

Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbinlerinde Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği için 3. Derece Modelinin Geliştirilmesi

Enes KAYMAZ ^{*1}, M. Kenan DÖŞOĞLU ²

^{1,2}Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

(Alınış / Received: 25.02.2025, Kabul / Accepted: 25.03.2025, Online Yayınlanma / Published Online: 25.04.2025)

Anahtar Kelimeler

ÇBAG tabanlı rüzgar türbini,
DGİY,
3. derece modelin
geliştirilmesi,
5. derece modeli

Öz: Şebekeye bağlı Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar türbinleri simetrik ve asimetrik arıza gibi geçici kararlılık durumlarından çok etkilenmektedir. Belirli bir süre geçici kararlılık durumunda ÇBAG'ın şebekeye bağlı kalması için Düşük Gerilim İyileştirme Yeteneği (DGİY)'nin şebeke kod gereksinimine ihtiyacı bulunmaktadır. Bunun için ÇBAG'ın dinamik model tabanlı benzetiminin oluşturulması gereklidir. Yapılan bu çalışmada, ÇBAG'da dinamik model oluşturulmasında 3. derece modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Stator dinamiğinin yanı sıra rotor dinamik modellemesi de bu çalışmada geliştirilmiştir. Geliştirilen 3. derece model ile geleneksel olarak kullanılan 5. derece modelin karşılaştırmaları 3 faz arızası 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızası durumları için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde, sistemin kısa sürede kararlı hale gelmesi ve salınımların sönümlenmesinde geliştirilen 3. derece modelin 5. derece modele göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Development of a 3rd Order Model for Low Voltage Ride Through Capability in DFIG Based Wind Turbines

Keywords

DFIG based wind turbine,
LVRT,
developed 3rd order model,
5th order model

Abstract: Grid connected Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based wind turbines are highly affected by transient stability conditions such as symmetric and asymmetric faults. In order for the DFIG to remain connected to the grid in case of transient stability for a certain period of time, the Low Voltage Ride Through Capability (LVRT) needs to be a grid code requirement. For this purpose, it is necessary to create a dynamic model-based simulation of DFIG. In this study, it is aimed to develop a 3rd order model in creating a dynamic model in DFIG. In addition to stator dynamics, rotor dynamic modeling is developed in this study. Comparisons of the developed 3rd order model with the traditionally used 5th order model are made for 3 phase fault, 2 phase fault and 1 phase ground fault situations. As a result of the results obtained, it was seen that the 3rd degree model developed gave better results than the 5th degree model in stabilizing the system in a short time and damping the oscillations.

1. Giriş

Şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar türbinlerinin şebeke kod gereksinimlerine göre devreye girip çıkması gerekmektedir. Bu durumlara uyulmadığı takdirde, kalkınma akımlarından dolayı hem ÇBAG hem de şebeke tarafında negatif etkiler meydana gelebilecektir. Bunun ortadan kaldırılması için DGİY'in sağlanması gerekmektedir. ÇBAG'da DGİY ile ilgili yapılmış çalışmalar bulunmaktadır. ÇBAG'ın şebeke kod gereksinime bağlı olarak geçici durum esnasında

şebekeye bağlı kalması için aktif ve pasif kompanzatör modelleri geliştirilmektedir. Bağlantı noktasındaki gerilim düşümünü hızlı bir şekilde ortadan kaldırmak için stator ve rotor devresinde geliştirilen modellerin etkili sonuçlar verdiği görülmüştür [1-3]. ÇBAG'da DGİY sağlanması için kullanılan diğer bir yaklaşım ise demanyetizasyon kontrolüdür. Demanyetizasyon stratejisinde sistemde geçici kararlılık oluşması sonucunda oluşan aşırı akım-gerilimlerin sönümlenmesi için akı kontrol modelleri geliştirilmektedir. Bu akı kontrolü ile geçici kararlılık

esnasında sistemde meydana gelen salınımların hızlıca sönümlendiği ve DGİY'in sağlandığı görülmektedir [4,5]. Geçici durum esnasında ÇBAG'ın şebekeye bağlı kalması ve sistemin güvenli bir şekilde çalışmasına devam etmesi için farklı koruma üniteleri geliştirilmektedir. Bu geliştirilen koruma üniteleri sayesinde şebeke kod gereksinimine bağlı olarak geçici kararlılık sırasında ÇBAG parametre çalışma sınır değerleri iyileştirilmiştir [6,7]. ÇBAG şebekeye direkt bağlı olduğu için oluşabilecek geçici durumlardan çok fazla etkilenmektedir. Bunun için ÇBAG'da, DGİY için aktif ve reaktif güç kontrol modelleri geliştirilmektedir. Sistemde kullanılan sanal direnç üniteleri sayesinde, çeşitli arızalara karşı ÇBAG'da kararlılık sağlanması ve salınımların sönümlenmesi etkili olmuştur [8,9]. ÇBAG'ın çeşitli arızalarda elektriksel moment ve DC link kontrolünün sağlanması DGİY açısından oldukça önemlidir. Elektriksel moment ve DC link kontrolü için ÇBAG'da çeşitli ardışıl modelleri geliştirilmektedir. Referans akım kontrolü ardışıl modellerin, ÇBAG'da koordineli bir şekilde sistem kararlılığını sağladığı görülmektedir [10-12]. Simetrik ve asimetrik arızalarda ÇBAG'da sistemin hızlı bir şekilde kararlı hale gelmesinde belirsizlik durumlarının kestirimi, DGİY için kullanılan diğer metotlardan birisidir. Şebeke tarafında oluşan arızaların hızlı bir şekilde tespit edilmesi ile ÇBAG'da hem parametrelerdeki salınımların azalması hem de şebekeye bağlı olarak çalışması sağlanmıştır [13,14].

ÇBAG'ın şebekeye bağlı olarak çalışmasında DGİY sağlanmasında, stator dinamiğinin sağlanması sistem kararlılığı için önemli bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra benzetim çalışması performansının artması ve hızlı hesaplama yapabilme yeteneği için azaltılmış derece modeli kullanılmaktadır. Azaltılmış derece modelinin geleneksel modele göre DGİY açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür [15-17].

Referans [15-17]'de elektriksel frekans dinamiği kullanılmıştır. Ancak elektriksel frekansın güçlü sistemlerde yeterince iyileştirici özelliği olmayabilmektedir. Bunun nedeni ise sadece elektriksel iyileştirmelerin yapıp, mekaniksel iyileştirmelerin yapılamamasıdır. Özellikle mekaniksel bazı parametrelerde kararsızlık durumları ortaya çıkabilmektedir. Bu çalışmada, azaltılmış derece modelinde hem elektriksel hem de mekaniksel frekans dinamiğinin koordineli bir şekilde kullanılması amaçlanmıştır. Bunun yanı sıra azaltılmış derece modelinde genlik-açı modelleri geliştirilerek rotor geriliminin geçici kararlılık durumlarında sistemi kompanze edecek şekilde desteklenmesi öngörülmüştür.

2. ÇBAG Modelinin Geliştirilmesi

ÇBAG rotorlu sargılı asenkron makine olarak isimlendirilmektedir. ÇBAG rüzgar enerjisi dönüşüm

sistemleri kW mertebesinde MW mertebesine kadar güç üretimi yapabilmektedir. ÇBAG modeli Şekil 1'de verilmiştir.

ÇBAG genel olarak dişli kutusu, generatör, Rotor Tarafındaki Evirici (RTE) ve Şebeke Tarafındaki Evirici (ŞTE) devresinden meydana gelmektedir. ÇBAG'ın stator devresi doğrudan şebekeye bağlanmaktadır. Rotor devresi güç elektroniği eviricileri sayesinde şebekeye bağlanmaktadır. Arka arkaya bağlı bu evirici devreleri çift yönlü akım akışına sahip olan darbe genişliği modülasyon anahtarlamalı iki gerilim kaynaklı evirici devresinden meydana gelmektedir. ÇBAG'da üretilen gücün kontrol edilmesinde rotor tarafındaki evirici devresi kullanılırken, DC bara geriliminin sabit tutulması kısmında şebeke tarafındaki evirici devresi kullanılmaktadır[18]. ÇBAG'da devre modellemesinde park-clark dönüşümlere göre hesaplamalar p.u. olarak yapılmaktadır. ÇBAG'da d-q eksen gerilim eşitlikleri Denklem 1 ile Denklem 4 arasında verilmiştir.

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

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

$$u_{dr} = R_r i_{dr} - s w_s \lambda_{qr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dr} \quad (3)$$

$$u_{qr} = R_r i_{qr} + s w_s \lambda_{dr} + \frac{d}{dt} \lambda_{qr} \quad (4)$$

ÇBAG'da halkalama akı eşitlikleri Denklem 5 ile Denklem 8 arasında gösterilmiştir.

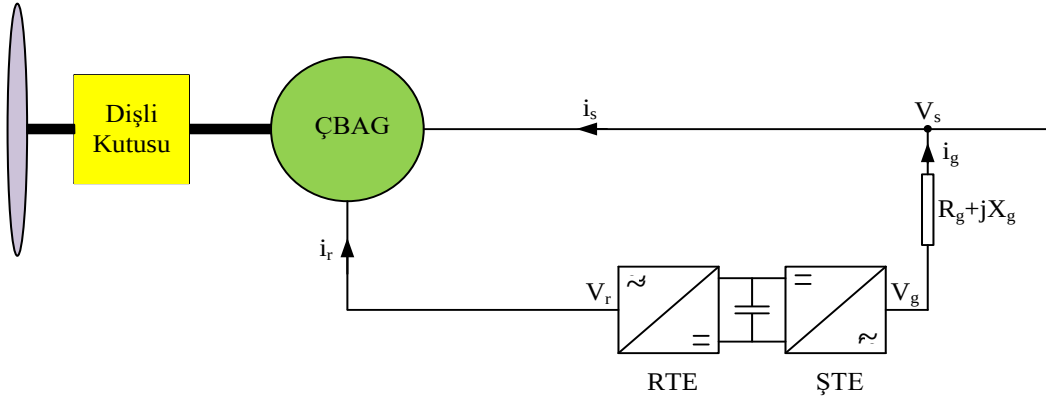
$$\lambda_{ds} = (L_s + L_m) i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (5)$$

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

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

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

Bu denklemlerde; 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, λ_{ds} , λ_{dr} , λ_{qs} , λ_{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 endüktanstır [18-20].



Şekil 1. ÇBAG modeli

Güç sistemi elektromekanik geçici durum analizinde ÇBAG'ın statör akı türevleri genelde ihmal edilmektedir. ÇBAG modellemesinde statör akı türevleri yerine DC eleman statör geçici gerilim kaynağı oluşumu sağlanmaktadır. Bunun yanı sıra geçici kararlılık analizlerinde makine içerisindeki hesaplamaların doğru ve güvenilir yapılabilmesi amacıyla klasik 3. derece modeli tercih edilmektedir. Klasik 3. derece modelinde d-q eksen statör gerilim ifadesi Denklem 9 ve 10'da gösterilirken, d-q eksen statör geçici gerilim kaynağı Denklem 11 ve Denklem 12'de, türevli statör geçici gerilim kaynağı ifadeleri ise Denklem 13 ve Denklem 14'te gösterilmiştir.

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} + X' i_{qs} + E'_d \quad (9)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + X' i_{ds} + E'_q \quad (10)$$

$$E'_d = -\frac{\omega_s L_m}{L_r} \psi_{qr} \quad (11)$$

$$E'_q = \frac{\omega_s L_m}{L_r} \psi_{dr} \quad (12)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E'_d - (X - X') i_{qs}] + s \omega_s E'_q - \omega_s \frac{L_m}{L_r} u_{qr} \quad (13)$$

$$\frac{dE'_q}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E'_q - (X - X') i_{ds}] - s \omega_s E'_d + \omega_s \frac{L_m}{L_r} u_{dr} \quad (14)$$

Klasik 3. derece modelinde kullanılan reaktans, geçici reaktans ve açık devre zaman sabiti ifadeleri Denklem 15 ve Denklem 17 arasında yer almaktadır.

$$X = \omega_s L_s \quad (15)$$

$$X' = \omega_s \left((L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \right) \quad (16)$$

$$T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} \quad (17)$$

Büyük güçlü sistemler simetrik ve asimetrik arızalardan çok fazla etkilenmektedir. ÇBAG'ın mevcut pratik modellerinde sistem frekans dinamikleri ihmal edilir. Bu, güç sistemi çok büyük olduğunda ve sistem frekansının bozulmalar sırasında sabit olduğu düşünüldüğünde makuldür. Ancak, incelenen sistem çok küçükse, sistem frekansı ciddi bir arıza sırasında büyük sapmalar yaşayabilir. Klasik 3. Derece modelinin geliştirilmesi için frekans dinamiğine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için sistemde kullanılan denklemlerin frekans dinamiklerinin ilave edilmesi ile oluşturulmaktadır. ÇBAG'ın kararlı hale gelebilmesi için klasik 3. derece modelinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bundan dolayı sistemde kullanılan denklemlerin frekans dinamiklerinin ilave edilmesi ile oluşturulur [21]. Frekans dinamiği rotor d-q eksen gerilimlerine ilave edilmesi Denklem 18 ve Denklem 19'da gösterilirken, buna bağlı olarak geliştirilen türevli statör geçici gerilim kaynağı ifadeleri Denklem 20 ve Denklem 21'de gösterilmiştir.

$$u_{dr} = \frac{1}{T_0} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_q + L_m i_{ds} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_q \right) \quad (18)$$

$$+ (\omega_s - \omega_r) \frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_d$$

$$u_{qr} = \frac{1}{T_0} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_d - L_m i_{qs} \right) + \frac{d}{dt} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_d \right) \quad (19)$$

$$- (\omega_s - \omega_r) \frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_q$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_q \right) = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{\omega_s} \frac{dE'_q}{dt} - \frac{E'_q}{\omega_s^2} \frac{d\omega_s}{dt} \right) \quad (20)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{L_r}{\omega_s L_m} E'_d \right) = \frac{L_r}{L_m} \left(\frac{1}{\omega_s} \frac{dE'_d}{dt} - \frac{E'_d}{\omega_s^2} \frac{d\omega_s}{dt} \right) \quad (21)$$

Frekans dinamiği rotor d-q eksen gerilim ifadelerinde görüldüğü gibi rotor açısal hızı (ω_r) stator açısal hızı ile etkileşime girmektedir. Frekans dinamiğinin oluşturulmasında geliştirilen 3. derece modeldeki reaktans ve geçici reaktans ifadeleri indüktans ve geçici endüktans ifadelerine dönüştürülmektedir. Bu dönüşümler Denklem 22 ve Denklem 23'te gösterilmiştir.

$$L = L_s \quad (22)$$

$$L' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \quad (23)$$

Denklem 15 ve Denklem 16'nın oluşturulması ile stator d-q eksen gerilim ifadeleri Denklem 24 ve Denklem 25'te gösterilirken, Frekans dinamiği sayesinde oluşturulan rotor d-q eksen gerilim ifadeleri Denklem 26 ve Denklem 27'de gösterilmiştir.

$$u_{ds} = -R_s i_{ds} + \omega_s L' i_{qs} + \omega_s E'_d \quad (24)$$

$$u_{qs} = -R_s i_{qs} + \omega_s L' i_{ds} + \omega_s E'_q \quad (25)$$

$$\frac{dE'_d}{dt} = -\frac{1}{T_0} [E'_d - (L - L') i_{qs}] + s \omega_s E'_q - \frac{L_m}{L_s} u_{qr} \quad (26)$$

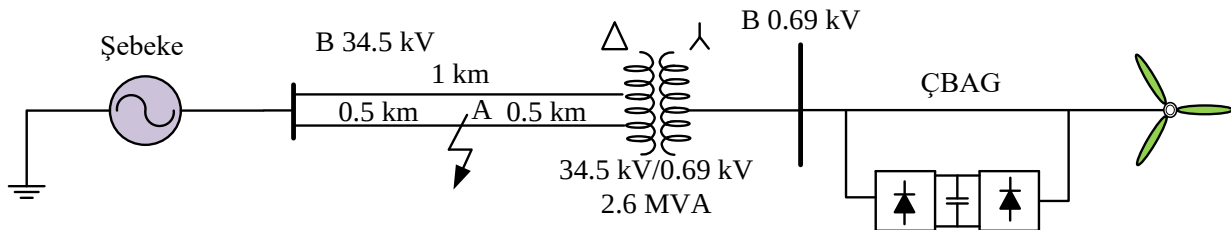
$$\begin{aligned} \frac{dE'_q}{dt} = & -\frac{1}{T_0} [E'_q - (L - L') i_{ds}] - s \omega_s E'_d \\ & + \frac{L_m}{L_s} u_{dr} \end{aligned} \quad (27)$$

3. Benzetim Çalışması ve Sonuçları

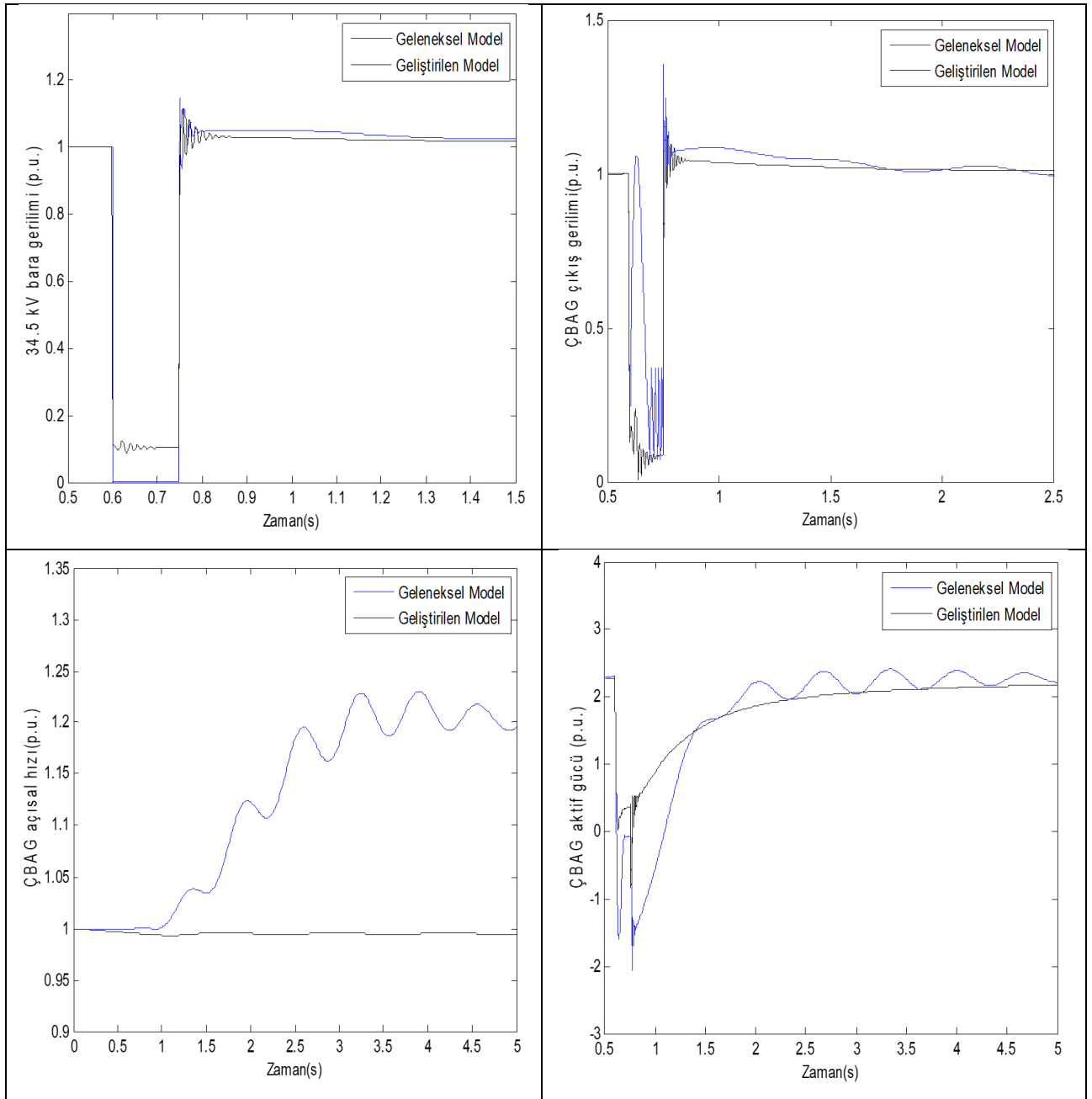
Benzetim çalışmasının gerçekleştirildiği sistem Şekil 2'de gösterilmiştir [22].

Sonsuz şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar türbinin gücü 2.3 MW değerindedir. ÇBAG çıkışındaki gerilim 690 V'dir. ÇBAG'da rüzgar hızı 8 m/s olarak sabit olarak ayarlanmıştır. Rüzgar türbini çıkışında 34.5 kV-0.69 kV'luk yükseltici transformatör kullanılmaktadır. Bu transformatörün primeri üçgen sekonderi yıldız bağlıdır ve gücü 2.6 MVA'dır. Trafo ile şebeke arasında 1 km'lik çift iletim hattı kullanılmaktadır. ÇBAG'da kullanılan parametreler ilgili çalışmada yer almaktadır. Bu benzetim çalışmasında kullanılan transformatörün doyma durumu ihmal edilmiştir. Sistemde simetrik ve asimetrik arızası iletim hattının alt kolunun ortasında meydana gelmektedir. Arıza süresi 0.6-0.75 saniyeler olarak belirlenmiştir. Arıza süresinin 0.15 saniye olmasının nedeni Türkiye'deki şebeke kod gereksiniminden kaynaklanmaktadır [23]. Arızalar sonucunda 5. derece modeli ve geliştirilmiş 3. derece modelinin karşılaştırmaları parametreler üzerinde gösterilmiştir.

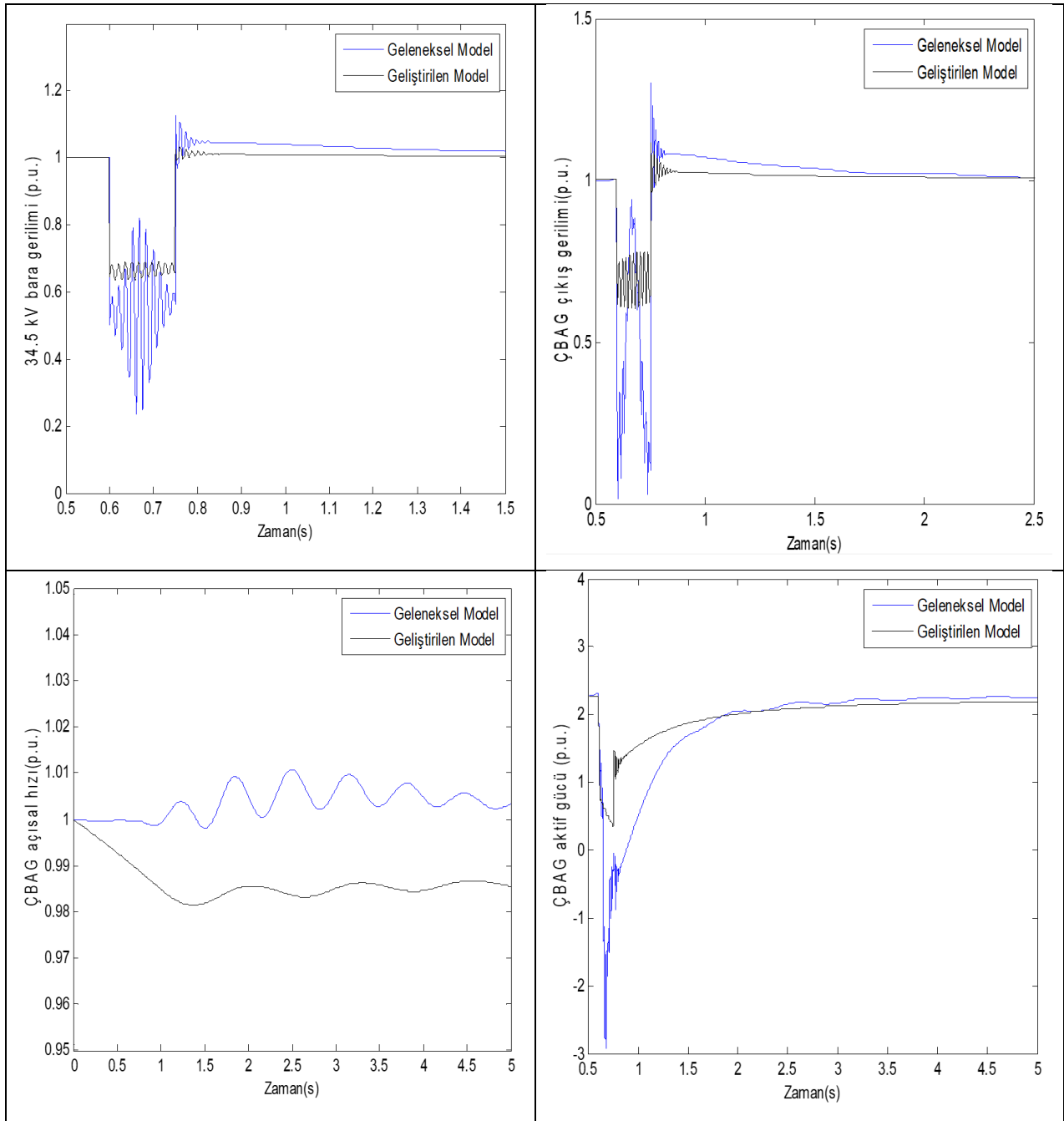
Bu çalışmada benzetim çalışması kapsamında üç farklı analiz gerçekleştirilmiştir. İlk analizde 3 faz arıza sonuçları elde edilirken, ikinci ve üçüncü analizlerde sırasıyla 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızası sonuçları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarda 5. derece modeli ve geliştirilmiş 3. derece modelinin karşılaştırmaları detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmasında, 5. derece modeli geleneksel model olarak isimlendirilirken, geliştirilen 3. derece modeli geliştirilmiş model olarak isimlendirilmiştir. Benzetim çalışması sonuçları Şekil 3 ile Şekil 5 arasında gösterilmiştir.



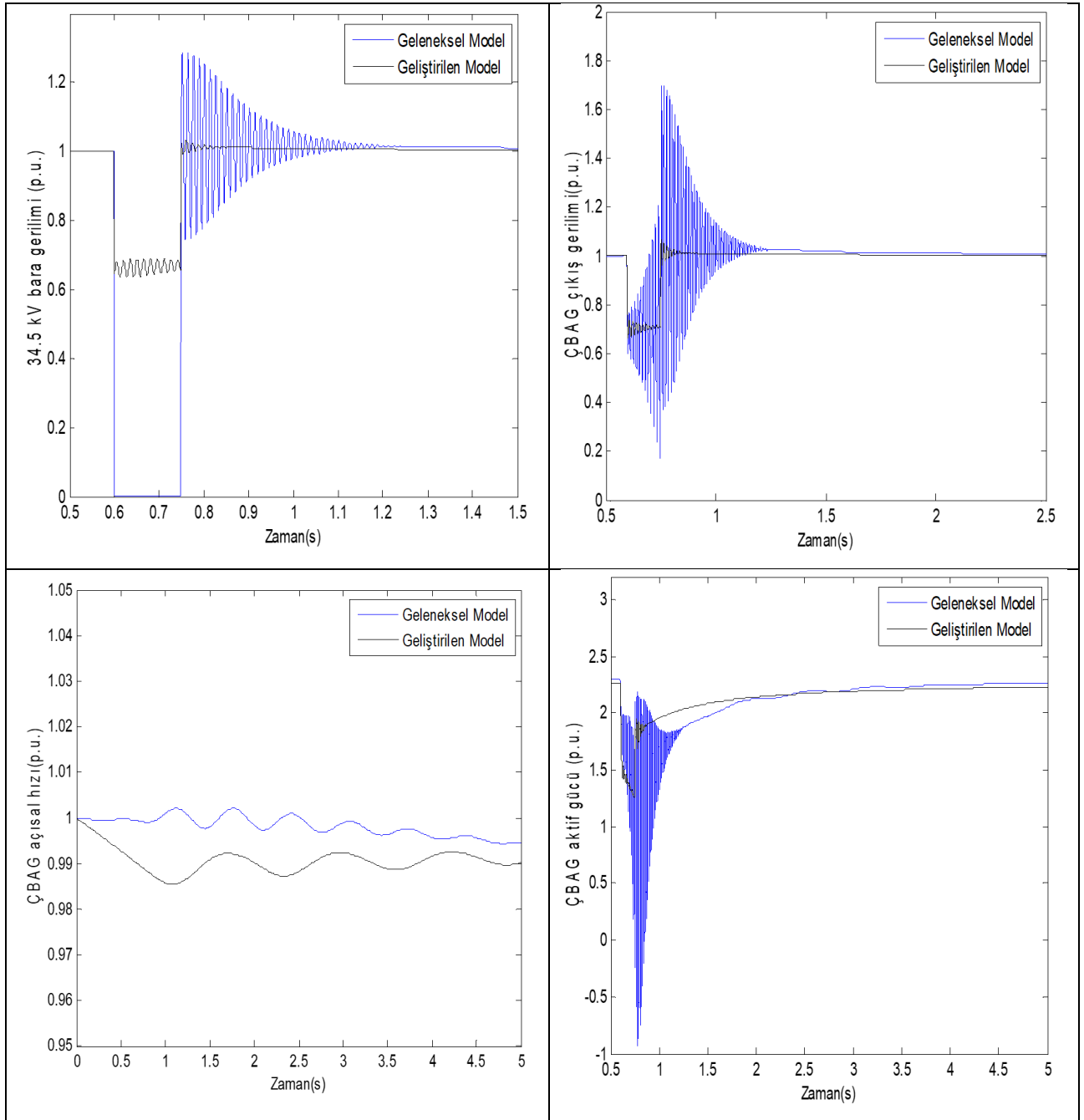
Şekil 2. Benzetim çalışmasının gerçekleştirildiği sistem



Şekil 3. 3 faz arızasında geleneksel model ve geliştirilmiş model karşılaştırmaları



Şekil 4. 2 faz arızasında geleneksel model ve geliştirilmiş model karşılaştırmalar



Şekil 5. 1 faz toprak arızasında geleneksel model ve geliştirilmiş model karşılaştırmalar

3 faz arızası, 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızası esnasında 34.5 KV ve ÇBAG çıkış gerilimlerinde geliştirilmiş 3. derece modeli sayesinde gerilimlerin kompanze olduğu görülmüştür. 3 faz arızasında 5. derece modelinde 34.5 kV bara gerilimi 0 p.u. ve ÇBAG çıkış gerilimi 0.25 p.u. değerindedir. 2 faz arızasında 5. derece modelinde 34.5 kV bara gerilimi 0.59 p.u. ve ÇBAG çıkış gerilimi 0.55 p.u. değerindedir. 1 faz toprak arızasında 5. derece modelinde 34.5 kV bara gerilimi 0 p.u. ve ÇBAG çıkış gerilimi 0.7 p.u. değerindedir. Geliştirilmiş 3. derece modelinin kullanılması ile sırasıyla 3 faz arızasında 34.5 kV bara gerilimi 0.14 p.u. değerine ÇBAG çıkış gerilimi 0.26 p.u. değerine yükselmektedir. 2 faz arızasında geliştirilmiş 3. derece modelinin kullanılması ile 34.5 kV bara gerilimi 0.66 p.u. değerine ÇBAG çıkış gerilimi 0.7 p.u. değerine yükselirken, 1 faz toprak arızasında geliştirilmiş 3. derece modelinin kullanılması ile 34.5 kV bara gerilimi 0.65 p.u. değerine ÇBAG çıkış gerilimi 0.72 p.u. değerine yükselmiştir.

4. Tartışma ve Sonuç

Yapılan çalışmada, şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgar türbinlerinde simetrik ve asimetrik arızalarda DGİY için sistem kararlılığının sağlanması amacıyla 3. derece modelinin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Mevcut olan 3. derece modeline ek olarak d-q eksen rotor devresinde genlik-açı tabanlı modelin geliştirilmesi ile 5. derece modeli ile detaylı bir şekilde karşılaştırmalar yapılmıştır. Elde edilen karşılaştırmalar sonucunda, geliştirilmiş 3. derece modelin kullanıldığı üç analiz sonucunda hem arızalar sırasında gerilimlerin kompanze olduğu hem de açısal hız ve aktif güç değişimlerinde sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Bunun yanı sıra salınımların sönümlenmesinde de geliştirilmiş 3. derece modeli ile daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Arızaların karşılaştırılmasında sistemi en çok etkileyen 3 faz arızası olurken, sistemi en az etkileyen 1 faz toprak arızası olmuştur.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Döşoğlu, M. K. 2020. Enhancement of Dynamic Modeling for LVRT Capability in DFIG-based Wind Turbines. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering, 44, 1345-1356.
- [2] El Makrini, A., El Karkri, Y., Boukhriss, Y., El Markhi, H., & El Moussaoui, H. 2017. LVRT Control Strategy of DFIG based Wind Turbines Combining Passive and Active Protection. International Journal of Energy Research, 7, 1258-1269.
- [3] Döşoğlu, K. 2020. A Novel Low Voltage Ride Through Capability Strategy for DFIG based Wind Turbines. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 12(1), 34-44.
- [4] Senapati, M. K., Pradhan, C., Nayak, P. K., Padmanaban, S., & Gjengedal, T. 2020. Modified Demagnetisation Control Strategy for Low-Voltage Ride-through Enhancement in DFIG-based Wind Systems. IET Renewable Power Generation, 14(17), 3487-3499.
- [5] Ma, Y., Zhu, D., Zhu, H., Hu, J., Zou, X., & Kang, Y. 2024. Transient Stability Analysis and Enhancement of DFIG-based Wind Turbine with Demagnetization Control During Grid Fault. IEEE Transactions on Industry Applications, 61(1), 1031-1042.
- [6] Yang L., Xu Z., Ostergaard J., Dong Z. Y., Wong K. P. 2012. Advanced Control Strategy of DFIG Wind Turbines for Power System Fault Ride Through. IEEE Transactions on Power Systems, 27, 713-722.
- [7] Loulijat, A., Chojaa, H., El Marghichi, M., Ettalabi, N., Hilali, A., Mouradi, A., ..., & Mossa, M. A. 2023. Enhancement of LVRT Ability of DFIG Wind Turbine by an Improved Protection Scheme with a Modified Advanced Nonlinear Control Loop. Processes, 11(5), 1417.
- [8] Hu S., Lin X., Kang Y., & Zou X. 2011. An Improved Low-Voltage Ride-Through Control Strategy of Doubly Fed Induction Generator During Grid Faults, IEEE Transactions on Power Electronics, 26, 3653-3665.
- [9] Döşoğlu, M. K. 2021. Hybrid Control Approach for Low-Voltage Ride-Through Capability in Doubly-Fed Induction Generator-based Wind Turbines. Computers & Electrical Engineering, 90, 106972.
- [10] Gomis-Bellmunt O., Junyent-Ferre A., Sumper A., & Bergas-Jan J. 2008. Ride-Through Control of a Doubly Fed Induction Generator under Unbalanced Voltage Sags, IEEE Transactions on Energy Conversion, 23, 1036-1045.
- [11] Ding, C., Chen, Y., & Nie, T. (2021). LVRT control strategy for asymmetric faults of DFIG based on improved MPCC method. IEEE Access, 9, 165207-165218.
- [12] Yang, R. H., Jin, J. X., & Abu-Siada, A. 2020. DFIG Protection with Rotor-Side SMES and Negative Sequence Control under Voltage Unbalance. International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD) 1-2, IEEE.
- [13] Luo, J., Zhao, H., Gao, S., & Han, M. 2020. A Low Voltage Ride Through Strategy of DFIG based on

Explicit Model Predictive Control. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 119, 105783.

- [14] Ding, C., Chen, Y., & Nie, T. 2021. LVRT Control Strategy for Asymmetric Faults of DFIG based on Improved MPCC Method. IEEE Access, 9, 165207-165218.
- [15] Fernandez L. M., Jurado F., & Saenz J. R., 2008. Aggregated Dynamic Model for Wind Farms with Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines, Renewable Energy, 33, 129-140.
- [16] Ekanayake J. B., Holdsworth L., Wu X., & Jenkins N. 2003. Dynamic Modeling of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines, IEEE Transaction on Power Systems, 18, 803-809.
- [17] Fernandez L.M., Garcia C. A., Saenz J. R., & Jurado F. 2009. Equivalent Models for Wind Farms by using Aggregated Wind Turbines and Equivalent Winds, Energy Conversion and Management, 50, 3, 691-704.
- [18] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. 1995. Analysis of electric machinery. Piscataway.
- [19] Döşoğlu, M. K. 2020. Crowbar Hardware Design Enhancement for Fault Ride Through Capability in Doubly Fed Induction Generator-based Wind Turbines. ISA transactions, 104, 321-328.
- [20] Ekanayake, J. B., Holdsworth, L., & Jenkins, N. 2003. Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines. Electric Power Systems Research, 67(3), 207-215.
- [21] Huang, H., Ju, P., Pan, X., Jin, Y., Yuan, X., & Gao, Y. 2019. Phase-amplitude model for doubly fed induction generators. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 7, 369-379.
- [22] Garcia-Gracia, M., Comech, M. P., Sallan, J., & Llombart, A. 2008. Modelling wind farms for grid disturbance studies. Renewable energy, 33(9), 2109-2121.
- [23] Rona, B. & Güler, Ö. 2015. Power system integration of wind farms and analysis of grid code requirements. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49, 100-107.