



Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi

International Journal of Technological Sciences



Araştırma Makalesi/Research Article

Güç sistemlerinde farklı PSS modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi

Muhammet DEMİRBAŞ^{1*}, M. Kenan DÖŞOĞLU²

¹Beykent Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Anahtar Kelimeler

Güç sistemleri
Küçük sinyal kararlılığı
Farklı PSS modelleri
UPFC-POD

Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 10.01.2022

Kabul Tarihi: 20.04.2022

Öz: Düşük frekanslı salınımların sönümlenmesi güç sistemleri kararlılığı açısından önemli bir konudur. Bu salınımlar güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) tarafından sönümlenmektedir. Son yıllarda güç elektroniği tabanlı Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları güç sistemlerinde kararlılığı çalışmalarında verimli bir şekilde kullanılmaktadır. Bu çalışmada farklı PSS modelleri, FACTS cihazlarının en gelişmiş olan Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC) ve Güç Salınım Sönümlenmesi (POD) modeli birlikte koordinasyon kontrolünün sağlanması amacıyla kullanılmıştır. Senkron generatörlerde kullanılan PSS modellerinin yanı sıra Otomatik Gerilim Regülatörü (AVR) ve Türbin Yöneticisi (TG) modelleri de kullanılmıştır. 2 alanlı, 4 makinalı güç sisteminde küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışması için Güç Sistemleri Analizi Programı (PSAT) kullanılmıştır. Yapılan çalışma neticesinde farklı PSS modellerin UPFC-POD ile birlikte kullanılmasında açılabilir hız, gerilim, aktif ve reaktif güç karşılaştırmaları yapılmış olup, küçük sinyal kararlılığı analizleri yorumlanmıştır.

Atf için/To Cite:

Demirbaş M. Döşoğlu M.K. Güç sistemlerinde farklı PSS modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(1), 11-22, 2022.

Investigation of small signal stability with different PSS models and UPFC-POD in power systems

Keywords

Power systems
Small signal stability
Different PSS models
UPFC-POD

Article history:

Received: 10.01.2022

Accepted: 20.04.2022

Abstract: The damping of small frequency oscillations is an important issue in terms of power system stability. These oscillations are damped by the power system stabilizer (PSS). In recent years, power electronics based Flexible AC Transmission System (FACTS) devices have been used efficiently in power system stability studies. In this study, different PSS models, the most advanced model of FACTS devices Unified Power Flow Control (UPFC) and Power Oscillation Damping (POD) were used to provide coordination controller. In addition to PSS models used in synchronous generators, Automatic Voltage Regulator (AVR) and Turbine Governor (TG) models were also used. Small signal stability analysis was carried out in a 2-field, 4-machine system. Power Systems Analysis Program (PSAT) was used for the simulation study. As a result of the study, angular velocity, voltage, active and reactive power comparisons were made in the use of different PSS models with UPFC-POD, and small signal stability analyzes were interpreted.

1. Giriş

Son yıllarda elektrik enerjisindeki taleplerin artışı, yeni üretim ünitelerinin enterekte sisteme dahil edilmesi ve iletim hatlarına daha çok yatırım yapılması gibi zorlukları ortaya çıkarmaktadır. Bu gibi zorlukları en düşük seviyeye indirmek için Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemlerinin kullanılması

günümüzde popüler olmaktadır. Bu kompanzasyon sistemleri FACTS cihazları olarak bilinmektedir. Statik ve dinamik kararlılık analizlerinin yanı sıra güç kapasitesini arttırmada da FACTS cihazlarının çok başarılı olduğunu söyleyebiliriz. FACTS cihazları; Statik Senkron Kompanzator (STATCOM), Statik Var Kompanzator (SVC), Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC), Tristör Kontrollü Seri Kompanzator (TCSC) ve

* İlgili yazar/Corresponding author: kenandosoglu@duzce.edu.tr

Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC)'den oluşmaktadır. FACTS cihazlarının en gelişmiş modeli olan UPFC hem güç sistemlerinde meydana gelen salınımların sönümlenmesinde hem de güç sisteminin gerilim, açı, empedans ve akım kontrolünde etkili olmaktadır. Salınımların sönümlenmesi açısından; UPFC, güç sistemi salınım sönümlenmesi (POD) model ile birlikte sistem üzerinde daha baskın olması için tercih edilmektedir.

UPFC-POD ikilisi; literatürde, özellikle de küçük sinyal kararlılığı çalışmalarında, yaygın bir şekilde yer almaktadır. Güç sistemlerinin kararlılık çalışmalarında, düşük frekanslı salınımların sönümlenmesinde, UPFC ile POD birlikte kullanılmaktadır. Tek makinalı ve iki alanlı sistemde UPFC-POD kullanılması ile salınımların etkili bir şekilde bastırıldığı ve küçük sinyal kararlılığının iyileştiği görülmektedir [1]. Güç sistemlerinde geçici kararlılık analizlerinde kullanılan güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) modelleri, yerel ve bölgeler arası salınımları ortadan kaldırmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Çok makinalı güç sistemlerinde farklı denetleyiciler ile kullanılan PSS modellerinin UPFC-POD ile birlikte kullanılmasında salınımların karşılaştırmaları yapılmış olup, küçük sinyal kararlılığı açısından sonuçlar yorumlanmıştır [2-3]. Güç sistemlerinde salınımların daha etkin sönümlenmesi için UPFC-POD parametreleri belirlenmektedir. Bunun için minimum tekil, hankel ve artık değer yaklaşımları kullanılmaktadır. Dinamik sistem yapısındaki değişimler sonucunda geliştirilen modeller ile salınımlar kısa süre içerisinde sönümlenmiş ve küçük sinyal kararlılığı artmıştır [4]. Çok makinalı güç sistemlerinde merkezi olmayan UPFC modeli POD ile birlikte kullanılmaktadır. UPFC'ye ilave bir denetleyici modelinin eklenmesi ile PSS modeli üzerinde geliştirmeler yapılmıştır. Geliştirilen bu modeller ile salınımların bastırılmasında etkili sonuçlar elde edilmiştir [5-6]. Dahası geliştirilen modellerde küçük sinyal kararlılığı karşılaştırmalarında elde edilen sonuçlar daha iyi olmuştur. Güç sistemlerinde salınımların sönümlenmesi için diğer tercih edilen modellemelerden birisi de koordineli kontrol modellemesidir. Koordineli kontrol modellerinde PSS, UPFC-POD modelleri eş zamanlı olarak çalışmaktadır. Çok makinalı güç sisteminde koordineli kontrol sayesinde küçük sinyal kararlılığı iyileşmiş olup, salınımların sönümlenmesi kısa süre içerisinde sağlanmıştır [7-9]. Yerel ve bölgeler arası frekans salınımlarını bastırmak için diğer kullanılan yöntemlerden birisi otomatik gerilim regülatörü (AVR) ve PSS koordineli kontrolüdür. AVR ve PSS'in çok makinalı güç sistemlerinde kullanılması ile salınımların daha kısa zaman içinde kontrol altına alındığı ve küçük sinyal kararlılığının iyileştiği görülmektedir [10-12]. Çok makinalı güç sistemlerinde

küçük sinyal kararlılığını iyileştirmek için senkron generator kontrolünde kullanılan AVR ve Türbin Yöneticisi (TG) modelleri tercih edilmektedir [13-14].

Küçük sinyal kararlılığında çok makinalı sistemin kararlılığı arttırmak, yerel ve bölgeler arası frekans salınımlarını azaltmak için bu çalışmada literatürden farklı olarak güç sisteminde UPFC-POD bulunuyorken; AVR, TG modelleri ile birlikte farklı PSS modelleri kullanılmıştır. 4 makinalı 2 alanlı test sisteminde; literatür [13] ve literatür [14]'de verilen en uygun AVR ve TG modelinin kullanılmasının yanı sıra farklı PSS modelleri ile yapılan analizler sonucunda sistem kararlılığının ve salınımların karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda en uygun PSS modelinin belirlenmesi ile sistemin geliştirilmesi çalışmada amaçlanmıştır.

2. Sistem Modelleri

2.1. Güç salınımları sönümlenmesi (POD)

Bir dengeleyici kazancı, arındırma filtresi ve faz kompanzâtörden oluşan POD denetleyicisi klasik PSS modeline benzemektedir. Arındırma sinyali POD çıkışını sabit durumda sıfır yapmaktadır. POD devresinde çıkış sinyali (V_{POD}) bir anti-windup sınırlayıcısına tabi tutulur ve dinamiğini küçük zaman sabiti (T_r) tarafından alır. Burada kullanılan K_{ω} kazancı, POD'un çalışmasındaki sönümlenme miktarını belirler. Faz kompanzâtör blokları ise giriş sinyalindeki faz gecikme telafisini sağlar [15].

POD denetleyicisinin parametrelerinin ayarlanması için bir dizi tasarım yöntemi bulunmaktadır. Bunlardan en popüler olanları frekans tepkisine, özdeğer hassasiyetine ve bu ikisinin birleşimine dayanmaktadır. Temelde tasarım iki aşamadan oluşur. Bunlardan ilki telafi edilecek fazın belirlenmesi ikincisi ise sönümlenme oranını elde etmek amacıyla denetleyici kazancının hesaplanmasıdır. POD'da kullanılan faz kompanzâtör bloğunun parametreleri denklem 1 ve denklem 2'de gösterilmiştir.

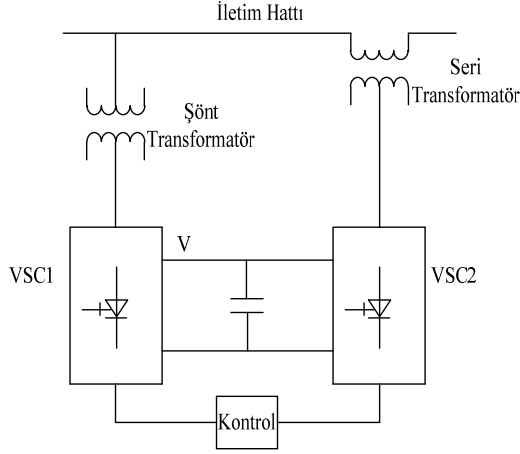
$$T = \frac{1}{\omega_n \sqrt{\alpha}} \quad (1)$$

$$\alpha = \frac{1 - \sin(\varphi/n)}{1 + \sin(\varphi/n)} \quad (2)$$

Burada; ω_n , sönümlenme frekansı; φ kompanse edilecek faz; n ise gecikmeli şebekelerin sayısıdır. İlk adımda parametreler ayarlanır. Daha sonraki adımda ise sönümlenme oranı belirlenmektedir. Genellikle sönümlenme oranı %10 olarak kabul edilmektedir [16].

2.2. Birleştirilmiş güç akış kontrolü (UPFC)

UPFC, bir statik senkronize şönt kompanzator (VSC1) ve bir seri kompanzator (VSC2)'den oluşmaktadır. UPFC'nin devre modeli şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. UPFC devre modeli

VSC1 ve VSC2 kompanzatorları, aralarında çift yönlü güç alışverişi sağlayan DC kapasitör ile birbirine bağlanmaktadır. VSC1, güç sistemine paralel bir transformatör vasıtasıyla bağlanmaktadır ve sistemin bağlantı noktalarına ayarlanabilir reaktif akım enjekte etmektedir. Bu bağlantı noktasındaki gerilimi kontrol etmek için reaktif güç sağlayan paralel bir akım kaynağına eşdeğerdir. VSC2, sisteme seri bir transformatör aracılığıyla bağlanır ve paralel taraftan farklı olarak bağlantı noktasına ayarlanabilir bir gerilim kaynağı ilave edilerek hat üzerindeki aktif ve reaktif gücü kontrol edebilmektedir [17]. UPFC'de kullanılan matematiksel ifadeler denklem 3 ile denklem 5 arasında gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_{Ad} \\ V_{Aq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_A \\ x_A & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{3d} \\ i_{3q} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_1 V_{DC} \cos \delta_1 \\ m_1 V_{DC} \cos \delta_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Bd} \\ V_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_B \\ x_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_2 V_{DC} \cos \delta_2 \\ m_2 V_{DC} \sin \delta_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Bd} \\ V_{Bq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -x_B \\ x_B & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2d} \\ i_{2q} \end{bmatrix} - \frac{1}{2} \begin{bmatrix} m_2 V_{DC} \cos \delta_2 \\ m_2 V_{DC} \sin \delta_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Burada; V_{Ad} VA bağlantı noktası geriliminin d eksen bileşeni, V_{Aq} VA bağlantı noktası geriliminin q eksen bileşeni, V_{Bd} VB bağlantı noktası geriliminin d eksen bileşeni, V_{Bq} VB bağlantı noktası geriliminin q eksen bileşeni, x_A TA transformatörünün reaktansı, x_B TB transformatörünün reaktansı, i_{3d} I₃ akımının d eksen bileşeni, i_{3q} I₃ akımının q eksen bileşeni, i_{2d} I₂ akımının

d eksen bileşeni, i_{2q} I₂ akımının q eksen bileşeni, V_{DC} DC kapasitör gerilimi, m_1 VSC1'in genlik modülasyon oranı, m_2 VSC2'nin genlik modülasyon oranıdır.

UPFC'de kullanılan DC kapasitörün enerji değişim oranı denklem 6'da gösterilmiştir.

$$C_{DC} V_{DC} \frac{\delta V_{DC}}{\delta t} = \text{Re}[\dot{V}_C \dot{I}_C^* - \dot{V}_D \dot{I}_D^*] \quad (6)$$

Burada, C_{DC} DC kapasitör, V_{DC} DC kapasitör gerilimi, \dot{V}_C paralel taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{I}_C^* paralel taraf dönüştürücünün akımının eşleniği, \dot{V}_D seri taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{I}_D^* seri taraf dönüştürücü akımının eşleniğidir.

UPFC'de kullanılan paralel ve seri dönüştürücülerin akım ve gerilim ilişkisi denklem 7 ile denklem 8'de gösterilmiştir.

$$(r_c + j\omega l_c) \dot{I}_C = \dot{V}_A - \dot{V}_C \quad (7)$$

$$(r_d + j\omega l_d) \dot{I}_D = \dot{V}_B - \dot{V}_D \quad (8)$$

Burada r_c , r_d , l_c ve l_d hat parametreleri, \dot{I}_C paralel taraf dönüştürücünün akımı, \dot{V}_C paralel taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{V}_A A bağlantı noktası gerilimi, \dot{I}_D seri taraf dönüştürücünün akımını, \dot{V}_D seri taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{V}_B B bağlantı noktası gerilimidir.

UPFC çalışmasında kondansatör geriliminin sabit olması gerekmektedir. Kondansatör geriliminin sabit olmasını sağlayacak olan ifade denklem 9'da gösterilmiştir.

$$\text{Re}[\dot{V}_C \dot{I}_C^* - \dot{V}_D \dot{I}_D^*] = 0 \quad (9)$$

Burada, \dot{V}_C paralel taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{I}_C^* paralel taraf dönüştürücünün akımının eşleniği, \dot{V}_D seri taraf dönüştürücünün gerilimi, \dot{I}_D^* seri taraf dönüştürücü akımının eşleniğidir.

2.3. Türbin yöneticisi (TG) modelleri

TG, senkron generatörün ilk frekans ayarlayıcısıdır. Düşme oranına ve mekanik moment limitine göre generatörün çalışma güç oranını tespit etmektedir. Senkron generatörün çalışma adımını kontrol ederek her durum için sistem kontrolü sağlamaktadır. Türbin yöneticisinin iki modeli bulunmaktadır [18]. Bunlar TG model 1 ve TG model 2 olarak isimlendirilir.

TG model 1'de açılma hızının referans değeri ve açılma hızının gerçek değeri arasındaki fark 1/R oranında bir

kazanç ile çarpılmaktadır. Bu kısmın çıkışında elde edilen aktif güç harici bir aktif güç ile toplanarak giriş gücü elde edilmektedir. Elde edilen giriş gücün minimum ve maksimum değerleri ayarlanarak çeşitli transfer fonksiyonları yoluyla mekanik gücün elde edilmesi sağlanmaktadır. Bu modelin matematiksel ifadesi denklem 10 ile denklem 15 arasında gösterilmiştir.

$$p_{in}^* = p_{order} + \frac{1}{R}(\omega_{ref} - \omega) \quad (10)$$

$$p_{in} = \begin{cases} p_{in}^* & \text{if } p^{\min} \leq p_{in}^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_{in}^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_{in}^* < p^{\min} \end{cases} \quad (11)$$

$$\dot{x}_{g1} = (p_{in} - x_{g1})/T_s \quad (12)$$

$$\dot{x}_{g2} = \left(\left(1 - \frac{T_3}{T_c} \right) x_{g1} - x_{g2} \right) / T_c \quad (13)$$

$$\dot{x}_{g3} = \left(\left(1 - \frac{T_4}{T_5} \right) \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) - x_{g3} \right) / T_5 \quad (14)$$

$$p_m = x_{g3} + \frac{T_4}{T_5} \left(x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) \quad (15)$$

TG model 2'de açılma hızının gerçek değeri ve referans değeri arasındaki fark $1/R$ kazançlı ve bir transfer fonksiyon bloğuyla çarpımı ile başlangıç mekanik güç ile toplanmaktadır. Elde edilen referans mekanik güç ifadesinin minimum ve maksimum değerleri ayarlanarak yeni mekanik güç elde edilmektedir. TG model 2'nin matematiksel ifadesi denklem 16 ile denklem 18 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_g = \left(\frac{1}{R} \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - x_g \right) / T_2 \quad (16)$$

$$p_m^* = x_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + p_m^0 \quad (17)$$

$$p_m = \begin{cases} p_m^* & p^{\min} \leq p_m^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & p_m^* > p^{\max} \\ p^{\min} & p_m^* < p^{\min} \end{cases} \quad (18)$$

Burada; ω_{ref} referans hız, p^{\max} maksimum türbin çıkışı, p^{\min} minimum türbin çıkışı, x_g , x_{g1} , x_{g2} , x_{g3} durum değişkeni dizinleri, p_m cebirsel değişken dizini, T_s yönetici zaman sabiti, T_c servo zaman sabiti, T_1 geçici kazanç zaman sabiti, T_2 yönetici zaman sabiti, T_3

geçici kazanç zaman sabiti, T_4 güç oranı zaman sabiti, T_5 reheat zaman sabiti, u bağlantı durumu (0,1) 'dir.

2.4. Otomatik gerilim regülatörü (AVR) modelleri

AVR, senkron generatörü referans geriliminde tutmaktadır. Bir gerilim sensörü yardımıyla çıkışını güncelleyerek referans gerilim ile karşılaştırır ve gerilimi değiştirmek için hata sinyalini kullanır. Senkron generatörde 3 tip AVR modeli kullanılmaktadır.

AVR model 1'de ölçülen gerilim ve referans gerilim değerleri farkları da alınarak bir transfer fonksiyona girmektedir. Transfer modelinin çıkışında rotor referans gerilimi elde edilmektedir. Rotor referans geriliminin minimum ve maksimum değeri ayarlandıktan sonra doyum oranı arasındaki fark alınarak uyarım gerilimi elde edilmektedir. AVR model 1'in matematiksel ifadesi denklem 19 ile denklem 23 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_m = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (19)$$

$$\dot{v}_{r1} = \frac{1}{T_1} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (20)$$

$$\dot{v}_{r2} = \frac{1}{T_4} \left[\left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) (v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m)) - v_{r2} \right] \quad (21)$$

$$v_r^* = v_{r2} + \frac{T_3}{T_4} \left[v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \quad (22)$$

$$\dot{v}_f = -\frac{1}{T_c} \left[v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \quad (23)$$

AVR model 2'de referans gerilim ve ölçülen gerilim değeri arasındaki fark ile uyarım gerilimi arasındaki fark bir kontrol bloğuna girmektedir. Bu kontrol bloğunun minimum ve maksimum değerleri ayarlanarak rotor gerilimi elde edilmektedir. Elde edilen rotor gerilimi ve doyum oranı arasındaki fark elektriksel transfer fonksiyon bloğu ile çarpılarak uyarım gerilimi elde edilmektedir. AVR model 2'nin matematiksel ifadesi denklem 24 ile denklem 27 arasında gösterilmiştir.

$$\frac{dv_{r1}}{dt} = \frac{1}{T_a} \left[Ka \left(v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{Kf}{Tf} v_f \right) - v_{r1} \right] \quad (24)$$

$$\frac{dv_m}{dt} = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (25)$$

$$\frac{dv_f}{dt} = -\frac{1}{T_e} \left[v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \quad (26)$$

$$\frac{dv_{r2}}{dt} = -\frac{1}{T_f} \left(\frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2} \right) \quad (27)$$

Burada model 1'den farklı olarak; K_a , yükseltici kazancı; K_f , dengeleyici kazancı; T_f , dengeleyici zaman sabitidir.

AVR model 3 diğer modellere nazaran daha basit yapıdır. Güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) giriş sinyali ifadesi transfer fonksiyon bloklarına girerek gerilimin minimum ve maksimum değerlerinin ayarlanması ile kaynak gerilimi elde edilmektedir. Bu modelin matematiksel ifadesi denklem 28 ile denklem 30 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_m = \frac{V - v_m}{T_r} \quad (28)$$

$$\dot{v}_r = \frac{1}{T_2} \left[\mu_0 \left(1 - \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) - v_r \right) \right] \quad (29)$$

$$\dot{v}_f = \frac{1}{T_e} \left[\left(v_r + \mu_0 \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) + v_{f0} \right) \frac{V}{V_0} - v_f \right] \quad (30)$$

Burada; v_{ref} , AVR'nin referans gerilimi; v_m , ölçüm devresi çıkışı; v_r , AVR, ve v_f geri besleme gerilimi; μ_0 , regülatör kazancı; T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 , AVR zaman sabitleri; T_e alan devresi sabiti; T_r , ölçüm süresi sabiti; $v_{r,min}$, v_r 'nin alt limiti; $v_{r,max}$, v_r 'nin üst limiti; v_{r1} yükseltici durum değişkeni; v_{r2} dengeleyici durum değişkenidir. S_e , uyarıcının doyumluk fonksiyonudur [17]. diğer modellerden farklı olarak; v_f alan gerilimi; v_{f0} alan offset gerilimi; V_0 ise bara offset gerilimidir.

2.5. Güç sistemleri kararlı kılıcısı (PSS) modelleri

PSS, senkron generatörde kullanılan diğer bir kontrol mekanizmasıdır. PSS modelin kullanılmasında ki asıl amaç geçici durumlar esnasında meydana gelen güç sistemi salınımlarını sönmüleyip, kısa zaman içerisinde sistemi kararlı hale getirmektir [19]. PSS modeli olarak 3 tip kullanılmaktadır.

PSS model 1'de; açısal hız, giriş gücü ve generatör gerilimleri toplanarak iki transfer fonksiyon bloğuna girmektedir. 2. transfer fonksiyon bloğunda gerilimin minimum ve maksimum değerleri ayarlandıktan sonra referans gerilim ifadesi ile toplanarak çıkış elde edilmektedir. PSS model 1'in matematiksel ifadeleri denklem 31 ve denklem 32'de gösterilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1) / T_\omega \quad (31)$$

$$\dot{v}_s = (K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s) / T_e \quad (32)$$

PSS model 2'de 4 transfer fonksiyon bloğunun sonunda gerilim ifadesinin minimum ve maksimum değerleri ayarlanarak senkron generatördeki kaynak gerilimi elde edilmektedir. Bu modelin matematiksel ifadesi denklem 33 ile denklem 36 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K_\omega V_{Sl} + v_1}{T_\omega} \quad (33)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_2} \left[\left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_\omega V_{Sl} + v_1) - v_2 \right] \quad (34)$$

$$\dot{v}_3 = \frac{1}{T_4} \left\{ \left(1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{Sl} + v_1) \right] - v_3 \right\} \quad (35)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left\{ v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left[v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{Sl} + v_1) \right] - v_s \right\} \quad (36)$$

PSS model 3'de güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) giriş sinyalinin 3 transfer fonksiyon bloğundan geçmesiyle senkron generatör kaynak gerilimi elde edilmektedir. 3. Transfer fonksiyon bloğunda gerilimin minimum ve maksimum değer aralığı ayarlanmaktadır. Bu modele ait matematiksel ifade denklem 37 ile denklem 40 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{v}_1 = -\frac{K_\omega V_{Sl} + v_1}{T_\omega} \quad (37)$$

$$\dot{v}_2 = \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) (K_\omega V_{Sl} + v_1) \quad (38)$$

$$\dot{v}_3 = -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4} \left(T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) \right] (K_\omega V_{Sl} + v_1) \quad (39)$$

$$\dot{v}_s = \frac{1}{T_e} \left[v_2 + \frac{T_3}{T_4} (K_\omega V_{Sl} + v_1) - v_s \right] \quad (40)$$

Burada; v_1 , v_2 ve v_3 durum değişkeni ifadeleri, v_s PSS çıkış sinyali, P_g PSS bağlı durumda senkron generatörün aktif gücü, V_g PSS bağlı durumda senkron generatör gerilimi, K_p aktif güç kazancı, K_ω PSS kazancı, K_v gerilim kazancı, T_ω arındırma zaman sabiti, T_1 birinci PSS zaman sabiti, T_2 ikinci PSS zaman sabiti, T_3 üçüncü PSS zaman sabiti, T_4 dördüncü PSS zaman sabiti, T_e anti-windup zaman sabitidir.

3. Küçük Sinyal Kararlılığı

Güç sistemlerinde kararlılık, bir güç sisteminin belirli bir çalışma koşulunda fiziksel bozulmaya maruz kalması ile birlikte çalışma dengesini sürdürme yeteneği olarak tanımlanırken küçük sinyal kararlılığı ise, güç sistemindeki küçük yük değişimleri ile birlikte generatörlerin senkronizmasını koruma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Sistemde meydana gelen kararsızlık durumları artan genlikte rotor salınımlarına sebep olmaktadır [19]. Küçük sinyal kararlılığı elektromanyetik salınım modları ve özdeğer analizi altında sınıflandırılmaktadır.

Elektromanyetik salınım modları açısından küçük sinyal kararlılığı oldukça önemlidir. Elektromanyetik salınım modları, yerel alan salınım modları ve bölgeler arası salınım modları olarak ikiye ayrılmaktadır. Yerel alan salınım modları, bir üretim tesisinde tek bir generatörle veya çok yakından bağlantılı olan ünite grubuyla ilişkilidir ve normalde 0.7 ile 2.0 Hz aralığındaki frekanslara sahiptir. Bölgeler arası salınım modları ise uzaktan bağlantılı olan generatör grupları ile ilişkilidir ve normalde 0.1 ile 1.0 Hz aralığındaki frekanslara sahiptir [20].

Küçük sinyal kararlılığına ulaşabilmek için bahsedilen modları sönmölemek gerekmektedir. Bu noktada AVR, PSS ve TG gibi kontrol cihazlarının sisteme entegrasyonu büyük önem taşımaktadır. Bu entegrasyon özdeğer analizi yardımıyla değerlendirilmektedir. Dinamik bir sistem davranışı denklem 41'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, z, u) \\ 0 &= g(x, z, u) \end{aligned} \quad (41)$$

Burada $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ durum değişkenleri vektörü; n , sistemin sırası; z , cebirsel çıktı değişkenlerinin (yani; V, θ) vektörü ve u cebirsel girdi değişkenlerinin vektörüdür. Denklem 16'nın doğrusallaştırılması güç sistemini incelemek için oldukça önemli bir adım olmaktadır. Bu yüzden diferansiyel denklemler bir

durum uzayı biçiminde ifade edilmektedir. Elde edilen doğrusal sistem ifadeleri denklem 42'de gösterilmiştir.

$$\begin{cases} \Delta \dot{x} = A\Delta x + B\Delta z \\ 0 = C\Delta x + D\Delta z \end{cases} \quad (42)$$

Burada; A , durum matrisi; B , girdi matrisi; C , çıktı matrisi ve D , katsayı matrisi olarak tanımlanmaktadır. Denklem 17'de kullanılan Δx ve Δz ifadeleri denklem 43'de gösterilmiştir.

$$\begin{cases} \Delta x = [\Delta \delta \quad \Delta \omega \quad \Delta e]^T \\ \Delta z = [\Delta \theta_1 \quad \Delta \theta_2 \quad \Delta \theta_3 \quad \Delta V_1 \quad \Delta V_2 \quad \Delta V_3]^T \end{cases} \quad (43)$$

Burada; $\Delta \delta$, rotor açısal konumu vektörü; $\Delta \omega$, rotor hızındaki değişim vektörü; Δe , diğer durum değişkenlerinin vektörü; $\Delta \theta_1$, $\Delta \theta_2$ ve $\Delta \theta_3$ senkron generatörlerin gerilim fazı değişim vektörleri; ΔV_1 , ΔV_2 ve ΔV_3 ise gerilim genliklerinin değişim vektörleridir.

Denklem 17'de doğrusallaştırılmış durum denklemi ifadeleri denklem 18'deki gibi hesaplanmaktadır. Son olarak denklem 44 çözülerek özdeğer λ_i elde edilir.

$$\det(A - \lambda_i I) = 0 \quad (44)$$

Burada; λ_i özdeğer ifadesi I ise birim matristir. σ_i özdeğer ifadesinin gerçek bileşeni ve ω_i sanal bileşeni olmak üzere; sönmöleme oranı (ζ_i) ve salınım frekansı (f_i) ifadeleri denklem 45 ile denklem 47 arasında gösterilmiştir.

$$\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i \quad (45)$$

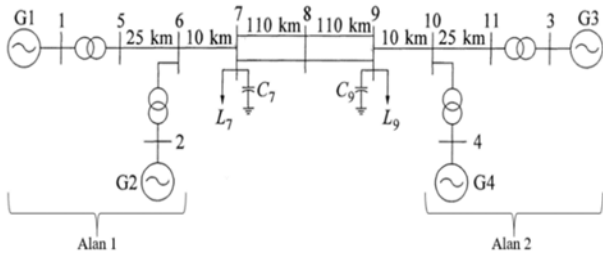
$$\zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \quad (46)$$

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (47)$$

Özdeğerlerin gerçek (reel) bileşeni salınımların sönmölenme durumunu, sanal (imajiner) bileşeni ise salınım frekansını ifade etmektedir.

4. Benzetim Çalışması

Bu çalışma; Güç Sistemi Analizi Programı (PSAT) kullanılarak, şekil 2'de gösterilen Kundur'un 4 makinalı, 2 alanlı test sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir [21].



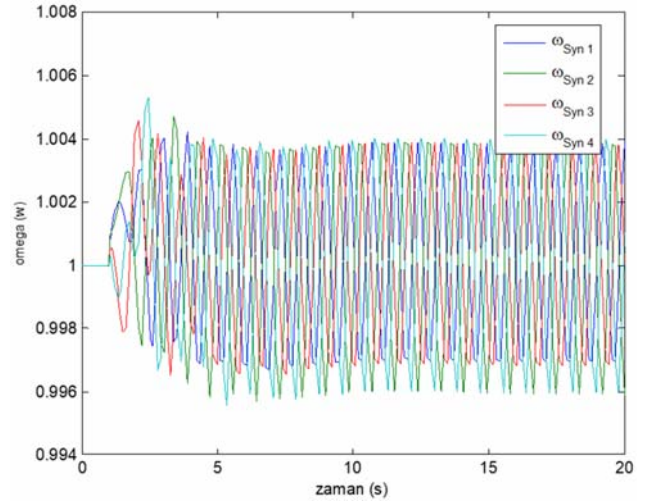
Şekil 2. 4 makinalı 2 alanlı test sistemi

Test sisteminde G1, G2, G3 ve G4 olmak üzere 6 numaralı derece modelinde çalışan toplam 4 senkron generatör vardır. G1 ve G2 senkron generatörlerinin bulunduğu kısım test sisteminin 1. alanını, G3 ve G4 senkron generatörlerinin bulunduğu kısım ise test sisteminin 2. alanını oluşturmaktadır. Senkron generatörlere AVR, TG ve PSS bağlı durumdadır. Bu test sisteminde toplam 11 bara bulunmaktadır. 3 numaralı bara hem salınım hem de generatör barasıdır. Geriye kalan 7 bara ise yük barasıdır. 7 ve 9 numaralı baralarda ZIP yük modeli de kullanılmıştır. 1-5, 2-6, 3-11, 4-10 numaralı iletim hatlarının arasında gerilim yükselten transformatörler kullanılmıştır. 8-9 numaralı iletim hatları arasında hat kopması oluşturmak amacıyla bir kesici bağlı durumda ve 8 numaralı barada ise üç faz hatası oluşturulmuş durumdadır. 7-8 numaralı iletim hattı arasında POD bulunurken, 8-9 numaralı iletim hatları arasında ise UPFC bulunmaktadır.

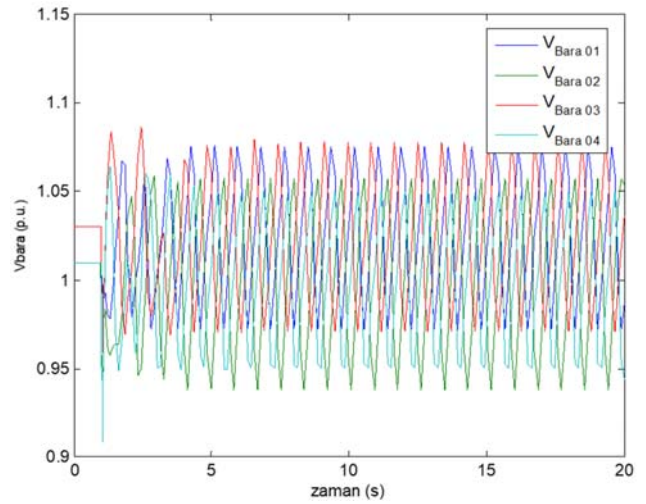
Bu çalışmada Kundur 4 makinalı, 2 alanlı test sistemi kullanılarak, AVR model 1'de, TG model 2'de çalışıyor olması durumunda farklı PSS modellerinin UPFC-POD ile birlikte kullanılma durumu incelenerek, açısal hız, gerilim, aktif ve reaktif güç karşılaştırmaları yapılmış olup, özdeğer analizi yardımıyla küçük sinyal kararlılığı açısından yorumlanmıştır.

4.1. Benzetim çalışması sonuçları

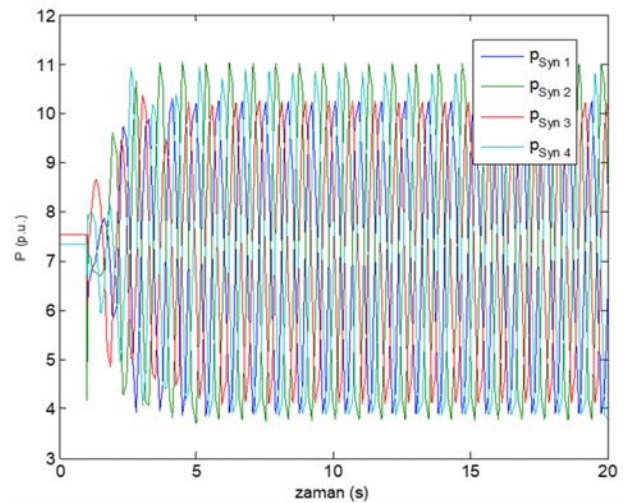
İlk olarak PSS model 1 kullanılmış ve senkron generatör açısal hızları şekil 3'de, senkron generatör bara gerilimleri şekil 4'de, senkron generatör aktif güçleri şekil 5'de, senkron generatör reaktif güçleri şekil 6'da ve özdeğerler grafiği şekil 7'de gösterilmiştir.



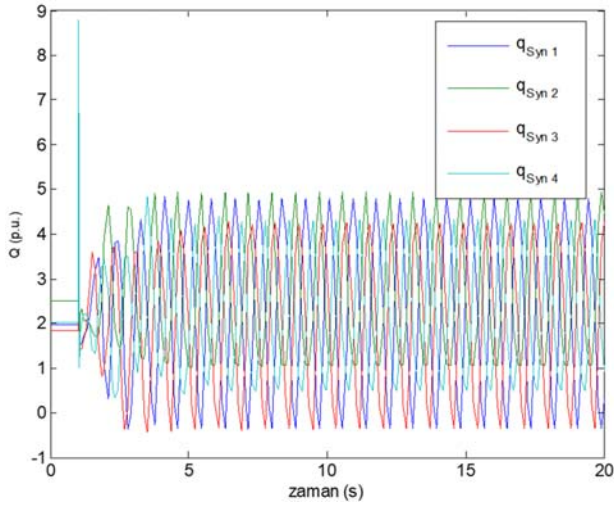
Şekil 3. PSS model 1- Senkron generatör açısal hızları



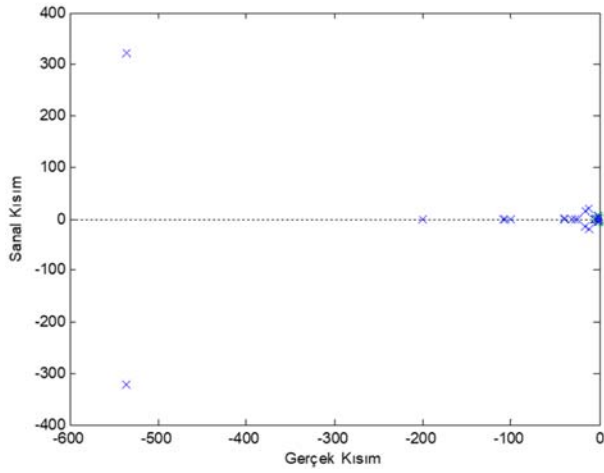
Şekil 4. PSS model 1- Senkron generatör bara gerilimleri



Şekil 5. PSS model 1- Senkron generatör aktif güçleri

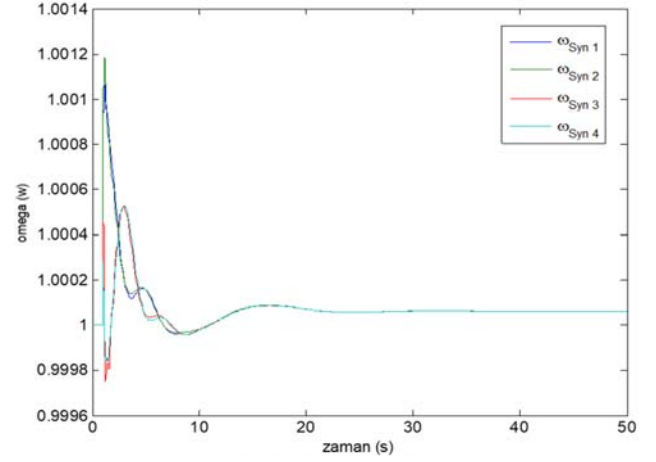


Şekil 6. PSS model 1- Senkron generatör reaktif güçleri

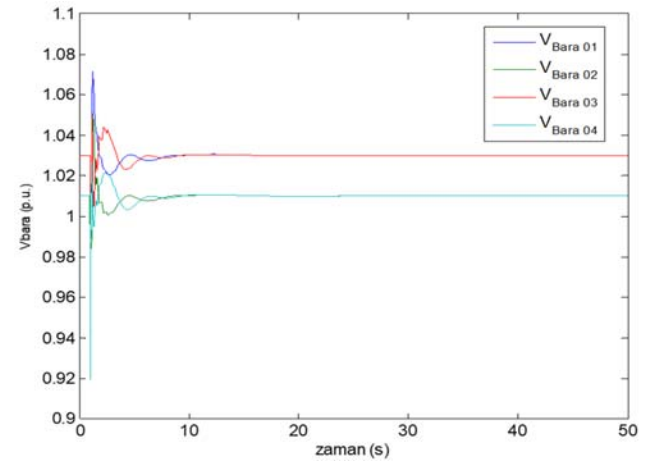


Şekil 7. PSS model 1- Özdeğer grafiği

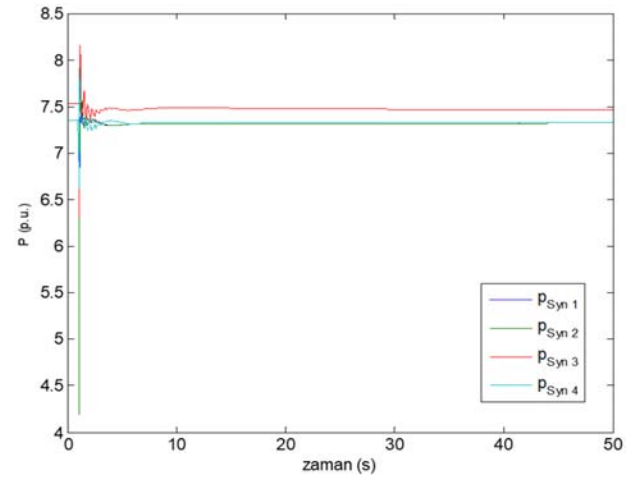
PSS model 1'in AVR ve TG ile birlikte kullanılması durumunda; açısız hız, gerilim, aktif ve reaktif güç değerlerinde salınımların arttığı ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir. Şekil 6'da verilen özdeğer grafiğinde kararlılığının 0 ile -200 gerçekteki kısım üzerinde olduğu görülmektedir. Diğer analizde AVR, TG ve PSS model 2'nin kullanılması ile geçici kararlılık analizi incelenmiştir. Senkron generatör açısız hız değerleri şekil 8'de, senkron generatör bara gerilimleri şekil 9'da, senkron generatör aktif güçleri şekil 10'da, senkron generatör reaktif güçleri şekil 11'de ve özdeğerler grafiği şekil 12'de gösterilmiştir.



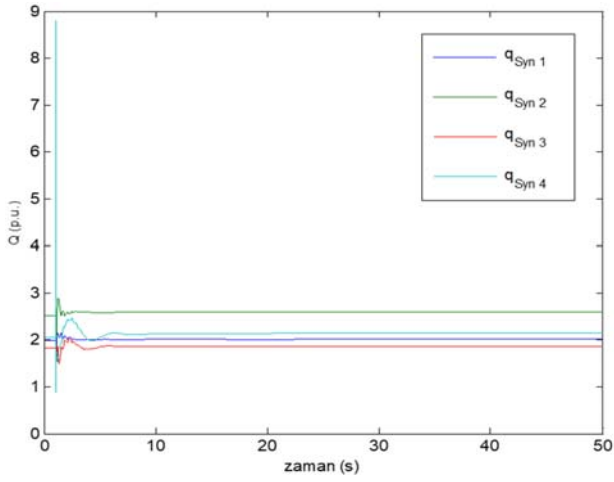
Şekil 8. PSS model 2- Senkron generatör açısız hızları



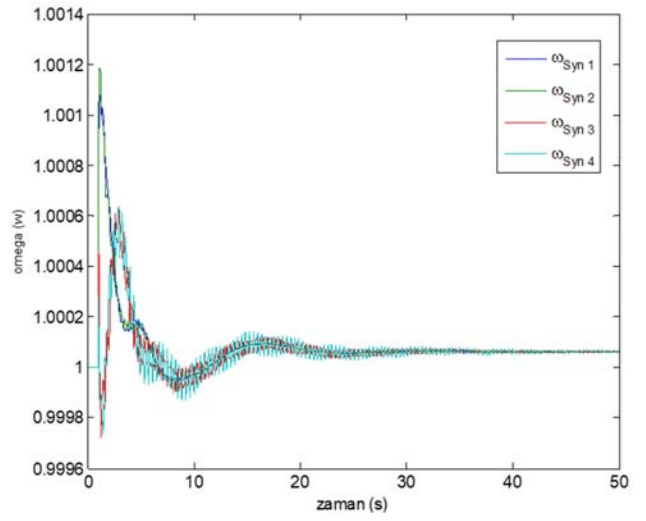
Şekil 9. PSS model 2- Senkron generatör bara gerilimleri



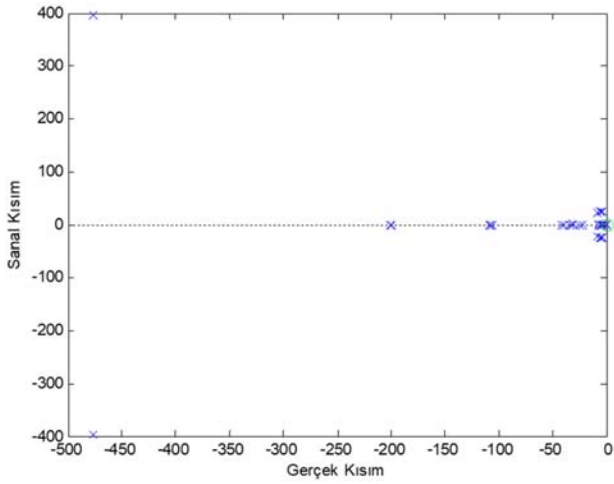
Şekil 10. PSS model 2- Senkron generatör aktif güçleri



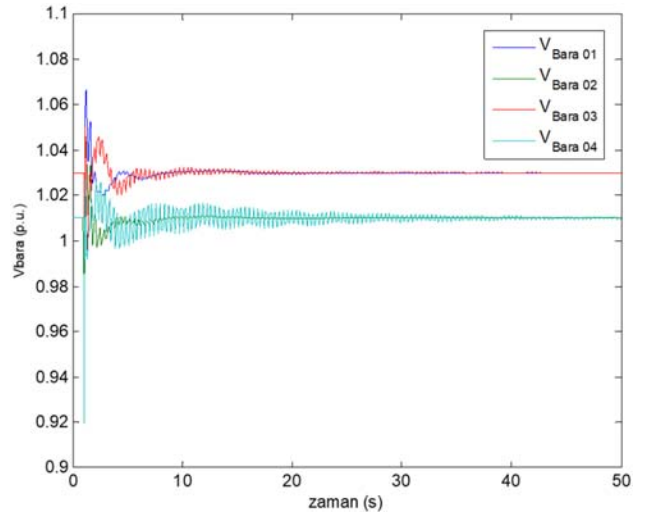
Şekil 11. PSS model 2- Senkron generatör reaktif güçleri



Şekil 13. PSS model 3- Senkron generatör açısal hızları

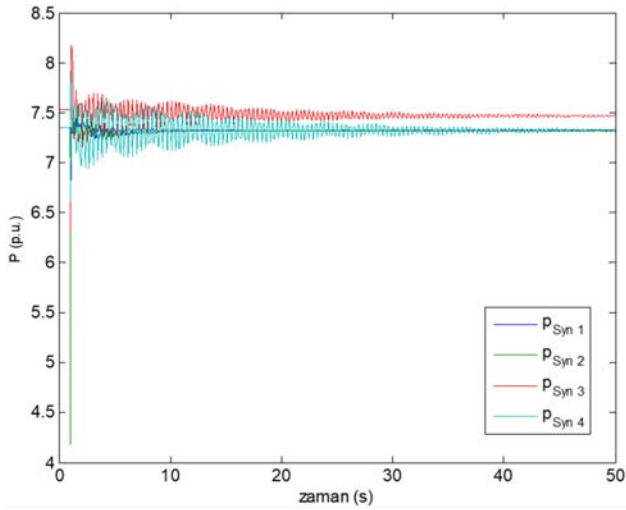


Şekil 12. PSS model 2- Özdeğer grafiği

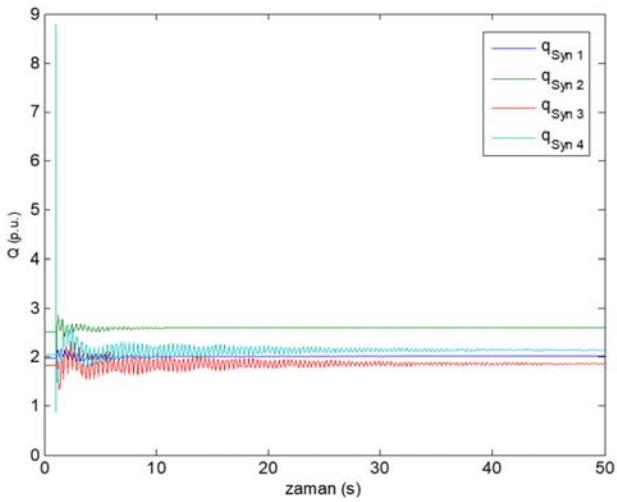


Şekil 14. PSS model 3- Senkron generatör bara gerilimleri

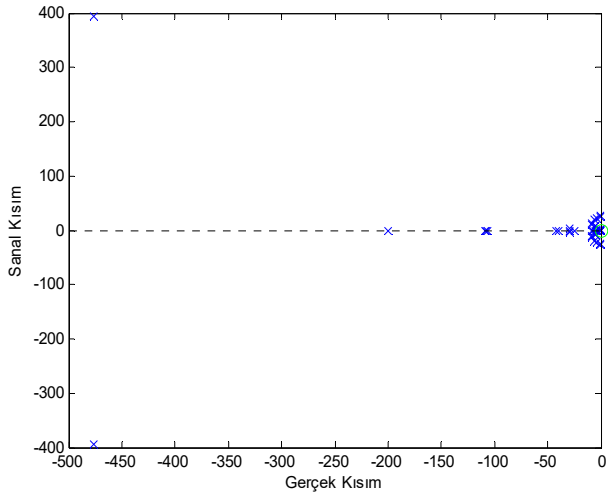
AVR, TG ve PSS model 2'nin birlikte kullanılması durumunda senkron generatör açısal hız değişimleri, senkron generatörün bağlı olduğu bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinin kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Dahası geçici kararlılık sonucu meydana gelen salınımların da sönümlendiği görülmüştür. Şekil 15'de elde edilen özdeğer şeklinde parametrelerin çok büyük bir kısmının sol tarafta toplandığı sağ tarafta herhangi bir parametrenin kalmadığı tespit edilmiştir. Son olarak AVR, TG ve PSS model 3'ün geçici kararlılık analizi incelenmiş olup, elde edilen sonuçlar şekil 13 ile 16 arasında gösterilmiştir. Özdeğerler grafiği ise Şekil 17'de gösterilmiştir.



Şekil 15. PSS model 3- Senkron generatör aktif güçleri



Şekil 16. PSS model 3- Senkron generatör reaktif güçleri



Şekil 17. PSS model 3- Özdeğer grafiği

AVR, TG ve PSS model 3'ün birlikte kullanıldığı durumda senkron generatör açılma hızı, senkron generatörün bağlı olduğu bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinde salınımların azaldığı sistemin belirli bir süre kararlı hale geldiği görülmüştür. PSS model 3'de salınımların sönümlenmesi zaman almaktadır. Şekil 17'de verilen özdeğer analizinde ise sistem parametrelerinin belirli bir oranda sol tarafta olduğu görülürken, diğer parametrelerin 0 noktasında ve sağ tarafta kaldığı görülmüştür.

PSS 1, 2 ve 3 numaralı çalışma modeli kullanıldığı durumda elde edilen özdeğer sonuçları sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 1. PSS model 1'in kullanıldığı durum

No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-2.0039±j6.4784	29.55	1.0311	Yerel alan
2	-1.3168±j6.5725	19.64	1.0460	Yerel alan
3	-3.6173±j0.6393	98.47	0.1018	Bölgeler arası
4	-0.2625±j0.6107	39.49	0.1000	Bölgeler arası
5	-0.3388±j3.5477	09.51	0.5646	Bölgeler arası

Tablo 2. PSS model 2'nin kullanıldığı durum

No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-7.8582±j2.0070	96.89	0.3194	Bölgeler arası
2	-7.9725±j1.9122	97.24	0.3043	Bölgeler arası
3	-3.7460±j0.6364	98.59	0.1013	Bölgeler arası
4	-0.5928±j1.6417	33.96	0.2613	Bölgeler arası
5	-0.9960±j1.5126	55.00	0.2407	Bölgeler arası

Tablo 3. PSS model 3'ün kullanıldığı durum

No	λ	ξ (%)	f	Salınım Modları
1	-5.1995±j7.9678	54.65	1.2681	Yerel alan
2	-5.1526±j8.0946	53.70	1.2883	Yerel alan
3	-3.7001±j0.6570	98.46	0.1046	Bölgeler arası
4	-0.6067±j1.6454	34.59	0.2619	Bölgeler arası
5	-1.0094±j1.4969	55.91	0.2382	Bölgeler arası

Özdeğer tablosunda sadece senkron generatörlerin baskın olduğu durumlar gösterilmiştir. Tüm özdeğerler kompleks sayı olarak bulunmuştur. Dolayısıyla bu özdeğerlerin salınımlı modlar ile ilişkili olduğu söylenilebilir. Kompleks özdeğerlerde gerçeğe bileşen sönümlenmeyi, sanal bileşen ise salınımların sıklığını göstermektedir. Bu çalışmada salınım sıklığının en fazla olduğu model PSS model 1, en az olduğu model ise PSS model 2 olarak belirlenmiştir. PSS modelleri içerisinde küçük sinyal kararlılığı açısından en iyi sonucun PSS model 2'ye, en kötü sonucun ise PSS model 1'e ait olduğu belirlenmiştir.

5. Sonuçlar

Küçük sinyal kararlılığında kullanılan denetleyici modellerinin en uygun olanını seçmek sistem kararlılığının zamanı ve salınımı açısından çok önemli olmaktadır. Bu çalışmada, yeterli sönümlemeyi sağlamak için UPFC-POD ile PSS, AVR ve TG'nin en uygun kontrol modellerinin seçimleri yapılarak karşılaştırmalar yapılmıştır. Dahası uygun PSS, AVR ve TG modellerin kullanılması ile küçük sinyal kararlılığı analizi gerçekleştirilmiştir. Bunun için benzetim çalışmasında AVR ve TG modellerin literatürde en uygun olarak belirtilenleri (AVR model 1 ve TG model 2) kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda PSS model 2'nin tercih edilmesi ile küçük sinyal kararlılığı açısından en iyi sonuçlar bulunurken, PSS model 1'in tercih edilmesinde en kötü sonuçlar elde edilmiştir. PSS model 2'nin kullanılması ile açısız hız, gerilim, aktif ve reaktif güç değerlerinin kısa zaman içerisinde kararlı hale geldiği görülmüştür. Bu çalışma ile farklı test sistemlerinde PSS, AVR ve TG modellerinin UPFC-POD ile birlikte kullanılmasının yanı sıra şebeke bağlantılı rüzgar türbinlerinin sisteme ilave edilmesi, farklı mod karşılaştırmaları ve küçük sinyal kararlılığı analizlerinin incelenmesine zemin hazırlamıştır.

Kaynaklar

- [1] Ayres HM, Kopcak I, Castro MS, Milano F, Da Costa VF. A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(6), 896-909, 2010.
- [2] Martins LFB, Araujo PB, Fortes EV, Miotto E., Gamino BR. Design of the PSSs, PI-UPFC and PI-UPFC-POD controllers using the Firefly Algorithm *The 12th Latin American Congress on Electricity Generation and Transmission*, Mar del Plata, Argentina, 12-15 Kasım 2017.
- [3] Dhurvey SN, Chandrakar VK. Optimized POD in coordination with UPFC for damping of power system oscillations. *43rd International Universities Power Engineering Conference*, Padova, Italy, 1-4 Eylül 2008.
- [4] Pandey RK, Singh NK. UPFC control parameter identification for effective power oscillation damping. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(6), 269-276, 2009.
- [5] Furini MA, Pereira ALS, Araujo PB. Pole placement by coordinated tuning of Power System Stabilizers and FACTS-POD stabilizers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33(3), 615-622, 2011.
- [6] Magaji N, Mustafa MW. Relative gain array Interaction Analysis of UPFC Device for damping Oscillations. *International Journal of Circuits, Systems and Signal Processing*, 2(5), 124-132, 2011.
- [7] Makkar CR, Dewan L. Simultaneous coordination of Power System Stabilizer and UPFC for improving dynamic stability of multimachine system. *IEEE 6th India International Conference on Power Electronics*, Kurukshetra, India, 8-10 Kasım 2014.
- [8] Hussain AN, Malek F, Rashid MA, Mohamed L, Mohd Affendi NA. Optimal coordinated design of multiple damping controllers based on PSS and UPFC device to improve dynamic stability in the power system. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-15, 2013.
- [9] Sadikovic R. *Use of FACTS devices for power flow control and damping of oscillations in power systems*. Doctoral dissertation, Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, 2006.
- [10] Dudgeon GJ, Leithead WE, Dysko A, o'Reilly J, McDonald JR. The effective role of AVR and PSS in power systems: Frequency response analysis. *IEEE Transactions on Power Systems*, 22(4), 1986-1994, 2007.
- [11] Dysko A, Leithead WE, O'Reilly J. Enhanced power system stability by coordinated PSS design. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1), 413-422, 2009.
- [12] Ramos RA. Stability analysis of power systems considering AVR and PSS output limiters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(4), 153-159, 2009.
- [13] Demirbaş M, Döşoğlu MK. Çok makinalı güç sistemlerinde farklı AVR modelleri, POD, UPFC ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. *Al-Farabi International Congress on Applied Sciences*, Nahçıvan Azerbaycan, 2-4 Mayıs 2021
- [14] Demirbaş M, Döşoğlu MK. Güç sistemlerinde farklı TG modelleri ve UPFC-POD ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. *II. International Hazar Scientific Researches Conference*, Bakü Azerbaycan, 10-11 Nisan 2021
- [15] Ayres HM, Kopcak I, Castro MS, Milano F, Da Costa VF. A didactic procedure for designing power oscillation dampers of FACTS devices. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 18(6), 896-909, 2010.
- [16] Castro MS, Ayres MS, Da Costa VF, Da Silva LCP. Impacts of the SSSC control modes on small-signal and transient stability of a power system. *Electric Power Systems Research*, 77(1), 1-9, 2007.
- [17] He P, Arefifar SA, Li C, Wen F, Ji Y, Tao Y. Enhancing oscillation damping in an interconnected power system with integrated

- wind farms using unified power flow controller. *Energies*, 12(2), 322, 2019.
- [18] Milano F. Documentation for PSAT Version 1.3.4. <https://dokumen.tips/documents/psat-134.html> (Eriřim tarihi: 23.12.2021)
- [19] Essallah S, Bouallegue A, Khedher A. Integration of automatic voltage regulator and power system stabilizer: small-signal stability in DFIG-based wind farms. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(5), 1115-1128, 2019.
- [20] Noroozian N, Andersson G. Damping of inter-area and local modes by use of controllable components. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 10(4), 2007-2012, 1995.
- [21] Kundur PS. Power System stability and control. McGraw-Hill, New York, 1994.