



# Yük frekans kontrol sistemlerinde gürbüz kararlılık zaman gecikmesi paylarının belirlenmesi

## Determination of the robust stability delay margins for the load frequency control systems

Kübra Nur Gül<sup>1,\*</sup>, Şahin Sönmez<sup>2</sup>, Saffet Ayasun<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 51240, Niğde Türkiye

<sup>2</sup> Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü, 06500, Malatya Türkiye

<sup>3</sup> Gazi Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 44900, Ankara Türkiye

### Öz

Bu çalışma, zaman gecikmesi içeren Yük Frekans Kontrol (YFK) sistemlerinde parametrik belirsizliklerin olması durumunda sistemin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerini hesaplamayı amaçlamaktadır. YFK sistemlerinde frekans kararlılığının sürdürülmesi bakımından çeşitli elektrik verilerinin ölçülerek kontrol merkezine iletilmesi ve kontrol merkezinden frekans kontrol servisine katılım sağlayan santrallere kontrol sinyallerinin iletilmesi gerekmektedir. Bu süreçte, haberleşme ağlarında veri iletimi nedeniyle, zaman gecikmeleri kaçınılmaz hale gelmektedir ve sistemin dinamik performansı ve kararlılığı olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca, YFK sisteminin modellenmesinden kaynaklı ve güç sisteminde oluşabilecek belirsizlikler nedeniyle sistem parametrelerinin belirsizlikleri dikkate alınarak haberleşme ağı tabanlı gözlemlenebilecek gecikme değerleri üzerinde böylece belirsizliklerin etkisi incelenmelidir. Bu amaçla, YFK sisteminde üstel terimin yok edilmesi yöntemi ile Kharitonov Teoremi birlikte kullanılarak sistemin gürbüz kararlılığını sağlayabilen gürbüz zaman gecikme payı değerlerinin teorik olarak hesaplanması sağlanmıştır. Aynı zamanda Matlab/Simulink programı ve QPmR (Quasi Polynomial Mapping Root Finder) algoritması kullanılarak elde edilen teorik sonuçların doğruluğu kanıtlanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Yük frekans kontrol sistemi, Haberleşme zaman gecikmesi, Kharitonov teoremi, Üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi

### 1 Giriş

Elektrik güç sistemlerinin sahip oldukları frekans değerini nominal düzeyde tutmak için elektrik şebekesinin günlük çalışması sırasında güç üretimi ve yük talebi arasındaki dengenin sağlanması oldukça önemlidir. Bu amaçla yük frekans kontrol (YFK) sistemleri elektrik güç sistemlerinin kararlılığı ve güvenilirliği sağlamak ve sistem frekansında oluşabilecek bozulmaları ortadan kaldırmak için uzun yıllardan beri yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [1, 2]. Güç sistemlerinde herhangi bir bozucu etki sonrası frekans

### Abstract

This study computes the robust stability delay margins of the time delayed load frequency control (LFC) system towards parametric uncertainties. The LFC systems are extensively equipped with communication networks to maintain the system frequency stability and to transmit/receive the measurement and control signals between the control central and generation units. However, network induced time delays due to the extensive utilization of communication networks are inevitable in LFC systems. Such delays could negatively affect the LFC system stability and could degrade the dynamical performance of system. Moreover, the parametric uncertainties are significant challenges for robust stability of the LFC system. Therefore, the effect of parametric uncertainties on the communication delay values could be investigated. For this purpose, this study determines the robust stability delay margin of LFC system by cooperating the direct method and Kharitonov theorem. The accuracy of theoretical computations is verified by the time domain simulations and QPmR algorithm.

**Keywords:** Load frequency control, Communication time delay, Kharitonov theorem, Direct method.

kararlılığının sürdürülmesinde, ölçülen çeşitli verilerin ve kontrol sinyallerinin iletilmesinde haberleşme ağları yoğun olarak kullanılmaktadır [3-5]. Elektrik güç santrallerinde çeşitli elektriksel veriler ölçülerek kullanılan haberleşme ağları ile merkezi denetleyici birimine gönderilmektedir. Bu denetleyici merkezinden frekans kontrolü içeren santrallere kontrol sinyallerinin aktarılması esnasında ihmal edilemeyecek boyutta haberleşme zaman gecikmelerinin olduğu gözlenmektedir. Bu zaman gecikmelerinin boyutu, sinyallerin aktarılmasını sağlayan haberleşme ağ yapısına, protokolüne, yüküne ve iletilen bilginin veya kontrol

\* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: kubragul@ohu.edu.tr (K. N. Gül)

Geliş / Received: 12.12.2023 Kabul / Accepted: 15.02.2024 Yayımlanma / Published: 15.04.2024

doi: 10.28948/ngumuh.1403702

sinyalinin paket büyüklüğüne göre değişim göstermektedir. Dolayısıyla, gözlemlenen zaman gecikmeleri sistemin dinamiğini ve kararlılığını olumsuz etkileyebilir [3].

Son yıllarda oldukça dikkat çeken Elektrikli Araçların (EA) frekans kontrol servislerine katılımı [6-9] veya YFK sisteminde yükün sisteme dâhil edileceği zaman aralıklarının programlandığı Dinamik Talep Cevabı (DTC) kontrol teknikleri [10-12] oldukça ilgi gören önemli YFK teknikleri olmuştur. Her ne kadar yeni kontrol teknikleri, güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini iyileştirmek için YFK sistemlerine dâhil edilse de, haberleşme ağ tabanlı gözlemlenen zaman gecikmeleri önemli bir problem olarak görülmüştür.

Elektrik güç sistemlerinin zaman gecikmesi üst sınır değerlerini hesaplamak için zaman düzleminde ve frekans düzleminde olmak üzere iki ayrı grupta yöntemler kullanılmaktadır. Frekans düzleminde sık kullanılan yöntemler grubunda;

1. Üstel Terimin Yok Edilmesi Yöntemi [5, 13],
2. Kritik Özdeğerlerin İzlenmesi Yöntemi [14],
3. Frekans Tarama Yöntemi [15],
4. Rekasius Yerine Koyma Yöntemi [16, 17]

bulunmaktadır.

Sunulan bu yöntemler ve bu yöntemlerin haricinde frekans düzleminde kullanılan pek çok yöntem, [18] tarafından yapılan derleme çalışmasında sunulmuştur. Frekans düzlemi üzerine uygulanan yöntemler, zaman gecikmesi sabit olan sistemlerin kararlılık analizi için kullanılmakta olup bu uygulanan yöntemlerin ortak noktası, sistemin sınırdaki kararlı olmasını sağlayacak bütün imajiner kökleri belirleyebilmeleridir. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde, Rekasius yerine koyma yöntemi ve üstel terimlerin yok edilmesi, klasik YFK sistemlerinde [5], EA içeren YFK sistemlerde [8, 19-21], DTC içeren YFK sistemlerde [10], talep yanıtı ve kesir dereceli oransal integral kontrolör içeren YFK sistemlerde [22], mikro şebeke sistemlerinde [23, 24] zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizlerinin yapıldığı çalışmalarda olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Güç sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinde son yıllarda yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde belirtilen yöntemler arasında uygulanma kolaylığı, hesaplama zamanları ve teorik olarak elde edilen sonuçların doğruluğu bakımından üstel terimlerin yok edilmesi yönteminin, diğer yöntemlere göre en uygun yöntem olduğu görülmektedir. [5, 20, 23].

Zaman düzleminde tanımlanan yöntemler ise doğrusal matris eşitsizlikleri ile birlikte kullanılan Lyapunov-Krasovskii ve Lyapunov-Razumikhin teoremlerini temel almaktadır [25, 26]. Bu grupta yer alan yöntemler, doğrusal matris eşitsizlik teknikleri yardımıyla kararlılık gecikmesi payı değerlerini hesaplar. Bu yöntemler ile EA içeren ve klasik yük frekans kontrol sistemi içerisinde zaman gecikmelerinin sabit ya da değişken olması halinde sistemi sınırdaki kararlı yapacak zaman gecikmesi değerleri teorik olarak hesaplanmıştır [4, 7, 25, 27]. Ancak, zaman düzlemindeki bu yöntemler frekans düzlemindeki yöntemler ile kıyaslandığında kararlılık gecikme payının gerçek değerinden daha küçük değerler vermektedir [4, 7, 8].

Zaman gecikmeli güç sistemlerinde kararlılık gecikme payı hesaplanması üzerine sunulan literatürdeki tüm çalışmaların ortak amacı nominal sistem parametreleri dikkate alınarak belirli bir denetleyici parametre seti için kararlılık gecikme üst sınırı değerlerinin hesaplanmasını sağlamaktır. Ancak, parametrik belirsizlikler, yük değişimi ve modelmeden kaynaklanan birçok belirsizliğin var olması elektrik güç sistemlerinde karşılaşılan önemli bir sorun olarak rapor edilmektedir [28-32]. Ayrıca, ayarlanabilir olan bu kontrolör kazanç değerleri için sistem parametreleri ve zaman gecikmesinde olası belirsizlik durumları için, güç sisteminin gürbüz zaman gecikmesi üst sınır değerlerinin hesaplanması üzerine dayalı gürbüz bir zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi yapılmalıdır [28].

Şimdiye kadar yapılan pek çok çalışmada, YFK sistemlerinin denetleyici parametrelerinin tasarımı üzerine gürbüz kararlılık analizi sunulmuştur. Gürbüz denetleyici parametre tasarımı sunulan çalışmalarda, Kharitonov Teoreminin etkin bir şekilde uygulandığı görülmektedir [29-31]. Bu teoreme göre, katsayıların belirli bir aralıkta değişmesi ile elde edilen aralık polinomlarından, belirlene katsayı aralıklarının minimum ve maksimum değerlerinden yola çıkarak, vertex polinomlar tanımlanır. Elde edilen olası tüm vertex polinomlarının Hurwitz anlamında kararlılığı test edilerek gürbüz bir kararlılık analizi yapılabilir [34]. [29-31]'da sunulan çalışmalarda YFK sistemlerinin gürbüz kararlılığını garanti eden oransal-integral (PI) denetleyici kazanç değerlerinin bir seti belirlenmiştir. [32]'de sunulan çalışmada YFK sistemlerinde kesir dereceli PI denetleyici parametrelerinin tasarımı yapılmıştır. [33]'te sunulan çalışmada EA içeren YFK sistemlerinin gürbüz kararlılığını sağlayan PI denetleyici düzleminde gürbüz kararlılık bölgelerinin elde edildiği görülmektedir. Literatürde sunulan çalışmalar incelendiğinde, gürbüz kararlılık gecikme payının hesaplanması üzerine herhangi bir çalışma mevcut değildir. Parametrik değişimler göz önüne alındığında gürbüz zaman gecikmesi problemlerini çözmek amacıyla, bu çalışmada Kharitonov teoremi ile birlikte üstel terimlerin yok edilmesi yöntemleri birleştirilerek hibrit bir yöntem üzerinden YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme paylarının hesaplanması amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, bu çalışmanın literatüre önemli katkıları üstel terimlerin yok edilmesi yöntemini ve Kharitonov teoremini birleştirilerek belirli bir denetleyici parametre seti için iki bölgeli YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesi üst sınırı değerinin hesaplanmasını sağlamak ve gürbüz zaman gecikmesi payı değerleri üzerinde parametrik belirsizliklerin etkisini incelemektir. Son olarak elde edilen teorik sonuçların doğrulanması açık erişime sahip QPmR (Quasi Polynomial Mapping Root Finder) algoritması [35] ve MATLAB/Simulink ortamında [36] oluşturulan benzetim çalışmaları yardımıyla gösterilecektir.

## 2 Zaman gecikmeli yük frekans kontrol sistemi

Şekil 1'de her bir kontrol bölgesi içerisinde zaman gecikmesi bulunan iki bölgeli YFK sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Şekil 1'den görüleceği üzere, YFK sistemini oluşturan her bir bloğun birinci dereceden transfer fonksiyonları kullanılarak doğrusal dinamik modelinin elde

edildiği görülmektedir. Sistem modelinde,  $D_i$ ,  $M_i$ ,  $R_i$ ,  $\beta_i$ ,  $T_{I2}$ ,  $T_{gi}$  ve  $T_{chi}$  ( $i=1,2$ ) sırası ile her bir kontrol bölgesinin jeneratör sönüm katsayısı, jeneratör eylemsizlik momenti, hız regülasyon düşüşü veya yüzdesi, frekans yönelim faktörü, bağlantı hattı senkronizasyon katsayısı, devir sayısı regülatörü ve türbin zaman sabitleridir. Ayrıca,  $\Delta f_i$ ,  $\Delta P_{vi}$ ,  $\Delta P_{di}$ ,  $\Delta P_{mi}$ ,  $\Delta P_{L2}$  ve  $ACE_i$  sırasıyla her bir kontrol bölgesinin frekansı, valf konumunu, yükteki değişimi, jeneratör mekanik gücü, bağlantı hattı güç değişimini ve alan kontrol hata sinyalini temsil etmektedir. Kontrol merkezi ve üretim santralleri arasında haberleşme ağı tabanlı gözlemlenecek olan zaman gecikmesi ifadesi sekonder kontrol çevrimine girilerek  $e^{-s\tau_i}$  ile gösterilmiştir. Burada,  $\tau_i$  ( $i=1,2$ ) her bir kontrol bölgesinde gözlemlenecek toplam zaman gecikmesini ifade etmekte ve sabit bir değer olarak varsayılmıştır [5], [8]. Son olarak, sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan  $K_{pi}$  ve  $K_{Ii}$  ( $i=1,2$ ) parametreleri PI denetleyici kazanç değerlerini göstermektedir. Her bir bölgedeki denetleyici kazançlarının birbirine eşit olduğu kabul edilmiştir. Şekil 1’de verilen iki bölgeyi YFK sistemine Kharitonov teoremini uygulamak ve gürbüz zaman gecikmesi değerlerini hesaplamak için öncelikle her bir bölgenin parametrik belirsizlikler içeren karakteristik denkleminin elde edilmesi gereklidir. İki bölgeyi YFK sisteminin zaman gecikmesi bakımından kararlılık analizi incelendiğinde, bölgeler arasındaki bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin düşük olduğundan [21], her iki frekans kontrol bölgesi birbirinden ayrılarak sistemin herhangi bir bölgesinin zaman gecikmeli karakteristik denklemi aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + F(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (1)$$

Burada,  $P(s)$  ve  $F(s)$  reel katsayılarla sahip polinomları temsil etmekte olup bu polinomlar ve sahip oldukları katsayılar aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

$$P(s) = p_4s^4 + p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s \quad (2)$$

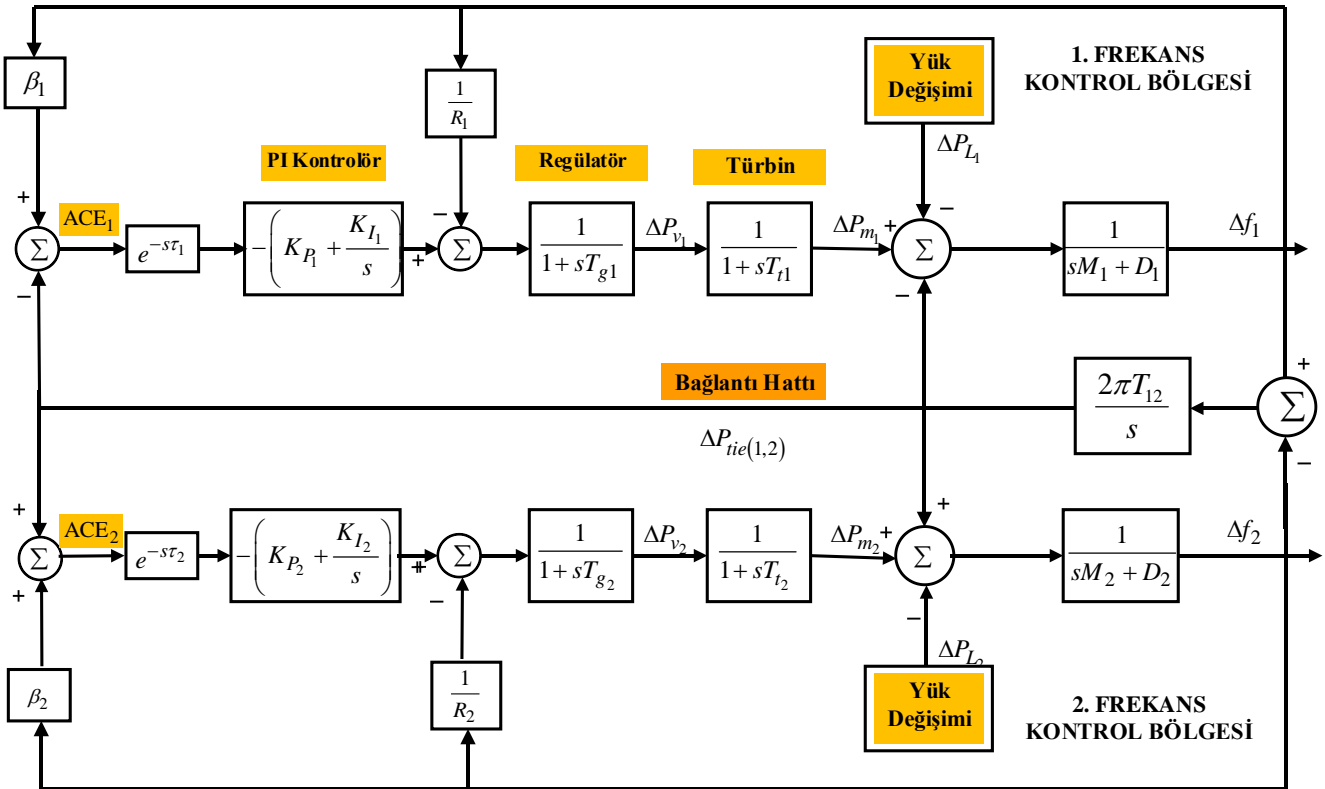
$$F(s) = \beta(K_p s + K_I)$$

Denklem (2)’de verilen  $P(s)$  polinomu sistem parametrelerini içeren ve sistemin gürbüz kararlılık analizinin yapılabilmesi için sadece bu polinomda yer alan parametrelerde belirsizlikler olacağı dikkate alınmaktadır. Böylesi bir polinom katsayıları belirli bir aralıkta değişen dört adet köşe polinomun tanımlanmasını sağlamaktadır. Burada,  $F(s)$  denetleyici parametrelerini içeren ve herhangi bir belirsizlik uygulanmayan sabit bir polinomdur. Dolayısıyla, parametrik belirsizliklerin uygulanabileceği  $P(s)$  polinomunun her bir kontrol bölgesi için genel formda verilen sistem parametreleri cinsinden katsayıları aşağıda elde edilmiştir.

$$p_4 = T_{gi}T_{chi}M_i, p_3 = T_{chi}M_i + T_{gi}T_{chi}D_i + M_iT_{gi}$$

$$p_2 = M_i + D_iT_{gi}, p_1 = D_i + 1/R_i \quad (3)$$

$$i = 1, 2.$$



Şekil 1. İki bölgeyi yük frekans kontrolü sistemi blok diyagramı

### 3 Parametrik belirsizlikler karşısında YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesi değerlerinin belirlenmesi

#### 3.1 Kharitonov teoremi

Kharitonov teoremi parametreleri belirli bir aralıkta değişen polinomların gürbüz kararlılığının belirlenmesinde gerekli ve yeterli şartların incelenmesini sağlar. **Denklem (1)**'de verilen karakteristik polinomda parametrik belirsizlikler içeren  $P(s)$  polinomu için belirli bir aralıkta parametrik değişimler uygulanarak, bir dörtgenin köşe noktalarına karşılık gelen Kharitonov teoremine dayalı dört adet polinom tanımlanabilir. Böylesi bir polinom aralık polinom olarak adlandırılabilir ve **Şekil 2**'de  $\omega > 0$  için  $P(s)$  polinomunun kompleks düzlemde bir dörtgenin köşelerine karşılık gelen dört köşe polinomu gösterilebilir. Bu polinomların her birinin Hurwitz kararlılık şartlarını yerine getirmesi halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlılığı incelenir. **Denklem (1)**'de verilen karakteristik denklemde  $P(s)$  polinomuna Kharitonov teoremini uygulamak için aşağıdaki tanım yapılabilir.

**Tanım 1:** **Denklem (1)**'de önceden tanımlanmış parametrik sınırlar altında  $P(s)$  polinomu için aşağıda verilen bir dörtgenin dört köşe noktasını oluşturan Kharitonov polinomları oluşturulabilir.

$$\begin{aligned} K_p^1(s) &= (p_4^+ s^4 + p_3^- s^3 + p_2^- s^2 + p_1^+ s) \\ K_p^2(s) &= (p_4^+ s^4 + p_3^+ s^3 + p_2^- s^2 + p_1^- s) \\ K_p^3(s) &= (p_4^- s^4 + p_3^+ s^3 + p_2^+ s^2 + p_1^- s) \\ K_p^4(s) &= (p_4^- s^4 + p_3^- s^3 + p_2^+ s^2 + p_1^+ s) \end{aligned} \quad (4)$$

Burada, - ve + indisler  $P(s)$  aralık polinomu için **Denklem (2)** ve **(3)**'te verilen  $p$  katsayılarının alt ve üst limitlerini göstermektedir.  $P(s)$  polinomu için  $p_k \in [p_k^-, p_k^+]$  ( $k=1,2,3,4$ ) bir aralıkta belirsizliğin alt ve üst limit değerleri tanımlanabilir. YFK sisteminin karakteristik denklemi Kharitonov köşe polinomları dikkate alınarak aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta_{V_i}(s, \tau) = K_p(s) + F(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (5)$$

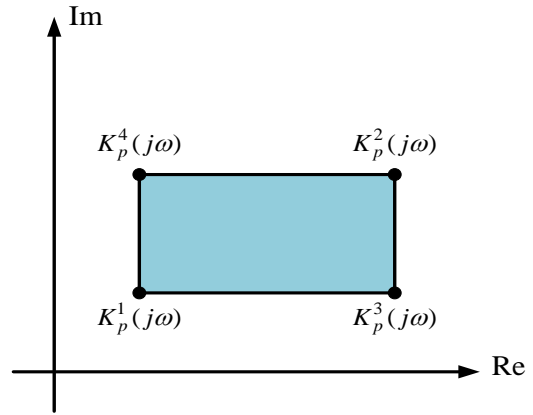
Burada,  $K_p(s) = \{K_p^i(s)\}$  ( $i=1,2,3,4$ )  $P(s)$  polinomu ile oluşturulan dört ayrı Kharitonov polinomlarının bir setidir. Bu polinomlar  $\Delta_V \in \{\Delta_{V_1}, \Delta_{V_2}, \Delta_{V_3}, \Delta_{V_4}\}$  olarak tanımlanır. Seçilen denetleyici kazanç değerleri için bu polinomların her biri klasik Hurwitz kararlılık kriterini sağlaması halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlı olduğu söylenebilir. Aynı zamanda, seçilen denetleyici kazançları tanımlanan belirsizlik sınırlarında zaman gecikmesi içeren veya içermeyen YFK sistemini gürbüz olarak kararlı kılmaktadır.

Kharitonov köşe polinomları dikkate alınarak parametrik belirsizliklere sahip  $\Delta_V(s, \tau)$  için aşağıdaki varsayımlar geçerlidir.

**Varsayım 1:** (4)'de verilen  $K_p(s)$ 'in her bir katsayısı tanımlanan aralıklarda birbirinden bağımsız olarak değişir.

**Varsayım 2:**  $\Delta_V(s, \tau)$  karakteristik denkleminin Kharitonov polinomları seti için derecesi değişmemektedir. Dolayısıyla,  $0 \notin [p_k^-, p_k^+]$  ( $k=1,2,3,4$ ) olduğu varsayılır.

Bu varsayımlar Kharitonov teoremini YFK sistemine uygulanması bakımından önemlidir. Sistem parametrelerinin belirsizlik aralığı tanımlandığında YFK sisteminin gecikme değerleri Kharitonov teoremi ile elde edilen her bir köşe polinom için değişecektir. Bu anlamda, üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi parametrik belirsizlikler içeren YFK sisteminin gecikmeye bağlı gürbüz kararlılık analizini incelemek ve (5)'te verilen dört köşe polinomunun kararlılığını sağlayan gürbüz zaman gecikmesi üst sınırı değerlerini hesaplamak için kullanılabilir.



**Şekil 2.**  $\omega > 0$  için Kharitonov köşe polinomları

#### 3.2 Gürbüz kararlılık gecikme payının hesaplanması: Üstel Terimlerin Yok Edilmesi Yöntemi

Zaman gecikmeli YFK sisteminin kararlılığı gecikmeye bağlı ve gecikmeden bağımsız kararlılık durumları altında incelenebilir. YFK sistemi, girilen sonlu gecikme değerleri karşısında kararlılığını sürdürüyorsa YFK sisteminin gecikmeden bağımsız kararlı olduğu bilinir. Diğer durumda, YFK sistemine girilen  $\tau_c < \tau$  gecikme değerlerinde sistemin kararlılığı olumsuz olarak etkileniyorsa, YFK sisteminin gecikmeye bağlı kararlı olduğu söylenebilir. Burada,  $\tau_c$ , YFK sisteminin sanal eksen üzerinde kritik köklerine ( $s = j\omega_c$ ) karşılık gelen kararlılık gecikme payı olarak tanımlanmaktadır. Girilen gecikme değeri, kararlılık gecikme payından büyük olması ( $\tau > \tau_c$ ) halinde sistem kararsız olmaktadır. YFK sistem parametreleri belirli bir aralıkta değiştirildiğinde **Denklem (5)**'ten görüldüğü üzere dört adet Kharitonov polinomu elde edilecektir. Başlangıçta  $\tau = 0$ 'da, seçilen denetleyici kazanç değerlerinde ve sistemin girilen parametrik belirsizlik sınırlarında tüm Kharitonov



polinomlarının kararlı olduğu kabul edilsin. Aslında, belirsizlikler içeren bir YFK sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini değerlendirmek için böylesi bir varsayım gereklidir. Aynı zamanda, seçilen denetleyici kazanç değeri için  $\tau=0$ 'da tüm Kharitonov polinomları Hurwitz kararlılık şartlarını sağlaması halinde YFK sisteminin gürbüz anlamda kararlı olduğu sonucuna ulaşılabilir.

Yöntemin ilk amacı karakteristik denklemde bulunan üstel terimin yok edilmesi ve klasik bir polinom elde edilmesini sağlamaktır. Bu doğrultuda, sistemin karakteristik denkleminin sanal eksen üzerinde  $s = j\omega_c$  ve  $s = -j\omega_c$  olarak kompleks eşlenik kök çifti olması özelliğinden faydalanılarak Denklem (5)'te verilen polinom setinin herhangi biri için aşağıda verilen polinom çifti yazılabilir [5, 13].

$$\begin{aligned} \Delta_{V_i}(j\omega_c, \tau) &= K_p^i(j\omega_c) + F(j\omega_c)e^{-j\omega_c\tau_c} = 0 \\ \Delta_{V_i}(-j\omega_c, \tau) &= K_p^i(-j\omega_c) + F(-j\omega_c)e^{j\omega_c\tau_c} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

Burada,  $K_p^i(\bullet)$  ( $i=1,2,3,4$ ), Denklem (5)'in  $i$ . köşe polinomunu göstermektedir.  $e^{-j\omega_c\tau_c}$  ve  $e^{j\omega_c\tau_c}$  üstel terimleri Denklem (7) kullanılarak elimine edilebilir. Bu eliminasyon sonrasında üstel terimler içermeyen klasik polinom aşağıda verildiği gibi belirlenebilir.

$$W(\omega_c^2) = K_p^i(j\omega_c)F(-j\omega_c) - K_p^i(-j\omega_c)F(j\omega_c) = 0 \quad (8)$$

Dikkat edilecek olunursa Denklem (8) herhangi bir yaklaşık ifade kullanılmadan tam bir şekilde sonuçlanmıştır. Bu denklem ifadesi kullanılarak sistemin sanal eksen kesen kritik kökleri hesaplanabilir. Denklem (8)'in açık ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$W(\omega_c^2) = t_8\omega_c^8 + t_6\omega_c^6 + t_4\omega_c^4 + t_2\omega_c^2 + t_0 = 0 \quad (9)$$

Denklem (9)'un katsayıları:

$$\begin{aligned} t_8 &= p_4^2, \quad t_6 = -p_3^2 - 2p_2p_4, \quad t_4 = p_2^2 - 2p_3p_1, \\ t_2 &= p_1^2 - q_1^2, \quad t_0 = -q_0^2. \end{aligned}$$

Denklem (9)'dan elde edilen köklerden yola çıkılarak YFK sisteminin gecikmeye bağlı veya gecikmeden bağımsız kararlılık durumlarının incelenmesi gerçekleştirilebilir. Denklem (9)'un çözümünden herhangi bir pozitif reel kök elde edilmediği durumda, sistem gecikmeden bağımsız kararlıdır. Denklem (9)'un çözümünden en az bir adet reel kök elde edilmesi halinde, YFK sistemi gecikmeye bağlı kararlı olup sistem sonlu zaman gecikmesi  $\tau_c$  değerinde sanal eksen üzerinde köklere sahip olur. Ayrıca, Denklem (9)'un elde edilen pozitif reel kökü Denklem (1)'in sanal eksen kesen köküne karşılık gelmektedir.

Denklem (9), reel bir köke ( $\omega_c$ ) sahip olması durumunda YFK sisteminin kararlı gecikme payı değeri  $\tau_c$  Denklem (10) yardımıyla elde edilebilir [5, 13].

$$\tau_c = \frac{1}{\omega_c} \text{Tan}^{-1} \left\{ \frac{\text{Im} \left\{ \frac{K_p^j(j\omega_c)}{F(j\omega_c)} \right\}}{\text{Re} \left\{ \frac{K_p^j(j\omega_c)}{F(j\omega_c)} \right\}} \right\} + \frac{2r\pi}{\omega_c}, \quad (10)$$

$r = 0, 1, 2, \dots, \infty$

Sonuç olarak, önerilen yöntem Denklem (5)'te tanımlanan dört Kharitonov köşe polinomunun her birine uygulanarak parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin hesaplanması sağlanabilir. Dolayısıyla, Denklem (5)'te köşe polinomları setine karşılık gelen gecikme değerlerinin seti aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.

$$\tau_V = \{ \tau_{V_{c1}}, \tau_{V_{c2}}, \tau_{V_{c3}}, \tau_{V_{c4}} \} \quad (11)$$

Denklem (11)'de verilen gecikme değerlerinden en küçük olanı aralık polinomlu YFK sisteminin tüm köşe polinomlarının kararlılığını sağlayan gürbüz kararlılık gecikme değeri olacaktır. Bu gecikme değeri aşağıda ifade edilmiştir.

$$\tau_{Vc} = \min \{ \tau_V \} \quad (12)$$

#### 4 Teorik ve benzetim sonuçları

Bu bölümde, YFK sisteminin parametrik belirsizliklere sahip olması halinde, sistemin her bir kontrol bölgesi için ayrı ayrı gürbüz zaman gecikmesi değerleri Bölüm 3'de verilen yöntemler uygulanarak teorik olarak elde edilmiştir. Daha sonra, elde edilen teorik sonuçların doğrulanmasını göstermek amacıyla farklı senaryolar altında benzetim çalışmaları uygulanmıştır. İki bölgeli YFK sisteminin her bir kontrol bölgesine ait nominal sistem parametreleri ve değerleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İki bölgeli YFK sistem parametre değerleri

Parametre	$T_{chi}(s)$	$T_g(s)$	R	D	$\beta_i$	M
Bölge 1	0.3	0.1	0.05	1	21	10
Bölge 2	0.4	0.17	0.05	1.5	21.5	12

Bölüm 3'te sunulan üstel terimlerin yok edilmesi yönteminin ve Kharitonov teoreminin YFK sistemine uygulanarak gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin hesaplanma aşamaları aşağıda adım adım gösterilmiştir.

**1. Adım:** Tablo 2’de verilen YFK sistemin 1. kontrol bölgesinin nominal parametreleri için,  $\delta = \pm 5\%$  parametrik belirsizlik tanımlanmış öncelikle Tablo 1’de verilen parametre değerlerinin alt ve üst limitleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Bölge-1 için;

$$T_{ch} = [0.285; 0.315], T_g = [0.095; 0.105], R = [0.0475; 0.0525]$$

$$D = [0.95; 1.05], M = [9.5; 10.5]$$

Bölge-2 için;

$$T_{ch} = [0.38; 0.42], T_g = [0.1615; 0.1785], R = [0.0475; 0.0525]$$

$$D = [1.425; 1.575], M = [11.4; 12.6]$$

Bu parametre değerlerine bağlı olarak ve PI denetleyici parametre değerleri  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  için Denklem 4’te verilen dört Kharitonov polinomunda yer alan sistem parametrelerinin alt ve üst limit değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$p_1 = [19.9976; 22.1076], p_2 = [9.8610; 10.9410]$$

$$p_3 = [3.6357; 4.4447], p_4 = [0.2572; 0.3473]$$

**2. Adım:** Denklem (4)’te verilen dört adet Kharitonov polinomu ve Denklem (5)’te verilen Kharitonov karakteristik denklemleri aşağıda verildiği elde edilmiştir.

$$K_p^1(s) = (0.3473s^4 + 4.4447s^3 + 9.8610s^2 + 19.9976s)$$

$$K_p^2(s) = (0.2572s^4 + 4.4447s^3 + 10.9410s^2 + 19.9976s)$$

$$K_p^3(s) = (0.3473s^4 + 3.6357s^3 + 9.8610s^2 + 22.1026s)$$

$$K_p^4(s) = (0.2572s^4 + 3.6357s^3 + 10.9410s^2 + 22.1026s)$$

**3. Adım:** 2. Adım ile elde edilen Kharitonov polinomlarının her birine Denklem (7) uygulandığında aşağıda verilen Denklem (8) ve (9)’da gösterilen aralık polinomlu YFK sisteminin klasik polinomları elde edilebilir.

- 1. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{+2}, t_6 = -p_3^{-2} - 2p_2^- p_4^+, t_4 = p_2^{-2} - 2p_3^- p_1^+,$$

$$t_2 = p_1^{+2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 2. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{+2}, t_6 = -p_3^{+2} - 2p_2^- p_4^+, t_4 = p_2^{-2} - 2p_3^+ p_1^-,$$

$$t_2 = p_1^{-2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 3. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{-2}, t_6 = -p_3^{+2} - 2p_2^+ p_4^-, t_4 = p_2^{+2} - 2p_3^+ p_1^-,$$

$$t_2 = p_1^{-2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

- 4. Kharitonov Polinomu için;

$$t_8 = p_4^{-2}, t_6 = -p_3^{-2} - 2p_2^+ p_4^-, t_4 = p_2^{+2} - 2p_3^- p_1^+,$$

$$t_2 = p_1^{+2} - q_1^2, t_0 = -q_0^2.$$

Denklem (9)’ ile elde edilen her bir Kharitonov karakteristik denklemlerine ait sanal eksen kesen kökler aşağıda verildiği hesaplanmıştır.

$$[0.2159rad / s, 0.2156rad / s, 0.194rad / s, 0.193rad / s]$$

**4. Adım:** 3. Adım ile elde edilen her bir sanal eksen kesen kök için Denklem (10) kullanılarak Kharitonov köşe polinomları için aşağıda verildiği zaman gecikmesi üst sınırı değerleri belirlenebilir.

$$\tau_{V_{c1}} = 7.766s ; \tau_{V_{c2}} = 7.722s ; \tau_{V_{c3}} = 8.636s ; \tau_{V_{c4}} = 8.594s$$

**5. Adım:** YFK sisteminin Kharitonov köşe polinomları için belirlenen zaman gecikmesi üst sınır değerlerinden minimum olanı parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin kararlılığını sağlayan gürbüz kararlılık gecikme payı değeri  $\tau_V = 7.722s$  olmaktadır.

YFK sisteminin her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerini hesaplamak için PI denetleyici parametreleri  $K_P=0-1.0$ ,  $K_I=0.05-1.0$  aralıklarında seçilerek yukarıda verilen adımlar uygulanmış ve elde edilen teorik sonuçlar Tablo 2 ve 3’te gösterilmiştir. Ayrıca, sistemin parametrelerinin belirsizliği  $\delta = \pm 10$  olması halinde her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri Tablo 4 ve 5’te verilmiştir. Tablo 2-5’te görüldüğü üzere elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinden mavi renk ile vurgulanan değerler  $\Delta_{V_1}(j\omega_c, \tau)$ , yeşil renk ile gösterilen değerler  $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$  ve kırmızı renk ile vurgulanan değerler  $\Delta_{V_3}(j\omega_c, \tau)$  Kharitonov karakteristik polinomlarından hesaplanmıştır. Tablolardan görüleceği üzere, pek çok gürbüz kararlılık gecikme değerinin  $\Delta_{V_2}$  polinomu kullanılarak hesaplandığı tespit edilmektedir. [4], [5], [21] ve [24]’de sunulan çalışmalar nominal sistem parametreleri için bir bölgeyi YFK sistemine ait kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanmıştır. Tablo 2’de verilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri, belirtilen çalışmalarda elde edilen kararlılık gecikme payı değerleri ile kıyaslandığında parametrik belirsizliğin dikkate alındığı YFK sisteminde zaman gecikme değerlerinin sistemin gürbüzlüğünün sağlanması bakımından beklenildiği üzere daha düşük olduğu görülmektedir. Tablo 4 ve 5’te verilen  $\delta = \pm 10$  parametrik belirsizlik durumunda elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri, Tablo 2 ve 3’te verilen sonuçlarla kıyaslandığında, belirsizlik oranının artmasıyla tüm PI denetleyici parametre değerlerine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Teorik olarak elde edilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla  $\delta = \pm 5$

parametrik belirsizliğinde, 1. frekans kontrol bölgesinde  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  denetleyici kazanç değerinde benzetim çalışmaları yapılmış ve sistemin baskın köklerini görmek amacıyla QPmR algoritması sonuçları incelenmiştir. YFK sisteminin frekans yanıtının incelendiği tüm senaryolarda,  $t=0$  anında  $\Delta P_d = 0.05 pu$  yük bozucu etkisinin altında benzetim çalışmaları uygulanmıştır. Yöntemin uygulandığını gösteren hesaplama basamaklarında 4. Adımda görüldüğü üzere,  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  denetleyici parametre değerleri için kararlılık gecikme payı değeri  $\tau_c = 7.7220 s$  olarak elde edilmiş ve **Tablo 2**'de bu değer vurgulanmıştır.  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  denetleyici kazançları ve gürbüz kararlılık gecikme payı YFK sistemine girilerek sistemin QPmR algoritması sonuçları ile birlikte 1. kontrol bölgesinin frekans tepkileri **Şekil 3** ve **4**'te sunulmuştur. **Şekil 3**'te YFK sisteminin tüm Kharitonov karakteristik polinomlarının baskın köklerinin dağılımı incelendiğinde,  $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$  Kharitonov karakteristik polinomunun sanal eksen üzerinde kökleri olduğu ve diğer polinomların baskın köklerinin kompleks düzlemin sol yarı kararlılık bölgesinde olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, **Şekil 4**'te görüldüğü üzere,  $\tau_c = 7.7220 s$  gürbüz kararlılık gecikme payı

değerinde  $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$  Kharitonov karakteristik polinomu haricinde diğer üç polinomda sistemin frekans değişiminin giderek sönümlendiği görülmektedir.  $\Delta_{V_2}(j\omega_c, \tau)$  Kharitonov karakteristik polinomunda YFK sisteminin frekansının sürekli salınımlarından dolayı sınırda kararlı olduğu görülmektedir.

Yapılan bir diğer doğrulama çalışması  $\delta = \pm 5$  belirsizlik sınırları içerisinde, sistem parametrelerinin maksimum, minimum ve nominal parametre durumlarında YFK sisteminin 1. kontrol bölgesinin frekans tepkisinin incelenmesidir. **Şekil 5**, belirtilen parametrik değişim durumlarına karşılık gelen frekans tepkilerini göstermektedir. **Tablo 2**'de verildiği üzere  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  denetleyici kazanç değerinde YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değeri  $\tau_c = 7.7220$  girildiğinde, her bir frekans yanıtında oluşan salınımların sönümlenerek sistemin kararlı olduğu görülmektedir. Sonuç olarak, **Şekil 4** ve **5**'te YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerinin tüm Kharitonov karakteristik polinomlarının kararlılığını ve sistemin gürbüz kararlılığını sağlandığını göstermektedir.

**Tablo 2.**  $\delta = \pm 5$  parametrik belirsizlik oranında 1. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

$\tau_{Vc}$ (s)	$K_I$						
$K_P$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	29.3631	14.3985	9.4057	6.9057	3.1353	1.8538	0.7481
0.05	30.3209	14.8774	9.7249	7.1450	3.2548	1.9332	0.7947
0.1	31.1902	15.3119	10.0145	7.3620	3.3628	2.0046	0.8344
0.2	32.6355	16.0340	10.4953	7.7220	3.5404	2.1201	0.8898
0.4	34.0860	16.7564	10.9736	8.0773	3.7053	2.2146	0.8666
0.6	32.7505	16.0793	10.5115	7.7192	3.4832	2.0135	0.5806
1	0.4429	0.4360	0.4286	0.4210	0.3874	0.3481	0.2660

**Tablo 3.**  $\delta = \pm 5$  parametrik belirsizlik oranında 2. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

$\tau_{Vc}$ (s)	$K_I$						
$K_P$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	29.2401	14.2689	9.2686	6.7605	2.9520	1.6210	0.2695
0.05	30.1978	14.7477	9.5877	6.9997	3.0712	1.6999	0.3146
0.1	31.0670	15.1821	9.8770	7.2163	3.1782	1.7694	0.3496
0.2	32.5119	15.9034	10.3565	7.5746	3.3517	1.8703	0.3885
0.4	33.9601	16.6213	10.8281	7.9205	3.4940	1.8692	0.3595
0.6	32.6171	15.9294	10.3433	7.5307	3.1256	0.7678	0.2794
1	0.3375	0.3285	0.3192	0.3097	0.2694	0.2270	0.1428

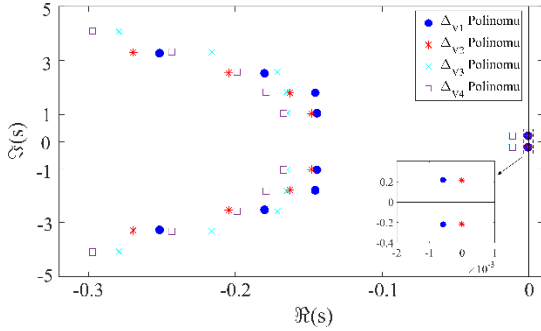
**Tablo 4.**  $\delta = \pm 10$  parametrik belirsizlik oranında 1. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

$\tau_{Vc}$ (s)	$K_I$						
$K_P$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	27.9378	13.6576	8.8924	6.5057	2.9028	1.6747	0.5185
0.05	28.8936	14.1354	9.2109	6.7446	3.0220	1.7539	0.5636
0.1	29.7562	14.5666	9.4982	6.9598	3.1290	1.8245	0.5984
0.2	31.1714	15.2735	9.9688	7.3120	3.3022	1.9368	0.6323
0.4	32.4583	15.9135	10.3914	7.6246	3.4429	1.9791	0.5276
0.6	30.6617	15.0025	9.7696	7.1428	3.0805	0.8952	0.3549
1	0.2585	0.2538	0.2490	0.2441	0.2231	0.2006	0.1539

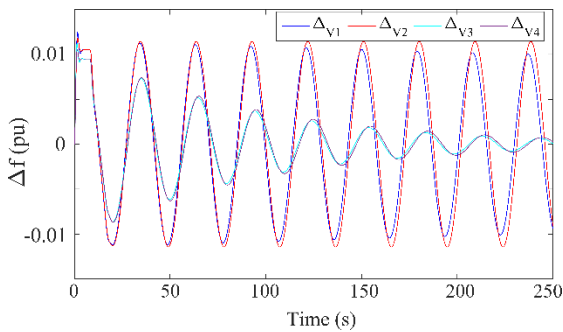
**Tablo 5.**  $\delta = \pm 10$  parametrik belirsizlik oranında 2. Frekans kontrol bölgesine ait gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri

$\tau_{Vc}$ (s)	$K_I$							
$K_P$	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1	
0	27.7965	13.5108	8.7375	6.3415	2.6935	1.3666	*	
0.05	28.7521	13.9885	9.0559	6.5802	2.8123	1.4432	0.0074	
0.1	29.6146	14.4194	9.3428	6.7950	2.9181	1.5057	0.0464	
0.2	31.0291	15.1253	9.8117	7.1448	3.0861	1.5800	0.1024	
0.4	32.3125	15.7590	10.2251	7.4449	3.1969	1.2415	0.1434	
0.6	30.5034	14.8260	9.5698	6.9163	0.6652	0.3949	0.1230	
1	0.1397	0.1330	0.1263	0.1194	0.0910	0.0617	0.0030	

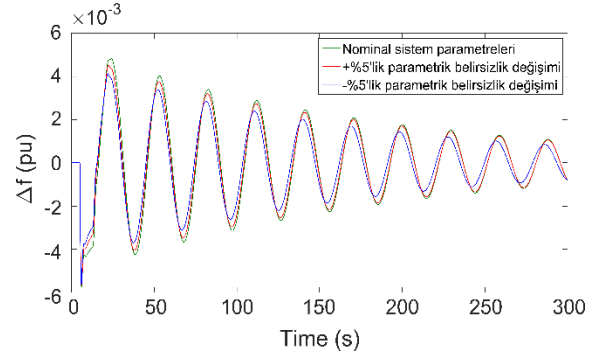
Şekil 4 ve 5'ten görülen sonuçlar, girilen gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hem denetleyici kazanç değerlerinin hem de sistem frekansının dinamik davranışının YFK sisteminin gürbüz çalışması ve kararlılığını sağladığını göstermektedir. Dikkat edilecek olunursa, Tablo 2-5'te sunulan gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri iki YFK kontrol bölgesi arasında bağlantı hattı güç değişiminin olmadığı ( $\Delta P_{12} = 0$ ) durumda elde edilmiştir. Elde edilen gürbüz kararlılık gecikme değeri üzerinde, bağlantı hattı güç değişiminin etkisini incelemek için her iki kontrol bölgesinde  $\delta = \pm 5$  parametrik belirsizlik altında  $K_P=0.2$ ,  $K_I=0.2$  denetleyici kazanç değerlerinde Tablo 2 ve 3'ten her bir bölgenin gürbüz gecikme değeri üst sınırı  $\tau_c = 7.7220s$  ve  $\tau_c = 7.5746s$  olarak belirlenmiştir. Şekil 6, farklı bağlantı hattı güç değişimi durumlarında girilen gürbüz zaman gecikmesi değerinde sistemin kararlılığını sürdürdüğünü göstermekte olup, gürbüz zaman gecikmesi değeri üzerinde bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin zayıf olduğu görülmektedir.



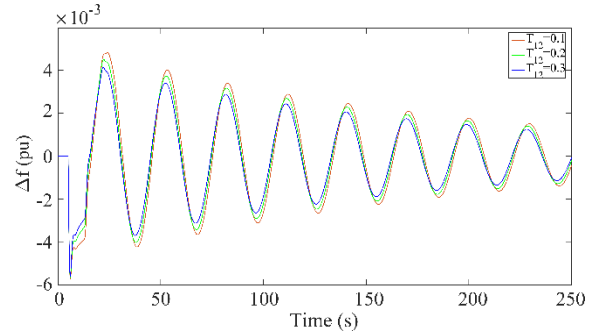
**Şekil 3.** YFK sisteminin her bir Kharitonov polinomunun dominant köklerin dağılımı



**Şekil 4.** YFK sisteminin her bir Kharitonov polinomu için sistemin frekans tepkisi



**Şekil 5.** YFK sisteminin farklı parametrik belirsizliklerinde sistemin frekans tepkisi



**Şekil 6.** İki bölge YFK sisteminde farklı bağlantı hattı güç değişimleri için sistemin frekans tepkisi

## 5 Sonuçlar

Bu çalışmada, parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi ve Kharitonov teoremi kullanılarak elde edilmiştir. Parametrik belirsizliklere sahip YFK sisteminin parametrelerinin belirsizlik oranı arttıkça sistemin gürbüz kararlılık gecikme payı değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir. Benzetim çalışmaları sonucu YFK sisteminin teorik gürbüz zaman gecikmesi değerlerinin doğru olduğunu ve sistem frekansının farklı parametrik değişimler için kararlılığını sürdürdüğünü göstermiştir. Ayrıca, iki bölge YFK sisteminin gürbüz zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini basitleştirmek amacıyla YFK sisteminin bağlantı hattı güç değişimi ihmal edilerek her iki kontrol bölgesinin gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanmıştır. Gürbüz kararlılık gecikme payı üzerinde bağlantı hattı güç değişimlerinin etkisi incelendiğinde, her iki kontrol bölgesi arasında farklı bağlantı hattı güç değişimleri için iki bölge YFK sisteminin



kararlılığını sürdürdüğünü ve gürbüz kararlılık gecikme payı hesabında bağlantı hattı güç değişiminin etkisinin düşük olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın bir sonraki aşamasında, iki bölgeyi YFK sisteminin elektrikli araçlar içermesi durumunda gürbüz kararlılık gecikme payı değerleri hesaplanarak gürbüz zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizleri incelenecektir.

#### Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

**Benzerlik oranı (iThenticate): %5**

#### Kaynaklar

- [1] P. Kundur, Power System Stability and Control (1. Basım). McGraw-Hill Inc, New York, 1994.
- [2] H. Saadat, Power System Analysis (1. Basım). McGraw-Hill Inc, New York, 1999.
- [3] D. Muiyere, L. K. Letting, B. B. Muiyazkiwiye, Effects of communication signal delay on the power grid: a review. Electronics, 11, 874, 2022. <https://doi.org/10.3390/electronics11060874>.
- [4] L. Jiang, W. Yao, J. Y. Wen, S. J. Cheng, and Q. H. Wu, Delaydependent stability for load frequency control with constant and time varying delay. IEEE Trans. Power Syst., 2012. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2172821>
- [5] Ş. Sönmez, S. Ayasun, and C. O. Nwankpa, 2016. An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays. IEEE Transactions on Power Systems, 31(1), 370-377, 2016. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2403865>
- [6] T. N. P. Janu, S. Nahavandi, L. V. Hien, H. Trinh and K. P. Wong,. Static output feedback frequency stabilization of time-delay power systems with coordinated electric vehicles state of charge control. IEEE Trans. Power Syst., 32(5), 3862–3874, 2017. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2633540>.
- [7] S. J. Zhou, H. B. Zeng, H. Q. Xia, Load frequency stability analysis of time-delayed multi-area power systems with evs aggregators based on bessell-legendre inequality and model reduction technique. IEEE Access, 8, 99948-99955, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2997002>.
- [8] A. Sarı, Ş. Sönmez, S. Ayasun, Y. Kabalcı, Delay-dependent stability analysis of multi-area LFC-EVs system. IEEE Transactions on Smart Grid, 14(3), 2178-2188, 2023. <https://doi.org/10.1109/TSG.2022.3212779>.
- [9] Ö Aydın, Ş. Sönmez and S. Ayasun, Stability delay margin computation of multi-area load frequency control system with electric vehicle using critical eigenvalue tracing method. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 45(5), 874-885, 2023. <https://doi.org/10.1177/01423312221122487>.
- [10] D. Katipoglu, Ş. Sönmez, S. Ayasun, A. Naveed, Impact of participation ratios on the stability delay margins computed by direct method for multiple-area load frequency control systems with demand response. Automatika, 63(1), 185-197, 2022. <https://doi.org/10.1080/00051144.2021.2020554>.
- [11] S. A. Pourmousavi and M. H. Nehrir, Introducing dynamic demand response in the LFC model. IEEE Transactions on Power Systems, 29(4), 1562-1572, 2014. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2296696>.
- [12] D. Katipoglu, Ş. Sönmez, S. Ayasun, A. Naveed, Dinamik talep cevabı içeren zaman gecikmeli iki bölgeyi yük frekans kontrol sistemlerinin kararlılık bölgelerinin hesaplanması. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 39(1), 431-442, 2024. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.951415>.
- [13] K. E. Walton and J. E. Marshall, Direct method for TDS stability analysis. IEEE Proceeding Part D, 134, 101-107, 1987. <https://doi.org/10.1049/ip-d:19870018>.
- [14] J. Hongjie, Y. Xiaodan, A simple method for power system stability analysis with multiple time delays. IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy, Pittsburgh. USA, 2008. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596157>.
- [15] J. Chen and H. A. Latchman, Frequency sweeping tests for stability independent of delay. IEEE Transactions on Automatic Control, 40 (9), 1640–1645, 1995. <https://doi.org/10.1109/9.412637>.
- [16] Z. V. Rekasius, 1980. A stability test for systems with delays. Joint Automatic Control Conference, TP9-A, 1980. <https://doi.org/10.1109/JACC.1980.4232120>.
- [17] N. Olgac and R. Sipahi, An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time invariant (LTI) systems. IEEE Transactions on Automatic Control, 47(5), 793-797, 2002. <https://doi.org/10.1109/TAC.2002.1000275>.
- [18] L. Pekař, Q. Gao, Spectrum analysis of LTI continuous-time systems with constant delays: A literature overview of some recent results. IEEE Access, 6, 35457–35491, 2018. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2851453>.
- [19] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, Impact of load sharing schemes on the stability delay margins computed by rekasius substitution method in load frequency control system with electric vehicles aggregator. International Transactions on Electrical Energy Systems, 31 (5), e12884, 2021. <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12884>.
- [20] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, The impact of electric vehicles aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins of load frequency control system. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 9(3), 595-601, 2021. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2019.000244>.
- [21] Ş. Sonmez, S. Ayasun, 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(12), 3385-3395, 2019. <https://doi.org/10.1177/0142331219826653>.
- [22] H. Gündüz, Ş. Sönmez and S. Ayasun, A comprehensive gain and phase margins based stability

- analysis of micro-grid frequency control system with constant communication time delays. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 11(3), 719-729, 2017. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0644>.
- [23] C. A. Macana, E. Mojica-Nava and N. Quijano, Time-delay effect on load frequency control for microgrids. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 544-549, 2013. <https://doi.org/10.1109/ICNSC.2013.6548797>.
- [24] D. Katipoglu, Stability analysis using fractional-order  $p_i$  controller in a time-delayed single-area load frequency control system with demand response. *Advances in Electrical and Computer Engineering*, 23 (2), 39-46, 2023. <https://doi.org/10.4316/AECE.2023.02005>.
- [25] L. Jin, C. K. Zhang, Y. He, L. Jiang, M. Wu, Delay-dependent stability analysis of multi-area load frequency control with enhanced accuracy and computation efficiency. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34 (5), 3687-3696, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2902373>.
- [26] C. Tunç, O. Tunç, Y. Wang and J. C. Yao, Qualitative analyses of differential systems with time-varying delays via Lyapunov–Krasovskii approach. *Mathematics*, 9 (11), 1196, 2021. <https://doi.org/10.3390/math9111196>.
- [27] C. Hua, Y. Wang, Delay-dependent stability for load frequency control system via linear operator inequality. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(7), 6984-6992. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2020.3037113>.
- [28] H. Bevrani, *Robust power system frequency control*. Springer-Verlag, New York, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07278-4>.
- [29] M. R. Toulabi, M. Shiroei, A. M. Ranjbar, Robust Analysis and design of power system load frequency control using the Kharitonov’s Theorem. *Int J Elect Power Energy Syst*, 55, 51–58, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.08.014>.
- [30] S. Saxena, Y. V. Hote, Decentralized PID load frequency control for perturbed multi-area power systems. *Int J Elect Power Energy Syst*, 81, 405–415, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.02.041>.
- [31] J. Sharma, Y. V. Hote, R. Prasad, PID controller design for interval load frequency control system with communication time delay. *Control Eng. Pract.*, 89, 154-168, 2019. [https://doi.org/10.1016/j.conen\\_gprac.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.conen_gprac.2019.05.016).
- [32] R. Lamba, S.K. Singla, S. Sondhi, Design of fractional order PID controller for load frequency control in perturbed two area interconnected system. *Electr. Power Compon. Syst.*, 47 (11-12), 998–1011, 2019. <https://doi.org/10.1080/15325008.2019.1660736>.
- [33] A. Naveed, Ş. Sönmez, S. Ayasun, S. Iqbal, H. Zeinoddini-Meymand, S. Kamel, Robust stability region analysis of time-delayed load frequency control systems with EVs aggregator using Kharitonov theorem”, *IET Generation, Transmission and Distribution*, 17 (19), 4386-4398, 2023. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12983>.
- [34] V. L. Kharitonov, Asymptotic stability of an equilibrium position of a family systems of linear differential equations. *Differentsial’nye Uraveniya*, 14, 1483-1485, 1978.
- [35] T. Vyhldal and P. Zitek, Mapping based algorithm for large-scale computation of quasi-polynomial zeros. *IEEE Transactions Automatic Control*, 2054 (1), 171-177, 2009. <https://doi.org/10.1109/TAC.2008.2008345>
- [36] Matlab (R2019b), Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2019.

