Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
Cilt 30, Sayı 2, 341-349, 2026

Süleyman Demirel University
Journal of Natural and Applied Sciences
Volume 30, Issue 2, 341-349, 2026

DOI: 10.19113/sdufenbed.1890759

Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Çiftliğinde Alt-Senkron Rezonans için Sönümleme Modelinin Geliştirilmesi

M. Kenan DÖŞOĞLU [*1], **Mustafa DURSUN** [2]

[1,2]Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

(Alınış / Received: 16.02.2026, Kabul / Accepted: 03.06.2026, Online Yayınlanma / Published Online: 25.08.2026)

Anahtar Kelimeler
ÇBAG tabanlı rüzgar çiftliği,
SSR,
RSC,
geliştirilen sönümleme modeli

Öz: Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar çiftliğinin şebekeye bağlantısında kullanılan iletim hattı üzerinde seri kompanzasyon oranındaki artışlar Alt-Senkron Rezonans (SSR) durumlarına sebep olmaktadır. SSR sistemde kararsızlık ve salınım artması durumlarını ortaya çıkarmaktadır. Bu problemlerin çözümlenmesi için bu çalışmada Rotor Tarafındaki Evirici (RSC) devresinde sönümleme modelin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. ÇBAG'da geliştirilmesi amaçlanan bu model d-q eksen iç akım döngüsü temelli olarak tasarlanmıştır. RSC devresinde geliştirilen model ile farklı seri kompanzasyon oranlarında ve farklı rüzgar hızlarındaki SSR durumları incelenmiştir. Yapılan çalışmada d-q eksen iç akım döngüsü temelli olarak geliştirilen sönümleme modelinin farklı çalışma koşullarında kararlılık ve salınımların sönümlenmesi açısından iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Development of a Damping Model for Subsynchronous Resonance in a Doubly Fed Induction Generator Based Wind Farm

Keywords
DFIG based wind farm,
SSR,
RSC,
developed damping model

Abstract: Increases in the level of series compensation on the transmission line used to connect a Doubly Fed Induction Generator (DFIG)-based wind farm to the grid lead to the occurrence of Sub-Synchronous Resonance (SSR) conditions. SSR causes system instability and an increase in oscillations. To address these issues, this study aims to develop a damping model in the rotor-side converter (RSC). The proposed model for the DFIG is designed based on the d–q axis inner current control loop. Using the damping model developed in the RSC, SSR conditions under different series compensation levels and varying wind speeds are investigated. The results show that the damping model developed based on the d–q axis inner current control loop provides effective performance in terms of stability enhancement and oscillation damping under different operating conditions.

1. Giriş

Son yıllarda rüzgar santralleri dünya genelinde yaygın olarak kurulmaktadır. Rüzgar santrallerinin kurulu kapasiteleri geleneksel senkron generatör üniteleriyle karşılaştırılabilir düzeyde bulunmaktadır. Endüstriyel uygulamalarda DFIG'in tercih edilmesindeki önemli sebepler düşük maliyeti, değişken hızlı sabit frekansta çalışması ve bağımsız olarak aktif-reaktif güç kontrolünü sağlaması gösterilmektedir. [1,2]. Rüzgar santralleri genellikle yük merkezlerinden uzakta bulunmasından dolayı yüksek kapasiteli uzun mesafeli iletimde seri kapasite durumları ortaya çıkmaktadır. İletim hattının seri kapasite etkisi SSR'yi oluşturmaktadır [3]. ÇBAG tabanlı rüzgar çiftliğinde SSR etkisini azaltmak için literatürde farklı yöntemler önerilmektedir. ÇBAG'da RSE ve Şebeke Tarafındaki Evirici (GSC) devrelerinde SSR durumlarının oluşum yeri olan iletim hattında empedans kontrolünün sağlanmasında çeşitli modeller geliştirilmektedir. Özellikle karmaşık vektör yaklaşımı, frekansa bağlı empedans modeli ve lineer olmayan empedans modelleri sayesinde ÇBAG'da SSR etkilerinin etkili bir şekilde azaltıldığı ilgili çalışmalarda görülmektedir [4-6]. Farklı rüzgar hızı ve farklı seri kompanzasyon oranlarında empedans kontrolünde kullanılan bir diğer yaklaşım ise geliştirilmiş iki serbestlik derece (2DOF) modelleridir. ÇBAG'da SSR etkisinin yanısıra

*Sorumlu yazar: kenandosoglu@duzce.edu.tr

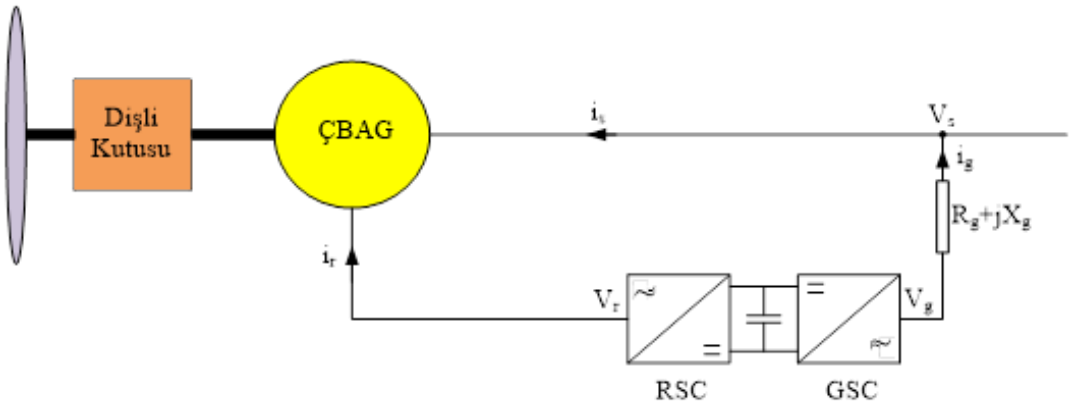
asenkon generatör etkisininde eş zamanlı olarak kontrol edilmesinde literatürde sunulan geliştirilmiş 2DOF modellerin kararlılık ve salınım sönümlemede etkili olduğu görülmektedir [7,8]. Yukarıda verilen referanslarda ÇBAG'da iç modeller kullanılarak empedans kontrolü SSR durumları için sağlanmaktadır. İç modellerin yanısıra harici olarak kullanılan Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları SSR etkileri azaltılabilmektedir. FACTS cihazlarından Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM), Gate Kontrollü Seri Kapasitör (GCSC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) ve Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) modelleri ile farklı seri kompanzasyon ve farklı rüzgar hızlarında ÇBAG'daki SSR olaylarında etkili bir şekilde kullanılabildiği ilgili çalışmalarda görülmektedir [9-12]. ÇBAG tabanlı rüzgar çiftliğinde iletim hattındaki seri kompanzasyon sonucu oluşan SSR etkisinin azaltılması için sanal kontrol yaklaşımları kullanılmaktadır. ÇBAG'da eylemsizlik durumu tabanlı sanal generatör modellemesi ile seri kompanzasyon tabanlı sanal direnç modelleri geliştirilmesi ile çeşitli çalışma koşullarındaki SSR etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir [13,14]. ÇBAG'da SSR olaylarında meydana gelen kararsızlık durumlarını ve salınım artmalarını önemek için etkisini ek Sönümleme kontrolü modelleri kullanılmaktadır. Farklı çalışma koşullarına bağlı olarak ek sönümleme kontrolü modellerinde çeşitli filtreleme modelleri ile birlikte ileri ve geri kompanzatörler geliştirilmektedir. Bazı referanlara bağlı olarak geliştirilen ek sönümleme kontrollerinde evirici devrelerinde kullanılması ile SSR analizlerindeki detaylı değerlendirmeleri yapılmıştır [15-17].

Referans [15-17]'de verilen çalışmalarda sönümleme kontrolünün geliştirilmesinde geleneksel olarak literatürde tercih edilen ileri-geri kompanzatör modelleri kullanılmaktadır. Bunun yanısıra referans giriş değerleri farklı parametrelere bağlı olarak belirlenmektedir. Yapılan bu çalışmada m-durum tabanlı ileri-geri kompanzatör sönümleme modelinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır. m-durum tabanlı ileri-geri kompanzatör sönümleme modelinde literatürde kullanılan modellerden daha az kontrol bloğunun oluşturulması ile benzetim çalışmasının performansının arttırılması bu çalışma için hedeflenmektedir. Geliştirilmesi önerilen model ile farklı çalışma koşullarında karşılaştırmalar yapılmıştır.

Bu çalışmanın ilk bölümünde ÇBAG modellemesine yer verilirken, ikinci ve üçüncü bölümünde sırasıyla ÇBAG'da SSR ile ÇBAG'da önerilen sönümleme modeline yer verilmiştir. Çalışmanın dördüncü bölümünde güç sistemi modellemesi ve sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. Son bölümde ise sonuç kısmı makalede anlatılmıştır.

2. ÇBAG Modellemesi

Bu çalışmada ele alınan ÇBAG modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. ÇBAG modeli

Genel olarak ÇBAG sistemi; dişli kutusu, generatör, Rotor Tarafı Eviricisi (RSC) ve Şebeke Tarafı Eviricisinden (GSC) oluşmaktadır. Arka arkaya bağlanan back to back olarak isimlendirilen bu evirici yapıları, darbe genişliği modülasyonu (DGM) ile anahtarlanan ve çift yönlü güç akışına imkân veren iki adet gerilim kaynaklı eviriciden oluşmaktadır. ÇBAG kullanılan back to back evirici devrelerinde üretilen aktif-reaktif güç ve DC bara gerilim kontrolünü gerçekleştirmektedir [18]. ÇBAG'ın devre modellemesinde hesaplama kolaylığı açısından Park–Clarke dönüşümleri tabanlı per-unit (p.u.) olarak gerçekleştirilmektedir. ÇBAG'a ait d–q ekseni gerilim denklemleri Denklem (1) ile Denklem (4) arasında sunulmuştur.

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

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

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

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

ÇBAG'da kullanılan d-q eksen 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 $v_{ds}, v_{dr}, v_{qs}, v_{qr}$ sırasıyla d-q eksenlerindeki stator ve rotor gerilimlerini ifade etmektedir. $i_{ds}, i_{dr}, i_{qs}, i_{qr}$ ise d-q eksenlerindeki stator ve rotor akımlarını göstermektedir. $\lambda_{ds}, \lambda_{dr}, \lambda_{qs}, \lambda_{qr}$ stator ve rotorun d-q eksenlerindeki kaçak akı bileşenlerini temsil etmektedir. ω_s açısal hızı, s ise kayma oranını ifade etmektedir. R_s ve R_r sırasıyla stator ve rotor dirençleri olup, L_s ve L_r stator ve rotor endüktanslarını göstermektedir. L_m ise manyetik (karşılıklı) endüktans olarak tanımlanmaktadır [18,19].

3. ÇBAG'da Alt-Senkron Rezonans (SSR)

Çalışmanın bu bölümünde SSR kavramı incelenmektedir. Uluslararası Elektrik Elektronik Mühendisliği (IEEE) tanımına göre SSR, güç sisteminde senkron frekansın altında, mil–türbin sisteminin bir veya daha fazla doğal frekansında elektriksel ağ ile generatör türbini arasında enerji alışverişi ile ilişkili bir durumdur [20]. SSR olgusu iki farklı şekilde ortaya çıkmaktadır: Bunlar kararlı duruma bağlı SSR ve geçici durumlara bağlı SSR olaylarıdır. Kararlı durum frekansına bağlı SSR'de, armatürden geçen senkron altı elektrik akımları, rotor devresinde moment ve akım indükleyerek frekansı f_r olan bir etki oluşturur . Bu frekans eşitliği denklem 9'da gösterilmiştir.

$$f_r = f_s - f_n \quad (9)$$

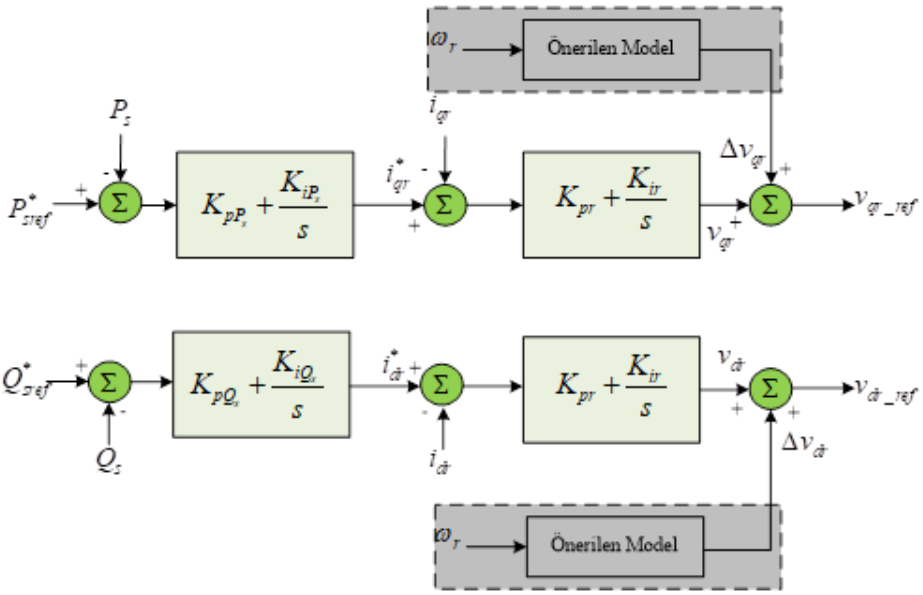
Denklem 9'da sırasıyla f_s senkron frekans ve f_n rezonans frekanstır. Rezonans frekansı ifadesi denklem 10'daki gibi elde edilmektedir.

$$f_n = f_s \sqrt{\frac{X_c}{X_l}} \quad (10)$$

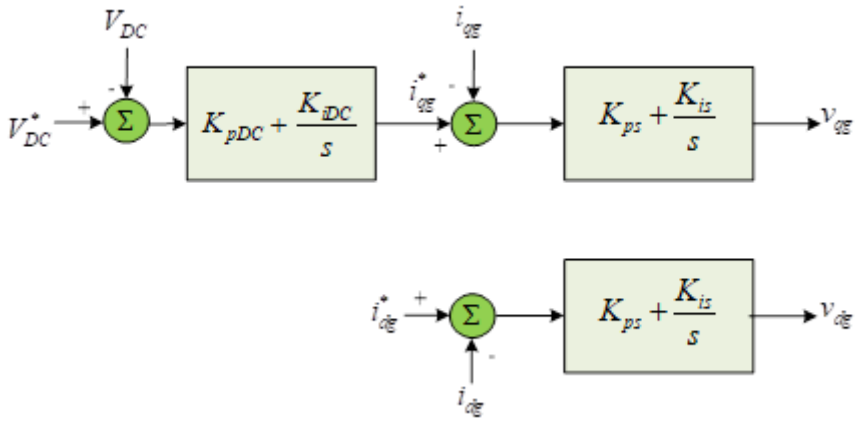
Denklem 10'da X_c kompanzatör reaktansını, X_l ise iletim hattının seri reaktansını ifade etmektedir. Her iki ifade de ohm cinsindendir. Rotor içerisinde indüklenen akımların akması, armatürde senkron altı gerilim bileşenlerinin oluşmasına neden olur; bu durum bazı hallerde senkron altı armatür akımlarının artmasına yol açarak öz-uyartım ya da kararlı durum SSR oluşumunu tetikleyebilir. Kararlı durum SSR ise endüksiyon etkisi ve burulma etkileşimi) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Buna ek olarak, SSR'nin bir diğer türü, rezonans frekansı bileşeninin senkron generatörlerin burulma frekanslarından birine yakın olduğu geçici durumlarda ortaya çıkmaktadır [21,22].

4. ÇBAG'da Önerilen Sönümleme Modeli

ÇBAG'da RSC devresinde akım için bir iç kontrol döngüsü ve güç için bir dış kontrol döngüsünden oluşurken, GSC devresinde akım için bir iç döngü ve gerilim için bir dış döngü içermektedir. RSC ve GSC denetleyicileri sırasıyla Şekil 2 ve Şekil 3'te gösterilmiştir.

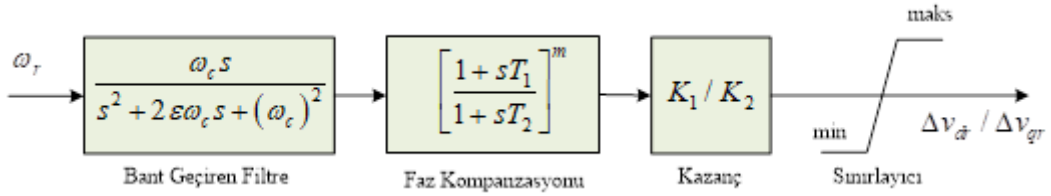


Şekil 2. RSC devresi



Şekil 3. GSC devresi

Şekil 2'de noktalı kutu ile gösterildiği üzere, bu çalışmada SSR'nin daha etkin bastırılması amacıyla) özel olarak iki adet sönümleme modeli kullanılmıştır; bu modeller RSC'nin q-ekseni ve d-ekseni kontrol döngülerine ayrı ayrı yerleştirilmiştir. Şekil 2'de görüldüğü gibi sönümleme modeli q eksen ve d ekseninde rotor gerilim değişimlerine ilave edilmektedir. Sönümleme modelinin girişi açısal hız olmaktadır. GSC devresinde ise geleneksel model bu çalışmada kullanılmaktadır. Referans [23]'de, ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinde farklı çalışma koşulları değiştiğinde, rotor elektromanyetik moment artışının rotor hız artışına göre faz–frekans karakteristiğinin salınım frekansı civarında neredeyse sabit kaldığı açıkça görülmektedir. Buna karşılık, rotor elektromanyetik moment değişimi ile rotor hız değişimi arasındaki faz sapması 180°'ye ne kadar yakın olursa, sistemin pozitif sönümleme etkisi o kadar güçlü olmaktadır. Bu doğrultuda, bu çalışmada rotor elektromanyetik moment değişimi ile rotor hız değişimi arasındaki 180°'lik bir faz sapmasını sağlamak ve maksimum pozitif sönümleme etkisine sahip ilave bir rotor elektromanyetik moment elde etmek amacıyla sönümleme modelinin RSC'nin iç akım döngüsüne dâhil edilmesi bu çalışmada amaçlanmaktadır. Bu çalışmanın RSC devresinde önerilen sönümleme modeli Şekil 4'de gösterilmiştir.

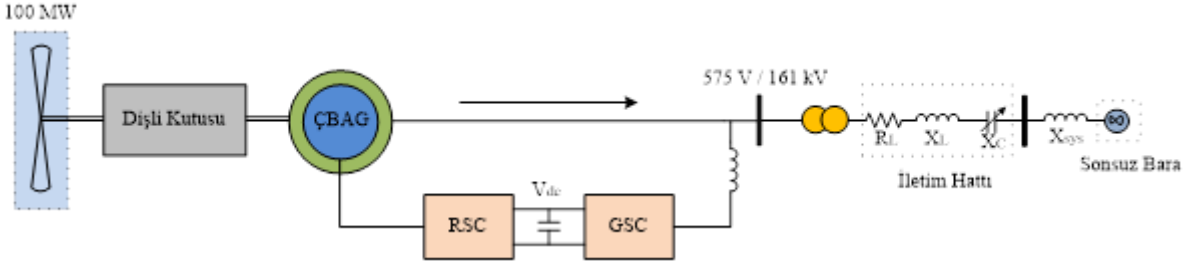


Şekil 4. Önerilen sönümleme modeli

Önerilen sönümleme modeli; bir bant geçiren filtre bloğu, m-durumlu faz kompanzasyon bloğu, bir kazanç bloğu ve bir sınırlayıcı bloğundan oluşmaktadır [24]. Ayrıca, sönümleme çıkışı, tüm sistemin SSR mod sönümlemesini ayarlamak amacıyla RSC için kontrol gerilimi olarak kullanılmaktadır. Sönümleme modelinde parametre değerleri ilgili çalışmada gösterilmiştir [25].

5. Güç Sistemi Modellemesi ve Sonuçları

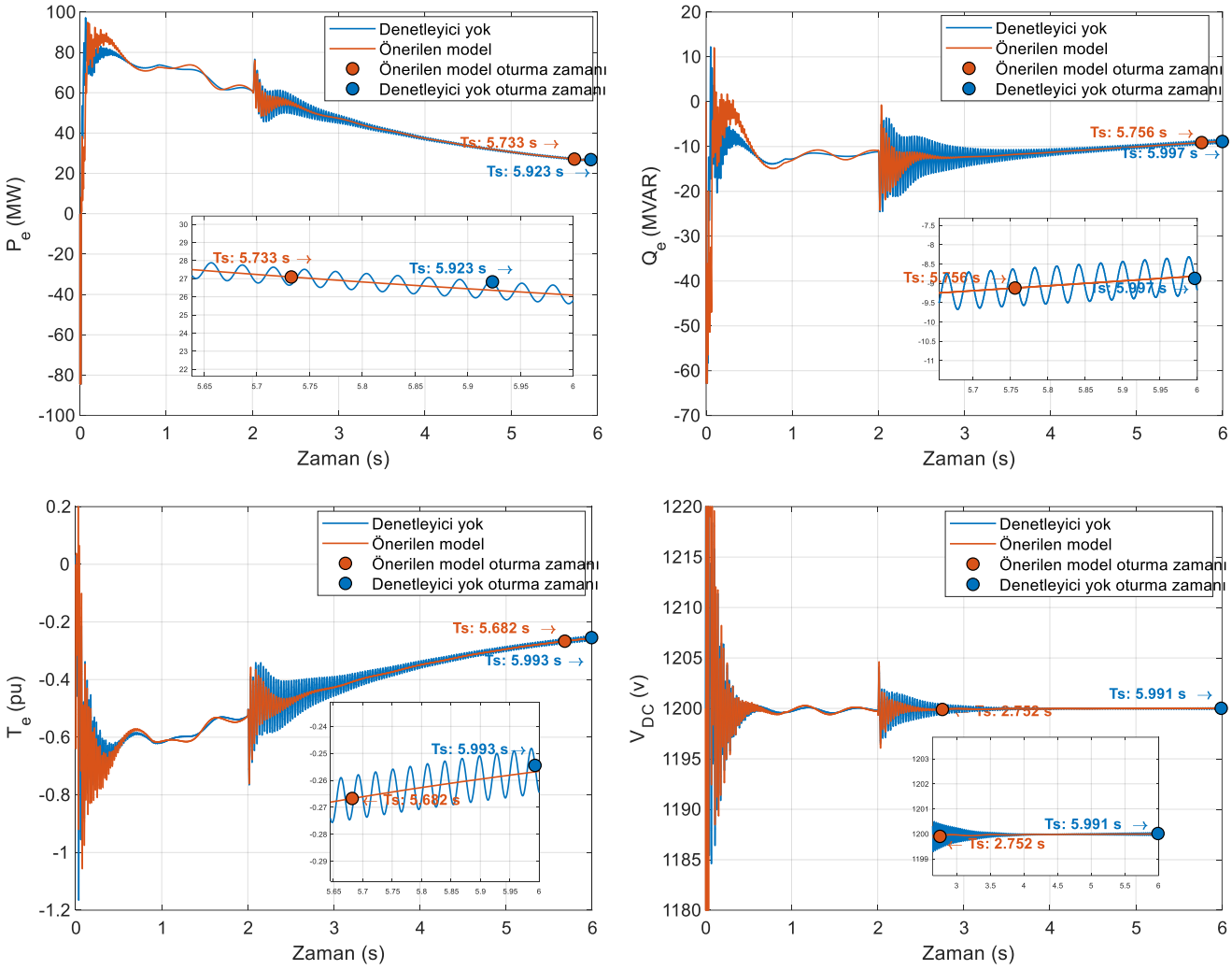
İncelenen IEEE benchmark test sistemi Şekil 5'de verilmiştir.



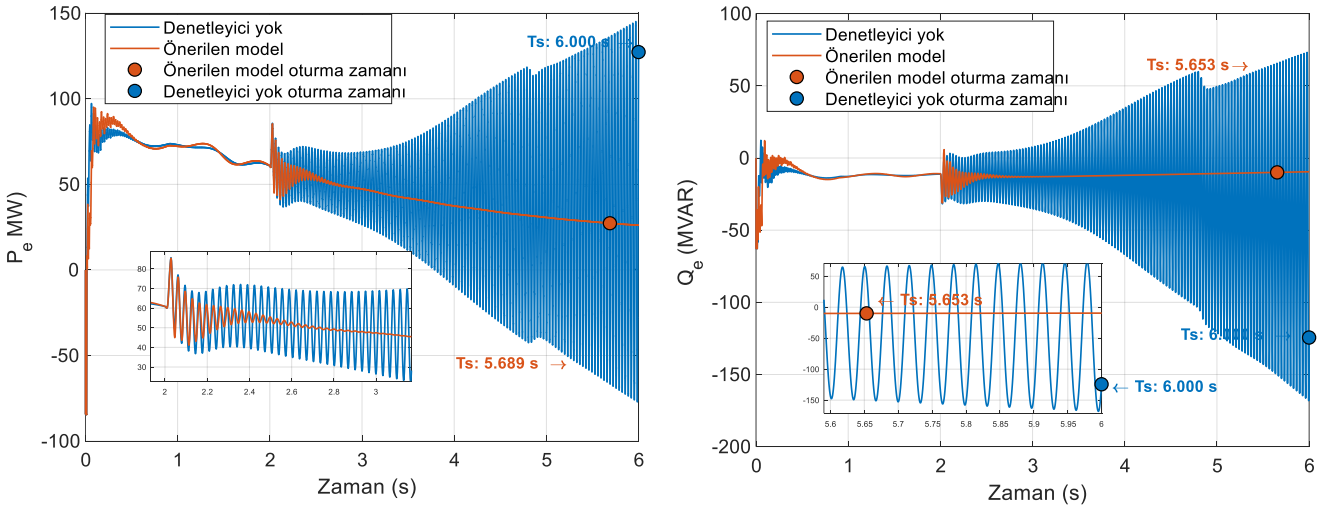
Şekil 5. IEEE benchmark test sistemi

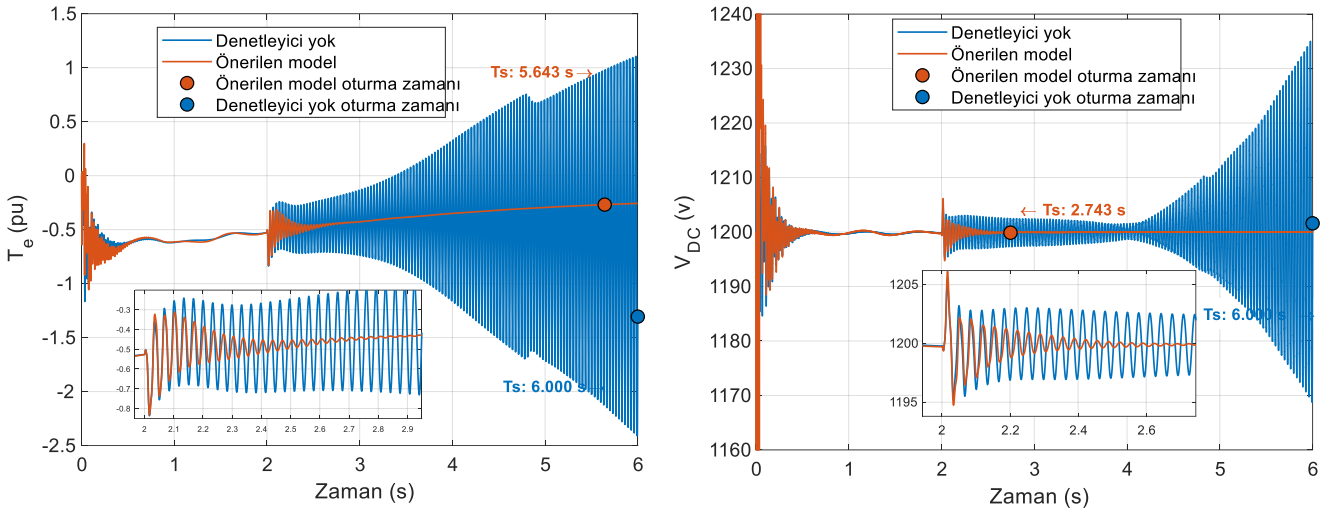
Bu test sisteminde, ÇBAG tabanlı bir rüzgâr çiftliği bir adet yükseltici transformatör kullanılmaktadır. Bu transformatörün primer-sekonder bağlantıları sırasıyla üçgen ve yıldızdır. ÇBAG çıkış gerilimi 575 V iken, şebeke gerilimi 161 kV'tur [26]. ÇBAG bir iletim hattı aracılığıyla sonsuz bara ile bağlanmaktadır. Rüzgâr çiftliğinin toplam gücü 100 MW'dır. Bu çalışmada toplamda 67 adet rüzgar türbini kullanılmaktadır. Benzetim çalışmasında iletim hattında bulunan kapasite 2. saniyede sistemde devreye girmektedir. SSR durumlarının incelenmesinde farklı rüzgar hızı ve farklı seri kompanzasyon oranlarında geleneksel model ile önerilen sönümleme modelin karşılaştırmaları incelenmiştir. İki farklı senaryo şeklinde incelenen çalışmada aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ve DC link gerilimleri detaylı şekilde yorumlanmıştır.

Farklı rüzgar hızı ve farklı kompanzasyon oranlarında elde edilen sonuçlar şekil 6 ile şekil 9 arasında sunulmuştur.

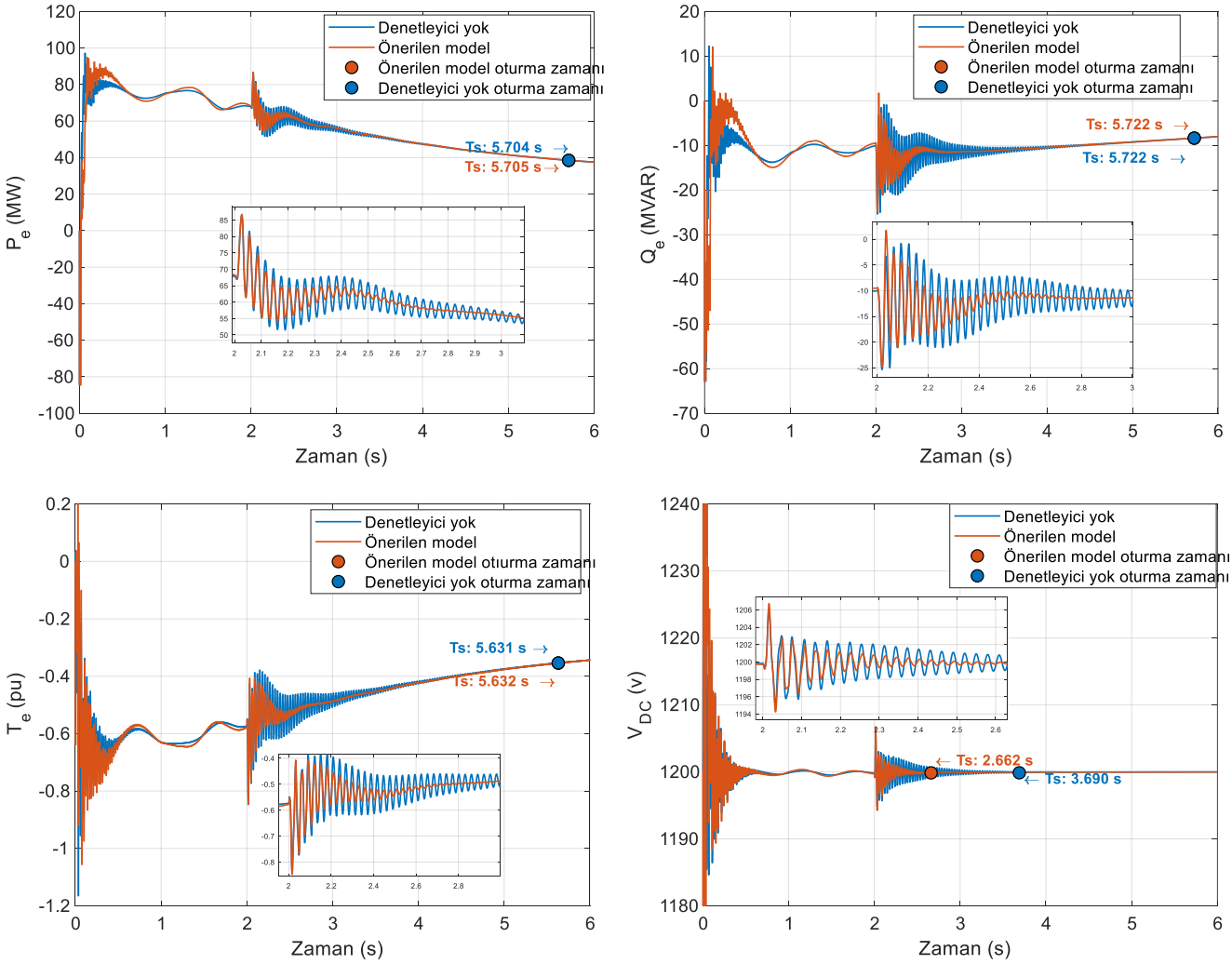


Şekil 6. 6m/s rüzgar hızı ve %35 kompanzasyon oranındaki karşılaştırmalar

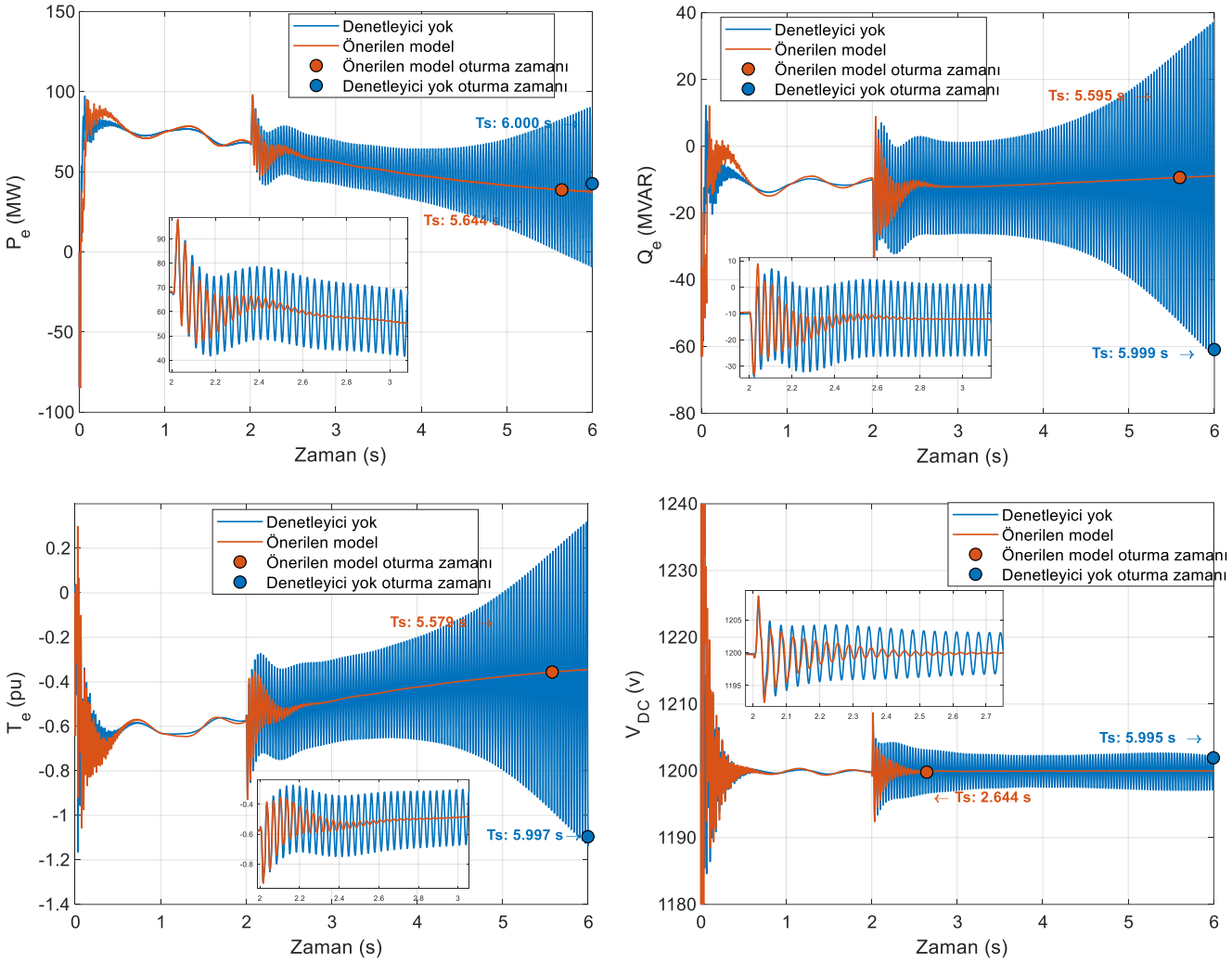




Şekil 7. 6m/s rüzgar hızı ve %45 kompanzasyon oranındaki karşılaştırmalar



Şekil 8. 8m/s rüzgar hızı ve %35 kompanzasyon oranındaki karşılaştırmalar



Şekil 9. 8m/s rüzgar hızı ve %45 kompanzasyon oranındaki karşılaştırmalar

Şekil 6 ile şekil 7'de görüldüğü gibi ÇBAG'da parametreler olarak aktif güç, reaktif güç, elektriksel moment ve DC link gerilimleri incelenmiştir. Benzetim çalışmasında SSR'de ÇBAG parametreleri üzerinde en etkilenen kısım geleneksel modelin kullanıldığı durum olmuştur. Sistemde denetleyici kullanılmadığı SSR durumunda en çok etkilenen çalışma koşulları olarak 8 m/s rüzgar hızı ve %45 seri kompanzasyon oranında elde edilen sonuçlar olarak görülmektedir. Başka bir ifade ile bu çalışmada seri kompanzasyon oranındaki artış salınımların SSR durumunda yükseldiğini özetlemektedir.

Rüzgar hızının 8 m/s, seri kompanzasyon oranlarının %35 ve % 45 olduğu durumdaki elde edilen sonuçlar şekil 8 ile şekil 9 arasında detaylı olarak incelendiğinde ÇBAG parametrelerinde geleneksel modelin kullanılmasında sistemin kararsız olduğu ve salınımların arttığı görülmektedir. RSC devresinde önerilen sönümleme modelinin kullanılması ile SSR durumunda rüzgar hızının 8 m/s, seri kompanzasyon oranlarının %35 ve %45 olduğu durumlarda sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği gözlemlenmiş olup, oluşan salınımların hızlı bir şekilde sönümlendiği görülmektedir.

Her iki analizde de önerilen sönümleme modelini geleneksel modele göre kararlılık ve salınım sönümlemesi açısından daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bunun yanısıra analizlerde önerilen modeldeki oturma zamanlarının denetleyici olmadığı durumlara göre daha kısa sürede kararlı hale geldiği görülmektedir. Her iki analiz sonucunda ÇBAG parametrelerinde değişimler incelendiğinde, en çok etkilenen parametre aktif güç olurken, en az etkilenen parametre DC link gerilimi olmuştur.

6. Sonuç

Bu çalışmada, şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı bir rüzgâr çiftliğinde seri kompanzasyonun neden olduğu SSR olgusu ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, farklı rüzgâr hızları ve çeşitli seri kompanzasyon oranları altında, ÇBAG'nin RSC devresinde önerilen sönümleme modeli aracılığıyla SSR etkilerinin azaltılmasını sağlamaktır. Açısal hıza bağlı olarak d–q eksen koordinat kontrolü temelli önerilen sönümleme modeli sayesinde, sistemin farklı çalışma koşullarında kısa sürede kararlı duruma ulaştığı; SSR anında ortaya çıkan salınımların ise önerilen model ile hızlı bir şekilde bastırıldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, geleneksel model yapısının SSR koşullarında yetersiz kaldığı bu çalışma kapsamında açıkça ortaya konmuştur. Karşılaştırmalı analizlerde ÇBAG'ye ait aktif güç, reaktif güç, elektromanyetik moment ve DC-link gerilimi gibi parametreler dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin ayrıntılı değerlendirilmesi sonucunda, önerilen sönümleme modelinin farklı senaryolar altında başarılı sonuçlar

sunduğu görülmüştür. Bununla birlikte, seri kompanzasyon oranındaki artışın hem geleneksel modelde hem de önerilen sönümleme modelinde salınımların büyümesine neden olduğu tespit edilmiştir. Bu bağlamda, sunulan çalışma, ilerleyen araştırmalarda daha yüksek seri kompanzasyon seviyelerinde RSC devresinde önerilen modelin, GSC devresinde geliştirilecek ek kontrol yapılarıyla birlikte kullanılmasına yönelik zemin hazırlayacaktır. Bu şekilde RSC ve GSC devresinde geliştirilen hibrit yaklaşım ile sistemin daha kısa sürede kararlı hale gelmesi ve salınımların hızlıca sönümlenmesine olanak sağlayacaktır.

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] Cardenas, R., Peña, R., Alepuz, S., & Asher, G. (2013). Overview of control systems for the operation of DFIGs in wind energy applications. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 60(7), 2776-2798.

[2] Bejaoui, M., Marinescu, B., Slama-belkhodja, I., & Monmasson, E. (2014). Control of doubly-fed induction generator for wind energy in network context. IET Renewable Power Generation, 8(2), 109-118.

[3] Yao, J., Wang, X., Li, J., Liu, R., & Zhang, H. (2018). Sub-synchronous resonance damping control for series-compensated DFIG-based wind farm with improved particle swarm optimization algorithm. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(2), 849-859.

[4] Zhang, X., Zhang, Y., Fang, R., & Xu, D. (2019). Impedance modeling and SSR analysis of DFIG using complex vector theory. IEEE Access, 7, 155860-155870.

[5] Ju, P., Sun, B., Shahidehpour, M., & Pan, X. (2020). Impedance modeling and analysis for DFIG-based wind farm in SSO studies. IEEE Access, 8, 158380-158390.

[6] Jiang, H., You, J., Liu, H., Ning, W., & Wu, L. (2017, July). Impedance characteristics of DFIGs considering the impacts of DFIG numbers and locations and its application on SSR analysis. In 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting (pp. 1-8). IEEE.

[7] Bodapatla, S. K., Sarma, P. M., & Gaddam, M. (2024). A Robust UDE-Based 2DOF Controller for Mitigating Sub-Synchronous Control Interaction in Wind Power Plants. Electric Power Components and Systems, 52(4), 610-628.

[8] Huang, P. H., El Moursi, M. S., Xiao, W., & Kirtley, J. L. (2014). Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy. IEEE Transactions on Power Systems, 30(3), 1442-1454.

[9] Moharana, A., Varma, R. K., & Seethapathy, R. (2014). SSR alleviation by STATCOM in induction-generator-based wind farm connected to series compensated line. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 5(3), 947-957.

[10] Mohammadpour, H. A., & Santi, E. (2014). Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(2), 1022-1033.

[11] Piyasinghe, L., Miao, Z., Khazaei, J., & Fan, L. (2014). Impedance model-based SSR analysis for TCSC compensated type-3 wind energy delivery systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(1), 179-187.

[12] Rohit, C., Darji, P., & Jariwala, H. R. (2023). A preordainment approach for design of auxiliary damping controller and SSSC tuning to enhance SSR mode stability in DFIG based windfarm. Smart Science, 11(3), 605-628.

[13] Gu, K., Wu, F., Zhang, X. P., Ju, P., Zhou, H., Luo, J., & Li, J. (2019). SSR analysis of DFIG-based wind farm with VSM control strategy. IEEE Access, 7, 118702-118711.

[14] Wu, K., Meng, Y., Pan, X., Zou, Y., Ye, R., & Xue, J. (2019, October). A combined SSR damping strategy based on virtual resistance method and SSR damping controller in dfig-based wind farm. In 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection (APAP) (pp. 1451-1455). IEEE.

[15] Abdeen, M., El-Banna, S. H. A., Elgohary, S., Mostafa, H., Ghaly, N., Adel, N., ... & Kamel, S. (2022). Adaptive fuzzy supplementary controller for SSR damping in a series-compensated DFIG-based wind farm. Ieee Access, 11, 1467-1476.

[16] Abdeen, M., Li, H., Mohamed, M. A. E. H., Kamel, S., Khan, B., & Chai, Z. (2022). Sub-synchronous interaction damping controller for a series-compensated DFIG-based wind farm. IET Renewable Power Generation, 16(5), 933-944.

[17] Mohammadpour, H. A., & Santi, E. (2015). SSR damping controller design and optimal placement in rotor-side and grid-side converters of series-compensated DFIG-based wind farm. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 6(2), 388-399.

[18] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D. 1995. Analysis of electric machinery. Piscataway.

[19] 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.

[20] Irwin, G.D.; Jindal, A.K.; Isaacs, A.L. Sub-synchronous control interactions between type 3 wind turbines and series compensated AC transmission systems. In Proceedings of the 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, Detroit, MI, USA, 24–28 July 2011; pp. 1–6.

[21] Raju, D.K.; Umre, B.S.; Junghare, A.S.; Babu, B.C. Mitigation of subsynchronous resonance with fractional-order PI based UPFC controller. Mech. Syst. Signal. Process. **2017**, 85, 698–715.

[22] Bostani, Y., Jalilzadeh, S., Mobayen, S., Rojsiraphisal, T., & Bartoszewicz, A. (2022). Damping of

subsynchronous resonance in utility DFIG-based wind farms using wide-area fuzzy control approach. Energies, 15(5), 1787.

[23] Dong, X., Hou, J., Wang, Z., Pi, J., Tian, X., & Jin, Y. (2016, August). Study on the subsynchronous resonance mechanism of DFIG based on the analysis of stator and rotor torques. In 2016 China International Conference on Electricity Distribution (CICED) (pp. 1-6). IEEE.

[24] Leon, A. E. (2015). Integration of DFIG-based wind farms into series-compensated transmission systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 7(2), 451-460.

[25] Yao, J., Wang, X., Li, J., Liu, R., & Zhang, H. (2018). Sub-synchronous resonance damping control for series-compensated DFIG-based wind farm with improved particle swarm optimization algorithm. IEEE Transactions on Energy Conversion, 34(2), 849-859.

[26] Abdeen, M., Li, H., & Jing, L. (2020). Improved subsynchronous oscillation detection method in a DFIG-based wind farm interfaced with a series-compensated network. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 119, 105930.