

Araştırma Makalesi/Research Article

### Güç sistemlerinde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi

M. Kenan DÖŞOĞLU<sup>ID</sup>\*1, Mahmut ÖZBAY<sup>ID</sup>2

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 81620, Düzce, Türkiye

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, 81620, Düzce, Türkiye

#### Anahtar Kelimeler

GSKK  
OGR  
TY  
Senkron generatör  
Küçük sinyal kararlılığı

#### Makale geçmişi:

Geliş Tarihi: 02.03.2022

Kabul Tarihi: 20.04.2022

**Öz:** Çok makinalı güç sistemlerinin sürekli, ekonomik ve güvenilir olarak çalışmasında benzetim programları yardımı ile kararlılık analizleri incelenmektedir. Güç sistemlerinde en yaygın olarak yapılan kararlılık analizi küçük sinyal kararlılığıdır. Bu çalışmada çalışmasında 4 makinalı 2 alanlı test sisteminde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığı analizi incelenmiştir. Farklı generatör denetleyici modelleri olarak Güç Sistem Kararlı Kılıcısı Denetleyicisi (GSKK), Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) ve Türbin Yöneticisi (TY) kullanılmıştır. Benzetim çalışması Güç Sistemleri Analiz Programı (PSAT)'da gerçekleştirilmiştir. Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durum ile GSKK, OGR ve TY modellerinin olduğu durumların karşılaştırmaları yapılmıştır. Karşılaştırmalar şekiller ve tablolar halinde verilmiştir. Bu çalışmada GSKK, OGR ve TY modellerinin senkron generatörde kullanılması sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği, parametrelerdeki salınımların azaldığı ve sistemin küçük sinyal kararlılığı açısından daha etkili sonuçlar verdiği görülmüştür.

#### Atf için/To Cite:

Döşoğlu M.K. Özbay M. Güç sistemlerinde farklı generatör denetleyici modelleri ile küçük sinyal kararlılığının incelenmesi. Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi, 14(2), 50-57, 2022.

### Investigation of small signal stability with different generator controller models in power systems

#### Keywords

PSS  
AVR  
TG  
Synchronous generator  
Small signal stability

#### Article history:

Received: 02.03.2022

Accepted: 20.04.2022

**Abstract:** Stability analyzes are examined with the help of simulation programs in the continuous, economical and reliable operation of multi-machine power systems. The most common stability analysis in power systems is small signal stability. In this study, small signal stability analysis was investigated with different generator controller models in a 4-machine 2-field test system. Power System Stabilizer (PSS), Automatic Voltage Regulator (AVR) and Turbine Governor (TG) are used as different generator controller models. The simulation study was carried out in the Power Systems Analysis Program (PSAT). Comparisons were made between the situation where there are no controllers in the synchronous generator and the situations with PSS, AVR and TG models. Comparisons are given in figures and tables. In this study, it was observed that the use of PSS, AVR and TG models in a synchronous generator stabilized the system in a short time, the oscillations in the parameters were reduced and the system gave more effective results in terms of small signal stability.

#### 1. Giriş

Güç sistemlerinin çalışma koşulları teknoloji ve endüstriyel gelişmeler nedeniyle karmaşık bir hal almaktadır. Karmaşık hal alan güç sistemlerinin benzetim programında analizleri ile kararlılık durumları incelenmektedir. Kararlılık analizleri

içerisinde en yaygın olarak kullanılanlarından birisi de küçük sinyal kararlılığı analizidir. Çok makinalı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı ile ilgili literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için kullanılan bazı yaklaşımlar bulunmaktadır. Bunlar faz ölçüm ünitesi, ayrık kısmi diferansiyel denklem

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

çözümleme modülü, uygun zaman çalışma modülü, doğrusal ayrık çalışma modülü ve yüksek zaman çözümleme ünitelerinde oluşmaktadır. Bu farklı yaklaşımlar sayesinde güç sistemlerinde daha az salınımların oluştuğu ve küçük sinyal kararlılığının iyileştiği görülmüştür [1-3]. Dahası farklı güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi için kullanılan eş zamanlı iterasyon, seçici model analizi ve modifiye edilmiş yöntemleri ile küçük sinyal kararlılığı analizlerinde benzetim çalışmasının performansının arttığı görülmüştür. Bu yöntemler ile sistemin özdeğerinin hesaplanmasında ve dinamik performansının sağlanmasında kullanılan yöntemlerin küçük sinyal kararlılığı üzerinde etkileyici sonuçlar verdiği görülmüştür [4-6]. Küçük sinyal kararlılığı analizinde kullanılan yaklaşımlardan birisi de sistem empedans kriteri belirleme yöntemidir. Yük değişimleri, giriş gerilim ve akım değişimine göre tasarlanan bu yöntem özdeğer hesaplamasında kolaylık sağlamaktadır. Sistem yüklenmesinde haritalama yaklaşımı kullanımı ile küçük sinyal kararlılığı iyileştirilmektedir [7-9]. Karmaşık yapılu güç sistemlerinde ağır yüklenme koşulları altında özdeğer analizinde farklı benzetim programları kullanılarak kapsamlı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile yüklenme koşullarına göre küçük sinyal kararlılığı karşılaştırmaları yapılmıştır [10]. Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizinde senkron generatörlerde kontrol modellerinin geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar bulunmaktadır. Bunlar OGR, GSKK, TY modelleridir. Bu modeller bazı çalışmalarda GSD uyarım modelleri ve OGR ile birlikte kullanılırken, diğer farklı çalışmalarda da GSD geliştirilerek farklı analiz yaklaşımları için kullanılmaktadır. Güç sistemlerinin çok alanlı çalışmalarında frekans düşmeleri ve salınımları azaltmada etkin olarak GSD modelleri uyarım modelleri ile birlikte kullanılmıştır. GSKK ve OGD modellerinin küçük sinyal kararlılığı ve özdeğer hesaplamalarında da etkili olduğu görülmüştür [11-13].

Yapılan bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan GSKK ve OGD modellerinin salınımların azaltılması ve küçük sinyal kararlılığının iyileştirilmesi için daha farklı bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemde GSKK ve OGD'ye ilaveten TY modelinin kullanılması düşünülmektedir. Senkron generatörde tek çıkış olarak kullanılan GSKK ve OGD modellerine ikinci bir çıkış olarak TY modeli eklenmiştir. Bu geliştirme ile makalenin literatüre farklı bir katkısı bulunmaktadır. Farklı tip modelleri olan bu modellerin karşılaştırmalar sonucu en optimum modelleri tespit edilmiş olup, bunlar ile senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumlar karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar sonucunda TY modelin sisteme ilave edilmesi ile etkili sonuçlar elde edildiği görülmüştür.

## 2. Senkron Generatörlerde Denetleyici Modelleri

Çok makinalı güç sistemlerinde senkron generatörün kontrolünde farklı denetleyiciler kullanılmaktadır. Bunların en yaygın olarak kullanılanları GSKK, OGD ve TY modelleridir. Senkron generatörde GSKK modeli geçici kararlılık esnasında sistemde meydana gelen salınımları azaltmaktır. Kullanılmasındaki asıl amaç geçici durumlarda esnasında meydana gelen güç sistemi salınımlarını sönümleyip, kısa zaman içerisinde sistemi kararlı hale getirmektir [14]. GSKK modeli senkron generatörlerde 3 farklı model olarak kullanılmaktadır. Bunlar GSKK 1, GSKK 2 ve GSKK 3 modelleridir. Bu üç modelin matematiksel ifadeleri denklem 1 ile denklem 3 arasında gösterilmektedir.

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -(K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1) / T_\omega \\ \dot{v}_s &= (K_\omega \omega + K_p P_g + K_v V_g + v_1 + v_s) / T_e\end{aligned}\quad (1)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -\frac{K_\omega V_{Sl} + v_1}{T_\omega} \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{T_2} \left[ \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (K_\omega V_{Sl} + v_1) - v_2 \right] \\ \dot{v}_3 &= \frac{1}{T_4} \left\{ \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) \left[ v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{Sl} + v_1) \right] - v_3 \right\} \\ \dot{v}_s &= \frac{1}{T_e} \left\{ v_3 + \frac{T_3}{T_4} \left[ v_2 + \frac{T_1}{T_2} (K_\omega V_{Sl} + v_1) \right] - v_s \right\}\end{aligned}\quad (2)$$

$$\begin{aligned}\dot{v}_1 &= -\frac{K_\omega V_{Sl} + v_1}{T_\omega} \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{T_4} v_3 + \frac{1}{T_4} \left( T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) (K_\omega V_{Sl} + v_1) \\ \dot{v}_3 &= -v_2 - \frac{T_2}{T_4} v_3 + \left[ 1 - \frac{T_3}{T_4} - \frac{T_2}{T_4} \left( T_1 - T_2 \frac{T_3}{T_4} \right) \right] (K_\omega V_{Sl} + v_1) \\ \dot{v}_s &= \frac{1}{T_e} \left[ v_2 + \frac{T_3}{T_4} (K_\omega V_{Sl} - v_1) - v_s \right]\end{aligned}\quad (3)$$

OGR modeller senkron generatörünü belirli bir referans gerilimde tutmaya yaramaktadır. Ölçülen gerilim değeri ile referans gerilimi karşılaştırması yapılarak hata sinyali üretmede kullanılmaktadır. Senkron generatörde OGR1, OGR 2 ve OGR 3 modelleri kullanılmaktadır. Bu üç modelin matematiksel ifadeleri denklem 4 ile denklem 6 arasında gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
\dot{v}_m &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\dot{v}_{r1} &= \frac{1}{T_1} \left[ \mu_0 \left( 1 - \frac{T_2}{T_1} \right) (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \\
\dot{v}_{r2} &= \frac{1}{T_4} \left[ \left( 1 - \frac{T_3}{T_4} \right) (v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m)) - v_{r2} \right] \\
v_r^* &= v_{r2} + \frac{T_3}{T_4} \left[ v_{r1} + \mu_0 \frac{T_2}{T_1} (v_{ref} - v_m) - v_{r1} \right] \\
\dot{v}_f &= -\frac{1}{T_e} \left[ v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right]
\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dv_{r1}}{dt} &= \frac{1}{T_a} \left[ Ka \left( v_{ref} - v_m - v_{r2} - \frac{Kf}{Tf} v_f \right) - v_{r1} \right] \\
\frac{dv_m}{dt} &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\frac{dv_f}{dt} &= -\frac{1}{T_e} \left[ v_f (1 + S_e(v_f)) - v_r \right] \\
\frac{dv_{r2}}{dt} &= -\frac{1}{T_f} \left( \frac{K_f}{T_f} v_f + v_{r2} \right)
\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
\dot{v}_m &= \frac{V - v_m}{T_r} \\
\dot{v}_r &= \frac{1}{T_2} \left[ \mu_0 \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) \right) - v_r \right] \\
\dot{v}_f &= \frac{1}{T_e} \left[ \left( v_r + \mu_0 \frac{T_1}{T_2} (v_{ref} - v_m) + v_{f0} \right) \frac{V}{V_0} - v_f \right]
\end{aligned} \quad (6)$$

TG senkron generatörün ilk frekans ayarlayıcısı modelidir. Frekansa bağlı olarak sistem kontrolünü adım adım kontrol eden devre modelidir. Senkron generatörde 2 çeşit TG modeli kullanılmaktadır. Bunlar TG1 ve TG 2 modelleridir. TG1 ve TG 2 modellerin matematiksel eşitlikleri denklem 7 ve denklem 8'de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
p_{in}^* &= p_{order} + \frac{1}{R} (\omega_{ref} - \omega) \\
p_{in} &= \begin{cases} p_{in}^* & \text{if } p^{\min} \leq p_{in}^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_{in}^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_{in}^* < p^{\min} \end{cases} \\
\dot{x}_{g1} &= (p_{in} - x_{g1}) / T_s
\end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_{g2} &= \left( \left( 1 - \frac{T_3}{T_c} \right) x_{g1} - x_{g2} \right) / T_c \\
\dot{x}_{g3} &= \left( \left( 1 - \frac{T_4}{T_5} \right) \left( x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) - x_{g3} \right) / T_5 \\
p_m &= x_{g3} + \frac{T_4}{T_5} \left( x_{g2} + \frac{T_3}{T_c} x_{g1} \right) \\
\dot{x}_g &= \left( \frac{1}{R} \left( 1 - \frac{T_1}{T_2} \right) (\omega_{ref} - \omega) - x_g \right) / T_2 \\
p_m^* &= x_g + \frac{1}{R} \frac{T_1}{T_2} (\omega_{ref} - \omega) + p_m^0 \\
p_m &= \begin{cases} p_m^* & \text{if } p^{\min} \leq p_m^* \leq p^{\max} \\ p^{\max} & \text{if } p_m^* > p^{\max} \\ p^{\min} & \text{if } p_m^* < p^{\min} \end{cases}
\end{aligned} \quad (8)$$

Burada;  $v_1$ , arındırma devre sinyali;  $v_s$ , GSKK çıkış sinyali;  $v_3$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$  ve  $T_4$ , GSKK zaman sabitleri;  $P_g$ , GSKK bağlı durumda senkron generatörün aktif gücü;  $V_g$ , GSKK bağlı durumda senkron generatör gerilimi;  $K_v$ , gerilim kazancı;  $T_\omega$ , arındırma zaman sabiti;  $T_e$ , anti-windup zaman sabiti,  $v_{ref}$ , AVR'nin referans gerilimi;  $v_m$ , ölçüm devresi çıkışı;  $v_r$ , AVR, ve  $v_f$ , geri besleme gerilimi;  $\mu_0$ , 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 doygunluk fonksiyonudur [14]. Diğer modellerden farklı olarak;  $V_{f0}$  ilk alan gerilimi,  $V_0$  ise bara offset gerilimi,  $\omega_{ref}$ , referans hız;  $p^{\max}$  maksimum türbin çıkışı;  $p^{\min}$  minimum türbin çıkışı;  $T_s$  yönetici zaman sabiti;  $T_c$  servo zaman sabiti;  $T_3$  geçici kazanç zaman sabiti;  $T_4$  güç oranı zaman sabiti;  $T_5$ , reheat zaman sabiti;  $u$  bağlantı durumudur.

### 3. Küçük Sinyal Kararlılığı

Küçük sinyal kararlılığı güç sistemindeki farklı yük değişimleri ile birlikte senkron generatörlerin senkronizmasının bozulmama durumu olarak tanımlanmaktadır. Küçük sinyal kararlılığı analizinde elektromekanik mod ve özdeğer analizi yaklaşımı kullanılmaktadır. Elektromekanik modda yerel ve bölgeler arası çalışmalardaki sistem frekans durumları

incelenmektedir. Özdeğerde ise yerel ve bölgeler arasındaki çalışmalarda sistemdeki salınımların sönümlenmesi ele alınmaktadır. Özdeğer analizinde sistem denge noktasında iken doğrusal olmayan bir sistem olduğu varsayılmaktadır. Doğrusal olmayan sistemdeki ilişki denklem 9 ve denklem 10'da gösterilmiştir.

$$\dot{x}_0 = f(x_0, u_0) = 0 \quad (9)$$

$$y_0 = g(x_0, u_0) \quad (10)$$

Burada,  $x_0$  ve  $u_0$  u denge noktasındaki durum ve giriş,  $y_0$  denge noktasındaki çıkış,  $x$  değeri,  $x_0$  durum değişkenindeki değişiklik olarak kabul edilebilir. Buna bağlı olan ilişki denklem 11'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \Delta \dot{x} \quad (11)$$

Burada,  $\Delta x$  bozulma olduğundaki  $x_0$  durumundaki farklılıktır. Buna bağlı olarak  $x$  değerinin türevi denklem 12'de gösterilmiştir.

$$\dot{x} = f[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (12)$$

Sistemdeki bozulma küçük sinyal kararlılığı hesaplanması küçük olduğu durumlarda gibi Taylor serisinin genişletmesi sağlanmaktadır. Buna göre giriş ve çıkış ifadelerinin Taylor serisindeki genişletilmesi denklem 13 ile denklem 18 arasında gösterilmiştir.

$$\dot{x}_n = \dot{x}_{n-0} + \Delta \dot{x}_n \quad (13)$$

$$= f_n[(x_0 + \Delta x), (u_0 + \Delta u)] \quad (14)$$

$$= f_n(x_0, u_0) + \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (15)$$

$$\dot{x}_n = \Delta \dot{x}_n \quad (16)$$

$$= \frac{\partial f_n}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial f_n}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial f_n}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (17)$$

$$\Delta y_m = \frac{\partial g_m}{\partial x_1} \Delta x_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \Delta x_m + \frac{\partial g_m}{\partial u_1} \Delta u_1 + \dots + \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \Delta u_q \quad (18)$$

Taylor seri açılımı hesaplamasında küçük sinyal kararlılığında kullanılan durum ve kontrol değişkeni ifadeleri denklem 19 ve denklem 20'de gösterilmiştir.

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (19)$$

$$\Delta y = C \Delta x + D \Delta u \quad (20)$$

Denklem 19 ve denklem 20'de kullanılan A, B, C ve D katsayılarının genişletilmiş hali denklem 21 ve denklem 22'de gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial u_q} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial x_m} \end{bmatrix}, D = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial u_q} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial g_m}{\partial u_1} & \dots & \frac{\partial g_m}{\partial u_q} \end{bmatrix} \quad (22)$$

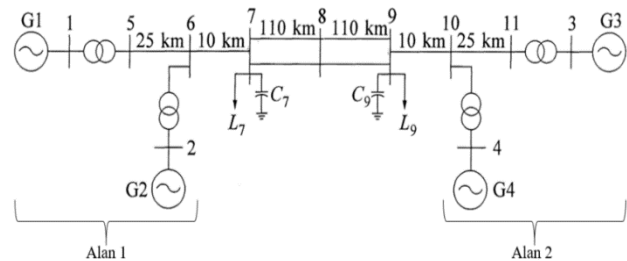
Küçük sinyal kararlılığındaki doğrusallaştırma işlemi için karakteristik denklem kullanılmaktadır. Karakteristik ifade denklem 23'de gösterilmiştir.

$$\det(A - \lambda I) = 0 \quad (23)$$

Burada,  $\lambda$  A matrisinin özdeğeridir.  $\lambda$  değeri genellikle bir sistemin kararlılığını temsil etmektedir. Sistemin kararlı olup olmaması 3 duruma göre belirlenmektedir.  $\lambda < 0$  ise sistem kararlıdır.  $\lambda = 0$  ise sistem kritik konumdadır.  $\lambda > 0$  ise sistem kararsızdır [15].

#### 4. Benzetim Çalışması

Bu çalışmada Kundur'un 2 bölge test sistemi üzerinde senaryolar üretilerek gerçekleştirilmiştir. Bu analizler Güç Sistemleri Analizi Programı'ndan (PSAT) kullanılmıştır [16]. Kundur 2 Bölge 4 generatörlü test sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir.

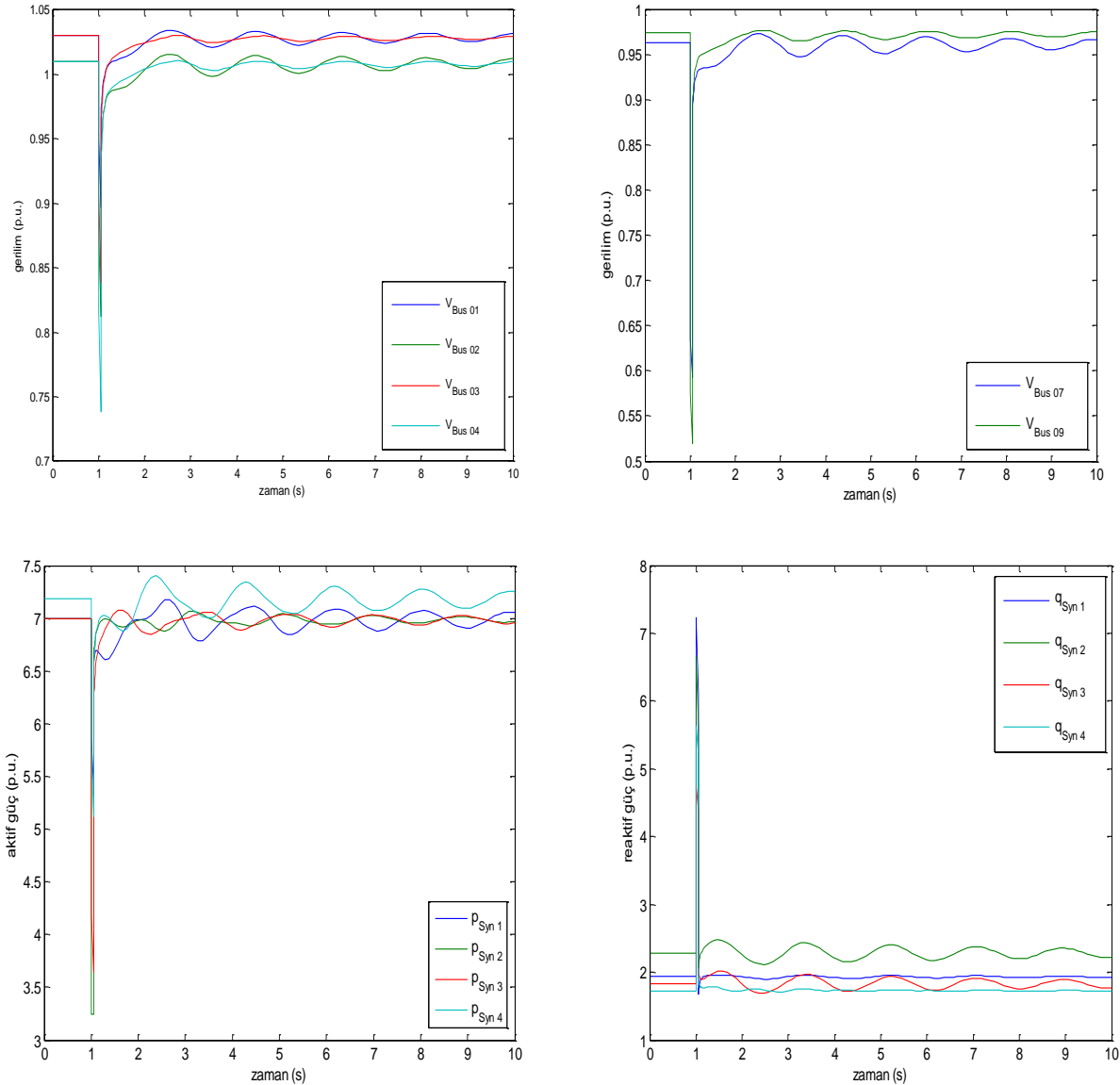


Şekil 1. Kundur 2 bölge 4 generatörlü test sistemi

Kundur'un iki bölge test sisteminde 1 adet salınım barası, 4 adet generatör, 12 adet iletim hattı, iki adet yük bulunmaktadır. İki bölmeli test sisteminde 1-5, 2-6, 3-11, 4-10 iletim hatlarında gerilimi yükselten transformatörler kullanılmıştır. Bu test sisteminde 3 numaralı bara hem salınım hem de generatör barası, 1, 2, ve 4 numaralı baralar generatör barası ve diğer 7 bara yük barasıdır. 7 ve 9 numaralı baralarda sabit empedans, sabit akım ve sabit aktif güç (ZIP) yük modeli 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.

## 5. Benzetim Çalışması Sonuçları

Benzetim çalışması sonuçları iki analizden oluşmaktadır. İlk analizde senkron generatörlerde herhangi bir denetleyici kullanılmadığı durum olurken, ikinci analizde senkron generatörlerde GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durumlardan oluşmaktadır. Senkron generatörlerde herhangi bir denetleyicinin kullanılmadığı durumdaki bazı bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimleri şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumda elde edilen sonuçlar

Senkron generatörde denetleyicilerin olmadığı durumda elde edilen sonuçlar incelenecek olursa bara

gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinin kararsız olduğu görülmektedir. Sistem

parametrelerinde geçici durum esnasında salınımların fazla olduğu tespit edilmiştir. Senkron generatörde

denetleyici kullanılmadığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları tablo 1'de gösterilmiştir.

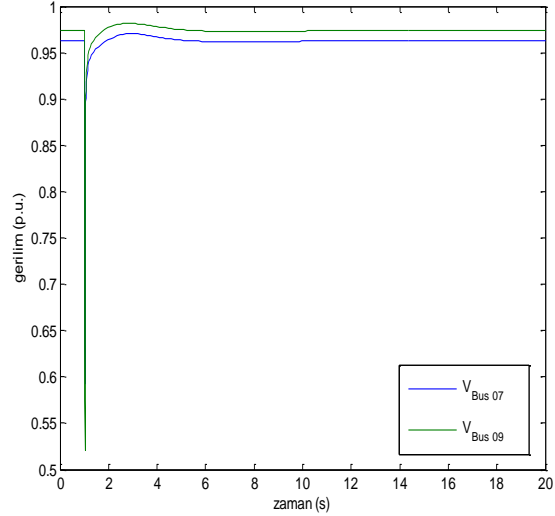
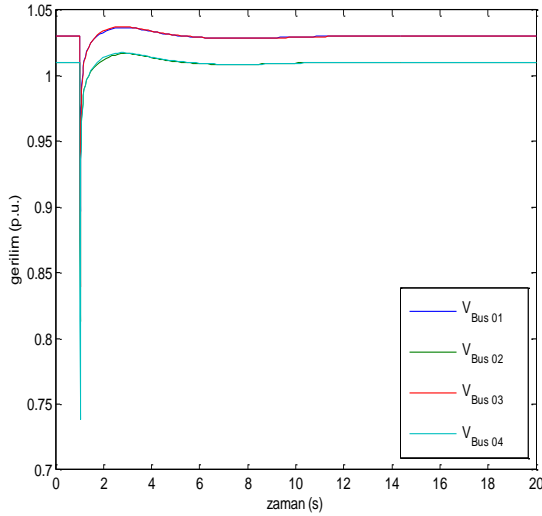
Tablo 1. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanılmadığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları

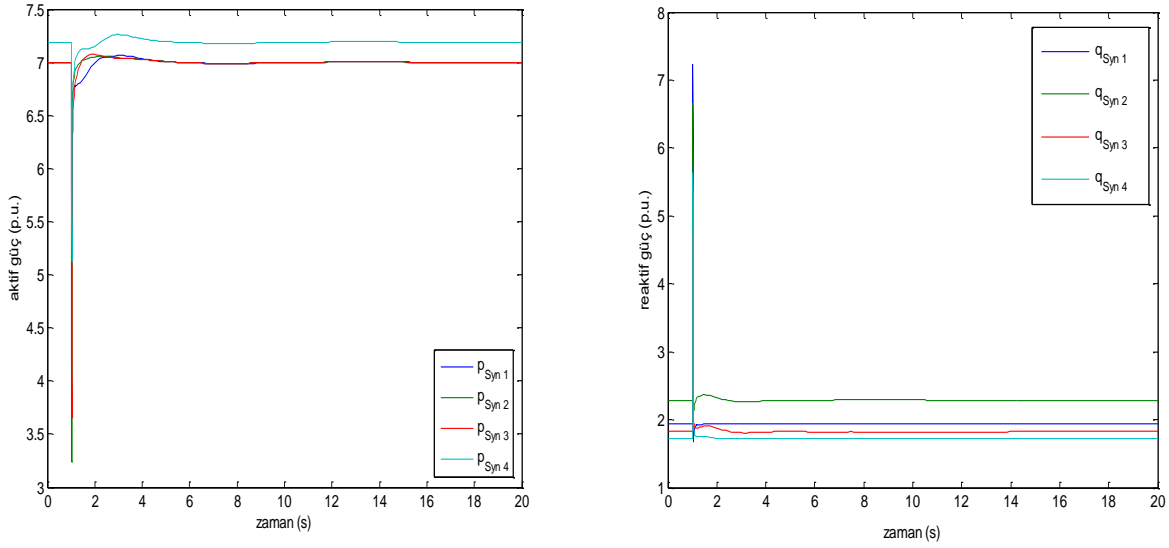
Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı $\zeta$ (%)	Katılım Faktörü (%)
Bölgeler Arası Mod-1	G <sub>1</sub>	-0.56 ± 6.79	1.0819	8.237	$\delta_1=25.6$ $\omega_1=25.6$
Bölgeler Arası Mod-2	G <sub>2</sub>	-0.56 ± 6.61	1.0522	8.475	$\omega_2=24.8$ $\delta_2= 24.8$
Yerel Mod-1	G <sub>4</sub>	-0.12 ± 3.46	0.5511	3.598	$\omega_4=18.8$ $\delta_4= 18.8$

Osilasyon sönümlenme oranları %3 ile %8 arası düşük seviyelerde olmasından dolayı sistemde sönümlenemeyen kararsız salınımlar bulunmaktadır. İlk senaryoda katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda  $\delta_1$  ve  $\omega_1$  olup analize %25.6 oranında katılmışlardır fakat bu sönümlenme oranı salınımları sönümlenmek için yeterli olmamaktadır. Denetleyici modelleri kullanılmadığı durumda baskın makineler açısından incelendiğinde

generatör 1, generatör 2 ve generatör 4'ün geçici durumdan etkilendiği görülmektedir. Çalışma modu olarak generatör 1 ve generatör 2'de bölgeler arası mod, generatör 4 yerel modda çalışmaktadır.

Bu çalışmadaki ikinci senaryoda senkron generatörde GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durum analizi gerçekleştirilmiştir. GSKK, OGD ve TY kullanıldığı durumdaki bazı bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimleri şekil 3'de gösterilmiştir.





Şekil 3. Senkron generatörde denetleyicilerin olduğu durumda elde edilen sonuçlar

Senkron generatörde GSKK, OGD ve TY model denetleyicilerin olduğu durumda elde edilen sonuçlar incelenecek olursa bara gerilimleri, senkron generatör aktif ve reaktif güç değişimlerinin kararlı olduğu görülmektedir. Sistem parametrelerinde geçici durum

esnasında salınımların denetleyiciler sayesinde sönümlendiği tespit edilmiştir. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanıldığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2. Senkron generatörde denetleyicilerin kullanıldığı durumdaki küçük sinyal kararlılığı sonuçları

Mod	Baskın Makineler	Özdeğerler	Osilasyon Frekansı (Hz)	Sönümlenme Oranı $\zeta$ (%)	Katılım Faktörü (%)
Yerel Mod-1	G <sub>1</sub>	-1.784 ± j3.89	0.6205	41.623	$\delta_1 = 21.57$
Yerel Mod-2	G <sub>2</sub> , G <sub>3</sub>	-1.745 ± j3.85	0.6133	41.271	$\delta_2 = 20.72$
Yerel Mod-3	G <sub>4</sub> , G <sub>1</sub>	-1.075 ± j1.98	0.3154	47.694	$S_4 = 17.11$ $\delta_1 = 15.13$

Senkron generatörde GSKK, OGD ve TY modelleri ilave edildiğinde her generatör kendi bölgesinde ve kendi arasında kararlılığa katkı sağlayıp bölgeler arası mod da birbirleriyle etkileşime geçmediği gözlenmiştir. Katılım faktöründe en etkili ilişkili değişkenler bölgeler arası modda  $\delta_1$  olup analize %21.57 oranında katılmıştır. Osilasyon sönümlenme oranları % 41 ile % 48 arasında yüksek seviyelerde olmasından dolayı sistemde sönümlenme olmasından dolayı salınımlar azalmaktadır. Denetleyici modelleri kullanıldığı durumda baskın makineler açısından incelendiğinde generatör 1, generatör 2, generatör 3 ve generatör 4'ün geçici durumdan etkilendiği görülmektedir. Çalışma modu olarak tümünün yerel modda çalıştığı görülmektedir.

## 6. Sonuçlar

Güç sistemlerinde küçük sinyal kararlılığı analizi sistemin çalışma bölgesi, özdeğeri, salınım ile sönümlenme frekansları ve katılım faktörlerini detaylı olarak ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada senkron generatörde denetleyicilerin kullanılmadığı durum ve kullanıldığı durum karşılaştırmaları yapılmış olup elde edilen sonuçlar detaylı olarak yorumlanmıştır. Sistemde denetleyicilerin kullanılması ile özdeğer sonuçlarının eksi sonsuza daha çok yaklaştığı görülmüştür. Buda sistemin kararlı hale geldiğini ortaya çıkarmaktadır. Senkron generatörlerde özellikle açılı ve açılma hız değerlerinin katılım faktörü içerisinde bulunduğu tespit edilmiştir. Salınımlar açısından da denetleyicilerin kullanılması ile sistemin kısa süre içerisinde kararlı hale geldiği ve salınımların

tamamının sönümlendiği görülmüştür. Çalışma modları açısından sistem değerlendirildiğinde denetleyicileri kullanılmadığı durumda hem bölgeler arası mod hem de yerel modda durumu oluşurken, denetleyicilerin kullanıldığı durumda yerel mod durumu oluşmaktadır. Bu çalışma ile literatürde yaygın olarak kullanılan GSKK ve OGR modellerine nazaran daha iyi sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu çalışma farklı test sistemlerinde senkron generatörlerde kullanılan denetleyiciler ile beraber yenilenebilir enerji kaynakları ve güç elektroniği tabanlı kompanzasyon sistemleri ile beraber kullanılmasına zemin hazırlamaktadır.

### Kaynaklar

- [1] Jia H, Yu X, Yu Y, Wang C. Power System Small Signal Stability Region with Time Delay, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 30(1), 16-22, 2008.
- [2] Milano F. Small-Signal Stability Analysis of Large Power Systems with Inclusion of Multiple Delays, *IEEE Transactions on Power Systems*, 31(4), 3257-3266, 2015.
- [3] Salim RH, Ramos RA. A Model-Based Approach for Small-Signal Stability Assessment of Unbalanced Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4), 2006-2014, 2012.
- [4] Wang L, Semlyen A. Application of Sparse Eigenvalue Techniques to the Small Signal Stability Analysis of Large Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(2), 635-642, 1990.
- [5] Kundur P, Rogers GJ, Wong DY, Wang L, Lauby MG. A Comprehensive Computer Program Package for Small Signal Stability Analysis of Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 5(4), 1076-1083, 1990.
- [6] Rouco L, Perez-Arriaga IJ. Multi-area Analysis of Small Signal Stability in Large Electric Power Systems by SMA, *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(3), 1257-1265, 1993.
- [7] Wang X, Yao R, Rao F. Three-Step Impedance Criterion for Small-Signal Stability Analysis in Two-Stage DC Distributed Power Systems, *IEEE Power Electronics Letters*, 1(3), 83-87, 2003.
- [8] Liu J, Feng X, Lee FC, Borojevich D. Stability margin monitoring for DC Distributed Power Systems Via Perturbation Approaches, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 18(6), 1254-1261, 2003.
- [9] Amin M, Molinas M. Small-Signal Stability Assessment of Power Electronics Based Power Systems: A Discussion of Impedance-and Eigenvalue-Based Methods, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(5), 5014-5030, 2017.
- [10] Angelidis G, Semlyen A. Improved Methodologies for The Calculation of Critical Eigenvalues in Small Signal Stability Analysis, *IEEE Transactions on Power Systems*, 11(3), 1209-1217, 1996.
- [11] Liu Z, Yao W, Wen J. Enhancement of Power System Stability Using A Novel Power System Stabilizer with Large Critical Gain, *Energies*, 10(4), 449, 2017.
- [12] Law KT, Hill DJ, Godfrey NR. Robust Controller Structure for Coordinated Power System Voltage Regulator and Stabilizer Design, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2(3), 220-232, 1994.
- [13] Quinot H, Bourles H, Margotin T. Robust Coordinated AVR+ PSS for Damping Large Scale Power Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(4), 1446-1451, 1999.
- [14] 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.
- [15] Westinghouse G. Electrical Transmission and Distribution Reference, *Westinghouse Electric & Manufacturing Company*, 1942.
- [16] Milano F. An Open-Source Power System Analysis Toolbox, *IEEE Transactions on Power systems*, 20(3), 1199-1206, 2005.