



## Rüzgar Enerji Santrallerinin Elektrik Şebekesine Etkilerinin İncelenmesi

### Investigation of Wind Power Plants Effects on Electric Distribution System

Emine AMAL<sup>1\*</sup> , Kadir YILMAZ<sup>2</sup> , Engin ÖZDEMİR<sup>3</sup> 

<sup>1</sup> Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-3381-2836

<sup>2</sup> Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0002-0819-3420

<sup>3</sup> Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Türkiye, **Orcid:** 0000-0003-0882-332X

#### Derleme

Gönderilme Tarihi : 31/03/2022

Kabul Tarihi : 03/06/2022

#### Anahtar Kelimeler

Gerilim Kararlılığı  
Güç Kalitesi  
Reaktif Güç Desteği  
Rüzgar Enerjisi  
Şebeke Entegrasyonu

#### Özet

Rüzgar enerjisinin elektrik üretiminde kullanımının küresel çapta artmasına paralel olarak Türkiye’de de son yıllarda rüzgardan elde edilen elektrik enerjisi oldukça artmıştır. Türkiye’de rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki payı (2021 ilk yarısından itibaren rüzgar gücü 10,585 MW ile) tüm ihtiyacın %9,22’sini karşılar hale gelmiştir. Ülkemizde son dönemde Rüzgar Elektrik Santralleri (RES) lisans başvurularında önemli artışlar yaşanmış olup, bu santrallerin enterekte sisteme bağlantı kriterleri ve sistem işletmeciliği üzerindeki etkileri daha büyük önem kazanmıştır. Rüzgar türbinlerinin zaman içinde ürettiği güç, birincil enerji kaynaklarının öngörülemez doğası nedeniyle karakteristik olarak dengesizdir. Bu durum, yalnızca çok sayıda rüzgar türbininin elektrik güç şebekesine entegrasyonundaki sorunları artırarak, katkılarının yönetilmesini oldukça zorlaştırmaktadır. Önceleri dağıtım sistemine bağlanan RES’lerde sadece gerilim kalitesi ilk aranan durumken şimdi değişen yönetmelige göre RES’lerden güç sisteminin dengesi konusunda katkı yapması beklenmektedir. RES’lerin arıza sonrası sisteme katkısı, gerilim, frekans etkileri ve aktif güç kontrolü özellikleri belirlenerek Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinde gerekli düzenlemelere gidilmiştir. Bu makale, rüzgar enerjisinin güç sistemlerine entegrasyonu ile ilgili temel teknik zorlukları ve önerilen çözüm metodolojilerini incelemeyi amaçlamaktadır. Bu zorluklar arasında güç kalitesi sorunları, güç dengesizlikleri (şebeke kararlılığı), reaktif güç desteği, arızadan kurtulma yeteneği gözden geçirilmiştir ve tüm zorluklar tartışılmıştır. Rüzgar enerji santrallerinin artan güçlerle enerji sistemine entegrasyonu Türkiye Elektrik İletim Sistemine etkileri ve bağlanma kriterleri gözden geçirilmiştir. Entegrasyon zorluklarını azaltmak için enerji depolama sistemleri, şebeke kodları ve yenilebilir enerji politikaları önemine değinilmiştir. Böylece, politika yapımcılar ve araştırmacılar bu çalışmayı gelecekteki enerji stratejilerini geliştirmede ve rüzgar enerjisi entegrasyon zorluklarının tam anlamıyla görmelerine yardımcı olacaktır.

#### Review Article

Received Date : 31/03/2022

Accepted Date : 03/06/2022

#### Keywords

Voltage Stability  
Power Quality  
Reactive Power Support  
Wind Energy  
Grid Integration

#### Abstract

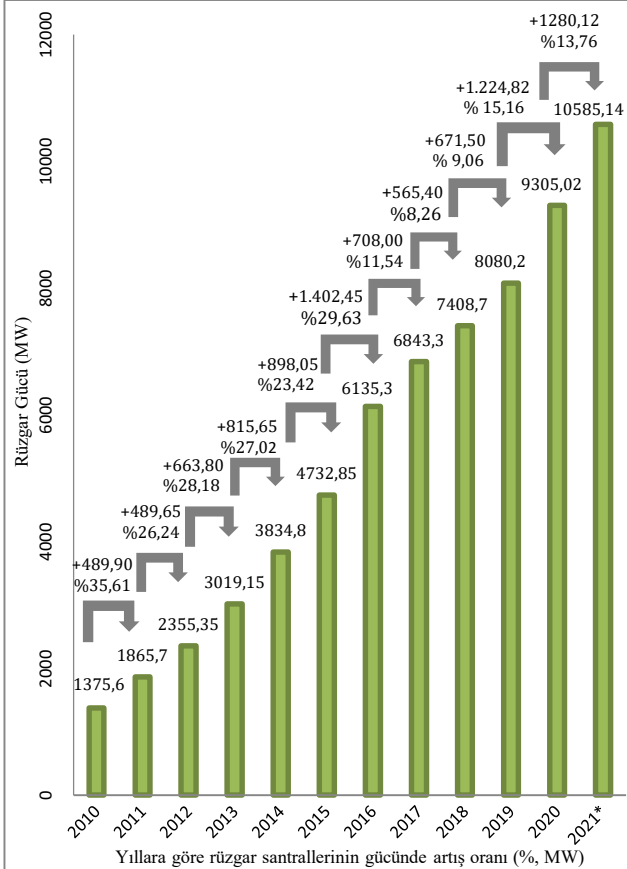
In parallel with the global increase in the use of wind energy in electricity generation, the electrical energy obtained from wind has increased considerably in Turkey in recent years. Share of wind power plants in electricity production in Turkey as of 2021, wind power has come to meet 9.22% of all needs with 10,585 MW. In our country, there has been a significant increase in license applications for Wind Power Plants (WPP) recently, and the connection criteria of these power plants to the interconnected system and their effects on system operation have gained greater importance. The power generated by wind turbines over time is characteristically unstable due to the unpredictable nature of primary power sources. This only exacerbates the problems inherent in the integration of large numbers of wind turbines into power grids, making their contribution extremely difficult to manage. While only the voltage quality was the first thing sought in WPPs connected to the distribution system, it is expected from WPPs to contribute to the balance of the power system according to the current changing regulation. The contribution of WPPs to the fault ride through system, voltage and frequency effects, and active power control features were determined and necessary arrangements were made in the Electricity Market Grid Code. This article aims to examine the main technical challenges and proposed solution methodologies related to the integration of wind energy into power systems. Among the various challenges, power quality issues, power imbalances (grid stability), reactive power support, fault recovery capability are reviewed and all challenges are discussed. Integration of wind power plants into the energy system with increasing power. The effects and connection criteria of the Turkish Electricity Transmission System have been reviewed. The importance of energy storage systems, grid codes and renewable energy policies are mentioned to reduce integration difficulties. Thus, policy makers and researchers will use this work to help develop future energy strategies and to take a full view of the wind energy integration challenges.

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): emineamal1980@gmail.com

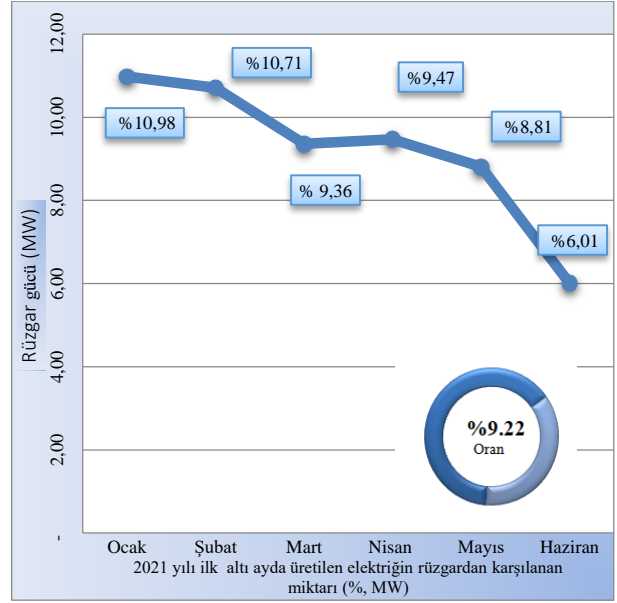


## 1. Giriş

Rüzgar enerjisi üretimi küresel olarak sürekli gelişmektedir ve bu alana yoğun yatırım yapan ülkelerin çoğunda şebekenin işleyişi önemli bir bileşen haline gelmiştir. Rüzgar enerjisi üretiminin dünya çapındaki yıllık büyümesi, onun güç sistemine etkisini ve genel enerji arzına katkısını artırmaktadır. Türkiye Rüzgâr Enerjisi Birliği'nin raporuna göre rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik üretimindeki payı 2021 yılı ilk yarısında devreye alınan 1.280 MW ile rüzgar kurulu gücü toplam 10.585 MW'a ulaşmıştır. Şekil 1'de görüldüğü gibi son on yılda kurulu rüzgâr santrallerinin gücünde önemli oranda artış sağlanmıştır. 2021 yılı ilk yarısında rüzgardan elde edilen elektrik toplamı 13 milyon 751 bin 842 MWh erişirken bu miktar Türkiye'de üretilen toplam elektriğin %9,22'sini oluşturmaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi Ocak ayında Türkiye'de elektriğin %10,98'i rüzgardan karşılanmıştır [1]



Şekil 1. Türkiye'deki rüzgar enerji santrallerinin için kümülatif kurulumu [1].



Şekil 2. Türkiye'de rüzgar enerji santrallerinin 2021 yılı ilk altı dönemdeki elektrik üretimindeki payı

Ülkelerin temiz enerjiye geçiş politikaları ve mevzuatı, gelecekte daha fazla rüzgar enerjisi projesine katkıda bulunmakta ancak yüksek kurulu güçlere sahip rüzgar çiftliklerinin şebeke bağlantıları büyük bir sorun haline geldiği görülmektedir. Rüzgar santrallerinin şebeke ile entegrasyonunda santralin bağlanacağı baranın kısa devre gücü, şebeke empedans açısı, rüzgar türbini karakteristikleri ve jeneratör teknolojisi de belirleyici bir unsurdur. Rüzgar santrallerinin arıza sonrası sisteme katkısı, gerilim, frekans tepkileri ve aktif güç kontrolüne ilişkin talepler belirlenerek bu yönde Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinde gerekli düzenlemeler yapılmıştır. Şebeke yönetmeliklerindeki talepler, özellikle sürekli ve geçici rejimde gerilim kararlılığı problemini çözmek için reaktif gücü desteklemek odaklıdır. Rüzgar santrallerinin sisteme bağlandıkları noktada meydana gelen bir gerilim düşümü esnasında santrallerin aktif güç vermeye devam etmeleri ve gerilim düşümünün en kısa sürede temizlenmesine yönelik şebekeye reaktif güç enjekte etmeleri yönetmeliklerle zorunlu kılınmıştır.

Literatür incelendiğinde, Yuan-Kanh Wu ve arkadaşları Türkiye dâhil dünya genelinde birçok ülkedeki şebekeye yönetmeliklerini incelemiş en önemli parametrelerin frekans kontrolü, reaktif güç sorunları, arıza sonrası sisteme katkı ve güç kalitesi olduğunu ortaya koymuştur [2]. Ahuja ve arkadaşları Çift Beslemeli İndüksiyon Jeneratörü (ÇBİJ) ile Sabit Mıknatıslı Senkron Jeneratör (SMSJ) kullanılan rüzgâr türbinlerini karşılaştırmış ve enerji kalitesi yönünden ÇBİJ'in daha iyi olduğunu saptamışlardır. Bunun sebebini de ÇBİJ'ün statoru direkt şebekeye bağlıyken, akıma ve

\* Sorumlu Yazar (Corresponding Author): emineamal1980@gmail.com

gerilime bozucu etkisi olan güç dönüştürücülerinin rotor tarafında enerji üretiminin sadece küçük bir bölümünü oluşturması olarak yorumlanmışlardır [3]. Shaker D. Ahmed ve arkadaşları Rüzgar enerji üretim payı yüksek olan ülkelerin şebekeye entegrasyon zorluklarını detaylı incelemiş, zorluklarla baş edebilmenin en önemli kriterleri olan ülkelerin şebeke kodları, yenilebilir enerji stratejileri ve enerji depolamanın önemini ortaya koymuşlardır [4]. Papathanassiou ve Tsili, yine dünya genelinde ülkelerin yüksek gerilim seviyesinde şebeke uyumluluk kriterlerini karşılaştırmış mevcut rüzgâr türbin teknolojilerinin 5-10 yıl içerisinde şebeke yönetmeliklerinin etkisiyle pozitif anlamda gelişeceğini ve istenilen tüm gereksinimlere karşılık verebilecek durumda olacağını belirtmişlerdir [5]. Mehmet Akif Ak, rüzgar santrallerinin şebekeye etkilerini ve entegrasyon sürecini araştırmış, rüzgar santralının şebekeye en uygun şekilde bağlanabilmesi için aktif, reaktif güç değişimi kaynaklı istenmeyen gerilim değişimlerinin önlenmesi, şebeke kısa devre limitlerinin zorlanması, harmoniklerin minimum seviyede tutulması ayrıca anahtarlama olaylarından kaynaklı şebekenin kararsız duruma gitmesinin önlenmesi gerektiği sonucunu paylaşmıştır [6].

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, Rüzgar enerjisi entegrasyonunun zorlukları kapsamlı bir şekilde tartışılrsa da, rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişki henüz netlik kazanmamıştır.

Bu makalede, rüzgar enerjisi sistemlerinin şebekelere entegrasyonu nedeniyle karşılaşılan, güç tahmini, gerilim/reaktif güç desteği, frekans kararlılığı, harmonikler, güç kalitesi sorunları, sinyal kararlılığı, alçak gerilimde kalabilme yeteneği, koruma, planlama ve bunlarla sınırlı olmayan diğer zorluklar detaylı olarak tartışılmıştır. Ayrıca bu zorlukların etkilerini azaltmak için rüzgar santrallerinin şebekeye bağlantı kriterleri ele alınarak araştırmacılara, gelecekteki enerji stratejilerini geliştirmede ve daha iyi sürdürülebilir politikalar benimseyebilmeleri için zorlukların tüm yönleri sunulmaktadır.

Böylece bu çalışma ile, gelecekte rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişkiyi bir bütün halinde görülmesi literatüre katkı olarak sunulmaktadır.

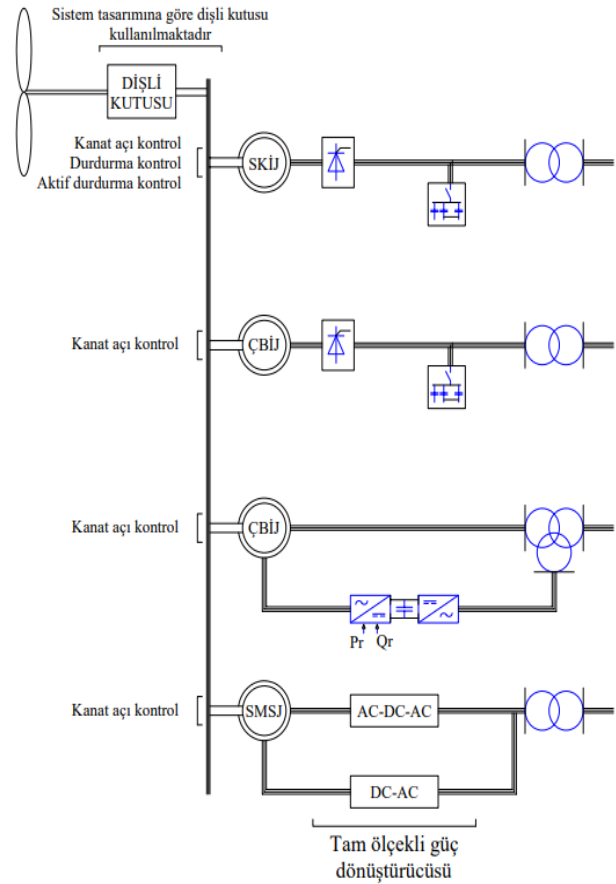
## 2. Rüzgar Türbin Teknolojileri

Bir elektrik jeneratörünün işlevi, ana hareket ettirici olarak rüzgar rotor türbininden gelen mekanik tork ile yerel yük veya elektrik şebekesi arasında bir araç veya enerji dönüşümü sağlamaktır. Rüzgar enerjisi üretimi için kullanılan dört farklı sistemin (tip 1, tip 2, tip 3 ve tip 4) jenerik modellerini geliştirilmiştir [7]-[8]. Rüzgar hızlarına göre Sabit ve Değişken hız olarak iki grupta incelenebilir. Modern rüzgar türbini sistemlerinde olası adaylar olan

yaygın AA jeneratör türleri aşağıdaki gibidir;

- Tip1: Sincap kafesli rotorlu indüksiyon jeneratörü;
- Tip2: Rotoru sargılı indüksiyon jeneratörü;
- Tip3: Çift beslemeli indüksiyon jeneratörü;
- Tip4: Senkron jeneratör (harici alan uyarıtlı) ve Sabit mknatıslı senkron jeneratör.

Rüzgar enerjisi sistemlerinin bazı yaygın tiplerini temsil eden basitleştirilmiş bir diyagram Şekil 3'te gösterilmektedir. Tasarım perspektifinden bakıldığında, bazı jeneratörlerin özel bir transformator aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlı olduğu, diğerlerinin ise güç elektroniği devre elemanları içerdiği görülmektedir. Bununla birlikte, birçok tasarım, kontrol edilebilirliği ve çalışma aralığını iyileştirmek için güç elektroniği elemanları bulunmaktadır. Hangi bağlantı konfigürasyonu kullanılırsa kullanılsın, her türbinin kendisi, iletim sisteminin güç kalitesi üzerinde bir etkiye sahiptir. Rüzgar çiftliklerinin, elektrik sistemi kararlılığını korumak için gerilim, reaktif güç kontrolü, frekans kontrolü ve arızadan geçiş yeteneği sağlayabilmesi gerektiğini öne sürüyor [9].

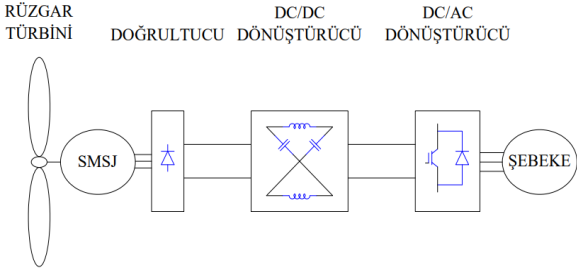


Şekil 3. Farklı tip Rüzgar Jeneratör sistemleri [9].

Sabit hızlı indüksiyon jeneratörlerine sahip rüzgar çiftlikleri, gerekli gerilim veya frekans kontrolünü sağlayamadıkları için aşamalı olarak kaldırılmalıdır. Ayrıca sincap kafesli indüksiyon jeneratör reaktif güç tüketir. Bu yüzden sincap kafesli indüksiyon jeneratörün reaktif güç

tüketimi her zaman güç faktörünü bire yaklaştırmak için kapasitörler kullanılarak dengelenir. ÇBİJ sistemlerinde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlanır. Rotor sargısı ise iki adet sırt sırta bağlı gerilim kaynaklı darbe genişlik modülasyon (DGM) tekniğini kullanan inverterden oluşan, dört bölgeli güç dönüştürücüsü üzerinden şebekeye bağlanmaktadır. Genellikle, rotor tarafındaki dönüştürücü, elektromanyetik torku düzenler ve makinenin manyetizasyonunu sürdürebilmesi için reaktif güç sağlar [9]. Şebekeye bağlı sistemin dönüştürücüsü için geliştirilen kontrolörlere genel bir bakış da [10]'da tartışılmış ve ÇBİJ'nin artık reaktif gücün düzenlenmesi ve çıkış gücü verimliliğini en üst düzeye çıkarmak, açısız hızın ayarlanması için en verimli tasarıma sahip olduğunu göstermiştir. Bu jeneratörler ayrıca gerilim düşmelerinde de sisteme destek verebilmektedir. Bununla birlikte, dönüştürücü tabanlı sistemlerin dezavantajları, sisteme enjekte edilen harmonik bozulmalardır. Son zamanlarda önerilen Z-kaynaklı evirici (ZKE), tek kademeli bir yükseltici evirici olarak, şebekeye bağlı gelecekteki DÜ sistemleri için güç kalitesi problemlerini azaltmak için iyi bir aday olmaktadır [11].

Şekil 4'de görüleceği üzere Sabit mıknatıslı senkron jeneratörü (SMSJ) tam ölçekli dönüştürücü, dişli kutusu elimine edilmiş ve son yıllarda rüzgâr enerji sektöründe sürekli mıknatıslı kullanımı yönünde önemli bir eğilim bulunmaktadır. IGBT'lerin kullanıldığı DGM ile reaktif, aktif güç kontrolü sağlanırken iç harmonikleri de azaltmak için filtreler kullanılmaktadır. Bu sayede rüzgâr santrali şebeke uyumluluk standartlarını rahatlıkla sağlayabilmektedir [12].



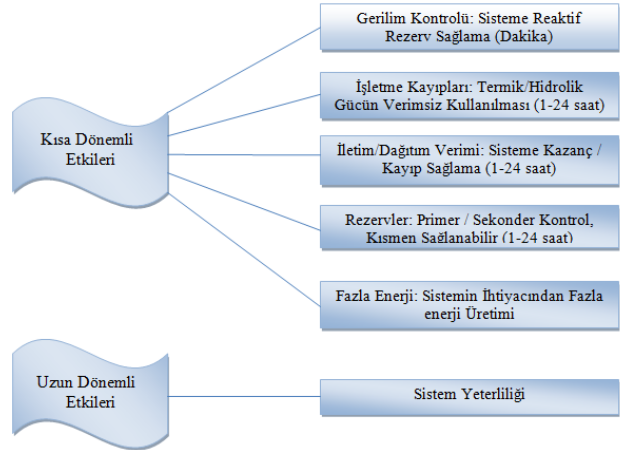
Şekil 4. DA yüksektici kıyıcı ve ZKE ile SMSJ tabanlı rüzgâr jeneratörü [9].

### 3. Rüzgâr Enerjisinin Şebekeye Entegrasyon Zorlukları

Rüzgâr enerjisi, temiz ve çevre dostu bir enerji kaynağı olarak modern elektrik şebekelerine en önemli katkılardan biridir. Aralıklı türbin teknolojisi ve koruma sorunları dahil olmak üzere rüzgâr enerjisi sistemlerinin benzersiz özellikleri, şebekelere başarılı ve ekonomik entegrasyon için yeni zorluklar getirmektedir.

### 3.1. Çıkış Gücü Tahmini

Çok sayıda rüzgâr türbininin entegrasyonu durumunda, tahmin eksikliği, büyük miktarlarda eğirme rezervlerinin varlığını gerektirdiğinden, tahmin üretim maliyetini düşürmede önemli bir rol oynar. Ayrıca, öngörülemeyen rampa şeklindeki ani durumlar, şebekenin güvenilirliğini bozabilmektedir. Son olarak, bir elektrik kaynağı olarak rüzgâr türbinleri ile şebeke yönetimi için tahmin yapmak oldukça faydalı hale gelmiştir [13]. Rüzgâr hızı tahmin edilmesi en zor meteorolojik öğelerden biri olduğu için rüzgâr enerjisinin tahmini için ideal bir strateji yoktur. Her metodolojinin, belirli özel durumlarda makul, farklı durumlarda uygunsuz olabilen artıları ve eksileri vardır. Operasyon ihtiyacına bağlı olarak, tahmin, kısa vadeli (1-6 saat) ve uzun vadeli olmak üzere iki döneme ayrılmaktadır. Şekil 5'te, rüzgâr santrallerinin güç sistemi üzerine dönemsel etkileri gösterilmektedir. Elektrik enerjisinin tüketicilere minimum hata ile sunulması gerektiğinden herhangi bir hatanın ekonomik, sosyal ve politik etkileri yüksektir.



Şekil 5. Rüzgâr santrallerinin güç sistemi üzerine etkileri [14].

### 3.2. Reaktif Güç / Gerilim Desteği

Rüzgâr enerjisinden elektrik üretmek için kullanılan makineler çoğunlukla, doğası gereği reaktif güç tüketen (yani uyarma için reaktif bir güç kaynağına ihtiyaç duyan) indüksiyon jeneratörleridir. Dolayısıyla senkron makineler gibi şebekeyi reaktif güçle destekleme avantajına sahip değildirler [15]. Hem aktif hem de reaktif güçleri desteklemek için ÇBİJ tabanlı rüzgâr türbinleri için kapasite geliştirme tekniği yoluyla arıza sürüşü önerilmektedir [16]. Rüzgâr türbin kontrol sistemlerinin doğru tasarımı, geleneksel jeneratörlerin yerini alarak rüzgâr santrallerinin optimum kullanımı için esastır. Ancak rüzgâr santrallerinin reaktif güç üretme veya tüketme yeteneği, şebekenin gücüne ve iletim hatlarının uzunluğuna bağlıdır. Yapılan çalışmalar

sonucu rüzgar türbinlerinin reaktif güç desteği sağlayabileceğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, kararsızlık problemlerini önlemek için rüzgar türbini ile ilişkili farklı reaktif güç kaynakları arasındaki koordinasyon esastır. Bir rüzgar türbini, reaktif güç üretme ve tüketme süreci yoluyla gerilim profilini geliştirerek şebeke tarafı esnekliğine katkıda bulunabilir.

Gerilimin çalışma sınırları içinde tutulması, özellikle yük veya güç üretimi ile ilgili yeni teknolojiler tanıtılırken her zaman kritik konulardan biri olarak kabul edilmektedir. Örneğin, rüzgar gücü çıkışının dalgalanması, rüzgar hızı ve üretim sisteminin türüne bağlı olarak gerilim dalgalanmalarına, titremelere neden olur. Sabit hızlı jeneratörler, rotorun hızına dayanan reaktif gücü tüketir. Bu jeneratörler, elektrik şebekelerinde gerilim dalgalanmasının ana kaynağıdır. Ayrıca rüzgar türbini ile şebeke arasındaki bağlantı noktasındaki kısa devre empedansı da gerilim dalgalanmalarına katkıda bulunan bir diğer temel faktördür. Rüzgar türbinlerinin zayıf şebelere entegre edilmesi durumunda önerilen çözümler arasında esnek AA iletim Sistemleri cihazlarının kurulması ve tesisin kontrol sistemlerinin modifikasyonu yer almaktadır [17]-[18].

Gerilim dalgalanmalarıyla başa çıkabilmek için yönetmelikte, şebekelerdeki yenilenebilir enerji oranının %20'yi geçmemesi gerektiğini ortaya koymaktadır [19].

### 3.3. Frekans Etkisi

Rüzgar santrallerinin çoğunun kontrol stratejileri, rüzgar santrallerini azaltan herhangi bir arıza durumunda mekanik sistemi elektrik sisteminden izole eder ve şebeke ataletine katkıda bulunur. Üretilen güç ve talep edilen güç (yük ve şebeke kayıpları) arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol açar. Üretilen gücün fazlalığı frekansta artışa, eksikliği ise düşüşe neden olur. Morren ve arkadaşlarına göre, rüzgar türbini merkezi kontrol ünitesine bir yardımcı kontrol cihazının eklenmesi, bir bozulma sırasında rüzgar türbini kütlesinden yararlanarak, tork ayar noktasını şebeke frekansının değişimine uyarlanabilir hale getirmek için değiştirebilir [20]. Başka bir kontrol stratejisi [21]'daki frekans salınımları sırasında şebeke frekansına dayalı olarak SMSJ'ün çıkış gücünü denetlemede kullanılmaktadır. Herhangi bir bozulma sırasında, rüzgar türbini geleneksel bir jeneratörü taklit edebilir ve rüzgar türbininin gizli kinetik enerjisinden yararlanarak atalet desteği sağlayabilmektedir. Rüzgar enerjisinin yüksek etkisinden kaynaklanan frekans bozulma problemini çözmek için enerji depolama sistemlerinin kullanımı, kinetik enerji çıkarma ve yük kontrolü gibi diğer çözümlerde uygulanabilir.

### 3.4. Harmoniklerin Etkisi / Güç Kalitesi Sorunları

Rüzgar türbinleri, şebekeye, kabul edilebilir güç kalitesinde elektrik sağlamalıdır. Düşük harmonik bozulum bu koşullardan biridir. Rüzgar türbinlerinin şebekeye entegrasyonu, farklı şebeke seviyelerinde harmonikler oluşturmaktadır. Harmonikleri analiz etmek, bunları azaltmak için çözümler geliştirirken emisyonlara katkıda bulunan unsurların bilinmesi gerekmektedir. Harmoniklerin kaynağı olan unsurlar, kollektör barasında kullanılan kablolar, türbin transformatörleri, filtreler, kapasitörler, güç faktörü düzeltme cihazları ve güç elektroniği dönüştürücüleridir. Literatür incelendiğinde, harmonikleri belirlemek için kullanılan çeşitli yöntemler bulunmaktadır. Harmonik güç akışı yöntemi, bozulmuş ve bozulmamış akım yöntemi, süperpozisyon yöntemi, Harmonik durum tahmin yöntemi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu Standart normuna göre akım ve gerilim fazör yöntemi gibi yöntemler tartışılmıştır [22]. Ayrıca, rüzgar türbinlerinin iletim sisteminin kısa devre kapasitesine katkısı minimumdur, bu da iletim bağlantısını zayıflatır ve gerilimde artan harmonik seviyeleri ile sonuçlanır. Bir SMSJ rüzgar enerjisi santralının orta gerilim şebekesine entegrasyonu, 2 kHz ile 150 kHz frekans aralığında harmonikler üretir. Güç hattı iletiminin etkin bir şekilde arızalanmasına neden olabilir. Reis A. ve arkadaşları [23], her bir rüzgar türbini tarafından üretilen akım harmoniklerini azaltmak için filtrelerin fonksiyonlarını tam dönüştürücü rüzgar türbinlerine entegre etmek için bir kontrol stratejisi oluşturmuşlar. Geliştirilen strateji, inverter geriliminin açısını ve genliğini düzenleyerek akım harmoniklerini azaltır, böylece bara invertör geriliminden farklı harmonikleri ortadan kaldırmaktadır. Vargas ve Ramirez, rüzgar türbini değişkenlerinin mekanik ve elektriksel geçici durumlarının harmoniklerinin frekanslarını incelemek için genişletilmiş bir harmonik etki alanı modeli önermişlerdir [24]. Ayrıca, uygun enerji depolama sistemlerinin ve filtrenin devreye alınması, rüzgar santrallerinin entegrasyonu nedeniyle ortaya çıkan harmonikleri azaltmaktadır. Özetlemek gerekirse, dönüştürücülerin geliştirilmesi, güvenilir bir güç kaynağı yapmak için rüzgar çiftlikleri entegrasyonu tarafından üretilen harmonikleri bastırmak için daha fazla araştırma gerekmektedir.

### 3.5. Açısız Kararlılık / Alanlar Arası Salınım

Açısız kararlılık, güç sistemindeki birbirine bağlı makinelerin herhangi bir bozulmaya maruz kalarak senkronize kalabilme yeteneğidir [25]. Şebekede artan rüzgar enerjisi kullanımı, küçük sinyal kararlılığını

iyileştirir. Kısa vadede, rüzgar türbininin reaktif gücü, güç sisteminde açılabilir kararlılık yaratabilir. ÇBİJ tabanlı rüzgar türbinlerinin sayısındaki istikrarlı artışın, bir toplu güç sisteminin kararlılığı (geçici ve küçük sinyal) üzerindeki etkisi incelendiğinde, rüzgar üretim miktarı ile ilgili olarak güç sisteminin genel ataletinde önemli bir değişiklik olduğunu göstermektedir. Rüzgar türbinlerinin şebekeye katkısı ne kadar yüksekse, atalet o kadar düşük olmaktadır[26]. Ayrıca, senkron jeneratörleri dolaylı olarak birçok rüzgar türbininin entegrasyonu sonucu şebekeyi kararsızlaştırabilir. Hız regülatörleri, frekans kontrolünü desteklemek için senkron jeneratörler tarafından düzenlenebilir. Bununla birlikte senkron jeneratörlerden farklı olarak, rüzgar türbinini jeneratörleri yalnızca küçük bir miktar için birincil frekans desteğine katkıda bulunabilir [27]. Rüzgar gücü çıkış dalgalanmaları, üretim ve yük uyumsuzluğundan dolayı şebeke gerilim kararlılığını da zayıflatacaktır [28]. Rüzgar türbinlerinin elektrik üretimindeki beklenen payının yıllar içinde önemli ölçüde artması göz önüne alındığında, rüzgar gücünün olumsuz etkileriyle başa çıkmak için güç sistemlerinde daha fazla esnekliğe ihtiyaç duyulacaktır. Rüzgar çiftlikleri ile entegre elektrik şebekelerinin açılabilir kararlılığıyla başa çıkabilmek için araştırmacıların bu konuyu daha derinlemesine araştırmaları gerekmektedir. Yenilenebilir enerjinin güç sistemlerine etkin bir şekilde entegrasyonu için esnekliği artırmak için dört ana seçenek önerilmiştir [29]:

- Sevk edilebilir üretim
- İletim ve dağıtım genişletmesi
- Talep tarafı yönetimi
- Enerji depolama

### 3.6. Şebeke Güvenilirliği ve Dayanıklılığı

Rüzgar enerjisinin artan etkisi, rüzgar gücü çıkış dalgalanmaları kontrol edilemediğinden ve genellikle rüzgar üretimi talep modeliyle ilgili olmadığından, sistem güvenilirliğini etkiler. Bu durum tepe ve yoğun olmayan dönemler arasındaki farkın artmasına neden olur. Şebeke güvenilirliğinin yapı taşları şu şekilde özetlenebilir 1) Elektrik sistemi içerisinde üretim ve talep dengesini sağlayarak sabit tutarak ve dengesizlik durumlarında üretimi veya talebi azaltarak hızlı tepki vererek frekans desteği sunmak. 2) Sistemin çökmesini önlemek için rutin veya acil çalışma durumlarında gerilimi şebekenin çalışma sınırları içinde tutarak desteklemek [30]. Konvansiyonel üretim sistemi bu hizmetleri çalışmasının önemli bir parçası olarak sağlar, ancak rüzgar türbinleri gibi yenilenebilir kaynaklarının yeni bir elektrik kaynağı olarak ortaya çıkması şebekenin dinamiklerini değiştirmiştir.

### 1) Gerilim Desteği

#### a: Reaktif Güç ve Gerilim Düzenleme

İnverter tabanlı kaynaklı sistemlerde sistemin, beklenmedik durum öncesi veya sonrası programlanmış voltajı korumak için sınırlamalar dahilinde daha fazla reaktif akım sağlayabiliyorsa, evirici bunu yapacak şekilde programlanmalıdır. Senkron bir makineye benzer şekilde, aktif güç çıkışını düşürmeden kararlı durum voltajını korumak için inverterin tam kapasitesinden yararlanılmalıdır. Rüzgar türbinleri, kontrol devresinin bir parçası olan inverter, güç elektroniği aracılığıyla şebekeye bu hizmeti sağlayabilir. Bu hizmet, türbin güç üretse de üretmese de mevcuttur.

#### b: Alçak Gerilim Geçiş

Şebekenin belirli bir bölgesinde meydana gelen arıza başlı başına bir risk olmayabilir ancak düşük gerilim durumunda çalışan koruma cihazları nedeniyle üreten kaynakların kaybolması tamamen çökmeye neden olabilir. Bu nedenle üretim kaynakları, koruma cihazlarının arızalı parçaları izole edebilmesi ve kontrolörlerin şebekeyi yeniden dengeleyebilmesi için voltaj düşüşünü belirli bir süre boyunca sürdürecektir bir sistemle tasarlanmıştır. Rüzgar türbinleri, beklenmedik olaylar sırasında şebekede kalmalarını ve gerilim düşüşünü aşmalarını sağlayan kontrolörlerle tasarlanmıştır [31].

### 2) Frekans Desteği

#### a: Frekans Düşüşü / Hızlı Frekans Cevabı

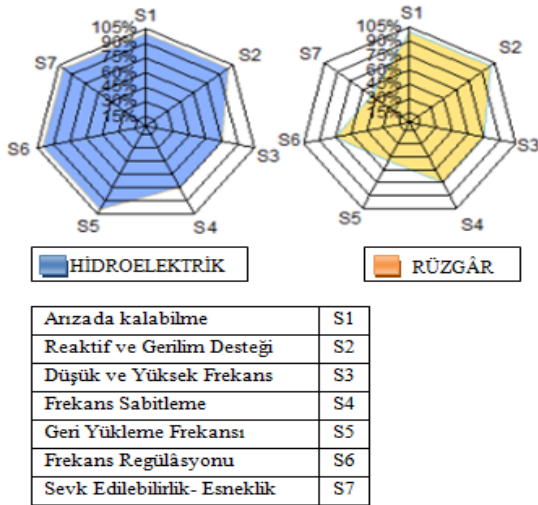
Acil bir durumda (iletim hattının veya birincil üretim kaynağının kaybı), sistem frekansı, sistemin ataletine bağlı bir oranda azalır. Bu aşamada frekansı yavaşlatmanın ve düşük frekans röleleri yükselmeden önce en alt noktaya ulaşmaya yardımcı olmanın iki yolu vardır. Birinci yol, büyük geleneksel jeneratörlerin özelliği olan büyük atalet momentidir. İkinci yol, şebekeye yüksek miktarda aktif güç enjekte etmek ve hızlı frekans yanıtı olarak bilinen şeyde yeterli kinetik enerji sağlamaktır. Son zamanlarda rüzgar türbinleri bu hizmeti ek kontroller yoluyla sağlayabilmektedir.

#### b: Frekans Düzenleme

Bu işlem, frekansı normal çalışma değerinde ayarlamak için geri besleme sinyaline yanıt veren jeneratörler tarafından gerçekleştirilir. Bu hizmet, bir acil durumun ardından normal çalışma veya arızadan kurturma süresi sırasında kullanılır. Rüzgar türbinleri, ihtiyaç anında yeterli kapasitenin olması (rüzgar mevcudiyeti ve üretilen gücün türbinin maksimum gücünden daha az olması) şartıyla bu hizmete katılabilir.

### 3.7. Esneklik

Şebekedeki değişiklikler, elektrik güç sisteminin genel bir özelliğidir. Bu nedenle esnek kaynaklar, ister beklenmedik ister rastgele meydana gelsin, bu değişikliklere karşı koyabilir. Esneklik, aşağı-yukarı yönlerde rampalamayı, hızlı başlama süresini, hızlı kapanma süresini, minimum (durma süresi/yükselme süresi) ve minimum kararlı üretim seviyesini içerebilir. Rüzgar türbinleri, kontrolde güç elektroniği kullanmaları nedeniyle üretim modunda ve hızlı tepki ile bu hizmete aşağı yönde katkıda bulunabilir. Ayrıca ön-kısıtlı modda ise yukarı yönde hizmet verebilmektedir. Bunlara rağmen, rüzgarın aralıklı doğası, rüzgar türbinleri tarafından istendiğinde bu hizmeti çok maliyetli hale getirir. Rüzgar türbinleri aracılığıyla bu hizmetten yararlanmanın maliyetini azaltmak için çaba sarf edilmektedir. Şekil 6'da rüzgar türbini güvenilirlik ve esneklik hizmetlerinin bir özeti. Güç sisteminde en iyi güvenilirlik ve esneklik sağlayıcısı olan hidroelektrik ile rüzgar türbinlerinin karşılaştırılması görülmektedir. Rüzgar türbininin gerilim geçişi, reaktif güç desteği ile ilgili olarak mükemmel bir hizmet verdiğini, frekansını yavaşlatma, frekansını stabilize etme ve düzenlemede çok iyi olduğunu görebiliriz. Frekans kurtarma aşamasında ve esneklikteki performansı ortalamadadır. Bu durumda maliyetten kaynaklanmaktadır [32].



Şekil 6. Hidrolik enerjiye kıyasla güvenilirlik/esneklik hizmetinde rüzgar performansı [32].

### 3.8. Koruma Zorlukları

En yaygın güç sistemi arızası türlerinden biri kısa devredir. Bu nedenle koruma cihazları, bir elektrik kısa devresi durumunda tedarikçiler veya tüketiciler tarafından ekipman kaybını veya hasarı önlemek için çalışan kalkanı temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Rüzgâr türbinlerinin iletim şebekesinin kısa devre katkısının değerlendirilmesi,

bu santrallerin etkilerinin ve şebeke elemanlarında oluşturabilecekleri stresin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Rüzgar türbinlerinin etkisi ve kısa devre katkısı rüzgar türbinlerinin tipine bağlıdır. Rüzgar türbinlerinin ayrıntılı modelleri ve özellikleri [33]–[34]'de bulunmaktadır. Tip 1 ve Tip 2 rüzgar türbinleri, rotorun ek direnci ile temsil edilen Tip 2'nin küçük bir farkı ile hemen hemen aynı özelliklere sahiptir ve bu nedenle bu iki tipin kısa devre akımına katkısı hemen hemen aynıdır. Tip 1, 2 ve 3'teki kısa devre akımı en yüksektir ve anma akımının 3 ile 6 katı arasında değişen bir değerle 3 fazlı arızada meydana gelir. Tip 4'e gelince, kısa devre akımı, nominal akımın değerine (%110 veya daha fazla) eşit bir değer bulur ve bunun nedeni, devresinin şebekeden bir dönüştürücü ile ayrılmasıdır [35]. Ortak bağlantı noktasındaki kısa devre hızı, paralel olarak bağlanan rüzgar türbinlerinin sayısına ve tipine bağlıdır. İletim ağları, arıza empedansının değişmesi nedeniyle rölelerin yetersiz/aşırı erişim sorunu dahil olmak üzere rüzgar gücünün toplu nüfuzu nedeniyle farklı koruma zorluklarıyla karşı karşıyadır. Koruma cihazlarının seçimi ve koordinasyonuna ek olarak arıza akımının seviyesi, rüzgarla birleştirilmiş mikro şebekelerin temel zorluklarıdır [36]. Literatürde birçok çözüm arasında uyarlamalı aşırı akım koruma şeması [37], arıza mesafesi tahmini tabanlı koruma şeması [38], bulanık çıkarım sistemi tabanlı şema [39], mikroişlemci tabanlı şema [40], salınım frekansı ve geçici güç tabanlı şema [41], gerilim-akım ters zaman tabanlı şema [42] yaygın olarak kullanılan koruma şemalarıdır. Ayrıca, rüzgar santralleri için jeneratör tipi seçimi, yani senkron jeneratör, indüksiyon jeneratör veya dönüştürücü arayüzlü jeneratör, elektrik şebekelerinin koruma şemasının tasarımında da hayati bir rol oynar. Senkron jeneratörler uzun süreli yüksek akım sürdürülebilirlik özelliklerine sahiptir ve endüktif jeneratörlerin arıza akımı kademeli olarak azalır. Tersine, dönüştürücü arabirimli jeneratörlerin kısa devre akımı, jeneratörlerin nominal akım değerinin iki veya üç katı ile sınırlıdır [43], alçak gerilim şebekeleri için, yenilenebilir enerji varlığındaki koruma sistemleri, yeni bir çok yönlü güç akışı olgusuna maruz kaldığından, özellikle dağıtılmış jeneratörlerde özel dikkat gerektirir. Özetlemek gerekirse, her koruma planının artıları ve eksileri vardır. Buna göre, korumanın her yönü verilen güç sistemi şebekeleri için kapsamlı koruma planlarının geliştirilmesine ve sistem operatörlerinin koruma sistemini gözden geçirmesi gereken şebekedeki rüzgar türbinlerinin penetrasyon düzeyi için ölçülebilir oranların belirlenmesine hala ihtiyaç vardır.

### 3.9. Alçak Gerilimde Şebekede Kalabilme Yeteneği

Rüzgar türbini tabanlı elektrik santrallerinin arıza veya

gerilim düşüşleri sırasında belirli bir süre boyunca şebekeye bağlı kalabilme kabiliyetine alçak gerilimde Şebekede kalabilme yeteneği denir[44]. Literatürde, çeşitli kontrol stratejileri dahil olmak üzere, sistemin devam etme yeteneğini geliştirmek için çeşitli yenilikçi teknikler incelenmiştir. [45]'deki kontrol stratejisinde SMSJ tabanlı bir rüzgar türbininin çalışma güvenilirliğini artırmak için çift yönlü alçaltıcı/yükseltici dönüştürücü ile şebeke tarafı dönüştürücü arasında entegre bir kontrol yöntemi önerilmiştir. Bir rüzgar türbininin kısa devreye tepkisi rüzgar türbininin tipine bağlıdır. Örneğin, ÇBİJ tabanlı türbinin terminalinde arıza meydana gelirse, kısa devre akımı, türbine zarar verebilecek nominal rotor akımının birimi (p.u.) başına 5 ile 6 kadar ulaşabilir.

### 3.10. Planlama Zorlukları

Tartışılan operasyonel ve koruma zorluklarına ek olarak, rüzgar enerjisinin büyük ölçekli entegrasyonu, güç sistemi planlamasına da karmaşıklıklar getirmiştir. Geleneksel ancak yaygın olarak benimsenen güç sistemi planlama ve simülasyon modelleme araçları, çoğu durumda maliyet minimizasyonunun amaç fonksiyonu olduğu optimal üretim portföylerini tasarlamak için kullanılır [46]. Bu tür modelleme yaklaşımları, yenilenebilir enerji ile ilgili belirsizlikleri ve önerilen çözüm yönlerini planlama aşamalarında dikkate almaz [47]. Ancak, rüzgar enerjisi sisteminin sınırlı sevk edilebilirliği nedeniyle, sevk edilebilir enerji santrali düşük rüzgar hızı sırasında hızlı bir üretim takviyesi sağlar, enerji depolama sistemi dalgalanmayı yumuşatır, iletim şebekesi üretim ve talebi dengeler ayrıca talep tarafı yönetimi kritik olmayan yükleri kontrol ederek sistem esnekliğini güçlendirir [48].

Bu nedenle, mevcut esnek çözümler göz önünde bulundurularak rüzgar enerjisinin ekonomisini ve teknikliğini elde etmek için planlama araçlarının güncellenmesi gerekmektedir.

Buna karşılık, araştırmacılar, rüzgar enerjisinin toplu entegrasyonu nedeniyle geleneksel güç sistemi planlama araçlarının zorluklarıyla başa çıkmak için çaba sarf etmektedirler. Örneğin, Rong et al. [49], ısı depolama sisteminde fazladan rüzgar enerjisi tüketerek hibrit sistemlerden en yüksek ekonomik faydayı elde etmek için koordineli bir dağıtım yöntemi geliştirdi. Rüzgar enerjisinin entegrasyonunu ve enerji depolama teknolojisinin rolünü göz önünde bulundurularak üretim genişletme planlama modelinde hata büyüklüğünü azaltmak için gelişmiş bir metodolojide sunulmuştur [50]. Üretim esnekliği, talep tarafı yönetimi, enerji depolama sisteminin rolü dahil olmak üzere daha fazla kısıtlama ve faydası göz önünde bulundurularak, kesintili RES'in toplu entegrasyonu altında güç sistemi planlama modellerinde daha fazla araştırmaya

geliştirmeye hala ihtiyaç duyulmaktadır.

### 3.11. İletim, İletişim ve Güvenlik Zorlukları

Yük merkezlerinden uzakta inşa edilen rüzgar enerjisi santralleri, iletim altyapısı veya iletim tıkanıklığı üzerindeki stres, düşük yük dönemlerinde aşırı arz, elektrik piyasası politikası, şebeke esnekliği ve arabağlantı sorunları dahil olmak üzere rüzgar enerjisi üretiminin azaltılmasının en çok bilinen nedenleridir [51]–[52]. Bununla birlikte, rüzgar enerjisinin kesintilerden kaçınarak enerji üretimine faydalı bir şekilde dahil edilmesi için iletim altyapısının güçlendirilmesine ilişkin daha fazla araştırma yapılması gerekmektedir. Müşterilere kesintisiz, güvenli enerji temini sağlamak için akıllı şebekelerle iletişim ve güvenlik unsurları çok önemlidir. Yük merkezlerinden uzakta bulunan rüzgar çiftlikleri, gerçek zamanlı olarak izlemeli ve mükemmel programlama için internet protokolü aracılığıyla kontrol merkezine iletilmelidir. Ancak mevcut rüzgar çiftliği izleme ve kontrol sistemleri dış saldırılara karşı savunmasız kalması, olası kötü niyetli saldırılar sebebi ile veri güvenliği konusunda endişelendirmiştir [53]-[54].

### 3.12. Elektrik Piyasası Zorlukları

Elektrik piyasaları, bir emtia olarak elektriğin anında alınıp satılması gerekmektedir. Bu nedenle, doğası gereği çok karmaşık olan bu kaynakların elektrik üretim belirsizlikleri, başta kısa vadeli piyasada olmak üzere elektrik piyasalarına katılımlarında engeller yaratmaktadır. Çünkü belirsizlikler geleneksel elektrik santrallerinin üretim ve talebi dengelemek için verimsiz çalışmasına yol açmaktadır. Rüzgar enerjisi üreticileri, tam üretim garantileri olmadığı için gün öncesi piyasasında ihaleye katılma konusunda biraz dirençlidir. Hatta beklenen çıktıdan daha düşük bir üretim sunabilirler, bu da tesisin maksimum güç noktasının altında çalışabileceğinden daha düşük gelirlere yol açabilir. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi üretiminin zirvesi, yük talebinin zirvesi aynı anda gerçekleşmeyebilir ve bu da yük merkezlerinde operasyonel zorluklara yol açabilir. Uygun piyasa çerçevesinin ve akıllı teşvik paketlerinin olmaması yenilenebilir enerji ticaretini engellemektedir [55]. Ortaya çıkan elektrik piyasası zorluklarını belirlemek, literatürde bildirilen birkaç ihale stratejisini tartışmak, bu tür zorluklarla başa çıkmada etkili bir şekilde yardımcı olabilir. Li ve Park [56], Amerika 'nın elektrik piyasasının bir rüzgar çiftliğinden toplanan bir dizi gerçek veri için gerekli piyasa bilgilerini içeren kısa vadeli elektrik piyasasında gelişmiş bir rüzgar enerjisi ihale stratejisi önerdi. Aquila ve arkadaşları [57], riske maruz değer tekniğini kullanarak Brezilya elektrik piyasasındaki ana belirsizlik parametrelerini ve risklerini belirlemek için



rüzgar enerjisi santrallerine yatırım yapmanın fizibilitesini analiz etti. Önerilen yaklaşım, bu tür projeler için daha yüksek ekonomik fizibilite olasılığını doğruladı. Ayrıca, yenilenebilir enerji nüfusunun artmasıyla birlikte değişken üretim kaynaklarının gelecekteki enerji sistemleri üzerindeki etkisini ölçmek için önerilen yeni bir yaklaşım, elektrik fiyatının düştüğünü gösterdi [58].

#### 4. Rüzgar Santrallerinin Şebeke Bağlantı Kriterleri

Rüzgâr santrallerinin ulusal enerji ağlarına entegrasyonu tüketici tarafında istenmeyen durumlara neden olabilir. Bu sebeple kamu kurumları da üretici ve tüketici arasında şebeke dengesinin korunması için gerekli sınırlamaların uyulmasını talep etmekle yükümlüdür [59]. Ülkemizde 2008 yılında yayınlanan yönetmeliğin EK-18'ine göre detaylı sınırlamalar belirlenmiştir. 2008 yılında yapılan bu güncelleme ile arıza sonrası sisteme katkı, aktif güç kontrolü, frekans tepkisi ve reaktif güç kapasitesi konularında önemli kısıtlamalara ve teknik detaylara yer verilmiştir [60], Elektrik Şebeke Yönetmeliği EK-18 içerisinde belirtilen sınırlamalar iletim sistemine bağlı rüzgâr enerji santralleri ile kurulu gücü 10 MW ve üzerinde olan dağıtım sistemine bağlı rüzgâr enerji santralleri için geçerlidir [61].

##### 4.1. Şebeke Kodları

Elektrik şebekesinin güvenli, emniyetli, güvenilir ve ekonomik işletim için teknik özellikleri, yaygın olarak şebeke kodu olarak bilinir. Herhangi bir şebeke kodu, güç sisteminin bütünlüğünü ve çalışmasını izlemekten sorumlu yetkililer tarafından tasarlanır. İçeriği, başta iletim şirketleri olmak üzere katılımcıların gereksinimlerine göre ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilmektedir. Tüm Rüzgar enerjisi üreticileri, şebeke frekansı ve gerilim değişimi gereklilikleri, arıza anından, reaktif güç ve güç faktörü düzenleme yeteneklerini içeren mevcut şebeke kodlarına bağlı kalmalıdır. Türkiye'de rüzgar santrallerinin karşılaması gereken teknik şartlar Enerji Piyasası Denetleme Kurulu tarafından 24.09.2008 tarihinde yayınlanmıştır. O zamana kadar rüzgar santralleri için tek kriter, şebekeye her noktadan bağlanabilecek kapasiteydi. Bu kriter, herhangi bir noktadan şebekeye bağlanacak rüzgar santrallerinin kurulu gücünün, ilgili erişim noktasının kısa devre MVA'sının %5'ine kadar sınırlandırılmasıydı. Yönetmeliğe göre rüzgar enerjisi santralinin üç ana özelliğini kapsar; Arızda kalabilme yeteneği, gerilim/reaktif güç yanıtı ve frekans/aktif güç yanıtı.

Genel olarak Türkiye Elektrik Şebeke Yönetmeliğinin

rüzgar santralleri ile ilgili eki olan Ek 18, teknik özellikler açısından oldukça katıdır. Birinci nesil rüzgar türbinlerini yani sabit hızlı rüzgar türbinlerini tamamen ortadan kaldırıyor. Ek 18'in gerekliliklerini sağlamak için, karmaşık güç elektroniği sistemleri ile herhangi bir senkron/asenkron makine kullanılabilir. Ancak Ek 18, bir iletim sistemine bağlı rüzgar santralleri ile ilgili tüm hususları kapsamamaktadır. Reaktif güç tepki hızları, yüksek gerilimde çalışma kapasitesi, güç faktörü aralığı ve rampa oranı, piyasadaki üreticiler tarafından sorulan sorulardan bazılarıdır. Ayrıca %5 sınırlaması rüzgar enerjisi piyasasında yatırımcılar için önemli bir engeldir. Rüzgarın olduğu yerlerin çoğunda iletim şebekesi yeterince güçlü değildir. Kısa devre güç limiti aynı kalsa bile teknik gereksinimler Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri (EİSİ) tarafından revize edilmelidir [61].

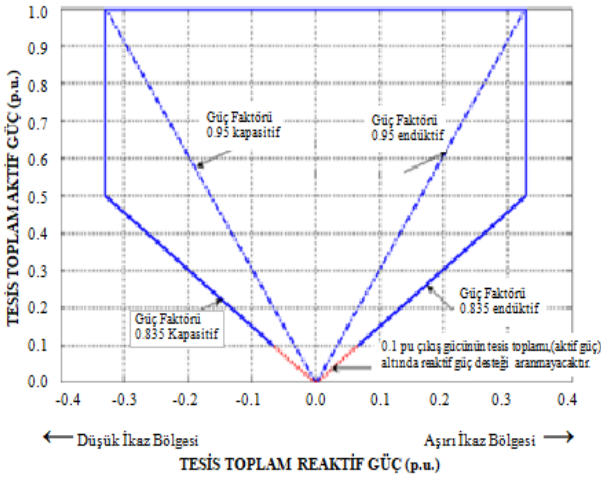
##### 4.2. Aktif Güç Kontrolü

Rüzgar türbinleri, aktif güç çıkışlarını düzenleyerek şebeke işletim kontrolüne dinamik olarak katılmak zorundadır. Şebeke kodlarındaki aktif güç düzenlemesi, maksimum aktif gücü sınırlayan, aktif güç çıkışını dengeleyen ve yukarı veya aşağı yönde rampa oranlarını tanımlayan aktif güç kontrol modlarını içermektedir [4]. Elektrik depolanmasının günümüzde hala zor olması sebebiyle, santraller tarafından üretilen güç ile şebeke tarafından tüketilen güç ve sistemdeki kayıplar arasındaki eşitliğin bozulmaması güç sistemi için dengenin devam ettirilmesi anlamına gelmektedir [62]. Türkiye'de, rüzgâra dayalı enerji üretim tesisleri aktif güç çıkışlarını, gerekli durumlarda Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) tarafından gönderilecek sinyallerle, üretim tesisinin mevcut şartlardaki kurulu gücünün %20 - %100'ü arasında otomatik olarak kontrol edilebilme yeteneğine sahip olmalıdır [61]. Bu şarta bağlı olarak da, kurulu gücü 100 MW ve altındaki üretim tesisleri, yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %5'ini geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %5'inden az olmamalıdır. Kurulu gücü 100 MW'ın üzerinde olan üretim tesislerinde ise yük alma hızı dakikada santral kurulu gücünün %4'ünü geçmemelidir, yük atma hızı ise dakikada santral kurulu gücünün %4'ünden az olmamalıdır [61].

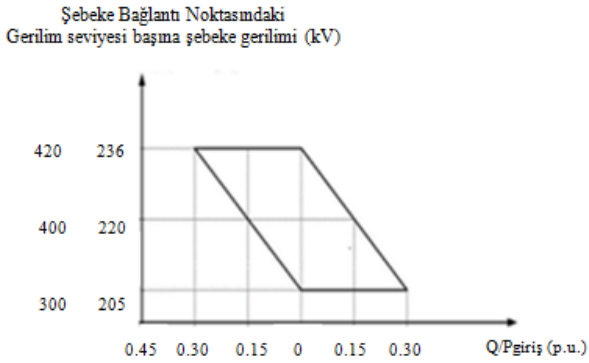
##### 4.3. Reaktif Güç ve Gerilim Kontrolü

Rüzgar türbinleri, şebeke bağlantı noktasındaki gerilim sapsmalarına ve EİSİ'ni tarafından gönderilen reaktif güç referanslarına cevaben reaktif güç çıkışlarını düzenlemek zorundadır. Reaktif güç gereksinimleri, bağlantı noktasının kısa devre gücü, X/R oranı ve rüzgar gücü penetrasyon seviyesini içeren şebeke bağlantı noktası özelliklerine

bağlıdır. Şebeke işletimi için, EİSİ'yi tarafından belirlenen reaktif güç referansları için üç farklı olasılık vardır; reaktif güç, güç faktörü ve gerilim referansları. Şebeke kodları, sırasıyla Şekil 7 ve Şekil 8'de gösterilen P/Q ve V/Q eğrileri gibi bu reaktif güç çalışma koşullarını belirtir. Ayrıca reaktif güç rampa hızı, reaktif güç kontrolü, ölçüm doğruluğu, reaktif güç değişimi için oturma ve yükselme süreleri şebeke kodlarında belirtilmiştir. Türkiye şebeke yönetmeliği gereğince de Şekil 7'de belirtildiği üzere 0,835 kapasitif 0,835 endüktif güç faktörü ile sınırlandırılmış alanda rüzgâr santralleri sistem bağlantı noktasında her noktada çalışabilir olması gerekmektedir [61].



Şekil 7. Rüzgâr Santrali Reaktif Güç Kapasite Eğrisi [61].



Şekil 8. V-Q Bağımlılığı [61].

#### 4.4. Frekans ve Gerilim Çalışma Aralıkları

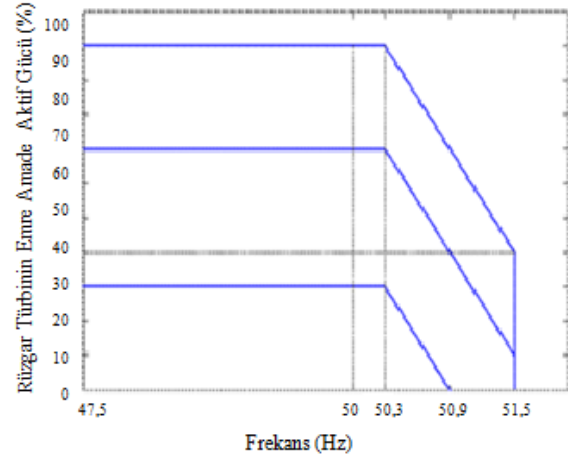
Rüzgâr türbinleri, şebeke bozulmalarından kaynaklanan kararsızlıkları önlemek için ortak bağlantı noktasının anma gerilimi ve frekans değerleri civarında bir aralıkta çalışma kabiliyetine sahip olmalıdır. Güç sisteminin frekansının kontrolü, direkt olarak üretim tesisinin aktif güç kontrolü ile ilişkilidir. Üretim ve tüketim arasındaki arz talep dengesinin bozulması frekans kararlılığını da bozacaktır [63]. Santraller tarafından sağlanan güç, tüketicinin

gereksiniminden fazla olması halinde frekansda artış olurken, tam tersi durumunda da frekansda azalma olacaktır. Şebeke yönetmeliğine göre rüzgâr santralleri Tablo 1'de belirtilen çalışma sürelerine karşılık gelen frekans aralıklarında çalışmalıdır.

Tablo 1. Frekans ve şebekeye bağlı kalma süreleri [61].

Frekans Aralığı	Minimum Çalışma Süresi
$50,5 \text{ Hz} \leq f < 51,5 \text{ Hz}$	1 saat
$49 \text{ Hz} \leq f < 50,5 \text{ Hz}$	Sürekli
$48,5 \text{ Hz} \leq f < 49 \text{ Hz}$	1 saat
$48 \text{ Hz} \leq f < 48,5 \text{ Hz}$	20 dakika
$47,5 \text{ Hz} \leq f < 48 \text{ Hz}$	10 dakika

Ayrıca yönetmeliğe göre şebeke frekansı 50,2 Hz'in üzerine çıkması halinde rüzgâr santrallerinin çıkış aktif gücü Şekil 9'da belirtilen eğrinin sınırları dâhilinde kalması zorunludur. Şebeke frekansının 47,5-50,3 Hz aralığında olduğu sürede rüzgâr santrali üretebileceği gücün tamamını üretmek zorundadır. Şekilde gösterildiği üzere frekans değeri 50,3 Hz'in üzerine çıktığında, aktif güç-frekans karakteristiklerini takip ederek %4 hız düşümü değerini sağlayacak şekilde yük atmalı ve 51,5 Hz'e ulaştığıdaysa tamamen şebekeden ayrılmalıdır [61].



Şekil 9. Güç-Frekans eğrisi [61].

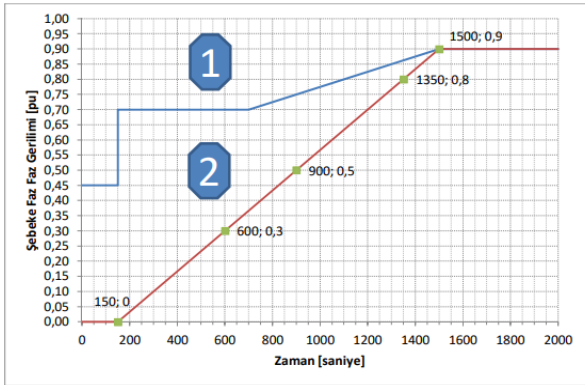
#### 4.5. Arıza Sonrası Sisteme Katkı (ASK) Yeteneği

Şebeke kesintileri sırasında, gerilim düşüşleri tipik olarak, kararsızlığa ve hatta elektrik kesintilerine yol açabilecek daha da kötü sistem koşulları yaratacak olan RES bağlantılarının kesilmesine yol açar. Bu sorunlardan kaçınmak için, şebeke kodları, gerilim düşüşü çok düşük seviyelere ulaşsa bile RES'lerin çalışmaya devam etmesini, reaktif akım enjekte ederek gerilim geri kazanımını desteklemesini ve arıza giderme sonrasında sınırlı rampa değerleri ile aktif gücü geri kazanmasını gerektirir. Tüm bu özellikler rüzgâr türbininin ASK yeteneği olarak şu şekilde tanımlanmaktadır [4];

- RES'lerin şebekeden ayrılmadan dayanabilmesi gereken simetrik ve asimetrik arızalar için minimum ve maksimum gerilim geçişi ve kurtarma eğimi açısından ASK,
- Arıza ve kurtarma sırasında aktif güç ve reaktif güç sınırlaması,
- Arıza ve kurtarma sırasında gerilim desteği için reaktif akım enjeksiyonu,
- Arıza giderme sonrasında sınırlı rampa ile aktif gücün geri yüklenmesi.

Genel olarak şebeke kodlarında, Şekil 10'da ASK'yi, şebeke bağlantı noktasında sınırlayıcı gerilim eğrisi olarak tanımlar. Taralı alanların açıklaması şu şekilde yapılabilir:

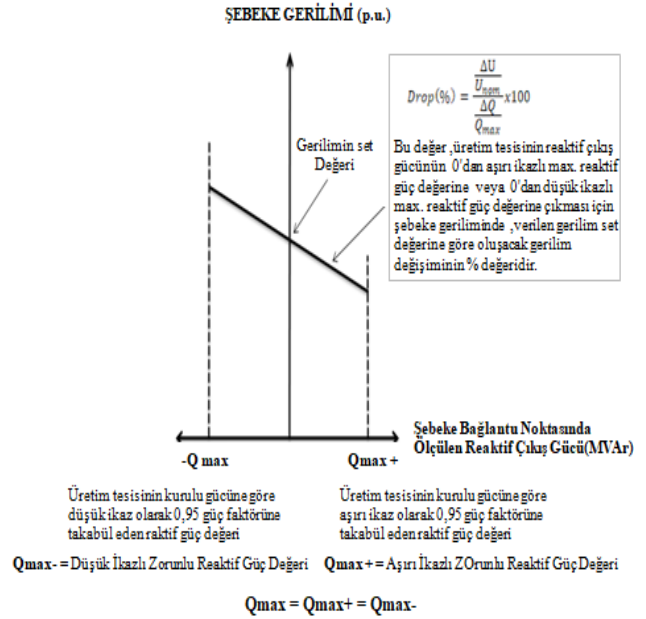
1. Bölge de bozulmalardan kaynaklanan 3 fazlı kısa devreler veya simetrik gerilim düşüşleri, kararsızlığa veya rüzgar türbinlerinin güç sisteminden ayrılmasına yol açmamalıdır.
2. Bölge de iki seçenek vardır. İlk seçenek, rüzgar türbinlerinin arıza sırasında şebekeye bağlı kalması gerektiğidir. Rüzgar türbinleri ihtiyacı karşılayamıyorsa, EİSİ ile anlaşarak sınır çizgisini değiştirmeye izin verilir. İkinci seçenekte, türbinler arızadan geçerken kararsız hale gelirse veya jeneratör koruması devreye girerse, EİSİ ile anlaşarak rüzgar türbinlerinin güç sisteminden kısa süreli olarak ayrılmasına izin verilir.
- Kırmızı çizgi altındaki bölgede iserüzgar türbinlerinin şebekeden kısa süreli kesintisi kabul edilir. Ayrıca rüzgar türbinlerinin koruma sistemleri ile devreden çıkarılmasına izin verilmektedir.



Şekil 10. PCC'de Gerilim Sınırlama Eğrileri [61].

Yönetmelikçe, rüzgâr santralleri için bağlantı noktası geriliminin 0,9 pu ve 1,1 pu değerleri arası normal işletim koşulu olarak tanımlanmıştır. TEİAŞ tarafından iletilen set değerlerine göre rüzgâr santralleri şebeke bağlantı noktasındaki gerilim değişimlerine Şekil 11'deki formülasyonda belirlenen oransal yanıtı vermelidir. Formülde "droop" gerilim düşümünü ifade ederken TEİAŞ tarafından belirlenmekte ve %2 - %7 arasında değişmektedir. Drop değeri üretim tesisinin reaktif çıkış gücünü 0'dan aşırı ikazlı maksimum reaktif güç değerine veya 0'dan düşük ikazlı maksimum reaktif çıkış gücüne

değerine çıkması için şebeke geriliminde verilen gerilim set değerine göre oluşacak % gerilim değişimidir [61].



Şekil 11. Şebeke Arızası Sırasında Gerilim Desteği Prensipleri [61].

#### 4.6. Enerji Depolama Sistemleri

Enerji Depolama Sisteminin (EDS), şebeke esnekliğini, ve güvenilirliğini artırmak için çok önemli teknolojilerden biridir. Bu teknoloji aynı zamanda, Yenilebilir Enerji Kaynaklarının şebekeye etkin bir şekilde entegre edilmesine, rekabetçi elektrik piyasasında tepe yük talebini ve elektrik fiyatını düşürmeye yardımcı olabilir. Son zamanlarda, Batarya enerji depolama sistemi (BEDS), maliyetlerinin azalması ve daha yüksek dönüşüm verimliliği nedeniyle yaygın olarak ilgi görmektedir [64]. Diğer EDS teknolojileri arasında, volan EDS elektromekanik depolama sistemi, süper kapasitör EDS elektrostatik depolama sistemi ve süper iletken manyetik EDS doğrudan enerji depolama sistemi sayılabilir. BEDS, düşük güç yoğunluğu nedeniyle dinamik tepkisi yavaş olduğu için elektrik şebekesinde güç kontrolü zorlukları yaratmaktadır. Buna karşılık, valon ve süper kapasitör, ömürlerini azaltan yüksek bir güç talebi sağlayabilir. Mevcut depolama teknolojilerinin hiçbiri fiziksel sınırlamaları nedeniyle hem enerji hem de güç yoğunluğunu aynı anda karşılayamamaktadır. Bu nedenle, hem yüksek enerji hem de güç uygulamaları için uygun olan mevcut BEDS'ni hibritleyerek enerji yönetiminde depolama sisteminin geçici ve kararlı durum performansını zenginleştirmek gerekmektedir. Rüzgâr türbinlerinde Enerji depolama sistemleri türbin çıkışı iyileştirebilir ve rampa oranını (MW/Min) kontrol edebilir bu da rüzgar kaynağını programlamada biraz güvenilir hale getirir. Optimal depolama sisteminin boyutu, rüzgar enerjisi tahmin

hatalarının dikkatli bir şekilde anlaşılmasını gerektiren, araştırmacıların ve sistem operatörlerinin karşılaştığı zorluktur [65]. Shi ve arkadaşları [66], optimum depolama boyutunu elde etmek ve kısa vadede öngörülemez rüzgar enerjisinin zamanlamasını iyileştirmek için bir hibrit güç depolama sistemi (pil ve süper kapasitör) önermiştir. Ayrıca, bu enerji depolama sistemleri, frekans regülasyonu, gerilim profili iyileştirmesi, güç kalitesi düzeltilmesi ve tepe yük talebini, yük kaydırma ve enerji yönetimi dahil olmak üzere talep yanıtı sağlama yeteneğine sahiptir [67].

Büyük ölçekli enerji depolama sistemleri altyapısının geliştirilmesi, ömürlerinin uzatılması, zorlu hava koşullarına dayanıklılıkları, maliyetlerinin düşürülmesi, enerji depolama şirketleri ve üreticileri için en kritik kaygılardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle araştırmacıların bu alana daha fazla dikkat etmesi, depolama kapasitesi ve depolama süresinin nasıl uzatılacağı konusunda çözümler bulması gerekmektedir.

#### 4.7. Modern İzleme ve Kontrol Stratejileri

Rüzgar türbini kontrol sistemlerinin amacı, rüzgar hızı dalgalanmaları nedeniyle türbinin izin verilen sınırlar içinde çalışmasını sağlamak ve ayrıca rüzgardan mümkün olan maksimum gücü elde etmektir. Ayrıca kontrol cihazları, gerilim veya frekansın bozulmasına neden olan bir arıza durumunda şebekeyi desteklemek için rüzgar türbinlerinin katılımını sağlar. Tablo 2’de, rüzgar türbinlerinde kullanılan kontrol türlerini ve teknikleri göstermektedir.

**Tablo 2.** Rüzgar türbinleri için izleme ve kontrol stratejileri.

Türleri (referans)	Teknikler
Tork Control [68]	Optimum Tork Kontrol
	Uç Hız Oranı Kontrol
	Tepe Tırmanma
	Kayar Mod Kontrol
	Güç Sinyali Geri Besleme
Yunuslama açısı Kontrol [69]	Toplu eğim Kontrol
	Bireysel eğim kontrol
Şebeke Entegrasyonu kontrol [70]-[71]	Frekans Regülasyonu
	Reaktif Güç Kontrol

#### 4.8. Yenilenebilir Enerji Politikaları

Rüzgar enerjisinin toplam elektrik enerjisi ürününe katkısı, gözden kaçırılmaması gereken bir gerçek haline gelmiştir. Birçok ülke, üretimlerinde %20’yi aşan rüzgar enerjisini paylaşmaktadır [72]. Bütün bunlar, birkaç ülkeyi bu endüstrinin büyümesine yardımcı olan ve aynı zamanda bu ülkelerin ekonomik, sosyal ve çevresel yönlerini destekleyen yasalar, politikalar çıkarmaya teşvik etti.

Aşağıdaki Tablo 3’de rüzgardan en çok enerji üreten beş ülkenin en belirgin politikalarına genel bir bakış sunmaktadır.

**Tablo 3.** Seçilmiş ülkelerde rüzgar enerji politikaları.

Ülkeler	Kurulum Kapasite [73]	Aktivasyon Yılı	Politika Durumu	Politika Türü
Çin	221 GW	2001-2018	Yürürlükte	Düzenleyici araçlar, Bilgi sağlama, Kesintisiz tarifeler/primler, Vergi indirimi, Doğrudan yatırım [74].
ABD	96,5 GW	1994-2010	Yürürlükte	Kodlar ve standartlar, Teknoloji gelişim, Hibeler ve sübvansiyonlar, Yükümlülük şemaları, Kamu gönüllü programları, Yenilebilir portföy standartları [75].
Almanya	59,3 GW	1989-2012	Yürürlükte	Kesintisiz tarifeler/primler, Hibeler ve sübvansiyonlar, Stratejik planlama [76].
Hindistan	35 GW	2000-2018	Yürürlükte	Hibeler ve sübvansiyonlar, Yeşil sertifikalar, Krediler, Stratejik planlama, Vergi indirimi [77].
İspanya	23 GW	2007-2016	Yürürlükte	Sanayi regülasyonu, Kesintisiz tarifeler/primler, Kodlar ve standartlar,

#### 5. Sonuçlar

Günümüzde artış gösteren rüzgar santrallerinin enterkonnekte sisteme bağlantı kriterleri ve sistem üzerindeki etkileri büyük önem kazanmıştır. Yapılan detaylı incelemeler sonucunda rüzgar enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda bazı zorluklarla karşılaşıldığı saptanmıştır. Yapılan bu çalışma ile rüzgar enerjisi santrallerinin elektrik şebekelerine entegrasyonunda karşılaşılan zorluklar, alınabilecek önlemler ve bulgular aşağıda sıralanmaktadır.

- Tartışılan zorluklar arasında, rüzgar enerjisi kesintisi, reaktif güç desteği, gerilim ve frekans kararlılığı, güç kalitesi sorunları, arızadan kur-tulma yeteneği, şebeke güvenilirliği ve da-yanıklılığı, koruma, siber güvenlik, esneklik, el-ektrik piyasası ve planlama zorluklarına odaklanılmıştır.

- Zorluklarla mücadele etmek için şebeke kodları, enerji depolama sistemleri ve rüzgar enerjisi politikası, modern izleme ve kontrol stratejileri dahil olmak üzere mevcut çözüm metodolojilerini gözden geçirilmiştir.

- Bu zorlukların birçoğuna olumlu yada olumsuz etki eden rüzgar türbin teknolojilerinin önemine değinilmiştir. Bu türbinlerin şebeke uyumluluk kriterleri karşılaştırmış ve mevcut rüzgâr türbin teknolojilerinin 5-10 yıl içerisinde şebeke yönetmeliklerinin etkisiyle pozitif anlamda gelişeceği görülmüştür.

- Gerekli özelliklere sahip enerji depolama sistem-leri, sevk edilebilirliği ve güvenilirliği de dahil olmak üzere rüzgar enerjisi sistemlerinin şebeke entegrasyonu ile ilgili birçok sorunu çözüle-bileceği görülmektedir. Büyük ölçekli enerji de-polama sistemleri altyapısının geliştirilmesi, ömürlerinin uzatılması, zorlu hava koşullarına dayanıklılıkları ve maliyetlerinin düşürülmesi, enerji depolama üreticileri için en kritik kaygılardan biri olarak kabul edilmektedir. Bu nedenle, araştırmacıların sektörel ve yönetsel olarak bu alana daha fazla dikkat etmesi, de-polama kapasitesi ve depolama süresinin nasıl uzatılacağı konusunda çözümler bulmaları ger-ekmektedir.

- Araştırmacılar, rüzgar enerjisi sistemlerinin şebekelere güvenilir bir şekilde entegrasyonunu sağlamak için rüzgar enerjisi üretim belirsizlikleri ile talep tarafı yönetimi arasındaki bağlantıyı da keşfetmelidirler. Gelecekte rüzgar türbinleri için izleme, kontrol stratejileri, tahmin modelleri geliştirirken tahmin doğruluğunu artırmak ve hesaplama yükünü azaltmak için yeni olasılıksal belirsizlik yöntemlerinin kullanılması yararlı olacaktır.

- Türkiye’de politika yapıcılarının gelecekteki ener-ji stratejilerini geliştirmede, ekonomik, sosyal ve çevresel yönlerini daha iyi sürdürülebilir poli-tikalar benimseyebilmeleri için şebeke ente-grasyonundaki zorlukları tüm yönleri ile bir ara-da görmeleri sağlanmıştır.

- Bu çalışmanın gelecekteki bir uzantısı olarak, benzer zorlukları ve bunların dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerini incelemekte literatüre katkı sağlayacaktır.

- Teknolojik ilerleme ve devam eden kapsamlı araştırmalar nedeniyle çok kısa bir süre içinde diğer birçok yenilikçi çözüm metodolojilerinin ortaya çıkması beklenmektedir. Bununla birlikte, rüzgar enerjisi kesintisi, esneklik ve güvenilirlik konuları dahil olmak üzere rüzgar enerjisinin elektrik şebekelerine entegrasyonu ile ilgili endişeler hala mevcuttur.

Elde edilen sonuçlar ile bu alanda akademik araştırma gerçekleştirecek araştırmacılara gelecekte rüzgar enerjisinin artış hızı ile bu zorluklar arasındaki ilişkiyi bir bütün halinde görmeleri, sektörel ve yönetsel bakış açısı kazandırılabilceği, aynı zamanda literatürdeki boşlukların tespitine yönelik katkı sunulabileceği düşünülmektedir.

### **Çıkar Çatışması Beyanı:**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması belirtilmemiştir.

### **Etik Standartlar Beyanı:**

Yazarlar bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

### **Kaynaklar**

- [1] Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. 2021. Türkiye Rüzgar Enerjisi Birliği (TÜREB).
- [2] Wu Y.H., Chang S.M. and Mandal P., 2019. Grid-connected wind power plants: a survey on the integration requirements in modern grid codes. IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), 55 (5).
- [3] Ahuja H., Bhuvanewari G., Balasubramanian R., 2011. Performance comparison of dfig and pmsg based wecs. IET Conference on Renewable Power Generation, New Delhi, India.
- [4] Shakır R.A., Fahad S.M.I, Fahad A.Al-Sulaman, Ibrahim M.E., 2020. Grid Integration Challenges of Wind Energy: A Review, King Fahd University of Petroleum & Minerals, Dhahran 31261, Saudi Arabia, January 8, 10857–10870.
- [5] Tsili, M., Patsiouras, S., Papathanassiou, S., 2008. “A review of grid code technical requirements for wind farms”, IET Renewable Power Generation, 2:271- 273, 31 July 2008, Denmark
- [6] Ak M. A., 2011. Rüzgâr santrallerinin şebekeye entegrasyonu ve şebeke üzerine etkileri. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Singh M. and Santoso S., 2011. Dynamic models for wind turbines and wind power plants. Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/SR-5500-52780, XEE-8-77567-01; TRN: US201124%%377, 2011
- [8] Wind Turbine Plant Capabilities Report, 2013. WindIntegration Studies, Austral. Energy Market Operator, Melbourne, VIC, Australia,
- [9] Khadem S.K., Basu M., Conlon M.F., 2010, Power Quality in Grid connected Renewable Energy Systems: Role of Custom Power Devices, Dublin Institute of Technology Kevin Street, Dublin 8, Ireland, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, March, III
- [10] Blaabjerg F., Teodorescu R., Liserre M, Timbus A. V., 2006. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems. IEEE Trns Indust Elect, 53 (5), 1398 – 1409.
- [11] Dehghan S.M., Mohamadian M., and Varjani A.Y., 2009. A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System Using Permanent Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter, IEEE Trns Energy Conv, 24 (3), 714 – 724.

- [12] Chowdhury S.P., CShowdhury A., Crossleyb P.A., 2009. Islanding protection of active distribution networks with renewable distributed generators: A comprehensive survey. *Electric Power Systems Research*, 79, 984–992.
- [13] Giebel G. and Kariniotakis G., 2017. Wind power forecasting a review of the state of the art. In *Renewable Energy Forecasting*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2017, 59–109, doi: 10.1016/b978-0-08-100504-0.00003-2.
- [14] Rona B, 2014. Rüzgâr santrallerinin güç sistemlerine entegrasyonu ve şebeke yönetmeliğine göre analizi. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Zhang Q. Li, Y., Lin T. Ji, X. and Cai Z., 2018. Volt/Var control for power grids with connections of large-scale wind farms: A review. *IEEE Access*, 6, 26675–26692, doi: 10.1109.
- [16] Xie, Z. Xu, L. Yang, J. Ostergaard, Y. Xue, and K. P. Wong, 2013. A comprehensive LVRT control strategy for DFIG wind turbines with enhanced reactive power support. *IEEE Trans. Power Syst.*, 28 (3), 3302–3310, Aug., doi: 10.1109
- [17] Zhou Y., Nguyen D. D., Kjaer P. C., and Saylor S., 2013. Connecting wind power plant with weak grid - Challenges and solutions. in *Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting*, Jul. doi: 10.1109.
- [18] Liu J., Yao W., Wen J., Fang J., Jiang L., He H., and Cheng S., 2020. Impact of power grid strength and PLL parameters on stability of gridconnected DFIG wind farm, *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 11 (1), 545–557, Jan. 2020, doi: 10.1109
- [19] Kroposki B., 2017. Integrating high levels of variable renewable energy into electric power systems, *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 5 (6), 831–837, Nov. doi: 10.1007.
- [20] Morren J., De Haan S., Kling W., and Ferreira J., 2006. Wind turbines emulating inertia and supporting primary frequency control, *IEEE Trans. Power Syst.*, 21 (1), 433–434, Feb. doi: 10.1109.
- [21] Y. Wang, J. Meng, X. Zhang, and L. Xu, 2015. Control of PMSG-based wind turbines for system inertial response and power oscillation damping. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, 6 (2), 565–574, Apr., doi: 10.1109/tste.2015.2394363.
- [22] Schwanz D., Bollen M., and Larsson A., 2018. Some methods for harmonic emission determination in wind power plants. In *Proc. IEEE 18th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, May, doi: 10.1109.
- [23] Reis A., Moura L. P., and Oliveira J. C., 2016. Mitigation of harmonic current produced by wind turbine throughout converter switching controll. In *Proc. 17th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (ICHQP)*, Oct. 2016, doi: 10.1109/ichqp.2016.7783477.
- [24] U. Vargas and A. Ramirez, 2016. Extended harmonic domain model of a wind turbine generator for harmonic transient analysis. *IEEE Trans. Power Del.*, 31, (3), 1360–1368, Jun., doi: 10.1109.
- [25] Kundur P., 2007. *Power system stability*. in *Power System Stability and Control*. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1–10. [Online]. Available: <https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1004391169>, doi: 10.1201/9781420009248.
- [26] Gautam D., Vittal V., and Harbour T., 2009. Impact of increased penetration of DFIG-based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Trans. Power Syst.*, 24 (3), 1426–1434, Aug., doi: 10.1109.
- [27] Sun Y., Zhang Z., Li G., and Lin J., 2010. Review on Frequency Control of Power Systems with Wind Power Penetration. In *Power System Technology*, 1–8.
- [28] Le H. T., Santoso S., and Nguyen T. Q., 2012. Augmenting Wind Power Penetration and Grid Voltage Stability Limits Using ESS: Application Design, Sizing, and a Case Study. *IEEE Trans. Power Syst.*, 27 (1), 161–171.
- [29] Various Authors, 2015. *Commercialisation of Energy Storage in Europe*.
- [30] NERC. Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF). 2019. Accessed: Oct. 9, [Online]. Available: [https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-\(ERSTF\).aspx](https://www.nerc.com/comm/Other/Pages/Essential-Reliability-Services-Task-Force-(ERSTF).aspx).
- [31] DEIF. LVRT—Low Voltage Ride Through: Wind Power. Accessed: Oct. 9, 2019. [Online]. Available: <https://www.deif.com/wind-power/technology/lvrt—low-voltage-ride-through>.
- [32] Milligan M., 2018. Sources of grid reliability services. *Electr. J.*, 31 (9), 1–7, Nov, doi: 10.1016/j.tej.2018.10.002.
- [33] Malekian K., Shirvani A., Schmidt U., and Schufft W., 2009. Detailed modeling of wind power plants incorporating variable-speed Synchronous Generator. In *Proc. IEEE Elect. Power Energy Conf. (EPEC)*, Oct., doi: 10.1109/epec.2009.5420926.
- [34] Muljadi E., Zhang Y. C., Gevorgian V., and Kosterev D., 2016. Understanding dynamic model validation of a wind turbine generator and a wind power plant. In

- Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep., doi: 10.1109.
- [35] Camm et al. E. H., 2009. Characteristics of wind turbine generators for wind power plants. In Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul. 2009, doi: 10.1109/pes.2009.5275330.
- [36] Telukunta V. Pradhan J., Agrawal A., Singh M. and Srivani S. G., 2017. Protection challenges under bulk penetration of renewable energy resources in power systems: A review. CSEE J. Power Energy Syst., 3 (4), 365–379, Dec., doi: 10.17775.
- [37] Piesciorovsky E.C., and Schulz N. N., 2017. Comparison of programmable logic and setting group methods for adaptive overcurrent protection in microgrids. Electr. Power Syst. Res., 151, 273–282, Oct., doi: 10.1016/j.epsr.2017.05.035.
- [38] Zhang L., Tai N., Huang W., and Wang Y., 2019. Fault distance estimation based protection scheme for DC microgrids. J. Eng., 2019 (16), 1199–1203, Mar., doi: 10.1049.
- [39] Abdali A., Noroozian R, and Mazlumi K., 2019. Simultaneous control and protection schemes for DC multi microgrids systems. Int. J. Elect. Power Energy Syst., 104, 230–245, Jan., doi: 10.1016.
- [40] Zamani M. A., Sidhu T. S., and Yazdani A., 2011. A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids. IEEE Trans. Power Del., 26 (3), 1873–1883, Jul., doi: 10.1109.
- [41] Mohanty R. and Pradhan A. K., 2019. DC ring bus microgrid protection using the oscillation frequency and transient power. IEEE Syst. J., 13 (1), 875–884, Mar., doi: 10.1109.
- [42] Singh M. and Agrawal A., 2019. Voltage–current–time inverse-based protection coordination of photovoltaic power systems. IET Gener. Transmiss. Distrib. 13 (6), 794–804, Mar, doi: 10.1049/ietgtd.2018.6143..
- [43] Eltigani D. and Masri S., 2015. Challenges of integrating renewable energy sources to smart grids: A review. Renew. Sustain. Energy Rev., 52, 770–780, Dec., doi: 10.1016/j.rser.2015.07.140.
- [44] Mahela O.P., Gupta N., Khosravy M, and Patel N., 2019. Comprehensive overview of low voltage ride through methods of grid integrated wind generator. IEEE Access, 7, 99299–99326, doi: 10.1109/access.2019.2930413.
- [45] Glover J. D., Sarma M. S., and Overbye T., 2012. Power System Analysis & Design, SI Version. Boston, MA, USA: Cengage Learning.
- [46] Deng X. and Lv T., 2020. Power system planning with increasing variable renewable energy: A review of optimization models. J. Cleaner Prod., 246, Feb., Art. no. 118962, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118962.
- [47] Ringkjøb H. K., Haugan P. M., and Solbrekke I. M, 2018. A review of modelling tools for energy and electricity systems with large shares of variable renewable. Renew. Sustain. Energy Rev., 96, 440–459, Nov, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.002.
- [48] Zhou S., Wang Y., Zhou Y., Clarke L. E., and Edmonds J. A., 2018. Roles of wind and solar energy in China’s power sector: Implications of intermittency constraints. Appl. Energy, 213, 22–30, Mar., doi: 10.1016.
- [49] Rong S., Chen X., Guan W., and Xu M., 2019. Coordinated dispatching strategy of multiple energy sources for wind power consumption. J. Mod. Power Syst. Clean Energy, 7 (6), 1461–1471, Nov., doi: 10.1007/s40565-019-0540-7.
- [50] Scott I. J., Carvalho P. M., Botterud A., and Silva C. A., 2019. Clustering representative days for power systems generation expansion planning: Capturing the effects of variable renewables and energy storage Appl. Energy, 253, Nov., Art. no. 113603, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113603.
- [51] Vargas L. S., Bustos-Turu G., and Larrain F., 2015. Wind power curtailment and energy storage in transmission congestion management considering power plants ramp rates. In Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul., doi: 10.1109/pesgm.2015.7285712.
- [52] Bird L., Cochran J., and Wang X., 2014. Wind and solar energy curtailment: Experience and practices in the United States. Nat. Renew. Energy Lab., Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/TP-6A20-60983, Mar., doi: 10.2172/1126842.
- [53] Nourian A. and Madnick S., 2018. A systems theoretic approach to the security threats in cyber physical systems applied to stuxnet. IEEE Trans. Dependable Secure Comput., 15 (1), 2–13, Jan., doi: 10.1109/tdsc.2015.2509994.
- [54] Lai J., Duan B., Su Y., Li L, and Yin Q., 2017. An active security defense strategy for wind farm based on automated decision. in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, Jul., doi: 10.1109.
- [55] Abhinav R. and Pindoriya N. M., 2018. Opportunities and key challenges for wind energy trading with high penetration in Indian power market. Energy for Sustain. Develop. 47, 53–61, Dec., doi: 10.1016/j.esd.2018.08.007.

- [56] Li S., and Park C. S., 2018. Wind power bidding strategy in the short-term electricity market. *Energy Econ.*, 75, 336–344, Sep., doi: 10.1016/j.eneco.2018.08.029.
- [57] Aquila G., Rotela Junior P., De Oliveira Pamplona E., and De Queiroz A. R., 2017. Wind power feasibility analysis under uncertainty in the Brazilian electricity market. *Energy Econ.*, 65, 127–136, Jun., doi: 10.1016/j.eneco.2017.04.027.
- [58] Sorknæs P., Djørup S. R., Lund H., and Thellufsen J. Z., 2019. Quantifying the influence of wind power and photovoltaic on future electricity market prices. *Energy Convers. Manage.* 180, 312–324, Jan., doi: 10.1016/j.enconman.2018.11.007.
- [59] S. Heieder, 2001, “Grid integration of wind energy converters and wind field applications,” 1.Rüzgâr Sempozyumu, İzmir.
- [60] Koç E., ve Güven A. N., 2010. Modeling and investigation of fault ride through capability of variable speed wind turbines. In *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering*, IEEE, 22-26.
- [61] Elektrik şebeke yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına dair yönetmelik, T.C. Resmi Gazete 2013. Sayı: 28517, Ocak.
- [62] Tang X., Yin M., Shen C., Xu Y., Dong Z. Y., ve Zou X., 2018. Active power control of wind turbine generators via coordinated rotor speed and pitch angle regulation. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 10 (2), 822-832.
- [63] Tur M. R., 2019. Grid Code Requirements of Wind Power, Integration Problems and Solutions. In VII. Umteb International Congress on Vocational & technical sciences, 42.
- [64] Larcher D. and Tarascon J. M., 2015. Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nature Chem*, 7 (1), 19–29, Jan., doi: 10.1038/nchem.2085.
- [65] Wu J., Zhang B., Li H., Li Z., Chen Y., and Miao X., 2014. Statistical distribution for wind power forecast error and its application to determine optimal size of energy storage system. *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, 55, 100–107, Feb., Mdoi: 10.1016.
- [66] Shi J., Wang L., Lee W. J., Cheng X., and Zong X., 2019. Hybrid Energy Storage System optimization enabling very short-term wind power generation scheduling based on output feature extraction. *Appl. Energy*, 256, Art. no. 113915, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113915.
- [67] Xie L., Carvalho P. M. S., Ferreira L. A. F. M., Liu J., Krogh B. H., Popli N., and Ilić M. D., 2011. Wind integration in power systems: Operational challenges and possible solutions. *Proc. IEEE*, 99 (1), 214–232, doi:10.1109/jproc.2010.2070051.
- [68] Abdullah M., Yatim A., Tan C., and Saidur R., 2012. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 16 (5) 3220–3227, Jun., doi: 10.1016/j.rser.2012.02.016.
- [69] Lasheen A. and Elshafei A. L., 2016. Wind-turbine collective-pitch control via a fuzzy predictive algorithm. *Renew. Energy*, 87, 298–306, Mar, doi: 10.1016/j.renene.2015.10.030.
- [70] Attya A., Dominguez-Garcia J., and Anaya-Lara O., 2018. A review on frequency support provision by wind power plants: Current and future challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 81, 2071–2087, Jan., doi: 10.1016/j.rser.2017.06.016.
- [71] Weng Y. T., and Hsu Y. Y., 2016. Reactive power control strategy for a wind farm with DFIG. *Renew. Energy*, 94, 383–390, Aug., doi: 10.1016/j.renene.2016.03.072.
- [72] Komusanac I., Fraile D., and Brindley G., 2019. *Wind Energy in Europe in 2018 Trends and Statistics*. Brussels, Belgium: WindEurope, Feb.
- [73] *World’s Top 10 Countries in Wind Energy Capacity—ET Energy World*, 2019.
- [74] Beijing, China. 2018. *Interim Administrative Measures for the Development and Construction of Decentralized Wind Power Projects*. [Online]. Available: [http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201804/t20180416\\_3150.htm](http://zfxgk.nea.gov.cn/auto87/201804/t20180416_3150.htm).
- [75] S. Singer, 2017. *Tribal energy program for California Indian Tribes*. Lawrence Livermore Nat. Lab., Livermore, CA, USA, Tech. Rep. LLNL-TR-723042, Feb., doi: 10.2172/1343849.
- [76] *The Iea/Irena Renewable Policies and Measures Database*, 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/policiesandmeasures/renewable-energy>.
- [77] Wind Energy Division, 2018. *National wind-solar hybrid policy*,” *Ministry New Renew. Energy*, 238–278 (238), 1–8.
- [78] Ministry of Industry of Tourism and Commerce, 2013. *Feed-in tariffs for electricity from renewable energy sources*, 1–66.