

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

**SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR  
TÜRBİN SİSTEMLERİNİN KAOTİK ANALİZİ VE  
SENKRONİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdallah Moussa YAYA**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı**

**AĞUSTOS 2023**



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

**SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR  
TÜRBİN SİSTEMLERİNİN KAOTİK ANALİZİ VE  
SENKRONİZASYONU**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Abdallah Moussa YAYA**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU**

**AĞUSTOS 2023**



Abdallah Moussa YAYA tarafından hazırlanan “SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN KAOTİK ANALİZİ VE SENKRONİZASYONU” adlı tez çalışması 23.08.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

### **Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :**           **Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU**           .....  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**             **Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN**           .....  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Jüri Üyesi :**             **Doç. Dr. Selçuk EMİROĞLU**           .....  
Sakarya Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN KAOTİK ANALİZİ VE SENKRONİZASYONU” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, etik kurul onay belgesi aldığımı, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(23/08/2023).

(imza)

Abdallah Moussa YAYA





**Anne ve Babama**



## TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tezi çalışmamın tamamlanmasında bana destek olan birçok kişiye içten teŐekkürlerimi sunmak istiyorum.

İlk olarak, değerli danışman hocam Yılmaz UYAROğLU Bey'e teşekkür etmek istiyorum. Beni yönlendirmek, ilham vermek ve tezimin her aşamasında rehberlik etmek için her zaman yanımda oldu. Bilgi birikimi, sabrı ve cesaretiyle bana ilham kaynağı oldu. Önerileri ve eleştirileri sayesinde çalışmamı geliştirmemde büyük bir rol oynadı.

Aileme ve sevdiklerime de teşekkür etmek istiyorum. Destekleri, güvenleri ve anlayışları sayesinde beni motive ettiler ve her zaman yanımda oldular. Benim başarımlarım için verdikleri destek ve fedakarlıklarından dolayı minnettarım.

Son olarak, çalışmamın yürütülmesinde katkıda bulunan diğer tüm kişilere de teşekkür etmek istiyorum. Kaynak sağlayan, veri toplamama yardımcı olan veya moral desteği veren herkese teŐekkürlerimizi iletiyorum.

Bu tez çalışmasının tamamlanmasında emeği geçen herkese teşekkür ederim. Sizlerin yardımları ve destekleri olmadan bu çalışma mümkün olmazdı. Size minnettarım ve teŐekkürlerimi sunuyorum.

Abdallah Moussa YAYA



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....	v
TEŞEKKÜR .....	ix
İÇİNDEKİLER .....	xi
KISALTMALAR .....	xiii
SİMGELER .....	xv
ŞEKİL LİSTESİ .....	xvii
ÖZET .....	xix
SUMMARY .....	xxiii
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
<b>2. RÜZGAR ENERJİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER .....</b>	<b>3</b>
2.1. Yenilenebilir Enerji Üretimi .....	4
2.2. Rüzgar Enerjisi Üretimi .....	4
2.3. Elektrikli Makineler ve Rüzgar Enerjisi Dönüştürme Sistemleri .....	5
2.3.1. Sincap kafes indüksiyon makineleri .....	5
2.3.2. Çift beslemeli asenkron makineler .....	6
2.3.3. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler .....	7
<b>3. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERİN MODELLENMESİ .....</b>	<b>9</b>
3.1. Senkron Makine .....	9
3.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Avantajları ve Dezavantajları .....	12
3.2.1. Avantajları .....	12
3.2.2. Dezavantajları .....	12
3.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Makinenin Modellenmesi .....	13
3.3.1. Modelde basitleştirici varsayımlar .....	13
3.3.2. Modelin açıklama .....	14
3.3.3. Modelin elektrik denklemleri .....	15
3.3.5. Modelin elektromanyetik denklemi .....	16
3.3.6. Park dönüşümü .....	16
3.3.6.1. Park'ın dönüşüm ilkesi .....	16
3.3.6.2. Clark'ın dönüşüm ilkesi .....	18
3.3.6.3. $(\alpha, \beta)$ çerçevesinden $(d, q)$ çerçevesine geçiş .....	19
3.3.7. Asenkron makinenin $(d, q)$ referans çerçevesindeki denklemleri .....	20
3.3.7.1. Elektriksel denklemler .....	20
3.3.7.2. Elektromanyetik denklem .....	20
3.3.8. Genel durum denklemleri .....	21
<b>4. DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLER VE KAOS .....</b>	<b>23</b>
4.2. Tanımlar .....	24
4.3. Kaos .....	26
4.3.1. Lyapunov üstelleri .....	29
4.3.2. Poincare haritası .....	30
4.3.3. Çekici kavramı .....	31
4.3.3.1. Lorenz çekicisi .....	32

4.3.3.2. Henon çekici .....	34
4.3.3.3. Rössler çekicisi .....	35
4.3.4. Çatallanma .....	36
4.4. Kaosun Var Olduğu Yerler .....	37
4.4.1. Canlı sistemlerde kaos .....	38
4.4.1.1. Kalpte kaos .....	39
4.4.1.2. Beyinde kaos.....	39
4.4.2. Güvenli iletişimde kaos .....	40
<b>5. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERDE KAOTİK ANALİZ VE KAOS SENKRONİZASYONU .....</b>	<b>43</b>
5.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Dinamik Modeli .....	43
5.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor İçin Kaotik Analiz.....	44
5.3. Denge ve Kararlılık Noktaları.....	47
5.4. Lyapunov Üstelleri .....	47
5.5. Çatallanmalar .....	49
5.6. Başlangıç Koşullarına Duyarlılık.....	50
5.7. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kaos Kontrolü .....	51
5.7.1. Pasif kontrol sistemin özellikleri .....	51
5.7.1.1. SMSJ 'nin pasif kontrolü.....	54
5.7.1.2. Pasif kontrol benzetim çalışmaları.....	56
5.7.2. Sabit mıknatıslı motorda kaos kontrolü: bileşik matris yaklaşımı.....	57
5.7.3. Geri besleme denetleyicisi .....	64
5.8. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Kaotik Senkronizasyonu.....	66
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>69</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>71</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>77</b>

## **KISALTMALAR**

<b>GW</b>	: Gigavat
<b>KMSJ</b>	: Sabit mıknatıslı senkron jeneratör
<b>ÇBAM</b>	: Çift beslemeli asenkron makine
<b>SKAM</b>	: Sincap kafesli asenkron makine
<b>NdFeB</b>	: Neodimyum-demir-bor
<b>SmCo</b>	: Samaryum-kobalt
<b>DC motör</b>	: Doğru akım motör
<b>SMSJ</b>	: Sabit mıknatıslı senkron jeneratör
<b>PMSG</b>	: Permanent magnet synchronous generato





## SİMGELER

- $V_s$  : Stator gerilim vektörü  
 $I_s$  : Stator akım vektörü  
 $\varphi_s$  : Stator akı vektörü  
 $R_s$  : Stator direnç matrisi  
 $L_s$  : Stator endüktans matrisi  
 $\omega$  : Elektrik darbesi.  
 $\Omega_r$  : Rotor hızı.  
 $P$  : Kutup çifti sayısı  
 $\Theta$  : Yük açısı  
 $V_d$  : d ekseninde stator gerilimi  
 $V_q$  : q eksenindeki stator gerilimi  
 $i_d$  : d eksenindeki stator akımı  
 $i_q$  : q eksenindeki stator akımı  
 $L_d$  : d ekseninde stator endüktansı  
 $L_q$  : q ekseninde stator endüktansı



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Sincap kafesli endüksiyon motorlar.....	6
Şekil 2.2. çift rotorlu asenkron motor. ....	7
Şekil 2.3. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar enerji.....	8
Şekil 3.1. Sabit mıknatıslar tarafından rotor uyarımı.....	14
Şekil 3.2. Park dönüşümünün gösterimi. ....	17
Şekil 4.1. Rössler sisteminin kaotik durumu. ....	26
Şekil 4.2. $x_1$ durumunda başlangıç koşullarına duyarlılık özelliğinin gösterimi. ....	29
Şekil 4.3. Poincare kesiti $S'$ 'de $P(x)$ üzerindeki $x$ noktasının Poincare haritasıyla projeksiyonu.....	31
Şekil 4.4. Garip bir çekicinin görsel temsili. ....	32
Şekil 4.5. Lorenz çekici. ....	33
Şekil 4.6. Hénon çekici. ....	34
Şekil 4.7. Rössler çekici.....	35
Şekil 4.8. kaosa çatallanma.....	37
Şekil 5.1. $a=5.45$ , $b=20$ , $x(0)=0$ , $y(0)=1$ ve $z(0)=0$ için (5.1) sistemin faz portresi. ....	45
Şekil 5.2. $a=10$ , $b=20$ , $x(0)=0$ , $y(0)=1$ ve $z(0)=0$ için (5.1) sistemin faz portresi...	45
Şekil 5.3. $a=15$ , $b=20$ , $x(0)=0$ , $y(0)=1$ ve $z(0)=0$ için (5.1) sistemin faz portresi...	46
Şekil 5.4. $a=15$ , $b=20$ , $x(0)=0$ , $y(0)=1$ ve $z(0)=0$ için (5.1) sistemin faz portresi...	46
Şekil 5.5. Lyapunov üstelleri. ....	48
Şekil 5.6. $a=[2-14]$ , $b=20$ , $x(0)=0$ , $y(0)=1$ ve $z(0)=0$ için sabit mıknatıslı senkron makinenin çatallanması. ....	49
Şekil 5.7. $x_0 = 0$ ; $y_0 = 1$ ; $z_0 = 0$ ve $x_0 = 0$ ; $y_0 = 1.01$ ; $z_0 = 0$ için faz portreleri. ....	50
Şekil 5.8. $x_0 = 0$ ; $y_0 = 1$ ; $z_0 = 0$ ve $x_0 = 0$ ; $y_0 = 1.01$ ; $z_0 = 0$ için zaman serileri. ...	51
Şekil 5.9. SMSJ 'nin çıkışları ne zaman $\alpha=2, v=0$ kontrolü altında sistemin başlangıç noktasında stabilize olduğunu $u(t)$ . ....	57
Şekil 5.10. Bileşik matris yaklaşımı ile kaos kontrol. ....	64
Şekil 5.11. $u$ 'in $t=25s$ 'de Geri besleme denetleyicisi ile kaos kontrol.....	65
Şekil 5.12. Kaos senkronizasyonu. ....	67
Şekil 5.13. Senkronizasyon hatası. ....	68



# SABİT MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLÜ RÜZGAR TÜRBİN SİSTEMLERİNİN KAOTİK ANALİZİ VE SENKRONİZASYONU

## ÖZET

Yenilenebilir enerji kaynaklarının, özellikle rüzgar enerjisinin elektrik şebekesine entegrasyonu, sera gazı emisyonlarını azaltma ve fosil yakıtlara olan bağımlılığımızı azaltma konusundaki muazzam potansiyeli nedeniyle büyük ilgi topladı. Rüzgar enerjisinden yararlanmanın birincil yolu olarak hizmet veren rüzgar türbinleri, rüzgardan elde edilen mekanik gücü kullanılabilir elektrik enerjisine dönüştürmek için verimli ve güvenilir jeneratörler gerektirir. Son yıllarda, sürekli mıknatıslı senkron jeneratör (SMSG) adı verilen çığır açan bir teknoloji ortaya çıktı ve kendisini rüzgar türbini uygulamaları için son derece umut verici bir çözüm olarak konumlandırdı. Bu yenilikçi jeneratör, olağanüstü verimlilik, kompakt boyut ve sağlamlık dahil olmak üzere bir dizi avantaj sağlar.

SMSG 'nin en önemli ayırt edici özelliklerinden biri yüksek verimliliğidir. Sabit bir mıknatıs rotor tasarımı kullanan bu jeneratör, geleneksel jeneratörlere kıyasla gelişmiş enerji dönüşüm oranlarına ulaşır. Sürekli mıknatıs konfigürasyonu, rotor sargılarına olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, kayıpların azalmasına ve genel verimliliğin artmasına neden olur. Sonuç olarak, SMSG ile donatılmış rüzgar türbinleri, aynı miktarda rüzgar enerjisinden daha fazla elektrik üretebilir ve bu da onları, optimum güç çıkışı arayan yenilenebilir enerji projeleri için oldukça çekici bir seçenek haline getirir.

Bu çalışmanın ilk bölümü, SMSG ve kaosa genel bir bakış sunarak temel oluşturmayı amaçlamaktadır. SMSG, dönen bir manyetik alan oluşturmak için rotordaki sabit mıknatısları kullanan belirli bir elektrik jeneratörü türüdür. Bu benzersiz tasarım, ayrı bir uyarma sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldırarak, geleneksel tasarımlara kıyasla daha kompakt ve verimli bir jeneratör sağlar.

Sabit mıknatıslar kullanarak, SMSG çeşitli avantajlar sunar. İlk olarak, ayrı bir uyarma sistemine olan ihtiyacı ortadan kaldırarak jeneratörün yapısını basitleştirir ve toplam boyutunu ve ağırlığını azaltırlar. Bu kompaktlık, rüzgar türbinleri veya elektrikli araçlar gibi alanın sınırlı olduğu uygulamalarda özellikle faydalıdır. Ek olarak, SMSG'de rotor sargılarının bulunmaması, kayıpları azaltır ve daha yüksek güç üretimine izin vererek genel verimliliği artırır.

Ayrıca, SMSG, kaosa ilişkin dikkate değer özellikler sergiler. Kaos, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde gözlemlenen, başlangıç koşullarına duyarlılık ve görünüşte rastgele davranışla karakterize edilen bir olguyu ifade eder. SMSG bağlamında, dönen manyetik alan, elektrik sistemi ve mekanik bileşenler arasındaki karmaşık etkileşimler nedeniyle kaos ortaya çıkabilir.

SMSG 'deki kaosu anlamak çok önemlidir çünkü hem olumlu hem de olumsuz etkileri olabilir. Bir yandan, jeneratör performansını iyileştirmek için kontrollü kaostan yararlanılabilir. Kaotik davranış, manyetik alanların karışımını artırarak daha verimli

güç üretimine yol açabilir. Bu fenomen, SMSG'nin tasarımını ve performansını optimize etmek için çeşitli araştırma çalışmalarında araştırılmıştır.

Öte yandan, kontrolsüz veya istenmeyen kaos, jeneratörün çalışması üzerinde zararlı etkilere neden olabilir. Kaotik davranış, aşırı titreşimlere, artan gürültü seviyelerine ve hatta sistem kararsızlığına yol açabilir. Bu nedenle, SMSG'de kaosa katkıda bulunan faktörlerin araştırılması ve anlaşılması, olumsuz etkilerini azaltmak için kontrol stratejilerinin geliştirilmesini sağlamak önemlidir.

Çalışmanın bu bölümü, SMSG ve kaosu temel kavramlarını keşfederek sonraki analiz için zemin hazırlar. SMSG ile kaos arasındaki ilişkiyi araştırmak için sağlam bir temel sağlayarak, araştırmacıların ve mühendislerin SMSG teknolojisini potansiyelini daha fazla keşfetmelerine ve performansını ve güvenilirliğini optimize edecek stratejiler geliştirmelerine olarak tanır.

SMSG ve kaos anlayışı üzerine inşa edilen bu çalışmanın ikinci bölümü, SMSG'de kaosu kontrolünü ele alıyor. Kaos kontrol teknikleri, kaotik sistemleri istikrara kavuşturmada ve istenen sonuçlar için benzersiz özelliklerinden yararlanmada çok önemli bir rol oynar. Bu çalışmada MATLAB kullanılarak uygulanan, uç özel kontrol yaklaşımı araştırılmıştır: geri beslemeli kontrol, bileşim matris yaklaşım ve pasif kontrol.

Geri besleme kontrolü, sistemin davranışının kendi çıkışından türetilen geri besleme sinyallerinden etkilendiği kaos kontrolünde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. SMSG bağlamında, jeneratörün kaotik davranışını düzenlemek ve stabilize etmek için geri besleme kontrol teknikleri kullanılabilir. Jeneratörün çıkış ölçümlerine dayalı kontrol algoritmalarını dikkatli bir şekilde tasarlayarak, sistemi kaotik bölgelerden uzaklaştırmak veya istenen periyodik yörüngelere yönlendirmek mümkün hale gelir. Bu yaklaşım, jeneratörün dinamikleri üzerinde hassas kontrol sağlar ve genel performansını artırabilir.

Pasif kontrol ise harici kontrol sinyallerine dayanmayan alternatif bir yaklaşımdır. Bunun yerine, kaotik davranış bastırmak veya dengelemek için sistemin parametrelerini veya yapısını değiştirmeyi içerir. SMSG söz konusu olduğunda, pasif kontrol teknikleri, istenmeyen kaotik salınımları bastırmak ve kararlılığı iyileştirmek için jeneratörün fiziksel parametrelerini ayarlamayı veya tasarımını değiştirmeyi içerebilir. Pasif kontrol stratejileri, kararlı çalışmaya yol açan parametre aralıklarını belirlemek için genellikle çatalanma analizine ve optimizasyon tekniklerine dayanır.

Bu tezde incelenen son kontrol sistemi, katkılı bileşik matrislerin yenilikçi yaklaşımına dayanmaktadır. Bu yöntemin kaotik olayları kontrol etmede de oldukça etkili olduğu kanıtlanmıştır. Matrislerin ustaca kullanılmasıyla bu yaklaşım, gerekli kontrol fonksiyonunun doğru bir şekilde hesaplanmasını mümkün kılar. Sağlam bir matematiksel temel üzerine inşa edilen toplamsal bileşik matrisler, kaosu düzenlemenin ümit verici bir yolunu sunar. Matrislerin yapısal özelliklerinden yararlanan bu metodoloji, kaotik sistemlerin daha proaktif ve hedefe yönelik yönetiminin yolunu açıyor, böylece bu karmaşık dinamik sistemlerde kararlılık ve kontrol edilebilirlik arayışında önemli bir ilerlemeye işaret ediyor.

Dinamik sistemleri modellemek ve benzetmek için yaygın olarak kullanılan bir hesaplama aracı olan MATLAB kullanılarak bu çalışmada hem geri beslemeli kontrol hem de pasif kontrol yaklaşımları incelenmiştir. MATLAB, kontrol algoritmaları geliştirmek, farklı kontrol senaryoları altında SMSG davranışını benzetmek ve sonuçları analiz etmek için uygun bir platform sağlar. MATLAB'de bu kontrol

yaklaşımlarını uygulayarak araştırmacılar, SMSG'de kaosu kontrol etmede her tekniğin etkinliği ve uygulanabilirliği hakkında değerli bilgiler edinebilirler.

SMSG'deki bu kontrol yaklaşımlarının araştırılması, kaos kontrolü potansiyelini ve bunun jeneratörün performansını ve istikrarını artırmaya yönelik etkilerini göstermeyi amaçlamaktadır. MATLAB simülasyonlarını kullanarak elde edilen sonuçlar, geri beslemeli kontrol ve pasif kontrol tekniklerinin kaosu bastırma ve SMSG'de kararlılığı sağlamadaki etkinliğine dair değerli bilgiler sağlayacaktır.

Bu araştırmanın bulguları, yenilenebilir enerji sistemleri alanı için büyük önem taşımaktadır. Rüzgar türbini uygulamalarının ve diğer SMSG tabanlı teknolojilerin önemli bileşenleri olan kaos kontrolünün ve SMSG'deki uygulamasının anlaşılmasına katkıda bulunurlar. Bu sistemlerdeki kaosu etkin bir şekilde kontrol etme yeteneği, gelişmiş güvenilirliğe, artan güç üretim verimliliğine ve gelişmiş genel performansa yol açabilir.

Bu araştırmanın çıkarımları, daha güvenilir ve verimli rüzgar türbini uygulamalarının geliştirilmesine kadar uzanır. Genellikle kaotik dinamiklerle ilişkilendirilen aşırı titreşim, gürültü ve dengesizlik gibi istenmeyen davranışları azaltmak için kaos kontrol teknikleri kullanılabilir. Bu çalışmada incelenen kontrol yaklaşımları, sistemi stabilize ederek ve onu istenen işletim rejimlerine yönlendirerek, rüzgar türbinlerinin uzun ömürlülüğüne ve etkinliğine katkıda bulunarak onları daha dayanıklı ve verimli hale getirebilir.

Ayrıca, bu araştırmadan elde edilen içgörüler, rüzgar türbinlerinin ötesinde SMSG tabanlı teknolojilerin tasarımını ve optimizasyonunu sağlayabilir. SMSG, yüksek verimlilik, kompakt boyut ve sağlamlık gibi avantajlar sunduğundan, uygulamaları dalga enerjisi dönüştürücüleri ve gelgit enerjisi cihazları dahil olmak üzere çeşitli yenilenebilir enerji sistemlerine kadar uzanabilir. Araştırmacılar ve mühendisler, SMSG'de kaosun nasıl kontrol edileceğini anlayarak, bu teknolojilerin tüm potansiyelini ortaya çıkarabilir ve daha güvenilir ve verimli yenilenebilir enerji çözümlerinin geliştirilmesine yol açabilir.





# **CHAOTIC ANALYSIS AND SYNCHRONIZATION IN PERMANENT MAGNET SYNCHRON GENERATOR OF WIND TURBINE SYSTEMS**

## **SUMMARY**

The integration of renewable energy sources, particularly wind power, into the electricity grid has garnered considerable attention due to its immense potential in reducing greenhouse gas emissions and diminishing our reliance on fossil fuels. Wind turbines, serving as the primary means of harnessing wind energy, necessitate efficient and dependable generators to convert the mechanical power obtained from the wind into usable electrical power. In recent years, a groundbreaking technology called the permanent magnet synchronous generator (PMSG) has emerged, positioning itself as a highly promising solution for wind turbine applications. This innovative generator brings forth a host of advantages, including exceptional efficiency, compact size, and robustness.

One of the key distinguishing features of the PMSG is its high efficiency. By employing a continuous magnet rotor design, this generator achieves improved energy conversion rates compared to conventional generators. The continuous magnet configuration eliminates the need for rotor windings, resulting in reduced losses and enhanced overall efficiency. As a result, wind turbines equipped with PMSG can generate more electricity from the same amount of wind energy, making them a highly attractive option for renewable energy projects seeking optimal power output.

Additionally, the compact size of PMSG offers significant advantages in terms of installation and maintenance. The absence of rotor windings allows for a more streamlined and simplified generator design, reducing the overall dimensions and weight. This compactness not only makes transportation and installation easier but also provides greater flexibility in locating wind turbines in various environments. Furthermore, the reduced size of the generator contributes to lower material and manufacturing costs, making PMSG a cost-effective choice for wind energy systems.

Robustness is another notable advantage offered by PMSG technology. The absence of rotor windings eliminates the risk of insulation degradation and related failures, enhancing the overall reliability and durability of the generator. This feature is particularly important for wind turbines located in harsh and demanding environments, such as offshore installations or regions with extreme weather conditions. The robust nature of PMSG ensures that wind turbines can operate consistently and withstand challenging circumstances, contributing to increased uptime and improved long-term performance.

The first section of this study aims to establish the groundwork by providing an overview of PMSG and chaos. PMSG are a specific type of electric generator that utilizes permanent magnets in the rotor to generate a rotating magnetic field. This unique design eliminates the need for a separate excitation system, resulting in a more compact and efficient generator compared to traditional designs.

By employing permanent magnets, PMSG offer several advantages. Firstly, they eliminate the need for a separate excitation system, simplifying the generator's construction and reducing its overall size and weight. This compactness is particularly beneficial in applications where space is limited, such as in wind turbines or electric vehicles. Additionally, the absence of rotor windings in PMSG reduces losses and enhances overall efficiency, allowing for higher power generation from the same input.

Furthermore, PMSG exhibit remarkable characteristics related to chaos. Chaos refers to a phenomenon observed in nonlinear dynamical systems characterized by sensitivity to initial conditions and seemingly random behavior. In the context of PMSG, chaos can arise due to the complex interactions between the rotating magnetic field, the electrical system, and the mechanical components.

Understanding chaos in PMSG is crucial because it can have both positive and negative implications. On one hand, controlled chaos can be harnessed to improve generator performance. Chaotic behavior can enhance the mixing of magnetic fields, leading to more efficient power generation. This phenomenon has been explored in various research studies to optimize the design and performance of PMSG.

On the other hand, uncontrolled or undesired chaos can have detrimental effects on the generator's operation. Chaotic behavior can lead to excessive vibrations, increased noise levels, and even system instability. Therefore, it is important to investigate and understand the factors that contribute to chaos in PMSG, enabling the development of control strategies to mitigate its negative effects.

By exploring the fundamental concepts of PMSG and chaos, this section of the study sets the stage for the subsequent analysis. It provides a solid foundation for investigating the relationship between PMSG and chaos, enabling researchers and engineers to further explore the potential of PMSG technology and develop strategies to optimize its performance and reliability. Ultimately, this research contributes to the advancement of renewable energy systems and the integration of sustainable power sources into the electricity grid.

Building upon the understanding of PMSG and chaos, the second section of this study delves into the control of chaos in PMSG. Chaos control techniques play a crucial role in stabilizing chaotic systems and harnessing their unique properties for desired outcomes. In this study, two specific control approaches are investigated: feedback control and passive control, both implemented using MATLAB.

Feedback control is a widely used approach in chaos control, where the system's behavior is influenced by feedback signals derived from its own output. In the context of PMSG, feedback control techniques can be employed to regulate and stabilize the generator's chaotic behavior. By carefully designing control algorithms based on the generator's output measurements, it becomes possible to steer the system away from chaotic regions or into desired periodic orbits. This approach allows for precise control over the generator's dynamics and can enhance its overall performance.

Passive control, on the other hand, is an alternative approach that does not rely on external control signals. Instead, it involves modifying the system's parameters or structure to suppress or stabilize chaotic behavior. In the case of PMSG, passive control techniques could involve adjusting the generator's physical parameters or altering its design to suppress unwanted chaotic oscillations and improve stability. Passive control strategies often rely on bifurcation analysis and optimization techniques to identify parameter ranges that lead to stable operation.

Both feedback control and passive control approaches are investigated in this study using MATLAB, a widely used computational tool for modeling and simulating dynamic systems. MATLAB provides a convenient platform for developing control algorithms, simulating the behavior of PMSG under different control scenarios, and analyzing the results. By implementing these control approaches in MATLAB, researchers can gain valuable insights into the effectiveness and feasibility of each technique in controlling chaos in PMSG.

The investigation of these control approaches in PMSG seeks to demonstrate the potential for chaos control and its implications for enhancing the generator's performance and stability. By utilizing MATLAB simulations, the obtained results will provide valuable insights into the effectiveness of feedback control and passive control techniques in suppressing chaos and achieving stability in PMSG.

The findings of this research hold significant importance for the field of renewable energy systems. They contribute to the understanding of chaos control and its application in PMSG, which are crucial components of wind turbine applications and other PMSG -based technologies. The ability to effectively control chaos in these systems can lead to improved reliability, increased power generation efficiency, and enhanced overall performance.

The implications of this research extend to the development of more reliable and efficient wind turbine applications. Chaos control techniques can be employed to mitigate undesirable behaviors such as excessive vibrations, noise, and instability, which are often associated with chaotic dynamics. By stabilizing the system and steering it towards desired operating regimes, the control approaches investigated in this study can contribute to the longevity and effectiveness of wind turbines, making them more resilient and productive.

Moreover, the insights gained from this research can inform the design and optimization of PMSG -based technologies beyond wind turbines. As PMSG offer advantages such as high efficiency, compact size, and robustness, their application can extend to various renewable energy systems, including wave energy converters and tidal energy devices. By understanding how to control chaos in PMSG, researchers and engineers can unlock the full potential of these technologies, leading to the development of more reliable and efficient renewable energy solutions.



## 1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi, elektrik ihtiyaçlarını karşılamak ve enerji endüstrisinin karbon ayak izini azaltmak için en umut verici yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir [1, 2]. Modern rüzgar türbinleri genellikle verimlilikleri, kompakt yapıları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle sabit mıknatıslı senkron jeneratörler kullanmaktadır (SMSJ). Rüzgar türbinlerinin dinamiğinin analizi, doğru işleyişlerini, kararlılıklarını ve elektrik şebekesine etkin bir şekilde entegrasyonlarını sağlamak için önemlidir.

Elektromekanik sistemlerin, özellikle rüzgar türbinlerinin dinamiğinin incelenmesi, sistemlerin güvenilirliğini ve optimal performansını sağlamak için her zaman kritik bir araştırma alanı olmuştur. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbinlerinde dinamik davranışlar, başlangıç koşullarına aşırı hassaslık ve doğrusal olmayan ve öngörülemeyen trajektuarlara sahip karmaşık özelliklerle kaotik nitelikler sergileyebilir [3, 4]. Bu kaotik davranışların anlaşılması ve analizi, rüzgar türbinlerinin güvenliğini ve kararlılığını sağlamak için önemlidir.

Kaotik analiz, rüzgar türbinleri gibi karmaşık dinamik sistemlerin incelenmesinde kullanılan güçlü bir matematiksel yaklaşımdır. Doğrusal olmayan fenomenleri ve kaotik davranışları anlamak için çeşitli bilimsel alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgar türbinleri bağlamında, kaotik analiz, bifürkasyonlar, garip çekiciler ve geçici davranışlar da dahil olmak üzere sistemlerin dinamik özellikleri hakkında değerli bilgiler sağlayabilir.

Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbinlerindeki kaotik davranışların nedenlerinden biri, jeneratörün kendisindeki doğrusal olmayan özelliklerdir. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlerde kullanılan daimi mıknatıslar, karmaşık salınımlara ve kaotik davranışlara neden olabilen manyetik doğrusal olmayanlıklar getirebilir. Bu salınımlar, rüzgar türbininin genel performansını etkileyebilir ve aşırı titreşimlere, enerji verimliliği kayıplarına ve hatta potansiyel arızalara yol açabilir.

Rüzgar türbinlerindeki kaosun diğer bir kaynağı, elektrik şebekesi ile etkileşimlerden kaynaklanmaktadır. Rüzgar türbinleri genellikle elektrik şebekesine bağlanır ve gerilim dalgalanmaları, elektriksel bozulmalar ve diğer faktörler sistem dinamiğini

etkileyebilir. Kaotik analiz, rüzgar türbinleri ile elektrik şebekesi arasındaki bu karmaşık etkileşimleri incelemek için kullanılabilir ve senkronizasyon fenomenleri, geçici kararsızlıklar ve doğrusal olmayan yanıtlar hakkında bilgi sağlayabilir.

2. bölüm, rüzgar enerjisinin genelliği ile ilgilidir. Bu bölümde rüzgar türbinlerinin farklı türleri ile bunların avantaj ve dezavantajları açıklanmıştır. Bölümün sonunda rüzgar enerjisi üretiminde kullanılan farklı motorlardan bahsedilmektedir.

3. bölüm sabit mıknatıslı senkron motorların modellenmesinden bahsetmektedir. Bu, sabit mıknatıslı senkron makinelerin yapısı ve işleyişinden, ardından avantaj ve dezavantajlarından ve son olarak matematiksel denklemleri türetmek için modellenmesinden bahsediyor.

4. bölüm doğrusal olmayan sistemler ve kaostan bahsediyor. Bu bölümde bir sistemin ne zaman kaotik olduğunu açıklanmış, ardından kaotik sistemlerden bazı örnekler verilmiştir.

5. bölümde sabit mıknatıslı senkron makinelerin kaotik analizi yapılmış ve Kaosun varlığının doğrulanmasının ardından, MATLAB ortamında üç farklı verimli kontrol sistemi geliştirilmiştir: geri beslemeli kontrol, bileşim matris yaklaşımı ve pasif kontrol. Bu kontrol sistemlerinin amacı, sabit mıknatıslı senkron makinenin kaotik davranışlarını düzenlemek ve istenilen hale getirmektir. Son olarak sabit mıknatıslı senkron makinelerin senkronizasyonu sağlanmıştır.

6. bölüm, yapılan çalışmanın sonuç bölümüdür.

Bu sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbin sistemlerinin kaotik analizine yönelik keşif, bu sistemlerin karmaşık dinamik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacak ve enerji verimliliğini ve rüzgar türbinlerinin güvenilirliğini maksimize etmek için yeni tasarım ve kontrol stratejilerinin geliştirilmesinin yolunu açacaktır.

## 2. RÜZGAR ENERJİSİ HAKKINDA GENEL BİLGİLER

Rüzgâr enerjisi, elektrik üretmek için rüzgârın gücünden faydalanan bir yenilenebilir enerji şeklidir. Modern rüzgâr türbinleri, Antik çağa kadar uzanan uzun bir evrimin ürünüdür. Rüzgârın kullanımına dair ilk izler, eski medeniyetlerin su pompalamak ve tahıl öğütmek için yelkenler ve yel değirmenleri kullandığı 5.000 yıldan daha eskiye dayanır. Bununla birlikte, bugün bildiğimiz gibi gerçek anlamda ilk rüzgar türbinleri, Orta Çağ'da Avrupa'da geliştirildi. 12. yüzyılda, dikey eksenli rüzgar değirmenleri Batı Avrupa'da ortaya çıkmaya başladı. Bu yapılar genellikle dikey bir mil ile bağlantılı bir bez yelken ve ahşap kirişlerden oluşurdu. Rüzgar değirmenleri, tahıl öğütme, yağ üretimi, odun kesimi ve hatta fabrikalarda mekanik enerji üretimi gibi çeşitli görevlerde kullanılırdı.

Zaman içinde rüzgar değirmenleri dikey tasarımlardan yatay tasarımlara doğru evrim geçirdi. 19. yüzyılda, ahşap veya metal kanatlara sahip yatay eksenli rüzgar türbinleri daha yaygın hale geldi. Bununla birlikte, sanayileşme ilerledikçe, rüzgar türbinleri daha verimli enerji kaynakları olan buhar makineleri ve daha sonra fosil yakıtlar tarafından giderek daha çok değiştirildi [5].

Sadece 1970'lerde çevresel endişelerin yükselmesi ve alternatif enerji kaynaklarının araştırılmasıyla rüzgar enerjisi ilgisi canlandı. Hafif malzemelerin kullanımı ve daha verimli türbinler gibi teknolojik ilerlemeler, büyük ölçekte elektrik üretebilen modern rüzgar türbinlerinin geliştirilmesine olanak sağladı.

Bugün rüzgar enerjisi, dünya çapında en yaygın ve hızla büyüyen yenilenebilir enerji kaynaklarından biridir. Rüzgar çiftlikleri, birkaç rüzgar türbinden oluşan, rüzgar enerji potansiyelinden yararlanmak için karada ve denizde inşa edilir. Rüzgar enerjisi, sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve daha sürdürülebilir bir ekonomiye geçişe katkıda bulunmaktadır [6].

Rüzgar enerjisi birçok avantaja sahip olmasına rağmen, elektrik şebekesinde teknik yönetimi ile ilgili bazı zorluklar ve kuşlar, manzara ve gürültü gibi çevresel etkiler gibi dikkate alınması gereken bazı sonuçlar hala mevcuttur. Ayrıca, rüzgar enerjisinin

yaygınlaştırılmasında arazi düzenlemesi de önemli bir rol oynamaktadır. Bu bölümde, rüzgar enerjisi elektrik üretiminin farklı yönlerini detaylı bir şekilde açıklanmıştır.

## **2.1. Yenilenebilir Enerji Üretimi**

Yenilenebilir enerji üretimi, tükenmez veya yeniden oluşabilir doğal kaynaklardan enerji elde etme sürecidir. Bu enerji kaynakları arasında güneş enerjisi, güneş ışığını fotovoltaik güneş panelleri aracılığıyla elektriğe dönüştürerek elde edilir [7]. Ayrıca güneş enerjisi, güneş panelleri termal kullanılarak su ve binaların ısıtılması için de kullanılabilir. Rüzgar enerjisi, rüzgar gücünü kullanarak rüzgar türbinlerini döndürerek üretilir. Rüzgar türbinleri, rüzgarın kinetik enerjisini jeneratörler aracılığıyla elektriğe dönüştürür. Hidroelektrik enerji, şelaleler veya deniz akıntıları gibi hareket halindeki suyun gücünü kullanarak elde edilir. Hidroelektrik barajlar ve deniz altı türbinleri, hidroelektrik enerjiyi elektriğe dönüştürmek için kullanılır. Biyokütle, tarımsal atıklar, orman kalıntıları, enerji bitkileri ve gıda atıkları gibi organik maddelerden üretilir. Biyokütle, ısı, elektrik veya biyoyakıtların üretimi için kullanılabilir. Son olarak, jeotermal enerji, Dünya'nın doğal ısısından kaynaklanır. Jeotermal santraller, yeraltındaki ısıyı buhar üretmek için kullanan ve bu buharı türbinleri döndürerek elektrik üreten sistemlerdir.

Bu yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajı, sürdürülebilir olmaları, az veya hiç sera gazı üretmemeleri ve karbon emisyonlarının azaltılmasına katkıda bulunmalarıdır. Ayrıca, bu kaynaklar bol miktarda bulunur ve yerel olarak kullanılabilirler, bu da enerji ithalatına olan bağımlılığı azaltır. Bununla birlikte, yenilenebilir enerji geliştirme, altyapı yatırımları, özel teknolojiler ve mevcut elektrik ağına etkili bir şekilde entegrasyon gerektirdiği unutulmamalıdır.

## **2.2. Rüzgar Enerjisi Üretimi**

Rüzgar enerjisi üretim kapasitesi 1970 ile 2023 yılları arasında önemli bir büyüme kaydetmiştir. 1970'lerde rüzgar enerjisi üretim kapasitesi hala nispeten düşük seviyedeydi ve sadece ABD, Danimarka ve Almanya gibi bazı öncü ülkelerde bulunuyordu. Bu dönemdeki rüzgar türbinleri genellikle küçük boyuttaydı ve küresel elektrik üretimine neredeyse hiç katkı sağlamıyordu. Yıllar geçtikçe, teknolojik ilerlemeler, destek politikaları ve yenilenebilir enerji kaynaklarını geliştirme gerekliliği konusunda artan farkındalık, rüzgar enerjisi üretim kapasitesinin hızlı bir



şekilde artmasına katkıda bulundu. Rüzgar türbinleri daha büyük, daha verimli ve daha düşük maliyetli hale geldi, bu da geniş ölçekte yaygınlaşmalarını teşvik etti. 1980'ler ve 1990'larda, özellikle Avrupa'da, rüzgar enerjisi üretim kapasitesi büyümeye devam etti. Birçok ülke, rüzgar enerjisine yönelik garantili alım tarifeleri gibi teşvik önlemleri benimsedi. Bu dönemde ABD'de de rüzgar enerjisi üretim kapasitesi önemli bir büyüme kaydetti. 2000'lerin başında rüzgar enerjisi üretim kapasitesi hızla arttı. Birçok ülke daha güçlü destek politikaları uyguladı ve sektör hızla genişledi. Büyük ölçekli rüzgar çiftlikleri, Çin, ABD ve Avrupa dahil birçok bölgede inşa edildi. Deniz üstü rüzgar türbinlerinin kurulumu da popülerlik kazanmaya başladı. Son on yılda rüzgar enerjisi üretim kapasitesi sürekli bir hızda büyümeye devam etti. Birçok ülke rüzgar enerjisi hedefleri belirledi ve sektöre yatırımlarını artırdı. Çin, dünyanın en büyük rüzgar enerjisi üreticisi haline geldi ve onu ABD, Almanya ve Hindistan takip etti.

Önemli bir nokta, rüzgar enerjisi üretim kapasitesinin belirli rakamlarının kaynaktan kaynağa değişebileceği ve toplam kapasitenin aynı zamanda türbinlerin gerçek kullanım oranına da bağlı olduğudur. Dünya Rüzgar Enerjisi Birliği tarafından yayımlanan verilere göre, 2021 yılında dünya rüzgar enerjisi kapasitesi 97,3 GW (gigawatt) arttı. Bu, 2020'de kaydedilen 92,7 GW'lik artıştan sonra tarihsel büyüme rekoru oldu. Dünya genelinde faaliyette olan tüm rüzgar türbinlerinin toplam gücü şu anda 840 GW'yi aşıyor. Bu kapasite, küresel elektrik tüketiminin %7'sini sağlamak için yeterlidir [8].

### **2.3. Elektrikli Makineler ve Rüzgar Enerjisi Dönüştürme Sistemleri**

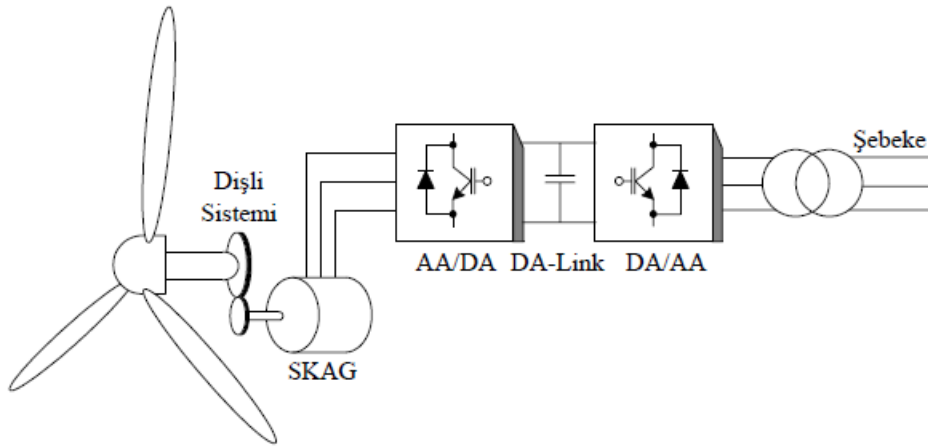
Günümüzde, bir rüzgar jeneratörü sisteminde jeneratör rolü oynayabilecek birkaç türde elektrik makinesi bulabiliriz. Bir rüzgar jeneratörü için kullanılan motor tipleri, rüzgar türbininin tipine ve boyutuna bağlı olarak değişir. Bu paragrafta, rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan birkaç makinelerin özelliklerinden bahsedilecektir.

#### **2.3.1. Sincap kafes indüksiyon makineleri**

Sincap kafesli indüksiyon motorları olarak da bilinen kafes endüksiyon makineleri, rüzgar enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan rüzgar türbinleri olan rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılır. Kafesli asenkron makineler, diğer elektrikli makine türlerine göre güvenilirliği, tasarımının basitliği ve nispeten düşük maliyeti nedeniyle tercih edilmektedir.

Sincap kafesli bir asenkron makinenin rotoru, uçlarında iletken halkalarla birbirine bağlanan kısa bakır veya alüminyum çubuklardan yapılmıştır. Rotor dönerken, rotor çubuklarında bir manyetik alan indüklenir. Bu manyetik alan daha sonra rotoru döndüren motor torku oluşturmak için makinenin statorunun manyetik alanı ile etkileşime girer.

Kafesli asenkron makinelerin temel özelliği, stator ve rotor arasında doğrudan elektrik bağlantısı gerektirmemesidir. Bu, sürtünen elektrik kontakları olmadığı, aşınmayı ve bakım gereksinimini azalttığı anlamına gelir. Ek olarak, asenkron makineler, rüzgar hızının önemli ölçüde değişebildiği rüzgar türbinlerinde gerekli olan değişken bir hız aralığında çalışabilir.



Şekil 2.1. Sincap kafesli endüksiyon motorlar.

### 2.3.2. Çift beslemeli asenkron makineler

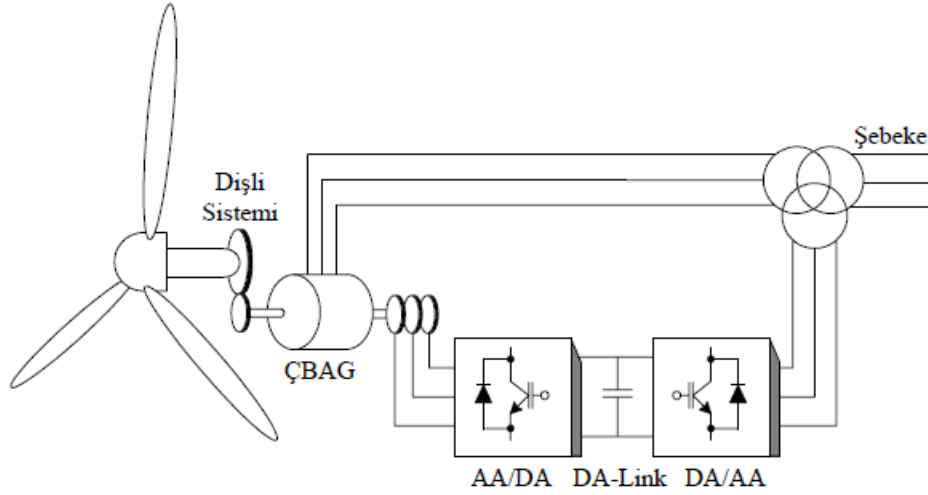
Çift beslemeli asenkron makineler veya çift rotorlu asenkron makineler olarak da bilinen çift beslemeli asenkron makineler, aslında aerogeneratörlerde (rüzgar türbinleri) kullanılmaktadır. Bu makineler, rüzgar enerjisini elektriğe dönüştürme verimliliğini en üst düzeye çıkarmak için tasarlanmıştır.

Çift beslemeli asenkron makinelerin çalışma prensibi rotor üzerinde iki ayrı sargı kullanılmasına dayanmaktadır. İlk sargı elektrik şebekesine (ana güç kaynağı) bağlanır ve ikincisi bir güç elektroniği dönüştürücüsüne (genellikle bir invertör) bağlanır. Stator, elektrik şebekesinden güç alırken, rotor dönüştürücüdən güç alır.

Bu sistemin ana avantajı, rüzgar türbininin dönüş hızını kontrol etme kabiliyetinde yatmaktadır. Dönüştürücü, rotoru besleyen akımın frekansını ve genliğini ayarlamayı mümkün kılar, bu da makinenin dönüş hızını elektrik şebekesinin frekansından

bağımsız olarak kontrol etmeyi mümkün kılar. Bu, farklı rüzgar hızlarından güç üretiminin verimliliğini optimize etmeye yardımcı olur.

Ayrıca çift beslemeli asenkron makinelerde harici bir uyarma sistemine ihtiyaç duymadan otomatik yol verme özelliği bulunmaktadır. Bu, makinenin diğer karmaşık cihazlara ihtiyaç duymadan otonom olarak elektrik şebekesiyle çalışabileceği ve senkronize olabileceği anlamına gelir [9].



Şekil 2.2. Çift rotorlu asenkron motor.

### 2.3.3. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler

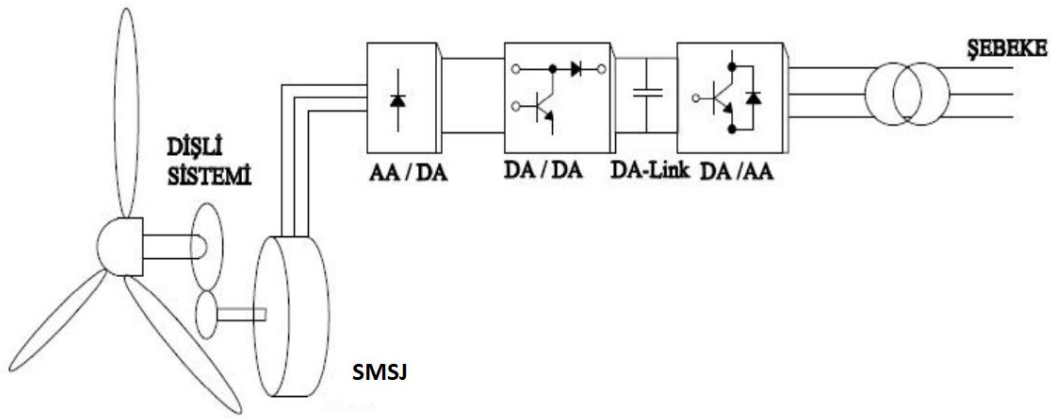
Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler, rüzgar enerjisi üretimi için rüzgar türbinlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu jeneratörler ayrıca doğrudan tahrikli sabit mıknatıslı jeneratörler veya eksenel akıllı sabit mıknatıslı jeneratörler olarak da bilinir.

Bu jeneratörlerde sabit mıknatıslar rotora, bakır sargılar ise statora monte edilir. Rotor dönerken sabit mıknatıslar sabit bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan, stator bobinleri ile etkileşime girerek bir elektrik voltajı indükler ve böylece elektrik üretir.

Sabit mıknatısların kullanımının rüzgar türbinlerinde birçok avantajı vardır. Her şeyden önce bu jeneratörler, geleneksel doğru akım jeneratörlerinde gerekli olan fırça ve komütatörlerin mekanik sürtünmesinden kaynaklanan kayıpların olmaması sayesinde yüksek verim sunmaktadır. Ek olarak, sabit mıknatıslı jeneratörlerin yüksek bir güç-ağırlık oranı vardır, bu da onları özellikle hafiflik ve kompaktlığın önemli faktörler olduğu rüzgar türbini uygulamaları için uygun hale getirir.

Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler, değişen dönüş hızlarında çalışabilme yetenekleri açısından da değerlidir. Bu, rüzgar türbinlerinin rüzgar hızındaki dalgalanmalara uyum sağlamasına ve böylece elektrik üretimini optimize etmesine olanak tanır.

Son olarak, bu jeneratörlerde kullanılan sabit mıknatısların genellikle neodimyum, samaryum ve disprosyum gibi nadir toprak alaşımlarından yapıldığına dikkat edilmelidir. Bu malzemelerin mevcudiyeti ve maliyeti zorluklar ortaya çıkarabilir, ancak dayanıklı ve ekonomik olarak uygun alternatifler bulmak için araştırmalar devam etmektedir.



Şekil 2.3. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar enerjisi.

### **3. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERİN MODELLENMESİ**

Rüzgar enerjisi, daha sürdürülebilir enerji sistemlerine geçiş bağlamında gelecek vadeden bir yenilenebilir enerji kaynağı haline gelmiştir. Rüzgarın kinetik enerjisini elektriğe çeviren rüzgar türbinleri bu dönüşümde önemli bir rol oynamaktadır. Rüzgar türbinlerinin verimliliğini ve performansını en üst düzeye çıkarmak için, bu özel uygulamalara uygun elektrikli makineler tasarlamak çok önemlidir. Mevcut teknolojik çözümler arasında, sabit mıknatıslı senkron makinelerin, mükemmel elektromekanik özellikleri nedeniyle tercih edilen seçenekler olduğu kanıtlanmıştır [10, 11].

SMSJ'ler, rotorun uyarma bobinleri yerine sabit mıknatıslarla donatıldığı elektrikli makinelerdir. Bu tasarımın, yüksek güç yoğunluğu, artan verimlilik ve yük değişimlerine daha iyi yanıt verme gibi birçok avantajı vardır [12-15]. SMSJ'lerin modellenmesi, elektromanyetik ve mekanik davranışlarının matematiksel ve fiziksel tanımını içerir.

Bu bölümde, Park dönüşümünü kullanarak rüzgar türbinleri için SMSJ'leri modellemeye odaklanacaktır. Park dönüşümü, özellikle üç fazlı güç sistemlerinde senkron makinelerin analizini basitleştirmek için kullanılan yaygın bir matematiksel tekniktir. Üç fazlı referans çerçevesinin elektromanyetik niceliklerini, sabit mıknatısın manyetik alanıyla senkronize dönen iki boyutlu bir referans çerçevesinde temsil etmeyi mümkün kılar.

#### **3.1.Senkron Makine**

Senkron makine, terminallerine uygulanan alternatif akımın frekansı ile senkronize dönen bir manyetik alandan çalışan bir elektrikli makine türüdür. Elektrik üretmek için kullanıldığında senkron jeneratör olarak da bilinir.

Senkron makine esas olarak sabit bir stator ve dönen bir rotordan oluşur. Stator, sabit kutupların etrafına sarılmış bobinlerden oluşurken, rotor, serbestçe dönebilen kutupların etrafına sarılmış bobinlere sahiptir. Elektrik uyarımı, rotora harici bir doğru akım kaynağı veya sabit mıknatıslar aracılığıyla sağlanır.

Statora alternatif akım uygulandığında, statorun kutupları etrafında dönen bir manyetik alan oluşur. Bu dönen manyetik alan, rotorun bobinlerinde bir elektromotor kuvveti indükleyen rotorun manyetik alanı ile etkileşime girer. Rotorun dönüşü daha sonra giriş alternatif akımının frekansı ile senkronize edilir.

Senkron makineler, elektrik santrallerinde elektrik jeneratörleri, rüzgar türbinleri ve elektrikli araçlar dahil olmak üzere birçok uygulamada kullanılmaktadır. Belirli endüstriyel uygulamalarda elektrik motoru olarak da kullanılabilirler.

Senkron makinelerin avantajları, yüksek verimlilikleri, yüksek güçleri ve sabit dönüş hızını koruma yeteneklerini içerir. Bununla birlikte, senkronizasyon kontrolü için ek cihazlar gerektirebilen senkronizasyonu sürdürmek için harici uyarım gerektirirler.

Sabit mıknatlara sahip bir senkron makinenin yapısı, klasik bir senkron makineninkine benzer, ancak rotorun yapısına sabit mıknatısların eklenmesiyle. İşte böyle bir makinenin yapısının ana özellikleri:

- Sabit mıknatıslı rotor: Sabit mıknatıslı senkron makinenin rotoru, yüksek manyetik yoğunluğa sahip sabit mıknatıslarla donatılmıştır. Bu mıknatıslar genellikle neodimyum-demir-bor (NdFeB) veya samaryum-kobalt (SmCo) gibi nadir toprak alaşımlarından yapılır. Sabit mıknatıslar, sabit ve güçlü bir manyetik alan oluşturacak şekilde düzenlenmiştir.
- Stator: Stator, lamine demir dişlerin etrafına sarılan bobinlerden oluşur. Bu bobinler, dönen bir manyetik alan oluşturmak için alternatif akımla beslenir. Statorun manyetik alanı, rotorun sabit mıknatıslarının sabit manyetik alanı ile etkileşime girerek stator bobinlerinde voltaj ve akımı indükler.
- Soğutma sistemi: Sabit mıknatıslar yoğun çalışmaya maruz kaldıklarında ısı üretebildikleri için sabit mıknatıslı senkron makinenin soğutma sistemine özellikle dikkat edilir. Sabit mıknatısların sıcaklığını kabul edilebilir sınırlar içinde tutmak için konveksiyon, sirkülasyon suyu veya sirkülasyon havası soğutma teknikleri kullanılabilir.
- Akım kontrolü: Sabit mıknatıslı senkron makinenin hızını ve torkunu düzenlemek için bir akım kontrol sistemi kullanılır. Bu kontrol sistemi, stator bobinlerine güç

sağlamak için doğru akımı değişken frekanslı alternatif akıma dönüştüren invertörler gibi elektronik güç dönüştürücülerine dayanabilir.

Sabit mıknatıslı senkron makineler, geleneksel senkron makinelere göre yüksek güç yoğunluğu, yüksek verimlilik, daha iyi dinamik yanıt, artırılmış kompaktlık ve harici uyarıma gerek olmaması gibi çeşitli avantajlar sunar.

Sabit mıknatıslı senkron makineler birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. İşte yaygın uygulamalardan bazı örnekler:

- Otomotiv endüstrisi: Elektrikli ve hibrit araçlarda tahrik için sabit mıknatıslı elektrik motorları kullanılmaktadır. Daha iyi yakıt verimliliği, yüksek tork ve yüksek güç yoğunluğu sunarlar.
- Rüzgar enerjisi: Sabit mıknatıslı jeneratörler rüzgar türbinlerinde rüzgar enerjisini elektriğe dönüştürmek için sıklıkla kullanılır. Rüzgar hızındaki değişikliklere hızlı tepki ve daha iyi enerji verimliliği sunarlar.
- İmalat sanayi: Sabit mıknatıslı senkron makineler, kompresörler, pompalar, fanlar ve takım tezgahları gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır. Yüksek verimlilik ve mükemmel kontrol hassasiyeti sunarlar.
- Enerji sektörü: Hidroelektrik santrallerde, jeotermal santrallerde ve gelgit santrallerinde elektrik üretmek için sabit mıknatıslı jeneratörler kullanılmaktadır. Yüksek güvenilirlik, uzun ömür ve yük değişimlerine hızlı tepki sunarlar.
- Havacılık uygulamaları: Sabit mıknatıslı elektrik motorları, uydularda ve uzay araçlarında yön kontrolü ve güç üretimi de dahil olmak üzere çeşitli işlevler için kullanılır.
- Tıp sektörü: Sabit mıknatıslı senkron makineler, MRG (manyetik rezonans görüntüleme) tarayıcıları ve tomografi cihazları gibi tıbbi cihazlarda kullanılmaktadır. Kararlı bir manyetik alan ve yüksek hassasiyet sunarlar.
- Endüstriyel otomasyon sektörü: Hassas ve verimli hareketler için endüstriyel robotlarda ve otomasyon sistemlerinde sabit mıknatıslı senkron makineler kullanılmaktadır.

Bu örnekler, sabit mıknatıslı senkron makinelerin birçok uygulamasının yalnızca bir kısmını temsil etmektedir. Genel olarak, enerji verimliliği, yüksek tork, az yer kaplama

ve kontrol hassasiyeti açısından yüksek performans gerektiğinde kullanımları uygundur.

### **3.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Makinelerin Avantajları ve Dezavantajları**

Sabit mıknatıslı senkron makineler, günümüzde ağırlıklı olarak bulunan elektrikli makine türleridir, ancak tüm teknolojiler gibi, diğerlerinin yanı sıra avantaj ve dezavantajları vardır [16, 17]:

#### **3.2.1. Avantajları**

- Yüksek verimlilik: Sabit mıknatıslı senkron makineler genellikle geleneksel endüksiyon makinelerinden daha yüksek verime sahiptir. Bu, daha fazla elektrik enerjisini mekanik enerjiye çevirerek daha enerji verimli hale getirebilecekleri anlamına gelir.
- Yüksek güç yoğunluğu: Sabit mıknatıslar, sabit mıknatıslı senkron makinelerin daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olmasını sağlayan daha güçlü bir manyetik alan sağlar. Daha küçük bir alanda daha yüksek güç sağlayabilirler, bu da özellikle alanın sınırlı olduğu uygulamalar için faydalıdır.
- Hızlı dinamik yanıt: Sabit mıknatıslı senkron makinelerin iyi bir dinamik tepkisi vardır, bu da onların istenen çalışma hızına hızlı bir şekilde ulaşabilecekleri ve yük değişikliklerine asenkron makinelerden daha verimli bir şekilde uyum sağlayabilecekleri anlamına gelir.
- Düşük bakım: Manyetik alan oluşturmak için elektromanyetik bobinlere ihtiyaç duymadıklarından, sabit mıknatıslı senkron makineler genellikle daha az bakım gerektirir. Bobinleri düzenli olarak kontrol etmeye veya değiştirmeye gerek yoktur, bu da bakım maliyetlerini azaltır.

#### **3.2.2. Dezavantajları**

- Yüksek başlangıç maliyeti: Sabit mıknatıslı senkron makinelerde kullanılan sabit mıknatıslar genellikle neodim veya samaryum-kobalt gibi pahalı malzemelerden yapılır. Bu nedenle, bu makinelerin üretimi geleneksel endüksiyon makinelerinden daha pahalı olabilir.
- Sıcaklık Hassasiyeti: Bu makinelerde kullanılan sabit mıknatıslar yüksek sıcaklıklarda manyetik güçlerini kaybedebilmektedir. Bu, sabit mıknatıslı senkron



makinelerin, belirli yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanımlarını sınırlayabilen belirli sıcaklık aralıklarında çalışacak şekilde tasarlanması gerektiği anlamına gelir.

- Kontrol zorluğu: Özel tasarımları nedeniyle, sabit mıknatıslı senkron makinelerin kontrolü, endüksiyon makinelerinden daha zor olabilir. Tedarik frekansı ile makinenin dönüş hızı arasındaki senkronizasyonu sürdürmek için genellikle özel kontrol teknikleri gerekir.
- Sabit mıknatısların çevresel etkisi: Bu makinelerde kullanılan sabit mıknatıslar genellikle sınırlı kaynaklar olan ve çıkarılması önemli bir çevresel etkiye sahip olabilen nadir toprak elementlerinden yapılır. Sabit mıknatısların uygun yönetimi ve geri dönüşümü bu nedenle genel çevresel etkilerini azaltmak için önemlidir.

### **3.3. Sabit Mıknatıslı Senkron Makinenin Modellenmesi**

Sabit mıknatıslı senkron makinenin modellenmesi, bu makinenin elektromanyetik davranışını matematiksel olarak temsil etmekten ibarettir.

#### **3.3.1. Modelde basitleştirici varsayımlar**

Sabit mıknatıslı senkron makinenin modellenmesi, genellikle bu makinelerin analizini ve tasarımını kolaylaştırmak için belirli basitleştirici varsayımlara dayanır. İşte o varsayımlardan bazıları:

- İdeal sabit mıknatıslar: Makinede kullanılan sabit mıknatısların ideal özelliklere sahip olduğu, yani zamanla mıknatıslanma kaybı olmadan sabit ve düzgün bir manyetik alan ürettikleri varsayılır. Gerçekte, sabit mıknatıslar zamanla kademeli olarak manyetikliği giderebilir ve bu da makine performansını etkileyebilir.
- Kayıpsız stator ve rotor: Stator sargılarındaki elektrik kayıpları ve rotordaki manyetik kayıplar genellikle ihmal edilir. Bu kayıplar genellikle, gerçek çalışma koşullarında makine verimliliğini azaltabilen girdap akımlarına ve histeretik kayıplara atfedilir.
- İdeal manyetik devreler: Stator ve rotorun manyetik devrelerinin ideal olduğu, yani manyetik malzemelerden manyetik akı sızıntısı olmadığı varsayılır. Gerçekte, makinedeki manyetik akı dağılımının daha ayrıntılı bir analizini gerektiren manyetik akı kayıpları olabilir.
- Manyetik doygunluğun olmaması: Genellikle makinede kullanılan manyetik malzemelerin doygun olmadığı, yani manyetik davranışlarının yüksek manyetik alan

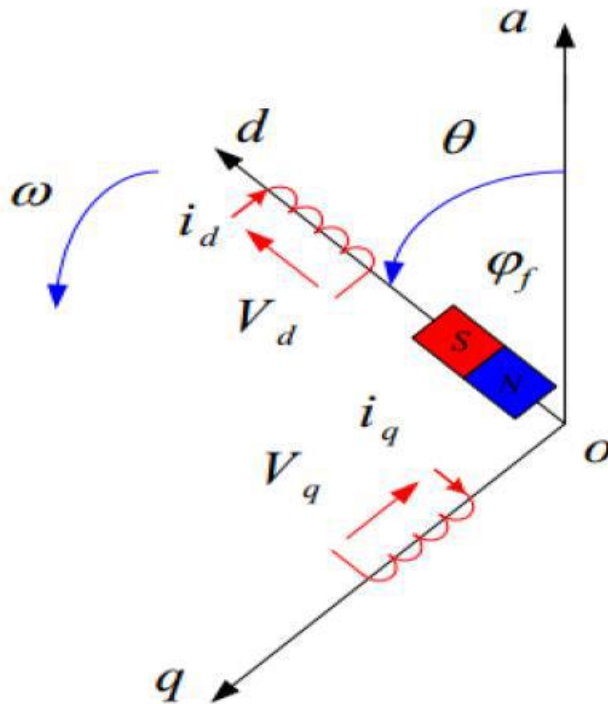
seviyelerinde bile doğrusal kaldığı düşünülür. Bununla birlikte, yüksek manyetik alan seviyelerinde, malzemenin manyetik özelliklerini değiştiren manyetik doygunluk meydana gelebilir.

- İhmal edilebilir mekanik kayıplar: Sürtünme, yatak kayıpları ve soğutma fanı kayıpları gibi mekanik kayıplar genellikle ihmal edilir. Bu kayıplar pratikte önemli olabilir ve makine performansının daha doğru bir analizi için dikkate alınmalıdır.

Bu basitleştirici varsayımların sabit mıknatıslı senkron makinenin analizini ve modellenmesini kolaylaştırdığını, ancak makinenin gerçek davranışından sapmalar getirebileceğini not etmek önemlidir. Daha doğru bir tasarım ve derinlemesine analiz için bu faktörleri hesaba katmak ve daha sofistike modeller kullanmak gerekir.

### 3.3.2. Modelin açıklama

Sabit mıknatıslı senkron makine, indüktörün sabit mıknatıslarla değiştirildiği bir varyanttır. Bu mıknatısların kullanımı, fırçaların ve rotor kayıplarının ortadan kaldırılması gibi birçok avantajı olan bir uyarım alanı yaratmayı mümkün kılar. SMSJ'nın yapısı, aralarında  $(2\pi/3)$ 'lik bir açı oluşturacak şekilde kademelendirilmiş üç adet üç fazlı stator sargısından (a, b, c) oluşur. Rotor uyarımı, Şekil 3.1'de gösterilen rotor üzerinde bulunan sabit mıknatıslar tarafından üretilir.



Şekil 3.1. Sabit mıknatıslar tarafından rotor uyarımı.

### 3.3.3. Modelin elektrik denklemleri

Stator gerilimlerinin ve akılarının üç fazlı denklemleri sırasıyla aşağıdaki gibi yazılır [18]:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\varphi_s] \quad (3.1)$$

$$[\varphi_s] = [L_s] \cdot [I_s] + [\Phi_{sf}] \quad (3.2)$$

Aşağıdaki vektörleri tanımlayarak:

$$\begin{aligned} [V_s] &= [v_a \quad v_b \quad v_c]^T & [I_s] &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T & [\varphi_s] &= [\varphi_a \quad \varphi_b \quad \varphi_c]^T \\ [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} & [L_s] &= \begin{bmatrix} L_{sa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_{sb} & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_{sc} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$[V_s]$  : Stator gerilim vektörü

$[I_s]$  : Stator akım vektörü

$[\varphi_s]$  : Stator akı vektörü

$[R_s]$  : Stator direnç matrisi

$[L_s]$  : Stator endüktans matrisi

$L_{sa}$   $L_{sb}$  ve  $L_{sc}$ : Sırasıyla fazlara (a, b ve c) özgü endüktanslar.

$M_{ab}$ ,  $M_{ac}$ ,  $M_{ba}$ ,  $M_{bc}$ ,  $M_{ca}$  ve  $M_{cb}$ : (a, b ve c) Sırasıyla fazlarda karşılıklı endüktanslar.

$[\Phi_{sf}]$  : Mıknatıs tarafından üretilen akı vektörü şu şekilde tanımlanır:

$$[\varphi_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$\theta$ : Yük açısı (rotor konumu) şu şekilde tanımlanır:

$$\theta(t) = \int_0^t \omega dt \quad (3.4)$$

Buradan;

$$\omega = P\Omega_r \quad (3.5)$$

Olarak bulunur.

$\omega$ : Elektrik darbesi.

$\Omega_r$ : Rotor hızı.

P: Kutup çifti sayısı.

### 3.3.4. Modelin mekanik denklemleri

Newton'un 2. yasasının uygulanması hareket denklemini verir:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_r) \quad (3.6)$$

J: Eylemsizlik momenti.

$C_{em}$ : Elektromanyetik tork.

$C_r$ : Dirençli tork.

f: Sürtünme katsayısı.

### 3.3.5. Modelin elektromanyetik denklemi

Elektromanyetik tork denklemi, mekanik denklemi tanımlamak için önemlidir ve aşağıdaki formu alır[18]:

$$C_{em} = [i_s]^T \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{d[L_s]}{d\theta} [i_s] + \frac{1}{2} \cdot \frac{d[\Phi_{sf}]}{d\theta} \right] \quad (3.7)$$

### 3.3.6. Park dönüşümü

Önceki denklemlerden, değişken katsayılı diferansiyel denklemlerin sayısı göz önüne alındığında, sistem çalışmasının oldukça zor olduğu fark edilmektedir. Bu sorunu çözmek için, sabit katsayılı diferansiyel denklemler kullanarak makinenin davranışını tanımlamayı mümkün kılan matematiksel dönüşümleri (Park'ın çerçevesi) kullanılmaktadır. Böylece, KMSJ 'nin Park dönüşümünü kullanarak rotora ve ardından statora bağlı referans çerçevesindeki modellemesini sunmaktadır.

#### 3.3.6.1. Park'ın dönüşüm ilkesi

$\alpha\beta\gamma$  dönüşümü veya dq0 dönüşümü olarak da bilinen Park'ın dönüşüm ilkesi, dengeli bir üç fazlı sistemin üç fazlı niceliklerini (genellikle akımlar ve gerilimler) eşdeğer iki fazlı niceliklere dönüştürmek için kullanılan bir yöntemdir. Bu dönüşüm, güç elektroniği ve elektrik sistemlerinin kontrolü alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Park'ın dönüşümü, üç fazlı sistemlerin analizini ve kontrolünü daha uygun bir biçimde sunarak basitleştirir. Dengeli bir üç fazlı sistemin iki bileşene ayrışmasına dayanır: doğrudan bileşen (veya d bileşeni) ve kareleme bileşeni (veya q bileşeni) [19].

Park'ın dönüşümü, Park'ın açısı ( $\theta$ ) adı verilen referans nicelik bilgisine dayanır. Bu açı genellikle, q bileşeni dengeli üç fazlı gerilimle karelemde olacak şekilde seçilir. Başka bir deyişle, q bileşeni, sistemin manyetik referans eksenini hizalanır.

Park dönüşümü matematiksel olarak şu şekilde formüle edilebilir:

$$I_d = \frac{2}{3} * (I_a * \cos(\theta) + I_b * \cos(\theta - 2\pi/3) + I_c * \cos(\theta + 2\pi/3))$$

$$I_q = \frac{2}{3} * (I_a * \sin(\theta) + I_b * \sin(\theta - 2\pi/3) + I_c * \sin(\theta + 2\pi/3))$$

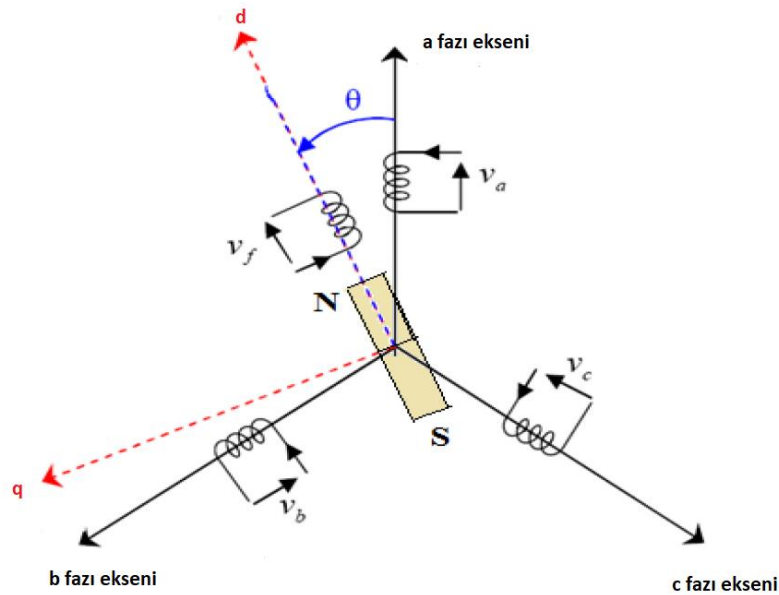
Burada:

$I_q$ : Akımın dördün bileşeni

$I_a, I_b, I_c$ : Dengeli üç fazlı akımlar

$\theta$ : Park açısı (genellikle dengeli üç fazlı voltajın açısı)

Üç fazlı büyüklükler eşdeğer iki fazlı büyüklüklere dönüştürüldüğünde, üç fazlı elektrik sistemini analiz etmek ve kontrol etmek daha kolay hale gelir. Örneğin, elektrikli makine kontrolü alanında, makinenin rotoru ile senkronize edilmiş referans sistemindeki akım ve gerilimlerin hesaplanmasını basitleştirmek için Park dönüşümü kullanılır.



Şekil 3.2. Park dönüşümünün gösterimi.

Park dönüşümü şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [T(\theta)]^{-1}[V_{dqo}] \\ [V_{dqo}] = [T(\theta)][V_{abc}] \end{cases} \quad (3.8)$$

$[T(\theta)]$  ve  $[T(\theta)]^{-1}$  ileri ve geri geçiş matrisleridir.

$$[T(\theta)] = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$[T(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

### 3.3.6.2. Clark'ın dönüşüm ilkesi

Clark'ın ortogonal bileşen dönüşümü veya abc-dq0 dönüşümü olarak da bilinen Clark'ın dönüşüm ilkesi, üç fazlı güç sistemlerinin kontrol ve regülasyon sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir tekniktir. Gerilimler ve akımlar gibi üç fazlı elektriksel büyüklükleri, doğrudan (d) ve dördün (q) bileşenler olarak adlandırılan bir dizi eşdeğer iki fazlı miktarlara dönüştürür.

Clark dönüşüm ilkesi aşağıdaki denklemlere dayanmaktadır:

- Doğrudan bileşen (d): üç fazlı sinyalin ortalama değerini temsil eder ve genellikle faz eksenini ile hizalanır. Üç fazlı niceliklerin doğrusal bir kombinasyonu kullanılarak hesaplanır:

$$d = \frac{2}{3} * (a - \frac{1}{2} * b - \frac{1}{2} * c)$$

- Dördün bileşeni (q): üç fazlı sinyalin salınım değerini temsil eder ve genellikle faz ekseninden 90 derece ofset faz eksenini ile hizalanır. Üç fazlı niceliklerin doğrusal bir kombinasyonu kullanılarak hesaplanır:

$$q = \frac{\sqrt{3}}{3} * (b - c)$$

- Boş bileşen (0): üç fazlı sinyalin boş ortalama değerini temsil eder ve genellikle ihmal edilir.

Clark'ın dönüşümü, karmaşık üç fazlı sinyalleri, kullanımını daha kolay eşdeğer iki fazlı bir sisteme dönüştürerek üç fazlı sistemlerin analizini basitleştirir. Bu, üç fazlı motor hız kontrolörleri, enerji dönüştürme sistemleri vb. gibi kontrol sistemlerinin tasarımını kolaylaştırır [20].

Clark dönüşümü şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{cases} [V_{\alpha\beta 0}] = [C][V_{abc}] \\ [V_{abc}] = [C]^{-1}[V_{\alpha\beta 0}] \end{cases} \quad (3.11)$$

$[C]$  et  $[C]^{-1}$  Clark'ın ileri ve ters geçiş matrisleridir.

$$[C] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{-1}{2} & \frac{-1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$[C]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ \frac{-1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ \frac{-1}{2} & \frac{-\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

İki referans çerçevesi arasındaki geçiş sırasında genliği korumak için Park ve Clark matrislerinin katsayısı seçildi.

### 3.3.6.3. $(\alpha, \beta)$ çerçevesinden $(d, q)$ çerçevesine geçiş

$(\alpha, \beta)$  bileşenlerinden  $(d, q)$  bileşenlerine geçiş, şu şekilde belirlenen bir döndürme matrisi ile verilir:

$$X_{dq} = [R][X_{\alpha\beta}] \quad (3.14)$$

$[R]$ :  $(d, q)$ 'daki geçiş matrisi  $(\alpha, \beta)$ , şu şekilde tanımlanır:

$$[R] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

### 3.3.7. Asenkron makinenin (d,q) referans çerçevesindeki denklemleri

#### 3.3.7.1. Elektriksel denklemler

P çift kutuplu sabit mıknatıslı senkron makinenin Park modeli aşağıdaki denklemlerle tanımlanır:

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q \\ V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Phi_f \end{cases} \quad (3.16)$$

$V_d$  : d ekseninde stator gerilimi

$V_q$  : q eksenindeki stator gerilimi

$i_d$  : d eksenindeki stator akımı

$i_q$  : q eksenindeki stator akımı

$L_d$  : d ekseninde stator endüktansı

$L_q$  : q ekseninde stator endüktansı

#### II.7.6.2 Mekanik denklem

Hareket denklemi her zaman aynı kalır:

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f \cdot \Omega_r) \quad (3.17)$$

#### 3.3.7.2. Elektromanyetik denklem

Aşağıdaki ifade ile temsil edilen dengeli sistemde makine tarafından çekilen anlık güç:

$$P_a = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (3.18)$$

Park dönüşümünde güç ifadesi aşağıdaki gibi yazılır:

$$P_e = \frac{3}{2} (V_d I_d + V_q I_q) \quad (3.19)$$

$V_d$  ve  $V_q$ 'yi ifadeleri elde edilir:

$$P_e = \frac{3}{2} \left[ \left( R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - P \Omega L_q I_q \right) I_d + \left( R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + P \omega L_d I_d + P \Omega \Phi_f \right) I_q \right] \quad (3.20)$$



$$P_e = \frac{3}{2} \left[ P\Omega[(L_d - L_q)I_d I_q + \Phi_f I_q] + R_s(I_d^2 + I_q^2) \left( L_d I_d \frac{dI_d}{dt} + L_q I_q \frac{dI_q}{dt} \right) I_d \right] \quad (3.21)$$

Bu güç şunlardan oluşur:

- $P_j = \frac{3}{2} R_s (I_d^2 + I_q^2)$  : Joule kayıplarını temsil eder
- $P_{\text{mag}} = \frac{3}{2} \left( L_d I_d \frac{dI_d}{dt} + L_q I_q \frac{dI_q}{dt} \right)$  : Depolanan manyetik enerjideki değişimi temsil eder.
- $P_{em} = \frac{3}{2} P\Omega[(L_d - L_q)I_d I_q + \Phi_f I_q]$  : Elektromanyetik gücü temsil eder.

Son olarak makinenin geliştirdiği tork yazılır: Son olarak makinenin geliştirdiği tork yazılır:

$$C_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} \Rightarrow C_{em} = \frac{3}{2} P[(L_d - L_q)i_d i_q + \Phi_f i_q] \quad (3.22)$$

### 3.3.8. Genel durum denklemleri

Durum yazısı seçilen işaretleyiciye bağlıdır, durum gösteriminin benzersiz olmadığını görüyoruz. Bir durum vektörünün bileşenlerinin herhangi bir doğrusal kombinasyonuna durum değişkenleri denir.

Denklem (3.16) sistemini geliştirerek, KMSJ denklemlerinin son şekli (d-q) eksenlerinde çıkarabilir.

Denklem (3.17) ve (3.22) ifadelerine göre, aşağıdaki durum denklemi biçiminde gösterime ulaşılabilir:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} i_q \\ \frac{-R_s}{L_q} i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} i_d - \frac{\omega \Phi_f}{L_q} \\ \frac{3 P \Phi_f}{2 J} i_q - \frac{P(L_q - L_d)}{J} i_d i_q - \frac{f}{J} \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix} \quad (3.23)$$



#### 4. DOĞRUSAL OLMAYAN SİSTEMLER VE KAOS

Kendilerini dünyanın her yerinde gösteren karmaşık fenomenleri araştırırken, davranışları doğrusal ilişkilerle basitçe tanımlanamayan sistemlerle sık sık karşılaşmıştır. Bu lineer olmayan sistemler, doğası gereği dinamik ve birbirine bağlı doğaları gereği, beklenmedi ve büyüleyici davranışlar zenginliği üretir. Bu davranışlar arasında kaos, çağdaş bilimin en büyüleyici ve gizemli yönlerinden biri olarak çıkıyor.

Bu bölümde, doğrusal olmayan sistemleri incelemiştir ve kausun birçok yönünü keşfedilmiştir. Doğrusal olmayan sistemlerin resmi bir tanımıyla başlayacaktır ve onların iyi anlaşılmiş doğrusal sistemlerden temel farklarını vurgulayacaktır. Ardından, başlangıç koşullarına duyarlı davranışları ve kaos yaratma eğilimleri nedeniyle doğrusal olmayan sistemleri analiz etmenin ve tahmin etmenin genellikle neden bu kadar zor olduğunun nedenlerini inceleyecektir.

Kaos, bilimsel anlamıyla kaotik ve düzensiz bir kavram olmaktan uzaktır. Aksine, kesin yasalar tarafından yönetilen, ancak görünüşte rastgele ve öngörülemeyen özellikler sunan deterministik davranışlara atıfta bulunur. Kaosun ortaya çıkması için gerekli koşulları, doğrusal olmayan dinamik sistemlere ve başlangıç koşullarına duyarlılık, garip çekiciler ve kaotik yineleme gibi olgulara vurgu yaparak inceleyecektir.

Keşfettikçe, fizikten biyolojiye, ekonomiden ekolojiye kadar pek çok bilim alanında doğrusal olmayan sistemlerin ve kausun nasıl var olduğunu keşfedilecektir. Kaos ve karmaşıklığın temel ilkelerini gösteren Lorenz çekicisi, Hénon çekicisi, Rösler çekicisi gibi somut örnekleri inceleneyecektir.

Son olarak, özellikle güvenli iletişim, kalp ve beyindeki kaosla ilgili olarak, kausun farklı alanlardaki sonuçlarını ve pratik uygulamalarını tartışılacaktır. Kaos, çevremizdeki dünya anlayışımızı yeniden düşünmek için heyecan verici entelektüel zorluklar ve fırsatlar sunar.

## 4.2. Tanımlar

- Doğrusal olmayan dinamik sistem

Doğrusal olmayan bir dinamik sistem, zaman içindeki evrimi basit doğrusal denklemlerle temsil edilemeyen bir sistemdir. Bir bozulmanın etkisinin, bozukluğun kendisi ile doğru orantılı olduğu doğrusal sistemlerin aksine, doğrusal olmayan sistemler girdi ve çıktı değişkenleri arasında karmaşık ve genellikle orantısız ilişkiler sergiler. Doğrusal olmayan dinamik sistemler, fizik, mühendislik, biyoloji, ekonomi ve meteoroloji gibi birçok bilimsel alanda mevcuttur. Örneğin, güneş sistemindeki gezegenlerin hareketi, sıvıların davranışı, sarkaçların salınımları, sinir ağları, ekosistemler ve ekonomik süreçlerin tümü doğrusal olmayan dinamik sistemlere örnektir.

Doğrusal olmayan sistemlerin temel özelliklerinden biri, başlangıç koşullarına duyarlı olmalarıdır. Başlangıç koşullarındaki küçük değişiklikler, sistemin uzun vadeli evriminde önemli farklılıklara yol açabilir. Bu, sistemi tanımlayan denklemlerin deterministik olmasına rağmen, sonuçların rastgele ve öngörülemez görünebileceği anlamına gelir. Bu özellik, küçük bozulmaların uzun vadeli büyük sonuçlara yol açabileceği kelebek etkisi olarak bilinir. Doğrusal olmayan dinamik sistemlerde gözlenen bir başka büyüleyici olgu da tuhaf çekicilerin varlığıdır. Lineer sistemlerin basit ve periyodik çekicilerinden farklı olarak, garip çekiciler, sistemin karmaşık bir şekilde yakınsadığı değer kümeleridir. Bu çekiciler fraktal yapılara sahip olabilir, yani farklı ölçeklerde benzer modeller sergilerler. Garip çekiciler genellikle kaos kavramıyla ilişkilendirilir. Doğrusal olmayan sistemlerin karakteristik davranışlarından biri olan kaos, başlangıç koşullarına karşı aşırı duyarlılığı, garip çekicilerin varlığını ve düzensiz ve düzensiz görünen yörüngeleri ifade eder. Bununla birlikte, rastgele görünümüne rağmen, kaos deterministiktir, bu da sistemin kesin ve tekrarlanabilir kanunları takip ettiği anlamına gelir.

Doğrusal olmayan dinamik sistemleri ve kaosu anlamak, birçok bilimsel ve uygulamalı alanda büyük önem taşımaktadır. Bu, karmaşık fenomenleri modellemeyi ve tahmin etmeyi, sistemlerin kararlılığını keşfetmeyi, kontrolleri ve düzenlemeleri tasarlamayı ve doğada gözlemlenen karmaşıklığın altında yatan mekanizmaları anlamayı mümkün kılar.

- Otonom sistem

Otonom bir dinamik sistem, zaman içinde özerk bir şekilde, yani sürekli dış müdahale olmadan gelişen matematiksel veya fiziksel bir sistemi ifade eder. Genellikle sistem değişkenlerinin evrimini zamanın bir fonksiyonu olarak tanımlayan bir dizi diferansiyel denklemlerle tanımlanır.

Dinamik bir sistemin özerkliği, sürekli dış müdahaleye ihtiyaç duymadan kararlı veya periyodik davranışı sürdürebilmesi anlamına gelir. Başlangıç koşulları belirlendikten sonra, sistem buradan tahmin edilebilir şekilde ve otonom olarak gelişebilir.

Otonom dinamik sistemin basit bir örneği, basit sarkaçtır. Sarkacın evrimi, sarkacın uzunluğuna, kütesine, ilk genliğine ve yerçekimine bağlı olan bir diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Sarkaç, belirli bir başlangıç genliği ile harekete geçirildiğinde, sürekli dış müdahale olmaksızın otonom olarak salınır.

Otonom dinamik sistemler, matematik, fizik ve mühendislik alanlarında özellikle ilgi çekicidir, çünkü dış etki olmadan doğal olarak meydana gelen olayları modellemeyi ve incelemeyi mümkün kılarlar. Ayrıca ekonomi, biyoloji, ekoloji ve daha pek çok alanda karmaşık davranışları ve dinamik kalıpları anlamak için kullanılırlar.

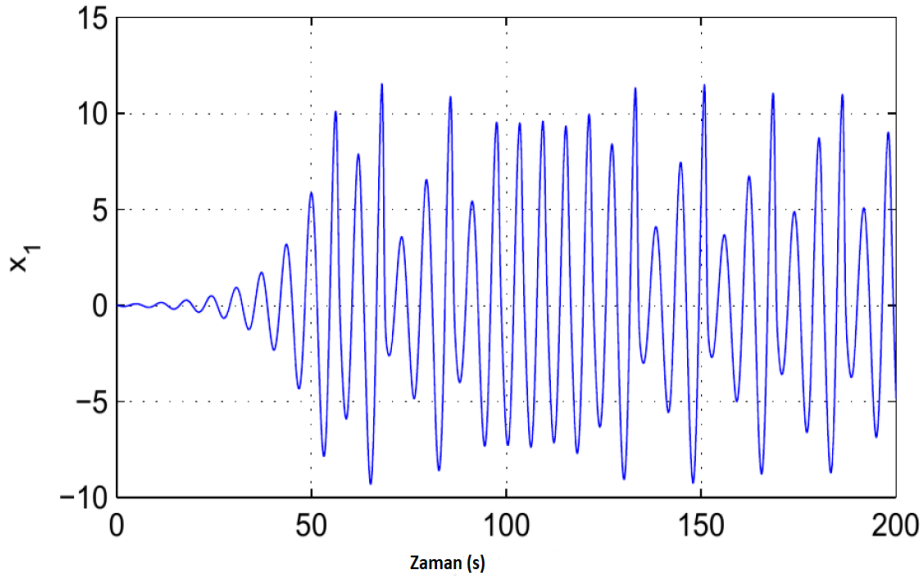
- Kaotik davranış

Doğrusal olmayan bir sistem söz konusu olduğunda, kararlı durum davranışı, periyodik veya yarı periyodik salınımlar gibi tipik davranışlardan çok daha karmaşık olabilir. Önemli bir özellik, sistemin çıktısının başlangıç koşullarına aşırı derecede duyarlı hale gelmesidir, bu da çıktının uzun vadeli tahminini neredeyse imkansız hale getirir. Bu aşamada sistem kaotik davranış olarak tanımlanabilir [21-23].

Aşağıdaki Rössler denklemi tarafından verilen kaotik model, bu tür sistemlerin kaotik karakterini göstermektedir:

$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z \\ \dot{y} = x + ay \\ \dot{z} = b + z(x - c) \end{cases}$$

$(x_1, x_2, x_3)$  durum vektörü ve  $a, b$  ve  $c$  sistem parametreleri ile. Rössler'in sistemi,  $x_1(0) = 0.01, x_2(0) = 0.01$  ve  $x_3(0) = 0.01$  başlangıç koşullarıyla  $a = 0.2, b = 5.7, c = 0.2$  için kaotik davranış gösterir.



**Şekil 4.1.** Rössler sisteminin kaotik durumu.

### 4.3. Kaos

Kaos, bilim ve matematikte temel bir kavramdır ve aşırı düzensizlik, öngörülebilirlik ve anlamın yokluğu anlamına gelir. Bilimsel bir bağlamda, kaos genellikle kaos teorisi çerçevesinde incelenir.

Matematikte kaos, kaotik davranışlar sergileyen doğrusal olmayan dinamik sistemlerle ilişkilendirilir. Bu sistemler, başlangıç koşullarına duyarlılıkları ile karakterize edilir; bu, küçük başlangıç varyasyonlarının uzun vadeli sonuçlarda ciddi farklılıklara yol açabileceği anlamına gelir. Bu, bu sistemlerin uzun vadeli tahminini imkansız değilse bile son derece zorlaştırır.

Kaotik davranışın klasik bir örneği, genellikle meteoroloji bağlamında atıfta bulunulan "kelebek etkisi" adı verilen dinamik sistemdir. Kaos teorisine göre, bir kelebeğin dünyanın herhangi bir yerinde kanat çırpması, teorik olarak uzun vadede dünyanın diğer ucunda bir fırtınaya neden olabilecek bir dizi olayı tetikleyebilir. Bu, başlangıç koşullarına duyarlılığı ve kaotik bir sistemin davranışını doğru bir şekilde tahmin etmenin zorluğunu göstermektedir.

Kaotik davranışın fizik, matematik, ekonomi, biyoloji, mühendislik ve daha pek çok alanda uygulamaları vardır. Kaotik sistemleri anlamak ve modellemek, davranışları ilk bakışta karmaşık görünse de karmaşık sistemleri analiz etmek ve kontrol etmek için yararlı olabilir.

- Doğrusal olmama

Kaotik sistemlerin doğrusal olmaması, davranışlarının temel bir özelliğidir. Girdi etkilerinin çıktı etkileriyle orantılı olduğu doğrusal sistemlerin aksine, kaotik sistemler doğrusal olmayan denklemlere dayanır. Doğrusal olmama, sistemdeki değişkenler arasındaki ilişkilerin basit doğrusal fonksiyonlar olmadığı anlamına gelir. Kaotik bir sistemin davranışını tanımlayan denklemler, çarpımlar, kuvvetler veya doğrusal olmayan trigonometrik fonksiyonlar gibi doğrusal olmayan terimler içerir. Kaotik sistemlerin karmaşıklığından ve öngörülemezliğinden doğrusal olmama sorumludur. Koşullardaki küçük başlangıç değişiklikleri bile, sistem değişkenleri arasındaki doğrusal olmayan etkileşimler nedeniyle uzun vadeli sonuçlarda önemli farklılıklara yol açabilir. Bu, kaosun temel bir yönü olan başlangıç koşullarına duyarlılık olarak bilinir.

Doğrusal olmama, kaotik sistemlerde karmaşık yapıların ve fraktal modellerin ortaya çıkmasına da izin verir. Yinelenen ancak periyodik modeller olmayan garip çekiciler, bu tür doğrusal olmayan yapılara bir örnektir. Fraktal şekillere sahip olabilirler, yani farklı ölçeklerde kendilerine benzerlik gösterirler. Kaotik sistemlerin doğrusal olmaması, analizlerini ve modellemelerini özellikle zorlaştırır. Doğrusallığa dayalı geleneksel matematiksel teknikler uygulanabilir değildir ve bu sistemleri anlamak ve incelemek için kaos teorisi ve gelişmiş sayısal yöntemler gibi özel yaklaşımlara ihtiyaç vardır.

- Determinizm

Kaos determinizmi, ilk bakışta gelişigüzel ve öngörülemez görünmelerine rağmen, kaotik sistemlerin deterministik karakterini öne çıkaran bir kavramdır. Kaotik sistemler, başlangıç koşullarına duyarlı karmaşık davranışlar sergilemelerine rağmen, deterministik denklemler tarafından yönetilirler.

Bu, eğer kaotik bir sistemin başlangıç koşulları sonsuz hassasiyetle bilinirse, sistemin gelecekteki durumlarının tam olarak hesaplanabileceği anlamına gelir. Bununla birlikte, pratikte, başlangıç koşullarını sonsuz hassasiyetle bilmek son derece zordur, bu da uzun vadeli öngörülemezliğe yol açar.

Kaos determinizmi, kaotik davranışın bir dizi deterministik kural veya denklemden ortaya çıktığını belirtir. Kaotik sistemler, başlangıç koşullarına duyarlılıkları ile karakterize edilir, bu da başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin gelecekteki

sonuçlarda önemli farklılıklara yol açabileceği anlamına gelir. Bu, sistemin uzun vadeli tahminini belirli bir zaman ölçeğinin ötesinde imkansız hale getirir.

- Rastgele görünüm

Kaosun rastgeleliği genellikle bir kafa karışıklığı kaynağıdır. Kaotik sistemler deterministik olmalarına rağmen, başlangıç koşullarına duyarlı olmaları nedeniyle davranışları rastgele görünebilir. Bu, başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin, çok farklı uzun vadeli sonuçlara yol açabileceği ve doğru tahmini imkansız hale getirebileceği anlamına gelir.

Kaosun rastgeleliği, sistem değişkenleri arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlerin karmaşıklığından kaynaklanır. Sistemi yöneten denklemler tam olarak bilinse bile, başlangıç koşullarındaki küçük belirsizlikler yayılabilir ve farklı yörüngelere yol açabilir.

Kaotik bir sistemin davranışını gözlemlediğimizde, öngörülemez ve düzensiz görünebilir. Yörüngeler karmaşık modeller, çatalanmalar, istikrar dönemleri ve ardından kaos dönemleri vb. gösterebilir. Ancak bu davranışlar, temeldeki sistem denklemleri tarafından belirlenir ve gerçekten rastgele değildir.

Kaosun saf şans veya rastgelelikle aynı şey olmadığına dikkat etmek önemlidir. Kaosta yörüngeler rastgele görünebilir, ancak aslında sistemin denklemleri tarafından belirlenirler. Bu nedenle, kaotik bir sistemin uzun vadeli davranışını, başlangıç koşullarına duyarlılığı nedeniyle doğru bir şekilde tahmin edemesek de, rastgele olmaktan çok deterministik bir karaktere sahiptir.

- Başlangıç koşullarına duyarlılık

Başlangıç koşullarına duyarlılık, kaotik sistemlerin temel bir özelliğidir. Bu, kaotik bir sistemin başlangıç koşullarındaki küçük varyasyonların veya hataların, uzun vadeli sonuçlarda önemli farklılıklara neden olabileceği anlamına gelir.

Kaotik bir sistemin davranışını gözlemlediğimizde, başlangıç koşullarındaki çok küçük farklılıklar bile tamamen farklı yörüngelere yol açabilir. Bunun nedeni, sistem değişkenleri arasındaki doğrusal olmayan etkileşimlerin bu ilk varyasyonları zaman içinde büyütmesidir. Böylece yörüngeler birbirinden uzaklaşır ve nihai sonuçlar, başlangıç koşullarına bağlı olarak çok farklı olabilir.

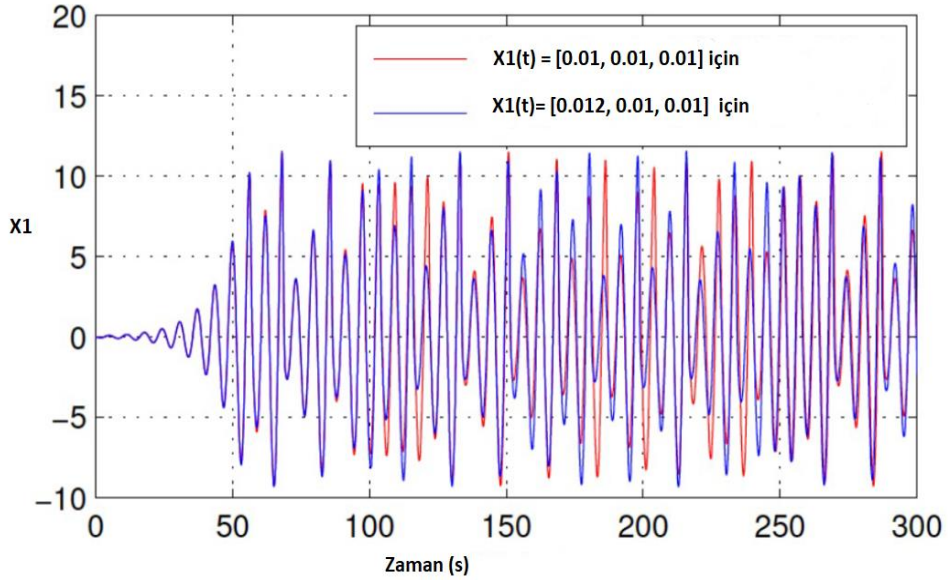
Başlangıç koşullarına olan bu duyarlılığın öngörülebilirlik açısından derin etkileri vardır. Sistemi yöneten deterministik denklemleri biliniyor olsa da, başlangıç



koşullarını kesin olarak bilmedeki hatalar veya belirsizlikler, sistemin uzun vadede gelecekteki davranışını doğru bir şekilde tahmin etme yeteneğini sınırlar.

Başlangıç koşullarına olan bu hassasiyet, kaosu genellikle uzun vadede öngörülemez olarak görülmesinin nedenlerinden biridir. Küçük bir ölçüm hatası veya başlangıç koşulları hakkında eksik bilgi bile tamamen farklı sonuçlara yol açabilir.

Başlangıç koşullarına duyarlılığın, sistemin tamamen öngörülemez olduğu anlamına gelmediğini not etmek önemlidir. Kısa süreler için, sistemin davranışını bir miktar doğrulukla tahmin etmek mümkün olabilir. Bununla birlikte, zaman geçtikçe, ilk hatalar ve varyasyonlar birikir ve uzun vadeli tahminleri imkansız değilse bile zorlaştırır.



Şekil 4.2.  $x_1$  durumunda başlangıç koşullarına duyarlılık özelliğinin gösterimi.

#### 4.3.1. Lyapunov üstelleri

Lyapunov üstelleri, özellikle kaotik sistemler olmak üzere dinamik sistemlerde başlangıç koşullarına duyarlılığı ölçmek için kullanılan matematiksel niceliklerdir. Yörüngelerin biraz farklı başlangıç koşullarından uzaklaşması veya yakınsaması hakkında bilgi sağlarlar.

Spesifik olarak, Lyapunov üstelleri, bir sistemin yörüngelerinin faz uzayında birbirinden ayrılma oranını ölçer. Faz uzayında her yön için tanımlanırlar ve pozitif, sıfır veya negatif olabilirler.

Pozitif bir Lyapunov üsteli, komşu yörüngelerin üstel bir ayrışmasını gösterir. Bu, başlangıçtaki küçük varyasyonların hızla yayıldığı ve zaman ilerledikçe önemli

farklılıklara yol açtığı anlamına gelir. Öte yandan negatif bir Lyapunov üssü, yörüngelerin yakınsamasını gösterir, bu da komşu yörüngelerin zaman geçtikçe birbirine yaklaştığı anlamına gelir.

Genel olarak, kaotik sistemler, başlangıç koşullarına duyarlılıklarını ve kaotik davranışlarını gösteren en azından pozitif bir Lyapunov üssü sergiler. Faz uzayında farklı yönlerde hassasiyeti ölçmek için birkaç Lyapunov üssü hesaplanabilir.

Lyapunov üstelleri, sistem yörüngelerinin türevleri kullanılarak hesaplanır ve genellikle sayısal olarak tahmin edilir. Başlangıç koşullarına duyarlılık hakkında nicel bilgi sağlarlar ve bir sistemin kaotik özelliklerini karakterize etmek ve incelemek için kullanılabilirler.

#### **4.3.2. Poincare haritası**

Poincare haritası olarak da adlandırılan Poincare kesitlemesi, dinamik sistemleri, özellikle kaotik sistemleri incelemek için kullanılan bir tekniktir. Yörüngelerini daha düşük boyutlardaki bir alt uzaya yansıtarak bir sistemin evrimini grafiksel olarak temsil etmeyi mümkün kılar.

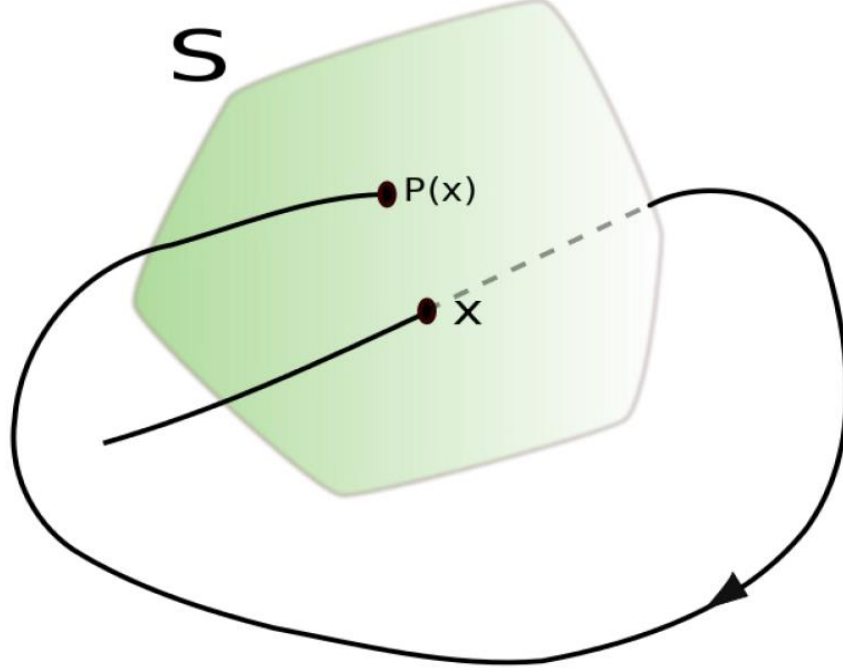
Bir Poincare haritasının inşası, sistemin faz uzayında bir düzlem (veya bir yüzey) seçmeyi içerir. Bu plan, evriminde belirli zamanlarda sistemin durumunu yakalayan bir "anlık görüntü" görevi görür. Bu düzlemi sistemin yörüngelerinin bir kesiti olarak düşünebiliriz.

Sistemin yörüngeleri Poincare haritasının düzlemini geçtiğinde kesişme noktalarının koordinatları kaydedilir. Bu noktalar, sistemin bu belirli anlardaki belirli durumlarını temsil eder. Bu kesişme noktalarını kronolojik sırada birleştirerek, sistemin yörüngelerinin ayrı bir temsili elde edilir.

Poincare haritası, boyutsallıklarını azaltarak dinamik sistemlerin analizini basitleştirmeyi mümkün kılar. Sistemin yapılarını, kalıplarını ve ortaya çıkan davranışlarını daha anlaşılır bir şekilde görselleştirmeye yardımcı olur. Bu, yörüngelerin karmaşık olabileceği ve tam haliyle kavranmasının zor olabileceği kaotik sistemler durumunda özellikle yararlıdır.

Poincare haritasının analizi, sistemin, tekrarlayan ancak periyodik olmayan modeller olan periyodik yörüngeler, sabit noktalar veya garip çekiciler gibi önemli özelliklerini

ortaya çıkarabilir. Ayrıca, sistem parametreleri değiştiğinde çatalanmaların, davranış geçişlerinin saptanmasına da yardımcı olabilir.



**Şekil 4.3.** Poincare kesiti S'de  $P(x)$  üzerindeki  $x$  noktasının Poincare haritasıyla projeksiyonu.

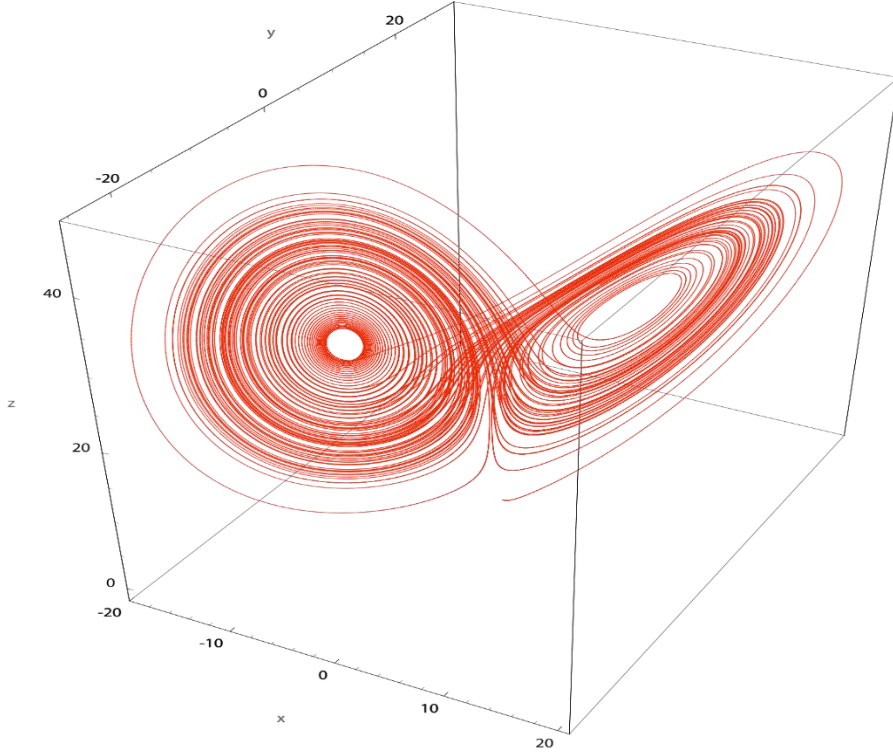
#### 4.3.3. Çekici kavramı

Çekici kavramı, dinamik sistemlerin incelenmesinde merkezi bir kavramdır. Bir çekici, bir sistemin yörüngelerinin uzun vadede birleştiği bir dizi değer veya noktadır. Bu nedenle, sistemin gelişme eğiliminde olduğu bir denge veya kararlılık durumunu temsil eder.

İncelenen sistemin özelliklerine bağlı olarak farklı çekici türleri vardır:

- **Nokta çekici:** Bu, yörüngelerin yakınsadığı bir nokta veya sonlu bir noktalar kümesidir. Bu, sistemde değerlerin sabit kaldığı sabit bir noktaya veya sistemin periyodik olarak birkaç durum arasında salındığı bir limit döngüsüne karşılık gelebilir.
- **Periyodik çekici:** Yörüngelerin tekrar tekrar döndüğü periyodik bir modeli temsil eder. Yörüngeler, boyut olarak bir nokta noktasından daha yüksek olabilen kapalı bir yörüngede olabilir.

- Garip çekici: Bu tür çekici, fraktal bir yapı ve başlangıç koşullarına duyarlılık ile karakterize edilir. Garip bir çekicideki yörüngeler periyodik değildir, ancak farklı ölçeklerde kendine benzerlik gösterir. Garip çekiciler genellikle kaos ve kaotik sistemlerle ilişkilendirilir.



**Şekil 4.4.** Garip bir çekicinin görsel temsili.

Dinamik bir sistemde bir çekicinin varlığı, kararlı veya tekrar eden davranışları yansıttığı için önemlidir. Çekiciler, sistemin yörüngeleri uygun bir projeksiyon üzerinde çizilerek faz uzayında grafiksel olarak görselleştirilebilir.

Bir sistemde, yörüngelerin birleştiği farklı bölgeleri veya durumları temsil eden birden fazla çekiciye sahip olmak da mümkündür. Birden fazla çekicinin varlığı, sistemin başlangıç koşullarına veya sistem parametrelerine bağlı olarak farklı kararlı durumlara dönüşebileceği çok kararlılık fenomenine yol açabilir.

#### **4.3.3.1. Lorenz çekicisi**

Lorenz çekicisi, garip ve kaotik bir çekicinin klasik bir örneğidir. Basitleştirilmiş iklim modelleri üzerine yaptığı araştırma sırasında 1960'larda matematikçi ve meteorolog Edward Lorenz tarafından keşfedildi.

Lorenz sistemi, bir dizi doğrusal olmayan adi diferansiyel denkleme dayanmaktadır. Üç ana değişkenle basitleştirilmiş bir atmosferik taşınım modelini açıklar:  $x$ ,  $y$  ve  $z$ . Lorenz denklemleri [24]:

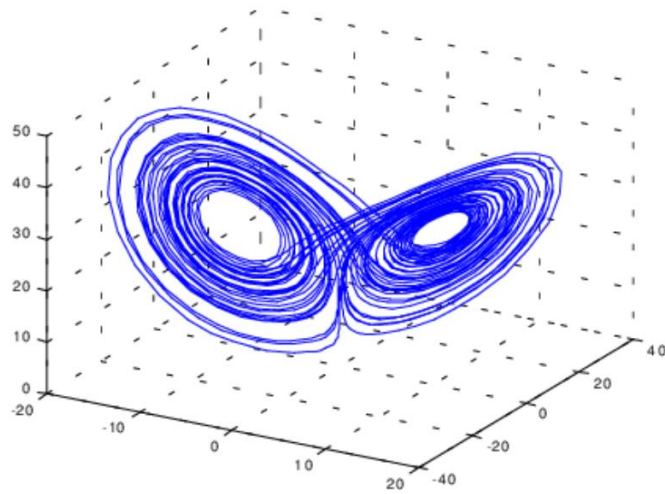
$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) \\ \dot{y} = x(b - z) - y \\ \dot{z} = xy - cz \end{cases}$$

Burada  $\sigma$ ,  $\rho$  ve  $\beta$  sistem parametreleridir.

Bu sistem, parametrelerin belirli değerleri için başlangıç koşullarına kaotik ve hassas davranışlar sergiler.  $\sigma$ ,  $\rho$  ve  $\beta$  değerleri belirli değerlere ayarlandığında ( $\sigma = 10$ ,  $\rho = 28$  ve  $\beta = 8/3$  yaygın olarak kullanılır), sistemin yörüngeleri kaotik bir şekilde uzaklaşır ve garip bir çekici oluşturur.

Lorenz çekicisi üç boyutludur ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Dönen desenler ve başlangıç koşullarına duyarlılık ile karakterizedir. Yörüngeler düzensiz görünür, ancak faz uzayının sınırlı bir bölgesiyle sınırlı kalırlar, böylece fraktal bir yapı oluştururlar. Lorenz çekicisi genellikle grafiksel olarak üç boyutlu bir diyagram veya "Lorenz'in Poincaré bölümü" adı verilen iki boyutlu bir izdüşüm olarak temsil edilir.

Lorenz çekicisi, görsel güzelliği ve deterministik kaos kavramını tasvir etmesi nedeniyle ikonik hale geldi. Ayrıca kaos teorisi, meteoroloji, akışkanlar dinamiği ve matematiksel modelleme dahil olmak üzere birçok bilimsel alanda önemli etkileri olmuştur.



Şekil 4.5. Lorenz çekici.

#### 4.3.3.2. Hénon çekici

Hénon çekicisi, garip ve kaotik çekicinin bir başka ünlü örneğidir. Matematikçiler Michel Hénon ve Carlos Heiles tarafından 1964 yılında galaksilerin dinamikleri üzerine çalışmaları sırasında tanıtıldı.

Hénon sistemi, genellikle aşağıdaki biçimde gösterilen iki ayrı tekrarlayan denklemlerle tanımlanır [25]:

$$\begin{cases} x_{n+1} = y_n + 1 - ax_n^2 \\ y_{n+1} = bx_n \end{cases}$$

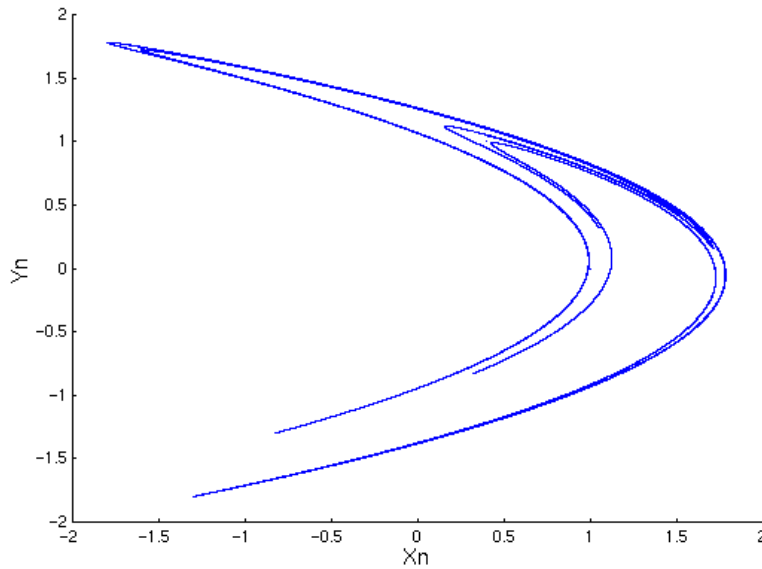
Burada  $x$  ve  $y$  sistem değişkenleridir ve  $a$  ve  $b$  parametrelerdir.

Hénon sistemi genellikle  $a = 1.4$  ve  $b = 0.3$  parametrelerinin değerleriyle incelenir. Bu konfigürasyonda sistem, karmaşık yörüngelere sahip kaotik bir çekici oluşturur.

Hénon çekicisi iki boyutludur ve fraktal bir yapı sergiler. Dönen desenler ve başlangıç koşullarına duyarlılık ile karakterizedir. Çekici üzerindeki yörüngeler, spiral şekiller ve yinelenen yapılarla görsel olarak çekici olabilir.

Hénon çekicisi genellikle yörüngeleri iki boyutlu bir düzleme yansıtılarak grafiksel olarak temsil edilir. Ardışık  $x$  ve  $y$  değerlerinin çizildiği bir faz diyagramı veya çekicinin kendisinin iki boyutlu bir izdüşümü olarak görüntülenebilir.

Hénon çekicisi, ayrık kaotik dinamiklerin ilginç bir örneğidir ve kaos teorisi, doğrusal olmayan dinamikler ve dinamik sistemler gibi birçok bilimsel alanda incelenmiştir. Ayrıca, örneğin şifreleme ve rasgele sayı üretimi alanında pratik uygulamaları vardır.



Şekil 4.6. Hénon çekici.

#### 4.3.3.3. Rössler çekicisi

Garip ve kaotik bir çekicinin bir başka ikonik örneği, Rössler çekicisidir. Alman matematikçi ve fizikçi Otto Rössler tarafından 1976 yılında doğrusal olmayan dinamik sistemlerin modellenmesi üzerine yaptığı araştırma sırasında keşfedildi.

Rössler sistemi, bir dizi sıradan diferansiyel denklemlerle tanımlanır. Rössler denklemleri [26]:

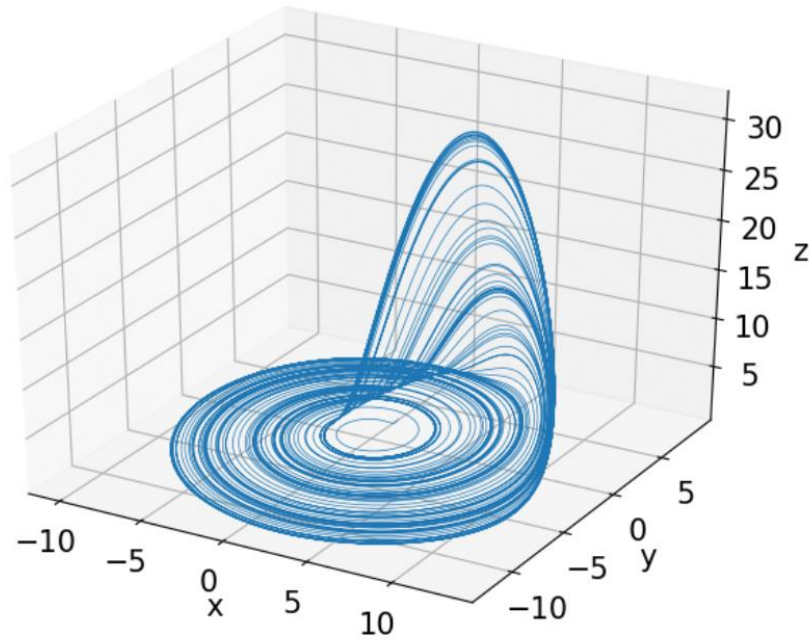
$$\begin{cases} \dot{x} = -y - z \\ \dot{y} = x + ay \\ \dot{z} = b + z(x - c) \end{cases}$$

Burada x, y ve z sistem değişkenleridir ve a, b ve c parametrelerdir.

Rössler çekicisini incelemek için kullanılan parametrelerin tipik değerleri a = 0.2, b=0.2 ve c = 5.7'dir. Bu değerler, kaotik bir çekici oluşturmayı mümkün kılar.

Rössler çekicisi üç boyutludur ve karmaşık bir yapıya sahiptir. Faz uzayının farklı bölgelerini keşfeden kaotik yörüngelerle karakterize edilir. Çekici üzerindeki yörüngeler, görsel olarak spiral şekiller ve yinelenen desenler olabilir.

Rössler çekicisi, kaos teorisi ve sistem dinamiklerinde geniş çapta incelenir. Osilatör modelleme, kaotik senkronizasyon, kriptografi ve diğer karmaşık dinamik sistemler gibi çeşitli alanlarda uygulamaları vardır.



Şekil 4.7. Rössler çekicisi.

#### 4.3.4. Çatallanma

Çatallanma, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin incelenmesinde, özellikle bunların kaosa geçişlerinde anahtar bir kavramdır. Bir sistem, parametrelerdeki bir değişikliğe yanıt olarak niteliksel davranışı değiştirdiğinde çatallanma meydana gelir. Bir sistemin parametreleri kademeli olarak değiştirildiğinde, sistem çeşitli çatallanmalardan geçebilir. Her çatallanmada, sonunda kaotik davranışlara yol açabilen yeni davranışlar ortaya çıkar. Kaosa giden yol, bir sistemde kaosun ortaya çıkmasına yol açan bir çatallanma dizisidir. Bu rota, sistemin kararlı veya periyodik durumlarının parametrelerin değişimiyle nasıl geliştiğini gösteren çatallanma diyagramları aracılığıyla gösterilebilir.

Parametreler belirli kritik değerlere ulaştıkça, sistem Hopf çatallanması, dirgen çatallanması, teğet çatallanması vb. gibi çatallanmalardan geçebilir. Bu çatallanmalar, sınır döngülerinin, çift periyodik yörüngelerin, çoklu sabit noktaların ve diğer karmaşık dinamik davranışların oluşmasına yol açabilir.

1977'de Grosmann ve Thomae, Hopf çatallanması ve onun kaosa geçişteki rolü konusunda öncü çalışmalar yaptı. Bir Hopf çatallanmasının, dinamik sistemlerde garip ve kaotik bir çekicinin ortaya çıkmasına nasıl yol açabileceğini gösterdiler.

1978'de Feigenbaum, doğrusal olmayan dinamik sistemlerde çatallanmalar üzerine kapsamlı araştırmalar yaptı. Feigenbaum sabiti olarak adlandırılan, kaosa doğru giden sistemlerdeki çatallanmaların davranışını tanımlayan evrensel ve son derece doğru bir ilişki keşfetti.

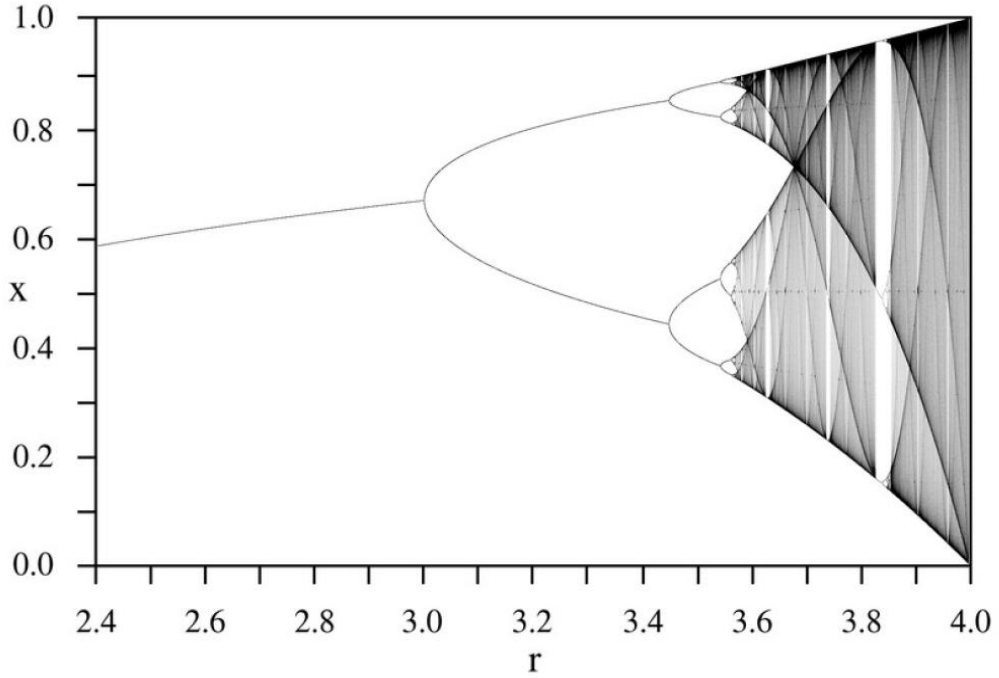
Ayrıca 1978'de Coullett ve Tresser, çoklu çatallanmalarda kaosa geçiş üzerine çalışmalar yürüttüler. Teğet çatallanmaların nasıl sonsuz sayıda iki katına çıkmış dönemlere ve kaotik rejimlere yol açabileceğini gösterdiler.

Bu araştırmacılar, çatallanmalar ve kaosa giden yol hakkındaki anlayışımızı derinleştirmemize katkıda bulundular. Çalışmaları, kaotik geçişlerde düzenlilikleri ve evrensel kalıpları tanımlayarak, kaos teorisi ve sistem dinamikleri alanında büyük ilerlemelere yol açtı.

Kaosa Giden Yol, parametrelerdeki veya başlangıç koşullarındaki küçük değişikliklerin sistem davranışında nasıl dramatik değişikliklere yol açabileceğini vurgular. Bu, doğrusal olmayan dinamik sistemlerin doğal karmaşıklığını ve



sergileyebilecekleri davranışların zenginliğini göstermektedir. Çatallanmaların ve kaosa giden yolun incelenmesi, dinamik sistemlerde düzenli ve kaotik davranışlar arasındaki geçişleri anlamak için çok önemlidir. Bu, küçük bozulmaların dinamiklerde ve gözlemlenen fenomenlerde nasıl ciddi değişikliklere yol açabileceğini anlamamızı sağlar.



Şekil 4.8. kaosa çatallanma.

#### 4.4. Kaosun Var Olduğu Yerler

Lorenz'in çalışmasından sonra, kaos ve kontrolü endüksiyon motorlarında [27], DC motorlarda ve sürücülerde [28, 29], kademeli motorlarda [30, 31], senkron relüktans motorlarda [32], anahtarlamalı relüktans motorlarda [33] ve mıknatıs senkron motorlar [34-37] gibi çok sayıda çalışma, birden çok kaos kaynağının varlığını doğruladı. Günümüzde pek çok araştırma, daha önce tanımlanmış kaos kaynaklarından yararlanmanın yanı sıra, hala keşfedilmemiş ve ustalaşmamış yeni kaynakları keşfetmeye odaklanmaktadır. Bu araştırma, kaos anlayışımızı derinleştirmeyi ve çeşitli alanlarda yeni potansiyel uygulamalar bulmayı amaçlamaktadır. Kaosun incelenmesi büyük ilgi uyandırmaya devam ediyor ve yeni keşifler ve uygulamalar için umut verici bakış açıları açıyor.

Mekanik sistemler veya fiziksel sistemler gibi inert sistemlerdeki kaos, sistemin farklı bileşenleri arasındaki karmaşık etkileşimden kaynaklanan kaotik davranışların varlığını ifade eder. İntert sistemler, sistem durumu değişkenlerinin zaman içindeki gelişimini tanımlayan diferansiyel denklemlerle karakterize edilir. Bazı durumlarda bu denklemler, başlangıç koşullarındaki veya sistem parametrelerindeki küçük değişikliklerin tamamen farklı yörüngelere yol açtığı kaotik çözümlere yol açabilir. İntert sistemlerdeki kaos, periyodik olmayan salınımlar, karmaşık yörüngeler ve istikrarsız dinamik rejimler dahil olmak üzere farklı şekillerde ortaya çıkabilir. Bu kaotik davranışların, örneğin, türbülanslı olaylardan ve karmaşık yapıların oluşumundan kaosun sorumlu olabileceği akışkanlar dinamiği alanında önemli sonuçları olabilir.

#### **4.4.1. Canlı sistemlerde kaos**

Canlı sistemlerde kaos, biyolojik süreçlerde ve karmaşık canlı sistemlerde gözlenen kaotik davranışların varlığını ifade eder. İntert sistemlerin aksine, canlı sistemler kaotik dinamiklerini etkileyen benzersiz özellikler sergiler. Canlı sistemler, karmaşıklıkları, doğrusal olmamaları ve çevre ile etkileşimleri ile karakterize edilir. Hücreler, organlar, organizmalar veya ekosistemler gibi canlı bir sistemin farklı bileşenleri arasındaki etkileşimler kaotik davranışlara yol açabilir. Canlı sistemlerdeki kaos, hücrel dinamiklerden fizyolojik süreçlere ve bir popülasyon içindeki bireyler arasındaki etkileşimlere kadar farklı düzeylerde gözlemlenebilir. Örneğin, biyolojik sistemler üzerine yapılan araştırmalar, kalp atışı, hormonal düzenleme, nüfus artışı ve türler arasındaki rekabet modellerinde kaotik davranışlar göstermiştir.

Canlı sistemlerde kaotik davranışın önemli sonuçları olabilir. Canlı organizmalarda görülen değişkenlik ve çeşitliliğe katkıda bulunarak değişen ortamlara uyum sağlamalarını sağlayabilir. Kaos, örneğin hücrel salınımların senkronizasyonunu veya farklı fizyolojik durumlar arasındaki geçişleri etkilemek gibi biyolojik süreçlerin düzenlenmesinde de rol oynayabilir. Canlı sistemlerde kaosun incelenmesi, yaşam bilimleri ve teorik biyolojide aktif bir araştırma alanıdır. Biyolojik bileşenler arasındaki karmaşık etkileşimlerin nasıl kaotik davranışlar oluşturabileceğini anlamayı ve canlı sistemlerde kaosun işlevsel ve evrimsel sonuçlarını incelemeyi amaçlar.

#### **4.4.1.1. Kalpte kaos**

Kalpdeki kaos, kalp kasının elektriksel aktivitesinde kaotik davranışların varlığını ifade eder. Kalp, doğrusal olmayan dinamikler sergileyen ve kaotik davranışlar sergileyebilen karmaşık bir biyolojik sistemdir. Normal kalp atışı genellikle düzenli ve periyodiktir, ancak belirli koşullar altında kaotik davranışlar ortaya çıkabilir. Bu, örneğin atriyal veya ventriküler fibrilasyon gibi kalp ritmi bozukluklarının varlığında meydana gelebilir. Bu kaotik durumlarda, kalbin elektriksel aktivitesi düzensizleşir ve tahmin edilmesi güçleşir. Kalp hücrelerinin kasılmasını düzenleyen elektrik sinyalleri, karmaşık ve öngörülemeyen salınımlar sergileyerek kalp atışlarının koordinasyonunun bozulmasına neden olabilir.

Kalpdeki kaosun önemli klinik sonuçları olabilir. Kaotik kalp aritmileri, zayıf kan akışına, azalan kalp pompası etkinliğine ve inme veya miyokard enfarktüsü gibi potansiyel olarak ciddi komplikasyon riskinde artışa neden olabilir. Kalpdeki kaosun tespiti ve anlaşılması bu nedenle kardiyak aritmilerin tanı ve tedavisi için esastır. Kalbin elektriksel kayıtlarındaki kaos belirtilerini belirlemek için zaman serisi yöntemleri veya fraktal teknikler gibi sinyal analiz yöntemleri kullanılabilir.

Kardiyak kaosun incelenmesi, kardiyak aritmilerin altında yatan mekanizmaları anlamamıza ve yeni tedavi stratejileri geliştirmemize katkıda bulunur. Kalbin kaotik davranışlarını benzetmek ve incelemek için matematiksel modelleme yaklaşımları da kullanılır ve ilgili karmaşık dinamiklere ilişkin içgörüler sunar.

#### **4.4.1.2. Beyinde kaos**

Beyindeki kaos, merkezi sinir sisteminin elektriksel ve dinamik aktivitelerinde kaotik davranışların varlığını ifade eder. Beyin, karmaşık ve birbirine oldukça bağlı bir biyolojik sistemdir ve bireysel nöronlardan sinir ağlarına ve tüm beyin salınımlarına kadar çeşitli organizasyon seviyelerinde kaotik davranışlar sergileyebilir. Elektroensefalografi (EEG) gibi teknikler kullanılarak ölçülen beyindeki elektriksel aktivite bazen düzenli, öngörülebilir bir model izlemeyen karmaşık ve düzensiz modeller sergileyebilir. Bu kaotik davranışlar, uyanıklık, REM uykusu veya bazı patolojik durumlar gibi beyin farklı durumlarında gözlemlenebilir. Beyindeki kaos, başlangıç koşullarına duyarlılık, çatallanma, nöronal salınımların senkronizasyonu ve sinaptik plastisite gibi olgularla ilişkili olabilir. Bilişsel süreçlerin değişkenliğine ve

esnekliğine katkıda bulunabilir, çevreye uyarlanabilir tepkiler ve farklı zihinsel durumlar arasında hızlı geçişler sağlar [38].

Bununla birlikte, kaosu beyin işlevindeki kesin rolü hâlâ tartışmaya ve bilimsel araştırmaya tabidir. Bazı araştırmalar, beyindeki kaotik durumların epilepsi, Parkinson hastalığı, depresyon veya şizofreni gibi nörolojik ve psikiyatrik bozukluklarla ilişkili olabileceğini düşündürmektedir. Beyindeki kaosu incelemesi, teorik, deneysel ve hesaplamalı yaklaşımlarla gelişen bir araştırma alanıdır. Doğrusal olmayan dinamik analiz, matematiksel modeller ve bilgisayar simülasyonları gibi gelişmiş analitik yöntemler, beyin etkinliğindeki kaotik kalıpları incelemek ve işlevsel rollerini keşfetmek için kullanılır.

Beyindeki kaosu anlamak, nörobilim, tıp ve bilişsel süreçleri anlamak için önemli etkilere sahip olabilir. Ayrıca beyin dinamiklerindeki işlev bozukluklarına bağlı nörolojik ve psikiyatrik bozukluklar için yeni tanı ve tedavi yaklaşımlarının geliştirilmesine yardımcı olabilir.

#### **4.4.2. Güvenli iletişimde kaos**

Güvenli iletişimde kaos, bir iletişim sistemindeki varlıklar arasında değiş tokuş edilen bilgilerin gizliliğini ve bütünlüğünü sağlamak için kaosa dayalı tekniklerin kullanılması anlamına gelir. Güvenli iletişim sistemlerinde kaos, güçlü şifreleme anahtarları oluşturmak için bir rastgelelik kaynağı olarak kullanılabilir. Kaos tabanlı şifreleme sistemleri, verileri şifrelemek ve şifresini çözmek için anahtar olarak kullanılan sözde rastgele diziler oluşturmak için kaotik sistemlerin öngörülemez ve karmaşık özelliklerinden yararlanır [39].

Bu sistemlerde kullanılan kaosu temel özelliği başlangıç koşullarına duyarlı olmasıdır. Kaotik sistemin başlangıç koşullarındaki veya parametrelerindeki küçük değişiklikler, görünüşte rastgele olan ancak başlangıç koşulları biliniyorsa deterministik ve tekrarlanabilir olan sayı dizilerine yol açabilir. Bu, iletişim kuran varlıkların aynı başlangıç koşullarından aynı anahtarları üretmesine izin verirken, yetkisiz üçüncü tarafların bu anahtarları çıkarmasını son derece zorlaştırır.

Kaos tabanlı güvenli iletişim sistemleri, benzersiz ve tahmin edilmesi zor anahtarlar oluşturmak için karmaşık dinamik süreçler kullandıklarından potansiyel güvenlik avantajları sunar. Bununla birlikte, bu sistemlerin uygulanması, kaosu özellikleri, güvenli anahtar oluşturma protokolleri ve iletişim kuran varlıklar arasındaki

senkronizasyon mekanizmaları hakkında kapsamlı çalışmalar gerektirir. Güvenli iletişimdeki kaosun, tam güvenli iletişimi sağlamak için gereken birçok unsurun yalnızca bir yönü olduğu unutulmamalıdır. Kaos tabanlı güvenli iletişim sistemleri, kimlik doğrulama, veri bütünlüğü ve kriptografik saldırılara karşı koruma gibi diğer hususlar dikkate alınarak bütünsel olarak tasarlanmalıdır.

Böylece, doğrusal olmayan sistemlerin ve kaosun incelenmesi, doğal olayların ve insan yapımı sistemlerin doğasında var olan karmaşıklığa dair büyüleyici bir içgörü sunar. Başlangıç koşullarına duyarlılıkları, öngörülemeyen dinamik davranışları ve ani geçişleri ile karakterize edilen bu sistemler, genellikle sezgilerimize ve geleneksel nedensellik anlayışımıza meydan okur. Doğrusal olmayan sistemlerin ve kaosun keşfi, bu karmaşık davranışları analiz etmeye ve tanımlamaya yardımcı olan çekiciler, çatallanmalar ve Lyapunov üstelleri gibi güçlü matematiksel kavramları ve araçları ortaya çıkardı. Bu kavramlar, fizik ve biyolojiden ekonomi, meteoroloji ve mühendisliğe kadar pek çok alanda uygulama bulmuştur. Kaosun kendisi ilgi çekici bir ikilik sunar. Bir yandan düzensiz ve öngörülemeyen davranışlar üreterek uzun vadeli kaotik sistemleri tahmin etmeyi zorlaştırabilir. Öte yandan, yenilik, uyum ve yaratıcılık potansiyeli sunan, ortaya çıkan model ve yapılara yol açabilir.

Bir sonraki bölümde sabit mıknatıslı senkron makinelerin kaotik analizi yapılacaktır.



## 5. SABİT MIKNATISLI SENKRON MAKİNELERDE KAOTİK ANALİZ VE KAOS SENKRONİZASYONU

Kaotik fenomen, birçok bilimsel ve teknolojik alanda artan ilgiyi çekmiştir ve sürekli mıknatıslı senkron makinelerde varlığı ve kontrolü konusundaki çalışmalar bir istisna değildir. Sabit mıknatıslı senkron makineler, yüksek performansları, üstün enerji verimlilikleri ve kompaktlıkları nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak belirli özel koşullar altında bu makineler, kararlılık, kontrol ve genel sistem performansı açısından zorluklara yol açabilen kaotik davranışlar sergileyebilir. Sabit mıknatıslı senkron makinelerin kaotik analizi, bu sistemlerde belirli koşullar altında ortaya çıkabilecek karmaşık dinamik özellikleri incelemeyi ve anlamayı amaçlar. Başlangıç koşullarına duyarlılık, garip çekiciler ve çatalanmaların varlığı gibi bu makinelerin çalışması ve düzenlenmesi üzerinde önemli etkileri olabilecek fenomenleri keşfetmeyi mümkün kılar.

Bu bölüm, sabit mıknatıslı senkron makinelerin kaotik analizine odaklanır ve kaotik davranışın ortaya çıkabileceği koşulları belirlemeye vurgu yapar. Kaosun ortaya çıkmasına neden olabilecek farklı faktörleri keşfedilecektir. Lyapunov analizi, çatalanma diyagramları ve Poincare haritası gibi bu makinelerdeki kaosu saptamak ve karakterize etmek için kullanılan analitik teknikleri de tartışılacaktır.

### 5.1. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Dinamik Modeli

(3.23) denklemden, sistemin denklemini aşağıdaki gibi elde edilmişti:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \\ \frac{d\Omega_r}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{L_d} i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} i_q \\ \frac{-R_s}{L_q} i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} i_d - \frac{\omega \Phi_f}{L_q} \\ \frac{3P\Phi_f}{2J} i_q - \frac{P(L_q - L_d)}{J} i_d i_q - \frac{f}{J} \Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ C_r \end{bmatrix}$$

Ancak, [40] referansında önerilen daha basit bir model kullanılarak simülasyonları ve hesaplamaları daha elverişli hale getirmek mümkün olacaktır. Bu önerilen yaklaşım, fonksiyonun temel yapısını koruyarak sadeleştirmeye yönelik adımlar içermektedir.

Bu adımlardan ilki, mevcut modelin a ve b parametrelerinin eklenmesidir. Bu parametrelerin dahil edilmesi, sistemin davranışını daha gerçekçi bir şekilde yansıtmaya yardımcı olacaktır. Ayrıca, bu sadeleştirilmiş modelde  $\omega=x$ ,  $i_q=y$  ve  $i_d=z$  eşitlikleri kullanılacaktır.

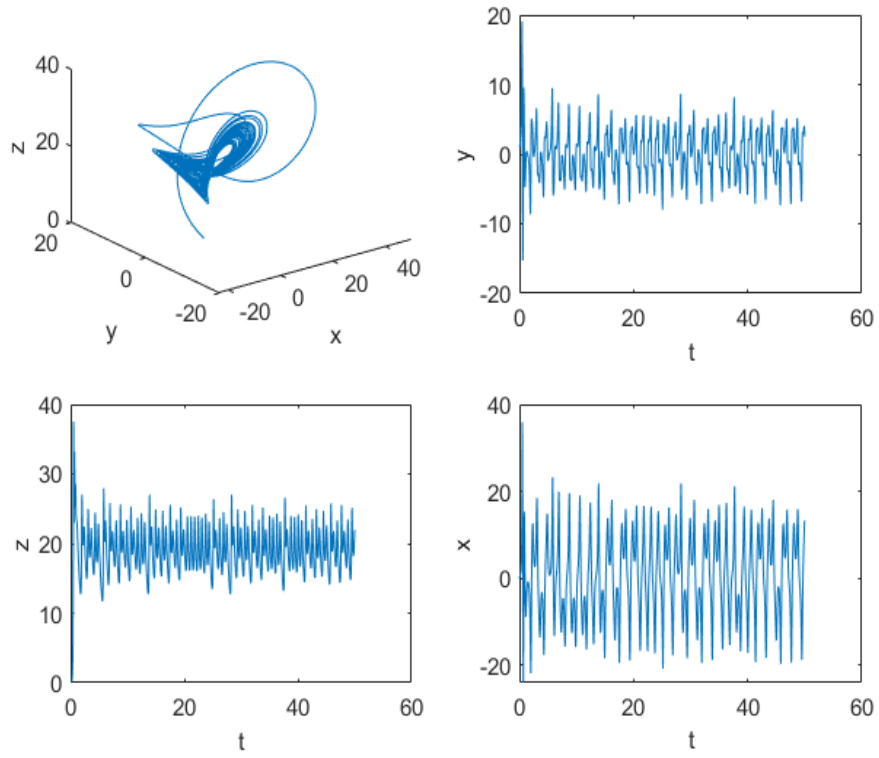
$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + zy \\ \dot{y} = -y - zx + bx \\ \dot{z} = -z + xy \end{cases} \quad (5.1)$$

## 5.2. Sabit Mıknatıslı Senkron Motor İçin Kaotik Analiz

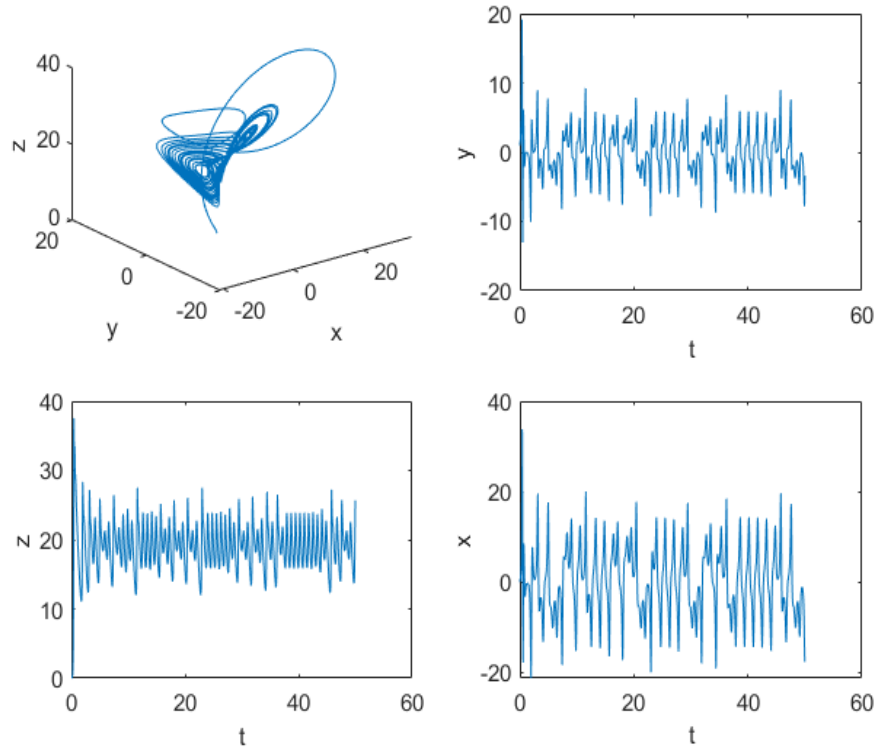
Sabit mıknatıslı senkron makinelerde kaotik davranışın analizi, bu sistemlerin karmaşık dinamik özelliklerini anlamak için temel bir çalışma alanıdır. Kaotik davranış, başlangıç koşullarına duyarlılık, düzensiz bir yörünge ve belirgin bir model veya periyodiklik eksikliği ile karakterize edilen doğrusal olmayan bir dinamik durumunu ifade eder. Sabit mıknatıslı senkron makineler bağlamında kaotik davranış, kritik parametre değerleri, yük dalgalanmaları veya sistemdeki bozulmalar gibi belirli özel koşullar altında kendini gösterebilir. Bu kaotik davranış, düzensiz salınımlara, hız veya torkta öngörülemeyen değişimlere ve farklı sistem çalışma modları arasında karmaşık etkileşimlere yol açabilir. Kaotik davranışın analizi genellikle Lyapunov analizi, Poincaré haritaları, Lyapunov spektrumları, Lyapunov üstelleri, garip çekiciler ve çatallanma diyagramları gibi gelişmiş matematiksel tekniklerin kullanımını içerir. Bu araçlar, sistemin dinamik özelliklerini karakterize etmeyi, kaotik davranış bölgelerini tanımlamayı ve sistemin düzenli ve kaotik durumlar arasında geçiş yapabileceği koşulları belirlemeyi mümkün kılar.

Sistem (5.1), a ve b parametrelerinin belirli değerleri için kaotik davranışı gösterir. Sabit mıknatıslı senkron motorların kaotik davranışını gözlemlemek için b parametresini a b=20 olarak sabit tuttuk ve ardından a parametresini 5 ile 30 arasında değiştirdik.

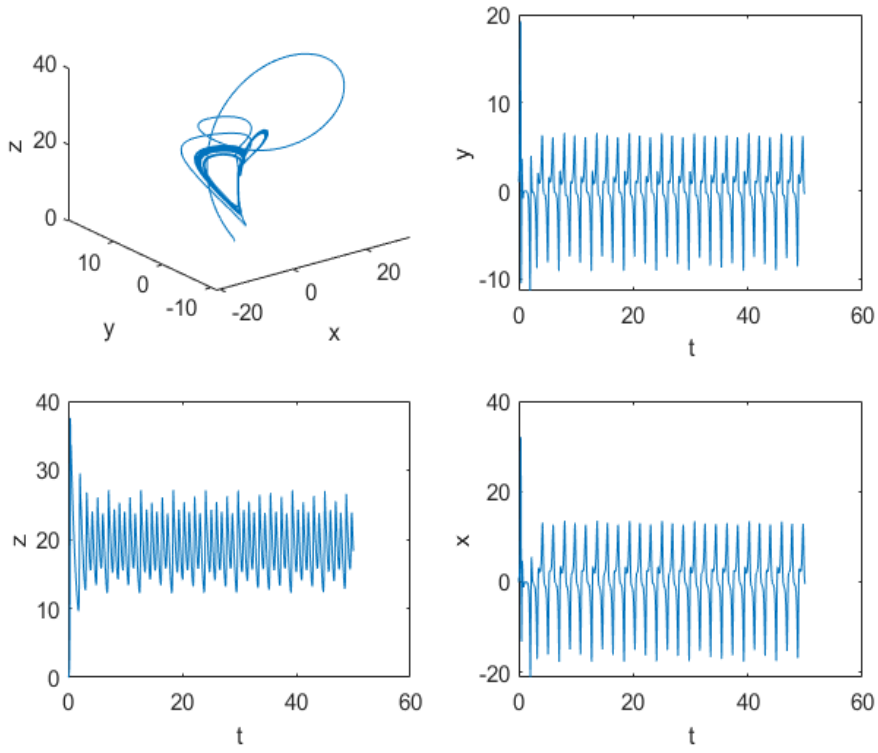




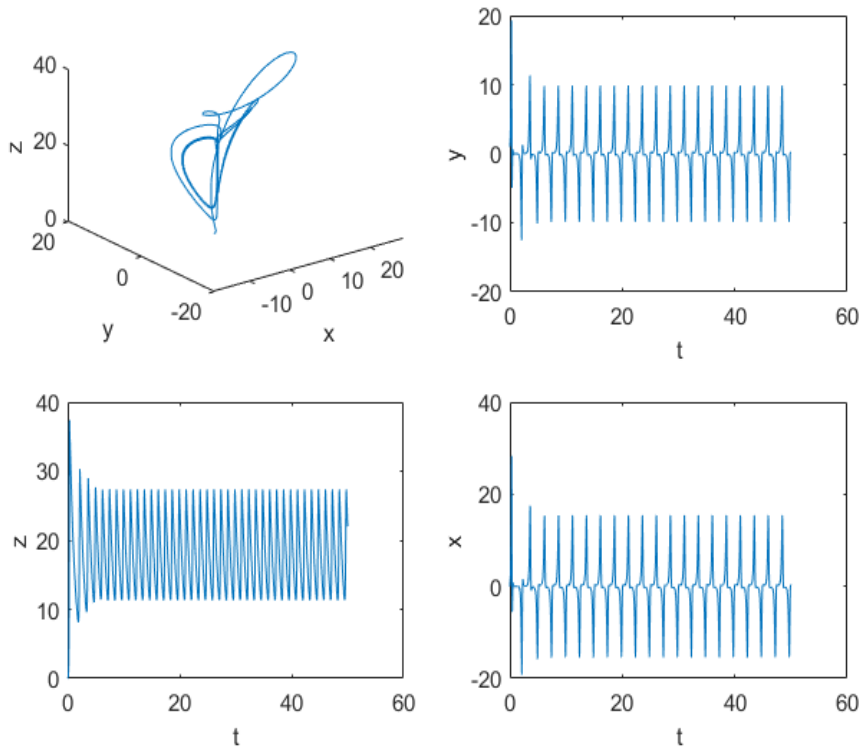
**Şekil 5.1.**  $a=5.45$  ,  $b=20$  ,  $x(0)=0$  ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  için (5.1) sistemin faz portresi.



**Şekil 5.2.**  $a=10$  ,  $b=20$  ,  $x(0)=0$  ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  için (5.1) sistemin faz portresi.



**Şekil 5.3.**  $a=15$  ,  $b=20$  ,  $x(0)=0$  ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  için (5.1) sistemin faz portresi.



**Şekil 5.4.**  $a=15$  ,  $b=20$  ,  $x(0)=0$  ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  için (5.1) sistemin faz portresi.

Şekilleri analiz ettikten sonra, ilk iki şekilde sabit mıknatıslı senkron makinenin davranışının kaotik olduğunu gözlemleyebilir. Ancak Şekil 3 ve 4'te bunun kaotik olmaktan çok periyodik olduğunu gözlemleyebilir.

$a= 5.45$  ,  $b=20$ ,  $x(0)=0$ ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  değerleri için sistemin tamamen kaotik bir durumda olduğunu görünebilir.

### 5.3. Denge ve Kararlılık Noktaları

Denge noktaları ve kararlılıkları, sabit mıknatıslı senkron makinelerin analizinde temel kavramlardır. Sabit nokta olarak da adlandırılan bir denge noktası, sistemin dinamik değişkenlerin zaman içinde sabit kaldığı bir durumdur. Sabit mıknatıslı senkron makineler bağlamında, bir denge noktası, sistemin elektriksel ve mekanik niceliklerinin dengelendiği sabit bir çalışma durumunu temsil edebilir.

Bir sistemin denge noktalarını belirlemek için sabit mıknatıslı senkron motorun matematiksel modelinin denklemlerini sıfıra ayarlayarak yani dinamik değişkenlerin türevlerini sıfıra ayarlayarak çözmek gerekir. Anahtar değişkenler arasında elektrik akımları, gerilimler, açısız konumlar ve hızlar bulunur.

(5.1) sisteminin denge noktalarını elde etmek için aşağıdaki sistemi çözmelidir:

$$\begin{cases} 0 = a(y - x) + zy \\ 0 = -y - zx + bx \\ 0 = -z + xy \end{cases} \quad (5.2)$$

Denklemin çözülmesi, (5.1) sistemin 3 denge noktası ile karakterize edildiğini gösterir; bunlardan biri (0,0,0) yerel olarak kararlı, diğer ikisi ise  $(b-1, \sqrt{b-1}, \sqrt{b-1})$  ve  $(b-1, -\sqrt{b-1}, -\sqrt{b-1})$ , yerel olarak kararsızdır. Sistemin Jacobian matrisi şu şekilde tanımlanır [41]:

$$J = \begin{bmatrix} -a & a+z & y \\ b-z & -1 & -x \\ y & x & -1 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

### 5.4. Lyapunov Üstelleri

Lyapunov üsteli veya Lyapunov sayısı, dinamik bir sistemin yörüngelerinin başlangıç koşullarına duyarlılığını ölçen bir ölçüdür. Sistemin kaotik veya düzenli davranma

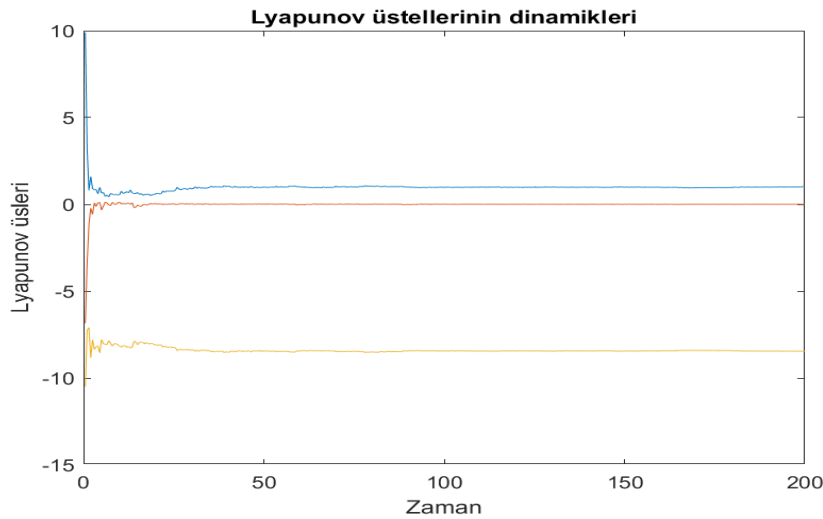
eğilimini değerlendirmeyi mümkün kılar. Lyapunov üsteli, sistemin faz uzayındaki komşu yörüngeler arasındaki sapmaların ortalama büyüme oranı hesaplanarak belirlenir. Daha kesin olarak, belirli bir dinamik sistem için Lyapunov üssü, zamanın her anında komşu yörüngeler arasındaki sapma oranlarının logaritmalarının ortalaması olarak tanımlanır.

Pozitif bir Lyapunov üsteli, komşu yörüngelerin, kaotik davranışın özelliği olan, üstel olarak birbirinden uzaklaştığını gösterir. Bu, sistem koşullarındaki küçük başlangıç farklılıklarının zaman içinde çok farklı yörüngelere yol açabileceği anlamına gelir. Öte yandan, negatif bir Lyapunov üsteli, komşu yörüngelerin, istikrarlı ve düzenli davranış için tipik olan ortak bir çözüme yakınsadığını gösterir. Bu, başlangıçtaki küçük farklılıkların zamanla kaybolma eğiliminde olduğu anlamına gelir.

Lyapunov üsteli genellikle sistemin faz uzayının her boyutu için hesaplanır ve böylece bir Lyapunov spektrumu elde edilir. Bu spektrum, sistemin davranışının karmaşıklığı, özellikle kaotik davranışların varlığı ve bu istikrarsızlığın doğası hakkında bilgi verebilir.

Lyapunov üsteli, sabit mıknatıslı senkron makineler dahil olmak üzere karmaşık dinamik sistemlerin analizi için önemli bir ölçüdür. Bu makinelerin tasarımı ve kontrolü için çok önemli olan başlangıç koşullarına duyarlılığın ölçülmesini ve sistemin kararlılığının değerlendirilmesini mümkün kılar.

$a=5.45$ ,  $b=20$  parametresi değerleri ve  $x(0)=0$ ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  başlangıç koşulları için sistemin Lyapunov üsteli şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5.5. Lyapunov üstelleri.

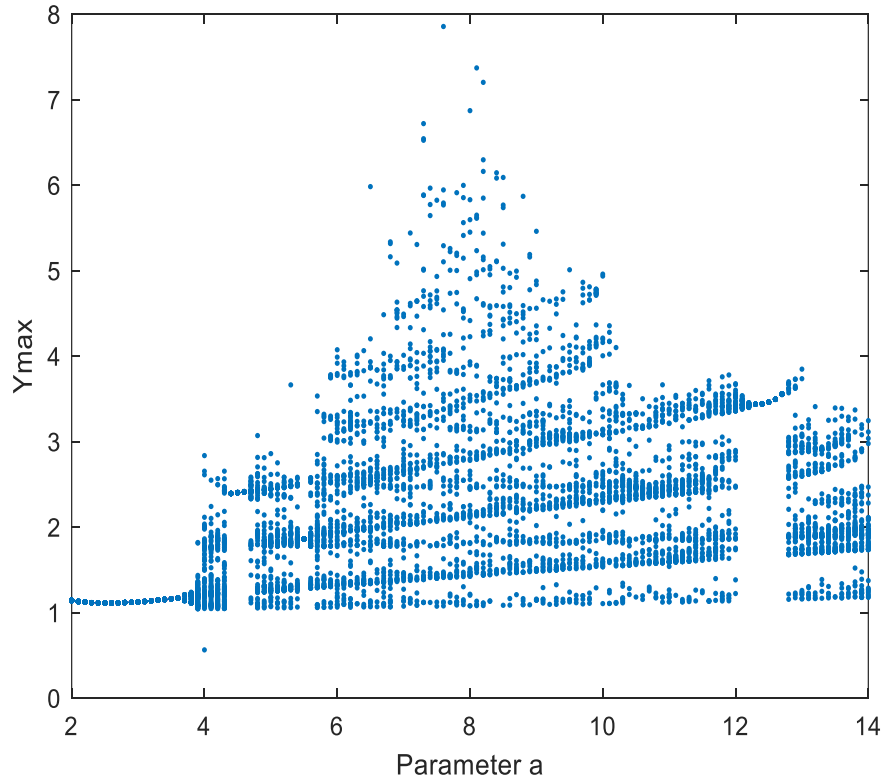
Lyapunov üstelleri, kaosun varlığını doğrulayan pozitif bir eğriye, sıfır eğrisine ve negatif bir eğriye sahiptir.

### 5.5. Çatallanmalar

Çatallanmalar, sabit mıknatıslı senkron makinelerde oluşabilen önemli dinamik olaylardır. Parametreler veya çalışma koşulları değiştiğinde sistemin davranışındaki niteliksel değişikliklerle ilişkilendirilirler.

Belirli sistem parametreleri kritik değerlere ulaştığında, sistem çözümlerinde değişikliklere ve yeni dinamik davranışların oluşmasına yol açan çatallanmalar meydana gelebilir. Bu çatallanmalar, düzenli salınımlar, kaotik hareketler veya sabit noktalar gibi farklı hareket türleri arasındaki geçişleri içerebilir.

Sabit mıknatıslı senkron makinelerdeki çatallanmalar, çatallanma teorisi ve özdeğer analizi gibi matematiksel araçlar kullanılarak incelenebilir. Bu teknikler, çatallanmaların meydana geldiği kritik parametreleri ve koşulları ve ayrıca Hopf çatallanmaları, kıvrımlı çatallanmalar, atlama çatallanmaları vb.



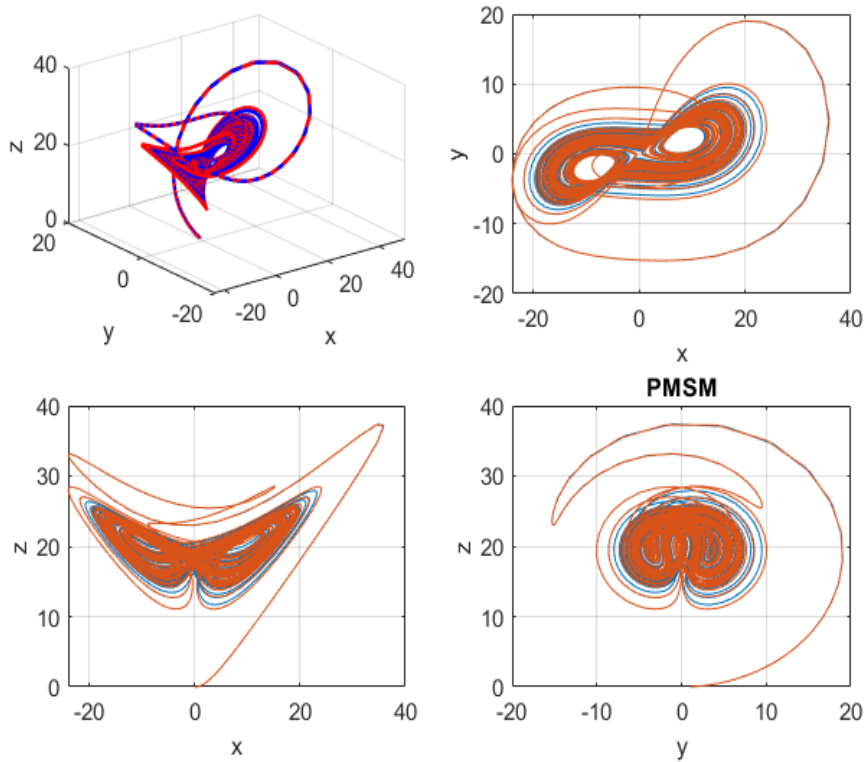
**Şekil 5.6.**  $a=[2-14]$  ,  $b=20$  ,  $x(0)=0$  ,  $y(0)=1$  ve  $z(0)=0$  için sabit mıknatıslı senkron makinenin çatallanması.

Çatallanma eğrisine baktığımızda,  $a = 2$ 'den  $a = 4$ 'e yatay bir düz çizgi ile başlayan, ardından  $a = 4$ 'ten  $a = 14$ 'e kadar çok sayıda dala ayrılan bir eğri görülmektedir. Senkron makine 4 ile 14 arasındaki  $a$  değerleri için kaotik bir çekiciye sahiptir.

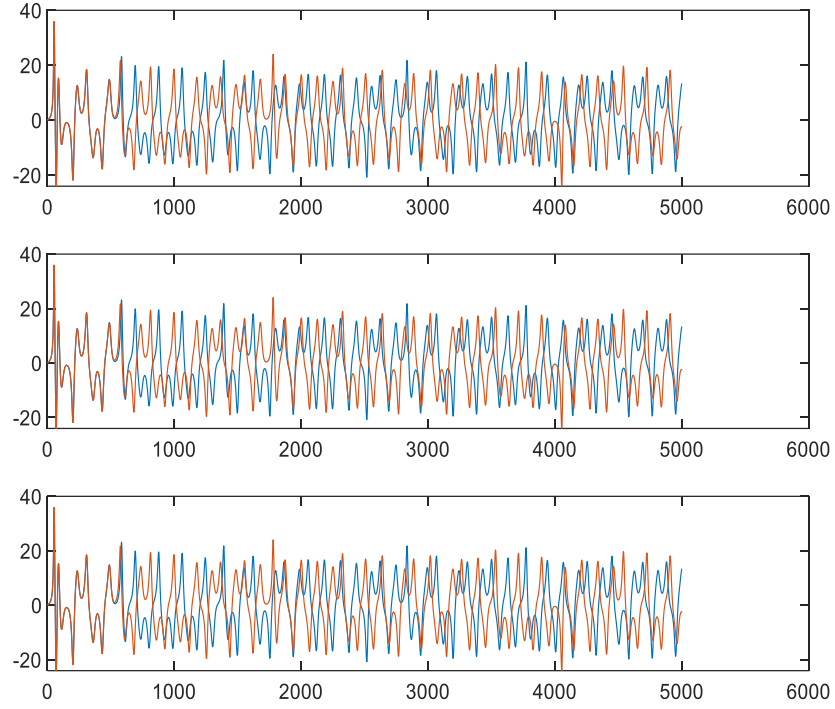
### 5.6. Başlangıç Koşullarına Duyarlılık

Başlangıç koşullarına duyarlılık, dinamik bir sistemin başlangıç koşullarındaki küçük değişimlere veya bozulmalara nasıl tepki verdiğini ifade eder. Bu, başlangıçta durum değişkenlerinin veya sistem parametrelerinin değerlerindeki küçük farklılıkların zamanla tamamen farklı yörüngelere yol açabileceği anlamına gelir.

Şekil 8 ve 9'da sabit mıknatıslı senkron makinenin iki fonksiyonunu  $x_0 = 0$  ile bire çok yakın başlangıç koşullarıyla çizdik;  $y_0 = 1$ ;  $z_0 = 0$ ; ve diğer  $x_0 = 0$ ;  $y_0 = 1.01$ ;  $z_0 = 0$ . Bu iki başlangıç koşulu arasındaki fark çok küçük olmasına rağmen, belli bir süre sonra iki eğrinin farklı yörüngelere sahip olduğunu fark ederiz. Sistem başlangıç koşullarına duyarlıdır.



Şekil 5.7.  $x_0 = 0$ ;  $y_0 = 1$ ;  $z_0 = 0$  ve  $x_0 = 0$ ;  $y_0 = 1.01$ ;  $z_0 = 0$  için faz portreleri.



**Şekil 5.8.**  $x_0 = 0; y_0 = 1; z_0 = 0$  ve  $x_0 = 0; y_0 = 1.01; z_0 = 0$  için zaman serileri.

## 5.7. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kaos Kontrolü

Yıllar geçtikçe, SMSJ 'ye çeşitli kontrol teknikleri uygulanmıştır. Bunlar, geri bildirim kontrol yöntemlerini içerir [42-44], adaptive fuzzy control [45- 47], simple sliding mode adaptive control [46, 48], adaptive neural sliding mode control [49], optimal Lyapunov exponents' placement [50], passive control [51], impulsive control [52, 53] and finite-time stability theory [54]. Bu çalışmada pasif kontrol, bileşik matrix yaklaşımı ve geri bildirim kontrolü kullanılmıştır.

### 5.7.1. Pasif kontrol sistemin özellikleri

Aşağıdaki diferansiyel denklem sürekli kaotik sistem göstermektedir:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{h}(\mathbf{x}) \end{aligned} \quad (5.4)$$

Burada  $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$  durum değişkenidir,  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$  çıkış fonksiyonudur.

Kaotik dinamik sistemin kararlı olabileceği kontrol yöntemini analiz etmek için, düzgün bir fonksiyon bulabiliriz  $\mathbf{g}$  ve giriş  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$  yeni bir sistem inşa etmek için:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \mathbf{f}(x) + \mathbf{g}(x) \cdot \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{h}(x)\end{aligned}\quad (5.5)$$

Burada  $\dot{x} \in \mathbb{R}^n$  durum değişkenidir,  $\mathbf{u} \in \mathbb{R}^m$  girdidir,  $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^p$  çıkış fonksiyonudur.  $f$  fonksiyonu en az bir denge noktasına sahiptir. Denge noktaları  $x = 0$  yazılarak elde edilir.

Tanım 1:  $f(x)$  ve  $\mathbf{g}(x)$  fonksiyonları, gerçekteğerli  $\beta$  sabiti için;  $\forall t \geq 0$

$$\int_0^t \mathbf{u}^T(\tau)\mathbf{y}(\tau)d\tau \geq \beta \quad (5.6)$$

Veya  $\rho > 0$  bir sabit varsa ve gerçekteğerli sabit  $\beta$ ;  $\forall t \geq 0$

$$\int_0^t \mathbf{u}^T(\tau)\mathbf{y}(\tau)d\tau + \beta \geq \int_0^t \rho \cdot \mathbf{y}^T(\tau)\mathbf{y}(\tau)d\tau \quad (5.7)$$

Denklem (5.3) formunun ve  $V(x): X \rightarrow \mathbb{R}$ , negatif olmayan bir fonksiyonu varsa, pasif olduğunu söylenir

$V(0) = 0$  depolama fonksiyonu olarak adlandırılır, herhangi bir  $\forall x \in X, \forall t \geq 0$  için:

$$V(x) - V(x_0) \leq \int_0^t \mathbf{y}^T(s)\mathbf{u}(s)ds \quad (5.8)$$

$V(x)$  Depolama işlevine sahip pasif bir sistem,  $S(x)$  pozitif tanımlı bir fonksiyon varsa ve  $\forall x \in X, \forall t \geq 0$  için pasif olduğu bilinmektedir.

$$V(x) - V(x_0) = \int_0^t \mathbf{y}^T(s)\mathbf{u}(s)ds - \int_0^t S(x(s))ds \quad (5.9)$$

Teorem 1 (Byrnes ve Isidori, 1991) Bir sistem Kalman-Yacubovich-Popov (KYP) özelliğine sahip denklem (2) formunun pasif olduğu söylenebilir.

Teorem 2: (Byrnes ve Isidori, 1991)  $\varphi$  herhangi bir düzgün fonksiyon olup  $\mathbf{y}^T\varphi(\mathbf{y}) > 0$  ve  $\varphi(0) = 0$ 'dir. Kontrol yasası;

$$\mathbf{u}(t) = -\varphi(\mathbf{y}) \quad (5.10)$$

$x = 0$  için asimptotik olarak dengeyi stabilize eder.



Teorem 3: Eğer sistem (2) uygun  $V(x)$  depolama fonksiyonuna sahip ise pasif bir sisteme eşdeğer olabilir.

Kanıt:  $\mathbf{y} = \mathbf{h}(x)$  yeni bir durum değişkeni olsun ve  $\eta = \varphi(x)$  için, sistem (2) aşağıdaki formdaki denklemlerle temsil edilir

$$\begin{cases} \dot{\eta} = c(\eta, \mathbf{y}) + d(\eta, \mathbf{y})u \\ \dot{\mathbf{y}} = b(\eta, \mathbf{y}) + a(\eta, \mathbf{y})u \end{cases} \quad (5.11)$$

Burada  $a(\eta, \mathbf{y})$  tekil değildir bütün  $(\eta, \mathbf{y}) (0,0)$ 'da için.

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{a}(\eta, \mathbf{y})^{-1}[-\mathbf{b}(\eta, \mathbf{y}) + \mathbf{v}] \\ \begin{cases} \dot{\eta} = \theta(\eta, \mathbf{y}) + \gamma(\eta, \mathbf{y})v \\ \dot{\mathbf{y}} = v \end{cases} \end{aligned} \quad (5.12)$$

$z = \eta - \gamma(\eta, 0)\mathbf{y}$ , sonra

$$\begin{cases} \dot{z} = f^*(z) + p(z, \mathbf{y})\mathbf{y} + \left( \sum_{i=1}^m q_i(z, \mathbf{y})y_i \right) \cdot v \\ \dot{\mathbf{y}} = v \end{cases} \quad (5.13)$$

Burada  $p(z, \mathbf{y}), q_i(z, \mathbf{y})$  uygun matrislerdir.

Eğer sistem (2) pozitif tanımlı  $W^*(z)$  bir fonksiyona sahipse ve  $W^*(0) = 0$  ise  $\mathbf{L}_{f'} \cdot V(z) \leq 0$  her biri için  $z \neq 0$ 'dır.

$$\mathbf{M}(z, \mathbf{y}) = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{q_1(z, \mathbf{y})} W^*(z) \\ \vdots \\ \mathbf{L}_{q_m(z, \mathbf{y})} W^*(z) \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Burada  $\mathbf{M}(0, \mathbf{y}) = 0$ . Geri besleme kontrol yasası;

$$\mathbf{v} = [\mathbf{I} + \mathbf{M}(z, \mathbf{y})]^{-1} \left[ -(\mathbf{L}_{p(z, \mathbf{y})} W^*(z))^T + \mathbf{w} \right] \quad (5.15)$$

$(0,0)$ 'nin bir komşuluğunda iyi tanımlanmıştır. Bu nedenle

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{\mathbf{y}} \end{bmatrix} = \bar{f}(z, \mathbf{y}) + \bar{g}(z, \mathbf{y})\mathbf{w} \quad (5.16)$$

Pozitif fonksiyon ile birlikte

$$V(z, y) = W^*(z) + \frac{1}{2}y^T y \quad (5.17)$$

Burada

$$L_f V(z, y) + L_g V(z, y)w = L_f * W^*(z) + y^T w \quad (5.18)$$

Bu nedenle

$$\begin{aligned} L_{\bar{f}} V(z, y) &= L_f \cdot W^*(z) \leq 0 \\ (L_{\bar{g}} V(z, y))^T &= y \end{aligned} \quad (5.19)$$

Ve sistem (2) pasif sistemdir.

### 5.7.1.1. SMSJ 'nin pasif kontrolü

SMSJ 'nin kaotik dinamik sistemi göz önüne alındığında:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + zy \\ \dot{y} = -y - zx + bx \\ \dot{z} = -z + xy \end{cases} \quad (5.20)$$

#### Kontrolör tasarımı

Durum vektörü  $x_3$  SMSJ sisteminin çıkışıdır ve  $z_1 = z, z_2 = x, y = y$  için sistem normal form ile ifade edilebilir:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = -z_1 + z_2 y \\ \dot{z}_2 = 5.45 \cdot (y - z_2) + z_1 \cdot y \\ \dot{y} = -y - z_1 z_2 + 20z_2 + u \end{cases} \quad (5.21)$$

$$\begin{cases} \dot{z} = f_0(z) + p(z, y)y \\ \dot{y} = b(z, y) + a(z, y)u \end{cases} \quad (5.22)$$

Burada

$$f_0(z) = [-z_1, -5.465]^T, p(z, y) = [z_2, 5.45]^T, \quad (5.23)$$

$$a(z, y) = 1, b(z, y) = -y - z_1 z_2 + 20z_2$$

Depolama fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilirse;

$$V(z, y) = W(z) + \frac{1}{2}y^2 \quad (5.24)$$

Burada  $W(z)$  Lyapunov fonksiyonu olup,  $W(0) = 0$  ise.

$$W(z) = \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 \quad (5.25)$$

Denklem (5.25)'den  $W(z)$  'nin  $f_0(z)$  fonksiyonun  $dW/dt \leq 0$  için Lyapunov'u bulunur.

Teorem 4'e göre  $f_0(z)$  'nin özdeğerlerinin pasif sisteme eşdeğer olduğunda, denklem (5.23)'nin asimtotik olarak kararlı olması gerekir. Böylece  $\lambda_1 = -1, \lambda_2 = -5.46$  olarak bulunur.

Yukarıdaki analize göre, SMSJ sisteminin sıfır dinamik karakteri Lyapunov kararlıdır, bu nedenle SMSJ kaotik sistemi minimum faz sistemidir. Denklem (20)'den

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{\partial W}{\partial z} \dot{z} + y\dot{y} \\ &= \frac{\partial}{\partial z} W(z) \cdot f_0(z) + \frac{\partial}{\partial z} W(z) \cdot p(z, y) \cdot y \\ &\quad + [b(z, y) + a(z, y)u]y \end{aligned} \quad (5.26)$$

Eşdeğer sistem minimum fazlı olduğu ve KYP özelliğine sahip olduğu için

$$\frac{\partial}{\partial z} W(z) \cdot f_0(z) \leq 0 \quad (5.27)$$

Denklem (5.26)'den

$$\frac{dV}{dt} \leq \frac{\partial}{\partial z} W(z) \cdot p(z, y) \cdot y + [b(z, y) + a(z, y)u]y \quad (5.28)$$

$u$  kontrol parametresi aşağıda gibi alınır;

$$u = a^{-1}(z, y) \left[ -b^T(z, y) - \frac{\partial}{\partial z} W(z)p(z, y) - \alpha y + v \right] \quad (5.29)$$

Burada  $\alpha$  pozitif reel sabittir,  $v$  harici bir giriş sinyalidir.

$$u = (1 - \alpha)y + v - 25.45z_2$$

Denklem (5.28) ve denklem (5.29)'e göre

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 5.45 \cdot (y - x) + z \cdot y \\ \dot{x}_2 = -\alpha y - zx - 5.45x + v \\ \dot{x}_3 = -z + xy \end{cases}$$

Sistemi bulunur.

### **Yakınsama koşulu**

Sistemin sabit noktada kararlılığını incelemek için  $x_e = 0$ , doğrusal olmayan fonksiyon sabit nokta yakınında Taylor serisi uygulanırsa geliştirilebilir.

$$\dot{x} = J(x - x_e) + R(x) \quad (5.30)$$

Burada  $R(x)$  yukarıdaki ifadenin yüksek dereceli türev ögesidir,

$$J(x) = f'(x) = \frac{\partial f(x)}{\partial x} \quad (5.31)$$

Jacobyen matrisidir.

Doğrusal olmayan kontrol teorisine göre, Jacobyan matrisinin tüm özdeğerleri aşağıdaki gibi ise doğrusal olmayan sistem kararlı hale getirilebilir  $J$  negatif gerçık değerlere sahiptir.

Kaotik senkronizasyon sistemini stabilize etmek için Jacobin matrisinin özdeğerleri  $x_e = 0$  için aşağıdaki gibi bulunur.

$$\lambda_i = \lambda_i(\alpha, x, v) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.32)$$

Burada  $\lambda_i$  Jacobyan matrisinin özdeğerleridir.

Sıfırdan küçük özdeğerlerin gerçık kısımları aşağıdaki gibidir;

$$\text{Re} \{ \lambda_i(\alpha, x, v) \} < 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5.33)$$

$\text{Re} \{ \lambda_i(\alpha, x, v) \} < 0, i = 1, 2, 3$  için yakınsama koşulunu elde edilebilir.

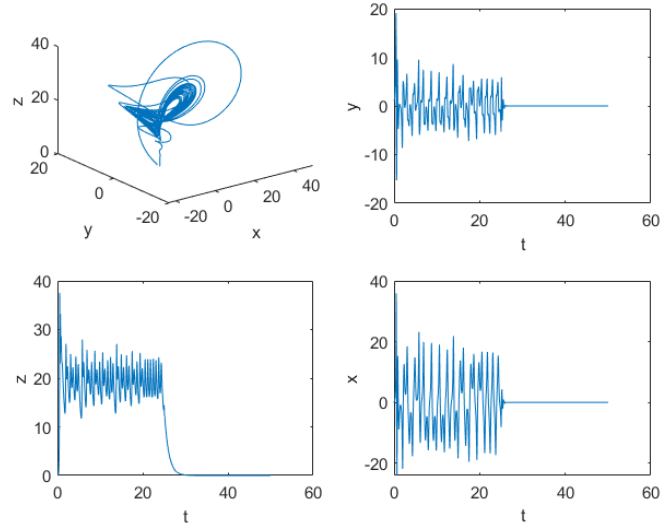
$$\alpha > -5.46$$

Parametre  $\alpha > 0$  kontrolörü SMSJ kaotik sistemi için tasarlanmıştır.

### **5.7.1.2. Pasif kontrol benzetim çalışmaları**

Önerilen yöntemi doğrulamak için, kontrol edilen sistemin sayısal simülasyonları MATLAB üzerinde 0.01 saniyelik bir hesaplama adımında gerçekleştirilir.

Simülasyon için MATLAB programı ode45 algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.9.'de,  $a=5.45$  ve  $b=20$   $\varepsilon=1$  nominal değerleri için sapma vektörü durumlarının gelişimini göstermektedir. Komut  $t=25$  saniyede yürütülür. Tüm simülasyonlardaki başlangıç koşulları  $(x(0), y(0), z(0))=(0, 1, 0)$  olarak ayarlanmıştır.  $\alpha = 2$  ve  $v = 0$  olarak alınmıştır.



**Şekil 5.9.** SMSJ 'nin çıkışları ne zaman  $\alpha=2, v=0$  kontrolü altında sistemin başlangıç noktasında stabilize olduğunu  $u(t)$ .

### 5.7.2. Sabit mıknatıslı senkron motorda kaos kontrolü: bileşik matris yaklaşımı

$(i_d^*, i_q^*, \omega^*)$  sistem (5.1) için bir denge noktası olsun. Bu çalışmanın amacı, sistemini denge noktası etrafında stabilize eden bir kontrol yasası sentezlemektir  $(i_d^*, i_q^*, \omega^*)$  kaotik davranışı ortadan kaldırırken. Bu amaçla, bir kontrol  $u$  (2) sistemine eklenir.

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -i_d + i_q \omega \\ \dot{i}_q = -i_q - i_d \omega + \gamma \omega + u \\ \dot{\omega} = \sigma(i_q - \omega) \end{cases}$$

$(e_1, e_2, e_3)$  sistem durumu ile referans durum arasındaki hata vektörü olsun.

$$\begin{cases} e_1 = i_d - i_d^* \\ e_2 = i_q - i_q^* \\ e_3 = \omega - \omega^* \end{cases} \quad (5.34)$$

Hata sistemi durum gösteriminde şu şekilde tanımlanır:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = i_d = -e_1 - i_d^* + (e_3 + \omega^*)(e_2 + i_q^*) \\ \dot{e}_2 = i_q = -e_2 - i_q^* - (e_3 + \omega^*)(e_1 + i_d^*) \\ + \gamma(e_3 + \omega^*) + u \\ \dot{e}_3 = \dot{\omega} = \sigma(e_2 + i_q^*) - \sigma(e_3 + \omega^*) \end{cases} \quad (5.35)$$

Herhangi bir denge noktası için  $(i_d^*, i_q^*, \omega^*)$  'ye sahip olunduğu varsayılırsa:

$$\begin{cases} i_d^* = -i_d^* + i_q^* \omega^* = 0 \\ i_q^* = -i_q^* - i_d^* \omega^* + \gamma \omega^* = 0 \\ \dot{\omega}^* = \sigma(i_q^* - \omega^*) = 0 \end{cases} \quad (5.36)$$

Bu dinamik sistem (5.34)'e indirgenir

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -e_1 + \omega^* e_2 + (i_q^* + e_2) e_3 \\ \dot{e}_2 = -\omega^* e_1 - e_2 - (i_d^* + e_1 - \gamma) e_3 + u \\ \dot{e}_3 = \sigma(e_2 - e_3) \end{cases} \quad (5.37)$$

Sistemin durumunun denge noktasına doğru yakınsaması  $(i_d^*, i_q^*, \omega^*)$  Böylece, dinamikleri (5.37) ile tanımlanan hata vektörünün sıfırda stabilize edilmesiyle elde edilir.

Parametreler  $\gamma$  ve  $\sigma$  nominal değerler etrafında merkezlenmiş aralıklar içinde tanımlandığı varsayılır  $\gamma_0$  ve  $\sigma_0$  :

$$\gamma \in [\underline{\gamma}, \bar{\gamma}] \text{ ve } \sigma \in [\underline{\sigma}, \bar{\sigma}] \quad (5.38)$$

Ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\gamma = \gamma_0 + \delta_\gamma \gamma_1 \text{ ve } \sigma = \sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1 \quad (5.39)$$

Eşitliği ile

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \frac{\underline{\gamma} + \bar{\gamma}}{2}, \gamma_1 = \frac{\bar{\gamma} - \underline{\gamma}}{2} \\ \sigma_0 &= \frac{\underline{\sigma} + \bar{\sigma}}{2}, \sigma_1 = \frac{\bar{\sigma} - \underline{\sigma}}{2} \\ &\text{ve } \delta_\gamma, \delta_\sigma \in [-1, 1] \end{aligned} \quad (5.40)$$

Parametrelerin bu yeni tanımını dikkate alarak  $\gamma$  ve  $\sigma$  (5.1) sistemi ve (5.35) hata sistemi sırasıyla (5.41) ve (5.42) diferansiyel sistemleri ile ifade edilebilir:

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -i_d + i_q \omega \\ \dot{i}_q = -i_q - i_d \omega + (\gamma_0 + \delta_\gamma \gamma_1) \omega + u \\ \dot{\omega} = (\sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1)(i_q - \omega) \end{cases} \quad (5.41)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -e_1 + \omega^* e_2 + (i q^* + e_2) e_3 \\ \dot{e}_2 = -\omega^* e_1 - e_2 - (i d^* + e_1 - \gamma_0 - \delta_\gamma \gamma_1) e_3 \\ \quad + \delta_\gamma \gamma_1 \omega^* + u \\ \dot{e}_3 = (\sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1)(e_2 - e_3) \end{cases} \quad (5.42)$$

Kontrolün amacı  $u$  parametrelerinin değerleri ne olursa olsun, sistemi (5.42) sıfır etrafında stabilize etmektir.  $\delta_\gamma$  ve  $\delta_\sigma$   $[-1,1]$  aralığında sistem kaotik davranış sergilemektedir.

Kaotik sistemi (5.42) kontrol etmek için önerilen yöntem, eklemeli bileşik matrisler kavramına dayanmaktadır. Aşağıda, kontrol yasasının sentezinde kullanılan tanımlar ve sonuçlar kısaca açıklanmaktadır.

Aşağıda,  $n$ . mertebeden kare matrislerin uzayı  $M_n(\mathbb{R})$  mertebeden kare matrislerin uzayı  $n$  içindeki elemanlarla  $\mathbb{R}$  'deki dış çarpım  $\mathbb{R}^n$  ile gösterilir.

$A$  matrisi  $(a_{ij})$  elemanlarından oluşmaktadır.  $M_n(\mathbb{R})$  ve  $k$  içinde bir tamsayı  $[1, n]$ . mertebeden eklemeli bileşik matris *olsun*.

Tanım 1:  $n$ . Mertebeden eklemeli bileşik matris  $A^{[k]}$  vektör uzayının kanonik temeline göre  $\Lambda^k \mathbb{R}^n$  tarafından üretilen  $k$  doğrusal bir operatördür.  $\Lambda^k \mathbb{R}^n$  bağıntısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\begin{aligned} A^{[k]}(v_1 \wedge \dots \wedge v_k) &= \sum_{i=1}^k v_1 \wedge \dots \wedge A v_i \wedge \dots \wedge v_k, \\ \forall v_1, \dots, v_k &\in \mathbb{R}^n \end{aligned} \quad (5.43)$$

$A$  ve  $A^{[k]}$  unsurları arasındaki ilişkiler doğrusaldır.

$i$  bir tamsayı olsun ve  $[1, C_n^k]$ .  $(i) = (i_1, \dots, i_k)$  ve  $i$   $k$ -tam sayı çiftlerinin sıralamasındaki parametre,  $1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n$  arasında bulunmaktadır. Aşağıdaki sonuç, eklemeli bileşik matrisin elemanlarını vermektedir.

[22, 23] Referanslara göre:

$$\tilde{a}_{ij} = \begin{cases} a_{i,i} + \dots + a_{i_k i_k} \\ (-1)^{r+s} a_{j_r i_s} \\ 0 \end{cases} \quad (5.44)$$

Özellikle de  $A^{[1]} = A, A^{[n]} = \text{iz}(A)$  için  $A \in M_3(\mathbb{R})$  :

$$A^{[2]} = \begin{pmatrix} a_{11} + a_{22} & a_{23} & -a_{13} \\ a_{32} & a_{11} + a_{33} & a_{12} \\ -a_{31} & a_{21} & a_{22} + a_{33} \end{pmatrix} \quad (5.45)$$

Tanım 2  $M_n(\mathbb{R})$   $A$  'nin bir alt matrisi olsun.  $M_n(\mathbb{R})$  logaritmik değişen  $\mu$  parametresi ile ilgili olarak :

$$\mu(A) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{|I + hA| - 1}{h} \quad (5.46)$$

Örnek olarak, bir matrisin Logaritmik ölçüleri  $A$  üç adet vektör normuna göre  $\|x\|_1 = \sum_i |x_i|, \|x\|_2 = \sqrt{\sum_i |x_i|^2}$  tarafından verilir:

$$\begin{aligned} \mu_1(A) &= \sup_j \left( a_{jj} + \sum_{i, i \neq j} |a_{ij}| \right) \\ \mu_2(A) &= s \left( \frac{A + A^T}{2} \right) \text{ et} \\ \mu_\infty(A) &= \sup_i \left( a_{ii} + \sum_{j, j \neq i} |a_{ij}| \right) \end{aligned} \quad (5.47)$$

$s(A)$ ,  $A$  'nin özdeğerlerinin maksimum reel kısmını ifade eder.

Bileşik matrisler, matrislerin kararlılığını incelemek için kullanılır. Bu çalışmada özellikle aşağıdaki sonuçlardan yararlanılacaktır.

**Teorem 1:** Eğer  $(-1)^n \det(A) > 0$  ise  $A$  matrisi kararlıdır.  $\mu$  parametresi eşitsizliği aşağıda verilmektedir.

$$\mu(A^{[2]}) < 0, m = C_n^2. \quad (5.48)$$

Önerilen kontrol yapısı aşağıdaki gibidir.



Matris  $A$  aşağıdaki durumlarda kararlıdır:

$$\begin{cases} (-1)^n \det(A) > 0 \\ \tilde{a}_{jj} + \sum_{i, i \neq j} |\tilde{a}_{ij}| < 0, \forall j = 1..C_n^2 \end{cases} \quad (5.49)$$

İspat: Teorem 1'e göre,  $(-1)^n \det(A) > 0$  ise, matrisin kararlılığı için yeterli bir koşul olup,  $\mu(A^{[2]}) < 0$  olmaktadır.

$$\mu_1(A^{[2]}) = \left( \tilde{a}_{jj} + \sum_{i, i \neq j} |\tilde{a}_{ij}| \right) < 0, j = 1..C_n^2 \quad (5.50)$$

ve

$$\tilde{a}_{ij} + \sum_{i, i \neq j} |\tilde{a}_{ij}| < 0, \forall j = 1..C_n^2 \quad (5.51)$$

Sistemin (5.42) kararlılığı bileşik matris yapısı kullanılarak incelenmiştir. Sistemin (5.42) kararlılığını ve dolayısıyla sistemin (5.41) iç durumunun referans noktaya yakınsamasını,  $\gamma$  ve  $\sigma$  parametrelerin değerleri ne olursa olsun sağlamaktadır.

Teorem 2: Eğer Sistemin belirsiz parametreleri (5.41)  $\sigma_1 - \sigma_0 - 1 + \gamma_1 \leq 0$  ise referans durum etrafında sistem stabilize edilebilir.  $(i_d^*, i_q^*, \omega^*)$  sistemine aşağıdaki kontrol yasasını uygulanır;

$$u = -k_1(i_d - i_d^*) - k_2(i_q - i_q^*) - k_3(\omega - \omega^*) \quad (5.52)$$

İle,

$$\begin{cases} k_1 = -\omega^* \\ k_2 = \alpha \left( \frac{2\sigma_1(|i_d - i_d^*| + \gamma_0 + 2|i_d^*|) + \gamma_1(\sigma_0 + \sigma_1)}{\sigma_0 - \sigma_1} \right. \\ \left. + |i_q| + |\omega^*| + \sigma_1 - 1 \right) + \beta \\ k_3 = -i_d + \gamma_0 \end{cases} \quad (5.53)$$

$\delta_\gamma, \delta_\sigma \in [-1,1], \alpha \geq 1$  ve  $\beta \geq 0$

Sistem (5.42) aşağıda matris formunda yazılabilir;

$$\dot{e} = A.e + bu \quad (5.54)$$

$$A = \begin{pmatrix} -1 & \omega^* & (iq^* + e_2) \\ -\omega^* & -1 & -(i_d^* + e_1 - \gamma_0 - \delta_\gamma \gamma_1) \\ 0 & \sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1 & -\sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1 \end{pmatrix} \quad (5.55)$$

$$b = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$u$  durum geri bildirim kontrol parametresi;

$$u = -(k_1.k_2.k_3)e \quad (5.56)$$

Denklem (5.54) 'e indirgenir:

$$\dot{e} = N.e \quad (5.57)$$

İle;

$$N = \begin{pmatrix} -1 & \omega^* & (iq^* + e_2) \\ -\omega^* - k_1 & -1 - k_2 & (-i_d^* - e_1 + \gamma_0) \\ 0 & \sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1 - k_3 & -\sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1 \end{pmatrix} \quad (5.58)$$

(24) sistemi kararlılığını göstermektedir.

$$N^{(2)} = \begin{pmatrix} -2 - k_2 & (-i_d^* - e_1 & -iq^* - e_2 \\ & +\gamma_0 + \delta_\gamma \gamma_1 - k_3) & \omega^* \\ \sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1 & -1 - \sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1 & (-1 - k_2 \\ 0 & -\omega^* - k_1 & -\sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1) \end{pmatrix} \quad (5.59)$$

Önerme 2'nin doğrudan uygulanmasıyla, aşağıdaki koşullar sağlandığında sistem (5.54) kararlı olmaktadır:

$$\begin{aligned} -2 - k_2 + |\sigma_0 + \delta_\sigma \sigma_1| &< 0 \\ |i_d^* + e_1 - \gamma_0 - \delta_\gamma \gamma_1 + k_3| & \\ +|\omega^* + k_1| - 1 - \sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1 &< 0 \\ |i_d^* + e_1 - \gamma_0 - \delta_\gamma \gamma_1 + k_3| & \\ +|\omega^* + k_1| - 1 - \sigma_0 - \delta_\sigma \sigma_1 &< 0 \\ \det(N) &< 0 \end{aligned}$$

$k_1$  ve  $k_3$  kazanç parametreleri;

$$k_1 = -\omega^*$$

ve

$$k_3 = -i_d^* - e_1 + \gamma_0$$

Koşulları aşağıdaki durumlarda sağlanır:

$$\begin{aligned} k_2 &\geq \sigma_0 + \sigma_1 - 2 \\ \sigma_1 - \sigma_0 - 1 + \gamma_1 &\leq 0 \\ k_2 &\geq |i_q| + |\omega^*| + \sigma_0 + \sigma_1 - 1 \\ k_2 &\geq \frac{2\sigma_1(|e_1| + \gamma_0 + 2|i_d^*|) + \gamma_1(\sigma_0 + \sigma_1)}{\sigma_0 - \sigma_1} - 1 \end{aligned}$$

Doğru olması için yeterli koşul;

$$k_2 \geq \frac{2\sigma_1(|e_1| + \gamma_0 + 2|i_d^*|) + \gamma_1(\sigma_0 + \sigma_1)}{\sigma_0 - \sigma_1} + |i_q| + |\omega^*| + \sigma_1 - 1$$

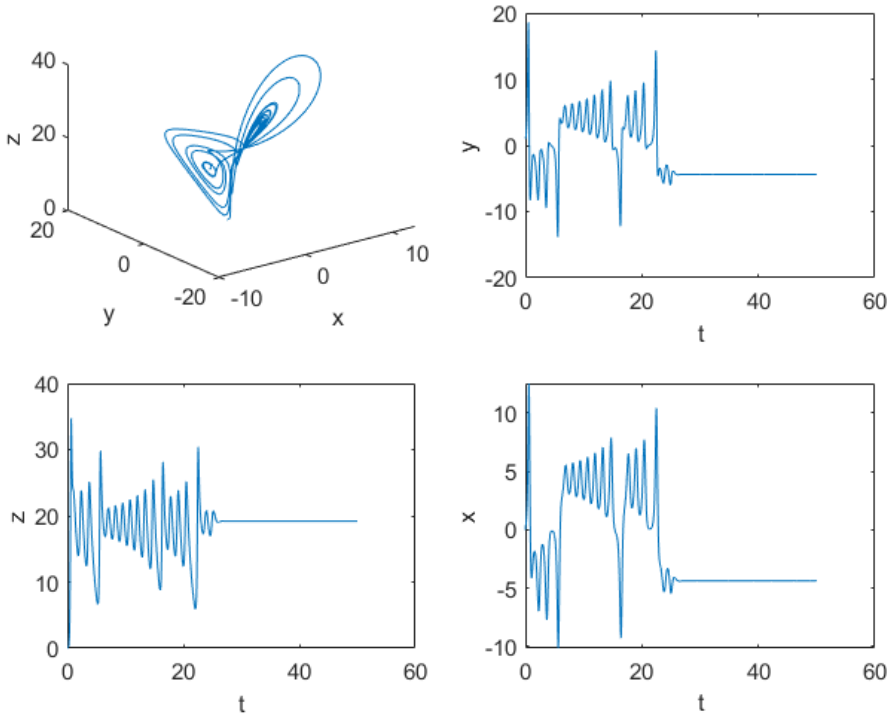
Burada  $k_2$  aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$k_2 = \alpha \left( \frac{2\sigma_1(|i_d - i_d^*| + \gamma_0 + 2|i_d^*|) + \gamma_1(\sigma_0 + \sigma_1)}{\sigma_0 - \sigma_1} + |i_q| + |\omega^*| + \sigma_1 - 1 \right) + \beta \quad (5.60)$$

$$\alpha \geq 1 \text{ ve } \beta \geq 0$$

Önerilen yöntemi doğrulamak için, kontrol edilen sistemin sayısal simülasyonları MATLAB üzerinde 0.01 saniyelik bir hesaplama adımında gerçekleştirilir. Simülasyon için MATLAB programı ode45 algoritması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.10.'de,  $a=5.45$  ve  $b=20$   $\varepsilon=1$  nominal değerleri için sapma

vektörü durumlarının gelişimini göstermektedir. Komut t=25 saniyede yürütülür. Tüm simülasyonlardaki başlangıç koşulları  $(x(0), y(0), z(0))=(0, 1, 0)$  olarak ayarlanmıştır.



**Şekil 5.10.** Bileşik matris yaklaşımı ile kaos kontrol.

### 5.7.3. Geri besleme denetleyicisi

Geri Besleme kontrolü, Sabit Mıknatıslı Senkron Motorun Kaos kontrolü için uygun kontrol girişlerini uygulayarak kullanılan bir tekniktir. Karmaşık doğrusal olmayan bir sistem olan sabit mıknatıslı senkron motorun kontrolü söz konusu olduğunda, farklı yöntemler kullanılarak kaos kontrolü sağlanabilir. Yaygın olarak kullanılan tekniklerden biri, geri besleme düzenleyicisidir [55].

Aşağıdaki denklemlere u kontrol parametresi eklenirse;

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + zy \\ \dot{y} = -y - zx + bz + u \\ \dot{z} = -z + xy \end{cases}$$

$\dot{y}$  komutu için y'ye eşit olmalıdır, bu nedenle  $u = zx - bz$ .

Denetlenen sistemdeki (5.1) denetleyici ifadesi u'nin ikamesi şöyle olur:

$$\begin{cases} \dot{x} = a(y - x) + zy \\ \dot{y} = -y \\ \dot{z} = -z + xy \end{cases} \quad (5.61)$$

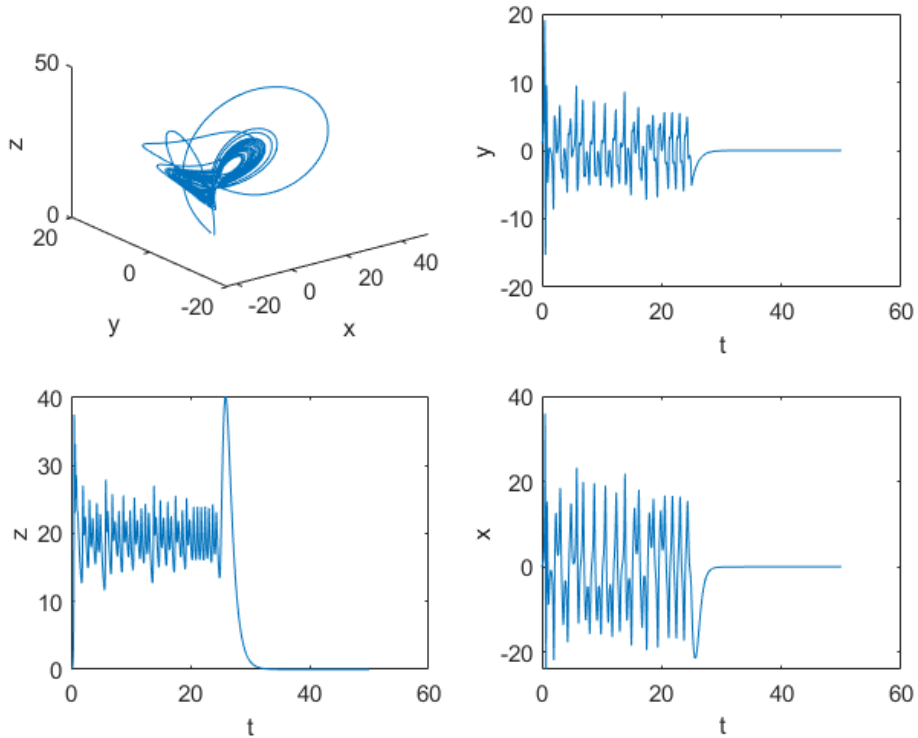
Denklemin çözümü  $y(t)=y(0)e^{-t}$  ve bundan  $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = 0$ , dolayısıyla sistem (5.61) şu şekilde indirgenebilir: aşağıdakiler:

$$\begin{cases} \dot{x} = -ax \\ \dot{z} = -z \end{cases} \quad (5.62)$$

Bu denklemden  $x(t)=x(0)e^{-at}$  ve  $z(t)=z(0)e^{-t}$  türetebilir. Bu da  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$  ve  $\lim_{t \rightarrow \infty} z(t) = 0$  verir.

$u=zx-bz$  kontrol cihazının sabit mıknatıslı senkron motorda bulunan kaotik davranışı kontrol edebilmesi için üç sınırın tümü sıfıra yakınsar.

Bunu kanıtlamak için  $(x(0), y(0), z(0))= (0,1, 0)$  ve  $a= 5.45$  ve  $b= 20$  başlangıç değerlerini kullanarak Matlab üzerinde denklemler çözüldü.



**Şekil 5.11.**  $u$ 'in  $t=25$ 'de Geri besleme denetleyicisi ile kaos kontrol.

## 5.8. Sabit Mıknatıslı Senkron Motorların Kaotik Senkronizasyonu

Tek yönlü eşleştirilmiş aynı sabit mıknatıslı senkron motorların kaotik senkronizasyonu, sabit mıknatıslara sahip birkaç özdeş senkron motorun tek yönlü olarak bağlandığı ve senkronize hareketlerinde kaotik davranış sergiledikleri karmaşık bir olay ifade eder.

Kaotik davranış sergileyen iki dinamik denklemi iki farklı başlangıç koşulu kullanarak senkronize edilmesi yapılabilir.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a(y_1 - x_1) + z_1 y_1 \\ \dot{y}_1 = -y_1 - z_1 x_1 + b z_1 \\ \dot{z}_1 = -z_1 + x_1 y_1 \end{cases} \quad (5.63)$$

Ve

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a(y_2 - x_2) + z_2 y_2 \\ \dot{y}_2 = -y_2 - z_2 x_2 + b z_2 \\ \dot{z}_2 = -z_2 + x_2 y_2 \end{cases} \quad (5.64)$$

İkinci denklem takımına  $u_1$  ve  $u_2$  komutlarını ekleyelim:

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = a(y_2 - x_2) + z_2 y_2 \\ \dot{y}_2 = -y_2 - z_2 x_2 + b z_2 + u_1 \\ \dot{z}_2 = -z_2 + x_2 y_2 + u_2 \end{cases} \quad (5.65)$$

Senkronizasyon hatası şu şekilde tanımlanır:

$$e_1 = x_2 - x_1;$$

$$e_2 = y_2 - y_1;$$

$$e_3 = z_2 - z_1.$$

Hatanın türevi aşağıdaki gibi verilir:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_2 - \dot{x}_1 = a(y_2 - x_2) + z_2 y_2 - a(y_1 - x_1) - z_1 y_1 = a(e_2 - e_1) + z_2 y_2 - z_1 y_1$$

$$\dot{e}_1 = a(e_2 - e_1) + z_2 e_2 + y_1 e_3$$

$$\dot{e}_2 = -y_2 - z_2 x_2 + b z_2 + u_1 + y_2 + z_2 x_2 - b z_2$$

$$\dot{e}_2 = -y_2 - z_2 x_2 + b z_2 + u_1 + z_2 x_1 - z_2 x_1 + y_2 + z_2 x_2 - b z_2 = -e_2 + b e_3 - z_2 e_1 + x_1 e_3 + u_1$$

$$\dot{e}_3 = -z_2 + x_2 y_2 + u_2 + z_1 + x_1 y_1 = -e_3 + x_2 e_2 + y_1 e_3 + u_2$$

$$u_1 = -be_3 + z_2e_1 + x_1e_3 \text{ ve } u_2 = -x_2e_2 - y_1e_3.$$

$u_1$  ve  $u_2$  denetleyicilerinin ifadelerini çıkartılırsa, hata sistem aşağıdaki gibi olur:

$$\dot{e}_1 = a(e_2 - e_1) + z_2e_2 + y_1e_3$$

$$\dot{e}_2 = -\dot{e}_2$$

$$\dot{e}_3 = -\dot{e}_3$$

Denklemin çözümü  $e_2(t) = e_2(0)e^{-t}$  ve  $e_3(t) = e_3(0)e^{-t}$  olup  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_2(t) = 0$  ve

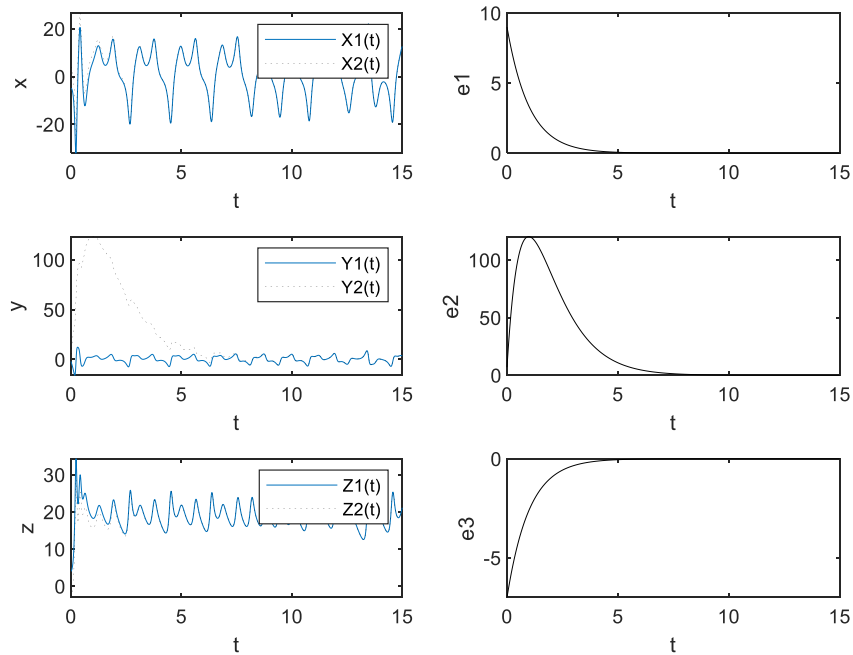
$\lim_{t \rightarrow \infty} e_3(t) = 0$  eşitliğini verir, dolayısıyla hata sistem aşağıdaki gibi indirgenebilir:

$$\dot{e}_1 = -ae_1$$

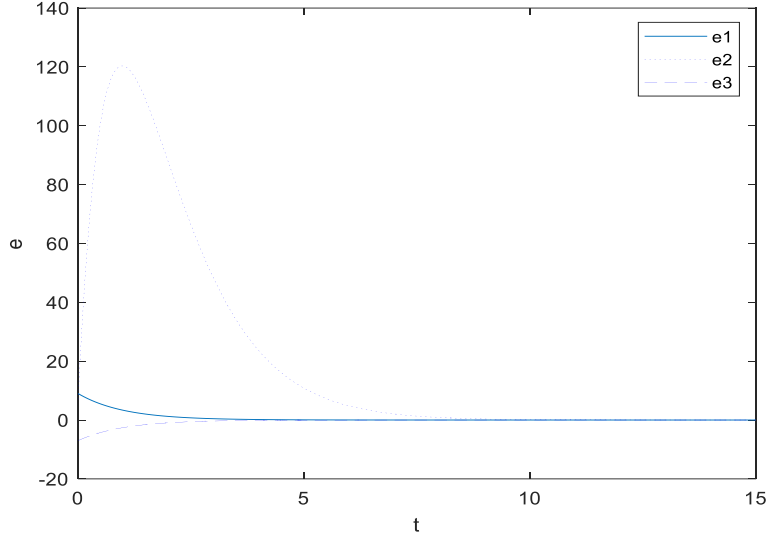
$$e_3(t) = e_3(0)e^{-\sigma t}$$

olduğu görülmektedir.

Burada  $u_1 = -be_3 + z_2e_1 + x_1e_3$  ve  $u_2 = -x_2e_2 - y_1e_3$  fonksiyonları senkronize edildiği Şekil 5.12.'e bakılarak söylenebilir.



Şekil 5.12. Kaos senkronizasyonu.



**Şekil 5.13.** Senkronizasyon hatası.

Sabit mıknatıslı senkron makinelerde kaotik analiz ve kaos senkronizasyonu çalışması, karmaşık ve öngörülemez dinamik olayların varlığını ortaya koymaktadır. Başlangıç koşullarına duyarlılık ve kaotik sistemlere ilişkin bir öngörülemezlik veren garip çekicilerin varlığı gibi kaosun farklı özelliklerini araştırıldı.

Kaotik analiz, sabit mıknatıslı senkron makinelerin temel özelliklerini daha iyi anlaşılmasına ve dinamik davranışlarını etkileyen kritik parametrelerin belirlenmesine imkan sağlamıştır. Birkaç senkronize makine arasında kesin ve tutarlı koordinasyon kurmayı mümkün kılan kaos senkronizasyonunun önemi de vurgulanmaktadır.

Kaos senkronizasyonu, güvenli iletişim, rasgele sayı üretimi ve kriptografi gibi çeşitli pratik uygulamalar için büyük bir potansiyele sahiptir. Kaosun öngörülemeyen doğasından yararlanarak, sağlam ve saldırılara karşı dayanıklı sistemler tasarlamak mümkündür.



## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbini sistemlerinin kaotik analizi, modern enerji sistemlerinde ortaya çıkabilecek karmaşık davranışlara büyüleyici bir bakış açısı sunuyor. Bu çalışma sırasında, kaosun teorik temellerini araştırılmıştır, sabit mıknatıslı senkron jeneratörlerin spesifik özelliklerini incelemiştir ve rüzgar türbinleri alanında kaotik analizin önemini tartışılmıştır.

Rüzgar enerjisi, fosil yakıtlara umut verici bir alternatif sunan, büyüyen bir yenilenebilir enerji kaynağıdır. Sabit mıknatıslı senkron jeneratörler, yüksek verimlilikleri ve kompaktlıkları nedeniyle modern rüzgar türbinlerinde popüler seçenekler haline geldi. Ancak bu sistemler, belirli koşullar altında meydana gelebilecek kaotik olaylara karşı bağışık değildir.

Kaotik analiz, başlangıç koşullarına duyarlılık ve yola bağlı yörünge dahil olmak üzere karmaşık matematiksel ilkelere dayanır. Bu kavramlar, rüzgar sistemlerini incelemek ve kararlılıklarını değerlendirmek için sağlam bir teorik çerçeve sağlar. Kaotik analiz, çatallanma bölgelerini, garip çekicileri ve periyodik davranışları tanımlayarak, sabit mıknatıslı senkron jeneratörlerin karmaşık dinamikleri hakkında bilgi sağlar.

Bu çalışmada sabit mıknatıslı senkron makinelerin kaotik davranışlarını inceleyen kapsamlı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sayesinde, makine davranışlarının karmaşıklığına dair değerli içgörüler elde edilmiştir. Faz portresi analizi, çatallanma diyagramları incelenerek ve Lyapunov üstelleri yöntemi kullanılarak kaosun varlığı kesin bir şekilde gözlenmiştir.

Kaosun varlığının doğrulanmasının ardından, MATLAB ortamında üç farklı verimli kontrol sistemi geliştirilmiştir: geri beslemeli kontrol, bileşim matris yaklaşımı ve pasif kontrol. Bütün kontroller  $t=25$  saniyede uygulandı ve saniyelerde kontrol altına alıyordular. Bu kontrol sistemlerinin amacı, sabit mıknatıslı senkron makinenin kaotik davranışlarını düzenlemek ve istenilen hale getirmektir. Bu bağlamda, basitlik ve etkinlik açısından geri beslemeli kontrol sistemi öne çıkmaktadır. Bu kontrol yöntemi, hem yüksek etkili bir performans sergilerken hem de kolayca kurulabilir olmasıyla avantaj sağlamaktadır.

Kontrol sistemleriyle ilgili çalışmaların tamamlanmasının ardından, senkronizasyon sistemi kurulumuna geçilmiştir. Bu aşamada, iki ayrı senkron makine sisteminin birbirine olan eşzamanlılığı hedeflenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, geliştirilen kontrol sistemlerinin yardımıyla iki farklı sistem arasındaki senkronizasyonun sadece birkaç saniye içinde sağlanabildiği gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, geliştirilen kontrol ve senkronizasyon yöntemlerinin etkinliğini ve gücünü vurgulamaktadır.

Sabit mıknatıslı senkron jeneratörlü rüzgar türbini sistemlerinin kaotik analizinin hala zorluklar ve sınırlamalar getirdiğine dikkat edilmelidir. Bu sistemleri tanımlamak için kullanılan matematiksel modeller basitleştirilebilir ve bu da tahminlerin doğruluğunu sınırlayabilir. Ek olarak, kaotik analiz, genellikle bu teknikleri gerçek dünya senaryolarında uygularken pratik zorluklar oluşturabilen büyük veri kümeleri ve hesaplama açısından yoğun hesaplamalar gerektirir.

Bu zorluklara rağmen, kaotik analiz, sabit mıknatıslı senkron jeneratör rüzgar türbini sistemlerini incelemek ve meydana gelebilecek karmaşık davranışları anlamak için güçlü bir çerçeve sunar. Bu çalışmanın sonuçları, rüzgar türbinlerinin tasarımına ve optimizasyonuna rehberlik ederek kararlılıklarını, enerji verimliliklerini ve ömürlerini geliştirebilir. Ayrıca kaotik analiz, rüzgar türbinlerinin düzenlenmesi ve kontrolü için yeni perspektifler açarak daha sürdürülebilir ve verimli enerji sistemlerine geçişe katkıda bulunabilir.

## KAYNAKLAR

- [1] F. L. W. J. K. C. Feng J, "Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland China—Based on GIS modeling and EROI analysis", *Resour Conserv Recycl*, 2020.
- [2] S. K. Chang B, "Evaluation of wind and solar energy investments in Texas", *Renew Energy*, c. 132, ss. 1348-1359, 2019.
- [3] L. C. Su K, "Chaos control of permanent magnet synchronous motors via unidirectional correlation", *Optik-Int J Light Electron Opt*, c. 125, ss. 3693-3696, 2014.
- [4] T. A. S. S. Singh Shweta, "Sensor-based and sensorless vector control of permanent magnet synchronous motor drives: a comparative study", *Recent Adv Electr Electron Eng*, c. 11, ss. 1-7, 2018.
- [5] J. G. M. and A. L. R. J. F. Manwell, "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2009.
- [6] C. İlkiliç, "Wind energy and assessment of wind energy potential in Turkey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 16, sy 2. Elsevier Ltd, ss. 1165-1173, 2012. doi: 10.1016/j.rser.2011.11.021.
- [7] K. Uslu, "Avrupa Birliği'nde Enerji ve Politikaları", *Marmara Üniversitesi İ.İ.B.F. Dergisi*, c. 19(1), ss. 155-172, 2004.
- [8] "(2022). Wind - Fuels & Technologies. Retrieved May 9, 2022 from <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/wind>", 09 Mayıs 2022.
- [9] Adam MIRECKI, "Comparative study of energy conversion chains dedicated to a low-power wind turbine", Doctoral thesis, National Polytechnic Institute of Toulouse France, 2005.
- [10] F. PITIERS, "Study And Control Of Asynchronous Generators For The Use Of Wind Energy", Doctoral Thesis, University of NANTES, 2003.
- [11] M. LOPEZ, "contribution to the optimization of a wind power conversion system for an isolated production unit", Doctoral Thesis, STITS Doctoral School, 2006.
- [12] A. P. L. T. E. İ. B. Karpuzoglu, "Design of control unit in PMSG based smallscale wind turbine for power factor correction", *7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris*, ss. 1190-1195, 2018.

- [13] M. B. C. J. R. B. D. M. M. G. Lawan, “Wind turbine and Batteries with Variable Speed Diesel Generator for Micro-grid Applications”, *7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris*, ss. 897-901, 2018.
- [14] F. K. S. Ikeda, “Efficiency Improvement of Isolated Bidirectional Boost Full Bridge DC-DC Converter for Storage to Grid Energy Management”, *International Conference on Smart Grid (icSmartGrid), Nagasaki, Japan*, ss. 254-257, 2018.
- [15] T. S. M. O. M. A. A. W. and M. M. H. M. M. Hussein, “Control of a grid connected variable speed wind energy conversion system”, *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Nagasaki*, ss. 1-5, 2012.
- [16] R. Krishnan, “Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless dc Motors for Servo Drives”, *IEEE Trans Ind Appl*, c. 27, sy 5, ss. 986-996, 1991, doi: 10.1109/28.90357.
- [17] D. P. Iracleous, N. Mastorakis, ve T. H. Piraeus, “Application of passivity control theory to chaotic systems”, 2004.
- [18] A. M. Eltamaly ve H. M. Farh, “Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control”, *Electric Power Systems Research*, c. 97, ss. 144-150, 2013, doi: 10.1016/j.epsr.2013.01.001.
- [19] M.T.Latreche, “Fuzzy Control Of The Permanent Magnet Synchronous Machine (MSAP) Used In A Wind Power System”, Magister’s dissertation, Ferhat Abbas University of Setif (UFAS), 2012.
- [20] W. A. H.Aid, “Synthesis of Non-Linear Control Laws for a Variable Speed Electrical Drive Based on a Permanent Magnet Synchronous Motor”, Master’s thesis, University abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [21] A. B. ÖZER, “Elektriksel Sürücü Sistemlerinde Doğrusal Olmayan Olguların Kaotik Analizi ve Yumuşak Hesaplama Yöntemleri ile Denetimi”, Doktora Tezi, Firat Üniversitesi, 2005.
- [22] K. T. , S. T. D. , Y. J. A. ALLIGOOD, “ Chaos”, *SpringerVerlag, New York*, 1997.
- [23] S. H. STROGATZ, “Nonlinear Dynamics And Chaos”, *Perseus Books Publishing, New York*, 1994.
- [24] E. N. Lorenz, “Deterministic nonperiodic flow”, c. 20, ss. 130-141, 1963.
- [25] M. Hénon and C. Heiles, “The applicability of the third integral of motion: Some numerical experiments”, *Astron. J.*, c. 69, ss. 73-79, 1964.
- [26] O. E. RöSSLER, “An equation for continuous chaos”, *Phys. Lett. A*, c. 57, ss. 397-398, 1976.
- [27] Y. Gao, K. T. Chau, ve S. Ye, “A novel chaotic-speed single-phase induction motor drive for cooling fans”, *Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.*, c. 2, ss. 1337-1341, 2005, doi: 10.1109/IAS.2005.1518533.

- [28] J. H. Chen, K. T. Chau, S. M. Siu, ve C. C. Chan, “Experimental Stabilization of Chaos in a Voltage-Mode DC Drive System”, 2000.
- [29] Z. M. Ge ve G. H. Lin, “The complete, lag and anticipated synchronization of a BLDCM chaotic system”, *Chaos Solitons Fractals*, c. 34, sy 3, ss. 740-764, 2007, doi: 10.1016/j.chaos.2005.11.013.
- [30] B. Robert, F. Alin, ve C. Goedel, “Aperiodic and Chaotic Dynamics in Hybrid Step Motor-New Experimental Results”, 2001.
- [31] J. Reiss, F. Alin, M. Sandler, ve B. Robert, “A detailed analysis of the nonlinear dynamics of the electric step motor”, *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*, c. 2, ss. 1078-1083, 2002, doi: 10.1109/ICIT.2002.1189321.
- [32] Y. Gao ve K. T. Chau, “Hopf bifurcation and chaos in synchronous reluctance motor drives”, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, c. 19, sy 2, ss. 296-302, Haz. 2004, doi: 10.1109/TEC.2004.827012.
- [33] J. H. Chen, K. T. Chau, Q. Jiang, C. C. Chan, ve S. Z. Jiang, “Modeling and analysis of chaotic behavior in switched reluctance motor drives”, *2000 IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference. Conference Proceedings (Cat. No.00CH37018)*, c. 3, ss. 1551-1556, 2000, doi: 10.1109/PESC.2000.880536.
- [34] X. Ge ve J. Huang, “Chaos control of permanent magnet synchronous motor”, *2005 International Conference on Electrical Machines and Systems*, ss. 484-488 Vol. 1, 2005, doi: 10.1109/ICEMS.2005.202575.
- [35] H. Ren ve D. Liu, “Nonlinear Feedback Control of Chaos in Permanent Magnet Synchronous Motor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, c. 53, sy 1, ss. 45-50, 2006, doi: 10.1109/TCSII.2005.854592.
- [36] D. Q. Wei, X. S. Luo, B. H. Wang, ve J. Q. Fang, “Robust adaptive dynamic surface control of chaos in permanent magnet synchronous motor”, *Physics Letters, Section A: General, Atomic and Solid State Physics*, c. 363, sy 1-2, ss. 71-77, Mar. 2007, doi: 10.1016/J.PHYSLETA.2006.10.074.
- [37] H. P. Ren ve C. Z. Han, “Chaotifying Control of Permanent Magnet Synchronous Motor”, *Proceedings of fifth international power electronics and motion control conference*, c. 1, ss. 1-5, Şub. 2006, doi: 10.1109/IPEMC.2006.4778064.
- [38] T. C. E. R. C. H. J. H. E. Y. K. U. J. A. C. B. M. J. S. S. and D. V. E. M. Glasser, “A multi-modal parcellation of human cerebral cortex”, *Nature*, c. 536, ss. 171-178, 2016.
- [39] Y. Yamaguti and I. Tsuda, “Functional differentiations in evolutionary reservoir computing networks”, *Chaos* 31, 2021.
- [40] K. Rajagopal, A. Karthikeyan, ve P. Duraisamy, “Chaos Suppression in Fractional order Permanent Magnet Synchronous Generator in Wind Turbine Systems”, *Nonlinear Engineering*, c. 6, sy 2, ss. 79-87, Haz. 2017, doi: 10.1515/nleng-2016-0059.

- [41] Z. Li, J. B. Park, Y. H. Joo, B. Zhang, ve G. Chen, “Bifurcations and chaos in a permanent-magnet synchronous motor”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, c. 49, sy 3, ss. 383-387, Mar. 2002, doi: 10.1109/81.989176.
- [42] M. Babaei, J. Nazarzadeh, ve J. Faiz, “Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems”, *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, doi: 10.1109/ICIT.2008.4608524.
- [43] J. Hu, L. Liu, ve D. wei Ma, “Robust nonlinear feedback control of a chaotic permanent-magnet synchronous motor with a load torque disturbance”, *Journal of the Korean Physical Society*, c. 65, sy 12, ss. 2132-2139, 2014, doi: 10.3938/jkps.65.2132.
- [44] J. Hu, Y. Qiu, ve H. Lu, “Adaptive robust nonlinear feedback control of chaos in PMSM system with modeling uncertainty”, *Appl Math Model*, c. 40, sy 19-20, ss. 8265-8275, Eki. 2016, doi: 10.1016/J.APM.2016.04.019.
- [45] (陈强) C. Q. vd., “Full-order sliding mode control of uncertain chaos in a permanent magnet synchronous motor based on a fuzzy extended state observer”, *Chinese Physics B*, c. 24, sy 11, ss. 110504-110504, Kas. 2015, doi: 10.1088/1674-1056/24/11/110504.
- [46] S. Luo, “Adaptive fuzzy dynamic surface control for the chaotic permanent magnet synchronous motor using Nussbaum gain”, *Chaos*, c. 24, sy 3, Eyl. 2014, doi: 10.1063/1.4895810/135620.
- [47] J. Yu, J. Gao, Y. Ma, H. Yu, ve S. Pan, “Robust adaptive fuzzy control of chaos in the permanent magnet synchronous motor”, *Discrete Dyn Nat Soc*, c. 2010, 2010, doi: 10.1155/2010/269283.
- [48] H. H. Choi, “Adaptive control of a chaotic permanent magnet synchronous motor”, *Nonlinear Dyn*, c. 69, sy 3, ss. 1311-1322, Ağu. 2012, doi: 10.1007/S11071-012-0349-7.
- [49] L. Wang, J. Fan, Z. Wang, B. Zhan, ve J. Li, “Dynamic Analysis and Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor With External Perturbation”, *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme*, c. 138, sy 1, Oca. 2016, doi: 10.1115/1.4031726.
- [50] M. Ataei, A. Kiyoumarsı, ve B. Ghorbani, “Control of chaos in permanent magnet synchronous motor by using optimal Lyapunov exponents placement”, *Phys Lett A*, c. 374, sy 41, ss. 4226-4230, 2010, Erişim: 22 Nisan 2023. [Çevrimiçi]. Erişim adresi: [https://www.academia.edu/9295607/Control\\_of\\_chaos\\_in\\_permanent\\_magnet\\_synchronous\\_motor\\_by\\_using\\_optimal\\_Lyapunov\\_exponents\\_placement](https://www.academia.edu/9295607/Control_of_chaos_in_permanent_magnet_synchronous_motor_by_using_optimal_Lyapunov_exponents_placement)
- [51] Q. Donglian, W. Jia-jun, ve Z. Guang-zhou, “Passive control of Permanent Magnet Synchronous Motor chaotic systems”, *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 2005, doi: 10.1007/BF02856180.
- [52] X. Chen, J. Hu, Z. Peng, ve C. Yuan, “Bifurcation and chaos analysis of torsional vibration in a PMSM-based driven system considering electromechanically coupled effect”, *Nonlinear Dyn*, c. 88, sy 1, ss. 277-292, Nis. 2017, doi: 10.1007/S11071-017-3419-Z.

- [53] D. Li, S. L. Wang, X. H. Zhang, D. Yang, ve H. Wang, “Impulsive control of permanent magnet synchronous motors with parameters uncertainties”, *Chinese Physics B*, c. 17, sy 5, ss. 1678-1684, May. 2008, doi: 10.1088/1674-1056/17/5/024.
- [54] W. Du-Qu ve Z. Bo, “Controlling chaos in permanent magnet synchronous motor based on finite-time stability theory”, *Chinese Physics B*, c. 18, sy 4, ss. 1399-1403, 2009, doi: 10.1088/1674-1056/18/4/019.
- [55] X. Liao ve P. Yu, “Absolute Stability of Nonlinear Control Systems”, c. 25, 2008, doi: 10.1007/978-1-4020-8482-9.





## **ÖZGEÇMİŞ**

Ad-Soyad : Abdallah Moussa YAYA

### **ÖĞRENİM DURUMU:**

- **Lisans** : 2018, Institut National Supérieur des Sciences et Techniques d'Abéché, elektrik
- **Yüksek lisans** : devam, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri, Elektrik

### **TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:**

- Abdallah Moussa YAYA, Prof. Dr. Yılmaz UYAROĞLU, Analysis and Control of Chaos in Permanent Magnet Synchronous Motor (Basımda)

### **DİĞER ESERLER :**