

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri için geri adımlamalı doğrusal olmayan bir denetleyici tasarımı

A backstepping nonlinear control design for variable speed wind turbines

Barış BİDİKLİ* 

¹Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İzmir Katip Çelebi Üniversitesi, İzmir, Türkiye.
barisbidikli@ikc.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 11.10.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 22.01.2019

* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2019.42027

Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızını uygun bir şekilde denetlemek, enerji üretimini ve güç verimliliğini eniyilemek için başvurulabilecek yöntemlerden bir tanesidir. Bu çalışmanın temel hedefi değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimini sağlayabilecek yapıda özgün bir doğrusal olmayan dayanıklı ve uyarlamalı denetleyici tasarlamaktır. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin mekanik ve elektrik yapıları incelendiğinde geri adımlamalı denetim tasarımı yaklaşımının bu tip sistemler için denetleyici tasarımı gerçekleştirmeye oldukça uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu durum göz önünde bulundurularak bu çalışmada sunulan denetleyici yapısı geri adımlamalı denetim tasarımı yaklaşımı kullanılarak tasarlanmıştır. Denetleyicinin dayanıklı yapısı sistem modeli ve parametreleri hakkında herhangi bir bilgiye ihtiyaç duyulmaksızın denetim hedefine ulaşmaya olanak sağlarken, uyarlamalı yapısı ise denetim esnasında parametrik belirsizlikleri telafi edebilmektedir. Tasarlanan denetleyicinin kuramsal çözümü Lyapunov-tabanlı bir yöntemle tamamlanarak çalışmada sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, tasarlanan denetleyicinin başarımının kuramsal bir ispatı niteliğindedir. Tasarımın başarımını daha net bir şekilde ortaya koymak için ise takip rotası olarak farklı rotor hızı senaryoları kullanılan benzetimler yapılmış ve bu benzetimlerin sonuçlarına çalışmada yer verilmiştir.

Anahtar kelimeler: Değişken hızlı rüzgâr türbinleri, Doğrusal olmayan denetim, Dayanıklı uyarlamalı denetim, Geri adımlamalı denetim

Abstract

Controlling the rotor speed of variable speed wind turbines properly is one of the most appropriate methods to optimize the energy production and power efficiency of these type of energy production systems. Designing a novel nonlinear robust adaptive controller that is able to provide the rotor speed control of variable speed wind turbines is the main purpose of this study. It was identified that the backstepping control design technique is a feasible way to design a controller for variable speed wind turbines when their mechanical and electrical subsystems are considered. The control design presented in this study is designed via backstepping control design approach by considering this issue. Robust structure of the designed controller provides that it reaches control purpose without using any information about system model and its parameters while its adaptive structure compensates the parametric uncertainties during the control process. Lyapunov-based arguments are used to complete the theoretical analysis of the designed controller. Results of this analysis theoretically prove that the designed controller is able to reach the control purpose. Additionally, performance of the designed controller is demonstrated via numerical simulation results that are realized by considering different desired rotor speed scenarios.

Keywords: Variable speed wind turbines, Nonlinear control, Robust adaptive control, Backstepping control

1 Giriş

Elektrik enerjisi günlük yaşamda en fazla ihtiyaç duyulan ve kullanılan enerji kaynaklarından bir tanesidir. Teknolojik gelişmelerle birlikte bu enerji tipine duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır. Fosil yakıtlar ve nükleer füzyon gibi geleneksel elektrik enerjisi üretim yöntemlerinin çevre ve doğa üzerinde birtakım olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu durum, toplumların ve bilim dünyasının yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmesini beraberinde getirmiştir. Verimli yenilenebilir enerji karakteristikleri ve olumlu çevresel etkileri düşünüldüğünde rüzgâr gücüyle elektrik enerjisi üretimi diğer yenilenebilir enerji üretim yöntemlerine göre daha önde görülmekte ve daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Tüm bunların bir sonucu olarak rüzgâr gücü ile elektrik enerjisi üretimi gelişen bir sektör haline gelmiştir. Rüzgâr gücünden elektrik enerjisi elde etmek için genellikle sabit hızda dönen rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Fakat son çalışmalar değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanılmasında güç verimliliğinin ve enerji üretiminin en üst noktaya çıkarılabileceğini göstermektedir. Rotor hızlarının, rüzgâr hızındaki değişime göre seçilip sisteme takip rotası olarak

verilmiş, bir hız profilini takip etmesini sağlayarak aerodinamik verimliliği en üst düzeye çıkarmak ve bu sayede en iyi verim-hız noktasında çalışmak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin kullanımının temel amaçlarıdır. Rotor hızını arzu edilen seviyeye getirmek ve o seviyede tutmak için faydalanılabilecek yaklaşım uygun bir denetleyici tasarımı yaparak rotor hızını denetleyebilecek duruma gelmektir. Bunun sonucu olarak değişken hızlı rüzgâr türbinleri için denetim tasarımı denetim araştırma alanında ilgi çekici ve üzerinde sıklıkla çalışılan bir konu haline gelmiştir.

Rüzgâr türbinlerinin denetimi bilimsel yazında uzun süredir yaygınlığını koruyan bir çalışma konusudur. Bu konuyla ilgili detaylı bilimsel yazın incelemesine [1]-[3] çalışmalarından erişilebilir. Bu çalışmada, çalışmanın güncelliği düşünülerek, son yirmi yıldır bu konu hakkında yapılan araştırmalara yer verilecektir. Çalışmalardan biri üretimin bobin tahrik gerilimini ayarlayarak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızlarını denetleyebilme prensibine dayanmaktadır [4]. Geri besleme doğrusallaştırma tekniğini temel alınarak tasarlanmış ve uyarlamalı olarak türbin milinin torkunu kestirebilen bir denetim tasarımı [5] çalışmasında sunulmuştur. Rüzgâr hızı kestirimcisi ile desteklenmiş statik ve dinamik geri beslemeli

doğrusal olmayan denetleyici tasarımları değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızlarını denetlemek için geliştirilen yöntemlerdir [6]. Bozucu etkilere karşı dayanıklı karakteristik gösterebilen iki farklı durum geri beslemeli denetleyici, değişken hızlı rüzgâr türbinlerini en iyi güç katsayılarına yakın çalıştırabilmek amacıyla, önerilmişlerdir [7]. Rüzgâr hızı kestirimcisi ile desteklenmiş bir başka doğrusal olmayan denetleyici, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimini sağlamak amacıyla, [8] çalışmasında tasarlanmıştır. Bahsedilen çalışmada sürekli mıknatıs üreticinin torkunu kestirmek için Kalman süzgecinden faydalanılarak, rüzgâr hızı ise rüzgâr türbinin kestirilen gücünden faydalanılarak ve Newton-Raphson yöntemi kullanılarak kestirilmiştir. Rüzgâr türbininin pervane kanadı açısını ve verim-hız oranını eşzamanlı olarak denetleme yeteneğine sahip ve bu sayede yakalanan rüzgâr enerjisini en üst noktaya çıkarabilen dayanıklı bir denetleyici yapısı da bu tip sistemlerin denetimi için önerilen denetleyiciler arasındadır [9]. Rüzgâr türbinlerinin verim-hız oranına göre ayrılan iki farklı operasyon bölgesindeki kararlılığı garanti altına almak amacıyla kayan kipli denetim yaklaşımından faydalanılmıştır [10]. Bu yaklaşımın parametrik belirsizliklere ve bozucu etkilere karşı dayanıklılığı bahsedilen amaca yönelik kullanılmasının temel sebepleridir. Yüksek dereceli kayan kipli denetim yaklaşımı da değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimi için benzer sebeplerle [11] çalışmasında tercih edilmiştir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin güç verimliliğini kayan kipli denetleyici kullanılarak eniyilenmeye çalışıldığı [12] çalışması ise kayan kipli denetim çalışmalarına bir başka örnektir. Değiştirilmiş Hill Climb Searching yönteminden ve uyarlamalı yapısını sağlamak için tanımlanmış iki döngüden faydalanan uyarlamalı bir denetim yapısı, rüzgâr türbininin en yüksek güç noktası takibini yapmasını sağlamak amacıyla, [13] çalışmasında önerilmiştir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin tüm parametrik belirsizliklerini denetim sürecinde telafi edebilen bir başka uyarlamalı denetim yapısına ise [14] çalışmasından ulaşılabilir. Çift beslemeli indüksiyon üreteçli rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimi için önceden tasarlanmış iki denetleyici ile yeni tasarlanan denetleyicinin başarımlarının karşılaştırılması [15] çalışmasında sunulmuştur. Bu karşılaştırmanın sonucu olarak ise yeni tasarlanan denetleyicinin reaktif güç üretimi anlamında var olanlara göre daha iyi başarımla çalıştığı görülmüştür. İki kütleli model üzerinde temellendirilmiş ve rüzgâr hızı kestirimcisi ile desteklenmiş doğrusal olmayan bir denetim yaklaşımıyla yakalanan rüzgâr gücü miktarı eniyilenmeye çalışılmıştır [16]. İki kütleli rüzgâr türbini modeli temel alınarak geliştirilen bir başka denetim yaklaşımı [17] çalışmasında sunulmuştur. Doğrusal ve doğrusal olmayan denetimin bir arada kullanılmasından faydalanarak değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin enerji çıkışı en yüksek seviyeye çıkarmak bahsedilen çalışmanın ana hedefidir. Rüzgâr gücü üretim sisteminin en yüksek güç verimliliğini sağlamak için yüksek çabalı çevrimiçi öğrenme yeteneğine sahip, Wilcoxon radyal fonksiyonu temelli ve geriye doğru yayınlı bir öğrenme algoritması kullanılan bir ağdan faydalanan değiştirilmiş parçacık sürü eniyilemesi düzenlemeli bir denetleyici değişken hızlı rüzgâr türbinine sahip kalıcı mıknatıslı senkron bir üreticinin denetimi için tasarlanmıştır [18]. Rotor açısız hızı üzerinden verim-hız oranını ve pervane kanadı açısını aynı anda denetleyerek değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin enerji yakalama miktarını en yüksek seviyeye çıkarabilen doğrusal olmayan dayanıklı bir denetim tasarımı Iyasere ve diğerleri tarafından [19] çalışmasında önerilmiştir. Değişken hızlı rüzgâr

türbininin rotor hızının asimptotik takibini sağlayan bir başka dayanıklı denetim yaklaşımı Ren ve Zhong tarafından önerilmiştir [20]. Bahsedilen çalışmada, belirsizliklerin ve bozan etkilerin varlığında denetimi sağlayabilmek amacıyla, denetleyici bozan etki ve belirsizlik kestirimcisi ile desteklenmiştir. Bozan etki ve belirsizlik kestirimcisi temelli vektör denetimi kalıcı mıknatıslı senkron üreteç tabanlı değişken hızlı rüzgâr türbini sisteminin denetim problemine bir çözüm olarak düşünülmüş olan bir diğer yaklaşımdır [21]. Petkovic ve diğerleri, [22] çalışmasında değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızlarını uyarlamalı bir nöro-bulanık sonuç sistemi temelli akıllı bir denetleyici ile ayarlayarak rüzgâr türbininin en üst verim noktasında çalışmasını sağlamışlardır. Tümlev kayan kip denetimi ve oransal-tümlev (OT) denetim yaklaşımları sırasıyla düşük oranlı ve yüksek oranlı rüzgâr hızlarında değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin güç üretimlerini en yüksek noktaya çıkarmak için [23] çalışmasında önerilmiştir. Belirtilen çalışmada denetleyiciler, rüzgâr hızının kestirimi için, değiştirilmiş bir Newton Raphson rüzgâr hızı kestirimcisi ile desteklenmişlerdir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimi için benzer başka bir yaklaşım [24] çalışmasında sunulmuştur. Yüksek oranlı rüzgâr hızı bölgesinde bulanık temelli OT denetleyici kullanılmış olması ve tümlev kayan kip denetleyicisinin uyarlanarak düşük oranlı ve yüksek oranlı rüzgâr hızı bölgeleri arasında kararlı bir anahtarlama sağlanması [24] çalışmasının [23] ile karşılaştırıldığında öne çıkan yenilikleridir. İki farklı dayanıklı denetleyicinin değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimi üzerinde başarımlarını karşılaştırması [25] çalışmasında yapılmıştır. Bu karşılaştırma için kullanılan dayanıklı denetleyiciler, yer kök eğrileri çözümlemesi temelli oransal-tümlev-türev denetleyici ve DK-iterasyon algoritması temelli μ sentez üzerinde temellendirilmiş H_∞ denetleyicilerdir. Bu denetleyicilerin takip başarımlarını farklı güç senaryoları için parametrik belirsizliklerin ve bozan etkilerin varlığında test edilmiştir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin parametrik belirsizlikleri ile baş edebilmek için bir telafi terimiyle desteklenmiş dayanıklı geri adımlamalı denetim yaklaşımı [26] çalışmasında değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimi için sunulmuştur. Model belirsizlikleriyle başa çıkabilmek için uyarlamalı bir ileri besleme terimi içeren dayanıklı denetleyici tasarımı, rotor hızı denetimi ile güç üretimini eniyilemek amacıyla, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetiminde kullanılmıştır [27]. Bazı model parametrelerinin belirsizliğini ve açısız ivme hızının ölçümünün yokluğunu uyarlamalı olarak telafi edebilen bir denetim stratejisi [28] çalışmasında değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin güç düzenlemesi için önerilmiştir. Rüzgâr tarlalarındaki çoklu değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin, aktif güç denetim probleminden dönüştürülen, rotor hızı takip denetim problemine çözmek için dayanıklı uyarlamalı hata-toleranslı denetim tasarımı [29] çalışmasında sunulmuştur. Bahsedilen çalışmada Ardjal ve diğerleri kayan kip denetimi stratejisi ve kesir-derece stratejilerini birleştirerek doğrusal olmayan bir denetim tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Uyarlamalı model öngörülü denetim yaklaşımı, değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rüzgâr enerjisi üretimini en üst seviyeye çıkarmak ve yorgunluk yüklerini hafifletmek amacıyla, [30] çalışmasında önerilmiştir. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimi için gürbüz uyarlamalı bir diğer denetim yaklaşımı [31] çalışmasında önerilmiştir. Bu çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin belirsiz parametrelerinin büyük bir kısmı için uyarlamalı kestirim kuralları önerilerek denetim tasarımına dahil edilmiş, geri kalan belirsiz parametreler için

ise en iyi sabit tahmin yaklaşımı değerleri kullanılmıştır. Bu sayede denetim tasarımının gürbüz yapısı korunabilmiş fakat enerji üretim ve uyarıcı dinamonun giriş kazançları konumunda olan belirsiz parametrelerin en iyi sabit tahmin yaklaşımı değerleri denetim başarımını etkiler konuma gelmiştir. [31] çalışmasında Açıklama 1’de de belirtildiği gibi en iyi sabit tahmin yaklaşımı değerlerinin iyi bir şekilde belirlenebilmesi için bu parametreler hakkında yüzeysel de olsa bir bilgiye sahip olma zorunluluğu bulunmaktadır.

Bu örneklerin sayısı rahatlıkla artırılabilir. Fakat incelenen çalışmalar değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimi ile ilgili birtakım genel gerçeklere ulaşmak için fazlasıyla yeterlidir. İlk olarak belirtilmelidir ki bu bölümde yer verilen tasarımları da içeren çok farklı yapıda denetleyici tasarımları ortak bir amaç üzerinde yoğunlaşmıştır. Bu bölümde daha önce de bahsi geçen bu amaç sisteme takip rotası olarak verilen bir hız profilinin takibini verimli bir şekilde sağlayabilmektir. Bahsedilen hız profili rüzgâr hızındaki değişimler düşünülerek seçilmektedir. Bu amacın temel çıkış noktası bu sayede enerji üretiminin ve güç verimliliğinin en üst noktaya çıkarılabilmesidir. Sonuç itibarıyla bu amaç bu tip sistemler için denetleyici tasarımı yapmanın ana motivasyonunu da oluşturmaktadır.

Değişken hızlı rüzgâr türbinleri elektromekanik sistemlerdir. Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürüldüğü kısımdaki değişken hızın ayarlanması bu kısma uygulanan elektrik ve mekanik torklar sayesinde sağlanmaktadır. Elektrik torkun üretilmesi için, uyarıcı dinamoya alan gerilimi uygulanması sonucunda elde edilen, alan akımına ihtiyaç duyulmaktadır. Sistem dinamik modeli uyarıcı dinamonun ve enerji üretimi yapılan kısmın dinamik modelleri birbirine bağlantılı bir şekilde verilerek elde edilmektedir [4]. Bunun bir sonucu olarak giriş ve çıkışı sırasıyla alan gerilimi ve rotor hızı olarak düşünülen bir sistem ortaya çıkmaktadır. Bilimsel yazındaki genel yaklaşım sistemin bütünleşik düşünülerek denetim girişi olarak alan geriliminin tasarlanması şeklindedir. Fakat bu durum matematiksel karmaşayı arttırdığından son dönemde geri adımlama yöntemi temel alınarak gerçekleştirilen denetim tasarımları da sunulmaya başlanmıştır [14],[26], [31]. Bu yöntem sistemi bütünleşik olarak düşünme zorunluluğunu ortadan kaldırıp, bahsedilen iki ayrı alt sistem için ayrı ayrı tasarım yapma imkânı sağladığından matematiksel karmaşanın göreceli olarak daha az olmasını sağlamaktadır.

Parametrik belirsizlikler ve bozucu etkiler denetim tasarımında ve sürecinde karşılaşılabilecek temel problemlerdir. Parametrik belirsizliklerle başa çıkabilmek amacıyla uyarlamalı denetim yaklaşımlarından sıklıkla faydalanılmıştır. Fakat uyarlamalı denetim tasarımlarındaki en büyük kısıt sistem modeliyle ilgili kısmi de olsa bir bilgiye ihtiyaç duyulmasıdır [4],[28]. Buna ek olarak bu tip yaklaşımların bir kısmında uyarlamalı kısım için ek bir araca (hız kestirimcisi, Kalman süzgeci, genetik algoritmalar, en iyileme kuralları vb.) ihtiyaç duyulmaktadır [5],[8],[16],[18], [22]. Sistem modelinden tamamen bağımsız ve bozucu etkilerin varlığında çalışabilecek yapıya sahip dayanıklı denetleyiciler değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimi için çokça tercih edilen diğer yapılardır [10]-[12],[19],[23]-[25]. Fakat bu tip yapılarda da ortaya çıkan denetim çabası ihtiyacı şüphesiz ki uyarlamalı denetleyicilere göre daha fazla olmaktadır. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetiminde özellikle son dönemde, hem karşılaşılabilecek problemlerle başa çıkabilecek yeterlilikte hem de dayanıklı denetleyicilere göre daha az denetim çabasına ihtiyaç duyarak denetim amacını sağlayabilecek yapıda olmalarından ötürü, dayanıklı uyarlamalı

denetleyiciler de kullanılmaya başlanmıştır [14],[20],[26],[27],[29], [31]. Bu tip yapıların da bazılarında uyarlamalı kısmın sağlanması için ek araçlara ihtiyaç duyulmaktadır [20],[27],[29]. Fakat uyarlamalı kısmın da tasarımın içinde sunulduğu dayanıklı uyarlamalı yapıların kullanılabilirlik ve verimlilik açısından daha iyi tasarımlar olduğu bir gerçektir.

Bu çalışmanın temel amacı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin enerji üretimini ve güç verimliliğini en üst seviyeye çıkarabilecek bir denetleyici tasarımı sunmaktır. Bu amaca ek olarak tasarlanan denetleyicinin denetim esnasında karşılaşılabilen yaygın problemlere çözüm niteliğinde olması hedeflenmiştir. Her iki amaç da düşünülerek olabildiğince geniş ve detaylı bir bilimsel yazın taraması yapılmış ve sonuç itibarıyla geri adımlama yöntemi temelli bir dayanıklı uyarlamalı doğrusal olmayan denetim tasarımı gerçekleştirilmiştir. Denetim tasarımı rotor hızı ile takip rotası olarak verilen hız profili arasındaki farkı yani diğer bir deyişle takip hatasını sıfıra götüreceği şekilde tasarlanmıştır. Bu sayede bilimsel yazında da üzerinde sıklıkla çalışılmış olan ortak hedefe ulaşılmış ve tasarımın enerji üretimi ve güç verimliliğine olumlu anlamda katkı yapacak potansiyelde olması sağlanmıştır. Denetleyici tasarımı için kullanılan geri adımlama yaklaşımı sayesinde sistem yapısı göz önünde bulundurulabilmiş ve alan gerilimi ile rotor hızı arasında ilişki kuran bir denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici dayanıklı yapısı sayesinde sistem modeli ve parametreleri ile ilgili herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymaksızın denetim hedefine ulaşabilmekte ve bozucu etkilere karşı da bu dayanıklı yapısını koruyabilmektedir. Yine tasarımın bir parçası olan belirsiz parametrelerin telafisi için önerilmiş uyarlamalı kestirim kuralları sayesinde denetim çabası ihtiyacının gereğinden fazla olmasının önüne geçilmeye çalışılmıştır. Bu noktada not edilmelidir ki önerilen kestirim kuralları da sistem parametrelerinden tamamen bağımsızdır ve ölçülebilir değerler üzerinden kestirimi yapabilir durumdadır. Bu sayede kestirim kuralları denetleyicinin dayanıklı yapısını korumaktadır. Sunulan özgün tasarım mevcut haliyle ayrı bir araca ihtiyaç duymaksızın tüm sistem parametrelerini kestirebilen tüm durum geri beslemeli bir dayanıklı uyarlamalı denetim tasarımıdır. Bu tip tasarımlara değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimi ile ilgili çalışmalarda çok nadir rastlanmaktadır. Karşılaşılan çalışmalar ise oldukça karmaşık ve aynı anda çok fazla denetim kazancının kullanıcı tarafından ayarlanmasını gerektiren yapılardır. Bu çalışmada sunulan tasarımın az sayıdaki benzerlerine göre en büyük üstünlüğü kullanıcı açısından oldukça basit bir yapıda olmasıdır. Tasarlanan denetleyici bahsedilen tüm hedefleri sağlamak amacıyla sadece iki adet denetim kazancının ayarlanmasına ihtiyaç duymaktadır. Bu basit yapı özgün tasarımın bugüne kadar yapılan benzer çalışmalara göre en büyük kazanımı olup aynı zamanda ilgili alana da büyük bir katkı sağlayabilecek bir denetleyici tasarımı haline gelmesini sağlamaktadır. Çalışmada kapalı döngü dinamiklerinin kararlılığını ve takip hatasının sıfıra yakınsadığını kuramsal olarak ispat etmek için Lyapunov temelli bir kararlılık çözümlenmesinden faydalanılmıştır. Tasarlanan denetleyicinin başarımlarını gösterimi ise farklı takip rotaları için gerçekleştirilen sayısal benzetim çalışmaları yardımıyla ortaya konulmuştur. Sayısal benzetim çalışmaları olabildiğince farklı senaryo için yapılarak tasarlanan denetleyicinin daha önceki kısımlarda bahsedilen üstünlükleri benzetim ortamında da gösterilmeye çalışılmıştır.

2 Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin yapısı ve dinamik modeli

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin dinamik modelini oluşturmak için uyarıcı dinamonun ve enerji üretim kısmının dinamik modelleri ayrı olarak ele alınmalıdır. Şekil 1’de yapısı gösterilen enerji üretim kısmının modeli aşağıdaki eşitlikte verildiği gibidir [4].

$$J\dot{\omega} + B\omega + K\theta = T_m - \gamma T_e. \quad (1)$$

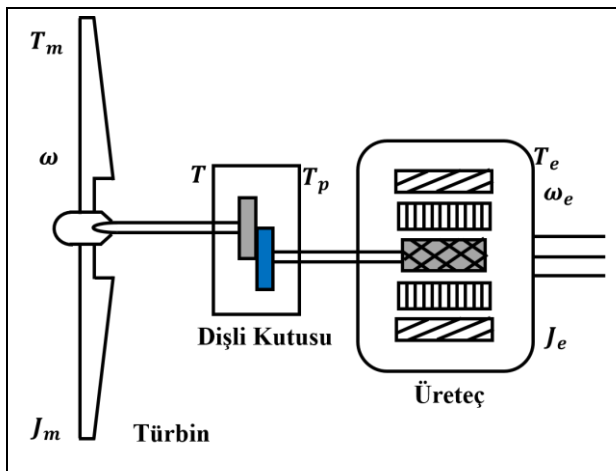
Bu eşitlikte milin açısız konumu ve rotor hızı sırasıyla θ ve $\omega \in \mathbb{R}$ ile gösterilmektedir. Dişli oranı $\gamma \in \mathbb{R}$ ile gösterilmekte olup, bu terim aynı zamanda rotor hızı ve üreteç sonundaki açısız hız olarak tanımlanan $\omega_e \in \mathbb{R}$ cinsinden $\gamma \triangleq \omega_e/\omega$ şeklinde tanımlanmaktadır. Üreteç-türbin çiftinin total eylemsizlik momenti, total sürtünmesi ve total burulması sırasıyla J , B ve $K \in \mathbb{R}$ ile temsil edilmektedir. Toplam eylemsizlik momenti, $J_m \in \mathbb{R}$ ile gösterilen türbinin eylemsizlik momenti ve $J_e \in \mathbb{R}$ ile gösterilen üretecin eylemsizlik momenti cinsinden $J = J_m + \gamma^2 J_e$ şeklinde ifade edilmektedir. Benzer yaklaşımla total sürtünmeyi ve burulmayı da sırasıyla $B = B_m + \gamma^2 B_e$ ve $K = K_m + \gamma^2 K_e$ şeklinde ifade etmek mümkündür. $T_m \in \mathbb{R}$ ile gösterilen türbin torku ve $T_e \in \mathbb{R}$ ile gösterilen üreteç torku rotor hızı ve $I_f \in \mathbb{R}$ ile gösterilen alan akımı cinsinden aşağıda verildiği gibi ifade edilebilmektedir [4],[32].

$$T_m = k_\omega \omega^2 \quad (2)$$

$$T_e = K_\phi c(I_f). \quad (3)$$

Yukarıdaki eşitliklerde sabit bir değer olan rüzgâr hızından güç aktarımına dönüşüm parametresi $k_\omega \in \mathbb{R}$ ile gösterilirken makine ilintili sabit de $K_\phi \in \mathbb{R}$ ile gösterilmiştir. Tüm bunlara ek olarak (3) numaralı eşitlikte alan akımının bir fonksiyonu şeklinde $c(I_f)$ olarak verilen akı, sabit bir terim ile alan akımının çarpımı şeklinde modellenmekte olup $c \in \mathbb{R}$ sabit bir terimi göstermek üzere $c(I_f) = c I_f$ şeklinde ifade edilmektedir. Sonuç itibarıyla (1) ile verilen matematik model, (2) ve (3)’ün ve bu eşitliklerle ilgili tanımların (1)’de yerine koyulmasıyla, aşağıdaki şekilde düzenlenebilir

$$J\dot{\omega} + B\omega + K\theta = k_\omega \omega^2 - \gamma K_\phi c I_f. \quad (4)$$



Şekil 1: Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin enerji üretim kısmı.

Şekil 2’de yapısı verilen uyarıcı dinamonun matematik modeli ise aşağıdaki eşitlikte gösterilmiştir

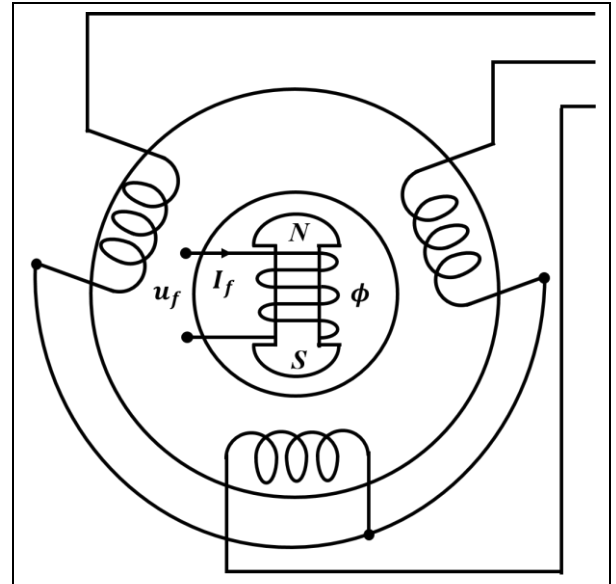
$$L\dot{I}_f + R_f I_f = u_f. \quad (5)$$

Bu eşitlikte kullanılan L ve $R_f \in \mathbb{R}$ sembolleri, sırasıyla, sabit indüktans ve rotor alanının direnç değerlerini göstermektedir. Bu eşitlikte alan gerilimi $u_f \in \mathbb{R}$ ile gösterilmekte olup kullanılan diğer bir terim olan I_f (3) eşitliğinde tanımlanmıştır. Sistem modelini bütünleşik bir formda ifade etmek için (4) ve (5) eşitliklerinde verilen sistem modelleri aşağıdaki gibi yazılabilir

$$\dot{\omega} = p_1 \omega + p_2 I_f + p_3 \theta + p_4 \omega^2 \quad (6)$$

$$\dot{I}_f = p_5 I_f + p_6 u_f. \quad (7)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde gösterilen belirsiz model parametreleri $p_1 \triangleq -\frac{B}{J}$, $p_2 \triangleq -\frac{\gamma K_\phi c}{J}$, $p_3 \triangleq -\frac{K}{J}$, $p_4 \triangleq -\frac{k_\omega}{J}$, $p_5 \triangleq -\frac{R_f}{J}$ ve $p_6 \triangleq \frac{1}{L} \in \mathbb{R}$ şeklinde tanımlanmaktadır.



Şekil 2: Uyarıcı dinamo.

3 Denetleyici tasarımı ve kararlılık çözümlemesi

Bu çalışmada temel denetim amacı rüzgâr hızındaki değişimleri göz önünde bulundurarak değişken hızlı rüzgâr türbinine takip rotası olarak verilen hız profiline rotor hızının ulaşmasını sağlamaktır. Bu hıza enerji üretim kısmına gerekli alan akımı I_f 'nin uygulanmasıyla ulaşılabilir. Gerekli alan akımı ise uyarıcı dinamoya uygun alan gerilimi u_f 'nin uygulanmasıyla sağlanır. Bu bölümdeki denetleyici tasarımı için uyarıcı dinamo ve enerji üretim kısmı ayrı sistemler olarak düşünülmüş ve bu düşünceden yola çıkılarak geri adımlama tekniğini temel alan bir denetleyici tasarımı yapılmıştır. Bu amaç doğrultusunda uyarıcı dinamonun girişi alan gerilimi, çıkışı alan akımı ve enerji üretim kısmının girişi alan akımı ise rotor hızı olarak düşünülmüştür. Öncelikle enerji üretim kısmına alan akımı olarak uygulanan ve rotor hızını arzu edilen seviyeye getirme kabiliyetine sahip bir sanal denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise gerçek denetim girişi (alan gerilimi) sanal denetim girişi ile alan akımı arasındaki farkı azaltmaya yönelik olarak tasarlanmıştır. İlerleyen alt bölümlerde tasarım adımları detaylı olarak açıklanmıştır.

3.1 Hata sistemi geliştirmesi

Sistemden ölçülen rotor hızı ile takip rotası arasındaki fark takip hatası olarak aşağıdaki eşitlikteki gibi tanımlanmıştır

$$e_1 \triangleq \omega - \omega_d. \quad (8)$$

Bu noktada not edilmelidir ki (8)'de $\omega_d \in \mathbb{R}$ düzgün değişen, yapısında süreksizlik noktaları ve/veya ani değişimler içermeyen takip rotası ifadesini temsil etmektedir. Alan akımı ile sanal denetim girişi arasındaki fark ise yardımcı bir hata terimi olarak,

$$e_2 \triangleq I_f - I_{fv} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanmış olup (9)'da verilen $I_{fv} \in \mathbb{R}$ terimi sanal denetim girişini temsil etmektedir. Takip hatasının zamana bağlı türevi, (6)'dan yararlanılarak, aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{e}_1 = p_1\omega + p_2I_f + p_3\theta + p_4\omega^2 - \dot{\omega}_d. \quad (10)$$

Tasarlanan denetleyicinin dayanıklı uyarlamalı yapısı belirsiz model parametrelerinin kestirimlerinin denetleyici tasarımında kullanılmasıyla sağlanır. Belirsiz parametreler için kestirim hataları aşağıdaki eşitliklerde verildiği gibi tanımlanır.

$$\tilde{p}_1 \triangleq \hat{p}_1 - p_1 \quad (11)$$

$$\tilde{p}_2 \triangleq \hat{p}_2 - p_2 \quad (12)$$

$$\tilde{p}_3 \triangleq \hat{p}_3 - p_3 \quad (13)$$

$$\tilde{p}_4 \triangleq \hat{p}_4 - p_4 \quad (14)$$

$$\tilde{p}_5 \triangleq \hat{p}_5 - p_5 \quad (15)$$

$$\tilde{p}_6 \triangleq \hat{p}_6 - p_6. \quad (16)$$

Yukarıdaki eşitliklerde $\hat{p}_i \in \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, 6$ değerleri belirsiz parametrelerin telafisi için kullanılan kestirim değerlerini göstermektedir. Kestirimler için aşağıdaki eşitliklerde ifade edilen kestirim kuralları önerilmiştir.

$$\dot{\hat{p}}_1 = e_1\omega + \frac{e_2(k_1 + \hat{p}_1 + 2\omega\hat{p}_4)\omega}{\hat{p}_2} \quad (17)$$

$$\dot{\hat{p}}_2 = e_1I_f + \frac{e_2(k_1 + \hat{p}_1 + 2\omega\hat{p}_4)I_f}{\hat{p}_2} \quad (18)$$

$$\dot{\hat{p}}_3 = e_1\theta + \frac{e_2(k_1 + \hat{p}_1 + 2\hat{p}_4\omega)\theta}{\hat{p}_2} \quad (19)$$

$$\dot{\hat{p}}_4 = e_1\omega^2 + \frac{e_2(k_1 + \hat{p}_1 + 2\hat{p}_4\omega)\omega^2}{\hat{p}_2} \quad (20)$$

$$\dot{\hat{p}}_5 = -e_2I_f \quad (21)$$

$$\dot{\hat{p}}_6 = -e_2\omega_f. \quad (22)$$

Eşitliklerde $k_1 \in \mathbb{R}^+$ artı, sabit ve ayarlanabilir bir kazanç değerini göstermektedir.

Açıklama 1: Bu noktada not edilmelidir ki, bilimsel yazında var olan Lyapunov-temelli uyarlamalı denetim çalışmalarının birçoğunda olduğu gibi, bu denetim tasarımında da (17)-(22) arasında verilen kestirim kurallarının temel amacı belirsiz parametrelerin sayısal değerlerini hatasız bir şekilde belirlemek yani bir bakıma sistem tanımlama yapmak değildir. Bu kuralların önerilmesindeki temel amaç kapalı döngünün kararlılığını ve takip hatasının sifıra yakınsamasını matematiksel olarak garanti altına alacak ve bunu yaparken de bu kestirim kuralları sayesinde sistemin model bilgisine herhangi bir şekilde ihtiyaç duymayacak bir denetleyici yapısı

elde etmektir. Kestirim değerleri belirtilen özellikleri sağladığı ve sonlu bir aralıkta değiştiği sürece sayısal kestirim değerleri önemini yitirmektedir. (17)-(22)'de verilen kuralların bu özellikleri sağlayan bir denetleyici yapısının elde edilmesini sağladığı denetim girişinin tasarımında ve kararlılık çözümlemesinde detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Yine aynı kararlılık çözümlemesi (11)-(16) ile verilen kestirim hatalarının da herhangi bir zaman diliminde sifıra yakınsadığını gösterir niteliktedir. Fakat bu durum takip hatasının sifıra yakınsaması ile eşzamanlı olmayabilir ve temel amaç takip hatasının sifıra yakınsamasıdır.

Takip hatasının türevinde (11)-(14) ile verilen kestirimler yerine konarak sanal denetleyici tasarımı için açık döngü hata dinamikleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\dot{e}_1 = (\hat{p}_1 - \tilde{p}_1)\omega + (\hat{p}_2 - \tilde{p}_2)I_f + (\hat{p}_3 - \tilde{p}_3)\theta + (\hat{p}_4 - \tilde{p}_4)\omega^2 - \dot{\omega}_d. \quad (23)$$

Bu noktadan sonra sanal denetim girişinin tasarlanarak (23)'te verilen açık döngü hata dinamiklerinde alan akımının yerine yazılması gerekmektedir. Bu sayede kapalı döngü hata dinamikleri elde edilebilecek ve kararlılık çözümlemesine geçilebilecektir.

3.2 Sanal denetim girişi tasarımı

Sanal denetim girişi aşağıdaki gibi tasarlanmıştır

$$I_{fv} = \frac{1}{\text{proj}\{\hat{p}_2\}} (\dot{\omega}_d - k_1e_1 - \hat{p}_1\omega - \hat{p}_3\theta - \hat{p}_4\omega^2). \quad (24)$$

Yukarıdaki eşitlikte $\text{proj}\{\cdot\}$ standart yansıtım operatörünü göstermektedir.

Açıklama 2: Eşitlikten de rahatlıkla görülebileceği gibi paydadaki değerin sifıra gitmesi durumunda sanal denetim girişi sonsuz değer almaktadır. Yansıtım operatörü sayesinde, matematiksel çözümlemeye bir değişiklik olmazken, bu durumdan kaçınılarak sanal denetim girişinin daima sonlu bir değer alması sağlanmaktadır.

Tasarlanan sanal denetim girişi (23)'te alan akımı I_f 'nin yerine yazılırsa hata dinamikleri aşağıdaki şekilde düzenlenebilir.

$$\dot{e}_1 = -k_1e_1 - (\tilde{p}_1\omega + \tilde{p}_2I_f + \tilde{p}_3\theta + \tilde{p}_4\omega^2). \quad (25)$$

Bu noktada daha sonra genel kararlılık çözümlemesinde faydalanılacak bir ön çözümleme sunulacaktır. Bu çözümleme için öncelikle takip eden eşitlikte tanımlanan kesin artı değerli ve $V_1(e_1, \tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \tilde{p}_3, \tilde{p}_4) \in \mathbb{R}$ ile temsil edilen bir fonksiyondan faydalanılır.

$$V_1 \triangleq \frac{1}{2}(e_1^2 + \tilde{p}_1^2 + \tilde{p}_2^2 + \tilde{p}_3^2 + \tilde{p}_4^2). \quad (26)$$

Eşitlik (26)'daki fonksiyonun türevinin alınıp, (11)-(14) ve (25) eşitliklerinden faydalanılmasıyla aşağıdaki sonuca ulaşılabilir.

$$\dot{V}_1 = -k_1e_1^2 + \tilde{p}_1(\dot{\hat{p}}_1 - e_1\omega) + \tilde{p}_2(\dot{\hat{p}}_2 - e_1I_f) + \tilde{p}_3(\dot{\hat{p}}_3 - e_1\theta) + \tilde{p}_4(\dot{\hat{p}}_4 - e_1\omega^2). \quad (27)$$

Öncesinde de bahsedildiği gibi verilen ön çözümlemenin geçerli olması ancak ve ancak sanal denetim girişi I_{fv} ile alan akımı I_f 'nin eşitliği durumunda mümkündür. Dolayısıyla ön çözümlemenin geçerliliğini gösterebilmek için (9) numaralı eşitlikte tanımlanan yardımcı hata terimi için de bir hata sistemi çözümlemesi yapılmalıdır. Bu amaca ulaşmak için

öncelikle e_2 'nin türevi aşağıdaki eşitlikte verildiği gibi elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & \left\{ c_1 - \frac{1}{\hat{p}_2} [(\hat{p}_1 + k_1)(\tilde{p}_1 + \tilde{p}_4\omega) + 2\tilde{p}_3\hat{p}_4\theta] \right\} \omega \\ & + \left[c_2 - \frac{\tilde{p}_2}{\hat{p}_2} (\hat{p}_1 + k_1 + 2\hat{p}_4\omega) - \tilde{p}_5 \right] I_f \\ & + \left[c_3 - \frac{\tilde{p}_3}{\hat{p}_2} (\hat{p}_1 + k_1) \right] \theta \\ & + \left[c_4 - \frac{2\hat{p}_4}{\hat{p}_2} (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_4) \right] \omega^2 + c_5 \\ & + (\tilde{p}_6 - \hat{p}_6) u_f. \end{aligned} \quad (28)$$

Bu noktada belirtilmelidir ki (28)'in elde edilebilmesi için (7), (8), (15), (16)'dan ve (24)'ün türevinden faydalanılmıştır. Bunlara ek olarak $c_i \in \mathbb{R}$, $i = 1, \dots, 5$ ile gösterilen yardımcı terimler ise aşağıda verildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$c_1 \triangleq \frac{\hat{p}_1 + \hat{p}_1(\hat{p}_1 + \hat{p}_4\omega + k_1) + \hat{p}_3(1 + 2\hat{p}_4\theta) + \omega(\hat{p}_4 + k_1\hat{p}_4)}{\hat{p}_2} - \frac{\hat{p}_2(k_1 + \hat{p}_1 + \hat{p}_4\omega)}{\hat{p}_2^2} \quad (29)$$

$$c_2 \triangleq \hat{p}_1 + 2\hat{p}_4\omega + \hat{p}_5 + k_1 \quad (30)$$

$$c_3 \triangleq \frac{1}{\hat{p}_2} [\hat{p}_3 + \hat{p}_3(\hat{p}_1 + k_1)] - \frac{\hat{p}_2\hat{p}_3}{\hat{p}_2^2} \quad (31)$$

$$c_4 \triangleq \frac{2\hat{p}_4}{\hat{p}_2} (\hat{p}_1 + \hat{p}_4\omega) \quad (32)$$

$$c_5 \triangleq \frac{\hat{p}_2}{\hat{p}_2^2} (\dot{\omega}_d + k_1\omega_d) - \frac{1}{\hat{p}_2} (\ddot{\omega}_d + k_1\dot{\omega}_d). \quad (33)$$

3.3 Denetim girişi tasarımı

Sistemin gerçek denetim girişi olarak düşünülen alan gerilimi aşağıdaki gibi tasarlanmıştır.

$$u_f = -\frac{1}{\text{proj}\{\hat{p}_6\}} (c_1\omega + c_2I_f + c_3\theta + c_4\omega^2 + c_5 + k_2e_2). \quad (34)$$

Eşitlik (34)'te $k_2 \in \mathbb{R}^+$ artı, sabit ve ayarlanabilir bir kazanç değerini göstermekte olup $\text{proj}\{\cdot\}$ operatörünün kullanım amacı Açıklama 2'de verilen amaca benzer şekilde denetim girişinin sonlu bir değer almasını garanti altına almaktır.

Açıklama 3: (34)'te verilen denetim girişi yapısında (33)'te verilen c_5 terimini ve dolayısıyla takip rotası ω_d 'nin türevinin bulunduğudur. Bu noktada takip rotası ifadesinin yapısında süreksizlik noktalarının bulunması c_5 'in ve dolayısıyla denetim girişinin sonsuza gitmesine sebep olacaktır. Fakat bu çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbinleri düşünülerek gerçekleştirilen tasarımda takip rotasının da bu tip sistemlere uygun bir şekilde seçileceği düşünülmüştür. Bilimsel yazın incelendiğinde bu tip sistemler için seçilen takip rotalarının düzgün değişen, yapısında süreksizlik noktaları ve/veya ani değişimler içermeyen takip rotaları olduğu açıkça görülmektedir. Bu durumun bir sonucu olarak c_5 'in ve dolayısıyla denetim girişinin sonsuza gitme ihtimali ortadan kalkmaktadır.

Açıklama 4: Tasarlanan denetleyicinin temel amacı daha önce de bahsedildiği gibi açıl rotor hızı ω 'yı arzu edilen seviyeye getirmek ve o seviyede kalmasını sağlamaktır. Bu çalışmanın ana çıkış noktası rotor hızının değişken rüzgâr hızı karşısında istenilen seviyeye getirilebilmesi halinde değişken hızlı rüzgâr

türbinlerinin en iyi verim-hız noktasında çalıştırılabilmesidir. Konuyla ilgili bugüne kadar yapılan çalışmalarda açıkça belirtilmektedir ki bu durum güç verimliliğini ve enerji üretimini en üst noktaya çıkarabilmektedir. Üretilen enerji ve güç verimliliği farklı tipteki türbin ve üreteçler için farklılık gösterebilmekte olup bu çalışmada incelenmeyecektir. Çalışmada incelenmesi düşünülen temel durum, çalışmanın amacına uygun şekilde, tasarlanan denetleyicinin rotor hızını takip rotasına ulaştırmak konusunda başarılı olup olmadığıdır.

Yardımcı hata e_2 ile ilgili hata dinamiklerini aşağıdaki şekilde düzenlemek için (34)'teki denetleyici girişini (28)'deki ifadede yerine koymak yeterlidir.

$$\begin{aligned} \dot{e}_2 = & -k_2e_2 - \left[\frac{\tilde{p}_1(k_1 + \hat{p}_1)}{\hat{p}_2} \right] \omega \\ & - \left[\frac{\tilde{p}_2(k_1 + \hat{p}_1 + 2\omega\hat{p}_4)}{\hat{p}_2} + \tilde{p}_5 \right] I_f \\ & - \left[\frac{\tilde{p}_3(k_1 + \hat{p}_1) + 2\omega\tilde{p}_3\tilde{p}_4}{\hat{p}_2} \right] \theta \\ & - \left[\frac{\tilde{p}_4(k_1 + \hat{p}_1 + 2\omega\hat{p}_4) + 2\tilde{p}_1\hat{p}_4}{\hat{p}_2} \right] \omega^2 \\ & + \tilde{p}_6 u_f. \end{aligned} \quad (35)$$

3.4 Kararlılık çözümlemesi

Kuram: Kapalı döngüdeki tüm terimlerin sınırlılığı ve tüm hataların denetim sürecinde herhangi bir zaman diliminde sifıra yakınsaması (34)'te verilen denetim tasarımı (17)-(22)'de verilen kestirim kuralları ile birlikte kullanıldığında denetim kazançları k_1 ve k_2 'nin artı seçimi için garanti altına alınır. Bu durum matematiksel olarak aşağıdaki eşitlikteki gibi ifade edilir.

$$t \rightarrow \infty \text{ için } \|\mathbf{z}(t)\| \rightarrow 0. \quad (36)$$

Bu eşitlikte $\mathbf{z} \in \mathbb{R}^8$ terimi birleştirilmiş hata vektörünü göstermekte olup aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\mathbf{z} = [e_1 \quad e_2 \quad \tilde{p}_1 \quad \dots \quad \tilde{p}_6]^T. \quad (37)$$

İspat: Kararlılık çözümlemesi için eksi değer almayan Lyapunov fonksiyonu adayı $V(\mathbf{z}, t) \in \mathbb{R}$ aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$V \triangleq V_1 + \frac{1}{2}(e_2^2 + \tilde{p}_5^2 + \tilde{p}_6^2). \quad (38)$$

Kestirim hataları tanımları (15), (16)'nın, kestirim kuralları (17)-(22)'nin, (27) ve (35)'in (37)'nin türevinde yerine konulmasıyla türev ifadesinin son hali aşağıda verildiği gibi elde edilir.

$$\dot{V} = -k_1e_1^2 - k_2e_2^2. \quad (39)$$

Yukarıdaki eşitlikte verilen ifade, sabit denetim kazançlarının uygun seçimi sonucu, uygun sabit ve artı değerli $\rho_i \in \mathbb{R}^+$, $i = 1, \dots, 8$ değerlerinin elde edilmesiyle takip eden eşitsizlikte verildiği gibi üstten sınırlandırılabilir.

$$\dot{V} \leq -\sum_{i=1}^6 \rho_i \tilde{p}_i^2 - \rho_7 e_1^2 - \rho_8 e_2^2. \quad (40)$$

Lyapunov fonksiyonu adayı için (40)'ta verilen üst sınır daha öz bir şekilde takip eden eşitsizlikte verildiği gibi elde edilebilir. Bu eşitsizlikte $\rho \in \mathbb{R}^+$ artı ve sabit bir değeri göstermektedir.

$$\dot{V} \leq -\rho \|z\|^2. \quad (41)$$

Kararlılık çözümü incelendiğinde, $V(z, t)$ 'nin (38) ve (40)'tan görülen sınırlılığı, V_1 , e_2 , \tilde{p}_5 ve \tilde{p}_6 'nın sınırlılığını garanti altına alır. Geriye kalan kestirim hatalarının ve yardımcı hata teriminin sınırlılığını garanti etmek için ise V_1 'in sınırlılığından faydalanmak yeterlidir. Tüm bu terimlerin sınırlılığı, $z(t)$ 'nin sınırlılığına ispat niteliğindedir ($z(t) \in \mathbb{Q}_\infty$).

Takip eden eşitsizliğe ulaşmak için (40)'ın tümlevi alınabilir.

$$\int_{t_0}^{\infty} \|z(\sigma)\|^2 d\sigma \leq \frac{V_1(t_0)}{\rho}. \quad (42)$$

Yukarıdaki eşitsizlikten $z(t) \in \mathbb{Q}_2$ sonucuna ulaşmak mümkündür. Birleştirilmiş hata vektörüyle ilgili elde edilen iki sınırlılık şartının kesişimi ($z(t) \in \mathbb{Q}_2 \cap \mathbb{Q}_\infty$) Barbalat'ın [33]'te verilen ön kuramı ile birlikte kullanıldığında $t \rightarrow \infty$ için $\|z(t)\| \rightarrow 0$ 'ı garanti altına alır. Kapalı döngü içinde kalan diğer bütün terimlerin sınırlılığı standart işaret takip işlemleriyle gösterilebilir.

4 Benzetim çalışmaları

Bu bölümde, tasarlanan denetleyicinin başarımını göstermek amacıyla, farklı takip rotaları için gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına yer verilmiştir. Sistem model parametrelerinin tamamı daha önce yapılan bir çalışmadan alınmış olup takip eden eşitlikteki gibi seçilmiştir [4].

$$\begin{aligned} J &= 16 \text{ Kg} - m^2, & B &= 52, & K &= 52, \\ k_\omega &= 3, & \gamma &= 37.5, & K_\phi &= 1.7, \\ c &= 1000, & R_f &= 0.02\Omega, & L &= 0.001 \text{ H}. \end{aligned} \quad (43)$$

Takip rotaları da aynı çalışmadan alınmıştır. Bu senaryolara göre öncelikle takip rotası sinüzoidal değişen bir hız olarak seçilmiştir. Sonrasındaki benzetimler ise daha gerçekçi bir takip rotası için yapılmıştır. Tüm benzetim çalışmaları için rotorun başlangıç hızı ise 0.5 rad/s olarak ayarlanmıştır.

4.1 Sinüzoidal takip rotası için benzetim sonuçları

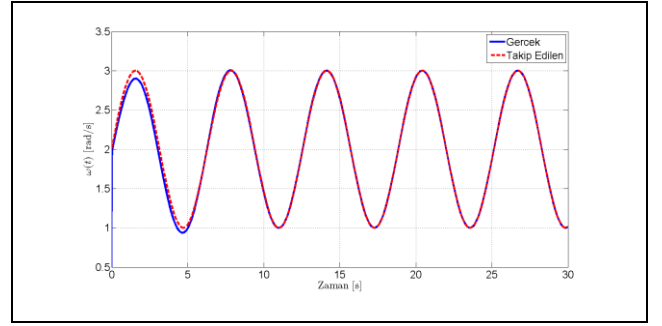
Bu alt bölümde sunulan benzetim sonuçları için aşağıdaki takip rotası seçilmiştir.

$$\omega_d(t) = 2 + \sin(t) \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right). \quad (44)$$

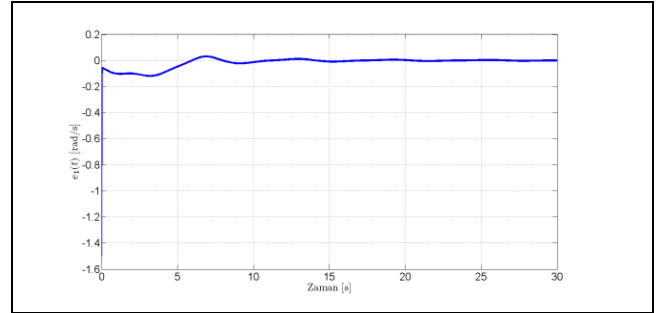
Denetim kazançları deneme yanılma yöntemi ile ayarlanmış olup aşağıdaki değerler için en iyi takip başarımı gözlemlenmiştir.

$$k_1 = 250 \quad k_2 = 500. \quad (45)$$

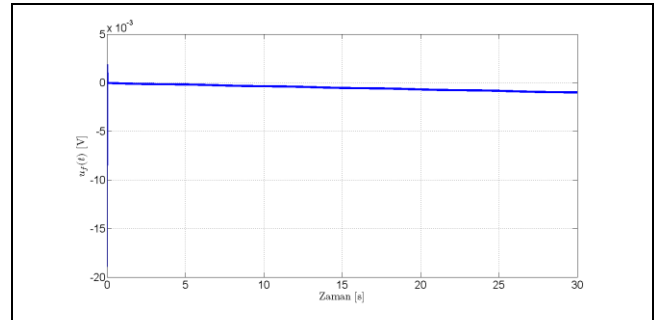
Rotor hızı ile takip rotası Şekil 3'te aynı şekil üzerinde gösterilirken takip hatasına Şekil 4'te yer verilmiştir. Bahsedilen şekillerden açıkça görülmektedir ki istenilen takip başarımına 5 sn. altında ulaşılabilmiştir. Uygulanan alan gerilimi ve parametre kestirimleri, sırasıyla, Şekil 5 ve Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekil 5'te görüldüğü gibi denetim sürecinde gerilim değeri mV mertebelerinde değişiklik göstermiştir. Şekil 6'da verilen parametre kestirimlerinin ise denetim sürecinde sonlu bir değer aralığında kaldığı gözlemlenmektedir. Tüm şekiller incelendiğinde denetim hedefine ulaşıldığı görülmektedir.



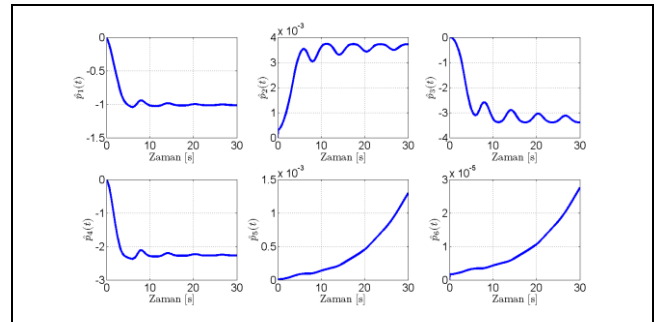
Şekil 3: Sinüzoidal takip rotası için takip sonuçları.



Şekil 4: Sinüzoidal takip rotası için takip hatası.



Şekil 5: Sinüzoidal takip rotası için giriş gerilimi.



Şekil 6: Sinüzoidal takip rotası için parametre kestirimleri.

4.2 Gerçekçi takip rotası için benzetim sonuçları

Bu alt bölümde gerçekçi bir takip rotası senaryosu kullanılmıştır. Bu senaryoda takip rotası 0 rad/s hızdan rotorun limitlerine göre belirlenmiş bir hızla yavaşça yükselmekte, bir süre o hızda sabit kaldıktan sonra 0 rad/s hızına yavaşça geri inmektedir. Bu çalışma için [4] çalışmasına benzer olarak rotorun en fazla 4.1 rad/s hızına çıkabildiği varsayılmıştır. Bu durum matematiksel olarak aşağıda verildiği gibi ifade edilmiştir [4].

$$f(x) = \begin{cases} 0 & , u(k) < u_c \\ X_m \left(1 + \sin\left(\frac{\pi(u(k) - s_1)}{2d_1}\right) \right) & , u(k) < u_r \\ X_m & , u(k) < u_f \\ X_m \left(1 - \sin\left(\frac{\pi(u(k) - s_2)}{2d_2}\right) \right) & , u(k) < u_s \\ 0 & , u(k) > u_s \end{cases} \quad (46)$$

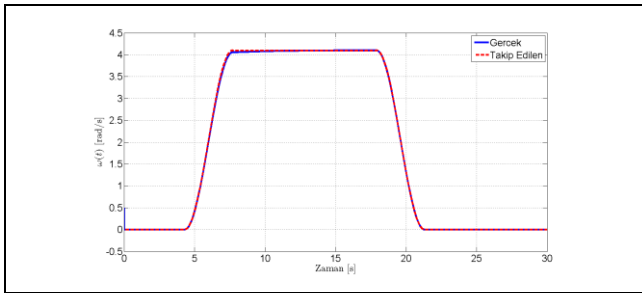
Yukarıda verilen ifadeye $u(k) \in \mathbb{R}$ yardımcı bir fonksiyonu göstermekte olup geri kalan terimler ise aşağıdaki eşitlikle verilmiştir.

$$\begin{aligned} s_1 &= \frac{u_c + u_r}{2}, & d_1 &= \frac{u_r - u_c}{2}, \\ s_2 &= \frac{u_f + u_s}{2}, & d_2 &= \frac{u_s - u_f}{2}, \\ u_s &= 21.3 \text{ m/s}, & X_m &= 4.1 \text{ rad/s}. \end{aligned} \quad (47)$$

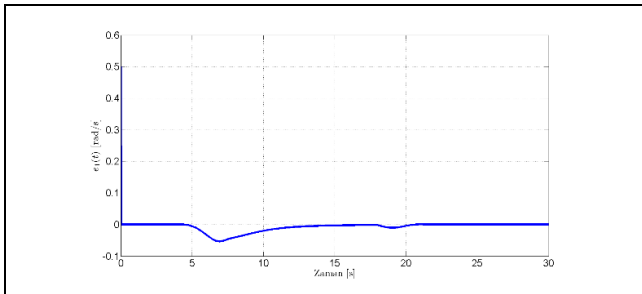
Denetim kazançları deneme yanılma yöntemi ile ayarlanmış olup aşağıdaki değerler için en iyi takip başarımı gözlemlenmiştir.

$$k_1 = 600 \quad k_2 = 600. \quad (48)$$

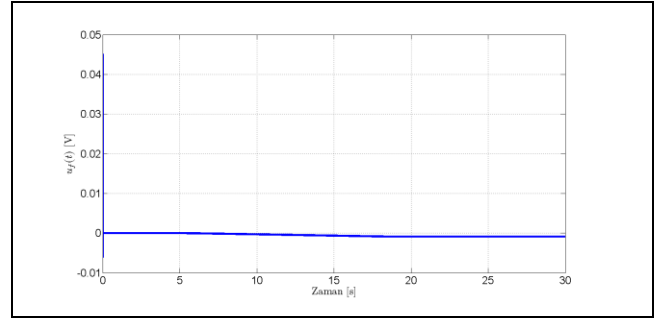
Rotor hızı ile takip rotası Şekil 7'de aynı şekil üzerinde gösterilirken takip hatasına Şekil 8'de yer verilmiştir. Bahsedilen şekillerden açıkça görülmektedir ki bu senaryo için istenilen takip başarımına çok daha kısa sürede ulaşılmıştır. Ayrıca rotor hızı takip rotasındaki değişikliklere de çok hızlı bir şekilde uyum sağlamıştır. Bu durumun temel sebebi takip rotasının, bir önceki senaryoya göre, çok daha az ve yavaş değişen bir rota olması olarak düşünülebilir. Uygulanan alan gerilimi ve parametre kestirimleri, sırasıyla, Şekil 9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Şekil 9'da görüldüğü gibi denetim sürecinde gerilim değeri mV mertebelerinde değişiklik göstermiştir. Şekil 10'da verilen parametre kestirimlerinin ise denetim sürecinde sonlu bir değer aralığında kaldığı gözlemlenmektedir. Tüm şekiller incelendiğinde denetim hedefine ulaşıldığı görülmektedir.



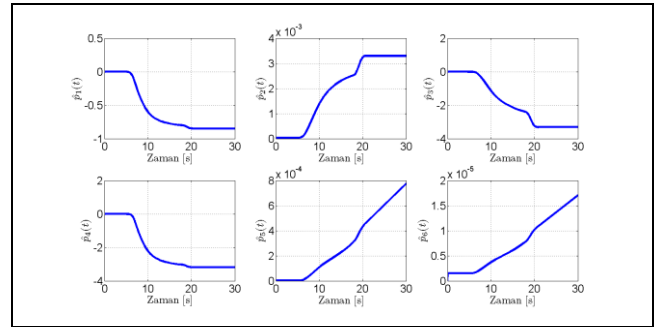
Şekil 7: Gerçekçi takip rotası için takip sonuçları.



Şekil 8: Gerçekçi takip rotası için takip hatası.



Şekil 9: Gerçekçi takip rotası için giriş gerilimi.



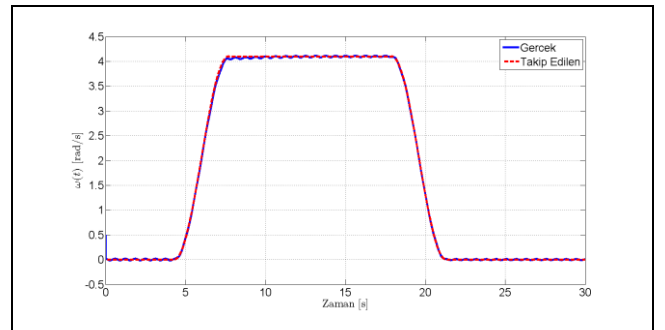
Şekil 10: Gerçekçi takip rotası için parametre kestirimleri.

4.3 Bozucu etki altında benzetim sonuçları

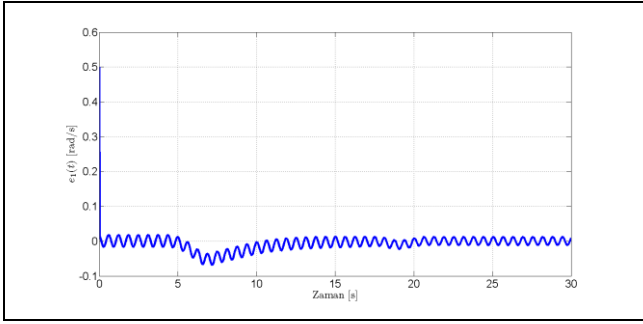
Bu alt bölümde gerçekçi takip rotası için yapılan benzetim çalışmaları sisteme bir bozucu etki eklenerek tekrarlanmıştır. Bu çalışmaların sunulmasındaki temel amaç tasarlanan denetleyicinin bozucu etkiye karşı göstereceği dayanıklı davranışı benzetim ortamında göstermektir. Bozucu etki olarak takip eden eşitlikte verilen terim hem konum hem de hız ölçümlerine toplamsal olarak eklenmiş ve bu etki altından denetleyicinin başarımı gözlemlenmiştir.

$$f_d(t) = 0.5 \sin(10t) \quad (48)$$

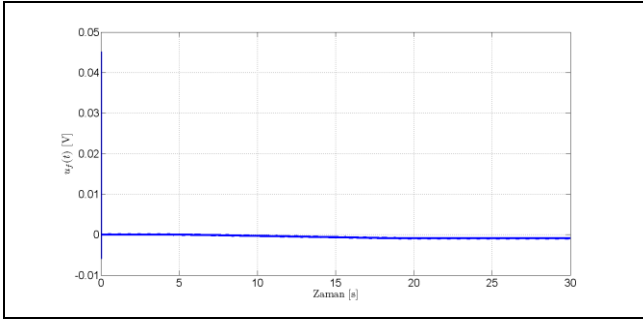
Bozucu etkinin olmadığı çalışmalarla bu çalışmalar arasındaki başarımlar farkını daha açık bir şekilde gözlemleyebilmek adına denetim kazançları bu çalışmalarda da (48)'de verildiği gibi kullanılmıştır. Şekil 11'de verilen rotor hızı ile takip rotasından ve Şekil 12'de verilen takip hatasından da görülebileceği gibi denetleyici bozucu etki altında da sistemi denetleyerek denetim hedefine ulaşılmasını sağlamıştır. Bu benzetim çalışmaları için elde edilen gerilim değerleri ve parametre kestirimleri sırasıyla Şekil 13 ve Şekil 14'te sunulmuştur.



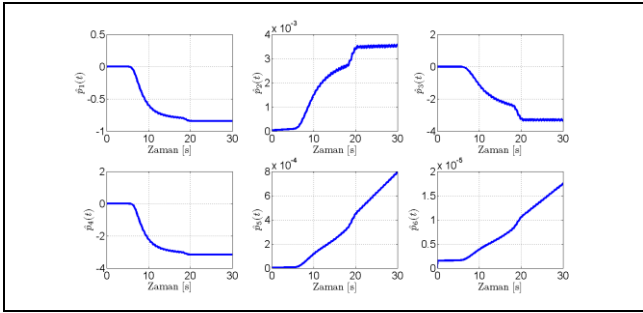
Şekil 11: Bozucu etki altında takip sonuçları.



Şekil 12: Bozucu etki altında takip hatası.



Şekil 13: Bozucu etki altında giriş gerilimi.



Şekil 14: Bozucu etki altında parametre kestirimleri.

4.4 Karşılaştırmalı benzetim sonuçları

Bu alt bölümde, tasarlanan denetleyicinin yaygın bir karşıtına göre üstünlüklerini göstermek için, karşılaştırmalı benzetim sonuçları sunulmuştur. Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetimini de içeren bilimsel ve endüstriyel denetim uygulamalarındaki yaygın kullanımı göz önünde bulundurularak OT tipi denetleyicinin başarımlarını karşılaştırması için uygun bir seçim olduğu düşünülmüştür. Bu duruma ek olarak OT tipi denetleyicinin ve bu çalışmada tasarlanan denetleyicinin benzer yapısal özellikler göstermesi de bu seçimin yapılmasında diğer önemli sebeptir. Bu ortak yapısal özelliklerden en önemlisi her iki denetleyicinin de sistem modeliyle ilgili herhangi bir bilgiye ihtiyaç duymaksızın sistemi denetleyebilecek yani dayanıklı yapıda olmasıdır. Ayrıca her iki denetleyici de denetimi sağlamak için hem açılma konum hem de açılma hız ölçümlerine ihtiyaç duymaktadır. Son olarak her ikisinin de uygulayıcı açısından kolay ayarlanabilir ve kolay uygulanabilir yapıları vardır.

OT denetim benzetimleri de (46) ve (47)'de verilen gerçekçi takip rotası için 0.5 rad/s başlangıç hızıyla gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar aynı koşullar için tasarlanan denetleyici ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. OT tipi denetleyicinin başarımlarını olabildiğince arttırmaya çalışarak yapılan tasarımın

verimliliğini daha net göstermek bu alt bölümün temel amacıdır. Bu sebeple OT denetleyici de geri adımlamalı bir yapı içerisinde hem sanal hem de gerçek denetim girişi olarak kullanılmıştır. Öncelikle bir sonraki eşitlikteki denetim girişi enerji üretim kısmına alan akımı olarak uygulanıp takip rotasına uygun bir rotor hızının elde edilmesi amaçlanmıştır.

$$I_{f_{v_{pi}}} = k_{p_v} e_1 + k_{i_v} \int_{t_0}^t e_1(\sigma) d\sigma. \quad (49)$$

Bu denetim girişi OT denetim benzetimleri için sanal denetleyici girişi olarak düşünülebilir. Daha sonrasında ise bu kısımda elde edilen gerekli alan akımı uyarıcı dinamo için takip edilmesi istenen akım değeri olarak düşünülmüş ve bu alt kısma aşağıdaki eşitlikteki OT denetim girişi alan gerilimi olarak uygulanarak alan akımının bu değere ulaşması sağlanmıştır.

$$u_{f_{pi}} = k_p e_2 + k_i \int_{t_0}^t e_2(\sigma) d\sigma. \quad (50)$$

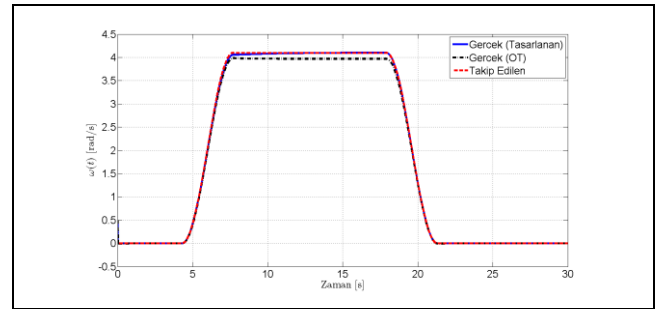
Bu noktada not edilmesi gereken durum (50) ile verilen denetim girişinin OT denetim benzetimleri için gerçek denetim girişi olmasıdır.

Her iki OT denetleyici için de denetim kazançları en iyi başarımlar elde edilene kadar deneme yanılma yöntemiyle ayarlanmış ve son olarak kullanılan değerler aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

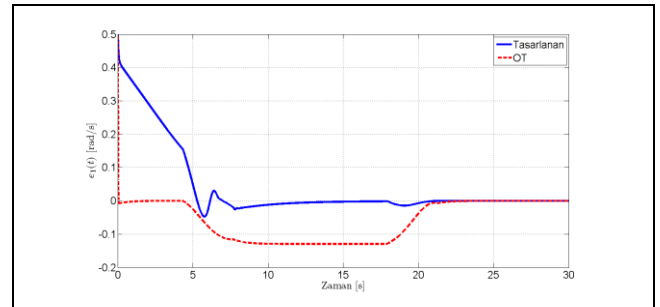
$$k_{p_v} = 0.019, \quad k_{i_v} = 0.025, \quad k_p = 0.013, \quad k_i = 0.02 \quad (51)$$

Bu noktada not edilmelidir ki OT denetleyicilerin başarımlarını daha iyi hale getirilmeye çalışıldığında alan geriliminde ve/veya rotor hızında sistem tarafından karşılanamayacak ani değişimler gözlemlenmeye başlamıştır.

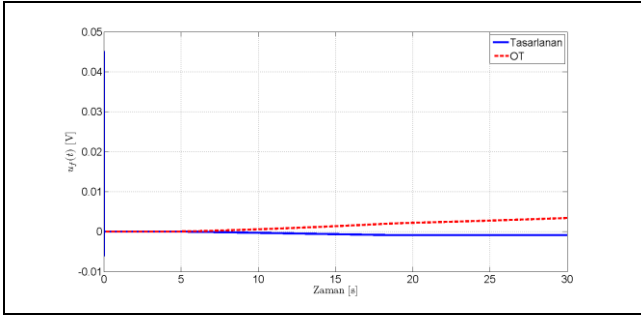
Karşılaştırmalı takip sonuçları, takip hataları ve alan gerilimleri sırasıyla Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de sunulmuştur. Şekiller 15 ve 16'dan da görülebileceği gibi tasarlanan dayanıklı uyarlamalı denetleyici, OT denetleyiciye göre çok daha iyi bir sürekli durum başarımlarını göstermiştir.



Şekil 15: Karşılaştırmalı takip sonuçları.



Şekil 16: Karşılaştırmalı takip hataları.



Şekil 17: Karşılaştırmalı giriş gerilimleri.

Karşılaştırmalı sonuçlar Tablo 1’de verilen nümerik başarımlar ölçütleri ile desteklenmiştir. Denetim başarımının ölçütü olarak takip hatasının mutlak değerinin altında kalan alan ($\int_{t_0}^t |e_1(\sigma)| d\sigma$), denetim çabasının ölçütü olarak ise alan geriliminin mutlak değerinin altında kalan alan ($\int_{t_0}^t |u_f(\sigma)| d\sigma$) kullanılmıştır. Bu tablodan da açıkça görülebileceği gibi tasarlanan denetleyici sadece daha iyi denetim başarımı göstermekle kalmamış aynı zamanda bunu daha az denetim çabasına ihtiyaç duyarak yapmıştır. Çalışmanın daha önceki kısımlarında da bahsedildiği gibi dayanıklı uyarlamalı bir denetleyicinin denetim çabası anlamında dayanıklı bir denetleyiciden daha iyi sonuç vermesi beklenen bir durumdur. Denetim başarımındaki fark ise kestirim kurallarının belirsiz parametreleri telafi etmek konusundaki başarısı ve tasarlanan denetleyicinin sistemin yapısına uygun olarak düşünülüp tasarlanmış olması ile açıklanabilir.

Tablo 1: Karşılaştırmalı benzetim çalışmaları için başarımlar ölçütleri.

Denetleyici	$\int_{t_0}^t e_1(\sigma) d\sigma$	$\int_{t_0}^t u_f(\sigma) d\sigma$
Tasarlanan	0.4597	0.0165
OT	1.7738	0.0426

5 Sonuçlar

Bu çalışmada değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızı denetimi için geri adımlama yaklaşımı temelli doğrusal olmayan bir tüm durum geri beslemeli dayanıklı uyarlamalı denetleyici tasarımı sunulmuştur. Bu tasarımın temel amacı değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin rotor hızını rüzgâr hızındaki değişimlere göre ayarlayarak enerji üretimini ve güç verimliliğini en üst noktaya çıkarmaktır. Tasarlanan denetleyicinin parametrik belirsizliklere karşı dayanıklı yapısı önerilen uyarlamalı parametre kestirim kurallarıyla sağlanmıştır. Bu sayede değişken hızlı rüzgâr türbinlerinin denetiminde sıklıkla karşılaşılan en büyük problemlerden biriyle başa çıkma yeterliğine sahip bir tasarım gerçekleştirilmiştir. Ek olarak çalışmada sunulan tasarım, uyarlamalı yapısı sayesinde, denetim hedefine dayanıklı denetleyicilere göre daha az denetim çabasına ihtiyaç duyarak ulaşma potansiyeline sahiptir. Tasarım özgün olmasının yanında sunulan haliyle, bilimsel yazında oldukça az bulunan, tüm belirsiz sistem parametrelerini sistem model bilgisinden bağımsız olarak kestirebilen denetleyici tasarımlarından biri konumundadır. Az miktarda bulunan benzer çalışmalara göre ise sunulan tasarımın en büyük kazanımı oldukça basit bir yapısının olmasıdır. Benzetim çalışmalarından ve denetleyici tasarımından da rahatlıkla görülebileceği gibi denetim amacına ulaşmak için sadece iki adet kazanç değerini uygun şekilde ayarlamak yeterlidir. Kazanç değerlerinin uygun şekilde

ayarlanmasının zorluğu ve denetim başarımına büyük etkisi düşünüldüğünde belirtilen kazanım ve özgünlük oldukça önemli etmenler olarak ön plana çıkmaktadır. Tasarımın kuramsal ispatı Lyapunov-temelli bir kapalı döngü kararlılık çözümlemesi ile gösterilmiş olup başarımlar gösterimi için benzetim çalışmalarından faydalanılmıştır.

Gerçeklenen tasarım mevcut haliyle bu tip sistemleri temel denetim hedefine ulaştırmak konusunda oldukça iyi bir başarımlar sağlamıştır. Fakat çalışmadaki açılal konum ölçümü gerekliliğini ortadan kaldırarak denetim tasarımını sadece hız geri beslemeli hale getirmek olası gelecek çalışmalardan bir tanesidir. Bu hedefin belirlenmesindeki en büyük sebep bilimsel yazın incelendiğinde rüzgâr türbini sistemlerinde hız ölçümlerinin daha yaygın olarak kullanıldığının tespit edilmiş olmasıdır. Açılal hız ölçümü uygun bir şekilde yapılabildikten sonra açılal konum ölçümüne ulaşmak çok zor olmasa da bu gerekliliğin ortadan kaldırıldığı özgün bir tasarım alanın gelişmesine katkı sağlayacaktır. İkincil gelecek hedefi ise tasarımı uygun bir deneysel kurulumla uygulayarak tasarımın gerçek hayattaki başarımını gözlemlemektir.

6 Kaynaklar

- [1] Laks J, Pao L, Wright A. "Control of wind turbines: Past, present, and future". *American Control Conference*, St. Louis, MO, USA, 10-12 June 2009.
- [2] Pao L, Jonhson K. "Control of wind turbines". *IEEE Control Systems*, 31(2), 44-62, 2011.
- [3] Bhandare A, Bandekar P, Mane S. "Wind energy maximum power extraction algorithms: A review". *International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability*, Nagercoil, India, 10-12 April 2013.
- [4] Song Y, Dhinarakaran B, Bao X. "Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms". *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85, 293-308, 2000.
- [5] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. "Adaptive control of variable speed wind turbines". *36th Universities of Power Engineering Conference*, Swansea, England, 12-14 September 2001.
- [6] Boukhezzar B, Siguerdidjane H. "Nonlinear control of variable speed wind turbines without wind speed measurement". *IEEE Conference on Decision and Control and the European Control Conference*, Seville, Spain, 12-15 December 2005.
- [7] Boukhezzar B, Siguerdidjane H, Hand M. "Nonlinear control of variable-speed wind turbines for generator torque limiting and power optimization". *Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4), 516-530, 2006.
- [8] Zhang J, Cheng M, Chen Z. "Nonlinear control of variable-speed wind turbines with permanent magnet generators". *International Conference on Electrical Machines and Systems*, Seoul, Korea, 8-11 October 2007.
- [9] Iyasere E, Salah M, Dawson D, Wagner J. "Nonlinear robust control to maximize energy". *American Control Conference*, Seattle, WA, USA, 11-13 June 2008.
- [10] Beltran B, Ahmed AT, Benbouzid M. "Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2), 551-558, 2008.
- [11] Beltran B, Ahmed AT, Benbouzid M. "High-order sliding mode control of variable speed wind turbines". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(9), 3314-3321, 2009.

- [12] Barambones O. "Sliding mode control strategy for wind turbine power maximization". *Energies*, 5(7), 2310-2330, 2012.
- [13] Hui J, Baksgai A. "A new adaptive control algorithm for maximum power point tracking for wind energy conversion systems". *IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Rhodes, Greece, 15-19 June 2008.
- [14] Ozbay U, Zergeroglu E, Sivrioglu S. "Adaptive backstepping control of variable speed wind turbines". *International Journal of Control*, 81(6), 910-919, 2008.
- [15] Fernandez L, Garcia C, Jurado F. "Comparative study on the performance of control systems for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines operating with power regulation". *Energy*, 33(9), 1438-1452, 2008.
- [16] Boukhezzer B, Siguerdidjane H. "Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26(1), 149-162, 2010.
- [17] Rajendran S, Jena D. "Control of variable speed variable pitch wind turbine at above and below rated wind speed". *Journal of Wind Energy*, 2014, 1-14, 2014.
- [18] Lin W, Hong CM. "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system". *Energy*, 36(6), 2440-2447, 2010.
- [19] Iyasere E, Salah M, Dawson D, Wagner J, Tatlicioglu E. "Optimum seeking-based non-linear controller to maximize energy capture in a variable speed wind turbine". *IET Control Theory & Applications*, 6(4), 526-532, 2012.
- [20] Ren B, Zhong QC. "UDE-based robust control of variable-speed wind turbines". *Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Vienna, Austria, 10-13 November 2013.
- [21] Ren B, Wang Y, Zhong QC. "UDE-based control of variable-speed wind turbine system". *International Journal of Control*, 90(1), 121-136, 2017.
- [22] Petkovic D, Cojbasic Z, Nikolic V, Shamshirband S, Kiah MLM, Anuar NB, Whab AWA. "Adaptive neuro-fuzzy maximal power extraction of wind turbine with continuously variable transmission". *Energy*, 64, 868-874, 2014.
- [23] Saravanakumar R, Jena D. "Validation of an integral sliding mode control for optimal control of a three blade variable speed variable pitch wind turbine". *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 69, 421-429, 2015.
- [24] Saravanakumar R, Jena D. "Nonlinear control of wind turbine with optimal power capture and load mitigation". *Energy Systems*, 7(3), 429-448, 2016.
- [25] Moradi H, Vossoughi G. "Robust control of the variable speed wind turbines in the presence of uncertainties: A comparison between H_∞ and PID controllers". *Energy*, 90(2), 1508-1521, 2015.
- [26] Seker M, Zergeroglu E, Tatlicioglu E. "Non-linear control of variable speed wind turbines with permanent magnet synchronous generators: A robust Backstepping Approach". *International Journal of Systems Science*, 47(2), 420-432, 2015.
- [27] Asl HJ, Yoon J. "Adaptive control of variable-speed wind turbines for power capture optimization". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(11), 1663-1672, 2017.
- [28] Coronado A, Gamez M, Penazola O. "Adaptive control of variable-speed variable-pitch wind turbines for power regulation". *IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications*, San Diego, CA, USA, 5-8 November 2017.
- [29] Ardjal A, Mansouri R, Bettayeb M. "Fractional order sliding mode control of wind turbine for maximum power tracking". *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41(2), 447-457, 2019.
- [30] Shaltout ML, Ma Z, Chen D. "An adaptive economic model predictive control approach for wind turbines". *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 140(5), 2018.
- [31] Bidikli B. "A robust adaptive control design for the rotor speed control of variable speed wind turbines". *International Journal of Control*, In press, <https://doi.org/10.1080/00207179.2019.1566644>, (22.01.2019).
- [32] Bergen AR. *Power system analysis*. Delhi, India, Pearson Education, 2009.
- [33] Krstic M. "Manifolds and asymptotic properties of adaptive nonlinear stabilizers". *IEEE Transactions On Automatic Control*, 41(6), 817-829, 1996.