



İSKENDERUN TEKNİK
ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**OTOMATİK VOLTAJ REGÜLATÖRÜ
İÇİN KESİR DERECELİ KAYAN
KİPLİ KONTROLÇÜ VE SİNÜS
KOSİNÜS ALGORİTMASI İLE
OPTİMİZASYONU**

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

AĞUSTOS 2022



**OTOMATİK VOLTAJ REGÜLATÖRÜ İÇİN KESİR DERECELİ KAYAN
KİPLİ KONTROLCÜ VE SİNÜS KOSİNÜS ALGORİTMASI İLE
OPTİMİZASYONU**

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2022

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ tarafından hazırlanan “OTOMATİK VOLTAJ REGÜLATÖRÜ İÇİN KESİR DERECELİ KAYAN KİPLİ KONTROLCÜ VE SİNÜS KOSİNÜS ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Başkan: Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Üye: Doç. Dr. Alkan ALKAYA

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mersin Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

Tez Savunma Tarihi: 29 / 08 / 2022

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülediğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ

29 / 08 / 2022

OTOMATİK VOLTAJ REGÜLATÖRÜ İÇİN KESİR DERECELİ KAYAN KIPLI
KONTROLCÜ VE SİNÜS KOSİNÜS ALGORİTMASI İLE OPTİMİZASYONU
(Yüksek Lisans Tezi)

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2022

ÖZET

Otomatik Voltaj Regülatörü (AVR) için yapılan çalışmalara incelendiğinde PID kontrolcülerin yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Bu tezde ise mevcut çalışmalardan farklı olarak kayan kipli kontrolcü AVR için tasarlanmıştır. Önceki çalışmalara göre özgün olan özelliği, önerilen kontrolcü için kesir dereceli bir kayma fonksiyonunun seçilmesidir. Önerilen kontrolcünün tasarım aşamaları adım adım verilmiştir. Tezde kullanılan AVR modelinde, literatürden farklı olarak IEEE tarafından önerilen uyarım sistemi modelleri dikkate alınarak hem kontrol sinyali sınırlandırılmış hem de uyarım sistemi çıkışı için bir doyum sınırı belirlenmiştir. Böylece daha gerçekçi bir matematiksel model kullanılmıştır. Bu yaklaşım önceki çalışmalar arasında çok az yer almaktadır.

Sinüs Kosinüs algoritması optimizasyon için seçilmiştir. Böylece, küresel en iyiyi aramada iyi sonuçlar alınması hedeflenmiştir. Önerilen kontrolcü, PI ve PID kontrolcüler ile birlikte aynı algoritma kullanarak optimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar hem basamak girişi bakımından hem de çeşitli bozucu ve belirsizliklere karşı dayanıklılık bakımından karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Önerilen yöntemin daha iyi çıkış verdiği hem performans ölçümleri ile hem de grafikler ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler : Otomatik voltaj regülatörü, kayan kipli kontrol, kesir dereceli kayma fonksiyonu, sinüs kosinüs algoritması
Sayfa Adedi : 49
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

FRACTIONAL ORDER SLIDING MODE CONTROLLER AND OPTIMIZATION WITH
SINE COSINE ALGORITHM FOR AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR
(M. Sc. Thesis)

Hatice Ayça ÇİMRİN AKTUĞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

August 2022

ABSTRACT

Considering the studies on Automatic Voltage Regulator (AVR), it is seen that PID controllers have been widely used. In this thesis, unlike the existing studies, a sliding mode controller is designed for AVR. The novelty over the previous work is the selection of a fractional sliding function for the proposed controller. The design stages of the proposed controller are given step by step. Unlike the literature, in the AVR model used in the thesis, both the control signal is limited and a saturation limit is determined for the excitation system output, considering the excitation system models recommended by IEEE. Thus, a more realistic mathematical model is used. This approach is very rare among previous studies.

Sine Cosine algorithm was chosen for optimization. Thus, it is aimed to achieve good results in the search for the global best. The proposed controller, PI and PID controllers are optimized using the same algorithm. The obtained results are given comparatively both in terms of step response and robustness against various disturbances and uncertainties. It has been shown with both performance measurements and graphics that the proposed method gives better output.

Key Words : Automatic voltage regulator, sliding mode controller, fractional order sliding function, sine cosine algorithm
Page Number : 49
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Murat FURAT

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerlerini örnek edindiğim, engin bilgi ve birikimlerini benimle büyük bir titizlikle paylaşıp, beni yönlendiren danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a ve yüksek lisans eğitimim süresince bana manevi destek veren eşim Burakcan AKTUĞ'a ve ayrıca beni sürekli motive eden, her zamana yanımda olan babam Kerim Mesut ÇİMRİN ve annem Tülay ÇİMRİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	4
3. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI.....	7
3.1. Ateş Böceği Algoritması.....	7
3.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması.....	7
3.3. Meyve Sineği Algoritması.....	8
3.4. Yarasa Algoritması.....	8
3.5. Gri Kurt Algoritması.....	8
3.6. Su Döngüsü Algoritması.....	8
3.7. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması.....	9
3.8. Genetik Algoritması.....	9
3.9. Benzetimli Tavlama Algoritması.....	9
3.10. Sinüs Kosinüs Algoritması.....	9
4. KAYAN KIPLİ KONTROL	12
5. MATERYAL VE YÖNTEM	14
5.1. Materyal	14
5.2. Yöntem.....	14
5.3. Simülasyon Sonuçları Ve Tartışma.....	18
5.3.1. Optimizasyon için en az simülasyon sayılarının bulunması.....	19

5.3.2. Kontrolcülerin basamak yanıtı.....	23
5.3.3. Kontrolcülerin $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı.....	28
5.3.4. Parametre belirsizliklerine karşı dayanıklılık.....	30
6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	41
KAYNAKLAR.....	42
EK-1. Kesir Dereceli Diferansiyel Hesaplama.....	47
DİZİN.....	49



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Doğrusallaştırılmış AVR modeli özellikleri.....	2
Çizelge 6.1. Kullanılan bilgisayar özellikleri	14
Çizelge 5.2. Kontrolcü parametreleri için arama uzayları	19
Çizelge 5.3. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile PI kontrolcü için optimizasyon sonuçları.....	20
Çizelge 5.4. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile en iyi PI kontrolcü parametreleri	20
Çizelge 5.5. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile PID kontrolcü için SCA optimizasyon sonuçları	21
Çizelge 5.6. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile en iyi PID kontrolcü parametreleri	22
Çizelge 5.7. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile önerilen KKK için SCA optimizasyon sonuçları	22
Çizelge 5.8. Farklı çözüm adayları ve döngü sayıları ile en iyi KKK parametreleri.....	23
Çizelge 5.9. Seçilen parametreler ile geçici durum performanslarının karşılaştırılması	27
Çizelge 5.10. Yük bozulmasında kontrolcülerin ISE performansları	30
Çizelge 5.11. AVR parametre belirsizliklerine karşı PI kontrolcü performansı.....	38
Çizelge 5.12. AVR parametre belirsizliklerine karşı PID kontrolcü performansı.....	38
Çizelge 5.13. AVR parametre belirsizliklerine karşı önerilen KKK performansı.....	40

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. AVR blok diyagramı.....	2
Şekil 3.1. SCA akış diyagramı.....	11
Şekil 5.1 Doğrusallaştırılmış AVR için PI ve PID kontrolcü bağlantısı.....	15
Şekil 5.2. AVR için KKK blok diyagramı.....	18
Şekil 5.3. Seçilen PI kontrolcü parametreleri ile AVR çıkışı	24
Şekil 5.4. Seçilen PI kontrolcü parametreleri ile kontrol sinyali	24
Şekil 5.5. Seçilen PID kontrolcü parametreleri ile AVR çıkışı	25
Şekil 5.6. Seçilen PID kontrolcü parametreleri ile kontrol sinyali	25
Şekil 5.7. Seçilen KKK parametreleri ile AVR çıkışı	26
Şekil 5.8. Seçilen KKK parametreleri ile kontrol sinyali	26
Şekil 5.9. Seçilen parametreler ile AVR çıkışlarının karşılaştırılması	27
Şekil 5.10. Seçilen parametreler ile kontrol sinyalleri.....	28
Şekil 5.11. Seçilen parametreler ile PI kontrolcüsünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı .	29
Şekil 5.12. Seçilen parametreler ile PID kontrolcüsünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı.....	29
Şekil 5.13. Seçilen parametreler ile önerilen kontrolcünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı.....	30
Şekil 5.14. PI kontrolcünün AVR’de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı ..	31
Şekil 5.15. PI kontrolcünün AVR’de uyarım sistemi zaman sabiti değişimlerine yanıtı	32
Şekil 5.16. PI kontrolcünün AVR’de jeneratör zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	32
Şekil 5.17. PI kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	33
Şekil 5.18. PID kontrolcünün AVR’de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	33
Şekil 5.19. PID kontrolcünün AVR’de uyarım sistemi zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	34
Şekil 5.20. PID kontrolcünün AVR’de jeneratör zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	34
Şekil 5.21. PID kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	35

Şekil 5.22. Önerilen kontrolcünün AVR’de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	35
Şekil 5.23. Önerilen kontrolcünün AVR’de uyarım sisteminin zaman sabiti değişimlerine yanıtı.....	36
Şekil 5.24. Önerilen kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı ..	37



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Kısaltmalar	Açıklamalar
ABC	Artificial Bee Colony Algorithm (Yapay Arı Kolonisi Algoritması)
AVR	Automatic Voltage Regulator (Otomatik Voltaj Regülatörü)
BA	Bat Algorithm (Yarasa Algoritması)
BTA	Benzetimli Tavlama Algoritması
CS	Cuckoo Search Algorithm (Guguk Kuşu Algoritması)
FA	Firefly Algorithm (Ateş Böceği Algoritması)
FFA	Fruit Fly Algorithm (Meyve Sineği Algoritması)
GWO	Gray Wolf Optimizer (Gri Kurt Algoritması)
KKK	Kayan Kipli Kontrol
MSO	Meyve Sineği Algoritması
P	Proportional (Oransal)
PI	Proportional Integral (Oransal Integral)
PID	Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
PSO	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)
SCA	Sine-Cosine Algorithm (Sinüs Kosinüs Algoritması)
SMC	Sliding Mode Control (Kayan Kipli Kontrol)
WCA	Water Cycle Algorithm (Su Döngüsü Algoritması)
Simgeler	Açıklamalar
τ_a	Yükseltici zaman sabiti
τ_e	Uyartım sistemi zaman sabiti
τ_g	Jeneratör zaman sabiti
τ_s	Sensör zaman sabiti
$\sigma(t)$	Kayma fonksiyonu
$r(t)$	Referans
$y(t)$	Çıkış
$u(t)$	Kontrol sinyali

1. GİRİŞ

Otomatik Voltaj Regülatörü (AVR), senkron jeneratörün çıkış terminal voltajını belirlenmiş bir değerde otomatik olarak tutmak için uyarım akımını değiştirmeye yardımcı bir cihaz olarak tanımlanabilir. AVR, alternatör uyarma sisteminin bir parçasıdır (Furat & Cucu, 2022).

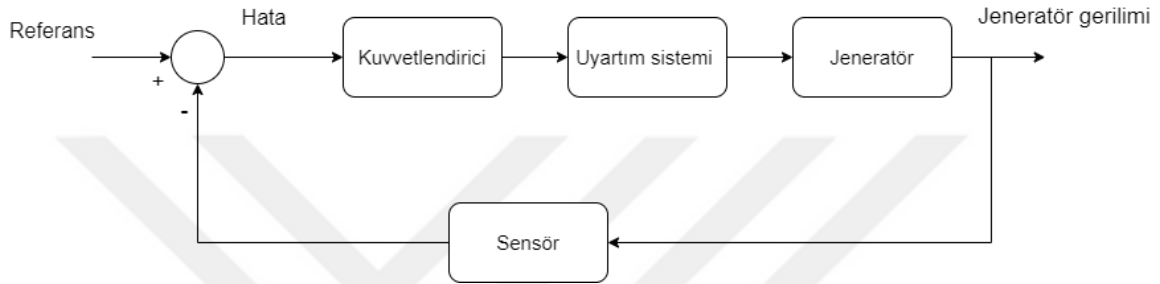
Elektrik enerjisi dağıtım şebekelerinden beklenen yük değişiminden oluşan gerilim değişimlerine karşı jeneratörlerin sabit bir şekilde ve istenen seviyede gerilim çıkışı vermesidir. Bu durumun sağlanması için senkron jeneratör kullanan rüzgar, termik ve hidroelektrik santrallerinde jeneratörün uyarım akımı kullanılır. Otomatik voltaj regülatörü sistemin amacı jeneratör çıkış geriliminin farklı yük koşullarına rağmen sabit gerilim üretmesi amacıyla gerekli uyarımı sağlamasıdır. AVR yapısında temel olarak bir kontrolcü, bir kuvvetlendirici, bir uyarım sistemi ve jeneratör bulunur (Ekinci & Hekimoglu, 2019).

Enerji dağıtım şebekelerinde beklenen durum ise gerilimin ve frekansın sabit genlikli olmasıdır. Gerilim AVR ile senkron jeneratörün uyarım akımının genliğinde ki değişiklik ile sabit tutulmaya çalışılır. Jeneratörün çıkış frekansı ise Yük Frekans Kontrolcüsü (Load Frequency Controller, LFC) yardımıyla sabit tutulur. Her ikisinin de senkron jeneratörlerin doğru bir şekilde şebekeye enerji aktarımında çok önemli bir rolü vardır. Burada, jeneratörün doğru çalışması için bir çok farklı ekipman da vardır ("IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," 2016) (IEEE 421.5TM-2016, 2006).

AVR sistemindeki kontrolcü ile ilgili çok sayıda araştırma bulunmaktadır. Literatürde bulunan çalışmaların büyük kısmında, PID ve PID türevi kontrolcülerin doğrusallaştırılmış AVR modelinde verdiği sonuçlar ortaya konmuştur (Şekil 1.1). Bu modelin özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

PID kontrolcüsünün tercih edilmesindeki en büyük neden her bir parametresinin kontrol edilen sistemin çıkışı üzerine etkisinin gözlemlenebilmesidir (Gidemen & Furat, 2015). Literatürdeki araştırmalarda önerilen kontrolcülerin en iyi parametre değerlerinin bulunması amacıyla meta-sezgisel optimizasyon algoritmaları tercih edilmiştir. Sonuç olarak en kısa yerleşme zamanı, en kısa yükselme zamanı ve en az aşım hedeflenmiştir. Kullanılan

algoritmaların genel olarak ortak özelliğini açıklamak gerekirse, var olan tüm parametreler için belirlenen bir arama uzayında, algoritmaların kuralına göre uygun görülerek seçilen bir uygunluk fonksiyonunun en iyi değerini veren parametreyi bulmaktır. Bu sebeple, seçilen uygunluk fonksiyonu ile algoritmanın performansı doğrudan birbiriyle ilişkilidir. Tek kriter bu olmamakla birlikte arama uzayı içindeki aday çözüm sayısı ve çözüm için belirlenen döngü sayısı da optimizasyon için önemlidir. İki kriterin çarpımı ise toplam benzetim sayısı olarak isimlendirilmektedir.



Şekil 1.1. AVR blok diyagramı

Çizelge 1.1. Doğrusallaştırılmış AVR modeli özellikleri

	Transfer fonksiyonu	Parametre aralığı	Seçilen kazanç ve zaman sabiti
Kuvvetlendirici	$G_a(s) = \frac{K_a}{1 + \tau_a s}$	$10 \leq K_a \leq 40$ $0.02s \leq \tau_a \leq 0.1s$	$G_a(s) = \frac{10}{1 + 0.1s}$
Uyartım sistemi	$G_e(s) = \frac{K_e}{1 + \tau_e s}$	$1 \leq K_e \leq 10$ $0.1s \leq \tau_e \leq 0.4s$	$G_e(s) = \frac{1}{1 + 0.4s}$
Jeneratör	$G_g(s) = \frac{K_g}{1 + \tau_g s}$	$0.7 \leq K_g \leq 1.0$ $1.0s \leq \tau_g \leq 2.0s$	$G_g(s) = \frac{1}{1 + s}$
Sensör	$G_s(s) = \frac{K_s}{1 + \tau_s s}$	$0.9 \leq K_s \leq 1.1$ $0.001s \leq \tau_s \leq 0.06s$	$G_s(s) = \frac{1}{1 + 0.01s}$

Bu tezde ise kesir dereceli PID (PI^λD) kayma fonksiyonu tabanlı bir kayan kipli kontrolcü önerilmiştir. Kontrol sinyalinin elde edilme aşamaları adım adım sunulmuştur. Ayrıca literatürdeki birçok kayan kipli kontrolcü tasarımında olduğu gibi kararlılık Lyapunov kararlılık teoremi ile yapılmıştır. Önerilen kontrolcünün en iyi parametrelerinin bulmak amacıyla meta-sezgisel bir algoritma olan sinüs kosinüs algoritması (SCA) kullanılmıştır. Önerilen kontrolcünün performansı PI ve PID kontrolcüler ile yapılmış, onların da

parametrelerinin optimizasyonunda SCA kullanılmıştır. Detaylı sonuçlar tablolar ve çizelgelerle sunulmuştur.

Tezin yapısı şu şekildedir: İlk olarak giriş kısmı verilmiş olup sonraki bölümde önceki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir. Daha sonra, yaygın olarak literatürde yer alan meta-sezgisel optimizasyon yöntemleri hakkında bilgilendirme üçüncü bölümde yapılmıştır. Bu bölümde son olarak tercih edilen SCA algoritması tanıtılmıştır. Ardından, kayan kipli kontrol yöntemi dördüncü bölümde anlatılmıştır. Beşinci bölümün materyal kısmında optimizasyon çalışmalarında kullanılan bilgisayarın özellikleri verilmiş ve yöntem kısmında doğrusallaştırılmış AVR sistemi hakkında bilgi verilip literatürden örnekler eklenmiştir. Elde edilen sonuçlar ışığında tercih edilen ve önerilen $PI^{\lambda}D$ tabanlı kayma yüzeyli kayan kipli kontrolcü tasarımı adım adım anlatılarak kontrol sinyali elde edilmiştir. Aynı bölümün simülasyon sonuçları ve tartışma kısmında ise optimizasyon sonucu bulunan kontrolcü parametreleri ayrı ayrı tablolar halinde, eşit sayıda döngü sayısı ile elde edilen sonuçlar kullanılarak çıkış grafikleri verilmiştir. Ayrıca eşitli dayanıklılık testleri karşısında önerilen kontrolcü ile PI ve PID kontrolcülerinin karşılaştırmalı analizi yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar tablolar çizelgeler ve grafikler ile sunulmuştur. Son bölümde yapılan çalışmaların değerlendirmesi yer almaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

AVR için önerilen kontrolcüler incelendiğinde, sıklıkla klasik PID başta olmak üzere PID türevleri kontrolcüler ile farklı yapıda kontrolcülerin ele alındığı görülmektedir. Bu çalışmaların ortak özelliği, doğrusal AVR modelinde herhangi bir koruma cihazının işlevini görecektir bir özelliğin olmamasıdır. Dolayısıyla, hesaplanan kontrol sinyali yükseltilerek doğrudan uyarım sistemine uygulandığı gibi elde edilen uyarımın üst sınırı olan doyum hakkında da bir bilgi model içinde yer almamaktadır.

AVR sistemi için farklı çeşitlerde PID ve PID türevi kontrolcüler vardır. Önerilen en yaygın kontrolcüler ideal PID, gerçek PID, kesirli mertebeden PID ve PID'nin ikinci dereceden türev ($PIDD^2$) kontrolcüsüdür. Bu kontrolcülerin parametreleri bağımsız olması metasezgisel algoritmaların optimizasyonda tercih sebebidir. Dolayısıyla, gerek kontrolcü performansı gerekse önerilen optimizasyon algoritmasının performansı benzer çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Çalasan vd., 2021).

Yukarıda sayılan tüm kontrolcüler ele alındığı bir çalışmada AVR için en iyi kontrolcünün bulunması hedeflenmiştir. Önerilen SA-MRO (benzetilmiş tavlama ve manta işini yiyecek arama optimizasyonu) hibrit optimizasyon algoritmasının üstünlüğü ortaya konulmuştur. Ayrıca, $PIDD^2$ kontrolcüsünün üstün sonuç verdiği bildirilmiştir (Micev vd., 2020)

AVR için denetleyici parametrelerinin optimal değerlerinin belirlenmesinde yeni bir optimizasyon yöntemi olan Denge Optimize Edici (EO) bir başka çalışmada sunulmuştur. EO algoritması ile daha hızlı optimum kontrolcü parametrelerinin bulunduğu rapor edilmiştir (Micev vd., 2021). İki serbestlik dereceli hareketli olarak ağırlıklandırılan durum geri beslemeli PI kontrolcü farklı optimizasyon algoritmaları ile optimize edilmiş ve sonuçları karşılaştırmalı olarak verilmiştir. EO algoritması karşılaştırılan algoritmalarından üstünlüğünü doğrulamıştır (Eke vd., 2021). Denge Optimize Edici (EO) algoritması fizik yasalarından yararlanarak geliştirilmiş bir arama algoritmasıdır. Denge optimizasyon algoritmasının ilham kaynağı kontrol hacmi üzerindeki dinamik kütle dengesinin karşılaştırılmasıdır (Şeker & Işık, 2021).

Doğadan ilham alınarak tasarlanan bir optimizasyon tekniği olan su döngüsü algoritması (WCA), AVR için PID'nin optimum parametre değerlerini bulmakta kullanılmıştır. Diğer

kontrolörlere kıyasla parametrik belirsizliklere karşı daha dayanıklı, referans noktası takibinde daha başarılı olduğu çeşitli simülasyon sonuçları ile sunulmuştur (Pachauri, 2020).

Evrimsel algoritma olan Guguk Kuşu Arama Algoritması (Cuckoo Search, CS) kullanarak bir otomatik voltaj regülatörünün oransal-integral-türev kontrolör kazançlarının en iyi değerlerini belirlemek için yeni bir tasarım tekniği sunmaktadır. Elde edilen sonuçlar, daha sağlam ve hızlı yakınsama özellikleri sunduğu çeşitli ölçümler ile ortaya konmuştur (Sikander & Thakur, 2020).

Stabilizatör ve PID kontrolör tarafından kontrol edilen AVR sisteminin analizini bir başka çalışmada yapılmıştır. Önerilen kontrolörlerin yerleşme süresi, salınımlar ve aşma açısından daha iyi performans özellikleri sağladığını göstermektedir (Yu Zaw, 2019).

Kontrol sistemlerinin önemli bir kısmında karşılaşılan sorun, yerleşme ve yükselme zamanının düşürülmesi ve aşım artma ile sonuçlanmaktadır. Fakat şebekeye bağlı olan bir jeneratörde aşım olması istenmez. Yapılan çalışmalarda, %5'in üzerinde gerçekleşen aşım jeneratörler için kabul edilemez şekilde değerlendirilmiştir (Jumani et al., 2020). Buna rağmen yapılan bir çok çalışmada %5 üzerinde sonuçlar bulunmuştur (Arıkuşu & Bayhan, 2021; Gozde & Taplamacioglu, 2011; Jumani vd., 2020; Kose, 2020).

Çeşitli yapılar kullanılarak oluşturulan PID kontrolcülerin parametrelerini en iyi şekilde ayarlamak amacıyla birçok meta-sezgisel optimizasyon algoritması kullanılmış ve üstünlükleri araştırılmıştır. Literatürde, bulunan bir çalışmada Balçık kalıp algoritması (SMA) olarak adlandırılan bir metasezgisel algoritmanın performans analizi incelenmiştir. Harris Hawks optimizasyonu (HHO), Atom Arama Optimizasyonu (ASO), gri kurt optimizasyonu (GWO) ve SMA tekniğiyle ayarlanan PID kontrolörlerin performansı kıyaslanmıştır (İzci & Ekinci, 2021).

Literatürde bulunan başka bir çalışmada kesirli filtreli yeni bir PID (FOPID) önerilmiş, ayarlanacak yedi bağımsız parametresi olduğu belirtilmiştir (Ayas & Sahin, 2020). Bu yedi parametrenin en iyi değerlerini bulmak için SCA kullanılmıştır.

Çok jeneratörlü güç sistemlerinde aşamalı ikincil voltaj kontrolü (CSV) için koordineli bir optimizasyon algoritmasının ve kontrolcünün önerildiği bir çalışmada, çalışma aşama aşama

verilmiş ve kıyaslanmıştır. İlk olarak, tercih edilen algoritma yapay bir duygusal pekiştirici öğrenme (AERL) algoritmasıdır. Tercih edilme sebebi daha küçük bir voltaj saptması elde etmektir (Yin vd., 2020). İkinci olarak, yusuşuk algoritması (CDA) kullanılmıştır. CSVC'nin merkezi olmayan bağımsız değişkenler optimizasyon problemi bu algoritmayla optimize edilmiştir, Üçüncü olarak, AVR kullanılmıştır. Sonuçlar üç simülasyonla ayrı ayrı ele alınmıştır. Bu kıyaslamada ise CDA-AERL'nin çok jeneratörlü güç sistemlerinde CSVC için en küçük kontrol hedeflerini ve yakınsamayı diğerlerine nazaran etkin bir şekilde elde ettiği gösterilmiştir.

Yapılan bir başka araştırmada meta sezgisel algoritma yöntemlerinden PSO ile karşılaştırma yapılmış ve ateş böceği algoritmasının üstünlükleri belirtilmiştir (Yang, 2009).

AVR'nin matematiksel modeline ve onun ikinci dereceye indirgenmiş modeline dayalı olarak yeni bir kayma yüzeyi fonksiyonuna sahip iki kontrolör önerilmiştir. Geliştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması ile optimize edilmiştir ve kıyaslanan çalışmalar içinde en iyi sonuçlar elde edilmiştir (Furat & Cucu, 2022).

3. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları, bağımsız parametrelere sahip kontrolcülerin en iyi parametrelerinin bulunmasında en çok tercih edilen yöntemdir. Özellikle son yıllarda bilgisayarın hızlanması ve modelleme yöntemlerinin gelişmesi ile birlikte daha çok tercih edilmiş ve bu nedenle de birçok farklı türde meta sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Bu bölümde sıklıkla kullanılan bu algoritmalarından öne çıkanlar özetlenmiştir.

3.1. Ateş Böceği Algoritması

Doğadan kaynak alan algoritmalar, optimizasyon için en güçlü algoritmalar arasındadır. Ateş Böceği Algoritması (Firefly Algorithm, FA) 2008 yılında Xin-She-Yang tarafından keşfedilen doğadan esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır (Aydilek, 2017; Kumar & Kumar, 2021; Yang, 2009).

Tüm ateş böceklerinin cinsiyetinin olmadığı kabul edilir. Bu yüzden tüm ateş böceklerinin birbirleri üzerine etkileri vardır. Çekicilik ateş böceklerinde parlaklıkla doğru orantılıdır. İki adet ateş böceği arasında hangisi daha fazla ışık yayıyorsa o daha çekici olarak kabul edilir ve daha fazla ışık yayana doğru eğilim olur. Parlaklık aradaki mesafeye göre değişir. Ateş böceklerinin parlaklığı ışık yoğunluğu, uygunluk fonksiyonunda bulunan sonuç ile doğrudan ilişkilidir (Aydilek, 2017; Kumar & Kumar, 2021).

3.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi algoritması (Artificial Bee Colony Algorithm, ABC) doğada bulunan arıların davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş 2005 yılında Derviş Karaboga tarafından sunulmuş bir algoritma çeşididir (Karaboga & Akay, 2009). Sunulduğu günden beri ABC algoritmalarına olan ilgi sürekli artmaktadır.

Kaynaktan yiyecek taşıyan arıya işçi arı denir. Arılar yiyecek kaynağı bulduklarında dans ederek aralarında haberleşme sağlamış olurlar daha sonra ise gelen habere göre bir yiyecek kaynağı seçilir bu işi yapan arıya ise gözcü arı denir. Rastgele dolaşarak yiyecek arayan arılar ise kâşif arı olarak isimlendirilir (Karaboga & Akay, 2009; Karabörk vd., 2018).

3.3. Meyve Sineği Algoritması

Meyve Sineği Algoritması (Fruit Fly Algorithm, FFA) doğada *Drosophila* olarak adlandırılan meyve sineğinin özünü bulabilmek için izlediği yolu taklit eder. Bir meyve sineği nektara yani öze ulaşmak için iki yol izler. İlk olarak koku takibi yaparak yön tayin eder. İkinci olarak keskin gözlerini kullanarak daha iyi bir yiyecek kaynağı bulmak için doğada ki diğer sinekleri izler (Kılıç, 2022).

3.4. Yarasa Algoritması

2010 yılında Yang tarafından önerilmiştir. Yarasa Algoritması (Bat Algorithm, BA) aynı zamanda bir sürü zekası algoritmasıdır. Yarasa algoritması ekolokasyon olarak bilinen ses ile konum belirleme şeklinde ifade edilebilir. Yarasalar da dahil olmak üzere ekolokasyon kullanan doğadaki tüm canlılar belirli bir frekansta sinyal yayarlar. Yarasalar avlanmada, saklanmada, birbirleri arasında iletişim kurma gibi hayatları için önemli olan çoğu durumda ekolokasyonu kullanırlar (Yang, 2011; Yetkin & Bilginer, 2018).

3.5. Gri Kurt Algoritması

Gri Kurt Algoritması (Gray Wolf Algorithm, GWO) gri kurtların doğadaki yiyecek arama davranışlarından ve liderlik hiyerarşisinden esinlenilerek geliştirilmiştir. Liderlik hiyerarşisini simüle etmek için algoritmada dört çeşit kurt vardır. Bunlar alfa (α), beta (β), delta (δ) ve omega'dır (ω). Bu kurtlar arasında bir hiyerarşi vardır. Hiyerarşinin en başında α kurtlar vardır. α kurtlar en baskın ve süreye hakim olan kurtlardır β kurtlar α kurtların yardımcılarıdır. Diğer kurtlarla hiyerarşinin en başındaki arasında iletişimi sağlar. ω kurtlar ise hiyerarşinin en altında bulunur onları α kurtlar seçer. Avlanma esnasında en son beslenebilirler. Bu üç sınıfa dahil olmayan kurtlar δ olarak belirlenir δ kurtlar ω kurtlardan daha baskındır. Yani hiyerarşide üçüncü olarak değerlendirilebilir (Şenel vd., 2018; Uzlu, 2019).

3.6. Su Döngüsü Algoritması

Su Döngüsü Algoritması (Water Cycle Algorithm, WCA) doğadan ilham alarak tasarlanmış bir algoritmadır. Su döngüsünde buharlaşma, yoğunlaşma, yağış, erozyon gibi aşamalar izlenerek matematiksel olarak ifade edilir. Bir optimizasyon algoritması haline dönüştürülmüştür (Gür & Furat, 2020).

3.7. Parçacık Sürüsü Optimizasyon Algoritması

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO) algoritması, hayvanların sosyal davranışlarını ilham alarak tasarlanmıştır. Böcekler, sürüler, balıklar kuşlar ve sürü halinde gezen diğer hayvanlar izlenerek oluşturulmuştur. Bu sürüler yiyecek bulmak amacıyla işbirliği yaparlar. Ve bu sürüler arama modellerini öğrenme deneyimlerine göre oluştururlar (Wang vd., 2018).

3.8. Genetik Algoritması

Genetik algoritmalar, evrim teorisinden ilham alarak geliştirilmiş, seçim ve yeniden üretim anlayışını kullanarak arama uzayındaki yeni işaretlerin belirlendiği, popülasyon esasına dayalı; arama, optimizasyon ve yapay öğrenme algoritmalarıdır (Civelek, 2020).

3.9. Benzetimli Tavlama Algoritması

Benzetimli Tavlama Algoritması (Simulated Annealing Algorithm, SAA), metallerin tavlama sürecinden esinlenerek belirli bir maliyet fonksiyonunun küresel optimumuna yaklaşmak için tasarlanmış sezgisel bir optimizasyon tekniğidir (Metin, 2021).

3.10. Sinüs Kosinüs Algoritması

Sinüs Kosinüs Algoritması (Sine Cosine Algorithm, SCA) Mirjalli tarafından önerilen, rastgele çözüm adayları kümesi ile başlayan diğerlerine nazaran daha yeni bir popülasyon tabanlı algoritmadır (Gulbas vd., 2020; Mirjalili, 2016; Şahin & Ayas, 2019).

$$X_j^{g+1} = \begin{cases} X_j^g + r_1 \sin(r_2) r_3 (Xb)_i^g - X_j^g & \text{Eğer } r_4 < 0.5 \\ X_j^g + r_1 \cos(r_2) r_3 (Xb)_i^g - X_j^g & \text{Eğer } r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (3.1)$$

r_1 : Bir sonraki hareket yönü

r_2 : Optimal çözüme doğru veya dışarıdan doğru çözüm

r_3 : Optimal çözüm için ağırlık

r_4 : Sinüs kosinüs bileşenleri arasında rastgele geçiş yapan değişken

Aşağıda, bu algoritmanın sözde kodu (pseudo code) verilmiştir:

Başla: Çözüm aday kümesini oluştur

Yap

Değerlendir: Her çözüm adaylarının uygunluk fonksiyonu ile değerlendir.

Güncelle: Eş. 3.1'i kullanarak çözüm adaylarının pozisyonlarını güncelle.

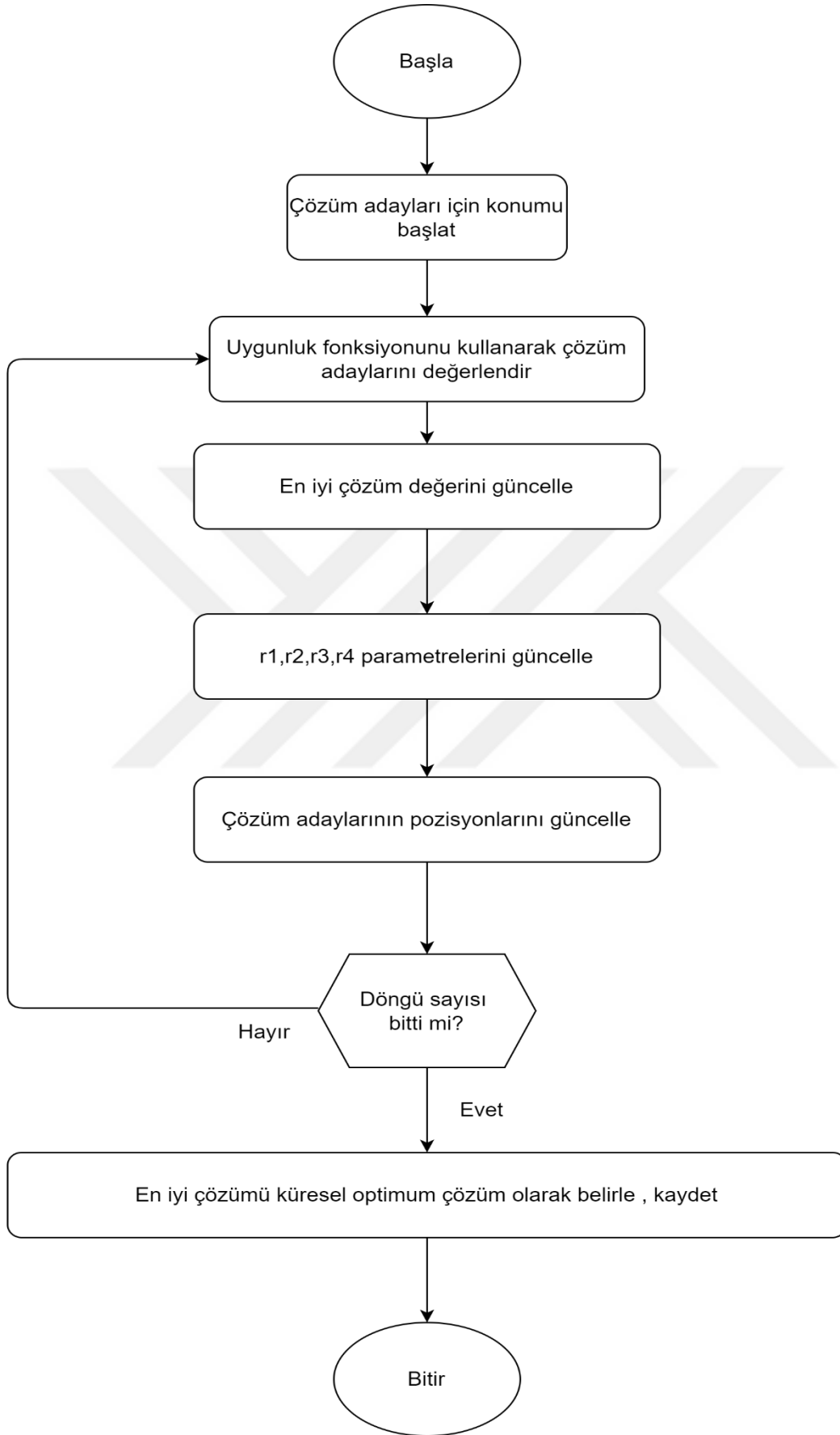
(t<döngü sayısı) oldukça

Şimdiye kadar küresel optimum olarak elde edilen en iyi çözümü döndür

Sinüs Kosinüs algoritmasının avantajları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Sinüs ve kosinüs fonksiyonları 1'den büyük veya -1'den düşük bir değer döndürdüğünde arama uzayının farklı bölgeleri keşfedilir.
- SKA, sinüs ve kosinüs fonksiyon aralığının uyumlu kullanımı ile başlangıçtan sonuca kolayca geçer.
- Global optimumun en iyi yakınsaması hedef nokta olarak bir değişkende saklanır ve optimizasyon sırasında asla kaybolmaz.
- Çözümler, pozisyonlarını elde edilen en iyi çözümler etrafında güncellediğinden optimizasyon boyunca arama uzayının en iyi bölgelerine doğru bir eğilim vardır.
- Arama, yerel en iyi çözüme odaklı değil küresel en iyiyi bulacak şekilde gerçekleşir.

Önerilen algoritma, optimizasyon problemini kara kutu olarak gördüğünden farklı alanlardaki problemlere kolayca uygulanabilir. Algoritmanın akış diyagramı Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. SCA akış diyagramı

4. KAYAN KIPLİ KONTROL

1800'lerin sonunda ilk kez Rusya'da Emelyanov ve arkadaşları tarafından kullanılmıştır. Kayan Kipli Kontrol (Sliding Mode Control, SMC) yöntemi 1977 yılına kadar bilinmemesine rağmen, Utkin bir çalışma yaptıktan sonra, uluslararası topluluklarda doğrusal ve doğrusal olmayan uygulamalar için kullanılmaya başlanmıştır (Omeroğlu, 2019).

Kayan Kipli Kontrol (KKK), doğruluk, dayanıklılık ve kolay uygulama özelliklerine sahip doğrusal olmayan bir kontrol yöntemidir. Kayan kipli kontrolcünün amacı, sistem çıkışının istenen referansı takip etmek ve izlemede olan hatanın en aza indirilmiş kontrol sinyalini üretmektir. Sistem kararlı ve kararsız yörüngeler arasında geçiş yaparak kayma yüzeyine ulaşır ve kayma yüzeyindeki hata sifıra yaklaşır. Kayan kipli kontrol, ayrıca sistem belirsizliklerine ve bozucu büyüklüklere karşı duyarsız olma özelliği ile bilinir (Furat & Cucu, 2022; Köse vd., 2010).

Literatürde birçok yönden geliştirilmiş farklı yapıda KKK yöntemleri vardır. Bunlar temelde iki farklı yapıda olmak üzere sınıflandırılabilir. Bunlar modelden bağımsız ve model tabanlı yöntemlerdir. Modelden bağımsız yöntemlerde sistem modeli kullanılmamaktadır. Bu yöntemler arasında burulma yöntemi, üstün burulma, sürüklenme, yarı-sürekli ve alt-optimal literatürde sıklıkla kullanılmıştır (Furat & Eker, 2016b). Model tabanlı KKK yöntemlerde sistemin açık çevrim yaklaşık modeli yeterli olmaktadır. Bu model kullanılarak belirlenen bir kayma fonksiyonu kontrol sinyalinin elde edilmesinde kullanılır. Bu yöntem, sistematik bir çözüm yolu içeren ancak kontrol sinyalinin oluşmasında kayma fonksiyonuna farklılık gösteren bir çözüme sahiptir.

Literatürde birçok farklı yapıda kayma fonksiyonu ile önerilen KKK yöntemleri vardır (Furat & Eker, 2012). Kayma fonksiyonları genel olarak Eş. 4.1'de verildiği formda seçilmiştir:

$$\sigma(t) = f(r(t), y(t), e(t)) \quad (4.1)$$

Model tabanlı KKK yöntemlerinde Eş. 4.2’de verildiği gibi kontrol sinyali iki ayrı sinyalin toplamından oluşur. Bunlardan ilki kayma fonksiyonu ve sistem modeli kullanılarak elde edilen eşdeğer kontrol sinyali ile kararlılığın sağlayan anahtarlama kontrol sinyalleridir:

$$u(t) = u_{es}(t) + u_a(t) \quad (4.2)$$

Eşdeğer kontrol sinyalinin elde edilmesi için kayma fonksiyonunun türevlerinde kontrol sinyaline bakılır. Anahtarlama kontrol sinyali için genellikle Lyapunov kararlılık teoremi kullanılarak sistemi kararlı yapacak fonksiyon tespit edilir. Yöntemin detayları, önerildiği birçok yayında mevcuttur (Camacho & Smith, 2000; Furat & Cucu, 2022; Furat & Eker, 2014b, 2016a; Kaya, 2007).

Farklı kayma fonksiyonları da olsa bu yöntemin önemli ortak özelliği çatırdama problemidir. Bu problem, kontrol sinyalindeki yüksek frekanslı osilasyondan kaynaklanır (Furat & Eker, 2016b). Problemin kaynağı olan işaret fonksiyonunun anahtarlama fonksiyonu olarak kullanmak yerine daha yumuşak bir geçişe sahip matematiksel fonksiyonlar tercih edilmiştir (Camacho & Smith, 2000; Eker, 2010; Fallaha vd., 2011; Furat & Cucu, 2022). Bunlar arasında hiperbolik tanjant fonksiyonunun literatürde yoğun olarak tercih edilmiştir (Furat & Cucu, 2022).

Yukarıda sayılan KKK yöntemlerinden başka sistem modelinin kullanılmadığı KKK yöntemleri de vardır. Bunlar ikinci derece KKK yöntemleri olup çatırdama problemine çözüm olarak önerilmiştir. Başlıcaları aşağıda verilmiştir (Furat & Eker, 2016b):

- Sürüklenme (drift)
- Burulma (twisting)
- Süper burulma (super-twisting)
- Yarı sürekli (quasi-continious)
- Alt-optimal (sub-optimal)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Tez çalışmasında yapılan optimizasyon uygulamaları için aşağıdaki tabloda donanım özellikleri verilen bilgisayar kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. Kullanılan bilgisayar özellikleri

Özellik	Değer
İşlemci	Intel Core i5-8265U CPU @ 1.60GHz
RAM	8.00 GB
İşletim Sistemi	64 bit

5.2. Yöntem

Doğrusallaştırılmış AVR modelinde başlıca bir kontrolcü, bir kuvvetlendirici, bir uyarım sistemi ve bir jeneratör bulunmaktadır. Literatürde AVR üzerine yapılan çalışmaların önemli kısmında, kuvvetlendirici, uyarım sistemi, jeneratör ve sensör için kullanılan transfer fonksiyonları aynıdır.

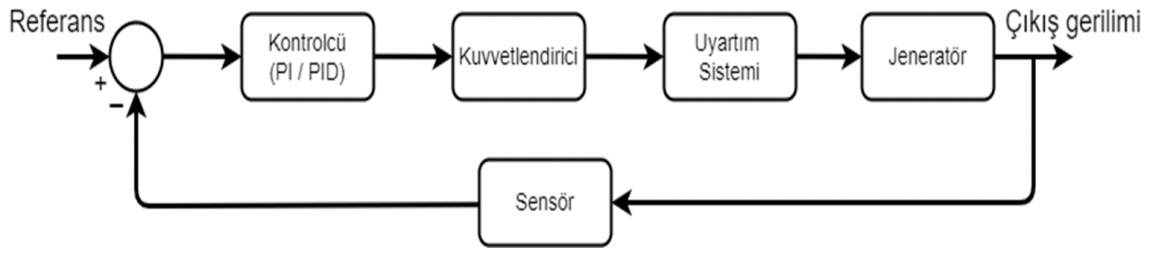
Bu çalışmada da önerilen kontrolcü için aşağıdaki Çizelge 1.1’de verilen transfer fonksiyonları kullanılmıştır. Önerilen kontrolcünün performansının karşılaştırılması amacıyla PI ve PID kontrolcüler seçilmiş ve SCA ile optimize edilen parametreler ile elde edilen sonuçlar karşılaştırmada kullanılmıştır. Buna göre PI ve PID kontrolcülerini ile uygulanan kontrol sinyalleri Eş. 5.1 ve Eş. 5.2’de verilmiştir.

$$u_{PI}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (5.1)$$

$$u_{PID}(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (5.2)$$

Referans, $r(t)$, ile çıkış, $y(t)$, arasındaki farkı gösteren hata değişkeni $e(t) = r(t) - y(t)$ ile elde edilmiştir.

PI ve PID kontrolcü bağlantısını gösteren blok diyagram aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 Doğrusallaştırılmış AVR için PI ve PID kontrolcü bağlantısı

Önerilen kesir dereceli KKK için öncelikle sistemin ikinci derece yaklaşık modeli elde edilmiştir. Bunun için açık çevrimde kuvvetlendirici, uyarım sistemi ve jeneratörden oluşan sistemin transfer fonksiyonu elde edilmiştir. Bunun için Çizelge 1.1’de verilen transfer fonksiyonları kullanılarak öncelikle üçüncü derece açık çevrim transfer fonksiyonu elde edilmiştir:

$$G_3(s) = \left(\frac{10}{0.1s+1} \right) \left(\frac{1}{0.4s+1} \right) \left(\frac{1}{s+1} \right) \quad (5.3)$$

$$G_3(s) = \frac{10}{0.04s^3 + 0.54s^2 + 1.5s + 1}$$

Eş. 5.3’te verilen transfer fonksiyonunun girişine 1pu uygulanarak açık çevrim çıkışı elde edilmiştir. Bu çıkışın ikinci derece yaklaşık model parametrelerini bulmak için birinci derece gecikme zamanlı model yöntemi kullanılmıştır (Furat & Eker, 2014a). Bu yöntem ile elde edilen ikinci derece yaklaşık model Eş. 5.4’te verilmiştir.

$$G_2(s) = \frac{19.4567}{s^2 + 3.0295s + 1.9457} \quad (5.4)$$

Eş. 5.4 ile verilen transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi formülize edilerek kontrolcü tasarımı yapılabilir:

$$G_2(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{C}{s^2 + As + B} \quad (5.5)$$

Eş. 5.5’e ters Laplace dönüşümü uygulandığında Eş. 5.6 elde edilir:

$$\ddot{y}(t) = -A\dot{y}(t) - By(t) + Cu(t) \quad (5.6)$$

Hata değişkeni $e(t) = r(t) - y(t)$ olduğundan, kontrol sinyalini hatanın ikinci derece türevinde bulunur:

$$\begin{aligned}\ddot{e}(t) &= \ddot{r}(t) - \ddot{y}(t) \\ \dot{e}(t) &= \dot{r}(t) + A\dot{y}(t) + By(t) - Cu(t)\end{aligned}\quad (5.7)$$

Bu çalışmada, kesir dereceli kayma fonksiyonu ile geliştirilen bir KKK yöntemi önerilmiştir. Önerilen kontrolcünün tasarımı izlenecek yol aşağıda adım adım verilmiştir. İlk olarak kesir dereceli kayma fonksiyonu belirlenir. Bu çalışmada Eş. 5.8’de verilen kayma fonksiyonu seçilmiştir:

$$\sigma(s) = (k_p + k_i s^{-\lambda} + k_d s) E(s) \quad (5.8)$$

Yukarıdaki eşitlikte kesir derecesi λ ile gösterilmiştir. Eş. 5.8’in birinci derece türevi için her iki taraf s ile çarpılırsa Eş. 5.9 elde edilir:

$$s\sigma(s) = k_p s E(s) + k_i s^{1-\lambda} E(s) + k_d s^2 E(s) \quad (5.9)$$

Yukarıdaki eşitliğe ters Laplace dönüşümü uygulanırsa Eş. 5.10 elde edilir:

$$\dot{\sigma}(t) = k_p \dot{e}(t) + k_i D^{1-\lambda} e(t) + k_d \ddot{e}(t) \quad (5.10)$$

Burada D türev operatörünü temsil etmekte ve derecesi $1-\lambda$ olarak temsil edilmiştir. Bu eşitlikte hatanın ikinci derece türevi (Eş. 5.7) yerine konulursa:

$$\dot{\sigma}(t) = k_p \dot{e}(t) + k_i D^{1-\lambda} e(t) + k_d [\ddot{r}(t) + A\dot{y}(t) + By(t) - Cu(t)] \quad (5.11)$$

elde edilir. Eşdeğer kontrol sinyali Eş. 5.11’in sıfıra eşitlenip kontrol sinyalinin çekilmesi ile bulunur:

$$u_{es}(t) = \frac{1}{k_d C} [k_p \dot{e}(t) + k_i D^{1-\lambda} e(t) + k_d [\ddot{r}(t) + A\dot{y}(t) + By(t)]] \quad (5.12)$$

Bu aşamada ideal kayma kipinin bulunması için $u(t) = u_{es}(t) + u_a(t)$ ve Eş. 5.12, Eş. 5.11’de yerine konulup gerekli sadeleştirmeler yapılır:

$$\dot{\sigma}(t) = -k_d C u_a(t) \quad (5.13)$$

Model tabanlı KKK yöntemlerinde kararlılık Lyapunov kararlılık teoremi kullanılarak sağlanır. Bunun için sistem parametrelerinden oluşturulan pozitif bir Lyapunov fonksiyonu belirlenir ve bu fonksiyonun türevini negatif yapan anahtarlama kontrol sinyali seçilir.

Önerilen kontrol yöntemi için literatürde sıklıkla kullanılan fonksiyon seçilmiştir:

$$V(t) = 0.5\sigma^2(t) > 0 \quad (5.14)$$

Eş. 5.14'ün birinci derece türevinde Eş. 5.13 yerine konulursa Eş. 5.15 elde edilir:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= \sigma(t)\dot{\sigma}(t) \\ \dot{V}(t) &= -\sigma(t)k_d C u_a(t) \end{aligned} \quad (5.15)$$

Eş. 5.16'yı negatif yapacak bir anahtarlama kontrolü aynı zamanda sistemin de kararlı olarak çalışmasını sağlayacaktır. Bunun için literatürde işaret fonksiyonu kullanılmıştır.

Anahtarlama kontrol sinyali $u_a(t) = k_a \operatorname{sgn}(\sigma(t)) = k_a \frac{|\sigma(t)|}{\sigma(t)}$, $k_a > 0$, olarak seçilip Eş.

5.16'da yerine konulursa:

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= -\sigma(t)k_d C k_a \operatorname{sgn}(\sigma(t)) \\ \dot{V}(t) &= -\cancel{\sigma(t)} k_d C k_a \frac{|\sigma(t)|}{\cancel{\sigma(t)}} \\ \dot{V}(t) &= -k_d C k_a |\sigma(t)| < 0 \end{aligned} \quad (5.16)$$

seçilen pozitif Lyapunov fonksiyonunun türevi negatif olur. Böyle sistemin kararlı çalışması garanti edilmiştir.

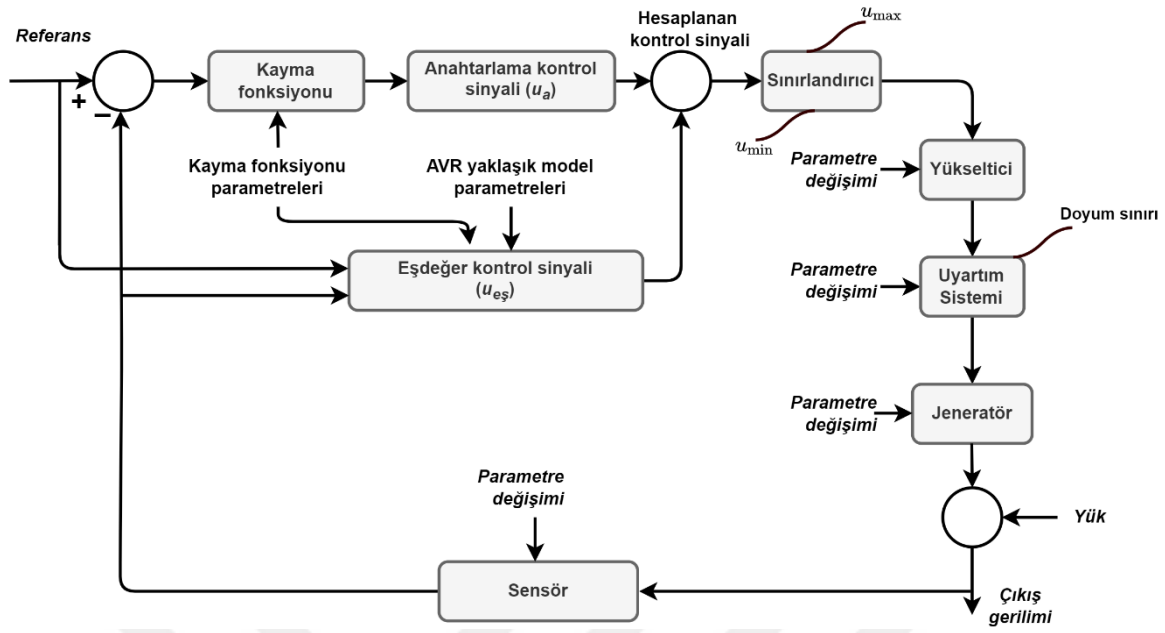
Eşdeğer kontrol sinyali ile anahtarlama kontrol sinyali toplanarak önerilen kontrolcünün üreteceği kontrol sinyali elde edilir:

$$\begin{aligned} u(t) &= u_{eş}(t) + u_a(t) \\ &= \frac{1}{k_d C} \left[k_p \dot{e}(t) + k_i D^{1-\lambda} e(t) + k_d [\ddot{r}(t) + A\dot{y}(t) + B y(t)] \right] + k_a \operatorname{sgn}(\sigma(t)) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Çatırdama probleminin kaynağı olan işaret fonksiyonu yerine literatürde sıklıkla kullanılan hiperbolik tanjant fonksiyonu kullanılırsa, toplam kontrol sinyali aşağıdaki gibi elde edilir:

$$u(t) = \frac{1}{k_d C} \left[k_p \dot{e}(t) + k_i D^{1-\lambda} e(t) + k_d [\ddot{r}(t) + A\dot{y}(t) + B y(t)] \right] + k_a \tanh(\sigma(t)) \quad (5.18)$$

Eş. 5.18 ile elde edilen kontrol sinyalinin uygulaması Şekil 5.2'de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. AVR için KKK blok diyagramı

5.3. Simülasyon Sonuçları ve Tartışma

Simülasyon çalışmalarında ilk aşama, en iyi kontrol parametrelerinin bulunması için gerekli uygunluk fonksiyonunun belirlenmesidir. Bu tez çalışmasında belirlenen uygunluk fonksiyonu ile geçici durumda aşımın istenen bir düzeyin altında olması amaçlanmıştır. Bu amaç çerçevesinde belirlenen uygunluk fonksiyonu, J , aşağıdaki gibidir:

Eğer Aşım > 1

$$J = 100 * (ISE + YükselmeZamanı)$$

değilse

$$J = ISE + YükselmeZamanı$$

Burada ISE, hatanın karelerinin integrali olup literatürde yoğun olarak optimizasyon ölçüğü olarak kullanılmaktadır:

$$ISE = \int e^2(t) dt \quad (5.19)$$

En iyi parametreler uygunluk fonksiyonunun değerinin en az yapacak şekilde belirlenir. Dolayısıyla, aşımın %1'in üzerinde olması durumunda uygunluk fonksiyonu 100 ile çarpılır ve yüksek aşım neden olan parametreler kötü olarak işaretlenir. Bu uygulama en iyi parametrelerin bulunmasında optimizasyon algoritmasının hızlı sonuç vermesini sağlar.

5.3.1. Optimizasyon için en az simülasyon sayılarının bulunması

Simülasyon çalışmalarının ilk aşamasında, belirlenen uygunluk fonksiyonu ile SCA farklı sayıda aday çözüm ve döngü sayıları ile çalıştırıldığında elde edilen sonuçlardan en hızlı çözümü tespit etmek amaçlanmıştır. Bunun için PI, PID ve önerilen kesir dereceli KKK parametrelerinin en iyi değerlerinin aranacağı arama uzayları Çizelge 5.2'deki gibi seçilmiştir.

Çizelge 5.2. Kontrolcü parametreleri için arama uzayları

Kontrolcü türü	Parametre arama uzayları
PI Kontrol	$0.20 < k_p < 0.40$ $0.03 < k_i < 0.10$
PID Kontrol	$1.00 < k_p < 3.00$ $0.10 < k_i < 0.50$ $0.10 < k_d < 0.05$
Önerilen KKK (fo: kesir derecesi)	$1.00 < k_p < 1.50$ $0.01 < k_i < 0.10$ $0.10 < k_d < 0.50$ $0.10 < f_o < 1.00$ $3.00 < k_a < 9.00$

Çizelge 5.3'te tüm arama kriterlerine göre ortaya çıkan sonuçlar yer almaktadır. Elde edilen sonuçlar arasından seçilen 10 aday ve 10 döngü sayısı ile yapılan optimizasyonda sonuç aşısız çıkmıştır. Bu nedenle PI kontrolcünün en iyi parametreleri bu optimizasyonda ortaya çıkan parametreler olarak alınmıştır.

Bu çalışmada kullanılan AVR modelinin önemli farkı IEEE'nin akademik çalışmalar için önerdiği modeller doğrultusunda eklenen sınırlandırmalardır. Dolayısıyla, gerek kontrol sinyali gerekse uyartım DC1C uyartım modeli özellikleri esas alınarak sınırlanmıştır. Böylece hesaplanan değerler bu sınırlar içinde uygulanmıştır.

Çizelge 5.3. Farklı çözüm adayı ve döngü sayıları ile PI kontrolcü için optimizasyon sonuçları

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	PI Geçici Durum Performansı				En İyi Uygunluk Değeri
		Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım (%)	Aşım Zamanı	
10	10	0.8495	7.7481	0	10	1.4383
10	20	0.7503	7.5522	0.9752	1.4030	1.2948
10	30	0.7570	7.4498	0.8987	1.4140	1.2974
10	40	0.7496	7.7143	0.7426	1.3960	1.3067
10	50	0.7718	7.4242	0.4086	1.4310	1.3156
10	60	0.7558	7.7367	0.4733	1.4010	1.3168
10	70	0.7509	7.5713	0.9209	1.4030	1.2969
10	80	0.7594	7.4689	0.7768	1.4160	1.3017
10	90	0.7735	7.2508	0.6516	1.4400	1.3101
10	100	0.7535	7.5849	0.7990	1.4050	1.3013
20	10	0.7679	7.3750	0.6325	1.4290	1.3080
20	50	0.7554	7.5455	0.7956	1.4080	1.3011
20	100	0.7516	7.5340	0.9556	1.4050	1.2954
50	10	0.7652	7.3778	0.7241	1.4260	1.3046
50	50	0.7496	7.6186	0.8923	1.3990	1.2987
50	100	0.7656	7.3232	0.8046	1.4280	1.3026

Her ne kadar farklı sayılarda simülasyonlar ile en iyi parametreler aransa da sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Ancak tüm çalışmada beklendiği gibi aşım %1'in altında çıkmıştır. Farklı sayılar ile yapılan optimizasyon çalışması sonucunda bulunan en iyi k_p ve k_i değerleri Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Benzer şekilde, PID kontrolcü için de yapılan çalışma sonucu ölçüm değerleri Çizelge 5.5'te yer almaktadır.

Çizelge 5.6 da kullanılan çözüm aday sayısı ve döngü sayıları ile parametreler bulunmuştur. Çalışmanın geri kalanı için seçilen parametreler koyu renk ile gösterilmiştir. k_d değeri için optimum değer 0.5 olduğu görülmektedir.

Çizelge 5.7'de, önerilen kontrolçüde hiçbir optimizasyonda ölçülen aşım belirlenen değer üstüne çıkmamıştır. Aşısız olarak elde edilen sonuçlar da en iyi uygunluk değeri 0.580 - 0.590 bandında değişmektedir.

Çizelge 5.4. Farklı çözüm adayı ve döngü sayıları ile en iyi PI kontrolcü parametreleri

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	PI Kontrolcü Parametreleri	
		k_p	k_i
10	10	0.23712	0.062667
10	20	0.26390	0.068913
10	30	0.26119	0.071877
10	40	0.26463	0.063603
10	50	0.25629	0.072402
10	60	0.26265	0.062866
10	70	0.26378	0.068317
10	80	0.26050	0.071308
10	90	0.25460	0.076825
10	100	0.26296	0.067886
20	10	0.25722	0.073775
20	50	0.26219	0.069090
20	100	0.26338	0.069460
50	10	0.25810	0.073743
50	50	0.26438	0.066820
50	100	0.25762	0.075164

Çizelge 5.5. Farklı çözüm adayı ve döngü sayıları ile PID kontrolcü için SCA optimizasyon sonuçları

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	PID Geçici Durum Performansı				En İyi Uygunluk Değeri
		Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım	Aşım Zamanı	
10	10	0.4047	1.1504	0	-	0.6654
10	20	0.3869	1.0845	0	-	0.59429
10	30	0.3400	1.1982	1.0006	0.6690	0.60266
10	40	0.3330	1.0350	0.5448	0.6280	0.58757
10	50	0.3359	1.0357	0	-	0.59111
10	60	0.3359	0.9849	0.9257	0.6380	0.58742
10	70	0.3292	1.0329	0.9423	0.6240	0.58691
10	80	0.3320	1.0366	0.4178	0.6260	0.58784
10	90	0.3332	1.0363	0	-	0.58932
10	100	0.3319	1.0364	0.8670	0.6270	0.58677
20	10	0.3670	1.0291	0.0447	2.1500	0.62263
20	50	0.3345	1.0343	0.4232	0.6310	0.58841
20	100	0.3336	1.0294	0.7766	0.6300	0.58733
50	10	0.3316	1.0613	0.5924	0.6330	0.58929
50	50	0.3302	1.0400	0.8043	0.6260	0.58742
50	100	0.3300	1.0358	0.9683	0.6250	0.58663

Çizelge 5.6. Farklı çözüm aday ve döngü sayıları ile en iyi PID kontrolcü parametreleri

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	PID Kontrolcü Parametreleri		
		k_p	k_i	k_d
10	10	1.8027	0.17229	0.43255
10	20	2.1304	0.15277	0.49636
10	30	1.7254	0.1	0.35108
10	40	2.5496	0.17914	0.5
10	50	2.484	0.16560	0.5
10	60	2.5057	0.34401	0.5
10	70	2.5741	0.1	0.5
10	80	2.5465	0.14214	0.5
10	90	2.5177	0.13715	0.5
10	100	2.5696	0.16812	0.5
20	10	1.6572	0.29229	0.37236
20	50	2.4966	0.20938	0.49334
20	100	2.5537	0.21719	0.5
50	10	2.326	0.10175	0.46112
50	50	2.5211	0.11203	0.49217
50	100	2.5776	0.12025	0.5

Çizelge 5.7. Farklı çözüm aday ve döngü sayıları ile önerilen KKK için SCA optimizasyon sonuçları

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	KKK Geçici Durum Performansı				En iyi uygunluk değeri
		Yükselme Zamanı	Yerleşme Zamanı	Aşım	Aşım Zamanı	
10	10	0.3331	0.8285	0.3222	0.9310	0.58624
10	20	0.3372	1.0031	0.8616	0.6440	0.59027
10	30	0.3319	0.8282	0.9209	0.9460	0.58479
10	40	0.3314	0.8465	0.8210	0.9610	0.58424
10	50	0.3316	0.8976	0.7427	1.0330	0.58463
10	60	0.3316	0.8430	0.6873	0.9550	0.58454
10	70	0.3318	0.8917	0.7828	1.0280	0.58483
10	80	0.3318	0.8302	0.5894	0.9370	0.58476
10	90	0.3314	0.8376	0.9874	0.5930	0.5842
10	100	0.3328	0.9390	0.6094	1.1070	0.58577
20	10	0.3315	0.8623	0.8298	0.9830	0.58442
20	50	0.3348	0.9598	0.6949	1.1820	0.58778
20	100	0.3314	0.8636	0.9160	0.9870	0.5843
50	10	0.3347	0.9545	0.3877	1.1350	0.58779
50	50	0.3318	0.8287	0.7377	0.9400	0.58473
50	100	0.3315	0.8917	0.9536	1.0310	0.58448

Çizelge 5.8 incelendiğinde k_p değeri için bir çok farklı kombinasyon denenmişse de optimum değeri 1.3 – 1.5 aralığında bulunmuştur.

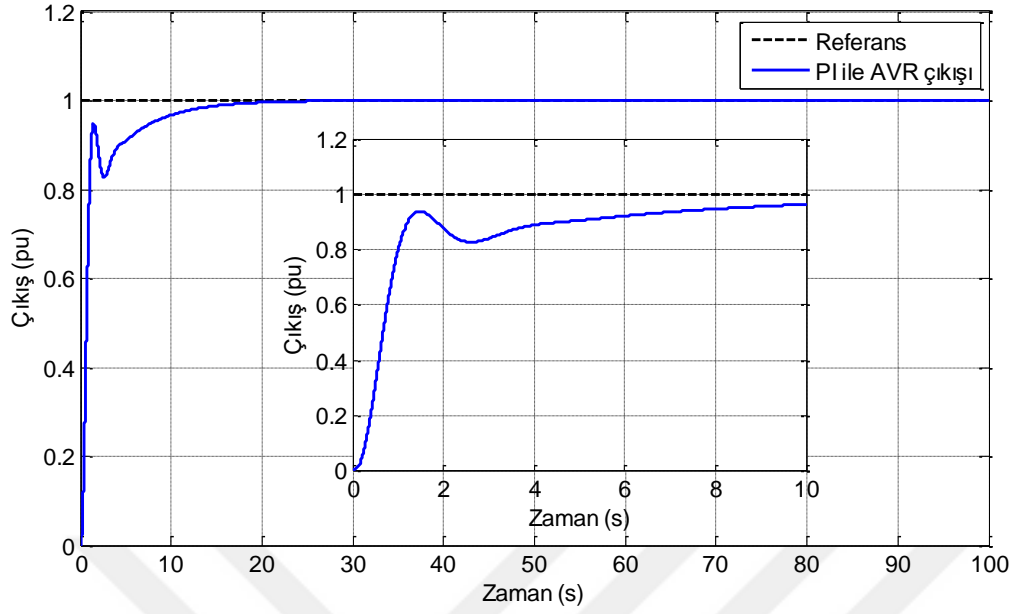
Çizelge 5.8. Farklı çözüm adayı ve döngü sayıları ile en iyi KKK parametreleri

Çözüm Adayı Sayısı	Döngü Sayısı	KKK Parametreleri				
		k_p	k_i	k_d	f_o	k_a
10	10	1.5	0.038484	0.335	0.2	8.7043
10	20	1.5	0.01	0.42464	0.75345	3
10	30	1.5	0.097227	0.33981	0.2048	8.2653
10	40	1.5	0.012015	0.31962	0.2878	8.4438
10	50	1.4146	0.013241	0.32354	0.2	6.2817
10	60	1.3912	0.021174	0.30203	0.20271	9
10	70	1.1705	0.023632	0.2706	0.24739	7.5905
10	80	1.5	0.027698	0.32501	0.2	9
10	90	1.5	0.015939	0.31565	0.3512	9
10	100	1.5	0.027941	0.37516	0.2	4.4199
20	10	1.3409	0.01	0.29127	0.50959	8.4171
20	50	1.5	0.1	0.41854	0.2	3.391
20	100	1.4512	0.018172	0.31581	0.3403	7.6892
50	10	1.4019	0.01	0.36354	0.2	4.2985
50	50	1.5	0.055613	0.33037	0.20468	8.7516
50	100	1.5	0.031402	0.34186	0.3255	6.0399

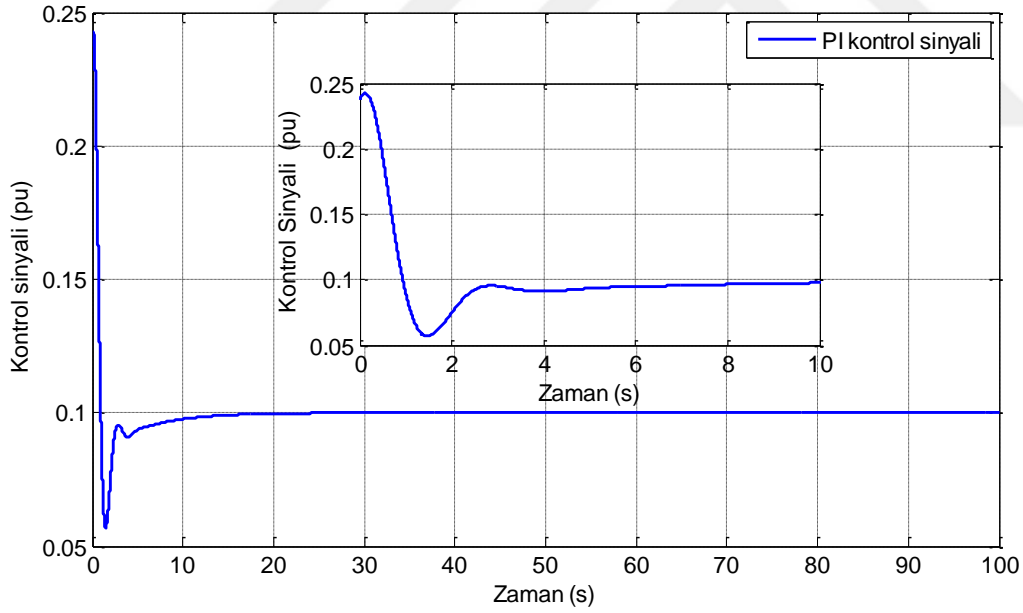
5.3.2. Kontrolcülerin basamak yanıtı

Literatürde bulunan AVR çalışmalarında ilk olarak basamak yanıtı cevabından önerilen kontrolcülerin geçici durum performansları ortaya konulmuştur. Benzer şekilde de, bu çalışmada ele alınan PI, PI ve önerilen kayan kipli kontrolcülerin seçilen parametreleri ile elde edilen basamak yanıtları verilmiştir. Kontrolcü çıkışları IEEE tarafından tavsiye edilen modeller doğrultusunda kısıtlanmıştır. Tüm optimizasyon çalışmalarında, DC1C model özelliklerine göre kontrol sinyalleri -0.9pu ile 1.0pu arasında, uyarım sistemi çıkışı ile 0 – 3.1pu arasında olacak şekilde ayarlanmıştır.

Şekil 5.3'te, PI kontrolcü geçici durum yanıtı gösterilmiştir. Her ne kadar sistem yanıtında aşım gözlenmese de ilk 10s içinde çıkışın istenen değere ulaşmadığı görülmektedir. Buna rağmen 1 saniyeden kısa yükselme zamanı ölçülmüştür.

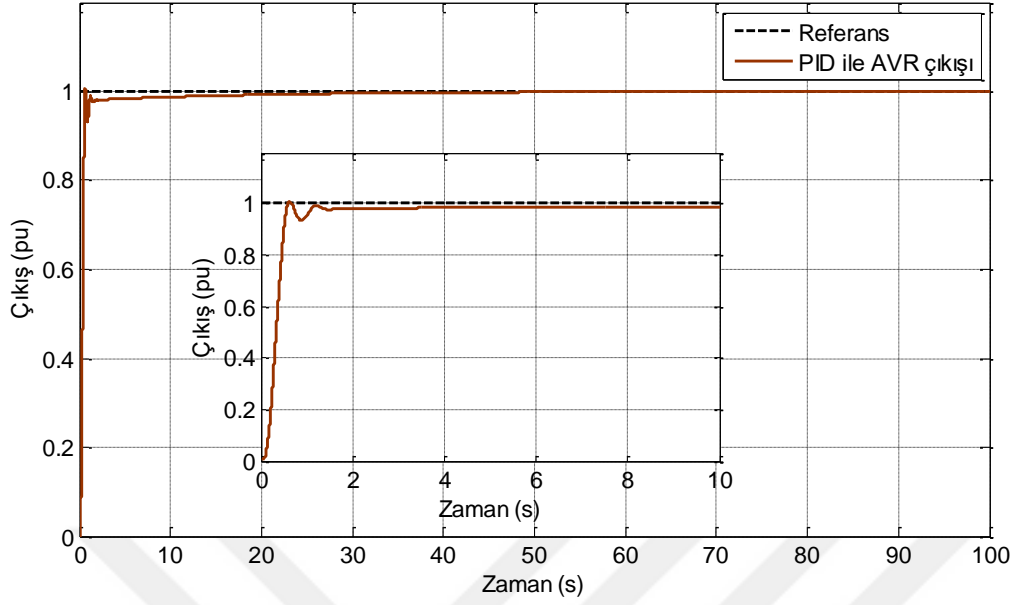


Şekil 5.3. Seçilen PI kontrolcü parametreleri ile AVR çıkışı



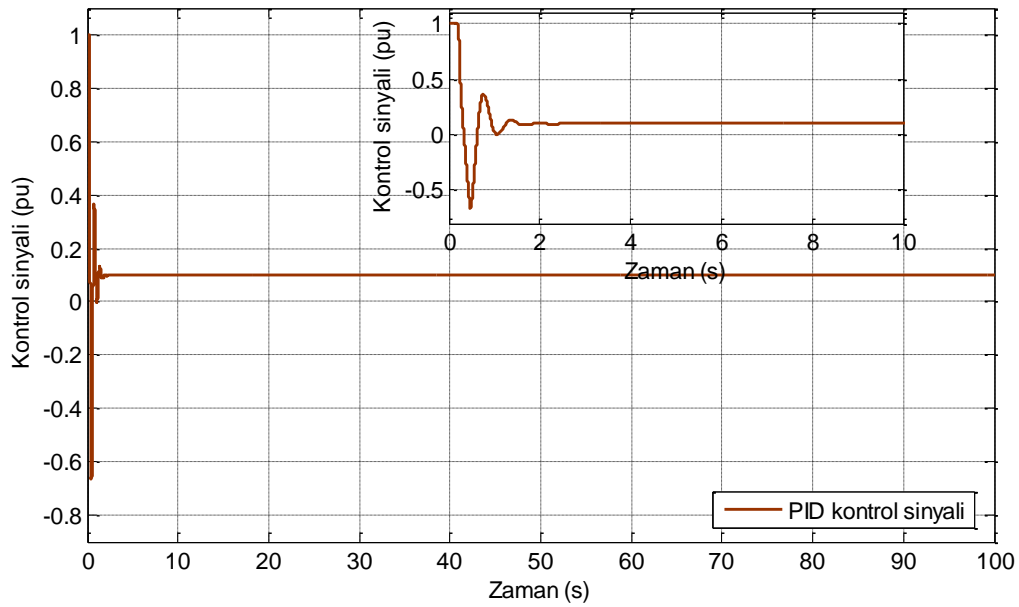
Şekil 5.4. Seçilen PI kontrolcü parametreleri ile kontrol sinyali

Şekil 5.5 PID kontrolcünün PI kontrolcüsüne göre çok daha hızlı olduğu gözlenmektedir. PID de PI gibi aşım olmamakla birlikte 10 saniyede PID kontrolcüsü de çıkışı referans değerine ulaştıramamıştır.



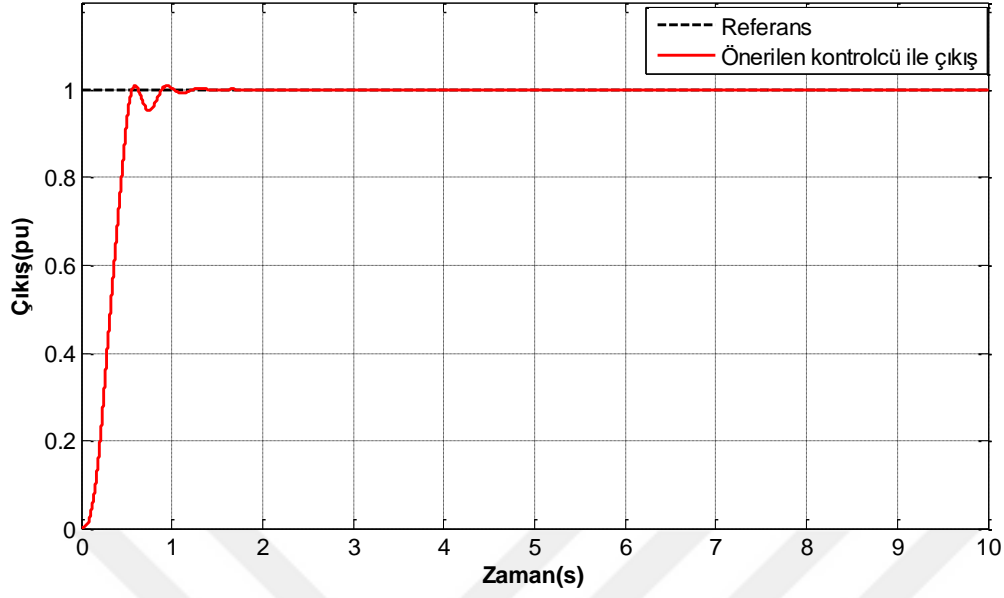
Şekil 5.5. Seçilen PID kontrolcü parametreleri ile AVR çıkışı

Şekil 5.6 için kontrol sinyalinin bir süre 1 değerinde sabit kalması, seçilen DC1C modeli ile ilgilidir. 1.5 saniyeden itibaren daha az osilasyonlu bir şekilde devam etmektedir.

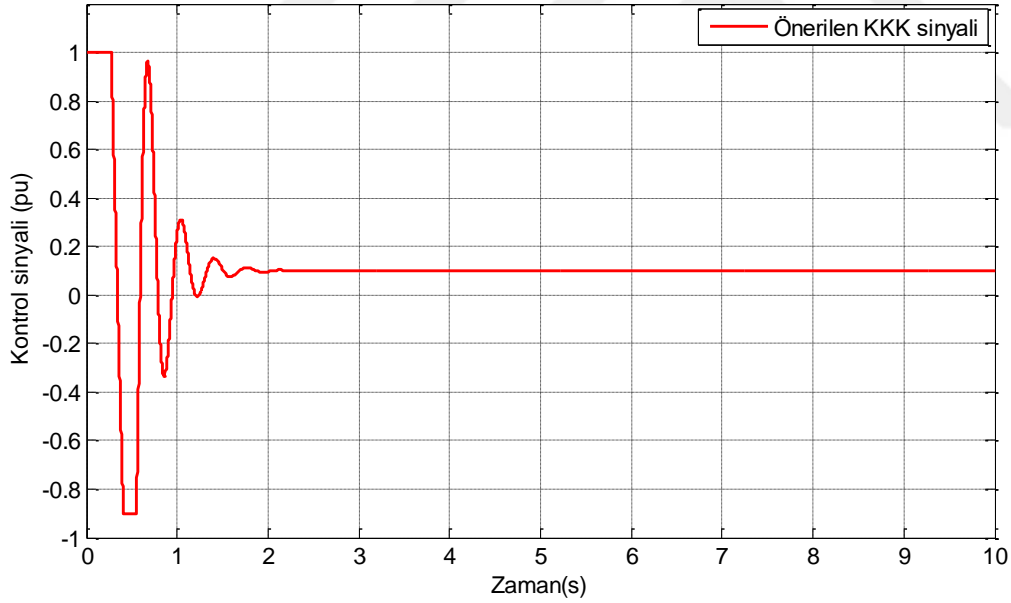


Şekil 5.6. Seçilen PID kontrolcü parametreleri ile kontrol sinyali

Şekil 5.7'de önerilen kontrolcünün aşım yapmadan çok az bir osilasyonla çok hızlı bir şekilde referansa tam olarak oturduğu karşılaştırılan kontrolcülere göre çok daha iyi performans sergilediği net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 5.7. Seçilen KKK parametreleri ile AVR çıkışı



Şekil 5.8. Seçilen KKK parametreleri ile kontrol sinyali

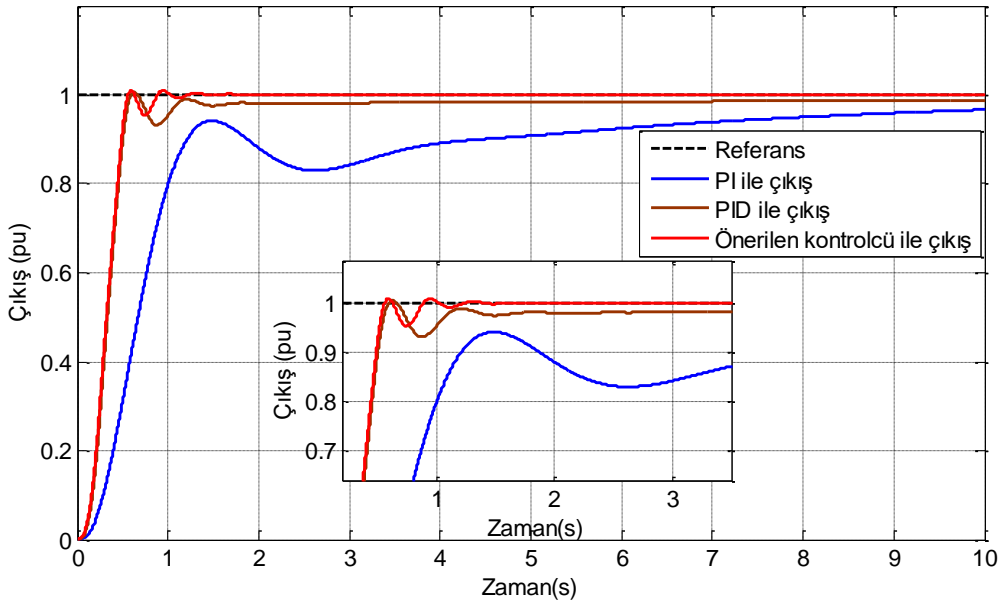
Çizelge 5.9 için yükselme zamanları kıyaslandığında önerilen kontrolcünün daha hızlı olduğunu ve yerleşme zamanı da göz önünde bulundurulduğunda diğerlerine göre daha hızlı bir şekilde referansı yakaladığını söylenebilir. Ayrıca aşımın da IEEE'nin DC1C modelinde seçilen aralıkta kaldığı gözlenmektedir.

Çizelge 5.9. Seçilen parametreler ile geçici durum performanslarının karşılaştırılması

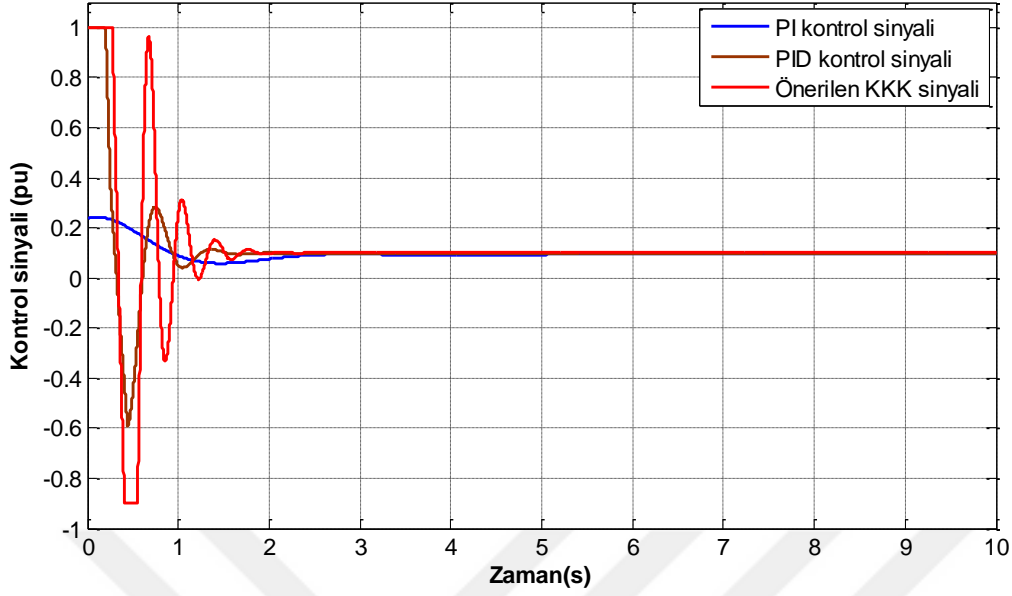
Kontrolcü	Yükselme zamanı (s)	Yerleşme zamanı (s)	Aşım (%)	Aşım Zamanı (s)	En iyi uygunluk değeri
PI	0.8495	7.7481	0	-	1.4383
PID	0.3332	1.0363	0	-	0.5893
Önerilen Kayan Kipli Kontrolcü	0.3347	0.9545	0.3877	1.1350	0.5877

Şekil 5.9 ile bütün kontrolcülerin tek bir grafikte incelenmesi gerekirse önerilen kontrolcünün üstünlüğü daha net anlaşılacaktır. 10 saniye olarak alınan grafikte PI kontrolcünün referansı yakalayamadığı diğer iki kontrolcüye göre daha yavaş olduğu görülmektedir. PI kontrolcüye göre daha iyi kabul edilebilen PID kontrolcü PI kontrolcüye kıyasla çok hızlıdır fakat o da referansı 10 saniyede yakalayamamıştır. Önerilen kontrolcü ise çok az bir osilasyonla 1.2 saniyede çıkış referans değerine ulaşmıştır.

Tüm kontrolcülerin ürettikleri kontrol sinyalleri Şekil 5.10'da verilmiştir. PI kontrolcünün ürettiği kontrol sinyali genliği diğerlerine göre çok düşüktür. PID ve önerilen kontrolcü ise kontrol sinyalinin üst sınırı olan 1pu'dan fazla kontrol sinyali üreterek sistemin hızlı başlatılmasını sağlamıştır.



Şekil 5.9. Seçilen parametreler ile AVR çıkışlarının karşılaştırılması



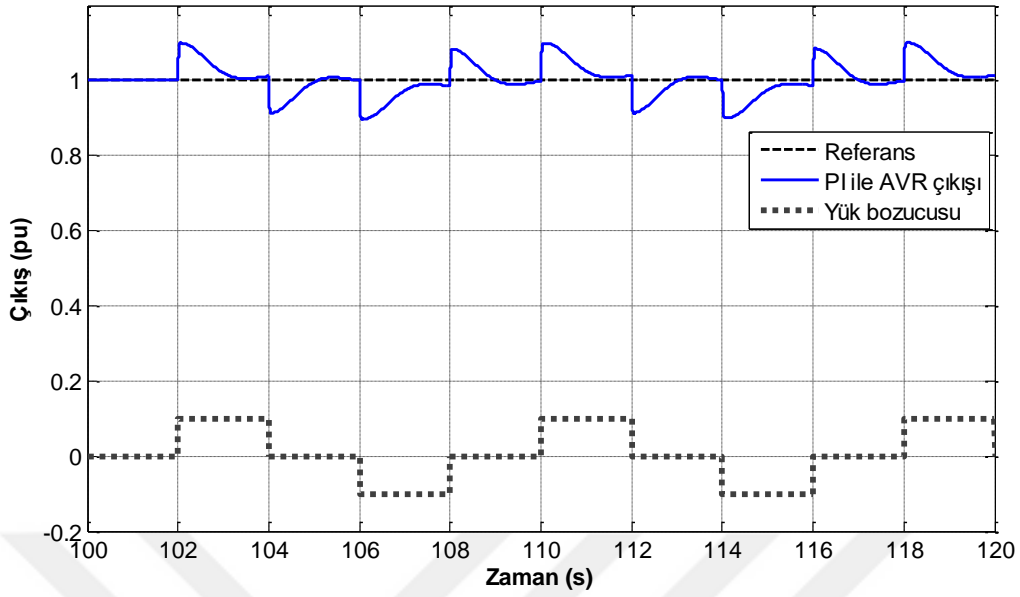
Şekil 5.10. Seçilen parametreler ile kontrol sinyalleri

5.3.3. Kontrolcülerin $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı

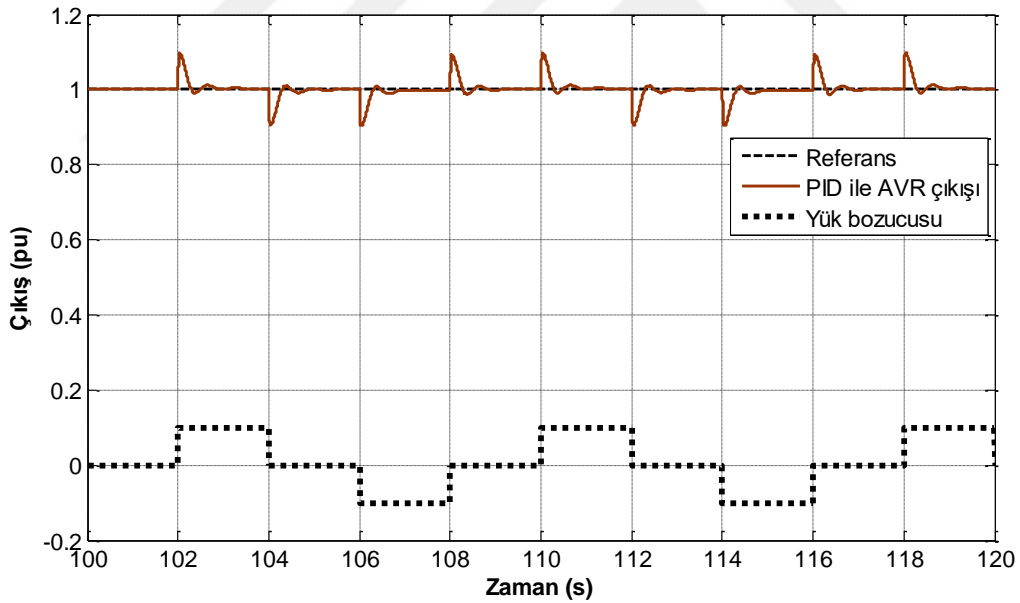
Literatürde yapılan çalışmalar arasında, önerilen kontrolcünün en iyi parametreler ile yük bozulmasına karşı dayanıklılık testleri de oldukça yaygın olarak verilmiştir. Bu aşamada, aynı şekilde test yapılmıştır. 102. saniye ile 120. Saniyeler arasında $\pm\%10$ yük bozulmasına karşı yanıtları araştırılmıştır. Bu test için ilerleyen bir zamanın seçilmesinin nedeni, tüm kontrolcülerin referans değerini yakaladıkları bir zaman diliminde yüke karşı verdikleri yanıtı araştırmaktır.

Şekil 5.11 incelendiğinde PI için bozucu uygulandığında sistem referans değerine geri ulaştığı fakat bir saniyeden fazla bir zaman aldığı gözlemlenmektedir.

Şekil 5.12 PID kontrolcüsünün bozucu yük altında gösterdiği performans PI kontrolcüsüne kıyasla çok daha hızlı bir şekilde sistemin toparlandığı ispatlanmıştır. Yük uygulandıktan sonra tekrar jeneratör çıkışının referans değerini yakalaması bir saniyeden kısa sürede ve az salınımlı sönümlü bir şekilde olmuştur.

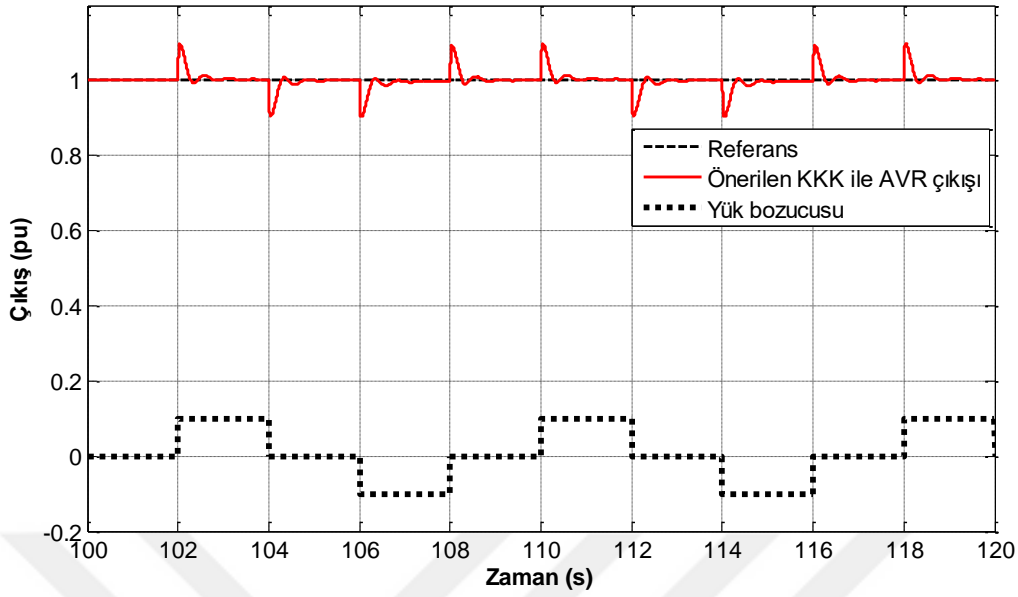


Şekil 5.11. Seçilen parametreler ile PI kontrolcüsünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı



Şekil 5.12. Seçilen parametreler ile PID kontrolcüsünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı

Şekil 5.13 incelendiğinde, önerilen kontrolcünün kıyaslanan kontrolcülerden daha üstün olduğu bozucu etki altında olduğunda toparlanma süresinden de anlaşılmaktadır. PID toparlanması 2 saniyelik zaman diliminin neredeyse yarısında oluyorken önerilen kontrolcü de bu süre daha az olarak görülmektedir.



Şekil 5.13. Seçilen parametreler ile önerilen kontrolcünün $\pm\%10$ yük bozulmasına yanıtı

Çizelge 5.10 da bozucu testi sonucu ISE ölçümleri verilmiştir. Buna göre, önerilen kontrolcünün ISE performansı diğerlerine göre çok daha küçük olması önerilen kontrolcünün üstünlüğünü göstermektedir. Önerilen kontrolcünün bozucu etkiye en hızlı şekilde tepki verdiği ve toparlandığı sayısal verilerle ispatlanmıştır.

Çizelge 5.10. Yük bozulmasında kontrolcülerin ISE performansları

Kontrolcü	ISE
PI	0.6401
PID	0.2782
Önerilen Kayan Kipli Kontrolcü	0.2734

5.3.4. Parametre belirsizliklerine karşı dayanıklılık

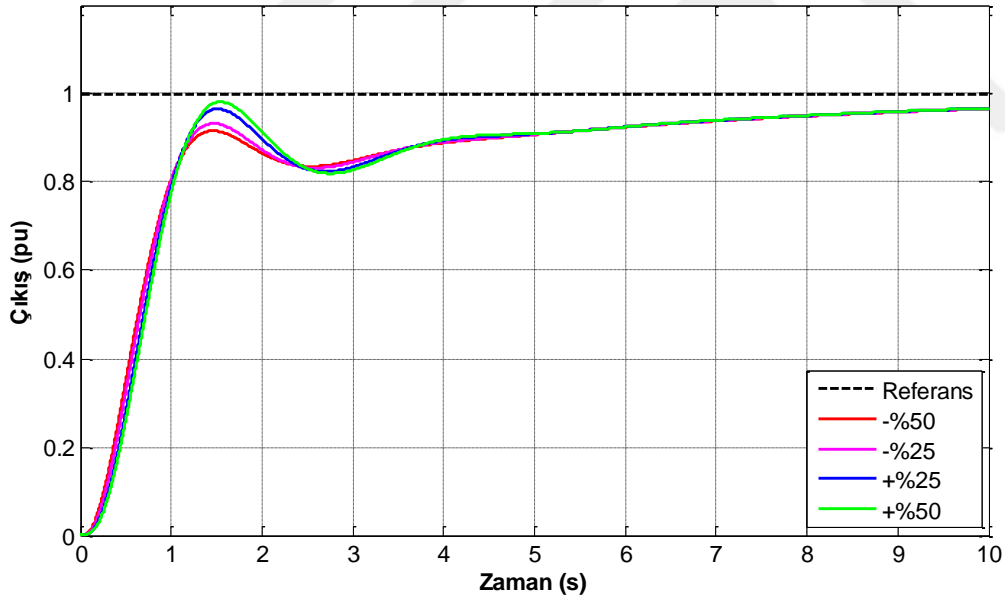
Literatürde, gerçek sistemlerin yaşlanmasına bağlı olarak parametrelerindeki belirsizliğin kontrol performansını nasıl etkilediği konusunda da dayanıklılık testleri yapılmıştır. AVR için yapılan dayanıklılık testlerinde, kuvvetlendirici, uyartım sistemi, jeneratör ve sensör için ayrı ayrı zaman sabitlerinde $\pm\%50$ aralığında $\%25$ adımlarla değişiklikler yapılmıştır. Bu değişikliklere sonucu önerilen kontrolcülerin basamak yanıtında geçici durum performansları sunulmuştur. Bu çalışmada da, aynı testler yapılmış ve sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 5.14'te PI denetleyici kullanıldığı zaman yükselticide yapılan değişiklikler incelendiğinde +%50 değerinde yapılan bozucu neredeyse aşımaya sebep olacağı görülmektedir. Tüm bozulma testlerinde yerleşme zamanları hemen hemen aynı olduğu, yani referans değerine aynı sürede erişeceği görülmektedir.

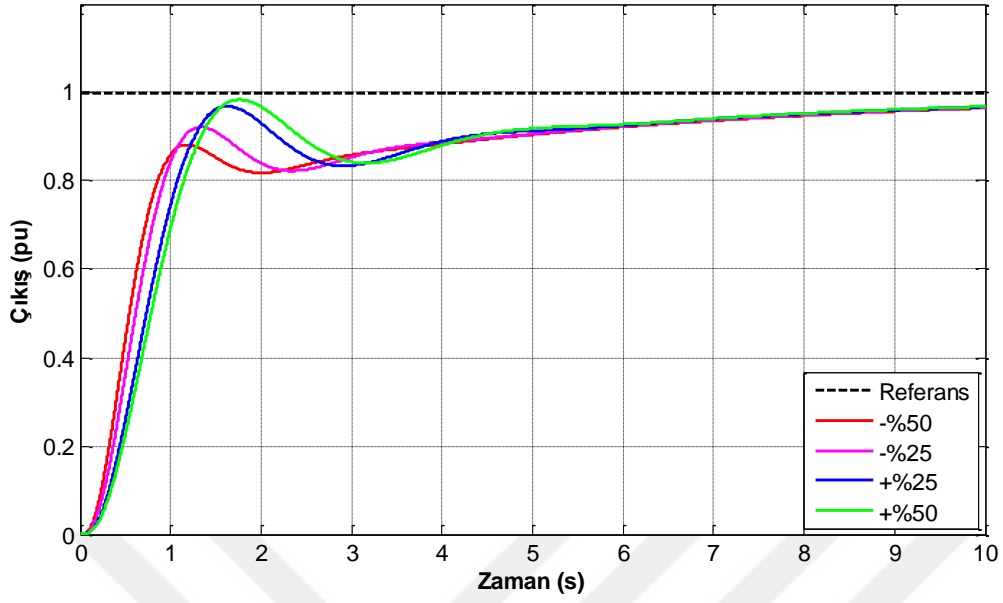
Şekil 5.15'te PI denetleyici kullanıldığı zaman uyarım sistemi üzerine uygulanan değişimler incelendiğinde değer negatiften pozitif gittikçe yükselme zamanının yavaşladığı görülmektedir.

Şekil 5.16'da görüldüğü gibi, PI denetleyici kullanıldığı zaman jeneratör zaman sabiti değişimlerine verdiği yanıt pozitif değerden negatif değere gittikçe yavaşlamıştır.

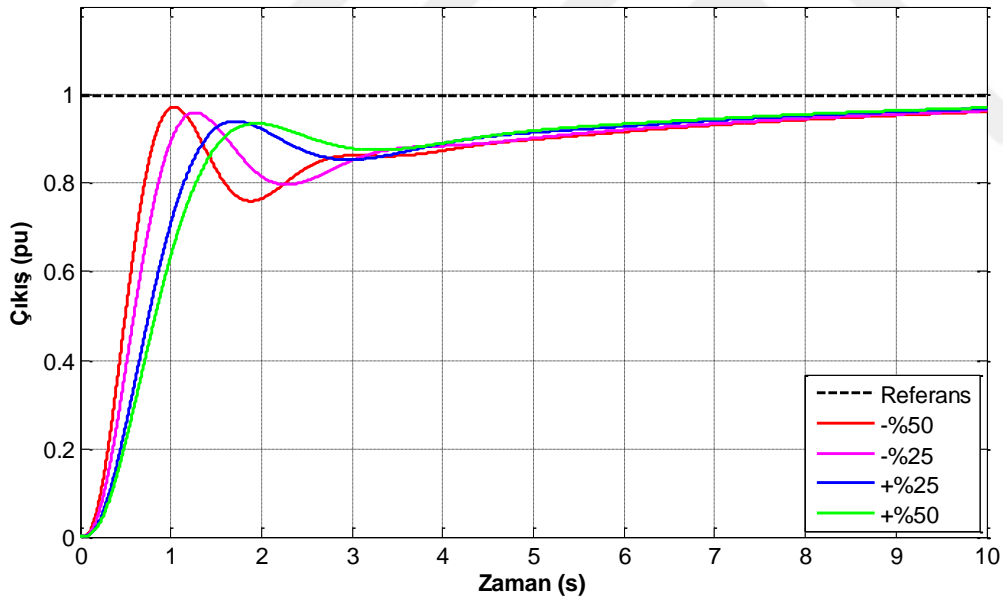
Şekil 5.17'de ise PI denetleyici kullanıldığı zaman sensör zaman sabiti değişimlerine bütün değerler hemen hemen aynı yanıtı vermiştir. Bunun nedeni sensörün zaman sabitinin oldukça düşük olmasıdır.



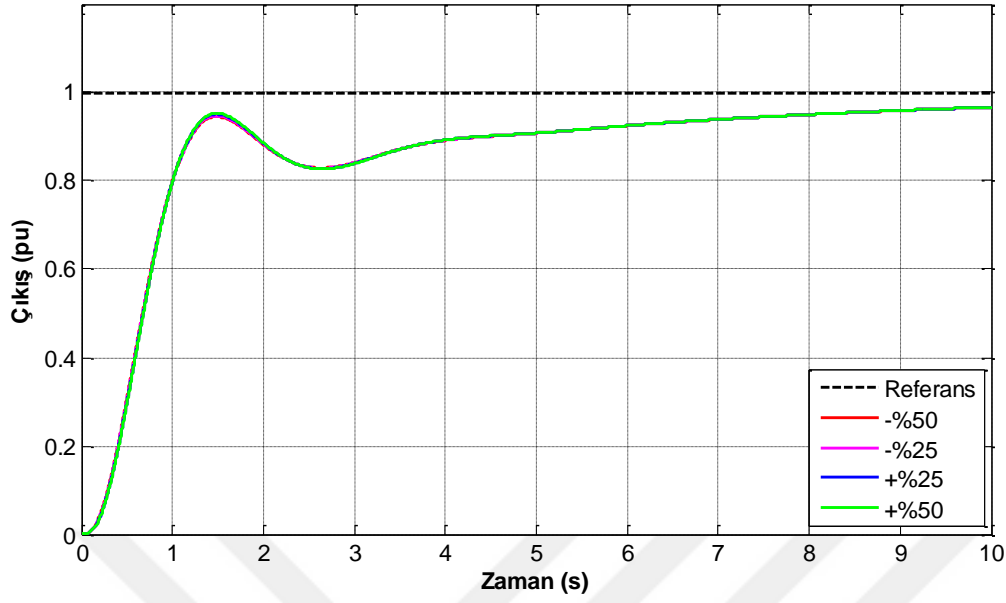
Şekil 5.14. PI kontrolcünün AVR'de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı



Şekil 5.15. PI kontrolcünün AVR’de uyarım sistemi zaman sabiti değişimlerine yanıtı

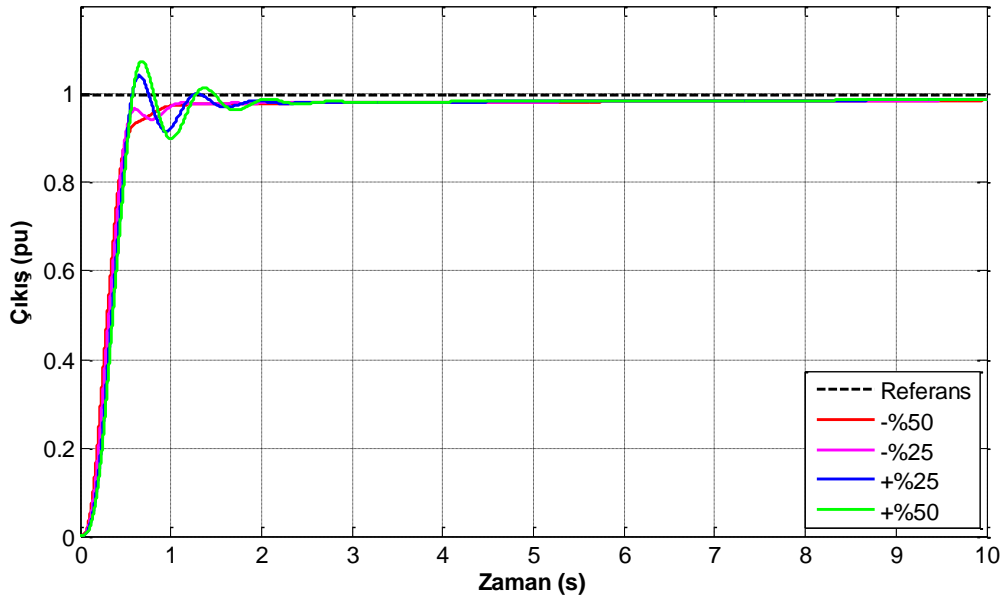


Şekil 5.16. PI kontrolcünün AVR’de jeneratör zaman sabiti değişimlerine yanıtı



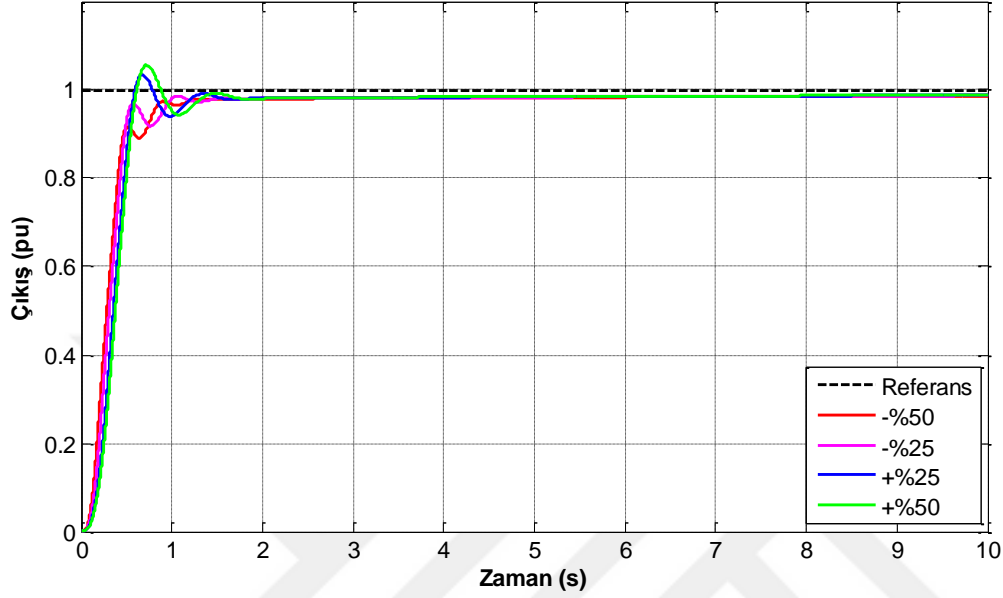
Şekil 5.17. PI kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Şekil 5.18 PID kontrolcüsü kullanıldığında AVR bileşeni olan yükselticinin zaman sabiti değişimlerine verdiği yanıtlar incelendiğinde değer pozitif olduğunda aşım gözlemlenmiştir. Zaman sabitinin değeri arttıkça aşım da artmaktadır.



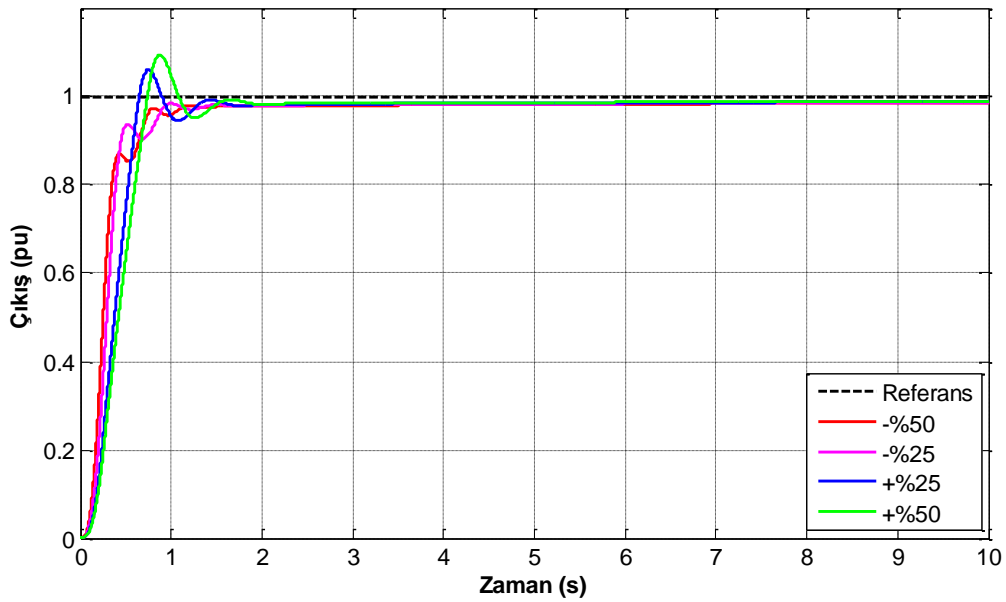
Şekil 5.18. PID kontrolcünün AVR’de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Şekil 5.19’da PID kontrolcüsünün AVR’de bir diğer bileşen olan uyarım sistemi göz önüne alınırsa pozitif yöndeki zaman sabiti değişimlerinde yine aşım görülmektedir. Uyarım sisteminin zaman sabitinin artması ile birlikte sistemin yavaşladığı görülmektedir.



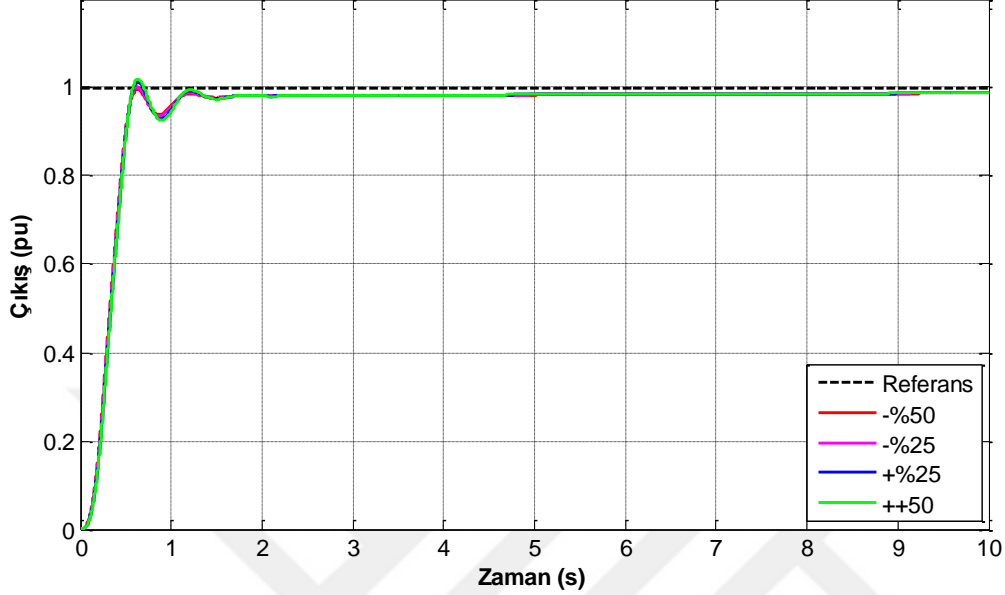
Şekil 5.19. PID kontrolcüsünün AVR’de uyarım sistemi zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Şekil 5.20’de jeneratörün zaman sabiti değiştirilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde, en yavaş yanıtı aşımli bir şekilde +%50 de vermiştir.



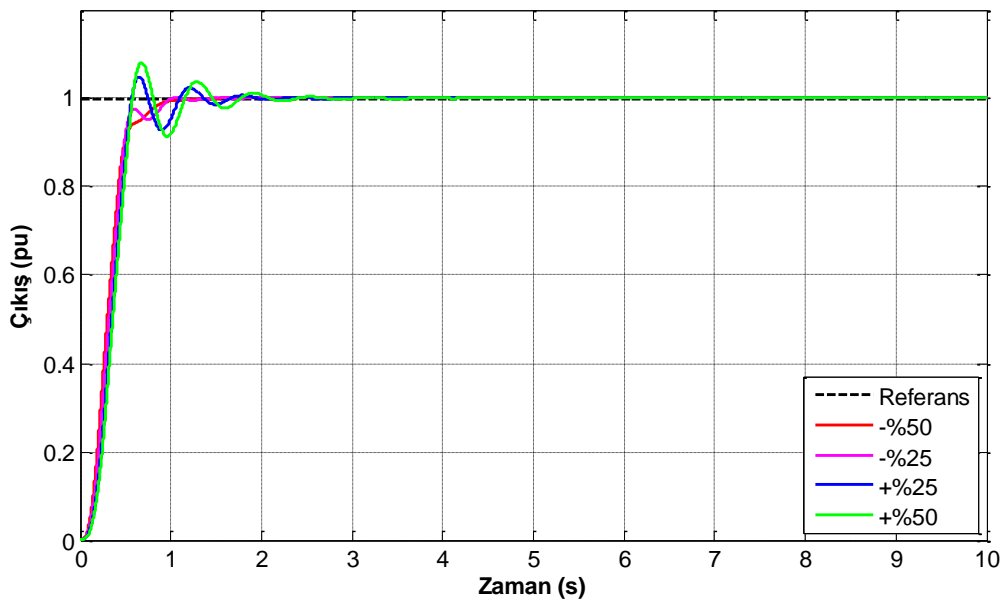
Şekil 5.20. PID kontrolcüsünün AVR’de jeneratör zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Şekil 5.21’de verilen PID kontrolcüde, PI kontrolcüde olduğu gibi sensörün parametresindeki değişim çıkışı çok az etkilemiştir.



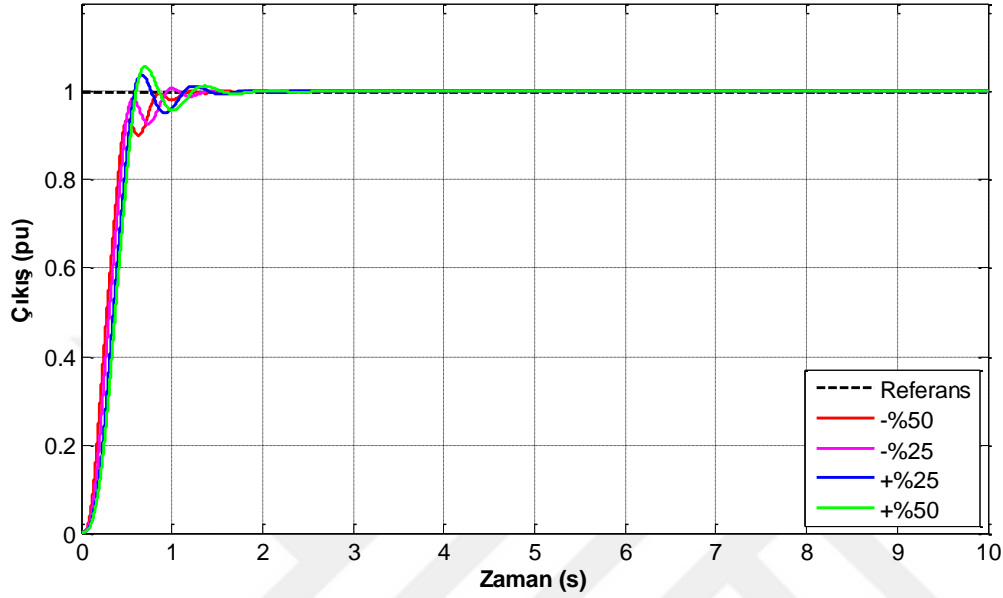
Şekil 5.21. PID kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Önerilen kontrolcünün AVR bileşeni olan yükselticiye verdiği yanıtta aşım görülmektedir. Aşım pozitif etkenler uygulandığında oluşmuştur ayrıca en çok aşım +%50 değerinde oluşmuştur. Hemen hemen bütün etkenlerin yerleşme zamanlarının aynı olduğu Şekil 5.22’de görülmektedir.



Şekil 5.22. Önerilen kontrolcünün AVR’de yükselticinin zaman sabiti değişimlerine yanıtı

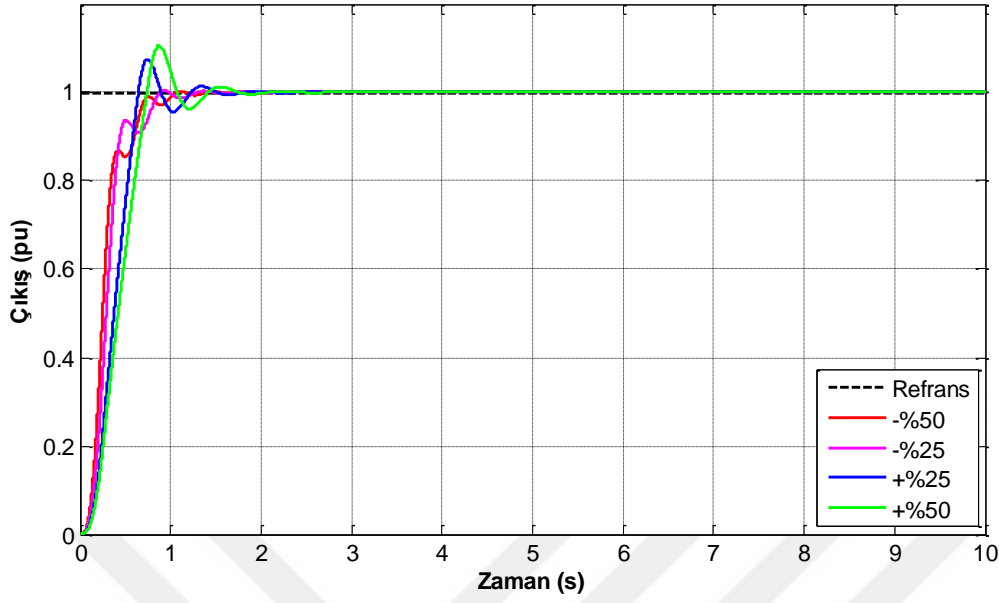
Şekil 5.23 uyarım sisteminin zaman sabiti değişimlerine verdiği yanıt için de aşım olduğunu ve pozitif etkenlerde arttıkça aşımın arttığını söylemek mümkün olsa da yükseltici de olduğu kadar yüksek bir aşımın olmadığı gözlemlenmiştir.



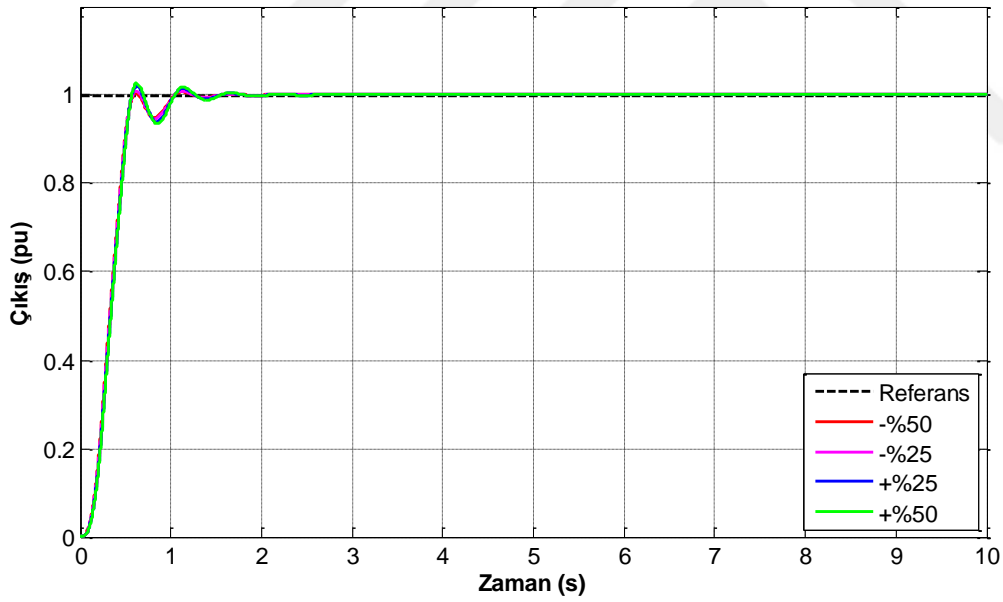
Şekil 5.23. Önerilen kontrolcünün AVR'de uyarım sisteminin zaman sabiti değişimlerine yanıtı

Şekil 5.24'te önerilen kontrolcünün AVR'de jeneratör zaman sabiti değişimleri incelendiğinde en yavaş olanın +%50 olduğu ve en hızlı olanın -%50 olduğu görülmektedir. Bütün değerlerde aşım olmasına rağmen pozitif değerlerde ki aşımın çok daha belirgin olduğu görülmektedir.

Şekil 5.25 diğer kontrolcülerde olduğu gibi önerilen kontrolcünün AVR'de sensör zaman sabiti değişimine olan yanıtı her değerde neredeyse aynı olarak seyretmiştir.



Şekil 5.24. Önerilen kontrolcünün AVR’de jeneratör zaman sabiti değişimlerine yanıtı



Şekil 5.24. Önerilen kontrolcünün AVR’de sensör zaman sabiti değişimlerine yanıtı

PI kontrolcünün parametre belirsizliklerine karşı verdiği basamak yanıtı performansı Çizelge 5.11’de verilmiştir. Çizelge 5.11’de öncelikle yükseltici kısmına bakılırsa zaman sabitinin değeri arttıkça aşım görülmeye başlamıştır. Uyarım sistemindeki bozucu pozitifte geçtiğinde aşım giderek artmaktadır. Yükselme zamanı değerleri 0.79 ile 0.93 arasında

değiştirdiği gözlenmiştir. Jeneratördeki bozucu incelendiğinde yerleşme zamanında çok büyük değişiklikler olmamıştır ve aşım negatif bozucudan pozitif giderken azalmıştır. Sensör için ise herhangi bir aşım görülmezken yerleşme zamanı nominal parametre etrafında seyretmiştir.

Çizelge 5.11. AVR parametre belirsizliklerine karşı PI kontrolcü performansı

	Zaman Sabiti Değişimi	Aşım (%)	Yükselme Zamanı (s)	Yerleşme Zamanı (s)
Nominal Parametreler		0	0.8495	7.7481
Yükseltici τ_a	-50%	0	0.8930	7.7603
	-25%	0	0.8565	7.7528
	+25%	0	0.8214	7.7374
	+50%	1.4488	0.8159	7.7264
Uyartım Sistemi τ_e	-50%	0	0.8096	7.8087
	-25%	0	0.7942	7.7775
	+25%	0.1427	0.8835	7.6889
	+50%	1.6102	0.9354	7.6554
Jeneratör τ_g	-50%	1.1433	0.5522	7.9070
	-25%	0	0.6926	7.8288
	+25%	0	0.9778	7.6379
	+50%	0	1.1243	7.5377
Sensör τ_s	-50%	0	0.8415	7.7467
	-25%	0	0.8377	7.7461
	+25%	0	0.8304	7.7447
	+50%	0	0.8269	7.7441

PID kontrolcünün parametre belirsizliklerine karşı verdiği basamak yanıtı performansı Çizelge 5.12’de verilmiştir. PID kontrolcü performansı incelendiğinde yükseltici bozucu altında pozitif değere çıkıldığında aşım oluşmuş ve zaman sabitinin değerinin artması ile aşımın da arttığı gözlenmiştir. Yükselme ve yerleşme zamanı ise nominal parametrelere yakın değerlerde değişmiştir.

Uyartım sistemine uygulanan bozucular sonucunda yükseltici de olduğu gibi bozucu değer pozitif geçtiğinde aşım görülmeye ve artmaya devam etmiştir. Jeneratör için diğer iki bileşen için yapılan yorumlar yapılabilirken sensör için aşım negatifteyken başlamış ve bozucu değeri pozitifte geçtikçe artmaya devam etmiştir yorumu yapılabilir.

Çizelge 5.12. AVR parametre belirsizliklerine karşı PID kontrolcü performansı

	Zaman Sabiti Değişimi	Aşım (%)	Yükselme Zamanı (s)	Yerleşme Zamanı (s)
Nominal Parametreler		0	0.3332	1.0363
Yükseltici τ_a	-50%	0	0.3523	0.8976
	-25%	0	0.3320	0.9717
	+25%	5.5950	0.3319	1.1291
	+50%	8.8023	0.3360	1.8056
Uyartım Sistemi τ_e	-50%	0	0.3245	1.1052
	-25%	0	0.3225	0.9490
	+25%	4.4837	0.3384	1.1585
	+50%	6.8584	0.3487	1.2642
Jeneratör τ_g	-50%	0	0.4993	1.0675
	-25%	0	0.2885	0.8918
	+25%	7.3080	0.3979	1.2380
	+50%	10.5062	0.4703	1.4244
Sensör τ_s	-50%	0.8718	0.3307	1.0444
	-25%	1.4051	0.3299	1.0489
	+25%	2.5427	0.3292	1.0590
	+50%	3.1363	0.3291	1.0647

Önerilen kayan kipli kontrolcünün parametre belirsizliklerine karşı verdiği basamak yanıtı performansı Çizelge 5.13'te verilmiştir. Çizelge 5.13'te önerilen kontrolcünün bozucu altındaki değerleri incelendiğinde, her bir bileşen için aşımın hep var olduğunu söylemek mümkün olup en yüksek aşım değerlerinin her zaman bozucu etken pozitifteyken ve artarken olduğu gözlenmiştir. Diğer iki parametrenin ise nominal değerlere çok yakın değerlerde seyrettiği görülmüştür.

Çizelge 5.13. AVR parametre belirsizliklerine karşı önerilen KKK performansı

	Zaman Sabiti Değişimi	Aşım (%)	Yükselme Zamanı (s)	Yerleşme Zamanı (s)
Nominal Parametreler		0.3877	0.3347	0.9545
Yükseltici τ_a	-50%	0.0175	0.3470	0.8290
	-25%	0.0971	0.3328	0.8997
	+25%	4.9011	0.3359	1.2680
	+50%	8.0593	0.3400	1.6412
Uyartım Sistemi τ_e	-50%	0.1022	0.3233	0.7944
	-25%	0.7531	0.3252	0.8894
	+25%	3.8701	0.3413	1.0656
	+50%	5.7676	0.3510	1.1508
Jeneratör τ_g	-50%	0.3149	0.4695	0.9674
	-25%	0.4300	0.2907	0.8248
	+25%	7.4435	0.4031	1.1546
	+50%	10.5663	0.4760	1.3278
Sensör τ_s	-50%	0.7138	0.3331	0.9664
	-25%	0.9347	0.3327	0.9727
	+25%	2.0678	0.3326	0.9864
	+50%	2.6523	0.3327	0.9937

6. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Literatürde yayınlanan AVR çalışmalarının önemli kısmında PID ve türevi kontrolcülerin yer aldığı görülmektedir. Ancak farklı kontrolcülerin tasarımı oldukça azdır. Bu nedenle bu çalışmada AVR için az sayıda yer alan kayan kipli kontrolcü tasarımı ele alınmıştır. Kontrolcü tasarımında, diğerlerinden farklı olarak kesir dereceli kayma fonksiyonu kullanılmıştır. $P^{\lambda}D$ tabanlı kayma yüzeyine sahip kayan kipli kontrolcünün tasarım aşamaları adım adım verilmiş ve kararlılığı Lyapunov kararlılık teoremi ile sağlanmıştır. Önerilen kontrolcünün tasarımında AVR'nin açık çevrim çıkış grafiğinden elde edilen ikinci derece yaklaşık modeli kullanılmıştır. Kontrol parametrelerinin optimizasyonu için sinüs kosinüs algoritması seçilmiştir.

Ayrıca, literatürden farklı olarak, AVR modelinde sınırlandırmalar yapılarak IEEE'nin önerdiği DC1C modelinin özellikleri elde edilmiştir. Elde edilen model üzerinde PI ve PID kontrolcülerin de optimizasyonu yapılarak elde edilen sonuçlar hem grafiksel hem de istatistiksel olarak verilmiştir.

Sonuç olarak, önerilen kontrolcünün performansının PI ve PID kontrolcü performansına göre daha iyi olduğunu göstermiştir. IEEE'nin önerdiği uyarım sisteminin seçilmesi ile daha gerçekçi bir model elde edilmiştir. Ayrıca uyarım sistemi çıkışı da doyum noktası düşünülerek yine DC1C model özellikleri ile aynı olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Bu model kullanıldığında her zaman hesaplanan kontrol sinyalinin ve uyarımın elde edilmemesine rağmen iyi bir performans önerilen kontrolcü ile ortaya konulmuştur.

İlerideki çalışmalarda, farklı yapıdaki kayan kipli kontrol yöntemleri ele alınarak literatüre katkıda bulunulması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- Ayas, M. S., & Sahin, E. (2020). FOPID controller with fractional filter for an automatic voltage regulator. *Computers and Electrical Engineering*, *xxxx*, 106895. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106895>
- Aydilek, I. B. (2017). Multi-class classification with modified firefly optimization algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *32(4)*, 1097–1107. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.369406>
- Ćalasan, M., Micev, M., Radulović, M., Zobaa, A. F., Hasanien, H. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2021). Optimal PID controllers for avr system considering excitation voltage limitations using hybrid equilibrium optimizer. *Machines*, *9(11)*. <https://doi.org/10.3390/machines9110265>
- Camacho, O., & Smith, C. A. (2000). Sliding mode control: An approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA Transactions*, *39(2)*, 205–218. [https://doi.org/10.1016/s0019-0578\(99\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0019-0578(99)00043-9)
- Chen, Y., Petr, I., & Xue, D. (2009). Fractional Order Control - A Tutorial. *2009 American Control Conference*, 1397–1411.
- Civelek, Z. (2020). Quadrotörün Dikey Hareketi için Tasarlanan Oransal- İntegral -Türevsel Kontrolörünün Katsayılarının Genetik Algoritma ile Optimizasyonu. *International Journal of Engineering Research and Development, Special Issue of Electrical Engineering & Computer Science* *12(3)*, 119,124.
- Das, S., & Pan, I. (2014). On the mixed H₂/H_∞ loop-shaping tradeoffs in fractional-order control of the AVR System. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, *10(4)*, 1982–1991. <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2322812>
- Eke, I., Saka, M., Gozde, H., Arya, Y., & Taplamacioglu, M. C. (2021). Heuristic optimization based dynamic weighted state feedback approach for 2DOF PI-controller in automatic voltage regulator. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *24(4)*, 899–910. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.12.023>
- Eker, I. (2010). Second-order sliding mode control with experimental application. *ISA Transactions*, *49(3)*, 394–405. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2010.03.010>
- Fallaha, C. J., Saad, M., Kanaan, H. Y., & Al-Haddad, K. (2011). Sliding-mode robot control with exponential reaching law. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *58(2)*, 600–610. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2045995>
- Furat, M., & Cucu, G. G. (2022). Design, Implementation, and Optimization of Sliding Mode Controller for Automatic Voltage Regulator System. *IEEE Access*, *10*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3177621>
- Furat, M., & Eker, I. (2014a). Computer-aided experimental modeling of a real system using graphical analysis of a step response data. *Computer Applications in Engineering Education*, *22(4)*, 571–582. <https://doi.org/10.1002/cae.20482>

- Furat, M., & Eker, I. (2014b). Second-order integral sliding-mode control with experimental application. *ISA Transactions*, 53(5), 1661–1669. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2014.05.030>
- Furat, M., & Eker, I. (2016a). Chattering-eliminated adaptive sliding-mode control: An experimental comparison study. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 24(2), 605–620. <https://doi.org/10.3906/elk-1309-137>
- Furat, M., & Eker, İ. (2012). Experimental Evaluation of Sliding-Mode Control Techniques. *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 27(June), 23–37.
- Furat, M., & Eker, İ. (2016b). Geliştirilmiş ikinci derece kayan kipli kontrol: teori ve deneysel uygulama. *Mühendis ve Makina Dergisi*, 57(675), 49–53.
- Gidemen, G., & Furat, M. (2015). PID parametrelerinin ayarlama yöntemleri: 2. derece sistem modeline uygulanması ve karşılaştırmalı olarak değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(December), 355–362.
- Gulbas, O., Hames, Y., & Furat, M. (2020). Comparison of PI and Super-twisting Controller Optimized with SCA and PSO for Speed Control of BLDC Motor. *HORA 2020 - 2nd International Congress on Human-Computer Interaction, Optimization and Robotic Applications, Proceedings*, 2, 1–7. <https://doi.org/10.1109/HORA49412.2020.9152853>
- Gür, H., & Furat, M. (2020). Özelleştirilmiş Uygunluk Fonksiyonu Tabanlı Su Döngüsü Algoritması ile PID Parametrelerinin Optimizasyonu. *European Journal of Science and Technology*, April, 332–341. <https://doi.org/10.31590/ejosat.araconf43>
- IEEE 421.5TM-2016. (2006). IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. İçinde *IEEE Std 421.5-2005 (Revision of IEEE Std 421.5-1992)* (C. 2005, Sayı April). <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1489146>
- Karaboga, D., & Akay, B. (2009). A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm. *Applied Mathematics and Computation*, 214(1), 108–132. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2009.03.090>
- Karabörk, T., Sönmez, M., Aydın, E., Çelik, T., & Bölükbaş, Y. (2018). Çelik Yapılarda Kullanılan Diyagonal Çelik Çaprazların Yapay Arı Koloni Algoritması İle Optimizasyonu. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(1), 51–64. <https://doi.org/10.17482/uumfd.414427>
- Kaya, I. (2007). Sliding-mode control of stable processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(2), 571–578. <https://doi.org/10.1021/ie0607806>
- Kılıç, İ. (2022). Levy Uçuşlu MeyvSineği Algoritması İle Görüntü Sikiştirme. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 16, 37–48. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.980173>
- Köse, E., Abacı, K., & Aksoy, S. (2010). Mekanik Sistemlerin PID ve Kayma Kipli Kontrol ile Modellenmesi ve Analizi. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, 179–183.

- Kumar, V., & Kumar, D. (2021). A Systematic Review on Firefly Algorithm : Past , Present , and Future. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(4), 3269–3291. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09498-y>
- Metin, S. (2021). Benzetimli Tavlama A lgoritması İle Eksik Veri Tamamlama. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 33(1), 295–301.
- Micev, M., Çalasan, M., Ali, Z. M., Hasanien, H. M., & Abdel Aleem, S. H. E. (2020). Optimal design of automatic voltage regulation controller using hybrid simulated annealing – Manta ray foraging optimization algorithm. *Ain Shams Engineering Journal*, xxx. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.07.010>
- Micev, M., Çalasan, M., & Oliva, D. (2021). Design and robustness analysis of an Automatic Voltage Regulator system controller by using Equilibrium Optimizer algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 89(March 2020). <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106930>
- Mirjalili, S. (2016). SCA: A Sine Cosine Algorithm for solving optimization problems. *Knowledge-Based Systems*, 96, 120–133. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.12.022>
- Omeroğlu, A. (2019). *DC Motorun Kesir Dereceli kayan Kipli Hız Denetimi*. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi.
- Öztekin, M. M. (2013). *Kesir Dereceli Kontrol Sistemlerinin Dayanıklı Analiz ve Tasarımı*. İnönü Üniversitesi.
- Pachauri, N. (2020). *Water cycle algorithm-based PID controller for AVR*. 39(3), 551–567. <https://doi.org/10.1108/COMPEL-01-2020-0057>
- Padiachy, V., Mehta, U., Azid, S., Prasad, S., & Kumar, R. (2021). Two degree of freedom fractional PI scheme for automatic voltage regulation. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.08.003>
- Şahin, Ö. S., & Ayas, M. Ş. (2019). *Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies Sine-Cosine Algorithm Based PID Controller for a Catamaran Bir Katamaran için Sinüs -K osinüs Algoritması Tabanlı PID Denetleyici*.
- Şeker, M., & Işık, H. (2021). Genetik Algoritma ve Denge Optimizasyon Algoritması (EO) kullanılarak Yıldırım Darbesinin Parametre Tahmini. *Computer Science*, 250–260. <https://doi.org/10.53070/bbd.991052>
- Şenel, F. A., Yüksel, A. S., Gökçe, F., & Yiğit, T. (2018). Gri kurt optimizasyon algoritması ile iki boyutlu dizilim yazılımının geliştirilmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 20(2), 1–14. <https://doi.org/10.25092/baunfbed.433321>
- Sikander, A., & Thakur, P. (2020). A new control design strategy for automatic voltage regulator in power system. *ISA Transactions*, 100, 235–243. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2019.11.031>
- Uzlu, E. (2019). Türkiye için gri kurt optimizasyon algoritması ile yapay sinir ağlarını kullanarak enerji tüketiminin tahmini. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(2), 245–262. <https://doi.org/10.29109/gujsc.519553>

- Wang, D., Tan, D., & Liu, L. (2018). Particle swarm optimization algorithm: an overview. *Soft Computing*, 22(2), 387–408. <https://doi.org/10.1007/s00500-016-2474-6>
- Yang, X. S. (2009). Firefly algorithms for multimodal optimization. *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 5792 LNCS, 169–178. https://doi.org/10.1007/978-3-642-04944-6_14
- Yang, X. S. (2011). Bat algorithm for multi-objective optimisation. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 3(5), 267–274. <https://doi.org/10.1504/IJBIC.2011.042259>
- Yetkin, M., & Bilginer, Ö. (2018). Yarasa Algoritması İle Robust Kestirimin Nivelman Ağlarına Uygulanması. *Geomatik*. <https://doi.org/10.29128/geomatik.395934>
- Yu Zaw, W. Y. (2019). Performance Analysis of Automatic Voltage Regulator in Power Generation System. *International Journal of Science and Engineering Applications*, 8(7), 180–185. <https://doi.org/10.7753/ijsea0807.1003>



EKLER

EK-1. Kesir Dereceli Diferansiyel Hesaplama

Kesir dereceli diferansiyel hesaplama 300 yıl öncesine dayanan bir geçmişe sahiptir (Chen vd., 2009). Gerek bu hesaplama yöntemine ihtiyaç olacak sistemlerin olmaması gerekse hesaplamayı yapacak bilgisayar sistemlerinin henüz o yıllarda olmaması nedeniyle pek ilgi görmemiştir. Bir başka sebep olarak da kesir dereceli diferansiyel denklemlerin çözümü için bir yöntemlerin tam olarak ortaya konulmaması söylenebilir (Öztekin, 2013).

Tam sayılı türev için $n \in \mathbb{N}$ olmak üzere $D^n f(t) = \frac{d^n}{dt^n} f(t)$, ile ifade edilmektedir.

Günümüzde kesir dereceli hesaplamada yaygın olarak kullanılan notasyon aşağıda verilmiştir (Chen vd., 2009):

$${}_a D_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha} & \text{eğer } \alpha > 0 \\ 1 & \text{eğer } \alpha = 0 \\ \int_0^t (d\tau)^{-\alpha} & \text{eğer } \alpha < 0 \end{cases} \quad (1.1)$$

Burada α kesir derecesini ifade etmekte, a ve t diferansiyel hesaplamanın sınırlarıdır.

Kesir dereceli diferansiyel hesaplamada kullanılan yöntemler arasında Caputo, Riemann-Liouville ve Grünwald-Letnikov yaygındır (Chen vd., 2009; Das & Pan, 2014; Padiachy vd., 2021):

Caputo yöntemi:

$${}_0 D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \int_0^t \frac{f^{(m)}(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau \quad (1.2)$$

Riemann-Liouville yöntemi:

$${}_0 D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(m-\alpha)} \left(\frac{d}{dt} \right)^m \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{\alpha-m+1}} d\tau \quad (1.3)$$

Grünwald-Letnikov yöntemi:

$${}_0D_t^\alpha f(t) = \lim_{h \rightarrow \infty} \frac{1}{h^\alpha} \sum_{j=0}^{\left[\frac{t-a}{h} \right]} (-1)^j \binom{\alpha}{j} f(t-jh) \quad (1.4)$$

Burada $m-1 < \alpha < m$, $m \in N$, $\Gamma(\bullet)$ Euler'in Gamma fonksiyonu, $[\bullet]$ tam sayı kısmını temsil etmekte ve $t < 0$ için $f(t) = 0$ olarak tanımlıdır.

Laplace dönüşümü kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanıldığından kesir dereceli diferansiyel hesaplamada da bu dönüşüm Riemann-Liouville ve Grünwald-Letnikov yöntemleri için aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\mathcal{L}\{ {}_0D_t^\alpha f(t), s \} = s^{-\alpha} \mathcal{L}\{ f(t) \} = s^{-\alpha} F(s) \quad (1.5)$$

Bir $f(t)$ fonksiyonu için ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplamaların özellikleri aşağıda verilmiştir (Öztek, 2013):

- Zamanın analitik bir fonksiyonu olan $f(t)$ için yapılacak kesir dereceli hesaplamalar da zamanın ve α değişkeninin analitik fonksiyonudur.
- ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplamada eğer α bir tam sayı ise klasik tam sayılı türev ya da integral hesaplaması yapılır.
- ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplamada eğer $\alpha = 0$ alınırsa sonuç $f(t)$ fonksiyonunun kendisini verir.
- ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplamaların lineerlik özelliği vardır. Örneğin:

$${}_0D_t^\alpha x f(t) + {}_0D_t^\alpha y f(t) = x {}_0D_t^\alpha f(t) + y {}_0D_t^\alpha f(t)$$
- ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplamalarda kesir derecesinin toplamı ile sonuca ulaşılabilir. Örneğin: ${}_0D_t^\beta ({}_0D_t^\alpha f(t)) = {}_0D_t^{\alpha+\beta} f(t)$
- ${}_aD_t^\alpha$ ile gösterilen kesir dereceli hesaplama ve $\frac{d^n}{dt^n}$ ile gösterilen tam sayılı diferansiyel hesaplamaların bir arada olduğu durumlarda yer değiştirme özelliği kullanılabilir. Örneğin:
$$\frac{d^n}{dt^n} ({}_0D_t^\alpha f(t)) = {}_0D_t^\alpha \left(\frac{d^n}{dt^n} f(t) \right)$$

DİZİN

<hr/> <p>A</p> <p>Automatic Voltage Regulator · v, 42, 44, 45</p> <hr/> <p>I</p> <p>IEEE · iv, v, 1, 19, 23, 26, 41, 42, 43</p> <hr/> <p>K</p> <p>Kayan Kipli Kontrol · xii, 12 kesir dereceli · iv, 2, 15, 16, 19, 41, 47, 48</p>	<p>KKK · ix, xii, 12, 13, 15, 16, 18, 19, 22, 23, 26, 40</p> <hr/> <p>O</p> <p>Optimizasyon · vii, 9, 19, 44 Otomatik Voltaj Regülatörü · iv, 1</p> <hr/> <p>P</p> <p>PI · iv, v, ix, xii, 2, 3, 4, 14, 15, 19, 20, 21, 23, 24, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 35, 38, 41, 42, 43, 44</p> <p>PID · iv, v, ix, xii, 1, 2, 3, 4, 5, 14, 15, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 27,</p>	<p>28, 29, 30, 33, 34, 35, 38, 39, 41, 43, 44</p> <hr/> <p>S</p> <p>Sine Cosine algorithm · v Sinüs Kosinüs algoritması · iv</p> <hr/> <p>U</p> <p>uygunluk fonksiyonu · 2, 10, 18, 19</p>
---	--	--



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

