



Computation of stability regions for time-delayed two-area load frequency control system including dynamic demand response

Deniz Katipoğlu¹, Şahin Sönmez^{2*}, Saffet Ayasun³

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Aksaray University, Aksaray, 68100, Türkiye

²Department of Electronics and Automation, Yesilyurt Vocational School, Malatya Turgut Ozal University, Malatya, 44210, Türkiye

³Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, Ankara, 06570, Türkiye

Highlights:

- The implementation of stability boundary locus method to time-delayed two area load frequency control system including dynamic demand response
- The investigation of effect of DDR participation factor on the stability regions for two area LFC-DDR system
- The investigation of effect of communication time delay on the stability regions for two area LFC-DDR system

Keywords:

- Dynamic demand response
- Load frequency control
- Stability boundary locus method
- Communication Time delay

Article Info:

Research Article

Received: 12.06.2021

Accepted: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.951415

Acknowledgement:

This work was supported by the Scientific and Technological Research Council of Turkey, TÜBİTAK [Grant 2 number 118E744].

Correspondence:

Author: Şahin Sönmez

e-mail:

sahin.sonmez@ozal.edu.tr

phone: +90 537 844 3305

Graphical/Tabular Abstract

This study computes the stability regions of a time-delayed two area load frequency control system including dynamic demand response (LFC-DDR) using stability boundary locus (SBL) method. Participating the controllable responsive loads into the frequency regulation service, DDR has become an important solution for proper balancing between generation and peak load and intermittent nature of renewable power generations. Although the utilization of DDR control technique increases the reliability and security of the LFC systems, time delays because of the communication networks adversely affect the controller performance and LFC system stability. Therefore, this study obtains the all stabilizing proportional-integral (PI) controller gains that guarantee the stability of the LFC-DDR system.

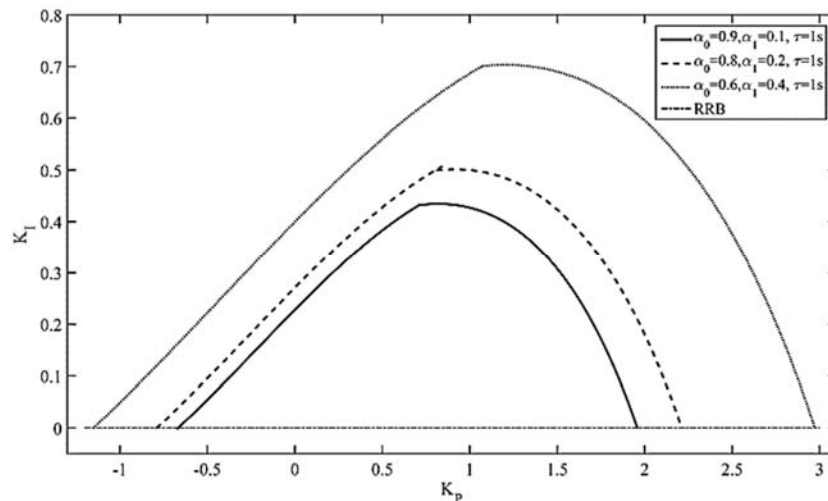


Figure A. The effect of participation factor of DDR control on the stability regions

Purpose: The purpose of this paper is to investigate the effect of participation factor of DDR control on stability regions of a time-delayed two-area LFC system enhanced by the DDR control (Figure A).

Theory and Methods: This study obtains the all stabilizing PI controller gains that guarantee the stability of the LFC-DDR system. For the purpose, SBL method based on a graphical method is used to extract the stability regions that constitute of complex root boundary (CRB) and real root boundary (RRB) loci of the time-delayed LFC-DDR system in controller parameters space.

Results: Stability regions are firstly computed for different participation factors of DDR control and secondary frequency control and communication time delays. The accuracy of theoretical stability regions is then shown by quasi-polynomial mapping root (QPmR) finder algorithm and time-domain simulations. Results indicate that the participation of DDR control loop increases the stability regions and stability margins of the LFC system.

Conclusion: Required frequency control effort is participated by DDR control and traditional frequency regulation services i.e., spinning/non-spinning reserve. The inclusion of the DDR control loop increases the flexibility and stability of the LFC system with time delay. Theoretical results shows that a small percentage rise in the participation of the DDR loop on the frequency regulation service of the LFC system considerably increases the stability regions ensuring set of stabilizing PI controller parameters.



Dinamik talep cevabı içeren zaman gecikmeli iki bölgeli yük frekans kontrol sistemlerinin kararlılık bölgelerinin hesaplanması

Deniz Katipoğlu¹, Şahin Sönmez^{2*}, Saffet Ayasun³

¹Aksaray Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 68100, Aksaray, Türkiye

²Malatya Turgut Özal Üniversitesi, Yeşilyurt Meslek Yüksekokulu, Elektronik ve Otomasyon Bölümü, 44210, Battalgazi, Malatya, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Kararlılık sınır eğrisi yönteminin dinamik talep cevabı içeren iki bölgeli yük frekans kontrol sistemine uygulanması
- İki bölgeli YFK sisteminin kararlılık bölgeleri üzerinde dinamik talep cevabı katılımının etkisinin incelenmesi
- İki bölgeli YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgeleri üzerinde zaman gecikmesinin etkisinin incelenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 12.06.2021

Kabul: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.951415

Anahtar Kelimeler:

Dinamik talep cevabı,
yük frekans kontrol sistemi,
kararlılık sınır eğrisi
yöntemi,
zaman gecikmesi

ÖZ

Bu çalışmada, dinamik talep cevabı (DTC) ve haberleşme zaman gecikmesi içeren iki bölgeli yük frekans kontrol (YFK-DTC) sisteminin kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak denetleyici parametre düzleminde kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır. DTC kontrol, kontrol edilebilir yük gruplarını frekans kontrol servisine dahil ederek, üretim ve puant yük talebi arasında dengenin daha kısa sürede sağlanması ve yenilenebilir enerji kaynaklarında güç dengesizlikleri problemlerine karşı önemli bir çözüm sunmaktadır. DTC kontrol mekanizmasının yük frekans kontrol sistemlerinde kullanımı, sistemin güvenliği ve güvenilirliğini sağlamasına rağmen, haberleşme ağlarından kaynaklanan zaman gecikmeleri, denetleyici performansını ve sistemin kararlılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, bu çalışma zaman gecikmesi içeren iki bölgeli YFK-DTC sisteminin kararlılığını garanti edecek tüm oransal-integral (PI) denetleyici kazanç değerlerini elde etmektedir. Bu amaçla, zaman gecikmeli YFK-DTC sisteminin denetleyici parametre düzleminde kararlılık bölgelerini oluşturan kompleks kök sınır (Complex Root Boundary, CRB) eğrisini ve reel kök sınır (Real Root Boundary, RRB) eğrisini bulmak için kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen teorik sonuçların doğruluğu, quazi-polynomial mapping root (QPmR) algoritması ve zaman düzleminde yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Sonuçlar, DTC kontrol çevriminin katkısı ile zaman gecikmeli YFK sisteminin kararlılık bölgelerinin ve kararlılık payının arttığını göstermektedir.

Computation of stability regions for time-delayed two-area load frequency control system including dynamic demand response

H I G H L I G H T S

- The implementation of stability boundary locus method to time-delayed two area load frequency control system including dynamic demand response
- The investigation of effect of DDR participation factor on the stability regions for two-area LFC-DDR system
- The investigation of effect of communication time delay on the stability regions for two-area LFC-DDR system

Article Info

Research Article

Received: 12.06.2021

Accepted: 12.03.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.951415

Keywords:

Dynamic demand response,
load frequency control,
stability boundary locus
method,
communication time delay

ABSTRACT

This study focuses on the computation of stability regions of the time-delayed two-area load frequency control including dynamic demand response (LFC-DDR) using stability boundary locus method. With the participation of controllable responsive loads into the frequency regulation service, dynamic demand response (DDR) has become an important solution for proper balancing between generation and peak load and to overcome the intermittent nature of renewable power generations. Although the utilization of DDR control technique increases the reliability and security of the load frequency control (LFC) systems, communication time delays because of the communication networks adversely affect the controller performance and LFC system stability. Therefore, this study obtains the all stabilizing proportional-integral (PI) controller gains that guarantee the stability of the LFC-DDR system. For that purpose, stability boundary locus method is used to obtain stability regions in the controller parameters space that constitute of complex root boundary (CRB) and real root boundary (RRB) loci of the time-delayed LFC-DDR systems. The accuracy of theoretical results is verified by an independent algorithm, quasi-polynomial mapping root (QPmR) finder algorithm, and time-domain simulations. Results indicate that the participation of DDR control loop increases the stability regions and stability margin of the LFC system even in the presence of communication time delays.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : denizkatipoglu@aksaray.edu.tr, *sahin.sonmez@ozal.edu.tr, saffetayasun@gazi.edu.tr / Tel: +90 537 844 3305

1. Giriş (Introduction)

Yük frekans kontrol (YFK) sisteminin temel görevi, üretilen güç ve talep edilen yük arasında herhangi bir dengesizlik olduğunda sistem frekansını nominal değerinde tutmak ve YFK sisteminin kontrol bölgeleri arasında programlanmış güç paylaşımını sürdürmektedir. Klasik YFK sistemlerinde, frekans regülasyonu için ihtiyaç duyulan gücün ayarlanması hidroelektrik güç santralleri ve termik güçlü santraller tarafından gerçekleştirilmektedir [1]. Ancak, iklim değişikliği, enerji güvenliği ve çevre kirliliğinin küresel zorlukları gibi nedenlerden dolayı, rüzgar güçlü santraller ve güneş enerji santralleri içeren yenilenebilir enerji (YE) sistemlerinin elektrik güç şebekesinde payı sürekli artmaktadır [2]. Elektrik güç sistemlerinde YE kaynaklarının bu artışından dolayı, klasik YFK sistemleri için frekans düzenleme servisi oldukça zor bir görev haline gelmektedir. Ayrıca, YE santrallerinde meydana gelen güç dengesizliği problemleri, frekansı nominal değerinde tutmak için klasik YFK sistemlerini oldukça kısıtlamaktadır. YE santrallerinin güç üretim aşamasında güç dengesizliklerine ek olarak, yüksek kurulum maliyetleri ve güç üretim verimliliğinin düşük olması elektrik güç şebekesinin kararlılığını olumsuz olarak etkileyebilmektedir. YFK sistemlerinde bu problemleri çözmek için, elektrikli araçlar (EA) tarafından sağlanan depolama cihazları [3-5] ve dinamik talep cevabı (DTC) kontrolü için kontrol edilebilir yüklerin [6-8] elektrik güç şebekesine dahil edilmesi hem frekans kontrolünü kolaylaştırmakta hem de güç şebekesinin kararlılığını iyileştirmektedir.

Son zamanlarda, DTC kontrol tekniği içerisinde değerlendirilen kontrol edilebilir yüklerin gerçek zamanlı akıllı güç şebekesine dahil edilmesi üretilen güç ve puant yük talebi arasında dengenin daha kısa sürede sağlanması bakımından önemli olduğu görülmüştür. DTC programı hem dağıtım şebekesi hem de iletim şebekesi için kullanılarak belirli bir süre için puant yük talebinin yüksek olduğu zamanlarda yük tüketiminin saatleri puant yük talebinin daha düşük olduğu zamanlara yayılarak daha kararlı bir yük eğrisi elde etmeyi amaçlar. Bu program kapsamında dikkate alınan, ısıtma, havalandırma, klima, elektrikli su ısıtıcıları, buzdolapları ve dondurucular gibi termostatik yük grupları ve hızlı yanıt verme kapasitesine sahip olan EA, DTC kontrol tarafında kontrol edilebilir yüklerin önemli bazı örnekleridir. DTC tekniği ilk olarak klasik güç üretim birimlerinden daha güvenilir ve hızlı bir teknik arayışı sonucu, [9] tarafından 1980 yılında ortaya çıkmıştır. Şebeke yapısının dayanıklılığı ve ekonomik yapısı dikkate alındığında DTC programı elektrik abonelerinin teşvik tabanlı veya dağıtım şebekesinin uyguladığı elektrik kullanım süresine göre fiyat tabanlı olarak iki şekilde kategorize edilebilir. Bu amaçla, DTC programları kullanıcıları ve şirketleri finansal olarak teşvik etmek [10], yenilenebilir enerji kaynaklarındaki güç dalgalanmalarının etkisini azaltmak [11, 12], gerilim ve frekans dalgalanmalarının önüne geçmek [13, 14] ve yan hizmet sağlamak [15, 16] gibi pek çok avantajının yanı sıra iletim sistemlerinin planlanması [17] ve dağıtım transformatörlerinin kullanımında esneklik [18] sağlamaktadır. Bu sayede, üretim ve yük talebi arasındaki dengenin daha kolay ve sürekli sağlanacağı amaçlanmaktadır.

DTC kontrol, elektrik güç sistemlerine esneklik sağlama, ekonomik faydaları ve hızlı yanıt verme karakteristiği nedeniyle, klasik frekans düzenleme servislerinde frekans değişimlerini sönmölemek için avantajlar sağlamaktadır. Dolayısıyla, DTC kontrolün klasik YFK ve otomatik üretim kontrolü (AGC) için frekans düzenleme servisi üzerinde etkisini incelemek amacıyla literatürde pek çok çalışma mevcuttur. İlk kez [19]'da, haberleşme zaman gecikmesine sahip olan DTC kontrol çevrimi AGC sistemlere dahil edilmiştir. Bu çalışmada

sunulan sonuçlar, DTC kontrol çevrimi ile geliştirilen YFK sisteminin klasik YFK sistemlerinin performansına kıyasla daha iyi bir dinamik performans sergilediğini açıkça ortaya koymuştur. [20]'de, haberleşme zaman gecikmesi içeren DTC kontrol çevrimi iki bölgeyi termik santraller içeren YFK sisteminin her bir kontrol bölgesine uygulanmış ve frekans düzenleme servisi üzerinde YFK ve DTC kontrol işleminin birlikte olan katkısı frekans değişimini minimum tutmayı sağlamıştır. [15]'de, farklı kontrol bölgelerinin frekansını hızlıca kararlı kılmak için, DTC kontrol çevriminin ek bir giriş sinyali olarak bağlantı hattına yerleştirilmiş ve genetik algoritma yardımıyla optimal denetleyici kazançları belirlenmiştir. [21]'de yapılan çalışma, frekans kararlılığını iyileştirmek için bir bölgeyi YFK sistemine hem DTC kontrol hem de eylemsizlik kontrol çevrimleri eklemiş ve bu kontrol çevrimlerinde yaşanan zaman gecikmelerinin, paylaşım faktörlerinin ve sistem parametrelerinin frekansın dinamik performans üzerindeki etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir. [11]'de yük bozucu etkilerin meydana geldiği kontrol bölgelerini belirlemek için akıllı bir DTC kontrol mekanizması önerilmiş ve bu kontrol bölgelerine DTC kontrol uygulanmıştır. Ayrıca, zaman gecikmesinden dolayı frekansta meydana gelen alt ve üst aşımalarını azaltmak için DTC kontrol ve sekonder kontrol arasında bir koordinatör olarak fuzzy tabanlı oransal-integral (PI) denetleyici önerilmiştir. [13]'de sunulan çalışma termostatik yük gruplarının günlük talep profillerini dikkate alarak primer ve sekonder frekans kontrolü için termostatik yük kontrol stratejisi geliştirmiştir. [22]'de yapılan başka bir çalışma, haberleşme gecikmelerinin etkilerini azaltmak ve yükleri kontrol etmek için merkezi ve dağıtık kontrol yöntemlerinin bir kombinasyonu olan melez bir kontrol yaklaşımı önermiştir. Bir bölgeyi YFK-DTC sisteminin parametrik belirsizlikleri ve yük bozucu etkilerini dikkate alan [23], sistem frekansının gürbüzülüğünü arttırmak için aktif bozucu etki kontrol sistemi ve frekans kararlılığı üzerinde haberleşme zaman gecikmesinin etkilerini azaltmak için adaptif gecikme denetleyicisi tasarlamıştır. [24]'de verilen çalışmada yazarlar, [21]'de sunulan çalışmalarını genişleterek DTC kontrol ve eylemsizlik kontrol ile ilişkili parametreleri dikkate alarak sistem frekansının kararlılık analizi ve duyarlılığı için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. [16]'da yapılan bir analizde, rüzgar türbinlerinin entegre edildiği bir bölgeyi termik güç sistemi için akıllı DTC kontrol çevrimi önerilmiş ve haberleşme zaman gecikmesinin frekans kararlılığı üzerindeki etkisini azaltmak için doğrusal kvadratik regülatör kontrolör aracılığı ile DTC kontrol ve sekonder kontrol arasında bir koordinasyon sağlamıştır.

Mevcut literatür, YFK sistemlerinde gözlemlenen zaman gecikmeleri sistemin dinamik performansı üzerinde olumsuz etkilerini tartışmakta ve kararlılık gecikme payı olarak tanımlanan zaman gecikmesi üst sınırının aşılması halinde kontrol sisteminin sönmöleme etkisini azaltarak sistem kararsızlıklarına yol açtığını rapor etmektedir [25, 26]. Özellikle, güç sistemlerinde merkezi denetleyici birimi ile güç üretim birimleri arasında veri alış-verişi amacıyla kullanılan açık ve dağıtık haberleşme ağlarından dolayı YFK sistemlerinde önemli zaman gecikmelerinin yaşandığı görülmektedir. Klasik YFK sistemlerinde, zaman gecikmesinin üst sınırının hesaplanması için çeşitli yöntemler uygulanarak klasik bir ve iki bölgeyi YFK sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizleri başarılı olarak yapılmıştır [25-28]. Son yıllarda, YE kaynakları, EA batarya sistemleri ve DTC kontrol programlarının güç sistemlerine yoğun bir şekilde dahil edilmesi sebebiyle, haberleşme zaman gecikmeleri daha fazla önemsenmesi gereken bir problem haline dönüşmüştür [19, 27-30]. EA batarya sistemlerinin YFK sistemlerine dahil edildiği çalışmalarda zaman düzleminde kullanılan Lyapunov tabanlı algoritmalar [29,30] ve frekans düzleminde kullanılan farklı yöntemler [31, 32] yardımıyla YFK sistemlerde EA gruplarının zaman gecikmesi değerleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Klasik YFK

sistemlerinin gecikmeye bağlı kararlılık analizi üzerine çeşitli çalışmalar olmasına rağmen, frekans düzenleme servisi üzerinde hem DTC kontrolün hem de zaman gecikmesinin etkisine odaklanan çalışmalar oldukça sınırlıdır. [19-21, 24]'de rapor edilen çalışmalar, frekans düzenleme servisi için DTC kontrol çevriminde gözlemlenen zaman gecikmeleri üzerine odaklanmıştır. Ancak, DTC kontrol çevrimi eklenmiş bir YFK sisteminde özellikle sekonder kontrol çevriminde yer alan zaman gecikmeleri ihmal edilmemelidir. Aynı zamanda, sekonder kontrol çevriminde gözlemlenen zaman gecikmelerinin DTC kontrol çevriminde gözlemlenen zaman gecikme değerlerine göre frekans kararlılığını daha fazla etkilediği rapor edilmiştir [25, 26]. DTC kontrol çevriminde gözlemlenen bu gecikmeler için yaklaşıklık içeren ifadeler kullanılmıştır. Bu tarz yaklaşık ifadelerin kullanılması, zaman gecikmelerinin frekans kararlılığı üzerinde gerçek karakteristiğini ve etkisini yansıtmamakla birlikte Pade yaklaşımı kullanılarak elde edilen bu ifadeler sistemin derecesini de arttırmaktadır. [19]'da DTC kontrol çevriminde bulunan zaman gecikmesi terimi için beşinci dereceden bir Pade yaklaşımı ile sistem derecesi artırılmıştır. Zaman gecikme değerlerinin bilinmesi ile ilgili olarak [21], kararlı gecikme paylarını deneme-yanılma yöntemi ile elde etmiştir. [22] ve [23]'de DTC kontrol çevrimlerinde zaman gecikmelerin frekans kararlılığı üzerinde etkisini azaltmak için çeşitli denetleyici tasarımları önerilmiştir. Son olarak, [33]'de önerilen başka bir çalışma DTC kontrol çevrimi ve EA grupları içeren iki bölgeli YFK sistemlerinde belirli bir denetleyici seti için benzetim ortamında zaman gecikmesi üst sınırının hesaplanmasını sağlamıştır.

YFK sistemlerde zaman gecikmesi dikkate alınarak kararlılık analizlerini, kararlılık gecikme pay değerlerinin hesaplanması ve denetleyici parametre tasarımı olarak çoğunlukla iki grup altında ifade edilebilir. Klasik YFK [25-28], EA içeren YFK [29-32], mikro-şebeke YFK sistemleri [34] ve DTC kontrol çevrimi içeren YFK sistemleri [35, 36] için, frekans düzleminde ve zaman düzleminde yöntemler kullanılarak kararlılık gecikme payları hesaplanmış ve gecikmeye bağlı kararlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. [35] ve [36]'da yapılan çalışmalar, bir ve iki bölgeli YFK-DTC sistemleri için frekans düzleminde kullanılan Rekasius yerine koyma yöntemi ve üstel terimlerin yok edilmesi yöntemi yardımıyla bir PI denetleyici kazanç seti için sistemin kararlılık gecikme payları hesaplanmıştır. Bu çalışmalarda, denetleyici parametrelerinin tasarımı yapılmadan herhangi bir PI denetleyici kazanç seti için YFK sistemlerinin kararlılık gecikme payları hesaplanmıştır. Bu durum, sistemin kararlılığını kaybetmeden tolere edebileceği maksimum gecikme değerleri hakkında bize bilgi vermektedir. Ancak, zaman gecikmesinin denetleyici performansı üzerinde olumsuz etkileri dikkate alındığında sistemin kararlılığını garanti eden PI denetleyici kazanç değerlerinin belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu amaçla, YFK sistemlerinin kararlılığını sağlayan tüm PI denetleyici parametre değerlerini hesaplamak için grafiksel bir yöntemle dayalı olan kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılmaktadır [37, 38]. Kararlılık sınır eğrisi yönteminin amacı, sistemin kararlılık çerçevesinin tam olarak belirlenebilmesi için önceden tanımlanan herhangi bir zaman gecikmesi değerinde sistemin kararlılığını garanti eden tüm denetleyici parametre değerlerini belirleyebilmektir. Önerilen yöntem, sistemin karakteristik denklemini reel ve sanal bileşenlerinin sifra eşitlenmesi yoluyla denetleyici parametre değerlerini hesaplamaktadır. Bu işlem neticesinde, denetleyici parametrelerinin bir kararlılık bölgesi olarak belirlenmesini sağlayan kompleks kök sınır (Complex Root Boundary, CRB) eğrisi ve reel kök sınır (Real Root Boundary, RRB) eğrisi elde edilmektedir. Kararlılık sınır eğrisi yöntemi, düşük dereceli kontrol sistemlerinin oransal-integral-türevsel (PID) denetleyici içermesi durumunda, integral veya türevsel denetleyicilerinden herhangi biri sabitlenerek iki boyutlu denetleyici parametre düzleminde PI ve PD denetleyicilerin tasarımı amacıyla etkin bir şekilde kullanılmıştır [37, 38]. Bu yöntemin, YFK sistemi

çalışmalarında PI tipi denetleyicilere uygulandığı ve kararlılık bölgelerinin hesaplandığı görülmektedir [32, 39, 41-43]. [39, 40]'da önerilen çalışmalarda, DTC kontrol çevrimi içermeyen klasik iki bölgeli YFK sistemlerinde, kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak kararlılık bölgeleri elde edilmiş ve bölgeler üzerinde zaman gecikmesinin etkisi vurgulanmıştır. [41, 42]'de büyük güçlü rüzgar türbin sistemleri için PI tipi bir denetleyici ile kapalı çevrim bir model oluşturularak denetleyici parametre düzleminde kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır. Ayrıca, kararlılık sınır eğrisi yöntemi EA grupları içeren bir bölgeli YFK sistemlerinin [32] ve mikro-şebeke sistemlerin [43] kararlılığını sağlayan PI denetleyici parametre setinin elde edilmesi amacıyla başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Yapılan bu çalışmalar, kararlılık sınır eğrisi üzerinden veya içerisinden seçilen herhangi bir denetleyici parametre değeri için YFK sisteminin sınırdaki kararlılık ve Hurwitz kararlılık şartlarının sağlandığını göstermiştir. Bu çalışmanın temel amacı, kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak iki bölgeli YFK-DTC sisteminin denetleyici parametre düzleminde kararlılık bölgelerini incelemektir. Bu amaçla, AGC sistemlere entegre edilen DTC kontrol sistemi dikkate alınarak çalışmanın önemli katkıları aşağıda vurgulanmıştır.

- İki bölgeli YFK-DTC sisteminin sadece sekonder kontrol çevrimi tarafında zaman gecikmelerinin etkisi dikkate alınarak önceden belirlenen herhangi bir zaman gecikme değeri için kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır.
- İki bölgeli YFK-DTC sisteminde frekans düzenleme servisine DTC ve sekonder kontrol çevrimlerinin belirli oranlarda katkı sunması göz önünde bulundurularak, DTC kontrol çevriminin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. DTC kontrol şemasının AGC sistemlerde etkinliği arttıkça sistemin kararlılık payının arttığı görülmüştür.
- İki bölgeli YFK-DTC sisteminin merkezi denetleyici tarafında gözlemlenen haberleşme zaman gecikmelerinin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu durum, zaman gecikmesinin kararlılık bölgeleri ve sistemin kararlılık payı üzerinde olumsuz etkilerinin olduğunu göstermektedir.
- Son olarak, elde edilen kararlılık bölgelerinin doğruluğu, zaman gecikmeli sistemlerin baskın köklerinin belirlenmesi amacıyla kullanılan QPmR (quasi-polynomial mapping root) algoritması [44] ve Matlab/Simulink [45] ortamında yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

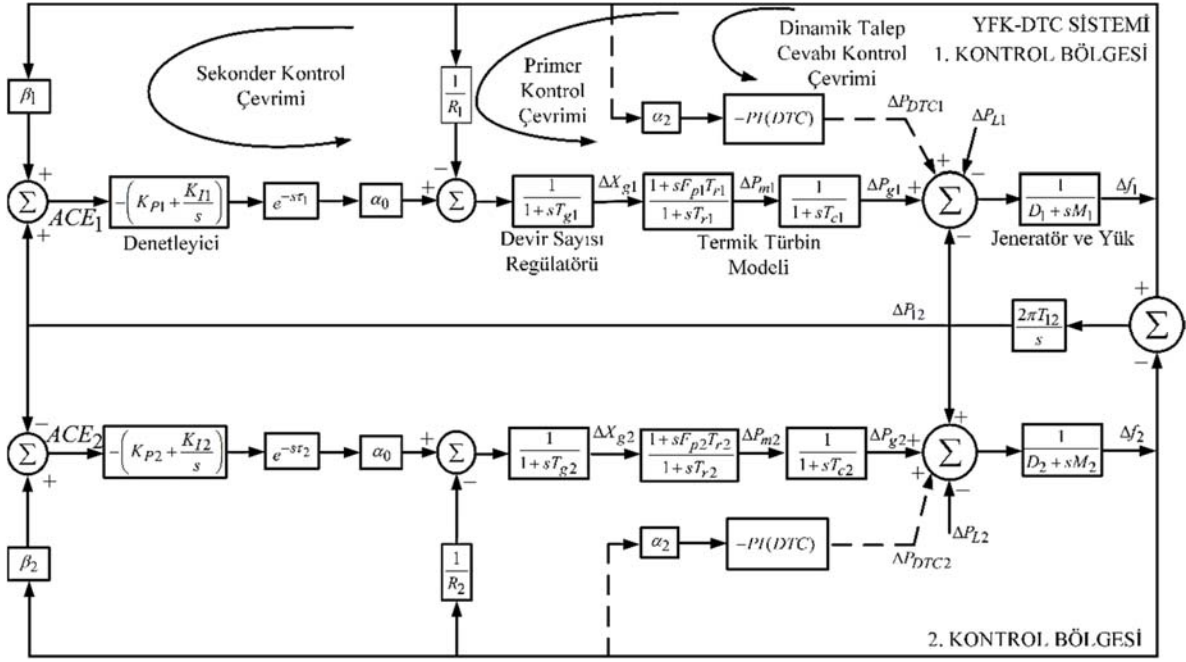
2. Dtc Kontrol Çevrimi İçeren Zaman Gecikmeli Yfk Sisteminin Modeli (Time-Delayed Lfc System Model Including Ddr Control Loop)

Şekil 1'de DTC kontrol çevrimi ve zaman gecikmesi içeren iki bölgeli YFK sisteminin dinamik modeli gösterilmiştir. Şekil 1'de dikkat edilecek olursa, kesikli çizgilerle vurgulanan DTC kontrol çevrimi klasik YFK sisteminin her iki bölgesine eklenmiştir. Burada, Δf_i ,

ΔP_{mi} , ΔP_{gi} , $\Delta P_{DTC,i}$, ΔP_{Li} , ΔX_{gi} , ($i = 1, 2$) sırası ile her bir bölgenin frekansında, jeneratör mekanik giriş gücünde, jeneratör çıkış gücü, talep taraflı yönetim gücü, şebeke yükü ve valf konumundaki değişimleri göstermektedir. Sistem parametreleri M_i , D_i , T_{gi} ,

T_{ci} , T_{ri} , F_{pi} , β_i , R_i , T_{12} , ACE_i ($i = 1, 2$) ise sırası ile her bir bölgenin jeneratör eylemsizlik katsayısı, jeneratör sönüm katsayısı, devir sayısı regülatörü zaman sabiti, ara ısıtmalı türbin zaman sabitleri, toplam türbin gücünün oranı, frekans yönelim faktörü, hız regülasyon katsayısını, bölgeler arasındaki senkronizasyon güç katsayısını ve alan kontrol hata sinyalinin ifade etmektedir.

Frekans düzenleme servisinde frekans sinyalinin değişimine göre DTC kontrol, kontrol edilebilir yükleri elektrik şebekesinde



Şekil 1. İki bölgeyi YFK-DTC sistem modeli (Two-area LFC-DDR system model)

anahtarlayarak senkron jeneratör tabanlı klasik üretim birimlerinin yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu esnek yük gruplarına, termostat kontrollü rezistif yük grupları, kompresör tabanlı ısıtma, havalandırma, klima, dondurucular, değişken hızda ısı sağlayan pompalar ve batarya sistemlerinin frekans regülasyonu için kullanılan elektrikli araçlar örnek gösterilebilir [7]. DTC kontrol tarafını yöneten ve kontrol eden yük toplayıcı firmalar (Load aggregator companies, Lagcos) tarafından DTC programları kapsamında bu yük grupları, frekans düzenleme servisinde gerçek zamanlı katılımı sağlar [19]. Klasik YFK sistemlerinde herhangi bir bozucu etki sonrası sistem frekansının sürekli durum hatasının sıfır olması ve nominal değerine ulaşması için sekonder frekans kontrolü kullanılmaktadır. Dolayısıyla, YFK sistemlerine DTC kontrolün dahil edilmesi nedeniyle, ihtiyaç duyulan frekans kontrolü sekonder kontrol çevrimi ve DTC kontrol arasında paylaşılmaktadır.

Şekil 1'den görüldüğü üzere, hem sekonder kontrol çevrimi hem de DTC kontrol çevrimi tarafında bir PI denetleyici kullanılmıştır. Sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan denetleyici parametreleri (K_P , K_I) olarak sembolize edilirken, DTC kontrol çevrimi tarafında denetleyici kazançları (K_{PD} , K_{ID}) olarak sembolize edilmiştir. Her iki kontrol çevrimi için kullanılan denetleyici kazanç değerlerinin birbirinden farklı olduğu varsayılmıştır. Bu çalışmada, DTC kontrol çevrimi tarafında yer alan denetleyici parametrelerin sabit olduğu ve dağıtım firması tarafından belirlenen denetleyici kazançları ile çalıştığı varsayılarak sadece sekonder kontrol çevrimi tarafında yer alan denetleyici kazanç değerlerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Sistemde DTC kontrol çevriminin YFK sistemine eklenmesi ile ihtiyaç duyulan frekans kontrol çabası Ω ile gösterilmek üzere DTC tarafından kontrol edilen yük gruplarının ve klasik üretim biriminin Eş. 1'de verilen paylaşım faktörleri dahilinde frekans düzenleme servisine katkı sunmaktadır [19].

$$\begin{aligned} \Delta P_g(s) &= \alpha_0 \Omega \\ \Delta P_{DTC}(s) &= \alpha_1 \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

Burada, frekans düzenleme servisi için sekonder kontrol çevriminin paylaşım faktörü α_0 ve DTC kontrol çevriminin paylaşım faktörü α_1 olmak üzere, toplamı bir'e eşittir ($\alpha_0 + \alpha_1 = 1$). $\alpha_0 = 1$ olması, tüm frekans kontrol eyleminin sekonder kontrol tarafında klasik üretim birimlerinin katılımı ile gerçekleştiğini göstermektedir. Klasik üretim birimlerinin ve kontrol edilebilir yüklerin rezerv miktarı dikkate alınarak, her iki kontrol çevriminin frekans kontrolüne katkısı, bağımsız sistem operatörleri (Independent system operators, ISOs) ve bölgesel iletim sistem operatörleri (Regional transmission organizations, RTOs) tarafından gerçek zamanlı olarak belirlenir. DTC kontrolün esnek yüklerle uygulanabilmesi için Lagcos ve kullanıcı arasında genellikle kablosuz ağ sistemleri kullanılmaktadır. ISOs/RTOs için bu kontrol çevriminde ihtiyaç duyulan haberleşme zaman gecikmesi genellikle milisaniyeler mertebesinde [7, 11, 19]. Özellikle, büyük güçlü ve yavaş dinamiklere sahip güç sistemlerinde sistemin dinamik kararlılığını ve denetleyici performansını olumsuz etkileyen zaman gecikmeleri sekonder kontrol çevrimi tarafında yaşanmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışmada DTC kontrol çevrimi zaman gecikmeleri ihmal edilmiş ve sekonder kontrol çevriminde gözlemlenen haberleşme zaman gecikmelerine odaklanılmıştır. Şekil 1'de sekonder kontrol çevriminde ölçüm ve veri transferinden kaynaklanan toplam haberleşme zaman gecikmesi τ olmak üzere YFK-DTC sisteminin her bir kontrol bölgesinde $e^{-s\tau} = e^{-s\tau_1} = e^{-s\tau_2}$ üstel terimleri ile ifade edilmiştir.

İki bölgeyi YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgelerinin hesaplanabilmesi için sistemin karakteristik denkleminin elde edilmesi gereklidir. Bu amaç için, zaman gecikmesi içeren iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin durum uzay modeli Eş. 2'de verildiği gibi elde edilmelidir.

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_o x(t) + A_d x(t - \tau) + F \Delta P_L \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned} \quad (2)$$

Burada, A_o , A_d , F ve C matrislerinin katsayıları aşağıda verilen Eş. 3, Eş. 4 ve Eş. 5'de sunulmuştur.

$$[A_d]_{13 \times 13} = \begin{bmatrix} [A_{d11}]_{6 \times 6} & [A_{d12}]_{6 \times 7} \\ [A_{d21}]_{7 \times 6} & [A_{d22}]_{7 \times 7} \end{bmatrix},$$

$$A_{dii} = \begin{bmatrix} 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 1} \\ 0_{1 \times 5} & \frac{F_{Pi} \alpha_{0i}}{T_{gi}} \\ 0_{1 \times 5} & \frac{\alpha_{0i}}{T_{gi}} \\ 0_{2 \times 5} & 0_{2 \times 1} \end{bmatrix}, i = 1, 2 \quad (3)$$

$$[A_o]_{13 \times 13} = \begin{bmatrix} [A_{o11}]_{6 \times 6} & [A_{o12}]_{6 \times 6} & [A_{o13}]_{6 \times 1} \\ [A_{o21}]_{6 \times 6} & [A_{o22}]_{6 \times 6} & [A_{o23}]_{6 \times 1} \\ [A_{o31}]_{1 \times 6} & [A_{o32}]_{1 \times 6} & [A_{o33}]_{1 \times 1} \end{bmatrix},$$

$$A_{oii} = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{M_i} & \frac{1}{M_i} & 0 & 0 & \frac{1}{M_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{ci}} & \frac{1}{T_{ci}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{F_{Pi}}{T_{gi} R_i} & 0 & -\frac{1}{T_{ri}} & \left(\frac{1}{T_{ri}} - \frac{F_{Pi}}{T_{gi}} \right) & 0 & 0 \\ -\frac{1}{T_{gi} R_i} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{gi}} & 0 & 0 \\ a_{51} & a_{52} & 0 & 0 & a_{55} & 0 \\ a_{61} & a_{62} & 0 & 0 & a_{65} & 0 \end{bmatrix},$$

$$a_{51} = -\frac{\alpha_{1i} K_{ID} M_i + \alpha_{1i} K_{PD} D_i}{M_i}; a_{52} = a_{55} = -\frac{\alpha_{1i} K_{PD}}{M_i}$$

$$a_{61} = \frac{\beta_i K_P D_i}{M_i} - \beta_i K_I; a_{62} = a_{65} = -\frac{\beta_i K_P}{M_i}, i = 1, 2 \quad (4)$$

$$A_{o12} = A_{o21} = \begin{bmatrix} 0_{5 \times 1} & 0_{5 \times 5} \\ 2\pi T_{12} K_P & 0_{1 \times 5} \end{bmatrix},$$

$$A_{o13} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} & 0_{1 \times 4} & -K_I \end{bmatrix}^T, A_{o23} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_2} & 0_{1 \times 4} & K_I \end{bmatrix}^T,$$

$$A_{o31} = -A_{o32} = [2\pi T_{12} \quad 0_{1 \times 5}], A_{o33} = 0,$$

$$F = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix}^T, C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix},$$

$$F_1 = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} & 0 & 0 & 0 & \frac{\alpha_{11} K_{PD}}{M_1} & \frac{\beta_1 K_P}{M_1} & 0_{1 \times 7} \end{bmatrix}^T, \quad (5)$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 6} & -\frac{1}{M_2} & 0 & 0 & 0 & \frac{\alpha_{12} K_{PD}}{M_2} & \frac{\beta_2 K_P}{M_2} & 0 \end{bmatrix}^T,$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0_{1 \times 1} & 1 \\ 0_{1 \times 5} & 1 & 0_{1 \times 7} \end{bmatrix}, C_2 = \begin{bmatrix} 0_{1 \times 6} & 1 & 0_{1 \times 4} & 0 & -1 \\ 0_{1 \times 6} & 0 & 0_{1 \times 4} & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Eş. 2'de, $x(t)$, $y(t)$ ve ΔP_L iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin durumlarını, çıkışlarını ve yük bozucu etkisini ifade etmektedir. Bu ifadeler Eş. 6 ile tanımlanmıştır.

$$x_i(t) = [\Delta f_i \quad \Delta P_{gi} \quad \Delta P_{mi} \quad \Delta X_{gi} \quad \Delta P_{DTCi} \quad \int ACE_i]^T,$$

$$y_i(t) = [ACE_i \quad \int ACE_i]^T, \quad i = 1, 2$$

$$x(t) = [x_1(t) \quad x_2(t) \quad \Delta P_L]^T, \quad (6)$$

$$y(t) = [y_1(t) \quad y_2(t)]^T,$$

$$\Delta P_L = [\Delta P_{L1} \quad \Delta P_{L2}]^T.$$

Eş. 2 yardımıyla, sistemin karakteristik polinomu Eş. 7'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\Delta(s, \tau) = \det [sI - A_o - A_d e^{-\tau s}] = 0 \quad (7)$$

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + Q(s)e^{-\tau s} + R(s)e^{-2\tau s} = 0$$

Burada, $P(s)$, $Q(s)$ ve $R(s)$ sistem parametrelerine bağlı s cinsinden polinomlardır. Polinomlar daha açık bir formda Eş. 8'de yazılmıştır.

$$P(s) = p_{13}s^{13} + p_{12}s^{12} + p_{11}s^{11} + p_{10}s^{10} + p_9s^9 + p_8s^8$$

$$+ p_7s^7 + p_6s^6 + p_5s^5 + p_4s^4 + p_3s^3$$

$$Q(s) = q_{11}s^{11} + q_{10}s^{10} + q_9s^9 + q_8s^8 + q_7s^7 + q_6s^6$$

$$+ q_5s^5 + q_4s^4 + q_3s^3 + q_2s^2 \quad (8)$$

$$R(s) = r_9s^9 + r_8s^8 + r_7s^7 + r_6s^6 + r_5s^5 + r_4s^4$$

$$+ r_3s^3 + r_2s^2.$$

Burada, p , q ve r ile gösterilen katsayılar sistem parametrelerine bağlı reel katsayılardır. Bu katsayılar, sistem parametreleri cinsinden sembolik işlemlerle gerçekleştirildiğinden dolayı oldukça fazla yer kaplamaktadır. Bu yüzden, polinom katsayıları burada açık bir formda verilmemiştir.

YFK sistemlerinin dinamikleri, diferansiyel-cebirselsel denklemler ve/veya lineer olmayan diferansiyel denklem takımları ile genellikle modellenir. YFK sistemi küçük bir bozucu etkiye maruz kaldığında, bir denge noktası etrafında lineer olmayan bu denklemler lineerleştirilerek, YFK sisteminin lineerleştirilmiş durum uzay denklemleri hesaplanabilir. Dolayısıyla böylesi sistemlerin lineerleştirilmiş modelleri, kararlı bir çalışma noktası etrafında sistemin küçük sinyal kararlılığını değerlendirmek için yeterlidir [25, 26]. Bu çalışmada, YFK-DTC sisteminin üretim oranı kısıtlamaları, governor etkisiz bölgesi ve oran sınırlayıcı gibi güç sisteminin lineer olmayan özellikleri dikkate alınmamıştır. Dolayısıyla, sistemin PI denetleyici tasarımında ve kararlılık analizinde böylesi lineer olmayan özellikler ihmal edilmiştir.

3. Kararlılık Bölgelerinin Belirlenmesi (Determination of Stability Areas)

Bu bölüm, kararlılık sınır eğrisi yönteminin, Eş. 7'de verilen iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin karakteristik denkleminin uygulanmasını sunmaktadır. Öncelikle, bu hesaplamalar yapılırken sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan PI denetleyici parametrelerinin tasarımı

için geliştirildiği bilinmelidir. DTC kontrol çevrimi tarafında tanımlanan PI denetleyici kazançlarının birer sabit olarak alındığı ve bu parametrelerin yük toplayıcılar tarafından tanımlanmış değerler olduğu varsayılmıştır. Bu durumda, karakteristik denklemin denetleyici parametrelerinin tasarımını yapmak için Eş. 7, sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan K_P ve K_I denetleyici parametreleri cinsinden Eş. 9'da yeniden düzenlenmiştir.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + Q'(s)(K_P s + K_I) e^{-s\tau} + R'(s)(K_P s + K_I)^2 e^{-2s\tau} = 0 \quad (9)$$

Burada, $P(s)$ polinomu içerisinde PI denetleyici parametreleri bulunmamaktadır. $Q'(s)$ ve $R'(s)$, Eş. 7 de verilen polinomda $Q(s)$ ve $R(s)$ polinomlarından denetleyici parametreleri cinsinden düzenlendikten sonra ortaya çıkan polinomlardır. $Q'(s)$ ve $R'(s)$ polinomlarının katsayılarını Eş. 10'da verildiği gibi denetleyici parametreleri cinsinden yazıldıktan sonra q' ve r' olarak ifade edilmiştir.

$$\Delta(s, \tau) = p_{13}s^{13} + p_{12}s^{12} + p_{11}s^{11} + p_{10}s^{10} + p_9s^9 + p_8s^8 + p_7s^7 + p_6s^6 + p_5s^5 + p_4s^4 + p_3s^3 + \left(q_9s^9 + q_8s^8 + q_7s^7 + q_6s^6 + q_5s^5 + q_4s^4 + q_3s^3 + q_2s^2 \right) (K_P s + K_I) e^{-s\tau} + \left(r_5s^5 + r_4s^4 + r_3s^3 + r_2s^2 \right) (K_P s + K_I)^2 e^{-2s\tau} = 0 \quad (10)$$

Eş. 10'da verilen polinomda denetleyici parametrelerini çözmek için bilinmeyenleri $m = (K_P s + K_I) e^{-s\tau}$ olacak şekilde Eş. 10 yeniden düzenlenerek Eş. 11 ile verilen formda yazılabilir.

$$\Delta(s, \tau) = m^2 R'(s) + m Q'(s) + P(s) = 0 \quad (11)$$

Dikkat edilecek olunursa, Eş. 11'in m olarak tanımlanan bilinmeyeninin Eş. 12 ile verildiği gibi iki adet çözümü hesaplanabilir.

$$m_{1,2} = (K_P s + K_I) e^{-s\tau} = \frac{-Q'(s) \pm \sqrt{Q'(s)^2 - 4P(s)R'(s)}}{2R'(s)} \quad (12)$$

İki bölgeli YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgesinin sınırlarını elde etmek için $\omega_c > 0$ olmak üzere $s = j\omega_c$ yazılırsa ve üstel terimli ifade için euler formu kullanılırsa $e^{-j\omega_c\tau} = \cos(\omega_c\tau) - j \sin(\omega_c\tau)$, Eş. 12, Eş. 13'de verildiği gibi elde edilebilir.

$$(K_P(j\omega_c) + K_I)(\cos(\omega_c\tau) - j \sin(\omega_c\tau)) = \frac{-Q'(j\omega_c) \pm \sqrt{Q'(j\omega_c)^2 - 4P'(j\omega_c)R'(j\omega_c)}}{2R'(j\omega_c)} \quad (13)$$

Eş. 13, (K_P , K_I) denetleyici parametre değerlerini elde etmek için düzenlenerek reel ve sanal bileşenlerine ayrıldığında Eş. 14'de verildiği gibi ifade edilebilir.

$$K_P(\omega_c \sin(\omega_c\tau)) + K_I(\cos(\omega_c\tau)) + \Re \left\{ \frac{-Q'(j\omega_c) \pm \sqrt{Q'(j\omega_c)^2 - 4P'(j\omega_c)R'(j\omega_c)}}{2R'(j\omega_c)} \right\} + j \left[K_P(\omega_c \cos(\omega_c\tau)) + K_I(-\sin(\omega_c\tau)) \right] + \Im m \left\{ \frac{-Q'(j\omega_c) \pm \sqrt{Q'(j\omega_c)^2 - 4P'(j\omega_c)R'(j\omega_c)}}{2R'(j\omega_c)} \right\} = 0 \quad (14)$$

Burada, $\Re\{\bullet\}$ ve $\Im m\{\bullet\}$ notasyonları reel ve sanal kısımları göstermek üzere, Eş. 14'de verilen ifade bilinmeyenleri (K_P , K_I) denetleyici parametre değerleri olan bir denklem haline dönüşmüştür. Dolayısıyla, bu bilinmeyenleri çözmek için Eş. 14'ün reel ve sanal bileşenlerini sıfıra eşitleyerek (K_P , K_I) denetleyici parametre değerlerini çözmek için Eş. 15'de verilen denklem takımını kolaylıkla elde edebiliriz.

$$K_{Pi}A(\omega_c) + K_{Ii}B(\omega_c) + C_i(\omega_c) = 0 \\ K_{Pi}D(\omega_c) + K_{Ii}E(\omega_c) + F_i(\omega_c) = 0 \\ i = 1, 2 \quad (15)$$

Burada katsayılar Eş. 16 ile gösterilmiştir.

$$A(\omega_c) = \omega_c \sin(\omega_c\tau), \quad B(\omega_c) = \cos(\omega_c\tau), \\ D(\omega_c) = \omega_c \cos(\omega_c\tau), \quad E(\omega_c) = -\sin(\omega_c\tau), \\ C_i(\omega_c) = \Re\{\delta\}, \quad F_i(\omega_c) = \Im m\{\delta\} \\ \delta = \frac{-Q'(j\omega_c) \pm \sqrt{Q'(j\omega_c)^2 - 4P'(j\omega_c)R'(j\omega_c)}}{2R'(j\omega_c)} \\ i = 1, 2. \quad (16)$$

Eş.15'de verilen iki denklem yardımıyla, K_P ve K_I çözümü, Eş. 17'de verildiği gibi hesaplanabilir.

$$K_{Pi} = \frac{B(\omega_c)F_i(\omega_c) - E(\omega_c)C_i(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)} \\ K_{Ii} = \frac{D(\omega_c)C_i(\omega_c) - A(\omega_c)F_i(\omega_c)}{A(\omega_c)E(\omega_c) - B(\omega_c)D(\omega_c)} \\ i = 1, 2 \quad (17)$$

Eş.17'den görüldüğü üzere, iki adet K_P ve K_I çözümü elde edilmektedir. Eş. 17'nin çözümünden dolayı, (K_P, K_I) düzleminde iki adet $\ell(K_P, K_I, \omega)$ kararlılık sınır eğrisi (Complex Root Boundary, CRB) elde edilebilir. Ayrıca, Eş. 7'de verilen zaman gecikmeli iki bölgeli YFK-DTC sisteminin reel kökleri $s=0$ 'da sanal eksenine kesebileceğinden dolayı $\omega_c = 0$ için sistemin reel kök sınır eğrisi (Real root boundary, RRB) belirlenmelidir. Elde edilen iki

adet CRB eğrisine ek olarak, Eş. 15'de verilen denklemlerden herhangi birinde $\omega_c = 0$ yerine yazıldığında sadece $B(\omega_c) \neq 0$ veya $E(\omega_c) \neq 0$ polinomlarının sıfırdan farklı olduğu görülmektedir. Bu sonucun anlamı, Eş. 15'de verilen denklemin sıfır olabilmesi için $K_I = 0$ olması gereklidir. Dolayısıyla, $K_I = 0$ doğrusu iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin reel kök sınır eğrisi olmaktadır. Sonuç olarak, kararlılık sınır eğrisi $\ell(K_P, K_I, \omega)$ ve $K_I = 0$ doğrusu denetleyici parametre düzlemini kararlı ve kararsız bölgelere ayırmaktadır. Elde edilen kararlılık bölgesinden seçilen (K_P, K_I) denetleyici test noktaları için iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin kararlılık analizleri incelenebilir.

Kararlılık sınır eğrisi yönteminin zaman gecikmesi içeren iki bölgeyi YFK-DTC sistemine uygulanma adımları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

1. *Adım:* Eş. 18'de verilen sistem parametreleri, DTC ve sekonder kontrol çevriminin güç paylaşım faktörü ve iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin haberleşme zaman gecikmesi değeri girilerek, Eş. 7'de verilen karakteristik denklem hesaplanır.

2. *Adım:* 1. Adım ile hesaplanan karakteristik denkleme kararlılık sınır eğrisi yönteminin uygulanabilmesi için, Eş. 7'de verilen karakteristik denklemin bilinmeyenleri sekonder kontrol çevrimi denetleyici kazançları K_P ve K_I olacak şekilde Eş. 9 – Eş. 12 formuna göre düzenlenir.

3. *Adım:* 2. Adım ile elde edilen denklemde kararlılık bölgesinin sınırlarını elde etmek için $\omega_c > 0$ olmak üzere $s = j\omega_c$ yazılarak ve üstel terimli ifade için euler formu kullanılarak, Eş. 13 formu elde edilir.

4. *Adım:* Eş. 13 formatında elde edilen denklem K_P ve K_I denetleyici parametrelerini elde etmek için Eş. 17 olarak yazılabilir. Eş. 17, $\omega_c \in [0, \bar{\omega}_c]$ ile tanımlanan bir aralıkta ω_c taranarak iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin CRB eğrisi hesaplanabilir. Ayrıca, $\omega_c = 0$ için Eş. 15'den hesaplandığı üzere $K_I = 0$ doğrusu sistemin RRB eğrisinin oluşturmaktadır. $\bar{\omega}_c$ değeri CRB eğrisi ile RRB eğrisinin kesiştiği değer olarak alınabilir. Bu değeri deneme-yanılma yöntemi ile her iki eğrinin kesişimi sonucu belirlenebilir.

4. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Bu bölümde, zaman gecikmesi içeren iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin parametre değerleri ve belirli bir zaman gecikmesi değeri için kararlılık bölgeleri sunulmuştur. Ayrıca, kararlılık bölgeleri üzerinde, DTC kontrol çevriminin katılım faktörünün ve zaman

gecikmesinin etkileri incelenmiştir. Elde edilen teorik sonuçların doğruluğu karakteristik denklemin baskın köklerini inceleme fırsatı sunan ve bağımsız bir algoritma olan QPmR algoritması yardımıyla ve MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Zaman gecikmesi içeren iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin Eş. 15 ve 17'de verilen denklemlerin uygulanabilmesi için, YFK sisteminin her iki kontrol bölgesi için zaman gecikmesi değeri $\tau = 1$ s değerinde ve sekonder kontrol çevrimi ile DTC kontrol çevriminin frekans düzenleme servisine katılım oranları $\alpha_0 = 0.8, \alpha_1 = 0.2$ olarak seçilmiştir. Ayrıca, DTC kontrol çevrimi denetleyici kazançları $K_{PD} = 0.5, K_{ID} = 0.7$ olarak girilmiştir. İki bölgeyi YFK-DTC sisteminin parametreleri aşağıda verilmiştir [29]:

$$\begin{aligned} M_i &= 8.8, D_i = 1, F_{p_i} = 1/6, R_i = 1/11, \beta_i = 21, \\ T_{gi} &= 0.2, T_{ci} = 0.3, T_{ri} = 12, T_{12} = 0.1 \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (18)$$

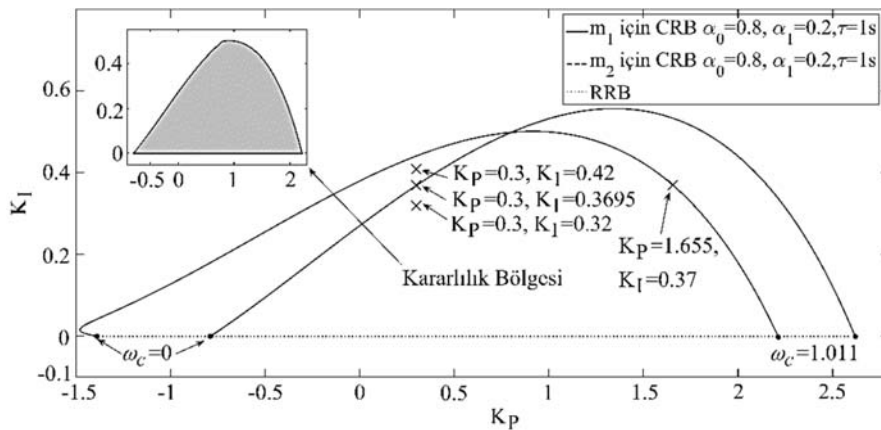
Eş. 18'de verilen sistem parametre değerleri, DTC denetleyici kazanç değerleri, seçilen katılım faktörleri ve $\tau = 1$ s zaman gecikme değeri için iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin Eş. 9 ile gösterilen karakteristik denklemi Eş. 19'da verildiği gibi hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} \Delta(s, \tau) &= P(s) + Q'(s)(K_P s + K_I) e^{-s} \\ &+ R'(s)(K_P s + K_I)^2 e^{-2s} = 0 \end{aligned} \quad (19)$$

Burada, Eş. 19 ile verilen polinomlar Eş. 20'de detaylı olarak yazılmıştır.

$$\begin{aligned} P(s) &= 0.33s^{13} + 5.67s^{12} + 36.5s^{11} + 110.3s^{10} + 162s^9 + 121s^8 \\ &+ 70.5s^7 + 22.4s^6 + 5.46s^5 + 0.34s^4 + 0.01s^3 \\ Q'(s) &= 3.52s^9 + 32s^8 + 81.2s^7 + 63.2s^6 + 29.7s^5 \\ &+ 8.2s^4 + 0.43s^3 + 0.003s^2 \\ R'(s) &= 9.33s^5 + 9.89s^4 + 2.9s^3 + 0.14s^2 \end{aligned} \quad (20)$$

Yukarıda elde edilen karakteristik polinoma 2. Adım'dan itibaren, tanımlanan kararlılık sınır eğrisi yöntemi uygulanabilir. 4. Adım'da ve Eş. 17'de PI denetleyici kazançlarının çözümü için $\omega_c \in [0, 1.011] \text{ rad/s}$ aralığında belirlenmiştir. Eş. 17 çözüldüğünde, Şekil 2'de gösterildiği gibi (K_P, K_I) denetleyici parametre düzleminde bir kararlılık bölgesi hesaplanmıştır. Dikkat edilecek olursa, Eş. 12'de tanımlanan iki adet çözüm için Eş. 15 ve

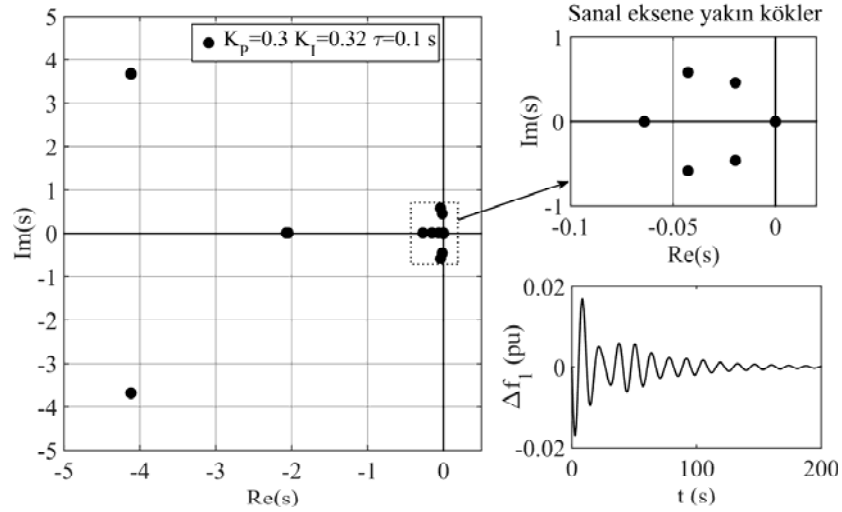


Şekil 2. YFK-DTC sisteminin iki adet CRB ve RRB eğrileri (Two CRBs and RRB curves of the LFC-DDR system)

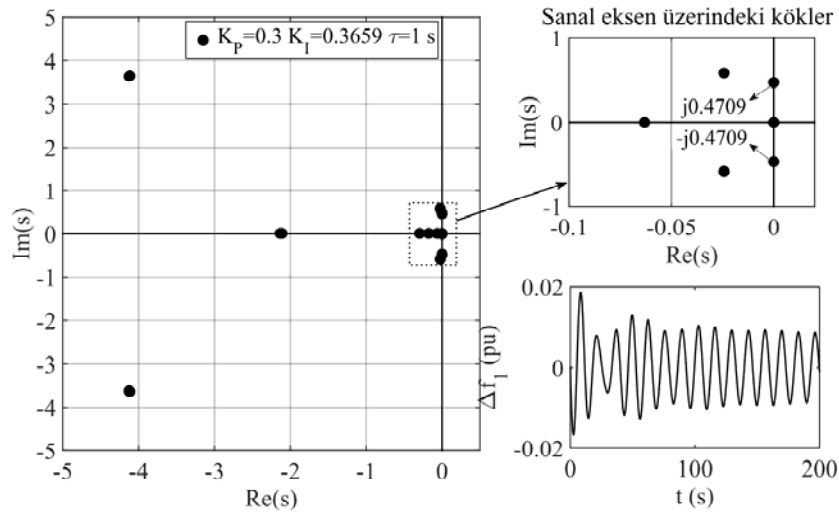
Eş. 17 kullanılarak iki adet CRB eğrisinin hesaplandığı ve $K_I=0$ 'ın RRB doğrusu olduğu Şekil 2'den görülmektedir. Sistemin kararlılık bölgesini netleştirmek ve teorik sonuçların doğruluğunu ispatlamak için QPmR algoritması kullanılarak YFK-DTC sisteminin baskın köklerinin incelenmesi ile birlikte $t=0s$ anında birinci kontrol bölgesinin $\Delta P_{L1}=0.1pu$ ($\Delta P_{L2}=0$) yük bozucu etkisi altında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Bu amaçla, iki CRB üzerinden ve etrafından denetleyici parametre değerleri seçilmiş ve bu denetleyici kazanç değerleri için benzetim çalışmaları ile birlikte sistemin baskın kökleri Şekil 3'de gösterilmiştir. CRB içerisinde seçilen ($K_P=0.3$, $K_I=0.32$) için sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve baskın köklerin sol yarı düzlemde olması nedeniyle Şekil 3a'dan YFK-DTC sisteminin kararlı olduğu görülmektedir. Bu analizin amacı yöntemin doğruluğunu göstermek olduğundan, seçilen denetleyici kazancına göre sistemin baskın kökleri, sanal eksene oldukça yakın olmakta ve frekans tepkisinde meydana gelen salınımlar geç sönümlenmektedir. Şekil 3b'de m_1 çözümünün sonucundan elde edilen CRB eğrisi üzerindeki ($K_P=0.3$, $K_I=0.3659$) denetleyici parametre değerleri için sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli devam ettiği ve QPmR algoritmasından iki adet kompleks kökün sanal eksen üzerinde olduğu görülmektedir. Bu durum, YFK-DTC sisteminin sınırda kararlı

olduğu davranışı göstermektedir. Şekil 3c, m_1 ile gösterilen CRB dışından seçilmiş ($K_P=0.3$, $K_I=0.42$) denetleyici parametre değerleri için sistemin frekans tepkisini ve QPmR algoritması sonucunu vermektedir. Şekil 3c'den, sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların giderek büyüdüğü ve dolayısıyla YFK-DTC sisteminin kararsız olduğu görülmektedir. Aynı zamanda, QPmR algoritması sonucuna göre sistemin iki adet kökünün sağ yarı düzlemde olması YFK-DTC sisteminin kararsız olduğunu desteklemektedir. Son olarak, Şekil 3d m_2 ile gösterilen CRB üzerinden seçilen ($K_P=1.655$, $K_I=0.37$) denetleyici parametre değeri için sistemin frekans yanıtı ve QPmR algoritması sonucu incelendiğinde YFK-DTC sisteminin sınırda kararlı olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, hem elde edilen kararlılık bölgesinin sınırlarını belirlemek adına hem de teorik sonuçların doğruluğunun gösterilmesi bakımından yeterli olmaktadır. Dolayısıyla, Şekil 2'de gri boyayla gösterilen alan m_1 ve m_2 ile tanımlanan CRB eğrilerinin kesişimini ve YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgesini vermektedir.

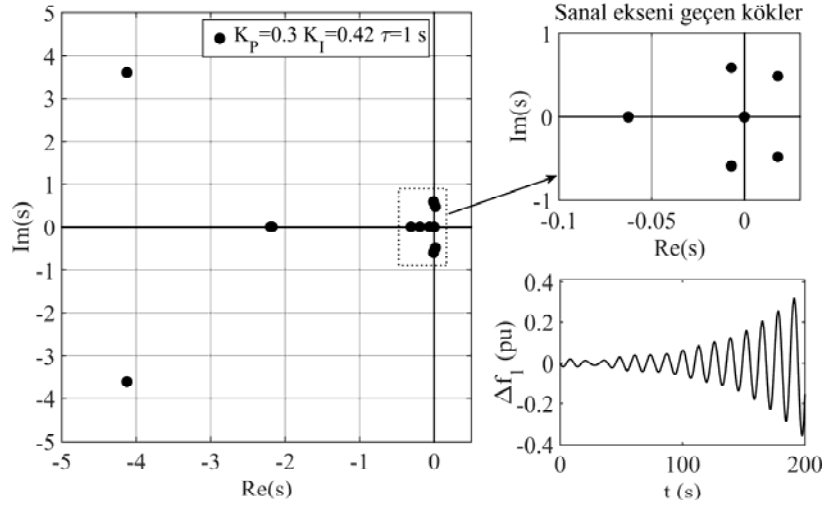
Bu çalışmanın önemli amaçlarında bir diğeri, DTC kontrol çevriminin katılım faktörünün sistemin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisini incelemektir. Bu amaç için, frekans düzenleme servisi üzerinde DTC



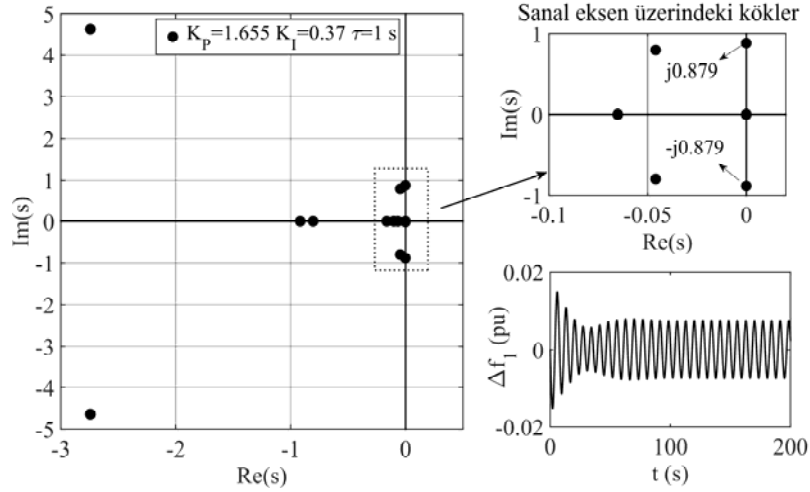
a) Kararlı durum (Stable case)



b) Sınırdaki kararlı durum (Marginally stable case)

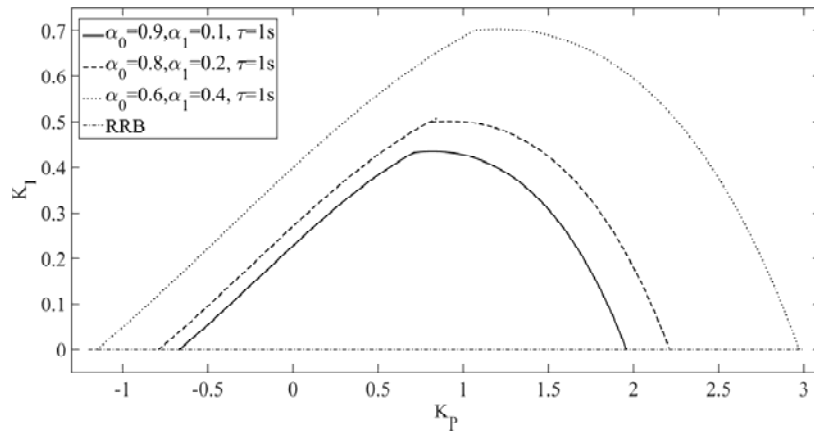


c) Kararsız durum (Unstable case)



d) Sınırdaki kararlı durum (Marginally stable case)

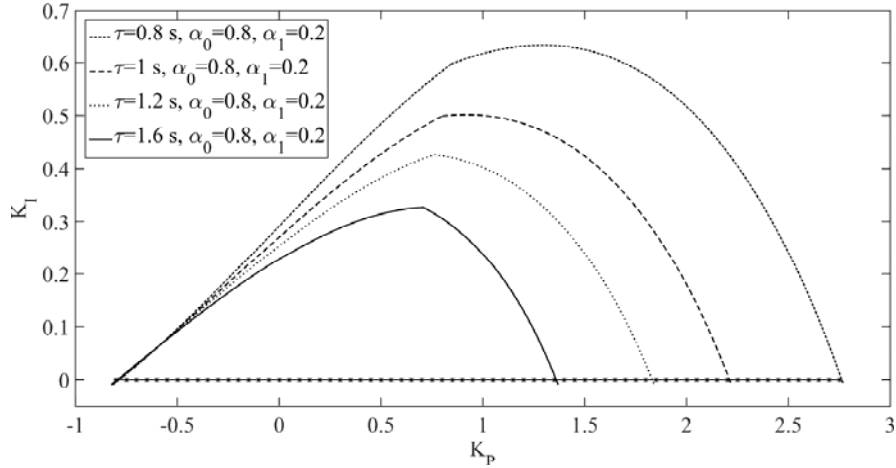
Şekil 3. İki bölgeyi YFK-DTC sisteminin baskın kökleri ve frekans yanıtları (Dominant root distributions and frequency responses of the two-area LFC-DDR system)



Şekil 4. $\tau = 1.0$ s için DTC kontrolünün kararlılık bölgesi üzerine etkisi (Effect of DTC control for $\tau = 1.0$ s on the stability region)

kontrol çevriminin katılım oranları $\alpha_1 = 0.1$ ($\alpha_0 = 0.9$), $\alpha_1 = 0.8$ ($\alpha_0 = 0.2$) ve $\alpha_1 = 0.4$ ($\alpha_0 = 0.6$) olarak belirlenmiş ve

$\tau = 1.0$ s değerinde Şekil 4'den görüldüğü üzere YFK-DTC sisteminin kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır. Pratik anlamda, Lagcos



Şekil 5. Zaman gecikmesi değerlerinin YFK-DTC sistemin kararlılık bölgesi üzerindeki etkisi
(The effect of time delay values on the stability region of the YFK-DTC system)

tarafından esnek yük gruplarının frekans düzenleme servisinde katılım payı 10%, 20% ve 40% olduğu varsayılmıştır. DTC programı kapsamında, esnek yük gruplarının frekans düzenleme servisi üzerinde katkı oranları senkron jeneratör tabanlı klasik üretim birimlerinin etkinliğini önemli derecede azaltmaktadır. Şekil 4'den, DTC kontrol çevriminin frekans düzenleme servisi üzerinde katılım oranı arttıkça sistemin kararlılık bölgelerinin büyüdüğü ve dolayısıyla sistemin kararlılığını olumlu yönde etkileyerek kararlılık marjının arttığı söylenebilir. Son olarak, sekonder kontrol çevrimi tarafında merkezi denetleyici ve üretim birimleri arasında yaşanan zaman gecikmesinin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisini incelemek için $\tau = 0.8$ s, $\tau = 1.0$ s, $\tau = 1.2$ s ve $\tau = 1.6$ s gecikme değerleri için sistemin kararlılık bölgeleri elde edilmiştir. Şekil 5'den görüldüğü üzere bu analiz, zaman gecikmesi değerleri arttıkça kararlılık bölgelerinin daraldığını ve sistemin kararlılık sınırını olumsuz olarak etkilediğini göstermektedir.

Elde edilen teorik sonuçlardan görüldüğü üzere, kararlılık sınır eğrisi yöntemi, iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin nominal sistem parametrelerine uygulanarak sistemin sınırdaki kararlılık ve Hurwitz kararlılık şartlarını sağlayan kararlılık bölgelerini başarılı bir şekilde hesaplamıştır. Ancak, YFK sisteminin gürbüz kontrol ihtiyacı gerçek güç sistemlerinin tasarımında ve kararlılık analizinde oldukça önemlidir. Önerilen bu yöntem, bir sistemin parametrik değişimleri karşısında, sistemin gürbüz kararlılık bölgelerinin hesaplanması ve gürbüz kararlılığını incelemek için tek başına yetersiz kalmaktadır. Herhangi bir sistemin gürbüz kararlılık bölgelerinin hesaplanması için, kararlılık sınır eğrisi yöntemi [37, 38] ve Kharitonov teoremi [46] birlikte kullanılarak sistemin gürbüz olarak denetleyici parametreleri tasarlanabilir. Kharitonov teoremi, sistem için tanımlanan parametrik aralıkların alt ve üst sınır değerlerinden yararlanarak katsayıları belirli bir aralıkta değişen bir aralık polinomunun tüm değer setine karşılık gelen dört adet köşe polinomunun elde edilebileceğini belirtir. Sistemin gürbüzlüğü bakımından, bu köşe polinomlarını aynı anda kararlı hale getirecek tüm denetleyici kazanç değerlerinin belirlenmesi kararlılık sınır eğrisi yöntemi ile gerçekleştirilebilir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, zaman gecikmeli iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin PI denetleyici parametre uzayında tanımlı kararlılık bölgeleri incelenmiş ve elde edilen sonuçların QPmR algoritması ve MATLAB/Simulink programı kullanılarak doğrulanması gerçekleştirilmiştir. YFK sistemlerinin frekans kontrolü için DTC kontrolün önemli bir esneklik

sağladığı ve senkron jeneratör tabanlı klasik üretim birimlerinin yükünü önemli ölçüde azalttığı görülmektedir. Kararlılık bölgeleri üzerinde DTC kontrol çevrimi katılım faktörünün etkisi incelendiğinde, DTC kontrol çevriminin frekans düzenleme servisinde katılım oranı arttıkça sistemin kararlılık bölgelerinin genişlediği görülmüştür. Bu durum, sistemin kararlılığını sağlayan daha geniş bir aralıkta PI denetleyici kazanç seti ile çalışma imkanı sağlamaktadır. Ayrıca, sekonder kontrol çevrimi tarafında bulunan haberleşme zaman gecikmesinin kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelendiğinde, zaman gecikme değerlerinde meydana gelen artış sistemin kararlılığını üzerinde olumsuz bir etki oluşturarak kararlılık bölgesinin daralmasına sebep olmaktadır. Elde edilen teorik sonuçların doğruluğunu göstermek için, kararlılık bölgelerinden seçilen denetleyici parametre değerleri kullanılarak benzetim çalışmaları ve baskın kök dağılımları incelenmiştir. Sistemin frekans tepkisi ve kök dağılımından elde edilen sonuçların doğru olduğu ispatlanmıştır.

İleride yapılacak çalışmalarda, YFK sisteminin bazı lineer olmayan davranışlarını ve gürbüz kararlılığını incelemek için, sistem parametrelerinin, zaman gecikmesi değerlerinin ve DTC kontrol çevrimi tarafında belirsizlikler dikkate alınarak kararlılık sınır eğrisi yöntemine [37, 38] ve Kharitonov teoremine [46] dayalı iki bölgeyi YFK-DTC sisteminin gürbüz PI denetleyici kazanç değerlerinin hesaplanması hedeflenmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 118E744 nolu "Elektrikli Araç Grupları ve Dinamik Talep Cevabı İçeren Yük Frekans Kontrol Sistemlerinin Zaman Gecikmesine Bağlı Kararlılık Analizi ve Gürbüz Denetleyici Tasarımı" isimli araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. TÜBİTAK'a desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Kundur P., Power System Stability and Control, New York, Mc Graw Hill, 1994.
2. Bevrani H., Ghosh A., Ledwich G., Renewable energy sources and frequency regulation: survey and new perspectives, IET Renewable Power Generation, 4 (5), 438-457, 2010.
3. Masuta T., Yokoyama A., Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters, IEEE Transactions on Smart Grid, 3 (3), 1253-1262, 2012.
4. Mu Y., Wu J., Ekanayake J., Jenkins N., Jia H., Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system, IEEE Transactions on Smart Grid, 4 (2), 1142-1150, 2013.

5. David A.O., Al-Anbagi I., EVs for frequency regulation: Cost benefit analysis in a smart grid environment, *IET Electrical Systems in Transportation*, 7 (4), 310-317, 2017.
6. Shoreh M.H., Siano P., Shafie-Khah M., Loia V., Catalão J.P., A survey of industrial applications of demand response. *Electric Power Systems Research*, 141, 31–49, 2016.
7. Shi Q., Li F., Hu Q., Wang Z., Dynamic demand control for system frequency regulation: Concept, review, algorithm comparison, and future vision, *Electric Power Systems Research*, 154, 75–87, 2018.
8. Wang J., Zhong H., Ma Z., Xia Q., Kang C., Review and prospect of integrated demand response in the multi-energy system, *Applied Energy*, 202, 772–782, 2017.
9. Schweppe F.C., Tabors R.D., Kirtley J.L., Outhred H.R., Pickel F.H., Cox A.J., Homeostatic utility control, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99 (3), 1151–1163, 1980.
10. Fernandez-Blanco R., Arroyo J. M., Alguacil N., Guan X., Incorporating price-responsive demand in energy scheduling based on consumer Payment minimization, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7 (2), 817–826, 2016.
11. Babahajani P., Shafiee Q., Bevrani H., Intelligent demand response contribution in frequency control of multi-area power systems, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (2), 1282–1291, 2018.
12. Hajibandeh N., Ehsan M., Soleymani S., Shafie-khah M., Catalao J.P.S., The mutual impact of demand response programs and renewable energies: A survey, *Energies*, 10 (9), 1353, 2017.
13. Shi Q., Li F., Liu G., Shi D., Yi Z., Wang Z., Thermostatic load control for system frequency regulation considering daily demand profile and progressive recovery, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10 (6), 6259–6270, 2019.
14. Munoz-Benavente I., Hansen A.D., Gómez-Lázaro E., García-Sánchez T., Fernández-Guillamón A., Molina-García Á., Impact of combined demand-response and wind power plant participation in frequency control for multi-area power systems, *Energies*, 12 (9), 1687, 2019.
15. Bao Y.Q., Li Y., Wang B., Hu M., Chen P., Demand response for frequency control of multi-area power system, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5 (1), 20–29, 2017.
16. Bharti K., Singh V.P., Singh S.P., Impact of intelligent demand response for load frequency control in smart grid perspective, *IETE Journal of Research*, 1-12, 2020.
17. Zakeri A.S., Askarian H.A., Transmission expansion planning using TLBO algorithm in the presence of demand response resources, *Energies*, 10 (9), 1376, 2017.
18. Humayun M., Degefa M.Z., Safdarian A., Lehtonen M., Utilization improvement of transformers using demand response, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30 (1), 202–210, 2015.
19. Pourmousavi S.A., Nehrir M.H., Introducing dynamic demand response in the LFC model, *IEEE Transactions on Power Systems*, 29 (4), 1562–1572, 2014.
20. Singh V.P., Samuel P., Kishor N., Impact of demand response for frequency regulation in two-area thermal power system, *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27 (2), 1-23, 2017.
21. Zaman M.S.U., Bukhari S.B.A., Hazazi K.M., Haider Z.M., Haider R., Kim C.H., Frequency response analysis of a single-area power system with a modified LFC model considering demand response and virtual inertia, *Energies*, 11 (4), 787, 2018.
22. Hui H., Ding Y., Song Y., Rahman S., Modeling and control of flexible loads for frequency regulation services considering compensation of communication latency and detection error, *Applied Energy*, 250, 161–174, 2019.
23. Hosseini S.A., Toulabi M., Dobakhshari A.S., Ashouri-Zadeh A., Ranjbar A.M., Delay compensation of demand response and adaptive disturbance rejection applied to power system frequency control, *IEEE Transactions on Power Systems*, 35 (3), 2037–2046, 2020.
24. Zaman M.S.U., Bukhari S.B.A., Haider R., Khan M.O., Baloch S., Kim C.H., Sensitivity and stability analysis of power system frequency response considering demand response and virtual inertia, *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14 (6), 986-996, 2020.
25. Sönmez Ş., Ayasun S., 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 (1), 370-377, 2016.
26. Jin L., Zhang C.K., He Y., Jiang L., Wu M., 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.
27. Yang F., He J., Wang D., New Stability Criteria of Delayed Load Frequency Control Systems via Infinite-Series-Based Inequality, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14 (1), 231-240, 2018.
28. Sönmez Ş., Ayasun S., Gain and phase margin based stability analysis of time delayed single area load frequency control system with fractional order PI controller, *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (2), 945-960, 2019.
29. Ko K.S., 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 (1), 669–680, 2018.
30. Yuan Z.L., Xu D., Jin L., Wang H.Z., Delay-dependent stability analysis of load frequency control for power system with EV aggregator, *Frontiers in Energy Research*, 9, 771465, 2021.
31. Naveed A., Sönmez Ş., Ayasun S., 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.
32. Naveed A., Sönmez Ş., Ayasun S., Impact of electric vehicle aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins in load frequency control system, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 9 (3), 595-601, 2021.
33. Tek B., Sönmez Ş., Ayasun S., Delay-dependent Stability Analysis Considering Dynamic Demand Response and Electric Vehicle Aggregator Integration in Two-Area Load Frequency Control Systems, *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 1 (1), 19-25, 2021.
34. Gündüz H., Sönmez Ş., Ayasun S., Gain and phase margins based stability analysis of micro grid systems with time delay by using Rekasius substitution, *Journal of Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34 (1), 553-567, 2019.
35. Katipoğlu D., Naveed A., Sönmez Ş., Ayasun S., The effect of demand response control on stability delay margins of load frequency control systems with communication time delays, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29 (3), 1383-1400, 2021.
36. Katipoğlu D., Sönmez Ş., Ayasun S., Stability Delay Margin Computation of Load Frequency Control System with Demand Response, *IEEE Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, 473-478, 2019.
37. Söylemez M.T., Munro N., Baki H., Fast calculation of stabilizing PID controllers, *Automatica*, 39 (1), 121–127, 2003.
38. Tan N., Kaya İ., Celaleddin Y., Atherton D.P., Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus, *Energy Conversion and Management*, 47 (18-19), 3045-3058, 2006.
39. Sönmez Ş., Computation of stability regions for load frequency control systems including incommensurate time delays, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 27 (6), 4596-4607, 2019.
40. Sönmez Ş., Ayasun S., 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, 2018.
41. Wang Y.J., Graphical computation of gain and phase margin specifications-oriented robust PID controllers for uncertain systems with time -varying delay, *Journal of Process Control*, 21 (4), 475-488, 2011.
42. Türksoy Ö., Ayasun S., Hameş Y., Sönmez S., Computation of robust PI-based pitch controller parameters for large wind turbines, *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, 43 (1), 57-63, 2020.
43. Gündüz H., Sönmez Ş., Ayasun S., 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.
44. Vyhlídal T., Zitek P., Mapping based algorithm for large -scale computation of quasi-polynomial zeros, *IEEE Transactions Automatic Control*, 2054 (1), 171-177, 2009.
45. Simulink, Simulation and Model-Based Design, Natick, MathWorks, MA, USA, 2019.
46. Kharitonov V.L., Asymptotic stability of an equilibrium position of a family systems of linear differential equations, *Differentsial'nye Uravneniya*, 14, 1483-1485, 1978.