



Otonom bir Rüzgâr Enerji Sistemi için Örnek Test Düzenine Gerçekleşmesi

Ersagun Kürşat YAYLACI^{1,*}, İrfan YAZICI²

¹Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 78050, KARABÜK

²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54050, Serdivan/SAKARYA

Öz

Rüzgâr enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülerek kullanılmasına yönelik mekanik ve elektriksel olarak birçok çalışma yapılmıştır. Mekanik çalışmalar genel olarak rüzgâr türbini ve özel tip makine tasarımlarıdır. Elektriksel çalışmalar ise güç dönüştürücü devreleri, şebeke entegrasyonu ve maksimum güç noktasının takibi konusunda yapılan çalışmalardır. Elektriksel çalışmaların yapılabilmesi için rüzgâr enerji dönüşüm sistemine (REDS) ihtiyaç duyulur. Ancak bir rüzgâr enerji santralinde çalışma imkânı yoksa rüzgâr enerji sisteminin gerçek zamanlı modelinin laboratuvar ortamında oluşturulması gerekmektedir. REDS'ler birçok farklı topolojide olabilmektedir. Genel olarak; rüzgâr türbini/rüzgâr türbini emülatörü, generatör ve güç dönüştürücü birimlerinden oluşmaktadır. Bu konuda literatürde oldukça fazla çalışma yapılmış olmasına rağmen, kurulan gerçek zamanlı sistem modeli hakkında detaylı bilgi elde edilememek çoğunlukla mümkün gözükmemektedir. Bu çalışmada, bu amaç göz önüne alınarak gerçek zamanlı rüzgâr enerji sisteminin deneysel ortamda oluşturulması detaylı olarak ele alınmış ve bu alanda çalışma yapacak araştırmacılara ışık tutması amaçlanmıştır. Kurulan gerçek zamanlı deney düzeninde maksimum güç çalışması için gerekli olan performans katsayısına ilişkin grafik elde edilmiş ve böylece kurulan deney düzeninin gerçek rüzgâr türbini ile aynı olduğu gösterilmiştir. Bunun yanı sıra sabit bir rüzgâr hızı için tasarlanan kontrol algoritması sisteme uygulanarak sistemin maksimum güç noktasında işletimi sağlanmıştır.

Makale Bilgisi

Başvuru: 09/10/2018

Düzeltilme: 18/12/2018

Kabul: 13/01/2019

Anahtar Kelimeler

Rüzgâr enerjisi

Rüzgâr enerji sistemi

Sabit mıknatıslı senkron jeneratör

Maksimum güç noktasının takibi

Keywords

Wind Energy

Wind energy system

Permanent magnet

synchronous generator

Maximum power point tracking

Implementation of a Sample Test System for an Autonomous Wind Energy System

Abstract

Many studies have been made in terms of mechanical and electrical related to using of convert the wind energy into electrical energy. The mechanical studies are generally wind turbine and special type machine designs. The electrical studies are the studies on power converter circuits, grid integration, and maximum power point tracking. A wind energy conversion system (WECS) is required to perform electrical studies. However, if there is no possibility to study in a wind power plant, the real-time model of the wind energy system should be established in the laboratory environment. The WECSs can be in many different topologies. Generally; the WECSs consist of wind turbine/wind turbine emulator, generator and power converter units. Although much work has been done in the literature on this topic, it is not possible to obtain detailed information about the established real-time system model. In this study, considering this aim, the real-time wind energy system is presented in detail and it is aimed to shed light on the researchers working in this field. The graph of the performance coefficient required for maximum power point tracking in the established experimental setup has been obtained and it was shown that the established experimental setup is similar to the real wind energy system. In addition, the system has been operated at maximum power point by applying the designed control algorithm to the system for a constant wind speed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Her geçen yıl artış gösteren elektriksel enerji talebi; fosil yakıtların tükenmeye doğru gitmesi ve çevresel olumsuz etkileri nedeniyle, alternatif enerji kaynaklarına yönelimi arttırmaktadır. Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından birisi olup doğada sonsuz kaynağa sahip ve çevre dostu bir enerji kaynağıdır [1, 2]. Ayrıca rüzgâr enerjisi, güneş oldukça varlığını sürdürebileceği gerekçesiyle tükenmez bir enerji kaynağı olarak görülmektedir. Bu sebeple rüzgâr enerjisi üretim kaynakları, gelecek için potansiyel bir alternatif enerji kaynağı olarak görülmektedir [3, 4].

Son yıllarda rüzgâr enerjisinin yenilenebilir enerji kaynakları arasında en iyi büyüme hızına sahip olduğu görülmektedir [5]. 2030 yılına kadar 1000 GW kurulu güç kapasitesi ile yaklaşık 2700 TWh rüzgâr enerjisi üretilebileceği ve bu değer toplam elektrik tüketiminin %9'una karşılık geleceği öngörülmektedir. 2050 yılına dek ise bu oranın %12 seviyelerine geleceği düşünülmektedir [6]. Büyük rüzgâr türbinleri neredeyse teknolojik olgunluğa erişmiş olup küçük ölçekli rüzgâr enerji dönüşüm sistemlerinin (REDS) daha da optimize edilerek verimliliklerinin ve güvenilirliklerinin artırılması gerekmektedir [5].

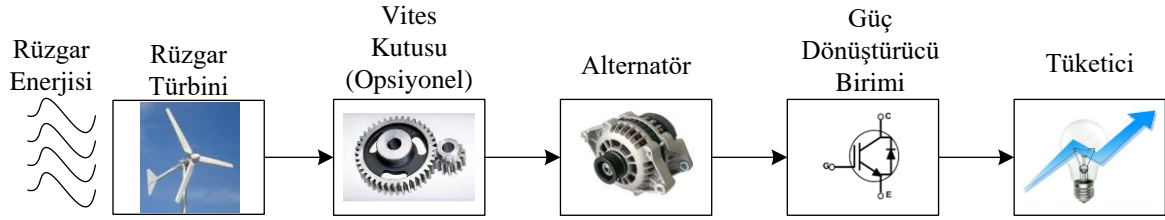
REDS'lerde verimliliğin artırılabilmesi için genel olarak rüzgâr türbin tasarımlarında yapılabilecek geliştirmeler ya da maksimum güç noktasının takibi (MGNT) konusunda yapılabilecek iyileştirmeler öne çıkmaktadır. Kanat tasarımında yapılan çalışmalar, performans ya da güç katsayısının Betz sınırı olarak bilinen maksimum sınırına olabildiğince yaklaşmasını sağlamak amacıyla yapılan çalışmalar olup daha çok kanatların mekanik geometrisi ile ilgilidir. MGNT çalışmaları ise her rüzgâr türbinine ait performans katsayısının, değişen rüzgâr hızına rağmen maksimum değerinin sağlanması amacıyla yapılır ve elektriksel olarak makine devir sayısının ayarlanması prensibine dayanır. Güvenilirlik çalışmaları denildiğinde ise REDS'lerin şebeke entegrasyonu ve güç kalitesine olan etkisi ön plana çıkmaktadır.

Tüm bu çalışmaları yapabilmek amacıyla her ne kadar benzetim programları kullanılabilir olsa dahi gerçek bir sistem modeli üzerinde çalışmak; yapılan çalışmanın gerçeğe daha uygun olduğunu kanıtlayabilmektedir. Literatür çalışmalarında gerçek zamanlı REDS'ler ile alakalı birçok çalışma yapılmıştır [7–11]. Gerçek zamanlı REDS modelleri birçok topolojilere sahip olabilmektedir. Genel olarak; rüzgâr türbini/rüzgâr türbini emülatörü, generatör ve güç dönüştürücü birimlerinden oluşmaktadır. REDS'ler kullanılarak literatürde akademik oldukça fazla deneysel çalışma yapılmış olmasına rağmen, kurulan gerçek zamanlı sistem modeli hakkında detaylı bilgi elde edebilmek çoğunlukla mümkün gözükmemektedir.

Bu çalışmada tüm bu sebepler göz önüne alınarak gerçek zamanlı REDS modelinin deneysel ortamda oluşturulması ele alınmış olup bu alanda çalışma yapacak kişilere ışık tutması amaçlanmıştır. Kurulan sistem modelinde, her bileşenin birbiri ile uyumlu olması gerekmekte ve sistem ancak bu şekilde gerçek modele yakın olabilmektedir. Bu amaçla her birim sırasıyla açıklanmış, benzetim modeli blok diyagramı ile verilmiş ve deneysel düzenek laboratuvar ortamında kurulmuş olan modeli verilerek ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Bunun yanısıra bu deneysel düzenek ile MGNT çalışmaları için gerekli olan performans katsayısı grafiği elde edilmiş ve MATLAB/Simulink modelinde elde edilen performans katsayısı grafiği ile karşılaştırılmıştır. Son olarak kontrol algoritması sayısal işlemciye yüklenerek sistemin MGNT çalışması yapılmış ve sonuçlar sunulmuştur.

2. RÜZGÂR ENERJİ DÖNÜŞÜM SİSTEMİ (WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM)

REDS'ler kullanılan topolojiye göre değişiklik gösterebilmesine rağmen genel olarak bir rüzgâr enerji dönüşüm sistemi şematik olarak Şekil 1'de verilmiştir. Öncelikle aerodinamik rüzgâr enerjisi türbin tarafından kanatları vasıtasıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu mekanik enerji; türbin şaftına doğrudan ya da vites kutusu üzerinden bağlı olan generatör vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürülür. Güç dönüştürücü birimine aktarılan elektrik enerjisi ile güç dönüştürücü biriminde hem MGNT çalışmaları yapılır hem de şebeke ya da tüketici ölçütlerine uygun hale getirilip kullanıcıya aktarılır.



Şekil 1. Klasik bir rüzgâr enerji dönüşüm sistemi şematik diyagramı (Schematic diagram of a conventional wind energy conversion system)

2.1. Rüzgâr Türbini (Wind Turbine)

Rüzgâr türbinleri; çok farklı yapılara sahip olmakla birlikte milinin yatay ya da düşey olmasına göre sınıflandırılırlar. Günümüzde en çok kullanılan rüzgâr türbini modeli; yatay eksenli olan türbin modelidir. Bu çalışmada da yatay eksenli bir rüzgâr türbin modeli esas alınmıştır. Rüzgâr türbini tarafından rüzgârdan çekilebilen mekanik güç

$$P_m = 0.5\rho A c_p V_r^3 \quad (1)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada ρ ; hava yoğunluğu (kg/m^3), A ; kanatların süpürdüğü alan, c_p ; performans katsayısı ve V_r ; rüzgâr hızı (m/s) değerlerini temsil etmektedir. Performans katsayısının değeri; Betz limiti olarak bilinen 0,59 değeri ile sınırlı olup kanatların mekanik tasarımına, kanat açısına (β) ve kanat uç hız oranına (λ) bağlı olarak değişmektedir. Literatür çalışmalarında sıklıkla kullanılan rüzgâr türbini modeli performans katsayısına ilişkin ifade aşağıda verilmiştir.

$$c_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) 116 - 0.4\beta - 5 \right) e^{-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right)} + 0.0068\lambda \quad (2)$$

Burada verilen sabit katsayılar kanatların mekanik tasarımına göre değişebilen katsayılardır. Kanat açısı nominal rüzgâr hızının üzerine çıkıldığında değiştirilerek türbinin devreden çıkarma hızına dek sabit güçte çalışmasını temin etmek için kullanılır. Kanat uç hız oranı ise;

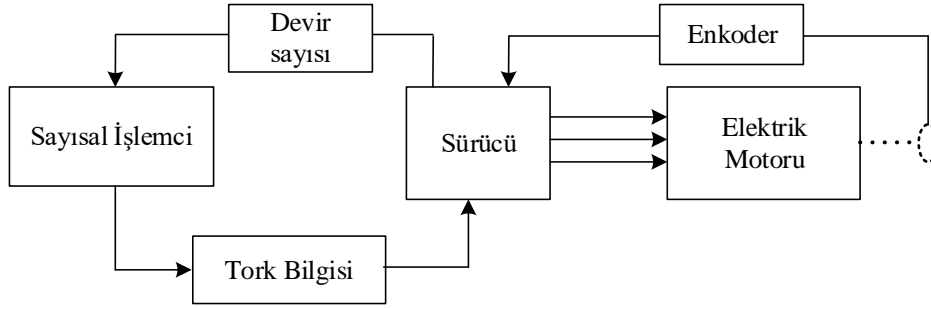
$$\lambda = \frac{\omega_m R}{V_w} \quad (3)$$

denklemleri ile verilir ve MGNT çalışmaları için optimum değerinde sabit tutulması gerekmektedir. Burada R ; kanat yarıçapı (m) ve ω_m ; açısal hız (rad/s) değerlerini temsil etmektedir. Türbin tarafından generatöre aktarılan mekanik moment (T_m) denklemleri aşağıdaki gibi verilebilir.

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (4)$$

(4) denklemleri ile aerodinamik rüzgâr enerjisi türbin tarafından mekanik momente dönüştürülmüş olur.

Gerçek zamanlı bir çalışma yapabilmek amacıyla eğer gerçek bir rüzgâr enerji santralinde çalışabilme imkânı [12] yoksa iki farklı yaklaşım öne çıkmaktadır. Bunlardan birincisi; yapay bir rüzgâr kanalı oluşturulup girişine fanlar aracılığıyla yapay rüzgâr uygulanması ve çıkışına endüstriyel bir rüzgâr türbininin konumlandırılması ile kurulan modeldir [13–16]. Bir diğer yaklaşım ise; literatürde sıklıkla kullanılan bir rüzgâr türbini matematiksel modelinin bir sayısal işlemciye aktarılması ve bu modelin sürücü üzerinden bir elektrik motoruna uygulanması ile gerçekleştirilen modeldir [17–25]. Böylelikle kullanılan elektrik motorunun bir rüzgâr türbini olarak davranması sağlanmış olur. Bu çalışmada bu yöntem kullanılmış olup blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir. Elektrik motorunun şaftına bağlı olan enkoderden devir sayısı bilgisi alınır ve sürücüye gönderilir. Sayısal işlemciye yüklenmiş olan türbin matematiksel modelinin (denklem (1)-(4)), üretebileceği moment için devir sayısı bilgisine ihtiyacı vardır. Sayısal işlemci, makine devir sayısına göre türbin matematiksel modelini kullanarak bir moment değeri üretir ve bu moment değeri sürücü üzerinden elektrik motoruna uygulanır.



Şekil 2. Gerçek zamanlı rüzgâr türbini modeli blok diyagramı (The block diagram of the real time wind turbine model)

Bu çalışmada elektrik motoru olarak 3 fazlı 4 kW, 710 devir/dakika'da 53,8 Nm moment üretebilen bir asenkron motor kullanılmıştır. ASM sürücüsü olarak, 3 fazlı, 4 kW gücünde, hız ve tork kontrol özelliğine sahip endüstriyel bir sürücü (Allen Bradley PowerFlex 753) kullanılmıştır. Motor hız bilgisinin sürücü üzerinden okunması, referans tork değerinin hesaplanması ve hesaplanan referans tork değerinin sürücüye iletilmesi için ADUC 841 mikrodenetleyicisi kullanılmıştır. Belirtilen işlemler işlemciye fazla bir hesap yükü getirmediğinden, Analog-Dijital ve Dijital-Analog dönüştürücü birimlerine sahip herhangi bir işlemci de tercih edilebilir.

2.2. Generatör (Generator)

Rüzgâr enerji sistemlerinde elektrik üretmek için kullanılan generatörler; senkron generatör, sincap kafesli asenkron generatör, çift beslemeli asenkron generatör ve sürekli mıknatıslı senkron generatör olarak verilebilir. Her bir generatör tipinin birbirine göre çeşitli avantajları ve dezavantajları vardır. Bu çalışmada sürekli mıknatıslı senkron generatör (SMSG) kullanılmıştır. Mıknatıs maliyetleri ve mıknatısların demanyetizasyonu gibi dezavantajları olmasına rağmen, harici bir elektriksel tahrik olmaksızın bu gereksinimini yapısında konumlandırılan sabit mıknatıslardan temin eden SMSG; küçük ve orta ölçekli rüzgâr enerji sistemlerinde en çok kullanılan makine tiplerinden birisidir [26, 27]. Seçilen SMSG; 480 devir/dakika'da 44.5 Nm moment ile 1.8 kW güç üretebilen 8 çift kutuplu bir generatördür. SMSG'lerin en önemli üstünlüklerinden birisi de, vites kutusu olmaksızın rüzgâr türbinine ya da rüzgâr türbin emülatörüne doğrudan bağlantı yapılabilmesidir. Bu çalışmada asenkron motorun şaftına doğrudan akupile edilerek kullanılmıştır.

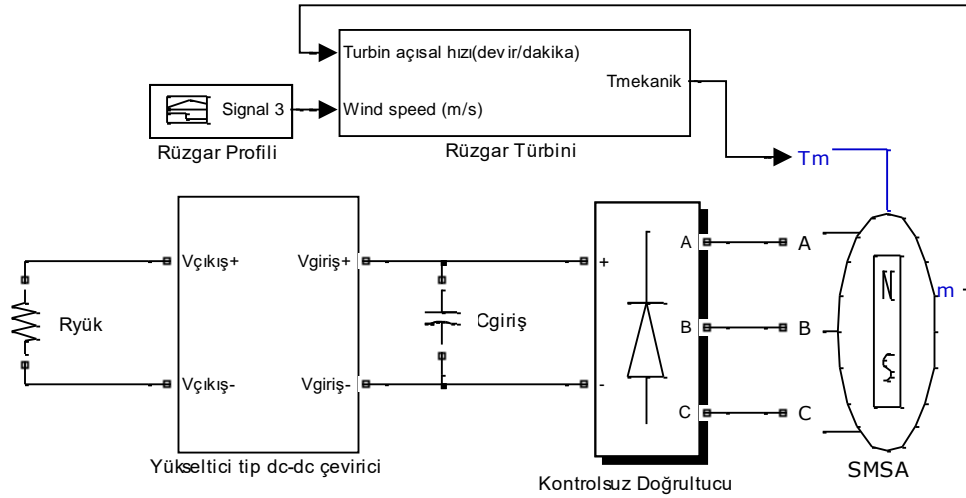
2.3. Güç Dönüştürücü Birimi (Power Converter Unit)

Generatörden çıkan 3 fazlı elektrik enerjisi, tüketiciye ulaşmadan önce çeşitli amaçlar ile güç dönüştürücü birimleri tarafından düzenlenirler. Bu amaçlardan bir tanesi MGNT çalışmalarını yapmak, bir diğeri de şebeke bağlantı ölçütlerini sağlayarak elektrik enerjisini tüketiciye aktarmaktır. Böylelikle hem verim çalışmaları hem de güç kalitesi çalışmaları yapılmış olur. Güç dönüştürücü birimi için birçok farklı topoloji kullanımı önerilmiştir. Ancak en çok kullanılan yapılar; peş peşe bağlı olan kontrollü doğrultucu-kontrollü evirici yapısı ya da kontrolsüz doğrultucu, dc-dc çevirici ve evirici yapısıdır. Eğer sadece MGNT çalışması yapılacak ise amaçtan uzaklaşmamak adına evirici yapısı elimine edilerek yerine doğrudan yükü temsil eden omik direnç kullanılır. Bu çalışmada, otonom bir sistem için MGNT çalışmaları yapabilmek amacıyla; generatör çıkışında 3 faz kontrolsüz doğrultucu kullanılmış ve dc-dc yükseltici tip dönüştürücü üzerinden elektrik enerjisi yüke bağlanmıştır. Kullanılan bu güç dönüştürücü topolojisi düşük maliyet, yüksek güvenilirlik ve daha kolay kontrol edilebilme kabiliyeti ile literatür çalışmalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [28, 29].

2.4. Rüzgâr enerji sistemi benzetim modeli (The simulation model of wind energy system)

Önceki bölümlerde verilen rüzgâr enerji sistemi modeli, bir benzetim programı kullanılarak da modellenilebilir. Literatür çalışmalarında bu amaçla Matlab/Simulink, PSCAD, PowerSim vb. paket programları kullanılmaktadır. Şekil 3'te Matlab/Simulink kullanılarak oluşturulmuş benzetim modeli verilmektedir. Üretilen rüzgâr hız profili ve devir sayısına göre rüzgâr türbini modeli bir mekanik moment üretir. Bu moment doğrudan şafta akupile SMSG'ye uygulanarak 3 faz çıkışından elektriksel enerji elde edilir. 3 faz tam dalga kontrolsüz doğrultucu ile dc işarete dönüştürülen elektrik enerjisi, bir kondansatör

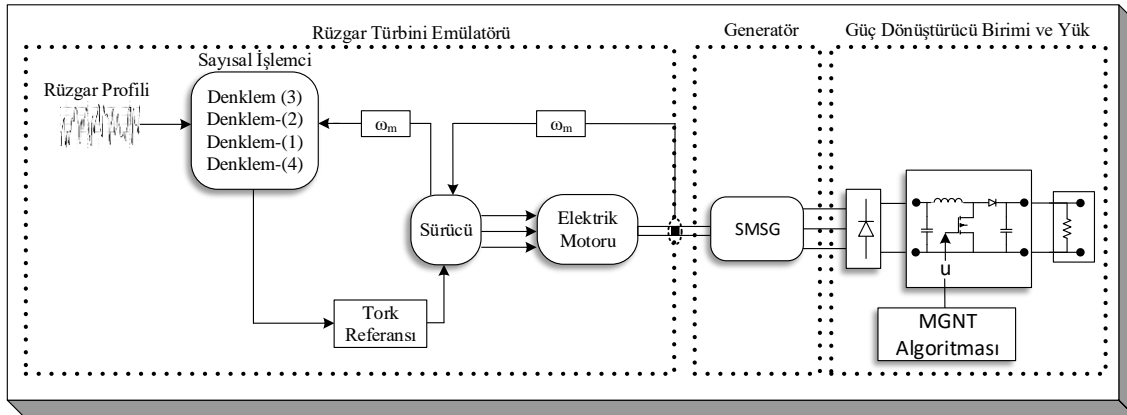
yardımıyla regüle edilir. Yükseltici tip dc-dc çeviricide, MGNT çalışmaları ile türbin devir sayısı ayarı yapılarak elde edilen elektriksel enerji yükü temsil eden omik dirence aktarılır.



Şekil 3. Rüzgâr enerji sistemi benzetim modeli (The simulation model of the wind energy system)

3. DEĞERLENDİRME (SURVEY)

Bu çalışmada kullanılan gerçek zamanlı rüzgâr enerji sistemi blok diyagramı olarak Şekil 4'te verilmiştir. Rüzgâr türbini matematiksel modeli şekilde belirtilen işlem sırasına göre sayısal işlemciye aktarılır. Rüzgâr profili sayısal işlemciye look-up tablosu olarak kaydedilir. Sürücü üzerinden açısal hız bilgisinin de alınması ile rüzgâr türbininin üreteceği mekanik moment hesaplanır ve sürücü üzerinden motora gönderilir. Motor şaftına akuple olan generatör 3 faz çıkışı doğrultularak dc-dc yükseltici tip dönüştürücüye aktarılır. Dönüştürücünün kontrol işareti kontrolör ile ayarlanarak MGNT çalışmaları yapılabilir ve elde edilen elektriksel güç; yükü temsil eden çıkıştaki omik dirence gönderilir.



Şekil 4. Gerçek zamanlı rüzgâr enerji sistemi blok diyagramı (The block diagram of the real time wind energy system)

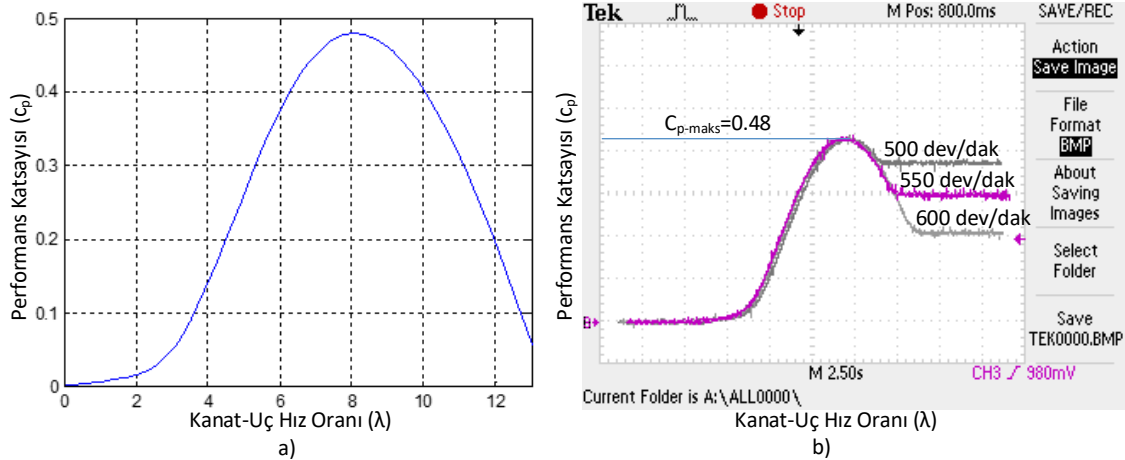
Rüzgâr enerji sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleşmesi Şekil 5'te verilmiştir. 1 numara ile gösterilen birim sayısal işlemci olup rüzgâr türbini matematiksel modeli bu işlemciye aktarılmıştır. 2 numara ile gösterilen AC motor sürücüsü, hız sınırlamalı tork referanslı olarak kullanılmaktadır. Motorun şaftına akuple edilen enkoderden devir sayısı bilgisini alır ve 0-2.5 V aralığında analog sinyal olarak sayısal işlemciye gönderir. Devir sayısı bilgisini alan sayısal işlemci; o devir sayısına göre türbinin üretebileceği moment referans değerini yine 0-2.5 V aralığında analog işaret olarak sürücüye gönderir. Sürücü bu moment değeri için gerekli olan tetiklemeleri yaparak 3 numara ile belirtilen asenkron motora uygular ve rüzgâr türbini gibi davranmasını sağlar. 4 numara ile belirtilen SMSG, asenkron motor tarafından tahrik edilerek döndürülür.

SMSG tarafından üretilen elektrik enerjisi, 5 numara ile belirtilen kontrolsüz tam dalga doğrultucu ve yükseltici tip dc-dc çeviriciye gönderilir. Güç birimi olarak adlandırılan 5 numaralı birimde, bir sayısal işlemci kullanılarak yükseltici tip dc-dc çeviricinin doluluk oranı ayarlanabilir ve böylelikle türbin devir sayısı değiştirilerek MGNT çalışmaları yapılabilir. 6 numara ile belirtilen birim ise yükü temsil eden omik bir dirençtir. Böylesi bir birim kullanılarak MGNT çalışmalarının yapılabilmesinin yanı sıra omik direncin yerine bir evirici birimi bağlanılarak elde edilen elektriksel güç şebekeye de aktarılabilir. Bu durumda hem MGNT hem de şebeke entegrasyonu üzerinde istenilen akademik çalışma deneysel olarak gerçekleştirilebilir.



Şekil 5. Gerçek zamanlı rüzgâr enerji sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleştirilmesi (The implementation of a real-time wind energy system in laboratory environment)

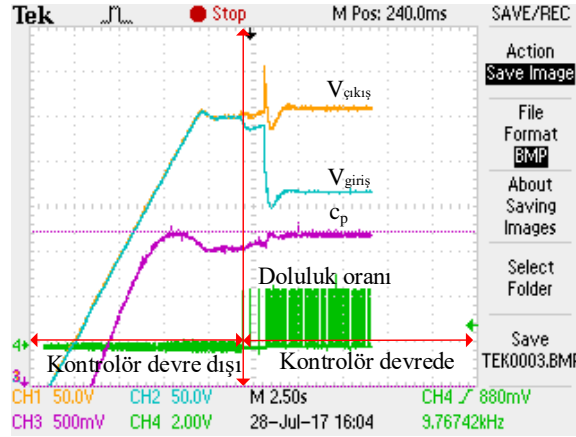
Bu amaçla Şekil 5 ile verilen düzenek kullanılarak performans katsayısının kanat uç hız oranına göre değişimi deneysel olarak elde edilmiş ve aynı matematiksel modeli kullanan Matlab/Simulink bloğu ile elde edilen grafik ile kıyaslanarak Şekil 6'da sunulmuştur. Generatörü aşırı yüklemekten korumak amacıyla deneysel düzeneğe AC sürücü üzerinden Şekil 6b ile verildiği gibi hız sınırlaması uygulanmıştır. Benzetim modelinden elde edilen sonuç ise Şekil 6a ile verildiği gibidir. Her iki sonuç kıyaslandığında deneysel model ile benzetim modelinin grafiklerinin aynı olduğu ve dolayısıyla gerçek zaman uygulamalar için deneysel modelin kullanılabileceği sonucu ortaya çıkmıştır. Böylelikle bu model kullanılarak MGNT çalışmaları yapmak mümkündür.



Şekil 6. Performans katsayısının a) benzetim, b) deneysel olarak elde edilmesi (To obtaining the performance coefficient by using a) simulation, and b) experiment)

MGNT çalışması yapmak için sayısal işlemciye kontrol algoritması yüklenmiş ve sabit bir rüzgâr hızında elde edilen sonuç Şekil 7 ile verilmiştir. Kontrolör devre dışı iken yükseltici tip dc-dc dönüştürücünün

tetiklemesi yapılmadığından, devrenin giriş gerilimi çıkış gerilimine eşit olacaktır. Daha sonra kontrolör devreye alınmış ve yükseltici tip dc-dc dönüştürücünün giriş gerilimi, çıkış gerilimi, doluluk oranı ve rüzgar enerji sistemine ilişkin performans katsayısının değişimi gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere maksimum güç noktası işletiminin göstergesi olan performans katsayısı, kontrolör devre dışı iken maksimum değerinde değildir. Kontrolörün devreye alınması ile birlikte performans katsayısı maksimum değerine çıkmış ve sistemin maksimum güç noktasında işletimi sağlanabilmiştir.



Şekil 7. Sabit bir rüzgar hızı için MGNT çalışmasının yapılması (MPPT study for a constant wind speed)

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada gerçek zamanlı bir rüzgâr enerji dönüşüm sisteminin laboratuvar ortamında gerçekleşmesi aşama aşama anlatılmıştır. Kullanılan düzenek literatür çalışmalarında birçok kez kullanılmış olmasına rağmen düzeneğin kurulumuna dair detaylı bilgi elde edebilmek çoğu kez mümkün değildir. Bu amaçla; bu alanda çalışma yapacak kişilere faydalı olacağı düşünülerek düzeneğin kurulumu detaylı olarak verilmiştir. Kurulan düzenekte MGNT çalışmaları için önce performans katsayısına ilişkin grafik elde edilmiş ve ardından sabit bir rüzgar hızında, kontrolörün devreye alınması ile sistemin maksimum güç noktası referansına getirildiği gösterilmiştir. Kurulan deneysel düzenek daha çok MGNT çalışmaları için kullanılabilir olsa dahi çıkışa bağlanan omik direnç yerine evirici bağlanarak şebeke senkronizasyonu sağlanabilir. Böylelikle otonom olmaktan çıkan düzeneğin şebeke bağlantısı sağlanarak güç kalitesine etkisi vb. birçok alanda çalışma yapmak mümkün olabilecektir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Atabey, G., Tezcan, S.S., Rüzgâr Santrallerinin Modellenmesi ve Rüzgâr Santrallerinin İletim Sistemi Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 5:3, (2017), 197–212.
- [2] Çelik, İ., Yıldız, C., Şekkeli, M., Rüzgâr Enerji Santrali kurulumunda rüzgâr türbinlerinin mikro yerleşimi için bir optimizasyon modeli, Gazi Üniversitesi Fen Bilim. Derg. Part C Tasarım ve Teknol., 6:4, (2018), 898–908.
- [3] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, and T. Chee Wei, A Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms for Wind Energy System, IEEE Conference on Clean Energy and Technology, (2011) 321–326.
- [4] R. Saidur, M. R. Islam, N. A. Rahim, and K. H. Solangi, A review on global wind energy policy, Renew. Sustain. Energy Rev., 14:7 (2010) 1744–1762.
- [5] I. Şerban and C. Marinescu, A sensorless control method for variable-speed small wind turbines, Renew. Energy, 43 (2012) 256–266.
- [6] International Energy Agency, Wind energy technology roadmap, (2009).
- [7] J. Castelló, J. M. Espí, and R. García-Gil, Development details and performance assessment of a Wind Turbine Emulator, Renew. Energy, 86, (2016) 848–857.

- [8] J. Lee and Y. Kim, Sensorless fuzzy-logic-based maximum power point tracking control for a small-scale wind power generation systems with a switched-mode rectifier, *IET Renew. Power Gener.*, 10:2 (2016) 194–202.
- [9] D. Song, J. Yang, Z. Cai, M. Dong, M. Su, and Y. Wang, Wind estimation with a non-standard extended Kalman filter and its application on maximum power extraction for variable speed wind turbines, *Appl. Energy*, 190 (2017) 670–685.
- [10] L. He, Y. Li, and R. G. Harley, Adaptive multi-mode power control of a direct-drive PM wind generation system in a microgrid, *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, 1:4 (2013) 217–225.
- [11] Z. M. Dalala, Z. U. Zahid, W. Yu, Y. Cho, and J. S. Lai, Design and analysis of an MPPT technique for small-scale wind energy conversion systems, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 28:3 (2013) 756–767.
- [12] Z. Ma, A Sensorless Control Method for Maximum Power Point Tracking of Wind Turbine Generators, *European Conference on Power Electronics and Applications*, (2011) 1–10.
- [13] C.-T. Pan and Y.-L. Juan, A Novel Sensorless MPPT Controller for a High-Efficiency Microscale Wind Power Generation System, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 25:1 (2010) 207–216.
- [14] H. Fathabadi, Maximum mechanical power extraction from wind turbines using novel proposed high accuracy single-sensor-based maximum power point tracking technique, *Energy*, 113 (2016) 1219–1230.
- [15] H. Fathabadi, Novel high efficient speed sensorless controller for maximum power extraction from wind energy conversion systems, *Energy Convers. Manag.*, 123, (2016) 392–401.
- [16] C. Lee, P. Chen, and Y. Shen, Maximum power point tracking system of small wind power generator using RBFNN approach, *Expert Syst. Appl.*, 38:10 (2011) 12058–12065.
- [17] X. Yuan, F. Wang, D. Boroyevich, R. Burgos, and Y. Li, DC-link voltage control of a full power converter for wind generator operating in weak-grid systems, *IEEE Trans. Power Electron.*, 24:9 (2009) 2178–2192.
- [18] Y. Xia, K. H. Ahmed, and B. W. Williams, A New Maximum Power Point Tracking Technique for Permanent Magnet Synchronous Generator Based Wind Energy Conversion System, *IEEE Trans. Power Electron.*, 26:12 (2011) 3609–3620.
- [19] Y. Zhu, M. Cheng, W. Hua, and W. Wang, A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Permanent Magnet Direct Drive Wind Energy Conversion Systems, *Energies*, 5:12 (2012) 1398–1412.
- [20] J. Chen, J. Chen, and C. Gong, Constant-bandwidth maximum power point tracking strategy for variable-speed wind turbines and its design details, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60:11 (2013) 5050–5058.
- [21] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, A Novel Algorithm for Fast and Efficient Speed-Sensorless Maximum Power Point Tracking in Wind Energy Conversion Systems, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58:1 (2011) 29–36.
- [22] I. Kortabarria, J. Andreu, I. Martínez de Alegría, J. Jiménez, J. I. Gárate, and E. Robles, A novel adaptative maximum power point tracking algorithm for small wind turbines, *Renew. Energy*, 63 (2014) 785–796.
- [23] R. J. Wai, C. Y. Lin, and Y. R. Chang, Novel maximum-power-extraction algorithm for PMSG wind generation system, *IET Electr. Power Appl.*, 1:2 (2007) 275–283.
- [24] H. Camblong, I. M. de Alegría, M. Rodriguez, and G. Abad, Experimental evaluation of wind turbines maximum power point tracking controllers, *Energy Convers. Manag.*, 47:18–19 (2006) 2846–2858.
- [25] P. Tenca, A. A. Rockhill, and T. A. Lipo, Wind Turbine Current-Source Converter Providing Reactive Power Control and Reduced Harmonics, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 43:4 (2007) 1050–1060.
- [26] A. M. Eltamaly and H. M. Farh, Maximum power extraction from wind energy system based on fuzzy logic control, *Electr. Power Syst. Res.*, 97 (2013) 144–150.

- [27] H. S. Kim and D. D.-C. Lu, "Review on wind turbine generators and power electronic converters with the grid-connection issues," Australasian Universities Power Engineering Conference, (2010) 1–6.
- [28] R. Esmaili, L. Xu, and D. K. Nichols, "A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application," IEEE Power Engineering Society General Meeting, (2005) 1–6.
- [29] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16:5 (2012) 3220–3227.