

RES PROJELERİNİN TASARIMINA İLİŞKİN SİMÜLASYON UYGULAMALARI

Aykut AĞDEMİR, Mustafa Can KÖKTEN, Sarper BAŞAK

ENERCON GmbH

Aykut.Agdemir@enercon.de, Mustafa.Can.Koekten@enercon.de, Sarper.Basak@enercon.de

ÖZET

Yenilenebilir enerji sistemlerinin özellikle rüzgâr enerjisinin güç sistemi içerisine katılımının son yıllarda artması ile elektrik şebekesinin gerilim ve frekans kararlılığının sağlanması için şebeke yönetmelikleri (Grid codes) geliştirilmiştir. Rüzgâr enerjisi santrallerinin (RES) modellenmesi ve simülasyonu şebeke bağlantı kriterlerinin sağlanması bakımından planlanma safhasında çok önemli rol oynar. Projelendirme kapsamında yapılan simülasyonların güvenilirliği, devreye alınmış olan RES'in şebeke bağlantı noktasında yapılan ölçüm değerleri ile karşılaştırılarak kontrol edilebilir. Bu çalışmada; RES'in şebeke ile etkileşiminin simülasyonları çeşitli ülkelerin şebeke bağlantı kriterleri göz önünde bulundurularak anlatılacaktır.

Anahtar kelimeler: Şebeke yönetmelikleri, RES'in modellenmesi ve simülasyonu

1. GİRİŞ

Hava kirliliği ve giderek azalan fosil yakıt rezervlerinden dolayı yenilenebilir enerji sektörü önem kazanmıştır. Son yıllarda rüzgâr enerji sistemlerindeki teknolojik gelişmeler ve verilen devlet destekleri sayesinde rüzgâr enerjisinin güç sistemi içindeki payı hızla artmaktadır.

Rüzgâr enerjisi yatırımlarındaki ilerleme sonucunda sayıca artan büyük ölçekli rüzgâr çiftliklerinin ulusal elektrik enerji sistemleri işletimi üzerinde önemli etkileri vardır [1]. Bu nedenle rüzgâr türbinlerinin şebekeye bağlantı yönetmeliklerinin iyi derecede analiz edilmesi gereklidir. Bu bağlamda rüzgâr santralının şebekeye bağlanabilmesi için, gerilim değişimlerinin yönetmeliklerin belirlediği sınırların dışına çıkmaması, mevcut şebeke elemanlarının kısa devre akım limitlerini zorlamaması, fliker ve harmoniğin kabul edilebilir sınırlar içinde olması ve anahtarlama ve anlık devreye girme gibi geçici durumlarda şebeke kararlılığının sınır değerleri içinde kalması gereklidir [2].

Şebeke yönetmelikleri RES'in şebekeye bağlantı kriterlerini belirler. Şebeke yönetmeliklerinin birçok ortak özelliklerinin olmasının yanı sıra ülkeden ülkeye çeşitli farklılıklarda söz konusudur. Günümüz rüzgâr türbinlerinde, güç elektroniği ekipmanlarının yardımı ile farklı ülkelerin şebeke yönetmeliklerine uyum için çeşitli iyileştirmeler yapılmıştır.

RES'lerin projelendirme aşamasında yapılan simülasyonları, şebekeye bağlantı kriterlerini kontrol etmekte çok önemli rol oynar. Bu simülasyonlar şebeke yönetmeliklerini de hesaba katarak, rüzgâr türbini tipinin seçiminde ve RES bileşenlerinin (Kablo, transformatör vs.) boyutlandırılmasında büyük kolaylık sağlar.

Simülasyon sonuçlarının kesinliği ekonomik ve teknik açıdan projeyi etkileyeceği için simülasyon sonuçlarının test edilmesi zorunludur. Bu testler kapsamında, simülasyonların sonuçları ile şebeke bağlantı noktasında yapılan ölçümler karşılaştırılır.

2. Şebeke Yönetmelikleri ve Rüzgâr Türbinlerinin Geliştirilmesi

Bu bölümde Türkiye'deki ve Avrupa'daki şebeke yönetmelikleri, yapılan simülasyonlar kapsamında incelenecektir. Ayrıca rüzgâr türbinlerinde bu yönetmelikleri gerçeklemeye yönelik yapılan geliştirme çalışmaları da ele alınacaktır.

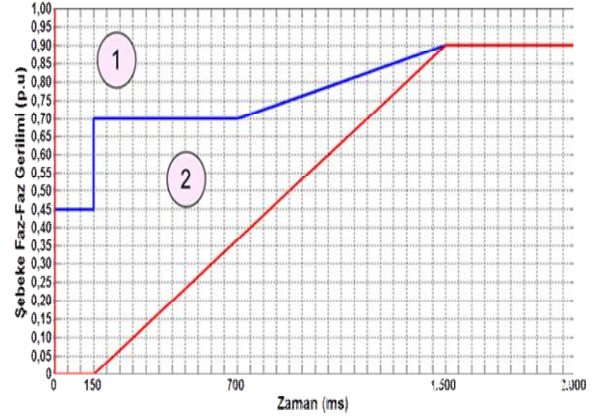
2.1. Türkiye'de Şebeke Yönetmelikleri

Ülkemizde artan rüzgâr enerji santrallerinin şebekeye olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak için Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliğinin EK 18'inde çeşitli değişiklikler yapılmıştır. Bu kriterler, iletim sistemine bağlı olan ve kurulu gücü 10 MW üzerinde dağıtım sistemine bağlı olan RES'lerde uygulanır [3].

2.1.1. RES'in Arıza Sonrası Sisteme Katkısı (FRT)

Şebekede meydana gelen arızalar sonucu değişen gerilimden dolayı rüzgâr santralleri şebekeden kopabilir. Geçmişte şebekenin kararlılığında büyük etkisi olmayan bu durum günümüzde RES'lerin elektrik üretimindeki payının artması ile şebekede kararsızlığa hatta tüm sistemin kesintisine (Blackout) sebep olabilir [1]. Bu tür durumların önlenmesi için, arıza halinde RES'in şebekeye bağlı kalması ve şebeke gerilimini desteklemesi beklenir [4].

Yenilenen yönetmelikte RES'in bağlantı noktasındaki şebeke geriliminin Şekil 1'de verilen 1 ve 2 numaralı bölgelerde kaldığı süre boyunca, herhangi bir fazda veya tüm fazlarda oluşan gerilim düşümlerinde RES'in şebekeye bağlı kalması gerekir [5].



Şekil 1: Arıza durumunda sağlanması gereken tepki[3]

2.1.2. Aktif Güç Kontrolü

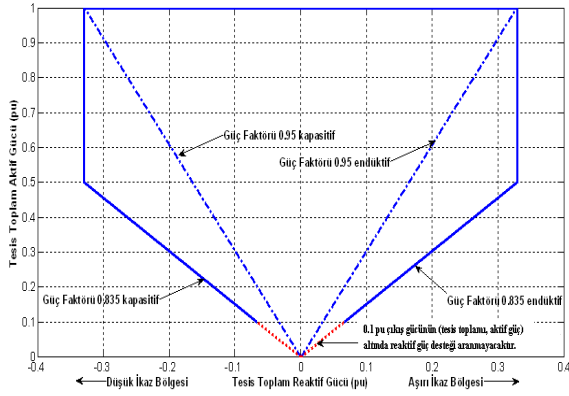
RES'in aktif güç çıkışı, gerektiğinde nominal gücünün %20-%100'ü arasında otomatik olarak kontrol edilebilir olmalıdır [5].

Bir elektrik şebekesinde verilen bir noktanın kısa devre gücü şebekenin o noktadaki performansının bir ölçüsüdür. Bir şebekenin bağlantı noktasındaki kısa devre gücü özellikle sistemdeki gerilim kalitesinin üzerinde önemli rol oynar.

Şebekede gerilim dengesizliğine yol açmamak ve yüksek seviyede gerilim kararlılığını sağlamak için, RES'in bağlantı noktasında yeteri derecede güçlü bir şebekeye bağlanması gerekir. Örneğin TEİAŞ tarafından şebekeye bağlanmasına izin verilen RES'lerin kurulu gücü, bağlantı noktasının minimum kısa devre gücünün (MVA), en çok yüzde beşi kadar olmalıdır [5].

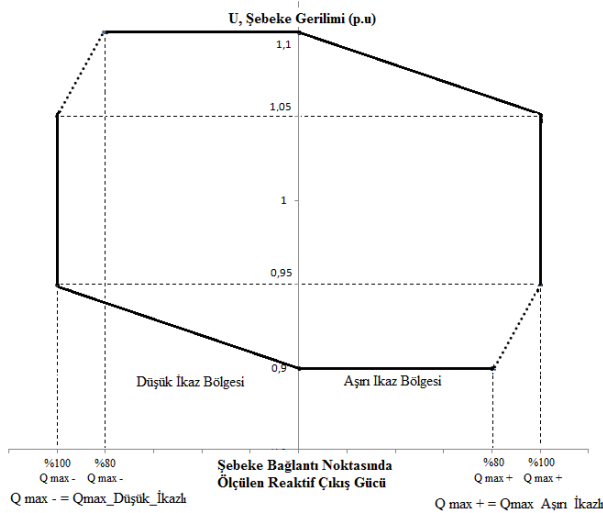
2.1.3. Reaktif Güç Kontrolü

Şekil 2'de koyu çizgilerle belirtilen sınırlar dahilindeki reaktif güç değerleri, RES'in şebekeye bağlantı noktası geriliminin değişim sınırları içindeki her noktada, sürekli olarak erişilebilir olmalıdır.



Şekil 2: Önerilen rüzgâr santrali reaktif güç kapasite eğrisi[3]

Şekil 2'deki reaktif güç değerlerine Şekil 3'te gösterilen gerilim aralıklarında ulaşılabilir.



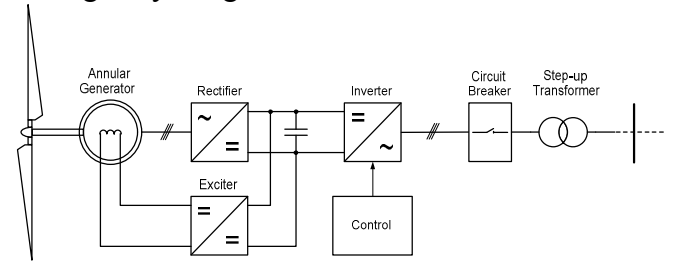
Şekil 3: Zorunlu reaktif güç değerlerinin bağlantı noktası gerilimine bağlı değişimi[3]

2.2. Avrupa'da Şebeke Yönetmelikleri

Başta Almanya ve diğer Avrupa ülkelerinde şebeke yönetmelikleri genel olarak Türkiye'deki şebeke yönetmeliklerine benzerlik gösterir. Birleşik Krallık'ta ise RES'in şebekeye bağlantı noktasında fliker ve transformatör darbe akımına bağlı gerilim düşümü P28 adlı mühendislik yönergesinde belirtilen sınırlar içinde kalmalıdır.

2.3. RES'İN ŞEBEKE YÖNETMELİKLERİNİ KARŞILAMAYA YÖNELİK GELİŞTİRİLMESİ

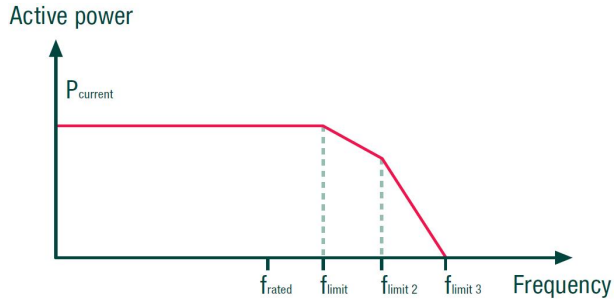
RES'in şebeke üzerindeki etkileri kullanılan generatör tipiyle ve bu generatörü şebekeye bağlayan ara elemanların konfigürasyonu ile değişir [1]. Önceki bölümlerde bahsedilen şebeke yönetmeliklerinin gerçekleşmesi için en uygun rüzgâr türbini konfigürasyonlarından birisi de tam ölçekli frekans çevirici ile şebekeye bağlı senkron generatördür. Bu tür rüzgâr türbinlerinde dişli kutusuna ihtiyaç olmamasının yanı sıra tam ölçekli çevirici ile farklı ülkelerin şebeke yönetmeliklerine uygun gerilim ve frekansta elektrik enerjisi üretilir. Şekil 4'te ENERCON'a ait rüzgâr türbini konfigürasyonu gösterilmiştir.



Şekil 4: Senkron generatörlü rüzgâr türbini konfigürasyonu ve şebeke yönetim sistemi [6]

2.3.1. Güç-Frekans Kontrolü

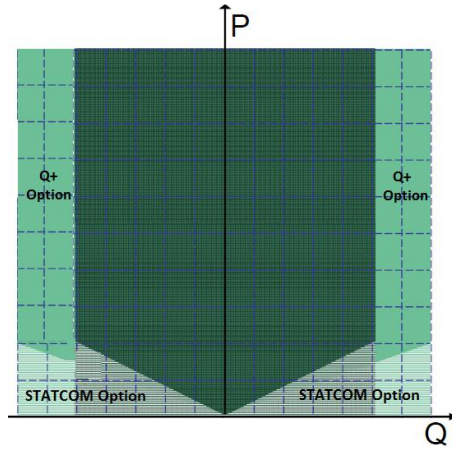
Şebeke frekans kontrolü, şebeke kararlılığının yanı sıra gerekli güç kalitesinin sağlanmasında önemli rol oynar. Eğer ki şebekenin frekansı geçici bir arıza sebebi ile normal sınırlardan yüksek olursa rüzgâr türbini aktif gücünü şebeke yönetmelikleri doğrultusunda Şekil 5'te gösterildiği gibi azaltma kapasitesine sahip olmalıdır.



Şekil 5: ENERCON rüzgar türbini güç-frekans eğrisi [6]

2.3.2. Reaktif Güç Yönetimi

Rüzgâr türbinlerinde reaktif güç yönetimi kablo ve transformatör gibi ekipmanların reaktif güç ihtiyacının karşılanması yanında şebeke geriliminin belirtilen yönetmelikler doğrultusunda düzenlenmesini sağlar. Farklı RES konfigürasyonlarında dahi şebekenin gerilim kararlılığının sağlanması için rüzgâr türbinleri Şekil 6'da gösterildiği gibi ek reaktif güç (Q^+) ve STATCOM gibi opsiyonlara sahip olmalıdır.



Şekil 6: STATCOM ve Q^+ opsiyonlu ENERCON E-70 rüzgar türbini aktif-reaktif güç eğrisi [7]

2.3.3. Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneği (FRT)

Şebekede meydana gelen herhangi bir kısa devre arızası sonrasında, gerilim düşümü oluşur ve sistemdeki bu gerilim düşümü ilerleyerek rüzgâr santrallerine kadar ulaşabilir. ENERCON rüzgar türbinlerindeki inverterler, LVRT taleplerine ve şebeke yönetmeliklerine uygun kontrol stratejisi (Zero Power Mode, QUM1, QUM2, PQM ve Phase Angle

Mode) ile kontrol edilebilme kapasitesine sahip olduklarından; arıza sonrasında rüzgar türbinleri şebekeden ayrılmaksızın işletmede kalmakta ve gerilim kararlılığının desteklenmesini sağlamaktadırlar. Şebeke arızası esnasında, şebeke tarafı konvertörü için şebeke yönetmeliği tarafından tanımlanan reaktif güç enjeksiyon eğrisine dayalı uygun kontrol stratejileri geliştirilerek generatör terminalindeki gerilimi düzeltebilmek için reaktif akım desteği verilebilir. Gerilim düşmesi esnasında gerilim restorasyonu için reaktif güç sağlamak şebeke tarafı konvertörünün kontrolü ile mümkündür [6].

3. RES PROJERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi RES'lerin bağlandığı enterkonnekte şebekede güç kalitesi problemlerine yol açmayacak şekilde planlanması zorunludur. Yapılacak simülasyon çalışmaları sayesinde bir rüzgar santralının şebekeye bağlandığında karşılaşılabilecek problemler ve kısıtlamalar varsa önceden belirlenip, RES tasarımı yeniden gözden geçirilebilir.

RES projelerindeki simülasyon uygulamaları genel olarak aşağıdaki konu başlıkları ile sınırlanabilir:

- Elemanların azami yüklenebilirlik noktasının belirlenmesi ve kısa devre akım hesapları
- Gerilim değişimleri ve dalgalanması
- RES bağlantı noktasındaki maksimum reaktif güç kapasitesi
- Harmonik analizleri ve fliker
- Arıza sonrası sisteme katkı yeteneği (FRT)
- Reaktif güç kontrolü
- Frekans ve aktif güç kontrolü
- Geçici aşırı gerilim

Aşağıdaki bölümlerde bazı simülasyon uygulamalarına dair çalışmalar vardır.

3.1. Elemanların Azami Yüklenebilirlik Noktasının Belirlenmesi

Güç kablolarından geçen akımın oluşturduğu kayıplar kabloları ısınmaya sebep olmaktadır. Ayrıca kabloların tesis edilme biçimi, toprak bileşimi ve kablunun cinsi kablolardaki ısınmayı etkiler.

Kablunun aşırı şekilde ısınmasını önlemek için, kablo üreticileri tarafından farklı işletme koşulları için maksimum akım taşıma kapasiteleri verilmektedir. Kurulacak rüzgar santrallerindeki kablunun en yüksek akım taşıma kapasitesi; kablunun döşendiği ortam koşulları ve döşeme şekline bağlı olarak IEC 60287'ye göre belirlenebilir [8]. Rüzgar santrali simülasyon modeli ile yapılan statik analizler (güç akışı) sayesinde kablo ve transformatör gibi elemanlardaki azami yüklenebilirlik noktası ENERCON tarafından belirlenebilir.

3.2. Statik Kısa Devre Akım Hesapları

RES elemanlarının kısa devre esnasında meydana gelen termik ve dinamik zorlamalara karşı dayanıklı olabilecek şekilde tasarlanmasında kısa devre simülasyonları önemli rol oynar.

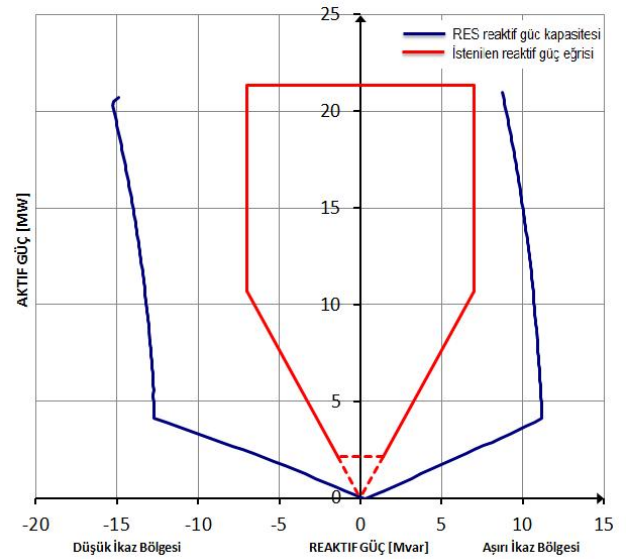
Kısa devre simülasyonlarında, tanımı IEC60909'a bağlı olarak yapılan üç fazlı başlangıç kısa devre akımı I_k'' oldukça önemlidir [9]. En büyük kısa devre akımı ($I_k''_{max.}$) elemanların seçimi için ve en küçük kısa devre akımı ($I_k''_{min.}$) ise sistemdeki koruma cihazlarının ayarları için kullanılmaktadır.

Kısa devre hesaplarının yapılabilmesi için öncelikle rüzgar türbininin kısa devre davranışı ve şebekenin kısa devre gücü bilinmelidir. ENERCON rüzgar

türbinlerinin kararlı durum kısa devre davranışı sabit değerli akım kaynağı olarak düşünülebilir. Türbinin maksimum üç kutuplu kısa devre akım çıkışı, çeviricilerdeki IGBT'ler tarafından fiziksel olarak sınırlandırılmıştır. Örneğin, ENERCON E-82 FT 2.3MW türbini için maksimum kısa devre akımı 4kA'dır.

3.3. Bağlantı Noktasındaki Reaktif Güç Kapasitesi Hesaplamaları

RES'ler şebeke yönetmelikleri kapsamında belirlenen aktif ve reaktif güç sınırları içerisinde çalışmalıdır. Örnek olarak, 7 adet ENERCON E-101 rüzgar türbininden oluşan RES'in nominal işletme koşulunda 110kV bağlantı noktasındaki aktif ve reaktif güç kapasitesinin PowerFactory adlı program yardımıyla yapılan simülasyonunun sonuçları Şekil 7'de gösterilmektedir [10]. Bu sonuçlar doğrultusunda bu RES'in Şekil 2'de istenilen şebeke kurallarına uygun olduğu görülür. Planlanan RES şebeke yönetmeliklerinde istenilen reaktif gücü karşılamaz ise, reaktif güç kapasitesi daha geliştirilmiş ENERCON rüzgar türbinleri (Q+ option) kullanılabilir.

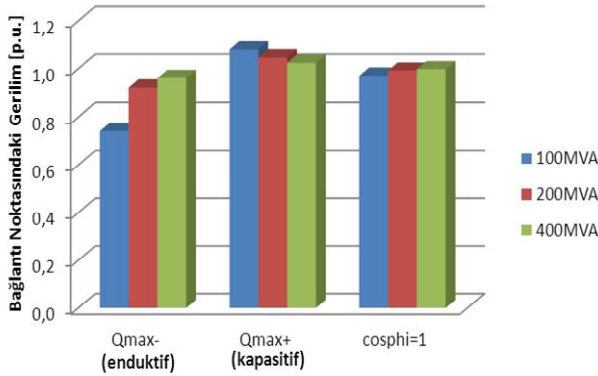


Şekil 7: RES aktif ve reaktif güç diyagramı

RES projesinde bağlantı noktasındaki kısa devre gücü RES toplam gücünün 4 katı veya daha az ise bu projelerin gerçekleştirilmesi sistemin stabilitesi ve gerilim kararlılığı yönünden oldukça zordur.

Şekil 8’de 7 adet rüzgar türbinine sahip bir RES’in farklı kısa devre gücüne sahip şebekelere bağlanması durumunda 110kV bağlantı noktasındaki gerilim değerleri görülmektedir.

Şebeke bağlantı noktası, sabit bir gerilim kaynağı ve bir empedans ile modellenmiştir. RES reaktif gücüne bağlı olarak zayıf bir şebekede (kısa devre gücü küçük) gerilim dalgalanmaları büyük ve güçlü bir şebekede (kısa devre gücü büyük) ise gerilim dalgalanmalarının da küçük olduğu Şekil 8’den görülebilir.



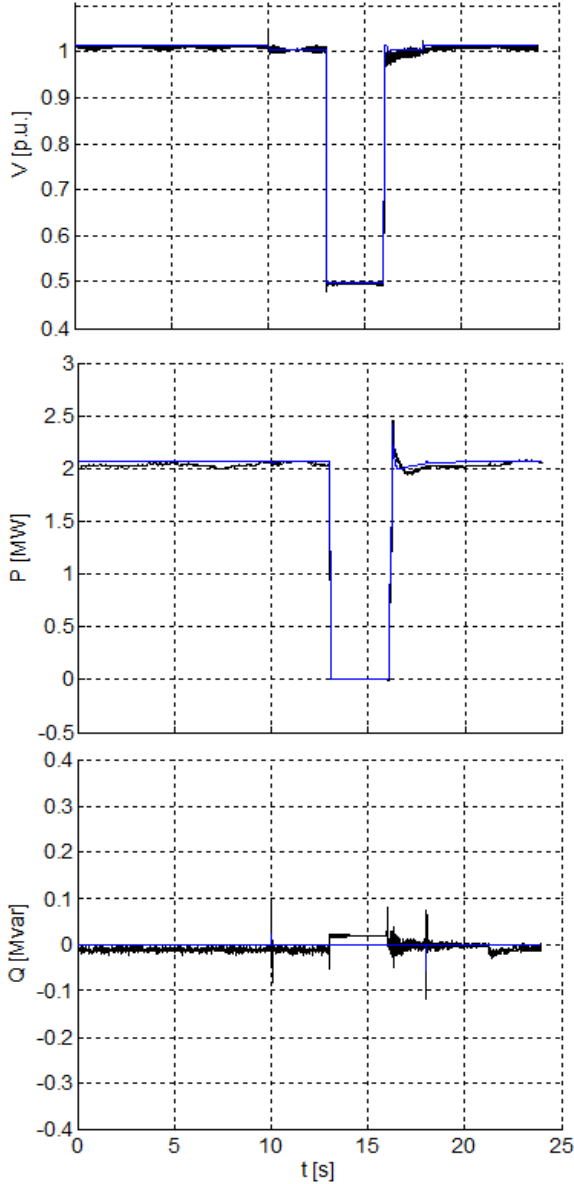
Şekil 8: Farklı kısa devre gücüne sahip şebekelere bağlanmış rüzgar türbinlerinin reaktif güç eğrisi

3.4. Arıza Sonrası Sisteme Katkı Yeteneği (LVRT) Simülasyonu

Şebekede oluşabilecek herhangi bir arıza halinde RES’in davranışı ve sisteme etkisi simülasyon modelleri sayesinde incelenebilir. Bunun için özellikle bir rüzgar türbininin arıza halindeki dinamik davranışının doğru modellenmesi zorunludur.

LVRT simülasyonları için ENERCON tarafından geliştirilmiş standart dinamik rüzgar türbin modelleri kullanılır. Şebeke yönetmelikleri doğrultusunda projede seçilen parametreler türbin modellerine verilebilmekte ve tüm RES şebeke bağlantı noktasında modellenebilmektedir.

Dinamik RES modelinin ve simülasyon sonuçlarının doğruluğu, öncelikle kullanılan türbin modelinin gerçeğe ne kadar benzediğine bağlıdır. Simülasyon modelinin gerçekliği simülasyonların sonuçları ile şebeke bağlantı noktasında yapılan ölçümler karşılaştırılarak test edilebilir. Şekil 9’da şebeke gerilim düşümü sonrası ENERCON türbinindeki LVRT davranışının (Zero Power Mode) simülasyon modeli (mavi) ile bağlantı noktasında yapılan ölçüm sonuçları (siyah) karşılaştırılmaktadır.



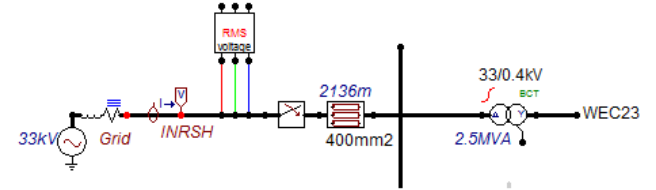
Şekil 9: ENERCON rüzgar türbini LVRT davranışının simülasyon ve ölçüm sonuçlarının karşılaştırılması

3.5. Türbin Transformatörlerinin Devreye Girmesi Sırasında Oluşan Darbe Akımlarının Hesaplanması

Bir türbin transformatörünün devreye girmesi sırasında geçici aşırı darbe akımları oluşmaktadır. Bu olay, bağlantı noktasındaki şebeke empedansının büyüklüğüne bağlı olarak, bağlantı noktasında gerilim çökmelerine ve aşırı yüke veya koruma rölelerinin açılmasına neden olabilir.

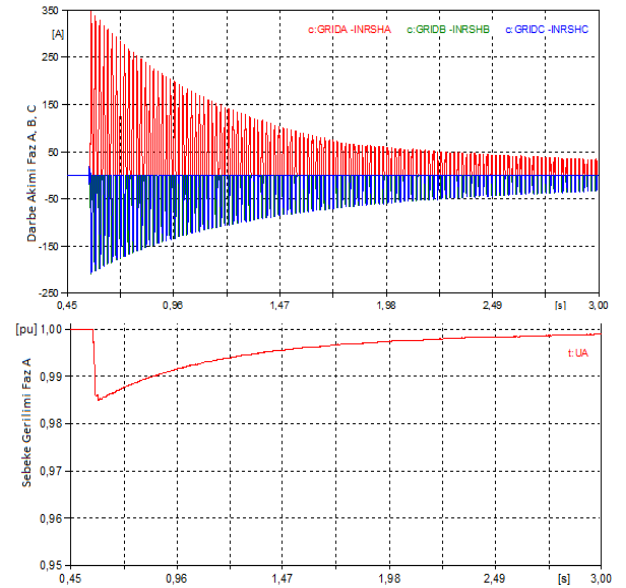
Şebeke yönetmelikleri bölümünde bahsi geçen ve Birleşik Krallık'da uygulanan

P 28 mühendislik yönergesi kapsamında RES'in şebeke bağlantı noktasındaki darbe akımının ve bu akımın sebebiyet verdiği gerilim düşümünün simülasyonu ATPDraw adlı program ile yapılabilir (Şekil10).



Şekil 10: RES'in transformatör darbe akımı ve şebeke bağlantı noktasındaki gerilim düşümü modeli

Şekil 11'de ATPDraw'da modellenmiş olan RES'teki trafoların devreye girme anındaki darbe akımı ve bu akımın sebebiyet verdiği anlık gerilim düşümü simülasyonunun sonuçları verilmiştir.



Şekil 11: Transformatör darbe akımı ve RES'in şebeke bağlantı noktasındaki gerilim düşümü

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada RES'in projelendirme aşamasında yapılan temel simülasyon hesaplamaları; güç kalitesi ve RES elemanlarının yüklenme kapasitesine değinilerek ele alınmıştır. Bunun yanında, RES'in şebeke yönetmeliklerine uygunluğunun proje aşamasında kontrol edilebilirliği gösterilmiştir. ENERCON rüzgar türbini simülasyon modelinin LVRT davranışının sonuçları ile yapılan ölçüm sonuçlarının benzerliği gösterilerek yapılan simülasyon modelinin güvenilirliği kanıtlanmıştır. ENERCON tarafından yapılan ve RES'lerin projelendirilmesi aşamasında önemli rol oynayan RES'in şebekenin harmonik seviyesine etkisi ve RES kontrol üniteleri ile ilgili simülasyonlar bir dahaki makale konusu olarak tarafımızdan sunulacaktır.

5. KAYNAKLAR

- [1] T. Ackermann, Ed., "Wind Power in Power Systems", Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2005.
- [2] Akdeniz E., "Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin şebekenin enerji kalitesi ve kararlılığı üzerine etkilerinin incelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
- [3] Elektrik piyasası şebeke yönetmeliğinde değişiklik yapılmasına ilişkin yönetmelik taslağı, Ek 18: Rüzgâr enerjisine dayalı üretim tesislerinin şebeke bağlantı kriterleri, <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/01/20130103-10.htm>.
- [4] Kurt Gül, Rüzgâr gücünün şebekeye entegrasyonunda arıza sonrası sisteme katkı yeteneği (FRT) 'nin farklı türbin –generatör üniteleri için incelenmesi.
- [5] Türkiye elektrik iletim sisteminde rüzgâr santralı bağlantıları, Türkiye Elektrik İletim A.Ş (TEİAŞ).
- [6] ENERCON wind energy converters, Technology & Service, Katalog.

- [7] Taveira Nuno, Grid codes in isolated systems, consequences for manufacturers, ENERCON GmbH.
- [8] IEC 60287: "Electric cables- Calculation of the current rating", Version 11, 1993.
- [9] IEC 60909: "Short-circuit currents in three-phase AC systems ", Version 1, 2001.
- [10] DiGSILENT PowerFactory Manual Version 14, Digital Simulation and network calculation software package, DiGSILENT GmbH, Gomarigen/Germany.