

RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

Ahmet Ali AKKAŞ

ÖZET

Bu tebliğ; rüzgar enerjisi uygulamalarının performans ve verimliliğini, örnek bir bölgedeki yıllık enerji üretimini belirleyen rüzgar özelliklerinin teknik olarak incelenmesi şeklinde değerlendirmekte ve açıklamaktadır. Daha sonra rüzgar sistemlerinin ürettiği elektrik gücündeki değişimlere değinilmiş ve tek bir rüzgar türbini ile bir rüzgar çiftliğinden elde edilen elektrik gücü arasındaki farklara dikkat çekilmiştir.

Çalışma sonucu genel olarak şu şekilde özetlenebilir:

- Rüzgar enerjisi sistemleri; rüzgar çiftlikleri, dağıtılmış üretim türbinleri ve hibrit sistemler olarak üç ana grupta incelenebilir.
- Bir rüzgar türbininin temel performans ifadesi türbin güç eğrisidir. Rüzgar türbininin çalıştığı yada çalışacağı bölgenin rüzgar rejimi ise rüzgar hızı frekans dağılımına bakılarak anlaşılabilir. Rüzgar hızı frekans dağılımı, belli bir hız aralığının yıl içerisinde gerçekleşme olasılığını gösterir. Güç eğrisi ve frekans dağılımı beraber kullanılarak rüzgar çiftliğinin yıllık enerji üretim kapasitesi belirlenir.
- Rüzgar türbinlerinin güvenilirlik ölçütü (bulunabilirlik {availability}), rüzgar sisteminin enerji verimliliği (kapasite faktörü {capacity factor}) ve rüzgar enerjisi sistemlerinin aynı hatta bağlı diğer konvensiyonel enerji kaynaklarına oranı (nüfuz oranı {line penetration}), rüzgar sistemlerinin ürettiği elektrik gücündeki değişimler {time-variability} rüzgar enerjisi performans değerlendirmesinde önemli olan diğer unsurlardır.

RÜZGAR TÜRBİNLERİ KULLANIM ALANLARI

Elektrik üreten rüzgar türbinlerinin kullanım alanları; rüzgar çiftlikleri, dağıtılmış üretim türbinleri ve hibrit sistemler olarak, kurulu güç ve diğer güç kaynakları ile entegrasyon derecesine göre üç sınıfa ayrılabilir. Rüzgar çiftlikleri; büyük güçte bir çok rüzgar türbininin beraberce çalıştırılarak konvensiyonel elektrik santrali oluşturması olarak tarif edilebilir. Dağıtılmış üretim türbinleri ise daha çok küçük güçte rüzgar türbinlerinden oluşan şebekeye yada direkt olarak yüke bağlı sistemlerdir. Hibrit sistemler ise; rüzgar türbinlerinin elektrik şebekesinin hiç olmadığı yerlerde; daha çok dizel jeneratörler ile oluşturulan minyatür bir şebeke yardımıyla çalıştırılmasıdır.

RÜZGARIN ENERJİ VERİMLİLİĞİ

Rüzgarlar bütün bir yıl ele alındığında bazen esmez yada rüzgar türbinin devreye girme (cut-in wind speed) rüzgar hızının altında eser. Rüzgar enerjisi sistemleri, termik santraller ve nükleer enerji santralleri gibi diğer konvensiyonel üretim sistemleri ile karşılaştırıldığında tüm yıl boyunca devamlı olarak enerji üretilmez elbette. Ürettikleri enerji ise çoğu zaman nominal güçte bile değildir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin bu özelliği yakıt olarak kullanılan rüzgarın kendi temel düzensiz doğası ile

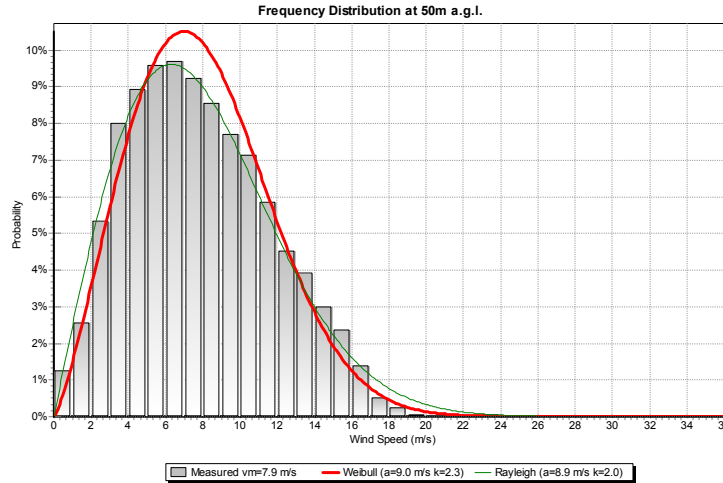
doğrudan alakalıdır. Fakat kurulması planlanan ya da zaten kurulu bir rüzgar enerjisi sisteminin hem ekonomik hem de teknik manada uygulanabilir ve varlığını devam ettirebilir oluşuna karar verme hususunda; yaygın olarak kullanılan ve diğer üretim sistemleri ile karşılaştırma yapabilmeye olanak tanıyan santralin kapasite faktörü belirleyici bir etkidir.

Kapasite faktörü: bir enerji üretim sisteminin bir yıl içerisinde (8760 saat) toplam kaç saat tam güçte enerji verdiğini anlatır. Bir başka deyişle santralin bir yıl içerisinde üretmiş olduğu enerjinin, santralin bir yıl boyunca nominal güçte çalışarak üretebileceği enerjiye oranı kapasite faktörü olarak adlandırılır. Bir örnekle açıklayacak olursak; kurulu gücü 7.2 MW olan ve bir yılda 18GWh enerji üreten bir rüzgar santrali nominal güçte (7.2 MW) bir yıl boyunca çalışmış olsaydı yılda 63 GWh enerji üretecekti. Bu şartlar altında bu rüzgar santralinin kapasite faktörü %29 (18GWh/63GWh * 100) dur denilir.

Rüzgar çiftliğinde kullanılacak türbinlerin güç eğrisi ile santral bölgesinin rüzgar özellikleri incelenerek yıllık enerji üretim miktarı hesaplanır. Enerji üretim miktarı hesaplaması Yıllık enerji üretim öngörüsü bölümünde detaylandırılmıştır. Kurulacak yeni rüzgar enerjisi santralinin kapasite faktörü: öngörülen üretim miktarından elektriksel ve diğer kayıpların düşülerek bulunduğu net enerji üretimi üzerinden yukarıda tanımlanan şekilde hesap edilir.

Rüzgar hızı frekans dağılımı

Şekil 1. bir ölçüm istasyonunun yerden 50m yükseklikteki rüzgar hızı sensöründen alınan verilerin frekans dağılımını göstermektedir.



Şekil. 1.: Rüzgar Hızı Frekans Dağılımı

Rüzgar hızı dağılımı fonksiyonu $f(v) \cdot \Delta v$ (Şekil 1. de [Olasılık] probability olarak tanımlanmıştır); v ile $v + \Delta v$ aralığında esen rüzgar hızlarının olasılıklarını verir. Şekil 1. deki dağılım grafiğinde $\Delta v=1$ m/s dir ve yatay eksen (Wind Speed) rüzgar hızını (v) göstermektedir. Rüzgar hızı frekans dağılımı fonksiyonu $f(k)$ olarak da gösterilebilir. Burada k parametresi rüzgar hızı endeksini gösterir ve tamsayı bir değerdir. Fonksiyon $f(k)$ olarak ifade edildiğinde; $f(1)$: 1 m/s ile 2 m/s arasında esmiş rüzgarların olasılığını verir. Şekil 1. üzerinden bir örnek verilecek olursa; $f(6)$ (6 m/s ile 7 m/s arasında gerçekleşen rüzgar hızlarının olasılığı) 0.096 olarak görülmektedir. Bir başka ifadeyle ölçüm istasyonunda 50m yükseklikte, yıl içerisinde esen tüm rüzgarlardan şiddeti 6 ile 7 m/s arasında bulunanların yüzdesinin 9.6 (%9.6) olduğu görülmektedir. Saat olarak söylemek gerekirse; bu olasılık değeri yıl içerisindeki toplam saat (8760) ile çarpılmalıdır. Buradan $0.096 \cdot 8760 = 841$ saat bulunur. Özetle bu ölçüm istasyonunda yılda 841 saat şiddeti 6 ile 7 m/s arasında olan rüzgarlar esmiştir denilebilir. Ve bu ve diğer rüzgar aralıkları için bulunacak değerler gelmiş ve gelecek tüm yıllar için doğru kabul edilerek santralin yıllık enerji üretimi hesaplaması yapılabilir.

Rüzgar hızı frekans dağılımı sürekli bir fonksiyon olarak da tanımlanabilir. Sürekli dağılım kullanılacağı zaman iki parametrelili Weibull dağılımı gözlenen frekans dağılımına uygulanabilir. Denklem 1. Weibull dağılım fonksiyonunu göstermektedir. Fonsiyondaki A [m/s] parametresi ölçeği, k parametresi ise biçimi tarif eder. k parametresinin 2 olduğu özel durumda dağılım Rayleigh dağılımı olarak adlandırılır. Pek çok bölgedeki rüzgarlar Rayleigh dağılımına uyarlar. Kümülatif Weibull dağılım fonksiyonu ise denklem 2. de görülmektedir.

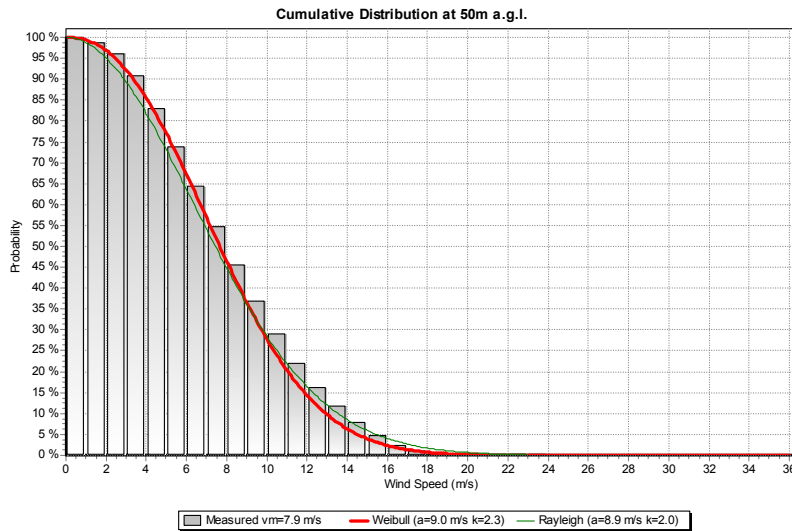
$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (1)$$

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k} \quad (2)$$

Ölçüm sonuçlarından elde edilen frekans dağılımına Weibull fonksiyonu LSF (Least Square Fit), MLE (Maximum Likelihood Estimation) gibi eğri uyarlama metodları uygulanarak en uygun Weibull-A ve Weibull-k parametreleri bulunur. Böylelikle bu iki parametre; son derece ekonomik bir biçimde bölgenin rüzgar hızı frekans dağılımını temsil ederler. Bu iki parametre kullanılarak ortalama rüzgar hızı ve enerji yoğunluğu bulunabilir. İlgili formüller denklem 3. ve 4. de verilmiştir.

Şekil 1. aynı zamanda frekans dağılımının Weibull ve Rayleigh parametrelerini de göstermektedir. Gözlemlenen frekans dağılımına *değişken ağırlıklı en küçük kareler metodu* (LSFVW – Least Square Fit with multi-Variate Weights¹) kullanılarak Weibull-A parametresi 9 m/s, Weibull-k parametresi 2.3 ve Rayleigh parametresi de 8.9 m/s olarak bulunmuştur.

Şekil 1. de gösterilen Weibull ve Rayleigh grafikleri bölgedeki rüzgar rejimini ifade ederler ve ölçülen frekans dağılımına en uygun parametrelerdir. Şekil 1. de hesaplanan Rayleigh parametresi (8.9 m/s) ölçülen frekans dağılımına en iyi uyumu göstermiş görünmektedir. Fakat bu parametrenin Weibull parametreleri yanında enerji üretim öngörüsü bakımından en iyisi olmadığı görülebilir. Örnek hesaplama aşağıda verilmiştir.



Şekil. 2.: Kümülatif Rüzgar Hızı Frekans Dağılımı

¹ Standart en küçük kareler metodu ile eğri uydurma yönteminin Entropy Microsystems tarafından rüzgar enerjisine uyarlanmış şekli. Winsite (Site Assesment And Wind Data Evaluation Software) programı bu metodu kullanmaktadır.

$$v_{ort} = A \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad [m/s] \quad (3)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho \cdot A^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad [Watts/m^2] \quad (4)$$

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} \cdot u^{x-1} du \quad \text{Gamma Function} \quad (5)$$

$$\rho : \text{air density} \quad [kg/m^3]$$

Ölçüm istasyonunda, yerden 50m yükseklikte gözlenen ortalama rüzgar hızı 7.9 m/s dir. Bu değer ölçüm yüksekliğinde kullanılan anemometrede çıkışının aritmetik ortalamasıdır. Rüzgar ölçüm sistemi anemometre çıkışını her 10 saniyede bir okuyarak sonuçları saatlik ortalamalar olarak hafızasına kaydeder. 7.9 m/s değeri bu saatlik ortalamaların 8760 (1 yıl) adedinin aritmetik ortalamasıdır. Weibull veya Rayleigh parametresi bilinen bir bölgenin yıllık ortalama rüzgar hızı Denklem 3. kullanılarak kolayca hesaplanabilir. Buna göre Weibull ortalaması 7.97 m/s ve Rayleigh ortalaması ise 7.89 m/s olarak bulunabilir.

Güç yoğunluğu cinsinden bir karşılaştırma yapılacak olursa Denklem 4. kullanılmalıdır. Weibull parametreleri kullanılarak bulunan güç yoğunluğu 522 Watt/m² dir. Aynı denklem Rayleigh parametreleri kullanıldığında 574 Watt/m² olarak sonuç vermektedir. Denklem 4. deki hava yoğunluğu (ρ) 1.225 kg/m³ olarak alınmıştır. Gerçekte ölçüm istasyonunda gözlenen güç yoğunluğu m² başına 533 Watt dir. Weibull parametreleri kullanılarak yapılan hesaplamada gerçek değerden sapma %2 dir ve gerçek değerden düşüktür. Rayleigh parametreleri ise gerçek değerden %7.69 fazla bir sapma göstermektedir.

Bir rüzgar santralinin yıllık enerji üretim öngörüsü yapıldığında ölçülen değerden daha düşük bir öngörü her zaman daha uygundur. Üstelik %7.69 gibi fazlalık enerji santrali için büyük bir hesaplama yanlıgsıdır.

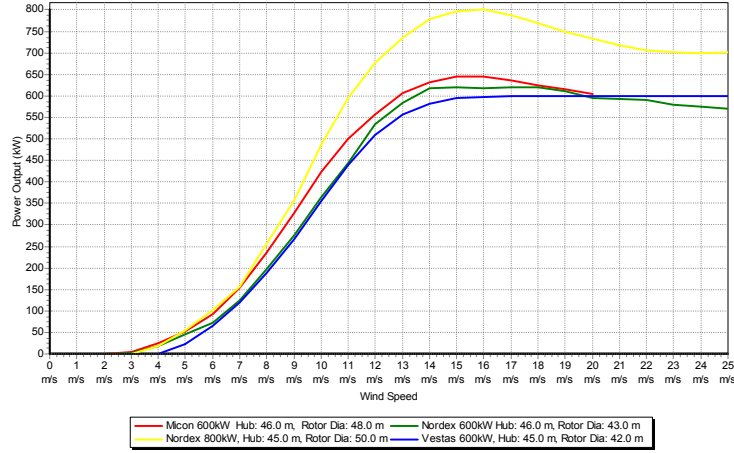
Yıllık ortalama rüzgar hızının hesaplanmasında son derece doğru bir yaklaşım gösteren Rayleigh parametreleri yanında yıllık ortalama güç yoğunluğu bakımından Weibull parametreleri ile çok daha doğru bir öngörü yapmak mümkün olmaktadır.

TÜRBİN GÜÇ EĞRİSİ

Şekil 2. üç adet 600kW ve bir adet 800 kW gücünde halihazırda pek çok rüzgar çiftliğinde kullanılan rüzgar türbinlerinin güç eğrilerini göstermektedir. Grafik rüzgar türbininin rotor yüksekliğinde esen rüzgar hızına göre türbinin elektriksel çıkış gücünü göstermektedir. Türbin güç eğrisi dört ayrı bölümde incelenmelidir. Bu bölgelerde türbinin çalışma durumları tablo 1 de özetlenmiştir.

Tablo 1. Rüzgar türbini güç eğrisinin dört operasyon bölgesi

1. Bölge	Rüzgar hızı elektrik üretmek için çok küçük.	0 – 3 m/s 3 m/s açma (cut-in) rüzgar hızı olarak adlandırılır
2. Bölge	Rüzgar hızının kübü ile doğru orantılı artan elektrik gücü	3 – 14 m/s 14 m/s nominal güç (rated) rüzgar hızı olarak adlandırılır.
3. Bölge	Elektrik çıkış gücü nominal-güç te sabit. Artan rüzgar hızına karşı kanatlar ve dişli kutusu ayarlanır.	14 – 25 m/s 25 m/s kesme (cut-out) rüzgar hızı olarak adlandırılır.
4. Bölge	Elektrik çıkış gücü yok. Türbin kendisini korumak üzere duruyor.	25 m/s – ...



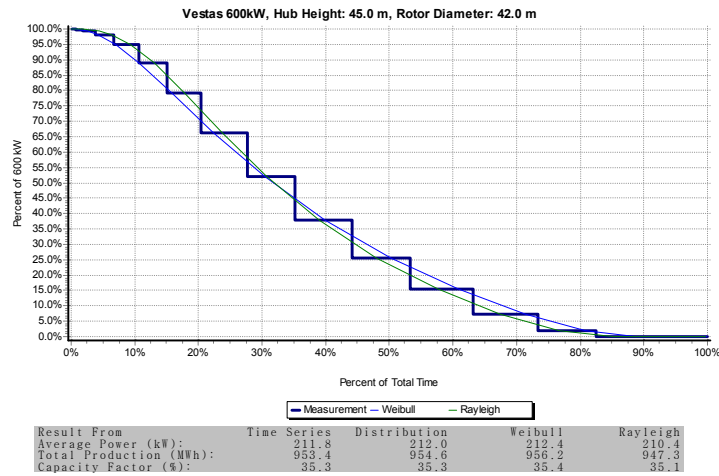
Şekil 3. Rüzgar türbini güç eğrileri

1. Bölge:

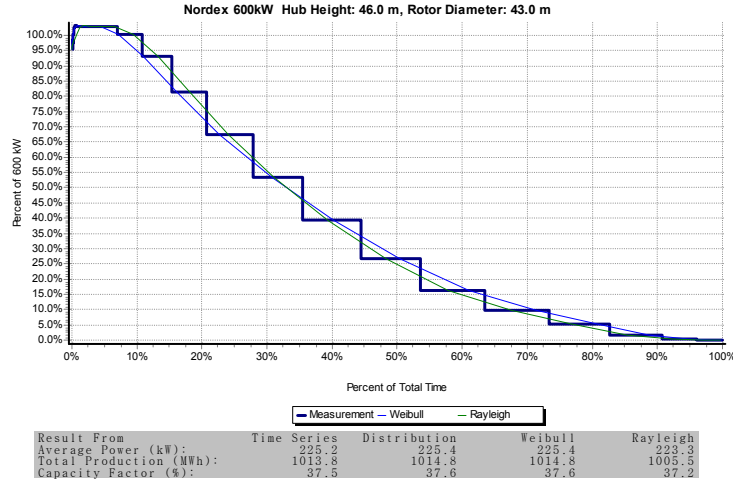
Güç eğrisinin bu bölümünde rüzgar hızı türbinin rotorunu döndürmeye yetecek derecede güç taşımamasından dolayı türbin elektrik üretmez. Bu bölge için üst sınır devreye girme rüzgar hızı (cut-in wind speed) olarak adlandırılır. Şekil 2. de gösterilen türbin güç eğrilerinin üçü (Nordex 600kW, Nordex 800kW ve Micon 600kW) için 3 m/s ve diğeri (Vestas 600kW) için ise 4m/s devreye girmek için gerekli en az rüzgar hızıdır.

2. Bölge:

Türbin poyra yüksekliğinde (turbine hub-height) esen rüzgar hızı 1. Bölgenin üst limitini aştığı zaman rüzgar türbini elektrik üretmeye başlar. Gerçekte bu üst limit kesin bir değer olmaz. Bir başka ifadeyle poyra yüksekliğinde esen rüzgar hızı bu üst limiti belirli bir süre aştığı zaman türbin devreye girer. Rüzgar hızının değişken ve oynak doğası gereği kısa süreli bir takım rüzgar hareketlenmeleri olabilir. Bu kısa süreli üst limit üzerine çıkışlarda rüzgar türbini devreye girecek olsaydı elektrik üretmek yerine elektrik harcayacaktı. Zira türbinin devreye girme rotora ilk hareketi vermek için şebekeden güç çekilir. Modern rüzgar türbinleri bu handikapı önlemek amacıyla çeşitli kontrol ve mantık sistemleri ile donatılmışlardır. Bu yöntemlerden en basiti, rüzgar hızının devreye girme rüzgar hızı üzerinde belirli bir süre kalmasını beklemektir. Son yıllarda bulanık mantık (Fuzzy-Logic) ve yapay zeka kontrol yöntemlerinin kullanılması ile çok daha etkin ve verimli kontrol sistemleri varlık göstermeye başlamıştır.

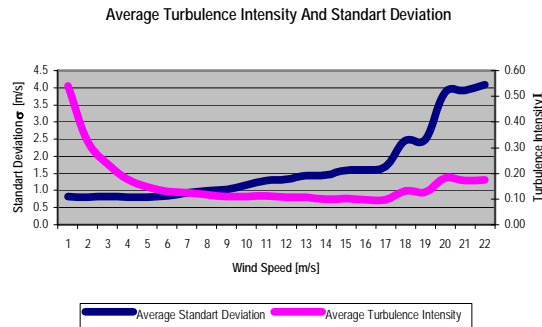


Şekil 4. Vestas 600 kW rüzgar türbininin zaman-güç yüzdesi



Şekil 5. Nordex 600 kW rüzgar türbininin zaman-güç yüzdesi

Türbin devreye girme rüzgar hızı ile türbinin nominal güce eriştiği rüzgar hızına kadar olan aralıkta rüzgar türbinin rüzgar hızının küpü ile doğru orantılı bir elektrik çıkış gücü verecektir. Rüzgar hızı kısa sürelerde çok fazla değişmez. Şekil 6. saatlik ortalama rüzgar hızlarından hesaplanmış rüzgar hızına göre türbülans şiddeti (I) ve standart sapma (σ) değerlerini göstermektedir. Türbülans şiddeti standart sapmanın ortalama rüzgar hızına oranıdır ve birimsiz bir niceliktir. Şekil 6. daki ortalama standart sapma grafiğinde devreye girme hızı 4m/s ile 14m/s nominal rüzgar hızı arasında kalan bölgede standart sapma değeri 0.7 m/s ile 1.5m/s arasında bir doğrusallık göstermekte ve standart sapma değerleri de çok büyük değildir. Örneğin 2. bölge sınırları arasında kalan 9 m/s ortalama rüzgar hızında ortalama saatlik standart sapma değeri 1 m/s dir. Bu değer bize ölçüm alınan yükseklikteki rüzgar hızının bir saat boyunca ortalaması 9 m/s olan ve %67 si 8 m/s ve 10 m/s arasında değişen yapıda olduğunu anlatmaktadır. Bu bir saat içerisinde türbin çıkış gücü ortalama rüzgar hızındaki çıkış gücünden %30 luk bir sapma ile gerçekleşeceğini ifade etmektedir. Örneğin Vestas 600 kW türbin ele alındığında; türbin 9 m/s ortalama hızda yaklaşık 275 kW çıkış gücü vermektedir. Türbin bu bir saat içerisinde %67 si 195 kW ile 350 kW arasında değişen bir çıkış gücü verecek demektir. Rüzgar hızındaki bu değişimleri kompense etmek için rüzgar türbinleri pek çok kontrol sistemleri kullanırlar. Genelde bu kontrol sistemleri rotor hızını sabit tutma yöntemini kullanırlar. Rotor hızını sabit tutmak amacıyla bazı türbinler kanat açısı ayarı (Blade Pitch Control) yöntemini kullanırlar bazı türbinler ise ayrodinamik olarak (Stall Control) bu şekilde bir kontrol için tasarlanılmışlardır. Ayrıca türbin rotorunun eylemsizliği de böyle değişikliklere karşı sağır olmayı getirir. Sonuç olarak gerçek değerler hesaplanan sapmaların çok daha aşağısındadır. Bu sapma seviyesi rüzgar enerjisi sistemlerini konvensiyonel enerji üretim sistemleri ile karşılaştırılabilir bir düzeydedir.



Şekil 6. Ortalama Türbülans Şiddeti ve Standart Sapma

3. Bölge

Rüzgar türbininin çıkış gücü rated rüzgar hızının üzerine çıktığı anda maksimum değerini alır. Rüzgar türbini, devreden çıkma rüzgar hızına kadar olan rüzgar hızlarında türbin çıkış gücü aktif veya pasif kontrol mekanizmaları ile sabit tutmaya çalışır. Gerçekte bu sabitlik sadece aktif kontrol sistemine sahip türbinlerde böyledir buna karşın pasif kontrol sistemli türbinler rated rüzgar hızının üzerindeki hızlarda hız arttıkça çıkış gücünü düşürür. Bu durum Şekil 4. üzerinden kolaylıkla takip edilebilir. Şekil 4. de gösterilen güç eğrilerinden Vestas 600 kW hariç diğer üç rüzgar türbini pasif (stall) kontrol yöntemini kullanır. Her üç rüzgar türbini de yaklaşık 14 m/s rüzgar hızının üzerinde çıkış güçlerini düşürmektedir. Vestas 600 kW ise aktif kontrol (Blade Pitch-Control) sistemine sahiptir. Bu türbin devreden çıkma rüzgar hızı 25 m/s sınırına kadar çıkış gücünü sabit tutmaktadır.

Rated rüzgar hızı üzerindeki hızlarda gözlenen bu türbin karakteristikleri her iki kontrol sisteminin birbiri üzerinde aslında o kadar da avantaj sahibi yapmaz. Şekil 4. kanat açısı ayar kontrol sistemine sahip türbinin Şekil 5. ise ayrodinamik kontrol sistemine sahip bir rüzgar türbininin zaman – güç yüzde grafiğini göstermektedir. Şekil 4. deki türbin yılda yaklaşık 964 saat (%11 * 8760 saat) 540 kW (600kW ın %90 ı) ve üzerinde güç üretmektedir. Buna Şekil 6. daki rüzgar türbini ise yılda yaklaşık 1314 saat (%15 * 8760 saat) 540 kW ve üzerinde güç üretmiştir. Pasif kontrol sistemli türbinler rated rüzgar hızında aslında adı geçen güçleri üzerinde üretim yaparlar ve rated rüzgar hızı üzerindeki hızlardaki eksikliklerini bu şekilde gidermeye çalışırlar. Bu durum Şekil 3. de Nordex 600 kW modelinde rahatlıkla görülebilir. Bu türbin 600 kW lık bir türbin olarak anılmasına rağmen rated rüzgar hızında yaklaşık 630 kW çıkış gücü verir ve 14 m/s üzerindeki rüzgar hızlarında çıkış gücünü giderek düşürür.

4. Bölge

Rüzgar türbinleri çok sayıda hareketli parçalardan oluşurlar. Rüzgar hızı arttıkça türbin kanatları üzerine binen yük de artacaktır. Rüzgar türbininin kontrol mekanizması artan mekanik kuvvetlerden kaynaklanacak malzeme ve donanım hasarlarını önlemek amacıyla kendisini devreden çıkartacaktır.

Pek çok modern rüzgar türbini için devreden çıkma rüzgar hızı 25 m/s dir. Fakat rüzgar türbini kendisini devreden çıkartmak ve kanatları durdurmak için tıpkı 1. bölgede olduğu gibi belirli bir süre bu rüzgar hızının bu seviye üzerinde kalmasını bekleyecektir.

YILLIK ENERJİ ÜRETİMİ ÖNGÖRÜSÜ

Rüzgar hızı dağılımı ve güç eğrisi beraberce çarpılıp, tüm rüzgar hızları için toplandığı zaman yıllık enerji üretimi bulunmuş olur.

$$E_y = 8760 \cdot \Delta v \cdot \sum f(k) \cdot p(k) \quad [kWh/y] \quad (6)$$

Denklem 6. bir rüzgar türbininin yıl içerisinde ne kadar enerji üreteceğini hesaplama imkanı verir. Buradaki $p(k)$ rüzgar türbininin k rüzgar endeksinde ortalama çıkış gücüdür. $p(k)$ aslında güç eğrisininin quantizasyon sonucu ortaya çıkmış güç eğrisi fonksiyonudur. Güç eğrisi ve rüzgar hızı frekans dağılımı bebarer integre edildiklerinde rüzgar türbininin yıllık ortalama gücü hesaplanabilir. Yıllık ortalama güç ifadesi rüzgar türbinini sanki her zaman sabit güçte bir elektrik üreten bir jeneratörmüş gibi ele almamıza olanak tanır. Bu durum bir örnekle açılacak olursa; Şekil 4. Vestas 600 kW modelinin ölçüm istasyonundaki rüzgar rejiminde ortalama gücü 211.8 kW dır. Bir başka deyişle bu ölçüm istasyonu çevresine 50m poyra yüksekliğine sahip bir Vestas 600kW model türbin kurulduğunda sabit olarak 211.8 kW gücünde bir jeneratör gibi davranacaktır. Böyle bir şekilde yıllık enerji üretim miktarı 1855 MWh (211.8 kW * 8760 saat) olacaktır.

KAPASİTE FAKTÖRÜ

Kapasite faktörü (KF) rüzgar türbinin enerji üretim performansını ifade eder ve şu şekilde hesap edilir

$$KF = \frac{\text{Yıllık Enerji Üretimi } (E_y)}{\text{Nominal Güç} \cdot 8780 \text{ saat/y}} \quad (7)$$

Tipik bir rüzgar türbinin kapasite faktörü; rüzgar türbininin kurulduğu yerin rüzgar kapasitesine bağlı olarak %20 ile %35 arasında değişir.

Kapasite faktörü %30 olan 600 kW lık bir türbin senede 1,577 MWh elektrik enerjisi üretir.

RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNİN GÜVENİLİRLİĞİ

İlk kurulan rüzgar santrallerinde pek çok hatalar ve problemlerle karşılaşıldı. Özellikle ani rüzgar yüklenmelerine karşı türbinlerin dayanıklılığı ve kontrol sisteminin değişikliğe karşı vermiş olduğu cevaplar analiz edildi. Şu anda dünya üzerinde rüzgar santrallerinin milyonlarca saatlik çalışma deneyimi mevcuttur. Elde edilen deneyim sayesinde türbin bilgisayar kontrol sistemleri, kanat ayarlama ve aerodinamik kavramlar daha da geliştirilmiş ve güvenilir rüzgar enerjisi sistemleri oluşturulmuştur.

BULUNABİLİRLİK

Rüzgar enerjisi sistemlerinin güvenilirliğini ölçmek için yaygınca kullanılan bir başka terim ise bulunabilirlik katsayısıdır (B_1). Bulunabilirlik katsayısı rüzgar enerjisi sisteminin bir zaman dilimi içerisinde çalışabilir durumda olmanın ifadesidir.

$$B_1 = \text{Çalışabilir durum zamanı/peryot} \quad (8)$$

$$B_2 = \text{Çalışabilir durum zamanı/2.-3. bölgelere giren rüzgar zamanı} \quad (9)$$

Diğer bir bulunabilirlik katsayısı ise türbinin koyulduğu yerde türbin güç eğrisinde 2. ve 3. bölgeler arasına giren rüzgar hızlarının gerçekleştiği zaman dilimi içerisinde türbin sisteminin çalışabilir durumda olduğunun ifadesi B_2 oranıdır. B_2 oranını kestirmek çok güçtür. Yıl içerisinde gerçekleşecek B_2 oranını arttırmak için rüzgar türbinlerinin periyodik bakımları rüzgar hızı düşük dönemlere getirilmelidir. Modern rüzgar türbinlerinde bu oran %98 ve daha yukarısı değerler olmaktadır.

ELEKTRİK GÜCÜNÜN ZAMAN İÇERİSİNDE DEĞİŞİMİ

Rüzgar sistemlerinden üretilen elektriğin en önemli karakteristiği rüzgarın zaman içerisinde değişmesinden dolayı, türbinlerden elde edilen elektrik gücünün zamanla değişimidir. Bu değişim saniyelerden yıllara değişim gösterir. Bu değişim miktarları ve nedenleri tablo 2. de gösterilmiştir.

Tablo 2. Rüzgar Enerjisi Sistemleri İçin Zaman Aralıkları

Zaman Dilimi	Sorumlu	Konu
... – 600 sn	Rüzgar Türbini Üreticileri	Yapısal salınımlar, rüzgar yüklenmesi, Voltaj ve frekans oynamaları
10 dk – 1 saat	Güç Sistemi İşleticisi	Güç üretiminin kompanse edilmesi, rüzgar tahminleri
1 gün	Güç Sistemi	Günlük yük profiline göre korelasyon
Aydan Aya	Güç sistemi planlayıcıları	Mevsimlik yük profiline göre korelasyon
1 yıl	Güç sistemi işleticisi ve finansman grubu	Yıllık üretim öngörüsü, ortalama rüzgarlı bir yıla göre borçların dengelenmesi
Yıldan yıla	Finansman grubu	Yıllar arası değişim ve alt standart yıla göre borçların dengelenmesi

RÜZGARIN TAHMİN EDİLMESİ

Rüzgar zamanla değişir ama bu değişim tamamiyle rastgele değildir. Şebeke güç sistemini işletenler için nasıl şebeke yükü istatiki olarak tahmin edilebiliyorsa rüzgar da istatistiki olarak tahmin edilebilir. Rüzgarın rastgele olmayan bileşenleri sayesinde rüzgar tahmin edilebilir. Tahminin kesinliği; rüzgarı doğuran fiziksel proseslerin tam anlamıyla anlaşılmasına, yapılan rüzgar ölçümünün doğruluğuna ve kullanılan matematiksel ve bilgisayar tekniklerinin kabiliyetine bağlıdır. Bir sonraki günün rüzgar durumu ve elektrik ihtiyacının tahmini A.B.D. ve Avrupada aktif bir araştırma konusudur ve her yıl yüzlerce ilerleme kaydedilmektedir.

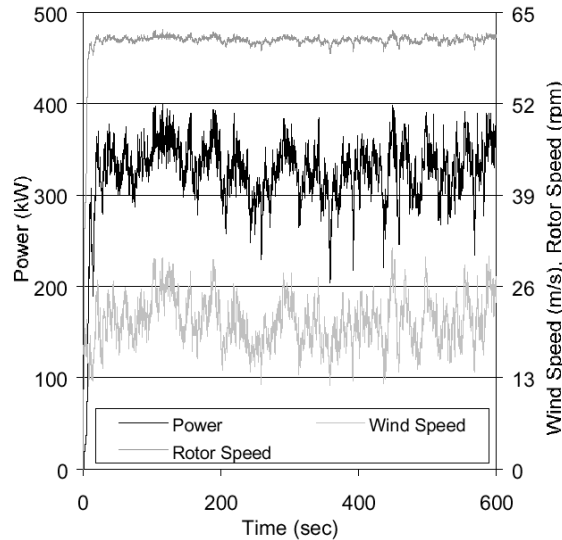
Bir aydan bir yıla kadar olan rüzgar tahminleri ve elektrik üretimi belirgin bir kesinliğe kadar tahmin edilebilmektedir. Bu tahminler ışığı altında bir rüzgar çiftliğinde türbinlerin konumlanacağı yerler bulunmakta ve bu tahminler ışığında finansal analizler yapılmaktadır.

YÜK İLE İLİŞKİLENDİRME

Tipik bir yaz ve/veya kış günü için saatlik yük miktarı aşağı yukarı bir kesinlikte bilinmektedir. Aynı şey aylık enerji talebi için de söylenebilir. Günlük ve aylık yük profilleri bir rüzgar çiftliğinin daha önce kesinleşmiş çıkışı ile kolayca karşılaştırılabilir. Bu ilişki ne kadar kuvvetli bulunursa rüzgar çiftliği o derece güvenilir bir elektrik üretim sistemi olur.

TEK BİR RÜZGAR TÜRBİNİN ÇIKIŞI

Bir rüzgar türbinin çıkış gücü kanatlara vuran rüzgar akışına bağlı olarak saniyeler bazında küçük değişimler gösterir. Şekil 7. bir rüzgar türbininden çıkan gücün zamanla değişimini göstermektedir. Rotorun eylemsizliği bu değişimlerin ortalamasını alarak daha düzgün bir çıkış vermesine yardımcı olur.



Şekil 7. Tipik bir 340kW stall kontrol tip rüzgar türbininin ortalama 21 m/s rüzgar hızında Kaimal türbülansı altında çıkış gücü ve rotor dönme hızı.

Şekil 7. pasif kontrol sistemine sahip bir rüzgar türbininin rüzgar değişimine göre türbin çıkış gücündeki değişimleri göstermektedir. Rüzgar türbinleri çalışırken sürekli olarak momentum dengesini sabit tutmaya çalışırlar bu amaçla özellikle aktif kontrol sistemli türbinler kanat açılarını rotor hızını sabit tutmak için değiştirirler. Son yıllarda bazı türbin modelleri elektrik jeneratörün slip ayarını değiştirerek çok daha sabit bir çıkış gücü elde edebilmektedirler. Jeneratör slip ayarı ile oynayarak

yapılan sabitlemenin yanında ilerleyen yarı iletken devre sistemleri ve elemanları ile gelişmiş invertör teknolojileri de türbin çıkış gücünü sabitleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Sözü geçen aktif kontrol ve regülasyon yöntemleri ile Şekil 7. de gözlenen yüksek değişimli güç çıkışı son derece düzgünleştirilebilmektedir. Hatta Şekil 7. deki güç çıkışı da tatmin edici düzgünlüktedir.

BİR RÜZGAR ÇİFTLİĞİNİN ÇIKIŞ GÜCÜ

Rüzgar çiftliklerinin geniş bir arazi üzerine kurulduğu düşünülürse, tek bir türbinden çıkan elektriksel gücün çiftlik içerisinde bulunan diğer türbinlerin çıkışlarına göre ilişkisiz olması genel anlamda rüzgar çiftliğinin çıkışında bir düzgünlük oluşturur. Rüzgar çiftliğinin çıkışında meydana gelen güç oynamaları çiftlik içerisinde çalışan ilişkisiz türbinlerin toplamlarının kare kökü oranında bir düşüş gösterir.

SONUÇ

Elektrik enerjisi dağıtım ve planlama organizasyonu mühendisleri rüzgar enerjisi santrallerinin sağlamış olduğu enerjinin özelliklerini dikkatlice incelemeli ve planlama esnasında göz önünde bulundurmalıdırlar. Bahsedilen tüm özellikler santralin güç kalitesi adı altında özetlenebilir. Güç kalitesinden bahsedildiği anda işin içerisine

- güç çarpanı (Power Factor)
- harmonik distorsiyon (Harmonic Distortion)
- voltaj oynamaları (Voltage Fluctuations)
- frekans kaymaları (Frequency Deviations)

gibi mevcut konvansiyonel üretim sistemlerinin de temel problemleri de girmektedir. Rüzgar enerjisi sistemlerinin yukarıda bahsedilen dört konuda enterkonnekte sisteme uyuşabilirliği konvansiyonel üretim sistemleri ile aynı derecededir.

KAYNAKÇA

1. NWCC, Wind Performance Characteristics, Wind Energy Issue Brief, No:10, January 1997
2. Walker, John F. Wind Energy Technology, Chapter 1-4, John Wiley & Sons, Chichester, 1997
3. www.egetek.unimedya.net.tr, EGETEK Vakfı