

## Farklı Dinamik Derece Modelindeki Senkron Generatörlerin Geçici Durumlarda Rüzgar Santrali Üzerindeki Etkileri

\*<sup>1</sup>Mehmet Kenan Döşoğlu, <sup>1</sup>Uğur Güvenç, <sup>2</sup>Gökhan Poyraz ve <sup>3</sup>Bayram Küçük  
\*<sup>1</sup>Teknoloji Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Düzce Üniversitesi, Türkiye  
<sup>2</sup>Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye  
<sup>3</sup>Bilişim Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

### Özet

Yapılan bu çalışmada, IEEE 14 baralı güç sisteminde kullanılan senkron generatörlerin farklı dinamik derece modelleri ile geçici kararlılık durumları incelenmiştir. Ayrıca generatör baralarına bağlı olan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)'den oluşan rüzgar santralinin geçici durum cevapları dinamik derece modellerine bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Senkron generatörlerin dinamik modellemesinde 3. ve 6. derece modelleri kullanılmıştır. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT)'da gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda, senkron generatörlerin derece modellerinin geliştirilmesi ile sistemin kısa zaman içinde kararlı hale geldiği, osilasyonların azaldığı ve benzetim çalışması performansının arttığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Senkron generatör, ÇBAG, derece modelleri, PSAT

## The Impacts of Synchronous Generator with Different Dynamic Order Model in Wind Farm during Transient Stability

### Abstract

In this study, transient stability conditions of synchronous generators with different order models used in IEEE 14 were investigated. In addition, wind farms consisting of DFIG connected to generator bus transient responses were compared with the dynamic order models. 3rd and 6th models of synchronous dynamic modeling were used. Simulation study was conducted in Power Systems Analysis Program (PSAT) environment. As a result of studies, the order of the system with the development of synchronous generator model became stable in a short time, and it was observed that the oscillations increased and decreased the performance of simulation study.

**Key words:** Synchronous generator, DFIG, order models, PSAT

### 1. Giriş

Son yıllarda fosil yakıtların fiyatındaki yükselmeler ve kullanımının sınırlı hale gelmesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Bunlardan en önemlisi rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisine dönüşümünde kullanılan rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonunun sağlanması, güç sistemlerinin çalışma sınırlarının genişletilmesi açısından oldukça önemli bir hal almaktadır. Rüzgar santralinde aktif güç ve moment kontrolü diğer

\*Corresponding author: Address: Faculty of Technology, Department of Electric-Electronic Engineering Duzce University, 81620, Duzce TURKEY. E-mail address: kenandosoglu@duzce.edu.tr, Phone: +903805421133 Fax: +903805421134

asenكرون generatörlere göre daha iyi olan ÇBAG tercih edilmektedir. Şebeke tarafındaki geçici durumların rüzgar santrali üzerindeki etkileri ile ilgi literatür çalışmaları mevcuttur. Şebeke tarafındaki dengeli ve dengesiz arızalar gibi olumsuz durumlardan rüzgar santralinde kullanılan ÇBAG oldukça etkilemektedir. [1-3]. ÇBAG'den oluşan rüzgar santralinin şebekeye bağlı olarak çalışmasında üzerinde durulan konulardan biri de statik ve dinamik yük değişimleridir. Statik ve dinamik yüklerin ÇBAG üzerinde oluşturduğu etkiler incelenmiştir [4-5]. Çok baralı güç sisteminde yük baralarındaki belli yük değişimlerinin rüzgar santralindeki analizleri yorumlanmıştır [6-7]. Generatör barasına bağlı olan rüzgar santralinde sistemin küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Ayrıca farklı generatör baralarına bağlanan ÇBAG'ün özdeğer analizleri incelenmiştir [8-9]. Güç sistemlerinde geçici kararlılık durumlarında senkron generatör ünitesinde güç sistem kararlılık ünitesi kullanılmaktadır. Farklı kontrol yapılarındaki bu ünitenin ÇBAG üzerindeki etkileri üzerinde durulmuştur [10-11]. Senkron generatörün farklı stator ve rotor modellerinin geliştirilmesi ile ÇBAG kullanıldığı ve kullanılmadığı durum karşılaştırılması yapılmıştır [12-13].

Yapılan bu çalışmada çok baralı güç sisteminde senkron generatörün farklı dinamik modellemeleri yapılmıştır. Bu farklı dinamik modellerin ÇBAG'ün kullanıldığı durumlardaki etkileri incelenerek, geçici durumlardaki zaman cevapları detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda derece modelinin artışı hem benzetim çalışmasının performansını hem de sistemin kısa sürede kararlı hale geldiğini göstermiştir.

## 2. Senkron Generator Modelleri

Senkron generatör modellerinde 3. ve 6. dinamik derece modelleri kullanılmıştır. 3. dinamik derece modelinde tüm q eksen elektromanyetik devreleri ihmal edilmiştir ve d eksen endüktansı transfer fonksiyon içerisinde kullanılmıştır. 3. dinamik derece modeli üç değişkenle tanımlanmaktadır. Bunlar açı, açısal hız ve q eksen geçici gerilim kaynağıdır. Açı, açısal hız ve q eksen geçici gerilim kaynağı Eş. 1 ve Eş. 3'te gösterilmiştir.

$$\delta = f_b(\omega - 1) \quad (1)$$

$$\omega = (P_m - P_e - D(\omega - 1)) / M \quad (2)$$

$$e'_q = (-f_s(e'_q) - (x_d - x'_d)i_d + v_f^*) / T'_{d0} \quad (3)$$

6. dinamik derece modelinde d eksenine bir devre ve q eksenine iki devrenin ilave edilmesi ile elde edilmektedir. 6. dinamik derece modeli altı değişkenden oluşmaktadır. Bunlar; açı, açısal hız, q eksen geçici gerilim kaynağı, d eksen geçici gerilim kaynağı, q eksen alt geçici gerilim kaynağı, d eksen alt geçici gerilim kaynağıdır. 6. dinamik derece modelinin elde edilmesinde kullanılan eşitlikler Eş. 4 ve Eş. 9'da verilmiştir.

$$\delta = f_b(\omega - 1) \quad (4)$$

$$\omega = (P_m - P_e - D(\omega - 1)) / M \quad (5)$$

$$e'_q = -e'_q - \left( x_d - x'_d - \frac{T''_{d0}}{T'_{d0}} \frac{x''_d}{x'_d} (x_d - x'_d) \right) i_d + \frac{(1 - T_{AA}/T'_{d0})v_f^*}{T'_{d0}} \quad (6)$$

$$e'_d = (-f_s(e'_d) + \left( x_q - x'_q - \frac{T''_{q0}}{T'_{q0}} \frac{x''_q}{x'_q} (x_q - x'_q) \right) i_q) / T'_{q0} \quad (7)$$

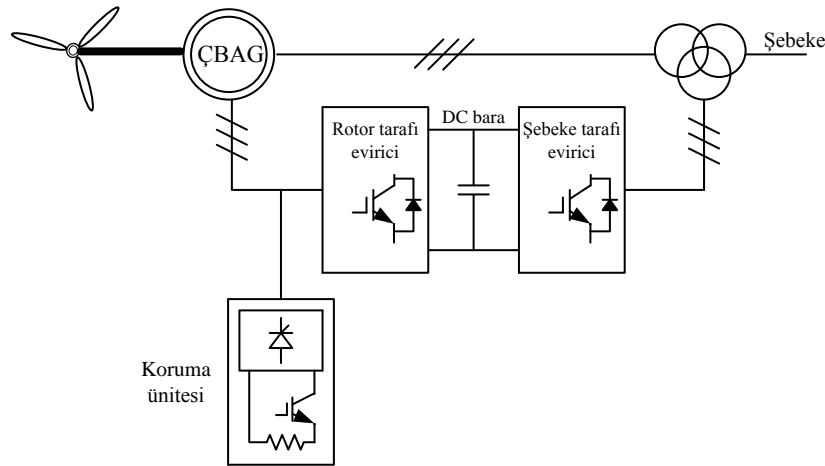
$$e''_q = \left( -e''_q + e'_q - \left( x'_d - x''_d + \frac{T''_{d0}}{T'_{d0}} \frac{x''_d}{x'_d} (x_d - x'_d) \right) i_d + \frac{T_{AA}}{T'_{d0}} v_f^* \right) / T''_{d0} \quad (8)$$

$$e''_d = \left( -e''_d + e'_d + \left( x'_q - x''_q + \frac{T''_{q0}}{T'_{q0}} \frac{x''_q}{x'_q} (x_q - x'_q) \right) i_q \right) / T''_{q0} \quad (9)$$

Burada,  $f_b$  temel frekans,  $P_m$  mekanik güç,  $M$  moment,  $D$  sönümlenme katsayısı,  $x_d$  and  $x_q$  d-q eksen senkron reaktanslar,  $x'_d$  and  $x'_q$  d-q eksen senkron geçici reaktanslar,  $x''_d$  and  $x''_q$  d-q eksen senkron alt geçici reaktanslar,  $T_{d0}$  and  $T'_{d0}$  d-q eksen açık devre geçici zaman sabiti,  $T''_{d0}$  and  $T''_{q0}$  d-q eksen açık devre alt geçici zaman sabiti,  $T_{AA}$  d-q eksen ilave kaçak zaman sabiti,  $i_d$  and  $i_q$  d-q eksen akımı,  $\delta$  rotor açısı,  $w$  rotor hızı,  $v_f$  alan gerilimi,  $e'_d$  and  $e'_q$  d-q eksen geçici gerilim kaynağı,  $e''_d$  and  $e''_q$  d-q eksen alt geçici gerilim kaynağıdır[14].

### 3. Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) Modeli

ÇBAG'ün devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ÇBAG devre modeli

ÇBAG temel olarak bir dişli kutusu, bir generator ve bir şebeke-rotor evirici devresinden oluşmaktadır. ÇBAG stator kısmı direk olarak şebekeye bağlanırken, rotor kısmı arka arkaya bağlı evirici devresi sayesinde şebekeye bağlanmaktadır. Arka arkaya bağlı evirici devresi generatörün değişik hızlarda çalışmasına izin vermektedir. ÇBAG rüzgar hızının çok az olduğu

veya çok olduğu durumlarda belli bir seviyeye kadar çıkış gücünü sabit tutma avantajına sahiptir. Seviye sınırlarının ihmal edilmesi durumunda rotor tarafındaki evirici devresinde bulunan crowbar ünitesi sayesinde rüzgar santrali şebekeden ayrılır. ÇBAG'ün stator ve rotor devresi matematiksel modellemesinde d-q eksen stator ve rotor gerilimleri kullanılmaktadır. D-q eksen stator ve rotor gerilimleri Eş. 10 – Eş. 13'te verilmiştir. .

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + w_s \lambda_{qs} + \frac{d}{dt} \lambda_{ds} \quad (10)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} - w_s \lambda_{ds} + \frac{d}{dt} \lambda_{qs} \quad (11)$$

$$v_{dr} = R_r i_{dr} - s w_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (12)$$

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

ÇBAG stator ve rotor akı eşitlikleri Eş. 14 – Eş. 17'de verilmiştir.

$$\lambda_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (14)$$

$$\lambda_{qs} = (L_s + L_m) i_{qs} + L_m i_{qr} \quad (15)$$

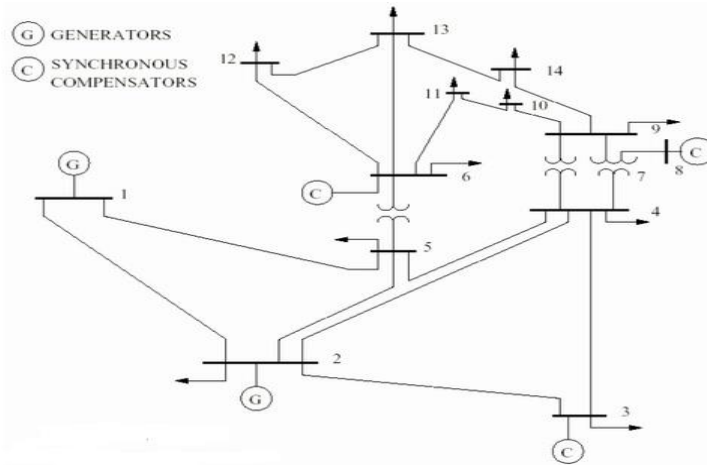
$$\lambda_{dr} = (L_r + L_m) i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (16)$$

$$\lambda_{qr} = (L_r + L_m) i_{qr} + L_m i_{qs} \quad (17)$$

Bu eşitliklerde;  $v_{ds}$ ,  $v_{dr}$ ,  $v_{qs}$ ,  $v_{qr}$  ,d-q stator ve rotor gerilimleri,  $i_{ds}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{qr}$ , d-q stator ve rotor akımları,  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{dr}$ ,  $\lambda_{qs}$ ,  $\lambda_{qr}$ , d-q stator ve rotor kaçak akıları,  $w_s$  açısal hız,  $s$  kayma,  $R_s$  ve  $R_r$ , d-q stator ve rotor dirençleri,  $L_s$  and  $L_r$ , d-q stator ve rotor endüktansları,  $L_m$ , manyetik endüktansdır [15].

#### 4. Benzetim Modeli

Yapılan çalışmada IEEE 14 baralı güç sistemi üzerinde test edilmiştir.ve Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir [16]. Oluşturulan 14 baralı güç sisteminin devre modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.

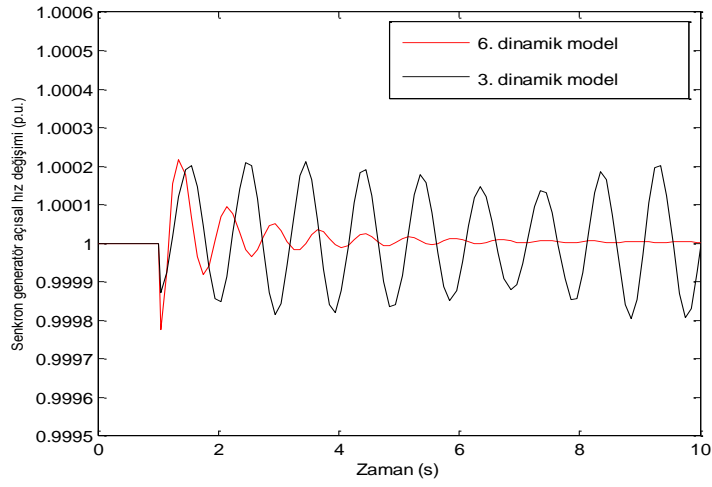


Şekil 2. IEEE 14 bus baralı güç sistemi

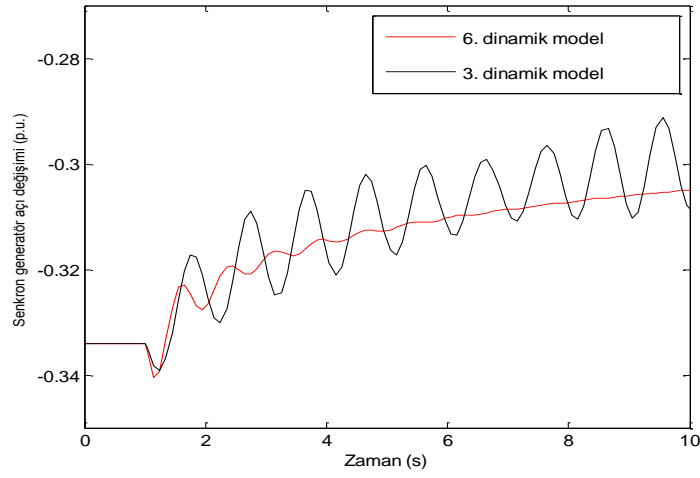
14 baralı bu güç sisteminde 1 numaralı bara sonsuz bara olarak kullanılırken, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralar generatör barası olarak kullanılmıştır. Diğer geri kalan 9 bara ise yük barası olarak kullanılmıştır. Bu sistemin 4-7, 4-8 ve 4-9 iletim hatlarında gerilimi düşüren transformatörler kullanılmıştır. 4-7 ve 4-9 nolu iletim hatları arasındaki transformatörlerde kademe değiştirme ve faz kaydırma işlemleri yapılmaktadır. Generatör baralarında generatörlerin güç kontrolünü sağlamada otomatik gerilim regülatörü kullanılmıştır. 2 numaralı generatör barasına ayrıca 30 MVA gücünde ÇBAG'den oluşan rüzgar santrali bağlanmıştır. Analizi yapılacak olan bu güç sisteminde 2 ve 4 numaralı baralar arasında kesicinin yanlış koordinasyon sonucu açma kapama işlemi gerçekleşmiştir. Kesicinin açma kapama süresi 1 saniye ile 1.3 saniye arasında meydana gelmiştir. Benzetim çalışması iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada kesici açıp kapama işleminde senkron generatörlerde 3. dinamik derece modeli kullanılmıştır. İkinci aşamada ise aynı açma kapama işlemi için 6. dinamik derece modeli kullanılmıştır.

## 5. Benzetim Modeli Sonuçları

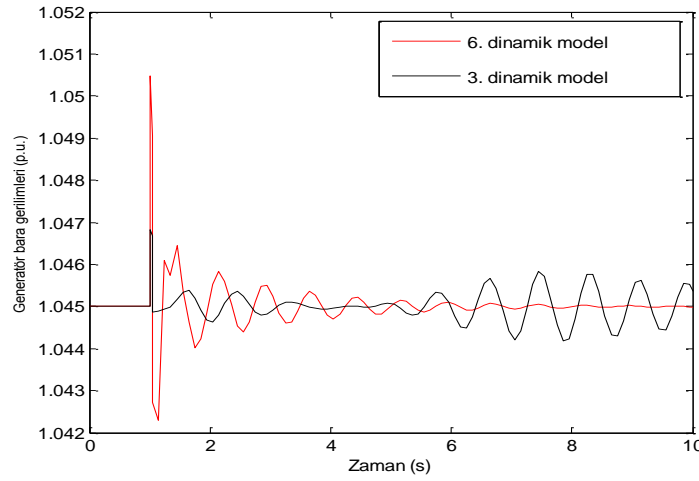
30 MW'lık ÇBAG'lerin 3 numaralı baraya bağlı olması esnasında 2 ve 4 baralar arasındaki 1-1.05 saniyeler arasında açılıp kapanması durumlarında 3 numaralı senkron generatörün açılma hızı, açısı ve bara gerilim değişimi Şekil 3-Şekil 6'da gösterilmiştir.



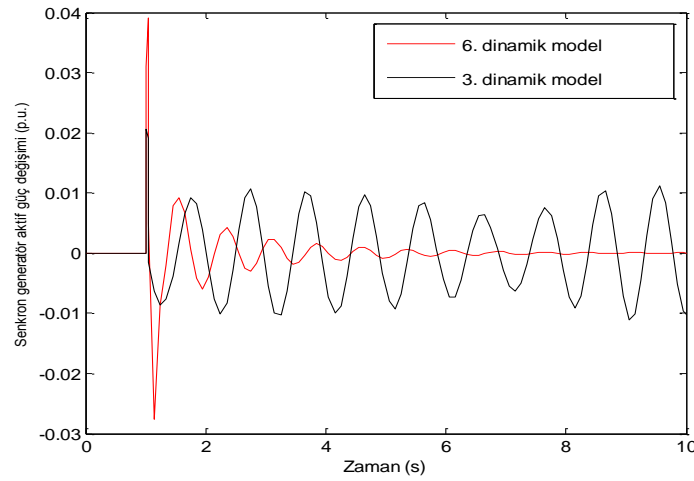
Şekil 3. 3 numaralı baraya bağlı senkron generatör açısal hız değişimi



Şekil 4. 3 numaralı baraya bağlı senkron generatör açı değişimi

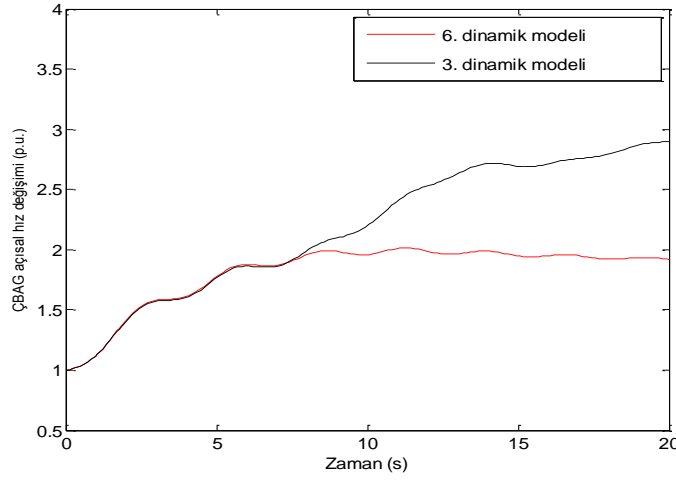


Şekil 5. Senkron generatörün farklı dinamik modellerde 3 numaralı bara gerilim

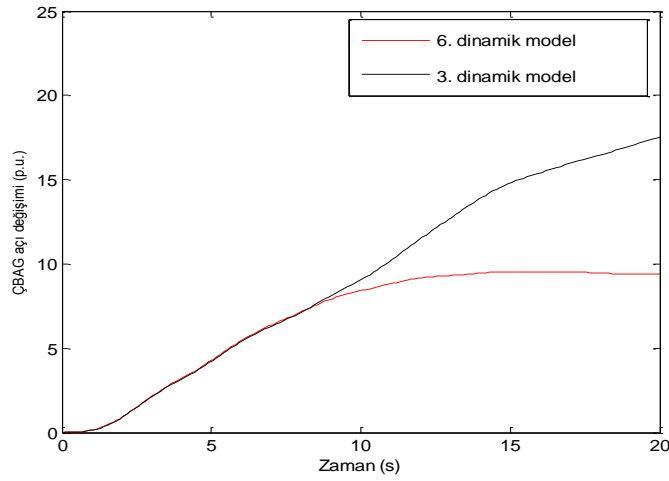


Şekil 6. Senkron numaralı baraya bağlı senkron generatör aktif güç değişimi

Farklı dinamik derece modelinde senkron generatörün açısal hız değişiminin 0.9998-1.0002 p.u., açı değişiminin -0.295-0.31 p.u. arasında, bara geriliminin 1.044-1.046 p.u. arasında, senkron generatör aktif güç değişiminin -0.01-0.01 p.u. arasında olduğu gözlemlenmiştir. 3. dinamik derece modelinde sistem parametreleri kararsız durumda iken 6. dinamik derece modelinde sistemin yaklaşık olarak 5 saniye sonra kararlı hale geldiği görülmüştür. 2 ve 4 baralar arasındaki 1-1.05 saniyeler arasında açılıp kapanması durumlarında ÇBAG'lerin açısal hızı ve açı değişimleri Şekil 7-Şekil 8'de gösterilmiştir.



Şekil 7. ÇBAG açısal hız değişimi



Şekil 8. ÇBAG açısı değişimi

3. dinamik derece modelinde ÇBAG açısal hız değişiminin 1-3 p.u. arasında, ÇBAG 0-18 p.u. arasında olduğu görülmüştür. 6. dinamik derece modelinde ÇBAG açısal hız değişiminin 1-2 p.u. arasında, ÇBAG 0-9 p.u. arasında olduğu görülmüştür.

### Sonuçlar

Çok baralı güç sisteminde senkron generatörlerin farklı dinamik derece modellemeleri ile hem güç sistemi üzerinde hemde ÇBAG'den oluşan rüzgar santrali üzerinde oluşturmuş olduğu etkiler bu çalışmada incelenmiştir. Senkron generatörlerin 3. dinamik derece modelinde kesici açma kapama işleminde oluşan kararsızlık durumunda yetersiz kaldığı görülmüştür. Senkron generatörlerin 6. dinamik derece modelinde kesici açma kapama işleminde oluşan kararsızlık durumunu kısa süre içerisinde kontrol etmede başarılı olmuştur. ÇBAG'den oluşan rüzgar santralinin 6. dinamik derece modelinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Özellikle kesici açma



kapama işleminde geçici kararsızlık durumunda senkron generatör parametrelerinden olan aktif güç en fazla etkilenen parametre olmuştur. Senkron generatörde olduğu gibi ÇBAG'de de açılı en fazla etkilenen parametre olmuştur.

## Kaynaklar

- [1] Ledesma P, Usaola J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis. *IEEE T Energy Conver* 2005; 20:2, 388-397.
- [2] Luna A, Lima FDA, Santos D, Rodríguez P, Watanabe EH, Arnaltes S. Simplified modeling of a DFIG for transient studies in wind power applications. *IEEE T Ind Electron* 2011; 58:1, 9-20.
- [3] Qiao W, Ronald GH. Effect of grid-connected DFIG wind turbines on power system transient stability. *IEEE Power Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century* 2008; 1-7.
- [4] Boemer JC, Madeleine G, Wil LK. Dynamic models for transient stability analysis of transmission and distribution systems with distributed generation: an overview. *IEEE PowerTech Conferences* 2009; 1-8.
- [5] Ren MH, Ji LW, Jin M, Yan HX, Dong H. Impacts of DFIG-based wind farm on load modeling. *IEEE Power Energy Soc Gen Meet* 2009; 1-6.
- [6] Shi L, Dai S, Ni Y, Yao L, Bazargan M. Transient stability of power systems with high penetration of DFIG based wind farms. *IEEE Power Energy Soc Gen Meet* 2009; 1-6.
- [7] Döşoğlu MK, Arsoy AB. Modeling and simulation of static loads for wind power applications. *Neural Comput Appl* 2014; 25:5, 997-1006.
- [8] Yang L, Xu Z, Østergaard J, Dong ZY, Wong KP, Ma X. Oscillatory stability and eigenvalue sensitivity analysis of a DFIG wind turbine system. *IEEE T Energy Conver* 2011; 26:1, 328-339.
- [9] Fernandez RD, Mantz RJ, Battaiotto PE. Impact of wind farms on a power system. An eigenvalue analysis approach. *Renew Energ* 2007; 32:10, 1676-1688.
- [10] Xu L, Cartwright P. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. *IEEE T Energy Conver* 2006; 21:3, 750-8.
- [11] Hughes FM., Anaya-Lara O, Jenkins N, Strbac G. Control of DFIG-based wind generation for power network support. *IEEE T Power Syst* 2005; 20:4, 1958-1966.
- [12] Rahimi M, Parniani M. Efficient control scheme of wind turbines with doubly fed induction generators for low-voltage ride-through capability enhancement. *IET Renew Power Gen* 2010; 4:3: 242-252.
- [13] Ekanayake JB, Holdsworth L, Jenkins N. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines. *Electr Pow Syst Res* 2003; 67:3, 207-215.
- [14] F. Milano, Available: <http://www.Power.uwaterloo.ca/~fmilano/archive/psat-1.3.4.pdf>. Documentation for PSAT version 1. 3. 4. 2005.
- [15] Krause PC, Oleg W, Scott D. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*, 2nd. ed., Ieee Press, New York USA: Piscataway NJ John Wiley Sons; 2002.
- [16] Milano F. An open source power system analysis toolbox, *IEEE T Power Syst* 2005; 20:3, 1199-1206.