

**Atf İçin:** Katipoğlu D, 2022. Kesir Dereceli PI Denetleyici ve Dinamik Talep Cevabı İçeren Zaman Gecikmeli Bir Bölge Yüklü Frekans Kontrol Sistemlerinin Kararlılık Bölgelerinin Belirlenmesi. İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12(3): 1468 - 1476.

**To Cite:** Katipoğlu D, 2022. Stability Region of a Time-Delayed Single-Area Load Frequency Control System with Demand Response and Fractional-Order PI Controller. Journal of the Institute of Science and Technology, 12(3): 1468 - 1476.

## Kesir Dereceli PI Denetleyici ve Dinamik Talep Cevabı İçeren Zaman Gecikmeli Bir Bölge Yüklü Frekans Kontrol Sistemlerinin Kararlılık Bölgelerinin Belirlenmesi

Deniz KATIPOĞLU<sup>1\*</sup>

**ÖZET:** Bu çalışmada, dinamik talep cevabı (DTC) içeren zaman gecikmeli bir bölge yüklü frekans kontrol (YFK) sisteminde kesir dereceli oransal - integral (FOPI) denetleyicinin sistemin kararlılığını garantiye alan parametre değerleri hesaplanmıştır. Tüm FOPI kontrolör kazançlarını hesaplamak için etkili ve basit bir grafiksel yöntem uygulanmıştır. Belirli bir zaman gecikmesi için yöntem, FOPI denetleyicinin parametre uzayında bir kararlılık bölgesi oluşturan tüm dengeleyici orantılı-integral (PI) denetleyici kazançlarını  $(K_P, K_I)$  düzleminde hesaplamaktadır. Bu işlem, sistemin karakteristik denkleminin reel ve sanal kısımları sıfıra eşitlenerek gerçekleştirilmiştir. Son olarak, Matlab/Simulink ortamında yapılan benzetim çalışmaları yardımıyla FOPI denetleyici içeren bir bölge yüklü YFK-DTC sistemi için elde edilen sonuçlar doğrulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Haberleşme gecikmesi, yük frekans kontrol sistemleri, dinamik talep cevabı, kesir dereceli PI denetleyici, kararlılık bölgesi

### Stability Region of a Time-Delayed Single-Area Load Frequency Control System with Demand Response and Fractional-Order PI Controller

**ABSTRACT:** In this research, the parameter values of the fractional order proportional-integral (FOPI) controller, which ensure the stability of the system, were calculated in a time-delay single area load frequency control (LFC) system with dynamic demand response (DDR). An efficient and simple graphical method had been applied to calculate all FOPI controller gains. For a given time delay, the method calculated all the compensating proportional-integral (PI) controller gains in the  $(K_P, K_I)$  plane, which creates a stability region in the parameter space of the FOPI controller. This was done by equating the real and imaginary parts of the characteristic equation of the system to zero. Finally, for time-delayed single area LFC-DDR system with FOPI controller, results obtained were verified by using the time-domain simulation studies in Matlab/Simulink.

**Keywords:** Communication delay, load frequency control systems, dynamic demand response, fractional order PI control, stability region

<sup>1</sup> Deniz KATIPOĞLU ([Orcid ID: 0000-0003-3082-3879](https://orcid.org/0000-0003-3082-3879)), Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

\*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Deniz KATIPOĞLU, e-mail: denizkatipoglu@aksaray.edu.tr

## GİRİŞ

Yük frekans kontrol sistemi (YFK) frekansı düzenlemeyi ve çok bölgeci birbirine bağıli sistemlerde programlı güç alışverişini sürdürmektedir. Artan çevresel kaygılar, fosil kaynakların kademeli olarak tükenmesi sistemin dinamik davranışını ve çalışma performansını olumsuz olarak etkileyebilmekte, frekans kontrolünde zorluk ortaya çıkarmaktadır (Panwar ve ark., 2011; Chien ve ark., 2021). Bu olumsuzluklardan dolayı şebekelerdeki rüzgar ve güneş kaynakları gibi yenilenebilir enerji (RE) kaynaklarının oranı hızla artmaktadır. Dinamik talep cevabı (DTC), yeni nesil enerji sistemleri için, güç üretim belirsizliği ve yük talebi dalgalanmalarıyla başa çıkarak RE kaynaklarının olumsuz etkilerini azaltabilen ve sistem frekansını düzenleyebilen önemli bir araçtır (Wang ve ark., 2015; Beil ve ark., 2016). Bu özelliklerinden dolayı YFK sistemlerinin dinamik performansını ve güç sisteminin çalışmasının güvenliğini arttırmaktadır. DTC kontrolüne katılan ısıtma (heating) soğutma (cooling), havalandırma (ventilating) ve iklimlendirme (air conditioning) olan sistemler (HVAC), elektrikli su ısıtıcıları gibi termostatik kontrol edilebilen yükler (Chen ve ark., 2018; Gasca ve ark., 2022) ve güç sistemlerinin karşılıklı olarak haberleşmesi sırasında zaman gecikmeleri yaşanmaktadır (Singh ve ark., 2017; Hosseini ve ark., 2019). İletişim gecikmelerinin varlığında YFK-DTC sistemlerinin dinamik frekans yanıtını iyileştirmek ve frekans yanıtlarındaki kararlı durum hatalarını ortadan kaldırmak veya azaltmak için genellikle geleneksel orantılı-integral (PI) veya orantılı-integral-türev (PID) kontrolörleri benimsenmektedir (Sönmez ve Ayasun, 2016). Son zamanlarda, YFK sistemlerinde daha iyi performans özelliklerine sahip olduğu için kesir dereceli PI ve PID kontrolörleri önerilmiştir (Sondhi ve Hote, 2014; Çelik ve ark., 2017; Çelik ve ark., 2019). Kesirli dereceli kontrolörler, geleneksel tamsayı dereceli kontrolörlere göre daha az yükselme süresi, aşma ve yerleşme süresi ile sonuçlanmaktadır (Alomoush, 2010). Sönmez ve Ayasun, (2019); kesir dereceli PI (FOPI) denetleyici içeren zaman gecikmeli bir bölgeci yük frekans kontrol sisteminin kararlılık analizi üzerine çalışmışlar yapmışlar ve FOPI denetleyici kullanılması durumunda sistemin kararlılığının arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, gecikmeli yakıt hücreli mikro şebeke sistemi daha esnek bir kontrol yapısına sahip olduklarından kesir dereceli bir PI kontrolör tarafından kontrol edilmiştir (Özdemir, 2020). Sanal ataletli mikro şebekelerde, YFK değerlendirmesinin mevcut dinamik analizi, sanal atalet kontrolü nedeniyle şebeke kararlılığını karşılamak için yeterli değildir ve kesir dereceli bir orantısız-integral kontrolör tasarımı geliştirilmiştir (Yıldırım ve ark., 2021). Yıldırım ve ark., (2021); modern denizcilik elektrik şebekelerinde ikincil yük frekans kontrolü (YFK) için tek bir giriş aralığı tip-2 bulanık kesirli sıralı PI (SIT2-FFOPI) denetleyicisi kullanmışlardır. Zaman gecikmeli YFK-DTC sistemlerinin kararlılık analizindeki mevcut çalışmalar, temel olarak geleneksel denetleyici tasarımına ve belirli bir dizi denetleyici parametresi için kararlılık zaman gecikmesi hesaplamasına odaklanmaktadır. Shayeghi ve ark., (2021); talep cevabı programı ile fuzzy kaskad denetleyici kullanarak tamamen yenilenebilir birbirine bağıli mikro şebekenin frekans kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Latif ve ark., (2018); parçacık sürü optimizasyonu ve ateş böceği algoritması tabanlı kontrolör kullanan bir mikro şebekenin frekans kontrolü için entegre talep cevabı yönetimi ve üretim kontrolünü çalışmışlardır. Mishra ve ark., (2020); lineer olmayan ara bağılantılı iki bölgeci yeniden ısıtılmayan bir termik santralin kesir dereceli fuzzy FOPID tabanlı talep cevabı kontrolü yoluyla yük frekans kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Zhu ve ark., (2017); düzensiz çok bölgeci bir güç sisteminde dinamik talep cevabı içeren yük frekans kontrol sistemi için sağlam bir PID tipi kontrolörü araştırmışlardır. Yük bozulmalarına, parametre belirsizliklerine, yük frekans kontrol döngüsü ve dinamik talep cevabı döngüsündeki çoklu gecikmelere sağlamlık sağlayan bir PID yük frekansı kontrolörü tasarlamak için  $H_{\infty}$  performans analizi ve parçacık sürü optimizasyonu arama algoritması aracılığıyla gürbüz bir PID kontrolör tasarım yöntemini önermişlerdir.

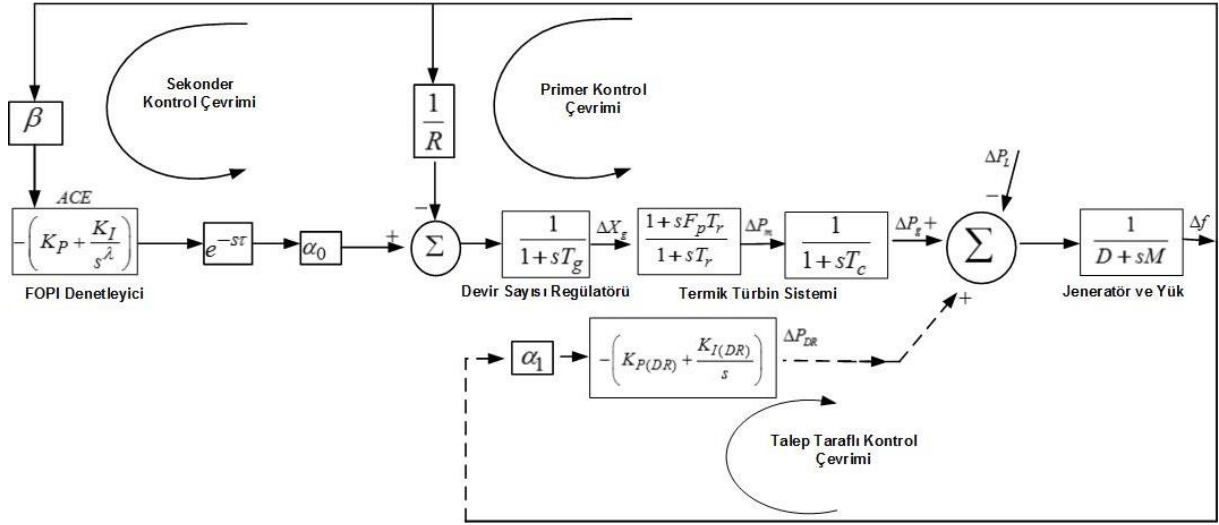
YFK-DTC sisteminin kararlılığı için, belirli bir zaman gecikmesi değerinde kararlı bir çalışma sağlayan geleneksel PI ve/veya FOPI kontrol parametrelerinin tüm olası değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. FOPI denetleyici içeren YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgelerine odaklanan bu çalışmanın önemli katkıları şu şekilde sıralanabilir:

- FOPI denetleyici içeren YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgeleri karakteristik denkleminin sanal ve reel kısımlarını sıfıra eşitlenmesiyle elde edilebilen kararlılık sınır eğrisine dayalı yöntem ile hesaplanmıştır.
- İntegral denetleyicinin kesir derecesinin kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. İntegral denetleyicinin kesir derecesi birden küçük olduğunda FOPI denetleyicisinin geleneksel PI denetleyicisine göre daha büyük bir kararlılık bölgesi verdiği gözlemlenmiştir.
- DTC katılımının YFK sistemine katılımının kararlılık bölgeleri üzerine etkisi incelenmiştir ve DTC katılımı arttıkça kararlılık bölgelerinin genişlediği gösterilmiştir.
- Zaman gecikmesi değerinin kararlılık bölgesi üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Zaman gecikmesi arttıkça kararlılık bölgesinin küçüldüğü görülmüştür.
- Zaman düzlemi benzetim çalışmaları yardımıyla önerilen yöntemin doğruluğu gösterilmiştir.

## MATERYAL ve METOT

### FOPI Denetleyici İçeren Zaman Gecikmeli Bir Bölgeci YFK-DTC Sistemi

Bir bölgeci YFK-DTC sisteminin modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Sürekli çizgilerle gösterilen klasik bir bölgeci YFK sistemine zaman gecikmesi ve kesikli çizgilerle gösterilen DTC eklenerek değiştirilmiştir. DTC tarafında oransal- integral tip denetleyici (PI) kullanılmaktadır (Katipoğlu ve ark., 2021). Frekans düzenleme servisine hem DTC kontrol çevrimi hem de klasik üretim biriminin katkısını belirli bir katılım oranı ile dikkate almak gereklidir. Dolayısıyla, Şekil 1'de, klasik üretim birimi  $\alpha_0$  ve DTC kontrol çevrimi  $\alpha_1$  ile temsil edilen katılım faktörleri kullanılmıştır. Şekil 1'de,  $\Delta f$ ,  $\Delta P_m$ ,  $\Delta P_g$ ,  $\Delta P_{DR}$ ,  $\Delta P_L$  ve  $\Delta X_g$  sırası ile sistemin frekansında, jeneratör mekanik giriş gücünde, jeneratör çıkış gücü, talep taraflı yönetim gücü, şebeke yükü ve valf konumundaki değişimleri göstermektedir. Sistem parametreleri  $\beta$ ,  $M$ ,  $T_g$ ,  $T_r$ ,  $F_p$ ,  $D$ ,  $T_c$  ve  $R$  için ise sırası ile frekans yönelim faktörü, jeneratör eylemsizlik momenti, devir sayısı regülatörü zaman sabiti, ara ısıtmalı türbin zaman katsayısı, jeneratör sönüm katsayısı, ara ısıtmalı türbin zaman sabitleri, hız regülasyon katsayısını göstermektedir. FOPI denetleyicinin kazanç değeri  $K_p$ , integral değeri  $K_I$  ve kesir değeri  $\lambda$  ile gösterilmiştir ve değeri  $0 < \lambda < 2$  arasındadır (Zheng ve ark., 2015). Kesir değeri  $\lambda > 1$  ve  $\lambda < 1$  olması durumunda kesir dereceli PI denetleyici elde edilmektedir.  $\lambda = 1$  olması durumunda ise klasik tam sayı dereceli PI denetleyici elde edilmektedir. Ayrıca, sistemdeki kontrol işlevlerinin yerine getirilmesi için merkezi denetleyici ve klasik üretim birimi arasındaki haberleşme zaman gecikmelerinin bilinmesi gereklidir. Merkezi denetleyici birimi ve klasik üretim birimi tarafında gözlemlenen zaman gecikmesi Şekil 1'de  $e^{-s\tau}$  üstel terimi ile verilmiştir.



Şekil 1. FOPI denetleyici ve DTC içeren zaman gecikmeli bir bölge yük sistemi blok diyagramı.

Zaman gecikmeli bir bölge yük-DTC sisteminin FOPI denetleyici kullanılarak elde edilen karakteristik denklemi, Eşitlik 1.'de verilmiştir.

$$\begin{aligned} \Delta(s, \lambda, \tau) &= P(s) + Q(s)e^{-s\tau} = 0 \\ &= p_5s^{5+\lambda} + p_4s^{4+\lambda} + p_3s^{3+\lambda} + p_2s^{2+\lambda} + p_1s^{1+\lambda} + p_0s^\lambda \\ &+ (q_3s^{2+\lambda} + q_2s^{1+\lambda} + q_1s^2 + q_0s)e^{-s\tau} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Burada

$$\begin{aligned} p_5 &= MRT_gT_cT_r, p_4 = MRT_r(T_g+T_c) + MRT_gT_c + DRT_gT_rT_c + \alpha_1RK_{P(DR)}T_gT_rT_c, \\ p_3 &= MR(T_g+T_c) + MRT_r + DRT_r(T_g+T_c) + DRT_gT_c + \alpha_1RK_{P(DR)}T_r(T_g+T_c) \\ &+ \alpha_1RK_{P(DR)}T_gT_c + \alpha_1RK_{I(DR)}T_gT_rT_c, \\ p_2 &= MR + DRT_r + DR(T_g+T_c) + \alpha_1RK_{P(DR)}(T_g+T_c) + \alpha_1RK_{I(DR)}T_gT_c \\ &+ \alpha_1RK_{I(DR)}T_r(T_g+T_c) + F_pT_r + \alpha_1RK_{P(DR)}T_r, \\ p_1 &= 1 + DR + \alpha_1RK_{P(DR)} + \alpha_1RK_{I(DR)}T_r + \alpha_1RK_{I(DR)}(T_g+T_c), p_0 = \alpha_1RK_{I(DR)} \\ q_3 &= \alpha_0\beta F_pT_rK_p, q_2 = \alpha_0\beta K_p, q_1 = \alpha_0\beta F_pT_rK_I, q_0 = \alpha_0\beta RK_I \end{aligned} \quad (2)$$

### FOPI Denetleyici Parametre Uzayında Kararlılık Bölgelerinin Belirlenmesi

Sistemin karakteristik denkleminde sınırda kararlı olacağı FOPI denetleyicinin  $K_p$  ve  $K_I$  değerlerini hesaplayabilmek için ilk olarak belirli bir  $\tau$  zaman gecikmesi için Eşitlik 1.'de verilen  $\Delta(s, \lambda, \tau)$  karakteristik denkleminde  $s = j\omega_c$ ,  $e^{-j\omega_c\tau} = \cos(\omega_c\tau) - j\sin(\omega_c\tau)$  ve  $j^\lambda = \cos\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right) + j\sin\left(\frac{\lambda\pi}{2}\right)$  yerine yazılmıştır ve karakteristik denklem reel ve sanal bileşenlerine ayrılarak  $K_p$  ve  $K_I$  parametreleri türünden Eşitlik 3.'de ifade edilmiştir (Tan ve ark., 2006; Sönmez ve Ayasun, 2016; Sönmez ve Ayasun, 2018).

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega_c, \lambda, \tau) &= \sum_{i=0}^5 p_i(a_i + jb_i) + (\cos(\omega_c\tau_{GPM}) - j\sin(\omega_c\tau_{GPM})) \\ &\quad \left( K_p(q'_3(c_2 + jd_2) + q'_2(e_1 + jf_1)) + K_I(-q''_1(\omega_c)^2 + jq''_0(\omega_c)) \right) \\ &= R\{\Delta(j\omega_c, \lambda, \tau)\} + jIm\{\Delta(j\omega_c, \lambda, \tau)\} = 0 \\ a_i &= R\{(j\omega_c)^{i+\lambda}\}, b_i = Im\{(j\omega_c)^{i+\lambda}\} \\ c_2 &= R\{(j\omega_c)^{2+\lambda}\}, d_2 = Im\{(j\omega_c)^{2+\lambda}\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$e_1 = R\{(j\omega_c)^{1+\lambda}\}, f_1 = Im\{(j\omega_c)^{1+\lambda}\}$$

Eşitlik 4.'nün sanal eksen üzerinde  $s = \pm j\omega_c$  kökü olabilmesi için Eşitlik 3.'nün reel ve sanal kısımları sifira eşit olmalıdır.

$$\begin{aligned} K_P A(\omega_c) + K_I B(\omega_c) + C(\omega_c) &= 0 \\ K_P D(\omega_c) + K_I E(\omega_c) + F(\omega_c) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Burada,

$$A(\omega_c) = \cos(\omega_c \tau)(q_3'' c_2 + q_2'' e_1) + \sin(\omega_c \tau)(q_3'' d_2 + q_2'' f_1)$$

$$B(\omega_c) = -\cos(\omega_c \tau)(q_1'''(\omega_c^2)) + \sin(\omega_c \tau)(q_0'''(\omega_c))$$

$$C(\omega_c) = \sum_{i=0}^5 p_i a_i$$

$$D(\omega_c) = -\sin(\omega_c \tau)(q_3'' c_2 + q_2'' e_1) + \cos(\omega_c \tau)(q_3'' d_2 + q_2'' f_1)$$

$$E(\omega_c) = \sin(\omega_c \tau)(q_1'''(\omega_c^2)) + \cos(\omega_c \tau)(q_0'''(\omega_c))$$

$$F(\omega_c) = \sum_{i=0}^5 p_i b_i$$

Seçilen herhangi bir  $\omega_c \neq 0$  için Eşitlik 3.'nün sanal ekse üzerinde köklerinin olacağı  $K_P$  ve  $K_I$  kazanç değerleri Eşitlik 4. çözümlenerek, Eşitlik 5.'de elde edilmiştir.

$$\begin{aligned} K_P &= \frac{B(\omega_c)F(\omega_c) - E(\omega_c)C(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)} \\ K_I &= \frac{D(\omega_c)C(\omega_c) - A(\omega_c)F(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)} \end{aligned} \quad (5)$$

Hesaplanan  $K_P$  ve  $K_I$  parametre seti kullanılarak  $(K_P, K_I)$  düzleminde  $\ell(K_P, K_I, \omega_c)$  kararlılık sınır eğrisi elde edilir. Eşitlik 5. kullanılarak hesaplanan  $\ell(K_P, K_I, \omega_c)$  kararlılık sınır eğrisi, kararlılık bölgesindeki kompleks kök sınırını (Complex Root Boundary, CRB) göstermektedir. Ayrıca,  $K_P$  ve  $K_I$  arasındaki ilişki Eşitlik 4.'de  $\omega_c = 0$  değeri yerine yazılarak aşağıda verilen biçimde elde edilir.

$$K_I = - \left[ \frac{K_P A(\omega_c) + C(\omega_c)}{B(\omega_c)} \right]_{\omega_c=0} \quad (6)$$

Eşitlik 6. ise kararlılık bölgesindeki reel kök sınırını (Real Root Boundary, RRB) göstermektedir. Böylece, CRB ve RRB sınırları kullanılarak kararlılık bölgeleri elde edilir. Hesaplanan bölgelerden  $(K_P, K_I)$  değerleri seçilerek sistemi kararlı yapan  $K_P$  ve  $K_I$  parametrelerinden oluşan kararlılık bölgesi belirlenir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir bölge YFK-DTC sisteminde  $(K_P, K_I)$  düzleminde kararlılık bölgelerinin belirlenmesi için önerilen yöntemin benzetim çalışmaları sonuçları bu bölümde verilmiştir. Sisteme ait parametreler aşağıdaki gibidir (Ko ve Sung, 2017):

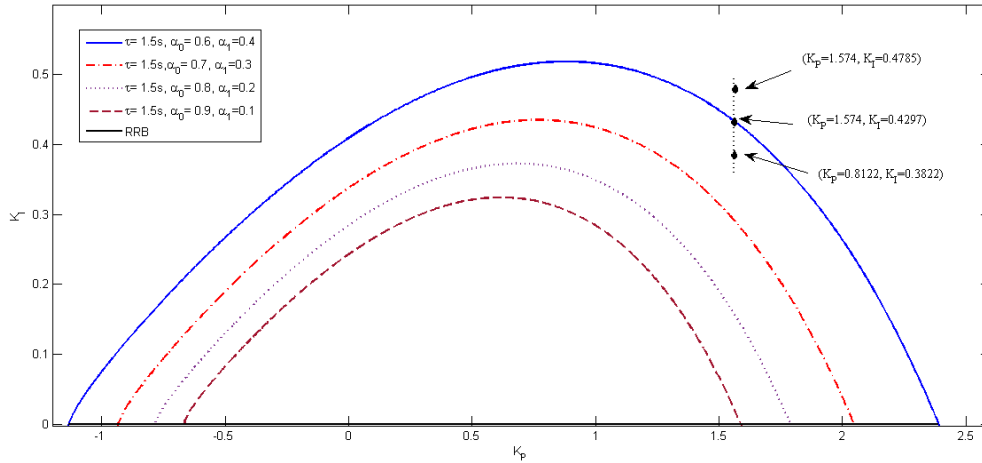
$$M = 8.8, D = 1, F_P = 1/6, R = 1/11, \beta = 21, T_g = 0.2,$$

$$T_c = 0.3, T_r = 12, K_{P(DR)} = 0.4, K_{I(DR)} = 0.6.$$

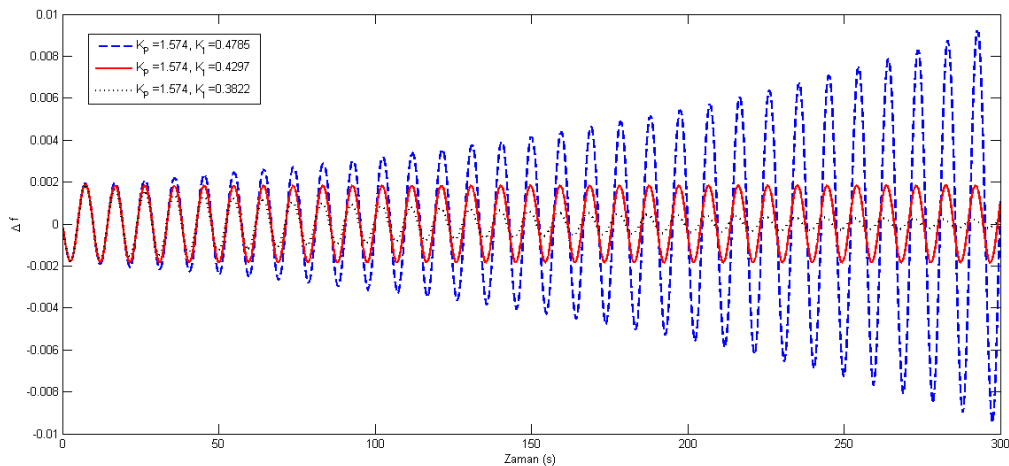
Kararlılık bölgelerinin hesaplanması için sistemdeki zaman gecikmesi değeri  $\tau = 1.5$  s ve  $\lambda = 0.9$  olarak seçilmiş ve DTC katılımının kararlılık bölgeleri üzerine etkisi incelenmiş ve Şekil 2'de gösterilmiştir. DTC katılımı azaldıkça kararlılık bölgelerinin küçüldüğü görülmüştür. Sabit  $K_P$  değeri için

sistemin kararlı bölge içerisinde, sınırda ve dışında PI denetleyici kazanç değerlerinin frekans tepkisi Şekil 3’de gösterilmiştir. Kararlılık bölgesi içerisindeki PI denetleyici kazanç değeri için sistemin kararlı, kararlılık bölgesi sınır eğrisi üzerinden seçilen değer için sistemin sınırda kararlı ve kararlılık bölgesi dışındaki değer için kararsız olduğu görülmüştür.

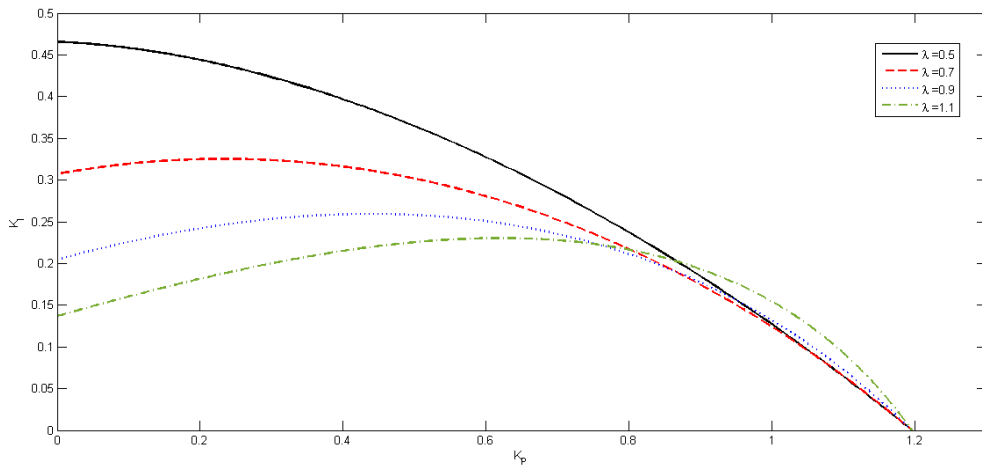
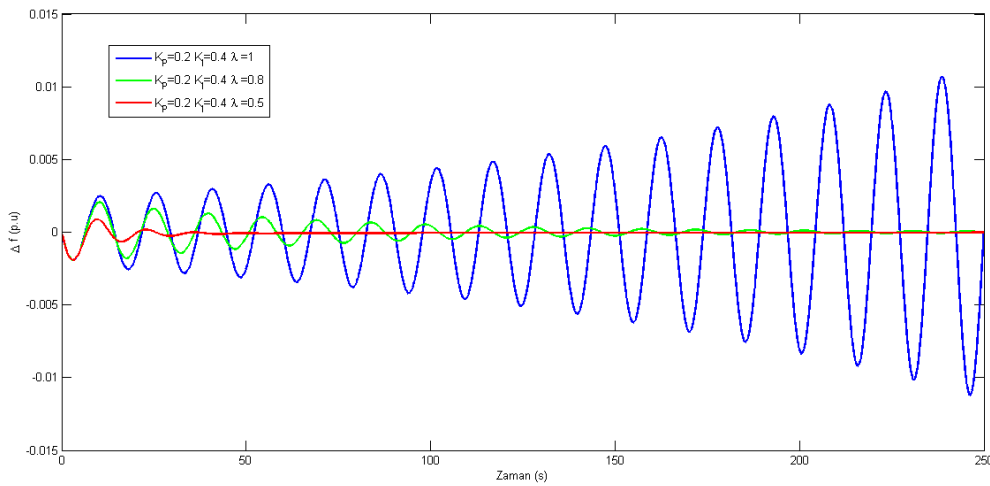
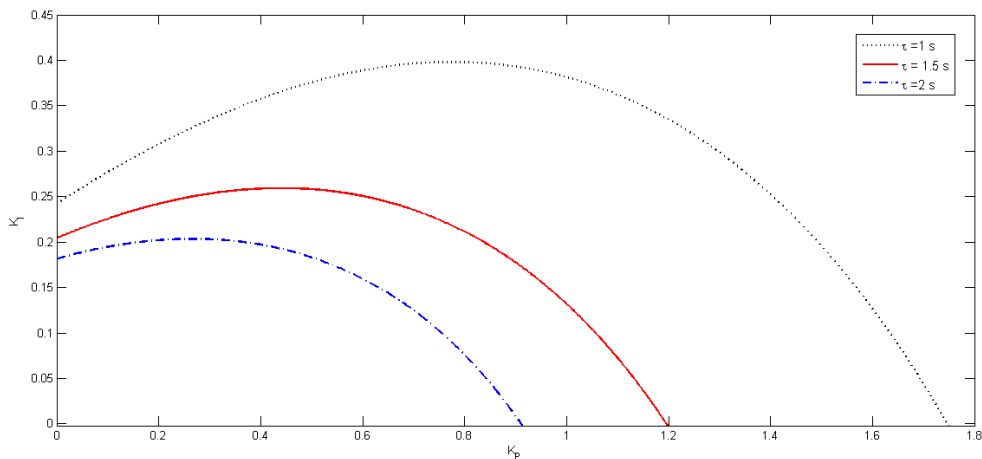
Kesir derecesinin kararlılık bölgeleri üzerindeki etkisini incelemek için  $\tau = 1.5 s$  ve  $\lambda = 0.5, \lambda = 0.7, \lambda = 0.9, \lambda = 1.1$  olduğu durumlarda kararlılık bölgeleri Şekil 4’de gösterilmiştir.  $\lambda$  değeri arttığında sistemdeki kararlılık bölgesinin daraldığı görülmektedir. Ayrıca kesir derecesinin  $\lambda = 1, \lambda = 0.8, \lambda = 0.5$  değerleri için  $\tau = 1.5 s$  ve  $K_p = 0.2, K_I = 0.4$  kullanılarak elde edilen frekans tepkileri Şekil 5’de gösterilmiştir. Şekil 5’de, geleneksel PI denetleyici kullanıldığında frekans sapmasındaki artan salınımlar nedeniyle YFK sisteminin kararsız hale geldiği açıkça görülmektedir. Denetleyici kesirli dereceli PI olarak seçildiğinde sistem kararlıdır. Zaman gecikmesinin kararlılık bölgesi üzerindeki etkisini incelemek içinde  $\tau = 1 s, \tau = 1.5 s, \tau = 2 s$  gecikme değerlerindeki sistemin kararlılık bölgeleri Şekil 6’da elde edilmiştir. Sistemin zaman gecikmesi değeri arttıkça sistemdeki kararlılık bölgesinin daraldığı görülmektedir.



Şekil 2.  $\tau = 1.5 s$  ve  $\lambda = 0.9$  için kararlılık bölgesi.



Şekil 3. PI denetleyicinin farklı kazanç değerlerindeki frekans tepkisi.

Şekil 4.  $\tau = 1.5$  s ve  $\lambda'$  nin farklı değerleri için kararlılık bölgeleri.Şekil 5.  $\tau = 1.5$  s için  $\lambda'$  nin farklı değerlerinin zamana göre frekans tepkisi.

Şekil 6. Zaman gecikmesinin sistemin kararlılık bölgesi üzerindeki etkisi.

## SONUÇ

Bu çalışmada, DTC içeren zaman gecikmeli YFK sisteminde FOPI denetleyici kullanılması sonucunda PI denetleyici parametre alanındaki kararlılık bölgelerini belirlemek için grafiksel bir yaklaşım kullanılmıştır. Yöntem, karakteristik denklemin reel ve sanal kısımlarının sıfıra eşitlenmesiyle elde edilen kararlılık sınır bölgesini temel almaktadır. Sistemdeki tüm parametreler sabit değerde tutulup, belirlenmiş bir zaman gecikmesi kullanılarak sistemi sınırdaki kararlı sağlayacak PI denetleyiciler

hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, Matlab/Simulink programı kullanılarak yapılan benzetim çalışmaları ile doğrulanmaktadır. Teorik ve benzetim çalışmaları sonuçlarının genel olarak uyumlu olduğu görülmüştür. Sonuçlardan aşağıdaki gözlemler ve yorumlar yapılabilir:

- DTC katılımının sistemin kararlılığına etkisi gösterilmiş ve katılım arttıkça bölgelerin genişlediği görülmüştür.
- Zaman gecikmesi değerinin kararlılık bölgeleri üzerine etkisi incelenmiş ve zaman gecikmesi değeri arttıkça kararlılık bölgelerinin daraldığı gösterilmiştir.
- Kesir dereceli PI denetleyici, sistemin daha esnek bir kontrolünü sağlamaktadır.
- FOPI denetleyici kullanmanın geleneksel PI denetleyicilere göre daha iyi bir kararlılık performansı sağladığı görülmektedir.

Sonuç olarak, elde edilen sonuçlara göre gecikmeli YFK-DTC sistemlerini kararlılık bölgesinde tutmayı veya gecikmeli YFK-DTC sistemlerini kararlı hale getirmeyi sağlayan kesirli dereceden bir PI denetleyici tasarlamak için kararlılık sınır eğrisi yöntemi etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Daha sonra yapılacak çalışmada parametrik belirsizliklerin olduğu durumlarda gürbüz PI tasarımı Kharitonov Teoremi kullanılarak gerçekleştirilecektir.

## KAYNAKLAR

- Alomoush MI, 2010. Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers. *Electrical Engineering*, 91: 357- 368.
- Beil I, Hiskens I, Backhaus S, 2016. Frequency regulation from commercial building HVAC demand response. *Proceedings of the IEEE*, 104(4): 745-757.
- Chen X, Wang J, Xie J, Xu S, Yu K, Gan L, 2018. Demand response potential evaluation for residential air conditioning loads. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 12(19): 4260-4268.
- Chien F, Kamran HW, Albashar G, Iqbal W, 2021. Dynamic planning, conversion, and management strategy of different renewable energy sources: a sustainable solution for severe energy crises in emerging economies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(11): 7745-7758.
- Çelik V, Özdemir MT, Bayrak G, 2017. The effects on stability region of the fractional-order PI controller for one-area time-delayed load–frequency control systems. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 39(10): 1509-1521.
- Çelik V, Özdemir MT, Lee KY, 2019. Effects of fractional-order PI controller on delay margin in single-area delayed load frequency control systems. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7(2): 380-389.
- Gasca MV, Ibáñez F, Pozo D, 2022. Flexibility quantification of thermostatically controlled loads for demand response applications. *Electric Power Systems Research*, 202: 107592.
- Hosseini SA, Toulabi M, Dobakhshari AS, Ashouri-Zadeh A, Ranjbar AM, 2019. Delay compensation of demand response and adaptive disturbance rejection applied to power system frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 35(3): 2037-2046.
- Katipoğlu D, Sönmez Ş, Ayasun S, Naveed A, 2021. The effect of demand response control on stability delay margins of load frequency control systems with communication time-delays. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 29(3): 1383-1400.
- Ko KS, Sung DK, 2017. The effect of EV aggregators with time-varying delays on the stability of a load frequency control system. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(1): 669-680.



- Latif A, Das DC, Ranjan S, Hussain I, 2018. Integrated demand side management and generation control for frequency control of a microgrid using PSO and FA based controller. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(1): 188-199.
- Mishra AK, Mishra P, Mathur HD, 2020. Load frequency control of a nonlinear power system via demand response control strategy based fractional order fuzzy controller. *National Power Systems Conference*: 1-6.
- Özdemir MT, 2020. The effects of the FOPI controller and time delay on stability region of the fuel cell microgrid. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(60): 35064-35072.
- Panwar NL, Kaushik SC, Kothari S, 2011. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 15(3): 1513-1524.
- Shayeghi H, Rahnema A, Alhelou HH, 2021. Frequency control of fully-renewable interconnected microgrid using fuzzy cascade controller with demand response program considering. *Energy Reports*, 7: 6077-6094.
- Singh VP, Samuel P, Kishor N, 2017. Impact of demand response for frequency regulation in two-area thermal power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(2): 2246.
- Sondhi S, Hote YV, 2014. Fractional-order PID controller for load frequency control. *Energy Conversion and Management*, 85: 343-353.
- Sönmez Ş, Ayasun S, 2016. Stability region in the parameter space of PI controller for a single-area load frequency control system with time delay. *IEEE Transactions on Power Systems* 31(1): 829–830.
- Sönmez Ş, Ayasun S, 2018. Computation of PI controllers ensuring desired gain and phase margins for two-area load frequency control system with communication time delays. *Electric Power Components and Systems*, 46(8): 938-947.
- Sönmez Ş, Ayasun S, 2019. Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(2): 945-959.
- Tan N, Kaya I, Yeroglu C, Atherton DP, 2006. Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus. *Energy Conversion and Management*, 47: 3045-3058.
- Wang Q, Zhang C, Ding Y, Xydis G, Wang J, Qstergaard J, 2015. Review of real-time electricity markets for integrating distributed energy resources and demand response. *Applied Energy*, 138: 695-706.
- Yildirim B, Gheisarnejad M, Khooban MH, 2021. A new parameter tuning technique for noninteger controllers in low-inertia modern power grids. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 3(2): 279-288.
- Yildirim B, Gheisarnejad M, Khooban MH, 2021. A robust non-integer controller design for load frequency control in modern marine power grids. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*.
- Zheng S, Tang X, Song B, 2015. Graphical tuning method for non-linear fractional-order PID-type controllers free of analytical model. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 38(12): 1442-1459.
- Zhu Q, Jiang L, Yao W, Zhang CK, Luo C, 2017. Robust load frequency control with dynamic demand response for deregulated power systems considering communication delays. *Electric Power Components and Systems*, 45(1): 75-87.