

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**GÜÇ TRAFOLARINDA FERROREZONANS
OLAYLARIN KAOTİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisi Engin YİĞİT

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜH.

Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Yılmaz UYAROĞLU

Haziran 2009

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ TRAFOLARINDA FERROREZONANS OLAYLARIN KAOTİK ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik-Elektronik Mühendisi Engin YİĞİT

Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜH.
Enstitü Bilim Dalı : ELEKTRONİK

Bu tez 24 / 06 /2009 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği ile kabul edilmiştir.



Prof. Dr. Mehmet Ali Yalçın
Jüri Başkanı



Yrd. Doç. Dr. Yılmaz Uyaroğlu
Üye



Yrd. Doç. Dr. İlyas Çankaya
Üye

ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlamamda çok önemli katkıları ve yardımlarından dolayı Sayın Hocam Yrd. Doç.Dr Yılmaz UYAROĞLU'na en içten teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans tez çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Yüksek lisans eğitimim sırasında gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı Haliç Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümü hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Engin Yiğit

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	ii
İÇİNDEKİLER	iii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
ÖZET.....	xi
SUMMARY.....	xii
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	
FERROMANYETİK MALZEMELER.....	3
2.1. İdeal Bir Fazlı Transformatör.....	3
2.2. Bir Fazlı İdeal Transformatörün Eşdeğeri.....	7
2.3. Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları.....	9
BÖLÜM 3.	
LİNEER REZONANS.....	12
3.1. Lineer L, R ve C Devresinin Analizi.....	13
3.1.1. Kayıpsız devre.....	13
3.1.2. Kayıplı devre.....	15
3.2. Seri Rezonans.....	17
3.3. Paralel Rezonans.....	19
BÖLÜM 4.	
FERROREZONANS.....	22
4.1. Ferrorezonans ile Lineer Rezonans Arasındaki Temel Farklar.....	22

4.2. Fiziksel Yaklaşım.....	23
4.3. Başlangıç Değerlerine Duyarlılık ve Atlama Olayı.....	27
4.4. İletim Sistemlerinde Ferrerezonans.....	29
4.4.1. Enerji iletim sistemlerinde seri ferrerezonans devreleri.....	29
4.4.2. Enerji iletim sistemlerinde paralel ferrerezonans devreleri.....	33
4.5 Ferrerezonans Modlarının Sınıflandırılması.....	35
4.5.1. Ferrerezonans tipinin teşhisi.....	35
4.5.2. Temel mod.....	36
4.5.3. Alt harmonik mod.....	37
4.5.4. Yarı periyodik mod.....	38
4.5.5. Karmaşık mod.....	39
4.5.6. Ferrerezonansın teşhis edilmesi.....	40
BÖLÜM 5.	
GÜÇ TRAFOLARINDA FERREZONANS OLAYLAR.....	41
5.1. Nötr İletkeninden İzole Edilmiş Gerilim Trafosunda Meydana Gelen Ferrerezonans.....	42
5.2. Kesicinin Kapama Esnasında Bir Fazın Açık Kalması Anındaki Ferrerezonans.....	43
5.3. Kutuplarına Paralel Bağlı Kondansatör Bulunan Kesicilerin Güç Trafosu ile Meydana Getirdiği Ferrerezonans.....	44
5.4. Kesicilerin Sıralı Açma Yapmaları Anında Oluşan Ferrerezonans..	46
5.5. Ferrerezonansın Tetikleyici Olayları ve Önlenmesi.....	48
BÖLÜM 6.	
NONLİNEER DİNAMİKLER VE KAOS.....	49
6.1. Durum Uzayı ve Vektör Alan.....	51
6.2. Kaotik Dinamik.....	55
6.2.1. Kaos teorisi.....	55
6.2.2. Kaotik sistemlerin gerekirciliği.....	55
6.2.3. Başlangıç koşullarına duyarlılık.....	56
6.2.4. Kaos analizi için gerek ve yeter koşullar.....	57
6.2.5. Kaotik sistemlerin davranışları.....	57

6.3. Kaos Analiz Yöntemleri.....	61
6.3.1. Yörüngelerin izlenmesi.....	61
6.3.2. Faz uzayı.....	62
6.3.3. Poincare haritalama.....	62
6.3.4. Güç spektrumu.....	63
6.3.5. Çatallaşma diyagramı.....	63
6.3.6. Lyapunov üstleri.....	63
6.4. Kaotik Osilatörler.....	64
6.4.1. Lorenz kaotik osilatörü.....	64
6.4.2. Chua kaotik osilatörü.....	66
6.4.3. Rossler kaotik osilatörü.....	68
6.4.4. Van Der Pol kaotik osilatörü.....	68
6.4.5. Chen kaotik osilatörü.....	70
6.4.6. Duffing Van Der Pol kaotik osilatörü.....	70
BÖLÜM 7.	
FERROREZONANS OLAYLARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ	
UYGULAMALARI.....	72
7.1. Tek Fazın Açık Kalması Durumunda Meydana Gelen	
Ferrorezonans Olayının Kaotik Olarak İncelenmesi.....	76
7.1.1. Sistem parametrelerinin seçilmesi.....	79
7.2. Kutuplarında Paralel Kondansatör Bağlı Bulunan Kesicilerin	
Meydana Getirdiği Ferrerozonans Olayının Kaotik Olarak	
İncelenmesi.....	91
7.2.1. Sistem parametrelerinin seçilmesi.....	92
BÖLÜM 8.	
SONUÇLAR.....	106
KAYNAKLAR.....	108
ÖZGEÇMİŞ.....	111

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

a	:Endüktansın Tersi (1/L)
B	:Manyetik Akı Yoğunluğu
B_m	:Şönt Suseptans
C_g	:Faz Nötr Arası Kapasite
C_m	:Faz Arası Kapasite
C_{CB}	:Paralel Bağlı Kesici Kapasitesi
C_P	:Faz Nötr Kapasitesi
emk	:Elektro Motor Kuvveti
f_r	:Rezonans Frekansı
$G_ç$:Kondüktans Değeri
H	: Manyetik Alan Şiddeti
mmk	: Manyetik Motor Kuvveti
i_L	:Endüktans Akımı
N	: Sarım Sayısı
T	:Periyod
X_L	:Endüktif Reaktans
X_C	:Kapasitif Reaktans
V_{baz}	:Baz Gerilimi
Z_{baz}	:Baz Reaktansı
ω_{baz}	:Baz Alınan Açısız Hız
ω	: Açısız Hız
μ	: Manyetik Geçirgenlik
Φ	: Manyetik Akı
\mathfrak{R}	: Çekirdek Relüktansı

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Bir Fazlı İki Sargılı Transformatör.....	3
Şekil 2.2.	Bir Fazlı İdeal Transformatörün Elektriksel Eşdeğeri.....	4
Şekil 2.3.	Bir Fazlı Transformatörün Eşdeğer Gösterimi.....	7
Şekil 2.4.	Bir Fazlı Transformatörün Sekonder Sargısının Primere İndirgenmiş Eşdeğer Gösterimi.....	8
Şekil 2.5.	Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Eğrisi.....	9
Şekil 2.6.	Histerisiz Çevrimi.....	10
Şekil 3.1.	Kayıpsız Devre.....	13
Şekil 3.2.	Net Endüktif Devrenin Fazör Diyagramı.....	14
Şekil 3.3.	Net Kapasitif Devrenin Fazör Diyagramı.....	14
Şekil 3.4.	Elemanter L, C Devre Analizi.....	15
Şekil 3.5.	Kayıplı Devre.....	15
Şekil 3.6.	Kayıplı Devre Fazör Diyagramı.....	16
Şekil 3.7.	Elemanter L,R,C Devre Analizi	16
Şekil 3.8.	Seri Rezonans Akım-Frekans Eğrisi.....	18
Şekil 3.9.	Seri Rezonans Devresinde Direnç Etkisi.....	18
Şekil 3.10.	Seri Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı.....	19
Şekil 3.11.	Paralel Rezonans Devresi.....	19
Şekil 3.12.	Paralel Rezonans.....	20
Şekil 3.13.	Paralel Rezonans Devre Akımı ile Frekans İlişkisi.....	20
Şekil 3.14.	Paralel Rezonans Devresinde Direnç Etkisi.....	21
Şekil 3.15.	Paralel Rezonans Devresinde Empedans Frekans Eğrisi.....	21
Şekil 4.1.	Ferrezonans Devresinin Şematik Diyagramı ve Basit Karakteristiği.....	23
Şekil 4.2.	Gerilim Akım ve Manyetik Akının Zamanla Değişim Eğrileri...	24

Şekil 4.3.	Ferrorezonansın Sistem Parametrelerine ve Atlama Olayına Duyarlılık.....	27
Şekil 4.4.	Ferrorezonansın Başlangıç Durumlarına Duyarlılığı.....	28
Şekil 4.5.	Basit Ferrerozonans Devresi.....	30
Şekil 4.6.	Seri Ferrerozonans Devresinin Fazör Diyagramı.....	30
Şekil 4.7.	Seri Ferrerozonans Devresinin Devre Elemanlarının Karakteristikleri ve İşletme Noktaları.....	31
Şekil 4.8.	Seri Ferrerozonans Devresinin Doyma Eğrisi.....	32
Şekil 4.9.	Paralel Ferrerozonans Devresi.....	33
Şekil 4.10.	Paralel Ferrerozonans Devresinin Fazör Diyagramı.....	34
Şekil 4.11.	Paralel Ferrerozonans Devresinin Doyma Eğrisi.....	34
Şekil 4.12.	Temel Ferrerozonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri.....	36
Şekil 4.13.	Alt Harmonik Ferrerozonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri.....	37
Şekil 4.14.	Yarı Periyodik Ferrerozonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri.....	38
Şekil 4.15.	Karmaşık Ferrerozonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri.....	39
Şekil 5.1.	Seri Rezonans Devresi.....	41
Şekil 5.2.	Faz-Toprak Arasına Bağlı Nötr İletkeninden İzole Edilmiş Gerilim Trafosu.....	42
Şekil 5.3.	Bir Fazın Açılması Anındaki Ferrerozonans.....	43
Şekil 5.4.	Kutuplarına Paralel Kondansatör Bağlı Kesici.....	45
Şekil 5.5.	Devre Kesici İle Seri Bağlı Güç Trafosu.....	45
Şekil 5.6.	Çift Hat Üzerinden Beslenen Bara.....	46
Şekil 6.1.	Durum Uzayı.....	52
Şekil 6.2.	İki Boyutlu Durum Uzayında Vektör Alanlar.....	54
Şekil 6.3.	a=0.9 ve b=0.3 parametreleri için x_n -n grafiği.....	58
Şekil 6.4.	a=1.4 ve b=0.3 parametreleri için x_n -n grafiği.....	59
Şekil 6.5.	Başlangıç Değerindeki Küçük Farkın Sonuçları $\delta = \log(x_n - x_n')$	59
Şekil 6.6.	a=10, b=21 ve c=8/3 değerleri Lorenz Sistemi x-z grafiği (periyodik).....	60
Şekil 6.7.	a=10, b=28 ve c=8/3 değerleri için Lorenz Sistemi x-z grafiği (kaotik).....	60
Şekil 6.8.	Lorenz Çekicisi ($\sigma=10, r=28, b=8/3$).....	65

Şekil 6.9.	Chua Devresi.....	66
Şekil 6.10.	Chua Doğrusal Olmayan Diyodu ve Chua Diyotunun Karakteristiği.....	67
Şekil 6.11.	Chua Kaotik Osilatörünün x, y ve z Fazlarının Karşılaştırılması	67
Şekil 6.12.	Rosler Dinamiği.....	68
Şekil 6.13.	Van Der Pol Kaotik Osilatörünün Oluşturduğu Limit Döngü.....	69
Şekil 6.14.	Chen Kaotik Osilatörünün x, y ve z Fazlarının Karşılaştırılması...	70
Şekil 6.15.	Duffing-Van Der Pol Osilatörü için Faz Portreleri.....	71
Şekil 7.1.	Basit Ferrerezonans Devresi.....	73
Şekil 7.2.	Akım Akı Eğrisi.....	74
Şekil 7.3.	Üç Fazlı Sistemde Tek Fazın Açık Kalması Durumu.....	76
Şekil 7.4.	Nonlineer Endüktans Modeli.....	77
Şekil 7.5.	Tek Fazın Açık Olması Durumdaki Basit Ferrerezonans Devresi.....	77
Şekil 7.6.	Sinüzoidal Durum için Akı-Zaman Grafiği.....	81
Şekil 7.7.	Sinüzoidal Durum için Gerilim-Zaman Grafiği.....	82
Şekil 7.8.	Sinüzoidal Durum için Akı-Gerilim Grafiği.....	82
Şekil 7.9.	Sinüzoidal Durum için Akı-Gerilim Zaman Grafiği.....	83
Şekil 7.10.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği.....	83
Şekil 7.11.	Temel Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği.....	84
Şekil 7.12.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği.....	84
Şekil 7.13.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim- Zaman Grafiği.	85
Şekil 7.14.	Yarı Periyodik Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği..	85
Şekil 7.15.	Yarı Periyodik Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği.....	86
Şekil 7.16.	Yarı Periyodik Ferrerezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği.	86
Şekil 7.17.	Yarı Periyodik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği.....	87
Şekil 7.18.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği.....	87
Şekil 7.19.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği.....	88
Şekil 7.20.	Kaotik Ferrerezonans Durumu Akı-Gerilim Grafiği.....	88
Şekil 7.21.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği	89
Şekil 7.22.	Kaotik Durum için Lyapunov Üstleri.....	89

Şekil 7.23.	Devre Kesicili Gerilim Trafosu.....	91
Şekil 7.24.	Basit Ferrerezonans Devresi.....	91
Şekil 7.25.	Sinüzoidal Durum için Akı-Zaman Grafiği.....	95
Şekil 7.26.	Sinüzoidal Durum için Gerilim-Zaman Grafiği.....	95
Şekil 7.27.	Sinüzoidal Durum için Gerilim-Akı Grafiği.....	96
Şekil 7.28.	Sinüzoidal Durum için Akı-Gerilim Zaman Grafiği.....	96
Şekil 7.29.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği.....	97
Şekil 7.30.	Temel Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği.....	97
Şekil 7.31.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği.....	98
Şekil 7.32.	Temel Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim- Zaman Grafiği.	98
Şekil 7.33.	Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği....	99
Şekil 7.34.	Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Zaman-Gerilim Grafiği.....	99
Şekil 7.35.	Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği...	100
Şekil 7.36.	Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği.....	100
Şekil 7.37.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Zaman-Akı Grafiği.....	101
Şekil 7.38.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Zaman-Gerilim Grafiği.....	102
Şekil 7.39.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği.....	102
Şekil 7.40.	Kaotik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği..	103
Şekil 7.41.	Kaotik Durum için Lyapunov Üstleri.....	103

ÖZET

Anahtar kelimeler: Güç Trafoları, Ferrerezonans, Kaos, Nonlineer Dinamikler

Ferrerezonans kelime anlamı olarak demir çekirdekli endüktif elemanların bulunduğu sistemlerde endüktif ve kapasitif elemanlar arasında oluşan özel bir rezonans çeşididir. En çok karşılaşılan ferrerezonans çeşidi güç trafolarındaki gerekli manyetik akıyı sağlamaya çalışırken ortaya çıkan ferrerezonans olaylarıdır.

Elektrik sistemlerinde görülen ferrerezonans olaylar nonlineer dinamik sistem davranışı gösterir. Bu davranış ferrerezonans olayların klasik lineer matematik yöntemleri ile analizinin için uygun olmadığını gösterir. Bu çalışmada kaos teorisi ve nonlineer dinamik çözüm yöntemleri kullanılarak ferrerezonans olaylar ile iletim sisteminde bulunan trafo verimi arasındaki ilişki incelenmiştir. Nominal çalışma şartlarında kaotik ferrerezonans durumunun, temel ve alt harmonik ferrerezonans durumlarına göre oluşma ihtimalinin zor olduğu görülmüştür.

CHAOTIC ANALYSIS OF FERRORESONANCE EVENTS IN POWER TRANSFORMERS

SUMMARY

Key Words: Power Transformers, Ferroresonance, Chaos, Nonlinear Dynamics

Ferroresonance means a kind of resonance which occurs between inductive and capacitive components in iron core inductive systems. Most commonly used ferroresonance type happen when creating magnetic flux required in power transformes.

Ferroresonance events show nonlinear dynamics behaviour in electrical systems. This behaviour prevents analysing them with classical linear mathematics methods. In this work, a relationship between ferroresonance events and transformers efficiency of a transmission system is being searched by using nonlinear dynamic solution methods and chaos theory.

As a conclusion, it is seen that occurance of chaotic ferroresonance event are more difficult than fundamental and subharmonic ferroresonance events, in nominal operating conditions.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Ferrorezonans direnç, kapasitans ve doğrusal olmayan endüktansın bulunduğu kararsız bir çalışma şeklidir. Bu şekilde çalışan devrelerde elektriksel öğelerden birinin değerinin değişmesi ile diğer öğelerin uçları arasındaki akım ve gerilim değerlerinde ani yükselmeler olur.

Ferrorezonans olayı elektrik enerjisi sisteminin büyümesi ile birlikte karmaşık, yüksek gerilimlerde aniden ortaya çıkan ve yüksek seviyeli harmonik distorsiyona neden olan bir elektriksel sorundur. Ferrorozonans lineer sistemlerde oluşan rezonanslardan farklıdır. Lineer sistemlerdeki rezonans yüksek genlikli sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekilleri oluştururken, ferrorozonans ise buna ek olarak yüksek akım ve gerilim değerlerinde genellikle düzensiz ya da karmaşık (kaotik) dalga şekillerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Ferrorezonans olayının en çok görüldüğü yerlerin başında güç transformatörleri gelir. Ferromanyetik nonlineer bir demir nüveye sahip olan güç trafolarının gerilim akım karakteristiği doğrusal değildir. Transformatörün demir çekirdeğindeki doymanın derecesine göre devredeki elektriksel salınımların doğal frekansı değişir. Bu değişimin temel sebebi doyuma sonucunda, transformatörün endüktans değerinin değişerek elektrik devresi ile rezonansa sebep olmasıdır.

Güç trafolarında görülen ferrorozonans olaylar ilk olarak Araujo tarafından üç farklı tipte tanımlanmıştır. Tanımlanan bu üç durum temel ferrorozonans, alt harmonik ferrorozonans ve kaotik ferrorozonans durumlarıdır.

Güç trafolarının manyetik devrelerinin doyuma ulaşması ile birlikte nonlinear özelliğinin artışı ve trafo nüve kayıplarının azalması güç sisteminde kaos ihtimalini arttıran bir etken olduğu ise ilk olarak Mozaffari tarafından elde edilmiştir. Ferrerezonansın başlangıç şartlarına bağlı ve nonlinear bir problem olması, güç sisteminin analizinde nonlinear dinamik yöntemlerin kullanılmasına sebebiyet verir.

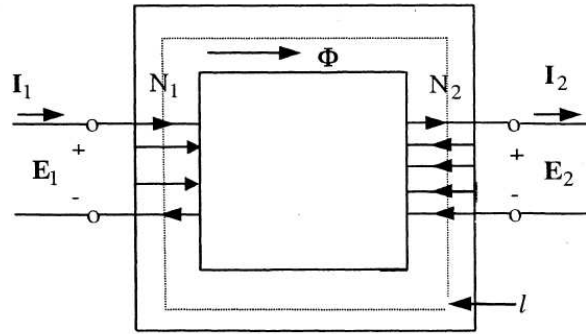
Bu çalışmada ilk olarak ferromanyetik özellikli demir nüvenin yapısı tanımlanmış olup, lineer rezonans ile ferrerezonans arasındaki farklar ortaya konmuştur. Güç sistemlerinde ferrerezonans ihtimalinin olduğu devre modelleri incelenmiş ve iki farklı devre modeli alınarak analizler yapılmıştır. Bilgisayar analizlerinde Matlab programı kullanılmıştır. Sisteme ait elde edilen nonlinear diferansiyel denklemler Butcher'in beşinci dereceden sabit adımlı Runga–Kutta metodu ile çözdürülmüştür. Trafoya ait kayıp değerleri değiştirilerek güç sisteminin ferrerezonans ve kaos durumları görülmüştür.

Gelecekteki elektrik sistemlerinde ferrerezonans olaylara daha çok rastlanacağı söylenebilir. İletim ve dağıtım gerilimlerinin giderek arttırılması, hat kapasitansı ile transformatörlerin manyetik doyma eğrileri arasında bu günkünden daha değişik bir ilişki yaratacaktır. Bu değişiklik ferrerezonans olayların artışı yönündedir.

BÖLÜM 2. FERROMANYETİK MALZEMELER

2.1. İdeal Bir Fazlı Transformator

Şekil 2.1 ile gösterilen bir fazlı iki sargılı bir transformator gösterimi verilmiştir. E_1 ve E_2 sırası ile primer ve sekonder etkin gerilim fazörleridir. I_1 , N_1 adet sarım içeren bir numaralı sargıya giren, I_2 ise N_2 adet sarım içeren iki numaralı sargıdan çıkan etkin akım fazörüdür. ϕ her iki sargı tarafından halkalanan akı fazörü, H manyetik alan fazörü, A akımın geçtiği yüzey alanı, l ortalama akı yolu, μ manyetik geçirgenlik katsayısı olarak alınmıştır.



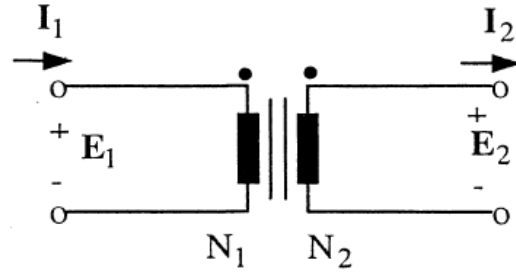
Şekil 2.1. Bir Fazlı İki Sargılı Transformator

Elektrik makineleri ve transformatorlerde elektromanyetik sistem önemli bir rol oynar. Manyetik sistemin görevi istenen enerji dönüşümünü veya enerji transfer işlemlerini yerine getirmektir. Bir nüve etrafına sarılı sargıdan geçen akım tarafından üretilen manyetik alanın matematiksel ifadesini açıklayan temel kanun Amper kanunu'dur. Amper kanunu şekil 2.1 de verilen manyetik devreye uygulanırsa;

$$\oint H \cdot dl = I_{net} \quad (2.1)$$

Burada H manyetik alan şiddeti olup, I_{net} akımı tarafından üretilir. SI sisteminde I amper (A) ve H amper-tur/metre (At/m) olarak ölçülür.

Şekil 2.1 de verilen ideal transformatörün elektriksel eşdeğeri şekil 2.2’de görülmektedir.



Şekil 2.2. Bir Fazlı İdeal Bir Transformatörün Elektriksel Eşdeğeri

Şekil 2.1 de dikdörtgen nüveli ve nüvenin her iki kolu üzerinde sarımlı N_1 ve N_2 sarımlı sargısı bulunan manyetik yapıyı görmekteyiz. Burada nüve demir veya ferromanyetik malzemeler olarak bilinen belirli diğer metallerin alaşımından yapılmış ise, akım tarafından üretilen bütün manyetik alan nüve içerisinde kalacaktır. Bu şekilde denklem 2.1 deki integralin yolu nüvenin ortalama yol uzunluğu olan l_c olacaktır. Akım taşıyan sargı telleri integralin yolunu N defa keserler. Böylece integral alanı içinden geçen akım (I_{net}) manyetik alan şiddeti ile manyetik alan yolu uzunluğunun çarpımına eşit olur. Manyetik alan şiddeti H, bir anlamda akımın manyetik alanı meydana getirmek için gösterdiği çabanın bir ölçüsüdür. Manyetik alan şiddeti H ve bir malzemede üretilen manyetik akı yoğunluğu B arasındaki ilişki

$$B = \mu H \quad (2.2)$$

Denklemleri ile gösterilir. Denklemlerde μ malzemenin manyetik geçirgenliği (H/m), B manyetik akı yoğunluğu (Wb/m^2) olarak gösterilir. Manyetik geçirgenlik manyetik alan geçişini kolaylaştırır. Boşluğun manyetik geçirgenliği

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m} \quad (2.3)$$

Bir malzemenin geçirgenliğini havanın geçirgenliği ile orantılayarak bağıl geçirgenliği elde ederiz. Bağıl geçirgenlik bize malzemenin mıknatıslanma özelliğini verir. Örneğin makinalarda kullanılan çelik malzemenin 2000–6000 kat daha fazla bağıl geçirgenliğe sahiptir. Bunun anlamı, verilen akım miktarına göre bir çelik parçasında meydana gelen manyetik akı, aynı boyuttaki hava aralığında meydana gelen akıdan 2000–6000 kat daha fazladır. Demirin geçirgenliği havaya göre çok daha fazla olduğu için şekil 2.1 deki manyetik yapıda akımın büyük çoğunluğu nüve içerisinde kalacaktır. Akı daha düşük geçirgenliğe sahip olan hava üzerinden yolunu tamamlayacaktır[1] .Şekil 2.1 deki gibi bir nüve üzerindeki akı yoğunluğu

$$B = \mu H = \frac{\mu Ni}{l_c} \quad (2.4)$$

Olarak verilir. Verilen kesit alandaki toplam akı

$$\phi = \int_A B \cdot dA \quad (2.5)$$

Burada dA birim alandaki artıştır. Eğer akı vektörü, A alanının düzlemine dik ise ve akı yoğunluğu alan içinde sabit ise akı denklemi

$$\phi = B \cdot A \quad (2.6)$$

Olarak yazılır. Özetle şekil 2.1 deki sargılarda i akımından dolayı oluşan nüvedeki toplam akı;

$$\phi = B \cdot A = \frac{\mu NiA}{l_c} \quad (2.7)$$

Olarak yazılır.

Şekil 2.2 deki devrede amper kanunu eşitlenir ise;

$$Hl = N_1 I_1 - N_2 I_2 \quad (2.8)$$

Olur. Manyetik akı yoğunluğu tüm çekirdek boyunca sabit kabul edildiği için (2.2) ve (2.6) eşitlikleri;

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = l \frac{B}{\mu} = \left(\frac{1}{\mu A} \right) \phi \quad (2.9)$$

Elde edilir. \mathfrak{R} çekirdek relüktansı olmak üzere;

$$\mathfrak{R} = \frac{1}{\mu A} \quad (2.10)$$

Olarak yazılır. 2.10 ifadesi 2.9 ifadesinde yerine yazılır ise;

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathfrak{R} \phi \quad (2.11)$$

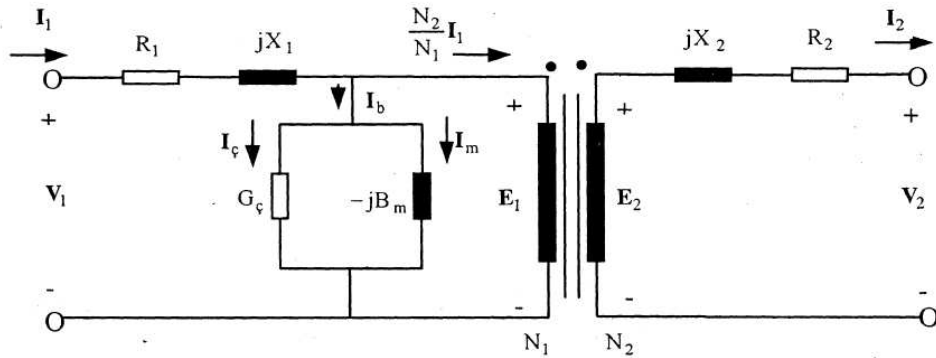
Elde edilir. Son elde edilen ifade manyetik devrelerde geçerli olan ohm kanunu olarak adlandırılır.

2.2. Bir Fazlı İdeal Transformatörün Eşdeğeri

Gerçek bir fazlı iki sargılı bir transformatör ile şekil 2.3.'de gösterilen ideal transformatör arasında bazı yönlerden farklılıklar vardır. Gerçek transformatörde;

- Sargı dirençleri ihmal edilmez,
- Çekirdeğin manyetik geçirgenliği sonsuz değildir,
- Kaçak akı mevcuttur(primer sargısının ürettiği tüm akı sekonder sargı tarafına aktarılamaz,
- Çekirdekte aktif ve reaktif güç kayıpları oluşur.

Aşağıdaki transformatör eşdeğer devresinde R sargı dirençlerini, X artık reaktansı, alt indis olarak 1 ve 2 rakamları ise sırası ile primer ve sekonder tarafı ifade etmektedir.



Şekil 2.3. Bir Fazlı Transformatörün Eşdeğer Gösterimi

2.11'deki denklemi N_1 değerine bölünerek gerekli düzenlemeler yapılır ise ideal olmayan bir transformatör için;

$$I_1 - \left(\frac{N_2}{N_1}\right)I_2 = \frac{\Re}{N_1}\phi = \frac{\Re}{N_1}\left(\frac{E_1}{j\omega N_1}\right) = -j\left(\frac{\Re}{\omega N_1^2}\right)E_1 \quad (2.12)$$

Elde edilir.

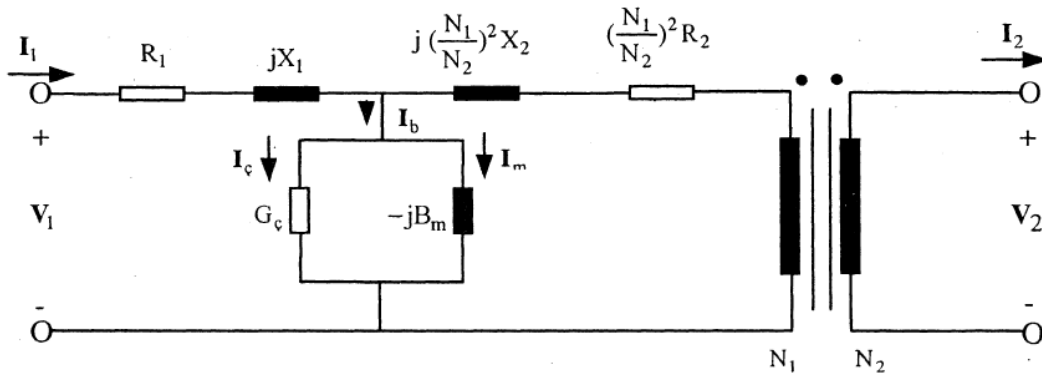
Elde edilen ifadenin sağ tarafı mıknatıslanma akımı (I_m) olarak tanımlanır. Aktığı kol üzerindeki şönt suseptans değeri ise;

$$B_m = \left(\frac{\mathfrak{R}}{\omega N_1^2} \right) \Omega^{-1} \quad (2.13)$$

Olur. B_m 'ye şönt olarak bağlı olan kondüktans değeri olan G_ζ üzerinden akan akım (I_ζ) değerine manyetik çekirdek kaybı denir. Bu durumda denklem 2.12 düzenlenir ise;

$$I_1 - \left(\frac{N_2}{N_1} \right) I_2 = I_\zeta + I_m = (G_\zeta - jB_m) E_1 \quad (2.14)$$

Elde edilir.



Şekil 2.4. Bir Fazlı Transformatörün Sekonder Sargısının Primere İndirgenmiş Eşdeğer Gösterimi

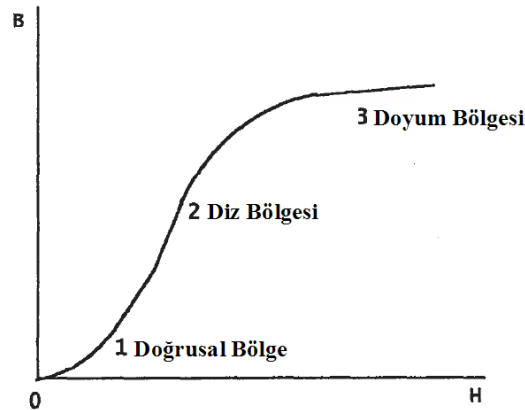
Şekil 2.4. deki eşdeğer devrede $(G_\zeta - jB_m) \Omega^{-1}$ ifadesi şönt admitansı içerir. Sekonder sargısı açık devre olduğunda ve sinüzoidal gerilim primer devre girişine uygulandığında I_1 akımı, I_ζ (manyetik çekirdek kaybı akımı) ve I_m (mıknatıslanma akımı) olarak iki kola ayrılır. Bu kayıp histerisiz kaybı ve girdap akımları kaybı olarak iki ayrı güç kaybının toplamından oluşur. İdeal bir transformatörde çekirdeğin manyetik geçirgenliği (μ) sabit olarak kabul edilir. Bu durumda (2.2)

eşitliğindeki B ile H arasındaki ilişkinin lineer olacağı anlamına gelir. Gerçekte ise transformatörün çekirdeğinde kullanılan ferromanyetik malzemeden dolayı B-H ilişkisi histerisiz etkisinden dolayı nonlineer ve çok değerlidir. Bu iki değişken arasındaki ilişki incelendiğinde belirli bir H değerinden sonra B'nin aldığı değerlerin sabit kalmaya başladığı görülür ve artık çekirdek doyma bölgesinde çalışmaktadır. Transformatöre ait gerilimin genliği nominal değerlerden daha büyük değerlere çıktıkça, çekirdek doyma noktasına ulaşır ve kaynaktan yüksek değerli mıknatıslanma akımları çekilir.

2.3. Ferromanyetik Malzemelerin Manyetik Davranışları

Bir ferromanyetik malzemenin manyetik geçirgenlik davranışını öğrenmek için şekil 2.1 deki devreye bir doğru akım uygularız. Akımı sıfır değerinden başlayarak yavaş yavaş arttırdığımızda, nüvede üretilen akının değişimi kendisini üreten mmk değerine karşı çizdirilir ise şekil 2.5 elde edilir. Bu eğriye mıknatıslanma eğrisi ya da doyum eğrisi denir. Başlangıçta akımdaki ve dolaylı olarak mmk'deki az bir değişiklik akıda büyük bir değişime neden olmaktadır. Belirli bir noktaya ulaştıktan sonra mmk'deki artışa karşılık akı aynı oranda artmaz ve mmk artırılmaya devam edilir ise akının artmadığı görülür.

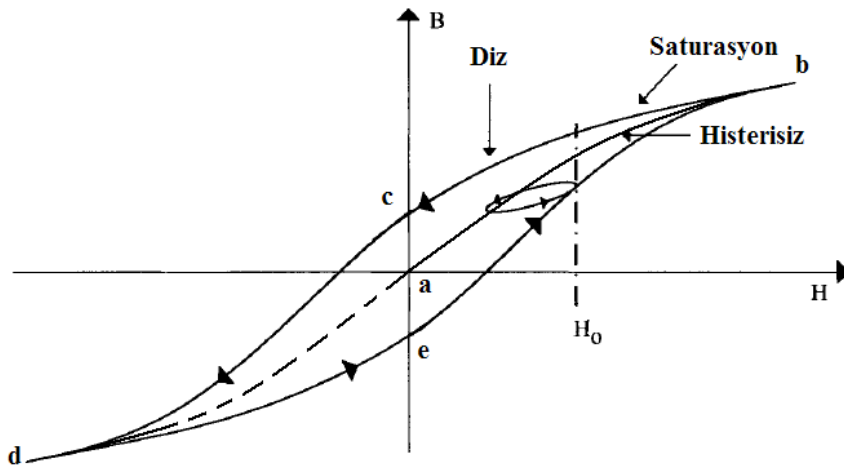
İşte eğrinin sabit kalan bu bölgesine doyum bölgesi denir ve nüve doymuş durumdadır. Akının mmk ile değiştiği bölgeye ise doymamış doğrusal bölge denir. Her iki bölgenin arasındaki geçiş bölgesine ise diz bölgesi denir.



Şekil 2.5. Ferromanyetik Malzemenin Mıknatıslanma Eğrisi

Nüve üzerine sarılan sargılara alternatif akım uygulanırsa nüvede meydana gelen akı eğrisi şekil 2.6.'daki gibi olur. Akımın sinüzoidal olarak değiştiği göz önünde bulundurulur ise akı eğrisi a-b yolunu izler bu yol doyum miktatsızlanma eğrisidir. Ancak akım azalmaya başladığında akı b-c-d yolunu izler. Akım tekrar arttığına da ise nüvenin akısı d-e-b yolunu izler.

Nüvede oluşan akımın değeri sadece sargılarda uygulanan akıma değil aynı zamanda nüvedeki oluşan akımın daha önceki durumlarına da bağlıdır. İşte akımın önceki durumlardaki değerlerinin yollarını yeniden izleyememesi olayı Histerisiz olarak adlandırılır. Akımın izlediği bu çevrime de histerisiz çevrimi denir.



Şekil 2.6. Histerisiz Çevrimi

Şekilde 2.5 de belli bir noktadan sonra akıdaki artışın manyetik akı yoğunluğunda küçük artışlara sebep olduğu görülür. Saturasyon noktası diye adlandırılan bu nokta akım ile akı yoğunluğu eğrisindeki bu değişimin gerçekleştiği ve eğrinin eğiminin bobinin endüktans değeri ile orantılı olduğu noktadır. Saturasyon noktası üzerinde akımın büyüklüğü indüktans değerinin hangi farklı değerde olduğunu gösterir. Bu ferrerezonansın anlaşılması için bir işarettir. Herhangi bir rezonans durumunda, rezonans frekansında endüktif ve kapasitif reaktans tam olarak iptal olur. Rezonansta akım ve gerilim uç değerleri gerçekleşir. Ferrerezonansla beraber endüktans değeri sabit durumdan çıkar ve bu durumda endüktansın değeri saturasyon derecesine göre

değişir. Endüktif reaktansın değişmesi ile beraber rezonans frekansının değeri de değişken bir değer olur. Alternatif akımda L, R ve C den oluşan doğrusal devrelerdeki L ve C elemanlarının doğal frekansı kaynak frekansına eşit olduğunda L ve C elemanlarının uçlarında çok yüksek aşırı gerilimler oluşabilir. Doğrusal sistemlerde bu durumun ortaya çıkışını önceden belirlemek ve tedbir alabilmek mümkündür. Ancak elektrik sistemlerindeki birçok elemanın içindeki demir çekirdeğin doyması sonucunda, doğrusal olmayan endüktans değerleri ortaya çıkar. Bu gibi durumlarda endüktansın değeri devredeki akım değerinden bağımsız olmaz ve akım arttıkça azalır.

Doğrusal olmayan L,R ve C devresinde doyma nedeniyle kararlı ve geçici rejimdeki elektriksel olaylar çok değişir ve bunların saptanması oldukça zorlaşır. Ferrerezonansın ve normal durumların dışındaki nonlineer değişikliklerin anlaşılması için elektrik devrelerindeki rezonans olayının öncelikle anlaşılması gerekir. Rezonans ve ferrerezonans arasındaki farklılıkların belirlenmesi ferrerezonansı önlemek ve korunmak için büyük önem taşır.

BÖLÜM 3. LİNEER REZONANS

Periyodik bir kuvvetin dürtüsü altındaki bir sistem, salınımlar sergiler ve eğer dürtü frekansı sistemin doğal frekansına eşit ise, bu salınımların genliği sınırsız artma eğilimine girer. Sonuç olarak sistem, belli bir genlikten sonra bütünlüğünü veya bulunduğu durumu koruyamaz dağılır veya bozunur.

Alternatif akım devrelerinin incelenmesinden de görüldüğü gibi bir devrede endüktif reaktansın etkisi, kapasitif reaktansın uygun değerinde bağlantısı ile ancak giderilebilir. Gerek seri gerek paralel alternatif akım devrelerinde endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olması özel bir durum oluşturur. Bu durumda devre sadece bir dirençten oluşan bir devre gibi davranır. Bu durumdaki lineer endüktansa sahip devrelerin, endüktif ve kapasitif reaktanslarının eşit olması durumuna rezonans devresi denir.

Alternatif akım devrelerinde endüktif reaktansın ifadesi;

$$X_L = 2\pi fL \quad (3.1)$$

Kapasitif reaktansın ifadesi

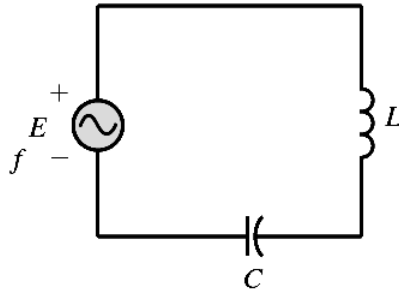
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.2)$$

Şeklinde olur.

3.1. Linear L, R ve C Devresinin Analizi

3.1.1. Kayıpsız devre

Kayıpsız devre ifadesi aşağıdaki şekilde olduğu gibi, devrede direnç elemanı olmadan sadece bir endüktans ve kapasitanstan oluşması durumu ile ifade edilir.



Şekil 3.1. Kayıpsız Devre

Kararlı işletme koşullarında devre için fazörel olarak aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$E = IX_L - IX_C \quad (3.3)$$

Yukarıdaki ifadede devredeki faz farkının oluşması X_L ile X_C değerleri ile belirlenir. X_L ' nin değeri X_C değerinden büyük ise I E ifadesinden 90° geride, X_L ' nin değeri X_C değerinden küçük ise I E değerinden 90° ileride bir faz farkına sebep olur.

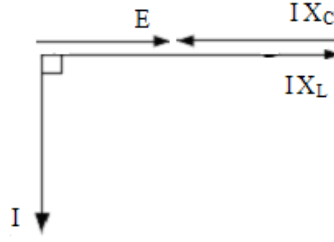
Net endüktif devre için fazörel ifadeler aşağıdaki gibidir;

$$E = IX_L - IX_C \quad (3.4)$$

$IX_L = V_L$, $IX_C = V_C$ ifadesinden

$$E = V_L - V_C \quad (3.5)$$

$$V_L = E - V_C \text{ olur.} \quad (3.6)$$



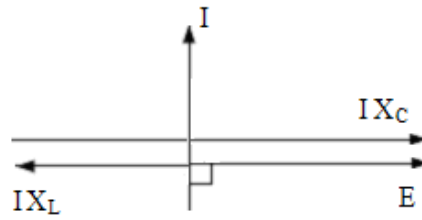
Şekil 3.2. Net Endüktif Devrenin Fazör Diyagramı

Net kapasitif devre için fazörel ifadeler aşağıdaki gibidir;

$$E = IX_C - IX_L \quad (3.7)$$

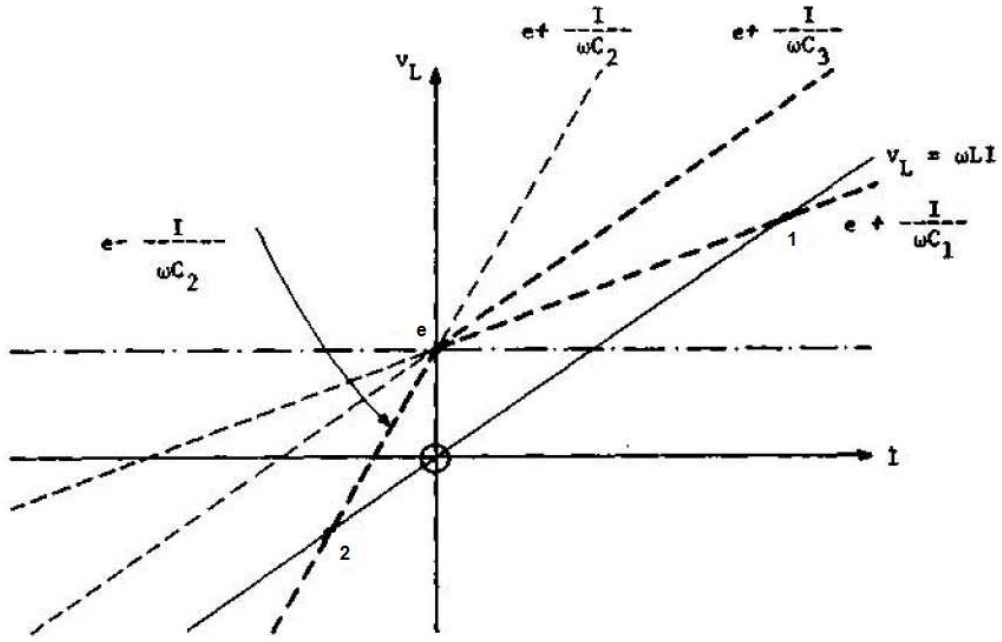
$$E = V_C - V_L \quad (3.8)$$

$$-V_L = E - V_C \text{ olur.} \quad (3.9)$$



Şekil 3.3. Net Kapasitif Devrenin Fazör Diyagramı

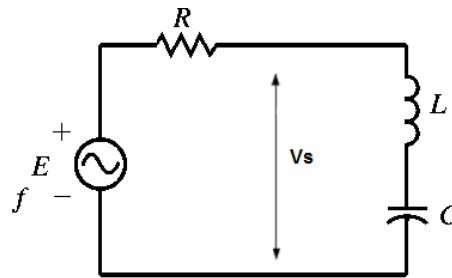
Şekil 3.4. de gördüğümüz gibi devrenin endüktif olması durumunda denge noktası 1 ile gösterilen kesişme noktası olur iken, devremiz kapasitif özellikte olduğunda denge noktası 2 ile gösterilen nokta olmaktadır. $X_C = X_L$ olması durumunda devredeki V ve I sonlu değerleri için bu ifadelerin doğruları kesişmez. Bu durum seri rezonans koşulunu belirler seri rezonansda V ve I değerleri sonsuz büyüklüklere ulaşır.



Şekil 3.4 Elemanter L,C Devre Analizi

3.1.2. Kayıplı devre

Kayıpsız devreye ek olarak devrede kapasitif ve endüktif elemanların yanı sıra direnç olması durumunda devre kayıplı devre olarak tanımlanır.

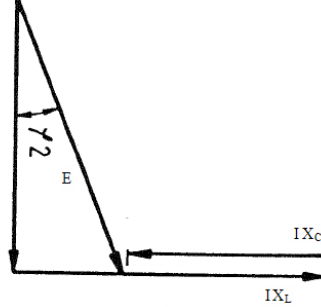


Şekil 3.5. Kayıplı Devre

Kayıplı devrenin fazörel eşitliklerini aşağıdaki gibi yazabiliriz;

$$E - IR = V_S \quad (3.10)$$

$$V = E - (IR) \quad (3.11)$$

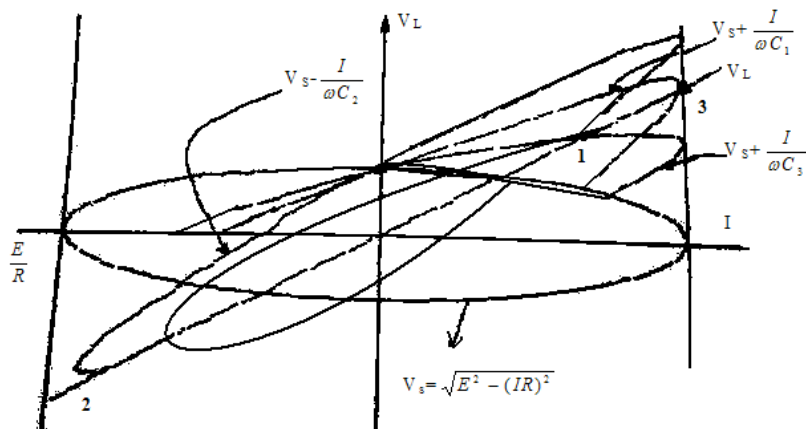


Şekil 3.6. Kayıplı Devre Fazör Diyagramı

Yukarıdaki ifadelerde V_S ifadesi devrenin L-C bölümüne uygulanan gerilimi göstermektedir.

$$V_L = E + IX_L \quad \text{ve} \quad -V_L = E - IX_C \quad \text{olur.} \quad (3.12)$$

Bu ifadelerdeki E yerine V_S konursa şekil 3.7. deki elips şeklindeki eğriler elde edilir. Burada 1 noktası endüktif, 2 noktası kapasitif işletmeyi gösterir. 3 noktası ise rezonans koşulunu belirler. Şekil 3.7. deki gibi endüktans uçlarındaki V_L geriliminin değeri kaynak geriliminden daha fazla olabilir. Rezonans durumunda V_L geriliminin artışını sınırlayan eleman devredeki R direncidir.



Şekil 3.7. Elemanter L,R,C Devre Analizi

3.2. Seri Rezonans

Şekil 3.5 deki kayıplı devrede endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu duruma seri rezonans ya da gerilimler rezonansı denir. Reaktanslar birbirinin etkisini yok edince devre ne endüktif nede kapasitif özellik gösterir sadece dirençten oluşan bir devre özelliği gösterir. Rezonans durumunda devreye uygulanan gerilimin frekansı $X_C = X_L$ eşitliğini sağlayacak değerdedir. Bu eşitliği sağlayan frekans değerine rezonans frekansı denir ve f_r ile gösterilir. Rezonans durumunda aşağıdaki ifadeleri yazabiliriz.

$$X_C = X_L \quad (3.13)$$

$$\frac{1}{2\pi f C} = 2\pi f L \quad (3.14)$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ olur.} \quad (3.15)$$

Rezonans frekansı belli olduğu durumlarda endüktansın ve kapasitansın değerleri aşağıdaki gibi yazılır.

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C} \quad (3.16)$$

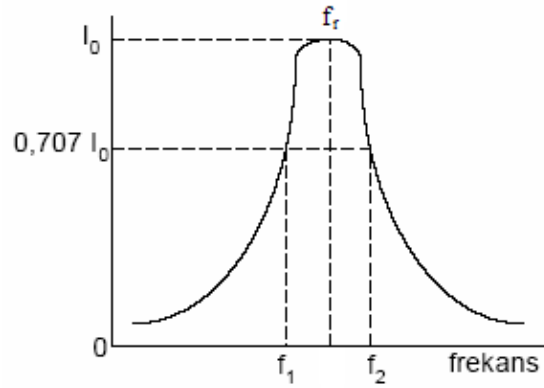
$$C = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 L} \quad (3.17)$$

Rezonans durumunda empedansın değeri

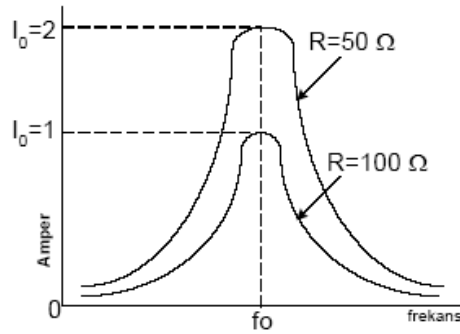
$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.18)$$

$Z=R$ olur.

Rezonans frekansından daha küçük frekanslarda X_L küçük X_C büyük, rezonans frekansından daha büyük frekanslarda ise X_L büyük X_C küçüktür. Rezonans anında empedans en küçük değerine ulaşırken, rezonans frekansından büyük değerlerde empedans daima büyüktür.

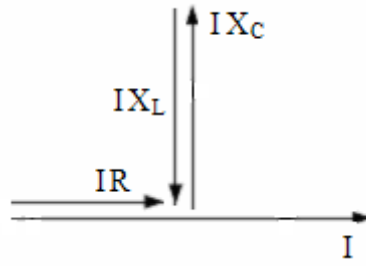


Şekil 3.8. Seri Rezonans Akım-Frekans Eğrisi



Şekil 3.9. Seri Rezonans Devresinde Direnç Etkisi

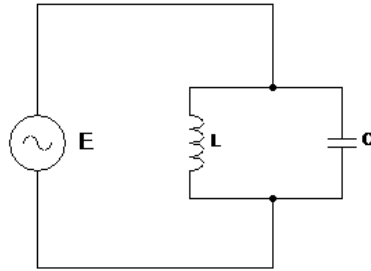
R-L-C seri alternatif devresinde rezonans frekansı endüktans ve kapasitans değerlerine bağlıdır. Devrenin direnç değeri rezonans frekansını değiştirmez. Direnç rezonans anındaki akım değerini etkiler. Rezonans anında devredeki endüktans ve kondansatör uçlarındaki gerilim değerleri çok yüksek değerlere ulaşabilir.



Şekil 3.10. Seri Rezonans Devresinin Fazör Diyagramı

3.3. Paralel Rezonans

Paralel devrelerdeki rezonans durumu seri devrelerdeki rezonans durumundan farklıdır. Bu devrelerdeki paralel bağlı endüktans ile kondansatör devresine genellikle tank devresi denir.



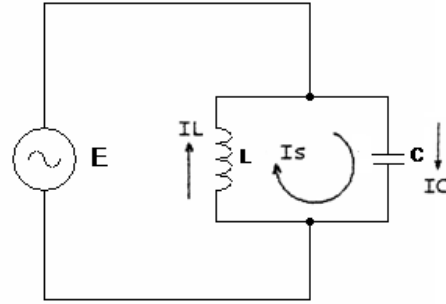
Şekil 3.11. Paralel Rezonans Devresi

Şekil 3.11. deki devrede rezonans anında endüktif reaktans kapasitif reaktansa eşittir ($X_L = X_C$).

Rezonans durumunda L ve C elemanlarının bulunduğu iki koldaki akımlarda eşit olur. Akımlar arasındaki faz farkı 180° dir. Bu faz farkından dolayı akımlar birbirlerinin etkisini yok ederler, devredeki toplam akım bu nedenle rezonans anında sıfır olur.

Devredeki akımın sıfır olması (ideal durum) devre empedansının sonsuz olduğu anlamına gelir. Paralel rezonans devrelerinde ideal durum için rezonans anında akım sıfır, empedans değeri sonsuzdur.

Hat akımının sıfır olduğu rezonans anında, paralel kollardaki I_C ve I_L akımlarının arasındaki 180° olması bu akımların fazörel toplamlarının sıfır olmasına neden olur. Tank içindeki bu iki akım bir sirkülasyon akımı (I_S) oluştururlar.



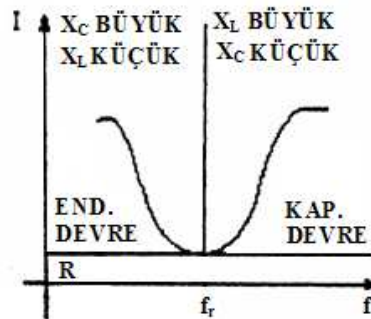
Şekil 3.12. Paralel Rezonans

I_L akımı I_C akımından küçük ise sirkülasyon akımı endüktif olur. Devrenin akımı ise kapasitif özellik gösterir.

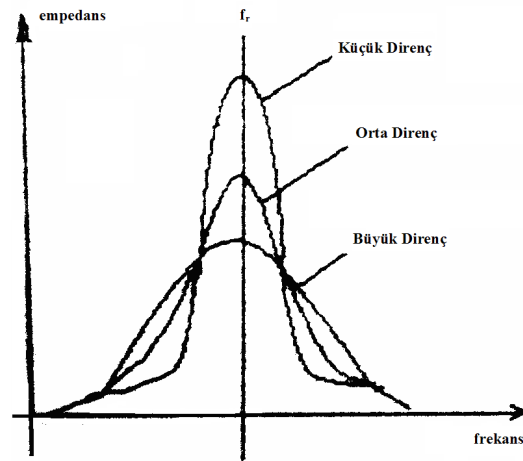
$$I = I_C - I_L \quad (3.19)$$

I_C akımı I_L akımından küçük ise sirkülasyon akımı kapasitif olur. Devrenin akımı ise endüktif özellik gösterir

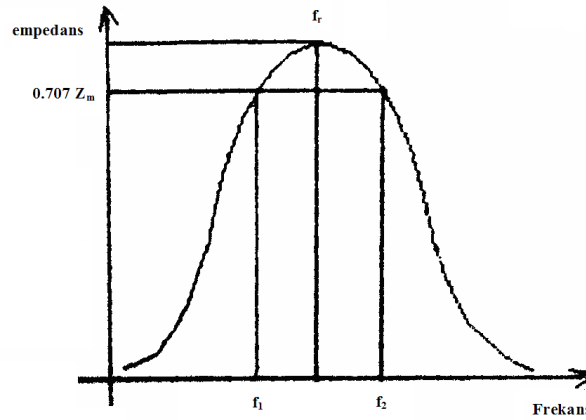
$$I = I_L - I_C \quad (3.20)$$



Şekil 3.13. Paralel Rezonans Devre Akımı ile Frekans İlişkisi



Şekil 3.14. Paralel Rezonans Devresinde Direnç Etkisi



Şekil 3.15. Paralel Rezonans Devresinde Empedans Frekans Eğrisi

Seri rezonans devresi ile paralel rezonans devresi arasındaki temel fark, rezonans durumundaki empedans ve akım değerlerinde ortaya çıkar. Seri rezonans devresinde rezonans anında akım maksimum olup, devre empedansı minimum olur iken, paralel rezonans devresinde ise akım minimum olup, devre empedansı maksimum değerde olur. Her iki rezonans devresi içinde sabit bir rezonans frekansı ve sabit bir rezonans empedansı bulunmaktadır.

BÖLÜM 4. FERROREZONANS

Ferrorezonans kelime anlamı olarak demir çekirdekli endüktif elemanların bulunduğu sistemlerde endüktif ve kapasitif elemanlar arasında oluşan özel bir rezonans çeşididir. En çok karşılaşılan ferrorezonans çeşidi trafolardaki gerekli manyetik akıyı sağlamaya çalışırken ortaya çıkan ferrorezonans olaylarıdır. Bu özel rezonans çeşidi gerekli kontroller altında kimi zaman yararlı bir şekilde kullanılabilir.

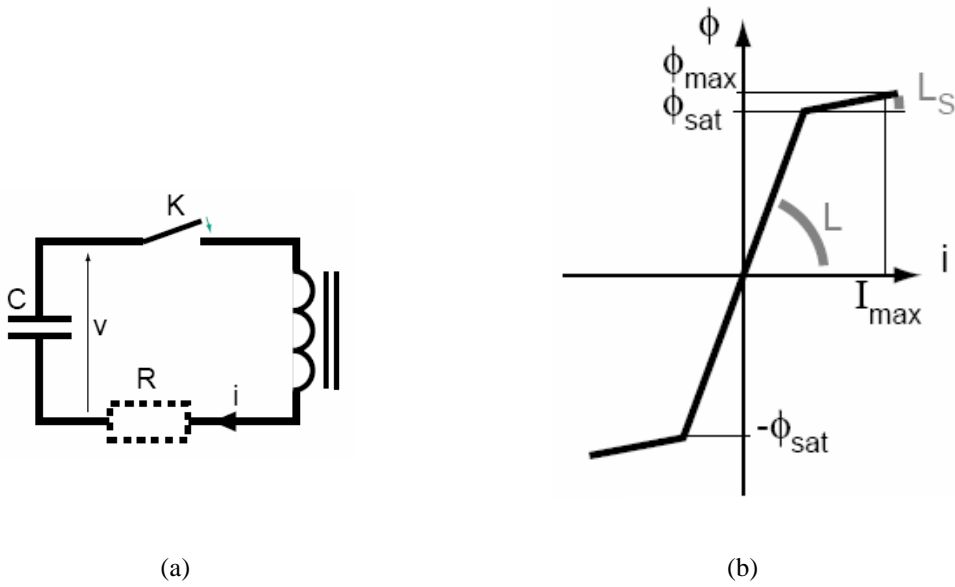
Ferrorezonans lineer sistemlerde oluşan rezonanslardan farklıdır. Lineer sistemlerdeki rezonans yüksek genlikli sinüzoidal akım ve gerilim dalga şekillerine neden olmaktadır. Ferrorezonans ise buna ek olarak yüksek akım ve gerilim değerlerinde genellikle düzensiz ya da kaotik dalga şekilleri oluşmasına neden olur.

4.1. Ferrorezonans ile Lineer Rezonans Arasındaki Temel Farklar

- Rezonans olayının geniş bir alan içerisindeki parametre değerleri ile gerçekleşmesi
- Akım ve gerilimin frekans değerinin, sinüzoidal kaynağın frekansından farklı değerlerde olması
- Belirli parametre değerleri ve konfigürasyonları için birden fazla kararlı sürekli hal cevaplarının olması
- Ferrorezonans tek fazlı olabilir. Ancak fazlar arasında nonlinear manyetik bağlantılar yapılması durumunda üç fazlı olarak tanımlanır. Üç nonlinear faz arasında bağlantı yoksa üç tek faz ferrorezonansı denebilir. Ferrorezonans seri ve paralel olabilir.

4.2. Fiziksel Yaklaşım

Şekil 4.1. a daki devre serbest salınımın özel davranışını gösteren bir devredir. Şekil 4.1. (b) de gösterilen grafik ise demir nüveli endüktansın basitleştirilmiş ϕ mıknatıslanma eğrisidir.



Şekil 4.1. Ferrerezonans Devresinin Şematik Diyagramı ve Basit Karakteristiği

Şekil 4.1. deki devrede K anahtarının t_0 anında kapatılması ile devrede akım geçmeye başlar ve osilasyon oluşur.

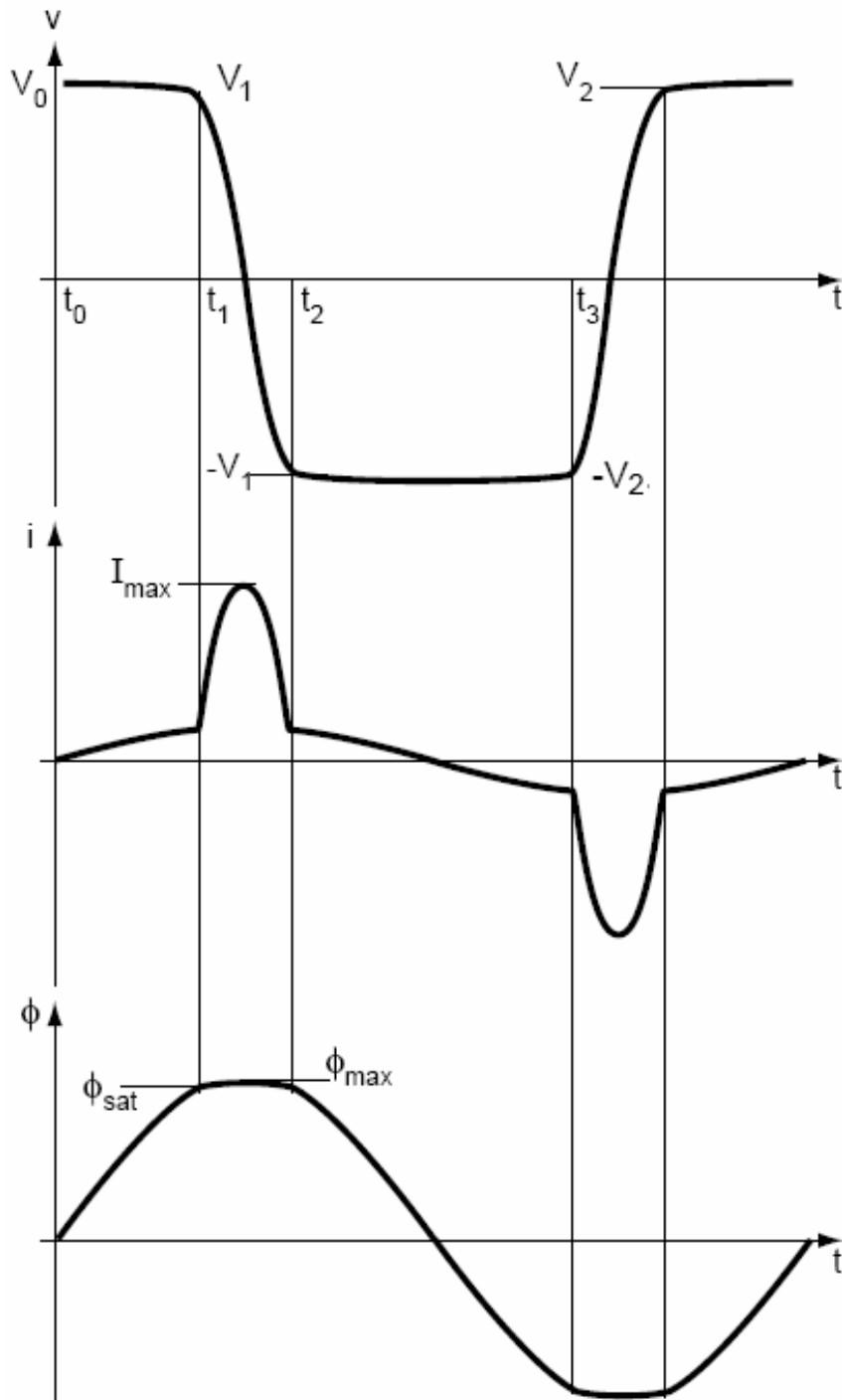
$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.1)$$

Endüktansın akısı ve kapasite uçlarındaki V geriliminin ifadesi;

$$\phi = \left(\frac{V_0}{\omega_1}\right) \sin \omega_1 t_1 \quad (4.2)$$

$$V = V_0 \cos \omega_1 t \quad (4.3)$$

Olur.



Şekil 4.2. Gerilim Akım ve Manyetik Akımın Zamanla Değişim Eğrileri

Eğer $\frac{V_0}{\omega_1} > \phi_{sat}$ ise son t_1 zamanında ϕ akısı ϕ_{sat} saturasyon akısına ulaşır. Gerilim

(V) V_1 'e eşittir ve endüktans doyumda olur. Saturasyon endüktansı L_s L ye göre çok küçüktür. Kapasitör bu anda aniden boşalır endüktanstaki dalga şekli değişir.

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (4.4)$$

Endüktansta depolanan elektromanyetik enerji, kondansatörde oluşan elektrostatik enerjiye ($1/2 CV_1^2$) eşit olduğunda akım ve akı maksimum değerlerine ulaşır.

t_2 anında ϕ_{max} akısı ϕ_{sat} saturasyon akı değerine geri döner. Endüktans L değerine ulaşır ve kayıpların ihmal edilmesinden dolayı V gerilimi $-V_1$ değerine eşit olur.

t_3 anında akı ϕ_{sat} saturasyon (ϕ_{sat}) değerine ulaşır. Gerilim $-V_2$ değerine eşittir. ω_1 çok az kullanıldığından dolayı $V_2 \cong V_1 \cong V_0$ olarak alınabilir. Bu durumda T periyodu, salınım aralığı dahil doymamış durumda;

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (4.5)$$

Saturasyon durumunda ise;

$$t_3 - t_2 \cong \frac{2\phi_{sat}}{V_0} \quad (4.6)$$

$$T = 2\pi\sqrt{L_s C} + 2(t_3 - t_2) \quad (4.7)$$

Olur.

Frekans (f) ifademiz ise;

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \langle f \rangle \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{sat} C}} \quad (4.8)$$

Olur.

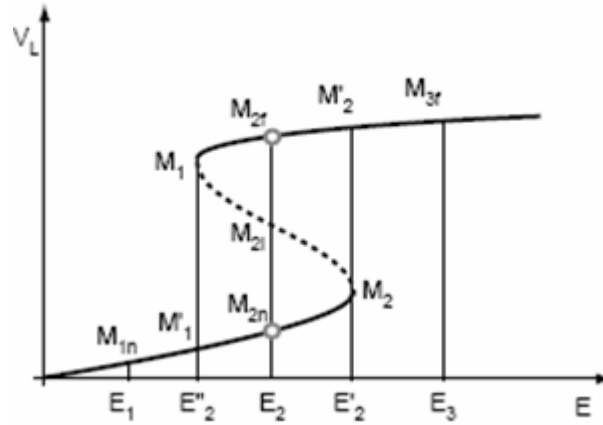
Bu ön frekans ifadesi nonlinear durumda ϕ_{sat} değerine ve V_0 geriliminin ilk durumuna bağlıdır. Pratik uygulamalarda R direnci nedeniyle oluşan kayıplara (Ri^2) bağlı olarak V geriliminin genliği azalır ($V_2 < V_1 < V_0$). Saturasyonun olmadığı t_3-t_2 süresi boyunca oluşan akı değişimi ($\Delta\phi$) aşağıdaki gibi ifade edilir [3].

$$\Delta\phi = 2\phi_{sat} = \int_{t_2}^{t_3} V dt \quad (4.9)$$

V geriliminde kayıplardan (joule ve nüve kayıpları) oluşan genliğin azalması frekansın azalması ile sonuçlanır. Eğer sistemdeki enerji kayıpları sistemi besleyen gerilim kaynağı tarafından karşılanırsa, frekans değerinde oluşan azalma sistemi besleyen kaynak frekansını (eğer baştaki frekans kaynak frekansından büyükse) veya kaynak frekansının birçok alt frekansını (eğer baştaki frekans kaynak frekansından küçükse) kilitleyebilir. Bu durum lineer rezonans ile ferrozonans olayının birbirine benzemediğini gösterir. Oluşan bu durum lineer rezonansın aksine verilen bir endüktans değeri için çok geniş bir C değer aralığında rezonansın ortaya çıkacağını gösterir.

4.3. Başlangıç Değerlerine Duyarlılık ve Atlama Olayı

Şekil 4.3. seri ferrezonans devresinde indüktans uçlarındaki (V_L) gerilim ile sinüsoidal gerilim kaynağı (E) arasındaki ilişkiyi göstermektedir. E değerinin sıfırdan başlayarak artmasıyla V_L gerilimi üç farklı davranış yaptığını görürüz.



Şekil 4.3. Ferrezonansın Sistem Parametrelerine Ve Atlama Olayına Duyarlılık

Şekil 4.3. deki şekilde;

— $E=E_1$ için V_L değeri tektir(M_{1n}). Bu durum lineer normal durumdur.

— $E=E_2$ için üç adet V_L değeri vardır(M_{2n} , M_{2i} , M_{2f}). Bu noktalardan iki tanesi M_{2n} , M_{2f} kararlı duruma denk gelir. M_{2n} normal duruma, M_{2f} ise ferrezonans durumuna uyar. Eğrinin noktalı olarak çizilen kısımları ise pratikte elde edilemeyen kararsız duruma denk gelir.

— $E=E_2'$ için V_L gerilimi aniden M_2 noktasından M_2' noktasına yükselir (atlama olayı). M_2 noktası sınır noktasıdır.

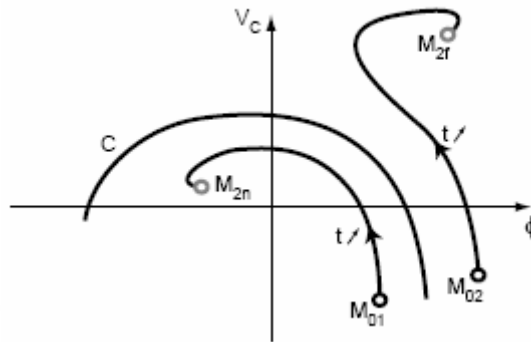
— $E=E_3$ için tek bir V_L gerilimi (M_{3f}) vardır. Muhtemel ferrezonans durumudur.

— E değeri E_3 değerinden E_2' değerine azalır ise V_L değeri M_1 noktasına gelir. Gerilimin azalması ile beraber V_L değeri ikinci limit noktası olan M_1 noktasından aniden M_1' noktasına geçer.

Ferrorezonansın en büyük özelliği olan atlama (sıçrama olayı) sistemdeki diğer parametreleri göz önünde bulundurularak ta elde edilebilir (direnç veya kapasite). Sistem parametre değerlerindeki küçük değişimler sistemin bir veya birçok farklı kararlı sürekli hal arasında ani ve geçici bir atlamaya sebebiyet verebilir [3].

V_L geriliminin bu şekilde ani bir artışla yeni bir çalışma gerilimine gelmesi ile birlikte sistemde

- Akım genlik itibariyle çok büyür,
- Akım faz itibariyle faz değiştirir (endüktif akımdan kapasitif akım olur),
- V_L sargı gerilimi yükselir,
- V_C gerilimi yükselir.



Şekil 4.4. Ferrerozonansın Başlangıç Durumlarına Duyarlılığı

Şekil 4.4. sistemin parametrelerinin başlangıç değerlerinin ferrerozonans anındaki sistemin durumuna olan etkisini göstermektedir. Şekilde farklı başlangıç koşulları (M_{01} ve M_{02}) için V_C gerilimi ile ϕ akısının zamanın bir fonksiyonu olarak yörüngelerini görmekteyiz. Şekilde C eğrisi bir sınırı tanımlamaktadır. Eğer başlangıç şartları (artık akı, kondansatör uçlarındaki gerilim gibi) sınır tarafında ise çözüm M_{2n} noktasına yönelir. Eğer başlangıç şartları sınır tarafında değil ise çözüm M_{2f} noktasına yönelir. Şekil 4.3. deki M_{2i} noktası sınıra ait olduğundan bu nokta civarında etkin şekilde ulaşılmış sürekli hal baştaki durumlara aşırı derecede duyarlıdır.

4.4. İletim Sistemlerinde Ferrerezonans

Enerji iletim sistemlerinde ise ferrerezonans olayını şu şekilde açıklayabiliriz. Yıldız noktası yalıtılmış şebekelerde boşta çalışan güç transformatörlerinin bulunması halinde bazı durumlarda aşırı gerilimler meydana gelebilir. Bu aşırı gerilimlerin oluşması durumuna ferrerezonans olayı olarak adlandırılır.

Orta gerilim şebekelerinde ise bir sigortanın erimesi, gerilim transformatörlerine ait açıcının bir kutuplu olarak açılması veya kapanması, bir bağlama işlemi sonunda meydana gelen simetrisizlik sebebi ile ferrerezonans olaylar meydana gelebilir.

4.4.1. Enerji iletim sistemlerinde seri ferrerezonans devreleri

Seri ferrerezonans devresi için en basit devre, bir kaynak bir kondansatör ve demir çekirdekli bir endüktansın seri bağlanması sonucunda elde edilir. Lineer bir endüktans ile seri bağlı bir kondansatör içeren bir devrede, devreye uygulanan sinüzoidal gerilimin belirli bir frekansında endüktansın endüktif reaktansı ile kondansatörün kapasitif reaktansının birbirine eşit olması durumuna seri rezonans devresi olduğunu ikinci bölümde tanımlanmıştı. Seri rezonans devresinde rezonansı meydana getirecek tek bir frekans değeri vardır ve bu frekans değerinde (f_r) uygulanan sinüzoidal gerilimin bütün değerlerinde rezonans meydana gelir.

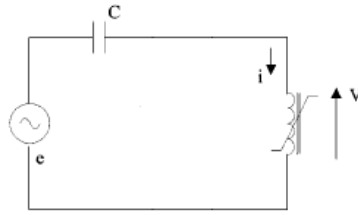
Ancak demir çekirdekli bir endüktans ile seri bağlı lineer bir kondansatör içeren bir devrede, frekansa bağlı olmadan uygulanan sinüzoidal gerilimin belirli bir değerinde, endüktif reaktans ile kondansatörün kapasitif reaktansının eşit olması durumunda seri ferrerezonans devresi meydana gelir.

Demir çekirdekli endüktans ile lineer kondansatör içeren bu tip devrelerde, endüktans ile kondansatör arasında gerçek anlamda bir rezonans meydana gelmez,

demir çekirdekteki manyetik doymadan dolayı belirli bir işletme noktasından başka bir işletme noktasına sıçrama (atlama) olayı gerçekleşir. Bu nedenle devre için tehlikeli olabilecek belirli bir rezonans frekansı oluşamaz.

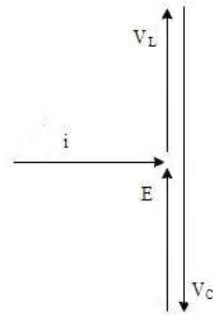
Bu durumun nedeni uygulanan gerilimin frekansının, devrenin herhangi bir doyma seviyesindeki doğal frekansına yaklaşması ile açıklanır. Gerilim frekansının doğal frekansa yaklaşması ile devrede akım artmaya başlar ve artan akımla beraber devrenin doğal frekansı değişir ve devre rezonans dışında kalır.

Şekil 4.5. de basit bir seri ferrerezonans devresi verilmiştir. Devrede endüktif reaktansa göre değeri çok küçük olduğundan, direnç değeri dikkate alınmamış olup devre demir çekirdekli bir endüktans ile seri bağlı lineer bir kondansatörden oluşmuştur.



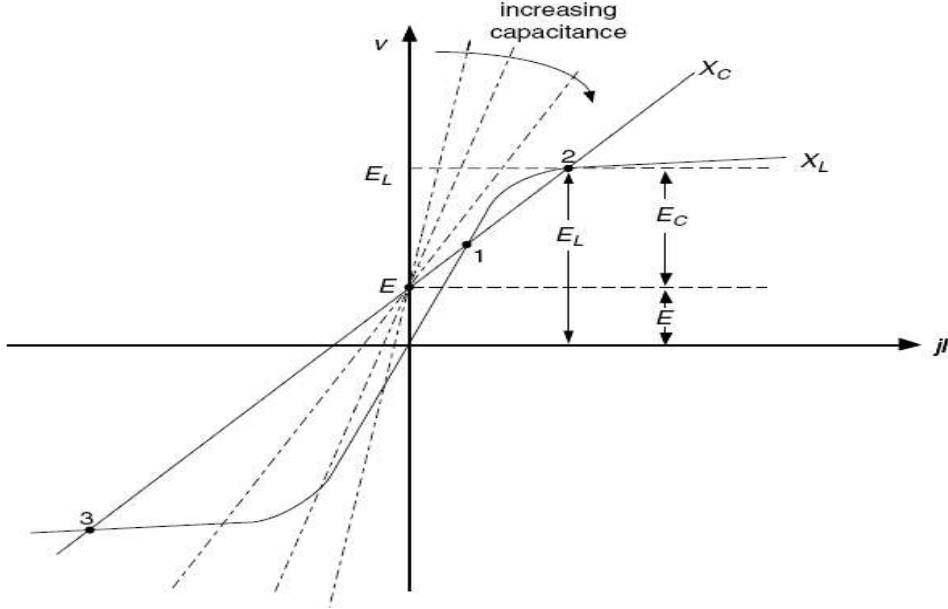
Şekil 4.5. Basit Ferrerezonans Devresi

Devrenin fazör diyagramı ise şekil 4.6. ile aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Seri Ferrerezonans Devresinin Fazör Diyagramı

Şekil 4.7. de ise demir çekirdekli endüktansın endüktif ve kapasitif akımlar için çıkarılmış temel frekans değerindeki ortalama gerilim-akım karakteristiği, doyma eğrisi gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Seri Ferrerezonans Devresinin Devre Elemanlarının Karakteristikleri ve İşletme Noktaları

Kondansatörün lineer bir devre elemanı olduğundan dolayı, bu elemandaki gerilim düşümü, içinden akacak akım ile doğru orantılı olacaktır. Kondansatörün akım gerilim eğrisi lineer olup X_C eğrisi ile gösterilmiştir. Şekil 4.7. de üç adet işletme noktası bulunmaktadır. Bu noktalardan 1 ve 3 kararlı çalışma noktalarını, 2 noktası ise kararsız çalışma noktasını göstermektedir.

1 noktasında akımda küçük bir değişiklik olması durumunda, kondansatörün uçlarındaki gerilim akımla lineer olarak değişir. Buna karşın endüktansda oluşan zıt e.m.k nedeni ile endüktans uçlarındaki gerilim, karakteristiğindeki görüleceği gibi değeri artacağından akım eski değerine döner.

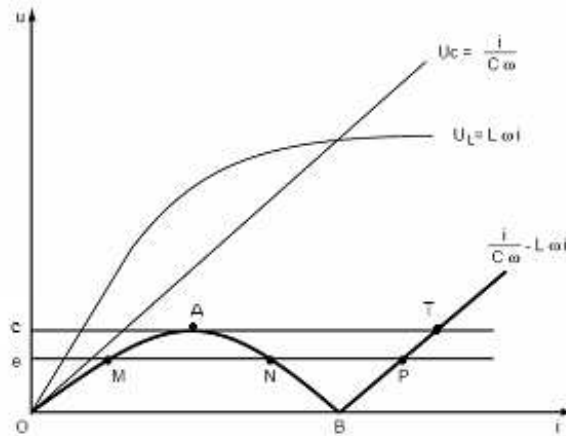
3 noktasında ise durum 1 noktasındaki durumun tam tersi şeklinde gerçekleşir. Kondansatör uçlarındaki gerilim, zıt e.m.k şeklinde etkin olduğundan, bu noktada

endüktans uçlarındaki gerilimden daha dik olarak değişerek herhangi bir akım değişiminde çalışma noktasını eski yerine getirir.

2 noktasında zıt e.m.k şeklinde etki eden endüktans ucundaki gerilimin akımla değişimi, kondansatör uçlarındaki gerilimin değişiminden daha az olacağından (eğimin sıfıra yakın olması) her hangi bir akım değişikliğinde 2 noktasındaki duruma geri dönme gerçekleşmez ve devre bu noktadan uzaklaşır.

Kararlı işletmenin hangi noktada olacağını devreye uygulanan gerilimin uygulandığı andaki faz açısı belirler [4].

Endüktans uçlarındaki gerilim ise self endüktansın lineer olmamasından dolayı doyma eğrisi ile gösterilebilir. Bu doyma eğrisi şekil 4.8. de basit şekilde çizilmiştir.



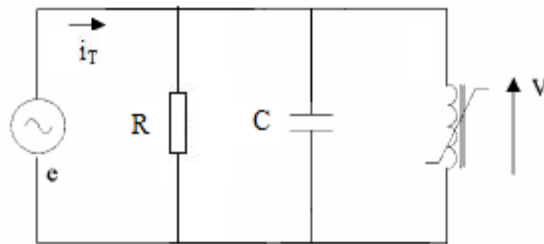
Şekil 4.8. Seri Ferreazonans Devresinin Doyma Eğrisi

Şekilde 4.8. de U_L ve U_C gerilimleri ile birlikte $(U_L - U_C)$ fark gerilim eğrilerini akımın bir fonksiyonu olarak görmekteyiz. Şekilde endüktans geriliminin lineer artmamasından dolayı fark eğrimizde lineer olarak değişmemektedir. Kaynak gerilimimizin e olması durumunda sistemin üç adet çalışma noktası oluşur. Bu noktalardan M ve P kararlı, N noktası ise kararsız çalışma noktası olarak görülür. N noktasının kararsız olması, eğrimizin A ile B noktaları arasındaki bölgede, endüktans geriliminin saturasyon bölgesine denk gelmesi ile açıklanabilir, bu bölgede akım ile

kaynak gerilimi ters orantıdadır. Sistemin normal çalışma şartlarına denk gelen kısım eğrinin OA kısmıdır. Devre akım veya gerilimindeki herhangi bir anlık kısa süreli değişim devrenin çalışma noktasının değişmesine sebep olur. Devre e gerilimi ile N çalışma noktasında bulunur iken, akımdaki herhangi bir küçük artış devrenin çalışma noktasının P ye gelmesine sebep olur. P noktasında endüktans ve kondansatör uçlarındaki gerilim ve akım çok yüksek değerlere ulaşır. Bununla birlikte grafikte gerilimde oluşacak bir değişiklik ile devrenin çalışma noktasının değişeceği açıkça görülebilir. Devreye uygulanan kaynak geriliminin c değerinden daha büyük bir gerilim değerine artırılması durumunda, devrenin çalışma noktasının A sınır çalışma noktasından T noktasına atladığını görülür. Bu durumla birlikte devredeki endüktans ve kondansatör uçlarında aşırı akım ve gerilim değerlerinin oluşması kaçınılmazdır. Devredeki endüktans ve kondansatör gerilim değerlerinin kesiştiği andaki akım değeri olan B noktası bize devrede ferrezonansın meydana geldiğini gösterir. Eğrinin B noktası ferromanyetik rezonansın ortaya çıktığı noktadır. Eğrinin B noktasından itibaren artışı ile devre elemanları üzerinde çok yüksek akım ve gerilim değerlerinin oluştuğu görülür [5].

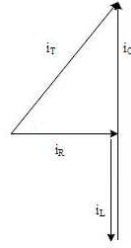
4.4.2. Enerji iletim sistemlerinde paralel ferrezonans devreleri

Demir çekirdekli bir endüktans ile paralel bağlı bir kondansatör ve direnç içeren devrede, frekansa bağlı olmadan uygulanan sinüzoidal gerilimin belirli bir değerinde, devrenin endüktif reaktansı, kondansatörün kapasitif reaktansına eşit olduğu durumdaki devreye paralel ferrezonans devresi denir. Bu devre şekil 4.9. de gösterilmiştir.



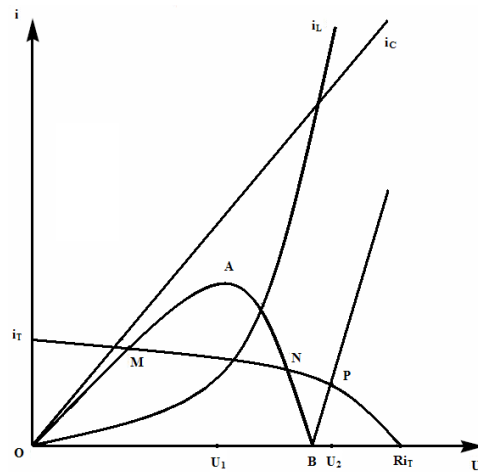
Şekil 4.9. Paralel Ferrezonans Devresi

Devrenin fazör diyagramı ise şekil 4.10. ile aşağıda gösterilmiştir.



Şekil 4.10. Paralel Ferrerezonans Devresinin Fazör Diyagramı

Şekil 4.11. de i_L , i_C ve $(i_L - i_C)$ akım fark eğrilerinin gerilimin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir. Şekil 4.11 de devre akımının (i_T) devredeki kondansatör ve endüktansın fark akımına ($i_L - i_C$) eşit olduğu üç nokta vardır. Bu noktalardan M ve P noktaları kararlı iken, N noktası kararsız çalışmayı gösterir. ($i_L - i_C$) fark akımının gerilim artışı ile ters orantıda olduğu AB aralığı endüktans akımının nonlinear bir özellik gösterdiği bölgeye denk gelir. Grafikte ayrıca i_L ve i_C akımlarının eşit olduğu B noktası ise bize devrenin rezonans noktasını verir. Sistemdeki herhangi bir değişim sonucu, ($i_L - i_C$) fark akımının A noktasında bulunduğu U_1 gerilimi U_2 gerilimine çıktığı anda devredeki ($i_L - i_C$) fark akımı P noktasına gelir ve bu noktadan itibaren gerilim ve akım değerleri çok yüksek değerlere ulaşır. Seri devredekilerin aksine devredeki direnç değerini çok küçük seçerek akım değerleri sınırlandırılabilir [6].



Şekil 4.11. Paralel Ferrerezonans Devresinin Doyma Eğrisi

4.5. Ferrerezonans Modlarının Sınıflandırılması

Güç sistemlerinin indirgenmiş sistem modellerine bağlı olarak yapılan simulasyonlar, güç sistemlerinin dalga şekillerinin ferrerezonans durumlarına göre dört değişik tipte sınıflandırılmasını mümkün kılar. Bir ferrerezonans devresi için normal geçici durumu, ferrerezonans geçici durumdan ayırmak zor olduğundan bu sınıflandırma kararlı hal durumuna bağlıdır, yani geçici hal durumu sonra erdiğinde sınıflandırılabilir. Sistemde meydana gelen bir ferrerezonans olayı elektrik ekipmanları için kısa süreli geçici bile olsa büyük bir risk oluşturur. Bu tehlikeli geçici yüksek gerilimler sistemdeki birçok periyodik olay esnasında (yüksüz bir transformatörün enerjilendirilmesi gibi) veya güç sistemindeki meydana gelen dalgalanmalar sırasında meydana gelebilir [2].

Dört çeşit ferrerezonans modu vardır.

- Temel mod
- Harmonik altı mod
- Periyodik benzeri(yarım periyodik) mod
- Karmaşık mod

4.5.1. Ferrerezonans tipinin teşhisi

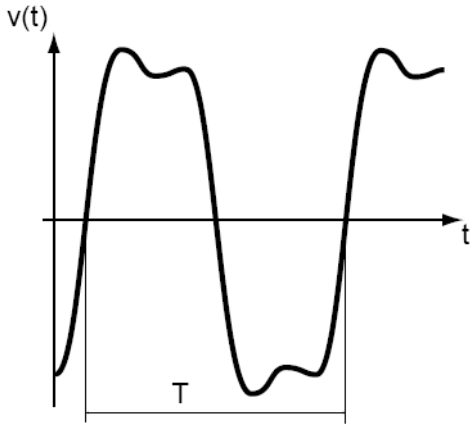
Ferrerezonans modlarının sınıflandırılması,

- Akım ve gerilim sinyallerinin her ikisinin spektrumu analizi
- Sistemin belirli bir çalışma noktasındaki V gerilimi serileri ve I akımının ölçülmesiyle elde edilen stroboskopik görüntü
- Bir sistem periyodu ile ayrılmış, I anlık değerlerinin V düzleminde çizilmesiyle

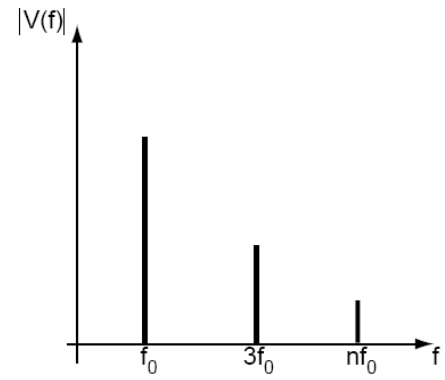
Teşhis edilebilir.

4.5.2. Temel mod

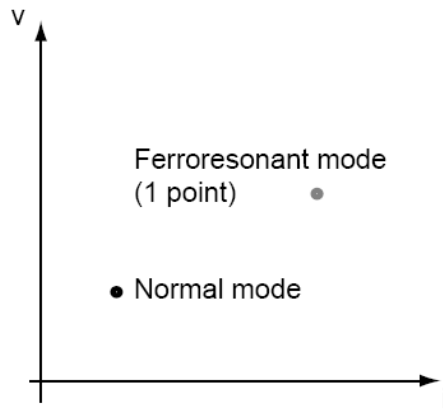
Ferrorezonans Temel mod durumunda sistem gerilim ve akımları periyodiktir. Sistemin bir T periyodu ve dalga şekillerinde belirli bir periyodiklik görülür. Ancak dalga şekilleri değişen harmonik değerini ihtiva edebilir (Şekil 4.12 a). Temel mod sinyal spektrumu incelendiğinde, f_0 ana harmonik ve kendi alt harmoniklerinden ($2f_0, 3f_0$) oluşan aralık bir spektrum görülür (Şekil 4.12 b). Stroboskopik görüntü normal çalışmayı gösteren noktadan çok uzakta bir noktadadır (Şekil 4.12 c).



Şekil 4.12. a



Şekil 4.12. b

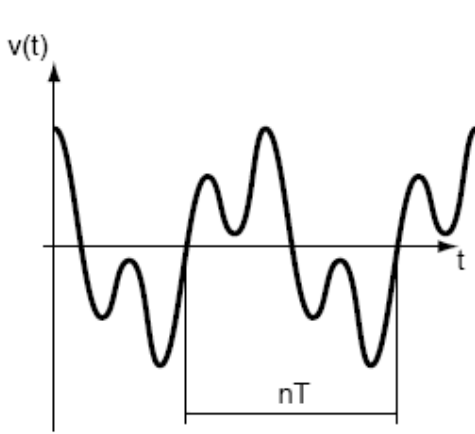


Şekil 4.12. c

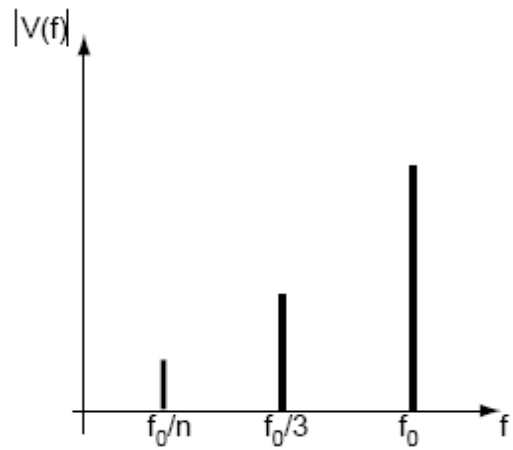
Şekil 4.12. a,b,c Temel Ferrorezonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri

4.5.3. Alt Harmonik mod (subharmonik modu)

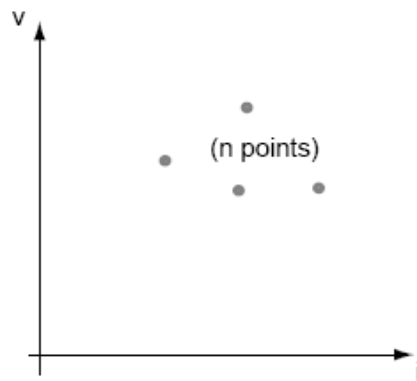
Sistemdeki gerilim ve akım grafikleri güç kaynağının periyodunun n kati olan nT periyodu ile periyodiktir. Bu durum, alt harmonik modu (n) ya da harmonik ($1/n$) modu olarak tanımlanır. Alt harmonik ferrezonans durumu normal durumun dışında bir durumdur. Spektrum incelendiğinde ise frekansın f_0/n (f_0 kaynağın frekansı ve n tamsayı ifadesidir) ilk değeri ile alt harmonik değerlerinden oluştuğu görülür. Stroboskopik görüntü bize sistemin n adet farklı denge noktasının ortaya çıktığını gösterir [2].



Şekil 4.13. a



Şekil 4.13. b

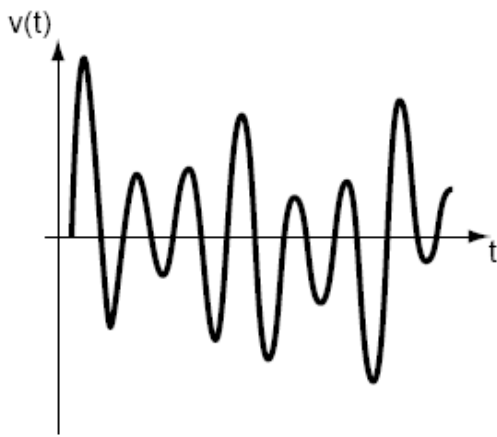


Şekil 4.13. c

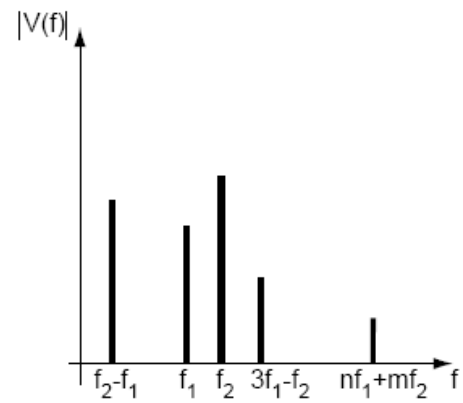
Şekil 4.13. a,b,c Alt Harmonik Ferrezonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri

4.5.4. Yarı periyodik mod

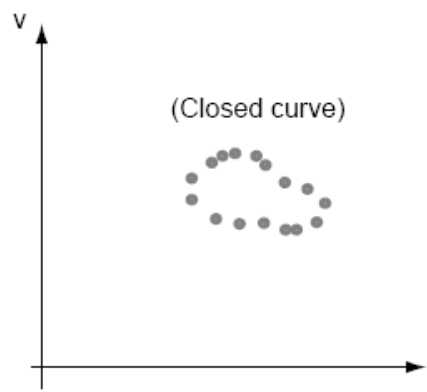
Yarı periyodik ferrorezonans modu yalancı periyodik mod olarak da tanımlanır. Sistemdeki gerilim ve akım grafikleri periyodik değildir. Yarı periyodik modun spektrumu sürekli olmayıp aralıklı bir spektrumdur. Frekans spektrum formu $nf_1 + mf_2$ oranı ile tanımlanır. Stroboskopik görüntü kapalı bir eğri meydana getirecek şekilde oluşur [2].



Şekil 4.14. a



Şekil 4.14. b

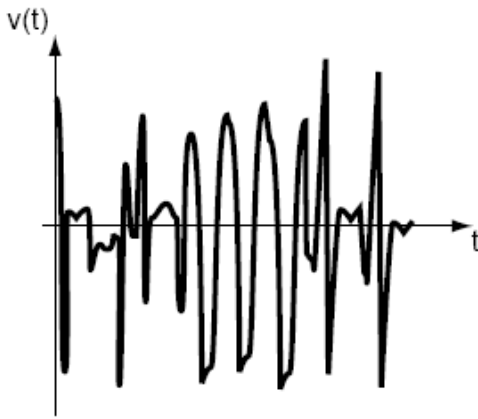


Şekil 4.14 c

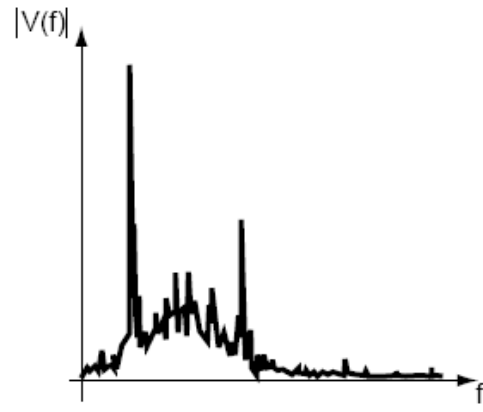
Şekil 4.14. a,b,c Yarı Periyodik Ferrorezonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri

4.5.5. Karmaşık mod

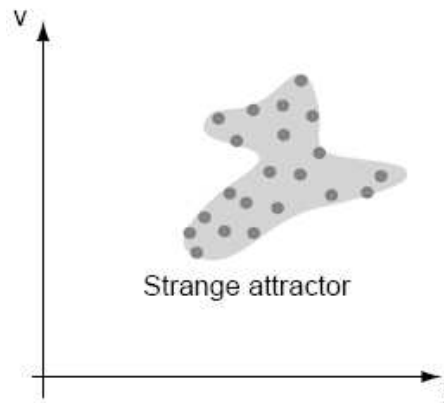
Kaotik ferreazonans modunda gerilim ve akım ifadelerinde periyodik bir düzen yoktur. Spekturum devamlı bir düzen yani hiçbir frekans değeri için sıfır değerini vermez. Stroboskopik görüntü farklı birçok nokta bir V düzleminde alan kaplayarak oluşur ve garip çekici olarak adlandırılır [2].



Şekil 4.15. a



Şekil 4.15. b



Şekil 4.15. c

Şekil 4.15. a,b,c Karmaşık Ferreazonans Mod V-t, V-f, V-I Grafikleri

4.6. Ferrerezonansın Teşhis Edilmesi

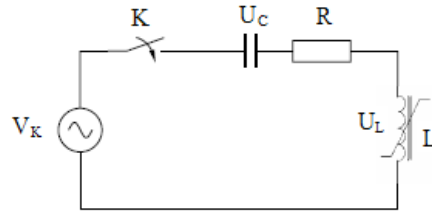
Ferrerezonans durumu

- Sistemde sürekli meydana gelen aşırı gerilimler
- Sürekli meydana gelen aşırı akımlar
- Yüksek distorsiyonlu gerilim ve akım dalga formları
- Nötr noktası geriliminin değişmesi ile yüksüz transformatörlerin ısınması
- Transformatör ve reaktörlerde gürültü
- Isınma etkisi ile güç sistemlerinde hasarlar ve izolasyon bozulmaları
- Düzensiz ve hızlı çalışan anahtarlama ve koruma cihazları

Sistemde ferrerezonans durumunun oluştuğunu gösterir. Ferrerezonans ile birlikte sistemin tek bir çalışma noktası dışında birden fazla çalışma noktası oluşur. Bu durum sistemin içindeki cihazların başlangıç durumlarına ve sistem içindeki ekipmanların parametrelerindeki çok küçük değişimlere bağlıdır.

BÖLÜM 5. GÜÇ TRAFOLARINDA FERROREZONANS OLAYLAR

Güç trafolarında meydana gelen ferreazonans olaylar faz-nötr ve fazlar arası aşırı gerilimlere, akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulmasına, transformatörlerde aşırı ısınmalara gürültülere ve elektrik ekipmanlarında izolasyon bozulmalarına sebebiyet verir. Ani ve rasgele meydana gelen bütün bu olaylar hem transformatörlerde hem de sistem üzerinde ciddi hasarlara sebep olur.



Şekil 5.1. Seri Ferreazonans Devresi

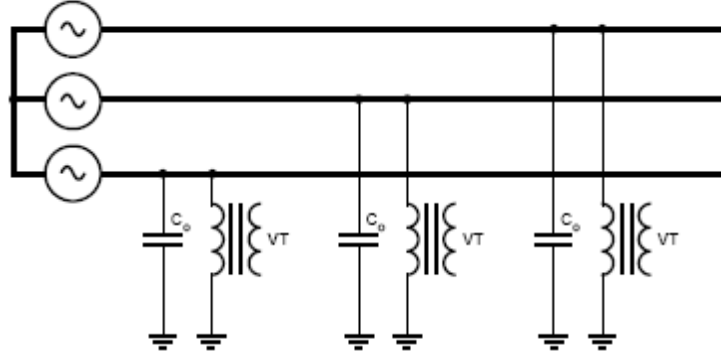
Şekil 5.1. deki devre basit olarak yıldız noktası bir endüktans (peterson bobini) üzerinden topraklı durumda olan sistemin eşdeğer seri rezonans devresi görülmektedir. Devredeki K anahtarının açılıp kapanması ile

- Sistemde ortaya çıkan küçük gerilim yükselmelerine,
- Endüktansın demir çekirdeğinin B-H karakteristiğinin durumuna,
- Kaynak geriliminin anlık değerine

Bağlı olarak ferreazonans durumu ortaya çıkabilir. Gerçek güç sistemlerindeki farklı kapasitans kaynaklarının ve nonlinear endüktans elemanlarının çok geniş bir alanda ve çok sayıda işletim durumunda olması, ferreazonansın ortaya çıkmasına neden olacak birçok güç devresi konfigürasyonu sayısının olduğunu bize gösterir.

5.1. Nötrü İzole Edilmiş Gerilim Trafosunda Meydana Gelen Ferrerezonans

İzole nötr iletkeni olan bir sistemde nötr noktası potansiyelinin değişmesi sonucu meydana gelen ferrerezonans olayı aşağıdaki şekil 5.2. de görülmektedir.



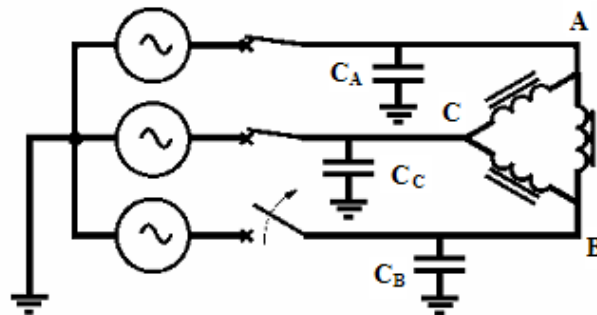
Şekil 5.2. Faz-Toprak Arasına Bağlı Nötrü İzole Edilmiş Gerilim Trafosu

Şekilde her bir faz için faz-nötr gerilimini ölçen bir ölçü transformatörü bağlıdır. Sekonderden çekilen yük küçük ise bu durumda transformatör demir çekirdekli bir endüktans gibi davranır ve sistemde bozulmalara yol açar. Sistemde her bir fazın toprağa göre bir kapasitesi vardır. Eğer her faza ait üç kapasite birbirine eşit ise veya değer olarak birbirlerine çok yakın ve nötr toprak potansiyelinde ise, kapasitörler den geçen akımların fazör toplamı sıfırdır. Aynı şekilde gerilim trafolarından geçen akımların eşit olması halinde sistem dengeli ve kararlı bir sistem olur. Ancak herhangi bir şekilde bir geçici olay, sistemin nötr noktasının toprak potansiyelinin değişmesine neden olur. Bu değişim güç sisteminde paralel ferrerezonans devresi için uygun şartları sağlayacak, geçici yüksek gerilim ve akımların oluşmasını sağlar. Demir nüvesi saturasyona sürüklenen gerilim trafosu ile hatların toprağa göre kapasitelerinin oluşturduğu paralel devreler ferrerezonansı sistemde meydana getirir. Oluşan aşırı gerilimler sistemdeki fazlar arası gerilim değerlerinden fazla olup elektrik ekipmanlarında hasarlara sebep olur.

Bu tip ferrezonanstan kaçınmak için en çok uygulana yol devreye uygun değerde direnç bağlamaktır. Trafoların sekonderlerine bağlanan dirençler ile sistemin ferrezonans gitmesi önlenir. Bu uygulama titreşim devrelerine paralel bir direnç bağlamaya denk bir uygulamadır. Alçak gerilim tarafına direnç konması işletme bakımından da daha kolay uygulanacak bir uygulamadır. Bu tip sistemlerde oluşan ferrezonansın temel alt harmonik veya yarı periyodik modlarda oluşması gerilim trafosunun endüktansının magnetizasyonunun ve kapasitansın değerlerine bağlıdır.

5.2. Kesicinin Kapama Esnasında Bir Fazın Açık Kalması Anındaki Ferrerzonans

Güç sistemlerinde ferrezonans olayının karşılaşıldığı durumlardan biri olan kesicilerin açık kalması durumu şekil 5.3.de gösterilmiştir. Bir anahtar üzerinden, sekonderi açık devre ve primeri izole nötr iletkeni içeren bir transformatörü besleyen üç fazlı bir sistemde, primer sargısı üçgen olan trafo yüksüzken devreye alınmak istenirse kesicilerinden bir veya daha fazlası açık kalabilir. Bu durum açık kalan kesicinin sigortasının atması veya her üç fazdaki kesicileri ayrı ayrı kumanda eden kontrol sisteminin, açık kalan kesiciye arıza sebebi ile kumanda vermemesi nedeni ile oluşabilir. Şekil 5.3. deki gibi A ve C fazlarının kesicilerinin kapalı B fazının kesicisinin açık kalması durumunda, A ve C noktalarının potansiyelleri şebekenin potansiyeline eşdeğerdedir. B noktasındaki potansiyel değeri ise AB arasındaki nonlineer endüktans değeri ile C_B ve C_C kapasitelerinden geçen akımlara bağlıdır [7].



Şekil 5.3. Bir Fazın Açılması Anındaki Ferrerzonans

Bu durumda sistemdeki kondansatörler ile kapasitanslara seri bağlı demir çekirdekli endüktanslar arasında seri ferrezonans devresi oluşabilir. Ferrerzonans durumunda B noktasında oluşan gerilimler anormal değerlere yükselebilir. Yüksüz trafonun devreye alınışı sırasında çekilen akımlar nominal dalga şekillerinden uzaklaşmış ve devredeki kondansatörleri şarj edebilecek kapasitede bir doğru akım bileşeni içerip, manyetik nüveli devrenin doymuş kısımları ile rezonansa gelmesi ferrezonansın oluşması için uygun şartların sağlanması anlamına gelir.

Aşırı ferrezonans gerilimlerinin meydana gelebilme olasılığı, kesiciler ile trafuyu birleştiren iletim hattının uzunluğuna bağlıdır. Aradaki iletim hattının mesafesi kısa, kondansatörlerin değerleri küçük olması durumunda, devredeki kapasitif akımların endüktif akımlar ile kompanze edilmesi mümkün olmayacaktır. Bu durumda sistemde ferrezonans tehlikesi ortadan kalkacaktır. Ancak iletim hattının uzunluğu, ferrezonans meydana getirecek kadar uzun ise trafonun anahtarlanması sırasında sekonderine anma gücünün %5–10 arasında aktif bir yük bağlanması sistemdeki ferrezonans olasılığını önlenmiş olur.

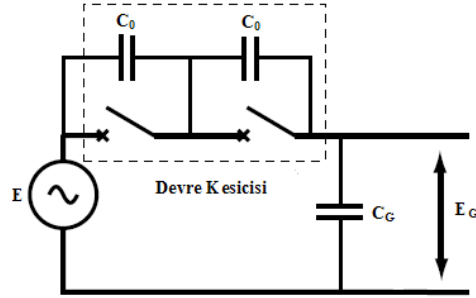
5.3. Kutuplarında Paralel Kondansatör Bulunan Kesicilerin Güç Trafosu ile Meydana Getirdiği Ferrerzonans

Yüksek gerilim sistemlerinde anahtarlama işlemleri, hatalı oluşan anahtarlama ile trafoların devreye alınması sırasında, faz toprak arasında bağlanmış güç trafoları devrenin ferrezonansa gitmesine neden olabilir. Aşağıdaki şekil 5.4. de kutuplarında paralel kondansatör bağlı kesici devresinde kesici açık durumda yani bara ayırıcısı kapalı iken, kesici kutuplarında paralel bağlı kondansatörler nedeni ile devrenin E_G uçlarında oluşan gerilim

$$E_G = \frac{C_0}{C_0 + C_G} E \quad (5.1)$$

olur.

E_G uçlarında oluşan gerilim 1 pu değerinden azdır ve güç sistemindeki teçhizatlara zarar vermez. Ancak bu tip deki bir baraya bir güç trafosunun bağlanması ile sistemde ferrezonans ihtimali oluşur [8].

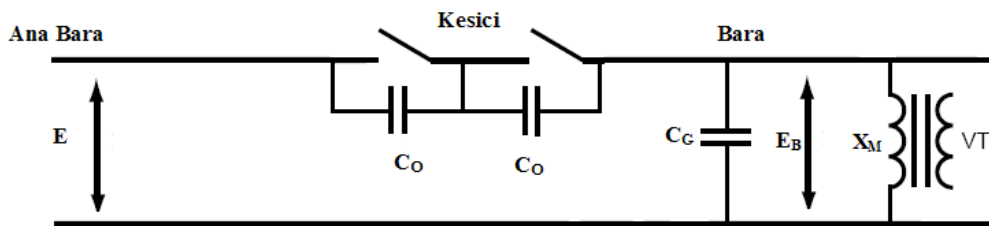


Şekil 5.4. Kutuplarına Paralel Kondansatör Bağlı Kesici

Güç trafosu enerjisiz baraya bağlandığında kesicilere paralel bağlı (C_0) kapasitanslar ile güç trafosunun endüktansı (X_M) üzerinden devreyi tamamlayarak ferrezonansa neden olur. Şekil 5.5. de C_G kapasitesi ihmal edilirse E_B gerilimi;

$$E_B = \frac{X_M}{X_{CO} - X_M} E \quad (5.2)$$

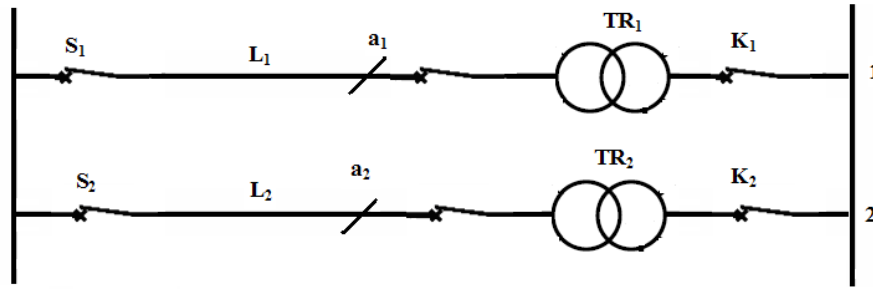
Olur. Güç trafosunun enerjilendirilmesi esnasında açılan kesicilerin kapasitans değerlerinin artması nedeni ile C kapasiteleri trafonun endüktif reaktansını doyuma ulaşmasına neden olur. Bu şekilde ortaya çıkan ferrezonans modu alt harmonik modunda oluşan ferrezonansdır.



Şekil 5.5. Devre Kesici İle Seri Bağlı Güç Trafosu

5.4. Kesicilerin Sıralamalı Açma Yapmaları Anında Oluşan Ferrerezonans

Yüksek gerilim enerji hatlarında aynı barayı besleyen çift devreli iletim hatları çok sık kullanılır. Devreyi çift hatla beslemenin amacı herhangi bir arıza veya bakım anında, devrenin beslediği baranın enerjisiz kalmasını önlemektir (şekil 5.6.).



Şekil 5.6. Çift Hat Üzerinden Beslenen Bara

Şekilde L_1 ve L_2 iletim hattını, TR_1 , TR_2 trafo birimlerini, S_1 S_2 K_1 K_2 ise kesici gruplarını a_1 a_2 ayırıcı gruplarını göstermektedir.

İletim hattı ve trafo birimi kesiciler tarafından devre dışı bırakıldığında hat kapasitansının trafolardaki manyetik alanda depolanmış enerji nedeni ile sistemde geçici salınımların oluşmasına sebep olur. Bu salınımlar, çoğunun demir kayıplarının oluşturduğu devre kayıpları nedeni ile kısa bir süre sonra sönümlenir. Ancak bu kayıpların barayı besleyen diğer hat üzerinden karşılanması durumunda sistemdeki salınımlar sürekli hale gelir ve trafo terminallerinde aşırı gerilimlerin oluşmasına sebebiyet verir [6].

Devre kesicilerinin açma kumandası ile birlikte üç fazın kontaklarını açması, aynı anda gerçekleşemeyebilir. Açma anlarının aynı anda oluşmaması açılma anında meydana gelen arkın büyüklüğüne bağlı olarak, sistemde oluşan bu arkı söndürme zamanına bağlıdır.

Kesici kutuplarının farklı açılması ile her bir fazda, ilgili olan hat-toprak kapasitanslarında depolanacak enerji, kesici kutuplarının aynı anda açılması ile depolanacak enerjiden farklı olacaktır. Bu durum sistemin ferrezonansa girip girmeyeceğini belirler.

Akımı ilk kesilen faz referans alınarak diğer fazlar bu faza göre ne kadar süre sonra açıldıkları derece olarak belirlenebilir, bu şekilde açma uygulamasına da sıralamalı açma denir.

Şekil 5.6. daki iletim hattında S_1 ve K_1 devre kesicilerinin açılması ile sistemden iletim hattı ve trafo birimi ayrılır. Bu sırada a_1 ayırıcısı kapalıdır. 1 nolu devrenin sistemden ayrılmasından sonra ayrılan bölümde depolanmış enerji K_1 kesicisinde K_{1a} K_{2b} K_{3c} kutupları ile S_1 kesicisindeki S_{1a} S_{2b} S_{3c} kutuplarının açıldığı anlardaki faz açılarına bağımlı olarak, sistemin çalışma geriliminin o andaki değerleri ile belirlenir.

Anahtarlama işleminden sonra hat kapasitanslarında depolanmış enerji, hat transformatör döngüsünde harcanan sönümlü bir salınım oluşturur. Bu salınımlar normal olarak durgun durum koşullarına ulaşır. Durgun durum koşulları sönümlü olabileceği gibi kalıcı bir ferrezonans durumuna da ulaşabilir. Bu durumda devrede harcanan kayıplar 2 nolu devre tarafından karşılanmış olur.

Devre kesici kutuplarının açılma sıraları çok yakın olmasına rağmen sistemin bazı durumlarda ferrezonansla sonuçlanır iken, bazı durumlarda ferrezonansın oluşmaması, devre kesicilerinin açılma esnasındaki başlangıç koşullarına ve açılma sıralarına bağlıdır. Ayrıca sistemin ferrezonans durumu hattın uzunluğuna ve gerilimin genliğine de bağlıdır.

5.5. Ferrerezonansın Tetikleyici Olayları ve Önlenmesi

Güç sistemlerinde ortaya çıkan ferrerezonans olayların meydana gelmesine sebep olabilecek devre yapıları sonsuzdur. Ancak sistem yapısının farklı şekillerde olmasına rağmen ferrerezonans başlıca aşağıdaki durumlarda ortaya çıkar;

- Tek faz açmaları, iletken kopuklukları, bir veya iki fazlı anahtarlama hatasının yarattığı dengesiz sistem yapılarında,
- Büyük kapasiteli hatlar ile beslenen trafolarında,
- Kutuplarında paralel kondansatör bağlı kesicilerin açma anlarında,
- Nötr noktasından izole edilmiş faz toprak arasına bağlı gerilim trafolarında,
- Yüksüz veya az yüklü trafoların devreden çıkmaları ve devreye alınmaları sırasında,
- İzolasyon hatalarında,
- Kapasitörlerin anahtarlanması sırasında,

Meydana gelebilir.

Ferrerezonans ihtimalini azaltmak için;

- Trafonun nötr noktasını doğrudan veya tek faz arıza akımlarını sınırlayan bir direnç üzerinden topraklanması,
- İletken kopmalarında kontrolü sağlayan rölelerin bağlanması,
- Kesici fazlarının farklı zamanlarda açma-kapama yapmasının önlenmesi,
- Trafo terminalleri ile kesici (veya sigortaların) arasındaki hat uzunluğunun azaltılması,

Yapılacak en temel önlemlerdendir.

BÖLÜM 6. NONLİNEER DİNAMİKLER VE KAOS

Bilim basit şekilde doğal olayların anlaşılmasına yardım eden, insan yaşamını her alanda etkileyen çok önemli bir kavramdır. Ulaşım araçları, elektronik cihazlar, sağlık sektöründeki gelişmeler ve akıllı yazılımlar bilimin yaşamımızı etkileyen uygulamalı sonuçlarından bazılarıdır. Bilimsel yollardan elde edilen bilgiler insanoğluna doğal çevresini denetim altına alma olanağı sağlamış ve doğa olanaklarını kendi yaşamını kolaylaştırmada daha rahat, daha güvenilir ve daha uzun yaşama yolunda kullanma yeteneğini vermiştir.

Klasik dönemdeki bilimsel yöntemler, sistemlerdeki düzensiz, kararsız ve birbirleriyle bağlantısız gibi gözüken davranışları göz ardı etmiş, gürültü veya dış etki olarak adlandırmış ve tasarım yoluyla bunlardan kaçınmaya çalışmıştır.

Ancak 17. yüzyılda Isaac Newton'un çalışmaları, fiziksel sistemlerin hareketlerinin diferansiyel denklemlerle ifade edilebileceğini göstermiş ve diferansiyel denklemleri parçacık ve gezegen hareketlerinin incelenmesinde kullanarak dünyanın güneş etrafındaki hareketini hesaplayan problemi çözmüştür. Daha sonra gelen bilim adamları Newton'un çalışmasını güneş, dünya ve ay'ın hareketini hesaplayacak şekilde genişletmek istemişler ancak uzun yıllar başarısız olmuşlardır [10–11].

Diferansiyel denklemlerin gelişmesinde Birkhoff, Cauchy, Lyapunov, Picard, Poincare ve Riemann'ın önemli katkıları olmuştur. Bu matematikçiler ve bunlardan sonra gelenlerin elde ettiği kuramsal sonuçlar birçok bilim dalında uygulama alanı bulmuştur. Fiziksel sistemlerin diferansiyel denklemler ile ifadesi 19. ve 20. yüzyılda gelişerek modern matematiğin bir kolu olup, yeni bir bilim dalı olan doğrusal olmayan sistemler teorisini ortaya çıkarmıştır. Doğrusal olmayan sistemlerin, zaman

içerisindeki düzensiz ve kestirilemez davranış göstermesi kaos olarak adlandırılmıştır [9].

Kaos teorisi bilimin birçok alanına etki yapmış, uygulamalı bilimdeki birçok araştırmacı sistemlerdeki düzensiz davranışları ve anormallikleri açıklamak için kaostan faydalanmıştır. Kaos teorisi, evrenin geometrisinden düzensizliğin kaynağına, güneş sisteminin işleyişinden yapısına, küçük etkilerin nasıl büyük değişikliklere neden olabileceğine ve düzensiz yapıların içinde bile nasıl bir düzenli yapının olduğunu göstermektedir [12–13]. Kaotik davranış gösteren sistemlere matematikten biyolojiye, ekonomiden elektronik devrelere, mühendislikten sosyal bilimlere, insan vücudunun davranışına kadar çok geniş bir alanda rastlanmaktadır. Kaotik sistemlere mühendislik uygulamaları açısından bakıldığında ise temel problem, karmaşıklığın ve kestirilemezliğin denetlenebilmesi şeklinde görülmektedir [14]. Geliştirilen sistemlerin özelliklerindeki artış sistemin karmaşıklığını arttırmakta bu durum da sistemin modellenmesini güçleştirmektedir. Sistem karmaşıklığını karşılayamayan bir modele dayanarak yapılan tasarımın, fiziksel uygulamasına geçildiğinde yaratabileceği bilinmeyen dinamik davranışlar belli koşullar oluştuğunda aktif olmakta ve sistemin cevabında beklenmeyen bir davranış gözlenebilmektedir.

Kaotik dinamik alanında yapılan birçok çalışmada, bahsedilen bu davranışın denetim altına alınabilmesini amaçlamaktadır. Kaosun disiplinler arası bir konu olması, sistemde kaosun varlığını gösteren yöntemleri ön plana çıkarmıştır. Kaos analizi yapabilmek için ilk adım kullanılacak yöntemin karakteristikleri hakkındaki teorik bilgi oluşturulması ve bu teorik bilginin modellenerek, bilgisayar sistemleri aracılığıyla benzetimi (simülasyonu) ve analizi olmuştur.

Bilişim sektöründeki birçok gelişme bilim insanlarının araştırmalarındaki benzetim ve analiz işlemini kolaylıkla yapma imkânı sağlamıştır ancak dikkat edilmesi gereken temel nokta yapılan benzetim ve analizlerin kullanıcı ihtiyaçlarını doğru şekilde karşılayabilmesi ve doğruluğunun kabul edilebilir seviyede olmasıdır. Bu sebeplerden ötürü sistemlerin benzetim ve analizinde kullanılacak bilgisayar sistemlerinin bir mühendislik tasarımı olarak geliştirilmesini gerektirmektedir.

6.1. Durum Uzayı ve Vektör Alan

Zamana bağlı olarak değişen dinamik sistemler, matematiksel olarak diferansiyel denklemler ve fark denklemleri şeklinde iki grup içinde modellenebilir. Diferansiyel denklemler sistem davranışını sürekli halde tanımlarken, fark denklemleri ayrık zamanlı çözümler içerir. Diferansiyel denklemler adi ve parçalı diferansiyel denklemler olmak üzere iki tiptir. Örneğin harmonik osilatörünün, yani sarkaç modelinin ifadesi adi bir diferansiyel denklem modelidir.

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (6.1)$$

Sarkaç modelinin ifadesi olan denklem 6.1'de sadece bir tane bağımsız değişken bulunmaktadır. Bu değişken t ile ifade edilen zamandır. Bunun yanı sıra ısı denklemi bir parçalı diferansiyel denklemdir.

$$\frac{du}{dt} = \frac{d^2 u}{dx^2} \quad (6.2)$$

Isı denklemi olan 6.2'de iki tane bağımsız değişken bulunmaktadır. Bu bağımsız değişkenler t ve x ile ifade edilmektedir. Nonlineer diferansiyel denklemlerin genel ifadesi şu şekilde olmaktadır.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ &\cdot \\ &\cdot \\ &\cdot \\ \dot{x}_n &= f_n(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{aligned} \quad (6.3)$$

Burada üzeri noktalı olan x ifadeleri, x'in zamana göre türevi alınmış durumu anlamına gelmektedir.

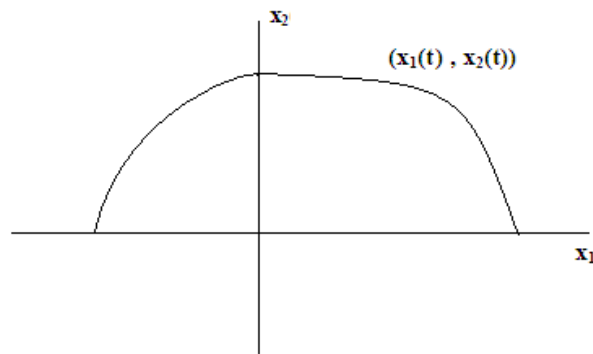
$$\dot{x} = \frac{dx}{dt} \quad (6.4)$$

x_1, x_2, \dots, x_n sistemin durum değişkenleridir. Denklem 6.1. de ifade edilen harmonik osilatör ifadesini düzenleyip lineerleştirirsek denklem aşağıdaki gibi olacaktır.

$$m \dot{x}_2 = -bx_2 - kx_1 \quad (6.5)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{b}{m}x_2 - \frac{k}{m}x_1$$

Denklemdaki bütün değişkenlerin derecelerini birinci dereceden oluşturarak sistemin lineer hale getirebiliriz. Aksi durumda sistem nonlinear bir yapıda olur. Sarkaç modeli denklemde ilk koşulların $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ için sistemin bir çözümünün olduğunu varsayıp, $x_1(t)$ ve $x_2(t)$ ifadelerini durum uzayında çizdirmek istersek, bu durum uzayında bir eğri boyunca hareket eden bir noktaya karşılık gelir. Bu eğriye yörünge denir. Bu eğrinin bulunduğu uzaya ise durum uzayı ya da faz uzayı denir. Durum uzayı tamamen yörüngelerle kaplıdır. Durum uzayında her bir nokta başlangıç noktası kabul edilebilir.



Şekil 6.1. Durum Uzayı

Dinamik sistem incelenirken sistem durumunu ifade eden durum değişkenleri belirlenir. Sistem dinamiğinin incelenmesi aslında bu durum değişkenlerinin zamanla nasıl değiştiklerinin incelenmesidir. Bir sistemin dinamik davranışı incelenirken ilk koşullardan başlayan eğrinin hesaplanması gerekir. Denklem 6.6 da gösterilen eşitlikte ifadenin sol kısmı durum değişkenlerinin değişim hızını göstermektedir. Bu durum değişkenlerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilen bir vektördür.

Bu durumda eşitlik durum uzayının her noktasında bir vektöre karşılık gelir. $\dot{x} = 0$ olan noktalara denge noktaları denir. Vektör alanının davranışı durum uzayında bölgeden bölgeye fark edebilir ve birden fazla denge noktası olabilir. Bu durumda vektör alanı lokal olarak incelenir. Yani vektör alanı lineer bölgelere bölünür ve her bir bölüm ayrı ayrı incelenir. Lokal olarak incelenirken sistem denge noktaları civarında lineerleştirilir. Bu işlem yapılırken sistemin jacobian matrisinden yararlanılır. Vektör alanının özellikleri jacobian matrisinin denge noktalarındaki özdeğerleri incelemek yapılır.

$$\dot{x} = f_1(x, y) \quad (6.6)$$

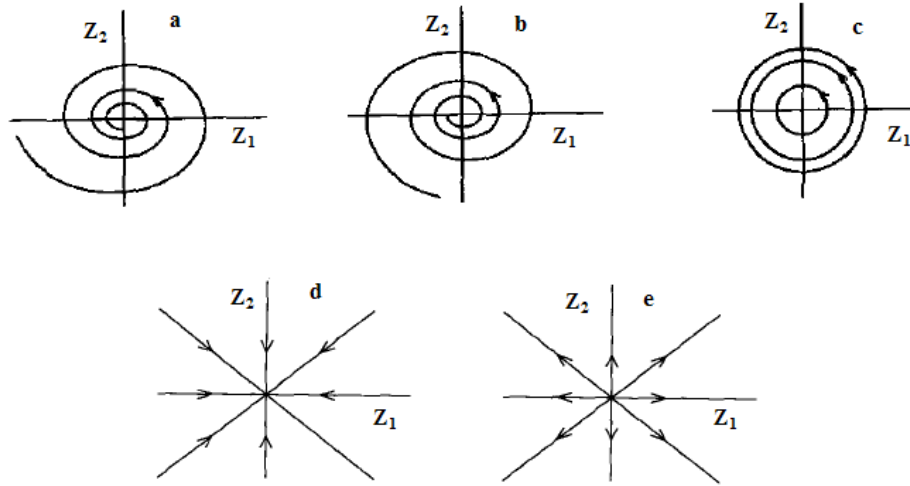
$$\dot{y} = f_2(x, y)$$

Denklem 6.6. daki sistemin denge noktaları $x^* y^*$ olsun. Sistemin denge noktalarında jacobian matrisi;

$$F = (x^* y^*) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x} & \frac{\partial f_1}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x} & \frac{\partial f_2}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Şeklinde olur. Sistemin özdeğerlerinin reel kısmı negatif ise sistem kararlı, pozitif ise sistem kararsızdır. Bazı özdeğerler reel ve negatif olurken, bazı özdeğerler reel ve pozitif ise sistem özdeğerleri negatif ve reel olan bölgelerde kararlı diğer yerlerde kararsızdır. Özdeğerlerin reel kısımları yok, sadece imajiner kısımları varsa sistem

sönümlenme yapmadan salınıma girer. Buna merkez denir. Şekil 6.2. de özdeğerlerin durumuna göre durum uzayları gösterilmiştir [15].



Şekil 6.2. İki Boyutlu Durum Uzayında Vektör Alanlar

- a) Spiral yapıda çekici: özdeğerlerin reel kısmı negatif ve kompleks eşlenik
- b) Spiral yapıda itici: özdeğerlerin reel kısmı pozitif ve kompleks eşlenik
- c) Merkez: özdeğerlerin sadece imajiner kısımları mevcut
- d) Çeken: her iki özdeğer negatif ve reel
- e) İten: her iki özdeğer pozitif ve reel

6.2. Kaotik Dinamik

6.2.1. Kaos teorisi

Kaos kelimesi genellikle karmaşa veya kestirilemezlik kavramlarıyla beraber anılmaktadır. Birçok doğrusal olmayan sistemin zamandaki değişiminin düzensiz ve kestirilemez olması ve birçok araştırmacının sistemlerindeki kestirilemezliği inceleme düşüncesi son zamanlarda kaos teorisini ön plana çıkarmıştır.

Kaotik sistemlerin matematiksel modelleri doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Hem sürekli zamanlı diferansiyel denklemlerde hem de ayrık zamanlı fark denklemleri ile ifade edilebilmektedir. Sistemlerin matematiksel modellerinin olması bir gerekircilik (determinizm) ortaya koyarken uzun dönemdeki davranışının kestirilemez olması; kaotik sistemleri doğrusal olmayan sistemler altında incelenen birçok modelden farklı kılmaktadır [16].

Kaotik sistemlerin sahip olduğu iki temel karakteristik:

- Sistem gerekirci denklemlerle ifade edilmesine rağmen sistemin geçmişteki davranışını tekrar etmeyerek düzensiz bir yapıya sahip olması
- Sistemin başlangıç koşullarına duyarlı olması seklindedir.

6.2.2. Kaotik sistemlerin gerekirciliği

Dinamik sistemler çeşitli dinamik kurallar ile tanımlanabilir ve bu dinamik sistemlerin çözümleri tektir. Bu nedenle bu tip sistemler gerekirci olarak adlandırılmaktadır. Dinamik sistemin durumu tüm zamanlar için tektir. Sistemin herhangi bir zamandaki durumuna karar verilebilir [17].

Gerekirci doğrusal olmayan dinamik sistemlerin çözümleri ise rasgele (istatistiğe bağlı durumlar) olabilir. Bu tip davranış gerekirci kaos olarak adlandırılmaktadır. Burada önemli olan temel nokta çözümlerin gerçekten rasgele olup olmadığıdır.

Rastgelelik temel olarak gürültü aracılığıyla üretildiğinden buradaki sonuçlar rasgele değildir. Sonuçların rasgele görünmesinin nedeni başlangıç koşullarına bağımlı olan gerekirci denklemlerde kullanılan değişkenlerin değerindeki çok küçük değişimlerdir.

Kaotik sistemler gerekirci olmasına karşın öngörülebilir değildir. Kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına aşırı duyarlılığı, başlangıç değerinin hassas ölçülememesi veya başlangıç değerinin irrasyonel sayılarla ($\sqrt{7}$ gibi) ifade ediliyor olabilmesi öngörülebilirliğe engel olur. Kaotik sistemler doğrusal olmayan yapılarından ötürü öngörülebilir olmaması ama aynı zamanda gerekirci bir yapıya da sahip olması klasik mekanikte beraber düşünülen bu kavramların ayrı ayrı ele alınması gerektiğini göstermiştir.

6.2.3. Başlangıç koşullarına duyarlılık

Kaotik dinamiklerin önemli bir diğer özelliği ise sistem birbirinden çok küçük farklı olan iki başlangıç koşulunda başlatıldığında gözlemlenebilir. Bu küçük farklar kaotik olmayan sistemlerde ölçme hatası olarak ifade edilebilir ve hata zamanla doğrusal olarak artmaktadır. Fakat kaotik sistemlerde hata üstel olarak artmakta ve sistemin gelecekteki durumları kestirilemez olmaktadır. Bu olgu başlangıç koşullarına duyarlılık olarak bilinmektedir. Bu alandaki ilk çalışma meteorolojik olayları modellemek için hava tahminlerinden elde edilen sayısal veriler kullanılarak bir model geliştirme fikri sonucu ortaya çıkmıştır. Ancak hava durumu sahip olduğu kaotik durumdan ötürü sayısal verilerin hassasiyeti her bir denemede artmasına rağmen geçerli bir model elde edilememiş verilerdeki küçük bir ihmal farklı sonuçlara neden olmuştur. Kaotik sistemlerde kararlılık ve kararsızlık çok küçük değişimlerle birbirine dönüşür. Kaos hali binlerce kararlı ve kararsız durumların birlikte var olduğu bir durumdur. Kararlı bir hal en küçük bir değişiklikle kararsızlığa, kararsızlık ise kararlılığa dönüşür. Bu nedenle “kararlı kararsızlık” durumu diye tanımlanabilir. Kararlı kararsız bölgeler aşırı derecede küçük olduğu için kararlı bölgedeki en küçük bir değişiklik sistemi kaosa götürür. Diğer bir deyişle kaotik sistemler başlangıç koşullarına aşırı duyarlıdır.

6.2.4. Kaos analizi için gerek ve yeter koşullar

Bir sistemde kaos analizi yapılabilmesi için bazı gerekli şartlar vardır. Bunlardan ilki sistemde doğrusal olmayan eleman veya elemanlar olmasıdır. Doğrusal sistemde kausun gözlenmeyeceği bilinmektedir. Şartlardan ikincisi ise, sürekli zamanlı sistemler için ve ayrık zamanlı sistemler için farklılık göstermektedir. Sistem sürekli zamanlı bir sistem ise, kausun aranabilmesi için ikinci şart en az 3. dereceden bir sistem olmasıdır. Fakat ayrık zamanlı sistemde böyle bir şart yoktur. Ayrık zamanlı sistem birinci dereceden dahi olsa kaos analizi yapılabilmektedir. Lojistik harita (logistic map) buna bir örnektir. Kaos analizi yapabilmek için bahsedilen iki şart gerekli şartlardır, yeterli şartlar değildir. Yani bu şartlara uyan sistemlerde kaos analizi yapılabilir fakat kesinlikle kaotik davranış gösterir diye bir yargıya varılamaz. Bir sistemde kaos gözlenebilmesi için yeter şart ise sistem yörüngesinin başlangıç koşullarına duyarlı olmasıdır.

6.2.5. Kaotik sistemlerin davranışları

Bu bölümde biri ayrık zamanlı diğeri sürekli zamanlı iki kaotik sistemin çeşitli parametre değerleri için davranışları verilmiş ve ardından bu sistemlerin başlangıç koşullarına olan hassasiyeti gösterilmiştir.

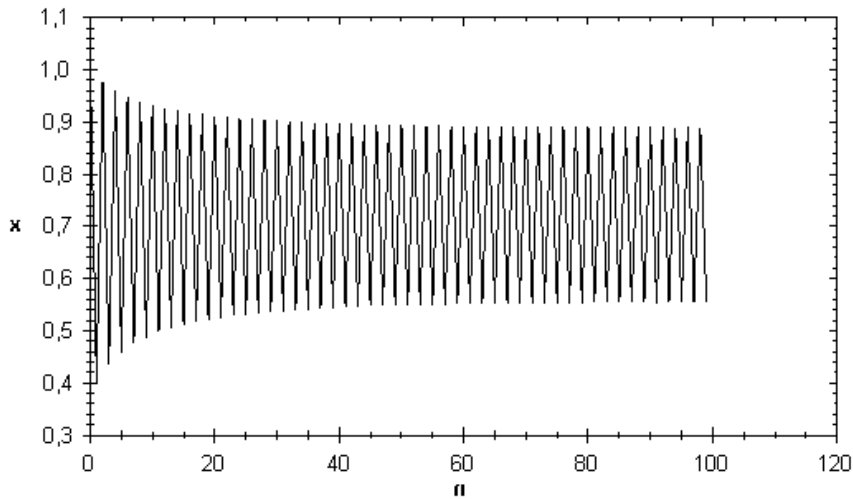
İlk örneğimiz iki boyutlu, ayrık zamanlı, doğrusal olmayan, kaotik bir sistem olan Henon haritadır. Henon haritaya ait dinamikler denklem 6.8.'de verilmiştir. Sistem parametreleri $-2 \leq x_n \leq 2$ ve $-2 \leq y_n \leq 2$ şeklinde değişmektedir. Sistem a ve b parametrelerine göre farklı davranışlar göstermektedir. a=0.9 ve b=0.3 parametreleri için periyodik davranış gösterirken, a=1 ve b=0.3 parametreleri için iki periyotlu (periyod=2) davranış göstermektedir. a=1.4 ve b=0.3 parametreleri için ise kaotik davranış göstermektedir. Henon haritasında a = 0.9, b = 0.3 parametreleri için x_n 'in değişimi şekil 6.3'de, a=1.4, b=0.3 parametreleri için ise x_n ' in değişimin şekil 6.4'de gösterilmiştir.

$$x_{n+1} = 1 - ax_n^2 + y_n \quad (6.8)$$

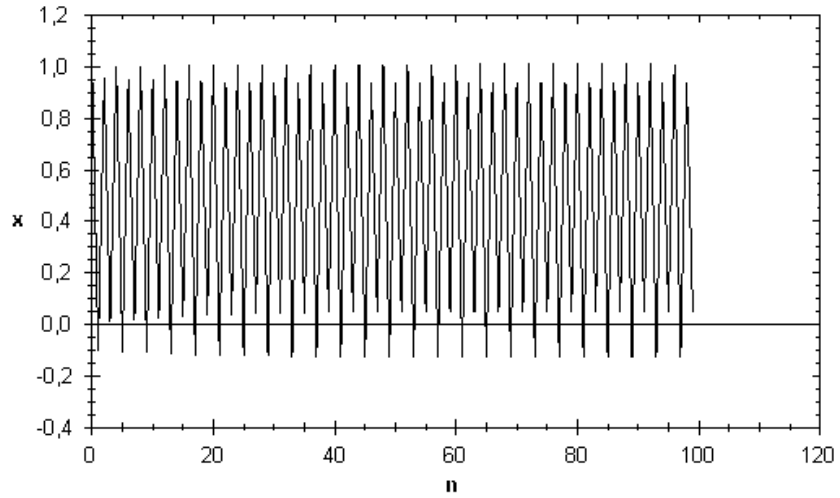
$$y_{n+1} = bx_n$$

Henon haritanın başlangıç koşullarına olan duyarlılığını göstermek için $a=1.4$, $b=0.3$ parametreleri ve $x_0=0$, $y_0=0$ başlangıç koşulları kullanılarak elde edilen x_n verileri ile $x_0=0.00000$, $y_0=0.000001$ başlangıç koşullarından elde edilen x_n verileri arasındaki fark Şekil 6.5.'de gösterilmiştir. Şekil 6.5.'den de anlaşıldığı gibi sistemin başlangıç koşullarında meydana gelen ve ihmal edilebilecek kadar küçük olan bir değişim çok farklı sonuçlara neden olmuştur.

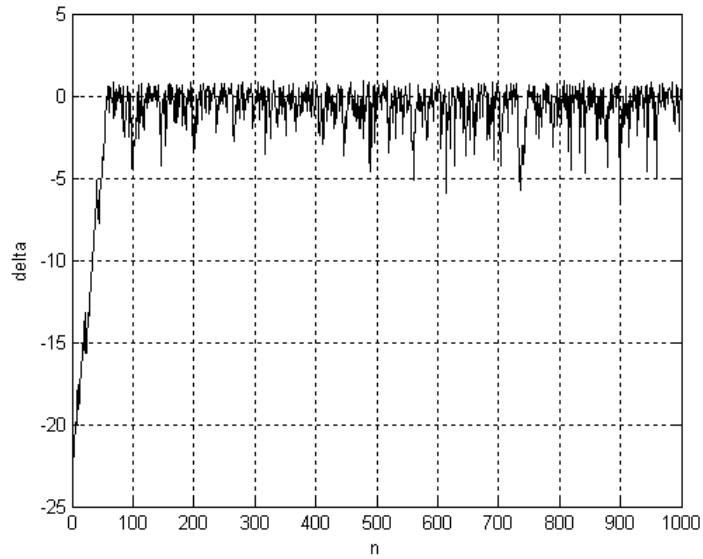
Kaotik sistemlerin karakteristiğindeki küçük bir değişimin üstel artışa neden olması kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına olan duyarlılığını göstermektedir. Bunun bir sonucu olarak kaotik sistemlerin uzun vadeli kestirimlerinde başarısız sonuçlar elde edilmektedir. Çünkü pratikte sistemin başlangıç koşullarının sonsuz sayıdaki durumu asla bilinemez. Herhangi bir hata olduğunda uzun vadeli kestirimde bulunmak anlamsız olacaktır. Bu nedenle kaotik sistemler kısa vadede yüksek kestirilebilirlik (zamanda gerekirci değişiminden dolayı) özelliğine sahipken uzun vadeli kestirimlerde bulunamazlar (başlangıç şartlarına bağlı olmalarından dolayı).



Şekil 6.3. $a=0.9$ ve $b=0.3$ parametreleri için x_n -n grafiği



Şekil 6.4. $a=1.4$ ve $b=0.3$ parametreleri için x_n -n grafiği



Şekil 6.5. Başlangıç Değerindeki Küçük Farkın Sonuçları $\delta = \log(x_n - x_n')$

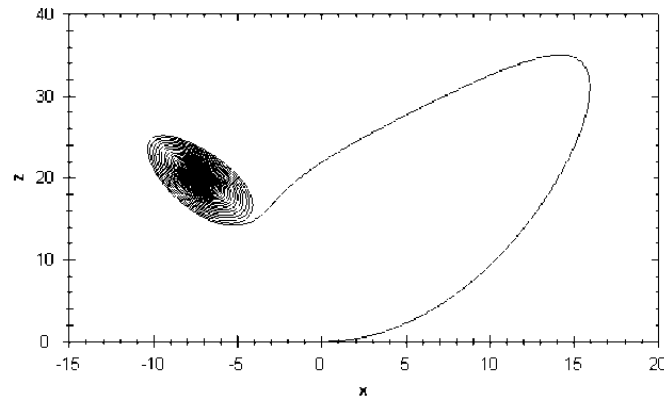
İkinci örneğimiz üç boyutlu sürekli zamanlı kaotik bir sistem olan Lorenz sistemidir. Kaos ile ilgili yapılan ilk sayısal çalışmadır. Edward Lorenz tarafından atmosferdeki havanın akışını modellemek için 1950'li yılların sonunda geliştirmiştir. Sisteme ait dinamikler denklem 6.9'de verilmiştir.

$$\frac{dx}{dt} = a(y - x) \quad (6.9)$$

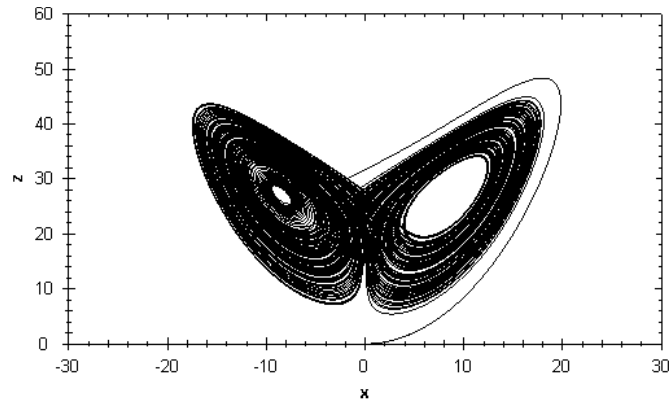
$$\frac{dy}{dt} = (bx - y - xz)$$

$$\frac{dz}{dt} = (xy - cz)$$

Sistemin başlangıç koşulları $-20 \leq x \leq 20$, $-50 \leq y \leq 50$, $-50 \leq z \leq 50$ şeklindedir. Sistem $a=10$, $b=21$ ve $c=8/3$ değerleri için periyodik davranış gösterirken $a=10$, $b=21$ ve $c=8/3$ durumunda kaotik davranış göstermektedir. Sistemin periyodik davranış gösterdiği parametrelerde x - z değerlerinin birbirlerine göre değişimi şekil 6.6.'da gösterilmiştir. Sistemin kaotik davranış gösterdiği parametre değerlerinde ise x - z değerlerinin birbirine göre değişimi sırasıyla şekil 6.7.'de gösterilmiştir.



Şekil 6.6. $a=10$, $b=21$ ve $c=8/3$ değerleri Lorenz Sistemi x - z grafiği (periyodik)



Şekil 6.7. $a=10$, $b=28$ ve $c=8/3$ değerleri için Lorenz Sistemi x - z grafiği (kaotik)

6.3. Kaos Analiz Yöntemleri

Bir sistemde kaos analizi yapılabilmesi için farklı yöntemler vardır [9]. Bu yöntemlerden en sık kullanılanlar:

- Yörüngenin izlenmesi (zaman serileri)
- Faz uzayının incelenmesi (Phase Portrait)
- Poincare haritalama (Poincare Map)
- Güç spektrumu
- Çatallaşma diyagramı (Bifurcation Diagram)
- Lyapunov üstelleri

Yukarıda verilen yöntemlerden başka yöntemler de vardır fakat fazla kullanışlı değildir. Özellikle çekicilerin boyut analizi yapılarak kaos analizleri yapılabilmektedir (Fraktal boyut, Lyapunov boyutu vb.) [18]. Boyut analizi sonucu çekicinin boyutu tamsayı çıkarsa, çekicinin kaotik olmadığı, boyut kesirli sayı çıkarsa çekicinin kaotik olduğu anlaşılmaktadır.

6.3.1. Yörüngenin izlenmesi

Yörüngenin izlenmesi yöntemi en basit yöntemdir. Sistemin durum değişkenlerinden herhangi biri zaman ekseninde gözlenerek sistemin kaosa girip girmediğine bakılabilir. Bu yöntemler incelenirken dikkat edilmesi gerekenlerden biri sistemin geçici durum davranışının kalktıktan sonra gözlemlenmenin yapılmasıdır. Anlatılan yöntemlerin tümünde bu duruma dikkat edilmelidir.

6.3.2. Faz uzayı

Bu yöntemde, durum değişkenlerinin birbirine göre davranışları çizdirilerek sistemin kaosa girip girmediğine karar verilmektedir. Sistem periyodik ise, durum değişkenleri birbirine göre çizdirildiğinde kapalı bir çevrim görülür. Buna limit çevrimi de (limit cycle) denir ve sistemin periyodik davranış gösterdiği anlamına gelir. Durum değişkenlerinin birbirine göre çizimi düzensiz ve anlamsız bir şekil ise bu tip karmaşık şekiller kaosu olduğunu anlamına gelmektedir.

6.3.3. Poincare haritalama

Birçok durumda ayrık zamanlı bir sistemi analiz etmek, sürekli zamanlı bir sistemi analiz etmekten daha kolaydır. Poincare, bu işi başarmak için bir yöntem geliştirmiştir. Aslında bu yöntem, n. dereceden sürekli zamanlı bir dinamik sistemi (n-1) dereceden ayrık zamanlı bir dinamik sisteme dönüştürme işlemidir. Faz uzayında Poincare yüzeyi diye bilinen bir yüzey seçilir. Bu yüzey üzerinde yörüngenin geçtiği noktalar işaretlenerek bir harita elde edilir. Poincare yüzeyi seçilirken belirli bir kural yoktur. Tamamen kişinin tecrübesine göre yörüngenin geçtiği bir yüzey seçilir. Özerk olmayan sistemlerin ise Poincare haritasını elde etmek daha kolaydır. Faz uzayı izlenirken belirli aralıklarla örnek alınarak Poincare harita elde edilir. Örnekleme süresi ise özerk olmayan sistemi süren büyüklüğün periyodudur. Karmaşık sistemleri daha basit hale getirmek ve kararlılık analiz yapmak için elverişlidir [14]. Periyodik bir davranış Poincare haritalama yöntemi ile incelenirse, sabit bir nokta elde edilir. Çünkü sistemin periyodu ile aynı zaman dilimlerinde örnekler alınırsa, hep aynı nokta alınacağından tek bir nokta görülür. Sistem periyodumsu, ise kapalı bir çevrim elde edilir. Fakat sistem kaotikse, kapalı olmayan, gelişigüzel bir fraktal şekil oluşur.

6.3.4. Güç spektrumu

Kaotik sinyaller geniş bantlı sistemlerdir. Dolayısıyla kaotik olan bir sinyalle, kaotik olmayan bir sinyal, güç spektrumuna bakarak ayrılabilir. Eğer sistem kaotikse, güç spektrumunda süreklilik vardır. Sistem kaotik değilse, sadece belli frekanslarda sıçramalar mevcuttur.

6.3.5. Çatallaşma diyagramı

Bu yöntem, diğer yöntemlerden biraz farklıdır. Düşey ekseninde sistemin asimptotik çözümlerini, yatay ekseninde ise kontrol parametresinin değişimini veren çizimlere çatallaşma diyagramı denilir. y ekseninde durum değişkenlerinden birinin davranışı verilmektedir, x ekseninde ise parametrelerden birinin farklı değerleri verilmektedir.

6.3.6. Lyapunov üstelleri

Lyapunov üstelleri (veya üstleri) olarak bilinen kaos analiz yöntemi ise diğer yöntemlerden farklı olarak kaosu niceliksel olarak inceleyen bir analiz yöntemidir. Lyapunov üstellerini kullanarak analiz yapma fikrinin çıkış noktası kaotik sistemlerin başlangıç koşullarına olan bağımlılığında kaynaklanmaktadır. Kaotik bir sistem birbirine çok yakın komşu iki başlangıç noktasından başlatıldığında yörüngelerin gittikçe birbirinden uzaklaşması veya yaklaşması ile kaos analizi yapılabilir. Lyapunov üstelleri komşu yörüngeler aradaki bu mesafeyi ölçen matematiksel bir yöntemdir.

6.4. Kaotik Osilatörler

6.4.1. Lorenz kaotik osilatörü

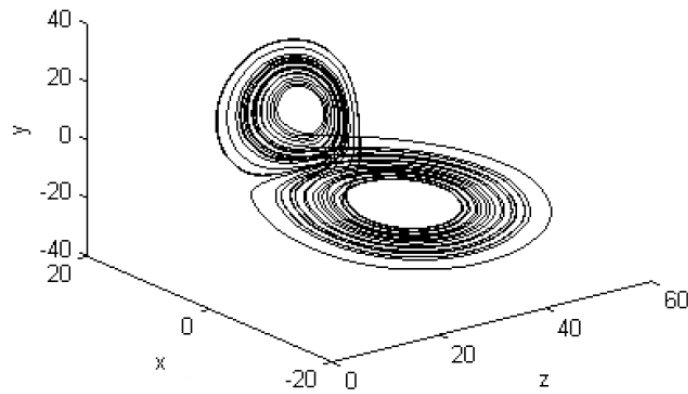
1963 yılında, havanın basitleştirilmiş bir modelini çalışmak üzere basit bir matematiksel bilgisayar programı yazan meteorolog Edward Lorenz, bir hava akımının güneş tarafından ısıtıldıkça nasıl azalıp çoğalacağına ilişkin bir model üzerinde çalışıyordu. Lorenz' in yazdığı bilgisayar kodları hava akımlarının akışlarını düzenleyen matematiksel formülleri içermekteydi. Bilgisayar kodu tamamen gerekirci özellikte olduğundan Lorenz, aynı başlangıç koşulları verildiği takdirde, programın çalıştırılması sonucu hep aynı sonuçları almayı bekliyordu. Fakat aynı zannettiği başlangıç değerlerini girdiği zaman, her seferinde kökten farklı sonuçlar elde ettiğini görmek Lorenz' i şaşkına çevirmişti. Daha dikkatli bir inceleme yaptığında her seferinde tamamen aynı değerleri değil, birbirinden çok küçük de olsa farklı değerleri girmiş olduğunu fark etti. Her deneme sırasındaki başlangıç değerlerinin farklı olduğunu anlayamamıştı, çünkü farklılıklar, alışılmış standartlara göre mikroskobik ve önemsiz addedilecek kadar inanılmaz düzeyde küçük farklılıklar vardı. Lorenz' in atmosfer modelinde kullandığı matematik 1970'lerde geniş bir biçimde araştırıldı. Zamanla, kaotik bir sistemin temel özelliği olarak, iki farklı başlangıç koşulları dizgesindeki düşünülebilecek en küçük farklılığın, daima, sonraki veya önceki zamanlarda büyük farklılıklara yol açacağı, bilinen bir gerçek haline geldi. E.Lorenz yaklaşık bir biçimde sonsuz boyutlu uzaydaki gerçek zamansal değişimi bilgisayarda inceleyebileceği üç boyutlu bir değişim kullanarak bugünkü Lorenz çekeri olarak bilinen bir nesne ortaya çıkmıştır.

Lorenz' in hava tahminlerini hesaplanmasında kullandığı iki boyutlu akışkan konveksiyonu için bir model olarak tanımladığı ve σ , r ve b sistem parametreleri olmak üzere;

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \sigma(x_2 - x_1) \\
\dot{x}_2 &= rx_1 - x_2 - x_1x_3 \\
\dot{x}_3 &= -bx_3 + x_1x_2
\end{aligned} \tag{6.10}$$

Denklemleri ile verilir. Burada x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenleridir [6]. Bir dinamik sistemin kaotik davranabilmesi için başlangıç şartlarına çok duyarlı olması gerekmektedir. Kaotik bir davranışı diğer davranışlardan ayıran bir diğer gösterge ise faz resmi görünümü ve frekans spektrumudur. Kaotik yapıya sahip sistemlerde faz resminin zaman gelişimi, dinamik sistemin yapısının oluşturduğu faz uzayı içerisinde sayılamayacak kadar çok yörüngelerin oluşması ile belirlenir. Zaman ilerledikçe bu yörüngeler kendini tekrar ederek faz uzayını doldurmaya başlar. İşte faz uzayının bu şekilde dolması bize sistemin kaotik bir sistem olduğunun bir göstergesidir.

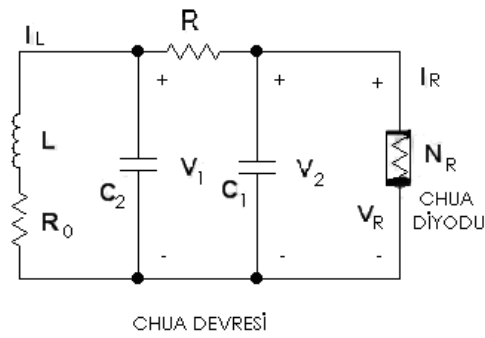
Sistem parametrelerinin değiştiği zaman değişik cevaplar vermektedir. x_1 , x_2 ve x_3 durum değişkenlerini σ , r ve b sistem parametrelerini değiştirildiği zaman farklı davranışlar gösterdiğini sistemin o anki cevabı olduğu görülmektedir (Şekil 6.8.).



Şekil 6.8. Lorenz Çekicisi ($\sigma=10$, $r=28$, $b=8/3$)

6.4.2. Chua kaotik osilatörü

Chua devresi en karmaşık kaosun varlığının deneysel olarak kurulabildiği, sayısal olarak doğrulanabildiği ve matematiksel olarak kanıtlanabildiği en basit devrelerden biridir. Şekil 6.9. da görüldüğü gibi Chua devresi bir doğrusal indüktans (L , iç direnç R_0), iki doğrusal kapasitör (C_1 , C_2), bir doğrusal direnç (R), ve Chua diyodu olarak adlandırılan doğrusal olmayan yapıda gerilim kontrollü direnç (N_R)'den oluşur. Herhangi bir elemanın değeri değiştirildiğinde kaotik davranış dizileri elde edilir.



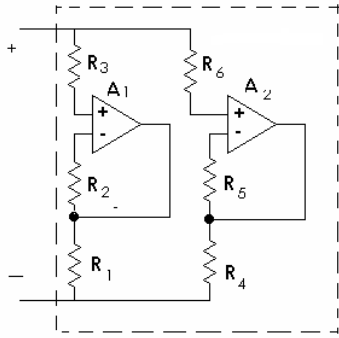
Şekil 6.9. Chua Devresi

Chua devresi üç adet durum denklemleri ile tanımlanır:

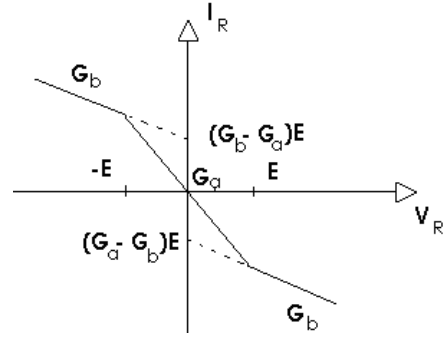
$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} &= \frac{G}{C_1}(V_2 - V_1) - \frac{1}{C_1}g(V_1) \\ \frac{dV_2}{dt} &= \frac{G}{C_2}(V_2 - V_1) - \frac{1}{C_2}(I_L) \\ \frac{dI_L}{dt} &= -\frac{R_C}{L}I_L - \frac{1}{L}V_2 \end{aligned} \quad (6.11)$$

Denklem 6.11 de $g(V_1)$ olarak tanımlanan N_R direncinin Şekil 6.10 (b) gösterilen doğrusal karakteristiğini temsil etmektedir.

$$g(V_1) = \left\{ \begin{array}{ll} G_b V_R + (G_b - G_a)E & ; V_R < -E \\ G_a V_R & ; -E < V_R < E \\ G_b V_R + (G_a - G_b)E & ; V_R > E \end{array} \right\} \quad (6.12)$$

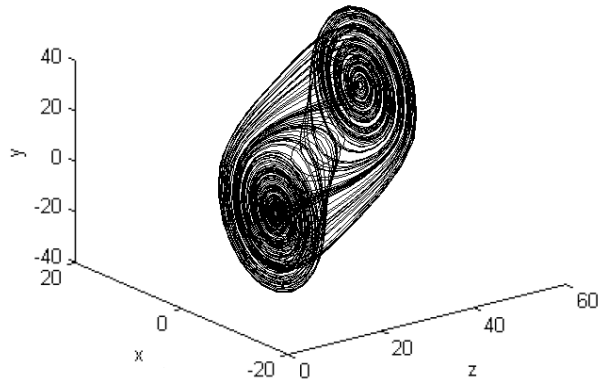


(a)



(b)

Şekil 6.10. a) Chua Doğrusal Olmayan Diyodu b) Chua Diyotunun Karakteristiği

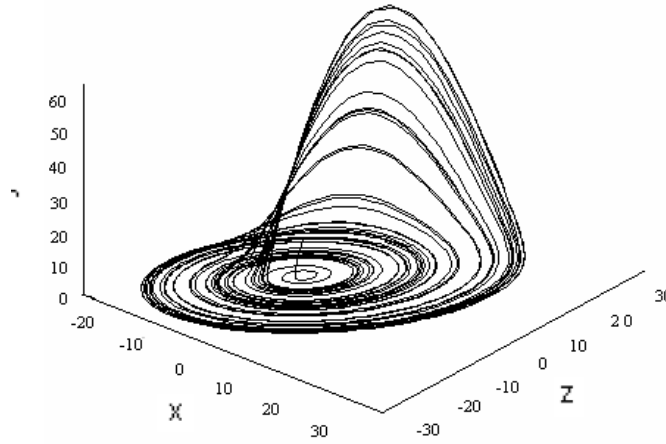


Şekil 6.11. Chua Kaotik Osilatörünün x , y ve z Fazlarının Karşılaştırılması

6.4.3. Rossler kaotik osilatörü

Kaotik işaretler üreten bir başka dinamik denklemde Rossler dinamik denklemleridir. Rossler dinamik denklemleri a, b ve c sistem parametreleri olmak üzere x, y ve z durum değişkenleridir.

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= -(y - z) \\ \frac{dy}{dt} &= x(1 + a) \\ \frac{dz}{dt} &= b + z(x - c)\end{aligned}\tag{6.13}$$



Şekil 6.12. Rossler Dinamiği

6.4.4. Van Der Pol kaotik osilatörü

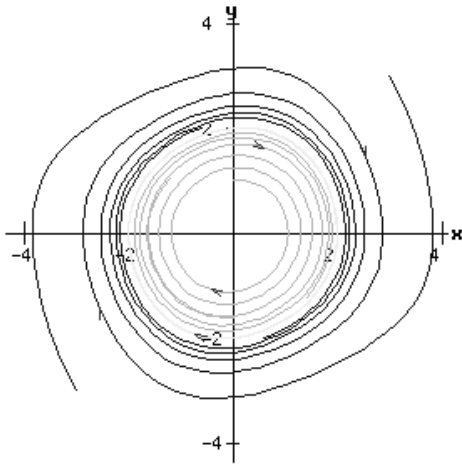
Kaotik işaret üreten bir başka dinamik denklemde Van Der Pol kaotik osilatörleridir. Dinamik denklemi ikinci dereceden bir diferansiyel denklem olup aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \mu(x^2 - 1)\frac{dx}{dt} + x = 0\tag{6.14}$$

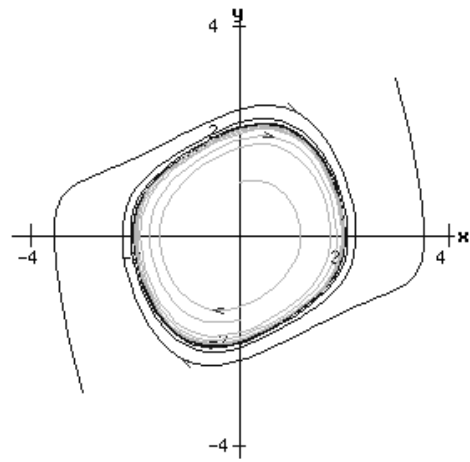
Denklem 6.14 deki ifadeyi iki adet birinci dereceden diferansiyel denklemlerle ifade edersek;

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= y \\ \frac{dy}{dt} &= \mu(1-x^2)y - x \end{aligned} \quad (6.15)$$

Olur. Bu eşitliğin çözümü, kapalı bir eğri üzerinde bir noktanın hareketidir. Bu hareket sabit genlikli bir osilasyondur. Bu şekilde davranması eşitliğin kendi kararını uygulayan osilatörlerin de bir örneğidir. Böyle bir çekici “Limit Döngü” olarak adlandırılır. Sistemin jacobian matrisinin elde edilmesi sonunda farklı μ değerleri için aşağıdaki şekiller Van Der Pol sistemine ait kaotik bir yapı olan limit döngü’yü göstermektedir.



(a) $\mu = 0.1$



(b) $\mu = 0.1$

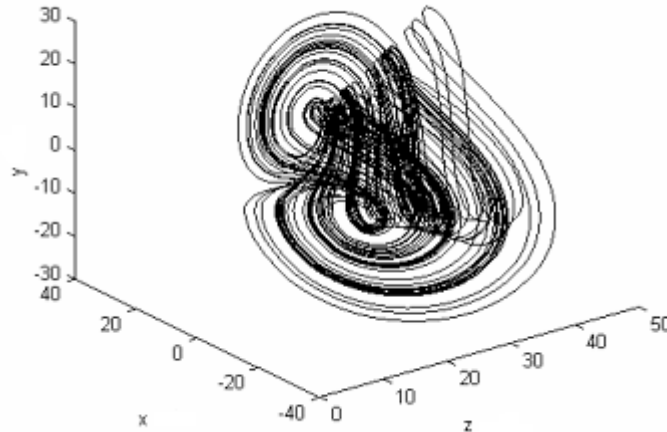
Şekil 6.13. Van Der Pol Kaotik Osilatörünün Oluşturduğu Limit Döngü

6.4.5. Chen kaotik osilatörü

Kaotik işaret üreten bir başka dinamik sistem chen kaotik osilatörleridir. Chen sistemi yapı olarak lorenz sistemine benzesede, kaotik sistemler içerisinde kanonik yapıdaki farklı bir sistemdir. Chen sisteminde değişkenler a,b ve c olup, dinamik denklemi aşağıda gibi tanımlanır;

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -ax + ay \\ \dot{y} &= (c - a)x + cy - xz \\ \dot{z} &= xy - bz\end{aligned}\tag{6.16}$$

Sistem değişkenlerinin $a = 35$, $b = 3$, $c = 28$ değerleri olması durumunda oluşan faz portresi şekil 6.14 de gösterilmiştir [19].



Şekil 6.14. Chen Kaotik Osilatörünün x, y ve z Fazlarının Karşılaştırılması

6.4.6. Duffing –Van Der Pol kaotik osilatörü

Bu kaotik osilatör denklemleri de diğer dinamik denklemler gibi otonom, kendi kararını uygulayan eşitliklerdir. Duffing-Van Del Pol osilatörü bu hali ile doğrusal olmayan dinamiklerin prototip uygulamalarından biridir. Bu sistem yay, doğrusal olmayan elektronik devreler, süper iletken Josephson parametrik kuvvetlendirici,

Plazmalardaki iyonize dalgalar gibi fiziksel sistemler için model olarak kullanılmaktadır. Duffing-Van Del Pol osilatörü dinamik denklemi:

$$\frac{d^2y}{dt^2} - \mu(1 - y^2) \frac{dy}{dt} + y^3 = f \cos \omega t \quad (6.17)$$

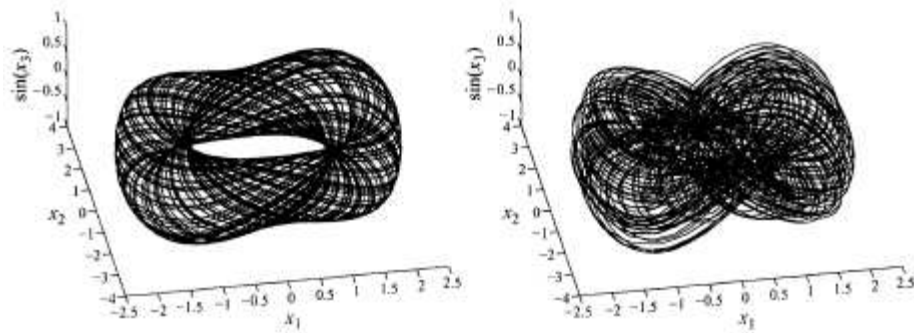
Biçiminde tanımlanır. μ, ω, f sistem parametreleri olarak tanımlanmıştır. Bu ikinci dereceden nonotonom denklemi birinci dereceden yazmak istersek;

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2$$

$$\frac{dx_2}{dt} - \mu(1 - x_1^2)x_2 + x_1^3 = f \cos x_3 \quad (6.18)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = \omega$$

Şeklinde olur. Sistemdeki dinamik değişkenler $x_1=y, x_2=dy/dt, x_3=\omega t$ olarak tanımlanmıştır.



Şekil 6.15. Duffing-Van Der Pol Osilatörü için Faz Portreleri

BÖLÜM 7. FERROREZONANS OLAYLARIN BİLGİSAYAR DESTEKLİ ANALİZ UYGULAMALARI

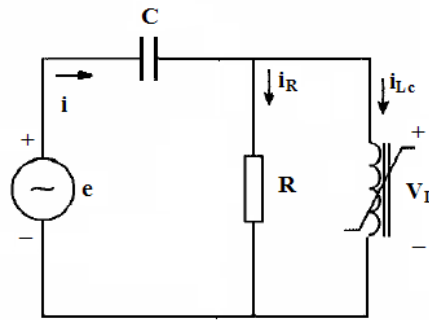
Güç sistemlerinde ferreazonans olayları meydana getirecek birçok devre modeli bulunmaktadır. Güç sistemlerinde çok sayıda nonlinear özellikte endüktans elemanının kullanılması, ferreazonans ihtimalinin ortaya çıkabileceği muhtemel senaryoların fazlalığının en büyük göstergesidir. Lineer olmayan bir rezonans olan ferreazonansın, güç sisteminde oluşturduğu aşırı harmonikli gerilim ve akımlar sistemde bulunan ekipmanlara büyük zararlar verir. Ferreazonans olayların güç sistemi içerisinde aniden, öngörülemez bir şekilde ortaya çıkması ve ferreazonansın lineer olmayan yapısı, ferreazonans analizini de zorlaştırmaktadır. Ferreazonansın klasik analiz yöntemleri içerisinde Rüdberg grafik yöntemi, Galerkin harmonik denge yöntemi, Swift fonksiyon tanımlama yöntemi ve ortalama değer yöntemi sayılabilir. Klasik analiz yöntemleri dışında modern nonlinear dinamik yöntemler ile sistemin analizini yapmak da mümkündür. Kaos analiz yöntemleri içerisinde sınıflandırılan çatalaşma diyagram yöntemi, faz uzaylarının incelenmesi (çekici karakterizasyonu), ve güç spektrum yöntemi (nonlinear frekans cevabı) modern nonlinear yöntemler içerisinde değerlendirilir [20].

Güç sistemin içerisinde anormal yüksek gerilimlerin oluştuğu, geçici durumların meydana geldiği bu tipteki devre yapılarını pratik uygulamalar yaparak incelemek oldukça pahalı bir yöntemdir. Dinamik ve geçici durum cevapları olan güç sistem devrelerinin analizleri bilgisayar simülasyonları kullanılarak gerçekleştirilebilir.

Ferreazonansın oluşmasına neden olan manyetik özellikli devrelerde kesin hatasız analizler yapmak oldukça zordur. Bu tipteki devrelerde devre içerisinde bulunan

elemanların matematiksel ifadeleri çıkarılarak sadece yaklaşık olarak analizler elde edilebilir.

Yüksüz bir transformatör ya da nonlinear bir endüktans ile seri bağlı bir kapasitenin oluşturduğu bir devreyi analiz edebilmek için, manyetik akının bağımsız değişkeni olduğu bir nonlinear diferansiyel denkleme ihtiyaç vardır (Şekil 7.1.).



Şekil 7.1. Basit Ferrorezonans Devresi

Devrenin nonlinear diferansiyel denkleminin elde edilmesinden önce, manyetik özellikteki endüktansın doyuma ulaşması ile birlikte, doyum derecesine göre endüktansın içinden geçecek akımın ($i_L(\phi)$) manyetik akıya bağlı ifadesine ihtiyaç duyulur. Akımın akıya bağlı olarak gerçekleşen değişimini tek derecelerden oluşan bir polinom denklemi ile ifade edebiliriz.

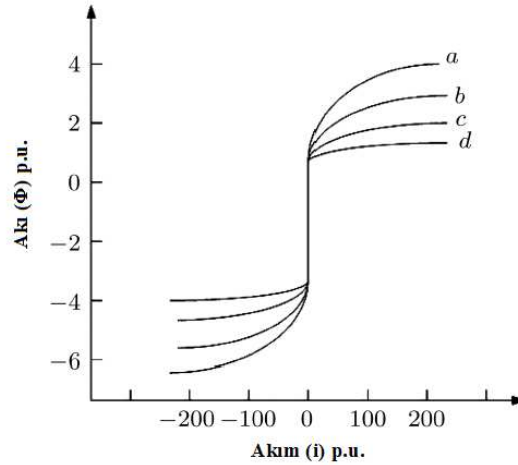
$$i_L(\phi) = a_1\phi + a_3\phi^3 + a_5\phi^5 + \dots + a_n\phi^n \quad (7.1)$$

En genel şekliyle ifade edilen denklemde n tek tamsayıları ifade ederken, a_1, a_3, \dots, a_n ifadeleri sabit olarak alınır. Genel olarak birçok uygulamada işlem kolaylığı sağlamak amacıyla, polinom denkleminin en büyük dereceli ifadesi ile en düşük dereceli ifadesi alınarak, denklem iki terimli olarak kullanılır[21].

$$i_L(\phi) = a_1\phi + a_n\phi^n \quad (7.2)$$

n ifadesi tek sayıları ifade etmektedir.

Şekil 7.1. deki devrede endüktansın doyuma gitmesi ile beraber, akı-akım karakteristiğinde nonlinear bir yapıda olur. Doyuma ulaşan endüktansın, doyum derecesini polinom denklemdeki n değeri belirler. Güç trafolarında meydana gelen ferrezonans olayların bilgisayar analizlerinde devre yapısı ve trafonun kapasitesi n değerini belirler. Örneğin 25MVA 110/44/4 kV'lık bir transformatör için n değeri 11 alınır. Polinom denklemde a ile gösterilen sabit ise devrede kullanılan endüktans değerinin çarpmaya göre tersini (1/L) ifade eder [22].



Şekil 7.2. Akım Akı Eğrisi

a) $a \phi + a_n \phi^5$ b) $a \phi + a_n \phi^7$ c) $a \phi + a_n \phi^9$ d) $a \phi + a_n \phi^{11}$

Şekil 7.1 deki nonlinear devrenin gerilim akım ve akıdan oluşan diferansiyel denklemi aşağıdaki formülle ifade edilir.

$$e(t) = \frac{1}{C} \int (i_L \cdot dt) + \frac{1}{RC} \int \frac{d\phi}{dt} dt + \frac{d\phi}{dt} \quad (7.3)$$

Elde edilen denklemde i_L ifadesi akı cinsinden yazılıp, denklemin türevinin alınması halinde ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir.

$$\frac{d^2 \phi}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{C} (a_1 \phi + a_3 \phi^3) = \omega V_m \cos(\omega t) \quad (7.4)$$

7.4 denkleminin düzenlersek;

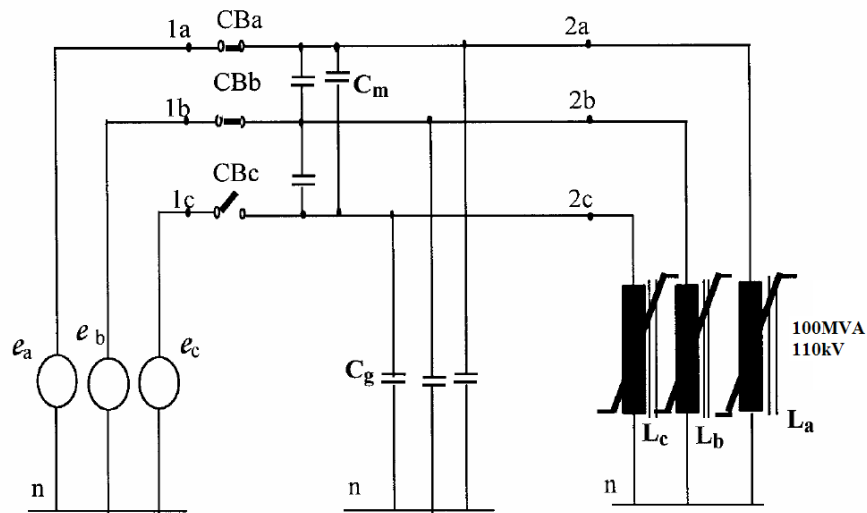
$$\ddot{\phi} + k \dot{\phi} + C_1 \phi + C_3 \phi^3 = G \cos(\omega t) \quad (7.5)$$

Denklemi elde edilir. Denklemden yer alan akı ifadesinin derecesi, transformatörün demir nüvesinde meydana gelen doyuma bağlı olarak değişir. 7.5 denkleminin bize kaotik bir sistem olan duffing osilatörünün dinamik denklemini vermektedir.

Ferrorezonansı meydana getiren sistemlerden elde edilen matematiksel ifadelerin, kaotik sistemlerden duffing osilatörüne benzer denklemler ortaya koyması, ferrorezonansın kaotik bir sistem olarak değerlendirilmesine imkân verir.

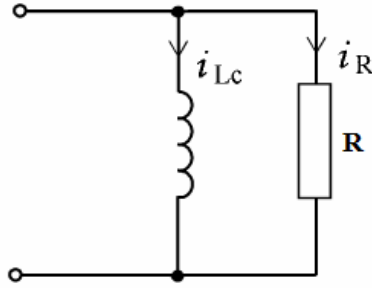
7.1. Tek Fazın Açık Kalması Durumunda Meydana Gelen Ferrerezonans Olayının Kaotik Olarak İncelenmesi

Yüksüz durumdaki güç trafolarının şebekeye bağlanması sırasında, kesicilerde oluşan problemlerden dolayı, trafo şebekeye iki faz ya da tek faz üzerinden bağlanabilir. Bu durum güç trafosunda ferrerezonansı meydana getirebilecek bir durumdur. Kesicilerin kapama esnasında açık kalması durumu mekanik arızalardan, kesicinin sigortalarının atmasından ya da kesicileri kontrol eden sistemde kaynaklanan arızalar nedeni ile kapama komutunu verememesinden kaynaklanabilir. Üç fazlı bir gerilim trafosunda tek fazın açık kalması ile birlikte güç sisteminde bulunan kapasitanslar trafodaki endüktif reaktanslarla seri bir rezonans devresi oluştururlar. Bu esnada oluşan rezonansla birlikte açık kalan fazda aşırı gerilimler meydana gelebilir. Trafonun demir nüveli nonlineer özellikteki sargıları ferrerezonansın oluşmasına sebebiyet verebilir.



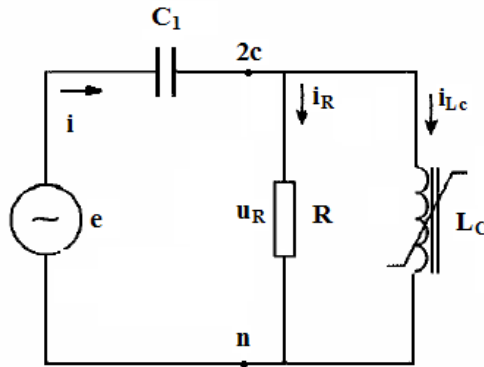
Şekil 7.3. Üç Fazlı Sistemde Tek Fazın Açık Kalması Durumu

Sistemin eşdeğer devresini elde edebilmek için trafonun açık kalan fazına bağlı nonlinear özellikteki demir nüveli endüktansı, trafonun nüve kayıplarını ifade eden bir direnç ve paralel nonlinear bir endüktans ile tanımlarız (şekil 7.4.). Şekilde R ile gösterilen direnç transformatöre ait demir nüve kayıplarını ifade eder.



Şekil 7.4. Nonlinear Endüktans Modeli

Tek fazın açık kalması ile birlikte oluşan devrenin thevenin eşdeğerini alırsak şekil 7.4. deki devreyi elde ederiz.



Şekil 7.5. Tek Fazın Açık Olması Durumdaki Basit Ferrerrezonans Devresi

Thevenin eşdeğeri verilen devre akımlarının matematiksel ifadesini Kirchoff'un birinci yasasına göre yazılır.

$$-i + i_R + i_{Lc} = 0 \quad (7.6)$$

Transformatörün karakteristiğinin nonlinear özellikte olmasından dolayı transformatörün çekeceği akımı, akının bağımsız değişken olduğu onbirinci dereceden bir polinom denklemi ile tanımlarız [7]. Burada polinom denkleminin derecesi demir nüvenin doyum (saturasyon) derecesini ifade eder.

$$i_L(\phi) = a\phi + b\phi^{11} \quad (7.7)$$

Denklem 7.6. daki akım ifadeleri devre elemanları cinsinden düzenlenir ise denklem 7.8. elde edilir.

$$C_1 \frac{d(u_R - e)}{dt} + \frac{u_R}{R} + a\phi + b\phi^{11} = 0 \quad (7.8)$$

Denklemden bulunan u_R gerilim ifadesi akı cinsinden yazılması durumunda ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir (denklem 7.9.).

$$u_R = \frac{d\phi}{dt} \quad (7.9)$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{1}{RC_1} \frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{C_1} (a\phi + b\phi^{11}) = \omega E_m \cos(\omega t) \quad (7.10)$$

Denklemden yer alan C_1 kapasitans değeri devrenin faz-nötr ve faz-faz arası kapasite değerlerini ifade eder.

$$C_1 = C_g + 2C_m \quad (7.11)$$

7.1.1. Sistem parametrelerinin seçilmesi

Şekil 7.3. deki güç devresinde trafo değerleri üç fazlı 100MVA gücünde 110/44/4 kV'luk bir güç trafosu seçilmiş olup, farklı hat uzunluklarında ve farklı trafo kayıpları olması durumunda sistemde oluşabilecek ferrezonans olaylar incelenmiştir. Sistemdeki parametreler gerçek değerleri üzerinden değil, per-unit değerlere çevrilerek hesaplanır. Sistem için baz değerleri, devredeki trafo gücüne ve gerilimine bağlı olarak belirlenir [23].

$$V_{\text{baz}} = \frac{110}{\sqrt{3}} \text{ kV} \quad (7.12)$$

$$Z_{\text{baz}} = \frac{V_{\text{baz}}^2}{S_{\text{baz}}} = \frac{(63,5 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 40,33 \Omega \quad (7.13)$$

$$\omega_{\text{baz}} = 2\pi 50 \text{ Hz} \quad (7.14)$$

$$\omega_{\text{baz}} = 314 \text{ rad/sn}$$

Baz değerlerinin belirlenmesi ile birlikte devre parametreleri per-unit değerlere çevrilir. Güç sisteminde hat uzunluğuna ve trafo nüve kayıplarına bağlı olarak üç farklı yapıda ferrezonans durumu meydana gelir. Transformatörde meydana gelen farklı nüve kayıpları sistemde oluşabilecek ferrezonans modunun belirlenmesinde önemli rol oynar. Bu nedenle dört farklı transformatör nüve kaybının olduğu aynı yapıdaki sistem incelenmiştir. İncelenen hattın uzunluğu 62km olarak seçilmiştir. Devrede bulunan kapasitans değerleri kilometre başına $C_g=5,41 \text{ nF km}^{-1}$, $C_m=1,18 \text{ nF km}^{-1}$ olarak alınmıştır. 62km lik iletim hattının seçilmesi durumunda devredeki kapasite değerleri $C_g=338.125 \text{ nF km}^{-1}$, $C_m=73.75 \text{ nF}$ olacaktır. İkinci dereceden diferansiyel denklemde yer alan C_1 kapasitans değeri aşağıdaki gibi olur.

$$C_1 = 338.125 + 2 \times (73.75) = 485.625 \text{ nF} \quad (7.15)$$

Sistemde transformatör nüve kayıplarını ifade eden R değeri dört farklı değerde alınmıştır ($R_1=10^3\Omega$, $R_2=10^4\Omega$, $R_3=10^5\Omega$, $R_4=10^6\Omega$). Kaynak gerilimi (E) ve açılmal hız (ω) ifadeleri 1 p.u değerine sabitlenmiştir.

Devrede bulunan transformatörün nüve kayıpları ve kapasite değerleri per-unit ifadelerine çevrilir.

$$R_{1p.u} = \frac{10 \times 10^2}{40.33} = 24.79p.u \quad (7.16)$$

$$R_{2p.u} = \frac{10 \times 10^3}{40.33} = 247.95p.u$$

$$R_{3p.u} = \frac{10 \times 10^4}{40.33} = 2479.54p.u$$

$$R_{4p.u} = \frac{10 \times 10^5}{40.33} = 24795.43p.u$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314 \times 485.625} = 6563.09\Omega \quad (7.17)$$

$$X_{c.p.u} = \frac{6563.09}{40.33} = 162.73p.u \quad (7.18)$$

$$C_{p.u} = \frac{1}{\omega_{p.u} \times X_{c.p.u}} = \frac{1}{1 \times 162.73} = 0.00614p.u \quad (7.19)$$

Devre parametrelerini per-unit değerler çevrilmesinden sonra, sistemi tanımlayan ikinci dereceden diferansiyel denklem üzerinde değişken dönüşümü yapılarak denklem düzenlenir. Akım denkleminin de endüktansın tersi olarak tanımlanan, transformatörün nonlineer karakteristiğini temsil eden $a = 2.8 \times 10^{-3}$ ve $b = 7.2 \times 10^{-3}$ olarak alınır.

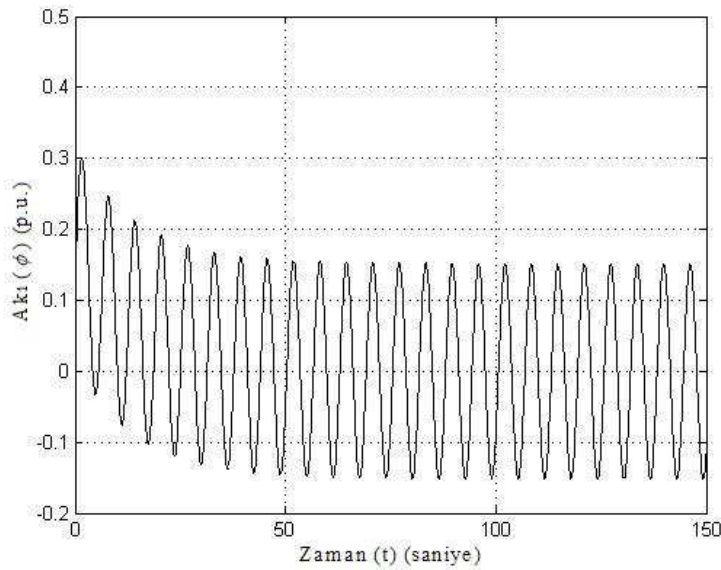
$$\phi = x_1 \quad \frac{d\phi}{dt} = x_2 = \dot{x}_1 \quad \frac{d^2\phi}{dt^2} = \dot{x}_2 \quad x_3 = \omega t \quad (7.20)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{RC_1} x_2 - \frac{1}{C_1} (ax_1 + bx_1^{11}) + \omega E_m \cos(x_3) \quad (7.21)$$

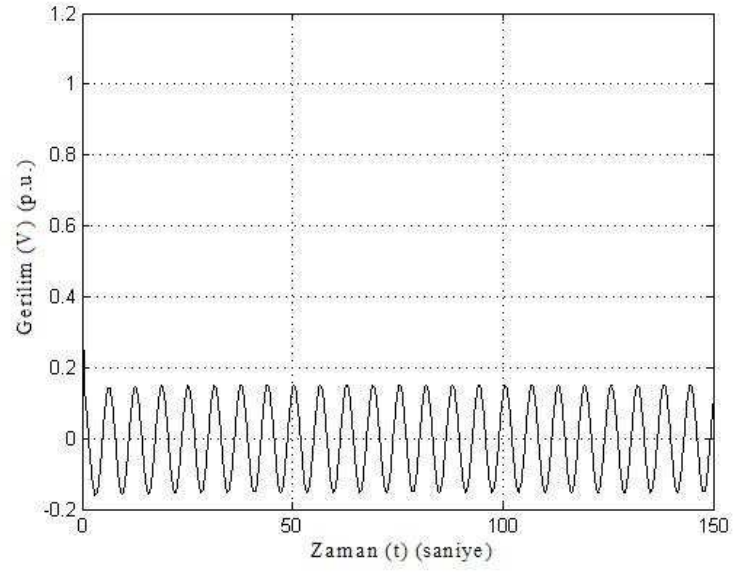
Elde edilen grafikler Matlab ortamında Butcher'in 5. dereceden sabit adımlı Runga – Kutta metodu ile çizdirilmiş olup, başlangıç değerleri $V(t)=\sqrt{2} \phi(t) = 0$ $t=0$ olarak alınmıştır. Simulasyon zaman aralığı 0–150 saniye aralığında gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{RC_1} x_2 - \frac{1}{C_1} (ax_1 + bx_1^{11}) + \omega E \cos(x_3) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7.22)$$

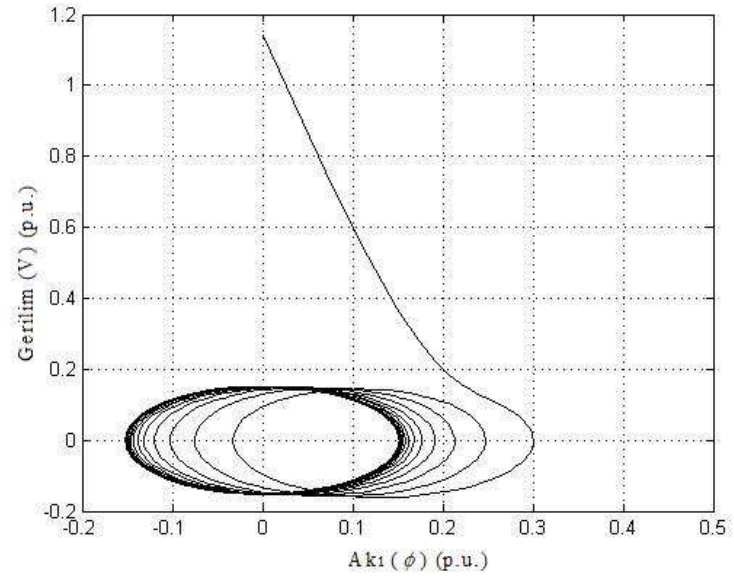
İlk incelen durum transformatörün nüve kayıplarının $R=10^3 \Omega$ olarak alınması halinde oluşan sinüzoidal durumdur. (Bkz. Şekil 7.6-7.7-7.8-7.9)



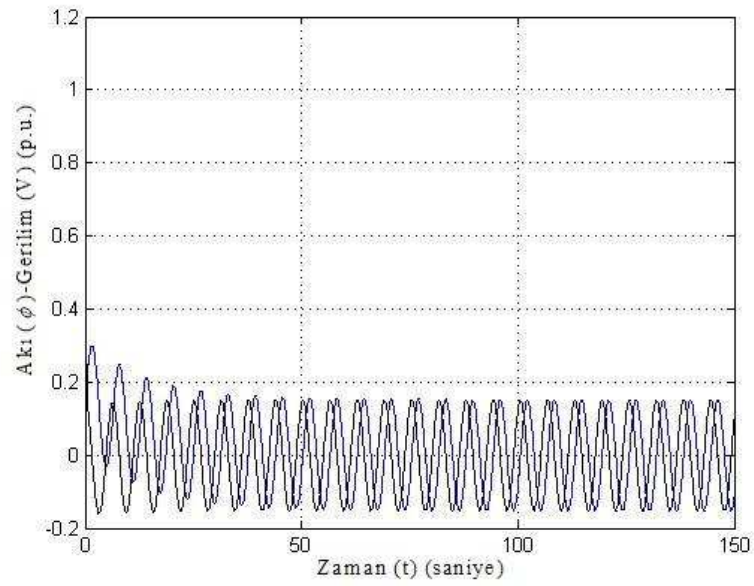
Şekil 7.6. Sinüzoidal Durum için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.7. Sinüzoidal Durum için Gerilim-Zaman Grafiği

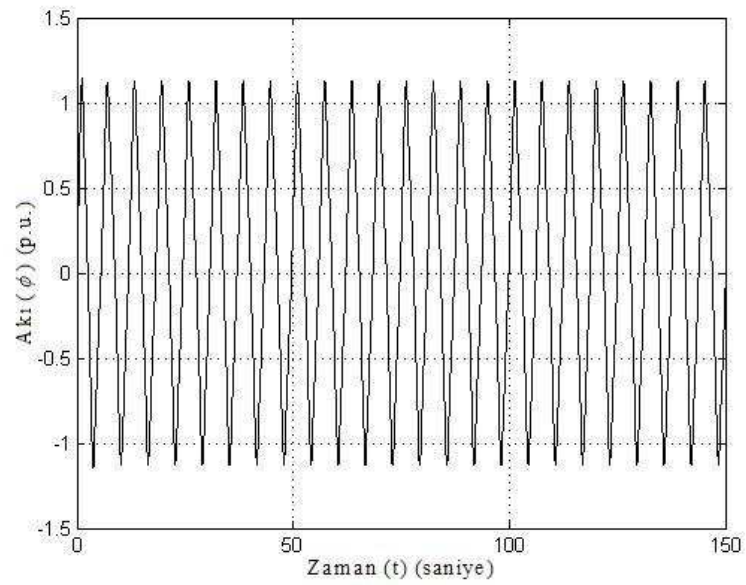


Şekil 7.8. Sinüzoidal Durum için Akı-Gerilim Grafiği

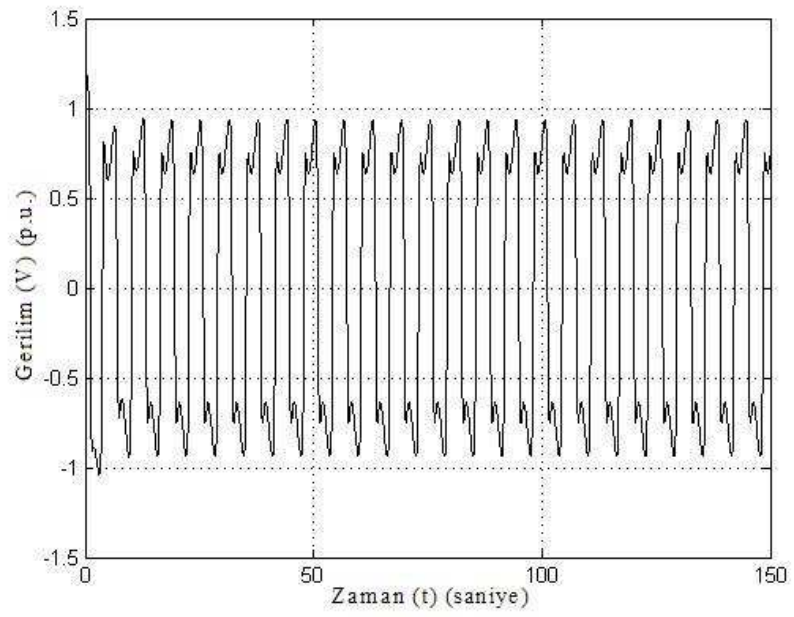


Şekil 7.9. Sinüzoidal Durum için Akı-Gerilim Zaman Grafiği

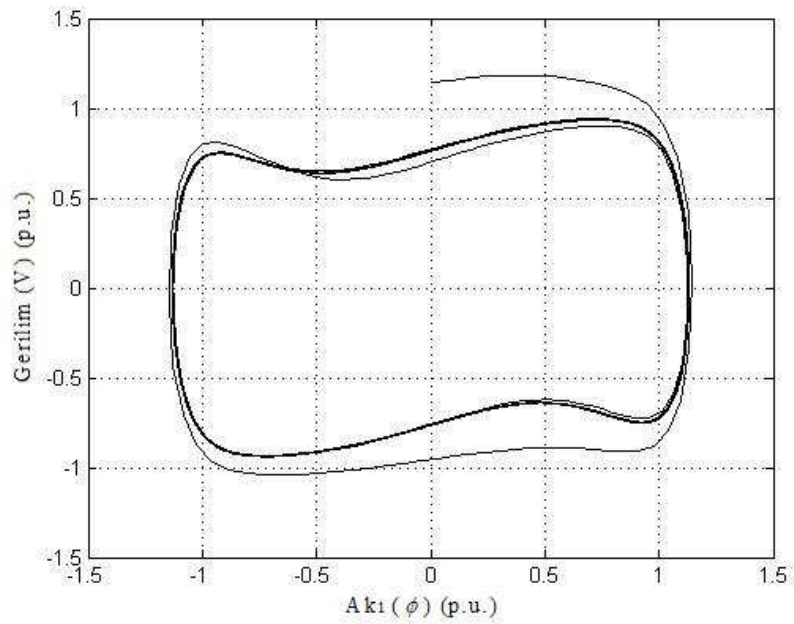
İkinci incelenen durum transformatör nüve kayıplarının $R=10^4\Omega$ olarak alınması halinde oluşan temel ferrezonans durumudur. (Bkz. Şekil 7.10.–7.11–7.12.–7.13.)



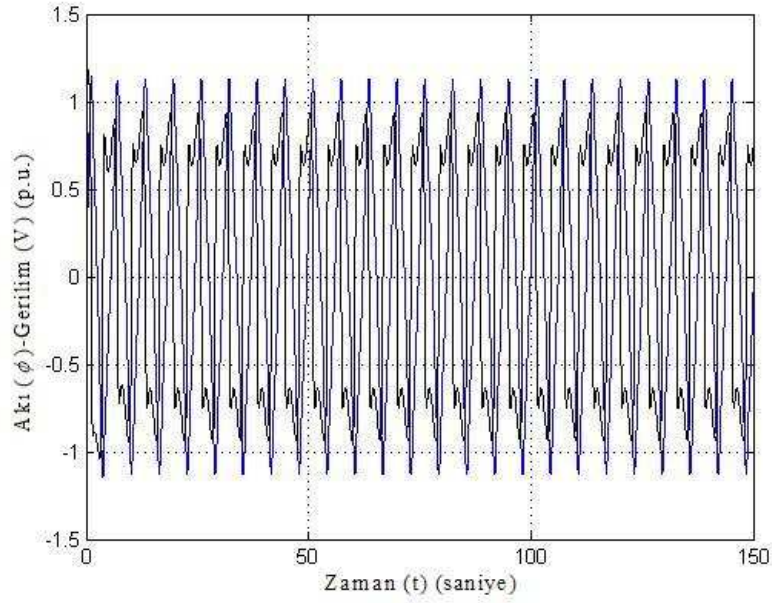
Şekil 7.10. Temel Ferrerezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.11. Temel Ferrezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği

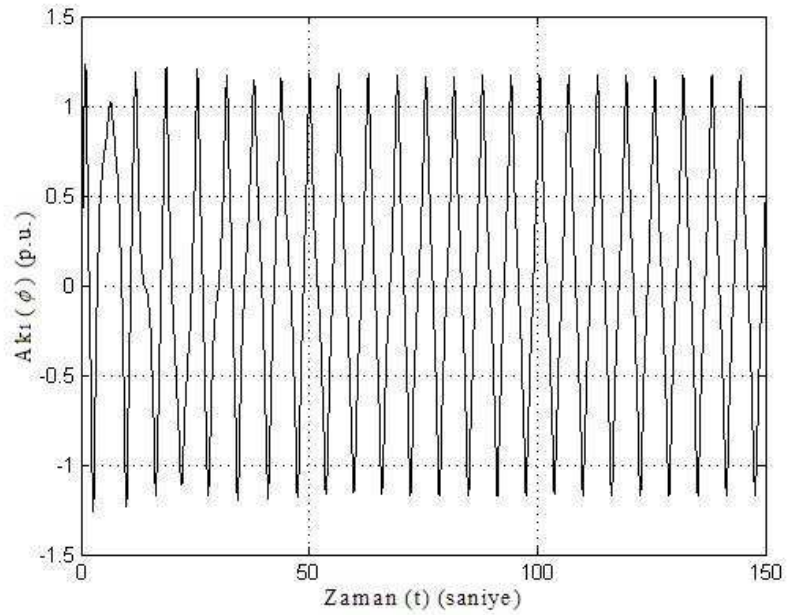


Şekil 7.12. Temel Ferrezonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği

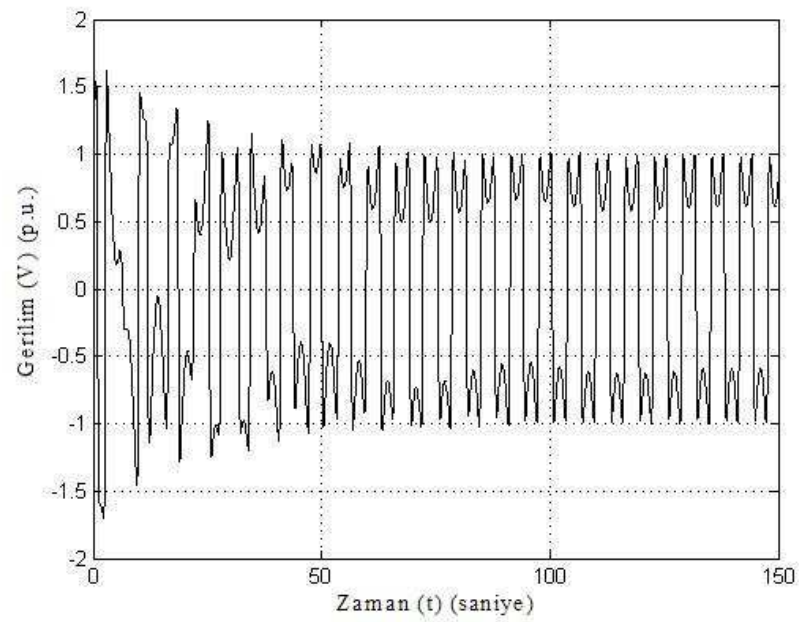


Şekil 7.13. Temel Ferrezonans Durumu için Akı Gerilim- Zaman Grafiği

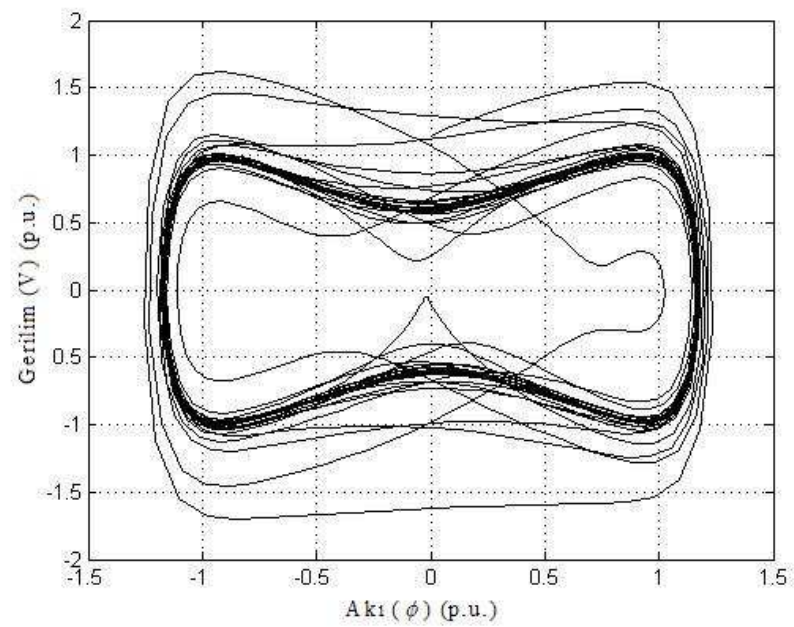
Üçüncü incelenen durum transformatör nüve kayıplarının $R=10^5\Omega$ olarak alınması halinde oluşan yarı periyodik ferrezonans durumudur. (Bkz. Şekil 7.14.–7.15.–7.16.–7.17.)



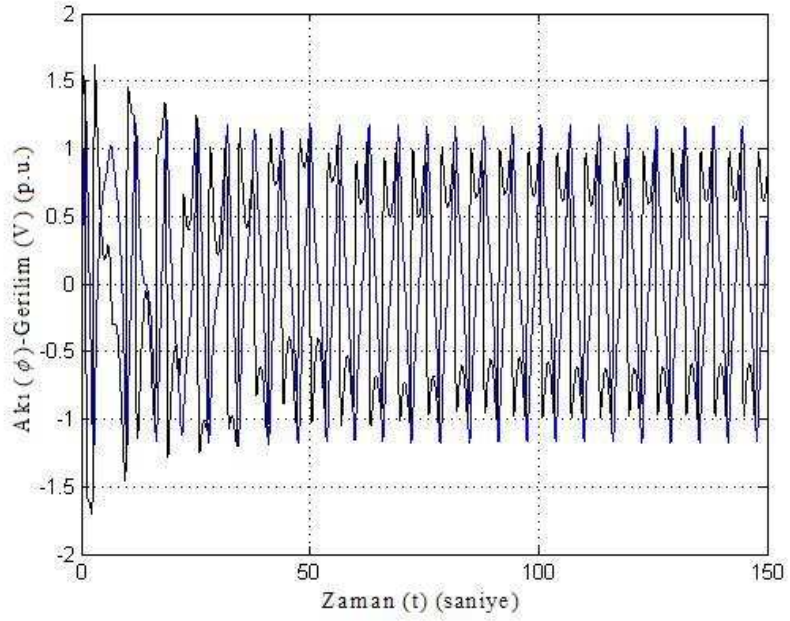
Şekil 7.14. Yarı Periyodik Ferrezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.15. Yarı Periyodik Ferreazonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği

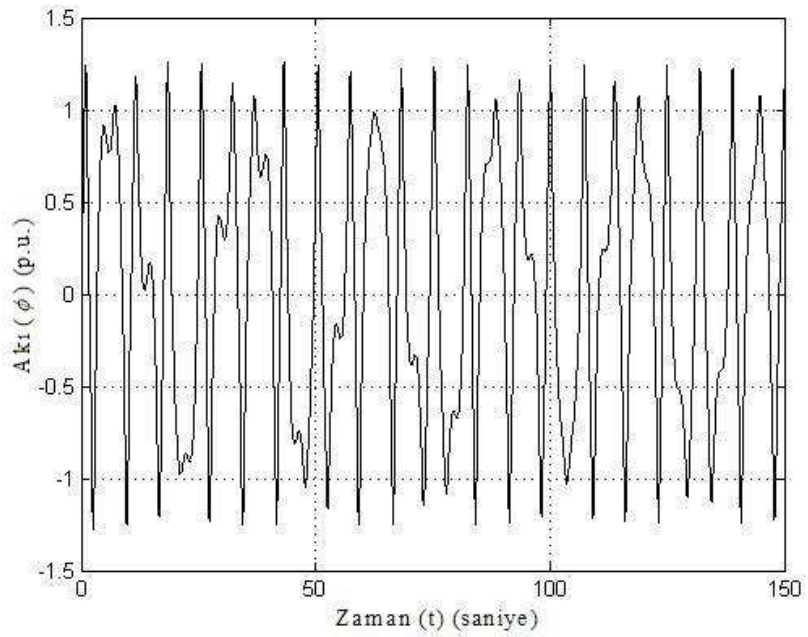


Şekil 7.16. Yarı Periyodik Ferreazonans Durumu için Akı-Gerilim Grafiği

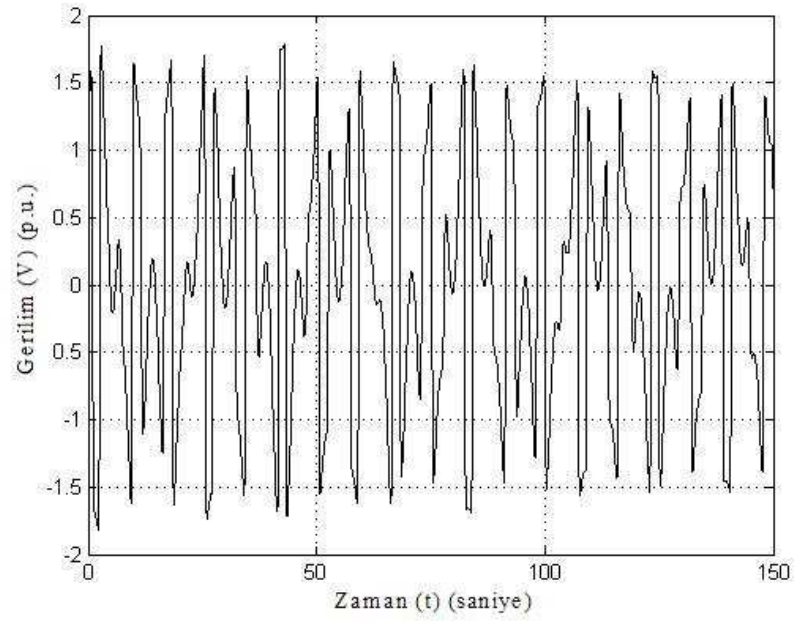


Şekil 7.17. Yarı Periyodik Ferreazonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği

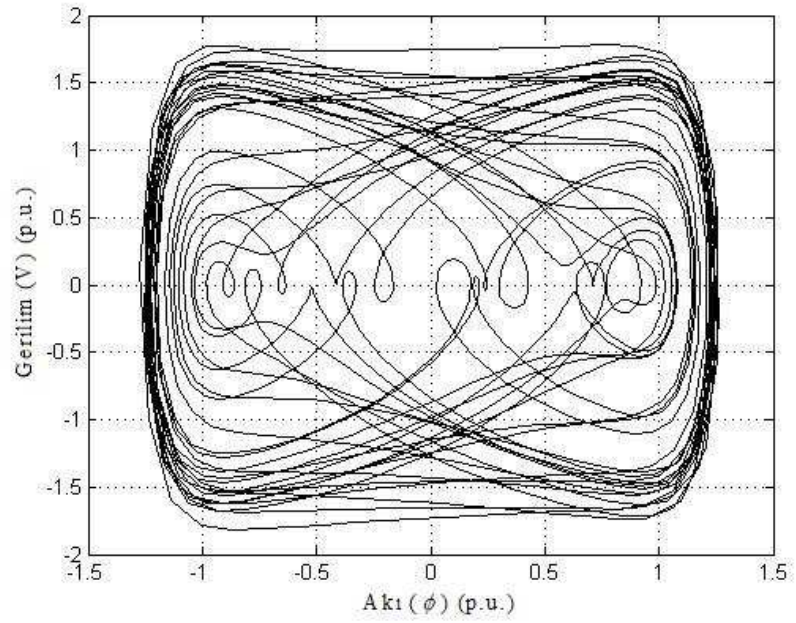
Son olarak incelenen durum transformatör nüve kayıplarının $R=1M\Omega$ olarak alınması halinde oluşan kaotik ferreazonans durumudur (Bkz. Şekil 7.18.–7.19.–7.20.–7.21.).



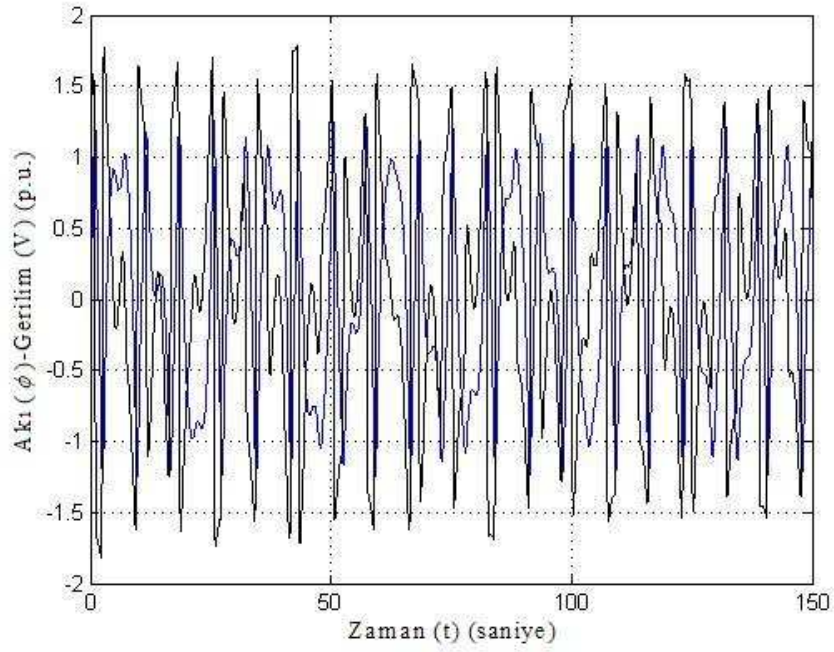
Şekil 7.18. Kaotik Ferreazonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği



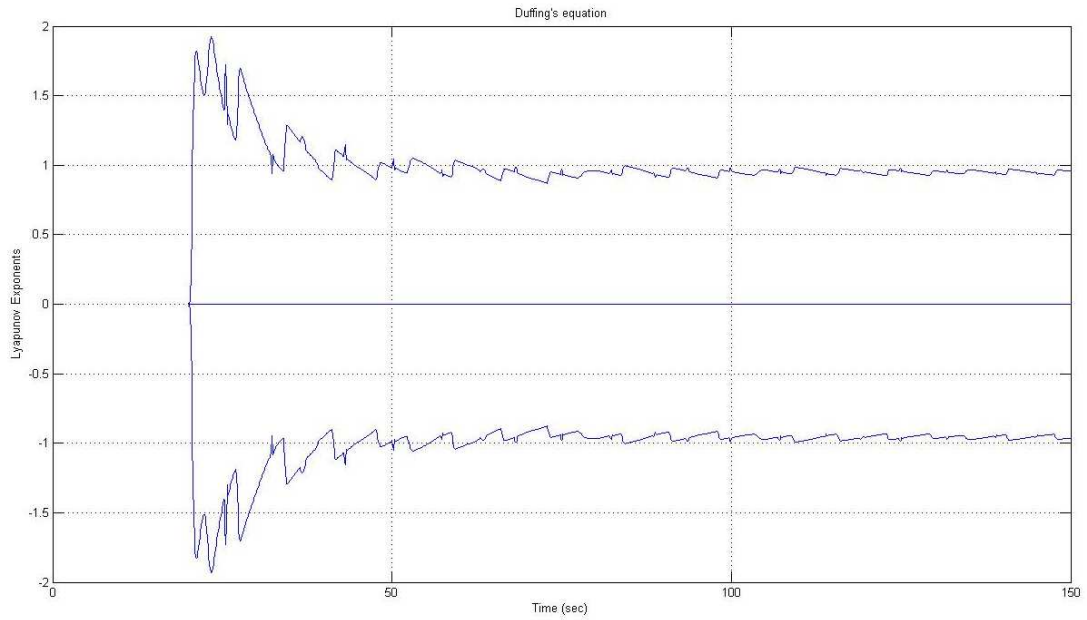
Şekil 7.19. Kaotik Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 7.20. Kaotik Ferrerezonans Durumu Akı-Gerilim Grafiği



Şekil 7.21. Kaotik Ferrezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği



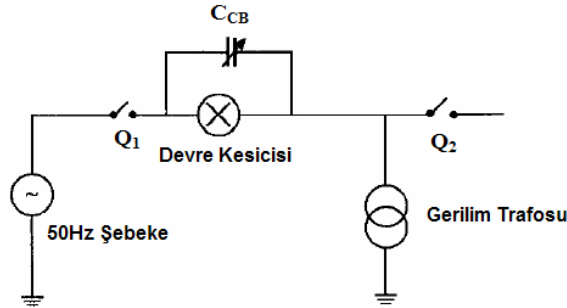
Şekil 7.22. Kaotik Durum için Lyapunov Üstleri

Matlab ortamında Lyapunov Exponents Toolbox programı ile güç devresine ait kaotik durumun Lyapunov üstleri şekil 7.22. da gösterilmiştir. Üstlerden biri pozitif, biri sıfır ve diğer üst negatif değerde çıkmıştır. Üstlerden birinin pozitif değerde olması sistemin kararlı bir çalışmada olmadığını göstermektedir.

Sistemde hattın uzunluğu ve demir nüvenin doyum derecesi değiştirilmeden, farklı transformatöre ait demir nüve kayıplarında sistemin verdiği cevaplar incelenmiştir. Elde edilen grafiklerde transformatöre ait nüve kayıplarının devrede meydana gelebilecek ferrozonans olaylarında belirleyici bir değişken olduğu görülmektedir. Transformatörde önemsenmeyen kayıpların küçük değişimlerinde bile sistemin verdiği cevap çok farklı özelliklerde olmaktadır. Ayrıca güç sisteminde kaotik durumun dışında ortaya çıkan yarı periyodik durumun, geniş bir değer aralığında harmonik kaynaklı birçok problemin ortaya çıkmasına da neden olacağı görülmektedir [24].

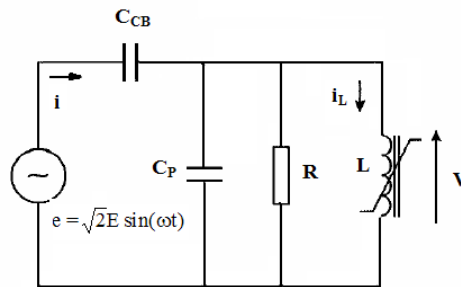
7.2. Kutuplarında Paralel Kondansatör Bulunan Kesicilerin Meydana Getirdiği Ferrerezonans Olayının Kaotik Olarak İncelenmesi

Güç trafolarında ferrerezonansın oluşmasına neden olan bir diğer devre yapısı kutuplarında paralel kondansatör bulunan kesicilerin açma esnasında transformatörün endüktif reaktansı ile oluşturdukları rezonans durumudur.



Şekil 7.23. Devre Kesicili Gerilim Trafosu

Sistemde hatalı yapılan bir ya da iki fazın enerjilendirilmesi (hat kopmaları, sigorta atması ve tek kutuplu anahtarlama gibi) , iletim hattı üzerinde oluşan kısa devre durumları gerilim transformatörünün güç sistemine bağlanması ile birlikte ferrerezonansı meydana getirebilir. Güç transformatörlerinin yüksüz durumda ya da düşük yüklü buldukları zamanlarda ferrerezonansın meydana gelmesi daha kolay gerçekleşen bir durumdur. Şekil 7.23 deki sistemde ferrerezonansın oluşabilmesi için devre kesicisinin ve devrede bulunan Q_2 ayırıcısının devreyi açması, aynı zamanda devrede bulunan Q_1 ayırıcısını ise devreyi kapaması gerekmektedir. Bu durumda devrenin eşdeğeri şekil 7.24 deki gibi olur [25].



Şekil 7.24. Basit Ferrerezonans Devresi

Devrede C_P kapasitesi faz-toprak arası kapasiteyi, R transformatöre ait demir nüve kayıplarını ve C_{CB} devre kesicisine bağlı olan kapasiteyi ifade etmektedir.

7.2.1. Sistem parametrelerinin belirlenmesi

Güç sistemi 220kV gerilim, 50 Hz'lik frekans değerine sahip bir sistem olup, devrede 100VA gücünde bir transformatör seçilmiştir. Devre parametrelerinin per-unit değerlere çevrilmesi için önce sistemin baz değerlerinin belirlenmesi gerekir.

$$V_{\text{baz}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\text{kV} \quad (7.23)$$

$$Z_{\text{baz}} = \frac{V_{\text{baz}}^2}{S_{\text{baz}}} = \frac{(220 \times 10^3)^2}{3 \times 100} = 161,33\text{M}\Omega \quad (7.24)$$

$$\omega_{\text{baz}} = 2\pi 50\text{Hz} \quad (7.25)$$

$$\omega_{\text{baz}} = 2\pi 50\text{rad/sn}$$

Transformatörde oluşacak manyetik doyumun ifadesini gösteren polinom eğrisinin derecesi yedinci dereceden seçilmiş olup, denklemde yer alan katsayılar $a = 3.42$ ve $b = 0.41$ olarak alınmıştır.

$$i_L(\phi) = a\phi + b\phi^7 \quad (7.26)$$

Basit ferrezonans devresine ait diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi tanımlarız;

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{R(C_{CB} + C_P)}V + \frac{1}{(C_{CB} + C_P)}(a\phi + b\phi^7) = \frac{C_{CB}}{C_{CB} + C_P} \sqrt{2}\omega E \cos(\omega t) \quad (7.27)$$

Devreye ait denklemde yer alan gerilim ifadesini akıya bağımlı olarak yazmak istersek ikinci dereceden bir diferansiyel denklem elde edilir;

$$\frac{d\phi}{dt} = V$$

$$\frac{d^2\phi}{dt^2} + \frac{1}{R(C_{CB} + C_P)} \frac{d\phi}{dt} + \frac{(a\phi + b\phi^7)}{(C_{CB} + C_P)} = \frac{C_{CB}}{C_{CB} + C_P} \sqrt{2}\omega E \cos(\omega t) \quad (7.28)$$

Elde edilen denklemde değişken dönüşümü yapılarak denklem düzenlenir.

$$x_1 = \phi \quad x_2 = \frac{d\phi}{dt} = \dot{x}_1 \quad \dot{x}_3 = \frac{d\theta}{dt} = \omega \quad (7.29)$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{1}{R(C_{CB} + C_P)} x_2 - \frac{(ax_1 + bx_1^7)}{(C_{CB} + C_P)} + \frac{C_{CB}}{C_{CB} + C_P} \sqrt{2}\omega E \cos(x_3) \quad (7.30)$$

Denklem üzerindeki kapasite değerlerini sadeleştirirsek;

$$C_1 = C_{CB} + C_P \quad (7.31)$$

Üç adet değişkenin bulunduğu ikinci dereceden diferansiyel denklemi matris formunda yazarsak aşağıdaki ifadeyi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{RC_1} x_2 - \frac{(ax_1 + bx_1^7)}{C_1} + \frac{C_{CB}}{C_1} \omega \sqrt{2} E \cos(x_3) \\ \omega \end{bmatrix} \quad (7.32)$$

Oluşturulan matris sistemine ait grafikler Matlab ortamında 5. dereceden sabit adımlı Runga–Kutta metodu ile çizdirilmiştir. Başlangıç değerleri $t=0$ için $V=\sqrt{2}$, $\phi = 0$ olarak alınmıştır. Devreye ait analizin zaman aralığı 0–150 saniye aralığında alınmıştır. Sisteme ait grafikler devre parametrelerinin per-unit değerlere çevrilmesi ile elde edilmiştir. Devrede transformatöre ait nüve kayıp değerleri göz önüne alınarak sistemde oluşan ferrezonans durumları incelenmiştir. Dört farklı değerde ($R_1=10^6\Omega$, $R_2=50\times 10^6\Omega$, $R_3=300\times 10^6\Omega$, $R_4=3500\times 10^6\Omega$) transformatör için demir nüveye ait kayıp değeri seçilerek oluşan farklı ferrezonans durumlarının grafikleri gösterilmiştir [26].

$$R_{1p.u} = \frac{1 \times 10^6}{161.33 \times 10^6} = 6.19 \times 10^{-3} p.u \quad (7.33)$$

$$R_{2p.u} = \frac{50 \times 10^6}{161.33 \times 10^6} = 0.3095 p.u$$

$$R_{3p.u} = \frac{300 \times 10^6}{161.33 \times 10^6} = 1.859 p.u$$

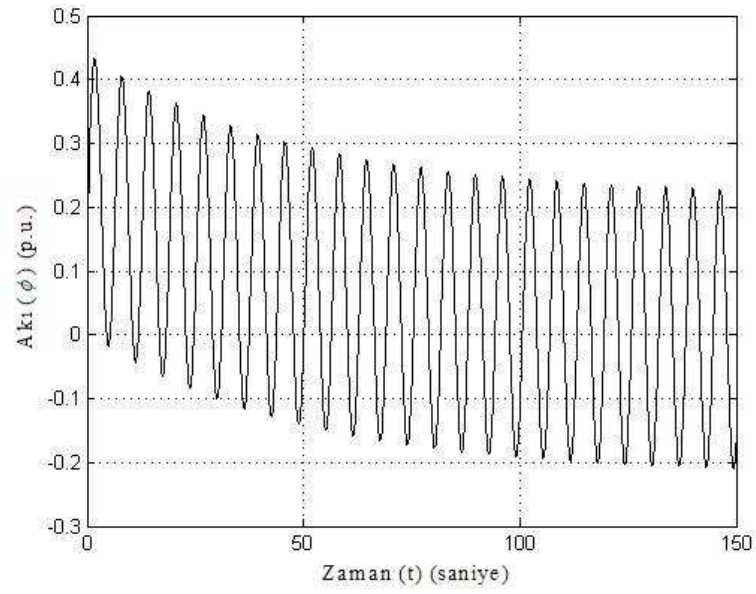
$$R_{4p.u} = \frac{3500 \times 10^6}{161.33 \times 10^6} = 21.69 p.u$$

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314.16 \times (0.5 + 0.13) \times 10^{-9}} = 50.55 \times 10^5 .\Omega \quad (7.34)$$

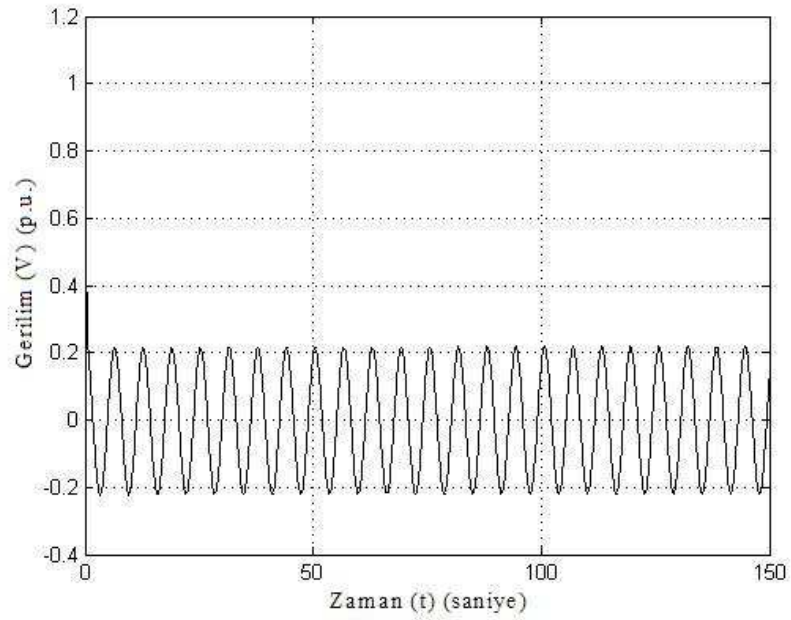
$$X_{c.p.u} = \frac{50.55 \times 10^5}{161.33 \times 10^6} = 0.0313 p.u \quad (7.35)$$

$$C_{p.u} = \frac{1}{\omega_{p.u} \times X_{c.p.u}} = \frac{1}{1 \times 0.0313} = 31.948 p.u \quad (7.36)$$

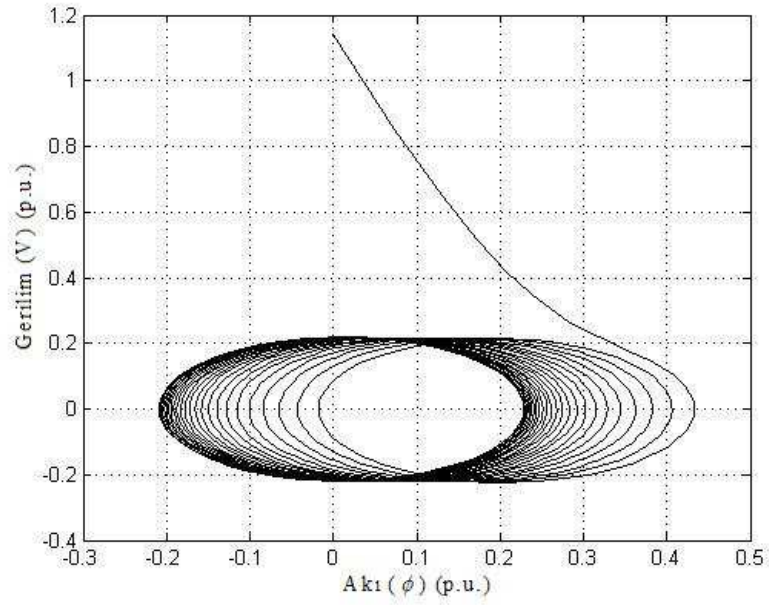
İlk durum için gerilim trafosunun demir nüve kayıpları $R=10^6 \Omega$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu durumda sistemin cevabı sinüzoidal durumuna karşılık gelmektedir. Grafiklerde transformatör gerilimi ile birlikte nonlineer endüktanstadaki akı per-unit değerlerde zamana bağlı olarak ve birbirlerine bağlı olarak çizilmiştir.



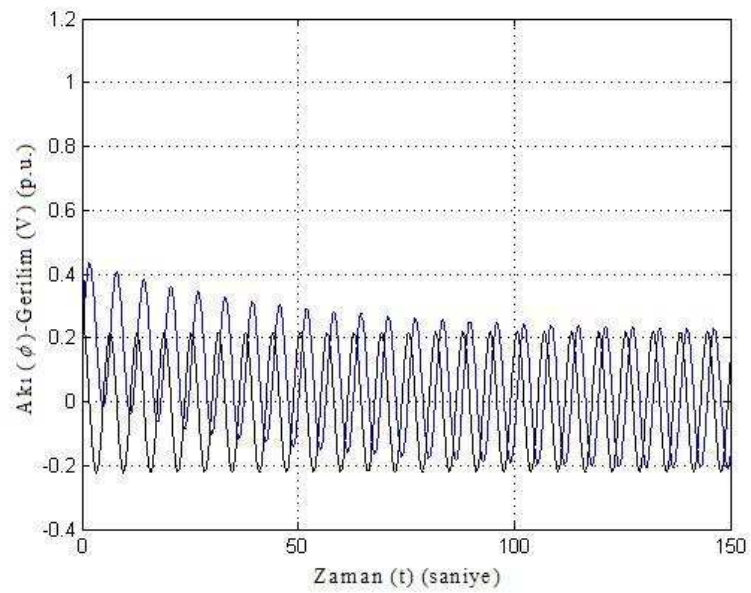
Şekil 7.25. Sinüzoidal Durum için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.26. Sinüzoidal Durum için Gerilim-Zaman Grafiği

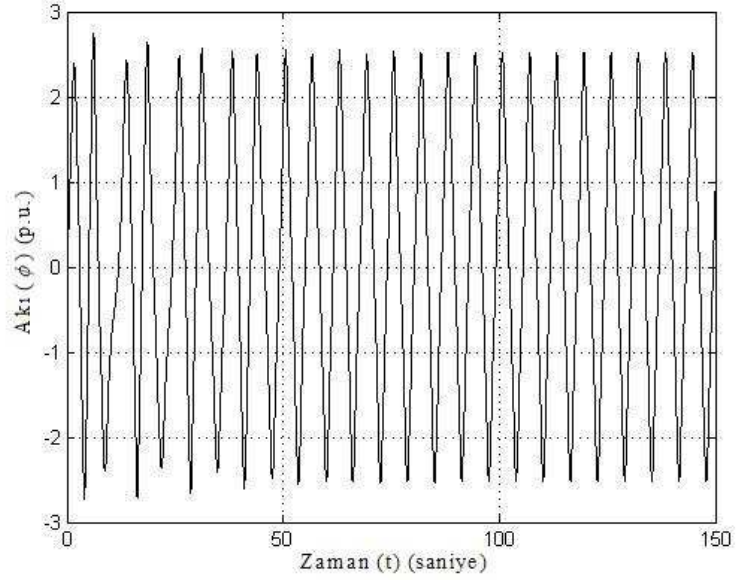


Şekil 7.27. Sinüzoidal Durum için Gerilim-Akı Grafiği

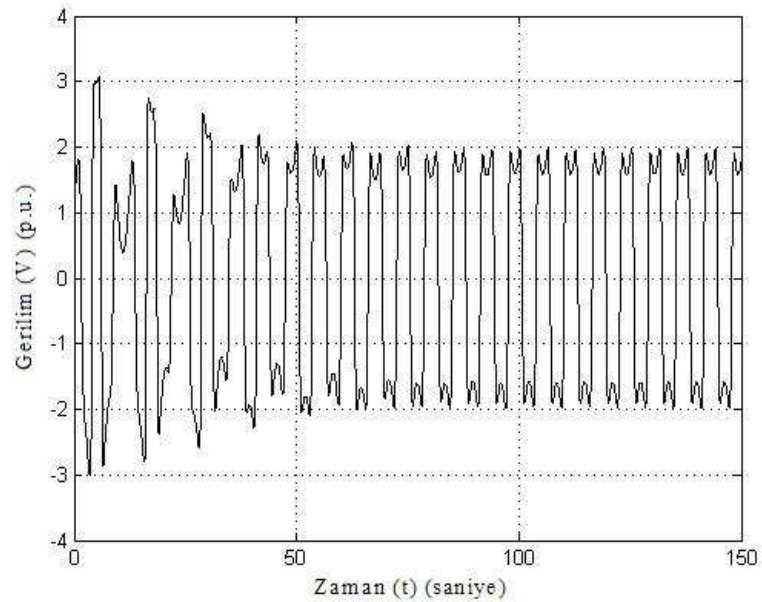


Şekil 7.28. Sinüzoidal Durum için Akı Gerilim- Zaman Grafiği

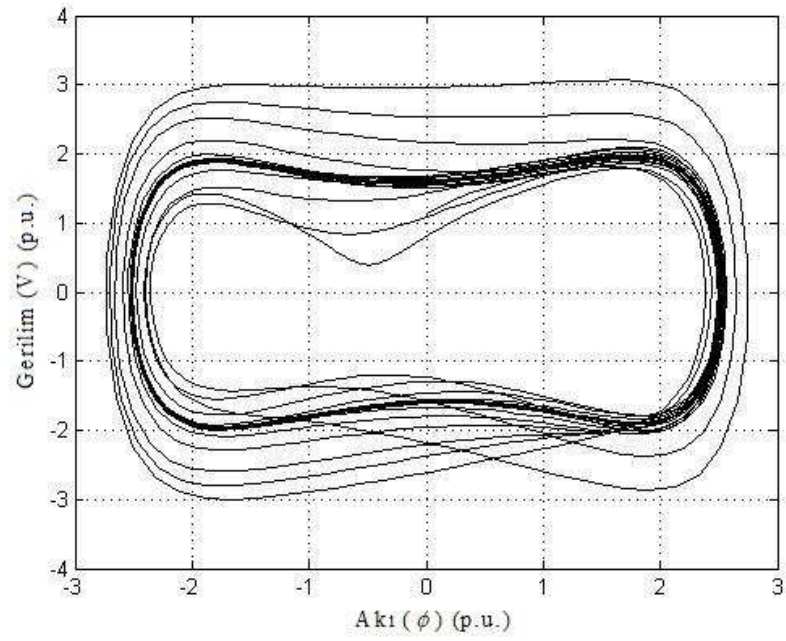
İkinci durum için gerilim trafosunun demir nüve kayıpları $R=50 \times 10^6$ olacak şekilde seçilmiştir. Bu durumda trafoya ait nonlineer özellikteki endüktans üzerinden aşırı akımların akmaya başladığı ve bu aşırı akımlar sebebi ile trafo için muhtemel tehlikeli gerilim osilasyonlarının meydana geldiği ferrezonans durumudur.



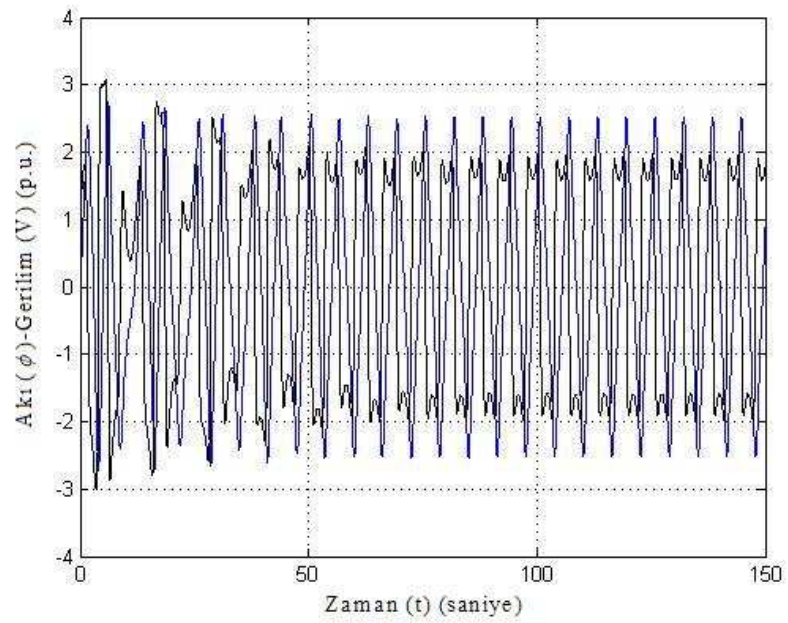
Şekil 7.29. Temel Ferrezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.30. Temel Ferrezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği

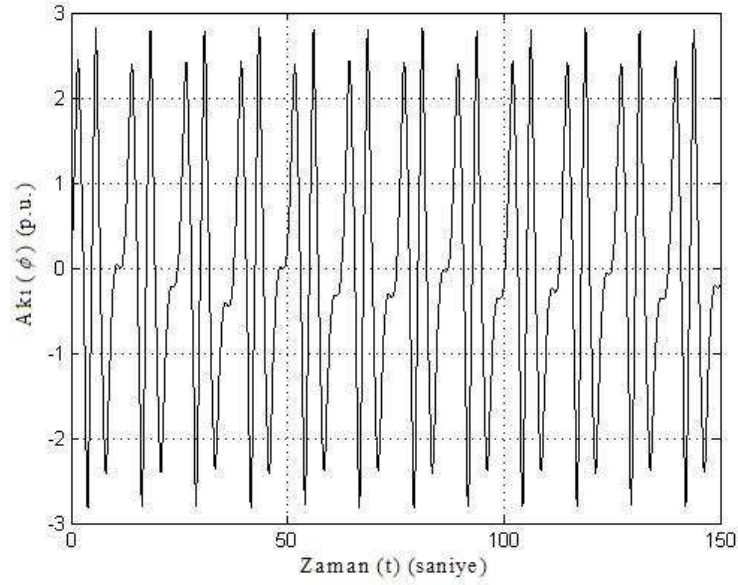


Şekil 7.31. Temel Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Akı Grafiği

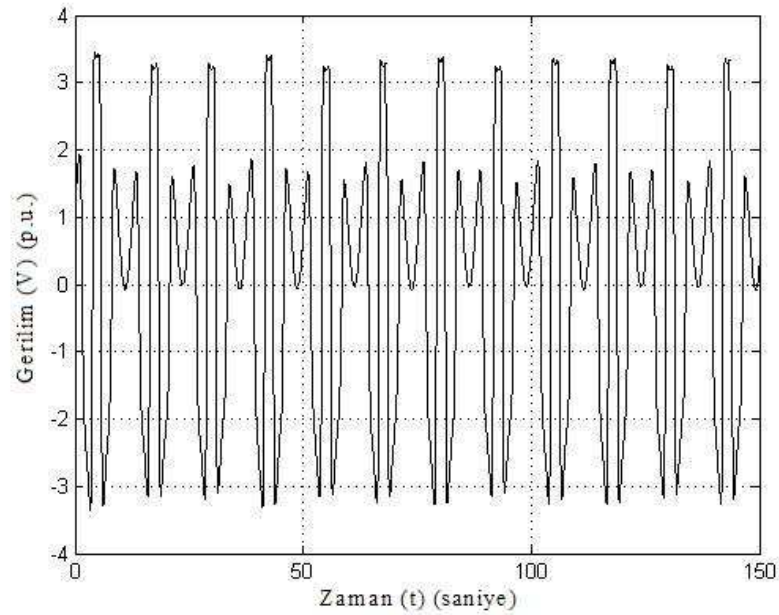


Şekil 7.32. Temel Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim- Zaman Grafiği

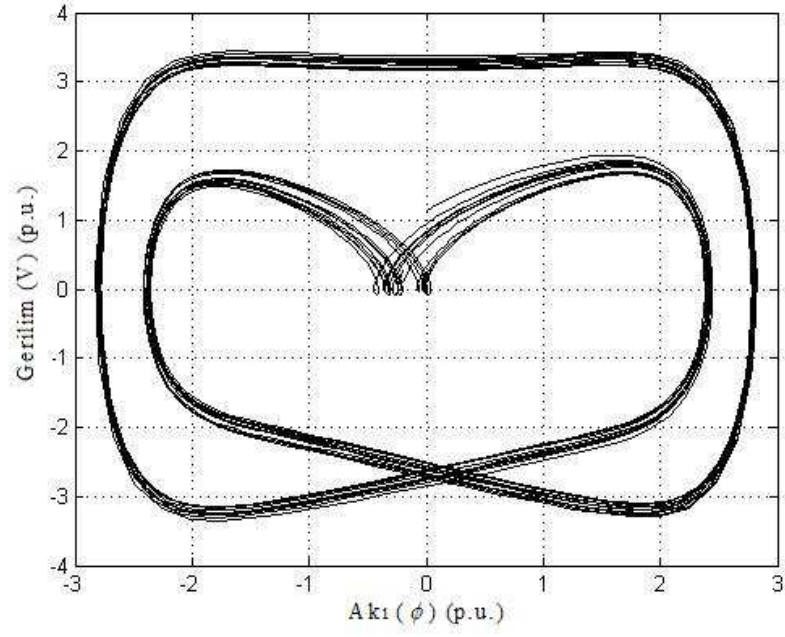
Üçüncü incelenen ferrezonans çeşidi alt harmonik ferrezonans durumudur. Elde edilen grafiklerde transformatörde bulunan demir nüvenin doyuma ulaşması sonucu harmonik içeren yüksek genlikli gerilimler görülmektedir. Trafoya ait nüve kaybı değerini $R=3 \times 10^8 \Omega$ olarak alırız.



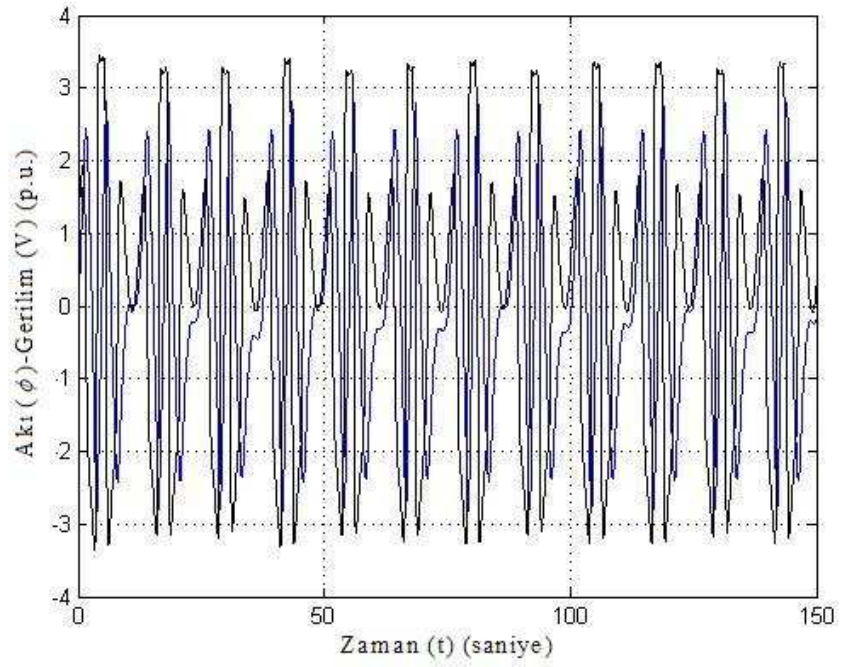
Şekil 7.33. Alt Harmonik Ferrezonans Durumu için Akı-Zaman Grafiği



Şekil 7.34. Alt Harmonik Ferrezonans Durumu için Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 7.35. Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Akı Grafiği



Şekil 7.36. Alt Harmonik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği

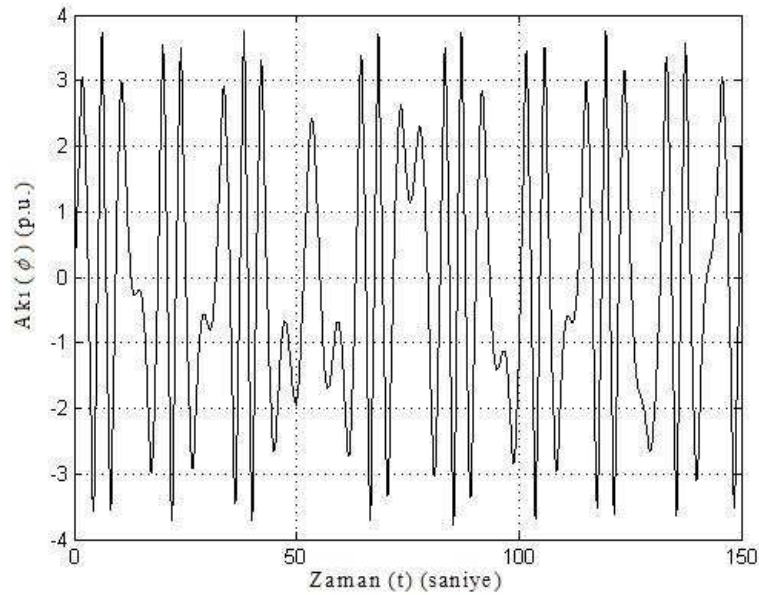
Sisteme ait önceki elde edilen grafiklerde, kaotik bir durumun oluşmadığı ortaya çıkan ferrezonans olayların gerilim trafosu üzerinde aşırı akım ve gerilimlere sebebiyet verdiği görülmüştür. Kaotik ferrezonans durumu, güç sisteminde düzensiz, periyodik olmayan gerilim ve akım grafiklerinin meydana geldiği karmaşık bir durumdur. Güç sistemine ait devre üzerinde kaotik durumu oluşturabilmek için sistem değişkenlerinden hem kapasite (C_{CB} , C_P) hem de direnç (R) değeri değiştirilerek $R=35 \times 10^8 \Omega$, $C_{CB}=3 \text{ nF}$, $C_P=0.1 \text{ nF}$ olarak alınmıştır.

Devrede kullanılan kapasite değerleri per-unit değerlere çevrilir.

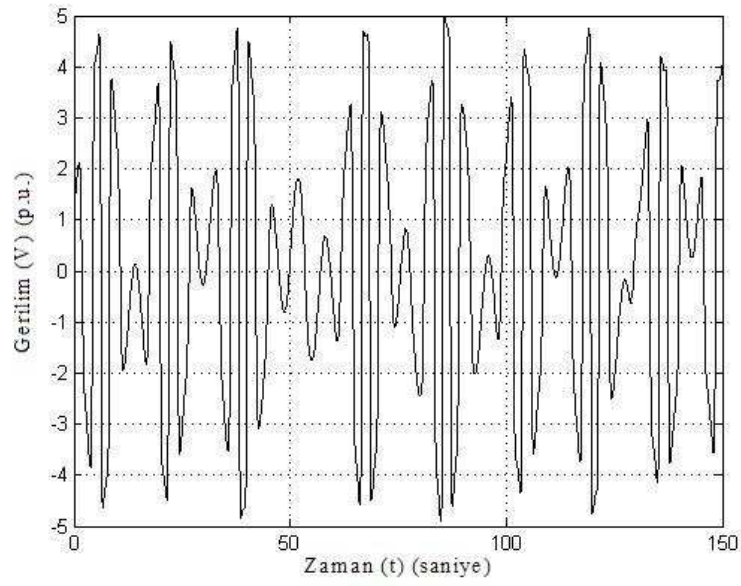
$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{314.16 \times (3 + 0.1) \times 10^{-9}} = 10.26 \times 10^5 \cdot \Omega \quad (7.37)$$

$$X_{c.p.u} = \frac{10.26 \times 10^5}{161.33 \times 10^6} = 0.00636 \text{ p.u} \quad (7.38)$$

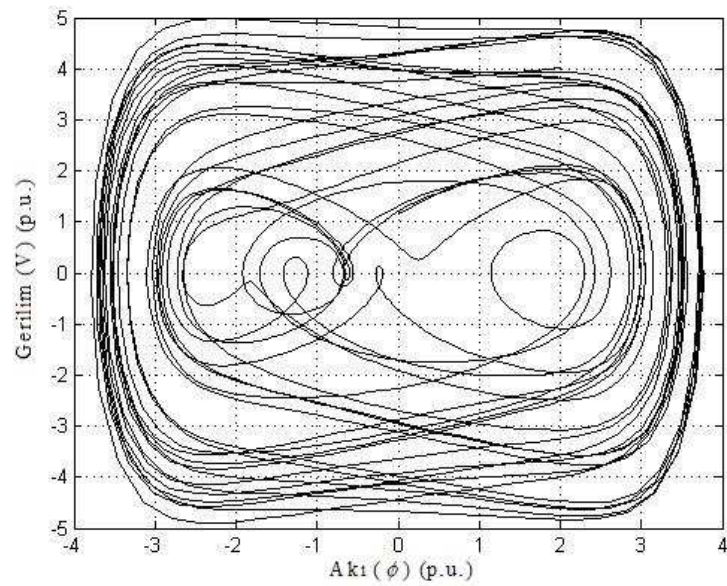
$$C_{p.u} = \frac{1}{\omega_{p.u} \times X_{c.p.u}} = \frac{1}{1 \times 0.00636} = 157.232 \text{ p.u} \quad (7.39)$$



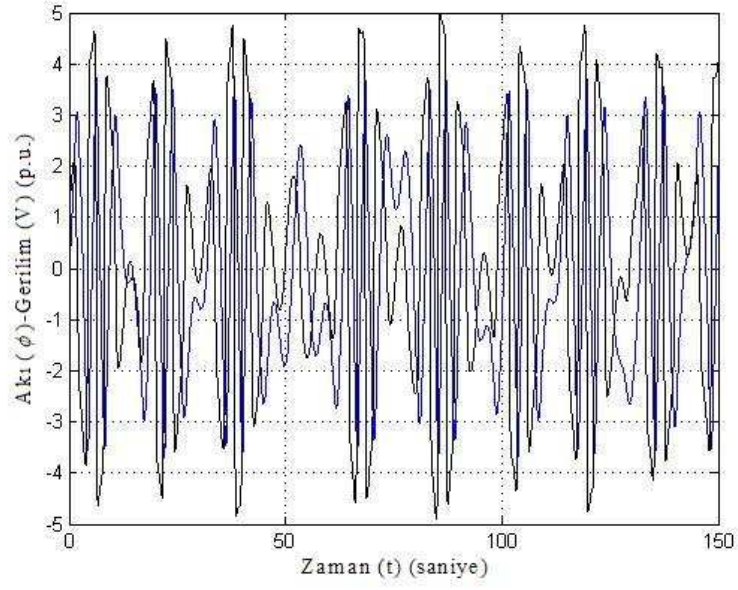
Şekil 7.37. Kaotik Ferrezonans Durumu için Akı -Zaman Grafiği



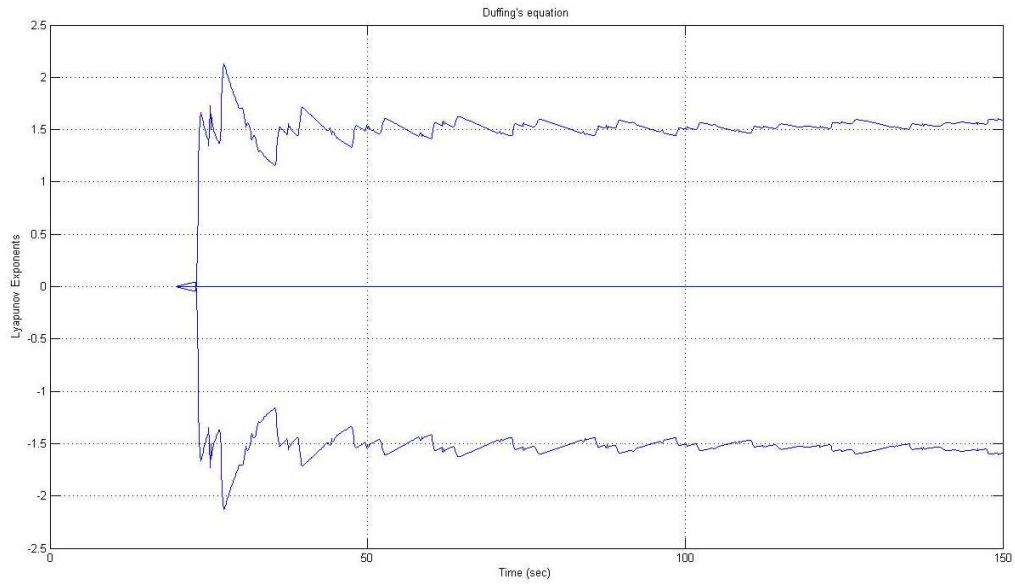
Şekil 7.38. Kaotik Ferrerezonans Durumu için Gerilim- Zaman Grafiği



Şekil 7.39. Kaotik Ferrerezonans Durumu için Gerilim-Akı Grafiği



Şekil 7.40. Kaotik Ferrerezonans Durumu için Akı Gerilim-Zaman Grafiği



Şekil 7.41. Kaotik Durum için Lyapunov Üstleri

Matlab ortamında Lyapunov Exponents Toolbox programı ile güç devresine ait kaotik durumun Lyapunov üstleri şekil 7.41. da gösterilmiştir. Üstlerden biri pozitif, biri sıfır ve diğer üst negatif değerde çıkmıştır. Üstlerden birinin pozitif değerde olması sistemin kararlı bir çalışmada olmadığını göstermektedir.

Kutuplarında paralel kondansatör bulunan bir kesici üzerinden, sinüzoidal bir kaynakla beslenen güç trafolarında ferrezonans ihtimalinin, trafoya ait demir nüve üzerinde oluşan kayıplara bağlı olduğu görülmüştür. Transformator nüve kayıpları için dört farklı direnç değeri seçilmiş olup, alınan bu değerler transformator nüve kayıpları ile ters orantıdır. Direnç değeri arttıkça trafoda oluşan nüve kayıpları azalmaktadır. İlk alınan $R=1M\Omega$ kayıp değeri için trafoda oluşan kayıp gücü 16.1 kW olur. Son değer olarak alınan $R=3500M\Omega$ değeri için ise kayıp değeri 4.6 W tır.

$$V_{\text{baz}} = \frac{220 \times 10^3}{\sqrt{3}} = 127 \text{ kV} \quad (7.40)$$

$$I_{\text{trafo}} = \frac{127 \times 10^3}{1 \times 10^6} = 0.127 \text{ A} \quad (7.41)$$

$$P_{\text{kayıp}} = I_{\text{trafo}}^2 \times R_1 \quad (7.42)$$

$$P_{\text{kayıp}} = (0.127)^2 \times 1 \times 10^6 = 16129 \text{ W} \quad (7.43)$$

Trafo nüve kayıplarını ifade eden direnç değerinin artması ile birlikte trafo nüve kayıplarının azaldığı, muhtemel arızalara ve sistem üzerinde aşırı gerilimlere sebebiyet verecek ferrezonans ihtimalinin ise arttığı görülür. Elde edilen grafiklerde oluşan temel ve alt harmonik ferrezonans durumlarının sistemin normal tehlikesiz çalışma koşullarında bile ortaya çıkabileceği görülmüştür. Kaotik ferrezonans durumunun ise gerçek dışı değerler alınması durumunda meydana geldiği ve sadece trafo nüve kayıplarına bağlı olmadığı, güç sistemi üzerindeki diğer parametrelere bağlı olarak oluştuğu görülmüştür.

Bu durum bize kaotik ferreazonansın pratik uygulamalarda oluşma ihtimalinin oldukça düşük ve sistem üzerindeki değışkenlerin ancak uygun değerlerde alınması durumunda oluşabileceğini göstermektedir [27].

Nonlinear bir durum olan ferreazonansın güç sistemlerinde birçok etkene bağı olarak ortaya çıkması, ferreazonans olayların kapsamlı ve her yönü ile incelenmesini zorlaştırmaktadır. Bilgisayarlar ile yapılan analizlerde ferreazonans olayların başlangıç değerlerine bağımlılığı, klasik lineer matematik yöntemlerin yetersiz kaldığını, ferreazonansın nonlinear dinamikler ve kaos teorisi ile açıklanabileceğini göstermektedir.

BÖLÜM 8. SONUÇLAR

Elektrik güç sistemlerinde nominal çalışma şartlarında ortaya çıkabilen ferreazonans olayları güç sisteminde aşırı akım ve gerilimlere sebep olmaktadır. Ferreazonans durumunda ortaya çıkan aşırı akım ve gerilim değerleri aynı zamanda iletim hattında düzensiz ve harmonikli osilasyonlarda sebebiyet vermektedir. Ferreazonansın ortaya çıkması güç sisteminde bulunan birçok etkene bağlı olarak gelişir. İletim hattının uzunluğu, hat üzerinde bulunan kesicilerin çeşitleri, trafonun gücü ve verimi güç sisteminde ferreazonans arızasının oluşmasına neden olan etkenlerin başında gelir. Ferromanyetik özellikli demir nüvenin doyuma ulaşması ile birlikte trafoya ait endüktans değeri değişir. Değişen endüktans değeri, güç sisteminde düzensiz ve aşırı akım ve gerilimlerin oluşmasına neden olan bir durum oluşturur.

Yapılan bu çalışmada güç sistemine ait iletim hattı uzunluğu ve devrede bulunan kesicilerin kapasite değerleri sabit alınarak, ferreazonansın trafo verimi ile olan ilişkisi kaotik yöntemler kullanılarak incelenmiştir. Pratik uygulamalardan ferreazonansın olduğu iki farklı devre modeli seçilmiştir. Alınan her iki modelde trafoya ait demir nüve kayıplarına bağlı olarak temel ferreazonans, alt harmonik ferreazonans ve kaotik ferreazonans durumları oluşturulmuştur. Elde edilen grafikler trafonun demir nüve kayıplarının, güç trafolarında oluşan ferreazonans çeşidinin belirlenmesinde önemli bir etken olduğunu ortaya koymaktadır.

Kaotik ferreazonans durumunun trafonun önemsiz derecede küçük kayıp değerlerine sahipken olduğu ve bu ferreazonans tipinin pratik uygulamalarda gerçekleşmesinin oldukça zor olduğu görülmüştür. Kaotik ferreazonans durumunun sistemin cevabında düzensiz, karmaşık ve yüksek osilasyonlara neden olduğu elde edilmiştir.

Ancak temel ve alt harmonik ferrorezonans tiplerinin geniş bir çalışma aralığında gerçekleştiği ve trafonun nominal çalışma değerlerinde bile ortaya çıkabilecek ferrorezonans çeşitleri olduğu görülmüştür. Elde edilen trafoya ait gerilim grafiklerinde, periyodik ancak harmonik içerikli yüksek genlikli değerler elde edilmiştir.

Transformatörde önemsenmeyecek kayıpların küçük değişimlerinde bile sistemin verdiği cevap çok farklı özelliklerde olmaktadır. Lineer çalışma durumu ile temel ferrorezonans durumları arasında temel farklılık trafo kayıp değerindeki küçük değişimlerdir.

Ferrorezonans olayların meydana gelmesi sadece arızanın olduğu trafoda değil güç sisteminde bulunan diğer ekipmanlara zarar veren bir durumdur. Ferrorezonans olaylar, enerji sistemlerinin günümüzde giderek büyümesi ve gelişmesi ile birlikte önemi artan bir kararlılık problemi.

KAYNAKLAR

- [1] BAL, G.. Transformatorlar, Şeşkin Yayıncılık, sf 15-17, Ankara,2008
- [2] AKÇA, F.. Enerji İletim Sistemlerinde Ferrerezonans Olayının Analizi, Yüksek Lisans Tezi, SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf 10-14, 2002
- [3] FERRACCI, P..Ferreresonance,Cahier Technique no. 190, Schneider Electric Mart 1998
- [4] Ferreresonance, Cadick Corparation Technical Bulletin-004a, Mayıs, 2002.
- [5] CALVAS, R.. Electrical Disturbances in Low Voltage, Cahier Technique no. 141, Schneider Electric Mart 2000
- [6] TEMİZ, İ..Güç Sistemlerinde Ferrerezonans Olayı, Yüksek Lisans Tezi, MÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf 52-54, 1998
- [7] ALANBARRI, K., RAMANUJAM, R., SUBBARAO, C., KUPPUSAMY, K., Effect of Circuit Configuration on Chaotic Ferreresonance in a Power Transformer, Electric Power Components and Systems, pp. 30:1015-1031, 2002
- [8] ÇUBUKÇU, Z.. Ferrerezonans ve Örnekler, Türkiye Elektrik Kurumu, Ekim 1990
- [9] ÖZER, A. B., Elektriksel Sürücü Sistemlerinde Doğrusal Olmayan Olguların Kaotik Analizi ve Yumuşak Hesaplama Yöntemleri ile Denetimi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, 2005
- [10] STROGATZ, S.H., Nonlinear Dynamics and Chaos, Perseus Books Publishing, New York, pp. 498 ,1994
- [11] ALLİGOOD, K.T., SAUER, T.D., YORKE, J.A., Chaos, Springer-Verlag, New York, pp 603, 1997
- [12] GLEİCK, J., Kaos, Tübitak Yayınları, pp 412, 2003
- [13] RUELLE, D., Raslantı ve Kaos, Tübitak Yayınları, pp 183, 2004

- [14] ÖZKAYNAK, F., Doğrusal Olmayan Sistemlerde Lyapunov Üsttellerini Hesaplayan Yazılımın Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, FÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007
- [15] KHALİL, H.K., Nonlinear Systems, Prentice Hall , pp 26-28, 1996
- [16] HİLBORN, R.C., Chaos and Nonlinear Dynamics, Oxford University Press, New York, pp 650, 2003
- [17] BAKER, G.L., GOLLUB, J.P., Chaotic Dynamics, Cambridge University Press, Cambridge, pp 179, 1990
- [18] CASTILLO, O., MELİN, P., Soft Computing for Control of Nonlinear Dynamical Systems, Physica-Verlag, New York, pp 221, 2001
- [19] SİMİN, Y., WALLACE, K.S., JİNHU, L., GUANRONG, C., Generating 2n-Wing Attractors From Lorenz-Like Systems, International Journal Of Circuit Theory And Applications, 2008
- [20] JACOBSON, D.A.N., Field Testing, Modelling and Analysis of Ferroresonance in a High Voltage Power System, Doctor of Philosophy, University of Manitoba, pp 10-11, 2000
- [21] TAŞMAZ, H., Dynamic Modeling of Protective Current Transformers, Yüksek Lisans Tezi, GÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, pp 32-33, Ağustos 2001
- [22] MOZAFFARİ, S., HENSCHER, S., SOUDACK, A.C., Chaotic Ferroresonance in Power Transformers, IEE Proctive Generation Transmission Distribution, Vol 142 No 3, May 1995
- [23] STOJKOVSKA, B., STEFANOVSKA, A., GOLOB, R., GRGİC, D., Time Delay Feedback Control Of Ferroresonant Chaotic Oscillations, IEEE Power Tech Conference, Porto 2001
- [24] ARAUJO, A.E.A., SOUDACK, A.C., MARTİ, J.R., Ferroresonance İn Power Systems: Chaotic Behaviour, IEE Proceedings-C, Vol. 140, No. 3, MAY 1993
- [25] AL ZAHAWİ, B.A.T., EMİN, Z., TONG, Y.K., Chaos in Ferroresonant Wound Voltage Transformers: Effect of Core Losses and Universal Circuit Behaviour, IEE Proctive Generation Transmission Distribution, Vol 144 No 4, July 1997
- [26] JAVORA, R., YAMADA, S., IWAHARA, M., Simulation of Ferroresonance Occurring in Power System Containing Voltage Transformer, AEM Vol -.11 No. 1 2003

- [27] EMİN, Z., AL ZAHAWİ, B.A.T., AUCKLAND, D.W., TONG, Y.K., Ferroresonance in Electromagnetic Voltage Transformers: A Study Based on Nonlinear Dynamics, IEE Proctive Generation Transmission Distribution, Vol 144 No 4, July 1997

ÖZGEÇMİŞ

Engin YİĞİT, 25.08.1983 de İstanbul'da doğdu. Sakarya Üniversitesi Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümüne 2001 yılında girdi ve 2006 yılında mezun oldu. 2007 yılında Haliç Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak göreve başladı. Halen Haliç Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak görev yapmaktadır.