

MATLAB/Simulink ile tek-makinalı sonsuz-baralı bir güç sisteminin kararlılık analizi

Serdar EKİNCİ^{1,*}, Baran HEKİMOĞLU²

¹Batman Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Bilgisayar Müh. Böl., Batı Raman Kampüsü, Batman.

²Batman Üniversitesi Müh.-Mim. Fak. Elektrik-Elektronik Müh., Batı Raman Kampüsü, Batman.

Geliş Tarihi (Received Date): 16.10.2017

Kabul Tarihi (Accepted Date): 24.03.2018

Özet

Bu makalede tek-makinalı sonsuz-baralı (TMSB) bir güç sisteminin elektromekanik salınımlarının küçük-ışaret analizini ve geçici hal kararlılık analizini öğretmek için bir eğitim aracı sunuldu. İlgili araç dinamik ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi, analizi ve simülasyonu için güçlü bir yazılım paketi olan MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Geliştirilen MATLAB/Simulink tabanlı programın en belirgin özellikleri kullanım basitliği, esneklik ile kolay anlaşılır ve kolayca değiştirilebilen çok iyi yapılandırılmış kodlardır. Simülasyon sonuçları, geliştirilen programın elektrik güç sistemi kararlılık çalışmaları için güçlü ve elverişli bir araç olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte, geliştirilen program öğrenciler ile araştırmacıların açısız kararlılık olgusunu anlaması için çok yararlıdır.

Anahtar kelimeler: MATLAB, Simulink, güç sistemi kararlılığı, güç sistemi modellemesi, eğitimsel araç.

Stability analysis of a single-machine infinite-bus power system with MATLAB/Simulink

Abstract

An educational tool for teaching small-signal analysis of electromechanical oscillations and transient stability analysis of a single-machine infinite-bus (SMIB) power system is presented in this paper. The corresponding tool has been developed within the environment of MATLAB/Simulink, which is a potent software package for modeling, analysis and simulating dynamical and nonlinear systems. The most prominent features of the developed MATLAB/Simulink-based program are simplicity of use, flexibility, and

* Serdar EKİNCİ, serdar.ekinci@batman.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-7673-2553>

Baran HEKİMOĞLU, baran.hekimoglu@batman.edu.tr, <http://orcid.org/0000-0002-1839-025X>

very well-structured code, which is easy to understand and can be easily modified. Simulation results have demonstrated that the developed program is a powerful and favorable tool for electric power system stability studies. In addition, the developed program is very helpful to understand the angle stability phenomena for students and researchers.

Keywords: *MATLAB, Simulink, power system stability, power system modeling, educational tool.*

1. Giriş

Elektrik güç sistemlerinin en önemli ve en karmaşık çalışma konularından biri kararlılıktır. Güç sisteminin elektromekanik dinamik davranışı üzerindeki arızaların etkisini araştıran kararlılık çalışmaları geçici hal ve sürekli hal kararlılığı olmak üzere iki ana gruba ayrılır [1]. Sürekli hal kararlılığı ya da diğer adıyla küçük işaret kararlılığı, güç sisteminin küçük bozulmalar altında senkronizmayı koruma yeteneği olarak tanımlanır. Geçici hal kararlılığı ise büyük arızaya maruz kalan güç sisteminin senkronizasyonda kalma yeteneğidir. İletim sistemlerindeki arızalar, ani yük değişimleri, üretim birimlerinin kaybı, önemli iletim hatlarının devre dışı kalması ve hat anahtarlamaları büyük arıza örnekleri arasında sayılmaktadır [1, 2]. Bu tür arızalarda sistem cevabı, generatör rotor açıları, yük akışları, bara gerilimleri ve diğer sistem değişkenlerinin büyük sapmalarına yol açar. Sürekli hal kararlılığı yalnızca başlangıç çalışma koşullarının bir fonksiyonu olmasına rağmen, geçici hal kararlılığı ise başlangıç çalışma koşulları ve bozucu etkilerin toplamından oluşan bir fonksiyondur. Ayrıca, geçici hal kararlılığı çalışmaları büyük arızaları içerir ve sistem denklemlerini doğrusal hale getirmesine izin vermez. Bu sayılan vasıflar nedeniyle, geçici hal kararlılık analizi önemli ölçüde karmaşıktır [3]. Düşünülen farklı bozucu etkiler (büyük arıza) için tekrarlı analizlerin yapılması gereklidir. Geçici hal kararlılık analizi çalışmalarında sıklıkla rastlanılan bozucu etkiler çeşitli kısa devrelerdir. Bunların dışında, bağlı makinanın maksimum hızlanmasına sebep olduğu için generatör barasındaki üç fazlı kısa devre en ciddi arıza türü sayılmaktadır. [1, 2].

Güç sistemleri analizi, dinamiği ve kontrolü gibi çalışma alanlarında üstün performans sergileyen ve yüksek seviyeli program dillerinden olan MATLAB, MATHEMATICA ve MODELICA son yirmi yıldır araştırmacılar ve öğrenciler tarafından sıkça kullanılmaktadır [4]. Ancak araştırma ve eğitim alanlarında kullanıcı tercihlerinden dolayı MATLAB açık ara öndedir. MATLAB program dilinin en göze çarpan özellikleri ise matris tabanlı programlanması, mükemmel grafik çizim yetilerine sahip olması ve kontrol şeması tasarımını gayet kolaylaştıran bir grafik ortamı olan Simulink programını barındırmasıdır [1, 3].

MATLAB ile uyumlu çalışan ve çok önemli görsel bir yazılım ortamı olan Simulink dinamik ve doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesinde, tasarımında ve simülasyonunda kullanılır. Simulink kütüphanesinde bulunan ön tanımlı bloklar sayesinde sürekli ve ayrık sistemlerin modellerini basitçe inşa eder ve simülasyon sonuçlarını osiloskop ile görüntüler. Simulink programının kullanımı, başta matematik ve mühendislik dalları olmak üzere ve aynı zamanda güç sistemleri alanlarında çok hızlı şekilde artmaktadır [5-11].

Bu makalenin ana amacı, matematiksel temele dayalı, tek-makinalı sonsuz-baralı (TMSB) bir güç sisteminde kararlılık analizi yapabildiğini, ayrıca eğitim alanında da kullanılabilen MATLAB/Simulink tabanlı yeni bir paket program geliştirmektir. Tasarlanan program vasıtasıyla TMSB bir güç sisteminin başlangıç koşulları elde edilerek doğrusallaştırılmış sistemin öz-değer analizi ve zaman bölgesi simülasyonları kolaylıkla yapılabilir. Programın genişletilebilir olma özelliğini kanıtlamak açısından kontrolsüz sisteme güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) da ilave edilmiştir.

2. TMSB güç sistemi

Sonsuz bir baraya bağlı tek makinalı güç sisteminin diferansiyel-cebirselleştirilmiş doğrusal olmayan modeli genel olarak aşağıdaki şekilde tanımlanır [12].

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y, u) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \quad (1)$$

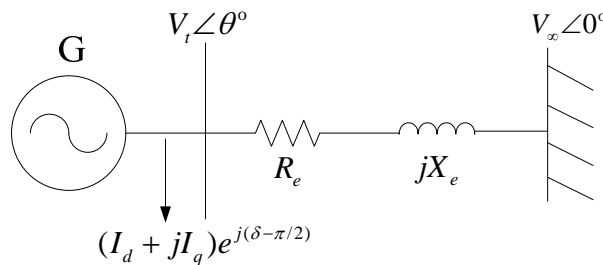
burada x durum vektörü ve y cebirsel değişkenler vektörüdür. f diferansiyel denklemlerden ve g stator cebirsel ve şebeke denklemlerinden oluşur. x^o , y^o ve u^o çalışma noktaları alınarak suretiyle $x = x^o + \Delta x$, $y = y^o + \Delta y$ ve $u = u^o + \Delta u$ bozucu işarete maruz kalmış değişkenler olarak alınır. Böylece (1) denklemi doğrusallaştırılırsa,

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A\Delta x + B\Delta y + E\Delta u \\ 0 &= C\Delta x + D\Delta y \end{aligned} \quad (2)$$

elde edilmiş olur.

2.1. Temel denklemler

Sonsuz baraya bir X_e dış reaktans ve R_e direnci vasıtasıyla bağlı tek makinalı sistemin şematik gösterimi Şekil 1'de verilmiştir. Generatör barasında yerel yükün olmadığı varsayımı yapılmıştır. Uyarma eklenmemiş akı-sönümlü modele ilişkin senkron makinanın diferansiyel ve cebirsel denklemleri aşağıda verildiği gibi ifade edilir [12]:



Şekil 1. Tek-makinalı sonsuz-baralı sistem.

2.1.1. Diferansiyel denklemler

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{do}}(E'_q + (X'_d - X_d)I_d - E_{fd}) \quad (3)$$

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s \quad (4)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H} \left[T_m - (E'_q I_q + (X_q - X'_d)I_d I_q + D(\omega - \omega_s)) \right] \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde δ rotor açılmal konumu, ω rotor açılmal hızı, ω_s senkron açılmal hızı, V_∞ sonsuz bara gerilimi, V_t generatör uç gerilimi, H senkron generatör atalet sabiti, D sönüm katsayısı, E_{fd} uyarma gerilimi, T'_{do} d -ekseni geçici zaman sabiti, E'_q q -ekseni geçici gerilimi, X_d ve X_q d -ekseni ve q -ekseni senkron reaktans bileşenleri, X'_d d -ekseni geçici reaktansı, I_d ve I_q d -ekseni ve q -ekseni endüvi akımları ve T_m mekanik güç girişi olarak tanımlanmaktadır.

2.1.2. Stator cebirsel denklemleri

$$V_t \sin(\delta - \theta) + R_s I_d - X_q I_q = 0 \quad (6)$$

$$E'_q - V_t \cos(\delta - \theta) - R_s I_d - X'_d I_d = 0 \quad (7)$$

$R_s = 0$ (stator direnci) olduğu varsayımı yapılarak ve generatör uç geriliminin büyüklüğü V_t olarak tanımlanırsa, önceki iki denklem aşağıdaki şekilde indirgenir.

$$X_q I_q - V_t \sin(\delta - \theta) = 0 \quad (8)$$

$$E'_q - V_t \cos(\delta - \theta) - X'_d I_d = 0 \quad (9)$$

$(V_d + jV_q)e^{j(\delta - \pi/2)} = V_t e^{j\theta}$ eşitliğinden $V_d = V_t \sin(\delta - \theta)$ ve $V_q = V_t \cos(\delta - \theta)$ olarak bulunur. V_d ve V_q (8) ve (9) nolu denklemlerde yerine koyulursa, stator cebirsel denklemleri,

$$X_q I_q - V_d = 0 \quad (10)$$

$$E'_q - V_q - X'_d I_d = 0 \quad (11)$$

şeklinde olur.

2.1.3. Şebeke denklemleri

Sonsuz barada sıfır faz açısı olduğu kabul edilerek şebeke denklemi yazılırsa:

$$I_G e^{j\gamma} = (I_d + jI_q) e^{j(\delta - \pi/2)} = \frac{(V_d + jV_q) e^{j(\delta - \pi/2)} - V_\infty \angle 0^\circ}{R_e + jX_e} \quad (12)$$

Çapraz çarpmadan sonra gerçekte ve sanal kısımlar ayrıldığında;

$$R_e I_d - X_e I_q = V_d - V_\infty \sin \delta \quad (13)$$

$$X_e I_d + R_e I_q = V_q - V_\infty \cos \delta \quad (14)$$

denklemleri elde edilir. Böylece tek makinalı sonsuz baralı sistem için (3)–(5) diferansiyel denklemlerini ve (10), (11), (13), (14) cebirsel denklemlerini bulmuş olduk.

2.2. Doğrusallaştırma işlemi ve K_1 – K_6 sabitlerinin türetilmesi

Adım 1: (10) ve (11) stator cebirsel denklemleri doğrusal hale getirilerek matris formda yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X_q \\ -X'_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} \quad (15)$$

Adım 2: (13) ve (14) yük-akışı denklemleri doğrusal hale getirilerek matris formda yazılırsa:

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_e & -X_e \\ X_e & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_\infty \cos \delta^\circ \\ -V_\infty \sin \delta^\circ \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (16)$$

Adım 3: (15) ve (16) denklemlerin sağ tarafları eşitlenip basitleştirilirse,

$$\begin{bmatrix} R_e & -(X_e + X_q) \\ (X_e + X'_d) & R_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -V_\infty \cos \delta^\circ \\ V_\infty \sin \delta^\circ \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (17)$$

Ayrıca 2×2 'lik bir matrisin tersi özelliğinden,

$$\begin{bmatrix} R_e & -(X_e + X_q) \\ (X_e + X'_d) & R_e \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} R_e & (X_e + X_q) \\ -(X_e + X'_d) & R_e \end{bmatrix} \quad (18)$$

Yukarıdaki denklemdeki Δ determinantı $\Delta = R_e^2 + (X_e + X_q)(X_e + X'_d)$ olarak verilebilir. (17) denklemindeki ΔI_d ve ΔI_q basitleştirme işlemlerinden sonra matris formda aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} (X_e + X_q) & -R_e V_\infty \cos \delta^\circ + V_\infty \sin \delta^\circ (X_e + X_q) \\ R_e & R_e V_\infty \sin \delta^\circ + V_\infty \cos \delta^\circ (X_e + X'_d) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \end{bmatrix} \quad (19)$$

Adım 4: Bu adımda (3)–(5) diferansiyel denklemleri doğrusallaştırılır. $v=\omega/\omega_s$ normalize edilmiş frekans olarak tanımlansın. Böylece doğrusal hale getirilmiş diferansiyel denklemler matris formda aşağıda verildiği gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{v} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T'_{do}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s \\ -\frac{I'_q}{2H} & 0 & -\frac{D\omega_s}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{(X_d - X'_d)}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{I'_q(X'_d - X_q)}{2H} & \frac{I'_d(X'_d - X_q) - E'_{qo}}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E_{fd} \\ \Delta T_m \end{bmatrix} \quad (20)$$

Adım 5: Bu adımda doğrusallaştırılmış denklemler K sabit terimleriyle ifade edilir. (19) denkleminde bulunan ΔI_d ve ΔI_q (20) denkleminde yerine koyulursa,

$$\Delta \dot{E}'_q = -\frac{1}{K_3 T'_{do}} \Delta E'_q - \frac{K_4}{T'_{do}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{do}} \Delta E_{fd} \quad (21)$$

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_s \Delta v \quad (22)$$

$$\Delta \dot{v} = -\frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta - \frac{D\omega_s}{2H} \Delta v + \frac{1}{2H} \Delta T_m \quad (23)$$

Yukarıdaki (21)–(23) denklemlerinde,

$$\frac{1}{K_3} = 1 + \frac{(X_d - X'_d)(X_q + X_e)}{\Delta} \quad (24)$$

$$K_4 = \frac{V_\infty (X_d - X'_d)}{\Delta} [(X_q + X_e) \sin \delta^o - R_e \cos \delta^o] \quad (25)$$

$$K_2 = \frac{1}{\Delta} [I'_q \Delta - I'_q (X'_d - X_q)(X_q + X_e) - R_e (X'_d - X_q) I'_d + R_e E'_{qo}] \quad (26)$$

$$K_1 = -\frac{1}{\Delta} [I'_q V_\infty (X'_d - X_q) \{(X_q + X_e) \sin \delta^o - R_e \cos \delta^o\} + V_\infty \{(X'_d - X_q) I'_d - E'_{qo}\} \{(X'_d + X_e) \cos \delta^o + R_e \sin \delta^o\}] \quad (27)$$

Adım 6: Generatör uç geriliminin doğrusallaştırılması aşağıdaki gibidir:

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (28)$$

(28) denklemi doğrusallaştırılırsa,

$$2V_t^o \Delta V_t = 2V_d^o \Delta V_d + 2V_q^o \Delta V_q \quad (29)$$

Böylece son denklem,

$$\Delta V_t = \frac{V_d^o}{V_t^o} \Delta V_d + \frac{V_q^o}{V_t^o} \Delta V_q \quad (30)$$

olur. (19) denklemini (15) denkleminde yerine yazarsak,

$$\begin{bmatrix} \Delta V_d \\ \Delta V_q \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} X_q R_e & X_q (R_e V_\infty \sin \delta^o + (X_e + X'_d) V_\infty \cos \delta^o) \\ -X'_d (X_e + X_q) & -X'_d (-R_e V_\infty \cos \delta^o + (X_e + X_q) V_\infty \sin \delta^o) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta E'_q \end{bmatrix} \quad (31)$$

elde edilir. Son olarak (31) denklemini (30) denkleminde yerine yazarsak aşağıdaki denklem bulunur.

$$\Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (32)$$

Son denklemdeki K_5 ve K_6 sabitleri ise,

$$K_5 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d^o}{V_t^o} X_q \left[R_e V_\infty \sin \delta^o + (X_e + X'_d) V_\infty \cos \delta^o \right] + \frac{V_q^o}{V_t^o} X'_d \left[R_e V_\infty \cos \delta^o - (X_e + X_q) V_\infty \sin \delta^o \right] \right\} \quad (33)$$

$$K_6 = \frac{1}{\Delta} \left\{ \frac{V_d^o}{V_t^o} X_q R_e - \frac{V_q^o}{V_t^o} X'_d (X_e + X_q) \right\} + \frac{V_q^o}{V_t^o} \quad (34)$$

Yerel düşük-frekanslı salınım çalışmaları için türetilen K_1 – K_6 sabitleri Heffron-Philips ve daha sonraları DeMello-Concordia tarafından geliştirilmiştir [12, 13].

2.3. Senkronizasyon ve sönüm momentleri

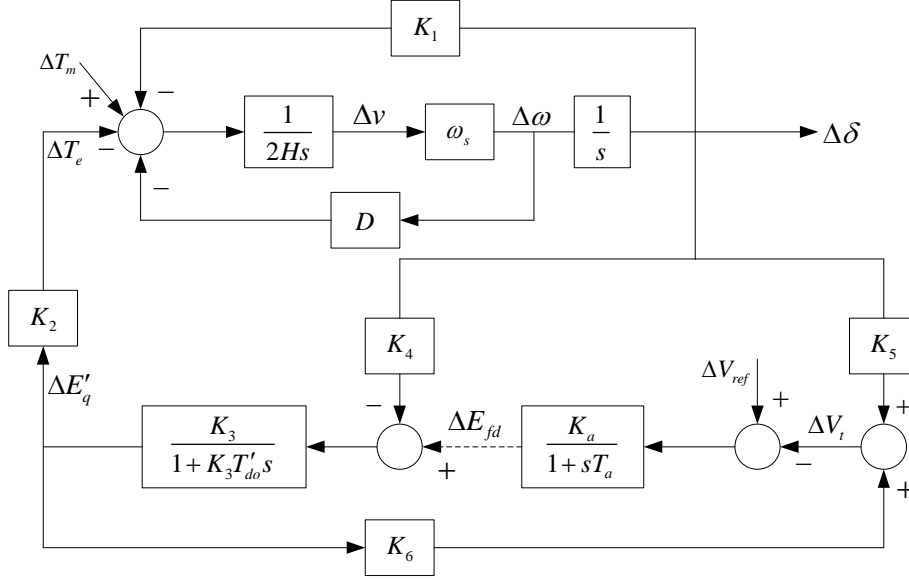
Şekil 1'deki tek-makinalı sonsuz-baralı sisteme durum-uzay denklemini aşağıda verilen hızlı uyarma ilave edilirse [12],

$$T_a \dot{E}_{fd} = -E_{fd} + K_a (V_{ref} - V_t) \quad (35)$$

Yukarıdaki denklemde T_a uyarma zaman sabiti, K_a uyarma kazancı ve V_{ref} referans gerilimini göstermektedir. Son denklem doğrusal hale getirilirse,

$$T_a \Delta \dot{E}'_{fd} = -\Delta E'_{fd} + K_a (\Delta V_{ref} - \Delta V_t) \quad (36)$$

Böylece (21)–(23) makine diferansiyel denklemlerini, (36) uyarma denklemini ve (32) cebirsel denklemini blok diyagram formunda Şekil 2’de gösterildiği şekilde yerine yerleştirilir. Şekilde ν normalize edilmiş frekans ve ω (rad/s) de gösterilmiştir.



Şekil 2. Doğrusallaştırılmış TMSB sistemin blok diyagramı (Noktalı kısım uyarmayı gösterir).

2.4. Durum uzayı modeli kullanılarak küçük işaret kararlılık analizi

Senkron makinanın durum uzayı gösterimi (21)–(23) denklemleri matris formda birlikte yazılınca elde edilir. $\Delta T_m=0$ varsayımı yapılarak, uyarma ilavesiz TMSB sistemin durum uzayı modeli aşağıda verildiği biçimdedir [13].

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{\nu} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s \\ -\frac{K_2}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D\omega_s}{2H} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta \nu \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta E_{fd} \quad (37)$$

Yukarıdaki denklemde ΔE_{fd} alan gerilimindeki pertürbasyondür. Uyarma olmadığında makinanın manuel kontrolde olduğu söylenir. Matrisin genellikle 1–3 Hz arasındaki elektromekanik moda karşılık gelen bir çift kompleks özdeğeri ve akı-sönümlü moda karşılık gelen bir negatif gerçek özdeğeri vardır. Uyarma olmadığında (diğer bir deyişle $K_a=0$ olduğunda) Şekil 2’deki blok diyagramda üç çevrim mevcuttur. Üsteki iki çevrim kompleks özdeğer çiftine karşılık gelen moment-açı çevrimleri olarak adlandırılır ve K_4 yoluyla $\Delta E'_q$ ’e bağlı olan alttaki çevrim ise gerçek özdeğer içindir. Alt çevrim pozitif geri-beslemeye katkı sağlar ve bunun sonucu olarak moment-açı özdeğerleri sol-yarı düzleme ve negatif gerçek özdeğer ise sağ-yarı düzleme hareket etme eğiliminde olurlar [13].

Uyarma sisteminin etkisini irdelemek için basitleştirilmiş gösterim vasıtasıyla uyarma eklersek, durum uzayı denklemi ΔE_{fd} bir durum değişkeni yapılarak değişecektir. (32) denklemindeki ΔV_t (36) denkleminde yerine yazılırsa aşağıdaki sonuç elde edilir.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{E}_{fd} &= -\frac{1}{T_a} \Delta E_{fd} + \frac{K_a}{T_a} (\Delta V_{ref} - \Delta V_t) \\ &= -\frac{1}{T_a} \Delta E_{fd} + \frac{K_a}{T_a} \Delta V_{ref} - \frac{K_a K_5}{T_a} \Delta \delta - \frac{K_a K_6}{T_a} \Delta E'_q \end{aligned} \quad (38)$$

Uyarma ilave bir negatif gerçektek özdeğer oluşturur. Şekil 2 için tüm durum uzayı modeli (39)'deki gibi olur.

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{E}'_q \\ \Delta \dot{\delta} \\ \Delta \dot{v} \\ \Delta \dot{E}_{fd} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 \\ -\frac{K_2}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D\omega_s}{2H} & 0 \\ -\frac{K_a K_6}{T_a} & -\frac{K_a K_5}{T_a} & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix}}_{A_{exciter}} \begin{bmatrix} \Delta E'_q \\ \Delta \delta \\ \Delta v \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{K_a}{T_a} \end{bmatrix} \Delta V_{ref} \quad (39)$$

2.5. Başlangıç koşullarının hesaplanması

TMSB sistemin akı-sönümlü modeli için durum değişkenlerin başlangıç koşulları (sürekli hal değerleri) sistematik şekilde aşağıdaki adımlar takip edilerek yapılır [12]. İşlemler yapılırken cebirsel ve durum değişkenlerdeki 0 üst indisi göz ardı edildi.

Adım 1: $I_G e^{j\gamma} = \frac{V_t \angle \theta^o - V_\infty \angle 0^o}{R_e + jX_e}$, den I_G ve γ hesaplanır.

Adım 2: $V_t e^{j\theta} + (R_s + jX_q) I_G e^{j\gamma}$, nın açısından δ hesaplanır.

Adım 3: $I_d + jI_q = I_G e^{j\gamma} e^{-j(\delta-\pi/2)}$ denkleminde yararlanılarak $I_d = I_G \sin(\delta - \gamma)$ ve $I_q = I_G \cos(\delta - \gamma)$ olarak hesaplanır.

Adım 4: $V_d + jV_q = V_t e^{j\theta} e^{-j(\delta-\pi/2)}$ denkleminde yararlanılarak $V_d = V_t \sin(\delta - \theta)$ ve $V_q = V_t \cos(\delta - \theta)$ olarak hesaplanır.

Adım 5: (11) denkleminde $E'_q = V_q + X'_d I_d$ olarak hesaplanır.

Adım 6: (3)–(5) ve (35) denklemlerindeki tüm türevler sıfıra eşitlenmek suretiyle

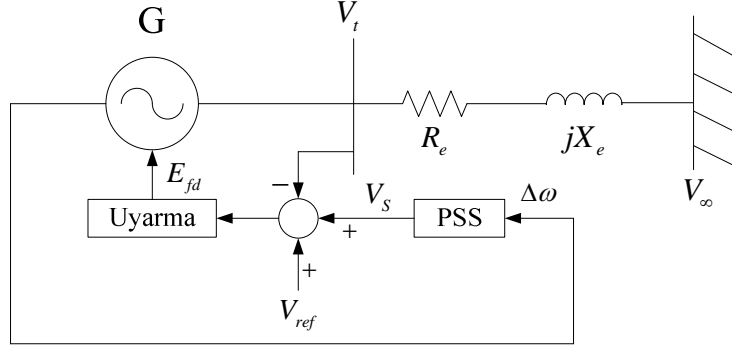
$$E_{fd} = E'_q + (X_d - X'_d) I_d, \quad V_{ref} = V_t + \frac{E_{fd}}{K_a}, \quad \omega_s = 2\pi f \quad \text{ve} \quad T_m = E'_q I_q + (X_q - X'_d) I_d I_q$$

olarak bulunur.

Bu adımlar yapılarak başlangıç değerlerin hesaplanması biter. Bu başlangıç değerleri küçük işaret kararlılık analizi ve geçici hal kararlılık çalışmalarında sistem koşullarını bilmemize olanak sağlar.

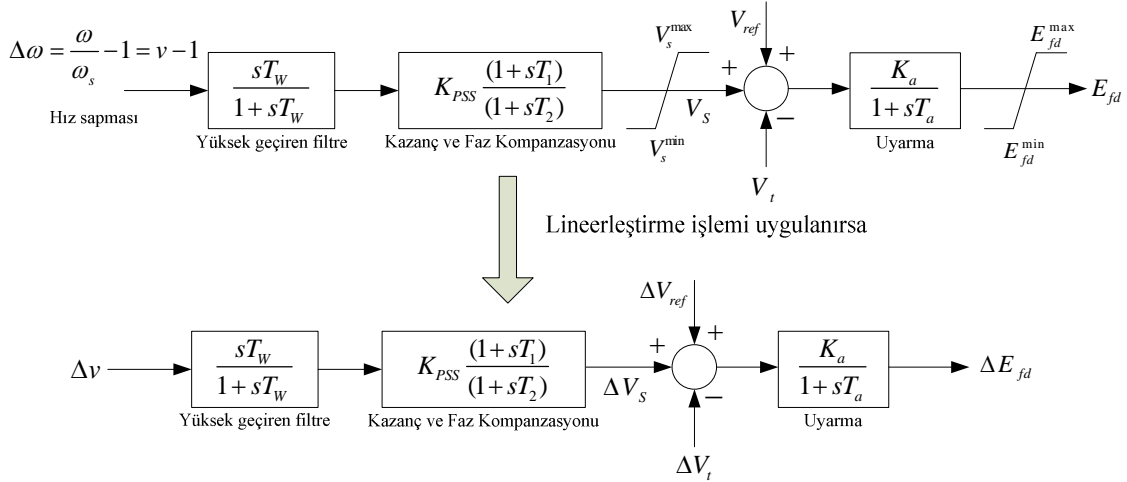
3. Güç sistemi kararlı kılıcılar

Çalışmanın bu kısmında, düşük-frekanslı salınımları sönmölemek maksadıyla kullanılan güç sistemi kararlı kılıcısı (PSS) tartışılacaktır. Şekil 3'te basit TMSB bir sistem gösterilmiştir. Bu sistemde küçük işaret salınımlarını iyileştirmek için bir PSS mevcuttur ve ayrıca makine hızı uyarma ile donatılmıştır.



Şekil 3. Uyarma ve PSS ilave edilmiş tek-makinalı sonsuz-baralılık sistemi.

PSS uyarmasını kontrol ederek generatör rotor salınımlarını bastırmak için bir çeşit elektrik-moment bileşeni üreten faz ilerlemeli-gerilemeli bir kompanseördür [3]. Basit yapısı ve uygulama kolaylığı özellikleri nedeniyle modern güç sistemi şebekelerinin vazgeçilmez tercihidir. Hız sapması girişli tek-aşamalı PSS'nin temel blok diyagramı Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4'te gösterilen güç sistemi kararlı kılıcısının kazanç K_{PSS} , yüksek geçiren filtre devre zaman sabiti T_w (kritik bir değer olmamakla beraber 1-20 s aralığındadır) ve faz kompanzasyonu zaman sabitleri ise T_1 ve T_2 'dir [2, 12].



Şekil 4. Uyarma sistemi ve PSS için fonksiyonel blok diyagramı.

Temizleme bloku (yüksek geçiren filtre) ihmal edilerek PSS'den dolayı eklenen durum denklemi yazılıp doğrusal hale getirilirse aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{V}_s &= -\frac{1}{T_2} \Delta V_s + \frac{K_{PSS}}{T_2} \Delta v + \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \Delta \dot{v} \\ &= -\frac{1}{T_2} \Delta V_s + \left(\frac{K_{PSS}}{T_2} - \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \frac{D\omega_s}{2H} \right) \Delta v + \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \left(-\frac{K_2}{2H} \Delta E'_q - \frac{K_1}{2H} \Delta \delta \right) \end{aligned} \quad (40)$$

PSS ilave edilmesi durumunda üstteki (40) denklemi TMSB sistemin (39) genel denkleminde eklenirse elde edilecek A_{PSS} sistem matrisi (41) denkleminde görüldüğü biçimde olacaktır.

$$A_{PSS} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{K_3 T'_{do}} & -\frac{K_4}{T'_{do}} & 0 & \frac{1}{T'_{do}} & 0 \\ 0 & 0 & \omega_s & 0 & 0 \\ -\frac{K_2}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & -\frac{D\omega_s}{2H} & 0 & 0 \\ -\frac{K_a K_6}{T_a} & -\frac{K_a K_5}{T_a} & 0 & -\frac{1}{T_a} & \frac{K_a}{T_a} \\ -\frac{K_2 T_1}{T_2} \left(\frac{K_{PSS}}{2H} \right) & -\frac{K_1 T_1}{T_2} \left(\frac{K_{PSS}}{2H} \right) & \left(\frac{K_{PSS}}{T_2} - \frac{K_{PSS} T_1}{T_2} \frac{D\omega_s}{2H} \right) & 0 & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \quad (41)$$

4. Eğitici programın tanıtılması ve test edilmesi

Bu çalışmada tek makinalı güç sisteminin kararlılık çalışmaları için kullanılması önerilen MATLAB/Simulink tabanlı paket programdaki tüm dosyalar ve özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Tasarlanan programdaki dosyalar ve işlevleri.

Dosya Adı	İşlevi
TMSB_veri.m	Örnek güç sisteminin verilerini içerir. Kullanıcı sistem parametrelerini değiştirebilir.
baslangic_kosullari.m	Başlangıç koşullarının hesaplanmasını sağlar.
kucuk_isaret_kararlilik_analizi.m	K_1 – K_6 katsayılarını, sistem matrisini ve özdeğerleri bulur.
rotor_acisi_cizimi.m, hiz_sapmasi_cizimi.m ve elektriksel_guc_cizimi.m	δ rotor açısı, $\Delta\omega$ rotor hız sapması ve T_e elektriksel güç çıkışlarının zamana göre sistem cevaplarını çizdirir.
gecici_hal_kararlilik_analizi.mdl	Sistemin doğrusal olmayan modeli üzerinden zaman bölgesi simülasyonlarını yapar.

4.1. Aydınlatıcı sistem örneği

TMSB güç sisteminin küçük işaret kararlılığı ve geçici hal kararlılığı olgularını daha iyi kavranabilmesi açısından nümerik bir örnek ele alındı. Şekil 3’teki güç sisteme ilişkin sistem verileri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İncelenen sisteme ilişkin sistem parametreleri.

İletim Hattı	$R_e = 0$, $X_e = 0.5$ pu, $V_t \angle \theta = 1 \angle 15^\circ$ pu ve $V_\infty \angle 0^\circ = 1.05 \angle 0^\circ$ pu
Generatör	$H = 3.2$ s, $T'_{do} = 9.6$ s, $R_s = 0.0$ pu, $X_q = 2.1$ pu, $X_d = 2.5$ pu, $X'_d = 0.39$ pu, $D = 0$, $f = 60$
Uyarma	$K_a = 400$, $T_a = 0.2$ s
PSS	$K_{pss} = 0.5$, $T_1 = 0.5$ s, $T_2 = 0.1$ s

Bu çalışmada ele alınan sistem [12]'den alınmış olup literatürde çok kullanılmaktadır. Örnek sisteme ilişkin MATLAB kodu Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Örnek sistemin verilerine ilişkin MATLAB m-file.

TMSB_veri.m	
1	clc
2	clear all
3	format short
4	%% Sistem verileri
5	Xe = 0.5 ; Re = 0; Vt = 1; theta = 15*pi/180; V_inf = 1.05;
6	H = 3.2; Tdod = 9.6; Rs = 0; Xq = 2.1; Xd = 2.5; Xdd = 0.39;
7	D = 0; f = 60; ws = 2*pi*f;
8	Efd_max = 7; Efd_min = 0;
9	
10	% Arıza öncesi, esnası ve sonrası için reaktanslar
11	Xbf = (Xe); % arızadan önceki reaktans
12	Xdf = 0; % arıza esnasındaki reaktans
13	Xaf = (Xe); % arıza sonrası reaktans
14	
15	% Uyarma sistemi
16	Ka = 400; Ta = 0.2;
17	
18	% PSS parametreleri
19	Kpss = 0.5; T1= 0.5; T2= 0.1; Vs_max = 0.2; Vs_min = -0.2;
20	
21	%% Geçici hal kararlılık analizi için arıza bilgisinin girilmesi
22	t_pre=input('arıza öncesi süreyi giriniz:');
23	t_fault=input('arıza süresini giriniz:');

4.2. MATLAB/Simulink tabanlı program ile başlangıç koşullarının hesaplanması

Bölüm 2.5'teki başlangıç koşullarının 6 adımda hesaplanması için gerekli MATLAB kodu Tablo 4'te verilmiştir. *baslangic_kosullari.m* yardımıyla bulunan başlangıç koşulları Tablo 5'te listelenmiştir.

Tablo 4. Başlangıç koşullarının hesaplanmasına ilişkin MATLAB m-file.

baslangic_kosullari.m	
1	%% Akı sönümlü model için başlangıç koşullarının hesaplanması
2	Ig = abs((Vt*(cos(theta)+j*sin(theta)) - V_inf)/(Re+j*Xe))
3	gamma = angle((Vt*(cos(theta)+j*sin(theta)) - V_inf)/(Re+j*Xe))
4	del = angle(Vt*(cos(theta)+j*sin(theta)) + (Rs+j*Xq)*Ig*(cos(gamma)+j*sin(gamma)))
5	Id = Ig*sin(del - gamma)
6	Iq = Ig*cos(del - gamma)
7	Vd = Vt*sin(del-theta)
8	Vq = Vt*cos(del-theta)
9	Eqd = Vq + Xdd*Id
10	Efd = Eqd+(Xd-Xdd)*Id
11	Vref = Vt + Efd/Ka
12	Tm = Eqd*Iq+(Xq-Xdd)*Id*Iq

Tablo 5. TMSB sistemin başlangıç çalışma noktaları.

I_G^o	0.54426
γ^o	17.996
δ^o	65.519
I_d^o	0.40142
I_q^o	0.36754
V_d^o	0.77183
V_q^o	0.63583
$E_q^{o'}$	0.79238
E_{fd}^o	1.6394
V_{ref}^o	1.0041
T_m^o	0.54352

4.3. MATLAB/Simulink tabanlı program yardımı ile doğrusallaştırılmış sistemin özdeğer analizinin yapılması

TMSB örnek güç sisteminin küçük işaret kararlılık analizinin yapılabilmesi için oluşturulan MATLAB tabanlı dosya Tablo 6'da verilmiştir. İlgili *m-file* çalıştırılırsa, K_1 – K_6 senkron generatör dinamik model katsayıları ile iki sisteme (uyarma dinamiği ve PSS içeren sistemler) ait sistem matrisleri ve özdeğerleri bulunur. Böylece dinamik model katsayıları $K_1=0.9223$, $K_2=1.0737$, $K_3=0.2967$, $K_4=2.2655$, $K_5=0.0050$ ve $K_6=0.3572$ olarak bulunur. Denklem (39)'daki yalnızca uyarma içeren sistemin (PSS'siz sistem) $A_{exciter}$ matrisi,

$$A_{exciter} = \begin{bmatrix} -0.3511 & -0.2360 & 0 & 0.1042 \\ 0 & 0 & 376.9911 & 0 \\ -0.1678 & -0.1441 & 0 & 0 \\ -714.4124 & -10.0051 & 0 & -5 \end{bmatrix}$$

olarak bulunur. Denklem (41)'deki PSS'li sistemin A_{PSS} matrisi ise,

$$A_{PSS} = \begin{bmatrix} -0.3511 & -0.2360 & 0 & 0.1042 & 0 \\ 0 & 0 & 376.9911 & 0 & 0 \\ -0.1678 & -0.1441 & 0 & 0 & 0 \\ -714.4124 & -10.0051 & 0 & -5 & 2000 \\ -0.4194 & -0.3603 & 5 & 0 & -10 \end{bmatrix}$$

olarak bulunur.

Tablo 6. Küçük işaret kararlılık analizine ilişkin MATLAB m-file.

kucuk_isaret_kararlilik_analizi.m	
1	%% Tek makinalı sonsuz baralı güç sisteminin küçük işaret kararlılık incelenmesi
2	clc,
3	%% K1-K6 senkron generatör dinamik model katsayılarının bulunması
4	Delta = Re^2+(Xe+Xq)*(Xe+Xdd)
5	K1 = -(Iq*V_inf*(Xdd-Xq)*((Xq+Xe)*sin(del)-Re*cos(del))+...
6	V_inf*((Xdd-Xq)*Id-Eqd)*((Xdd+Xe)*cos(del)+Re*sin(del))/Delta
7	K2 = (Iq*Delta-Iq*(Xdd-Xq)*(Xq+Xe)-Re*(Xdd-Xq)*Id+Re*Eqd)/Delta
8	K3 = 1/(1+((Xd-Xdd)*(Xq+Xe))/Delta)
9	K4 = (V_inf*(Xd-Xdd)/Delta)*((Xq+Xe)*sin(del)-Re*cos(del))
10	K5 = (Vd*Xq*(Re*V_inf*sin(del)+V_inf*cos(del)*(Xdd+Xe))+...
11	Vq*(Xdd*(Re*V_inf*cos(del)-V_inf*(Xq+Xe)*sin(del)))/(Vt*Delta)
12	K6 = ((Vd*Xq*Re-Vq*Xdd*(Xq+Xe))/Delta+Vq)/Vt
13	
14	%% Sistem matrisleri
15	% Uyarmalı sisteme ilişkin sistem matrisi
16	A_exciter = [-1/(K3*Tdod) -K4/Tdod 0 1/Tdod ;
17	0 0 ws 0 ;
18	-K2/(2*H) -K1/(2*H) -D*ws/(2*H) 0 ;
19	-Ka*K6/Ta -Ka*K5/Ta 0 -1/Ta]
20	% Uyarma ve PSS ilaveli sisteme ilişkin sistem matrisi
21	A11 = A_exciter;
22	A12 = [0 0 0 Ka/Ta];
23	A21 = (Kpss/T2)*[-K2*T1/(2*H) -K1*T1/(2*H) 1-T1*D*ws/(2*H) 0];
24	A22 = -1/T2;
25	A_pss = [A11 A12; A21 A22]
26	
27	%% Özdeğerler ve sönüm oranları
28	disp('Uyarmalı sistemin özdeğerleri')
29	disp(eig(A_exciter))
30	disp('Uyarmalı sistemin sönüm oranları')
31	disp(-real(eig(A_exciter))./abs(eig(A_exciter)))
32	
33	disp('Uyarma ve PSS ilaveli sistemin özdeğerleri')
34	disp(eig(A_pss))
35	disp('Uyarma ve PSS ilaveli sistemin sönüm oranları')
36	disp(-real(eig(A_pss))./abs(eig(A_pss)))

Bu iki sistemin özdeğerleri ($\lambda_i = \sigma_i \pm j\omega_i$) ve sönüm oranları ($\zeta_i = -\sigma_i / \sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}$) Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Sistem özdeğerleri ve sönüm oranları.

Sistem Türü	Özdeğerler	Sönüm Oranları
PSS'siz sistem	$\lambda_{1,2} = -0.0871 \pm j7.1139$	0.0122
	$\lambda_{3,4} = -2.5885 \pm j8.502$	0.2913
PSS'li sistem	$\lambda_{1,2} = -0.86026 \pm j7.0766$	0.1207
	$\lambda_{3,4} = -1.6327 \pm j8.5575$	0.1874
	$\lambda_5 = -10.365$	1

Tablo 7'den açıkça anlaşılacağı üzere, sistemin PSS'siz çalışması durumunda $\lambda_{1,2}$ elektromekanik modu kötü sönümlüdür çünkü özdeğerlerin negatif gerçekte kısmı küçüktür ve sönüm oranları da %1.22'dir. Bununla beraber sistemin PSS ilave edilerek çalışması durumunda $\lambda_{1,2}$ özdeğerlerinin negatif gerçekte kısmı daha solda yer alır ve sönüm oranları da %12.07 değeri alarak sistemin salınımlarını önemli ölçüde iyileştirir. Özdeğer analizi sonuçları, PSS cihazının eklenmesinin elektromekanik mod sönümünü iyileştirdiğini göstermektedir. Tüm bu sonuçlar elde edilirken paket programdaki *kucuk_isaret_kararlilik_analizi.m* dosyasından yararlanılmıştır.

4.4. Geçici hal kararlılık çalışmaları için Simulink tabanlı modelin oluşturulması

Bu bölüm çalışmanın en önemli eğitici tarafını oluşturan doğrusal olmayan TMSB güç sisteminin Simulink yardımıyla nasıl modelleneceğini detaylı ve anlaşılır bir biçimde göstermektedir. Genel olarak uyarma ve PSS ilaveli TMSB sistemin Simulink tabanlı model yapısı inşa edilirken kullanılacak diferansiyel ve cebirsel denklemleri toplu şekilde yeniden yazılırsa;

$$\dot{\delta} = \omega - \omega_s = \omega_s \Delta\omega \quad (42)$$

$$\dot{\omega} = \frac{\omega_s}{2H} [T_m - T_e - D(\omega - \omega_s)] \quad (43)$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{T'_{do}} (E'_q + (X_d - X'_d)I_d - E_{fd}) \quad (44)$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_a} (-E_{fd} + K_a(V_{ref} - V_t + V_S)) \quad (45)$$

$$X_q I_q - V_d = 0 \quad (46)$$

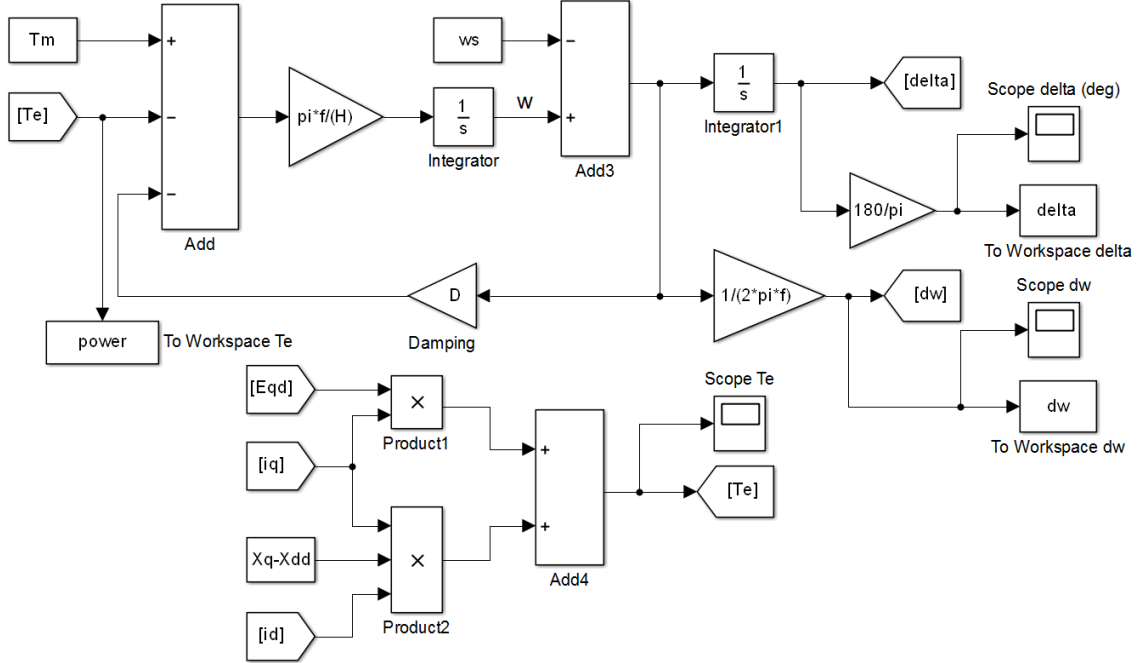
$$E'_q - V_q - X'_d I_d = 0 \quad (47)$$

$$R_e I_d - X_e I_q = V_d - V_\infty \sin \delta \quad (48)$$

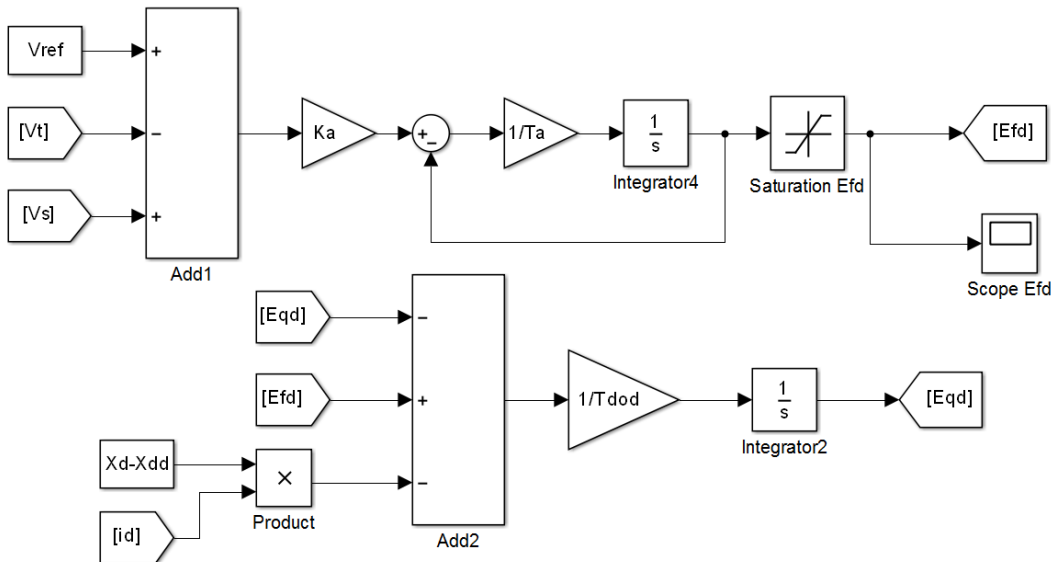
$$X_e I_d + R_e I_q = V_q - V_\infty \cos \delta \quad (49)$$

$$V_t = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \quad (50)$$

Şekil 5 ve 6 sırasıyla, (42)–(43) ile (44)–(45) diferansiyel denklemlerin Simulink ortamında modellenmesini göstermektedir. (42) denklemindeki $\omega_s = 2\pi f$ ve (43) denklemindeki elektriksel güç $T_e = E'_q I_q + (X_q - X'_d) I_d I_q$ 'dir. Şekil 5 ve 6'da toplam dört adet $1/s$ bloku mevcuttur ve içlerine başlangıç koşulları eklenmiştir.



Şekil 5. Simulink bloklarla (42) ve (43) diferansiyel denklemlerinin modellenmesi.

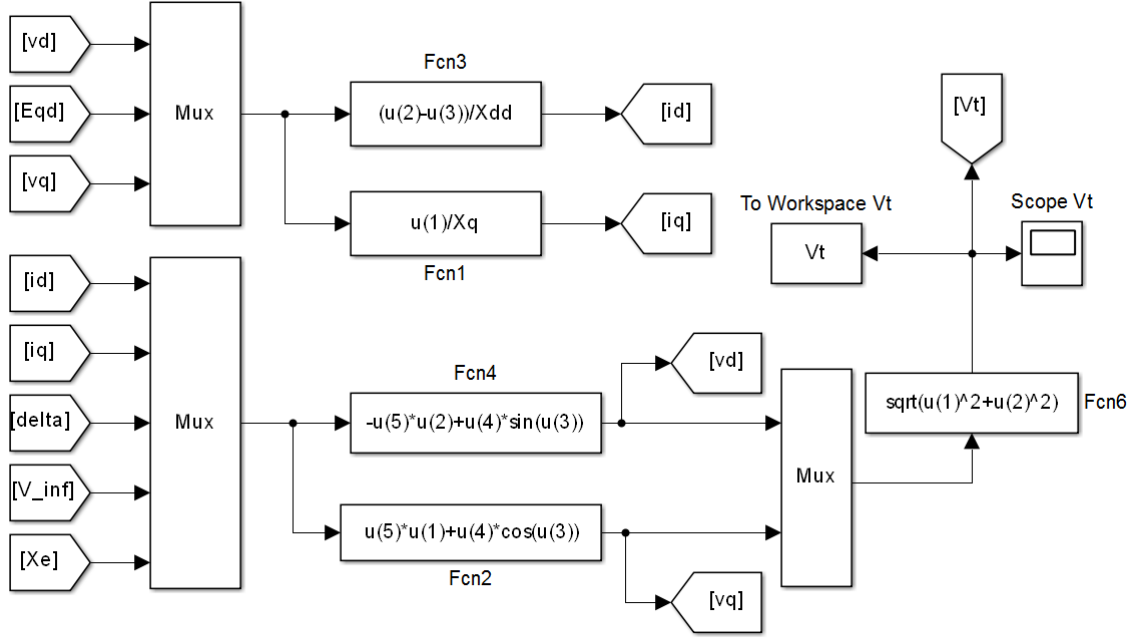


Şekil 6. Simulink bloklarla (44) ve (45) diferansiyel denklemlerinin modellenmesi.

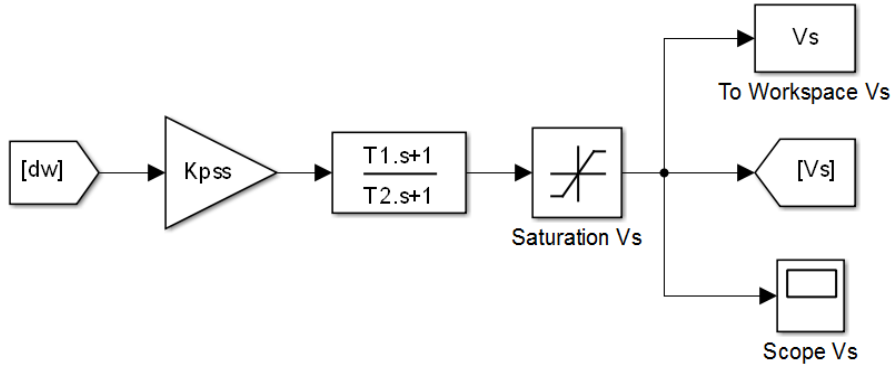
(46) ile (47) denklemleri stator cebirsel denklemlerini; (48) ile (49) denklemleri şebeke denklemlerini ve (50) denklemini ise generatör uç gerilim büyüklüğü denklemini

göstermekte olup, bu beş denkleme ilişkin Simulink tabanlı model Şekil 7’de gösterilmiştir. Şebeke denklemlerindeki R_e direnci ihmal edilmiştir.

Tek makinalı güç sistemlerinin kararlılık analizleri için tasarlanan programın genişletilebilme özelliğini kullanarak sisteme PSS eklentisi yapılabilir. Blok diyagramı Şekil 4’te verilen PSS’nin Simulink modeli Şekil 8’de verilmiştir. PSS’nin temizleme bloku ihmal edilmiştir.



Şekil 7. Simulink bloklarla (46)–(50) cebirsel denklemlerinin modellenmesi.

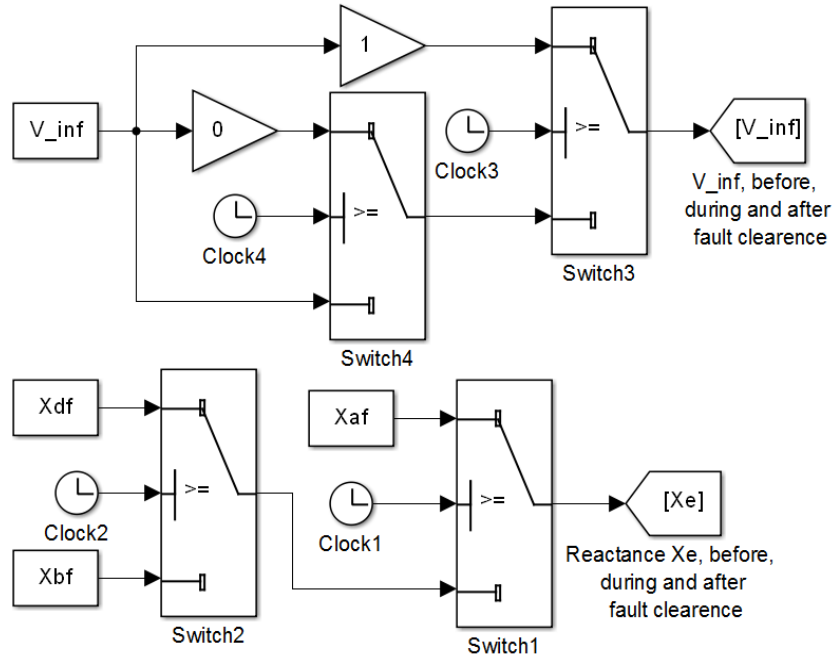


Şekil 8. Hız sapması giriqli PSS’nin Simulink modeli.

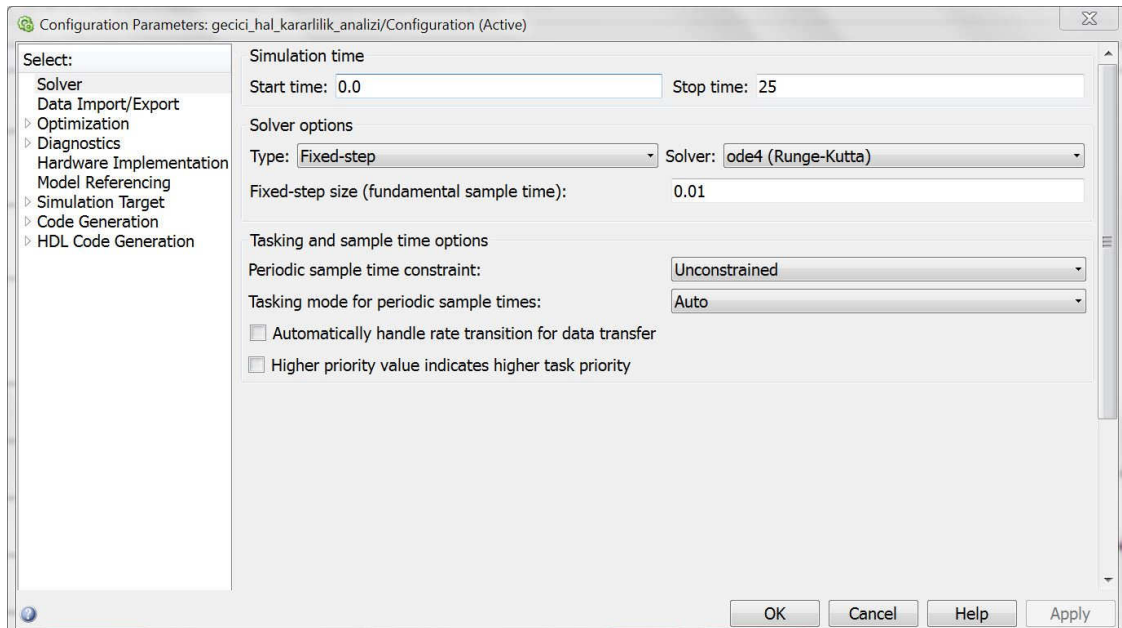
TMSB sisteme bir arıza uygulanırsa, sistemde arıza öncesi, esnası ve sonrası olmak üzere üç farklı çalışma durumu oluşur. Arıza durumlarına göre V_∞ sonsuz bara gerilimi ve X_e reaktansının Simulink modeli Şekil 9’da verilmiştir.

Zaman bölgesi simülasyonunda kullanılan konfigürasyon parametreleri Şekil 10’da gösterilmiştir. Gerekmesi durumunda bu parametrelerde dilenen değişiklikler basitçe yapılabilir. Ayrıca, geçici hal kararlılık için geliştirilen Simulink tabanlı modeller

yardımıyla PSS eklenmiş sistem ile kontrolsüz sistemin zaman cevapları karşılaştırılabilir ve PSS cihazının sistem üzerindeki pozitif etkileri de görülebilir.



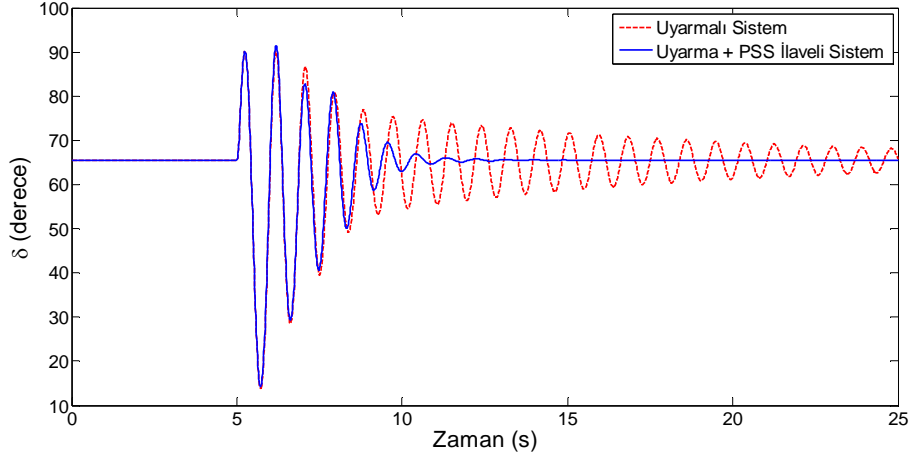
Şekil 9. Üç farklı arıza durumu için V_{∞} sonsuz bara gerilimi ve X_e reaktansının Simulink modeli.



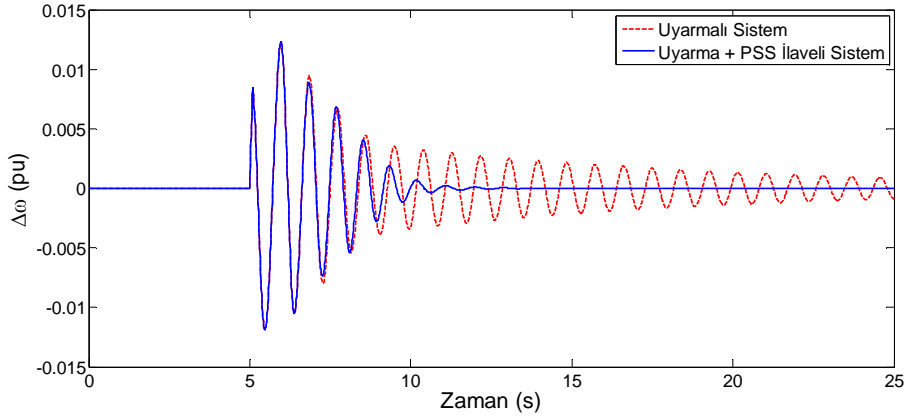
Şekil 10. Seçilen konfigürasyon parametreleri.

TMSB güç sisteminin geçici hal kararlılık çalışması için tasarlanan ve Şekil 5–9'daki Simulink modellerini tamamıyla içeren paket programdaki *gecici_hal_kararlilik_analizi.mdl* adlı Simulink dosyasının modelleme avantajını, geçerliliğini ve etkinliği ispatlamak amacıyla $t=5$ s'de generatör uçlarına üç-fazlı bir arıza uygulandı. Arıza 100 ms (6 devir) devam ettikten sonra ilgili arıza kaldırılmak

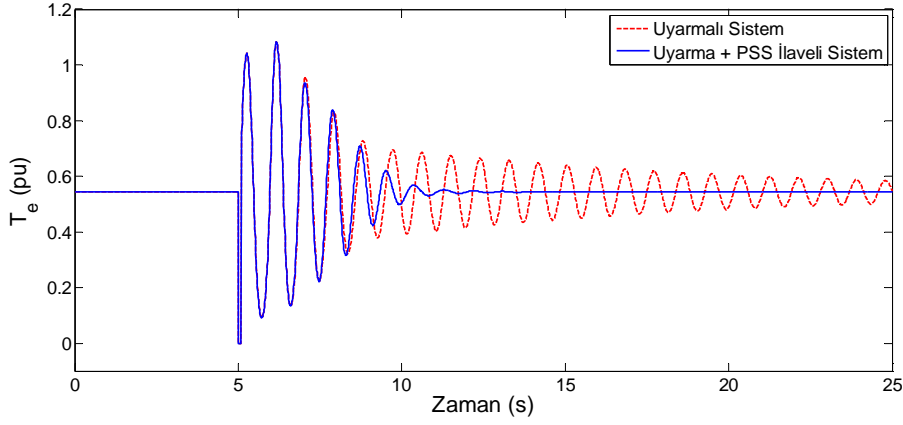
suretiyle sistem önceki haline getirildi. Bu durum için Tablo 3'teki t_{pre} ve t_{fault} değerleri sırasıyla 5 ve 0.1 olarak girilir. Bu büyük arızaya maruz kalan güç sisteminin sistem cevapları Şekil 11–13'te verilmiştir. Her bir şekil iki simülasyon sonuçlarını içerir: Uyarmalı sistem (PSS'siz sistem) ile uyarma ve PSS ilaveli sistem. Şekil 11–13 sırasıyla δ güç açısı, $\Delta\omega$ hız sapması ve T_e elektriksel güç çıkışı cevaplarını göstermektedir. Sistem cevapları çiziminde, geliştirilen programda mevcut olan *rotor_acisi_cizimi.m*, *hiz_sapmasi_cizimi.m* ve *elektriksel_guc_cizimi.m* dosyalarından yararlanılmıştır.



Şekil 11. δ güç açısının grafiği.



Şekil 12. $\Delta\omega$ rotor hız sapmasının grafiği.



Şekil 13. T_e elektriksel güç çıkışının grafiği.

Simülasyon şekillerden açıkça görüleceği gibi, yalnızca uyarma içeren sistem karardır ancak salınımlar çok geç sönmemektedir. Bununla birlikte sisteme PSS ilavesi yapılması durumunda, sistemin geçici hal kararlılık performansı iyileşmekte ve güç sistem salınımları daha hızlı sönümlenmektedir.

4.5. Geliştirilen MATLAB/Simulink tabanlı programın eğitim alanında kullanımı

Programdaki kod ve modellerin esnek, basit ve açık yapıları dolayısıyla kodlar ve Simulink modelleri üzerinde değişiklikler kolaylıkla yapılabilir. Esnek alternatif akım iletim sistemleri (Flexible AC Transmission System, FACTS), türbinler ve hız regülatörü gibi diğer yapılar programa entegre edilerek genişletilebilir. Ayrıca paket program kullanılarak geleneksel ve sezgisel optimizasyon teknikleri ile kontrolör parametre optimizasyonu işlemi de kolaylıkla yapılabilir. Yazarlar olarak, bu çalışmanın sonuçları ve paket programın üniversitelerin Elektrik Mühendisliği yüksek lisans bölümlerinde verilen Enerji Sistemlerinin Kararlılığı (Power Systems Stability) dersinin daha verimli ve anlaşılır olmasına katkı sağlayacağına inanıyoruz.

Ayrıca, bu çalışmada TMSB güç sisteminin küçük işaret kararlılık ve geçici hal kararlılık analizleri için geliştirilen MATLAB/Simulink tabanlı program eksiksiz olarak bu konularda araştırma ve proje yapan öğrenci ve akademisyenlere açıktır ve programa [14]'ten ulaşabilirler.

5. Sonuç

Bu çalışma TMSB güç sistemlerinin kararlılığının MATLAB/Simulink ortamında geliştirilen paket bir program aracılığıyla incelenmesini ele almaktadır. Tasarlanan ve özellikle eğitici yönü olan yeni program, sahip olduğu basit kodlarla yazılma, esneklik, genişletilme, kodlara ve modellere erişebilme özellikleri nedeniyle tek makinalı güç sistemlerinin küçük işaret kararlılık ve geçici hal kararlılık analizlerini çok etkin ve başarılı bir şekilde yapabilmektedir. MATLAB/Simulink tabanlı önerilen programın performansı ve geçerliliğini belirlemek amacıyla literatürde mevcut olan uyarma ve PSS eklentili örnek bir sistem ele alındı. Yapılan analizler ve simülasyon sonuçları neticesinde programın kararlılık çalışmaları üzerine öğretici ve güçlü bir araç olduğu kanısına varıldı. Ayrıca, program Elektrik Mühendisliğinde yüksek lisans düzeyindeki Enerji Sistemlerinin Kararlılığı dersinde destekleyici bir araç olarak kullanılabilir.

Eğitim ve araştırma amaçları için geliştirilen açık kaynak kodlu yazılım ilgili web sayfasından erişilmektedir.

Teşekkür

Çalışmanın yönlendirilmesi ve sonuçlandırılmasında emeği geçen Sayın Yusuf Ali Ekinci'ye teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Ekinci, S., Zeynelgil, H.L., Demiroren, A., A didactic procedure for transient stability simulation of a multimachine power system utilizing SIMULINK, **International Journal of Electrical Engineering Education**, 53(1), 54–71, (2016).
- [2] Kundur, P., **Power System Stability and Control**, McGraw-Hill, New York, (1994).
- [3] Ekinci, S., Çok makinalı güç sisteminde açılabilir kararlılık analizi ve kontrolör parametre optimizasyonu, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2015).
- [4] Milano, F., An Open Source Power System Analysis Toolbox. **IEEE Transactions on Power Systems**, 20(3), 1199–1206, (2005).
- [5] Chow, J.H. ve Cheung, K.W., A toolbox for power system dynamics and control engineering education and research. **IEEE Transactions on Power Systems**, 7(4), 1559–1564, (1992).
- [6] Allen, E., White, N.L., Yoon, Y., Chapman, J., Ilic, M., Interactive object-oriented simulation of interconnected power systems using SIMULINK. **IEEE Transactions on Education**, 44(1), 87–94, (2001).
- [7] Patel, R., Bhatti, T.S., Kothari, D.P., MATLAB/Simulink-based transient stability analysis of a multi-machine power system. **International Journal of Electrical Engineering Education**, 39(4), 320–336, (2002).
- [8] Demiroren, A., Zeynelgil, H.L., Modelling and Simulation of synchronous machine transient analysis using SIMULINK. **International Journal of Electrical Engineering Education**, 39(4), 337–346, (2002).
- [9] Cho, Y.S., Park, J., Jang, G., A novel tool for transient stability analysis of large-scale power systems: Its application to the KEPCO system. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 15(7), 786–800, (2007).
- [10] Gelen, A., Yalcinoz, T., An educational software package for Thyristor Switched Reactive Power Compensators using Matlab/Simulink. **Simulation Modelling Practice and Theory**, 18(3), 366–377, (2010).
- [11] Ekinci, S., Demiroren, A. ve Zeynelgil, H.L., PowSysGUI: A new educational software package for power system stability studies using MATLAB/Simulink. **International Journal of Electrical Engineering Education**, 54(4), 283–298, (2017).
- [12] Sauer, P.W., Pai, M.A., ve Chow, J.H. **Power System Dynamics and Stability: With Synchrophasor Measurement and Power System Toolbox**, Hoboken, NJ, USA : IEEE Press, Wiley, (2017).
- [13] Mondal, D., Chakrabarti, A. ve Sengupta, A., **Power System Small Signal Stability Analysis and Control**, London, Academic Press, (2014).
- [14] <http://mmf.batman.edu.tr/Personel/SERDAR-EKINCI/438/847?o=1>, (14.03.2018)