

ŞEBEKEYE BAĞLI RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN FLİKERETKİLERİ

Akın Taşcıkaraoğlu, Mehmet Uzunoğlu
Yıldız Teknik Üniversitesi
atasci@yildiz.edu.tr,uzunoglu@yildiz.edu.tr

Özet

Rüzgar türbinlerinin şebekeler içindeki güçlerinin artmasıyla birlikte, türbinlerden kaynaklanan nedenlerden dolayı eğer yeterince önlem alınmazsa güç kalitesi sorunlarımeydana gelebilmektedir. Bu sorun şebeke içerisindeki rüzgar gücünün daha fazla artmasına engel olabilmektedir.Çözüm için öncelikle türbinlerin neden olduğu güç kalitesi problemlerinin tam olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle bu çalışmada rüzgar türbinlerinin olası güç kalitesi problemleri incelenmiştir.Türbinlerin neden olduğu problemler arasında, analizlerinin daha zor yapılabilmesi nedeniyle hızlı gerilim değişimleri (flikler)ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler:Rüzgar Türbinleri, Güç Kalitesi, Fliker.

1. Giriş

Rüzgar gücü endüstrisinin 1980'lerde gelişmeye başlamasıyla birlikte rüzgar türbinlerinin nominal güçleri oldukça büyük bir artış göstermiştir ve bu güçteki türbinlerden oluşan rüzgar çiftliklerinin kullanımı günümüzde oldukça yaygınlaşmıştır. Ancak rüzgar çiftliklerinin yüksek kurulu güç değerlerine ulaşmasıyla şebeke bağlantıları bir sorun haline gelmeye başlamıştır. Bu sorunlar genellikle güç sistemlerinde yavaş gerilim değişimleri, fliker, gerilim çökmeleri ve harmonikler olarak görülmektedir [1,2]. Bu nedenle özellikle son yıllarda, iletim sistemine bağlanacak olan rüzgar santrallerinin uyması gereken teknik kriterleri içeren çok sayıda şebeke yönetmeliği yayımlanmıştır. Bu kodlara göre rüzgar santralleri, şebekenin gerilim ve frekans kontrolüne yardımcı olmalıdır ve aynı zamanda arıza durumlarında iletim sistemine bağlı kalarak gerekli aktif ve reaktif gücü üretmelidir [3,4]. Ancak bazı durumlarda, güç sistemlerine bağlı olan rüzgar türbinlerinin bu şartları sağlamasına rağmen, şebeke güç kalitesi açısından bakıldığında belirlenen sınırların dışına çıkabilmektedir. Bu nedenle rüzgar türbinlerine sahip olan ülkelerin, şebeke içerisindeki rüzgar gücünü sınırlayan yönetmelikleri bulunmaktadır. Bu yönetmelikler genellikle, türbinlerin neden olabileceği gerilim değişimlerini tanımlayan şartlardan oluşmaktadır [5]. Gerçekte bu şartlar çoğu bölgede şebekelerin güç kalitesindeki bozulmaları sınırlandırmaya yetmektedir. Ancak özellikle rüzgar potansiyeli yüksek olan ve zayıf şebekelere sahip bölgelerde ise rüzgar gücünden faydalanma oranı oldukça düşmektedir.Bu oranı arttırabilmek için yapılan çalışmalar arasında en önemlisi 2001 yılında IEC 61400-21 adıyla yayımlanan standarttır [6].

Rüzgar türbinlerinin güç kalitesi karakteristiklerini belirlemek için gerekli işlemleri tanımlayan bu standardın kullanılmasıyla, rüzgar türbinleri henüz kurulmadan önce şebeke üzerindeki olası etkileri değerlendirilebilmekte ve böylece şebekelerde daha fazla rüzgar gücü için yer açılabilir. Ancak bu standartta önerilen yöntemlerin gerçekleştirilmesi gerek veri eksikliğinden gerekse oldukça karmaşık olan işlem yükünden dolayıher zaman mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada rüzgar türbini bileşenlerinin güç kalitesi üzerindeki olası etkileri, konu ile ilgili literatürde yer alan en önemli yayınlar temel alınarak incelenmiştir. Böylece bu bilgilerin bir ön değerlendirme açısından kullanılabilemesi amaçlanmaktadır.

Bu değerlendirmeler güç kalitesi problemlerinin tamamı için yapılmıştır, ancak en önemli kısım hızlı gerilim değişimlerine ayrılmıştır. Bunun en önemli nedeni, hızlı gerilim değişimlerinin insan faktörü ile olan doğrudan ilişkisi nedeniyle analizinin daha zor yapılabilmesi ve bu değişimlerin genellikle rüzgar enerjisinin şebeke içerisindeki oranının artması önündeki en büyük engellerden biri olmasıdır.

2. Rüzgar Türbinlerinin Güç Kalitesi Üzerine Etkileri

Yüklerin iyi eşleştirildiği, yüksek güç rezervi olan ve komşu şebekelerle güçlü bağlantıları olan sistemlerde rüzgardan elde edilen güç, sistemin güvenilirliğini etkilemeksizin kurulu gücün % 30-40'ı arasında olabilir. Bu şartların sağlanamaması durumunda rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artması, güç kalitesini olumsuz yönde etkileyebilir. Farklı rüzgar türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkileri oldukça değişkendir ve genellikle modern türbinlerin olumsuz etkileri çok daha azdır. Türbinlerin şebeke üzerindeki etkileri çoğunlukla kullanılan generatör tipiyle ve bu generatörün şebekeye bağlanma şekliyle (direkt veya kontrollü bağlantı) değişir.Kısa devre rotorlu veya çift beslemeli endüksiyon generatörleri kullanan rüzgar santralleri, şebekeye değişken bir güç ulaştırırlar. Bu güç akışı, gerilimin şeklini etkiler ve fliker emisyonunu artırır. Bu etkilerin azaltılabilmesi için çoğu zaman reaktif güç kompanzasyonundan yararlanılır. Kısa devre rotorlu generatörlerde reaktif güç ihtiyacı kondansatör grupları ile sağlanırken, çift beslemeli endüksiyon generatörlerinde ise frekans konverterlerinin kullanılması reaktif güç kompanzasyonuna yardımcı olur. Ayrıca frekans konverterleri, aktif güç çıkışındaki dalgalanmaları da azaltırlar.Harmonik distorsiyonunu arttırmaları ise bu konverterlerinin güç kalitesi açısından tek

dezavantajdır. Bunların dışında rotor kanatları ile generatör arasında kullanılan dişli kutuları, verimi azaltırken fliker oluşumuna da sebep olurlar. Bu nedenle dişli kutusu kullanılmaması güç kalitesi açısından daha uygundur[7].

Rüzgar türbinlerinin şebekenin güç kalitesi üzerindeki etkileri, türbinlerin özellikleri kadar bağlanan şebekenin şartları ile de ilgilidir. Özellikle şebekenin kısa devre gücünün ve şebeke empedansının (X/R oranı) güç kalitesi parametreleri üzerinde doğrudan bir etkisi vardır. Bu nedenle şebekenin yeni bağlantılarla kuvvetlendirilmesi, büyük rüzgar çiftliklerinin bağlantısını sağlamak amacıyla ortak bağlantı noktasının kısa devre gücünün artırılmasında kullanılabilir. Ancak ekonomik nedenlerden dolayı bu durum her zaman mümkün olmayabilir. Bunun yerine dinamik gerilim düzelticiler veya aktif filtreler gibi yerel düzeltici yöntemlerin kullanılması çok daha yaygındır [8,9]. Ayrıca türbinlerin şebeke bağlantısında kullanılan transformatörlerin tipi, bu bağlantının gerilim seviyesi ve koruma sistemlerinin koordinasyonu da güç kalitesi üzerinde etkilere sahiptirler [7].

Şebekeye bağlanacak olan rüzgar türbinlerinin nominal gücünün ve sayısının artmasıyla, güç kalitesi üzerindeki olumsuz etkiler artar. Bunun dışında rüzgar türbinlerinin rüzgar çiftliği içindeki yerleşme planlarının da güç kalitesi üzerinde önemli etkileri vardır. Rüzgar çiftliği topolojileri genelde, bazı türbinlerin gölge etkisi altında çalışmasını önleyecek şekilde yapılır. Bu topolojiler mevcut standartlarda yer almalarına rağmen rüzgar çiftliklerinin dinamik davranışını etkilediği için ihmal edilmemelidir [10].

Rüzgarın ani hız değişimlerinin ve hava boşluğu yoğunluğunun güç kalitesi üzerindeki etkileri, deneysel çalışmalar sayesinde bilinmesine rağmen genellikle ihmal edilmektedir. Ancak hava boşluğu yoğunluğunun farklı değerlerindeki güç kalitesi parametreleri, reaktif güç kontrolü yapabilen rüzgar türbinleri dışındaki türbinler için oldukça değişkendir. Ayrıca rüzgar akış yönünü ve hızını değiştirebilecek her türlü engel, türbin kulelerinde olduğu gibi türbinin gölge etkisi altında çalışmasını sağlayarak güç kalitesini etkilemektedir[8,11].

Rüzgar türbinlerinin, üzerinde bozucu etkilere sebep olduğu başlıca güç kalitesi problemleri aşağıda alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.1. Gerilim Dalgalanmaları

Gerilim kalitesini etkileyen en yaygın sorun yük ve üretim değerlerin sürekli değişimidir. Yük değerlerindeki değişime genellikle ark ocakları, eritme tesisleri ve sık sık devreye girip çıkan büyük güçlü motorlar gibi yükler sebep olurken, üretim değerlerindeki değişiminin en önemli nedeni olarak ise rüzgar türbinleri gösterilebilir. Rüzgar

türbinleri, sisteme aktif güç verdikleri için sistemdeki gerilim seviyesini artırırlar. Aynı zamanda sistemden reaktif güç çekmeleri nedeniyle de gerilim seviyesini düşürürler. Rüzgar türbinlerindeki bu gerilim değişimleri aşağıdaki eşitlikle tahmin edilebilir:

$$U = R \frac{P}{U_n} - X \frac{q}{U_n} + U_n \quad (1)$$

Burada U bağlantı noktasındaki gerilimi, U_n şebekenin nominal gerilimini, p üretilen aktif gücü, q tüketilen reaktif gücü, R ve X ise sırasıyla şebeke direnci ve reaktansını göstermektedir [11]. Bu durumda, rüzgar türbinlerinin gerilim seviyesine bağlı olarak aktif veya reaktif güç değerlerinin değiştirilmesi veya tamamen şebekeden ayrılması gerekebilir. Bu sayede türbinde maksimum elektrik üretimi nedeniyle oluşan yüksek gerilim değerlerinde gerilim seviyesi aşağıya çekilebilir. Gerilim dalgalanmaları da kendi aralarında hızlı ve yavaş gerilim değişimleri olmak üzere ikiye ayrılıp incelenebilir.

2.1.1. Yavaş Gerilim Değişimleri

İletkenlerin empedansından dolayı gerilim seviyesi, rüzgar gücü üretimine ve beslenen yüke bağlı olarak hat boyunca değişir. Bu etkiyi değerlendirmek ve rüzgar türbinini gerilim değerinin gereken sınırların dışına çıkmamasını sağlamak amacıyla yük akış analizlerinin yapılması önerilmektedir. En doğru çözüm için şebekenin, yüklerin ve rüzgar türbininin tüm durumları göz önüne alınmalıdır, ancak genelde bu analizler rüzgar gücü ve yüklerin en düşük ve en yüksek değerlerinin kombinasyonlarından oluşan dört uçdeğer için yapılır.

Rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artması, maksimum gerilim değerini arttırmaktadır. Bu sorun rüzgar türbinlerinin güç faktörü ayarlanarak çözülebilir. Ancak güç faktörünün düşürülmesi, şebekede kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle güç faktörü regülasyonu dikkatli kullanılmalıdır ve alternatif çözümler de değerlendirilmelidir. Bu çözümlerin bazıları; yeni hatlar ile şebekeye takviye yapmak ve rüzgar çiftliği gücünü gerilime göre azaltmak olarak sıralanabilir. Gerilime bağlı güç faktörü kontrolü ile de şebeke kayıplarındaki artış önemli derecede azaltılabilir [12].

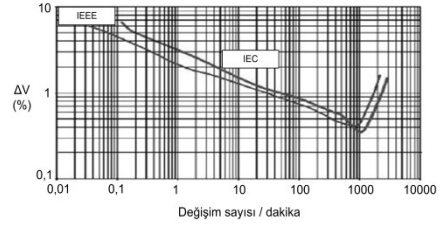
2.1.2. Hızlı Gerilim Değişimleri (Fliker)

Hızlı gerilim değişimleri genellikle yükteki veya üretilen güç değerindeki hızlı değişimlerden kaynaklanırlar. 0,5 Hz ile 35 Hz frekans aralığındaki gerilim dalgalanmalarının neden olduğu ışık kaynaklarındaki aydınlık şiddetleri değişimi, gerilim flikeri olarak adlandırılır. Başlıca gerilim flikeri kaynakları, dahili kaynaklar olan klimalar, çamaşır ve bulaşık makineleri, kurutucular ve buzdolapları olarak sıralanabilirken harici kaynaklar ise kapasitörlerin anahtarlanması, ark kaynakları, hadde makineleri ve kaynak makineleri olarak genelleştirilebilir

[13].Gerilim flikerinin röleleri trip ettirme, güç elektroniği elemanlarının hatalı çalışmasına veya arızalanmasına neden olma gibi etkileri vardır. Ancak şebekeler içerisindeki değerinin standartlarla kesin bir şekilde sınırlandırılmasının asıl nedeni, insan sağlığı üzerindeki etkileridir. Flikerin insanlar üzerindeki etkileri çok sayıda parametreye bağlıdır ve flikerin neden olduğu rahatsızlık derecesi bu parametrelere bağlı olarak artabilir. Hızlı değişimlere sahip bir gerilim tarafından beslenen ışık kaynaklarına uzun süre maruz kalan insanlarda yorgunluk, baş ağrısı ve migren gibi belirtiler görülebilmektedir. Özellikle epilepsi eğilimi olan insanlarda ciddi sağlık sorunları yaşanmaktadır.Bu rahatsızlıklar aynı zamanda iş yerlerinde güvenlik sorunlarına yol açabilmektedir. Bu yönüyle, güç kalitesi problemleri içinde insan sağlığını ve yaşam kalitesini en fazla etkileyen hızlı gerilim değişimleridir[14,15].

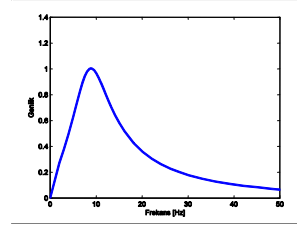
Gerilim flikeri IEC 61000-4-15 standardında belirtildiği gibi bir flikermetrenin kullanılmasıyla ölçülebilir. Flikermetre giriş olarak gerilim değerlerini alır ve çıkışta fliker şiddetlerini verir. Ancak bir rüzgar türbininin neden olduğu fliker seviyesinin flikermetre ile ölçümü sırasında, ölçüm yapılacak olan noktaya her zaman başka fliker kaynakları da bağlı olacağından hatalı değerler bulunabilir. Rüzgar türbinlerinin ölçüm süresi boyunca şebekeden ayrılması ise ekonomik olmayacağından, türbinlerde şebekeden bağımsız fliker ölçümü, akım ve gerilim veya aktif ve reaktif güç ölçümlerine göre yapılır [16].Fliker şiddeti, 10 dakikalık bir periyot içinde ölçülen bir kısa dönem değeri (P_{st}) veya 2 saatlik bir ölçüm sonucunda elde edilen kısa dönem değerlerinden hesaplanan bir uzun dönem değeri (P_{lt}) ile verilebilir. Standartlara göre uzun dönem fliker şiddeti bir haftanın % 95'i boyunca 1'e eşit veya 1'den küçük olmalıdır. Ancak flikere verilen tepki öznel olduğundan 1 değeri de bazı insanlar için rahatsız edici olabilir. Tüketici noktasında $P_{lt} = 1$ değerini sağlamak için şebekeye bağlı her bir fliker kaynağının IEC 61000-3-7'de belirtildiği gibi sınırlı bir değerde katkı yapmasına izin verilir. Rüzgar türbinleri için bu değeri her ülke kendi belirlemekle birlikte genellikle 0,25-0,35 arasında alınmaktadır.

Flikerin insanlar üzerindeki olumsuz etkisi, gerilimin genliğine ve frekansına bağlıdır. Farklı frekans ve genliklerde hızlı gerilim değişimlerinin uygulandığı bir akkor flamanlı lambanın ışık akısına maruz bırakılan insanların verdiği tepkilere göre oluşturulan $P_{st} = 1$ eğrileri, Şekil 1'de gösterildiği gibidir. Bu eğriler üzerindeki her noktada kısa dönem fliker katsayısı bire eşittir [17,18].



Şekil 1:IEC 61000-4-15 standardına göre düzenli dikdörtgen gerilim değişimleri için $P_{st} = 1$ eğrisi

Şekil 1'den görülebileceği gibi, küçük bir gerilim dalgalanması bile belli frekanslarda fliker seviyesinin sınır değerlere yaklaşmasına neden olabilir.Yüksek frekansa sahip gerilim dalgalanmalarının insanlar tarafından fark edilememesinin nedeni, lamba flamanının ısı değerinin bu kadar hızlı değişmemesidir. Düşük frekansa sahip dalgalanmalar ise insan beynindeki görme ile ilgili hafızaya alma bölümünün uzun süreli değişimleri depolayamamasından dolayı fark edilememektedir [19]. İnsanın göz beyin cevabı Şekil 2'de verilen IEC ağırlıklandırma eğrisi ile gösterilebilir.



Şekil 2:İnsan gözünü simüle eden ağırlık filtresinin frekans cevabı

230V/50Hz için elde edilen bu eğri yardımıyla belirli frekanslarda hızlı gerilim dalgalanmaları uygulanan bir lambanın ışık akısına maruz bırakılan insanların yüzde kaçının rahatsız olduğu hesaplanabilmektedir. Ağırlıklandırma eğrisi en yüksek değerine 8,8 Hz civarında ulaşmaktadır. Bu nedenle bu değer insan gözü ve beyinin en hassas olduğu ışık akısı değişimi olarak ifade edilir. 120V/60Hz'lik ağırlıklandırma eğrisi daha uzun ısıl zaman sabitleri nedeniyle daha düşük genlikli olarak elde edilmektedir. Bunun en önemli nedeni 120 V'luk lambanın daha küçük bir dirence, dolayısıyla daha kalın bir filaman kesitine sahip olmasıdır. Filaman kesitinin kalınlığı ise cevap süresini uzatmaktadır. Benzer bir durum aynı gerilim seviyesine sahip enkandesan lambalar için de geçerlidir. Örneğin 120V/60Hz'lik bir sistemde 100W güce sahiplambalar, 60 W'lıklardan daha az flikere neden olurlar. Floresan lambalar ise enkandesan lambalara göre gerilim değişimlerine karşı daha hassaslardır, ancak ışık flikerleri enkandesanlardan daha azdır [20].

2.2. Gerilim Çökmesi

Elektrik güç sistemlerinde hatbaşı ve hatsonu arasındaki faz farkı aktif güç tarafından belirlenirken, gerilimin genliği reaktif güç değişimi ile kontrol edilir. Güç sisteminde kaynak ile yük arasındaki aktif ve reaktif güç akışı, büyük akım ve gerilim

dalgalanmalarından sakınmak için dengelenmelidir. Bir hata meydana geldiğinde akımla ve trafo merkezinden uzaklıkla orantılı olarak devre boyunca bir gerilim düşümü meydana gelir. Rüzgar çiftlikleri genellikle trafo merkezlerinden uzakta bulunduğu için empedans yüksek değerlerde olmakta ve bu nedenle gerilim düşümleri önemli boyutlara ulaşmaktadır. Trafo merkezindeki regülatör, kendi gerilim sınırlarını aşmadan rüzgar çiftliği bağlantı noktasındaki gerilimi yükseltmeyebilir. Bu durumda rüzgar çiftlikleri gerilim kontrolü özelliğine sahip olmalıdır [21].

Gerilim çökmeleri, rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonundaki en önemli sorundur. Geçici hataların etkileri, büyük coğrafi alanlara yayılabilir ve bu hata şartları altında rüzgar çiftliklerinin bağlantısının kesilmesi ile de şebeke ve kaynakların güvenliği açısından ciddi bir tehlike oluşabilir. Bu yüzden günümüzde çoğu şebeke yönetmeliklerinde, rüzgar türbinlerinin arıza üstü çalışma yeteneğine sahip olması zorunlu hale getirilmiştir. Ancak bir sistemin rüzgar gücünün çoğu, asenkron generatörlü küçük güçlü rüzgar türbinleri tarafından sağlanıyorsa gerilim çökmelerinde türbinlerin bağlantısını kesmek daha uygun olabilmektedir. Böylece düşen reaktif güç talebi şebeke gerilimini artırabilir [22].

2.3. Reaktif Güç

Rüzgar türbinlerinde bulunan generatörler şebeke tarafından talep edilen reaktif gücü sağlarken, ürettikleri aktif güç düşük ise güç faktörü düşebilir. Ancak generatörler nominal şartlarda çalışırken güç faktörü 1'den uzaklaşırsa aşırı akımlar oluşur. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde sağlayabileceği aktif ve reaktif güç değerleri, genellikle bir sınırlayıcı eğri ile belirlenir.

Türbinlerde en çok kullanılan generatör tipi olan endüksiyon generatörleri şebekeden reaktif güç çekerler ve düşük güç faktörü üretirler. Çekilen reaktif gücün çok fazla artmasıyla sistem kararsız hale gelebilir. Rüzgar türbinlerinin reaktif güç ihtiyaçlarının kondansatör grupları kullanılarak azaltılması, gerilim seviyesini yükseltecektir. Bu sayede türbinlerin gerilim üzerindeki etkileri azalacaktır.

2.4. Frekans

Bir generatörün çıkış gücünün aktif bileşeni, miline uygulanan mekanik giriş gücü ile belirlenir. Sağlanan güç (üretim) ve talep edilen güç (yük ve şebeke kayıpları) arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol açar. Üretimdeki fazlalık frekansta artışa, eksiklik ise düşüşe neden olur. Şebekelerde yükün artması durumunda sistem frekans kontrolü devreye girerek, frekans yeniden nominal değerine ulaşana kadar bazı generatörlerin momentini artırır. Rüzgar türbinlerinde frekans 50 Hz'i aştığında, türbinin aktif güç üretimi ancak nominal değerinin

altında bir değerde olacak şekilde sürdürülebilir. Rüzgar türbinlerinin bağlı olduğu şebekelerde, farklı durumlarda kullanabilmek amacıyla ek güç kontrol stratejileri gerekmektedir. Şebekenin durumuna ve yerel şebeke yönetmeliğine bağlı olarak en önemli güç regülasyon tipleri; tam güç sınırlaması, delta üretim sınırlaması, denge regülasyonu, güç eğim sınırlaması ve sistem koruması olarak sıralanabilir [21].

2.5. Harmonikler

Bir güç elektroniği konverteri olmaksızın şebekeye direkt bağlanan endüksiyon generatörlü bir rüzgar türbini, gerilimin dalga şeklini bozmaz. Türbinlerde yumuşak kalkış (soft start) için kullanılan güç elektroniği elemanları ise kısa süreli olarak yüksek dereceli harmonik akımları oluşturabilir, ancak bunların süreleri ve genlikleri çok küçük olduğu için göz önüne alınmazlar. Bu nedenle sabit hızlı rüzgar türbinli sistemler için harmonikler bir sorun teşkil etmemektedirler. Değişken hızlı türbinlerde ise tristör kullanan konverterler, standartlarda sınırları verilen harmonik gerilimlerini aşabilecek değerleri üretirler. Ancak bu konverterler, yeni rüzgar türbinlerinde nadiren kullanılmaktadır. Günümüzde türbinlerde kullanılan konverterler daha çok transistör bazlıdır ve 3 kHz'in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışırlar. Sonuç olarak yeni rüzgar türbinlerinin ürettikleri harmonik miktarının gerilim dalga şekli üzerindeki etkileri genelde önemsenmeyecek kadar azdır ve bu nedenle rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artmasına bir engel oluşturmamaktadır.

3. Rüzgar Türbinlerinin Fliker Etkileri

Rüzgar türbinlerinin ilk çalışması (start-up) gibi anahtarlama işlemleri ve sürekli çalışması esnasındaki aktif ve/veya reaktif güçteki dalgalanmalar, flikere neden olurlar. Sürekli çalışma sırasındaki güç dalgalanmaları genellikle; hava boşluğu yoğunluğu, kule gölge etkisi, kanat açısı kontrol ve sapma mekanizmalarının hatalı çalışması, kısa bir mesafe içindeki rüzgar hız ve yönünün farklı değerler alması (wind shear), kule salınımı, dişli kutusundaki problemler ve rüzgar hızındaki dalgalanmalar nedeniyle meydana gelir. Meydana gelen bu dalgalanmaların şebeke üzerindeki etkisi, şebekenin kısa devre gücüne ve şebeke empedans açısına bağlıdır. Fliker şiddetleri, kısa devre gücünün artması ile azalırken şebeke empedans faz açısının artmasıyla, türbinin ürettiği aktif güce ve şebekeden çektiği reaktif güce bağlı olarak değişir [23]. Örneğin X/R oranının 0,5 olması durumunda ortaya çıkan fliker emisyonu, bu oranın 2 olması durumuna göre 10 kat daha fazla olabilmektedir. Ayrıca artan rüzgar hızıyla da fliker emisyonu genellikle artmaktadır [24].

Kullanılan generatörler açısından fliker etkisi incelenecek olursa, endüksiyon generatörüne sahip olan türbinler, şebekeden çektiikleri değişken reaktif güç nedeniyle fliker üretirler. Bu generatörler daha

çok sabit hızlı türbinlerde kullanıldığından ve sabit hızlı türbinler ani rüzgarlarda kendileri de flikere neden olduklarından, bu türbinlerin fliker açısından şebekeye olumsuz etkileri, değişken hızlı türbinlerden çok daha fazladır. Sabit hızlı türbinlerde hızlı gerilim değişimlerinin şebeke üzerindeki etkilerini azaltmak amacıyla kondansatör grupları kullanılarak çekilen reaktif gücün kontrol edilmesi sağlanabilir. Ancak bu durumda da kondansatörler arası anahtarlamalar sırasında yüksek fliker değerleri ortaya çıkabilir. Senkron generatörlü değişken hızlı makineler ise fliker üretmezler. Ancak günümüzde çoğu değişken hızlı türbin, şebekeden reaktif güç çeken çift beslemeli endüksiyon generatörlerine sahiptir ve belli bir oranda fliker emisyonu görülebilir. Bu türbinlerde de güç elektroniği dönüştürücüleri ile reaktif güç kontrol edilerek, hızlı gerilim değişimlerinin şebeke üzerindeki etkileri sınırlandırılabilir.

Sabit hızlı rüzgar türbinlerinde rüzgardan kaynaklanan stokastik güç dalgalanmaları dikkate alınmazsa, baskın olan periyodik güç dalgalanmalarının frekansı 1-2 Hz arasındadır. Bu güç dalgalanmaların en yaygın olanı, rotor kanatlarının kulenin önünden geçmesiyle oluşan ve üç kanatlı türbinler için frekansı, 1p rotor hızını göstermek üzere, 3p olarak belirtilen dalgalanmalardır. 1p frekansına sahip olan dalgalanmalar ve kule rezonans frekansındaki dalgalanmalar ise 3p frekansına sahip dalgalanmalarda olduğu gibi, gerilimde hızlı değişimlere dolayısıyla flikere neden olurlar. Burada frekansı 1p olan dalgalanmaların, rotorun dengeli olmamasından veya kanatlardan birinin diğerlerinden daha yüksek bir moment üretmesinden kaynaklanabileceği tahmin edilmektedir. Bu frekanstaki dalgalanmaların oluştuğu anlarda rotor kanatlarının pozisyonları çok farklı şekillerde olabilir, ancak 3p frekansındaki dalgalanmalar yalnızca kanatlardan birinin kule ile paralel konuma gelmesi durumunda meydana gelir. Kule rezonans frekansında oluşan güç dalgalanmaları ise genellikle düşük değerdedir, ancak eğer bir türbin iz (wake) etkisi altında çalışıyorsa bu dalgalanmalar en yüksek değerlerini alırlar. Bunun nedeni iz etkisi altında çalışan türbinlere gelen rüzgarın hız ve yönünün oldukça değişmesi ve böylece hava boşluğu yoğunluğunun artmasıdır. Gücün kule rezonans bileşeninin genliği, naselin herhangi bir yöne doğru açısal hareket etme hızıyla doğru orantılıdır. Endüksiyon generatörlerinde üretilen güç, rotorun açısal hızı ve statordaki döner magnetik alanın açısal hızı arasındaki fark (kayma) ile orantılı olduğundan kulenin açısal yer değiştirmesi, naselin açısal sapmasına neden olur. Böylece döner magnetik alanda, görünür bir salınım meydana gelir ve türbinin çıkış gücünde dalgalanmalar oluşur [25-27].

Rüzgar türbinlerinin sürekli çalışmaları sırasında ürettikleri güç değerlerinde dalgalanmalara neden olan bir diğer önemli faktör ise hava boşluğu yoğunluğudur. IEC 61400-21 standardında yapılan

ölçümler sırasında daha doğru sonuçlar elde etmek için hava boşluğu yoğunluğunun % 8 ile % 16 arasında olmasının yeterli olduğunun belirtilmesine rağmen, bu iki değer için yapılan ölçümlerinde bile fliker şiddetlerinin iki kata kadar fark edebildiği görülmüştür [7].

Rüzgar türbinlerinin oluşturduğu ani değişimler türbin büyüklüğü ile artmaktadır. Tek bir rüzgar türbininin gerilimde meydana getirdiği ani değişimler, toplamda aynı güce sahip birkaç türbinin neden olduğu değişimlerden daha fazladır[28]. Ayrıca IEC standardına göre aynı tipteki N sayıda rüzgar türbininin belirli bir şebekedeki toplam fliker emisyonu, yalnızca bir türbinin fliker emisyonundan \sqrt{N} kat daha fazladır. Ancak rüzgar çiftliği farklı tiplerdeki veya konfigürasyonlardaki türbinlerden oluşuyorsa her bir türbinin fliker katsayısının ayrı ayrı hesaba dahil edilmesi gerekir.

Rüzgar enerjisinin şebeke içerisindeki oranının artması üzerindeki önemli etkisi nedeniyle hızlı gerilim değişimleri bugüne kadar farklı simülasyon programlarıyla ve farklı yöntemlerle modellenmeye çalışılmıştır. Bu modeller içerisinde ağırlıklandırma eğrilerini kullanan ve gerilimin analog filtrelemesine dayanan yapılar da bulunmasına rağmen [29], filtrelerin dijital uygulaması yaklaşımına dayananlar daha önemli bir yer tutmaktadır [30-32]. Rüzgar türbinlerinin fliker etkilerini analiz edebilmek için Vilar vd. frekans domeninde sabit hızlı bir rüzgar türbininin tüm bileşenlerini modelleyerek yeni bir yöntem önermişlerdir [33]. Bir başka yeni yaklaşım ise Wu ve Chen tarafından sunulmuştur [13]. Bu yayında gerilim flikeri bileşenlerini hesaplayan bir yöntem ayrık Fourier dönüşümünü, ani gerilim vektörlerini ve hızlı Fourier dönüşümünü birleştirmektedir. Ayrıca literatürde ışık kaynaklarına uygulanan gerilim değerlerini kullanmadan direkt lambanın ışık yoğunluğunu ölçerek fliker emisyonu tahmini yapan flikermetreler gibi farklı uygulamalar da vardır [15]. Ancak en yüksek doğruluğa sahip ölçümleri yapan algoritmalar genellikle IEC 61000-4-15 flikermetre standardının [34] baz alınmasıyla elde edilmiştir. Rüzgar türbinlerinin güç kalitesi üzerindeki etkilerini değerlendiren IEC 61400-21 standardı da flikermetre algoritmasından faydalanmaktadır. Ülkemizde de kabul edilmiş olan her iki standart ile yapılacak bir değerlendirme işlemi sayesinde, türbin tipini değiştirmek ve anahtarlama sayılarını bir kontrol sistemi ile azaltmak gibi önlemler alınarak türbinlerin neden olduğu güç kalitesi sorunlarının oluşması baştan önlenabilir. Bu durumda bozulan güç kalitesi karakteristiklerini düzeltmek için kullanılacak gerilim düzelticiler (SVC, STATCOM, vb.), filtreler ve diğer güç kalitesini iyileştirmeye yardımcı olabilecek cihazların yüksek ek masraflarının önüne geçilebilir. Bu amaçla literatürde son yıllarda her iki standardın da modellemeleri yapılmaya çalışılarak, türbinlerin sürekli çalışma ve anahtarla işlemleri

esasındaki fliker ve gerilim değişimlerini tahmin etmeye yönelik çalışmalar artmaktadır [16,35,36].

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, şebeke parametrelerinin ve rüzgar türbinlerinin tüm bileşenlerinin güç kalitesi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Rüzgar enerjisinin şebekeler içerisindeki oranının artmasına engel olan bu etkiler arasında en önemli bölüm, mevcut standartlarla önemi vurgulanan ve bir algılama problemi olması nedeniyle analizi oldukça karmaşık olan flikere ayrılmıştır. Bu amaçla yapılan ayrıntılı bir literatür taraması sonucunda elde edilen sonuçlar derlenerek, çeşitli türbin elemanlarının seçimlerinde vebilimsel çalışmalarda faydalanılabilecek detaylı bir fliker analizi yapılmıştır. Sonuç olarak sabit hızlı türbinlerin fliker etkilerinin daha fazla olduğu, türbülans yoğunluğu ile fliker emisyonunun arttığı ve özellikle kulenin dalgalanmalar üzerinde önemli bir etkisi olduğu belirlenmiştir.

5. Kaynaklar

- [1] Knudsen, H. ve Akhmatov, V., (2001), "Evaluation of Flicker Level in a T&D Network with a Large Amount of Dispersed Windmills", 16th International Conference and Exhibition on CIRED, 18-21 June 2001.
- [2] Bollen, M.H.J., Olguin, G. ve Martins, M., (2005), "Voltage Dips at the Terminals of Wind Power Installations", *Wind Energ.*, 8:307-318.
- [3] Tande, J.O.G., (2003), "Grid Integration of Wind Farms", *Wind Energ.*, 6:281-295.
- [4] Ummels, B.C., Gibescu, M., Kling, W.L. ve Paap, G.C., (2006), "Integration of Wind Power in the Liberalized Dutch Electricity Market", *Wind Energ.*, 9:579-590.
- [5] Ackermann, T., (2005), *Wind Power in Power Systems*, John Wiley & Sons, Chichester.
- [6] IEC 61400-21, (2001), *Wind Turbine Generator Systems-Part 21: Measurement and Assessment of Power Quality Characteristics of Grid Connected Wind Turbines*.
- [7] Estanteiro, A.L., Tande, J.O., Lopes ve J.A. Pecos, (2007), "Assessment of Power Quality Characteristics of Wind Farms", IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007, 1-4.
- [8] Bossanyi, E., Saad-Saoud Z. ve Jenkins, N., (1998), "Prediction of Flicker Produced by Wind Turbines", *Wind Energ.*, 1:35-51.
- [9] Tande, J.O.G., (2000), "Exploitation of Wind-Energy Resources in Proximity to Weak Electric Grids", *Applied Energy*, 65:395-401.
- [10] Masters, G.M., (2004), *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [11] Thiringer, T., Petru, T. ve Lundberg, S., (2004), "Flicker Contribution From Wind Turbine Installations", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 19:157-163.
- [12] Tande, J.O.G., (2002), "Applying Power Quality Characteristics of Wind Turbines for Assessing Impact on Voltage Quality", *Wind Energ.*, 5:37-42.
- [13] Wu, C. ve Chen, Y., (2006), "A Novel Algorithm for Precise Voltage Flicker Calculation by Using Instantaneous Voltage Vector", *IEEE Trans. Power Delivery*, 21:1541-1548.
- [14] Wang, C. ve Devaney, M.J., (2004), "Incandescent Lamp Flicker Mitigation and Measurement", *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 53:1028-1034.
- [15] Gallo, D., Landi, C. ve Pasquino, N., (2008), "An Instrument for Objective Measurement of Light Flicker", *Measurement*, 41:334-340.
- [16] Gutierrez, J.J., Ruiz, J., Leturiondo, L.A. ve Lazkano, A., (2007), "Flicker Measurement System for Wind Turbine Certification", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 1-3 May 2007, Warsaw.
- [17] Halpin, S.M., Bergeron, R., Blooming, T.M., Burch, R.F., Conrad, L.E. ve Key, T.S., (2003), "Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?", *IEEE Trans. Power Delivery*, 18:1088-1097.
- [18] Bollen, M.H.J. ve Gu, I.Y.H., (2006), *Signal Processing of Power Quality Disturbances*, John Wiley & Sons, New Jersey.
- [19] Diez, G., Eguiluz, L.I., Manana, M., Lavandero, J.C. ve Ortiz, A., (2002), "Instrumentation and Methodology for Revision of European Flicker Threshold", 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 262-265.
- [20] Wang, C., Devaney, M.J. ve Yang, S., (2001), "Decomposition of the IEC Flickermeter Weighting Curves", IMTC, 18-20 May 2004. Italy.
- [21] De Alegria, I.M., Andreu, J., Martin, J.L., Ibanez, P., Villate, J.L. ve Camblong, H., (2007), "Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requirements and Regulation", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 11:1858-1872.
- [22] Akhmatov, V. ve Eriksen, P.B., (2007), "A Large Power System in Almost Island Operation-A Danish Case Study", *IEEE Trans. Power Systems*, 22:937-943.
- [23] Hsu, Y.J. ve Lu, C.N., (2006), "Flicker Measurements at an Industrial Power Network with Wind Turbines", *Power Engineering Society General Meeting*, 18-22 June 2006.
- [24] Sorensen, P., Tande, J.O.G., Sondergaard, L.M. ve Kledal, J.D., (1996) "Flicker Emission Levels from Wind Turbines", *Wind Energ.*, 20:39-46.
- [25] Thiringer, T., (1996), "Power Quality Measurements Performed on a Low-Voltage Grid Equipped with Two Wind Turbines", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 11:601-606.
- [26] Thiringer, T. ve Dahlberg, J.A., (2001), "Periodic Power Pulsations from a Three-Bladed Wind Turbine", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 16:128-133.
- [27] Larsson, A., (2002), "Flicker Emission of Wind Turbines During Continuous Operation", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 17:114-118.
- [28] Tande, J.O.G. ve Uhlen, K., (2001), "Wind Turbines in Weak Grids-Constraints and Solutions", 16th International Conference and Exhibition on CIRED, 18-21 June 2001.
- [29] Bertola, A., Lazaroiu, G.C., Roscia, M. ve Zaninelli, D., (2004), "A Matlab-Simulink Flickermeter Model for Power Quality Studies", 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 12-15 Sept. 2004, 734-738.
- [30] Caldara, S., Nuccio, S. ve Spataro, C., (1999), "Digital Techniques for Flicker Measurement: Algorithms and Implementations Analysis", 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 656-661.
- [31] Soliman, S. ve El-Hawary, M., (2000), "Measurement of Power System Voltage and Flicker Levels for Power Quality Analysis Static LAV State Estimation Based Algorithm", *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, 22:447-450.
- [32] Wei, K., Xiangwu, Y. ve Lixia, Z., (2003), "A Modified Digital Measuring Method on Flickering", *Proceedings of Asia-Pacific Conference on CEEM*, 4-7 Nov. 2003, 621-625.
- [33] Vilar, C., Usaola, J. ve Amari, H., (2003), "A Frequency Domain Approach to Wind Turbines for Flicker Analysis", *IEEE Trans. Energy Conversion*, 18:335-341.
- [34] IEC 61000-4-15, (1997), *Electromagnetic Compatibility (EMC)-Part 4: Testing and Measurement Techniques-Section 15: Flickermeter-Functional and Design Specifications*.
- [35] Tascikaraoglu, A., Uzunoglu, M., Vural, B. ve Erdinc, O., (2010), "Power quality assessment of wind turbines and comparison with conventional legal regulations: A case study in Turkey", *Applied Energy*, 88:1864-1872.
- [36] Bo L., Liu X. ve He X., (2011), "Measurement system for wind turbines noises assessment based on LabVIEW", *Measurement*, 44:445-453.