

RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜMÜ EMÜLASYON SİSTEMİ

Siamak Pourkeivannour, H. Bülent Ertan²

¹ODTÜ-RÜZGEM, ²ATILIM Üniversitesi

¹siamak.pourkeivannour@metu.edu.tr, ²bulent.ertan@atilim.edu.tr

ÖZET

Rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren sistemleri incelemek için, gerçek zamanlı emülatöre sahip olmak büyük önem taşımaktadır. Yeni bir türbin tasarımı veya yeni bir jeneratörün davranışı gerçekçi koşullar altında test edilmelidir. Benzer şekilde yeni bir kontrol algoritması da gerçekçi koşullar altında test edilmelidir. Rüzgâr enerjisi dönüşüm emülatörü kontrollü koşullar altında bu testleri mümkün kılar. Bu bildiride, ODTÜ Rüzgâr Araştırmaları Merkezinde geliştirilen rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşümünü emüle eden “yazılım içinde donanım” (YİD) ekipmanı tanıtılmaktadır. Bu sistemde, bilgisayarda bir türbin modeli oluşturulur. Tanımlı veya kaydedilmiş bir rüzgâr rejimi girdiyi oluşturmaktadır. Türbin modeli yazılımdan elde edilen şaft momenti ve hızı, bir elektrik motorunu süren sürücüye referans olacak şekilde gönderilerek motor şaftının rüzgâr türbini şaftı ile aynı davranışı göstermesi sağlanmaktadır. Bu şaft çıkışına, sahada kullanılacak alternatör ve diğer ekipmanlar bağlanabilir. Bu sistem sayesinde, sahada yakalanması zor olan rüzgâr koşullarının veya arıza koşullarının, gerçek sistemde kullanılarak, donanım ve yazılımlarının test edilmesi sağlanmış olunur. Sistem üzerinde yapılan deneylerle emülatörün maksimum güç noktası algoritması performansının hassasiyeti de gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Dünyada enerji talebi sürekli artmaktadır. Bu durum fosil enerji kaynakları için büyük bir yük oluşturmaktadır. Ayrıca fosil yakıtların ısıtma ve elektrik üretimi için kullanılması küresel ısınmaya yol açtığı bilinmektedir. Küresel ısınma dünyamız ve insanlık için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. Sonuç olarak yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanarak enerji ihtiyacımızı karşılamak çok önemli bir konuya dönüşmüştür. Yenilenebilir enerji dönüşüm teknolojileri arasında; güneş enerjisini elektrik enerjisine ve rüzgâr enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren teknolojiler, enerji ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılama anlamında umut vadetmektedir.

Yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde edilmesi ve onların kullanılması sırasında kimi belirsizlikler ve yeni aşılması gereken zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Tüketicie sağlanan enerjinin güvenliğinden ve kalitesinden ödün vermemek için, tüketici talebinin karşılanması ve yönetilmesi aşamasında yeni çözümler bulunması gerekmektedir. Bu nedenle talebin karşılanması, güvenlik ve kalitenin sağlanması için kapsamlı araştırmaların yapılması gerekmektedir. Bundan hareketle, çalışma koşullarını simüle edilebilecek ortamların oluşturulması çok önemlidir. Böyle tip bir ortam, enerji dengesini ve kalitesini korumak için kontrol stratejilerini test etmek için kullanılabilir. Yeni geliştirilen donanım ve yazılım tedarik stratejileri gerçekçi bir ortamda test edilebilir. Bunun yanında sahada yakalanması zor olan ve ekipmana zarar verebilecek çalışma koşulları, test ortamında oluşturulabilir ve bu koşullar kişilerin kontrolü ile oluşturulabilir. Ayrıca bu koşulları yönetmek için geliştirilmiş donanım ve yazılım test edilebilir.

İspanya, Almanya, Danimarka ve Hollanda gibi Avrupa ülkelerinde, tam ölçekli “Yazılım İçinde Donanım” (YİD) deney ortamları mevcuttur. Literatür incelendiğinde, rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşüm sistemlerinin test edilmesi için YİD emülatörlerinin çeşitli yönlerine

odaklanan çok sayıda makale bulunduğu ve bu tür emülatörlerin rüzgâr enerjisi dönüşümünün çeşitli yönlerini araştırmak için kullanıldığı görülmektedir [1-10].

Bu bildiriye, ODTÜ-RUZGEM araştırma merkezinde geliştirilen, rüzgar-elektrik enerjisi dönüştürücü sistemlerini araştırabilecek, “Yazılım İçinde Donanım” (YİD) emülatörü tanıtılmaktadır. Sistem performansının gerçekçiliğini göstermek için sistemin değişken rüzgar hızlarında, maksimum güç noktasını bulma algoritmasının (MPPT) performansını gösteren bazı deney sonuçları da sunulmuştur. Bu sistemin, tam ölçekli test ortamı için gerekli donanımı ve yazılımı geliştirmek için kullanılması planlanmaktadır. Bu sistem çeşitli enerji üretim birimlerinin, depolama tesislerinin ve tüketicilerden oluşan karmaşık akıllı şebekelerin sorunlarının araştırılması için de kullanılabilir.

YİD ortamında, testler gerçek zamanlı olarak gerçekleştirildiğinden, doğru bir ölçüm donanımının kurulması önemlidir. Veriler gerçek zamanlı olarak kaydedilmeli ve daha sonra verilerin işlenmesi kolay olmalıdır. Sistem aynı zamanda kullanıcı dostu olmalıdır. Bir test koşulu oluşturmak zaman alıcı olmamalıdır. Ayrıca, test sistemini oluşturan çeşitli donanımlar; örneğin jeneratörler, dönüştürücüler, dişli kutusu vb., test ortamının farklı koşullara uyandırabilmesi için esnek bir yapıya sahip olacak şekilde bir araya getirilmelidir.

Azru edilen diğer bir unsur da rüzgar enerjisi dönüştürücü sisteminin, hem şebekeye bağlı hem de şebekeden izole (ada) işletme modunda çalışabilmesidir. Bu yazıda açıklanan ortam, tüm bu gereklilikleri karşılayabilir niteliktedir. Aşağıdaki bölümlerde, bu sistemin tasarımı ve gerçekleştirilmesinde belirlenen hedeflere nasıl ulaşıldığı açıklanmaktadır.

Test ortamının güç değeri bu çalışmada düşük tutulmuştur. Ancak, bu YİD sistemi için geliştirilen yazılım ve donanım daha büyük ölçekli sistemlere kolaylıkla uygulanabilir. Ayrıca, ölçeklendirme yoluyla, daha büyük güçteki sistemlerin davranışları, geliştirilen emülatör üzerinde çalışmasını da mümkündür [11].

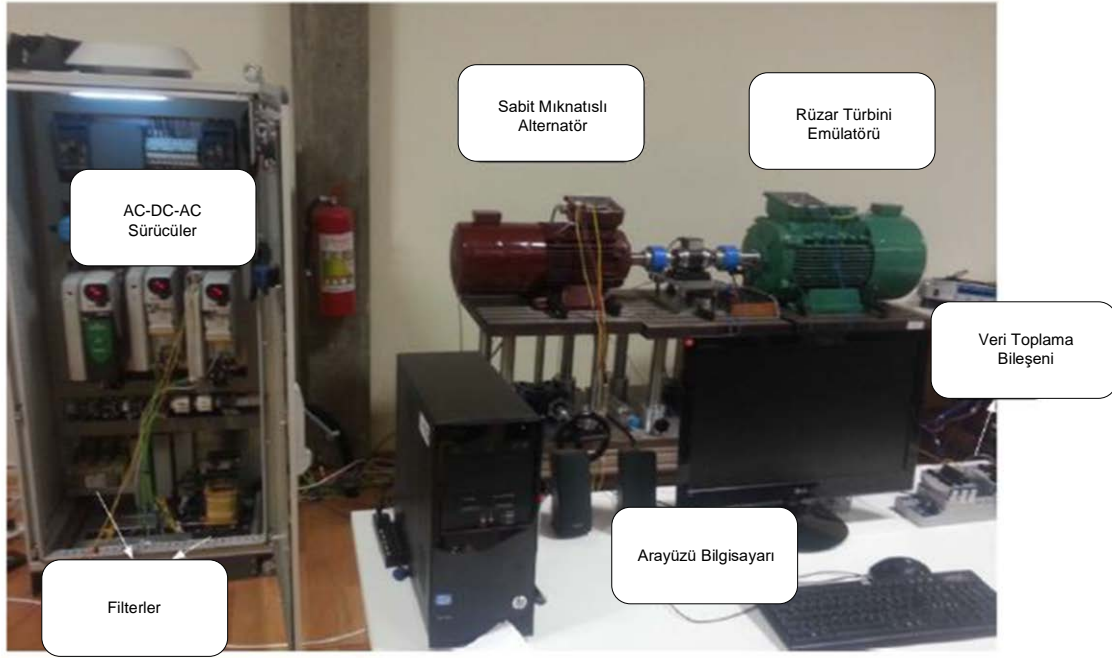
2. YAZILIM İÇİNDE DONANIM ORTAMININ TEMEL ÖZELLİKLERİ

Rüzgâr enerjisi sistemlerinin test edilmesinde asıl zorluk, belirli bir çalışma koşulundaki performansı test edilebilmek için, istenen rüzgâr koşullarına erişmektir. İstenilen zamanda doğru rüzgâr mevcudiyetine sahip olmak imkânsızdır. Ayrıca, rüzgârın olduğu yerlerde, test koşulları genellikle uygun değildir. Bu olumsuzluklara alternatif olarak, rüzgâr türbini istenen koşulların yaratılabileceği bir rüzgâr tüneline çalıştırılabilir. Türbinin güç değeri arttıkça, çok büyük ve çok pahalı bir rüzgâr tüneline ihtiyaç olduğu gözden kaçırılmamalıdır. Bunu akılda tutarak ve gerçekçi çalışma koşullarına ulaşmak için; Şekil 1'de şematik olarak gösterilen “yazılım içinde donanım” tabanlı emülatör geliştirilmiştir. Sistem bileşenleri, sensörleri ve ana bilgisayara geri bildirim ve veri sağlayan unsurlar Şekil 1’de verilen diyagramda görülmektedir.

Sistemin ana bileşenleri aşağıda kısaca açıklanmıştır.

- Ana bilgisayar

Bu birim, zamana göre rüzgâr hızı verilerini alır ve rüzgâr türbini için tork referansın değeri hesaplar. Bu bilgisayarın bünyesinde kurulu bir maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritması vardır. Bu algoritma türbinin bu durumda çalışmasını sağlar. Türbinden alınabilen maksimum gücü hesaplar ve “Şebekeye bağlı dönüştürücü”, bu gücün şebekeye aktarılması için gereken referans sinyallerini üretir ve gönderir. Ayrıca, veri toplama sisteminden ölçülen değerleri toplar ve depolar.



Şekil 2. Laboratuvarda Kurulan Rüzgar-Elektrik Dönüşüm Emülatörünün Görünümü

Bu donanım tüm sistemi kontrol eden bir yazılım tarafından yönetilmektedir. Ana bilgisayarda yüklü olan kullanıcı arayüzünü, kullanıcının uygun koşullarını seçmesine izin verir. İlk veri olarak, türbin karakteristiğini tanımlayan parametreler girilir (türbin yarıçapı, kanat ayar özelliği, hava yoğunluğu vb.). Bu yazılımın diğer önemli özellikleri aşağıdaki bölümde açıklanmıştır.

3. SİSTEMİN YAZILIM ÖZELLİKLERİ

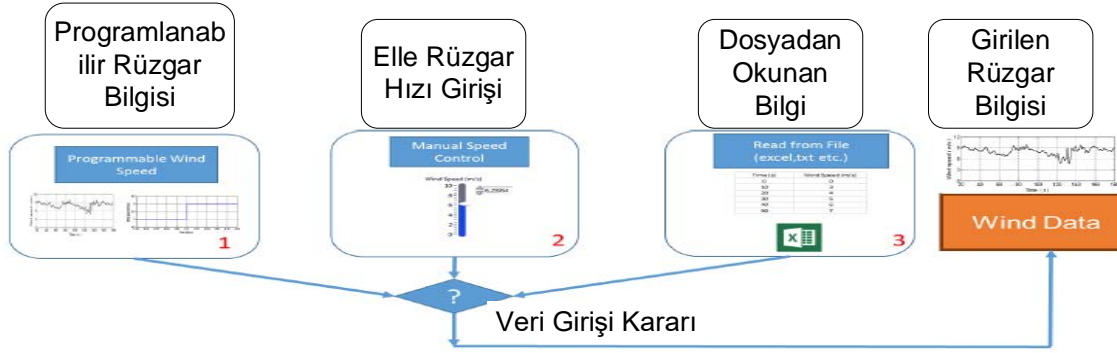
Bu bölümde “Yazılım İçinde Donanım” (YID) rüzgâr-elektrik enerjisi dönüşüm sisteminin, bazı yönleri sunulmuştur. Bu sistemde kullanılan yazılımın önemli bileşenleri aşağıda verilmiştir.

- Rüzgâr verisi giriş bileşeni
- Rüzgâr türbini modeli bileşeni
- MPPT algoritması bileşeni
- Kullanıcı arayüzü bileşeni
- Veri işleme bileşeni

Bu bölümde, emülatörün esnekliğini, geliştirilen ve herhangi bir türbinin özelliklerini kullanarak nasıl modellenebileceğini göstermek için sadece yukarıda belirtilen ilk iki bileşene odaklanılmıştır.

Rüzgâr Verisi Giriş Bileşeni

Bu modül kullanıcının sisteme belirli bir rüzgar profili girmesini sağlar. Bu veri ölçümler üzerinden elde edilebilir veya kullanıcı tarafından belirli bir çalışma koşulunu incelemek için oluşturulabilir. Şekil 3'te verilen akış şemasında gösterildiği gibi, üç veri girişi modu vardır.



Şekil 3. Rüzgar Verisi Giriş Bileşeninin Blok Şeması

- Zamana karşı rüzgâr hızı bir fonksiyon olarak girilebilir.
- Rüzgâr hızı ekranda farenin imleci ile istenildiği gibi kontrol edilebilir.
- Zamana karşı rüzgâr hızı, bilgisayarda depolanan bir Excel dosyasından veya metin dosyasından girilebilir.

Kullanıcı verinin örnekleme sayısını seçebilir. Sistem, rüzgâr hızının başka bir rüzgâr hızı bilgisi girilene kadar sabit kaldığını varsayar. Rüzgâr hızı girildikten sonra, rüzgâr türbini modülü, türbinin mevcut yük ile çalışacağı torku hesaplar ve çalışması için türbini temsil eden asenkron motor sürücüsüne tork referans değeri gönderir. Daha sonra MPPT modülü gride enerji aktaran dönüştürücüye referans çıkış gücü miktarının iletir. Böylece motor shaft hızını ayarlar, alternatörün shaft hızı ve çıkış gerilimi ile akım verileri ana bilgisayara geri bildirilir. Bu sayede MPPT algoritması istenen çalışma durumuna ulaşmak için bir sonraki shaft hızını tahmin eder ve verilen rüzgâr hızında maksimum enerjinin şebekeye aktarılmasını sağlar.

Türbin-kanat açısı başlangıçta 0 derece olarak ayarlanır. Sistem denetleme yazılımı, kanat açısını gerektiğinde türbin modelinde değişiklik yaparak, ayarlayabilir olmasını ve türbinin istenen koşulda çalışmasını sağlar.

4. RÜZGAR TÜRBİNİ MODEL BİLEŞENİ

“Rüzgâr türbini model” bileşeni, emülatörde rüzgâr türbini benzeten endüksiyon motorunu kontrol eden dönüştürücü için tork referansını hesaplar. Torku hesaplamak için o andaki rüzgar hızından yararlanıp türbin milindeki güç belirlenir. Türbinin ürettiği güç Denklem (1) 'de verilmiştir.

$$P_t = 0.5 \rho C_p(\lambda, \beta) A v^3 \quad (1)$$

A : kanatın süpürdüğü alan (m^2), ρ : havanın yoğunluğu (kg/m^3), v : rüzgâr hızı (m/s), R : türbin kanadının yarıçapı (m), ω_r : shaftın açısal hızı (rad/s), C_p : güç katsayısı, β : kanat açısı λ : Kanat ucu hız oranı (TSR) ve λ şu şekilde hesaplanabilir: $(\omega_r * R) / v$.

C_p , türbin gücünün rüzgâr gücüne oranı olarak tanımlanır. C_p , iki parametreye bağlı fonksiyondur; Kanat ucu hız oranı (λ) ve kanat açısı (β). Bu nedenle, rüzgâr hızı verileri elde edildikten sonra, türbin shaftında mevcut güç Denklem 1'den hesaplanır. Aslında gerçek güç çeşitli kayıplar nedeni ile hesaplanan değerden biraz daha düşüktür ve bu oluşturulan modelde bu kayıplar dikkate alınmaktadır. Bu unsur belirli bir türbin için kullanıcı tarafından ayarlanabilir.

Verilen bir rüzgâr hızı için maksimum güç noktası izleme (MPPT) algoritmasından hesaplanan türbinin maksimum güç çıkışına karşı gelen bir shaft hızı vardır. Bu hız değeri, sistemden

maksimum güç elde etmek için türbinin çalışmasında gerekli olan hız değeridir. Bu hız değerinden türbinin üreteceği moment Denklem 1'den kolayca hesaplanabilir.

Ancak, türbin gücünün hesaplanmasında kulenin gölge etkisi ve farklı yüksekliklerde değişen rüzgâr hızından kaynaklanan moment salınımları da etkindir. Geliştirilen modelde bu etkilerin her ikisi de referans torkun hesaplanmasında dikkate alınmaktadır.

Rüzgâr türbini modelinden hesaplanan moment değeri, rüzgâr türbinini temsil eden elektrik motoru için referans sinyalini üretir. Bu sinyal Modbus üzerinden motoru süren vektör kontrollü dönüştürücüye gönderir. Hesaplanan türbin momenti türbinin maksimum güç noktasında üretebileceği momenti belirler. Bu bilgiden üretilen referans sinyali ise gride bağlı evirgecin referans sinyalini oluşturur.

Referans torkunun, hızının hesaplanması, bu bilgilerin motor sürücüyü aktarılması ve sürücünün referans sinyaline tepkisi yaklaşık 1 mili saniye sürmektedir. Bu nedenle, rüzgâr veri girişini daha hızlı güncellemek anlamlı değildir. Burada yapılan uygulamada rüzgâr verisinin 50 ms civarında güncellenmesi önerilmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu noktadan itibaren MPPT algoritması girilen rüzgâr hızına göre emülatörü kontrol etmeye başlar.

Bir sonraki bölümde emülatör üzerinde yapılan bazı deneylerin sonuçları verilmektedir. Bu deneylerde türbin üreticisinin sağladığı karakteristik özelliklerden yararlanılarak belirlenen maksimum güç noktasına ulaşmak için emülatörün değişen rüzgâr hızına karşı tepkisi incelenmektedir.

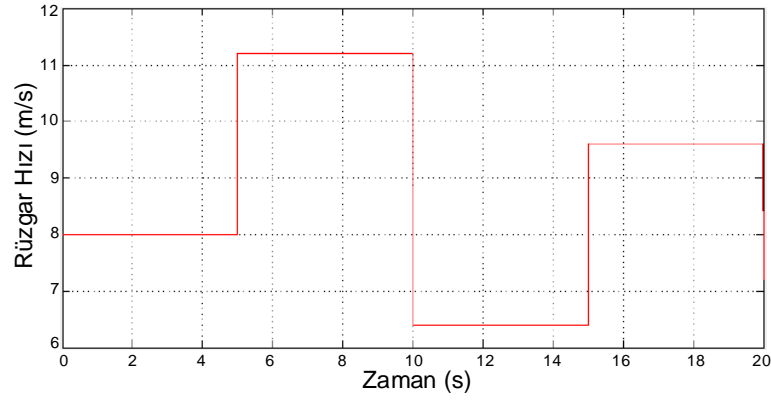
5. DENEYLER

Bu bölümde, emülatör sistemi üzerinde yapılan testlerden birinin sonuçları gösterilmiştir. Sistem belirli bir rüzgâr hızı için maksimum güç çıktısını elde edebilmektedir. Bu test sırasında sabit mıknatıslı jeneratör türbin şaftını temsil eden endüksiyon motorunun şaftına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, şaft hızı, gerçek türbin için 75 rpm yerine 750 rpm'dir. Bununla birlikte, bunun MPPT algoritmasının test edilmesinde önemi yoktur.

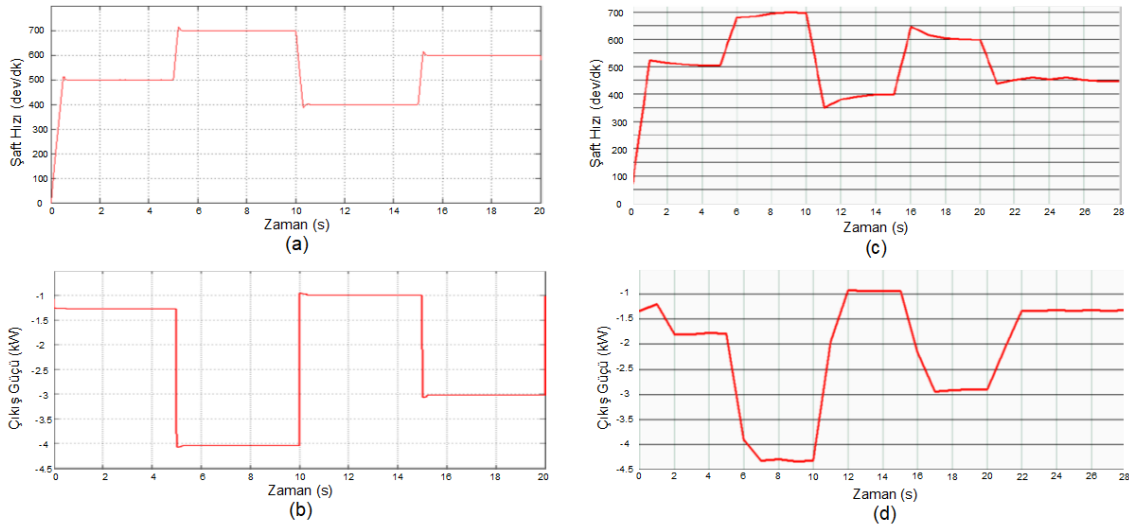
Şekil 4'te gösterilen rüzgâr hızı profili, ana bilgisayara rüzgâr verisi olarak girilmiştir. İzlenebileceği gibi ilk rüzgâr hızı 8 m/s'dir ve 5 saniye boyunca sabit kalır ve daha sonra 11,2 m/s'ye çıkar, ardından 6,4 m/s ve 9,6 m/s değerlerinde her biri 5 saniye olacak şekilde sabit kalır. MPPT algoritması ve emülatör sistemi düzgün bir şekilde çalışıyorsa, emülatörün şaftının hızı, her rüzgâr hızı için türbinden maksimum güç aktarma koşulunu sağlamak için MPPT algoritması tarafından otomatik olarak değişmektedir. Bunu yapabilmek için, daha önce sözü edildiği gibi denetleyici, sistemin şebekeye aktardığı gücü ayarlar.

Şekil - 5a ve 5b'de, her bir rüzgâr hızı ve buna karşılık gelen türbinin maksimum güç noktasındaki güç çıkışı izlenebilir. Emülatör sisteminden ölçülen değerler, Şekil - 5c ve 5d'de verilmiştir.

Bu sonuçlar incelendiğinde, emülatörün beklenen güç çıkışını % 5'in altında bir hata payı ile gözlemlenmektedir. Ayrıca emülatörün beklenen güç çıkışında önemli bir salınım gözlenmemektedir. Beklenildiği gibi her rüzgâr hızı için emülatör sisteminde, istenen çalışma durumuna ulaşmada gecikmeler vardır. Bu gecikmeler iletişim için geçen zaman ve ayrıca çeşitli PI kontrolörlerinin etkilerinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 1. Emülatöre Uygulanan Rüzgâr Hızı Profili



Şekil 2. (a) ve (b) Beklenen Şaft Hızı ve Şaftın Çıkış Gücü. (c) ve (d) Ölçülen Şaft Hızı ve Şaftın Çıkış Gücü

Sistem denetim yazılımının parametreleri ayarlanarak sistem performansı iyileştirilebilir.

6. SONUÇ

Bu yazıda ODTÜ-RÜZGEM laboratuvarları tarafından geliştirilen rüzgar-elektrik enerjisi dönüşüm sistemi araştırmaları için kullanılması planlanan “yazılım içinde donanım” sisteminin temel özellikleri açıklanmıştır. Bildiride sunulan deney sonuçları türbinin maksimum güç noktasını çok iyi izleyebildiğini göstermektedir. Yazarlar, sistemin şebekeye bağlı ve ada modunda çalışmasını incelemek ve simülasyon koşullarını iyileştirmek için araştırmalarını sürdürmektedir. Bu çalışmalar başka bir bildirinin konusu olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma ODTÜ Rüzgâr Enerjisi Merkezi (RÜZGEM) tarafından desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **N. Muntean, L. Tutulea, D. Petrila, and O. Pelan**, "Hardware in the loop wind turbine emulator," *Int. Aegean Conf. Electr. Mach. Power Electron. ACEMP 2011 Electromotion 2011 Jt. Conf.*, no. September, pp. 53–58, 2013.
- [2] **I. Munteanu, A. I. Bratcu, S. Bacha, D. Roye, J. Guiraud**, "Hardware-in-the-Loop-based Simulator for a Class of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems: Design and Performance Assessment," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 25, no. 2, pp. 564–576, June 2010.
- [3] **P. K. Banerjee and M. Arifujjaman**, "Development of a test-rig for large scale wind turbine emulation," in *Proc. Int. Conf. Electr. Comput. Eng. (ICECE'10)*, Dec. 2010, pp. 159–162.
- [4] **J. Mushi, K. Han, G. Chen, and J. Daozhuo**, "Design and implementation of wind turbine imitation system for direct drive permanent magnet synchronous generator using dc motor," in *Proc. IEEE Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply*, Apr. 2009, pp. 1–6.
- [5] **J. Li, B. Zhou, and H. Guo**, "Hardware-in-loop simulation of wind turbine based on BLDCM," in *Proc. World Non-Grid-Connected Wind Power Energy Conf. (WNWEC'09)*, Sep. 2009, pp. 1–5.
- [6] **R. I. Ovando, J. Aguayo, and M. Cotorogea**, "Emulation of a low power wind turbine with a dc motor in Matlab/Simulink," in *Proc. IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, Jun. 2007, pp. 859–864.
- [7] **M. Arifujjaman, M. Iqbal, and J. Quaicoe**, "An isolated small wind turbine emulator," in *Proc. IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, May 2006, pp. 1854–1857.
- [8] **H. Li, M. Steurer, K.L. Shi, S. Woodruff, D. Zhang**, "Development of a Unified Design, Test, and Research Platform for Wind Energy Systems Based on Hardware-in-the-Loop Real-Time Simulation," *IEEE Trans. Ind. Elect.*, vol. 53, no. 4, pp.1144-1151, Aug. 2006.
- [9] **S. Song, B. Jeong, H. Lee, J. Kim, J. Oh, G. Venkataramanan**, "Emulation of Output Characteristics of Rotor Blade Using Hardware-In-Loop Wind Turbine Simulator," in *Proc. IEEE APEC*, Mar. 6-10,2005, vol.3, pp. 1791-1796.
- [10] **H. Kojabadi, L. Chang, and T. Boutot**, "Development of a novel wind turbine simulator for wind energy conversion systems using an inverter-controlled induction motor," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 19, no. 3, pp. 547–552, Sep. 2004.
- [11] **S. Pourkeivannour, H. B. Ertan**, "Accurate scale modeling for the dynamic behavior of a large wind turbine on a Wind Turbine Emulator," *VI. European Conference on Renewable Energies. ECRES, Istanbul, Sep, 2018*, pp. 53–58, 2013.