

Dinamik talep cevabı ve elektrikli araç grupları içeren iki bölgeli yük frekans kontrol sisteminin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi

Delay-dependent stability analysis of a two-area load frequency control system including electric vehicle aggregator and dynamic demand response

Bilal Tek¹, Şahin Sönmez², Saffet Ayasun¹

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi
enginarbt@gmail.com, saffetayasun@gazi.edu.tr

²Elektronik ve Otomasyon Bölümü
Malatya Turgut Özal Üniversitesi
ssonmeztr@gmail.com

Özet

Bu çalışmada, elektrikli araç (EA) ve dinamik talep cevabı (DTC) ile geliştirilen iki bölgeli yük frekans kontrol (YFK) sisteminin kararlılığı üzerinde zaman gecikmesinin etkisi incelenmiştir. EA bataryası gibi enerji depolama cihazları ve DTC kontrol çevriminin çeşitli yükleri kontrol edebilmesi, sistemin kararlılığının artırılması bakımından önemli gelişmelerdir. Ancak, güç sistemlerinde kontrol merkezi ve üretim birimleri arasında kontrol sinyallerinin iletilmesi sırasında yaşanan zaman gecikmeleri sistem frekansında istenmeyen salınımlara yol açmaktadır. Dolayısıyla, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren iki bölgeli YFK sisteminin kararlı çalışması için sistemin sınırda kararlı olabileceği maksimum zaman gecikme değerlerinin bilinmesi önemlidir. Bu çalışmada, zaman düzleminde yapılan benzetim çalışmaları yardımıyla, oransal-integral (PI) denetleyici kazançlarının bir seti için sistemin maksimum zaman gecikme değerleri belirlenmiştir

Abstract

This paper investigates the impact of time delays on the stability of a two-area load frequency control (LFC) system enhanced by electric vehicles (EVs) and demand response (DR) control. Energy storage devices such as EVs and responsive loads for DR control are becoming promising tools for the frequency control and power grids stability. However, an open communication networks used to send and receive control signals cause inevitable time delays which lead to undesired oscillations in the system frequency. Therefore, for a stable operation it is essential to compute stability delay margins of the two-area LFC system with EVs and DR control. By implementing a simulation approach, this paper determines stability delay margins for a wide range of the proportional-integral (PI) controller gains of the two-area LFC system.

1. Giriş

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].

Yenilenebilir enerji santralleri, talep edilen güç değişimlerine hızlı yanıt verme karakteristiklerine sahip olmasına rağmen, rüzgar gücünde ve güneş enerjisinde meydana gelen güç dalgalanmaları, sistemin dinamik davranışını ve çalışma performansını olumsuz olarak etkileyebilmektedir [6]-[8]. Ayrıca, invertörler gibi dönüştürücü tabanlı cihazların kullanılması sistemdeki toplam mekanik eylemsizliğin azalmasına neden olmaktadır [9], [10]. Bu sorunlar dikkate alındığında sistemin güvenilirliğini, güvenliğini, yük değişimleri karşısında tepki hızını ve kararlılığını arttırmak için enerji depolama cihazları gibi kaynaklar ve dinamik talep cevabı (DTC) kontrol yönteminin kullanılması, üretilen güç ve talep edilen yük arasındaki dengenin kısa sürede sağlanması bakımından önemli görülmüştür [11], [12]. Ayrıca, elektrik güç sistemlerinde, hem yük grubu olması hem de elektrik güç şebekesine enerji transferi yapması bakımından elektrikli araçlarda (EA) bulunan batarya sistemlerinin, YFK sisteminin hızlı ve güvenilir bir şekilde kararlılığının sağlanması bakımından önemli bir çözüm olmuştur [11], [13], [14].

Elektrik güç sistemlerinde, yük değişimleri karşısında sistem frekansını kontrol etmek için, sistem frekansının ölçülmesi ve ölçüm verilerinin merkezi denetleyiciye aktarılması gerekmektedir [15],[16]. DTC kontrol birimi hızlı yanıt verme karakteristiğine sahip olmasına rağmen, kontrol merkezinden DTC kontrol çevrimine kontrol sinyallerinin iletilmesi, kontrol edilebilir yüklerin frekans düzenleme servisine alınabilmesi veya çıkarılabilmesi için bu kontrol çevriminde belirli bir zaman gecikmesi yaşanmasına neden olmaktadır [17], [18]. Ayrıca, kontrol merkezinden EA gruplarına kontrol sinyallerinin iletilmesi ve EA'ların frekans düzenleme servisine katılımlarını sağlamak için bir haberleşme alt yapısına ihtiyaç duyulmaktadır [19]-[22]. Bu durum, EA grupları tarafından zaman gecikmelerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Hem EA grupları hem de DTC kontrol çevrimi tarafında yaşanan zaman gecikmeleri, sistem dinamik performansını olumsuz olarak etkilemekte ve maksimum zaman gecikmesi olarak bilinen gecikme payının aşılması halinde sistem kararsızlığına neden olmaktadır [15], [16]. Bu nedenle, sistemin sınırdaki kararlı olabileceği zaman gecikme değerlerinin bilinmesi, denetleyici tasarım ve sistem dinamik kararlılık analizi bakımından oldukça önemlidir.

Literatürde, frekans düzleminde ve zaman düzleminde yöntemler kullanılarak EA grupları veya DTC kontrol birimi içeren YFK sistemlerinin zaman gecikmesinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. [19]-[21]'de yapılan çalışmalarda, frekans düzleminde bulunan frekans tarama, Rekasius yerine koyma ve üstel terimlerin eliminasyonu yöntemleri kullanılarak EA grupları içeren bir bölgesel YFK sistemlerinin zaman gecikme değerleri hesaplanmıştır. [22] ve [23]'de zaman düzleminde bulunan Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak EA grupları içeren bir bölgesel YFK sistemlerinin ve DTC kontrol çevrimi içeren YFK sistemlerinin zaman gecikmesi değerleri hesaplanmıştır. Ancak, hem EA grupları hem de DTC kontrol biriminin dahil edildiği YFK sisteminde EA grupları ve DTC biriminin frekans düzenleme servisi üzerinde etkisini incelemek ve sistemin zaman gecikme paylarının belirlenmesi oldukça önemlidir. Dolayısıyla, bu çalışmada öncelikle, hem DTC hem de EA grupları dikkate alınan zaman gecikmeli iki bölgesel YFK (YFK-EA-DTC) sisteminin modeli Matlab/Simulink ortamında [24] oluşturulmuştur. Daha sonra, oransal-integral (PI) denetleyici farklı kazanç değerleri için iki bölgesel YFK sisteminin gecikme pay değerleri benzetim çalışmaları yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca, sistemin gecikme pay değerleri üzerinde klasik üretim birimi, DTC ve EA gruplarının etkisini incelemek için, bu birimlerin farklı katılım oranları dikkate alınarak seçilen PI denetleyici kazanç değerleri için sistemin gecikme pay değerleri belirlenmiştir. Son olarak, Matlab/Simulink ortamında elde edilen sistem modeli kullanılarak iki bölgesel YFK-EA-DTC sisteminin farklı zaman gecikme değerinde frekans tepkileri incelenmiştir.

2. DTC kontrol Birimi ve EA grupları içeren zaman gecikmeli YFK sisteminin modeli

Şekil 1'de, EA grupları ve DTC kontrol çevrimi eklenen zaman gecikmeli iki bölgesel YFK sisteminin dinamik modeli görülmektedir. Bu modelde, klasik YFK sistem modeline kesikli çizgilerle gösterilen EA grupları ve DTC kontrol çevrimleri eklenerek sistem modeli değiştirilmiştir. Sistemin dinamik

modelinde, durum ifadeleri Δf_i , ΔX_{gi} , ΔP_{mi} , ΔP_{gi} , $\Delta P_{DTC,i}$, $\Delta P_{EV,i}$ ve ΔP_{Li} ($i=1,2$) olarak tanımlanmış ve bu ifadeler sırasıyla, her bir bölge için frekans değişimini, valf pozisyonunun, mekanik güç çıkışının, jeneratör güç çıkışının, DTC kontrol güç çıkışı, EA'ların güç çıkışının değişimlerini ve yükteki değişimi temsil etmektedir. Ayrıca, M_i , D_i , R_i , T_{gi} , T_{ci} , T_{ri} , F_{Pi} , β_i , ACE_i , ve T_{12} ($i=1,2$) sırasıyla, jeneratör eylemsizlik katsayısı, yük sönüm katsayısı, hız regülasyonu düşü sabiti, devir sayısı regülatörü zaman sabiti, türbin zaman sabiti, ara-ısıtma zaman sabiti, ara-ısıtmalı türbin katsayısı, frekans yönelim faktörü, alan kontrol hata sinyali ve iki bölge arasında senkronizasyon katsayısını göstermektedir. Şekil 1'den görüldüğü üzere, YFK sisteminin merkezi denetleyici tarafında ve DTC kontrol birimi tarafında PI denetleyici kullanılmıştır.

$$G_{ci}(s) = K_{Pi} + \frac{K_{Ii}}{s} \quad (1)$$

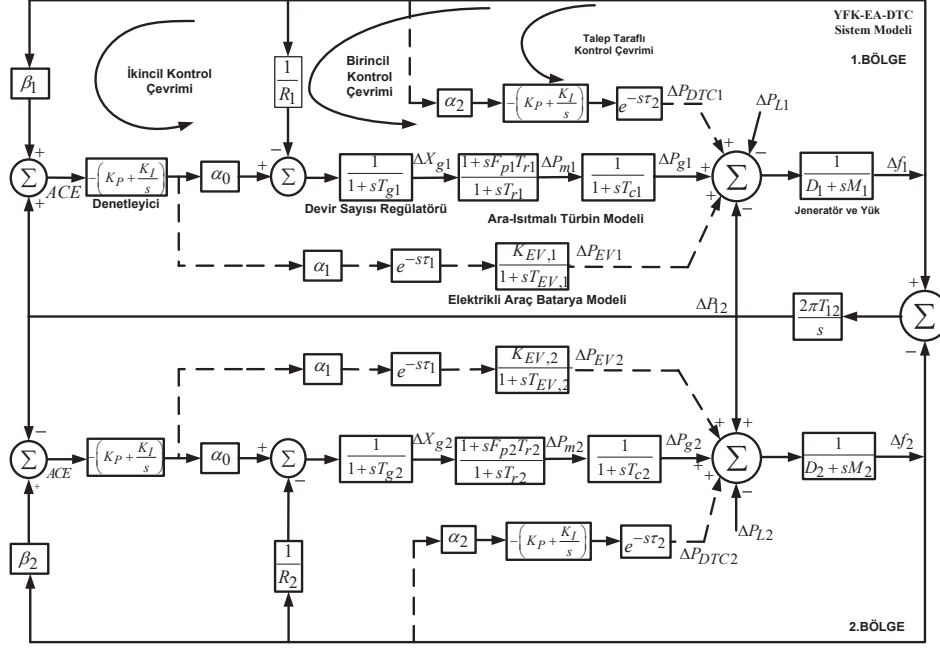
Burada, K_{Pi} ve K_{Ii} oransal ve integral denetleyici kazançlarıdır. Bu çalışmada, merkezi denetleyici ve DTC kontrol çevrimi kazanç değerlerinin birbirine eşit olduğu varsayılmıştır. Şekil 1'de, YFK sisteminin merkezi denetleyici çıkışına birinci dereceden bir transfer fonksiyona sahip olan EA batarya modeli dahil edilmiştir. Bu model aşağıda verildiği gibi tanımlanabilir.

$$G_{EVi}(s) = \frac{K_{EV,i}}{1 + sT_{EV,i}}, \quad i=1,2. \quad (2)$$

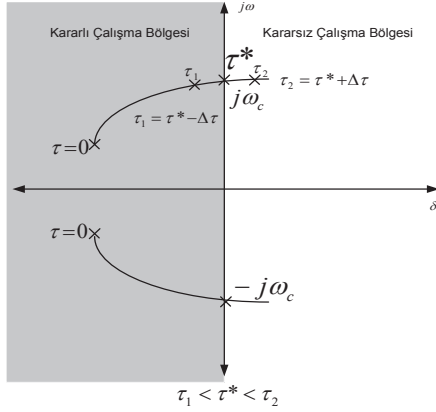
Burada, K_{EV} ve T_{EV} sırasıyla, EA grubuna ait batarya kazanç ve zaman sabitleridir. Ω frekans kontrol çabası olmak üzere; EA grupları, DTC kontrol birimi ve klasik üretim biriminin frekans düzenleme servisine olan katkıları aşağıda verildiği gibi bir paylaşımla yapılabılır [12],[22].

$$\begin{aligned} \Delta P_{S,i}(s) &= \alpha_{0i}\Omega \\ \Delta P_{EA,i}(s) &= \alpha_{1i}\Omega \\ \Delta P_{DTC,i}(s) &= \alpha_{2i}\Omega \end{aligned} \quad (3)$$

Burada, α_{0i} , α_{1i} ve α_{2i} ($i=1,2$) sırasıyla, klasik güç üretim birimi, EA gruplarının ve DTC kontrol çevriminin frekans düzenleme servisine olan katılımlarını göstermektedir. Katılım faktörlerinin toplamı $\alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 = 1$ olmaktadır. Bu katılım faktörlerine göre, her üretim birimi frekans düzenleme servisine katkı sunmaktadır. İki bölgesel YFK-EA-DTC sisteminde, EA grupları tarafında haberleşme gecikmesinin toplam miktarı τ_1 olmak üzere, EA modelini içeren çevrimlerde $e^{-s\tau_1}$ ifadesi ile gösterilmektedir. Benzer şekilde, DTC kontrol çevrimlerinde meydana gelen zaman gecikmesi τ_2 olarak belirlenmiş ve bu çevrimde $e^{-s\tau_2}$ olarak temsil edilmiştir. Hem DTC çevrimi tarafında hem de EA gruplarının bulunduğu çevrimde meydana gelen zaman gecikmeleri sistemin dinamik performansını ve kararlılığını olumsuz olarak etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, her bir bölge için $\tau_1 = \tau_2 = \tau$ olduğu varsayılmıştır.



Şekil 1: EA grupları ve DTC kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli iki bölge YFK sisteminin modeli



Şekil 2: Sistem köklerinin zaman gecikmesine göre değişimi

3. Zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi

İki bölge YFK-EA-DTC sisteminin kararlılık analizi için, öncelikle sistemin gecikmeye bağlı veya gecikmeden bağımsız kararlı olup olmadığı belirlenmelidir [16]. Şekil 2'de grafiksel olarak bir sistemin gecikmeye bağlı kararlılık şartı incelenebilir. Bir sistemin asimptotik kararlılık şartını sağlaması için, sistemin tüm kökleri verilen herhangi bir zaman gecikmesi değeri için kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde olmalıdır. Şekil 2'den görüldüğü üzere, sistemde herhangi bir zaman gecikmesi olmadığında ($\tau=0$), kökler kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde bulunmakta ve dolayısı ile yük frekans kontrol sistemi kararlı olmaktadır. Ancak, zaman gecikmesi $0 < \tau < \tau^*$ ($\tau = \tau^* - \Delta\tau$) için kompleks düzleme yaklaşmakta ve τ zaman gecikmesi $0 < \tau^* < \tau$ ($\tau = \tau^* + \Delta\tau$) olarak arttırılmaya devam edilirse, bir çift kompleks kök sol yarı bölge içerisinden, sağ yarı

bölgeye doğru hareket etmeye başlayabilir. Kökler, sonlu bir zaman gecikme değerinde ($\tau = \tau^*$) sanal eksenini $s = \pm j\omega_c$ noktalarında keserek, kompleks düzlemin sağ yarı bölgesine geçebilir. Köklerin, sanal eksenini kestiği zaman gecikmesi değeri kararlıdır. Dolayısıyla, τ^* gecikme değeri sistemin zaman gecikme payı olarak adlandırılır. Bu durum, $\tau \in [0, \tau^*)$ aralığında tanımlıdır ve $\tau > \tau^*$ değerinde sistem kararsız olmaktadır [16]. Ancak, $\tau \in [0, \infty)$ aralığında zaman gecikmesinin tüm pozitif ve sonlu değerlerinde sistem kararlılığını kaybetmeden çalışmasını sürdürabiliyorsa, bu durum sistemin gecikmeden bağımsız kararlılık şartını sağladığını göstermektedir [16]. Bu çalışmada, iki bölge YFK-EA-DTC sisteminin zaman gecikme payı değerleri benzetim ortamında belirlenmiştir.

4. Benzetim sonuçları

Bu bölümde, Şekil 1'de verilen iki bölge YFK-EA-DTC 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 payı değerleri elde edilmiştir. İki bölge YFK-EA-DTC kontrol sisteminin parametreleri aşağıda verilmiştir [22].

$$M_i = 8.8 \text{ s}, D_i = 1, F_{P_i} = 1/6, R_i = 1/11 \text{ pu}, \beta_i = 21 \text{ pu / Hz},$$

$$T_{g_i} = 0.2 \text{ s}, T_{c_i} = 0.3 \text{ s}, T_{r_i} = 12 \text{ s}, T_{12} = 0.1 \text{ pu} \quad (i = 1, 2)$$

Bu bölümün ilk analizi, seçilen PI denetleyici kazanç değerleri için iki bölge YFK-EA-DTC sisteminin farklı katılım oranlarında maksimum zaman gecikme değerlerinin belirlenmesidir. İkinci analizi ise, PI denetleyici kazanç değerlerinin sistemin zaman gecikme değerleri üzerinde etkisinin incelenmesidir. Öncelikle, iki bölge YFK-EA-DTC 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 1'de gösterilmiştir. Çizelge 1'de gösterilen " ∞ " sembolü bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesinden bağımsız kararlı 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 2'de gösterilmiştir. EA gruplarının katılımının zaman gecikme payı değeri üzerinde etkisini tam olarak incelemek için, Çizelge 1, Çizelge 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 daraldığını söyleyebiliriz. Başka bir analiz, DTC kontrol çevriminin zaman gecikme payı değerleri üzerinde etkisini incelemektir. Dolayısıyla, DTC kontrol çevrimi katılımı ($\alpha_2 = 0.3$) 30% oranında artırılmış 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 payı değerleri Çizelge 3'de sunulmuştur. Çizelge 1'e benzer olarak, Çizelge 3'de " ∞ " sembolü bazı denetleyici parametrelerinde sistemin zaman gecikmesinden bağımsız kararlı olduğunu göstermektedir. Çizelge 3, Çizelge 1 ile karşılaştırıldığında, Çizelge 3'den DTC kontrol çevriminin katılım oranının artması ile zaman gecikme payı değerlerinin arttığı açık olarak görülmektedir. Sonuç olarak, DTC kontrol birimi katılım oranı arttıkça sistemin kararlılık sınırının arttığını söyleyebiliriz.

PI denetleyici kazanç değerlerinin sistemin zaman gecikmesi payı değerleri üzerinde etkisi ayrıca Çizelge 1-3'den incelenebilir. Çizelge 1-3'den görüldüğü üzere, K_P denetleyici kazancı herhangi bir değerinde sabit tutulduğunda, K_I integral denetleyici kazancı arttıkça sistemin zaman gecikme payı değerleri azalmakta ve sistemin kararlılık sınırı olumsuz olarak etkilenmektedir.

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 1'den $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ katılım oranlarında $K_P = 0.8$ ve $K_I = 0.6$ denetleyici parametreleri için sistemin zaman gecikme payı $\tau^* = 2.110s$ olarak belirlenmiştir. Şekil 3, $\tau^* = 2.110s$ etrafında seçilen zaman gecikme değerleri için sistemin birinci bölgenin frekans tepkisini göstermektedir. $\tau^* = 2.110s$ maksimum zaman gecikme değerinden ($\tau = 2.030s < \tau^* = 2.110s$) küçük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sönümlendiği ve sistemin kararlılığa doğru gittiği görülmektedir.

$\tau^* = 2.110s$ değerinde, Şekil 3'den görüldüğü üzere sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların sürekli olarak devam ettiği ve sistemin sınırdaki kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, ($\tau^* = 2.110s < \tau = 2.190s$) büyük olan gecikme değerlerinde sistemin frekans tepkisinde meydana gelen salınımların gittikçe büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir.

Çizelge 1: $\alpha_0 = 0.8$, $\alpha_1 = 0.1$ ve $\alpha_2 = 0.1$ için zaman gecikmesi payları

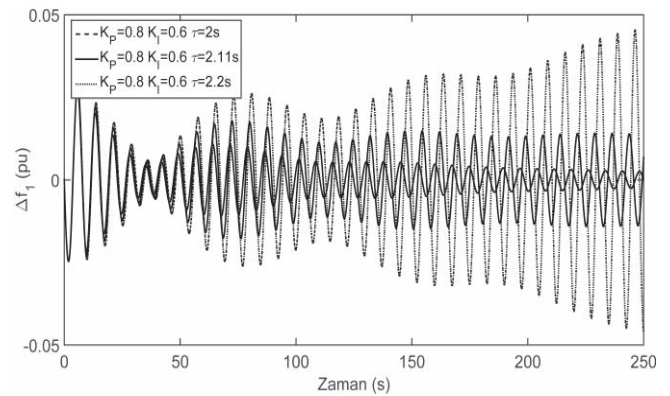
$\tau^* (s)$	K_I				
K_P	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
0.2	∞	1.764	0.732	0.273	0.020
0.4	∞	2.850	1.323	0.736	0.408
0.6	∞	4.049	1.783	1.118	0.739
0.8	∞	∞	2.110	1.404	1.003
1.0	∞	∞	2.322	1.601	1.198

Çizelge 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
0.2	2.381	0.938	0.510	0.305	0.186
0.4	2.379	1.279	0.811	0.557	0.399
0.6	2.080	1.386	0.985	0.733	0.563
0.8	1.770	1.348	1.046	0.830	0.671
1.0	1.506	1.245	1.032	0.862	0.726

Çizelge 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
0.2	∞	1.988	0.949	0.492	0.244
0.4	∞	2.835	1.431	0.872	0.560
0.6	∞	3.489	1.786	1.183	0.832
0.8	∞	3.954	2.008	1.410	1.048
1.0	∞	4.218	2.116	1.558	1.206



Şekil 3: Farklı gecikme değerlerinde sistemin frekans yanıtı

5. Sonuç

Bu çalışmada, iki bölgeyi YFK-EA-DTC sisteminin zaman gecikme payları üzerinde EA grupları ve DTC kontrol biriminin katılım oranlarının etkisi benzetim ortamında incelenmiştir. Bu amaçla, Matlab/Simulink ortamında iki bölgeyi YFK-EA-DTC sisteminin modeli oluşturulmuş ve PI denetleyici kazançlarının farklı değerleri için zaman gecikme payları değerleri belirlenmiştir. Çizelge 1-3'de sunulan bu sonuçlar DTC kontrol çevriminin katılım oranının artışının sistemin kararlılık sınırı üzerinde olumlu bir etkisinin olduğunu ancak, EA katılımlarının kararlılık sınırını daralttığı görülmüştür. 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.

Teşekkür

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

6. Kaynaklar

- [1] Saadat, H., Power system analysis, McGraw Hill Inc., New York, 1999.
- [2] Kundur, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill Inc., New York, 1994.
- [3] Datta, M., Senju, T., Yona, A., Funabashi, T. and Kim, C.H., "A frequency-control approach by photovoltaic generator in a PV-diesel hybrid power system", IEEE Transactions on Energy Conversion 26, 559–571, 2011.
- [4] Delille, G., Francois, B. and Malarange, G., "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, 2012.
- [5] Wang, W., Xu, Y. and Khanna, M., "A survey on the communication architectures in smart grid", Computer Networks, 55, 3604-3629, 2011.
- [6] Falahati, S., Taher, S.A. and Shahidehpour M., "A new smart charging method for EVs for frequency control of smart grid", Electrical Power and Energy Systems 83, 458–469, 2016.
- [7] Liu, H., Qi, J., Wang, J., Li, P., Li, C. and Wei, H., "EV Dispatch Control for Supplementary Frequency Regulation Considering the Expectation of EV Owners", IEEE Transactions on Smart Grid, 9, 3763 - 3772, 2018.
- [8] Masuta, T. and Yokoyama, A., "Supplementary load frequency control by use of a number of both electric vehicles and heat pump water heaters", IEEE Transactions on Smart Grid 3, 1253–1262, 2012.
- [9] Shi, Q., Cui, H., Li, F., Liu, Y., Ju, W., Sun, Y., "A Hybrid Dynamic Demand Control Strategy for Power System Frequency Regulation", CSEE Journal of Power and Energy Systems, 3, 176 - 185, 2017.
- [10] Li, Y. J., Xu, Z., Ngan, H.W. and Wong, S.C., "A novel topology design for integration of offshore wind farm via

- high-voltage DC transmission", Electric Power Components and Systems, 43, 1100–1112, 2015.
- [11] Babahajiani, P., Shafiee, Q., Bevrani, H., "intelligent demand response contribution in frequency control of multi area power systems", IEEE Transactions on Smart Grid, 9, 1282 - 1291, 2018.
- [12] Pourmousavi, S.A. and Nehrir, M.H., "Introducing dynamic demand response in the LFC model", IEEE Transactions on Power Systems, 29, 1562-1572, 2014.
- [13] Luo, X., Xia, S. and Chan, K.W. "A decentralized charging control strategy for plug-in electric vehicles to mitigate wind farm intermittency and enhance frequency regulation", Journal of Power Sources, 248, 604 – 614, 2014.
- [14] Shimizu, K., Masuta, T., Ota, Y. and Yokoyama, A., "Load frequency control in power system using vehicle-to-grid system considering the customer convenience of electric vehicles", Power System Technology (POWERCON), 2010, 1-8.
- [15] Jiang, L., Yao, W., Wu, Q.H., Wen, J.Y., Cheng, S.J., "Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays", IEEE Transactions on Power Systems, 27, 932-941, 2012.
- [16] Sönmez, Ş., Ayasun, S. and Nwankpa, C.O., "An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays", IEEE Transactions on Power Systems, 31, 370-377, 2016.
- [17] Hui, H., Ding, Y., Song, Y. and Rahman, S., "Modeling and control of flexible loads for frequency regulation services considering compensation of communication latency and detection error", Applied Energy, 250, 161-174, 2019.
- [18] Hosseini, S.A., Toulabi, M., Dobakhshari, A.S., Ashouri-Zadeh, A. and Ranjbar, A.M., "Delay compensation of demand response and adaptive disturbance rejection applied to power system frequency control", IEEE Transactions on Power Systems, 35, 2037–2046, 2020.
- [19] Khalil, A. and Peng, A.S., "Delay margin computation for load frequency control system with plug-in electric vehicles", International Journal of Power and Energy Systems, 38, 1-17, 2018.
- [20] Naveed, A., Sönmez, Ş. and Ayasun, S., "Identification of stability delay margin for load frequency control system with electric vehicles aggregator using Rekasius substitution", IEEE 2019 Milan PowerTech, 2019, 1-6.
- [21] Naveed, A., Sönmez Ş. and Ayasun, S., "Impact of electric vehicle aggregator with communication time delay on stability regions and stability delay margins in load frequency control system", Accepted for publication in Journal of Modern Power Systems and Clean Energy 2020. doi: 10.35833/MPCE.2019.000244.
- [22] Ko, K.S. and Sung, D.K., "The effect of EV aggregators with time-varying delays on the stability of a load frequency control system" IEEE Transactions on Power Systems, 33, 669–680, 2018.
- [23] Zhu, Q., Jiang, L., Yao, W., Zhang, C.K. and Luo, C., "Robust load frequency control with dynamic demand response for deregulated power systems considering communication delays", Electric Power Components and Systems, 45, 75-87, 2017.
- [24] Simulink, Model-Based and System-Based Design, Using Simulink. Natick: MathWorks, 2000.