

# SONSUZ GÜÇLÜ BARAYA BAĞLI ÇİFT SENKRON JENERATÖRDEN OLUŞAN DİNAMİK SİSTEMİN KÜÇÜK İŞARET KARARLILIK ANALİZİ

**B. Taşar<sup>1</sup>, M. Özdemir<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>University of Firat, Department of Mechatronics Engineering, Elazig/Turkey

<sup>2</sup>University of Firat, Department of Electrical and Electronics Engineering, Elazig/Turkey

[btasar@firat.edu.tr](mailto:btasar@firat.edu.tr), [mozdemir@firat.edu.tr](mailto:mozdemir@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 28.02.2011; Kabul/Accepted: 23.01.2012)

## ÖZET

Bu çalışmada, sonsuz güçlü baraya bağlı iki senkron jeneratörden oluşan dinamik sistemin düşük genlikli ve düşük frekanslı küçük işaret bozucular karşısındaki kararlılığı incelenmiştir. Güç sistemlerinin dinamik kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere senkron jeneratörlerin farklı dereceden çeşitli basitleştirilmiş modelleri literatürlerde önerilmiş ve kullanılmıştır. Rotor dinamiğine ilave olarak rotor sargı dinamiğinin de dikkate alındığı fakat sönüm sargılarının etkisinin, stator sargı direncinin ve stator akı değişimlerinin ihmal edildiği 3. dereceden Sonsuz Güçlü Baraya bağlı Senkron Jeneratör (SGBSJ) modeli en çok kullanılan modeldir. Bu çalışmamızda; literatürde yer alan çalışmalardan farklı olarak; stator direnci ve akı değişimlerini ihmal etmeksizin oluşturduğumuz senkron jeneratörün t-modeli kullanılmış ve Sonsuz Güçlü Baraya bağlı Çift Senkron Jeneratör (SGBÇSJ) sisteminin dinamik modeli Matlab/Simulink programında simüle edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada SGBSJ sisteminin kararlılığını arttırmak amacı ile literatürde yer alan doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan Geleneksel Güç Sistem Kararlı Kılıcılarının (GGSK'ların) seçilen çalışma noktasının değişmesi durumlarında önemli derecede performans kaybına uğradıkları bilindiğinden, güç sistemlerinde çalışma noktası ve hat empedansı gibi bazı sistem parametrelerinin değişmesi durumunda dahi performans kaybına uğramayan, dayanıklı yapıya sahip Bulanık mantık tabanlı GSK tasarımı (BGSK) gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda, önerilen BGSK'lı sistem ile GGSK'lı sistemin ve ek destekleyici kontrolör içermeyen sadece Otomatik Gerilim Regülatörünün (OGR'nin) bulunduğu sistemin küçük işaret bozucular karşısındaki performansları karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Güç sistem kararlılığı, Bulanık mantık kontrolör, GGSK, OGR, Küçük işaret kararlılığı.

## SMALL SIGNAL STABILITY ANALYSIS OF DYNAMIC POWER SYSTEM CONSISTING OF DOUBLE SYNCHRONOUS GENERATORS CONNECTED TO INFINITE BUS

### ABSTRACT

In this study, it has been analyzed the stability of a dynamic system consist of double synchronous generators connected to infinite power bus against small signal disturbances which is low amplitude and low frequency. In the literature, many simplified models with different degree of synchronous generator have been proposed and used for studying the dynamic stability of power systems. The most widely one is third order model of Synchronous Generator connecting to Infinite Power Bus (SGIPB) in which are taken into consideration both rotor dynamics and stator dynamics but are neglected the affect of damping windings, the stator winding resistance and the stator flux variation. In this study; t-model of synchronous generator has been generated without neglecting stator resistant and stator flux variation as different from other studies in the literature and a dynamic model of double synchronous generators infinite bus system(DSGIB) has been simulated in Matlab /Simulink environment. On the other hand, Conventional Power System Stabilizer (CPSS) is designed by using the linearized model to increase the stability of synchronous generator. In this case, the system exhibits performance loses when the operating point have change. In this study, in order to get rid of the disadvantage, a

Fuzzy logic based Power System Stabilizer (FPSS) having a robust structure has been additionally designed, which the loss of performance is not seen even if system parameters such as operation point and line impedance of the power system change. In the simulations, the performances across the small signal disturbance of the proposed FPSS system has been compared to those of CPSS system and the system including only Automatic Voltage Regulator (AVR).

**Key Words:** Power system stability, Fuzzy logic control, CPSS, AVR, Small signal stability.

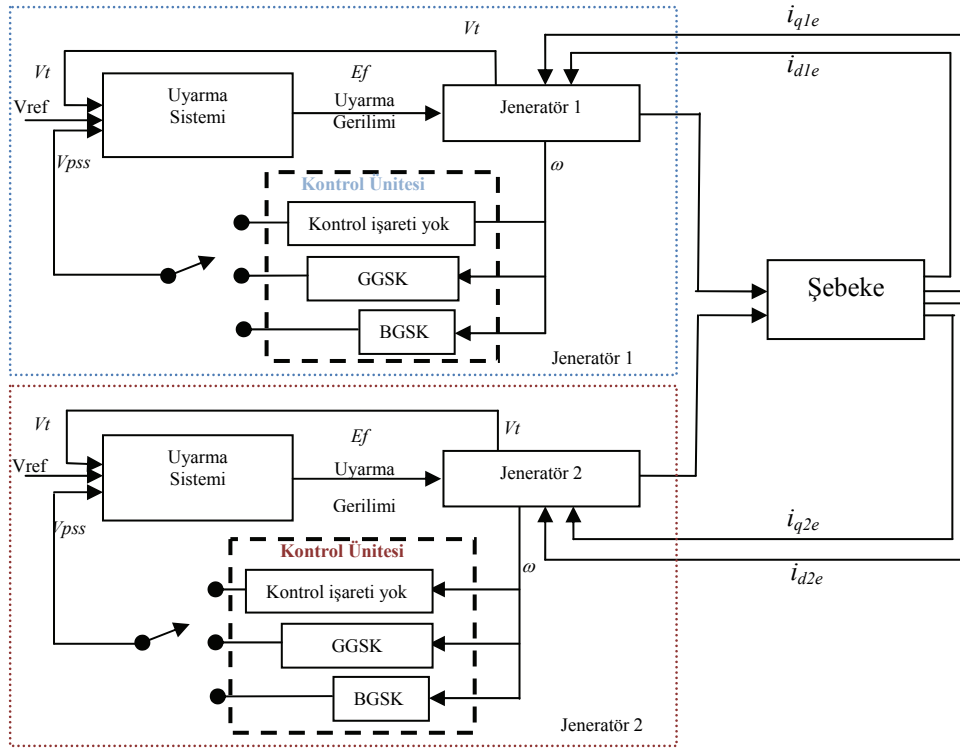
## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Güç sistemlerinde küçük işaret kararlılığı veya sürekli hal kararlılığı olarak bilinen dinamik kararlılık; en basit ve en genel şekli ile normal çalışma koşulları altında sistemin denge noktasında kalması, maruz kaldığı herhangi bir küçük bozucu (düşük genlikli ve düşük frekanslı) karşısında ise güç sisteminin senkronizmayı koruyabilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Yani bozucu etki ortadan kalktığında bozucu etkinin neden olduğu salınımların sonlu bir zamanda sönümlenmesi ve sistemin yeniden kabul edilebilir bir denge noktasına ulaşması gereklidir. Bozucu etki sonrasında sistemin üretim tüketim dengesinde bir değişiklik yok ise sistem başlangıçtaki denge noktasına geri dönmeli, üretim tüketim arasındaki güç dengesinde bir artış veya azalma var ise sistem yeni bir kararlı çalışma noktasına kabul edilebilir sonlu bir sürede yerleşmelidir.

Birden fazla senkron jeneratörden oluşan bir güç sisteminin sağlaması gereken temel kriterler ise sistemdeki bütün senkron jeneratörlerin senkronizmada kalmalarını sağlamak ve sürekli değişen güç tüketimini karşılayacak miktarda güç üretmektir. Aksi durumda sistemdeki senkron jeneratörlerden birinin senkronizmadan ayrılması iletim hattında önemli derecede gerilim ve akım dalgalanmalarına neden olur hatta gerekli önlemler alınmadığı takdirde senkronizmadan ayrılan jeneratör, yüksek hızlara ulaşır ciddi zarar görebilir. Normal çalışma koşulları altında bir senkron jeneratörün senkronizmadan ayrılması zordur. Senkron jeneratörün rotoru hızlanmaya veya yavaşlamaya başladığında, senkronlayıcı kuvvet senkron jeneratörü nominal hızında tutmaya çalışır. Ancak senkronlayıcı momentin yetersiz olması rotor açısının sürekli olarak artmasına ve sönümleyici momentin yetersiz olması ise artan genlikli rotor salınımlarının oluşmasına neden olabilir [1,2]. Bu salınımların gerektiği gibi sönümlendirilememesi ise güç sisteminin kararsızlığa gitmesine ve neticede geniş bir bölgede enerji kesintisinin gerçekleşmesine neden olabilir. Güç sistemlerinde uyarım sistemine destekleyici sönümleme momenti üretmek amacı eklenen Güç Sistem Kararlı kılıcılar (GSK'ları), sisteme etkileyen küçük bozucular sonrasında senkron jeneratörlerin rotorlarında oluşan düşük genlikli ve düşük frekanslı salınımları sönümlendirerek güç sisteminin kararlılığının iyileştirirler. Uzun yıllar GSK tasarımına yönelik çok sayıda çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmaların birçoğunda doğrusallaştırılmış model kullanılarak tasarlanan Geleneksel Güç Sistem

Kararlı kılıcılarının (GGSK'ların) seçilen çalışma noktasında beklenen performansı sağlarken çalışma noktasının değiştiği durumlarda önemli derecede performans kaybına uğradığı görülmüştür. Erdem [6] çalışmasında, modellediği bulanık güç sistemi kararlı kılıcının, tek makina-sonsuz baradan oluşan bir güç sisteminde üç fazlı bir kısa devre meydana gelmesi durumunda rotor açısı salınımlarını söndürme kabiliyetini, GGSK'nın salınımlarını söndürme kabiliyeti ile karşılaştırmıştır. GGSK parametrelerinin belirli bir şebeke çalışma noktasına göre seçilmesinden dolayı, farklı şebeke çalışma noktalarında iyi bir sönüm sağlayamadığını analiz etmiştir. BGSK'nın ise geniş bir çalışma koşulu bölgesinde iyi bir sönüm sağlayabildiğini ifade etmiştir. Caner [7] çalışmasında, enerji üretim kontrollerinden biri olan uyarım kontrol sisteminin dinamik performansının artırılması ve uyarım kontrol sistemi bileşenlerinden güç sistem kararlı kılıcısına "hiyerarşik fuzzy kontrol metodu" uygulanması konusunda çalışmıştır. Yaptığı simülasyon çalışmalarıyla BGSK'nın GGSK'ya ve PID kontrolöre göre daha iyi sonuçlar verdiğini ifade etmiştir. Varyak [8] çalışmasında; bulanık mantık tabanlı kontrolörün GSK olarak kullanılmasının; GGSK gibi sabit parametrelili olmadığından ve nonlineerlik özelliğinden dolayı daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir. Kartez, Gözde ve Taplamacioğlu [13] çalışmalarında; BGSK ile, bozucu etkinin çıkış büyüklüklerinde yarattığı salınımlarda azalmalar sağladığını gözlemlemiş ve salınımdaki bu azalmaların, elektrik üretiminin daha kaliteli ve kesintisiz olmasını sağladığını ifade etmişlerdir. Oğuz ve Demirören [14] ise çalışmalarında açılabilir kararlılık için, BGK'nın GGSK'dan daha üstün sönüm sağladığını ve gerilimin şeklini ise çok daha etkin bir şekilde düzelttiğini ifade etmişlerdir. Bu çalışmanın temelini de oluşturan Bulanık mantık tabanlı Güç Sistem Kararlı kılıcılar (BGSK'lar); güç sistemlerinde çalışma noktası ve/veya hat empedansı gibi bazı sistem parametrelerinin değişmesi durumunda dahi performans kaybına uğramayan, dayanıklı yapıya sahip destekleyici kontrolörlerden biri olup, üzerinde araştırmaların devam ettiği aktif bir çalışma konusudur.

Bu çalışmada Şekil 1'de yer alan uyarım ve kontrol sistem diyagramı esas alınarak sistem birimleri tek tek Matlab/ Simulink programında alt birimler olarak tasarlanmış ve bu birimler arasındaki bağlantılar gerçekleştirilerek Sonsuz Baraya bağlı Çift Senkron Jeneratör (SGBÇSJ) sisteminin tam modeli elde edilmiştir.



**Sekil 1:** Küçük işaret kararlılık analizini yaptığımız SGBÇSJ sisteminin uyarma ve kontrol blok diyagramı  
(Excitation and control block diagram of small signal stability analysis of our DSGIB)

## 2. ŞEBEKEYE BAĞLI SENKRON JENERATÖRLERİN MODELLENMESİ (SIMULATION MODELLING OF GENERATOR CONNECTED TO INFINITE BUS)

Bu çalışma bünyesinde küçük işaret kararlılık analizi yapılan SGBÇSJ'lü dinamik sistemin elektriksel eşdeğeri Şekil 2'de verilmiştir. SJ1 (senkron jeneratör 1) ve SJ2 (senkron jeneratör 2) yerel jeneratörler olup sistemin geri kalan kısmı sonsuz güçlü bir bara (şebeke) olarak modellenmiş ve bu jeneratörler ile sonsuz güçlü olarak seçilen 3 nolu bara, hat empedansları ile birbirlerine bağlanmışlardır. Güç sistemi dinamik kararlılık çalışmalarında kullanılmak üzere senkron jeneratörler için farklı dereceden çeşitli basitleştirilmiş modeller önerilmiş ve kullanılmıştır. Bu çalışmada ise sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratörlerin t-modeli kullanılmıştır. İlk olarak

senkron jeneratörlerin geçici rejim modelleri elde edilmiş daha sonra ise sonsuz güçlü baraya Şekil 2'de görüldüğü gibi ile  $jx_{24}$ ,  $jx_{34}$  ve  $r_{24}$ ,  $r_{34}$  bara empedansları ile bağlantı yapılmıştır [3].

Senkron jeneratörlere ait sistem parametrelerine Tablo 1'de ve senkron jeneratörlere ait denklemlere ise (1)-(13)'de yer verilmiştir.

*Stator sargı denklemleri:*

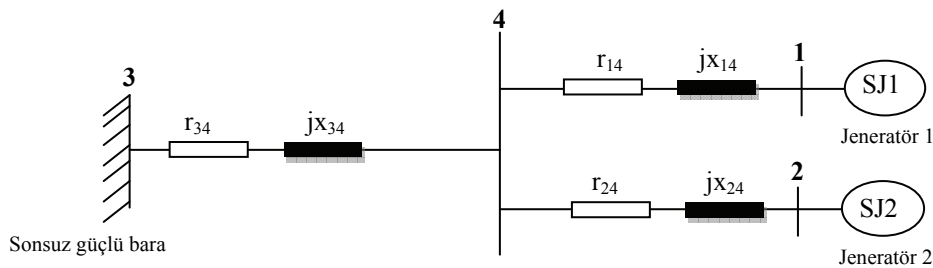
$$v_q = -r_s i_q - x_d' i_d + E_q' \quad (V \text{ veya pu}) \quad (1)$$

$$v_d = -r_s i_d - x_q' i_q + E_d' \quad (2)$$

*Rotor sargı denklemleri:*

$$T_{d0}' \frac{dE_q'}{dt} + E_q' = E_f - (x_d - x_d') i_d \quad (3)$$

$$T_{q0}' \frac{dE_d'}{dt} + E_d' = E_g - (x_q - x_q') i_q \quad (4)$$



**Sekil 2.** Analizini yaptığımız SGBÇSJ Sistemi (Our analysis of DSGIB System)[3]

Ve burada;

$$\lambda'_q = \lambda_q - L'_q(-i_q) \quad (5)$$

$$E'_q = -\omega_r \lambda'_q \quad (6)$$

$$\lambda'_d = \lambda_d - L'_d(-i_d) \quad (7)$$

$$E'_d = -\omega_r \lambda'_d \quad (8)$$

Moment denklemi:

$$T_{em} = -\frac{3}{2} \frac{P}{2\omega_r} \{E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_q - x'_d) i_q i_d\} Nm \quad (9)$$

$$= -\{E'_q i_q + E'_d i_d + (x'_q - x'_d) i_q i_d\} pu \quad (10)$$

Hareket Denklemleri:

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_{em} + T_{mech} - T_{damp} \quad Nm \quad (11)$$

$$2H \frac{d(\omega_r - \omega_e)/\omega_b}{dt} = T_{em(pu)} + T_{mech(pu)} - T_{damp(pu)} \quad (12)$$

$$\frac{d\delta_e}{dt} = \omega_r - \omega_e \quad \omega_r = \frac{P}{2} \omega_{rm} \quad (13)$$

Denklem (1)-(13)'de yer alan stator denklem takımı cebirseldir. Eğer bu cebrik stator denklemlerini iki jeneratör için statik şebeke denklemleri ile beraber çözmeye çalışırsak cebirsel döngüler oluşacaktır ve işlemler karışıklaşacaktır. Bu nedenle daha doğru ve kolay bir çözüm için senkron jeneratör denklemleri ile şebeke denklemleri birleştirilmelidir. Birden çok jeneratörden oluşan veya geniş şebeke denklemlerinin yer aldığı bir sistem için stator gerilim denklemleri, şebeke denklemleri ile çok bütünleşik. Sonsuz güçlü bara olarak temsil edilen şebekenin gerilim fazörü diğer bara gerilimleri ve rotor açıları için referans olarak seçilmiştir [3]. Jeneratörlerin dinamik denklemleri; uygun bir sistem bütünlüğü oluşturmak amacı ile statik şebeke (sonsuz güçlü baranın) cebirsel denklemleri ile bağlantılı olarak ifade edilmeye çalışılmış ve bu nedenle stator gerilim denklemleri, senkron döner alan çatı referansı q eksenini olarak belirlenmiş olan denklem takımına dönüştürülmüştür. Kendi rotor çatısını referans alan denklem takımı durum uzay vektör formunda yazılacak olursa,

$$\begin{pmatrix} v_q \\ jv_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x'_q & jx'_d \\ E'_q & -E'_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q \\ j i_d \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$(v_q - jv_d) = e^{-j\beta} (v_q^e - jv_d^e) \text{ ve}$$

$$(i_q - j i_d) = e^{-j\beta} (i_q^e - j i_d^e) \text{ denklemlerini yerine yazar ve düzenlersek,$$

$$\begin{pmatrix} v_q^e - jv_d^e \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} x'_q & jx'_d \\ E'_q & -E'_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q^e - j i_d^e \end{pmatrix} \quad (15)$$

dikkat edilmesi gereken durum, reaktansın reel ve imajiner kısımlarının farklı olmasıdır. diğer yandan transiyet durumunda  $x'_d \neq x'_q$  dir [3].

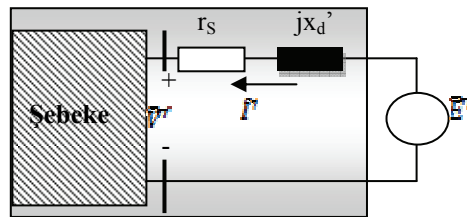
$$\begin{pmatrix} v_q^e - jv_d^e \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} x'_q + x'_d \\ E'_q - E'_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_q^e - j i_d^e \end{pmatrix} \quad (16)$$

Yukarıda fazör formunda verilen stator gerilim denklemleri bir thevenin eşdeğer devresi olarak modellenilebilir. Şekil 3'de görüldüğü gibi  $(x'_q + x'_d)$  eşdeğer empedansı, şebekenin  $Z_{bus}$  veya  $Y_{bus}$  empedansına kolaylıkla eklenebilir.

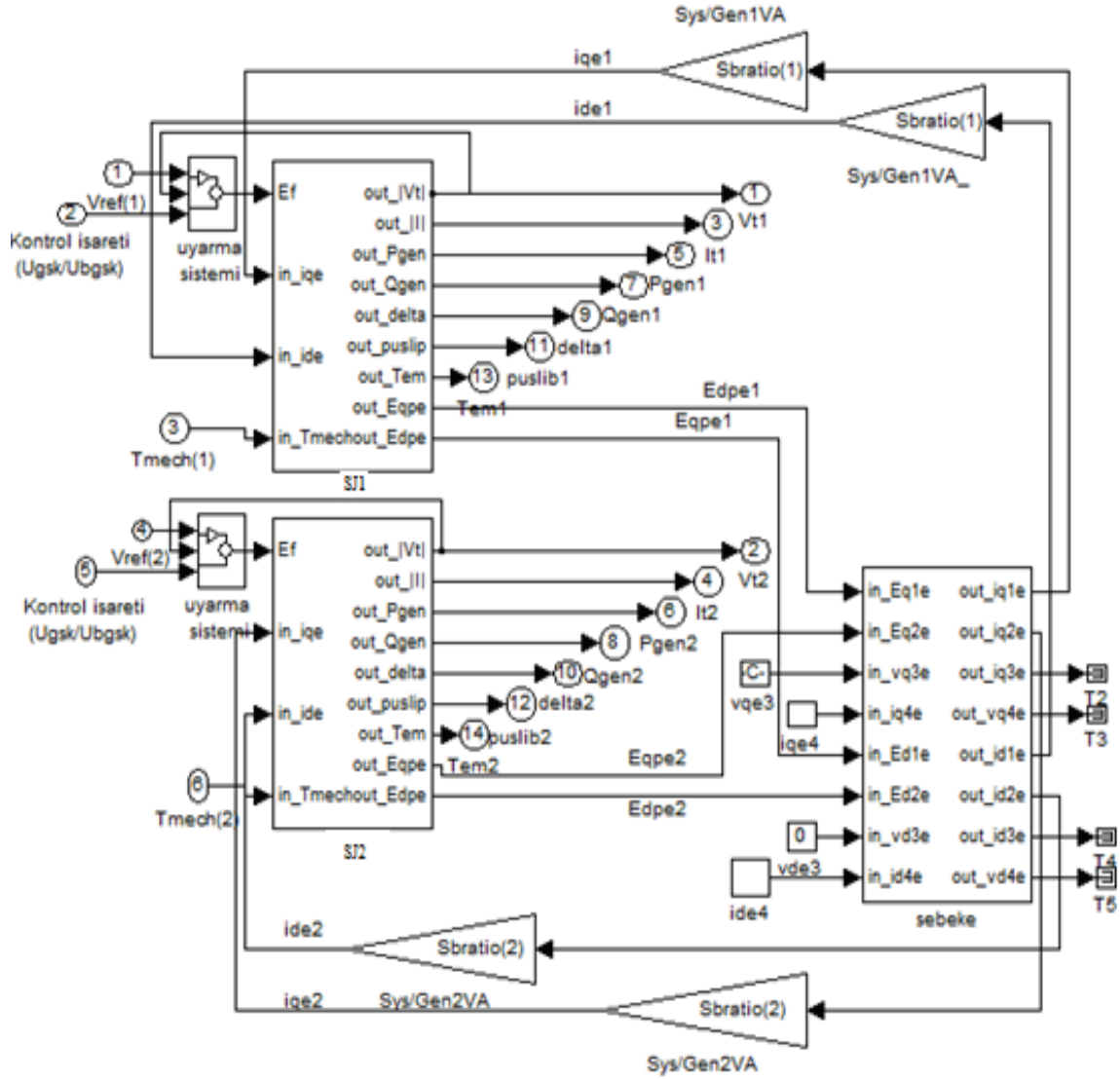
Eğer Şekil 3'deki gibi thevenin eşdeğer devresinden yola çıkarsak  $\vec{E}^e$  dahili geriliminin değeri, rotor alan denklemlerinden elde edilebilir [3]. Jeneratörlerin geçici rejim empedansları şebeke admitans matrisi ile birleştirildiği zaman, akan akım ise; dahili gerilim vektörü ile sonuç admitans matrisinin çarpımı ile elde edilebilir.  $\vec{I}^e$  nin veya  $i_q^e - j i_d^e$  'nin makina simülasyonunda ihtiyaç duyulan makinanın terminal geriliminin elde edilmesi için rotor çatı referans eksenine yani  $i_q - j i_d$  formunu geri dönüştürülmelidir. Şebekenin bara admitans matris denklemleri, iki jeneratöründe geçici rejim empedanslarını kapsayacak şekilde tekrar yazılırsa;

$$\begin{bmatrix} i_{q1}^e - j i_{d1}^e \\ i_{q2}^e - j i_{d2}^e \\ i_{q3}^e - j i_{d3}^e \\ i_{q4}^e - j i_{d4}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{q1}^e - j E_{d1}^e \\ E_{q2}^e - j E_{d2}^e \\ v_{q3}^e - j v_{d3}^e \\ v_{q4}^e - j v_{d4}^e \end{bmatrix} \quad (17)$$

Burada Y'ler referans olarak şebeke toprağının alınması ile oluşturulan admitans matris elemanlarıdır [3]. Şekil 4'de şebeke ile Y admitans matrisi üzerinden bağlı olan iki jeneratörden oluşan dinamik sistemin Matlab/Simulink modeli yer almaktadır. Modelde yer alan Sbratio(1) ve Sbratio(2) jeneratör güçlerinin referans olarak seçilen baz güce bölünmesi ile elde edilen oran katsayısıdır.



Şekil 3: Sistemin Thevenin eşdeğer modeli (Thevenin's equivalent of system)



Şekil 4: SGBÇSJ sistemi için oluşturduğumuz simülasyon bloğu (Simulation block is created for DSGIBsystem )

Tablo 1: Sistem Parametreleri (System Parameters)

<b>Gsk parametreleri:</b>
$K_s = 20 \text{ pu}; T_w = 8 \text{ s}; T_1 = 0.8 \text{ s}; T_2 = 0.001 \text{ s}; T_3 = 0.8 \text{ s}; T_4 = 0.001 \text{ s};$
<b>Şebeke parametreleri ve sistem baz değerleri:</b>
$\omega_b = 2 * \pi * 60; S_{ba} = 1000 \text{ VA}; z_{14} = z_{24} = 0.004 + j0.1 \text{ p.u.}, z_{34} = 0.008 + j0.3 \text{ p.u.}$
<b>Senkron jeneratör 1-2:</b>
$S_{ratio} = 1000/920.35 \text{ VA}; r_s = 0.0048 \text{ pu}; x_d = 1.790 \text{ pu}; x_q = 1.660 \text{ pu}; x_{is} = 0.215 \text{ pu}; x'_d = 0.355 \text{ pu};$ $x'_q = 0.570 \text{ pu}; T'_{do} = 7.9; T'_{qo} = 0.410; H = 3.77 \text{ s.}; D_{\omega} = 2$
<b>Uyartım sistemi ve Otomatik gerilim regülatörü parametreleri:</b>
$K_A = 200 \text{ pu}; T_A = 0.06 \text{ s}; V_{Rmax} = 1 \text{ pu}; V_{Rmin} = -1 \text{ pu}; T_E = 0.052 \text{ s}; K_E = -0.0465 \text{ pu}; T_F = 1.0 \text{ s}; K_F = 0.0832$ $\text{pu}; A_{Ex} = 0.0012; B_{Ex} = 1.264$

### 3. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ VE UYARMA SİSTEMİ MODELİ (MODEL OF AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR AND EXCITATION SYSTEM)

Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) gibi kontrol elemanları, uyarım akımını kontrol ederek jeneratör uç geriliminin ve reaktif gücün belirlenen değerinde sabit kalmasını sağlarlar. Yüksek kazanç

ve düşük zaman sabitine sahip modern OGR'ler güç sistemlerinin kararlılığı üzerinde birbirine zıt etkiye sahiptirler. OGR'ler yüksek çalışma hızları sayesinde bir yandan senkronlayıcı moment değerini artırırken diğer yandan sönümleyici momenti azaltıcı etkilerinden dolayı güç sisteminin dinamik kararlılığının bozulmasına neden olabilirler. [1-3,18].

### 4. GELENEKSEL GÜÇ SİSTEM KARALI KILICI (GGSK) MODELİ (MODEL OF POWER SYSTEM STABILIZER (PSS))

OGR'ye destekleyici sönümleme momenti üretmek amacı ile en yaygın kullanılan destekleyici kontrolör yapıları GSK'lardır [1-2]. Rotor hız sapmasını giriş işareti olarak alan bir geleneksel güç sistemi kararlı kılıcı (GGSK) modeli Şekil 6'de verilmiştir. GSK modeli; kazanç, temizleme bloğu, faz ilerletici bileşen bloklarından oluşur.

**GSK kazancı:** Rotor salınımlarını sönümlemede büyük etkisi vardır. Kazanç değerini belirlerken, geniş bir aralıktaki etkileri göz önünde bulundurulur. [1,2,4-8,18].

**Temizleme filtre bloğu:** Yüksek frekanslı işaretlerin alçak frekanslı işaretlerden ayrılmasını sağlayan yüksek geçiren bir filtre olarak görev yapar.  $T_w$  zaman sabitinin seçimi çok kritik olmamakla birlikte 1-20 s arasında seçilebilir [1,2,4-8,18].

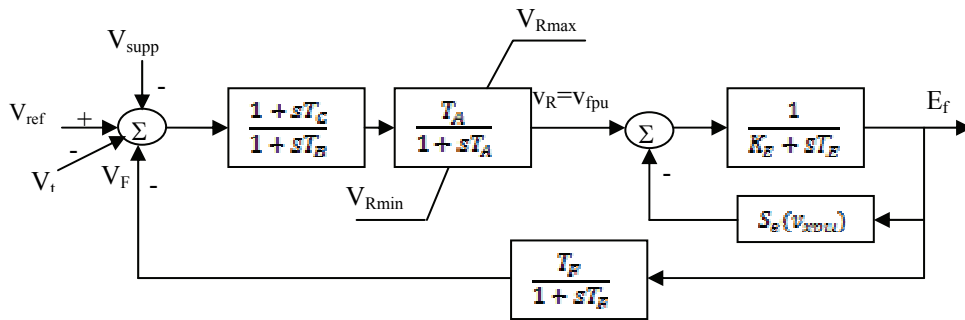
**Faz kompanzasyonu bloğu:** GGSK, rotor salınımlarını sönümleyebilmek için rotor hız sapmalarıyla aynı fazda elektriksel moment bileşeni üretmek zorundadır. Dolayısıyla uyarım girişi (yani GGSK çıkışı) ile elektriksel moment arasındaki faz gecikmesini kompanse edecek faz ilerletme devrelerine gereksinim vardır [1,2,4-8,18].

### 5. BULANIK MANTIK TABANLI GÜÇ SİSTEMİ KARARLILIKLI MODELİ (MODEL OF FUZZY LOGIC BASED POWER SYSTEM STABILIZER)

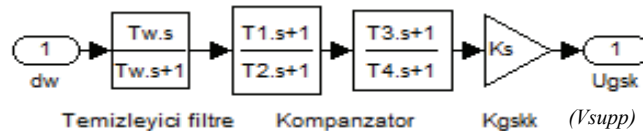
OGR'ye destekleyici sönümleme momenti üretmek amacı ile kullanılan ve dayanıklı yapısından dolayı tercih edilen Bulanık mantık tabanlı GSK'lar (BGSK'lar) aynı zamanda son yılların en popüler çalışma alanlarından [6-9,12-15,17,18,26,27]. En temel hali ile bir BGSK modeli Şekil 7'de görülmektedir.

**Bulanıklaştırıcı:** Giriş değişkenlerinin ölçümünü, normalizasyonu yapıldığı ve üyelik fonksiyonları aracılığıyla bulanık değişkenler için üyelik derecelerinin üretildiği birimdir [6-9,18].

**Bulanık kurallar:** Sisteme ait bilgiler ve dilsel kontrol kural tabanını içerir. İstenilen giriş kontrol işlemlerinin karşılaştırılmasını sağlar [6-9,18].



Şekil 5: Otomatik gerilim regülatörü ve uyarım sisteminin simülasyon modeli [3]  
(Model of automatic voltage regulator and excitation)



Şekil 6: Geleneksel güç sistemi kararlı kılıcı (GGSK) modeli  
(Model of power system stabilizer)

**Bulanık çıkarım motoru:** Bulanık kural tabanını kullanarak bulanık giriş işaretlerine karşılık düşen bulanık çıkış işaretlerinin üretildiği birimdir [6-9,18].

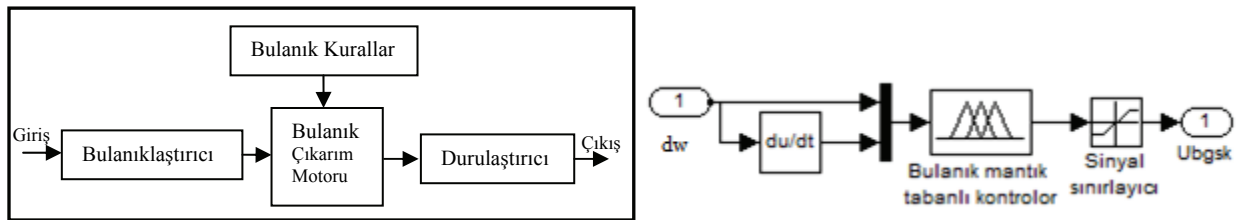
**Durulaştırıcı:** Üretilen bulanık çıkışın, sisteme uygulanabilecek şekilde gerçek işarete dönüştürülmesini ve ölçeklendirilmesini sağlayan kısımdır. [6-9,18].

BGSK'da; GGSK'da kontrolü sağlayan transfer fonksiyonlarının işlevini üyelik fonksiyonları ve kural tablosu yerine getirmektedir. Oluşturulan BGSK modeline giriş olarak hız farkının değişimi ve bu farkın türevi verilmiştir. BGSK'nın giriş işaretleri  $d\omega$  ve  $ce\omega$  uygun ölçeklendirme faktörleriyle;  $d\omega$  [-0.002, +0.002] aralığında ve  $ce\omega$  [-0.002, +0.002] aralığında sınırlandırılmıştır. Giriş işaretleri bu aralıkta negatif büyük (NB), negatif orta (NO), negatif küçük (NS), sıfır (S), pozitif küçük (PS), pozitif orta (PO), pozitif büyük (PB), olmak üzere yedi dilsel

değişkene ayrılmıştır. Vpss çıkış geri besleme geriliminin değişimi ise [-0,15, +0,15] aralığında sınırlandırılmış olup Tablo 2'de sistem için oluşturulan kural tablosuna yer verilmiştir.

## 6. GÜÇ SİSTEMİNE AİT SİMÜLASYONLAR VE SAYISAL SONUÇLAR (SIMULATIONS FOR POWER SYSTEM and NUMERICAL RESULTS)

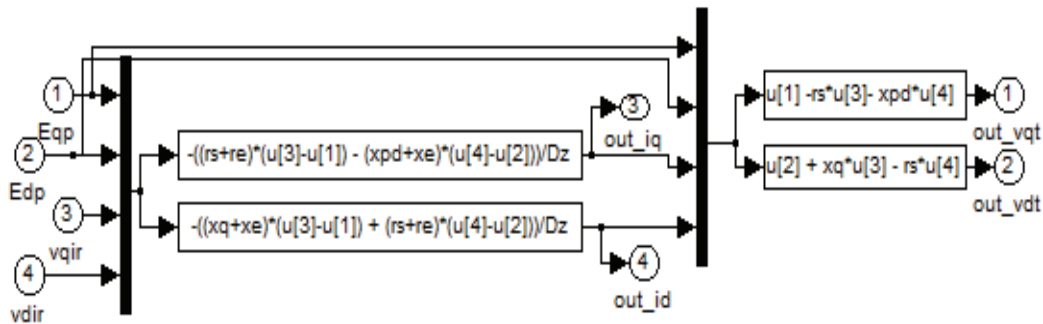
Bu çalışma için; ikinci bölümde elde ettiğimiz stator sargı denklemleri (1)-(2), rotor sargı denklemleri (3)-(4), moment ve hareket denklemleri (10)-(13) ve şebeke admitans denklemleri (14)-(17) kullanılarak Matlab-Simulinkde oluşturulan alt blok diyagramlarına Şekil 8-12'de ve bu alt blok diyagramları kullanarak oluşturulan sistemimizin tam modeline ise Şekil 13'de yer verilmiştir.



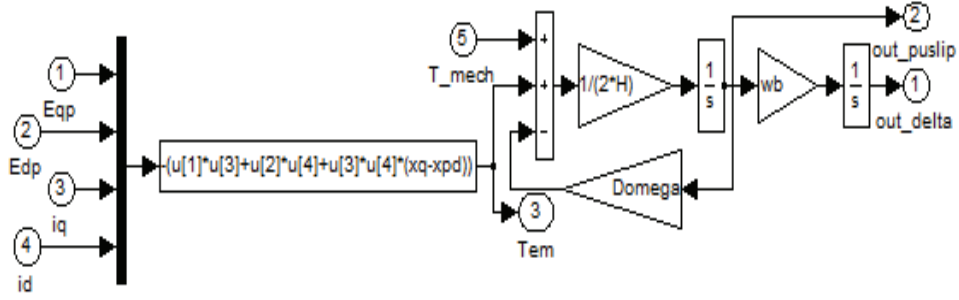
**Şekil 7.** Bulanık mantık tabanlı kontrolörün temel yapısı ve simulasyon modeli  
(The basic structure of fuzzy controller and simulation model)

**Tablo 2:** BGSK kural tablosu (Rules of FPSS)

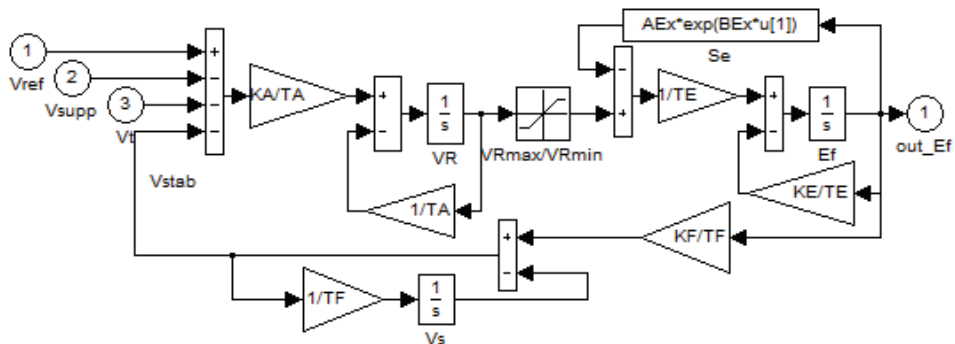
$ce\omega$ \ $d\omega$	NB	NO	NS	S	PS	PO	PB
NB	PO	PS	PS	NS	NS	NO	NB
NO	PO	PS	PS	NS	NS	NO	NB
NS	PO	PS	S	NS	NS	NS	NB
S	PO	PS	S	S	NS	NO	NB
PS	PO	PS	S	S	NS	NO	NB
PO	PO	PS	PS	PS	NS	NO	NB
PB	PO	PS	PS	PO	NS	NO	NB



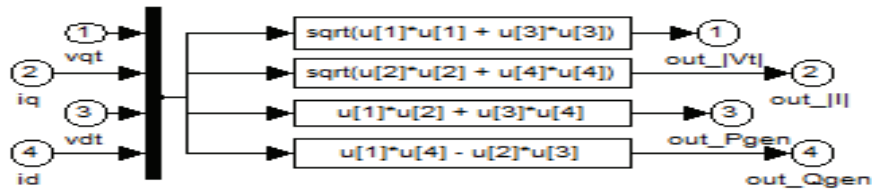
**Şekil 8:** Stator sargı denklemleri bloğu (Block of the stator winding equations)



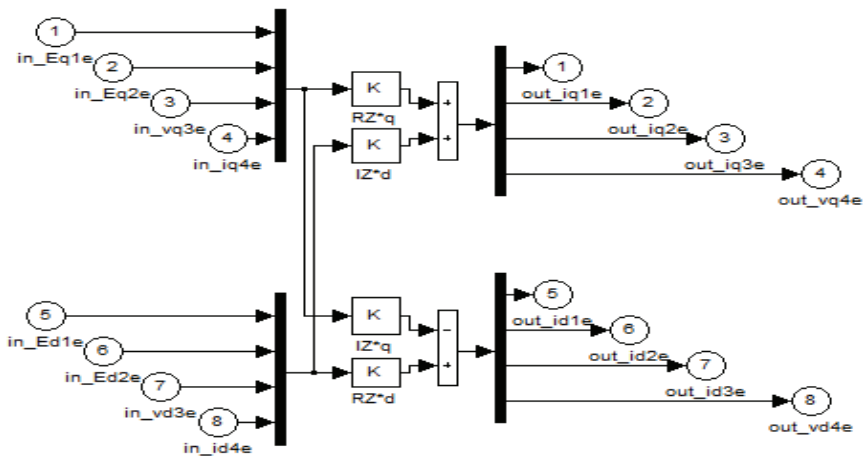
Şekil 9. Moment ve hareket denklemleri bloğu (Block of motion and torque equations)



Şekil 10. Uyartım denklemleri bloğunu (Block of the excitation equations)

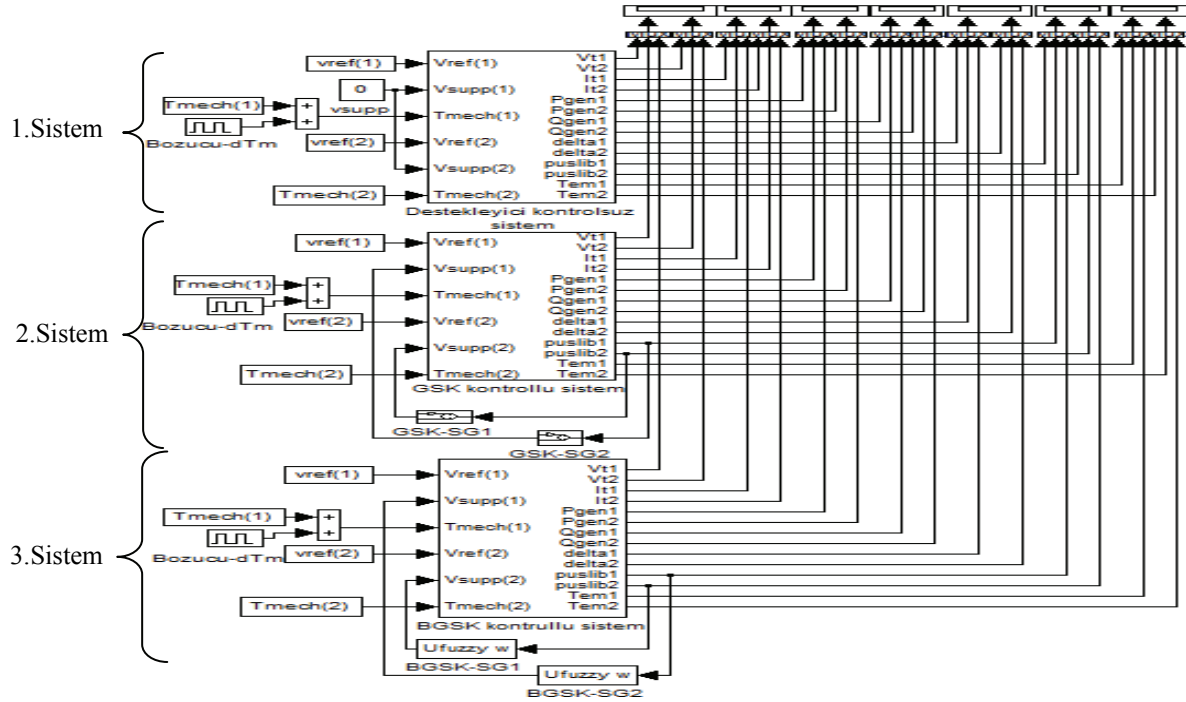


Şekil 11. Çıkış büyüklükleri bloğu (Block of the output parameters)



Şekil 12. Şebeke denklemleri bloğunu (Block of the network equations)

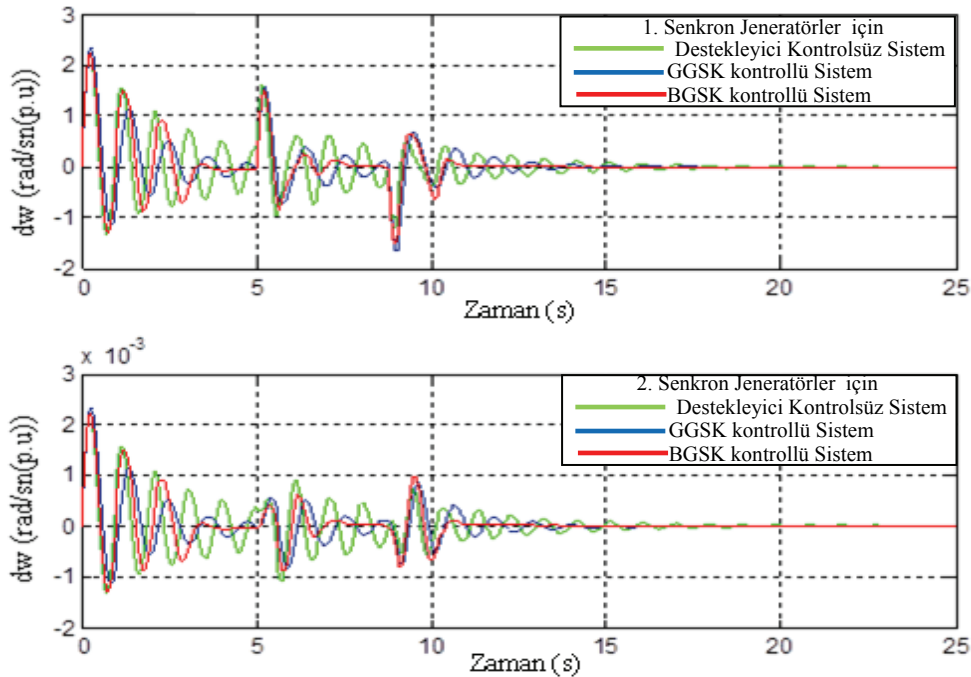




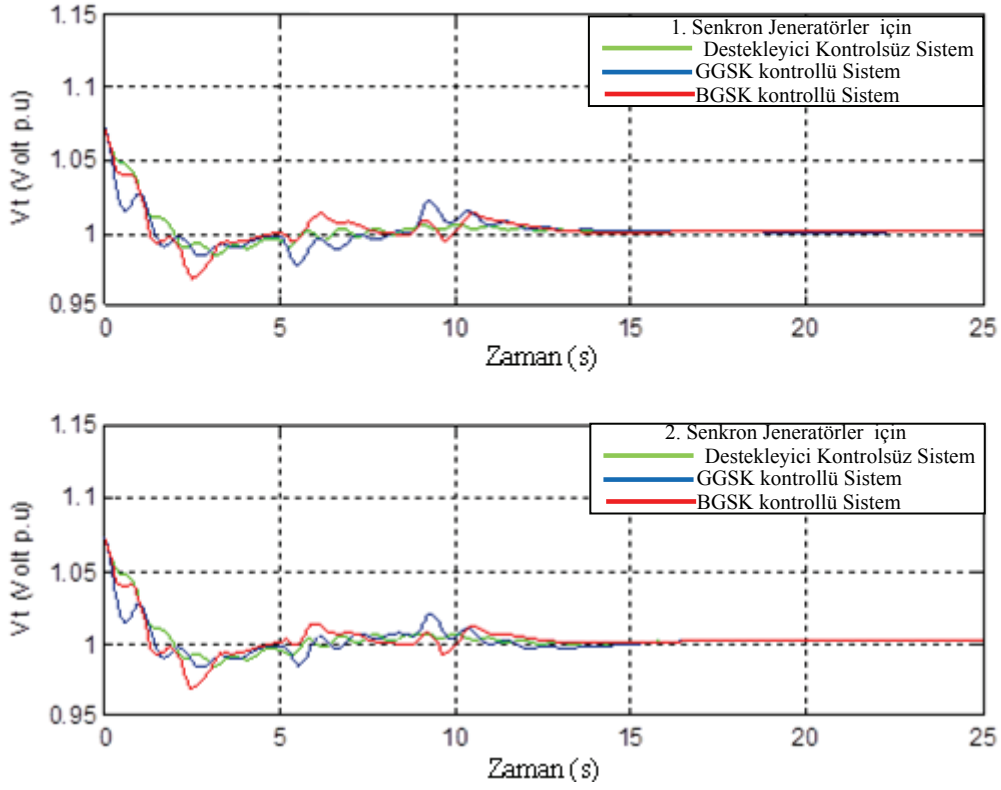
Şekil 13. SGBÇSJ sisteminin küçük işaret kararlılık analizi için gerçekleştirdiğimiz simülasyon modeli  
(DSGIB system is a powerful simulation model is realized for small signal stability analysis)

Birinci sistemde sadece OGR bulunmaktadır yani herhangi bir destekleyici kontrolör yapısı yer almamaktadır. İkinci ve Üçüncü sistem simülasyonu bloklarında ise destekleyici kontrolörler yapıları bulunmaktadır. Üçüncü sistemde bu çalışma için tasarladığımız BGSK destekleyici kontrolör yapısı ve ikinci sistemde ise BGSK'nın küçük işaret bozucu karşısındaki kararlılık performansını karşılaştırmak

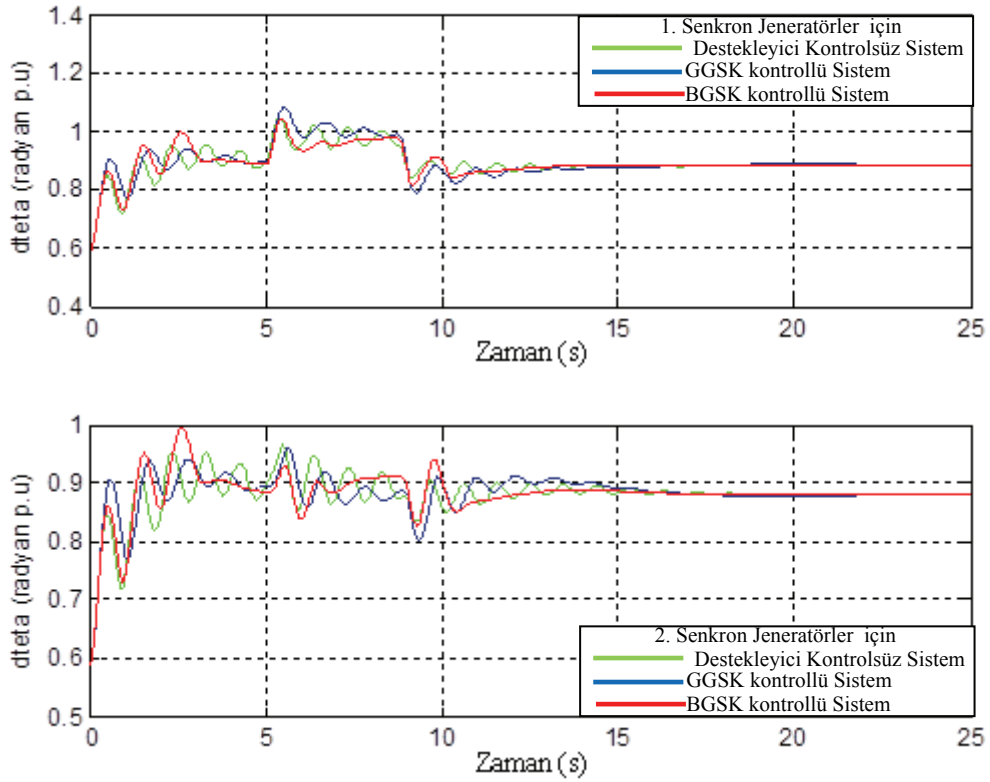
amacı ile GGSK destekleyici kontrolörü bulunmaktadır. Her üç sistemde de sadece 1.SJ'lere küçük bozucu sinyal olarak 0.1 pu genlikli periyodu 30s, darbe genişliği %12.5,  $t_{\text{delay}}=5s$  lik gecikme zamanlı bir pals uygulanmış ve çıkış büyüklüklerinin değişimlerinin Şekil 14-19'deki gibi olduğu gözlemlenmiştir.



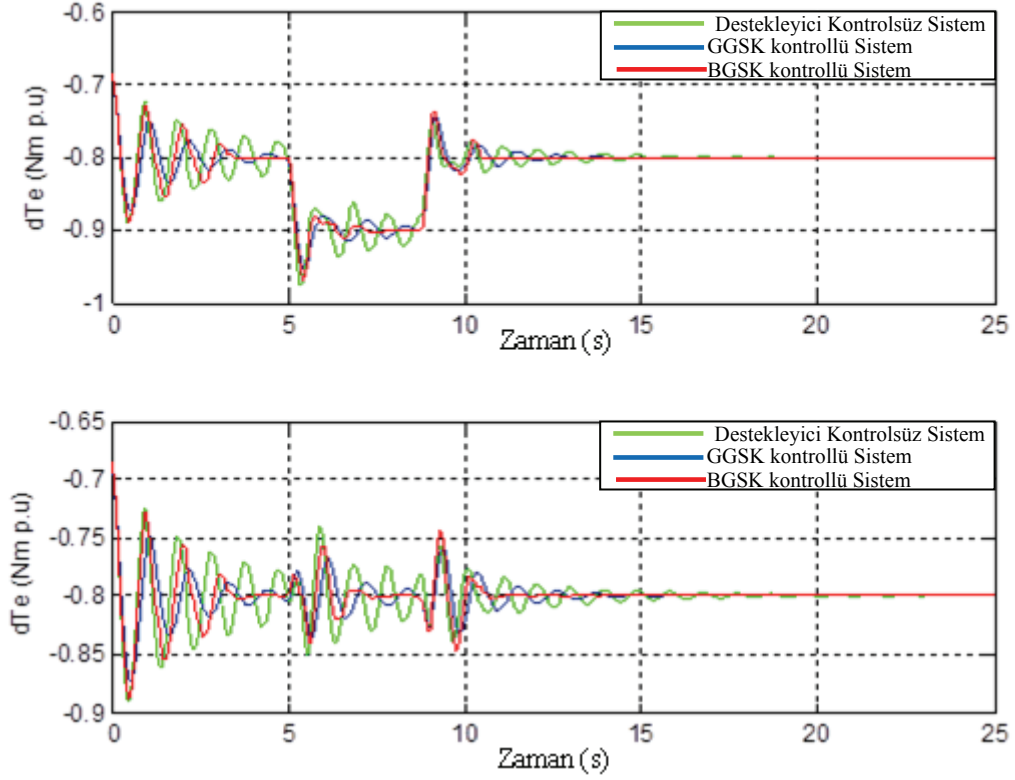
Şekil 14. SGBÇSJ sisteminde rotor hızının değişimi (Rotor speed variation of DSGIB system)



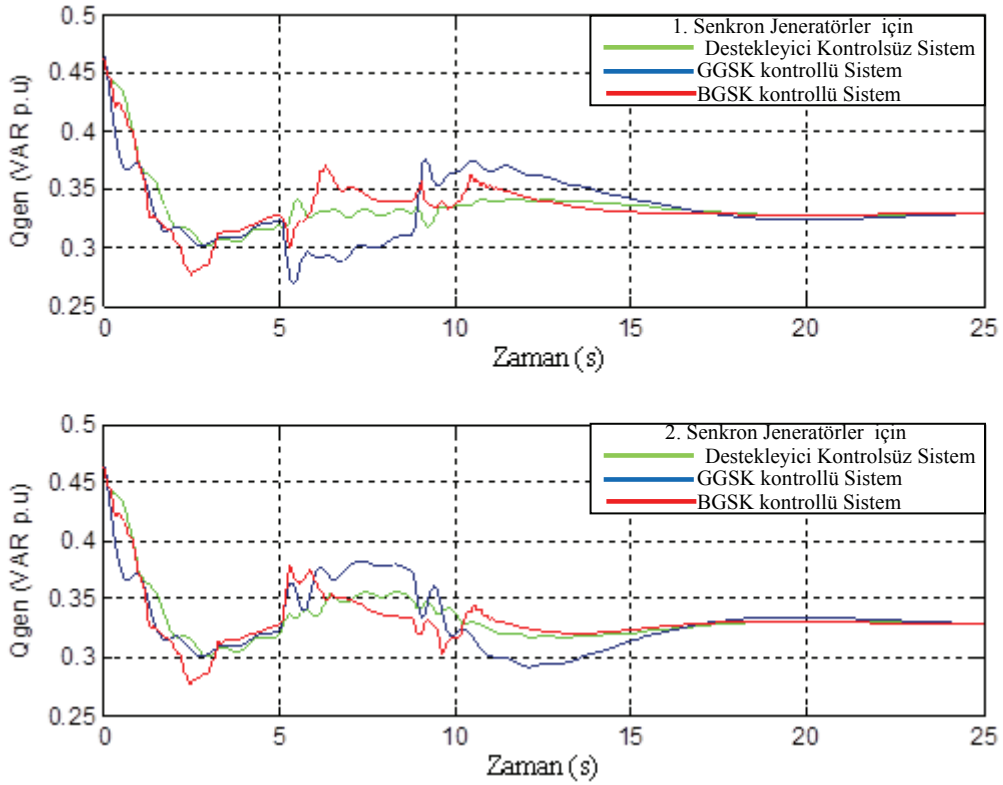
Şekil 15. SGBÇSJ sisteminde jeneratör uç geriliminin değişimi (Terminal voltage variation of DSGIB system)



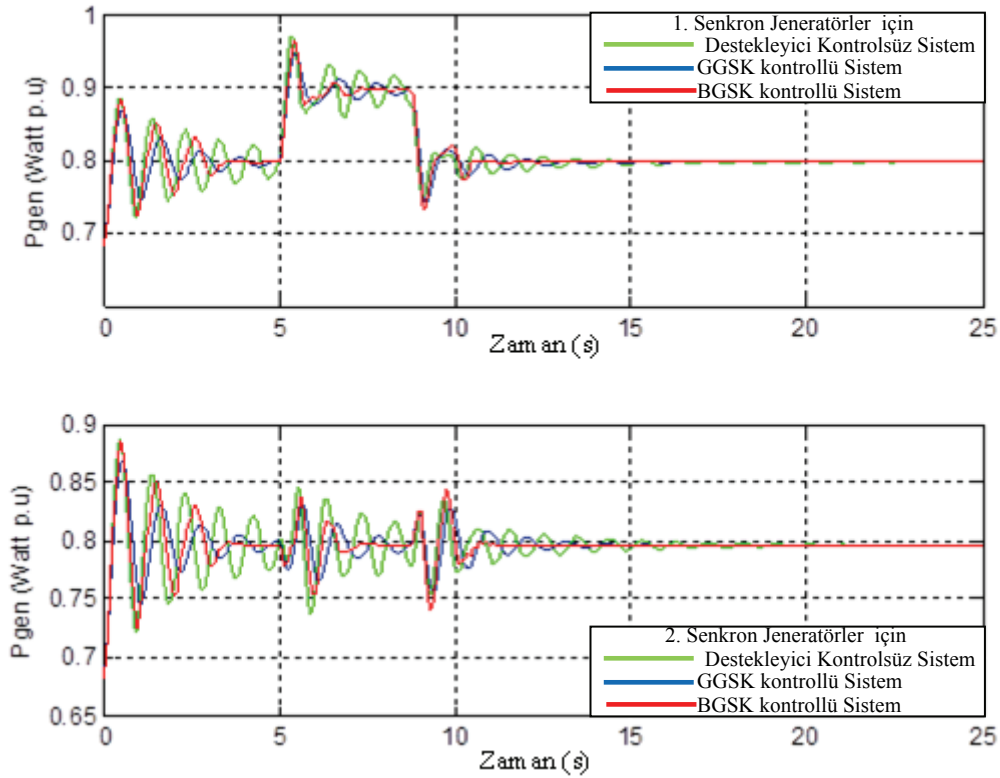
Şekil 16. SGBÇSJ sisteminde rotor açısının değişimi (Rotor angle variation of DSGIB system)



Şekil 17. SGBÇSJ sisteminde elektriksel momentin değişimi (Electrical torque variation of DGIB system)



Şekil 18. SGBÇSJ sisteminde reaktif gücün değişimi (Reactive power variation of DSGIB system)



Şekil 19. SGBÇSJ sisteminde aktif gücün değişimi (Active power variation of DSGIB system)

Tablo 3. Grafiklerden Elde Edilen Sayısal Sonuçlar (The numerical Results Obtained Chars)

	Destekleyici Kontrolsüz sistem (Sistem 1)		GGSK (Sistem 2)		BGSK (Sistem 3)	
	SJ1	SJ2	SJ1	SJ2	SJ1	SJ2
$\dot{\omega}$ daki max aşma miktarı	0,0022	0,0022	0,0023	0,0023	0,0022	0,0022
$\dot{\omega}$ 'nın mutlak değerlerinin integrali	0,0070	0,0067	0,0051	0,0046	0,0046	0,0043
$\dot{\omega}$ 'nın mutlak değerlerinin integrali için % iyileşme değeri	-	-	27,14286	31,34328	34,28571	35,82090
Yerleşme zamanı(t)	26,5	26,5	22,6	22,6	16,22	16,22
Yerleşme zamanı için % iyileşme değeri	-	-	14,71698	14,71698	38,79245	38,79245

Grafiksel sonuçların daha net ve doğru bir şekilde yorumlanabilmesi için Tablo 3'de grafikler ışığında elde edilen sayısal sonuçlara yer verilmiştir.

Tablo 3'de yer alan sayısal veriler yorumlanacak olursa:

- SGBÇSJ sistemlerinde; bozucu etki sadece birinci senkron jeneratörlere uygulanmasına rağmen ikinci jeneratörlerde bu bozucudan etkilenmiş ve  $\dot{\omega}$ 'da max. aşma değeri, bağlı oldukları birinci senkron jeneratörler ile aynı olan salınımlar görülmüştür.
- Salınım süresine ve genliğine bağlı olarak değişen  $\dot{\omega}$ 'nın mutlak değerlerinin integrali ifadesi ise birinci senkron jeneratörler için BGSK kontrollü sistemde 0,0046 p.u., GGSK kontrollü sistemde ise 0,0051 p.u. ve destekleyici

kontrolörün bulunmadığı sistemde 0,0070 p.u. değerindedir. Değerlerden de analiz edildiği gibi açılma hızında oluşan salınımın genliği ve süresi BGSK kontrolörlü sistemde kayda değer ölçüde azalmıştır.

- Bozucu etkiye maruz kalan sistemlerden destekleyici hız kontrolörün bulunmadığı sistem 26,5 s de, GGSK kontrolörünün bulunduğu sistem 22,6 s de ve BGSK kontrolörün bulunduğu sistem ise 16,2' s de kararlı çalışma duruma ulaşmıştır. Yerleşme zamanı (t)den de açıkça görüldüğü gibi BGSK, GGSK'ya göre sistemi çok daha kısa sürede kararlı duruma erdirmektir.

## 7. DEĞERLENDİRME (CONCLUSION)

Bu çalışmada; sonsuz güçlü baraya bağlı çift senkron jeneratörden (SGBÇSJ) oluşan dinamik sistemin küçük işaret bozucu etkiye maruz kalması durumunda sistemlerinin çalışma performansları ve dinamik davranışları; destekleyici kontrolün bulunmadığı durum, destekleyici kontrolör olarak GGSK'nın bulunduğu durum ve destekleyici kontrolör olarak BGSK'nın bulunduğu durumlar için karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir.

- ✓ GGSK, destekleyici kontrolörün bulunmadığı sisteme göre  $\omega_0$  açısız hız farkındaki salınımları; birinci senkron jeneratörde % **27,14286**, ikinci senkron jeneratörde % **31,34328** oranında iyileştirmiştir. BGSK ise destekleyici kontrolörün bulunmadığı sisteme göre birinci senkron jeneratörde % **34,28571**, ikinci senkron jeneratörde % **35,82090**'lık bir iyileşme sağlamıştır. Yazıcı [5], SGBSJ sistemi için tasarımı gerçekleştirmiş olduğu GSK ile sistem performansında % **33**'lük iyileşme ve NALBANTOĞLU [10] ise tasarımı gerçekleştirmiş olduğu GSK ile sistem performansında % **37,3** lük bir iyileşme sağlamıştır.
- ✓ GGSK, destekleyici kontrolörün bulunmadığı sisteme göre  $t$  yerleşme zamanını ise birinci ve ikinci senkron jeneratör için % **14,71698** oranında iyileştirme sağlarken; BGSK, destekleyici kontrolörün bulunmadığı sisteme göre  $t$  yerleşme zamanını ise birinci ve ikinci senkron jeneratör için % **38,79245** oranında iyileştirmiştir.

Sonuç olarak bu çalışmada elde edilen grafiksel ve sayısal veriler literatür ile uyum içinde olup, tasarladığımız BGSK'nın güç sisteminin geçici hal kararlılığını sağlamada GGSK'ya göre daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. BGSK'nın bu başarısı modellendiği şebeke ağır yük çalışma koşullarında sınırlı kalmayıp, farklı şebeke çalışma koşullarında da aynı etkiyi sağlayabilmesinden bir sonucudur.

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR (SYMBOLS AND ABBREVIATION)

SGBÇSJ (DSMİB) SISTEMI: Çift jeneratör sonsuz güçlü bara sistemi ( Double Synchronous generator infinite bus)  
 SGBSJ (SGIPB): Sonsuz güçlü baraya bağlı senkron jeneratör (Synchronous Generator connecting to Infinite Power Bus)  
 SJ: Senkron jeneratör  
 GGSK(CPSS): Güç sistem kararlılık (Power system stabilizer)  
 BGSK(FPSS): Bulanık mantık tabanlı güç sistem kararlılık (Fuzzy logic based power system stabilizer)  
 KGSK: Kayma Kipli güç sistem kararlılık

OGR(AVR): Otomatik gerilim regülatörü ( Automatic voltage regulator)

Sbratio(1)(2): baz hız dönüşüm katsayısı

$V_t$ : Jeneratör uç gerilimi

$I_t$ : Akım

$V_{supp}$ : Destekleyici kontrol işareti

$E_f$ : Uyarma gerilimi

$V_{ref}$ : Referans gerilimi

$T_{mech}$ : Tahrik momenti

$T_e$ : Elektrik momenti

$T_{damp}$ : Sönümleyici momenti

( $\omega_{slip}$ ) $\omega_0$ : Rotor açısız hız farkı

$\omega_r$ : Rotor açısız hızı

$\omega_e$ : Elektriksel açısız hız

$\omega_{rm}$ : Mekanik rotor açısız hız

$\delta$  (delta): Güç (rotor) açısı

$T'_{do}$ : d -ekseni geçici zaman sabiti

$T'_{qo}$ : q -ekseni geçici zaman sabiti

$T_a$ : regülatör zaman sabiti

$K_a$ : Regülatör kazancı

$T_e$ : Uyarıcı zaman sabiti

$S_e, K_e$ : Uyarıcı kazancı

$T_f$ : Kararlı kılıcı zaman sabiti

$K_f$ : Kararlı kılıcı kazancı

H: Senkron jeneratör atalet sabiti

Omega: Sönüm katsayısı

$x'_d, x'_q$ : Senkron reaktans bileşenleri

$x_q, x_d$ : Geçici reaktans bileşenleri

$r_s$ : Stator sargı direnci

$r_{24}, r_{34}$ : İletim hattı dirençleri

$x_{14}, x_{24}, x_{34}$ : İletim hattı indüktansları

Y: Admitans matrisi

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Kundur, P., **Power System Stability and Control**, Neal J. Balu & Mark G. Lauby Mc Graw-Hill, New York, A.B.D., 1993.
2. Demirören, A., Zeynelgil, L., **Elektrik Enerjisi Sistemlerinin Kararlılığı, Kontrolü ve Çalışması**, Birsen Yayınevi, İstanbul, Türkiye, 2004.
3. Mun Ong, C., " Synchronous Machines in Power Systems and Devices", **Dynamic Simulation of Electric Machinery**, Russ Hall, Prentice Hall PTR, New Jersey, A.B.D., 463-568, 1998.
4. Yılmaz, A. S., **Güç Sistem Kararlılıkları ve Uygulamaları**, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 1997.
5. Yazıcı, İ., **Modern Referans Kayan Kipli Kontrolör Tabanlı Güç Sistem Kararlılık Tasarımı**, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
6. Erdem, A., **Bulanık Mantık Kontrolör Yardımı İle Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı**, Yüksek lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2007.
7. Caner, M., **Hiyerarşik Fuzzy Yöntemiyle Senkron Jeneratörlerde Uyarım Kontrol**, Doktora Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.

8. Varbak N., **Enerji Sistemlerinde Bulanık Mantık Temelli Güç Sistem Kararlı Kılıcı Uygulamaları**, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.
9. Kaytez, F., **Klasik PID ve Bulanık Mantık Kontrol ile Senkron Generatör Kontrolü**, Yüksek lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2005.
10. Nalbantoğlu, M., Orhan, A., Bayındır, M. İ., "Sonsuz Baraya Bağlı Bir Senkron Generatörün Uyarma Kontrolü İçin Kayma Kipli Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı", **5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)**, Karabük, Türkiye, Paper ID : 1216, 13-15 Mayıs 2009
11. Nalbantoğlu, M., Orhan, A., Bayındır, M.İ., "Erişim Kurallı Kayma Kipli Güç Sistemi Stabilizatörünün Tasarımı", **Elektrik - Elektronik Ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO**, Bursa 26-30 Kasım 2008.
12. Özkop, E., Altaş, İ.H., Akpınar, A.S., "Bulanık Mantık Denetleyici Güç Sistem Uygulaması", **Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO**, 2004.
13. Kartez, F., Gözde, H., Taplamacıoğlu, M. C., "Klasik PID ve Bulanık Mantık Kontrolör ile Senkron Makine Kontrolü", **Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi**, 429-432, İstanbul, 22-25 Eylül 2005.
14. Oğuz, G., Demirören, A., "Bulanık Mantıklı Kontrolör İle Güç Sistemlerinde Geçici Kararlılığın İyileştirilmesi", **Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, ELECO**, 2004.
15. Caner, M., Umurkan, N., Çimen, H., "Bulanık Mantık Tabanlı Uyarım Kontrolü", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, Cilt 1, s. 17-22, 2004.
16. Yazıcı, İ., Özdemir, A., "Optimal Kazanç Tablolamalı Güç Sistem Kararlıkılıcı Tasarımı", **SAÜ. Fen Bilimleri Dergisi**, Cilt 12, Sayı 1, s. 38-42, 2008.
17. Erdem, A., Demirören, A., "Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolör Yardımı İle Güç Sistemi Kararlı Kılıcı Tasarımı", **EMO 40.dönem Sempozyum ve kongreler**, 2007.
18. Taşar, B., Özdemir, M., "Çıkık Kutuplu Senkron Generatörde Küçük İşaret Kararlılık Analizi", TOK 2010. "Üniversite Sanayi İşbirliği", **Ulusal Otomatik Kontrol Toplantısı, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü**, Kocaeli, 21-23 Eylül 2010.
19. You, R., **Controller Design for PSS and FACTS Devices to Enhance Damping of Low-Frequency Power Oscillations in Power Systems**, Doctor of Philosophy, Montana State University, 2006.
20. Tavahodi, M., **Mixed Model Predictive Control with Energy Function Design for Power System**, Master of Engineering, Queensland University of Technology, 2007.
21. He, J., **Adaptive Power System Stabilizer Based on Recurrent Neural Network**, Doctor of Philosophy, The University of Calgary, Alberta, 1998.
22. Gupta, R., **Robust Nondynamic Multirate Output Feedback Technique Based Power System Stabilizers**, Doctor of Philosophy, Indian Institute Of Technology, Bombay, 2003.
23. Kavvaseri, R. G., **A New Methodology for The Design of Power System Stabilizers**, Doctor of Philosophy, Washington State University, 2002.
24. Bandal, V. S., **Power System Stabilizer Design based on Multirate Output Feedback Sliding Mode Control Strategies**, Doctor of Philosophy, Indian Institute Of Technology, Bombay, 2006.
25. Elshafei, A.L., El-Metwally, K.A., Shaltout A.A., A Variable-Structure Adaptive Fuzzy Logic Stabilizer For Single And Multi-Machine Power Systems, **Control Engineering Practice**, 13, (4), 413-423, 2005.
26. Hiyama, T., Kita, T., Miyake, T., Andou, H., Experimental Studies Of Three Dimension Fuzzy Logic Power System Stabilizer On Damping Of Low-Frequency Global Mode Of Oscillation, **Fuzzy Sets and Systems**, 102, (1), 103-111, 1999.
27. Hariri, A., Malik, O.P., Fuzzy logic power System stabilizer based on genetic adaptive network, **Fuzzy Sets and Systems**, 102, (1), 31-40, 1999.
28. Ajami, A., Asadzadeh, H., Damping of Power System Oscillations Using UPFC Based Multipoint Tuning AIPSO-SA Algorithm, **Gazi University Journal of Science**, 24, (4):791-804, 2011.