

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMİNE BAĞLI RÜZGÂR ENERJİSİ DÖNÜŞÜM SİSTEMLERİNİN BÜTÜNLEŞİK MODELLENMESİ

Özgür Salih Mutlu

Eyüp Akpınar

Dokuz Eylül Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
Kaynaklar Yerleşkesi, 35160 Buca / İZMİR
evup.akpinar@deu.edu.tr, ozgurmutlu@yahoo.com

ÖZET

Bu çalışmada rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinden oluşan şebeke bağlantılı rüzgâr enerjisi santrallerinin bütünleşik modellenmesi ile ilgili bilgiler verilmiş ve örnek olarak seçilen rüzgâr enerjisi santrali için bütünleşik model geliştirilmiştir. Bütünleşik model ile elde edilen sonuçlar detaylı model ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Rüzgâr Enerjisi Santrali, Rüzgâr Enerjisi Dönüşüm Sistemi, Bütünleşik Modelleme

1. GİRİŞ

Elektrik güç sistemi içerisinde elektrik enerjisi üretimi için rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri (REDS) giderek daha fazla pay almaktadır. Bu durum rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin elektrik güç sistemi ile bağlantısında karşılıklı etkileşimleri araştırmayı gerekli kılmaktadır. Konu ile ilgili planlama ve işletme safhalarında doğru sonuçlar veren analizlerin yapılabilmesi için yeterli teknik bilgi içeren, doğru varsayımlarla sadeleştirilmiş ve incelenecek konu başlığı ile ilgili doğru girdilere sahip modellerin geliştirilmesi şarttır.

Önceki yıllarda rüzgâr enerjisi santralleri; güç sisteminde herhangi bir aktif rolü bulunmayan, büyük konvansiyonel/nükleer santrallerin yanında sadece deneysel/bölgesel santraller olarak kabul edilen, sistem açısından sadece problem kaynağı olarak gösterilen, sisteme faydasının sınırlı olabileceği değerlendirilen ve sistemdeki her olağan dışı durumda sadece kendi sistemlerini korumak için sistem ile irtibatını koparan santraller olarak görülmekteydiler.

Ancak rüzgâr enerjisinin üretimdeki payının elde edilen deneyimlere bağlı olarak gelişen teknoloji ile artması bu öngörünün değişmesini gerekli kılmaktadır. Ulusal ve uluslar arası yapılan çalışmalar sonucu geliştirilen “şebeke bağlantı kriterleri-grid codes” ile uyumlu rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemleri; iletim sistemine bağlanan, düşük gerilimde sistem ile irtibatını kurallara uygun biçimde sağlayan, sistemin gerilim ve frekans kontrolüne katkıda bulunan büyük güçlü birer üretim santraline dönüşmektedirler.

Şebeke işletme sorumluları; rüzgâr santralinin bağlanacağı şebeke noktasında yapacağı etkinin daima pozitif yönde olması ve kontrollü olmasını şart koşmaktadır. Bunun nedeni rüzgâr enerjisinin şebekedeki payının artması ile konvansiyonel sistemlerin payının göreceli biçimde düşmesi ve sistem kontrolü ile ilgili görevlerin bir kısmının yeni rüzgâr santralleri tarafından yüklenilmek zorunda olmasıdır.

Bu durumda planlama ve işletme aşamasında rüzgâr santrali ile şebekenin birlikte doğru biçimde modellendiği bilgisayar simülasyonları ile çalışmalar yapılması, rüzgâr santralinin şebeke ile karşılıklı etkileşimini incelemek için zorunludur. Yapılacak bilimsel çalışmalar ile birbirinden farklı koşullarda; her iki taraf için kritik konular analiz edilir ve oluşabilecek problem sahaları için çözüm yolları araştırılır. Bilgisayar simülasyonlarının sahada ya da üretim tesislerinde yapılacak ölçümler ile karşılaştırılması; sonuçların doğrulanmasını ve daha sonra yapılacak yeni analizler için yeni yöntemler geliştirilmesini sağlar.

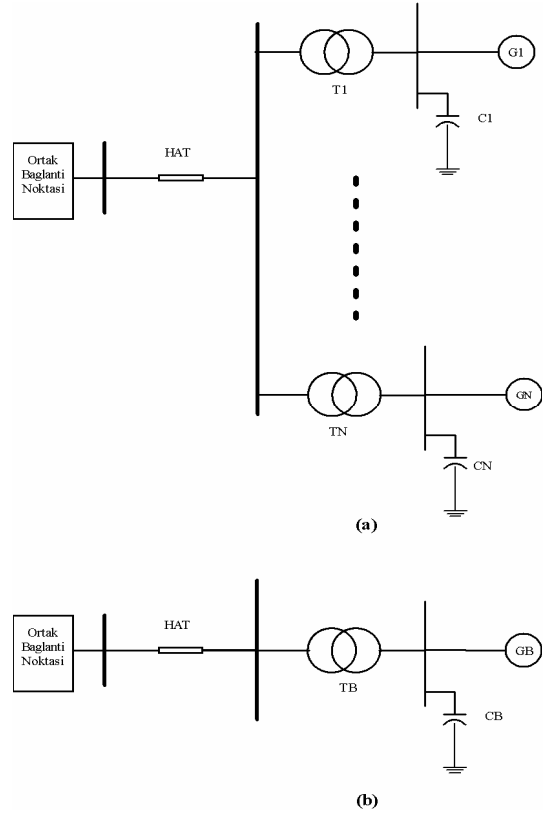
Elektrik güç sistemi ile rüzgâr santralinin aynı simülasyon programı içinde modellenme zorunluluğu bir takım problemleri de beraberinde getirir. Birbirine bağlı binlerce elektriksel noktayı içeren ve belli bölümleri sonsuz bara olarak kabul edilebilen elektrik güç sisteminin modellenmesinde birçok basitleştirme-bütünleştirme yapılmak zorundadır. Bu durum rüzgâr santrali tarafında da detaylı modellerin elektrik güç sistemi çalışmasına uygun biçimde sadeleştirilmesini gerektirir. Bu sadeleştirme yapılırken dikkat edilmesi gereken nokta, incelenen konu başlıklarını etkileyen parametreleri doğru belirleyebilmektir. Rüzgâr enerjisi sistemlerinin elektrik güç sistemleri

simülasyonları için “bütünleşik modellenmesi” bu ihtiyacı karşılayan bir seçenektir. Geçerli bir bütünleşik rüzgâr santrali modeli, yüzlerce REDS’ den oluşan rüzgâr santrallerinin elektrik güç sistemi simülasyon platformlarında doğru ve hızlı bir biçimde modellenmesini sağlayabilir.

Konu ile ilgili farklı çalışmalar yapılarak yayınlanmıştır. Bilezikli asenkron jeneratör ile kurulmuş rüzgâr santralleri için, türbinler farklı rüzgârlara maruz kalsa da, detaylı rüzgâr santrali modeli yerine hem kararlı hal analizlerinde hem de dinamik analizlerde kullanılabilir, bağlantı noktasında sadece bir rüzgâr türbini ile oluşturulan bütünleşik rüzgâr santrali modeli geliştirilmiştir [1]. Tek makineden oluşan bütünleşik model yanında birden fazla makine ile oluşturulan bütünleşik makine modellerinin farklı sonuçları detaylı rüzgâr santrali modeli ile karşılaştırılarak sunulmuş ve birden fazla makineden oluşan bütünleşik modelin gerilim kararlılığı ile ilgili yapılan çalışmada doğru sonuçlar verdiği belirtilmiştir [2]. Türbinleri tamamen ayrı olarak modellenmiş detaylı rüzgâr santrali modelleri ile bütünleşik rüzgâr santrali modellerinin kısa süreli şebeke hatası ile ilgili simülasyon sonuçları verilerek, analizler sonucu belirlenen farklılıklara dikkat çekilmiştir[3].

Bu çalışmada örnek olarak seçilen rüzgâr enerjisi santrali için bütünleşik model geliştirilmiş ve sonuçlar detaylı model ile karşılaştırılmıştır.

2. BÜTÜNLEŞİK MODELLEME



Şekil 2.1 Rüzgâr Enerjisi Santrali'nin (a) Tam Modellenmesi (b) Bütünleşik Modellenmesi

Şebeke bağlantılı rüzgâr enerjisi santralleri güç sistemi çalışmalarına yönelik farklı seviyelerde modellenebilirler. Az sayıda (1-10 Adet) REDS içeren rüzgâr enerjisi santralleri detaylı modellenebildiği gibi, göreceli fazla sayıda rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminden kurulu bulunan rüzgâr enerjisi santrallerinin detaylı modelleri yerine güç sistem analizlerine uygun olarak üretilmiş bütünleştirilmiş modelleri tercih edilebilmektedir.

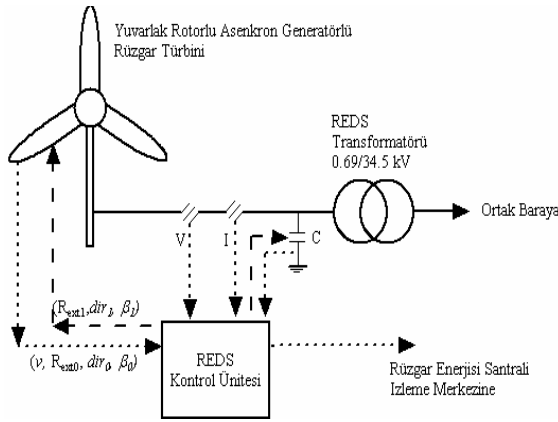
N sayıda rüzgâr enerjisi dönüşüm sisteminden oluşan örnek rüzgâr enerjisi santralinin tek hat şeması Şekil 2.1(a)'da verilmiştir. Jeneratörler, kompanzasyon kapasitörleri ve transformatörler aynı etiket değerlerine sahiptir. Bu örnek sistemin bütünleşik modeli; N sayıdaki jeneratör, kompanzasyon kapasitörü ve transformatörü, her bir elemandan sadece bir adet içeren tek bir dönüşüm sisteminde bütünleştirilerek elde edilir. Örnek sistemin bu şekilde oluşturulan bütünleşik modeli Şekil 2.1(b)'de verilmiştir.

Bütünleşik modelde, her bir elemanın per-unit empedansları orijinal değerlerinde tutulurken, güç baz değeri N ile çarpılmıştır. Bu kapsamdaki bütünleştirme işleminde tüm türbinler aynı yönden

ve aynı şiddette rüzgâr aldığıında sonuçların matematiksel olarak karşılaştırılması yapılabilir.

3. RÜZGÂR ENERJİSİ SANTRALİ

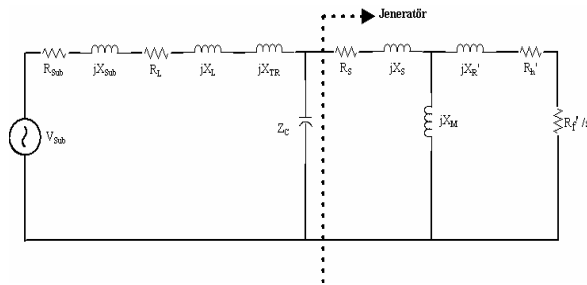
Alaçatı transformatör merkezine bağlı bulunan rüzgâr enerjisi santrali üzerinde yapılan çalışmalar sonucunda, rüzgâr çiftliği ile ilgili detaylı “tam model” oluşturulmuş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Yapılan çalışmada kullanılan sistem elemanları ile ilgili detaylı bilgiler ve tam model bilgileri [4-5] ile verilmiştir. 12 adet bilezikli asenkron jeneratör ile donatılmış REDS bulunduran santral, 34,5 kV. gerilim seviyesinden enterkonekte şebekeye Alaçatı transformatör merkezi üzerinden bağlanmıştır.



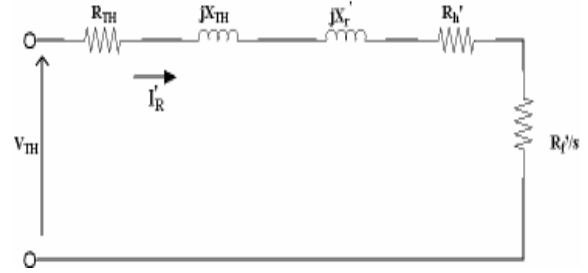
Şekil 3.1 REDS Kontrol Sistemi

Rüzgâr enerjisi santrali izleme noktasına irtibatlı bulunan her bir REDS kontrol ünitesinin bağlantı şeması Şekil 3.1’de verilmiştir. Kontrol ünitesi rüzgâr enerjisinden maksimum şekilde elektrik enerjisi üretebilmek için, REDS çıkışında ölçtüğü akım ve gerilim bilgisine göre en uygun kanat açısı ve rotor direnci değerini belirlemektedir.

Alaçatı transformatör merkezine bağlı bulunan rüzgâr enerjisi santralinin bütünleşik modelinin elde edebilmesi için Şekil 3.2’de verilen devre kullanılmış ve sonuçta Şekil 3.3’de verilen eşdeğer devre kullanılmıştır[6].



Şekil 3.2 Eşdeğer devre elde edilmesi için kullanılan devre



Şekil 3.3 Eşdeğer Devre

4. BÜTÜNLEŞİK MODEL PSCAD SİMÜLASYON SONUÇLARI

Bu bölümde, sistemin kararlılık sınırlarına ana parametrelerin etkisi bütünleşik model sonuçları yardımı ile incelenmiştir. Sonuçlar aynı zamanda bilezikli asenkron jeneratör kullanan rüzgâr enerjisi santrallerinde kararlılık konusu hakkında deneysel bilgiler içerir. Üzerinde çalışılan parametreler; güç sistemi elemanları, rotor direnci kontrolü ve transformatör merkezi gerilim seviyesidir. PSCAD/EMTDC ile gerçekleştirilen simülasyonlarda rüzgâr enerjisi santralinin bütünleşik modeli kullanılmıştır.

Bilezikli asenkron jeneratöre uygulanan bütünleşik mekanik tork adım adım arttırılarak jeneratöre uygulanabilecek maksimum mekanik tork (T_{max}) belirlenmiştir. Jeneratöre uygulanan mekanik torkun maksimum değeri geçmesi durumunda asenkron jeneratör kararlılığını kaybeder. N adet REDS’den oluşan santralde salınım eşitliğinin sayısal toplamının alınması şeklindeki bütünleştirme yöntemi per-unit olarak (4.1) ile verilmiştir[7]. H eylemsizlik sabiti, P_{in} ve P_{out} ise REDS’in giriş ve çıkış güçleridir.

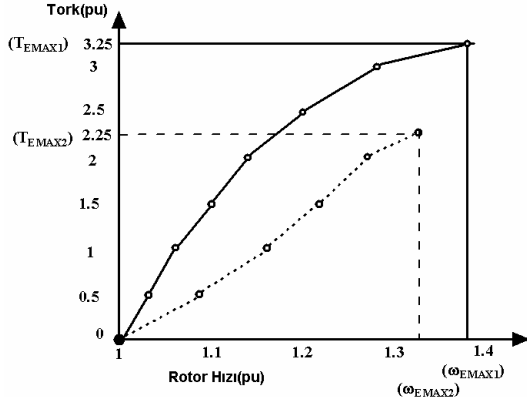
$$H^B = \sum_{i=1}^N H_i, P_{in}^B = \sum_{i=1}^N P_{in_i}, P_{out}^B = \sum_{i=1}^N P_{out_i}$$

$$2H^B \frac{d\omega}{dt} = P_{in}^B - P_{out}^B \quad (4.1)$$

4.1 Güç Sistemi Elemanlarının Etkisi

Şekil 4.1 bütünleşik model ile iki farklı durum için gerçekleştirilen PSCAD/EMTDC simülasyon sonuçlarını tork-hız eğrileri ile göstermektedir. Sürekli çizgi ile verilen eğride yuvarlak rotorlu asenkron jeneratör şebekeye arada iletim hattı, transformatör ve yer altı kabloları olmadan (kuvvetli şebeke) direk olarak bağlanmış ve T_{EMAX1} , ω_{EMAX1} değerleri elde edilene kadar simülasyon yinelenmiştir. İkinci olarak aynı jeneratör şebekeye arada sayılan sistemler eklenerek bağlanmış (T_{EMAX2} , ω_{EMAX2}) noktaları elde edilmiştir. Her iki

simülasyonda rotor hız kontrol sistemi sabit değerlerde çalıştırılmıştır.

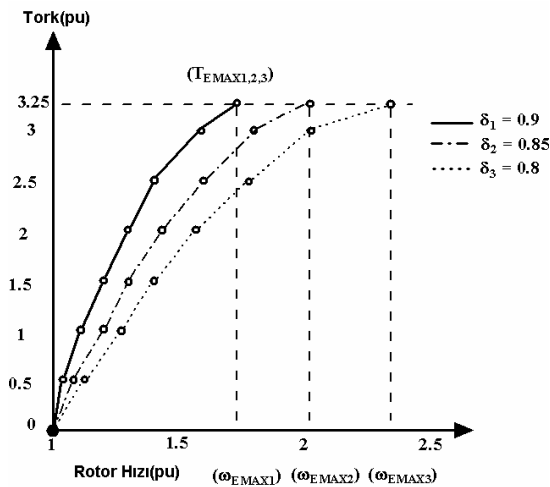


Şekil 4.1 İki farklı durum için tork-hız eğrisi

Bütünleşik model ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarından; şebeke ile REDS'nin bağlantısını sağlayan güç sistemi elemanlarının empedansının artması sonucu jeneratöre uygulanabilecek maksimum mekanik torkta azalmaya neden olduğu gözlenmiştir. Şebeke ile REDS arasında uygun bağlantı noktasının belirlenmesinde daima en düşük empedans değeri ve en yüksek gerilim seviyesi tercih edilir.

4.2 Rotor Direnç Kontrolü Etkisi

Şekil 4.2 bütünleşik model ile üç farklı durum için yapılan simülasyon sonuçlarını tork-hız eğrileri ile göstermektedir. Simülasyonda rotor direnç kontrol sistemi parametresi değiştirilerek rotor direnci değiştirilmiş ve sonuçlar kaydedilmiştir. $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3$ olup δ azaldıkça rotora bağlı direnç değeri artmaktadır.



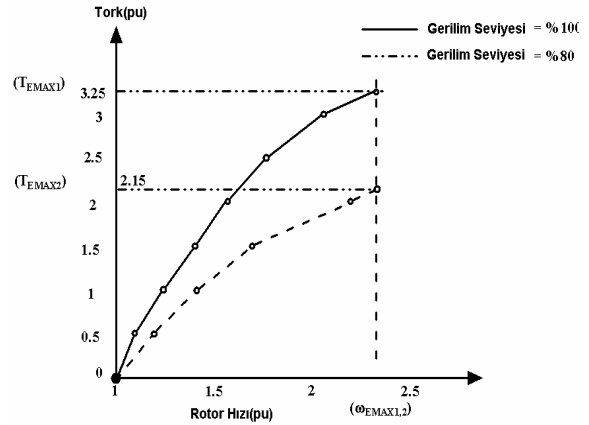
Şekil 4.2 Üç farklı durum için tork-hız eğrisi

Bütünleşik model ile yapılan bu simülasyon sonucunda beklendiği gibi; jeneratörde maksimum torkun rotor direnci değeri ile değişmediği, ancak maksimum torkun olduğu kayma değerinin direnç değerine bağlı olduğu görülmüştür.

REDS kontrol ünitesi tarafından sistemden alınan bilgilere göre yapılan rotor direnç değeri kontrolünün etkisi tork-hız grafiklerinden görülmektedir.

4.3 Transformatör Gerilim Seviyesi Etkisi

Şekil 4.3 bütünleşik model ile iki farklı durum için gerçekleştirilen PSCAD/EMTDC simülasyon sonuçlarını tork-hız eğrileri ile göstermektedir: Sürekli çizgi ile gösterilen eğride REDS'nin bağlı bulunduğu ortak bağlantı noktasında gerilim seviyesi nominal değerinde tutulmuş; T_{EMAX1} ve ω_{EMAX1} değerleri alınmıştır. İkinci olarak ortak bağlantı noktasında gerilim seviyesi nominal değerinin %80'ine indirilmiş ve T_{EMAX2} ve ω_{EMAX2} değerleri alınmıştır.



Şekil 4.3 İki farklı gerilim seviyesi için tork-hız eğrisi.

Bütünleşik model ile yapılan bu simülasyon sonucunda ortak bağlantı noktasında gerilim seviyesinin düşmesinin jeneratöre uygulanabilecek maksimum mekanik torkta azalmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek rüzgâr hızı görüldüğü (rüzgâr enerjisi santralının aktif güç çıkışının arttığı) durumlarda ortak bağlantı noktasında görülecek gerilim düşmelerinde REDS'lerinin koruma amaçlı devre dışı kalabileceğini göstermektedir.

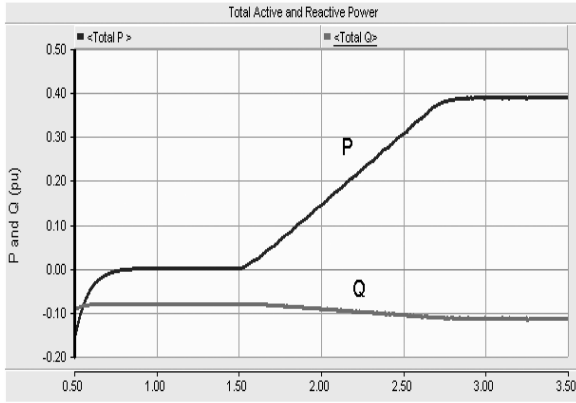
5. BÜTÜNLEŞİK VE TAM MODEL PSCAD SİMÜLYASYON SONUÇLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Rüzgâr çiftliği için geliştirilen modelin PSCAD/EMTDC simülasyon programındaki

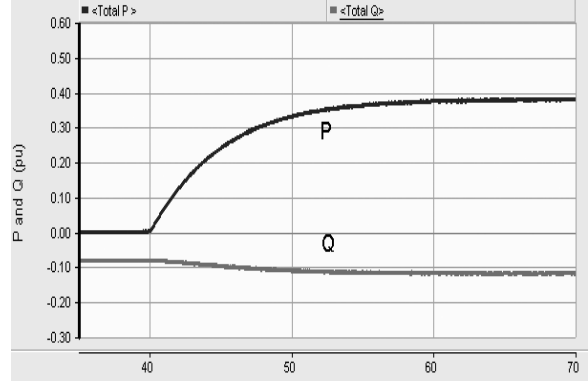
sonuçları, tam modele ait sonuçlar ile doğrulama amaçlı karşılaştırılmıştır. Bütünleşik modelin, rüzgâr çiftliğinin ortak bağlantı noktasında şebeke ile etkileşimlerini modelleyebilmedeki yeterliliği, tam model sonuçları ile bütünleşik model simülasyon sonuçlarının farklı koşullar için karşılaştırılması vasıtasıyla irdelenmiştir.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 sırasıyla, tam model ve bütünleşik modele ait aktif/reaktif güç çıkışlarını göstermektedir. İki modelin güç eğrilerinin eğimlerinin farklı olmasının nedeni; tam modelde jeneratörlerin sırasıyla (tek tek) rüzgârdan güç üretmeye başlaması, bütünleşik modelde ise tek jeneratörün üretime geçmesidir. Modelleme detayının değişmesi simülasyon süresi ve zaman sabitinin büyüklüğünü etkilemektedir.

Nominal işletme koşulları olarak; dengeli kaynak gerilimi, hatasız işletme, rüzgâr hızı bilgisinde gürültü birimi bulunmaması ve tüm türbinlerin aynı rüzgâr hızını almaları belirlenmiştir. Nominal işletme koşulları için bütünleşik model, tam modele ait simülasyon sonucundaki aktif ve reaktif güç değerlerini karalı çalışma koşulunda yakalamıştır. Bu sonuç bütünleşik modelin güç sistemleri çalışmalarındaki kararlı hal analizlerinde, ortak bağlantı noktasında rüzgâr çiftliği-şebeke etkileşimini incelemek için yeterli olabileceğini göstermiştir.

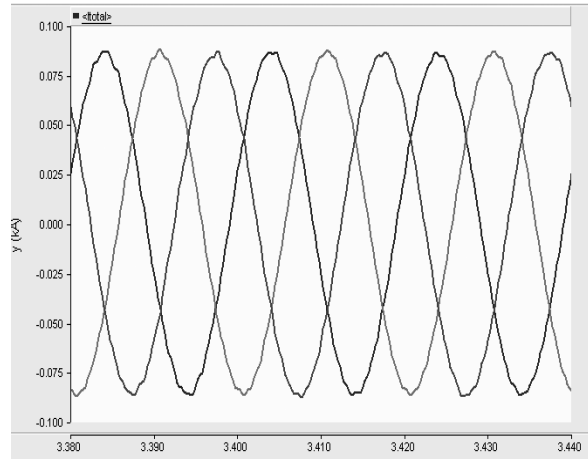


Şekil 5.1 Tam model ile rüzgâr çiftliği aktif (P) ve reaktif (Q) güç çıkışı

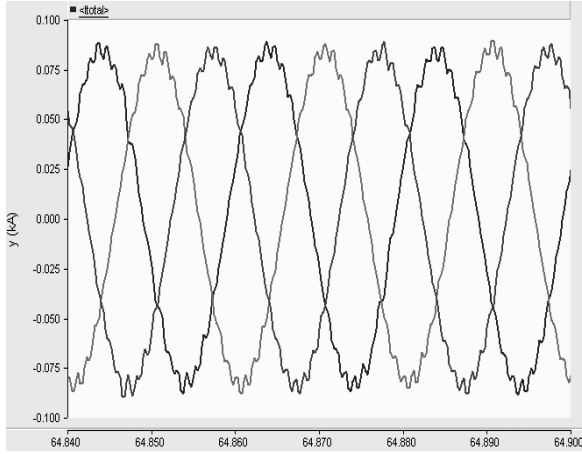


Şekil 5.2 Bütünleşik model ile rüzgâr çiftliği aktif (P) ve reaktif (Q) güç çıkışı

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 sırasıyla tam model ve bütünleşik modelin ortak bağlantı noktasındaki üç fazlı akım dalga şekillerini kararlı hal için göstermektedir. Mevcut rüzgâr çiftliği sisteminde, rotorda bulunan doğrultuculu direnç kontrol düzeneği nedeniyle harmonikler oluşur. Tam modelde on iki jeneratörün farklı dalga şekillerine sahip akım çıkışları, karşılıklı etkileşim sonucu toplam akımdaki harmonik şiddetini azaltmıştır. Tam modelde yer alan on iki jeneratör yerine bütünleşik modelde tek jeneratör ile tüm jeneratörlerin modellenmiş olması sebebiyle toplam akım dalga şeklindeki harmoniklerin etkisi azalmaktadır.



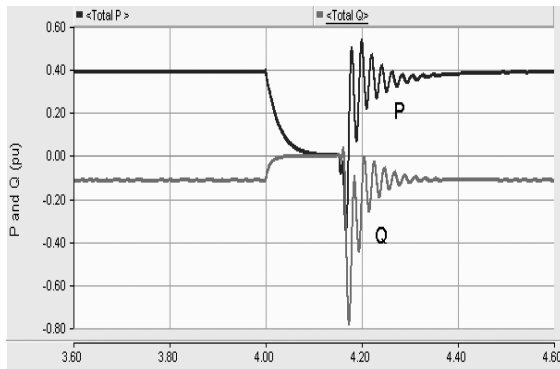
Şekil 5.3 Tam modelin toplam akımı



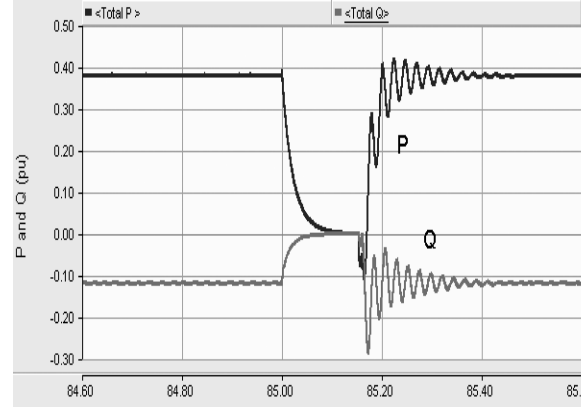
Şekil 5.4 Bütünleşik modelin toplam akımı

Şekil 5.5 ve Şekil 5.6 sırasıyla tam model ve bütünleşik modelin 150 ms. lik şebeke hatasında aktif ve reaktif güç çıkışlarının sonuçlarını göstermektedir. Şebeke hatası olarak, şebeke ile rüzgâr çiftliği ortak bağlantı noktasını irtibatlandıran iletim hattında 150 ms. süreli üç faz-toprak kısa devresi oluşturulmuştur. Hata anı dışında nominal işletme koşulları sürdürülmüştür.

Grafiklerden görüldüğü üzere hata sonrasında aktif ve reaktif güç dalga şekilleri her bir model için farklı karakter göstermiştir. Hata sonrasındaki etkileşim sonuçları her ne kadar farklı olsa da, güç sistemi çalışmalarının kararlı hal analizleri için, bütünleşik model ile elde edilen sonuçların yeterli olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.5 150 ms. lik Şebeke hatasında tam model aktif(P) ve reaktif(Q) güç çıkışları.



Şekil 5.6 150 ms. lik Şebeke hatasında bütünleşik model aktif(P) ve reaktif(Q) güç çıkışları.

6. SONUÇLAR

Rüzgâr enerjisi dönüşüm sistemlerinin enerji sistemi içinde yük olarak değil enerji santralleri olarak kabul edilerek dinamik tepkilerin incelenmesi yeni şebeke bağlantı koşullarının teminini oluşturmada ve modellenmenin bu yaklaşımla oluşturulmasını da zorunlu kılmaktadır. Rüzgâr çiftliklerinin enerji sistemi ile birlikte modellenmesinde bu çalışmada sunulan eşdeğer modelleme tekniği kullanılabilir. Her bir REDS'nin mekanik zaman sabitleri birleştirilmiş modele (4.1) eşitliği ile verildiğinden, geçici durum analizlerinde sonuçlar detaylı model sonuçlarıyla bire bir örtüşmese de kararlılık sınırlarının belirlenmesinde bütünleşik modelin kullanılabileceği anlaşılmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışma proje numarası 105G129(106G102) olan "Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Akışını İzleme, Problemlerinin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi Projesi" kapsamında TÜBİTAK ve TEİAŞ tarafından desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı TÜBİTAK ve TEİAŞ'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- [1]. Fernandez L. M., Francisco J. ve Saenz, J. R., "Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines", Renewable Energy 33 (2008) 129–140.
- [2]. Akhmatov V. ve Knudsen H., "An Aggregate Model of a Grid-Connected, Large-Scale, Offshore Wind Farm for Power Stability Investigations-Importance of Windmill Mechanical System", Electrical Power and Energy Systems, 24 (2002), 709-717.

[4]. Mutlu, Ö.S. ve Akpınar, E. (2005). Şebeke Kesintilerinin Asenkron Jeneratörlü Rüzgar Enerjisi Dönüşüm Sistemi Üzerinde Etkisi., III. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Sempozyumu, Mersin-Turkey.157-163.

[5]. Mutlu, Ö.S., Akpınar, E. ve Balıkcı, A. (2009). Power Quality Analysis of Wind Farm Connected to Alaçatı Substation in Turkey. Renewable Energy 34(5). Pages 1312-1318

[6]. Mutlu, Ö.S.(2009) “Effects of Wind Turbines on Power System Operation-Rüzgar Türbinlerinin Güç Sistemi İşletmesi Üzerine Etkisi”, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi.

[7]. Shafiu, A., Anaya-Lara, O., Bathurst, G. ve Jenkins, N. (2006). Aggregated Wind Turbine Models for Power System Dynamic Studies, Wind Engineering, Volume 30(3). 171-186.