

# Weibull Distribution and Composite Wind Speed Transient Stability Analysis of Wind Turbine Based on DFIG

## Çift Beslemeli Asenkron Generatör'ü (ÇBAG) Rüzgar Türbininin Weibull Dağılımı ve Birleşik Rüzgar Hızında Geçici Durum Analizi

M.K. Döşoğlu<sup>1</sup>, S. Tosun<sup>1</sup>, A. Öztürk<sup>1</sup>, B. Saraçoğlu and G. Poyraz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Duzce University, Duzce/Turkey, [kenandosoglu@duzce.edu.tr](mailto:kenandosoglu@duzce.edu.tr), [salihtosun@duzce.edu.tr](mailto:salihtosun@duzce.edu.tr), [aliozturk@duzce.edu.tr](mailto:aliozturk@duzce.edu.tr), [bilalsaracoglu@duzce.edu.tr](mailto:bilalsaracoglu@duzce.edu.tr)

<sup>2</sup>Bilecik Şeyh Edebali University, Bilecik/Turkey, [gokhan.poyraz@bilecik.edu.tr](mailto:gokhan.poyraz@bilecik.edu.tr)

**Abstract**— In this study, transient stability analyses in wind speed models of the wind turbine based on Double Fed Induction Generator (DFIG) have been investigated. In wind speed models, weibull distribution and composite wind speed have been used. DFIG's analyses have been carried out in different scenarios by connecting DFIG with the same and alternative buses. In this simulation study, Power Systems Analysis Toolbox (PSAT) has been used. During 3 phase faults of DFIG connecting with the generator buses in IEEE 14 buses systems the effects of the 3 phase faults on angular speed, angle of the synchronous generators with DFIG and buses voltage have been emphasized. As a result of the study, it has been observed that weibull distribution and composite wind speed models have caused the varied results on the system in different scenarios.

**Keywords**— Double Fed Induction Generator, wind speed modeling, weibull distribution, composite wind speed, 3 phase fault

**Özet**—Yapılan bu çalışmada, Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG)'den oluşan Rüzgar Türbininin rüzgar hızı modellemelerinde geçici durum analizleri incelenmiştir. Rüzgar hızı modellemesinde weibull dağılımı ve birleşik rüzgar hızı kullanılmıştır. ÇBAG'ler aynı baralara ve farklı baralara bağlanarak farklı senaryolar halinde analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim çalışmasında Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır. IEEE'nin 14 baralı sisteminde generatör baralarına bağlanan ÇBAG'lerin 3 faz arızası esnasında açılma hızı, açı, senkron generatörlerin açılma hızları, açıları ve bara gerilimleri üzerinde oluşturdukları etkiler üzerinde durulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda weibull dağılımı ve birleşik rüzgar hızı modellemelerinin farklı senaryolarda sistem üzerinde değişik sonuçlar oluşturduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler**— Çift Beslemeli Asenkron Generatör, rüzgar hızı modellemesi, weibull dağılımı, birleşik rüzgar hızı, 3 faz arıza,

### I. GİRİŞ

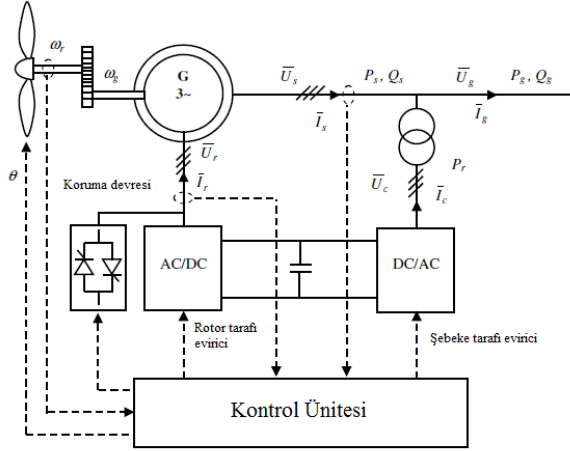
Son yıllarda fosil yakıtların fiyatındaki yükselmeler ve kullanımının sınırlı hale gelmesinden dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının en önemli olanlarından biride rüzgar enerjisidir. Hem temiz enerji olmasından dolayı hem de karmaşık güç sistemlerini rahatlatması açısından kullanımı çok önemli bir hal almaktadır. Rüzgar enerjisinde elektrik enerjisi üretimi için kullanılan rüzgar türbinlerinden son yıllarda MW mertebesine kadar güç alınmaktadır. Rüzgar türbinin en önemli parçalarından biri olan generatör özellikle rüzgarın farklı hızlarda olması nedeniyle seçiminde değişken hızlı ve verimi en yüksek olacak şekilde tercih edilmektedir. Yapımında aktif güç ve moment kontrolünü diğerlerine göre daha avantajlı olan Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tercih edilmektedir. Rüzgar enerjisinin güç kalitesi yönünden birçok önemli kısım bulunmaktadır. Bunlardan en önemlilerden biride ÇBAG'ün rüzgar hızı modellemesidir. ÇBAG'ün rüzgar hızına bağlı olarak yapılan çalışmalarda; ÇBAG'de weibull rüzgar hızı modelinde hız kontrolü sağlanmıştır. Bu geliştirilen kontrol ile dişli oranı, kutup sayısı ve şebeke frekansı üzerindeki etkileri incelenmiştir [1]. ÇBAG'de rüzgar hızı fonksiyonuna bağlı olarak çeşitli kayıp hesaplama metodu geliştirilmiştir. Weibull ve birleşik rüzgar hızı dağılımı ile yıllık enerji üretimi ve kapasite faktörü sağlanmıştır [2-5]. ÇBAG'ün gerilim kararlılığı analizinde weibull rüzgar hızı modellemesine bağlı olarak statik ve dinamik yüklerdeki etkileri incelenmiştir [6-7]. ÇBAG'de muhtemel weibull rüzgar hızı modellemesi yapılarak çok baralı sistemde küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Farklı bölgelere konulan ÇBAG'ün Weibull rüzgar hızı-mekaniksel güç arasındaki ilişki üzerinde durulmuştur [8-9]. ÇBAG'de harmonik analizinde rüzgar hızı modelinin etkisi üzerinde durulmuştur. Ölçüm dataları ile weibull ve birleşik

rüzgar hız modeli arasındaki muhtemel rüzgar hızı tahmini hesaplaması yapılmıştır [10].

Yapılan bu çalışmada IEEE 14 baralı güç sisteminde farklı baralara bağlanan ÇBAG'ün farklı rüzgar hız modeli etkileri incelenmiştir. 3 faz arızasının açılma hızı, açı ve bara gerilimleri üzerinde oluşturmuş oldukları etkiler incelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda 3 faz arızasında weibull rüzgar hız modelinin birleşik rüzgar hız modelinden daha az etkilendiği görülmüştür.

## II. ÇİFT BESLEMELİ ASENKRON GENERATÖR (ÇBAG)

ÇBAG genel olarak rotor, stator, koruma devresi, kontrol ünitesi ve evirici devrelerinde oluşmaktadır. ÇBAG'in devre modeli Şekil 1'de gösterilmiştir [11].



Şekil 1: ÇBAG devre modeli

ÇBAG'ün stator devresi direkt 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 [12]. Ayrıca şebeke ile birlikte çalışan ÇBAG'de herhangi bir olumsuz durum olduğundan koruma ünitesi ÇBAG'ü şebekeden ayırır. Problemin ortadan kalkmasında sonra koruma devresi tarafından tekrar devreye alınır. Eviricilerin, koruma ünitesi ve pitch açısı kontrolü kontrol ünitesi tarafından gerçekleştirilmektedir. Ayrıca ÇBAG'ün güç üretiminde önemli bir yeri olan rüzgar hızının weibull dağılım analizi,

$$f_w(v) = \left(\frac{k}{c}\right)\left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (1)$$

Şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $v$  rüzgar hızı,  $k$  rüzgar hızına bağlı bir katsayıdır. Weibull dağılımının ölçek parametresi olan  $c$  aynı zamanda rüzgar hızının birim referans değeridir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu,

$$F_w(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad (2)$$

şeklinde ifade edilir. Weibull kümülatif dağılım fonksiyonu, rüzgar hızının, belli bir  $v$  değerinden küçük yada eşit gerçekleşme olasılığını verir. Ortalama rüzgar hızı ( $v_m$ ) ve rüzgar hızının standart sapması'nın ( $\sigma$ ), hesaplanmasında denklem 3 ve denklem 4 formülleri kullanılmaktadır.

$$v_m = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{c^2\left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)\right]} \quad (4)$$

Burada gamma fonksiyonu,

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} e^{-x} x^{\alpha-1} dx \quad (5)$$

şeklinde hesaplanır. Weibull dağılımına dayanarak, en büyük sıklığa sahip rüzgar hızı ( $v_{mod}$ ) denklem 6'daki gibi hesaplanır.

$$v_{mod} = c\left(1 - \frac{1}{k}\right)^{1/k} \quad (6)$$

Maksimum rüzgar hızı ( $v_{max e}$ ),

$$v_{max e} = c\left(\frac{k+2}{k}\right)^{1/k} \quad (7)$$

şeklinde hesaplanır [13]. Birleşik rüzgar hızı modelleri ise ortalama rüzgar hızı ( $v_{wa}$ ), rampa ( $v_{wr}$ ), ani rüzgar ( $v_{wg}$ ) ve türbülans ( $v_{wt}$ ) oluşmaktadır. Birleşik rüzgar hızı hesaplaması denklem 8'de gösterilmiştir.

$$v_w(t) = v_{wa} + v_{wr}(t) + v_{wg}(t) + v_{wt}(t) \quad (8)$$

Zaman yönünden ortalama rüzgar hızı diğerlerinden bağımsızdır. Rampa değişim hızı hesaplaması denklem 9'da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} t < T_{sr} &\Rightarrow v_{wr}(t) \leq 0 \\ T_{sr} < t < T_{er} &\Rightarrow v_{wg}(t) = A_{wr} \left(\frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}}\right) \\ T_{er} < t &\Rightarrow v_{wr}(t) = A_{wr} \end{aligned} \quad (9)$$

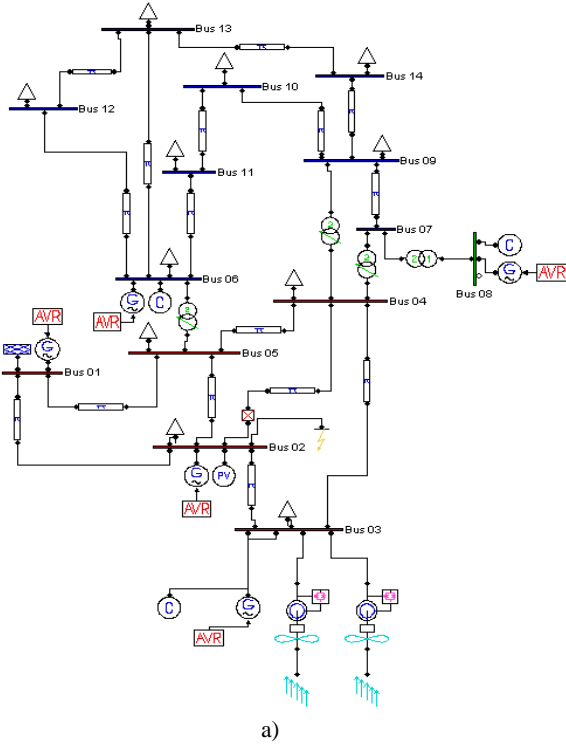
Burada  $T_{eg}$  ve  $T_{sg}$  rüzgar hızının başlangıç ve bitiş süreleri,  $A_{wr}$  ani rüzgar hızının genliği olarak ifade edilmektedir. ani değişim hızı hesaplaması denklem 10'da gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
t < T_{sg} &\Rightarrow v_{wg}(t) < 0 \\
T_{sg} < t < T_{eg} &\Rightarrow v_{wg}(t) = \frac{A_{wg}}{2} \left(1 - \cos\left(2\pi \frac{t - T_{sg}}{T_{eg} - T_{sg}}\right)\right) \\
T_{eg} < t &\Rightarrow v_{wg}(t) = A_{wg}
\end{aligned} \quad (10)$$

Rüzgar türbülans hızı değişiminde öncelikli olarak güç yoğunluk spektrumu hesaplanmaktadır.

$$S_{wt} = \frac{1/(\ln(h/z_0))^2 l v_{wa}}{\left(1 + 1.5 \frac{ef}{v_{wa}}\right)^{5/3}} \quad (11)$$

Burada  $f$  frekans,  $h$  kule uzunluğu,  $z_0$  pürüzlülük katsayısı ve  $l$  türbülans uzunluğudur. Bu parametrelere bağlı olarak türbülans hızı hesaplaması denklem 12'de gösterilmiştir.

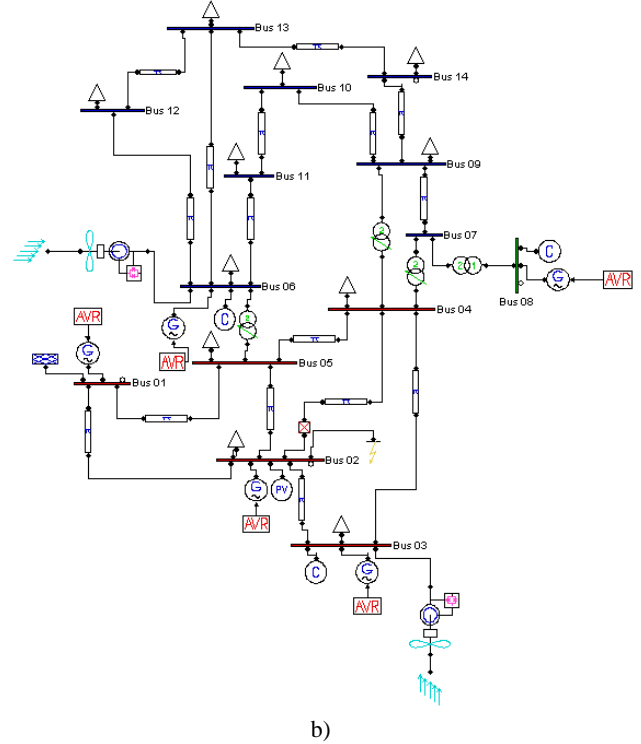


$$v_{wt}(t) = \sum_{i=1}^n \sqrt{S_{wt}(f_i) \Delta f} \cos(2\pi f_i t + \phi_i + \Delta\phi) \quad (11)$$

Burada,  $f_i$  ve  $\phi_i$  ilk frekans ve faz açısı değerleri,  $\Delta f$  ve  $\Delta\phi$  frekans ve faz açısı değişimleridir [14].

### III. BENZETİM ÇALIŞMASI

Yapılan bu çalışmada IEEE 14 baralı güç sistemi üzerinde test edilmiştir. Bu çalışma Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) ile gerçekleştirilmiştir [15]. Oluşturulan 14 baralı güç sisteminin devre modeli Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: Çift Beslemeli Asenkron Generatörlü IEEE 14 baralı güç sistemi

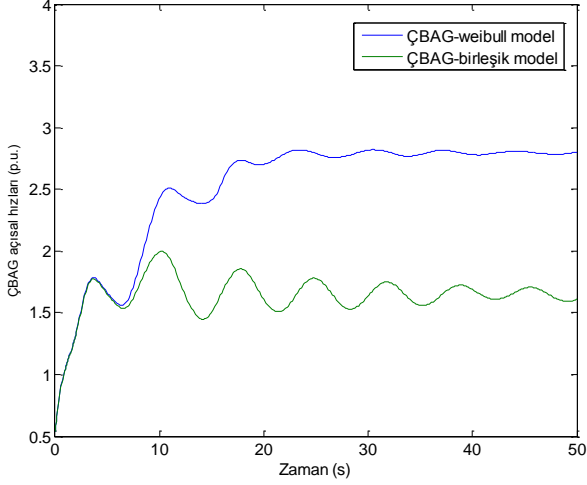
14 baralı bu güç sisteminde 1 numaralı bara sonsuz bara olarak kullanılırken, 2, 3, 6 ve 8 numaralı baralar generatör barası olarak kullanılmıştır. Diğer geri kalan 9 bara ise yük barası olarak kullanılmıştır. Bu sistemin 4-7, 4-8 ve 4-9 iletim hatlarında gerilimi düşüren transformatörler kullanılmıştır. 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. Analizi yapılacak olan bu güç sisteminde öncelikli olarak 2 numaralı

generatör barasında 3 faz arızası oluşmuştur. 3 faz arızasının süresi 1 saniye ile 1.3 saniyeler arasında meydana gelmiştir. 2 numaralı ve 4 numaralı baralar arasında kullanılan kesici devresini 1 saniye ile 1.5 saniyeler arası açıp kapatmaktadır. Şekil 2a'da 5 MW ÇBAG 3 numaralı baraya bağlanmıştır. Bunlardan birinin rüzgar hızı modeli weibull olarak seçilirken diğerinde birleşik olarak seçilmiştir. Şekil 2b'de ise ÇBAG'ler farklı baralara bağlanmıştır. 3 numaralı baraya bağlı olan ÇBAG rüzgar hızı modeli weibull olarak seçilirken, 6 numaralı baraya bağlı ÇBAG rüzgar hızı modeli birleşik

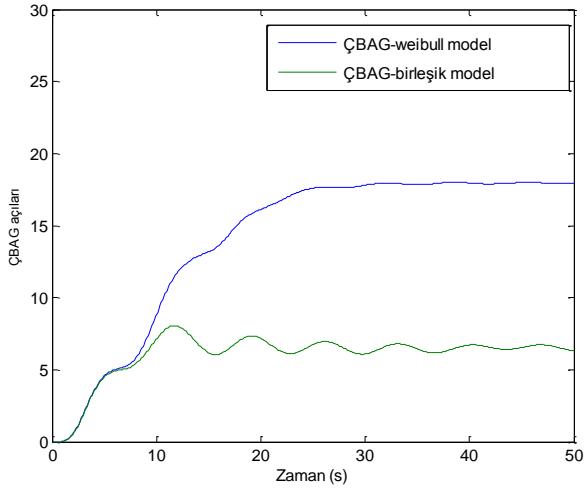
seçilmiştir.

#### IV. BENZETİM ÇALIŞMASI SONUÇLARI

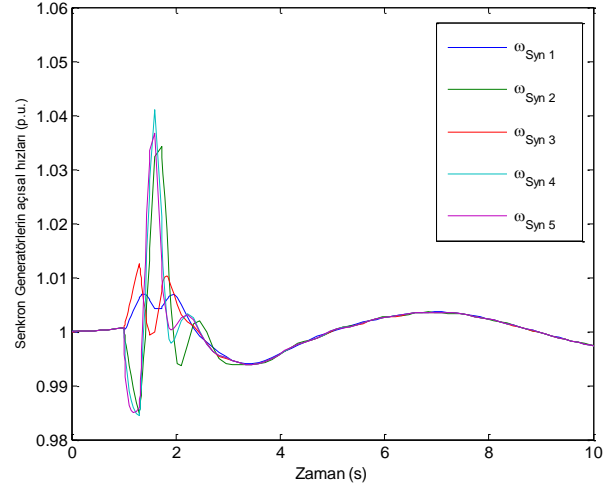
5 MW'lık ÇBAG'lerin her ikisinin 3 numaralı baraya bağlı olması esnasında 3 faz arızasının 2 numaralı barada olması durumunda ÇBAG açısal hızı, açısı, Senkron Generatörlerin açısal hızı, açısı ve bara gerilim değişimleri Şekil 3 ile Şekil 7 arasında gösterilmiştir.



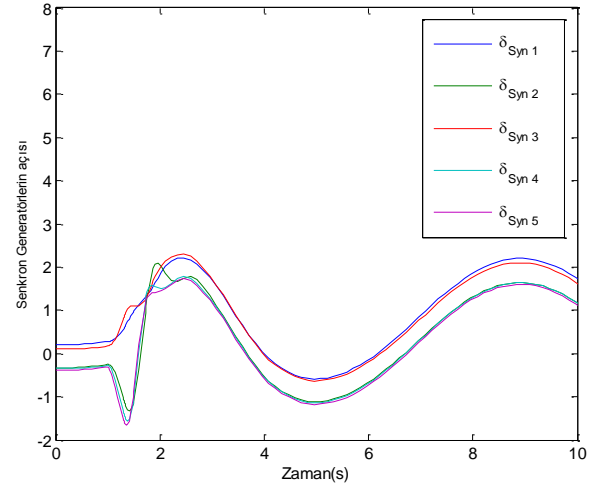
Şekil 3: 3 numaralı baradaki ÇBAG açısal hız değişimleri



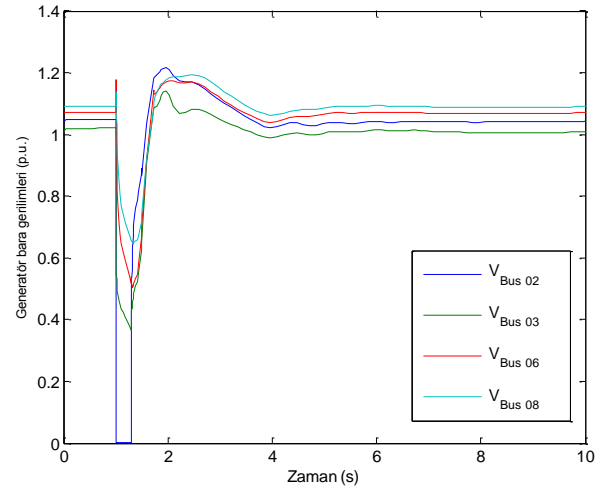
Şekil 4: 3 numaralı baradaki ÇBAG açı değişimleri



Şekil 5: Senkron Generatörlerin açısal hız değişimleri (ÇBAG 3 numaralı barada)

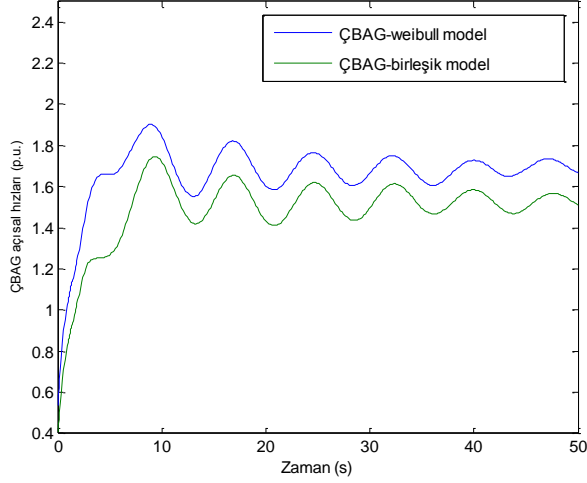


Şekil 6: Senkron Generatörlerin açı değişimleri (ÇBAG 3 numaralı barada)

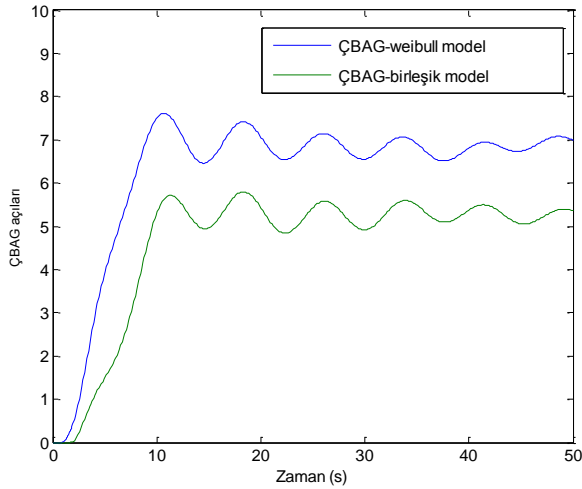


Şekil 7: Generator baralarının gerilim değişimleri (ÇBAG 3 numaralı barada)

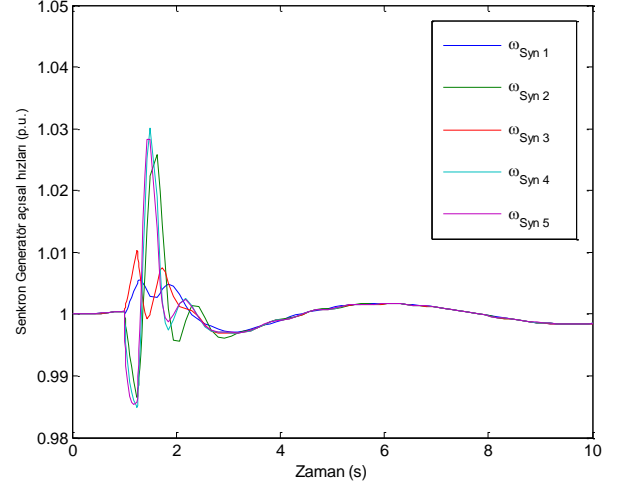
Weibull rüzgar hız modelinin birleşik hız modeline göre daha kısa zamanda kararlı hale geldiği görülmüştür. ÇBAG'ün bağlı olduğu baradaki senkron generatörleri açısal hız ve açı üzerinde etki oluşturdukları görülmüştür. Arıza sonrasında bara gerilimlerinin kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. 5 MW'lık ÇBAG'lerin her ikisinin 3 numaralı baraya bağlı olması esnasında 3 faz arızasının 2 numaralı barada olması durumunda ÇBAG açısal hızı, açısı, Senkron Generatörlerin açısal hızı, açısı ve bara gerilim değişimleri Şekil 8 ile Şekil 12 arasında gösterilmiştir.



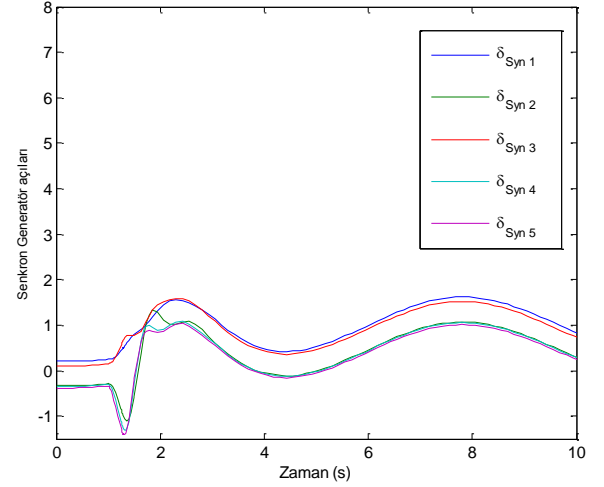
Şekil 8: 3 ve 6 numaralı baradaki ÇBAG açısal hız değişimleri



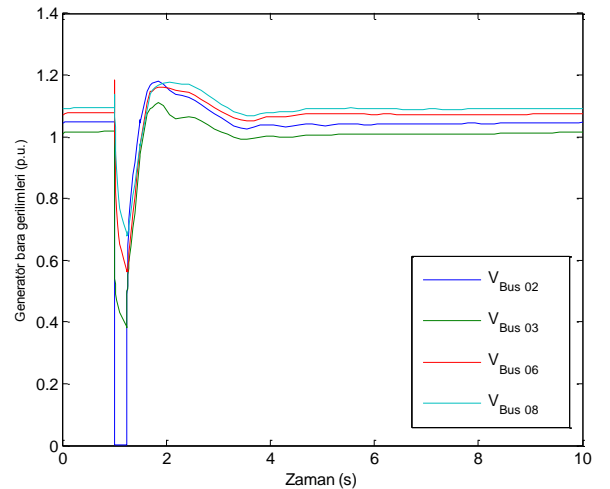
Şekil 9: 3 ve 6 numaralı baradaki ÇBAG açı değişimleri



Şekil 10: Senkron Generatörlerin açısal hız değişimleri (ÇBAG 3 ve 6 numaralı baradaki barada)



Şekil 11: Senkron Generatörlerin açı değişimleri (ÇBAG 3 ve 6 numaralı baradaki barada)



Şekil 12: Generator baralarının gerilim değişimleri (ÇBAG 3 ve 6 numaralı baradaki barada)

ÇBAG'ün farklı generatör baralarına bağlandığında weibull rüzgar hız modelinin ve birleşik hız modelinin birbine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. ÇBAG'ün bağlı olduğu baradaki senkron generatörlerin diğer generatörlere göre kararlılık durumundan daha çok etkilendiği görülmüştür.

## V. SONUÇLAR

ÇBAG'ün farklı rüzgar modellemelerinde incelenen bu çalışmada 3 faz arızasında sistem üzerinde oluşan etkiler incelenmiştir. IEEE 14 baralı güç sistemine her iki rüzgar hız modelinin aynı ve farklı generatör baralarına bağlı olduğu durumdaki analizi yapılmıştır. Aynı baraya bağlı ÇBAG'ün 3 faz arızasında hem weibull hem de birleşik rüzgar hızı modelinde açılmal hız ve açı değerlerinin belli bir değere yükseldikten sonra kararlı hale geldiği görülmüştür. Farklı baralara bağlı olan ÇBAG'de hem weibull hem de birleşik rüzgar hız modelinin birbirlerine yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Her iki aşama sonucunda weibull rüzgar hız modelinin birleşik hız modeline göre kullanımının karmaşık güç sistemlerinde kararlılık açısından daha önemli olduğunu söyleyebiliriz.

## REFERENCES

- [1] S. Li, T. A. Haskew, "Energy capture, conversion, and control study of DFIG wind turbine under weibull wind distribution", *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-9, July 2009.
- [2] B. Safari, J. Gasore, "A statistical investigation of wind characteristics and wind energy potential based on the Weibull and Rayleigh models in Rwanda", *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2874-2880, December 2010.
- [3] K. C. Divya, "Wind generator annual energy output estimation considering grid voltage and frequency variations", *European Transactions on Electrical Power*, vol. 21, pp. 263-272, January 2011.
- [4] R. Takahashi, H. Ichita, J. Tamura, M. Kimura, M. Ichinose, M. Futami, K. Ide, "Efficiency Calculation of Wind Turbine Generator System with Doubly-Fed Induction Generator", *IEEE 2010 XIX International Conference on Electrical Machines*, pp.1-4, September 2010.
- [5] O. Wasynczuk, D. T. Man, J. P. Sullivan, "Dynamic Behavior of a Class of Wind Turbine Generators During Randon Wind Fluctuations", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol.6, pp. 2837-2845, June 1981.
- [6] N. K. Roy, H. R. Pota, M. J. Hossain, D. Cornforth, "Impact of SCI and DFIG Type Wind Turbine on the Stability of Distribution Networks: static and dynamic aspect", *IEEE 2012 International Conference on Environment and Electrical Engineering*, pp.543-548, May 2012.
- [7] S. Abdelaziz, K. K Ben, E. Mohamed, "Bifurcation in power systems distribution networks integrating variable speed wind generation", *IEEE 6th International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices*, pp. 1-6, March 2009.
- [8] C. Wang, L. Shi, L. Yao, L. Wang, Y. Ni, M. Bazargan, "Modelling analysis in power system small signal stability considering uncertainty of wind generation", *IEEE In Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1-7, July 2010.
- [9] S. Q. Bu, W. Du, H. F. Wang, Z. Chen, L. Y. Xiao, H. F. Li, "Probabilistic analysis of small-signal stability of large-scale power systems as affected by penetration of wind generation", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.27, pp. 762-770, May 2010.
- [10] S. T. Tentzerakis, S. A. Papathanassiou, "An investigation of the harmonic emissions of wind turbines", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, pp. 150-158, March 2007.
- [11] L. M. Fernandez, C. A. Garcia, J. R. Saenz, F. Jurado, "Equivalent models of wind farms by using aggregated wind turbines and equivalent winds" *Energy conversion and management*, vol. 50(3), pp. 691-704, March 2009.

- [12] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins, G. Strbac, "Control of DFIG-Based Wind Generation for Power Network Support", *IEEE Transaction on Power Systems*, vol. 20, pp. 1958-1966, November 2005.
- [13] M. Kurban, Y. M. Kantar, F. O. Hocaoglu, "Weibull Dağılımı Kullanılarak Rüzgar Hız ve Güç Yoğunluklarının İstatistiksel Analizi", *Afyon Kocatepe Üniversite Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 7, pp. 205-218.
- [14] P. M. Anderson, B. Anjan "Stability simulation of wind turbine systems", *IEEE transactions on Power Apparatus and Systems*, vol 12, pp. 3791-3795, Dec. 1983.
- [15] F. Milano, "An open source power system analysis toolbox", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol.20, pp. 1199-1206, Aug. 2005.