

## Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Çiftliğinde Alt-Senkron Rezonans Durumları için Koordinat Kontrolünün Geliştirilmesi

### Development of Coordinate Control for Sub-Synchronous Resonance Conditions in Doubly Fed Induction Generator Based Wind Farm

<sup>1</sup>Mustafa DURSUN , <sup>2</sup>M. Kenan DÖŞOĞLU 

<sup>1,2</sup> Düzce Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>kenandosoglu@duzce.edu.tr, <sup>1</sup>mustafadursun@duzce.edu.tr

Araştırma Makalesi/Research Article

#### ARTICLE INFO

##### Article history

Received : 17 February 2026  
Accepted : 1 April 2026

##### Keywords:

Doubly Fed Induction Generator, based wind farm, Sub-Synchronous Resonance, Thyristor Controlled Series Capacitor, Supplementary Damping Control

#### ABSTRACT

One of the most common methods for increasing the transferable power in power systems is the installation of a fixed series capacitor in the transmission line. However, the use of series capacitors shows that system stability is inversely proportional to the compensation level. This phenomenon is referred to as Sub-Synchronous Resonance (SSR). SSR has a negative impact on the security and stability of the system. Therefore, in this study, Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) and Supplementary Damping Control (SDC) models implemented in the grid-side converter were developed in order to damp the oscillations occurring under SSR conditions and to improve system stability in Doubly Fed Induction Generator (DFIG) based wind farm. The effects of the TCSC and SDC models on the system were examined in detail under variable wind speeds and different series compensation levels, and the obtained results were interpreted. Based on the results, it was observed that TCSC and SDC provide good performance in terms of system stability and oscillation damping under variable wind speeds and different series compensation levels.

© 2026 Bandırma Onyedi Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

#### MAKALE BİLGİSİ

##### Makale Tarihleri

Gönderim : 17 Şubat 2026  
Kabul : 1 Nisan 2026

##### Anahtar Kelimeler:

Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tabanlı Rüzgar Çiftliği, Alt-Senkron Rezonans, Tristör Kontrollü Seri Kapsitör, Ek Sönümleme Kontrolü

#### ÖZET

Güç sistemlerinde iletilebilir gücü artırmanın en yaygın yöntemlerinden birisi iletim hattına sabit bir yerleştirmektir. Ancak Seri kapasitör kullanım sistem kararlılığının kompanzasyon seviyesi ile ters orantılı olduğunu göstermektedir. Bu durum Alt-Senkron Rezonans (SSR) olarak adlandırılmaktadır. SSR sistemin güvenliği ve kararlılığı üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir. Bunun için yapılan bu çalışmada Tristör Kontrollü Seri Kapsitör (TCSC) ve şebeke tarafındaki evirici devresinde Ek Sönümleme Kontrolü (SDC) modelleri geliştirilerek, Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) tabanlı rüzgar çiftliğinde SSR durumlarında oluşan salınımların sönümlemesi ve sistem kararlılığının iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Değişken rüzgar hızlarında ve farklı seri kompanzasyon oranlarında sistemde TCSC ve SDC modellerin etkileri detaylı olarak incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar neticesinde değişken rüzgar hızlarında ve farklı seri kompanzasyon oranlarında TCSC ve SDC'nin sistem kararlılığı ve salınımların sönümlemesi açısından iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

© 2026 Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

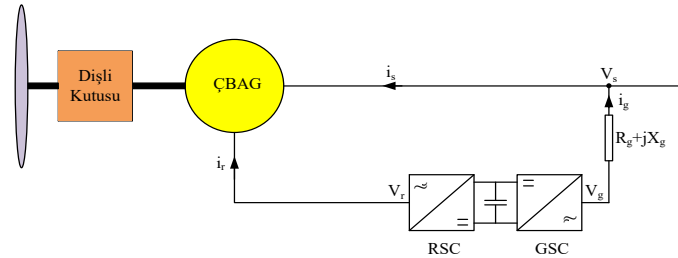
## 1. GİRİŞ

Rüzgâr çiftlikleri ile tüketim merkezleri arasındaki uzun mesafe sebebiyle, iletilebilir gücü artırmak amacıyla seri kapasitör kullanımı etkili ve ekonomik bir yöntem olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak, yüksek kompanzasyon seviyelerinde SSR oluşma durumu bulunmaktadır [1,2]. SSR, ÇBAG (DFIG) tabanlı rüzgâr türbininin, senkron frekanstan daha düşük frekanslarda seri kompanzasyonlu şebeke ile enerji alışverişinde bulunması durumu olarak tanımlanmaktadır. ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde SSR olayları için çeşitli modeller literatürde kullanılmaktadır. Rüzgâr çiftliğinde kullanılan asenkron generatör etkisi nedeniyle ortaya çıkan SSR'yi azaltmak ve sistem kararlılığını artırmak amacıyla iki serbestlik dereceli (2DOF) kontrol stratejisi geliştirilmiştir. Önerilen kontrol modelleri farklı seri kompanzasyon oranları ve değişken rüzgâr hızlarında çeşitli çalışma koşulları altında analizler yapılmıştır [3,4]. Modal analiz ve zaman alanı benzetimleri kullanılarak, ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinde SSR'nin sönümlenmesi amacıyla, rotor tarafı evirici (RSC) ve şebeke tarafı evirici (GSC) devrelerinde en uygun giriş kontrol sinyalinin doğru şekilde seçilmesi amaçlanmıştır. RSC ve GSC devrelerinde çeşitlik çalışma koşullarında denetleyicilerin içerisinde yerleştirileceği en uygun sinyallere göre ek sönümleme modelleri ilgili çalışmalarda geliştirilmiştir [5-7]. SSR, güç şebekelerinin genel güvenliği ve kararlılığı açısından önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu risklerin minimum yapılması için ÇBAG için bir kontrol döngüsü ile birlikte rezonans ve oransal rezonans kontrol modelleri kullanılması amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, geliştirilmiş sönümleme modelleri sayesinde en uygun yerleşim yerleri farklı çalışma koşulları için test edilmiştir [8,9]. ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinin şebekeye bağlanmasıyla ortaya çıkan alt-senkron rezonans durumlarını çözmek için kullanılan diğer yöntemlerden birisi de farklı kayan kip kontrol modelleridir. SSR anında ÇBAG için bozunumlara karşı önceden kestirim ve bozunumlara karşı dayanıklılık ilkelliğine bağlı olarak geliştirilen çeşitli kayan kip kontrol modellerin farklı çalışma koşullarındaki özellikleri detaylı olarak ilgili çalışmalarda ele alınmıştır [10-12]. ÇBAG'da SSR analizlerinde RSC ve GSC devrelerinde geliştirilen modellerin yanısıra, sistemde harici olarak kullanılan ekipmanlar tarafından da sistem kontrolü sağlanmaktadır. Güç elektroniği tabanlı seri ve paralel kompanzasyon sistemleri ile farklı çalışma koşullarında SSR analizleri şebekeye bağlı ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliklerinde değerlendirilmiştir [13-18].

Yapılan bu çalışmada ÇBAG tabanlı rüzgâr çiftliğinde şebeke tarafındaki evirici devresinde geliştirilen SDC ve FACTS cihazlarından TCSC'nin birlikte kullanılması ile koordinat kontrolünün sağlanması amaçlanmaktadır. Sistemde koordinat kontrolünün sağlanmasındaki amaç, yüksek rüzgâr hızlarında ve yüksek seri kompanzasyon oranlarında ortaya çıkan kararsızlık durumlarını hızlı bir şekilde iyileştirmek olduğunu söyleyebiliriz. Bu çalışma sonucunda TCSC ve SDC'nin sistemi kısa süre içerisinde karar getirdiği ve oluşan salınımlarında hızlı bir şekilde ortadan kaldırdığı görülmüştür.

## 2. ÇBAG MODELLEMESİ VE SSR OLGUSU

Bu çalışmada incelenen ÇBAG yapısı Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. ÇBAG yapısı.

ÇBAG; dişli kutusu, generatör, Rotor Tarafı Eviricisi (RSC) ve Şebeke Tarafı Eviricisinden (GSC) meydana gelmektedir. Ardışık şekilde bağlanan ve back-to-back olarak adlandırılan eviricilerin yapısı, darbe genişliği modülasyonu (DGM) ile anahtarlanan, çift yönlü güç akışına olanak tanıyan iki adet gerilim kaynaklı eviriciden oluşmaktadır. ÇBAG sistemlerinde kullanılan back-to-back evirici devreleri, aktif ve reaktif güçlerin yanı sıra DC bara geriliminin kontrolünü de sağlamaktadır. ÇBAG'ın devre modellemesi, hesaplama kolaylığı sağlamak amacıyla Park-Clarke dönüşümlerine dayalı per-unit (p.u.) sisteminde gerçekleştirilmektedir. ÇBAG'a ait d-q eksenli gerilim denklemleri Denklem (1) ile Denklem (4) arasında sunulurken, d-q eksenli halkalama akı ifadeleri ise Denklem (5) ile Denklem (8) arasında verilmiştir.

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

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

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

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

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

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

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

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

Burada,  $v_{ds}$ ,  $v_{dr}$ ,  $v_{qs}$ ,  $v_{qr}$  sırasıyla d-q eksenlerindeki stator-rotor gerilimlerini ifade etmektedir.  $i_{ds}$ ,  $i_{dr}$ ,  $i_{qs}$ ,  $i_{qr}$  ise d-q eksenlerindeki stator-rotor akımlarını göstermektedir.  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{dr}$ ,  $\lambda_{qs}$ ,  $\lambda_{qr}$  stator ve rotorun d-q eksenlerindeki kaçak akı bileşenlerini temsil etmektedir.  $\omega_s$  açısal hızı,  $s$  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 [19,20].

SSR'de Asenkron Generatör Etkisi (IGE), mekanik bileşenleri içermeyen, tamamen elektriksel bir ifadedir. Stator sargılarında alt-senkron akım tarafından üretilen manyetik itici kuvvetin (MMF), generatörün MMF'sinden daha yavaş dönmesi durumunda ortaya çıkmaktadır. Üretilen MMF'nin daha düşük dönme hızı, generatörün bir asenkron generatör gibi davranmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, Denklem (9)'da hesaplanan alt-senkron kayma ( $S_1$ ) her zaman negatif olup, alt-senkron akıma karşılık gelen eşdeğer rotor direnci ( $R_r/S_1$ ) negatif olarak görülmektedir.

$$S_1 = \frac{f_n - f_m}{f_n} \quad (9)$$

Burada  $f_n$  güç sisteminin doğal frekansını,  $f_m$  ise rotorun dönme hızına karşılık gelen elektriksel frekansı ifade etmektedir. Eşdeğer rotor direnci, IGE olarak sınıflandırılan rezonans olgusuna katkıda bulunan temel faktörlerden

biridir. Alt-senkron durumda, eşdeğer rotor direnci negatif değer almaktadır ( $\frac{R_r}{S_1} < 0$ ). Eğer  $\frac{R_r}{S_1}$  değeri, generatör

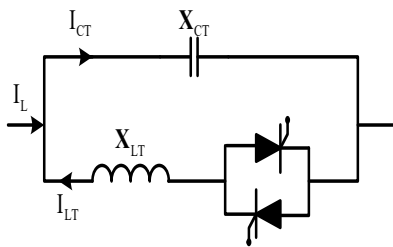
endüvisi ile şebekenin birleşik empedansını ( $R_r + R_{net}$ ) değerini geçerse, sistem alt-senkron frekanslarda kararsız hâle gelir. Doğal frekans senkron frekans ile ilişkisi Denklem 10'da gösterilmektedir.

$$f_n = f_s \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X_G + X_T}} \quad (10)$$

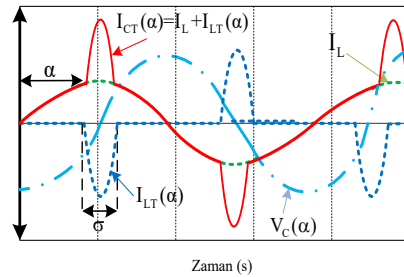
Burada  $X_c$ ,  $X_L$ ,  $X_G$  ve  $X_T$  sırasıyla seri kapasitörlerin, iletim hatlarının, generatörlerin ve transformatörlerin reaktanslarını temsil etmektedir. ÇBAG'da yüksek seri kompanzasyon oranlarında ve düşük rüzgâr hızlarına sahip güç sistemleri IGE'ye karşı çok daha duyarlı olduğu ifade edilebilmektedir [21-23].

### 3. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR (TCSC)

TCSC sabit bir kapasitör reaktansı ( $X_{CT}$ ) ile paralel bağlı değişken bir endüktif reaktans ( $X_{LT}$ )'den oluşmaktadır. TCSC devre yapısı Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. TCSC devre yapısı.



Şekil 3. TCSC dalga şekilleri.

Burada,  $I_L$  hat akımı,  $I_{CT}$  kapasitör akımı,  $V_C$  kapasitör gerilimi ve  $I_{LT}$  endüktör akımıdır. Şekil 3'de TCSC dalga şekilleri gösterilmektedir. Başlangıçta, tristör valfi açıktır endüktör akımı sifıra eşittir; buna karşılık hat akımı ile kapasitör akımı aynı değere sahiptir. Daha sonra, ateşleme açısı  $\alpha$ 'dan sonra tristör kapatıldığında, akım hem TCSC endüktöründen hem de TCSC kapasitöründen geçmektedir.

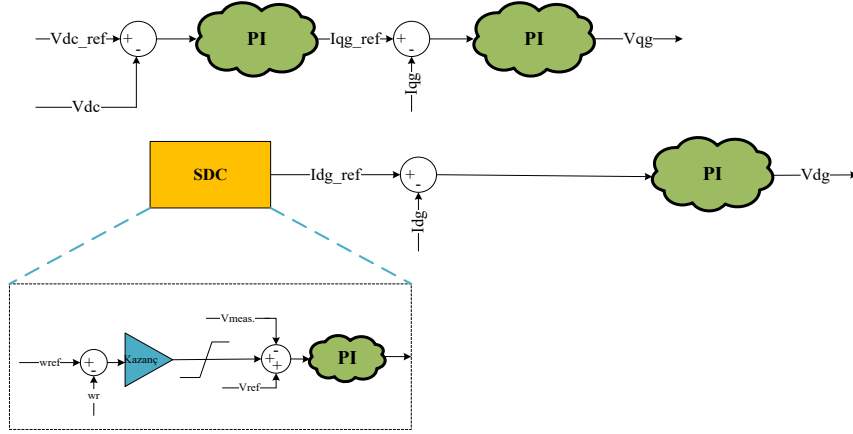
Burada,  $\sigma$  iletim açısıdır ve  $\pi - 2\alpha$ 'ya eşittir. Hat akımının sabit bir akım kaynağı olduğu açıktır. TCSC'nin temel amacı, sistemi kararlı tutmak için endüktif reaktansı kontrol ederek kapasitör akımının bir kısmını kompanse etmektir. Ateşleme açısı kontrol edilerek endüktif reaktansın yeni değeri Denklem 11 gösterildiği gibi belirlenmektedir.

$$X_{LT}(\alpha) = X_{LT} \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin \alpha} \quad (11)$$

Bu denklemde,  $\alpha$  açısı hat akımının sıfır geçişlerinden itibaren ölçülür.  $X_{LT}$ , TCSC'nin endüktif reaktansdır.  $\alpha = 0$  olduğunda,  $X_{LT}(\alpha)$  minimum değerini alır. Bu durumda hat akımının büyük bir kısmı TCSC endüktif reaktansından geçer. Bu durum, tristör valfinin kapalı olduğu (tam iletim modu) bypass durumu olarak adlandırılır. Buna karşılık,  $\alpha = 90^\circ$  olduğunda  $X_{LT}(\alpha)$  maksimum değerini alır ve TCSC endüktif reaktansından hiç akım geçmez. Bu durum, tristör valfinin açık olduğu (açık iletim modu) blocked durumu olarak adlandırılır.  $\alpha$  açısı 0 ile  $90^\circ$  arasında olduğunda (kısmi iletim modu), akım hem TCSC endüktif reaktansı  $X_{LT}$  hem de TCSC kapasitif reaktansı  $X_{CT}$  üzerinden geçer. Bu durum vernier işletimi olarak adlandırılır. TCSC'ye  $\alpha$  açısı uygulandığında, kapasitörün gerilim ve akım karakteristiğinin değiştiği gözlemlenebilir. Kapasitör akımı artar ve buna bağlı olarak kapasitör gerilimi de artar. Kapasitör akımındaki ani artış nedeniyle kapasitör geriliminin polaritesi değişir [24,25].

#### 4. ÇBAG TABANLI EK SÖNÜMLEME MODELİNİN GELİŞTİRİLMESİ

GSC devresinde akım ve güç kontrolü, bir iç kontrol çevrimi ile bir dış kontrol çevriminden oluşmaktadır. Geliştirilen GSC yapısı Şekil 4'de sunulmaktadır.

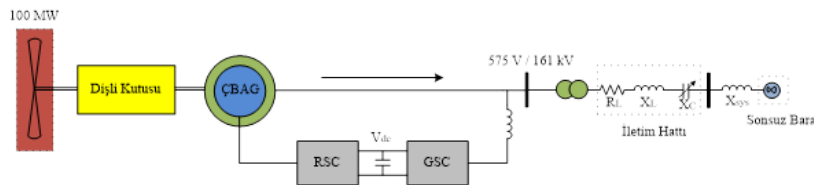


Şekil 4. Geliştirilen GSC devresi.

GSC devresinde önerilen sönmleme yapısında giriş değişkenleri olarak rotor açısal hız değeri ile referans rotor açısal hız değeri kullanılmaktadır. Ölçülen rotor açısal hız ile referans değer arasındaki fark, ÇBAG bloğunda belirlenen bir kazanç katsayısından geçirilerek bir sınırlandırıcı bloğuna uygulanmaktadır. Sınırlandırıcı çıkışında elde edilen sayısal değer, toplama ünitesine gönderilmektedir. Aynı toplama ünitesine ayrıca referans gerilim değeri de uygulanmakta ve ölçülen gerilim ile referans gerilim arasındaki fark dikkate alınmaktadır. Geliştirilen ek sönmleme kontrolünde kazanç değeri -250 olarak belirlenmiştir. Bunun yanısıra sönmleme modelinde kullanılan sınır değerleri -0.1 ile 0.1 aralığında verilmiştir. Şekil 4'te gösterildiği üzere, toplama ve çıkarma işlemleri sonucunda oluşan sinyal bir Oransal-İntegral (PI) denetleyiciye giriş olarak verilmektedir. PI denetleyici çıkışı, GSC devresindeki  $I_{q\_ref}$  referans akım bileşenini oluşturmaktadır. Bu yapı ile GSC devresi Şekil 4'te gösterildiği şekilde geliştirilmiştir.

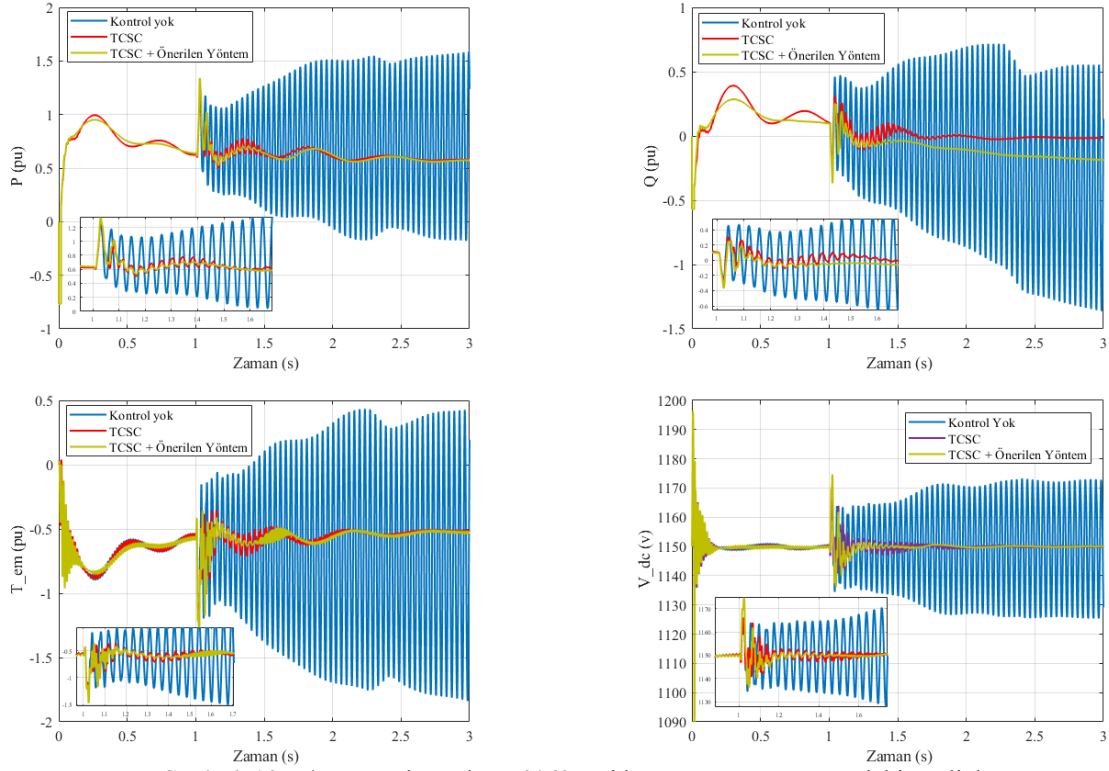
#### 4.1. Benzetim Çalışması Sonuçları

Bu çalışma için analiz edilen benzetim çalışması Şekil 5'de gösterilmiştir.

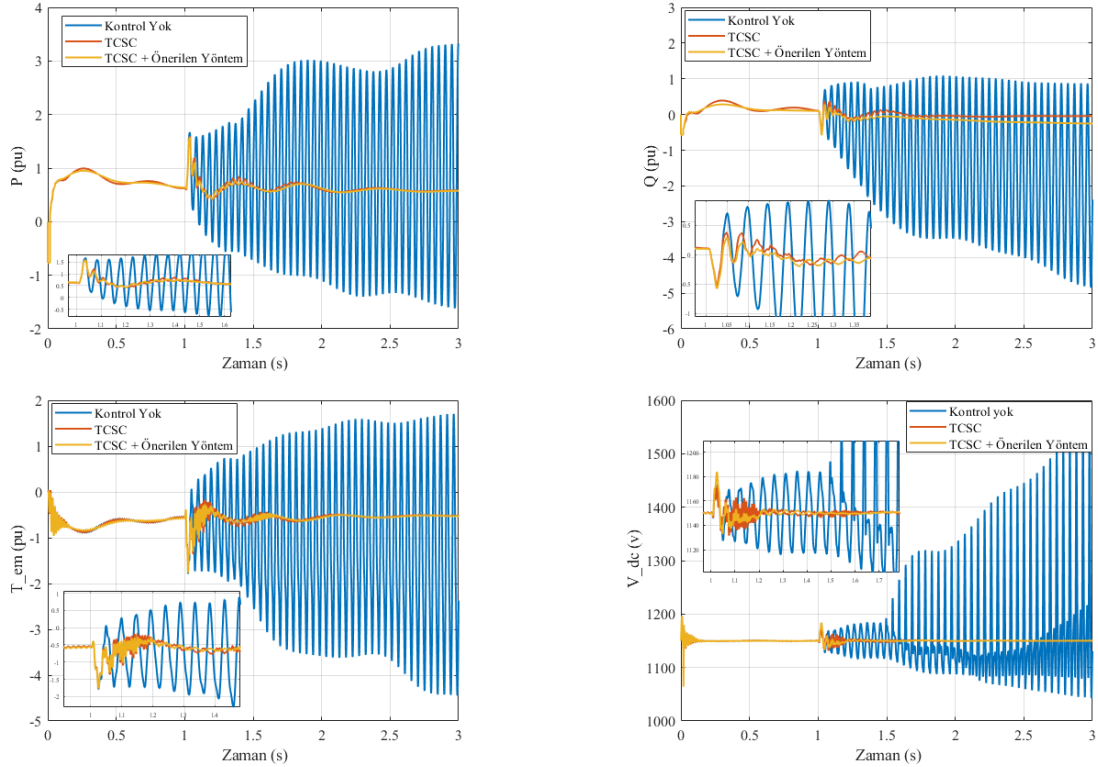


Şekil 5. Analiz edilen benzetim çalışması.

Analiz edilen benzetim çalışmasında görüldüğü gibi ÇBAG tabanlı rüzgar çiftliği şebekeye bağlı olarak çalışmaktadır. Sistemde toplamda 66 adet 100 MW gücünde rüzgar türbini bulunmaktadır. ÇBAG terminal gerilimi 575 V'tur. 575 V'luk gerilim kullanılan transformatör vasıtasıyla 161 kV'a yükseltilmektedir. Bu transformatörün primer-sekonder bağlantısı sırasıyla bağlantısı üçgen-yıldızdır. Güç sisteminde seri kompanzasyon oranları %60 ve %80 olarak tercih edilmiştir. ÇBAG'de rüzgar hızları ise 10 m/s ve 12 m/s olarak tercih edilmiştir. İletim hattında 100 MVA gücünde TCSC kullanılırken, ÇBAG'da GSC devresinde sönmleme modeli geliştirilmiştir. Amaçlanan model ile geleneksel modelin karşılaştırmaları yapılmıştır. ÇBAG'da rüzgar hızının 10 m/s olduğu ve seri kompanzasyon oranının sırasıyla %60 ve %80 olduğu durumlarda elde edilen sonuçlar şekil 6 ve şekil 7'de gösterilmiştir.



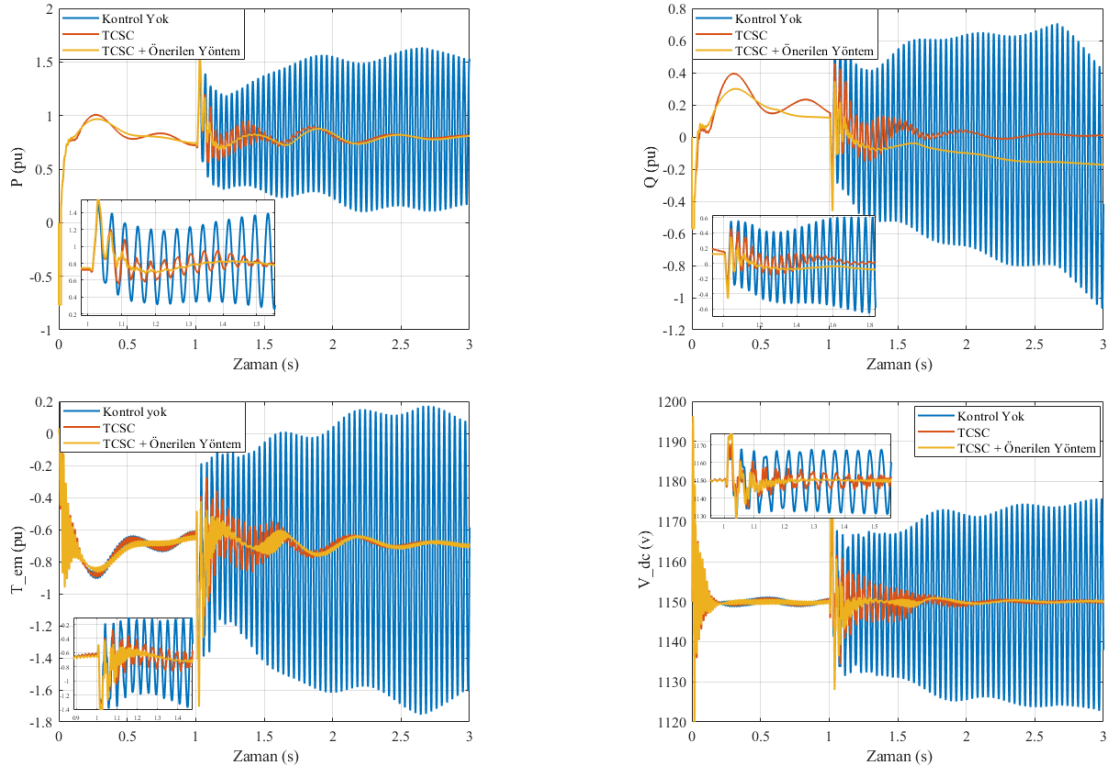
Şekil 6. 10 m/s rüzgar hızında ve %60 seri kompanzasyon oranındaki analizler.



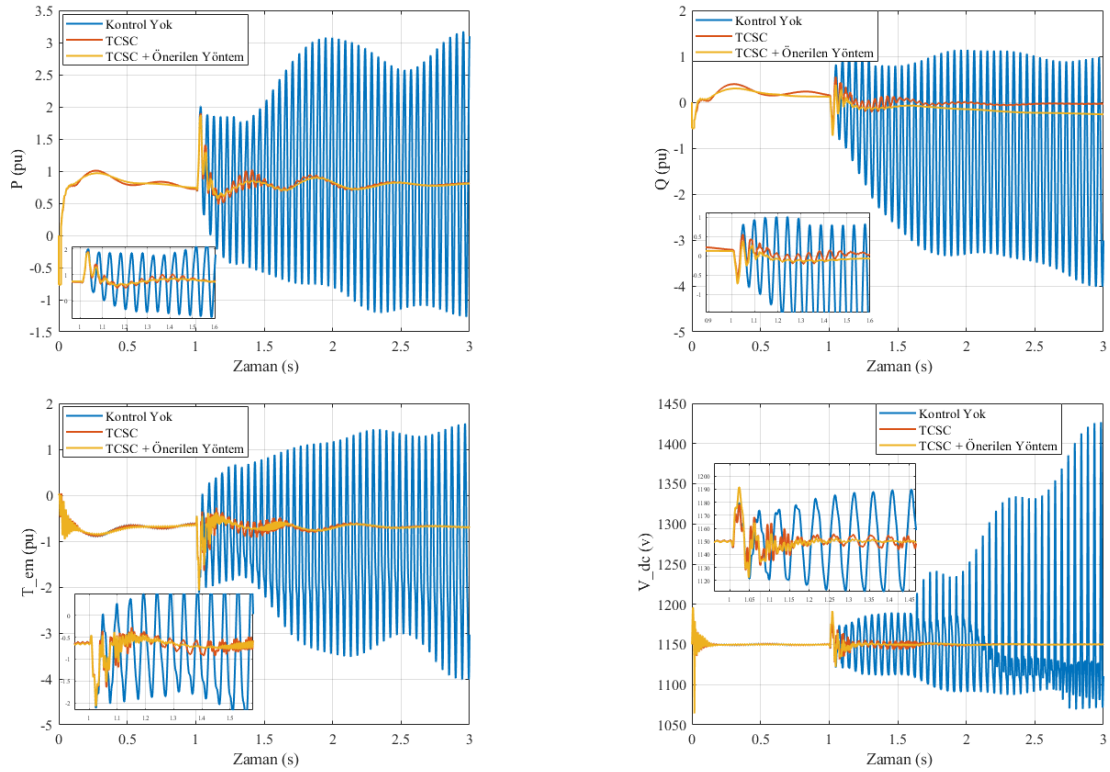
Şekil 7. 10 m/s rüzgar hızında ve %80 seri kompanzasyon oranındaki analizler.

Karşılaştırmalarda geleneksel model, TCSC'nin kullanıldığı durum ve TCSC-SDC'nin birlikte kullanıldığı modeller kullanılmıştır. Şekil 6 ve şekil 7'de ÇBAG parametreleri detaylı bir şekilde incelendiğinde TCSC-SDC'nin birlikte kullanılmasının diğer sonuçlara göre kararlılık ve salınımların sönümlenmesi açısından daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Özellikle sistemde seri kompanzasyon oranının artması ile sistemdeki osilasyonların daha çok olduğu ve sistemin daha kararsız olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmanın diğer bir

analizinde ÇBAG'da rüzgar hızının 12 m/s olduğu ve seri kompanzasyon oranının sırasıyla %60 ve %80 olduğu durumlar incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar şekil 8 ve şekil 9'da gösterilmiştir.



Şekil 8. 12 m/s rüzgar hızında ve %60 seri kompanzasyon oranındaki analizler.



Şekil 9. 12 m/s rüzgar hızında ve %80 seri kompanzasyon oranındaki analizler.

12 m/s rüzgar hızında ve %60 ile %80 seri kompanzasyon oranındaki analizler gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalarda; geleneksel yapı, yalnızca TCSC kullanılan durum ve TCSC ile SDC'nin birlikte uygulandığı modeller irdelenmiştir. Şekil 8 ve Şekil 9'daki sonuçlar detaylı olarak değerlendirildiğinde, TCSC-SDC'nin eş zamanlı kullanımının, sistem kararlılığı ve salınımların bastırılması bakımından diğer yaklaşımlara kıyasla daha

üstün performans sergilediği görülmektedir. İlk yapılan analize benzer şekilde seri kompanzasyon oranının artmasıyla birlikte sistemdeki osilasyonların şiddetinin arttığı ve sistem kararlılığının olumsuz yönde etkilendiği tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇ

İletim hattında seri kompanzasyon sonucu oluşan kararsızlık durumları için, şebekeye bağlı ÇBAG'da GSC devresinde geliştirilen sönümlenme modeli ile iletim hattında kullanılan TCSC'nin birlikte kullanılması ile SSR olayları, bu çalışmada detaylı olarak incelenmiştir. Geliştirilen sönümlenme modeli ve TCSC'nin koordineli bir şekilde kullanılması ile güç sistemlerinde meydana gelecek olan SSR durumlarında iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. İletim hattında kapasite etkisinden dolayı oluşan kararsızlık durumlarının ortadan kaldırıldığı ve oluşan salınımların hızlı bir şekilde sönümlendiği geliştirilen sönümlenme modeli ve TCSC'nin kullanılması ile görülmüştür. Dahası SSR olaylarında özellikle seri kompanzasyon oranındaki artışların salınımları çok arttırdığı bu çalışmada görülmüştür. ÇBAG parametrelerinde SSR olaylarında salınımlar açısından en çok etkilenen aktif güç olurken, en az etkilenen parametrenin DC link gerilim olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma önerilen yöntemin uygulanabilirliği, rüzgar hızları ve seri kompanzasyon seviyelerinin ötesindeki çeşitli senaryolar altında gerçek zamanlı dijital simülasyon kullanılarak doğrulanmasının yapılmasına gelecekteki çalışmalara zemin hazırlayacaktır.

## Yazar Katkıları

Tüm yazarların çalışmadaki katkı oranları eşittir.

## Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

## KAYNAKÇA

- [1] L. Wang, X. Xie, Q. Jiang, H. Liu, Y. Li and H. Liu, "Investigation of SSR in practical DFIG-based wind farms connected to a series-compensated power system", IEEE transactions on power systems, vol. 30, no. 5, pp. 2772-2779, 2014.
- [2] M. Abdeen, H. Li, and L. Jing, "Improved subsynchronous oscillation detection method in a DFIG-based wind farm interfaced with a series-compensated network", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.119, no. 105930, pp. 1-10, 2020.
- [3] P.H. Huang, M.S. El Moursi, W. Xiao and J.L. Kirtley, "Subsynchronous resonance mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm by using two-degree-of-freedom control strategy", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 3, pp. 1442-1454, 2014.
- [4] B.S. Kumar, P.M. Sarma, and M. Gaddam, "A Robust UDE-Based 2DOF Controller for Mitigating Sub-Synchronous Control Interaction in Wind Power Plants", Electric Power Components and Systems, vol. 52, no. 4, pp. 610-628, 2024.
- [5] H.A. Mohammadpour and E. Santi, "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, vol. 6, no. 2, pp. 388-399, 2015.
- [6] S.R. Jayakrishnan, E.P. Cheriyan and T.K. Sindhu, "Best input location pair selection for SSR damping controller in DFIG based wind farms", IEEE Access, vol. 9, pp. 160332-160346, 2021.
- [7] M.S. Zahra, "Proposed sub-synchronous resonance damping controller for large-scale wind farms", IET Renewable Power Generation, vol. 17, no. 13, pp. 3209-3220, 2023.
- [8] E. Touti, M. Abdeen, M.A. El-Dabah, H. Kraiem, A. M. Agwa, A. Alanazi and T. I. Alanazi, "Sub-synchronous oscillation mitigation for series-compensated DFIG-based wind farm using resonant controller", IEEE Access, vol. 12, pp. 66185-66195, 2024.
- [9] M. Abdeen, S. Al Dawsari, M.A. El-Dabah, M. K. Ahmed, E. Touti, A. A. Z. Diab and A. G. Abo El-Magd, "Doubly fed induction generator frequency regulation enhancement using combined inertia and proportional resonant controller", Processes, vol. 13, no. 5, 1284, 2025.
- [10] H. Dong, M. Su, K. Liu and W. Zou, "Mitigation strategy of subsynchronous oscillation based on fractional-order sliding mode control for VSC-MTDC systems with DFIG-based wind farm access", IEEE Access, vol. 8, pp. 209242-209250, 2020.
- [11] P. Li, J. Wang, L. Xiong, S. Huang, Z. Wang and M. Ma, "SSCI mitigation of grid-connected DFIG wind turbines with fractional-order sliding mode controller", Wind Energy, vol. 23, no. 7, pp. 1564-1577, 2020.
- [12] P. Li, L. Xiong, Z. Wang, M. Ma and J. Wang, "Fractional-order sliding mode control for damping of subsynchronous control interaction in DFIG-based wind farms", Wind Energy, vol. 23, no. 3, pp. 749-762, 2020.
- [13] A. Moharana, R.K. Varma and R. Seethapathy, "SSR alleviation by STATCOM in induction-generator-based wind farm connected to series compensated line", IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 3, pp. 947-957, 2014.
- [14] H. Xie and M.M. de Oliveira, "Mitigation of SSR in presence of wind power and series compensation by SVC," International Conference on Power System Technology, pp. 2819-2826, Chengdu, China, 2014.

- [15] C. Rohit, P. Darji and H.R. Jariwala, "A preordainment approach for design of auxiliary damping controller and SSSC tuning to enhance SSR mode stability in DFIG based windfarm", *Smart Science*, vol. 11, no. 3, pp. 605-628, 2023.
- [16] M. Abdeen, A. Emran, A. Moustafa, D. Kamal, R. Hassan, E. Hassan and F. Jurado, "Investigation on TCSC parameters and control structure for SSR damping in DFIG-based wind farm," 12th International Renewable Energy Congress, pp. 1-5, Hammamet, Tunisia, 2021.
- [17] H. Jiang, R. Song, N. Du, P. Zhou, B. Zheng, Y. Han and D. Yang, "Application of UPFC to mitigate SSR in series-compensated wind farms", *The Journal of Engineering*, vol. 2019, no. 16, pp. 2505-2509, 2019.
- [18] H.A. Mohammadpour and E. Santi, "Modeling and control of gate-controlled series capacitor interfaced with a DFIG-based wind farm", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 2, pp. 1022-1033, 2014.
- [19] P.C. Krause, O. Wasynczuk and S.D. Sudhoff, "Analysis of electric machinery," *Analysis of electric machinery and drive system*, vol. 2. New York: IEEE press, 2002.
- [20] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth and N. Jenkins, "Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines", *Electric Power Systems Research*, vol. 67, no. 3, pp. 207-215, 2003.
- [21] M. Abdeen, H. Li, S. Kamel, A. Khaled, M. El-Dabah, M. Kharrich and H. F. Sindi, "A recent analytical approach for analysis of sub-synchronous resonance in doubly-fed induction generator-based wind farm", *IEEE Access*, vol. 9, pp. 68888-68897, 2021.
- [22] H.A. Mohammadpour and E. Santi, "Analysis of sub-synchronous resonance (SSR) in doubly-fed induction generator (DFIG)-based wind farms", Springer Nature, 2022.
- [23] P.N. Nguyen, C.L.T. Minh, V.N.H. Minh and T. N. Le, "Analysis of Sub-Synchronous Oscillation in Grid-Connected Wind Farm and Proposed Improved Solution", *IEEE Access*, vol. 13, pp.95821-95836, 2025.
- [24] K.R. Padiyar, "FACTS controllers in power transmission and distribution," New age international publishers, New Delhi, 2007.
- [25] D. Chatterjee, A. Mitra, and S. Sarkar, "A conceptual study for control strategy of TCSC in inductive and capacitive region," *International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies*, pp. 1-6, Nagercoil, India, 2014.