
	SAKARYA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ DERGİSİ <i>SAKARYA UNIVERSITY JOURNAL OF SCIENCE</i>		
	e-ISSN: 2147-835X Dergi sayfası: http://dergipark.gov.tr/saufenbilder		
	<u>Geliş/Received</u> 25.05.2016 <u>Kabul/Accepted</u> 09.05.2017	<u>Doi</u> 10.16984/saufenbilder.327114	

Değişken hızlı rüzgâr türbinlerinde kanat ucu hız oranı tabanlı maksimum güç izleme denetimi; kapsamlı bir tasarım

Murat Karabacak^{*1}, Fuat Kılıç¹, Yasin Cantaş¹, Özhan Atmaca¹, Tufan Volkan Küçük¹

ÖZ

Rüzgârdan elektrik enerjisi üretmek için kullanılan rüzgâr türbinlerinin en ilkel denetim yöntemi, sabit hızlı denetim yöntemidir. Bu yöntemle, türbin giriş gücünün maksimum oranda şebekeye aktarılması mümkün değildir. Bu nedenle Maksimum Güç İzleme (MGİ) şemaları önerilmiştir. MGİ yapabilmek için rüzgâr hızının her farklı değerinde, pervane farklı bir hızla dönmelidir. Bu durum MGİ tabanlı sistemlere Değişken Hızlı Rüzgâr Türbini (DHRT) sistemleri denilmesine yol açmıştır. DHRT sistemlerinde türbin giriş gücü maksimum güce yakın oranlarda şebekeye aktarılabilmektedir. DHRT sistemlerinin MGİ tabanlı denetimi söz konusu olduğunda iki önemli işlem öne çıkar. Bunlar MGİ noktasının anlık olarak saptanması ve izlenmesidir. Bu çalışmada kanat ucu hız oranı tabanlı maksimum güç izleme şeması kullanılarak, Sabit Miknatıslı Senkron Generatörlü (SMSG) bir DHRT sistemi ile rüzgârda bulunan güç değeri maksimum oranda arka arkaya bağlı çevirici sistem üzerinden şebekeye aktarılmaktadır. Ayrıca fiziksel bir rüzgâr türbini modellenmiş ve benzetimi yapılmıştır. Sonuçlar zamanla değişen bir MGİ noktasının yüksek performansla izlendiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: MGİ, Rüzgâr Türbini, SMSG

Tip speed ratio based maximum power tracking control of variable speed wind turbines; a comprehensive design

ABSTRACT

The most primitive control method of wind turbines used to generate electric energy from wind is the fixed speed control method. With this method, it is not possible that turbine input power is transferred to grid at maximum rate. For this reason, Maximum Power Tracking (MPT) schemes are proposed. In order to implement MPT, the propeller has to rotate at a different speed for every different wind speed. This situation has led MPT based systems to be called Variable Speed Wind Turbine (VSWT) systems. In VSWT systems, turbine input power can be transferred to grid at rates close to maximum power. When MPT based control of VSWT systems is the case, two important processes come into prominence. These are instantaneously determination and tracking of MPT point. In this study, using a Maximum Power Point Tracking (MPPT) method based on tip speed ratio, power available in wind is transferred into grid over a back to back converter at maximum rate via a VSWT system with permanent magnet synchronous generator (PMSG). Besides a physical wind turbine simulator is modelled and simulated. Results show that a time varying MPPT point is tracked with a high performance.

Keywords: MPPT, Wind Turbine, PMSG

* Corresponding Author

¹ Faculty of Technology, Mechatronics Engineering Department, Sakarya University, Turkey

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Rüzgârdan elektrik enerjisi elde etmek için rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri, kısaca rüzgâr türbinleri kullanılmaktadır. Bir yenilenebilir enerji kaynağı olarak rüzgâr enerjisinden elektrik üretimi, doğa dostu olma, yüksek seviyelerde elektrik enerjisi sağlama ve uzun ömürlü olma gibi önemli üstünlüklere sahiptir. Bu durum dünyada birçok ülkenin bu alanda büyük yatırımlar yapmasını sağlamıştır [1]. Rüzgâr rejiminin iyi olmadığı bölgelere Sabit Hızlı Rüzgâr Türbini (SHRT) sistemleri kurmak çok verimli enerji üretimi sağlayamamaktadır [2-4].

DHRT sistemlerinin kurulumu ve tasarımı daha zor ve maliyetli, denetimi ise daha karmaşıktır. Fakat DHRT sistemleri ile rüzgârdan alınabilecek güç değerini, idealde maksimum, gerçekte ise maksimuma yakın seviyelerde tutmak mümkündür. Rüzgâr rejiminin iyi olmadığı bölgelerde veya rüzgâr hızının düşük olduğu belirli zaman aralıklarında, DHRT sistemleri SHRT sistemlerine göre çok daha verimli çalışmaktadır. Bir karşılaştırma yapmak gerekirse, DHRT sistemleri ile aynı koşullarda SHRT sistemlerine göre %38 daha fazla elektrik enerjisi elde etmek mümkündür. Buradaki önemli olan nokta şudur, rüzgâr hızı düştükçe DHRT sistemleri ile elde edilen elektrik enerjisi SHRT sistemlerine göre artmaktadır [5].

Rüzgâr türbinlerinin değişken hızlı denetiminde amaç rüzgârdan alınabilecek enerjiyi her zaman maksimum seviyede tutmaktır. Bu amaçla DHRT sistemlerinde generatör arka arkaya bağlı iki adet güç elektroniği çeviricisi üzerinden şebekeye bağlanır. Generatör tarafındaki çevirici ile maksimum güç izleme, şebeke tarafındaki çevirici ile şebekeye güç aktarma ve DC barayı sabit bir değerde tutma amaçları yerine getirilmektedir. Bu tür bir şemada şebeke tarafı ve generatör tarafı birbirinden bağımsızdır.

SHRT ve DHRT sistemleri denetim ve tasarım gibi parametreler açısından kendi içlerinde çeşitli sınıflara ayrılmaktadır. SHRT sistemlerinin çalışmasında pervane, dolayısıyla generatör hızı sabittir. Bu bağlamda denetim karmaşık değildir fakat rüzgârdan alınan enerji hiçbir zaman maksimum seviyede olmaz. SHRT sistemlerinin DHRT sistemlerine göre üstünlükleri daha basit, ucuz ve az karmaşık olmalıdır. Bununla birlikte bir SHRT sisteminin kurulumu için çok iyi bir

bölgesel rüzgâr rejimi analizi yapmak gereklidir. Rüzgâr rejiminin her farklı ortalama değeri için özel bir SHRT tasarımı iyi bir verim elde etmek için elzemdir ki bu durum da neredeyse mümkün değildir. Sonuç olarak SHRT sistemleri genellikle 8-12m/s rüzgâr hızları aralığında verimli çalışmak üzere üretilirler. Rüzgârdaki ani değişimlerle şebekeye aktarılan aktif güçler de anlık olarak yüksek veya düşük değerlere ulaşmaktadır. Bu durum şebekede anlık frekans dalgalanmasına neden olmaktadır. Ayrıca SHRT sistemlerinde yaygın olarak kullanılan asenkron generatörler, diğer generatörler ile karşılaştırıldığında yüksek miktarda reaktif güç tüketmektedir. Bu durum ise şebekede gerilim düşümüne ve dolayısıyla şebekede gerilim kararlılığı ile ilgili problemler yaşanmasına neden olabilir. Sonuç olarak, büyük güçlü çok sayıda SHRT sisteminin oluşturduğu geniş güç ölçekli bir alt şebekenin ana şebekeye doğrudan bağlanması, yukarıdaki sebepten ötürü ana şebekede, frekans ve gerilim kararlılığı ile ilgili problemler yaşanmasına neden olabilmektedir [6-12].

DHRT sistemleri reaktif güç tüketmediği için şebekede gerilim kararlılığı problemlerine neden olmaz, fakat frekans kararlılığı ile ilgili problemler DHRT sistemlerinde de yaşanabilmektedir. Bu problemi de gidermek için günümüzde rüzgâr türbini sistemleri enerji depolama sistemleri ile beraber kurulmaktadır. Böylece rüzgârdaki anlık güç değişimleri enerji depolama sistemi ile kompanze edilerek şebekeye düzgün sürekli bir güç aktarımı yapılmaktadır [13-14].

Bu çalışmada, bir DHRT sistemi için kanat ucu hız oranı tabanlı bir MGİ şeması ile bir denetim sistemi tasarlanmıştır. Rüzgârda bulunan mevcut güç değeri ise maksimum oranda şebekeye aktarılabilir.

Çalışmanın geri kalanında ilk olarak rüzgâr türbinin dinamikleri açıklanmış, ardından denetim sistemi ve MGİ şeması verilmiş ve son olarak Benzetim çalışması sonuçları sunulmuştur. Benzetim sonuçlarına göre, kanat güç katsayısı ve kanat ucu hız oranı çok yaklaşık olarak optimal değerlerinde kalmakta ve MGİ amacı yüksek performansla yerine getirilmektedir.

2. RÜZGÂR TÜRBİNİ DİNAMİKLERİ (DYNAMICS OF WIND TURBINES)

Rüzgâr türbini karakteristiklerini anlamak için sıvı ve hava araçları aerodinamikleri temelinde bazı bilgilere sahip olmak gereklidir. Bu konuda çok sayıda yayınlanmış kaliteli ayrıntılı yayınlar bulunmaktadır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan pervanenin şekli, türbinin karakteristiğini baştan sona etkiler. Bunlar arasında 3 bıçaklı pervaneler en yüksek pervane güç katsayısına sahiptir. Bu durum, özellikle büyük güçlerde 3 bıçaklı pervaneleri en çok kullanılan pervaneler haline getirmiştir.

Rüzgâr türbinleri yatay ve dikey eksenli olarak ikiye ayrılmaktadır. Yatay eksenli türbinlerde pervane rüzgârı önden almaktadır. Bu tarz türbinler yüksek verimlidir, güç yoğunlukları yüksektir, kapatma rüzgâr hızları düşüktür ve birim güç çıkışı başına daha düşük maliyetlidir. Fakat bu türbinlerde rota (yaw) denetimi yapılmak zorundadır, yani yönleri rüzgâra döndürülmelidir. Düşük güçlerde bu denetim pasif, yani bir kuyruk mekanizması ile kendiliğinden yapılır. Büyük türbinlerde ise aktif, yani elektrik motorlarının konum kontrolü ile yapılır. Rüzgâr türbinleri dikey eksenli olarak da üretilmektedir, bu türbinlerin en büyük üstünlüğü her yönden esen rüzgârın pervaneye etki etmesidir. Bu durum pervanenin rota denetimini ortadan kaldırır. Bununla birlikte, yatay eksenli türbinlerin üstünlükleri burada bulunmaz.

Rüzgâr türbinlerindeki ana fikir, pervane alanından geçen hava kütlelerinin (yani rüzgârın) hızını azaltarak, hava kütlelerinin sahip olduğu kinetik enerjinin belirli bir kısmını önce mekanik sonra elektrik enerjisine dönüştürmektir.

Burada dikkat çeken en önemli nokta, pervanenin önünden gelen hava akımının pervaneden geçerken hız kaybettiği, fakat pervanenin arkasında hâlâ belirli bir hız değerine sahip olduğudur. Bu durum, rüzgârda bulunan kinetik enerjinin tamamının alınmadığını göstermektedir. Hava kütlelerinin hareketinin (yani rüzgârın) oluşturduğu kinetik enerjinin sahip olduğu güç miktarı ve diğer aerodinamik formüllerin gelişimi aşağıda verilmektedir. Öncelikle, pervanenin çizdiği “A” alanından geçen havanın kinetik enerjisi,

$$E_w = \frac{1}{2} m V_w^2 \quad (1)$$

olarak ifade edilmektedir. Burada m , pervane alanından geçen havanın kütlesi (kg), V_w pervane alanından geçen rüzgârın hızı (m/s), E_w ise bu havanın sahip olduğu kinetik enerjidir (Joule). Bu enerjinin zamana göre türevi alındığında, birim zamanda aktarılan enerji miktarı, yani güç bulunur.

$$P_w = \frac{dE_w}{dt} = E_w = \frac{1}{2} \dot{m} V_w^2 \quad (2)$$

Bu durumda, hava kütlesi akış oranı aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\dot{m} = \rho A V_w \quad (3)$$

Burada ρ , havanın yoğunluğudur (kg/m³) ve A pervanenin çizdiği etkin daire alanıdır (m²). Hava yoğunluğu havanın sıcaklığı ve basıncı aracılığı ile hesaplanır. Denklem (3), (2)'de yerine konulduğunda o an rüzgârda bulunan güç miktarı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde gördüğümüz gibi pervanenin çizdiği daire alanı ne kadar fazla ise, diğer bir deyişle pervane bıçaklarının boyu ne kadar uzun ise, rüzgârda alınan güçte o kadar fazla olmaktadır. Diğer taraftan, rüzgâr hızı ve yoğunluğu da rüzgârda bulunan güç ile doğru orantılıdır. Genellikle rakım yükseldikçe rüzgâr hızı artar. Güç formülünde rüzgâr hızının küpü alındığı için, rüzgâr hızındaki küçük bir artış bile güç miktarını çok artırır. Bu yüzden rüzgâr türbinleri uygun şekilde tasarlanarak türbin gücü ile orantılı olarak yükseğe imal edilir. Redüktör bulunmayan rüzgâr türbinlerine doğrudan sürülen veya redüktörsüz rüzgâr türbinleri, redüktör bulunanlara ise redüktörlü rüzgâr türbinleri denilmektedir [15-16].

Doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri, redüktörlü olanlara göre daha üstündür, çünkü bu tür türbinlerde gürültü düşük, arıza ve bakım onarım az, tasarım daha kolay ve verim daha yüksek olmaktadır. Bu duruma paralel olarak, arıza ve bakım süreçlerinin oldukça azalması güvenilirliği önemli ölçüde artırmaktadır. Doğrudan sürülen rüzgâr türbinleri Sürekli Miknatıslı Senkron

Generatör (SMSG)'lerden başka generatörler ile imal edilememektedir [16-17]. Kanat ucu hız oranı rüzgâr hızına ve pervanenin yarıçapına bağlıdır. Aşağıdaki formülle değeri hesaplanmaktadır ve birimsiz bir büyüklüktür.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_w} \quad (5)$$

Yukarıda ω_r pervanenin açısal hızı (rad/s)'dir. R ise pervanenin yarıçapı (m)'dir. Sabit bir rüzgâr hızı için biri çok büyük biri çok küçük iki farklı hız oranında bir rüzgâr türbinin çalıştığı kabul edilsin. Küçük hız oranında pervaneler yavaş dönecek ve rüzgârın büyük bir kısmı pervane alanından bıçaklar arasından serbest geçiş yapacaktır. Bu durumda rüzgârda bulunan gücün ilgili kısmı bu serbest geçişle kaybolacaktır. Yüksek hız oranında ise pervane hızlı dönecek ve pervane alanından geçen rüzgâra engel teşkil edecektir. Bu durumda pervane alanından geçen hava akımının kütlesi azalacak ve yine rüzgârdan alınan güç azalacaktır. Buradaki yorumdan her rüzgâr türbini için hız oranına ait optimum bir değer bulunduğu ortaya çıkmaktadır. Yani hız oranını optimum yapmak demek, her rüzgâr hızında pervaneyi farklı bir hızda döndürerek, rüzgârdan alınan mekanik gücü maksimum yapmak demektir.

C_p birimsiz bir büyüklüktür, pervanenin mil gücü rüzgârda bulunan güce bölündüğünde pervane güç katsayısı bulunmuş olur. Pervane güç katsayısının değerini hız oranı ve birtakım sabitler belirlemektedir, değeri ise aşağıdaki formüller aracılığı ile hesaplanmaktadır.

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4 \right) e^{\left(\frac{C_5}{\lambda_i} \right)} + C_6\lambda \quad (7)$$

Buradaki sabitler, $C_1=0.5176$, $C_2=116$, $C_3=0.4$, $C_4=5$, $C_5=21$, $C_6=0.0068$ olarak verilmektedir [4-5]. β ise pervanelerin rüzgâr eğimidir. Küçük güçlü türbinlerde bu mekanizma bulunmadığı için $\beta=0$ alınır. Yukarıda görüldüğü gibi önce hız oranı hesaplanır, hız oranı ve β aracılığı ile λ_i ara değeri hesaplanır. Daha sonra katsayılar yerine konarak pervane güç katsayısı hesaplanır. Bu katsayı ile türbin giriş gücü P_{in} bulunur.

$$P_{in} = C_p P_w \Rightarrow P_{in} = \frac{1}{2} C_p \rho A V_w^3 \quad (8)$$

Türbin giriş gücü türbinin elektromekanik denklemi aracılığı ile de hesaplanabilmektedir.

$$P_{in} = \omega_r T_w \quad (9)$$

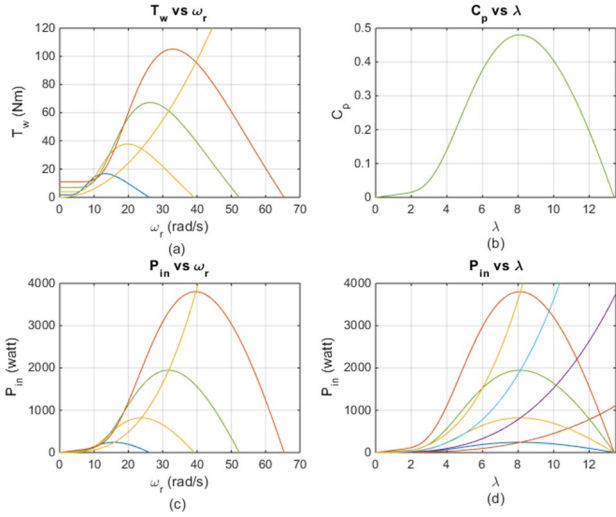
Yukarıdaki denklemde T_w , rüzgârdan kaynaklanan milde indüklenen momenttir. Eğer sistemde redüktör var ise, redüktörün her iki tarafı için hızmoment eşitlikleri kullanılarak miller arasında hızmoment dönüşümleri yapılabilir. Denklem (4)'de görüldüğü gibi rüzgârda bulunan mevcut gücün hesaplaması verilmektedir. Denklem (4), (8) ve (9)'u kullanılması ile

$$T_w = \frac{P_{in}}{\omega_r} = \frac{C_p P_w}{\omega_r} = \frac{1}{2} \rho A C_p V_w^2 \quad (10)$$

elde edilir [18]. Formüllerden anlaşıldığı gibi, rüzgâr hızı arttıkça rüzgâr gücü ve dolayısıyla türbin giriş gücü artmaktadır. Türbin giriş gücünü belirleyen diğer parametre pervane güç katsayısıdır. Güç katsayısını ise hız oranı belirlemektedir. Hız oranı optimum değerinde tutulursa, Betz teoremine göre pervane güç katsayısının değeri de maksimum, yani en fazla 0.5926 olabilmektedir. Fakat gerçek uygulamalarda birçok ideal olmayan durumdan ötürü, genellikle 0.45 ile 0.55 arasında kalmaktadır [15-17].

Şekil 1'de rüzgâr hızı ve generatör hızının değişimine karşı pervane güç katsayısının ve türbin giriş gücünün değişiminin grafikleri verilmektedir. Ayrıca hız oranının değişimine karşı kanat güç katsayısının değişimi ve türbin giriş gücünün değişimi de verilmektedir. Şekildeki rüzgâr türbini karakteristikleri; 3 bıçaklı, yatay eksenli, $R = 2.05m$, $\beta = 0$, $\rho = 1.235$, redüktörsüz bir sistem, "up-wind" tasarım ve 3.7 kW'lık bir türbin giriş gücü için elde edilmiştir.

Şekil 1 (b)'de hız oranına karşı pervane güç katsayısı çizdirilmiştir. Görüldüğü gibi hız oranının optimum değeri (λ_{opt}) 8.134 olarak bulunmaktadır. Şekil 1 (d)'de, hız oranının değişimine karşı farklı rüzgâr hızları için türbin giriş gücü çizdirilmiştir. Şekil 1 (b)'de açıklandığı gibi, hız oranının optimum değerinde pervane güç katsayısı maksimum değerine ulaşmakta, bu durumda rüzgâr hızı ne olursa olsun türbin giriş gücünü o rüzgâr hızı için maksimum yapmaktadır [18].

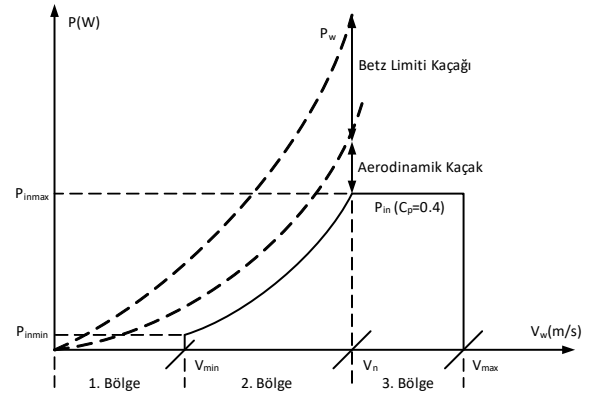


Şekil 1. Rüzgâr türbini dinamiklerinin değişimi (a) Moment ve Hız (b) Güç Katsayısı ve Kanat Ucu Hız Oranı (c) Giriş Gücü ve Hız (d) Giriş gücü ve Kanat Ucu Hız Oranı (Variation of wind turbine dynamics (a) Torque and Speed (b) Power Coefficient and Tip Speed Ratio (c) Input Power and Speed (d) Input Power and Tip Speed Ratio)

Şekil 1 (a)'da görüldüğü gibi, farklı rüzgâr hızları için pervanenin hızı (redüktör olmadığı için generatörün hızı da denilebilir) değiştirilerek pervane güç katsayısının değişimi elde edilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, belirli bir rüzgâr hızı için pervane uygun bir değerde döndürülürse pervane güç katsayısı maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu durum da türbin giriş gücünü maksimum yapmaktadır. Örnek olarak Şekil 1 (c)'deki pembe eğri incelenir. Bu eğri için rüzgâr hızı 10m/s'dir. Bu rüzgâr hız değerinde, eğer generatör hızı 29.76 rad/s değerine sürülürse hız oranı, pervane güç katsayısı ve türbin giriş gücü maksimum değerlerine ulaşmaktadır. Yani türbin giriş gücünü maksimum yapmak amacıyla her rüzgâr hızında pervane farklı bir hızla dönmelidir. Bu değişken hızı sağlamak için generatör tarafındaki güç elektroniği çeviricisi anahtarlanır. Anahtarlanmanın temeli ise generatör denklemlerine ve seçilen denetim yöntemine dayanır. Şekil 1'de görüldüğü gibi kanat ucu hız oranının optimum değeri (λ_{opt}) 8.134'tür. Kanat ucu hız oranı her zaman bu optimal değerde tutulabilirse, MGİ gerçekleşmiş olacaktır. Rüzgâr türbinlerinde kullanılan generatörlerin hepsinin birbirlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları vardır. Rüzgâr türbinin gücü, boyutu, güvenilirliği, verimi ve maliyet parametreleri göz önüne alınır. Bulunulan durumda hangi parametre önemli ise, o parametre açısından üstün bir generatör seçimi yapılır. Çoğu zaman en önemli parametre verimdir. Şekil 2'de, bir DHRT sisteminin çalışma bölgeleri

verilmektedir, bu bölgelerin oluşumunda generatörün önemli bir payı vardır. Şekil 1'deki eğriler 3, 5, 7 ve 10 m/s rüzgâr hızları için elde edilmiştir (turuncu:10, yeşil: 7, sarı: 5, mavi: 3).

DHRT sistemlerinde en yaygın kullanılan generatörler, (uyartımlı) senkron generatör, SMSG, asenkron generatör ve rotoru sargılı asenkron generatördür. Bu generatörler arasında verimi en yüksek olan SMSG'dür. Bu generatörlerin 80-100 arasında kutup sayısına sahip olacak şekilde tasarlanmasıyla, birçok uygulamada redüktör ihtiyacı ortadan kaldırılmaktadır. Güç miktarı arttıkça kutup sayısı artmaktadır ve dolayısıyla boyut, ağırlık ve maliyet diğer generatörlerin kullanıldığı DHRT sistemlerine nazaran yükselmektedir. 1,5 MW ve üstü DHRT sistemlerinde SMSG'ün kullanımı bu nedenlerden dolayı kısıtlı, küçük ve orta ölçekli rüzgâr türbinlerinde kullanımı ise yaygındır [19-29]. Bu çalışmada DHRT sistemi sadece 2. Bölge'de çalıştırılmıştır, bu bölge MGİ yapılması gereken bölgedir.



Şekil 2. DHRT sisteminin çalışma bölgeleri (Operation areas of a VSWT system)

Şekil 2'de 1. bölge türbinin çalışmadığı bölgedir. Bu bölgede rüzgâr enerjisi türbin kayıplarını bile karşılamayacak değerlerde olduğu için türbin çalıştırılmaz. 2. bölge MGİ yapılması gereken bölgedir, bu bölgede rüzgâr enerjisi türbin çıkışında sıfırdan generatör anma gücüne kadar değişen değerlerde yansır. 3. bölge ise rüzgâr enerjisi türbin gücünden, yani generatör gücünden daha yüksek değerdedir. Bu bölgede MGİ yapılmaz, kanat eğim oranı veya türbin yönü değiştirilerek türbin gücü anma değerinde tutulur, yani türbin aşırı güçten korunmuş olur.

2.1. Rüzgâr türbininin bir tahrik elemanı kullanılarak modellenmesi (Modelling of wind turbine)

Benzetim çalışmasında rüzgâr türbini bir sürekli mıknatıslı senkron motor aracılığıyla modellenmiştir, kısım 2’de verilen denklemler temelinde rüzgâr türbininin modeli, Şekil 3’te verilmektedir. Şekil 3’te, üç fazlı kaynaktan beslenen üç fazlı diyotlu doğrultucunun girişinde bir L filtre kullanılmaktadır. Bu filtrenin amacı, kondansatörün çektiği yüksek genlikli ani şarj akımlarını bastırmaktır.

2.2. LCL Filtre Tasarımı (LCL filter design)

Generatörden elde edilen gücün şebeke bağlantılı evirici ile şebekeye aktarılması gereklidir. Aktarım yapılırken şebekeye gönderilen akımların harmonik bozunumu %5.0 Toplam Talep Bozunumu (TTD) değerini, ilgili güç kalitesi standartları (IEEE STD 519 CURRENT HARMONIC LIMITS) gereği geçmemelidir. Bu amaçla şebeke bağlantılı eviriciler için giriş filtreleri, yaygın olarak L, LCL ve LLCL çeşitleri kullanılır. L filtrede sadece bir endüktans, LCL filtrede endüktansı-(paralel) kondansatör-endüktans kullanılır. LLCL filtrede paralel kolda kondansatöre seri bir endüktansta bulunur. Geri kalan kısmı LCL ile aynıdır. LLCL filtre ile anahtarlama frekansındaki harmonik sıfırlanır, çoklu ayarlı (multi-tuned) filtre olarak isimlendirilir. LCL filtre hepsi arasında en çok kullanım alanı bulan filtre çeşitlerinden biridir. LCL filtre tasarımında, Toplam Harmonik Bozunum (THD), reaktif güç ve güç faktörü değerlerinin üç faz için yaklaşık formülleri kullanılarak grafik tabanlı nümerik bir yaklaşım kullanılır. Bu yaklaşım literatürde önerilmiş en son ve en gelişmiş tasarım yöntemlerinden biridir [30]. Bu bağlamda reaktif güç;

$$q = \frac{(r_q - 1)(1 + r_l)(r_f f_n)}{f_{sw} \sqrt{r_q} \sqrt{r_l}} \tag{11}$$

olarak verilir. Burada, r_q bir ara değişkendir ve 1.0 seçildiğinde, sistemde reaktif güç sıfır çıkar. r_l ise L_1 ve L_2 arasındaki orandır, yenilenebilir enerji sistemleri ve kesintisiz güç kaynakları gibi uygulamalarda değeri optimum olarak 1.0 seçilir [21]. Güç faktörü ise reaktif güce bağlı olarak aşağıdaki gibi verilir.

$$PF = 1/\sqrt{1 + q^2} \tag{12}$$

PF 0.995’e ayarlandığında, $q = 0.1$ pu olarak sonuçlanır. Bu durumda evirici yaklaşık olarak %1 aşırı yüklenir [30]. L_1 ve L_2 ’nin toplamı olarak, toplam endüktans değeri ise;

$$L_T = \frac{(\sqrt{3}V_n)^2 r_f f_n (1 + r_l)}{P_n \cdot \omega_n f_{sw} \sqrt{r_l r_q}} \tag{13}$$

Burada V_n faz gerilimidir. “Filtre kondansatörü akımı geri besleme” sönmleme yöntemine göre $r_f = 3.12$ optimum olarak seçilir [21]. Buradan faz akımlarının THD’si;

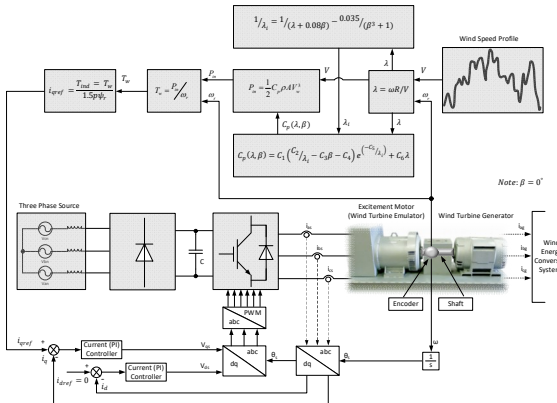
$$THD = \left(\frac{\pi V_{dc} \sqrt{3}}{12 I_a V_n} \right) \left(\frac{\sqrt{r_l}}{r_f^2} \right) \left(\frac{\sqrt{r_l}}{1 + r_l} \right) \left(\frac{1}{(1 - 6/m_f)^2 - (1/r_f^2)} \right) \sqrt{\frac{3}{2} m^2 - \frac{4\sqrt{3}}{\pi} m^3 + \frac{9}{8} \left(\frac{3}{2} - \frac{9\sqrt{3}}{8\pi} \right) m^4} \tag{14}$$

olarak bulunur [21]. Burada m , modülasyon oranıdır ve 1.0’a yakın bir değerdedir. Buradaki m ile denklem (1)’deki m farklı değişkenleri ifade etmektedir. Denklem (14)’te bulunan L_T değerine göre C_f ise aşağıdaki hesaplanır. m_f ise frekans modülasyonudur.

$$C_f = \frac{r_f^2 (1 + r_l)^2}{4\pi^2 L_T f_{sw}^2 r_l} \tag{15}$$

Burada f_{sw} anahtarlama frekansıdır. Yukarıda verilen analiz temelinde, Şekil 4’teki grafik elde edilmekte ve grafik üzerinden değerler seçilerek aşağıdaki gibi tasarım tamamlanmaktadır.

Şekil 4’deki grafikten, şebeke akımlarının THD’si %3.0 seçildiğinde, $PF = \%99.5$ ve $L_T = 0.0002644$ H olarak sonuçlanır. Bu durumda, $r_l = 1$ seçildiği için, $L_1 = L_2 = L_T/2 = 0.1322$ mH olarak bulunur. Denklem (15) kullanılarak C_f , 37.303 uF olarak hesaplanır. Rezonans problemlerinin yaşanmaması için, anahtarlama frekansı, kondansatör akımı geri besleme aktif söndürme

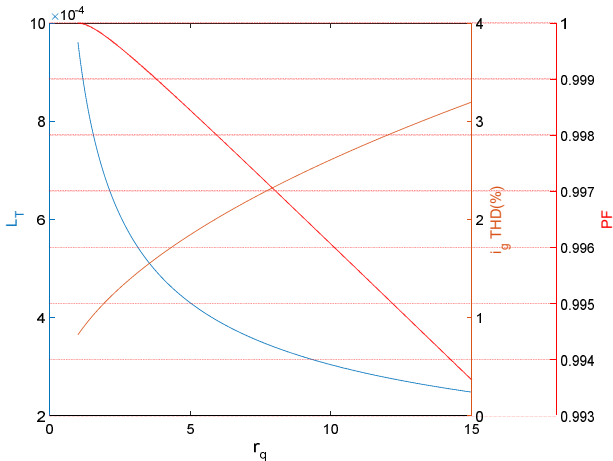


Şekil 3. Rüzgâr Türbini modeli (Wind turbine model)

sisteminde, rezonans frekansının en az iki katı olmalıdır. (Sayısal işaret işleyici) DSP tabanlı sayısal gerçekleştirme durumunda, aynı oran örnekleme frekansı ve rezonans frekansı arasında da bulunmaktadır. Yani, örnekleme frekansı da rezonans frekansının en az iki katı olmalıdır. Aynı zamanda, rezonans frekansı şebeke frekansının en az on katı olmalıdır. Bu durum aşağıda verilmektedir.

$$f_{resLCL} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (16)$$

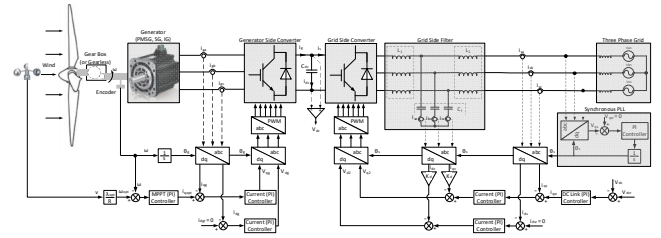
Rezonans frekansı denklem (16)'dan 3205.6 Hz olarak bulunmaktadır. Burada yapılan tasarımda, $r_f = f_{sw} / f_{resLCL}$ a ve $r_f = f_{sampling} / f_{resLCL}$ 'e eşittir. Burada $f_{sampling}$, geribeslenen değişkenlerin örnekleme frekansdır. Dolayısıyla, anahtarlama frekansı ve örnekleme frekansı, rezonans frekansının 3.12 katı olmakta ve koşul sağlanmaktadır. Burada yapılan tasarım referans [30] temel alınarak yapılmıştır.



Şekil 4. LCL filtre tasarım grafiği (LCL filter design graphic)

3. DENETİM SİSTEMİ TASARIMI (CONTROL SYSTEM DESIGN)

Bu başlık altında, denetim sisteminin genel şeması verilmiş ayrıca şebeke tarafındaki çevirici için LCL filtre tasarımı yapılmıştır. Öncelikle rüzgâr türbini sisteminde kullanılan generatörün ve tahrik motorunun parametreleri; çift kutup sayısı $p = 4$, faz endüktansı $L_s = 0.5$ mH, faz direnci $R_s = 0.5 \Omega$, eylemsizlik momenti $J = 0.00100324$ kgm², viskoz sürtünme katsayısı $B = 0.01$ Nms, moment sabiti $k_t = 1$ olarak verilmektedir. Tasarlanan türbin sisteminin tüm şeması aşağıda, Şekil 5'te verilmektedir. Buradaki parametreler, yapılan TUBİTAK projesi kapsamında yapılan proje ile ilgili uyumlu seçilmiş parametrelerdir.



Şekil 5. DHRT sistemi tüm şeması (Overall scheme of VSWT system)

Doğru Akım (DA) bara gerilimi 350 V'tur, bu durumda generatör ve şebeke tarafı eviricilerin (yükseleç) kazancı, 1.0 modülasyon indeksi için, $K_{inv} = 302.92/3750 = 0.0808$ olarak bulunmaktadır. Bu kazanç, herhangi bir modülasyon indeksi değeri için, evirici çıkış geriliminin o modülasyon indeksi değeri için var olan doluluk oranına bölünmesiyle bulunur. Hız döngüsü (MPPT denetleyicisi) açık çevrim yerleşme zamanı 0.5 s olarak alınmıştır. Akım döngüsü açık çevrim yerleşme zamanı ise 0.005 s olarak alınmıştır. Belirlenen yerleşme zamanları için, hız döngüsü Oransal-İntegral (PI)_ω denetim kazançları; $K_{p\omega} = 10J = 0.01$, ve $K_{i\omega} = 10B = 0.1$ olarak bulunur. Sonuç olarak hız döngüsünde ileri yol transfer fonksiyonu ve hız döngüsü kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi sırasıyla bulunur. Kapalı çevrim transfer fonksiyonundan anlaşıldığı gibi, 5τ'dan yerleşme zamanı 0.5 s olarak bulunmaktadır. Yani denetim amacına ulaşılmaktadır.

$$\omega_{ol} = \frac{K_{p\omega}s + K_{i\omega}}{s} \cdot \frac{1}{Js + B} = \frac{10}{s} \quad (k_t = 1) \quad (17)$$

$$\omega_{cl} = \frac{10}{s + 10}$$

Burada unutulmaması gereken diğer bir dinamik, hız PI denetleyicisinin çıkışının, 1/k_t ile çarpılmasıdır. d-q eksenlerinde akım denetimi için ayrıştırma (decoupling) tabanlı denetim uygulanmış ve PI_i denetim kazançları her iki eksen için de, $K_{pi} = 1000L_s = 0.5$, ve $K_{ii} = 1000R_s = 500$ olarak hesaplanmıştır. d-q eksenlerinde ileri yol ve kapalı çevrim transfer fonksiyonları sırasıyla aşağıdaki gibi bulunur.

$$i_{ol} = \frac{K_{pi}s + K_{ii}}{s} \cdot \frac{1}{L_s s + R_s} = \frac{1000}{s} \quad (18)$$

$$i_{cl} = \frac{1000}{s + 1000}$$

Yukarıda görüldüğü gibi, kapalı çevrim transfer fonksiyonunda yerleşme zamanı 0.005 s'dir. Sonuç itibariyle akım döngülerinde de denetim amacına ulaşılmıştır. Akım döngülerinde, PI denetleyici çıkışında önce ayırıştırma yapılmalı, ardından ayırıştırma çıkışı $1/K_{inv}$ ile çarpılmalıdır.

Şekil 5'te SMSG'ün denetim bloğunun açık şeması, şebeke tarafındaki eviricinin denetim bloğunun açık şeması ve (Faz Kilitlemeli Döngü) PLL şemaları verilmektedir. PLL şebeke açısını elde etmek için kullanılmaktadır, böylece tüm d-q (park) dönüşümleri yapılabilmektedir. PLL sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_{cl(s)} = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (19)$$

Burada, $k_p = 15$ ve $k_i = 100$ alındığında, PLL kapalı çevrim sisteminin aşması %20, yükselme zamanı ise 0.497 s olmaktadır.

Generatör ve motor olarak aynı değerlere sahip sürekli mıknatıslı senkron makineler kullanıldığı için, akım döngülerinde kullanılan PI denetim kazançları, generatör için verilen kazançlar ile aynıdır. Motorun denetiminde yine aynı şekilde ayırıştırma tabanlı denetim uygulanmıştır.

K_d 'nin değeri 2'ye ayarlanmıştır. K_d arttıkça, harmoniklerin artacağı unutulmamalıdır. K_d 'nin seçimi ve analizi için ilgili kaynak incelenebilir [21]. Şebeke bağlantılı eviricinin denetimi, ayırıştırma tabanlı PI denetleyiciler ile yapılmıştır. PI denetleyicilerin tasarımında, C_f kapasitörü ihmal edilerek, $L = L_1 + L_2$ endüktanslarının toplamı dikkate alınmaktadır. Yani, LCL filtre L filtre olarak kabul edilmekte ve akım döngülerinde PI denetleyicilerin tasarımı, ayırıştırma tabanlı kutup-sıfır yok etme yöntemi ile yapılmaktadır. DC bara geriliminin denetiminde kullanılan PI denetleyiciler ise, teknik optimum (technical optimum) yaklaşımı ile tasarlanmıştır.

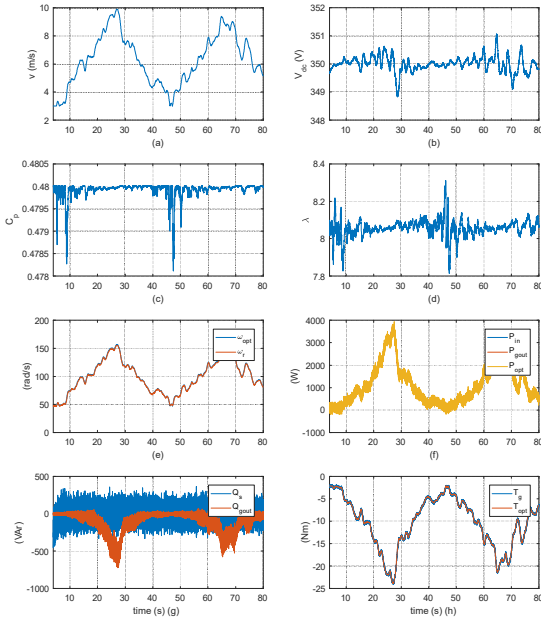
4. SİMÜLASYON SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

Benzetim çalışmalarında Şekil 6 (a)'daki rüzgâr hızı profili kullanılmıştır. Bu rüzgâr hızı, DHRT sistemi çalışmasında, Şekil 2'de görüldüğü gibi 2. Bölge'ye denk gelmektedir. Bu bölge MGİ bölgesidir. Şekil 3'te verilen DHRT sisteminin tüm dinamikleri çizdirilmiştir. Şekil 6'da

görüldüğü gibi, DHRT dinamiklerin tüm değişimleri sunulmuştur. (a)'da kullanılan rüzgâr hızı profili, (b)'de DC bara geriliminin değişimi (c)'de kanat güç katsayısının, (d)'de kanat ucu hız oranının, (e)'de optimum ve gerçek generatör hızları (f)'de türbin gücü, generatör çıkış gücü ve şebekeye aktarılan güç değerleri (g)'de generatör çıkışı ve şebekeye aktarılan reaktif güç değerleri ve son olarak (h)'de ise türbin ve generatör momenti grafikleri verilmiştir. Şekillerde görüldüğü gibi generatör hızı optimum kanat hızını takip etmektedir. Bunun sonucu olarak C_p ve λ sırasıyla 0.48 ve 8.134 olan optimum değerlerine yerleşmiştir. DC baradaki gerilim değişimi en fazla 1 V olmuştur. Bütün aktif güç değerleri tüm rüzgâr profili boyunca yaklaşık olarak üst üste çakışıktır. Reaktif güç değeri ise şebeke tarafında kararlı bir şekilde sıfırda tutulmuş, generatör tarafında ise ihmal edilebilecek seviyede küçük bir değişim yaşanmıştır. Generatör momenti ise gücün maksimize olduğu optimal türbin momenti değerini tüm çalışma boyunca izlemiştir. Benzetim sonuçları önerilen sistemin performansını doğrulamaktadır.

Şekil 6'da görüldüğü gibi, DHRT dinamiklerin tüm değişimleri sunulmuştur. (a)'da kullanılan rüzgâr hızı profili, (b)'de DC bara geriliminin değişimi (c)'de kanat güç katsayısının, (d)'de kanat ucu hız oranının, (e)'de optimum ve gerçek generatör hızları (f)'de türbin gücü, generatör çıkış gücü ve şebekeye aktarılan güç değerleri (g)'de generatör çıkışı ve şebekeye aktarılan reaktif güç değerleri ve son olarak (h)'de ise türbin ve generatör momenti grafikleri verilmiştir.

Şekillerde görüldüğü gibi generatör hızı optimum kanat hızını takip etmektedir. Bunun sonucu olarak C_p ve λ sırasıyla 0.48 ve 8.134 olan optimum değerlerine yerleşmiştir. DC baradaki gerilim değişimi en fazla 1 V olmuştur. Bütün aktif güç değerleri tüm rüzgâr profili boyunca yaklaşık olarak üst üste çakışıktır. Reaktif güç değeri ise şebeke tarafında kararlı bir şekilde sıfırda tutulmuş, generatör tarafında ise ihmal edilebilecek seviyede küçük bir değişim yaşanmıştır. Generatör momenti ise gücün maksimize olduğu optimal türbin momenti değerini tüm çalışma boyunca izlemiştir. Benzetim sonuçları önerilen sistemin performansını doğrulamaktadır.



Şekil 6. DHRT sisteminin dinamiklerinin değişimi (a) rüzgâr hızı (b) DC bara gerilimi (c) C_p (d) λ (e) ω_{opt} , ω_r (f) P_{in} , P_s , P_{gout} (g) Q_s , Q_{gout} (h) T_g , T_t (L filter simulation scheme)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, DHRT sistemlerinin tasarımı ve benzetimi yapılmıştır. DHRT sisteminde generatör olarak SMSG kullanılmıştır. Yapılan tasarımlarda, literatürdeki son zamanlarda önerilmiş güncel yaklaşımlar kullanılmıştır. Özetle, şebeke tarafı eviricide giriş filtresi olarak LCL filtre kullanılmıştır, ayrıca grafik tabanlı tasarım yapılmıştır. Bir fiziksel rüzgâr türbini tahrik modeli SMSG kullanılarak elde edilmiştir. Tüm kapalı çevrim döngülerde denetleyici olarak PI kullanılmış, tasarımlar sıfır-kutup yok etme yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Sonuç itibarıyla, tasarlanan sistem zamanla değişen bir MGİ notasını yüksek performansla izlemiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: 114E159).

REFERENCES

[1] G. J. Herbert, S. Iniyar, E. Sreevalsan and S. Rajapandian. (2007, Aug.). A review of wind energy technologies. *Renewable and sustainable energy*

Reviews. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 11(6). pp. 1117-1145. Available:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S136403210500095X>

[2] G. Raina, and O. P. Malik. (1983, Dec.). Wind energy conversion using a self-excited induction generator. *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems. (12).* pp. 3933-3936. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4111922>

[3] K. Natarajan, A.M. Sharaf, S. Sivakumar and S. Naganathan. (1987, Sept.). Modeling and control design for wind energy power conversion scheme using self-excited induction generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion. 2(3).* pp. 506-512. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5527429>

[4] P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik and B. Schmidtbauer. (1995, Aug.). Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics. *Control Systems, IEEE. 15(4),* pp. 28-38. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=408463>

[5] M. A. Mayosky and G. I. Canelo. (1999, Jul.). Direct adaptive control of wind energy conversion systems using Gaussian networks. *Neural Networks, IEEE Transactions on, 10(4).* pp. 898-906. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=774245>

[6] M. Mauri, L. Frosio and G. Marchegiani. "Integration of Hybrid Distributed Generation Units in Power Grid" in *Electrical Generation and Distribution Systems and Power Quality Disturbances*, Prof. Gregorio Romero (Ed.), (2011). ISBN: 978-953-307-329-3

[7] A. Lin. (2012, January). Research on Voltage Stability in Grid-Connected Large Wind Farms. *In Advanced Materials Research. 354.* pp. 989-992.

[8] J. D. Duan and R. Li, L. An. (2012, January). Study of Voltage Stability in Grid-Connected Large Wind Farms. *In*

- Advanced Materials Research*. 433, pp. 1794-1801.
- [9] Sarika D. Patil. (2012). Improvement of Power Quality Considering Voltage Stability in Grid Connected System by FACTS Devices. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 1(3). pp. 14-19.
- [10] S. M. Muyeen, S. Shishido, M. Ali, R. Takahashi, T. Murata and J. Tamura. (2008). Application of energy capacitor system to wind power generation. *Wind energy*. 11(4), pp. 335-350. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.265/epdf>
- [11] M. H. Ali, J. Tamura and B. Wu. "SMES strategy to minimize frequency fluctuations of wind generator system" *In Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. 34th Annual Conference of IEEE. Orlando USA*. (2008, November). (pp. 3382-3387). IEEE.
- [12] M. H. Ali, B. Wu and R. A. Dougal. (2010, April). An overview of SMES applications in power and energy systems. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*. 1(1). pp. 38-47. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5433171>
- [13] L. Wang, J. Y. Yu and Y.T. Chen. (2011, Oct.). Dynamic stability improvement of an integrated offshore wind and marine-current farm using a flywheel energy-storage system. *Renewable Power Generation, IET*, 5(5), pp. 387-396. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6009135>
- [14] X. Li, D. Hui and X. Lai. (2013, April). Battery energy storage station (BESS)-based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations. *Sustainable Energy, IEEE Transactions on*, 4(2), pp. 464-473. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6473871>
- [15] F. W. Lanchester. (1915, May). A contribution to the theory of propulsion and the screw propeller. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 27(2). pp. 509-510. Available: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1559-3584.1915.tb00408.x/epdf>
- [16] D. Bang, H. Polinder, G. Shrestha, J. A. Ferreira, "Review of generator systems for direct-drive wind turbines", *Presented at the EWEC (European Wind Energy Conference Exhibition)*, Brussels, Belgium, (2008, March), pp. 1-10.
- [17] A. Betz. (1920). Das maximum der theoretisch möglichen ausnützung des windes durch windmotoren. *Zeitschrift für das Gesamte Turbinewesen*. 26. pp. 307-309.
- [18] S. Heier, "Grid integration of wind energy conversion systems", Wiley, Chichester, UK, (1998).
- [19] Z. Alnasir and M. Kazerani. (2013, Dec.). An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 28. pp. 597-615. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113005674>
- [20] M. A. Khan, P. Pillay and K. D. Visser. (2005, Sept.). On adapting a small pm wind generator for a multiblade, high solidity wind turbine. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*. 20(3). pp. 685-692. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1495542>
- [21] J. R. Bumby and R. Martin. (2005, Sept.). Axial-flux permanent-magnet air-cored generator for small-scale wind turbines. *In Electric Power Applications, IEE Proceedings*. 152(5). pp. 1065-1075. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1516795>
- [22] G. K. Singh. (2004, May). Self-excited induction generator research—a survey. *Electric Power Systems Research*, 69(2). pp. 107-114. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779603002037>
- [23] R. C. Bansal, T. S. Bhatti, and D. P. Kothari. (2003, Sept.). Bibliography on the application of induction generators in nonconventional energy systems. *Energy*

- Conversion, IEEE Transactions on.* 18(3). pp. 433-439. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1223612>
- [24] P.K. Shadhu Khan and J.K. Chatterjee. (1999). Three-phase induction generators: a discussion on performance. *Electric Machines & Power Systems*, 27(8). pp. 813-832. Available: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/073135699268867>
- [25] M. Ermiş, H. B. Ertan, M. Demirekler, B. M. Sarıbatır, Y. Üçtuğ, M. E. Sezer and I. Çadırcı, (1992, January). Various induction generator schemes for wind-electricity generation. *Electric Power Systems Research*. 23(1). pp. 71-83. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877969290036Z>
- [26] S. Müller, M. Deicke and R. W. De Doncker. (2002, May/June). Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *Industry Applications Magazine. IEEE*. 8(3). pp. 26-33. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=999610>
- [27] R. Datta and V. T. Ranganathan. (2002, Sept.). Variable-speed wind power generation using doubly fed wound rotor induction machine-a comparison with alternative schemes. *Energy Conversion. IEEE Transactions on.* 17(3). pp. 414-421. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1033974>
- [28] L. Holdsworth, X. G.Wu, J. B. Ekanayake and N. Jenkins. (2003, May). Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. *In Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*. 150(3). pp. 343-352. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1201854>
- [29] S. Grabic and V. Katic, "A comparison and trade-offs between induction generator control options for variable speed wind turbine applications" *In Industrial Technology, 2004. IEEE ICIT'04*, (Vol. 1, pp. 564-568), Hammamet Tunisia, (2004, December).
- [30] R. Pena-Alzola, M. Liserre, F. Blaabjerg, M. Ordonez and Y. Yang. (2014, Nov.). LCL-filter design for robust active damping in grid-connected converters. *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, 10(4), pp. 2192-2203. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6917012>