



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE DİNAMİK TALEP KONTROLÜ İÇEREN
İKİ BÖLGELİ YÜK FREKANS KONTROL SİSTEMİNİN ZAMAN
GECİKMESİNE BAĞLI KARARLILIK ANALİZİ**

Bilal TEK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Bilal TEK

02/07/2021

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR VE DİNAMİK TALEP KONTROLÜ İÇEREN İKİ BÖLGELİ
YÜK FREKANS KONTROL SİSTEMİNİN ZAMAN GECİKMESİNE BAĞLI
KARARLILIK ANALİZİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Bilal TEK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Temmuz 2021

ÖZET

Elektrikli Araç (EA) grupları ve Dinamik Talep Cevabı (DTC) uygulamaları bir veya birden fazla bağımsız kontrol bölgesinden oluşan güç sistemlerinde frekans kontrolü için umut vadeden bir araç olmuştur. Bunun temel nedeni çevre konusundaki artan endişeler, fosil yakıtların hızla tükeniyor olması ve değişken çıkış gücü olan yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmasıdır. EA'da bulunan bataryalar, hızlı cevap karakteristiklerinden dolayı çıkış güçlerini konvansiyonel santrallerden daha hızlı bir şekilde artırabilir ya da azaltabilir olması nedeniyle Yük Frekans Kontrol (YFK) sistemlerinin dinamik performansını artırmaktadır. EA grupları, jeneratör veya yük olarak kullanılabilirdikleri için üretim ve talep değişimlerini azaltarak sistemin frekans cevabını iyileştirirler. Gerçek zamanlı DTC uygulamaları, üretim ve talep arasındaki dengeyi sağlamaya katkıda bulunan, hızlı tepki verebilen yüklerin tüketimlerini ayarlayarak sistemin, YEK'deki üretim değişkenliğini yönetebilmesini mümkün kılmaktadır. EA grupları ve DTC kontrol çevriminin YFK sistemine entegrasyonunun yapılabilmesi için merkezi kontrol birimi tarafından EA grupları ve DTC toplayıcılarına kontrol sinyallerini gönderecek haberleşme ağının kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, genellikle açık dağıtılmış haberleşme ağları kullanılmaktadır. Ancak, bu tür ağlarda kontrol sinyallerinin iletilmesinde haberleşme zaman gecikmeleri gözlemlenmektedir. Hızlı tepki verebilme karakteristiklerine sahip olan EA grupları ve DTC uygulamalarının YFK sisteminin performansını artıracak beklenişinin aksine, bu zaman gecikmeleri sistemde kararsızlığa sebep olabilmektedir. Bu yüzden, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren YFK (EA-DTC-YFK) sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinin yapılması ve sistem parametreleri ile zaman gecikmelerindeki belirsizliklerin olması durumunda gürbüz oransal-integral (PI) denetleyici tasarım tekniklerinin geliştirilmesi önemlidir. Bu tez çalışmasının amacı EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren iki bölgeli YFK sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini yapmaktır. Bu amaçla, iki-bölgeli bir YFK sistemi dikkate alınarak EA grupları ve DTC kontrol çevriminin farklı katılım faktörleri ve PI denetleyicinin farklı kazanç değerleri için sisteminin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri benzetim yöntemi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar, EA grupları ve DTC kontrol çevriminin YFK sisteminin kararlılığını artırdığını göstermiştir.

Bilim Kodu : 90526

Anahtar Kelimeler : Elektrikli araçlar(EA), Dinamik talep kontrolü (DTC), Haberleşme ağı, Yük frekans kontrolü (YFK), PI kontrolör, Sistem frekans kararlılığı, Kararlılık, Kararlılık gecikme payı, Zaman gecikmesi

Sayfa Adedi : 64

Danışman : Prof. Dr. Saffet AYASUN

DELAY-DEPENDENT STABILITY ANALYSIS OF A TWO-AREA LOAD
FREQUENCY CONTROL SYSTEM WITH ELECTRIC VEHICLES AND DYNAMIC
DEMAND CONTROL

(M. Sc. Thesis)

Bilal TEK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

July 2021

ABSTRACT

Electric Vehicles (EVs) and Dynamic Demand Response (DDR) applications have become a promising tool for frequency regulation (Load Frequency Control-LFC) in an interconnected system with one or more independently controlled areas. This is due to increasing environmental concerns, gradual depletion of fossils resources and increased penetration of highly variable renewable energy (RE) power generation. Batteries in EVs can increase or decrease faster power output than conventional generators. This fast response characteristic enhances dynamic performance of LFC system. EVs can be used as generators or loads and hence reduce generation/demand fluctuations, and improve frequency response. The real-time DDR applications allow the system to manage the variability of RE sources by adjusting responsive loads contributed for proper balance between generation and loads. The integration of EVs and DDR control loops into LFC system requires a communication network to send control signals to EVs and DDR aggregators. For this purpose, an open distributed communication network is generally used. However, uncertain time delays are observed in such a communication network. These delays can cause instability of power system against an expectation that EVs and DDR applications having fast-response characteristics can improve the LFC performance. Hence, it is important to investigate delay-dependent stability of LFC system enhanced by EVs and DDR loops (EV-DDR-LFC) and to develop robust controller design techniques in the presence uncertainties in system parameters and time delays. The purpose of this project is to investigate the delay-dependent stability of two-area EV-DDR-LFC systems and to design robust proportional-integral (PI) controller. For that purpose, stability delay margins of the EV-DDR-LFC are determined using a simulation approach for different values of EAs and DDR participation factors and PI controller Gains. Results shows that the integration of EAs and DDR loop improves the Stability of the two-area LFC System.

Science Code : 90526

Key Words : Electric vehicles(EV), Dynamic demand response(DDR),
Communication network, Load frequency control(LFC), PI controller,
Stability, System frequency stability, Stability delay margin, Time delay

Page Number : 64

Supervisor : Prof. Dr. Saffet AYASUN

TEŞEKKÜR

Tezimde bana yol gösteren, her zaman katkı veren tez danışmanım Prof. Dr. Saffet AYASUN'a çok teşekkür ederim. Büyük fedakarlıklarla beni büyütüp bu günlere gelmemi sağlayan Annem ve Babamı rahmetle anıyorum. Tez çalışmalarım sürecinde bana sabır gösteren ve destek olan sevgili eşime, iki kızım ve oğluma teşekkür ediyorum ve bu çalışmayı onlara armağan ediyorum. Bu tez çalışmalarından biri bildiri ve biri de makale olmak üzere iki yayın yapılmıştır. Bildiri, ELECO 2020 Konferansı'nda "En iyi öğrenci bildirisi ödülü"ne uygun bulunmuştur. Makale ise uluslararası düzeyde bir dergi olan TEPES Dergisi'nde İngilizce olarak yayınlanmıştır.



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMA.....	5
2.1. Dinamik Talep Cevabı İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar	5
2.2. Elektrik Araç Toplayıcıları İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar	5
2.3. Elektrik Araç Toplayıcıları ve Dinamik Talep Cevabı İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar	6
2.4. PI ve PID Denetleyici Tasarımına Dair Çalışmalar	8
2.5. Bu Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar ve Tezin Özgün Yanları.....	10
3. İKİ BÖLGELİ YÜK FREKANS SİSTEM MODELİ VE KARARLILIĞI	13
3.1. EA Grupları ve DTC İçeren Güç Sistemi	13
3.2. Durum Denklemleri.....	19
3.3. Zaman Gecikmesine Bağlı Kararlılık.....	24
4. BENZETİM YÖNTEMİ İLE MAKSİMUM ZAMAN GECİKME DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ	29
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	43

	Sayfa
EKLER.....	49
EK-1. Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi.....	50
ÖZGEÇMİŞ	64



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. EA-DTC-YFK sisteminin parametreleri, değerleri ve durumları.....	27
Çizelge 4.1. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için zaman gecikmesi payları	30
Çizelge 4.2. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için zaman gecikmesi payları	31
Çizelge 4.3. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için zaman gecikmesi payları	32
Çizelge 4.4. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$, $K_P = 1.4$, $K_I = 0.6$ için zaman gecikmesi payları	33

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Elektrik araç ve yük toplayıcıları içeren akıllı şebeke.....	13
Şekil 3.2. EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölgeli YFK sisteminin modeli	17
Şekil 3.3. Karakteristik denklemin köklerinin zaman gecikmesine göre değişimi.....	25
Şekil 4.1. İki bölgeli EA-DTC-YFK sistem modelinin simülasyonu	29
Şekil 4.2. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi.....	35
Şekil 4.3. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi.....	36
Şekil 4.4. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi.....	37
Şekil 4.6. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için K_I sabit iken K_P değerlerine bağlı zaman gecikme payının değişimi	38
Şekil 4.7. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için K_P sabit iken K_I değerlerine bağlı zaman gecikme payının değişimi	38
Şekil 4.8. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$ için K_P ve K_I sabit iken α_1 katılım oranlarına bağlı zaman gecikme payının değişimi	39
Şekil 4.9. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$ için K_P ve K_I sabit iken α_2 katılım oranlarına bağlı zaman gecikme payının değişimi	39

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a_0	Klasik üretim birimlerinin YFK sistemine katılım oranı
a_1	EA gruplarının frekans düzenlemesine katılım oranı
a_2	DTC'nin frekans düzenlemesine katılım oranı
β_i	Frekans yönelim faktörü
D_i	Jeneratör sönümlleme katsayısı
Δf_i	Frekans değişimi
ΔP_{EV_i}	EA grubunun güç çıkışının değişimi
ΔP_{DR_i}	Dinamik talep cevabı güç çıkışının değişimi
ΔP_{L_i}	Şebeke yükündeki değişim
ΔP_{m_i}	Jeneratör mekanik giriş gücündeki değişim
ΔP_{V_i}	Valf konum değişimi
ΔP_{12}	İki bölge arasında transfer edilen aktif güç değişimi
ΔX_{g_i}	Jeneratör güç çıkışının değişimi
F_{p_i}	Ara-ısıtmalı türbin katsayısı
i	Bölgeyi gösteren indis (1 veya 2)
K_{EV_i}	Batarya sisteminin kazanç katsayısı
K_{I_i}	İntegral denetleyici kazancı
K_{P_i}	Oransal denetleyici kazancı
M_i	Jeneratör eylemsizlik momenti katsayısı

Simgeler**Açıklamalar**

R_i	Hız regülasyon düşü katsayısı
T_{EV_i}	Batarya sisteminin zaman sabiti
T_{c_i}	Türbin zaman sabiti
T_{g_i}	Devir sayısı regülatörü zaman sabiti
T_{r_i}	Ara ısıtılmalı türbin zaman sabiti
T_{12}	İki bölge arasındaki senkronizasyon güç katsayısı
τ	Zaman gecikmesi
τ^*	Maksimum zaman gecikmesi (Kararlık Gecikme Payı)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ACE	Area Control Error (Alan Kontrol Hatası)
EA	Elektrikli Araçlar
EV	Electric Vehicle
DDR/DR	Dynamic Demand Response
DTC	Dinamik Talep Cevabı
Hz	Hertz
LFC	Load Frequency Control
MW	Mega Watt
PI	Oransal ve İntegral Denetleyici
PMU	Fazör Ölçüm Birimi
p.u.	Birim Değer (Per Unit)
PV	Fotovoltaik
s	Saniye
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YFK	Yük Frekans Kontrolü

1. GİRİŞ

Elektrik güç sisteminde en önemli konu üretim ve tüketim dengesinin sağlanması diğer bir ifadeyle frekansta meydana gelen bir değişimin sifıra düşülerek frekansın nominal seviyede sabit tutulmasıdır. Bu nedenle yük taleplerindeki sürekli değişikliklerden dolayı frekansı sabit tutmak için güç üretiminin kontrolü gereklidir.

Elektrik yük frekans kontrol (YFK) sistemi, her bir kontrol bölgesinde yük talebi ile üretim arasındaki dengeyi sağlamak ve dolayısı ile yük değişimlerine bağlı olarak sistem frekansındaki değişimleri yok etmek amacı ile uzun yıllardan beri elektrik güç sistemlerinin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla, enterkonnekte bir güç sisteminde YFK sisteminin bölgeleri arasında önceden programlanmış seviyelerde güç paylaşımını sürdürmekle ve elektrik güç şebekesinin frekansını kontrol etmekle görevlidir [1, 2]. Klasik YFK sistemleri güç dengesini, daha çok fosil kaynakların kullanıldığı santraller tarafından sağlamaktadır. Ancak, fosil kaynakların dünyadaki rezerv miktarları hızlıca azalmakta ve bu kaynakların kullanımından dolayı çevresel kirlilikler oldukça artmaktadır. Bu anlamda, bu tip klasik elektrik üretim santrallerinin çevreye olan zararlı etkilerini azaltmak için rüzgar, güneş ve jeotermal gibi enerji kaynaklarını kullanabilen yenilenebilir enerji santralleri enterkonnekte güç sistemlerine yoğun olarak dahil edilmiştir [3-5].

Güneş, rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının iklim koşullarına bağlı olarak çıkış güçlerinin büyük değişkenlik göstermesi bu kaynakların en büyük dezavantajıdır. Güneş ve rüzgârdan yeterli güç sağlanmadığı zamanlarda üretim ve tüketim arasında bir güç dengesizliği oluşur.

Elektrikli araç (EA) grupları ve dinamik talep cevabı (DTC) uygulamaları bir veya birden fazla bağımsız kontrol bölgesinden oluşan güç sistemlerinde frekans kontrolü için umut vadeden bir araç olmuştur. Bunun temel nedeni çevre konusundaki artan endişeler, fosil yakıtların hızla tükeniyor olması ve değişken çıkış gücü olan yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) enerji üretiminde yaygın olarak kullanılmasıdır. EA'da bulunan bataryalar, hızlı cevap karakteristiklerinden dolayı çıkış güçlerini konvansiyonel santrallerden daha hızlı bir şekilde artırabilir ya da azaltabilir olması nedeniyle YFK sistemlerinin dinamik performansını artırmaktadır. EA grupları, jeneratör veya yük olarak

kullanılabilirlikleri için üretim ve talep değişimlerini azaltarak sistemin frekans cevabını iyileştirirler. Gerçek zamanlı DTC uygulamaları, üretim ve talep arasındaki dengeyi sağlamaya katkıda bulunan, hızlı tepki verebilen yüklerin tüketimlerini ayarlayarak sistemin, YEK'deki üretim değişkenliğini yönetebilmesini mümkün kılmaktadır [6-9].

EA grupları ve DTC kontrol çevriminin YFK sistemine entegrasyonunun yapılabilmesi için merkezi kontrol birimi tarafından EA grupları ve DTC toplayıcılarına kontrol sinyallerini gönderecek haberleşme ağının kullanılması gerekmektedir. Bu amaçla, genellikle açık dağıtılmış haberleşme ağları kullanılmaktadır. Ancak, bu tür ağlarda kontrol sinyallerinin iletilmesinde haberleşme zaman gecikmeleri gözlemlenmektedir. Hızlı tepki verebilme karakteristiklerine sahip olan EA grupları ve DTC uygulamalarının YFK sisteminin performansını artıracak beklentisinin aksine, bu zaman gecikmeleri sistemde kararsızlığa sebep olabilmektedir. Bu yüzden, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren YFK (EA-DTC-YFK) sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinin yapılması, klasik güç üretim biriminin, batarya sisteminin ve DTC kontrol çevriminin YFK sisteminde frekans düzenleme servisine katılım oranlarını ifade eden paylaşım faktörü katsayılarının, sistem parametrelerinin ve sınırdaki kararlı olacak maksimum zaman gecikme değerlerinin (Kararlılık Gecikme Payı) belirlenmesi önemlidir. Literatürde hem EA ve hem de DTC kontrol çevrimi içeren YFK sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi mevcut değildir.

EA grupları ve DTC kontrol çevriminin frekans kontrolüne dahil edilmesi ve kararlılık analizlerinin yapılması bu tez çalışmanın özgün değeridir. Kararlılık gecikme paylarının yardımı ile sistemin kararlılığını garantileyecek PI denetleyici kazancını ayarlamak ve sistemde meydana gelecek zaman gecikme değerlerinin, belirlenen kararlılık gecikme payından daha düşük olacak biçimde haberleşme ağını tasarlamak mümkün olacaktır.

Bu yüksek lisans tez çalışmasında elektrikli araçlar (EA) ve talep tarafı kontrol çevrimi (DTC) içeren iki bölgeli bir yük-frekans kontrol sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi yapılarak, sistemin sınırdaki kararlı olacak maksimum zaman gecikme (Kararlılık Gecikme Payı) değerleri benzetim çalışmaları ile belirlenmiştir.

İki bölgeli EA-DTC-YFK sisteminin sınırdaki kararlı olacak maksimum gecikme payları (Kararlılık Gecikme Payı) Matlab/Simulink programı kullanılarak zaman düzleminde

yapılan benzetim çalışmaları ile belirlenmiştir. Tezin diğerk bölümleri aşağıdaki biçimde yapılandırılmıştır.

Bölüm II’de literatür taraması yapılarak YFK yöntemleri ve zaman gecikmesinin sistem kararlılığına etkisi hakkında yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Bölüm III’te iki bölgeli YFK sistem modeli ile yapısı hakkında bilgiler verilmekte ve zaman gecikmeli sistemlerin kararlılığı incelenmiştir. Bölüm IV’te benzetim yöntemi ile maksimum zaman gecikmelerinin belirlenmesi için Matlab/Simulink programı kullanılarak benzetim çalışmaları yapılmaktadır. Bölüm V’te sonuç ve öneriler kısmı yer almaktadır.



2. LİTERATÜR TARAMA

Literatürde, klasik YFK yöntemleri yüksek gerilim enterkonnekte güç sistemlerinde yıllardır verimli bir şekilde kullanılmaktadır [2]. Ancak literatürde, EA-DTC-YFK sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılığı konusunda yapılmış olan oldukça sınırlı sayıda çalışma vardır. Aşağıda klasik YFK sistemlerine DTC, EA toplayıcılarının ayrı ayrı veya birlikte dahil edilerek meydana gelen DTC-YFK, EA-YFK ve EA-DTC-YFK sistemlerinin kararlılık analizi konusunda yapılmış olan çalışmalara yer verilmiştir. Ayrıca bu çalışmalarda kullanılan yöntemlerin güçlü ve zayıf yönleri göz önüne serilmiştir.

2.1. Dinamik Talep Cevabı İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar

Pourmousavi ve Nehrir [6], bir bölgesel YFK sistemine bir DTC kontrol çevrimi ekleyerek, bu çevrimdeki haberleşme zaman gecikmesinin PI denetleyici tasarımına etkisini araştırmıştır. Bu çalışma, YFK sistemine DTC çevrimi ilave edilmesi bakımından önemli bir çalışma olmasına rağmen, bazı önemli dezavantajlara sahiptir. Sadece bir bölgesel sisteme uygulanmış olması, EA gruplarını içermemesi ve en önemlisi de lineer olmayan transfer fonksiyonunun Pade yaklaşımı kullanılarak lineer hale getirilmiş olması bu dezavantajlardan bazılarıdır. Kullanılan Pade yaklaşımı sistemin derecesini artırmış ve elde edilen sonuçların yaklaşık olması sonucunu doğurmuştur. Diğer bir çalışmada ise, Singh vd. [7] her kontrol bölgesine bir DTC kontrol çevriminin ilave edildiği iki bölgesel YFK kontrol sisteminde, bu çevrimlerin frekans kontrolüne etkisini araştırmışlardır. Önceki çalışmaya benzer biçimde bu çalışmada da EA grupları dikkate alınmamış ve 5. Dereceden Pade yaklaşımı kullanılarak dinamik analizler yapılmıştır. DTC kontrol çevrimi içeren bu iki çalışmada da verilen sistem parametreleri için YFK sisteminin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri hesaplanmamıştır.

2.2. Elektrik Araç Toplayıcıları İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar

EA gruplarının YFK sistemine dahil edilmesi ve zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi konusunda yapılan çalışmalar da oldukça sınırlı sayıdadır. Ko ve Sung [8], bir bölgesel YFK sistemine EA grupları ilave etmiş ve PI denetleyici kazançlarının farklı değerleri için sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerlerini Lyapunov-Krasovskii kararlılık teorisini kullanarak hesaplamıştır. Diğer bir çalışmada ise, Khalil vd. [9] EA

grupları içeren ada modunda çalışan basit bir mikro-şebekesinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini yapmışlardır. Her iki çalışmada da incelenen sistemin sadece bir bölgesi basit bir YFK sistemi ve bir mikro-şebeke sistemi olması ve DTC kontrol çevriminin analizlerde dikkate alınmamış olması bu çalışmaların zayıf yönleridir. Ayrıca, her iki çalışmada da sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri, Lyapunov-Krasovskii kararlılık teorisi ve lineer matris eşitsizlikleri (LMI) kullanılarak hesaplanmıştır. Bu tür yöntemler ile elde edilen maksimum zaman gecikme değerlerinin, zaman düzleminde yapılan benzetim çalışmaları ile elde edilen sonuçlardan daha düşük olduğu ve bunun da kullanılan yöntemin tutuculuğundan kaynaklandığı literatürde yapılan çalışmalarda gözlemlenmiştir [10-15].

2.3. Elektrik Araç Toplayıcıları ve Dinamik Talep Cevabı İçeren YFK Sistemine Dair Çalışmalar

Literatürde, Şekil 3.2’de verilen iki bölgesi EA-DTC-YFK sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi ve PI denetleyici tasarımı konularında yapılmış bir çalışma mevcut değildir. Bu sistemin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizini ve sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerlerini analitik olarak hesaplamak için literatürde kullanılabilecek birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler frekans düzleminde ve zaman düzleminde olmak üzere iki ayrı şekilde maksimum zaman gecikmesinin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Frekans düzleminde kullanılan yöntemler sabit zaman gecikmesi içeren sistemlerin kararlılık analizinde kullanılmaktadır ve bu yöntemlerin ortak noktası sistemin sınırdaki kararlı olacağı tüm sanal köklerin belirlenmesidir. Frekans düzlemindeki bu yöntemler beş temel gruba ayrılabilir:

- 1) Schur-Cohn Yöntemi (Hermite matris formu) [16-18]
- 2) Üstel Terimin Yok Edilmesi Yöntemi [19-22]
- 3) Matris Pencil - Kronecker Toplam Metodu [16-18, 23]
- 4) Kronecker Çarpım ve Temel Dönüşüm Yöntemi [16, 24]
- 5) Rekasius Yerine Koyma Yöntemi [14. 25-28]

Elektrik güç sistemlerinin kararlılık analizi için frekans düzleminde kullanılan bu yöntemlerle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Bu yöntemlerden, Schur-Cohn Yöntemi, zaman gecikmeli iki bölgesi YFK sistemin zaman gecikmesine bağlı kararlılık

analizi ve maksimum zaman gecikme hesabında etkin bir şekilde kullanılmıştır [29]. Özellikle, klasik YFK sistemlerinde, mikro-şebeke sistemlerde ve uyarma kontrol sistemlerinde zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizlerinin yapıldığı çalışmalarda Üstel Terimin Yok Edilmesi Yönteminin ve Rekasius Yerine Koyma Yönteminin olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür [14, 20, 22, 30-33].

Zaman düzleminde kullanılan yöntemler ise Lyapunov-Krasovskii kararlılık teorisine ve Razumikhin teoremine dayalıdır. Her iki kararlılık teorisinde de uygun bir Lyapunov enerji fonksiyon oluşturularak sistemin kararlılığı için yeterli şartlar elde edilir ve lineer matris eşitsizlik teknikleri yardımıyla maksimum zaman gecikme değerleri hesaplanır. Bu yöntemler klasik YFK sistemlerinde hem sabit hem de değişken zaman gecikmeleri olması durumunda maksimum zaman gecikmesinin hesaplanmasında kullanılmıştır [10-13]. Son zamanlarda EA grupları içeren YFK sistemleri için yapılan çalışmalarda, Ko ve Sung [8] tarafından Lyapunov teorisi ve lineer matris eşitsizliği tekniği yardımıyla denetleyicinin farklı kazanç değerleri için bir bölgeyi YFK sisteminin maksimum zaman gecikme değerleri hesaplanmıştır. Jia vd. [34] tarafından yapılan başka bir çalışmada, EA grupları eklenmiş olan YFK sisteminin kararlılığını arttırmak için Lyapunov kararlılık teorisi kullanılmıştır. Hem frekans düzleminde hem de zaman düzleminde kullanılan yöntemler sayesinde, zaman gecikmeli YFK sistemlerinin maksimum gecikme değerleri hesaplanabildiği görülmüştür. Ancak, frekans düzleminde kullanılan yöntemler zaman düzleminde kullanılan yöntemlere göre daha büyük zaman gecikme değerleri hesaplamaktadır. Bu durum, zaman düzleminde kullanılan yöntemlerin daha tutucu gecikme değerlerini hesaplandığını göstermektedir. Ayrıca, sistem frekans yanıtının istenilen özellikleri taşıması için girilen kazanç ve faz payı parametrelerine karşılık gelen gecikme değerlerinin hesaplanması, literatürde yapılan çalışmalarda sadece frekans düzleminde kullanılan üstel terimin yok edilmesi yöntemi ile belirlendiği görülmüştür [35, 36]. Her iki grup yöntemlerle hesaplanan gecikme değerlerinin karşılaştırılması, Sönmez vd. [14, 15] çalışmalarında gösterilmiştir.

Literatürde, frekans düzleminde kullanılan beş yöntem, zaman gecikmeli dinamik sistemlerin sınırda kararlı olacağı maksimum zaman gecikme hesabına uygulanarak performansları karşılaştırılmıştır [37]. Yöntemler; yönetimin uygulama kolaylığı, hesaplama zamanı ve elde edilen sonuçların doğruluğu açısından karşılaştırılmış ve bu yöntemlerden Üstel Terimin Yok Edilmesi ve Rekasius Yerine Koyma Yöntemlerin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır. Bu iki yöntem, zaman gecikmeli EA grupları ve DTC kontrol çevrimi

içermeyen iki bölgeli YFK sistemi ve mikro-şebekeye uygulanmış ve elde edilen teorik maksimum zaman gecikme değerlerinin benzetim yöntemi ile elde edilenler ile aynı sonucu verdiği gözlemlenmiştir [14, 15, 20, 30-32]. Bu nedenle, bu tez çalışmasında iki bölgeli EA-DTC-YFK sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi ve PI denetleyicinin farklı kazanç değerleri için sistemlerin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikmesi (Kararlılık gecikme payı) benzetim çalışmaları ile belirlenmesi yoluna gidilmiştir.

2.4. PI ve PID Denetleyici Tasarımına Dair Çalışmalar

Klasik kontrol sistemlerinde PI veya PID denetleyiciler, gürbüz çalışması, parametreleri kolaylıkla tasarlanan, tasarlanması için birçok yöntem geliştirilen ve uygulanması basit olduğu için frekans kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır [38, 39, 40]. PI denetleyicilerin YFK sistemlerindeki kullanılmasının temel amacı, sistemde bir bozucu etki meydana geldiğinde, güç sisteminin frekansını kontrol etmek, bağlantı hattından üretim bölgeleri arasındaki güç değişimini düzenlemek, sürekli durum hatasının minimum tutulmasını sağlamak ve frekansın minimum sürede nominal değere ulaşabilmesi için tepki hızının yüksek olmasını sağlamaktır [1, 2, 41]. Literatürde, Genetik Algoritma [42], Parçacık Sürü Optimizasyonu [43] ve Bakteri Besin Arama Optimizasyonu [44] gibi algoritmalar YFK sistemlerinin PI tasarımında kullanılmıştır. Ancak, bu yöntemler optimum çözümü sistem parametre değerlerinin nominal değerde sabit kalması durumu için hesapladığından, YFK sistem parametrelerinde belirsizlik olması durumunda, uygun optimum çözüm sunamamaktadır [45]. Güç sistemleri parametrelerindeki değişiklikler, yük değişimi ve modellemeyen kaynaklanan birçok parametrik belirsizlikler içermektedir. Özellikle, elektrik enerji piyasasının yeniden yapılandırılması ile birlikte, elektrik üretim, iletim ve dağıtım faaliyetlerinin farklı firmalar tarafından yürütülmesi ve bu firmalar arasında planlama, kontrol ve sistemin genişletilmesi açısından koordinasyon eksikliği, bu belirsizleri daha da artırmıştır [46]. Bu yüzden, nominal sistem parametrelerine göre tasarlanan PI denetleyiciler istenilen sistem frekans performansını sağlamak için yeterli olamamaktadır. Literatürde, sistem parametrelerindeki belirsizleri dikkate alarak YFK sistemleri için gürbüz PI tasarım yöntemleri sunan birçok çalışma mevcuttur. Yazdizadeh vd. [47] sistem matrisine ait özdeğerleri kullanarak gürbüz bir denetleyici tasarım yöntemi önermiştir. Tan vd. [48], PI denetleyici kazançlarının optimum ayarlanmasını sağlayan iki derece serbestliğe sahip Dahili Model Kontrol yöntemini önermişlerdir. Khodabakhshian vd. [49] ardışık kuadratik programlama kullanarak gürbüz PI tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Toulabi vd. [45],

Kharitonov Teoremini [50, 51] kullanarak çok bölgeli bir YFK sistemi için, sistemin kararlılığını garanti edecek sistemin parametrelerine ait maksimum belirsizlik sınırı hesaplayacak grafiksel bir yöntem sunmuşlardır. Benzer bir çalışma da ise Saxena ve Hote [52], çok bölgeli bir YFK sistemi için Kharitonov Teoremini kullanarak, sistem parametrelerindeki belirsizliklere rağmen sistemin gürbüz çalışmasını garantileyecek PI denetleyici uzayında tanımlanan denetleyici kazanç setini belirlemişlerdir. Ancak, yukarıda belirtilen çalışmaların hiçbirinde, günümüz akıllı şebekelerin önemli frekans düzenleme araçlarından olan EA grupları, DTC kontrol uygulamaları ve haberleşme açısından kaynaklanan haberleşme zaman gecikmeleri gürbüz PI tasarımında dikkate alınmamıştır. Son zamanlarda yapılan bazı yeni çalışmalarda bu hususlardan bir veya ikisini dikkate alarak YFK sistemleri için gürbüz PI tasarım yöntemleri sunulmuştur. Örneğin, Zhu vd. [53], klasik H_∞ yöntemini kullanarak, DTC kontrol çevrimi ve haberleşme zaman gecikmesi içeren üç bölgeli bir YFK sistemi için gürbüz denetleyici tasarlamışlardır. Krishnan vd. [54] ise sadece haberleşme zaman gecikmesini dikkate alarak Lyapunov-Krasovskii fonksiyon yaklaşımını kullanarak iki bölgeli bir YFK sistemi için gürbüz kararlılık analizleri yapmışlardır. Jia vd. [34] ise EA grupları ve haberleşme zaman gecikmesini dikkate alarak, bir bölgeli YFK sistem için EA grupları ve santraller arasında koordineli bir kontrol yöntemi önermişlerdir.

Yukarıda detaylıca verilen mevcut çalışmalar incelendiğinde, bir ve iki bölgeli EA-DTC-YFK sistemleri için haberleşme zaman gecikmeleri ve sistem parametrelerindeki belirsizlikleri dikkate alacak kapsamlı bir gürbüz PI tasarım çalışması mevcut değildir. Bu amaçla, kompleks Kharitonov Teoremi [50,51] ve Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi [55, 56] birlikte kullanılarak, sistem parametre ve haberleşme zaman gecikmesinde belirsizlikler olması durumu için PI denetleyici parametre uzayında gürbüz kararlılık bölgeleri elde edilebilmektedir. Kharitonov Teoremi, literatürde aralık (interval) polinomlar olarak bilinen kompleks veya reel katsayıları belirli bir aralıkta değişen polinomların kararlılığını analiz eden grafiksel bir yöntemdir. Bu teoreme göre, katsayıları belirli bir aralıkta değişen bir aralık polinomdan, verilen katsayı aralıklarının minimum ve maksimum değerlerinden faydalanılarak, sekiz (8) adet vertex polinomlar elde edilir. Belirsiz olan polinom katsayıları, zamanla değişen zaman gecikmesi ve ayarlanabilir PI kazanç değerleri bu sekiz vertex polinomun katsayılarını oluşturduğundan teoremin amacı sekiz Kharitonov polinomunu aynı anda kararlı kılacak tüm PI kazanç değerlerini hesaplamaktır. Bu amaca ulaşmak için Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi kullanılmaktadır. Her bir Kharitonov polinomunu kararlı kılacak kararlılık bölgesi hesaplanmakta ve bu sekiz bölgenin kesişimi olan bölge aralık

polinomun kararlılık bölgesini temsil etmektedir. Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi, Tan vd. [55] ve Söylemez vd. [56] tarafından önerilen kararlılık sınır eğrisine dayalı bir grafiksel yöntemdir ve sistemin belirlenen herhangi bir zaman gecikmesi değeri için PI denetleyici parametre değerlerini düzleminde hesaplamaktadır. Bu hesaplama işlemi, sistemin karakteristik denkleminin reel ve sanal kısımları sıfıra eşitlenerek kolaylıkla gerçekleştirilebilir. Önerilen yöntem kullanılarak, zaman gecikmeli EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içermeyen klasik YFK sisteminde seçilen herhangi bir zaman gecikmesi değeri için PI denetleyici parametreleri düzleminde bir kararlılık bölgesi [22, 36], büyük rüzgar türbin sistemlerinde [57], zaman gecikmeli mikro şebeke sistemlerde PI denetleyici tasarımında [35] ve zaman gecikmeli veya zaman gecikmesi içermeyen sistemler için denetleyici tasarımı ve sentezinde etkili olarak uygulanmıştır [58]. Kharitonov Teoremi ve Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi kullanılarak zaman gecikmeli 2. Derecen sistemler için gürbüz kararlılık bölgesinin hesaplandığı bir çalışma ise Wang [59] tarafından yapılmıştır.

2.5. Bu Tez Kapsamında Yapılan Çalışmalar ve Tezin Özgün Yanları

Klasik YFK sistemlerinde farklı nedenlerden dolayı meydana gelen haberleşme zaman gecikmeleri, literatürde yapılan çalışmalarda önemli bir sorun olarak rapor edilmiştir [11-16]. Klasik YFK sistemine DTC kontrol çevriminin ve EA batarya gruplarının dahil edilmesi, sistemin frekans kararlılığı bakımından zaman gecikmesi probleminin yeni YFK sisteminde de analiz edilmesini gerekli kılmaktadır. Şekil 3.1 incelendiğinde, enterkonnekte şebekede DTC programı kapsamında kontrol edilebilir yükler ve EA grupları eklenmeden önce klasik YFK sisteminde sadece kontrol merkezi ile güç üretim birimleri arasında yapılan haberleşme söz konusuydu. Ancak, kontrol edilebilir yüklerin ve EA gruplarının frekans düzenleme servisine katılımı ile birlikte kontrol merkezinin, yük toplayıcısı ve EA toplayıcısı ile yapacağı veri transferlerinden dolayı meydana gelen haberleşme zaman gecikmelerinin önemli olduğu görülmüştür. Bu amaçla, yeni YFK sisteminde DTC yük toplayıcısı ve EA toplayıcısı tarafında yaşanan haberleşme zaman gecikmelerinin sisteme olan olumsuz etkilerinin incelenmesi ve sistemin kapsamlı olarak kararlılık analizinin yapılması gerekmektedir. Bu yüzden, bu tez kapsamında yapılan ve aşağıda belirtilen maddeler bu çalışmanın özgün yanlarını ortaya koymaktadır:

1) İki bölgeyi klasik YFK sistemine EA grupları ve DTC kontrol çevriminin her ikisinin birlikte entegrasyonu yapılarak, EA grupları ve kontrol edilebilen yüklerin sistemin frekans

regülasyonuna katkısının araştırılmış olması: DTC kontrol çevriminin ve EA batarya gruplarının YFK sistemine eklenmesi ve iki bölgeli EA-DTC-YFK sistemin bir bütün olarak kararlılık analizi ile ilgili literatürde bugüne kadar yapılmış herhangi bir çalışma bulunmamaktadır.

2) İki bölgeli YFK sistemine EA grupları ve DTC kontrol çevriminin her ikisinin birlikte eklenmesi durumları için sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikmesi değerlerinin benzetim yoluyla belirlenmesi ve PI denetleyici kazancının maksimum zaman gecikme değerlerine etkisinin araştırılmış olması: Elde edilen bu sonuçlar kullanılarak, haberleşme ağında meydana gelecek zaman gecikmelerinin belirlenen maksimum zaman gecikmesini (Kararlılık Gecikme Payı) aşmayacak şekilde PI denetleyici tasarımı yapılarak haberleşme ağının bu maksimum zaman gecikme değerleri dikkate alınarak seçilmesi mümkün olacaktır. Böylece sistemin kararlı olması sağlanacaktır.

3) Matlab/SIMULINK [60] ile gerçekleştirilen zaman düzlemindeki benzetim çalışmaları iki bölgeli EA-DTC-YFK sistemin kararlılığını temin eden maksimum gecikme değerlerinin belirlenmesi: Gecikmeye bağlı olarak EA-DTC-YFK sistemlerinin kararlılığını garanti edecek maksimum zaman gecikme değerlerinin benzetim çalışması ile etkin bir şekilde belirlenebileceği ilk kez gösterilmiştir.

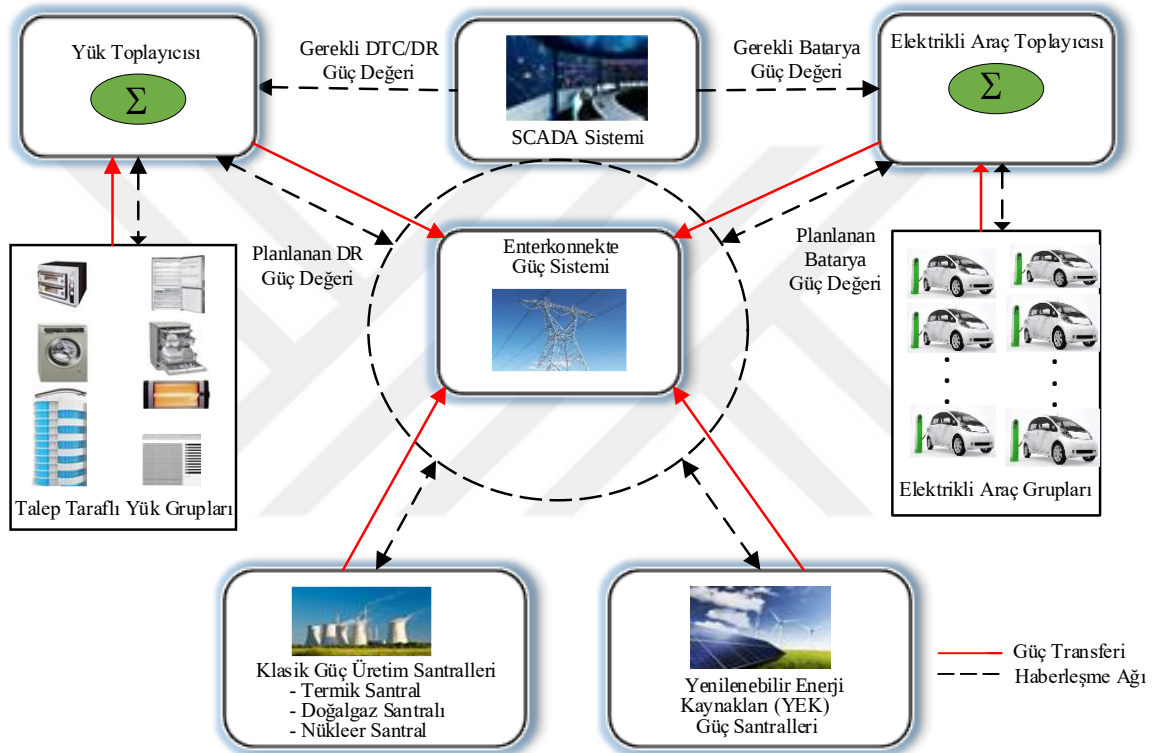
Geleceğin akıllı şebekelerin vazgeçilmez bir parçası olacağı öngörülen EA grupları ve kontrol edilebilen yüklerin (DTC) frekans kontrolüne katılması, klasik YFK sistem modellerinin haberleşme ağını dikkate alarak geliştirilmesi, haberleşme zaman gecikmelerinin sistemin kararlılığını nasıl etkileyeceği ve YFK, DTC ve EA katılım oranlarına bağlı olarak PI denetleyicinin parametrelerinin kararlılık gecikme payına etkisine odaklanan bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar, literatürde bu alandaki boşluğu dolduracak bir çalışma olacaktır. Ayrıca literatürde gerek akıllı şebekeler ve gerekse de mikro-şebekeler için bu alanlarda yapılacak yeni çalışmalara da öncülük edecektir.



3. İKİ BÖLGELİ YÜK FREKANS SİSTEM MODELİ VE KARARLILIĞI

3.1. EA Grupları ve DTC İçeren Güç Sistemi

EA toplayıcısı ve DTC kontrol çevrimi içeren akıllı şebeke sisteminin temsili Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Elektrik araç ve yük toplayıcıları içeren akıllı şebeke

Şekil 3.1’de klasik santraller, yenilenebilir enerji kaynakları, DTC kontrolünün uygulanacağı evsel yük grupları, EA grupları ve haberleşme ağını içeren elektrik güç sistemi gösterilmiştir. Şekil 3.1’de verilen klasik santraller, EA grupları ve DTC kontrolünün uygulanacağı yük grupları frekans kontrolüne dahil olan elemanlardır. Klasik santraller frekans kontrolüne, primer ve sekonder frekans kontrolü yardımı ile katkıda bulunmaktadır. Primer frekans kontrolünde, hız regülatörüne sahip tüm santraller, frekansta meydana gelen değişikliklere üretimlerini artırarak ve azaltarak otomatik olarak cevap verirler. Sekonder frekans kontrolüne dahil olan santraller ise sistem operatöründen gelen frekans regülasyon sinyaline göre üretimlerinde değişiklikler yaparak, frekansın nominal değere gelmesine katkıda bulunurlar. Benzer şekilde, kontrol merkezinden gücünü azalt ya da artır şeklinde

alınan kontrol sinyaline istinaden Elektrikli Araç Toplayıcısı EA gruplarının çıkış gücünü ve Yük Toplayıcısı ise DTC kontrolüne dahil olan yüklerin gücünü kontrol etmektedir. Enterkonnekte güç sisteminde ölçüm verileri ve kontrol komutlarının kontrol merkezi ile santraller, Elektrikli Araç Toplayıcısı ve Yük Toplayıcısı arasında karşılıklı iletilmesi gerekmekte ve sistemin performans ihtiyaçlarını karşılayan bir haberleşme alt yapısına ihtiyaç duyulmaktadır. Şekil 3.1’de kesikli çizgi ile gösterilen haberleşme alt yapısı çok sayıda kontrol çevrimlerine bağlantılı olduğundan ve karmaşık cihaz haberleşmelerinden dolayı, geniş alan ağları kullanılmaktadır. Geniş alan ağları, enterkonnekte sistemde farklı noktalarda çalışan daha küçük alan ağları arasında ve merkezi kontrol birimi arasında bağlantı sağlayan en önemli ağ sistemidir. Kontrol merkezi, şalt sahalardan, güç üretim birimlerinden ve kullanıcılardan oldukça uzak noktalarda olduğundan dolayı enterkonnekte şebekeden alınan gerçek zamanlı elektriksel ölçümlerin kontrol merkezine iletilmesi veya kontrol merkezinden alınan kontrol komutlarının elektriksel cihazların kontrolü için çeşitli ağ sistemlerine iletilmesi gerekmektedir. Böylece, iletilen bu bilgiler kullanılarak güç sistemlerinde geniş alanlı koruma, kontrol ve izleme görevlerinin yerine getirilmesi amaçlanmaktadır. Enterkonnekte sistemde durum tahmini, izleme, kontrol ve koruma işlemlerinin yapılabilmesi için, şalt sahalarında ve iletim sistemlerinde bulunan fazör ölçüm birimleri (Phasor Measurement Units, PMUs) kullanılarak gerçek zamanlı akım, gerilim fazör bilgileri ve güç verisinin geniş alanlı ağ sistemi yardımıyla kontrol merkezine iletilmesi gerekmektedir [61-63].

Elektrik güç sisteminde, verilerin bir noktadan başka bir noktaya iletilmesi için güç hattı haberleşmesi, kablolu ve kablosuz ağlar yaygın olarak kullanılmaktadır [64]. Kablolu ağlar, elektrik güç hatlarından ayrı olarak oluşturulan ve ölçüm kontrol ve sinyallerinin iletilmesi için tahsis edilmiş haberleşme ağlarıdır. Bu özel tahsis edilmiş ağlar güç hattından ayrı olduğundan dolayı kurulumu için fazladan yatırım maliyeti gerektirmektedir. Ancak, daha yüksek haberleşme kapasitesi ve daha kısa haberleşme gecikmelerinin yaşanmasını sağlamaktadır. Bir diğer haberleşme ağı olarak kullanılan kablosuz ağlar, sistemde bulunan cihazlar arasındaki haberleşmenin kablosuz olarak gerçekleştiği ve herhangi bir kablo kurulum maliyeti gerektirmeyen ağlardır. Ancak, çok uzak mesafelerde kullanılamaması ve veri gönderim hızının düşük olması önemli dezavantajıdır [61]. Haberleşme alt yapısı sistemin kararlılığının sürdürülmesi için elektrik şebekesindeki haberleşme cihazları arasında önemli mesajların iletilmesinde ve alınmasında güven vermelidir. Örneğin, kontrol komutlarına yanıt verilmede aşırı gecikme yaşanması, haberleşme katmanlarında meydana

gelen fiziksel bir arıza, haberleşme ağında meydana gelen gürültü, dışarıdan gelebilecek siber saldırı veya fiziksel müdahale gibi durumlar iletilmek istenilen mesajların zamanında ve başarılı bir şekilde iletilmemesine ve sistemin güvenilirliğinin olumsuz etkilenmesine neden olabilir [61, 62]. Elektrik güç sistemlerinde çeşitli elektriksel verilerin ölçülmesi ve kullanılan haberleşme alt yapısı ile verilerin merkezi denetleyici birime gönderilmesi ve merkezi kontrol biriminden frekans kontrolüne katılan santraller, EA ve DTC toplayıcılarına kontrol sinyali gönderilmesi sırasında ihmal edilemeyecek büyüklükte haberleşme zaman gecikmeleri gözlemlenmektedir. Bu zaman gecikmelerinin büyüklüğü, kullanılan haberleşme ağının yapısına, aktarılabilecek bilgi ya da kontrol sinyalinin paket büyüklüğü, kullanılan haberleşme protokolüne ve haberleşme ağının yüküne bağlı olarak değişmektedir [64].

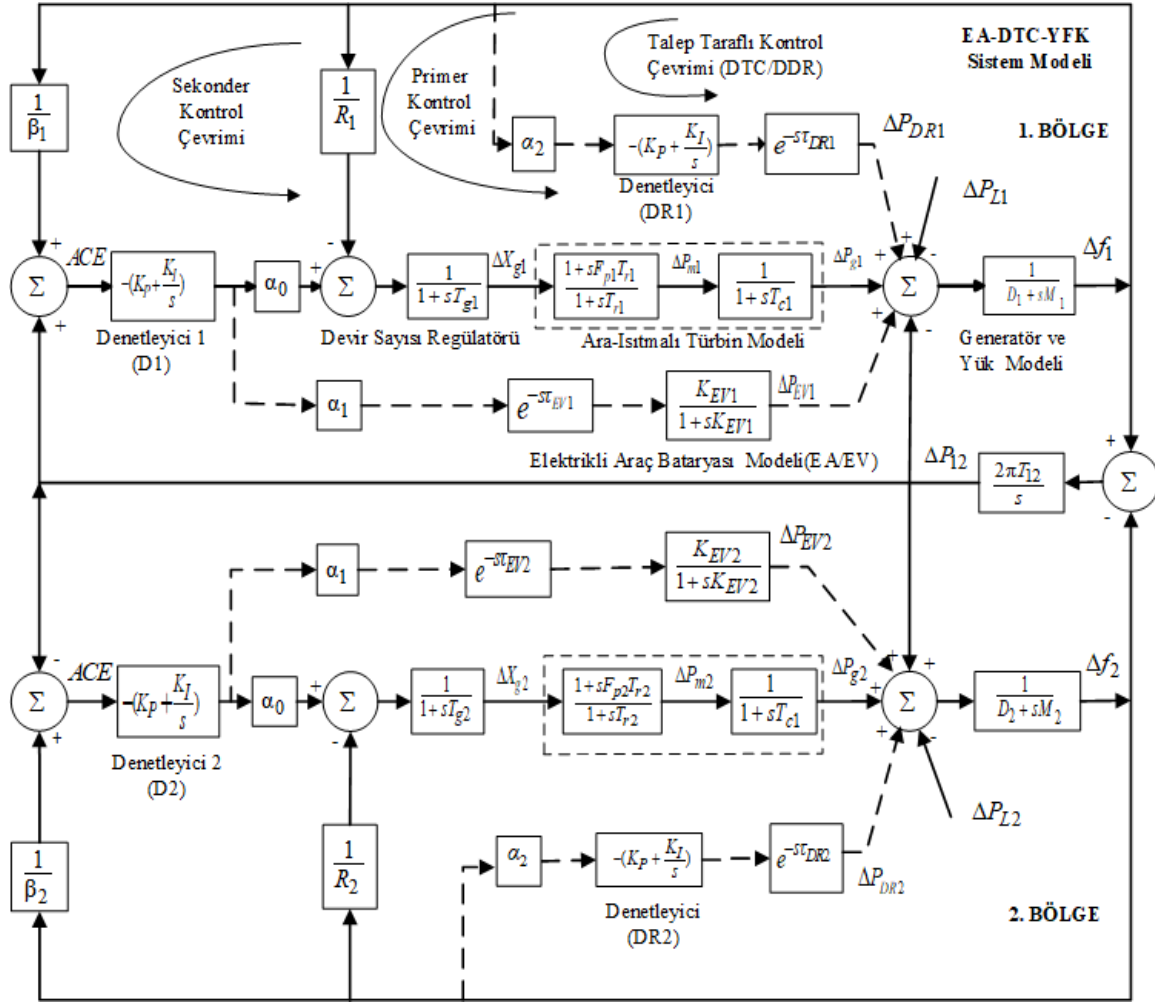
Frekans düzenleme servisine katılan DTC kontrol biriminin ve EV gruplarının frekans düzenleme servisine katılımları için merkezi denetleyici ile karşılıklı olarak veri transferi yapmaları gerekmektedir. Bu veri alışverişleri sırasında yaşanan zaman gecikmeleri sistemin dinamiğini ve kararlılığını etkileyebilir ve sistemin kararsız olmasına neden olabilir. Literatürde yapılan çalışmalarda, elektriksel verilerin ölçülmesi ve merkezi denetleyiciden DTC kontrol birimine bilgi sinyallerinin iletilmesi sırasında meydana gelen zaman gecikmelerinin saniyeler mertebesinde olabileceği rapor edilmiştir [61, 63]. Ayrıca, elektrikli araç gruplarının YFK sisteminde çift yönlü olarak enerji transferi yapması durumunda merkezi denetleyiciden elektrikli araçlara iletilen kontrol sinyallerinin değerlendirilmesi ve batarya gruplarının YFK sistemine katılımı sırasında yaşanan zaman gecikmelerinin de dikkate alınması gerekmektedir. Bu amaçla, elektrikli araç modülü tarafındaki RAM boyutu, CPU hızı, haberleşme ağındaki sinyal yoğunluğu, şarj/deşarj işlemlerinde gerekli algoritmaların devreye girmesi ve verilerin yüklenmesi gibi durumlar, sistemdeki haberleşme gecikmesini etkileyen önemli faktörlerdir [34, 65, 66]. EA grupları ve DTC kapsamındaki kontrol edilebilen yüklerin hızlı tepki verebilme karakteristiğine sahip olmalarına rağmen, belirli bir aralıkta değişebilen bu haberleşme zaman gecikmeleri, elektrik güç sistemlerinde kararsızlıklara sebep olabilmektedir. Bu nedenle, elektrik güç sistemlerinin optimal çalışmasını sağlamak, korumak, kararlılığını ve dinamik performansını arttırmak için, sistemde iletilen bilgi sinyallerinden dolayı meydana gelecek olan haberleşme zaman gecikmelerinin güç sistemlerinin modellenmesinde dikkate alınması ve bu gecikmelerin sistemin dinamiğine ve frekans kontrolüne olası olumsuz etkilerinin analiz edilmesi zorunluluktur. Özellikle, verilen sistem ve oransal-integral (PI) denetleyici

parametreleri için, sistemin kararlılığını kaybetmeden tolere edebileceği maksimum haberleşme zaman gecikmelerinin bilinmesi oldukça önemlidir.

Ayrıca, elektrik güç sistemleri, sistem parametrelerindeki değişiklikler, yük değişimi ve modellemeyen kaynaklanan birçok parametrik belirsizlikler içermektedir. Özellikle, elektrik enerji piyasasının yeniden yapılandırılması ile birlikte, elektrik üretim, iletim ve dağıtım faaliyetlerinin farklı firmalar tarafından yürütülmesi ve bu firmalar arasında planlama, kontrol ve sistemin genişletilmesi açısından koordinasyon eksikliği, bu belirsizleri daha da artırmıştır [46]. Belirsizliğin diğer bir sebebi de elektrik güç sisteminin çalışma koşullarının (üretim, tüketim veya kontrol) gün boyunca değişim göstermesidir. EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren güç sistemlerinde, ölçüm bilgisi ve kontrol sinyallerinin açık ve dağıtılmış haberleşme ağı üzerinden iletilmesi belirli bir aralıkta değişen haberleşme zaman gecikmelerine sebep olmaktadır. Diğer yandan, PI denetleyici kazanç değerleri ayarlanabilir parametreler olup, sistem parametreleri ve zaman gecikmesindeki belirsizlikleri dikkate alarak, güç sisteminin farklı çalışma koşulları ve yük değişim senaryoları için istenilen dinamik performans ve frekans kontrolünü sağlayabilecek şekilde tasarlanabilirler. Bu yüzden, sistem parametreleri ve zaman gecikmesindeki belirsizler göz önüne alınarak, güç sisteminin kararlılığını garanti edecek gürbüz PI denetleyici kazanç değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir.

EA toplayıcısı ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölgeli YFK sisteminin dinamik modeli Şekil 3.2’de görülmektedir. Burada α_0 , α_1 ve α_2 sırasıyla klasik üretim birimi, EA grupları ve DTC sisteminin katılım faktörleridir. Her bir bölgedeki denetleyici parametre değerleri ($K_P = K_{PD} = K_P$ ve $K_I = K_{ID} = K_I$), üretim birimlerinin frekans düzenleme servisine olan katkılarının eşit ($\alpha_{0,i} = \alpha_0, \alpha_{1,i} = \alpha_1, \alpha_{2,i} = \alpha_2$ ve $i = 1; 2$) YFK çevrimindeki toplam zaman gecikmesi değerlerini aynı ($\tau_{DR} = \tau_{EV} = \tau$) olduğu varsayılmıştır.

Çizelge 3.1’de iki bölgeli YFK sistem modeline ait parametreler ve katsayıları detaylı olarak sunulmuştur.



Şekil 3.2. EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölge YFK sisteminin modeli

Şekil 3.2’de, elektrikli araç gruplarını temsil eden batarya sisteminin ve talep taraflı kontrol sisteminin klasik iki bölge YFK sistemine olan bağlantısını gösteren blok diyagramı verilmiştir [7-9]. Literatürde yapılan birçok çalışmada sürekli çizgilerle oluşturulan klasik YFK sistemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.2’den görüldüğü üzere, sürekli çizgilerle oluşturulan klasik iki bölge YFK sistemine, kesikli çizgilerle oluşturulan elektrikli araç gruplarına ait batarya sistemi modeli ve talep taraflı kontrol çevrimi eklenerek klasik iki bölge YFK sistemi değiştirilmiştir. Burada, Δf , ΔP_m , ΔP_v , ΔP_{EV} , ΔP_{DR} , ΔP_L sırası ile her bir bölgenin frekansında, jeneratör mekanik giriş gücünde, valf konumunda, batarya tarafından talep edilen güçte, talep taraflı yönetim gücünde ve şebeke yükündeki değişimleri ifade etmektedir. Sistem parametreleri M , D , T_g , T_c , T_r , F_p , K_{EV} , T_{EV} , β , R ve T_{12} sırası ile her bir bölgenin jeneratör eylemsizlik momenti, jeneratör sönüm katsayısı, devir sayısı regülatörü zaman sabiti, ara ısıtmalı türbin zaman sabitleri, toplam türbin gücünün oranı,

batarya sisteminin kazanç katsayısı, batarya sisteminin zaman sabiti, frekans yönelim faktörü, hız regülasyon katsayısı ve iki bölge arasındaki senkronizasyon güç katsayısını ifade etmektedir. Ayrıca, EA-DTC-YFK sisteminde hem sekonder kontrol tarafında hem de DTC kontrol tarafında PI denetleyici kullanılmaktadır.

Şekil 3.2 incelendiğinde, klasik güç üretim biriminin, batarya sisteminin ve DTC kontrol çevriminin YFK sisteminde frekans düzenleme servisine katılım oranlarını belirlemek için α_0 , α_1 ve α_2 ile gösterilen paylaşım faktörü katsayıları kullanılmaktadır [6-8]. EA-DTC-YFK sisteminde, α_0 , α_1 ve α_2 katsayılarının toplamı bire eşit olarak alınmakta ve istenilen üretim biriminin frekans düzenleme servisine olan etkisinin artırılması veya azaltılması şartlarına göre katılım oranları değiştirilmektedir. YFK sistemlerinde, primer frekans kontrol çevrimi şebeke yükünde meydana gelen değişimler sonucu şebeke frekansının ayarlanabilmesi için ilk kontrol işleminin gerçekleştirildiği birimdir. Ancak, primer kontrol çevriminde sürekli durumda frekans yanıtında meydana gelen kalıcı hatalardan dolayı sekonder frekans kontrol çevrimine ihtiyaç duyulmaktadır. Dikkat edilecek olunursa, sekonder frekans kontrol çevriminde sistemin değişen yük şartlarında hızlı ve etkili bir kontrol işleminin gerçekleştirilmesi için klasik üretim birimlerine yardımcı olarak elektrikli araç gruplarına ait bataryalar sisteme eklenmiştir. Sekonder frekans kontrolünde frekans düzenleme servisine klasik üretim birimleri ve elektrikli araç gruplarının katılım oranları α_0 ve α_1 katsayıları ile gösterilmiştir. Şebeke yükünde meydana gelen bir değişim sonucu EA gruplarının frekans düzenleme servisine katılımlarını sağlamak için her bir elektrikli araç grubuna çeşitli haberleşme ağları yardımıyla komutlar gönderilmektedir. Kontrol merkezinden gönderilen komutlar alınınca gerekli olan güç transferi elektrikli araçların katılımlarına göre paylaşılır. EA toplayıcısı tarafından elektrikli araç grubundaki her bir elektrikli araca gönderilen güç paylaşım bilgisine elektrikli araçlar yanıt verir. Bu veri transferleri ve karşılıklı haberleşmeden kaynaklanan zaman gecikmeleri, YFK sisteminin kararlılığını olumsuz olarak etkileyebilir ve sistemin kararsız olmasına neden olabilir. Şekil 3.2 incelendiğinde, her iki kontrol bölgesinde elektrikli araç gruplarına iletilen veriler ve bu verilere yapılan yanıtların toplamda τ_{EV} kadar bir zaman gecikmesi ile gösterildiği ve her iki bölge için de eşit alındığı görülmektedir.

Frekans düzenleme servisinde sekonder frekans kontrol çevrimine yardımcı olarak sistem frekansında meydana gelen sürekli durum hatalarını sıfır yapmak için talep taraflı kontrol çevriminin de önemli olduğu görülmüştür [7]. Sistemde bulunan kontrol edilebilir yüklerin sistemin değişen yük koşullarına göre devreye alınıp çıkarılması ve bu sayede sistemin kararlılığının hızlı bir şekilde artırılması talep taraflı kontrolün frekans düzenleme servisinde önemli olduğunu göstermiştir. Bu yüzden, sekonder frekans kontrolünün α_0 ve α_1 katsayılarının toplamı kadar, talep taraflı kontrol çevriminin ise α_2 paylaşım faktörü oranında frekans düzenleme servisi üzerinde etkinliği bulunmaktadır. DTC kontrolde, kontrol merkezinden haberleşme ağları yardımıyla verilerin iletilmesi ve kontrol edilebilir yüklerin frekans düzenleme servisine katılımları sırasında sistemde zaman gecikmeleri yaşanmaktadır. DTC kontrol çevriminde yapılan ölçümler ve veri transferleri sırasında yaşanan toplam zaman gecikmesi değerinin τ_{DR} kadar olduğu düşünülmüş ve her iki bölge için de eşit alınmıştır. Şekil 3.2'den görüldüğü üzere, hem EA gruplarında hem de DTC kontrol çevriminde yaşanan zaman gecikmeleri üstel terimler ile ifade edilmiştir.

3.2. Durum Denklemleri

Şekil 3.2'de gösterilen EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölgeyi YFK sistemi modeline ait EK-1'de elde edilen durum denklemleri (Bkz. EK-1), zaman gecikmeleri eşit ($\tau_{DR1} = \tau_{DR2} = \tau_{EV1} = \tau_{EV2} = \tau$) alınmak suretiyle A_0, A_τ, B ve C birer matris olmak üzere aşağıdaki şekilde gösterilebilir:

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_\tau x(t - \tau) + Bu(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (3.2)$$

Eş. 3.1 ve Eş. 3.2'de yer alan $x(t)$, $\dot{x}(t)$, $u(t)$, $y(t)$ ile A_0, A_τ, B ve C katsayı matrisleri aşağıda ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Şekil 3.2'deki iki bölgeyi EA-DTC-YFK sistem modelinde her bir bölgedeki yük değişimleri sistemin giriş parametreleri, frekans değişimleri ise sistemin çıkış parametreleri olması dolayısıyla $u(t)$ ve $y(t)$ aşağıda gösterildiği gibi elde edilir.

$$u(t) = \begin{bmatrix} \Delta P_{L1} \\ \Delta P_{L2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Şekil 3.2’de yer alan iki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinde 1. bölgeye ait durum değişkenleri $x^{(1)}(t)$, 2. bölgeye ait durum değişkenleri $x^{(2)}(t)$, 1. ve 2. bölge arasındaki durum değişkeni ise $x^{(3)}(t)$ olmak üzere durum değişkenleri gruplandırılırsa Eş. 3.1 ve Eş. 3.2’deki $x(t)$ durum değişkenleri matrisi Eş. 3.5’teki gibi ifade edilmesi mümkündür

$$x(t) = \begin{bmatrix} X^{(1)}(t) \\ X^{(2)}(t) \\ X^{(3)}(t) \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$x^{(1)}(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \\ x_5(t) \\ x_6(t) \\ x_7(t) \end{bmatrix} \quad x^{(2)}(t) = \begin{bmatrix} x_8(t) \\ x_9(t) \\ x_{10}(t) \\ x_{11}(t) \\ x_{12}(t) \\ x_{13}(t) \\ x_{14}(t) \end{bmatrix} \quad x^{(3)}(t) = [x_{15}(t)] \quad (3.6)$$

Eş. 3.1’deki A_0 katsayı matrisi iki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinin zaman gecikmesi olmayan durum değişkenlerinin katsayılarından oluşmaktadır. A_0 katsayı matrisi ve elde edilen katsayılar aşağıda sunulmuştur (Bkz. Eş. 3.7-Eş. 3.16). A_0 katsayı matrisi 15x15 boyutludur. Ayrıca burada A_{11} , A_{12} , A_{21} , A_{22} her biri 7x7 boyutunda, A_{13} , A_{23} 7x1 boyutunda ve A_{31} , A_{32} 1x7 boyutunda, A_{33} ise 1x1 boyutundaki matrislerdir.

$$A_0 x(t) = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{(1)}(t) \\ X^{(2)}(t) \\ X^{(3)}(t) \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{D_1}{M_1} & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{c1}} & \frac{1}{T_{c1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{F_{p1}T_{r1}}{R_1T_{g1}} & 0 & -1 & \frac{(T_{g1}-F_{p1}T_{r1})}{T_{g1}} & 0 & \frac{F_{p1}T_{r1}\alpha_0}{T_{g1}} & 0 \\ -\frac{1}{R_1T_{g1}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{g1}} & 0 & \frac{\alpha_0}{T_{g1}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{K_{EV1}} & 0 & 0 \\ \frac{(D_1K_P\beta_1-M_1K_P2\pi T_{12}-M_1K_I\beta_1)}{M_1} & -\frac{K_P\beta_1}{M_1} & 0 & 0 & -\frac{K_P\beta_1}{M_1} & 0 & 0 \\ \frac{(D_1K_P\alpha_2-M_1K_P\alpha_2)}{M_1} & -\frac{K_P\alpha_2}{M_1} & 0 & 0 & -\frac{K_P\alpha_2}{M_1} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_P2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$A_{13} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{(K_P\beta_1-M_1K_I)}{M_1} \\ \frac{K_P\alpha_2}{M_1} \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ K_P2\pi T_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} -\frac{D_2}{M_2} & \frac{1}{M_2} & 0 & 0 & \frac{1}{M_2} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{c2}} & \frac{1}{T_{c2}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{F_{p2}T_{r2}}{R_2T_{g2}} & 0 & -1 & \frac{(T_{g2}-F_{p2}T_{r2})}{T_{g2}} & 0 & \frac{F_{p2}T_{r2}\alpha_0}{T_{g2}} & 0 \\ -\frac{1}{R_2T_{g2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{g2}} & 0 & \frac{\alpha_0}{T_{g2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{K_{EV2}} & 0 & 0 \\ \frac{(D_2K_P\beta_2-M_2K_P2\pi T_{12}-M_2K_I\beta_2)}{M_2} & -\frac{K_P\beta_2}{M_2} & 0 & 0 & -\frac{K_P\beta_2}{M_2} & 0 & 0 \\ \frac{(D_2K_P\alpha_2-M_2K_I\alpha_2)}{M_2} & -\frac{K_P\alpha_2}{M_2} & 0 & 0 & -\frac{K_P\alpha_2}{M_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A_{23} = \begin{bmatrix} \frac{1}{M_2} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{(M_2K_I-K_P\beta_2)}{M_2} \\ -\frac{K_P\alpha_2}{M_2} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$A_{31} = [2\pi T_{12} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.14)$$

$$A_{32} = [-2\pi T_{12} \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.15)$$

$$A_{33} = [0] \quad (3.16)$$

Eş. 3.1'deki A_τ katsayı matrisi iki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinin zaman gecikmeli durum değişkenlerinin katsayılarından oluşmaktadır. A_τ katsayı matrisi ve elde edilen katsayılar aşağıda sunulmuştur (Bkz. Eş. 3.17-Eş. 3.23). A_τ katsayı matrisi 15x15 boyutuna sahiptir. Ayrıca $A_{\tau11}$, $A_{\tau12}$, $A_{\tau21}$, $A_{\tau22}$ her biri 7x7 boyutunda, $A_{\tau13}$, $A_{\tau23}$ 7x1 boyutunda ve $A_{\tau31}$, $A_{\tau32}$ 1x7 boyutunda, $A_{\tau33}$ ise 1x1 boyutundaki matrislerdir.

$$A_\tau x(t-\tau) = \begin{bmatrix} A_{\tau 11} & A_{\tau 12} & A_{\tau 13} \\ A_{\tau 21} & A_{\tau 22} & A_{\tau 23} \\ A_{\tau 31} & A_{\tau 32} & A_{\tau 33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X^{(1)}(t-\tau) \\ X^{(2)}(t-\tau) \\ X^{(3)}(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

$$x^{(1)}(t-\tau) = \begin{bmatrix} x_1(t-\tau) \\ x_2(t-\tau) \\ x_3(t-\tau) \\ x_4(t-\tau) \\ x_5(t-\tau) \\ x_6(t-\tau) \\ x_7(t-\tau) \end{bmatrix} \quad x^{(2)}(t-\tau) = \begin{bmatrix} x_8(t-\tau) \\ x_9(t-\tau) \\ x_{10}(t-\tau) \\ x_{11}(t-\tau) \\ x_{12}(t-\tau) \\ x_{13}(t-\tau) \\ x_{14}(t-\tau) \end{bmatrix} \quad x^{(3)}(t-\tau) = [x_{15}(t-\tau)] \quad (3.18)$$

$$A_{\tau 11} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_P \beta_1}{M_1} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_P \alpha_2}{M_1} \end{bmatrix} \quad A_{\tau 12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{\tau 13} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$A_{\tau 21} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad A_{\tau 22} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_P \beta_2}{M_2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_P \alpha_2}{M_2} \end{bmatrix} \quad A_{\tau 23} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

$$A_{\tau 31} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.21)$$

$$A_{\tau 32} = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (3.22)$$

$$A_{r33} = [0] \quad (3.23)$$

Eş. 3.1'deki B katsayı matrisi iki bölgeli EA-DTC-YFK sistem modelinin giriş parametrelerinin katsayılarından oluşmaktadır. B katsayı matrisi ile katsayılarını oluşturan B_{11}, B_{21}, B_{31} matrisleri Eş. 3.24 ve Eş. 3.25'te verilmiştir. B katsayı matrisi 1x15 boyutunda, B_{11}, B_{21} her biri 7x2 boyutunda, B_{31} ise 1x2 boyutundaki matrislerdir.

$$Bu(t) = \begin{bmatrix} B_{11} \\ B_{21} \\ B_{31} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta PL_1 \\ \Delta PL_2 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

$$B_{11} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{M_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{K_p \beta_1}{M_1} & 0 \\ \frac{K_p \alpha_2}{M_1} & 0 \end{bmatrix} \quad B_{21} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{M_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_p \beta_2}{M_2} \\ 0 & \frac{K_p \alpha_2}{M_2} \end{bmatrix} \quad B_{31} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Eş. 3.2'deki C katsayı matrisi iki bölgeli EA-DTC-YFK sistem modelinin çıkış parametrelerinin katsayılarından meydana gelmektedir. 2x15 boyutuna sahip olan C katsayı matrisi Eş. 3.26'da verilmiştir.

$$y(t) = \begin{bmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta f_2 \end{bmatrix} = Cx = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^{(1)}(t) \\ x^{(2)}(t) \\ x^{(3)}(t) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

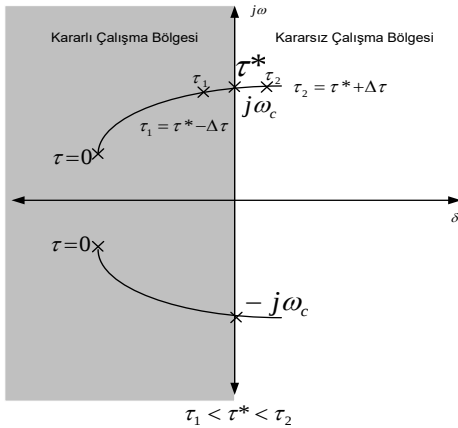
3.3. Zaman Gecikmesine Bağlı Kararlılık

Zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinin temel hedefi, YFK sistemi ve kullanılan PI denetleyicilerin verilen parametre değerleri için sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerlerini analitik olarak hesaplamaktır. Denetleyici tasarımının temel

amacı ise verilen YFK sistem parametreleri ve zaman gecikme değerleri için sistemin kararlılığını garantileyecek PI denetleyici kazanç setini belirlemektir. İki bölge EA-DTC-YFK sistemlerine ait karakteristik denklemler aşağıda verilen biçimde üstel terimler içeren karakteristik denklemlerdir.

$$\Delta(s, \tau) = \sum_{k=0}^p a_k(s) e^{-k\tau s} = a_0(s) + a_1(s) e^{-\tau s} + a_2(s) e^{-2\tau s} + \dots + a_p(s) e^{-p\tau s} = 0 \quad (3.27)$$

Burada $a_k(s), k = 0, 1, \dots, n$ $a_k(s)$ katsayıları sistem parametrelerine bağlı polinomlardır. Eş. 3.27’de verilen karakteristik denklem p adet orantılı zaman gecikmeli üstel terimler içermektedir. Orantılı zaman gecikmesinin derecesi “ p ” ile ifade edilmektedir. Zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi yapabilmek için Eş. 3.27’de verilen karakteristik denklemin köklerinin zaman gecikmesine bağlı olarak nasıl değiştiğinin analiz edilmesi gerekmektedir. Ancak, karakteristik denklemde zaman gecikmesinden dolayı üstel terimler ($e^{-k\tau s}$) bulunmakta ve bu durum, köklerin belirlenmesini oldukça karmaşık hale getirmektedir. Üstel terimin mevcudiyeti, karakteristik denklemin sonsuz adet köke sahip olmasına neden olmaktadır. Sonsuz adet kökün değeri ve bunların zaman gecikmesi (τ)’nun değişimine göre nasıl değişebileceğinin analiz edilmesi oldukça zor bir problemdir. Ancak, kararlılık analizi yapabilmek için bütün köklerin belirlenmesi zorunlu değildir. Köklerden hangilerinin zaman gecikmesine göre nasıl değişeceğinin belirlenmesi kararlılık analizleri açısından yeterli olmaktadır. EA-DTC-YFK sisteminin kararlı olabilmesi için, karakteristik denklemin tüm kökleri kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde bulunmalıdır.



Şekil 3.3. Karakteristik denklemin köklerinin zaman gecikmesine göre değişimi

Zaman gecikmeli sistemlerde, sistemin kararlı çalışabileceği parametre değerlerinde gecikme şartlarının belirlenmesi ve sistemin kararlı çalışabileceği maksimum gecikme zamanının hesaplanması kararlılık çalışmalarındaki önemli amaçlardır. Toplam zaman gecikmesi τ 'nın değişimi ile köklerden bazılarının konumunun değişeceği muhakkaktır. Köklerin, zaman gecikmesine bağlı olarak nasıl değişebileceği ve kararlı sistemin zaman gecikmesi τ 'nın artmasına göre nasıl kararsız olabileceği Şekil 3.3'te grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 3.3'ten görüldüğü üzere sistemde herhangi bir zaman gecikmesi olmadığında ($\tau = 0$), kökler kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde bulunmakta ve dolayısı ile YFK sistemi kararlı olmaktadır. Zaman gecikmesi τ artırıldığında, bir çift kompleks kök, sol yarı bölge içerisinden sağ yarı bölgeye doğru hareket etmeye başlayabilir. Kökler, sonlu bir zaman gecikme değerinde ($\tau = \tau^*$) sanal eksen $s = \mp j\omega_c$ noktalarında keserek, kompleks düzlemin sağ yarı bölgesine geçebilir. Köklerin, sanal eksen kestiği zaman gecikmesi değerinde sistem sınırda kararlıdır. Dolayısı ile kararlılık analizi açısından sistemin köklerinin hangi zaman gecikme değerinde sanal eksen üzerinde olacağını belirlenmesi yeterli olmaktadır. Bu zaman gecikme değeri, sistemin kararlılığını kaybetmeden dayanabileceği maksimum zaman gecikmesi (Kararlılık Gecikme Payı) olarak tanımlanmakta ve sistemin zaman gecikmesi açısından kararlılık sınırını temsil etmektedir. EA-DTC-YFK sisteminin çalışma koşulları ve parametrelerine bağlı olarak Eş. 3.27'de verilen karakteristik denklem için iki farklı kararlılık durumu ortaya çıkabilir:

- i) Zaman Gecikmesinden Bağımsız Kararlılık: Eğer Eş. 3.27'de verilen karakteristik denklemin kökleri zaman gecikmesi τ 'nın artması ile kararlı sol yarı bölgeden kararsız sağ yarı bölgeye geçmiyor ise EA-DTC-YFK sistemi zaman gecikmesinin tüm sonlu değerleri için zaman gecikmesinden bağımsız her zaman kararlı olmaktadır.
- ii) Zaman Gecikmesine Bağlı Kararlılık: Eğer Eş. 3.27'de verilen karakteristik denklemin kökleri zaman gecikmesi τ 'nın artması ile kararlı sol yarı bölgeden kararsız sağ yarı bölgeye geçiyor ve sonlu bir zaman gecikmesi değerinde $\tau = \tau^*$ karakteristik denklemin sanal eksen üzerinde en az bir çift kompleks eşlenik ($s = \mp j\omega_c$) kökü mevcut ise EA-DTC-YFK sisteminin kararlılığı, zaman gecikmesine bağlı olarak değişmekte ve EA-DTC-YFK sistemi maksimum zaman gecikmesi değerinde $\tau = \tau^*$ sınırda kararlı olmaktadır. Eğer, $\tau > \tau^*$ olursa sistem kararsız hale gelmektedir (Bkz. Şekil 3.3).

Zaman gecikmeli dinamik sistemlerde, maksimum zaman gecikmesini hesaplamak için literatürde kullanılan birçok yöntem mevcuttur. Frekans düzlemi yöntemlerinden olan Üstel

Terimin Yok Edilmesi [15, 21, 30] ve Rekasius Yerine Koyma Yöntemi [14, 26-28, 37], EA-DTC-YFK sisteminin sınırda kararlı olacağı maksimum zaman gecikmesi değerlerini hesaplamak için elverişlidirler. Bu yöntemlerin kullanılmasının temel nedeni EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içermeyen bir ve iki bölgeli YFK sistemleri [14, 15], mikro-şebeke sistemleri [35] ve jeneratör uyarma kontrol sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizlerinde [30, 31] etkin bir şekilde kullanılmış ve benzetim çalışmaları ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırıldığında, oldukça doğru sonuçlar vermişlerdir.

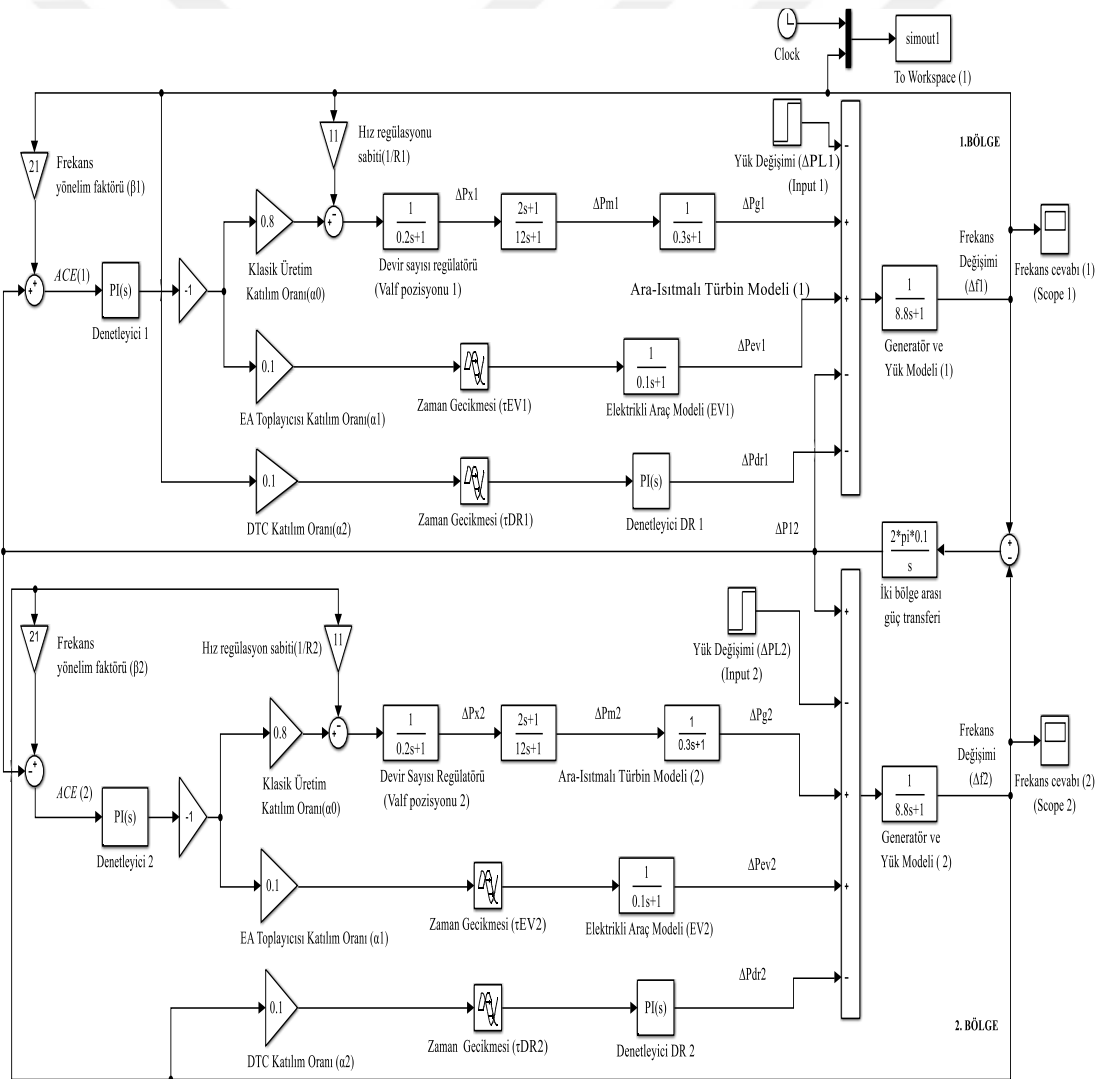
Çizelge 3.1. EA-DTC-YFK sisteminin parametreleri, değerleri ve durumları

Sistem Durum Değişkenleri ve Parametreleri ($i=1,2$ herhangi bir YFK bölgesini temsil etmek üzere)	Değeri
Yük sönüm katsayısı, D_i	1 p.u.MW/Hz
Jeneratör eylemsizlik katsayısı, M_i	8.8 p.u.MW s
Hız regülasyonu düşü sabiti, R_i	1/11 Hz/p.u.MW
Frekans yönelim faktörü, β_i	21 p.u.MW/Hz
Ara-ısıtmalı türbin katsayısı, $F_{p,i}$	1/6
Devir sayısı regülatörü zaman sabiti, $T_{g,i}$	0.2 s
Ara-ısıtma zaman sabiti, $T_{r,i}$	12 s
Türbin zaman sabiti, $T_{c,i}$	0.3 s
Oransal denetleyici kazancı, $K_{P,i}$	0.2-2.0
İntegral denetleyici kazancı, $K_{I,i}$	0.2-2.0
DTC çevriminin oransal denetleyici kazancı, $K_{PD,i}$	0.2-2.0
DTC çevriminin integral denetleyici kazancı, $K_{ID,i}$	0.2-2.0
EA bataryası kazancı, $K_{EV,i}$	1.0
EA bataryası zaman sabiti, $T_{EV,i}$	0.1 s
İki bölge arasındaki senkronizasyon katsayısı, T_{12}	0.1 p.u.
YFK Sisteminin Durumları	
Frekansın değişimi, Δf_i	-
Valf pozisyonunun değişimi, $\Delta X_{v,i}$	-
Mekanik güç çıkışının değişimi, $\Delta P_{m,i}$	-
Jeneratör güç çıkışının değişimi, $\Delta X_{g,i}$	-
İki bölge arasında transfer edilen aktif güç değişimi, ΔP_{12}	-
Yükteki değişimi, $\Delta P_{L,i}$	-
EA grubunun güç çıkışının değişimi, $\Delta P_{EV,i}$	-
Dinamik talep cevabı güç çıkışının değişimi, $\Delta P_{DR,i}$	-



4. BENZETİM YÖNTEMİ İLE MAKSİMUM ZAMAN GECİKME DEĞERLERİNİN BELİRLENMESİ

Bu bölümde; EA toplayıcısı ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölge YFK sisteminin benzetim ortamında zaman gecikme payları belirlenmiştir. Şekil 3.2'de verilen iki bölge EA-DTC-YFK sistem modeli Matlab/Simulink ortamında oluşturularak, farklı PI denetleyici kazanç değerleri ve üretim birimlerinin farklı katılım faktörleri için EA grupları tarafında ve DTC kontrol çevrimi tarafında zaman gecikme pay değerleri elde edilmiştir. İki bölge EA-DTC-YFK sisteminin Matlab/Simulink ortamında oluşturulan simülasyonu Şekil 4.1'de gösterilmektedir.



Şekil 4.1. İki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinin simülasyonu

İki bölge EA-DTC-YFK kontrol sisteminin parametreleri aşağıda verilmiştir [8].

$$\begin{aligned} M_i &= 8.8 \text{ s}, D_i = 1, F_{pi} = 1/6, R_i = 1/11 \text{ pu}, \beta_i = 21 \text{ pu / Hz}, \\ T_{gi} &= 0.2 \text{ s}, T_{ci} = 0.3 \text{ s}, T_{ri} = 12 \text{ s}, T_{12} = 0.1 \text{ pu} \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Burada ilk analiz, seçilen PI denetleyici kazanç değerleri için iki bölge EA-DTC-YFK sisteminin farklı katılım oranlarında maksimum zaman gecikme değerlerinin belirlenmesidir. İkinci analiz ise, PI denetleyici kazanç değerlerinin sistemin zaman gecikme değerleri üzerinde etkisinin incelenmesidir. Öncelikle, iki bölge EA-DTC-YFK kontrol sisteminin frekans düzenleme servisi için, klasik üretim birimi ($\alpha_0 = 0.8$), EA grupları ($\alpha_1 = 0.1$) ve DTC kontrol çevrimi ($\alpha_2 = 0.1$) katılım oranlarında katkısı göz önüne alınmıştır. Başka bir ifadeyle, frekans düzenleme servisine klasik üretim birimi %80, EA grupları %10 ve DTC kontrol çevrimi %10 oranında katkı sağlamaktadır. Belirlenen bu şartlar altında ve seçilen PI denetleyici kazanç değerleri için sistemin maksimum zaman gecikme değerleri benzetim çalışmaları yardımıyla elde edilmiş ve Çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için zaman gecikmesi payları

$\tau^*(s)$	K_I									
K_p	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	∞	1.764	0.732	0.273	0.020	*	*	*	*	*
0.4	∞	2.850	1.323	0.736	0.408	0,198	0,047	*	*	*
0.6	∞	4.049	1.783	1.118	0.739	0.490	0.312	0.178	0.075	*
0.8	∞	∞	2.110	1.404	1.003	0.735	0.536	0.386	0.268	0.173
1.0	∞	∞	2.322	1.601	1.198	0.920	0.718	0.560	0.433	0.330
1.2	∞	∞	2.439	1.722	1.329	1.061	0.857	0.698	0.569	0.462
1.4	∞	∞	2.470	1.780	1.410	1.155	0.958	0.802	0.675	0.568
1.6	∞	∞	2.432	1.791	1.448	1.210	1.025	0.877	0.754	0.650
1.8	∞	∞	2.430	1.760	1.452	1.234	1.064	0.926	0.810	0.710
2.0	∞	∞	2.175	1.702	1.430	1.233	1.080	0.953	0.845	0.752

Çizelge 4.1'de gösterilen “ ∞ ” sembolü, bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesinden ($\tau = \infty$) bağımsız kararlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.1'de gösterilen “*” sembolü, bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesi ($\tau = 0$) olmasa bile sistemin kararsız olduğunu göstermektedir.

EA gruplarının katılım faktörünün maksimum zaman gecikmesi değerleri üzerinde etkisini incelemek için, EA gruplarının katılımı ($\alpha_1 = 0.3$) %30 oranında artırılmış, klasik üretim biriminin katılımı ($\alpha_0 = 0.6$) %60 oranına indirilmiş ve DTC kontrol biriminin katılımı ($\alpha_2 = 0.1$) %10 oranında sabit tutulmuştur. Bu yeni durumlar için, seçilen PI denetleyici kazanç değerlerine karşılık gelen maksimum zaman gecikme değerleri Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için zaman gecikmesi payları

$\tau^*(s)$	K_I									
K_P	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	2.381	0.938	0.510	0.305	0.186	0.109	0.056	0.018	*	*
0.4	2.379	1.279	0.811	0.557	0.399	0.292	0.216	0.159	0.115	0.081
0.6	2.080	1.386	0.985	0.733	0.563	0.442	0.352	0.283	0.229	0.185
0.8	1.770	1.348	1.046	0.830	0.671	0.551	0.458	0.384	0.324	0.275
1.0	1.506	1.245	1.032	0.862	0.726	0.618	0.530	0.457	0.397	0.346
1.2	1.289	1.122	0.975	0.848	0.740	0.648	0.571	0.505	0.448	0.399
1.4	1.116	1.006	0.903	0.809	0.726	0.652	0.587	0.529	0.478	0.434
1.6	0.977	0.901	0.828	0.760	0.696	0.638	0.585	0.536	0.492	0.453
1.8	0.864	0.810	0.757	0.707	0.658	0.612	0.670	0.530	0.494	0.458
2.0	0.772	0.733	0.694	0.655	0.618	0.582	0.548	0.516	0.485	0.457

Çizelge 4.2'de gösterilen “*” sembolü, bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesi ($\tau = 0$) olmasa bile sistemin kararsız olduğunu göstermektedir. EA gruplarının katılımının zaman gecikme pay değeri üzerinde etkisini tam olarak incelemek için, Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ile karşılaştırıldığında tüm PI denetleyici kazanç değerlerinde sistemin zaman gecikme değerlerinin azaldığı görülmektedir. Başka bir ifade ile, EA gruplarının

katılım oranı arttıkça sistemin kararlılık sınırının daraldığı görülmektedir.

Başka bir analiz, DTC kontrol çevriminin zaman gecikme pay değerleri üzerinde etkisini incelemektir. Dolayısıyla, DTC kontrol çevrimi katılımı ($\alpha_2 = 0.3$) %30 oranında arttırılmış, klasik üretim biriminin katılımı ($\alpha_0 = 0.6$) %60 oranına indirilmiş ve EA grupları katılımı ($\alpha_1 = 0.1$) %10 oranında sabit tutulmuştur. Bu senaryo durumunda, seçilen PI denetleyici kazanç değerlerine karşılık gelen zaman gecikme pay değerleri Çizelge 4.3'te sunulmuştur.

Çizelge 4.3. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için zaman gecikmesi payları

$\tau^*(s)$	K_I									
K_p	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
0.2	∞	1.988	0.949	0.492	0.244	0.090	*	*	*	*
0.4	∞	2.835	1.431	0.872	0.560	0.360	0.220	0.120	0.043	*
0.6	∞	3.489	1.786	1.183	0.832	0.600	0.435	0.312	0.218	0.143
0.8	∞	3.954	2.008	1.410	1.048	0.800	0.620	0.483	0.375	0.289
1.0	∞	4.218	2.116	1.558	1.206	0.957	0.701	0.627	0.511	0.418
1.2	∞	2.255	2.131	1.636	1.310	1.071	0.888	0.743	0.625	0.527
1.4	∞	2.910	2.093	1.664	1.368	1.146	0.972	0.831	0.715	0.617
1.6	∞	2.624	2.014	1.650	1.390	1.189	1.027	0.894	0.783	0.688
1.8	∞	2.373	1.913	1.610	1.384	1.205	1.058	0.935	0.831	0.740
2.0	∞	2.152	1.800	1.551	1.358	1.201	1.069	0.958	0.861	0.776

∞ : Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3'te K_I ve K_p 'nin bu değerlerinde zaman gecikmesinden ($\tau = \infty$) bağımsız olarak sistem kararlıdır. Yani zaman gecikmesi ne olursa olsun sistem kararlıdır.

*: Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'te K_I ve K_p 'nin bu değerlerinde zaman gecikmesi ($\tau = 0$) olmasa bile sistem kararsız olduğundan Kararlık gecikme payının belirlenmesine ihtiyaç yoktur.

Çizelge 4.1'e benzer olarak, Çizelge 4.3'teki " ∞ " sembolü bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesinden bağımsız ($\tau = \infty$) kararlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3'te gösterilen "*" sembolü, bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesi ($\tau = 0$) olmasa bile sistemin kararsız olduğunu göstermektedir. Çizelge 4.3, Çizelge 4.1 ile

karşılaştırıldığında, Çizelge 4.3'ten DTC kontrol çevriminin katılım oranının artması ile zaman gecikme pay değerlerinin arttığı açık olarak görülmektedir. Sonuç olarak, DTC kontrol birimi katılım oranı arttıkça sistemin kararlılık sınırının arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

PI denetleyici kazanç değerlerinin sistemin zaman gecikmesi pay değerleri üzerinde etkisi ayrıca Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'ten incelenebilir. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere, K_p oransal denetleyici kazancı herhangi bir değerinde sabit tutulduğunda, K_I integral denetleyici kazancı arttıkça sistemin zaman gecikme pay değerleri azalmakta ve sistemin kararlılık sınırı olumsuz olarak etkilenmektedir.

Diğer bir analiz; ilk analizde olduğu gibi frekans düzenleme servisine klasik üretim birimi %80, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi ikisi birlikte toplam olarak %20 oranında katkı sağlamaktadır. Belirlenen bu şartlar altında ve seçilen PI denetleyici kazanç değerleri ($K_p = 1.4$ ve $K_I = 0.6$) için sistemin maksimum zaman gecikme değerleri benzetim çalışmaları yardımıyla elde edilmiş ve Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$, $K_p = 1.4$, $K_I = 0.6$ için zaman gecikmesi payları

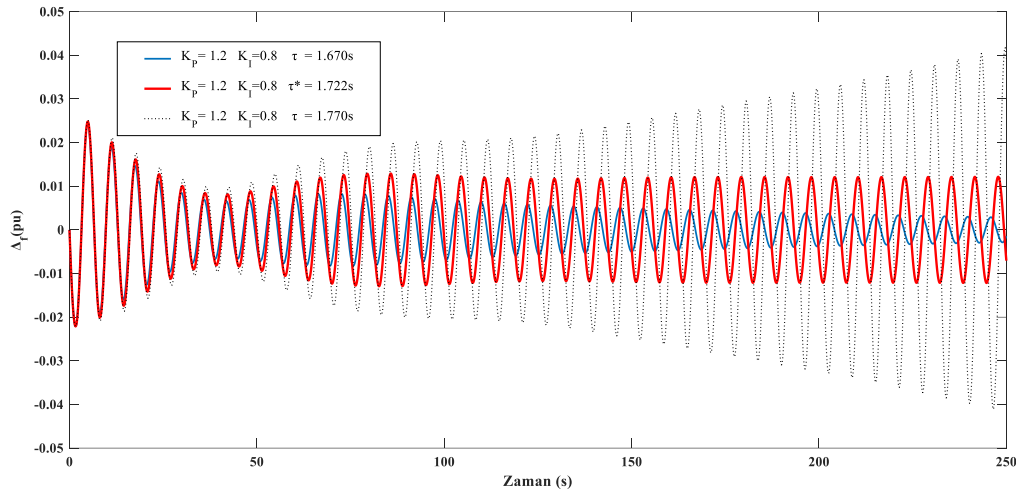
$\alpha_1 + \alpha_2$	α_1	α_2	$\tau^*(s)$
0.2	0.1	0.1	2.470
0.2	0.11	0.09	2.152
0.2	0.12	0.08	1.948
0.2	0.13	0.07	1.797
0.2	0.14	0.06	1.675
0.2	0.15	0.05	1.574
0.2	0.16	0.04	1.488
0.2	0.17	0.03	1.414
0.2	0.18	0.02	1.349
0.2	0.19	0.01	1.290

Çizelge 4.4'ten görüleceği üzere YFK sistemine klasik üretim birimi %80, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi ikisi birlikte toplam olarak %20 sabit katılım koşulu altında EA grupları katılım oranının artırılması dolayısıyla DTC kontrol çevriminin katılım oranının azaltılması kararlılık gecikme payın olumsuz etkilemektedir.

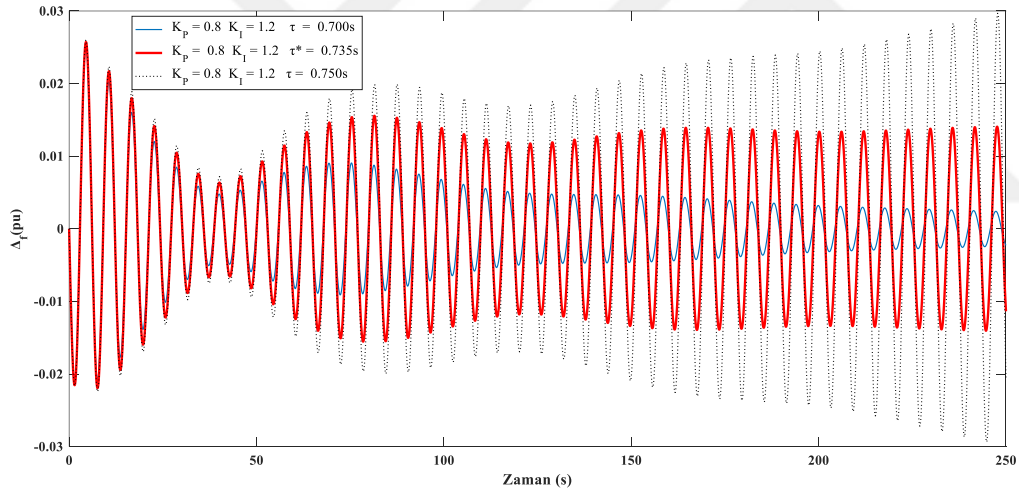
Benzetim ortamında elde edilen bu sonuçların doğruluğu $t = 0$ anında $\Delta P_{L1} = 0.2 pu$ ($\Delta P_{L2} = 0$) yük bozucu etkisi altında sistemin frekans yanıtları incelenerek gösterilmiştir.

Çizelge 4.1'de $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında $K_P = 1.2$ ve $K_I = 0.8$ denetleyici parametreleri için sistemin zaman gecikme payı $\tau^* = 1.722s$ olarak belirlenmiştir. Şekil 4.2, $\tau^* = 1.722s$ etrafında seçilen zaman gecikme değerleri için sistemin birinci bölgenin frekans tepkisini göstermektedir. $\tau^* = 1.722s$ maksimum zaman gecikme değerinden ($\tau = 1.670s < \tau^* = 1.722s$) küçük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlılığa doğru gittiği görülmektedir. $\tau^* = 1.722s$ değerinde, Şekil 4.2'den görüldüğü üzere sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli olarak devam ettiği ve sistemin sınırda kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, ($\tau^* = 1.722s < \tau = 1.770s$) büyük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların gittikçe büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.1'de $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında bu defa yukarıdakinin tersine $K_P = 0.8$ ve $K_I = 1.2$ denetleyici parametreleri için sistemin zaman gecikme payı $\tau^* = 0.735s$ olarak belirlenmiştir. Bu gecikme payı Şekil 4.2'deki $\tau^* = 1.722s$ 'den daha küçüktür. Bu durum aynı katılma oranlarında denetleyici parametrelerinin tam tersiyle değiştirilmesinin sonucudur. Şekil 4.3, $\tau^* = 0.735s$ etrafında seçilen zaman gecikme değerleri için sistemin birinci bölgenin frekans tepkisini göstermektedir. $\tau^* = 0.735s$ maksimum zaman gecikme değerinden ($\tau = 0.700s < \tau^* = 0.735s$) küçük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlılığa doğru gittiği görülmektedir. $\tau^* = 0.735s$ değerinde, Şekil 4.3'ten görüldüğü üzere sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli olarak devam ettiği ve sistemin sınırda kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, ($\tau^* = 0.735s < \tau = 0.750s$) büyük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların gittikçe büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir.



Şekil 4.2. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi



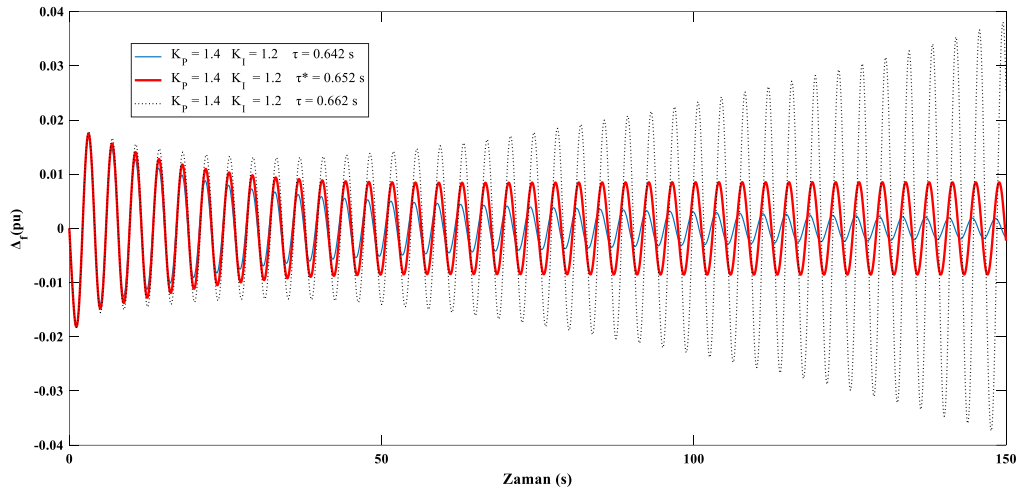
Şekil 4.3. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi

Çizelge 4.2’de $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında $K_p = 1.4$ ve $K_i = 1.2$ denetleyici parametreleri için sistemin zaman gecikme payı $\tau^* = 0.652s$ olarak belirlenmiştir. Bu gecikme payı Şekil 4.2’deki $\tau^* = 1.722s$ ’den daha küçüktür. Bu durum EA gruplarının katılımı ($\alpha_1 = 0.3$) %30 oranında arttırılmış, klasik üretim biriminin katılımı ($\alpha_0 = 0.6$) %60 oranına indirilmiş ve DTC kontrol biriminin katılımı ($\alpha_2 = 0.1$) %10 oranında sabit tutulmuş olmasının sonucudur. Şekil 4.4, $\tau^* = 0.652s$ etrafında seçilen zaman gecikme değerleri için sistemin birinci bölgenin frekans tepkisini göstermektedir.

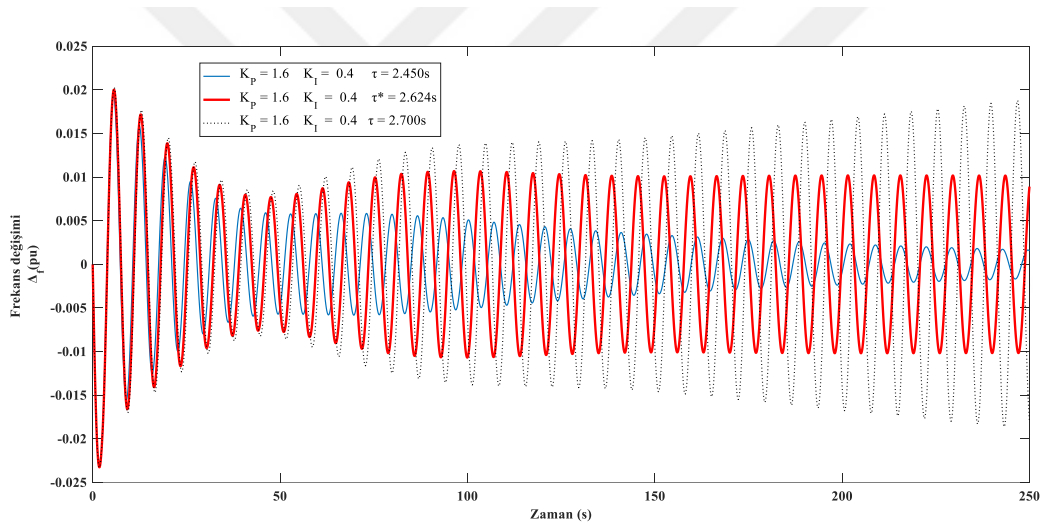
$\tau^* = 0.652s$ maksimum zaman gecikme değerinden ($\tau = 0.642s < \tau^* = 0.652s$) küçük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlılığa doğru gittiği görülmektedir. $\tau^* = 0.652s$ değerinde, Şekil 4.4'ten görüldüğü üzere sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli olarak devam ettiği ve sistemin sınırdaki kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, ($\tau^* = 0.652s < \tau = 0.662s$) büyük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların gittikçe büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.3'te $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ katılım oranlarında $K_P = 1.6$ ve $K_I = 0.4$ denetleyici parametreleri için sistemin zaman gecikme payı $\tau^* = 2.624s$ olarak belirlenmiştir. Bu gecikme payı Şekil 4.2'deki $\tau^* = 1.722s$ 'den daha büyüktür. Bu durum DTC kontrol biriminin katılımı ($\alpha_2 = 0.3$) %30 oranında arttırılmış, klasik üretim biriminin katılımı ($\alpha_0 = 0.6$) %60 oranına indirilmiş ve EA gruplarının katılımı ($\alpha_1 = 0.1$) %10 oranında sabit tutulmuş olmasının sonucudur. Şekil 4.5, $\tau^* = 2.624s$ etrafında seçilen zaman gecikme değerleri için sistemin birinci bölgenin frekans tepkisini göstermektedir. $\tau^* = 2.624s$ maksimum zaman gecikme değerinden ($\tau = 2.450s < \tau^* = 2.624s$) küçük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlılığa doğru gittiği görülmektedir. $\tau^* = 2.624s$ değerinde, Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli olarak devam ettiği ve sistemin sınırdaki kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, ($\tau^* = 2.624s < \tau = 2.700s$) büyük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların gittikçe büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.2'den $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında sabit K_I ($K_I = 0.4, K_I = 0.8, K_I = 1.2$) değerlerinde K_P 'ye bağlı zaman gecikme paylarının değişimi Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekil 4.6'dan integral denetleyici kazancı K_I belli bir değerde sabit tutulup oransal denetleyici kazancı K_P ($K_P = 0.2, 0.4, \dots, 2.0$) arttırılırsa zaman gecikme payının önce arttığı, belli bir değere ulaştıktan sonra tekrar azaldığı görülmektedir. Şekil 4.6'dan görüldüğü üzere eğer aynı katılım oranlarında K_I değeri arttırılırsa, örneğin $K_I = 0.4$ yerine $K_I = 0.8$ seçilirse, daha düşük gecikme payları benzer bir eğilim göstermektedir.

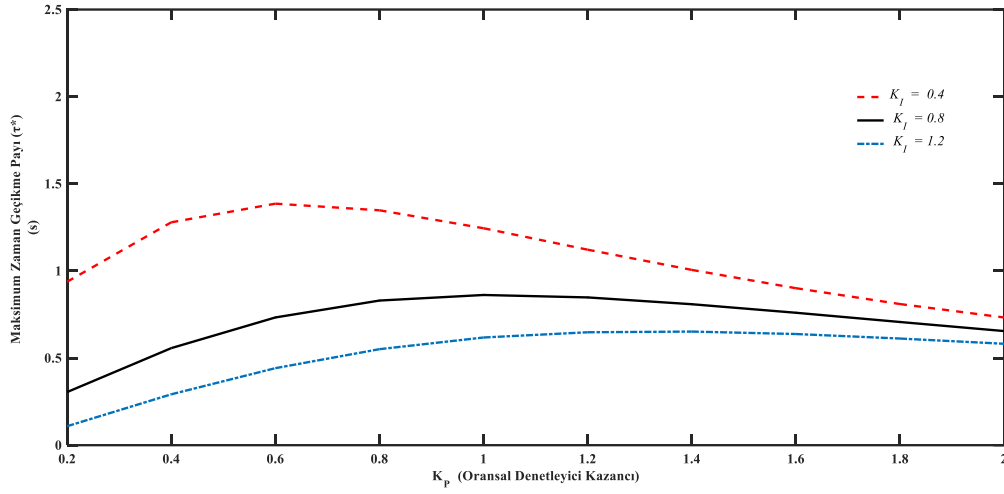


Şekil 4.4. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi

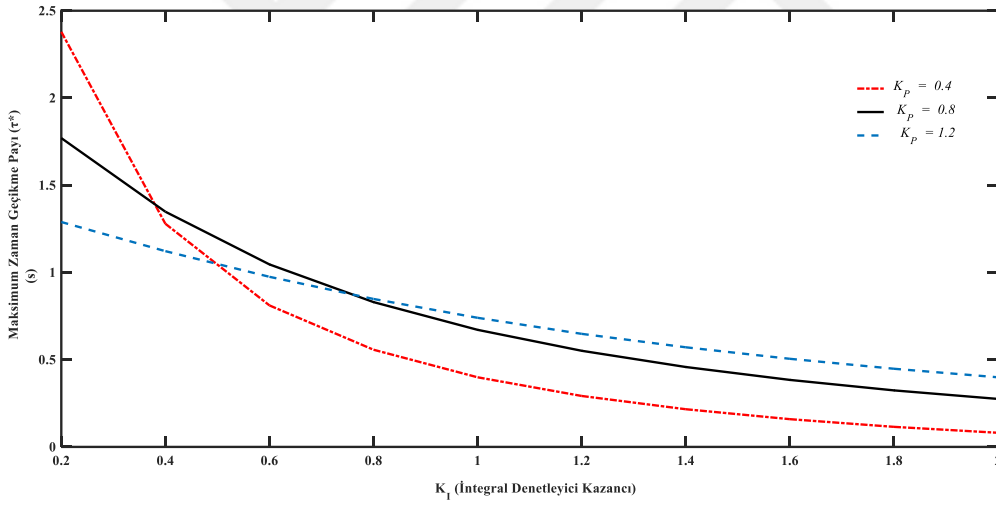


Şekil 4.5. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisi

Çizelge 4.3'den $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında sabit K_P ($K_P = 0.4, K_P = 0.8, K_P = 1.2$) değerlerinde K_I 'ya bağlı zaman gecikme paylarının değişimi Şekil 4.7'de verilmiştir. Şekil 4.7'den oransal denetleyici kazancı K_P belli bir değerde sabit tutulup integral denetleyici kazancı K_I ($K_I = 0.2, 0.4, \dots, 2.0$) artırılırsa zaman gecikme payının önce azaldığı, belli bir değere ulaştıktan sonra yatay seyir ettiği görülmektedir.

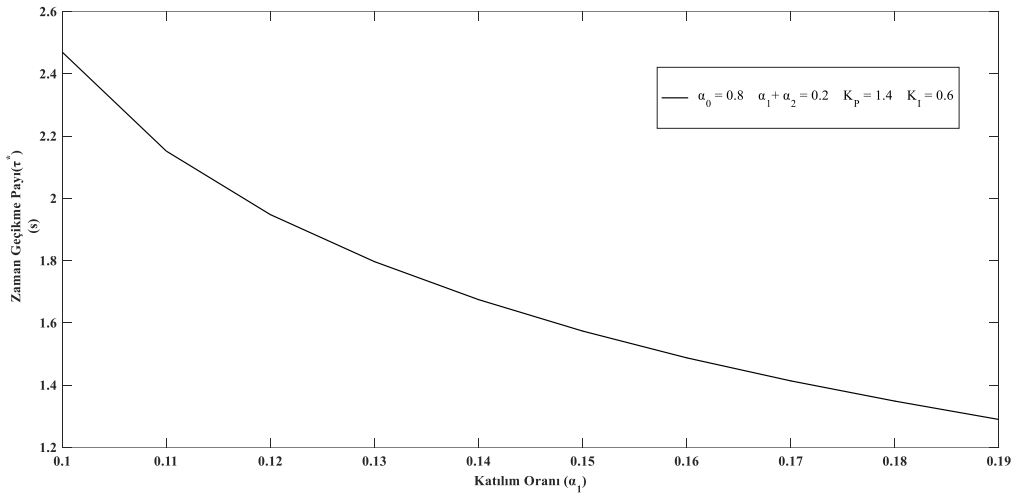


Şekil 4.6. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.3$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için K_I sabit iken K_p değerlerine bağlı zaman gecikme payının değişimi

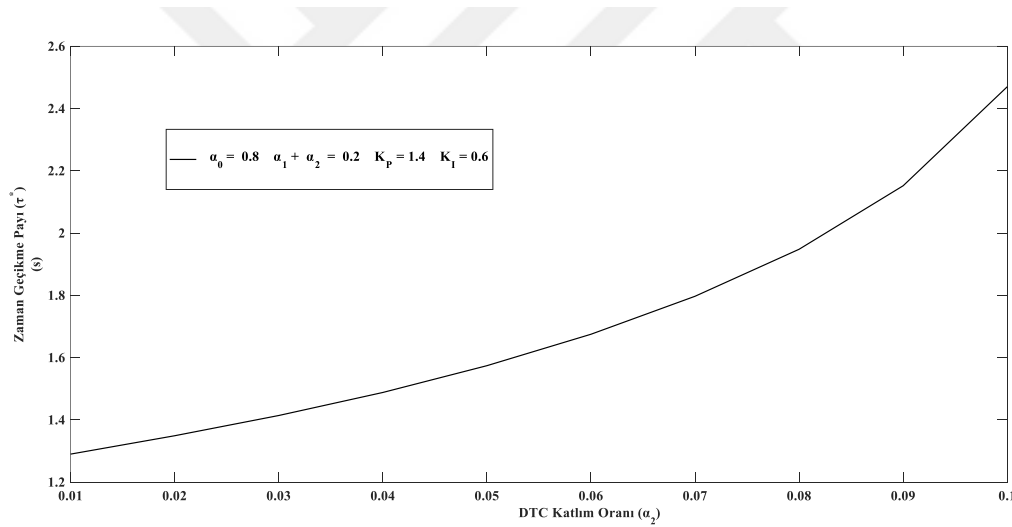


Şekil 4.7. $\alpha_0 = 0.6$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.3$ için K_p sabit iken K_I değerlerine bağlı zaman gecikme payının değişimi

Çizelge 4.4'ten $\alpha_0 = 0.8$ ve $(\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2)$ katılım oranlarında α_1 'e bağlı zaman gecikme paylarının değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir. Şekil 4.8'den görüldüğü üzere $K_p = 1.4$ ve $K_I = 0.6$, klasik üretim birimlerinin katılımı ($\alpha_0 = 0.8$) %80, EA gruplarının ve DTC kontrol biriminin katılımının toplamı ($\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$) %20'de sabit iken EA gruplarının katılımı α_1 artırıldığında zaman gecikme payları azalmaktadır.



Şekil 4.8. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$ için K_P ve K_I sabit iken α_1 katılım oranlarına bağlı zaman gecikme payının değişimi



Şekil 4.9. $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$ için K_P ve K_I sabit iken α_2 katılım oranlarına bağlı zaman payının değişimi

Çizelge 4.4'ten sabit $\alpha_0 = 0.8$ ve ($\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$) katılım oranlarında α_2 'e bağlı zaman gecikme paylarının değişimi Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9'dan görüldüğü üzere aynı denetleyici kazançlarında ($K_P = 1.4$ ve $K_I = 0.6$); klasik üretim birimlerinin katılımı ($\alpha_0 = 0.8$) %80, EA gruplarının ve DTC kontrol biriminin katılımının toplamı ($\alpha_1 + \alpha_2 = 0.2$) %20'de sabit iken DTC kontrol çevriminin katılımı α_2 artırıldığında zaman gecikme payları artmaktadır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölgeli YFK sisteminin zaman gecikme payları üzerinde EA grupları ve DTC kontrol biriminin katılım oranlarının etkisi benzetim ortamında incelenmiştir. Öncelikle, zaman gecikmeli iki bölgeli EA-DTC-YFK sisteminin durum denklemleri elde edilmiş ve EK-1’de sunulmuştur. İki bölgeli EA-DTC-YFK sisteminde tüm zaman gecikmeleri eşit kabul edilerek bu durum denklemleri tekrar düzenlenerek değişkenler matrisi ile katsayı matrisleri oluşturulmuştur. Daha sonra, Matlab/Simulink ortamında iki bölgeli EA-DTC-YFK sisteminin simülasyon modeli oluşturulmuş, söz konusu model dikkate alınarak EA grupları ile DTC kontrol çevriminin farklı katılım faktörleri ve PI denetleyicinin farklı kazanç değerleri için sistemin sınırda kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri (Kararlılık Gecikme Payı) benzetim yöntemi ile belirlenmiştir. Benzetim ortamında elde edilen bu sonuçların doğruluğu $t = 0$ anında $\Delta P_{L1} = 0.2 pu$ ($\Delta P_{L2} = 0$) yük bozucu etkisi altında sistemin frekans yanıtları incelenerek gösterilmiştir.

Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te sunulan sonuçlar DTC kontrol çevriminin katılım oranının artışının sistemin kararlılık sınırı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu ancak, EA katılımlarının kararlılık sınırını daralttığı görülmüştür. Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.3’teki sonuçlardan PI denetleyici kazançlarının bazı değerlerinde zaman gecikmesinden ($\tau = \infty$) bağımsız olarak sistemin kararlı olduğu, başka bir ifade ile zaman gecikmesi ne olursa olsun sistemin kararlı olduğu görülmüştür. Çizelge 4.1, Çizelge 4.2 ve Çizelge 4.3’te elde edilen sonuçlardan PI denetleyici kazançlarının bazı değerlerinde zaman gecikmesi ($\tau = 0$) olmasa bile sistemin kararsız olduğu görülmüştür. Bu durumda Kararlılık Gecikme Payının belirlenmesine ihtiyaç olmayacaktır.

Benzetim sonuçları, zaman gecikmesinin sistem dinamiğini olumsuz etkilediğini ve hatta kritik değerleri aştığında kararsızlığa sebep olduğunu ortaya koymuştur. Bu nedenle, denetleyici tasarım ve kazanç değerlerinin seçiminde zaman gecikmeleri mutlaka dikkate alınmalıdır.

Gelecekte bu alanda yapılacak çalışmalar aşağıda verilen konulara yoğunlaşacaktır:

- i) İki bölgele EA-DTC-YFK sisteminin sınırda kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerlerinin literatürde mevcut olan Üstel Terimin Yok Edilmesi [15, 21] ve Rekasius Yerine Koyma [26-28] yöntemleri ile teorik olarak hesaplanması,
- ii) Verilen bir zaman gecikme değeri için İki bölgele EA-DTC-YFK sisteminin kararlılığını garanti edecek denetleyici kazanç setini ifade eden kararlılık bölgelerinin literatürde mevcut olan Kararlılık Sınır Eğrisi Yöntemi [22, 55, 56] ile belirlenmesi.



KAYNAKLAR

1. Saadat, H.(1999). Power System Analysis. New York: McGraw Hill Inc.
2. Kundur, P.(1994). *Power System Stability and Control*. New York: McGrawHill Inc.
3. Datta, M., Senjyu, T., Yona, A., Funabashi, T. and Kim, C.H. (2011). A frequency-control approach by photovoltaic generator in a PV-diesel hybrid power system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 26, 559–571.
4. Wang, W., Xu, Y. and Khanna, M. (2011). A survey on the communication architectures in smart grid. *Computer Networks*, 55, 3604-3629.
5. Delille, G., Francois, B. and Malarange, G. (2012). Dynamic frequency control support by energy storage to reduce the impact of wind and solar generation on isolated power system's inertia. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 3, 931–939.
6. Pourmousavi, S.A., Nehrir, M.H. (2014). Introducing dynamic demand response in the LFC model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(4), 1562-1572.
7. Vijay, P. Singh, V.P., Samuel, P., Kishor, N. (2016). Impact of demand response for frequency regulation in two-area thermal power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27(2), 1-23.
8. Ko, K.S., Sung, D.K. (2018). 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.
9. Khalil, A., Rajab, Z., Alfergabi, A., Mohamed, O. (2017). The impact of the time delay on the load frequency control system in Microgrid with plug-in-electric-vehicles. *Sustainable Cities and Society*, 35, 365-367.
10. Jiang, L., Yao, W., Wu, Q.H., Wen, J.Y., Cheng, S.J. (2012). Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(2), 932-941.
11. Wang, S., Meng, X., Chen, T. (2012). Wide-area control of power systems through delayed network communication. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(2), 495-503.
12. Zhang, C.K., Jiang, L., Wu, Q.H., He, Y., Wu, M. (2013a). Delay-dependent robust load frequency control for time delay power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 2192-2201.
13. Zhang, C.K., Jiang, L., Wu, Q.H., He, Y., Wu, M. (2013b). Further results on delay-dependent stability of multi-area load frequency control. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(4), 4465-4474.
14. Sönmez, Ş., Ayasun, S., Eminoğlu, U. (2014). Computation of time delay margins for stability of a single-area load frequency control system with communication delays. *WSEAS Transactions on Power Systems*, 9, 67-76.

15. Sönmez, Ş., Ayasun, S., Nwankpa, C.O. (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.
16. Chen, J., Gu, G., Nett, C.N. (1995). A new method for computing delay margins for stability of linear delay systems. *System and Control Letters*, 26(2), 101–117.
17. Fu, P., Niculescu, S.I., Chen, J. (2006). Stability of linear neutral time-delay systems: exact conditions via matrix pencil solutions. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 51(6), 1063-1069.
18. Gu, K., Kharitonov, V.L., Chen, J. (2003). *Stability of Time Delay Systems*. Boston: Birkhauser.
19. Ayasun, S., Nwankpa, C.O. (2009). Stability of a two-area automatic generation control system with communication delays. International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO 2009), 65-69.
20. Ayasun, S., Eminoğlu, U., Sönmez, Ş. (2014). Computation of stability delay margin of time-delayed generator excitation control system with a stabilizing transformer”, *Mathematical Problems in Engineering*, 1-10.
21. Walton, K.E., Marshall, J.E. (1987). Direct method for TDS stability analysis. *IEEE Proceeding Part D*. 134, 101-107.
22. Sönmez, Ş., Ayasun, S. (2016a). 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.
23. Su, J.H. (1995). The asymptotic stability of linear autonomous systems with commensurate time delays. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 40(6), 1114-1117.
24. Louisell, J. (2001). A matrix method for determining the imaginary axis eigenvalues of a delay system. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 46(12), 2008–2012.
25. Fazelinia, H., Sipahi, R., Olgaç, N. (2007). Stability robustness analysis of multiple time delayed systems using “building block” concept”. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(5), 799–810.
26. Rekasius, Z.V. (1980). *A stability test for systems with delays*. Joint Automatic Control Conference, Paper No. TP9-A.
27. [27] Olgaç, N., Sipahi, R. (2002). An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time invariant (LTI) systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47(5), 793-797.
28. Olgaç, N., Sipahi, R. (2004). A practical method for analyzing the stability of neutral type LTI-time delayed systems. *Automatica*, 40(5), 847-853.

29. Liu, M., Yang, L., Gan, D., Wang, D., Gao, F., Chen, Y. (2007). The stability of AGC systems with commensurate delays. *European Transactions on Electrical Power*, 17(6), 615–627.
30. Ayasun, S. (2009). Computation of time delay margin for power system small-signal stability. *European Transactions on Electrical Power*, 19(7), 949-968.
31. Sönmez, Ş., Eminoğlu U., Ayasun, S. (2015). An exact method to compute time delay margin for stability of time-delayed generator excitation control system. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 2(8), 276-283.
32. Ayasun, S., Gelen, A. (2010). Stability analysis of a generator excitation control system with time delays. *Electrical Engineering*, 91(6), 347-355.
33. Macana, C.A., Mojica-Nava, E., Quijano, N. (2013). Time-delay effect on load frequency control for microgrids. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Evry, France, 544-549.
34. Jia, H., Li, X., Mu, Y., Xu, C., Jiang, Y., Yu, X., Wu, J., Dong, C. (2018). Coordinated control for EV aggregators and power plants in frequency regulation considering time-varying delays. *Applied Energy*, 1363-1376.
35. Gündüz, H., Sönmez, Ş., Ayasun, S. (2017). 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.
36. Sönmez, Ş., Ayasun, S. (2018). Gain and phase margins based delay-dependent stability analysis of single-area load frequency control system with constant communication time delay. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 40(5), 701-710.
37. Sipahi, R., Olgaç, N. (2005). A comparative survey in determining the imaginary characteristic roots of LTI time delayed systems. 16th IFAC World Congress, 390–399.
38. Dorf, R.C., Bishop, R.H. (2001). *Modern Control Systems*. New Jersey: Prentice-Hall.
39. Xue, D., Chen, Y., Atherton, D.P. (2007). *Linear feedback control: analysis and design with MATLAB*. Philadelphia: SIAM.
40. Ziegler, J.G., Nichols, N.B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions ASME*, 64, 759–768.
41. Alomoush, M.I. (2010). Load frequency control and automatic generation control using fractional-order controllers. *Electrical Engineering*, 91(7), 357-368.
42. Golpira, H., Bevrani, H. (2011). Application of GA optimization for automatic generation control design in an interconnected power system. *Energy Conversion and Management*, 52(5), 2247–55.
43. Gözde, H., Taplamacıoğlu, M.C. (2011). Automatic generation control application with craziness based particle swarm optimization in a thermal power system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(1), 8–16.

44. Ali, E., Abd-Elazim, S. (2011). Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system. *International Journal of Electrical Power Energy and Systems*, 33(3), 633–638.
45. Toulabi, M. R., Shiroei, M., Ranjbar, A.M. (2014). Robust analysis and design of power system load frequency control using the Kharitonov's theorem. *Electrical Power and Energy Systems*, 55, 51–58.
46. Bervani, H. (2014). *Robust Power System Frequency Control*. New York: Springer-Verlag.
47. Yazdizadeh, A., Ramezani, M.H., Hamedrahmat, E. (2012). Decentralized load frequency control using a new robust optimal miso PID controller. *International Journal of Electr Power and Energy Systems*, 35(1), 57–65.
48. Tan, W., Zhang, H., Yu, M. (2012). Decentralized load frequency control in deregulated environments. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 41(1), 16–26.
49. Khodabakhshian, A., Pour, M.E., Hooshmand, R. (2012). Design of a robust load frequency control using sequential quadratic programming technique. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 40(1), 1–8.
50. Kharitonov, V.L. (1978a). Asymptotic stability of an equilibrium position of a family systems of linear differential equations. *Differential'nye Uraveniya*, 14, 1483–1485.
51. Kharitonov, V.L. (1978b). On a generalization of a stability criterion. *Izvestiya Akademii Nauk Kazakhskoi SSR Seriya Fizika Matematika*, 1, 53–57.
52. Saxena, S., Hote, Y.V. (2016). Decentralized PID load frequency control for perturbed multi-area power systems. *Electrical Power and Energy Systems*, 81, 405–415.
53. Zhu, Q., Jiang, L. Yao, W., Zhang, C.K., Cheng 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.
54. Krishnan, R., Pragasheeswaran, J. K., Ray, G. (2017). Robust stability of networked load frequency control systems with time-varying delays. *Electric Power Components and Systems*, 45(3), 302–314.
55. Tan, N., Kaya, İ., Celaleddin, Y., Atherton, D.P. (2006). Computation of stabilizing PI and PID controllers using the stability boundary locus. *Energy Conversion and Management*, 47(18-19), 3045-3058.
56. Söylemez, M.T., Munro, N., Baki, H. (2003). Fast calculation of stabilizing PID controllers. *Automatica*, 39(1), 121–127.
57. Wang, J., Tse, N., Gao, Z. (2011b). Synthesis on-PI-based pitch controller of large wind turbine generator. *Energy Conversion and Management*, 52(2), 1288-1294.

58. Hamamcı, S.E., Köksal, M. (2010). Calculation of all stabilizing fractional-order PD controllers for integrating time delays. *Computers and Mathematics with Applications*, 59(5), 1621-1629.
59. Wang, Y.J. (2011). Graphical computation of gain and phase margin specifications-oriented robust PID controllers for uncertain systems with time-varying delay. *Journal of Process Control*, 21, 475–488.
60. Simulink. (2000). *Model-Based and System-Based Design, Using Simulink*. USA: Natick, MathWorks.
61. Wang, W., Xu, Y. and Khanna, M. (2011). A survey on the communication architectures in smart grid. *Computer Networks*, 55, 3604-3629.
62. Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., Tipper, D. (2013). A survey on smart grid communication infrastructures: motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 15(1), 5-20.
63. Güngör, V.C., Şahin, D., Koçak, T., Ergut, S., Buccella, C., Cecati, C., Hancke, G.P. (2013). A survey on smart grid potential applications and communication requirements. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 9(1), 28-41.
64. Naduvathuparambil, B., Valenti, M. C., Feliachi, A. (2002). Communication delays in wide area measurement systems. *Thirty-Fourth Southeastern Symposium on System Theory*, 118-122.
65. Fan, H., Jiang, L., Mao, C. (2016). Frequency regulation of multi-area power systems with plug-in electric vehicles considering communication delays. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 10(14), 3481-3491.
66. Zhou, B., Yao, F., Littler, T., Zhang, H. (2016). An electric vehicle dispatch module for demand-side energy participation. *Applied Energy*, 177, 464–474.





EK-1. Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

Şekil 3.2’de yer alan ‘EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölge YFK sisteminin modeli’ne ait durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Şekil 3.2’deki iki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinde yer alan transfer fonksiyonları içeren blokların çıkışları birer durum değişkeni olarak tanımlanırsa her bir bölge için 7’şer durum değişkeni olmak üzere 14 adet durum değişkeni ($x_1, \dots, x_{14}$) atanmış olur. İki bölge arasında aktarılan gücün değişimi de bir durum değişkeni (x_{15}) olarak tanımlanırsa toplam 15 adet durum değişkeninden oluşan durum değişkenleri seti elde edilir. Burada sırasıyla;

$$\begin{array}{ll}
 x_1 = \Delta f_1 & x_8 = \Delta f_2 \\
 x_2 = \Delta P_{g1} & x_9 = \Delta P_{g2} \\
 x_3 = \Delta P_{m1} & x_{10} = \Delta P_{m2} \\
 x_4 = \Delta X_{g1} & x_{11} = \Delta X_{g2} \\
 x_5 = \Delta X_{EV1} & x_{12} = \Delta X_{EV2} \\
 x_6 = PI_{D1_{\text{çıkış}}} & x_{13} = PI_{D2_{\text{çıkış}}} \\
 x_7 = PI_{DR1_{\text{çıkış}}} & x_{14} = PI_{DR2_{\text{çıkış}}} \\
 & x_{15} = \Delta P_{12}
 \end{array}$$

olarak tanımlanmıştır. Şekil 3.2’deki iki bölge EA-DTC-YFK sistem modelinde yer alan blokların giriş-çıkışları arasındaki bağıntılardan ve aşağıda yapılan işlemlerin sonucunda tüm durum değişkenlerine ait durum denklemleri tespit edilmiştir. Bu bölümün sonunda da iki bölge EA-DTC-YFK sistemine ilişkin elde edilen tüm durum denklemleri toplu olarak gösterilmiştir.

1) I. Bölge Durum Denklemleri:

Generatör ve yük blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_1 = \Delta f_1$):

$$\frac{X_1(s)}{U_1(s)} = \frac{1}{D_1 + sM_1} \quad (1.1)$$

$$sM_1 X_1(s) + D_1 X_1(s) = U_1(s) \quad (1.2)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$sX_1(s) = \dot{x}_1(s) \quad (1.3)$$

Eş. 1.2'deki “ $sX_1(s)$ ” ifadesi, Eş. 1.3'te gösterildiği üzere Laplace Dönüşümünde $x_1(t)$ 'nin zamana göre türevine ($\dot{x}_1(t)$) eşit olduğu gerçeğinden hareketle burada ‘ s ’ düzleminden ‘ t ’ düzlemine geçiş yapılırsa Eş. 1.2;

$$M_1\dot{x}_1(t) + D_1x_1(t) = u_1(t) \quad (1.4)$$

şekline dönüşür. Burada $u_1(t)$, blok diyagramdan Eş. 1.5'teki gibi elde edilir.

$$u_1(t) = x_2(t) + x_5(t) + x_7(t - \tau_{DR1}) - x_{15}(t) - \Delta P_{L1} \quad (1.5)$$

Eş.1.4'te $u_1(t)$ yerine yazılırsa ve $\dot{x}_1(t)$ tek başına bırakılırsa;

$$M_1\dot{x}_1(t) + D_1x_1(t) = x_2(t) + x_5(t) + x_7(t - \tau_{DR1}) - x_{15}(t) - \Delta P_{L1} \quad (1.6)$$

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{D_1}{M_1}x_1(t) + \frac{1}{M_1}x_2(t) + \frac{1}{M_1}x_5(t) + \frac{1}{M_1}x_7(t - \tau_{DR1}) - \frac{1}{M_1}x_{15}(t) - \frac{1}{M_1}\Delta P_{L1} \quad (1.7)$$

x_1 durum değişkenine ait durum denklemi elde edilir.

Benzer olarak diğer durum değişkenlerine ($x_2, x_3, \dots, x_{15}$) ait durum denklemleri aşağıdaki gibi elde edilebilir.

Türbin blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_2 = \Delta P_{g1}$):

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\frac{X_2(s)}{X_3(s)} = \frac{1}{1 + sT_{c1}} \quad (1.8)$$

$$sT_{c1}X_2(s) + X_2(s) = X_3(s) \quad (1.8)$$

$$T_{c1}\dot{x}_2(t) + x_2(t) = x_3(t) \quad (1.9)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{T_{c1}}x_2(t) + \frac{1}{T_{c1}}x_3(t) \quad (1.10)$$

Ara-Isıtmalı türbin blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_3 = \Delta P_{m1}$):

$$\frac{X_3(s)}{X_4(s)} = \frac{1 + sF_{p1}T_{r1}}{1 + sT_{r1}} = F_{p1} + \frac{1 - F_{p1}}{1 + sT_{r1}} \quad (1.11)$$

$$X_3(s) = F_{p1}X_4(s) + \frac{1 - F_{p1}}{1 + sT_{r1}}X_4(s) \quad (1.12)$$

$$X_3(s) + sT_{r1}X_3(s) = F_{p1}X_4(s) + sF_{p1}T_{r1}X_4(s) + X_4(s) - F_{p1}X_4(s) \quad (1.13)$$

$$\dot{x}_3(t) = F_{p1}T_{r1}\dot{x}_4(t) - x_3(t) + x_4(t) \quad (1.14)$$

$$\dot{x}_4(t) = -\frac{1}{R_1T_{g1}}x_1(t) - \frac{1}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.15)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{F_{p1}T_{r1}}{R_1T_{g1}}x_1(t) - \frac{F_{p1}T_{r1}}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{F_{p1}T_{r1}\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) - x_3(t) + x_4(t) \quad (1.16)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{F_{p1}T_{r1}}{R_1T_{g1}}x_1(t) - x_3(t) + \frac{(T_{g1} - F_{p1}T_{r1})}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{F_{p1}T_{r1}\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.17)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{F_{p1}T_{r1}}{R_1T_{g1}}x_1(t) - x_3(t) + \frac{(-F_{p1}T_{r1} + T_{g1})}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{F_{p1}T_{r1}\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.18)$$

Devir sayısı regülatörü blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_4 = \Delta X_{g1}$):

$$\frac{X_4(s)}{U_4(s)} = \frac{1}{1 + sT_{g1}} \quad (1.19)$$

$$sT_{g1}X_4(s) + X_4(s) = U_4(s) \quad (1.20)$$

$$\dot{x}_4(t) = -\frac{1}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{1}{T_{g1}}u_4(t) \quad (1.21)$$

$$u_4(t) = -\frac{1}{R_1}x_1(t) + \alpha_0x_6(t) \quad (1.22)$$

$$\dot{x}_4(t) = -\frac{1}{R_1T_{g1}}x_1(t) - \frac{1}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.23)$$

EA blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_5 = \Delta X_{EV1}$):

$$\frac{X_5(s)}{U_5(s)} = \frac{K_{EV1}}{1 + sK_{EV1}} \quad (1.24)$$

$$sK_{EV1}X_5(s) + X_5(s) = K_{EV1}U_5(s) \quad (1.25)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\dot{x}_5(t) = -\frac{1}{K_{EV1}} x_5(t) + u_5(t) \quad (1.26)$$

$$u_5(t) = \alpha_1 x_6(t - \tau_{EV1}) \quad (1.27)$$

$$\dot{x}_5(t) = -\frac{1}{K_{EV1}} x_5(t) + \alpha_1 x_6(t - \tau_{EV1}) \quad (1.28)$$

PI denetleyici 1 (D1) blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_6 = PI_{D1_{çıkış}}$):

$$\frac{X_6(s)}{U_6(s)} = -(K_P + \frac{K_I}{s}) \quad (1.29)$$

$$sX_6(s) = -sK_P U_6(s) - K_I U_6(s) \quad (1.30)$$

$$\dot{x}_6(t) = -K_P \dot{u}_6(t) - K_I u_6(t) \quad (1.31)$$

$$u_6(t) = \beta_1 x_1(t) + x_{15}(t) \quad (1.32)$$

$$\dot{u}_6(t) = \beta_1 \dot{x}_1(t) + \dot{x}_{15}(t) \quad (1.33)$$

$$\dot{x}_6(t) = -K_P \beta_1 \dot{x}_1(t) - K_P \dot{x}_{15}(t) - K_I \beta_1 x_1(t) - K_I x_{15}(t) \quad (1.34)$$

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{D_1}{M_1} x_1(t) + \frac{1}{M_1} x_2(t) + \frac{1}{M_1} x_5(t) + \frac{1}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) - \frac{1}{M_1} x_{15}(t) - \frac{1}{M_1} \Delta P_{L1} \quad (1.35)$$

$$\dot{x}_{15}(t) = 2\pi T_{12} x_1(t) - 2\pi T_{12} x_8(t) \quad (1.36)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\begin{aligned}\dot{x}_6(t) = & \frac{K_P\beta_1 D_1}{M_1} x_1(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_5(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) + \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_{15}(t) \\ & + \frac{K_P\beta_1}{M_1} \Delta P_{L1} - K_P 2\pi T_{12} x_1(t) + K_P 2\pi T_{12} x_8(t) - K_I \beta_1 x_1(t) - K_I x_{15}(t)\end{aligned}\quad (1.37)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_6(t) = & \frac{(K_P\beta_1 D_1 - M_1 K_P 2\pi T_{12} - M_1 K_I \beta_1)}{M_1} x_1(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_5(t) \\ & - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) + K_P 2\pi T_{12} x_8(t) + \frac{(K_P\beta_1 - M_1 K_I)}{M_1} x_{15}(t) + \frac{K_P\beta_1}{M_1} \Delta P_{L1}\end{aligned}\quad (1.38)$$

DTC çevrimi denetleyicisi blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_7 = PI_{DR1_{\text{çıkışı}}}$):

$$\frac{X_7(s)}{U_7(s)} = -(K_P + \frac{K_I}{s}) \quad (1.39)$$

$$sX_7(s) = -sK_P U_7(s) - K_I U_7(s) \quad (1.40)$$

$$\dot{x}_7(t) = -K_P \dot{u}_7(t) - K_I u_7(t) \quad (1.41)$$

$$u_7(t) = \alpha_2 x_1(t) \quad (1.42)$$

$$\dot{u}_7(t) = \alpha_2 \dot{x}_1(t) \quad (1.43)$$

$$\dot{x}_7(t) = -K_P \alpha_2 \dot{x}_1(t) - K_I \alpha_2 x_1(t) \quad (1.44)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_7(t) = & \frac{D_1 K_P \alpha_2}{M_1} x_1(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_5(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_{15}(t) \\ & + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} \Delta P_{L1} - K_I \alpha_2 x_1(t)\end{aligned}\quad (1.45)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\begin{aligned} \dot{x}_7(t) = & \left(\frac{D_1 K_P \alpha_2 - M_1 K_I \alpha_2}{M_1} \right) x_1(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_5(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) \\ & + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_{15}(t) + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} \Delta P_{L1} \end{aligned} \quad (1.46)$$

2) II. Bölge Durum Denklemleri:

Generatör ve yük blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_8 = \Delta f_2$):

$$\frac{X_8(s)}{U_8(s)} = \frac{1}{D_2 + sM_2} \quad (1.47)$$

$$sM_2 X_8(s) + D_2 X_8(s) = U_8(s) \quad (1.48)$$

$$M_2 \dot{x}_8(t) + D_2 x_8(t) = u_8(t) \quad (1.49)$$

$$u_8(t) = x_9(t) + x_{12}(t) + x_{14}(t - \tau_{DR2}) + x_{15}(t) - \Delta P_{L2} \quad (1.50)$$

$$M_2 \dot{x}_8(t) + D_2 x_8(t) = x_9(t) + x_{12}(t) + x_{14}(t - \tau_{DR1}) + x_{15}(t) - \Delta P_{L2} \quad (1.51)$$

$$\dot{x}_8(t) = -\frac{D_2}{M_2} x_8(t) + \frac{1}{M_2} x_9(t) + \frac{1}{M_2} x_{12}(t) + \frac{1}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{1}{M_2} x_{15}(t) - \frac{1}{M_2} \Delta P_{L2} \quad (1.52)$$

Türbin blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_9 = \Delta P_{g2}$):

$$\frac{X_9(s)}{X_{10}(s)} = \frac{1}{1 + sT_{c2}} \quad (1.53)$$

$$T_{c2} \dot{x}_9(t) + x_9(t) = x_{10}(t) \quad (1.54)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\dot{x}_9(t) = -\frac{1}{T_{c2}} x_9(t) + \frac{1}{T_{c2}} x_{10}(t) \quad (1.55)$$

Devir sayısı regülatörü blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_{10} = \Delta X_{g2}$):

$$\frac{X_{10}(s)}{X_{11}(s)} = \frac{1 + sF_{p2}T_{r2}}{1 + sT_{r2}} = F_{p2} + \frac{1 - F_{p2}}{1 + sT_{r2}} \quad (1.56)$$

$$X_{10}(s) = F_{p2}X_{11}(s) + \frac{1 - F_{p2}}{1 + sT_{r2}} X_{11}(s) \quad (1.57)$$

$$X_{10}(s) + sT_{r2}X_{10}(s) = F_{p2}X_{11}(s) + sF_{p2}T_{r2}X_{11}(s) + X_{11}(s) - F_{p2}X_{11}(s) \quad (1.58)$$

$$\dot{x}_{10}(t) = F_{p2}T_{r2}\dot{x}_{11}(t) - x_{10}(t) + x_{11}(t) \quad (1.59)$$

$$\dot{x}_{11}(t) = -\frac{1}{R_2T_{g2}} x_8(t) - \frac{1}{T_{g2}} x_{11}(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g2}} x_{13}(t) \quad (1.60)$$

$$\dot{x}_{10}(t) = -\frac{F_{p2}T_{r2}}{R_2T_{g2}} x_8(t) - \frac{F_{p2}T_{r2}}{T_{g2}} x_{11}(t) + \frac{F_{p2}T_{r2}\alpha_0}{T_{g2}} x_{13}(t) - x_{10}(t) + x_{11}(t) \quad (1.61)$$

$$\dot{x}_{10}(t) = -\frac{F_{p2}T_{r2}}{R_2T_{g2}} x_8(t) - x_{10}(t) + \frac{(T_{g2} - F_{p2}T_{r2})}{T_{g2}} x_{11}(t) + \frac{F_{p2}T_{r2}\alpha_0}{T_{g2}} x_{13}(t) \quad (1.62)$$

Devir sayısı regülatörü blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_{11} = \Delta X_{g2}$)

$$\frac{X_{11}(s)}{U_{11}(s)} = \frac{1}{1 + sT_{g2}} \quad (1.63)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$sT_{g2}X_{11}(s) + X_{11}(s) = U_{11}(s) \quad (1.64)$$

$$\dot{x}_{11}(t) = -\frac{1}{T_{g2}}x_{11}(t) + \frac{1}{T_{g2}}u_{11}(t) \quad (1.65)$$

$$u_{11}(t) = -\frac{1}{R_2}x_8(t) + \alpha_0x_{13}(t) \quad (1.66)$$

$$\dot{x}_{11}(t) = -\frac{1}{R_2T_{g2}}x_8(t) - \frac{1}{T_{g2}}x_{11}(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g2}}x_{13}(t) \quad (1.67)$$

EA blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_{12} = \Delta X_{EV2}$):

$$\frac{X_{12}(s)}{U_{12}(s)} = \frac{K_{EV2}}{1 + sK_{EV2}} \quad (1.68)$$

$$sK_{EV2}X_{12}(s) + X_{12}(s) = K_{EV2}U_{12}(s) \quad (1.69)$$

$$\dot{x}_{12}(t) = -\frac{1}{K_{EV2}}x_{12}(t) + u_{12}(t) \quad (1.70)$$

$$u_{12}(t) = \alpha_1x_{13}(t - \tau_{EV2}) \quad (1.71)$$

$$\dot{x}_{12}(t) = -\frac{1}{K_{EV2}}x_{12}(t) + \alpha_1x_{13}(t - \tau_{EV2}) \quad (1.72)$$

PI denetleyici 2 (D2) blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_{13} = PI_{D2_{\text{çıkışı}}}$):

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\frac{X_{13}(s)}{U_{13}(s)} = -(K_p + \frac{K_I}{s}) \quad (1.73)$$

$$sX_{13}(s) = -sK_p U_{13}(s) - K_I U_{13}(s) \quad (1.74)$$

$$\dot{x}_{13}(t) = -K_p \dot{u}_{13}(t) - K_I u_{13}(t) \quad (1.75)$$

$$u_{13}(t) = \beta_2 x_8(t) - x_{15}(t) \quad (1.76)$$

$$\dot{u}_{13}(t) = \beta_2 \dot{x}_8(t) - \dot{x}_{15}(t) \quad (1.77)$$

$$\dot{x}_{13}(t) = -K_p \beta_2 \dot{x}_8(t) + K_p \dot{x}_{15}(t) - K_I \beta_2 x_8(t) + K_I x_{15}(t) \quad (1.78)$$

$$\dot{x}_8(t) = -\frac{D_2}{M_2} x_8(t) + \frac{1}{M_2} x_9(t) + \frac{1}{M_2} x_{12}(t) + \frac{1}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{1}{M_2} x_{15}(t) - \frac{1}{M_2} \Delta P_{L2} \quad (1.79)$$

$$\dot{x}_{15}(t) = 2\pi T_{12} x_1(t) - 2\pi T_{12} x_8(t) \quad (1.80)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{13}(t) = & \frac{D_2 K_p \beta_2}{M_2} x_8(t) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_9(t) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_{12}(t) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_{15}(t) \\ & + \frac{K_p \beta_2}{M_2} \Delta P_{L2} + K_p 2\pi T_{12} x_1(t) - K_p 2\pi T_{12} x_8(t) - K_I \beta_2 x_8(t) + K_I x_{15}(t) \end{aligned} \quad (1.81)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{13}(t) = & K_p 2\pi T_{12} x_1(t) + \frac{(D_2 K_p \beta_2 - M_2 K_p 2\pi T_{12} - M_2 K_I \beta_2)}{M_2} x_8(t) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_9(t) \\ & - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_{12}(t) - \frac{K_p \beta_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{(M_2 K_I - K_p \beta_2)}{M_2} x_{15}(t) + \frac{K_p \beta_2}{M_2} \Delta P_{L2} \end{aligned} \quad (1.82)$$

DTC çevrimi denetleyicisi blok çıkışındaki durum değişkeni ($x_{14} = PI_{DR2_{\text{çıkışı}}}$):

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\frac{X_{14}(s)}{U_{14}(s)} = -(K_p + \frac{K_I}{s}) \quad (1.83)$$

$$sX_{14}(s) = -sK_p U_{14}(s) - K_I U_{14}(s) \quad (1.84)$$

$$\dot{x}_{14}(t) = -K_p \dot{u}_{14}(t) - K_I u_{14}(t) \quad (1.85)$$

$$u_{14}(t) = \alpha_2 x_8(t) \quad (1.86)$$

$$\dot{u}_{14}(t) = \alpha_2 \dot{x}_8(t) \quad (1.87)$$

$$\dot{x}_{14}(t) = -K_p \alpha_2 \dot{x}_8(t) - K_I \alpha_2 x_8(t) \quad (1.88)$$

$$\dot{x}_8(t) = -\frac{D_2}{M_2} x_8(t) + \frac{1}{M_2} x_9(t) + \frac{1}{M_2} x_{12}(t) + \frac{1}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{1}{M_2} x_{15}(t) - \frac{1}{M_2} \Delta P_{L2} \quad (1.89)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{14}(t) &= \frac{D_2 K_p \alpha_2}{M_2} x_8(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_9(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{12}(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{15}(t) \\ &+ \frac{K_p \alpha_2}{M_2} \Delta P_{L2} - K_I \alpha_2 x_8(t) \end{aligned} \quad (1.90)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{14}(t) &= \frac{(D_2 K_p \alpha_2 - M_2 K_I \alpha_2)}{M_2} x_8(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_9(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{12}(t) - \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) \\ &- \frac{K_p \alpha_2}{M_2} x_{15}(t) + \frac{K_p \alpha_2}{M_2} \Delta P_{L2} \end{aligned} \quad (1.91)$$

İki bölge arasındaki durum değişkeni ($x_{15} = \Delta P_{12}$)

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\frac{X_{15}(s)}{U_{15}(s)} = \frac{2\pi T_{12}}{s} \quad (1.92)$$

$$sX_{15}(s) = 2\pi T_{12}U_{15}(s) \quad (1.93)$$

$$\dot{x}_{15}(t) = 2\pi T_{12}u_{15}(t) \quad (1.94)$$

$$x_{15}(t) = x_1(t) - x_8(t) \quad (1.95)$$

$$\dot{x}_{15}(t) = 2\pi T_{12}x_1(t) - 2\pi T_{12}x_8(t) \quad (1.96)$$

3) İki Bölge EA-DTC-YFK Sisteminin Durum Denklemleri:

$$\dot{x}_1(t) = -\frac{D_1}{M_1}x_1(t) + \frac{1}{M_1}x_2(t) + \frac{1}{M_1}x_5(t) + \frac{1}{M_1}x_7(t - \tau_{DR1}) - \frac{1}{M_1}x_{15}(t) - \frac{1}{M_1}\Delta P_{L1} \quad (1.97)$$

$$\dot{x}_2(t) = -\frac{1}{T_{cl}}x_2(t) + \frac{1}{T_{cl}}x_3(t) \quad (1.98)$$

$$\dot{x}_3(t) = -\frac{F_{p1}T_{r1}}{R_1T_{g1}}x_1(t) - x_3(t) + \frac{(T_{g1} - F_{p1}T_{r1})}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{F_{p1}T_{r1}\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.99)$$

$$\dot{x}_4(t) = -\frac{1}{R_1T_{g1}}x_1(t) - \frac{1}{T_{g1}}x_4(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g1}}x_6(t) \quad (1.100)$$

$$\dot{x}_5(t) = -\frac{1}{K_{EV1}}x_5(t) + \alpha_1x_6(t - \tau_{EV1}) \quad (1.101)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\begin{aligned}\dot{x}_6(t) = & \frac{(K_P\beta_1 D_1 - M_1 K_P 2\pi T_{12} - M_1 K_I \beta_1)}{M_1} x_1(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_5(t) \\ & - \frac{K_P\beta_1}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) + K_P 2\pi T_{12} x_8(t) + \frac{(K_P\beta_1 - M_1 K_I)}{M_1} x_{15}(t) + \frac{K_P\beta_1}{M_1} \Delta P_{L1}\end{aligned}\quad (1.102)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_7(t) = & \left(\frac{D_1 K_P \alpha_2 - M_1 K_I \alpha_2}{M_1} \right) x_1(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_2(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_5(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_7(t - \tau_{DR1}) \\ & + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} x_{15}(t) + \frac{K_P \alpha_2}{M_1} \Delta P_{L1}\end{aligned}\quad (1.103)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_8(t) = & -\frac{D_2}{M_2} x_8(t) + \frac{1}{M_2} x_9(t) + \frac{1}{M_2} x_{12}(t) + \frac{1}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{1}{M_2} x_{15}(t) \\ & - \frac{1}{M_2} \Delta P_{L2}\end{aligned}\quad (1.104)$$

$$\dot{x}_9(t) = -\frac{1}{T_{c2}} x_9(t) + \frac{1}{T_{c2}} x_{10}(t) \quad (1.105)$$

$$\dot{x}_{10}(t) = -\frac{F_{p2} T_{r2}}{R_2 T_{g2}} x_8(t) - x_{10}(t) + \frac{(T_{g2} - F_{p2} T_{r2})}{T_{g2}} x_{11}(t) + \frac{F_{p2} T_{r2} \alpha_0}{T_{g2}} x_{13}(t) \quad (1.106)$$

$$\dot{x}_{11}(t) = -\frac{1}{R_2 T_{g2}} x_8(t) - \frac{1}{T_{g2}} x_{11}(t) + \frac{\alpha_0}{T_{g2}} x_{13}(t) \quad (1.107)$$

$$\dot{x}_{12}(t) = -\frac{1}{K_{EV2}} x_{12}(t) + \alpha_1 x_{13}(t - \tau_{EV2}) \quad (1.108)$$

$$\begin{aligned}\dot{x}_{13}(t) = & K_P 2\pi T_{12} x_1(t) + \frac{(D_2 K_P \beta_2 - M_2 K_P 2\pi T_{12} - M_2 K_I \beta_2)}{M_2} x_8(t) - \frac{K_P \beta_2}{M_2} x_9(t) \\ & - \frac{K_P \beta_2}{M_2} x_{12}(t) - \frac{K_P \beta_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) + \frac{(M_2 K_I - K_P \beta_2)}{M_2} x_{15}(t) + \frac{K_P \beta_2}{M_2} \Delta P_{L2}\end{aligned}\quad (1.109)$$

EK-1. (devam) Durum Denklemlerinin Elde Edilmesi

$$\begin{aligned} \dot{x}_{14}(t) = & \frac{(D_2 K_P \alpha_2 - M_2 K_I \alpha_2)}{M_2} x_8(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_2} x_9(t) - \frac{K_P \alpha_2}{M_2} x_{12}(t) \\ & - \frac{K_P \alpha_2}{M_2} x_{14}(t - \tau_{DR1}) - \frac{K_P \alpha_2}{M_2} x_{15}(t) + \frac{K_P \alpha_2}{M_2} \Delta P_{L2} \end{aligned} \quad (1.110)$$

$$\dot{x}_{15}(t) = 2\pi T_{12} x_1(t) - 2\pi T_{12} x_8(t) \quad (1.111)$$



GAZİ GELECEKTİR..