

Sincap Kafesli Asenkron Generatörlü Rüzgar Türbin Sisteminin Özdeğer Hassasiyet ve Salınlı Kararlılık Analizi

Burak YILDIRIM

¹ Bingöl Üniversitesi Teknik Bilimler MYO, Bingöl
byildirim@bingol.edu.tr

(Geliş/Received: 16.04.2018; Kabul/Accepted: 10.09.2018)

Özet

Dünya genelinde rüzgar enerjisi seviyesinde meydana gelen artış nedeniyle rüzgar santrallerinin güç sistemleri kararlılığı üzerine etkileri yoğun bir şekilde araştırılmaktadır. Bu çalışmada, bir sincap kafesli asenkron generatöre (SKAG) sahip rüzgar santralının güç sistemi kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizleri yardımı ile incelenmiştir. Çalışmada ilk olarak özdeğer analizleri yardımı ile güç sistemlerinin salınlı modları belirlenmiştir. Daha sonra, sistem kararlılığı üzerindeki etkilerini değerlendirmek için makine ve kontrol parametrelerine göre özdeğer hassasiyet analizi gerçekleştirilmiştir. SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemine etkilerini incelemek amacıyla Kundur çift bölgeci güç sistemi üzerinde gerekli analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Analiz çalışmaları için SKAG rüzgar türbin sistemi ilk olarak çift bölgeci güç sisteminde bulunan bir senkron generatör ile yer değiştirilmiştir. Daha sonra senkron generatör ile yer değiştirmeden uygun bulunan bir baraya SKAG rüzgar türbin sistemi ilave edilerek analiz işlemleri gerçekleştirilmiştir. SKAG rüzgar türbin sistemi ilave edilen durumlar ile temel sistem durumu için karşılaştırmalı analiz işlemleri gerçekleştirilerek SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemine etkileri incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sincap Kafesli Asenkron Generatör, Rüzgar Türbini, Salınlı Kararlılık, Özdeğer Hassasiyet Analizi

Eigenvalue Sensitivity and Oscillatory Stability Analysis of Wind Turbine System with Squirrel cage induction generator

Abstract

Due to the increase in wind energy level at worldwide, the impact on power systems stability of wind power plants are intensively investigated. In this study, the effects of wind farm with a squirrel cage induction generator (SCIG) on power system stability were investigated with the help of eigenvalue analysis. With the help of eigenvalue analysis in the study, the oscillatory modes of the power systems were first determined. Later, an eigenvalue sensitivity analysis was performed to evaluate the effects of machine and control parameters on system stability. In order to investigate the effects on the power system of SCIG wind turbine systems, analysis studies have been carried out on the Kundur's two-area power system. For analysis studies, the SCIG wind turbine system was first replaced by a synchronous generator located in the two-area power system. After that, synchronous generators were preserved and SCIG wind turbine system was added to suitable bus for analysis. For the systems with SCIG wind turbine and the basic system, comparative analysis procedures were carried out to examine the effects of the SCIG wind turbine system on the power system.

Keywords: Squirrel Cage Induction Generator, Wind Turbine, Oscillatory Stability, Eigenvalue Sensitive Analysis

1. Giriş

İçinde yaşadığımız modern toplumun enerji talebi her geçen gün artmaktadır. Enerji üretimi için kullanılan fosil kaynaklarımız geri dönüşü olmayan bir şekilde azalmaktadır. Buna ek olarak, bu yakıtları kullanan enerji santralleri dünyamıza ciddi zararlar vermektedir. Enerji devamlılığı ve mevcut elektrik dağıtım ve iletim

şebekelerinin altyapılarında ki yaşlanma gibi sorunlar mevcut güç şebekeleri için artan endişeler, elektrik enerjisi tedarikinin güvenliğini, güvenilirliğini ve kalitesini giderek daha fazla zorlamaktadır. Buna ek olarak, gelişmekte olan ülkelerdeki mevcut şebeke altyapıları artan yüksek maliyet ve mevcut şebeke verimliliğini artırma ihtiyacı gibi çeşitli sorunlar ile yüzleşmektedir. Bu alt yapıların karşılaştıkları sorunların üstesinden gelmek ve

bu gelişmeleri için önemli miktarda yatırım yapılması gerekirken, mevcut ihtiyaçları karşılamanın çok daha etkili bir yolu, yenilikçi çözümler, teknolojiler ve şebeke yapılarını birleştirmektir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının şebeke bağlantıları, bu sorunlara çözüm sağlamanın en önemli yoludur [1-3]. Rüzgar enerjisi, yaygın olarak kullanılan yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak kabul edilir ve özellikle son yirmi yılda rüzgar teknolojilerindeki gelişmelere bağlı olarak dünya genelinde 2017 yılı sonu itibari ile kurulu gücü 539,581 MW değerine ulaşmıştır [4].

SKAG, tip 1 rüzgar generatörü olarak adlandırılan sabit hızlı bir rüzgar türbin üreticidir. SKAG rüzgar türbini, senkron hızın %1–2 üzerinde çalışır ve SKAG, güç elektroniği kullanmadığı için, Çift Beslemeli İndüksiyon Generatörü ve Sabit Mıknatıslı Senkron Generatöre göre daha ucuzdur. SKAG rüzgar türbinleri, GE, Vestas ve Enercon gibi büyük rüzgar türbin üreticileri tarafından 1,5MW'a kadar olan değerlerde ticari olarak satılmaktadır [5].

Literatürde SKAG rüzgar türbinlerinin büyük bozucu kararlılık analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda SKAG rüzgar türbinlerine ait küçük sinyal kararlılık analiz çalışmaları da bulunmakta ayrıca farklı özelliklerdeki rüzgar türbin sistemlerinin de karşılaştırıldığı yayınlar literatürde bulunmaktadır [5-8]. Bu çalışmalarda SKAG rüzgar türbinlerinin detaylı osilasyonlu kararlılık analizinin yapıldığı ve mod şekilleri ve hassasiyet analizleri yardımı ile salımlı modları üzerine etkilerinin detaylı incelendiği bir yayın bulunmamaktadır.

Bu makalede SKAG rüzgar türbin sisteminin güç sistemi salımlı kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizi yöntemiyle detaylı olarak incelenmiştir. Bu amaçla ilk olarak bölüm 2’de salımlı kararlılık konusu hakkında açıklayıcı bilgiler verilmiş ve bölümün devamında özdeğer analizi yöntemi açıklanmıştır. Bölüm 3’de SKAG rüzgar türbinine ait model ve denklemler gösterilmiştir. Makalenin 4. bölümünde SKAG rüzgar türbininin güç sistemi üzerine etkileri analiz edilmiştir. Son olarak, Bölüm 5’de sonuçlar sunulmuştur.

2. Özdeğer ve Hassasiyet Analizi

Salımlı kararlılık problemi rotor açısı kararlılık problemi içerisinde incelenir [9]. Açık kararlılığı veya rotor açısı kararlılığı senkronizasyonda kalabilmek için birbirine bağlı senkron makinelerin yeteneği şeklinde tanımlanabilir. Bu kararlılık problemi güç sistemlerinin doğasında bulunan elektromekanik salımların incelenmesini içerir ve açı kararlılığı küçük bozucu açı kararlılığı ve transiyet açı kararlılığı olmak üzere iki ana alt kategoriye ayrılır [9-10]. Elektromekanik salımların 2 tipi vardır [10-11]:

(i)Lokal mod salımları: Güç sisteminin geriye kalan bölümlerine göre bir üretim istasyonundaki ünitelerin salımları ile ilişkili salımlardır. Salımlar güç sisteminin küçük bir kısmı veya tek istasyonda yerleştiği için lokal terimi kullanılır.

(ii)Bölgeler arası mod salımları: Güç sisteminin bölgeleri veya diğer kısımlarındaki makinalara karşı sistemin bir kısmındaki birçok makinenin salımları ile ilişkili salımlardır. Bu salımlara zayıf bağ ile bağlı olan eşleşmiş makinelerin 2 veya daha fazla grupları neden olur.

Küçük bozucu (aynı zamanda küçük sinyal veya salımlı olarak adlandırılır) rotor açısı kararlılığı generatörlerin küçük arızalardan sonra senkronizasyonlarını sürdürebilme kabiliyeti ile ilişkilidir. Burada “küçük” kelimesi anlam olarak, bozucular, sistem model denklemlerinin doğrusallaştırılması yoluyla olgunun incelenebileceği bir büyüklükte olduğu anlamını taşımaktadır [12].

Güç sisteminin küçük bozucu kararlılığı aşağıdaki denklemler ile verildiği gibi sıradan diferansiyel cebirsel denklem takımı ile gösterilebilir [13]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= g(x, u) \end{aligned} \quad (1)$$

Burada $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ durum değişkenleri vektörü, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ sistem çıkış değişkenleri vektörü $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ sistem giriş değişkenleri vektörüdür. $f = [f_1, f_2, \dots, f_n]^T$ ve $g = [g_1, g_2, \dots, g_n]^T$ ise durum ve çıkış değişkenlerini tanımlayan lineer olmayan fonksiyonlardır.

Küçük bir bozucuya maruz kaldığı zaman sistemin dinamik davranışını tanımlayan modal analiz, belirli bir işletme noktası etrafında denklem (1) lineerleştirilerek türetilir. Lineerleştirilen denklemler aşağıdaki denklemler tarafından verildiği gibi durum uzayın bir kümesi şeklinde gösterilebilir.

$$\begin{aligned}\Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta u \\ \Delta y &= C\Delta x + D\Delta u\end{aligned}\quad (2)$$

Burada Δ ifadesi durum değişkenlerine karşılık gelen küçük değişimleri gösterir. Δx ve Δy , durum vektörü ve çıkış vektörü değişkenlerini gösterir. Δu ise giriş vektörü değişkenlerini gösterir. Durum, giriş ve çıkış matrisleri A , B ve C olarak tanımlanır. D matrisi ise giriş ve çıkış değişkenleri arasındaki bağlantıyı tanımlar.

Salınım şartlarına ve sistem dinamik yanıtına ilişkin önemli bilgiler durum matrisi A 'nın özdeğerlerinden türetilir. Sistemin özdeğerlerine bakılarak sistemin kararlılığı belirlenir. Eğer bütün özdeğerler negatif reel kısma sahip ise sistem kararlı, en az bir özdeğer pozitif reel kısma sahip ise sistem kararsızdır. Eğer özdeğerlerden bir tanesi imajiner eksen üzerinde olup diğer özdeğerler negatif reel kısma sahip ise sistem kritik kararludur ve sürekli salınımlara sahiptir.

Bir λ_i özdeğer ile ilgili modun zamana bağlı karakteristiği $e^{\lambda_i t}$ ile verilir. Sistem yanıtı buna bağlı olarak özdeğer sadece reel kısımdan oluşuyor ise salınımsız mod ile kompleks özdeğerler ise salınımlı mod ile ilişkilidir. Özdeğerlerin reel bileşeni sönümlenmeyi verirken imajiner bileşeni salınımların frekansını verir. Bir negatif reel bileşen sönümlü salınımları verirken pozitif reel bileşen artan genlikli salınımları gösterir. Özdeğerlerin kompleks bir çifti için;

$$\begin{aligned}\lambda &= \sigma \pm j\omega \\ f &= \frac{\omega}{2\pi - \sigma} \\ \zeta &= \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}\end{aligned}\quad (3)$$

Burada f Hz cinsinden frekansı, ζ ise sönüm oranını gösterir.

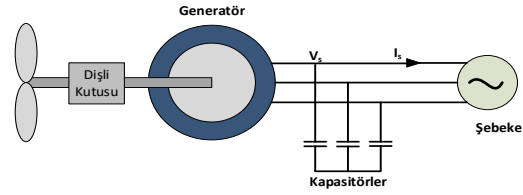
$$p_{ki} = \phi_{ki}\psi_{ik}\quad (4)$$

Burada ϕ_{ki} ve ψ_{ik} sırasıyla sağ ve sol özvektör elemanlarını gösterir. Sağ ve sol özvektörlerin birleşimi olan katılım faktörü (p_{ki}) durum değişkenleri ve modlar arasındaki

ilişkinin bir ölçüsünü verir. Bu, i . moddaki k . durum değişkeninin, göreceli katılımının bir ölçüsüdür. Katılım faktörü aslında, özdeğer λ_i 'nin, durum matrisi A 'nın köşegen elemanı a_{kk} 'ya hassasiyetine eşittir [14].

$$p_{ki} = \frac{\partial \lambda_i}{\partial a_{kk}}\quad (5)$$

3. SKAG Rüzgar Türbini Modeli



Şekil 1. SKAG rüzgar türbini

Denklemler, şebeke referans açısına göre reel (r) ve imajiner (m) eksen cinsinden formüle edilir. Eşzamanlı olarak dönen bir referans çerçevesinde, şebeke ve stator makine gerilimleri arasındaki bağlantı aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}v_r &= V \sin(-\theta) \\ v_m &= V \cos(\theta)\end{aligned}\quad (6)$$

ve güç emilimleri:

$$\begin{aligned}P &= v_r i_r + v_m i_m \\ Q &= v_m i_r - v_r i_m + b_c(v_r^2 + v_m^2)\end{aligned}\quad (7)$$

Burada b_c başlatma aşamasında belirlenen sabit kondansatör iletkenliğidir. Stator direnci r_s arkasındaki gerilim açısından diferansiyel denklemler şunlardır:

$$\begin{aligned}e_r' - v_r &= r_s i_r - x' i_m \\ e_m' - v_m &= r_s i_m - x' i_r\end{aligned}\quad (8)$$

Gerilim, akım ve durum değişkenleri arasındaki bağlantı şu şekildedir:

$$\begin{aligned}e_r' &= \Omega_b(1 - \omega_m)e_m' - (e_r' - (x_0 - x')i_m)/T_0' \\ e_m' &= -\Omega_b(1 - \omega_m)e_r' - (e_m' + (x_0 - x')i_r)/T_0'\end{aligned}\quad (9)$$

Burada ω_m rotor açısal hızıdır ve x_0 , x' ve T_0 generatör parametrelerinden elde edilebilir:

$$\begin{aligned}x_0 &= x_s + x_m \\ x' &= x_s + \frac{x_R x_m}{x_R + x_m}\end{aligned}\quad (10)$$

$$T_0' = \frac{x_R + x_m}{\Omega_b r_R}$$

Türbin ataleti H_t , rotor ataleti H_m ve shaft sıklığı K_s 'i dikkate alan mekanik diferansiyel denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_t &= (T_t - K_s \gamma)/(2H_t) \\ \dot{\omega}_m &= (K_s \gamma - T_e)/(2H_m)\end{aligned}\quad (11)$$

$$\dot{\gamma} = \Omega_b(\omega_t - \omega_m)$$

Burada ω_t rüzgar türbini açısal hızıdır ve elektriksel tork T_e aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$T_e = e_r' i_r + e_m' i_m \quad (12)$$

Mekaniksel tork T_t de şu şekildedir:

$$T_t = \frac{P_\omega}{\omega_t} \quad (13)$$

Burada P_ω rüzgardan çıkarılan mekaniksel güçtür. Ayrıca, rüzgarın ve rotor hızlarının bir fonksiyonudur ve aşağıdaki gibi yaklaşılabılır:

$$P_\omega = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda) A_r v_\omega^3 \quad (14)$$

Burada ρ hava yoğunluğudur, c_p performans katsayısı veya güç katsayısıdır, λ uç hız oranıdır ve son olarak A_r rotor tarafından süpürülen alandır. Hız ucu oranı λ , kanat ucu hızı v_{bt} ile rotor rüzgar kaynak yönü v_ω arasındaki orandır:

$$\lambda = \frac{v_{bt}}{v_\omega} = \eta_{GB} \frac{2R\omega_t}{pv_\omega} \quad (15)$$

Burada η_{GB} dişli kutusu oranı, p asenkron generatörün kutuplarının sayısı ve R de rotor yarıçapıdır. Son olarak $c_p(\lambda)$ eğrisi yaklaşık olarak aşağıdaki gibidir:

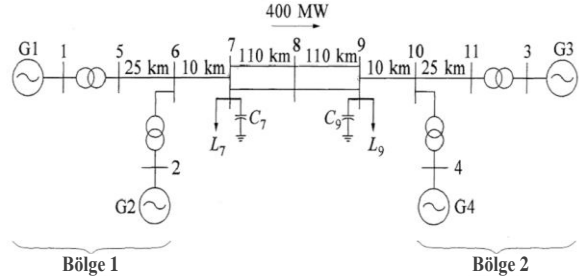
$$c_p = 0.44 \left(\frac{125}{\lambda_i} - 6.94 \right) e^{-\frac{16.5}{\lambda_i}} \quad \text{ile} \quad (16)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda} + 0.02}$$

Kule gölge etkilerini simule etmek için, T_t ' ye bir periyodik tork titreşimi ilave edilir ve bu

frekans, rotor hızı ω_t 'ye dişli kutusu oranı η_{GB} 'ye ve kanatların sayısı n_b 'ye bağlıdır [15].

$$\tilde{T}_t = T_t \left(1 + 0.025 \sin \left(\eta_{GB} \frac{\Omega_b \omega_t}{n_b} t \right) \right) \quad (17)$$



Şekil 2. Kundur 2 bölgeli güç sistemi [14].

4. Analiz Çalışmaları

SKAG rüzgar türbinin güç sistemine etkileri Şekil 2'de gösterilen Kundur'un 2 bölgeli güç sistemi üzerinde incelenmiştir. Güç sistemi üzerine SKAG etkilerini göstermek için aşağıdaki üç durum için özdeğer ve hassasiyet analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

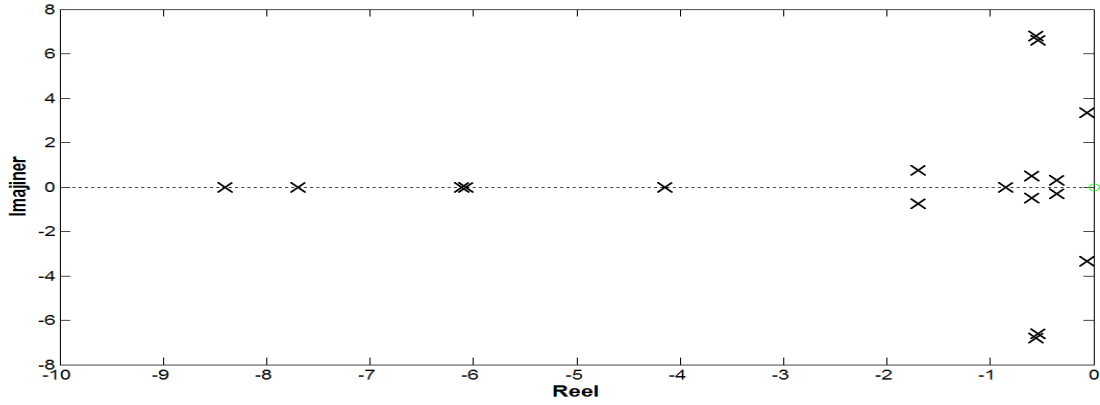
Durum 1: Temel durum

Durum 2: 1 nolu baradaki senkron generatör aynı güçte SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirmiştir.

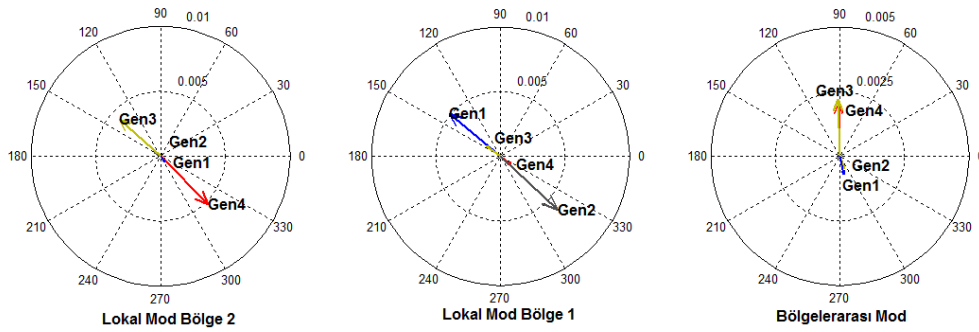
Durum 3: Temel durum sistem için 5 nolu baraya 450 MVA güce sahip SKAG rüzgar türbini ilave edilmiştir.

Tablo 1. Durum 1 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri				Mod çeşidi
				Gen1 ($\Delta Syn1$ $\omega Syn1$)	Gen2 ($\Delta Syn2$ $\omega Syn2$)	Gen3 ($\Delta Syn3$ $\omega Syn3$)	Gen4 ($\Delta Syn4$ $\omega Syn4$)	
1	$-0.5548 + 6.7889j$	1.0841	0.081	0.0048	0.0078	0.2166	0.2942	Lokal mod-Bölge 2
2	$-0.5548 - 6.7889j$	1.0841	0.081	0.0048	0.0078	0.2166	0.2942	Lokal mod-Bölge 2
3	$-0.5440 + 6.5979j$	1.0536	0.082	0.2236	0.2862	0.0100	0.0039	Lokal mod-Bölge 1
4	$-0.5440 - 6.5979j$	1.0536	0.082	0.2236	0.2862	0.0100	0.0039	Lokal mod-Bölge 1
5	$-0.0671 + 3.34j$	0.5316	0.02	0.0777	0.0381	0.2274	0.1708	Bölgeler arası mod
6	$-0.0671 - 3.34j$	0.5316	0.02	0.0777	0.0381	0.2274	0.1708	Bölgeler arası mod



Şekil 3. Durum 1 için özdeğerler



Şekil 4. Durum 1 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 3 ve Tablo 1’de durum 1 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 1 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlarda Tablo 1’de verilmiştir. ΔSyn ve ωSyn generatöre ait rotor açıları ve rotor hızlarını göstermektedir. Son olarak durum 1’e ait mod şekilleri de Şekil 4’de gösterilmiştir.

Şekil 3 incelendiği zaman durum 1 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 1 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde 2 adet lokal mod salınımı 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Lokal mod ve bölgelerarası salınım modları, senkron generatörlerin rotor hızı durum değişkenlerinin modlara katılım oranları hesaplanarak belirlenir. Lokal modların hangi bölgelere ait olduğu bölgelerde bulunan senkron generatörlerin o moda yaptıkları katkılara bakılarak karar verilir. Lokal mod bölge 1 için bölge 1 de bulunan senkron generatör 1 ve 2’nin katkılarının en fazla olduğu ve diğer bölgedeki generatörlerin katkılarının en az olduğu mod olarak belirlenir. Lokal mod bölge 2 içinde aynı

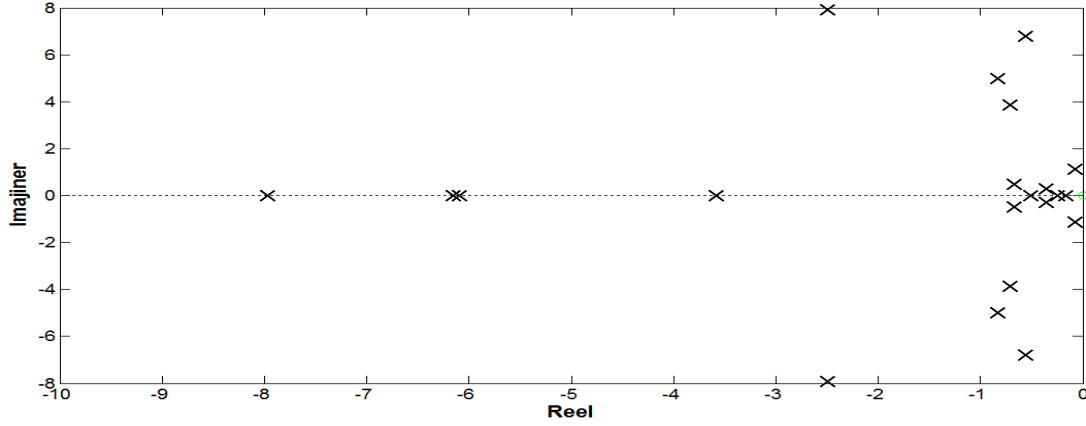
durum geçerlidir. Bölgelerarası salınım modunda ise bu moda bütün generatörlerin katkı yaptığı mod olarak belirlenir. Bu modların salınım frekanslarının literatüre uygun olarak bölgelerarası salınımlar için 1 HZ’den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

Durum 1 için Mod şekilleri (senkron generatörlerin rotor hızları ile ilişkili özvektör bileşenleri) Şekil 4’de gösterilmiştir. Mod şekilleri lokal ve bölgeler arası modların belirlenmesinde ve incelenmesinde büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.53 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1’in generatörleri Gen1 ve Gen2 bölge 2’nin generatörleri Gen 3 ve Gen 4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.05 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 için de görülebilir. Bu şekilde de bölge içindeki Gen1 ve Gen2 bir birlerine karşı salınım göstermektedir. 1.08 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2’de bulunan Gen3 ve Gen4 birbirlerine karşı salınımlar göstermektedir. Lokal modlarda diğer

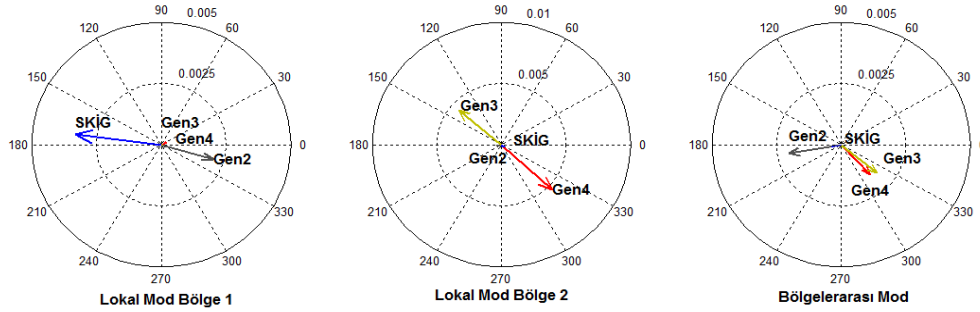
bölgede bulunan generatörlerin salınım boyutları çok küçüktür.

Tablo 2. Durum 2 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri				Mod çeşidi
				SKAG ω_{skig}	Gen2 Δ_{Syn2} ω_{Syn2}	Gen3 Δ_{Syn3} ω_{Syn3}	Gen4 Δ_{Syn4} ω_{Syn4}	
1	$-2.4899 + 7.929$	1.3227	0.299	0.3471	0.1631	0.0002	0.0024	Lokal mod-Bölge 1
2	$-2.4899 - 7.929$	1.3227	0.299	0.3471	0.1631	0.0002	0.0024	Lokal mod-Bölge 1
3	$-0.5579 + 6.7889$	1.0841	0.082	0.0004	0.0017	0.2231	0.2995	Lokal mod-Bölge 2
4	$-0.5579 - 6.7889$	1.0841	0.082	0.0004	0.0017	0.2231	0.2995	Lokal mod-Bölge 2
5	$-0.7072 + 3.8486$	0.6227	0.18	0.0164	0.2347	0.1628	0.1107	Bölgeler arası mod
6	$-0.7072 - 3.8486$	0.6227	0.18	0.0164	0.2347	0.1628	0.1107	Bölgeler arası mod



Şekil 5. Durum 2 için özdeğerler



Şekil 6. Durum 2 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 5 ve Tablo 2’de durum 2 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 2 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlarda Tablo 2’de verilmiştir. Son olarak durum 2’de ait mod şekilleri de Şekil 6’da gösterilmiştir.

Şekil 5 incelendiği zaman durum 2 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 2 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde 2 adet lokal mod salınımı 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Durum 2 için bara 1’de bulunan senkron generatör aynı güce sahip bir SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirmiştir. Tablo 2 incelendiği zaman durum 1’e göre lokal mod bölge 1 de SKAG rüzgar türbinin ilavesi önemli oranda sistemin sönüm oranını artırmış ve buna bağlı olarak güç sistemi salınım kararlılığı açısından olumlu bir etki sağlamıştır. Lokal mod bölge 2 de ise sistem üzerine önemli bir etki sağlamamıştır. Bölgelerarası mod üzerine etkileri incelendiği zaman lokal mod bölge 1 üzerine yaptığı etkiye benzer şekilde güç sisteminin bu moduna sönümleyici etki sağlayarak sönümlü

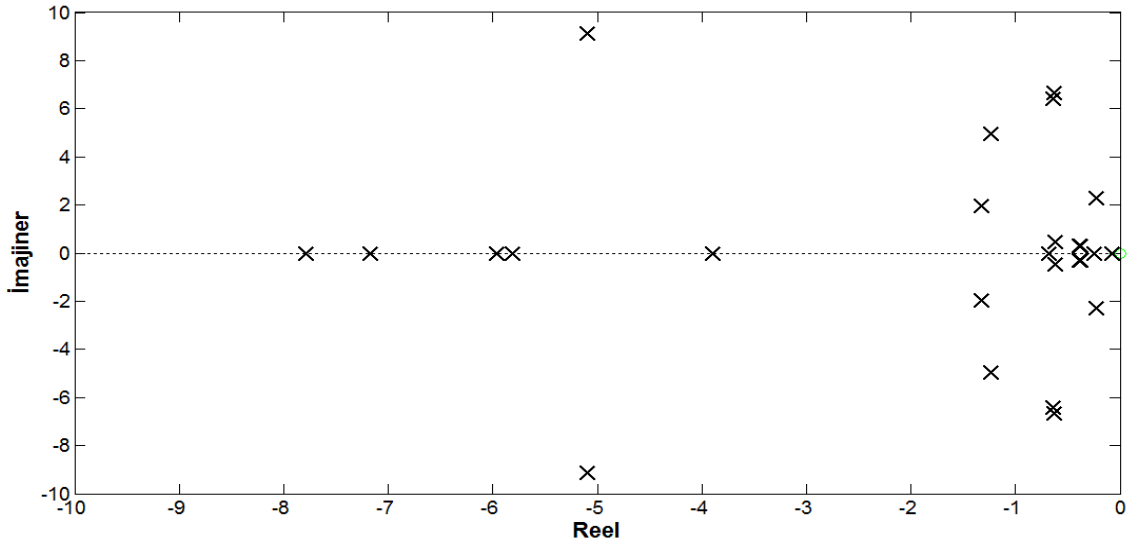
kararlılık açısından sistemin iyileşmesini sağlamıştır. Lokal modların belirlenmesinde kullanılan yöntem durum 1 de açıklanmıştır. Durum 2 içinde belirlenen salınımların literatüre uygun olarak bölgelerarası salınımlar için 1HZ'den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

SKAG'ler senkron generatörlere göre yapısal olarak daha iyi sönümlenmiştir ve sönümleme sağlamak için senkron generatörlere göre güç sistemine daha az bağımlıdır. Bu nedenle nadiren güç sistemi salınımlarına neden olurlar [16]. Durum 2 için elde edilen sonuçlarda bu durumu göstermektedir.

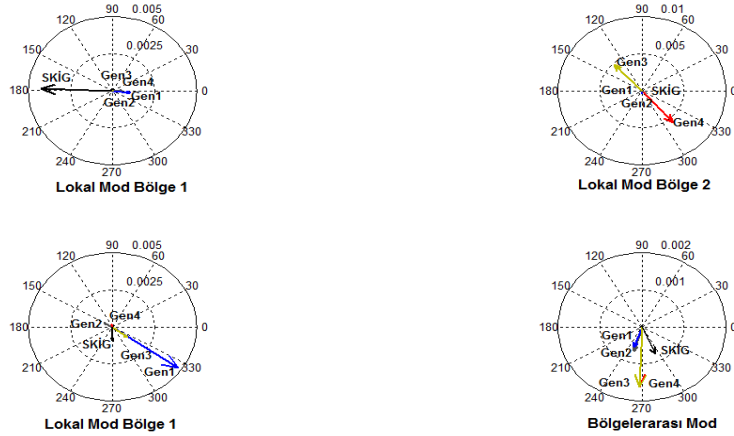
Durum 2 için mod şekilleri Şekil 6'da gösterilmiştir. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.62 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1'in generatörleri SKAG ve Gen2 bölge 2'nin generatörleri Gen 3 ve Gen 4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.32 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 içinde görülebilir. Bu şekilde de bölge içindeki SKAG ve Gen2 bir birlerine karşı salınım göstermektedir. 1.08 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2'de bulunan Gen3 ve Gen4 birbirlerine karşı salınımlar göstermektedir.

Tablo 3. Durum 3 için özdeğerler.

EM modu	Özdeğer	Frekans	Sönüm oranı	Katılım faktörleri					Mod çeşidi
				SKAG ω_{skigm}	Gen1 $\Delta Syn1$ ω_{Syn1}	Gen2 $\Delta Syn2$ ω_{Syn2}	Gen3 $\Delta Syn3$ ω_{Syn3}	Gen4 $\Delta Syn4$ ω_{Syn4}	
1	$-5.1006 + 9.1284j$	1.6642	0.487	0.5457	0.0758	0.0258	0.00013	0.00036	Lokal mod-Bölge 1
2	$-5.1006 - 9.1284j$	1.6642	0.487	0.5457	0.0758	0.0258	0.00013	0.00036	Lokal mod-Bölge 1
3	$-0.6285 + 6.6794j$	1.0678	0.093	0.00001	0.0028	0.0013	0.2352	0.2903	Lokal mod-Bölge 2
4	$-0.6285 - 6.6794j$	1.0678	0.093	0.00001	0.0028	0.0013	0.2352	0.2903	Lokal mod-Bölge 2
5	$-0.6352 + 6.4231j$	1.0273	0.098	0.0049	0.2205	0.3046	0.0056	0.00062	Lokal mod-Bölge 1
6	$-0.6352 - 6.4231j$	1.0273	0.098	0.0049	0.2205	0.3046	0.0056	0.00062	Lokal mod-Bölge 1
7	$-0.2314 + 2.2818j$	0.6227	0.1008	0.099	0.1710	0.1205	0.5408	0.4857	Bölgeler arası mod
8	$-0.2314 - 2.2818j$	0.6227	0.1008	0.099	0.1710	0.1205	0.5408	0.4857	Bölgeler arası mod



Şekil 7. Durum 3 için özdeğerler



Şekil 8. Durum 3 için bölgeler arası ve lokal modların generatör hızlarının mod şekilleri

Şekil 7 ve Tablo 3’de durum 3 için özdeğer analizi sonuçları verilmiştir. Ayrıca durum 3 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmalarına ait sonuçlar da Tablo 3’de verilmiştir. Son olarak durum 3’e ait mod şekilleri de şekil 8’de gösterilmiştir.

Şekil 7 incelendiği zaman durum 3 için güç sistemine ait özdeğerlerin tümü imajiner eksenin sol tarafında bulunduğu için güç sistemi kararlıdır. Durum 3 için gerçekleştirilen hassasiyet analiz çalışmaları yardımıyla bu güç sisteminde durum 1 ve 2’den farklı olarak 3 adet lokal mod salınımları 1 adet de bölgeler arası salınım olduğu görülmektedir.

Durum 3 için bara 5’e 450 MW güce sahip bir SKAG rüzgar türbini yerleştirilmiştir. Tablo 3 incelendiği zaman durum 1’e göre SKAG rüzgar türbini ilavesi ile bölge 1 için yüksek bir sönümle frekansına sahip yeni bir lokal mod oluştuğu görülmektedir. Ayrıca durum 1 ile kıyaslandığı zaman bölge 1’e ait diğer lokal mod için ise SKAG rüzgar türbinin ilavesi sistemin sönüm oranını çok küçük bir miktarda arttırmış ve buna bağlı olarak güç sistemi salınım kararlılığı açısından olumlu bir etki sağlamıştır. Lokal mod bölge 2 de ise yine sistem üzerinde küçük oranda sönüm miktarını artırarak olumlu yönde katkı sağlamıştır. Bölgelerarası mod üzerine etkileri incelendiği zaman güç sisteminin bu moduna önemli bir ölçüde sönümleyici etki sağlayarak sönümlü kararlılık açısından sistemin iyileşmesini sağlamıştır. Lokal modların belirlenmesinde kullanılan yöntem durum 1 de açıklanmıştır. Durum 3 içinde belirlenen salınımların literatüre uygun olarak bölgelerarası

salınımlar için 1 Hz’den düşük lokal modlar için ise 1 ile 2 Hz arasında olduğu görülmüştür.

Güç sistemine rüzgar gücünün ilave edilmesi ile mevcut senkron generatörler güç talebini karşılamak için daha az katkıda bulunurlar. Ancak sistem topolojisi değişmeden kaldığı için şebekenin empedansı ile orantılı olarak senkron generatörler daha küçük hale gelecektir. Bu da birçok durumda senkron generatörler arasında herhangi bir salınımın sönümlenmesini iyileştiren ortak kuplajı güçlendirecektir [16]. Durum 3 için elde edilen sonuçlar da bu durumu göstermektedir.

Durum 3 için mod şekilleri Şekil 8’de gösterilmiştir. Mod şekillerinden de görüleceği üzere 0.62 Hz frekansa sahip olan mod bölgelerarası moddur ve bölge 1’in generatörleri Gen1, Gen2 ve SKAG bölge 2’nin generatörleri Gen3 ve Gen4 ile karşılıklı salınımlar göstermektedir. Aynı durum 1.02 Hz ve 1.66 Hz frekansa sahip lokal mod bölge 1 şekilleri içinde görülebilir. Bu şekiller de 1.66 Hz için bölge içindeki SKAG ile Gen1 ve Gen2 bir birlerine karşı 1.02 Hz için ise Gen1 ile Gen2 ve SKAG bir birine karşı salınım göstermektedir. 1.06 Hz frekansa sahip mod içinde bölge 2’de bulunan Gen3 ve Gen4 bir birlerine karşı salınımlar göstermektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, SKAG rüzgar türbininin güç sistemi kararlılığı üzerine etkileri özdeğer analizleri yardımı ile incelenmiştir. Analiz çalışmaları Kundur’un iki bölgeli güç sistemi

modeli üzerinde gerçekleştirilmiş ve temel duruma ait özdeğer sonuçları rüzgar türbininin bulunduğu durumlara ait özdeğerler ile kıyaslanarak rüzgar türbinin etkileri gösterilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar incelendiği zaman ilk olarak güç sisteminde mevcut bulunan bir senkron generatör SKAG rüzgar türbini ile yer değiştirdiği zaman bu generatörün bulunduğu bölgeye ait lokal modlar ve bölgelerarası mod üzerinde sönümlenme etkisi yaparak güç sistemini salınımlı kararlılık açısından iyileştirici etkiler sağlamış diğer bölgeye ait lokal mod üzerinde ise belirgin bir etki göstermemiştir. Bu sonuç SKAG'lerin senkron generatörlere göre yapısal olarak daha iyi sönümlenmeye sahip olmaları ve sönümlenme sağlamak için senkron generatörlere göre güç sistemine daha az bağımlı olmalarındandır.

6. Kaynaklar

1. Yıldırım, B. and Gencoglu M. T. (2017). Impact of Microgrid on Power System Voltage Stability. *2nd International Conference on Advances in Engineering and Technology (RTET-2017)*, Penang (Malaysia) 158–162.
2. Sharkh, S. M., Abu-Sara, M. A., Orfanoudakis, G. I., and Hussain B. (2014). Power electronic converters for microgrids. John Wiley & Sons.
3. Hatziargyriou, N. (2014). Microgrids Architectures and Control. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
4. GLOBAL WIND STATISTICS 2017. <http://gwec.net/global-figures/graphs/>. Erişim Tarihi:10.204.2018.
5. Kong, S. Y., Bansal, R. C., and Dong, Z. Y. (2012). Comparative small-signal stability analyses of PMSG-, DFIG- and SCIG-based wind farms. *Int. J. Ambient Energy*, **33**: 87–97.
6. Chandra, D. R. *et al.* (2014). Impact of SCIG, DFIG wind power plant on IEEE 14 bus system with small signal stability assessment. *2014 18th Natl. Power Syst. Conf. NPSC 2014*.
7. He, P., Wen, F., Ledwich, G., Xue, Y., and Huang, J. (2015). Investigation of the Effects of Various Types of Wind Turbine Generators on Power-System Stability. *J. Energy Eng.* **141**:1–10.
8. Lopez, Y. U. and Navarro, J.A.D. (2008). Small signal stability analysis of wind turbines with squirrel cage induction generators. *2008 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am.*
9. Kundur, P. *et al.* (2004). Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions. *IEEE Trans. Power Syst.* **19**:1387–1401,.
10. Mondal, D., Chakrabarti, A. and Sengupta, A. (2014). Power System Small Signal Stability Analysis and Control. Elsevier.
11. Sauer, P. W. and Pai, M. A. (1998). Power System Dynamics and Stability.: Pearson Education Pte. Ltd. Singapore.
12. Gomez-Exposito, A., Coneho, A.J. and Canizares, C. (2009) Electric Energy Systems Analysis and Operation. CRC Press Taylor@Francis Group.
13. Krismanto, A. U., Mithulanathan, N, and Kamwa, I. (2018). Oscillatory stability assessment of microgrid in autonomous operation with uncertainties. *IET Renew. Power Gener.* **12**: 494–504.
14. Kundur, P. (1994). Power system stability and control. New York: McGraw-hill.
15. Milano, F. (2008). PSAT Power System Analysis Toolbox.
16. Ackermann, T. (2005) .Wind power in power systems. Wiley Online Library.