

# Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri İçin Generatör Sistemleri

Murat UYAR    Muhsin Tunay GENÇOĞLU\*    Selçuk YILDIRIM  
Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektrik Eğitimi Bölümü, 23119, ELAZIĞ  
[muyar@firat.edu.tr](mailto:muyar@firat.edu.tr)    [syildirim@firat.edu.tr](mailto:syildirim@firat.edu.tr)

\*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 23279, ELAZIĞ  
[mtgencoglu@firat.edu.tr](mailto:mtgencoglu@firat.edu.tr)

**Özet:** Rüzgar santrallerinde senkron, asenkron ve doğru akım generatörleri kullanılmaktadır. Senkron generatörler rüzgarın sürekli olduğu yerlerde ve büyük güçlerde kullanılırlar. Asenkron ve doğru akım generatörleri ise değişken rüzgar hızlarında kullanılır.

Bu çalışmada, sabit hızlı rüzgar türbinleri ile değişken hızlı rüzgar sistemleri karşılaştırılmış ve rüzgar enerjisi sistemlerinde en çok kullanılan senkron ve asenkron generatörler incelenmiştir. Ayrıca rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörlerin birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgar Enerjisi, Rüzgar Türbini, Elektriksel Dönüşüm Sistemleri, Generatör.

## 1. Giriş

Son yıllarda yenilenebilir enerji kaynaklarına verilen önem ve yenilenebilir enerji ile çalışan enerji üretim santrallerinin sayısı giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar enerjisi oldukça fazla ilgi görmekte ve bu alana yapılan yatırımlar hızla artmaktadır. Rüzgar, üretim kapasitesi açısından dünyanın en hızlı büyüyen enerji kaynağıdır. Dünyadaki rüzgar enerjisi santrallerinin toplam kurulu gücü 1996 yılında 6000 MW iken, 2002 yılında 31128 MW'a ve 2003 yılı sonunda da yaklaşık 37500 MW'a ulaşmıştır. 1998 ile 2002 yılları arasında dünyanın toplam rüzgar kurulu gücünde ortalama %32'lik bir artış görülmektedir [1].

Rüzgar enerjisinin elektriksel enerjiye dönüştürüldüğü sistemlerin çoğunda güç elektroniği devreleri kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, üretilen enerjinin istenen şekle dönüştürülmesi ve belirlenen kontrol mekanizması çerçevesinde rüzgardan optimum enerji elde edilmesi amaçlanmaktadır [2].

Rüzgar enerjisi dönüşüm sistemleri, türbin hızı ve üretilen gerilimin frekansı esas alındığında, çalışma prensibine göre üç gruba ayrılabilir:

- Sabit hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri,
- Değişken hız, sabit frekans dönüşüm sistemleri,
- Değişken hız, değişken frekans dönüşüm sistemleri.

Sabit hızlı sistemlerde, sadece rotor hızının küçük değişikliklerine müsaade edilir. Bu sistemin yapı ve performansı kanat eğim kontrolü gibi mekanizmaların mekaniksel karakteristiğine bağlıdır. Ayrıca türbülans ve kule şekli, güçteki değişimler olarak görülen dalgalanma yüklerini hızlı bir şekilde etkiler. Bu değişimler, şebekeye bağlı rüzgar türbinleri için istenmeyen bir özelliktir. Güçteki bu değişimler, rüzgar türbininin ömrünü kısaltan mekaniksel baskılara neden olur ve güç kalitesini azaltır. Bu nedenle rüzgar türbinleri optimum performansında çalıştırılmazlar ve genellikle rüzgardan maksimum güç elde edilemez.

Sabit hızlı sistemlere alternatif olan değişken hızlı sistemlerde ise, rotor hızı kontrol edilmeye uygundur. Bu özellik, rüzgar türbin sisteminin sürekli olarak optimum hız oranına yakın çalışmasına imkan sağlamaktadır. Değişken hızlı sistemlerin, sabit hızlı sistemlere göre bazı önemli avantajları aşağıda verilmiştir [3,4]:

- Türbin hızı, çıkış gücünü en üst düzeye çıkarabilecek şekilde rüzgar hızının bir fonksiyonu olarak ayarlanabildiği için yıllık enerji üretimi artar. Türbin aerodinamiğine ve rüzgar rejimine bağlı olarak, yıllık enerjiye ortalama %10 oranında bir katkı sağlanır.
- Sistem, gücün en uygun şekilde düzenlenmesine imkan sağladığı için mekaniksel baskılar azalır.
- Rüzgar ve mekaniksel sistemlerden kaynaklanan ve çıkış gücünde değişime sebep olan anlık durumlar önemli ölçüde azalır. Türbin ani ve çok kuvvetli rüzgara maruz kaldığında, mekaniksel sistemin eylemsizliği rotor hızını artırıp artık enerjiyi emerek, elektriksel sistemin şebekeye sabit güç aktarmasına engel olmaz.

- Güç kalitesi, güçteki dalgalanmalar azaltılarak iyileştirilebilir. Güçteki dalgalanmaların azalması, gerilimin nominal değerinden uzaklaşmasını da önleyecektir. Bu da rüzgar gücünün şebekedeki etkisini arttıracaktır.
- Kanat eğim açısının kontrol zaman sabiti, daha yüksek olabileceğinden, kanat eğim mekanizmasının karmaşık kontrol sistemi daha basit bir şekilde yapılabilmektedir.
- Akustik gürültü azalacaktır. Yerleşim bölgelerinin yakınlıklarına kurulan rüzgar çiftliklerinde gürültü önemli bir problem olmaktadır.

Değişken hızlı sistemlerin dezavantajları ise; generatör ve şebeke arasındaki bağlantı için gerekli güç konverterlerinin karmaşıklığı ve maliyetin yüksek olmasıdır. Fakat son yıllarda gerek güç elektroniğinde kaydedilen ilerlemeler, gerekse yarı iletken teknolojisinin maliyetinin her geçen gün azalması, rüzgar güç sistemlerinde bu yapının kullanımını oldukça cazip hale getirmiştir.

## 2. Rüzgar Türbinleri

Rüzgar enerjisinden faydalanarak mekanik enerji elde etmeye yarayan makinalara rüzgar türbini denir. Rüzgar türbinlerinin kW 'lardan MW 'lara kadar geniş bir kapasitesi vardır. Rüzgar türbinleri çeşitli özelliklerine göre sınıflandırılabilirler. Eksenlerine göre; yatay eksenli ve dikey eksenli türbinler olmak üzere ikiye ayrılırlar. Tablo 1 'de rüzgar türbinlerinin güçlerine göre sınıflandırılması görülmektedir. Türbinleri, dişli kullanılan ve dişli kullanılmayan türbinler olarak da sınıflandırmak mümkündür. Ayrıca kanat sayılarına göre de; tek kollu, çift kollu ve üç kollu türbinler olarak sınıflandırılabilirler. Bunların dışında, önden ve arkadan rüzgarlı, durdurma ve kanat eğimli denetimli, sabit ve değişken hızlı rüzgar türbinleri şeklinde sınıflandırmalar da vardır.

**Tablo 1.** Rüzgar türbinlerinin sınıflandırılması [5]

Ölçek	Rotor Çapı (m)	Güç (kW)
Mikro	3'den küçük	0.05-2
Küçük	3-12	2-40
Orta	12-45	40-1000
Büyük	45'den büyük	1000'den büyük

## 3. Rüzgar Türbinlerinde Kullanılan Generatörler

Rüzgar türbininin ürettiği mekanik enerjiyi minimum kayıpla elektrik enerjisine dönüştürmek için, farklı hız ve çıkış kombinasyonları kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinde üç çeşit generatör kullanılmaktadır.

- 1) Doğru akım generatörü,
- 2) Senkron generatör,
- 3) Asenkron generatör.

Küçük güçlü sistemlerde eskiden çok kullanılan doğru akım (d.a.) generatörü, günümüzde yerini genellikle senkron veya asenkron generatörlere bırakmıştır. Bu generatörler, konverterler yardımıyla kolayca doğru akımı alternatif akıma dönüştürebilen güç elektroniği elemanları ile birlikte çalışmaktadırlar. Senkron ve asenkron generatörler daha çok orta ve büyük güçlü sistemlerde yaygın olarak kullanılırlar. Bu bölümde değişken hızlı rüzgar türbinlerinde kullanılan generatörler ve konverterlerin ana özellikleri incelenecektir.

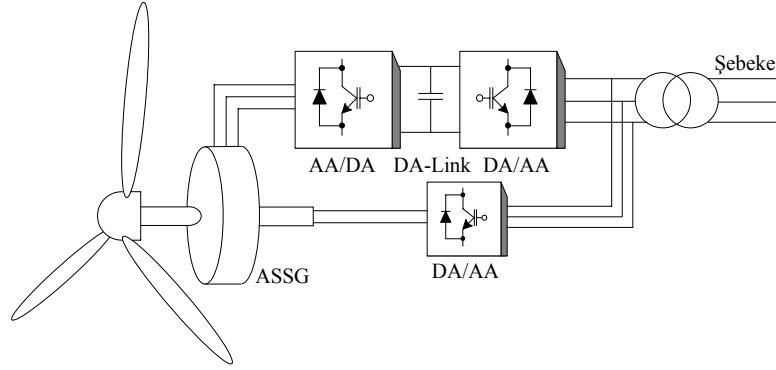
### 3.1. Doğru Akım Generatörleri

Doğru akım makinaları, düşük güvenilirlik ve bakım gerektirmesi gibi dezavantajlarına rağmen, hız kontrollerinin kolay olması nedeniyle endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. D.a. generatörleri küçük kapasiteli rüzgar türbinlerinde, özellikle elektriğin şebekeden bağımsız olarak kullanıldığı yerlerde tercih edilmektedirler. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü d.a. makinaları, komütatörü elimine etmek için daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaya başlanmıştır. Bu tertibatta üretilen alternatif akım (a.a.) yarı iletken doğrultucular yardımıyla d.a.'ya dönüştürülür. Fırçasız d.a. makinaları olarak da isimlendirilen bu makinalar, daimi mıknatısların kapasitelerinin ve güçlerinin sınırlı olması nedeniyle, küçük güçlü rüzgar türbinlerinde kullanılmaktadırlar [6].

### 3.2. Senkron Generatörler

Senkron generatör, harici bir yükü besleyen üç fazlı sargıların oluşturduğu bir stator ve manyetik alanı oluşturan bir rotordan meydana gelir. Rotorun oluşturduğu manyetik alan ya daimi mıknatıslardan ya da sargılardan akan doğru akımdan üretilir. Senkron generatörler sabit hızlı sistemler için daha uygundur. Bu nedenle sabit hıza bağlı olarak sabit frekansta çalışırlar. Rüzgar türbinlerinde, genellikle alan sargılı ve daimi mıknatıslı olmak üzere iki tip senkron generatör kullanılmaktadır [4,6].

### a) Alan Sargılı Senkron Generatör



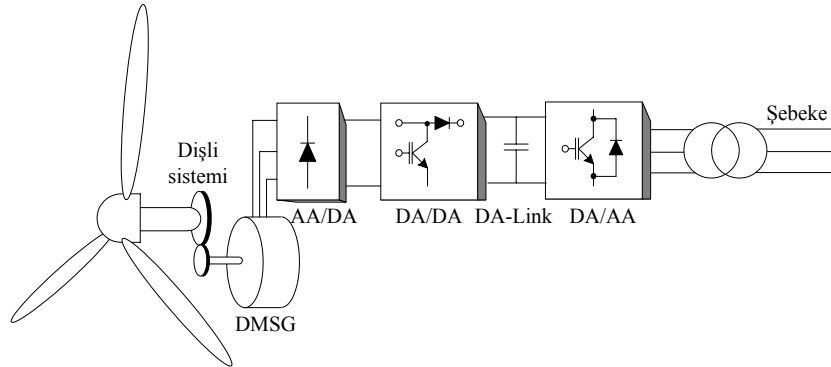
Şekil 2. Değişken hızlı alan sargılı senkron generatör

Alan sargılı senkron generatörlerde (ASSG); stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu (DGM) tekniğine göre anahtarlama yapabilen, çift yönlü akım akışının olabildiği (back-to-back) gerilim kaynaklı iki inverterden meydana gelmiş, dört bölgeli bir güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır (Şekil 2). Stator tarafındaki konverter elektromanyetik torku, şebeke tarafındaki konverter ise bu sistemin oluşturduğu aktif ve reaktif gücü regüle eder [4,7]. ASSG'nin sağladığı avantajlar şunlardır:

- Elektromanyetik tork üretiminde stator akımının tamamı kullanıldığı için bu makinanın verimi genellikle yüksektir.
- Çıkık kutuplu alan sargılı senkron generatörün kullanılmasının en büyük faydası, makinanın güç faktörünün doğrudan kontrolüne müsaade edilmesidir. Bunun sonucu olarak, stator akımı bir çok işletim durumunda minimize edilebilir.
- Bu generatörlerin kutup eğimi indüksiyon makinalarına göre daha küçük olabilir. Bu durum dişli kutusu elimine edilerek, düşük hızlı çok kutuplu makinalar elde edilmesinde önemli bir özellik olabilmektedir.

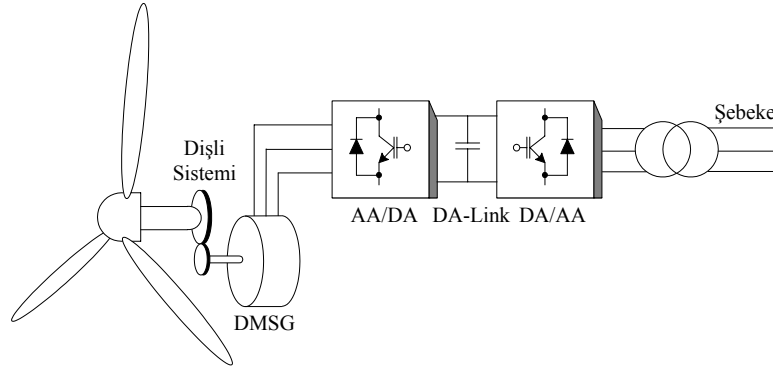
Rotorda sargı devresinin bulunması daimi mıknatıslı senkron generatör (DMSG) ile kıyaslandığında bir dezavantajdır. Ayrıca üretilen aktif ve reaktif gücü regüle etmek için, nominal rüzgar gücünün 1.2 katı büyüklüğünde konverterler kullanılması gerekmektedir.

### b) Daimi Mıknatıslı Senkron Generatör



Şekil 3. Yükseltici DA-DA kıyıcısı ile beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör

Şekil 3 'de üç fazlı doğrultucuyu takip eden, yükseltici DA-DA kıyıcısı ile bağlantısı sağlanmış, daimi mıknatıslı senkron generatöre (DMSG) ait rüzgar güç sistemi görülmektedir. Burada yükseltici DA-DA kıyıcısı elektromanyetik torku kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki konverter ise, girişin güç faktörünü kontrol ettiği gibi, aynı zamanda DA link gerilimini de regüle etmektedir. Genellikle bu konfigürasyon küçük güçlü (50 kW'tan küçük) rüzgar güç sistemleri için tercih edilmektedir [4,8].



Şekil 4. DGM konverterden beslenen daimi mıknatıslı senkron generatör

Şekil 4 'de farklı bir DMSG rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde generatör ve DA linki arasına DGM tekniğini kullanan doğrultucu yerleştirilmiştir ve DGM inverter üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Bu sistemin Şekil 3 'deki sisteme göre avantajı; generatör ve güç elektroniği devresindeki kayıpları azaltmak için, optimal çalışma noktasına yakın bir çalışmaya müsaade edilen alan yönlendirmeli kontrolün kullanılmasıdır. Fakat, sıcaklık ve frekansla değişebilen generatör parametrelerinin performansı etkileyebileceği dikkate alınmalıdır [4,7,8].

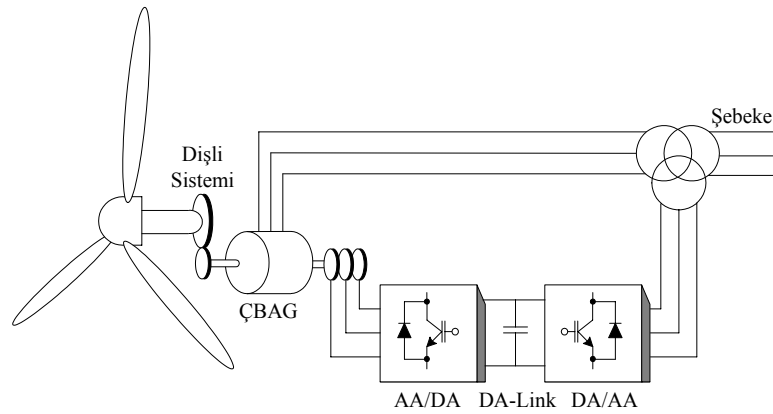
DMSG 'nin dezavantajları şunlardır:

- Makinanın fiyatını arttıran daimi mıknatısların maliyeti yüksektir.
- Akımın genliğini arttıran diyotlu doğrultucular kullanılmaktadır.
- Mıknatıs malzemesinin manyetikliği bozulabilmektedir.
- Makinanın güç faktörünün kontrol edilmesi mümkün değildir.

### 3.3. Asenkron Generatörler

Rüzgar türbinlerinde, alternatif akım üretmek için üç fazlı asenkron generatör veya indüksiyon generatörü olarak isimlendirilen generatörler kullanılmaktadır. Bu tip generatörler rüzgar türbin endüstrisi ve küçük hidroelektrik santraller dışında yaygın bir şekilde kullanılmamaktadırlar. Bu generatörlerin tercih edilmelerinin sebebi, emniyetli olmaları ve maliyetlerinin düşük olmasıdır. Rüzgar türbinlerinde, genellikle rotoru sargılı ve sincap kafesli olmak üzere iki tip asenkron generatör kullanılmaktadır [6].

#### a) Çift Beslemeli Asenkron Generatör



Şekil 5. Çift beslemeli rotoru sargılı asenkron generatör

Şekil 5 'de çift beslemeli asenkron generatörün (ÇBAG) kullanıldığı bir rüzgar güç sistemi görülmektedir. Bu sistemde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanmıştır. Rotor sargısı ise iki adet back-to-back gerilim kaynaklı DGM tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeyi güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanmıştır. Genellikle, rotor tarafındaki konverter kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın

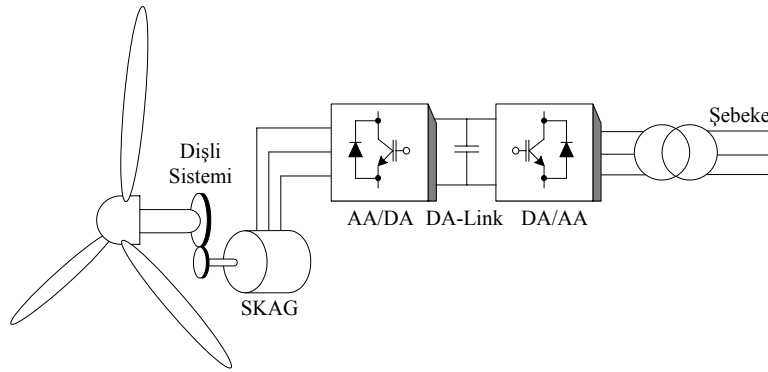
manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter kontrol sistemi ise, DA linkini regüle eder [3,4,8,9]. Senkron generatörlerle karşılaştırıldığında, ÇBAG 'ün aşağıda belirtilen bazı avantajları vardır [5,7,10].

- Sadece rotorun kayma gücünü kontrol etmeye yarayan konverter sistemine sahip olduğu için, toplam sistem gücünün yaklaşık %25 'i oranında bir inverter kullanılmaktadır. Bu da inverter maliyetini azaltır.
- Sistemde kullanılan filtreler toplam sistem gücünün 0.25 p.u.'lik kısmı için gerekli olduğundan, inverter filtrelerinin maliyeti azalmaktadır. Aynı zamanda inverter harmonikleri, toplam sistem harmoniklerinin daha küçük bir bölümünü temsil etmektedir.
- Ayrıca bu makina harici bozucu etkilere karşı dayanıklılık ve kararlılık göstermektedir.

ÇBAG için en büyük dezavantaj bünyesinde periyodik bakıma ihtiyaç duyan bilezik tertibatının bulunmasıdır [5,7].

#### b) Sincap Kafesli Asenkron Generatör

Rüzgar güç sistemlerinde kullanılan bir başka generatör ise, sincap kafesli asenkron generatör (SKAG)'dür (Şekil 6).



Şekil 6. Değişken hızlı sincap kafesli asenkron generatör

Bu sistemde stator sargısı, DA linkinin iki tarafına back-to-back bağlı gerilim kaynaklı iki DGM inverterden meydana gelen, dört bölgeli güç konverteri üzerinden şebekeye bağlanır. Stator tarafındaki konverterin kontrol sistemi, elektromanyetik torku regüle eder ve makinanın manyetik alan üretebilmesi için reaktif güç sağlar. Şebeke tarafındaki konverter, sistemden şebekeye aktarılan aktif ve reaktif gücü ve aynı zamanda DA linkini regüle eder [9,10]. Rüzgar güç sistemlerinde kullanılan SKAG 'nin sağladığı avantajlar aşağıda verilmiştir:

- Sincap kafesli asenkron makineler, fırçasız, güvenilir, ekonomik ve sağlam bir yapıya sahip olmaları nedeniyle uygulamada sıkça kullanılmaktadırlar.
- Doğrultucu, generatör için programlanabilir bir uyartım oluşturabilmektedir.
- İnverter, harmonik kompanzator olarak çalıştırılabilmektedir.

Generatör parametrelerinin sıcaklık ve frekansla değişerek sistemin kontrolünü karmaşılaştırması ve stator tarafındaki konverterin, makinanın ihtiyaç duyduğu manyetik alanı sağlamak için nominal güce göre %30-%50 oranında daha büyük ölçülerde yapılması, bu sistemin dezavantajları arasında yer alır [7].

Ayrıca yukarıda anlatılan generatörlerin dışında; fırçasız çift beslemeli generatörler, değişken relüktanslı generatörler ve çift hızlı asenkron generatörler de bazen, rüzgar güç sistemlerinde özel uygulamalar için kullanılmaktadırlar.

## 4. Sonuç ve Öneriler

Bu makalede değişken hızlı rüzgar sistemlerinde kullanılan generatörler incelenmiştir. Rüzgar türbinlerinde, türbin rotoru üzerindeki aerodinamik kuvvetleri azaltmak için bazı önlemler gerekmektedir. Bunun için, orta ve büyük güçlü rüzgar türbinlerinde, pasif hız yavaşlatıcı regülasyon ve kanat eğim regülasyonu tercih edilmektedir. Türbin çıkış gücü, shaft gücü ayarlanarak maksimum yapılır. Bu amaçla maksimum güç noktası izleyicili sistemler kullanılmaktadır. Bunun nedeni, güç ölçümünün rüzgar hızının ölçümünden daha kolay olması ve ölçülen gücün vektör kontrolü tasarımı için gerekli olmasıdır.

Bir rüzgar santralının performansı, santralin kurulacağı bölgenin rüzgar rejimine ve türbin tipine en uygun generatörün kullanılmasına bağlıdır. Küçük ve orta güçlü rüzgar güç sistemlerinde hem SKAG, hem de DMSG kullanılır. Büyük güçlü rüzgar güç sistemleri için ise hem ÇBAG, hem de senkron generatör tercih edilir. DGM, sistemin giriş ve çıkışındaki akım harmoniklerini azaltacağı için, DGM tekniğine göre anahtarlama yapabilen, back-to-back gerilim kaynaklı dört bölgeli güç konverteri tercih edilir. Böylece, generatör üzerindeki tork titreşimleri azalır ve çıkış gücünün kalitesi artar. Ayrıca güç elektroniği teknolojisinde kaydedilecek yeni gelişmeler ile beraber, rüzgar güç sistemlerinin performansını optimize etmek mümkün olacaktır.

## Kaynaklar

- [1] "American Wind Energy Association Homepage"  
<http://www.awea.org>
- [2] Sürgevil, T., Akpınar, E., "Rüzgar Gücünden Elektriksel Güç Elde Etmede Kullanılan Dönüşüm Sistemleri ve Kontrol Teknikleri," Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, YEKSEM'2001, s. 234- 237, İzmir.
- [3] Muller, S. Deicke ve M. De Doncker, R.W., "Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines," IEEE Industry Applications Magazine, 8, 3, s. 26-33, 2002.
- [4] Marques, J., Pinheiro, H., Gründling, A., Pinheiro, J.R., Hey, H.L., "A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System," 2003, CE. 7<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'03, Fortaleza, Brazil, 1, s. 732-738, 2003.
- [5] [http://www.itdg.org/docs/technical\\_information\\_service/wind\\_electricity\\_generation.pdf](http://www.itdg.org/docs/technical_information_service/wind_electricity_generation.pdf)
- [6] Patel, M.R., "Wind and Solar Power Systems" CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington, 1999.
- [7] Hansen, L.H., Madsen, P.H., Blaabjerg, F., Christensen, H.C., Lindhard, U., Eskildsen, K. "Generators and Power Electronics Technology For Wind Turbines," The 27th Annual Conference of the IEEE, IECON 2001, 3, s. 2000 -2005.
- [8] Nicolás, C.V, Lafoz, M. And Iglesias, J. " Guidelines For the Design and Control of Electrical Generator Systems for New Grid Connected Wind Turbine Generator." IECON 2002.
- [9] Polinder, H., Haan S.W.H., Dubois, M.R., Sootweg, J.G., "Basic Operation Principles and Electrical Conversion of Wind Turbines," NORPIE 2004, Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, June 2004, Trondheim, Norway.
- [10] "Wind Turbine Grid Connection and Interaction," Deutsches Windenergie-Institut Tech wise A/S, DM Energy, 2001.  
[http://europa.eu.int/comm/energy/res/sectors/doc/wind\\_energy/maxibrochure\\_final\\_version.pdf](http://europa.eu.int/comm/energy/res/sectors/doc/wind_energy/maxibrochure_final_version.pdf)