



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Zaman gecikmeli elektrik güç sistemlerinin gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin hesaplanması

Computation of delay-dependent stability regions for electric power systems with time delay

Yazar(lar) (Author(s)): Şahin SÖNMEZ¹, Saffet AYASUN²

ORCID¹: 0000-0002-0057-2522

ORCID²: 0000-0002-6785-3775

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Sönmez Ş. ve Ayasun S., “Zaman gecikmeli elektrik güç sistemlerinin gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin hesaplanması”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 581-592, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.772330

Zaman Gecikmeli Elektrik Güç Sistemlerinin Gecikmeye Bağlı Kararlılık Bölgelerinin Hesaplanması

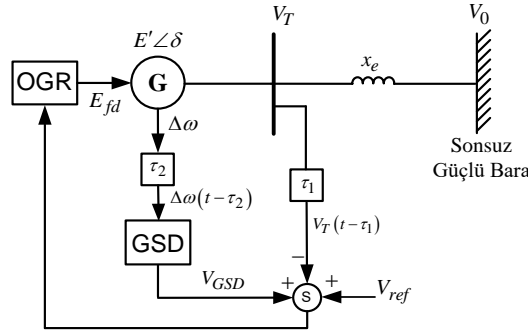
Computation of Delay-Dependent Stability Regions for Electric Power Systems with Time Delay

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ OGR ve GSD içeren çoklu zaman gecikmeli TMSB sistemi (The multiple incommensurate time delayed SMIB system with AVR and PSS)
- ❖ TMSB sisteme özdeğer izleme yönteminin uygulanması (The implementation of eigenvalue tracing method to SMIB system)
- ❖ Gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin hesaplanması (The computation of delay-dependent stability regions)

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Bu çalışma, GSD ve OGR içeren çoklu zaman gecikmeli TMSB sisteminin zaman gecikmeleri düzleminde kararlılık bölgelerini ve zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini incelemektedir. (This work investigates delay-dependent stability analysis and stability regions in time delays space for a multiple time delayed SMIB system including PSS and AVR)



Şekil. GSD ve OGR içeren zaman gecikmeli TMSB sistemi/ **Figure.** Time delayed SMIB system including AVR and PSS

Amaç (Aim)

Bu çalışma, OGR ve GSD içeren TMSB sisteminin maksimum zaman gecikmesi değerlerini ve gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerini elde etmeyi amaçlamaktadır. (The aim of the study is to obtain the delay-dependent stability regions and delay margin values of the SMIB system with PSS and AVR)

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Özdeğer izleme yöntemi (Eigenvalue tracing method)

Özgünlük (Originality)

Özdeğer izleme yöntemi kullanılarak sistem kararlılığı üzerinde GSD ve OGR kontrol çevrimlerindeki zaman gecikmelerinin etkisi incelenmiştir. (it is investigated the effect of time delays of PSS and AVR control loops on the system stability using eigenvalue tracing method.)

Bulgular (Findings)

Jeneratörün yükü ve GSD kazançları arttıkça kararlılık bölgelerinin küçüldüğü görülmüştür. (It is found that the stability regions decrease as the PSS gain and load increase)

Sonuç (Conclusion)

Bu çalışma mevcut literatüre önemli katkılar yapmaktadır. (The study makes the significant contributions to existing literature)

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Zaman Gecikmeli Elektrik Güç Sistemlerinin Gecikmeye Bağlı Kararlılık Bölgelerinin Hesaplanması

Araştırma Makalesi / Research Article

Sahin SÖNMEZ^{1*}, Saffet AYASUN²

¹Yeşilyurt Meslek Yüksek Okulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Gazi Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 21.07.2020 ; Kabul/Accepted : 26.10.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 29.10.2020)

ÖZ

Bu çalışma, bir özdeğer izleme yöntemi kullanarak güç sistem dengeleyici (GSD) ve otomatik gerilim regülatörü (OGR) içeren zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin zaman gecikmeleri düzleminde kararlılık bölgesini elde etmeyi ve zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini incelemektedir. Elektrik güç sistemlerinde gerilim ve frekans kararlılığının sürdürülmesi bakımından haberleşme alt yapısına ve ölçme sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, haberleşme alt yapısı ve ölçme sistemlerinden dolayı sistemin dinamik davranışını ve kararlılığını olumsuz etkileyen zaman gecikmeleri meydana gelmektedir. Bu çalışmada, jeneratör uyarma kontrol sisteminin durum denklem modellerini kullanarak özdeğerlerini ve bu özdeğerlere karşılık gelen zaman gecikmesi değerlerini belirleyen bir yöntem kullanılmıştır. Ayrıca, bu gecikme değerleri kullanılarak gecikmeye bağlı bir kararlılık bölgesi elde edilmiştir. Kararlılık analizleri için, GSD ve OGR içeren tek makineli sonsuz baralı (TMSB) bir güç sistemi seçilmiştir. Gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin doğruluğu, zaman düzleminde gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ve zaman gecikmeli sistemlerin köklerini kompleks düzlemde hesaplayan QPmR (the quasi-polynomial mapping-based root finder) algoritması ile gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Jeneratör uyarma kontrol sistemi, haberleşme zaman gecikmesi, QPmR algoritması, özdeğer izleme yöntemi.

Computation of Delay-Dependent Stability Regions for Electric Power Systems with Time Delay

ABSTRACT

This work investigates delay-dependent stability analysis and stability regions in time delays space using eigenvalue tracing method for a time-delayed generator excitation control system including a power system stabilizer (PSS) and an automatic voltage regulator (AVR). Electrical power systems need to communication networks and measurement systems for keeping the voltage and frequency stability. However, the utilizing of communication networks and measurement systems causes inevitable time delays which deteriorate the system dynamical behavior. In the study, a simple method finding delay margin values and critical eigenvalues considering state-space equations of the excitation control system are used. Also, the stability regions using the obtained delay margin values are determined. For the stability analysis, a single-machine-infinite-bus (SMIB) system including AVR and PSS is assigned as a test system. The accuracy of the delay-dependent stability regions are verified by time-domain simulations and the quasi-polynomial mapping-based root finder (QPmR) algorithm which demonstrates the dominant roots of time-delayed systems in complex plane, respectively.

Keywords: Generator excitation control system, communication time delay, QPmR algorithm, eigenvalue tracing method.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu çalışma, özdeğer izleme yöntemi yardımıyla otomatik gerilim regülatörü (OGR) ve güç sistem dengeleyici (GSD) içeren zaman gecikmeli bir jeneratör uyarma kontrol sisteminin maksimum zaman gecikme değerlerini hesaplamayı ve gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerini elde etmeyi amaçlamaktadır. Elektrik güç sistemlerinde, aktif/reaktif yük taleplerinde sürekli olarak değişimler meydana gelmektedir. Bu durum, sistem frekansında ve jeneratör terminal geriliminde değişimlere neden olmaktadır. Dolayısıyla, güç şebekesinin güvenilirliği, güvenliği ve kararlılığının sağlanması için güç üretim birimleri yük frekans kontrol

(YFK) ve OGR sistemine sahiptirler [1]-[3]. Ayrıca, yük bozucu etkilerinin bir sonucu olarak jeneratör rotorunda 0.2-2Hz aralığında düşük frekanslı salınımlar meydana gelmektedir.

Düşük frekanslı salınımları sönmölemek ve sisteme elektro-mekaniksel moment sağlamak için jeneratör sistemlerinde GSD görev almaktadır. Ancak, kontrol sistemlerinin istenilen bu görevleri yerine getirebilmesi için, frekans ve gerilim bilgilerinin geniş alanlı ölçüm/izleme sistemleri yardımıyla ölçülmesi ve ölçüm verilerinin haberleşme ağları aracılığıyla kontrol birimlerine iletilmesi gerekmektedir. Aynı zamanda, düşük frekanslı bu salınımların sönmölenmesi için rotor hızı ve aktif güç gibi lokal büyüklüklerin geri besleme sinyali olarak ölçülmesi gereklidir [4]. Bu süreç, elektrik

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)

e-posta : ssonmeztr@gmail.com

güç sistemlerinde ölçüm ve haberleşme zaman gecikmelerinin yaşanmasına neden olmaktadır [5], [6]. Ölçüm zaman gecikmelerinin kaynağı daha çok frekans ve gerilim değerlerinin ölçülmesi için kullanılan fazör ölçüm birimleri tarafında gözlenmektedir. Ayrıca, ölçülen bu sinyallerin çeşitli haberleşme ağları yardımıyla kontrol birimlerine iletilmesinden kaynaklanan haberleşme zaman gecikmeleri meydana gelmektedir [5], [7]. Güç sistem kontrolü için veri ölçüm gecikmelerinin milisaniyeler mertebesinde olduğu [5], [8], veri transferinden dolayı haberleşme gecikmesinin 100ms ile 10s arasında değiştiği rapor edilmiştir [9]-[11]. Elektrik güç sistemlerinde, böylesi zaman gecikmeleri sistemin dinamik performansını ve kararlılığını olumsuz olarak etkilemektedir [8], [12]. Sistemde gözlemlenen toplam zaman gecikmesinin, zaman gecikmesi üst sınırı olarak tanımlanan maksimum zaman gecikmesi değerini aştığı durumda sistem kararsız bir davranış sergilemektedir [12].

Son zamanlarda, zaman gecikmesinin elektrik güç sistemlerinin kararlılığı üzerinde etkisini inceleyen pek çok çalışma sunulmuştur. [13]'de, elektrik güç sistemlerinde yaşanan zaman gecikmelerini kompanze etmek ve dolayısıyla zaman gecikmelerinin olumsuz etkilerini azaltarak elektrik güç sistemlerinin kararlılığını arttırmak için 14 baralı ve 39 baralı güç sistemlerine iki farklı gecikme kompanze yöntemi uygulanmıştır. [14]'de tartışılan benzer bir çalışma, değişken zaman gecikmeli 39 baralı bir güç sisteminde öncelikle zaman gecikmelerinin kompaze edilmesi sağlanmış ve daha sonra geniş alan GSD tasarımı gerçekleştirilmiştir. [15]'de, 68 baralı bir güç sisteminde geniş alan sönümleme kontrolü tarafında yaşanan zaman gecikmeleri ve sistemin parametrik belirsizlikleri dikkate alınarak düşük frekanslı salınımlar için geniş alan sönümleme kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. [16]'da geniş alan kontrol çevriminde zaman gecikmelerinin dikkate alındığı bir güç sistemi için klasik oransal-integral-türevsel (PID) denetleyici önerilmiş ve Hermite-Biehler teoremi kullanılarak PID denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu çalışma sistem parametrelerinin değişimini karşısında gürbüz denetleyici tasarımına odaklanmıştır. Son olarak, [17]'de tartışılan çalışma, zaman gecikmeli bir güç sisteminin özdeğerlerinin hesaplanması için sistemin sadece zaman gecikmesi içeren durumlarını kullanarak yeni bir ayrıklaştırma tekniği üzerinden özdeğerleri hesaplamaktadır. TMSB güç sisteminin geçici yanıtını iyileştirmek ve sistem çıkış geriliminin regülasyonu için lineer olmayan bir uyarma kontrol sistemi geliştirilmiştir. Bu çalışmaların temel amacı, zaman gecikmeli elektrik güç sistemlerinin sönümleme etkisini artırılması, elektrik güç sistemlerinin denetleyici tasarımlarının ve sistemin parametrik değişimleri karşısında gürbüz denetleyici tasarımlarının gerçekleştirilmesidir. Yukarıda tartışılan çalışmaların haricinde, elektrik güç sistemlerinde yaşanan zaman gecikmelerinin hesaplanması ve güç sistemlerinin kararlılık analizinde maksimum zaman gecikmesi değerlerinin bilinmesi

gerçek ve pratik güç sistemleri için oldukça önemli bir konu haline gelmiştir.

Mevcut literatür, zaman gecikmeli sistemlerin maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması için frekans düzleminde doğrudan ve zaman düzleminde dolaylı olarak iki ayrı grupta yöntemler kullanılmaktadır. Frekans düzlemindeki yöntemler, farklı teknikler kullanarak zaman gecikmeli karakteristik denklemin sanal eksen üzerindeki köklerini hesaplamakta ve sistemin sınırdaki kararlı olacağı zaman gecikmesi üst sınırlarını elde etmektedir. Zaman gecikmeli elektrik güç sistemlerine uygulanan bu yöntemlerden bazıları; Schur-Cohn yöntemi [18], üstel terimlerin yok edilmesine dayalı direkt metot [19], Rekasius yerine koyma yöntemi [20]-[22], frekans tarama yöntemi [23], [24] ve özdeğerlerin izlenmesi yöntemidir [25]. Frekans düzleminde kullanılan bu yöntemlerin ortak noktası, sistemin karakteristik denklemi ve durum uzay matrislerinden yola çıkarak sanal eksen üzerindeki kökleri belirlemektir. Bu yöntemler kullanılarak başarılı sonuçların alındığı bir çok çalışma literatürde mevcuttur. [9]'da Schur-Chon yöntemi kullanılarak OGR sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılığı analiz edilmiştir. Üstel terimin yok edilmesine dayalı olan direkt metot, zaman gecikmeli klasik YFK sistemlerine [19], bir TMSB sisteminin OGR çevriminde zaman gecikmelerinin hesaplanmasına [26], mikro şebeke sistemlerde maksimum zaman gecikmesinin hesaplanmasına [27] ve elektrikli araçlar içeren zaman gecikmeli YFK sistemlerine [28] uygulanmıştır. Rekasius yerine koyma yöntemi, zaman gecikmeli TMSB sisteminin zaman gecikmesi değerlerinin belirlenmesine [22], zaman gecikmeli klasik iki bölge YFK sistemine [29], basit bir mikro şebekenin maksimum zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanmasına [30], zaman gecikmeli mikro şebeke sisteminin kazanç ve faz payı tabanlı zaman gecikme değerlerinin belirlenmesine [31] ve elektrikli araçlar eklenen zaman gecikmeli YFK sistemlerine [32] etkin olarak uygulanmıştır. Benzer şekilde, Frekans tarama yöntemi, klasik YFK sistemleri ve jeneratör uyarma kontrol sistemlerine uygulanmıştır [23], [24]. Bu çalışmada önerilen özdeğer izleme yöntemi, GSD içermeyen klasik 3 baralı 9 jeneratörlü bir güç sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık bölgelerinin elde edilmesine [25] ve mikro-şebekelerin gecikmeye bağlı kararlılık analizinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır [33]-[35]. Zaman gecikmesinin hesaplanması için kullanılan diğer gruptaki yöntemler ise, Lyapunov kararlılık teorisine ve doğrusal matris eşitsizlikleri tekniğine dayalı zaman düzlemindeki yöntemlerdir. Bu gruptaki yöntemler, geniş alan sönümleme kontrolü [4], [11], klasik YFK sistemleri [10], [36]-[38] ve elektrikli araçlar içeren YFK sistemleri [39] için maksimum zaman gecikmesi hesaplanmasında etkili olarak kullanılmıştır. Lyapunov temelli algoritmalar, frekans düzlemindeki yöntemler ile kıyaslandığında, Lyapunov temelli algoritmalar, sistemin kararlılık sınırı olan maksimum zaman gecikmesi değerlerini daha küçük değerlerde

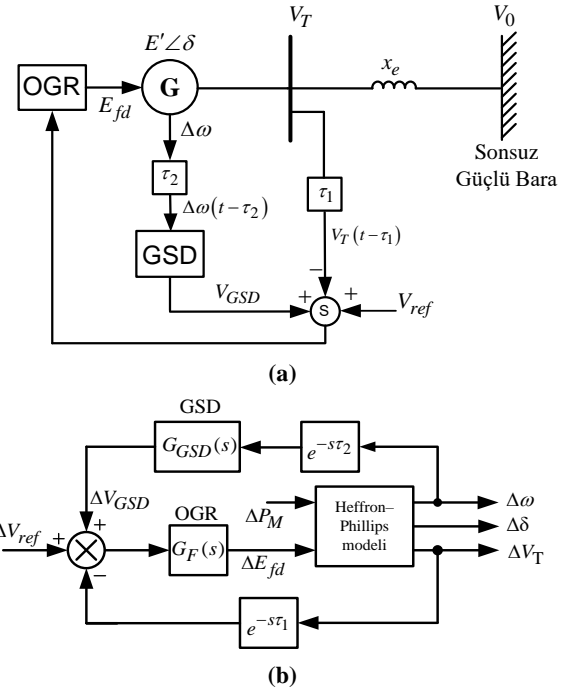
hesaplamaktadır. Bu durum, sistemin sınırdaki kararlılık sonucunu veren gecikme değerlerinin tam olarak hesaplanmadığını göstermektedir [19]. Ancak, Lyapunov temelli algoritmaların önemli avantajı, sabit zaman gecikmesi ve zamanla değişen gecikme değerinin hesaplanmasında etkin olarak kullanılabilirliği [10].

Literatürde frekans düzleminde kullanılan direkt metot, frekans tarama yöntemi ve Rekasius yerine koyma yöntemi, OGR ve GSD içeren zaman gecikmeli güç sistemlerinin maksimum zaman gecikme değerlerini hesaplamak için son zamanlarda tercih edilen yöntemlerdir [22], [23], [26]. Ancak, bu yöntemler sadece OGR kontrol çevriminde zaman gecikmesi içeren güç sistemlerine uygulanmıştır. Bu çalışma, hem OGR hem de GSD kontrol çevrimlerinde zaman gecikmesi olması durumunda bir güç sisteminin zaman gecikmesi üst sınırının elde edilmesi ve gecikmeye bağlı bir kararlılık bölgesi hesaplanmasına yöneliktir. Dolayısıyla, önerilen yöntem hem tek hem de çoklu zaman gecikmesi içeren güç sistemlerinde gecikmeye bağlı kararlılık analizlerini kolaylıkla yapmaktadır. Böylece, kararlılık bölgelerinin gecikmeye bağlı bir kararlılık sınırı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca, önerilen yöntemin diğer frekans düzlemindeki yöntemlere göre önemli bir avantajı, sistemin değişen şartlar altında sürekli olarak karakteristik denkleminin elde edilmesine gerek duymadan doğrudan sistemin durum uzay formu kullanılarak zaman gecikmesi hesaplanmasıdır. Bu durum, hesaplama zamanı ve işlem yükünü önemli derecede azaltmakta ve ağır sembolik işlemlerden dolayı hesaplama hatalarını ortadan kaldırmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmanın en önemli katkısı sistemin özdeğerlerini basit ve tam olarak belirleyerek sistemin kararlılığını incelemek için gecikmeye bağlı bir kararlılık bölgesi elde edilmesidir. Bu kapsamda elde edilen sonuçların doğruluğu ve yöntemin kullanılabilirliği, [22], [23], [26]'da yapılan çalışmalarla kıyaslanarak gösterilmiştir. Aynı zamanda, [22], [23], [26] çalışmalar genişletilerek önemli katkılar sunulmaktadır. Pratik anlamda, çoklu zaman gecikmeleri içeren bir güç sisteminin çeşitli kontrol çevrimlerinde yaşanan zaman gecikmelerinin miktarının belirlenmesi, sistem kararlılığının sürdürülmesi ve denetleyici parametrelerinin tasarımı bakımından oldukça önemlidir. Bu çalışmanın diğer bir katkısı, elde edilen teorik sonuçların zaman düzleminde gerçekleştirilen benzetim çalışmaları [40] ve zaman gecikmeli sistemin sanal eksenli köklerinin kompleks düzlemde dağılımını gösteren QPmR algoritması [41] yardımıyla gösterilmesidir. QPmR algoritması, teorik sonuçların doğrulanması amacıyla literatürde bir çok çalışmada kullanılmıştır [22], [28], [31], [42], [43].

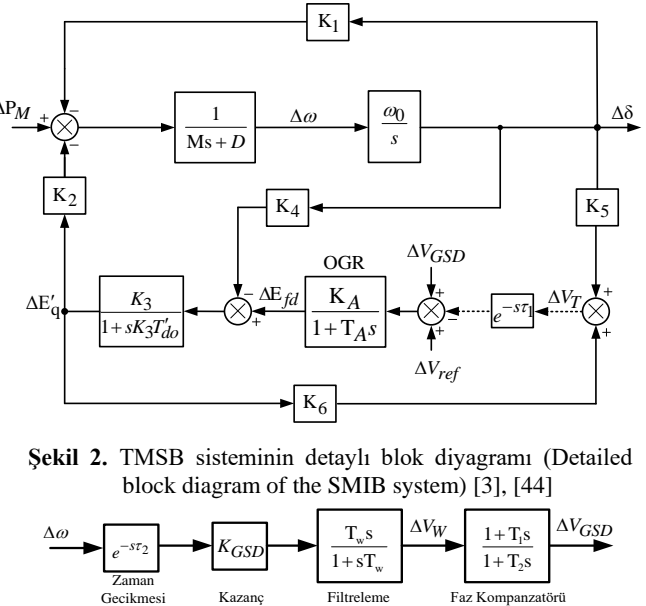
2. SİSTEM TANIMI (SYSTEM DESCRIPTION)

Şekil 1, gerilim ve rotor hızı geri besleme çevriminde zaman gecikmesi içeren basit bir TMSB sisteminin tek hat diyagramını ve blok diyagramını göstermektedir [3], [44]. [22], [23], [26]'da sunulan çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada, Şekil 1'den görüldüğü üzere hem

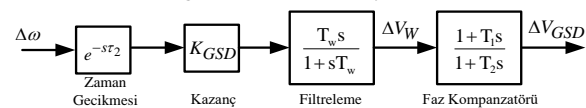
OGR hem de GSD tarafında yer alan zaman gecikmelerinin hesaplanmasına odaklanılmıştır. Şekil 1a'da, τ_1 jeneratör terminal gerilim bilgisinin ölçülmesi ve ölçülen verilerin OGR kontrol birimine iletilmesi sırasında yaşanan toplam zaman gecikmesi değerini ifade etmektedir.



Şekil 1. GSD ve OGR içeren zaman gecikmeli TMSB sistemi
a) Tek hat diyagramı, b) Blok diyagramı (Time delayed SMIB system including AVR and PSS a) One-line diagram, b) Block diagram) [3], [44]



Şekil 2. TMSB sisteminin detaylı blok diyagramı (Detailed block diagram of the SMIB system) [3], [44]



Şekil 3. GSD blok diyagramı (Block diagram of PSS) [2], [3], [44]

Benzer olarak, τ_2 rotor hız bilgisinin ölçülmesi ve GSD birimine iletilmesi süresince yaşanan toplam zaman gecikmesi değerini temsil etmektedir. Bu gecikme değerleri, Şekil 1b’de kontrol çevrimlerine $e^{-s\tau_1}$ ve $e^{-s\tau_2}$ üstel terimleri ile girilmektedir. Her iki kontrol çevriminde böylesi zaman gecikmelerinin oluşması sistemin dinamik performansını olumsuz olarak etkileyecektir. Dolayısıyla, çoklu zaman gecikmesi içeren sistemin kontrol çevrimlerinde meydana gelen zaman gecikmelerinin büyüklüklerinin hesaplanması gereklidir. TMSB sisteminin gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin belirlenmesi ve zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanabilmesi için sistemin doğrusal denklem modeline ihtiyaç duyulmaktadır. Denge noktaları etrafında lineerleştirilmiş TMSB sisteminin modeli Şekil 2’de verilmiştir. Heffron–Phillips modeli olarak adlandırılan bu modelin K_1 - K_6 parametreleri, TMSB sisteminde jeneratörün farklı yük koşulları altında çalışma şartlarının incelenmesi ve doğrusal modelin elde edilmesi için kullanılmaktadır. [3]’de K_1 - K_6 parametrelerinin elde edilmesi detaylı olarak belirtilmektedir. Şekil 3’de faz kompanzator, filtreleme ve kazanç bloklarından oluşan GSD blok diyagramı görülmektedir [2,3,44]. GSD, jeneratörün rotorunda meydana gelen düşük frekanslı salınımlar için sönümlenme desteği sağlamak ve sistemin dinamik performansını arttırmakla görevlendirilmiştir. TMSB sisteminin parametreleri ve tanımları Semboller ve Kısaltmalar Bölümü’nde bulunmaktadır. Sistemin zaman gecikmeli durum uzay denklemi, Şekil 2 ve 3 kullanılarak aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\dot{x}(t) = A_0x(t) + A_{\tau_1}x(t - \tau_1) + A_{\tau_2}x(t - \tau_2) + Bu(t) \quad (1)$$

Burada,

$$x(t) = \left[\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E'_{fd} \quad \Delta V_w \quad \Delta V_{GSD} \right]^T$$

durum değişkenleri matrisini tanımlamaktadır [3]. Sistemin A_0 , A_{τ_1} , A_{τ_2} ve B matrisi aşağıda verilmiştir.

Özdeğer izleme yöntemi yardımıyla zaman gecikmeli TMSB sisteminin maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması ve gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerinin çıkarılması için, sistemin karakteristik denkleminde ihtiyaç duymadan (1)’de verilen durum uzay formu matrisleri kullanılmaktadır.

$$A_0 = \begin{bmatrix} [A_{011}]_{3 \times 3} & [A_{012}]_{3 \times 3} \\ [A_{021}]_{3 \times 3} & [A_{022}]_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_{011} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} \end{bmatrix}, A_{012} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{022} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_A} & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 \\ 0 & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w} \right) & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix}, A_{021} = [0_{3 \times 3}]$$

$$A_{\tau_1} = A_{\tau_1} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_6 K_A}{T_A} & 0_{1 \times 3} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 5} & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}^T$$

$$A_{\tau_2} = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 3} \\ -\frac{K_P K_1}{M} & -\frac{K_P D}{M} & -\frac{K_P K_2}{M} & 0_{1 \times 3} \\ -\frac{K_P K_1 T_1}{M T_2} & -\frac{K_P D T_1}{M T_2} & -\frac{K_P K_2 T_1}{M T_2} & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}$$

3. MATERYAL ve METOD (MATERIAL and METHOD)

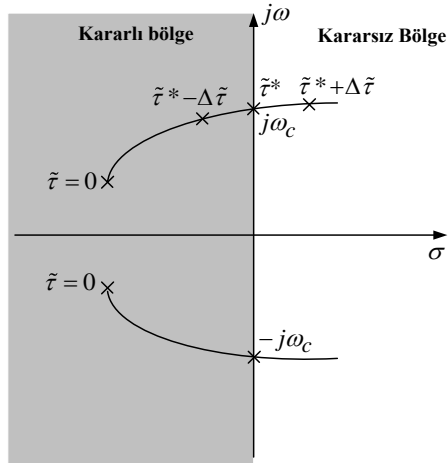
Bu bölüm, [25]’de sunulan özdeğer izleme yöntemi yardımıyla maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması prosedürünü açıklamaktadır. Bu yaklaşımın temel amacı durum uzay formunda tanımlanan zaman gecikmeli sistemin özdeğerlerini periyodik olarak izlemektir. Sistemin sanal eksen üzerinde $s = \pm j\omega_c$ kompleks kökleri mevcutsa, bu kritik özdeğerlere ve seçilen sistem parametrelerine karşılık gelen zaman gecikmesi üst sınırı hesaplanabilir.

3.1. Gecikmeye Bağlı Kararlılık Analizi (Delay-Dependent Stability Analysis)

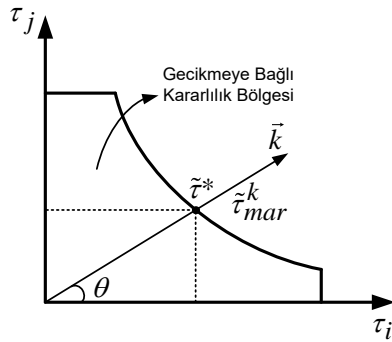
Şekil 1’de verilen çoklu zaman gecikmesi (τ_1, τ_2) içeren TMSB sisteminin kararlılık analizi için, öncelikle sistemin gecikmeye bağlı veya gecikmeden bağımsız kararlılık şartları incelenmelidir. (1) ile verilen TMSB sisteminin asimptotik olarak kararlı olabilmesi için, sistemin tüm köklerinin kompleks düzlemin sol yarı düzleminde bulunması temel bir şarttır.

$$\Delta(s, \tilde{\tau}) \neq 0, \quad \forall s \in C^+ \quad (2)$$

Burada C^+ kompleks düzlemin sağ yarı bölgesini temsil etmektedir. $\tilde{\tau}$, τ_i ($i=1,2,\dots,n$) olarak ifade edilen n boyutlu uzayda çoklu zaman gecikmeleri durumu için norm vektörünü tanımlamaktadır. Sistem parametrelerine bağlı olarak, aşağıda iki farklı asimptotik kararlılık durumu belirtilmiştir [12], [19]:



Şekil 4. Zaman gecikmesine bağlı olarak kompleks köklerin hareketi (The movement of complex roots in terms of time delay)



Şekil 5. (τ_i, τ_j) düzleminde zaman gecikmelerinin gösterilmesi (The illustration of time delays in (τ_i, τ_j) -space)

- i) *Gecikmeden bağımsız kararlılık durumu:* Zaman gecikmesinin tüm pozitif ve sonlu değerleri için $(\tilde{\tau} \in [0, \infty))$, (2) ile verilen kararlılık şartı sağlanırsa sistemin zaman gecikmesinden bağımsız kararlı olduğu söylenebilir.
- ii) *Gecikmeye bağlı kararlılık durumu:* Zaman gecikmesinin bazı değerleri için $(\tilde{\tau} \in [0, \tilde{\tau}^*))$, (2) ile verilen şart sağlanırsa sistemin gecikmeye bağlı kararlı olduğu söylenebilir. Ayrıca, $\tilde{\tau} \geq \tilde{\tau}^*$ için sistem kararsız bir davranış gösterir.

Gecikmeye bağlı kararlılık durumunu Şekil 4 ile açıklayabiliriz. $\tilde{\tau} = 0$ için, TMSB sisteminin tüm köklerinin kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde olduğunu varsayalım. Başka bir anlamda, $\tilde{\tau} = 0$ 'da TMSB sistemi kararlı olmaktadır. Ancak, $\tilde{\tau}$ arttıkça Şekil 4'den görüleceği üzere sistemin köklerinin bazıları kompleks düzlemde sol yarı kararlılık bölgesinden sağ yarı kararsızlık bölgesine doğru hareket etmeye başlayacaktır. $\tilde{\tau} = \tilde{\tau}^* - \Delta\tilde{\tau}$ için, sistemin köklerinin sanal eksene yaklaştığını Şekil 4'den gözlemleyebiliriz. Daha sonra, zaman gecikmesi artırılmaya devam

edilirse, $\tilde{\tau} = \tilde{\tau}^*$ için sistemin bir adet kompleks eşlenik kök çifti sanal eksen üzerinde olacaktır. Dolayısıyla, $\tilde{\tau}^*$ değeri TMSB sisteminin sınırdaki kararlı olacağı zaman gecikmesi üst sınırı veya maksimum zaman gecikmesi değeri olarak tanımlanmaktadır. $\tilde{\tau} = \tilde{\tau}^* + \Delta\tilde{\tau}$ için, sistemin kompleks kök çifti sanal eksenini keserek sağ yarı düzlemde bulunacaktır. Bu durumda, tüm pozitif ve sonlu $\tilde{\tau} > \tilde{\tau}^*$ değerlerinde sistemin kararlı olacağını ve $\tilde{\tau} < \tilde{\tau}^*$ değerleri için sistemin kararsız olacağını söyleyebiliriz. Sonuç olarak, önerilen yöntem böylece lokal ölçümlerin yapıldığı bir TMSB sisteminin farklı kontrol çevrimlerinde yaşanan zaman gecikmelerinin maksimum değerlerinin hesaplanmasına ve bir kararlılık bölgesi üzerinden sistemin dinamiklerinin analiz edilmesine imkan vermektedir.

3.2. Özdeğer İzleme Yöntemi Kullanarak Gecikmeye Bağlı Kararlılık Bölgelerinin Hesaplanması (Computation of Delay-Dependent Stability Regions Using Eigenvalue Tracing Method)

Bu bölüm, çoklu zaman gecikmesi içeren bir sistemin gecikmeye bağlı kararlılık bölgesini ve bu kararlılık bölgesini oluşturan zaman gecikme değerlerinin hesaplanması prosedürünü sunmaktadır. Şekil 5, eksenleri τ_i ve τ_j olarak tanımlanan zaman gecikmesi düzleminde gecikmeye bağlı kararlılık bölgesini temsil etmektedir. Şekil 5'de $\theta \in [0, \pi/2]$ olmak üzere, herhangi bir \vec{k} vektörü yönündeki zaman gecikmesi vektörü görülmektedir. τ_{mar}^k , \vec{k} vektörü yönünde tüm gecikme değerlerini ve $\tilde{\tau}^*$, seçilen \vec{k} vektörü yönünde gecikme üst sınır değerini tanımlamaktadır. Şekil 4'de verilen gecikmeye bağlı kararlılık durumu, Şekil 5'de herhangi bir \vec{k} yönünde tanımlanan $\tilde{\tau}^*$ maksimum zaman gecikmesi değeri ile ilişkilendirilebilir. n boyutlu düzlemde, \vec{k} 'nin herhangi bir yöndeki zaman gecikmesi vektörü (3) ile gösterilebilir [25].

$$\boldsymbol{\tau} = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i, \dots, \tau_n) = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n) \tilde{\tau} \quad (3)$$

Burada $\vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n)$ n boyutlu düzlemde zaman gecikmesi yönlerini belirtmekte ve $\|\vec{k}\| = 1$ 'dir. Şekil 5'de verilen kararlılık bölgesinin sınırı üzerinde maksimum zaman gecikmesi ($\tilde{\tau}^*$) değerlerini elde edebilmek için, (4) kullanılarak sanal eksen üzerinde bulunan $\lambda_c = \pm j\omega_c$ özdeğer kök çiftini hesaplamamız gerekmektedir [25].

$$j\omega_c = \text{eig}\left(A + \sum_{i=1}^n A_{di} e^{-j\omega\tau_i}\right) \quad (4)$$

(3)'de verilen $\boldsymbol{\tau} = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n) \tilde{\tau}$ ifadesi (4)'de yerine yazılarak, (4) ifadesi zaman gecikmelerinin yönlerinin de belirtildiği aşağıdaki formda yazılabilir.

$$j\omega_c = \text{eig}\left(A + \sum_{i=1}^n A_{di} e^{-jk_i\omega\tilde{\tau}}\right) = \text{eig}\left[\Delta(\omega, \tilde{\tau})\right] \quad (5)$$

(5) ile verilen üstel terimli sistemin özdeğerleri 2π periyodu sonrasında tekrarlandığından dolayı, (5) ifadesinde üstel terimler $\xi = \omega\tilde{\tau}$ formunda tekrar düzenlenebilir. Bu sayede, sistemin özdeğerleri 2π periyodu boyunca ve sonrasında kolaylıkla izlenebilir.

$$\Delta(\omega, \tilde{\tau}) = \Delta(\xi, \vec{k}) = A + \sum_{i=1}^n A_{di} \cdot e^{-jk_i \cdot \xi} \quad (6)$$

Burada $\xi \in \square$ ve $e^{-j\xi}$ terimi ξ ile periyodik olarak değişir. Ayrıca, ξ 'nin 2π periyoduna sahip olduğu söylenebilir. Ancak, $\vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_i, \dots, k_n)$ yön vektöründen dolayı (6) ile verilen $\Delta(\xi, \vec{k})$ ifadesinin özdeğerleri $\xi \in [0, \Gamma \cdot 2\pi]$ boyunca değişecektir. Bu işlemin bir sonucu olarak, TMSB sisteminin $\pm j\omega_c$ özdeğerleri ξ_c noktasında sanal eksen üzerinde olacaktır. Dolayısıyla, bu özdeğerlere ve ξ_c noktasına karşılık gelen kritik zaman gecikmesi değeri aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplanabilir.

$$\tilde{\tau}_c = \frac{\xi_c}{|\omega_c|} \quad (7)$$

ξ herhangi bir \vec{k} vektörü yönünde $[0, \Gamma \cdot 2\pi]$ aralığında değiştirilerek, \vec{k} vektörü yönünde bir çok zaman gecikmesi değeri ($\tilde{\tau}_c$) elde edilebilir ve bu zaman gecikmelerini aşağıda verildiği gibi kritik gecikme değerleri olarak ifade edilebilir.

$$\tau_{mar}^k = (\tilde{\tau}_{c1}, \tilde{\tau}_{c2}, \tilde{\tau}_{c3}, \dots, \tilde{\tau}_{cm}) \quad (8)$$

(8) ile verilen gecikme değerlerinden minimum olanı, \vec{k} vektörü yönünde maksimum zaman gecikmesi değeri olarak tanımlanır.

$$\tilde{\tau}^* = \min(\tau_{mar}^k) \quad (9)$$

$\theta \in [0, \pi/2]$ aralığında değiştirilerek, \vec{k} vektörünün tüm yönlerde maksimum zaman gecikme değerleri hesaplanabilir ve bu gecikme değerleri kullanılarak bir kararlılık bölgesi elde edilebilir. Yapılan bu işlemlerde dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta Γ ifadesinin belirlenmesidir. $\vec{k} = (k_1, k_2, \dots, k_m)$ vektörü yönünde Γ rasyonel bir sayı ise, Γ (10) ile ifade edilebilir.

$$k_i = \frac{M_i}{N_i} \quad (10)$$

Burada pay ve payda değerleri M_i ve N_i pozitif tamsayılardır. N , (N_1, N_2, \dots, N_m) olan payda değerlerinin en küçük ortak katı ise, $\Gamma = N$ olduğu söylenebilir. Böylece, (3) ile verilen zaman gecikmesi vektörü (11) gibi yazılabilir.

$$\tau = (k_1, k_2, \dots, k_m) \tilde{\tau} = \left(\frac{M_1}{N_1}, \frac{M_2}{N_2}, \dots, \frac{M_m}{N_m} \right) \tilde{\tau} =$$

$$(M'_1, M'_2, \dots, M'_m) \tau \quad (11)$$

Burada $\tau' = \tilde{\tau}/N$, $\xi' = \xi/N$, $M'_i = M_i \cdot N/N_i \in Z^+$

$$\Delta(\xi, \vec{k}) = A + \sum_{i=1}^n A_{di} e^{-jM'_i \cdot \xi'} = \Delta(\xi', \vec{k}) \quad (12)$$

$\Gamma = N$ ve $\xi \in [0, \Gamma \cdot 2\pi]$ olduğundan dolayı, $\xi' \in [0, 2\pi]$ olduğu görülmektedir. Ancak, $k \in \vec{k}$ irrasyonel sayı olması durumunda belirli bir hata toleransı ile pay ve payda sayılarının tam sayı olabilecek şekilde yaklaşık ifadeleri kullanılabilir [25].

4. SONUÇLAR ve TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSION)

Bu bölümde, çoklu zaman gecikmesi içeren TMSB sisteminin gecikmeye bağlı kararlılık bölgeleri, GSD farklı kazanç değerlerinde ve jeneratörün farklı yük koşulları altında Bölüm 3.2'de belirtilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Teorik zaman gecikme değerleri ve kararlılık bölgelerinin doğruluğu, QPMR algoritması ve Matlab/Simulink ortamında benzetim çalışmasıyla gösterilmiştir. Zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin parametreleri; $x_d=1.60 pu$, $x_q=1.55 pu$, $x'_d=0.32 pu$, $M=6.0$, $D=0$, $T'_{d0}=6.0s$, $\omega_0=3.77 rad/s$, $K_A=50$, $T_A=0.05s$, $T_1=0.5s$, $T_2=0.1s$, $T_w=2s$, $r_e=0$, $x_e=0.4pu$ ve güç faktörü $pf=\cos\phi=0.9$ geri güç faktöründe sabit olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın amaçlarından biri, elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu göstermek için [22], [23] ve [26]'da sunulan çalışmalarla kıyaslamaktır. Bu amaçla, sözü edilen çalışmalarda K_1-K_6 ile ifade edilen doğrusal sistem parametrelerinin hesaplanması gereklidir. [22], [23] ve [26]'da sunulan çalışmalarda aynı K_1-K_6 parametrelerinin hesaplanabilmesi için jeneratörün yüklenme durumu $P_L=0.5 pu$ olarak seçilmiştir. Dolayısıyla, $P_L=0.5 pu$ yüklenme durumu için K_1-K_6 doğrusal sistem parametreleri: $K_1=1.0058$, $K_2=0.8441$, $K_3=0.360$, $K_4=1.0805$, $K_5=0.0468$, $K_6=0.4991$ olarak hesaplanmıştır [22], [23] ve [26]. Öncelikle, Bölüm 3.2'de sunulan yöntem aşağıdaki uygulama adımlarıyla daha basit bir şekilde sunulmuştur.

1. Adım: TMSB sisteminin yukarıda verilen sistem parametreleri, $P_L=0.5 pu$ yük durumu altında ve $K_{GSD}=10$ seçilerek (1) ile verilen sistemin durum uzay matrisleri oluşturulur.

$$A_{\tau_1} = \begin{bmatrix} 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 1} & 0_{3 \times 3} \\ -46.82 & 0 & -499.11 & 0_{1 \times 3} \\ 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 1} & 0_{2 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_{\tau_2} = \begin{bmatrix} 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 1} & 0_{4 \times 3} \\ -1.68 & 0 & -1.41 & 0_{1 \times 3} \\ -8.38 & 0 & -7.03 & 0_{1 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 377 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2 & 0 & -0.5 & 0.2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -20 & 0 & 1000 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.5 & -10 \end{bmatrix}$$

2. Adım: TMSB sistemi OGR ve GSD kontrol çevrimlerinde bulunan τ_1 ve τ_2 zaman gecikmelerinden dolayı, Şekil 5’de tanımlandığı gibi (τ_1, τ_2) düzleminde gecikmeye bağlı kararlılık bölgesi ifade edilebilir. Şekil 5’de \vec{k} zaman gecikmesi vektörü $\theta = 36.87^\circ = 0.6435 \text{ rad}$ olarak seçilmiştir. Bu durumda, (5) aşağıda olduğu gibi yazılabilir:

$$\Delta(\omega, \vec{\tau}) = A_0 + A_{\tau_1} e^{-jk_1\omega\vec{\tau}} + A_{\tau_2} e^{-jk_2\omega\vec{\tau}} \quad (13)$$

Burada $\vec{\tau} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$, $k_1 = \cos(0.6435) = 0.8$ and $k_2 = \sin(0.6435) = 0.6$ ’dır.

3. Adım: TMSB sisteminin kritik özdeğerlerini bulmak için, $\xi = \omega\vec{\tau}$ dönüşümü yapılır ve $k_1=4/5$ ve $k_2=4/5$ rasyonel sayılarına dönüştürülür.

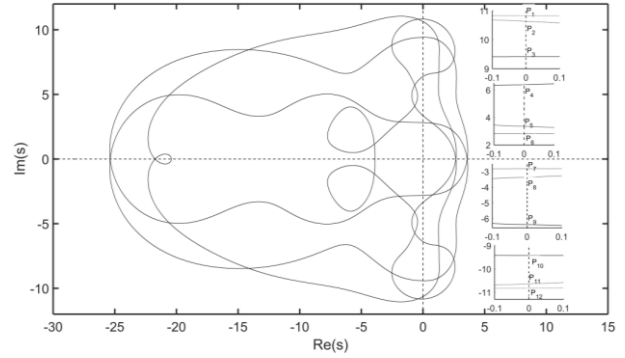
$$\Delta(\xi, \vec{k}) = A_0 + A_{\tau_1} e^{-jM'_1 \cdot \xi'} + A_{\tau_2} e^{-jM'_2 \cdot \xi'} = \Delta(\xi', \vec{k}) \quad (14)$$

Burada $M'_1 = 4$, $M'_2 = 3$, $\Gamma = N = 5$, $\xi' \in [0, 2\pi]$ ve $\xi \in [0, \Gamma \cdot 2\pi]$ olmaktadır.

4. Adım: $[0, \Gamma \cdot 2\pi]$ aralığı için ξ veya $[0, 2\pi]$ aralığı için ξ' değiştirilerek, (14) çözüldüğünde, seçilen \vec{k} vektörü yönünde TMSB sisteminin kritik özdeğerleri elde edilir ve sistemin özdeğer eğrisi Şekil 6’da gösterilmiştir. Şekil 6’dan, 12 adet kritik özdeğerin sanal eksenini kestiği görülmektedir.

5. Adım: Tüm kritik özdeğerlere ve kritik açılara karşılık gelen kritik zaman gecikmelerinin bir seti, (7) kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 1’de gösterilmiştir. Çizelge 1’den, kritik zaman gecikmelerinin $\tau_{mar}^k = (0.0682, 0.9601, \dots, 1.993, 2.833)$ minimum olan değeri $\tilde{\tau}^* = \min(\tau_{mar}^k) = 68.2ms$ olarak belirlenmiştir.

Bu zaman gecikmesi değeri kullanılarak OGR ve GSD kontrol çevrimlerinde gözlemlenen kritik gecikme değerleri $\tau_1^* = (\tilde{\tau}^*) \cos(0.6435) = 54.6ms$ ve $\tau_2^* = (\tilde{\tau}^*) \sin(0.6435) = 40.9ms$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6. $K_{GSD} = 10$ için TMSB sisteminin özdeğer eğrisi (The eigenvalue loci of SMIB system for $K_{GSD} = 10$)

Çizelge 1. Farklı ξ_c noktalarında sanal eksen üzerinde bulunan kritik kökler ve kritik zaman gecikme değerleri (Critical time delay values and critical roots located on the imaginary axis for different ξ_c points)

| | ξ_c (rad) | ω_c (rad / sec) | $\tilde{\tau}_c$ (s) |
|-----------------|---------------|------------------------|----------------------|
| P ₁ | 0.783 | 10.83 | 0.0682 |
| P ₂ | 10.215 | 10.64 | 0.9601 |
| P ₃ | 21.677 | 9.42 | 2.312 |
| P ₄ | 6.406 | 6.386 | 1.003 |
| P ₅ | 9.241 | 3.357 | 2.753 |
| P ₆ | 2.046 | 2.822 | 0.7251 |
| P ₇ | 29.371 | -2.8216 | 10.41 |
| P ₈ | 22.175 | -3.357 | 6.605 |
| P ₉ | 25.01 | -6.386 | 3.916 |
| P ₁₀ | 9.4202 | -9.42 | 1.034 |
| P ₁₁ | 21.201 | -10.64 | 1.993 |
| P ₁₂ | 30.678 | -10.83 | 2.833 |

Çizelge 2. Önerilen yöntem ve [22], [23], [26] çalışmalarının karşılaştırılması (The comparison of proposed method with studies reported in [22], [23], [26])

| K_{GSD} | Yöntemler | $\tilde{\tau} = \tau_1$ (s) |
|-----------|-----------------------------------|-----------------------------|
| 5 | Özdeğer İzleme Yöntemi | 0.1632 |
| | [22]’de önerilen yöntem (Tablo 3) | 0.1632 |
| | [23]’de önerilen yöntem (Table 3) | 0.1632 |
| | [26]’da önerilen yöntem (Table) | 0.1632 |
| 10 | Özdeğer İzleme Yöntemi | 0.1289 |
| | [22]’de önerilen yöntem (Tablo 3) | 0.1289 |
| | [23]’de önerilen yöntem (Table 3) | 0.1289 |
| | [26]’da önerilen yöntem (Table) | 0.1289 |
| 20 | Özdeğer İzleme Yöntemi | 0.0786 |
| | [22]’de önerilen yöntem (Tablo 3) | 0.0786 |
| | [23]’de önerilen yöntem (Table 3) | 0.0786 |
| | [26]’da önerilen yöntem (Table) | 0.0786 |

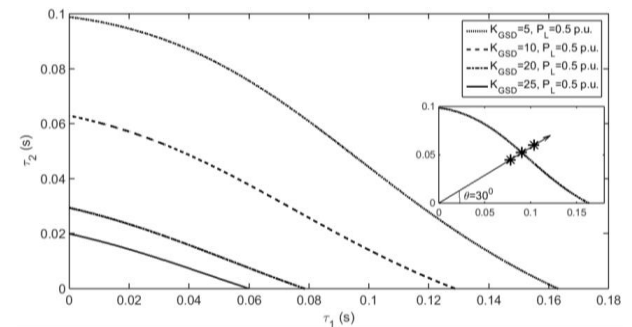
| | | |
|----|-----------------------------------|--------|
| 25 | Özdeğer İzleme Yöntemi | 0.0600 |
| | [22]'de önerilen yöntem (Tablo 3) | 0.0600 |
| | [23]'de önerilen yöntem (Table 3) | 0.0600 |
| | [26]'da önerilen yöntem (Table) | 0.0600 |
| 30 | Özdeğer İzleme Yöntemi | 0.0439 |
| | [22]'de önerilen yöntem (Tablo 3) | 0.0439 |
| | [23]'de önerilen yöntem (Table 3) | 0.0439 |
| | [26]'da önerilen yöntem (Table) | 0.0439 |

4.1. Gecikmeye Bağlı Kararlılık Bölgeleri (Delay-Dependent Stability Regions)

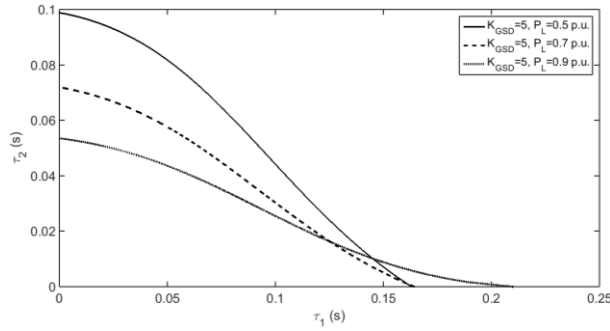
Öncelikle, yöntemin doğru sonuçlar verdiği, daha önce yapılan [22], [23] ve [26] çalışmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. [22], [23] ve [26] çalışmaları TMSB sisteminin sadece gerilim geri besleme kontrol çevriminde meydana gelen zaman gecikmelerinin üst sınırlarının hesaplanmasına odaklanmıştır. Rekasius yönteminin kullanıldığı [22]'de rapor edilen çalışmada Tablo 3, frekans tarama yönteminin kullanıldığı [23] çalışmasında Table 3 ve üstel terimlerin yok edilmesi yönteminin kullanıldığı [26] çalışmasında Table olarak belirtilen çizelgelerde farklı GSD kazanç değerleri için gerilim geri besleme kontrol çevriminde hesaplanan zaman gecikme değerlerinin üst sınırları yer almaktadır. Doğru bir karşılaştırma yapabilmek için, bu aşamada sadece gerilim geri besleme kontrol çevriminde zaman gecikmesi gözlenmesi durumunda önerilen yöntem kullanılarak teorik sonuçlar elde edilmiştir. Dikkat edilirse, bu durum için rotor hızı geri besleme yönündeki zaman gecikmesi ihmal edilmiş ($\tau_2=0$, $\theta=0$) ve dolayısıyla, \vec{k} vektörünün yönü $\theta=0$ olarak seçilmiştir. Adım 1-5 uygulanarak, GSD dengeleyicinin farklı kazançları ($K_{GSD}=5-30$) ve $P_L=0.5$ yük durumu için zaman gecikmesi sonuçları elde edilmiştir. Teorik olarak, karşılaştırmalı sonuçlar Çizelge 2'de verilmiştir. Çizelge 2 incelendiğinde, önerilen yöntemin diğer frekans düzlemi yöntemleriyle aynı sonuçlar verdiği teorik olarak ispatlanmıştır. Ancak, diğer yöntemlerle hesaplama yükü bakımından kıyaslandığında önemli sonuçlar göze çarpmaktadır. [22] ve [26]'da önerilen yöntemler sistemin zaman gecikmesi hesabının yapılabilmesi için farklı koşullar altında karakteristik denklemin sürekli olarak elde edilmesine ihtiyaç duymaktadır. Sistemin 6. dereceden bir karakteristik polinomu olduğu ve zaman gecikmesinin hesaplanması işlemleri boyunca sistemin derecesinin arttığı veya karmaşık işlemlerin yapıldığı görülmektedir. Ayrıca, [22]'nin çoklu zaman gecikmesi içeren sistemlere uygulanamaması önemli bir dezavantaj olarak görülmektedir. Benzer şekilde, [23]'de önerilen yöntemin çoklu zaman gecikmesi sistemlerine uygulanmadığı görülmekte ve iteratif işlem gerektirmesinden dolayı önemli dezavantajlara sahiptir. Ancak, özdeğer izleme yöntemi bu dezavantajları ortadan kaldırarak çoklu ve tek zaman gecikmesi içeren sistemlerin gecikmeye bağlı kararlılık analizine uygulanabilmektedir.

Bir sonraki aşamada, Adım 1-5 kullanılarak GSD'nin çeşitli kazanç değerlerinde $K_{GSD}=0-25$ ve $P_L=0.5-0.7-0.9$ pu yük şartları altında $\theta \in [0, \pi/2]$ 'de, \vec{k} 'nin tüm yönlerinde sistemin gecikmeye bağlı kararlılık bölgeleri teorik olarak elde edilmiştir. Öncelikle, GSD kazanç değerlerinin sistemin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu amaç için, GSD kazanç değerleri

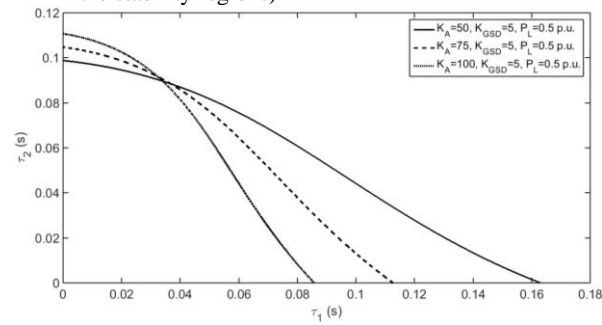
$K_{GSD}=0-25$ aralığında seçilmiş ve $P_L=0.5$ yük durumu sisteme girilmiştir. $P_L=0.5$ yük durumu altında daha önce belirtildiği gibi sistemin $K_1 - K_6$ parametreleri; $K_1=1.0058$, $K_2=0.8441$, $K_3=0.360$, $K_4=1.0805$, $K_5=0.0468$, $K_6=0.4991$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 7, (τ_1, τ_2) düzleminde $K_{GSD}=5, 10, 20$ ve 25 için TMSB sisteminin gecikmeye bağlı kararlılık bölgelerini göstermektedir. Şekil 7'den görüldüğü üzere, GSD kazançları arttıkça sistemin kararlılık bölgeleri küçülmektedir. Bu durum, GSD kazanç artışının sistemin kararlılık sınırı üzerinde negatif bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu durumun, Çizelge 2 ile verilen zaman gecikmesi sonuçları ile desteklendiği görülmektedir. Çizelge 2'de $K_{GSD}=5$ için sistemin en büyük gecikme değerine ulaşıldığı ancak K_{GSD} arttıkça gecikme değerlerinin gittikçe azaldığı gözlemlenebilir. Şekil 8, jeneratör yük artışının sistemin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisini göstermektedir. $K_{GSD}=5$ değerinde sabit tutulduğunda, $P_L=0.5-0.7-0.9$ için sistemin kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır. Sistemin diğer parametreleri sabit olduğundan dolayı, yük artışına bağlı olarak sistemin $K_1 - K_6$ parametreleri; $P_L=0.7$ için $K_1=1.1330$, $K_2=1.0189$, $K_3=0.36$, $K_4=1.3042$, $K_5=0.0157$, $K_6=0.4711$ ve $P_L=0.9$ için $K_1=1.2083$, $K_2=1.1431$, $K_3=0.36$, $K_4=1.4632$, $K_5=-0.0283$, $K_6=0.4466$ olarak hesaplanmıştır. Şekil 8'den görüldüğü üzere, jeneratörün yükü arttıkça sistemin kararlılık bölgeleri küçülmektedir. Bu durum, hesaplanan $K_1 - K_6$ parametrelerinin değişiminden görülmektedir. Özellikle, yük artışına bağlı olarak K_5 parametresinde sürekli bir azalma olduğu ve dolayısıyla, sistemin sönümleme ve kararlılığı üzerinde negatif bir etkinin olduğu söylenebilir [3]. Son olarak, uyarma kontrol sisteminin kazancının kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu amaç için, $K_{GSD}=5$ ve $P_L=0.5$ değerlerinde sabit tutulduğunda, $K_A=50, 75$ ve 100 değerleri için kararlılık bölgeleri hesaplanmış ve Şekil 9'da gösterilmiştir. Şekil 9'dan görüldüğü üzere, uyarma kontrol sisteminin kazancı arttıkça sistemin kararlılık bölgelerinin daraldığı ve sistemin kararlılık sınırının küçüldüğü görülmektedir.



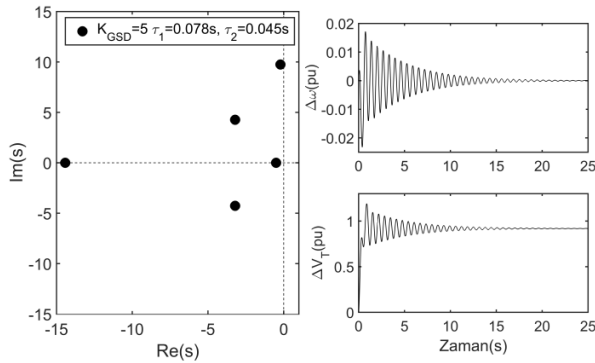
Şekil 7. GSD kazanç değişiminin kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisi (The effect of PSS gains on the stability regions)



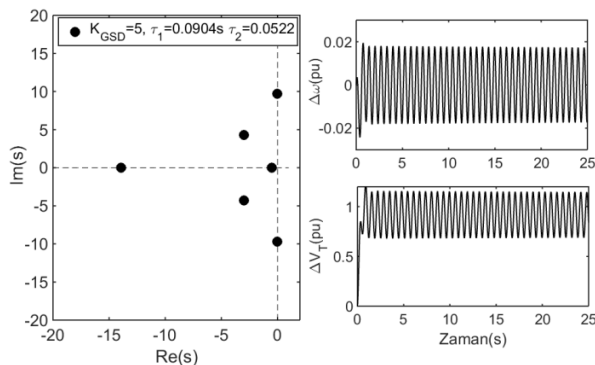
Şekil 8. Jeneratörün yük artışının kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisi (The effect of increase in the generator load on the stability regions)



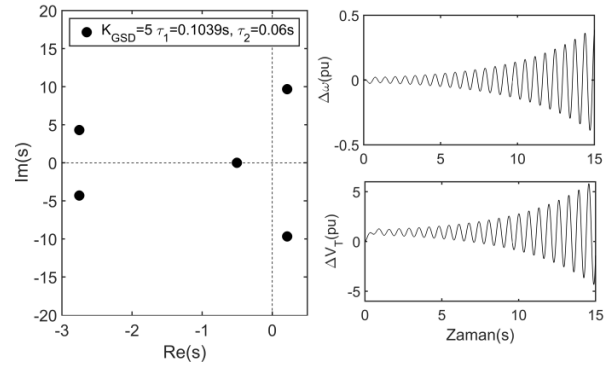
Şekil 9. Uyarma kontrol sistemi kazancının kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisi (The effect of excitation control gains on the stability regions)



(a)



(b)



(c)

Şekil 10. $K_{GSD}=5$ ve $P_L=0.5$ pu için kök dağılımları ve benzetim çalışmaları a) $\theta = 0.09s$, b) $\tilde{\tau}^* = 0.1044s$, c) $\tilde{\tau}_2 = 0.12s$ (The distribution of complex roots and simulation studies for $K_{GSD}=5$ ve $P_L=0.5$ pu)

4.2. Teorik Sonuçların Doğrulanması (Verification of Theoretical Results)

Bu çalışmanın bir diğer amacı, elde edilen teorik zaman gecikmesi sonuçlarının doğruluğunun QPmR algoritması ve benzetim çalışmaları yardımıyla ispatlanmasıdır. Teorik zaman gecikmesi değerlerinin doğruluğu, Şekil 7'de $P_L=0.5$ ve GSD kazancı $K_{GSD}=5$ için hesaplanan gecikmeye bağlı kararlılık sınırı üzerinde ve bu sınırın etrafında "*" ile işaretlenmiş üç zaman gecikmesi değeri seçilerek gösterilmiştir. Dikkat edilecek olursa, bu gecikme değerleri $\theta = 30^\circ$ yönünde seçilen bir zaman gecikmesi vektörü üzerinde yer almaktadır. Şekil 10a, kararlılık bölgesi içerisinde seçilen $\tilde{\tau}_1 = 0.09s$

($\tau_1 = \tilde{\tau}_1 \cos(30^\circ) = 0.078s$) ($\tau_2 = \tilde{\tau}_1 \sin(30^\circ) = 0.045s$) zaman gecikmesi değerinde sistemin kararlı olduğunu hem de zaman düzlemindeki benzetim çalışmalarıyla göstermektedir. Bu şekilde QPmR algoritması, sistemin baskın köklerinin kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde olduğunu ve dolayısıyla benzetim çalışmaları, gerilim ve rotor hızındaki dalgalanmaların sönmülerek sistemin kararlı olduğunu göstermektedir. Şekil 10b, kararlılık bölgesi sınırı üzerinde seçilen $\tilde{\tau}^* = 0.1044s$ ($\tau_1^* = 0.0904s, \tau_2^* = 0.0522s$) zaman gecikmesi değerinde sistemin gerilim ve rotor hızı dalgalanmalarının sürekli devam ettiği ve sistemin sınırda kararlı olduğunu göstermektedir. Bu durum için QPmR algoritmasından görüleceği üzere, sistemin sınırda kararlı olmasına neden olan bir adet kompleks eşlenik kök çifti sanal eksen üzerinde yer almaktadır. Son olarak, Şekil 10c'de benzetim çalışmaları $\tilde{\tau}_2 = 0.12s$ ($\tau_1 = 0.1039s, \tau_2 = 0.06s$) zaman gecikmesi değerinde sistemin geriliminde ve rotor hızında meydana gelen dalgalanmaların giderek büyüdüğünü ve sistemin kararsız olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda, QPmR algoritmasının bu durumu doğruladığını ve sistemin bir adet kök çiftinin kompleks düzlemin sağ yarı bölgesinde yer aldığını göstermektedir

5. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada, özdeğer izleme yöntemi kullanılarak GSD ve OGR kontrol çevrimleri içeren zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin gecikmeye bağlı kararlılık bölgeleri ve maksimum zaman gecikmesi değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, literatürde bulunan mevcut çalışmalara katkı sunulmuştur. [22], [23], [26]'da yapılan çalışmalara en önemli katkısı hem OGR hem de GSD tarafında haberleşme kaynaklı zaman gecikmelerinin olması durumunda sistemin kararlılık analizinin yapılmasıdır. Yapılan analizler sadece zaman gecikmesi hesaplaması ile sınırlı kalmayıp aynı zamanda sistemin gecikmeye bağlı kararlılık bölgeleri elde edilmiştir.

Yüksek dereceli güç sistemlerde önemli problemlerden biri, sistemin karakteristik denkleminin hesaplanmasıdır. Dolayısıyla, yüksek dereceden sistemlerde karakteristik denklemin hesaplanması, işlem hatalarını ve işlem yükünü önemli derecede arttırmakta ve sistemin kararlılık analizini zorlaştırmaktadır. Bu zorluklar karşısında, bu çalışmada kullanılan yöntemin en önemli avantajı, [22] ve [26]'da sunulan klasik yöntemlerden farklı olarak sistemin karakteristik denklemine ihtiyaç duymadan sadece durum uzay matrislerini kullanmasıdır. Bu durum, giderek büyüyen güç sistemlerinde, değişen sistem şartları altında sürekli olarak karakteristik denklemin elde edilmesi problemlerini ortadan kaldırmaktadır. Önerilen yöntemin güvenilir ve teorik olarak doğru sonuçlar verdiği, [22], [23] ve [26]'da elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak gösterilmiştir. Ayrıca, benzetim çalışmaları ve QPmR algoritması elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu desteklemektedir.

SEMBOLLER ve KISALTMALAR (SYMBOLS and ABBREVIATIONS)

| | |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------|
| δ, ω | : Jeneratör açısı ve hızı |
| E_q | : q eksenli senkron jeneratörün indüklenen gerilimi |
| E_{fd} | : Jeneratör alan gerilimi |
| K_A, T_A | : Uyarma sargısı kazancı ve zaman sabiti |
| ΔP_M | : Mekanik giriş gücü |
| D, M | : Yük sönüm sabiti ve jeneratör eylemsizliği |
| T'_{d0} | : d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti |
| V_0, V_T | : Sonsuz güçlü bara ve jeneratör terminal gerilimi |
| x_e | : İletim hattı reaktansı |
| x_d, x'_d | : Jeneratör reaktansı ve d eksenli geçici reaktansı |
| $K_1 - K_6$ | : Senkron jeneratör doğrusal model sabitleri |
| T_1, T_2, T_w | : Faz kompanzator ve filtreleme zaman sabitleri |
| K_{GSD} | : GSD Kazancı |
| $\tilde{\tau}, \tilde{\tau}^*$ | : Zaman gecikmesi ve maksimum zaman gecikmesi |

| | |
|------|----------------------------------------------|
| YFK | : Yük frekans kontrol |
| TMSB | : Tek makineli sonsuz güçlü bara |
| SMIB | : Single-machine-infinite-bus |
| OGR | : Otomatik gerilim regülatörü |
| AVR | : Automatic voltage regulator |
| GSD | : Güç sistem dengeleyici |
| PSS | : Power system stabilizer |
| QPmR | : Quasi-polynomial mapping-based root finder |

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Şahin SÖNMEZ: Sonuçları elde etmiş, sonuçları analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

Saffet AYASUN: Makalenin yazımı ve literatür taraması aşamalarında katkı sunmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Saadat H. "Power System Analysis", McGraw-Hill Inc., New York, (1999).
- [2] Kundur P. "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., New York, (1994).
- [3] Sauer P.W. and Pai M.A., "Power System Dynamics and Stability", 1st Indian Reprint, Singapore, (2002).
- [4] Yao W., Jiang L., Wu Q.H., Wen J.Y. and Cheng S.J., "Delay-Dependent Stability Analysis of the Power System with a Wide-Area Damping Controller Embedded", *IEEE Transactions on Power Systems*, 26: 233- 240, (2011).
- [5] Naduvathuparambil B., Valenti M.C. and Feliachi A., "Communication delays in wide area measurement systems", *the 34th Southeastern Symposium on System Theory*, Huntsville, Alabama, 118-122, (2002).
- [6] Xia X., Xin Y., Xiao J., Wu J. and Han Y., "WAMS applications in Chinese power systems", *IEEE Power and Energy Magazine*, 4: 54-63, (2006).
- [7] Phadke A.G., "Synchronized phasor measurements in power systems. *IEEE Computer Applications in Power*, 6: 10-15, (1993).
- [8] Wu H., Tsakalis K. and Heydt G.T., "Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design", *IEEE Transactions on Power Systems*, 19: 1935-1941, (2004).
- [9] Liu M., Yang L., Gan D., Wang D., Gao F. and Chen Y., "The stability of AGC systems with commensurate delays", *European Transactions on Electrical Power*, 17: 615-627, (2007).
- [10] Jiang L., Yao W., Wu Q.H., Wen J.Y. and Cheng S.J., "Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 27: 932-941, (2012).

- [11] Yao W., Jiang L., Wu Q.H., Wen J.Y. and Cheng S.J., "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 29: 318-329, (2014).
- [12] Ayasun S., "Computation of time delay margin for power system small-signal stability", *European Transactions on Electrical Power*, 19: 949-968, (2009).
- [13] Liu M., Dassios I., Tzounas G. and Milano F., "Model-independent derivative control delay compensation methods for power systems", *Energies*, 13:342, (2020).
- [14] Prakash T., Singh V.P. and Mohanty S.R., "A synchrophasor measurement based wide-area power system stabilizer design for inter-area oscillation damping considering variable time-delays", *Electrical Power and Energy Systems*, 105:131-141, (2019).
- [15] Bento M.E.C., "Fixed Low-Order Wide-Area Damping Controller Considering Time Delays and Power System Operation Uncertainties", *IEEE Transactions on Power Systems*, 35: 3918 - 3926, (2020).
- [16] Qi J., Li Y. and Ou L., "PID damper design for wide-area power systems considering time delays", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30: 1-18, (2020).
- [17] Li C., Wu J., Duan C. and Du Z., "Development of an effective model for computing rightmost eigenvalues of power systems with inclusion of time delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 34: 4216-4227, (2019).
- [18] Chen J., Gu G. and Nett C.N., "A new method for computing delay margins for stability of linear delay systems", *System and Control Letters*, 26: 107-117, (1995).
- [19] Sönmez Ş., Ayasun S. and Nwankpa C.O., "An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 31: 370-377, (2016).
- [20] Rekasius Z.V., "A stability test for systems with delays", *the Joint Automatic Control Conference*, San Francisco, USA, TP9-A, (1980).
- [21] Olgaç N. and Sipahi R., "An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time-invariant (LTI) systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47:793-797, (2002).
- [22] Sönmez Ş. and Ayasun S., "Rekasius yöntemi kullanılarak zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması", *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8: 783 – 795, (2019).
- [23] Khalil A. and Peng A.S., "An Accurate Method for Delay Margin Computation for Power System Stability", *Energies*, 11: 3466, (2018).
- [24] Khalil A. and Peng A.S., "A New Method for Computing the Delay Margin for the Stability of Load Frequency Control Systems", *Energies*, 11: 3460, (2018).
- [25] Jia H.J. and Yu X.D., "A Simple Method for Power System Stability Analysis with Multiple Time Delays", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Pittsburgh, USA, 1-7, (2008).
- [26] Sönmez Ş. and Ayasun S., "Effect of load increase and power system stabilizer on stability delay margin of a generator excitation control system", *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 24: 5183 – 5194, (2016).
- [27] Gündüz H., Sönmez Ş. and Ayasun S., "Comprehensive gain and phase margins based stability analysis of micro-grid frequency control system with constant communication time delays", *IET Generation, Transmission & Distribution* 11: 719 – 729, (2017).
- [28] Sönmez Ş. and Ayasun S., "Gain and phase margins-based delay margin computation of load frequency control systems using Rekasius substitution", *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 41: 3385-3395, (2019).
- [29] Naveed A., Sönmez Ş. and Ayasun S., "Impact of electric vehicle aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins in load frequency control system", *Accepted for publication in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, (2020). doi: 10.35833/MPCE.2019.000244
- [30] Macana C.A., Mojica-Nava E. and Quijano N., "Time-delay effect on load frequency control for microgrids", *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Evry, France, 544-549, (2013).
- [31] Gündüz, H., Ayasun, S. and Sönmez Ş., "Zaman gecikmeli mikro-şebeke sistemlerin Rekasius yerine koyma yöntemiyle kazanç ve faz payı tabanlı kararlılık analizi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 34:553-568, (2019).
- [32] Naveed A., Sönmez Ş. and Ayasun S. "Identification of stability delay margin for load frequency control system with electric vehicles aggregator using Rekasius substitution", *IEEE 2019 Milan PowerTech*, Milan, Italy, 1-6, (2019).
- [33] Liu S., Wang X. and Liu P.X., "Impact of Communication Delays on Secondary Frequency Control in An Islanded Microgrid", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62: 2021-2031, (2015).
- [34] Lou G., Gu V., Xu Y., Jin W. and Du X., "Stability Robustness for Secondary Voltage Control in Autonomous Microgrids With Consideration of Communication Delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 33: 4164-4178, (2018).
- [35] Lou G., Gu W., Lu X., Xu Y. and Hong H., "Distributed Secondary Voltage Control in Islanded Microgrids With Consideration of Communication Network and Time Delays", *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11: 3702 - 3715, (2020).
- [36] Wu M., He Y., She J.H. and Liu G.P., "Delay-dependent criterion for robust stability of time-varying delay systems", *Automatica*, 40: 1435–1439, (2004).
- [37] Xu S.Y. and Lam J., "On equivalence and efficiency of certain stability criteria for time-delay systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52: 95–101, (2007).
- [38] Jin L., Zhang C.K., He Y., Jiang L. and Wu M., "Delay-dependent stability analysis of multi-area load frequency control with enhanced accuracy and computation efficiency", *IEEE Transactions on Power Systems*, 34: 3687-3696. (2019).
- [39] Ko K.S. and Sung D.K., "The effect of EV aggregators with time-varying delays on the stability of a load

- frequency control system”, *IEEE Transactions on Power Systems*, 33: 669–680, (2018).
- [40] Simulink, “*Model-Based and System-Based Design*”, Natick: MathWorks, (2000).
- [41] Vyhlídal, T. and Zitek, P., “Mapping based algorithm for large-scale computation of quasi-polynomial zeros”, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2054: 171-177, (2009).
- [42] Vyhlídal, T., Olgaç, N. and Kučera, V., “Delayed resonator with acceleration feedback – Complete stability analysis by spectral methods and vibration absorber design”, *Journal of Sound and Vibration*, 333: 6781– 6795, (2014).
- [43] Kammer, A.S. and Olgaç, N., “Delayed-feedback vibration absorbers to enhance energy harvesting”, *Journal of Sound and Vibration*, 363: 54–67, (2016).
- [44] Shahgholian G. and Faiz J., “The effect of power system stabilizer on small-signal stability in single-machine-infinite-bus”, *International Journal of Electrical and Power Engineering*, 4: 45-53, (2010).