

# TAM VE AZALTI MIŞ DERECE MODELLİ RÜZGAR SANTRALLERİNİN GEÇİCİ DURUM DAVRANIŞI

M. Kenan DÖŞOĞLU<sup>1</sup>, Ayşen BASA ARSOY<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

<sup>2</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü

kenandosoglu@duzce.edu.tr,aba@kocaeli.edu.tr

## Özet

Yapılan bu çalışmada, 2.3 MW gücündeki Çift Beslemeli Asenkron Generatörden (ÇBAG) oluşan rüzgar santralinde geleneksel kontrol modellemesi olarak kullanılan Tam Derece Modeli (TDM) ile ÇBAG dinamik modellemesi olarak kullanılan Azaltılmış Derece Modelinin (ADM) 3 faz arıza analizi gerçekleştirilmiştir. 3 baralı sistemden oluşan bu benzetim çalışmasında 34.5 kV'luk barada oluşan arızanın bara gerilimleri, ÇBAG'ün açılma hızı, elektriksel momenti ve d-q eksen stator akımları üzerinde oluşturdukları etkiler incelenmiştir. Bu çalışma MATLAB/SİMULİNK ortamında yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde ADM'in TDM'e göre sistemi daha kısa zaman içerisinde kararlı hale getirdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** ÇBAG, Tam Derece Modeli, Azaltılmış Derece Modeli, 3 faz arızası

## Giriş

Son yıllarda fosil yakıtların tükenme aşamasına gelmesi ve fiyatındaki yükselmeler nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemlilerinden biri olan rüzgar enerjisinin kullanılması ile hem temiz enerjinin elde edilmesi hem de güç sistemlerinin çalışma koşullarının iyileşmesi sağlanmıştır. Rüzgar santralinde kullanılan generatör modelleri içerisinde ÇBAG daha çok tercih edilmektedir. Tercih edilmesinde en önemli nedenleri ise aktif güç ve moment kontrolünü hızlı bir şekilde gerçekleştirmesidir. ÇBAG'ün şebeke ile çalışması esnasında bir çok problem ile karşı karşıya kalmaktadır. Bu problemlerin kısa süre içerisinde giderilmesinde ÇBAG'ün dinamik modellemesi önemli bir hal almaktadır [1-2].

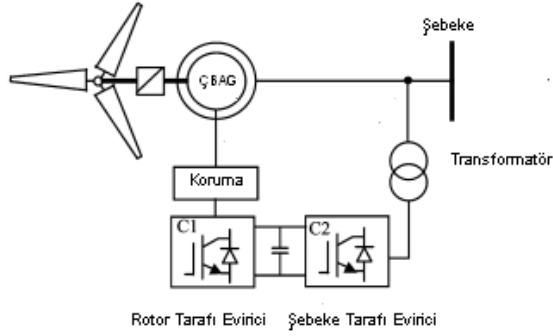
Literatürde yapılan çalışmaları incelenecek olursa, ÇBAG'ün ADM kullanılarak koruma devresinin tek

ve çift kafesli olmasında sistem üzerinde oluşturdukları etkiler incelenmiştir [3]. ADM'nin kullanılmasında hız kontrol karakteristiği ve evirici kontrolünü sağlamada etkili olmuştur [4]. ÇBAG'de kısa süreli frekans kararlılığı analizinde farklı çıkış güçleri ve farklı rüzgar hızlarında ADM'in kullanılmasının etkili olduğu görülmüştür [5]. Küçük sinyal kararlılığı analizinde ADM sayesinde parametrelerinin optimum değerinin bulunması ile ÇBAG'ün özdeğer hesaplaması yapılmıştır[6]. ADM'in kullanılması ile ÇBAG'de subsenkron rezonans, süper senkronizasyon, elektromekanik ve şaft modellemesi analizi gerçekleştirilmiştir [7]. Yük akışı analizinde kullanılan ÇBAG'ün ADM ile modellemesi yapılarak PV ve PQ baraları üzerindeki etkileri incelenmiştir[8]. Güç kalitesi açısından ADM'i ile sürekli durum, gerilim titreşimi ve harmonik analizi gerçekleştirilmiştir[9]. ÇBAG'de endüktansların akı yoğunluğu analizi incelenmiştir. ADM'nin kullanılmasında akı yoğunluğu üzerinde çok etkili olduğu yapılan çalışmada görülmüştür [10].

Yapılan bu çalışmada ise 34.5 kV'luk baradaki 3 faz arızasında hem TDM hemde ADM 'de ÇBAG üzerinde oluşturdukları etkileri incelenmiştir. Dinamik modellemenin geleneksel olarak kullanılan modellere nazaran geçici durum analizinde oldukça etkili olduğu görülmüştür.

## Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) Modellemesi

ÇBAG oluşan rüzgar santrali arka arkaya bağlı evirici devresi, koruma ünitesi ve transformatörden oluşmaktadır. ÇBAG'ü devre modellemesi şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ÇBAG devre modeli

ÇBAG'ün stator devresi direk olarak şebekeye bağlı iken, rotor devresi koruma ünitesi ve rotor tarafı evirici devresine bağlıdır. Şebeke tarafı evirici devresi bir transformatör ile şebekeye bağlanmaktadır. Eviricilerde güç transferi iki yol ile sağlanmaktadır. Şebeke tarafındaki evirici DC link sayesinde stator çıkışında güç üretimini sağlamaktadır. Rotor tarafındaki evirici ise rotordaki kayma halkasına bağlı olarak frekans değişimi sayesinde güç üretimini sağlamaktadır [11]. ÇBAG modellemesinde ise TDM ve ADM kullanılmıştır. TDM'de d-q eksen stator ve rotor gerilimleri aşağıdaki denklemlerde verilmiştir.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \omega_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - \omega_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (2)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + s \omega_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - s \omega_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (4)$$

burada,  $v_{ds}$  stator d eksen gerilimi,  $v_{dr}$  rotor d eksen gerilimi,  $v_{qs}$  rotor q eksen gerilimi,  $v_{qr}$  rotor q eksen gerilimi,  $R_s$  stator direnci,  $R_r$  rotor direnci,  $\omega_s$  stator açısal hızı,  $s$  kayma,  $\lambda_{ds}$  d eksen stator manyetik akısı,  $\lambda_{qs}$  q eksen stator manyetik akısı,  $\lambda_{dr}$  d eksen rotor manyetik akısı,  $\lambda_{qr}$  q eksen rotor manyetik akısı,  $i_{ds}$  d eksen stator akımı,  $i_{qs}$  q eksen stator akımı,  $i_{dr}$  q eksen rotor akımı,  $i_{qr}$  q eksen rotor akımıdır. d-q eksen dönüşümlerinin endüktans biçiminde gösterimi ise,

$$\lambda_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5)$$

$$\lambda_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$\lambda_{dr} = (L_s + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (7)$$

$$\lambda_{qr} = (L_s + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (8)$$

şeklindedir.  $L_s$  stator endüktansı,  $L_m$  manyetizasyon endüktansıdır [12]. Stator kısmındaki manyetik akıların ihmal edilmesi ve manyetik akıların yerine reaktans ile gerilim kaynağının kullanılması ADM elde edilmiştir. ADM'de d-q eksen stator ve rotor gerilimleri,

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + X' i_{qs} + E_d \quad (9)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - X' i_{ds} + E_q \quad (10)$$

$$\frac{dE_{ds}}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_{ds} - (X - X') \times I_{qs}] + \quad (11)$$

$$s \times \omega_s \times E_{qs} - \omega_s \times \frac{L_m}{L_m + L_s} \times v_{qr}$$

$$\frac{dE_{qs}}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E_{qs} + (X - X') \times I_{ds}] - \quad (12)$$

$$s \times \omega_s \times E_{ds} + \omega_s \times \frac{L_m}{L_m + L_s} \times v_{dr}$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} + s \omega_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (13)$$

$$v_{qr} = R_r i_{qr} - s \omega_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (14)$$

ADM'de gerilim kaynağı ve akı modellemesi ise,

$$E_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (15)$$

$$E_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (16)$$

$$\lambda_{dr} = (L_s + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (17)$$

$$\lambda_{qr} = (L_s + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (18)$$

şeklinde olmaktadır. ADM'de geçici reaktansı,

$$X' = X_s + \frac{X_r + X_m}{X_r \times X_m} \quad (19)$$

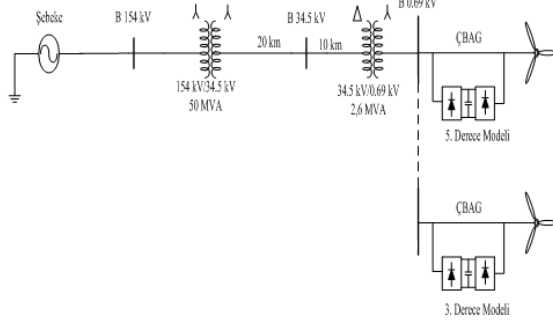
Geçici açık zaman sabiti ise,

$$T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} = \frac{L_{rr}}{R_r} \quad (20)$$

şeklinde ifade edilmektedir [13-14].

### Benzetim Çalışması

Rüzgar santralinde ÇBAG kullanılmıştır. 2.3 MW'lık rüzgar santrali 0.69 kV'luk baraya bağlanmıştır. açılal hız değişiminde Rüzgâr santralinden elde edilen 0.69 kV gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 kV' a yükseltilmiştir. Sistemin şebeke tarafı 154 kV' luk baraya bağlanmıştır. Benzetim çalışması yapılan sistemin modellenmesi Şekil 2'de gösterilmiştir.

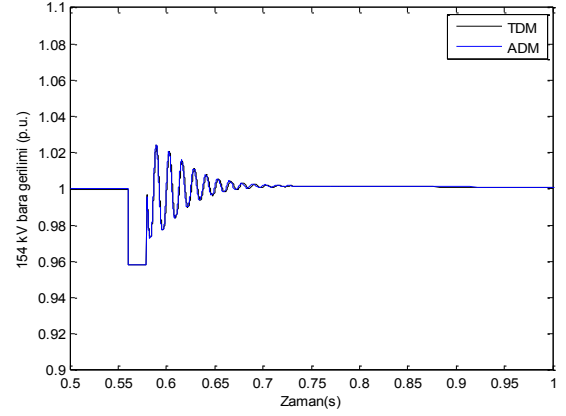


Şekil 2. Benzetim çalışması yapılan sistem

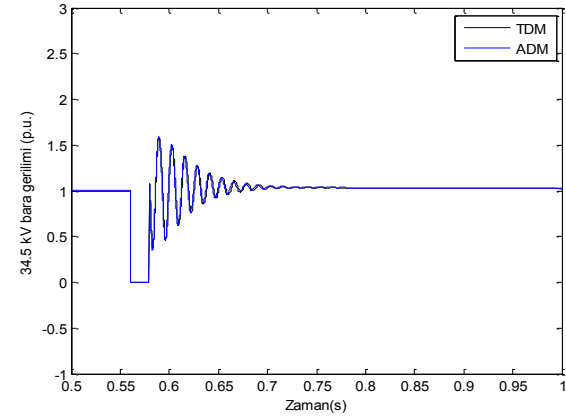
Şebekedeki 154 kV' luk gerilim alçaltıcı transformatör sayesinde 34,5 kV da düşürülmüştür. Şebeke tarafındaki transformatörün gücü 50 MVA, rüzgar santralinin olduğu taraftaki transformatörün gücü 2.6 MVA seçilmiştir. Şebeke tarafındaki transformatörün primer ve sekonder kısmı yıldız bağlanmıştır. Rüzgar santralinin olduğu kısımdaki transformatörün primer kısmı üçgen, sekonder kısmı ise yıldız bağlanmıştır. Transformatörlerin doyum karakteristiği ihmal edilmiştir. Bu sistemde 34.5 kV'luk baraya bağlı iki iletim hattı kullanılmıştır. 3 faz PI eşdeğer devresi olan iletim hatları şebeke tarafında 20 km uzaklıkta, rüzgar santralinin olduğu kısma 10 km uzaklıktadır. ÇBAG'ün rüzgar hızı sabit 8 m/s olarak verilmiştir.

### Benzetim Çalışması Sonuçları

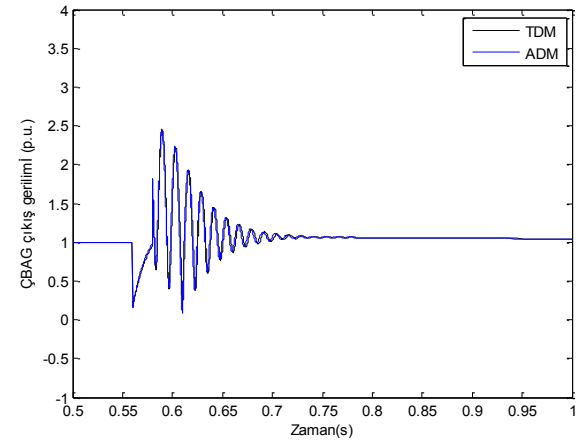
Yapılan bu çalışmada 3 baralı sistemde 3 faz arızası 34.5 kV'luk barada meydana gelmiştir. 0.56 saniye ile 0.58 saniyeler arası meydana gelen arıza sonucunda 154 kV'luk bara gerilimi, 34.5 kV'luk bara gerilimi, 0.4 kV'luk bara gerilimi, ÇBAG'ün açılal hızı, elektriksel momenti ve d-q eksen stator akımlarında elde edilen sonuçlar şekil 3 ile şekil 9 arasında gösterilmiştir.



Şekil 3. 154 kV bara gerilimi (p.u.)

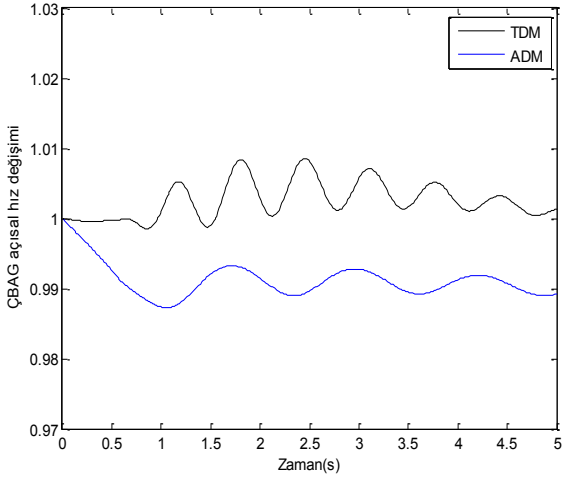


Şekil 4. 34.5 kV bara gerilimi (p.u.)

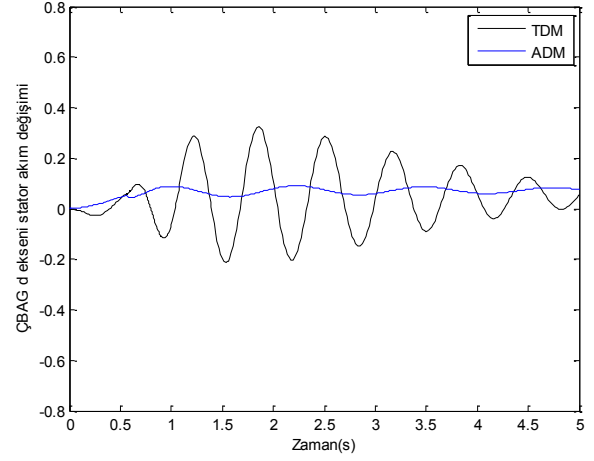


Şekil 5. ÇBAG çıkış gerilimi (p.u.)

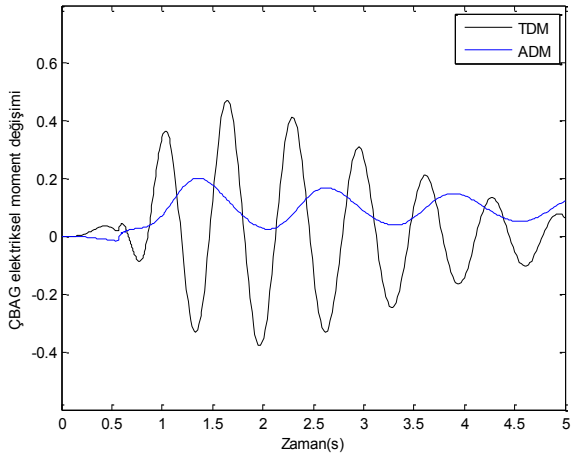
Bara gerilimleri incelendiğinde 154 kV'luk bara gerilimi arıza sonrasında yaklaşık olarak 1.03 değerine, 34.5 kV'luk bara geriliminin 1.7 p.u. değerine ve rüzgar türbini çıkış gerilim ise yaklaşık olarak 2.5 p.u. değerine kadar yükseldiği görülmüştür.



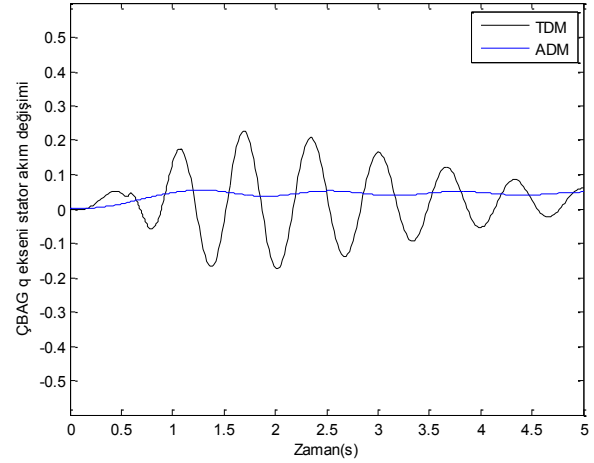
Şekil 6. ÇBAG açışal hız değışimi (p.u.)



Şekil 8. ÇBAG d ekseni stator akım değışimi



Şekil 7. ÇBAG elektriksel moment değışimi (p.u.)



Şekil 9. ÇBAG q ekseni stator akım değışimi

ÇBAG'ün arızadan sonra açışal hız değışiminde ADM'de kısa bir süre sonra kararlı hale gelirken, TDM'de yaklaşık olarak 1.01 değerine yükselerek daha uzun sürede kararlı hale gelmiştir. Elektriksel moment değışiminde ise TDM'de osilasyonların arttığı ve süre olarak ADM'e nazaran daha uzun sürede kararlı hal aldığı görülmüştür.

d-q eksen stator akımlarında TDM'inde osilasyonların yükseldiği ve yaklaşık olarak 6 saniye içerisinde kararlı hale gelirken, ADM'de sistemin çok daha kısa zamanda kararlı hale geldiği görülmüştür.

## Sonuçlar

Bu çalışmada, rüzgar santrallerinde yaygın olarak kullanılan ÇBAG tam derece ve azaltılmış derece modelleri oluşturularak, şebeke tarafında oluşturulan bir simetrik arıza karşısında davranışı incelenmiştir. Santral çıkışı ve şebeke gerilimleri her iki modellemeye de aynı davranışı göstermiştir. 154 kV'luk bara geriliminin arıza sonrası tepe değerinde az bir yükselme olurken, 34.5kV bara ve rüzgar santrali çıkış gerilim değerinin nominal değerinin 2-3 kat kadar üstünde olmuştur. Açışal hız ve moment değışiminde, ADM'de kullanılan gerilim kaynağı ve  $X'$ 'in TDM'inde kullanılan akı ve  $R_s$ 'ye göre daha baskın olduğundan, ADM cevabının kararlılık açısından daha iyi olduğu görülmüştür. ADM ile

modellenmiş generatörün TDM ile modellenmiş olana göre salınımların sönümlenmesi ve daha kısa zaman içinde sistemin karalı hale gelmesi bakımından daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır.

### Referanslar

- [1] Fernandez, L. M., Jurado, F., Saenz, J. R., Aggregated dynamic model for wind farms with doubly fed induction generator wind turbines. *Renewable Energy*, vol.33, pp.129-140, 2008.
- [2] Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G., Yacamini, R., Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 21, pp. 257-264, 2006.
- [3] Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., Wu, X., Jenkins, N., Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines. *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, pp.803-809, 2003.
- [4] Holdsworth, L., Wu, X. G., Ekanayake, J. B., Jenkins, N., Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances. *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 150, pp.343-352, 2003.
- [5] Anaya-Lara, O., Hughes, F. M., Jenkins, N., Strbac, G., Contribution of DFIG-based wind farms to power system short-term frequency regulation. *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol.153, pp.164-170 2006.
- [6] Elkington, K., Knazkins, V., & Ghandhari, M., Model Analysis of Power Systems with Doubly Fed Induction Generators, *IEEE Bulk Power System Dynamics and Control*, pp., 2007.
- [7] Ostadi, A., Yazdani, A., Varma, R. K., Modeling and stability analysis of a DFIG-based wind-power generator interfaced with a series-compensated line. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol.24, pp.1504-1514, 2009.
- [8] Holdsworth, L., Wu, X. G., Ekanayake, J. B., Jenkins, N., Direct solution method for initialising doubly-fed induction wind turbines in power system dynamic models. In *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol.150, pp.334-342, 2003.
- [9] Peterson, A., Thiringer, T., Harnefors, L., Petru, T., Modeling and experimental verification of grid interaction of a DFIG wind turbine. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.20, pp.878-886, 2005.
- [10] Alireza A., Saeed L., Vahid M., Transient response of doubly fed induction generator under voltage sag using an accurate model, *IEEE*

*Sustainable Alternative Energy Conference*, pp.1-6, 2007.

- [11] Hughes F. M., Anaya-Lara O., Jenkins N., Strbac G., Control of DFIG-Based Wind Generation for Power Network Support, *IEEE Transaction on Power Systems*, vol.20, pp.1958-1966, 2005.
- [12] Krause, P. C., Oleg W., and Scott D. S., *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Piscataway, NJ: IEEE press, 2002.
- [13] Slootweg. J.G., Polinder. H.. And Kling. W.L. Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2001.
- [14] Lei, Y., Mullane, A., Lightbody, G., Yacamini, Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, , vol.21, pp.257-264, 2006.