

Design of PID Controller for Automatic Voltage Regulator System through Kidney-inspired Algorithm

Serdar EKİNCİ^{1,*}, Ayşen DEMİRÖREN², H. Lale ZEYNELGİL³, Serhat KAYA⁴

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 72100, Batı Raman/BATMAN

^{2,3}İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak/İSTANBUL

⁴Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100, Batı Raman/BATMAN

Graphical/Tabular Abstract

Article Info:

Received: 22/01/2019

Revision: 14/04/2019

Accepted: 19/04/2019

Highlights

- Optimization
- Kidney-inspired algorithm is effective technique
- PID controller design

Keywords

Automatic Voltage Regulator
Kidney-inspired Algorithm
PID Controller

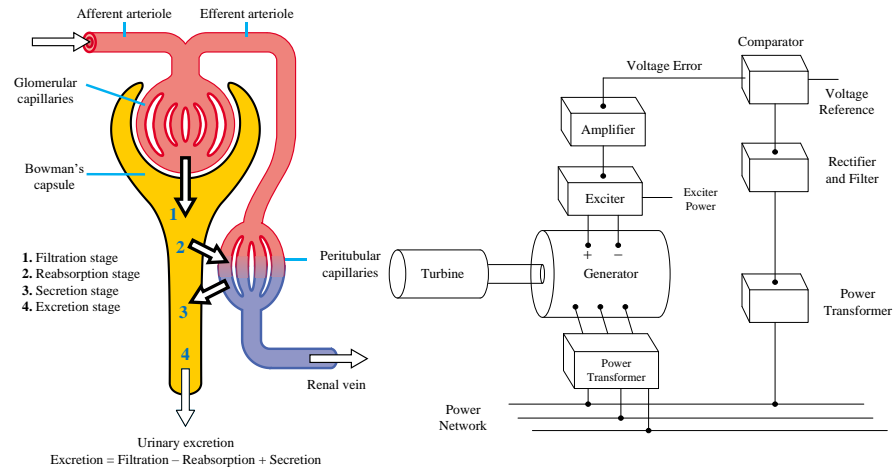


Figure A. KA-based PID controller design for AVR system

Purpose: This study presents a new design method for determining the best proportional-integral-derivative (PID) controller parameters (K_p , K_i and K_d) of an automatic voltage regulator (AVR) system using kidney-inspired algorithm (KA) for the first time.

Theory and Methods: KA technique has high quality solution ability, good computational efficiency and fast convergence characteristics. The design problem of the proposed PID controller is defined as an optimization problem and KA technique is utilized to find the controller gains of K_p , K_i and K_d .

Results: The superiority of the optimized PID controller with KA technique over Ziegler-Nichols (ZN) classical tuning method and some modern heuristic optimization algorithms based controllers is inspected via transient response analysis to achieve an efficient AVR system. To evaluate the stability of the related power system tuned by KA technique, pole/zero map analysis and Bode plot are performed. Afterwards, robustness analysis is also carried out to check the performance of the proposed controller in the AVR system.

Conclusion: The numerical simulation results verify that KA technique has an excellent tuning capability and is more efficient in improving the step response of the AVR system than the other existing methods.



Böbrek-ilhamlı Algoritma ile Otomatik Gerilim Regülatör Sistemi için PID Kontrolör Tasarımı

Serdar EKİNCİ^{1,*}, Ayşen DEMİRÖREN², H. Lale ZEYNELGİL³, Serhat KAYA⁴

¹Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 72100, Batı Raman/BATMAN

^{2,3}İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak/İSTANBUL

⁴Batman Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 72100, Batı Raman/BATMAN

Öz

Bu çalışma, ilk kez böbrek-ilhamlı algoritma (KA) kullanarak otomatik gerilim regülatörü (AVR) sisteminin en iyi oransal-integral-türevsel (PID) kontrolör parametrelerini (K_p , K_i ve K_d) belirlemek için yeni bir tasarım yöntemi sunmaktadır. KA tekniği yüksek kaliteli çözüm, iyi hesaplama verimliliği ve hızlı yakınsama özelliklerine sahiptir. Önerilen PID kontrolörünün tasarım problemi bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmıştır ve K_p , K_i ve K_d 'nin kontrolör kazançlarını bulmak için KA tekniği kullanılmıştır. KA tekniği ile optimize edilmiş PID kontrolörünün Ziegler-Nichols (ZN) klasik ayar metoduna ve bazı modern sezgisel optimizasyon algoritmalarına dayalı kontrolörlere göre üstünlüğü, etkin bir AVR sistemi elde etmek için geçici hal cevap analizi yapılarak incelenmiştir. KA tekniği ile ayarlanan ilgili güç sisteminin kararlılığını değerlendirmek için kutup/sıfır haritası analizi ile Bode çizimi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, önerilen kontrolörün performansını AVR sisteminde kontrol etmek için gürbüzlük analizi de yapılmıştır. Sayısal simülasyon sonuçları, KA tekniğinin mükemmel bir ayarlama kabiliyetine sahip olduğunu ve AVR sisteminin diğer mevcut yöntemlere göre basamak cevabını iyileştirmede daha etkili olduğunu doğrulamaktadır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 22/01/2019

Düzeltilme: 14/04/2019

Kabul: 19/04/2019

Anahtar Kelimeler

Otomatik Gerilim
Regülatörü
Böbrek-ilhamlı Algoritma
PID Kontrolör

Keywords

Automatic Voltage
Regulator
Kidney-inspired Algorithm
PID Controller

Design of PID Controller for Automatic Voltage Regulator System through Kidney-inspired Algorithm

Abstract

This study presents a new design method for determining the best proportional-integral-derivative (PID) controller parameters (K_p , K_i and K_d) of an automatic voltage regulator (AVR) system using kidney-inspired algorithm (KA) for the first time. KA technique has high quality solution ability, good computational efficiency and fast convergence characteristics. The design problem of the proposed PID controller is defined as an optimization problem and KA technique is utilized to find the controller gains of K_p , K_i and K_d . The superiority of the optimized PID controller with KA technique over Ziegler-Nichols (ZN) classical tuning method and some modern heuristic optimization algorithms based controllers is inspected via transient response analysis to achieve an efficient AVR system. To evaluate the stability of the related power system tuned by KA technique, pole/zero map analysis and Bode plot are performed. Afterwards, robustness analysis is also carried out to check the performance of the proposed controller in the AVR system. The numerical simulation results verify that KA technique has an excellent tuning capability and is more efficient in improving the step response of the AVR system than the other existing methods.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Otomatik gerilim regülatörü (AVR), senkron bir generatörün sabit gerilim seviyesini otomatik olarak kontrol etmek, ayarlamak veya korumak için tasarlanmış bir cihazdır. AVR'nin temel görevi, bir alternatörün gerilimini belirli bir seviyede tutmaktır. Bu nedenle güç sisteminin güvenliği AVR sisteminin kararlılığından ciddi şekilde etkilenir [1]. Bununla birlikte, AVR sistemi yetersiz salınımlı geçici hal cevabı, maksimum aşım ve sürekli hal hataları ile ilgili sorunlar içerir. Bu sorunlar, AVR

sistemi ve kontrolör ile bir kapalı çevrim sistemi oluşturarak aşılabilir. Farklı yapıya sahip modern kontrol tekniklerinin potansiyeline rağmen, basit yapısı ve kolay uygulanabilirliği sayesinde oransal-integral-türevsel (PID) tipi kontrolör, AVR sistemi için hala yaygın olarak kullanılmaktadır. AVR sistemlerinde PID kontrol cihazlarının endüstriyel uygulamaları, PID kontrolör parametrelerinin uygun seçiminin, sistem kesintileri sırasında tatmin edici bir performansla sonuçlandığını göstermiştir. Bu nedenle, istenilen performans seviyesini elde etmek için PID kazançlarının en iyi şekilde ayarlanması gereklidir [2].

Uzun yıllardan beri PID kazançlarının belirlenmesi amacıyla çeşitli metotlar önerilmiştir. Çok popüler geleneksel PID kontrol teknikleri Ziegler-Nichols, kazanç-faz marjı, Cohen-Coon ve kutup yerleştirme metotlarıdır [3]. Ancak bu metotlar, sistemi daha karmaşık hale getiren çok sayıda matematiksel hesaplama içerdiğinden en uygun PID parametrelerinin bulunmasını zorlaştırır. Bu sebepten ötürü, son zamanlarda kontrolör parametrelerinin optimizasyonu için yapay zeka tabanlı ayarlama ve optimizasyon yöntemleri tercih edilmektedir [4]. Genetik algoritma (GA) [5], parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) [6, 7], yapay arı kolonisi (ABC) [7], diferansiyel evrim (DE) [7], örüntü arama algoritması (PSA) [8], anarşik toplum optimizasyonu (ASO) [9], yerel tek modlu örnekleme algoritması (LUS) [10], dünya kupası optimizasyonu (WCO) [11], çekirge optimizasyon algoritması (GOA) [12], yer çekimsel arama algoritması (GSA) [13], öğretim öğrenme tabanlı optimizasyon (TLBO) [1, 14], biyo-coğrafya tabanlı optimizasyon (BBO) [15], stokastik fraktal arama (SFS) algoritması [16], sürekli ateş böceği algoritması (CFA) [2], salp sürüsü algoritması (SSA) [17], sinüs kosinüs algoritması (SCA) [18], karınca aslanı optimizasyonu (ALO) [19, 20], simbiyotik organizmalar arama algoritması [21] ve simbiyotik organizmalar arama ile benzeltmiş tavlama tekniğinin hibrit hali [22] gibi yapay zeka tabanlı yaklaşımlar AVR sisteminin PID kontrolör ayarlanması için kullanılmıştır. Bununla birlikte, AVR sistemi için optimal çözümü elde etmek için kesin bir algoritma yoktur. Bu nedenle, bir AVR sistemindeki PID kontrolörün en iyi parametrelerini tanımlamak için yeni bir sezgisel-üstü optimizasyon algoritma üzerinde çalışılması araştırmacılar için ilgi çeken önemli bir problemdir.

Verimli ve güçlü bir küresel optimizasyon tekniği olarak böbrek-ilhamlı algoritma (KA), ilk olarak 2017 yılında Jaddi ve arkadaşları tarafından önerildi [23]. Bu optimizasyon tekniği böbreklerin üriner sisteminin fizyolojik yapısındaki dört işlevi (filtreleme, geri-emilim, salgılama ve boşaltım) taklit eder. Ön çalışmalar, KA'nın optimizasyon kabiliyetinin GA, PSO ve kısıtsız optimizasyon problemlerini çözmek için literatürde bulunan diğer optimizasyon algoritmalarından daha üstün olduğunu göstermektedir [23, 24]. Keşif ve sömürü arasındaki uyumlu denge, bu optimizasyon tekniğinin en göze çarpan özelliğidir. Bu özellik, optimizasyon tekniğinin daha iyi bir yakınsamaya ulaşmasını sağlamaktadır. Bu algoritma, birkaç mühendislik uygulaması haricinde birçok araştırma konusuna henüz uygulanmamıştır [25, 26].

Bu makalede, KA tekniğinin bu avantajlarını göz önünde bulundurarak, bir AVR sisteminde PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için KA tekniği ilk defa uygulanmıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın asıl amacı akıllı ve verimli bir şekilde gerilim büyüklüğünü kontrol eden etkili ve gürbüz bir KA tabanlı PID (KA-PID) kontrolörünün tasarlanması ve uygulanmasıdır. Zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (ITSE) amaç fonksiyonu kullanılarak PID kontrolör kazançları optimize edildi ve önerilen kontrolörün performansını değerlendirmek için geçici hal cevap analizi yapıldı. Elde edilen geçici hal cevabı parametrelerinin (maksimum aşım, yerleşme zamanı, yükselme zamanı ve tepe zamanı) değerleri, klasik ayarlama tekniklerinden en bilineni olan ZN [12] ve güncel sezgisel algoritmalar sınıfına giren ABC [7], LUS [10], PSA [8] ve BBO [15] ile elde edilen değerlerle karşılaştırıldı. Önerilen sistemin geçici hal cevabı parametrelerinin tümünün en düşük değerlere sahip olması, KA tekniğinin literatürdeki diğer tekniklere olan üstünlüğünü açıkça kanıtlamaktadır. Bununla birlikte, önerilen AVR sistemin kararlılığını test etmek için, kutup/sıfır haritası analizi ile Bode analizi ve ardından bazı sistem parametrelerini değiştirerek önerilen sistemin gürbüzlük analizi yapıldı.

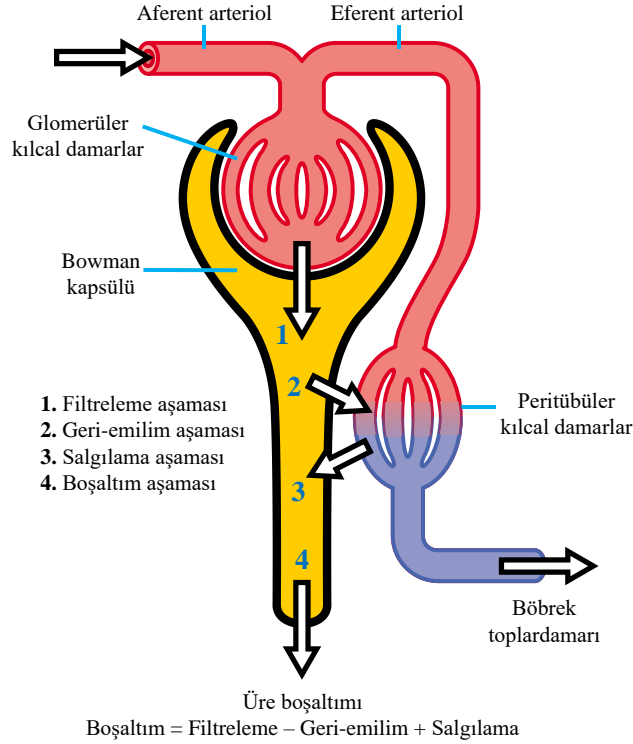
2. BÖBREK-İLHAMLI ALGORİTMA (KIDNEY-INSPIRED ALGORITHM)

KA, insan vücudundaki böbrek çalışma sürecinden esinlenilerek geliştirilmiş bir sezgisel-üstü arama algoritmasıdır. KA algoritmasının esinlendiği böbreğin çalışma döngüsünü açıklayan başlıca adımlar aşağıda verilmektedir [23, 24]:

- i. Filtreleme (filtration): su ve çözünmüş maddelerin kandan tüplere aktarılması

- ii. Geri-emilim (reabsorption): faydalı suyun ve çözülmüş maddelerin tüplerden kan dolaşımına taşınması
- iii. Salgılama (secretion): zararlı ve atık bileşenlerin kan dolaşımından tüplere aktarılması
- iv. Boşaltım (excretion): Üriner sistem yardımı ile önceki üç adımdan atık maddelerin tahliye işlemi

Şekil 1, böbrek ana biyolojik mekanizmasını göstermektedir. Şekil 1'in alt kısmında belirtildiği üzere, boşaltım miktarı, filtreleme miktarı ile salgılama miktarının toplamından geri-emilim miktarının çıkarımıdır.



Şekil 1. Böbreğin ana biyolojik mekanizması [27]

KA'da yer alan bileşenler aşağıdaki gibi basitçe tanımlanmaktadır [23, 24].

2.1. Sanal çözümlerin hareketi (Movement of virtual solutes)

KA'nın popülasyonundaki her bir çözüm, biyolojik böbrekte bir çözünmeyi temsil eder. Bu algoritmada, mevcut çözümü en iyi çözüme doğru hareket ettirerek yeni bir çözüm yaratılmaktadır. Bu hareket aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$S_{i+1} = S_i + rand(S_{best} - S_i) \quad (1)$$

Eş. (1)'de, S_i i . iterasyondaki çözüm, $rand$ 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı ve S_{best} ise algoritma tarafından önceki iterasyonlardan elde edilen en iyi çözümdür.

2.2. Filtreleme Oranı (Filtration Rate)

Popülasyon içindeki çözümler, her bir iterasyonda bir filtreleme fonksiyonu ile hesaplanan bir filtreleme oranı kullanılarak süzülür. Filtreleme oranı (f_r) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$f_r = \alpha \times \sum_{i=1}^p f(x_i) / p \quad (2)$$

Eş. (2)'de, α sabit bir sayı olup (0, 1] aralığındadır, $f(x_i)$ amaç fonksiyonunu, x_i i . çözüm adayını ve p ise popülasyondaki çözüm aday sayısını temsil etmektedirler.

2.3. Geri-emilim süreci (Reabsorption Process)

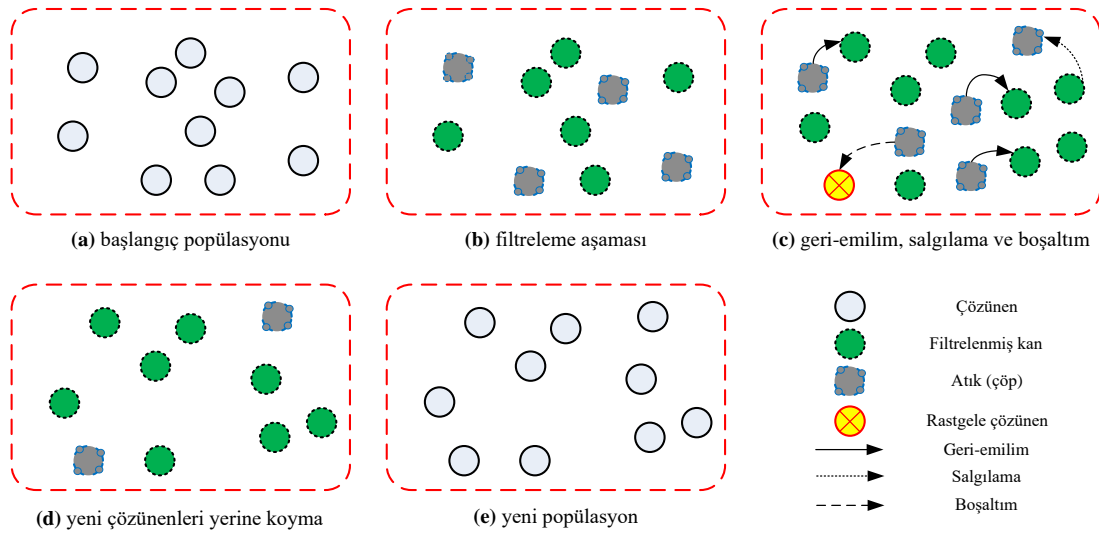
Geri-emilim operatörü, atık çöpiye (W) ait bir çözünmüş kanın (FB) bir parçası olması için şans sağlayan süreçtir. Eş. (1)'deki aktarma operatörü tekrar uygulandıktan sonra, filtreleme oranını karşılaması durumunda W 'ye atanan bir çözüm FB 'ye geri atanabilir.

2.4. Salgılama Süreci (Secretion Process)

Salgılama, FB 'ye atanan çözümler için bir operatördür. FB 'ye atanan bir çözüm, FB 'deki en kötü çözümden daha iyi değilse, W 'ye aktarılır; aksi halde bu çözüm FB 'de kalır ve FB 'deki en kötü çözüm salgılanarak W 'ye taşınır.

2.5. Boşaltım Süreci (Excretion Process)

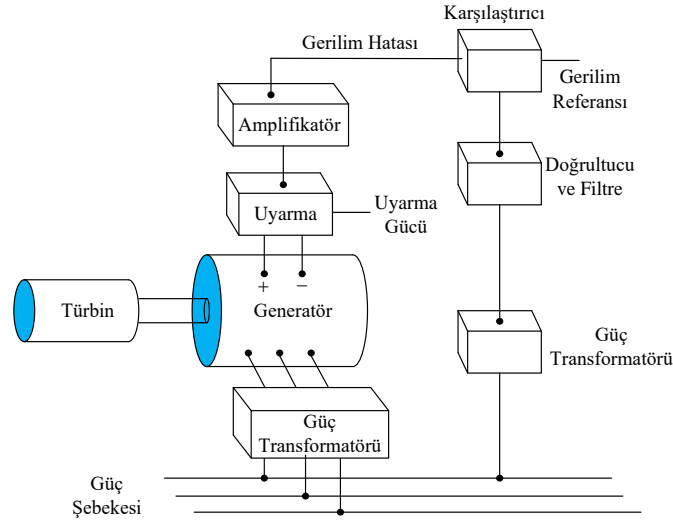
W 'deki çözümler, geri-emilim şansı verildikten sonra, FB 'nin bir parçası olmak için filtreleme oranını karşılayamazlarsa atılırlar. İki kez hareket ettikten sonra FB olma becerisine sahip değilse, bu çözümler atılır. Bu durumda, W 'deki böyle bir çözüm, rastgele bir çözüm ile değiştirilir. Rastgele çözümlerin eklenmesi, böbreklerin glomerüler kılcal damarlarına sürekli su ve çözünmüş madde girişini taklit eder. Şekil 2, böbrek algoritmasının aşamalarını göstermektedir.



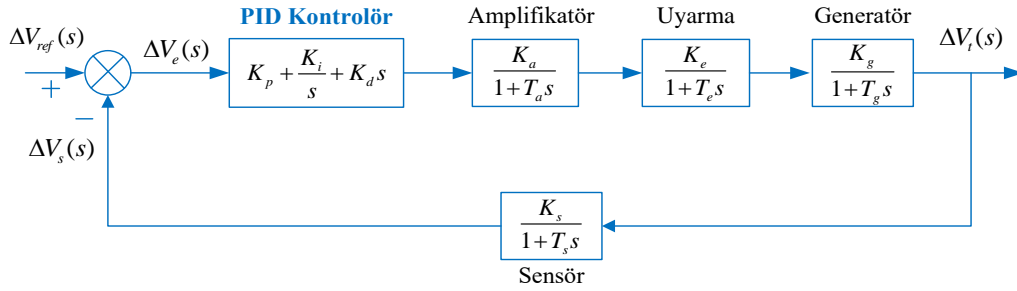
Şekil 2. KA sürecinin şeması: a) başlangıç popülasyonu, b) filtreleme aşaması, c) geri-emilim, salgılama ve boşaltım, d) yeni çözümleri yerine koyma, e) yeni popülasyon [26]

3. AVR SİSTEMİ (AVR SYSTEM)

Bir güç sisteminde, aktif güçteki bir değişim temel olarak frekans etkiler ve reaktif güçteki bir değişim ise temel olarak gerilim büyüklüğünü etkiler. Bir güç üretim sisteminin gerilim kontrolü ve frekans kontrolü arasındaki karşılıklı etki genellikle yeterince zayıf olduğundan, analizleri ayrı ayrı yapılabilir [28]. Generatörler, reaktif gücün ana kaynaklarından biridir ve bir generatörün reaktif güç kontrolünün ana araçlarından biri AVR yoluyla kendi uyarmasını kontrol etmektir. Dolayısıyla, bir AVR'nin işlevi bir generatörün terminal gerilim büyüklüğünü belirli bir seviyede tutmaktır. Şekil 3 tipik bir AVR sistemini göstermektedir. Şekil 3'te görüldüğü gibi, AVR sistemi esas olarak dört bileşenden oluşmaktadır: amplifikatör, uyarma, sensör ve generatör [28]. PID kontrol yöntemi oransal, integral ve türevsel kontrolör olarak adlandırılır [29]. PID kontrolör ilaveli bir AVR sistemi, Şekil 4'te gösterildiği gibi tüm bileşenlerinin transfer fonksiyonu ile modellenilebilir.



Şekil 3. Bir AVR sisteminin şematik diyagramı



Şekil 4. PID kontrolör ilaveli bir AVR sisteminin transfer fonksiyonu modeli.

Burada $\Delta V_{ref}(s)$, $\Delta V_s(s)$, $\Delta V_e(s)$ ve $\Delta V_t(s)$ sırasıyla referans giriş gerilimi, sensör çıkış gerilimi, hata gerilimi ve generatör terminal gerilimidir. PID kontrolsüz ve kontrolörlü AVR sisteminin transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{K_a K_e K_g (1 + sT_s)}{(1 + sT_a)(1 + sT_e)(1 + sT_g)(1 + sT_s) + K_a K_e K_g K_s} \quad (3)$$

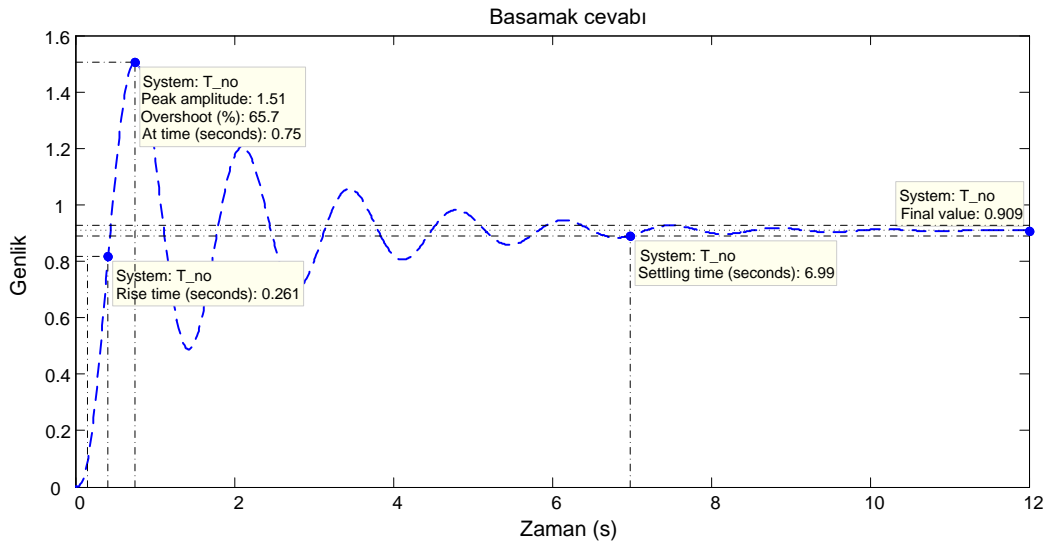
ve

$$\frac{\Delta V_t(s)}{\Delta V_{ref}(s)} = \frac{(s^2 K_d + sK_p + K_i)(K_a K_e K_g)(1 + sT_s)}{s(1 + sT_a)(1 + sT_e)(1 + sT_g)(1 + sT_s) + (K_a K_e K_g K_s)(s^2 K_d + sK_p + K_i)} \quad (4)$$

AVR sistem bileşenlerinin sınır değerleri ve AVR sisteminde kullanılan parametre değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu değerler kullanıldığında, sistem kararlı olmasına rağmen, kontrolsüz AVR sisteminin basamak gerilim cevabı Şekil 5'te gösterildiği gibi yüksek derecede titreşimlidir. Kontrolsüz sistemin iki reel kutbu ($s_1 = -99.971$ ve $s_2 = -12.489$) ve sönüm oranı 0.111 olan iki kompleks kutbu ($s_{3,4} = -0.5198 \pm 4.6642i$) vardır. Kontrolsüz sistemin yükselme zamanı $t_r = 0.261$ s; tepe zamanı $t_p = 0.752$ s; %2'lik tolerans bandı için yerleşme zamanı $t_s = 6.99$ s; maksimum yüzdelerik aşım $\%OS = \%65.7$ (tepe değeri $M_p = 1.5066$ pu) ve sürekli hal hatası ise $E_{ss} = 0.091$ pu'dur. Bu rakamlara bakıldığında AVR sisteminin dinamik cevabının geliştirilmesi gerekmektedir ve sürekli hal hatasının PID kontrolör kullanılarak iptal edilmesi gerektiği açıktır.

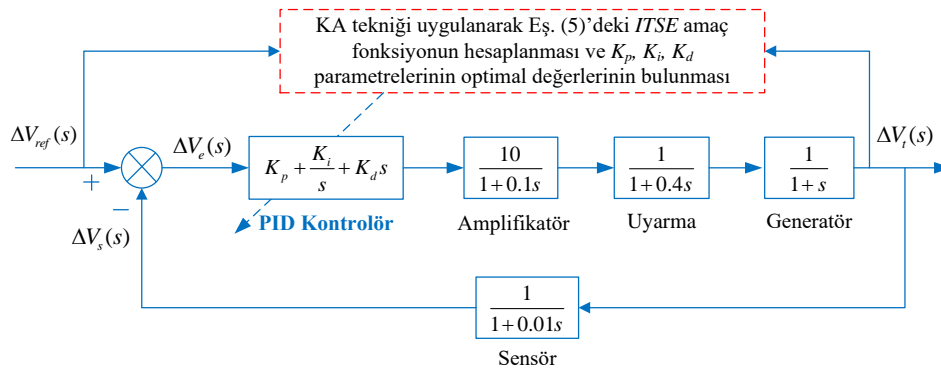
Tablo 1. PID Kontrolör İleveli AVR Sisteminin Sınır Değerleri.

Bileşenler	Parametre Aralıkları	AVR sisteminde kullanılan değerler
Kontrolör	$0.2 \leq K_p, K_i, K_d \leq 2.0$	K_p, K_i, K_d 'nin en iyi değerleri
Amplifikatör	$10 \leq K_a \leq 40, 0.02 \leq T_a \leq 0.1$	$K_a = 10, T_a = 0.1$ s
Uyarma	$1.0 \leq K_e \leq 10, 0.4 \leq T_e \leq 1.0$	$K_e = 1.0, T_e = 0.4$ s
Generatör	$0.7 \leq K_g \leq 1.0, 1.0 \leq T_g \leq 2.0$	$K_g = 1.0, T_g = 1.0$ s
Sensör	$1.0 \leq K_s \leq 2.0,$ $0.001 \leq T_s \leq 0.06$	$K_s = 1.0, T_s = 0.01$ s

**Şekil 5. Kontrolsüz AVR sisteminin basamak cevabı.**

4. AVR SİSTEMİNE KA'NIN UYGULANMASI (APPLICATION OF KA TO THE AVR SYSTEM)

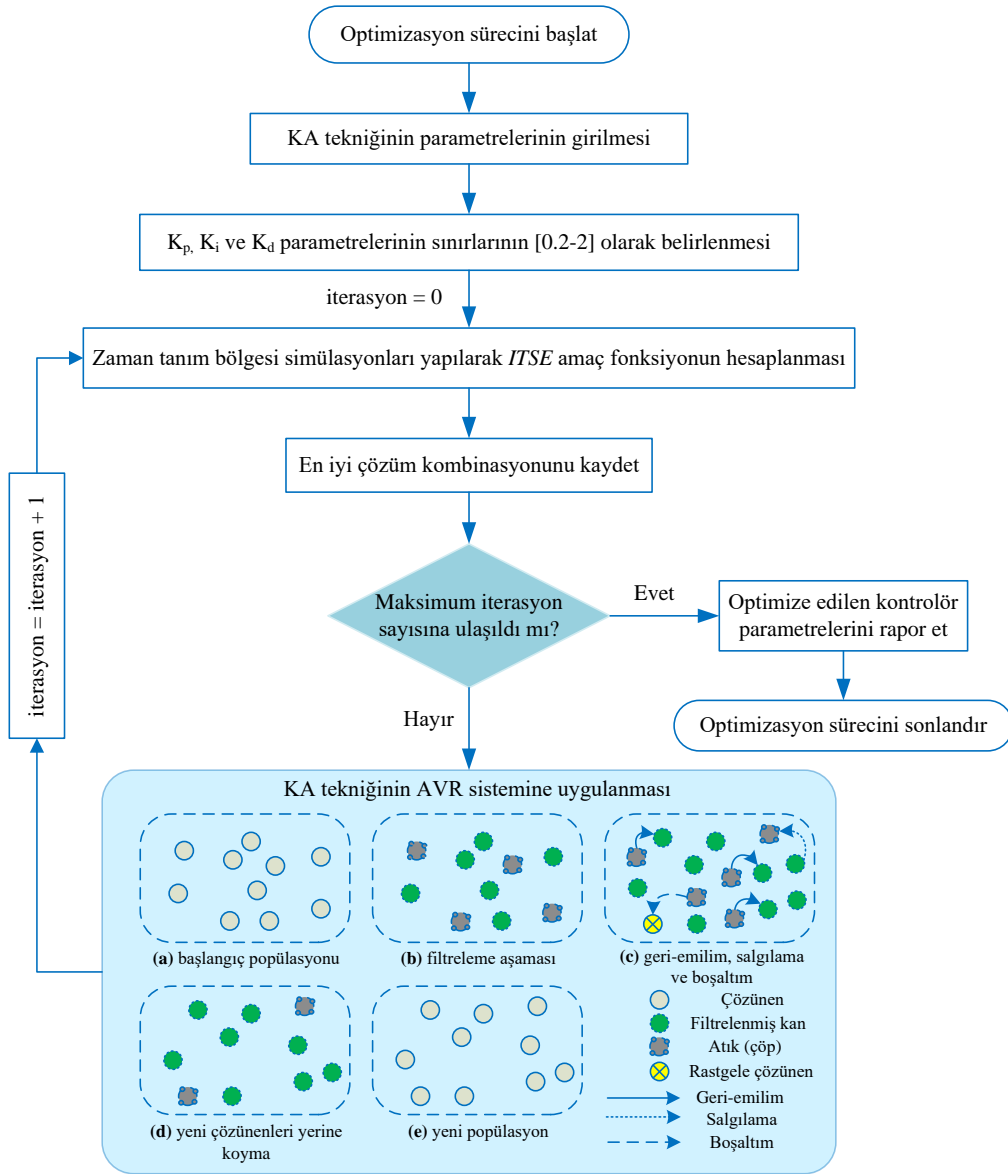
Bu bölümde bir AVR sisteminin geçici hal cevabını düzeltmek için, nispeten yeni olan güçlü KA tekniğinden yararlanılarak bir PID kontrolör tasarımı gerçekleştirilecektir. KA tekniği kullanılarak en uygun K_p , K_i ve K_d kontrolör parametreleri bulunabilir ve böylece ilgili sistemin kontrol performansı etkin bir şekilde artırılabilir. KA-PID kontrolörü ile birleştirilmiş bir AVR sisteminin blok diyagramı Şekil 6'da gösterilmiştir.

**Şekil 6. KA-PID kontrolör ilaveli AVR sistemi.**

KA kullanılmak suretiyle üç adet PID parametresini optimize etmek için, tasarım parametreleri ilk olarak her çözünen maddenin reel bir sayı ile temsil edildiği $S = [K_p; K_i; K_d]$ gibi bir çözünen maddeye kodlanır.

Daha sonra, çözünen maddeler bir amaç fonksiyonunun değerini en aza indirmek için KA tekniğinin adımlarını takip ederek optimize edilir. Bu amaç fonksiyonunu seçimi oldukça önemlidir ve istenilen biçimde parametreleri optimize edilmiş bir PID kontrolörü elde etmek için problemin doğasına bağlı olarak gerçekleştirilmelidir. Bu çalışmada AVR çalışmalarında yaygın olarak kullanılan ve sistemdeki yerleşme zamanını en aza indirgeyen Eş. (5)'deki zaman ağırlıklı karesel hatanın integrali (*ITSE*) amaç fonksiyonu olarak tercih edildi. AVR sisteminin performansını optimize etmek için uygulanan KA tekniğinin detaylı akış diyagramı Şekil 7'de gösterilmiştir.

$$ITSE = \int_0^{t_{sim}} t \cdot e^2(t) \cdot dt = \int_0^{t_{sim}} t \cdot (\Delta V_e)^2 \cdot dt \quad (5)$$



Şekil 7. AVR sistemini optimize etmek için KA uygulama blok şeması

5. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

KA tekniğine ilişkin kodlamalar ve simülasyonlar, Intel® i7 2.50 GHz işlemci ve 16.00 GB RAM özelliğine sahip kişisel bir bilgisayarda çalışan MATLAB/Simulink 7.11.0 (R2010b) ortamında yapılmıştır. Optimize edilecek parametre sayısı yalnızca üç adet olduğundan KA tekniği çalıştırılırken popülasyon (çözünen madde) büyüklüğünün 40 ve maksimum iterasyon sayısının ise 50 alınması yeterlidir. KA tekniğinin 30 kez çalıştırılmasıyla *ITSE* amaç fonksiyonu için bulunan istatistiksel sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Ayrıca

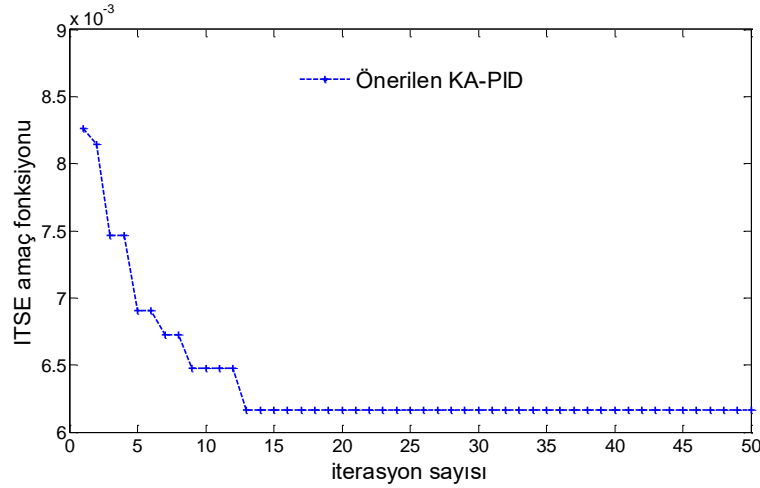
optimizasyon aşamasında geçen süre 185.07 s'dir. Simülasyon sürecinden sonra, elde edilen PID kontrolör parametrelerinin en iyi değerleri $K_p=1.0685$, $K_i=1.0018$ ve $K_d=0.5103$ 'dir. Bu parametreleri kullanmak suretiyle elde edilen KA-PID kontrolörlü sistemin kapalı çevrim transfer fonksiyonu Eş. (6)'da verilmiştir.

$$T_{KA-PID} = \frac{0.05103s^3 + 5.21s^2 + 10.79s + 10.02}{0.0004s^5 + 0.0454s^4 + 0.555s^3 + 6.613s^2 + 11.69s + 10.02} \quad (6)$$

Tablo 2. KA tekniğine ilişkin istatistiksel sonuçlar

Amaç fonksiyonu	En kötü	En iyi	Ortalama	Standart sapma
ITSE	0.00642	0.00614	0.00621	8.65E-05

Şekil 8, AVR sisteminin PID kontrolör kazançlarının optimizasyonunda önerilen KA tekniğinin tipik yakınsama profilini göstermektedir. Şekilden görüleceği gibi KA tekniği, *ITSE* amaç fonksiyonu 0.0061 değerini alarak, 13. iterasyondan sonra yakınsamaya başlamaktadır.

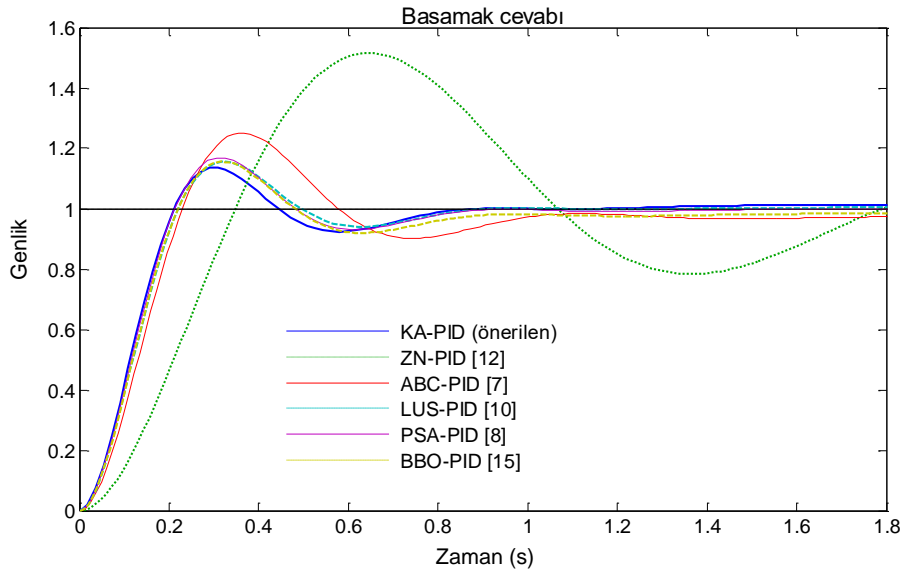


Şekil 8. KA tekniğinde yakınsama eğrisi

Önerilen KA-PID kontrolörün etkinliğini kanıtlamak amacıyla, literatürdeki çalışmalardan olan klasik ayarlama tekniğine dayalı ZN-PID [12] ve sezgisel algoritmalara dayalı ABC-PID [7], LUS-PID [10], PSA-PID [8] ve BBO-PID [15] kontrolörler ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bu tekniklerdeki kontrolör kazançları için arama uzayı sınırları ve sistem parametreleri aynı olduğu için uygun bir performans karşılaştırması yapılabilir. Farklı kontrolörler ile AVR sisteminin terminal gerilim basamak cevabı için elde edilen karşılaştırmalı simülasyon sonuçları Şekil 9'da gösterilmiştir. Nominal çalışma koşulları ($K_g = 1$ ve $T_g = 1$) altında M_p , E_{ss} ($t=1.8$ s sonundaki), t_s , t_r ve t_p performans özelliklerini içeren karşılaştırmalı geçici hal cevap analizi Tablo 3'te verilmiştir. Tabloda ayrıca kontrolör parametreleri ve optimizasyon süresinde kullanılan *ITSE* amaç fonksiyonun değerleri de verilmiştir. En iyi bulunan değerler kalın yazı tipi ile vurgulanmıştır. Tablodan açıkça anlaşılacağı üzere AVR sistemi için M_p , t_s , t_r , t_p ve *ITSE* değerleri önerilen KA-PID kontrolör ile en az çıkmıştır ve bu sonuçlar önerilen kontrolörün diğer metotlarla (ZN, ABC, LUS, PSA ve BBO) ayarlanan kontrolörlerden daha iyi performansa sahip olduğunu doğrulamaktadır.

Tablo 3. Karşılaştırmalı Optimize Edilen PID Parametreleri ve Geçici Hal Cevap Analizi Sonuçları

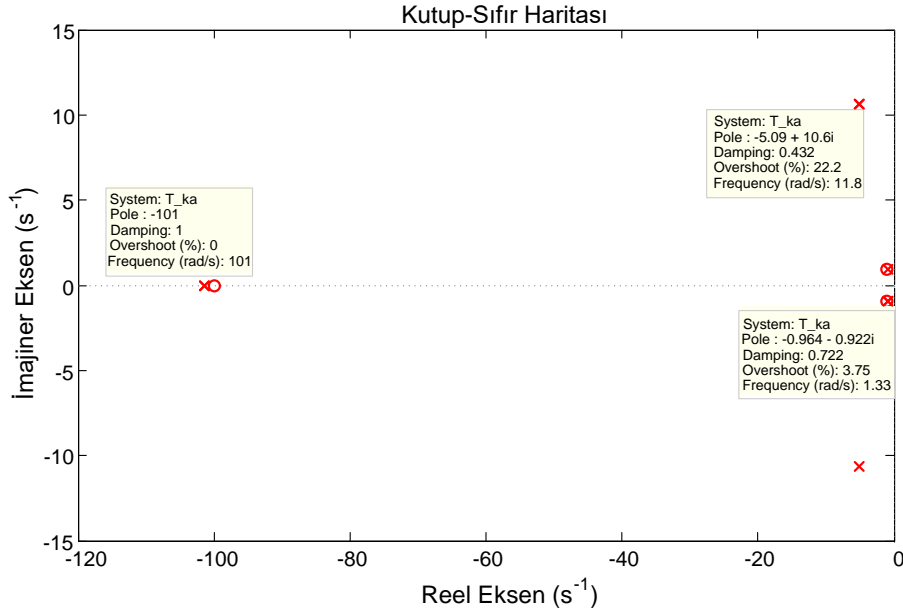
Kontrolör tipi	K_p	K_i	K_d	M_p (pu)	E_{ss} (pu)	t_s (s)	t_r (s)	t_p (s)	<i>ITSE</i> ($t_{sim}=20$ s)
KA-PID (önerilen)	1.0685	1.0018	0.5103	1.136	0.01290	0.771	0.143	0.308	0.0061
ZN-PID [12]	1.0210	1.8743	0.1390	1.515	0.00553	3.052	0.237	0.644	0.1070
ABC-PID [7]	1.6524	0.4083	0.3654	1.250	0.02684	3.094	0.156	0.360	0.0180
LUS-PID [10]	1.2012	0.9096	0.4593	1.156	0.00358	0.800	0.149	0.322	0.0064
PSA-PID [8]	1.2771	0.8471	0.4775	1.169	0.00174	0.804	0.144	0.316	0.0064
BBO-PID [15]	1.2464	0.5893	0.4596	1.160	0.01564	1.446	0.149	0.317	0.0077



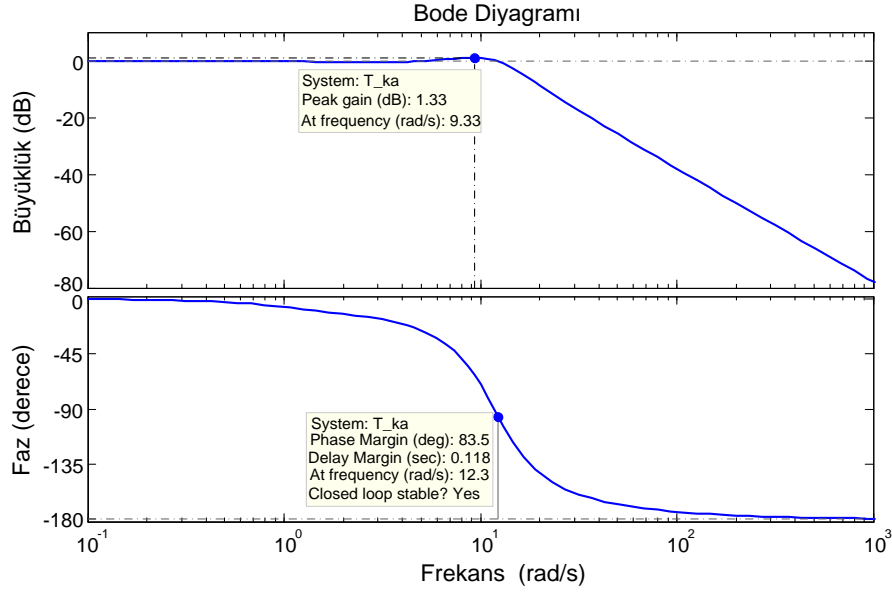
Şekil 9. KA-PID ve farklı kontrolörler ile AVR sisteminin terminal gerilim basamak cevabı

KA algoritması ile ayarlanan tasarlanmış AVR sisteminin kararlılık performansını kontrol etmek için kutup/sıfır haritası ve Bode analizleri yapılmıştır. Kutup/sıfır haritası ve Bode çizimleri sırasıyla Şekil 10 ve Şekil 11’de verilmiştir. Farklı yaklaşımlarla tasarlanan AVR sisteminin karşılaştırmalı kutup/sıfır haritası ve Bode kararlılık analizi sonuçları sırasıyla Tablo 4 ve Tablo 5’te verilmiştir.

Kutup/sıfır haritası sonuçlarına göre, KA-PID tabanlı AVR sisteminin kapalı çevrim kutupları sırasıyla $s_1 = -101.4$, $s_{2,3} = -5.0883 \pm 10.628i$ ve $s_{4,5} = -0.96356 \pm 0.92227i$ ’dir ve ilgili sönüm oranları ise sırasıyla 1.000, 0.432 ve 0.722’dir. Ayrıca, Bode çiziminden elde edilen tepe kazancı, faz payı, gecikme payı ve bant genişliği parametreleri ise sırasıyla 1.33 dB (9.33 rad/s), 83.5°, 0.118 s (12.3 rad/s) ve 15.11’dir. Bu sonuçlara göre KA-PID tabanlı sistemin kapalı çevrim kutuplarının hepsi s -düzleminin sol-yarısında olduğu için sistem kararlıdır ve sistem iyi bir frekans cevabına sahiptir.



Şekil 10. KA-PID kontrolörlü AVR sisteminin kutup/sıfır haritası çizimi.



Şekil 11. KA-PID kontrolörlü AVR sisteminin Bode çizimi

Tablo 4. Farklı Kontrolör Tipleri için AVR Sisteminin Kapalı Çevrim Kutupları ve Sönüm Oranları

Kontrolör tipi	Kapalı çevrim kutupları	Sönüm oranları
KA-PID (önerilen)	-101.4	1.00
	-5.0883+10.628i	0.432
	-5.0883-10.628i	0.432
	-0.96356+0.92227i	0.722
	-0.96356-0.92227i	0.722
ZN-PID [12]	-100.37	1.00
	-7.7225	1.00
	-1.2282+4.3549i	0.271
	-1.2282-4.3549i	0.271
	-2.9528	1.00
ABC-PID [7]	-100.98	1.00
	-3.7585+8.4058i	0.408
	-3.7585-8.4058i	0.408
	-4.7483	1.00
	-0.25108	1.00
LUS-PID [10]	-101.25	1.00
	-4.8842+9.8807i	0.443
	-4.8842-9.8807i	0.443
	-1.2388+0.56033i	0.911
	-1.2388-0.56033i	0.911
PSA-PID [8]	-101.3	1.00
	-4.8163+10.109i	0.430
	-4.8163-10.109i	0.430
	-1.2829+0.14614i	0.994
	-1.2829-0.14614i	0.994
BBO-PID [15]	-101.25	1.00
	-4.8024+9.892i	0.437
	-4.8024-9.892i	0.437
	-2.0568	1.00
	-0.58505	1.00

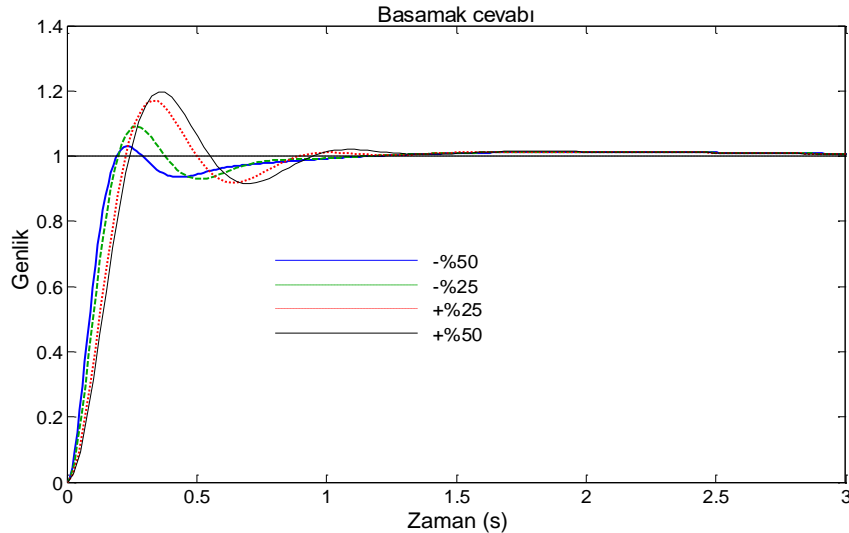
Tablo 5. Farklı Kontrolör Tipleri için AVR Sisteminin Bode Kararlılık Analizi

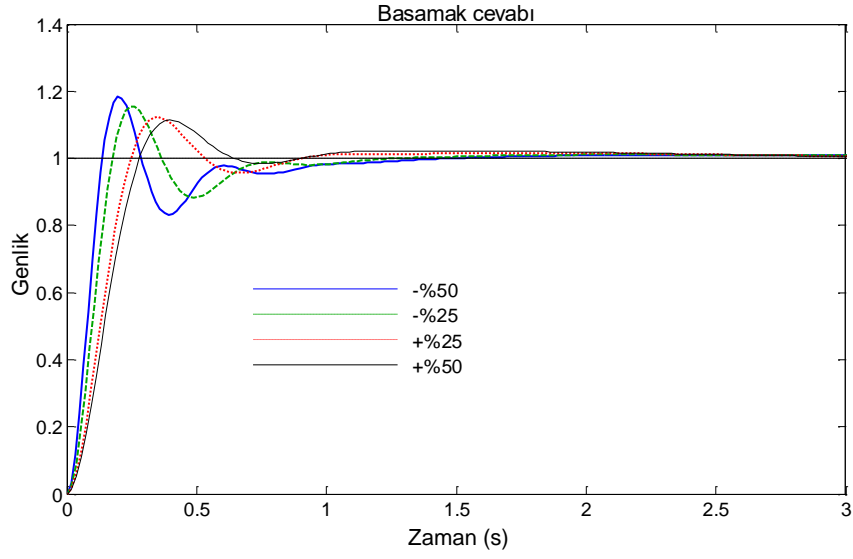
Kontrolör tipi	Tepe kazancı	Faz payı (derece)	Gecikme payı	Bant genişliği
KA-PID (önerilen)	1.33 dB (9.33 rad/s)	83.5	0.118 s (12.3 rad/s)	15.11
ZN-PID [12]	6.96 dB (4.18 rad/s)	51.9	0.14 s (6.48 rad/s)	7.428
ABC-PID [7]	2.87 dB (7.52 rad/s)	69.4	0.111 s (10.9 rad/s)	12.88
LUS-PID [10]	1.43 dB (8.59 rad/s)	83.2	0.126 s (11.6 rad/s)	14.21
PSA-PID [8]	1.68 dB (8.89 rad/s)	79.7	0.115 s (12.1 rad/s)	14.64
BBO-PID [15]	1.56 dB (8.65 rad/s)	81.6	0.122 s (11.7 rad/s)	14.28

Son olarak, KA tekniği ile ayarlanan PID kontrollü AVR sisteminin gürbüzlüğünü incelemek için amplifikatör, uyarma, generatör ve sensör zaman sabitleri %25'lik adımlarla -%50 ile +%50 arasında ayrı ayrı değiştirildi. Elde edilen sonuçlar Şekil 12-15 ve Tablo 6'da sunulmuştur. Ayrıca incelenen sisteme ilişkin toplam sapma aralığı ve maksimum sapmaların yüzdelik değerleri ise Tablo 7'de listelenmiştir. Bu tablo, KA ile optimize edilen AVR sisteminin gürbüz olduğuna işaret etmektedir.

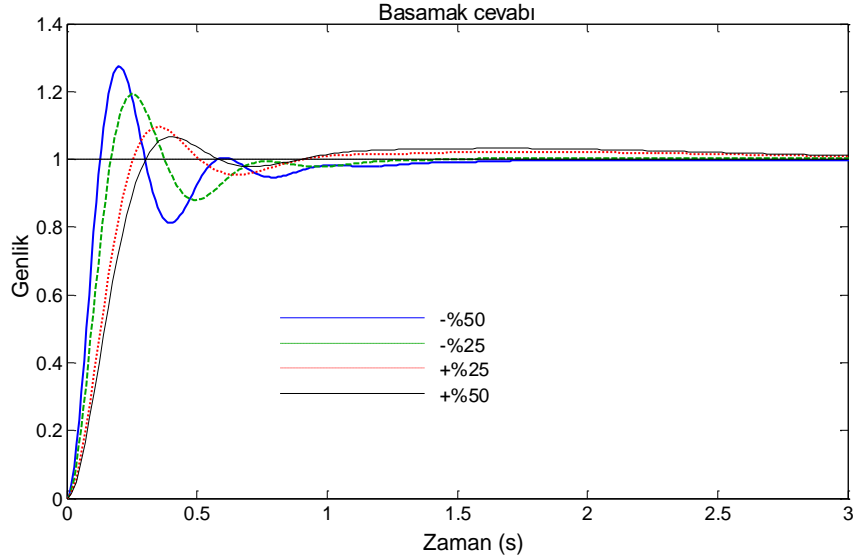
Tablo 6. KA Tekniği ile Optimize Edilmiş Kontrol Sisteminin Gürbüzlük Analizi Sonuçları

Parametre	Yüzdelik değişim oranı	M_p (pu)	t_s (s) (\pm %2)	t_r (s)	t_p (s)
T_a	-50	1.029	0.792	0.123	0.238
	-25	1.092	0.728	0.133	0.269
	+25	1.171	0.830	0.153	0.326
	+50	1.197	1.111	0.163	0.352
T_e	-50	1.184	0.969	0.093	0.196
	-25	1.155	0.701	0.119	0.245
	+25	1.123	0.805	0.166	0.352
	+50	1.114	1.827	0.188	0.395
T_g	-50	1.275	1.198	0.087	0.199
	-25	1.193	1.016	0.115	0.248
	+25	1.095	2.103	0.171	0.358
	+50	1.066	2.520	0.200	0.407
T_s	-50	1.112	0.779	0.148	0.304
	-25	1.124	0.775	0.145	0.297
	+25	1.150	0.768	0.141	0.301
	+50	1.163	0.766	0.139	0.293

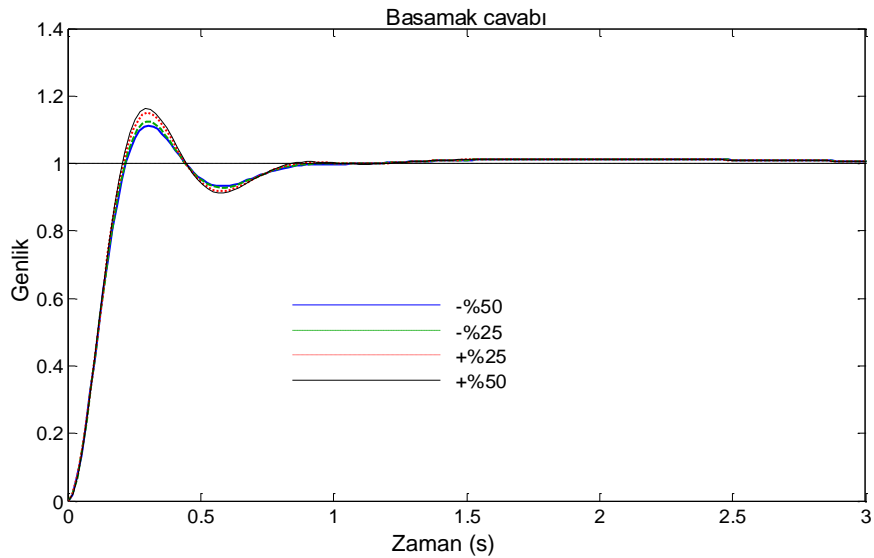
**Şekil 12.** -%50 ile +%50 aralığında değişen T_a için gerilim değişim eğrileri



Şekil 13. -%50 ile +%50 aralığında değişen T_e için gerilim değişim eğrileri



Şekil 14. -%50 ile +%50 aralığında değişen T_g için gerilim değişim eğrileri



Şekil 15. -%50 ile +%50 aralığında değişen T_s için gerilim değişim eğrileri

Tablo 7. Toplam Sapma Aralığı ve Sistemin Maksimum Sapma Yüzdesi

Parametre	Performans ölçütleri	Toplam sapma aralığı	Maksimum sapma yüzdesi (%)
T _a	M_p (pu)	0.168	9.42
	t_s (s) ($\pm\%2$)	0.383	44.10
	t_r (s)	0.040	13.99
	t_p (s)	0.114	22.73
T _e	M_p (pu)	0.070	4.23
	t_s (s) ($\pm\%2$)	1.126	136.96
	t_r (s)	0.095	34.97
	t_p (s)	0.199	36.36
T _g	M_p (pu)	0.209	12.24
	t_s (s) ($\pm\%2$)	1.504	226.85
	t_r (s)	0.113	39.86
	t_p (s)	0.208	35.39
T _s	M_p (pu)	0.051	2.38
	t_s (s) ($\pm\%2$)	0.013	1.04
	t_r (s)	0.009	3.50
	t_p (s)	0.011	4.87

6. SONUÇ (CONCLUSION)

PID kontrolör, dikkate değer etkinliği ve uygulama kolaylığı nedeniyle kontrol sistemlerinde kullanılan en popüler kontrolördür. PID kontrolörlerinin tasarımında PID parametrelerini ayarlamak çok önemlidir. Bu ayarlama yetersizse, sadece kontrol performansları kötüleşmez, aynı zamanda kontrol sistemi de verimsiz olur. Bu makalede, insan vücudundaki böbreklerin temel işlevinden esinlenen güncel bir optimizasyon algoritması olan KA tekniğinin AVR sistemindeki PID kontrolör tasarımında kullanılması ilk kez önerilmiştir. Parametre ayarlama sürecinde, tekli amaç fonksiyonu olarak *ITSE* kullanılarak KA tekniği defalarca çalıştırıldı ve minimum iterasyon sayısı ile PID kazançlarının en iyi değerleri bulundu. Sunulan tasarımın işe yararlılığını açığa çıkarmak için klasik ayarlama kuralından ZN ve bazı modern optimizasyon tekniklerinden ABC, LUS, PSA ve BBO algoritmaları ile performans karşılaştırması yapılmıştır. Simülasyon sonuçları, KA ile ayarlanan sistemin M_p , t_s , t_r , t_p ve *ITSE* açısından mevcut tekniklere nazaran daha iyi geçici hal cevap profiline sahip olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, KA tekniği ile ayarlanan sistemin kararlılığını değerlendirmek için kutup/sıfır haritası analizi, Bode analizi ve gürbüzlük analizi yapılmıştır. Bu analizlerden sistemin iyi bir kararlılık yapısına sahip olduğu ve önerilen KA-PID kontrolörün sistem parametreleri değişiminden etkilenmediği görülmüştür.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] S. Chatterjee, V. Mukherjee, PID controller for automatic voltage regulator using teaching-learning based optimization technique, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 77 (2016) 418-429.
- [2] O. Bendjehaba, Continuous firefly algorithm for optimal tuning of PID controller in AVR system, *Journal of Electrical Engineering*, 65: 1 (2014) 44-49.
- [3] L. dos Santos Coelho, Tuning of PID controller for an automatic regulator voltage system using chaotic optimization approach, *Chaos, Solitons & Fractals*, 39: 4 (2009) 1504-1514.
- [4] S. Ekinçi, B. Hekimoğlu, Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32: 4, (2017) 1271-1285.
- [5] H.M. Hasanien, Design optimization of PID controller in automatic voltage regulator system using Taguchi combined genetic algorithm method, *IEEE Systems Journal*, 7: 4 (2013) 825-831.

- [6] Z. L. Gaing, A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19: 2 (2004) 384-391.
- [7] H. Gozde, M. C. Taplamacioglu, Comparative performance analysis of artificial bee colony algorithm for automatic voltage regulator (AVR) system, *Journal of the Franklin Institute*, 348: 8 (2011) 1927-1946.
- [8] B. K. Sahu, S. Panda, P. K. Mohanty, N. Mishra, Robust analysis and design of PID controlled AVR system using pattern search algorithm, *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Bengaluru, India, (2012) 1-6.
- [9] H. Shayeghi, J. Dadashpour, Anarchic society optimization based PID control of an automatic voltage regulator (AVR) system, *Electrical and Electronic Engineering*, 2: 4 (2012) 199-207.
- [10] P. K. Mohanty, B. K. Sahu, S. Panda, Tuning and assessment of proportional–integral–derivative controller for an automatic voltage regulator system employing local unimodal sampling algorithm, *Electric Power Components and Systems*, 42: 9 (2014) 959-969.
- [11] N. Razmjooy, M. Khalilpour, M. Ramezani, A new meta-heuristic optimization algorithm inspired by FIFA world cup competitions: theory and its application in PID designing for AVR system, *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 27: 4 (2016) 419-440.
- [12] B. Hekimoğlu, S. Ekinçi, Grasshopper optimization algorithm for automatic voltage regulator system, *IEEE 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul, Turkey, (2018) 152-156.
- [13] S. Duman, N. Yörükeren, İ. H. Altaş, Gravitational search algorithm for determining controller parameters in an automatic voltage regulator system, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24: 4, (2016) 2387-2400.
- [14] V. Rajinikanth, S. C. Satapathy, Design of controller for automatic voltage regulator using teaching learning based optimization, *Procedia Technology*, 21 (2015) 295-302.
- [15] U. Güvenç, A. H. Işık, T. Yiğit, I. Akkaya, Performance analysis of biogeography-based optimization for automatic voltage regulator system, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24: 3 (2016) 1150-1162.
- [16] E. Çelik, Incorporation of stochastic fractal search algorithm into efficient design of PID controller for an automatic voltage regulator system, *Neural Computing and Applications*, 30: 6 (2018) 1991-2002.
- [17] S. Ekinçi, B. Hekimoğlu, S. Kaya, Tuning of PID controller for AVR system using salp swarm algorithm, *IEEE International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP)*, Malatya, Turkey, (2018) 424-429.
- [18] B. Hekimoğlu, Sine-cosine algorithm-based optimization for automatic voltage regulator system, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41: 6 (2019) 1761-1771.
- [19] R. Pradhan, S. K. Majhi, B. B. Pati, Design of PID controller for automatic voltage regulator system using Ant Lion Optimizer, *World Journal of Engineering*, 15: 3 (2018) 373-387.
- [20] S. Ekinçi, B. Hekimoğlu, S. Kaya, O. Adıbelli, Ş. Ay, Design of PID controller employing ALO algorithm for automatic voltage regulator system, *1st International Engineering and Technology Symposium (IETS 2018)*, Batman, Turkey, (2018) 640-645.
- [21] E. Çelik, R. Durgut, Performance enhancement of automatic voltage regulator by modified cost function and symbiotic organisms search algorithm, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 21: 5 (2018) 1104-1111.

- [22] E. Çelik, N. Öztürk, A hybrid symbiotic organisms search and simulated annealing technique applied to efficient design of PID controller for automatic voltage regulator, *Soft Computing*, 22: 23 (2018) 8011-8024.
- [23] N. S. Jaddi, J. Alvankarian, S. Abdullah, Kidney-inspired algorithm for optimization problems, *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 42 (2017) 358-369.
- [24] N. S. Jaddi, S. Abdullah, Optimization of neural network using kidney-inspired algorithm with control of filtration rate and chaotic map for real-world rainfall forecasting, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67 (2018) 246-259.
- [25] S. Ekinci, B. Hekimoğlu, E. Uysal, Kidney-inspired algorithm for determination of PID power system stabilizer parameters. *Journal of Polytechnic*, 22: 2 (2019) 453-460.
- [26] S. Ekinci, A. Demiroren, B. Hekimoglu, Parameter optimization of power system stabilizers via kidney-inspired algorithm, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41: 5 (2019) 1405-1417.
- [27] J. E. Hall, *Guyton and Hall Textbook of Medical Physiology*. Philadelphia: Elsevier Health Sciences (2015).
- [28] S. Ekinci, B. Hekimoğlu, Improved kidney-inspired algorithm approach for tuning of PID controller in AVR system, *IEEE Access*, 7 (2019) 39935-39947.
- [29] K. Kayışlı, M. Uğur, 3 Serbestlik Dereceli Bir Robot Kolun Bulanık Mantık ve PID ile Kontrolü, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5: 4 (2017) 223-233.