



Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Türbinlerinde Azaltılmış Derece Modeli Tabanlı Aktif-Reaktif Kompanzator Modelin Geliştirilmesi

Enhancement of Reduced Order Model Based Active-Reactive Compensator Model in Doubly Fed Induction Generator-based Wind Turbines

¹Enes KAYMAZ , ²M. Kenan DÖŞOĞLU 

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

kenandosoglu@duzce.edu.tr, eneskaymaz@duzce.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 28 February 2025
Accepted : 26 March 2025

Keywords:

DFIG based Wind Turbine,
Reduced Order Model,
Active-Reactive
Compensator, Transient
Stability.

ABSTRACT

DFIG based wind turbines connected to the grid are greatly affected by transient stability conditions. In transient stability conditions, excessive currents and oscillations in DFIG can damage the system. In order to eliminate these, the aim of this study is to develop active-reactive compensator models based on reduced order model. While the reduced order model was developed to provide ease of calculation in the system and to increase the performance of the simulation study, an active compensator model was developed in the stator circuit and a passive compensator model was developed in the rotor circuit. In the study, comparisons were made between the traditionally used model and the proposed models. Comparisons were made for 3 phase faults, 2 phase faults and a phase ground faults according to the parameters of 34.5 kV bus voltage, DFIG output voltage, angular speed and active power. As a result of the study, it was observed that the developed model damped the oscillations in a short time compared to the traditional model and stabilized the system in a short time.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 28 Şubat 2025
Kabul : 26 Mart 2025

Anahtar Kelimeler:

ÇBAG tabanlı Rüzgar
Türbini, Azaltılmış Derece
Modeli, Aktif-Reaktif
Kompanzator, Geçici
Kararlılık.

ÖZET

Şebekeye bağlı olan ÇBAG tabanlı Rüzgar Türbinleri geçici kararlılık durumlarından çok etkilenmektedir. Geçici kararlılık durumlarında ÇBAG'da aşırı akımların ve salınımların olması sisteme zararlar verebilmektedir. Bunları ortadan kaldırmak için bu çalışmada azaltılmış derece modeli tabanlı aktif-reaktif kompanzator modellerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sistemde hesaplama kolaylığının sağlanması ve benzetim çalışması performansının artırılması için azaltılmış derece modeli geliştirilirken, stator devresinde aktif kompanzator modeli ve rotor devresinde de pasif kompanzator modeli geliştirilmiştir. Yapılan çalışmada geleneksel olarak kullanılan model ile önerilen modellerin karşılaştırmaları yapılmıştır. 3 faz arızası, 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızasında karşılaştırmalar 34.5 kV bara gerilimi, ÇBAG çıkış gerilimi, açılma hız ve aktif güç parametrelerine göre yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, geliştirilen modelin geleneksel modele göre salınımları kısa sürede sönümlendiği ve sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale getirdiği görülmüştür.

© 2025 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

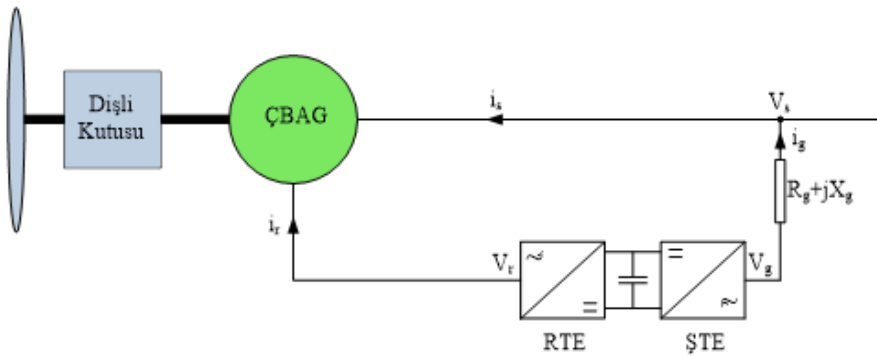
1. GİRİŞ

Son yıllarda fosil yakıtların tükenme aşamasına gelmesi ve fiyatlarındaki artışlardan dolayı yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelimler artmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları arasında en önemlilerin başında rüzgar enerjisi gelmektedir. Rüzgar gücünden elektrik enerjisi üretmek için ÇBAG yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ÇBAG'ın aktif güç ve moment kontrolünün diğer generatörlere kıyasla daha iyi olmasından dolayı tercih edilmektedir. ÇBAG'ın statoru şebekeye doğrudan bağlanmasından dolayı şebeke tarafındaki olumsuz durumdan çok etkilenmektedir. Bunu kontrol etmek için ÇBAG'da düşük gerilim iyileştirme yeteneğinin sağlanması gerekmektedir. ÇBAG'da düşük gerilim iyileştirme yeteneği ile ilgili bir çok çalışma yapılmaktadır. ÇBAG'da geçici kararlılık olaylarında arka arkaya bağlı evirici devresinde rotor kalkınma akımını sınırlandırmak için ve aşırı gerilimlerinde sönümlenmesi için koordinat kontrolü sağlanmıştır. Bunun gerçekleşmesi için sönümleme dirençleri kullanılmıştır [1,2]. ÇBAG'da rotor tarafındaki evirici devresinde geçici kararlılık durumları için çeşitli kontrol modelleri geliştirilmiştir. Kesintisiz güç elde edilebilmesi ve akımın belli sınırlar içerisinde tutulması için geliştirilen modellerin etkili çözümler verdiği ilgili çalışmalarda görülmüştür [3,4]. ÇBAG'da düşük gerilim iyileştirme yeteneğinin sağlanması için sanal direnç ünitesi geliştirilmiştir. Geçici kararlılık durumlarında ÇBAG'ın şebeke kod gereksinimine göre devrede kalabilmesi için sanal direnç ünitesi ile aktif ve reaktif güç kontrolleri sağlanmıştır [5]. Üç faz arızasında ÇBAG'da gerilim düşümünün etkisini azaltmak için aktif ve reaktif güç kontrolünün kullanılmasının düşük gerilim iyileştirme yeteneğinin sağlanmasında etkili rolü bulunmaktadır. Geçici durumda rotor kısa devre akımı ve çıkış gerilimini kontrol etmek için aktif ve reaktif gücün koordineli kontrolü ilgili çalışmalarda sağlanmıştır [6,7]. ÇBAG'da çeşitli arızalar sonucunda kararsızlık durumlarını ortadan kaldırmak için uygun parametre değerlerinin doğru bir şekilde belirlenmesi sağlanmalıdır. Arızalar sonucunda meydana gelen salınımların en hızlı şekilde sönümlenmesinde, kontrol ünitesinde sezgisel yöntem yaklaşımı ile etkili sonuçlar elde edilmektedir [8,9]. Şebeke kod gereksinime bağlı olarak ÇBAG'da düşük gerilim iyileştirme yeteneğinin sağlanmasında, hibrit kontrol modelleri geliştirilmektedir. Hibrit kontrol modelleri şebeke tarafındaki evirici devresinde enerji depolama sistemi elemanlarının kullanılması ile geliştirilirken, rotor tarafındaki evirici devresinde rotor geçici gerilim kaynağı modelinin geliştirilmesi sağlanabilmektedir. Bunun yanı sıra, ÇBAG kalkınma akımının kontrolü ve aşırı gerilim sönümlenmesinin gerçekleştirilmesi için sadece rotor tarafındaki evirici devresinde de sağlanmaktadır [10-12]. Geçici durum esnasında ÇBAG'da gerilim düşümü etkisini minimum seviyeye indirmek için pozitif ve negatif dizi modelleri tercih edilmektedir. Akım referans kontrolü tabanlı olarak tasarlanan modellerin geçici kararlılık durumlarında etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir [13-15].

Pozitif ve negatif dizi modellerin büyük güçlü ÇBAG tabanlı rüzgar türbinlerinde bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Arızalar esnasında oluşan akımların ve gerilimlerin sönümlenmesi için pozitif ve negatif dizi modellerin daha da desteklenebilmesi gerekmektedir. Bunun için pozitif ve negatif dizi modellerin yanısıra benzetim çalışmasında doğal akı ve güçlendirilmiş akı bileşeni modelleri geliştirilmiştir. Benzetim çalışmasında, hesaplama zorluklarının en aza indirilmesi ve performansı artırılması önemli bir konu olmaktadır. Bunları iyileştirebilmek amacıyla bu çalışmada azaltılmış derece modeli tabanlı aktif-reaktif kompanzator modellerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

2. ÇBAG MODELLEMESİ

ÇBAG devre modelinin yapısı Şekil 1'de yer almaktadır.



Şekil 1. ÇBAG devre modeli.

ÇBAG'ın statoru şebekeye doğrudan bağlanırken, rotor devresi şebekeye arka arkaya bağlı evirici devresi vasıtasıyla bağlanır. Hem rotor tarafındaki evirici hem de şebeke tarafındaki evirici sürekli ve geçici durum çalışmada aktif ve reaktif güçleri kontrol edebilmektedir. ÇBAG'da kullanılan aktif güç (P_s) ve reaktif güç (Q_s) eşitlikleri Denklem (1) ve Denklem (2)'de gösterilmektedir.

$$P_s = V_{grid} \frac{L_m}{L_s} i_{dqr} \quad (1)$$

$$Q_s = V_{grid} \frac{L_m}{L_s} i_{dqr} - \frac{v_{grid}^2}{w_s L_s} \quad (2)$$

ÇBAG'daki parametrelerin hesaplama kolaylığı açısından p.u. değerler kullanılmaktadır. ÇBAG d-q eksen stator ve rotor gerilim ifadeleri Denklem (3) ile Denklem (6) arasında gösterilirken, d-q eksen akı eşitlikleri Denklem (3) ve Denklem (6) arasında gösterilmiştir.

$$v_{dqs} = R_s i_{dqs} \pm j w_s \lambda_{dqs} + \frac{d}{dt} \lambda_{dqs} \quad (3)$$

$$v_{dqr} = R_r i_{dqr} \mp j s w_s \lambda_{dqr} + \frac{d}{dt} \lambda_{dqr} \quad (4)$$

$$\lambda_{dqs} = (L_s + L_m) i_{dqs} + L_m i_{dqr} \quad (5)$$

$$\lambda_{dqr} = (L_r + L_m) i_{dqr} + L_m i_{dqs} \quad (6)$$

Burada, V_{grid} şebeke gerilimi, v_{ds} , v_{dr} , v_{qs} , v_{qr} sırasıyla d-q eksen stator ve rotor gerilimleri, i_{ds} , i_{dr} , i_{qs} , i_{qr} sırasıyla d-q eksen stator ve rotor akımları, λ_{ds} , λ_{qs} , λ_{dr} , λ_{qr} sırasıyla d-q eksen stator ve rotor halkalama akıları, w_s ÇBAG açısal hızı, s kayma, R_s ve R_r sırasıyla stator ve rotor direnci, L_s ve L_r sırasıyla stator ve rotor endüktansı, L_m manyetik endüktansıdır [16-18].

ÇBAG'da stator dinamik modellemenin oluşumunda ve benzetim çalışmasının doğru hesaplama yapabilmesi için azaltılmış derece modeli kullanılmaktadır. Azaltılmış derece modelinde stator akı türevi ifadesinin ihlal edilmesi ve geçici gerilim kaynağı ve geçici reaktansın kullanılması ile oluşturulmaktadır. Azaltılmış derece modelinde DC eleman stator geçici akımı ile oluşturulmaktadır. Azaltılmış derece modeli ile d-q eksen stator gerilimleri ve geçici kaynak gerilimlerinin (e_{ds} ve e_{qs}) türevli eşitlikleri Denklem (7) ve Denklem (8)'de gösterilmiştir.

$$v_{dqs} = R_s i_{ds} \mp X' i_{qs} \pm e_{ds} \quad (7)$$

$$\frac{de_{dqs}}{dt} = -\frac{1}{T_0} [e_{dqs} \mp (X - X') \times I_{dqs}] \pm s \times w_s \times e_{dqs} \mp w_s \times \frac{L_m}{L_m + L_s} \times v_{dqr} \quad (8)$$

Azaltılmış derece modelinde kullanılan geçici reaktans (X') ve açık devre zaman sabiti (T_0) ifadeleri Denklem (9) ve Denklem (10)'da gösterilmiştir.

$$X' = w_s \left((L_m + L_s) - \frac{L_m^2}{L_m + L_r} \right) \quad (9)$$

$$T_0 = \frac{L_r + L_m}{R_r} \quad (10)$$

3. AZALTILMIŞ DERECE MODELİ TABANLI AKTİF-PASİF KOMPANZATÖR MODELİ

Azaltılmış derece tabanlı aktif-pasif kompanzatör modelinin geliştirilmesi için pozitif ve negative dizi modelleri kullanılmaktadır [14,15]. Bu modelin d-q eksen stator gerilimi ifadesi Denklem (11)'de gösterilmiştir.

$$v_{dqs} = V_{s1} e^{jw_s t} + V_{s2} e^{-jw_s t} \quad (11)$$

Burada, V_{s1} ve V_{s2} sırasıyla pozitif ve negatif dizi model gerilimleridir. Stator direncinin küçük gerilim düşümünde ihmal edildiğinde şebeke arızalarındaki stator akısının kararlı durum ifadesi Denklem (12)'de verilmiştir.

$$\lambda_{ss} = \frac{V_{s1}}{jw_s} e^{jw_s t} + \frac{V_{s1}}{-jw_s} e^{-jw_s t} \quad (12)$$

Burada, sabit durum bileşenidir. Devre teorisine göre akı bir durum değişkenidir ve sürekli değiştirilememektedir. Buna bağlı olarak başlangıç durumunun sabit duruma göre değerlerinin farklı olması gerekmektedir. Bu nedenle, stator ve rotor sabit durum bileşeni, doğal akı ve güçlendirilmiş akı bileşeni ile birlikte kullanılmaktadır. Geliştirilen bu akı ifadesinin stator (λ_{dqs}) ve rotor (λ_{dqr}) devresindeki ifadeleri Denklem (13) ve Denklem (14)'te gösterilmiştir.

$$\lambda_{dqs} = \frac{V_{s1}}{jw_s} e^{jw_s t} + \frac{V_{s1}}{-jw_s} e^{-jw_s t} + (\lambda_{sn0} + \lambda_{nf0}) e^{-t/\tau_s} \quad (13)$$

$$\lambda_{dqr} = \frac{V_{s1}}{jw_s} e^{js.w_s t} + \frac{V_{s1}}{-jw_s} e^{-j(2-s)w_s t} + (\lambda_{sn0} + \lambda_{nf0}) e^{-t/\tau_s} e^{jw_s t} \quad (14)$$

Stator akı bileşenleri rotor geri geçici gerilim kaynağı gerilimi (E_r) bileşenini oluşturmaktadır. Rotor geri geçici gerilim kaynağı gerilimi bileşen ifadesi Denklem (15)'te gösterilmiştir.

$$E_r = \frac{L_m}{L_s} [sV_{s1} e^{js.w_s t} + (2-s)V_{s2} e^{-j(2-s)w_s t} + (1-s)Ke^{-(1/\tau_s + jw_s t)}] \quad (15)$$

Burada, K basitleştirme katsayısıdır. Stator akısının pozitif dizisi normal çalışma koşulları altında Denklem (15)'in ilk kısmını oluşturmaktadır. Bu dizi kaymanın frekansı ile orantılıdır. Denklem (15)'in ilk kısmının geçici çalışma koşullarında değeri küçük çıkarken, ikinci ve üçüncü kısımlarının sırasıyla $(2-s)$ ve $(1-s)$ ile orantılı olarak değeri büyük çıkmaktadır [19,20]. Şebekeye güç desteği sağlanamadığından dolayı rotor hızının artması ile beraber rotor akımlarının artmasına ve statordaki salınımların büyümesine sebep olmaktadır. Bu durum, DFIG'in rotor tarafındaki evirici devresinin zarar görmesine neden olmaktadır. Bu nedenle, DFIG'in sistem için destek

gücü ve gerilimi sağlaması mümkün değildir. Bu problemi ortadan kaldırmak için aktif kompanzator ÇBAG'da güç ve şebeke gerilimini desteklemek için geliştirilmektedir. Aktif kompanzator, stator akı salınımlarını azaltmak ve şebeke gerilimi toparlanmasını desteklemek amacıyla şebekeye reaktif güç enjekte etmek için rotor tarafındaki evirici ve şebeke tarafındaki evirici devresini kontrol etmektedir. Azaltılmış derece modeli tabanlı geliştirilen aktif kompanzator ifadeleri Denklem (16) ve Denklem (19) arasında gösterilmiştir.

$$0 \cong v_{dqs1} - j\omega_s \lambda_{dqs1} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs1} + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{dqr1} \quad (16)$$

$$0 \cong v_{dqs2} - j\omega_s \lambda_{dqs2} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs2} + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{dqr2} \quad (17)$$

$$0 \cong v_{dqs n} - j\omega_s \lambda_{dqs n} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs n} + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{dqr n} \quad (18)$$

$$0 \cong v_{dqs f} - j\omega_s \lambda_{dqs f} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs f} + \frac{R_s L_m}{L_s} i_{dqr f} \quad (19)$$

Azaltılmış derece modeli tabanlı modelde $d-q$ eksen akı türevleri 0 olduğu için bu ifadelerin 0'dan farklı olması amacıyla belirli bir katsayı ile çarpımı sağlanmıştır. Stator akısının pozitif dizi bileşeni şebeke gerilimindeki azalmalarda açılma hız değerinde döndüğünden dolayı $d-q$ senkron referans çerçevesine göre değişimleri sıfıra eşit olmaktadır. Dengesiz gerilim düşmelerinde stator akısı negatif dizi bileşeninin salınımlarını azaltmak için Denklem (17) sıfıra göre ayarlanmaktadır. Ayrıca, gerilim düşümü altında stator akısı doğal ve güçlendirilmiş bileşenlerinin salınımlarını azaltmak için Denklem (18) ve Denklem (19)'daki eşitlikler de sıfıra eşit olmaktadır. Sonuç olarak rotor akım referansının negatif dizi (i_{dqr2}^*), doğal ($i_{dqr n}^*$) ve güçlendirilmiş bileşeni ($i_{dqr f}^*$) Denklem (20) ve Denklem (22) arasında gösterilmiştir.

$$i_{dqr2}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (-v_{dqs2} - j\omega_s \lambda_{dqs2} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs2}) \quad (20)$$

$$i_{dqr n}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (-j\omega_s \lambda_{dqs n} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs n}) \quad (21)$$

$$i_{dqr f}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (-j\omega_s \lambda_{dqs f} - \frac{R_s}{L_s} \lambda_{dqs f}) \quad (22)$$

Eşzamanlı referans çerçevesindeki rotor akımı referans eşitliği Denklem (23)'te verilirken, bu ifadenin ayrıştırılmış ifadeleri Denklem (24) ve Denklem (25)'te gösterilmiştir.

$$i_{dqr2}^* + i_{dqr n}^* + i_{dqr f}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (v_{dqs2} - j\omega_s (\lambda_{dqs2} + \lambda_{dqs n} + \lambda_{dqs f}) - \frac{R_s}{L_s} (\lambda_{dqs2} + \lambda_{dqs n} + \lambda_{dqs f})) \quad (23)$$

$$i_{dr2}^* + i_{dr n}^* + i_{dr f}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (v_{ds2} + \omega_s (\lambda_{ds2} + \lambda_{ds n} + \lambda_{ds f}) - \frac{R_s}{L_s} (\lambda_{ds2} + \lambda_{ds n} + \lambda_{ds f})) \quad (24)$$

$$i_{qr2}^* + i_{qr n}^* + i_{qr f}^* = -\frac{L_s}{R_s L_m} (v_{qs2} - \omega_s (\lambda_{qs2} + \lambda_{qs n} + \lambda_{qs f}) - \frac{R_s}{L_s} (\lambda_{qs2} + \lambda_{qs n} + \lambda_{qs f})) \quad (25)$$

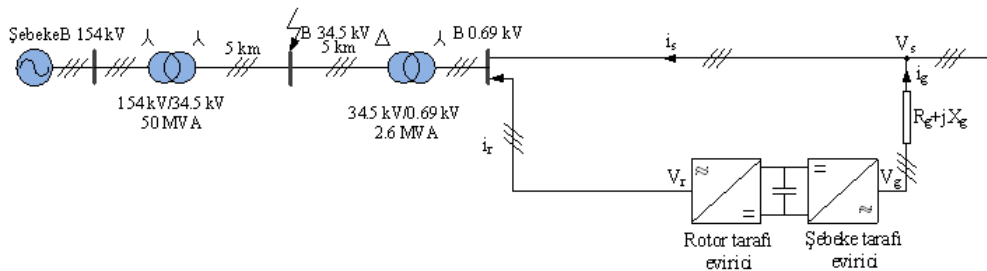
Stator direncinin küçük değere sahip olması nedeniyle gerilim düşmesi gerekli rotor akımı referansları çok yüksek olmaktadır. Rotor tarafındaki evirici devresi sınırlı kapasitesi ile bu kadar yüksek akımlara karşı gelememesinden dolayı gerekli rotor akımı referanslarını belirli bir değere düşürmek için stator sönümleme direnci kullanılmaktadır. Rotor devresinde bu akımı azaltmak için buna bağlı olarak pasif kompanzator modellemesi geliştirilmektedir. Ayrıca pasif kompanzator modelde geçici durumlar esnasında devrede geçici rotor direnci kullanılmaktadır. RSC maksimum akım sınırlarının altına düşürmek için bir stator sönümleme direnci uygulanır. Bu şekilde, stator direnci ve dolayısıyla pasif kompanzator tarafından rotor geçiş direnci aşağıdaki gibi artırılır. Pasif kompanzator modelinin geliştirilmesi ile elde edilen $d-q$ eksen rotor gerilim ifadesi Denklem (26)'da gösterilmiştir.

$$v_{dqr} = \frac{L_m}{L_s} \times (v_{dqs} - j\omega_s) + (R_r + \frac{L_m^2}{L_s^2} R_s) i_{dqr} + \sigma L_r \frac{di_{dqr}}{dt} \quad (26)$$

Denklem (26)'da stator direncini artırarak, rotor geçici direnç değeri arttırılmaktadır. Böylece stator akı sönümlemesi hızlandırılır ve rotor giriş akımları azaltılır.

4. BENZETİM ÇALIŞMASI

Analizi yapılan benzetim çalışması Şekil 2'de gösterilmiştir.

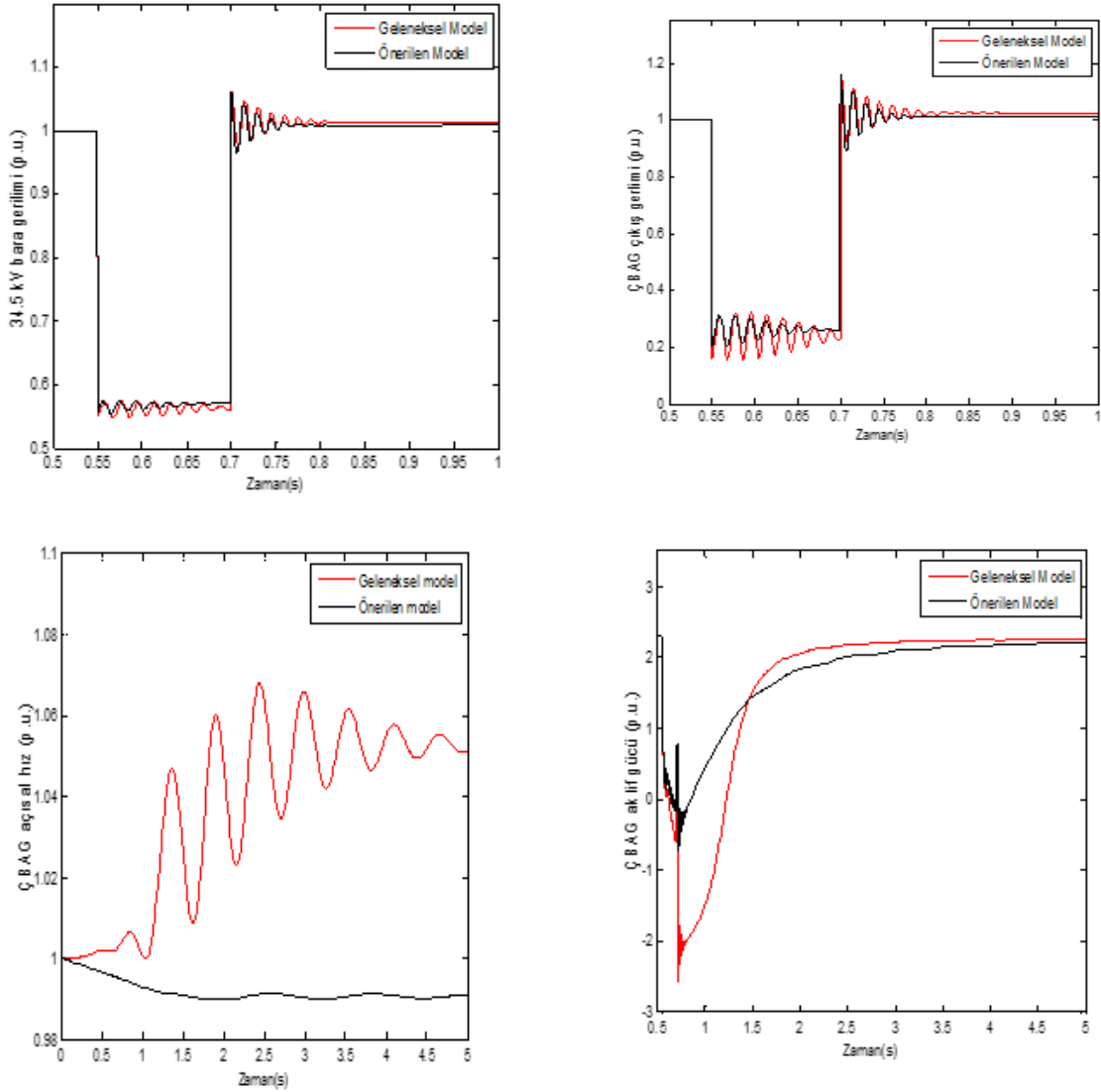


Şekil 2. Analizi yapılan benzetim çalışması.

Bu sistemde ÇBAG çıkış gerilimi 690 V'tur. 690 V gerilimi 34.5 kV'a yükselten transformatör kullanılmıştır. Bunun yanı sıra 34.5 kV'u 154 kV'a yükselten başka bir transformatör daha sistemde kullanılmıştır. 690 V gerilimi 34.5 kV'a yükselten transformatör üçgen-yıldız bağlı iken, 34.5 kV'u 154 kV'a yükselten transformatör yıldız-yıldız bağlanmıştır. Her iki transformatörün doyumları bu çalışmada ihmal edilmiştir. 10 km'lik iletim hattı kullanılmıştır. Hattın tam ortasında B 34.5 kV isimli bara bulunmaktadır. Ayrıca, sistemde B 154 kV ve B 0.69 kV'luk iki bara daha kullanılmıştır. Bu çalışmada, ÇBAG tabanlı rüzgar türbinin rüzgar hızı 8 m/s olarak belirlenmiştir. 154 kV'luk şebekenin kısa devre gücü 2500 MVA ve X/R oranı 6 olarak belirlenmiştir. ÇBAG'da kullanılan parametre değerleri için ilgili çalışma baz alınmıştır [21]. Sistemde B 34.5 kV'luk barada 3 faz arızası, 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızası meydana gelmektedir. Sistemdeki analizlerde, arıza süresi 0.65-0.8 saniyeler arası olarak belirlenmiştir. Simetrik ve asimetrik arızalarda Türkiye'deki şebeke kod gereksinimi göz önünde bulundurulmuştur [22]. Türkiye'deki şebeke kod gereksiniminde rüzgar türbinlerinin arıza esnasında şebekeden ayrılmasında süre 0.15 saniyedir. Arıza esnasında gerilimin bu süre içerisinde şebekeden ayrılmadan sürekli olarak çalışması kararlılık açısından çok önemlidir. Üç arıza analizinde elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak detaylı olarak yorumlanmıştır.

4.1. Benzetim Çalışması Sonuçları

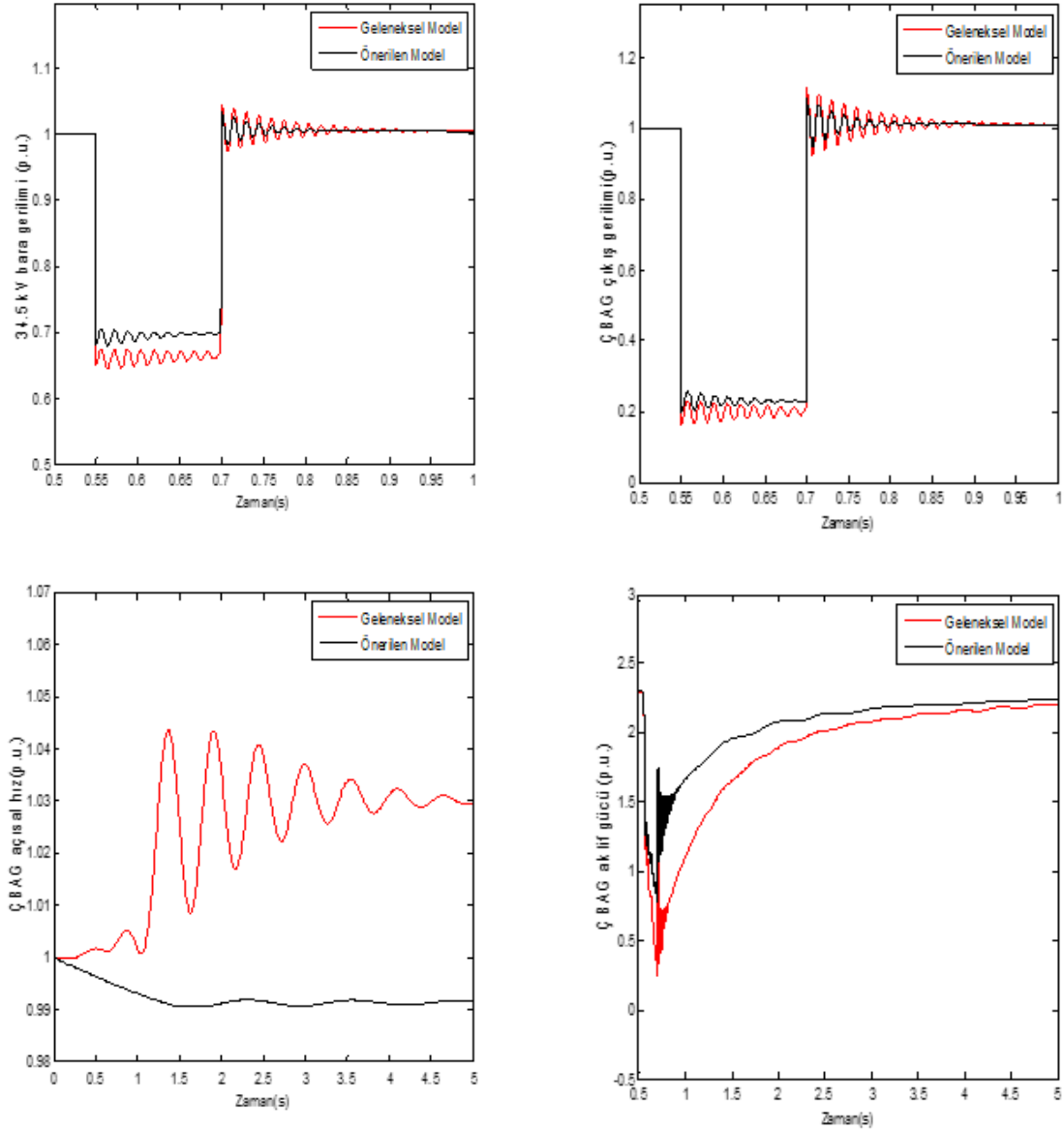
Benzetim çalışması üç analizden oluşmaktadır. İlk analizde 3 faz arızası incelenirken, ikinci analizde 2 faz arızası ve üçüncü analizde 1 faz toprak arızası sırasıyla incelenmiştir. 34.5 kV'luk barada oluşan arızaların süreleri Türkiye şebeke kod gereksinimi göre gerçekleştirilmiştir. Bundan dolayı arıza süresi 0.15 saniye olarak belirlenmiştir. Sistemde 0.65 saniye ile 0.8 saniyeler arası meydana gelen arıza durumlarında elde edilen sonuçlar Şekil 3 ile Şekil 5 arasında yer almaktadır.



Şekil 3. 3 faz arızasında geleneksel model ve önerilen model karşılaştırması.

Şekil 3'te sistemde meydana gelen 3 faz arıza analizinde geleneksel olarak kullanılan modelde geçici kararlılık

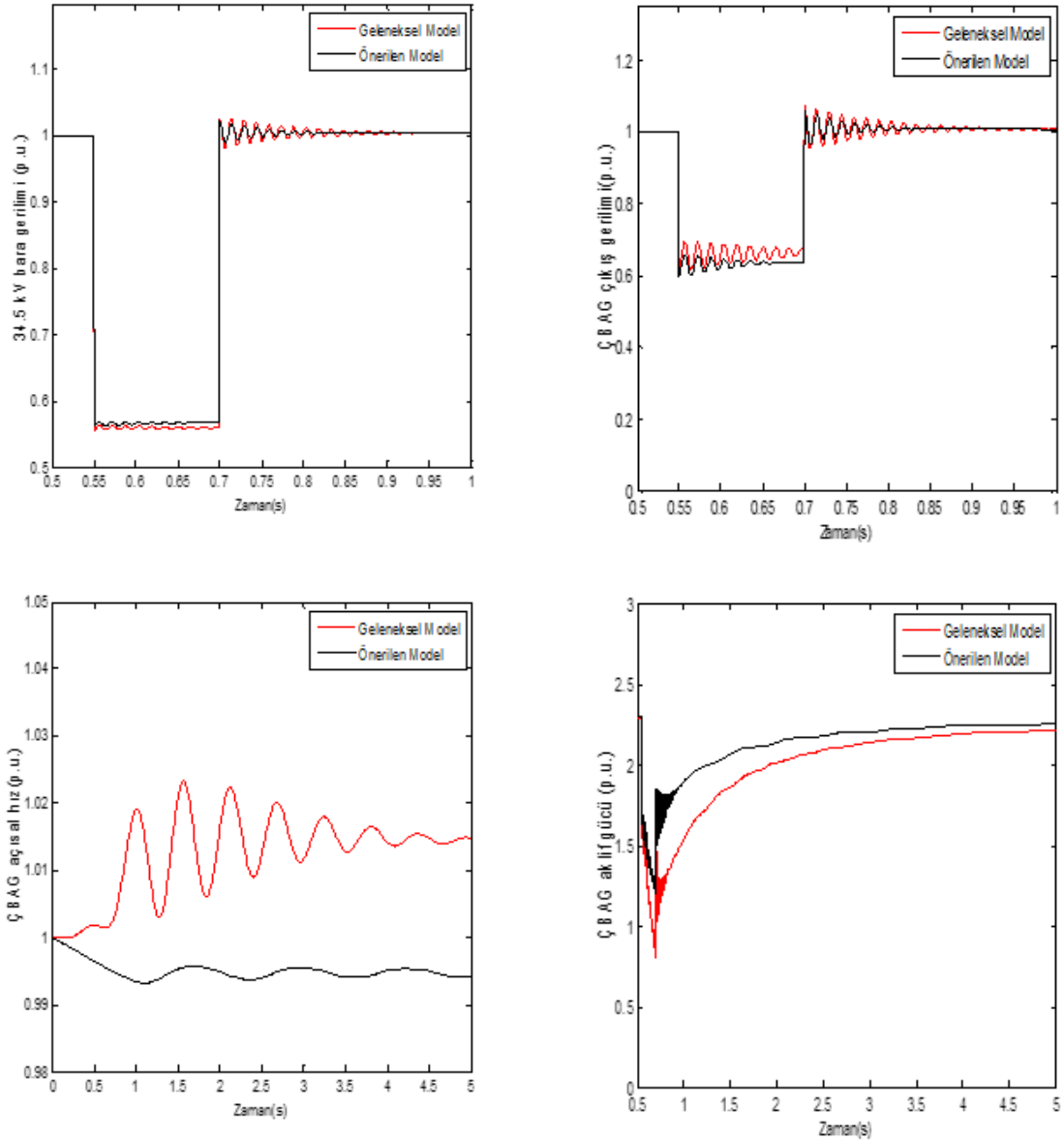
anında 34.5 kV bara gerilimi 0.56 p.u değerine düşerken, önerilen modelde 34.5 kV bara gerilimi 0.57 p.u değerine yükselmiştir. ÇBAG çıkış gerilimi geleneksel modelin kullanılmasında arıza esnasında 0.21 p.u. değerlerine düşerken, önerilen model sayesinde ÇBAG çıkış geriliminin 0.23 p.u değerine yükseldiği görülmüştür.



Şekil 4. 2 faz arızasında geleneksel model ve önerilen model karşılaştırması.

Her iki gerilimde de ayrıca 3 faz arızasından sonra önerilen model ile sistemin kısa sürede kararlı hale geldiği görülmüştür. Benzer şekilde ÇBAG açışsal hızı ve aktif gücünde arıza sonrasında önerilen model ile hem kısa süre içerisinde karar hale geldiği hem de oluşan salınımların hızlıca sönümlendiği görülmüştür.

Şekil 4'te verilen ikinci analizde geleneksel model ile önerilen modelin detaylı karşılaştırmaları yapılmıştır. 2 faz arıza anında geleneksel modelde 34.5 kV bara gerilimi 0.66 p.u değerine düşerken, önerilen modelde 34.5 kV bara gerilim değeri 0.7 p.u değerine yükselmiştir. 2 faz arıza analizinde arıza sırasında ÇBAG çıkış gerilimi geleneksel model ile 0.2 p.u. değerlerine düşerken, önerilen model ile ÇBAG çıkış geriliminin 0.215 p.u değerine yükseldiği görülmüştür. Hem 34.5 kV bara gerilimi hem de ÇBAG çıkış geriliminin 3 faz arızasından sonra önerilen model ile kısa sürede kararlı hale geldiği görülmüştür. ÇBAG açışsal hızı ve aktif güç değerlerinde de arıza sonrasında önerilen model ile sistem kısa süre içerisinde karar hale gelirken, oluşan salınımlarında hızlıca sönümlendiği görülmüştür. Şekil 5'deki karşılaştırmalarda 1 faz toprak arıza esnasında 34.5 kV bara gerilimi 0.56 p.u değerine düşerken, önerilen modelde 34.5 kV bara gerilimi 0.57 p.u değerine yükselmiştir. Arıza esnasında ÇBAG çıkış gerilimi önerilen modelin kullanılması ile 0.63 p.u. değerlerine düşerken, geleneksel model ile ÇBAG çıkış geriliminin 0.64 p.u değerine yükseldiği görülmüştür. Her iki gerilimde de 1 faz toprak arızasından sonra önerilen model ile sistemin kısa sürede kararlı hale geldiği görülmüştür. Bunun yanı sıra ÇBAG açışsal hızı ve aktif gücünde arıza sonrasında önerilen model sayesinde ile kısa süre içerisinde karar hale geldiği görülmüş olup, arıza esnasında meydana gelen salınımların hızlıca sönümlendiği görülmüştür.



Şekil 5. 1 faz toprak arızasında geleneksel model ve önerilen model karşılaştırması.

5. SONUÇ

Bu çalışmada simetrik ve asimetrik arızalar için kararlılığın sağlanmasında azaltılmış derece modeli tabanlı aktif-reaktif kompanzator modellerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Sistemde simetrik arıza olarak 3 faz arızası seçilirken, asimetrik arıza olarak 2 faz ve 1 faz toprak arızası seçilmiştir. Bu çalışmada, hesaplama kolaylığının sağlanması ve stator dinamiği için azaltılmış derece modeli kullanılmıştır. Stator devresindeki kararlılığın sağlanmasında aktif kompanzator modeli geliştirilirken, rotor devresinin kararlılığının sağlanması için pasif kompanzator modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada yapılan detaylı karşılaştırmalar sonucunda, önerilen modelin kısa sürede kararlılığın sağlanması ve kısa sürede salınımların sönümlenmesinde etkili olduğu görülmektedir. Yapılan üç analiz sonucunda sistemde en çok salınımların olduğu arıza 3 faz arızası olurken, sistemde en az salınımların olduğu durum 1 faz toprak arızası olmuştur. Ancak 1 faz toprak arıza sırasında önerilen model ile ÇBAG çıkış geriliminde nispeten küçük bir düşmesi söz konusudur. 3 faz arızası, 2 faz arızası ve 1 faz toprak arızasında en çok etkilenen parametre aktif güç olmuştur. Yapılan bu çalışma, ÇBAG tabanlı rüzgar türbininde stator ve rotor devresi için farklı düşük gerilim iyileştirme modellerinin oluşturulabilmesine ve bunların farklı şebeke kod gereksinime göre incelenebilmesine zemin hazırlamaktadır.

Yazar Katkıları

Tüm yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKÇA

- [1] M. Rahimi and M. Parniani, "Coordinated control approaches for low-voltage ride-through enhancement in wind turbines with doubly fed induction generators," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.25, pp. 873-883, 2010.
- [2] A.D. Hansen , G. Michalke , P. Sørensen, T. Lund and F. Iov, "Coordinated voltage control of DFIG wind turbines in uninterrupted operation during grid faults," *Wind Energy*, vol.10, pp. 51-68, 2007.
- [3] J. Liang, W. Qiao and R.G. Harley, "Feed-forward transient current control for low-voltage ride-through enhancement of DFIG wind turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 25, pp. 836-843, 2010.
- [4] S. Foster, L. Xu and B.Fox, "Coordinated reactive power control for facilitating fault ride through of doubly fed induction generator and fixed speed induction generator-based wind farms," *IET Renewable Power Generation*, vol. 4, pp. 128-138, 2010.
- [5] S. Hu, X. Lin , Y. Kang, and X. Zou, "An improved low-voltage ride-through control strategy of doubly fed induction generator during grid faults," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 3653-3665, 2011.
- [6] S. Chondrogiannis and M. Barnes , "Specification of rotor side voltage source inverter of a doubly-fed induction generator for achieving ride-through capability," *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, pp. 139-150, 2007.
- [7] J. Dai , D. Xu, B. Wu, and N.R. Zargari, "Unified DC-link current control for low-voltage ride-through in current-source-converter-based wind energy conversion systems," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 288-297, 2011.
- [8] Y. Mishra , S. Mishra, M. Tripathy, N. Senroy and Z.Y. Dong, "Improving stability of a DFIG-based wind power system with tuned damping controller," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol.24, pp. 650-660, 2009.
- [9] A.H. Kasem, E.F. El-Saadany, H. H. El-Tamaly, M. A. A.Wahab, "An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines," *IET Renewable Power Generation*, vol.2, pp. 201-214, 2007.
- [10] M.K.Döşoğlu, "Nonlinear dynamic modeling for fault ride-through capability of DFIG-based wind farm," *Nonlinear Dynamics*, vol. 89, pp. 2683-2694, 2017.
- [11] M.K.Döşoğlu, "Hybrid control approach for low-voltage ride-through capability in doubly-fed induction generator-based wind turbines," *Computers & Electrical Engineering*, vol.90, pp. 106972, 2021.
- [12] M.K. Döşoğlu, "Hybrid low voltage ride through enhancement for transient stability capability in wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol.78, pp. 655-662, 2016.
- [13] J. Mohammadi, S.Afsharnia, S. Vaez-Zadeh and S. Farhangi, S. "Improved fault ride through strategy for doubly fed induction generator based wind turbines under both symmetrical and asymmetrical grid faults," *IET renewable power generation*, vol.10, no.8, pp. 1114-1122, 2016.
- [14] J. Mohammadi, S. Afsharnia, E. Ebrahimzadeh, and F. Blaabjerg, "An enhanced LVRT scheme for DFIG-based WECSs under both balanced and unbalanced grid voltage sags," *Electric Power Components and Systems*, vol.45, no.11, pp. 1242-1252, 2017.
- [15] J. Mohammadi, S. Afsharnia, and S. Vaez-Zadeh, "Efficient fault-ride-through control strategy of DFIG-based wind turbines during the grid faults," *Energy conversion and management*, vol. 78, pp. 88-95, 2014.
- [16] P.C. Krause, *Analysis of electric machinery*. McGraw-Hill, 2th ed., New York, 2002.
- [17] J.B.Ekanayake, L. Holdsworth and N. Jenkins, "Comparison of 5th order and 3rd order machine models for double fed induction generators (DFIG) wind turbines," *Electric Power System Research*, vol.67, no.3, pp. 207-215, 2003.
- [18] J.G. Sloopweg, H. Polinder and W.L.Kling, "Dynamic modelling of a wind turbine with doubly fed induction generator," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting vol.1*, pp.644-649, 2001.
- [19] M.K. Döşoğlu, "Enhancement of dynamic modeling for LVRT capability in DFIG-based wind turbines," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 44, pp. 1345-1356, 2020.
- [20] M.K. Döşoğlu, "ÇBAG Tabanlı rüzgar türbinleri için yeni bir düşük gerilim iyileştirme yeteneği stratejisi," *International Journal of Technological Sciences Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, vol. 12, no.1, pp. 33-44, 2020.
- [21] M.K. Döşoğlu, O. Özkaraca and U. Güvenç, "Novel active-passivecompensator-supercapacitor modeling for low-voltage ride-through capability in DFIG-based wind turbines," *Electrical Engineering*, vol. 101, pp. 1119-1132, 2019.
- [22] B. Rona , Ö. Güler, "Power system integration of wind farms and analysis of grid code requirements," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 49, pp. 100-107, 2015.