ŞEBEKE GERİLİM ÇUKURU VE ACİL DURDURMA DURUMLARINDA RÜZGAR TÜRBİNİ ŞAFT VE KANAT TORKUNDA MEYDANA GELEN DEĞİŞİMLER VE ETKİLERİ

İbrahim Alişar¹, Erencan Duymaz², Erhan Demirok³

¹⁻²Siemens Gamesa Renewable Enerji AŞ, ³Dokuz Eylül Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ¹ibrahim.alisar@siemensgamesa.com, ²erencan.duymaz@siemensgamesa.com, ³erhan.d emirok@deu.edu.tr

ÖZET

Rüzgar türbinleri elektrik şebekesine bağlı durumdayken şebekede oluşacak gerilim çukurlarından ve arıza durumlarından etkilenmeleri söz konusudur. Rüzgar türbinlerinin sahip olması gereken önemli özelliklerden birisi de şebeke arızaları durumunda şebekeye bağlı kalabilmesi ve arıza durumunun ortadan kalkıp normal işletme koşullarına dönünceye kadar şebekeyi destekleyebilmesidir. Ülkelerin sahip oldukları farklı şebeke yönetmelikleri dolayısıyla şebekeye bağlı kalınması gereken süreler ve koşullar değişiklik gösterebilmektedir. Bu çalışmada, Tip-3 rüzgar türbinlerinin gerilim çukuru (gerilim düşüşü ve bu seviyede kalınması) süresince kanat, şaft ve generatör torkunda meydana gelen değişimler ele alınmış ve farklı koşullarda ortaya çıkan sonuçlar kıyaslanmıştır. Ayrıca, acil durdurma senaryosunda da benzer şekilde ortaya çıkan tork değişimleri incelenmiştir. Çalışmada, PLECS simülasyon ortamında oluşturulmuş 2MW gücündeki Tip-3 rüzgar türbini model kullanılmıştır. Farklı gerilim çukuru, farklı güç değerleri ve farklı hata tiplerinde simülasyon çalışmaları gerçekleştirilerek değişkenlerin sonuçlara olan etkileri gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

Rüzgar enerjisi, her yıl gittikçe artan kurulum kapasitesiyle, elektrik üretimi içerisindeki payını artırmaktadır. Mevcut durumda, son verilere göre dünyadaki toplam kurulu rüzgar enerjisi kapasitesi 740GW düzeyinin üzerine çıkmıştır [1].

Elektrik üretiminde gittikçe daha önemli bir paya sahip olan rüzgar enerjisi, yenilenebilir enerji kaynağı olması nedeniyle çevre dostu olması, ekonomik işletme maliyetleri, kurulduğu bölgelerde başka faaliyetlerin devam ettirilebilmesi ve birim alanda yüksek kapasitede üretim gibi özellikleriyle öne çıkmaktadır [2]. Kurulum alanları açısından karasal ve denizüstü (onshore ve offshore) olarak sınıflandırılabilecek olan rüzgar türbinleri, Şekil 1'de genel yapıları verilmekte olan çoğunlukla çift beslemeli asenkron generatör (DFIG), sürekli mıknatıslı senkron generatör (PMSG) ve sincap kafesli asenkron generatör (SCIG) tabanlı olarak tasarlanmaktadır [3]. Bu çalışmada, DFIG tabanlı Tip-3 rüzgar türbini ele alınmaktadır.



Şekil 1. (a) SCIG, (b) DFIG ve (c) PMSG tipi rüzgar türbinleri yapıları

Bir DFIG rüzgar türbininde bilezikli (wound-rotor) tip indüksiyon makinesi bulunur. Makinenin statör terminalleri doğrudan şebekeye (bir trafo aracılığıyla) bağlı iken, rotor kısmı rotor ve trafo arasında bulunan güç çevirgeci (sırt sırta bağlı iki adet AA/DA çevirgeçten oluşan) tarafından ikaz edilir (excited). Bu topoloji ile rotor akımları kontrol edilirken (statör gücünün kontrolü) rotor gücü de şebekeye güç çevirgeçleri vasıtasıyla aktarılır.

DFIG sisteminde limitli bir değişken hız aralığında ($\pm 30\%$), güç çevirgeçlerinin belirli bir güç kapasitesinde (toplam türbin gücünün %20-%30'u) olmaları yeterlidir. Bu ilişki şu şekilde verilebilir:

$$P_r = \frac{s}{1-s} P_{mech} \tag{1}$$

Bu durumda statör tarafındaki güç akışı şu şekildedir:

$$P_{S} = \frac{P_{mech}}{1-s} \tag{2}$$

Bu formüllerde geçen s ifadesi makine kayma (slip) değeri olarak isimlendirilir ve değeri şu şekilde hespalanır:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \tag{3}$$

Burada ω_1 elektrik şebekesi ile senkron olan statör elektriksel dönme frekansı, ω ise makinenin elektriksel dönme hızıdır.

Tip-3 rüzgar türbinleri (DFIG sistemleri), tüm rüzgar türbin çeşitleri göz önüne alındıklarında genel olarak maliyet avantajı ve verimlilik düzeyleri ile ön plana çıkmaktadır. Özellikle PMSG (Sürekli Mıknatıslı Senkron Generatör) yapısı ile kıyasladığımızda bu özellikler açısından avantajlı olduğu bilinmektedir. Ancak, tüm gücü çevirgeçler üzerinden şebekeye aktaran bu rüzgar türbini tipinde ise şebeke bağlantıları açısından çeşitli avantajlar bulunmaktadır. Bu bildiri konusunu teşkil eden gerilim çukurları açısından da PMSG tipinin ihtiva ettiği tam ölçek güç dönüştürücüleri üstün bir çözüm oluşturmaktadır. DFIG tipi rüzgar türbinlerinde ise generatörün doğrudan şebekeye bağlı olmasından dolayı gerilim çukuru konusu çok daha önemli bir problem teşkil etmekte ve yeterli çözümler oluşturulmadığı takdirde mekanik yapıların ciddi zararlar görmesi muhtemel hale gelmektedir.

Elektrik şebeke yönetmelikleri ve standartlar tarafından tanımlanmış olan güç kalitesi sorunlarından birisi de gerilim çukurlarıdır. Gerek üretim tesisleri ve tüketiciler, gerekse sistem operatörleri açısından önemi gittikçe artan gerilim çukurları IEEE standardında sistem temel frekansında gerilim rms değerinin 0.5 periyot ile 1 dk. arasında değişen süreler boyunca 0.1 - 0.9 pu aralığında azalması olayı olarak tanımlanmaktadır [4].

Gerilim çukurlarını ifade ederken düşülen gerilim seviyesi ve o seviyede kalma süresi parametreleri kullanılmaktadır [5].

Gerilim çukurunun oluşmasının çeşitli nedenleri bulunmaktadır. Bunlardan önde geleni, elektrik şebekesinde meydana gelen arızalardır. Diğer sebepler olarak da ani yük artışları, güçlü motorların devreye girmesi, trafoların enerjilendirilmesi vb. gösterilebilir.

Şebeke yönetmelikleri, şebekeye bağlı üretim ve tüketim noktalarının bağlantı şekilleri ve koşullarını belirlemektedir. Dünyada bölgeden bölgeye, ülkeden ülkeye değişiklik gösterebilse de teknik bazı konularda (farklı sayısal kosullar tanımlanarak) sebeke yönetmelikleri benzer isterler icermektedir. Bu kosullardan birisi de rüzgar santralleri icin tanımlanmıs olan sebekeve bağlı olma koşuludur. Büyük ölçekli, anlık bir rüzgar üretimi kaybı, şebekede büyük olumsuzluklara sebebiyet verebilecek potansiyele sahiptir. Burada kastedilen olası olumsuzluklar, kısa süreli (transient) ve kararlı hal (steady state) stabilite sorunlarıdır [6]. Bu nedenle Alçak Gerilimde Şebekede Kalabilme (LVRT), rüzgar türbinleri açısından hayati öneme sahip bir özellik olmaktadır. Genel olarak, belirli gerilim seviyelerinde belirli süreler boyunca sebekeye bağlı kalınması gerekmektedir. Sekil 2'de cesitli ülkeler icin her bir gerilim seviyesinde şebekeye bağlı kalınması gereken minimum süreler verilmiştir. Buna göre, örneğin Türkiye'de 0 gerilim seviyesinde 150ms'ye kadarki durumlarda şebekeye bağlı kalınması gerekmektedir. Diğer gerilim çukuru seviyeleri için ilgili azami süreler Şekil 2'deki eğri üzerinden takip edilebilir. Rüzgar türbinleri aşağıda farklı şebekeler için tanımlanan LVRT eğrilerinin üzerinde kalacak gerilim çukurlarında şebekeye bağlı kalmaya devam edecek, daha uzun süren arıza durumlarında türbinin güvenliği için şebekeyle bağlantısını kesebilecektir.



Şekil 2: Çeşitli ülkeler için şebeke gerilimi-minimum şebekeye bağlı kalma süresi grafiği

Acil durdurma, rüzgar türbinlerinin çeşitli nedenlerle ani olarak durdurulması sürecidir. Acil durdurma durumlarında gerilim çukuru durumlarındaki gibi şebekeye bağlı kalma durumu söz konusu olmayıp, tam tersine şebeke ile olan bağlantının kesilmesi gerekmektedir. Yine de bağlantının kesilmesi anına kadarki süre zarfında (ve sonrasında bir süre daha) rüzgardan aktarılan aerodinamik torkun devam etmesi nedeniyle mekanik stresler meydana gelebilmektedir. Acil durdurma işlemleri esnasında yunuslama açısının (pitch angle) en üst değişim hızında değiştirilmesi ve mekanik frenleme sisteminin devreye alınması söz konusudur.

Bu bildiri kapsamında rüzgar türbinlerinde LVRT ve acil durdurma durumlarında türbin içerisinde meydana gelecek tork stresleri incelenmektedir. Bildirinin ilk bölümünde, çalışmaların gerçekleştirildiği ve sonuçların elde edildiği simülasyon ortamı tanıtılmaktadır. İkinci bölümde, gerilim çukur değerinin tork tepe değerine olan etkisi incelenmektedir. Üçüncü bölümde, güç değerinin hata durumunda oluşan tork tepe değerine olan etkisi, dördüncü bölümde farklı tip hata durumlarının tork tepe değerine etkisi incelenmiştir. Beşinci bölümde, reaktif güç desteğinin olmasının LVRT'ye etkisi incelenirken; altıncı bölümde ise oluşturulan acil durdurma senaryosu gerçekleştirilmiş. Yedinci bölümde ise LVRT metodları sıralanarak avantaj ve dezavantajlarından bahsedilmiştir.

2. SİMÜLASYON TANITIMI VE PARAMETRELERİ

Simülasyon, Plexim firmasına ait PLECS programı vasıtasıyla, programın içeriğinde bulunan DFIG rüzgar türbini modeli geliştirilerek gerçekleştirilmiştir. Şebeke bağlantısı olan, türbin modeli, kanat modeli, yunuslama açısı (pitch angle) kontrolcüsü, mekanik frenleme sistemi ve çevirgeç kontrolcüsü içeren 2MW'lık bir DFIG sistemi kullanılmıştır (Şekil 3-6). Simülasyon ortamından kanat, dişli kutusu, yük ve rotor tork (elektriksel tork) ölçümleri yapılmıştır.



Şekil 3. DFIG sistemi simülasyonu genel görünümü



Şekil 4. Çevirgeç kontrolcüleri ve yunuslama açısı (pitch) kontrolcüsü



Şekil 5. Simülasyon türbin modeli



Şekil 6. Simülasyon kanat modeli

Rotor ataleti J_g	75 kgm^2
Dişli kutusu ataleti J_{gb}	$4,26x10^5$ kgm ²
Göbek (hub) ataleti J_h	$6,03 \times 10^4 \text{ kgm}^2$
Kanat ataleti J_b	$1,13x10^{6}$ kgm ²
Rotor sürtünmesi D_g	0,81 Nms/rad
Dişli kutusu sürtünmesi D_{gb}	1,78x10 ⁴ Nms/rad
Göbek (hub) sürtünmesi D_h	$8,11 \times 10^3$ Nms/rad
Kanat sürtünmesi D_b	$1,08 \times 10^3$ Nms/rad
Dişli kutusu-rotor bükülme direnci k_{gbg}	4,67x10 ⁷ Nms/rad
Göbek-dişli kutusu bükülme direnci k _{hgb}	$1,39 \times 10^1$ Nms/rad
Kanat-göbek bükülme direnci k _{bh}	$1,07 \times 10^1$ Nms/rad
Dişli kutusu-rotor sönümlendirme d_{gbg}	$0,81 \times 10^3$ Nms/rad
Göbek-dişli kutusu sönümlendirme d _{hgb}	2,84x10 ⁶ Nms/rad
Kanat-göbek sönümlendirme <i>d</i> _{bh}	$3,24 \times 10^6$ Nms/rad

Çizelge 1. Rüzgar türbini mekanik parametreleri

Simülasyon sonuçları verilirken kullanılan pu değerleri düşük hız tarafında T_{baz} =1162790.69 Nm, yüksek hız tarafında ise bu değerin yüzde biri baz alınarak hesaplanmıştır.

3. GERİLİM ÇUKUR DEĞERİNİN TORK TEPE DEĞERİNE OLAN ETKİSİ

Bu bölümde şebekede oluşması muhtemel gerilim çukurları ve tork tepe değerlerine olan etkileri incelenmiştir. Şekil-7'de kanat, yük ve generatör torku değişimi 0pu 150ms gerilim çukuru koşulu için gösterilmiştir.



Şekil 7. 0 pu gerilim çukuru koşulunda kanat, yük ve generatör torku grafiği

Bu bölümde Şekil 2'de gösterilen Türkiye için tanımlanmış olan eğriye ait değerler kullanılmıştır. Seçilen gerilim çukurları için karşılık gelen azami süreler simülasyon ortamında uygulanarak tork değişimi tepe değerleri tespit edilmiştir.

Gerilim (pu)	Süre	Tork Tepe Değeri Nominal tork farkı (pu)
0	150ms	1,679
0,2	450ms	1,155
0,5	900ms	0,362
0,7	1200ms	0,103
0,9	1500ms	0,034

Çizelge 2. Gerilim çukur değeri senaryoları ve tork tepe değerleri

0, 0.2, 0.5, 0.7 ve 0.9pu değerlerinde yapılan benzetim çalışmaları sonucunda beklendiği gibi en büyük tork tepe değeri 0pu gerilim çukurunda gözlemlenmiştir. 0pu değerinden üst değerlere doğru uzaklaştıkça tork osilasyon tepe değeri düşmektedir. Buradan, gerilimin ani olarak 0 değerine düşme durumunun türbin açısından en zorlayıcı senaryo olduğu sonucuna varabiliriz. Bu bölümde gerilim çukurları senaryoları, şebeke yönetmeliklerinde olduğu gibi 3 fazda dengeli olacak şekilde kurgulanmıştır.

Şekil 8'de farklı gerilim çukuru seviyeleri için oluşan tork tepe değerleri birlikte gösterilmiştir. Beklenildiği gibi gerilim çukuru seviyesi düştükçe oluşan tork değişimi tepe değerinin dramatik şekilde arttığı tespit edilmiştir.



Sekil 8. %0, %20, % 50, %70 ve %90 gerilim çukuru seviyelerinde kanat torku tepe değerleri

Gerilim çukurları tanımlanırken kullanılan parametreler olan gerilim çukur seviyesi ve bu seviyede kalınan sürenin yanı sıra gerilim çukurlarının ne sıklıkla oluştuğu da bir diğer parametredir. Bu konuda Türkiye'den bir istatistiki çizelge Bölüm-4'te sunulmaktadır.

4. GÜÇ DEĞERİNİN HATA DURUMUNDA TORK TEPE DEĞERİNE ETKİSİ

Bu bölümde şebekede hata olması ya da gerilim çukurunun oluşması esnasında rüzgar türbinin üretmekte olduğu gücün tork değişimi tepe değerlerine olan etkisi incelenmiştir.



Şekil 9. Farklı güç seviyelerinde kanat torku ve yük torku değişimi

Çizelge 3.	. Farklı	güç yüzdesi	durumlarında	kanat	ve yük t	orku 1	nominal	ve tepe	değerleri

	Ka	anat torku (pu)		Yük Torku (pu)			
Güç Yüzdesi	Nominal	Tepe Değeri	Fark	Nominal	Tepe Değeri	Fark	
%25	-0,426	0,628	1,054	-0,405	0,487	0,892	
%50	-0,629	0,557	1,186	-0,604	0,448	1,052	
%100	-1,119	0,481	1,600	-1,091	0,419	1,510	

Şekil 9'da görsel olarak ve Çizelge 3'te sayısal olarak verilen analiz sonuçlarına göre beklenildiği gibi tam güç çalışma koşulunda en yüksek tork tepe noktası elde edilirken güç değeri düştükçe tork değişimi de azalmaktadır.

5. FARKLI TİP HATA DURUMLARININ TORK TEPE DEĞERİNE ETKİSİ

2. bölümde ele alınan senaryolar tam güçte 3 faz toprak arızası oluşturularak incelenmiştir. Bu bölümde ise farklı hata tipleri ele alınarak benzer senaryolarda tork değişimleri kıyaslanarak incelenmiştir. Şekil 10'da farklı şebeke hata tiplerinde oluşan tork tepe değerleri gösterilmektedir.



Şekil 10. Şebeke hata tiplerinin tork tepe değerine etkisi

Çizelge 4. Farklı hata tiplerinde tam güç çalışma durumunda oluşan tork değerleri

	Tork (pu)				
	Tepe değeri Fark				
Faz-Toprak	-0,632	0,418			
3-faz Toprak	0,628	1,678			
Faz-Faz-Toprak	0,321	1,371			
Faz-Faz	0,280	1,331			

Çizelge 4'te nominal durumda -1,05032pu kanat tork değeri ölçülmüşken oluşan çeşitli şebeke hata durumları için elde edilen ölçümler ile hata durumlarında ortaya çıkan tork tepe değerleri arasındaki fark tespit edilmiştir.

Çizelge 4'ten görüldüğü gibi en yüksek tork tepe değeri 3-faz toprak hatasında meydana gelmektedir. Faz-faz-toprak ve faz-faz hatasında benzer bir tork değeri oluşmaktadır. Hata tipleri arasında daha düşük değerde tork farkı meydana gelmesine sebep olan durum, faz-toprak hatası olarak tespit edilmiştir. 3-faz toprak hatasında en fazla değerin görülmesi ve faz-toprak hatasında ise en düşük tork farkı değerinin elde edilmesi beklenen sonuçlardır.

Elde edilen bu sonuçların yanı sıra, farklı tipteki şebeke hatalarının ne sıklıkla görüldüklerine dair bir istatistik sonucunu da paylaşmak yerinde olacaktır.

2015 Yılı Boyunca Fider Başına Düşen Olay Sayıları									
	380kV fiderleri			154 kV fiderleri			154 kV altı fiderler		
	Çukur	Tepe	Kesinti	Çukur	Tepe	Kesinti	Çukur	Tepe	Kesinti
	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa	Kısa
	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli	Süreli
İstanbul Avrupa Yakası Bölge Müdürlüğü	197.2	47.9	2.3	278.5	15.6	2.0	188.1	36.8	41.2
Bursa Bölge Müdürlüğü	1021.6	9.7	426.1	210.6	5.4	20.4	310.8	44.2	86.8
İzmir Bölge Müdürlüğü	109.0	8.9	47.0	90.7	4.1	10.8	851.3	10.1	388.2
İstanbul Anadolu Yakası Bölge Müdürlüğü	201.2	4.3	0.5	200.9	0.7	1.9	85.5	14.3	16.9
Sakarya Bölge Müdürlüğü	180.7	39.9	2.2	123.0	1.4	0.4	205.2	24.5	46.4
Kütahya Bölge Müdürlüğü	186.9	3.9	3.8	127.2	1.8	3.0	32.0	2.8	0.8
Isparta Bölge Müdürlüğü	119.5	29.5	3.3	684.5	5.5	36.0	460.3	18.0	51.7
Ankara Bölge Müdürlüğü	266.2	12.5	3.6	731.1	21.1	27.7	218.4	33.6	97.7
Konya Bölge Müdürlüğü	523.9	8.1	90.9	288.3	24.5	3.0	62.1	66.1	1.9
Samsun Bölge Müdürlüğü	189.9	5.1	3.6	162.4	7.3	2.0	22.8	1.8	1.8
Kayseri Bölge Müdürlüğü	274.4	18.2	19.5	151.0	1.6	2.6	102.0	16.6	13.0
Gaziantep Bölge Müdürlüğü	183.6	7.4	16.8	405.6	7.0	15.8	350.0	32.5	27.8
Elazığ Bölge Müdürlüğü	235.5	12.5	65.8	221.2	2.6	3.6	1416.0	23.0	509.3
Trabzon Bölge Müdürlüğü	298.4	9.0	8.8	3153.4	3.5	1192.8	16.6	0.9	0.3
Erzurum Bölge Müdürlüğü	262.0	78.5	5.0	193.3	4.6	199.3	3.6	4.2	2.3
Batman Bölge Müdürlüğü	285.7	9.0	2.6	351.8	4.6	181.9	437.2	35.1	93.2
Van Bölge Müdürlüğü	254.3	9.7	5.7	1061.4	20.4	15.6	0.0	0.0	0.0
Adana Bölge Müdürlüğü	78.1	4.2	3.2	225.4	36.1	9.8	258.1	3.8	47.5
Antalya Bölge Müdürlüğü	210.4	3.1	3.4	162.7	7.5	38.9	0.0	0.0	0.0
Edirne Bölge Müdürlüğü	210.9	7.4	0.7	766.0	22.0	115.4	44.8	13.7	13.5
Denizli Bölge Müdürlüğü	70.0	2.7	0.2	81.6	4.6	2.2	69.5	6.9	51.3
Kastamonu Bölge Müdürlüğü	151.8	2.2	5.4	27.0	0.2	0.8	0.3	1.3	0.7

Çizelge 5. 2015 yılında gerçekleşen olayların gerilim seviyelerine göre fider başına düşen ortalama sayıları [7]

Çizelge 5'te yer alan kesinti ifadesi, bir veya daha fazla fazda gerilimin nominal gerilimin %10'undan daha aşağı bir değere düşmesini ifade etmektedir.

TOPLAM	<= 0.1 s	> 0.1-0.5 s	> 0.5-1 s	> 1-1.5 s	> 1.5-2 s	> 2-2.5 s	>2.5-3 s	> 3 s
0-10%	2	0	0	0	0	0	0	0
10-20%	45	11	3	0	0	0	0	0
20-30%	30	2	0	0	0	0	0	0
30-40%	20	7	0	0	0	0	0	0
40-50%	9	4	0	0	0	0	0	1
50-60%	7	1	0	0	0	0	0	0
60-70%	3	1	0	0	0	0	0	0
70-80%	2	0	0	0	0	0	0	0
80-90%	0	2	0	0	0	0	0	0
>=90%	0	0	0	0	0	0	0	6

Çizelge 6. Alibeyköy-Beykoz hattında bir yıl süresince oluşan çukur sayısının genlik-zaman değerleri [8]

Yukarıdaki örnek çizelgede yer alan veriden görülebileceği gibi gerilim çukurları çoğunlukla daha düşük yüzdeli düşüm durumlarında meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra daha düşük olasılıkla da olsa derin çukurlar meydana gelebilmektedir.

6. REAKTİF GÜÇ DESTEĞİNİN LVRT'YE ETKİSİ

Rüzgar türbinleri, şebekede gerilim çukuru ile karşılaştıkları durumda şebekeye bağlı kalırken aynı zamanda reaktif güç desteğinde bulunmaları gerekmektedir. Bu sayede bağlı bulundukları barada gerilim regülasyonuna katkıda bulunarak gerilim düşümünün boyutunu azaltma, geri toparlanma sürecini kolaylaştırma vb. etkiler beklenmektedir.

Tip-3 rüzgar türbinlerinin yaşanan gerilim çukurları esnasında reaktif güç desteğinde bulunmasının tork değişimine etkisi incelenmiş ve kısıtlı bir etkisinin olduğu sonucu elde edilmiştir. Özellikle ilk gerilim düşümü esnasında yaşanan ani tork artışına ait olan tepe noktasına bir etkisinin neredeyse bulunmadığı, osilasyondaki sonraki tepe noktalarını iyileştirici yönde bir etkisinin olduğu görülmektedir. Bunun en önemli sebeplerinden birisi de reaktif güç desteğinin gecikmeli olarak uygulanabilmesidir. Çünkü, türbinin gerilimin düşüşüyle birlikte reaktif güç desteği sağlama kararını uygulamaya başlaması gecikmeli olmakta; ancak gerilim düşümüne bağlı tork artışı ise o esnada yaşanmaya devam etmektedir. Bu nedenle reaktif güç desteği sağlanmasının tam güçte tork artışı açısından önemli bir iyileştirici etkisinin bulunmadığı; ancak bağlı bulunan barada gerilim regülasyonu açısından elzem olduğu değerlendirilmektedir. Ayrıca, reaktif güç desteğinin olmasının gerilim çukurunun ortadan kalkarak gerilimin nominal değerlerine dönmesi esnasında oluşacak tork osilasyonu durumlarında etkili olabileceği söylenebilir.



Şekil 11. Reaktif güç desteğinin gerilim çukur kaynaklı tork değişimi tepe noktası değerine etkisi

Şekil 11'de görüldüğü gibi ilk tork tepe değerinde bir farklılık oluşmamakta; ancak takip eden tepe noktalarında reaktif güç desteğinin etkisi gözlemlenmektedir.

7. ACİL DURDURMA SENARYOSU

Acil durdurma durumları rüzgar türbinlerinde ortaya çıkabilecek acil durumlarda türbinin bir an önce şebeke bağlantısı kesilerek durdurulması prosedürlerini içermektedir. Bu durumun LVRT'den farkı şebekede herhangi bir hata durumu olmaması ve işlemin başlatılmasıyla birlikte türbinin yavaşlatılarak durdurulmasıdır. LVRT durumlarında (tanımlanan süreler boyunca) şebekeye bağlı kalınması gerekmektedir.

DFIG simülasyon modeli içerisinde rüzgardan gelen güç ve tork değerinin generatör açısal hızına, rüzgar hızına ve kanat açısına bağlı bir modeli geliştirilmiştir. Buna ek olarak acil durdurma butonu vasıtasıyla acil durma senaryosunu gözlemleyebilmek adına mekanik fren yavaş şaft kısmına eklenmiş ve türbinin güvenli bir şekilde durduralabilmesi için kanat açısı kontrolüyle beraber devreye alınmıştır. Şekil 12'de frenleme sistemine ait kontrolcülerin genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 12. Frenleme sistemine ait kontrolcüler

Kanat Açısı Kontrolü: Türbinin kanat açıları hem generatör dönüş hızının hem de aktif gücün maksimum değerinin sınırlanması amacıyla kullanılmaktadır. Bu nedenle kanat açısının referans değeri hem dönüş hızında meydana gelen hatanın hem de aktif güçte meydana gelen hatanın PI kontrolcülerden geçirilmesiyle elde edilmektedir. Türbin sistemlerinin mekanik sistemler olması sebebiyle bu referans açısının yerine getirilmesinin gerçeğe en yakın şekilde modellenmesi için referans değerinin artış hızı saniyede 5 derece/saniye olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 13'te kanat açısı kontrolcüsü genel görünümü yer almaktadır.



Şekil 13. Kanat açısı kontrolcüsü genel görünümü

Mekanik frenin uygulaması: Mekanik fren uygulaması simülasyon ortamında aşağıdaki formül ile uygulanmıştır [9].

$$Tb = Tb_{max}tanh(\alpha\omega_r) \tag{4}$$

Bu formülde α değeri 5 olarak alınmıştır. Tb_{max} değeri ise simülasyonda 1200kNm olarak kullanılmıştır.

Türbinin Aerodinamik Modeli:

Belirli bir kanat çevresel hız oranı (tip speed ratio) ve yunuslama açısı (pitch angle) için güç katsayısı Denklem-6 ve Denklem-7 aracılığıyla hesaplanmaktadır [10].

$$\lambda = \frac{\omega_{turR}}{u_{wind}} \tag{5}$$

$$C_p(\lambda,\beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3\beta - c_4\right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6\lambda \tag{6}$$

Denklem-6'da yer alan katsayılar şu şekildedir:

 $c_1 = 0.5176, c_2 = 116, c_3 = 0.4, c_4 = 5, c_5 = 21, c_6 = 0.0068$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$
(7)

Acil durdurma senaryosu için simülasyon ortamında iki farklı alt senaryo uygulanmıştır. İlkinde acil durdurma işlemi başlar başlamaz aerodinamik ve mekanik frenleme sisteminin devreye girdiği, aslında gerçekçi olmayan; ancak alt limit değerde (0 süre) bir gecikmenin etkisinin

gözlemlendiği bir senaryo koşturulmuştur. İkinci senaryoda ise frenleme sisteminin 50ms'lik bir gecikme ile devreye girdiği bir senaryo ele alınmıştır. Her iki senaryoda da şebeke ile olan bağlantıyı kesecek devre kesicilerin tepki süresi olarak 100ms belirlenmiştir. Şekil 14'te bu iki alt senaryo ve tam güçteki gerilim çukuru senaryosunun bir arada gösterildiği tork değişimleri gösterilmektedir.

Elde edilen sonuçlara göre acil durdurma durumlarındaki tork değişimlerinin Opu gerilim çukuru durumuna göre daha az oldukları sonucuna varılmıştır. Burada, frenleme sisteminin etkisi görülmektedir. Ayrıca, uzun süreli devam edebilecek olan gerilim çukurları sonucu oluşan tork osilasyonları, acil durdurma durumlarında daha kısa süreli olmaktadır.

	Tork (pu)	Fark (pu)
Nominal	-1,119	
LVRT	0,628	1,747
Acil Durdurma	-2,537	1,418

Çizelge 7. Acil durdurma ve LVRT senaryolarının tork değişimi açısından karşılaştırması

Çizelge 7'de de görüldüğü gibi acil durdurma senaryosunda kararlı hal durumuyla aynı işaretli bir tork tepe değeri oluşmaktadır. Bunun yanı sıra, gerilim çukuru oluşması esnasında meydana gelen tork tepe değerine göre daha büyük değerde bir tork tepe değeri gözlenmektedir. Acil durdurma senaryosunda 2.5pu tork değerlerine ulaşılması nedeniyle acil durdurma senaryosunun tasarım aşamasında önem arz ettiği değerlendirilmektedir. Ayrıca, gerilim düşümü esnasında tork dalgalanmalarının azalan yönde olduğu görülürken, acil durdurma senaryolarında ise tork dalgalanmalarının kararlı haldeki değerine göre artan yönde olduğu gözlenmektedir.

Alt senaryoların simülasyonu sonucunda elde edilen bir diğer sonuç da frenleme sisteminin gecikme süresinin oluşan tork değişim tepe noktası değerini değiştirmediğidir. Elbette, frenleme sistemi ne kadar erken devreye girebilirse devre kesici açıldığı andaki tork değişimini iyileştirici yöndeki etkisi o kadar fazla olacaktır.



Şekil 14. Acil durdurma senaryosunda oluşan tork karakteristiği

Acil durdurma seçeneğinin ne sıklıkla kullanılabileceği operatörlere ve belirlenen prosedürlere bağlıdır. Elbette türbin tasarımının hangi kriterler ve parametreler göz önüne alınarak yapıldığına göre de azami acil durdurma sayısı değişebilmektedir. Sektörden bir sayısal örnek olarak türbin servis yaşamı boyunca toplam acil durdurma sayısının genellikle 500 ile 1000 arasında olduğu belirtilmektedir [11].

8. LVRT METODLARI, AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

Bu bölümde önceki bölümlerde etkileri çeşitli açılardan ele alınan gerilim düşüşleri durumlarında DFIG sistemlerinin şebekeye bağlı kalabilmeleri için gerekli olan LVRT metodları, avantaj ve dezavantajları özet olarak sunulmaktadır.

DFIG, sahip olduğu çeşitli özelliklerden dolayı yaygın olarak tercih edilen generatör tiplerindendir. Değişken hızda çalışırken frekansın sabit tutulabilmesi, daha düşük güçte çevirgeç ihtiyacı ve aktif-reaktif gücün ayrıştırılmış (decoupled) kontrolü ve yüksek verim bu özelliklerden bazılarıdır.

Bu özelliklerin yanı sıra statör bağlantısının doğrudan şebekeye bağlı olması şebekede oluşabilecek hata ve gerilim düşüşü durumlarında generatörün bu durumlara doğrudan maruz kalması anlamına gelmektedir. Şebeke gerilim düşüşleri, gerekli önlemlerin alınmadığı durumlarda rotor aşırı akımlarının oluşmasına, tork osilasyonlarının ortaya çıkmasına ve DC barada aşırı gerilimlerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumlarda DC bara kapasitörlerin, rotor tarafındaki çevirgecin ve mekanik parçaların zarar görmesi olasıdır.

Tüm bu nedenlerden dolayı DFIG (Tip-3) rüzgar türbinlerinin çeşitli donanımlar ve kontrol teknikleriyle birlikte şebekeye entegre edilmesi gerekmektedir.

Tip-3 rüzgar türbinleri için LVRT teknikleri genel olarak iki ana kategoride değerlendirilebilir. İlk kategori **donanımsal çözümleri** içermektedir. Donanım tabanlı çözümler de genel olarak ikiye ayrılmaktadır. İlki koruma devreleri, ikincisi ise reaktif güç sağlayan sistemlerdir.

Koruma devrelerine örnek olarak crowbar devresi, SDR tabanlı crowbar ve DC bara chopper devresi verilebilir. Crowbar koruma devresi, en bilinen LVRT yöntemidir. Bu devre, rotor sargılarına bağlı olan hatta bağlı, kontrol edilebilen dirençlerden oluşmaktadır [12]. Hata durumlarında, DFIG rotor ve statör tarafının manyetik olarak bağlaşık olmasından dolayı kısa süreli yüksek rotor akımları oluşmaktadır. Rotor tarafında yer alan çevirgecin kısa devre edilmesinde direnç grubu (crowbar koruma devresi) kullanılır.

Crowbar devrelerinin, yalnızca direnç içeren, direnç ve indüktörlü, kıyıcılı (chopper'lı), DVR'li (dynamic voltage restorer – dinamik gerilim onarıcı), DSR'li (dynamic series resistor – dinamik seri direnç) ve aktif crowbar olarak çeşitleri bulunmaktadır [13-16].

Statör zayıflatma direnci (stator damping resistor), ya da başka bir isimle **seri dinamik direnç** (SDR) statör ile şebeke bağlantısı arasında çift yönlü iletime imkan sağlayan anahtarla seri dirençlerin devreye alınıp çıkarılabildiği bir donanımdır [17]. Normal çalışma durumunda çift yönlü iletimli anahtarlar aktif iken, hata durumlarında anahtarlar devreden çıkarak akımın dirençler üzerinden geçmesi sağlanır ve statör akım değerleri limitlenmiş olur. Bu sayede, DFIG

tipi rüzgar türbinlerinde LVRT kapasitesi artırılmış olur. Seri dinamik direnç başka bir konfigürasyon olarak DFIG sisteminde stator ile şebeke tarafı çevirgecinin birleştiği nokta ile trafo arasında da bulunabilir. Bu pozisyonda da benzer şekilde hata durumlarında akımı limitleme görevini yerine getirir [18].

Hata durumları esnasında DC bara gerilimi azami limit değerlerinin üzerine çıkabilir. Bu durumda DC bara kapasitörleri ve yarı iletken anahtarların zarar görme ihtimali bulunmaktadır. Bu soruna DC baraya paralel olarak kullanılacak bir **kıyıcı (chopper) devresi** çözüm oluşturmaktadır. DC gerilim belirli bir seviyeyi geçtiği durumda kıyıcı devresi aktif olur ve direnç yardımıyla fazla gerilimin oluşması önlenmektedir. Referans 19'da DC baraya paralel olarak bağlı frenleme kıyıcı devresi (brake chopper circuit) uygulamasıyla LVRT metodu üzerine deneysel bir çalışma sunulmaktadır.

Dinamik gerilim onarıcı (dynamic voltage restorer), genel olarak bir gerilim kaynaklı bir çevirgeçtir. DFIG sistemi bu çevirgeç ile seri olarak şebekeye bağlanmaktadır ve bu sayede LVRT kapasitesi artırılmaktadır.

Referans 20'de, DVR kullanımı metodu ile DFIG sisteminin LVRT kapasitesinin geliştirilmesine yönelik bir çalışma sunulmaktadır.

Reaktif güç enjekte eden sistemlere örnek olarak dinamik gerilim onarıcı (DVR) ve STATCOM verilebilir.

Donanım modifikasyonu tabanlı sistemlerin avantajları olarak, tork osilasyonlarının, rotor aşırı akımlarının ve DC bara aşırı gerilimlerinin azaltılmasına yardımcı olmaları, simetrik ve asimetrik şebeke hatalarında etkili olmaları ve daha derin gerilim çukurlarında diğer yönteme (çevirgeç kontrolü modifikasyonu) göre daha verimli olmaları gösterilebilir.

Bu avantajların yanısıra bazı dezavantajlar da sıralanabilir. Fazladan donanım eklenmesinin yol açacağı maliyet artışı, verim düşümü, ağırlık ve hacimde artış ve dolayısıyla ortaya çıkabilecek yerleşim problemleri vb. sorunlar bahsi geçen dezavantajlardandır. Fazladan donanım eklenmesi nedeniyle sistem güvenilirliği (reliability) konusunda düşüş yaşanabilecek ve sistem karmaşıklığı artacaktır.

İkinci kategori ise DFIG çevirgeçlerinin kontrollerinin modifikasyonu tabanlıdır. Bunlara örnek olarak, model kestirimci kontrol, kayma mod denetleyicisi, bulanık kontrol, histeresis kontrol ve modifiye edilmiş vektör kontrol gösterilebilir.

Kontrol tabanlı LVRT çalışmalarına örnek olarak aşağıdaki çalışmalar verilebilir:

- Çift beslemeli indüksiyon generatörlerinin sensörsüz vektör kontrolüyle düşük gerilim dayanım performansları [21]
- DFIG türbinlerin şebeke arızalarındaki kontrol performansını arttırmak için ileri besleme akım referans kontrolü [22]
- DFIG türbinlerin arıza dayanım kabiliyetleri için direkt-model kestirimci kontrolü [23]
- DFIG türbinlerin düşük ve yüksek gerilim dayanımları için hibrit akım kontrollü çevirgeçler [24]
- DFIG rüzgar türbinlerinin akı halkalama takibilye LVRT kontrol stratejisi [25]
- Şebeke bağlantılı DFIG türbinlerin hata dayanımları için güç açısı kontrolü [26]

Bu yöntemlerin avantajları olarak, önceki metoda benzer şekilde tork osilasyonlarının, rotor aşırı akımlarının ve DC bara aşırı gerilimlerinin azaltılması, fazladan donanım ihtiyacının bulunmaması, dolayısıyla maliyet artışı ve sistem karmaşıklığında artış olmaması ve sistem güvenilirliğinin daha yüksek olması gösterilebilir.

Bu avantajların yanı sıra bu metodun belirli düzeye kadarki gerilim çukurlarında etkili sonuç göstermeleri ve çoğunlukla simetrik şebeke hatalarında kullanışlı olmaları bu yöntemlerin dezavantajları olarak sıralanabilir.

9. SONUÇ

Şebekede meydana gelen arıza tipleri, arıza sıklığı, şebeke kaybı, acil durdurma ihtiyacı ve bu durumlarda rüzgar türbinlerinin çalışma metodları (sahip oldukları teknolojiler), türbinlerin tasarımını, maliyetini ve yatırım fizibiletelerini etkileyen önemli unsurlardandır.

Türkiye'deki şebeke yönetmeliğine göre rüzgar türbinleri 150 ms boyunca devam edebilecek 0 p.u. değerindeki gerilim çukuru koşullarında (diğer gerilim değerleri için süreler verilmiştir) şebekeye bağlı olmaya ve şebekeyi desteklemeye devam etmek durumundadır. Bu tip şebeke arızalarında ve rüzgar türbini acil durdurma işlemi esnasında (uygun donanımsal ya da yazılımsal çözümler içerilmiyorsa) türbin kanadına, şaftına ve generatöre oldukça yüksek düzeyde mekanik yük binmektedir. Bu çalışmada farklı senaryolarda (gerilim çukur düzeyi, güç düzeyi, hata tipleri vb.) türbin kanat, şaft ve generatör tork değerlerinin değişimleri simüle edilmiş ve ilgili parametrelerin etkileri yorumlanmıştır.

Ayrıca, acil durdurma modu senaryosu tasarlanarak, yine oluşan tork değerleri incelenerek yorumlanmıştır. Sonuç olarak acil durdurma modunun rüzgar santrali operatörleri tarafından çok gerekli olmadıkça, aciliyet gerektirmeyen durumlarda kullanılmaması ve öncelikle başka çözümler üzerinde durulması tavsiye edilmektedir. Acil durdurma modunun devreye alınmasıyla birlikte değişen elektriksel parametrelerin oluşturmuş olduğu mekanik streslerin (bu çalışmada değişen tork miktarları üzerinde durulmuştur) mekanik bileşenlerin ömür sürelerinde olumsuz bir etkisinin olduğu unutulmamalıdır.

Çalışmanın sonraki aşamasında daha yüksek dereceli mekanik modellerle birlikte analiz gerçekleştirilmesi ve şebeke hatası sonrasındaki değişimlerin de analiz edilmesi planlanmaktadır.

Sorumluluk Reddi:

"Bu bildiride ifade edilen herhangi bir görüş, bulgu ve sonuç veya öneri yazarların görüşleridir ve Siemens Gamesa Renewable Energy şirketinin görüşlerini yansıtmak zorunda değildir."

Disclaimer:

"Any opinions, findings, and conclusions or recommendations expressed in this material are those of the authors and do not necessarily reflect those of Siemens Gamesa Renewable Energy."

KAYNAKLAR

- [1] https://wwindea.org/worldwide-wind-capacity-reaches-744-gigawatts/
- [2] R. Khezri and H. Bevrani, "Voltage performance enhancement of DFIGbased wind farms integrated in large-scale power systems: Coordinated AVR and PSS," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 73, pp. 400_410, Dec. 2015.
- [3] Ackermann, T. [Editor], "Wind Power in Power Systems", 2nd Edition, April 2012, John Wiley&Sons, UK. ISBN 0-470-974168
- [4] Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality, IEEE Std. 1159-1995
- [5] Bollen M.H.J, "Understanding power quality problems: voltage sags and interruptions" 2000.
- [6] Bollen P.-H. Huang, M. S. El Moursi, W. Xiao, and J. L. Kirtley, "Fault ridethrough configuration and transient management scheme for self-excited induction generatorbased wind turbine," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 5, no. 1, pp. 148-159, Jan. 2014.
- [7] Durmuş V., Avşar M., Taşkent S., Mantaş C.A., "Türkiye Elektrik İletim Şebekesinde 2015 Yılı Güç Kalitesi Analizi", 2016 Cigre Bildirisi
- [8] İnan, E., Alboyacı, B., Güç Kalitesi Monitör Ölçümleri Tabanlı Gerilim Çukur Sıklık İndeksleri, EMO
- [9] Calderon J.G., Natarajan A., Cutululis N.A., "Ultimate design load analysis of planetary gearbox bearings under extreme events", Wind Energy 2017; 20:325-343
- [10] https://www.izanda.com/en/wind-turbine-braking-system/
- [11] S. Heier, Grid Integration of Wind Energy, 3 ed., 1998.
- [12] S. Yang, T. Zhou, L. Chang, R. Shao, X. Zhen, and X. Zhang, "An analytical method for the response of DFIG under voltage dips," in Proc. IEEE Energy Convers. Congr. Expo. (ECCE), Sep. 2015, pp. 963-970.
- [13] J. Yang, J. E. Fletcher, and J. O'Reilly, "A series-dynamic-resistor-based converter protection scheme for doubly-fed induction generator during various fault conditions," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 2, pp. 422-432, Jun. 2010.
- [14] J. J. Justo and R. C. Bansal, "Parallel R-L configuration crowbar with series R-L circuit protection for LVRT strategy of DFIG under transientstate," Electr. Power Syst. Res., vol. 154, pp. 299-310, Jan. 2018.
- [15] S. Swain and P. K. Ray, "Short circuit fault analysis in a grid connected DFIG based wind energy system with active crowbar protection circuit for ridethrough capability and power quality improvement," Int. J. Elect. Power Energy Syst., vol. 84, pp. 64-75, Jan. 2017.
- [16] K. E. Okedu, S. M. Muyeen, R. Takahashi, and J. Tamura, "Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme," IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 3, no. 2, pp. 242-254, Apr. 2012.
- [17] M. Rahimi and M. Parniani, "Low voltage ride-through capability improvement of DFIGbased wind turbines under unbalanced voltage dips," Int. J. Electr. Power Energy Syst., vol. 60, pp. 82-95, Sep. 2014.
- [18] Sajjad Tohidi, Mohammadi-ivatloo Behnam, "A comprehensive review of low voltage ride through of doubly fed induction wind generators", Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 57, pp. 412, 2016.
- [19] G. Pannell, B. Zahawi, D. J. Atkinson, and P. Missailidis, "Evaluation of the performance of a DC-link brake chopper as a DFIG low-voltage fault-ride-through device," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 28, no. 3, pp. 535-542, Sep. 2013.
- [20] A. O. Ibrahim, T. H. Nguyen, D.-C. Lee, and S.-C. Kim, "A fault ridethrough technique of DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 3, pp. 871-882, Sep. 2011.
- [21] C.Wei,W. Qiao, and T. Kim, "Low-voltage ride-through performance of sensorless vector controlled doubly-fed induction generators," in Proc. IEEE Int. Conf. Electro Inf. Technol. (EIT), May 2017, pp. 530_534.

- [22] D. Zhu, X. Zou, S. Zhou, W. Dong, Y. Kang, and J. Hu, "Feedforward current references control for DFIG-based wind turbine to improve transient control performance during grid faults," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 32, no. 2, pp. 670_681, Jun. 2018.
- [23] M. Abdelrahem and R. Kennel, "Direct-model predictive control for fault ride-through capability enhancement of DFIG," in Proc. Eur., Int. Exhib. Conf. Power Electron., Intell. Motion, Renew. Energy Energy Manage. (PCIM), May 2017, pp. 1_8.
- [24] M. Mohseni, M. A. S. Masoum, and S. M. Islam, "Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters," Electr. Power Syst. Res., vol. 81, no. 7, pp. 1456_1465, 2011.
- [25] S. Xiao, G. Yang, H. Zhou, and H. Geng, "An LVRT control strategy based on _ux linkage tracking for DFIG-based WECS," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 60, no. 7, pp. 2820_2832, Jul. 2013.
- [26] S. Q. Bu, W. Du, H. F. Wang, and S. Gao, "Power angle control of gridconnected doubly fed induction generator wind turbines for fault ridethrough," IET Renew. Power Gener., vol. 7, no. 1, pp. 18_27, Feb. 2013.