

Bir Rüzgâr Türbinine ait Kanat Hatve Açısının AHA Tabanlı PID Tipi Denetleyiciler ile Optimal Kontrolü

Selim Soylu*¹

*¹ Aksaray Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, AKSARAY

(Alınış / Received: 22.06.2023, Kabul / Accepted: 31.08.2023, Online Yayınlanma / Published Online: 31.08.2023)

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr Türbini,
PID Tipi Denetleyiciler,
Kanat Hatve Açısı,
Optimal Kontrol

Öz: Bu çalışmada, bir rüzgâr türbinine ait kanat hatve açısı zamanla değişen rüzgâr hızı varlığında kontrol edilmeye çalışılmıştır. Böylece rüzgâr türbin sisteminin çıkış gücünün nominal çıkış gücünde tutulması ve oluşabilecek zararlardan sistemin korunması amaçlanmıştır. Bu amaçla PD (oransal-türevsel), PI (oransal-integral) ve PID (oransal-türevsel-integral) denetleyici yapıları kullanılmıştır. Denetleyicilere ait parametreler literatürde oldukça yeni olan metasezgisel optimizasyon algoritması olan yapay sinek kuşu algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm-AHA) ile optimize edilmiştir. Her üç denetleyiciye ait parametrelerin optimizasyonu için 30 bağımsız yürütme gerçekleştirilmiş ve bu yürütmelere ait istatistiksel veriler değerlendirilmiştir. Rüzgâr türbininin modellenmesi, optimizasyonu ve kontrol çalışmaları Matlab/Simulink'te gerçekleştirilmiştir. AHA tabanlı PD denetleyici (AHA-PD) sistemin geçiş cevabında en düşük maksimum aşmaya ve en hızlı oturma süresine sahiptir. Bu bulgulara göre AHA-PD rüzgâr türbini çıkış gücünün nominal seviyesinin takibi için kanat hatve açısının kontrolünde daha başarılı sonuçlar üretmiştir.

Optimal Control of Blade Pitch Angle of a Wind Turbine with AHA Based PID Type Controllers

Keywords

Wind Turbine,
PID Type Controllers,
Blade Pitch Angle,
Optimal Control.

Abstract: In this study, the blade pitch angle of a wind turbine was tried to be controlled in the presence of time-varying wind speed. Thus, it is aimed to maintain the output power of the wind turbine system at its nominal output power and to protect the system from potential damages. For this purpose, PD (proportional-derivative), PI (proportional-integral) and PID (proportional-derivative-integral) controller structures were used. The parameters of the controllers are optimized with Artificial Hummingbird Algorithm (AHA), which is a brand-new metaheuristic optimization algorithm in the literature. 30 independent runs were performed for the optimization process and the statistical data of these runs were evaluated. Modeling, optimization, and control studies of the wind turbine were carried out in Matlab/Simulink. The AHA-based PD controller (AHA-PD) has the lowest maximum overshoot and the fastest settling time in the transient response of the system. According to these results, the AHA-PD has produced better results in controlling the blade pitch angle for tracking the nominal level of wind turbine output power.

*İlgili Yazar email: selimsoylu@aksaray.edu.tr

1. Giriş

Yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi günden güne artmaktadır. Bu kaynaklar arasında öne çıkan bir enerji türü de rüzgâr enerjisidir. Rüzgâr enerjisi, atmosfere salınan CO₂ emisyonunda sebep olduğu azalmalar da göz önünde bulundurulduğunda oldukça çevre dostu bir enerji kaynağıdır. Geçmişte ilk yatırım maliyetlerindeki yüksekliğe rağmen, hem gelişen teknolojiyle bu maliyetlerin azalmış olması hem de üretimi sonrasında hammaddeye ihtiyaç duymaması sebebiyle rüzgâr türbinleri elektrik enerjisi üretiminde öne çıkmaktadır [1,2].

Rüzgâr türbinleri hızlarına göre sabit hızlı ve değişken hızlı olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Değişken hızlı rüzgâr türbinleri şebekeye doğrudan bağlanabilme, enerji verimliliğinin sabit hızlılara göre daha yüksek olması gibi avantajlara sahiptir [3]. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde rüzgâr hızı da değişken olduğu için kanat hatve açısının kontrol edilmesi gerekmektedir. Kanat hatve açısının kontrolündeki amaç rüzgâr hızı nominal rüzgâr hızının altında olduğu bölgelerde çıkış gücünün optimize edilmesi için maksimum güç noktası takibi (MPPT) yapmak, nominal hıza ulaştığı ve bu hızı aştığı durumlarda ise rotor gücünü tasarım limitlerinin izin verdiği sınırlarda tutmaktır [4,5].

Kanat hatve açısının kontrolü amacıyla literatürde birçok çalışma yapılmıştır. Klasik oransal-integral (PI) denetleyici [4-8], oransal-türevsel-integral (PID) denetleyici [7,9], bulanık mantık denetleyici [10,11], bulanık mantık tabanlı PI-PID tipi hibrit denetleyiciler [6,12] ve doğrusal karesel regülatör (LQR) [13] denetleyici bunlardan bazılarıdır. Bunların yanında son yıllarda rüzgâr türbinlerinde kanat hatve açısı kontrolü amacıyla çeşitli metasezgisel optimizasyon teknikleri de kullanılmaktadır. Genetik algoritma [7,14,15] ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması [16,17] başta olmak üzere birçok metasezgisel algoritma yukarıda bahsedilen denetleyici yapılarının performanslarını artırmak amacıyla kullanılmıştır. Klasik tekniklere nazaran sahip oldukları potansiyel sebebiyle de kullanımları günden güne artmaktadır [18]. Önemle belirtmek gerekir ki optimizasyon algoritmaları stokastik yapıya sahiptir ve her yürütmede aynı sonuçlar elde edilememektedir. Yukarıda bahsi geçen çalışmalarda ve literatürdeki diğer birçok çalışmada metasezgisel optimizasyon algoritmaları optimal denetleyici parametrelerini bulmak için ya bir defa yürütülmüş ya da kaç defa yürütüldüğü belirtilmemiştir. Bir algoritmanın optimal parametre tahmininde etkinliği ve verimliliğinin test edilmesi açısından ortalama 30 kez yürütülmesi ve bu bağımsız yürütmelere ait istatistiksel verilerin toplanıp değerlendirilmesi gerekmektedir [19-21].

Bu çalışmada, kanat hatve açısının kontrolü amacıyla PD, PI ve PID denetleyici yapıları önerilmiştir. Denetleyicilere ait ilgili parametreler literatüre 2022 yılında kazandırılmış, oldukça yeni bir metasezgisel algoritma olan yapay sinek kuşu algoritması (Artificial Hummingbird Algorithm-AHA) ile optimize edilmiştir. Yukarıda bahsedilen çalışmalar da göz önünde bulundurularak optimizasyon için 30 bağımsız yürütme gerçekleştirilmiş ve bu yürütmelere ait istatistiksel veriler kaydedilmiştir. Böylece hem sonuçların güvenilirliği sağlanmaya çalışılmış hem de AHA'nın her üç denetleyici yapısına ait parametreleri optimize etmedeki etkinliği doğru bir şekilde incelenmeye çalışılmıştır.

2. Materyal ve Metot

2.1. Rüzgâr türbini

Aerodinamik teorileri göz önünde bulundurularak bir rüzgâr türbini tarafından elde edilen mekanik güç Denklem 1 ile tanımlanmaktadır [22]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

Burada ρ , A ve v sırasıyla hava yoğunluğu (kg/m^3), rüzgâr türbini kanatlarının süpürdüğü alan (m^2) ve rüzgâr hızıdır (m/s). $C_p(\lambda, \beta)$, deneysel olarak belirlenen ve genellikle doğrusal olmayan rüzgâr türbini güç katsayısıdır. Kanat uç-hız oranı λ ile kanat hatve açısı β 'nin bir fonksiyonu olarak Denklem 2'deki gibi elde edilebilen güç katsayısı C_p için maksimum değer Betz limitinin belirlediği sınır olan %59'u geçemez [23].

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

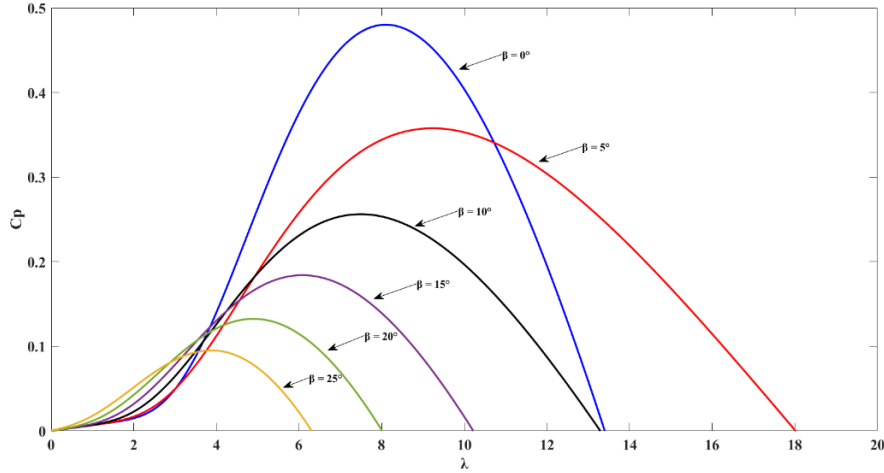
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} + \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3)$$

Kanat uç-hız oranı λ , kanat açılal hızının rüzgâr hızına oranıdır ve Denklem 4'teki gibi verilmiştir:

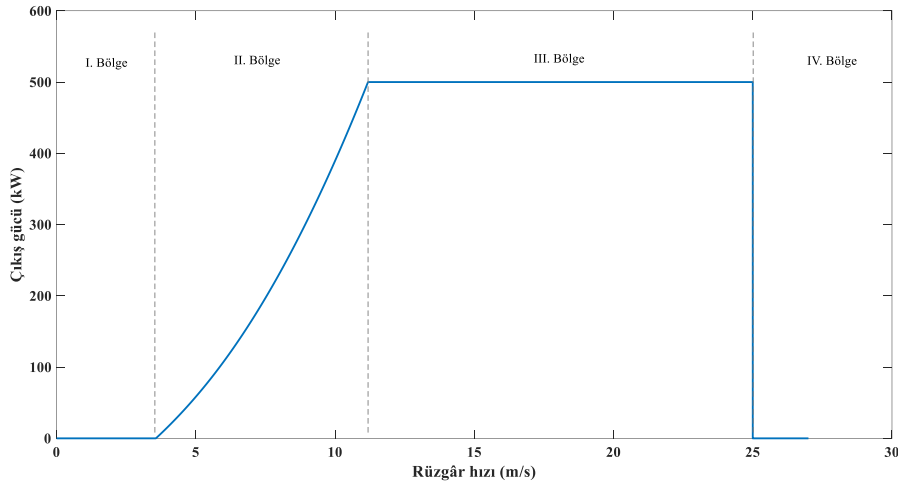
$$\lambda = \frac{w_t R}{v} \quad (4)$$

Burada w_t açılal hız (rad/s), R ise kanat yarıçapıdır (m). Şekil 1' de farklı β değerleri için güç katsayısı ve kanat uç-hız oranı değişim eğrileri verilmiştir.

Rüzgâr hızının ve kanat hatve açısının değişmesi mekanik çıkış gücünde değişikliğe sebep olmaktadır. Şekil 2’de örnek olarak nominal gücü 500 kW olan bir rüzgâr türbininin değişen rüzgâr hızına karşılık çalışma bölgeleri gösterilmektedir. I. Bölgede rüzgâr hızı türbini devreye alma hızından düşük olduğu için burada çıkışta güç yoktur. II. Bölge, türbinin devreye girdiği nokta ile nominal güce ulaştığı nokta arasındadır. Bu bölgede hızın artması gücün de artmasına neden olur ve MPPT gereklidir. MPPT, güç katsayısını maksimum değerde tutabilecek güç elektroniği devreleriyle gerçekleştirilir. III. Bölge ise rüzgâr hızlarının nominal gücü veren rüzgâr hızlarından yüksek olduğu nokta ile türbinin güvenlik sebebiyle kesime gittiği nokta arasındaki bölgedir. Bu bölgede tasarım sınırları dahilinde gücün nominal güce tutulması için kontrol sistemleri gerekmektedir. Son bölge olan IV. Bölge’de ise rüzgâr türbini güvenlik nedeniyle kapatılmaktadır [24,25].



Şekil 1. Farklı β değerleri için güç katsayısı C_p .



Şekil 2. 500 kW nominal güce sahip bir rüzgâr türbininin çalışma bölgeleri.

2.2. Eyleyici modeli

Türbin kanatlarının ayarlanan eksen boyunca hareketi için elektriksel ya da hidrolik eyleyici sistemine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada kanatların ve kanat hatve açılarının dinamik davranışının doğrusal olduğu kabul edilerek pozisyon transfer fonksiyonu Denklem 5’te verilen bir dc servo motor eyleyici olarak kullanılmıştır [6].

$$G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)} \quad (5)$$

2.3. PD, PI ve PID denetleyici yapıları

Literatürde yaygın olarak kullanılan klasik PD, PI ve PID denetleyiciler kontrol edilmek istenen proses çıkışı ile set noktası arasındaki hatayı düzelterek sistemi istenilen koşullarda tutmaya çalışırlar. PD, PI ve PID denetleyici yapılarının kontrol fonksiyonları sırasıyla Denklem 6-8’de verilmiştir [26].

$$u_{PD}(t) = K_P e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

$$u_{PI}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (7)$$

$$u_{PID}(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

Bu denklemlerde $u(t)$ ilgili denetleyicinin kontrol çıkışı, $e(t)$ t anındaki arzu edilen giriş (set noktası) ile proses çıkışı arasındaki hata, K_P oransal kazanç, K_I integral kazancı ve K_D türevsel kazanç parametreleridir. Bahsi geçen her bir kazanç parametresi; yükselme süresi, yerleşme süresi, aşma, kararlılık ve kararlı hal hatası gibi kapalı döngü sistem cevabına ait kriterleri bireysel olarak etkilemektedir. Bu etkiler Tablo 1’de sunulmuştur.

Tablo 1. Kontrol terimlerinin sistem cevabı üzerine bireysel etkileri [27].

| Kapalı döngü cevabı | Yükselme süresi | Aşma | Yerleşme süresi | Kararlı hal hatası | Kararlılık |
|---------------------|-----------------|--------|-----------------|--------------------|------------|
| Artan K_P ile | Azalır | Artar | Az değişir | Azalır | Azalır |
| Artan K_I ile | Azalır | Artar | Artar | Yok olur | Azalır |
| Artan K_D ile | Az değişir | Azalır | Azalır | Az değişir | Artar |

2.3. Yapay sinek kuşu algoritması (AHA)

Zhao ve arkadaşları [28] tarafından yapılan çalışmayla literatüre kazandırılan AHA, doğada sinek kuşlarının uçuş becerilerini ve zeki yiyecek arama stratejilerini taklit eden metasezgisel bir optimizasyon tekniğidir. Bu oldukça yeni algoritmanın biyolojik altyapısı mevcut diğer algoritmalarından oldukça farklıdır. AHA’nın güdümlü yiyecek arama, bölgesel yiyecek arama ve göç yiyecek arama olmak üzere üç çeşit yiyecek arama stratejisi vardır. Bu yiyecek arama davranışları boyunca, arama sürecini etkin bir şekilde yürütmek için eksenel, çapraz ve çok yönlü uçuş olmak üzere üç farklı uçuş becerisi kullanılır. AHA’nın bir diğer önemli farkı keşif ve sömürdür. Güdümlü arama stratejisinde keşif erken aşamalarda yapılırken, sömürü sonraki aşamalarda gerçekleştirilir. Öte yandan, bölgesel yiyecek arama stratejisi keşifleri geliştirir ve göç yiyecek arama, sömürüyü artırır. AHA’nın diğer ayrımı, hafıza mekanizması ile ilgilidir. Sinek kuşlarının besin kaynakları için bellek mekanizmasını modellemek için bir ziyaret tablosu oluşturulmuştur. Her sinek kuşu, diğer sinek kuşlarının ilgili besin kaynağını en son ne zaman ziyaret ettiğini öğrenebilir ve ziyaret tablosu aracılığıyla istediği besin kaynağını seçebilir. AHA’nın temel aşamalarına bağlı olarak matematiksel model aşağıda verilmiştir [19,28].

➤ Başlangıç

AHA, n besin kaynağına aşağıdaki gibi yerleştirilen n sinekkuşu popülasyonu ile rastgele başlar:

$$x_i = L + r(U - L) \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

Burada x_i , verilen bir problemin çözümü olan i . besin kaynağının konumunu temsil eder, L ve U , d -boyutlu bir problem için sırasıyla alt ve üst sınırlardır, r , $[0, 1]$ ’de rastgele bir vektördür. Gıda kaynaklarının ziyaret tablosu şu şekilde başlatılır.

$$VT_{i,j} = \begin{cases} 0, & i \neq j \\ null, & i = j \end{cases} \quad i = 1, \dots, n \quad j = 1, \dots, n \quad (10)$$

Burada $i \neq j$ için, $VT_{i,j} = 0$ j . besin kaynağının mevcut iterasyonda i . sinekkuşu tarafından henüz ziyaret edildiğini gösterir; $i = j$ için $VT_{i,j} = null$ bir sinek kuşunun kendi besin kaynağında yiyecek aldığını gösterir.

➤ Güdümlü yiyecek arama

Üç uçuş becerisinin yardımıyla, mevcut tüm kaynaklardan hedef besin kaynağı seçilir ve bir aday besin kaynağı elde edilir. Güdümlü yiyecek arama davranışını simüle eden matematiksel denklem ve aday bir besin kaynağının elde edilmesi aşağıdaki gibidir:

$$v_i(t+1) = x_{i,target}(t) + b \cdot D(x_i(t) - x_{i,target}(t)), \quad b \sim N(0,1) \quad (11)$$

Burada $x_{i,target}(t)$ hedef gıda kaynağının konumudur, D eksenel, çapraz veya çok yönlü uçuş anlamına gelir, b yönlendirilmiş bir faktördür ve $x_i(t)$ i . gıda kaynağının t anındaki konumudur. i . besin kaynağının konum güncellemesi şu şekilde ifade edilir:

$$x_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t), & f(x_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1), & f(x_i(t)) > f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad (12)$$

Burada $f(v_i(t+1))$ ve $f(x_i(t))$ sırasıyla $v_i(t+1)$ ve $x_i(t)$ için uygunluk fonksiyonu değeridir.

➤ Bölgesel yiyecek arama

AHA' da bir sinek kuşunun, hedef kaynak ziyaretinden sonra mevcut diğer besin kaynaklarını ziyaret etmek yerine kendi bölgesinde yeni bir besin kaynağı araması mümkündür. Böylece bir sinekkuşu, sömürü sürecini yerel bölgesinde gerçekleştirir. Bölgesel yiyecek arama stratejisinde yerel arama ve bir aday gıda kaynağının türetilmesi aşağıdaki denklemle temsil edilir:

$$v_i(t+1) = x_i(t) + c \cdot D \cdot x_i(t), \quad c \sim N(0,1) \quad (13)$$

Burada c , ortalama = 0 ve standart sapma = 1 olan $N(0,1)$ normal dağılıma bağlı bölgesel bir faktördür.

➤ Göç yiyecek arama

Bir bölgedeki besin kaynakları sıklıkla ziyaret edildiğinde, muhtemelen yiyecek sıkıntısı yaşanır. Bu gibi durumlarda, bir sinek kuşu beslenmek için daha uzak bir besin kaynağına göç etme eğilimindedir. Denklem 14, en kötü nektar doldurma hızına sahip kaynaktan rastgele üretilen yeni bir kaynağına göç eden bir sinek kuşunun göç aramasının matematiksel denklemini vermektedir:

$$x_w(t+1) = L + r(U - L) \quad (14)$$

Burada x_w popülasyondaki en kötü yeniden nektar doldurma oranına sahip besin kaynağını temsil eder, r $[0, 1]$ aralığında rastgele bir vektördür ve L ve U ise sırasıyla alt ve üst sınırlardır.

2.4. Denetleyici tasarımı ve optimizasyon süreci

Çalışma bölgeleri göz önünde bulundurularak hem rüzgârdan maksimum gücü elde etmek (II. Bölge) hem de nominal güçte çalışmasını sağlamak (III. Bölge) amacıyla kanat hatve açısı β 'nin kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla PD, PI ve PID denetleyici yapıları kullanılmış; PD denetleyiciye ait K_P ve K_D parametreleri, PI denetleyiciye ait K_P ve K_I parametreleri ve PID denetleyiciye ait K_P , K_I ve K_D parametreleri optimize edilerek parametre arama uzayı daha iyi keşfedilmeye ve böylece en uygun denetleyici katsayıları elde edilmeye çalışılmıştır. Bu optimizasyon işlemi literatürde oldukça yeni bir metasezgisel optimizasyon algoritması olan AHA ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3'te optimize edilmiş PD, PI ve PID denetleyicileriyle rüzgâr türbininin kanat hatve açısı kontrolünü içeren sisteme ait blok diyagram gösterilmektedir. Bahsi geçen denetleyicileri ayarlamak için AHA kullanılırken, nominal çıkış gücü ile ölçülen çıkış gücü arasındaki hata kullanılarak bir uygunluk fonksiyonu hesaplanmaktadır. Ardından, AHA' ya bağlı olarak denetleyici parametreleri değiştirilmektedir.

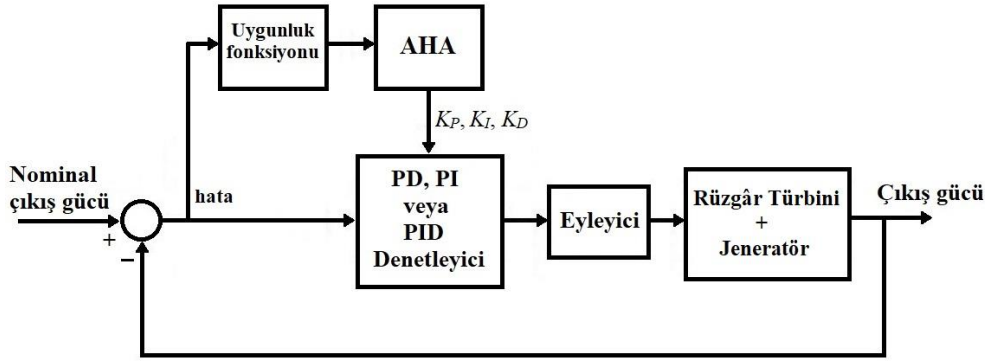
Optimizasyon süreci için uygunluk fonksiyonunun seçimi önemli bir adımdır. Bu çalışmada, nominal çıkış gücü ile ölçülen çıkış gücü arasındaki hatayı temel alarak hem Denklem 15'te tanımlanan integral mutlak hata (integral absolute error-IAE) hem de Denklem 16'da tanımlanan ortalama karesel hata (mean squared error-MSE) uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Rüzgâr türbini ile ilgili kontrol ve optimizasyon çalışmalarında literatürde kullanılmış ve iyi sonuçlar üretmiş olması, uygunluk fonksiyonu olarak IAE seçilmesinde önemli bir etken olmuştur [8,29,30]. Her ne kadar MSE, rüzgâr türbini ile ilgili kontrol ve optimizasyon çalışmalarında çok sık kullanılsa da benzetim süresi boyunca denetlenen çıkış gücünün nominal çıkış gücüne ne kadar yaklaştığını, ortalama değer etrafında ne şekilde bir dağılım olduğunu görme açısından kullanılması önemlidir.

$$IAE = \int_0^t |e(\tau)| d\tau \quad (15)$$

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e(k))^2 \quad (16)$$

Optimizasyon sürecinde AHA için seçilen kontrol parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Optimizasyon sonuçlarının güvenilir kabul edilebilmesi için istatistiksel olarak tekdüze bir dağılım göstermesi gerekmektedir. Bu yaklaşımla, literatüre uygun olarak optimizasyon işlemi her bir denetleyici parametresinin optimizasyonunda (PD, PI ve PID)

30 kez tekrarlanmıştır. Her tekrara ait sonuçlar kaydedilmiş ve ilgili uygunluk fonksiyonunun en iyi, en kötü, ortalama ve medyan değerleri ile standart sapmaları hesaplanmıştır.



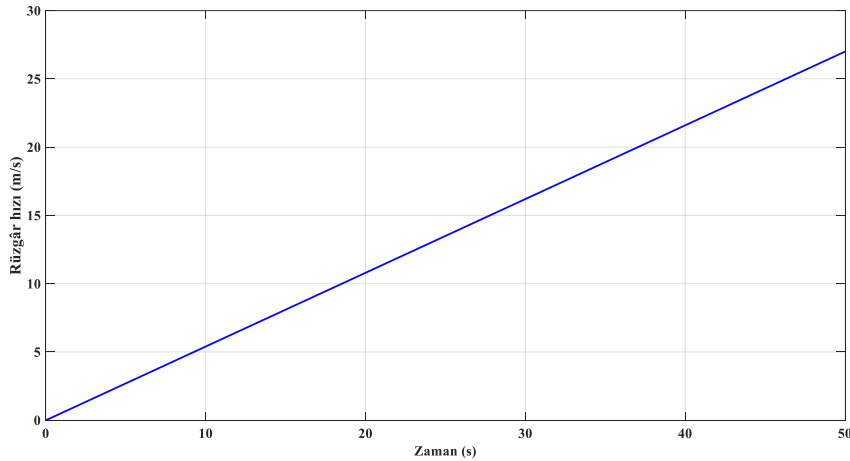
Şekil 3. Kanat hatve açısı kontrolü blok diyagramı.

Tablo 2. AHA ile optimizasyona ait kontrol parametreleri.

| | |
|----------------------------|-----------|
| Popülasyon sayısı | 20 |
| Maksimum iterasyon sayısı | 20 |
| Yürütmelerin tekrar sayısı | 30 |
| Arama aralıkları | [-10 +10] |

3. Bulgular

Optimal kanat hatve açısı kontrolü için Şekil 3'te gösterilen sistem, ilgili eşitlikler kullanılarak Matlab/Simulink ile oluşturulmuştur. AHA ile optimize edilmiş PD denetleyici (AHA-PD), AHA ile optimize edilmiş PI denetleyici (AHA-PI) ve AHA ile optimize edilmiş PID denetleyici (AHA-PID) Şekil 3'te gösterildiği gibi kullanılarak benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemi için kanat hatve açısı kontrolünde ayrı ayrı kullanılmış ve performansları incelenmeye çalışılmıştır. Benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemine ait parametreler Tablo 3'te listelenmektedir. Bununla birlikte rüzgâr hızı, sistem modeline uygulanan bir rampa fonksiyonu olarak verilmiş ve Şekil 4'te gösterilmiştir.

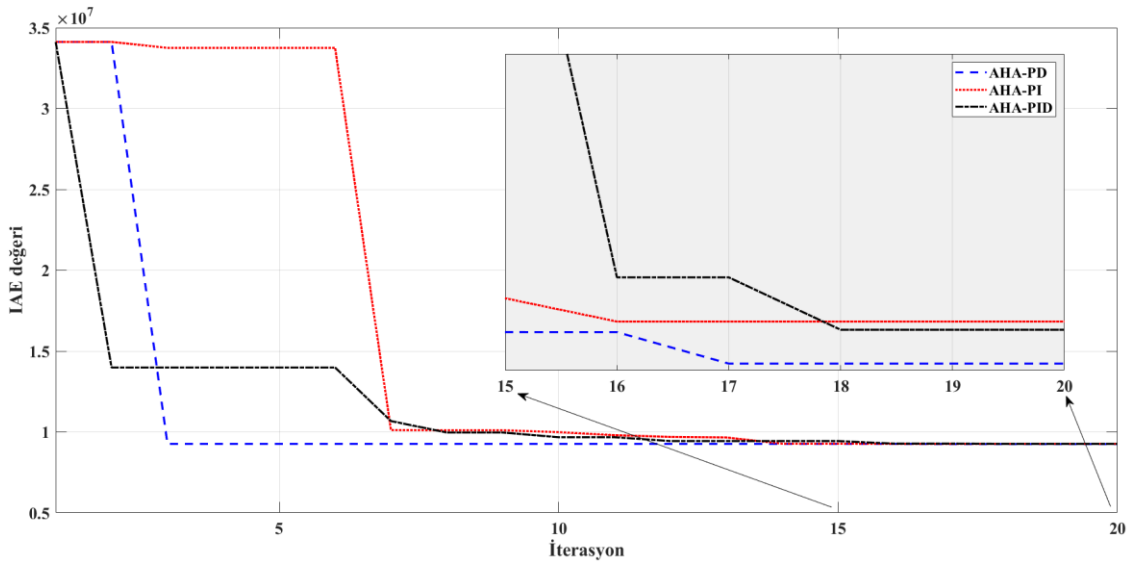


Şekil 4. Rüzgâr hızı-zaman grafiği.

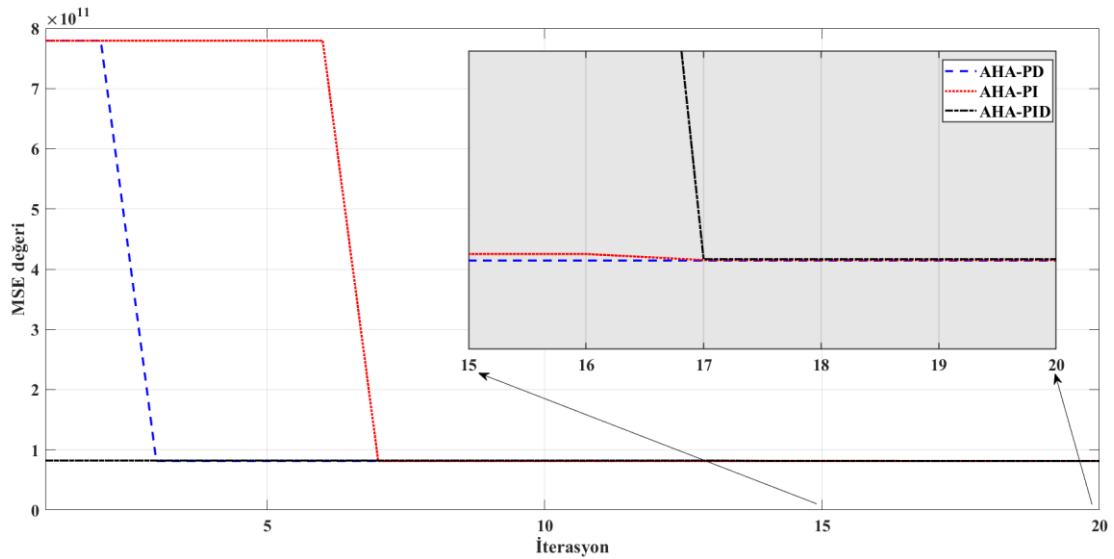
AHA-PD, AHA-PI ve AHA-PID denetleyicilerine ait IAE ve MSE kriterleri bazında optimizasyonlar sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla verilmiştir. Ayrıca, 30 bağımsız yürütme ile optimize edilmiş her üç denetleyiciye ait elde edilen en iyi, en kötü ve ortalama uygunluk fonksiyonu değerleri ile standart sapmaları ve denetleyici parametreleri ise Tablo 4'te sunulmaktadır. Şekil 5'ten ve Tablo 4'ten her üç denetleyici içerisinde AHA-PD'nin 20 iterasyon boyunca en düşük IAE değerine ulaştığı açıkça görülmektedir. Öte yandan, verilerin veri setine yakınlığını standart sapma ile açıklamaktadır. Standart sapmanın küçük olması ilgili denetleyicinin optimizasyon sürecindeki kararlılığını göstermektedir. AHA-PID'nin en düşük standart sapma değeri 0.1727×10^6 ile 30 bağımsız yürütme süresince daha gürbüz ve güvenilir olduğu söylenebilir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçildiğinde ise her üç denetleyici de en iyi MSE değeri açısından birbirine yakın sonuçlar üretmiştir. Bu durum hem Şekil 6'da hem de Tablo 4'te gösterilmiştir. Bununla birlikte standart sapmanın en düşük değeri 3.5490×10^8 ile AHA-PID denetleyicisi için elde edilmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçildiğinde, AHA-PID 30 bağımsız yürütme süresince birbirine daha yakın sonuçlar üretmiştir ve daha gürbüzdür.

Tablo 3. Benzetimi gerçekleştirilen rüzgâr türbini sistemine ait parametreler [6,31].

| Parametre | Değer |
|----------------------------|-----------------------|
| Nominal çıkış gücü | 500 kW |
| Çalışma modu | Şebekeye bağlı |
| Devreye girme rüzgâr hızı | 3 m/s |
| Nominal rüzgâr hızı | 12 m/s |
| Devreden çıkma rüzgâr hızı | 25 m/s |
| Rotor çapı | 48 m |
| Süpürme alanı | 1810 m ² |
| Kanat sayısı | 3 |
| Nominal rotor hızı | 30 rpm |
| Rotor hız aralığı | 10-30 rpm |
| Dişli kutusu oranı | 1:50 |
| Jeneratör adedi | 2 |
| Jeneratör tipi | Asenkron sincap kafes |
| Jeneratör nominal çıkış | 250 kW |
| Jeneratör nominal devir | 1500 rpm |
| Jeneratör gerilimi | 690 V |



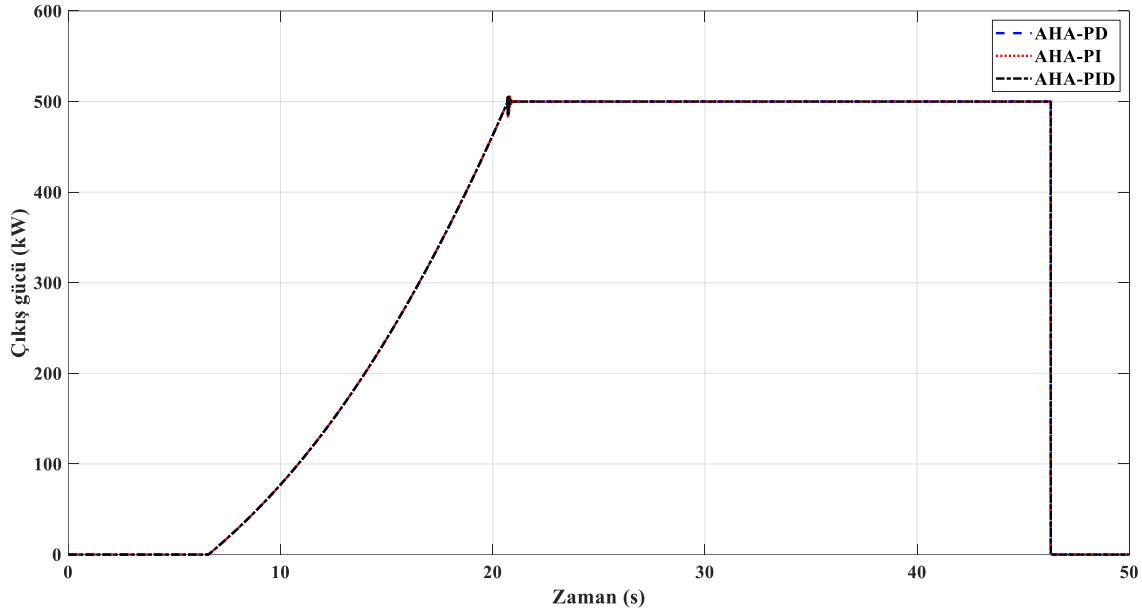
Şekil 5. IAE için AHA ile optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri.



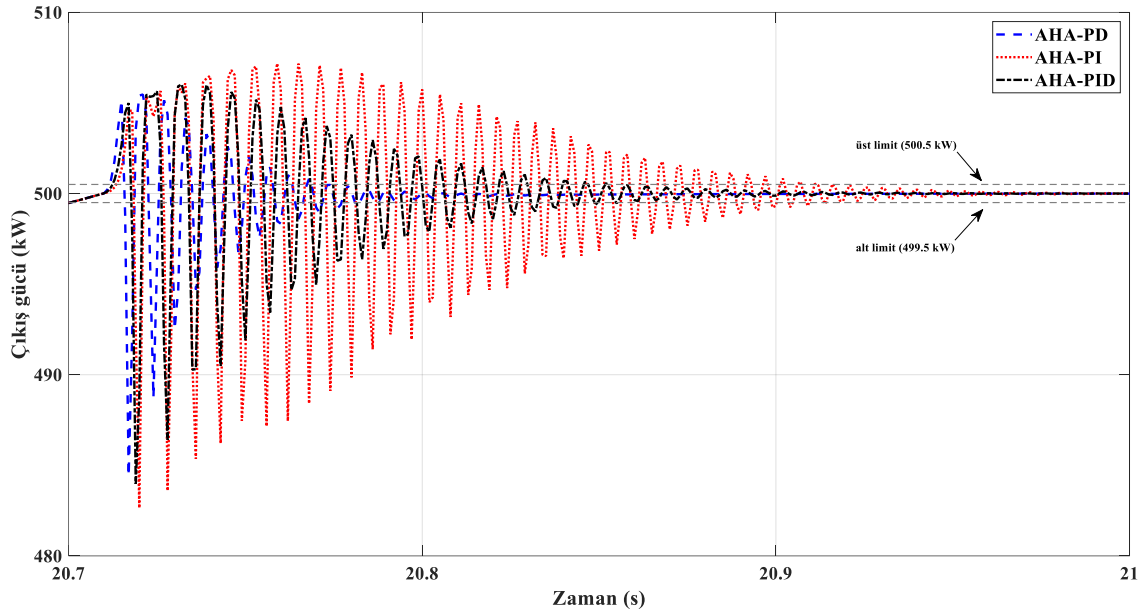
Şekil 6. MSE için AHA ile optimizasyon sonucunda elde edilen yakınsama grafikleri.

IAE uygunluk fonksiyonu kullanılarak optimize edilen her üç denetleyiciye ait benzetim sonuçlarına bu kısımda yer verilmiştir. Şekil 7'de zamana göre sistemin çıkış gücü eğrileri gösterilmektedir. Şekil 8'de ise bu eğrilerin 20.7-21 saniye aralığında yakınlaştırılmış hali gösterilmektedir. Böylece her üç denetleyici varlığında sistemlerin

göstermiş olduğu geçiş cevaplarının daha net gösterilmesi ve kararlı hal cevabına geçişteki performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Her üç denetleyici yapısı ile de sistem nominal rüzgâr hızına ulaştığında nominal güç olan 500 kW seviyelerine erişmiş fakat geçiş cevabında milisaniyeler mertebesinde osilasyonlar gerçekleşmiştir. Sistemin kararlı hal hatası için %0.1 hata referans olarak kabul edilmiş ve böylece 500.5 kW üst limit, 499.5 kW ise alt limit olarak belirlenmiştir. Şekil 8'den de görülmektedir ki, sistem kararlı hal cevabına sırasıyla AHA-PD ile 0.063 saniyede, AHA-PI ile 0.206 saniyede, AHA-PID ile 0.145 saniyede ulaşmaktadır. Her üç denetleyici yapısı ile de sistemin nominal güce hızlı bir şekilde ulaşmaktadır. Fakat AHA-PD ile sistemin kararlı hal cevabına daha çabuk eriştiği, osilasyonların daha hızlı bastırıldığı açıkça görülmektedir. Bunun yanında sistemde oluşan maksimum aşma AHA-PD ile %1.09, AHA-PI ile %1.43 ve AHA-PID ile %1.20 olarak gerçekleşmiştir. Sonuç olarak her üç denetleyici yapısı ile de maksimum aşmanın makul düzeyde tutulduğu, uygunluk fonksiyonu olarak IAE seçildiğinde AHA-PD'nin daha başarılı bir sonuç ürettiği söylenebilir.



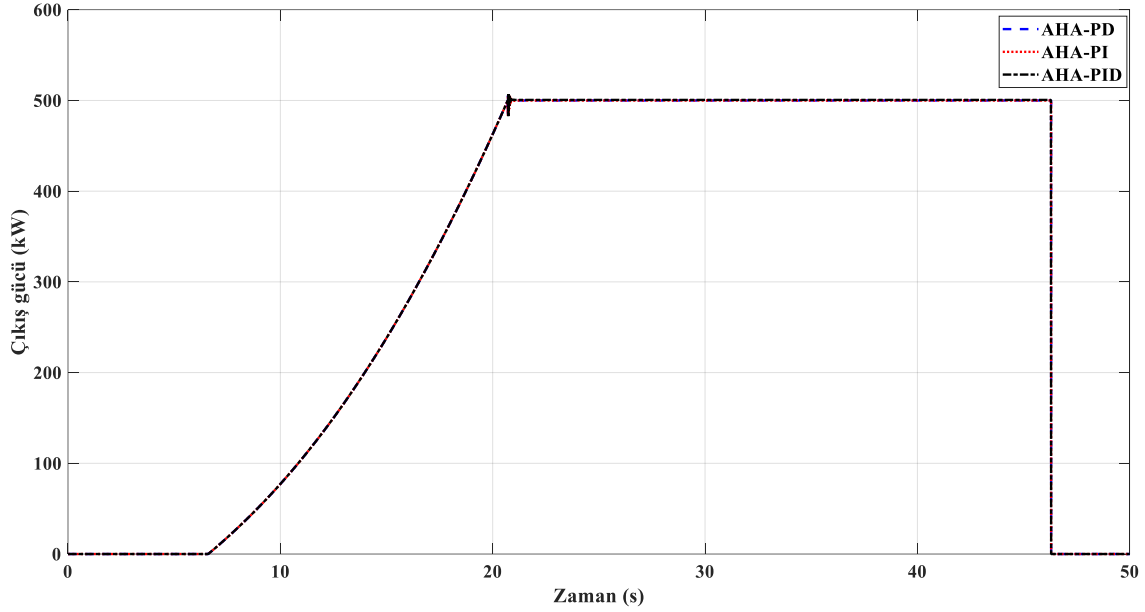
Şekil 7. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-zaman eğrileri grafiği (IAE kullanımında).



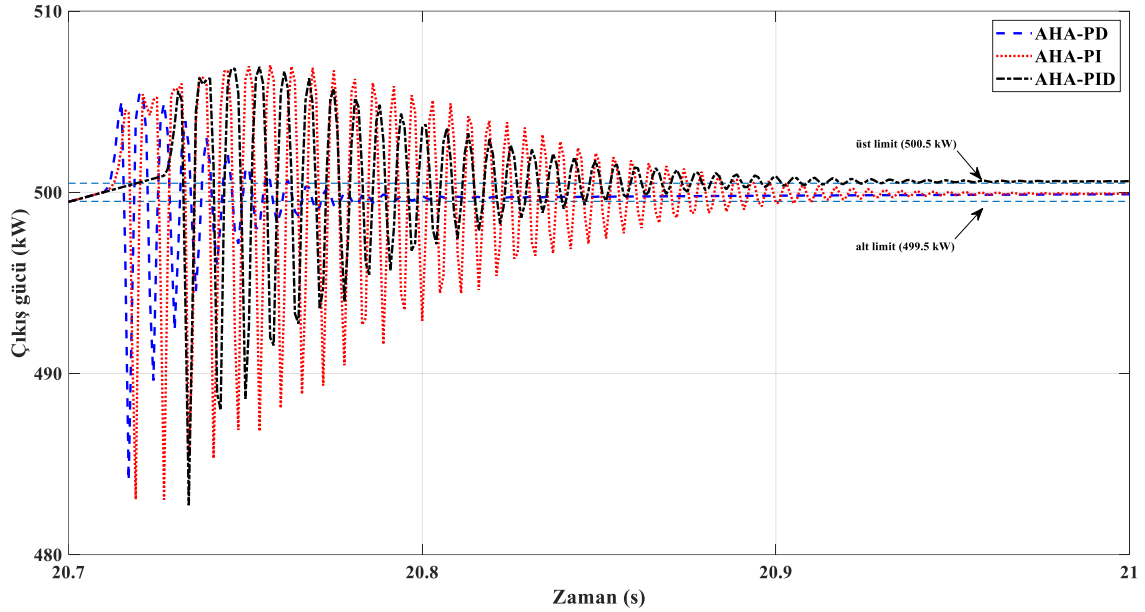
Şekil 8. Çıkış gücü-zaman eğrilerinin geçiş cevabında yakınlaştırılmış grafikleri (IAE kullanımında).

MSE uygunluk fonksiyonu kullanılarak optimize edilen denetleyicilerin benzetim sonuçlarına ise bu kısımda yer verilmiştir. Sistemin zamana göre çıkış gücü eğrileri Şekil 9'da verilmektedir. Şekil 10'da ise yine bu eğrilerin 20.7-21 saniye aralığında yakınlaştırılmış hali gösterilmektedir. Kararlı hal hatası için %0.1 hata referans kabul edildiğinde sistem kararlı hal cevabına AHA-PD ile 0.077 saniyede, AHA-PI ile de 0.201 saniyede erişmektedir. Bununla birlikte Şekil 10'da da gösterildiği üzere AHA-PID ile sistemin hata referansının üst sınırı olan 500.5 kW civarında salınımlarına devam ettiği ve sistemin nihai cevabında kararlı hal hatası olduğu gözlemlenmiştir. Sistemde oluşan maksimum aşma ise sırasıyla AHA-PD ile %1.08, AHA-PI ile %1.40 ve AHA-PID ile %1.38 olarak

gerçekleşmiştir. Uygunluk fonksiyonu olarak MSE seçilmesiyle optimize edilen denetleyiciler arasında AHA-PD'nin hem elde edilen maksimum aşma değerleri hem de geçiş cevapları açısından AHA-PI ve AHA-PID'ye göre daha başarılı olduğunu söylemek mümkündür.



Şekil 9. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-zaman eğrileri grafiği (MSE kullanımında).



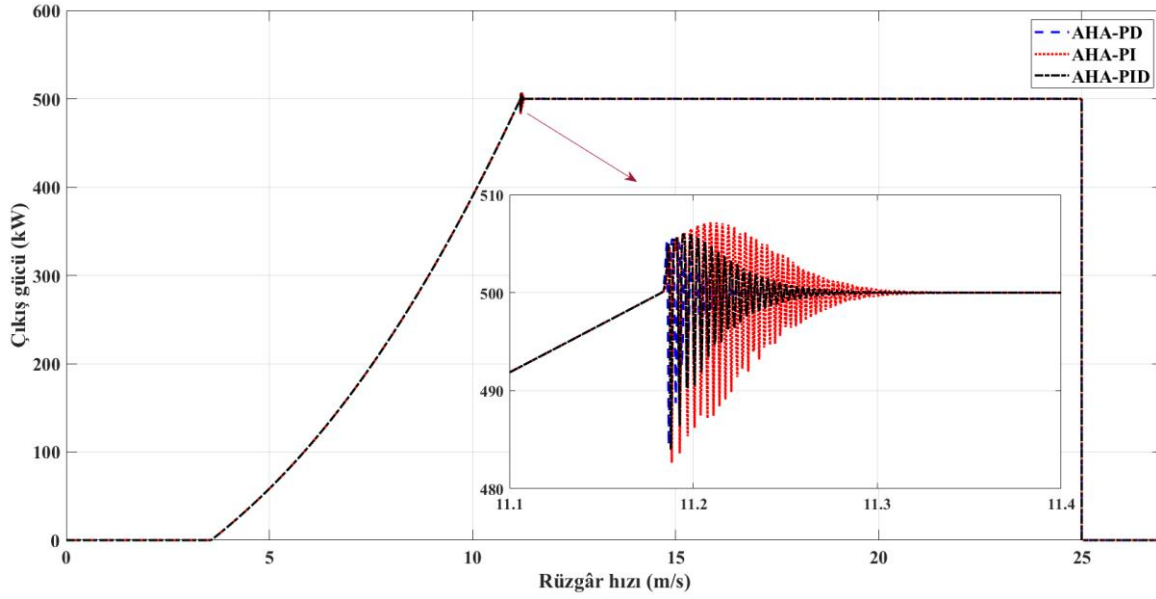
Şekil 10. Çıkış gücü-zaman eğrilerinin geçiş cevabında yakınlaştırılmış grafikleri (MSE kullanımında)

Tablo 4. Elde edilen uygunluk fonksiyonu değerleri ve denetleyici parametreleri.

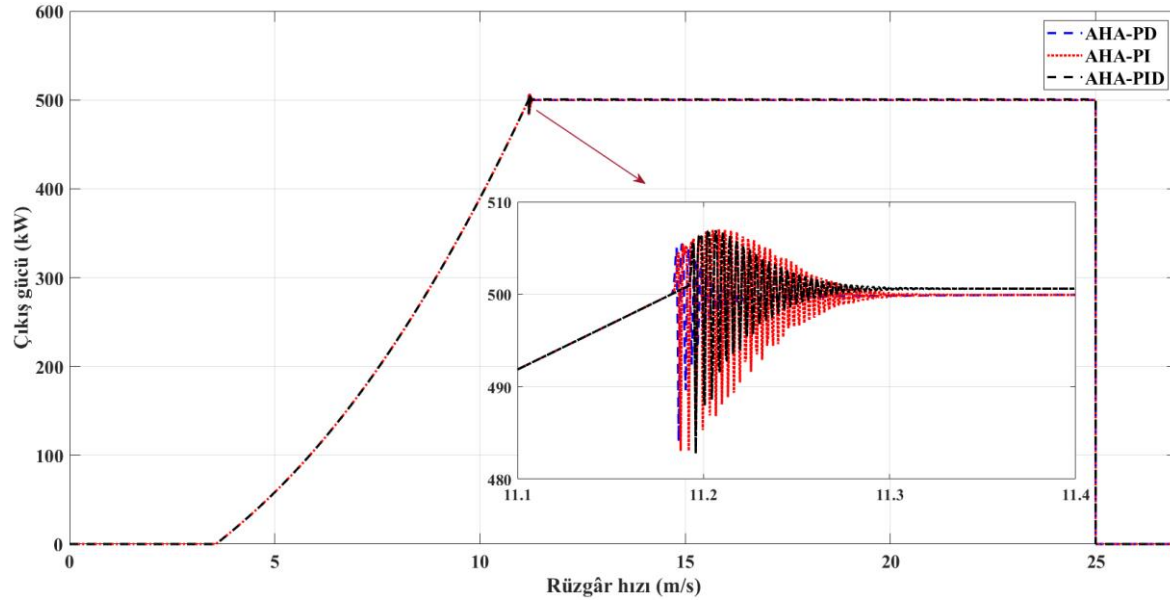
| | IAE değerleri | | | | Elde edilen denetleyici parametreleri | | |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| | En İyi | En Kötü | Ortalama | Standart Sapma | K_P | K_I | K_D |
| AHA-PD | 9.2621×10^6 | 34.1220×10^6 | 13.4254×10^6 | 9.4147×10^6 | -1.499358 | | -0.080500 |
| AHA-PI | 9.2627×10^6 | 34.1220×10^6 | 17.7681×10^6 | 11.7699×10^6 | -8.968615 | 0.000003 | |
| AHA-PID | 9.2624×10^6 | 9.8518×10^6 | 9.5065×10^6 | 0.1727×10^6 | -4.280695 | 0.000001 | -0.027245 |
| | MSE değerleri | | | | Elde edilen denetleyici parametreleri | | |
| | En İyi | En Kötü | Ortalama | Standart Sapma | K_P | K_I | K_D |
| AHA-PD | 8.1465×10^{10} | 7.7936×10^{11} | 1.5131×10^{11} | 2.1293×10^{11} | -0.509519 | | -0.090396 |
| AHA-PI | 8.1465×10^{10} | 7.7936×10^{11} | 2.9107×10^{11} | 3.2513×10^{11} | -9.247371 | 0.000092 | |
| AHA-PID | 8.1465×10^{10} | 8.3120×10^{10} | 8.1674×10^{10} | 3.5490×10^8 | -4.545807 | -0.000371 | -0.024764 |

Şekil 11 ve Şekil 12'de sırasıyla IAE ve MSE kriterleri seçilerek optimize edilen denetleyiciler için rüzgâr hızının değişimine göre çıkış gücü eğrileri gösterilmektedir. Her iki şekilden de görüldüğü gibi AHA-PD ile rüzgâr hızı değişimine göre kanat hatve açısı daha hızlı bir şekilde olması gereken değeri takip etmekte ve böylece sistem

nominal güce daha çabuk oturmaktadır. Denetleyicilerin optimizasyon sürecinde uygunluk fonksiyonu olarak IAE ya da MSE seçilmesi, kanat hatve açısını kontrol ederek nominal güç takibini gerçekleştirme işlevi açısından dikkate değer bir farklılık oluşturmamaktadır.



Şekil 11. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-rüzgâr hızı eğrileri (IAE kullanımında).



Şekil 12. Her üç denetleyiciye ait sistemin çıkış gücü-rüzgâr hızı eğrileri (MSE kullanımında).

4. Tartışma ve Sonuç

Rüzgâr türbinlerinde üretilen gücün kontrol edilmesi açısından kanat hatve açısının ayarlanması önemli bir mekanizmadır. Bu çalışmada kanat hatve açısının ayarlanması amacıyla PD, PI ve PID denetleyici yapıları önerilmiştir. Bu denetleyicilere ait parametreler literatürde oldukça yeni bir algoritma olan AHA ile optimize edilmiştir. Sonuçların güvenilirliği açısından optimizasyon işlemi 30 kez tekrarlanmış ve bu tekrarlara ait veriler kaydedilmiştir. Bahsi geçen denetleyiciler arasında optimizasyon süreci açısından AHA-PID'nin daha gürbüz ve güvenilir olduğu, 30 kez tekrarlanan optimizasyon süresince birbirine daha yakın sonuçlar ürettiği açıktır. En düşük standart sapma değerinin sırasıyla IAE uygunluk fonksiyonu için 0.1727×10^6 ve MSE uygunluk fonksiyonu için 3.5490×10^8 olarak AHA-PID ile elde edilmesi bu durumu desteklemektedir. Öte yandan her iki uygunluk fonksiyonunun en iyi değerleri göz önünde bulundurulduğunda ise AHA-PD denetleyici IAE kriteri baz alınarak gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda daha başarılı sonuçlar üretmiş, MSE kriteri baz alınarak gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda ise üç denetleyici arasında bir fark görülmemiştir. Sistem %0.1'lik yerleşme süresine, IAE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile 0.063 saniyede, MSE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile 0.077 saniyede ulaşmıştır. Benzer şekilde sistemin geçiş cevabındaki maksimum aşma IAE kriteri baz

alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile %1.09, MSE kriteri baz alınarak optimize edilmiş AHA-PD ile %1.08 olarak gerçekleşmiştir. Kullanılan üç denetleyici arasından hem en düşük maksimum aşma değerlerine hem de en kısa yerleşme sürelerine sahip olması AHA-PD'nin diğer iki denetleyiciden daha başarılı olduğunu göstermektedir.

IAE ve MSE kriterleri baz alınarak 30 kez bağımsız yürütülen optimizasyon sürecinde elde edilen standart sapma değerlerine göre AHA-PD ve AHA-PI denetleyicilerden daha başarılı sonuçlar veren AHA-PID denetleyici, kanat hatve açısının kontrolünde aynı başarıyı gösterememiştir. AHA-PI ve AHA-PID denetleyici yapılarının integral kazançlarından dolayı az da olsa aşma miktarında artışa ve yerleşme süresinde gecikmeye sebep olduğu açıktır. Hem Tablo 1'de performans kriterleri açısından verilen bilgiler hem de literatürdeki PD denetleyicinin kullanıldığı birçok çalışmada daha kararlı ve geçiş cevabı açısından daha başarılı sonuçlar üretmiş olması [32-36], bu çalışmada elde edilen bulguları destekler niteliktedir. Benzetim çalışmalarına ait bulgular ışığında daha başarılı sonuçlar üreten AHA-PD'nin bulanık mantık denetleyici, kesir dereceli denetleyici gibi tekniklerle birleştirilip geliştirilmesi ve mikrodenetleyici yapıları üzerinde hayata geçirilmesi gelecekte yapılması planlanan çalışmalar arasındadır.

Kaynakça

- [1] Gültekin, U. 2019. Türkiye'de Rüzgâr Enerjisi Yatırımlarının Gelişimi. *Turkish Studies (Elektronik)*, 14(4), 2333-2348.
- [2] Şenel, M. C., Koç, E. 2015. Dünyada ve Türkiye'de rüzgâr enerjisi durumu-Genel değerlendirme. *Mühendis ve Makina*, 56(663), 46-56.
- [3] Koç, E., Güven, A. N. 2011. Değişken Hızlı Rüzgâr Türbinlerinin Modellenmesi ve Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneklerinin İncelenmesi/Modeling and Investigation of Fault Ride Through Capability of Variable Speed Wind Turbines. *EMO Bilimsel Dergi*, 1(1), 51-55.
- [4] Hwas, A., Katebi, R. 2012. Wind turbine control using PI pitch angle controller. *IFAC Proceedings Volumes*, 45(3), 241-246.
- [5] Lüy, M., Civelek, Z., Çam, E. 2017. Kalıcı miknatıslı senkron jeneratörlü rüzgâr türbinlerinde bireysel hatve açısı kontrolü ile çıkış gücü kararlılığı ve mekanik yüklerin azaltılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(5), 504-511.
- [6] Civelek, Z., Lüy, M., Çam, E., Barışçı, N. 2016. Control of pitch angle of wind turbine by fuzzy PID controller. *Intelligent Automation & Soft Computing*, 22(3), 463-471.
- [7] Karthik, R., Hari, A. S., Kumar, Y. P., Pradeep, D. J. 2020. Modelling and control design for variable speed wind turbine energy system. *International Conference on Artificial Intelligence and Signal Processing (AISP)*, January 10-12, Amaravati, India.
- [8] Sougueh, I. M., Görel, G. 2022. PI, PID ve GA-PID Kontrolör ile Rüzgâr Türbinin Kanat Hatve Açısı Kontrolü. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(2), 502-513.
- [9] Habibi, H., Nohooji, H. R., Howard, I. 2018. Adaptive PID control of wind turbines for power regulation with unknown control direction and actuator faults. *IEEE Access*, 6, 37464-37479.
- [10] Han, B., Zhou, L., Yang, F., Xiang, Z. 2016. Individual pitch controller based on fuzzy logic control for wind turbine load mitigation. *IET Renewable power generation*, 10(5), 687-693.
- [11] Van, T. L., Nguyen, T. H., Lee, D.-C. 2015. Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 30(2), 578-587.
- [12] Naik, K. A., Gupta, C. P., Fernandez, E. 2020. Design and implementation of interval type-2 fuzzy logic-PI based adaptive controller for DFIG based wind energy system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 115, 105468.
- [13] Jeon, T., Paek, I. 2021. Design and verification of the LQR controller based on fuzzy logic for large wind turbine. *Energies*, 14(1), 230.
- [14] Pehlivan, A. S., Bahceci, B., Erbatur, K. 2022. Genetically optimized pitch angle controller of a wind turbine with fuzzy logic design approach. *Energies*, 15(18), 6705.
- [15] Zheng, S.-G., Chang, C.-K., Pan, J.-S. 2020. Double fuzzy pitch controller of wind turbine designed by genetic algorithm. *International Automatic Control Conference (CACCS)*, November 4-7, Taiwan.
- [16] Chouket, M., Abdelkafi, A., Krichen, L. 2018. Wind Turbine PI Controller's Optimization Using PSO Algorithm. *15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, March 19-22, Tunisia.

- [17] Poultangari, I., Shahnazi, R., Sheikhan, M. 2012. RBF neural network based PI pitch controller for a class of 5-MW wind turbines using particle swarm optimization algorithm. *ISA Transactions*, 51(5), 641-648.
- [18] Navarrete, E. C., Perea, M. T., Correa, J. J., Serrano, R. C., Moreno, G. R. 2019. Expert control systems implemented in a pitch control of wind turbine: A review. *IEEE Access*, 7, 13241-13259.
- [19] Çelik, M., Soylu, S. 2023. Parameter estimation study of polymer electrolyte membrane fuel cell using artificial hummingbird algorithm. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 237(8), 1956-1967.
- [20] Dirik, M. 2022. Comparison of Recent Meta-Heuristic Optimization Algorithms Using Different Benchmark Functions. *Journal of Mathematical Sciences and Modelling*, 5(3), 113-124.
- [21] Hussain, K., Salleh, M. N. M., Cheng, S., Naseem, R. 2017. Common benchmark functions for metaheuristic evaluation: A review. *International Journal on Informatics Visualization*, 1(4-2), 218-223.
- [22] Ghasemi, S., Tabesh, A., Askari-Marnani, J. 2014. Application of fractional calculus theory to robust controller design for wind turbine generators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 29(3), 780-787.
- [23] Garcia-Sanz, M., Houpis, C. H. 2012. *Wind Energy Systems: Control Engineering Design*. Taylor & Francis Group CRC press. Boca Raton, Florida, USA, 613s.
- [24] Janssens, O., Noppe, N., Devriendt, C., Van de Walle, R., Van Hoecke, S. 2016. Data-driven multivariate power curve modeling of offshore wind turbines. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 55, 331-338.
- [25] Xiao, Z., Zhao, Q., Yang, X., Zhu, A. 2020. A power performance online assessment method of a wind turbine based on the probabilistic area metric. *Applied Sciences*, 10(9), 3268.
- [26] Ogata, K. 2010. *Modern Control Engineering*. 5th edition. Prentice Hall. New Jersey, USA, 912s.
- [27] Ang, K. H., Chong, G., Li, Y. 2005. PID Control System Analysis, Design, and Technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576.
- [28] Zhao, W., Wang, L., Mirjalili, S. 2022. Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 388, 114194.
- [29] Frikh, M. L., Soltani, F., Bensiali, N., Boutasseta, N., Fergani, N. 2021. Fractional order PID controller design for wind turbine systems using analytical and computational tuning approaches. *Computers and Electrical Engineering*, 95, 107410.
- [30] Maroufi, O., Choucha, A., Chaib, L. 2020. Hybrid fractional fuzzy PID design for MPPT-pitch control of wind turbine-based bat algorithm. *Electrical Engineering*, 102(4), 2149-2160.
- [31] Civelek, Z. 2013. Bulanık PID kontrolör ile rüzgâr türbininin hatve açısının kontrolü. *Kırıkkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek lisans tezi*, 134s, Kırıkkale.
- [32] Borase, R. P., Maghade, D., Sondkar, S., Pawar, S. 2021. A review of PID control, tuning methods and applications. *International Journal of Dynamics and Control*, 9, 818-827.
- [33] Castillo-Zamora, J. J., Camarillo-Gomez, K. A., Perez-Soto, G. I., Rodriguez-Resendiz, J. 2018. Comparison of PD, PID and sliding-mode position controllers for V-tail quadcopter stability. *IEEE Access*, 6, 38086-38096.
- [34] Oku, D. E., Obot, E. P. 2018. Comparative study of PD, PI And PID controllers for control of a single joint system in robots. *International Journal of Engineering and Science*, 7(6), 51-54.
- [35] Song, Y.-D. 2018. *Control of nonlinear systems via PI, PD and PID: Stability and performance*. Taylor & Francis Group CRC press. Boca Raton, Florida, USA, 152s.
- [36] Zhou, F., Liu, J. 2018. Pitch controller design of wind turbine based on nonlinear PI/PD control. *Shock and Vibration*, 2018, 1-14.