

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS OLAYININ
SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE
BELİRLENMESİ

Tahir Çetin AKINCI

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN
Prof. Dr. Serhat ŞEKER

İSTANBUL 2009

T.C.
MARMARA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS OLAYININ
SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE
BELİRLENMESİ

Tahir Çetin AKINCI
(141201220050003)

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

DANIŞMAN
Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN
Prof. Dr. Serhat ŞEKER

İSTANBUL 2009

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanmasında yardımlarını esirgemeyen, değerli tecrübeleriyle yol gösteren birinci danışmanım Sayın, Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN'e,

Yüksek Lisans tezimden itibaren akademik hayatımın her aşamasında desteğini ve yardımını esirgemeyen, sabırlı, anlayışlı ve hoşgörülü yaklaşımı ile beni cesaretlendiren, teşvik eden ve daima özveri ile bana vakit ayıran, tezin her aşamasında destekleyici, öğretici, yönlendirici yaklaşımıyla yanımda bulunan çok sevdiğim değerli hocam ve ikinci danışmanım Sayın Prof. Dr. Serhat ŞEKER'e,

Destek, teşvik ve yardımlarıyla her zaman çalışma motivasyonumuzu artıran Bölüm Başkanımız değerli hocam Sayın Prof. Dr. Osman KILIÇ'a,

Çalışmalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen Yrd. Doç. Dr. Bülent ORAL, Yrd. Doç. Dr. Gökhan GÖKMEN, Yrd. Doç. Dr. Nevzat ONAT, Dr. Gökhan KOÇYİĞİT, Ferdun DÖNMEZ ve Yrd. Doç. Dr. Ahmet NAYIR'a,

Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesindeki mesai arkadaşlarıma ve değerli hocalarıma,

Her zaman bana güvenen ve yanımda olan eşime, aileme,

En içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Kasım 2009

Tahir Çetin AKINCI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	ii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
YENİLİK BEYANI	vii
SEMBOLLER ve KISALTMALAR.....	viii
ŞEKİLLER	x
TABLolar	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
I.1. ÇALIŞMANIN AMACI	3
I.2. FERROREZONANS VE LİTERATÜRDEKİ YERİ	4
BÖLÜM II MATEMATİK YÖNTEMLER	13
II.1. SPEKTRAL ANALİZ YÖNTEMİ	13
II.1.1. Güç Spektrum Yoğunluğu.....	13
II.1.2. Spektrogram	14
II.1.3. Koherens Analizi	14
II.2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ	15
II.2.1. Tarihsel Bakış	16
II.2.2. Genel Bakış	18
II.2.3. Sürekli Dalgacık Dönüşümü	20
II.2.4. Ölçek	22
II.2.5. Ayrık Dalgacık Dönüşümü.....	22
BÖLÜM III FERROREZONANS OLAYININ FİZİKSEL TANIMI.	
.....	26
III.1.1.Ferrorezonansa Fiziksel Yaklaşım.....	27
III.1.2.Kapasitif Gerilim Transformatörlerinde Ferrorezonans	30
III.1.3.Ferromanyetik Malzemelerin Özellikleri	31
III.1.4.Güç Sistemlerinde Ferrorezonans Olayları	34

III.1.5.Nötr Sisteminden İzole Edilmiş Gerilim Transformatörünün	
Bağlantısı	35
III.1.6.Ferrorezonans Dalga Formları.....	36
III.1.7.Ferrorezonansın Önlenmesi.....	39
BÖLÜM IV TÜRKİYE BATI ANADOLU İLETİM HATININ	
MODELLENMESİ VE FERRORESONANS OLAYININ	
SİMÜLASYONU.....	41
IV.1. SİSTEM PARAMETRELERİ İLE MODEL OLUŞTURMA	42
IV.2. FERROREZONANS SENARYOLARI ve ÜÇ FAZDA AKIM	
GERİLİM ANALİZLERİ	45
IV.2.1.Oymapınar Yük Gurubun Devre Dışı Kalması (1. DURUM).....	45
IV.2.2.Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Bırakılması (2.DURUM)	51
IV.2.3.Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Aynı Anda Devre Dışı	
Kalması (3. DURUM).....	53
IV.2.4.Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 saniye İçin Devre Dışı Kalması	
(4.DURUM)	56
IV.2.5.Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Kesilmesi (5.DURUM)	60
IV.2.6.Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin Devreyi Kesmesi (6. DURUM)	64
IV.2.7.Pi Hattı Sonundaki Kesicilerin 0.1 Saniye için Devreyi Açması	
(7.DURUM)	67
BÖLÜM V FERROREZONANS OLAYININ SPEKTRAL	
ANALİZİ ve ÖZELLİK ÇIKARIMI	72
V.1. GÜÇ SPEKTRUMU YOĞUNLUKLARININ DEĞİŞİMİ.....	73
V.2. ZAMAN-FREKANS DÜZLEMİNDE İNCELEME	75
V.3. KOHERENS ANALİZLERİ.....	77
BÖLÜM VI FERROREZONANS OLAYININ DALGACIK	
TABANLI İNCELENMESİ ve ÖZELLİK ÇIKARIMI.....	79
VI.1. Sürekli Dalgacık Dönüşümünün Uygulanması	79
VI.2. SDD ile Özellik Çıkarımı.....	83
BÖLÜM VII SONUÇLAR ve YORUMLAR	85
VII.1. Elde Edilen Bulgular	85
KAYNAKLAR.....	889

EKLER	 10606
EK 1	106
EK 2	111
EK 3	113
EK 4	115
EK 5	117
EK 6	120
ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS OLAYININ SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ

Ferrorezonans, güç sistemlerinde doyumlu transformatör, seri kapasitörler ve transformatörlerin manyetik empedansı ile ilişkili olarak ortaya çıkan bir olaydır. Ferrorezonans ile iletim ve dağıtım sistemlerinde yıkıcı etkiler gözlemlenir, hatların izolasyonu bozulabilir ve arklar oluşabilir. Ferrorezonans yüksek ve orta gerilim şebekelerinde devrenin açılıp kapanması sonucu, yüklerin aniden devre dışı kalması sonucu ve gerilim transformatörlerinin yüklerindeki simetrisizlik sebebi ile meydana gelir.

Bu çalışmada; Türkiye Batı Anadolu enerji iletim hattından 380kV'luk Seydişehir-Oymapınar iletim hattı modellenerek, model üzerinde muhtemel ferreazonans senaryoları oluşturulmuş olup, güç sisteminde ferreazonans olayı ile ortaya çıkan aşırı gerilim ve akım sinyallerinin analizleri yapılmıştır. Bu gerçek model üzerinde benzetim çalışmasından elde edilen veriler, “Zaman-Frekans” ve “Zaman-Ölçek” tanım bölgelerinde Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) teknikleri vasıtasıyla analiz edilmiştir. Ayrıca Çapraz Güç Spektrumu Yoğunlukları (ÇGSY) da göz önünde bulundurularak, bunların normalizasyonu sonucunda tanımlanan “Koherens” ilişkileri kullanılmış ve güç sistemimdeki anahtarlamaların etkileri de tespit edilmiştir.

Elde edilen bulgular ferreazonans olayının tanımı ile uyumlu olup, özellikle SDD'nin analiz yöntemi olarak literatürde en çok bilinen Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi (ÇÇDA) yaklaşımından daha etkin bir yaklaşım olarak kullanılabileceğini de göstermektedir. Bu anlamda da SDD'nin kullanımı yeni bir uygulamadır.

İlgili literatürde frekans tanım bölgesindeki analizler, tek bir sinyal üzerine yoğunlaşmışken, bu tez çalışmasında ÇGSY'da göz önünde bulundurularak, bunların normalizasyonu sonucunda tanımlanan Koherens ilişkileri, bu alanda ilk kez kullanılarak, güç sistemimdeki anahtarlamaların etkileri de bu yolla gösterilebilmiştir.

Kasım 2009

Tahir Çetin AKINCI

ABSTRACT

DETERMINATION OF FERRORESONANCE PHENOMENON WITH SPECTRAL AND WAVELET ANALYSIS METHODS IN POWER SYSTEMS

The ferroresonance is a phenomenon occurs due to magnetic impedance of saturable transformer, serial capacitors and transformers. By means of ferroresonance, distructive impacts are observed within the transmission and distribution system; line insulation may be damaged; and arcs may appear. The ferroresonance occurs as a result of swithcing on and off the circuit; of immediate deactivating the loads; and of the asymetricity within the transformer loads, within high and medium voltage systems.

In this study, the Seydisehir-Oymapınar transmission line of 380kV from West-Anatolia power transmission line in Turkey has been modelled; the probable ferroresonance scenarios have been established; and over-voltage and over-current resulting from ferroresonance within the power system was analyzed. The data obtained from simulation on this real model has been analyzed by means of Short Time Fourier Transform (STFT) and Continuous Wavelet Transform (CWT) techniques within the ‘Time-Frequency’ and ‘Time-Scale’ domains. In addition, considering the Cross Power Spectral Density (CPSD), their “Coherence” relations defined as a result of their normalization were utilized and the impacts of the switching were identified.

The findings are in concordance with the definition of ferroresonance phenomenon and have shown that the CWT, as an analysis method, may be used as a much more effective approach than Multi Resolution Wavelet Analysis, the most known analyzing method in the literature. In this sense, applying the CWT is a new application.

In regarding literature, the analysis of frequency domain focuses on only one signal, while in this thesis study, considering the CPSD, their “Coherence” connections defined as a result of their normalization were utilized for the first time in this field and the impacts of the switching were identified in this way.

November 2009

Tahir Çetin AKINCI

YENİLİK BEYANI

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FERROREZONANS OLAYININ SPEKTRAL VE DALGACIK ANALİZİ YÖNTEMLERİYLE BELİRLENMESİ

Ferrorezonans elektrik güç sistemlerine büyük zararlar veren, önemli maddi ve iş kayıplarına sebep olan bir olaydır. Literatürde ferrorezonans olayı üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu ferrorezonansın analizinden çok ferrorezonans olayının etkilerini önlemeye yönelik tasarım ve tedbirleri içerirken, bu tezde; ferrorezonans olayına ilişkin işaretlerin matematiksel yöntemlerle analizleri yapılarak, ferrorezonansa ve öncesinde oluşan durumların özellikleri belirlenmiştir.

- Tez çalışmasında Türkiye enerji iletim hatlarına ilişkin gerçek veriler kullanılarak gerçekleştirilen modelleme çalışması üzerine temellendirilmiştir.
- Ferrorezonans olayının benzetimi (simülasyonu), bu model üzerinde değişik senaryolar kullanarak gerçekleştirilmiştir.
- Benzetimden elde edilen veriler, “Zaman-Frekans” ve “Zaman-Ölçek” tanım bölgelerinde KZFD ve SDD teknikleri vasıtasıyla analiz edilmiştir. Bu yöntemler kullanılarak yapılan uygulama, ulusal ve uluslararası literatürde yer alacak ilk uygulamadır.
- İlgili literatürde ferrorezonans olayı daha çok transformatörler üzerinde incelenirken, bu tez çalışmasında gerçek güç sistemi modelleri üzerinde ferrorezonans olayının araştırılması konunun diğer yeni bir uygulamasıdır.
- Elde edilen bulgular ferrorezonans olayının tanımı ile uyumlu olup, özellikle SDD’nin analiz yöntemi olarak literatürde en çok bilinen Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi (ÇÇDA) yaklaşımından daha etkin bir yaklaşım olarak kullanılabileceğini de göstermektedir. Bu anlamda da SDD’nin kullanımı yeni bir uygulama olarak kabul edilebilir.
- İlgili literatürde frekans tanım bölgesindeki analizler, tek bir sinyal üzerine yoğunlaşmışken, bu tez çalışmasında Çapraz Güç Spektrumu Yoğunlukları (ÇGSY) da göz önünde bulundurularak, bunların normalizasyonu sonucunda tanımlanan Koherens ilişkileri, bu alanda ilk kez kullanılarak güç sistemimdeki anahtarlamaların etkileri de bu yolla gösterilebilmiştir.

Kasım 2009

Yrd. Doç. Dr. Nazmi EKREN

Prof. Dr. Serhat ŞEKER

Tahir Çetin AKINCI

SEMBOLLER ve KISALTMALAR

A	: Amper
ADD	: Ayırık Dalgacık Dönüşümü
APSDD	: Ayırık Parametrelili Sürekli Dalgacık Dönüşümü
ATP	: Alternate Transient Program
B	: Manyetik indüksiyon [A/m]
BAİH	: Batı Anadolu İletim Hattı
C	: Kapasite
ÇÇA	: Çok Çözünürlüklü Analiz
ÇÇDA	: Çok Çözünürlüklü Dalgacık Analizi
ÇGSY	: Çapraz Güç Spektral Yoğunluğu
ÇYG	: Çok Yüksek Gerilim
DD	: Dalgacık Dönüşümü
E	: Elektrik alan şiddeti [V/m]
EMTP	: Elektromanyetik Transient Program
EMO	: Elektrik Mühendisleri Odası
ENH	: Enerji Nakil Hattı
FD	: Fourier Dönüşümü
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
f	: Frekans [Hz]
f_s	: Örnekleme Frekansı
GT	: Gerilim Transformatörü
GSY	: Güç Spektrum Yoğunluğu
H	: Alan şiddeti
Hz	: Hertz
i	: Ani akım
KGT	: Kapasitif Gerilim Transformatörü
KVA	: Kilo Volt Amper
KZFD	: Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü
L	: İndüktans
MVA	: Mega Volt Amper
MVAR	: Mega Volt Amper Reaktif

MW	: Mega Watt
ms	: Milisaniye
ÖGSY	: Öz Güç Spektral Yoğunluğu
P	: Aktif güç [Watt]
R	: Omik Direnç
S	: Görünür güç [Volt Amper]
s	: Saniye
s	: Ölçek parametresi
S₁	: Kesici 1
S₂	: Kesici 2
S₃	: Kesici 3
SDD	: Sürekli Dalgacık Dönüşümü
SOİH	: Seydişehir-Oymapınar İletim Hattı
t	: Saniye cinsinden zaman
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
U	: Şebeke gerilimi
U_R	: R Gerilimi
U_{RS}	: R fazı ile S fazı arasındaki gerilim
U_S	: S Fazı gerilimi
U_T	: T Fazı gerilimi
U_{TR}	: T fazı ile R fazı arasındaki gerilim
V	: Gerilim [Volt]
YG	: Yüksek Gerilim
ZFA	: Zaman Frekans Analizi
ZÖA	: Zaman Ölçek Analizi
ω	: Açısal frekans ($2\pi f$)
$\psi(t)$	: Ana dalgacık fonksiyon
τ	: Kaydırma parametresi
S{.}	: Sinyalin Spektogramı
μ_0	: Boşluğun manyetik geçirgenliği [H/m]
Φ	: Manyetik akı
Δt	: Zaman farkı

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil II.1 Dalgacık Dönüşümünün Uygulama Alanları.	15
Şekil II.2 Dalgacık Dönüşümü	20
Şekil II.3 a)Alçak ve Yüksek Dereceden Süzgeç Katsayıları, b) Dalgacık Ağacı...	23
Şekil II.4 Ayrık Dalgacık Dönüşümünde Geri Çatma İşlemi.....	24
Şekil III.1 a) Şematik Diyagram. b) Basitleştirilmiş Karekarakteristik Eğri	27
Şekil III.2 Gerilim(V), Akım (I) ve Akı (Φ) Zaman Fonksiyonu.....	30
Şekil III.3 Ferromanyetik İndüktansta Akım ve Manyetik Akı Değişimi.....	33
Şekil III.4 Devre Kesicisine Seri Bağlı GT'nin Ferrerezonansı.....	35
Şekil III.5 Faz ve Toprak Arasında Bağlı Nötr Sisteminden İzole Edilmiş Gerilim Trafosunun Bağlantısı.....	36
Şekil III.6 Temel Formda Ferrerezonans Grafiği	37
Şekil III.7 Alt-harmonik Formda Ferrerezonans Grafikleri	38
Şekil III.8 Yarı-Periyodik Formda Ferrerezonans Grafikleri	38
Şekil III.9 Kaotik Formda Ferrerezonans Grafikleri.....	39
Şekil IV.1 Türkiye Elektrik Şebekesindeki Bölgeler Arası Entegrasyon Şeması	43
Şekil IV.2 Seydişehir-Oymapınar 380kV Enerji İletim Hattı Modeli.....	44
Şekil IV.3 Hat Üzerinde Oluşturulan Temel Senaryolar. Error! Bookmark not defined.	
Şekil IV.4 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum).	46
Şekil IV.5 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması Sonucu Oluşan Gerim-Zaman Grafiği.	47
Şekil IV.6 Oymapınar Yük Gurubunun Kalkması Sonucu Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği Ayrıntısı.....	48
Şekil IV.7 Oymapınar Yük Gurubunun Devreden Çıkması (1.Durum) Sonucu Oluşan Akım-Zaman Grafiği.	48
Şekil IV.8 Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalkmasının 3 Numaralı Bara Üzerine Etkisi.	49
Şekil IV.9 Oluşan Ferrerezonansın 3 Numaralı Barada Akım Üzerindeki Etkisi.	50
Şekil IV.10 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması Modeli (2.Durum)	51

Şekil IV.11 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla (İkinci Durum) 3.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	51
Şekil IV.12 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği Detayı.	52
Şekil IV.13 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (2.Durum) Sonucu 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.	53
Şekil IV.14 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasına Ait Model (3. DURUM).....	54
Şekil IV.15 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (3.Durum) Sonucu Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	54
Şekil IV.16 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla	55
Şekil IV.17 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	55
Şekil IV.18 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.....	56
Şekil IV.19 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye İçin Devre Dışı Kalmasına Ait Model (4.Durum).....	56
Şekil IV.20 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla (4.Durum) 2.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	57
Şekil IV.21 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla Oluşan Gerilim-Zaman Ayrıntılı Grafiği.	58
Şekil IV.22 Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3 Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	59
Şekil IV.23 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.....	59
Şekil IV.24 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla 2. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.....	60
Şekil IV.25 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye için Devre Dışı Kalmasına Ait (5.Durum) Modeli.	61
Şekil IV.26 Beşinci Durumda 2. Bara'da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği.	61
Şekil IV.27 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum) Sonucunda 3. Bara'da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği Ayrıntısı.....	62

Şekil IV.28	Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)	
	Sonucunda 2. Bara'da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği.....	62
Şekil IV.29	Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)	
	Sonucunda 2.Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.....	63
Şekil IV.30	Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)	
	Sonucunda 3.Baradaki Akım-Zaman Grafiği.....	63
Şekil IV.31	Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)	
	Devre Modeli.	64
Şekil IV.32	Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)	
	Sonucu 2.Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.	65
Şekil IV.33	Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)	
	Sonucu 3.Bara'da Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.	65
Şekil IV.34	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi	
	(6.Durum) Sonucu 2.Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.	66
Şekil IV.35	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2. Saniyede Devreyi Kesmesi	
	(6.Durum) Sonucunda 3.Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.	67
Şekil IV.36	Pi İletim Hattının 0.1 Saniye Anahtarlanması (7.Durum) için Devre	
	Modeli.	67
Şekil IV.37	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlanması	
	(7.Durum) Sonucu 2. Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.....	68
Şekil IV.38	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlanması	
	(7.Durum) Sonucu 3. Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.....	69
Şekil IV.39	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlanması	
	(7.Durum) Sonucu 2. Bara'da Oluşan Akım - Zaman Grafiği.	69
Şekil IV.40	Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlanması	
	(7.Durum) Sonucu 3. Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.....	70
Şekil V.1	Sinyal Analizi Yöntemlerinin Uygulanması.....	72
Şekil V.2	Birinci Durum için GSY Analizi.	74
Şekil V.3	Oymapınar Yük Gurubunun 2. Saniyede Devreden Çıkarılması (1.Durum)	
	Sonucunda Oluşan Ferrerezonans Bölgesinin Zaman-Frekans	
	Spektrumu.	76
Şekil V.4	Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (4. Durum)	
	Sonucunda Oluşan Ferrerezonans Bölgesinin Zaman-Frekans	
	Spektrumu.	77

Şekil V.5	Senaryolardaki Koherens Değişimi.....	78
Şekil VI.1	Birinci Durum için Tüm Veri için SDD ile Ferrerezonans Analizi.	80
Şekil VI.2	Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum) Sonucunda Ferrerezonans Bölgesinin SDD ile Lokalizasyonu.....	81
Şekil VI.3	Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla (4.Durum) 2.Barada Meydana Gelen Ferrerezonans Bölgesinin SDD ile Lokalizasyonu.....	82
Şekil VI.4	Sürekli Parametrelili Sürekli Dalgacık (SPSDD) Dönüşümünün Ferrerezonans Olayındaki Sonucu.....	Error! Bookmark not defined.
Şekil VI.5	Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum) Sonucunda Ferrerezonans Bölgesinin Özelliğinin Belirlenmesi.	84
Şekil VII.1	GSY Uygulamasının Sinyalin Değişik Bölgeleri için Karşılaştırması. ...	86
Şekil VII.2	Özellik Çıkarımında, KZFD ve SDD Arasındaki İlişki.	87
Şekil VII.3	Birinci Durumda SDD ile Lokalizasyon.	88

TABLÖLAR

	Sayfa
Tablo IV.1 Seydişehir- Oymapınar İletim Hattındaki Elektriksel Bileşenler.....	44
Tablo IV.2 Modelde Uygulanan Durumlar (Senaryolar) Sonucu Oluşan Ferrorezonans Tablosu.....	71

BÖLÜM I

GİRİŞ

Ülkemizin hızla gelişmesi ve sanayi potansiyelinin artması, elektrik enerjisine olan gereksinimlerini de beraberinde getirmektedir. Elektrik enerjisinin üretimini artırmak için gösterilen çabalara paralel olarak üretilen enerjinin iletimi, dağıtımı ve sistemde meydana gelebilecek arızaların giderilmesi gerekmektedir. Elektrik enerjisini üreten, ileten ve dağıtan kuruluşların görevi; kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir hizmeti tüketicilerine sunmaktır. Enerji iletim hatlarında arızalar; generatör, transformatör, hat kesici, ayırıcı şalt cihazlarında kısa devrelerle ya da yalıtım sonucunda meydana gelirler. Bu arızaların tespiti arızanın başlangıç ve bitiş süresi, arızanın giderilmesi için önem taşımaktadır[1-3].

Enerji iletim sistemlerinde meydana gelebilecek arızalar büyük ekonomik kayıplara sebep olmaktadır. Bu sebeple sistemin arızası, hemen giderilmesi, enerjinin sürekliliğinin sağlanması ve bu doğrultuda yapılan çalışmalar önemli araştırma konuları olarak güncelliğini korumaktadır. Son çalışmalar; enerji iletim, dağıtım ve korunmasına yönelik araştırmaların yeni yöntemlerin kullanılmasının ve geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Gelişen bilgisayar teknolojisi ile birlikte güç sistemlerinde bilgisayar tabanlı algoritmalar ile analiz ve koruma yöntemleri geliştirilmektedir. Özellikle güç sistemlerinin herhangi bir aşamasında meydana gelen arızaların sebepleri ve giderilmesi bilgisayar tabanlı uygulamalarla araştırılmakta, çeşitli matematiksel yöntemler kullanılarak arızalar tespit edilmektedir.

Güç sistemleri için kullanılan simülasyon programları, sistemin davranışını tanıma ve arıza anında müdahale edilecek noktaları tespit etme açısından büyük kolaylık sağlamaktadır. Mevcut bir güç sisteminin yeterliliğinin değerlendirilmesi

amacıyla sistem üzerinde testler yapılması imkansız olduğundan incelenmek istenen sistemin simülasyonu yapılarak sistem üzerinde testler yapmak, gerçek güç sistemi üzerindeki elemanların gerçeğe uygun modellenmesi koşuluyla çok benzer sonuçlar vereceğinden, simülasyonları tasarlamak ve olası senaryolar ile arızaların analizlerini simülasyon üzerinde yapmak çok ekonomik olmasının yanında sistemden elde edilen verilerin çeşitli matematiksel yöntemlerle incelenmesini de sağlamaktadır. Ayrıca bu benzetim çalışmaları ile bilgisayar tabanlı analizlere fırsat verdiğinden matematiksel analizleri yapmak da oldukça kolay olmaktadır.

Enerji iletim sistemlerinde gerilim düşümü veya kesintileri, sisteme bağlı bir çok cihazda sorun çıkartabilir. Bu sorunlar güç kalitesi problemi olabildiği gibi bir iletim hattının kısmen yada tamamen zarar görmesi şeklinde çok büyük maddi kayıplara da neden olabilir. Milisaniye mertebesindeki çok kısa sürelerde meydana gelebilecek bu arızalar uzun süreli enerji kesintilerine ve iş kayıplarına sebep olabilmektedir.

Enerji iletim sistemlerinde meydana gelen ferreazonans olayı, sistemde oluşan aşırı gerilim veya akım olarak kendini gösterir. Sistemde bir arıza sonucunda meydana gelen bu yüksek akım veya gerilimler, dalga formu ve genliğinden dolayı kısa sürede şebekede yıkıcı ve onarılamaz arızalara sebep olarak, büyük maddi ve iş kayıplarına sebep olmaktadır[4]. Ferreazonans, elektrik güç sistemlerinin en ciddi problemlerinden biridir[5]. Çok uzun yıllardır adından söz edilmesine rağmen bu yıkıcı yüksek genlikli akım ve gerilimlerin önlenmesi hakkında bilgilerimiz hala tamamlanmış değildir[6]. Bir çok bilim adamı tarafından ferreazonans olayı karmaşık bir olay olup hala gizemini korumaya devam etmektedir[7]. Bu gizemin sebebi güç sistemleri ekipmanlarının; transformatör, lineer (doğrusal) ve non-lineer (doğrusal olmayan) elemanlardan, rezistif, indüktif, kapasitif elemanlara kadar çok fazla elemanı bünyesinde barındırmasından ileri gelmektedir[8]. Ferreazonansın oluşumunda, özellikle manyetik doğrusal olmayan elemanlar, transformatörün nüvesi ve kapasitansın etkisi büyüktür[9-12].

Ferreazonans özellikle üç fazlı bir güç sisteminde yüklü durumdayken fazlardan birinin kesilmesi sonucunda meydana gelen, simetrik olmayan yüksek genlikli dalga formuna sahiptir[13]. Kendine özgü dalga formuna sahip olan ferreazonans durumunda, kesilen faz diğer iki faz üzerine etki eder ve güç sisteminde yıkıcı aşırı gerilimler meydana gelebilir[14]. Ferreazonans aşırı gerilimler iletim hatlarındaki izolasyonu bozabilir, arklara sebep olabilir ve farklı

arızalara da yol açabilir[15-22]. Bu nedenle ferreazonans, güç sistemlerinde meydana gelen ve tam olarak aydınlığa kavuşturulamamış kendine özgü dalga formu ve özel oluşma sebepleri bulunan aşırı akım ve gerilim durumu olarak tanımlanabilir.

Bu tez, yedi ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde ferreazonans konusunda literatürde yer alan çalışmalara değinilmiştir. İkinci bölümde Matematiksel yöntemlerden; Spektral Analiz, Güç Spektrum Yoğunluğu, Spektrogram, Koherens ve Dalgacık Analizi yöntemi açıklanmıştır. Üçüncü bölümde ferreazonansın fiziksel tanımına değinilmiştir. Dördüncü bölüm modelleme kısmının yer aldığı temel bölümlerden birini teşkil etmektedir. Beşinci bölümde modellemedeki veriler üzerinden Spektrum analizleri, Zaman-frekans ve Koherens analizlerine yer verilmiştir. Altıncı bölümde modelleme verileri Sürekli Dalgacık Dönüşümüne uygulanarak analizler yapılmış ve son bölümde elde edilen bulgular değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Bu çalışmada gerçek güç sistemlerinde çok az uygulama alanı bulan, ferreazonans olayının karakteristiğinin (özelliklerinin) model tabanlı veriler üzerinde ileri sinyal işleme yöntemleri kullanılarak çıkarılması amaçlanmaktadır.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Ülkemizde yapılan çalışmalarda enerji iletim hatlarının gerçek verilere uygun olarak kapsamlı modellenmesi, modelleme sonucunda detaylı analizleri bulunmamaktadır. Enerji iletim hatlarının modellenmesi modelleme sonucunda oluşabilecek arızaların senaryolar şeklinde tasarlanarak analiz edilmesi, olası arızaların önlenmesi ve tedbirlerin artırılması veya artırılması yönünden önem arz etmektedir. Ferreazonans olayı enerji iletim hatlarında meydana gelen yüksek genlikli akım veya gerilim dalgalanmalarıdır. Bu yüksek genlikli sinyaller nominal akımın 2.5-3 katı kadar olabilmektedir. Bu yüksek genlikli akım yada gerilimlerin oluşması enerji iletim hatlarında büyük maddi ve iş gücü kayıplarına sebep olmaktadır. Bu maksatla enerji iletim hatlarında ferreazonansın oluşmaması için tedbirler alınmaktadır. Ancak literatürde ülkemizdeki elektrik güç sistemlerinin gerçek parametrelerinin kullanıldığı model üzerinde detaylı analizleri yapılmamış ve iletim hatları üzerinde oluşabilecek ferreazonans olayları incelenmemiştir.

Bu sebeple bu tezde; Türkiye Batı Anadolu enerji iletim hattından Seydişehir-Oymapınar iletim hattı gerçek verilere uygun olarak modellenmiş, modelleme sonucunda çeşitli matematiksel analizler yapılmıştır. Bu çalışma ile Batı Anadolu

iletim hattı üzerindeki temel ferromrezonans senaryoları da belirlenerek hattın ferromrezonans güvenirliği de test edilmiş olmaktadır. Çalışma ile Seydişehir-Oymapınar iletim hattı üzerindeki oluşan ferromrezonans olaylarının öncesi ve sonrası esnasında oluşan sinyaller analiz edilerek sinyallerin özellikleri de belirlenmiştir.

Tezde yapılan çalışmalar için genel amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- Tez modelini Türkiye enerji iletim hatları üzerinde gerçek bir model üzerine temellemek,
- Ferromrezonans olayının benzetimini bu model üzerinde farklı senaryolar kullanarak gerçekleştirmek,
- Benzetimden elde edilen verileri, “Zaman-Frekans” ve “Zaman-lek” tanım bölgelerinde Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD) teknikleri vasıtasıyla analiz etmek,
- Yapılan sinyal işleme tekniği ve uygulaması ile literatürdeki çalışmalardan farklılık sağlamak ve analiz yöntemi ile yenilik getirmek,
- Elde edilen bulguların ferromrezonans olayının tanımı ile uyumlu olup olmadığını araştırmak.

1.2. FERROMREZONANS VE LİTERATÜRDEKİ YERİ

Ferromrezonans kelimesi 1920’lerden beri bilinmekte[23,24] ancak transformatörler üzerindeki rezonans çalışmaları 1907 yılının başlarında görülmektedir[24-27]. 1930 yılında ferromrezonansın dağıtım tesisleri üzerindeki yıkıcı etkisini gidermek için seri kapasitör kullanılarak pratik bir çalışma[28,29] gerçekleştirilmiştir. İlk analitik alışmalar Rudenberg tarafından[16,17] 1949 ve 1950 yıllarında yapılmıştır. Bu çalışmadan sonra Hayashi[30] ferromrezonans üzerindeki çalışmalarını derinleştirmiştir. Bir süre sonra ferromrezonans üzerindeki çalışmalar ikiye ayrılmaya başlamış, bir grup araştırmacı transformatörler üzerinde meydana gelen ferromrezonans olaylarını incelerken diğer grup g sistemleri üzerinde meydana gelen ferromrezonans olaylarına yönelmiştir. Swift[31] ve Jiles[32,33] transformatör nüvesi üzerinde Eddy akım kayıplarını, Histerisiz dağılımlarını ve transformatörlerin nüve üzerindeki davranışlarını ortaya çıkarmışlardır. Pascetti[34] Histeresis’in matematiksel modellemeleri üzerinde çalışıp “skaler histerik” sistemlerin genel özelliklerini çıkarmıştır. Ardından Frame[35] doyumlu indüktansta doğrusal olmayan (non-linear) modelleme metotlarını (piecewise-linear) geliştirmiştir. Daay[36] seri ve π (pi) bağlanmış g

devrelerinde ferreazonans metotlar teziyle bir dizi deneysel uygulamalar yapmıştır. Dimitriyev, Haşimov ve Nayır[37] *elektrik iletim hatlarında meydana gelen kaza açmaları sonucu oluşan gerilimlerin modeli* isimli çalışmasında korona olayı ve ferreazonans olayını incelemişler ve özellikle ferreazonansı engellemek için kullanılan devre modellerine değinmişlerdir. Ayrıca Azerbaycan iletim hattı üzerinde örnek model oluşturarak bu modelin ferreazonans dalga formlarını incelemiş ve matematik modelini çıkarmıştır. Odessey ve Weber ferreazonansın teşhisinde grafik yaklaşım üzerine iyi bir referans olan 1907’de Bethenod tarafından yapılan çalışma noktalarının çözümü üzerine tanımlamaları yapmıştır[38]. Grafik yaklaşımı ile analiz Prusty ve Panda tarafından çok daha sonra tekrar incelenmiştir[39]. 1917’de Stark tarafından geliştirilen ve 1934’de Rouelle tarafından düzenlenen grafik analiz yöntemini ilk kez tanımlamıştır. Bu çalışmanın amacı kontrol parametrelerinin röle ile ilişkilerini belirlemektir. Burada elde edilen sonuçta hatalar harmoniklerin ortaya çıkmasını sağlamakta ve var olan direncin değeri üzerinde etkili olmaktadır. Thomson[40] ferreazonans devreleri üzerindeki kritik koşulları simüle etmiştir. Yazarın RLC devresi kullanıp akım-gerilim eğrileri üzerinde kritik noktaları belirlediği bu çalışma, grafik uydurma yaklaşımına ilk örneklerdendir. McCrumm alt harmoniklerin deneysel bir yöntemle araştırmasını yapmış ferreazonans olayındaki alt-harmonikleri tanımlamak için farklı benzetimler kullanmıştır[41]. Shott ve Peterson primer tarafı yıldız, sekonder tarafı üçgen bağlı olan transformatörler üzerinde incelemeler yapmıştır[42]. Bu çalışma daha sonra Peterson’un *Güç Sistemleri Üzerindeki Geçici Olaylar* kitabında da yer almıştır[43]. Brenner sargılar üzerindeki histeresis ile ferreazonans devrelerin alt-harmonik cevabını incelemiştir[44]. Yazar seri RLC devresi kurarak üzerinde analizler yapmıştır. Kaynak ve sarım sayısı ilişkisini belirleyerek harmonik cevaplarını kıyaslamıştır. Plotkin ferreazonans bölgesi ile ferreazonans olayı olmayan bölgeler arasında teorik bir çalışma yapmıştır[45]. Oluşturduğu denklemleri Harmonik denge yöntemini ve Kryloff-Bogoliuboff’un çalışmasına dayanarak her iki ferreazonans devresini de diferansiyel olarak çözmüştür. Harmonik denge üzerine daha sonra Craenenbroeck ve arkadaşları güç sistemlerinde bir model devre oluşturarak matematiksel olarak devre üzerindeki omik ve doğrusal olmayan etkileri harmonik denge yöntemiyle incelemişlerdir[46]. Kelly *Ferreazonans Devresi* isimli çalışmasıyla 2kVA ve 120-240 volt’luk transformatörler üzerinde hem deneysel hem de teorik analizler yapmıştır[47]. Kelly’nin devresi basitleştirilmiş tek fazlı devre

üzerinde açık devre uygulamasıdır. Karliceck ve Taylor güç sistemlerinde transformatörlerin topraklanması ve topraklanmaması sonucunda oluşan ferreazonans etkileri araştırmışlardır[48]. Transformatörle üzerinde ferreazonans etkileri araştırmak için benzer çalışmalar hem teorik hem de deneysel olarak bir çok araştırmacı tarafından yapılmıştır[49-55]. Ferreazonansın meydana geldiği anahtarlama durumları Clerici ve Didriksen tarafından incelenmiştir[56]. 400kV'luk İran enerji sistemi için yapılan çalışma ile sistem üzerinde ferreazonansın önlenmesine ilişkin tedbirler belirtilmiştir. Enerji güç sistemlerinde ferreazonans olayının analizi ile ilgili teorik ve uygulama çalışmaları da literatürde yer almaktadır bu çalışmalardan bazıları özellikle teorik bilgiler içeren "review" tarzındadır[57,58]. Bu çalışmalardan bazıları sadece belirli matematiksel yöntemlere yada grafik yöntemlere atıfta bulunmaktadır[58]. Prusty ve Sanyal *Güç Sistemlerinde Ferreazonans Problemine Yeni Çözüm Önerileri* çalışmasında önceki çalışmalarda yapılan fonksiyon denklemlerini geliştirmiştir[60]. Çalışmada analitik çözümleme yapan yazarlar 3. ve 5. harmoniklerin doğrusal olmayan karakteristiklerini de incelemiştir[59,61]. Üç fazlı sistemlerde ferro non-lineer osilasyonların zaman düzleminde osilasyonları incelenmiş özellikle transformatörler yeni hibrit yaklaşımlarla ele alınmıştır. Gerilim transformatörlerinin ferreazonans etkileri ve bir fazlı devrelerdeki sıçrama rezonansları üzerine çalışmalar literatürde önemli yer tutmaktadır[62,63]. Staats ve Elbert[64] orta büyüklükteki gerilim transformatörleri üzerindeki yüksek gerilimleri, Shein ve arkadaşları[65] 400kV'luk gerilim transformatörü üzerindeki ferreazonans etkileri incelemişler, Mason transformatörlerde ferreazonansın kontrolünü Swift'in denklemini kullanarak araştırmıştır[66]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda daha çok bilgisayar tabanlı modellemeler göze çarpmaktadır. Ferreazonans üzerine önemli çalışmalardan birisi Mork ve arkadaşları tarafından EMTP tabanlı ferreazonansın modellemesi ile yapılmıştır[67]. Guuinic ve arkadaşları üç fazlı ferreazonans olayını laboratuvar şartlarında analiz etmişlerdir[68]. Al-Anbarri ve arkadaşları iletim hatlarında güç transformatörleri üzerindeki ferreazonans etkilerin devre parametrelerinden nasıl etkilendiğini, Pasand ve arkadaşları Preisach teorisini kullanarak güç transformatörlerindeki başlangıç koşullarının etkisini araştırmışlardır[69,70]. Pattanapakdee yeraltı kablolarında ortaya çıkan ferreazonans olayını ATP/EMTP programı ile modelleyerek servis istasyonlarında oluşan arızaları analiz etmiştir[71]. Yapılan analizde 112.5 kVA'lık transformatörü modelleyerek modelleme üzerindeki

üç fazın gerilim değişimlerini incelemişlerdir. Özellikle bilgisayar programlarının kullanılmaya başlanmasıyla güç sistemlerinde oluşan arızaların modellenmesi ve arızaların tespiti daha da kolay hale gelmiştir. Hashimov ve arkadaşları iletim hatlarında çalışma noktalarında hat kesilmesi sonucu oluşan ferreazonans olaylarının analizini matematiksel olarak ispat etmişlerdir[72]. Türkiye’de ferreazonans konusunda yapılan ilk çalışmalardan birisi Alparslantarafından manyetik doyma ve ferreazonansın tarifinin yapıldığı grafik analiz yönteminin de incelendiği çalışmadır[73]. Barbisio ve arkadaşları ferreazonans çalışmalarında sıkça kullanılan RLC parametrelerinin ferreazonans üzerine etkisini araştırmışlardır[74]. Bir diğer çalışma Temiz tarafından yapılan bir yüksek lisans çalışmasıdır ki bu çalışma grafik yöntem uygulaması bakımından önemli çalışmalar arasında değerlendirilebilir[75]. Bir diğer yüksek lisans tez çalışması enerji iletim sistemlerinde ferreazonans olayını anlatan bir çalışma olup[76] Cadick Corporation’un Teknik Bülteni[77] ve Schneider Gurubundan Ferraci[78] tarafından hazırlanan *Ferreazonans* teknik bülteninin detayı niteliğindedir. Ferraci’nin bu çalışması ferreazonansın tanımlanmasında kullanılan başlıca teknik bültenlerden birisidir. Bu teknik bültende ferreazonans formlarından, ferreazonansın önlenmesi için pratik çözümlere kadar analitik olarak örnek verilerek ferreazonans konusunda temel konulara değinilmiştir. Hasimov ve arkadaşları yüksek gerilimde oluşan ferreazonans olayını nümerik olarak analiz ettikleri deneysel bir çalışma yapmışlardır[79]. Voraphonpiput ferreazonansın yüksek gerilim devre kesicilerinde uygulandığı deneysel bir çalışma yapmıştır[80]. Bu çalışma 12.5MVA’lık bir santralde kesiciler üzerindeki ferreazonans şartlarını ve etkileri incelemektedir. Son yıllarda Piasecki ve arkadaşları tarafından yapılan orta gerilim hatlarında gerilim transformatörlerinin ferreazonans etkilerinin araştırıldığı çalışmada; oluşan dalga formları hem gerilim değişimi olarak hem de zaman frekans boyutunda incelenmiştir[81]. Jacobson yüksek voltaj güç sistemlerindeki ferreazonans örneği çalışmasında tipik bir Kapasitif Gerilim Transformatöründe (KGT) oluşan ferreazonans kaynaklı dalga formlarını analiz etmiştir[82]. Ferreazonans olayını devre modeli oluşturarak inceleyen Maklad ve Fahmy ferreazonans devreler kurarak analitik bir inceleme yapmışlardır[83]. Oluşturdukları devre üzerinde histerezisin etkisini, alt-harmonik dalga formlarını ve ferreazonansta sıçrama ve başlangıç koşullarını analitik olarak incelemişlerdir. Javora ve arkadaşları gerilim transformatörü bulunan bir güç sistemindeki ferreazonans olayının benzetimini

yapmışlardır[84]. Benzetimde tek hatlı bir RLC elemanı kullanarak analiz yolunu tercih etmişler ve simülasyon sonucunda güç spektrumu dalga formlarını incelemişlerdir. Sakarung kaotik bir güç sistemi oluşturmuş ve sistemi EMTP/PSCAD programı kullanarak analiz etmiştir[85]. Barbisio ve arkadaşları ferreazonans bir elektrik devresini hem deneysel hem de modelleme yoluyla analiz etmişlerdir[86]. Analizlerinde kondansatörün histerezis üzerindeki etkilerini göstermişler ve ferreazonans bölgesini tespit etmişlerdir. Chandrasena ve arkadaşları güç transformatöründeki Eddy akımı ve Histerezisin simülasyonunu yapmışlardır[87]. Daha sonra simülasyon ile test sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Vahidi güç sistemlerinde meydana gelen ferreazonans olayının transformatör bağlantı şekillerine göre (yıldız-üçgen) sıralayarak bir modelleme yapmıştır[88]. Stunckens iletim hatlarındaki topraklama riskinin ferreazonansa olan etkisini incelemiştir[89]. Ferreazonans olayının gerçek modeller üzerinde incelendiği çalışmalar da literatürde yer almaktadır[90-92]. Bunlardan biri 33kV'luk Tayland dağıtım sistemindeki örnektir. Bu çalışma ferreazonans olayını gerilim değişimi olarak incelemiştir, diğer çalışma 13.8kV'luk hat üzerinde düşük güçlü yük çalıştırılarak oluşturulan ferreazonans olayını incelemektedir. Diğer çalışma ise 400kV'luk bir simülasyon devresi üzerinde yapılan çalışmadır ki bu tezde incelenen zaman-frekans spektrumlarını ilk analiz eden çalışma olarak kabul edilebilir. Literatürdeki önemli bir diğer çalışma Iravani ve arkadaşları tarafından yapılan literatür çalışması şeklinde tasarlanmış ferreazonans olayını modelleme yöntemiyle incelemektedir[93]. Son dönemlerde literatürde yer alan çalışmalarda ferreazonans olayını ATP/EMTP programı ile modelleme yaparak yada iletim hatlarında oluşan ferreazonans olayının modellemesi sonucundaki histerezis eğrilerinin analizini yapan, transformatörlerdeki geçici durumları analiz eden, örnek model üzerindeki gerilim değişimlerini inceleyen analitik çalışmalardır[94-110]. Bu çalışmalar arasında Chiesa ve arkadaşları transformatörlerdeki geçici durumlardaki magnetik akıları analiz etmişlerdir[93]. Jacobson ve arkadaşları 230kV'luk Manitoba hidro-elektrik santrali üzerinde alan testlerini EMTP ile modellemişler magnetik, akım ve gerilim değişimlerini incelemişlerdir[95]. Zahawi, Emin ve Tong gerilim transformatörleri üzerindeki doğrusal olmayan davranışların etkilerini göstermişlerdir[96]. Simha ve Lee'nin dağıtım transformatöründeki üç fazlı transformatörlerin geçici davranışlarını analiz ettikleri çalışma, ATP ile gerçekleştirilmiş benzetim çalışmalarını içerir[99]. Chakravarthy ve Nayar paralel bir

ferrerezonans devresi oluşturmuş devre üzerinde analitik çözümler yaparak faz eğrilerini elde etmişlerdir[100]. Xukai ve arkadaşları topraklanmamış bir gerilim transformatörü üzerindeki ferrerezonans olayı üzerine bir inceleme yapmış analitik modelleme ile farklı frekanslarda oluşan ferrerezonans özelliklerini incelemişlerdir[101]. Ferrerezonansın bilgisayar ortamında yapılmış analizleri de literatürde yer almaktadır[102,104,105,109]. Craenenbroeck ve arkadaşları deneysel çalışma yaparak üç fazlı ferrerezonans devresi üzerinde çatallanma temelli harmonik analizi yapmışlardır[111]. Sanaye, Pasand ve Aghazadeh güç elektroniği devreleri kullanarak ferrerezonansı önleme çalışması yapmışlar ve yük altında ve yüksüz şartlarda modelleme yaparak kıyaslamışlardır[112]. Sowa, Walczak ve Pasko güç sistemlerindeki transformatörler üzerinde, çalışma şartlarında kaotik etkileri model devre oluşturarak incelemişlerdir[97]. Al-Anbarri, Ramanujam, Keerthiga ve Kuppusamy transformatörlerdeki doğrusal olmayan olayları yaptıkları model üzerinde çatallanma grafikleri ile analiz etmişlerdir[112]. Andrei ve Halley enerji iletimi esnasında anahtarlama ile oluşan ferrerezonans olaylarını analitik yolla hesaplayarak gerilim transformatörleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır[114]. Dugan oluşan ferrerezonans vakalarından hareketle kaza sonucu gerçekte olmuş önemli ferrerezonans olaylarını yorumlamıştır[115]. Ferrerezonans olaylarını modellemekte kullanılan önemli paket programlardan da çalışmalarda yararlanılmıştır. Kazimov ferrerezonans aşırı gerilimleri MATLAB paket programı ile modellemiştir[116]. Çalışmasında oluşturduğu örnek model üzerinde gerilim değişimi grafiklerini incelemiştir. Huawei, Fan ve Shi *Ferrerezonans ve Kaos* isimli çalışmasında ferrerezonansın kapasitif etkisini temel RLC seri devresi üzerinde anahtarlama yaparak modellemiş, oluşan ferrerezonans özellik gösteren grafikleri incelemişlerdir[117]. Naidi ve Souza bir Newton-Raphson şeması kullanarak oluşturdukları ferrerezonans devrelerin analizini yapmışlardır[118]. Çalışmada devrenin ferrerezonans karakteristiğini belirlemek için tipik ferrerezonans devresinde bir kaç kararlı durum örneğini Newton Raphson ve Hibrit metoduyla analiz etmişler ayrıca zaman düzlemi analizleriyle çatallanma ve dönüş noktalarını belirlemişlerdir. Ferrerezonans konusunda firmaların yaptığı teknik notlardan birisi de ABB firması tarafından hazırlanmıştır[119]. Teknik not ferrerezonans hakkında temel bilgileri özetle ele almıştır. Yine bir diğer teknik not da Kapasitif Gerilim Transformatörlerinin dalga formlarının incelendiği çalışmadır[120]. Güç sistemlerinde doğrusal olmayan sistemler, alt-harmonik ferrerezonans olayları,

sistemlerin simetrik olmamasından kaynaklanan kaotik ferrerezonans olayları, çatalanmalar ferrerezonans araştırmalarında bir çok yazar tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmaların bir kısmı örnek sistemler göz önüne alınarak yapılan modellemeler olduğu gibi bir kısmı da analitik çalışmalar olarak literatürde yer almıştır[121-125]. Literatürde ferrerezonans olaylarını açıklayan en önemli çalışmalardan birisi Escudero ve arkadaşları tarafından ferrerezonans olaylarını genel hatlarıyla anlatan çalışmadır[126]. Shoup, Paserba ve Mannarino 13kV’luk gerilim regülatörünün geri besleme şartlarında oluşan ferrerezonans koşulları üzerine yaptıkları çalışmada dağıtım sistemlerindeki anahtar devre parametrelerini tanımlamışlar, oluşturdukları devreyi EMTP ortamında modelleyerek gerilim değişimlerini incelemişlerdir[127]. Li, Shi ve Li RLC devre modelini EMTP programı ile modelleyerek model üzerindeki doğrusal olmayan karaktere sahip indüktansın etkisini analitik olarak incelemiş ve harmonik analizi yapmışlardır[128]. Leon ve Semlyen geçici elektromanyetik olayların benzetiminde güç transformatörlerindeki dinamik histeresiz kayıplarını inceleyerek oluşturdukları örnek devre üzerinde kapasitörün ferrerezonans üzerine etkisini vurgulamışlardır[129]. Lamba ve arkadaşları bir RLC devresinde histeresizle birlikte oluşan alt harmonik ferrerezonansları incelemişler, analizlerinde *Preisach* modeli kullanmışlardır[130]. Bu çalışma alt harmonik ferrerezonans analizi için analitik bir çalışma olarak değerlendirilebilir. Escudero ve arkadaşları 400kV’luk gerilim transformatörü üzerinde gerçekleştirdikleri deneysel bir çalışma ve ATP/EMTP modeli ile de karşılaştırma yapmışlar, kondansatörün etkisini incelemişler ayrıca devre modelinde gerilim değişimleri ve faz düzlemini çıkarmışlardır[131]. Endo ve arkadaşları Chua tipinde magnetodinamik bir model oluşturarak ferrerezonans olayını incelemişlerdir[132]. Çalışmada üretilen işaretlerin gerilim değişimleri, akım değişimleri ve faz eğrileri analiz edilmiştir. Li, Shi, Qin ve Yang modelledikleri bir devre üzerinde analitik çözümler yapmışlar ayrıca maksimum gerilim-frekans eğrilerini analiz etmişlerdir[133]. Malyar ve Malyar yaptıkları çalışmada ferrerezonans devrelerini analitik olarak diferansiyel-spline metdunu kullanarak çözmüşlerdir[134]. Abdallah, Saied ve arkadaşları güç transformatörleri üzerine yaptıkları deneysel bir çalışmada, ferrerezonansa sebep olan yüksek gerilimin yük altındaki analizlerini yapmışlardır[135-136]. Tsao ve Ning Tayvan’daki Maanshan Nükleer santralde 2001 yılında meydana gelmiş olan ferrerezonans olayını analiz etmişlerdir[137]. Walling kayıpları düşük dağıtım transformatörleri üzerindeki ferrerezonans olayını incelemiştir, kurduğu örnek model

üzerinde ferreazonans ile kapasitans, süseptans aralarındaki korelasyonları analiz etmiştir[138]. Mokryani ve arkadaşları dağıtım hatları üzerinde meydana gelen ferreazonans işaretlerini ayırık dalgacık yöntemiyle analiz etmişlerdir[139]. 2007 yılındaki bu çalışma, literatürde yer alan ferreazonans ile dalgacık analizinin bir arada kullanıldığı tek çalışmadır. Burada elde edilen işaretler öncelikle Ayırık Dalgacık Dönüşümü (ADD) ile yaklaşım ve detaylarına ayrılmış daha sonra Yapay Sinir Ağları (YSA) ile ferreazonans işaretlerindeki geçici durumları belirlemişlerdir. Zare ve arkadaşları bir gerilim transformatörü için test ve ölçüm sistemi oluşturarak sistemin verdiği cevapları hem magnetik açıdan histeresiz özelliklerine bakarak hem de gerilim değişimi ve güç kayıpları analizleri ile incelemişlerdir[140].

Ferreazonans olayı; yüksek gerilimde birdenbire ortaya çıkan ve yüksek seviyeli harmonik bozulmalara (distorsiyonuna) neden olan olay olarak da tanımlanmıştır. İlk defa 1920'lerde ortaya çıkan ferreazonans terimi bir elektrik devresinde ortaya çıkan ve en az aşağıdaki elemanları barındıran devrelerdeki bütün osilasyon olaylarını çağırır.

- Doğrusal olmayan indüktans
- Bir kapasite
- Bir gerilim kaynağı
- Düşük kayıplar

Güç şebekeleri yüksek sayıda doyabilir indüktanstan (güç transformatörleri, gerilim ölçüm indüktif transformatörleri, şönt reaktörler) olduğu gibi kapasitörlerden (kablolar, uzun hatlar, KGT'ler seri yada şönt kapasitör bankaları, devre kesicilerdeki gerilim ayarlama kapasitörleri metal kaplama alt istasyonları) oluşur. Bunlar böylece ferreazonansın ortaya çıkabileceği muhtemel senaryoların gerçekleşme yollarını gösterirler. Bu olayın temel özelliği aynı çeşit şebeke parametreleri için birden fazla kararlı sürekli durum cevabı vermesidir. Geçici durumlarda (yıldırım düşmesiyle oluşan yüksek gerilimler, trafolar ya da yüklere enerji verilmesi ve kesilmesi, hataların ortaya çıkması veya temizlenmesi) yada çalışma esnasında ferreazonans tetiklenebilir[76-78]. Cevap, normal bir kararlı hal durumundan (kaynakla aynı sinüzoidal frekansta) yüksek bir gerilim ve harmonik seviyesi ile karakterize edilebilecek ve malzemelerdeki ciddi zararlara yol açabilecek ferreazonans kaynaklı kararlı duruma atlayabilir. Bu çeşit bir davranışın pratik bir örneği bir devre açıcısının açılması ile bir gerilim trafosunun enerjisinin kesilmesidir.

Transformatör devre kesicisinin devreyi açıp kapatması esnasında değişen kapasitesi tarafından transformatör uçlarındaki sıfır gerilime, yada normal gerilimin üstünde zarar verici kalıcı bir gerilime yol açabilir. Koruma cihazlarının zamansız devre dışı kalmaları, güç trafoları yada gerilim trafoları gibi cihazların zarar görmesi, üretim kayıpları gibi durumlardan korunmak için ferrezonansın meydana geliş sebebini analiz etmek, oluşabileceği bölgeleri tahmin etmek önemlidir. Ferrezonans hakkında çok az şey bilinmektedir. Bunun sebebi güç sistemlerinde ve gerilim transformatörlerinde çok az rastlanması, doğrusal yaklaşıma dayalı hesaplama metotları ile analiz ve tahmin edilememesidir. Bu bilgi eksikliği ferrezonansın birçok sebebi açıklanamamış yüksek gerilim arızalarından ve meydana gelen hasarlardan sorumlu olduğu düşüncesini ortaya çıkarmaktadır. Ferrezonansın analiz edilmesi zordur çünkü düzenlilik göstermez ve meydana gelecek ferrezonans olaylarının önceden kestirilmesi mümkün değildir. Kararlı bir sürekli hal cevabından daha çok başlangıç devre parametrelerinden etkilenebilir. Geçici voltaj cevabı faz-nötr hatlarının devreye zarar vererek açması enerjili veya enerjisiz ekipmanlarda hatlara yıldırım düşmesi sonucunda indüklenen yüksek gerilimler veya birden bire ortaya çıkan ufak değişimlerde meydana gelebilir. Ferrezonans, sistemin doğrusal olmayan atlamalardan dolayı ani değişiklikler ile aldığı normal sürekli hal cevabıdır. Sürekli hal durumuna kadar şiddetli harmonik bozulmalar ve yüksek gerilimler oluşturarak güç sistemi ekipmanları üzerinde zararlı etkiler oluşturur.

Gelecekteki enerji iletim sistemlerinde ferrezonansa daha çok rastlanacağı söylenebilir. Gelecekte iletim ve dağıtım sistemlerindeki gerilim seviyelerinin giderek artması hat kapasitansı ile transformatörlerin manyetik doyma eğrileri arasında bugünkünden daha farklı bir ilişki oluşturacağı düşünülmektedir. Bu değişiklik ferrezonans olayının artışı yönündedir. Bununla birlikte ekipmanların zarar görmemesi için güç sistemleri mühendisleri ferrezonans hakkında meydana gelebilecek problemlerin azaltılması, bertaraf edilmesi ve tasarım sistemleri ile ilgili yeterli bilgiye sahip olmalıdır[73,76-78].

BÖLÜM II

MATEMATİK YÖNTEMLER

Bu bölümde Ferreazonans olayının analiz edilmesinde kullanılan matematiksel yöntemlerden bahsedilmiştir. Analizde; Spektral analiz yöntemlerinden, Güç spektrum yoğunluğu, Spektrogram ve Koherens analizi yöntemleri kullanılmıştır.

II.1. SPEKTRAL ANALİZ YÖNTEMİ

Spektral analiz yöntemleri Fourier Dönüşümü (FD) temelli yaklaşımlar olup, bu tez çalışmasında daha çok Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) ve Güç Spektrum Yoğunluğu (GSY) hesaplamaları kullanılacaktır.

KZFD yaklaşımı klasik Fourier dönüşümü üzerine temellenmiş durağan olmayan veri analizinde kullanılan alternatif bir yöntemdir. Bu bölümde; durağan sinyalleri belirlemede kullanılan Güç Spektrum Yoğunluğu (GSY) değişimi ve bunun yanında Kısa Zaman Fourier Dönüşümünden (KZFD) bahsedilmiştir. Ayrıca frekans düzleminde sinyaller arasındaki ilintiyi gösteren *koherens* analiz yaklaşımı gösterilmiştir. Bu spektral yöntemler güç sistemlerinin çeşitli alanlarında etkili olarak kullanılabilen metotlardır[141-145].

II.1.1. Güç Spektrum Yoğunluğu

Güç Spektrum Yoğunluğu (GSY), rastgele bir işaretin frekans özelliklerini elde etmek için Fourier dönüşümü kullanılarak hesaplanır. Matematiksel içeriği, N örnek uzunluğundaki bir veri seti için, Ayırık Fourier Dönüşümü (AFD) Denklem (II.1)'deki gibi verildikten sonra, Denklem (II.2) şeklinde tanımlanır.

$$X(m\Delta f) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k\Delta t) \exp[-j2\pi km/N]. \quad (\text{II.1})$$

Burada Δf , frekanstaki çözünürlük; Δt ise örnekleme aralığı (örnekleme periyodu) veya zamandaki çözünürlük şeklinde isimlendirilir. O zaman, herhangi bir $x(t)$ fonksiyonunun, Öz Güç Spektral Yoğunluğu (ÖGSY) aşağıdaki gibi kestirilir.

$$S_{xx}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)|^2, \quad f = m\Delta f. \quad (\text{II.2})$$

Benzer şekilde $x(t)$ ve $y(t)$ gibi iki farklı sinyal için de Çapraz Güç Spektrumu Yoğunluğu (ÇGSY) ifadesi aşağıdaki eşitlikle verilebilir[141].

$$S_{xy}(f) = \frac{1}{N} |X(m\Delta f)Y(m\Delta f)| \quad (\text{II.3})$$

II.1.2. Spektrogram

Zaman tanım bölgesindeki $x(t)$ sinyali için pencerelemiş Fourier dönüşümünün zaman-frekans düzlemindeki genlik değişimleri aşağıdaki eşitlikle gözlenir.

$$S\{x(t)\} \equiv |X(\tau, f)|^2 \quad (\text{II.4})$$

Bu anlamda $S\{\cdot\}$ büyüklüğüne $x(t)$ sinyalinin spektrogramı denir.

II.1.3. Koherens Analizi

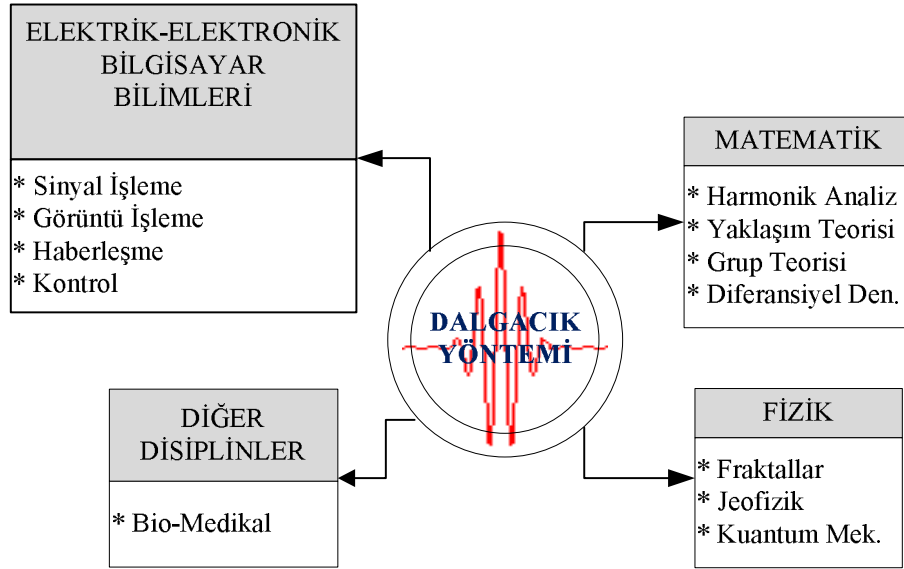
Koherens analizi genellikle, $x(t)$ ve $y(t)$ gibi iki sinyal arasındaki ilişkinin frekans düzlemindeki bir ölçüsü olup, normalize bir değer olarak, ÖGSY ve ÇGSY kavramlarına dayandırılarak aşağıdaki eşitlikle verilir[141,146,147].

$$C_{xy}(f) = \frac{|S_{xy}(f)|}{\sqrt{S_{xx}(f)S_{yy}(f)}}, \quad 0 < C_{xy} < 1 \quad (\text{II.5})$$

II.2. DALGACIK DÖNÜŞÜMÜ

Sinyallerin frekans içeriği ilk kez Fourier Dönüşümü (FD) ile belirlenmiştir. Ancak, Fourier dönüşümü ile elde edilen frekans düzlemi (domeni) bilgisi durağan olmayan sinyal işleme uygulamaları için yeterli değildir. Bu eksikliği gideren ilk matematiksel dönüşüm, sinyalin zaman-frekans gösteriminin elde edilmesini sağlayan Kısa Zaman Fourier Dönüşümü (KZFD) olmuştur. Fakat KZFD’de beklentileri tam olarak karşılayamamıştır. Çünkü düşük frekans bileşenleri için yüksek frekans çözünürlüğüne gereksinim varken; yüksek frekans bileşenleri için yüksek zaman çözünürlüğüne gereksinim vardır. Buna karşılık KZFD ile sadece sabit zaman-frekans çözünürlüğü elde edilebilir[148].

KZFD’nin sinyallerin zaman-frekans gösteriminin elde edilmesindeki bu dezavantajın giderilmesi için; KZFD’ye alternatif bir yaklaşım olarak, değişken zaman-frekans çözünürlüğünün elde edilebileceği Dalgacık Dönüşümü (DD) geliştirilmiştir[1].



Şekil II.1 Dalgacık Dönüşümünün Uygulama Alanları.

Dalgacık dönüşümü işaretlerin zaman-ölçek gösteriminin elde edilmesi için kullanılan matematiksel bir araçtır. DD günümüzde bağımsız olarak farklı birçok bilim dalında gelişme göstermiştir[149]. DD’nin genel uygulama alanları Şekil II.1’de gösterilmiştir. DD, kuantum fiziğinde, jeofizikte, elektrik-elektronik bilimlerinde işaret işleme, biyomedikal işaret işleme, görüntü işleme gibi alanlardaki

çalışmalarla ayrıca imge sıkıştırma, türbülans, radar ve deprem tahmini gibi bir çok dalgacık uygulamasının geliştirilmesine katkıda bulunmuştur[1].

İşaret işleme, işaretle bulunan bilgilerin elde edilmesi için kullanılan teknikleri içerir [150]. İşaret işleme, sistem analiz ve sentezi için, sistemlerin işaretlerde yaptığı değişimlerin bulunması veya işaretle istenen değişiklikleri yerine getirecek bir sistemin tasarlanmasıdır[151]. Bir işaretin özellikleri (parametreleri) zamanla değişmiyorsa bunlara durağan işaretler denir. Durağan işaretleri incelemek için Fourier dönüşümü yeterlidir. Bu işaretler sinüs ve kosinüs dalgalarının doğrusal bileşimine ayrışır[152]. Böylece, Fourier analizi bir işareti frekans bileşenlerine ayrıştırır ve her bir bileşenin etkisini belirler[150].

Sürekli değişken t 'nin fonksiyonu olan $f(t)$ işareti için zamandaki frekans bileşeni bölgesel olarak incelenebilir. Klasik Fourier dönüşümü işaretin frekans dağılımını verir. Fakat zamanla ilgili hiç bir bilgi vermez. Eğer aralıklar arasında, işaretin frekans bileşeni önemli ölçüde değişiyorsa, Fourier dönüşümüyle bu işaretin analiz edilmesi halinde, bu dönüşüm bütün zaman eksenini kaplar ve örneğin yüksek frekans bilgisinin kaybolması gibi işaretledeki her tür bölgesel/yerel (lokalize) düzensizlikleri kaldırır. Bu nedenle durağan olmayan işaretler ve gerçek zaman işaretlerinin incelenmesinde Fourier dönüşümü tek başına yeterli değildir. Durağan olmayan işaretler için zaman-frekans analiz metodu kullanılması işaretin zamana karşı ani frekans bileşenlerinin karakterize edilebilmesini sağlar[1,152].

II.2.1. Tarihsel Bakış

Matematik tarihinde, dalgacık çözümlemesi çok farklı kökenlere sahiptir. Çalışmaların büyük çoğunluğu 1930'lu yıllarda yapılmıştır. 1930 yılından önce dalgacıkların ortaya çıkmasına sebep olan dal Fourier analizidir. Matematiğin bu dalı, günümüzde Fourier sentezi olarak da isimlendirilen frekans analizi teorilerine sahip olan Joseph Fourier (1807) ile başladı. Fourier, periyodu 2π olan herhangi bir $f(x)$ fonksiyonunun, o fonksiyonun Fourier serisi denilen,

$$f(x) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos kx + b_k \sin kx) \quad (\text{II.6})$$

toplamı ile temsil edilebileceğini gösterdi. Buradaki a_0 , a_k ve b_k katsayıları,

$$a_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (\text{II.7})$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(kx) dx \quad (\text{II.8})$$

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(kx) dx \quad (\text{II.9})$$

eşitlikleri ile hesaplanır. Fourier'ın bu gösterimi, matematikçilerin fonksiyonlar hakkında sahip oldukları fikirlerin evriminde temel rol oynadı. Bu şekilde Fourier, yeni bir fonksiyonel evrene giden kapıyı açmış oldu.

1807 sonrası, fonksiyonların Fourier serisinin yakınsaklığının ve ortogonal sistemlerin anlamının keşfedilmesiyle matematikçiler giderek önceki frekans analizi fikirlerinden ölçek analizi fikrine, yani ölçeği değişen matematiksel yapılar oluşturarak $f(x)$ fonksiyonunu analiz etmeye yöneldiler. Bunu yapmak için bir fonksiyon oluşturup onu bir miktar ötelediler ve ölçeğini değiştirdiler. Bu yapıyı bir işareti (sinyali) yaklaşık olarak göstermede uyguladılar ve yöntemi tekrar ettiler. Temel yapıyı alıp onu ötelediler ve yeniden ölçeklediler. Yeni bir yaklaşık gösterim elde etmek için aynı işarete bu yöntemi uygulayıp bu şekilde devam ettiler. Bu tür ölçek analizinin dış etkilere karşı daha az duyarlı olduğu ortaya çıktı. Çünkü bu analiz, farklı ölçek değerlerinde işaretin ortalama dalgalanmalarını ölçüyordu[1].

Dalgacıkların ilk bahsi A. Haar'ın (1909) tezinde bulunan bir ekte geçti. Haar dalgacığının bir özelliği, tam desteğe sahip olmasıdır. Yani Haar dalgacığı sonlu bir aralık dışında sıfır olur. Ne yazık ki, Haar dalgacıklarının türevi sürekli değildir ve bu özellik onların uygulamalarını biraz sınırlar.

1930'lu yıllarda, birbirlerinden bağımsız olarak çalışan birkaç grup, ölçeği değişen baz fonksiyonlarını kullanarak fonksiyonları temsil etme üzerine araştırma yaptılar. Baz fonksiyonları ve ölçeği değişen baz fonksiyonları kavramlarını anlama, dalgacıkları anlamının temelidir.

1960 ve 1980 yılları arasında, Guido Weiss ve Ronald R. Coifman isimli matematikçiler, atomlar diye isimlendirilen bir fonksiyon uzayının en basit elemanları üzerinde çalıştılar. Amaçları ortak bir fonksiyon için atomları ve bu atomları kullanarak fonksiyon uzayının tüm elemanlarını yeniden yapmaya izin veren "toplanma kurallarını" bulmaktı. 1980 yılında, fizikçi Grossman ve mühendis Morlet kuantum fiziği bağlamında dalgacıkları genel olarak tanımladılar. Bu iki araştırmacı, dalgacıklar hakkında fiziksel sezgiye dayanan bir düşünce biçimi sağladılar.

1985 yılında, Stephane Mallat sayısal işaret işleme konusundaki çalışmaları sonucunda dalgacıkların gelişimine ek bir hız kazandırdı. İkinci derece ayna filtreleri, piramit algoritmaları ve ortonormal dalgacık bazları arasında bazı ilişkiler olduğunu keşfetti. Y. Meyer, bu sonuçların bir kısmından esinlenerek ilk tanınan olmayan dalgacıkları oluşturdu. Haar dalgacıklarının türevi sürekli olmadığı halde, Meyer dalgacıklarının türevi sürekli; ama buna rağmen Meyer dalgacıkları tam desteğe sahip değildir.

İki yıl sonra, Ingrid Daubechies belki şimdiye kadarkilerin en düzenlisi olan, dalgacık uygulamalarının kilometre taşı olmuş ve bugün hala olmaya devam eden dalgacık ortonormal baz fonksiyonları kümesi oluşturmak için Mallat'ın çalışmasını kullandı[1,148-153].

II.2.2. Genel Bakış

Dalgacıkların arkasındaki temel fikir, ölçeğe göre analiz etmektir. Veri işlemlerinde dalgacıkları kullanarak tamamen yeni bir düşünce yapısı veya bakış açısı kazanılabilir.

Dalgacıklar, belirli matematiksel ihtiyaçları karşılayan ve veri veya diğer fonksiyonları temsil etmede kullanılan fonksiyonlardır. Bu fikir yeni değildir. Fonksiyonları yaklaşık olarak temsil etme, 1800'lü yılların başından beri mevcuttur. Bu yıllarda Joseph Fourier, fonksiyonları temsil etmesi için, sinüs ve kosinüs fonksiyonlarının kullanılabileceğini bulmuştu. Bununla birlikte, veriye bakmak için kullandığımız ölçek de dalgacık analizinde özel bir rol oynar. Dalgacık algoritmaları, veriyi farklı ölçek veya çözünürlüklerde işler. Eğer geniş bir pencereden bir işarete bakılırsa, büyük özellikleri fark edilir. Benzer şekilde, küçük bir pencereden bir işarete bakılırsa, küçük özellikleri fark edilir.

Dalgacıkları ilginç ve aynı zamanda yararlı kılan bu özelliktir. Bilim adamları yıllarca çok sayıda kısa ve düzensiz dalgalara sahip olan işaretleri yaklaşık olarak temsil etmesi için, Fourier analizinin bazlarını oluşturan sinüs ve kosinüs fonksiyonlarından çok daha uygun fonksiyonlar aramışlardır. Tanımlarına göre bu fonksiyonlar yöresel (lokalize) değildir (ve sonsuza doğru uzanırlar). O yüzden bu fonksiyonlar sivri uçları (ani değişimleri) yaklaşık olarak temsil etme konusunda çok yetersiz kalırlar. Ama dalgacık çözümlemesiyle, sonlu tanım bölgelerinde düzgün olarak bulunan, yaklaşık olarak temsil edilmiş fonksiyonlar kullanılabilir.

Dalgacıklar keskin süreksizliklere sahip olan veriyi yaklaşık olarak temsil etmek için oldukça uygundur.

Dalgacık analizinde amaç, “analiz eden dalgacık” veya “ana dalgacık” diye isimlendirilen bir dalgacık örnek fonksiyonunu elde etmektir. Zaman analizi, örnek dalgacığın daraltılmış yüksek frekans versiyonu ile yapılır. Buna karşılık frekans analizi ise, aynı dalgacığın genişletilmiş düşük frekans versiyonu ile yapılır. Orijinal işaret veya fonksiyon, dalgacık açılımı (dalgacık fonksiyonlarının doğrusal bileşimlerindeki katsayıları kullanarak) cinsinden temsil edilebildiği için, veri işlemleri yalnız karşı gelen dalgacık katsayılarını kullanarak yapılabilir. İlave olarak eğer veriye uygun en iyi dalgacıklar seçilirse veya bir başlangıç değerinin altında kalan katsayılar atılırsa, veri kısmen temsil edilmiş olur. Bu kısmi kodlama, veri sıkıştırma alanında dalgacıkları mükemmel bir araç yapar.

Dalgacıkların kullanıldığı diğer uygulamalı alanlar astronomi, ses bilimi, nükleer mühendislik, alt-band kodlama, işaret ve görüntü işlemleri, nörofizyoloji, müzik, manyetik rezonans görüntüleme, konuşmayı ayırt etme, optik, fraktallar, türbülans, depremin önceden tahmini, radar, insan görüşü ve kısmi türevli diferansiyel denklemleri çözüme gibi matematiksel uygulamalardır.

Dalgacık dönüşümü, bir $\psi(t)$ ana fonksiyonunun (ana dalgacık) ötelenme ve yayılması ile oluşturulan baz fonksiyonlarına işaretin iz düşümünün alınması ile bulunur. Baz fonksiyonları işareti tam ve doğru olarak ayrıştırabilmek için, yüksek frekanslarda kısa süreli, düşük frekanslarda uzun sürelidir.

Dalgacık dönüşümü, Kısa Zaman Fourier Dönüşümünden farklı olarak değişken zaman-frekans çözünürlük özelliğine sahiptir. Bu nedenle çok çözünürlüklü işaret işleme aracı olarak kullanılır.

Mühendislik uygulamalarında Dalgacık dönüşümü sürekli işaretlerden çok, ayrık zamanlı işaretlerin işlenmesinde kullanılır. Bu bakımdan bilgisayar uygulamaları açısından kolaylık sağlar[1,149].



Şekil II.2 Dalgacık Dönüşümü[154].

Dalgacık analizinde işaret, zaman-frekans yerine zaman-ölçek ortamında incelenir ve en önemli üstünlüklerinden biri; işaretin belirli bir bölgesinin (lokal) analizinin mümkün olmasıdır. Yani süreksizliğe sahip bir sinyalin Fourier dönüşümünü ile analiz edildiğinde süreksizliğin nerede olduğunu fark edilemez fakat dalgacık yöntemi ile analiz edildiğinde bu süreksiz olan bölge tam olarak görülebilir.

II.2.3. Sürekli Dalgacık Dönüşümü

Sürekli Dalgacık Dönüşümü (SDD), çözünürlük problemini aşmak için Kısa Zaman Fourier Dönüşümüne (KZFD) alternatif bir yaklaşım olarak geliştirildi. Dalgacık Analizi (DA), KZFD'ne benzer yolla gerçekleştirilir. KZFD pencere fonksiyonuna benzer olarak, sinyalin bir fonksiyonla iç çarpımı şeklinde temsil edilir ve dönüşüm, işaretin farklı parçaları için ayrı olarak hesaplanır[1,149,155].

TANIM:

$$SDD(s, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi_{s, \tau}^*(t) dt \quad (II.10)$$

Yukarıdaki II.10 denkleminde * eşleniği simgelemektedir, s parametresi ölçek ve τ ise kaydırma parametresidir.

$s > 1$ zaman ekseninde fonksiyon genişler ve genliği düşer.

$s < 1$ zaman ekseninde daralır ve genlik büyür.

$s < 0$ $t=0$ noktasına göre simetriği alınır.

$\tau > 0$ zaman ekseninde sağa doğru kaydırma

$\tau < 0$ zaman ekseninde sola doğru kaydırma

Dalgacık fonksiyonları bir ana dalgacıktan, ψ , ölçek ve kaydırma faktörleri yardımıyla elde edilir. Matematiksel ifadesi aşağıda verilmiştir:

$$\psi_{s,t}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi\left(\frac{t-\tau}{s}\right) \quad (\text{II.11})$$

Buradaki $\frac{1}{\sqrt{s}}$ faktörü enerjinin normalize oluşunu ifade eder.

Denklem II.11, denklem II.10'da yerine konursa, denklem II.12'deki ifade elde edilir. $f(t)$ dönüşümü yapılacak fonksiyon ve $\psi_{s,\tau}(t)$ ise ana dalgacık fonksiyonudur.

$$SDD(s, \tau) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-\tau}{s}\right) dt \quad (\text{II.12})$$

$\psi_{s,\tau}(t)$ fonksiyonu aşağıdaki koşulu yerine getirmek zorundadır.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi_{s,x}(t) dt = 0 \quad (\text{II.13})$$

$\psi_{s,\tau}(t)$ fonksiyonun integrali, dalgacık kavramının oluşturabilmesi için sıfır olmalıdır.

Matematiksel yolla diğer bir yazılım biçimi de, $f(t)$ ve dalgacık fonksiyonunun iç çarpım şeklinde ifadesi denklem (II.14) de verilmiştir.

$$SDD(s, \tau) = \left\langle f(t), \psi_{s,\tau}(t) \right\rangle \quad (\text{II.14})$$

$$s \propto \frac{1}{\text{frekans}} \quad (\text{II.15})$$

Yukarıdaki eşitlikte görüldüğü gibi, dönüştürülen sinyal iki değişkenli bir fonksiyondur. Öteleme ve ölçekleme parametreleri sırası ile $\psi(t)$ dönüşüm fonksiyonudur ve “ana dalgacık” olarak isimlendirilir. Ana dalgacık terimi, ismini dalgacık analizinin iki önemli özelliğinden alır. Dalgacık iki ucu sıfır genlik değerinde küçük dalga demektir. Küçüklük, fonksiyonun sonlu uzunlukta olması şartını işaret eder. Dalga ise bu fonksiyonun salınımlı olması şartını işaret eder. Ana terimi ise dönüşüm sürecinde kullanılan farklı bölgelere sahip fonksiyonların bir

temel fonksiyondan türetilmiş olduğunu gösterir. Bir başka deyişle ana dalgacık diğer pencere fonksiyonlarının üretimi için esas modeldir.

Öteme terimi KZFD’de kullanıldığı gibi aynı anlamda kullanılır. Pencerenin konumu ile ilgilidir, pencere sinyal boyunca kaydırılır. Bu terim açık olarak dönüşüm alanında zaman bilgisine karşılık gelir. Bununla beraber KZFD’de olduğu gibi frekans parametresine sahip değildir bunun yerine 1/frekans ($1/f$) olarak ifade edilen ölçekleme parametresi vardır [1,151,155].

II.2.4. Ölçek

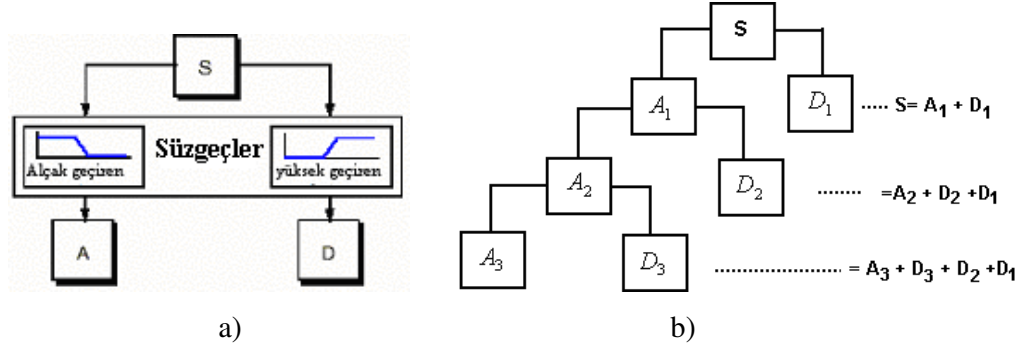
Dalgacık analizinde ölçekleme parametresi haritalarda kullanılan ölçeğe benzetilebilir. Haritalarda olduğu gibi, yüksek ölçekler ayrıntılı olmayan genel görünüşe, düşük ölçekler ise ayrıntılı bir görünüşe karşılık gelir. Benzer olarak frekans teriminde düşük frekanslar yüksek ölçek katsayısına, yüksek frekanslar düşük ölçek katsayısına karşı gelmektedir.

Matematiksel bir operasyon olarak ölçekleme bir sinyalin genişletilmesi veya sıkıştırılmasıdır. Geniş ölçek katsayılarıyla sinyalin genişlemesine, küçük ölçek katsayılarıyla ise sinyalin sıkıştırılmasına karşılık gelir[155].

II.2.5. Ayrık Dalgacık Dönüşümü

Sürekli Dalgacık Dönüşümünde, sürekli olarak ölçeklenen bir fonksiyonun sürekli olarak işaret üzerinde kaydırılıp ikisi arasındaki korelasyonların hesaplanmasıyla elde edilen dalgacık dönüşümü katsayıları gereksiz terimler ve gereksiz bilgi içerir bu nedenle de hesaplanması çok zaman alır. Bu nedenle dalgacıklar ayrıklaştırılır.

Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) sinyali değişik frekans bantlarında Yaklaşım ve Detay bilgileri ile bileşenlerine ayırarak analiz eder. ADD fonksiyonların iki kümesini çalıştırır. Bunlar ölçekleme ve dalgacık fonksiyonlarıdır, sırası ile alçak ve yüksek geçiren filtreler ile ilişkilidir[155].



Şekil II.3 a)Alçak ve Yüksek Dereceden Süzgeç Katsayıları, b) Dalgacık Ağacı[1]

Şekil II.3’de S işaretinin alçak ve yüksek frekans bileşenlerine ayrılması ve Mallat tarafından geliştirilen Dalgacık dönüşüm tekniği gösterilmiştir. Sinyalin değişik frekans bantlarında bileşenlerine ayrılması zaman düzlemindeki sinyalin alçak ve yüksek geçiren filtrelenebilmesi ile elde edilir. Orijinal sinyal $s(n)$ önce yarım bant yüksek geçiren filtreden $g(n)$ sonra alçak geçiren filtreden $h(n)$ geçirilir. Filtrelemeden sonra örneklemelerin yarısı Nyquist kuralına göre elenir. Bu nedenle şimdi sinyalin en yüksek frekansı p yerine $p/2$ dir. Sinyal 2 ile alt örnekleme yapılmış diğer örneklemeler göz ardı edilmiştir. Bu işlem birinci seviye ayrıştırma oluşturur ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y_{yüksek}[k] = \sum_n x[n].g[2k - n] \quad (II.16)$$

$$y_{alçak}[k] = \sum_n x[n].h[2k - n] \quad (II.17)$$

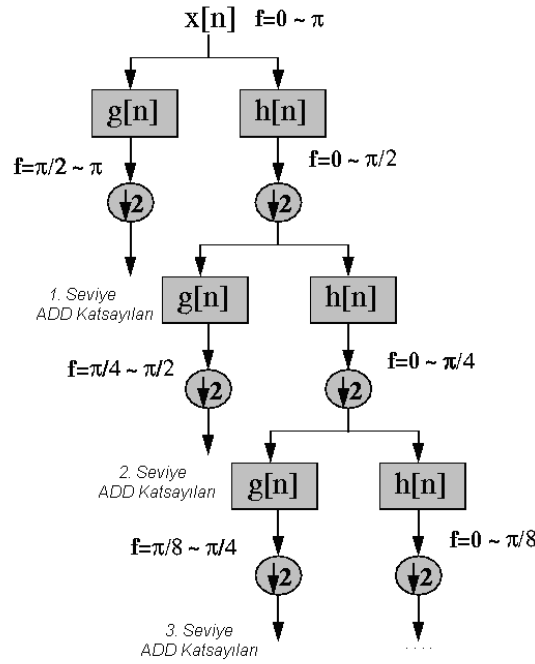
Burada $y_{yüksek}[k]$ ve $y_{alçak}[k]$ 2 ile alt örnekleme yapıldıktan sonra sırası ile yüksek ve alçak geçiren filtrelerin çıkışı gösterir. Bu ayrıştırma zaman çözünürlüğü yarıya indirir, bu nedenle örneklemelerin yarısı bütün sinyali karakterize eder. Bununla beraber bu işlem frekans çözünürlüğünü ikiye katlar. Yukarıdaki prosedür Altbant örnekleme olarak da bilinir ve daha ileri seviye ayrıştırma için tekrar edilebilir. Aşağıdaki şekil $x(n)$ orijinal sinyalin ayrıştırılmasını gösterir. $h(n)$ ve $g(n)$ sırası ile alçak ve yüksek geçiren filtrelerdir. Sinyalin bant genişliği her seviyede f olarak işaretlenmiştir.

ADD’nin en önemli özelliklerinden birisi de yüksek ve alçak geçiren filtrelerin impuls cevaplarıdır. Yüksek ve alçak geçiren filtreler birbirinden bağımsız değildirler ve aralarında şu bağıntı vardır.

$$g[L - 1 - n] = (-1)^n . h[n] \quad (II.18)$$

Burada $g(n)$ yüksek geçiren filtreyi, $h(n)$ alçak geçiren filtreyi, L ise filtre uzunluğunu (nokta sayısı) gösterir. Bu iki filtre birbirlerinin tek indeksli dönüştürülmüş tersi alınmış versiyonlarıdır. Alçak geçirenden yüksek geçiren dönüşümü $(-1)^n$ çarpanı ile yapılır. Bu filtreler Kuadratik Ayna Filtreler (KAF) olarak bilinir. Filtreleme ve alt örnekleme işlemleri aşağıda Denklem (II.19) ve Denklem (II.20)'deki gibi ifade edilir.

Şekil II.4'de ADD ne ait geri çatma işleminin grafiği verilmiştir.



Şekil II.4 Ayrık Dalgacık Dönüşümünde Geri Çatma İşlemi [155].

$$y_{yüksek}[k] = \sum_n x[n].g[-n + 2k] \quad (II.19)$$

$$y_{Alçak}[k] = \sum_n x[n].h[-n + 2k] \quad (II.20)$$

Yeniden oluşturma işlemi ortonormal tabanlı filtreler ile kolaylıkla gerçekleştirilir. Yeniden yapılandırma için yukarıdaki prosedürün tersi izlenir. Sinyaller her seviyede iki ile örnekleme arttırılır. Sonra sentezleme filtrelerinden $g'(n)$ ve $h'(n)$ (sırası ile yüksek geçiren ve alçak geçiren) geçirilir ve toplanır. İlginç olan nokta analiz ve sentez filtreler zaman tersine çevrimi dışında birbirleri ile aynıdır. Yeniden birleştirme formülü her seviye için Denklem (II.21)'de verilmiştir.

$$x[n] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} (y_{Yuksek}[k].g[-n+2k]) + (y_{Alcak}[k].[-n+2k]) \quad (II.21)$$

Bununla beraber filtreler ideal yarım bant filtreler değildirler bu nedenle mükemmel yeniden oluşturma başarılabilir. İdeal filtreler gerçekleştirilemeyeceği için belirli şartlar altında mükemmel yeniden birleştirmeyi sağlayacak filtreleri bulmak mümkündür. Bunların en meşhur olanları Ingrid Daubechies tarafından geliştirilmiştir ve Daubechies dalgacıkları olarak bilinirler[155].

Dalgacık Dönüşümü, güç sistemlerinde geçici durumların analizinde, güç sistemlerinde ferreazonans gibi aşırı yüksek gerilimlerin özelliklerinin belirlenmesinde etkili olarak kullanılabilecek bir yöntemdir. Özellikle durağan olmayan ferreazonans aşırı gerilim işaretlerinin Sürekli Dalgacık Dönüşümü ile zaman- ölçek özelliklerinde ve ara-harmoniklerin belirlenmesinde oldukça anlamlı sonuçlar vermektedir[156].

BÖLÜM III

FERROREZONANS OLAYININ FİZİKSEL TANIMI

Elektrik enerji sisteminin tüketicilerin gereksinim duyacakları elektrik enerjisini kaliteli ve güvenilir bir şekilde sağlaması sosyal ve ekonomik açıdan büyük önem taşımaktadır. Elektrik enerji sistemi enerjinin üretimi, iletimi ve dağıtımı gibi bir çok unsuru içerisinde barındıran sistemler bütünüdür. İletim hattında; generatörler, transformatörler, kapasitörler, koruma elemanları ve yükler bulunmaktadır. Böyle bir iletim sisteminde bu tür elemanların bulunması devrenin farklı çalışma durumlarında veya bazı arıza hallerinde çeşitli fiziksel olaylara yol açabilir. Bu olaylardan bir tanesi de ferreazonanstır.

Ferreazonans karmaşık bir elektriki olaydır. 1920'lerin başından itibaren farkında olunup, güç sistemleri araştırmalarında en az bilinen olaylar arasında yer almaktadır ve elektrik güç sistemlerinde ferreazonansın çeşitli kazalar sonucunda meydana geldiği eskiden beri bilinmektedir[21]. Ferreazonans olayı doyumlu transformatör nüvesinin doğrusal olmayan indüktansı ve kondansatör ile aynı devre içerisinde oluşturduğu osilasyondur[111,112].

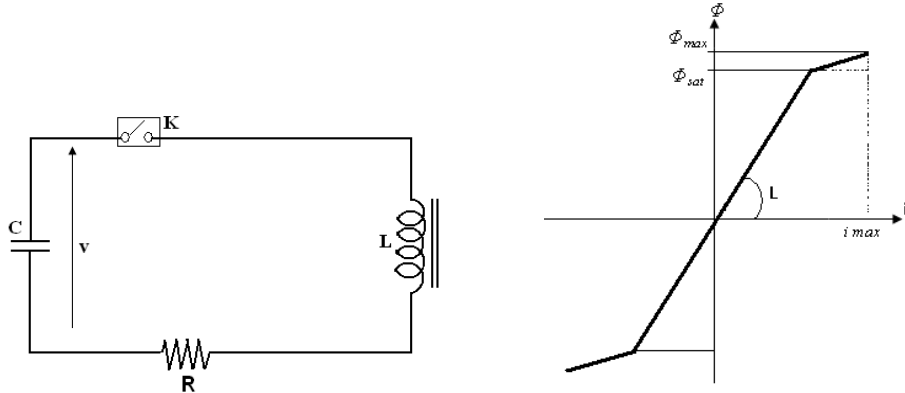
Bir güç sisteminde transformatörlerin bulunduğu iletim hattında yük gruplarından bazıları devre dışı kalmasıyla yada çok az yüklenmesiyle ferreazonans oluşabilir[113]. Elektrik güç sistemlerinde ferreazonansın olduğu uzun yıllardır bilinmektedir. Son yıllarda güç sistemlerinde ferreazonans kaynaklı kazalar artmaktadır. Ferreazonans olayı yeni bir olay değildir[21] ve bu terime 1920'lere kadar uzanan çalışmada bile rastlanmaktadır[23,24,114]. Geçen doksan yıl içinde ferreazonansı anlamak ve analiz etmek için çeşitli modeller ve yöntemler kullanılmıştır. Bir çok araştırmacı doğrusal olmayan transformatörlerin manyetik

karakteristiklerinden yola çıkarak analitik teknikleri kullanıp klasik yöntemlerle diferansiyel denklem içeren problemleri çözmüşlerdir[115-118].

Güç sistemlerinde ferreazonans transformatörler, iletim hatları ve tüm ekipmanlar üzerinde yıkıcı etkiler oluşturabilir[118]. Çünkü ferreazonansta sistem üzerindeki gerilim, hattın uzunluğuna bağlı olarak nominal gerilimin (1.8–3) katı olabilmektedir[4,37].

III.1.1. Ferreazonansa Fiziksel Yaklaşım

Bilindiği gibi Alternatif Akımda L, R ve C'den oluşan doğrusal devrelerdeki L ve C'nin doğal frekansı kaynak frekansına eşit olduğunda, L ve C elemanlarının uçları arasında çok yüksek frekanslı aşırı gerilimler oluşabilir. Doğrusal sistemlerde bu olayın oluşacağı tahmin edilerek tedbirler alınabilir[73]. Ancak Güç sistemlerinde bir çok eleman içerdikleri demir çekirdeğin doymasıyla doğrusal olmayan indüktif karakteristik sergilerler. Bu durumda indüktansın değeri, akım değeri ile ilişkilidir ve akım arttıkça azalır. Yani doğrusal olmayan elektrik sistemlerinde doyma sebebiyle kararlı ve geçici rejimde olayların çözümü ve anlaşılması zorlaşır. Çok büyük aşırı gerilimlerin oluştuğu bu olaylar Ferreazonans temellidir detaylı analiz gerektirir. Genel olarak nüvenin doyma derecesine göre devredeki elektriksel harmoniklerin frekansları değişim gösterir. Doğrusal olmayan sistemlerde grafik ve matematiksel analiz büyük kolaylık sağlar[76,78]. Özellikle günümüzde bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle grafik yaklaşım terk edilerek matematiksel yöntemler sıkça kullanılmaktadır ve modellemede ise güç sistemleri için kullanılan bilgisayar paket programları tercih edilmektedir. Ferreazonansın şematik diyagramı ve karakteristik eğrisi Şekil III.1'de gösterilmiştir.



Şekil III.1 a) Şematik Diyagram.

b) Basitleştirilmiş Karakteristik Eğri[76].

Şekil II.1a'daki devrenin serbest rezonansı bu özel davranışı gösteren bir devredir. Şekil III.1b'de Kayıplar göz ardı edilmiş demir nüveli bobinin basitleştirilmiş Φ mıknatıslanma eğrisi gösterilmiştir. Temelde kondansatör uçlarındaki gerilim V_o 'a eşit olduğu varsayılır. K anahtarı t_o anında kapatılmasıyla devreden bir akım geçmeye başlar ve osilasyon meydana gelir.

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (III.1)$$

Bobinin akısı ve kapasite uçlarındaki V geriliminin ifadesi

$$\Phi = (V_o.w_1). \sin w_1 t_1 \quad (III.2)$$

$$V = V_o. \cos w_1 t \quad (III.3)$$

Eğer $\frac{V_o}{w_1} > \Phi_{sat}$ ise son t_1 zamanında Φ akısı Φ_{sat} doyum (saturasyon) akısına

ulaşır; gerilim V, V_1 'e eşittir ve bobin indüktansı doyumda olur. Ls, L'ye göre çok küçüktür. Kapasitör aniden boşalır bobindeki darbe dalga şekli değişir.

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L.C}} \quad (III.4)$$

Bobinde biriken elektromanyetik enerji kondansatörde depolanan elektrostatik enerjiye eşit olduğunda, akım ve akı tepe değerine eşittir[75-78].

$$\frac{1}{2CV_1} \quad (III.5)$$

t_2 anında akı Φ_{sat} 'a döner ve indüktans L değerini var sayar ve kayıplar önemsenmediğinden dolayı ters çevrilmiş olan V gerilimi (-V) ye eşit olur.

t_3 anında akı $-\Phi$ doyuma ulaşır ve gerilim V, $+V_2$ ye eşittir. w_1 çok az kullanıldığından dolayı $V_2 \cong V_1 \cong V_o$ denklemleri kullanılabilir. Bu nedenle T periyodu salınım aralığı dahil doymamış durumda

$$2\pi\sqrt{L.C} \quad (III.6)$$

ve doyum durumunda ($\frac{t_2 - t_3}{V_0} \cong 2\phi_{sat}$ olduğunda)

$$2\pi\sqrt{L_s.C} + 2(t_3 - t_2) \quad (III.7)$$

Bu durumda frekans

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L.C}} < f < \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s.C}} \quad (III.8)$$

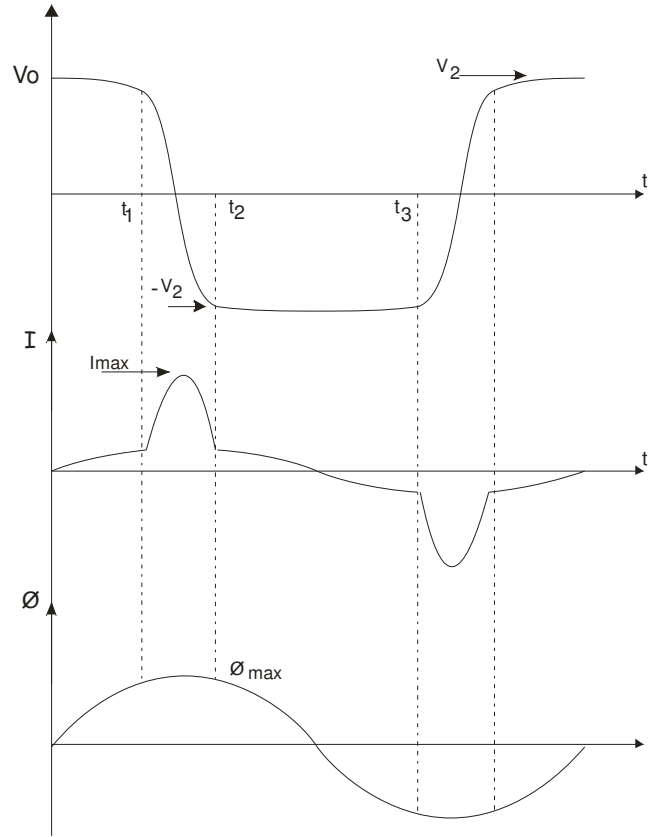
dır.

Bu ön frekans Φ_{sat} 'a ve V_0 'ın ilk durumuna bağlıdır. Pratikte R omik direncindeki $R.I^2$ kayıplarına bağlı olarak her bir ters gerilimde V geriliminin genliği düşer ($V_2 < V_1 < V_0$) doyumsuz periyot boyunca ($t_3 - t_2$) böylece akı değişimi $\Delta\Phi$

$$\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} V . dt \quad (III.9)$$

V'nin düşmesi frekansın azalmasıyla sonuçlanır. Eğer enerji kayıpları (joule kaybı, nüve kaybı) sistemi besleyen gerilim kaynağı frekans tarafından karşılanırsa frekans rezonansı düştükçe kaynağın frekansını (eğer baştaki frekans güç frekansından büyükse) veya kaynak frekansının birçok alt frekansını (eğer baştaki frekans güç frekansından küçükse) kilitleyebilir. Bu doğrusal rezonans ile ferreazonansın birbirinden farklı olduğunu gösterilir. Verilmiş bir indüktans için meydana gelen rezonans belirli C değerinde değil, ancak geniş bir C değeri altında ortaya çıkar.

Şekil III.2'de gerilim, akım ve manyetik akının zamanla değişim eğrileri gösterilmiştir[75-78].



Şekil III.2 Gerilim(V), Akım (I) ve Akı (Φ) Zaman Fonksiyonu[78].

III.1.2. Kapasitif Gerilim Transformatörlerinde Ferrerezonans

Bir kapasitör ve doğrusal olmayan bir indüktanstan meydana gelen seri rezonans devrelerinde, ferrerezonans olarak bilinen ve doğrusal olmayan sistemlerde sıkça gözlenen, *limit cycle* meydana gelebilir. Gerilim transformatörleri (GT) normal olarak manyetik devrelerin lineer (doğrusal) kısmında çalışacak şekilde tasarlandığı halde aşağıda sıralanan nedenlerle ferrerezonans olayı meydana gelebilir [157].

- Primer geriliminin ani uygulanması veya değişmesi.
- Yüksek hızlı sistem açılıp tekrar kapamalarında (re-closing)
- Sekonder yüklerin ani değişmesinde.
- Sekonder ve tersiyer sargıların kısa devre olmasında.

Ferrerezonans harmonikler, anma frekansının 1/3 veya 1/5'nci harmoniklerinde ortaya çıkar. Ferrerezonans harmonikler ölçü cihazlarının yanlış ölçü yapmasına ve koruma rölelerinin hatalı çalışmasına neden olacaktır.

Ferrezonans harmoniklerin meydana gelmemesi için kapasitif gerilim transformatörlerinde, aşağıdaki önlemlerden biri alınır.

- Manyetik devre çok düşük akı yoğunluklarında çalışacak biçimde tasarlanır.
- Sekonder devreye sabit yük ilave edilir.
- Düşük kayıplı anti ferrezonans filtre kullanılır.

Bu filtre, 50Hz'nin altındaki frekanslara karşı küçük empedans göstererek, ferrezonans harmonikleri söndürür[157].

III.1.3. Ferromanyetik Malzemelerin Özellikleri

Ferrezonansın meydana gelmesinin sebebi devredeki indüktansın nüvesinin genellikle demir olan ferromanyetik malzemeden yapılmasıdır. Ferromanyetik indüktanslar bir dönüştürücüye güzel örnek olarak gösterilebilir. Sıradan ferromanyetik özelliği olmayan basit bir bobin telinde olduğu gibi indüktans değerini belirleyen bobinin şekli ebadı, sarım sayısı, kesiti vs. dir. Demir gibi ferromanyetik malzemeler bobinin içerisine yerleştirildiklerinde indüktans değerini değiştirir çünkü ferromanyetik materyallerin manyetik akı yoğunluğunu artırma özelliğine sahip olması söz konusudur ve manyetik indüksiyon bu sebeple oluşmaktadır. Birçok pratik uygulamada amaca uygun olacak şekilde manyetik alan üreten özel bobinlere ihtiyaç duyulmaktadır. Özellikle mümkün oldukça kuvvetli manyetik alanı, bobinlerden geçen en küçük akımla sağlanması istenir. Akımın manyetik alan ile orantılı olması sebebi ile bu düşüncenin gerçekleşmesi için yüksek manyetik geçirgenlikli malzemeler kullanılır, bu malzemelere ferromanyetik malzemeler denir. Malzemelerin manyetik geçirgenliklerinin (μ) boşluğun manyetik geçirgenliği (μ_0) ile farklı olmasının nedenlerini ancak atomik boyutta inceleyerek açıklamak mümkündür.

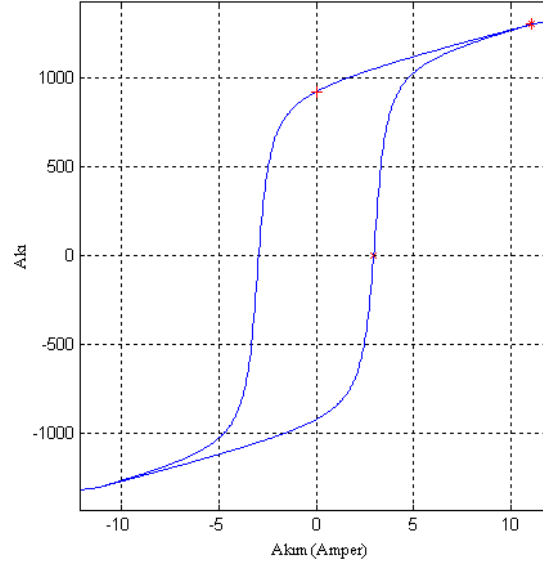
Bir malzemenin atomlarındaki hareketli yüklerin dış manyetik alanla etkileşmesine bağlı olarak (B) manyetik akısı, manyetik geçirgenliği boşluğa göre büyükse artar, manyetik geçirgenliği boşluğa göre küçükse azalır. Atomun yapısını açıklayan kuramlara göre, atomun yörüngelerindeki her bir elektron hem çekirdek etrafında hem de kendi etrafında dönmektedir. Yörüngelerdeki elektronların kendi etrafındaki bu dönme hareketine “*elektron spin*” denir. Elektron spinleri pozitif yada negatiftir. Yani elektronların bazıları kendi etrafında bir yönde dönerken bazıları diğer yönde dönmektedir. Elektronların bu dönüş hareketlerinden dolayı atomda bir

elektrik akımı ve bu akımda bir manyetik alan oluşturur. Yani demir moleküllerinin içresinde elektrik akımı bulunur ve bu akımdan dolayı demir manyetik özellik gösterir. Başka bir deyişle, demir molekülleri küçük birer mıknatıstır ve bu özellik sadece demire aittir. Demir atomunun dış yörüngesindeki elektronların biri pozitif spinli diğeri negatif spinlidir. Bu elektronlar kolayca bitişik atomun kolayca en dış yörüngesine geçebilecek serbest elektronlardır. Bir malzemenin çok iyi mıknatıs olabilmesi için aynı yörüngedeki veya alt yörüngelerdeki elektron sayılarının farklı olmasının yanında, bitişik atomlardaki spinlerinde birbiri ile aynı yönlü olmalıdır. Sonuç olarak manyetik olmayan malzemelerde elektron dönüşü aynı yönlü, eşit dengeli ferromanyetik malzemelerde ise elektron dönüşü karşı yönlüdür ve tamamen dengede değildir.

$$H=(N.L).I \quad (III.10)$$

$$B_{iç}=\mu_0.M \quad (III.11)$$

N çevrimli (sipirli / sarımlı) L uzunluğundaki bobinde manyetik alan H ve manyetik akı B'dir. Manyetik duyarlılığı çok yüksek olan ferromanyetik malzemeler kuvvetli B alanı üretmekte kullanılır. Anti ferromanyetik malzemeler dış alanlarda çok az etkilenirler. Manyetik indüksiyon miktarı selenoid'in merkezindeki demir nüveye ve indüksiyon büyüklüğü bobinden geçen akıma bağlıdır. Ferrerezonansın önemini anlamak için ferromanyetik malzemelerin iki önemli ek özelliği olan doyum ve histerezis sergiledikleri bilinmelidir. Demir nüveli bobinin tipik manyetizasyon eğrisi Şekil III.2'de gösterilmiştir. Bu eğri Bölüm IV'de devre modellerinde kullanılan transformatörün manyetizasyon eğrisidir. Burada akımın artışına göre manyetik akı yoğunluğu artmaktadır. Ancak belli bir noktadan sonra akımın artışı manyetik akı yoğunluğundan daha küçük artışlara sebep olur. Doyum noktası (saturasyon noktası) diye adlandırılan ve akım ile akı yoğunluğu eğrisindeki eğimin değişimiyle karakterize edilen eğrinin eğimi bobinin indüktansı ile orantılıdır. Doyum noktası üzerindeki akımın büyüklüğü indüktans değerinin hangi farklı değerde olduğunu gösterir. Bu ferrerezonansın anlaşılması için anahtar kabul edilebilir[76].



Şekil III.3 Ferromanyetik İndüktansta Akım ve Manyetik Akı Değişimi.

Ferromanyetik bir bobinden geçen akım doyum noktasının ötesinde artarken bobinin indüktansı aniden değişir. Şekil III.2’de gösterilen bir başka şey, şeklin altındaki eğride akı yoğunluğunun negatif akımdaki değişimidir. Şeklin üstündeki eğri akı yoğunluğunun pozitif akımdaki değişimini gösterir. Bu ferromanyetik malzemelerin karakteristiklerinden biridir. Akımın büyüklüğünün sebebi demirin doyuma gitmesidir, bu doyum dışındaki herhangi bir büyüklükle aynı değildir. Şekil III.3’de gösterilen histerezis eğrisi Bölüm IV’de modellenen devrede kullanılan transformatörün karakteristik eğrisi olup bu transformatörde doyma akımı 11.023 Amper, doyum akısı da 1299.5 değerindedir.

Doğrusal çalışma sınırı ve doyuma çalışma esnasında akım sabit değerde değildir ancak sınır akımın önceki değerlerine bağlıdır. Histerezis diye adlandırılan ve akımın yön değiştirmesinde üstesinden gelinmesi gereken manyetik akı yoğunluğunun demir nüvede artarak depolanmasıdır.

Herhangi bir rezonansa ve rezonans frekansında indüktif ve kapasitif reaktans tam olarak gösden kaybolur. Rezonansta akım ve gerilim uç değerlerini alır. Ferrerezonansla beraber indüktans sabit değildir doyuma göre değişir, indüktif reaktansı değiştirir ve rezonans frekansı değişken olur. Demir malzeme doyuma giderken indüktansta ani değişikliğe sebep olur. Ani değişimin hangi rezonans frekansında meydana geldiği bulunur.

Diğer bir durum da meydana gelen rezonans da kapasitenin değeridir bir doğrusal rezonansta bu değer teorik olarak tanımlanır. Bununla birlikte ani ve

önceden tahmin edilemeyen diye tanımlanan ferrerezonansa geniş bir alanda belirli bir frekansta kapasite, indüktanstaki değişimle potansiyel olarak rezonansa sebep olur.

Bir kez doyum (saturasyon) içerisine giren ferromanyetik indüktans akım büyüklüğü azalana kadar doyumda kalır. İndüktansın doyuma gitmesi rezonans sebebidir (yani devrede indüktif ve kapasitif reaktans eşittir) ve akımın büyüklüğü sisteme zarar verecek şekilde artar. Doyum halindeki demir daha da ilerleyerek doyum kararlı noktası şu şekilde sağlanır. Eğer akımın doyum noktası üzerinde aşağı düşme kabiliyeti varsa indüktans doyumdan çıkar ve tekrar indüktans değeri değişir. Daha önce bahsedilen manyetik histerezisin sebebi indüktansın doyuma girip çıktığı noktaların farklı olmasıdır. Bu indüktanstaki ani değişim ferrerezonansın kararlı cevap karakteristiği için çok yönlü hesaplanır. Histerezisin açıklaması başlangıçtaki durumda oluşan cevaba çok bağlıdır. Doğrusal rezonans ile birlikte akım ve gerilimin uç değerlerini azaltmak için rezistans devrelerine de ayrıntılı olarak bakmak gereklidir.

Demirdeki doymanın derecesine göre devredeki elektriksel harmoniklerin doğal frekansları değişir. Kuşkusuz indüktansın doyma eğrisinin biçimi ve en üst değeri değiştirilerek de ferrerezonans oluşturabileceğinden olayın araştırılmasında gerçek karakteristiklerin incelenmesi önem taşır. Ferrerezonans riski altındaki elektriksel güç sistem donanımlarının örnekleri, potansiyel tehlikeli konfigürasyonların çeşitliliğini belirlemek ve vurgulamak için kullanılabilir güç sistemleri planlanırken bu tür risklerden kaçınılır. Uygun sayısal analiz yöntemleri kullanılarak bir güç sistemindeki normal ve daha düşük derecedeki sistem parametreleri rezonans riskinin tahminine ve değerlendirmesine imkan verir. Bu da sistem parametrelerinin ayarlanarak daha güvenli bir güç sistemi tasarlanmasını sağlayacaktır[76].

III.1.4. Güç Sistemlerinde Ferrerezonans Olayları

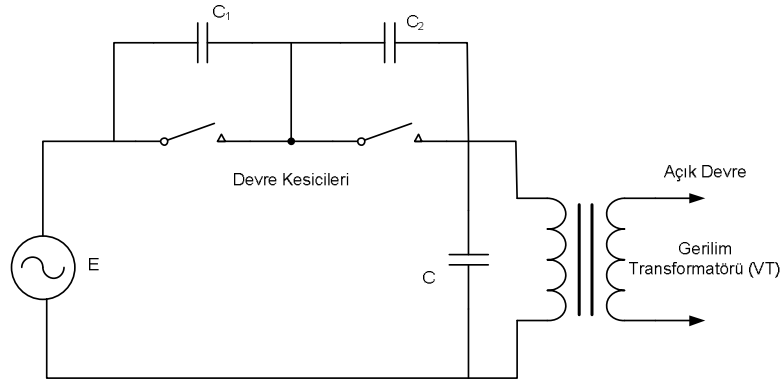
Bir güç sisteminde ferrerezonans aşağıdakilerden en az biri ile kendini gösterebilir.

- Fazlar arası veya faz-nötr geriliminde aşırı yükselmeler ile
- Aşırı akım yükselmeleri ile
- Yüksek seviyedeki akım veya gerilimlerin dalga şekillerinin bozulması ile

➤ Transformatördeki aşırı ısınmalar ve gürültülü çalışması ile kendini gösterecektir. Bu olaylar tedbir alınmaksızın ve rastgele meydana geldiğinde güç sisteminde büyük zararlara yol açacaktır.

Ferrezonansın meydana gelmesiyle oluşan bir sonraki durum da gerilimi sabit olmayan bir sistem noktasının varlığıdır. Bu durum izole edilmiş nötr hattında ya faz anahtarlarının kapatılması yada sigortaların devreyi açması sırasında oluşabilir. Sistem durumu bir ferrezonans olayının oluşmasına rahatlıkla müsaade eder.

Bir ferrezonans olayında rahatlıkla oluşan bu durumlar sistemin sükûnete ulaşılmasına engel olur. Aslında bu durumlardan biri yok ise ferrezonans oluşma olasılığı son derece azdır. Deneyimlerle ferrezonansın ortaya çıkmasına sebep olduğu anlaşılan birkaç donanım (konfigürasyon) tanımlanabilmektedir. Yüksek gerilimde bazı anahtarlama işlemleri, hatalı açılan anahtarlar faz-toprak arasına bağlanmış gerilim transformatörünü ferrezonansa götürebilir. Bu bağlantı Şekil III.4’de gösterilmiştir[76-78].



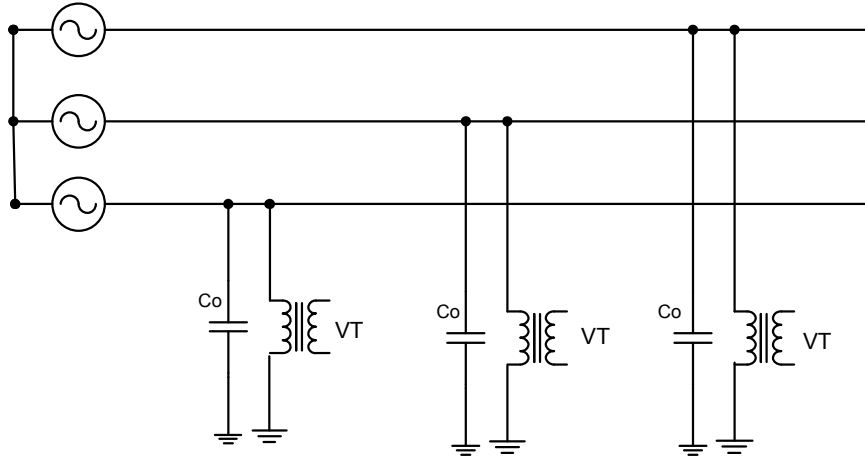
Şekil III.4 Devre Kesicisine Seri Bağlı GT'nin Ferrezonansı[78].

Burada gerilim transformatörü enerjilendirilir, bir veya birden çok açık devre anahtarının kapasitanslarının yükseltilmesi ile C kapasitesi GT yoluyla boşalır ve GT doyuma yönelir. Kaynak salınımı sağlamak için C kapasitesini yükseltir. C kapasitesi GT'ye bağlı bütün kapasitelere ve anahtarların açılması ile oluşan kapasitanslara karşılık gelir. Buradaki ferrezonans alt-harmoniktir[76-78].

III.1.5. Nötr Sisteminden İzole Edilmiş Gerilim Transformatörünün Bağlantısı

Acil durumlarda kaynağın nötründen ayrı olarak bağlanmış topraklanmış bu sistem seçilebilir. Güç sistemlerindeki uygun anahtarlama işlemleri bu topraklanmış

sistemde veya toprak hatası sonucunda geçici yüksek gerilim ve yüksek akımlarla sonuçlanabilir. Paralel ferrezonans devresindeki bir veya iki gerilim transformatörünün demir nüvesinin doyuma sürüklenmesi ferrezonansı başlatabilir. O zaman faz-nötr ve nötr noktası gerilimlerinin (V_n) her ikisinde de ferrezonans olayı gözlenir. Nötr noktasının gerilimi yerinden çıkar ve bir yada iki fazın potansiyeli yükselir ve yönü nötr'e doğrudur.



Şekil III.5 Faz ve Toprak Arasında Bağlı Nötr Sisteminden İzole Edilmiş Gerilim Trafosunun Bağlantısı[78].

Sistemde kararlı hal durumunda yüksek gerilimin değeri normal faz-faz gerilim değerini aşabilir ve elektrik donanımların zarar görmesine neden olur. Ferrezonansın temel alt-harmonik (sub-harmonik) veya yarı periyodik (quasi-periyodik) olması gerilim transformatörünün indüktansının magnetizasyonunun ve kapasitansı C_o 'nun nisbi değerlerine bağlıdır. Şekil III.5'de faz ve toprak arasında bağlı nötr sisteminden izole edilmiş gerilim trafosunun bağlantısı gösterilmiştir[76-78].

III.1.6. Ferrezonans Dalga Formları

Güç sistemlerinde sistem modellerinden ve analizlerden elde edilmiş sonuçlara dayanılarak dört farklı tipte ferrezonans dalga formu (modu) belirlenmiştir. Normal bir sistemin çalışmaya başlamadan önceki hali ile ferrezonans halini bir birinden ayırmak zordur[78]. Başlangıç esnasında sistemlerin dalga formları ferrezonans dalga formu ile benzer özellikler göstermektedir. Bu olaya başlangıç anında geçici hal denilmekte ve bu geçici halde sistemler için risk oluşturmaktadır. Ancak burada

anlatılmak istenen geçici halde ferrerezonans durumunun dalga formu ile, ferrerezonansın riski ve başlangıç şartlarıyla oluşumundan dolayı benzerlikler gösterse de başlangıç koşullarında periyodiklik bir süre sonra yok olmakta ve sistemler geçici halden kararlı hale geçmektedir. Ferrerezonans durumunda ise sistem kararlı haldedir ve periyodik bir şekilde aynı yüksek genlikli yıkıcı dalga formunu koruyarak devam eder.

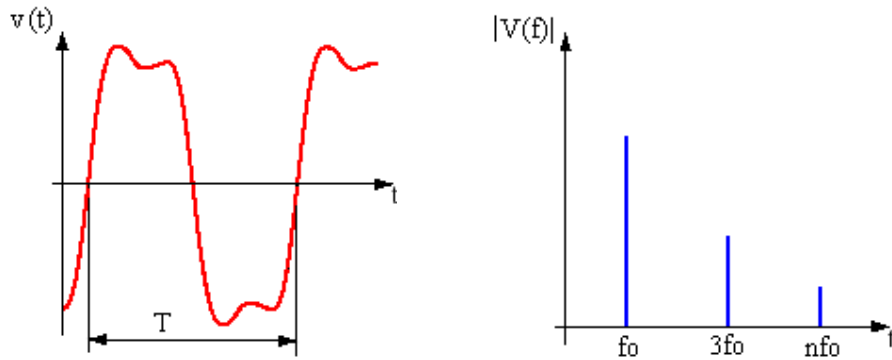
Ferrerezonansı dört farklı dalga formu şeklinde sıralamak mümkündür;

- a) Temel form
- b) Alt-harmonik (Sub-harmonik) form
- c) Yarı periyodik (Quasi-Periyodik) form
- d) Kaotik form

Bu modlar akım ve gerilim eğrilerinin zamana bağlı grafikleri ile yada spektrumları ile gösterilmektedir[76-78].

a) Temel Form

Bu formda gerilimler yada akımlar periyodiktir ve harmonik bileşenler içerir. Sistemin yapısına göre değişiklikler gösterse de Şekil III.6'da $v(t)$ grafiğinde gösterildiği gibi sinüs formunda tepe noktalarında bozulmalara uğramış sinyal formuna sahiptir. Gerilim frekans analizi $|V(f)|$ grafiğinde görüldüğü gibi diğer frekans bileşenlerini de içermesine rağmen f_0 temel frekans bileşenidir[76-78].

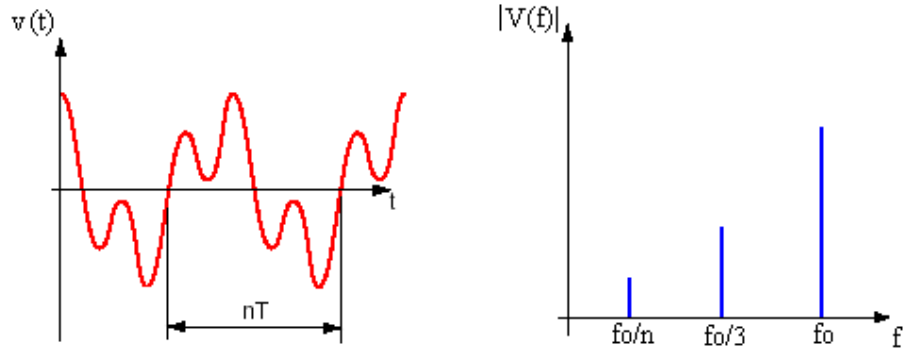


Şekil III.6 Temel Formda Ferrerezonans Grafiği[78].

b) Alt-Harmonik Form

Buradaki dalga formu alt-harmonik yada sub-harmonik olarak isimlendirilir. Şekil III.7'de görüldüğü gibi nT periyodu şeklinde devam etmekte ve periyodiktir. Bu alt-harmonik n veya $1/n$ harmonik olarak da isimlendirilir. Alt-harmonik mod oldukça farklı bir durumdur, burada spektrum f_0/n 'e eşit bir temelli ve onun

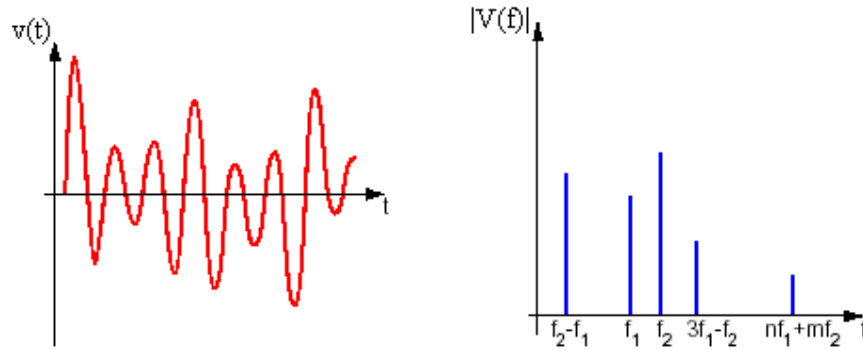
harmoniklerini gösterir. Bu formda f_0 frekansı spektrumun da bir parçası olmaktadır[76-78].



Şekil III.7 Alt-harmonik Formda Ferrerezonans Grafikleri[78].

c) Yarı-Periyodik Form

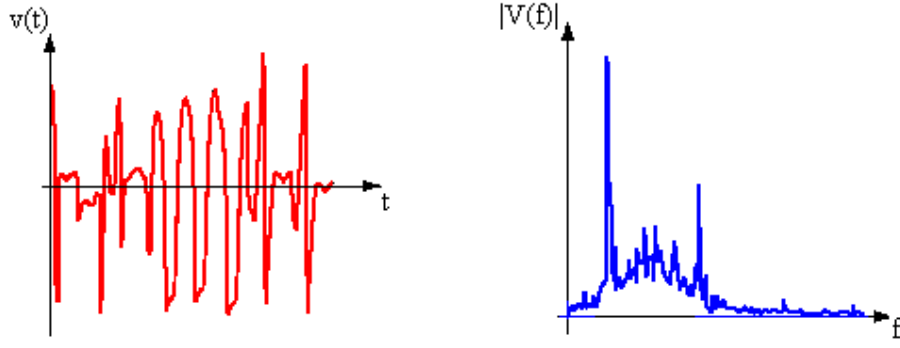
Bu modda dalga formu periyodik değildir. Quasi-periyodik yada yarı periyodik mod olarak isimlendirilir. Spektrumu da daha aralıklı şekilde görülür. Alt-harmonik formun $\frac{1}{2}$ frekansına sahiptir. Dengeli bir osilasyona sahiptir. Yarı-periyodik form için temel grafik Şekil III.8'de gösterilmiştir[76-78].



Şekil III.8 Yarı-Periyodik Formda Ferrerezonans Grafikleri[78].

d) Kaotik Form

Karmaşık mod dalga formu olarak diğer formlardan oldukça farklı düzensiz ve tahmin edilemez davranış gösteren sürekli bir sinyaldir. Bu form tüm frekans içeriklerini içerir. $V(t)$ grafiği Şekil III.9'de gösterilmiştir. Bu form oldukça karmaşık olup güç sistemlerinde dengesiz yük dağılımı sonucu ortaya çıkan ferrerezonans olaylarında görülmesi muhtemeldir. Doğrusal olmayan sistemlerdeki ferrerezonans olayları günümüzde üzerinde çalışmaların devam ettiği araştırma konularından biridir. Ferrerezonans olayında kaotik bir davranışın olması için, sistem başlangıç koşullarında oldukça hassas davranış göstermesi gereklidir[85].



Şekil III.9 Kaotik Formda Ferrerezonans Grafikleri[78].

Ferrerezonans karmaşık bir olaydır ve üzerinde çalışmalar hala devam etmektedir. Ferrerezonans genellikle yüksüz transformatörlerin manyetik özellikleriyle ve orta ve uzun iletim hatlarının kapasitif etkileriyle ortaya çıkmaktadır. Yıldırım düşmesi, transformatörlerin enerjisinin aniden kesilmesi yada transformatörlere aniden enerji verilmesi, çeşitli arızalar ile ferrerezonans tetiklenebilir[76-78]. Ferrerezonansın oluşumunda sistem parametrelerinin etkili olduğu, başlangıç şartlarına duyarlı olduğu, sistemlerde büyük zararlara yol açtığı bilinen önemli bilgiler arasındadır.

Ferrerezonans kendini genellikle yüksek gerilim yada akım dalga formunda gösterir. Transformatörlerin aşırı ısınması, fazla yük, transformatör ve reaktörlerin gürültülü çalışması ile ön teşhisler yapılabilmektedir.

III.1.7. Ferrerezonansın Önlenmesi

Ferrerezonans, transformatör sekonderi üzerindeki yüke, devrenin kesilme tipine ya da anahtarlamanın tipine, hattın uzunluğuna ve hattın tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Ferrerezonans aşırı gerilimlerden korunma uzun enerji iletim hatlarının tasarımlarının önemli problemlerinden birisidir [37]. Araştırmalarda, ferrerezonansın en çok yüklerin devre dışı kalmasından ortaya çıktığı daha sonra ise iletim hatlarında anahtarlama benzeri etkiyi oluşturacak arızalardan kaynaklandığı belirlenmiştir. Yapılan çalışmalarla ferrerezonansı önlemek için ileri sürülen başlıca tedbirler aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Her koşulda topraklamanın muntazam yapılması,
- Transformatörün nötr noktasının Betel rezistörü ile topraklanması,
- Gerilim Transformatörleri (GT) kullanılması,
- Primeri üçgen bağlı GT kullanılması,

- İletim hatlarında, hat-başı ve hat-sonuna reaktörler yerleştirilmesi,
- Kaza açmalarından oluşan ferrorezonansın önlenmesi için yeni koruma devrelerinin tasarlanması ve yeni analiz yöntemlerinin geliştirilmesi[19,37,115].

Literatürde, ferrorezonans üzerine yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu ferrorezonansın analizinden çok ya devre modeli üzerinde yada örnek bir güç sistemi modeliyle ferrorezonans esnasında meydana gelen gerilim/akım dalga formları elde edilerek yorumlanması şeklinde olmuştur. Yine literatürde ferrorezonans olayı sonucu meydana gelen etkileri önlemeye yönelik tasarım ve tedbirleri içeren çalışmalar da önemli yer tutmaktadır. Gerçek güç sistemi üzerine Tayland, Malezya ve İngiltere’de yapılan üç çalışma bulunmakla birlikte bu çalışmalar, ferrorezonans olayı esnasında oluşan gerilim/akım dalga formlarını yorumlama ve ferrorezonansın oluş sebeplerini inceleme çalışmalarıdır.

Bu tezde ferrorezonansın önlenmesine yönelik tedbirlerden ziyade, gerçek bir iletim sistemi modeli esas alınarak model üzerinde olası senaryolarla meydana gelen ferrorezonans sinyallerinin matematiksel yöntemlerle analizleri yapılmış, ferrorezonans esnasında ve ferrorezonans öncesinde oluşan sinyallerin özellikleri belirlenmiştir.

BÖLÜM IV

TÜRKİYE BATI ANADOLU İLETİM HATININ MODELLENMESİ VE FERRORESONANS OLAYININ SİMÜLASYONU

Modelleme yada simülasyon var olan bir sistemin sistematik olarak incelenmesi ve tasarlanması için kullanılan bir terimdir. Matematiksel modelleme, sistemlerin daha iyi anlaşılması, analiz edilmesi ve tasarlanmasının etkin ve ekonomik bir yoludur.

Modellemede model, gerçek sistemden alınan sonuçlara izin verecek şekilde detaylı, matematiksel olarak hesaplanabilir ve sonuçları gerçeği yansıtmalıdır. Bir sistemin performansı ile ilgili bir çalışmada, öncelikle bu sistemin bir modelinin oluşturulması gereklidir[158]. Bu amaçla; bir model gerçek bir sistem ile benzeşmelidir, gerçek bir sistemin basitleştirilmiş bir örneği ve gerçek bir sistemin ideal bir hali olmalıdır. Özellikle elektriksel sistemlerin modellenmesi, oluşacak arızaların önceden tahmin edilerek hesaplanması, önlemlerin alınması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, bu tezde kullanılan model, 2006 TEİAŞ verileri ile ideal şartlarda iletim hattındaki parametreler kullanılarak Seydişehir-Oymapınar iletim hattının birebir modeli olarak tasarlanmıştır.

İletim Sistemi, üretim tesislerinden itibaren dağıtım sistemine kadar olan ve Yüksek Gerilim (YG) ve Çok Yüksek Gerilim (ÇYG) seviyesinde elektrik enerjisinin iletiminin gerçekleştirildiği tesislerdir. 380kV'luk ÇYG ve 154kV'luk YG hatları güçlü ve güvenilir bir donanım ile donatılmıştır. Ülkemizde iletim sistemi gerilim seviyesi 380kV ve 154kV ile standart hale getirilmiştir[159].

Ülkemizde 380kV'luk hatların uzunluğu 14420.4km ve taşıma kapasitesi yaklaşık 1000MW'tır. Aktarma istasyonlarımız yeterli olmasına rağmen belli bölgelerdeki iletim sistemi yetersizliği/sorunları devam etmektedir. Ülkemizdeki enerji ihtiyacının karşılanmasına yönelik yeni yapılan barajlar ve 1999 depreminden sonra meydana gelen enerji iletim hatlarındaki bozulmalar sonucunda 2006 yılından sonra ayrılan bütçe ve yapılan programlarla ülkemizdeki iletim hatları sürekli yenilenmekte yeni hatlar, yeni transformatör gurupları yada şebekelere yeni termik santraller eklenerek geliştirilmektedir. Bu geliştirme ve yenileme çalışmaları enerji iletim ve dağıtım hatlarında sürekli değişikliklere yol açmaktadır, TEİAŞ verilerine göre mevcut santrallerin üretim kapasitesi 228 Milyar kWh iken 2008 yılında lisansı alınıp inşaatına başlanmış olan santrallerin devreye girmesiyle 308 Milyar kWh olacaktır. Bunun yanında; elektrik tüketiminde yıllık 4000MW'lık ek tüketim ihtiyacı, mevcut sistemin her yıl değişikliğe uğramasına, yeni santrallerin sisteme eklenmesini zaruri kılmaktadır. Bu yenileme, geliştirme çalışmaları sanayileşme ve şehirleşmenin etkisiyle sürekli devam etmektedir[159-162].

Bu tezde; 380kV'luk Batı Anadolu İletim Hattından (BAİH) Seydişehir-Oymapınar İletim Hattı (SOİH) 2006 yılındaki TEİAŞ verileri kullanılarak gerçeği yansıtacak şekilde modellenmiştir. Modellemeler Matlab-Simulink paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tezde modellenen Seydişehir-Oymapınar İletim Hattı Matlab-Simulink devresi EK1-Şekil 1'de, ayrıca modelin generatör Matlab-Simulink devresi de EK1-Şekil 2'de gösterilmiştir.

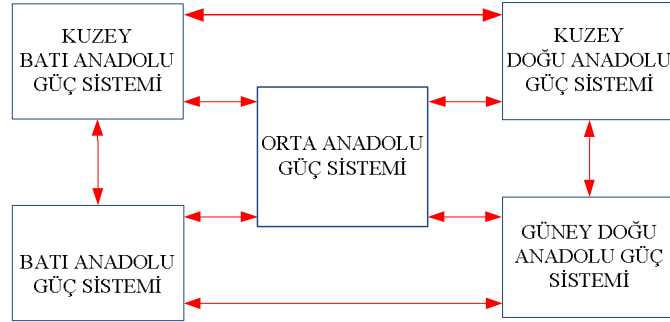
IV.1. SİSTEM PARAMETRELERİ İLE MODEL OLUŞTURMA

Ülkemizde güç sistemlerinin yük dağılımı 1999 yılından itibaren Milli Yük Tevzi Müdürlüğüne yapılmaktadır. Ulusal yük dağılım kontrolü Milli Yük Tevzi Müdürlüğü denetiminde;

- Kuzey Doğu Anadolu Yük Dağılım Müdürlüğü (Çarşamba)
- Kuzey Batı Anadolu Yük Dağılım Müdürlüğü (Adapazarı)
- Batı Anadolu Yük Dağılım Müdürlüğü (İzmir)
- Orta Anadolu Yük Dağılım Müdürlüğü (Gölbaşı)
- Güney Doğu Anadolu Yük Dağılım Müdürlüğü (Keban)

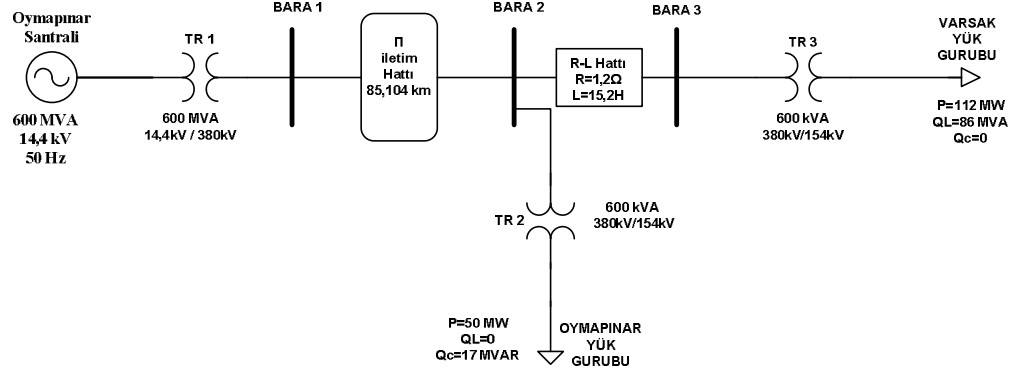
müdürlüklerince bölgesel olarak yürütülmektedir. Bu müdürlükler bölgelerinde bulunan enterkonnekte sistem elemanlarının bakım, çalışma ve yük dağılımlarından

sorumludurlar[161-164]. Bölgeler arası enterkoneksiyon şeması Şekil IV.1’de verilmiştir[164].



Şekil IV.1 Türkiye Elektrik Şebekesindeki Bölgeler Arası Entegrasyon Şeması[164].

Şekil IV.1’de verilen entegrasyon şeması dışında ülkemizin komşuları ile arasında da entegrasyonlar vardır. Bu tezde; Türkiye Elektrik Şebekesindeki Batı Anadolu Güç Sistemi incelenmiş olup, sistem 50 MW’lık Oymapınar yük gurubu ve 112MW’lık Varsak yük gurubunun bulunduğu 4x150MVA’lik generatör gurubundan oluşan toplam 600MVA’lik, 14.4kV’luk Oymapınar santrali ile 380kV’luk şebekeden beslenmektedir. Türkiye Elektrik Dağıtım Şirketinin 9. İletim Tesis ve İşletme Gurup Müdürlüğüne ait 533805 kodlu 380kV’luk Oymapınar Seydişehir Enerji iletim hattı 85 km uzunluğunda olup, iletim hattında 2’li demet, 954 MCM ACSR kesitli ve 70mm² kor telli iletkenli kullanılmıştır. Bu hat üzerinde 74 adet elektrik direği bulunmaktadır[162]. Seçilen hattın yük değerleri ve diğer parametreleri 2006 yılında güncellenen enterkonnekte şebekenin özelliklerini yansıtmaktadır. Şekil IV.2’de modelin hat şeması gösterilmiştir.



Şekil IV.2 Seydişehir-Oymapınar 380kV Enerji İletim Hattı Modeli.

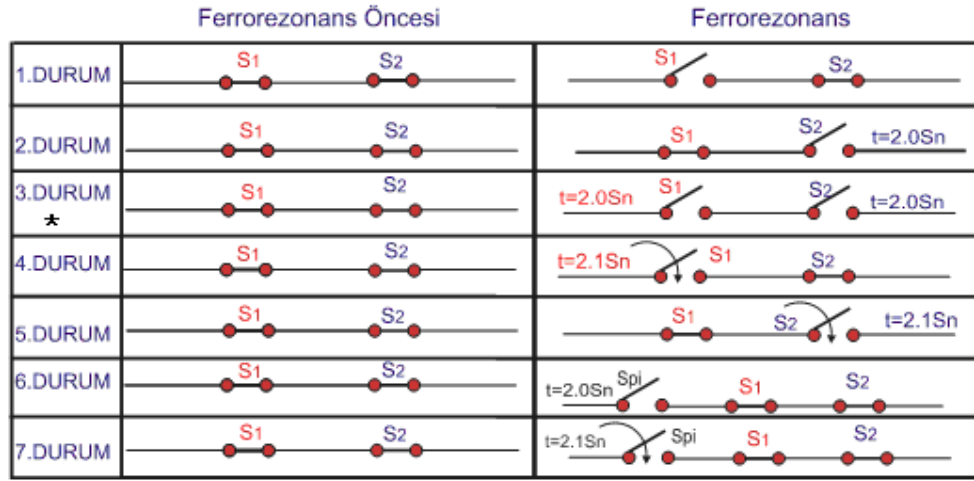
Yukarıdaki Şekil IV.2’de modeli verilen 380kV’luk Seydişehir-Oymapınar iletim hattının elektriksel bileşenlerinin parametreleri Tablo IV.1’de verilmiştir. Hat; 3 adet transformatör (TR), iletim hatları (π hattı ve R-L hattı), yükler (L_1 ve L_2), 180MVA’lık generatör, yükler(L_1 , L_2), baralar (B_1 , B_2 , B_3) ve anahtarlardan (S_1 ve S_2) den oluşmaktadır. S_1 anahtarı Oymapınar yük gurubunu, S_2 anahtarı Varsak yük gurubunu kontrol etmektedir. Burada π iletim hattı 85.104km uzunluğunda, B_2 - B_3 baraları arasında yer alan R-L hattı ise 80 km’den daha kısa olduğundan kısa iletim hattı olarak değerlendirilip sadece R ve L parametreleri verilmiştir. Anahtarların konumları ise her senaryo için Şekil IV.2 de ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Benzetimden yapılan ölçümler transformatörlerin yük tarafından yapılmıştır.

Tablo IV.1 Seydişehir- Oymapınar İletim Hattındaki Elektriksel Bileşenler

ELEKTRİKSEL BİLEŞENLER	PARAMETRELER
Generator	600MVA, 14.4 kV, 50Hz
Transformatörler	TR ₁ :600 MVA, 14.4kV/ 380kV TR ₂ : 600kVA, 380kV / 154kV TR ₃ : 600kVA, 380kV / 154kV
İletim Hatları	π Hattı(B_1 - B_2): 85.104 km R:0.2568 Ω /km L: 2e-3 H/km C: 8.6e-9 F/km Hat(B_2 - B_3): R:1 Ω L:1e-3 H
Yükler	L_1 :P=50 MW, Qc=17 MVAR L_2 :P=112MW, QL=86 MVA
Anahtarlar	S_1 & S_2 (0-2s /2-2.1s)

IV.2. FERROREZONANS SENARYOLARI VE ÜÇ FAZDA AKIM GERİLİM ANALİZLERİ

Bu bölümde; Seydişehir-Oymapınar iletim hattında meydana gelebilecek ferreazonans olayı için temel 7 durum (senaryo) ele alınarak bu senaryo durumlarında meydana gelebilecek ferreazonans olayları ayrı-ayrı incelenmiştir. Bu senaryo durumları Şekil IV.3 den de görüleceği üzere yüklerin kaldırılması veya hatların kopması esasına dayanarak gruplandırılmıştır. Bu bölümde her bir durumun gerilim-zaman ve akım zaman grafikleri incelenerek yorumlanmıştır.



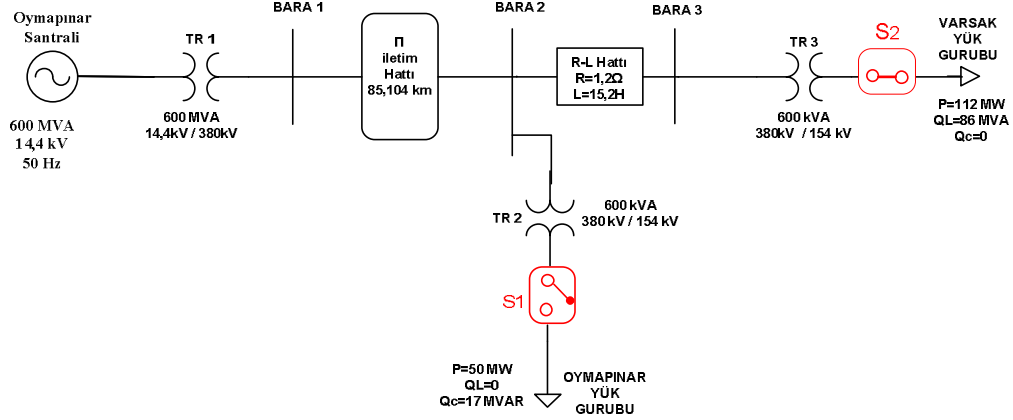
Şekil IV.3 Hat Üzerinde Oluşturulan Temel Senaryolar.

IV.2.1. Oymapınar Yük Gurubun Devre Dışı Kalması (1. DURUM)

Şekil IV.4’de Seydişehir-Oymapınar iletim hattı üzerinde meydana gelebilecek ilk senaryo durumuna ait model gösterilmiştir. Şekil IV.3’de anahtarların durumunda gösterildiği gibi S_1 anahtarı Oymapınar yük gurubunu açmak için, S_2 de Varsak yük gurubunu açmak için kullanılmaktadır. 1. Durumda 4 saniye sürecek bir simülasyon için S_1 anahtarı 2. saniyede açılmaktadır. 2. saniyede S_1 anahtarının açılmasıyla sistem üzerinde 2. ve 3. bara’dan alınan ölçümler sonucunda oluşan harmonikler analiz edilerek sistemde ferreazonans olayının olup oluşmadığı tespit edilecektir.

*: $\Delta t=0.2$ için de analiz yapılmıştır.

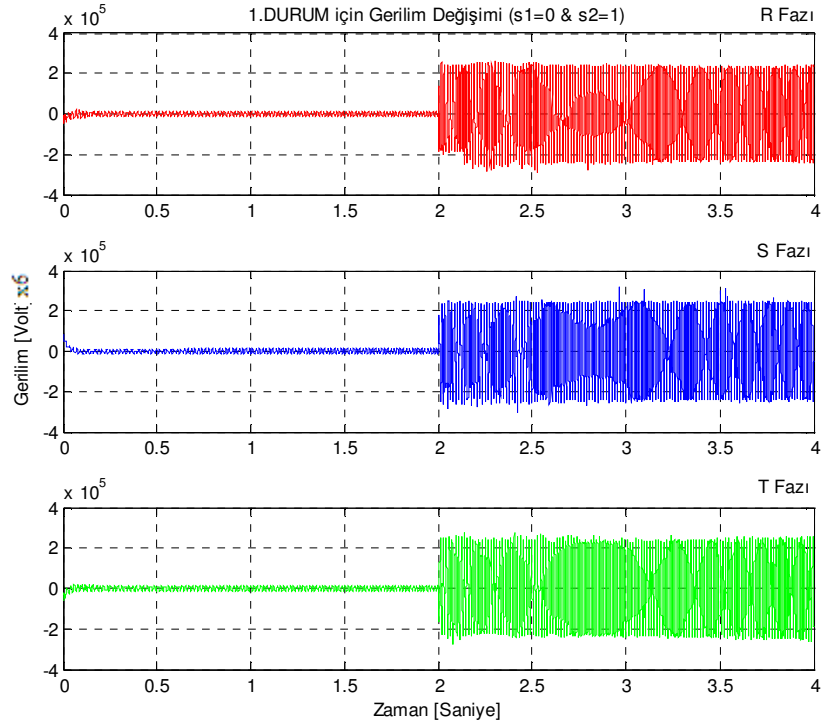
$$\Delta t=t_2-t_1=0.2S_n$$



Şekil IV.4 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum).

Yapılan çalışmada Transformatörler ve tüm elemanlar Seydişehir-Oymapınar iletim hattının tüm parametrelerine uygun olacak şekilde simüle edilmiştir. Simülasyonunda Oymapınar yük gurubu S_1 anahtarı vasıtasıyla 2. saniyede sistemden kaldırıldığında yükün kalktığı hatta ferreazonans aşırı gerilimler görülmektedir. Hat üzerinde meydana gelen Gerilim-Zaman grafiği Şekil IV.5’de gösterilmiştir.

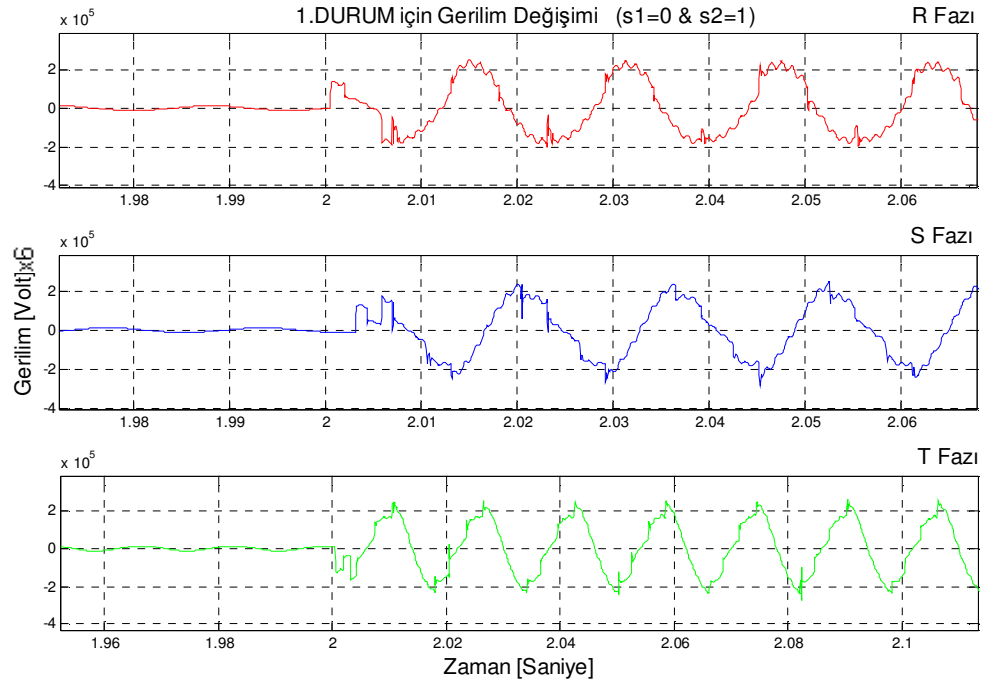
Şekil IV.5’de Gerilim-Zaman grafiğinin ferreazonans etki oluşturduğu görülmektedir. 2.saniyede Oymapınar yük gurubunun aniden devreden çıkarılması ile oluşan aşırı yüksek gerilimler sistemin nominal gerilimin yaklaşık 2.5 katı kadar yükselerek ferreazonans bir etki oluşturmaktadır. Ferreazonans öncesi ve ferreazonans anı için gerilim değişimine ait grafikler EK1-Şekil 3 ve EK1-Şekil 4’de verilmiştir. Ayrıca senaryo durumlarının takibini kolaylaştırmak için EK1-Tablo1’de her senaryo durumunun şekil ve sayfa numarası verilmiştir.



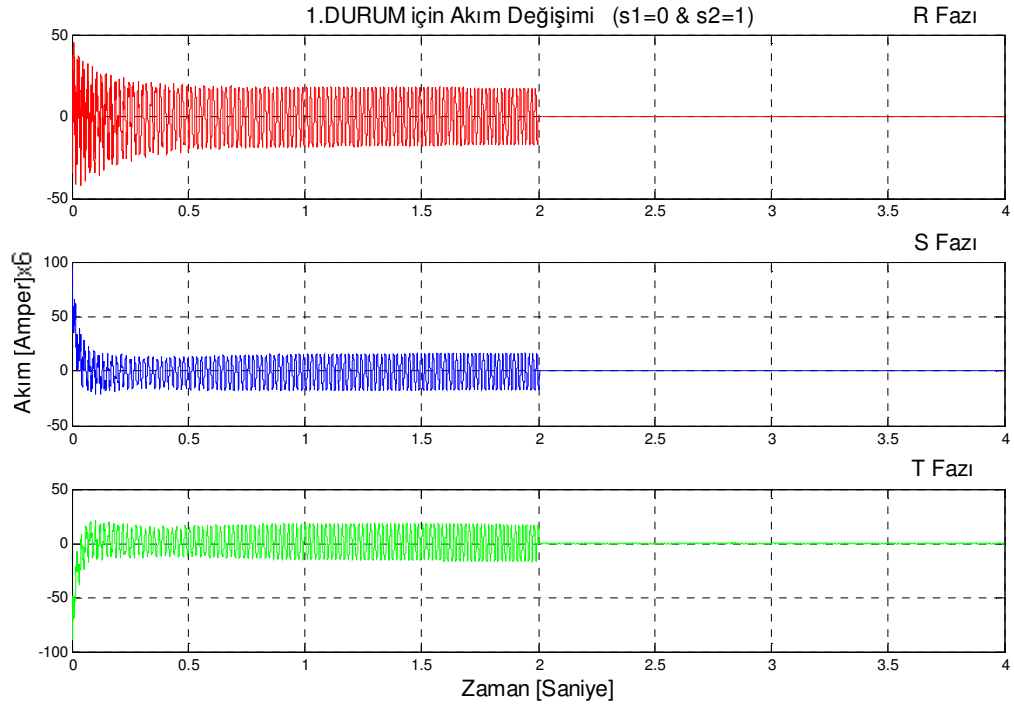
Şekil IV.5 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması Sonucu Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.

Birinci durumda Oymapınar yük gurubunu S_1 anahtar vasıtasıyla devre dışı bırakılması sonucu oluşan ferreazonans olayının gerilim-zaman grafiği Şekil IV.6'da ayrıntılı olarak gösterilmiştir. 2. saniyede yük kalktığı anda sistemde ferreazonans etki görülmektedir. Bu etki her fazda görülmektedir. Grafik incelenecek olursa ferreazonans etkiden kaynaklanan her periyotta aynı harmonik bozulmaların tekrarladığı görülecektir. Bu da ferreazonans olayının temel karakterlerinden biridir.

Model üzerinde 2 ve 3 numaralı baralar aynı zamanda ölçüm istasyonu olarak da kullanılmaktadır. Ancak ölçümler baraların bulunduğu hat üzerindeki transformatörlerin yüke yakın bölümlerinden yapılmıştır. Baralar ayrıca sistemlerin bağlantısı amacıyla kullanılmıştır. Bu baralar sayesinde bir yük gurubunun devre dışı kalması ya da anahtarlanması sonucunda oluşabilecek ferreazonans olayının diğer hatlar üzerinde oluşturduğu etkisi de incelenmiştir. Sistemdeki hatlarda transformatörlerin ferreazonans etkilerde baralardan daha büyük önem taşıdığı görülmektedir.

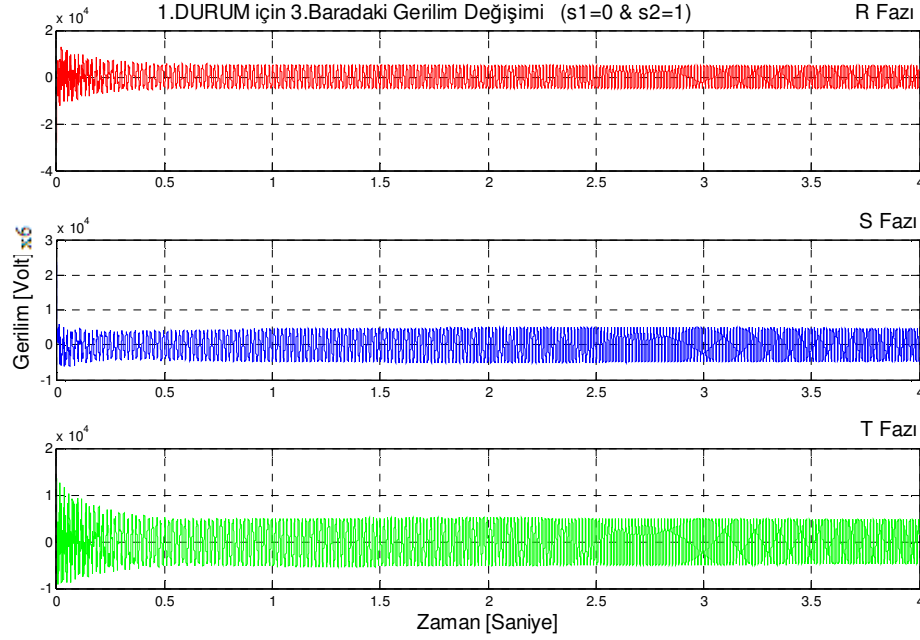


Şekil IV.6 Oymapınar Yük Gurubunun Kalkması Sonucu Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği Ayrıntısı.



Şekil IV.7 Oymapınar Yük Gurubunun Devreden Çıkması (1.Durum) Sonucu Oluşan Akım –Zaman Grafiği.

Şekil IV.6'da Seydişehir-Oymapınar 380kV'luk iletim hattı üzerinde Oymapınar yük gurubunun 2. saniyede aniden devre dışı bırakılması sonucu oluşan gerilim-zaman grafiğinden ferreazonans etki ile aşırı yüksek gerilim ve periyodik bozulmalar görülürken, Şekil IV.7'de 2. baradan alınan ölçümler sonucunda akım-zaman grafiğinde ferreazonans etkiye rastlanmamıştır. 2. saniyeden itibaren sistem üzerinde akım sıfır değerini almaktadır.

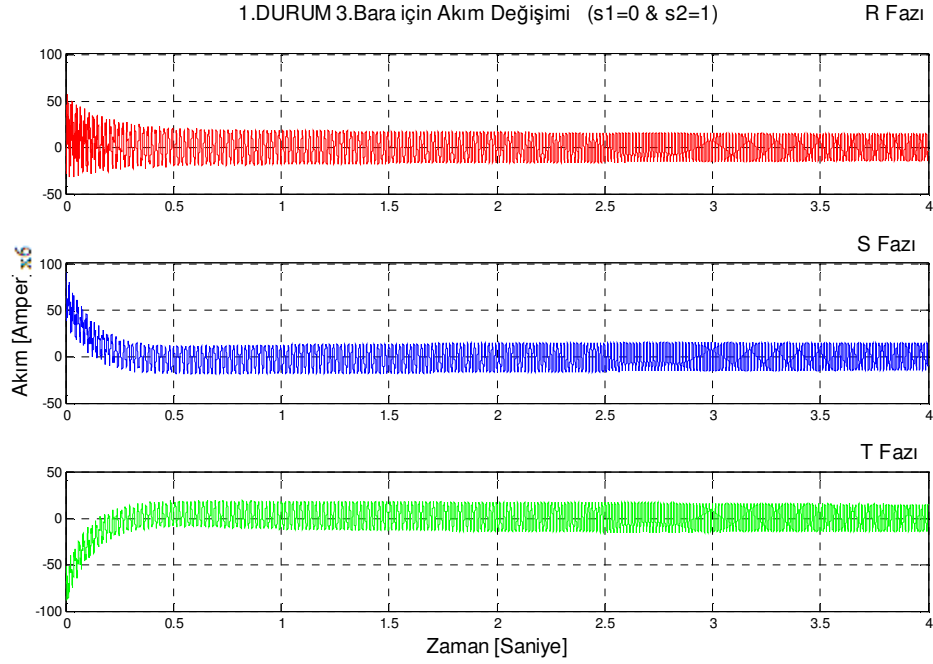


Şekil IV.8 Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalkmasının 3 Numaralı Bara Üzerine Etkisi.

Seydişehir-Oymapınar 380kV'luk enerji iletim sisteminde Oymapınar yük gurubunun 2. saniyede devreden çıkarılması sonucu 3 numaralı bara üzerindeki etkiler de incelenmiştir. Modelde 3. bara'dan elde edilen ölçümler sonucunda ferreazonans etkinin Transformatörü geçerek diğer iletim hatlarını etkileyip etkilemediği de araştırılmıştır. Şekil IV.8'de 2. saniye sonunda 3. bara'dan alınan ölçümler gerilimin Oymapınar yük gurubunun devre dışı kalmasından etkilenmediğini ferreazonans etkinin transformatörleri geçmediği tespit edilmiştir.

Şekil IV.9'dan da görüleceği üzere ferreazonans etki transformatörü geçmemiş bu hat üzerinde transformatörler tampon görevi yapmışlardır. Şekil IV.9'da Oymapınar yük gurubunun kalkması sonucu oluşan ferreazonans etkinin transformatörleri aşmadığı Gerilim-Zaman grafiğinden anlaşılmaktadır. Oymapınar yük gurubunun kalkması sonucunda 3 numaralı bara'dan alınan analizlerin gerilim-

zaman ve akım-zaman grafikleri, Oymapınar yük gurubunun kalkması sonucu oluşan Ferreazonans gerilimler ve akımlar 2 numaralı bara ile sınırlı kalmış 3 numaralı bara'nın hemen önünde bulunan transformatörler tarafından tamponlanarak Varsak hattına geçememiştir.

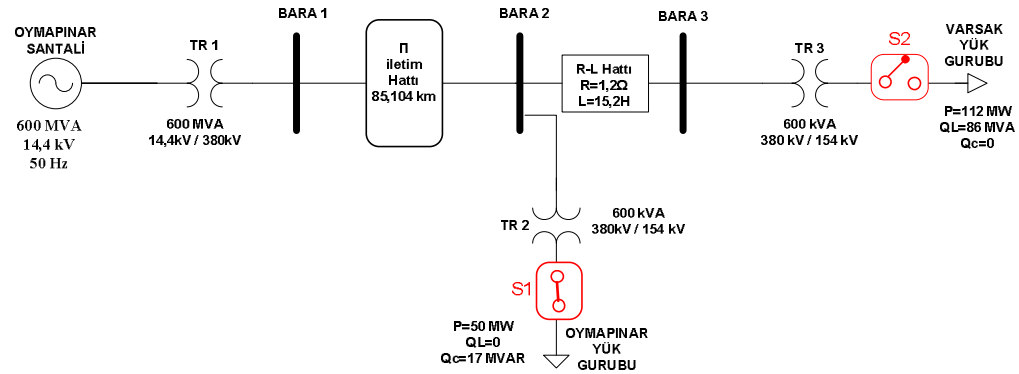


Şekil IV.9 Oluşan Ferreazonansın 3 Numaralı Barada Akım Üzerindeki Etkisi.

Şekil IV.9'da Oymapınar Yük gurubunun 2.saniyede devreden çıkarılması sonucu oluşan ferreazonansın 3 numaralı bara üzerindeki R, S, T fazlarına ait akım-zaman grafiği görülmektedir.

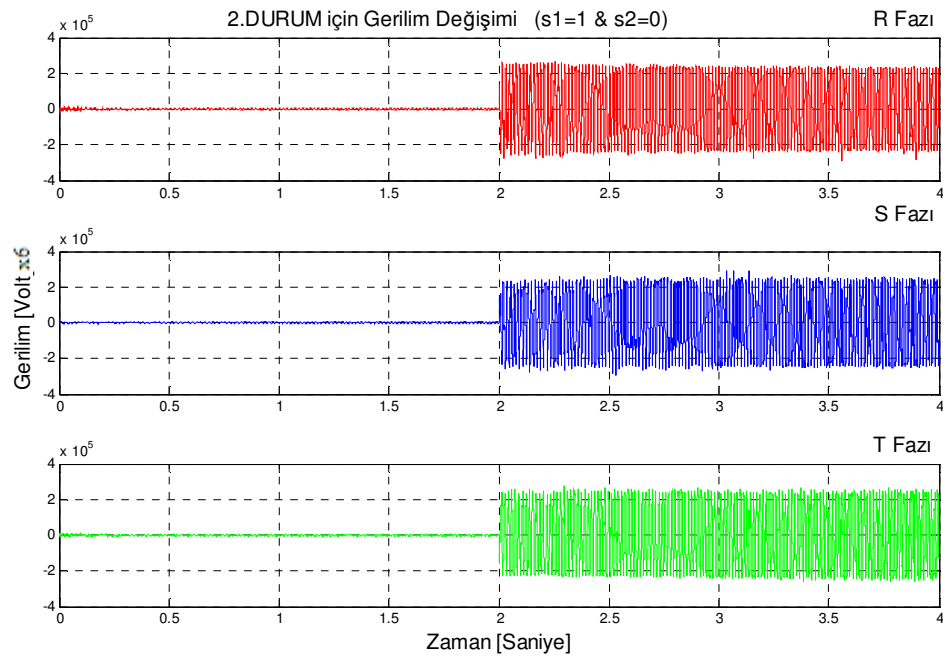
3 Numaralı bara'da gerilimler üzerinde herhangi bir etki görülmediği gibi akımlar üzerinde de herhangi bir etki görülmemektedir. Burada baralar ile ayrılmış bulunan sistemlerin bir birinden bağımsız oldukları transformatörler sayesinde oluşabilecek yüksek harmonikli akım veya gerilim dalgalanmalarından ve ferreazonans etkilerden korundukları söylenebilir. Transformatörlerin bu özellikleri amacıyla enerji iletim hatlarının planlanması aşamasında, hat gruplarını bir birbirinden yalıtarak oluşabilecek olumsuz etkilerinde azalttığı da göz önünde tutulan değerlerden birisi olduğu bilinmektedir.

İkinci durumda 112MW değerine sahip olan Varsak yük gurubu S₂ anahtarı ile sistemden ayrılacak şekilde modellenmiştir.



Şekil IV.10 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması Modeli (2.Durum).

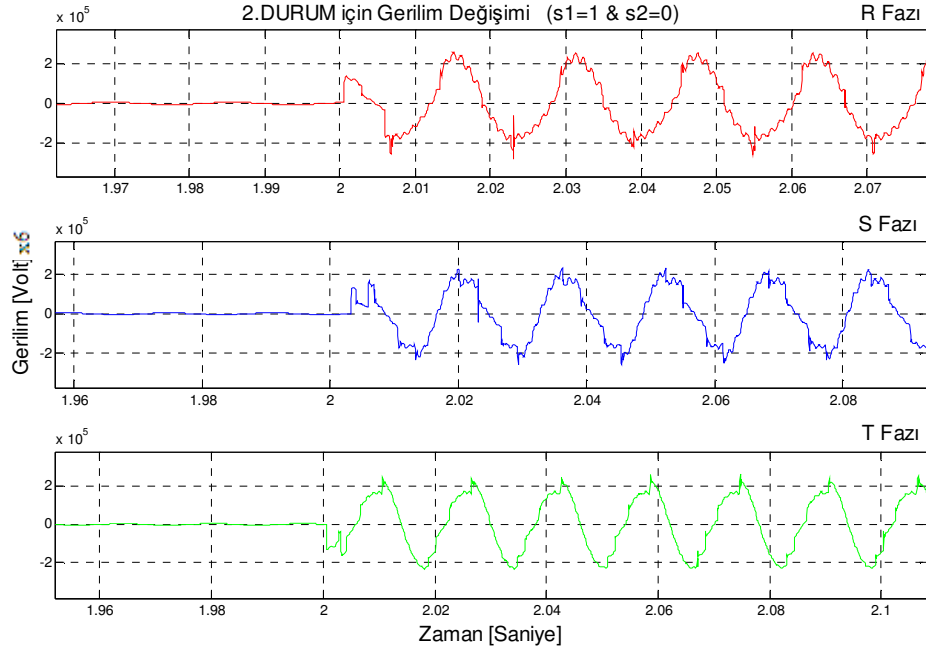
Şekil IV.10'da Varsak yük gurubu 2. saniyede devre dışı bırakıldığı model (2.Durum) gösterilmiştir. Varsak yük gurubunun devre dışı bırakılmasıyla sistemde meydana gelebilecek ferreazonans olayları önce 3 numaralı transformatör üzerinden daha sonra da TR2 üzerindeki ölçü aletlerinden incelenmiştir.



Şekil IV.11 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla (İkinci Durum)

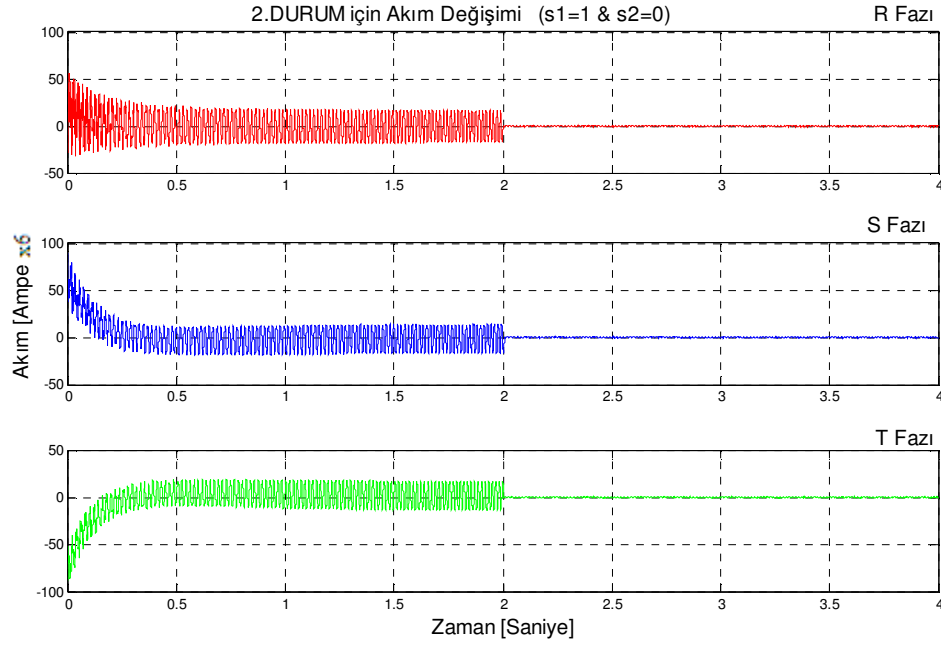
3.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.

Şekil IV.11’de Varsak yük gurubunun her üç fazı aynı anda 2. saniyede devre dışı bırakılarak yükün ayrılması sağlanmıştır. Şekil IV.11’de gerilim-zaman grafiğinde 4 saniye boyunca ferrezonans gerimin seyri gösterilmiştir. Şekil IV.12’de ise aynı gerim-zaman grafiği detaylı olarak verilmiştir.



Şekil IV.12 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği Detayı.

Bu durumda devrenin her üç faza ait olan tüm yükleri aynı anda devreden çıkarılınca tüm yükler kalktığı için ferrezonans etki görülüyor. Ferrezonans etki sadece gerilim değişimi üzerinde görülürken, akım değişiminde ferrezonans etki görülmemektedir. Şekil IV.12’de 3. baradan her üç faz için de elde edilen verilerle 2. saniyeden sonra yükler devre dışı bırakılınca sistem üzerinden akım çekilmediği görülmektedir. Bu etkiler Oymapınar yük gurubunun devre dışı kalması (1. durumda) oluşan etkiler ile benzerlik taşımaktadır. Burada ölçümler transformatör üzerinden yapılmış olup hat üzerindeki baradan ölçüm şeklinde ifade edilmiştir.

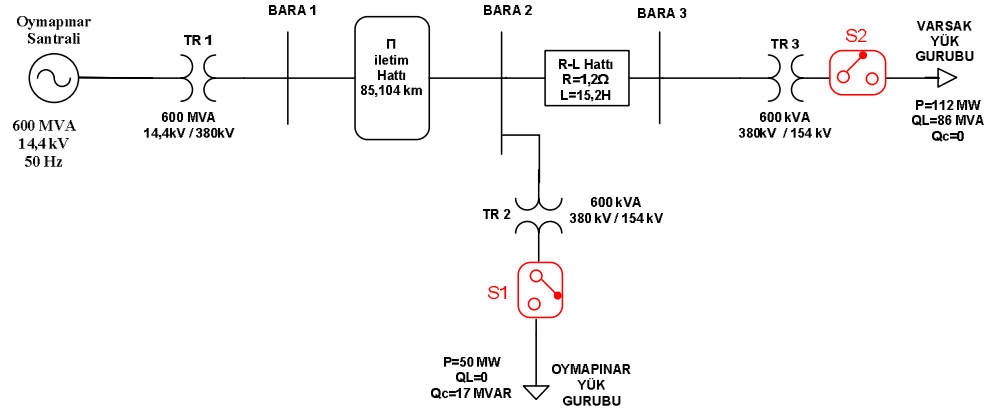


Şekil IV.13 Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (2.Durum) Sonucu 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

3 numaralı transformatör ve S_2 anahtarının bulunduğu Varsak yük gurubunun devre dışı kalması sonucunda Oymapınar barasından alınan ölçümler sonucunda da akım değişimlerinde ve gerilim değişimlerinde herhangi bir ferrezonans etki gözlemlenmemiştir. 1. durumda da bahsedildiği gibi baralar arasındaki transformatörler tampon görevi yaparak ferrezonans aşırı akım ve gerilim değişimlerinin diğer baralara sıçramasına engel olmuştur.

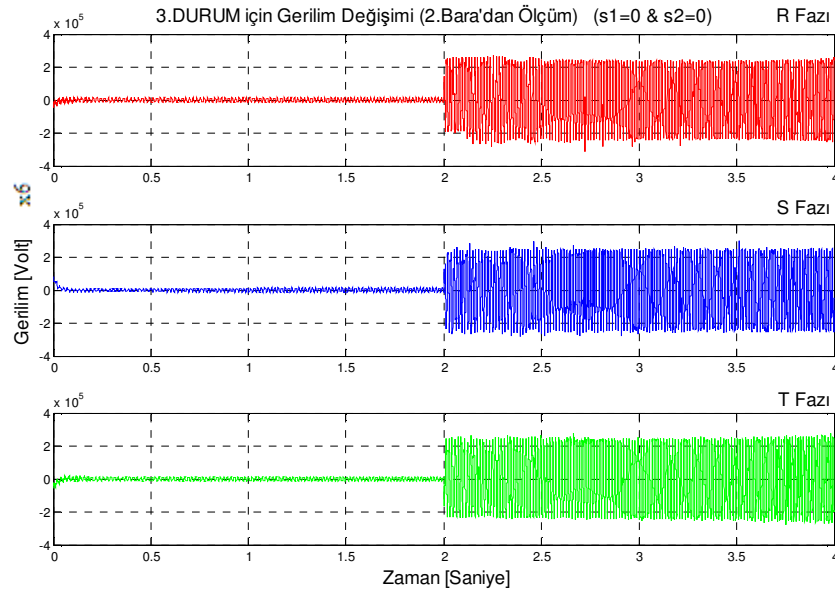
IV.2.3. Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Aynı Anda Devre Dışı Kalması (3. DURUM)

Şekil IV.14’de Oymapınar ve Varsak yük gurubu 2. saniyede aynı anda devre dışı bırakıldığı model (3.Durum) gösterilmiştir. Oymapınar ve Varsak yük gurubunun devre dışı bırakılmasıyla sistemde meydana gelebilecek ferrezonans olayları hem 2, hem de 3 numaralı bara üzerinden ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil IV.15’de (3.durumda) 2. bara’da meydana gelen gerilim-zaman grafiği, Şekil IV.16’de ise (3.durumda) 2. bara üzerinde bulunan TR2 de meydana gelen akım-zaman grafiği gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde önceki iki duruma benzer grafikler olduğu görülmektedir.

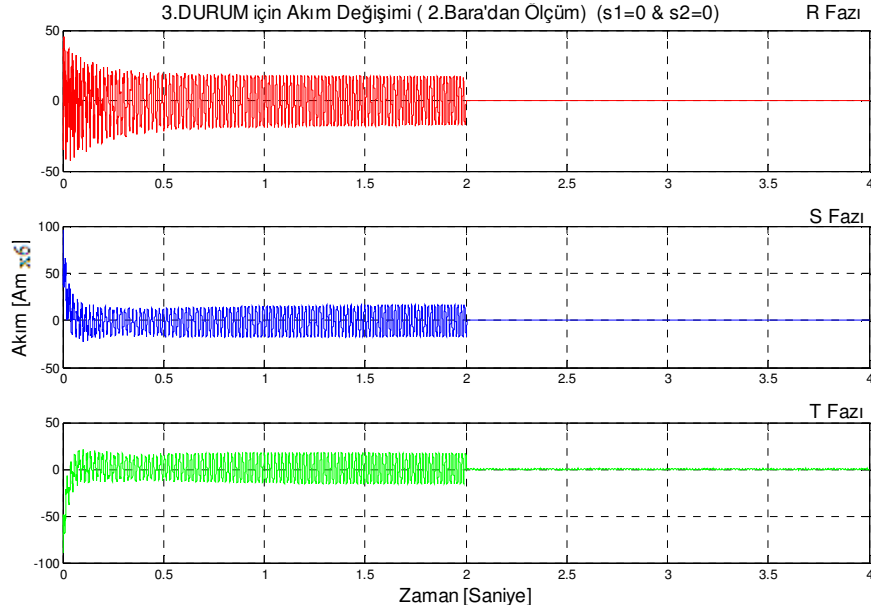


Şekil IV.14 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasına Ait Model (3. DURUM).

Şekil IV.14’de S_1 ve S_2 anahtarı aynı anda açılarak her iki yük gurubunu da sistemden ayırmaktadır. 3.durum olarak belirlenen Oymapınar ve Varsak yük gurubunun aynı anda devreden çıkması durumunda akım ve gerilim analizleri aşağıdaki Şekil IV.15 ve Şekil IV.16’da verilmiştir. Analizlerde önce TR2’den ölçümler alınarak incelenmiş, ardından üçüncü baradan ölçümler alınarak ferreazonans durum incelenmiştir. Grafiklerden görüleceği üzere ferreazonans etkiler gerilim değişimi bu senaryo ile gerçekleşmektedir. Burada aynı anda her iki anahtarda açılarak yük guruplarının birbirleri üzerindeki etkileşimi gözlenmek istenmiştir.

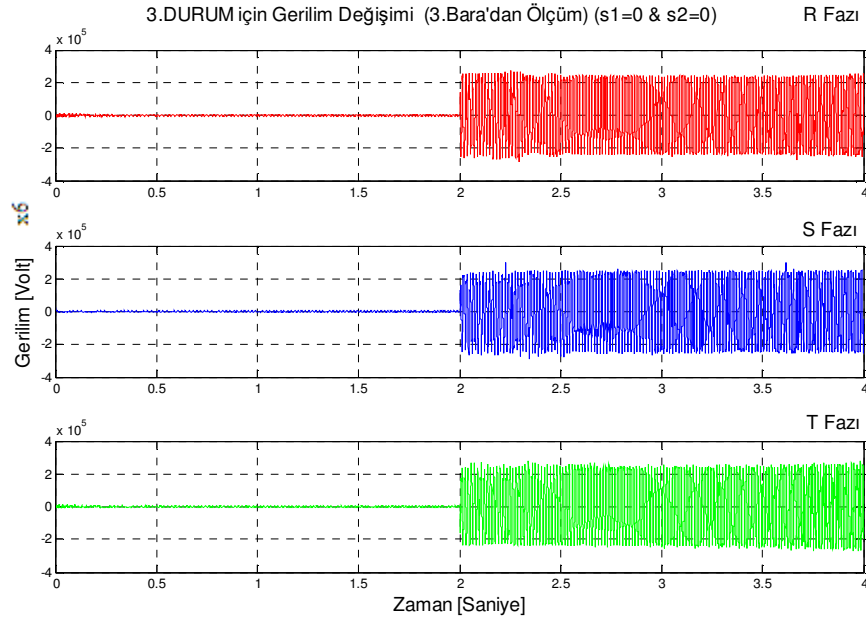


Şekil IV.15 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (3.Durum) Sonucu Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.

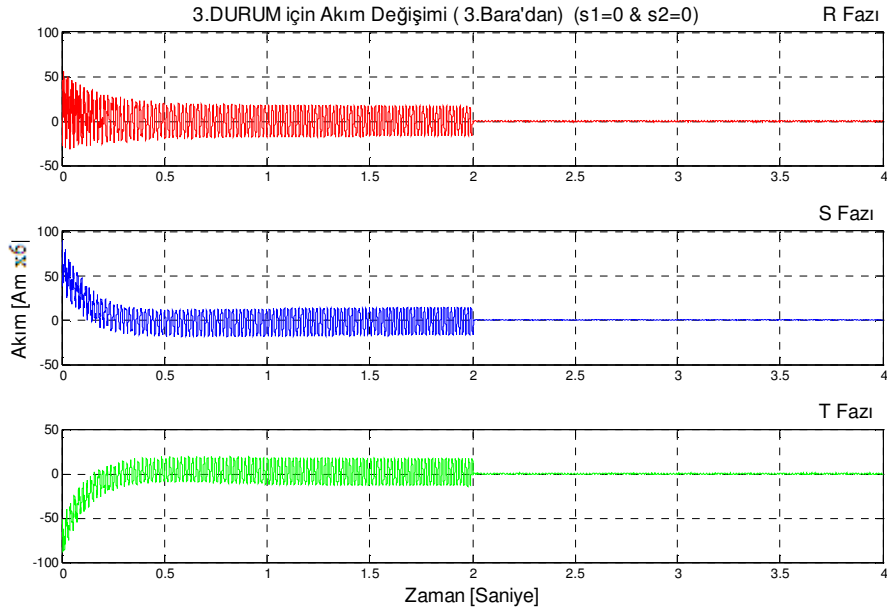


Şekil IV.16 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla
2. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

Şekil IV.15 ile Şekil IV.17 gerilim grafikleri gerilim değeri ve dalga formu ile birbirine çok benzemekle beraber aralarındaki çok küçük genlik farklılıklarının oluşmasının nedeni farklı yüklerden kaynaklanmaktadır.



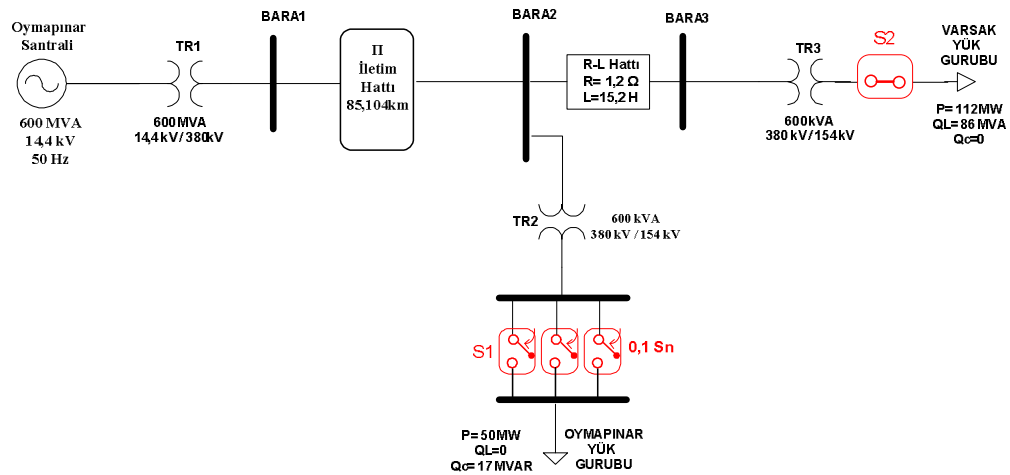
Şekil IV.17 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada
Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.



Şekil IV.18 Oymapınar ve Varsak Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

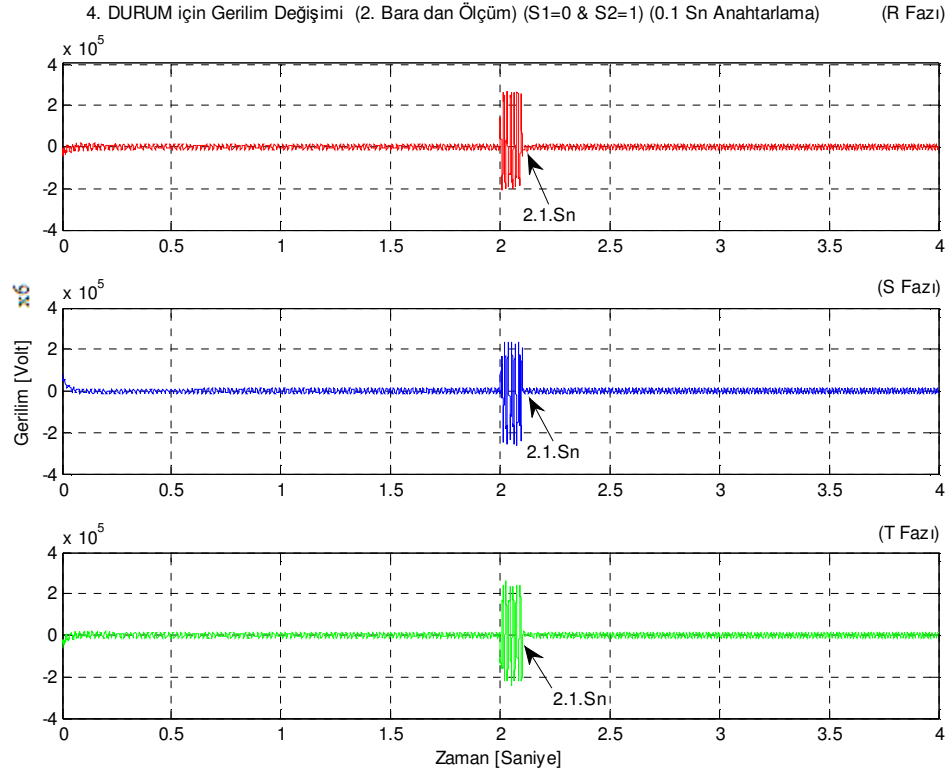
IV.2.4. Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 saniye İçin Devre Dışı Kalması (4.DURUM)

Seydişehir-Oymapınar iletim hattının 50MW, 17MVAR'lık Oymapınar yük gurubu kesiciler vasıtasıyla devreden çıkarılması simülasyonu Şekil IV.19'da gösterilmiştir.



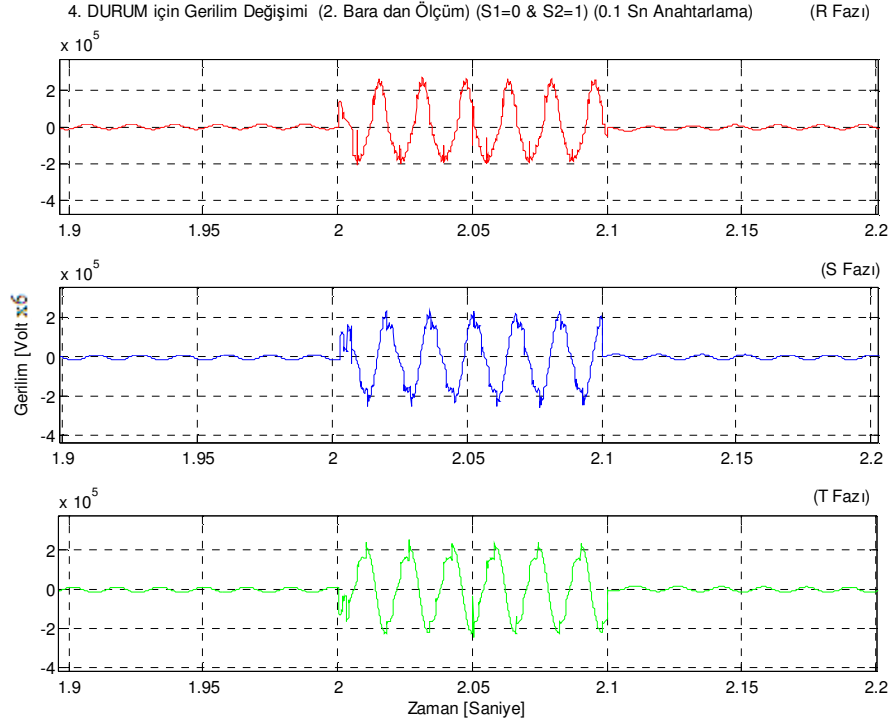
Şekil IV.19 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye İçin Devre Dışı Kalmasına Ait Model (4.Durum).

Şekil IV.19’da İletim hattında Oymapınar yük gurubu 2. saniyeden 2.1 saniye ye kadar (0.1sn) devre dışı bırakıldığı model gösterilmiştir. 4.Durum olarak isimlendirilen simülasyonda Oymapınar yük gurubunun kısa bir süre devre dışı kalıp tekrar devre girmesi sonucu oluşacak davranışı incelenerek yorumlanmıştır. Yapılan simülasyon sonucunda sadece yük bölgesi gerilimlerinde ferrerezonans etki görülmektedir.



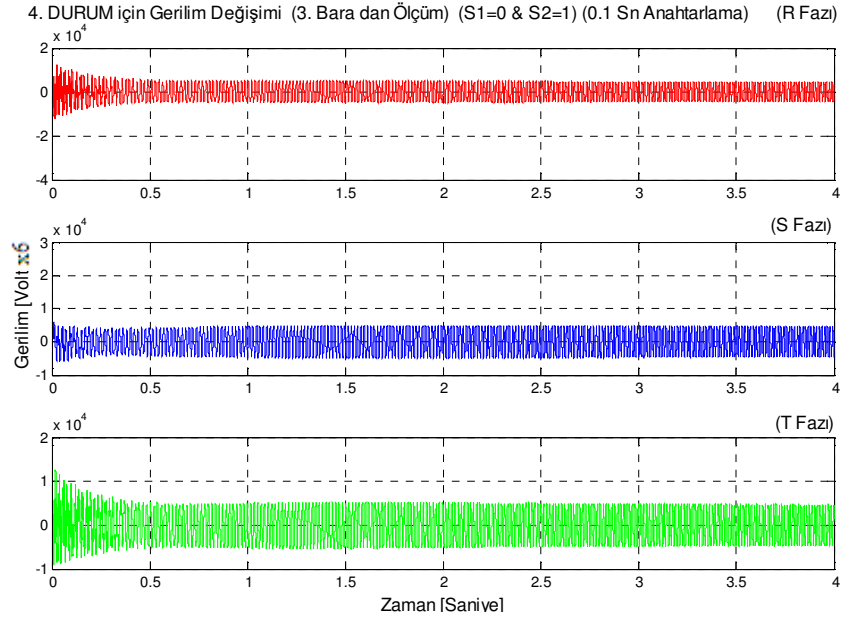
Şekil IV.20 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla (4.Durum) 2.Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.

Simülasyon sonucunda Oymapınar yük hattı üzerindeki gerilimlere ait grafik Şekil IV.20 ve IV.21’de gösterilmiştir. Grafikte 2. saniyede kesiciler tarafından kesilen hattın tekrar 2.1’nci saniyede tekrar devreye alındığı görülebilir. Devrenin açılması anında gerilim aniden 12×10^5 volt’a kadar çıkmaktadır.



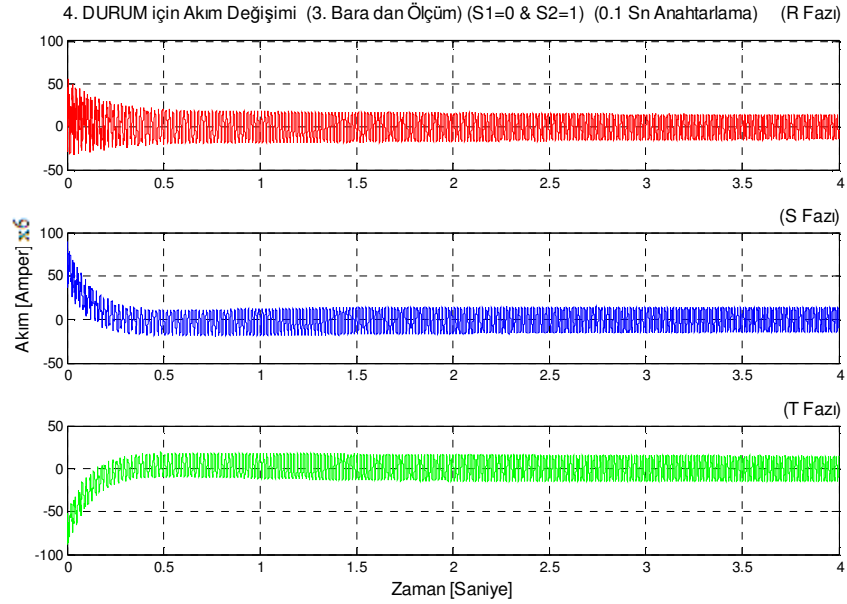
Şekil IV.21 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla Oluşan Gerilim-Zaman Ayrıntılı Grafiği.

Şekil IV.22’de ise 3. bara’dan elde edilen gerilim-zaman grafiği gösterilmiştir. Şekil IV.22’deki grafik incelendiğinde ferrerezonans etkiler görülmemektedir. Bu sonuç diğer durumlarda farklı baralardan elde edilen ölçümlerle benzer sonuçları göstermektedir. Dördüncü durum için her üç faza ait detaylı grafik EK1-Şekil 5’de verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde; yükün, hattın uzunluğunun ve anahtarlamanın etkisiyle oluşan ferrerezonans olayının dalga formu temel form şeklinde olmasına rağmen, bu temel form üzerinde de harmoniklerin yer aldığı da görülmektedir. Ferrerezonans etkiler sonucu oluşan harmoniklerin dalga formları hattın uzunluğu, yükün kapasitif yada indüktif olması ile yakından ilişkilidir. Bu tezde yapılan modellemelerden de görüleceği gibi yükler indüktif özellik göstermektedir ve şebeke üzerindeki yükler sistemin maksimum yük çektiği an dikkate alınarak modellenmiştir.

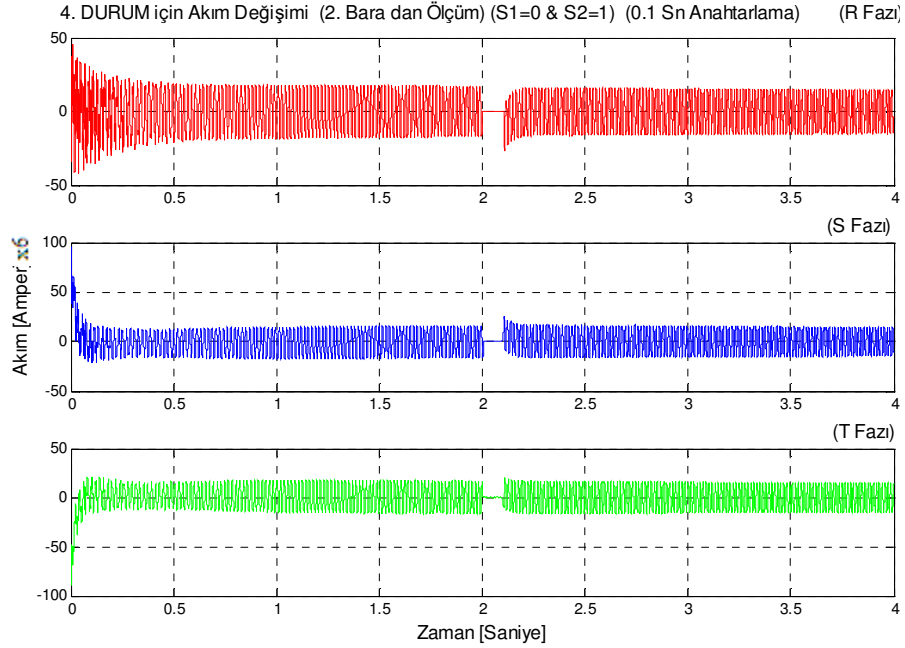


Şekil IV.22 Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalmasıyla 3 Barada Oluşan Gerilim-Zaman Grafiği.

Akım değişimlerine ait grafikler Şekil IV.23 ve IV.24’de her iki bara içinde ayrı ayrı verilmiştir. Burada yüklerin devreden çıkışı ve tekrar devreye girişleri net bir şekilde görüldüğü gibi sistemin akımında anahtarın kapanması ile küçük kaymalar dışında herhangi bir değişim gözlemlenmemiştir.



Şekil IV.23 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla 3. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

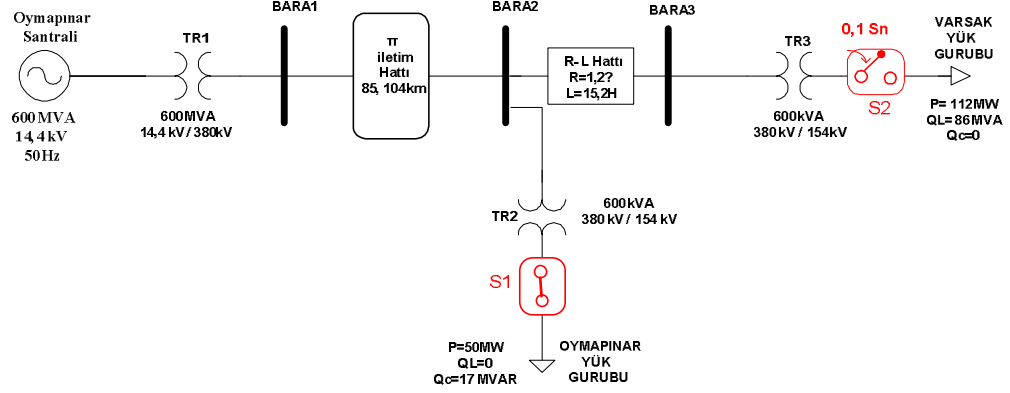


Şekil IV.24 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla 2. Barada Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

Diğer baralar da incelendiğinde her bara da oluşan anahtarlamanın etkisi akım ölçümlerinde görülmektedir, ancak gerilim ölçümlerinde bu anahtarlamaların etkisi diğer baraları etkilemediği gözlemlenmiştir. Yine bu ferrezonans etki transformatörleri aşmadan yükler ile transformatör arasında kalmıştır. Özetle ferrezonans etki sadece gerilim değişimleri üzerinde görülmüştür ki literatürdeki çalışmalardan da bilindiği üzere indüktif özellik gösteren yüklerde ve yaklaşık bizim sistemimiz uzunluğundaki iletim hatlarında ferrezonans etkilerin gerilim değişimleri üzerinde etkili olduğu yönündedir.

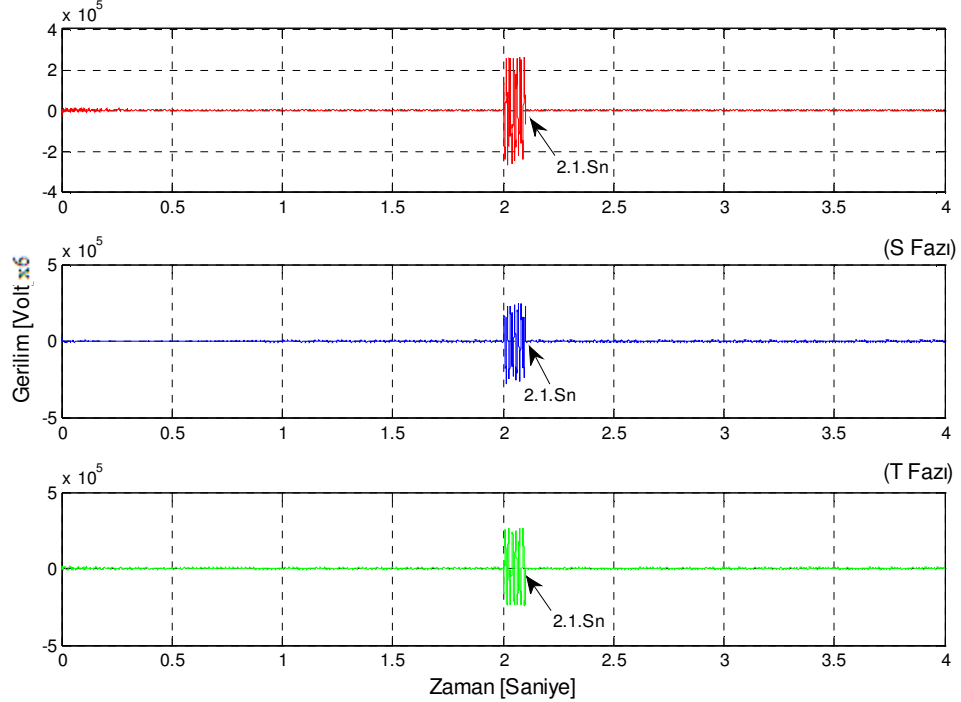
IV.2.5. Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Kesilmesi (5.DURUM)

Beşinci Durumda Şekil IV.25’de Seydişehir-Oymapınar İletim Hattında, Oymapınar yük gurubu kesiciler vasıtasıyla 2’nci saniyeden 2.1’nci saniye ye kadar devreden çıkarılıp tekrar devreye alınmıştır. Sistemin 0.1 saniye için anahtarlamaıyla sistemde oluşabilecek ferrezonans olayları incelenmiştir.



Şekil IV.25 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye için Devre Dışı Kalmasına Ait (5.Durum) Modeli.

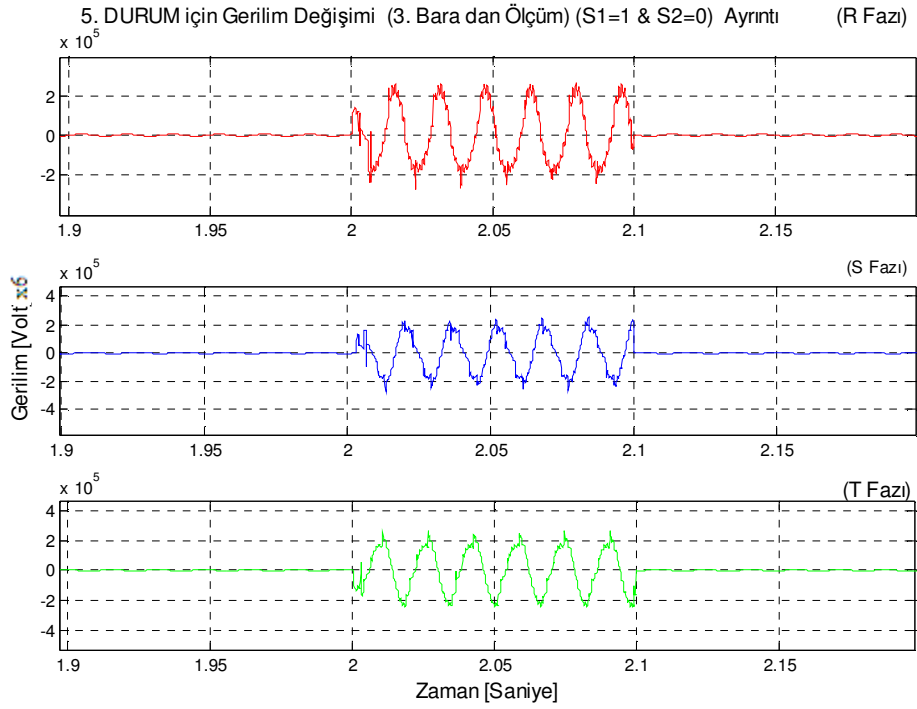
5. DURUM için Gerilim Değişimi (3. Bara dan Ölçüm) ($S1=1$ & $S2=0$) (0.1 Sn Anahtarlama) (R Fazı)



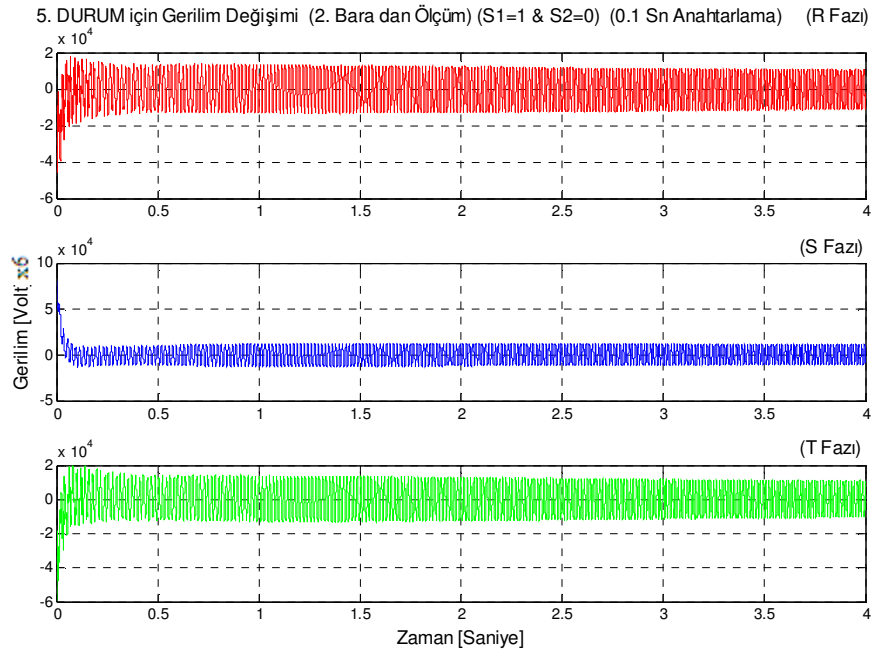
Şekil IV.26 Beşinci Durumda 2. Bara'da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği.

Yapılan benzetimde (simülasyonunda) Oymapınar yük gurubu 0.1 saniye devre dışı bırakıldığında (anahtarlandığında) gerilim dalga formunda ferreazonans olayı etkisi görülmüştür. Akım dalga formunda ise ferreazonans etki gözlemlenmemiştir. Şekil IV.26'da 5. durum için gerilim-zaman grafiği gösterilmiştir. 2 ve 2.1'nci

saniyeler arasında ferrezonans etki açık bir şekilde görülmektedir. Şekil IV.27’de bu gerim zaman grafiği ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

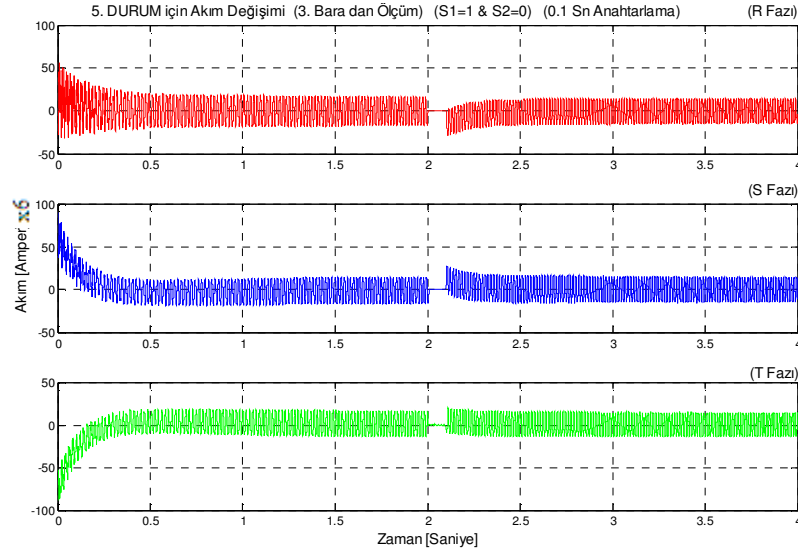


Şekil IV.27 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)
Sonucunda 3. Bara’da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği Ayrıntısı.

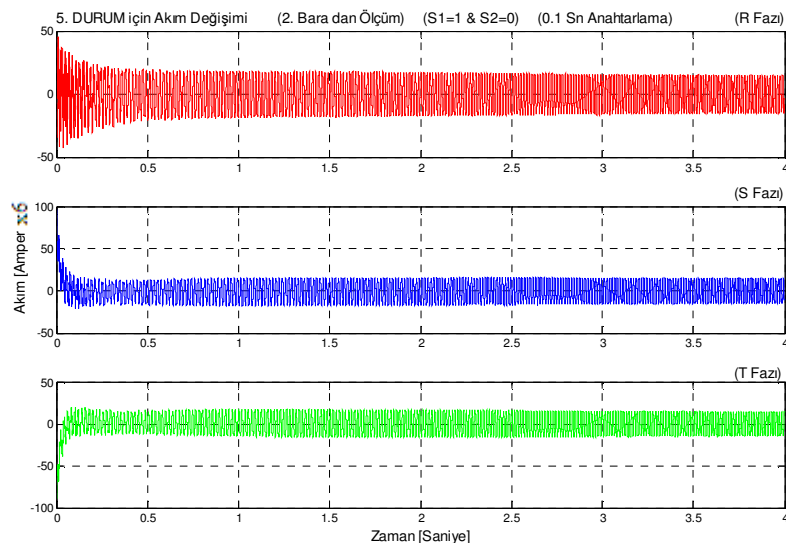


Şekil IV.28 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)
Sonucunda 2. Bara’da Meydana Gelen Gerilim-Zaman Grafiği.

Ferrezonans etki sadece Oymapınar yük gurubunun bulunduğu hatta meydana gelirken diğler hatların gerilim değlerlerinde önemli değışimler olmamıştır. Ancak diğler hatlar üzerinde akım değlerlerinde bozulmalar meydana gelmektedir. 3 numaralı bara üzerindeki akım değleri Şekil IV.29’da gösterilmiştir. Grafik incelenecek olursa her üç fazda da anahtarlanmanın etkisi belirgin bir şekilde görölmesine rağmen ferrezonans etki oluşmamıştır. Şekil IV.30’daki 2 numaralı baradan alınan değler de değışim gözlenmemiştir.



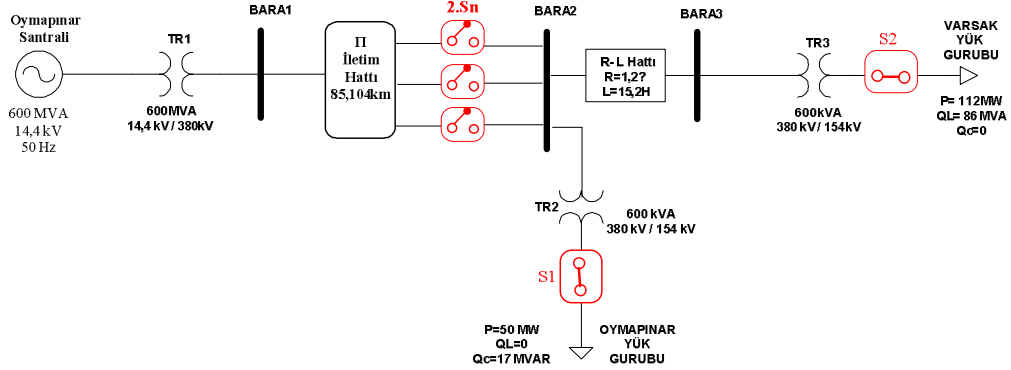
Şekil IV.29 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)
Sonucunda 2.Bara’da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.



Şekil IV.30 Varsak Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (5.Durum)
Sonucunda 3.Baradaki Akım-Zaman Grafiği.

IV.2.6. Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin Devreyi Kesmesi (6. DURUM)

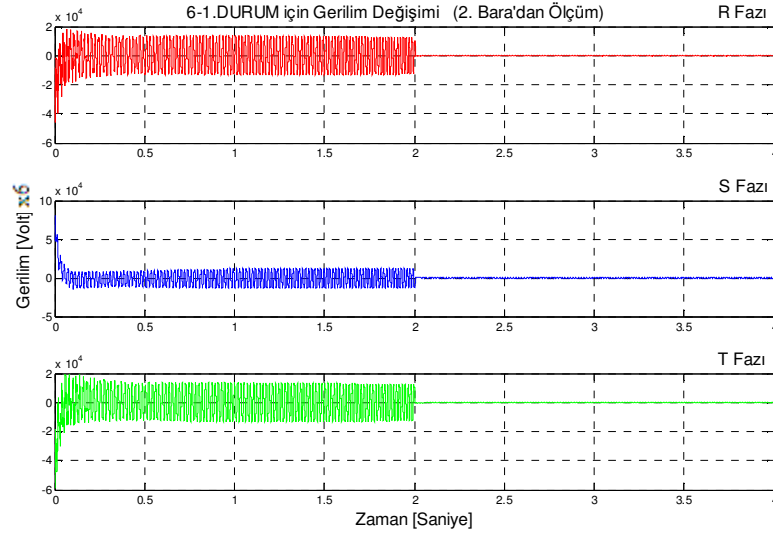
Altıncı durumda 85.104km'lik π hattının üzerinde bulunan kesiciler vasıtasıyla devrenin 2'nci saniyede kesilmesi sonucunda meydana gelen değişimler incelenmiştir. Yapılan bu benzetim (simülasyon) ile her iki yük gurubu da 2'nci saniyeden itibaren hattın kesilmesi suretiyle devre dışı bırakılmıştır.



Şekil IV.31 Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)
Devre Modeli.

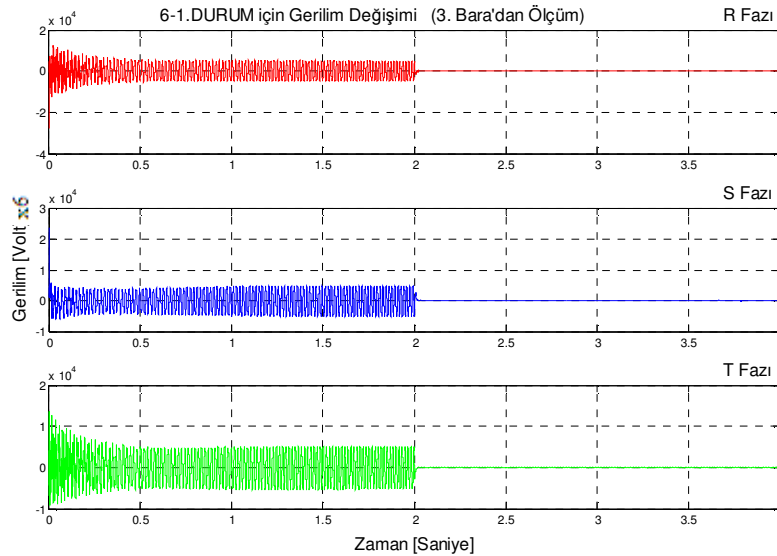
6.Durumda Şekil IV.31'de yapılan deney sonucunda kesiciler π iletim hattının üzerindeki kesiciler üç fazı aynı anda 2. saniyede devre dışı bıraktıklarında iletim hattı üzerinde herhangi bir ferrezonans olayı etkisi görülmemiştir. Literatürde enerji iletim hatlarında meydana gelen kopmalar sonucunda bazı iletim hatlarında ferrezonans olayı etkilerinin olduğu bilinmesine rağmen, Seydişehir-Oymapınar iletim hattında π iletim hattı üzerinde hat kesilmeleri benzetimleri sonucunda hem akım değişimlerinde hem de gerilim değişimlerinde ferrezonans etki görülmemiştir. Bu model oluşturulan senaryo sonucunda 2. Bara'dan alınan gerilim ölçümleri şekil IV.32'de gösterilmiştir. Şekil IV.32'de anahtarların açılması ile sistemde ferrezonans olayı meydana gelmemiş ve 2. saniyeden itibaren gerilim sıfır değerini almıştır.

Gerçekte bir sistemin ferrezonans olayına karşı dirençli olması o sistemin iyi tasarlanmış ve gerekli güvenlik önlemlerinin alınmış olduğunu göstermektedir. Bu çalışma ile aynı zamanda bu iletim hattının ferrezonans güvenlik testleri de yapılmış olmaktadır.



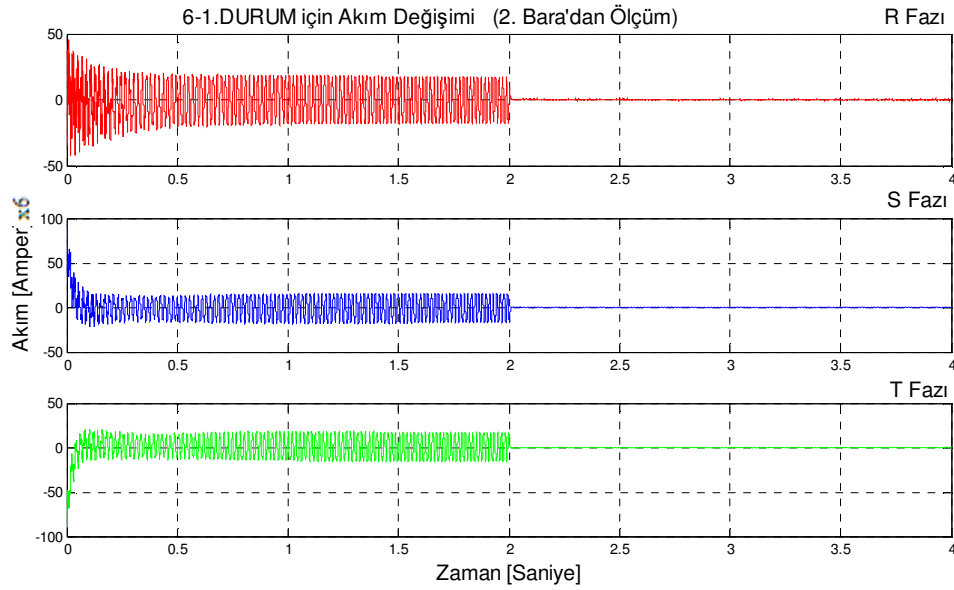
Şekil IV.32 Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)
Sonucu 2.Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.

Seydişehir-Oymapınar iletim hattında Pi iletim hattı üzerindeki kesicilerin devreyi açması (6.Durum) sonucunda 2. bara'dan alınan sonuçlar ile 3. baradan alınan sonuçlar benzerlik göstermektedir. Her iki baranında bağlı olduğu iletim hatları kesildiğinden benzer sonuçların elde edilmesi beklenen bir sonuçtur. Yapılan model ile Seydişehir-Oymapınar iletim hattının π hattı üzerindeki kopmalarda ferrezonans olayına karşı güvenli olduğu söylenebilir.



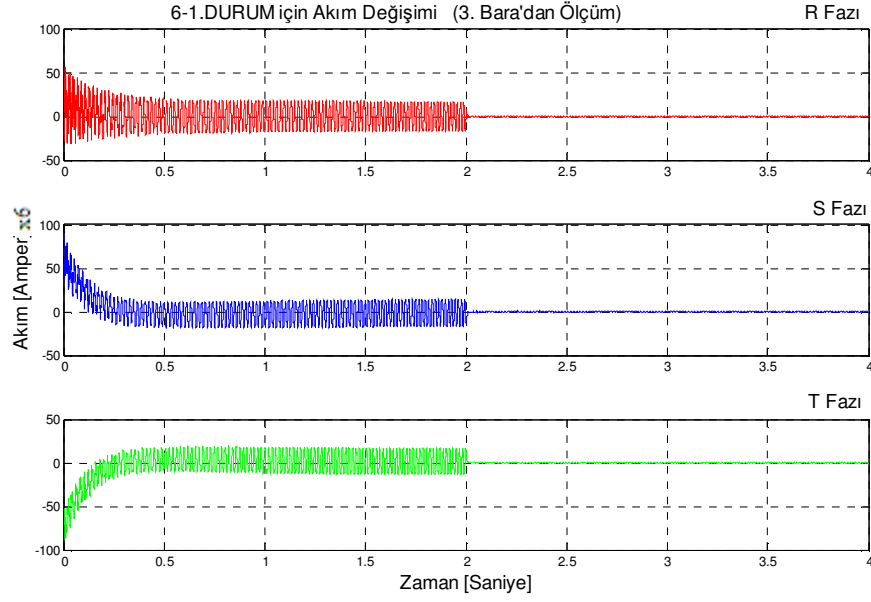
Şekil IV.33 Pi Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum)
Sonucu 3.Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.

Modeldeki p_i iletim hattı üzerindeki kesicilerin hattı kesmesi (6.Durum) senaryosunda, 3. baradan alınan sonuçlar diğer baradan alınan sonuçlar ile benzerlik göstermektedir. Ferrorezonans olayının özelliği gereği baralar arasında transformatörler ile izole edilmiş olan kapalı sistemlerde hatların kopması sonucu yada çeşitli sebepler ile anahtarlama etkisi meydana gelmesiyle ferrorezonans olayı gerçekleşmeyecektir. Bu sonuç 6. durumlardaki her baradan alınan akım-zaman ve gerilim-zaman grafiklerinden görülmektedir.



Şekil IV.34 P_i İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 2.Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum) Sonucu 2.Bara'da Oluşan Akım - Zaman Grafiği.

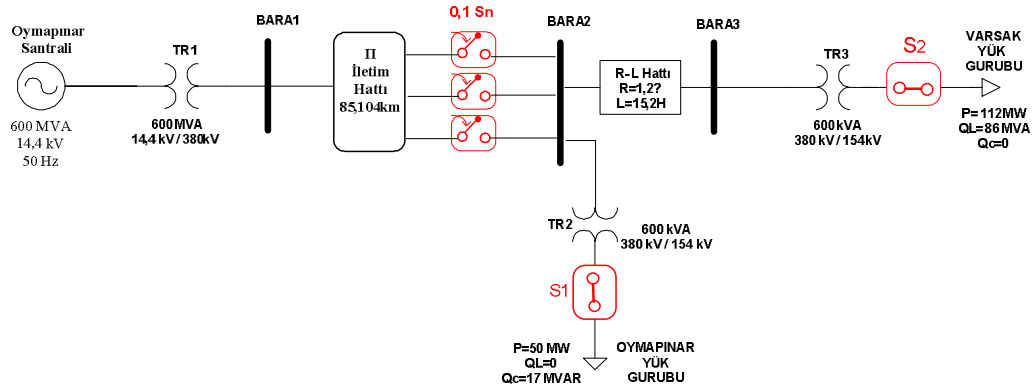
Altıncı duruma ait tüm grafikler incelendiğinde bu senaryo ile akım ve gerilim Grafikleri incelendiğinde sistem tamamen kesintiye uğrayarak herhangi bir ferrorezonans olayı görülmemiştir. Bu durum, 6. duruma ait tüm grafiklerde açıkça görülmektedir ve sistem bu senaryodakine benzer bir sebeple kopmalara karşı ferrorezonans oluşturmayacak güvenlidir.



Şekil IV.35 Pi İletim Hattı Üzerindeki Kescicilerin 2. Saniyede Devreyi Kesmesi (6.Durum) Sonucunda 3.Bara'da Oluşan Akım - Zaman Grafiği.

IV.2.7. Pi Hattı Sonundaki Kescicilerin 0.1 Saniye için Devreyi Açması (7.DURUM)

Şekil IV.36'da pi (π) iletim hattı sonunda 3 fazın aynı anda 0.1 saniye kesiciler tarafından kesilip tekrar açılması (anahtarlanması) (7.Durum) modellenmiştir.

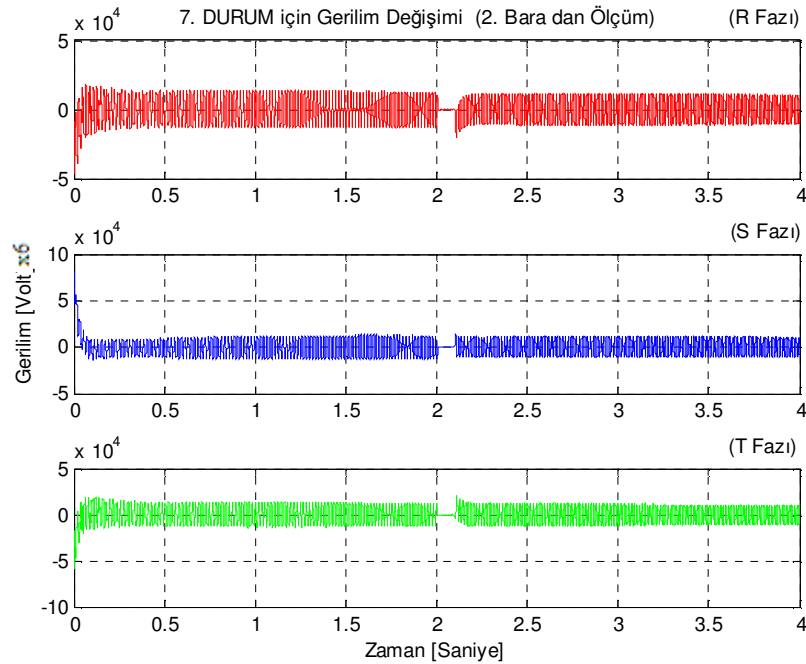


Şekil IV.36 Pi İletim Hattının 0.1 Saniye Anahtarlanması (7.Durum) için Devre Modeli.

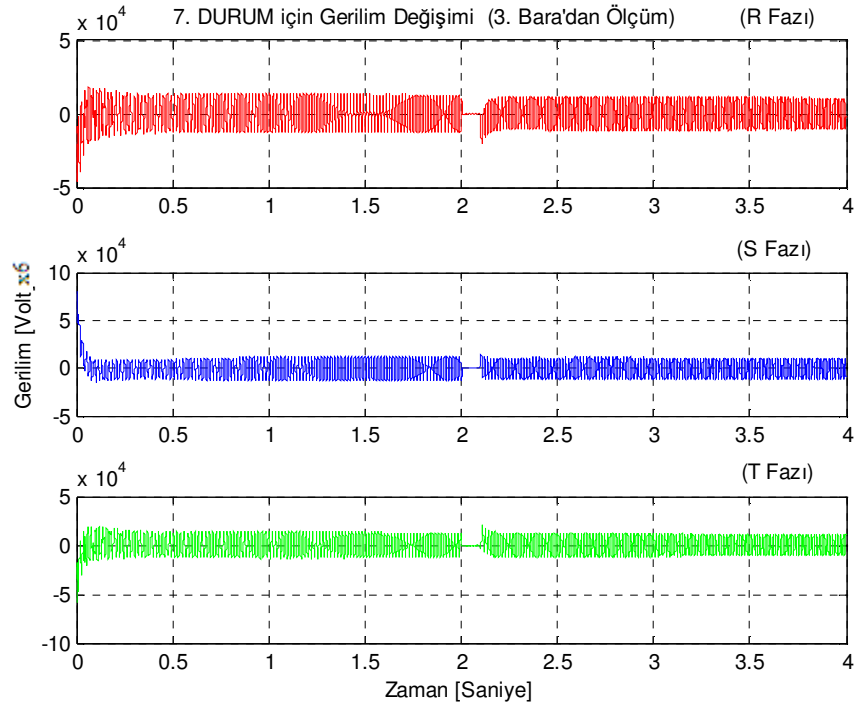
Anahtarlama sonucu 3 numaralı baranın gerilim değerleri incelenmiştir. Gerek gerilim formundaki değişimlerinde gerekse akım formundaki değişimlerinde ferrezonans olayı etkisi ile karşılaşılmamıştır.

Yedinci durumun modellenmesi ve analizi aşamasında anahtarların farklı zaman aralıklarında (Δt) kombinasyonları denenerek de deneyler yapılmıştır, örneğin anahtarların üçü aynı anda 2'nci saniyeden sonra açılmıştır herhangi bir ferrezonans etki görülmemiştir. Yine anahtarların sırayla sadece 1'ncisi ve ikisi birden açılmış önce sistem iki hattın, sonra ise tek hattın beslenmesi anı incelendiğinde yine ferrezonans etkilere rastlanmamıştır. Bu anahtarların konumları ilk seferde sistemi diğer hatlardan beslenmesini sağlamış iki anahtarın açılmasında ise bağlı hattın gerilimi yükselmiştir ancak bu konumlardaki davranışlar yine ferrezonans etkileri oluşturmamıştır.

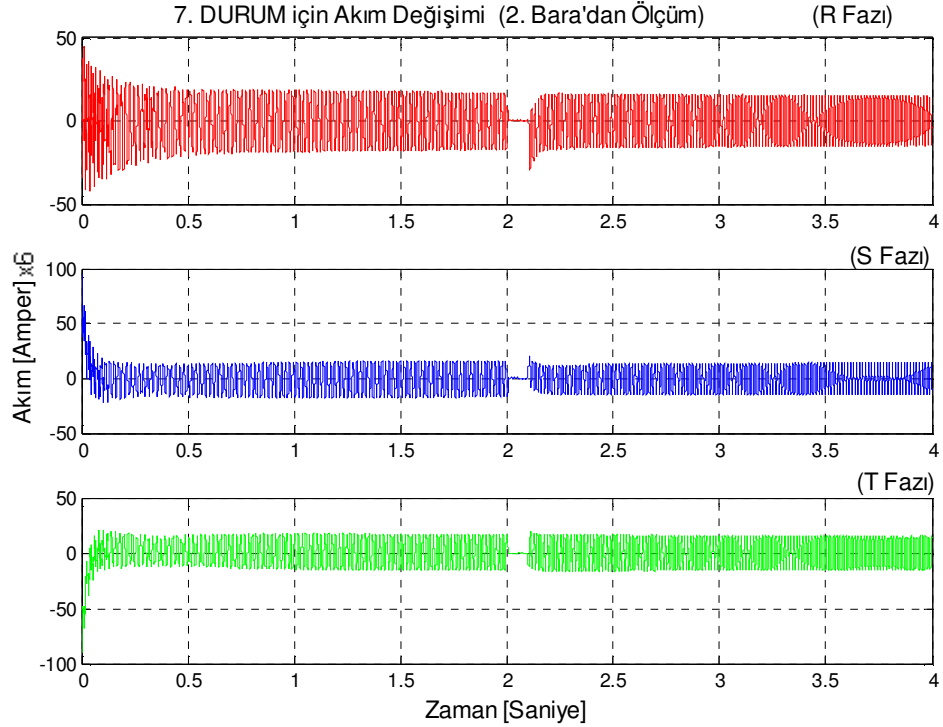
Bu model incelenecek olursa iletim hatlarının başında meydana gelen bu tür bir anahtarlama yada anahtarlama benzeri oluşabilecek arıza sonucunda ferrezonans etkiler oluşmamıştır. Bu ferrezonans etkiler hattın uzunluğuna sistemin yük özelliklerine ve transformatörlerin özelliklerine göre değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışma ile, Seydişehir-Oymapınar iletim hattının planlamasında ferrezonans olayı gibi istenmeyen sonuçların oluşmasını önlemek için devre tasarımında ve uygulamasında bu hat için güvenlik önlemlerinin alındığı söylenebilir. Bu tür önlemlerin alınması çok önemlidir aksi halde oluşabilecek ferrezonans olayı etkilerinin sistem üzerinde çok büyük arızalara yol açabileceği bir gerçektir.



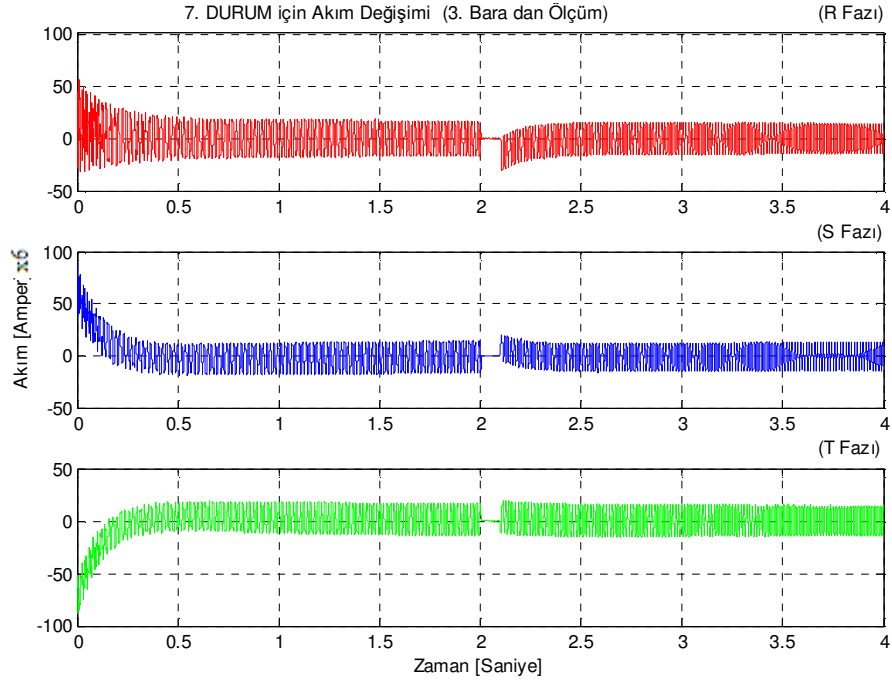
Şekil IV.37 Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlama (7.Durum) Sonucu 2. Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.



Şekil IV.38 Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlama (7.Durum) Sonucu 3. Bara'da Oluşan Gerilim - Zaman Grafiği.



Şekil IV.39 Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlama (7.Durum) Sonucu 2. Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.



Şekil IV.40 Pi İletim Hattı Üzerindeki Kesicilerin 0.1 Saniye Anahtarlanması
(7.Durum) Sonucu 3. Bara'da Oluşan Akım-Zaman Grafiği.

Bu çalışmalar göz önüne alındığında bu tezdeki oluşturulan senaryolar ile literatürdeki çalışmalar hem akım formundaki analizlerinde hem de gerilim formundaki analizlerinde benzerlik göstermektedir. Bu tezde Batı Anadolu iletim hattından Seydişehir-Oymapınar iletim hattı gerçek parametreler kullanılarak modeli oluşturulmuş 7 farklı senaryo ile ferrezonans analizleri yapılmıştır. Tezin bu bölümünde; incelenen bölgenin gerçeğe uygun olmasına dikkat edilerek simülasyonlar oluşturulmuştur. Anahtarların konumları (açık/kapalı) anlaşılır olması için devre modellerinde gösterilirken benzetim analizleri için MATLAB-Simulink'te kapalı konumdaki anahtarlar diferansiyel etkileri engellemek için kullanılmamıştır.

Gerçekleştirilen senaryoların özgünlüğü ile bu iletim hattında olası ferrezonans olaylarının önceden tahmini ve önlemlerin alınması açısından yapılan çalışma önem taşımaktadır. Ayrıca yapılan çalışma ile Seydişehir-Oymapınar hattının ferrezonans güvenlik testleri de yapılmış olmaktadır.

Yapılan çalışma ile oluşturulan 7 farklı ferrezonans senaryosu sonucunda elde edilen sonuçlar Tablo IV.2'de gösterilmiştir. Ayrıca her anahtarlama senaryosunun takip kolaylığı açısından hangi sayfada olduğunu gösteren tablo EK1-Tablo1'de verilmiştir.

Tablo IV.2 Modelde Uygulanan Durumlar (Senaryolar) Sonucu Oluşan
Ferrorezonans Tablosu.

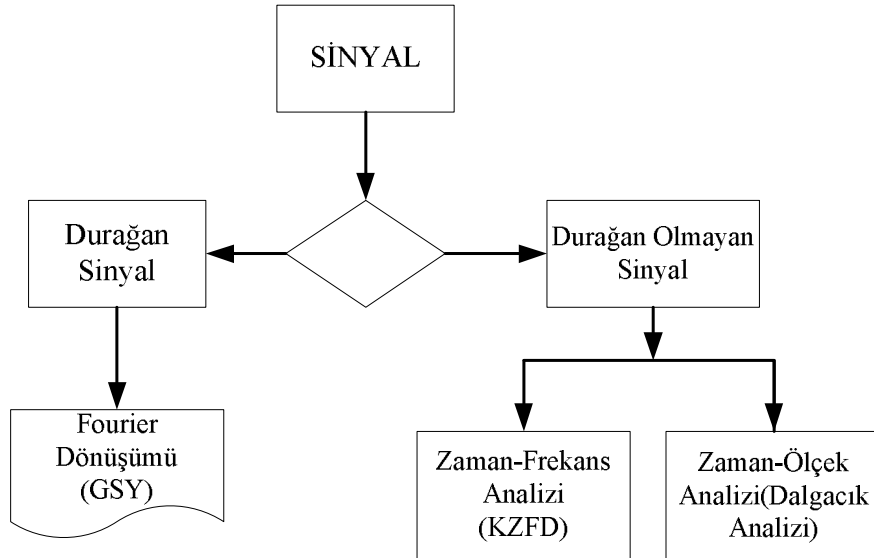
SENARYOLAR	Akım Formundaki Ferrorezonans	Gerilim Formundaki Ferrorezonans
1. Durum Varsak yük Gurubunun 2.saniyeden Sonra Sürekli Devre Dışı Kalması	-	✓
2. Durum Varsak yük Gurubunun 2.saniyeden Sonra Sürekli Devre Dışı Kalması	-	✓
3. Durum Varsak ve Oymapınar yük Gurubunun 2.saniyeden Sonra Sürekli Devre Dışı Kalması	-	✓
4. Durum Varsak yük Gurubuna Ait Anahtarların (S ₁) Sadece 0,1 saniye Açılıp Kapanması	-	✓
5. Durum Oymapınar Yük Gurubundaki Anahtarlarının (S ₁) Sadece 0,1 saniye Açılıp Kapanması	-	✓
6. Durum Pi Hattı Sonundaki 3 Fazın Anahtarlarının 2. saniyeden itibaren Devreyi kesmesi	-	-
7. Durum Oymapınar Yük Gurubundaki 3 Fazın Anahtarlarının Sadece 0.1 saniye Açılıp Kapanması	-	-

Tablo IV.2 incelendiğinde bütün durumlarda (senaryolarda) akım değişiminde ferrorezonans olayı etkisine rastlanmamıştır, bu durum literatürde de bu tip iletim hatlarındaki çalışmalarla benzerlik taşımaktadır. Ferrorezonans etkiler 6 ve 7'nci senaryo durumları hariç, diğer senaryo durumlarda oluşmuştur bu da 380kV'luk hatlarda yapılan çalışmalarla paralellik göstermektedir. Yine yapılan çalışmalar incelendiğinde, tez çalışmasında rastlanmayan ancak literatürdeki bazı çalışmalarda gözlemlenmiş olan 6 ve 7'nci senaryo durumda ve hatların biri ya da ikisinin kopması sonucunda da ferrorezonans olayı etkileri görülmektedir. Bunun sebebi hattın uzunluğu ve yüklerin özelliklerinden kaynaklanmakta ayrıca iletim hattının doğru projelendirilmemesinden de ileri gelebilmektedir. İletim hatlarında özellikle yüklerin devre dışı kalması veya yüklerdeki ani azalma sonucu oluşan ferrorezonans olaylarında ferrorezonans gerilimler, nominal gerilimin (1.5-1.8) katı olurken, özellikle 500 km'den uzun iletim hatlarında ferrorezonans gerilimler nominal gerilimin (2-2.5) katı değerlerini alabilmektedir[37]. Bu nedenle, iletim hatlarının projelendirilmesi esnasında; iletim hatlarının uzunluklarının iyi hesaplanması, şalt tesisleri, baraların, transformatörlerin yerlerinin doğru tespit edilmesi, ayrıca uygun izolasyonun seçilmesi önem kazanmaktadır.

BÖLÜM V

FERROREZONANS OLAYININ SPEKTRAL ANALİZİ VE ÖZELLİK ÇIKARIMI

Bu bölümde Seydişehir-Oymapınar iletim hattında benzetiminde meydana gelen ferreazonans olayı sonunda elde edilen verinin spektral analizi yapılarak özelliği belirlenmiştir. Yapılan analizle ferreazonans öncesi, ferreazonans bölgesi ve her iki durumu da kapsayan olayların GSY'si (Power Spectrum Density (PSD)-Güç Spektrum Yoğunluğu) ayrı ayrı incelenmiştir. Güç spektrum yoğunluğu grafikleri ile ferreazonans öncesi ve ferreazonans bölgesinin belirleyici yönleri vurgulanmıştır. Bu belirleyici durumlar tüm datanın yer aldığı sinyal üzerinde de fark edilir yönleriyle incelenmiştir.

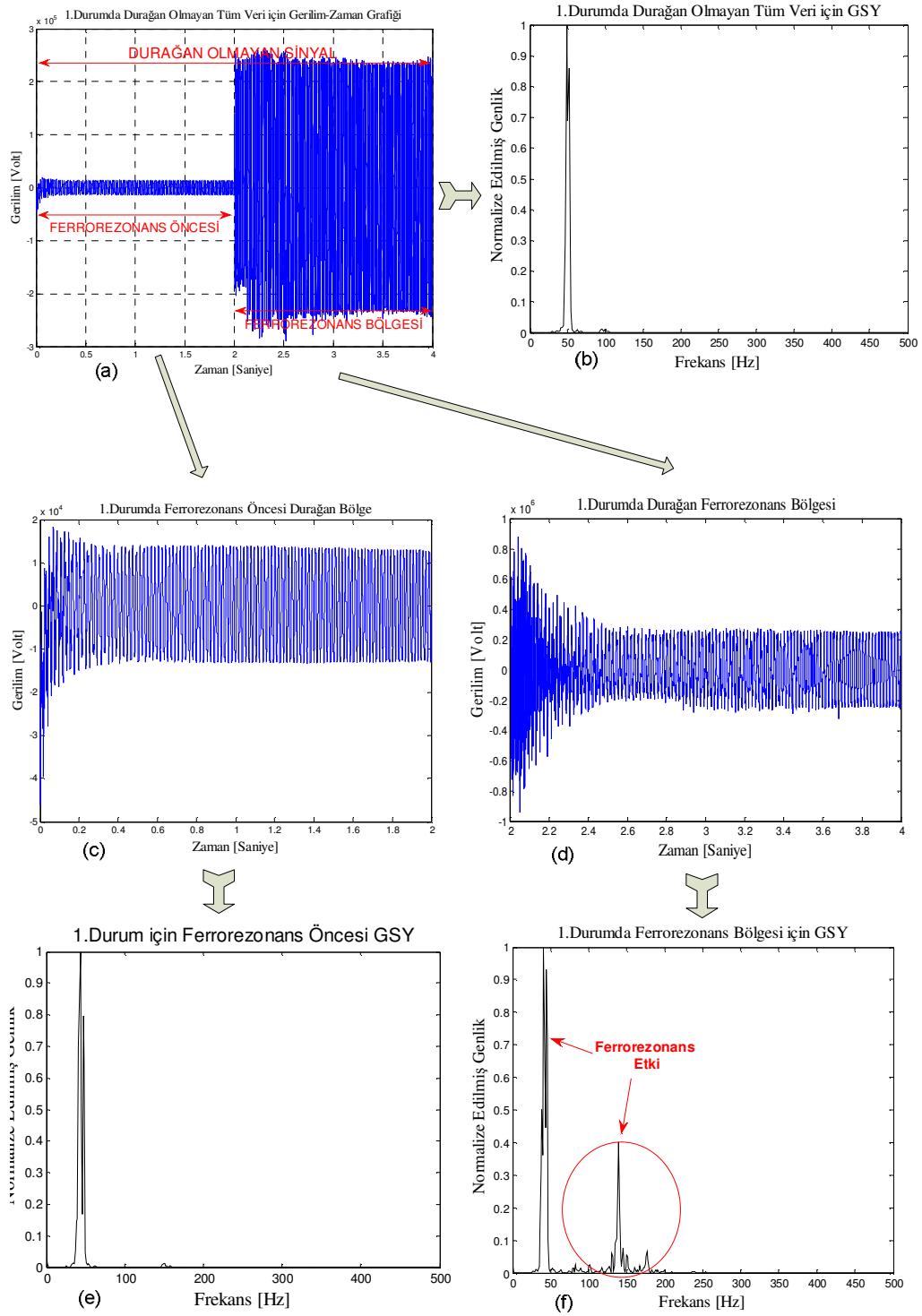


Şekil V.1 Sinyal Analizi Yöntemlerinin Uygulaması.

V.1. GÜÇ SPEKTRUMU YOĞUNLUKLARININ DEĞİŞİMİ

Güç spektrum yoğunluğu durağan sinyaller üzerinde analiz açısından bilgi (enformasyon) içermez. Ancak durağan olmayan işaretlerin parçalanarak GSY'lerinin incelenmesi, sinyalin karakterize edilmesi bakımından doğru sonuç vermektedir. Bu nedenle tüm veri için verilen ferreazonans sinyali parçalanarak iki tane durağan sinyal şeklinde göz önüne alınıp sıra ile GSY'leri incelenmiştir.

Şekil V.2(a)'da birinci durum olarak bahsedilen senaryonun gerilim-zaman grafiği verilmiştir. Bu grafik durağan olmayan bir sinyal olarak tüm veriyi içermektedir ve hem ferreazonans öncesi ilk 2 saniyeyi hem de ferreazonans olayının gerçekleştirdiği 2-4 saniye arasındaki verileri kapsamaktadır. Şekil V.2(b)'de ise durağan olmayan Şekil V.2(a)'daki sinyalin GSY grafiği verilmiştir. Bu grafik durağan olmayan tüm veriyi içerdiğinden çok fazla bilgi içermemektedir. Ancak Şekil IV.2(a)'daki sinyal; ferreazonans öncesi bölüm ve ferreazonans bölgesi olarak iki kısma ayrılarak incelenecek olursa buradaki işaretler artık durağan olduklarından, bu işaretlerin GSY'leri incelendiğinde sinyal hakkında karakterize edici bilgiler edinilebilir. Bu doğrultuda Şekil V.2(a)'daki sinyal Şekil V.2(c) ve Şekil V.2(d)'de gösterilen iki durağan parçaya ayrılarak incelenmiştir. Şekil V.2'de gösterildiği gibi (e) ferreazonans öncesi GSY'yi, (f) de ferreazonans olayının olduğu GSY'yi göstermektedir. (e) grafiği incelendiğinde 50Hz temel frekans üzerinde bir çatallanma olduğu görülecektir, bu çatallanmanın (c) grafiğinde de görüleceği gibi başlangıç koşullarından kaynaklandığı söylenebilir. Yine (f) şeklinde işaret edildiği gibi ferreazonans olayı neticesinde temel frekans 50 Hz dışında 100-200 Hz arasında yüksek genlikli frekansların oluştuğu ve bu yüksek genlikli frekansların ferreazonans kaynaklı olduğu söylenebilir.



Şekil V.2 Birinci Durum için GSY Analizi.

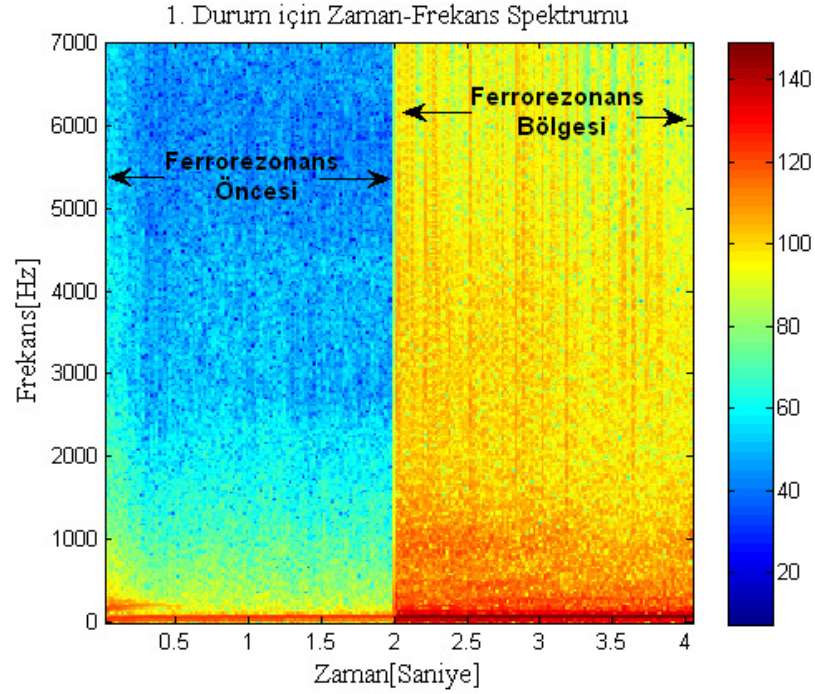
Birinci durumda ferromagnetic resonance bölgesi için GSY'si şekil V.3'de gösterilmiştir. 50 Hz temel frekansta meydana gelen çatallanma ve 150-250 Hz civarında kırmızı daire ile işaret edilen bölge ferromagnetic resonance etki sonucunda ortaya çıkan

harmoniklerdir. Şekil V.2(e) incelendiğinde ferreazonans öncesi bu etkilerin yok denecek kadar az olduğu söylenebilir. Ferreazonans öncesi bu etkiler, sistemin başlangıç koşullarından kaynaklanan etkilerdir. İlk senaryo durumundaki ferreazonans bölgesinin GSY'si, ikinci durumdaki ferreazonans öncesi GSY, üçüncü durumdaki ferreazonans bölgesindeki GSY ve beşinci durumdaki tüm veri için GSY grafikleri EK2'de verilmiştir.

V.2. ZAMAN-FREKANS DÜZLEMİNDE İNCELEME

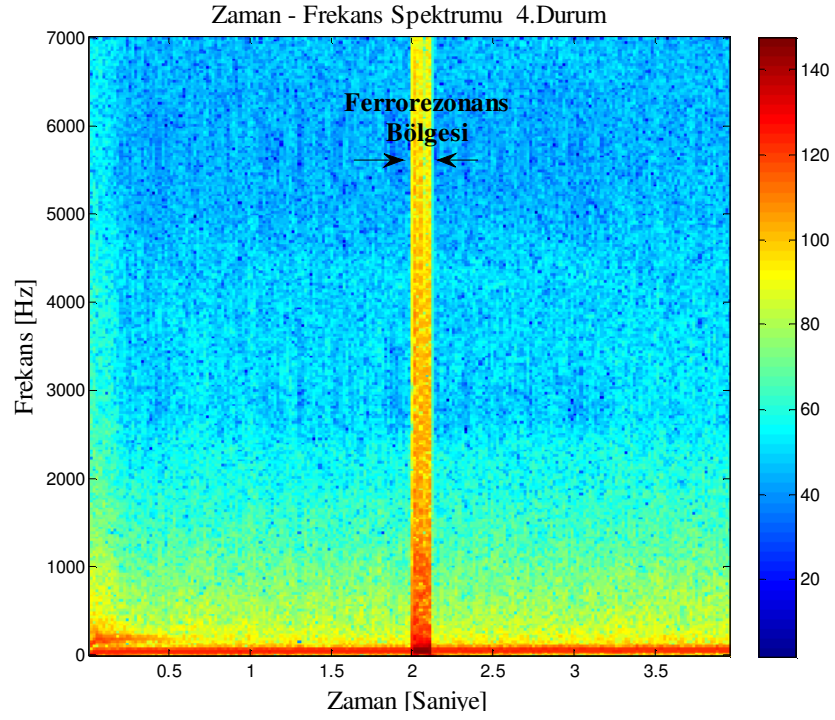
Zaman-frekans düzleminde inceleme ile güç sisteminde ferreazonans anında gelişen frekans–zaman değişimini incelemek mümkündür.

Şekil V.3'de birinci durum için zaman-frekans spektrumu gösterilmiştir. Dört saniyelik bir benzetim için 0-2 saniye arasında ferreazonanstan öncesi, 2-4 saniye arası ise ferreazonans bölgesi alan olarak, bu analizle açık olarak belirlenmektedir. Burada koyu kırmızı renkten mavi renge doğru yüksek frekanslı bölgeler daha düşük frekanslı bölgelere renk ölçeğinde gösterilmiştir. Koyu kırmızı renklerle gösterilen yüksek frekanslı bölgeler ferreazonans bölgesinde daha yoğun olarak görülmektedir. Ferreazonanstan önceki bölgede ilk 0.5 saniyelik bölgede yer alan yüksek frekanslı bölgeler güç sisteminin başlangıç koşullarından ileri gelmektedir. Bilindiği gibi başlangıç anında sistemler nominal akımlarından yüksek akımlar çekerler bu başlangıç koşulları her sisteme göre değişiklik gösterebilir, sistemimizde 0.5 saniyelik bölge başlangıç koşullarından kaynaklanan yüksek genlikli bölgedir EK3-Şekil 1'den bu başlangıç anındaki yüksek genlikler görülebilir.



Şekil V.3 Oymapınar Yük Gurubunun 2. Saniyede Devreden Çıkarılması (1.Durum)
Sonucunda Oluşan Ferorezonans Bölgesinin Zaman-Frekans Analizi.

Şekil IV.2’de temel senaryolar için verilen tabloda gösterilen Oymapınar yük gurubunun 0.1 Saniye devre dışı kalması (4. Durum) aşağıdaki Şekil V.4’da gösterilmiştir. Burada 0.1 saniyelik bir anahtarlamanın etkisi ile oluşan ferorezonans bölgesi açık olarak görülmektedir. Şekilde, 2. saniyede aniden gerilim yüksek genlikli ve nominal frekansına oranla yüksek frekanslı sıçrama yapmaktadır. Bu durum 0.1 saniyelik anahtarlama süresi sonunda sona ermektedir. Enerji iletim hatlarında anahtarlama ile meydana geldiği bilinen ferorezonans olayları bu sistem üzerinde de etkin olmaktadır. Ferorezonans bölgesi bu senaryo için 2-2.1 saniye arasında sınırlı kalmıştır. Dördüncü bölümde, Şekil IV.19 ile gösterilen Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 saniye devre dışı kalmasıyla 2.barada oluşan gerilim değişiminin zaman-frekans gösterimi aşağıdaki gibi Şekil V.4 ile gösterilir. Birinci durumdaki ferorezonans öncesi zaman-frekans spektrumu EK3-Şekil 1’de, ikinci durum için zaman-frekans spektrumu EK3-Şekil 2’de, üçüncü durum için zaman-frekans analizleri ise EK3-Şekil 3’de verilmiştir. EK3-Şekil 3’de 0-500Hz için örneklenmiş zaman-frekans analizinden ferorezonans bölgesinin frekans aralığını açık bir şekilde görülmektedir.

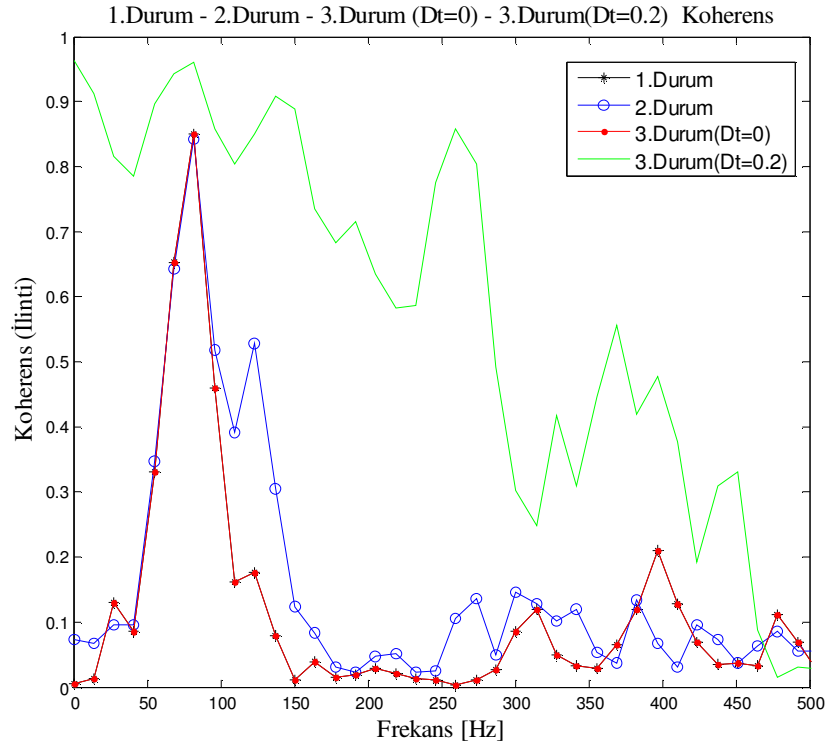


Şekil V.4 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Anahtarlanması (4. Durum)
Sonucunda Oluşan Ferrerezonans Bölgesinin Zaman-Frekans Analizi.

V.3. KOHERENS ANALİZLERİ

Ferrorezonans olayı anahtarlama olayları ile oldukça kuvvetli bir korelasyona sahip olduğu için farklı anahtarlama durumları altında ferrerezonans özellikleri ortaya çıkartmak önem kazanacaktır. Bu bakımından Tablo IV.1 ile gösterilen senaryolara göre frekans tanım bölgesinde tanımlanan korelasyon değişimi şeklinde yorumlanabilecek olan koherens (ilinti) yaklaşımı göz önünde bulundurulacak olursa şekil V.5 ile gösterilen örnek değişimler gözlemlenebilir.

Burada sayfa 45’de verilen farklı senaryolar bakımından bara 2 ve bara 3’den gerilim değişimlerinin gözlemlendiği tüm zaman aralığı (ferrorezonans öncesi ve sonrası) için koherensler her bir durum için Şekil V.5’deki gibi gösterilebilir.



Şekil V.5 Senaryolardaki Koherens Değişimi.

Yukarıda Şekil V.5’de gösterilen koherens değişimlerine göre durum 3 ($\Delta t=0.2$) ile gösterilen değişim, en güçlü korelasyonu gösteren değişimdir. Bu durumda yüksek korelasyonlar 0-250 Hz’lik bölgede karşımıza çıkmaktadır. Bu durum ise ferreazonansın ortaya çıktığı ve aralarında zaman farkı bulunan anahtarlama sebepleri olarak yorumlanabilir. Ayrıntılı özellikler bakımından SDD ile analiz edilerek yeni bulgular elde edilmelidir. Farklı senaryo durumları için koherens analizleri EK4’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Ayrıca her bir durumun hangi anahtarlama senaryolarından oluştuğu, takip kolaylığı açısından şekil ve sayfa numaralarının yer aldığı tablo EK1-Tablo 1’de verilmiştir.

Burada;

1. Durum $\rightarrow$ Oymapınar yük gurubunun 2. saniyede devre dışı olmasını;
2. Durum $\rightarrow$ Varsak yük gurubunun 2. saniyede devre dışı olmasını;
3. Durum ($\Delta t=0$) $\rightarrow$ Oymapınar ve Varsak yük gurubunun 2. saniyede aynı anda devre dışı olmasını;
3. Durum ($\Delta t=0.2$) $\rightarrow$ Oymapınar ve Varsak yük gurubunun ($\Delta t=0.2$) zaman farkıyla devre dışı kalmasını temsil etmektedir.

BÖLÜM VI

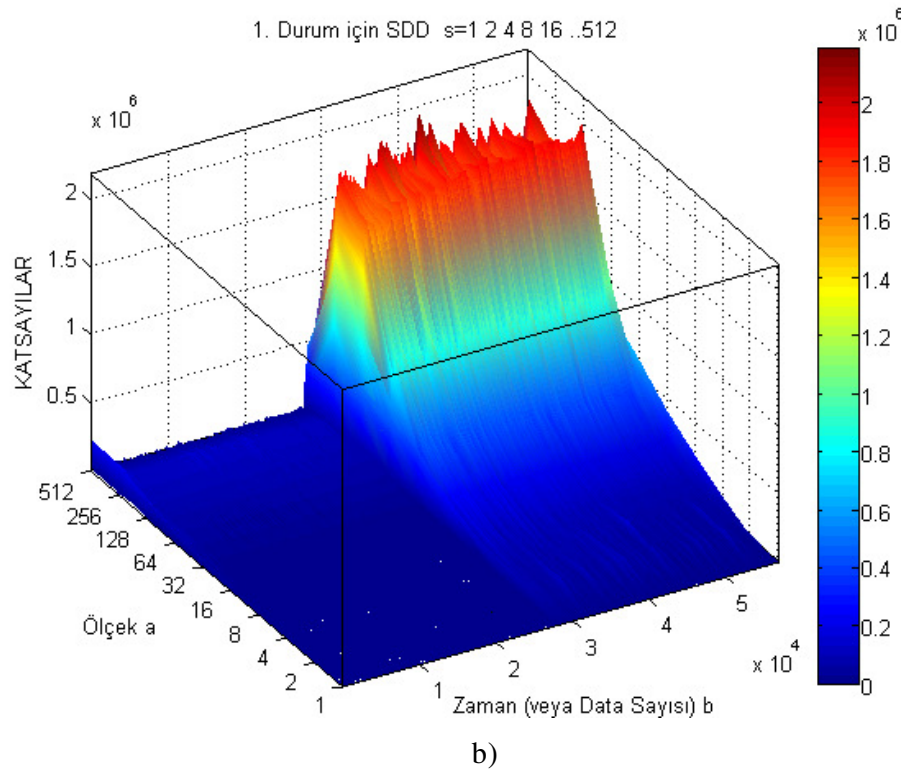
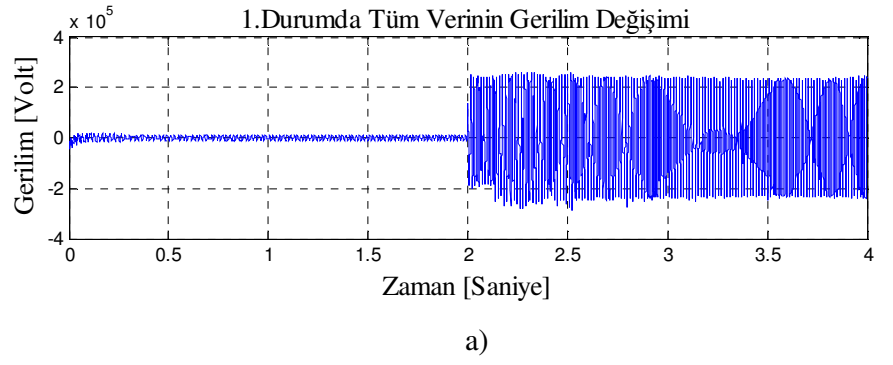
FERROREZONANS OLAYININ DALGACIK TABANLI İNCELENMESİ VE ÖZELLİK ÇIKARIMI

Durağan sinyaller için Fourier Dönüşümü (FD) anlamlı sonuçlar verebilmektedir. Ancak durağan olmayan sinyaller için Fourier dönüşümü yetersiz kalmaktadır ve durağan olmayan sinyallerin analizinde KZFD ile zaman-frekans analizi daha uygundur. Bu çalışmada Seydişehir-Oymapınar enerji iletim hattının simülasyonu sonucunda meydana gelen ferreazonans olaylarının işaretleri durağan olmayan sinyallerdir ve bu sinyalleri FD ile incelemek anlamlı olmamaktadır. Meydana gelen ferreazonans olayının sinyali KZFD ile analiz edildiğinde zaman-frekans bilgisi açık olarak belirlenmesine rağmen, zaman-frekans analizinde net bilgiler elde edilememiştir. Bu yüzden Dalgacık Dönüşümü tekniğinden yararlanılmıştır. Bu bölümde SDD kullanılarak Seydişehir-Oymapınar modelinden olası senaryolar SDD ile analiz edilmiştir.

VI.1. SÜREKLİ DALGACIK DÖNÜŞÜMÜNÜN UYGULANMASI

Bu bölümde belirlenen senaryolar sonucunda verilerin Ayırık Parametrelili Sürekli Dalgacık Dönüşümü (APSDD) yöntemiyle analizleri yapılmıştır. Burada her senaryo için ferreazonans öncesi ve ferreazonans anı ayrıca incelenmiştir. Analizler hem üç boyutlu olarak gösterilmiş bazı durumlarda da zaman-frekans / ölçek olarak iki boyutlu gösterim yapılarak ferreazonans bölgelerinin lokalizasyonu belirlenmiştir.

Burada, ayırık parametre kavramı SDD uygulamasında ölçek değişiminin ayırık değerler üzerinden yapıldığını göstermektedir.

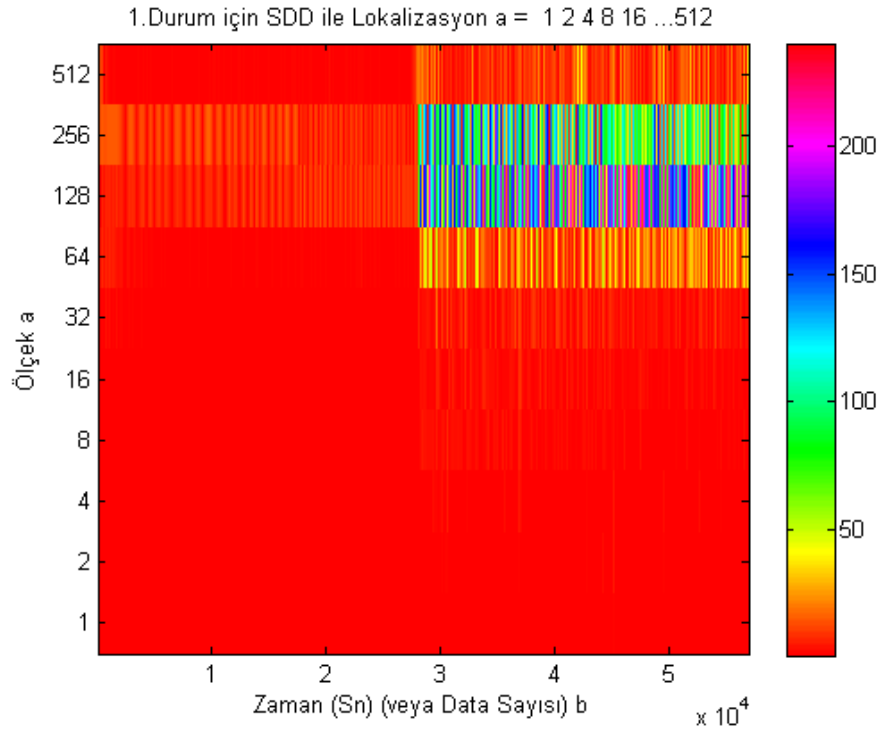


Şekil VI.1 Birinci Durum için Tüm Veri için SDD ile Ferrerezonans Analizi
(Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

Tüm verinin gerilim değişimi Şekil VI.1a'da verilmiş ayrıca Şekil VI.1b'de birinci durum için SDD ile yapılan analiz ile zaman, ölçek ve katsayı grafiği üç boyutlu olarak gösterilmiştir. Burada zaman boyutu dalgacık analizinin özelliğinden dolayı data sayısı olarak algılanmaktadır (data sayısı x , Δt ile zaman boyutuna çevrilebilir. Burada, Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn olarak verilebilir). Ayrıca frekans ile ölçek ters orantılı olarak değişmektedir. Grafikten görüleceği gibi başlangıç anında başlangıç koşullarından kaynaklanan yüksek genlikli bölgeler ile 2'nci saniyeden

itibaren meydana gelen ferrerezonans olayı ile ortaya çıkan yüksek genlikler açıkça görülmektedir.

Yukarıda Şekil VI.1 ile gösterilen üç boyutlu grafik bilgi çıkarımı bakımından durağan olmayan bölgeyi göstermesine karşı daha detaylı gösterim, durağan olmayan bölgenin ayrıntılı lokalizasyonunu veren zaman-ölçek düzlemindeki gösterimdir. Bu anlamda Şekil VI.1 ile gösterilen SDD analizi, zaman-ölçek düzleminde Şekil VI.2 ile aşağıdaki gibi gösterilebilir.

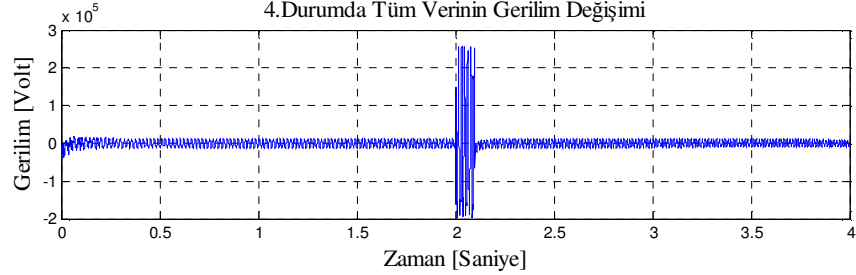


Şekil VI.2 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum) Sonucunda Ferrerezonans Bölgesinin SDD ile Lokalizasyonu (Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

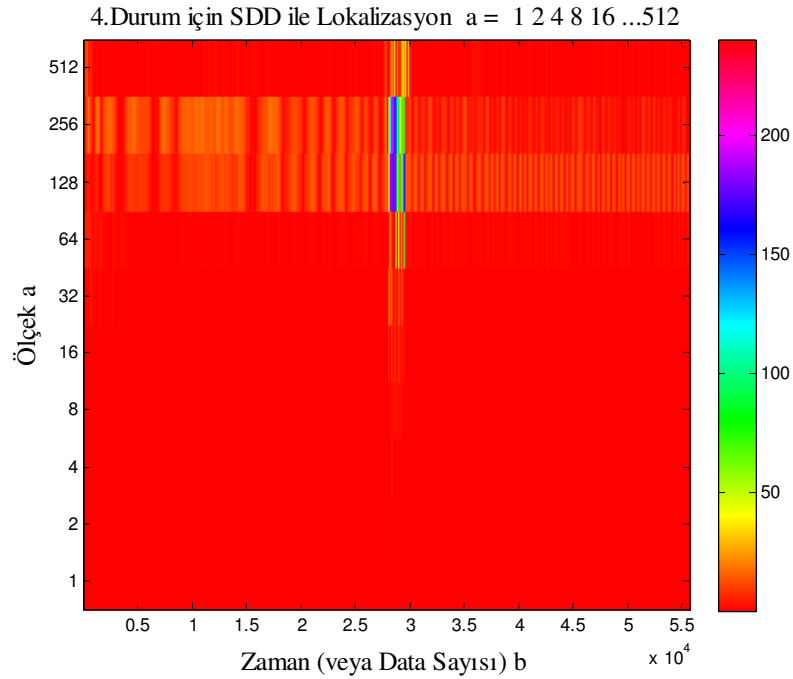
Yukarıdaki Şekil VI.2'den görüleceği gibi ferrerezonans olayını karakterize eden bölge zaman-ölçek düzleminin sağ üst köşesinde farklı genlik değerleri ile (farklı renklerde) lokalize olmuştur.

Benzer şekilde, tezin 4'ncü bölümünde, Şekil IV.19 ile gösterilen Oymapınar yük gurubunun 0.1 saniye devre dışı kalmasıyla 2.bara'da oluşan gerilim değişiminin gerilim değişimi Şekil VI.3(a)'da, zaman-ölçek düzlemindeki ifadesi Şekil VI.3(b) ile verilebilir. Buradan da görüleceği gibi 0.1 saniyelik süre içerisindeki aşırı gerilim değerleri 96-386 ölçek değerleri arasında lokalize olur. Bu ölçek değerlerine karşı

gelen frekans aralığı yaklaşık olarak 18-73Hz olmasına rağmen daha geniş bir ölçekte, bu frekans aralığı 18-145Hz (ölçek olarak 48-384 ve daha yukarısı) olarak tanımlanabilir.



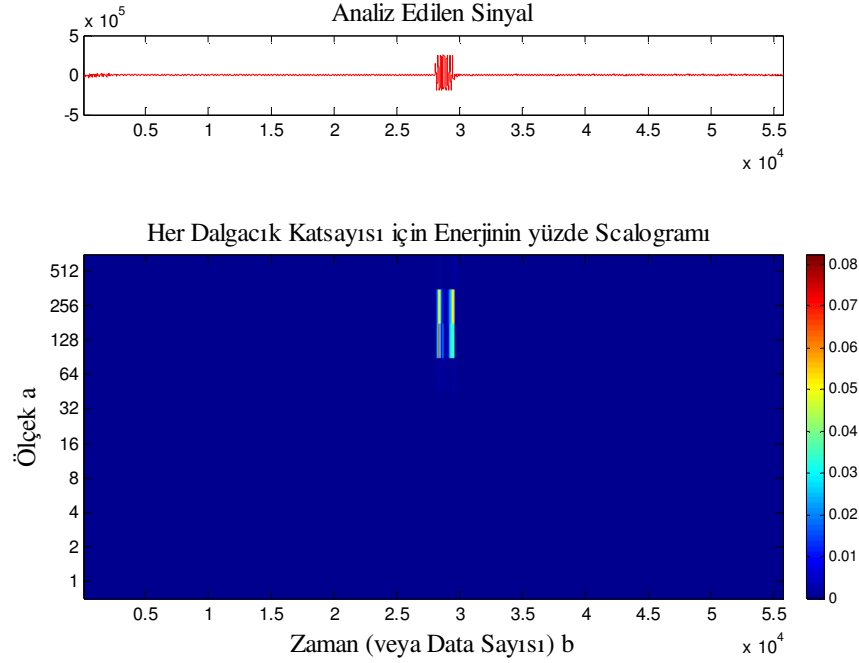
a)



b)

Şekil VI.3 Oymapınar Yük Gurubunun 0.1 Saniye Devre Dışı Kalmasıyla (4.Durum) 2.Barada Meydana Gelen Ferrerezonans Bölgesinin SDD ile Lokalizasyonu (Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

Alternatif bir gösterim olarak, ölçek parametresinin sürekli değerlerle gösterilmesi durumunda yukarıdaki gösterim, Şekil VI.4'deki gibi yeniden ifade edilebilir. Buradan görüleceği gibi ferrerezonans bölgesi daha hassas bir şekilde lokalize edilebilir.



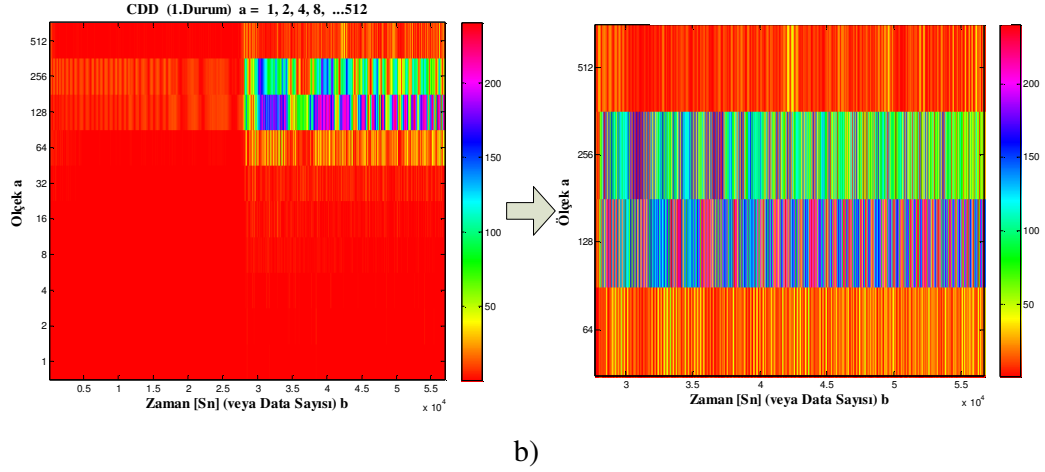
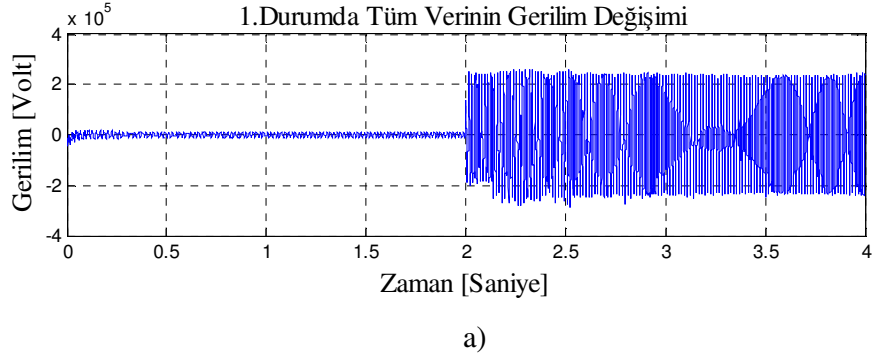
Şekil VI.4 Sürekli Parametrelili Sürekli Dalgacık (SPSDD) Dönüşümünün Ferrezonans Olayındaki Sonucu (Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

Şekil VI.3 ve Şekil VI.4'ün karşılaştırması yapılırsa SPSDD uygulaması sonucunda ferrezonans olayının lokalize edildiği bölge etrafındaki belirsizliklerin minimize edildiği kolayca görülmektedir.

Ancak lokalize bölge etrafındaki belirsizlikler frekans aralıklarına esneklik getirdiği için bu çalışmada APSDD uygulaması ön plana çıkartılmıştır. EK5'de bazı farklı senaryolar için SDD analizleri verilmiştir.

VI.2. SDD İLE ÖZELLİK ÇIKARIMI

İlk durumda tüm verinin gerilim formundaki değişimi Şekil VI.5.a'da iletim sisteminde ikinci saniyeden sonra ferrezonans olayının meydana geldiği görülmektedir ve Şekil VI.6.b'de ikinci saniyeden sonra iletim hattında meydana gelen ferrezonans olayı Sürekli Dalgacık Analizi sonucunda ferrezonans bölgesinin “zoom” edilerek frekans aralığı belirlenmiştir.



Şekil VI.5 Seydişehir-Oymapınar Hattında Oymapınar Yük Gurubunun Devre Dışı Kalması (1.Durum) Sonucunda Ferrorezonans Bölgesinin Özelliğinin Belirlenmesi (Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

Şekil VI.5.b’de gösterildiği gibi SDD ile analiz edilen ve belirlenen ferrorezonans bölgesinin 2 ile 4 saniye arasında yaklaşık 18Hz ile 200Hz frekans değerlerini (390-35 ölçekleri arasında) aldığı tespit edilmiştir. Bu ise Şekil V.2 (f)’deki sonuçları gösteren bir lokalizasyondur. Böylece ferrorezonans olayı bu frekans aralığındaki harmonik ve interharmoniklerle ifade edilir.

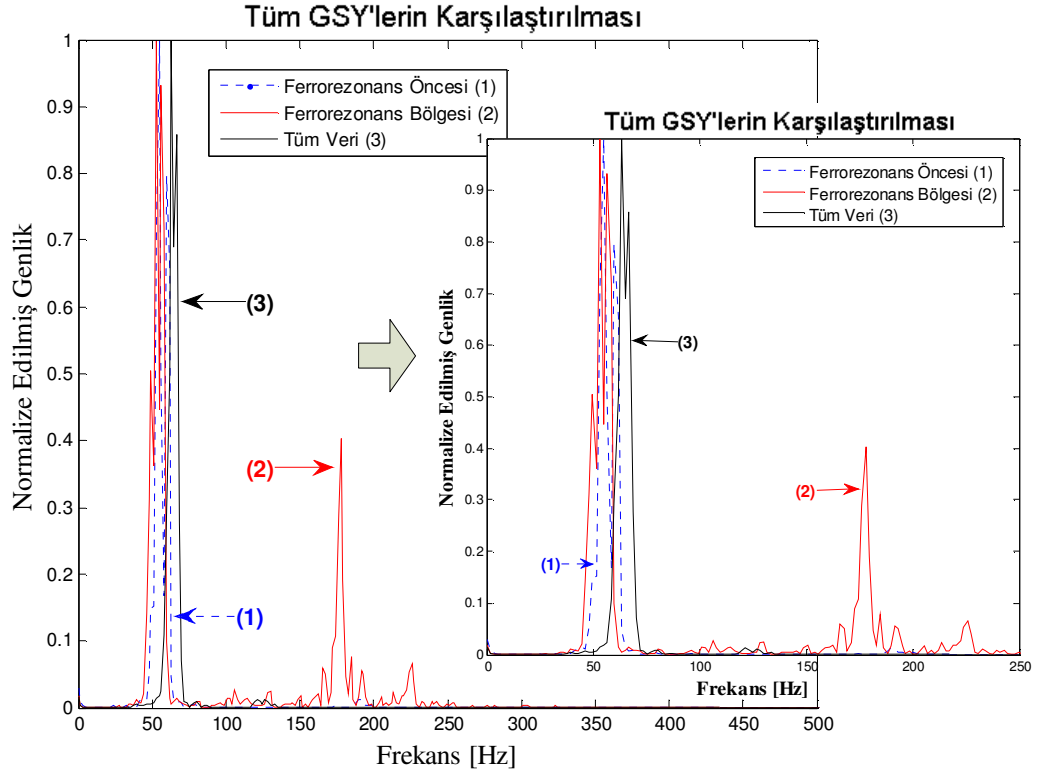
BÖLÜM VII

SONUÇLAR ve YORUMLAR

KZFD ferorezonans özelliği daha küçük bir ölçekte saklı bulunduğu için ilk anda saptanamaz o nedenle zaman-frekans gösterimi üzerinde daha küçük ölçeğe yönelerek (“zoom” yaparak) özellik çıkarımı gerçekleştirilmiştir. Oysa ki SDD zaman-ölçek düzlemini kullandığı için frekansı karakterize eden belli bir zaman ve ölçek bölgesinde lokalize olur. Bu lokalize olmuş bölge zaman-frekans düzlemine farklı bir ölçekten bakarak elde edilen özelliklerle aynı türden özelliği yansıttığı gösterilebilir. Bu bağlamda Dalgacık Dönüşümü özellik çıkarımı bakımından mevcut en etkin yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

VII.1. ELDE EDİLEN BULGULAR

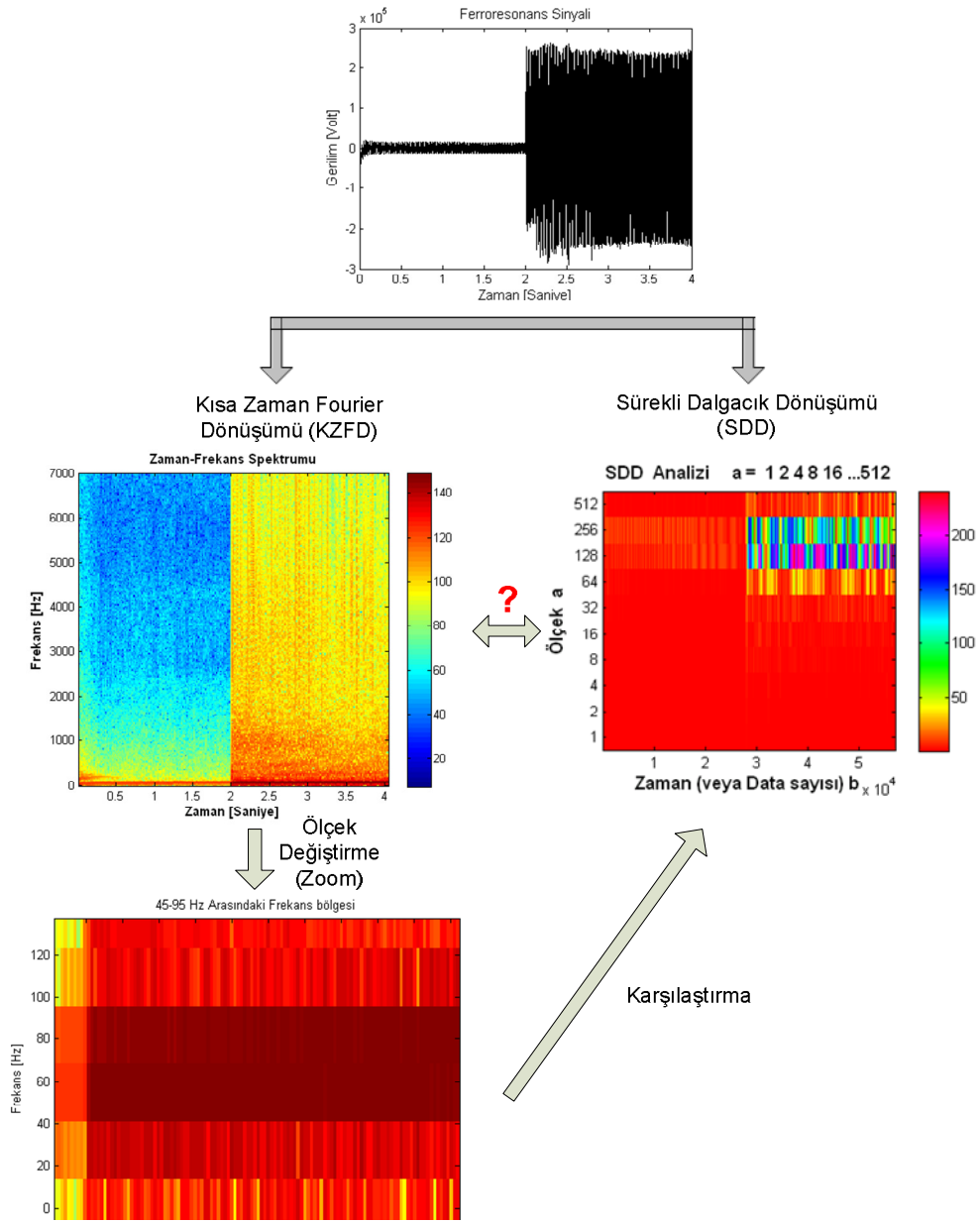
GSY uygulamaları durağan sinyaller için uygun olduğundan ferorezonans olayını temsil eden tüm veri, ferorezonans olayı öncesi ve ferorezonans bölgesi olarak iki durağan kısımda ifade edilebilir. Bu bağlamda her bir durağan kısmın GSY değişimleri ve durağan olmayan tüm verinin GSY değişimleri aşağıdaki Şekil VII.1 vasıtasıyla karşılaştırılabilirler. Şekil VII.1 senaryolardan 1.durum için bara 2 ve bara 3’den alınan gerilim değişimleri arasındaki GSY’nin karşılaştırılmasını göstermektedir.



Şekil VII.1 GSY Uygulamasının Sinyalin Değişik Bölgeleri için Karşılaştırması.

Şekil VII.1’den görüleceği gibi yalnızca ferrezonans bölgesi için, (2) numara ile işaret edilen 25-250 Hz’lik frekans aralığı ferrezonans olayının bir göstergesi olarak kabul edilmesine rağmen durağan olmayan tüm veri göz önüne alındığında buraya ferrezonans öncesi etkilerin de karışabileceği düşünülebilir. Bu durum ancak durağan olamaya sinyaller için kullanılan KZFD ve SDD yöntemleri ile belirlenebilir. Bu bakımdan Şekil VII.2 ile gösterilen genel karşılaştırma yapılabilir.

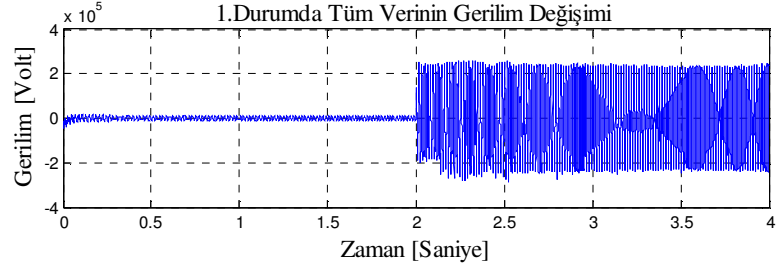
Aşağıdaki Şekil VII.2’nin SDD kısmına ilişkin olarak ferrezonansı karakterize eden en belirgin (en yoğun) bölgenin 45-95 Hz arasında ortaya çıktığı belirlenmişti. Bu sonuç KZFD sonucunun daha küçük bir ölçeğe indirgenmek üzere yakınlaştırılmasıyla (“zoom”), KZFD sonuçları, SDD’nin lokalize bölgesiyle uyumlu hale getirilebilir. Bu anlamda, KZFD için bir ölçek problemi söz konusudur. Ayrıca, SDD uygulaması ile lokalize olan ferrezonans bölgesinin orta kısmında yer alan yüksek genlikli aralık ise, temel frekans olan 50Hz’den sonra ortaya çıkan 2.harmonikle bu temel bileşen arasında yer alan ara-harmonikler olarak yorumlanabilir. Bu ise KZFD’nin “zoom” yapılan ilgili bölgesinin sınırları içinde kalan bir tanımlamadır.



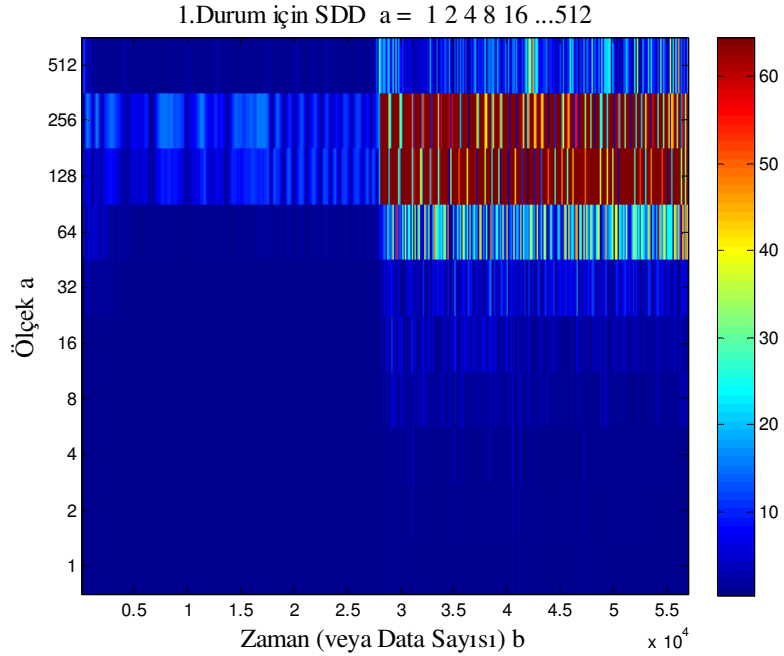
Şekil VII.2 Özellik Çıkarımında, KZFD ve SDD Arasındaki İlişki.

Burada, SDD ile lokalize olmuş bölgenin belirliliği bakımından, zaman-ölçek düzleminin zemini tek bir genliğe indirgenerek (tek renk kodu ile) gösterilmiştir. Oysa ki, ferreazonans bölgesinin dışındaki bu zeminde de başka özellikler mevcuttur, bu durumu irdelemek bakımından aynı SDD uygulaması aşağıdaki şekil VII.3 ile yeniden verilebilir. Buna göre Şekil VII.3.b'ye göre lokalize olmuş bölgenin dışında da ferreazonans olayından önce gelişen olayların etkileri gözlemlenebilir. Bu anlamda verinin hemen başında, başlangıç durumunun etkisi ve bunun kararlı bir hale gelmesiyle yaklaşık 50Hz'lik ana bileşen ve onun etrafındaki ilave frekans

bileşenlerinin sinyalin tüm zaman eksenine yayılışı, (128-256) ölçekleri arasında görülmektedir. Bu etki ferrezonans olayı bölgesine de girerek burada da etkisini sürdürmektedir. Bu bağlamda ferrezonans bölgesi başlangıç durumları ve durağan bileşenlerinin de etkilerinin devam ettiği bir süreç olarak yorumlanabilir. Bu bakımdan bu durumları birbirinden ayırt etmek oldukça zordur [37,70,78,165,166].



a)



b)

Şekil VII.3 Birinci Durumda SDD ile Lokalizasyon ($\text{Zaman} = \text{Veri} / 1.4 \times 10^4 \text{ Sn}$).

Yine de Şekil VI.2 deki gibi saf lokalize olmuş bölge ile karşılaştırıldığında Şekil VII.3.b'nin lokalize olmuş bölgesi de oldukça belirgindir.

Tezin getirdiği bulgular bakımından en çarpıcı sonuçlardan birisi değişik anahtarlama durumları için ferrezonans olayını tanımlamaktır.

KAYNAKLAR

- [1] Akıncı, T.Ç.; “Dalgacık (Wavelet) Tabanlı Dağıtım Sistemleri Koruma Algoritması”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2005).
- [2] Yeşil, M.: “Enerji Sistemleri Üzerindeki Nonlineer Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (1996).
- [3] Pansini, A.J.: “Basics of Electrical Power Transmission”, *Prentice Hall*, ISBN: 0-13-059866-6, New Jersey, USA, (1990) 1-13.
- [4] Akıncı, T.Ç.; Gökmen, G.; Mokryani, G.; Ekren, N.; Şeker, S.: “Bir Fazlı İletim Sistemlerinde Ferrorezonans Olayının İncelenmesi”, *5.Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu*, Karabük, Türkiye, 13-15 Mayıs (2009).
- [5] Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: “Spectral Analysis for Signal Based on Ferroresonance Phenomena in Electric Power System”, *International Conference Engineering, Technologies and Systems TechSys'2009*, Fundamental Sciences and Applications”, Vol.14, May 29-30, Plovdiv, Bulgaria, (2009).
- [6] Ijaz, S.A.; “Ferroresonance On Power Systems”, *Master of Science in Electrical Engineering*, The University of Texas at Arlington, USA, (1992).
- [7] Kieny, C.: “Application of the Bifurcation Theory in Studying and Understanding the Global Behavior of a Ferroresonant Electric Power Circuit”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.6, No.2, April (1991).
- [8] Sakurung, P.: “Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis”, *International Conference on Power*

Systems Transients (IPST'05), No.IPST05-227, June 19-23, Montreal, Canada, **(2005)**.

- [9] Tanggawelu, B.; Mukerjee, R.N.; Arifin, A.E.: "Ferroresonance Studies in Malaysian Utility's Distribution Network", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol.2, 13-17 July **(2003)** 1216-1219.
- [10] Janssens, N.; Vanderstockt, V.; Denoel, H.; Monfils, P.A.: "Elimination of Temporary Overvoltages due to Ferroresonance of Voltage Transformers: Design and Testing of a Damping System", No.33-204, *CIGRE*, September **(1990)** 1-8.
- [11] Naidu, S.R.; Souza, B.A.: "Analysis of Ferroresonant Circuits in the Time and Frequency Domains", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.33, No.5, September **(1997)** 3340-3342.
- [12] Batora, B.; Toman, P.; Topolaneck, D.; Belatka, M.: "Hysteresis and Influence on the Creation of the Ferroresonance", *XIV Modern Technique and Technologies International Conference*, Tomsk, Russia, 24-28 March **(2008)** 9-12.
- [13] Orestes, M.B; Donavan, J.C.: "An Unsymmetrical Mode of Ferroresonance", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.7, No.4, December **(1971)**.
- [14] "Ferroresonance", <http://en.wikipedia.org/wiki/Ferroresonance> (26/09/2008).
- [15] McKee, S.; Simpson, R.: "Ferroresonance and Preisach Theory", : Warning! Ferroresonance Can Damage Your Plant (Digest No: 1997/349), *IEE Colloquium*, 12 November **(1997)** 3/1-314.
- [16] Rudenberg, R.: "Nonharmonic Oscillations as Caused by Magnetic Saturation", *Transactions AIEE*, Vol.68 I, **(1949)** 676-685.
- [17] Rudenberg, R.: "Transient Performance of Electric Power Systems", *McGraw-Hill Book Company*, New York, NY, USA, **(1950)**.
- [18] Stojkovsa, B.; Golob, R.: "Time-Delay Feedback Control of Ferroresonant Chaotic Oscillations", *IEEE Porto Power Tech Conference*, Porto, Portugal, 10-13 September **(2001)**.

- [19] Hoesrauf, R.; Nichols, N.: "Avoiding Potential Transformer Ferroresonant Problems in Industrial Power Systems", *IEEE, Industrial and Commercial Systems Technical Conference*, (1989) 61-68.
- [20] Barr, R.A.; Platt, D.: "Modelling and Mapping Ferroresonant States in Series Compensated Distribution and Subtransmission Lines", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.11, No.2, April (1996).
- [21] Jacobson, D.A.N.; Swatek, D.R.; Mazur, R.W.: "Mitigating Potential Transformer Ferroresonance in a 230kV Converter Station", *Transmission and Distribution Conference*, Canada, 15-20 September (1996) 269-275.
- [22] Mukerjee, R.N; Tanggawelu, B.; Ariffin, A.E.; Balakrishnan, M.: "Indices for Ferroresonance Performance Assessment in Power Distribution Network", *International Conference on Power Systems Transients*, New Orleans, USA, (2003).
- [23] Jacobson, D.A.N.: "Stability Domain Calculations of Period-1 Ferroresonance in a Nonlinear Resonant Circuit", *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.17, No.3, July (2002) 865-821.
- [24] Buigues, G.; Zamora, I.; Valverde, V.; Mazon, A.J.; San Martin, J.I.: "Ferroresonance in Three-Phase Power Distribution Transformers: Source, Consequences and Prevention", *CIREN, 19th International Conference on Electricity Distribution*, No.0197, Vienna, 21-24 May (2007) 1-4.
- [25] Santoso, S.; Dugan, D.C.; Grebe, T.E.; "Modeling Ferroresonance Phenomena in an Underground Distribution System," *International Conference on Power Systems Transients (IPST'01)*, Rio de Janeiro, Brazil, 24-28 June (2001).
- [26] Scoggin, D.M.; Hall JR, J.E.: "Ferroresonance", *IBM Journal Research Development*, Vol.31, No.6, November (1987).
- [27] Emin, Z; Tong, Y.K.,: "Ferroresonance Experience in UK: Simulations and Measurements", *IPST'01, International Conference Power System Transients*, Rio de Jenerio, Brasil, 24-28 June (2001).
- [28] Butler, J.W.; Concordia, C.: "Analysis of Series Capacitor Application Problems", *AIEE Transaction*, Vol.56, August (1937) 957-988.

- [29] Mozaffari, S.: “Chaotic Ferroresonance in Power Transformers”, *Phd Thesis*, The University of British Columbia, August (1996).
- [30] Hayashi, C.: “Nonlinear Oscillations in Physical Systems”, *McGraw-Hill Book Company*, New York, USA, (1964).
- [31] Swift, G.W.: “Power Transformer Core Behavior Under Transient Conditions”, *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol.90, No.5, September (1971) 2206-2209.
- [32] Jiles, D.C.; Atherton, D.L.: “Ferromagnetic Hysteresis”, *IEEE, Transactions Magnetics*, Vol.19, No.5, September (1983) 2183-2185.
- [33] Jiles, D.C.; Atherton, D.L.: “Theory of Ferromagnetic Hysteresis”, Elsevier Science Publishers B.V., *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Vol.61, No.5, September (1983) 2183-2185.
- [34] Pascetti, D.: “Mathematical Modelling of Hysteresis”, *Nuovo Cimento*, Vol.11D, No.8, August (1989) 1191-1215.
- [35] Frame, J.G.; Mohan, N.; Liu, T.: “Hysteresis Modeling in an Electromagnetic Transient Program”, *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol.101, 21 January (1986) 48-60.
- [36] Daay, B.P.: “Methods for Studying Ferroresonance in Pi and Series Power Circuits”, *Phd Thesis*, Iowa State University, Ames-Iowa, USA, (1985).
- [37] Dimitriyev, Y.V.; Haşimov, A.; Nayır, A.: “Elektrik İletim Hatlarında Kaza Açmalarında Oluşan Gerilimlerin Modelleri”, ISBN:5-8066-1446-8, Bakü, *ELM*, Azerbaijan, (2002).
- [38] Odessey, P.H.; Weber, E.: “Critical Conditions in Ferroresonance”, *AIEE Transaction*, Vol.57, August (1938) 444-452.
- [39] Prusty, S.; Panda, M.: “Predetermination of Lateral Length to Prevent Overvoltage Problems due to Open Conductors in Three-Phase Systems”, *IEE Proceedings*, Vol.132, Pt.C. No.1, January, (1985) 49-55.
- [40] Thomson, W.T.: “Similitude of Critical Conditions in Ferroresonance Circuits”, *AIEE Transaction*, Vol.58, March (1939) 127-130.

- [41] McCrumm, J.D.: “An Experimental Investigation of Subharmonic Currents”, *AIEE Transaction*, Vol.60, (1941) 533-540.
- [42] Shott, H.S.; Peterson, H.A.: “Criteria for Neutral Stability of Wye-Grounded-Primary Broken-Delta-Secondary Transformer Circuits”, *Transactions on AIEE*, Vol.60, (1941) 997-1002.
- [43] Peterson, H.A.: “Transient in Power Systems”, *John Wiley & Sons*, New York, USA, (1951) 265-279.
- [44] Brenner, E.: “Subharmonic Response of the Ferroresonance Circuit with Coil Hysteresis”, *AIEE Transaction*, Vol.74, September (1956) 450-456.
- [45] Plotkin, S.: “Discontinuous Transition Time Between Stable State in Ferroresonance Circuits”, *AIEE Transactions*, Vol.75, September (1957) 410-421.
- [46] Van Craenenbroeck, T.; Van Dommelen, D.; Janssens, N.: “Damping Circuit Design for Ferroresonance in Floating Power Systems”, *ETEP*, Vol.10, No.3, May/June (2000).
- [47] Kelly, Jr. G.E.: “The Ferroresonance Circuit”, *AIEE Transactions*, Vol.77, January (1959) 843-848.
- [48] Karlicek, R.F.; Taylor, Jr.E.R.: “Ferroresonance of Grounded Potential Transformers on Ungrounded Power Systems”, *AIEE Transactions*, Vol.77, August (1959) 607-618.
- [49] Kratz, E.F.; Manning, L.W.; Maxwell, M.: “Ferroresonance in Series Capacitor-Distribution Transformer Applications”, *AIEE Transactions*, Vol.77, August (1959) 438-449.
- [50] Hopkinson, R.: “Ferroresonance During Single-Phase Switching of 3-Phase Distribution Transformer Banks”, *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.84, No.10, April (1965) 1258-1265.
- [51] Hopkinson, R.: “Ferroresonant Over Voltage Control Based on TNA Tests on Three-Phase Delta-Wye Transformer Banks”, *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.86, No.10, October (1967) 289-293.

- [52] Hopkinson, R.: "Ferroresonant Over Voltage Control Based on TNA Tests on Three-Phase Delta-Wye Transformer Banks", *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.87, No.2, February (1968) 352-361.
- [53] Swift, G.: "An Analytical Approach to Ferroresonance", *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.88, No.1, January (1969) 42-46.
- [54] Dolan, E.; Gillies, D.; Kimbark, E.: "Ferroresonance in Transformer Switched with an EHV Line", *IEEE Summer Power Meeting*, Paper.71, TP 533-PWR. T-PAS-91, No.3, May/June (1972) 1273-1280,
- [55] Smith, D.; Swanson, S.; Borst, J.: "Overvoltages with Remotely- Switched Cable- Fed Grounded Wye-Wye Transformers", *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.94, No.5, September/October (1975) 1843-1853.
- [56] Clerici, A.; Didriksen, C.H.: "Dynamic Overvoltages and Ferroresonance Found in Switching Surge Studies for IRAN 400kV System", *IEEE Winter Power Meeting*, paper.71, TP 142-PWR. T-PAS-91, No.1, January/February (1972) 195-203,
- [57] Germay, N.; Mastero, S.; Vroman, J.: "Review of Ferroresonance Phenomena in High Voltage Power System and Presentation of a Voltage Transformer Model for Predetermining Them", *CIGRE* , No.33-18, (1974).
- [58] "Dual Prescription for Ferroresonance", *Electrical World T & D*, May (1979).
- [59] Germond, A.: "Computation of Ferroresonant Overvoltages in Actual Power Systems by Galerkin's Method", *IEEE PICA'75 Conference*, New Orleans, USA, June (1975) 127-135.
- [60] Prusty, S.; Sanyal, S.K.: "Some New Solutions to Ferroresonance Problem in Power System", *Proceeding of IEE*, Vol.124, No.12, December (1977) 1207-1211.
- [61] Ashok Kumar, B.S.; Tripathy, A.K.; Parthasarathy, K.; Kothari, G.C.: "Approach to the Problem of Ferro-Resonance in A.H.V. Systems", *Proceeding of IEE*, Vol.119, No.6, June (1972) 672-676.

- [62] Hirst, D.E.; Barakat, E.E.: “Improved Analysis of Jump Resonance in Single-Phase Circuits”, *Proceeding of IEE*, Vol.125, No.12, December (1978) 1380-1382.
- [63] Barakat, E.E.; Hirst, D.E.; “Susceptibility of 3-Phase Power Systems to Ferro-Nonlinear Oscillations”, *Proceeding of IEE*, Vol.126, No.12, December (1979) 1295-1300.
- [64] Staats, G.W.; Ebert, J.A.: “Overvoltages in Medium Power Transformers”, *IEEE Transactions on Power Application & Systems*, Vol.101, No.4, April (1982) 877-885.
- [65] Shein, D.; Zissu, S.; Schapira, W.: “Voltage Transformer Ferroresonance in One 400 kV GIS Substation”, *IEEE Conference on Electrical and Electronics Engineering*, Israel (1989) 4321-4325.
- [66] Masson, L.: “Control of Ferroresonance in Transformers”, *CEA Research Project 087*, D 166, June (1982).
- [67] Mork, B.A.; Stuehm, D.L.; Rao, K.S.: “Modelling Ferroresonance with EMTP”, *EMTP Newsletter* Vol.3, No.4, May (1983) 2-7.
- [68] Guuinic, Ph.; Janssens, N.: “Full Scale Laboratory Investigations of the Three Single Phase Ferroresonance Phenomenon”, *IEEE Transaction on Magnetics* Vol.Mag19, No.5, September (1983) 2106-2108.
- [69] Al-Anbarri, K.; Ramanujam, R.; Rao, CH.S.; Kuppusamy, K.: “Effect of Circuit Configurad on Chaotic Ferroresonance in Power in a Power Transformer”, *Electric Power Components and Systems*, Vol.30, No.10, October (2002) 1015-1031.
- [70] Pasand, M.S.; Mohseni, H.; Farhangi, Sh.; Zare, A.R.; Iravani, R.: “Effects on Initial Conditions on Ferroresonance in Power Transformers Using Preisach Theory”, *39th International Universities Power Engineering Conference, UPEC’04*, Vol.2, 6-8 September (2004) 845-850.
- [71] Pattanapakdee, K: “Failure of Riser Pole Arrester due to Station Service Transformer Ferroresonance”, *International Conference of Power Systems Transients(IPST’07)*, Lyon, France, June (2007).

- [72] Hashimov, A.M.; Babayeva, A.R.; Nayir, A.: “Analysis of Ferroresonance Processes at Open-Phase Operating Conditions of Transmission Lines: Computer Modelling”, *TPE’06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*, Ankara-Turkey, 29-31 May (2006) 97-99.
- [73] Alparslan, Y.: “Elektrik Sistemlerinde Demir Çekirdekdeki Manyetik Doyma Dolayısıyla Hasıl Olan Gerilimler (Ferrorezonans)”, *Elektrik Mühendisliği 6.Teknik Kongresi*, Cilt.19, Sayı.219, Mart (1975) 147-153.
- [74] Barbisio, E.; Bottauscio, O.; Chiampi, M.; Crotti, G.; Giordano, D.: “Parameters Affecting Ferroresonance in LCR Electric Circuits”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.44, No.6, June (2008).
- [75] Temiz, İ.: “Güç Sistemlerinde Ferrorezonans Olayı”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye (1988).
- [76] Akça, F.: “Enerji İletim Sistemlerinde Ferrorezonans Olayının Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye (2002).
- [77] Cadick Corporation, Technical Bullettin-004a, “*Ferroresonance*”, 29 May (2002).
- [78] Ferracci, P., “Ferroresonance”, Cahier Technique No.190, *Groupe Schneider Technique Publication*, (2002).
- [79] Hashimov, A.M.; Hasanova, S.I.; Dimitriyev, Y.V.; Akhmedov, Kh.M.: “Numerical and Experimental Studies of Ferroresonant Overvoltage in High-Voltage Networks”, *TPE’06 3rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*, Ankara-Turkey, May 29-31 (2006) 172-175.
- [80] Voraphonpiput, N.: “Ferroresonance Phenomena of a Station Service Transformer during Black Start and Its Investigation”, *17th Conference of the Electric Power Supply Industry*, MacauSAR, Chine, 27-31 October (2008).
- [81] Piasecki, W.; Florkowski, M.; Fulczyk, M.; Mahonen, P.; Nowak, W.: “Mitigating Ferroresonance in Voltage Transformers in Ungrounded MV

- Networks”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.22, No.4, October (2007) 2362-2369.
- [82] Jacobson, D.: “Examples of Ferroresonance in a High Voltage Power System”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol.2, ISBN: 0-7803-7989-6, 13-17 July (2003) 1206-1212.
 - [83] Maklad, M.S.; Fahmy, M.M.: “An Analytical Investigation of a Ferroresonant Circuit”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.MAG16, No.2, March (1980) 465-468.
 - [84] Javora, R.; Yamada, S.; Iwahara, M.: “Simulation of Ferroresonance Occuring in Power System Containing Voltage Transformer”, *Journal of the Japan Society of Applied Electromagnetic*, ISSN:0919-4452, Vol.11, No.1, (2003) 37-41.
 - [85] Sakarung, P.: “Application of PSCAD/EMTDC and Chaos Theory to Power System Ferroresonance Analysis”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST’05)*, Paper No.227, Montreal, Canada, 19-23 June (2005).
 - [86] Barbisio, E.; Bottauscio, O.; Chiampi, M.; Crotti, G.; Giordano, D.: “Experimental and Modelling Analysis of Ferroresonant Electric Circuits”, *Elsevier, Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 316, (2007) 299-301.
 - [87] Chandrasena, W.; McLaren, P.G.; Annakkage, U.D.; Jayasinghe, R.P.; Muthumuni, D.; Dirks, E.: “Simulation of Hysteresis and Eddy Current Effects in a Power Transformer”, *International Conference on Power System Transients (IPST’03)*, New Orleans, USA, (2003).
 - [88] Vahidi, B.; Nassab, R.S.; Zadeh, S.G.; Abedi, E.: “Ferroresonant Overvoltage Investigation in Wye-Wye Transformers on Transmission systems by Using MATLAB”, *9th Spanish Portuguese Congress on Electrical Engineering (9CHLIE)*, Spain, 30 June - 2 July (2005).
 - [89] Stuckens, C.; Monfils, P.A.; Jansens, N.; Craenenbroeck, Th.V.; Dommelen, D.V.: “Risk of Ferroresonance in Isolated Neutral Networks and Remedies”, *CIREN’97, Conference Publication*, No.438, 2-5 June (1997).

- [90] Laohacharoensombat, K.; Jaruwattanadilok, S.; Tuitemwong, K.; Wattanasakpubal, C.; Kleebmek, K.: “Case Study of Ferroresonance in 33kV Distribution Network of PEA Thailand”, *TENCON’04, IEEE Region 10 Conference*, ISBN: 0-7803-8560-8, (2004) 417-420.
- [91] Sutherland, P.E.; Manning, R.: “Ferroresonance in a 13.8kV Distribution Line”, *41st IAS Annual Meeting, Industry Applications Conference*, ISBN: 1-4244-0364-2, 8-12 October (2006) 2238-2241.
- [92] Charalambos, C.; Wang, Z.D.; Li, J.; Osborne, M.; Jarman, P.: “ Validation of a Power Transformer Model for Ferroresonance with System Tests on a 400kV Circuit”, *International Conference on Power Systems Transients*, Lyon, France, 4-7 June (2007).
- [93] Iravani, R.; Chandhury, A.K.S.; Hassan, I.D.; Mrtinez, J.A.; Morched, A.S.; Mork, B.A.; Parniani, M.; Shirmohammadi, D.; Walling, R.A: “ Modeling Gudelines for Low Frequncy Transients”, *IEEE Power Engineering Society Special Publication- Modeling and Analysis of System Transient- 99TP133-0*, (1998) 3/1-3/29.
- [94] Chiesa, N.; Avendano, A.; Hoidalen, H.K.; Mork, B.A.; Ishchenko, D.; Kunze, A.P.: “On the Ringdown Tansient of Transformers”, *International Conference on Power Systems Transients*, Lyon, France, 4-7 June (2007).
- [95] Jacobson, D.A.N.; Marti, L.; Menzies, R.W.: “ Modeling Ferroresonance in a 230kV Transformer-Terminated Double-Circuit Transmission Line”, *International Conference on Power Systems Transients*, Budapest, Hungary, 20-24 June (1999) 451-456.
- [96] Al Zahawi, B.A.T.; Emin, Z.; Tong,Y.K.: “Chaos in Ferroresonant Wound Voltage Transformers: Effect of Core Losses and Universal Circuit Behaviour”, *IEEE Proc.Sci. Meas. Technol.* Vol.145, No.1, January (1998) 39-43.
- [97] Sowa, P.; Walczak, J.; Pasko, M.: “Evaulation of the Inflence of the Chaotic Ferroresonance in Transformer on the Power System Work Conditions”, *IEEE 9th Mediterranean Electrotechnical Conference MELCON’98*, ISBN:0-7803-3879-0, Vol.2, Tel-Aviv, Israel, 18-20 May (1998) 1126-1130.

- [98] Kocis, L.: “ Ferroresonances during Black Stars- Criterion for Feasibility of Scenarios”, *International Conference on Power Systems Transients*, Lyon, France, 4-7 June (2007).
- [99] Simha, V.; Lee, W.J.: “Transients Behavior of Three-Phase Shell Transformers in a Distribution Feeder”, *IEEE 41st IAS Annual Meeting Industry Application Conference*, Vol.2, ISBN: 1-4244-0364-2, Tapma, Florida, USA, 8-12 October (2006) 741-746.
- [100] Chakravarthy, S.K.; Nayar, C.V.: “Transactions Briefs”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems-I*, Fundamental Theory and Applications, Vol.42, No.9, September (1995) 530-534.
- [101] Xukai, Z.; Yihan, Y.; Hongbo, L.; weipu, T.: “Study on Ferroresonance due to Electromagnetic PT In Ungrounded Neutral System”, *International Conference on Power System Technology (POWERCON’04)*, Singapora, 21-24 November (2004) 924-929.
- [102] Drapela, J.; Toman, P.; Orsagova, J.; Kratky, M.: “Simulation of Ferroresonance Phenomena in Power Systems”, *5th WSEAS/ASME International Conference on Power Systems, High Voltages-Electric Machines*, Tenerife, Spain, 16-18 December (2005) 373-377.
- [103] Bohmann, L.J.; McDaniel, J.; Stanek, E.K.: “ Lightning Arrester Failure and Ferroresonance on a Distribution System”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.29, No.6, November/December (1993) 1189-1195.
- [104] Chen, X.S.; Neudorfer, P.; Cheng, S.: “Simulation of Ferroresonance in Low-Loss Grounded Wye-wye Transformers Using a New Multi-Legged Transformer Model in EMTP”, *IEEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*, Hong Kong, December (1993) 718-724.
- [105] Zare, A.R.; Pasand, M.S.; Mohseni, H.; Farhangi, S.; Iravani, R.: “Analysis of Ferroresonance Modes in Power Transformers Using Preisach-Type Hysteretic Magnetizing Inductance”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.22, No.2, April (2007) 919-929.

- [106] Marti, J.R.; Soudack, A.C.: “Ferroresonance in Power Systems: Fundamental Solutions”, *IEE Proceedings-c*, Vol.138, No.4, July (1991) 321-329.
- [107] Parks, O.C.; Girgis, A.A.; Frick, M.E.: “Simulating Ferroresonance in a Series Compensated Distribution Network”, *IEEE Ninth International Conference on Harmonic and Quality of Power*, Vol.1, ISBN: 0-7803-6499-6, Orlando, USA, 1-4 November (2000) 162-167.
- [108] Gagnon, R.; Viarouge, P.; Sybille, G.; Tourkhani, F.: “Identification of Ferroresonance as the Cause of SVC Instability in a Degraded Series Compensated Network”, *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting* Vol.2, ISBN: 0-7803-5935-6, (2000) 1377-1382.
- [109] Valverde, V.; Mazon, A.J.; Zamora, I.; Buigues, G.:” Ferroresonance in Voltage Transformers: Analysis and Simulations”, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'07)*, Sevilla, Spain, March (2007).
- [110] Casoria, S.; Burunelle, P.; Sybille, G.: “Hysteresis Modeling in the Matlab/Power System Blockset”, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.63, No.3-5, (2003) 237–248.
- [111] Van Craenenbroeck, T.; Van Dommelen, D.; Stuckens, C.; Janssens, N.; A.Monfis, P.: “Harmonic Balance Based Bifurcation Analysis of Three-Phase Ferroresonance with Full Scale Experimental Validation”, *IEEE Transmission and Distribution Conference*, Vol.2, New Orleans, USA, ISBN:0-7803-5515-6, 11-16 April (1999) 772-777.
- [112] Sanaye Pasand, M.; Aghazadeh, R.: “Capacitive Voltage Substations Ferroresonance Prevention Using Power Electronic Devices”, *International Conference on Power Systems Transients-IPST'03*, New Orleans, USA, (2003).
- [113] Al-Anbarri, K.; Ramanujam, R.; Keerthiga, T.; Kuppusamy, K.: “Analysis of Nonlinear Phenomena in MOV Connected Transformer”, *IEE Proc.-Gener.Transform Distribution*, Vol.148, No.6, November (2001) 562-566.
- [114] Andrei, R.G.; Halley, B.R.: “Voltage Transformer Ferroresonance From an Energy Transfer Standpoint”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No.3, July (1989) 1773-1778.

- [115] Dugan, R.C.: “Examples of Ferroresonance in Distribution Systems”, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Vol.2, ISBN: 0-7803-7989-6, July (2003) 1213-1215.
- [116] Kazimov, Sh.A.: “Use of Matlab for Modelling of Ferroresonance Overvoltage”, *2nd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*, Tabriz, IRAN, 6-8 September, (2004) 48-50.
- [117] Li, H.; Fan, Y.; Shi, R.: “Chaos and Ferroresonance”, *IEEE Electric and Computer Engineering, CCECE’06 Canadian Conference*, ISBN: 1-4244-0038-4 Ottawa, Canada, May (2006) 494-497.
- [118] Naidi, S.R.; Souza, B.A.: “ Analysis of Ferroresonant Circuits Using a Newton-Raphson Scheme”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.12, No.4, October (1997) 1793-1798.
- [119] ABB s.r.o, “Ferroresonance”, <http://www.abb.de>, (19.12.2008).
- [120] Trench Group Brochure, “Ferroresonance Phenomena and Strategy” <http://www.trenchgroup.com>. (18.12.2008).
- [121] Mork, B.A.; Struehm, D.L.: “Application of Nonlinear Dynamics and Chaos to Ferroresonance in Distribution Systems”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol.9, No.2, April (1994) 1009-1017.
- [122] Wright, I.A.; Morszytn, K.: “Subharmonic Oscilations in Power Systems-Theory and Practice”, *IEEE Transactions*, PAS 89, (1970) 1805-1815.
- [123] Wright, I.A.; Morszytn, K.: “Three Phase Subharmonic Oscilations in Symmetrical Power Systems”, *IEEE Transactions*, PAS 89, (1971) 1295-1304.
- [124] Kavasseri, R.G.: “Analytical Prediction of Subharmonic Oscilations in a Ferroresonant Circuit”, *Proc. 35th North American Power Symposium*, Rolla, Missouri, October (2003).
- [125] Amar, F.B.; Dhifaoui, R.: “Bifurcation Lines Calculations of Period-1 Ferroresonance”, *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Power Systems*, Lisbon, Portugal, 22-24 September (2006).

- [126] Escudero, M.V.; Dudurych, I.; Redfern, M.: “Understanding Ferroresonance”, *IEEE 39th International Universities Power Engineering Conference- UPEC’04*, Vol.2, (2004) 1262-1266.
- [127] Shoup, D.; Paserba, J.; Mannarino, A.: “Ferroresonance Conditions Associated with a 13kV Voltage Regulator During Back-feed Conditions”, *International Conference on Power Systems Transients (IPST’07)*, Lyon, France, 4-7 June (2007).
- [128] Li, Y.; Shi, W.; Li, F.: “Novel Analytical Solution to Fundamental Ferroresonance-Part I: Power Frequency Excitation Characteristic”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.21, No.2, April (2006) 788-793.
- [129] Leon, F.; Semlyen, A.: “A Simple Representation of Dynamic Hysteresis Losses in Power Transformers”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.10, No.1, January (1995) 315-321.
- [130] Lamba, H.; Grinfeld, M.; McKee, S.; Simpson, R.: “Subharmonic Ferroresonance in an LCR Circuit with Hysteresis”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.33, No.4, July (1997) 2495-2500.
- [131] Val Escudero, M.; Dudurych, I.; Redfern, M.A.: “Characterization of Ferroresonance Models in HV substation with CB Grading Capacitors”, *Elsevier Electric Power System Research* 77, (2007) 1506-1513.
- [132] Endo, H.; Marinova, I.; Hayano, S.; Saito, Y.: “Ferroresonance Circuit Exhibiting Chaotic Phenomenon: rule Extraction from Nonlinear Systems”, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics* 19, (2004) 257-261.
- [133] Li, Y.; Shi, W.; Qin, R.; Yang, J.: “A Systematical Method for Suppressing Ferroresonance at Neutral-Grounded Substations”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.18, No.3, July, (2003) 1009-1014.
- [134] Malyar, V.; Malyar, A.: “Calculation and Analysis of Stationary Modes of Electrotechnical Devices with Ferroresonant Circuits”, *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 2002. *Proceedings of the International Conference (TCSET’02)*, Lviv-Slavsko, Ukraine, 18-23 February (2002) 29-30.
- [135] Abdallah, A.S.; El-Kady, M.A.: “Ferroresonance Phenomenon in Power Transformers-Experimental Assessment”, *JKAU: Eng.Sci.*, Vol.16, No.1, (2005) 71-82.

- [136] Saied M.M.; Abdallah H.M.; Abdallah A.S.: "Damping Effect of Load on the Ferroresonance Phenomenon in Power Networks, *Electric Power System Research* 7, (1984) 271-277.
- [137] Tsao, Ta-P.; Ning, CC.: "Analysis of Ferroresonant of Overvoltages at Maanshan Nuclear Power Station in Taiwan", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.21, No.2, April (2006) 1006-1012.
- [138] Walling, R.A.: "Ferroresonance in Low-Loss Distribution Transformers", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, ISBN: 0-7803-7989-6, Vol.2, 13-17 July (2003) 1220-1222.
- [139] Mokryani, G.; Haghifam, M.R.; Esmailpoor, J.: "A Novel Technique for Ferroresonance Identification in Distribution Networks", *International Journal of Electrical, Computer and Systems Engineering*, Vol.1, No.2, (2007) 103-108.
- [140] Zare, R.A.; Irvani, R.; Pasand, M.S.; Mohseni, H.; Ferhangi, S.: "An Accurate Hysteresis Model for Ferroresonance Analysis of a Transformer", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.23, No.3, July (2008) 1448-1456.
- [141] Vaseghi, V.S.: "Advanced Signal Processing and Digital Noise Reduction", *John Wiley*, New York, USA (1996).
- [142] Taskin, S., Seker, S., Karahan, M., Akinci, T.C.: "Spectral Analysis for Current and Temperature Measurements in Power Cables", *Electric Power Components and Systems*, Vol.37, No.4, April (2009) 415-426.
- [143] Akinci, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: "Feature Extraction for Ferroresonance Phenomena in Electric Power System", *International Conference on Modeling and Simulation (IASTED) MS'09*, Alberta, Canada, July (2009).
- [144] Yıldırım, S.; Akinci, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: "Determination of The Characteristics for Ferroresonance Phenomenon in Electric Power Systems", *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.55, ISSN:2070-3724, Oslo, Norway, 29-31 July (2009) 108-112.
- [145] Akinci, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: "Detection of The Ferroresonance Phenomenon for an Electric Power Network Using the Spectral Methods", *International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering & Communications*, (değerlendirme aşamasında).
- [146] Mitra, S.K.: "Digital Signal Processing: A Computer Based Approach", 3rd Edition, *McGraw-Hill*, ISBN:007-124467-0, (2006) 100-106.

- [147] Goh, S.S.; Ron, A.; Shen, Z.: “Gabor and Wavelet Frames”, ISSN:1793-0758, Copyright© *World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, (2007) 112.
- [148] Çankaya, İ.; Vatansever F.: ”Fourier ve Dalgacık Dönüşümünün Karşılaştırılması”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Sayı.6-3, (2002) 16-26.
- [149] Abbate, A.; DeCusatis, C.M.; Das, P.K.: “Wavelets and Subbands: Fundamentals and Applications”, ©*Birkhauser*, Boston, ISBN:0-8176-4136-x (2002).
- [150] Meyer, Y.: “Wavelets Algorithms and Application”, *Siam*, Philadelphia, USA, (1993).
- [151] Ertürk, S.: “Sayısal İşaret İşleme”, *Birsen Yayınevi*, İstanbul, Türkiye, (2004).
- [152] Ayaz, E.: “Dalgacıklar ve Elektrik Mühendisliğindeki Uygulamaları”, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (1997).
- [153] Louis, A.K.; Maaß, P.; Rieder, A.: “Wavelets, Theory and Applications”, *John Wiley & Sons*, Chichester, (1997).
- [154] Misiti, M.; Misiti, Y.; Oppenheim, G; Poggi, J.M.: Wavelet Toolbox User’s Guide by The MathWorks, Inc., (2009).
- [155] Polikar, R.: “ The Wavelet Tutorial”, [http:// engineering.rowan.edu/~polikar](http://engineering.rowan.edu/~polikar) (23/04/2009).
- [156] Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N., Yıldırım, S.: “Continuous Wavelet Transform for Ferroresonance Phenomena in Electric Power Systems” *IEEE Transactions on Power Systems*, (değerlendirme aşamasında).
- [157] Ulusoy, H.: “Yüksek Gerilim Elektrik Malzemeleri ve Testleri”, *Akay Ofset*, (1993) 113.
- [158] Dehning, C.; Wolf, K.: “Why do Multi-Physics Analysis?”, *Nafems Ltd*, United Kingdom, (2006).
- [159] TEİAŞ: “İletim ve Dağıtım Sistemi- İletim Sistemi”, <http://www.teias.gov.tr/apkuretim/iletimdagitim.htm> (16/09/2009).
- [160] TEİAŞ: “Türkiye Elektrik Üretim-İletim İstatistikleri 2008”, <http://www.teias.gov.tr/istatistik2008/index.htm> (16/09/2009).
- [161] TEİAŞ: “Yük Tevzi Dairesi Başkanlığı İşletme Faaliyetleri Raporları”, http://www.teias.gov.tr/yukdagitim/yillik_menu.htm (16/09/2009).

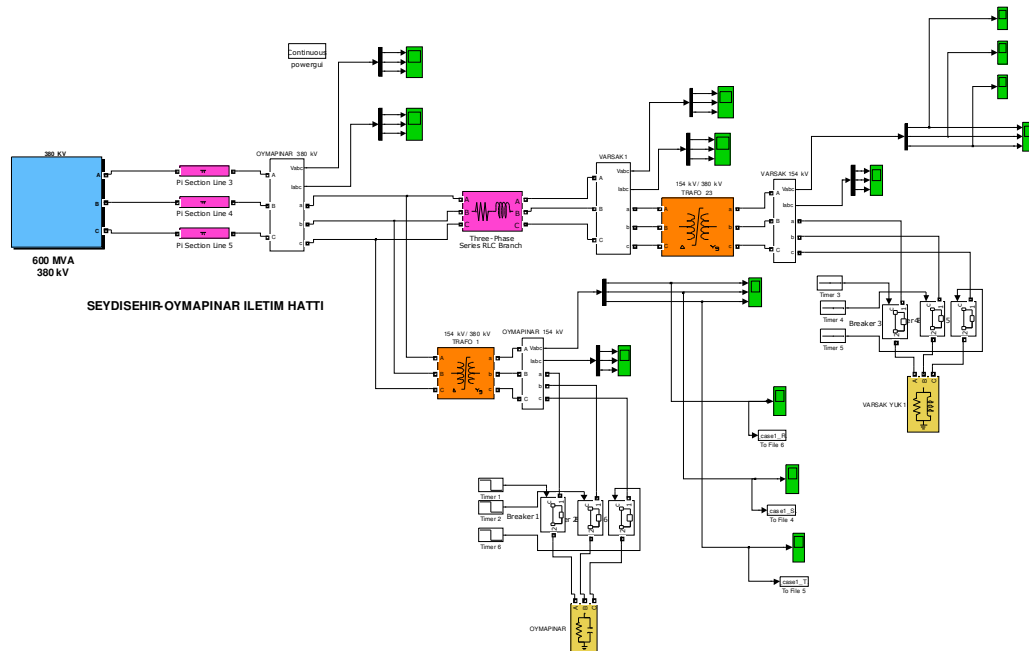
- [162] TEİAŞ: “9. İletim Tesis ve İşletme grup Müdürlüğü 380kV’luk ENH Listesi”, www.teias.gov.tr/Gr9/eihatlariliste.xls (16/09/2009).
- [163] EMO: “Üretim İletim ve Dağıtımda Ege Bölgesi”, *Teknik*, EMO İzmir Şubesi Enerji Komisyonu, Mayıs (2007) 21-23.
- [164] Dönmez, F.; “Genel Afet Sonrası Elektrik Şebekelerinde Oluşan Sistem Çökmelerinin Bilgisayar Destekli Analizi”, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, (2008).
- [165] Mozaffari, S.; Sameti, M.; Sodack, A.C.: “Effect on Initial Conditions on Chaotic Ferroresonance in Power Transformers”, *IEE Proc. Gener. Transm. Distribution*, Vol.144, No.5, September (1997).
- [166] Milicevic, K.; Emin, Z.: “Impact of Initial Conditions on the Initiation of Ferroresonance”, *ELSEVIER, Electric Power and Energy Systems*, Vol.31, No.4, May (2009) 146-152.

EKLER

EK 1

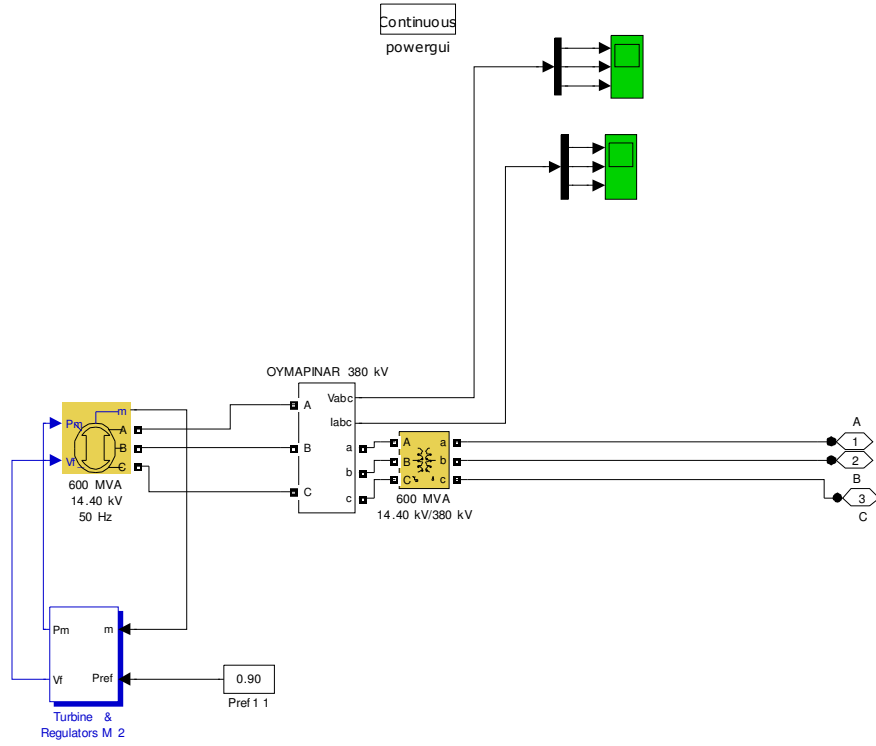
SEYDİŞEHİR-OYMAPINAR 380kV ENERJİ İLETİM HATTI MATLAB-SİMULİNK MODELİ

Batı Anadolu Enerji İletim Hattı'ndan Seydişehir-Oymapınar 380kV' luk hattın MATLAB-Simulink modeli EK1-Şekil 1'de gösterilmiştir. Tüm modelin görüldüğü devrede generatör bloğu mavi renkle gösterilmiştir. Generatörün açık modeli de EK1 Şekil 2'de gösterilmiştir.



EK1-Şekil 1 Seydişehir-Oymapınar Enerji İletim Hattı Matlab-Simulink Modeli.

Seydişehir-Oymapınar Enerji İletim Hattının Generatörüne ait Matlab-Simulink Modeli EK1-Şekil 2’de görülmektedir. Burada generatörün parametreleri TEİAŞ 2006 verilerinden yararlanılarak modellenmiştir. Yapılan modelde generatör çıkışındaki elektriksel değişimlerin izlenmesi için de ölçü aletleri kullanılmıştır. Böylece iletim hattı üzerinde meydana gelen ferrerezonans aşırı gerilimlerin etkilerini generatör üzerinden de gözlemlemek mümkün olabilmektedir.



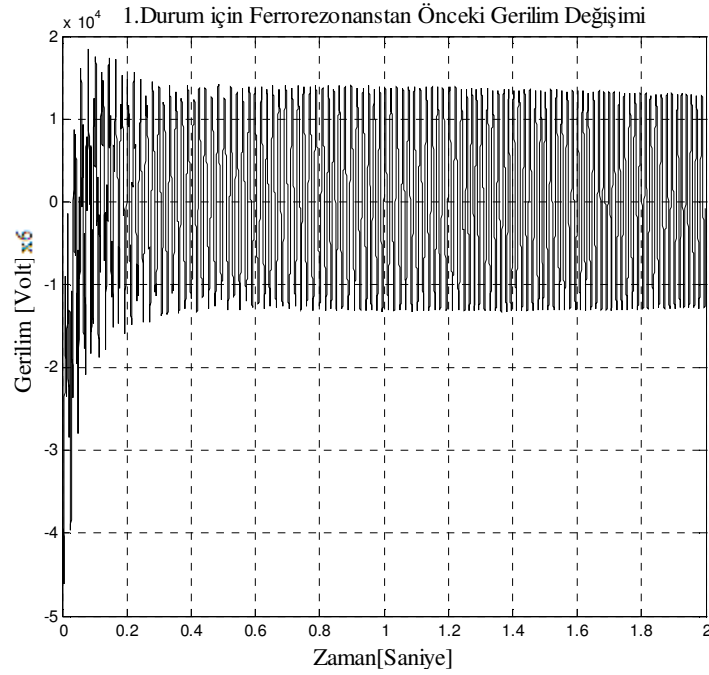
EK1-Şekil 2 Seydişehir-Oymapınar Enerji İletim Hattı Generatör Matlab-Simulink Modeli.

FARKLI SENARYOLAR İÇİN GERİLİM DEĞİŞİMLERİ

Tezde belirtilen *Durum* ifadesinden iletim hattı üzerinde oluşturulan senaryolar kastedilmektedir. Burada her bir anahtarlama senaryosu bir durum olarak gösterilmiştir. Her bir durumun anahat şema şekli ve sayfa numarası Tablo EK1-1’de verilmiştir.

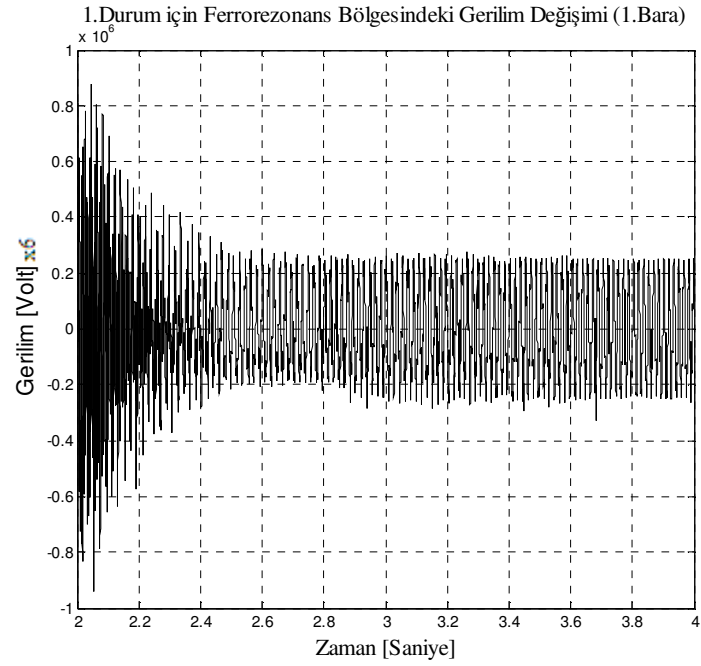
EK1-Tablo 1 Verilen Durumlar için Şekil ve Sayfa Numaraları

DURUM	Şekil Numarası	Sayfa Numarası
1.Durum	Şekil IV.3	46
2.Durum	Şekil IV.10	51
3.Durum	Şekil IV.14	54
4.Durum	Şekil IV.19	56
5.Durum	Şekil IV.25	61
6.Durum	Şekil IV.31	64
7.Durum	Şekil IV.36	67

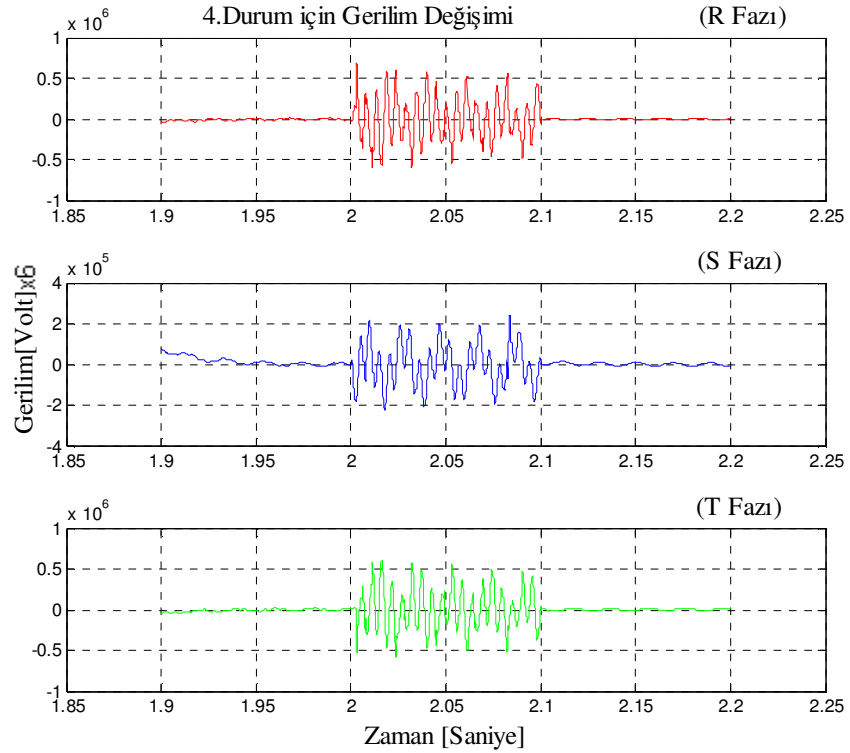


EK1-Şekil 3 Birinci Durum için Ferrerezonans Olayından Önceki Gerilim Değişimi.

Birinci durum sayfa 46'da, Şekil IV.3'de gösterilen hat üzerinde temel senaryolardaki anahtarların durumlarıyla ilgilidir. Ayrıca tüm durumların anahat modellerini ve senaryoların anahtarlama konumlarını daha rahat bulabilmek için

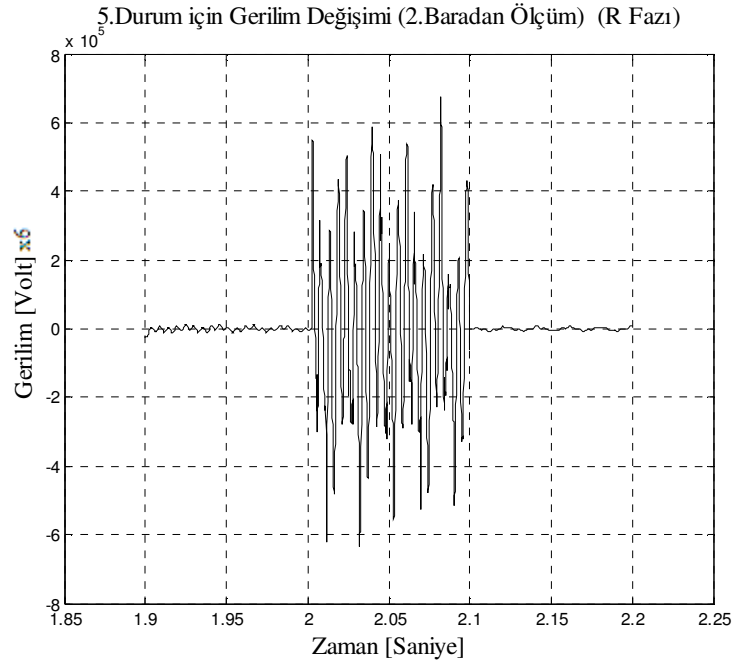


EK1-Şekil 4 Birinci Durum için Ferrorezonans Bölgesindeki Gerilim Değişimi.



EK1-Şekil 5 Dördüncü Durumda R, S, T Fazları için Gerilim-Zaman Grafiği.

4.Durum Sayfa 56 ve Şekil IV.19’da gösterilen devreye ait anahtarlama sonucu oluşan ferrorezonans senaryosudur.



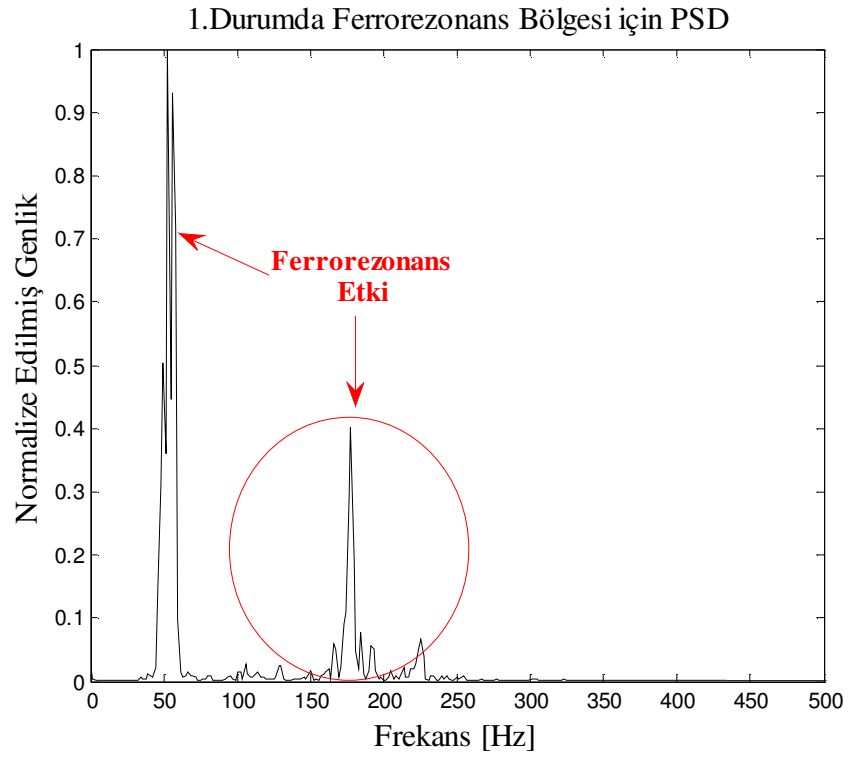
EK1-Şekil 6 Beşinci Durumda (1.9 Saniye ile 2.2 Saniye Arası) Gerilim Değişimi.

Beşinci durumda iletim hattının 2 ile 2.1 saniye arasındaki anahtarlama sonucu oluşan ferreazonans aşırı gerilimlerin gerilim-zaman grafiği EK1-Şekil 6’da gösterilmiştir. 5.durum için oluşturulan hat modeli Şekil IV.25’de sayfa 61 de verilmiştir.

EK 2

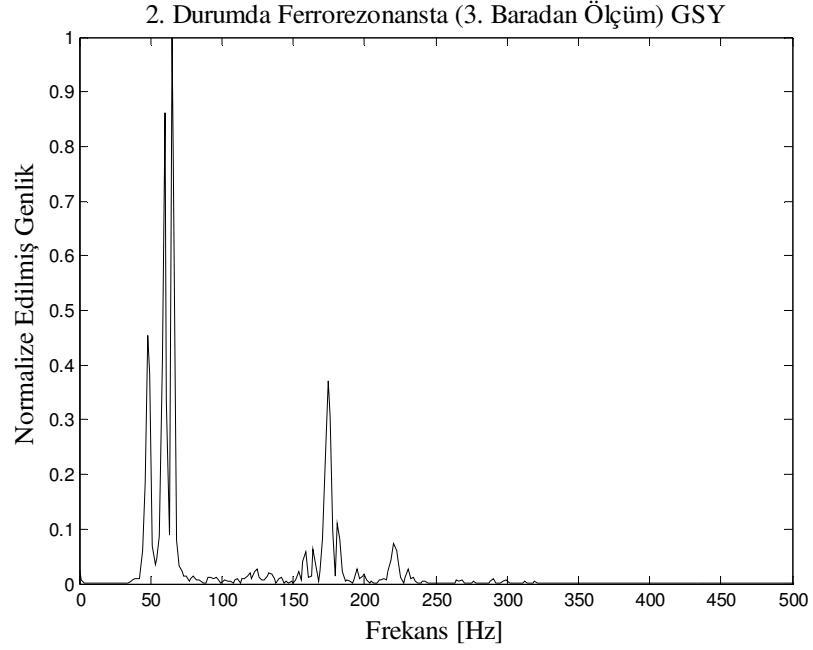
FARKLI SENARYOLAR İÇİN FERROREZONANS BÖLGELERİNİN GÜÇ SPEKTRUM YOĞUNLUKLARI

Analizlerde ilk iki saniye ferreazonanstan önceki bölge olarak seçilmiş ve örnekleme frekansı (fs) 14000Hz olarak belirlenmiştir.

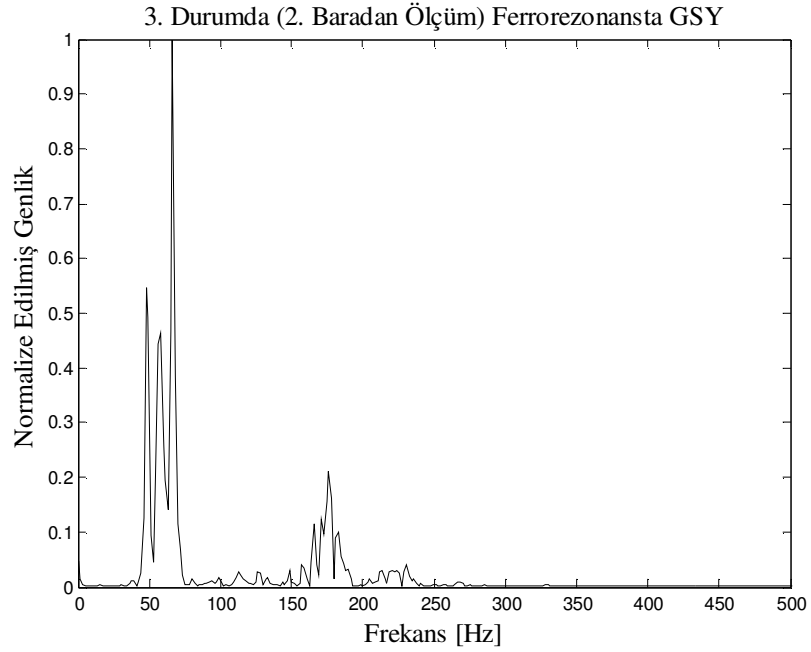


EK2-Şekil 1 Birinci Durum için Ferreazonans Bölgesinin GSY'si.

Yukarıdaki şekilde birinci durum için ferreazonans bölgesinin GSY'si incelendiğinde 100-250 Hz frekansları arasında ferreazonans kaynaklı yüksek genlikli etkilerin ayrıca temel frekans 50 Hz de ise çatallanmaların meydana geldiği gözlemlenmektedir. Benzer şekilde EK2-Şekil 2'deki grafikte 100-250 Hz arasında yüksek genlikler ve 50 Hz temel frekans ta ise kayma ve çatallanmalar meydana gelmektedir.



EK2-Şekil 2 İkinci Durumda Ferreazonans Öncesi GSY.



EK2-Şekil 3 Üçüncü Durumda Ferreazonans Bölgesindeki GSY ($\Delta t=0$).

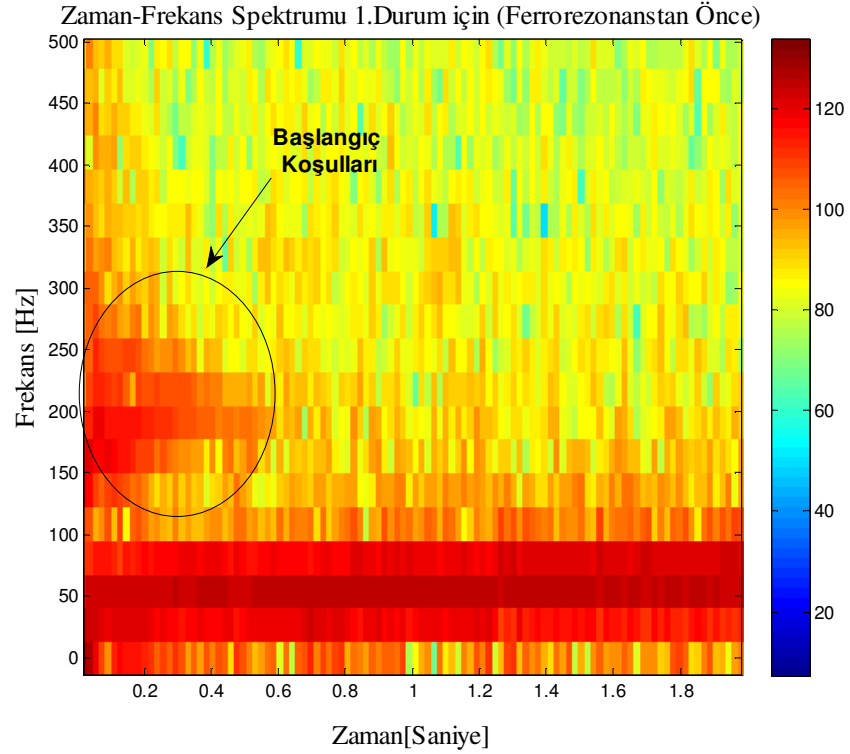
Bu incelemelerden varılan sonuca göre, durağan olmayan veri bilgi vermemektedir bu sebeple sadece ferreazonans bölgeleri incelenmiştir.

İkinci duruma ait hat modeli sayfa 51 de Şekil IV.10'da ve üçüncü duruma ait hat modeli de Sayfa 54, Şekil IV.14'de verilmiştir.

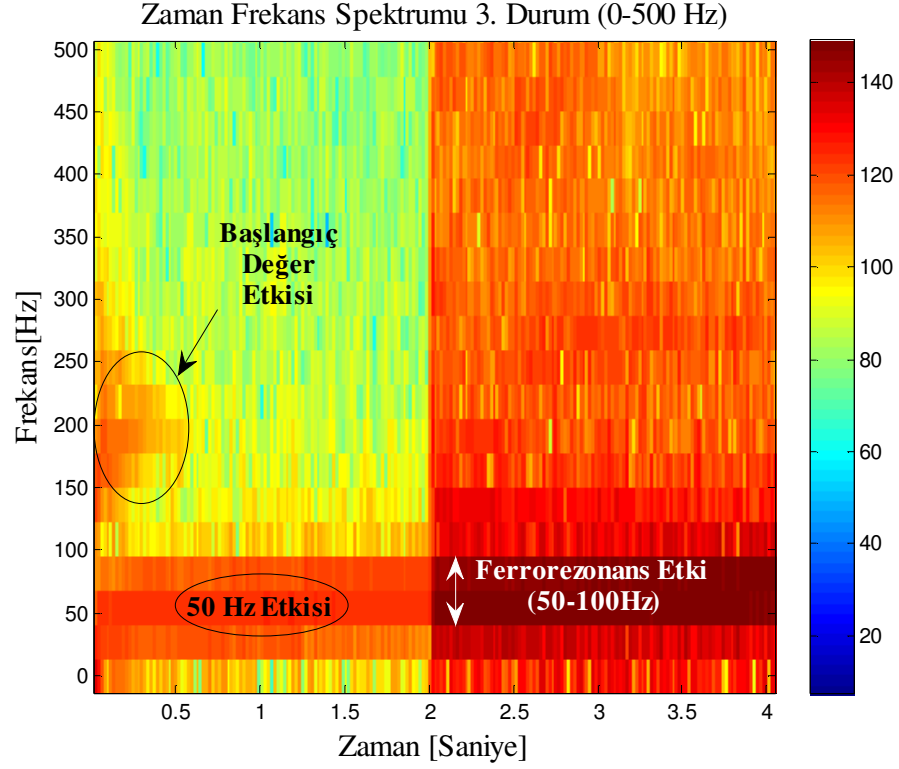
EK 3

BAZI FARKLI SENARYOLAR İÇİN ZAMAN-FREKANS SPEKTRUMLARI

Bölüm V'deki zaman-frekans analiz sonuçlarına ek olarak aşağıdaki analiz sonuçları verilmiştir. Sayfa 76'da Şekil V.3 ile verilen ferreazonans olayının öncesinde 200Hz civarındaki başlangıç koşullarının geçici durumu aşağıdaki şekil ile gösterilir.



EK3-Şekil 1 Birinci Durum için Ferreazonans Olayından Önce Zaman-Frekans Analizi.



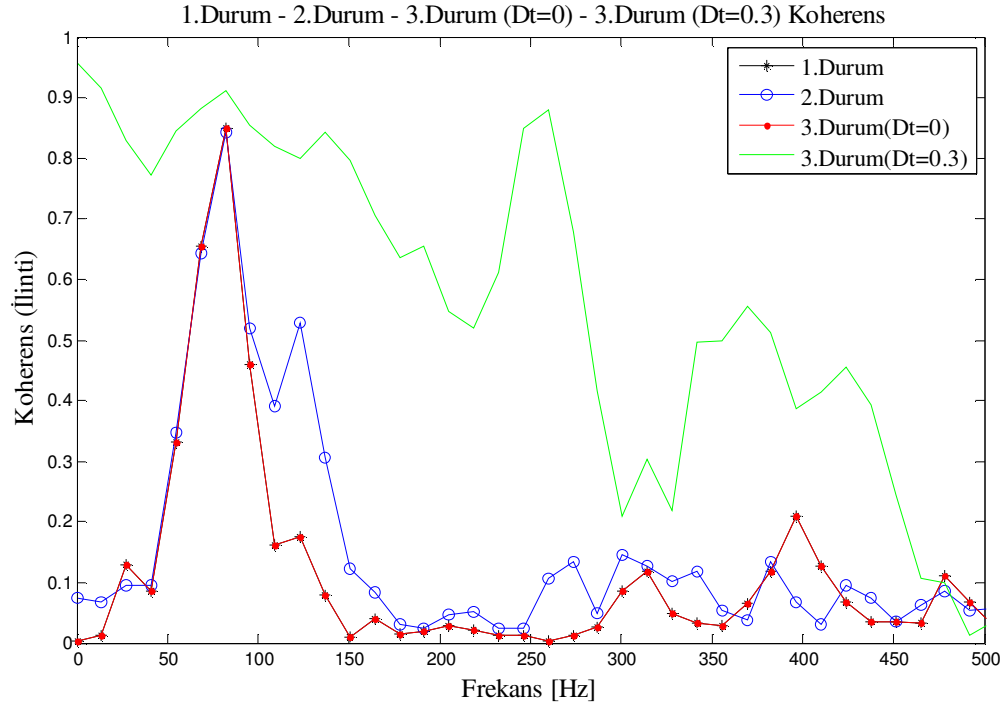
Burada 3. durum özellikleri daha da ayrıntılandırılmıştır. 50 Hz'nin tüm zamana yayılması 200 Hz'in başlangıç değerini etkilemesi ve 50 Hz-100 Hz arasında ferorezonans etki görülmektedir.

Üçüncü duruma ait ferorezonans anahtarlama senaryoları sayfa 56 ve Şekil IV.17'de verilmiştir.

EK4

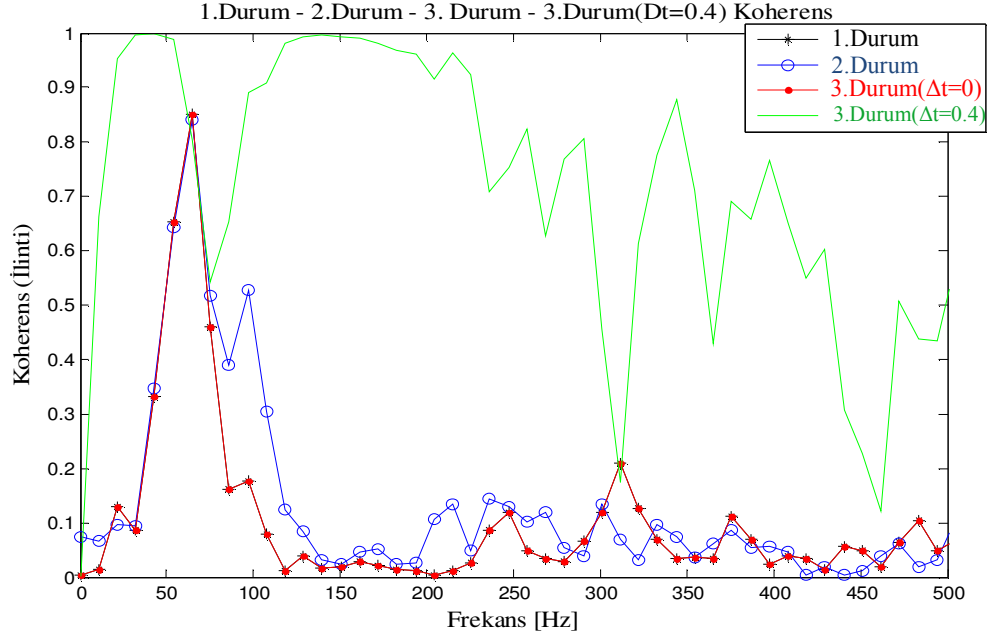
İLK ÜÇ SENARYO İÇİN KOHERENS ANALİZLERİ

Burada farklı senaryolar altında Bara 2 ve 3'den alınan gerilim değişimlerinin 0-4 saniye aralığındaki tüm benzerlikleri koherens fonksiyonları ile verilmekte ve bu bağlamda anahtarlamalar arasındaki zaman farkının etkisi gösterilmektedir.



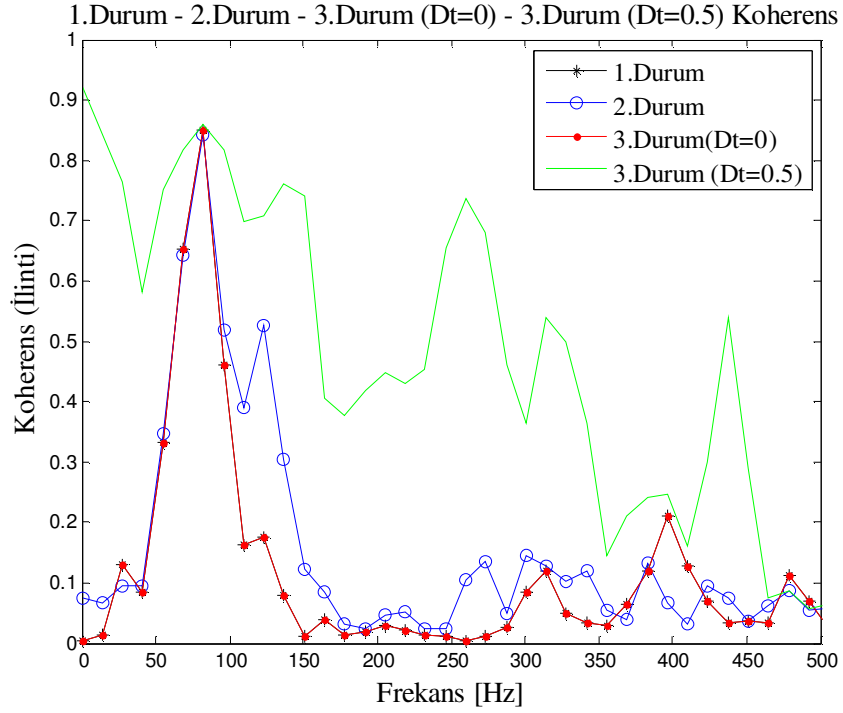
EK4-Şekil 1 İlk Üç Durum ile 3.Durumda $\Delta t=0.3$ iken Koherens.

İlk üç durum için ferreazonans anahtarlama senaryoları sırasıyla sayfa 45, 51 ve 53'de verilmiştir.



EK4-Şekil 2 İlk Üç Durum ile 3.Durumda $\Delta t=0.4$ iken Koherens.

Yukarıdaki şekle göre anahtarlamalar arasındaki zaman farkı Δt 'nin büyümesi ile 2 ve 3. baralardaki gerilimler üzerinde ferreazonans etkiler de büyümektedir.



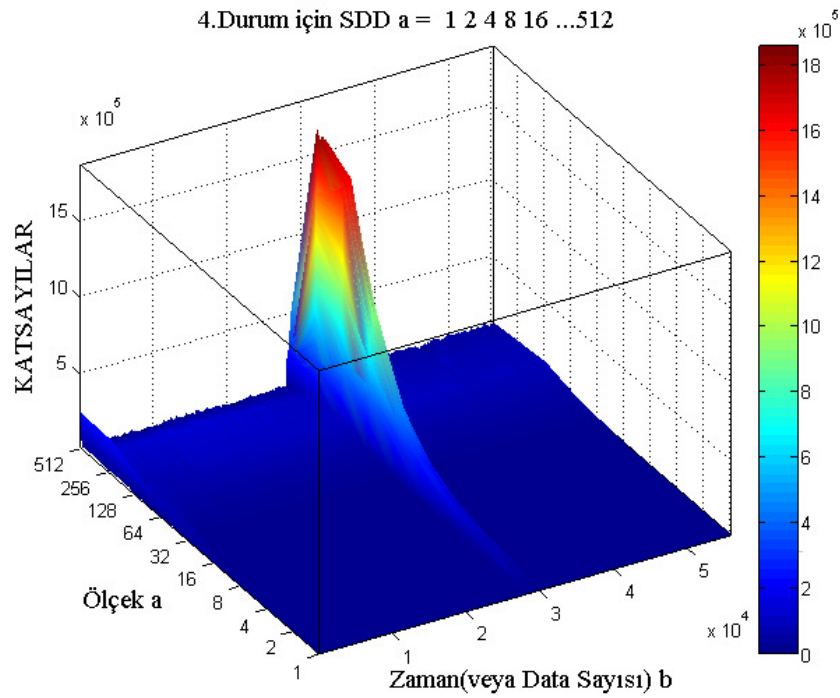
EK4-Şekil 3 İlk Üç Durum ile 3.Durumda $\Delta t=0.5$ iken Koherens.

Burada da anhtarlamaların etkisi önceki durumlar gibidir.

EK 5

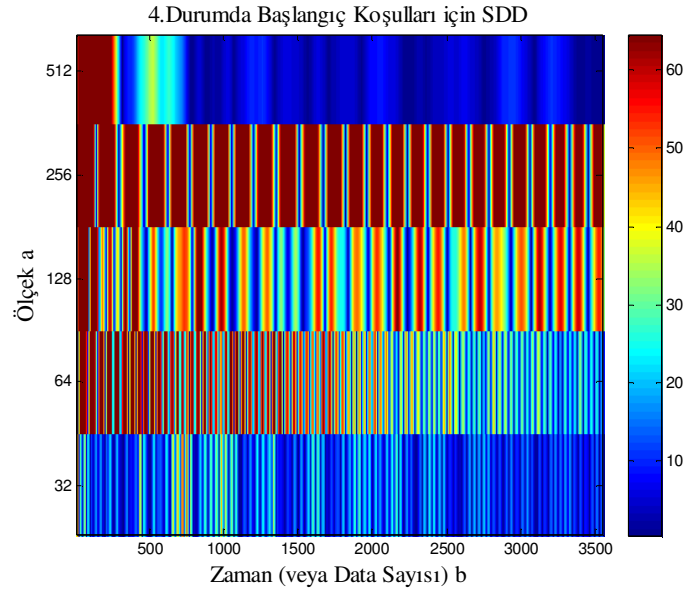
BAZI FARKLI SENARYOLAR İÇİN SDD ANALİZLERİ

Bu bölümde 4 ve 5. duruma ait sonuçlar gösterilmiştir. Burada tüm verinin gerilim değişimi SDD ile yapılan analiz ile zaman, ölçek ve katsayı grafiği üç boyutlu olarak gösterilmiştir. Grafikte zaman boyutu dalgacık analizinin özelliğinden dolayı; $Zaman = Veri / 1.4 \times 10^{+4}$ Saniye olarak ifade edilebilir.



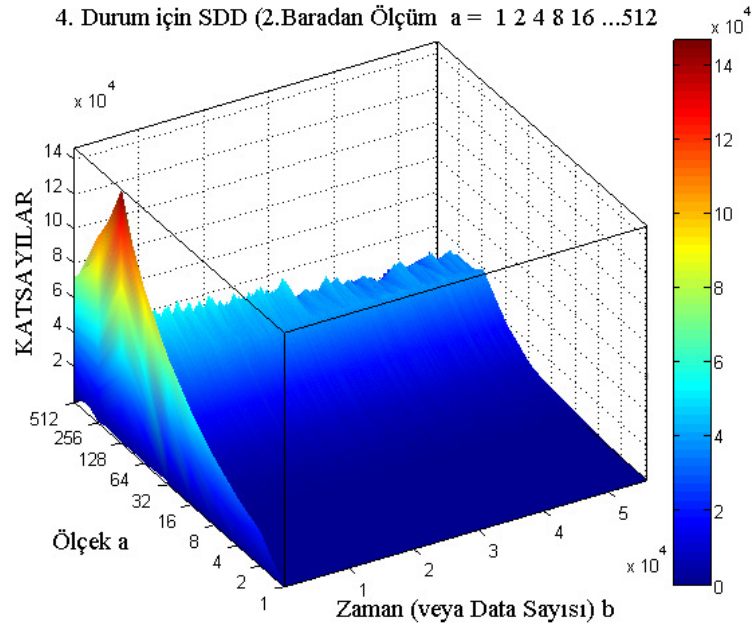
EK5-Şekil 1 Dördüncü Durumda SDD ($Zaman = Veri / 1.4 \times 10^{+4}$ Sn).

4. duruma ait hat şeması sayfa 56'da verilmiştir. SDD analizleri aşağıdaki gibidir.



EK5-Şekil 2 Dördüncü Durumda Başlangıç Koşulları için SDD

(Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

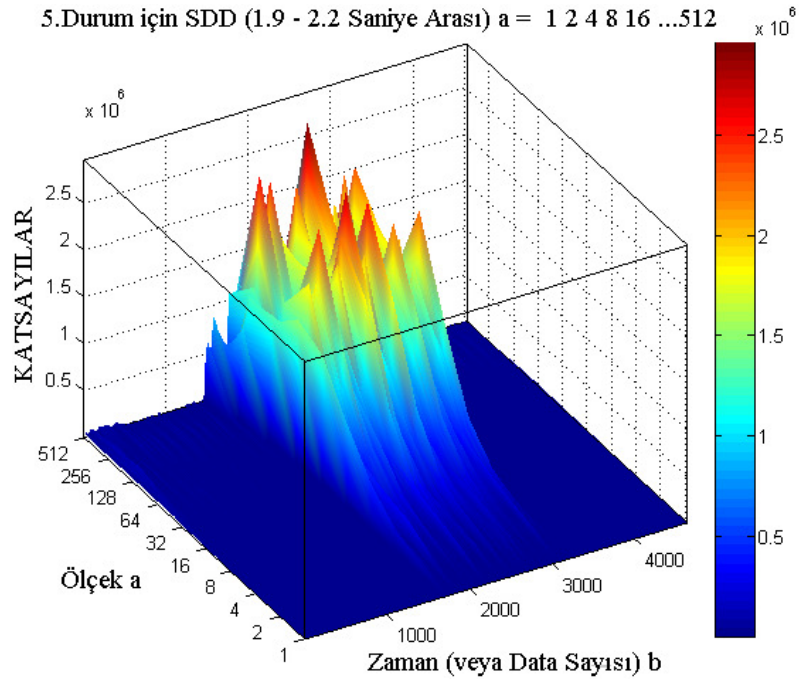


EK5-Şekil 3 Dördüncü Durumda (2.Baradan Ölçüm) SDD

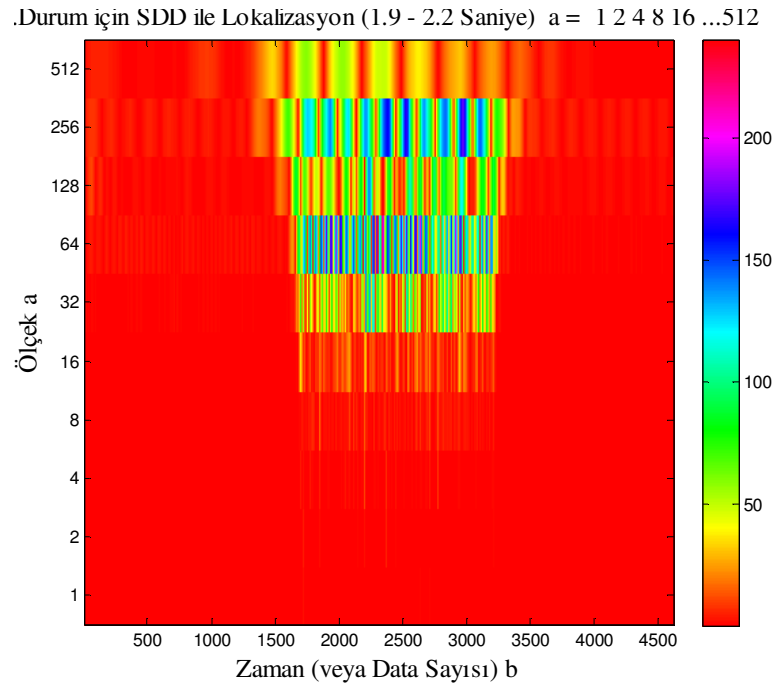
(Zaman=Veri / 1.4×10^4 Sn).

Geçici başlangıç değerlerinin etkisi büyük genlik düşük frekanslarda gözlemlenmektedir.

Beşinci duruma ilişkin hat şeması sayfa 61’da Şekil IV.25’de verilmiştir. SDD analizleri izleyen şekillerde verilmiştir.



EK5-Şekil 4 Beşinci Durumda (1.9 - 2.2 Saniye Arasındaki) SDD.



EK5-Şekil 5 Beşinci Durumda (1.9 - 2.2 Saniye Arasındaki) Lokalizasyon
(Zaman=Veri / $1.4 \times 10^{+4}$ Sn).

EK 6

TEZ ÇALIŞMASINDAN ÜRETİLEN ÇALIŞMALAR

- 1- Akıncı, T.Ç.; Mokryani, G.; Gökmen, G.; Seker, S.; Ekren, N.: “Analysis of Ferroresonance on Single Phase Line Model”, *IATS’09 - 5th International Advanced Technologies Symposium*, Karabuk, Turkey, May 13-15, (2009).
- 2- Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: “Spectral Analysis for Signal Based on Ferroresonance Phenomena in Electric Power System”, *Journal of the Technical University Sofia, Branch Plovdiv- Fundamental Sciences and Applications*, ISSN: 1310-271, Vol. 14(1), pp.239-244Vol. Bulgaria, May 28-29, (2009).
- 3- Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: “Feature Extraction for Ferroresonance Phenomena in Electric Power System”, *IASTED’09 Albea-Canada*, July (2009).
- 4- Yıldırım, S.; Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: “Determination of The Characteristics for Ferroresonance Phenomenon in Electric Power Systems”, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol.55, ISSN. 2070-3724, Oslo-Norway, July (2009).
- 5- Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N.: “Detection of The Ferroresonance Phenomenon for West Anatolian Electric Power Network in Turkey” *International Journal of Engineering Intelligent Systems for Electrical Engineering & Communications*, (değerlendirme aşamasında).
- 6- Akıncı, T.Ç.; Şeker, S.; Ekren, N., Yıldırım, S.: “Continuous Wavelet Transform for Ferroresonance Phenomena in Electric Power Systems” *IEEE Transactions on Power Systems*, (değerlendirme aşamasında).

ÖZGEÇMİŞ

Tahir Çetin AKINCI, 1974 yılında Pınarbaşı’da doğdu. İlköğrenimini Yüzüncü Yıl İlkokulu’nda ve Birecik Lisesi orta kısmında tamamladıktan sonra lise öğrenimini 1991 yılında Dinar Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümü’nde tamamladı. 1994 yılında İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümünü kazandı, bu bölümden üçüncü sınıfta ayrılarak Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümüne kayıt yaptırdı. 2000 yılında Elektrik Eğitimi Bölümü’nden mezun oldu ve aynı yıl İnönü Üniversitesi Malatya Meslek Yüksek Okulu Kontrol Sistemleri Programında Öğretim Elemanı olarak çalışmaya başladı. 2002 yılında Trakya Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü Enerji Tesisleri A.B.D’da Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı. 2003 yılında Marmara Üniversitesine Yüksek Lisans ve Doktora eğitimini yapmak üzere görevlendirildi. Ekim 2003 tarihinde Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı. 2005 yılında “Dalgacık (Wavelet) Tabanlı Dağıtım Sistemleri Koruma Algoritması” tezi ile yüksek lisans programını tamamladı. Aynı yıl doktora eğitimine başlayan Tahir Çetin AKINCI, halen görev yeri olan Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümü’nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmalarına devam etmektedir.

İstanbul, 2009