



## Rüzgar türbinlerinde mekanik dengesizlik arızalarının elektriksel ölçümlerden tespit edilmesi

Mehmet Bayrak\*, Eric Nduwayezu, Ahmet Küçükler

<sup>1</sup>Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

### Ö N E Ç İ K A N L A R

- Rüzgar türbinlerinde mekanik dengesizlik arızaları
- Rüzgar türbinlerinde arıza ve anormal çalışma durumu tespiti
- Güç tabanlı yeni bir arıza tespit algoritması tasarımı

#### Makale Bilgileri

Geliş: 06.04.2015

Kabul: 30.07.2015

#### DOI:

10.17341/gummfd.92544

#### Anahtar Kelimeler:

Rüzgar türbinleri,  
arıza teşhisi,  
durum izleme sistemleri

#### ÖZET

Hava kirliliğine olan etkisinin yok denecek kadar az olması nedeniyle dünyada yeni elektrik enerjisi üretimi kaynaklarından rüzgar enerjisi en hızlı gelişen kaynak çeşidi olmuştur. Rüzgar türbinlerinin kapasitelerinin artması sonucunda işletme sırasında ortaya çıkan arızalardaki bakım maliyetlerini ve durma zamanlarını azaltmak, türbinlerin güvenilirliği ile performansını artırmak amacıyla bir izleme sisteminin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. Arızanın giderilmesi ve ulaşım zorluğundan dolayı kıyıda uzak türbinlerde bakım masrafları ile durma zamanları daha yüksek olmaktadır. Rüzgar türbinlerinin durum izleme sistemlerinde titreşim verileri ile yağ analizi verileri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerin kuruluş maliyetlerinin yüksek olmasının yanında, durum izleme sistemlerinde oluşan sorunlara bu yöntemler tam olarak çözüm sunamamaktadır. Ayrıca, geliştirilen bu arıza tespit sistemleri türbine bağlı generatörler ile şebekede oluşabilecek anormal çalışma durumları ve arızaları algılayamamaktadır. Rüzgar türbinini izleme sistemlerindeki bu tür sorunları azaltmak için bu çalışmada elektriksel ölçümlere dayanan ve mekanik dengesizlik durumlarını algılayan yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen durum izleme sistemi üç fazlı akım ve gerilim verilerini kullanarak generatör çıkış ani gücünü hesaplamaktadır. Mekanik dengesizlik durumunda generatörün kutup sayısına bağlı olarak çıkış ani gücünde ilave frekans bileşenleri ortaya çıkmakta olup, bu da geliştirilen algoritmanın temelini oluşturmaktadır.

## Detection of mechanical unbalanced faults in wind turbines by using electrical measurements

### H I G H L I G H T S

- Mechanical unbalanced faults in wind turbines
- Detection of fault and abnormal operating condition detection in wind turbines
- A new power based fault estimation algorithm design

#### Article Info

Received: 06.04.2015

Accepted: 30.07.2015

#### DOI

10.17341/gummfd.92544

#### Keywords:

Wind turbines,  
fault diagnosis,  
condition monitoring  
systems

#### ABSTRACT

Wind power generation is the fastest growing energy source among the new power generation sources in the world because of less atmospheric pollution. The increasing production capacity needs online condition monitoring system to improve wind turbine reliability and performance and reduce wind turbine downtime, operating and maintenance costs. Maintenance cost and downtime period of offshore wind turbines is getting higher because of remote location and difficult to access for fault repair. Vibration measurement and lubrication oil analysis are used in wind turbine condition monitoring systems. However, initial cost of these systems are higher and they do not provide a complete solution to the wind turbine condition monitoring system problem. They also can not detect electrical faults and abnormal condition occurring in the wind turbine generator and electrical systems. To reduce wind turbine monitoring system problem, a new mechanical unbalance detection algorithm based on electrical parameter measurement has been introduced in this study. The proposed condition monitoring system measures three phase current and voltage measurement and calculates instantaneous generator output power. In the mechanical unbalanced condition additional frequency components, which is the basis of the proposed algorithm, according to the generator pole number appear in the instantaneous power.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding author: bayrak@sakarya.edu.tr / 0264 295 5810

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada fosil yakıt kaynaklarının gün geçtikçe azalması ve gaz salınımlarının artması nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması için son yıllarda hızla artan oranda çalışmalar yapılmaktadır. Bu nedenle rüzgar ve güneş enerjisinin etkin kullanımı, verimliliğin artırılması ve bu sistemlerde oluşan arızaların veya anormal çalışma durumlarının tespit edilmesi önemli bir çalışma konusu haline gelmiştir. Bunun sonucunda da elektrik enerjisi üretim yöntemlerinden biri olan rüzgar türbinlerinin kullanımı bazı düzenlemelerin getirilmesi sonucu en hızlı artan bir üretim yöntemi olmuştur [1]. Bu alanda yapılan teknolojik çalışmaların ardından 20 kW ile 5 MW arasındaki güçlerde türbin tasarımları tamamlanmış ve kullanılmaya başlanmıştır. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinin kullanımının artmasıyla rüzgar enerjisinin diğer enerji kaynaklarına olan oranı da hızla artmaktadır. Rüzgar enerjisinden daha fazla yararlanmak için deniz kıyısının açıklarında rüzgar çiftliklerinin kurulması yaygınlaşmaya başlamıştır. Enerji üretimi bakımından avantajlı olan bu çözümün türbin bakımlarının yapılmasındaki zorluklar ve beklenmeyen arıza durumlarında ulaşım güçlüğü gibi bazı dezavantajları da vardır. Özellikle beklenmeyen arızalarda türbinlerin devre dışında kalma sürelerini azaltmak ve bazı önleyici tedbirleri almak için rüzgar türbinlerinin durumlarının izlenmesi bir zorunluluk olmuştur.

Rüzgar türbinleri rüzgardan aldığı kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren karmaşık sistemlerdir [2]. Elektrik ve mekanik sistemlerin olması nedeniyle, rüzgar türbinlerinde oluşan arızaların kaynaklarının bilinmesi durum izleme sisteminin oluşturulması bakımından önem kazanmaktadır [3-5]. Durum izleme sisteminin oluşturulması için türbinin ana kısımlarından olan generatör, redüktör, ana yataklama ve milinden bazı bilgilerin alınması gerekmektedir. Uygun bir izleme sisteminin oluşturulması rüzgar türbinlerinin yatırım maliyetleri ve çalışma sırasında ortaya çıkabilecek bakım maliyetleri bakımından çok önemlidir. Günümüzde kullanılan en yaygın durum izleme sistemleri türbinlerdeki titreşim verilerini kullanmaktadır [6, 7]. Bu yöntemde generatör, redüktör ve yataklamada bulunan titreşim sensörlerinden alınan veriler kullanılmaktadır. Sensörlerin zamanla arızalanması ve türbin üretim maliyetlerini artırması bu yöntemin güvenilirliğini azaltmış ve yapılan bazı çalışmalar sonucunda elektriksel ölçümlerle mekanik ve elektriksel arızaların tespit edilmesi araştırılmıştır [8-11]. Fakat yapılan bu çalışmaların birçoğu karmaşık işaret işleme yöntemlerini gerektirdiğinden uygulanabilir bulunmamıştır. Elektriksel ölçümlerle mekanik arızaları tespit etmek için geliştirilen yöntemlerin çok karmaşık olması ve fazla hesap işlemlerini gerektirmesi nedeniyle, daha az işlem gerektiren ve mevcut sistemlere kolaylıkla uygulanabilir bir yöntem geliştirilmesi araştırılmıştır. Geliştirilen yöntemde rüzgar türbinlerindeki mekanik dengesizlik arızalarının tespiti için generatör çıkışındaki ani güç verileri kullanılmaktadır.

## 2. MEKANİK DENGESİZLİK ARIZALARI (MECHANICAL UNBALANCED FAULTS)

Rüzgar türbinlerinin kanatları, türbin verimlerini etkileyen en önemli parçası olup, kanatlardaki küçük bir dengesizlik verimi ve türbin ömrünü önemli ölçüde etkilemektedir. İşletme sırasında rüzgar türbinlerinin bakımlarının garanti kapsamında yapılabilmesi için türbinlerin belirlenen koşullar ve sınırlar içerisinde çalıştırılması gerekir. Türbin kanatlarında oluşabilecek dengesizlikler önemli titreşim sorunlarına neden olmakta ve bazı durumlarda türbin bakımları garanti kapsamı dışına çıkmakla birlikte, beklenmeyen arızalar da oluşabilmektedir. Bu şekilde beklenmedik arızaları kısmen engellemek için türbin kanatlarındaki dengesizlikler tespit edilip, titreşimlerin azaltılması çalışmaları yapılmaktadır [12]. Mekanik dengesizliklerin rüzgar türbinlerinde meydana getirdiği titreşimler türbinlerin çalışma performansını olumsuz etkilediğinden, titreşimlere neden olan kaynaklar ve bunların etkileri önemli bir araştırma konusu olmuştur [13-16]. Rüzgar türbinlerinde periyodik bakımlar rüzgarın en az estiği aylarda yapılarak satılamayan elektrik enerjisinden dolayı oluşan kayıplar minimum seviyede tutulmaktadır. Fakat aşırı titreşimlerden dolayı meydana gelen durmalar sonucu hem bakım masrafları artmakta, hem de üretilmeyen elektrik enerjisinden dolayı oluşan zararlar büyük olabilmektedir. Bu zararları azaltmak için güvenilir durum izleme sistemlerinden alınan verilerle durum tabanlı bakım ile periyodik bakım aynı tarihe getirilerek satılamayan elektrik enerjisi miktarı azaltılmaktadır. Türbinlerin durmalarına neden olan arızalar ülkelere göre farklı olmakla birlikte, yaygın olarak en büyük oranda karşılaşılan arızalar mekanik arızalardır. Tablo 1'de Finlandiya'daki rüzgar türbinlerinde 2000-2004 yılları arasında durmalara neden olan arızalar ve oranları görülmektedir [4]. Türbinlerde meydana gelen arızaların sıklığı ve giderilme süreleri çok önemlidir. Eğer arıza sıklığı ve giderilme süreleri bilinirse uygun yedek parça bulundurulması ile beklenmeyen bakım süreleri azalacak ve zarar daha az olacaktır.

**Tablo 1.** Finlandiya'da durmalara neden olan rüzgar türbini arızaları (Wind turbine failures causing stop in Finland)

Arıza Nedeni	Oranı (%)
Dişliler	32,8
Kanatlar/Pitch	21,2
Hidrolik	11,4
Yönlendirme sistemi	6,5
Ana yapı	6,5
Elektrik sistemi	6,4
Generatör	4,4
Mekanik fren	2,8
Diğer	2,1
Bilinmeyen	2,1
Sensörler	2,0
Kontrol sistemi	1,7
Hub	0,1

**Tablo 2.** Rüzgar türbinlerindeki arızalar ve bu arızaları giderme süreleri (Failures in wind turbine and repairing time)

	Almanya	Finlandiya	İsveç
Ortalama türbin başına yıllık arıza sayısı	1,86	1,38	0,42
Ortalama yıllık durma süresi (saat)	149	237	52
Arıza başına ortalama durma süresi (saat)	62,6	172	170
Ortalama yıllık redüktör arıza sayısı	0,1	0,15	0,045
Redüktör arızasında ortalama durma süresi (saat)	153,3	602	256,7

Bunun yanında, türbinlerin bulunduğu bölgedeki ulaşım güçlüğü ve beklenmedik arıza için gerekli parçaların temin edilme süreleri bakım ve işletme zararlarını artıracaktır. Avrupa ülkelerinde beklenmedik zararları azaltmak için türbin arızaları ve bakım süreleri konusunda bir araştırma yapılmış ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir [4]. Yukarıdaki tablodan da görüldüğü gibi, mekanik titreşimler sonucunda oluşan redüktör arızalarında durma süreleri, dolayısıyla maddi kayıplar çok büyük olmaktadır. Bu arızaları oluşmadan önce kestirmek için geliştirilen yöntemlerin çok pahalı veya güvenilir olmaması gibi nedenlerle yeni, güvenilir ve mevcut sistemlere kolaylıkla uygulanabilir arıza kestirim yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir.

### 3. GELİŞTİRİLEN MEKANİK DENGESİZLİK ARIZASI TESPİT YÖNTEMİ (THE PROPOSED MECHANICAL UNBALANCED FAULT DETECTION METHOD)

Rüzgar türbinlerinde kanatlarda, milde, yataklarda veya redüktörde herhangi bir mekanik arıza olduğunda generatörün çıkış gücü de bu arızaya bağlı olarak etkilenir. Rüzgardan alınan kinetik enerji normal çalışma durumunda belirli bir kayıpla generatöre aktarılır ve elektriksel çıkış gücü Eş. 1’den de görüldüğü gibi sabittir [17, 18]. Mekanik arıza oluşması durumunda generatörün rotoruna aktarılan güç bozucu etkiler içerip, hava aralığı momentinde oluşan dengesizlikler sonucunda da generatörün çıkış akım ve gerilimi etkilenir.

$$P_{tot} = v_1(t)i_1(t) + v_2(t)i_2(t) + v_3(t)i_3(t) \quad (1)$$

Mekanik arızaların generatör çıkış gücünde meydana getireceği ilave bileşenlerin varlığı arıza tespitinin bir göstergesi olacaktır. Mekanik dengesizliğin varlığı asenkron generatörün her bir fazına ilişkin akım spektrumunda, kaymaya ve çift kutup sayısına bağlı olarak, Eş. 2’de görüldüğü gibi yan bant bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır [19-24].

$$f_{ecc,i} = f_s \left( 1 \pm k \frac{1-s}{p/2} \right) \quad (2)$$

Burada  $f_s$  şebeke frekansını,  $f_{ecc}$  mekanik dengesizlikten dolayı akımda oluşan frekans bileşenini,  $k$  değişkeni,  $s$

kaymayı ve  $p$  çift kutup sayısını göstermektedir. Asenkron generatörün rotor frekansı Eş. 3’te verildiği şekilde ifade edilir.

$$f_r = \frac{1-s}{p/2} \cdot f_s \quad (3)$$

Mekanik dengesizliğin oluşması durumunda  $f_r$  rotor frekansı olmak üzere, oluşan ilave bileşenler Eş. 4 ve Eş. 5’te verilmiştir.

$$f_{ecc,1} = f_s + kf_r \quad (4)$$

$$f_{ecc,2} = f_s - kf_r \quad (5)$$

Bu bağıntılar gösteriyor ki, mekanik dengesizlik durumunda rotor frekansının katları biçiminde ilave bileşenler oluşmaktadır. Bu durum dengesizlik durumunun varlığı ve derecesi hakkında bilgi vermektedir. Dengesizlik durumunda generatör akımı Eş. 6’da görüldüğü biçimde ifade edilebilir.

$$i_{L,ecc}(t) = \left\{ \begin{array}{l} I_m \cos[2\pi ft - \theta] + \\ \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ I_{ecc,k1} \cos[2\pi f_{ecc1}t - \alpha_1] + \right. \\ \left. I_{ecc,k2} \cos[2\pi f_{ecc2}t - \alpha_2] \right\} \end{array} \right\} \quad (6)$$

Burada  $i_{L,ecc}$  dengesizlik durumundaki faz akımının ani değerini,  $I_m$  akımın şebeke frekansındaki bileşeninin maksimum değerini ve  $I_{ecc}$  dengesizlikten dolayı oluşan akım bileşeninin maksimum değerini göstermektedir. Asenkron generatörün stator akımında oluşan bu harmonikler gerilime etki etmekte ve dolayısıyla generatör çıkış gücünde harmonik bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Dolayısıyla mekanik dengesizlik arızalarının generatör çıkış gücünde hangi harmonik bileşenini oluşturduğu arızanın tespiti bakımından önemlidir. Arıza sırasında oluşan ve denklem 6’da verilen ilave bileşenler ve bunların gerilimde oluşturduğu bozucu etkiler kullanılarak generatör çıkış gücü bir faz için aşağıdaki Eş. 7’de verildiği biçimde bulunur [25].

$$p_{ecc}(t) = p_0(t) + \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\frac{U_m I_{ecc,k_1}}{2} \cos[2\pi(2f_s - kf_r)t - \alpha_1] \\ &+ \frac{U_m I_{ecc,k_1}}{2} \cos[2\pi(kf_r)t + \theta_1] + \\ &\frac{U_m I_{ecc,k_2}}{2} \cos[2\pi(2f_s + kf_r)t - \alpha_2] \\ &+ \frac{U_m I_{ecc,k_2}}{2} \cos[2\pi(kf_r)t + \theta_2] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

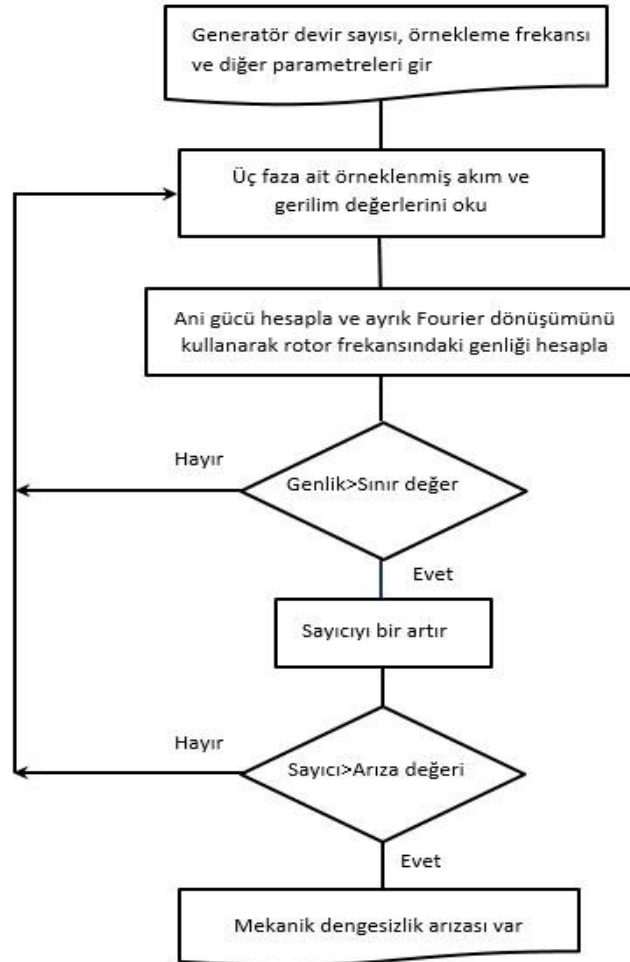
Yukarıdaki işlemler diğer fazlar için de yapıldığında generatör çıkışındaki toplam ani güç bağıntısı Eş. 8’deki biçiminde bulunur.

$$p_{tot,ecc}(t) = \left\{ \begin{aligned} &p_{tot,0}(t) + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \begin{aligned} &\frac{\sqrt{3}U_m I_{ecc,k_1}}{2} \cos(\theta) \cos[2\pi(kf_r)t + \theta_1] + \\ &\frac{\sqrt{3}U_m I_{ecc,k_2}}{2} \cos(\theta) \cos[2\pi(kf_r)t - \theta_2] \end{aligned} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

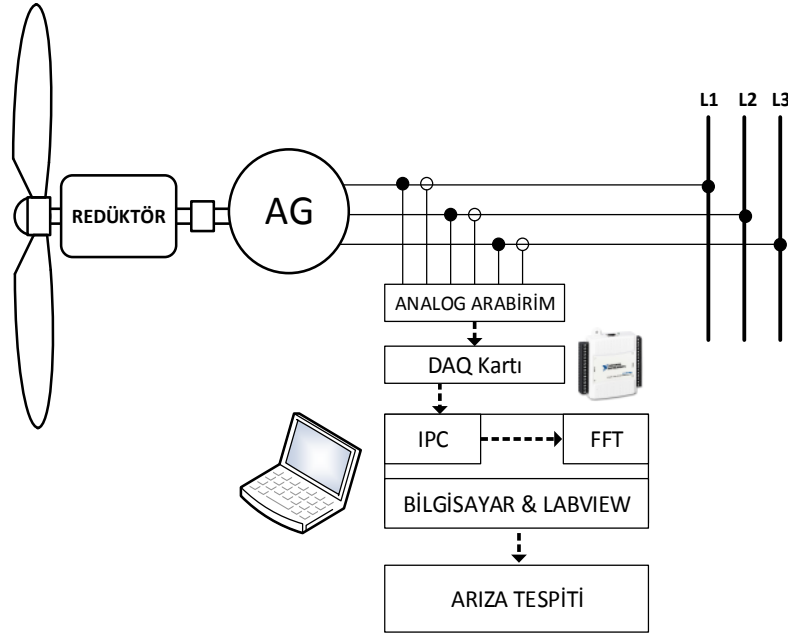
Bu bağıntıdan da görüldüğü gibi, generatör çıkış gücünde DC bileşen ile dengesizlik durumunda rotor dönme frekansının katları biçiminde harmonik bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla generatör çıkışında ölçülen ani güçteki rotor frekansı ve bunun katları olan frekans bileşenlerinin gözlenmesi arıza varlığının tespit edilmesi için önemli ve güvenilir bir gösterge olacaktır. Mekanik dengesizlik arızalarında veya anormal çalışma koşullarında rüzgar türbinlerinde büyük zararlar oluşmadan erken uyarı yapmak amacıyla geliştirilen ve akış diyagramı Şekil 1’de verilen güç tabanlı arıza tespit algoritması yukarıdaki bağıntılarda ortaya çıkan rotor frekansındaki ve bunun katları biçimindeki bileşenlerini Eş 9’da verilen bağıntı kullanılarak ayrık Fourier dönüşümünü yardımıyla hesaplamaktadır.

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x[n]e^{-j\omega n} \quad (9)$$

Arıza sırasında rotor frekansının katları olan frekans bileşenlerinin ortaya çıktığı bir sonraki bölümdeki deneysel çalışmalardan da görüleceği gibi, arızanın varlığı konusunda karar vermek için bütün frekans bileşenlerinin tamamını



Şekil 1. Geliştirilen mekanik dengesizlik arızası tespit algoritmasının akış diyagramı (Flowchart of the proposed mechanical unbalance fault detection algorithm)



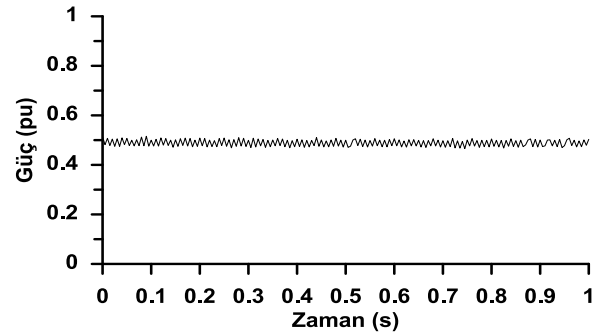
Şekil 2. Deney düzeneğinin bağlantı şeması ve kullanılan arabirimler (Scheme of the experimental studies and interface units)

hesaplamak fazla işlem gerektirmektedir. Ayrıca asenkron generaörlerde oluşan elektriksel ve kırık rotor çubuğu arızasında ani güçte yüksek frekanslı bileşenler görüldüğünden, arızaları birbirinden ayırmak için arıza tespit algoritmasında sadece rotor frekansındaki bileşenin genliğinin miktarına göre karar verilmektedir.

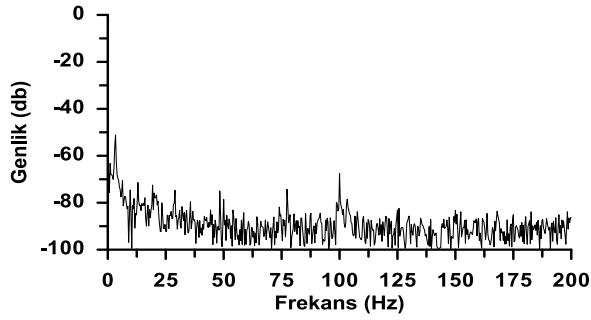
#### 4. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Rüzgar türbinlerindeki mekanik dengesizlik arızalarını tespit etmek için geliştirilen ve matematiksel temellere dayanan yöntemin performansı Şekil 2’de bağlantı şeması verilen deney sistemi ile test edilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan test sisteminde rüzgar türbinini (redüktör ile birlikte) temsil eden doğru akım motoru kullanılmıştır. Şebekeye enerji vermek için kullanılan asenkron generatör için 3 kW gücünde çift kutup sayısı 2 olan sincap kafesli asenkron makine kullanılmıştır. Deneysel ölçme sisteminin gerçek sistemlerde kullanılanlara uygun olması ve geliştirilen arıza tespit sisteminin mevcut sistemlere kolaylıkla bağlanabilmesi amacıyla akım verileri akım transformatörleri ve gerilim verileri de gerilim transformatörleri üzerinden alınmıştır. Akım verileri akım transformatörünün çıkışına bağlanan  $1\Omega$  değerindeki %1 hassasiyetindeki direnç ile gerilime dönüştürülmüştür. Ardından üç faza ait analog akım ve gerilim verileri Nyquist teoremi gereği yüksek frekanslı bileşenleri yok etmek amacıyla alçak geçiren üçüncü dereceden RC filtresinden geçirilmiştir. Alçak geçiren filtrelerden alınan ve içeriğinde örnekleme frekansının yarısından daha az frekanslı bileşenleri içeren gerilim ve akım işaretlerini sayısal dönüştürmek için NI-6251 DAQ veri toplama kartı kullanılmıştır. Sayısal dönüştürülen işaretlerden bilgisayar

ortamında Labview yazılımı kullanılarak şebekeye verilen ani güç ve frekans spektrumu hesaplanmıştır. Yapılan hesaplardaki hatayı en küçük düzeyde tutmak için örnekleme frekansı 5 kHz seçilmiştir. Şebekeye doğrudan bağlanan asenkron generatörü yüklemek için doğru akım motorunun çıkış momenti artırılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar ilk önce rüzgar türbinini temsil eden sistemle buna bağlı asenkron generatörün sağlam olduğu, mekanik dengesizliğin oluşturulmadığı durum için uygulanmıştır. Mekanik dengesizliğin oluşturulmadığı ve asenkron generatörün yarı yükle yüklendiği durumda generatörün çıkış ani gücü Şekil 3’te verilmiştir. Generatörün hangi oranda yüklendiğinin tam olarak anlaşılması için ölçülen ani güç nominal güce bölünerek birim değere dönüştürülmüştür. Doğru akım motoru ile asenkron generatörün kaplin bağlantısı tam olarak yapılmadığı ve şebekede az da olsa bir dengesizlik bulunduğundan, ani güçte çok küçük oranda 50 Hz ve 100 Hz’lik bileşen oluşmuştur (Şekil 4).

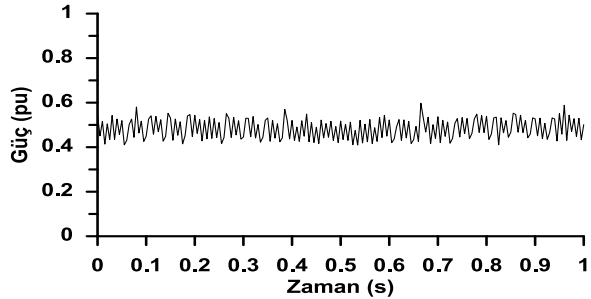


Şekil 3. Yarı yükte arızasız çalışma durumunda asenkron generatörün ani gücü  
(Instantaneous power of the half loaded asynchronous generator in unfaulty condition)

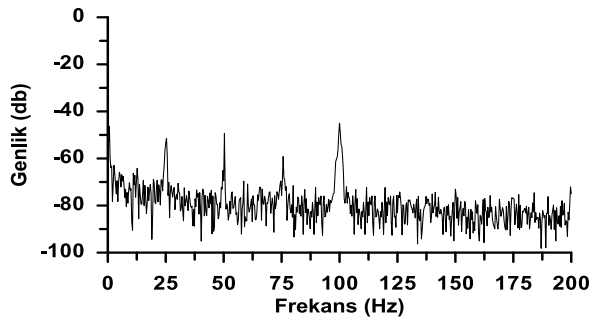


**Şekil 4.** Yarı yükte arızasız çalışma durumunda ani gücün frekans spektrumu  
(Frequency spectrum of the instantaneous power in half loaded unfaulty condition)

Sistemde mekanik dengesizlik oluşturmak için kaplin bağlantı noktasına 86 g değerinde bir ağırlık bağlanmıştır. Meydana gelen mekanik dengesizlik sonucunda asenkron generatörün ani gücünde Şekil 5'te görülen ilave frekans bileşenleri oluşmuştur. Mekanik dengesizlik durumunda elde edilen ani güç bağıntısından da ifade edildiği gibi, asenkron generatörün çıkış gücünde 25, 75, 50 ve 100 Hz'lik bileşenler ortaya çıkmıştır (Şekil 6). Bu bileşenlerin varlığı sistemde titreşimler meydana getirmiştir ve bunun sonucu olarak ses gürültüsü ortaya çıkmıştır. Bu durum küçük bir mekanik dengesizliğin oluşması durumunda deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ile matematiksel çıkarımlar sonucu bulunan ifadelerin birbiriyle tam olarak örtüştüğünü göstermiştir.

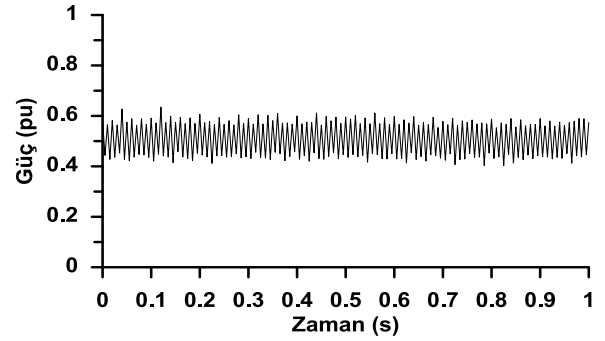


**Şekil 5.** Yarı yükte küçük mekanik dengesizlik durumunda asenkron generatörün ani gücü  
(Instantaneous power of the half loaded asynchronous generator in small mechanical unbalanced condition)

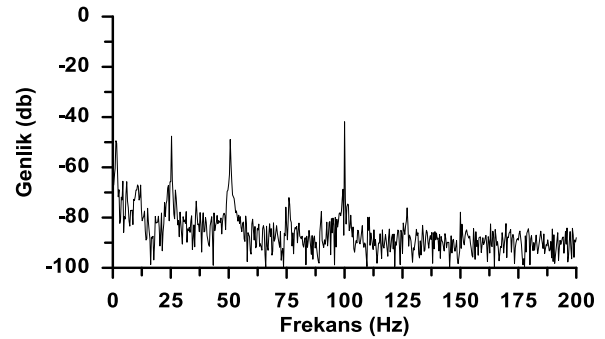


**Şekil 6.** Yarı yükte küçük mekanik dengesizlik durumunda ani gücün frekans spektrumu  
(Frequency spectrum of the instantaneous power in half loaded and small mechanical unbalanced condition)

Mekanik dengesizlik oluşturulmak için bağlanan ağırlığın iki katına çıkarılması sonucu generatör ani gücündeki salınımlar Şekil 7'de görüldüğü gibi biraz daha artmıştır. Mekanik dengesizliğin artmasıyla mekanik titreşimler ve dolayısıyla sistemin ses gürültü düzeyi artmıştır. Bu salınımların frekans bileşenleri hesaplanmış ve sonuç Şekil 8'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, mekanik dengesizliğin artmasıyla ani güçteki 25 Hz ve katlarındaki frekans bileşenlerinin genliği ve enerjisi beklendiği gibi biraz daha artmıştır. Küçük bir dengesizliğin oluşması durumunda 125 ve 150 Hz frekansında bileşenler ortaya çıkmazken (Şekil 6) dengesizliğin artırılması sonucunda Şekil-8'de görüldüğü gibi küçük de olsa ani güçte beklendiği gibi 125 ve 150 Hz frekansında bileşenler ortaya çıkmıştır. Bu durum mekanik dengesizliğin varlığı ve derecesine bağlı olarak, denklem 8'de verilen ani güç bağıntısıyla deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların birbiriyle örtüştüğünü göstermektedir.



**Şekil 7.** Yarı yükte orta derecede mekanik dengesizlik durumunda asenkron generatörün ani gücü  
(Instantaneous power of the half loaded asynchronous generator in middle mechanical unbalanced condition)



**Şekil 8.** Yarı yükte orta derecede mekanik dengesizlik durumunda ani gücün frekans spektrumu  
(Frequency spectrum of the instantaneous power in half loaded and middle mechanical unbalanced condition)

## SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Rüzgar türbinlerindeki çalışma durumlarını ve arızaları izlemek için titreşim, mekanik moment ölçme tabanlı geliştirilen sistemler birçok ilave sensör gerektirmektedir. Türbin kuruluş maliyetlerini çok artıran bu izleme sistemlerinin kendilerinde de çok fazla arıza olmakta, bu nedenle tam ve güvenilir bir çözüm sunamamaktadır.

Dünyadaki gelişmiş ülkelerde kullanılan rüzgar türbinlerinde arıza kaynaklı durma süreleri ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında, mevcuttan farklı, güvenilir ve kolaylıkla montajı yapılabilen yeni sistemlerin gerekliliğini zorunlu hale getirmiştir. Rüzgar türbinlerinde meydana gelen arızaların ve durma sürelerinin uzun olmasına neden olan en büyük etken mekanik sistem tabanlıdır. Bu nedenle, mekanik sistemlerdeki sorunları arıza ortaya çıkmadan önce tespit etmek bakım maliyetlerini ve sürelerini azaltmak için çok önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada, rüzgar türbinlerindeki mekanik dengesizlik arızalarını elektriksel ölçümlerden tespit eden yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Dengesizlik durumunda generatör ani gücünde farklı frekanslı bileşenlerin ortaya çıkması algoritmanın temelini oluşturmuştur. Geliştirilen bu yeni arıza tespit algoritmasının performansı deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Deneysel çalışmalardan da görüldüğü gibi küçük mekanik dengesizlik durumunda dahi generatör çıkış ani gücünde 25 Hz ve katı bileşenleri ortaya çıkmıştır. Bu da geliştirilen yeni yöntemin güvenilir bir biçimde rüzgar türbinlerinde kullanılabilirliğini göstermiştir. Algoritmanın arıza teşhisi için sadece akım ve gerilim verilerine ihtiyaç duyması nedeniyle mevcut rüzgar türbinlerinde ilave bir maliyet gerektirmeden kolaylıkla uygulanabilecek olması büyük bir üstünlük sağlayacaktır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Ata R., Analysis by Ann of Electricity Generation at Different Height from Autonomous Wind Turbine, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 23 (3), 523-529, 2008.
- Yıldırım E., Aydemir M.T., Analysis, Design and Implementation of an Axial Flux, Permanent Magnet Machine To Be Used In a Low Power Wind Generator, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 24 (3), 525-531, 2009.
- Ribrant J. ve Bertling L., Survey of failures in wind power systems with focus on Swedish wind power plants during 1997-2005, IEEE Trans. on Energy Conversion, 22 (1), 167-173, 2007.
- Ribrant J., Reliability performance and maintenance - A survey of failures in wind power systems, Yüksek Lisans Tezi, KTH School of Electrical Engineering, İsveç, 2006.
- Nilsson J. ve Bertling L., Maintenance management of wind power systems using condition monitoring systems life cycle cost analysis for two case studies, IEEE Trans. on Energy Conversion, 22 (1), 223-229, 2007.
- Tsai C.S., Hsieh C.T., Huang S.J., Enhancement of damage detection of wind turbine blades via CWT-based approaches, IEEE Trans. on Energy Conversion, 21 (3), 776-781, 2006.
- Changzheng C., et al., Fault diagnosis for large scale wind turbine rolling bearing using stress wave and wavelet analysis, IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Electrical Machines and Systems, 2239-2244, 2005.
- Bellini A. ve et al., Advanced in diagnostic techniques for induction machines, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 55 (12), 4109-4126, 2008.
- Yang W., Tavner P., Wilkinson M., Wind turbine condition monitoring and fault diagnosis using both mechanical and electrical signatures, IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 1296-1301, 2008.
- Bellini A. ve et al., High frequency resolution techniques for rotor fault detection of induction machine, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 55 (12), 4200-4208, 2008.
- Hedeyati S., Henao H., Capolino G.A., Torsional vibration assessment using machine electromagnetic torque estimation, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 57 (1), 209-219, 2010.
- Eric N., Bayrak M., Wind turbine mass and aerodynamic imbalances determination, International Journal of Engineering Sciences & Research Technology, 4 (2), 224-233, 2015.
- Donth A. ve et al., Improving performance of wind turbines through blade angle optimization and rotor balancing, EWEA O/M strategies 350, 2011.
- Hansen M., Aerodynamics of wind turbines, Earthscan, London, 2008.
- Ramlau R., Niebsch J., Imbalance estimation without test masses for wind turbines, ASME J. Sol Energy Eng., 131 (1), 2009.
- Gong X., Qiao W., Simulation investigation of wind turbine imbalance faults, IEEE International Conference on Power System Technology, 2010.
- Redfern M.A., Usta Ö., Fielding G., Protection Against Loss Of Utility Grid Supply For A Dispersed Storage and Generation Unit, IEEE Trans. on Power Delivery, 8 (3), 946-954, 1993.
- Usta Ö., Bayrak M., Redfern M.A., A new digital relay for generator protection against asymmetrical faults, IEEE Trans. on Power Delivery, 17 (1), 54-59, 2002.
- Benbozid M.E., A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection, IEEE Trans. on Industrial Electronics, 47 (5), 984-993, 2000.
- Kliman G.B., Stein J., Methods of motor current signature analysis, Elect. Mach. and Power System, 20 (5), 463-474, 1992.
- Thomson, W.T., Fenger M., Current signature analysis to detect induction motor faults, IEEE Industrial Appl. Mag., 7 (4), 2634, 2001.
- Blodt M., et al., Mechanical load fault detection in induction motors by stator current time-frequency analysis, IEEE Trans. on Industrial Appl., 42 (6), 1454-1463, 2006.
- Ian M.C., Wendell R., Using current signature analysis technology to reliably detect cage winding defects in squirrel cage induction motors, IEEE Trans. on Industrial Appl., 43 (2), 422-428, 2007.

24. Obaid R.R., Habetler T.G., Gritter D.J., A simplified technique for detecting mechanical faults using stator current in small induction motors, IEEE Industry Applications Conference, 479-483, 2000.
25. Kucuker A., Bayrak M., Detection of mechanical imbalances of induction motors with instantaneous power signature analysis, Journal of Electr. Eng. Technol., 8 (5), 1116-1121, 2013.