

GÜNEŞ ENERJİ SANTRALLERİ VE ELEKTRİK ŞEBEKE YÖNETMELİKLERİ

Faruk Ugranlı¹, Duygu Tavşancı², Eşref Deniz², Mehmet Çelen², Engin Karatepe³

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bakırçay Üniversitesi, İzmir

²Entegro Enerji Sistemleri, İzmir

³Güneş Enerjisi Enstitüsü, Ege Üniversitesi, İzmir

ÖZET

Çıkış gücü olasılıksal değişen ve evirici tabanlı güneş enerji santrallerinden elektrik üretiminin payının her geçen gün artması şebekenin işletilmesinde yeni zorlukları beraberinde getirmektedir. Bunun bir sonucu olarak güneş enerji santrallerinden sadece aktif güç üretme beklentisi şebeke kararlılığını ve güvenilirliğini destekleyici fonksiyonları da yerine getirme beklentisine dönüşmektedir. Bu dönüşüm şebeke operatörü ve diğer paydaşların ortak çabalarıyla şebeke yönetmeliklerinin yeni ve farklı bir yöne doğru evrilmesini tetiklemiştir. Dolayısıyla gelişen teknoloji ve artan kapasiteler şebeke yönetmeliklerinin de revizyonlarını teşvik ederek güvenilir bir şekilde yeni kapasite artışlarının da önünü açabilecektir. Bu bildirinin ilk aşamasında güneş enerji santrallerinin şebeke yönetmeliklerine uyumlu çalışmaları için geliştirilen farklı yaklaşımlar irdelenerek sunulmuştur. İkinci bölümde, güneş enerji santrallerine yapılan yatırımlar şebeke yönetmelikleri ile ilişkilendirilerek analiz edilmiştir. Üçüncü bölümde, farklı ülkelerin şebeke yönetmeliklerinde yer alan bağlantı koşulları arasındaki benzerlik ve farklılıklar tartışılmıştır. Doğası gereği sürekli bir gelişim halinde olan teknolojilerin ve yönetmeliklerin, santrallerin dinamik analiz ve modellerinin geliştirilmesi eşliğinde, daha iyi irdelenmesi ve anlaşılması önümüzdeki dönemde yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygınlaşmasında önemli bir rol oynayacağı görülmektedir.

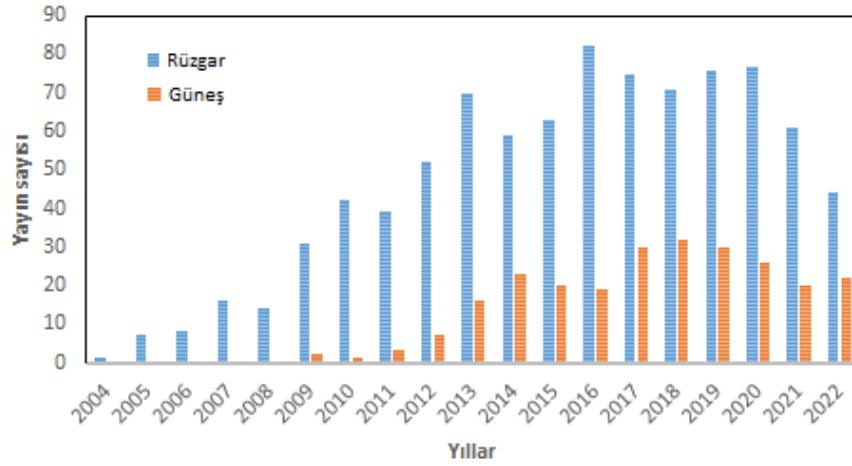
Anahtar kelimeler: Fotovoltaik sistemler, güneş enerjisi santralleri, şebeke yönetmelikleri

1. GİRİŞ

Güneş enerjisinden elektrik üretiminin toplam üretimdeki payının hızla artmasının bir sonucu olarak güneş enerji santrallerinden sadece aktif güç üretme beklentisi şebekeden kaynaklı farklı çalışma koşulları altında da çalışabilmesi için tanımlanmış şebeke kararlılığını ve güvenilirliğini destekleyici fonksiyonları da yerine getirmesine yönelik sistemlerin geliştirilmesine dönüşmektedir [1, 2]. Bu bağlamda güneş enerji santrallerinin frekans-aktif güç ve gerilim-reaktif güç kabiliyetlerinin şebeke yönetmeliklerinde belirtilen koşulları sağlayacak şekilde geliştirilmesi ve ayrıca şebeke kodlarının modernizasyonuna yönelik çalışmalar

güncel bir araştırma konusu olarak karşımıza çıkmaktadır [3].

Bir elektrik şebekesindeki santrallerin, birbirinden çok da bağımsız düşünülmemesi gereken elektrik enerjisinin temini ve yan hizmetleri olmak üzere iki önemli fonksiyonu söz konusudur. Çıkış gücü stokastik bir davranış gösteren güneş ve rüzgâr santrallerinin enerji üretimi ülkelerin ulusal üretimlerinin küçük bir kısmını oluşturduğu şebekelerde, teşvik ve ödüllendirme mekanizmaları ile enerji arzı ön planda tutulmaktadır [4-6]. Diğer yandan bu santrallerin bazı yan hizmetleri sağlama yeteneklerinin şebeke operatörleri tarafından zorunlu hale getirilmesi



Şekil 1. Web of Science ortamında şebeke arıza koşulları – rüzgâr ve güneş enerjisi konulu yayınlar.

donanım ve yazılım açısından ek maliyetlerin artmasına sebep olmakta diğer bir ifade ile bu hizmetlerin gerektiğinde sağlanması için ek ödeme mekanizmalarının düzenlenmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Bu nedenlerle katılım oranları her geçen gün artan fotovoltaik güç sistemlerinin güvenilir bir şekilde şebekeye entegrasyonunun devamlılığı hem teknik altyapının hem de ilgili mevzuatların geliştirilmesine çok bağlıdır [7].

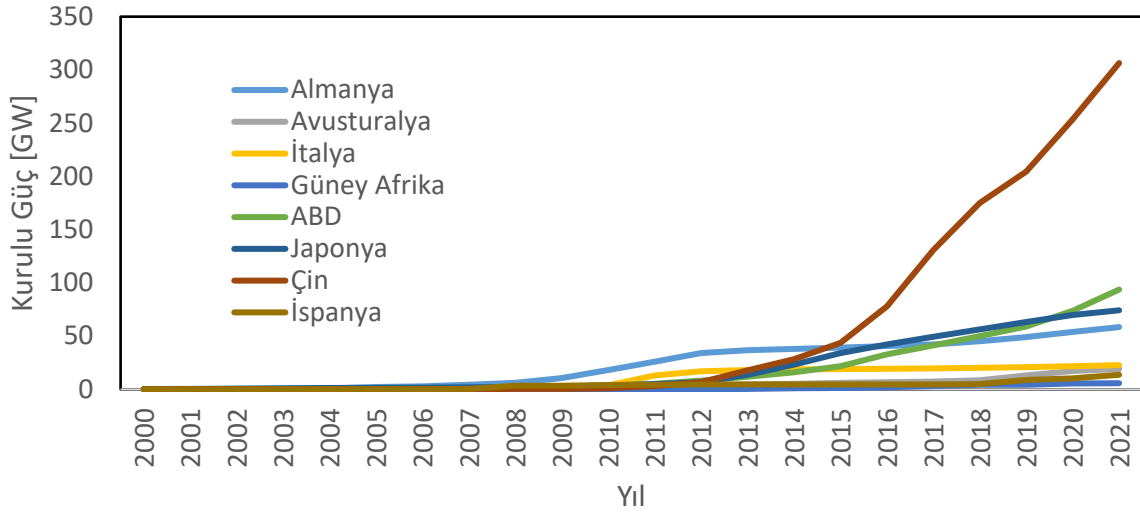
Elektrik şebekelerinde hava koşulları, ekipmanlardaki eskimeler veya üçüncü taraflar nedeniyle arızalar meydana gelebilmekte ve bu arızalar şebekede önemli gerilim veya frekans değişimlerine neden olabilmektedir. Şebekeye bağlı güneş enerji santrallerinde eviricilerin kontrol sistemleri referans olarak şebekenin frekans ve gerilimini izlediğinden belirli sınırlar dışındaki çalışma koşullarında santral üretimi durdurabilir. Diğer yandan, bugün gelinen noktada güneş enerjisinden elektrik üretiminin katılım oranlarının artması konvansiyonel jeneratörlerden beklendiği gibi arızalar sırasında yönetmeliklerde

konulan bağlantı koşulları çerçevesinde bu santrallerin de çalışmaya devam edebilmesi beklenmektedir. Bu kapsamda yapılan çalışmaları kontrol stratejileri, evirici topolojileri ve enerji depolama destekli hibrit sistemler olmak üzere üç ana başlıkta toplayabiliriz [8, 9]. Bilimsel literatürde elektrik şebekesindeki arızalar sırasında yönetmeliklerde beklenen koşulları karşılamak için güneş ve rüzgâr enerjisi santrallerinin geliştirilmesi üzerine yapılan çalışmaların yıllara göre değişimi Şekil 1’de sunulmuştur. Burada arama yapılırken grid code, grid compliance, low voltage ride through, fault ride through, LVRT, FRT anahtar kelimeleri kullanılmıştır. Güneş enerjisi santralleri özelinde yapılan çalışmaların rüzgâr enerjisi ile kıyaslandığında araştırma ve geliştirme açısından oldukça yeni bir konu olduğu görülmektedir.

Yapılan çalışmalarda fotovoltaik güç sistemlerinin şebeke arızaları ve ani yük değişimleri durumlarında bağlantı kesintisi olmadan şebeke stabilitesini desteklemesine yönelik modellerin geliştirildiği ve deneysel çalışmaların gerçekleştirildiği görülmektedir. Referans

[10]'da normal şebeke koşullarında maksimum güç noktası takibi, şebeke arızası ile oluşan düşük gerilimlerde ve ani talep kaybı durumlarındaki yüksek gerilimlerde şebekede bağlı kalabilme modları olmak üzere üç modun dikkate alındığı bir kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Referans [11]'de simetrik bir arıza altında düşük gerilimde şebekede kalabilme koşulunu sağlayabilen bir fotovoltaik güç sisteminde kısa devre akımının karakteristiği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Dinamik simülasyon modelleri devreye alınacak bir enerji santralının şebeke yönetmeliğine uygunluğu için kullanılır. Bu bağlamda, referans [12]'de yeni bir güneş enerjisi elektrik santralının belirlenen teknik gereklilikler kapsamındaki tepkilerini değerlendirebilmek için daha hızlı sonuç veren basitleştirilmiş bir dinamik model önerilmiştir. Diğer yandan güneş enerjisi santralının elektrik üretiminde, ışınım değişimi önemli bir rol oynamaktadır. Referans [13]'de farklı ışınım koşullarında çalışan ve farklı kısa devre ve X/R oranlarına sahip şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin arıza sırasında beklenen performansı sağlayabilmesi için santraldeki bireysel PV birimleri arasındaki dinamik davranış farklılıklarını gözetken bir model sunulmuştur. Bir diğer çalışmada [14], operasyonel kısıtlar ile birlikte rüzgâr hızı, güneş ışınımı ve sıcaklık gibi çevresel faktörlerin dikkate alındığı düşük gerilim koşullarında şebekeye destek olabilmeye yönelik koordineli bir kontrol stratejisi rüzgâr ve güneş enerjisinden oluşan hibrit bir sistem için sunulmuştur. Bir diğer önemli konu ise sistem koruması ile düşük gerilim durumlarında şebekede bağlı kalma gereksinimleri arasındaki koordinasyondur. Bu noktada referans [15]'te, nötr nokta direnci seçimine ilişkin

analizler yapılarak koruma ve düşük gerilim koşullarında bağlı kalma gereklilikleri arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanan gereksiz bağlantı kopmalarının önlenebileceği gösterilmiştir. Şebekede oluşan bir arıza sonucu şebeke akımı artarken, santralin bağlantı noktasındaki gerilimde düşme ve evirici tarafındaki dc bara geriliminde yükselme gözlenir. Referans [16]'da bu değişimler dikkate alınarak düşük gerilim koşulundaki şebeke gereksiniminin sağlanmasındaki performansı artırmak için bulanık mantık tabanlı aktif ve reaktif güç kontrol yöntemi önerilmiştir. Kontrol tabanlı bir diğer çalışmada [17], Kalman filtresi kullanılarak dağıtım şebekesinde dengeli ve dengesiz düşük gerilim arızaları altında santralin şebekede bağlı kalabilme yeteneği sağlanırken güç faktörünün iyileştirilmesi ve harmoniklerin azaltılması da dikkate alınmıştır. Arıza koşullarında daha iyi performans elde etmek için yapılan bir diğer çalışmada [18], anlık güç teorisi kullanılarak maliyete etkisi olan filtre boyutunun azaltılması ve hızlı tepki elde edilebilmesi için oransal integral ile bulanık mantık yönteminin birleştirildiği bir kontrol stratejisi önerilmiştir. Fotovoltaik sistemin ışınım kaynaklı çıkış gücündeki kesikli karakteristiği de şebeke yönetmeliklerinde belirtilen gereksinimlerin sağlanmasında önemli bir problem olarak karşımıza çıkan bir diğer husustur. Bu bağlamda, ışınım kaynaklı belirsizlikleri azaltmak ve şebekenin güç talebini karşılamak için yakıt hücreleri ile birlikte düşünülen hibrit bir santralin enerji yönetim sistemi referans [19]'da sunulmuştur. Şebekeye bağlı fotovoltaik sistemlerin güç yönetimi ve kontrol stratejisinde süper kapasitör gibi enerji depolama sistemlerinin de dâhil



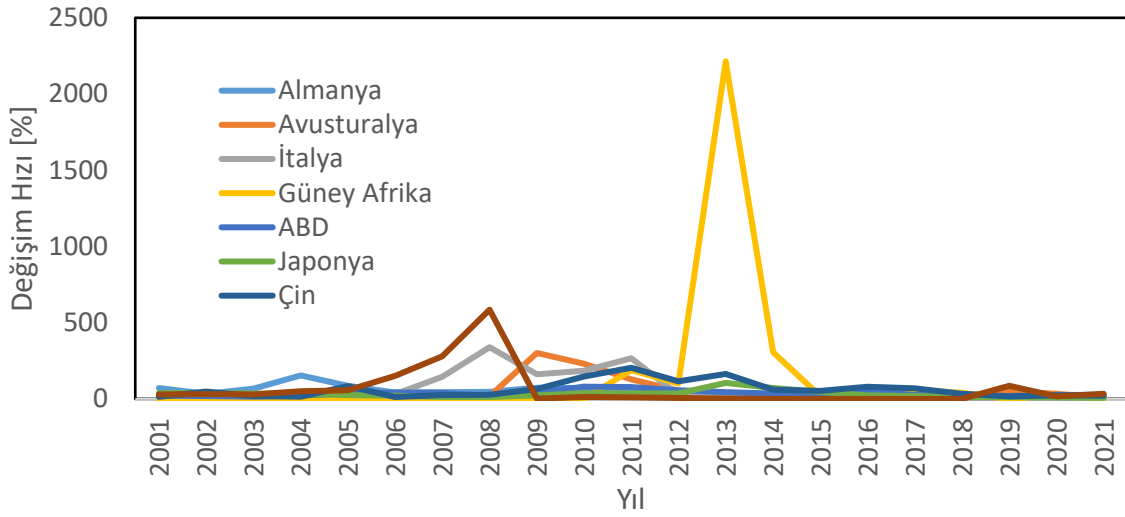
Şekil 2. Yıllara göre güneş enerji santrallerinin kurulu güçleri.

edildiği çalışmalar yapılmaktadır [20, 21]. Referans [22]'de küçük boyutlu bir batarya birimi, fotovoltaik sistemin şebeke yan hizmetlerinde destek amaçlı kullanılmış ve düşük gerilim koşullarında şebekeye destek olmak için sonlu durum makine kontrol yöntemi ile bir enerji yönetim algoritması geliştirilmiştir. Tüm bu çalışmalar güneş enerjisi santrallerinin şebeke yönetmeliklerinde belirtilen koşullara uyumlu hale getirilmesinin geliştirilmeye açık bir konu olduğunu göstermektedir.

Bu bildirinin ikinci bölümünde güneş enerjisinin gelişimi şebeke yönetmelikleri açısından getirdiği zorluklar eşliğinde irdelenmiştir. Üçüncü bölümde şebeke yönetmeliklerinde belirtilen gereklilikler tartışılmıştır. Sonuç bölümünde ise yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişimi sonucu gelinen noktanın genel bir değerlendirilmesi yapılmıştır.

2. ŞEBEKE YÖNETMELİĞİ AÇISINDAN GÜNEŞ ENERJİSİ YATIRIMLARI

Rüzgâr enerjisinin öncülüğünde yenilenebilir enerji kaynaklarına yapılan yatırımların hız kazandığı 90'lı yıllarla birlikte şebeke yönetmeliğinin yenilenebilir enerji kaynaklarına uygulanması da büyük önem kazanmıştır. Bu sebeple, şebeke yönetmeliği bulunan ülkelerde yenilenebilir enerjiye yapılan yatırımların yıllar bazında incelenmesi şebeke yönetmeliklerinin önemini belirten bir göstergedir. Şekil 2'de güneş enerji santrallerinin kurulu kapasitelerinin yıllar bazında değişimi çeşitli ülkeler için sunulmuştur [23]. Özellikle 2008 yılından sonra kapasitelerde büyük artışlar gözlemlenirken 2008 öncesindeki durumu daha iyi irdelenebilmek adına kurulu güçlerin yıllara göre değişim hızları Şekil 3'te verilmiştir. Bu amaçla ardışık iki yılın kurulu güçleri arasındaki fark alınarak önceki yılın değerine bölünmüş ve değerler yüzde olarak gösterilmiştir. Her ne kadar kurulu güç kapasiteleri 2008'den önce düşük olsa da bu dönemdeki kapasite artışlarının kayda değer olduğu

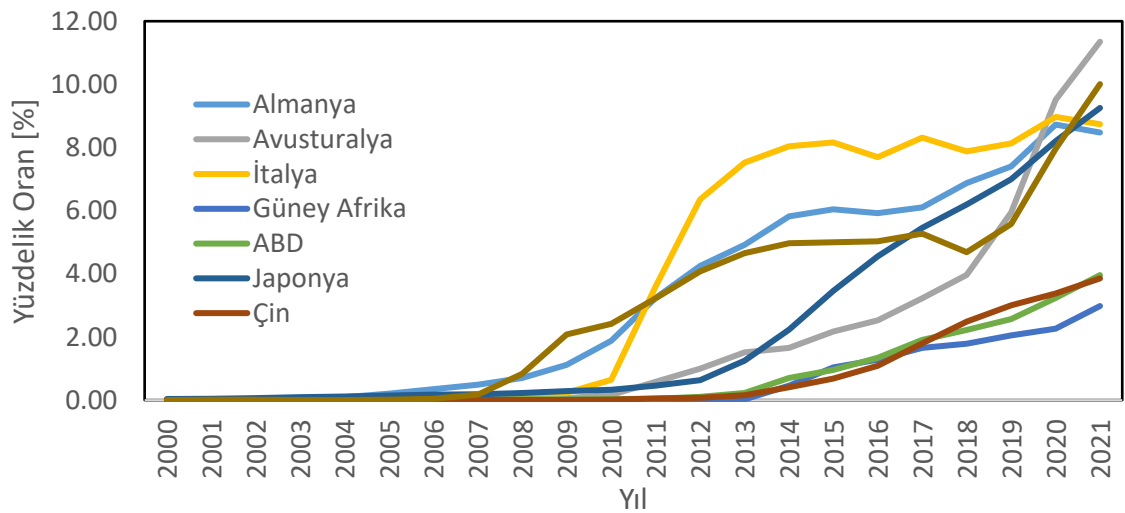


Şekil 3. Güneş enerji santrallerinin kurulu güçlerinin değişim hızı.

gözükmektedir. Bu durum, şebeke yönetmeliklerinin yenilenebilir enerji kaynaklarına yeni yeni uygulandığı bir dönemde, şebekelerin arıza sırasındaki davranışı açısından büyük bir gelişme olarak görülebilir. Bu bağlamda 2003 yılında Almanya’da yürürlüğe alınan şebeke yönetmeliği ile rüzgâr türbinlerinin arıza sırasında daha düşük gerilimlerde devrede kalabilmesi öngörülmüştür [24]. Şebeke yönetmeliğinde yapılan değişiklikler zaman içinde güneş enerji santrallerini de kapsamış olup, gelişen şebeke yönetmelikleriyle birlikte ülkelerin

büyük çoğunluğunda kapasite değişim hızlarının 2010’lu yılların başlarından itibaren belirli bir seviyede kaldığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kapasite artışlarında Güney Afrika özelinde 2012 ile 2015 yılları arasında nispeten daha büyük değişimler gözlemlenmektedir. Her ülke özelinde bu verilerin detaylı incelenmesinin şebeke geleceği ve şebeke yönetmelikleri açısından önem arz ettiği söylenebilir.

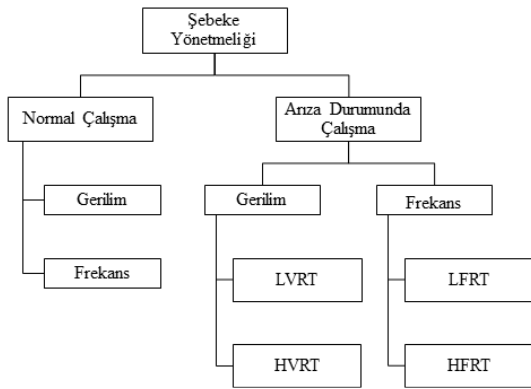
Diğer yandan, güneş ve rüzgâr enerji santrallerinin üretiminin konvansiyonel



Şekil 4. Güneş enerji santrallerinden elektrik üretimin toplam üretime oranı.

santrallere göre oranı da şebeke kararlılığı açısından burada önemli bir faktör olarak irdelenebilir. Bu amaçla Şekil 4'te ülkelerin yıllar bazında güneş enerji santrallerinden elektrik üretiminin toplam enerji üretimine oranı verilmiştir [25]. Burada görüldüğü üzere şebeke yönetmeliği ile ilgili makalelerin çıktığı ilk dönemlerde Almanya ve İspanya gibi ülkelerde güneşten elektrik üretimi de azımsanmayacak seviyelere gelmiştir. Daha sonraki yıllarda ise güneş santrallerinin enerji üretimindeki payında yaşanan artışlar bazı ülkelerde sürekli bazı ülkelerde ise satürasyona uğradığı gözükmemektedir. Buradaki profillerin farklılıkları şebeke yönetmeliklerinde yapılacak revizyonların daha dikkatli yapılması gerektiğini göstermektedir. Özet olarak artan güneş ve rüzgâr enerjisi yeni şebeke yönetmeliklerini ve revizyonlarını teşvik ederken, gelişen şebeke yönetmelikleri de güvenilir bir şekilde yeni kapasite artışlarını mümkün kılacak bir ortam oluşturmaktadır.

3. ŞEBEKE YÖNETMELİKLERİ VE TEMEL FARKLILIKLAR



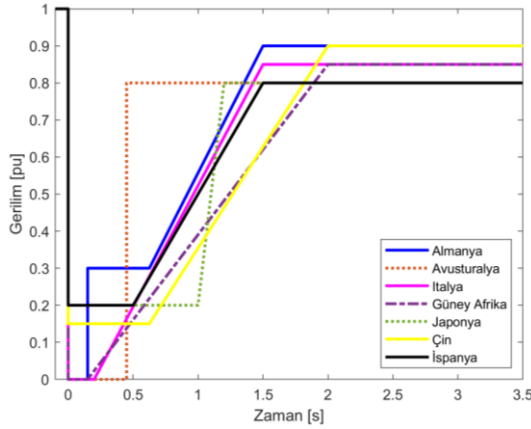
Şekil 5. Şebeke yönetmeliklerinin ilgilendiği alt başlıkları.

Dünya genelinde birçok ülkenin ulusal şebeke gereksinimlerine göre birbirine benzeyen ya da farklılıklar taşıyan şebeke yönetmeliği bulunmaktadır. Şebeke yönetmelikleri doğası gereği sürekli gelişim ve revizyon halinde olduğundan [3] burada sunulacak olan şebeke kodları bilimsel literatürde erişilebilen kaynaklara dayanmaktadır. Bu sebeple, tarihsel bir yaklaşım yerine bu bölümde yönetmelikler arasındaki benzerlik ve farklılıkların neler olduğu üzerine durulacaktır.

Şebeke yönetmeliği Şekil 5'te gösterildiği üzere temel olarak iki çalışma moduyla ilgilenebilir. Özellikle şebekenin kararlılığını etkilediğinden ötürü arıza durumundaki çalışma modu oldukça önemlidir. Burada LVRT (low voltage ride through) ve HVRT (high voltage ride through) sırasıyla şebekede yaşanan gerilim düşüşü ve artışı sırasında santrallerden beklenen davranışları tanımlamaktadır. Benzer şekilde LFRT (Low frequency ride through) ve HFRT (High frequency ride through) ise şebekede yaşanan frekans düşüşü ve artışı

Çizelge 1. Düşük gerilim arızası sırasında ve sonrasında şebeke gereklilikleri.

Ülkeler	Arıza Sırası		Arıza Sonrası	
	V_{min} (pu)	t_{min} (s)	V_{maks} (pu)	t_{maks} (s)
Almanya	0	0.150	0.90	1.50
Avustralya	0	0.450	0.80	0.45
İtalya	0	0.200	0.85	0.40
G. Afrika	0	0.150	0.85	2.00
Japonya	0.20	1.000	0.80	1.20
Çin	0.15	0.625	0.90	2.00
İspanya	0.20	0.500	0.80	1.00



Şekil 6. Ülkelerin LVRT gereksinimleri. sırasında santrallerden beklenen davranışları içermektedir.

Burada öncelikle ele alacağımız, LVRT olarak da kısaltılan gerilimde yaşanan aşırı düşüşlere karşı santralin bir süre daha devrede kalarak reaktif güç desteği vermesinin sağlanması olgusudur. Bu kapsamda yedi farklı ülkenin LVRT gereksinimlerine ait kritik değerler Çizelge 1’de verilmiş olup, Şekil 6’da da grafik olarak sunulmuştur [26-31]. Buradaki V_{min} ve V_{maks} sırasıyla üretim tesisinin şebekede kalması gereken minimum gerilim değerini ve gerilim toparlanması esnasında belirli bir sürede ulaşması beklenen gerilimi ifade etmektedir. t_{min} ve t_{maks} ise sırasıyla en düşük gerilimde tesisin bağlı kalması gerektiği süre ile gerilimin V_{maks} ’a ulaşması beklenen süreyi göstermektedir. Görüldüğü üzere irdelediğimiz ülkeler içinde arıza temizlenene kadar tesislerin operasyona devam etme zorunluluğu süresi açısından en talepkâr ülkeler Japonya ve Çin olup, daha kısa sürelerde şebekeden ayrılma izni veren ülkeler ise Almanya ve Güney Afrika’dır. Diğer yandan, güneş ve rüzgâr enerji santralleri ilk zamanlar nominal gerilimin %80’ininde bir gerilime maruz

kaldıklarında şebekeden ayrılabilirlerken [24], geliştirilen şebeke yönetmeliklerinde %0 gerilimlere kadar düşülmesi durumunda şebekede kalma zorunluluğu getiren ülkeler olduğunu görüyoruz. Bazı kaynaklarda bu durum ZFRT (zero fault ride through) olarak adlandırılmaktadır [32]. Arıza temizlendikten sonra ise Avustralya ve Japonya hariç diğer ülkelerin gerilimin toparlanması esnasında tesislerden daha uzun süre destek bekledikleri anlaşılmaktadır. Bu durum Şekil 6’da yer alan rampa şeklindeki bölgelerde açıkça gözükmemektedir.

LVRT gereksinimleri her ne kadar farklılık gösterse de arıza sırası ve sonrasında verilecek reaktif akım desteği prensibi aynıdır. Bu amaçla, güneş enerji santralleri arıza sırasında maksimum reaktif akımı sağladıktan sonra arıza sonrasında toparlanmanın hızına göre bu desteği geri çekmesi gerekmektedir. Genel terimlerle bu ilişkiyi denklem şeklinde yazmak mümkündür [33]:

$$i_q = k(v_{alt} - v_{ölç})I_{an}, \quad v_1 < v_{ölç} < v_{alt} \quad (1)$$

$$i_q = I_{an}, \quad v_{ölç} \leq v_1 \quad (2)$$

$$i_q = 0, \quad v_{ölç} \geq v_{alt} \quad (3)$$

burada i_q verilecek reaktif akım desteğini, v_{alt} şebeke normal çalışma geriliminin alt limitini, $v_{ölç}$ tesisin bağlantı noktasından ölçülen gerilimi ve I_{an} tesisin anma akımını ifade eder. v_1 gerilimi maksimum reaktif akımın hangi gerilim düşümünde sağlanacağını, k ise gerilim düşümüne bağlı olarak reaktif akım artışının hangi eğimle olacağını belirlemektedir. Bu bağlamda bu değerlerin değişmesiyle farklı ülkelerde farklı reaktif akım desteği gereksinimleri ortaya çıkmaktadır [32].

Burada bahsi geçen LVRT gereksinimleri şebekenin güvenilir bir şekilde çalışması adına geliştirilmiş olup, arıza sırasında evirici tabanlı güneş enerji santrallerinden destek alabilmeyi hedeflemektedir. Bu gereksinimlerin sağlanması adına geliştirilecek teknolojiler ise güncel bir araştırma konusudur.

Şebekedeki aktif güç üretim ve tüketiminde oluşabilecek ani dengesizlikler de frekans açısından arıza durumu olarak düşünülebilir. Bu şekilde oluşabilecek frekans dalgalanmalarında da şebeke yönetmelikleri belli gereksinimler ortaya koymaktadır. Almanya'da 47.5 ile 51.5 Hz aralığında güneş enerji santrali sürekli çalışabilir olmalıdır. Bu limitlerin dışında ise şebekeden ayrılmak zorundadır [34]. Çin'de ise bu durum biraz daha farklı olup santraller daha sınırlı bir frekans bölgesinde sürekli çalışabilir olmalıdır. 50.2 Hz'den büyük frekanslar için 2 dakika, 48 ile 49.5 Hz aralığında ise 10 dakika şebekeye bağlı kaldıktan sonra trip edebilirler. 48 Hz'den daha düşük frekanslarda ise evirici kabiliyetlerine göre durum belirlenmektedir [26]. Aynı atıftan alınan ve Güney Afrika'ya ait şebeke yönetmeliğinde ise çalışma frekans aralığının daha çok parçaya bölüdüğü anlaşılmaktadır. Burada dikkat çekici nokta diğer yönetmeliklere kıyasla Güney Afrika'da tesislerin 45 ile 55 Hz frekans aralığının tamamında muhtelif sürelerde çalışmasının bekleniyor olmasıdır. Burada belirtilen süreler, temelinde santralin ilgili frekans değerinde kaç çevrim dayanması gerektiği ile ilişkilidir. Santrallerin şebekeye bağlı kaldıkları bu süreçlerde üretimlerini kısarak özellikle HFRT durumlarında şebekenin kararlılığına destek olmaları yine yönetmeliklerde bir gereksinim olarak yer almaktadır [34].

Son olarak, tüm bu gereksinimler ve şebeke yönetmeliklerinin revizyonları standartlarda yapılan değişikliklerle de motive edilmektedir. Bu bağlamda, IEEE 2800-2022 standardı 2022 yılında yayımlanmıştır [35]. Bu standartla birlikte evirici tabanlı üretim tesisleri için ortak bir gereksinimler seti oluşturulduğu görülmektedir. Bu gibi daha kapsamlı standartların geliştirilerek şebekelerde uygulanması önümüzdeki yıllarda giderek önemini artıracaktır.

4. SONUÇ

Tüm dünyada güneş enerjisinden elektrik üretiminin payı çok hızlı artması ve güneş enerjisinin çıkış gücünün ve şebekedeki arızaların olasılıksal davranışı, bu üretimin konvansiyonel güç sistemleri üzerindeki yükü azaltmasının ötesinde şebeke güvenilirliği ve kararlılığı açısından bu santrallere getirilen gereksinimleri artırmaktadır. Bu durum sistem kurulum maliyetini ve karmaşıklığını artırmak ile birlikte, giderek zorunlu bir hal alan yan hizmetlerden gelir elde etme fırsatları eşliğinde güneş enerji santrallerinin güvenilir bir şekilde yaygınlaşması teknolojik gelişmeler ile birlikte enerji ekonomisi ve şebeke yönetmeliklerinin geliştirilmesine bağlıdır. Bu bağlamda güneş enerjisi santrallerinin dinamik analiz ve modellerinin geliştirilmesi, olası problemlerin tanımlanmasında ve ilgili mevzuatların oluşturulmasında önemli bir rol oynayacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK TEYDEB - Çağrılı 1501 Sanayi Ar-Ge Projeleri Destekleme Programı kapsamında 3220917 numaralı

proje ile desteklenmiştir. Tüm katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.

REFERANSLAR

[1] W. Jinpeng, Z. Bo, Y. Qinxue, Jeremy-Gillbanks, Z. Xin, Research on the automatically independent controlling algorithm of the grid-connected PV inverter jointly considering dynamic load features and active LVRT capability, *IEEE Access*, 11, 2023.

[2] A. Q. Al-Shetwi, M. Z. Sujod, F. Blaabjerg, Y. Yang, Fault ride-through control of grid-connected photovoltaic power plants: A review, *Solar Energy*, 180, 2019.

[3] M. Martínez-Lavín, R. Villena-Ruiz, A. Honrubia-Escribano, J. C. Hernández, E. Gómez-Lázaro, Evaluation of the latest Spanish grid code requirements from a PV power plant perspective, *Energy Reports*, 8, 2022.

[4] J. E. Rannels, Technology development in the U.S. photovoltaic program, *Renewable Energy*, 15(1-4), 1998.

[5] K. Kiefer, V. U. Hoffmann, Measurement and analysis programme within the thousand roofs programme, *Renewable Energy*, 5(1-4), 1994.

[6] S. Gonzalez, R. Bonn, J. Ginn, Removing barriers to utility interconnected photovoltaic inverters, 28th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 15-22 Eylül 2000.

[7] P. Mir-Artigues, P. del Río, A. Gil-Estallo, Regulation of photovoltaic prosumer plants: An analysis through a

dynamic expression of the avoided cost, *Energy Reports*, 9, 2023.

[8] J. Joshi, A. K. Swami, V. Jatelly, B. Azzopardi, Comprehensive review of control strategies to overcome challenges during LVRT in PV systems, *IEEE Access*, 9, 2021.

[9] Z. Hasan, A. Emir, J. Selvaraj, N. A. Rahim, A review on current injection techniques for low-voltage ride-through and grid fault conditions in grid-connected photovoltaic system, *Solar Energy*, 207, 2020.

[10] C. Nithya, J. P. Roselyn, Multimode inverter control strategy for LVRT and HVRT capability enhancement in grid connected solar PV system, *IEEE Access*, 10, 2022.

[11] S. Yuan, B.-F. Yang, J.-Y. Zhang, Experimental study on short-circuit current characteristics of a photovoltaic system with low voltage ride through capability under a symmetrical fault, *Energy Reports*, 8, 2022.

[12] M. Martínez-Lavín, R. Villena-Ruiz, A. Honrubia-Escribano, J. C. Hernández, E. Gómez-Lázaro, Proposal for an aggregated solar PV power plant simulation model for grid code compliance, *Electric Power Systems Research*, 213, 2022.

[13] P. Chao, W. Li, S. Peng, X. Liang, L. Zhang, Y. Shuai, Fault ride-through behaviors correction-based single-unit equivalent method for large photovoltaic power plants, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 12(1), 2021.

[14] Y. He, M. Wang, Z. Xu, Coordinative low-voltage-ride-through control for the wind-photovoltaic hybrid generation system, *IEEE Journal of Emerging and*

Selected Topics in Power Electronics, 8(2), 2020.

[15] Z. Li, J. Lu, J. Liu, Y. Zhu, Q. He, Resistance selection and control strategy considering the coordination of protection performance and low voltage ride through of a large-scale photovoltaic power station, *IEEE Access*, 8, 2020.

[16] J. P. Roselyn, C. P. Chandran, C. Nithya, D. Devaraj, R. Venkatesan, V. Gopal, S. Madhura, Design and implementation of fuzzy logic based modified real-reactive power control of inverter for low voltage ride through enhancement in grid connected solar PV system, *Control Engineering Practice*, 101, 2020.

[17] P. Shah, B. Singh, Low-voltage ride-through operation of grid interfaced solar PV system enabling harmonic compensation capabilities, *IET Renewable Power Generation*, 14(12), 2020.

[18] S. Bagchi, D. Chatterjee, R. Bhaduri, P. K. Biswas, An improved low-voltage ride-through (LVRT) strategy for PV-based grid connected inverter using instantaneous power theory, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 15, 2021.

[19] A. Sabir, A novel low-voltage ride-through capable energy management scheme for a grid-connected hybrid photovoltaic-fuel cell power source, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(2), 2019.

[20] M. Y. Worku, M. A. Abido, Grid-connected PV array with supercapacitor energy storage system for fault ride through, *IEEE International Conference on Industrial Technology*, 17-19 Mart 2015.

[21] S. Wang, X. Tang, X. Liu, C. Xu, Research on low voltage ride through control of a marine photovoltaic grid-connected system based on a super capacitor, *Energies*, 15(3), 2022.

[22] M. Talha, S. R. S. Raihan, N. A. Rahim, A grid-tied PV inverter with sag-severity-independent low-voltage ride through, reactive power support, and islanding protection, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9(6), 2021.

[23] <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-cumulative-capacity?time=2000..latest&country=AUS~DEU~ZAF~USA~CHN~ITA~ESP~JPN>, Erişim Tarihi: 31 Mayıs 2023.

[24] I. Erlich, U. Bachmann, Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany, *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 12-16 Haziran 2005.

[25] <https://ourworldindata.org/grapher/share-electricity-renewables?tab=chart&time=2000..latest&country=AUS~DEU>, Erişim Tarihi: 31 Mayıs 2023.

[26] A. Cabrera-Tobar, E. Bullich-Massagué, M. Aragüés-Peñalba, O. Gomis-Bellmunt, Review of advanced grid requirements for the integration of large scale photovoltaic power plants in the transmission system, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 62, 2016.

[27] A. Q. Al-Shetwi, M. A. Hannan, K. P. Jern, M. Mansur, T. M. I. Mahlia, Grid-connected renewable energy sources: Review of the recent integration requirements and control methods, *Journal of Cleaner Production*, 253, 2020.

[28] A. Honrubia-Escribano, T. García-Sánchez, E. Gómez-Lázaro, E. Muljadi, A.

Molina-García, Power quality surveys of photovoltaic power plants: characterisation and analysis of grid-code requirements, *IET Renewable Power Generation*, 9(5), 2015.

[29] Y. Yang, F. Blaabjerg, H. Wang, Low-voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(3), 2014.

[30] L. Meegahapola, M. Datta, I. Nutkani, J. Conroy, Role of fault ride-through strategies for power grids with 100% power electronic-interfaced distributed renewable energy resources, *WIREs Energy and Environment*, 7(4), 2018.

[31] A. Colmenar-Santos, A.-R. Linares-Mena, E.-L. Molina-Ibáñez, E. Rosales-Asensio, D. Borge-Diez, Technical challenges for the optimum penetration of grid-connected photovoltaic systems: Spain as a case study, *Renewable Energy*, 245, 2020.

[32] Y. G. Landera, O. C. Zevallos, R. C. Neto, J. F. da Costa Castro, F. A. S. Neves, A review of grid connection requirements for photovoltaic, *Energies*, 16, 2023.

[33] K. H. Oon, C. Tan, A. H. A. Bakar, H. S. Che, H. Mokhlis, H. A. Illias, Establishment of fault current characteristics for solar photovoltaic generator considering low voltage ride through and reactive current injection requirement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 2018.

[34] Y. Bae, T.-K. Vu, R.-Y. Kim, Implemental control strategy for grid stabilization of grid-connected PV system based on German grid code in symmetrical low-to-medium voltage network, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 28(3), 2013.

[35] IEEE Power and Energy Society, IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Inverter-Based Resources (IBRs) Interconnecting with Associated Transmission Electric Power Systems, 2022.