



Sanal Atalet Moment Kontrolü İçeren Zaman Gecikmeli Mikro-Şebeke Sisteminin Gürbüz Kararlılık Analizi

Robust Stability Analysis of Time-Delayed Microgrid System with Virtual Inertia Control

Kübra Nur Gül¹, Şahin Sönmez², Saffet Ayasun³

¹Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi
kubragul@ohu.edu.tr

²Elektronik ve Otomasyon Bölümü
Malatya Turgut Özal Üniversitesi
sahin.sonmez@ozal.edu.tr

³Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü
Gazi Üniversitesi
saffetayasun@gazi.edu.tr

Özet

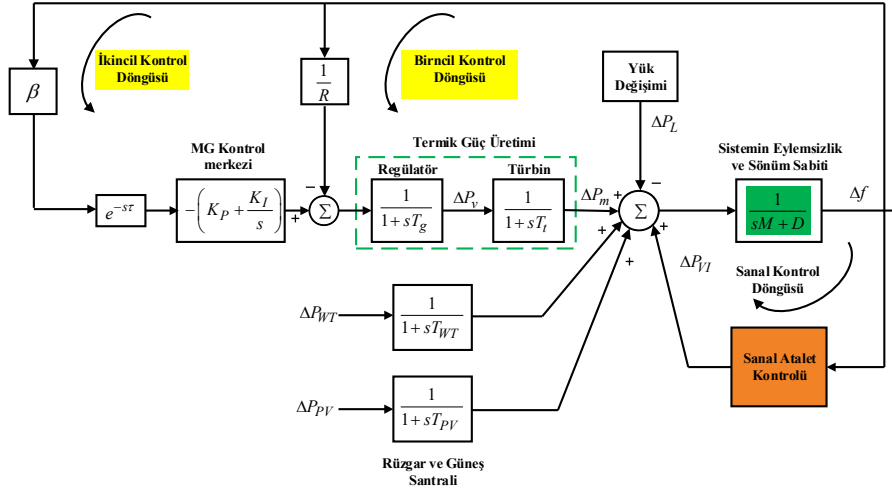
Bu çalışmada sanal atalet ve sönümleme kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli bir mikro-şebekenin (MG) gürbüz kararlılık bölgeleri elde edilmiştir. Güç elektroniği tabanlı yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) MG sistemlerine dahil edilmesi nedeniyle sistemin dinamik performansı bozulabilmektedir. Ayrıca, sistem parametrelerinde ve haberleşme zaman gecikmesinde belirsizliklerin olması, MG sistemin dinamik kararlılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Dolayısıyla, MG sistemlerin denetleyici parametrelerinin gürbüz olarak tasarlanması gürbüz frekans kararlılığının sağlanması bakımından oldukça önemlidir. Bu çalışmada, Kharitonov teoremi ve kararlılık sınır eğrisi yöntemi kullanılarak bir MG sistemin gürbüz kararlılık bölgeleri hesaplanmış ve kararlılık bölgeleri üzerinde sanal atalet ve sönümleme kontrol parametrelerinin etkisi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Abstract

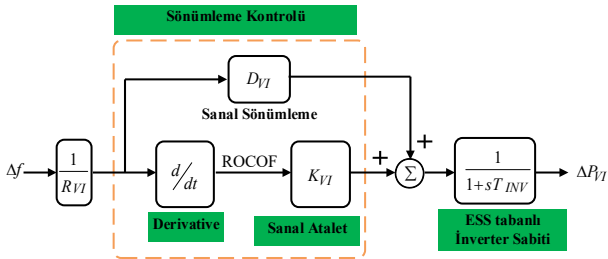
This study obtains the robust stability regions of time delayed microgrid (MG) system enhanced by virtual inertia and damping (VID) control. The inclusion of power electronics converter based renewable energy sources (RES) in the MG system could degrade the dynamic performance of the system. Additionally, the uncertainties in MG system parameters and communication time delay negatively affect the dynamic stability of the system. Therefore, the design of the robust controller parameters of the MG system is vital to maintain the robust frequency stability. In this study, Kharitonov's theorem and stability boundary locus method are used to obtain robust stability regions of the MG system and the effect of the VID control on the robust regions is comprehensively examined.

1. Giriş

Günümüz mikro-şebeke (MG) sistemlerinin, frekans kontrolünün ve kararlılığının sağlanması bakımından iki önemli sorunla yüzleştiği söylenebilir. Bu sorunlar, yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) tabanlı üretim birimlerinin yoğun olarak MG sistemlerine dahil edilmesi nedeniyle atalet ve sönümleme momenti yetersizliğinin ortaya çıkması [1] ve MG sistemlerde haberleşme ağlarının kullanımından kaynaklanan haberleşme zaman gecikmeleridir [2, 3]. Fosil yakıtların, iklim değişikliği ve çevre problemleri üzerinde bozucu etkisinin artması nedeniyle, YEK tabanlı rüzgar gücü ve güneş enerji santralleri gibi küçük güçlü dağıtık üretim birimlerinin MG sistemlerde kurulumu her geçen gün artmaktadır. Böylesi üretim birimlerinin MG sistemlere entegre edilebilmesi için güç elektroniği tabanlı dönüştürücüler kullanılmaktadır [4]. Bu durum, klasik senkron jeneratör tabanlı üretim birimlerinin frekans kontrol servisi üzerinde etkinliğinin azalmasına ve MG sistemlerde, atalet ve sönümleme momentinin yetersizliğine neden olmaktadır [4, 5]. Dolayısıyla, YEK tabanlı üretimlerin bu tesisi, sistemin güç dengesizliği karşısında frekans kararlılığını olumsuz etkilemekte ve frekansta dalgalanmaların artmasına yol açmaktadır. MG sistemlerin eylemsizlik ve sönümleme momenti ihtiyacını karşılamak amacıyla, gerçek bir senkron jeneratörün davranışı taklit edilerek çeşitli topolojiler geliştirilmiştir [5-8]. Bu yöntemler arasında, aktif güç-frekans dengesi dikkate alınarak frekans değişim oranı (the Rate of Change of Frequency, RoCoF [5]) tabanlı sanal eylemsizlik kontrolü MG frekans kontrol sistemlerine etkin olarak uygulanmıştır [5-9]. Bu çalışmada, sanal eylemsizlik ve sönümleme (virtual inertia and damping, VID) kontrolünü sağlamak ve gerçek bir senkron jeneratörün eylemsizliğini taklit etmek için RoCoF topolojisi kullanılmıştır[5].



Şekil 1: VID kontrol çevrimi içeren MG sistemi blok diyagramı



Şekil 2: VID kontrol biriminin detaylı gösterimi

Eylemsizlik ve sönümlenme momenti problemine ek olarak, MG sistemlerinde meydana gelen haberleşme zaman gecikmeleri sistemin frekans kararlılığını ve denetleyici performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Güç üretim birimlerinden alınan ölçüm verilerini bir MG kontrol merkezine iletmek ve kontrol merkezinden alınan kontrol sinyallerinin üretim birimlerine iletmek amacıyla haberleşme ağları yoğun olarak kullanılmaktadır. Bu durum, sistemde haberleşme zaman gecikmelerinin yaşanmasına neden olmaktadır [10, 11]. Dolayısıyla, denetleyici parametre tasarımında ve sistemin kararlılık analizi çalışmalarında zaman gecikme değerleri dikkate alınmalıdır.

Bu çalışmada, VID kontrol çevrimi içeren MG (MG-VID) sistemi için, Kharitonov teoremi kullanılarak MG-VID sisteminin gürbüz kararlılık bölgeleri elde edilmiş ve VID parametrelerinin gürbüz kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi incelenmiştir. Bu doğrultuda, kararlılık sınır eğrisi yöntemi [12] ve Kharitonov teoremi [13] üzerine dayalı olarak gürbüz denetleyici parametre tasarımı sağlanmıştır. Basit bir grafiksel yaklaşım olarak kararlılık sınır eğrisi yöntemi, VID kontrol birimi içeren zaman gecikmeli MG sisteminin önceden tanımlanmış herhangi bir zaman gecikmesi değeri için denetleyici parametre düzleminde bir kararlılık bölgesi hesaplamaktadır. Bu çözüm ile elde edilen denetleyici parametreleri sınırdaki kararlılık veya Hurwitz kararlılık şartlarını sağlamasına rağmen, sistem parametrelerinin belirsizliği karşısında sistemin gürbüz kararlılığını garanti etmek için gürbüz denetleyici parametrelerinin tasarlanması gerekmektedir [14-16]. Parametrik belirsizlikleri önceden tanımlanmış bir

sistemin gürbüz kararlılığını sağlamak ve kontrol etmek için, sadece dört adet aralık polinomu üzerine dayalı olan Kharitonov teoremi uygulanabilir [13]. Son yıllarda, bu teknik MG [14,15] ve klasik YFK [16] sistemlerine etkin bir şekilde uygulanmıştır. Son olarak, MATLAB/Simulink [17] ortamında oluşturulan benzetim çalışmaları yardımıyla elde edilen teorik sonuçların doğruluğu analiz edilmiştir.

2. Zaman gecikmeli MG-VID sistem modeli

Şekil 1'de, VID kontrol çevrimi eklenen zaman gecikmeli bir MG sisteminin dinamik modeli görülmektedir. Klasik MG sistem modelinden farklı olarak, ikincil kontrol çevrimi tarafında $e^{-s\tau}$ ile gösterilen zaman gecikmesi ifadesi ve bir VID kontrol bloğu eklenmiştir. Sistemde meydana gelen toplam zaman gecikmesi değeri τ ile gösterilmiştir. Ayrıca, ikincil kontrol çevrimi tarafında bir oransal-integral (PI) denetleyici yer almaktadır. Bu kontrol çevrimi tarafında K_P ve K_I oransal ve integral denetleyici kazanç değerlerini göstermektedir. Sistem modelinde, M , D , R , β , T_g , T_t , T_{WT} ve T_{PV} sırasıyla, jeneratör eylemsizlik ve sönüm sabitleri, hız regülasyon düşü sabiti, frekans yönelim faktörü, devir sayısı regülatörü, türbin, rüzgar türbini ve güneş enerji sistemi zaman sabitleridir. Sistemin dinamik modelinde, durum ifadeleri Δf , ΔP_v , ΔP_m , ΔP_{VI} olarak tanımlanmış ve bu ifadeler sırasıyla, frekans değişimini, valf pozisyonunun, mekanik güç çıkışının ve VID kontrol çıkışının güç değişimlerini temsil etmektedir. Ayrıca, ΔP_L , ΔP_{WT} ve ΔP_{PV} sırasıyla, yükteki değişimi, rüzgar gücü değişimini ve güneş santrali güç üretim değişimini göstermektedir. Dikkat edilecek olunursa, MG sisteminde, yük değişimi ve YEK üretim birimlerinin güç dalgalanmaları neticesinde, sistem frekansında meydana gelen aşırı dalgalanmaları en aza indirmek ve sistemin eylemsizlik ve sönümlenme momentini arttırmak için enerji depolama tabanlı bir sanal eylemsizlik ve sönüm momenti kontrol çevrimi eklenmiştir [5-8]. VID kontrol modelinin detaylı gösterimi Şekil 2'de ve bu kontrol çevriminin RoCoF tabanlı transfer fonksiyonu Denklem (1)'de yer almaktadır.

$$\frac{\Delta P_{VI}(s)}{\Delta f(s)} = \frac{sK_{VI} + D_{VI}}{1 + sT_{INV}} \left(\frac{1}{R_{VI}} \right) \quad (1)$$

Burada, K_{VI} , D_{VI} , T_{INV} ve R_{VI} sırasıyla, VID kontrol çevriminin sanal eylemsizlik ve sönüm sabitleri, inverter tabanlı enerji depolama sisteminin zaman sabiti ve sanal hız düşü sabitini temsil etmektedir [5-8]. Böylesi bir güç sisteminde, YEK tabanlı üretimlerde meydana gelen değişimler, sistemin parametrik değişimleri ve zaman gecikmesinde meydana gelen belirsizlikler gürbüz olarak frekansı kontrol etmek ve sistemin kararlılığının sürdürülmesi için önemlidir. Bu amaçla, öncelikle Şekil 1'deki sistemin karakteristik denklemi aşağıda verildiği gibi elde edilmelidir.

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

$$P(s) = p_1s + p_2s^2 + p_3s^3 + p_4s^4 + p_5s^5 + p_6s^6 + p_7s^7 \quad (3)$$

$$Q(s) = q_0 + q_1s + q_2s^2 + q_3s^3 + q_4s^4$$

Burada, p ve q katsayıları $P(s)$ ve $Q(s)$ polinomlarının sistem parametreleri cinsinden katsayılarıdır. Polinomlar, sistem parametreleri cinsinden fazla yer kapladığından dolayı burada ayrıntılı olarak sunulmamıştır.

3. Sistemin gürbüz kararlılık bölgelerinin hesaplanması

3.1. Kararlılık sınır eğrisi yönteminin uygulanması

Bu bölümde, karakteristik denklem (3)'de verilen MG sistemin nominal parametreleri için kararlılık sınır eğrisi yönteminin uygulanması ve tüm kararlı kılıcı PI denetleyici parametrelerinin hesaplanması sunulmuştur. Öncelikle, $s=j\omega_c$ ($\omega_c > 0$) için karakteristik Denklem (2), denetleyici parametreleri cinsinden aşağıda verildiği gibi düzenlenmiştir.

$$\begin{aligned} \Delta(j\omega_c, \tau) &= p_7(j\omega_c)^7 + p_6(j\omega_c)^6 + p_5(j\omega_c)^5 + p_4(j\omega_c)^4 + \\ & p_3(j\omega_c)^3 + p_2(j\omega_c)^2 + p_1(j\omega_c) + \\ & K_P(q_4(j\omega_c)^4 + q_3(j\omega_c)^3 + q_2(j\omega_c)^2 + q_1(j\omega_c))e^{-j\omega_c\tau} + \\ & K_I(q_3(j\omega_c)^3 + q_2(j\omega_c)^2 + q_1(j\omega_c) + q_0)e^{-j\omega_c\tau} = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Burada, q' ve q'' sırasıyla, Denklem (3)'de q katsayıları içerisinde K_P ve K_I parametreleri çıkartıldıktan sonra bilinen sistem parametreleri cinsinden katsayılarıdır. Denklem (4)'de $e^{-j\omega_c\tau} = \cos(\omega_c\tau) - j\sin(\omega_c\tau)$ eşitliği yazıldığında, $\Delta(j\omega_c, \tau)$ ifadesinin reel ve sanal kısımları sıfıra eşitlenerek bilinmeyen K_P ve K_I parametrelerini çözmek için aşağıda verilen denklem hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} K_P A_1(\omega_c) + K_I B_1(\omega_c) + C_1(\omega_c) &= 0 \\ K_P A_2(\omega_c) + K_I B_2(\omega_c) + C_2(\omega_c) &= 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Burada, $A_i(\omega_c)$, $B_i(\omega_c)$ ve $C_i(\omega_c)$ ($i=1,2$) katsayıları, ω_c ve sistem parametreleri cinsinden polinomlardır, Denklem (5)'in aşağıda verilen çözümü kullanılarak (K_P , K_I) düzleminde sistemin nominal sistem parametreleri için kararlılık sınır eğrisi elde edilebilir [12].

$$\begin{aligned} K_P &= \frac{B_1(\omega_c)C_2(\omega_c) - B_2(\omega_c)C_1(\omega_c)}{A_1(\omega_c)B_2(\omega_c) - A_2(\omega_c)B_1(\omega_c)} \\ K_I &= \frac{A_2(\omega_c)C_1(\omega_c) - A_1(\omega_c)C_2(\omega_c)}{A_1(\omega_c)B_2(\omega_c) - A_2(\omega_c)B_1(\omega_c)} \end{aligned} \quad (6)$$

Denklem (6)'da ω_c belirli bir aralıkta değiştirilerek, MG-VID sisteminin kararlılık sınır eğrisi (Complex Root Boundaries, CRB) hesaplanabilir. CRB eğrisine ek olarak, MG-VID sisteminin sanal eksenini kesen reel kökleri için reel kök sınır (Real Root Boundary, RRB) eğrisi hesaplanmalıdır. Dolayısıyla, Denklem (6)'da $\omega_c=0$ için $K_I=0$ doğrusu MG-VID sisteminin RRB eğrisi olarak tanımlanır. CRB ve RRB eğrisi, sistemin (K_P , K_I) düzleminde kararlı ve kararsız bölgelere ayırmaktadır [12]. Ancak, sistemin parametrik belirsizliği ve parametrelerdeki değişim karşısında gürbüz kararlılık bölgelerinin elde edilmesi için Kharitonov teoremi uygulanmalıdır.

3.2. Gürbüz kararlılık bölgeleri için Kharitonov teoreminin MG-VID sistemine uygulanması

Güç sistemlerinin pratik ve gerçek uygulamalarında, sistemin parametrik belirsizliği ve modelmeden kaynaklanan hatalar sistemin dinamik performansını ve kararlılığını olumsuz etkileyebilmektedir. Böylesi sistemlerin parametreleri, tanımlanan alt ve üst limit değerlerinde değiştirilerek, parametreleri belirli bir aralıkta değişebilen karakteristik polinomlar hesaplanmaktadır. Kharitonov teoremi, MG-VID sisteminin karakteristik Denklem (2) ve (3) ile verilen parametrelerinin belirsizliği karşısında sadece dört adet polinom üzerine dayalı olarak tanımlanmaktadır [13] ve her bir polinomun Routh-Hurwitz kararlılık testini sağlaması halinde MG sistemin gürbüz kararlılık şartını sağladığı söylenebilir. Kharitonov teoremini Denklem (2)'de verilen karakteristik polinoma uygulayabilmek için, öncelikle $s=j\omega_c$ için $e^{-j\omega_c\tau} = \cos(\omega_c\tau) - j\sin(\omega_c\tau)$ yazılarak aşağıda verilen denklem elde edilmelidir.

$$\Delta(s, \alpha, \beta) = \sum_{\ell=0}^7 (\alpha_\ell + j\beta_\ell)s^\ell = 0 \quad (7)$$

Burada, α_ℓ ve β_ℓ ($\ell=0,1,\dots,7$) karakteristik denklem (3)'ün parametreleri cinsinden ifade edilen reel ve sanal katsayılarıdır. MG-VID sistem parametrelerinde değişimler dikkate alınarak Denklem (7)'de verilen sistemin karakteristik polinomuna Kharitonov teoremi uygulanarak aşağıda verildiği gibi dört adet vertex polinom hesaplanmaktadır.

$$\begin{aligned} K_1(s) &= (\underline{\alpha}_0 + \underline{\alpha}_1s + \underline{\alpha}_2s^2 + \underline{\alpha}_3s^3 + \dots) + j(\underline{\beta}_0 + \underline{\beta}_1s + \underline{\beta}_2s^2 + \underline{\beta}_3s^3 + \dots) \\ K_2(s) &= (\overline{\alpha}_0 + \overline{\alpha}_1s + \overline{\alpha}_2s^2 + \overline{\alpha}_3s^3 + \dots) + j(\overline{\beta}_0 + \overline{\beta}_1s + \overline{\beta}_2s^2 + \overline{\beta}_3s^3 + \dots) \\ K_3(s) &= (\underline{\alpha}_0 + \underline{\alpha}_1s + \underline{\alpha}_2s^2 + \underline{\alpha}_3s^3 + \dots) + j(\overline{\beta}_0 + \overline{\beta}_1s + \overline{\beta}_2s^2 + \overline{\beta}_3s^3 + \dots) \\ K_4(s) &= (\overline{\alpha}_0 + \overline{\alpha}_1s + \overline{\alpha}_2s^2 + \overline{\alpha}_3s^3 + \dots) + j(\underline{\beta}_0 + \underline{\beta}_1s + \underline{\beta}_2s^2 + \underline{\beta}_3s^3 + \dots) \end{aligned} \quad (8)$$

Burada, vertex polinomların katsayılarının minimum ve maksimum değerleri sistem parametreleri cinsinden aşağıda verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
\alpha_0 &= K_I q_0'' \cos(\omega\tau); \bar{\alpha}_0 = K_I \bar{q}_0'' \cos(\omega\tau); \alpha_1 = (K_P q_1' + K_I q_1'') \cos(\omega\tau); \\
\bar{\alpha}_1 &= (K_P \bar{q}_1' + K_I \bar{q}_1'') \cos(\omega\tau); \alpha_2 = (K_P q_2' + K_I q_2'') \cos(\omega\tau); \\
\bar{\alpha}_2 &= (K_P \bar{q}_2' + K_I \bar{q}_2'') \cos(\omega\tau); \alpha_3 = (K_P q_3' + K_I q_3''); \\
\bar{\alpha}_3 &= (K_P \bar{q}_3' + K_I \bar{q}_3'') \cos(\omega\tau); \alpha_4 = K_P q_4' \cos(\omega\tau); \bar{\alpha}_4 = K_P \bar{q}_4' \cos(\omega\tau); \alpha_5 = p_5; \\
\bar{\alpha}_5 &= \bar{p}_5; \alpha_6 = p_6; \bar{\alpha}_6 = \bar{p}_6; \alpha_7 = \bar{p}_7; \alpha_7 = \bar{p}_7; \\
\beta_0 &= -K_I q_0'' \sin(\omega\tau); \bar{\beta}_0 = -K_I \bar{q}_0'' \sin(\omega\tau); \beta_1 = -(K_P q_1' + K_I q_1'') \sin(\omega\tau); \\
\bar{\beta}_1 &= -(K_P \bar{q}_1' + K_I \bar{q}_1'') \sin(\omega\tau); \beta_2 = -(K_P q_2' + K_I q_2'') \sin(\omega\tau); \\
\bar{\beta}_2 &= -(K_P \bar{q}_2' + K_I \bar{q}_2'') \sin(\omega\tau); \beta_3 = -(K_P q_3' + K_I q_3'') \sin(\omega\tau); \\
\bar{\beta}_3 &= -(K_P \bar{q}_3' + K_I \bar{q}_3'') \sin(\omega\tau); \beta_4 = -K_P q_4' \sin(\omega\tau); \bar{\beta}_4 = -K_P \bar{q}_4' \sin(\omega\tau).
\end{aligned} \tag{9}$$

Burada, p , q' ve q'' katsayılarında yer alan alt ve üst indisler, sistem parametrelerinin alt ve üst sınır değerlerini temsil etmekte ve bu katsayılar pozitif değerlere sahiptir. Dolayısıyla, Denklem (8)'e göre oluşturulan vertex polinomları kullanılarak dört adet kararlılık bölgesinin oluşturulması amaçlanmaktadır. Kararlılık bölgelerinin hesaplanması için Denklem (4)-(6) her bir vertex polinomu için uygulanarak dört adet kararlılık bölgesi hesaplanmalıdır. Sonuç olarak dört adet kararlılık bölgesinin kesişimi, MG-VID sisteminin gürbüz kararlılık bölgesini göstermektedir.

4. Benzetim sonuçları

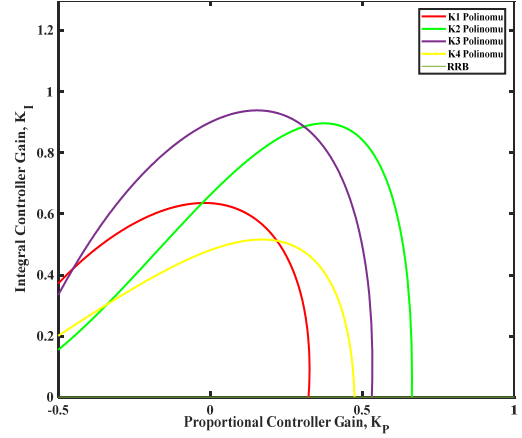
Bu bölümde, Şekil 1'de verilen MG-VID sisteminin aşağıda verilen parametreleri [5] kullanılarak ve bu parametrelerdeki değişimler dikkate alınarak gürbüz kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned}
M &= 0.164, D = 0.016, R = 2.4, \beta = 0.99, T_{PV} = 1.9s, T_{WT} = 1.4s, \\
T_g &= 0.1s, T_l = 0.4, R_{VI} = 2.7, K_{VI} = 1.6, D_{VI} = 1.2, T_{INV} = 10s.
\end{aligned}$$

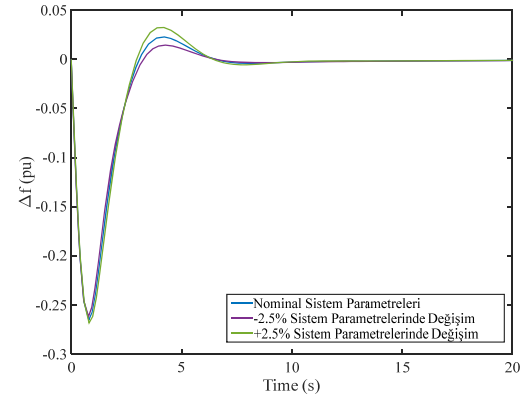
Sistemin gürbüz kararlılık bölgelerinin hesaplanmasında, zaman gecikmesi ifadesi $\tau=1.0$ s olarak seçilmiş ve sistemin tüm parametrelerinde $\pm 2.5\%$ 'lik bir değişim olması halinde Denklem (9)'da verilen sistem katsayılarının alt ve üst limit değerleri aşağıda verildiği gibi elde edilmiştir.

$$\begin{aligned}
p_1 &\in [2.08 \ 2.13]; p_2 \in [19.07 \ 20.33]; p_3 \in [49.84 \ 55.79]; \\
p_4 &\in [48.38 \ 57.38]; p_5 \in [18.06 \ 23.1]; p_6 \in [5.147 \ 6.94]; \\
p_7 &\in [0.35 \ 0.5]; q_1' = q_0'' \in [2.26 \ 2.5]; q_2' = q_1'' \in [29.29 \ 34.03]; \\
q_4' = q_3'' &\in [76.57 \ 93.52]; q_3'' \in [55.69 \ 71.51].
\end{aligned}$$

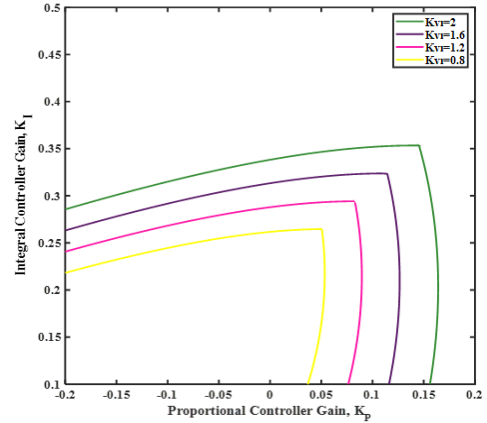
Yukarıda tanımlanan aralıklar için Denklem (8)'de verilen dört adet Kharitonov polinomunun kararlılık bölgeleri hesaplanmış ve Şekil 3'de sunulmuştur. Şekil 3'den görüldüğü üzere, $K_I=0$ doğrusu tüm vertex polinomları için RRB eğrisini oluşturmakta ve her bir polinoma karşılık gelen bir CRB eğrisi elde edilmektedir. Dört CRB eğrisinin bu kesişimi MG-VID sisteminin gürbüz kararlılık bölgesini vermektedir. Şekil 3'de elde edilen gürbüz kararlılık bölgesinin doğruluğunu göstermek ve sistemin gürbüz frekans kararlılığını incelemek için gürbüz kararlılık bölgesi içerisinde $K_P=0.02$ ve $K_I=0.2$ olarak denetleyici parametreleri seçilmiştir. $\Delta P_L=0.1pu$ yük değişimi ve $\Delta P_{WT}=\Delta P_{PV}=0.01pu$ YEK tabanlı güç üretim değişikliği karşısında sistemin gürbüz frekans kararlılığı Şekil 4'de sunulmuştur. Şekil 4'de verilen frekans tepkisinden, sistemin nominal parametreleri ve parametrik değişimleri karşısında kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 3: $\tau=1.0s$ ve 2.5% belirsizlik oranı için Kharitonov polinomları kararlılık bölgeleri

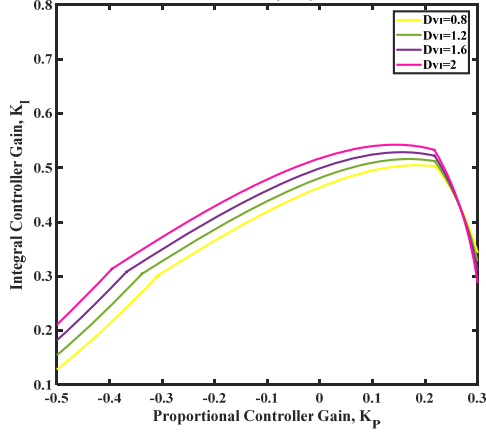


Şekil 4: Seçilen denetleyici kazanç değerlerinde ve nominal sistem parametrelerinde sistemin frekans tepkisi



Şekil 5: $\tau=1.0s$ ve 5.0% belirsizlik oranı için farklı atalet değerlerinde gürbüz kararlılık bölgeleri

Son olarak, gürbüz kararlılık bölgeleri üzerinde VID kontrol parametrelerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla, $\tau=1.0s$ ve $D_{VI}=1.2$ seçilmiş ve sistemin diğer parametrelerinde 5.0% belirsizlik dikkate alınmıştır. Bu durum için, K_{VI} değerlerinin gürbüz kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 5'den, $K_{VI}=0.8$ 'den $K_{VI}=2.0$ değerine kadar arttıkça gürbüz kararlılık bölgelerinin büyüdüğü görülmektedir.



Şekil 6: $\tau=1.0s$ ve 2.5% belirsizlik oranı için farklı sönümlenme değerlerinde gürbüz kararlılık bölgeleri

Benzer bir analiz, $\tau=1.0s$ ve $K_{VI}=1.6$ seçilerek ve sistemin diğer parametreleri için 2.5% belirsizlik olduğu durumda yapılmıştır. Bu durumda, D_{VI} parametresinin gürbüz kararlılık bölgeleri üzerinde etkisi Şekil 6'da görülmektedir. Şekil 5'de elde edilen sonuçlara benzer olarak, D_{VI} değerleri arttıkça gürbüz kararlılık bölgelerinin büyüdüğü Şekil 6'dan açıktır. Dolayısıyla, sanal eylemsizlik ve sönümlenme sabitinin sistemin gürbüz kararlılık bölgelerini iyileştirdiği ve sistemin kararlılık marjını arttırdığı görülmektedir.

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, VID kontrol çevrimi içeren zaman gecikmeli bir MG sistemin gürbüz kararlılık bölgeleri hesaplanmıştır. Gürbüz kararlılık bölgelerinin hesaplanması için, kararlılık sınır eğrisi yöntemi ve Kharitonov teoremi üzerine dayalı olarak sistemin denetleyici parametreleri düzleminde kararlılık bölgeleri çıkarılmıştır. Teorik sonuçlar, hem sanal eylemsizlik sabitinin hem de sanal sönümlenme sabitinin sistemin gürbüz kararlılık bölgelerini büyüttüğünü ve sistemin kararlılık marjını arttırdığını göstermektedir. Sonuç olarak, VID kontrol çevrimi YEK tabanlı MG sistemlerin kararlılık analizinde dikkate alınmalıdır. Aynı zamanda, benzetim sonuçları, gürbüz kararlılık bölgelerinden seçilen denetleyici parametrelerinde sistemin parametrik değişimler karşısında frekans kararlılığını sağladığını göstermektedir.

6. Kaynaklar

- [1] Bevrani, H., Golpîra, A. Messina, A. R., Hatziargyriou, N., Milano, F. and Ise, T. "Power system frequency control: An updated review of current solutions and new challenges", *Electric Power Systems Research*, 194,2021.
- [2] Mohan, A.M., Meskin, N. and Mehrjerdi, H., "A comprehensive review of the cyber-attacks and cyber-security on load frequency control of power systems", *Energies*, 13, 2020.
- [3] Mohandes, B., El Moursi, M.S., Hatziargyriou, N. and El Khatib, S., "A Review of power system flexibility with high penetration of renewables", *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 3140-3155, 2019.
- [4] Kerdphol, T., Rahman, F.S., Watanabe, M., Mitani, Y., Turschner D. and Beck, H.-P., "Enhanced virtual inertia control based on derivative technique to emulate

- simultaneous inertia and damping properties for microgrid frequency regulation", *IEEE Access*, 7, 2019.
- [5] T. Kerdphol, F. S. Rahman, M. Watanabe, and Y. Mitani, "Virtual Inertia Synthesis and Control", Springer, 2021.
- [6] Beck P. and Hesse, R., "Virtual synchronous machine", 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2007, pp. 1-6.
- [7] Sakimoto, K., Miura, Y. and Ise, T., "Stabilization of a power system with a distributed generator by a virtual synchronous generator function", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE, 2011, pp. 1498-1505.
- [8] Kerdphol, T., Rahman, F.S. and Mitani, Y., "Virtual inertia control application to enhance frequency stability of interconnected power systems with high renewable energy penetration", *Energies*, 11, 2018.
- [9] Abubakr, H., Mohamed, T.H. Hussein, N.M., Guerrero, J.M. and Agundis-Tinajero, G., "Adaptive frequency regulation strategy in multi-area microgrids including renewable energy and electric vehicles supported by virtual inertia", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 129, 2021.
- [10] Thangaiah, J.M. and Parthasarathy, R., "Delay dependent stability analysis of power system considering communication delays", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27, pp. 1-13, 2017.
- [11] Aydın, Ö., Sönmez, Ş. and Ayasun, S., "Determination of stability delay margins for multi-area load frequency control systems with incommensurate time delays through eigenvalue tracing method", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 137, 2022.
- [12] Hamamcı, S.E. and Tan, N., "Design of PI controllers for achieving time and frequency domain specifications simultaneously", *ISA transactions*, 45, pp. 529-543, 2006.
- [13] Kharitonov, V.L., "On a generalization of a stability criterion", *Izvestiya Akademii Nauk Kazakhskoi SSR Seriya Fizika Matematika*, 1, pp. 53-57, 1978.
- [14] Gundüz, H., Sönmez Ş. and Ayasun, S., "Identification of gain and phase margins based robust stability regions for a time-delayed micro-grid system including fractional-order controller in presence of renewable power generation", *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30, pp. 1097-1115, 2022.
- [15] Veronica, A.J.S.J., Kumar, N.S. and Gonzalez-Longatt, F., "Robust PI controller design for frequency stabilisation in a hybrid microgrid system considering parameter uncertainties and communication time delay", *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13, pp. 3048 – 3056, 2019.
- [16] Sondhi, S. and Hote, Y.V., "Fractional order PID controller for perturbed load frequency control using Kharitonov's theorem", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, pp. 884-896. 2016.
- [17] Simulink, Model-Based and System-Based Design, Using Simulink. Natick: MathWorks, 2000.