçek zamanlı deneysel ölçümlerden faydalanılır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar elektriksel arkın kararlılığını koruyabilmek için yaklaşık 40 V eşik gerilimine ve 4 kA’lık ark akımına ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir [33, 34]. Ark gerilimi, ark uzunluğuna bağlı olarak aşağıdaki ifade ile tanımlanabilir:

$$U_{th} = A + B.L \quad (2.3)$$

Bu ifadede, A anot ile katot arasındaki eşik gerilim seviyesidir ve yaklaşık 40 V olarak kabul edilir. B birim uzunluktaki gerilim çökmesini ifade eder ve ark mesafesinin her bir santimetresi için 6-10 V aralığında olduğu kabul edilir. L ise ark uzunluğunu ifade etmektedir. Elektrik arkının gerilim ve akım karakteristik eğrisinin Şekil 2.4’de sunulmuştur.



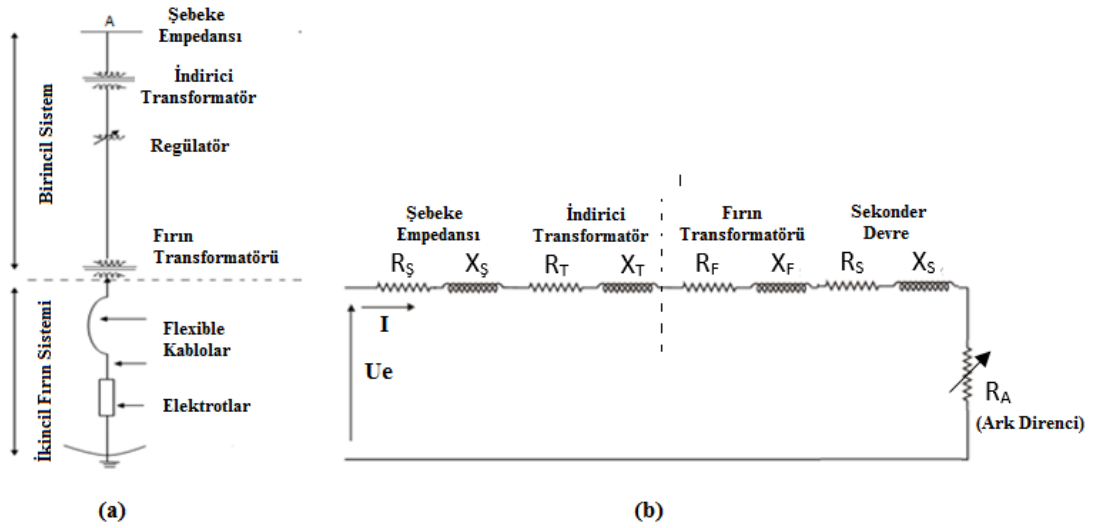
Şekil 2. 4. Elektrik arkının gerilim akım (V-I) karakteristik eğrisi.

EAF'lerde güç kalitesinin incelenebilmesi için elektrik arkının davranışının iyi anlaşılması gereklidir. Günümüzde gelişmiş benzetim programları EAF'lerin neden olduğu güç kalitesi problemlerin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Fakat bu benzetim çalışmalarından gerçekçi sonuçların elde edilebilmesi için elektrik arkının davranışının gerçeğe yakın olarak modellenmesi gereklidir. Elektrik arkının modellenmesi birçok araştırmacı tarafından önemli bir inceleme konusu olmuştur [35-51].

Elektriksel arkın modellenmesi için bazı araştırmacılar zaman domeni modellerini kullanırken [39,40], bazıları da lineer olmayan diferansiyel denklemlerden faydalanmıştır [41, 43]. Bu çalışmalara ilave olarak EAF yükünün davranışının tanımlanabilmesi için elektrik arkının V-I karakteristiği [44-47], lineerleştirme yöntemleri ve frekans cevabı analizleri gibi birçok yöntem araştırmacılar tarafından ortaya konulmuştur [47-51].

2.1.2. EAF'lerde Güç Hesaplamaları

EAF'yi besleyen elektrik sisteminin temel tek hat prensip şeması ve bir faz elektriksel eşdeğeri Şekil 2.5'de gösterilmiştir [27, 52].



Şekil 2.5. a) Elektrik ark fırınının prensip tek hat şeması, b) Bir elektrik ark fırınının temel bir faz elektrik eşdeğer devresi.

Şekil 2.5’de sunulan EAF’nin bir faz eşdeğer devresinde devre empedansı genel olarak Z empedans formunda gösterilir bu empedans değeri R direnci ve jX reaktans bileşenini içermektedir. EAF’yi besleyen sistemde hat ve transformatör empedansları sırası ile aşağıda sunulan matematiksel ifadeler ile yaklaşık olarak hesaplanabilir:

$$Z_{hat} = \frac{(E_h)^2}{MVA} \quad (2.4)$$

$$Z_{transformatör} = \frac{\%Z \cdot (E_h)^2 \cdot 10}{MVA \cdot 10^3} \quad (2.5)$$

Bu denklemlerde, E_h - fazlar arasındaki gerilim; MVA şebeke kısa devre gücü ve $\%Z$ yüzde kısa devre gücü oranıdır.

Z eşdeğer empedans değeri $Z=R+jX$ biçiminde ifade edilir. EAF gibi güç transformatörlerine sahip yüksek güçlü sistemlerde X/R oranı iletim hatları için 10 ve transformatörler için ise 8 olduğu kabul edilir.

Bu durumda şebeke empedansı için denklem (2.6) ve transformatör empedansı için ise denklem (2.7)’deki ifadeler R ve X değerlerinin hesaplanmasında kullanılır:

- Hat empedansı için;

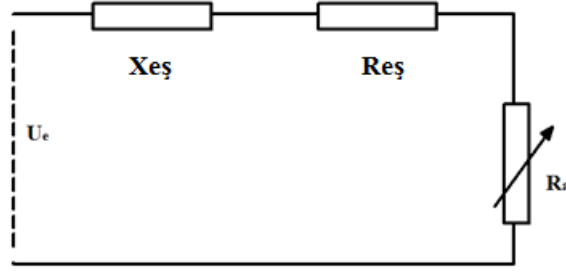
$$\frac{X}{R} = 10 ; \quad R = Z \cdot \cos(84,28) , X = Z \cdot \sin(84,28) \quad (2.6)$$

- Transformatör empedansı için;

$$\frac{X}{R} = 8 ; \quad R = Z \cdot \cos(82,87) , X = Z \cdot \sin(82,87) \quad (2.7)$$

- $X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$ (2.8)

Şekil 2.5’deki devre Şekil 2.6’daki gibi gösterilebilir [53-55].



Şekil 2.6. EAF'yi besleyen iletim hattının basitleştirilmiş bir faz eşdeğer devresi.

Burada; $X_{eş}$ ve $R_{eş}$ sırası ile toplam reaktans ve toplam direnç değerini göstermektedir ve bu devredeki değişkenler;

$X_{eş}$: Sistemin toplam reaktans değeri ($X_S+X_T+X_F+X_S$)

$R_{eş}$: Sistemin toplam direnç değeri ($R_S+R_T+R_F+R_S$)

R_a : Ark direnci

Bu eşdeğer devrede indirici transformatör ile fırın transformatörü arasındaki iletim hattının direnci çok küçük olduğundan güç hesaplamalarında ihmal edilebilir. Bu durumda devreden geçen akım değeri ark akımı değerine eşit olacağından, I_a ark akımı;

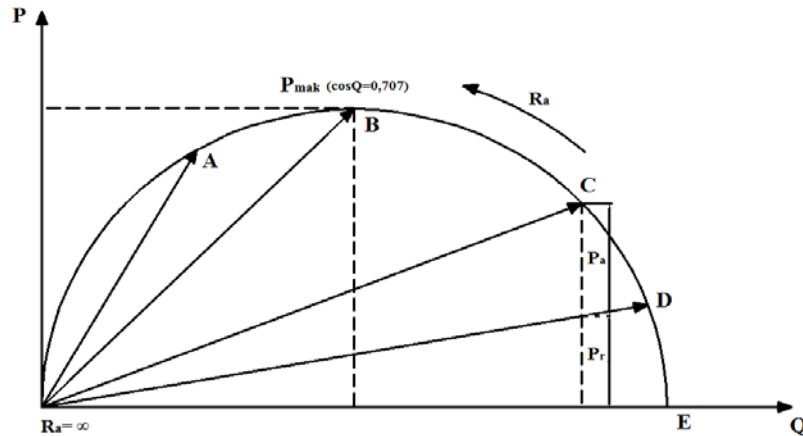
$$I_a = \frac{U_f}{\sqrt{(R_{eş} + R_a)^2 + X_{eş}^2}} \quad (2.9)$$

ifadesi ile tanımlanabilir. Ortak bağlantı noktasındaki güç ifadesi ise;

$$P = 3 \cdot I_a^2 \cdot (R_{eş} + R_a) = \frac{U_f^2 \cdot (R_{eş} + R_a)}{(R_{eş} + R_a)^2 + X_{eş}^2} \quad (2.10)$$

bulunur, üç faza ait toplam ark gücü (P_a) ise aşağıdaki matematiksel ifadesi ise aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$P_a = 3 \cdot I_a^2 \cdot R_a \quad (2.11)$$



Şekil 2.7. EAF'de ark direncine (R_a) bağlı olarak güç değişimi.

Ark direncine bağılı olarak EAF'deki güç değişim eğrisi Şekil 2.7'de gösterilmiştir. Bu grafikten görüldüğü gibi, $R_a=0$ olması durumu fırının kısa devrede olduğunu göstermektedir. $R_a=\infty$ olması ise elektrik arkının söndüğü durumu ifade eder. Sistemin güç faktörü ($\cos\theta$) ifadesi aşağıda sunulan ifadesi ile hesaplanabilir.

$$\cos\theta = \frac{R_{eş} + R_a}{\sqrt{(R_{eş} + R_a)^2 + X_{eş}^2}} \quad (2.12)$$

Ark direncinin değişimine bağılı olarak EAF'nin maksimum güç ifadesini tanımlamak için (2.12) denkleminin R_a 'ya göre türevi alınarak sıfıra eşitlendiğinde;

$$\frac{U_e^2 \cdot (X_{eş}^2 - (R_{eş} + R_a)^2)}{(R_{eş} + R_a)^2 + X_{eş}^2} = 0 \quad (2.13)$$

bulunur, Bu durumda,

$$X_{eş}^2 - (R_{eş} + R_a)^2 = 0 \quad (2.14)$$

şartı sağlamalıdır.

EAF yükünün bir faz eşdeğer devre parametrelerinden hesaplanan değerler ve ark direncine bağılı olarak, EAF girişinin aktif, reaktif ve görünür güç ifadelerinin genel denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$P = \frac{3 \cdot I_{ark}^2 \cdot (R_f + R_s + R_a)}{10^6} \quad (2.15)$$

$$Q = \frac{3 \cdot I_{ark}^2 \cdot (X_f + X_s)}{10^6} \quad (2.16)$$

$$S = \frac{3 \cdot I_{ark}^2 \cdot (R_f + R_s + R_a)^2 + J \cdot (X_f + X_s)^2}{10^6} \quad (2.17)$$

2.1.3. EAF'de Operasyon Direncine Bağılı Olarak Güç Hesaplanmaları

EAF'nin bir faz eşdeğer devre parametreleri kullanılarak operasyonel direnci ve operasyonel dirence bağılı olarak çalışma yük karakteristik eğrileri hesaplanabilir. Bu işlem için sırası ile aşağıda belirtilen adımlar tek tek hesaplanmalıdır.

1. Çalışma direnci (R_{op})

$$R_{op} = \sqrt{\frac{(PF)^2 \cdot (X_T + X_S + X_s)^2}{1 - PF^2}} \quad (2.18)$$

2. Çalışma empedansı

$$Z_{OP} = \sqrt{R_{op}^2 + X_{top}^2} \text{ (m}\Omega\text{)} \quad (2.19)$$

3. Sekonder çalışma akımı

$$I_{op} = \frac{E_h}{\sqrt{3} \cdot Z_{op}} \quad (kA) \quad (2.20)$$

4. Primer giriş gücü

$$P(MW) = \frac{3 \cdot [R_{op} - (R_s - R_s)] \cdot I_{op}^2}{10^3} \quad (2.21)$$

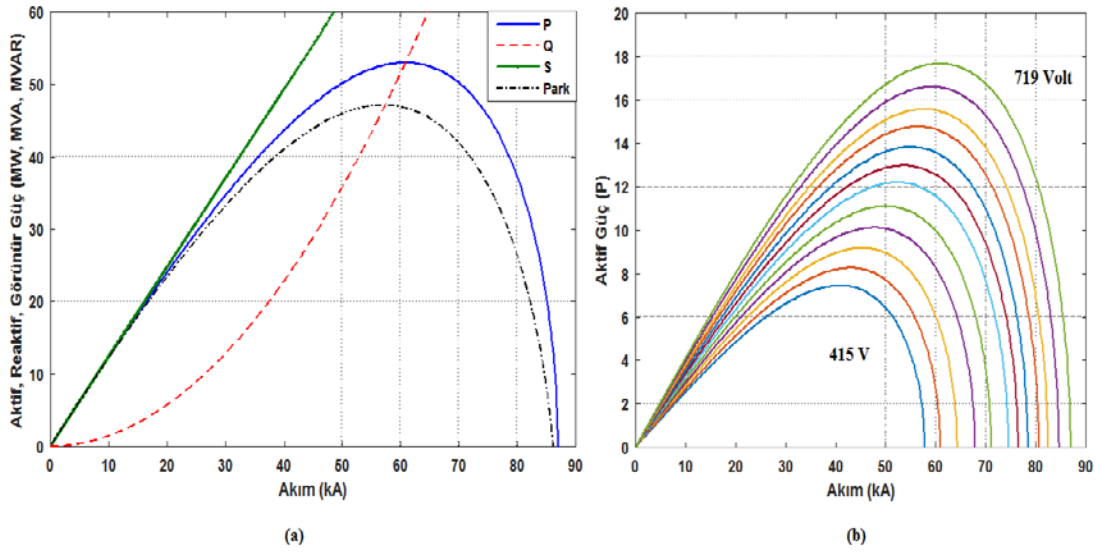
5. Primer reaktif güç

$$Q = \frac{3 \cdot (X_f + X_{sek}) \cdot I_{op}^2}{10^3} \quad (2.22)$$

6. Primer görünür güç

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.23)$$

Bu ifadeler kullanılarak elektrik ark fırınının farklı gerilim kademeleri ile çalıştırılması durumunda çalışma karakteristikleri hesaplanabilir. SİDEMİR tesisinde 60 MVA EAF sistemini besleyen ark fırın transformatörünün 12. Kademesi için hesaplanan güç eğrileri Şekil 2.8 (a)'da ve farklı gerilim kademeleri için 12 kademe bir faza ait aktif güç değişim eğrisi ise Şekil 2.8 (b)'de gösterilmiştir [47].



Şekil 2.8. 60 MVA EAF'nin, a) 719 volt kademesi için güç eğrileri, b) 12 kademe için aktif güç eğrisinin değişimi.

2.1.3. Güç Kalitesinin Tanımı

EAF'ler elektriksel sistemlerde güç kalitesi problemlerine neden olan en büyük güçlü lineer olmayan yüklerdir. Güç kalitesi kavramında temel amaç sabit frekans ve genlik değerinde sinüzoidal uç gerilimine sahip elektrik iletimini sağlamaktır. Elektrik

sistemlerinde güç akım ve gerilim ile ilişkili olduğundan güç kalitesi kavramı yerine gerilim kalitesi ifadesi de kullanılmaktadır [56].

Güç Kalitesini değerlendirmede ülkeler kendi şebeke yapılarına uygun olarak farklı kriterler belirlemektedir. Bu nedenle güç kalitesinin değerlendirilmesinde kullanılacak çözüm önerileri de farklılık göstermektedir.

2.1.3.1. Türkiye’de Güç Kalitesi Standartları

Güç kalitesi problemlerinin incelenmesi ve sınıflandırılmasında (IEC, 1999), (IEEE, 1996) ve (IEEE/SCC22-IEEE Standarts Coordinating Committee 22) dağıtım seviyeleri ile ilgili bazı standartlar tanımlanmaktadır. Türkiye’de güç sistemlerindeki bozulmalar ve güç kalitesi problemlerinin kaynakları IEC standartlarına göre belirlenmektedir. Bu standartlar [57, 58];

- IEC-61000-4-30 Test ve Ölçüm Teknikleri-Güç kalitesi ölçüm yöntemleri.
- IEC-61000-4-7 Deneyler ve ölçme teknikleridir.

Türkiye’de güç kalitesinin değerlendirilebilmesi için TS EN-61000-4-30 standardına uyumlu olarak güç kalitesi analizörleri yardımı ile aşağıda belirtilen parametrelerin ölçülmesi gereklidir [59].

- Üç faz akım ve gerilimin RMS değeri
- Frekans değişimi
- Toplam akım ve gerilim harmonik bozunumu
- Gerilim dengesizlikleri (gerilim çökme ve yükselmeleri)
- Hızlı ve yavaş gerilim değişimleri (Kısa süreli kırpışma şiddeti (P_{st}), uzun süreli kırpışma şiddeti (P_{lt}))
- Güç faktörü

Ölçülen bu büyüklüklerin IEC standartlarına göre güç sistemlerinde elektromanyetik bozunum karakteristikleri ve katagorileri Tablo 2.1’de sunulmuştur.

2.1.3.2. Güç Kalitesinin Temel Kabulleri

Güç kalitesinin temel kabullerinde akım ve gerilim sinüzoidal olmayan yapıya sahiptir ve akım ve gerilim ifadeleri aşağıda sunulan matematiksel ifadeler ile tanımlanır.

$$u(t) = \sum_{k=1}^N U_k \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (2.24)$$

$$i(t) = \sum_{k=1}^N I_k \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(k\omega t + \gamma_k - \theta_k) \quad (2.25)$$

Bu denklemlerde U_k ve I_k , k. harmonik seviyesindeki gerilim ve akımın RMS değeridir, γ_k gerilimin her bir k. harmonik seviyesindeki faz açısı, θ_k ise k. Harmonik seviyesinde akım ve gerilimin faz açısı farkıdır. Bu kabuller dikkate alındığında güç sistemlerinde;

- Aktif güç:

$$P = \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k \cdot \cos\theta_k \quad (2.26)$$

- Reaktif Güç

$$Q = \sum_{k=1}^N U_k \cdot I_k \cdot \sin\theta_k \quad (2.27)$$

- Görünür Güç

$$S = \sqrt{\sum_{k=1}^N U_k^2} \cdot \sqrt{\sum_{k=1}^N I_k^2} \quad (2.28)$$

- Güç Faktörü

$$K_p = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}} \quad (2.29)$$

- Reaktif faktör

$$\rho = \frac{Q}{P} \quad (2.30)$$

- Bozulma Faktörü

$$\sigma = \frac{D}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (2.31)$$

Bu denklemlerde $D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ ile ifade edilir ve Budeanu güç bozulması olarak adlandırılır.

Akım ve gerilimdeki toplam harmonik bozulma temel frekanstaki akım ve gerilimin RMS değerleri ile ilişkili olarak tanımlanır;

- Toplam gerilim harmonik bozulma (THDV) değeri

$$THD_U = \sqrt{\sum_{N=2}^N \left(\frac{U_n}{U_{(1)}}\right)^2} \quad (2.32)$$

- Toplam akım harmonik bozulma (THDI) değeri

$$THD_I = \sqrt{\sum_{N=2}^N \left(\frac{I_n}{I_{(1)}}\right)^2} \quad (2.33)$$

Bu denklemlerde $U_{(1)}$ ve $I_{(1)}$ temel frekanstaki akım ve gerilimin RMS değerleridir. Toplam harmonik bozulma (THD) aşağıda verilen denklem ile ifade edilir.

$$\delta_u = \frac{U_d}{U_1} \cdot 100(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} U_h^2}}{U_1} \quad (2.34)$$

Ölçülen bu parametrelerin ulusal standartlara uyumlu olup olmadığı incelenerek, standartlara uygun olmayan parametreler standarda uygun hale getirilmelidir.

Tablo 2. 1. Güç Sistemlerinin Elektromanyetik Bozunum Karakteristikleri ve Katagorileri (pu-Per Unit birim sistemi).

Katagoriler	Özgün Spektral İçeriği	Özgün Süre	Özgün Gerilim Büyüklüğü
1. Transientler			
1.1. Darbesel			
1.1.1. Nonasaniye	5- ns Yükselme	<50 ns	
1.1.2. Mikrosaniye	1-µs Yükselme	50 ns-1 ms	
1.1.3. Milisaniye	0,1-ms yükselme	>1 ms	
1.2. Osilasyonlu			
1.2.1. Düşük Frekans	<5 kHz	0,3-50 ms	0-4 pu
1.2.2. Orta Frekans	5-500 kHz	20 µs	0-8 pu
1.2.3. Yüksek Frekans	0.5-5 Mhz	5 µs	0-4 pu
2. Kısa Süreli Değişimler			
2.1. Ani			
2.1.1. Kesinti		0,5-30 saykıl	<0,1 pu
2.1.2. Gerilim Çömesi		0,5-30 Saykıl	0.1-0,9 pu
2.1.3. Gerilim Yükselmesi		0,5-30 Saykıl	1,1-1,8 pu
2.2. Anlık			
2.2.1. Kesinti		30 Saykıl-3 s	<, pu
2.2.2. Gerilim Çömesi		30 Saykıl-3 s	0,1-0,9 pu
2.2.3. Gerilim Yükselmesi		30 Saykıl-3 s	1,1-1,2 pu
2.3. Geçici			
2.3.1. Kesinti		3 s- 1 dakika	<0,1 pu
2.3.2. Gerilim Çökmesi		3 s- 1 Dakika	0,1-0,9 pu
2.3.3. Gerilim Yükselmesi		3 s- 1 Dakika	1,1-1,2 pu
3. Uzun süreli Değişimler			
3.1. Sürekli Kesintiler		>1 dakika	0 pu
3.2. Düşük gerilimlerde		>1 dakika	0,8-0,9 pu
3.3. Aşırıgerilimler		>1 dakika	1.1-1.2 pu

4. Gerilim Dengesizlikleri		Kararlı Durum	0,5-2
5. Dalgaformu Bozulmaları			
5.1. DC Ofset		Kararlı Durum	%0-0.1
5.2. Harmonikler	0-100. Harmonik	Kararlı Durum	%0-20
5.3. Araharmikler	0-6 kHz	Kararlı Durum	%0-2
5.4. Çentik		Kararlı Durum	
5.5. Gürültü	Genişbant	Kararlı Durum	%0-0,1
6. Gerilim Dalgalanmaları	<25 Hz	Aralıklı	%0,1-7 -0,2-2 Pst

2.2. EAF'lerin Elektrik Şebekesine Etkileri

2.2.1. Harmonikler

Elektrik güç sistemlerinde lineer olmayan yükler, iletim ve dağıtım sistemlerinde ciddi harmonik kirliliğe neden olurlar ve tüketicilere sunulan elektrik kalitesini bozarlar [59-62]. Elektrik ark fırınları ise elektrik güç sistemlerinde harmonik bozulmalara yol açan en büyük güçlü lineer olmayan yüklerdir.

EAF yükleri başlangıçta düşük kapasitelere sahip olması nedeni ile harmonik etkiler ihmal edilmiştir. Günümüzde enerjinin giderek pahalalanması ve EAF yüklerinin kapasitelerinin artması nedeniyle EAF yüklerinin neden olduğu harmonik etkiler ihmal edilemez boyutlara ulaşmıştır. Elektrik ark fırınlarının neden olduğu harmonik etkiler birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir [63-74].

Bu çalışmalarda, Acha vd. Fortran paket yazılımı kullanılarak güç sistemlerinde harmonik uygulamaları için gelişmiş programların kullanılabileceğini ve polinomal, eğri uydurma yöntemi ile elde edilen elektriksel ark modelinin elektriksel deşarjlarını tanımlamada kullanılabileceğini göstermişlerdir [63]. Mendis ve çalışma arkadaşları ise ark fırınlarının neden olduğu harmonik etkilerin incelenmesi için bilgisayar benzetimi tanımlamışlardır ve paralel dalgalanma kapasitörü yardımıyla ark fırınlarının neden olduğu harmonik ve geçici durumların incelenebileceğini belirlemişlerdir [64]. Andrews ve diğerleri saha ölçümlerine bağlı olarak elde edilen sonuçları kullanarak filtreler yardımı ile harmoniklerin azaltılabileceğini ve güç kalitesinin iyileştirilebileceğini tanımlamışlardır [65]. Ting vd. ark fırınının neden olduğu harmonikleri tanımlamada Newton-Raphson algoritmasının diferansiyel denklemlerin çözümü için kullanılabileceğini ve tek faz eşdeğer devre modeli için

elektrik arkının akım gerilim karakteristiğinin harmonik analizinde kullanılabileceğini ortaya koymuştur [66]. Mayodormo ise elektrik ark fırın yüklerinin Newton metodu kullanılarak analiz edilebileceği yeni bir frekans domeni analiz metodu geliştirmişlerdir ve bu çalışmaya ilave olarak harmonik güç akışı kavramını tanımlamışlar [67, 68]. [69-72]'de harmoniklerin etkilerinin incelenmesi için analizler sunularak elektrik ark fırın yükleri için matematiksel modeller oluşturulmuştur.

2.2.1.1. Harmoniklerin Etkileri

Elektrik sistemlerinde akım ve gerilim dalga şeklinin bozulması birçok probleme yol açmaktadır. Bu etkilerden harmonikler, şebekede rezonans olayı ve rezonans nedeni ile ortaya çıkan aşırı akım ve aşırı gerilimlerin ortaya çıkmasına, senkron ve asenkron motorlarda aşırı ısınmaya, enerji sistemlerinde kayıpların artmasına, elektriksel ekipmanların ekonomik ömürlerinin azalması gibi birçok olumsuzluğa neden olmaktadır. Bu etkilerin azaltılması için sistemlerde harmonik filtreler kullanılmaktadır.

2.2.1.2. Harmonik Filtreler

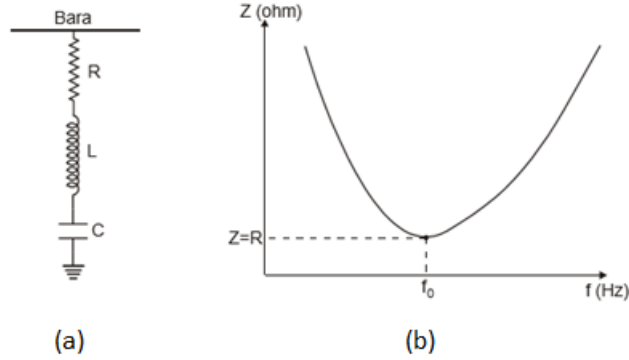
Elektrik ark fırınları sahip olduğu yüksek lineer olmayan akım nedeniyle harmoniklerin oluşumuna neden olurlar. Bu harmoniklerin azaltılması için harmonikleri süzmeye yarayan harmonik Filtrelere ihtiyaç duyulmaktadır. Harmonik filtrelerinin amacı akım veya gerilimdeki harmonik mertebelerinin etkilerini azaltmaktır. Bu çalışmaya inceleme konusu olan SİDEMİR tesisinde tek ayarlı bant geçiren filtre ve yüksek geçiren sönümlü filtreler kullanıldığı için bu filtre tipleri açıklanmıştır.

2.2.1.2.1. Tek Ayarlı Bant Geçiren Filtreler

Tek ayarlı paralel pasif filtreler R, L ve C devre elemanlarından oluşturulur. Bu filtreler tek bir frekansta rezonans durumuna sahip olacağından tek bir frekanstaki harmonik etkilerin filtrelenmesinde kullanılır. R, L ve C yüklerinin ayarlanması ile farklı frekans değerlerinde tasarlanabilir. Temel tek ayarlı bant geçiren pasif filtre devre şeması Şekil 2.9'daki gibidir. Tek ayarlı filtre için empedans ifadesi aşağıda sunulan matematiksel ifade tanımlanır:

$$Z = R + j \cdot (X_L - X_C) = R + j \left(2\pi f_n L - \frac{1}{2\pi f_n C} \right) \quad (2.35)$$

burada, f_n filtrelenmesi istenilen harmonik değerindeki rezonans frekansıdır ve rezonans durumunda $X_L=X_C$ olacağından filtrenin istenilen frekans değeri;



Şekil 2. 9. Pasif tek ayarlı pasif filtre, a) prensip devre şeması, b) Tek ayarlı filtrenin frekans-empedans grafiği.

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.36)$$

ifadesi ile tanımlanır. Sistemde L ve C değerleri değiştirilerek filtre istenilen frekans değerinde ayarlanabilir. Burada dikkat edilmesi gereken husus tasarlanan filtrenin sistemin kompanzasyon ihtiyacını karşılayacak C değeri ile belirlenmesi ve bu değere bağlı olarak ekdüktans (L) değerinin seçilmesi gerekliliğidir. Bunun için sistemin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Sistemin reaktif gücü ile aktif gücü arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir:

$$Q = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.37)$$

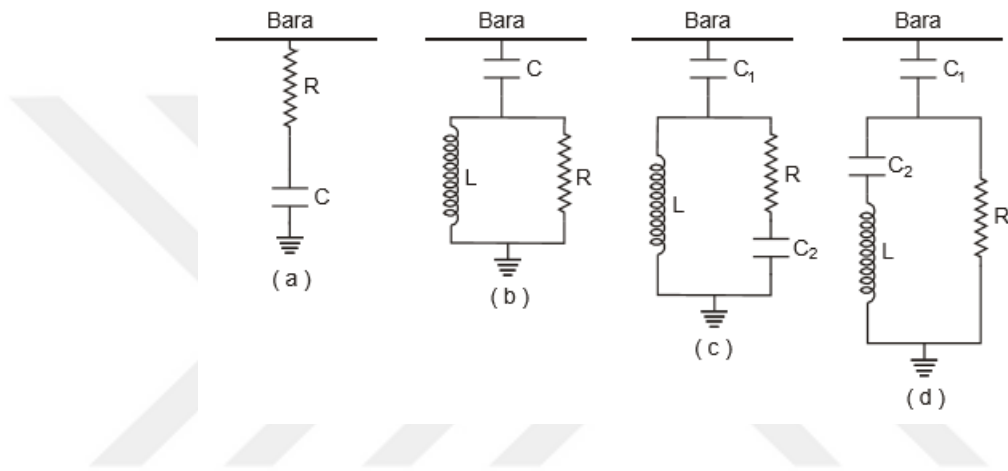
Burada; Q istenilen güç faktörü değerine ulaşabilmek için gerekli olan bağlanacak kondansatör gücü (Var), P sistemin aktif gücü, φ_1 kompanzasyondan önceki sistemin güç açısı, φ_2 kompanzasyondan sonra sistemin istenilen güç açısıdır. Bu ifadeden faydalanılarak bağlanması istenilen kondansatörün kapasite değeri;

$$X_{CT} = \frac{U^2}{Q} \quad (2.38)$$

ifadesi ile belirlenir. Burada, X_{CT} sisteme bağlanması gereken kapasitif reaktans değeri, U sistemin çalışma gerilimidir.

2.2.1.2.2. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler

Yüksek geçiren filtreler, belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans gösteren filtrelerdir. Bu filtrelerin tek ayarlı filtreler ile birlikte kullanılması uygundur. Tek ayarlı filtreler yüksek genlik değerine sahip düşük harmonik frekanslarını her harmonik için farklı paralel kollarla süzerken, yüksek geçiren filtreler genlik değeri düşük yüksek harmonik frekanslarını tek bir paralel kol yardımı ile süzerler. Dört farklı çeşit yüksek geçiren filtre mevcuttur, bunların birbirlerine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Yüksek geçiren filtre çeşitleri Şekil 2.10'da verilmiştir.

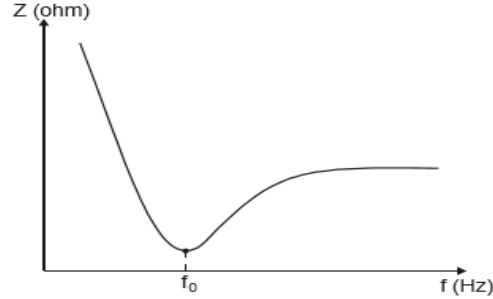


Şekil 2.10. Yüksek Geçiren Sönümlü Filtreler, (a) Birinci derece, (b) İkinci derece, (c) Üçüncü derece, (d) C Tipi.

Birinci dereceden yüksek geçirgen sönümlü filtreler büyük bir kondansatör gücü gerektirdiğinde ve kayıplara sebep oldukları için fazla tercih edilmezler. C tipi yüksek geçirgen sönümlü filtreler EAF'lerde yaygın olarak kullanılır. Bu filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü derecenin filtrelerin filtreleme performansı arasındadır. Temel avantajı, C₂ ve L seri olarak bağlandığından temel frekansta kayıplarının düşük olmasıdır. Bu tip filtreler, temel frekanstaki sapmalar ve elemanların değerlerinin zamanla değişmelerine karşı oldukça hassastır. Yüksek geçirgen sönümlü filtrelerde elemanların seçimi tek ayarlı filtrelerdeki gibi yapılır. Ancak, yüksek geçirgen sönümlü filtrelerdeki direnç değerini hesaplayabilmek için aşağıda sunulan kalite faktörü adında bir eşitliğin tanımlanması gerekmektedir.

$$K = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (2.39)$$

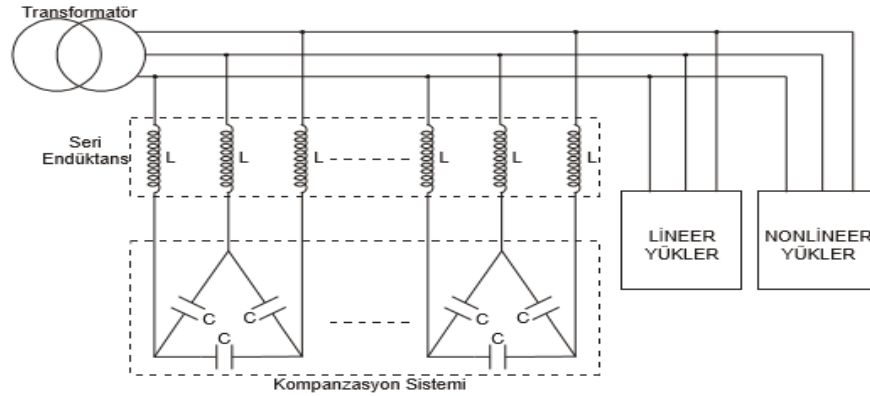
Yüksek geçiren bir filtrenin frekans-empedans ilişkisi Şekil 2.11’de verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi filtre belirli bir frekansın üzerinde düşük empedans göstererek yüksek dereceli harmoniklerin sistemden uzaklaşmasını sağlamaktadır [59].



Şekil 2.11. Yüksek geçiren sönümlü paralel pasif filtre için frekans-empedans ilişkisi.

2.2.1.2.3. Kompanzasyon Sistemine Seri Endüktans Bağlamak

Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlanmasının prensip devre şeması Şekil 2.12’de gösterilmiştir. Bu tip harmonik önleme yöntemi çok fazla tercih edilmeyen bir yöntem olmasına rağmen Elektrik Ark Fırınlarının kompanzasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.12. Kompanzasyon sistemine seri endüktans bağlama durumu prensip devre şeması.

Harmonikleri elektrikli sistemlerde en fazla etkisi kompanzasyon sistemleri üzerinde meydana gelmektedir. Ark fırınlarında yüksek harmonikler olduğundan, harmonikli akımlara karşı seri endüktans sayesinde yüksek empedans gösterilerek kompanzasyon sistemine geçmesi önlenmekte ve bu seri endüktansla kompanzasyon sisteminin kapasitesi bir filtre görevi görerek harmoniklerin etkinliğini azaltmaktadır. Bu sistem

için seçilecek olan endüktans değerine karar vermek için p faktörüne dikkate alınmalıdır ve p faktörü aşağıdaki ifade ile belirlenir.

$$p = \frac{X_L}{X_C} \quad (2.40)$$

p faktörü sistemde etkin olan harmonik derecesine göre seçilmelidir. Örneğin; sistemde 3. harmonik baskın ise bu sistemi 189 Hz'de rezonansa getirecek (endüktans ve kompanzasyon sistemi arasındaki seri rezonans) p değeri %7 olan endüktanslar seçilmelidir, sistemde 5. harmonik baskın ise bu sistemi 210 Hz de rezonansa getirecek p değeri %5,67 olan endüktanslar seçilmelidir. Burada bahsedilen, 3. harmonik için 189 Hz, 5. harmonik için 210 Hz değerleri zamanla uygulamadan kazanılan tecrübelerden elde edilmiş verilerdir [59].

Kompanzasyon sistemine seri bağlanan endüktanslar, kompanzasyon uçlarındaki gerilimin bir miktar yükselmesine sebep olmaktadır. Bunun sebebi, kompanzasyon sisteminden akan akım sınırlandırıldığından azaldığı için uçlarındaki gerilim yükselecektir (gücün sabit kalmak istemesinden dolayı). Bu yüzden sistem için seçilen kapasitanslar şebeke geriliminden daha büyük gerilimlere dayanıklı olmalıdır. Bu nedenle kapasitansların belirlenmesi için,

$$U_C = \frac{U}{1 - p} \quad (2.41)$$

ile kapasitör gerilimi hesaplanabilir. Bu denklemde U_C kapasitans gerilimi, U şebeke gerilimi ve p sabit değerdir.

Bu durumda kapasitans güçleri aşağıdaki matematiksel eşitlik ile hesaplanır:

$$Q_2 = \left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot Q_1 \quad (2.42)$$

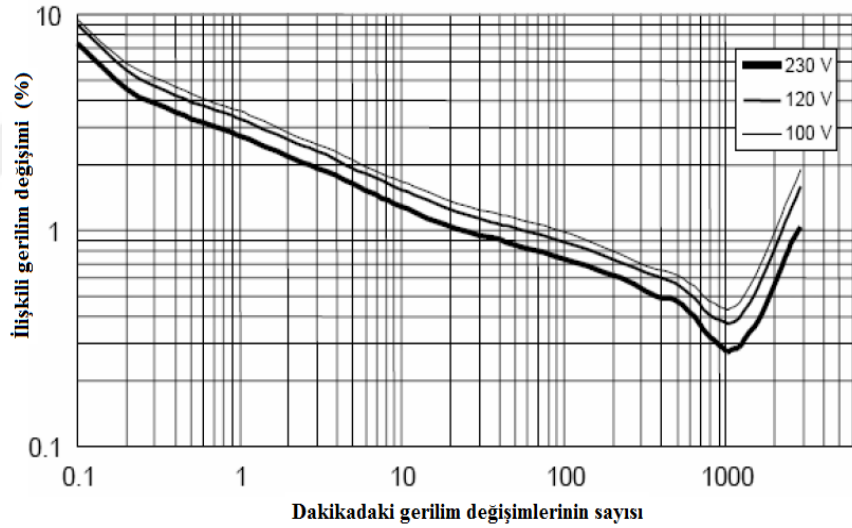
Burada; Q_1 kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi altında üreteceği reaktif güç (VAr), Q_2 gerilimin değişmesi sonucunda kompanzasyon sisteminin üreteceği reaktif güç (VAr), U_1 kompanzasyon sisteminin nominal çalışma gerilimi(V), U_2 değişen gerilimin değeridir (V). Kompanzasyon sistemine seri bağlı reaktörlerin tükettiği güç ise aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$Q_L = 3 \cdot I^2 \cdot X_L \quad (2.43)$$

Bu ifadeden görüldüğü gibi seri reaktör uygulaması az miktarda rekatif gücüde sisteme verecektir. Bu denklemde, Q_L seri reaktansın tükettiği rekatif güç (Var), I seri endüktans üzerinden geçen akım ve X_L seri endüktansın temel frekanstaki endüktif reaktansdır (Ω).

2.2.2. Kırpışma Etkisi

Kırpışma ışık şiddeti veya spektrum dağılımının zamanla dalgalanan bir ışık uyarısı ile meydana gelen görme duyusundaki kararsızlık belirtisi olarak tanımlanmaktadır [73]. Ark fırınları neden olduğu kırpışma etkisi birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir ve ark fırınlarının bağlı oldukları şebekelerde ciddi gerilim kırpışması problemlerine neden olduğu belirlenmiştir [74-76]. Kırpışma etkisi göz hassasiyetini temsil eden frekans eğrisindeki belirli bir genliği aşarsa insan gözünü rahatsız edici olmaktadır. Kırpışma etkisi için sınır değerler [77]'ye göre Şekil 2.13'deki grafiksel eğri ile tanımlanır.

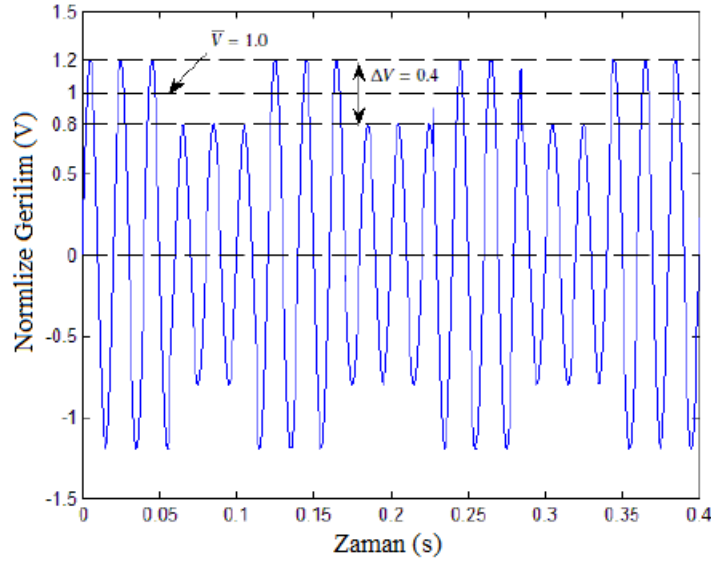


Şekil 2.13. Kırpışma eğrisi [77].

Bu tanımda kırpışma yüzdesel olarak dalgalı bir sinyal gerilimi olarak tanımlanır ve aşağıdaki modülasyon denklemi ile ifade edilir:

$$\text{Yüzde Gerilim Modülasyonu} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{V_0} \times 100 = \frac{\Delta V}{V_0} \quad (2.44)$$

bu ifadede, V_{\max} modüle edilen sinyalin maksimum tepe değeri, V_{\min} modüle edilen sinyalin minimum tepe değeri, V_0 normal çalışma koşullarında ortalama gerilimin değeridir. V_0 değeri normal çalışma koşullarındaki gerilimin onar dakikalık aralıklar ile ölçülen değerlerinden elde edilen ortalamalar olarak kabul edilir.



Şekil 2.14. Modüle edilmiş sinyal dalga formu.

Kırpışma etkisinin tanımlanmasında kısa süreli kırpışma etkisi (P_{st}) ve uzun süreli kırpışma etkisi (P_{lt}) olmak üzere iki farklı kabul kullanılır. Bu kabuller IEC standartlarında belirlenmiştir ve kırpışma metreler veya bu özelliğe sahip güç kalitesi analizörleri yardımı ile tanımlanabilir.

2.2.3. Ark Fırınlarında Kompanzasyon

Enerji sistemlerinde endüktif ve reaktif gücün dengelenmesi ve böylelikle yükün ihtiyacı olan reaktif gücü belli teknikler kullanarak karşılanması işlemi kompanzasyon olarak adlandırılır [78]. Elektrik ark fırınları bağlı oldukları şebekelerde yüksek reaktif güç çekerler. Bu nedenle EAF'lerde en önemli konulardan biri reaktif güç kompanzasyonudur. Elektrik ark fırınları stokastik akım ve gerilim değişimlerine sahip olan yüklerdir ve güç kompanzasyonu geleneksel mekanik kompanzasyon düzenekleri ile sağlanamaz çünkü geleneksel kompanzasyon sistemleri yükün ani olarak değişimine bağlı olarak ihtiyaç duyulan reaktif güç talebine hızlı cevap veremezler ve kompanzasyon işlemini tam olarak gerçekleştiremezler. Fakat ark fırınları alanında son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar geleneksel kompanzasyon tekniklerinin elektrik ark fırınlarının neden olduğu karşılayamadığı ve reaktif güç kompanzasyonu için güç elektroniği tabanlı devrelerin kullanılabilmesi belirlenmiştir bu devreler yardımı ile hızlı değişimlerin geçici ve dinamik kararlılığının iyileştirilebileceği gösterilmiştir [79, 80]. Günümüzde Esnek Alternatif Akım (AA) İletim Sistemi (FACTS) olarak adlandırılan gelişmiş teknoloji yapıları güç

sistemlerinin iletim yeteneğini arttırmada ve yüzlerce megawatt değerine kadar hızlı anahtarlama özelliği sağlayarak hızlı kompanzasyon sağlanmasında kullanılmaktadır.

FACTS felsefesi, güç elektroniği tabanlı elemanlar kullanılarak şebekede güç kontrolünü sağlamaktır. Statik Volt-Amper-Reaktif (VAR) uzun yıllardır iletim şebekelerinin kararlılığını arttırmak için kullanılmaktadır [81]. İletim hatlarındaki güç akışını kontrol edebilmek için seri kompanzasyon olarak bilinen gerilim kompanzasyonu, paralel kompanzasyon olarak bilinen akım kompanzasyonu ve akım ve gerilim kompanzasyonlarının birlikte kullanıldığı birleşik kompanzasyon yapıları kullanılmaktadır. EAF'lerde seri ilave edilecek yükler akımın azalmasına ve fırın performansını düşmesine neden olacağı için seri kompanzasyon uygulamaları tercih edilmemektedir. EAF'lerde ve iletim sistemlerinde FACTS elemanları ile kompanzasyon işlemlerinin iyileştirilmesi için birçok araştırmacı tarafından benzetim modelleri ve saha uygulamaları gerçekleştirilmiştir [82-90].

2.2.3.1. Şönt Kompanzatorler

Şönt kompanzasyonda, sistemin bağlantı noktasına enjekte edilerek gerilim ve akım kaynağının değiştirilmesi ile gerçekleştirilir. Enjekte edilen akım hat gerilimi ile dik fazlı ise şönt kompanzator sadece değişken reaktif güç sağlar. Bu işlem için tristörler kullanılır ve tristörler, kapıdan kesime gidilebilen tristörler (GTO), Mos-kontrollü tristörler (MCT) veya yalıtılmış bipolar tristörler gibi (IGBT) güç dönüştürücüleri yardımıyla anahtarlama yaparak akımın kontrolü için gerekli olan anahtarlama işlemini gerçekleştirir [91, 93].

2.2.3.1.1. Tristör Kontrollü Reaktör (TKR)

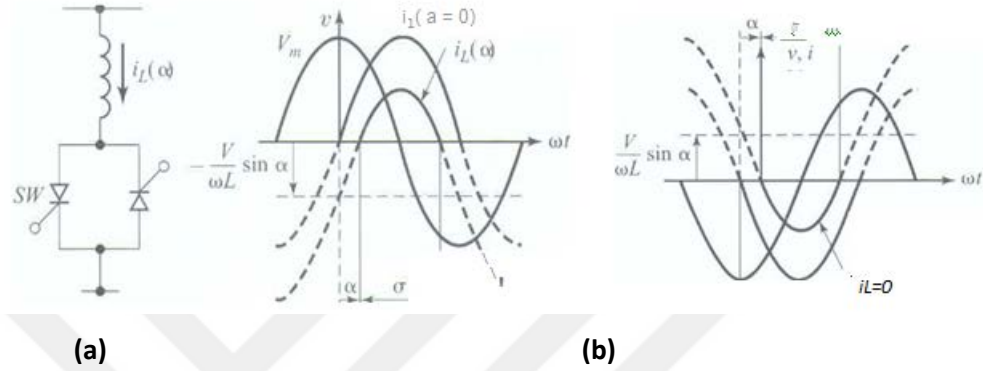
Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) L indüktanslı bir reaktör ve çift yönlü tristör elemanından oluşur. Reaktör üzerindeki akım, tristörün tetikleme açısı α açısının değiştirilmesi ile sıfırdan maksimuma kadar kontrol edilebilir. Tristörlerin tetikleme açılarının α olduğu ve düşünüldüğünde $\alpha=0$ olduğu durum tristörün kesimde olduğu durumu ifade eder [94]. Tristörün iletim açısı ise $\sigma = \pi - 2\alpha$ formülü ile tanımlanır. Bu durumda $V(t) = V_m \cdot \cos(\omega t)$ kaynak gerili ile değiştiği kabul edildiğinde anlık indüktör akımı;

$$I_L(t) = \frac{1}{L} \int_{\alpha}^{\omega t} v(t) \cdot dt = \frac{V_m}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha) \quad (2.45)$$

ifadesi ile tanımlanır. Akımın pozitif ve negatif yarım periyodu için $\alpha \leq \omega t \leq \pi - \alpha$ aralığında reaktör akımının temel bileşeninin etkin değeri ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_{LF}(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin \alpha \right) \quad (2.46)$$

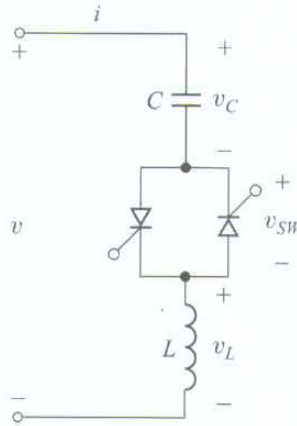
Tristör kontrollü reaktörün genel yapısı ve akım, gerilim dalga formları ise şekil 2.15’de sunulmuştur.



Şekil 2.15. a) Tristör Kontrollü Reaktör genel devre şeması, b) Tristör kontrollü reaktörün akım ve gerilim dalga şekilleri.

2.2.3.1.2. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC)

Tristör anahtarlama kapasitör (TSC)’ün devre şeması Şekil 2.16’da gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi TSC devresi çift yönlü tristör anahtarı ve L, C devre elemanlarından oluşur. Bu uygulamadaki L değeri düşük değerde seçilmelidir.



Şekil 2.16. Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) genel devre şeması.

Bu devrede gerilim ifadesi aşağıdaki matematiksel ifade ile tanımlanabilir.

$$V(s) = \left(Ls + \frac{1}{Cs} \right) I(s) + \frac{V_0}{s} \quad (2.47)$$

Bu ifadede, V_0 gerilimi kapasitörün başlangıç gerilimidir. Gerilimin sinüzoidal olarak değiştiği varsayıldığında akım ifadesi;

$$i(t) = V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos(\omega t + \alpha) - n \omega C \left(V_0 - \frac{n^2 V_m}{n^2 - 1} \cdot \sin \alpha \right) x \sin \omega_n t - V_m \omega C \cos \alpha \cdot \cos \omega_n t \quad (2.48)$$

olarak tanımlanır. Bu durumda devrenin frekansı;

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = n \omega$$

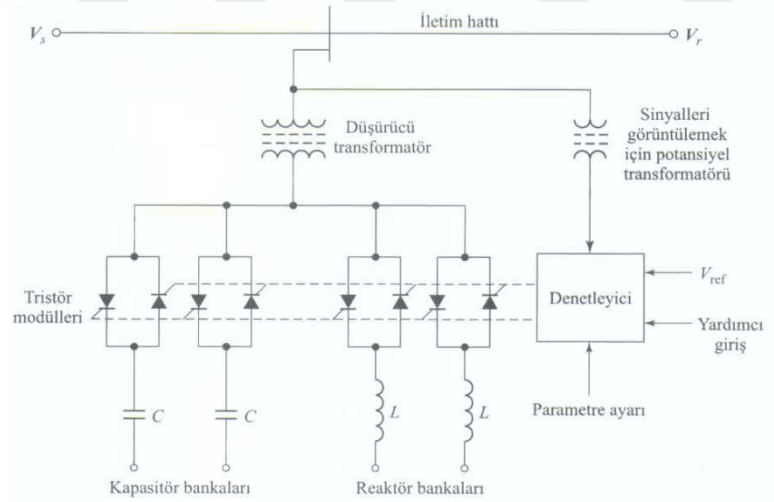
$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 L C}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.49)$$

olur. (2.48) ifadesi kapasitörün başlangıç gerilimine sahip olması ve geçici çalışma durumu için geçerlidir. Kalıcı durum akımı ise aşağıda sunulan ifade ile tanımlanır.

$$i(t) = V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega \cdot C \cdot \cos(\omega t + 90) = -V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \sin \omega t \quad (2.50)$$

2.2.3.1.3. Statik Var Kompanzatorler (SVC)

Statik Var Kompanzatorler (SVC) hem endüktif hem de kapasitif kompanzasyona sahip sistemlerdir yani hem TCR hem de TKR yapılarını içerirler. Bu sistemlerde birden fazla TCR veya TCR birbirine paralel olarak bağlanabilir [93-96]. SVC sistemin temel devre yapısı Şekil 2.17'deki gibidir.



Şekil 2.17. Statik Var Kompanzatorün sistem yapısı.

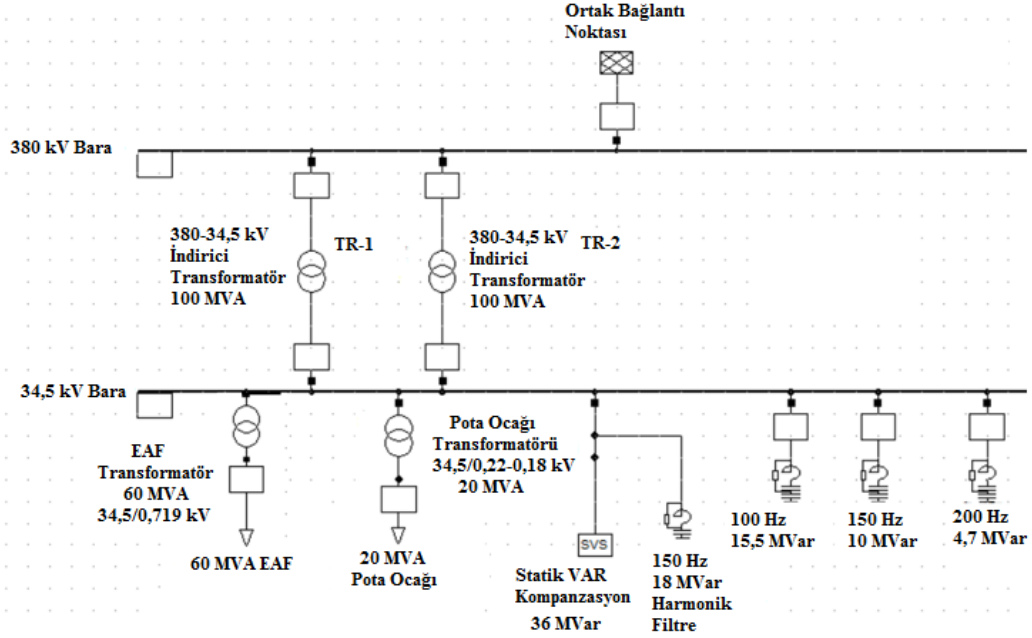
Bu yapılar denetleyici kontrol sistemleri sayesinde, tristörlerin iletim açılarını ayarlayarak kompanzator geriliminin değişmeden kalmasını sağlar.

3. SİDEMİR TESİSİNDE ELEKTRİKSEL GÜÇ KALİTESİ PARAMETRELERİNİN DENEYSEL ÖLÇÜMÜ

3.1. EAF' ının Güç Kalitesi Parametrelerinin Ölçümü

Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SİDEMİR) tesisinde, 28.04.2012-19.07.2012 tarih aralığında farklı zamanlarda haftalık ve günlük güç kalitesi ölçümleri HIOKI 3197 ve Chauvin Arnoux (CA) 8332B güç kalitesi analizörleri kullanılarak IEEE 519-1992, IEC 61000-4-7, IEC 61000-4-30 standartlarına uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Sivas Demir Çelik fabrikasında EAF-60 fırını besleyen kirli baranın tek hat şeması Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Sivas Demir Çelik İşletmeleri (SİDEMİR) tesisinin kirli bara tek hat şeması.

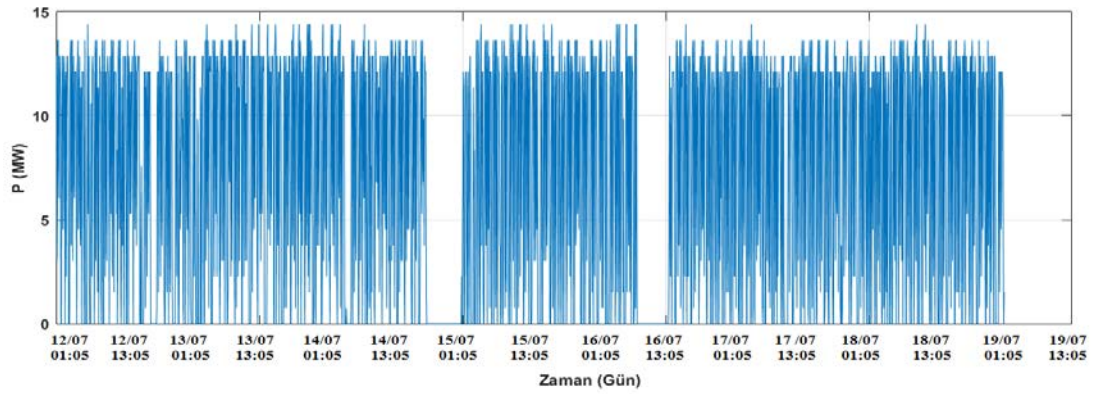
Tek hat şeması verilen devrenin 34,5 kV barasına (EAF transformatörü girişine) Chauvin Arnoux (CA) 8332B güç kalitesi analizörü üç faz olarak bağlanmıştır ve 34,5 kV baradaki güç kalitesi parametreleri kayıt altına alınmıştır. Ayrıca bu analizöre eş zamanlı olarak TR 1 transformatörünün sekonder ölçüm hücrelerine HIOKI 3197 güç kalitesi analizörü bağlanarak EAF ının farklı çalışma proseslerindeki akım ve gerilim dalga formu değişimleri 12 çevrim ve 1024 Hz çözünürlük ile kaydedilmiştir. Elektriksel parametrelerin değerlendirilmesinde “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi Yönetmeliği” nin kabul edilebilir akım harmonik sınır değerleri [97] ve Elektrik piyasası Şebeke Yönetmeliği’ndeki kabul edilebilir gerilim harmonik

sınır değerleri kullanılmıştır. Bu yönetmeliklere ilişkin sınır değerler Ekler bölümünde sunulmuştur.

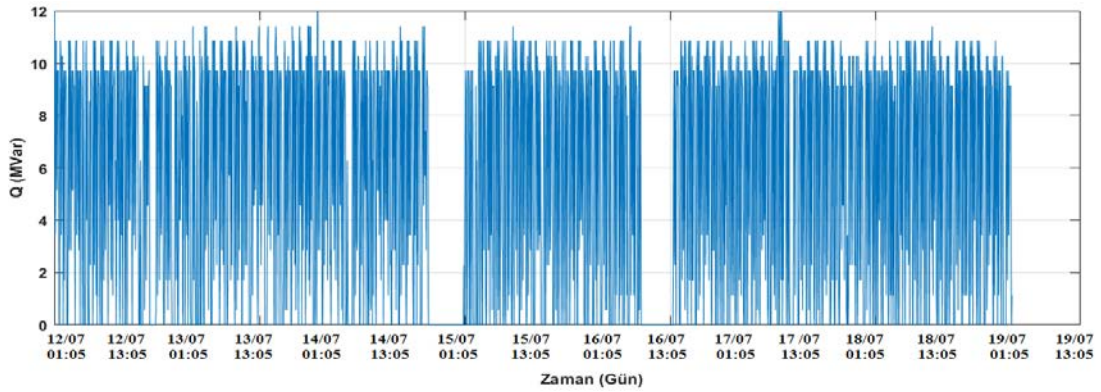
3.1.1. EAF girişi 34,5 kV bara lm Sonuçları

TEİAŞ 11. Bölge Müdürlüğünden alınan izin ile HIOKI 3197 güç kalitesi analizörü Tr-1 transformatörünün sekonder barasına bağlanmıştır. CA 8332B güç kalitesi analizörü ise fırın transformatörünün bağlı olduğu 34,5 kV baraya bağlanarak ark fırını girişindeki güç kalitesi parametreleri kayıt altına alınmıştır. Ölüm sürecinde harmonik filtre gruplarının ve kompanzasyon sisteminin devre dışı bırakılmasına izin verilmediğinden tüm ölümler sürecinde kompanzasyon ve harmonik filtreler devrede iken ölümler gerçekleştirilmiştir ve EAF'nin eritme prosesinde oluşan şarj (C)-Sondaj (B), Ergitme (E) ve arıtma (R) fazları olmak üzere dört farklı çalışma durumuna ait güç kalitesi parametreleri değerlendirilmiştir.

HIOKI 3197 güç kalitesi analizör ile EAF transformatörü girişinden haftalık olarak ölçülen aktif ve reaktif güç değişimleri sırası ile Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Şekil 3.2. HIOKI 3197 g analizörü ile 34,5 kV EAF girişinden llen A fazına ait aktif gücün haftalık değişimi (5 dakikalık ortalamalar ile).



Şekil 3.3. HIOKI 3197 g analizörü ile 34,5 kV EAF girişinden llen A fazına ait reaktif gücün haftalık değişimi (5 dakikalık ortalamalar ile).

Güç kalitesinin değerlendirilmesi için ölçümler maksimum onar dakikalık ortalamalar ile yapılması önerilmektedir. Fakat on dakikalık ortalamalar ile EAF fırının hızlı değişim gösteren şarj (Charge), sondaj (Boring), eritme (Melting) ve arıtma (Refine) fazlarındaki çalışma karakteristiklerini tanımlamak mümkün olmamaktadır. EAF'ler her ne kadar stokastik davranışa sahip olsa da farklı eritme işlemi sırasında benzer karakteristik davranışlara sahiptir. Bu nedenle EAF'lerin eritme periyodu süresince çalışma proseslerinin daha iyi anlaşılabilmesi için bir eritme periyodu sürecindeki ölçümler grafiksel olarak tanımlanmıştır ve güç kalitesi problemleri değerlendirilmiştir. Bir eritme periyodu boyunca EAF yükünün çalışma sürecindeki süreleri Tablo 3.1'de gösterilmiştir.

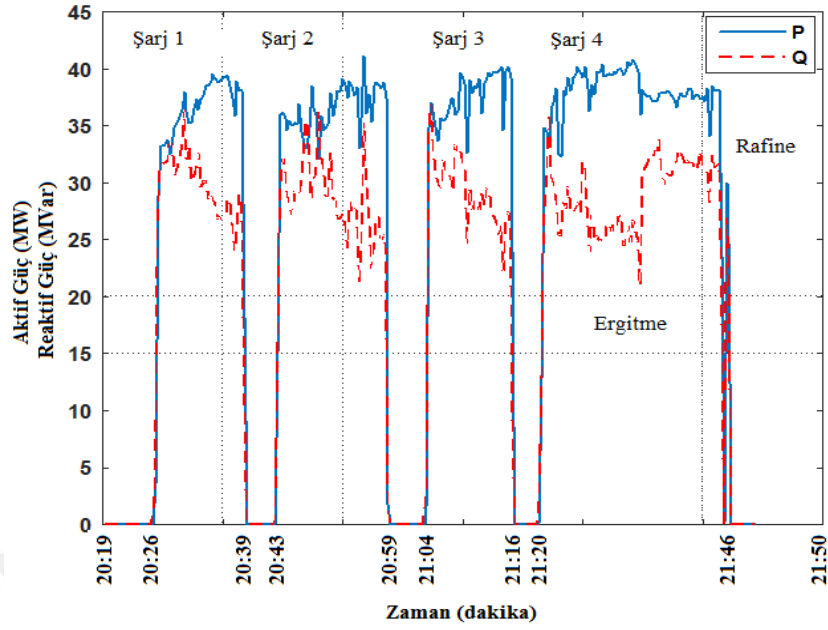
Tablo 3. 1. EAF'nin 87 dakikalık eritme periyodu sürecinde çalışma faz süreleri.

Fırın Çalışma Süresi	EAF çalışma koşulu
Zaman (dakika)	Fırın çalışma durumu
7	Fırın çalışmıyor
13	Şarj 1, Sondaj, Eritme
4	Fırın çalışmıyor
16	Şarj 2, Sondaj, Eritme
5	Fırın çalışmıyor
12	Şarj 3, Sondaj, Eritme
4	Fırın çalışmıyor
26	Şarj 2, Sondaj, Eritme, Rafine
4	Fırın çalışmıyor

Tablo 3.2'deki eritme periyodu süresince EAF yükü tarafından oluşan aktif ve reaktif güç değişimleri sırası ile Şekil 3.4'de grafiksel olarak sunulmuştur ve bu ölçüm periyodunda elde edilen enerji değerleri Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

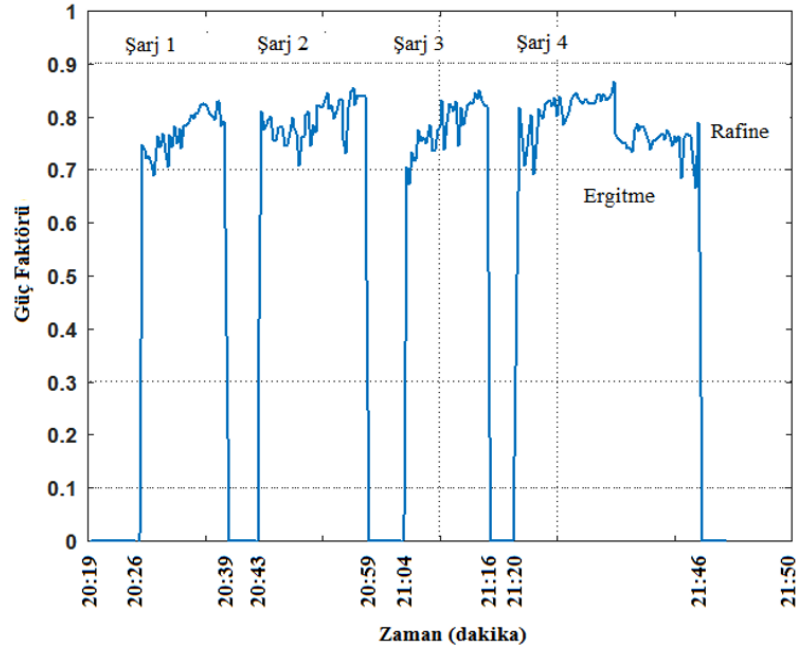
Tablo 3. 2. 87 dakikalık çalışma sürecindeki enerji değerleri.

Çalışma sürecinde enerji değerleri				
	% Endüktif Reaktif/Aktif	Çalışma Periyodunda Aktif Enerji (MWh)	Çalışma Periyodunda Reaktif Enerji(Endiktüf) (MVarh)	Aktif Güç Maksimum değeri (MW)
EAF Trafosunun Primer Tarafı	78,44	40,194	31,529	52,834



Şekil 3.4. 60 MVA güce sahip EAF'ının SVC sistem ve harmonik filtrelerin devrede olduğu durumda 87 dakikalık çalışma süresinde CA 8332B güç kalitesi analizörü ile ölçülen toplam aktif ve reaktif güç değişimleri.

İncelenen EAF yükünün Endüktif/ Reaktif oranının % 78,44 olduğu görülmektedir. Yani endüktif güç faktörü yaklaşık 0,8'dir. 34,5 kV barada A fazına ait ölçülen güç faktörü grafiksel olarak Şekil 3.5'deki gibidir.



Şekil 3.5. 60 MVA güce sahip EAF'nin SVC sistem ve harmonik filtrelerin devrede olduğu durumda 87 dakikalık çalışma süresinde CA 8332 güç kalitesi analizörü ile A fazına ait ölçülen güç faktörünün değişimi.

Şekil 3.5'den görüldüğü gibi Statik Var Kompanzasyon (SVC) ile reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirildiğinde ortalama güç faktörü değeri yaklaşık 0,8 olmaktadır. Bu durum SVC sisteminin sistemin reaktif güç kompanzasyonu başarılı bir şekilde sağladığını göstermektedir.

3.1.1.1. 34,5 kV barada EAF yükünün neden olduğu Akım ve Gerilim Harmonikleri

a) Akım Harmoniklerinin İncelenmesi

Türkiye'deki elektriksel şebekelerde harmonik akım sınır değerlerinin hangi standartlara göre belirleneceğinin tanımlanması için Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ) yönetmeliklerinde belirtilen I_K/I_L değeri hesaplanmalı ve bu değere göre harmonik akımları için sınır değerler tanımlanmalıdır [97]. İncelenen tesisin ortak bağlantı noktasında kısa devre akımı 11070 A olarak hesaplanmıştır. Bu durumda 34,5 kV baranın kısa devre akımı aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$

$$S = \sqrt{3} \times 380000 \times I_{base}$$

Bu ifadeden I_{base} akımını 144 A olarak hesaplanır.

$$I = I_{p.u.} \times I_{base}$$

İfadesinden,

$$I_{p.u.} = \frac{11070}{144} = 76,875 \text{ A}$$

olur. YG indirici transformatör merkezinde iki adet transformatör bulunmaktadır ve % Uk değerleri %14,8' dir. Bu kabuller dikkate alındığında, Trafo gücü ve S_{base} gücüne göre p.u. değerleri için $U_k=14,8$ ve $X_{trA(p.u)} = X_{trB(p.u)}$: Trafo A ve Trafo B empedansları olduğu kabul edildiğinde;

$$X_{s(p.u)} = \frac{1}{76,875} = 0,0130 \text{ (p.u)}$$

Bu ifadeden toplam empedans;

$$X_{toplam} = X_s + X_{TrA} // X_{TrB} = 0,0879 \text{ p.u}$$

olarak tanımlanabilir. Bu durumda 34,5 kV baradaki kısa devre akımının p.u değeri $1/0.0879=11,376$ (p.u) olmaktadır. Buradaki I_{base} değeri

$$S_{base} = \sqrt{3} * V_{base} * I_{base}$$

$$100 = \sqrt{3} * 34500 * I_{base}$$

olmaktadır. Bu formülden I_{base} akımını 1673 A olarak hesaplanır.

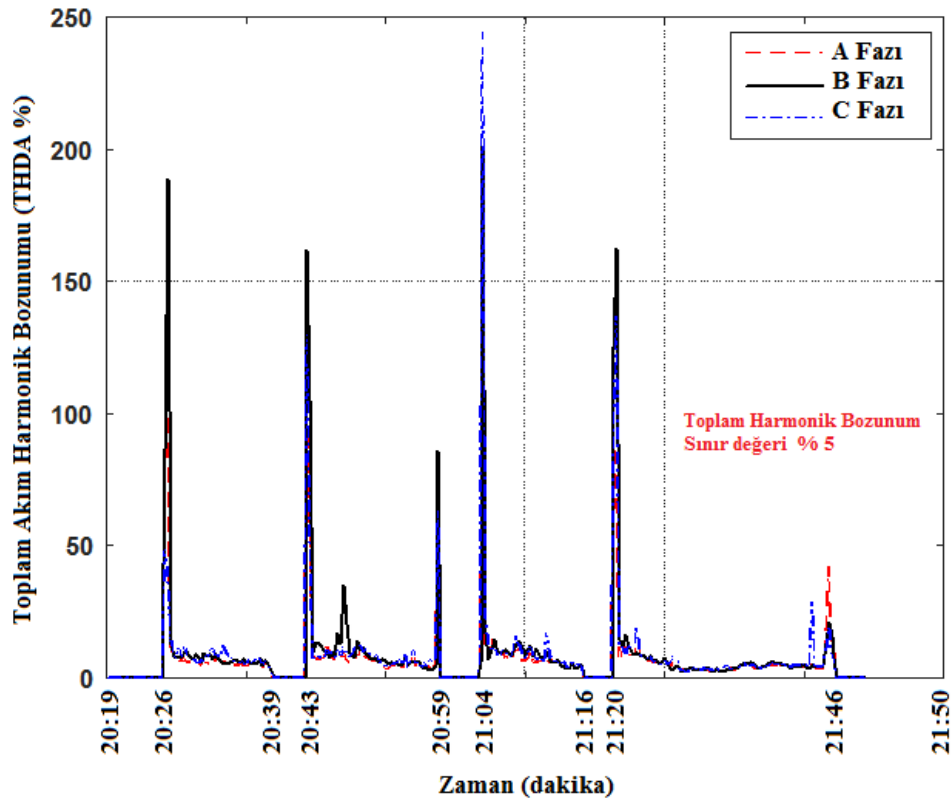
$$I_K = I_{base} * (\rho \text{ değeri}) = 1673 \times 11.376 = 19032 \text{ A}$$

Buradan hesaplanan I_K kısa devre akımının I_L değerine oranlanarak I_K/I_L oranı hesaplanır. I_L değeri fabrikanın ana girişi için 1023 A ve Ark ocağı girişi için 1071 A olarak ölçülmüştür. Bu durumda;

Kirli bara girişi için $I_K/I_L = 17,770 \text{ A}$

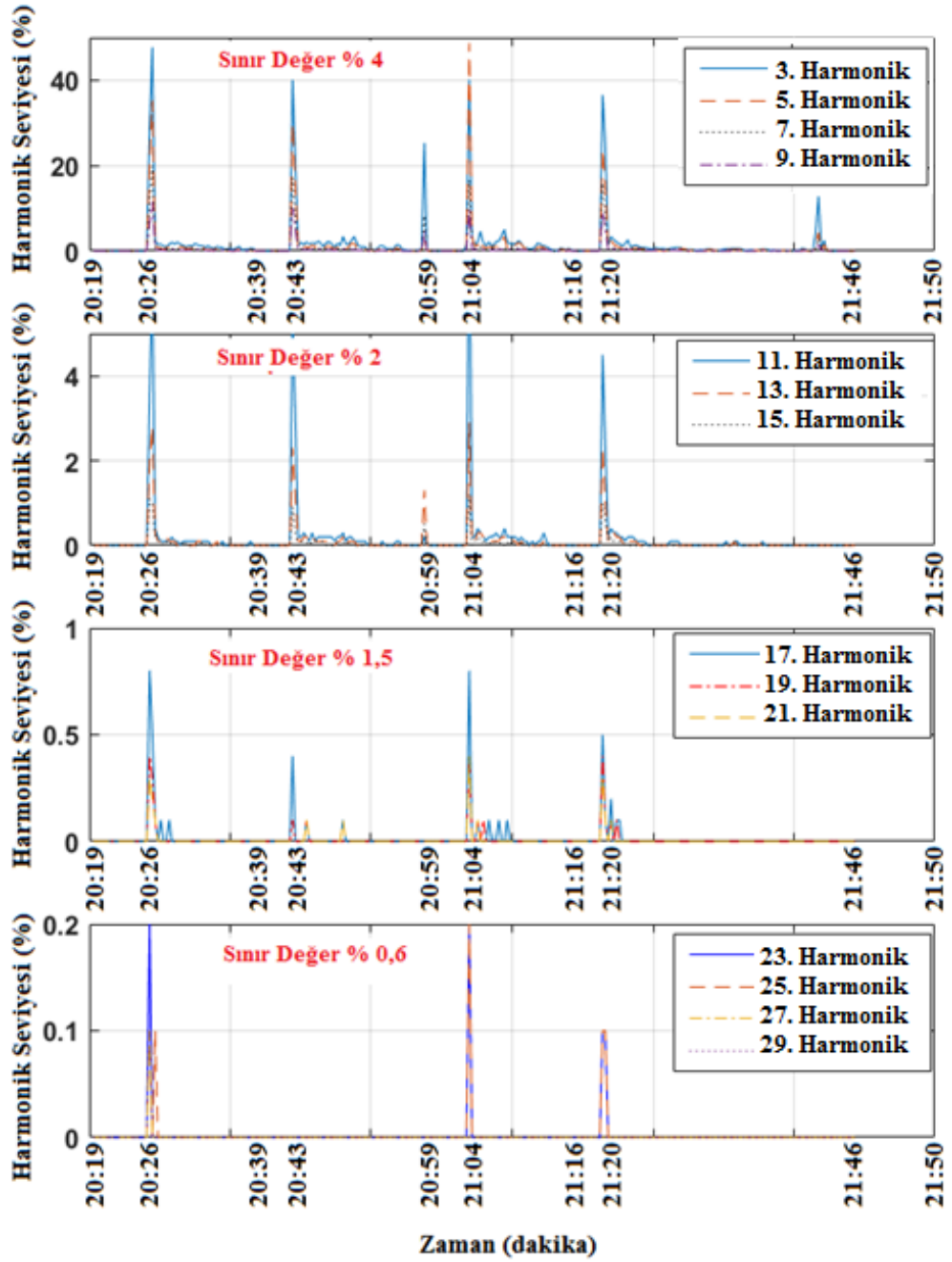
Ark ocağı girişi için $I_K/I_L = 18,6041 \text{ A}$

Olmaktadır. Hesaplanan bu değerlere göre akım harmonik sınırları için “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Kabul Edilebilir Akım Harmonik Limitleri” tablosunda belirtilen 1. Sütuna göre harmonik akım sınır değerleri belirlenir. CA 8332B yardımı ile 34,5 kV baradan ölçülen üç faza ait toplam akım harmonik bozunumu Şekil 3.6’da gösterilmiştir.



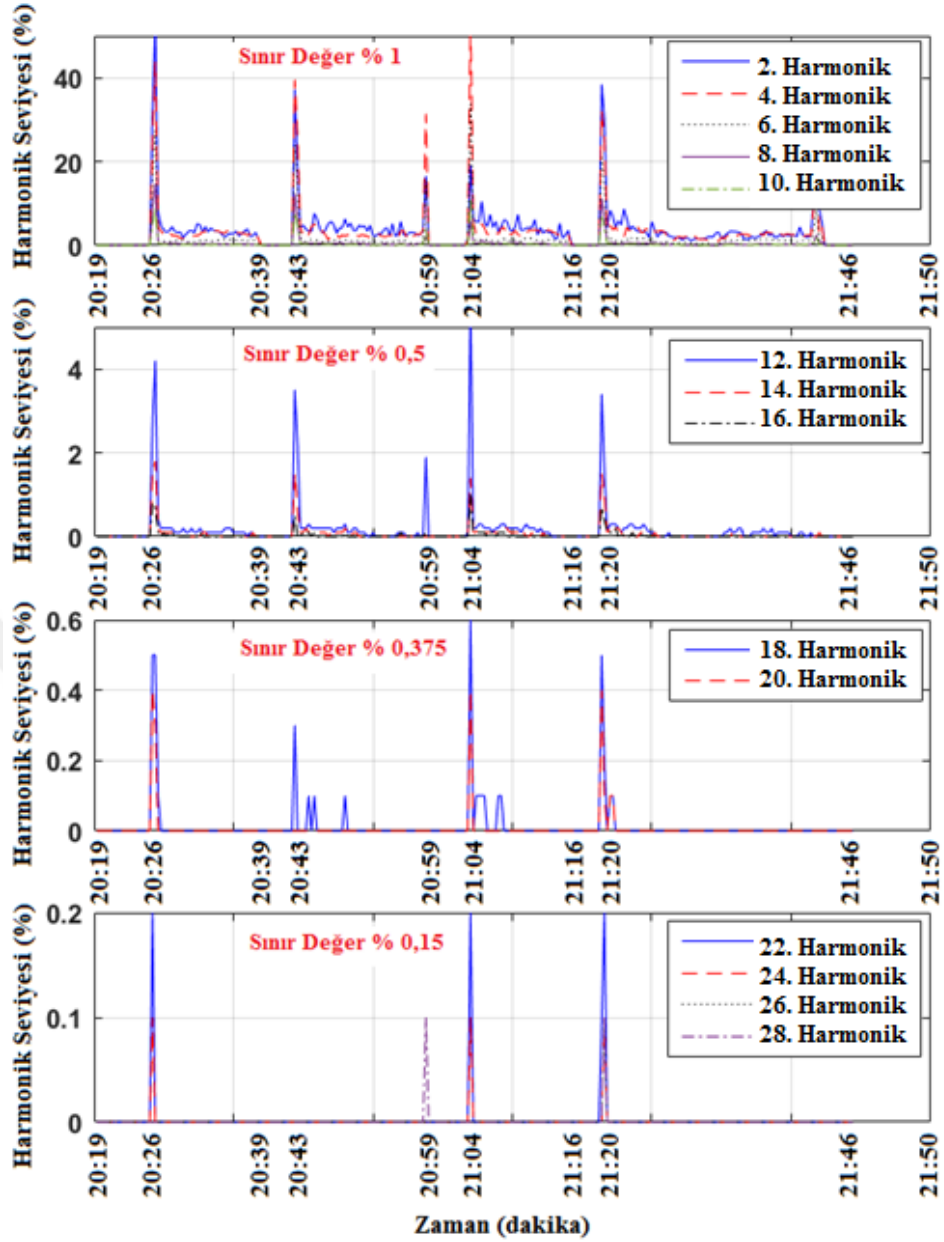
Şekil 3.6. EAF' ını besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık çalışma sürecinde ölçülen üç faza ait Akım toplam harmonik bozulunu (harmonik bozulma sınır değeri % 5' dir).

Ayrıca tek akım harmoniklerine ilişkin ölçülen Toplam harmonik bozunumu değerleri sınır değerlere bağlı olarak Şekil 3.7' de sunulmuştur.



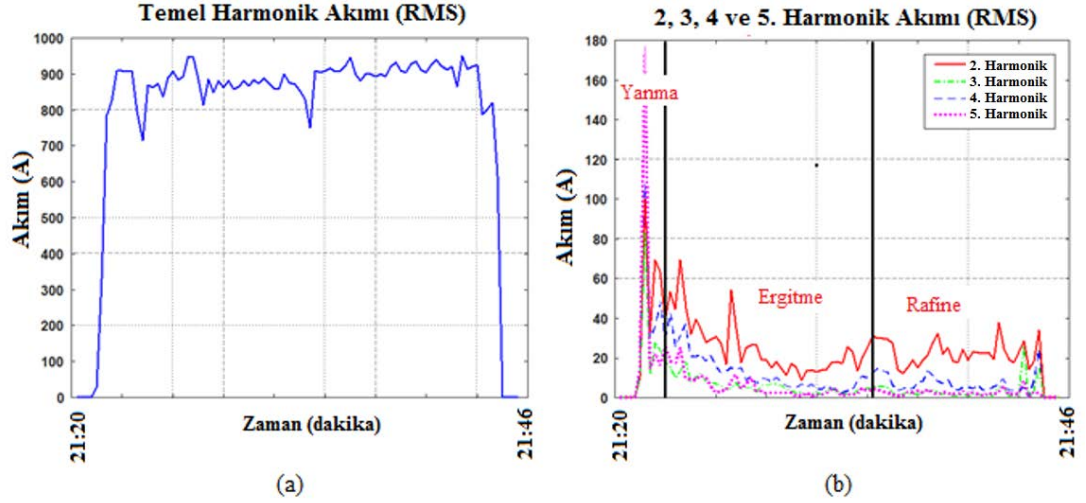
Şekil 3.7. EAF' ını besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık ölçüm sürecinde A fazına ait tek akım harmoniklerinin sınır değerlerle karşılaştırılması.

Şekil 3.7'den görüldüğü gibi, ölçüm sonuçlarında 17, 19, 21, 23, 25, 27 ve 29. harmonikler dışındaki diğer tek akım harmonik değerlerinin yönetmelikte belirlenen standartların üzerinde olduğu belirlenmiştir. Çift numaralı harmonik bozunum değerleri ise Şekil 3.8'deki gibidir ve 20. Harmonik dışındaki diğer çift harmoniklerin de değerleri yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin üzerindedir. Güç kalitesine etki eden en fazla akım harmonik bozulmaları 2, 3, 4 ve 5. harmoniklerde meydana gelmektedir.



Şekil 3.8. EAF' ını besleyen 34,5 kV ana barada 87 dakikalık ölçüm sürecinde A fazına ait çift akım harmoniklerinin sınır değerlerle karşılaştırılması.

Şekil 3.9'da bir ergitme periyodunda şarj, sondaj, ergitme ve arıtma süreçlerinde temel akım harmoniği ve harmonik bozulmaya en fazla etki eden 2, 3, 4 ve 5. harmonik akımlarının RMS değerlerinin değişimi grafiksel olarak gösterilmiştir. Grafiksel sonuçlardan görüldüğü gibi en fazla akım harmonik şarj ve yanma süreçlerinde ortaya çıkmaktadır. En az akım harmonik bozulması ise arıtma sürecinde görülmektedir.

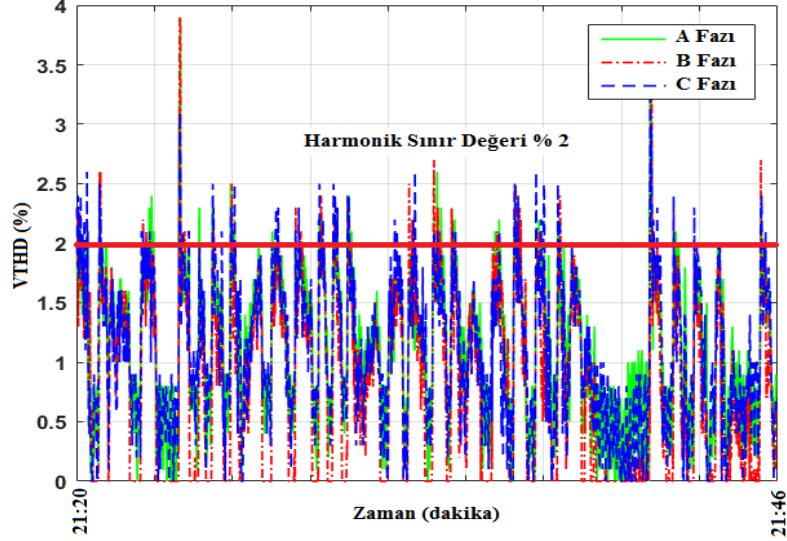


Şekil 3.9. Bir ergitme periyodunda sondaj, ergitme ve rafine süreçlerinde A fazına ait akım harmoniklerinin RMS değişimi, a) Temel akım harmoniği, b) 2, 3, 4 ve 5. harmonik akımları (10 çevrimlik ortalamalar ile elde edilen 20 s'lik ortalama değerler grafiksel olarak gösterilmiştir).

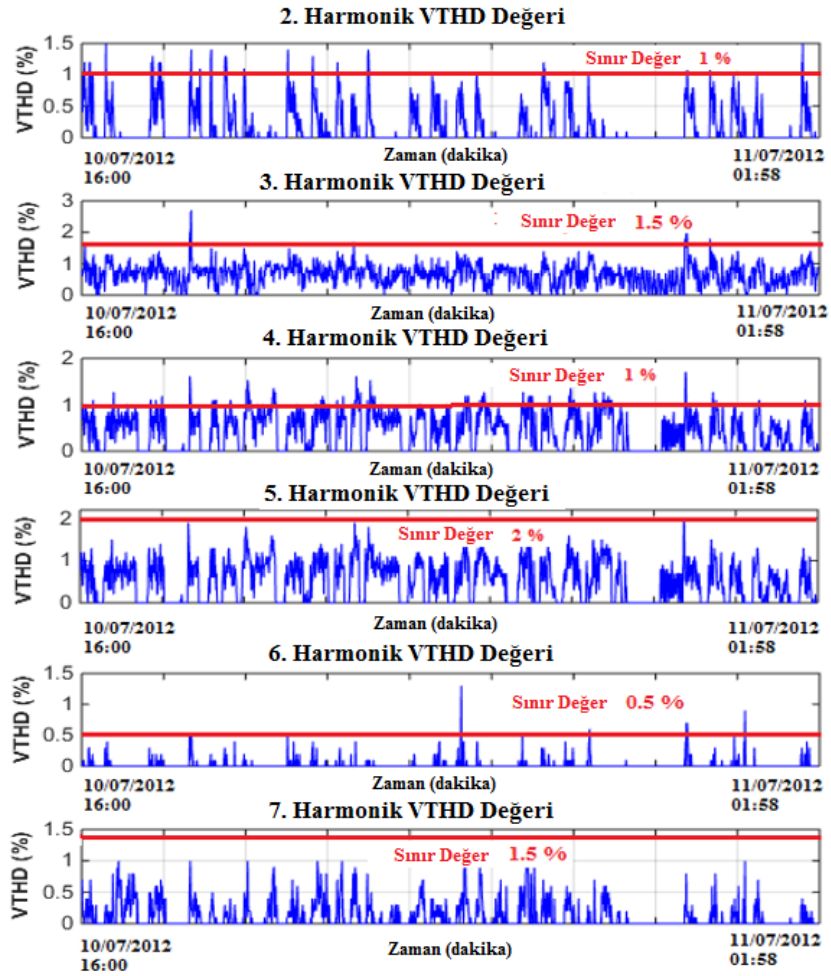
b) Gerilim Harmoniklerinin İncelenmesi

EAF sistemini besleyen 34,5 kV baranın gerilim harmonikleri deneysel olarak CA 8332B güç kalitesi analizörü yardımı ile incelendiğinde 2, 3, 4 ve 6. harmonikler dışındaki gerilim harmonik değerlerinin yönetmeliklerde arzu edilen sınır değerler içerisinde oldukları belirlenmiştir. 2 ve 4. harmonik sınır değerlerinin genellikle standartların üzerinde olduğu görülürken, 3 ve 6. harmonikler zaman zaman sınır değerinin üzerine çıkmaktadır. 34,5 kV barada ölçülen toplam gerilim harmonik bozunumunun yüzdesel olarak zamanla değişimi ise Şekil 3.10'da gösterilmiştir.

Gerilim harmoniklerinin daha iyi anlaşılabilmesi haftalık ve günlük ölçüm değerleri yerine 10/07/2012-11/07/2012 tarihlerindeki ölçülen yaklaşık 10 saatlik ölçüm periyodu grafiksel olarak gösterilmiştir. 10 saatlik ölçüm süresindeki 2-7. Gerilim harmoniklerinin zamana bağlı yüzdesel değişimi Şekil 3.11'deki gibidir.



Şekil 3.10. Yaklaşık 10 saatlik ölçüm periyodunda 34,5 kV barada CA 8332 Güç kalitesi analizörü yardımı ile ölçülen A,B,C fazlarında toplam gerilim harmonik bozulma değerleri (%).



Şekil 3.11. Yaklaşık 10 saatlik ölçüm periyodunda EAF'yi besleyen 34,5 kV ana barada A fazına ait gerilim harmoniklerinin sınır değerlerle karşılaştırılması.

3.1.1.2. EAF'nin neden olduğu Kırpışma etkisinin incelenmesi

Elektrik ark fırınlarının bağlı olduğu elektriksel şebekedeki kırpışma etkisinin olmaması için EAF'nin bağlanacağı noktadaki şebeke minimum kısa devre gücünün ark fırınının görünür gücüne oranının 80'den fazla olması gerektiğini belirlemiştir [98]. Bu çalışmanın aksine Mendis vd. bu oranın 50'den büyük olması gerektiğini tanımlamışlardır [73]. Ortak bağlantı noktasındaki kısa devre gücü ile ark ocağının gücü arasında aşağıda sunulan kabul kullanılabilir:

$$Max\ ergitme\ gücü \leq \frac{1}{80 \cdot \sqrt[4]{n}} \cdot S_k \quad (3.1)$$

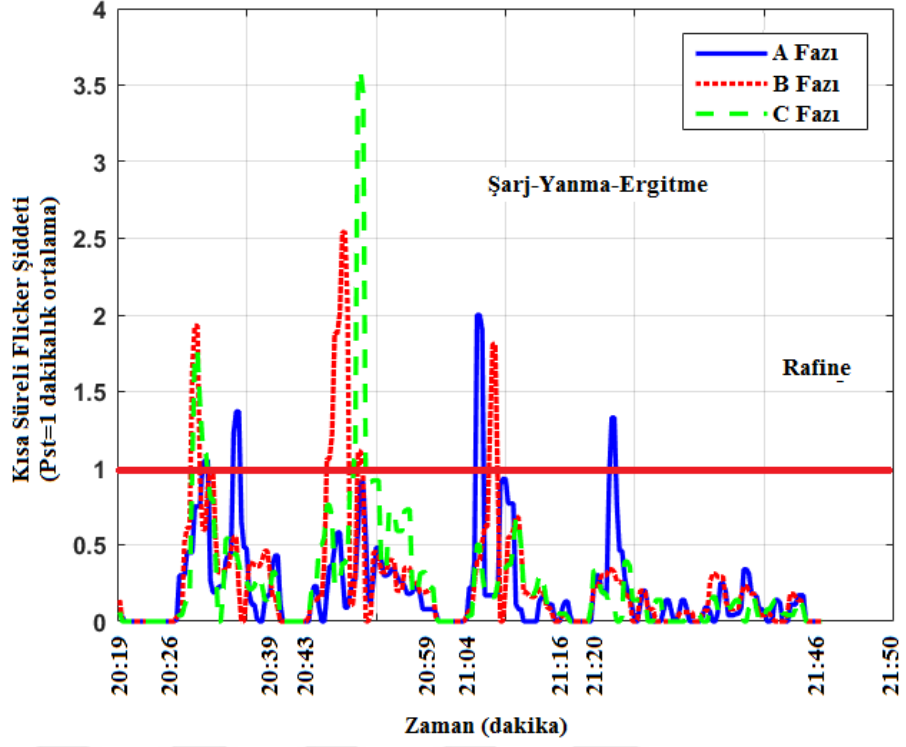
Burada; S_k ortak bağlantı noktasında şebeke kısa devre gücü, n- birlikte çalışan fırın sayısıdır. Gelişmiş ülkelerde 380 kV sistemlerde ortalama kısa devre güçleri 16000 MVA üzerinde iken incelenen EAF'nin şebekeye bağlandığı noktadaki minimum kısa devre gücü ($SCMVA_{min}$) 7250 MVA'dır ve şebekeye bağlı başka bir fırın bulunmamaktadır. Bu durumda EAF'nin görünür gücü 60 MVA olduğuna göre:

$$\frac{SCMVA_{min}}{MVA_{EAF}} = \frac{7250\ MVA}{60\ MVA} = 120,83 \quad (3.2)$$

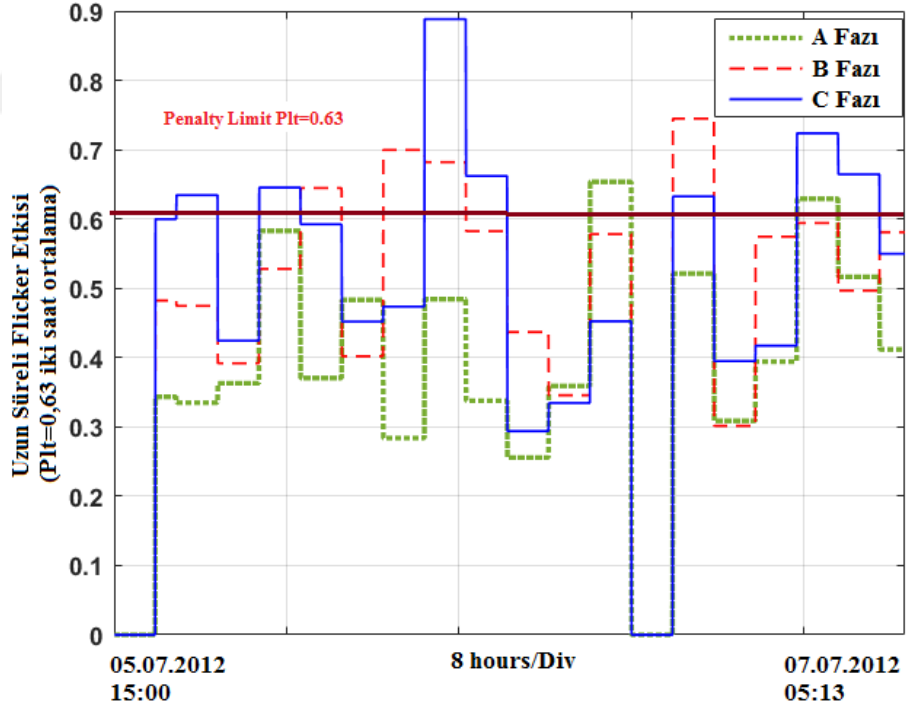
olmaktadır. Bu durumda EAF'lerin neden olduğu kırpışma etkisinin az olması beklenebilir.

Elektrik ark fırını besleyen 34,5 kV baradan bir ergitme süreci içerisinde ölçülen (yaklaşık 87 dakika) kısa süreli kırpışma şiddetinin (P_{st}) değerleri Şekil 3.12'deki gibidir. Uzun süreli kırpışma şiddeti iki saatlik periyotlar ile değerlendirildiği için 05.07.2012-07.07.2012 tarihleri arasında yaklaşık 36 saatlik ölçüm süresince elde edilen uzun süreli kırpışma (P_{lt}) değerleri Şekil 3.13'de sunulmuştur.

Ölçüm sonuçlarından görüldüğü gibi ortak bağlantı noktasındaki kısa devre gücünün 60 MVA EAF'nin kısa devre gücüne oranı 80-100'den daha büyük olmasına rağmen kırpışma etkisi görülmektedir. Mevcut durumda sistemde kısa süreli ve uzun süreli kırpışma etkisi arzu edilen sınır değerlerin üzerindedir ve sistemde kırpışma etkisi kaçınılmazdır.



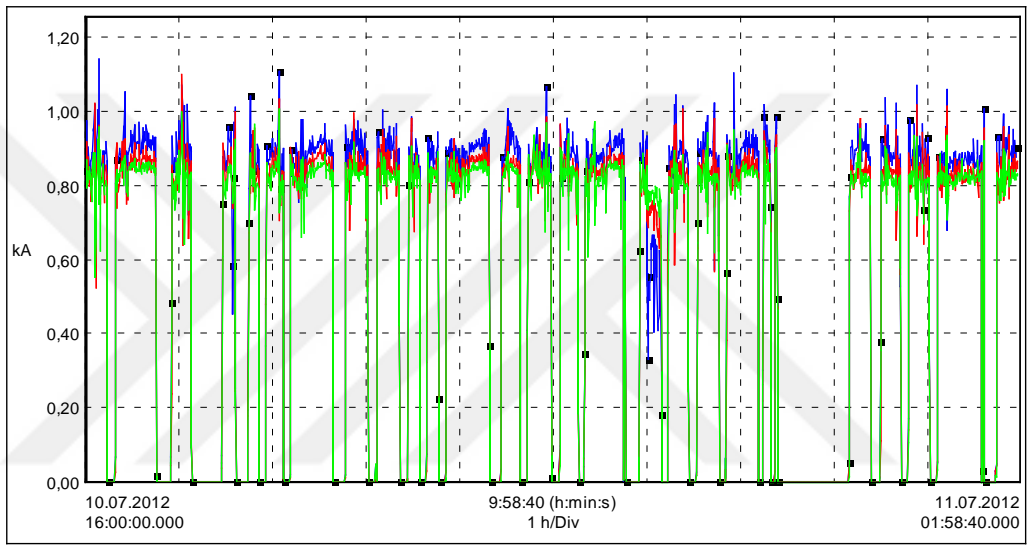
Şekil 3.12. 34,5 kV barada kısa süreli kırpışma etkisinin (P_{st}) değişimi.



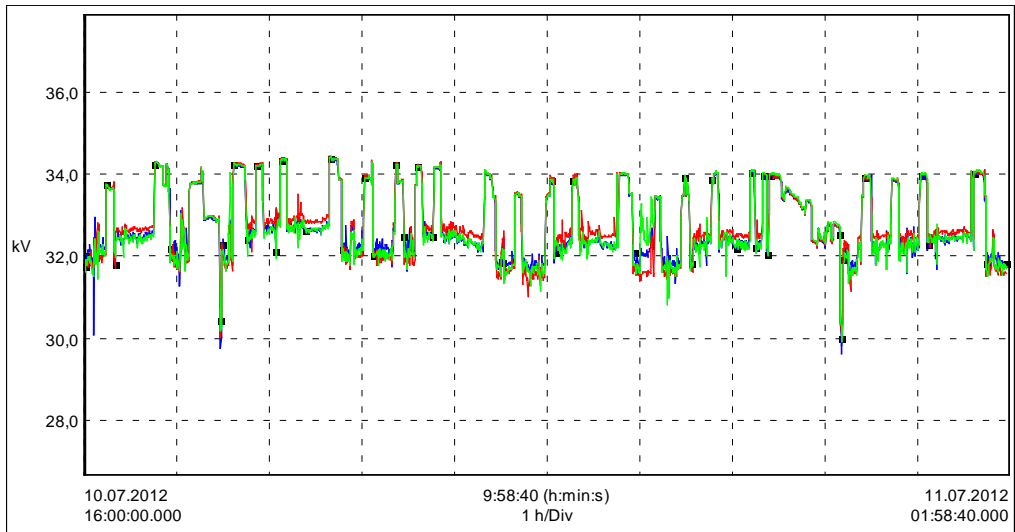
Şekil 3.13. 34,5 kV barada 05.07.2012-07.07.2012 tarihinde ve 2 saatlik ortalamalar ile yaklaşık 36 saatlik ölçüm süresinde ölçülen uzun süreli kırpışma şiddeti (P_{lt}) değişimi.

3.1.1.3. 34,5 kV barada akım ve gerilim dalgalanmaları

EAF sistemini besleyen TR 1 Transformatörünün 34,5 kV sekonder çıkışına HIOIKI 3197 güç kalitesi analizörü bağlanarak haftalık ve günlük deneysel ölçümler ile baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları kayıt altına alınmıştır. Ayrıca EAF'nin ergitme prosesinde oluşan şarj (C)-Sondaj (B), ergitme (E) ve arıtma (R) fazları olmak üzere dört farklı çalışma durumuna ait akım ve gerilim dalgalanmaları 12 çevrim ve 1024 Hz çözünürlük ile kaydedilmiştir. Deneysel verilerden elde edilen 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmalarının RMS değeri sırası ile Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de sunulmuştur.

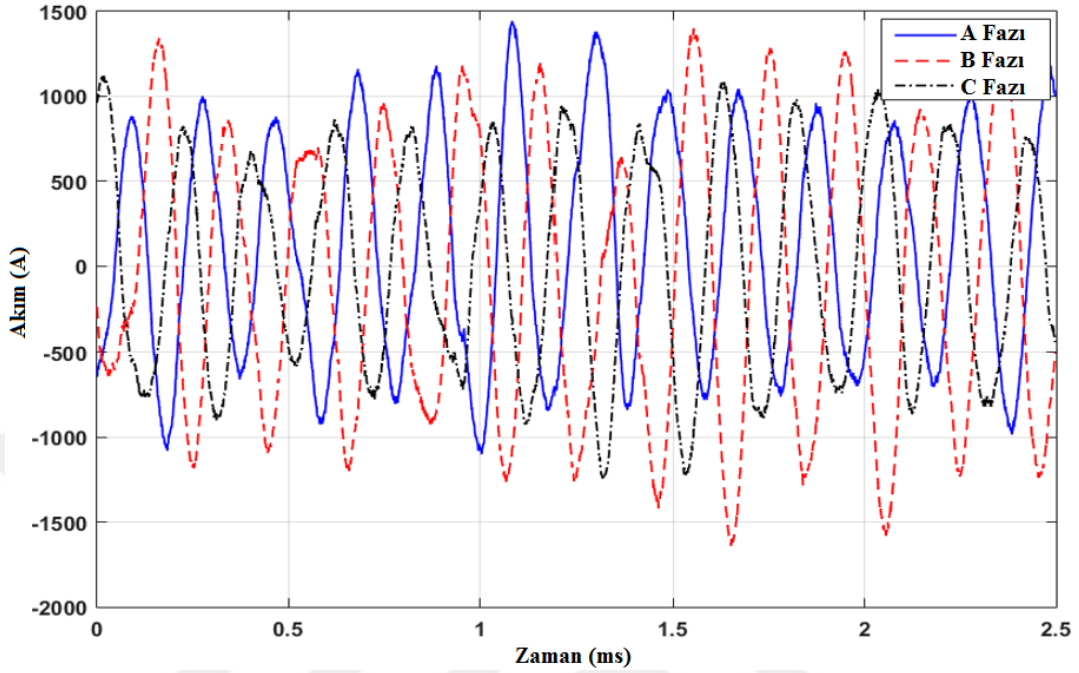


Şekil 3.14. EAF'yi besleyen 34,5 kV barada üç faz akım dalgalanmalarının RMS değeri.

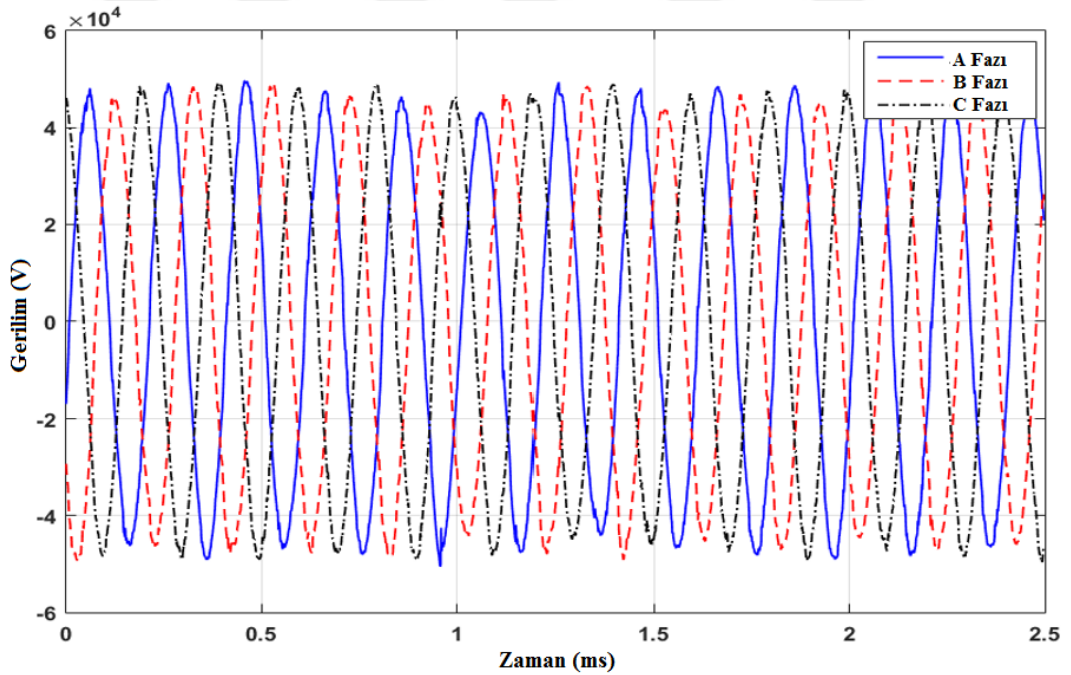


Şekil 3.15. EAF'yi besleyen 34,5 kV barada üç faz gerilim dalgalanmalarının RMS değeri.

1024 Hz örnekleme frekansı ile 12 çevrim ile 34,5 kV baradan ergitme prosesinde ölçülen üç faz akım ve gerilim dalga formları sırası ile şekil 3.17 ve Şekil 3.18'deki gibidir.

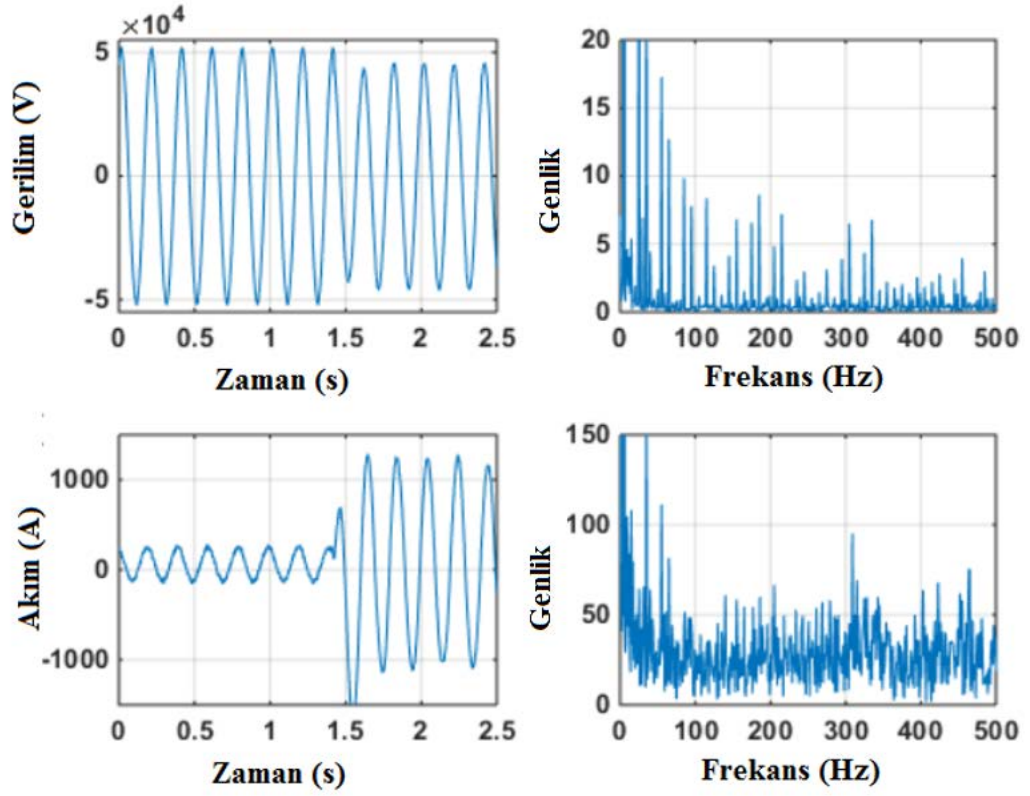


Şekil 3.16. 34,5 kV barada EAF'nin ergitme sürecinde ölçülen üç faz akım dalga formu değişimi.

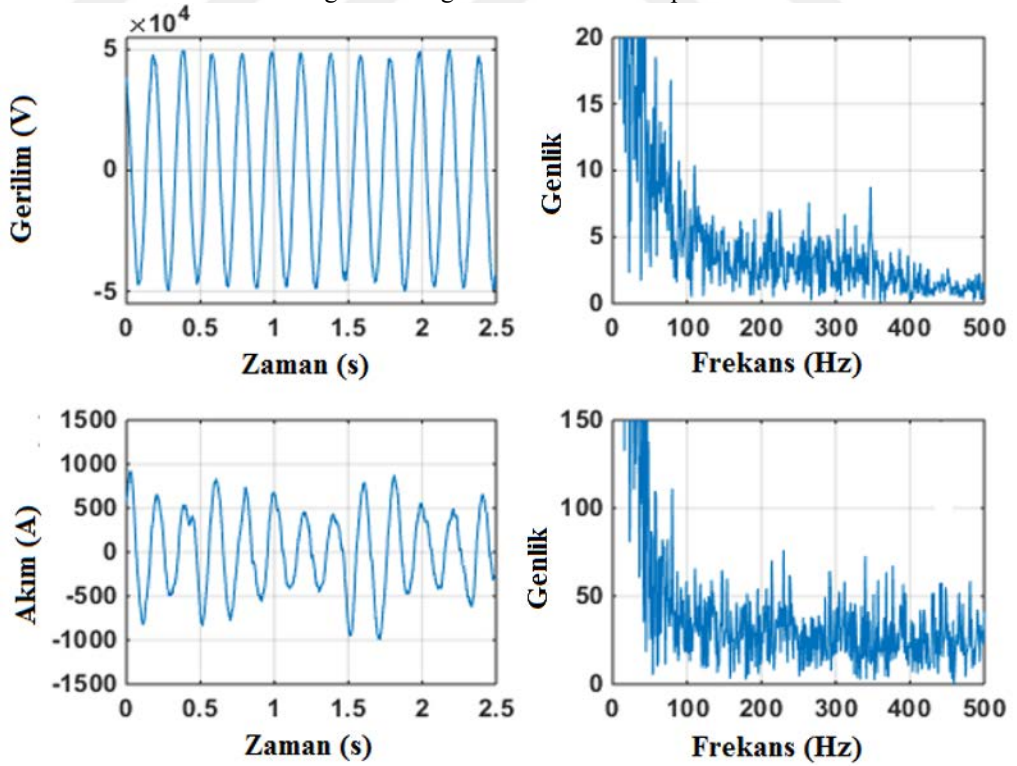


Şekil 3.17. 34,5 kV barada EAF'nin ergitme sürecinde ölçülen üç faz gerilim dalga formu değişimi.

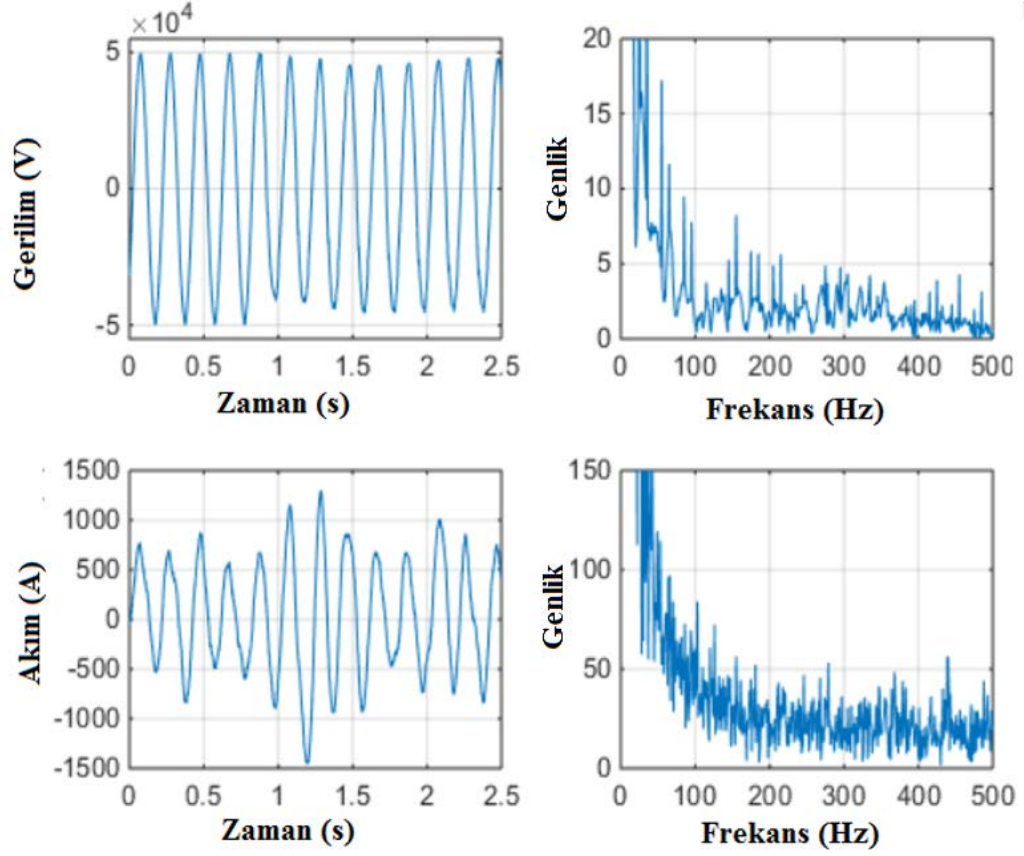
EAF'nin farklı çalışma şarj, sondaj, ergitme ve rafine sürecinde ölçülen akım ve gerilimin dalga formları ve bu dalga formlarından elde edile FFT spektrumları sırası ile Şekil 3.18, Şekil 3.19 ve Şekil 3.20'de gösterilmiştir.



Şekil 3.18. EAF'nin Şarj ve Sondaj süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.



Şekil 3.19. EAF'nin Ergitme süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.



Şekil 3.20. EAF'nin Rafine süresinde 34,5 kV baradaki akım ve gerilim dalgalanmaları ve akım ve gerilim dalgalanmalarının FFT spektrumu.

Şekillerden görüldüğü gibi en fazla harmonik etki sondaj periyodunda meydana gelmektedir. Rafine periyodunda ise akım ve gerilim dalgalanmaları sinüzoidal forma yakındır.

3.2. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Ölçüm sonuçları incelendiğinde, EAF yükünün bağlı olduğu 34,5 kV barada 21, 23, 24, 25, 27, 29 ve 30. Harmonikler dışında harmonik akımlarının sınır değerleri aştığı görülmektedir. Gerilim harmoniklerinde ise 2 ve 4. Harmoniklerin sınır değerlerin üzerinde olduğu ve 3. ve 6. Gerilim Harmoniklerinin zaman zaman sınır değerinin üzerine olduğu görülmektedir. Toplam harmonik bozulma değerlerinde ise akım ve gerilim harmonikleride sınır değerini aşmaktadır. Sistem enerji bakımından incelendiğinde %78 endüktiftir. Ayrıca kısa ve uzun süreli kırpışma değerleri sınır değerlerin üzerindedir ve ortak bağlantı noktasındaki kısa devre gücünün fırın transformatörünün gücüne oranı yüzden büyük olsa bile kırpışma etkisi görülebilmektedir.

4. 60 MVA EAF'DE AKIM VE GERİLİM DALGALANMALARININ OLASILIK YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

4.1. Olasılık Yöntemleri Kullanılarak EAF' larının Şebekelerde Gerilim ve Akım Kaynağı gibi İncelenmesi

Elektrik ark fırınlarındaki prosesler keyfi karakter taşımaktadırlar. Bu keyfi karakterler nedeniyle akım, EAF'nin çalışması durumunda sürekli olarak değişmektedir. EAF'lerde akımın değişiminin belirlenmesinde;

- Metal kırıntılarının eritilmesinde ark aralığında iyonlaşma ve buharlaşma;
- Sıcaklığın, metalin ve şurubun kimyasal özelliklerinin değişimi;
- Metal kırıntılarının yer değiştirmesi;
- Metalin ve şurubun hareketi;
- Erinti yüzeyinin girinti ve çıkıntılı olması nedeniyle elektrik alan şiddetinin değişimi;
- Elektro manyetik kuvvetlerin etkisi nedeniyle eriyen metalin hareketi;
- Elektrotların titreşimleri;
- Besleyici şebeke geriliminin değişimi;

gibi faktörler etkili olmaktadır. Göz önüne alınan bu faktörler her üç fazda da meydana gelir. Akımdaki dalgalanmalar gerilimde de dalgalanmalara neden olur. Akım dalgalanmalarının keyfi olmasından dolayı, gerilim dalgalanmaları da genliğe ve frekansa göre keyfi karakterli olmaktadır.

Elektrik ark fırınlarının akımına çok sayıda belirleyici etki olduğundan onun denklemi çok değişkenli bir fonksiyon şeklinde yazılmalıdır. Bu fonksiyonların mevcut matematiksel modellemeler ile tanımlanması çok zor olmakta veya birçok belirleyici faktör dikkate alındığında mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bu tip proseslerin incelenmesinde olasılık teorisi yöntemleri kullanılarak analizler gerçekleştirilmektedir.

Keyfi proseslerin olasılık yöntemleri ile analizi, ayrı ayrı fiziksel olayları göz önüne almadan büyük hacimde deneysel bilgiler ve fiziksel prosesler hakkındaki esas bilgilerin az sayıda karakteristik ile gösterilmesine olanak sağlamaktadır. Bu sayede karakteristik keyfi yük değişimine sahip EAF'lerdeki proseslerin analizine imkân sağlanmaktadır.

Değişken yüklü sistemlerin istatistik analiz yöntemleri kullanılarak araştırılması birçok bilim adamı tarafından önemli bir araştırma konusu olmuştur [99, 102, 109, 112, 113, 114, 115, 116]. Olasılık açısından EAF'lerin şebekeye etkisi [99, 109, 114]'de gösterilmiştir.

Bu bölümde Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş (SIDEMİR) tesisinde bulunan 60 MVA EAF'nin deneysel incelemelerinin sonuçları olasılık teoremi yöntemleri kullanılarak değerlendirilmesi hakkındaki analizler sunulmuştur.

4.1.1. EAF'lerde Akım Dalgalanmalarının Keyfi Prosesinin Türünün Belirlenmesi

EAF'lerde oluşan fiziksel proseslerin incelenmeleri için tüm bilgileri fırın akımındaki dalgalanmalar içermektedir. Kısacası diğer tüm proseslerin oluşmasının temel nedeni akımda meydana gelen ani değişimlerdir.

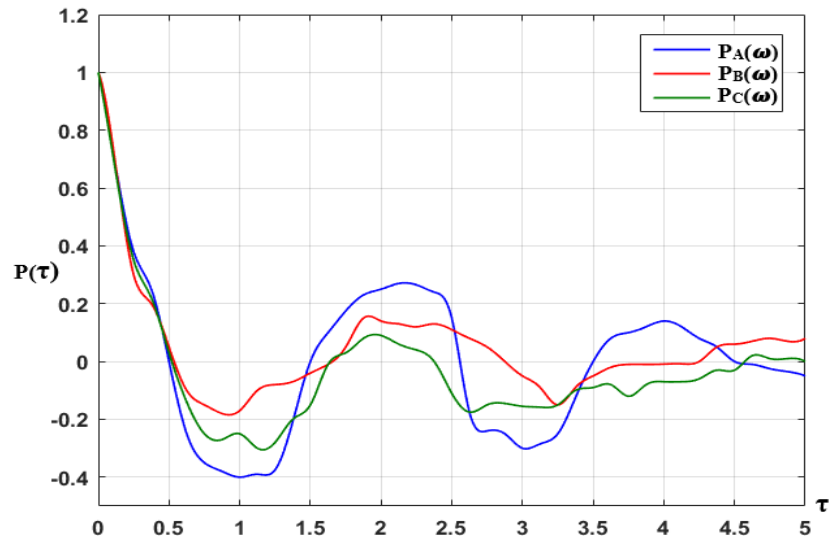
EAF'nin neden olduğu güç kalitesi problemleri Bölüm 3'de belirtildiği gibi HIOKI 3197 ve Chauvin Aurnox (CA) 8332 güç kalitesi analizörleri yardımı ile kayıt altına alınmıştır. Bu cihazlar yardımı ile EAF'nin faz akımları, faz gerilimleri, aktif güç, reaktif güç ve görünür güç gibi parametreleri fırının farklı çalışma rejimleri için 20 s, 1 dakika ve 5 dakikalık ortalamalar ile deneysel olarak ölçülmüştür.

Bölüm 3'de sunulan deneysel eğrilerden görüldüğü gibi en kuvvetli ve hızlı dalgalanmalar metal kırıntılarının ergitilmeye başladığı ilk anlarda oluşmaktadır. Fazlarda görülen dalgalanmaların birbirinden farklı olduğu da açıkça görülmektedir. Fazlardaki dalgalanmaların birbirinden farklı olması yük simetrisini bozmaktadır ve tek fazlı akım darbelerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. EAF'lerin ergitme prosesi sırası ile ergitmenin başlangıcı (Şarj), elektrotların çevrelerinde oluşan kuyucukların eritilmesi (Sondaj), kuyucukların açılması (ergitme) ve ergitmenin bitiş prosesi (rafine) olmak üzere dört temel kısma ayrılır. Deneysel sonuçların analizi bu dört karakteristiğin incelenmesine olanak sağlamaktadır. Ergitmenin başlangıcında (ilk 10-15 dakika) ve ergitmenin sonunda son (15-20 dakika) EAF'ler düşük güçlerde ve düşük gerilimlerde çalışmaktadır. EAF'ler kuyucukların eritilmesi ve kuyucukların açılmasında maksimum güç ve maksimum gerilimlerde çalıştırılmaktadır. Bu kısımlarda şebekede akım ve gerilim genlikleri en yüksek seviyeye ulaşır.

Günümüzde EAF'lerde hızlı ergitme prosesleri kullanılmaktadır. Hızlı ergitme prosesinde maksimum gerilimle prosesin başlanması sağlanır. Bu nedenle de maksimum akımlar ve gerilimler ergitme işleminin başlangıcında ortaya çıkmaktadır.

Ergitme prosesinde eritilen metalin özellikleri ve arkın yanma kuralları, elektrotlardaki gücün ve gerilimin aşamalarla değişimi, fırında komutasyon işlemlerinin yapımı ve eritilen metalin erintinin içine uçması sonucunda oluşan geçici rejimler akım ve gerilimin değişim karakteristiklerinin stokastik olmasına neden olmaktadır. Elektrik ark fırınının akım ve geriliminin stokastik olması EAF'lerin şebekeye olan etkilerinin analizini zorlaştırmaktadır. Eritilen metalin özelliğinin aniden değişmediği göz önüne alındığında, eritme prosesinin 2-5 dakika süresinde kısımlara ayırarak bu kısımlarda akım ve gerilimin ortalama değerinin fazla dalgalanmadığı düşünülür. Eritmenin karakteristik kısımlarında, farklı eritmelerdeki fiziksel prosesler birbirine benzer olmaktadır. Bu benzerlik otomatik kontrol sistemlerinin karakteristiklerinin stabil olması, çok sayıda eritme fırınının iç kaplamasının özelliklerinin değişmemesi ve her marka çelik için metalin türünün seçilmesi sonucunda mümkün olmaktadır. Yukarıdaki göz önüne alınan açıklamalara göre EAF'lerin akımlarının stokastik dalgalanmaları benzer özelliklere sahiptir.

Şekil 4.1'de incelenen ark fırınının fazlarının korelasyon fonksiyonları verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi tüm eğriler sönen eğrilerdir ki, buda matematiksel benzerliğin yeterli kurallarından biridir.



Şekil 4.1. 60 MVA EAF'nin eritme zamanında faz akımlarının korelasyon fonksiyonları.

Keyfi proseslerin ve onların benzerliği deney zamanı ve matematiksel olarak incelenmiştir. Benzerlik özelliği istatistiksel karakteristiklerin denemede belirlenmesine olanak sağlamaktadır. Akımın keyfi dalgalanma prosesini karakterize eden esas istatistiksel karakteristikler ve parametreler olarak: ortalama akım değeri, akım dalgalanmalarının dispersiyonu, düzeltme fonksiyonları, spektrum sıklığı, akım

dalgalanmalarının yayılma kuralı, farklı fazların akımlarının arasındaki karşılıklı korelasyon fonksiyonları tanımlanmaktadır.

Ergitme prosesinde istatistiksel örneklerin ergitmenin başlangıcında, yüksek gerilim durumundaki ergitmede, elektrotlar etrafındaki kuyuların ergitilmesinin ortalarında, kuyuların ergitilmesinin sonunda, ergitilen metal kısımlarının uçurulmasında, kuyuların yok olmasında ve ergitmenin sonuçlanmasında alınması önerilmektedir [99, 102, 109, 110, 112].

EAF'lerin faz akımlarının dalgalanması her bir fazda çok sayıda keyfi değişimden ve komşu fazlardaki dalgalanmaların etkisinden oluşur. EAF'lerin kontrol sistemlerinin normal çalışması durumunda komşu fazlardaki dalgalanmaların etkisi fazla olmamaktadır.

Merkez sınır teoremine göre çok sayıda bağımsız büyüklüğün yayılma kuralı normal yayılma kuralına yakındır. Bu nedenle EAF'lerin ayrı ayrı fazlarındaki keyfi akım dalgalanmalarının normal paylaşımına sahip olduğu kabul edilir.

4.1.2. Orta İstatistiksel Akımın ve Korelasyon Fonksiyonun Belirlenmesi

Ortalama akımın (I_{ort}) ve korelasyon fonksiyonu R_i^* benzerlik teoremine göre aşağıda gösterildiği gibi belirlenmelidir:

$$I_{ort} = m_i^* = \frac{1}{T} \int_0^T i(t). dt \quad (4.1)$$

$$R_i^*(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [i(t) - I_{ort}][i(t + \tau) - I_{ort}]. dt \quad (4.2)$$

Burada; $i(t)$ akım kullanımının kesintisiz yazılımı; T reelleştirme zamanı, τ korelasyon fonksiyonunun hesaplanmasındaki kayma, m_i^* matematiksel beklentidir.

Akım dalgalanmalarının dispersiyonu korelasyon fonksiyonunun $\tau=0$ 'daki değerine eşittir ve aşağıdaki matematiksel ifade ile tanımlanır:

$$D_i^* = \sigma_T^{*2} = R_i^*(0) = \frac{1}{T} \int_0^T [i(t) - I_{ort}]^2. dt \quad (4.3)$$

Bu ifadede; σ orta kuadratik sapmadır. Reelleştirmenin istenen uzunluğu istatistik değerlendirmenin hesaplama hatasının az olması ile belirlenmektedir. Matematiksel beklentinin ve korelasyon fonksiyonunun Reelleştirilmesinde uzunluğun belirlenmesi için farklı yöntemler tanımlanmaktadır [100, 101, 103, 104, 108, 111]. İstatistiksel karakteristiğin hassasiyetinin derecesi gibi genellikle matematiksel beklentinin ortakuadratik sapmanın gerçek değerden sapma büyüklüğü alınmalıdır.

Reelleştirilmenin uzunluğu (maksimumu aşmamak şartı ile) aşağıdaki ifade ile belirlenebilir:

$$T = \frac{2}{(n_0 \eta_D^2)} \quad (4.4)$$

Burada: n_0 birim zamandaki sıfırların sayısıdır (1/s);

$$\eta_D = \frac{\sigma_D}{D_i} = \frac{\sigma_R(0)}{D_i} - \tau = 0 \quad (4.5)$$

η_D korelasyon fonksiyonunun hesaplanmasında oransal ortakuadratik hata ve D_i akım dalgalanmalarının dispersiyonudur. η_D parametresi genellikle 0,05-0,10 (%5-%10) aralığında alınmaktadır. Sıfırların ortalama değeri deneyler sonucunda kaydedilen prosesin istenilen kısmında, 20-70 sıfır sayısına sahip aralığı alınmaktadır. İncelenen EAF-60 fırınında kuyuların eritilmesi prosesinde $i(t)$ ' nin reelleştirilme zaman sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4. 1. EAF' larda $i(t)$ reelleştirme zaman sonuçları.

Fırın Türü	Birim aralığın uzunluğu T_0, S	n aralığındaki sıfırların sayısı	n_0 Sıfırların ortalama değerleri (1/s)	Reelleştirme uzunluğu (T(s))		
				$\eta_D = 0,05$	$\eta_D = 0,085$	$\eta_D = 0,10$
EAF-60	45	77	1,71	468	200	117
EAF-20	32	60	1,88	426	189	106
EAF-200	42	66	1,57	509	226	127

EAF-20 ve EAF-200 fırınlarının reelleştirme zamanlarının karşılaştırmaları [107]'de sunulmuştur ve örnekleme zamanı aşağıdaki gibi belirlenir [103, 104]:

$$\Delta t \leq \frac{2}{\pi \cdot \eta_0} \sqrt{2x\eta_p} \quad (4.6)$$

Burada, η_p $i(t)$ prosesinin örneklenmesinde korelasyon fonksiyonunun maksimum nisbi hatasıdır. $\eta_p = 0,10$ kabul edilirse (denklem (4.6)) $\Delta t=0,166$ saniye alınmaktadır. Reelleştirme uzunluğunu 180 saniye alınırsa, örnekleme nokta sayısı;

$$n = \frac{T}{\Delta t} = \frac{180}{0,166} = 1084 \quad (4.7)$$

alınır. (4.1) entegralinin hesaplanmasında dikdörtgenler yöntemi kullanılırsa, ortaistatistiksel akımın ifadesi alınır;

$$\bar{I} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n i(t_i) \quad (4.8)$$

olarak tanımlanır. Analoji olarak (4.10) ifadesinde τ 'ya göre integralenmesinde;

$$\frac{T}{n} = \Delta t; 2 \cdot \frac{T}{n} = 2\Delta t; \dots \dots \dots m \frac{T}{n} = m\Delta t \quad (4.9)$$

değeri veriliyorsa ve entegralin hesaplanmasında dikdörtgenler formülü kullanıldığında istatistiksel otokorolasyon fonksiyonu için;

$$R_{L(\tau)}^* = R_{i(m\Delta t)} = \frac{1}{n-m} \sum_{i=1}^{n-m} (i_i - \bar{I})(i_{i+m} - \bar{I}) \quad (4.10)$$

ifadesi tanımlanabilir ve $m=0$ ($\tau = 0$) değerinde (4.10) ifadesi dispersiyonu vermektedir. Bu durumda dispersiyon ifadesi:

$$D_i^* = \sigma_i^{*2} = R_i^*(0) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (i_i - \bar{I})^2 \quad (4.11)$$

şeklinde yazılabilir. Şekil 4.11'de EAF-60 fırınında kuyuların eritilmesinde faz akımlarının dalgalanmalarının korelasyon fonksiyonları verilmektedir. Normalleştirilmiş otokorolasyon fonksiyonu (4.10) ifadesinin (4.11) ifadesine bölünmesi ile elde edilmektedir.

$$\rho_{i(\tau)}^* = \rho_i^*(m\Delta t) = \frac{1}{(n-m) \cdot D_i^*} \sum_{i=1}^{n-m} (i_i - \bar{I}) \cdot (i_{i+m} - \bar{I}) \quad (4.12)$$

Korelasyon fonksiyonlarının belirlenmesinde genellikle $m_{\max} \leq (0,2-0,25) \cdot n$ alınmaktadır.

Korelasyon fonksiyonları (4.8)-(4.12) algoritmalarının hesaplanması için bilgisayar programları [101]'de verilmiştir. EAF-60 için $\bar{I}, D_i^*, \sigma_i^*$ için alınmış hesaplama sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Şekil 4.2 ve Tablo 4.2'de görülüyor ki eğrilerin;

$$\rho_{i(\tau)} = e^{-\alpha[\tau]} \cdot \cos \omega_0 t \quad (4.13)$$

ifadesi ile ortalaması alınabilmektedir. Burada, α korelasyonun sönme katsayısı (1/s), ω_0 taşıyıcı frekans (1/s) işaretlenmiştir. α ve ω_0 in belirlenmesinde exponansiyel kosinüs fonksiyonlarının büyük hacimli dönüşümlerinin yapılmaması nedeniyle, küçük kareler metodunun seri yaklaşımlar metodu ile birlikte kullanım yöntemi kullanılmıştır ve hesaplama sonuçları Tablo 4.2'de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. İstatistiksel parametrelerin hesaplama sonuçları.

Fırın Türü	Eğritme Periyotlarının kısımları	Fazlar	İstatistiksel Parametreler								Yayıma Konumunun Belirlenmesi		
			I (A)	$\frac{I}{I_n}$ (%)	D_i^* (A ²)	σ_i^* (A)	$\frac{\sigma_i^*}{I_n}$ (%)	α (1/s)	ω_0 (1/s)	F (Hz)	Δ_{mak}	λ	Yayıma konumu
EAF - 60	Birinci kuyuların eritilmesi	A	256	133.3	1882.7	43.39	22.6	1.52	2.71	0.43	0.1105	0.1917	Normal
		B	247	128.6	1983.8	44.54	23.2	1.25	1.85	0.29	0.0817	0.6124	Normal
		C	225	117.2	1549.2	39.36	20.5	2.15	3.21	0.51	0.0922	0.4997	Normal
	Kuyuların açılması	A	232	120.8	1579.3	39.74	20.7	2.22	4.28	0.68	0.1135	0.4135	Normal
		B	220	114.6	1444.8	38.01	19.8	2.01	3.85	0.61	0.1027	0.4318	Normal
		C	209	108.8	1656.5	40.7	21.2	2.95	4.12	0.65	0.1102	0.3825	Normal
	Kırıntıların eklenmesi	A	209.9	109.3	1929	33.6	17.5	3.15	0.28	0.04	0.0865	0.5260	Normal
		B	193.3	100.7	1358.7	36.86	19.2	2.91	0.31	0.05	0.0627	0.4737	Normal
		C	199.8	101.1	1719.8	41.47	21.6	3.22	0.30	0.05	0.1215	0.5315	Normal
	Eritme bitimi	A	202	105.2	1040	32.25	16.8	3.10	1.27	0.20	0.1208	0.6107	Normal
		B	192	100	897	29.25	15.6	4.26	1.33	0.21	0.0729	0.5918	Normal
		C	185	96.35	1234.1	35.13	18.3	3.92	1.21	0.19	0.0982	0.4516	Normal

4.1.3. Elektrik Ark Fırınlarında Keyfi Dalgalanmaların Spektrumu

$i(t)$ 'nin keyfi dalgalanmalarının esas karakteristiklerinden biri dalgalanmanın frekans değeri ile karakterize olan spektrumdur.

Frekans spektrumunun belirlenmesinde Fourier dönüşümü kullanılmaktadır.

$$S_i^*(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_i^*(\tau) \cdot e^{-j\omega\tau} \cdot d\tau \quad (4.14)$$

$R_i^*(\tau)$ çift fonksiyon olmasından dolayı;

$$S_i(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} R_i^*(\tau) \cdot \cos(\omega\tau) \cdot d\tau \quad (4.15)$$

olur. Burada ω açısal frekans ifadesidir. $S_i(\omega)$ spektrum sıklığı ve $R_i(\omega)$ korelasyon fonksiyonudur.

Hesaplamaların kolaylaştırılması için (4.15) ifadesindeki entegral, toplama işlemine dönüştürülür. Burada örnekleme zamanı yukarıda gösterildiği gibi $\Delta t = \frac{T}{n} =$

$\frac{180}{1084} = 0,166$ saniye alındığında aşağıdaki ifadesi tanımlanır:

$$S_i^*(\omega) = \frac{\Delta t}{m} \sum_{m=0}^{\infty} R_i^*(m\Delta t) \cdot \cos\omega_i \cdot m\Delta t \quad (4.16)$$

bu ifadede;

$$\omega_i = \frac{2\pi\tau}{(m_{mak}\Delta t)}, \quad i = 0,1,2, \dots \dots m_{mak}$$

zaman kaydırması $\tau(\omega_{mak}\Delta t)$ arttırıldığında spektrum sıklığının hatasının azaltılması için korelasyon fonksiyonunun kesiminin Bartletta fonksiyonuna çarpımı kullanılmıştır. Bu durumda $S_i(\omega_i)$ ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$S_i(\omega_i) = \frac{\Delta t}{\pi} \sum_{w=0}^{\infty} R_i^*(kes)(\omega\Delta t) \cdot \xi_m \cos\omega_i \cdot m\Delta t \quad (4.17)$$

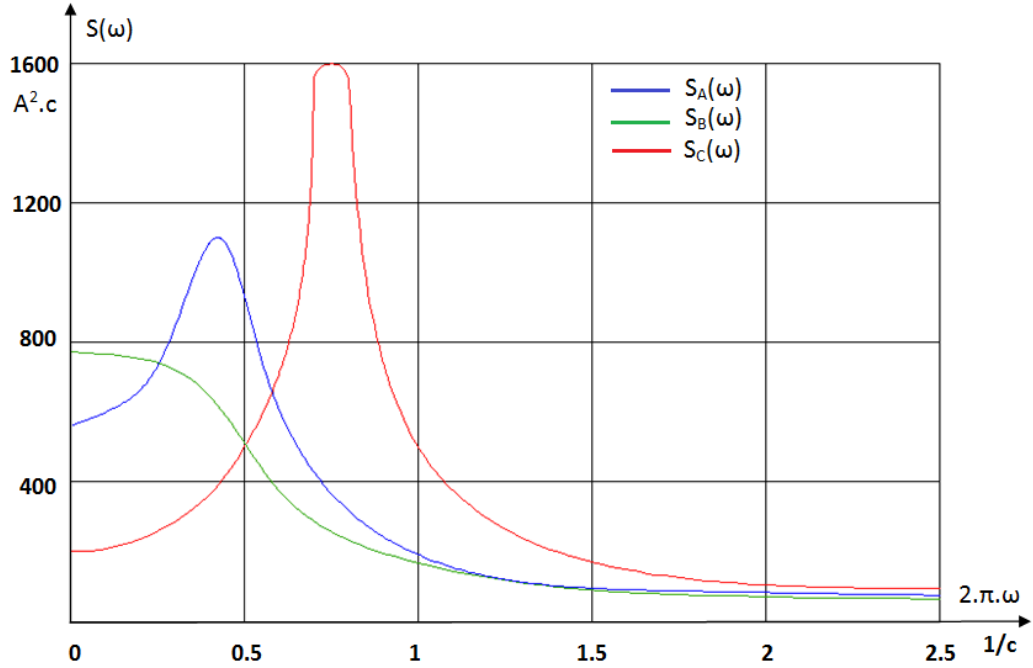
Burada; $R_i^*(kes)(\tau)$ kesilmiş korelasyon fonksiyonudur.

$$R_i^*(kes)(\tau) = \begin{cases} R_i^*(\tau) , & \text{eğer } \tau < m_{kes} \\ 0 & , \text{ eğer } \tau \geq m_{kes} \end{cases} \quad (4.18)$$

(4.18) ifadesinde, m_{kes} kesim apsisi ($m_{kes} \leq m_{mak}$), ξ_m Bartletta fonksiyonudur:

$$\xi_m = \begin{cases} 1 - \frac{m}{m_{kes}} ; \text{ eğer} & m < m_{kes} \\ 0 & ; \text{ eğer} & m \geq m_{kes} \end{cases}$$

ve (4.17) algoritmasına göre bilgisayar analizleri kullanılarak akım dalgalanmalarının spektral sıklığı Şekil 4.2’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Kuyuların eritilmesinde A, B, ve C fazlarındaki akım dalgalanmalarının spektral sıklığı.

Exponansiyel kosinüs korelasyon fonksiyonlarının kullanımında deneysel alınmış spektrum sıklığının yaklaşımı aşağıdaki ifadesi ile tanımlanmaktadır.

$$S_i(\omega) = \frac{D_i^* \alpha}{\pi} \cdot \frac{(\alpha^2 + \omega_0^2 + \omega^2)}{\omega^4 + 2 \cdot \omega^2(\alpha^2 - \omega_0^2) + (\alpha^2 + \omega_0^2)^2} \quad (4.19)$$

Bu ifadede, D_i^* akım dalgalanmalarının dispersiyon değerleri α ve ω_0 korelasyon fonksiyonlarının appksimasyonunda aynı anda kullanılan parametrelerdir.

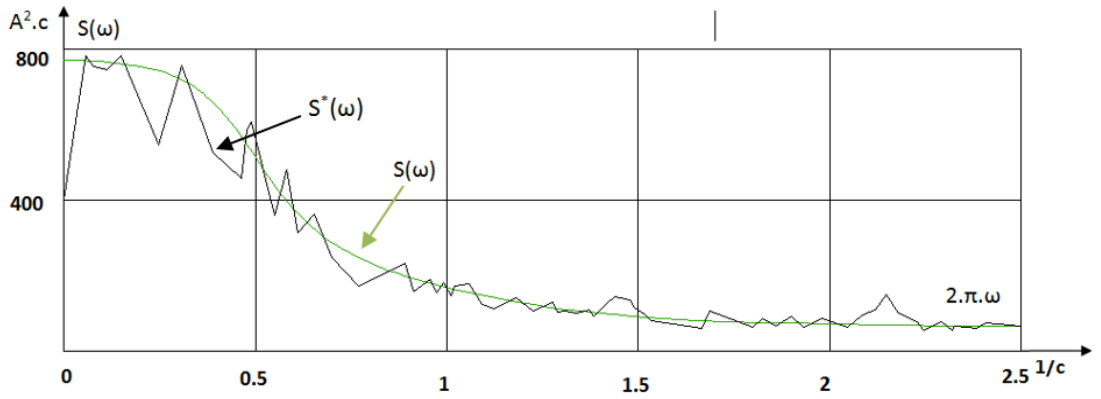
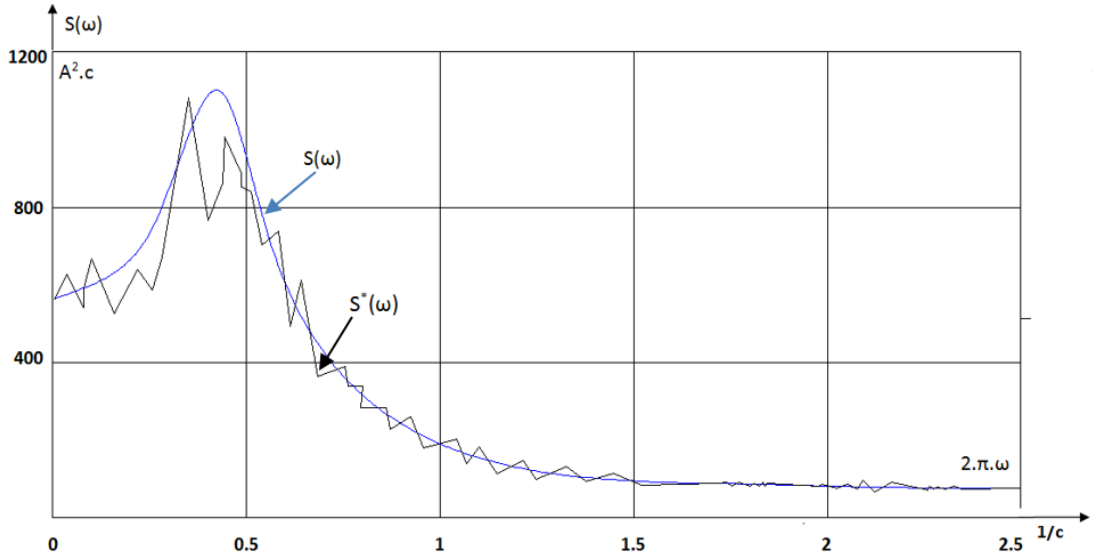
Tablo 4.2'den görüldüğü gibi eğritme anında birçok durumda aşağıdaki ifade geçerlidir.

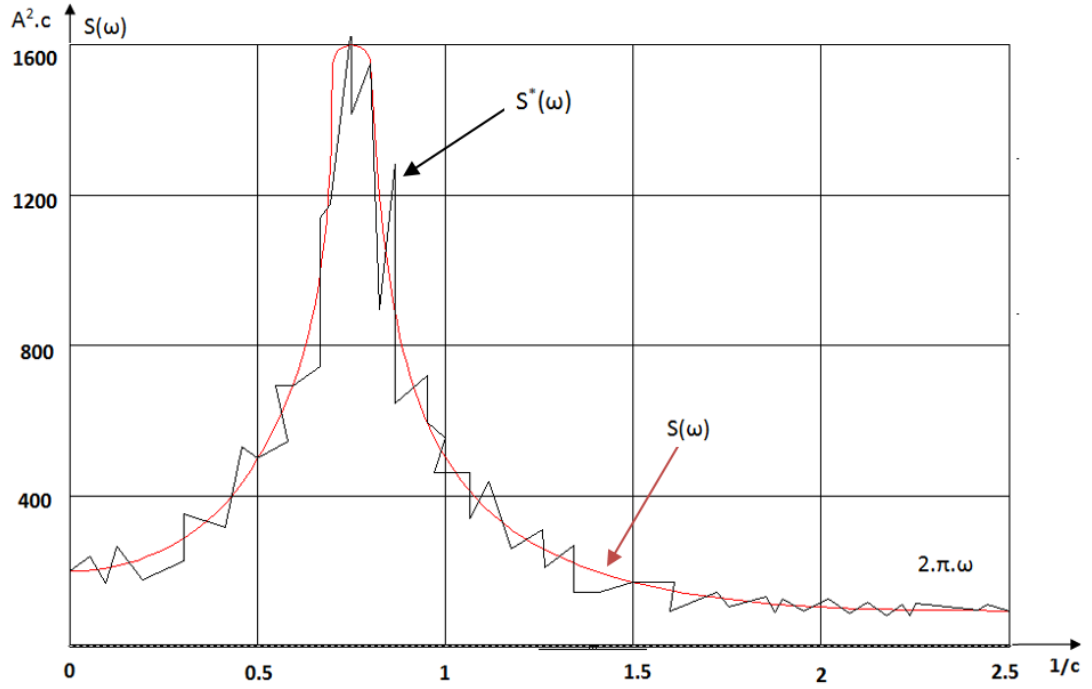
$$\frac{\alpha}{\omega_0} < 1 \quad (4.20)$$

Yani $i(t)$ olasılığı taşıyıcı frekansta dar bantlıdır. Dar bantlı proseslerin yaklaşımı daha basit şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$S_i(\omega) \approx \frac{D_i^*}{2\pi} \cdot \frac{\alpha}{\alpha^2 + (\omega - \omega_0)^2} \quad (4.21)$$

Şekil 4.3'de aproksimasyon sonuçlarının deneme sonuçları ile örtüştüğü görülmektedir.





Şekil 4.3. EAF-60 akım fazları dalgalanmalarının deneysel spektral sıklıklarının yaklaşımı.

4.1.4. Akım Dalgalanmalarının Yayılımının Olasılık Kuramının Belirlenmesi

$i(t)$ kesilmez keyfi prosesin örneklemeinden alınan dijital seriye, keyfi değerlerin toplanması gibi bakılabilir. Yayılma kuralının belirlenmesi için bağımsız keyfi büyüklüklerden seçilmiş kümelemeleri oluşturulmalıdır. Böyle bir kümenin oluşturulmasında minimal örnekleme zamanı, korelasyon zamanı τ_k 'ya eşit olmalıdır.

Dar bantlı keyfi prosesler için korelasyon zamanı yeterli hassaslıkla aşağıdaki ifadesi ile tanımlanabilir.

$$\tau_k = \frac{1}{\alpha} \quad (4.22)$$

Tablo 4.2'den $\alpha=1,11-4,18$ aralığında değiştiği görülmektedir. Bu durumda, $\tau_k \approx 0,24 - 0,9$ aralığında alınmalıdır.

$T=180s$ çalışma süresinde alınmış τ_k değerlerinde bağımsız nokta sayısı;

$$n_{mak} = \frac{T}{\tau_k} = 200 - 750 \quad (4.23)$$

aralığında olmaktadır. İstatistiksel yayılım fonksiyonunun istenilen hassaslıkta hesaplanması için gereken nokta sayısı aşağıda sunulan ifade ile belirlenir:

$$n = \frac{1}{c \cdot \eta} \quad (4.24)$$

bu ifadede; η paylaşım fonksiyonunun nisbi hatası, c ise 0,5-2 aralığında değişen katsayıdır. Tablo 4.3'de c ve η 'nin farklı değerleri hesaplanmış ve n 'nin değerleri gösterilmiştir.

Tablo 4. 3. Paylaşım fonksiyonunun oransal hatası

η	c			
	0,5	1	1,5	2
0,01	200	100	67	50
0,02	100	50	33	25
0,05	40	20	13	10
0,1	20	10	7	5

Yapılan incelemelerde istatistiksel parametreler ve korelasyon fonksiyonları için seçilmiş $I(t)=180s$ gerçekleştirme zamanı, yayılma kanununun yaklaşık olarak normale yakın olması içinde geçerlidir.

Analizi basitleştirmek için prosesin örnekleme $i(t)=40$ seçilmiştir. Toplum hacminin seçilen değerinde hesaplama hatası ortalama %10'dan büyük olmamaktadır (Bkz. Tablo 4.3).

Yayılmının istatistiksel fonksiyonu ise aşağıdaki ifade ile belirlenebilir:

$$F^*(I_i) = \frac{1}{n_i} \quad (4.25)$$

Burada; n_i , $I < I_i$ olan noktaların sayısıdır. Yaklaşım fonksiyonu gibi parametreler $m=I$ ve $\sigma_I = \sigma_I^*$ olan normal yayılım fonksiyonu seçilmiştir.

$$F(i) = \frac{1}{\sigma_i^* \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^1 e^{-\frac{(I-i)^2}{2\sigma_i^{*2}}} \cdot di \quad (4.26)$$

Deney ve teorik yayılımların yakınlık derecesi Kolmogorov kriterine göre belirlenmiştir. Yaygın olarak kullanılan yöntemle göre $F(I_i)$ istatistiksel yayılım fonksiyonunun tüm noktalar için farkın mutlak değeri bulunmaktadır,

$$\Delta = [F^*(I_i) - F(I_i)]$$

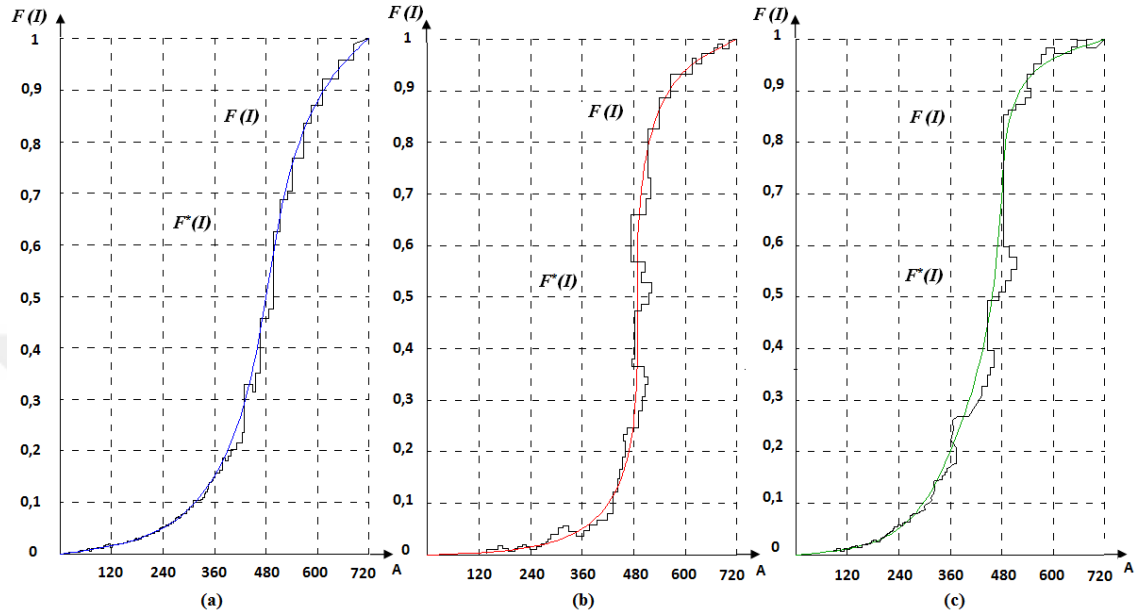
q değerlilik katsayısına göre $F(I_i)$ ve $F^*(I_i)$ ' in değerlerinin uygun olması için aşağıdaki kural karşılanmalıdır.

$$\Delta_{mak} \cdot \sqrt{n} \leq \lambda_{1-q} \quad (4.27)$$

burada; $\Delta_{mak} = [F^*(I_i) - F(I_i)]_{mak}$, n alınmış toplumun hacmi; λ_{1-q} q değerine denk gelen deneme ve teorik değerlerinin sınır farklarıdır. Elektrotekniksel hesaplamalarda

değerlilik katsayısı genellikle %5 alınmaktadır. Bu büyüklüğe denk gelen $\lambda_{i-q}=1,36$ olmaktadır.

Tablo 4.2’de farklı eğritme momentlerinde EAF-60 için akım dalgalanmalarının yayılımının normal olup olmamasının inceleme sonuçları verilmiştir. Şekil 4.4’de ise yayılımının deneysel ve teorik eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.4. Kuyuların eritilmesi zamanı fazların akım dalgalanmalarının istatistiksel ve teorik yayılımı, a) A Fazı, b) B Fazı, c) C Fazı.

Literatürden ve gerçekleştirilen analiz sonuçlarından akım dalgalanmalarının yayılımı 0,95 olasılığı ile normale yakın olduğu görülmektedir. Akım dalgalanmalarının yayılımının normalden farklılığı kuyuların uçulması zamanı oluşan kısa devrelerde ve diğer geçici durumlarda olabilmektedir. Çalışma zamanında oluşan kısa devreler dalgalanma prosesinin tümüne etki göstermektedir. Göz önüne alınmalıdır ki bu durumlarda akım dalgalanmalarının dağılımları normale yakındır.

4.1.5. EAF-60 Fırınının Ayrı-Ayrı Faz Akımlarının Karşılıklı Korelasyon Fonksiyonları

Karşılıklı korelasyon fonksiyonları ayrı-ayrı faz akımları arasındaki ilişkiyi belirlemektedir ve EAF çalıştığında şebekedeki hat gerilimlerinin dalgalanmalarını incelemeye imkan sağlamaktadır. İki kesilmez prosesin karşılıklı korelasyon fonksiyonu $I_x(t)$ ve $I_y(t)$ arasındaki ilişki aşağıdaki ifadeler ile tanımlanmaktadır;

$$R_{xy}^*(\tau) = \frac{1}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} [I_x(t) - \bar{I}_x] [I_y(t + \tau) - \bar{I}_y]. dt \quad (\tau > 0 \text{ için}) \quad (4.28)$$

$$R_{xy}^*(-\tau) = \frac{1}{T-\tau} \int_0^{T-\tau} [I_y(t) - \bar{I}_y] [I_x(t+\tau) - \bar{I}_x]. dt \quad (\tau \leq 0 \text{ için}) \quad (4.29)$$

Kesilemez $I_x(t)$ ve $I_y(t)$ fonksiyonları keyfi örneklenmiş fonksiyonlara dönüştürüldüklerinde, ilişkide olan korelasyon fonksiyonları ise aşağıda sunulan ifadeler ile hesaplanmaktadır;

$$R_{xy}^*(m\Delta\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{n=1}^{n-m} (I_{xi} - \bar{I}_x)(I_{y,i+m} - \bar{I}_y) (\tau > 0 \text{ için}) \quad (4.30)$$

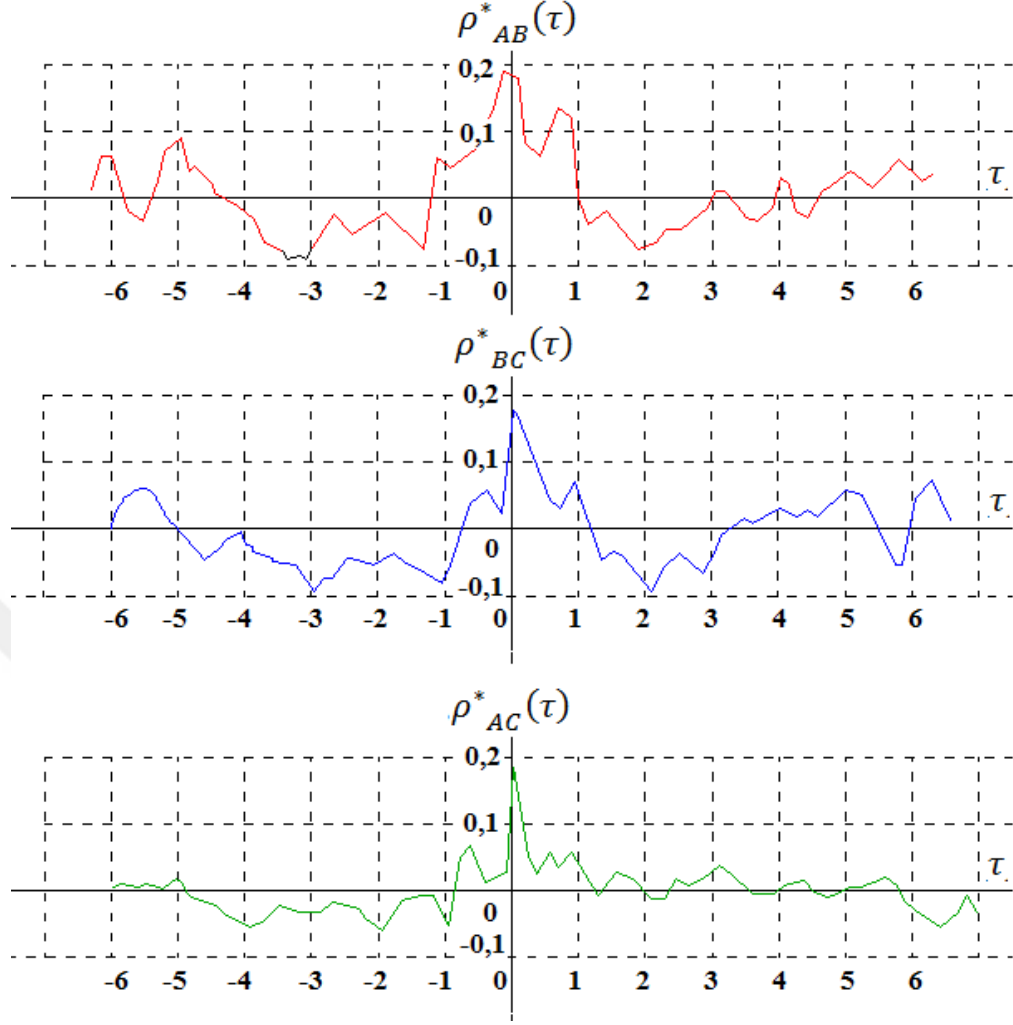
$$R_{xy}^*(-m\Delta\tau) = \frac{1}{n-m} \sum_{n=1}^{n-m} (I_{yi} - \bar{I}_y)(I_{x,i+m} - \bar{I}_x) (\tau < 0 \text{ için}) \quad (4.31)$$

Normalleştirilmiş ilişkili fonksiyon değerleri ise aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\rho_{x,y}(\tau) = \frac{R_{x,y}^*(\tau)}{\sigma_{Ix}^* \cdot \sigma_{Iy}^*} (\tau > 0 \text{ için}) \quad (4.32)$$

$$\rho_{x,y}^*(-\tau) = \frac{R_{x,y}^*(\tau)}{\sigma_{Ix}^* \cdot \sigma_{Iy}^*} (\tau < 0 \text{ için}) \quad (4.33)$$

burada σ_{Ix}^* ve σ_{Iy}^* incelenen fazların akım dalgalanmalarının ortakuadratik sapmalarının değerleridir. (4.30) ve (4.33) ifadeleri kullanılarak yukarıdaki gözönüne alınan noktaların korelasyon fonksiyonları hesaplanmıştır. Ortak olarak $\rho_{AB}^*(\tau)$, $\rho_{AC}^*(\tau)$, $\rho_{BC}^*(\tau)$ normalleştirilmiş korelasyon fonksiyonları Şekil 4.5'de verilmiştir. Burada A, B, C fırının akım fazlarını karakterize etmektedir.



Şekil 4.5. Ergitmenin sonunda EAF-60'ın faz akım dalgalanmalarının korelasyon fonksiyonu.

4.2. EAF'lerde Akım Dalgalanma Sapmalarının Genlikleri

Elektrik ark fırınlarının akımlarının değişimi seri olarak bir ekstremum noktasından diğerine geçiş ile karakterize edilir. Akım sapmaları komşu ekstremumlar arasındaki mutlak farka eşittir ve aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$\delta I_i = |I(t_i + \Delta t_i) - I(t_i)| \quad (4.34)$$

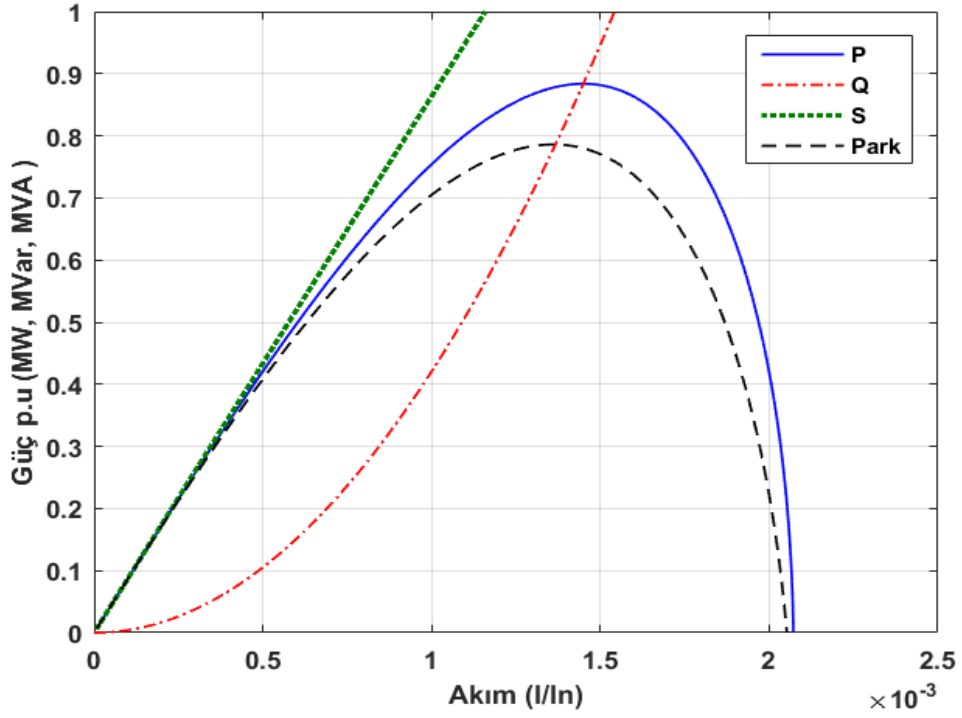
Burada; t_i ekstremum oluşmasının keyfi zamanı, Δt_i iki komşu ekstremum arasındaki zamandır. Ekstremum gibi $I(t)$ 'nin grafiğinin değişiminin istenen noktası ve eğrilerin eğim noktaları da alınmaktadır.

Elektrik ark fırınlarında akımın maksimum değeri çalışma prosesindeki kısa devrelerin oluşmasında alınmaktadır ve bu değeri fırın çevresine bağımlı olarak normal çalışma akımının katlarına eşit olmaktadır:

$$K_{\text{ÇKD}} = I_{\text{ÇKD}} / I_n \quad (4.35)$$

Burada; I_{CKD} çalışma prosesindeki kısa devre akımı, I_n fırın transformatörünün nominal akımıdır.

Şekil 4.6’da EAF-60’ın çalışma karakteristikleri görülmektedir. Karakteristikten görüldüğü gibi nominal YG’de I_K akımı nominal akımın 2,12 katına ulaşabilmektedir. Denemeler sonucunda belirlenmiş kısa devre akımlarının değerleri Tablo 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.6. EAF-60 çalışma güç karakteristikleri.

Tablo 4. 4. Denemeler sonucunda elde edilen kısa devre akımları.

Fırın Kapasitesi, (T)	I_k artma katı
0,5-6	3-3,5
10-50	2,5-3,2
80-200	1,5-2,3

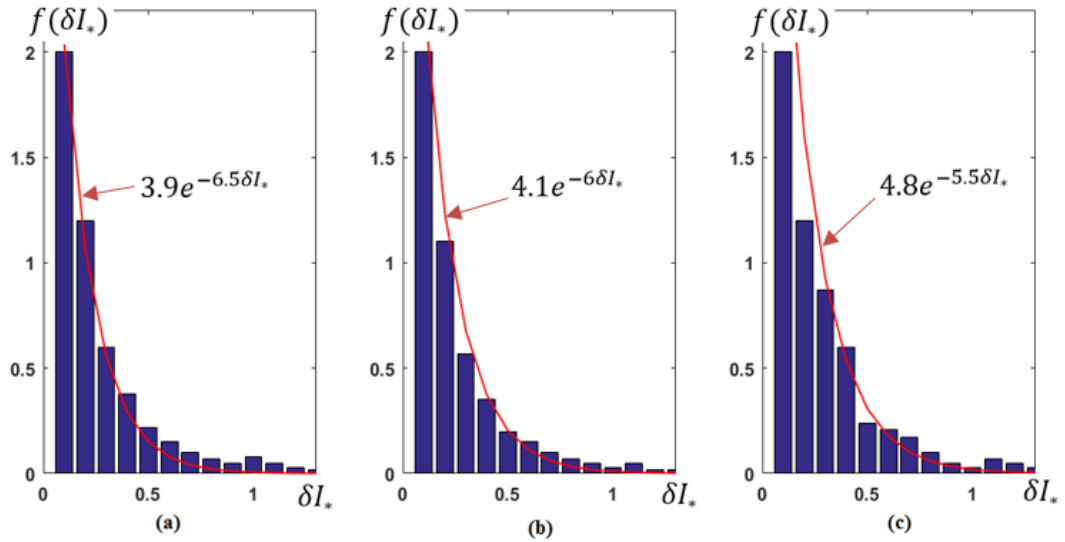
Yüksek gerilim tarafındaki ölçülen değerlerin alçak gerilime indirgenmesi ile hesaplanmış değerler ise Tablo 4.5’de sunulmuştur.

Tablo 4. 5. Yüksek gerilimde ölçülen parametrelerin alçak gerilime indirgenmesi.

Kısa Devre Türü	Fırın	Dönüştürme Oranı	Yüksek Gerilimde Ölçülen Değerler										Alçak Gerilimi İndirgenmiş Parametreler							
			I_1 , A	I_2 , A	I_3 , A	U_{1-2} , kV	U_{2-3} , kV	U_{3-1} , kV	P (MW)	Q (MVar)	I_1 , kA	I_2 , kA	I_3 , kA	U_{1-2} , V	U_{2-3} , V	U_{3-1} , V	R faz ortalama	X Faz ortalama	Cos α	I_p/I_n
3	1	76,667	875	835	790	33,4	33,5	33,5	7,41	39,6	67,08	64,02	60,57	0,436	0,437	0,437	1,950	10,42	0,183	1,380
3	3	69,000	890	815	830	33,6	33,9	33,7	5,85	37,7	61,41	56,23	57,27	0,487	0,491	0,488	1,737	11,19	1,533	1,381
3	5	62,956	930	875	710	33,9	34,1	34,1	5,99	30,20	59,81	55,09	44,70	0,538	0,542	0,542	2,166	10,67	0,194	1,260
3	8	55,556	770	750	738	34,3	34,3	34,3	5,36	26,15	42,77	41,66	41,00	0,617	0,617	0,617	3,06	14,95	0,200	0,995
2 (1-2)	8	55,556	775	735	0	33,9	35,7	36,0	2,84	13,6	43,06	40,83	0,00	0,610	0,643	0,648	1,614	7,740	0,204	0,998
2 (2-3)	8	55,556	0	682	685	35,6	34,6	35,3	2,35	13,8	0,00	37,89	38,06	0,641	0,623	0,635	1,629	9,659	0,167	0,900
2 (1-3)	8	55,556	790	0	771	35,4	35,6	34,6	2,12	12,6	43,89	0,00	42,83	0,637	0,641	0,623	1,154	6,859	0,165	1,020
3	12	47,983	1037	998,5	935,7	34,534	34,396	34,911	41,987	38,143	49,76	44,90	44,90	0,720	0,717	0,728	19,39	17,62	0,740	1,184

Teorik olarak EAF'nin akım dalgalanmalarının değeri I_K kısa devre akımı kadar olabilmektedir. Bu çalışmada analizi yapılan fırında böyle bir olayın oluşma olasılığı sıfıra yakındır. Eritilen metal kırıntılarının dökülmesi ve elektrot hareketlerinin otomatik kontrol sistemleri ile denetimli olması nedeniyle akımın büyük dalgalanmaları oluşmayacaktır ve basamaklı küçük dalgalanmalar şeklinde olacaktır. Elektrik ark fırınlarının bağlı olduğu şebekelerde gerilim dalgalanmalarını bu küçük akım dalgalanmaları oluşturmaktadır. Deneysel sonuçlara göre fırında akım dalgalanmaları, farklı durumlarda dalgalanmaların genliğinin oluşma frekansı ile ters orantılıdır. Akım, gerilim, aktif ve reaktif güç dalgalanmalarının analizi için şekil 3.4, 3.14 ve 3.15'deki deneysel eğriler kullanılmıştır.

Şekil 3.4'de verilmiş akım değişim eğrileri kullanılarak Şekil 4.7'de akım dalgalanmalarının histogramı verilmiştir.



Şekil 4.7. Akım dalgalanmalarının histogramı.

Şekilden görüldüğü gibi akım dalgalanmaları genliğinin yayılımının olasılık histogramı azalan karakterli olup aşağıda belirtilen üstel fonksiyon ile lineerleştirilmiştir:

$$f(\Delta I_*) = A \cdot e^{-\gamma \Delta I_*} \quad (4.36)$$

Bu denklemde, $f(\Delta I_*)$ dalgalanma genliğinin olasılık sıklığı, ΔI_* fırın transformatörünün nominal akımına indirgenmiş dalgalanma genliği, γ genel olarak fırın kısa devresinin parametrelerinden, otomatik kontrol sisteminin karakteristiklerinden ve fırının önerilen çalışma rejimine bağlı parametrelerden bağımlı olarak belirlenmektedir. İncelenen kısımlar için A ve γ parametreleri seri yaklaşımlar yöntemi ile belirlenmiştir.

Dalgalanma genliklerinin olasılığı 0,95'ten küçük olmayan [101] fırınlarda sapmalar fırın akımının nominal değerinden yüksek olmamaktadır. Dalgalanma genliklerinin sapmaları aşağıdaki matematiksel ifade ile tanımlanabilir:

$$P(\delta I \leq I_n) = \int_0^{\delta I=I_n} f(\delta I)d\delta I = A \cdot \int_0^{\delta I=I_n} e^{-\nu\delta I} \cdot d\delta I \geq 0,95 \quad (4.37)$$

Ergitme prosesinde bazı sapmaların değerleri $(1,2-1,4) \times I_n$ olabilmektedir. Ancak bu büyüklük elektromekanik hesaplamalarda geçerli olan %5'den büyük olmamaktadır. $\sigma_{I_{mak}}$ ifadesinin maksimum değeri aşağıdaki gibidir:

$$\sigma_{I_{mak}} = \frac{I_k}{2} \quad (4.38)$$

EAF-60'ın çalışma karakteristiklerinden görüldüğü gibi sapmaların değerleri $0-I_k$ sınırları arasında olmaktadır ve bu aralıktaki $\sigma_{I_{mak}}$ ve $\mathcal{D}_{I_{mak}}$ değerleri ise aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\sigma_{I_{mak}} = \frac{I_k}{6} = \frac{K_k \cdot I_n}{6} \quad (4.39)$$

$$\mathcal{D}_{I_{mak}} = \sigma_{I_{mak}}^2 = \frac{K_k^2 \cdot I_n^2}{36} \quad (4.40)$$

EAF-60 fırını için bu parametrelerin değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4. 6. Farklı fırınlar için Akım sapma parametrelerinin karşılaştırılması.

Fırın	I_n, A	K_k	$\frac{I_k}{2} \cdot A$	$\sigma_{I_{mak}}$	$\frac{\sigma_{I_{mak}}}{I_n}$	$\sigma_{I_{mak}}^2, A^2$	$\left(\frac{\sigma_{I_{mak}}}{I_n}\right)^2$
EAF-20	173	2,50	216	72,00	0,417	5184	0,174
EAF-60	601	2,12	425	135,20	0,224	18279	0,050
EAF-200	742	1,56	579	193,00	0,260	37249	0,063

Akım dispersiyonun \mathcal{D}_{Imak} büyük olması yayılımın normalden farklı olduğunu göstermektedir. Elektrik ark fırınlarında akım dalgalanmalarının dispersiyonun tüm yayılımlarda teorik olarak sınır değeri aşağıdaki ifade ile tanımlanmaktadır:

$$\mathcal{D}_{I_{sin}} = \sigma_{I_{sin}}^2 = \left(\frac{I_k}{2}\right)^2 = \frac{K_k \cdot I_n^2}{4} \quad (4.41)$$

[101]'de fırının akım aşamasının maksimal verim, maksimal ısı ve elektrik enerjisinin optimal kullanıldığı durum için seçilmesi önerilmektedir.

4.3. EAF'nin Bağlanmış Olduğu Şebeke Noktasında Gerilim Dalgalanmaları

EAF'lerin çalıştığı şebekelerde oluşan gerilim dalgalanmaları şebekedeki gürültülerin temel kaynağıdır. Bu nedenle uluslararası pratikte EAF'lerin güçlerinin bağlandığı şebeke güçlerinin %20 sinin altında olması önerilmektedir.

Genellikle EAF'ler kullanılan ülkelerde, şebekenin gücü fırınların şebekeye bağlandığı noktaları devlet standartlarına göre belirlenmektedir. Genel şekilde EAF'lerin simetrik rejimde çalışması durumunda bağlantı noktasındaki hat geriliminin dalgalanması ifadesi:

$$\delta U_s(t) = \sqrt{3} I_s \cdot d(t) \cdot Z_c \quad (4.42)$$

ifadesi ile tanımlanır. Bu ifadede; $U_s(t)$ gerilimin sapsması, I_s akım sapsmasının değişen bileşenidir.

Karmaşık hesaplamalarda (4.42) denklemini kullanmak mümkün değildir. Çünkü bu denklem akım dalgalanmaları ile gerilim dalgalanmaları arasındaki ilişkiyi belirlemektedir. Bilindiği gibi herhangi bir parametrenin bulunması için diğer parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.

Bu nedenle hat geriliminin dispersiyonu $[D_u(t)]$ faz akımı dalgalanmaları $[D_i(t)]$ arasındaki ilişkiyi belirleyerek incelenen noktadaki gerilim dalgalanmalarının dispersiyonu:

$$D_u(t) = \mathcal{D}[\dot{U}_m(t)] = \mathcal{D}[\dot{U}_m + \delta U_s(t)] = \mathcal{D}[\delta \dot{U}_s(t)] \quad (4.43)$$

ifadesi ile tanımlanabilir. Bu ifadede; $\dot{U}_m(t) = \dot{U} + \Delta \dot{U}' - \Delta \dot{U}_s(t)$ ifadesi düğüm noktasındaki gerilimin sabit bileşeni veya ortalama değeri, $\delta U_s(t) = \delta \dot{U}_{sa} + \delta \dot{U}_{sr}$ gerilimin değişen kısmının aktif ve reaktif kısımları:

$$\mathcal{D}[\delta \dot{U}_s(t)] = \mathcal{D}[\delta \dot{U}_{sa}(t) + j \delta \dot{U}_{sr}(t)] = M \cdot [|\delta U_{sa}(t)|^2 + |\delta U_{sr}(t)|^2]$$

olarak belirtilir. Bu durumda $\delta \dot{U}_s(t)$ ifadesi;

$$\begin{aligned} \delta \dot{U}_s(t) &= \sqrt{3} \cdot I_{sd}(t) \cdot Z_c = \sqrt{3} \cdot [I_{sad}(t) + j I_{srd}(t)] \cdot (r + j X_c) \\ &= \sqrt{3} \cdot [I_{sad}(t) \cdot r_c - I_{srd}(t) \cdot x_c] + \sqrt{3} \cdot j \cdot [I_{srd}(t) \cdot r_c + I_{sad}(t) \cdot x_c] \end{aligned}$$

olduğundan,

$$\begin{aligned} D_u(t) &= M \cdot \left\{ \left| \sqrt{3} [I_{sad}(t) \cdot r_c - I_{srd}(t) \cdot Z_c] \right|^2 \right\} + M \cdot \left\{ \left| \sqrt{3} [I_{srd}(t) \cdot r_c + I_{sad}(t) \cdot x_c] \right|^2 \right\} \\ &= 3 \cdot (r_c^2 + x_c^2) \cdot M \cdot [I_{sad}^2(t)] + 3(r_c^2 + x_c^2) \cdot M \cdot [I_{srd}^2(t)] \\ &= 3 \cdot Z_c^2 \cdot [DI_a(t) + DI_r(t)] = 3Z_c^2 \cdot D_I(t); \end{aligned}$$

$$\mathcal{D}_{u(t)} = 3 \cdot Z_c^2 \cdot \mathcal{D}_I(t)$$

$$\sigma_u(t) = \sqrt{\mathcal{D}_{u(t)}} = 3 \cdot \sigma_I(t) \cdot Z_c = \sqrt{3} \sigma_I(t) \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m r_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m X_i\right)^2} \quad (4.44)$$

yazılabilir ve $\sigma_u(t)$ ifadesi denklem (4.44)'deki gibi alınmaktadır. Böylece fırının simetrik yönündeki bağlantı noktasında gerilim dalgalanmalarının dispersiyonu ile akım dalgalanmalarının dispersiyonu arasında ohm yasası şeklinde bağıntı mevcuttur. Sapma olmayan kısımdaki dispersiyon sabittir.

$$\mathcal{D}_I(t) = \mathcal{D}_I ; \sigma_I(t) = \sigma_I$$

Bu durumda (4.43) ve (4.44) ifadeleri;

$$\mathcal{D}_u = 3 \cdot Z_c^2 \cdot \mathcal{D}_I = 3 \cdot \mathcal{D}_I \cdot \left[\left(\sum_{i=1}^m r_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m X_i\right)^2 \right] \quad (4.45)$$

$$\sigma_u = 3 \cdot Z_c^2 \cdot \sigma_I = 3 \cdot \sigma_I \cdot \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m r_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m X_i\right)^2} \quad (4.46)$$

şeklinde yazılabilir. Eğer yük simetrik değil ise hat gerilim dalgalanmalarının dispersiyonu,

$$\mathcal{D}_{U_{ij}} = Z_c^2 \cdot [\mathcal{D}_{I_i} + \mathcal{D}_{I_j} + R_{ij}(0)] \quad (4.47)$$

ifadesi ile tanımlanır. Burada i, j- fazların işareti, $R_{ij}(0)$ - i ve j fazları arasındaki $\tau=0$ durumuna karşılık gelen korelasyon fonksiyonudur.

Gerilim dalgalanmalarının dispersiyonunun belirlenmesinden sonra dalgalanma sınırının belirlenmesi gerekmektedir.

Normal paylaşım kuralında bu sınır $\pm 3 \sigma_u$ olmaktadır. Gerilim sapsmalarının değerleri mühendislik hesaplamalarındaki matematiksel ifadesi aşağıdaki gibi belirlenmektedir.

$$\delta U = \sqrt{3} \delta I (r_c \cdot \cos \vartheta_A + X_c \cdot \sin \vartheta_B) \quad (4.48)$$

Burada denklemde; δI fırınları besleyen hatlarda akım sapsmalarının değeri, r_c ve X_c bağlantı noktası ve fırın arasındaki iletkenlerin aktif ve reaktif dirençleri, ϑ_A bağlantı noktasındaki akım ve gerilim vektörlerinin arasındaki faz açısıdır.

Yapılan denemeler sonucunda akım sapsmalarının değerinin fırın trafosunun nominal akımının 0,95'inden büyük olmadığı görülmektedir. Bu nedenle gerilim

sapmalarının değerlendirilmesi için akım sapmalarının sınır değeri olan I_n alınmaktadır. I_n ifadesi denklem aşağıda sunulan matematiksel ifade ile tanımlanır.

$$\delta I = I_n = \frac{S_T}{\sqrt{3}U_n} \approx \frac{S_T}{\sqrt{3}U} \quad (4.49)$$

Burada, S_T fırın trafosunun nominal gücü, U fırın transformatörünün primer gerilimine eşit olan şebeke noktasındaki gerilimidir.

Deneme sonuçlarına göre $\delta I = I_n$ 'nin EAF-60 için belirlenen değerleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Tabloda verilen değerler fırının gerilimindeki açığı göstermektedir. Fırın transformatörünün bağlandığı ortak şebeke noktasında ϑ_Δ bir o kadar büyük olmaktadır.

Tablo 4.7. Fırın parametrelerinin dalgalanma sonuçları.

Fırın	Dalgalanma Yönü	Akım Dalgalanmalarının orta seviyesi	Güç Dalgalanmaları		$\cos \vartheta_A$	$\sin \vartheta_B$	ϑ_Δ
			$\Delta P(\text{MW})$	$\Delta Q(\text{MVar})$			
EAF-60	Yukarı	0,61	7,8	25,6	0,291	0,956	73,05
	Aşağı	1,55	8,2	27,2	0,288	0,941	73,23
EAF-200	Yukarı	0,34	17,0	50,5	0,314	0,947	710
	Aşağı	1,28	24,0	54,8	0,452	0,892	630

Tablo 4.7'de karşılaştırmak amacıyla [109]'da verilmiş EAF-200 fırınının verileri görülmektedir. Tablo 4.7'den görüldüğü gibi orta ve yüksek kapasiteli fırınlarda aktif direncin elektrik şebekelerine etkisi çok azdır ve şebeke analizinde onu göz önünden atmak ve:

$$Z_C = X_C \quad (4.50)$$

olması durumunda çizelgeden görüldüğü gibi, $r_c \cdot \cos \vartheta_A \ll X_C \cdot \sin \vartheta_B$ ve $\sin \vartheta_B \approx 1$ olmaktadır. Bu durumda (4.48) ifadesi daha basit bir şekilde aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\delta U = \sqrt{3} \cdot \delta \cdot I \cdot X_C \quad (4.51)$$

ve (4.50) , (4.51) ifadeleri göz önüne alındığında δU ifadesi,

$$\delta U = \frac{S_T}{U_n^2} \cdot X_C \quad (4.52)$$

veya;

$$\delta U_{\%} = \frac{S_T}{U_n^2} \cdot X_C \% \approx \frac{S_T}{U^2} \cdot X_C \% \quad (4.53)$$

şeklinde tanımlanabilir. X_C direncinin değeri ortak bağlantı noktasındaki kısa devre direnci ile ifade edilebilir ve aşağıdaki ifadesi ile tanımlanır.

$$X_C = \frac{U^2}{S_k} \quad (4.54)$$

(4.53) ifadesi göz önüne alındığında,

$$\delta U_{\%} = \frac{S_T}{S_k} \cdot 100$$

olmaktadır. Bu durumda ortak bağlantı noktasında $\delta U_{\%}$ değeri V_T 'den küçük alınmalıdır.

$$\delta U_{\%} \leq V_T$$

Bu durumda, V_T gerilimin izin verilen dalgalanmasının yüzdelere ifadesidir ve:

$$\delta U_{\%} = \frac{S_T}{S_k} \cdot 100 \leq V_T$$

devlet standartlarına göre ark fırınları ve diğer işleticileri besleyen şebekelerde gerilim dalgalanmaları % 1' den büyük olmamalıdır.

$$V_T = \% 1$$

Böylelikle,

$$\delta U_{\%} = \frac{S_T}{S_k} \cdot 100 \leq 1 \%$$

olmalıdır.

Birçok yabancı ülkede yapılan incelemeler [2, 6, 12, 67, 83] sonucunda (4.50) ifadesinin doğruluğu ispatlanmış ve analizler sonucunda gerilim dalgalanmalarının genliklerinin olasılık sıklığı aşağıda sunulan üstel denklem ile lineerleştirilmiştir.

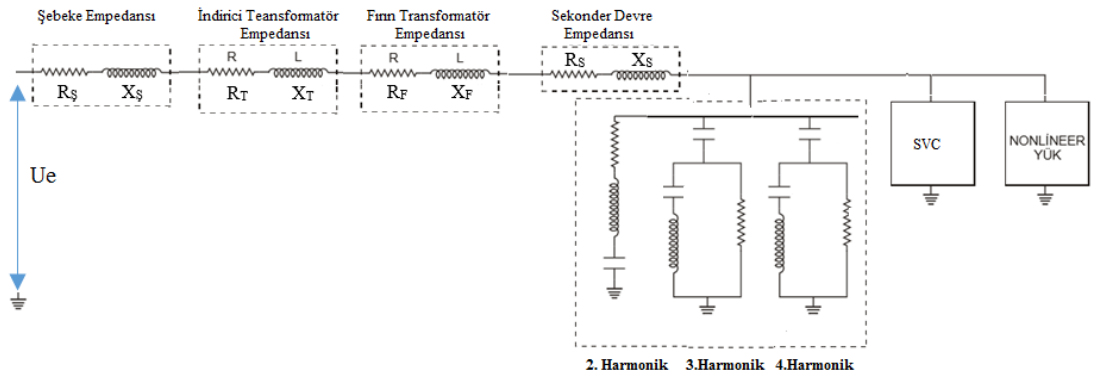
$$f(\delta U_*) = 0,7 \cdot e^{-0,8\delta U_*} \quad (4.55)$$

Burada δU_* ifadesi gerilim dalgalanmalarının yüzdesel olarak genliğini ifade etmektedir.

5. EAF'Yİ BESLEYEN SİSTEMİN VE ELEKTRİK ARKININ MODELLENMESİ

5.1. EAF'nin bir faz eşdeğer devresinin hesaplanması

Elektrik Ark Fırınlarını besleyen elektrik sistemin modellenmesinde sistemin bir faz eşdeğer devre modelinden faydalanılır. EAF'yi besleyen sistem şebeke empedansı, indirici transformatör empedansı, ara hat empedansı, sekonder devre empedansı ve lineer olmayan yük (ark direnci) elemanlarından oluşmaktadır. Ayrıca kompanzasyon ve harmonik filtreleme için paralel kompanzasyon sistemi ve harmonik filtre grupları kullanılır. Bir EAF'yi besleyen sistemin temel bir faz eşdeğer devre modeli Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu sisteminin parametreleri hesaplanırken, indirici transformatör ile fırın transformatörü arasındaki hat empedansı çok küçük olacağından bir faz hesaplamalarda ihmal edilebilir.



Şekil 5.1. EAF'yi besleyen elektrik sisteminin temel bir faz gösterimi.

SİDEMİR tesisindeki 60 MVA ark fırını besleyen sistemin bir faz eşdeğer devresinin hesaplanmasında kullanılan devre parametreleri Tablo 5.1'de sunulmuştur [117].

Tablo 5. 1. EAF'yi besleyen sistemin bir faz eşdeğer devresinin hesaplanmasında kullanılan devre parametreleri.

Şebeke	Kısa devre gücü: 7250 MVA Şebeke gerilimi: 380 kV
İndirici Transformatör	Transformatör gerilimi: 380/34,5 kV Transformatör gücü: 100 MVA % $U_K=14,8$
EAF Transformatörü	Transformatör gerilimi: 34,5/0,719 kV Transformatör gücü: 60 MVA % $U_K=4,9$

Tablo 5.1’de sunulan parametreler ve Bölüm 2’de belirtilen kabuller dikkate alındığında SİDEMİR tesisini besleyen elektrik sisteminin 719 V referans gerilimi için bir faz eşdeğer sistem parametreleri Tablo 5.2’deki gibidir.

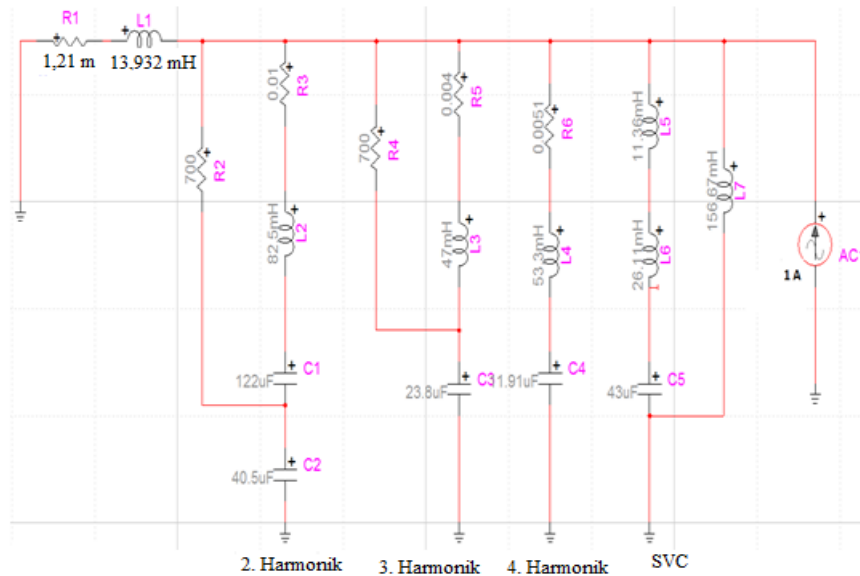
Tablo 5. 2. SİDEMİR tesisinde 60 MVA EAF’yi besleyen sistemin 719 V referans gerilimi için bir faz eşdeğer devre parametreleri.

	R(mohm)	X(mH)
Şebeke	0.071	0.0713
İndirici transformatör	0.096	2,469
EAF Transformatör	0.527	0.422
EAF reaktans	0.612	12.67

Tablo 5.2’de sunulan parametrelere ark direnci, kompanzasyon ve harmonik filtre gruplarının dâhil edilmesi ile 60 MVA EAF fırınına besleyen sistemin komple bir faz eşdeğer modeli tanımlanabilir.

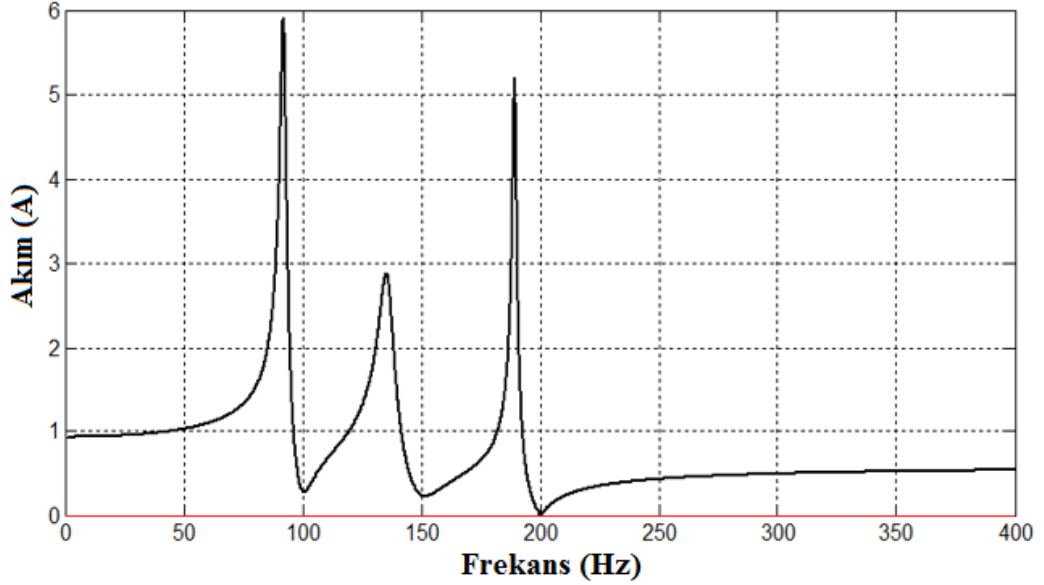
5.2. EAF’nin bir faz eşdeğer devre modeli kullanılarak EMTP ile harmonik analizi

SİDEMİR tesisindeki EAF yükünü besleyen sistemdeki harmoniklerin şebekeye etkisinin değerlendirilmesi için Static var Kompanzasyon (SVC) sistemi ile 100 Hz 15,5 MVar (C-Type), 150 Hz 10 MVar (C-Type) ve 200 Hz 4,7 MVar (single tuned) harmonik filtreler tasarlanmıştır. Tasarımlar sonucunda oluşturulan elektriksel sistemin EMTP (Electromagnetic Transient Program) modeli Şekil 5.2’deki gibidir [118].



Şekil 5.2. Harmonik analizi için kullanılan EMTP programı ile oluşturulmuş devre şeması.

Bu devre şeması kullanılarak EAF tarafında 1 A'lık akım kaynağı ile şebeke tarafında sistem tarafından üretilen harmonik miktarları hesaplanabilir. Şekil 5.2'de sunulan sistemde hesaplamalar sonucunda elde edilen harmonik emisyonu Şekil 5.3'deki gibidir.



Şekil 5.3. Sidemir 34,5 kirli bara sisteminin şebeke tarafındaki harmonik emisyonu.

Şekil 5.3'deki harmonik analiz sonuçları incelendiğinde 2. Harmonik ve 4. Harmonik civarındaki akımlarının süzülemediği görülmektedir. Ayrıca 100-200 Hz aralığındaki ara harmoniklerde bir miktar yükselme olduğu görülmektedir. Bu durum güç kalitesi analizörleri ile elde edilen ölçüm sonuçları ile uyumaktadır.

Benzetim sonucundan görüldüğü üzere 5 ve üzerindeki harmoniklerden kaynaklı bozulmalar SİDEMİR tesisinden dolayı oluşacaktır. Sistemdeki tek harmoniklerin süzülmesi için filtrelerin yeterli olduğu görülmektedir. Çift harmoniklerin azaltılması hem toplam harmonik bozulma hem de kırpışma etkisinde iyileştirme sağlayacaktır. Çift harmonik akımları SVC sisteminden kaynaklanmaktadır ve çift harmoniklerin azaltılabilmesi için aşağıdaki yöntemler önerilebilir.

a) Çift harmonik akımlarının azaltılması

Deneysel ve EMTP benzetim sonuçlarından çift harmoniklerin yeterince süzülmediği belirlenmiştir. Çift harmonikler içerisinde en büyük etkiye 2. Harmonik bileşeni neden olmaktadır. 2. Harmonik filtresinin karakteristiği değiştirilerek harmonik değerleri azaltılabilir. Fakat bu durum 50-100 Hz aralığında ara harmonikler yükselmesine neden olabilir. Çift harmoniklerin azaltılması için bir diğer yöntem

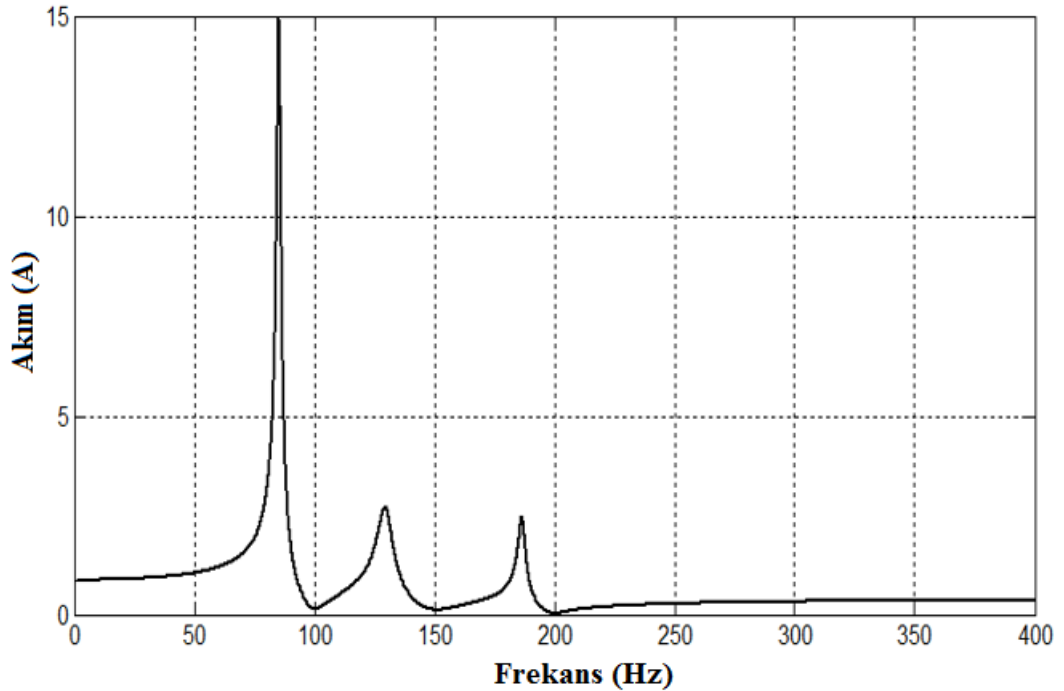
olarak fırın gücünün düşürülmesi düşünülebilir, fakat bu durum üretim kayıplarına neden olacaktır.

b) Şebeke kısa devre gücünün artırılması

EAF'ler şebeke kısa devre gücü yüksek olan noktalara bağlanmalıdır ve kısa devre gücü yüksek olan şebekelerde harmoniklerden kaynaklı akımların etkisi azalacaktır. Fakat mevcut sistemde şebeke kısa devre gücünün artırılması TEİAŞ inisiyatifinde olup yüksek bir maliyet gerektirmektedir.

c) Ark fırınının akımının kısıtlanması

EAF'ye seri reaktör kullanılarak akımı sınırlandırılabilir. Fakat bu durumda iki önemli olumsuz etki ortaya çıkmaktadır. Birinci etki EAF akımının sınırlandırılması ile üretim kapasitesinin düşmesidir ve bu durum istenmemektedir. İkinci etki ise seri reaktör kullanıldığında şebeke tarafında üretilen harmonik akımlarının değişimidir. Seri reaktör uygulaması ile Şekil 5.2'de gösterilen benzetim tekrarlandığında Şekil 5.4'deki frekans-Akım değişimi oluşmaktadır.



Şekil 5.4. Seri reaktör uygulaması ile harmonik emisyonunun değişimi.

Şekil 5.4'den görüldüğü üzere seri reaktör uygulaması 4. Harmonik değerinin azalmasına neden olurken SVC sistem tarafından üretilen 2. Harmonik civarında yükselmenin artmasına neden olmuştur. Bu nedenle seri reaktör uygulaması mevcut

sistemin güç kalitesi problemlerini iyileştirmediği gibi üretim performansını da olumsuz etkilemektedir.

d) Kompanzasyon sisteminin kurulu gücünü arttırmak veya kompanzasyon sistemini daha hızlı çalışabilecek Statik Var Kompanzasyon ile değiştirmek.

Mevcut Statik VAr kompanzasyonun reaktif gücün azaltılmasında verimli olduğu söylenebilir fakat Statik Var kompanzasyon kullanımının şebekede çift harmoniklerin oluşmasına neden olduğu açıktır. Bu nedenle Statik var kompanzasyon kırpışma etkisinin artmasında en önemli etkendir ve bu tip kompanzasyon sistemlerinin ark fırınlarında kullanılması verimli değildir. Mevcut kompanzasyon sisteminin yerine daha hızlı çalışan Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) veya Statik Kompansatör (STATCOM) gibi sistemlerin kullanılması düşünülebilir.

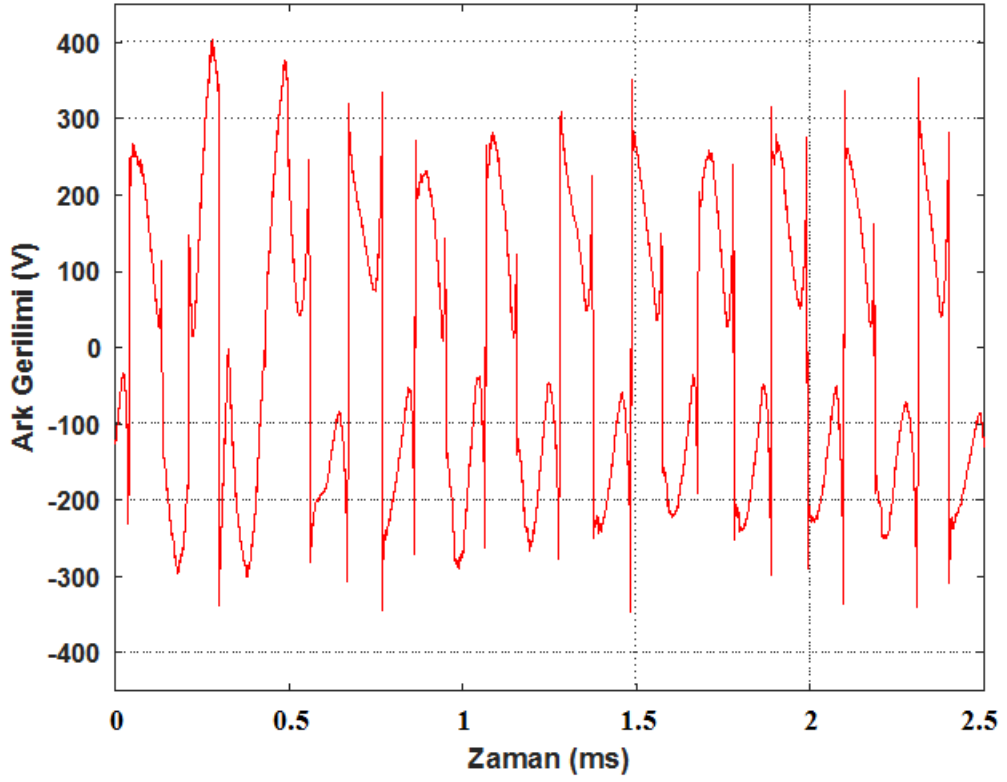
5.3. Elektrik Arkının Modellenmesi

EAF sisteminin tanımlanmasında en önemli konu elektrik arkının lineer olmayan davranışının modellenmesidir. EAF fırınlarında elektrik arkının dinamik karakteristiği aşağıda sunulan diferansiyel ifade ile tanımlanır [63].

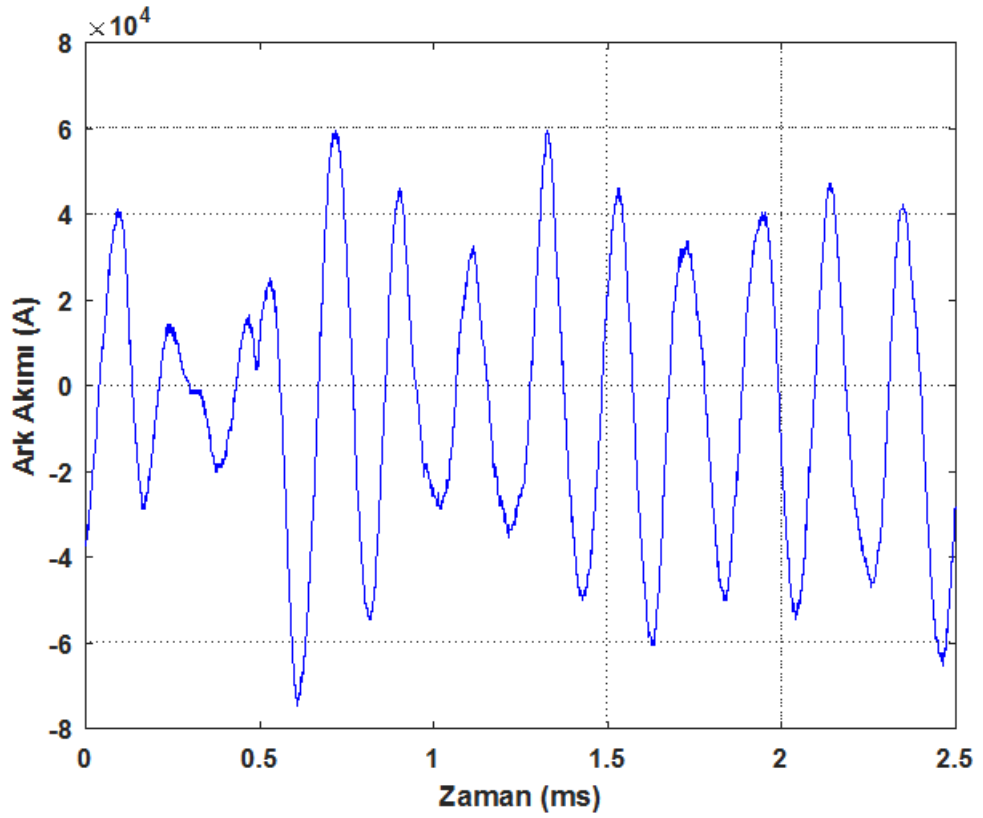
$$k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r \cdot \frac{dr}{dt} = \frac{k_3}{r^2} \cdot i^2 = V_a \quad (5.1)$$

Bu denklemde; r ark direnci, i anlık ark akımı, k_n model için kullanılan oransal bir sabittir (n=1 ...3) ve V_a ark gerilimidir.

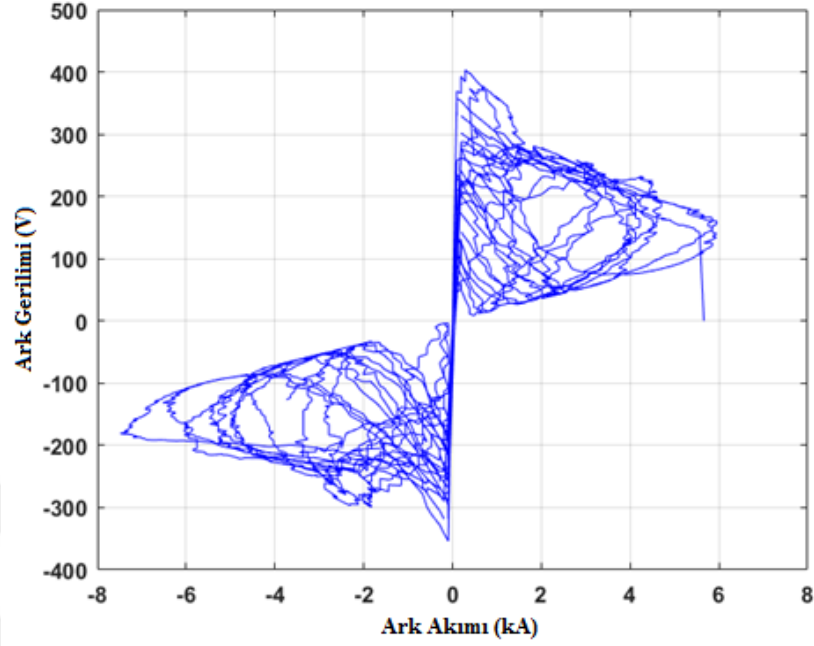
Bu diferansiyel denklemin çözümü ve katsayıların belirlenmesi zor olmaktadır. Bu nedenle denklem (5.1)'de sunulan ifadenin yerine deneysel verilerden elde edilen gerilim akım karakteristiği kullanılarak elektrik arkı için matematiksel bir model tanımlanabilir. Bölüm 3'de Şekil 3.16 ve 3.17'de sunulan 12 çevrimlik akım ve gerilim dalga formları ve EAF'nin bir faz devresi kullanılarak elde edilen elektrik arkının ertitme prosesinde akım ve geriliminin zamana göre değişim eğrileri ve dinamik gerilim akım (V-I) karakteristiği sırası ile Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'deki gibidir.



Şekil 5.5. 60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının ergitme prosesinde elde edilen gerilim dalga formu.



Şekil 5.6. 60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının ergitme prosesinde elde edilen akım dalga formu.



Şekil 5.7. 60 MVA elektrik ark fırın yükünde deneysel olarak elde edilen elektrik arkının dinamik gerilim-akım (V-I) karakteristiği.

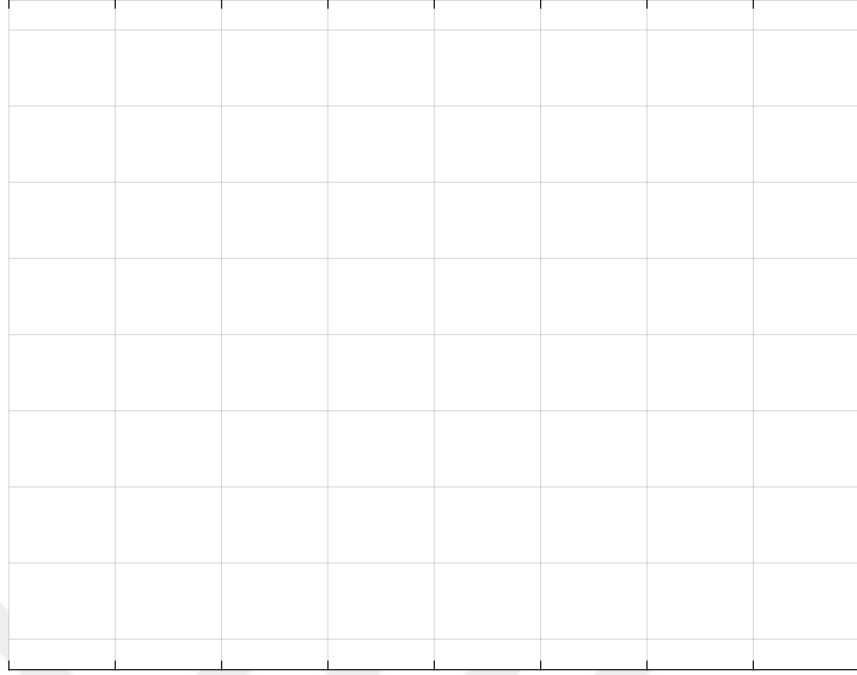
Bu karakteristik eğriden faydalanılarak ve Matlab Curve Fitting Toolbox kullanılarak eğri uydurma yöntemleri ile elektrik arkının dinamik karakteristiği için farklı matematiksel modeller tanımlanabilir. EAF'nin bir faz eşdeğer devresi ve literatürde tanımlanan matematiksel modeller Matlab/Simulink kullanılarak analiz edilmiştir. Ayrıca yeni tasarlanan lineer olmayan direnç modeli ile literatürde sunulan modeller karşılaştırılarak bu modellerin EAF yüklerinin davranışı tanımlamadaki performansları değerlendirilmiştir.

5.3.1. Elektrik Arkın Modellenmesi ve Matlab Benzetimi

5.3.1.1. Model 1: Üstel Model

Bu modelde elektrik arkının gerilim-akım (V-I) karakteristiği Matlab Curve Fitting Toolbox kullanılarak üstel bir fonksiyon ile lineerleştirilmiştir. Lineerleştirilmiş gerilim-akım denklemi (5.2)'de ve lineerleştirme ile elde edilen V-I karakteristik eğrisi ise Şekil 5.8'de sunulmuştur.

$$V(i) = V_{at} \cdot \left(1 - e^{-\frac{|i|}{t_0}}\right) \cdot \text{signum}(i) \quad (5.2)$$



Şekil 5.8. Üstel bir fonksiyon olarak lineerleştirilmiş elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.

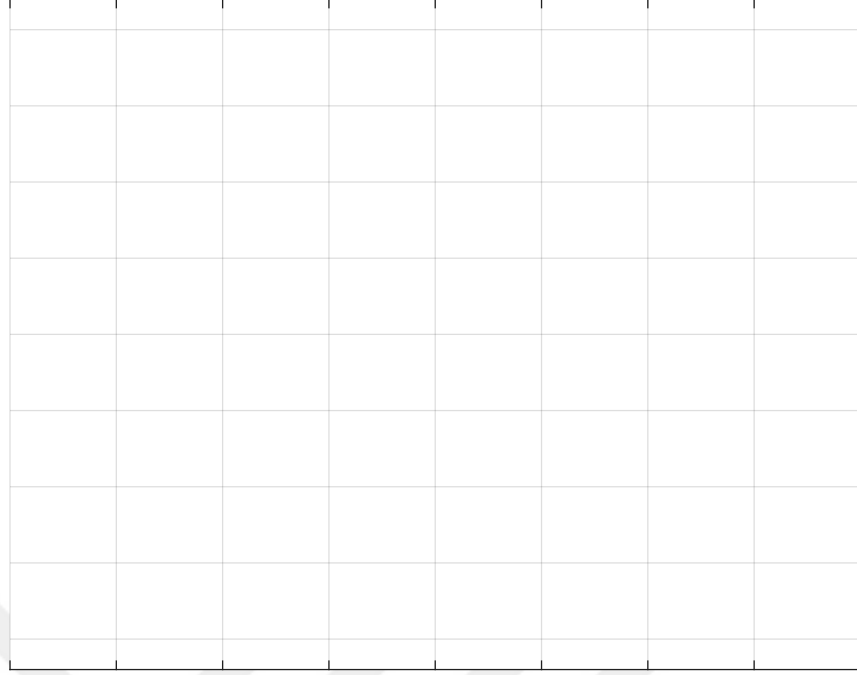
(5.2) ifadesinde; V_{at} eşik gerilimi, i_0 pozitif ve negatif akımın dikliğini belirlemek için kullanılan sabit değer ve i ark akımını ifade etmektedir. Lineerleştirilmiş eğrinin elde edilmesinde $V_{at}=200$ V ve i_0 değeri 1000 A kabul edilmiştir.

5.3.1.2. Model 2: Hiperbolik Model

Hiperbolik modelde elektrik arkının karakteristiği $V(i)$ formunda değerlendirilir ve aşağıdaki matematiksel ifade ile lineerleştirilir.

$$V(i) = \left[V_{at} + \frac{C_{i,d}}{D_{i,d} + |i|} \right] \cdot \text{signum}(i) \quad (5.3)$$

Bu ifadede; V_{at} eşik gerilimi, $C_{i,d}$ ve $D_{i,d}$ akımın yükselmesi ve düşmesi durumunu tanımlamak için kullanılan sabitlerdir. Signum ifadesi ise karakteristik eğrinin pozitif ve negatif bölgelerini tanımlamak için kullanılır. (5.3) denkleminde $V_{at}=200$, $C_i=190$ kW ve $C_d=39$ kW olarak kabul edilmiştir ve C_i akımın artışı, D_i ise akımın azalması durumunda kullanılan sabitlerdir. Matlab Curve Fitting Toolbox kullanılarak elde edilen elektriksel arkın lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi Şekil 5.9'da sunulmuştur.



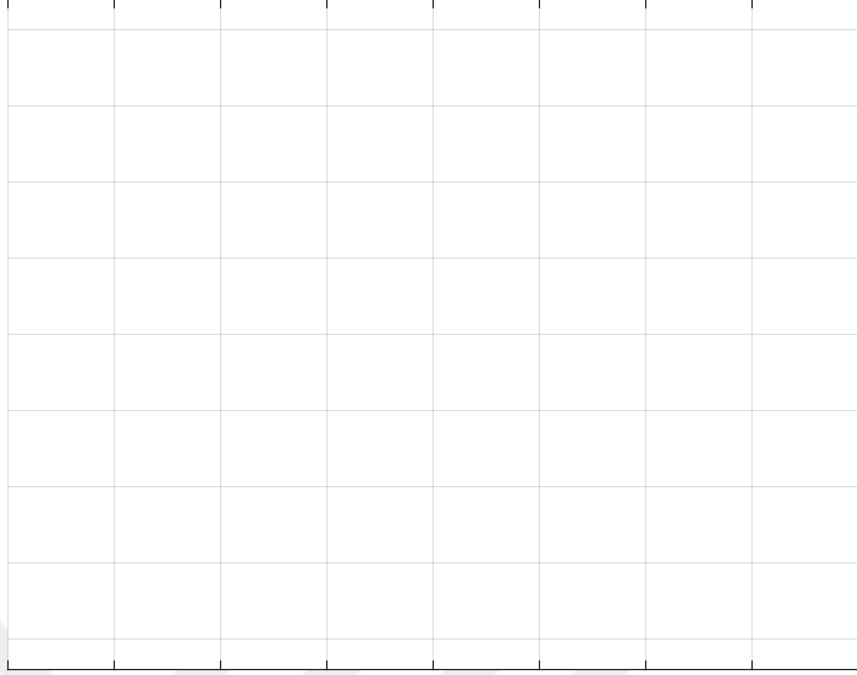
Şekil 5.9. Hiperbolik bir fonksiyon olarak elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.

5.3.1.3. Model 3: Üstel-hiperbolik Model

Üstel ve Hiperbolik model, üstel model ve hiperbolik modelin birleşimi olarak kabul edilemektedir. Bu modelde akımın artışı hiperbolik bir fonksiyon ve akımın azalışı üstel bir fonksiyon olarak tanımlanır. Üstel hiperbolik modelin matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$V(i) = \begin{cases} \left[V_{at} + \frac{C_i}{D_i + |i|} \right] \cdot \text{signum}(i) , & \frac{di}{dt} \geq 0 \text{ ve } i > 0 \\ V_{at} \cdot \left(1 - e^{-\frac{i}{i_0}} \right) \cdot \text{signum}(i) , & \frac{di}{dt} < 0 \text{ ve } i < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

Bu ifadede fonksiyon değişkenlerinin belirlenmesinde üstel ve hiperbolik modelde sunulan kabuller kullanılır. Fakat bu modelde akımın azalmasının daha iyi tanımlanabilmesi için i_0 akımının değeri 5000 A olarak kabul edilmiştir. Üstel-Hiperbolik modele ilişkin lineerleştirilmiş elektrik arkının V-I karakteristik eğrisi Şekil 5.10'daki gibidir.



Şekil 5.10. Üstel-Hiperbolik fonksiyon olarak elektrik arkının lineerleştirilmiş V-I karakteristik eğrisi.

5.3.2. Kırpışma Etkisinin Modellenmesi

EAF'lerde ergitilen metal ile elektrotlar arasındaki mesafe sürekli olarak değişmektedir. Lineerleştirme ifadeleri ile tanımlanan matematiksel denklemler elektrik arkının sabit bir uzunlukta olması için tanımlanabilir. Fakat pratikte böyle bir durum söz konusu değildir ve ark uzunluğu ergitme sürecinde sürekli ve hızlı olarak değişmektedir. EAF' ler bağlı oldukları şebekelerde ciddi kırpışma problemlerine neden olmasının asıl kaynağı bu hızlı değişimlerdir. Bu nedenle elektrik arkının dinamik bir modelini tanımlamak için kırpışma etkisinin de dikkate alınması gereklidir. EAF'lerin neden olduğu kırpışma etkisinin matematiksel olarak modellenmesinde sinüzoidal kırpışma ve rastgele (Random) kırpışma olmak üzere iki farklı kabul kullanılmaktadır.

5.3.2.1. Sinüzoidal Kırpışma Etkisi

Sinüzoidal kırpışma etkisinin denklemi aşağıda sunulan ifade ile tanımlanır.

$$Vat(t) = Vat. (1 + m. \sin(w_f. t)) \quad (5.5)$$

Bu denklemde, V_{at} ark uzunluğuna bağlı eşik gerilimi, m modülasyon indeksi, w_f kırışma frekansını ifade etmektedir.

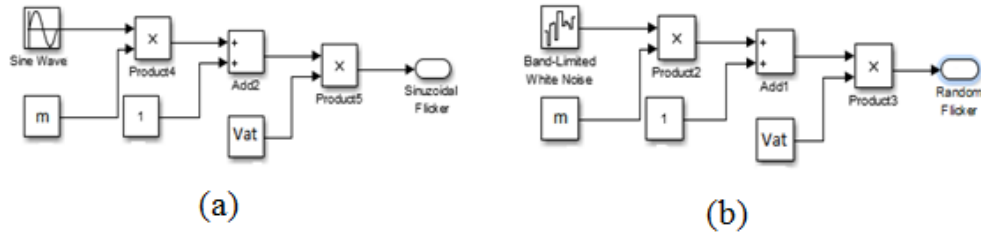
5.3.2.2. Rastgele Kırışma etkisi

Rastgele kırışma etkisi 0-12 Hz aralığında frekans bandı ile sıfır ortalamaya sahip olan rastgele bir sinyal olarak modüle edilir. Rastgele kırışma aşağıdaki matematiksel ifade ile tanımlanır.

$$V_{at}(t) = V_{at} \cdot (1 + m \cdot N(t)) \quad (5.6)$$

Bu ifadede, V_{at} ark uzunluğuna bağlı eşik gerilimi, $N(t)$ bant sınırlı beyaz gürültü sinyali ve m modülasyon indeksidir.

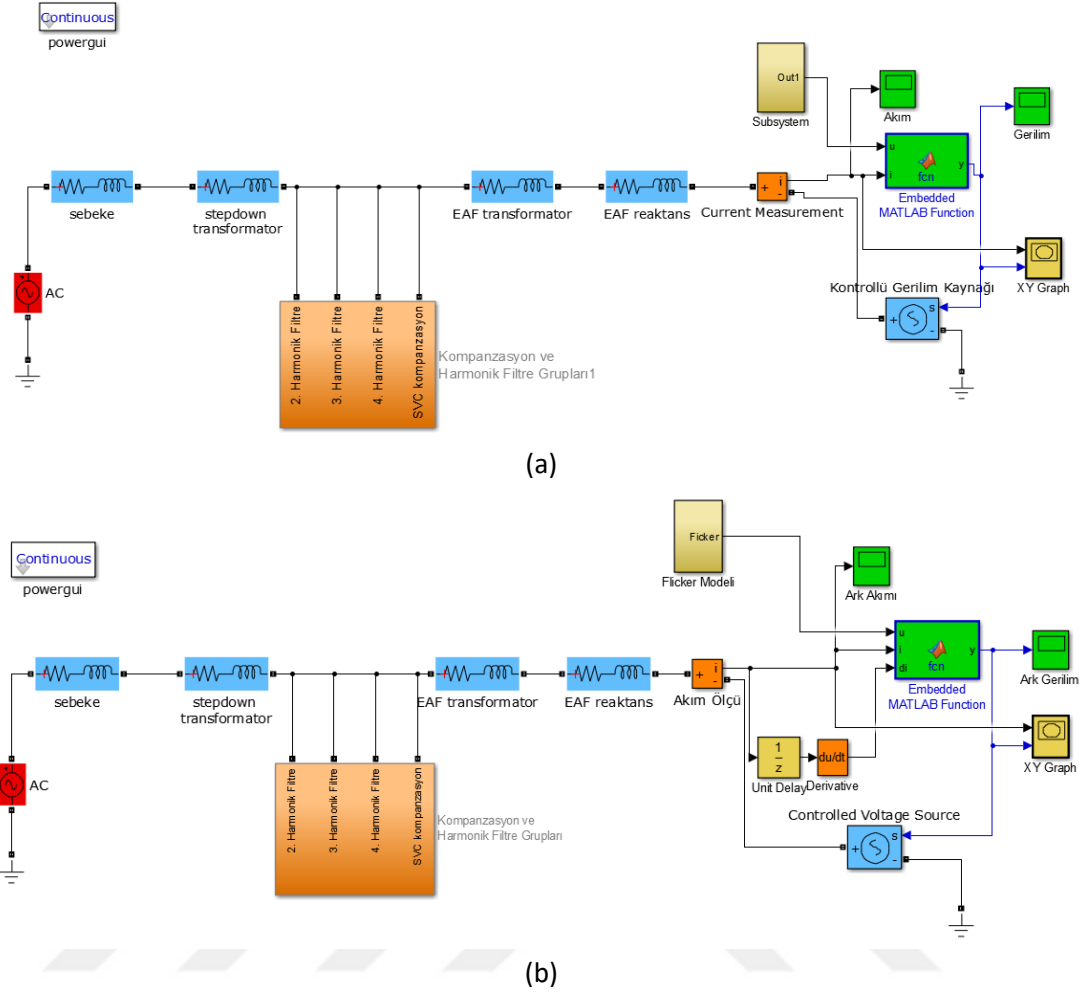
(5.5) ve (5.6) ifadelerinde tanımlanan kırışma etkilerinin bulunmasında kullanılan matematiksel denklemlerin Matlab/Simulink ile oluşturulmuş sistem modelleri Şekil 5.9'da sunulmuştur.



Şekil 5.11. Matematiksel kırışma ifadelerini tanımlamada kullanılan Matlab/Simulink sistem modeli, a) Sinüzoidal kırışma etkisi, b) Rastgele (random) kırışma etkisi.

5.4. EAF Sisteminin Bir Faz Benzetim Sonuçları

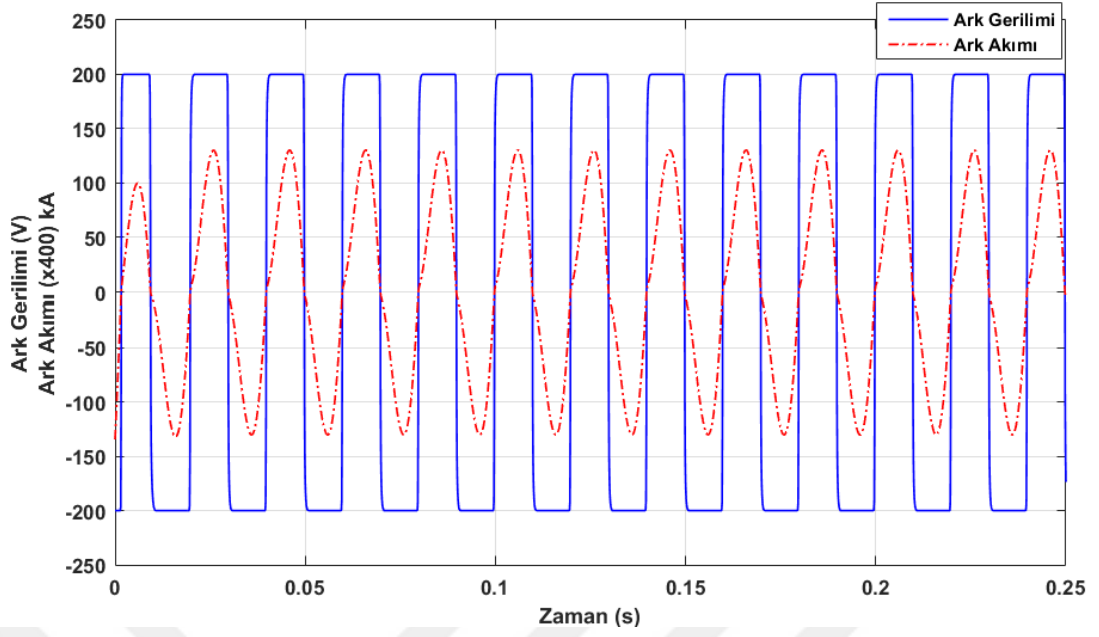
SİDEMİR tesisinin hesaplanan bir faz eşdeğer devre modeli kullanılarak Matlab/Simulink yardımı ile benzetim modeli oluşturulmuştur. Sistemin kompanzasyon ve harmonik filtre gruplarının modellenmesi için Şekil 5.2'de sunulan eşdeğer devre modeli ve kırışma etkisinin modellenmesi içinde Şekil 5.11'deki blok yapıları kullanılmıştır. Bu sistem yapılarının altblok olarak kullanıldığı bir faz eşdeğer Matlab/Simulink sistem modeli Şekil 5.12'deki gibidir. Modellemede elektrik arkının matematiksel ifadesi üstel model, hiperbolik model ve üstel hiperbolik model için Embedded Matlab/Function bloğunda kullanılan algoritma içerisinde tanımlanmıştır. Hiperbolik ve üstel hiperbolik modelde akımın türev ifadesine ihtiyaç duyulduğu için, akımın türevi alınarak fonksiyon bloğunda türev ifadesi değişken olarak atanmıştır. EAF'nin bir faz eşdeğer devresi, üstel benzetim modeli için Şekil 5.12 (a)'da, Hiperbolik ve üstel hiperbolik benzetim modelleri için ise Şekil 5.12 (b)'de sunulmuştur.



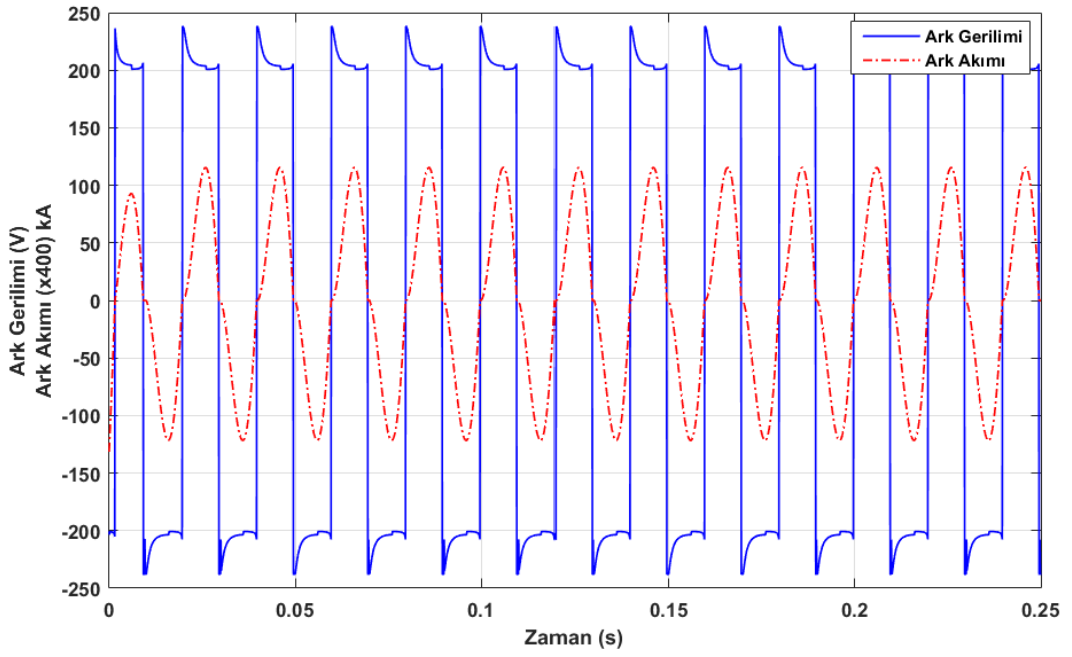
Şekil 5.52. SİDEMİR tesisinde 60 MVA EAF'yi besleyen elektriksel sistemin bir faz eşdeğer Matlab/Simulink devre modeli, a) Üstel Model, b) Hiperbolik ve üstel hiperbolik model.

5.4.1. Ark Modellerinin Statik V-I karakteristiklerinin İncelenmesi

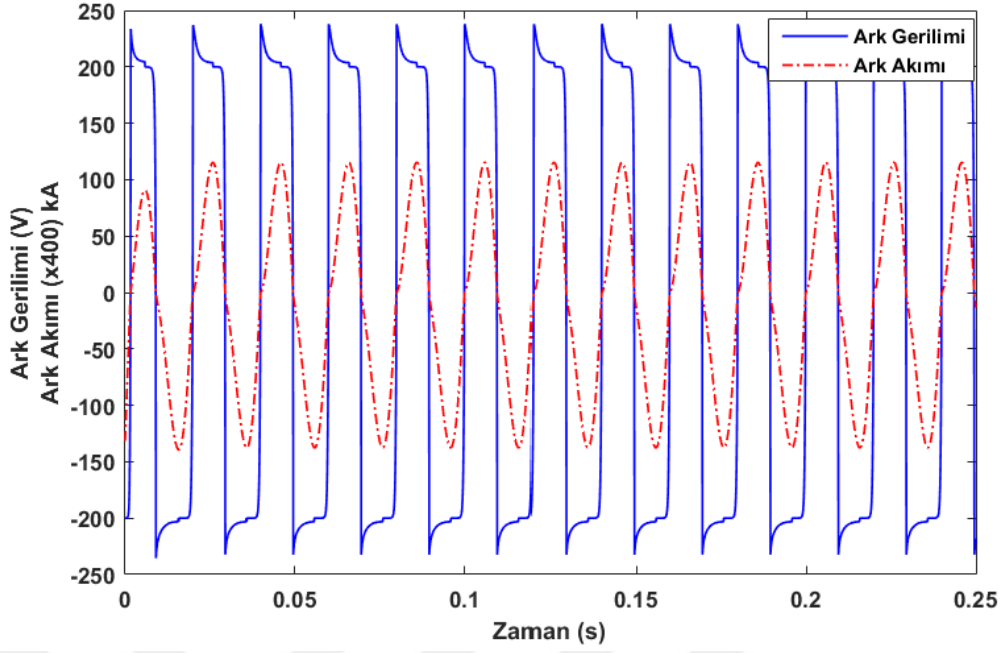
Elektrik arkının statik V-I karakteristiği sabit ark uzunluğu olduğu kabul edilerek tanımlanır. Gerçekte elektrik arkının sabit olması mümkün değildir. Fakat lineerleştirilmiş akım gerilim karakteristiği ile elektrik arkının statik karakteristiğinin tanımlanması mümkün olmaktadır. Statik V-I karakteristiğinden faydalanarak elektrik arkının dinamik karakteristiklerinin modellenmesi için uygun parametrelerin seçimi sağlanır. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8' de sunulan lineerleştirilmiş eğriler ve denklem (5.3),(5.4) ve (5.5)' de sunulan matematiksel ifadeler ile sabit ark uzunluğu için elektrik arkının üstel, hiperbolik ve üstel hiperbolik fonksiyon olarak modellenmesi durumundaki statik gerilim ve akım değişimleri sırası ile Şekil 5.13, 5.14 ve 5.15'de sunulmuştur. Bu grafiklerde V_{at} eşik gerilimi 200 V olarak seçilmiştir. Ark uzunluğunun sabit olduğu durumda kırpışma etkisi oluşmayacaktır.



Şekil 5.63. $V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda üstel model ile elde edilen elektrik arkının gerilim ve akım dalgaformu değişimi.



Şekil 5.74. $V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda hiperbolik model ile elde edilen elektrik arkının gerilim ve akım dalga formu değişimi.



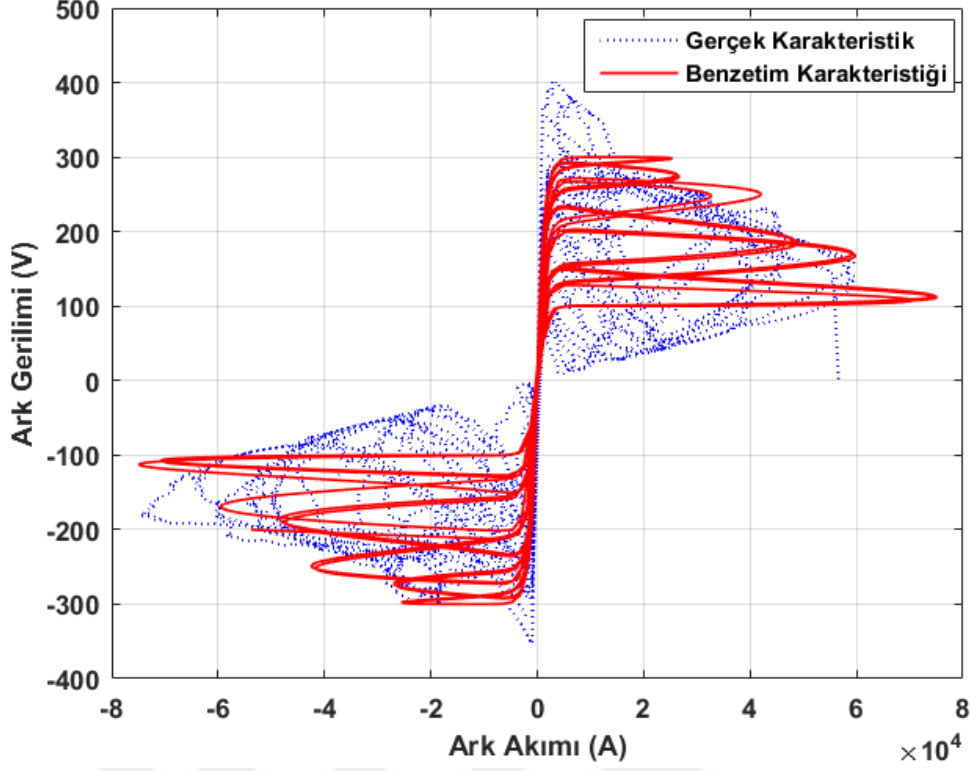
Şekil 5.15. $V_{at}=200$ V için sabit ark uzunluğunda üstel-hiperbolik model ile elde edilen elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu değişimi.

5.4.2. Elektrik Arkının Dinamik Olarak Modellenmesi

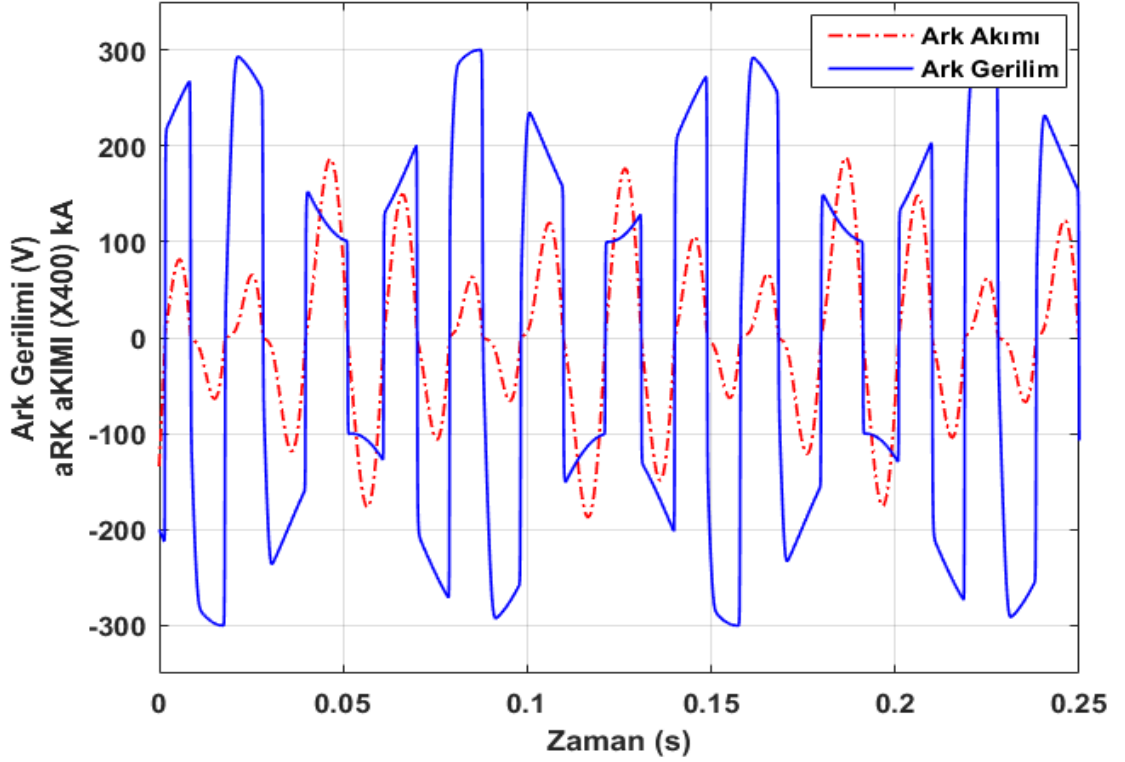
EAF'lerde ergitme işleminde ergitilen metal ile hurda arasındaki mesafe sürekli olarak değiştiği için ark gerilimi de değişkendir. Bu değişkenlikten ötürü gerilim dalgalanmaları ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle Elektrik arkının dinamik olarak modellenebilmesi için kırpışma etkisinin dikkate alınması gereklidir. Belirtildiği üzere kırpışma etkisinin tanımlanmasında sinüzoidal kırpışma ve rastgele kırpışma olmak üzere iki farklı kırpışma etkisi dikkate alınmaktadır.

5.4.2.1. Sinüzoidal Kırpışma Etkisi İle Elektrik Arkının Dinamik Karakteristiğinin Tanımlanması

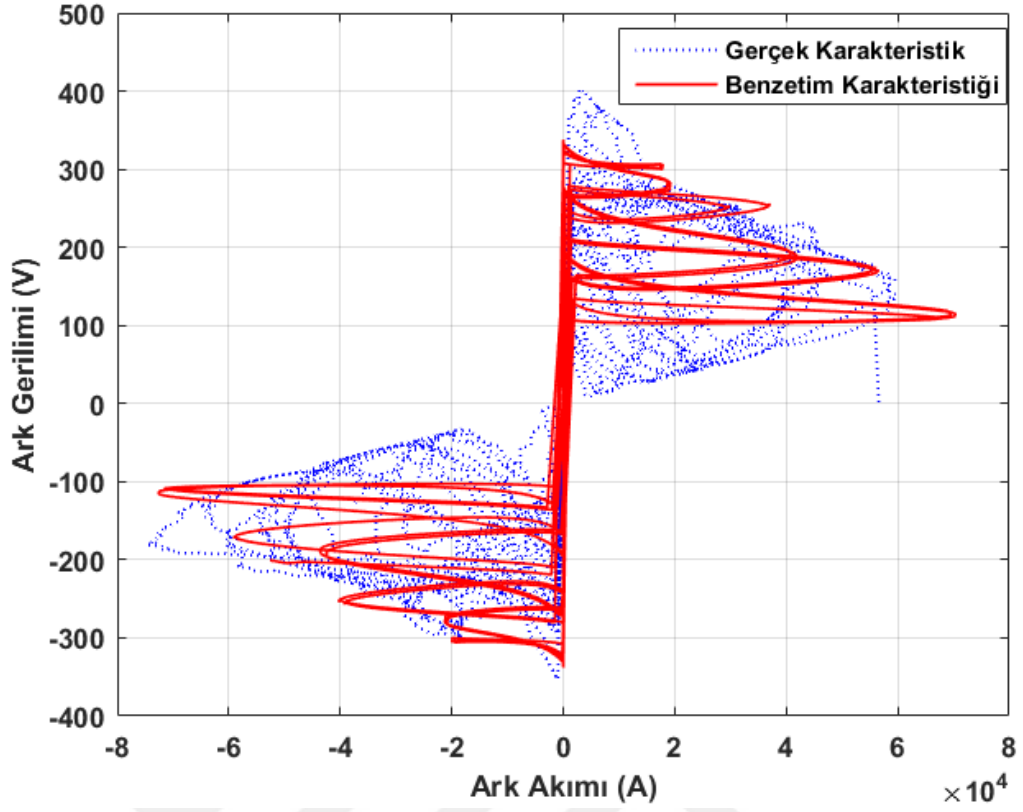
Sinüzoidal kırpışma etkisinin tanımlanmasında Şekil 5.11 (a)'da sunulan kırpışma modeli kullanılmıştır. Bu modelde V_{at} eşik gerilimi 200 V, sinüs dalgası ise genliği 1 olan sinüzoidal sinyal olarak seçilmiştir. Kırpışma etkisinin şiddetini belirleyecek olan modülasyon katsayısı ise deneysel eğrilerden 0,5 olarak belirlenmiştir. Bu kabuller dikkate alındığında sinüzoidal kırpışma etkisi ile elde edilen benzetim sonuçları aşağıdaki gibidir.



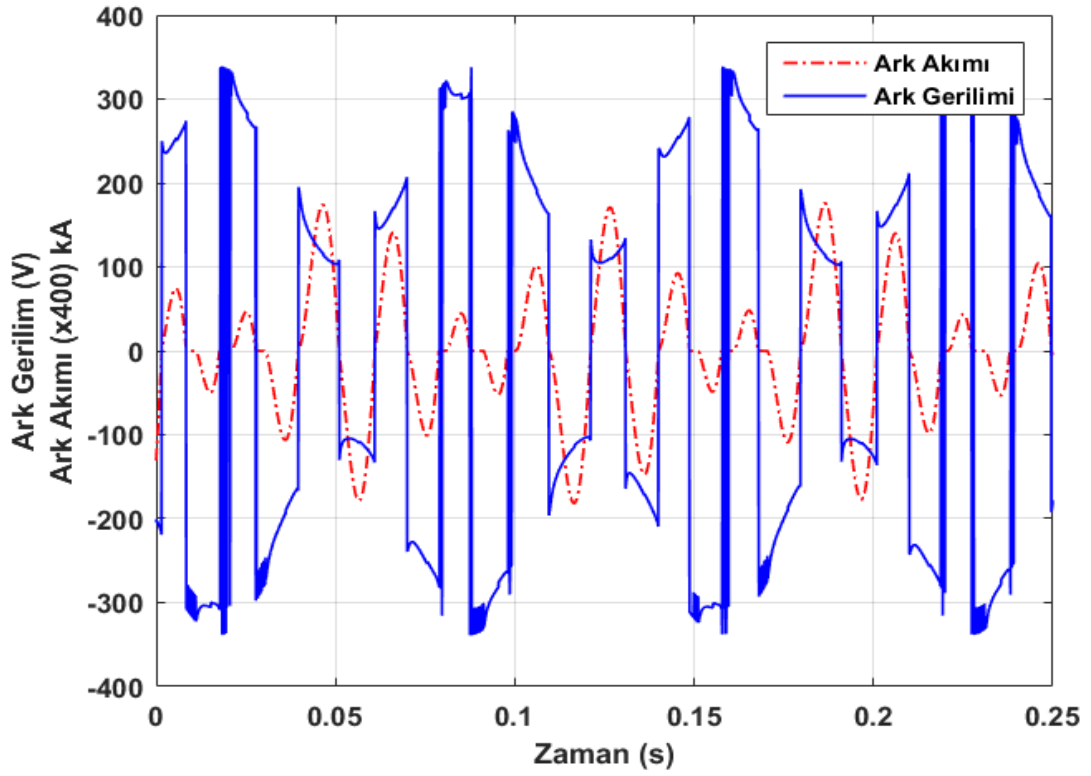
Şekil 5.86. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



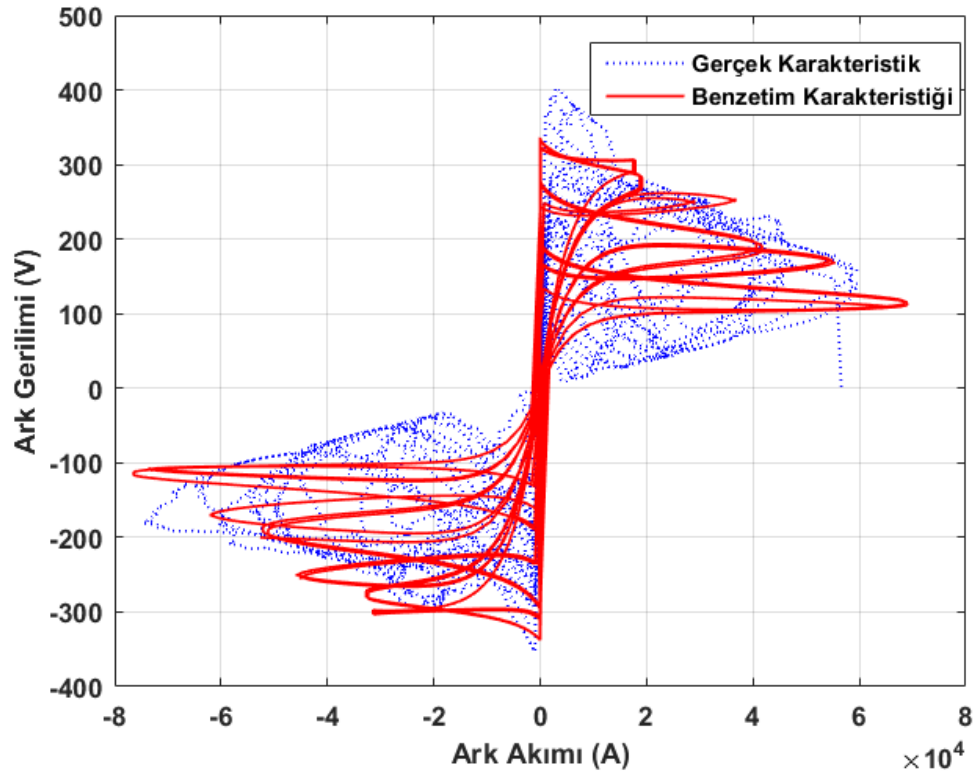
Şekil 5.97. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.



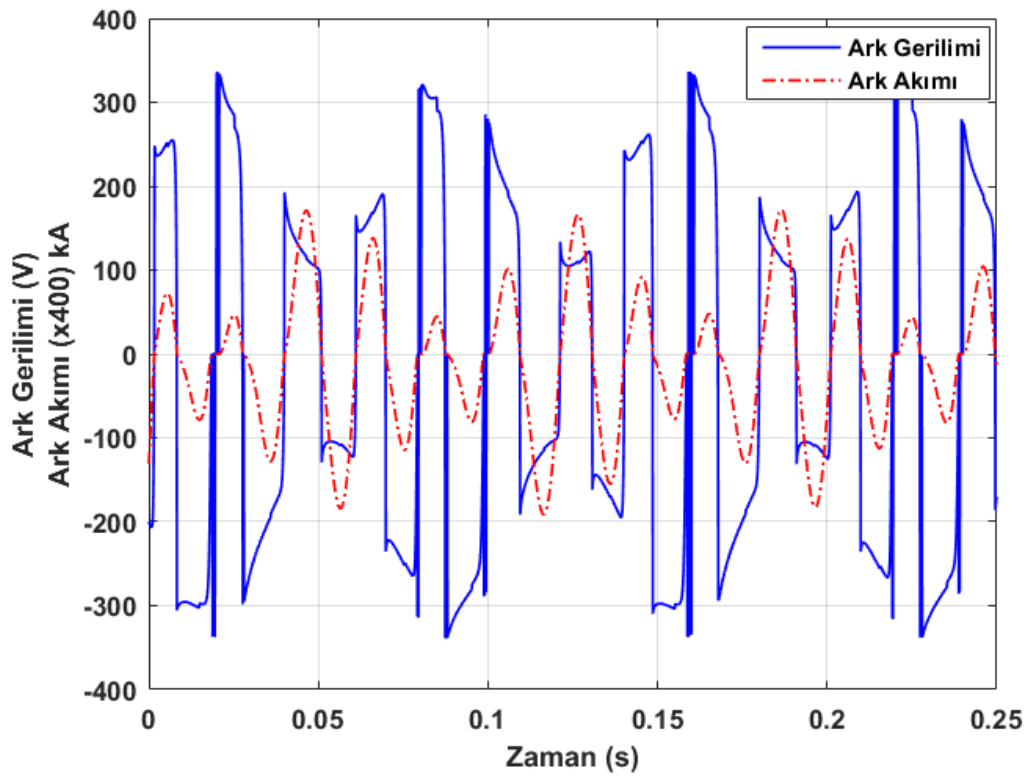
Şekil 5.18. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



Şekil 5.19. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.5$ seçildiğinde sinüzoidal kırışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.



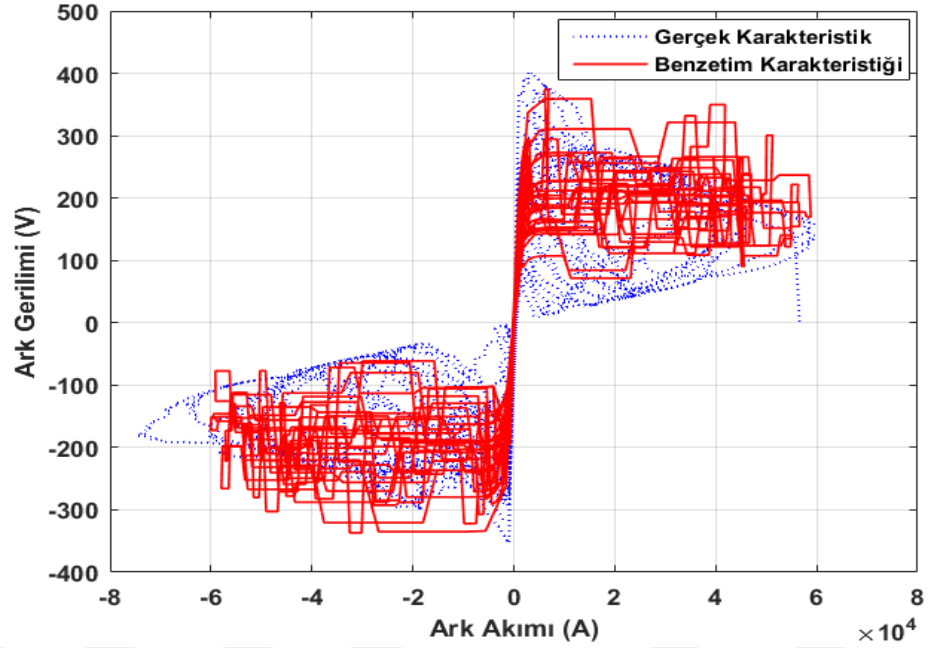
Şekil 5.20. Vat=200 Volt ve m=0.5 seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



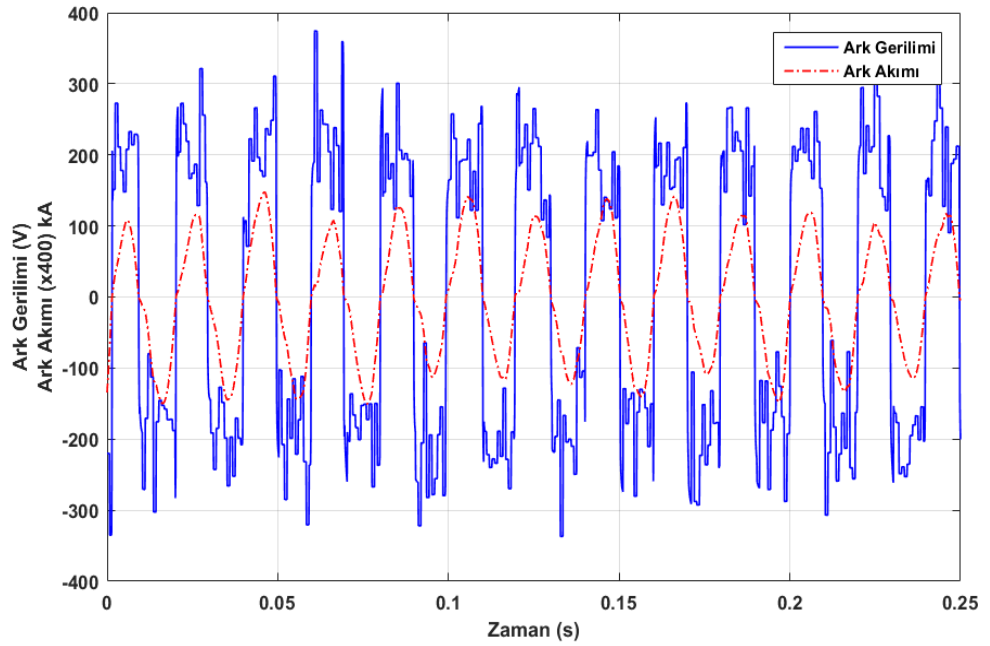
Şekil 5.21. Vat=200 volt ve m=0,5 seçildiğinde sinüzoidal kırpışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektriksel akım ve gerilim dalga formu.

5.4.2.2. Rastgele Kırışma Etkisi İle Elektrik Arkının Dinamik Karakteristiğinin Tanımlanması

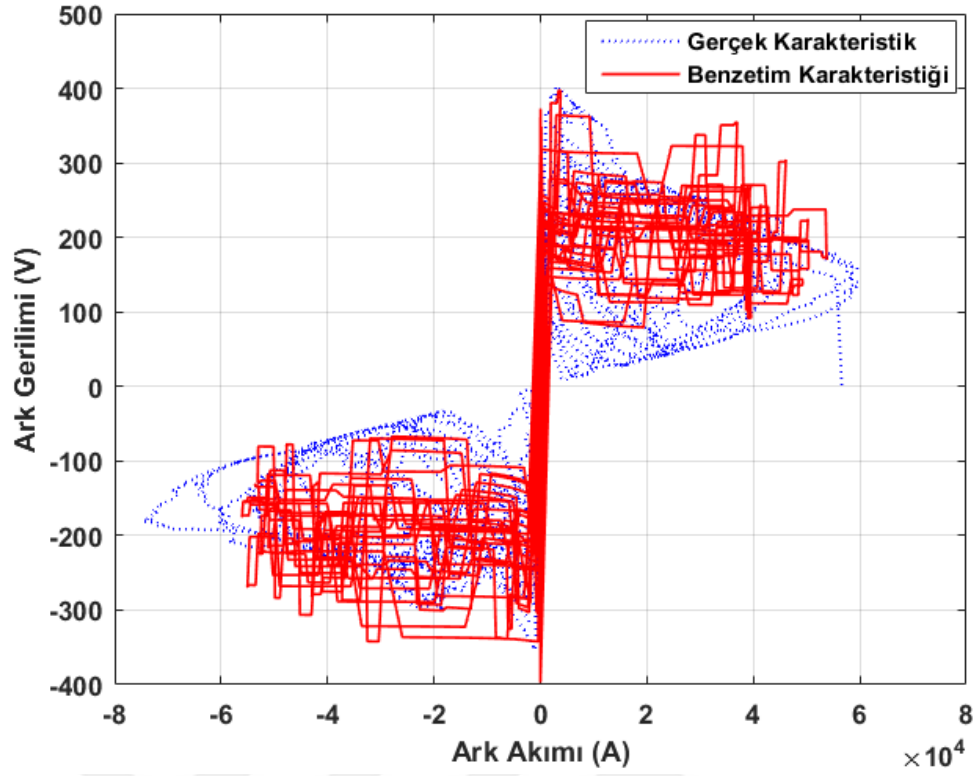
Rastgele kırışma etkisinin tanımlanmasında Şekil 5.11 (b)'de sunulan kırışma modeli kullanılmıştır. Bu modelde V_{at} eşik gerilimi 200 V, modülasyon indeksi 0,8 ve gürültü faktörü 0,0001 alınmıştır. Rastgele kırışma etkisi ile elde edilen benzetim sonuçları aşağıdaki gibidir.



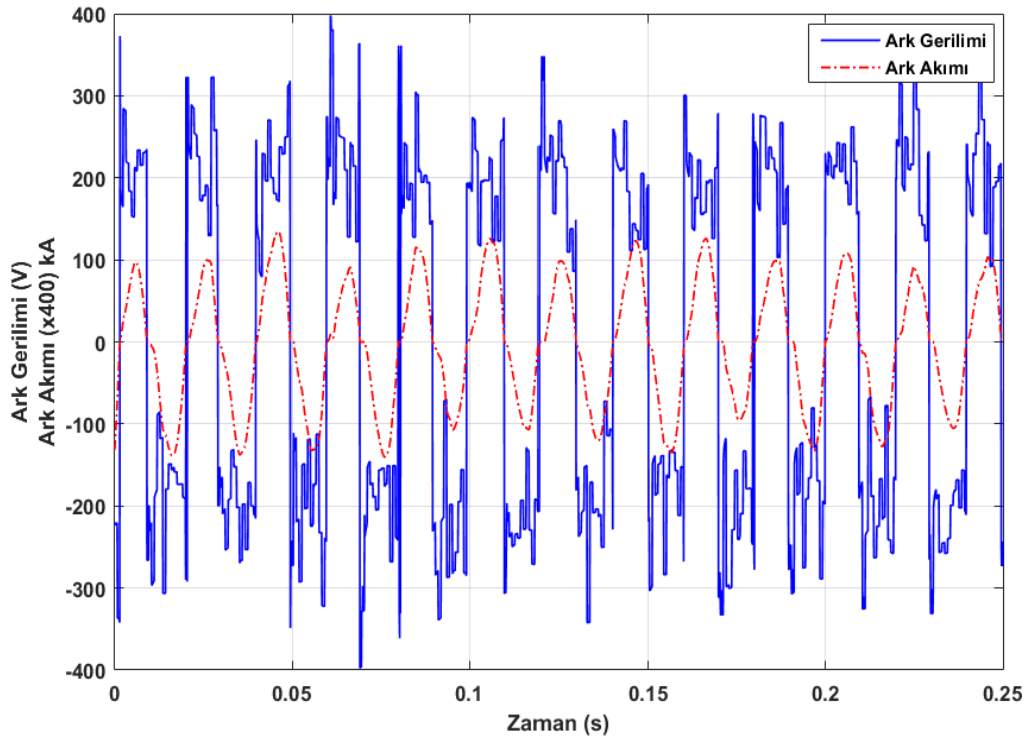
Şekil 5.102. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



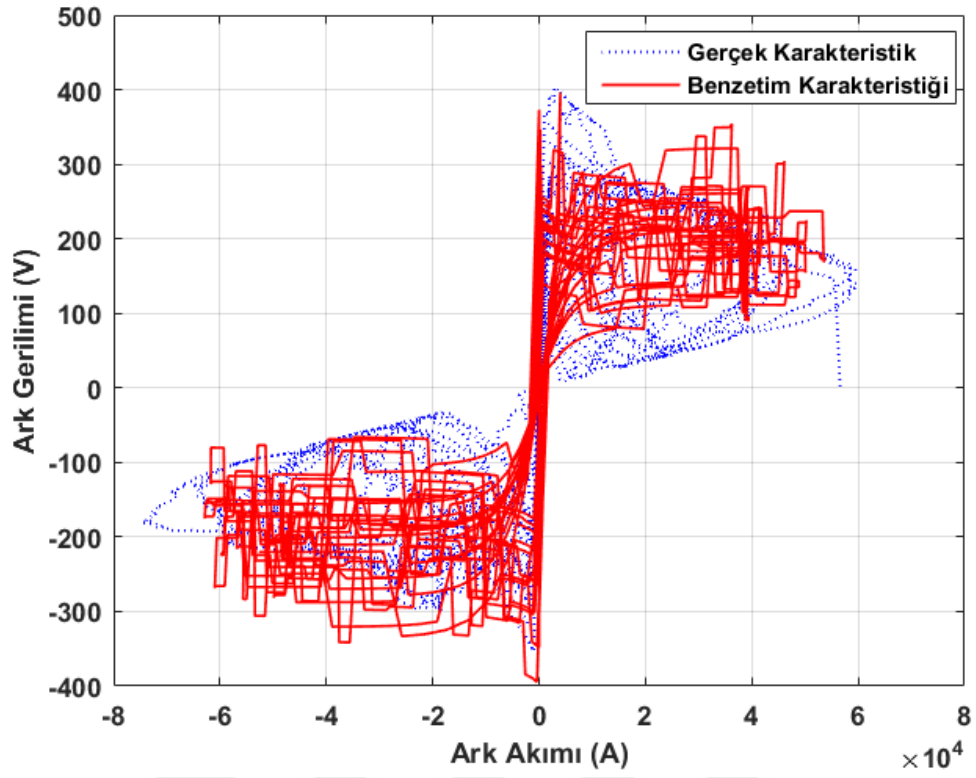
Şekil 5.113. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile üstel model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.



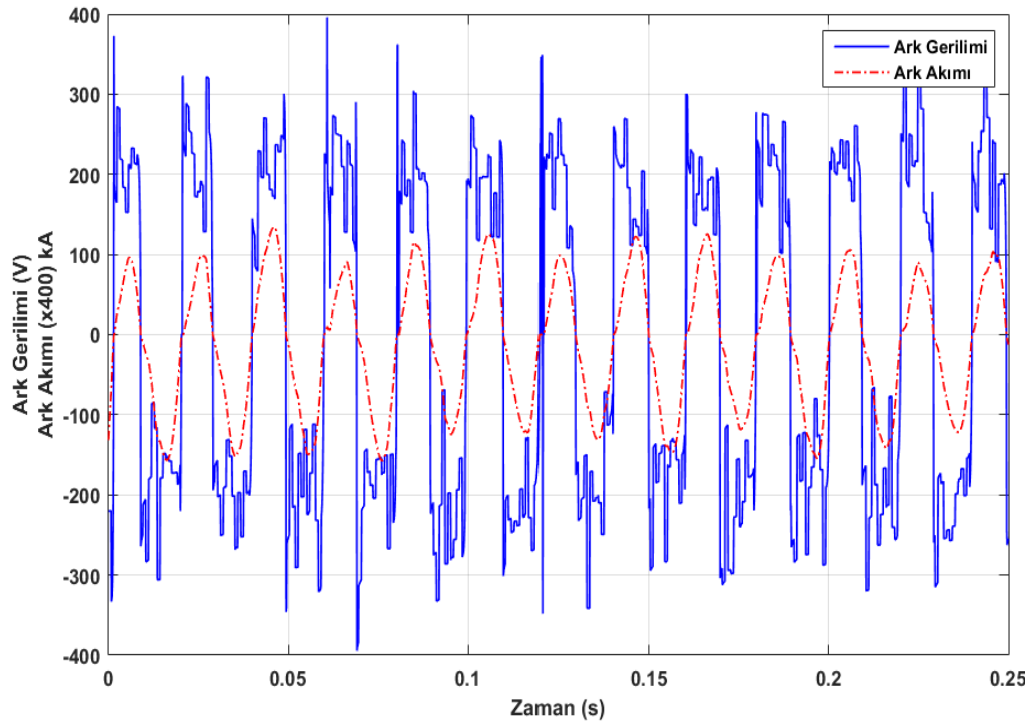
Şekil 5.124. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



Şekil 5.135. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.



Şekil 5.146. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği.



Şekil 5.157. $V_{at}=200$ Volt ve $m=0.8$ seçildiğinde rastgele kırışma etkisi ile üstel-hiperbolik model için elektrik arkının akım ve gerilim dalga formu.

5.4.3. Model 4: Elektrik Arkının Modelelenmesi için Yeni Zaman Domeni Modeli

Denklem (5.1)'de sunulan diferansiyel denklemin çözümü ve katsayıların belirlenmesi zor olmaktadır. Deneysel verilerden elde edilen V-I karakteristik eğrisi kullanılarak elektrik arkının modellenmesi için sunulan bu yeni modelde elektrik arkının davranışı Tablo 5.3'de görüldüğü dört temel kısma ayrılmıştır.

Tablo 5.3. Elektriksel arkın karakteristiğinin tanımlanabilmesi için karakteristik bölgelerin tanımlanması.

Alan	Koşul
Alan 1	$(di/dt)>0, i>0, V_a>0$
Alan 2	$(di/dt)<0, i>0, V_a>0$
Alan 3	$(di/dt)<0, i<0, V_a<0$
Alan 4	$(di/dt)>0, i<0, V_a<0$

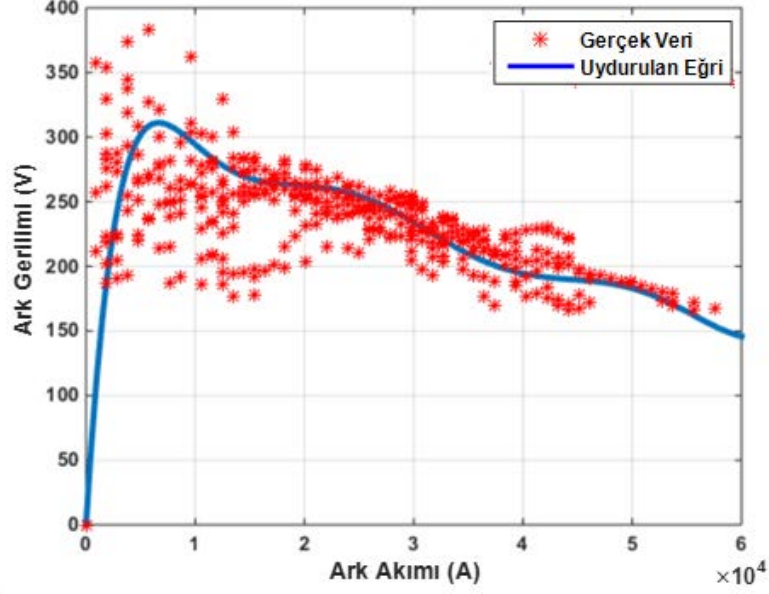
Gerçek zamanlı ölçüm sonuçlarından elde edilen V-I karakteristik eğrisi için Alan 1 ve Alan 3, Alan2 ve Alan 4' ün simetrik olacağı düşünüldüğünde sadece Alan 1 ve Alan 2'ye göre oluşturulacak benzetim ile elektrik arkı tanımlanabilir. Alan 1'de sunulan koşul için Matlab Curve Fitting Toolbox kullanılarak gerilim ve akım arasındaki matematiksel ilişki aşağıda gösterildiği gibi 9. Dereceden bir polinom ifadesi ile tanımlanabilir.

$$f(x) = p_1 \cdot x^9 + p_2 \cdot x^8 + p_3 \cdot x^7 + p_4 \cdot x^6 + p_5 \cdot x^5 + p_6 \cdot x^4 + p_7 \cdot x^3 + p_8 \cdot x^2 + p_9 \cdot x^1 + p_{10} \quad (5.7)$$

Bu polinom ifadesinde polinom katsayıları eğri uydurma yöntemi ile,

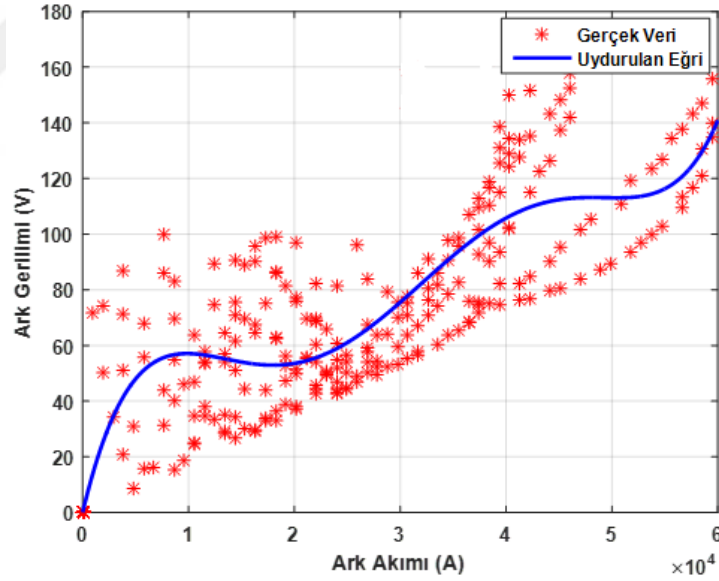
$$p_1 = 2.878e-37, p_2 = -7.783e-32, p_3 = 8.91e-27, p_4 = -5.624e-22, p_5 = 2.135e-17, p_6 = -4.98e-13, p_7 = 6.995e-09, p_8 = -5.521e-05, p_9 = 0.2098, p_{10} = 0.1143$$

olarak belirlenmiştir ve eğri uydurma yöntemi ile elde edilen 9. Dereceden polinom eğrisi ile gerçek zamanlı gerilim-akım eğrisi Şekil 5.28'deki gibidir [119].



Şekil 5.28. $(di/dt) > 0$, $i > 0$ ve $V_a > 0$ koşulunu sağlayan akım ve gerilim ölçüm değerleri ve uydurulan 9. Dereceden polinom eğrisi.

Alan 2 eğri uydurma yöntemi ile akımın azalması durumu için 5. Dereceden bir polinom ifadesi olarak tanımlanabilir.



Şekil 5.29. $(di/dt) < 0$, $i > 0$ ve $V_a > 0$ koşulunu sağlayan akım ve gerilim ölçüm değerleri ve uydurulan 5. Dereceden polinom polinom eğrisi.

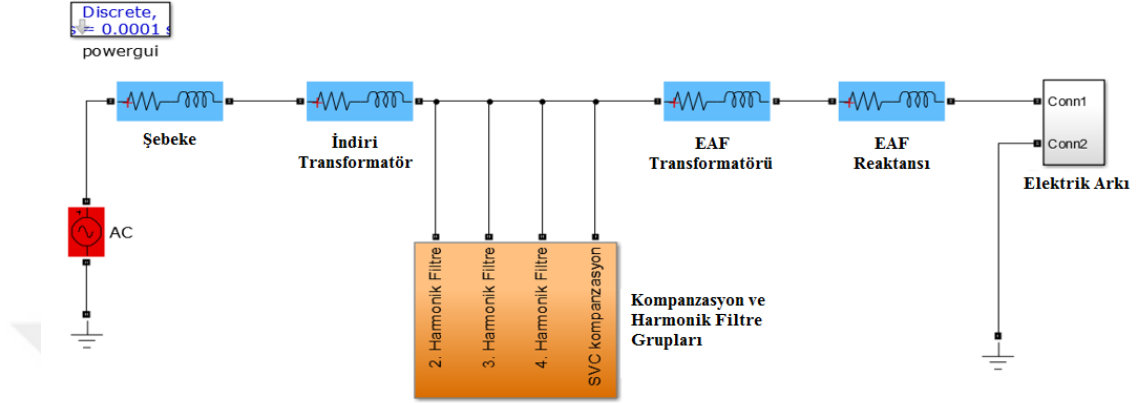
Şekil 5.29'da sunulan polinom eğrisinin polinom fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$f(x) = p_1 \cdot x^5 + p_2 \cdot x^4 + p_3 \cdot x^3 + p_4 \cdot x^2 + p_5 \cdot x + p_6 \quad (5.8)$$

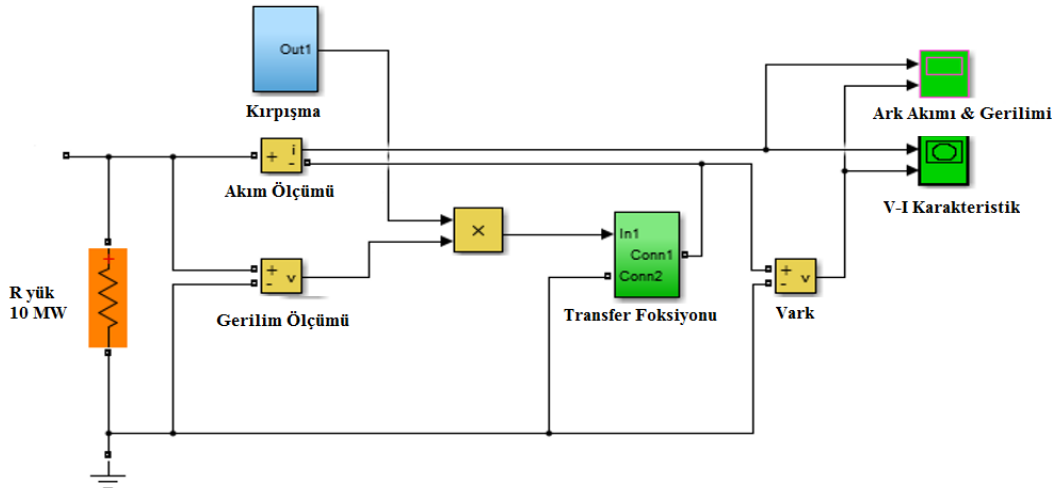
ve bu polinomun katsayıları

$p_1 = 7.42e-21$, $p_2 = -1.172e-15$, $p_3 = 6.611e-11$, $p_4 = -1.577e-06$, $p_5 = 0.01596$ ve $p_6 = 0.05533$ 'dür.

Bu polinom ifadesini tanımlamak için kullanılan EAF'yi besleyen sistemin bir faz eşdeğer Matlab/Simulink devre şeması şekil 5.30'daki gibidir. Elektriksel arka kadar olan sistem şeması daha önce açıklanan modeller ile aynıdır. Fakat sunulan bu yeni modelde gerilim kontrollü kaynak modeli yerine Şekil 5.31'de gösterildiği gibi akım kaynağı modeli kullanılarak lineer olmayan direnç tasarlanmıştır.

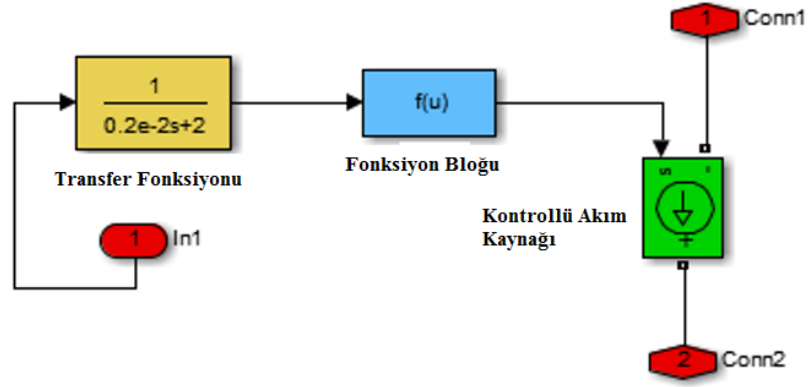


Şekil 5.30. EAF'yi besleyen sistemin Matlab/Simulink ile oluşturulmuş bir faz eşdeğer sistem modeli.



Şekil 5.31. Elektrik Arkinin modellenmesinde kullanılan EAF yükünün Matlab/Simulink ile oluşturulan nelineer direnç modeli.

Bu modelde R yük değeri HIOKI 3197 güç analizörü ile ölçülen güç eğrilerinden 14 MW olarak ölçülmüştür. Transfer fonksiyonu ise Şekil 5.32'de sunulan akım kontrollü kaynak ve fonksiyon bloğu kullanılarak oluşturulmuştur.

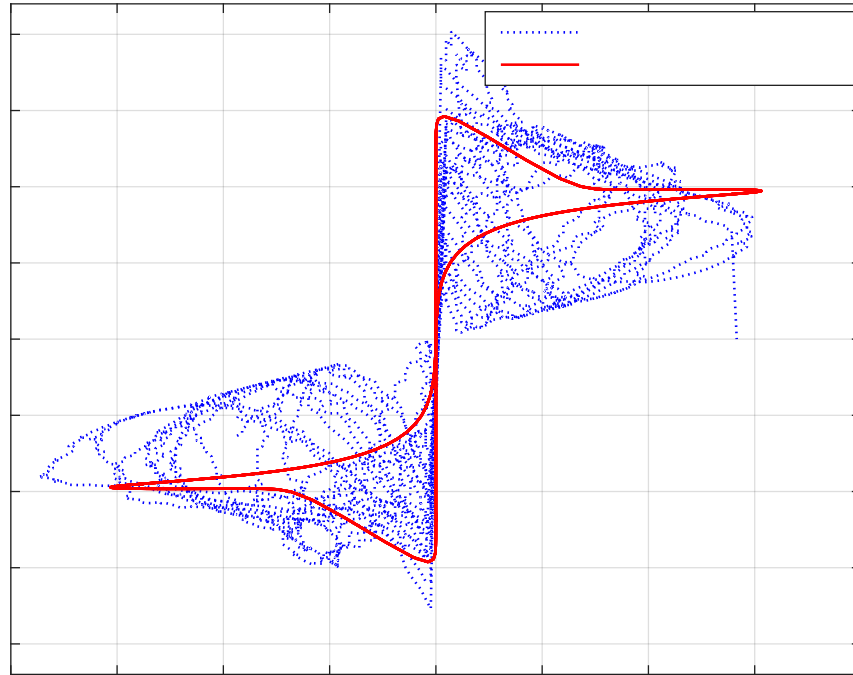


Şekil 5.32. Elektrik arkını tanımlamak için kullanılan transfer fonksiyon bloğu.

Burada fonksiyon bloğunun matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$i = I_0 \cdot \left(\frac{V}{V_{at}} \right)^\alpha \quad (5.9)$$

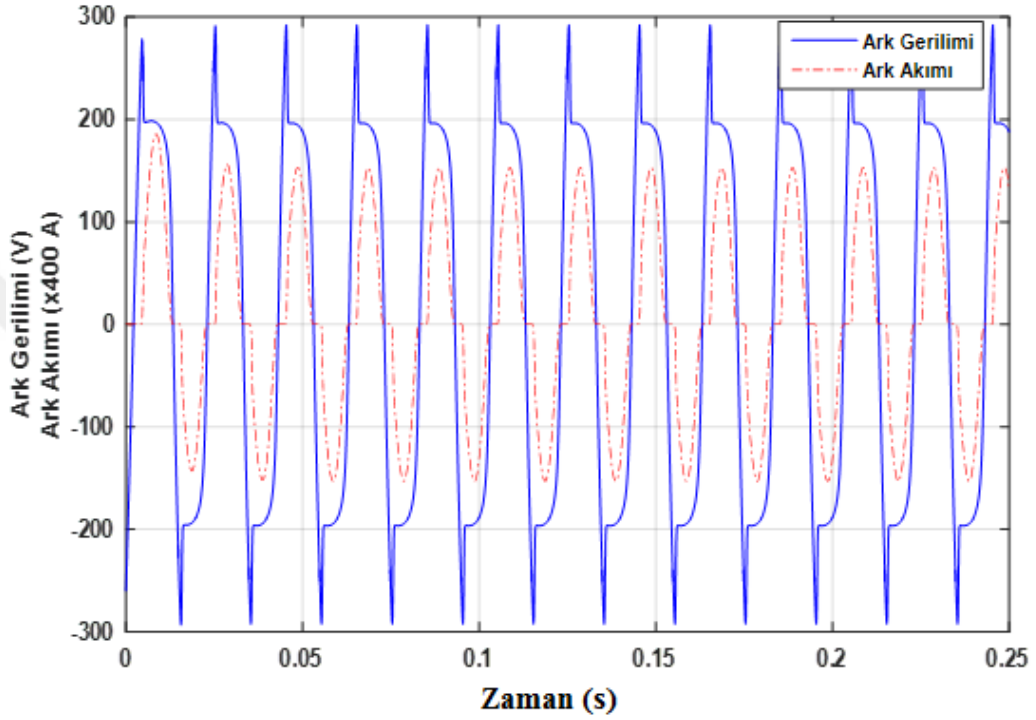
Bu ifadede, V ve i akımın ani değerleri, I_0 maksimum gerilim değerini belirlemek için kullanılan referans akım ve V_{at} eşik gerilimidir, α ise doğrusal olmayan karakteristiği tanımlamada kullanılan bir üstel ifadedir ve çalışmada $\alpha=15$ olarak kullanılmıştır. Modelde $I_0=60$ kA ve $V_{at}=120$ V seçilerek benzetim analizi gerçekleştirildiğinde elde edilen elektrik arkının dinamik V-I karakteristiği Şekil 5.33’ de gösterilmiştir.



×

Şekil 5.33. Simülasyon sonucunda elde edilen elektrikselsel arkın dinamik V-I karakteristik eğrisi.

Bu karakteristik eğri gösteriyorki, Şekil 5.32’de sunulan blok yapısında uygun parametreler kullanılarak akımın yükselmesinde elde edilen 9. Dereceden polinom eğrisi şeklinde modellenebilir. Akımın azalması ise 5. Dereceden bir fonksiyon yerine üstel bir fonksiyon olarak kabul edilerek elektriksel arkın modellenmesi basitleştirilebilir. Simülasyon ile elde edilen elektrik arkının dinamik akım ve gerilim değişimleri grafiksel olarak Şekil 5.34’deki gibidir.

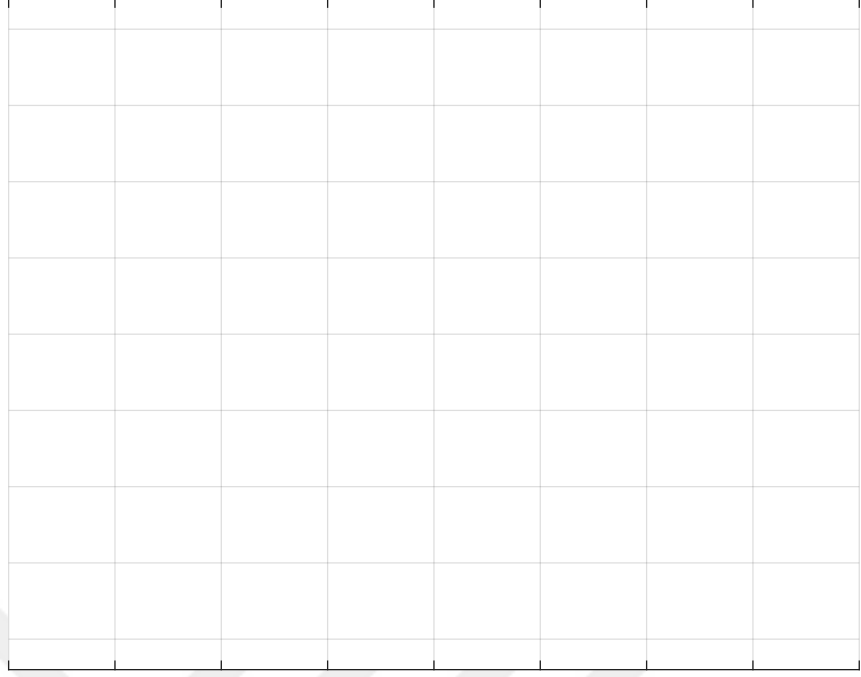


Şekil 5.164. Simülasyon sonucunda elde edilen elektriksel arkın dinamik akım ve geriliminin değişimi (Akım değeri ölçekli olarak gösterilebilmek için 1/400 oranında küçültülmüştür).

5.4.3.1. Model 4’ün Rastgele Kırpışma Etkisi ile İncelenmesi

Model 4 için geliştirilen benzetim modeli rastgele kırpışma etkisi ile analiz edildiğinde elektrik arkının V-I karakteristiği Şekil 5.35’deki gibi elde edilmiştir.

Model 4 için elektrik arkının gerilim akım dalga formu değişimi ise Şekil 5.36’deki gibidir. Sunulan bu modelde Transfer fonksiyonu ve üstel fonksiyon içerisindeki parametreler değiştirilerek karakteristik eğrinin genliği ve akımın yükselme ve düşme pik değerleri değiştirilebilir. Böylece farklı büyüklükteki fırınlar içinde bu model uygulanabilir.

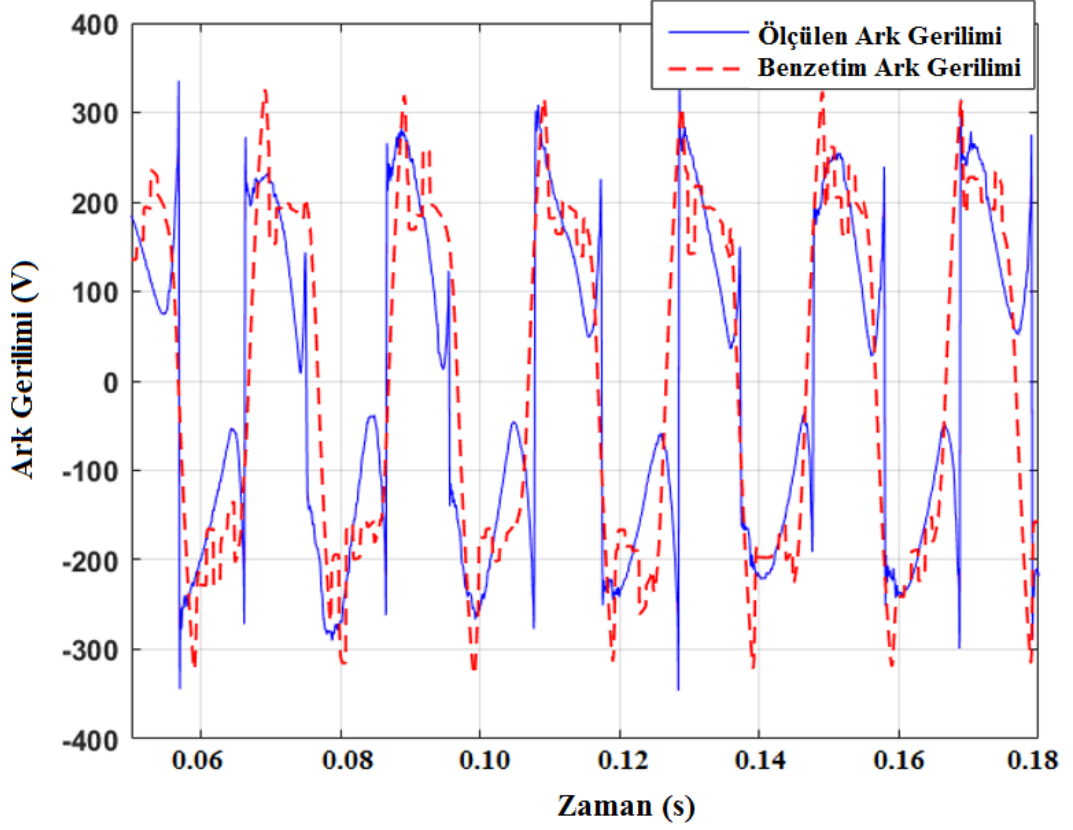


Şekil 5.35. Rastege kırışma etkisi ile Model 4' ün V-I karakteristiği.



Şekil 5.36. Model 4' ün rastgele kırışma etkisi ile gerilim ve akım dalga formu değişimi.

Ölçülen elektrik ark gerilimi ile benzetim sonucunda elde edilen ark geriliminin zaman ekseninde karşılaştırılması Şekil 5.37’ de sunulmuştur. Şekil 5.37’den görüldüğü gibi benzetim modelinden elde edilen ark gerilimi gerçek ark karakteristiğine yakın alınmaktadır.

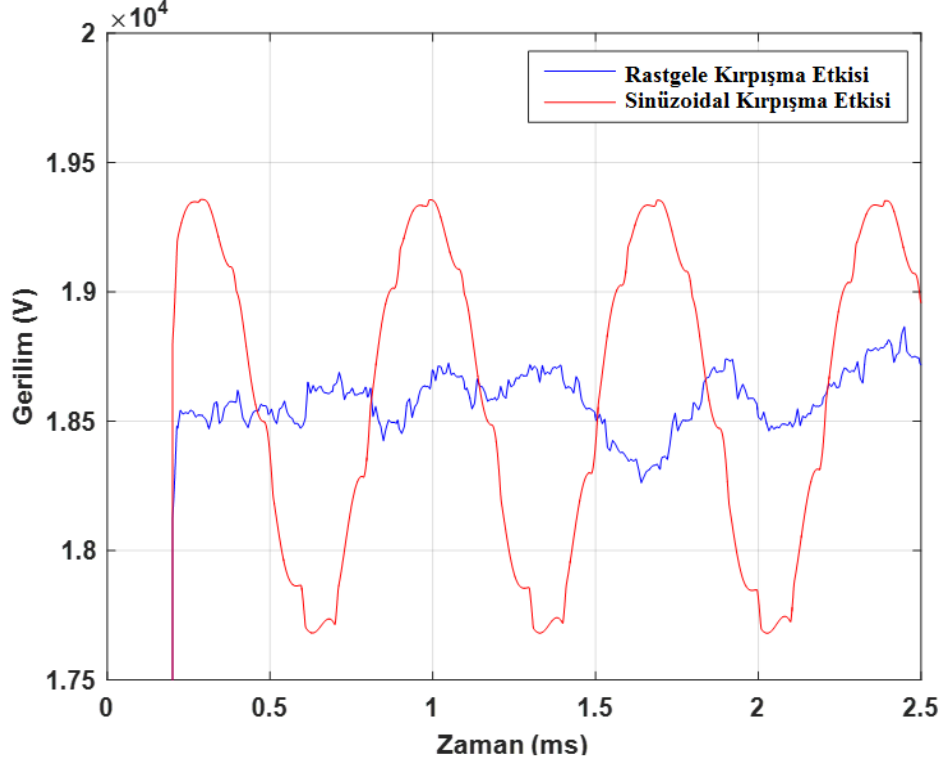


Şekil 5.37. Model 4 kullanılarak benzetim sonucunda elde edilen ark gerilimi ile gerçek zamanlı ölçüm sonuçlarından elde edilen ark geriliminin zaman ekseninde karşılaştırılması.

5.4.4. Bir Faz Benzetim Sonuçlarının Karşılaştırılması

EAF'yi besleyen sistemin bir faz eşdeğer modeli ve sunulan dört farklı elektrik ark modeli kullanılarak gerçekleştirilen benzetim sonuçları karşılaştırıldığında;

- 1- Üstel model, hiperbolik model, üstel hiperbolik model ve sunulan yeni zaman domeni modeli elektrik arkının modellenmesinde kullanılabilir.
- 2- Üstel model kullanılarak, sinüzoidal kırpışma ve rastgele kırpışma etkisi ile OBN'deki gerilimin RMS değerlerinin değişimi Şekil 5.38'de gösterilmiştir.



Şekil 5.38. Üstel model kullanılarak OBN’de elde edilen gerilimin sinüzoidal kırışma ve rastgele kırışma etkisi ile değişimi.

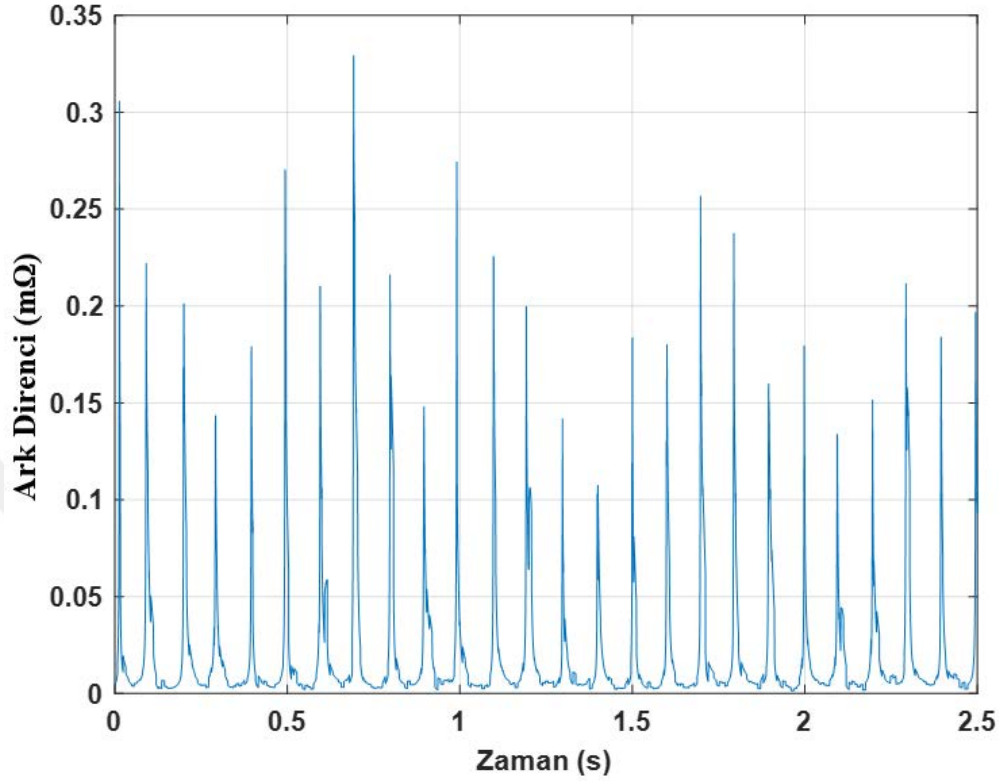
Şekil 5.38’den görüldüğü gibi sinüzoidal kırışma etkisinde gerilim dalgalanmalarının değişimi periyodik olarak değişmektedir fakat elektrik arkının neden olduğu gerilim değişimi OBN’de periyodik olmayacaktır. Bu nedenle kırışma etkisinin tanımlanmasında rastgele kırışma etkisi kullanılmalıdır.

- 3- Bir faz benzetim modellerinden elde edilen OBN’deki gerilim harmonik bozulma değerleri ve ölçümler sonucunda elde edilen gerilim harmonik bozulma değerleri Tablo 5.4’de sunulmuştur.

Tablo 5. 4. Deney ve benzetimler sonucunda elde edilen gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması.

DeneySEL Ölçüm	2. Harmonik (%)	3. Harmonik (%)	4. Harmonik (%)	5. Harmonik (%)	7. Harmonik (%)	THDV (%)
A fazı	0,146	0,641	0,056	0,619	0,013	2,00
B Fazı	0,158	0,652	0,056	0,722	0,015	2,30
C Fazı	0,139	0,508	0,065	0,628	0,016	2,50
Benzetim						
Model 1	0,160	0,301	0,196	1,880	1,030	3,54
Model 2	0,140	0,102	0,265	1,810	1,190	3,47
Model 3	0,130	0,119	0,200	1,930	0,890	3,63
Model 4	0,100	0,650	0,040	0,550	0,024	2,15

Tablo 5.4'den görüldüğü gibi tasarlanan yeni model (Model 4) EAF'nin neden olduğu gerilim harmoniklerinin belirlenmesinde daha faydalıdır. Model 4 ile elde edilen ark direncinin değişimi Şekil 5.39'daki gibidir.

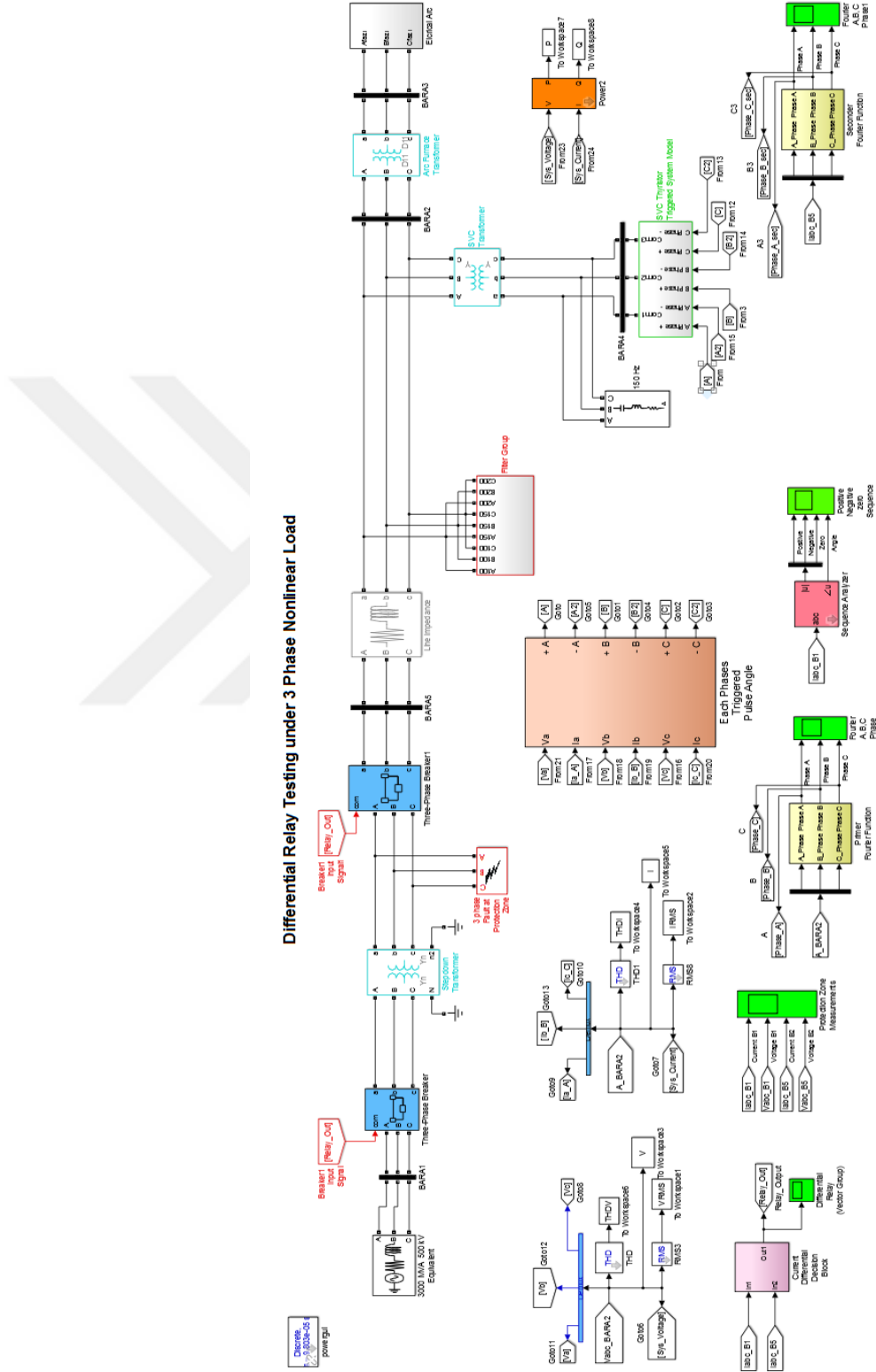


Şekil 5.179. Yeni zaman domeni model ile (model 4) benzetim sonucunda elde edilen ark direncinin değişimi.

Uygulanan bir faz eşdeğer devre modelleri elektrik ark fırının dengesiz çalışma koşulunu tanımlamada yetersiz kalacağı için EAF'nin üç faz sistem modeli ile güç kalitesi parametreleri ve dengesizlikler değerlendirilmelidir.

5.4. EAF'nin 3 FAZ BENZETİM MODELİ

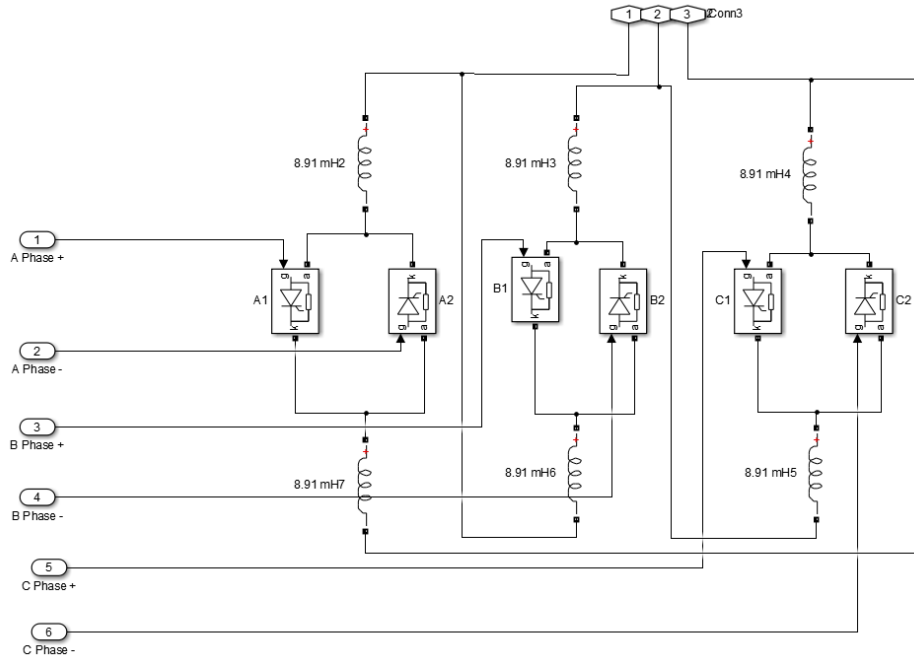
Matlab Simulink ile modellenen EAF'nin 3 faz benzetim modeli Şekil 5.40'da sunulmuştur.



Şekil 5.40. EAF'yi besleyen sistemin üç faz Matlab/Simulink sistem modeli.

5.4.1. TKR Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi

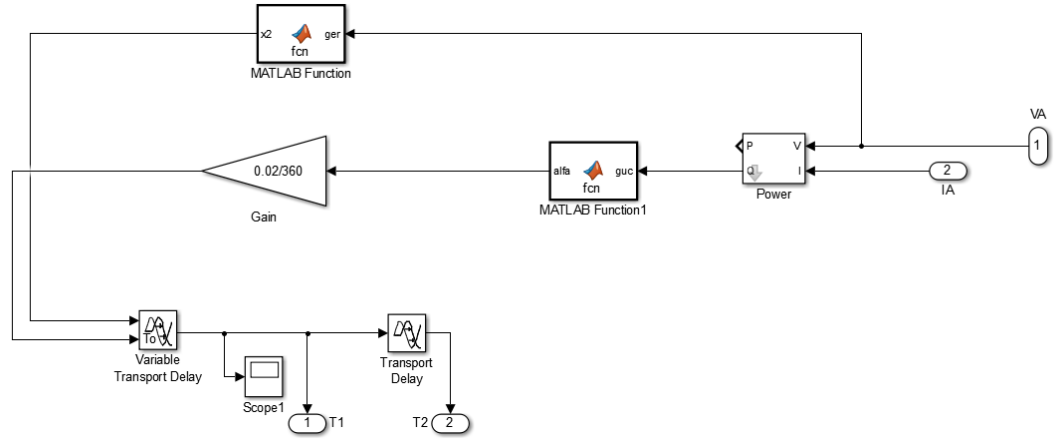
SİDEMİR tesisinde Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) SVC yapısı ile reaktif güç kompanzasyonu yapılmaktadır. Fakat kompanzasyon sistemi ve harmonik filtreler manuel olarak kontrol edilmektedir. Yüksek reaktif güç çeken EAF'nin devre dışı kalması durumunda harmonik filtre grupları ve TKR kompanzasyon sistemi de devre dışı kalmalıdır. Bu sistemler devre dışı bırakılmazsa sistem yönetmeliklerde belirtilen sınırların üzerinde reaktif güç çekebilir ve işletme reaktif güç cezası ödemek zorunda kalacağı gibi elektrik sistemindedeki ciddi güç kalitesi problemlerine neden olabilir. Bu nedenle uygulanan 3 faz benzetim modelinde harmonik filtre grupları ve TKR sisteminin firının devre dışı kalması durumunda tristör anahtarlamaları ile sistemden izole edilecek şekilde bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. EAF'de kompanzasyon için kullanılan TKR devre şeması şekil 5.41'de gösterilmiştir.



Şekil 5.41. 60 MVA EAF fırınının kompanzasyonu için kullanılan TKR devre modeli.

Bu modelde tristörlerin devreye girebilmesi için gerekli tetikleme açısı EAF giriş gücüne bağlı olarak hesaplanabilir ve tristörlerin tetikleme açısını tanımlamak için kullanılan sistem modeli Şekil 5.42'deki gibidir. Bu modelde elektrik ark fırını girişindeki reaktif güç değeri akım ve gerilim değerine bağlı olarak anlık hesaplayan Matlab/Function1 bloğu içerisindeki algoritma yardımıyla α tetikleme açısı tanımlanmıştır (hesaplama algoritması ekler bölümünde verilmiştir). Tetikleme açısı Gain kazanç bloğundan geçirilerek derece/dakika dönüşünün yapılması sağlanır,

böylece gecikme blokları yardımı ile pozitif ve negatif alternans için tristörlerin ilettime girmesi ve kesime gitmesi sağlanabilir [120].

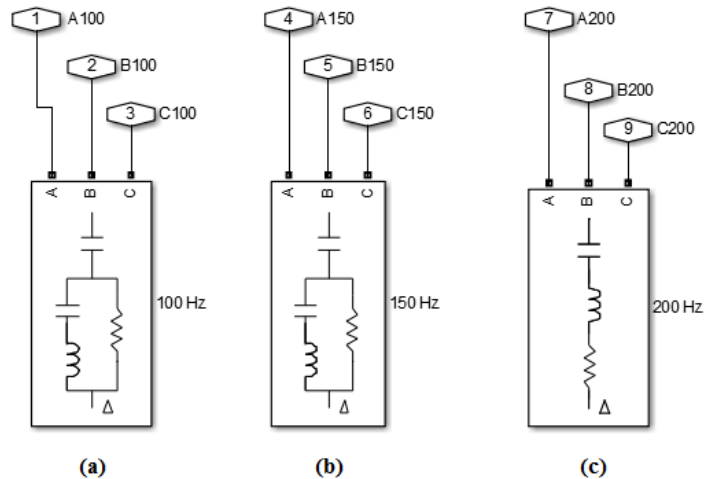


Şekil 5.42. EAF girişinden ölçülen reaktif güce göre tetikleme açısını hesaplayan kontrol bloğu.

Şekil 5.42’de sunulan sistem modeli her üç faza da uygulanarak EAF’nin çektiği güce bağlı olarak tetikleme açısı otomatik olarak ayarlanabilir. Böylelikle kompanzasyon sistemi otomatik olarak ayarlanarak reaktif güçten dolayı oluşabilecek cezalar ve güç kalitesi problemleri için önlem alınabilecektir.

5.4.2. Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi

100 Hz 15,5 MVar C tipi, 150 Hz 10 MVar C tipi ve 200 Hz 4,7 MVar tek ayarlı harmonik filtre grupları Şekil 5.43’de görüldüğü gibi modellenmiştir. Harmonik filtre gruplarının kalite faktörü 16 olarak alınmıştır.



Şekil 5.43. 3 Faz devre modelinde harmonik filtre gruplarının modellenmesi.

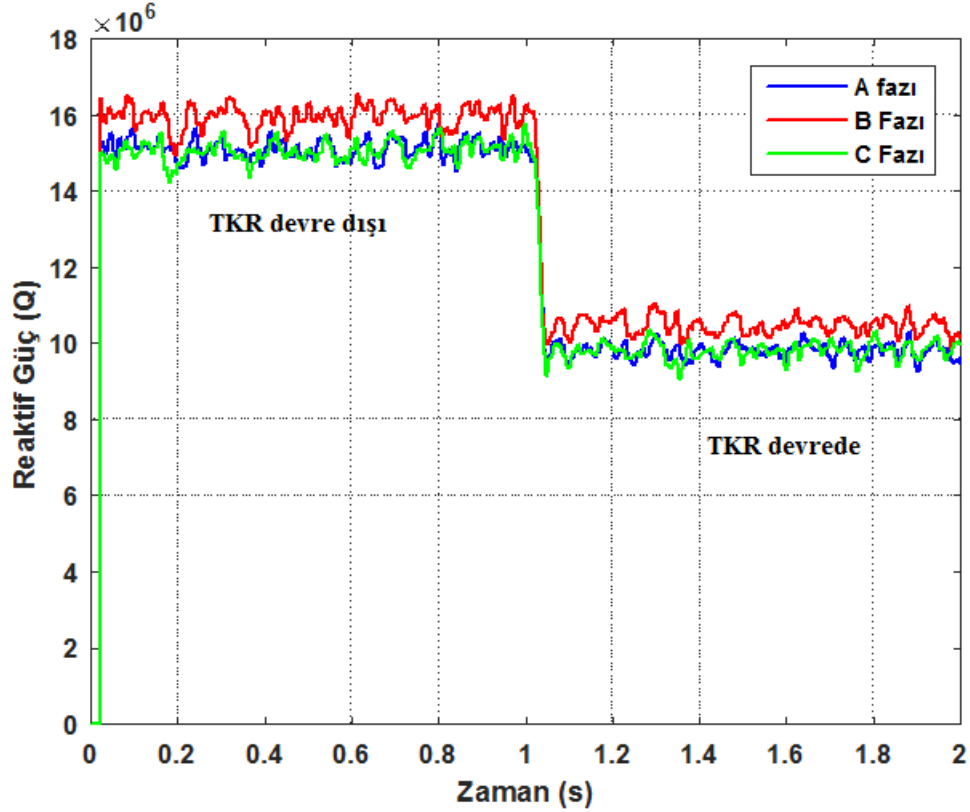
Ayrıca TKR kompanzasyon sistemine paralel olarak 150 Hz 18 MVar harmonik filtre grubu tasarlanmıştır.

5.4.3. EAF'yi Besleyen Sistemin 3 Faz Benzetim Modeli Sonuçları

60 MVA EAF'yi besleyen sistemin üç faz Matlab/Simulink benzetim modeli Şekil 5.40'da sunulmuştur. Bu benzetim modelinde elektrik ark modeli, literatürde sunulan üstel, hiperbolik ve üstel hiperbolik modellere göre elektrik arkının karakteristiğini daha iyi tanımlayan yeni zaman domeni modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

5.4.3.1. TKR Kompanzasyon Sisteminin Çalışma Performansının İncelenmesi

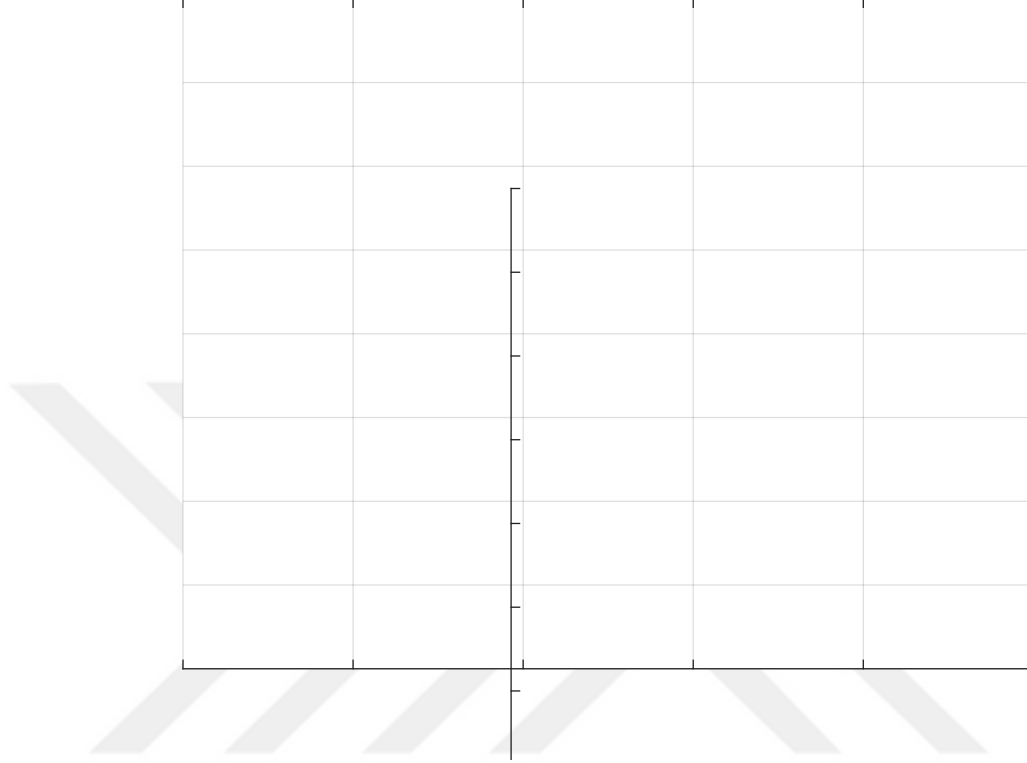
TKR sistemini kontrol etmek için EAF girişindeki reaktif gücün değişimine bağlı olarak tristörleri tetikleyecek faz açısının ayarlanması ve bu açı değerine bağlı olarak tristörlerin iletme geçmesi sağlanmaktadır. TKR sisteminin devrede olmadığı ve devre olduğu durumda EAF girişinden ölçülen reaktif gücün değişimi Şekil 5.44'deki gibidir.



Şekil 5.18. Tristör Kontrollü Reaktör ile reaktif güç kompanzasyonu.

Şekil 5.44'den görüldüğü gibi, TKR sistemi mevcut sistemin reaktif güç kompanzasyonunu başarılı bir şekilde sağlamaktadır. TKR sisteminin devrede olması durumunda hesaplama algoritması ile elde edilen tristör tetikleme açıları Şekil 5.45'de gösterilmiştir. Kompanzasyon sisteminin maksimum verimle çalışması için tristör tetikleme açısının 120 derece olması gerekmektedir. Bu grafik gerçekleştirilen

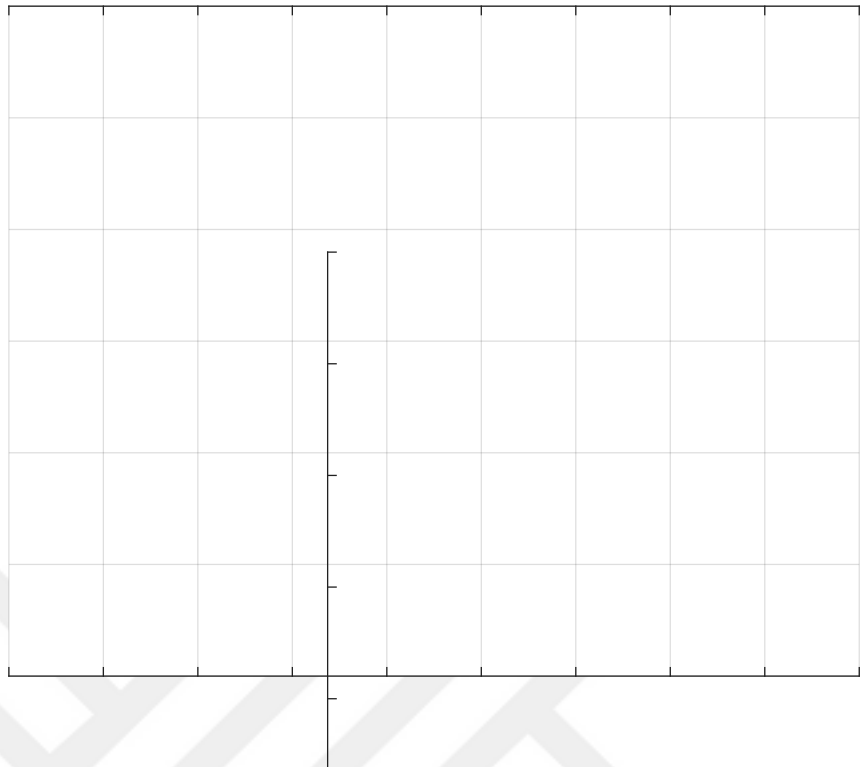
kompanzasyon sisteminin maksimum verime yakın bir kompanzasyon sağladığı göstermektedir. Uygulanan kontrol sistemi ile reaktif güç kompanzasyonu verimli bir şekilde gerçekleştirmektedir.



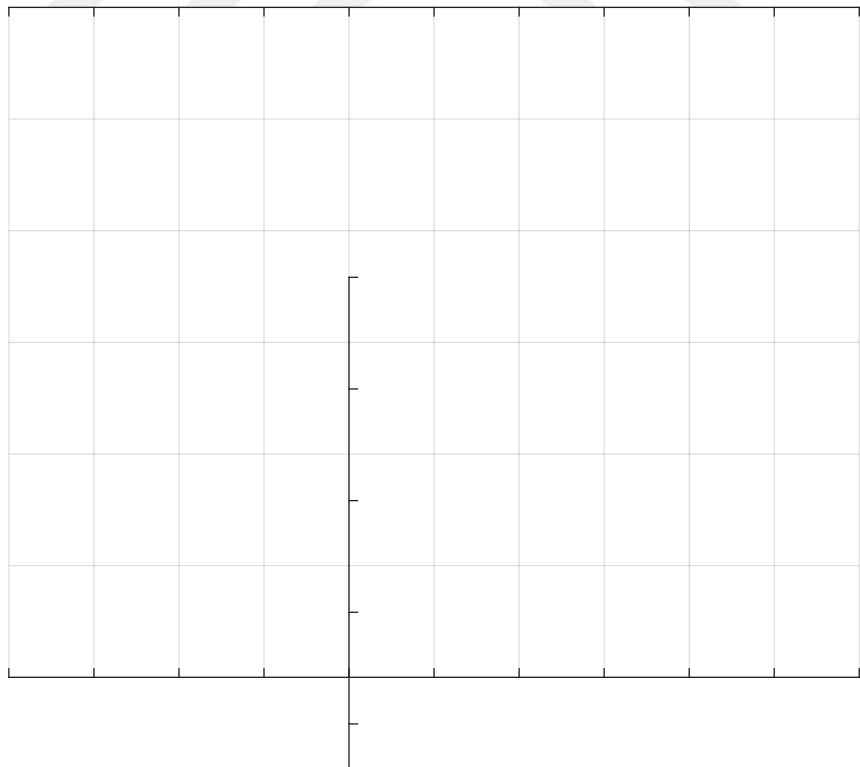
Şekil 5.19. Reaktif güç değişimine bağlı olarak tristör tetikleme faz açılarının değişimi.

5.4.3.2. Ark Fırını Girişinde Güç Parametrelerinin Değişimi

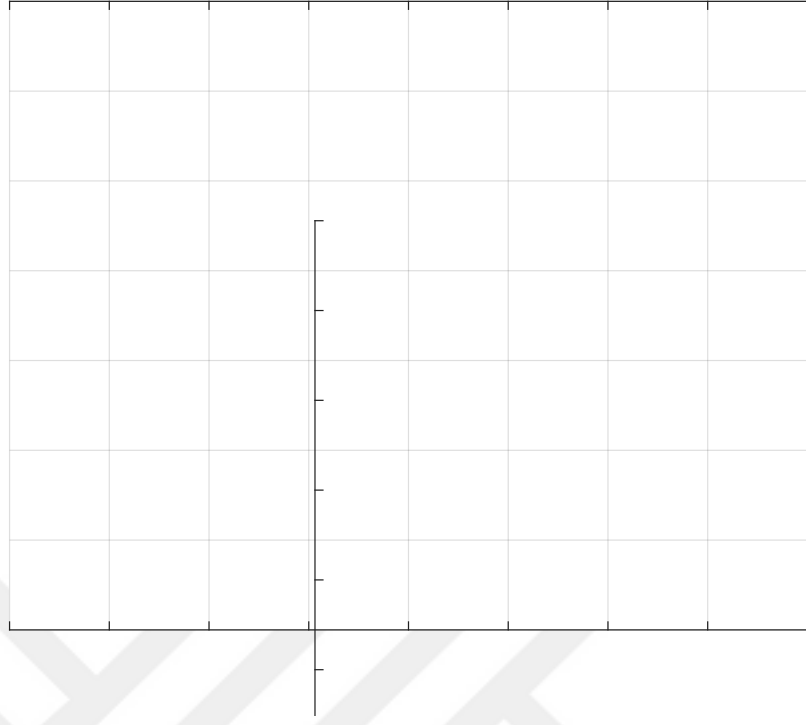
Model 4 kullanılarak üç faz benzetim modelinde elde edilen elektrik arkının gerilim akım karakteristikleri Şekil 5.46'de sunulmuştur. Bu karakteristiklerin neden olduğu etkilerin incelenmesi için, EAF girişinden aktif güç, reaktif güç, güç katsayısı, toplam akım ve gerilim harmonik bozunumu değerleri analiz edilmiştir. Analiz sonucunda elde edilen üç faz aktif ve reaktif güç değişimleri sırası ile Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de sunulmuştur. Grafiklerin daha iyi anlaşılabilmesi için 12 çevrimlik dalga formundaki değişimler grafiksel olarak gösterilmiştir.



(a)

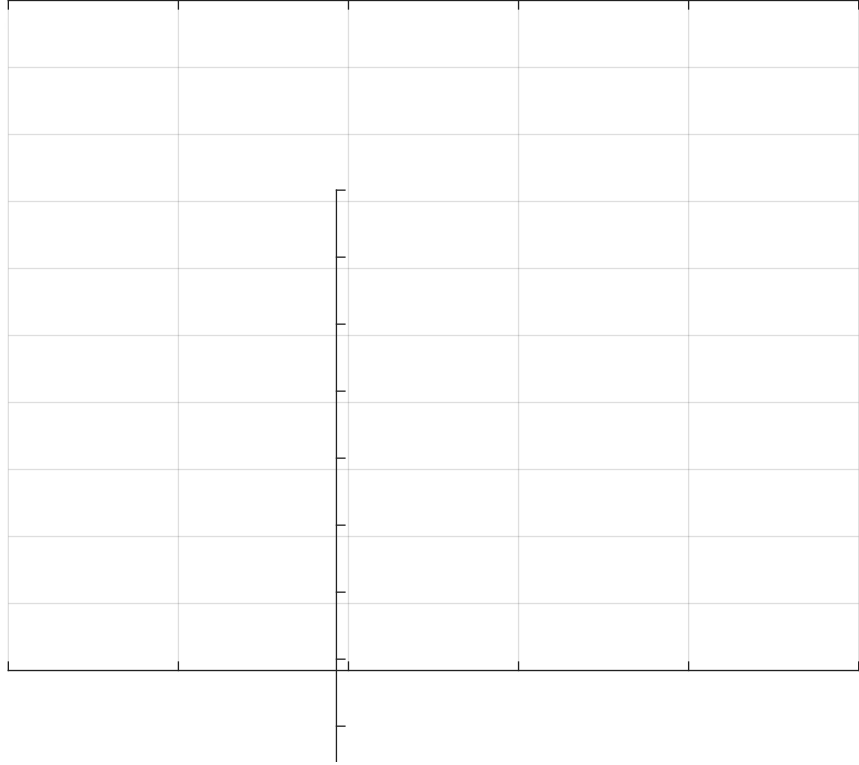


(b)

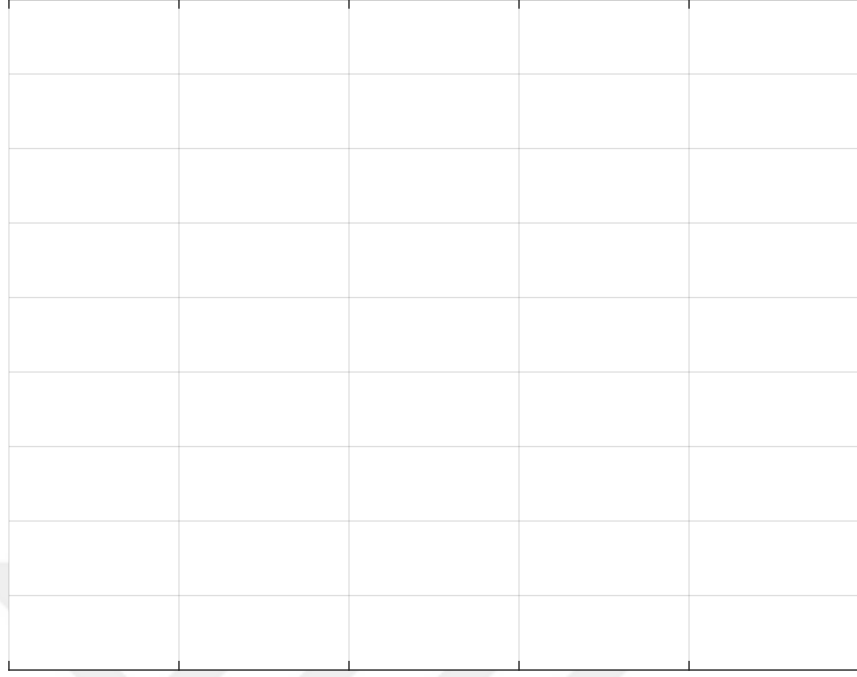


(c)

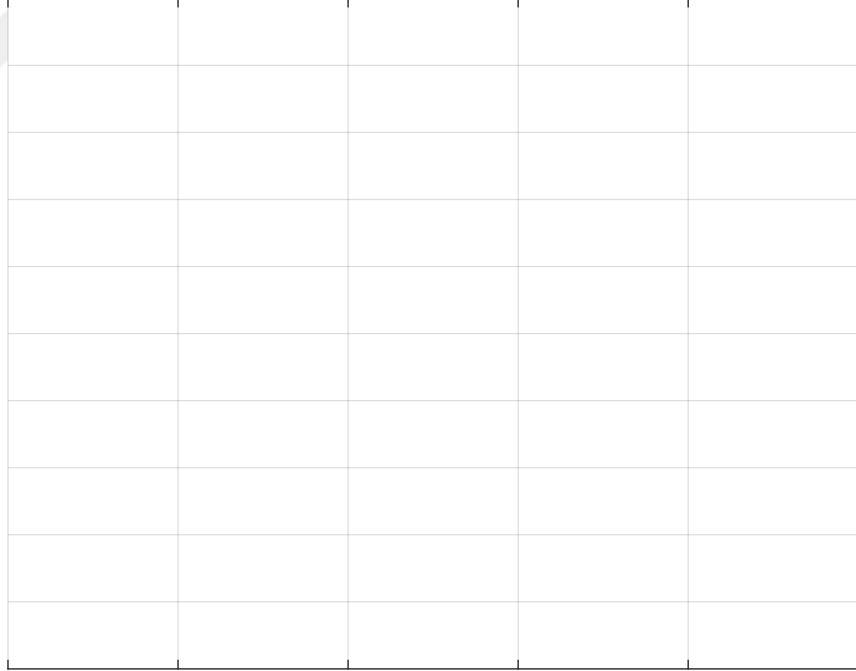
Şekil 5.20. Model 4 ile Üç faz çalışma durumunda A, B, C fazlarına ait elektrik arkının V-I karakteristik eğrileri (a- A Fazı, b- B Fazı, c- C Fazı)



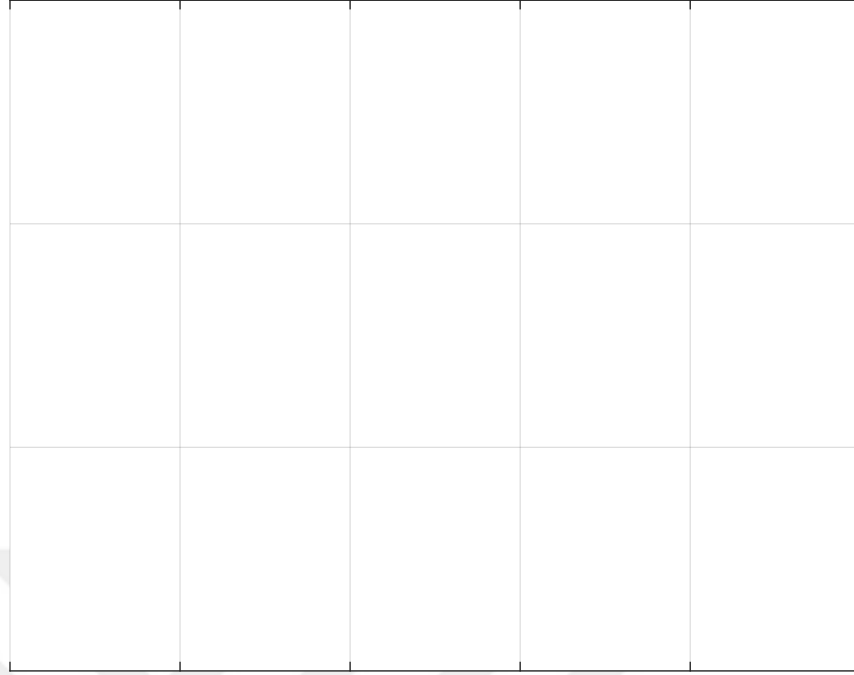
Şekil 5.21. Model 4 ile EAF girişinde benzetim sonucunda elde edilen aktif gücün değişimi.



Şekil 5.228. Model 4 ile EAF girişinde benzetim sonucunda elde edilen üç faz reaktif gücün değışimi.



Şekil 5.239. Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz akım RMS değışimi.



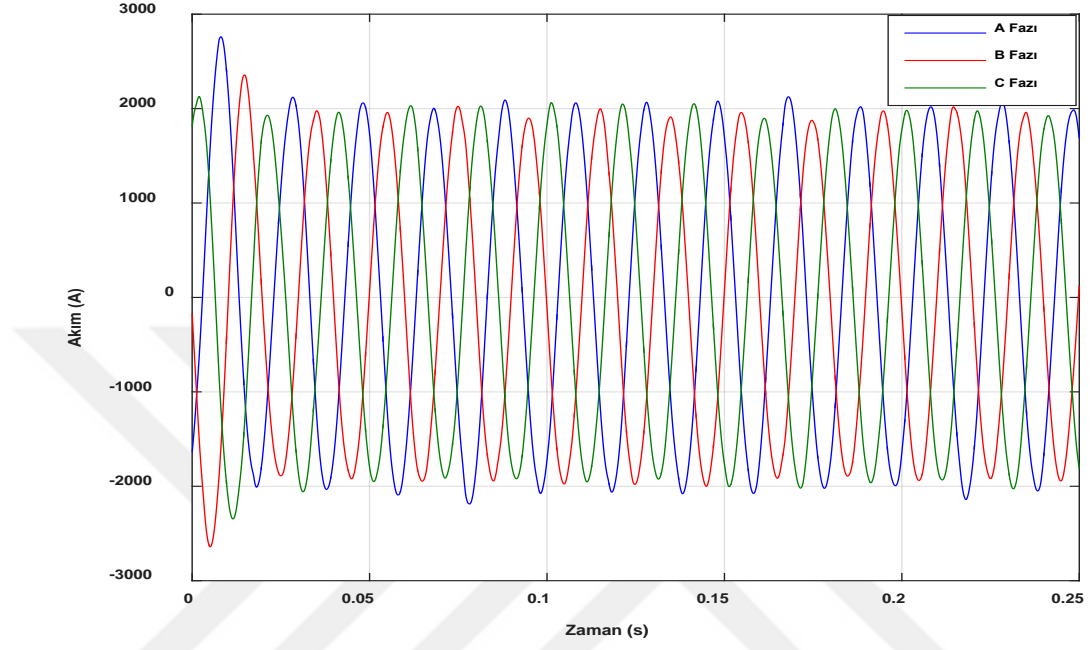
Şekil 5.50. Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz gerilimin RMS değeri (bir faz- toprak olarak gösterilmiştir).



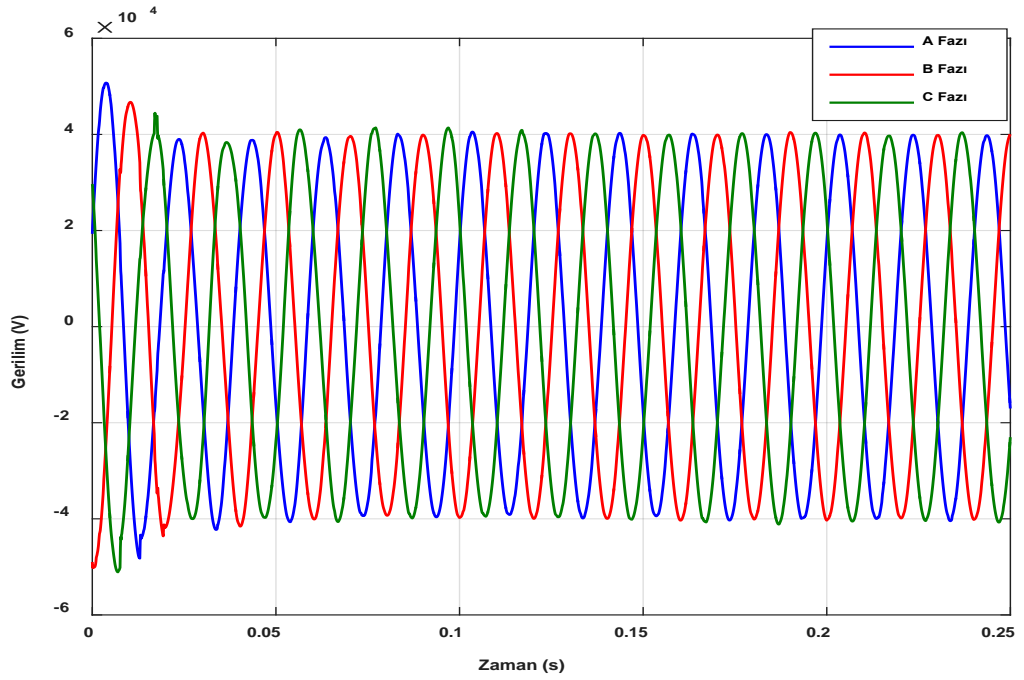
Şekil 5.51. Model 4 ile EAF girişinden benzetim sonucunda elde edilen üç faz toplam gerilim harmonik bozunumu.

5.4.3.2. İndirici Transformatörün Sekonder Barasında Akım ve Gerilim Dalganmaları

Üç faz benzetim modeli kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonucunda transformatör girişinde elde edilen akım ve gerilim dalganmaları sırası ile Şekil 5.52 ve Şekil 5.53' de gösterilmiştir.



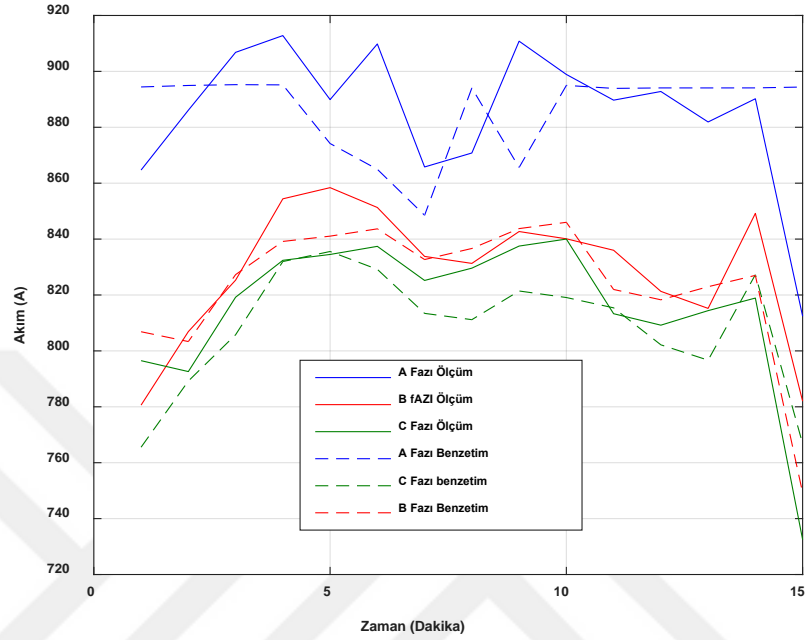
Şekil 5.52. İndirici transformatörün sokonder barasından benzetim ile elde edilen üç faz akım dalga formu.



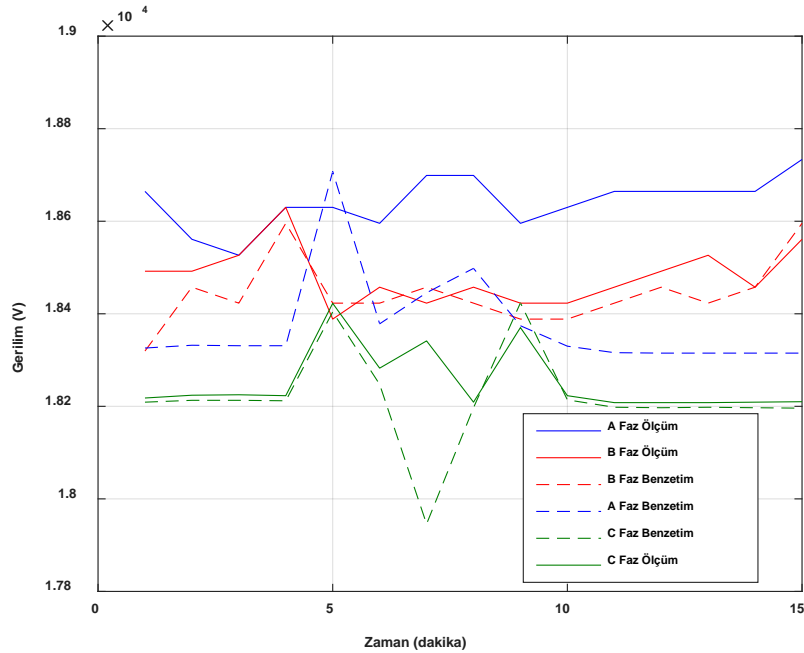
Şekil 5.53. İndirici transformatörün sokonder barasından benzetim ile elde edilen üç faz gerilim dalga formu.

5.4.3.3. 3 faz Benzetim Sonuçları ile Deneysel Sonuçların Karşılaştırılması

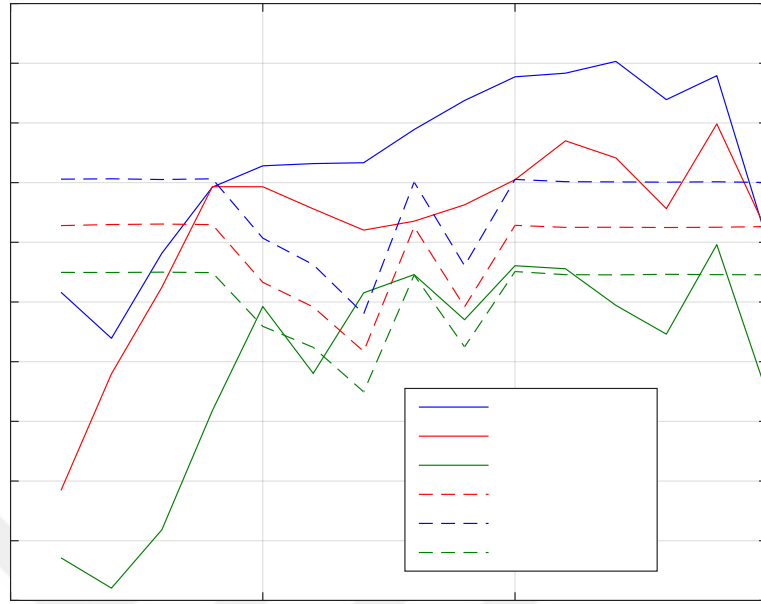
Deneysel olarak elde edilen veriler ile benzetim sonucunda elde edilen verilerin ark fırını girişindeki akım RMS değeri, gerilim RMS değeri, aktif güç ve reaktif güç değişimleri sırası ile Şekil 5.54-57’de sunulmuştur.



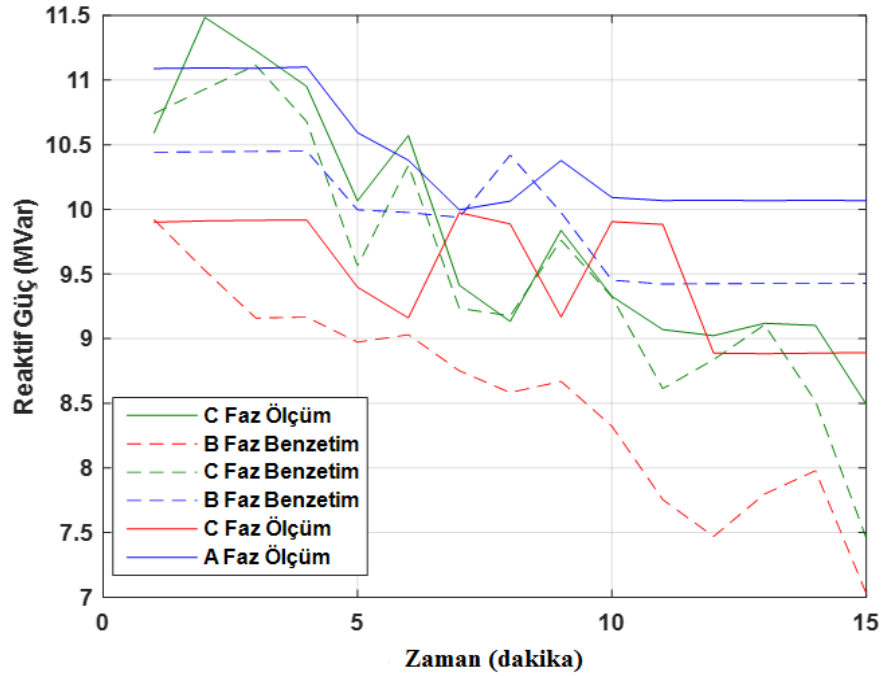
Şekil 5.54. 15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen üç faz akım RMS değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).



Şekil 5.55. 15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen gerilimin RMS değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).



Şekil 5.56. 15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen aktif güç değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).



Şekil 5.57. 15 dakikalık eritme sürecinde deneysel ve üç faz benzetim sonucunda elde edilen reaktif güç değerlerinin karşılaştırılması(1 dakikalık ortalamalar).

Deneyisel ve benzetim sonucunda elde edilen toplam akım ve harmonik bozunum değerleri ise Tablo 5.5’de ve Tablo 5.6 ‘daki gibidir.

Tablo 5.5. 15 dakikalık eritme süresinde deneyisel ölçümler ve benzetimler sonucunda elde edile toplam akım harmonik bozunumunun karşılaştırılması.

Zaman (d)	Deneyisel Ölçüm Sonuçları (ITHD %)			Benzetim Sonuçları (ITHD %)		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3
1	5,90	11,5	8,70	7,65	8,46	8,16
2	8,60	10,3	10,20	6,89	7,22	8,07
3	7,90	6,90	9,60	8,32	8,87	7,16
4	7,00	5,50	9,20	7,32	7,44	8,06
5	6,10	4,90	6,90	8,1	7,62	7,56
6	5,80	5,60	8,20	8,52	8,63	8,02
7	4,80	5,90	5,60	6,57	7,22	7,67
8	4,90	5,50	6,30	8,30	8,70	7,80
9	4,80	6,00	7,10	8,37	7,98	8,22
10	4,60	4,50	5,30	7,51	7,73	8,55
11	3,60	3,80	4,00	7,93	8,89	8,30
12	3,40	3,50	6,30	6,44	7,69	9,36
13	4,80	3,80	6,50	8,41	8,37	7,92
14	3,10	3,40	3,30	7,37	8,77	8,15
15	5,30	4,80	5,50	7,92	7,81	8,65

Tablo 5.6. 15 dakikalık eritme süresinde deneyisel ölçümler ve benzetimler sonucunda elde edile gerilim harmonik bozunumunun karşılaştırılması.

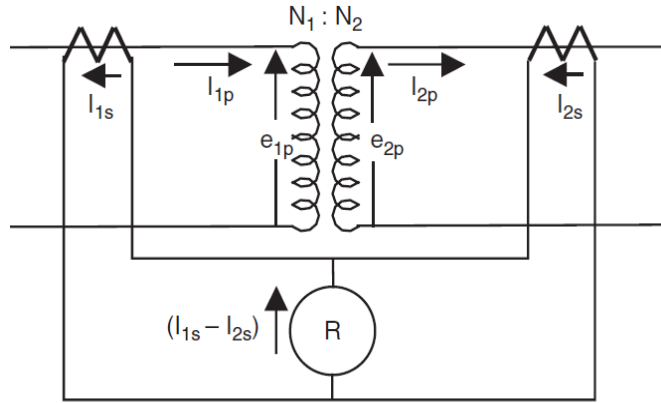
Zaman (d)	Deneyisel Ölçüm Sonuçları (VTHD %)			Benzetim Sonuçları (VTHD %)		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3
1	2,50	2,40	2,50	2,44	2,44	2,48
2	2,60	2,60	2,40	2,44	2,44	2,48
3	2,60	2,30	2,30	2,44	2,44	2,48
4	2,70	2,30	2,60	2,44	2,44	2,48
5	2,80	2,50	2,50	2,44	2,45	2,48
6	2,50	2,20	2,60	2,44	2,45	2,47
7	2,50	2,60	2,60	2,42	2,45	2,47
8	2,40	2,50	2,80	2,44	2,44	2,47
9	2,80	2,70	2,80	2,43	2,45	2,47
10	2,30	2,20	2,30	2,44	2,44	2,47
11	2,40	2,40	2,10	2,44	2,44	2,47
12	2,20	1,90	2,30	2,44	2,44	2,47
13	2,60	2,00	2,40	2,44	2,44	2,47
14	2,20	2,10	2,30	2,44	2,44	2,48
15	2,10	2,00	2,10	2,44	2,44	2,48

Sonuçlardan görüldüğü gibi, sunulan yeni zaman domeni modeli (Model 4) EAF'nin şebekede oluşturduğu etkileri gerçeğe çok yakın bir şekilde tanımlamaktadır. Bu model kullanılarak EAF'lerin neden olduğu güç kalitesi problemleri değerlendirilebileceği gibi, yeni kurulması planlanan tesisler için şebeke analizleri gerçekleştirilebilir.

5.4.4. İndirici Transformatorün Korunması için Diferansiyel Fark Rölesinin Matlab/Simulink Benzetimi

SİDEMİR tesisinde EAF'yi besleyen indirici transformator oluşan bir arıza neticesinde zarar görerek kullanılamaz hale gelmiştir. Bu nedenle benzer bir arıza durumunda transformatorün korunması amacıyla diferansiyel fark rölesinin kullanılması önerilmektedir. Bu amaçla mevcut sistem için oluşturulan üç faz benzetim modeli kullanılarak diferansiyel koruma rölesinin mevcut sistem üzerindeki etkisi ve çalışma performansı analiz edilmiştir.

Diferansiyel rölenin temel yapısı Şekil 5.58'de gösterilmiştir. Bu şekilde transformator normal çalışmada (yük altında yada boşta) çalışırken primer ve sekonder sargı uçlarında akan akımların farkları trafonun dönüştürme oranları dikkate alındığında matematiksel olarak sıfır olmalıdır. Bu durumda denklem (5.9) bağıntısından söz edilebilir [121].



Şekil 5.58. Diferansiyel rolenin bağlantı şeması

$$N_1 \cdot i_{1p} = N_2 \cdot i_{2p} \quad (5.9)$$

Trafonun primer ve sekonder uçlarına akım trafosu bağlandığı ve akım trafosunun dönüştürme oranlarının $1:n_1$ ve $1:n_2$ olğunu kabul edilsin. Bu durumda trafoya bağlanan akım trafosunun sekonder uçlarından okunan değerler aşağıdaki ifade ile tanımlanır:

$$N_1 \cdot n_1 \cdot i_{1s} = N_2 \cdot n_2 \cdot i_{2s} \quad (5.10)$$

Akım trafosunun değerleri uygun seçildiği takdirde $N_1 \cdot n_1 = N_2 \cdot n_2$ olur ve akım trafosunun sekonder uçlarından okuduğumuz akım değerleri $i_{1s} = i_{2s}$ olur. Fakat Güç trafosunda meydana gelecek herhangi bir arıza durumunda (üç faz toprak, iki faz... vb) akım eşitliği söz konusu olmayacak ve $|i_{1s} - i_{2s}| \gg 0$ aradaki akım farkı sıfırdan oldukça büyük değerlere ulaşacaktır.

$$I_d = |i_{1s} - i_{2s}| \quad (5.11)$$

Gerçek zamanlı bir uygulama yapıldığında göz önüne alınması gereken bir kaç kriter vardır. Bunlardan bir tanesi $N_1 \cdot n_1 = N_2 \cdot n_2$ eşitliğinin sağlanabilmesi için $i_{1s} = i_{2s}$ eşitliğinin var olması gerekmektedir. Bu durumun standart akım trafolarıyla sağlamak oldukça zordur. Bu nedenle akım trafolarının farklı kademe pozisyonları veya yardımcı akım trafoları kullanılarak istenilen değere yakın sonuçlar elde edilmeye çalışılır. Bir diğer kriter ise, akım trafolarının dönüştürme oranlarından kaynaklanan uyumsuzudur (residual-mismatch ratio). Bu durum fark rölesinin yanlış şekilde çıkış (trip) üretmesine sebebiyet verecektir.

Fark röleleri genel olarak çalışırken Güç trafosunun koruma bölgesi dışında (protection zone) oluşan herhangi bir (izolasyon, faz nötr yada faz faz gibi) arıza durumunda hata sinyali üretmemesi gerekir. Trafonun normal çalışma esnasında (full-load) trafonun sargılarından akan akım kesinlikle fark rölesinde yanlış bir sinyalin üretilmesine sebebiyet vermemelidir. (no, false-trip signal).Fakat koruma bölgesi alanında oluşacak hatada ise en kısa sürede kesiciler yardımıyla enerjiyi kesmeli ve sistemin güvenliğini ve kararlılığının devamını garanti edebilmelidir.

Fark rölesinin (percentage-differential relay) çalışabilmesi için mutlaka belirlenmiş (sabit-fixed) akım değerinin üzerinde bir akımın trafosunun sargılarından akması gerekmektedir. Bu akım değeri akım trafosunun primer ve sekonder uçlarından akan akımın ortalamasının yaklaşık yarısı olarak kabul edilir.

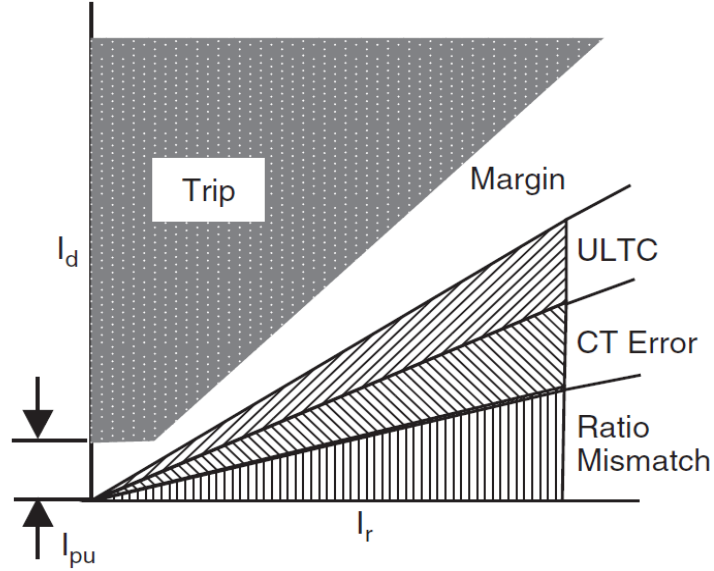
$$i_r = \frac{|i_{1s} + i_{2s}|}{2} \quad (5.12)$$

Bu ifadede i_r sınırlama akımı (restraint current) olarak bilinir. i_r ifadesi elektromekaniksel röle tasarımlarında diski harekete geçirecek gerekli torkun üretilmesine karşılık gelmektedir.

Rölenin harekete geçebilmesi (yada çıkış sinyalini üretebilmesi) için:

$$i_d \geq K \cdot i_r \quad (5.13)$$

eşitliğinin olması gerekmektedir. Burada K olarak tanımlanan ifade diferansiyel fark rölesinin karakteristiğini temsil etmektedir ve her röle için ayrı seçilmektedir. Diferansiyel fark rölesinin genel çalışma karakteristiği Şekil 5.59'da sunulmuştur [122-123].



Şekil 5.59. Diferansiyel rölenin çalışma karakteristiği.

Ratio-Mismatch: Akım trafolarının dönüştürme oranlarının uyumsuzluğundan kaynaklanan hata

CT-Error : Akım trafosundan kaynaklanan hatalar

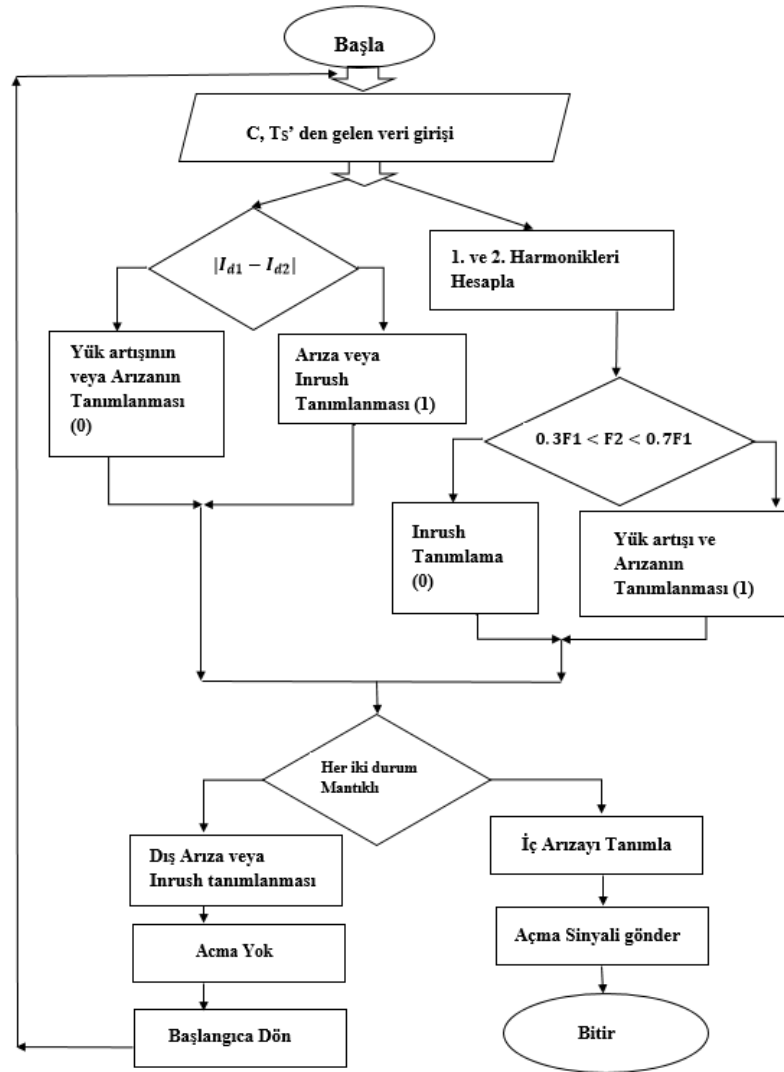
ULTC : Under load tap changer (yük altında Akım trafosunun kademe değişimi)

Margin : Hata toleransı veya güvenlik Bölgesi

Diferansiyel rölelerin çalışabilmesi için rölenin başlangıcında set edilen (pick-up setting) değerinin üzerinde bir akım geçtiği anda harekete geçer (çalışmaya başlar). Akım trafosunun sekonder kısmına ait başlangıç değeri (Pick-up setting) normalde oldukça küçük değerler seçilir (örneğin 0.25 Amper gibi). Başlangıç set değerinin seçilme sebebi akım trafosunun artık (residual) hatalarının kompanse edilmesi ve bu gibi hatalardan dolayı sistem çalışmasının kesintiye uğramaması sağlamaktır.

Günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birçok algoritma ve yeni koruma metodları keşfedilmiştir. Bu algoritmaların temel çalışma mantığı aynı olsa da doğruluk (accuracy) yada hız (speed) gibi değerler algoritma mantığına göre değişiklik göstermektedir. IEEE standartlarına göre, güç trafosunun korunmasına yönelik kabul edilebilir süre 100 mili-saniyedir. Günümüzdeki birçok modern algoritmalar IEEE'nin sunduğu standart değerinin oldukça altına inmiş durumdadır. Bu süre şu anda

10 milisaniyenin altındadır. Hızlı Fourier algoritması (FFT) kullanarak uygulanan benzetim modelindeki algoritma yaklaşık 15 ms civarında hatayı temizlemektedir. Bu algoritma üzerindeki ufak değişiklikle algoritmanın hızı oldukça yükseltilebilir ve doğal olarak 15 ms'yenin altına rahatlıkla düşürülebilir. Matlab yardımıyla benzetimi gerçekleştirilen güç sisteminde test edilen fark rölesi genel olarak trafo koruma bölgesinde (internal fault) hızlı şekilde çalışırken, koruma bölgesi dışında meydana gelen arızalarda tripping signal istenildiği üzere hata sinyali üretmemektedir. Trafonun ilk enerjilenmesi anında meydana gelen Inrush-Current gibi durumları eale etmek için ise inrush anında oluşan 2. harmonikler değerinden faydalanılmıştır. Diferansiyel röle için kullanılan algoritma akışı şekil 5.57'de gösterilmiştir.



Şekil 5.60. Diferansiyel röle genel algoritması.

Algoritma çalışma mantığı aşağıda belirtilen sıra ile uygulanır;

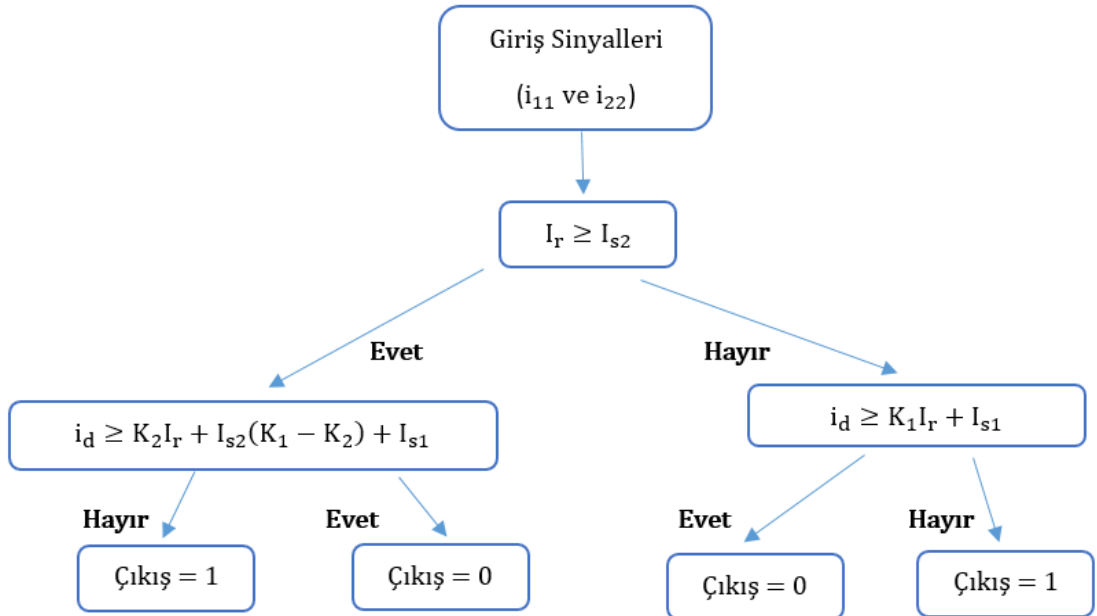
- 1- Akım transformatörleri yardımıyla primer ve sekonder kısımlarındaki akım verilerinin elde edilmesi.
- 2- Elde edilen verilerin primer yada sekonder kısmına indirgenmesinin yapılması ve trafonun ve akım transformatörünün bağlantı sekline göre vektör adaptasyonun sağlanması.

$|I_{d1} - I_{d2}|$ akım trafoları arasındaki ölçüm farkını göstermektedir. Eğer bu değer $|I_{d1} - I_{d2}| > 0$ ise sistemde bir hatanın varlığından söz edilebilir (çıkış 0'dan 1'e değişir) ama eşitlik tek başına diferansiyel rölenin çalışması için yeterli değildir. Eğer $|I_{d1} - I_{d2}| = 0$ ise sinyal üretilmez ve logic olarak sıfır kalmaya devam eder.

$0.3F_1 < F_2 < 0.7F_1$ durumu: F_1, F_2 transformatörünün giriş akımının sırasıyla birinci ve ikinci harmoniğini göstermektedir.

Yukarıdaki eşitlik durumunda yani $0.3F_1 < F_2 < 0.7F_1$ aralığında bir değere ulaşılmışsa, trafonun ilk enerjilendiğini ve gerek uyartım (exciting) akımı gerekse de kalkış başlangıç ya da yüklenme (Inrush) akımları nedeniyle trafonun çalışmaya başladığını ve herhangi bir hatanın söz konusu olmadığını ortaya koymak için yazılmıştır.

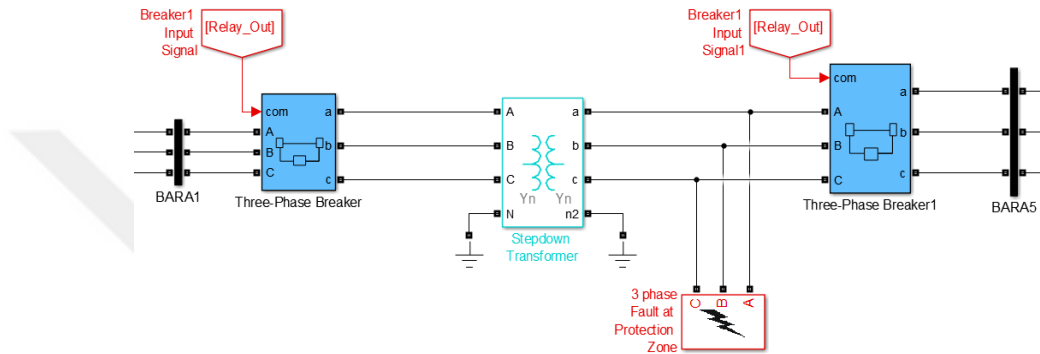
- 3- Karar Verilme Aşaması: Algoritma incelendiği takdirde iki ayrı koldan teste tabi tutulduğu görülecektir. Birincisi akımlarda oluşan fark ve ikincisi harmonik analizi yada harmonik etkisidir.



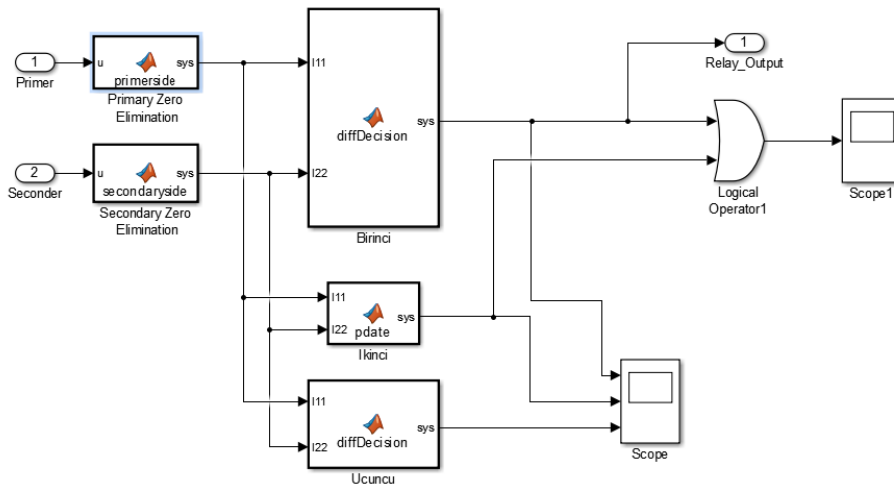
Şekil 5.24. Diferansiyel rölenin karar verme şeması.

5.4.4.1. Diferansiyel Fark Rölesinin Benzetim Sonuçları

Trafoda diferansiyel rölenin koruma bölgesinin oluşturulabilmesi için Şekil 5.62’deki model tasarlanmıştır. Transformatörün primer ve sekonder tarafından akım değerleri ölçülerek Şekil 5.63’deki kontrol algoritması yardımıyla kesicilere sinyal göndererek koruma bölgesinde arıza olması durumunda kesiciler açılarak trafo kendini korumaya alacaktır. Fakat koruma bölgesi dışındaki arızalarda bu işlem gerçekleşmeyecektir. Koruma algoritmasında kullanılan algoritmalar ekler bölümünde sunulmuştur.

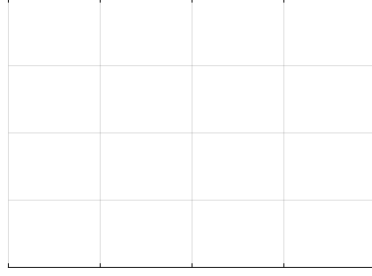


Şekil 5.62. Diferansiyel röle Matlab/Simulink sistem modeli.

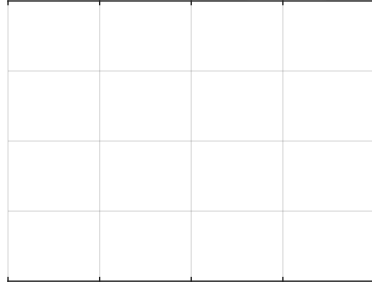


Şekil 5.63. Diferansiyel Röle karar blok yapısı.

Uygulanan modelde 1. saniyede arızanın koruma bölgesinde meydana gelmesi durumunda elde edilen sonuçlar sırası ile Şekil 5.64’de sunulmuştur. Arızanın koruma bölgesi dışında gerçekleşmesi durumunda elde edilen grafiksel eğriler ise Şekil 5.65’deki gibidir.



Şekil 5.64. Diferansiyel rölenin koruma bölgesinde 1. saniyede üç faz toprak arızası oluşması durumuna primer ve sekonder akım ve gerilim dalga formları.



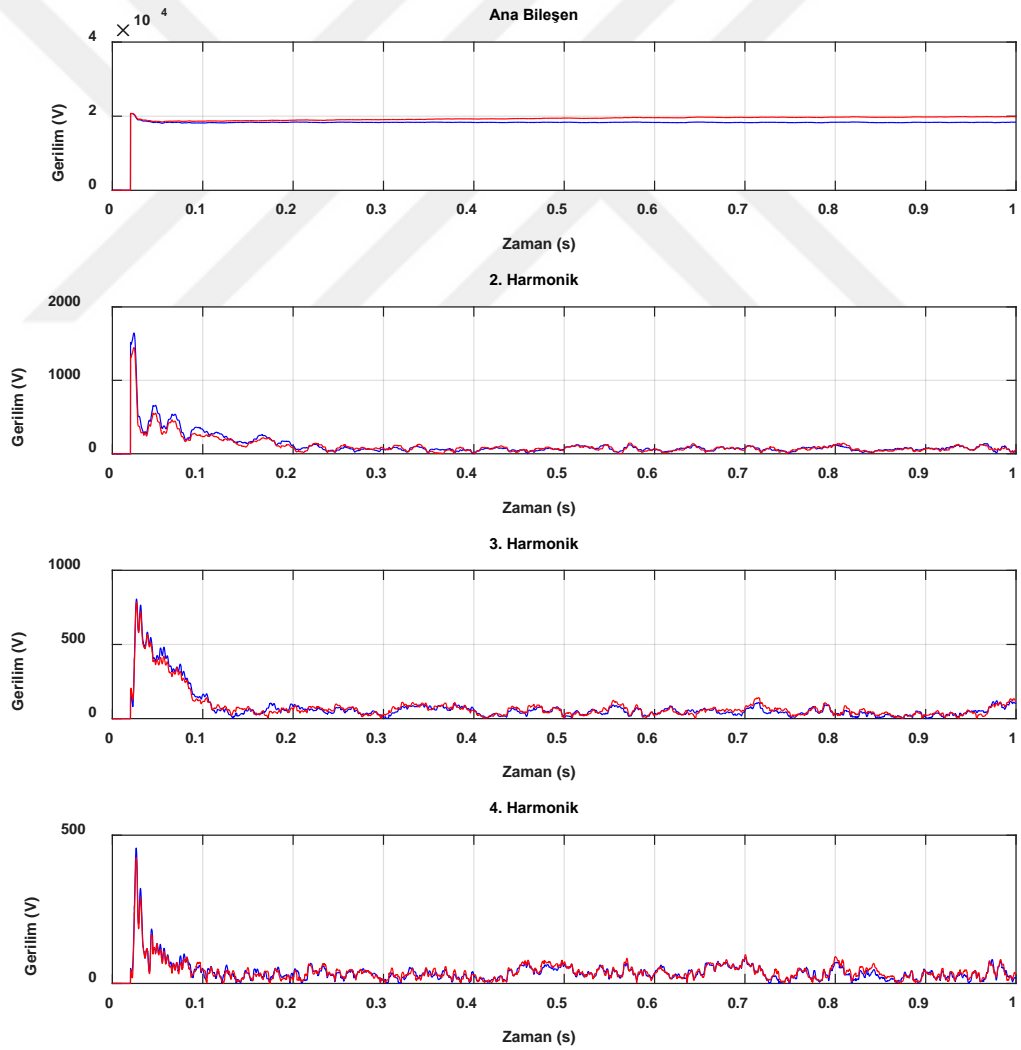
Şekil 5.65. Diferansiyel rölenin koruma bölgesinde dışında 1. saniyede üç faz toprak arızası oluşması durumuna primer ve sekonder akım ve gerilim dalga formları.

Şekillerden görüldüğü gibi koruma rölesi koruma alanının dışında oluşan arızalarda devreye girmemektedir ve diferansiyel röle uygun biçimde çalışmaktadır.

Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları diferansiyel rölenin margin bölgesinde çalışacak şekilde ayarlanması durumunda 10 ms'nin altında açma yapabileceğini göstermektedir. Margin bölgesinin alt kısmında bir ayar yapıldığında ise açma süresi yaklaşık 4-5 ms artmaktadır.

5.4.5. Senkron Kompanzasyon Uygulaması

EAF'yi besleyen elektrik sisteminde SVC kompanzasyon sistemine paralel olarak 5 MVA senkron generatör bağlandığında gerilim harmonik bileşenlerinin değişimi Şekil 5.66 ve 5.67'deki gibidir.



Şekil 5.66. Benzetim Sonucunda elde edilen 1-4. gerilim harmoniklerin 5 MVA senkron jeneratör ile hesaplanması durumundaki değişimlerinin karşılaştırılması (mavi-normal çalışma durumu, kırmızı-Senkron kompanzasyon ile çalışma durumu).



Şekil 5.67. Benzetim Sonucunda elde edilen 5-8. gerilim harmoniklerin 5 MVA senkron jeneratör ile hesaplanması durumundaki değişimlerinin karşılaştırılması (mavi-normal çalışma durumu, kırmızı-Senkron kompanzasyon ile çalışma durumu).

Grafiklerden görüldüğü gibi kompanzasyon sistemine paralel olarak 5 MVA senkron jeneratör bağlandığında 2. harmonik bileşenin genliğinde ergitme başlangıcında oluşan geçici durumda %14'lük bir azalma olduğu görülmektedir. 3. gerilim harmonik bileşenlerinde ise %4'lük bir azalma ve diğer harmonik değerlerinde ise %2 civarında bir azalma olduğu görülmektedir. Bu nedenle ergitme işlemini başlangıcında (şarj ve sondaj durumunda) kompanzasyon sistemine paralel olarak senkron jeneratör bağlanmalı ve ergitme işlemine geçildiğinde senkron jeneratör devreden çıkarılmaz. Bu yöntem ile ergitme işleminin ilk başlangıcında görülen yüksek gerilim harmonikleri azaltılabilir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1. Bu Tez Çalışmasından Elde Edilen Sonuçlar

Bu çalışmada, Sivas Demir Çelik İşletmeleri A.Ş. (SİDEMİR) tesisinde bulunan 60 MVA EAF yükünün elektrik şebekesine olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca EMTP ve Matlab paket yazılımları kullanılarak güç kalitesi parametreleri bilgisayar ortamında değerlendirilmiş ve güç kalitesi parametrelerini incelemek için benzetim modeli oluşturulmuştur.

Gerçekleştirilen deneysel ve benzetim çalışmaları sonucunda;

EAF'nin bağlı olduğu barada 21, 23, 24, 25, 27, 29 ve 30. harmonik akımları dışındaki tüm harmonik akımlarının yönetmelikte belirtilen sınır değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. Akım harmonik bozulmalarının en büyük değerleri ise elektrik ark fırınının şarj ve yanma işlemleri sırasında ortaya çıkmaktadır. Akım harmoniklerinin en düşük değerleri ise rafine fazında görülmektedir. 3 ve 6. gerilim harmonikleri ise sınır değeri zaman zaman aşmaktadır.

EMTP yazılımı ile gerçekleştirilen harmonik analizinden görüldüğü gibi 5 ve üzerinde oluşacak harmonik etkilerin tümü EAF yükünden kaynaklanacaktır. 2. ve 4. harmonik değerlerinin yüksek çıkmasının nedeni ise SVC sisteminin yapısından ve çalışmasından kaynaklanmaktadır. SVC sistemler özellikle 2. harmonik civarında akım harmoniklerini artırdığı belirlenmiştir.

SVC sistemin neden olduğu çift harmoniklerin azaltılması için aşağıdaki öneriler sunulmuştur,

1. Fırın gücünü düşürmek veya Statik Var Kompanzasyon yerine daha hızlı çalışabilen bir kompanzasyon sistemi kullanmak. Fakat bu durumda fırın gücünün düşürülmesi üretim performansını azaltacağı için tercih edilmemelidir.
2. Şebeke kısa devre gücünü arttırmak; EAF'ler şebeke kısa devre gücü yüksek olan şebekelere bağlanmalıdır. Şebeke kısa devre gücünü arttırmak tamamen TEİAŞ insiyatifindedir ve maliyetlidir. Sunulan çalışmalarda EAF fırınının kırpışma etkisinin azaltılması için, EAF'nin bağlanacağı OBN'de şebeke kısa devre gücünün Fırın transformatör gücüne oranının bazı araştırmacılar tarafın 50 olması gerektiği, bazı araştırmacılar tarafından ise 80 olması gerektiği savunulmaktadır. Fakat SİDEMİR tesisinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda bu oranın 120' den büyük olması gerektiğini belirlenmiştir. Ayrıca

SVC sistem kullanılması durumunda bu oran 120 olsa bile kırpışma etkisi görülmektedir.

3. EAF girişine seri reaktör bağlanması: EAF fırını girişine seri reaktör bağlanmasının 4. harmonik akımlarının azalttığı fakat 2. harmonik akımlarında yükselmesine neden olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle bu tür uygulamalar yüksek güçlü olmayan EAF tesisleri için önerilmemektedir.

Literatürde sunulan zaman domeni modelleri EAF fırının elektrik arkını tanımlamada kullanılabileceği deneysel olarak incelenmiştir ve elektriksel arkın modellenmesinde kullanılabilecek yeni bir zaman domeni modeli sunulmuştur. Sunulan bu modelin EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerini tanımlamada daha faydalı olduğu görülmektedir. Bu model kullanılarak gerçekleştirilen üç faz benzetim modeli ile elde edilen sonuçlar gerçeğe yakın alınmaktadır.

EAF yüklerinin neden olduğu kırpışma etkisinin belirlenmesinde sunulan sinüzoidal kırpışma modeli periyodik bir değişime sahip olduğu için EAF yüklerinin neden olduğu kırpışma etkisini tam olarak tanımlayamamaktadır. Bu nedenle kırpışma etkisinin tanımlanmasında rastgele kırpışma modeli kullanılmalıdır.

Mevcut sistemde kompanzasyon işlemi manuel olarak yapılmaktadır ve reaktif güç cezasına girme ve şebekeden aşırı reaktif güç çekme riski vardır. Bu durumun iyileştirilmesi için ark fırını girişinde ölçülen güce göre tristör tetikleme açılarını belirleyecek ve kompanzasyon sistemini iletme ve kesime götürebilecek bir kontrol sistemi Matlab/Simulink ile modellenmiştir. Gerçekleştirilen modelin kompanzasyon işlemi başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği benzetim sonuçlarından görülmektedir.

Ayrıca EAF'yi besleyen indirici transformatörün korunması için diferansiyel röle uygulamasının başarılı sonuçlar verdiği ve bu tür sistemlerde mutlaka diferansiyel rölelerin kullanılması gerektiği önerilmektedir. Diferansiyel rölenin marjın bölgesinin üst kısmında çalıştırılması durumunda açma süresi 10 ms'nin altında olmaktadır. Marjın bölgesinin altında kullanılması durumunda ise (one slop) açma süresi yaklaşık 4 ms'daha uzamaktadır. Bu nedenle diferansiyel röle bölge marjın bölgesinin üst kısmında çalışacak şekilde tasarlanması daha hızlı açma süresine neden olacaktır.

Kompanzasyon sistemine senkron jenarötör bağlanması durumunda başlangıçta yüksek olan gerilim harmoniklerinin 2. harmonik için % 14, 3 harmonik için % 4 ve diğer harmonikleri için % 2 civarında azalmaya neden olduğu görülmektedir. Fakat

rafine sürecinde senkron jeneratörün devrede olması harmonik akımlarını yükseltmektedir. Bu yüzden senkron jeneratör ertime işleminin başlangıcında devreye alınarak rafine sürecinden önce devre dışı bırakılacak şekilde kullanılması önerilmektedir. Mevcut sistemde olasılık teorisi ile gerçekleştirilen analizlerde akım ve gerilim sapmalarının sapma olasılığının % 5' den küçük olduğu görülmektedir.

Uygulanan 3 faz Matlab/Simulink benzetim modeli EAF yüklerinin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin incelemede kullanılabilir. Ayrıca yeni planlanması düşünülen EAF tesislerinin bağlanacakları noktalarda oluşturacağı problemler bu model kullanılarak belirlenebilir ve çözüm önerileri geliştirilebilir.

Gerilim sapmalarının veya dalgalanmalarının azaltılması için teknolojik prosesler incelendiğinde,

Fırının içinde eritilen metalin küçük parçalar halinde dökülmesi arkın lineer olmayan yapısını azaltmaktadır (ark uzunluğu daha az değişmektedir). Elektrotların çapının çok dikkatli seçilmesi gereklidir. Elektrot çapı büyük seçildiğinde elektrot tek taraflı olarak erir ve arkın kararlılığı bozulur. Elektrot çapı çok küçük seçildiğinde ise arkın kararlılığı iyileşmektedir fakat bu durumda elektrotlar aşırı ısınarak çabuk bozulurlar. Bu nedenle elektrot çapları rasyonel olarak seçilmeli ve yüksek akım sıklığı sağlanmalıdır. Elektrik ark fırınlarında yüksek sıcaklık ve iyonlaşma malzemelerinin yanma alanına dâhil edilmesi de arkın kararlılığını arttırarak güç kalitesinde iyileşme sağlayacaktır.

Yapılan araştırmalarda soğuk fırının çalışması durumunda elektrik arkının dayanıksız olarak alındığı belirlenmiştir ve bu durumun şebekede gürültüyü arttırdığı belirlenmiştir. Birkaç ertimededen sonra (fırın ısındıktan sonra) fırındaki akım dalgalanmaları ve gürültüler azalmaktadır. Bu nedenle EAF'ler uzun süre bekletilmeden (1 saat bekleme süresinden daha kısa bir süre içerisinde) tekrar çalıştırılmalıdır. Akımın artmasıyla daha kısa ark ile eritme işlemi yapılabileceğinden ark da kısalarak daha kararlı olmaktadır ve mümkün olduğu kadar yüksek akımla eritme işlemi yapılmalıdır. Transformatörün sekonder gerilimi yüksek olursa ark akımında yüksek olacağından fırının kararlı çalışması için en büyük gerilim kademesi seçilerek eritme işlemi yapılmalıdır.

7. KAYNAKLAR

- [1] M. Izhar, C.M. Hadzer, S. Masriand S. Idris, "A Study of The Fundamental Principles into Power System Harmonic", National Power and Energy Conference (PECon), Malaysia, 2003, pp. 225-232.
- [2] R. Yacamni, "Power System Harmonics", IEE Power Engineering Journal, August 1994, pp. 193-198.
- [3] K.S.R. Rao, M.N. Karsiti, "Optimal Design of a Furnace Transformer by Inettligent Evolutionary Methods", Electrical Power and Energy Systems, Vol. 43, pp. 1056-1062, 2012.
- [4] A. N. Marakov, V. V. Rybakova, M. K. Galicheva, "Electromagnetism and the Arc Efficiency of Electric Arc Steel Melting Furnace", Journal of Electromagnetic Analysis and Application, 2014, pp. 184-192.
- [5] A. A. Mattahedi, S. Amani, "Using Oxygen Reaction as Electricity Saving in Electric Arc Furnace Steel Making", International Journal of ChemTech Research, Vol. 1, No. 1, pp. 62-70, January-March, 2009.
- [6] H. Hang, Z. Mao, "Controller Design for Electrode Regulating System of Electric Arc Furnace", 27th Control and Decision Conference (CCDC), Chinese, 2015.
- [7] M. Moghodasian, E. Alenasser, "Modelling and Artificial Intelligence-Based Control of Electrode System for an Electric Arc Furnace", J. Electromagnetic Analysis&Applications, Vol. 3, pp. 47-55, 2011.
- [8] H. Andrei, C. Cepisca, S. Grigorescu, "Power Quality and Electric Arc Furnace", Chapter 5, DOI:10.5772/15996. Source: In Tech, In Book: Power Quality.
- [9] Ö. Solar, B. Gültekin, S. Buhan, B. Boyrazoğlu, T. İnan, T. Atalık, A. Açık, A.Terciyanlı, Ö. Ünsar, E. Altıntaş, Y. Kaya, E. Özdemirci, I. Çadırcı, M. Ermiş, "Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry in Turkey", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 46, No. 1, January/February, 2010.
- [10] P. E. Issouribehere, F. Issouribehere, and G. A. Berbera, "Power Quality and Operating Characteristics of Electric Arc Furnace", in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Genarel Meeting, pp. 784-791, 2005.
- [11] P. E. Issouribehere, j. C. Barbero, G. A. Berbera, and F. Issouribehere, "Compability Between Disturbance Emission and Argentinian Power Quality Regulations in Iron and Steel Industry", in Proc. IEEE/PES, TDC (Latin America), pp-1-6.
- [12] J. G. Mayordomo, E. Prieto, A. Hernandez, and L. F. Beites, "Arc Furnace Characterization from an off-line Analysis of Measurement", in Proc. IEEE 9th Int. Conference, Harmonics Quality Power, pp-1073-1078, Orlando, FL, 2000.
- [13] Deacanu. S. I., N. Nopa, A. I. Toma, M. Topor, "Modelling and Experimental Analysis for Modernization of 100 –t EAF", IEEE Transaction on Industrial Applications., Vol. 46, No.6, November/December, 2010.
- [14] M. P. Donsion, J. A. Güemes, F. Oliviera, "Influence od a SVC on AC Arc Furnaces Harmonics, Flicker and Unbalance Measurement and Analysis", 15th

IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 26-28 April, 2010.

- [15] B. Boulet, J. Wikston, L. Kadar, “The Effect of Measuring System on Power Quality Measurements in Electrical Arc Furnace”, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, 5-9 October, 1997.
- [16] E. Özdemirci, Y. Akkaya, B. Boyrazoğlu, S. Buhan, A. Terciyanlı, O. Unsar, E. Altıntaş, B. Haliloğlu, A. Açık, T. Atalık, Ö. Solar, T. Demirci, I. Çadırcı and Muammer Ermiş, “Mobile Monitoring System to take PQ snapshots of Turkish Electricity Transmission System”, in Proc. IEEE IMTC, Warsaw, Poland, 2007, pp. 1-6.
- [17] T. Demirci, A. Kalaycıoğlu, B. Boyrazoğlu, Ö. Solar, S. Pakhuylyu, M. Dagh, T. Kara, H.S. Aksuyek, C. Topçu, B. Polat, S. Bilgen, S. Umut, I. Çadırcı and M. Ermiş, “National PQ Monitoring Network for Turkish Electricity Transmission System”, in Proc IEEE IMTC, Warsaw, Poland, 2007, pp-1-6.
- [18] TR. Mediterranean Development Agency , “Demir Çelik Sektör Raporu”, 2014.
- [19] Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği, “Türkiye Demir ve Demir Dışı Metaller Meclisi Sektör Raporu, 2010.
- [20] <http://www.dcud.org.tr/14Ekim2011>, Demir Çelik Üreticileri Derneği.
- [21] T. Zheng, E. B. Makram, “An Adaptive Arc Furnace Model”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July, 2000.
- [22] O. Ozgun, A. Abur, “Flicker Study Using a Novel Arc Furnace Model”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, pp. 1158-1163, October 2002.
- [23] K. Timm, “Circle Diagram of AC-Furnace”, Electrical Engineering of Arc Furnace Symposium, Kehl Germany, pp. 18-21, April, 2015.
- [24] Hooshmand, R., Banejad, M., Estefani, M.T., “A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 4, pp. 195-202, 2008
- [25] A.A. Gomez, J.J.M., Durango ve A.E., Mejia, “Electric arc furnace modeling for power quality analysis,” Proc. of the IEEE ANDESCON Conf., 14-17 Sept., Bogota, pp. 1-6, 2010.
- [26] A. Memmedov, “Effect of arc furnaces working in groups on grid voltage”. S. Electric, 215, pp. 142-145, 2007.
- [27] M. Şeker, A. Memmedov, “Inversigation of Voltage Quality in Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink”, International Journal of Engineering and Technological Research (IJETR), Vol 2., Issue-11, November, 2014.
- [28] [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_arc_furnace.](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_arc_furnace)
- [29] Arrillage, J., Brandly, D.A., and Bodler, P.S., “Power System Harmonics”, Wohm Willey, S. Sons, 1985
- [30] M. Şeker, A. Memmedov, “Elektrik Ark Fırını Besleyen Elektrik Şebekelerinde Gerilim Sapmalarının Deneysel İncelenmesi”, ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.

- [31] K.M., Orhon, “Ark Fırınları Elektriği”, Asil elik ve Ticaret A.Ş. Teknik Yayını, Ferik Ofset Basımevi, Bursa, 1986.
- [32] B. Danai, “Statistical Analysis of Electric Arc Furnace Parameter Variations, Proc. Inst. Electrical and Electrical. C. Vol. 132, No. 2, pp. 82-93, March, 1985.
- [33] G. Manchur, C. C. Erven, “Development of a Model for Predicting Flicker from Arc Furnace”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 416-426, Jan. 1992.
- [34] M. Şeker, A. Memmedov, R. Huseyinov, “Investigation of Characteristics of Electric Arc Furnace Operation”, ELECO '2016 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 01-03 Aralık 2016, Bursa
- [35] H. Math, J. Bollen, I. Gu., Yu-Hua. Gu., “Signal Processing of Power Quality Disturbances”, Wiley-Interscience, New York, 2006.
- [36] C., Sankaran, Power Quality, CRC Press, London, 2008.
- [37] R.A. Hooshmand, M.T., Esfahani, “Optimal Design of TCR/FC in Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement in Power System”, Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, Issue 19, pp. 31-50, 2009.
- [38] C. Lazaroiu, D., Zaninelli, “DC Arc Furnace modelling for Power Quality Analysis”, Scientific Bulletin of Politehnica University of Bucharest, Serie C, Vol. 72, Issue 1, pp. 56-62, 2010.
- [39] R.C., Bellindo, C. Gomez, “Identification and Modelling of aThree Phase Arc Furnace for Voltage Disturbance Simulation”, IEEE Transaction on Power Deliver Delivery, Vol.12, No.2, pp. 888-8977, September, 1997
- [40] H. Mokhtari, M. Hejri, “A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnace Using Matlab”, Transmission and Disturbution Conference and Exhibition 2002, Asia Pacific. IEEE/PES 3, pp. 2078-2083, October, 2002
- [41] P. Chittora, A. Singh, M. Singh, “Modelling and Analysis of Power Quality Problems in Electric Arc Furnace”, Annual IEEE India Conference (INDICON), pp.1-6, 2015
- [42] S. Golestani, H. Samet, “Generalised Cassie-Mary Electrical Arc Furnace Models”, IET Generation, Transmission & Disturbution, Vol. 10, Issue 133, pp. 3364-3373, 2016 .
- [43] H. Schau, D. Stade, “Mathematical Modelling of Three Phase Arc Furnaces”, Proc. IEEE International Conference Harmonic Power System, pp. 422-428, September, 1994
- [44] H.M. Petersen, R.G. Koch, P.H. Swart, R. Heerden, “ Modelling Arc Furnace Flicker Investigation Compensation Techniques”, International Conference on Industrial Application Conference, Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS! 95, pp. 1733-1740. October 1995.
- [45] T. Zheng, E.B. Makram, A. Girgis, “Efect of Different Arc Furnace Model on Voltage Distortion”, IEEE Conference on Harmonics and Power Quality of Power, pp. 1079-1085, October, 1998.

- [46] G.C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, “Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Network”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, 1994
- [47] A., Memmedov, R., Huseynov, M., Şeker, “Elektrik Ark Fırınlarını Besleyen Şebekelerde Gerilim Dalgalanmaları”, 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK 2011), Kocaeli, 2011.
- [48] R. Hooshmand, M. Benejad, M.T. Esfahani, “A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 4, pp. 195-202, 2008.
- [49] M. Anxo, P. Alonso, M. Perez, “An Improved Time Domain Arc Furnace Model for Harmonic Analysis”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, 2004.
- [50] S. Varadan, E.B. Makram A. Girgis, “A New Time Domain Model Voltage Source for An Arc Furnace using EMTP”, IEEE Transaction on Power Delivery Vol. 11, No. 3, 1996.
- [51] T. Zheng, E.B. Makram, “An Adaptive Arc Furnace Model”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, pp. 931-939, 2000.
- [52] ŞEKER, M., Memmedov, A., HUSEYİNOV, R., “Elektrik Ark Fırınlarında Çalışma Karakteristiklerinin İncelenmesi”, Elektrik-Elektronik ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı (ELECO 2016), Bursa.
- [53] Bello, J.R., “Fundamental of The Electric Arc Furnace”, Electric Furnace Proceedings 29, 1971, p 219
- [54] Borrebach, E.J., “Maximum Power Operation of Electric Arc Furnaces”, Iron and Steel Engineering, May 1969, p. 74
- [55] Montari, G.C., Loggini, M., Cavallini, A., Pitti, L., Zaninelli, D., “ Arc Furnace Model for The Study of Flicker Compensation In Electrical Networks”, IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 9, No. 4, October 1994
- [56] R.C. Dugan, M.F., McGranaghan, M.F., Santosa, H.W. Beaty, Electrical Power System Quality, The McGraw-Hill Company, Professional Engineering, 2004.
- [57] Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods, IEC 61000-4-30, 2003
- [58] IEC 61000-4-15 Electromagnetic Compatibility (EMC)- Part 4: Testing and Measurement Techniques- Section 15: Flickermeter Functional and Design Specification, 2003.
- [59] C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, R. Yumurtacı, A. Karataş, O. Arıkan, “Elektrik Sistemlerinde Harmonikler”, İstanbul, Birsen Yayınevi, 2003.
- [60] M. Izhar, C.M. Hadzer, S. Masri, S. Idris, “A Study of the Fundamental Principles to Power System Harmonics”, National Power and Energy Conference (PECon), Malaysia, 2003, pp. 225-232.
- [61] R. Yacamini, “Power System Harmonics”, IEE Power Engineering Journal, August 1994, pp. 193-198.

- [62] M.T. Chen, C.W. Lu, C.H. Huang, Flicker Characteristic Estimation of an Electric Arc Furnace Feeder”, Power System Technology, International Conference POWERCON '98, 18-21 August, 1998.
- [63] E. Acha, A. Semiyen, N. Rajakovic, “A Harmonic Domain Computational Package for Nonlinear Problems and It’s Application to Electrical Arc”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, July, 1990.
- [64] S.R. Mendis, A. Gonzalez, “Harmonic and Transient Overvoltage Analyses in Arc Furnace Power Systems”, IEEE Transaction on Industrial Applications, Vol. 28, No. 2, March/April, 1992.
- [65] D. Andrews, T. Bishop, J.F. Witte, “ Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility”, IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 32, No. 3, May/June, 1996
- [66] W. Ting, S. Wennan, Z. Yao, “A New Frequency Domain Method for the Harmonic Analysis of Power System with Arc Furnace”, Proceedings of the 4th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM-97), Hong Kong, November, 1997.
- [67] J.G. Mayordomo, L.F. Beites, R. Asensi, M. Izzeddine, L. Zabala, J. Amantegui, “A New Frequency Domain Arc Furnace Model for Iterative Harmonic Analysis”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 12, No. 4, October 1997.
- [68] L.F. Beites, J.G. Mayordomo, A. Hernandez, R. Asensi, “Harmonic, Interharmonic and Unbalances of Arc Furnaces:A New Frequency Domain Approach”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, 1998.
- [69] E.E. Ahmed, M.M.A. Aziz, E.A. El-Zahab, W. Xu, “Investigation and Mitigation of Harmonic from Electric Arc Furnaces”, Proceedings of the 1999 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Shaw Conference Center, Edmonton, Alberta, Canada, May 9-12, 1999.
- [70] C. Surapong, C.Y. Yu, D. Thukaram, T. Nipon, K. Damrong, “Minimization of the Effects of Harmonics and Voltage Dips Caused by Electric Arc Furnace”, IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, January 21-23, 2000.
- [71] M.T. Chen, C.W. Lu, Static Characteristic Estimations of Harmonic and Flicker on Electric Arc Furnace Feeders, 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power System KTH, Stocholm, Sweden, June 11-15, 2006.
- [72] G.W. Chang, Y.J. Liu, H.M. Huang, S.Y. Chu, Harmonic Analysis of the Industrial Power System with an AC Electric Arc Furnace, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2006.
- [73] S.R. Mendis, M.T. Bishop, J.F. Witte, “Investigation of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power Systems”, IEEE Endustry Application Magazine, Issue 1, Vol. 2. 1996.
- [74] S.C. Wang, Y.J. Chen, C.J. Wu, “Comparision of Computation Algorithm for Three-Phase Voltage Flicker Equivalent Value”, International Journal of Mathematical Model and Methods in Applied Science, Issue 3, Vol. 1, 2007.

- [75] Y. Hsu, K.H. Chen, P. Huang, C.N. Lu, "Electrical Arc Furnace Voltage Flicker Analysis and Protection", IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement, Vol. 60, Issue:10, Oct. 2011.
- [76] G.C. Montanari, M. Loggini, A. Cavallini, L. Pitti, D. Zaninelli, "Arc Furnace Model for the Study of Flicker Compensation in Electrical Networks", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No. 4, October 1994.
- [77] IEC Standard 61000-3-3 "Limits - Limitation of voltage changes, voltage fluctuations and flicker in public low-voltage supply systems, for equipment with rated current 16 A per phase and not subject to conditional connection".
- [78] Eser, H., "Kompanzasyon ve Uygulama Esasları", 1998.
- [79] L. Gyugyi, Power Electronics in Electric Utilities: Static VAR Compensators, Proceedings of the IEEE, pp. 483-493, 1988.
- [80] Cigre, Static Synchronous Compensator, Working Group 14:19, 1998.
- [81] M.H. Rashid, Power Electronics, devices, Circuit and Applications, Nobel Akademik Yayıncılık, 2015.
- [82] R.A. Hooshmand, M.T. Estafani, "Optimal Design of TCR/FC in Electric Arc Furnace for Power Quality Improvement in Power Systems", Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies", Issue. 15, pp. 31-50, 2009.
- [83] K. Anuradha, B.P. Muni, A.D.R. Kumar, "Modelling of Electric Arc Furnace & Control Algorithms for Voltage Flicker Mitigation Using DTATCOM", 16th National Power System Conference, 15-17 December, 2010.
- [84] S.I. Deaconu, P.G. Nicolea, T. Latinovic, "Comparative Study for EAF's Reactive Energy Compensation Methods and Power Factor Improvement", WSEAS Transaction on Systems, Issue 9, Volume 9, September, 2010.
- [85] T. Masood, R.K. Aggarwal, S.A. Qureshi, "STATCOM Model Against SVC Control Model Performance Analyses Technique by Matlab", International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ' 10), Granada, March, 2010.
- [86] A. Banga, S.S. Kaushik, "Modelling and Simulation of SVC Controller for Enhancement of Power System Stability", International Journal of Advances in Engineering and Technology, Vol. 1, Issue 3, pp. 79-84, July, 2011.
- [87] D. Mohanty, A. Ahamad, M.A. Khan, "Modelling, Simulation and Performance Analysis of FACTS Controller in Transmission Line", International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, Vol. 3, Issue 5, May, 2013.
- [88] G. Vishwakarma, N. Saxena, "Enhancement of Voltage Profile by using Fixed Capacitor- Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR), International Journal of Electrical Electronics and Computer Engineering, Vol. 2, 2013.
- [89] S. Sharma, D. Patel, "Modelling and Simulation of FC-TCR for Reactive Power Compensation using The Matlab/Simulink", International Journal of Advances in Engineering & Technology, Vol. 7, Issue 6, pp. 1767-1773, Jan. 2015.

- [90] A. Gelen, T. Yalçınöz, “Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) ve Tristör Anahtarlama Reaktör Tabanlı Statik Var Kompanzatorün (TSR-Tabanlı SVC) PI ile kontrolü”, Gazi Üniversitesi Mük. Fak. Dergisi, Cilt 24, No. 2, pp-237-244, 2009.
- [91] N.G. Hingorani, L. Gyugyi, “Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Piscataway, NJ. IEEE Press, 2000.
- [92] Y.H. Song, A.T. JOHNS, “Flexible AC Transmission Systems, London, United Kingdom: IEE Press. 1999.
- [93] P. Moore, P. Ashmole, “Flexible AC Transmision System: Part 4- Advanced FACTS Controlers, Power Engineering Journal, pp.95-100, April, 1998
- [94] E.H. Watanabe, R.M. Stephan, M. Aredes, “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power for Three Phase System and Generic Loads”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, February, 1993.
- [95] S. Mori, K. Matsuno, M. Takeda, M. Seto, “Development of a large Stativ Var Generator using Self-cummtated inverters for Improving Power System Stability”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 8, No. 1, February, 1993.
- [96] C. Schauder, M. Gernhardt, E. Stacey, T. Lemak, L. Gyugyi, T.W. Cease, A. Edris, “Development of a Mvar Static Condenser for Voltage control of transmission System”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July, 1995.
- [97] Türkiye Elektrik İletim Sistemi arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliğinde Kabul Edilebilir Akım Harmonik Limitleri.
- [98] B. Bharat, “Arc Furnace Flicker Measurement and Control”, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 8, No. 1, pp. 400-410, January/February 1993.
- [99] Alekseev, C.B., Treyvas, V.G., “Elektrik Ark Fırınlarının Endüstriyel elektrik şebeke yüküne ve gerilim kalitesine etkisi”, (Rusça), Moskova Energia, 1968, s-194-204
- [100] Venökovskiy, L.B., “Keyfi prosesin beklenme ve dispersiyonunun matematiksel değerlendirilmesi”, Moskova Otomatika ve Telemeknika, 1962, No. 5, 565-570, (Rusça)
- [101] Volgin, V.V., Karimov, R.H., “Keyfi proseslerin deneme sonuçlarına göre korelasyon fonksiyonunun hesaplanmasında reelleştirme sınırının seçimi”, Moskova Otomatika ve Telemeknika, No. 6, 1967, 53-62, (Rusça)
- [102] Galkin, M.F., Kroll, Y.C., Şalit, A.I., “Eelktrik Ark fırın akımının dalgalanmasının istatistiksel analizi”, Moskova Nauka, denemelerin planlanması problemleri, 53-62, (Rusça)
- [103] Isskoviç, E.L., “Sanayi otomasyonunda istatistiksel metotlar”, Moskova Enerjiya, 1964.
- [104] Kondraşin, A.V., “Matematiksel beklentinin incelenmesinde keyfi proseslerin reelleştirilmesi için nomogramalar”, Moskova MEI, 1969, 43-48

- [105] Klomov, Y.U., “ Keyfi proseslerin hesaplanmasında spektral sıklıkların seçilmesinde örnekleme aralığının değerlendirilmesi”, Moskova otomatika ve telemekanika, 1964, No. 3, 356-367
- [106] Efroymoviç, Y.E., “Elektrik ark fırınlarının optimal elektrik rejimleri”, Moskova Metallurji, 1956, 99
- [107] Kutin, B.B.” Deneme sonuçlarına göre keyfi kararlı proseslerin korelasyon fonksiyonlarının hesaplanması”, Matematika ve Telemekanika, 1957, No. 3, 201-222
- [108] Livşiss, N.A., Pugaçev, M.N., “Otomatik Kontrol Sistemlerinin Olasılık Analizi”, Moskova, Sovetskoye Radio, 1963,
- [109] Matinsev, V.V.”Elektriksel darbe mekanizmalarının çalışmasında elektrik istasyonlarının gerilim dalgalanmalarının incelenmesi”, Kuybişev, KPI, 1971
- [110] Sokolav, A.N., Galkin, M.F., Çeliğin elektrikle ergitmesinde teknolojik prosesin farklı momentlerinin dolaylı kontrol sistemlerinin incelenmesi”, Elektrotermiya, 1969, No. 82, 14-18
- [111] Harubin A.E., “Keyfi büyüklüğün ortalama değerinin ve onun karesinin belirlenmesinde hataların analizi”, Moskova Otomatika ve Telemekanika, No. 4, pp. 304-314, 1957.
- [112] Edemskiy, V., Aleksayev, S.V., Treyvass, V.G., “Elektrik ark fırınının elektrik rejiminin oluşmasının matematiksel yazılımı”, Moskova Energiya, 1969, 39-48
- [113] Payne, J.W.S., “The control of large electric arc furnaces, IVth International Congress on Electro-Heat, No. 207, 1959.
- [114] Wasowski, A., “ Methode probabiliste pour estimer l’influence des fautes a arcs les reseaux de distribution, VI Congres International d’Electrothermie, No. 118, 1968.
- [115] Zinzugi, T., “Problems of lamp flicker caused by large electric arc furnace for steel production in Japan”, VI International Congres on Electro-Heat, No. 145, 1968
- [116] Zinzugi, T., “progress in electric arc power to arc furnace loads in Japan”, VI International Congres on Electro-Heat, No. 145, 1968
- [117] M. Şeker, A. Memmedov, R. Hüseyinov, The Modeling Of Three Phase Electric Arc Furnace System Using Matlab And Examining The Harmonic Effects With FFT Analysis, International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP’16), pp. 326-333, Turkey-Malatya, 2016.
- [118] M. Şeker, A. Memmedov, R. Hüseyinov, S. Kockanat, “Power Quality Measurement and Analysis in Electric Arc Furnace for Turkish Electricity Transmission System”, 21th International Conference (Electronics 2017), 19-21 June 2017, Palanga, Lithuania, 2017 (sözlü sunum olarak ELECTRONICS 2017 konferansında sunulmak üzere Electronika ir Elektrotehnika dergisinde SCIE olarak yayınlanmak üzere kabul edilmiştir).
- [119] M. Şeker, A. Memmedov, “An Experimental Approach for Understanding V-I Characteristic of Electric Arc Furnace”, 21th International Conference (Electronics 2017), 19-21 June 2017, Palanga, Lithuania, (sözlü sunum

olarak ELECTRONICS 2017 konferansında sunulmak ve Electronika ir Elektrotechnika dergisinde SCIE olarak yayınlanmak üzere kabul edilmiştir).

- [120] M. Şeker, A. Memmedov, R. Huseyinov, “The Modelling and Simulation os Stativ VAR Compensator (SVC) System for Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink”, ELECO '2016 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 01-03 Aralık 2016, Bursa.
- [121] A. Aktaibi, M.A. Rahman, “A Software Design Technique for Differential Protection of Power Transformers”, IEEE International Electric Machines & Drivers Conference (IEMDC), 2011.
- [122] A. Hajjar, “Modeling and Testing of a Digital Differential Relay Using MATLAB/SIMULINK”, Res. J. of Aleppo University, Engineering Science Series, No. 102, 2011.
- [123] B. Vahidi, E. Esmaeeli, “MATLAB-SIMULINK-Based Simulation for Digital Differential Relay Protection of Power Transformer for Educational Purpose”, Computer Application in Engineering Education, Volume 21, Issue 3, Pages 475-483,September,2013.

8. EKLER

EK-1 : Kabul Edilebilir Akım Harmonik Limitleri

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV					34.5 kV <V≤154 kV					V>154 kV				
Grup	No	I _k /I _L					I _k /I _L					I _k /I _L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000	<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	h<11	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11≤h<17	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17≤h<23	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23≤h<35	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h≥35	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
TTB		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniye çözünürlükle ölçülen 10'ar dakikalık ortalamalardır.																

I_k: Ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı

I_L: Ortak bağlantı noktasındaki maksimum yük akımının ana bileşeni

EK 2 : 400 kV İletim Sisteminde Harmonik Gerilim Planlama Sınır Değerleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	2,0	3	1,5	2	1,0
7	1,5	9	0,5	4	0,8
11	1,0	15	0,3	6	0,5
13	1,0	21	0,2	8	0,4
17	0,5	>21	0,2	10	0,4
19	0,5			12	0,2
23	0,5			>12	0,2
25	0,5				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THB _v : %2					

Ek-3 : Tristör tetikleme açısını ayarlama da kullanılan fonksiyon bloğu

algoritması

```
function alfa = fcn(guc)
%#codegen
guc=abs(guc);
Vetkin=19942;
B=guc/Vetkin^2;
alfa=pi/2;
epsilon=0.0001; max1=1; x1=pi/2; y=0;
XL=5.61;
    for k=1:max1
        a=2-2*cos(2*alfa);
        x1=alfa-(B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa)))/a;
        alfa=x1;
        y=B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa));
        if abs(y)<epsilon
            break
        end
        alfa=alfa*180/pi;
        if alfa<0;
            alfa=90;
        else
            end
    if alfa>180;
        alfa=180;
    else
        end
end
```

Ek-4 : Diferansiyel röle primer girişi için kullanılan algoritma

```
function sys = primerside(u)
xi=1;
    if xi==1;
        T1 = [2 -1 -1;-1 2 -1;-1 -1 2]/3;
        end
I1 = [u(1),u(2),u(3)];
I11= (T1*I1)';
sys= I11;
Röle 1. Sekonder side
function sys = secondaryside(u)
xi=1;
    if xi==1;
        T2 = [2 -1 -1;-1 2 -1;-1 -1 2]/3;
        end
I2 = [u(1),u(2),u(3)];
I22= (T2*I2)';
sys = I22;
```

Ek-5 : Diferansiyel Röle Karar Algoritması

```
function sys = diffDecision(I11,I22)
n=380/34.5; % Transformör dönüştürme oranı
I11 = n*[I11(1,1),I11(1,2),I11(1,3)];
I22 = [I22(1,1),I22(1,2),I22(1,3)];
Iop = abs(I11-I22);
Ires = abs(I22+I11)/2;
i = 1;
is1 = 50 ;
is2 = 50 ;
k1 = 0.30;
k2 = 0.40;
x=1;
    if x==1
        while i<=3
            if Ires (i)<=is2
                if Iop(i)>(k1*Ires (i)+is1)
                    x=-100;
                    break
                else
                    x=1;
                end
            else
                if Iop(i)>(k2*Ires (i)+(k1-k2)*is1)
                    x=0;
                    break
                else
                    x=1;
                end
            end
            i=i+1;
        end
        else
            x=0;
        end
    sys=x;
```

%Röle. İkinci harmonik

```
function sys =pdate(I11,I22)
n=500/315;
I11 = n*[I11(1,1),I11(1,2),I11(1,3)];
I22 = [I22(1,1),I22(1,2),I22(1,3)];
Iop = abs(I11-I22);
Ires = abs(I22+I11)/2;
iop0 = 0.2*100 ;
ires0 = 0.5/4*100 ;
k=0.5;
    for i = 1:3
        if (Iop(i) > iop0) && (Ires(i) <= ires0) || ( Iop(i) > k*(Ires(i) -ires0) + iop0) && (Ires(i) >
            ires0)
            x = 1;
            break
        else
            x =0;
        end
    end
    sys = x;
```

9. ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad	: Mustafa ŞEKER
Doğum Yeri ve Tarihi	: Üsküdar, 1981
E-Posta	: mustafaseker@d-emi.com
Lisans	:Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği.
Yüksek Lisans	:Elektrik-Elektronik Mühendisliği ABD, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi

Mesleki Deneyim:

- Cumhuriyet Üniversitesi, Divriği Nuri Demirağ M.Y.O., Öğretim Görevlisi (Ocak 2007- Haziran 2014)
- DNV-GL Energy Advisory, Çamlıbel EDAŞ 5-10 Yıllık Master Plan Projesi, Proje Koordinatörü (Haziran 2014, Kasım 2015)
- D-Emi Bilgi Teknolojileri & EHA Adi Ortaklığı, Çamlıbel EDAŞ Elektriksel Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ve Varlık Envanteri Oluşturma Projesi, Çamlıbel EDAŞ Proje Yöneticisi (Ocak 2016- Devam Ediyor).

Tezden Üretilen Projeler:

- Bu tez çalışması İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (İÜBAP) tarafından 2011-135 proje numarası ile “Elektrik Ark Fırını Besleyen Elektrik Şebekelerinde Gerilim Kalitesinin Deneysel İncelenmesi” adlı proje ile desteklenmiştir. (Proje Yürütücüsü: Prof. Dr. Arif MEMMEDOV, Proje Bütçesi: 15.000,000 TL).

Tezden Üretilen Yayınlar/Sunumlar:

1. M. Şeker, A. Memmedov, R. Huseyinov, S. Kockanat, “Power Quality Measurement and Analysis in Electric Arc Furnace for Turkish Electricity Transmission System”, 21th International Conference (Electronics 2017), 19-21 June 2017, Palanga, Lithuanian,2017 (sözlü sunum olarak ELECTRONICS 2017 konferansında sunulmak ve Elektronika ir Elektrotehnika dergisinde SCI-E olarak yayınlanmak üzere kabul edilmiştir).

2. M. Şeker, A. Memmedov, "An Experimental Approach for Understanding V-I Characteristic of Electric Arc Furnace", 21th International Conference (Electronics 2017), 19-21 June 2017, Palanga, Lithuanian, (sözlü sunum olarak ELECTRONICS 2017 konferansında sunulmak ve Elektronika ir Elektrotechnika dergisinde SCI-E olarak yayımlanmak üzere kabul edilmiştir).
3. Mustafa ŞEKER, Arif MEMMEDOV," Investigation of Voltage Quality in Electric Arc Furnace with Matlab/Simulink" International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR) ISSN: 2321-0869, Volume-2. issue-1, November 2014.
4. Şeker, M., Çıkan, M., Memmedov, A., Kockanat, S., Doğan, H., "Design of Differential Relay Application with Matlab Simulink for Protection of Transformer in Electric Arc Furnace Loads 5th International Conference on Advanced Technology&Sciences (ICAT-2017), 9-12 May, İstanbul, Turkey.
5. Şeker, M., Memmedov, A., Çıkan, M., A., Kockanat, S., Doğan, H., "Investigation Of Current And Voltage Fluctuations In Electric Arc Furnaces With The Help of Probability" Theory", 5th International Conference on Advanced Technology&Sciences (ICAT-2017), 9-12 May, İstanbul, Turkey.
6. Şeker, M., Memmedov, A. , "The modelling of Three Phase Electric Arc Furnace System using Matlab and Examining the Harmonic Effect with FFT Analysis", International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium' 16, (IDAP-2016) Malatya, Turkey.
7. Memmedov, A., Huseynov, R., Şeker, M., "Elektrik Ark Fırınlarını Besleyen Şebekelerde Gerilim Dalgaları", 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu (EVK 2011), Kocaeli, 2011.
8. Şeker, M., Memmedov, A., "Elektrik Ark Fırını Besleyen Elektrik Şebekelerinde Gerilim Sapmalarının Deneysel İncelenmesi", Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2012), Bursa. Aralık 2012,
9. Şeker., M, Memmedov., A.. "Elektrik ark fırın yükünün matlab Simulink ile modellenmesi", SİU 2015, Mayıs 16-19, Malatya.
10. Mustafa Şeker, Arif Memmedov, Rafael Huseynov, Elektrik Ark Fırınlarında Çalışma Karakteristiklerinin İncelenmesi, Elektrik- Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO 2016), Bursa.

11. Mustafa Şeker, Arif Memmedov, Rafael Hüseyinov, Matlab Simulink ile Elektrik Ark Fırın Sistemleri için Statik Var Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi ve Benzetimi” Elektrik- Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu (ELECO 2016), Bursa.

Yazarın Diğer Yayınları:

12. Arif MEMEDOV, Teymuraz ABBASOV, Mustafa ŞEKER, "Theoretical Modeling and Experimental Analysis of Drying Process in Electromagnetic Field", World Journal of Science and Engineering, V ol. 2, No. 1 , 27 February 2014.
13. A. Memmedov, T. Abbasov, M. Seker, "Some Aspects of The Magnetic Field Disturbution Problems of Linear Induction Motor”, Transaction on Electrical and Electronic Circuits and Systems, Vol. 4, No. 3, 2014.
14. Arif MEMEDOV, Teymuraz ABBASOV, Mustafa ŞEKER, "Intensification of the Banana Drying Processes by Using EFL Electromagnetic Waves", World Journal of Science and Engineering, VOL 4, No. 2, 23 May 2016
15. Memmedov, A., Abbasov,T., Şeker, M., "On The Distribution of Magnetic Field of Linear Induction Motor”, 9th International Conference on "Technical and Physical Problems of Electrical Engineering” (ICTPE Conference),Istanbul-Turkey, 9-11 September 2013
16. Şeker, M., Çıkan, M. , Kockanat, S., Doğan, 1-1.. Lafcı, 0., Şentürk, Z., Memmedov, A., " Evaluation OF Production performance of Different Type PV Panels and Experimental Evaluation of Risk Analaysis of PV System in LV Networks", 5th International Conference on Advenced Technology&Sciences (İCAT-2017), 9-12 May, İstanbul, Turkey.
17. Memmedov, A. , Şeker, M, "Lojik Kontrolörlü OKS' lerin Harmonik Lineerleştirme Yöntemi ile Analizi", Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı ve Sergisi(TOK 2013), Malatya, 2013.
18. Ahmet Aydın, Mustafa ŞEKER. Arif Memmedov, Bingöl Orta Gerilim Şebekesinin Teknik Kayıplarının Analizi için Digslient Power Factory Yazılımı ile Bilgisayar Destekli Şebeke Modeli” Mesleki Bilimler Dergisi, cilt 6, sayı 1, 2017.

19. Kaygusuz, A.,Şeker M. , 154 kV' luk Enerji Nakil Hatlarında Kullanılan Kafes Direklerin Yıldırım Analizi, Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu (FEEB 2011), 5-7 Eylül 2011 Elazığ.
20. Mustafa ŞEKER, Mahmut TOKMAKÇI, Musa Hakan ASYALI, “Examining EEG Signals with Spectral Analyses Methods in Migrain Patients during Pregnancy”, Gazi Üniversitesi Journal of Science, Part A: Engineering and Inovation, Vol 1, No 4, 2013.
21. ŞEKER, M., “EEG Tanısında Modified Covariance Yönteminin Model Derecesi Hassasiyetinin İncelenmesi”, Fırat Üniversitesi Elektrik-Elektronik Bilgisayar Sempozyumu, ELAZIĞ, 2011. .

