



T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**AVR SİSTEMİNİN PID KONTROLÖR
PARAMETRELERİNİN SÜRÜNGEN ARAMA
ALGORİTMASI (REPTILE SEARCH
ALGORITHM -RSA) KULLANILARAK
OPTİMİZASYONU**

Abdurrahim BAVLİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

AĞUSTOS-2023
BATMAN
Her Hakkı Saklıdır

TEZ KABUL VE ONAYI

Abdurrahim BAVLI tarafından hazırlanan “AVR Sisteminin PID Kontrolör Parametrelerinin RSA Algoritması Kullanılarak Optimizasyonu” adlı tez çalışması .../.../... tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Unvanı Adı SOYADI

.....

Danışman

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Üye

Unvanı Adı SOYADI

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr.

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Abdurrahim BAVLİ

Tarih:

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

AVR SİSTEMİNİN PID KONTROLÖR PARAMETRELERİNİN RSA ALGORİTMASI KULLANILARAK OPTİMİZASYONU

Abdurrahim BAVLİ

**Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

2023, 58 Sayfa

Jüri

Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

Doç. Dr. Yılmaz KAYA

Dr. Öğr. Üyesi Murat AKDEMİR

Bu tez çalışmasında, jeneratörlerde çıkış gerilimlerinin istenilen AVR sisteminin kontrolörsüz modeli incelenmiştir. Sonra durum uzay denklemi çıkarılmıştır. Buradan sisteme PID kontrolörü eklenerek modelleme yapılmıştır. Daha sonra kontrolörlü modelin sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. En son aşamada ise Sürüngen Arama Algoritması (RSA) açıklanarak PID kontrolör parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Sonuçlar grafiklerle desteklenmiştir.

Anahtar Kelimeler: AVR sistemi, Jeneratör, Optimizasyon, PID kontrolör, RSA algoritması

ABSTRACT

MS THESIS

OPTIMIZATION OF PID CONTROLLER PARAMETERS OF AN AVR SYSTEM BY USING RSA ALGORITHM

Abdurrahim BAVLI

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF
BATMAN UNIVERSITY
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE
IN ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

Advisor: Asst. Prof. Davut SEVİM

2023, 58 Pages

Jury

Asst. Prof. Dr. Davut SEVİM

Assoc. Prof. Yılmaz KAYA

Asst. Prof. Dr. Murat AKDEMİR

In this thesis, in the first stage, Generators and their working principles are mentioned. Then, the uncontrolled model of the AVR system, which ensures that the output voltage of the generators is within the desired value ranges, is examined first. The state space equation of the system is derived. From here, modeling was done by adding a PID controller to the system. Then the results of the model with the PID controller are shown graphically. In the last stage, RSA algorithm is explained and optimization of PID controller parameters is aimed. The results are supported by graphics.

Keywords: AVR system, Generator, optimization, PID controller, RSA algorithm

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında yönlendirmeleriyle ve tecrübesiyle çalışmaların yapılması sürecine büyük katkısı olan, karşılaşılan problemlerin çözümüne yönelik bilgi ve deneyimlerini güler yüz ve samimiyeti ile aktarmaya çalışan çok değerli danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM' e, engin bilgileriyle destek olan sayın Doç. Dr. Serdar EKİNCİ' ye şükranlarımı sunarım.

Yoğun iş programında desteklerini esirgemeyen meslektaşım Rojin TEMİZ'e teşekkürlerimi sunarım.

Eğitimim süresince karşılaştığım zorluklarda bana destek olan ve dualarını eksik etmeyen Annem ve Babam'a, çalışmalarım süresince moral ve motivasyonumu arttıran, keyiflendiren eşim Tuba BAVLİ' ye ve çocuklarım Baver ve Emirhan' a teşekkürlerimi sunarım.

Abdurrahim BAVLİ
BATMAN-2023

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	iv
TABLO LİSTESİ.....	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
1.GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	2
3. JENERATÖRÜN ÇALIŞMA MANTIĞI VE YAPISI.....	4
3.1. Rotor ve Yapısı	6
3.2. Stator	7
3.3. Jeneratörün Çalışması	8
4. PID (ORANSAL-İNTEGRAL-TÜREVSEL) KONTROLÖR	10
4.1. PID Kontrol Yapısının Tanımlanması	10
4.2. Oransal (P) Kontrolör Yapısının Tanımlanması.....	11
4.3. Oransal-İntegral (PI) Kontrolör Yapısının Tanımlanması.....	13
4.4. Oransal-Türevsel (PD) Kontrolör Yapısının Tanımlanması.....	15
4.5. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrolör Yapısının Tanımlanması.....	16
5. AVR SİSTEMİ VE MODELİ.....	19
5.1. Sistemin Durum Uzay Denklemi	22
5.2. PID Kontrolörlü AVR Sistemi.....	23
6. MATERYAL VE YÖNTEM.....	26
6.1. RSA (Reptile Search Algorithm) Algoritmasına Giriş	26
6.2. Timsahların Yapıları ve Yaşam Alanları	26
6.3. Başlama Fazı.....	28
6.4. Kuşatma Aşaması	29
6.5. Avlanma Aşaması	31
6.6. RSA Algoritmasının Uygulanması	34
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	35

7.1. Sonuçlara İlişkin Elde Edilen Grafikler	35
7.2. AVR Sisteminin Gerilim Yanıtlarının Karşılaştırılması.....	37
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	39
8.1. Sonuçlar	39
8.2. Öneriler	40
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	45



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ΔV_t : Senkron generatörün uç gerilimi

ΔV_{ref} : Referans gerilimi

ΔV_s : Sensör gerilimi

ΔV_e : Hata gerilimi

K_a : Kuvvetlendirici kazancı

K_e : Uyarma Kkazancı

K_g : Generatör kazancı

K_s : Sensör Kkazancı

T_a : Kuvvetlendirici zaman sabiti

T_e : Uyarma zaman sabiti

T_g : Generatör zaman sabiti

T_s : Sensör zaman sabiti

t_s : Yerleşme zamanı

t_r : Yükselme zamanı

E_{ss} : Kararlı durum hatası

β : Ağırlık faktörü

$e(t)$: Hata değeri

LB : Alt Sınır

UB : Üst Sınır

M_p : Maksimum aşım yüzdesi

E_{ss} : Kararlı durum hatası

Kısaltmalar

PID KONTROLÖR: Oransal, Türevsel, İntegral Kontrolör

AVR: Otomatik Gerilim Regülatörü

RSA: Sürüngen Arama Algoritması

ZN: Ziegler NICHOLS

GA: Genetik Algoritma

PSO: Parçacık Sürü Optimizasyonu

ZLG: ZWE-LEE GAING

Rand: Rastgele bir değer



TABLO LİSTESİ

Tablo 4.1 Kazançların etkileri.....	18
Tablo 5.1. Parametre değerleri	21
Tablo 5.2. Kontrolörsüz avr sisteminin basamak yanıtı değerleri	22
Tablo 5.3. ZN metoduyla elde edilen basamak yanıtı.....	25
Tablo 6.1. RSA algoritmasının parametreleri	34
Tablo 7.1. RSA algoritmasının istatistiksel sonuçları.....	37
Tablo 7.2. Önerilen RSA, PSO ve TSA tabanlı AVR sisteminin basamak yanıtlarının karşılaştırma grafiği değerleri	38

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 3.1. İndüksiyon geriliminin oluşması (Faraday kanunu).....	4
Şekil 3.2. Manyetik alan içerisinde emk oluşumu.....	5
Şekil 3.3. AC dalga oluşumu	5
Şekil 3.4. Alternatif akım eğrisi.....	6
Şekil 3.5. Rotorun yapısı	7
Şekil 3.6. Statorun yapısı.....	7
Şekil 3.7. Statorun alternatif akım oluşturma mantığı.....	8
Şekil 3.8. Rotor ve statorun çalışması	9
Şekil 4 1. Oransal (P) kontrolör yapısının blok diyagramı	12
Şekil 4.2. Oransal (P) kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği.....	13
Şekil 4.3. Oransal-integral (PI) kontrolör yapısının blok diyagramı.....	14
Şekil 4.4. Oransal-integral (PI) kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği	14
Şekil 4.5. Oransal-türevsel (PD) kontrolör yapısının blok diyagramı.....	15
Şekil 4.6. Oransal-türevsel (PD) kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği	16
Şekil 4.7. Oransal-integral-türevsel (PID) kontrolör yapısının blok diyagramı	17
Şekil 4.8. Oransal-integral-türevsel (PID) kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği	18
Şekil 5.1. AVR sisteminin şematik çalışma şeması.....	19
Şekil 5.2. AVR sisteminin blok diyagramı.....	20
Şekil 5.4. PID kontrolörlü avr sistemin blok diyagramı.....	24
Şekil 5.5. ZN metoduyla elde edilen basamak yanıtı	24
Şekil 6.1. Avın kuşatılması aşaması ($t \leq T_2$ iken)	31
Şekil 6.2. Ava saldırı aşaması ($t > T_2$ iken).....	32
Şekil 6.3. RSA algoritmasının blok diyagramı.....	33
Şekil 6.4. RSA algoritmasının uygulanması.....	34
Şekil 7.1. RSA/PID kutu grafiği.....	35

Şekil 7.2. Yakınsama eğrisi	36
Şekil 7.3. Koşturma sonuçları.....	36
Şekil 7.4. Önerilen RSA, PSO ve TSA tabanlı avr sisteminin basamak yanıtlarının karşılaştırma grafiği	37



1.GİRİŞ

Elektrikle çalışan cihazların nominal gerilim değerleri dışına çıkması, kararsız çalışma ve bozulma gibi sorunlara yol açabilmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinde, çıkış geriliminin belirli bir aralıkta tutulması önemlidir (Gozde, 2020). Son yıllarda, enerji üretimi için kullanılan santrallerin artmasıyla birlikte, gerilim kararlılığı ve stabilitesi daha da önem kazanmıştır (Kundur ve ark., 1994). AVR sistemi, senkron jeneratörlerin değişen yük durumlarına göre gerçek güç, reaktif güç ve gerilim seviyesini kontrol etmek için kullanılır (Ula ve ark., 1992).

Senkron jeneratörlerin çıkış gerilimini etkileyen birçok faktör vardır. Örneğin ani yük değişimleri ve sistem titreşimlerini sayabiliriz. Bu sorunların etkilerini azaltmak için AVR sistemi kullanılır. Kontrolör tasarımı sırasında en büyük sorun, en uygun parametre değerlerinin bulunmasıdır. PID kontrolörü, endüstride yaygın bir şekilde kullanılan ve oransal, integral ve türevsel kazançlar olmak üzere üç kısımdan oluşan bir kontrolör türüdür (Munagala ve ark., 2022).

Literatürde Ziegler-Nichols gibi geleneksel yöntemlerin yanı sıra, teknolojinin gelişmesiyle birlikte çeşitli algoritmalar da oluşturulmuştur. Bunlardan bazıları, Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization - PSO), Genetik Algoritma (Genetic Algorithm) ve Yapay Arı Kolonisi Algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm) gibi algoritmaları içerir (Hekimoğlu ve ark., 2019).

Metasezgisel algoritmalar arttıkça sistemler üzerindeki etkinlikleri sürekli olarak kontrol edilmeli ve diğer algoritmalarla karşılaştırmalar yapılmalıdır. Böylelikle yeni çıkan algoritmaların bu sistemler üzerindeki kontrolörlerin parametrelerinin değerleri daha da iyileştirilerek en uygun sonuçlar çıkarılmaya çalışılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, AVR sisteminin kontrolörsüz modeli incelenmiştir. Sonra durum uzay denklemi çıkarılmıştır. Buradan sisteme PID kontrolörü eklenerek modelleme yapılmıştır. Daha sonra kontrolörlü modelin sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. En son aşamada ise meta sezgisel bir algoritma olan RSA algoritması açıklanarak PID kontrolör parametrelerinin optimizasyonu amaçlanmıştır. Sonuçlar grafiklerle desteklenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

AVR sistemine ait PID kontrolör parametreleri çeşitli optimizasyon algoritmaları kullanılarak elde edilip programlar vasıtasıyla kullanılır. Algoritma yöntemleri geliştirildikçe sistemlere uygulanıp karşılaştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların başında Gaing (2004), Parçacık Sürü Optimizasyonu tekniğini kullanarak AVR sisteminin PID kontrolör parametrelerinin optimizasyonunu yaparak karşılaştırmalı sonuçlar sundu. Genetik Algoritmaya göre daha iyi sonuçlar verdiğini gösterdi.

Kashki ve ark. (2008), Pekiştirmeli öğrenme otomatları yöntemini (Reinforcement Learning Automata – RLA) kullanarak, analitik sistem modeli bilgisi olmadan kontrol performansını iyileştirmeyi keşfedebilen ve öğrenebilen Sürekli Eylem Takviyeli Öğrenme Otomatını (CARLA) önermişlerdir. Sonuçlar, Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile karşılaştırılmıştır.

Zhu ve ark. (2009), CAS (Kaotik Karınca Sürüsü) algoritmasını yani karıncaların kaotik ve kendi kendini organize etme davranışlarından esinlenen bu algoritmayı kullanmış ve sonuçlarını GA yöntemiyle karşılaştırmıştır.

Gozde ve ark. (2011), Yapay Arı Kolonisi algoritması kullanarak karşılaştırmalı performans analizi yapıp, sonuçlarını PSO ve DE (Diferansiyel Evrim) algoritmalarıyla karşılaştırmıştır .

Panda ve ark. (2012), bir diğer adı çoğu optimize edici algoritma olan (MOL-Many Optimizing Liaisons) basitleştirilmiş PSO algoritmasını kullanarak sonuçlarını yapay arı kolonisi algoritmasıyla karşılaştırmıştır .

Bendjeghaba (2014), ateşböceklerinin birbirlerine olan uzaklıkları ve çekicilikleri baz alınarak oluşturulan sürekli ateş böceği algoritması kullanarak elde etmiş olduğu sonuçları PSO algoritmasıyla karşılaştırmıştır.

2016 senesinde 2 farklı makale yayınlanmış olup, bunlardan biri Güvenç ve ark., biyocoğrafya temelli optimizasyon diğeri ise Chatterjee ve ark. tarafından yazılmış olan öğretme-öğrenme temelli optimizasyon (Teaching-Learning Based Optimization - TLBO) algoritmasıdır.

Hekimoğlu ve ark. (2018), tarafından Grasshopper optimizasyon algoritması kullanılarak yapay arı kolonisi algoritmasıyla karşılaştırma yapılmıştır .

Zhou ve ark. (2019), Su Dalgası Optimizasyon algoritması kullanarak sonuçlarını birkaç farklı algoritmayla karşılaştırmış, Ekinci ve ark. (2019) ise geliştirilmiş böbrek ilhamlı algoritma kullanarak sonuçlarını karşılaştırmalı olarak göstermiştir.

Köse (2020), tarafından Ağaç Tohumu Algoritması (TSA) kullanılarak sonuçları çeşitli algoritmalarla karşılaştırılmıştır.

Alghamdi ve ark. (2022), tarafından Hibrit Simüle Tavlama ve Goril Birlikleri Optimizasyonu kullanarak sonuçlar elde edilmiştir.

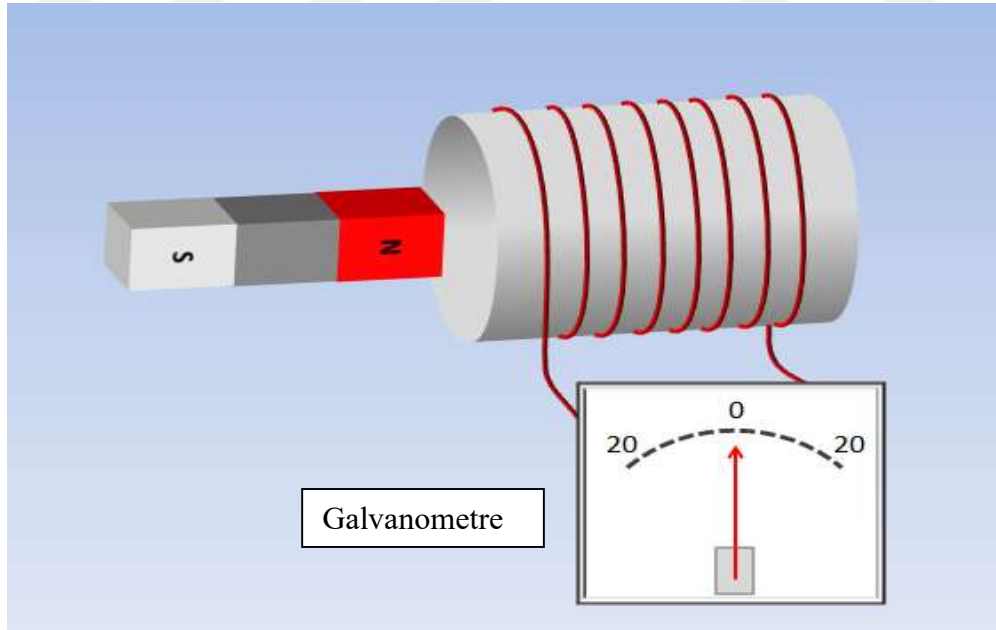


3. JENERATÖRÜN ÇALIŞMA MANTIĞI VE YAPISI

Jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirme işini yapmaktadır. Mekanik enerji, bir mil vasıtasıyla alınıp rotorun döndürülmesi ile birlikte stator sargılarında alternatif akım üretimi gerçekleştirilir. Jeneratör temel olarak, rotor, elektrik akımını üreten stator ve akımı doğrultan diyotlardan oluşmaktadır. Bunların yanında, manyetik alan oluşturulması için rotora bağlı fırçalar, rotorun yumuşak bir şekilde dönmesini sağlayan rulmanlar ile rotorun, statorun ve diyotların soğumasını sağlamak için bir fan bulunmaktadır.

Jeneratörler Faraday prensibine göre çalışmaktadır. Bu prensibe göre bir manyetik alan içerisinde hareket eden bir iletken, manyetik kuvvet hatlarını kesiştiğinde bu iletken üzerine elektromotor kuvveti uygulanmakta ve indüksiyon gerilimi oluşmakta ve iletkenin bir yüke bağlanması durumunda ise üzerinden bir akım akışı olmaktadır (Plonsey ve Barr, 1982).

Şekil 3.1’ de görülen iletkenin bobine mıknatıs yaklaştırılıp uzaklaştırıldığında iletken üzerinde bir gerilim indüklenir. Oluşan bu gerilim çok küçük gerilim değerlerini okuyabilen galvanometre cihazıyla görülebilmektedir.

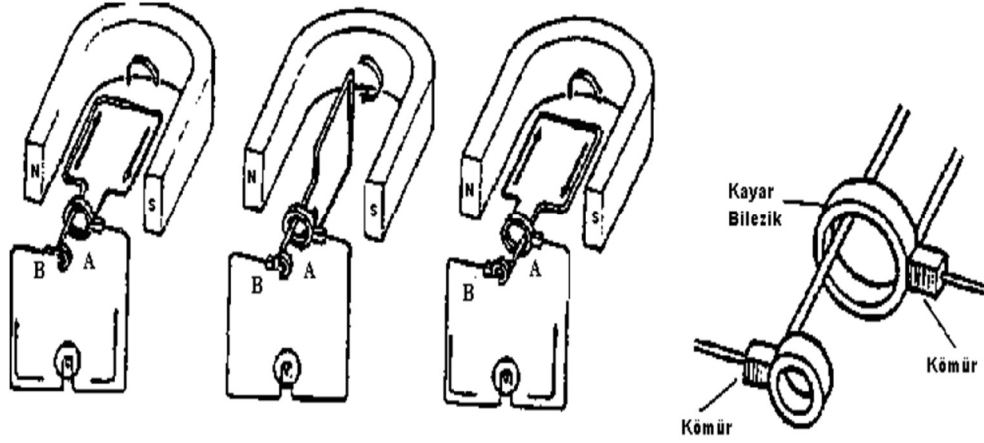


Şekil 3.1. İndüksiyon geriliminin oluşması (Faraday Kanunu) (Doğanay, 2022)

Sonuç olarak, tek bir iletkenin bir manyetik alan içinde döndürülmesiyle oluşan elektromotor kuvveti değeri çok küçük çıkmaktadır.

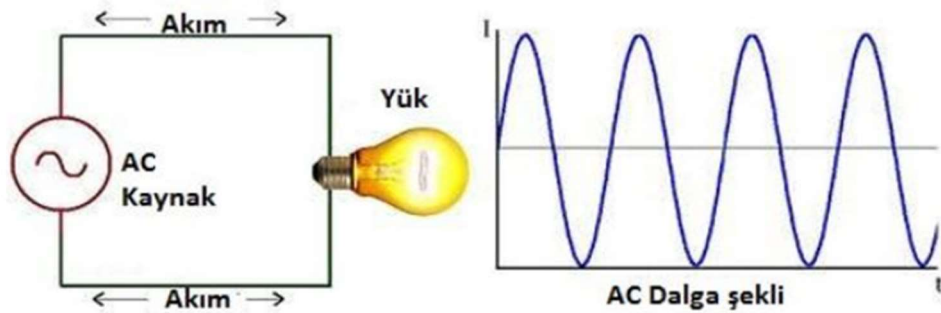
İletken sayısı ikiye çıkarılıp bunlar uç uca bağlanırsa oluşan Elektromotor Kuvveti (EMK) değeri de iki katına çıkacaktır. Bu şekilde manyetik alan içerisindeki iletken sayıları artırılarak daha fazla EMK değeri üretilebilecektir (Doğanay, 2022).

Şekil 3.2’de gösterildiği gibi akım, kayar bilezik ve kömürler (böylelikle bobin dönebilecektir) üzerinden beslenen bir bobin tarafından üretildiğinde lamba üzerinden geçen akım miktarı ve akımın yönü de değişecektir. Bobinin döndürülmesiyle, ilk yarım turda üretilen akım, "A" tarafındaki kömürden verilecek, lambadan geçecek ve "B" tarafındaki kömüre dönecektir. Diğer yarım turda ise akım "B" tarafından verilip "A" tarafına geri dönecektir.



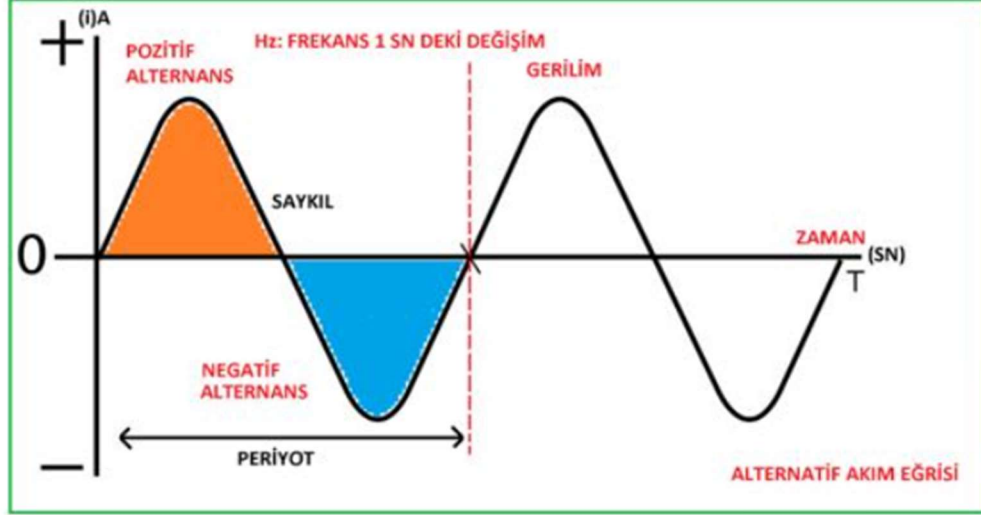
Şekil 3.2. Manyetik alan içerisinde EMK oluşumu (Doğanay, 2022)

Bu metotla Şekil 3.3’te görüldüğü gibi AC dalga oluşmaktadır. Akım, sıfır değerinden başlayıp tepe değerine ulaştıktan sonra tekrar sıfır değerine gider.



Şekil 3.3. AC Dalga oluşumu (Candemir, 2022)

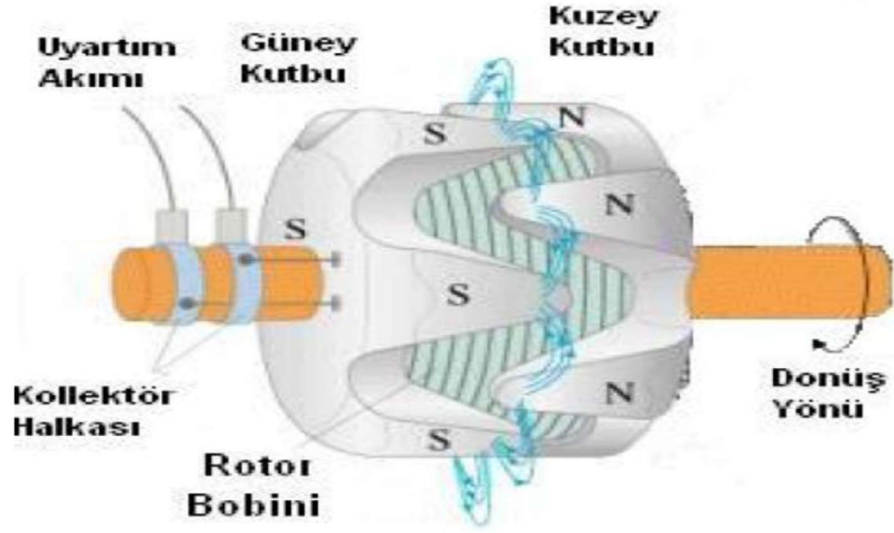
Bu duruma Alternans denir. Daha sonra diğer ucundan başlayıp tekrar tepe değerine ulaşır ve tekrar sıfıra gider. Bu iki alternanstan oluşan eğri kısmına 1 saykıl (dalga) adı verilir. Bir saykıl için geçen zamana ise Periyot denir ve T ile gösterilir, 1 saniyede tekrarlanan saykıl sayısına ise Frekans denir ve sembolü f 'dir. Frekans' ın ise birimi Hertz (Hz) dir. Bu durum Şekil 3.4'te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Alternatif akım eğrisi (Candemir, 2022)

3.1. Rotor ve Yapısı

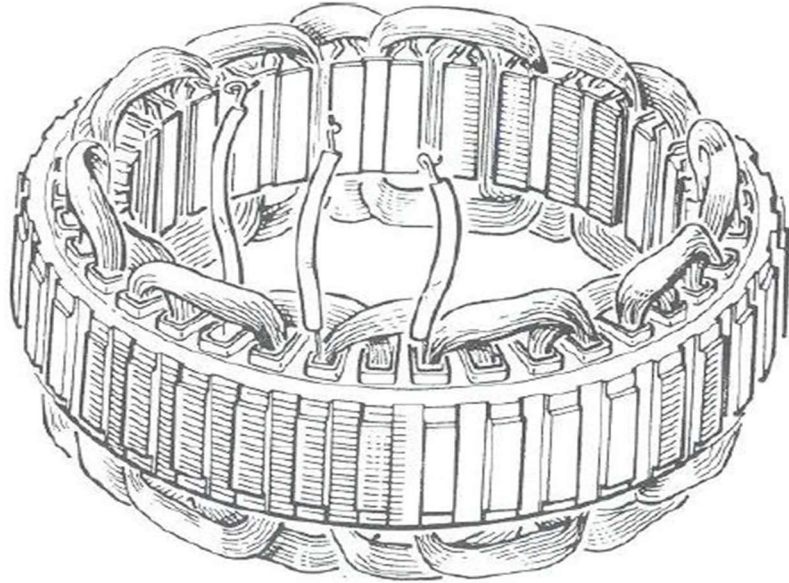
Rotor, Şekil 3.5'teki gibi N-S manyetik kutupları, rotor bobini, kolektör halkaları ve bir rotor milinden oluşmaktadır. Jeneratörün dönen hareketli parçasıdır. Manyetik alan (Rotor) bobini, dönme yönüyle aynı yönde sarılmıştır ve bobinin her iki ucu bir kolektör halkasına bağlanmıştır. Bobinin her iki ucuna manyetik alan bobinini kuşatacak şekilde kutup çekirdeği (N-S) bağlanmıştır. Manyetik alan, akımın rotor bobini üzerinden geçmesiyle ve kutuplardan birinin N kutbu, diğerinin S kutbu olmasıyla oluşturulmaktadır. Kolektör halkaları, fırçaların temas ettiği 4 yüzeyler yüksek kalitede işlenmiş, paslanmaz çelik gibi metallerden yapılmaktadırlar. Bunlar rotor milinden yalıtılmışlardır.



Şekil 3.5. Rotorun yapısı (Candemir, 2022)

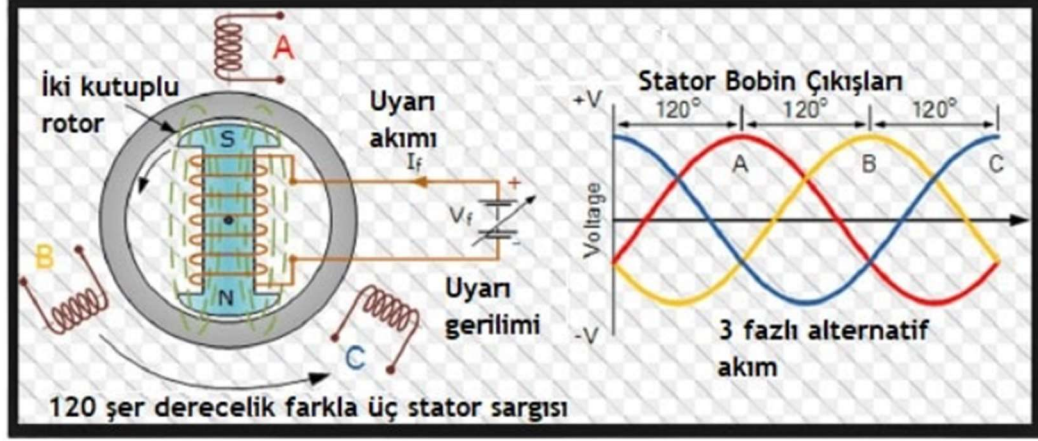
3.2. Stator

Stator yapısı Şekil 3.6’da görüleceği üzere, stator çekirdekleri ve stator bobinlerinden meydana gelmiştir. Ön ve arka kapaklara tutturulmuştur. Stator çekirdeği, çelik kaplanmış ince plakalardan meydana gelmektedir.



Şekil 3.6. Statorun yapısı (Otomobilteknolojisi.com, 2023)

Çekirdeğin iç kısmında şekil 3.7'deki gibi kanallar ve üç adet stator sargısı bulunmaktadır. Her bir sargıya bir faz denir. Jeneratörlerin üç fazlı yapılmasının sebebi, çıkış akımını 5 yükseltmek ve çalışma sırasında meydana gelebilecek akım değişimlerini azaltmaktır. Bu fazlar birbirinden 120° açı farkıyla çalışmaktadır.



Şekil 3.7. Statorun alternatif akım oluşturma mantığı (elektrikmen.com, 2023)

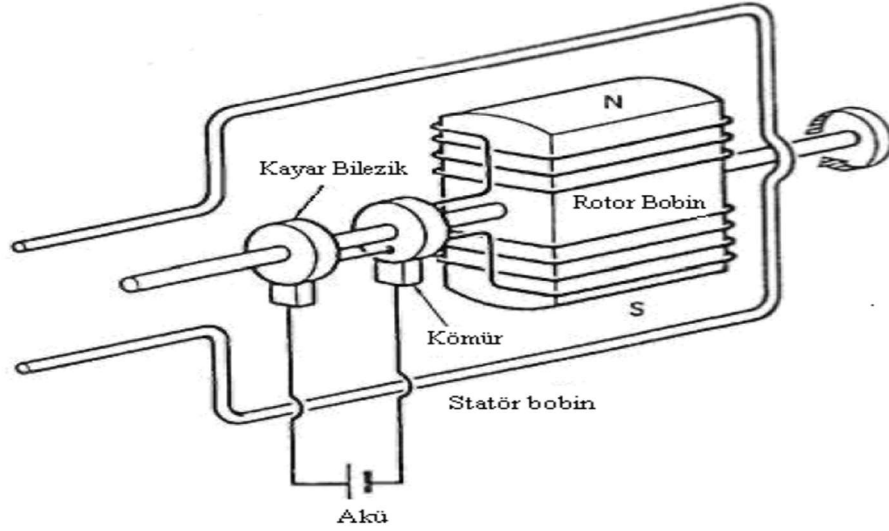
3.3. Jeneratörün Çalışması

Jeneratörün çıkış gücü üç etkene göre değişmektedir. Bunlar;

- Stator sargılarının boyu ve kesiti,
- Jeneratör rotorunun dönüş hızı,
- Rotor sargılarının oluşturduğu manyetik alandır.

Stator sargılarının sayısı belli olduğu için değişimi mümkün olmamakta, rotorun dönme hızı ise motordan aldığı ivmeye göre olduğu için değiştirilememektedir. Jeneratörün çıkış enerjisinin kontrol edilebilmesi için manyetik alanı oluşturan rotor sargılarının çektiği akım (ikaz akımı) şiddeti kontrol edilmelidir (Schlabach, 2005).

Faraday kanuna göre sabit bir manyetik alan içerisinde iletkenin döndürülmesiyle iletkende akım indüklenecaktır; fakat bu yöntemde iletkenin devri yükseldiğinde fazla miktardaki akımın indüklenmesinden dolayı iletkenin ısınmasına neden olacaktır. Bu mahsuru ortadan kaldırmak için Şekil 3.8.'de olduğu gibi manyetik alan sabit bir iletken içerisinde hareket ettirilerek iletkende akım indüklenerek ısınma sorunu ortadan kaldırılmıştır.



Şekil 3.8. Rotor ve statorun çalışması (Schlabach, 2005)

Jeneratörde, istenen gerilim değerlerini elde edebilmek için mıknatısın belli bir hızda döndürülmesinin sağlanması gerekir. Aynı zamanda Jeneratörün bağlı olduğu hatta yükler değişken olduğundan, jeneratörün hızı sabit tutulamaz. Bu sorunu çözmek ve istenen bir gerilim değerinin sağlanması amacıyla sabit bir mıknatıs yerine elektromıknatıs kullanılmıştır. Elektromıknatıs, üzeri bobinlerle sarılmış bir demir çekirdektir. Bobinlerden akım geçtiğinde, çekirdek mıknatıslanır. Mıknatıslanmanın derecesi, bobinden geçen akımın miktarıyla değişir. Elektromıknatıstan geçen akım miktarı gerilim regülatörü tarafından kontrol edilir.

Gerilim regülatörü, jeneratör düşük hızlarda dönerken ikaz akımını artırır, jeneratör yüksek hızlarda dönerken de ikaz akımını azaltarak oluşan manyetik alanı değiştirir. Böylece jeneratör yüke bağlı olmaksızın istenen gerilim değeri üretir. Jeneratörlerde akımın üretildiği iletkenler sabit durur ve manyetik alanı oluşturan rotor kısmı döner.

4. PID (ORANSAL-İNTEGRAL-TÜREVSEL) KONTROLÖR

4.1. PID Kontrol Yapısının Tanımlanması

PID (oransal-integral-türevsel), kontrolör yapısı endüstriyel sistemlerde ve otonom kontrol amaçlı uygulamalarda feedback kontrol yapısı ile büyük bir öneme sahiptir. Sistemler veya otonom uygulamalarda kararsız olan durumları, istenilen referans noktasında giriş işareti ile çıkış işareti arasındaki hızlı değişimleri süreç içerisinde farkı hesaplayarak sistemleri daha hızlı tepki veren ve istenilen referans noktasına getirerek sistemi kararlı ve verimli bir şekilde çalışmasında büyük öneme sahip bütüncül bir yapıdır (Birok, 2013).

PID (oransal-integral-türevsel), kontrolörün sade yapısı sayesinde üç ana bileşen faktör parametre yapısıyla, kararlı olan giriş sinyalinin uygun referans değer aralığında tatbik edilebilir olması ve bu referans değerleri arasında stabil, bir durumda tutması, kontrolör yapısını fazla bozmaması, ayrıca değişken olan durumlarda da sisteme ait parametre değerlerini çok fazla etkilememesine karşı sistem duyarlılığını azami olması gibi etkenlerden ötürü PID kontrolör yapısını endüstriyel ve otonom sistemlerde önemli bir hususiyete sahip özellikleridir (Markaroğlu, 2006).

PID (oransal-integral-türevsel) kontrolör, sade yapısı sayesinde üç ana bileşen faktör parametre barındırır; oransal (P), integral (I) ve türevsel (D). Kontrolör yapısında bulunan oransal bileşen oluşabilecek hatalara karşı dürtüyü, integral bileşeni ise nihai hataların totale bağlı dürtüyü, türevsel bileşeni ise hatanın değişim oranına bağlı olarak dürtüyü izah etmektedir. PID (oransal-integral-türevsel) kontrolör ile hata, hatanın sürece bağlı olarak integrali ve hata değişkenine bağlı olarak bir kontrol sinyal çıktı üretmektedir (Astrom, 1995). Bu çıktı sinyaline bağlı olarak matematiksel olarak ifade edilecek olursa genel olarak yazılacak olan denklemler denklem 4.1, denklem 4.2 ve denklem 4.3'te gösterilmiştir;

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (4.1)$$

Şeklinde ifade edilebilir. Fakat endüstriyel sistemlerde sık kullanılan denklem ise;

$$u(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (4.2)$$

Şeklinde verilebilir. Denkleminde verilen ifadeler ise;

K_P : Oransal katsayısı

K_I : İntegral katsayısı

K_D : Türevsel katsayısı

K_C : toplam kontrolör kazanç

T_I : integral zaman sabit

T_D : türev zamanı sabit

$e(t)$: hata sinyali

$u(t)$: kontrol sinyali

Olarak tanımlanabilir.

PID (oransal-integral-türevsel) kontrolör yapısına göre;

$u(t)$ = kontrol sinyali

$P(t)=K_C e(t)$ oransal terim

$I(t) = \frac{K_C}{T_I} \int e(t) dt$ İntegral ifadesi

$D(t) = K_C T_D \frac{de(t)}{dt}$ Türev ifadesi ise olarak yazıldığında,

$$u(t) = P(t) + I(t) + D(t) \text{ biçimde ifade edilebilir (Siemens, 2011).} \quad (4.3)$$

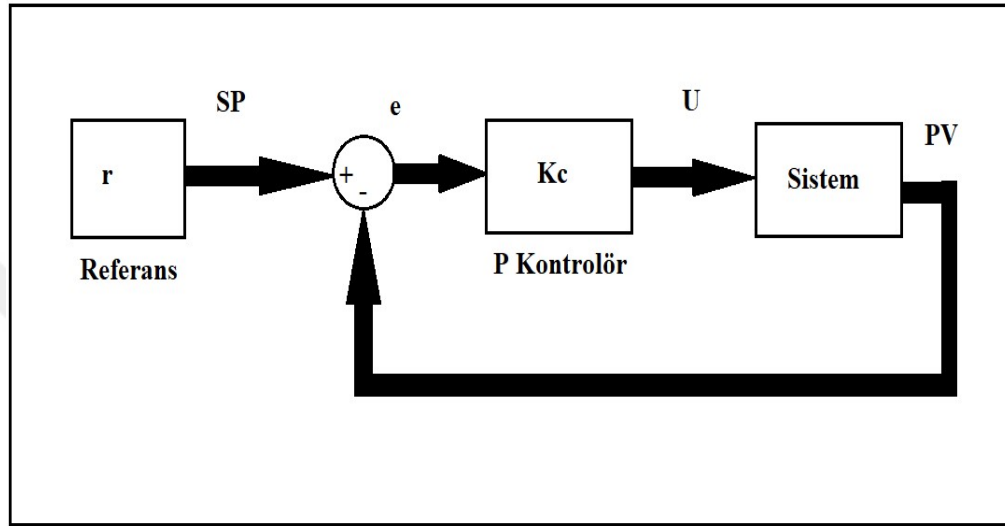
Bu denklem takımlarında oransal ifade $e(t)$ hata sinyalinin oran katsayı değeriyle (K_C, K_P) çarpılması kadar, hata değeri sıfır değerinden büyük olursa kontrolör sinyali pozitif yönde yani arttırma yönünde, şayet hata değeri sıfırdan küçük olursa sinyal negatif yani azaltma yönünde etki gösterecektir. İntegral ifade $I(t)$ ise kontrolör sinyali arttırma veya eksiltme doğrultusunda etkilenmesi hatanın sürece bağlı olarak total değere bağlıdır. Türevsel ifade $D(t)$ ise hatanın zaman içerisindeki değişim oranı nispetinde kontrolör sinyali değişecektir.

4.2. Oransal (P) Kontrolör Yapısının Tanımlanması

Oransal (P) kontrolör, katsayının faal olarak PID (oransal-integral-türevsel), kontrolör tipidir. Oransal (P) kontrolör kuralı ise,

$$U = K_C (SP - PV) \quad (4.4)$$

Şeklinde ifade edilen bir kontrolör yapısı olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki ifadelerde ise SP kontrol edilmek istenilen büyüklük ifade edilmek istenilen değeri, PV ifadesi ise kontrol edilmek istenilen büyüklüğe ait gerçek değerini ve K_C sabiti ise oransal (Kurtulan, 2008) kontrolörün katsayısını ifade etmektedir. Oransal (P) kontrolör ifade edilmesi için basit bir blok diyagramı ile şekil 4.1’ de ele alınabilir.



Şekil 4 1. Oransal (P) Kontrolör Yapısının Blok Diyagramı

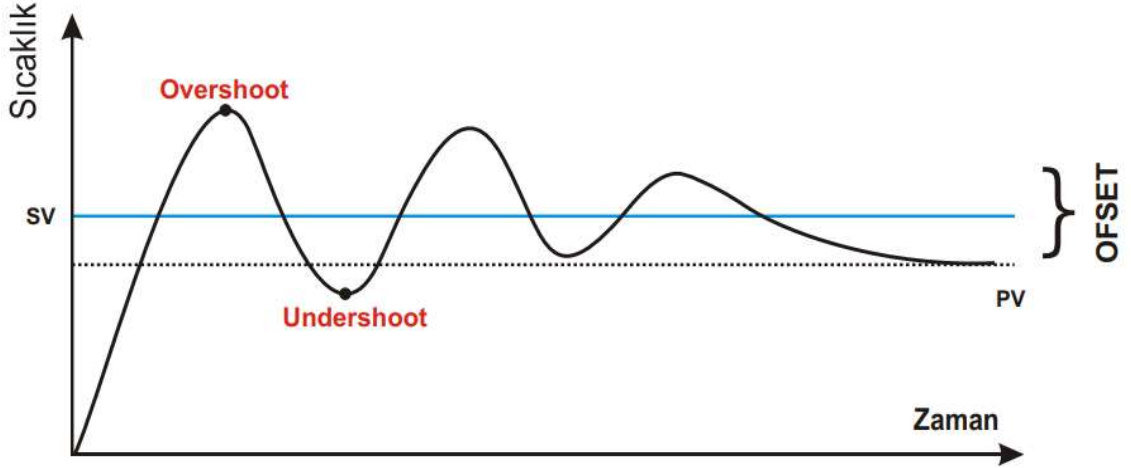
Oransal (P) kontrolör ait kazanç değerinin yüksek olması kontrolörün giriş ile çıkış arasındaki yüksek fark sistemde büyük değişikliğe neden olabilir.

Bu sebeple oransal kontrolörün kazanç değeri yüksek olması sistemi kararsızlığa götürebilir. Bu durum aksi olması halinde ise giriş ile çıkış arasındaki cevap yanıtının zayıf olması kontrolörün hassas davranmamasına neden olabilir.

Oransal (P) kontrolörde, sistem çıkış sinyalini sürecin zaman bağılı olarak talebi doğrultusunda enerji kontrolünü otonom olarak ayarlar. Bu otonom kontrol ise sistemin talep edilen enerji ile sisteme verilecek olan enerji değeri arasında sistemin katsayısına bağlı olarak bu oran belirlenerek sistemin giriş ile çıkış arasındaki enerji ihtiyacına göre kontrol etmektedir.

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere Oransal (P) kontrolör sistemlerde alınan değer daha önceden referans alınan noktanın üst değere çıkmakta olup birkaç defa referans noktasının üst değerleri seviyesinde salınım yaparak, referans alınan noktanın altında bir noktaya yerleşmektedir. Referans noktası ile sistemin yerleştiği nokta arasında oluşan kayma veya farka ise off-set olarak adlandırılmaktadır. Oransal (P) kontrolör

sistemlerde ise referans alınacak olan değer aralığı tercihinde tasarımcının sisteme vakıf olması sistemin tasarımı ise önem arz etmektedir. Oransal (P) kontrolör sistemlerde referans aralığı süreç değeri referansın üstünde meydana getirdiği fazla yükselmeler (Overshoot) veya fazla düşüşler (Undershoot) görülebilmektedir, bu da hassas olan sistemler için istenilmeyen bir durum oluşturmaktadır.



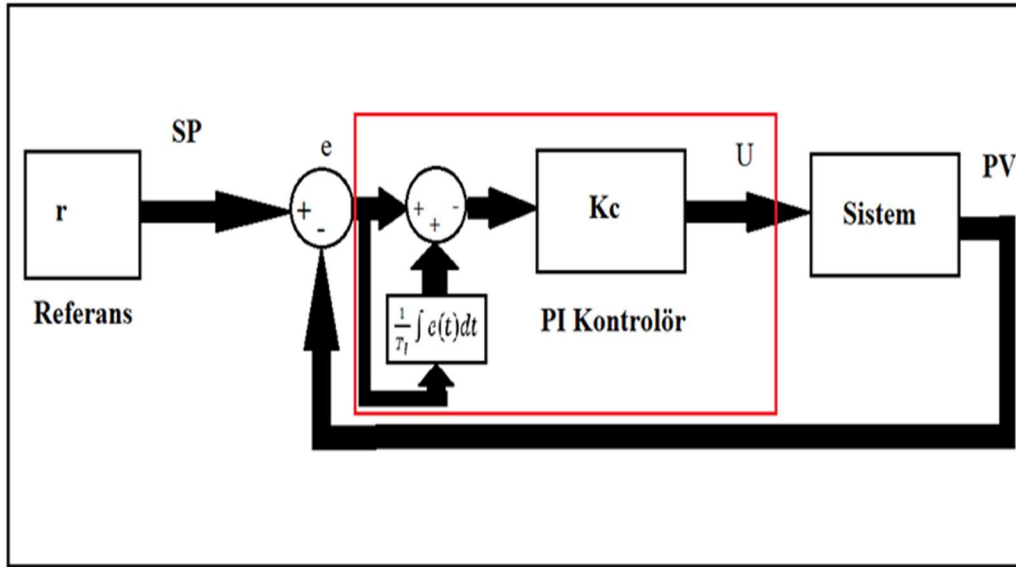
Şekil 4.2. Oransal (P) Kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği

4.3. Oransal-İntegral (PI) Kontrolör Yapısının Tanımlanması

Oransal-İntegral (PI) kontrolör katsayı sabitlerin aktif olduğu PID kontrolör çeşididir. PI kontrol çalışma yapısı ise; u kontrol sinyali, e hata sinyali, K_c oransal katsayısı ve T_I integral zaman sabiti olarak tanımlanarak transfer fonksiyonu ise,

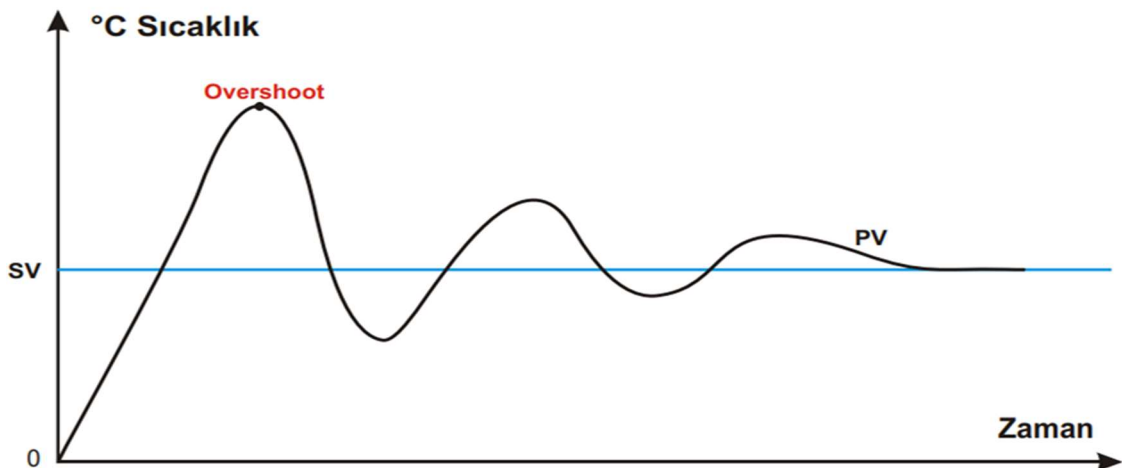
$$U(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt \right] \quad (4.5)$$

Transfer fonksiyonu denklemi ile ifade edilebilir (Kurtulan, 2008). Oransal-İntegral (PI) kontrolör ifade edilmesi için basit bir blok diyagramı ile şekil 4.3' te ele alınabilir.



Şekil 4.3. Oransal-İntegral (PI) Kontrolör Yapısının Blok Diyagramı (Hurma, 1998).

Oransal-İntegral (PI) kontrolör kısmında hatanın kalmamasına rağmen kontrolör tarafından sinyale üretimi devam etmektedir. Bu sinyal üretimin devam etmesinden dolayı sistemde şekil 4.4'teki gibi osilasyonlar oluşmasına neden olmaktadır. Osilasyonları önleyebilmek için kontrolcüye referans noktası ile sistemin oturduğu nokta arasındaki hatanın sıfır olduğunu sisteme geri bildirim ile iletilmelidir. Bu işlem ise sistemdeki hatanın türevi alınmasıyla mümkün olabilir. Türev kullanım ise oransal (P) kontrolör ile birlikte aktif olarak kullanılabilir (Hurma, 1998).



Şekil 4.4. Oransal-İntegral (PI) Kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği (Hurma, 1998).

Oransal-İntegral (PI) kontrolöründe, sisteme uygulanan enerji integral akış diyagramı sayesinde zaruret durumuna göre süreç içerisinde sistemin aktif olduğu zaman dilimlerinde değeri artırıp veya azaltarak off-set durumu ortadan kaldırılabilir.

Oransal-İntegral (PI) kontrolöründe ise riayet edilmesi gereken en önemli husus ise ilk çıkış anında süreç değerini referans noktası üzerine az bir seviyede çıkmasıyla overshoot olarak adlandırılmaktadır.

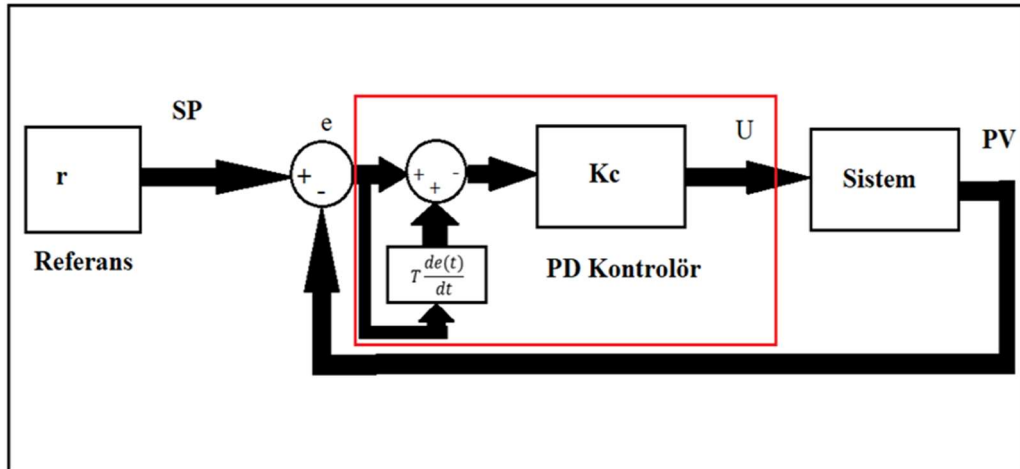
Daha sonra süreç değeri referans değerinin çevresinde birkaç defa osilasyon yaptıktan sonra arzu edilen değere ulaşmaktadır. Sürekli aktif olan ya da uzun zaman alan süreçlerde veya off-set gibi istenilmeyen durumlarda Oransal-İntegral (PI) kontrolör uygulaması kullanılabilir.

4.4. Oransal-Türevsel (PD) Kontrolör Yapısının Tanımlanması

Oransal-Türevsel (PD) kontrolörlere ait katsayıların aktif olduğu zaman dilimlerindeki PID kontrolör çeşididir. Oransal-Türevsel (PD) kontrolör çalışma yapısı ise u kontrol sinyali, e hata sinyali, K_c oransal katsayısı ve T_D türeve ait zaman sabiti olarak ifade edilmektedir. Oransal-Türevsel (PD) kontrolöre ait transfer fonksiyonu ise;

$$U(t) = K_c \left[e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.6)$$

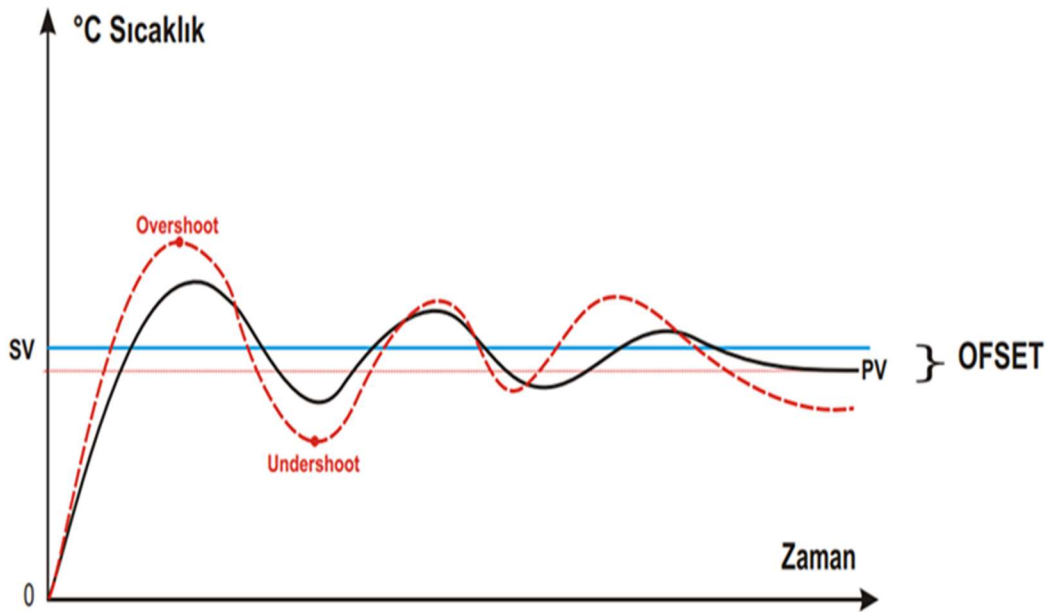
Transfer fonksiyonu denklemi ile ifade edilebilir. Oransal-Türevsel (PD) kontrolörün ifade edilmesi için basit bir blok diyagramı ile şekil 4.5'te ele alınabilir.



Şekil 4.5. Oransal-Türevsel (PD) Kontrolör Yapısının Blok Diyagramı

Oransal-Türevsel (PD) kontrolör uygulamasında ise integral bölgesinde hata olmamasına rağmen kontrolör tarafından işaret üretimi halen devam etmeye başlar. Bu durum nihayetinde ise sistem içerisinde osilasyonlar oluşmaktadır. Bu durum ortadan kalması için Oransal-Türevsel (PD) kontrolör yapısına geri besleme ile hatanın sıfır değerine ulaştığı bilgisi iletilerek ortadan kaldırılabilir. Bu işlem ise zamana bağlı olarak hatanın türevi alarak bu durum ortadan kaldırılabilir. Türev ise oransal kontrolör ile birlikte eş zamanlı olarak kullanılabilir (Hurma, 1998).

Oransal-Türevsel (PD) Kontrolörün çalışma fonksiyonunda ise Şekil 4.6'da türevin düzeltme faktörü referans noktasının aşım etkisini azalttığı görülmektedir. Grafikte ise overshoot olarak belirtilen işaret ait reaksiyon eğrisi ise oransal (P) kontrolör ifade ederken, PV ile ifade edilen işaret ait reaksiyon eğrisi ise Oransal-Türevsel (PD) kontrolörü ifade etmektedir. Grafikte ise türevin oransal kontrolör ile referans değer aralığının etkisi overshoot ile undershoot bağlı olarak etkisini off-set değerinin azalması grafikteki değişimler ile gözlemlenebilir.



Şekil 4.6. Oransal-Türevsel (PD) Kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği (Hurma,1998)

4.5. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrolör Yapısının Tanımlanması

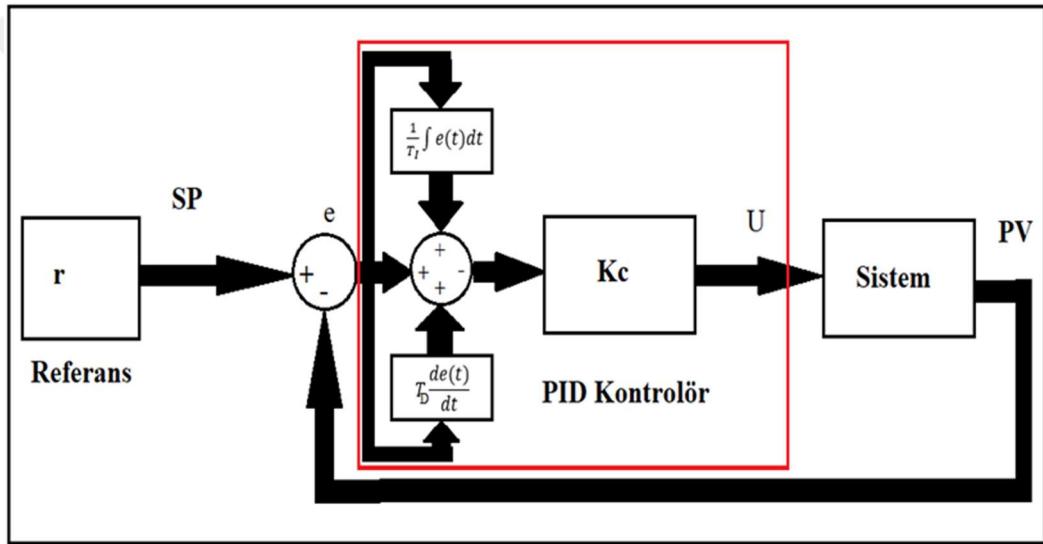
Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolör, (P), İntegral (I) ve Türevsel (D) kontrolcülerin birleşiminden oluşmuştur. Oransal denetleyicinin, yükselme zamanını

kısıltma etkisi vardır ama asla yok etmez (sürekli hal hatası). İntegral denetleyicinin ise kararlı hal hatasını yok eder ancak bu geçici tepkinin daha kötü olmasına sebep olur. Türevsel denetleyici ise sistemin kararlılığının yükseltir, aşımı azaltır ve geçici cevabı iyileştirir. Kapalı çevrimli sistemlerdeki her bir denetleyicinin etkisi Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

$$u(t) = K_c \left\{ e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right\} \quad (4.7)$$

Transfer fonksiyonu denklemi ile ifade edilebilir.

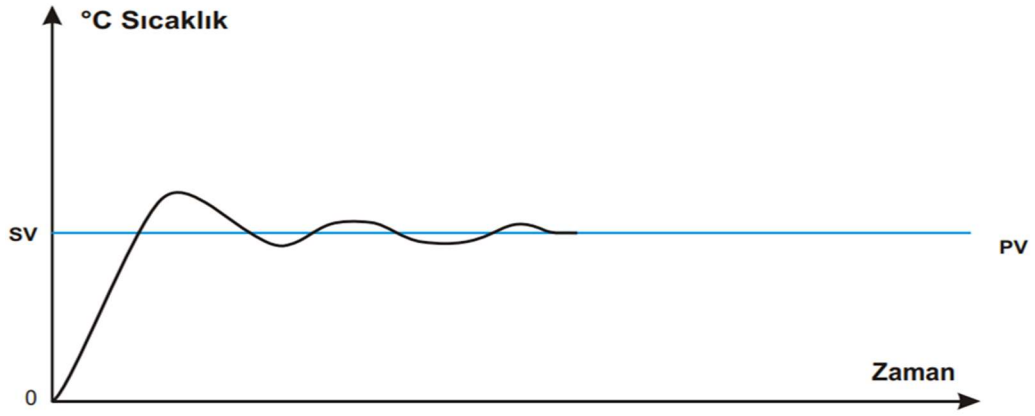
Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolörün ifade edilmesi için basit bir blok diyagramı ile şekil 4.7’ de ele alınabilir.



Şekil 4.7. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrolör Yapısının Blok Diyagramı

PID parametrelerin uygun şekilde elde edilebilmesi amacıyla ortaya konulan çok sayıda çalışma mevcuttur. İyi bilinen yaklaşımlar arasında Ziegler-Nichols (Z-N) metodu, Cohen-Coon metodu, hata değerlerinin toplamını esas alan minimum ISE ve IAE yöntemleri bulunmaktadır (Kocaoğlu, 1988).

Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolör ait katsayı parametreleri referans değerlerine ayarlanmasıyla sistemin kararlı ve doğru bir biçimde çalışması önemli bir hususiyettir. Kontrolöre ait katsayı parametre ayarlarına bağlı olarak Şekil 4.8’de referans noktası ile sisteme ait tepki işareti de değişkenlik gösterebilmektedir.



Şekil 4.8. Oransal-İntegral-Türevsel (PID) Kontrolörün çalışma fonksiyonu grafiği

Bu sebeple Oransal-İntegral-Türevsel (PID) kontrolör tabanlı sistem veya cihazların kalibrasyon ayarlamalarında PID kontrolörün katsayı parametreleri doğru bir şekilde hesaplanarak en ideal değer alınması gerekmektedir.

Bu nedenle sisteme ait katsayı parametreleri cihazları içerisinde genellikle mevcut olarak Self Tune modu ile kendi kendine ayarlama ve Auto Tune modu otomatik ayar olarak sistemin içerisinde bulunabilmektedir.

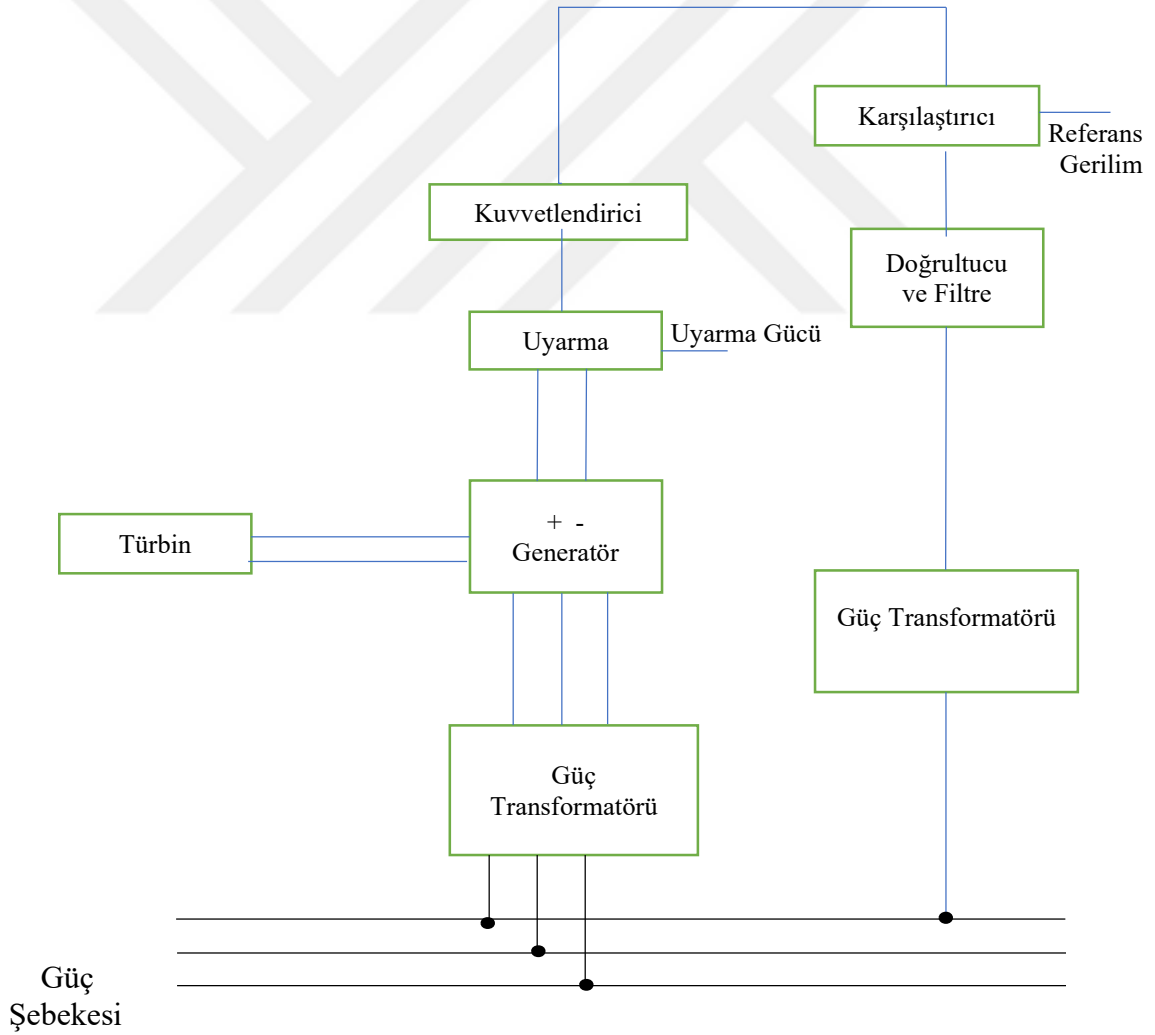
Tablo 4.1. Kazançların etkileri

	Yükselme zamanı	Aşım	Yerleşme zamanı	Kalıcı hal hatası
K_P	Azalır	Artar	Az değişir	Azalır
K_i	Azalır	Artar	Artar	Yok olur
K_D	Az değişir	Azalır	Azalır	Az değişir

Genel anlamda PID kontrolör yapısında göz ardı edilmemesi gereken hususlar tabloda K_P , K_i , K_D parametreleri birbirlerine bağlıdır. Yani kazançlardan birinin değişmesi diğerlerinin etkisini değiştirebilir. Bu yüzden Tablo 4.1' de K_P , K_i , K_D kazançlarının değerlerinin bilinmesinde referans olarak alınabilir.

5. AVR SİSTEMİ VE MODELİ

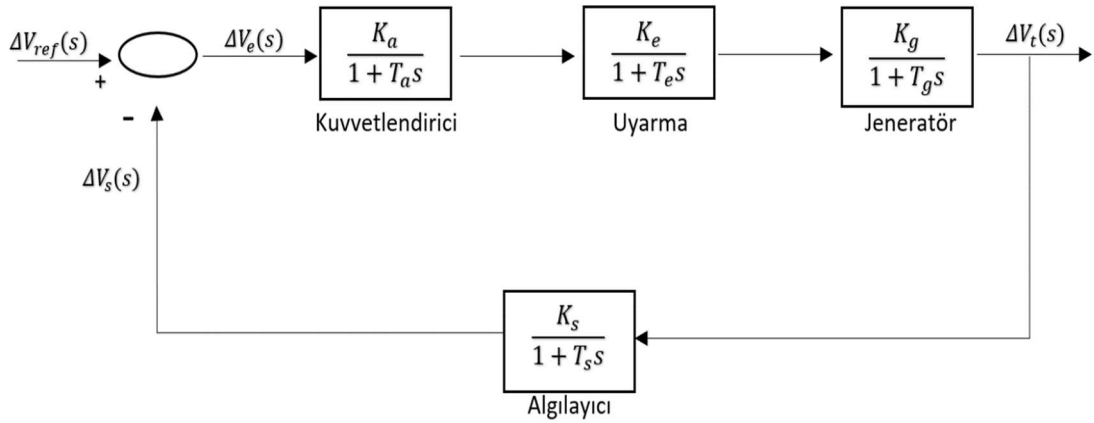
AVR sistemi, öncelikle generatör çıkış voltajını kontrol ederek çalışır. Bunu önce generatör terminallerinden gelen gerilimi algılayarak ve ardından varsa hata sinyalini kontrol etmek için önceden ayarlanmış sabit referans değeriyle karşılaştırarak gerçekleştirir. AVR sistemi bu iki değer arasında bir uyumsuzluk olması durumunda, statöre giden akım akışını yükselterek ya da düşürerek alan akımını ayarlar. Bu da sırasıyla ana stator terminallerinde daha düşük veya daha yüksek bir voltaj sağlar. Yükün değiştiği durumlarda da sistem bu şekilde çalışarak stabil bir gerilim üretir. Böylelikle çıkış gerilimi istenen aralıklarda kalır ve dengeli bir gerilim sağlanmış olur. Aksi takdirde istenen gerilim değeri verilemeyecek ve kontrol edilemeyecektir.



Şekil 5.1. AVR sisteminin şematik çalışma şeması (Ekinci ve ark.,2019)

AVR sistemi, Kuvvetlendirici, Uyarma, Generatör ve Sensör (Algılayıcı) olmak üzere 4 kısımdan oluşmaktadır. Ana bileşenler transfer fonksiyonu denklemleri, aralıkları, kazançları ve kullanılan zaman sabitleri Tablo 5.1' de gösterilmektedir. Şekil 5.2' deki ΔV_t , senkron jeneratörün (ΔV_t) uç gerilimini göstermektedir. Bu voltaj, bir komparatör aracılığıyla referans voltajı (ΔV_{ref}) ile karşılaştırılmak üzere sensör tarafından algılanır. Karşılaştırıcının çıkışı, referans voltajı (ΔV_{ref}) ile sensör voltajı (ΔV_s) arasındaki fark olan hata voltajıdır (ΔV_e). Hata voltajı yükseltilir ve uyarıcının uyarma akımını ayarlamak için gönderilir. Uyarma akımı, senkron generatörün stator terminal voltajını ayarlayan ve düzenleyen stator sargısı üzerindeki elektromanyetik kuvveti (E.M.F) kontrol eden senkron generatörün rotor alan akımını düzenler (Kocaoğlu, 1988). K_a, K_e, K_g ve K_s sırasıyla Kuvvetlendirici, Uyarma, Generatör ve Sensör' ün kazançlarını, T_a, T_e, T_g ve T_s ' de zaman sabitlerini göstermektedir.

Dört bölümden oluşan doğrusallaştırılmış AVR sistemi blok diyagramı MATLAB\SIMULINK ortamında çizilmiş olup, aşağıdaki gibi gösterilmektedir. Tablo 1' deki değerler benzer makalelerden alınmıştır.



Şekil 5.2. AVR Sisteminin blok diyagramı

Blok diyagramından transfer fonksiyonu yazılırsa kontrolörsüz AVR sisteminin Transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{K_a K_e K_g (1 + T_s s)}{(1 + T_a s)(1 + T_e s)(1 + T_g s)(1 + T_s s) + K_a K_e K_g K_s} \quad (5.1)$$

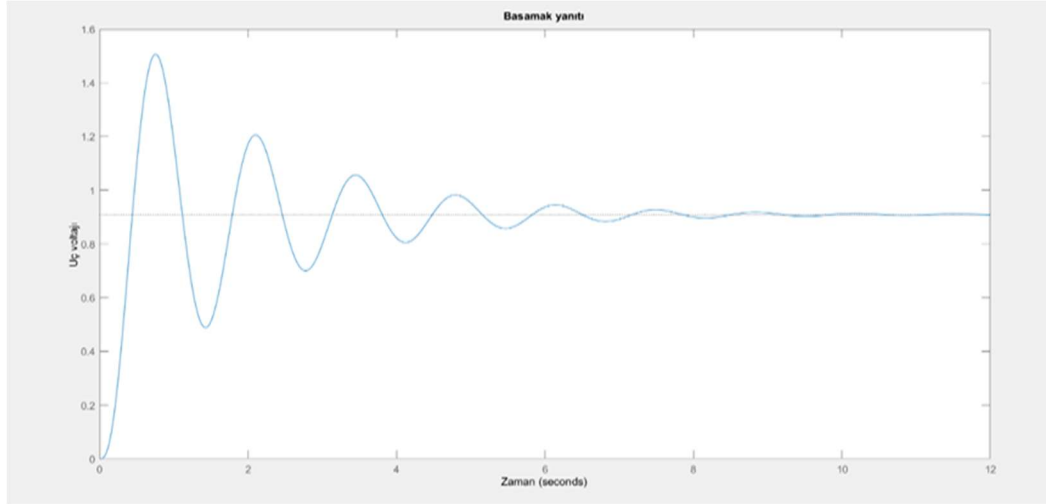
Tablo 5.1. Parametre değerleri

Katsayılar	Transfer fonksiyonları	Değer aralıkları	Seçilen değer
Kuvvetlendirici	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + T_a s}$	$10 \leq K_a \leq 40$ $0.02 \leq T_a \leq 0.1$	$K_a = 10$ $T_a = 0.1$
Uyarma	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + T_e s}$	$1 \leq K_e \leq 10$ $0.4 \leq T_e \leq 1$	$K_e = 1$ $T_e = 0.4$
Jeneratör	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + T_g s}$	$0.7 \leq K_g \leq 1$ $1 \leq T_g \leq 2$	$K_g = 1$ $T_g = 1$
Algılayıcı	$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + T_s s}$	$0.9 \leq K_s \leq 1.1$ $0.001 \leq T_s \leq 0.06$	$K_s = 1$ $T_s = 0.01$

Tablo 5.1 ‘deki değerler yerine yazıldıktan sonra kontrolörsüz sistemin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.1s + 10}{0.0004s^4 + 0.0454s^3 + 0.555s^2 + 1.51s + 11} \quad (5.2)$$

Bu transfer fonksiyonunun basamak yanıtı ise şekil 5.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Kontrolörsüz AVR sisteminin basamak yanıtı

Şekilden görüleceği üzere sistemin yerleşme zamanı, aşım miktarı ve salınımları çok fazladır.

Tablo 5.2. Kontrolörsüz AVR sisteminin basamak yanıtı değerleri

Yükselme zamanı	Yerleşme zamanı	Minimum yerleşme	Maksimum yerleşme	Aşım miktarı	Tepe değeri	Tepe zamanı
0.2607	6.9865	0.4881	1.5066	65.7226	1.5066	0.7522

Sistemin bir kontrolöre ihtiyaç duyduğu açıktır. Sistemin daha stabil bir şekilde çalışması için sisteme PID kontrolör eklenecektir.

5.1. Sistemin Durum Uzay Denklemi

Sistemlerin matematiksel modellerinin incelenebilmesi için Durum uzay denklemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Durum uzay denklemleri aşağıdaki gibi gösterilmektedir;

$$\dot{x} = Ax(t) + Bu(t) \quad (5.3)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (5.4)$$

Sistemin kapalı döngü transfer fonksiyonu;

$$\frac{\Delta V_t(S)}{\Delta V_{ref}(S)} = \frac{G_A(s)G_E(s)G_G(s)}{1 + G_A(s)G_E(s)G_G(s)G_S(s)} \quad (5.5)$$

Şeklindedir. Bunu denkleme dökersek;

$$\Delta V_{ref}(S) - \Delta V_s(S) = \frac{(1 + T_a S)}{K_a} \Delta V_a(S) \quad (5.6)$$

$$K_e \Delta V_a(S) = (1 + T_e S) \Delta V_e(S) \quad (5.7)$$

$$K_g \Delta V_e(S) = (1 + T_g S) \Delta V_t(S) \quad (5.8)$$

$$K_s \Delta V_t(S) = (1 + T_s S) \Delta V_s(S) \quad (5.9)$$

Buradan denklemleri düzenlersek;

$$S\Delta V_a(S) = \frac{K_a}{T_a} \Delta V_{ref}(S) - \frac{K_a}{T_a} \Delta V_s(S) - \frac{1}{T_a} \Delta V_a(S) \quad (5.10)$$

$$S\Delta V_e(S) = \frac{K_e}{T_e} \Delta V_a(S) - \frac{1}{T_e} \Delta V_e(S) \quad (5.11)$$

$$S\Delta V_t(S) = \frac{K_g}{T_g} \Delta V_e(S) - \frac{1}{T_g} \Delta V_t(S) \quad (5.12)$$

$$S\Delta V_s(S) = \frac{K_s}{T_s} \Delta V_t(S) - \frac{1}{T_s} \Delta V_s(S) \quad (5.13)$$

Zaman domaininde gösterimi yapılırsa;

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_a \\ \Delta \dot{V}_e \\ \Delta \dot{V}_t \\ \Delta \dot{V}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_a} & 0 & 0 & -\frac{K_a}{T_a} \\ \frac{K_e}{T_e} & -\frac{1}{T_e} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_g}{T_g} & -\frac{1}{T_g} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{K_s}{T_s} & -\frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_e \\ \Delta V_t \\ \Delta V_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_a}{T_a} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta V_{ref} \quad (5.14)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta V_t \quad (5.15)$$

Olarak bulunur.

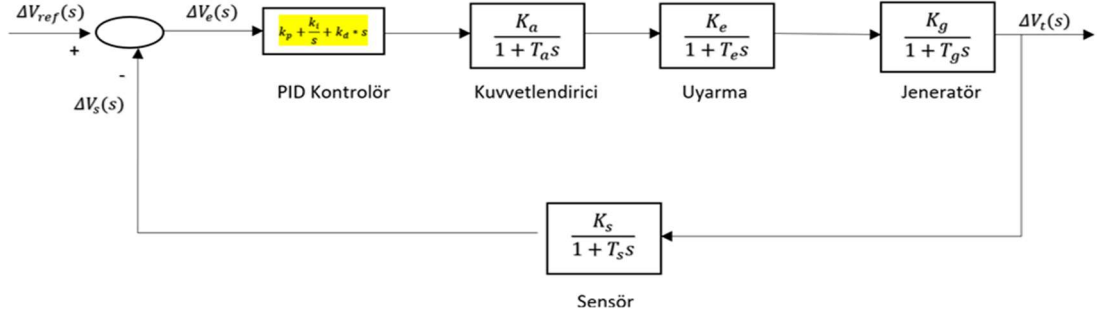
5.2. PID Kontrolörlü AVR Sistemi

Oransal, Türevsel ve İntegral kazançlardan oluşan PID kontrolörde; Oransal kazanç (k_p), yükselme zamanını düşürür. İntegral kazancı (k_i), kararlı durum hatasını iyileştirir. Türevsel kazanç (k_d) ise fazla aşımını azaltır, kararlılık marjını artırır.

PID Kontrolör' ün transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$G_{PID}(S) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d * s \quad (5.16)$$

PID Kontrolörlü AVR sistemi blok diyagramı Şekil 5.4' te gösterilmiştir.



Şekil 5.4. PID Kontrolörlü AVR sistemin blok diyagramı

PID Kontrolörlü AVR sisteminin transfer fonksiyonu;

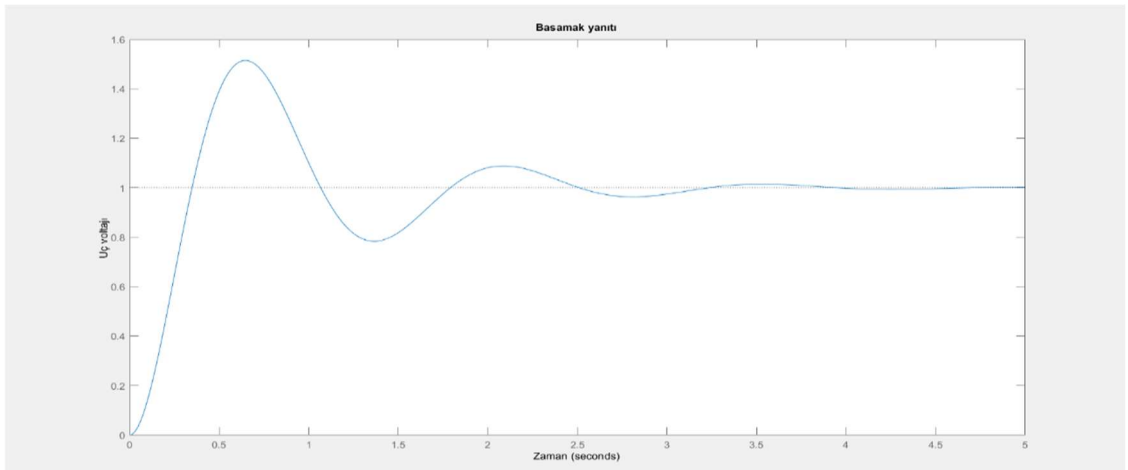
$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{(k_d s^2 + k_p s + k_i)(K_a K_e K_g)(1 + T_s s)}{s(1 + T_a s)(1 + T_e s)(1 + T_g s)(1 + T_s s) + (K_a K_e K_g K_s)(k_d s^2 + k_p s + k_i)} \quad (5.17)$$

Olur. Tablodaki değerler yerine konulduğunda ise;

$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.1k_d s^3 + (0.1k_p + 10k_d)s^2 + (0.1k_i + 10k_p)s + 10k_i}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + (1.51 + 10k_d)s^2 + (1 + 10k_p)s + 10k_i} \quad (5.18)$$

Ziegler Nichols yöntemiyle elde edilen veriler; PID kontrolör ayarı, klasik tekniklerden biri olan Ziegler Nichols metodu ile yapılabilir. Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen PID kazançları $k_p = 1.0210$, $k_i = 1.8743$ ve $k_d = 0.1390$ 'dır (Hekimoğlu ve Ekinci, 2018).

Şekil 5.5' te bu transfer fonksiyonunun basamak yanıtı gösterilmiştir.



Şekil 5.5. ZN metoduyla elde edilen basamak yanıtı

ZN metoduyla elde edilen basamak yanıtına ait veriler Tablo 5.3'te gösterilmiştir.

Tablo 5.3. ZN metoduyla elde edilen basamak yanıtı

Yükselme zamanı	Yerleşme zamanı	Minimum yerleşme	Maksimum yerleşme	Aşım yüzdesi	Tepe değeri	Tepe zamanı
0.2366	3.0516	0.7839	1.5150	51.4951	1.5150	0.6440

6. MATERYAL VE YÖNTEM

Doğal yaşamda sürüngenlerin beslenmek için av arama ve avlarını bulma yöntemleri araştırılarak, bu davranışların matematiksel modellemeleri yapılmış ve ortaya birçok algoritma çıkmıştır. Bu algoritmalarından biri Sürüngen Arama Algoritması (Reptile Search Algorithm-RSA)'dır. Bu tez çalışmasında AVR sisteminin PID kontrolör parametrelerinin RSA kullanılarak elde edilmesi amaçlanmıştır ve elde edilen bu değerlerin uygunluğunun görülmesi hedeflenmiştir. AVR sistemine eklenmiş olan PID kontrolörün olduğu sistemin transfer fonksiyonu çıkarılarak elde edilen denklem RSA algoritması uygulanarak en uygun kontrolör parametrelerinin bulunması amaçlanmaktadır. Daha sonra bulunan sonuçlar iki farklı algoritma olan PSO ve TSA algoritmalarıyla karşılaştırılacaktır.

6.1. RSA (Reptile Search Algorithm) Algoritmasına Giriş

Abualigah ve arkadaşları tarafından 2022 yılında geliştirilen RSA (Sürüngen Arama Algoritması) algoritması timsahların davranışlarının matematiksel formüle edilip, algoritması çıkarılarak optimizasyon alanında kullanılmaya başlanmıştır. Timsahların doğadaki kuşatma mekanizmalarından, avlanma mekanizmalarından ve sosyal davranışlarından esinlenilerek önerilmiştir. Bu algoritma keşif (global arama) ve sömürü (yerel arama, avlanma) olarak 2 bölümden oluşmaktadır. Timsahların doğadaki davranışları avını kuşatmak ve avlamaktan ibarettir. RSA popülasyon tabanlı ve gradyan içermeyen bir yöntemdir. Bu nedenle belirli kısıtlamalara tabi olan karmaşık veya basit optimizasyon problemlerini ele almak için kullanılabilir (Abualigah vd., 2022).

6.2. Timsahların Yapıları ve Yaşam Alanları

Avustralya, Afrika, Asya ve Amerika gibi tropik bölgelerde yaşayan Timsahlar (alt aile, gerçek timsahları içerir), hem suda hem de karada yaşayan sürüngenlerdir. Timsah kelimesi, yalnızca "Crocodylinae" alt familyasındaki türleri ifade eder. Timsahlar genel olarak güçlü bir avcı olarak tanımlanmıştır (Dinets vd., 2015; Kushlan ve Mazzotti, 1989). Çene yapıları çok dişli ve güçlü olup, avlanmak için gerekli olan hız, sakinlik ve güçlülük özelliklerine sahiptir. Timsahların hava ve su akışına karşı çok

az direnci vardır (aerodinamik vücut). Bu şekil timsahların hızını artırır ve hem suda hem karada daha rahat hareket etmelerini sağlar.

Aynı zamanda daha hızlı koşabilmek için ayaklarını yana doğru kaldırarak hareket eder. Timsahların perdeli ayakları, onların yüzerken dönüş ve ani hareketleri hızlı bir şekilde yapmalarına imkân sağlar (Dinets, 2015; Platt vd., 2006).

Timsahların ana karakteristik özellikleri aşağıda sırayla anlatılacaktır;

Görme: Timsahlar geceleri çok iyi görme özelliğine sahip olduğundan çoğunlukla gece avlanmaktadır. Avlarının gece iyi görmemesinden faydalanıp onları en zayıf anlarında yakalama fırsatından faydalanır.

Avlanma ve beslenme düzenleri: Timsahlar yakın çevrelerindeki balık veya kara hayvanlarını bulup, onlara tuzak kurarak saldırır ve avlar. Timsahlar balıkları, sürüngenleri, kabukluları, amfibileri, yumuşakçaları, memelileri ve kuşları avlar ve bazen de daha küçük timsahları yerler. Timsahlar genellikle küçük balıkları ve omurgasızları avlar ve yavaş yavaş daha büyük avlara geçer. Timsahlar soğukkanlı yırtıcılar olduklarından uzun süre yemek yemeden yaşayabilirler. Yavaş hareket ediyormuş gibi görünmelerine rağmen, timsahlar çok hızlı hareket ederler. Yaşam alanlarında en iyi ve güçlü avcılardır. Köpekbalıkları ve geyikler gibi diğer avcılara saldıran ve onları öldüren birkaç hayvandan biri olarak bilinir. Araştırmalar timsahların birkaç çeşit meyveyle de beslendiklerini göstermektedir.

Hareket etme: Timsahlar, su dışında bile küçük mesafelerde çok hızlı koşabilirler. Bir timsah hızlı hareket ettiğinde bacaklarını vücudunun altında daha düz ve dik durumda tutar (yüksek yürüyüş olarak adlandırılır). Bu yürüme şekli, timsahlara yüksek hız sağlar.

Avlanma: Timsahlar gelişmiş avcılar olup avlarını avlamak için bir ekip olarak hareket ederler. Avlanma, koordinasyon ve işbirliği iş birliği içinde gerçekleştirilir. Koordineli avlanma, belirli yırtıcıların organize olarak avlanmaları sırasında hedef-av üzerinde karar verilen hareketlere göre birleştiği sofistike bir işbirlikçi avlanma biçimidir.

Bazı durumlarda, aslanlarda görüldüğü gibi, bireysel olarak Timsahlar çeşitli avlar sırasında aynı rolü üstlenir (pusu kuran veya sürücü olarak).

Timsahların koordinasyonu ve ortak hareket etmesi: Modern araştırmalar timsahların bir takım halinde avlandığını göstermektedir. Bu, onları, farklı rollere sahip farklı bireyler arasında işbirliği yapabilen en sofistike ve zeki hayvanlardan biri olarak göstermektedir. Timsahların avlanma şekli çok karmaşıktır. Pusu kurarak avlanırlar; metabolizmaları yavaş olduğu için ara sıra yemek yerler ve neredeyse tüm avlanma

zamanları geceleyin olmakta ve bazen de sığ sularda gerçekleşmektedir. Örneğin, timsahlar bir grup balığı, küçük bir grup (yoğun grup) olarak bir arada toplanmaya zorlamak için birlikte hareket ederler. Daha sonra sırayla bu gruptan balık avlarlar (yem topu). Daha sonra, timsahlar sırayla daire merkezini keserek balıklara saldırır. Çoğu zaman, çeşitli boyutlardaki Timsahlar çeşitli rolleri takip eder. Daha büyük dev timsahlar, balıkları bir lagünün daha derin bölgesinden, daha küçük, daha zeki Timsahların kaçışını engellediği sığılıklara götürür. Diğer vakalar arasında, bir timsahın bir domuzu veya bir zebrayı (yaban arıları) korkutması ve diğer timsahların ortadan kaybolduğu ve saldırıyı beklediği bir lagüne hızla girmesi sayılabilir. Timsahların avlanma davranışı nispeten sabittir; Bir Timsah avını yakaladığında avlanma alanından ayrılır ve avını yedikten sonra tekrar Takıma katılır.

Sonuç olarak, timsahlar en zeki ve uzman avcılardan biridir. Bu algorithmada Timsah davranışları matematiksel bir optimizasyon modeli olarak belirlenmiş ve bazı problemlerde en iyi çözümü elde ediyor. Optimizasyon problemleri, mühendislik, ekonomi ve bilgisayar bilimlerinden yöneylem araştırması ve endüstriye kadar çeşitli kantitatif disiplinlerde ortaya çıkar ve arama tekniklerindeki gelişmeler bilimin çeşitli alanlarında ilgi çekmektedir. Önerilen algoritmanın (RSA) ana ilham kaynağı, timsahın avını çevrelemesi ve avlanmasıdır.

6.3. Başlama Fazi

RSA algoritmasında optimizasyon süreci, aşağıdaki denklem 4 'de gösterildiği gibi, stokastik olarak oluşturulan bir dizi aday çözümle (X) başlar ve en iyi elde edilen çözüm, her iterasyonda neredeyse optimum olarak kabul edilir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \cdots & x_{1,j} & x_{1,n-1} & x_{1,n} \\ x_{2,1} & \cdots & x_{2,j} & \cdots & x_{2,n} \\ \cdots & \cdots & x_{i,j} & \cdots & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{N-1,1} & \cdots & x_{N-1,j} & \cdots & x_{N-1,n} \\ x_{N,1} & \cdots & x_{N,j} & x_{N,n-1} & x_{N,n} \end{bmatrix} \quad (6.1)$$

Burada X , aşağıdaki denklemle rastgele elde edilen olası çözümlerin kümesidir. $x_{i,j}$, i . Çözümün j . Pozisyonunu göstermektedir. N ise olası aday çözümlerin sayısını ve n de verilen problemin boyutunu göstermektedir.

$$x_{i,j} = \text{ran } x(UB-L) + LB, \quad j=1,2,\dots,n \quad (6.2)$$

Bu denklemde ise *rand* rastgele bir değeri, *LB* problemin alt sınırını, *UB* ise üst sınırını göstermektedir.

6.4. Kuşatma Aşaması

Bu aşamada timsahların 2 adet hareketi mevcuttur. Bunlar yükselme yürüyüşü (High walking) ve göbek yürüyüşü (belly walking) şeklindedir. Ancak bu hareketlerde timsahlar çok fazla ses çıkardıklarından avlarına kolayca yaklaşamazlar. Bu yüzden büyük bir alanda keşif yapmak zorundadır. RSA algoritması, kuşatma (keşif) ve avlanma (sömürü) arama aşamaları arasında geçiş yapabilir, çeşitli davranışlar arasındaki bu değişiklik dört koşula göre yapılır; toplam iterasyon sayısı dört parçaya bölünür. RSA' nın keşif mekanizmaları, arama bölgelerini araştırır ve iki ana arama stratejisine (yüksekte yürüme stratejisi ve göbek üzerinde yürüme stratejisi) dayalı olarak daha iyi bir çözüm bulmaya çalışır. Bu, bu koşulun keşif iterasyonlarının neredeyse yarısının Yüksek yürüyüş ve diğer yarısı da Göbek yürüyüşü için karşılanacağı anlamına gelir. Bunlar iki keşif arama yöntemidir. Ögenin daha çeşitli çözümler üretmesi ve çeşitli bölgeleri keşfetmesi için stokastik bir ölçeklendirme katsayısının incelenmektedir. Timsahların kuşatma davranışını taklit edebilen en basit kural kullanılmıştır. Keşif aşaması için Denklem 6'daki gibi konum güncelleme denklemleri önerilmiştir.

Keşif aşaması 2 durum üzerinde konumlandırılmıştır. Yükselme yürüyüşü $t \leq \frac{T}{4}$ göbek yürüyüşü ise $t \leq 2\frac{T}{4}$ ve $t > \frac{T}{4}$ olarak belirlenmiş olup, şekil 6.1 ve 6.2 'de gösterilmektedir..

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times -\eta_{(i,j)}(t) \times \beta - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq \frac{T}{4} \\ Best_j(t) \times x_{(r_1,j)} \times ES(t) \times rand, & t \leq 2\frac{T}{4} \text{ ve } t > \frac{T}{4} \end{cases} \quad (6.3)$$

Bu denklemde T maksimum iterasyon sayısını göstermekte, rand 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı, t bulunduğu iterasyon sayısını, $Best_j(t)$ ise en iyi çözümün j. konumunu göstermektedir. $\eta_{(i,j)}(7)$. Denklemde hesaplanan i. Çözümdeki j. konumun avlanma operatörünü, β ,0.1 değerine eşitlenmiş hassasiyet parametresini, (6.3).

Denklemden gösterilen $R_{(i,j)}$ azaltma fonksiyonu olup, arama alanının azaltılmasını sağlamaktadır. r_1 1 ile N arasındaki rastgele bir sayıyı göstermektedir. $x_{(r_1,j)}$ i . Çözümün rastgele konumunu göstermektedir. Evrimsel alan ($ES(t)$) ise 2 ile -2 arasında rastgele değer alan, iterasyon sayısı boyunca azalarak değişen olasılık oranıdır. Denklem (6.6)'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\eta_{(i,j)} = Best_j(t) \times P_{(i,j)} \quad (6.4)$$

$$R_{(i,j)} = \frac{Best_j(t) - x_{(r_2,j)}}{Best_j(t) + \epsilon} \quad (6.5)$$

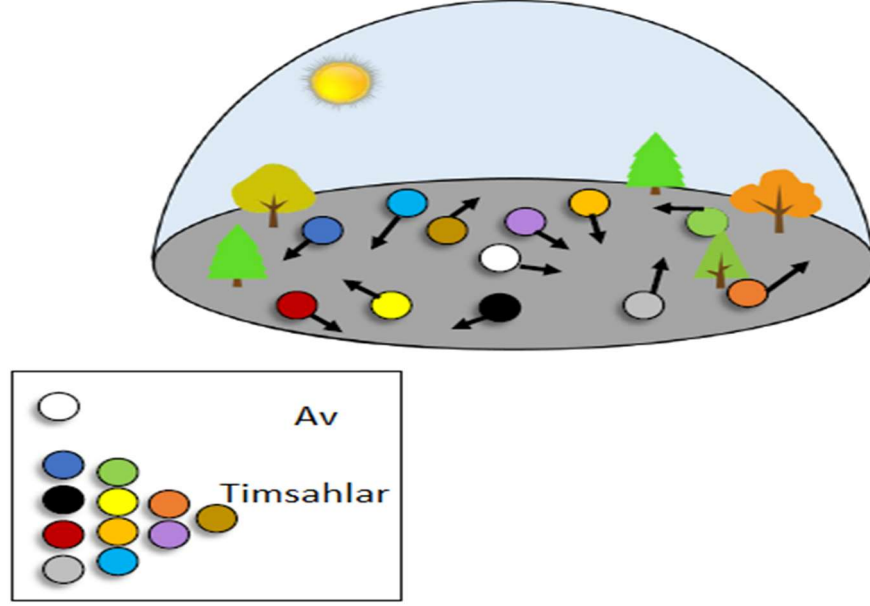
$$ES(t) = 2 \times r_3 \times \left(1 - \frac{1}{T}\right) \quad (6.6)$$

ϵ küçük bir değeri göstermekte, r_2 1 ile N arasındaki rastgele bir sayıyı göstermektedir. 2 değeri 2 ile 0 arasında değer verebilmek için kullanılan düzeltme katsayısıdır. r_3 -1 ile 1 arasındaki rastgele bir tam sayıyı göstermektedir. $P_{(i,j)}$ ise mevcut konumu ile en iyi çözümün bulunduğu j . konumu arasındaki yüzdelik farkı olup (6.7) no'lu denklemdeki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{(i,j)} = \alpha + \frac{x_{(i,j)} - M(x_i)}{Best_j(t) + (UB_{(j)} - LB_{(j)}) + \epsilon} \quad (6.7)$$

$M(x_i)$ (6.8). Denklemden gibi hesaplanıp, i . Çözümün ortalama pozisyonlarını göstermektedir. $UB_{(j)}$ j . konumdaki üst sınırı, $LB_{(j)}$ ise j . konumdaki alt sınırı ifade etmektedir. α ise avlanma boyunca keşif doğruluğunu ifade eden hassaslık parametresi olup 0.1'e eşitlenmiştir.

$$M(x_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{(i,j)} , \quad (6.8)$$



Şekil 6.1. Avın kuşatılması aşaması ($t \leq \frac{T}{2}$ iken) (Abualigah ve ark.,2022)

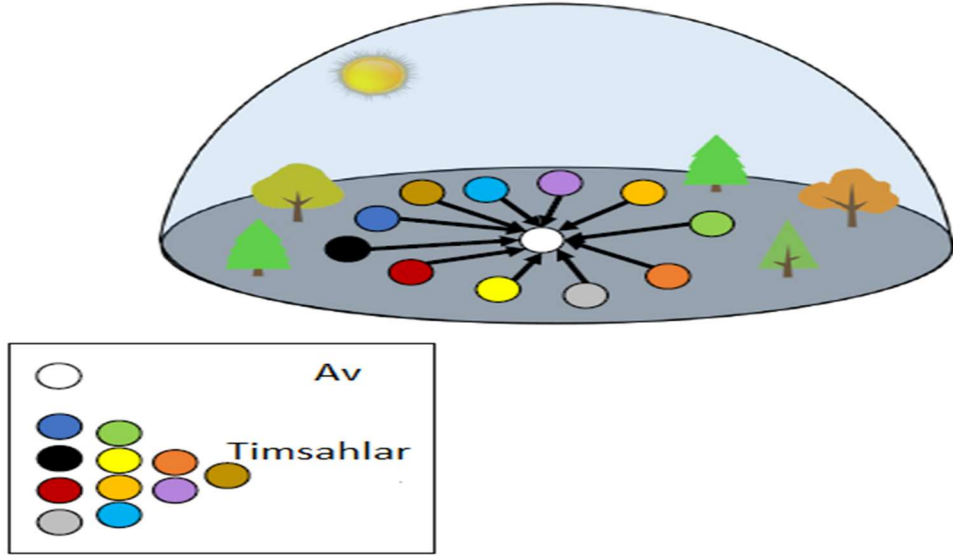
6.5. Avlanma Aşaması

Timsahların avlanma sırasında koordinasyon ve iş birliği olmak üzere iki stratejisi vardır. Bu stratejiler, avlanma aramasına (yerel olarak) bağlı olan farklı yoğunlaştırma tekniklerine karşılık gelir. Timsah stratejileri (avlanma koordinasyonu ve iş birliği), kuşatma mekanizmalarından farklı olarak, yoğunlaşarak hedef ava kolayca yaklaşmalarını sağlar. Bu nedenle, av araması, belki birkaç çabadan sonra optimuma yakın çözümü keşfeder. Ayrıca, en uygun çözüme yakın bir yoğunlaştırma araması yapmak için optimizasyonun bu aşamasında avlanma mekanizmaları çalıştırılır ve aralarındaki iletişim vurgulanır. RSA' nın kullanım mekanizmaları, Denklem 1' de olduğu gibi modellenen iki ana arama stratejisini (yani, (1) avlanma koordinasyonu ve (2) avlanma iş birliği) kullanmaya dayalı olarak en uygun çözümü bulmak için arama uzayını ve yaklaşımını kullanır (Denklem 6.9). Bu aşamadaki arama, avlanma koordinasyon stratejisi $t \leq 3\frac{T}{4}$ ve $t \geq 2\frac{T}{4}$ ile şartlandırılmıştır, aksi takdirde, avlanma işbirliği stratejisi $t \leq T$ ve $t > 3\frac{T}{4}$ olduğunda gerçekleştirilir. Stokastik katsayıların daha yoğun çözümler ürettiği ve gelecek vaat eden bölgeleri (yerel olarak) kullandığı kabul edilir. Timsahların avlanma davranışını taklit edebilen en basit kuraldır. Bu bölümde, kullanım aşaması için aşağıdaki konum güncelleme denklemleri (6.9) önerilmiştir.

$$x_{i,j}(t+1) = \begin{cases} Best_j(t) \times -P_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq 3\frac{T}{4} \text{ ve } t \geq 2\frac{T}{4} \\ Best_j(t) - \eta_{(i,j)}(t) \times \epsilon - R_{(i,j)}(t) \times rand, & t \leq T \text{ ve } t > 3\frac{T}{4} \end{cases} \quad (6.9)$$

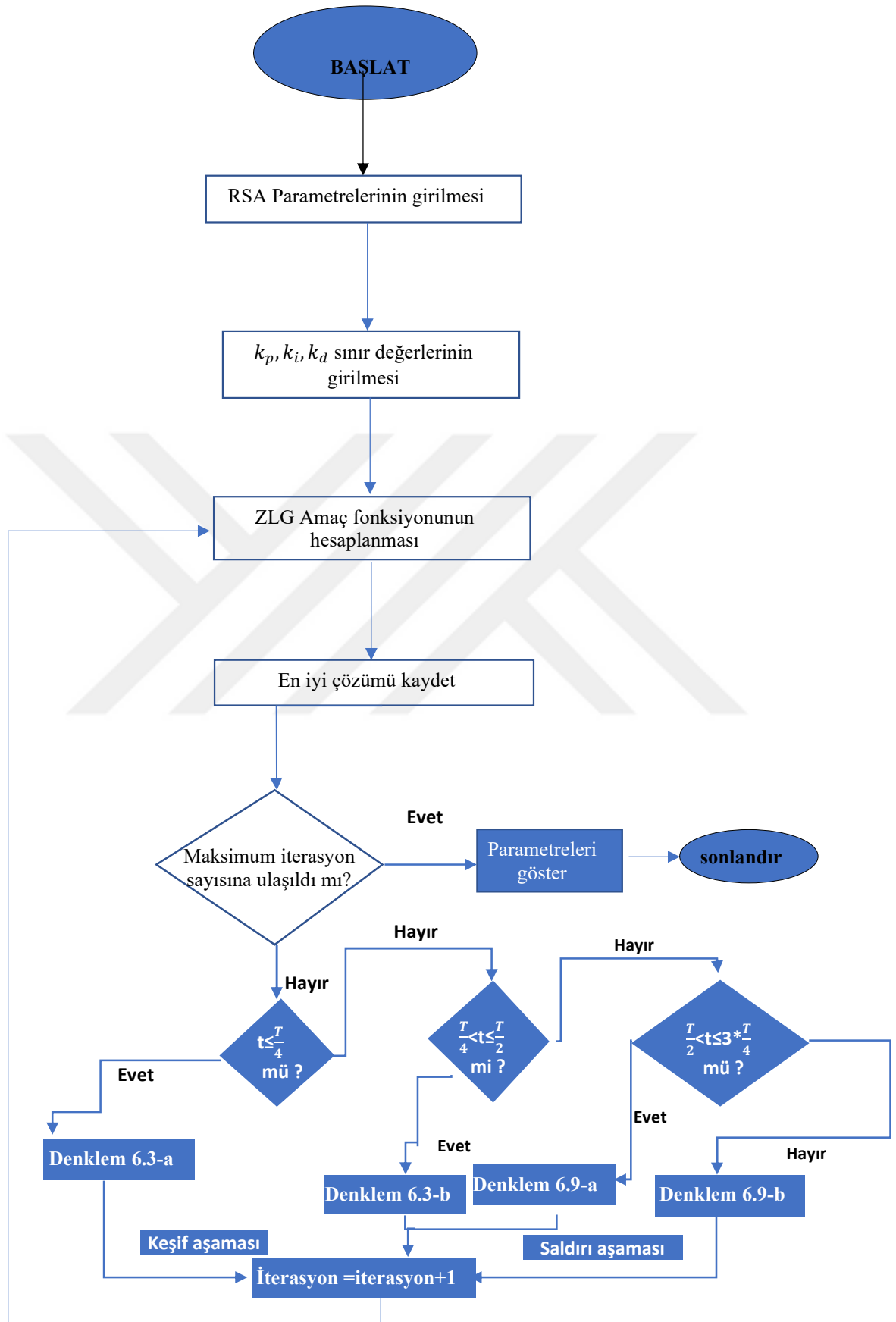
Bu denklemde T maksimum iterasyon sayısını göstermekte, rand 0 ile 1 arasında rastgele bir sayıyı, t bulunduğu iterasyon sayısını, $Best_j(t)$ ise en iyi çözümün j. konumunu göstermektedir. $\eta_{(i,j)}$ (6.4). Denklemde hesaplanan i. Çözümdeki j. konumun avlanma operatörünü, Denklemde gösterilen $P_{(i,j)}$ ise j. konumdaki en iyi değer ile j. konumun yüzdelik farkını göstermekte dolup Denklem 6.7'deki gibi hesaplanmaktadır. ϵ ise Denklem 6.5'de hesaplanan en küçük değerdir. $R_{(i,j)}$ ise avlanma alanını azaltmak için kullanılan ve Denklem 6.5'deki gibi hesaplanan değerdir.

Bu bağlamda, Şekil 6.1 ve 6.2, $t \leq \frac{T}{2}$ olduğunda kuşatma aşamasının (keşif) olacağını gösterir, aksi halde $t > \frac{T}{2}$ olduğunda avlanma aşaması (saldırı), ava yeterince yakın olduğunda, saldırı gerçekleşir.



Şekil 6.2. Ava saldırı aşaması ($t > \frac{T}{2}$ iken) (Abualigah ve ark.,2022)

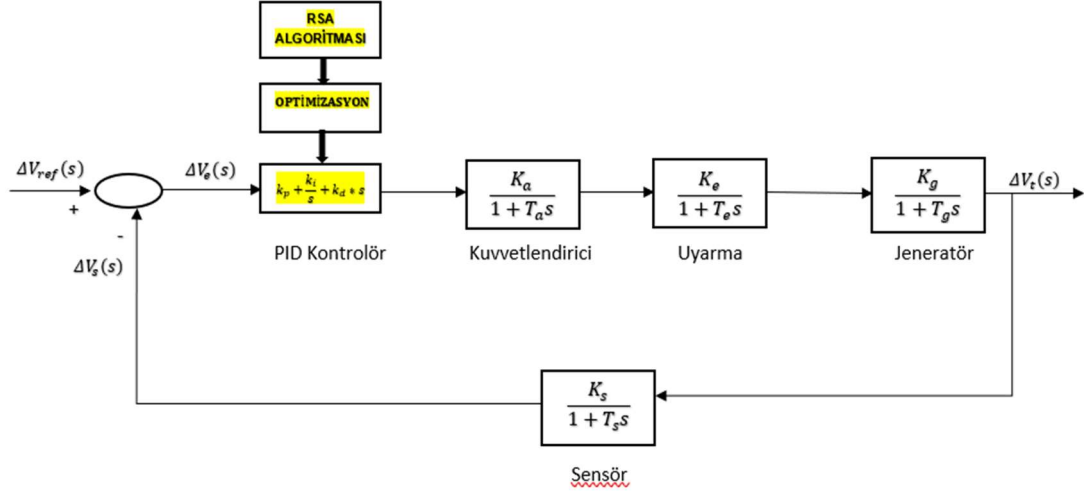
Yapılan çalışmanın RSA algoritmali blok şeması Şekil 6.3'te gösterilmiştir.



Şekil 6.3. RSA Algoritmasının blok diyagramı

6.6. RSA Algoritmasının Uygulanması

RSA Algoritması 30 kez koşturulmuş olup, iterasyon sayısı 50 olarak seçilmiştir. Aşağıda Şekil 6.4 üzerinde RSA uygulanmış sistemin blok diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 6.4. RSA Algoritmasının uygulanması

Bu çalışmada amaç fonksiyonu olarak ZLG fonksiyonu seçilmiştir. ZLG fonksiyonu aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır;

$$ZLG = (1 - e^{-\beta}) * (M_p + E_{ss}) + e^{-\beta}(t_s + t_r) \quad (6.10)$$

M_p maksimum aşım yüzdesini, t_s (settling time) yerleşme zamanını, t_r (rise time) yükselme zamanını, E_{ss} kararlı durum hatasını (steady state error), β ise $[0.5 \ 1.5]$ aralığında bir ağırlık faktörüdür. M_p , t_s , t_r , E_{ss} ve t_p en düşük değerler aldığında sistem en iyi performansını gösterecektir (Chatterjee ve ark., 2016).

Tablo 6.1. RSA Algoritmasının parametreleri

Maksimum iterasyon sayısı	50
k_p, k_i ve k_d için alt sınırlar	[0.2 0.2 0.2]
k_p, k_i ve k_d için üst sınırlar	[2 2 2]

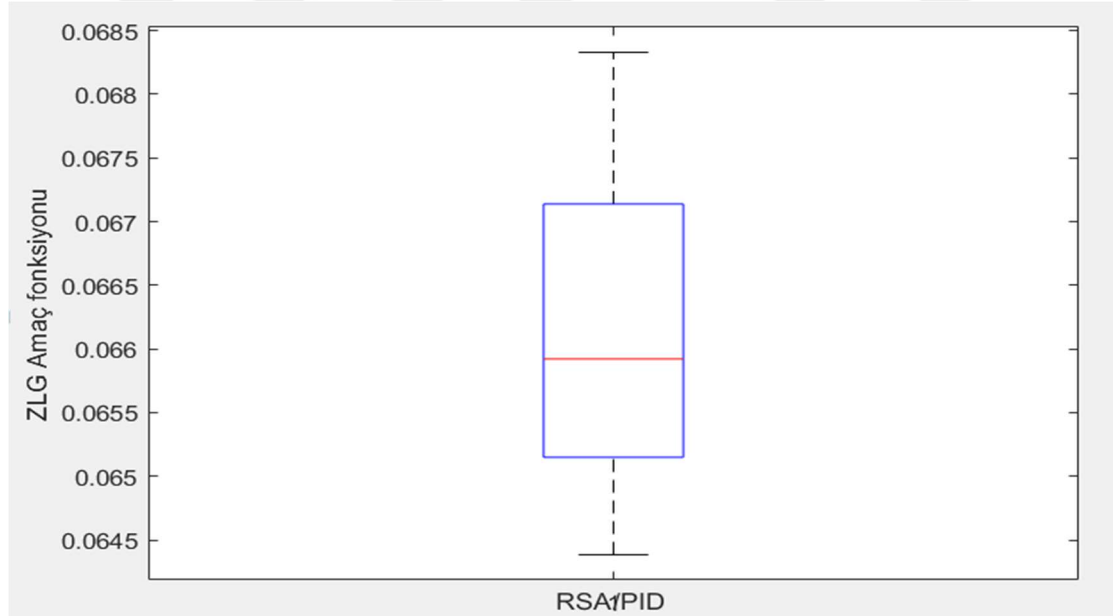
7. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

MATLAB Programı kullanılarak, RSA Algoritması 30 kez koşturularak içerisinde en iyi ZLG değerine karşılık gelen PID parametreleri $K_p=0.63164$; $K_i=0.45009$; $K_d=0.21176$ bulunmuştur. Bu değerleri yerine koyduğumuzda AVR sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olmaktadır;

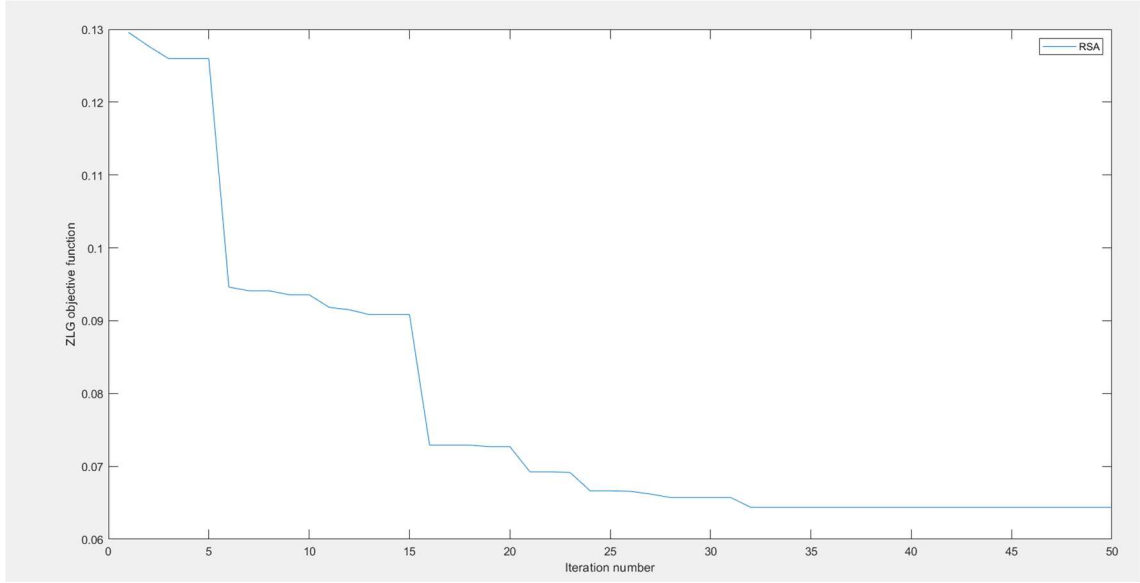
$$T_{AVR}(S) = \frac{\Delta V_t(S)}{\Delta V_{ref}(S)} = \frac{0.02118 s^3 + 2.181 s^2 + 6.361 s + 4.501}{0.0004 s^5 + 0.0454 s^4 + 0.555 s^3 + 3.628 s^2 + 7.316 s + 4.501} \quad (7.1)$$

7.1. Sonuçlara İlişkin Elde Edilen Grafikler

Elde edilen değerler transfer sonunda yerlerine konulmuş ve sisteme ait grafikler MATLAB Simülink kullanılarak elde edilmiştir. Bu grafikler Kutu grafiği Şekil 7.1, yakınsama eğrisi Şekil 7.2 ve koşturma sonuçları Şekil 7.3'te gösterilmiştir.

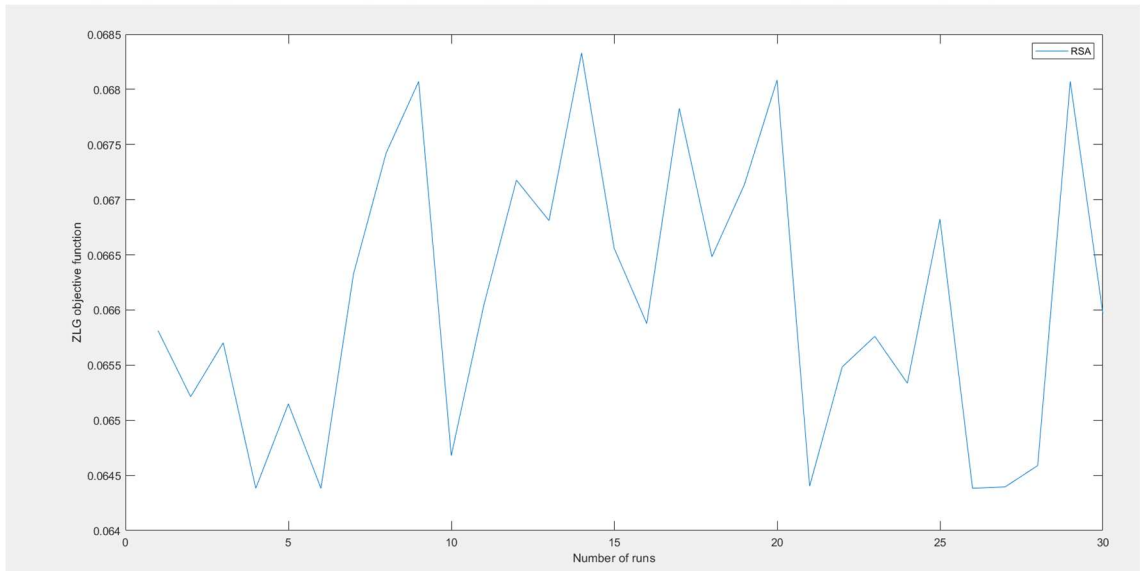


Şekil 7.1. RSA/PID Kutu grafiği



Şekil 7.2. Yakınsama eğrisi

AVR sisteminin PID kontrolör kazançlarının optimizasyonunda önerilen RSA tekniğinin tipik yakınsama profilini göstermektedir. Şekil 7.2’de görüleceği gibi RSA tekniği, ZLG amaç fonksiyonu 0.0644 değerini alarak, 32. iterasyondan sonra yakınsamaya başlamaktadır.



Şekil 7.3. Koşturma sonuçları

Elde edilen değerler tablo 7.1’de gösterilmiştir;

Tablo 7.1. RSA Algoritmasının istatistiksel sonuçları

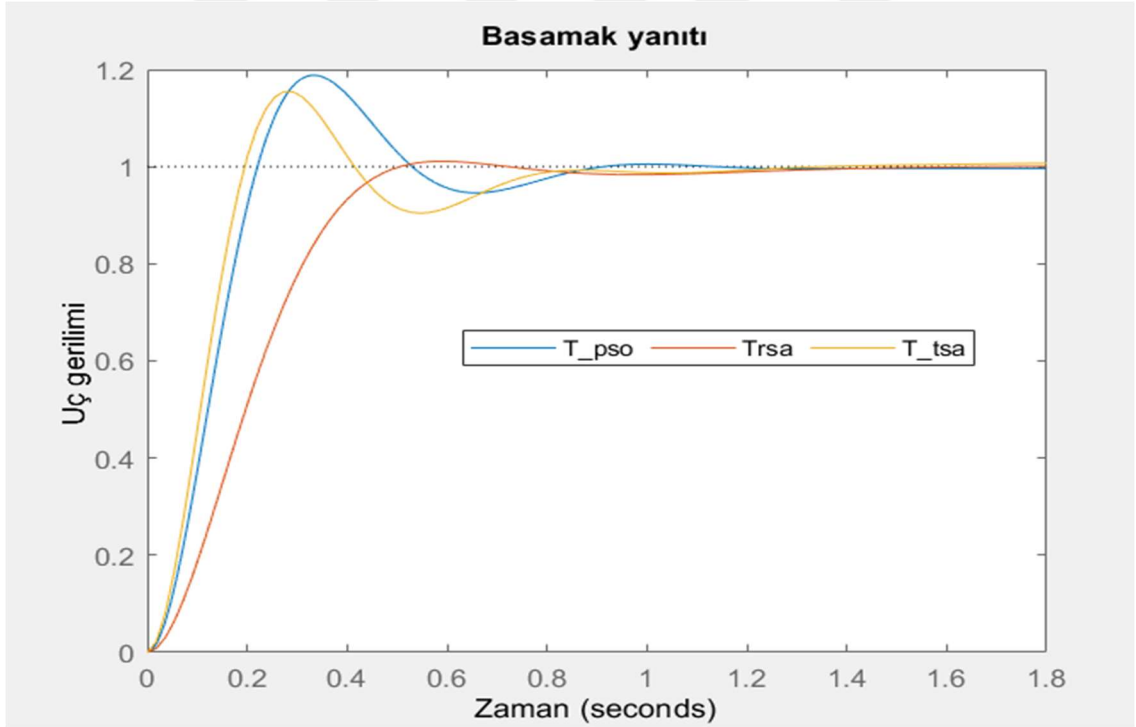
Amaç Fonksiyonu	En iyi değer	En kötü değer	Ortalama	Standart sapma
ZLG	0.0644	0.0683	0.0659	0.0013

7.2. AVR Sisteminin Gerilim Yanıtlarının Karşılaştırılması

RSA Algoritmasının etkinliğinin görülmesi amacıyla daha önce kullanılmış olan algoritmaların sonucuyla karşılaştırılacaktır. Bunun için iki adet çalışma kullanılacaktır. Bunlar PSO algoritması ve TSA algoritmasıyla yapılan çalışmalardır. Karşılaştırma sonuçlarının basamak yanıtı Şekil 7.4'te gösterilmiştir.

$$T_{PSO} = \frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.04378s^3 + 4.513s^2 + 13.63s + 9.266}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + 5.888s^2 + 14.54s + 9.266} \quad (7.2)$$

$$T_{TSA} = \frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{0.05671s^3 + 5.784s^2 + 11.38s + 9.567}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + 7.181s^2 + 12.28s + 9.567} \quad (7.3)$$



Şekil 7.4. Önerilen RSA, PSO ve TSA tabanlı AVR sisteminin basamak yanıtlarının karşılaştırma grafiği

Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde, maksimum yüzdelerik aşım, yerleşme zamanı ve tepe zamanı değerleri, önerilen RSA/PID algoritmasında daha az çıkmıştır. Elde edilen değerler Tablo 7.2 'de gösterilmiştir.

Tablo 7.2. Önerilen RSA, PSO ve TSA tabanlı AVR sisteminin basamak yanıtlarının karşılaştırma grafiği değerleri

	Yükselme zamanı	Yerleşme zamanı	Min Yerleşme	Max Yerleşme	Aşım	Tepe değeri	Tepe zamanı
T_{RSA}	0.3035	0.4595	0.9109	1.0111	1.1084	1.0111	0.5986
T_{PSO}	0.1493	0.8145	0.9125	1.1882	18.8183	1.1882	0.3372
T_{TSA}	0.1321	0.7582	0.9043	1.1548	15.4763	1.1548	0.2736

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Jeneratörler elektrik üretiminde aktif rol almakta olup, ürettiklerin gücün kullanılabilmesi için gerilimin istenilen aralıklarda olması bir elzendir. İstenilen aralıklarda gerilim üretilmediği sürece bu sistemden beslenen hiçbir elektrikli cihaz da düzgün çalışamayacaktır. Bu sebeple AVR sistemi çok büyük öneme sahiptir. Çünkü gerilim istenilen aralıklarda olmazsa elektrikle çalışan cihazlar çalışamazlar veya istenilen performansı gösteremezler. AVR sistemi ne kadar iyi olursa sistemin çıkış gerilimi de o kadar iyi olur.

Karasız haldeki bir sisteme kontrolör eklendiğinde kontrolör parametrelerinin optimizasyona ihtiyaç duyduğu çok açıktır. Bu da parametre değerlerinin en iyiye en yakın değerleri veren metotların tespit edilerek bulunan sisteme uygulanması gerektiği ihtiyacını doğurmaktadır.

AVR sistemine kontrolör eklenerek elde edilen yeni sistem için kontrolör parametrelerinin değerleri en uygun şekilde seçilmeye çalışılmalıdır. Bu değerleri bulmak içinde çeşitli yöntemler mevcuttur. Günümüzde eski metotların yerine geliştirilen meta sezgisel algoritmalar sıklıkla kullanılmaktadır. Her yeni çıkan algoritmanın da sistemlere uygulanarak elde edilen değerlerin eski değerlerle karşılaştırılması, yeni çıkarılan algoritmaların o sisteme uygunluğu görülebilmektedir. Her ortaya çıkan algoritma her sisteme uygulanamasa da bir sistem için en iyi algoritma da sürekli olarak değişebilmektedir.

Bir algoritmanın sonuçlarının nasıl olduğunu ancak farklı algoritmalarla karşılaştırarak öğrenebiliriz. Daha önceki algoritmalarda elde edilen değerler ile yeni algoritmadaki değerler karşılaştırılarak hangisinin bu sistem için daha iyi sonuçlar verdiğinin görülmesi gerekmektedir. Bu amaçla bu çalışmada RSA algoritması PSO ve TSA algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. RSA algoritmasının maksimum aşımı oldukça azalttığı, yerleşme süresini yarıya yakın düşürdüğü ve en düşük tepe değerine sahip olduğu görülmektedir. Sonuçlar göz önüne alındığında RSA Algoritmasının üstünlüğü açık bir şekilde görülmektedir. Sonuçlar bu algoritmanın AVR sistemi için kullanıldığında iyi veriler elde edileceğini göstermektedir. Bu da RSA algoritmasının AVR sistemi için uygun bir algoritma olduğunu göstermektedir

8.2. Öneriler

Bu tez çalışmasında AVR sisteminin öneminden açıkça bahsedilmiştir. Çünkü Jeneratör çıkış gerilimleri kontrol altında tutulmadığı sürece sistem düzgün çalışmayacak olup bu sistemden beslenen elektrikli her türlü cihaz da düzgün çalışmayacaktır. Bu amaçla AVR sistemine kontrolör eklenerek optimum aralıklarda çalışması gerektiği vurgulanmıştır.

AVR sistemine PID kontrolör eklenerek daha stabil çalışması sağlanmıştır. Ancak kontrolör eklenmesi yeterli olmayıp bu kontrolörün parametre değerlerinin en iyi sonuçları verecek değerlerde olması amaçlanmalıdır. Bu nedenle meta sezgisel algoritmalarla sistemler sürekli olarak test edilmeli ve sonuçları da diğer algoritmalarla karşılaştırılmalıdır. Nasıl ki her algoritma her sisteme uygulanamıyorsa da bir sistem için de en iyi algoritmanın hangisi olacağı sürekli değişebilmektedir. Bu tez çalışmasında kullanılan RSA algoritması da bunu göstermektedir.

Elde edilen veriler ve karşılaştırma sonuçları göz önüne alındığında AVR sisteminin RSA algoritması uygulanarak elde edilen PID kontrolör parametrelerinin sistemin en uygun şekilde çalışabileceğini göstermektedir. Bu amaçla bugüne kadar çeşitli algoritmalar kullanılarak yapılan çalışmalara bir yenisi daha eklenmiş bulunmaktadır.

İlerleyen zamanlarda ortaya çıkacak yeni meta sezgisel algoritmalar da bu sisteme uygulanmaya devam edilmeli ve bu sistem için en iyi değerler sürekli olarak geliştirilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abualigah, L., Abd Elaziz, M., Sumari, P., Geem, Z. W., & Gandomi, A. H. (2022). Reptile Search Algorithm (RSA): A nature-inspired meta-heuristic optimizer. *Expert Systems with Applications*, 191, 116158.
- Alghamdi, S., Sindi, H. F., Rawa, M., Alhussainy, A. A., Calasan, M., Micev, M., ... & Abdel Aleem, S. H. (2022). Optimal PID Controllers for AVR Systems Using Hybrid Simulated Annealing and Gorilla Troops Optimization. *Fractal and Fractional*, 6(11), 682.
- Astrom K. J., Hagglung T., PID Controllers: Theory, design and tuning, 2nd Edition, *Instrument Society of America, New York*, 1995
- Bendjeghaba, O. (2014). Continuous firefly algorithm for optimal tuning of PID controller in AVR system. *Journal of Electrical Engineering*, 65(1), 44.
- Candemir, A., <https://egitim.ahmetcandemir.com.tr/2-akim-gerilim-guc-enerji-dogru-ve-alternatif-akim/>
- Birok E., Yüksek Mertebeden Teorik Bir Ssistemin S7-300/400 Tipi PLC için Sayısal Benzetim İle Dijital PID Kontrolör Tasarımı, *Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2013.
- Chatterjee, S., & Mukherjee, V. (2016). PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77, 418-429.
- Doğanay, M. M. (2022). Güç sistemlerinde simetrik ve simetrik olmayan arıza analizleri ve uygulamaları (*Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*).
- Ekinci, S., & Hekimoğlu, B. (2019). Improved kidney-inspired algorithm approach for tuning of PID controller in AVR system. *IEEE Access*, 7, 39935-39947.
- Elektrikmen sitesi, <https://elektrikmen.com/senkron-generator/>

- Gaing, Z. L. (2004). A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system. *IEEE transactions on energy conversion*, 19(2), 384-391.
- Gozde, H., & Taplamacioglu, M. C. (2011). Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system. *Journal of the Franklin Institute*, 348(8), 1927-1946.
- Gozde, H. (2020). Robust 2DOF state-feedback PI-controller based on meta-heuristic optimization for automatic voltage regulation system. *ISA transactions*, 98, 26-36.
- Güvenç, U., Işık, A. H., Yiğit, T., & Akkaya, I. (2016). Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(3), 1150-1162.
- Hekimoğlu, B., & Ekinci, S. (2018, May). Grasshopper optimization algorithm for automatic voltage regulator system. In 2018 5th international conference on electrical and electronic engineering (ICEEE) (pp. 152-156). IEEE.
- Hurma H. N., PID kontrolör ve PLC uygulaması, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1998, 75219.
- Kashki, M., Abdel-Magid, Y. L., & Abido, M. A. (2008). A reinforcement learning automata optimization approach for optimum tuning of PID controller in AVR system. In *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence: 4th International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008 Shanghai, China, September 15-18, 2008 Proceedings 4* (pp. 684-692). Springer Berlin Heidelberg.
- Kocaoğlu, E. (1988, Nisan). *Lecture notes on Linear Control Systems, senior-level control*. Ankara: Ortadoğu Teknik Üniversitesi.
- Köse, E. (2020). Optimal control of AVR system with tree seed algorithm-based PID controller. *IEEE Access*, 8, 89457-89467.

- Kundur, P., Balu, N. J., & Lauby, M. G. (1994). Sub-synchronous resonance. In Power system stability and control (Vol. 7, pp. 1025-1105). McGraw-hill.
- Kurtulan S., *PLC ile endüstriyel otomasyon, 5. Basım, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2008*
- Munagala, V. K., & Jatoth, R. K. (2022). Improved fractional PI λ D μ controller for AVR system using Chaotic Black Widow algorithm. Computers & Electrical Engineering, 97, 107600.
- Markaroğlu H., İntegral yığılması problemine karşı yeni bir yaklaşım, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2006, 221961.
- Otomobilteknoloji, <https://otomobilteknoloji.blogspot.com/2020/01/stator-sargisi-nedir-elektriksel-kontrolleri.html>
- Panda, S., Sahu, B. K., & Mohanty, P. K. (2012). Design and performance analysis of PID controller for an automatic voltage regulator system using simplified particle swarm optimization. *Journal of the Franklin Institute*, 349(8), 2609-2625.
- Plonsey, R., & Barr, R. (1982). The four-electrode resistivity technique as applied to cardiac muscle. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, (7), 541-546.
- Schlabbach, J. (2005). *Short-circuit currents (Vol. 51)*.
- Siemens Sitrain otomasyon ve kontrol eğitim bölümü, *SIMATIC S7-300/S7-400 ile PID kontrol, İstanbul, 2011*.
- Ula, A. H. M. S., & Hasan, A. R. (1992). Design and implementation of a personal computer based automatic voltage regulator for a synchronous generator. *IEEE transactions on energy conversion*, 7(1), 125-131.
- Zhou, Y., Zhang, J., Yang, X., & Ling, Y. (2019). Optimization of PID controller based on water wave optimization for an automatic voltage regulator system. *Information Technology and Control*, 48(1), 160-171.

Zhu, H., Li, L., Zhao, Y., Guo, Y., & Yang, Y. (2009). CAS algorithm-based optimum design of PID controller in AVR system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 42(2), 792-800.



ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Abdurrahim BAVLI
Uyruğu : T.C.

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Üniversite	Gaziantep Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği, Şahinbey, Gaziantep	2013
Yüksek Lisans	Batman Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	Halen
Doktora	:	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2013	Alfen Elektrik	Elektrik Şefi
2014	MD Yapı İnşaat	Elektrik Şefi
2015	Tur-Sum Müşavirlik	Elektrik Müşaviri
2016	May İnşaat	Elektrik Şefi
2017-Halen	Dicle Edaş	Proje Tesis Yöneticisi

UZMANLIK ALANI

ENH , AG-YG Test ve Devreye Alma, Keşif, hakediş ve metraj hazırlama ve kontrolleri, Röle ve Otomasyon sistemleri

Autocad

MS Office Programları

YABANCI DİLLER

İngilizce (İleri seviye)

YAYINLAR

- Sevim D., Bavli A. (2023), AVR sisteminin Matematik modellemesi ve PID kontrolör parametrelerinin bulunması, 5. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi- Konferans bildirisi