

REKASİUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

Şahin SÖNMEZ¹ (ORCID: 0000-0002-0057-2522)*

Saffet AYASUN¹ (ORCID: 0000-0002-6785-3775)

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Niğde, Türkiye

Geliş / Received: 14.03.2019

Kabul / Accepted: 21.07.2019

ÖZ

Bu çalışma, otomatik gerilim regülatörü (OGR) ve güç sistem dengeleyici (GSD) içeren zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin Rekasius yerine koyma yöntemi kullanılarak zaman gecikmesine bağlı kararlılığını incelemektedir. Sistemin kararlılığını kaybetmeden çalışabileceği zaman gecikmesi üst sınırının hesaplanması için Rekasius yönteminin farklı bir prosedürü kullanılmıştır. Önerilen yöntem, ilk olarak uyarma kontrol sisteminin karakteristik denkleminde bulunan üstel terimi herhangi bir yaklaşık içermeyen bir eşitlik yardımıyla elimine etmekte ve karakteristik denklemi sıradan bir polinoma dönüştürmekte ve daha sonra, sistemin sanal eksen üzerindeki köklerine karşılık gelen maksimum zaman gecikmesi değerlerini hesaplamaktadır. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık analizi için tek makineli sonsuz baralı (TMSB) bir güç sistemi seçilmiş ve GSD kazanç değerleri için sistemin zaman gecikmesi değerleri hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğu, üstel terim içeren polinomların köklerini hesaplamak için geliştirilen QPmR (the quasi-polynomial mapping-based root finder) algoritması ve zaman düzleminde gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

Anahtar kelimeler: Haberleşme zaman gecikmesi, kararlılık, jeneratör uyarma kontrol sistemi, QPmR algoritması, Rekasius yöntemi.

DELAY MARGIN COMPUTATION OF A TIME DELAYED GENERATOR EXCITATION CONTROL SYSTEM USING REKASİUS SUBSTITUON

ABSTRACT

This paper investigates the delay-dependent stability analysis of a time delayed generator excitation control system including an automatic voltage regulator and a power system stabilizer (PSS) using Rekasius substitution. A modified Rekasius substitution method is proposed to compute delay margin for which the system is marginally stable. The proposed method first eliminates transcendental terms in characteristic equation of the excitation control system without making any approximation and then, computes stability delay margins corresponding to purely imaginary roots with the crossing frequency. In this study, a single-machine-infinite-bus system is chosen as a test system. For a wide range of PSS gains, delay margins of the control system are computed. The accuracy of complex roots and delay margins are verified by using an independent algorithm, the quasi-polynomial mapping-based root finder (QPmR) and time-domain simulations, respectively.

Keywords: Communication time delay, stability, generator excitation control system, QPmR Algorithm, Rekasius substitution

*Corresponding author / Sorumlu yazar. Tel.: +90 388 225 2280; e-mail / e-posta: sahinsonmez@ohu.edu.tr

1. GİRİŞ

Bu çalışma otomatik gerilim regülatörü (OGR) ve güç sistem dengeleyici (GSD) içeren zaman gecikmeli bir jeneratör uyarma kontrol sisteminin kararlılık analizini incelemektedir. Elektrik güç sistemlerinde, aktif/reaktif yük taleplerinde herhangi bir değişiklik olduğunda sistem frekansını ve jeneratör terminal gerilimini sabit tutmak için her bir jeneratör yük frekans kontrol (YFK) ve OGR sistemine sahiptir [1-3]. Fazör ölçüm birimlerinin ve açık haberleşme ağlarının geniş alanlı ölçüm/izleme sistemlerinde yoğun olarak kullanılması, elektrik güç sistemlerinde ölçüm ve haberleşme zaman gecikmelerinin yaşanmasına neden olmaktadır [4,5]. Güç sistemlerinde, fazör ölçüm birimleri tarafından verilerin ölçülmesi, toplanması, işlenmesi gibi nedenlerden dolayı ve gerçek zamanlı ölçüm sinyallerinin iletiminden dolayı zaman gecikmelerinin ölçüm ve haberleşme kaynaklı olduğu rapor edilmiştir [4,6]. Güç sistem kontrolü için toplam ölçüm gecikmesinin milisaniyeler mertebesinde [4,7], veri transferinden kaynaklanan toplam haberleşme gecikmesinin 100 ms ile 10s arasında değişmektedir [8-10]. Özellikle elektrik güç sistemlerinde böylesi zaman gecikmeleri sistemin dinamik performansını bozabilmekte ve hatta maksimum gecikme sınırının aşılması durumunda sistemin kararsız olmasına yol açmaktadır [7,11,12]. Bu yüzden, maksimum zaman gecikme bilgisinin belirlenmesi için pratik yöntemler geliştirilerek zaman gecikmeleri, kontrolör tasarımı ve kararlılık analizinde dikkate alınmalıdır.

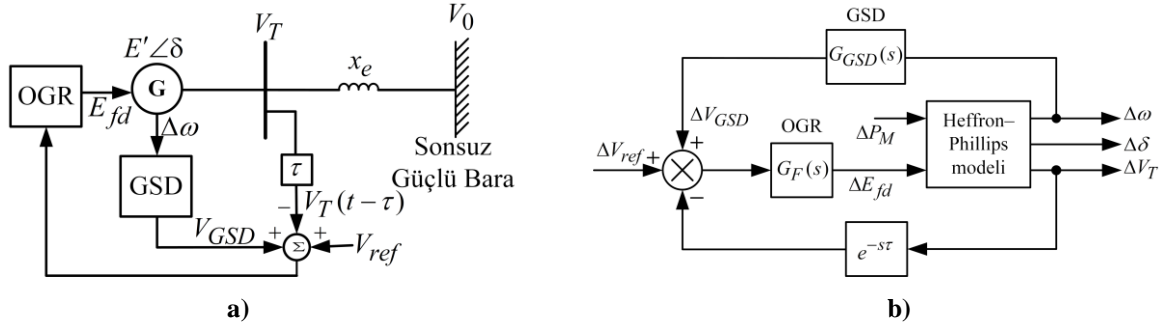
Literatürde, sistemin frekans düzleminde doğrudan ve zaman düzleminde dolaylı olarak maksimum zaman gecikmesinin hesaplanmasını sağlayan iki ayrı grupta yöntemler kullanılmaktadır. Frekans düzlemindeki yöntemler, sistemin karakteristik denkleminin ait sanal eksen üzerindeki kompleks köklerini hesaplayarak sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerini elde etmeye yöneliktir. Bu yöntemler; Schur-Cohn yöntemi [13], üstel terimlerin yok edilmesine dayalı direkt metot [14,15], Rekasius yerine koyma yöntemi [16-18] ve frekans tarama yöntemi [19,20] güç sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizine uygulanan frekans düzlemindeki yöntemler arasındadır. Bu yöntemlerden, Schur-Cohn yöntemi; otomatik üretim kontrol sistemleri için maksimum zaman gecikmesinin hesaplanmasında etkin olarak kullanılmıştır [8]. Üstel terimin yok edilmesine dayalı olan direkt metot; zaman gecikmesi içeren YFK sistemleri [15], zaman gecikmesi içeren jeneratör uyarma kontrol sistemleri ve mikro şebeke sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi için uygulanmıştır [12,21,22]. Rekasius yerine koyma yöntemi; zaman gecikmeli YFK sistemleri, zaman gecikmeli mikro şebeke sisteminin kazanç ve faz payı tabanlı kararlılık analizi ve basit bir mikro şebekenin maksimum zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanması için etkin olarak kullanılmıştır [23-25]. Son zamanlarda, yaygın olarak kullanılan frekans tarama yöntemi YFK sistemleri ve jeneratör uyarma kontrol sistemlerinin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinde etkin olarak kullanılmaktadır [19,20]. Ayrıca, Lyapunov kararlılık teorisine ve doğrusal matris eşitsizlikleri tekniğine dayalı zaman düzlemindeki yöntemler, YFK sistemleri ve geniş alan sönümleme kontrolü için maksimum zaman gecikmesi hesaplanmasında başarılı olarak kullanılmıştır [9,10, 26-29]. Lyapunov temelli algoritmalar frekans düzlemindeki yöntemlere göre sistemin kararlılık sınırı olan maksimum zaman gecikmesi değerlerinin daha küçük değerlerde hesaplanmaktadır. Bu durum, sistemin kararlılık sınırının tam olarak belirlenemediğini gösterir ve istenmeyen bir hesaplama sonucudur. Ancak, Lyapunov temelli algoritmaların sistemin zamanla değişen gecikme değerlerinin hesaplanmasına imkan vermesi önemli bir avantajdır. YFK sistemlerinin gecikmeye bağlı kararlılık analizinin yapıldığı [9]'da Lyapunov temelli bir algoritma ve [15]'de üstel terimin yok edilmesine dayalı direkt metot kullanılmıştır. Bu karşılaştırmaların detaylı olarak incelenmesi [15]'de yapılan çalışmada bulunmaktadır.

Bu çalışmada önerilen yöntem klasik Rekasius yerine koyma yönteminden farklı bir işlem prosedürü izlemektedir. Zaman gecikmeli sistemlerin kararlılık analizini yapmak için, karakteristik denklemde bulunan üstel terimlerin yok edilmesi gerekmektedir. Bu amaçla, Rekasius yerine koyma eşitliği birçok çalışmada kullanılmaktadır [16-18]. Klasik Rekasius yerine koyma yöntemi, zaman gecikmeli sistemin sanal eksen kesen köklerini hesaplamak için Routh Hurwitz kararlılık kriterini kullanmaktadır [16,17]. Ancak, Routh tablosunun oluşturulması sırasında yoğun sembolik işlemlerin yapılması hem işlem yükünün hem de işlem süresinin artmasına neden olur. Önerilen yöntem sistemin sanal eksen kesen köklerinin hesaplanması için kullanılan Routh Hurwitz kararlılık kriterine ihtiyaç duymamaktadır. Bunun yerine, üstel terimin yok edilmesi sonucunda elde edilen karakteristik denklem reel ve sanal kısımlarına ayrılarak sifra eşitlenir. Daha sonra, bu polinomlardan bilinmeyen parametrelerini hesaplamak için sonuç polinom teoremi uygulanır [18] ve son olarak, sistemin maksimum zaman gecikmesi değerleri hesaplanır. Bu yöntemin klasik Rekasius yerine koyma yöntemine göre en önemli avantajı işlem prosedürlerinin daha basit, anlaşılır ve daha kısa sürede sonuca ulaşılmasıdır. Literatürde frekans düzleminde kullanılan direkt metot ve frekans tarama yöntemi OGR ve GSD içeren zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin maksimum zaman gecikmesini hesaplamak için son zamanlarda kullanılan popüler yöntemlerdir [19,21]. Ancak, önerilen yöntemin [19] ve [21]'de kullanılan yöntemlere göre işlem yükünün daha az olması ve basit bir yöntem olması bakımından avantajları bulunmaktadır. Önerilen yöntemin, frekans tarama yöntemine göre avantajı, sistemin sanal eksen üzerindeki

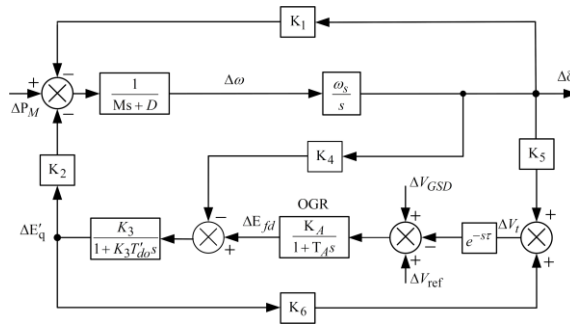
REKASIUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

kökünün hesaplanması sırasında iteratif işlemler gerektirmeden doğrudan sistemin sanal eksen kesen köklerini hesaplamaktadır [19,20]. Herhangi bir iteratif işlem gerektirmediğinden hem daha kısa sürede maksimum zaman gecikmesi değerlerinin belirlenmekte hem de sistemin sanal eksen üzerindeki kökünü analitik olarak elde etmektedir. Önerilen yöntemin, [21]'de verilen direkt metoda göre üstünlükleri ise, üstel terimlerin yok edilmesi işlemi basit bir eşitlik yardımıyla yapılmaktadır. [15]'de yapılan çalışmada, sistemde bulunan üstel terimlerin derecelerinin birbirinin katı şeklinde olması durumunda işlem yoğunluğunun arttığı görülmektedir. Ancak, Rekasius tarafından önerilen basit bir eşitlik [16] yardımıyla üstel terimlerin derecelerine bakılmaksızın üstel terimlerin yerine kullanılmaktadır. Ayrıca, direkt metotta maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması için kullanılan eşitlikler sistem parametreleri cinsinden elde edildiğinden farklı sistemler için farklı eşitliklerin hesaplanmasına neden olur [15,21]. Ancak, önerilen yöntemde tüm sistemler için geçerli olan bir eşitlik yardımıyla maksimum zaman gecikmesinin hesaplanması yapılabilmektedir [16-18]. Bu yüzden, bu çalışmanın ilk önemli katkısı, önerilen yöntemle sistemin maksimum zaman gecikmesi değerlerini hesaplamak ve diğer iki yöntemle Bölüm 3.2'de detaylı bir karşılaştırma yapmaktır.

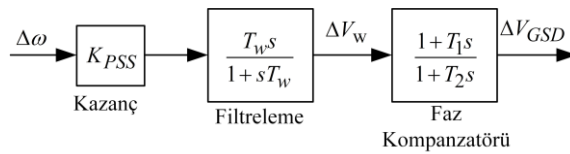
Son olarak, önerilen yöntem kullanılarak kompleks köklerin ve maksimum zaman gecikme değerlerinin doğruluğu bağımsız bir yöntem olan üstel terim içeren polinomların köklerini hesaplamak için geliştirilen QPmR algoritması [30] ve zaman düzleminde gerçekleştirilen benzetim çalışmaları [31] ile gösterilmiştir. QPmR algoritması, geniş bir düzlemde üstel terim içeren polinomların köklerini sayısal olarak hesaplayan bir yöntem olup, bu yöntemin doğruluğu ve verimliliği birçok çalışma tarafından ortaya konmuştur [32, 33]. Rekasius yerine koyma yöntemi ile elde edilen sanal köklerin ve maksimum zaman gecikme değerlerinin doğruluğunun QPmR algoritması ile gösterilmesi, bu çalışmanın ikinci önemli katkısıdır. Son olarak, önerilen yöntemle elde edilen maksimum zaman gecikme değerlerinin doğruluğu zaman düzleminde yapılan benzetim çalışmalarıyla kanıtlanmıştır.



Şekil 1. OGR ve GSD içeren zaman gecikmeli TMSB sisteminin a) tek hat diyagramı b) blok diyagramı [3,34]



Şekil 2. a) Zaman gecikmesi içeren doğrusal TMSB sisteminin detaylı blok diyagramı b) GSD blok diyagramı [3,34]



Şekil 3. GSD blok diyagramı [2,3,34]

Tablo 1. Sistem parametreleri tanımı [20,34]

Parametre	Tanımı
δ, ω	Jeneratör açısı ve hızı
E_q	q eksenli senkron jeneratörün indüklenen gerilimi
E_{fd}	Jeneratör alan gerilimi
K_A, T_A	Uyarma sargısı kazancı ve zaman sabiti
P_M	Mekanik giriş gücü
D, M	Yük sönüm sabiti ve jeneratör eylemsizliği
T'_{d0}	d eksenli geçici hal öncesi açık devre zaman sabiti
V_0, V_T	Sonsuz güçlü bara ve jeneratör terminal gerilimi
x_e	İletim hattı reaktansı
x_d, x'_d	Jeneratör reaktansı ve d eksenli geçici reaktansı
$K_1 - K_6$	Senkron jeneratör doğrusal model sabitleri
T_1, T_2, T_w	Faz kompanzatör ve filtreleme zaman sabitleri
K_{PSS}	GSD Kazancı

2. GSD VE OGR İÇEREN TEK MAKİNELİ SONSUZ GÜÇLÜ BARA

Şekil 1a'da hem OGR hem de GSD içeren bir TMSB sisteminin tek hat diyagramı ve Şekil 1b'de sistemin gerilim geri besleme çevriminde zaman gecikmesi bulunan blok diyagramı görülmektedir [3,34]. Bu çalışmada, Şekil 1b'de $e^{-s\tau}$ üstel terim olarak gösterilen jeneratör terminal gerilimi geri besleme çevriminde bulunan zaman gecikmesine odaklanılmıştır. τ , jeneratör terminal gerilim bilgisinin uyarma kontrol sistemine iletilmesi sırasında yaşanan toplam zaman gecikmesi değeridir. GSD tarafında frekans bilgisinin iletilmesi sırasında benzer şekilde gecikme bilgisi oluşabilir. Ancak, bu çalışmada işlem kolaylığı açısından analizleri basitleştirmek için GSD çevrimi tarafında meydana gelen zaman gecikmeleri ihmal edilmiştir [19,21]. Jeneratör uyarma kontrol sisteminin zaman gecikmesine göre kararlılık analizinin yapılabilmesi için TMSB sisteminin doğrusal denklem modeli elde edilmelidir. TMSB sisteminin denge noktaları etrafında elde edilen doğrusal modeli Şekil 2'de verilmiştir. Heffron-Phillips modeli olarak bilinen bu modelde $K_1 - K_6$, TMSB sisteminin jeneratörün yük durumuna göre değişen ve doğrusal modelin elde edilmesi için kullanılan parametrelerdir [3]. $K_1 - K_6$ parametrelerinin elde edilmesi [3]'de bulunmaktadır. Şekil 3'de kazanç, filtreleme ve faz kompanzatör bloklarından oluşan GSD blok diyagramı görülmektedir [2,3,34]. GSD temel görevi senkron makinenin rotor salınımları için sönümleme desteği sağlamak ve sistemin dinamik performansını arttırmaktır. Şekil 1-3'de verilen sistem parametrelerinin tanımı Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 2 ve 3 kullanılarak sistemin zaman gecikmeli durum uzay denklemi aşağıda verildiği gibi elde edilebilir.

$$\dot{x}(t) = A_0 x(t) + A_\tau x(t - \tau) + Bu(t) \quad (1)$$

Burada $x(t) = [\Delta\delta \ \Delta\omega \ \Delta E'_q \ \Delta E'_{fd} \ \Delta V_w \ \Delta V_{GSD}]^T$ durum değişkenleri matrisini tanımlamaktadır [3]. Sistemin A_0 , A_τ ve B matrisleri aşağıda verilmiştir.

REKASİUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{M} & -\frac{D}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_4}{T'_{d0}} & 0 & -\frac{K_3}{T'_{d0}} & \frac{1}{T'_{d0}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_A} & 0 & \frac{K_A}{T_A} \\ -\frac{K_p K_1}{M} & -\frac{K_p D}{M} & -\frac{K_p K_2}{M} & 0 & -\frac{1}{T_w} & 0 \\ -\frac{K_p K_1 T_1}{MT_2} & -\frac{K_p D T_1}{MT_2} & -\frac{K_p K_2 T_1}{MT_2} & 0 & \left(\frac{1}{T_2} - \frac{T_1}{T_2 T_w}\right) & -\frac{1}{T_2} \end{bmatrix} \quad A_\tau = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_A K_5}{T_A} & 0 & -\frac{K_6 K_A}{T_A} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}^T$$

Maksimum zaman gecikmesi hesabı ve sistemin kararlılık analizi için, Denklem (1)'de verilen zaman gecikmeli durum uzay denkleminde sistemin zaman gecikmeli karakteristik denkleminin elde edilmesi gereklidir. Sistemin zaman gecikmeli karakteristik denklemi aşağıda verilmiştir.

$$\Delta(s, \tau) = \det(sI - A_0 - A_\tau e^{-s\tau}) = P(s) + Q(s)e^{-s\tau} = 0 \tag{2}$$

Burada, $P(s)$ ve $Q(s)$ s 'e bağlı reel katsayılı polinomlardır.

$$P(s) = p_6 s^6 + p_5 s^5 + p_4 s^4 + p_3 s^3 + p_2 s^2 + p_1 s + p_0$$

$$Q(s) = q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s + q_0$$

Sistem parametrelerine bağlı p ve q katsayıları ekte verilmiştir.

3. KARARLILIK ANALİZİ

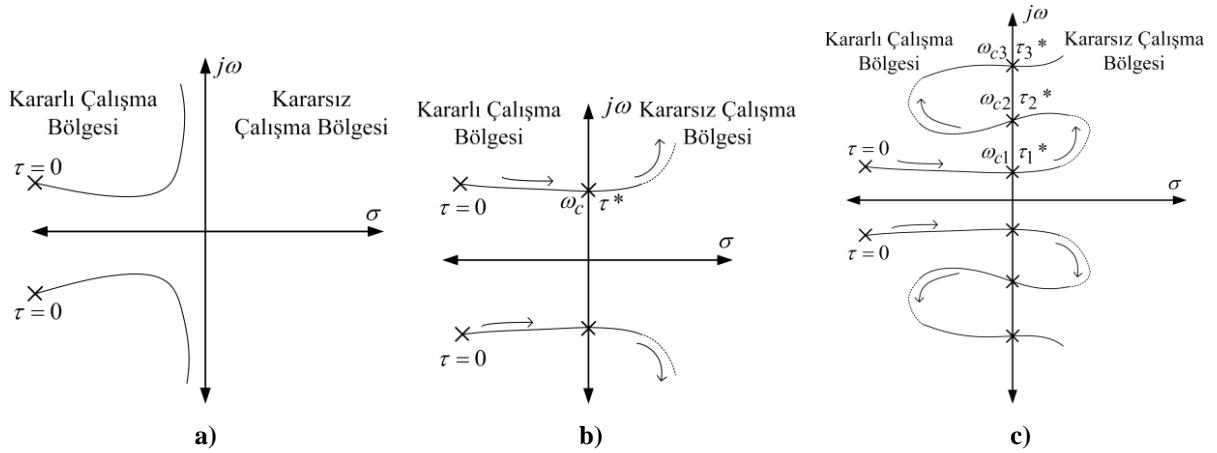
3.1. Gecikmeye Bağlı Kararlılık Analizi ve Maksimum Zaman Gecikmesi Tanımı

TMSB sisteminde jeneratör terminal geriliminin kararlılık analizi için, sistemin kararlı olacağı gecikme değerlerinin bilinmesi önemlidir. Sistemin kararlılığı Denklem (2) ile verilen karakteristik denklemin kökleri ile belirlenmektedir. Karakteristik denklemde bulunan $e^{-s\tau}$ üstel terimi sistemin sonsuz adet köke sahip olmasına neden olduğundan sistemin kararlılık analizi oldukça zorlaşmaktadır. Ancak, sistemin tüm köklerinin belirlenmesine ihtiyaç yoktur. Bunun yerine, zaman gecikmesinin değişimine göre karakteristik denklemin köklerinin değişimini izlemek yeterlidir. Sistemin kararlı olabilmesi için karakteristik denklemin kökleri kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde olması gerekmektedir. Sistemin asimptotik kararlılık analizi için aşağıda verilen denklem (3) incelenebilir.

$$\Delta(s, \tau) \neq 0 \quad \forall s \in C^+ \quad \tau \geq 0 \tag{3}$$

Burada, C^+ sanal eksenin sağ yarı bölgesini göstermektedir. Sistem parametrelerine bağlı olarak, zaman gecikmesi dikkate alındığında iki farklı asimptotik kararlılık durumu ortaya çıkmaktadır [12,14]:

- i) Denklem (3)'deki kararlılık şartı tüm pozitif ve sonlu gecikme değerleri için sağlanırsa $\tau \in [0, \infty)$, karakteristik denklem (2) zaman gecikmesinden bağımsız kararlılığa sahiptir. Bu durum, Şekil 4a'da görüldüğü gibi tüm sonlu pozitif zaman gecikmesi değerleri için sistemin köklerinin kompleks düzlemin sol yarı bölgede kaldığını açıklamaktadır.
- ii) Denklem (3)'deki kararlılık şartı $\tau \in [0, \tau^*)$ aralığındaki gecikme değerleri için sağlanırsa, karakteristik denklem (2) zaman gecikmesine bağlı olarak kararlıdır ve $\tau \geq \tau^*$ değerleri için sistem kararsız olmaktadır.



Şekil 4. Karakteristik denklemin köklerinin zaman gecikmesine göre hareketi [12,19]

Zaman gecikmesine bağlı kararlılık durumunda, sistemin diğer tüm parametreleri sabit durumda iken, $\tau = 0$ 'dan başlayarak zaman gecikmesi τ arttıkça karakteristik denklemin köklerinin bazılarının konumu gecikmeye bağlı olarak değişir. Bu durum, τ zaman gecikmesi arttıkça, bir veya daha fazla kompleks eşlenik kök çiftinin kompleks düzlemin sol yarı bölgesinden sağ yarı bölgesine doğru taşınması demektir. Kompleks eşlenik kök çiftinin sanal eksen üzerinde olması halinde bu köke karşılık gelen bir zaman gecikmesi değeri bulunmaktadır. Bu gecikme değeri Şekil 4b'de karakteristik denklemin sanal köklerinin gecikmeye bağlı hareketinden görüldüğü, sistemin sınırdaki kararlı olduğu maksimum zaman gecikmesi veya zaman gecikmesinin üst sınırı olarak tanımlanan τ^* gecikme miktarıdır. Sistem herhangi bir $\tau < \tau^*$ zaman gecikmesi değerinde kararlı ve $\tau > \tau^*$ değeri için kararsız olacaktır. Ancak herhangi bir kompleks eşlenik kök çiftinin sanal eksenini keserek sağ yarı bölgeye geçtiği ve daha sonra, aynı veya farklı bir kök çiftinin sağ yarı bölgeden tekrar sanal eksenini keserek sol yarı bölgeye geçtiği durumlar da söz konusudur. Böylesi durumlarda sistemin sanal eksenini kesen her bir kompleks eşlenik kök çiftine karşılık gelen gecikme değerleri bulunmaktadır. Şekil 4c'den sanal eksenini kesen her bir kök çifti için τ_1^* , τ_2^* ve τ_3^* gibi farklı zaman gecikme değerlerinin ortaya çıkacağı görülmektedir.

3.2. Maksimum Zaman Gecikmesinin Hesaplanması

Bölüm 3.1'de açıklanan kararlılık analizini gerçekleştirebilmek için öncelikle sistemin Şekil 4'de verildiği gibi varsa sanal eksenini kesen kökleri hesaplamak gereklidir. Önerilen yöntemin amacı, zaman gecikmesine göre kararlılığı değişen bir sistemin sanal eksen üzerinde bulunan köklerini ve bu köklere karşılık gelen zaman gecikmesi değerlerini hesaplamaktır. $\Delta(s,0) = 0$ karakteristik denkleminin ($\tau = 0$) durumunda tüm köklerinin kompleks düzlemin sol yarı bölgesinde olduğu ve dolayısıyla, gecikme içermeyen sistemin kararlı olduğu kabul edilsin. Karakteristik denklem $e^{-s\tau}$ üstel teriminden dolayı exponansiyel bir özelliğe sahiptir. Bu durum sonsuz adet köke sahip olan karakteristik denklemin sanal eksen üzerindeki köklerinin ve maksimum zaman gecikmesi değerinin hesaplanması için oldukça zor bir problem olmaktadır. Bu zorluğun üstesinden gelebilmek için, Rekasius [16-18] tarafından önerilen ve $e^{-s\tau}$ üstel terimin tam karşılığı olan Denklem (4) kullanılabilir.

$$e^{-s\tau} = \frac{1-Ts}{1+Ts} \quad \tau \in \mathfrak{R}^+, \quad T \in \mathfrak{R} \quad (4)$$

Denklem (4) sadece $s=j\omega_c$ için tanımlıdır. Ayrıca, Denklem (4) üstel terimin yerine yazılabilecek yaklaşık içermeyen bir ifadedir. Karakteristik denklem (2) sanal eksen üzerinde köklere sahip olması halinde Denklem (4) yardımıyla bu köklerin daha kolay hesaplanabileceği açıktır. Bu yöntemde, $s=j\omega_c$ için Denklem (2)'de yer alan $e^{-s\tau}$ üstel terimi yerine Denklem (4) ile verilen Rekasius dönüşümü aşağıda verildiği gibi yazılabilir.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + Q(s) \left(\frac{1-Ts}{1+Ts} \right) = 0 \quad (5)$$

Denklem (4)'de verilen ifade Denklem (2)'de yerine yazıldıktan sonra elde edilen TMSB sistemine ait yeni karakteristik denklem, Denklem (6)'da verilmiştir.

REKASIUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

$$\Delta(s,T) = p_6s^7 + p_5Ts^6 + p_6s^6 + (p_4 - q_4)Ts^5 + p_5s^5 + (p_3 - q_3)Ts^4 + (p_4 + q_4)s^4 + (p_2 - q_2)Ts^3 + (p_3 + q_3)s^3 + (p_1 - q_1)Ts^2 + (p_2 + q_2)s^2 + (p_0 - q_0)Ts + (p_1 + q_1)s + (p_0 + q_0) \tag{6}$$

Denklem (6) üstel terim içermeyen yeni bir polinomdur. Bu polinom yardımıyla sistemin sanal eksenini kesen kökleri ve reel T değerlerinin çözülmesi amaçlanmaktadır. Bunun için, $s=j\omega_c$ 'de Denklem (6) reel ve sanal kısımlarına ayrılarak reel ve sanal kısımlar sıfıra eşitliğinde Denklem (7) elde edilir.

$$\Delta(j\omega_c,T) = h_R(j\omega_c,T) + jh_I(j\omega_c,T) = 0 \tag{7}$$

Burada,

$$h_R(j\omega_c,T) = \left[\begin{array}{l} (p_3\omega_c^4 - p_1\omega_c^2 - p_5\omega_c^6 + q_1\omega_c^2 - q_3\omega_c^4)T + \\ (p_0 + q_0 - p_2\omega_c^2 + p_4\omega_c^4 - p_6\omega_c^6 - q_2\omega_c^2 + q_4\omega_c^4) \end{array} \right] = 0 \tag{8}$$

$$h_I(j\omega_c,T) = \left[\begin{array}{l} (p_0\omega_c - q_0\omega_c - p_2\omega_c^3 + p_4\omega_c^5 - p_6\omega_c^7 + q_2\omega_c^3 - q_4\omega_c^5)T + \\ (p_1\omega_c + q_1\omega_c - p_3\omega_c^3 + p_5\omega_c^5 - q_3\omega_c^3) \end{array} \right] = 0$$

Burada h_R ve h_I , $\Delta(j\omega_c,T)$ polinomunun reel ve sanal kısımlarını ifade etmektedir. Denklem (7) ve (8) yardımıyla sistemin sanal eksenini kesen köklerinin hesaplanabilmesi için öncelikli olarak h_R ve h_I polinomlarından bilinmeyen T parametresi elimine edilmelidir. Bu eliminasyon işlemi için sonuç polinom teoremi kullanılmaktadır [18]. T parametresinin elimine edildikten sonra sadece ω_c 'ye bağlı yeni bir polinom elde edilmekte ve bu polinom Denklem (9)'da verilmiştir.

$$W(\omega_c^2) = t_{12}\omega_c^{12} + t_{10}\omega_c^{10} + t_8\omega_c^8 + t_6\omega_c^6 + t_4\omega_c^4 + t_2\omega_c^2 + t_0 = 0 \tag{9}$$

Denklem (9)'un katsayıları sistem parametreleri cinsinden aşağıda verilmiştir.

$$t_{12} = p_6^2; t_{10} = p_5^2 - 2p_6p_4; t_8 = p_4^2 - q_4^2 - 2p_5p_3 + 2p_2p_6; t_6 = p_3^2 - q_3^2 - 2p_6p_0 + 2p_5p_1 - 2p_4p_2 + 2q_4q_2;$$

$$t_4 = p_2^2 - q_2^2 + 2p_4p_0 - 2p_3p_1 - 2q_0q_4 + 2q_3q_1; t_2 = p_1^2 - q_1^2 - 2p_2p_0 + 2q_2q_0; t_0 = p_0^2 - q_0^2;$$

Denklem (9) ω_c^2 'ye bağlı bir polinomdur ve bu polinomun çözümünden elde edilen pozitif reel kökler sistemin sanal eksenini kesen kökleridir. Genel anlamda, bu polinomun çözümü iki önemli sonuç vermektedir. Denklem (9)'un herhangi bir pozitif reel kökü varsa, bu durum Denklem (2) ile verilen sistemin zaman gecikmesine bağlı kararlı olduğunu göstermektedir. Ancak, Denklem (9)'un herhangi bir pozitif reel kökü yoksa, Denklem (2) ile verilen sistem zaman gecikmesinden bağımsız kararlı olmaktadır.

Reel T değerlerini hesaplamak için, Denklem (9)'da hesaplanan pozitif reel kökler Denklem (8)'de verilen h_R ve h_I polinomlarından herhangi birinde yerine yazılmalıdır. Eğer hesaplanan ω_c değeri bu sistemin bir kökü ise, h_R ve h_I polinomlarının aynı reel T değerlerini sağlaması gereklidir. Elde edilen reel T değerleri ve sanal eksenini kesen pozitif reel kök yardımıyla sistemin sınırda kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri aşağıda verilen Denklem (10) ile kolaylıkla hesaplanabilir.

$$\tau^* = \frac{2}{\omega_c} \left[\text{Tan}^{-1}(\omega_c T) \pm 1\pi \right] \quad 1 = 0,1,2,\dots \tag{10}$$

Önerilen yöntem, sanal eksenini kesen kökleri kolaylıkla hesaplayabilmektir. Ancak, Denklem (2) için sanal eksenini kesen herhangi bir pozitif reel kökün τ 'nin artması ile sanal eksenini keserek kompleks düzlemde hangi bölgesine (sol yarı bölgeden sağ yarı bölgeye veya sağ yarı bölgeden sol yarı bölgeye) geçtiğini belirlemek önemlidir. Sistemin köklerinin sanal eksenini keserek sol yarı bölgeden sağ yarı bölgeye veya sağ yarı bölgeden sol yarı bölgeye geçebilmesi için Denklem (11) ile verilen şart sağlanmalıdır. Bu şart kompleks köklerin reel kısmının zaman gecikmesine göre değişimini içermektedir. .

$$RT = \text{Re} \left[\frac{ds}{d\tau} \right]_{s=j\omega_{ck}} \neq 0 \tag{11}$$

Ş. SÖNMEZ, S.AYASUN

Burada, $Re(\bullet)$ kompleks bir değişkeninin reel kısmını ifade etmektedir. Köklerin bu değişim hızı Denklem (9) yardımı ile aşağıda verilen ifade ile kolaylıkla hesaplanabilir [12, 14, 21].

$$RT|_{s=j\omega_c} = \operatorname{sgn} \left\{ \operatorname{Re} \left[\frac{ds}{d\tau} \right]_{s=j\omega_c} \right\} = \operatorname{sgn} [W'(\omega_c^2)] \quad (12)$$

Burada, RT kökün hareket yönünü göstermekte ve kökün hareket yönünü belirlemek için Denklem (9)'un ω_c^2 'ye göre birinci dereceden türevi alınması yeterli olmaktadır. Denklem (12)'de RT işareti kökün hangi düzlemde olduğu hakkında gerekli bilgiyi vermektedir. $RT = -1$ olması ilgili kökün sanal eksen keserek kompleks düzlemin kararsız sağ yarı bölgesinden kararlı sol yarı bölgesine geçtiğini, $RT = +1$ olması halinde ise ilgili kökün sanal eksen keserek kararlı sol yarı bölgeden kararsız sağ yarı bölgeye geçtiğini ifade etmektedir. Denklem (13), TMSB sistemi için sanal eksen kesen her bir pozitif reel kökün RT işareti belirlemek için hesaplanmıştır.

$$W'(\omega_c^2) = 6t_{12}\omega_c^{10} + 5t_{10}\omega_c^8 + 4t_8\omega_c^6 + 3t_6\omega_c^4 + 2t_4\omega_c^2 + t_2 \quad (13)$$

Önerilen yöntemle, [21]'de kullanılan yöntem kıyaslandığında, önemli bir ortak noktanın olduğu görülmektedir. Denklem (9)'da elde edilen ω_c^2 'ye bağlı polinom [21]'de Denklem (4)'de elde edilen polinomla tamamen aynıdır. Ancak, [21] çalışmasında üstel terimin elimine edilmesi daha karmaşık işlemler gerektirdiğinden dolayı Denklem (4)'de verilen Rekasius eşitliği yardımıyla üstel terim daha basit bir şekilde elimine edilmiştir. Ayrıca, [21]'de maksimum zaman gecikmesi hesabında kullanılan denklemin derecesinin yüksek olması ve işlem yoğunluğunu artırması önemli bir dezavantajdır. Bu yüzden, önerilen yöntem incelendiğinde Denklem (10) ile verildiği gibi daha basit bir formda sistemin maksimum zaman gecikmesinin hesaplanabileceği görülmektedir. [19]'da verilen frekans tarama yönteminde sistemin sanal eksen kesen kökünün hesaplanması için iteratif işlem gerektirmesi hesaplama süresini önemli derecede etkileyebilir. Önerilen yöntemde Denklem (9) ile doğrudan sistemin sanal eksen kesen kökleri hesaplanabilmektedir. Ayrıca, [19]'da önerilen yöntem sanal eksen kesen kökünün hesaplanması için Denklem (1)'de verilen durum uzay matrislerini kullanmaktadır. Bu yüzden, sistemin karakteristik polinomu elde edilmemiş ve dolayısıyla Denklem (11) ile verilen kök hareket şartı incelenmemiştir.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Zaman gecikmeli jeneratör uyarma kontrol sisteminin, GSD'nın çeşitli kazanç değerlerinde $K_{PSS} = 0 - 30$ ve $P_L = 0.5 pu$ yük değişimi için maksimum zaman gecikme değerleri önerilen yöntem kullanılarak hesaplanmıştır. Elde edilen teorik zaman gecikme değerlerinin doğruluğu QPmR algoritması ve Matlab/Simulink benzetim ortamında gösterilmiştir. Ayrıca, önerilen yöntemle elde edilen teorik sonuçlar, [19] ve [21] çalışmalarında elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Sistemin sönüm katsayısı $D=0$ ve güç faktörü $pf = \cos\phi = 0.9$ geri güç faktöründe sabit olarak seçilmiştir. Sistemin diğer parametreleri: $x_d = 1.60 pu$, $x_q = 1.55 pu$, $x'_d = 0.32 pu$, $M=6.0$, $T'_{do} = 6.0s$, $\omega_0 = 377 rad/s$, $K_A = 50$, $T_A = 0.05s$, $T_1 = 0.5s$, $T_2 = 0.1s$, $T_w = 2s$, $r_e = 0$, $x_e = 0.4 pu$. Jeneratörün $P_L = 0.5 pu$ yüklenme durumu için K_1-K_6 doğrusal sistem parametreleri: $K_1=1.0058$, $K_2=0.8441$, $K_3=0.360$, $K_4=1.0805$, $K_5=0.0468$, $K_6=0.4991$ olarak hesaplanmıştır [3,21].

4.1. Teorik Sonuçlar

Sistem parametreleri, $K_{PSS} = 20$ ve $P_L = 0.5 pu$ yük durumu için Bölüm 3.2'de verilen Rekasius yerine koyma yöntemi kullanılarak sistemin maksimum zaman gecikme değerinin hesaplanması aşağıda adım adım verilmiştir.

1. Adım: Denklem (2) yardımıyla sistemin karakteristik denkleminin elde edilmesi:

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

$$P(s) = 135.72s^6 + 4.2x10^3 s^5 + 3.97x10^4 s^4 + 6.1x10^5 s^3 + 2.57x10^6 s^2 + 1.43x10^6 s + 2.67x10^5$$

$$Q(s) = (1.13x10^4 s^4 + 1.19x10^5 s^3 + 7.14x10^5 s^2 + 6.9x10^6 s + 3.3x10^6)$$

REKASİUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

2. Adım: Denklem (4) ile verilen Rekasius eşitliği kullanılarak üstel terimin elimine edilmesi ve Denklem (6)'nın elde edilmesi:

$$\Delta(s, T) = 135.72s^6 + 4.2 \times 10^3 s^5 + 3.97 \times 10^4 s^4 + 6.1 \times 10^5 s^3 + 2.57 \times 10^6 s^2 + 1.43 \times 10^6 s + 2.67 \times 10^5 + (1.13 \times 10^4 s^4 + 1.19 \times 10^5 s^3 + 7.14 \times 10^5 s^2 + 6.9 \times 10^6 s + 3.3 \times 10^6) \left(\frac{1-Ts}{1+Ts} \right)$$

3. Adım: Denklem (8) uygulanarak $s = j\omega_c$ için 2. Adımda verilen üstel terim içermeyen yeni polinom reel ve sanal kısımlarına ayrılarak sıfıra eşitlenir.

$$h_R(j\omega_c, T) = \left[(546.9\omega_c^2 + 49.1\omega_c^4 - 0.42\omega_c^6)T + (5.1\omega_c^4 - 328.2\omega_c^2 - 0.013\omega_c^6 + 355.4) \right] = 0$$

$$h_I(j\omega_c, T) = \left[(2.8\omega_c^5 - 302\omega_c - 185.4\omega_c^3 - 0.013\omega_c^7)T + (833.5\omega_c - 72.8\omega_c^3 + 0.42\omega_c^5) \right] = 0$$

4. Adım: 3. Adımda T 'nin elimine edilmesi ile sistemin sanal eksen kesen kökleri Denklem (8) yardımıyla hesaplanır. Denklem (9)'u temsil eden aşağıdaki denklemin çözümünden $\omega_{c1} = 13.1187$ rad/s, $\omega_{c2} = 11.0473$ rad/s ve $\omega_{c3} = 2.5140$ rad/s olarak sistemin sanal eksen kesen 3 adet kompleks eşlenik kökü hesaplanmıştır.

$$W(\omega_c^2) = 1.84\omega_c^{12} + 689\omega_c^{10} - 2.98 \times 10^5 \omega_c^8 + 1.82 \times 10^6 \omega_c^6 + 5.92 \times 10^8 \omega_c^4 - 4.23 \times 10^9 \omega_c^2 - 1.07 \times 10^9 = 0$$

5. Adım: Sistemin sanal eksen kesen her bir kökü 3. Adımda verilen karakteristik denkleminin reel ve sanal kısımları için yerine yazıldığında her iki denklemde aynı reel T değerlerinin hesaplanması gereklidir. $\omega_c = \{13.1187, 11.0473, 2.5140\}$ karşılık gelen reel T değerleri $T = \{0.04319, -0.33647, 0.28593\}$ olarak hesaplanmıştır. Sanal eksen kesen kökler ve bu köklere karşılık gelen reel T değerleri Denklem (10)'da yerine yazıldığında sistemin maksimum zaman gecikme değerleri $\tau_1^* = 0.0786$ s, $\tau_2^* = 0.3320$ s ve $\tau_3^* = 0.4958$ s olarak hesaplanmıştır.

6. Adım: Denklem (12) yardımıyla, 4. Adımda elde edilen pozitif reel köklerin sanal eksen keserek $\omega_{c1} = 13.1187$ rad/s için $RT = +1$, $\omega_{c2} = 11.0473$ rad/s için $RT = -1$, ve $\omega_{c3} = 2.5140$ rad/s için $RT = +1$ olarak belirlenmiştir. Bu durum ω_{c1} 'in sanal eksen keserek sol yarı düzlemden sağ yarı düzleme geçtiğini, ω_{c2} 'nin sanal eksen keserek sağ yarı düzlemden sol yarı düzleme geçtiğini ve ω_{c3} kökünün tekrardan sanal eksen keserek sol yarı düzlemden sağ yarı düzleme geçtiğini göstermektedir.

Bu çalışmanın ilk amacı önerilen yöntem ile uyarma kontrol sisteminin maksimum zaman gecikme değerlerinin hesaplanması ve farklı yöntemlerle elde edilen sonuçları kıyaslayarak yöntemin doğruluğunu gösterilmesidir. Tablo 2'de hem [21] hem de [19] çalışmasında elde edilen sonuçlarla yukarıda verilen adımlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tablo 2'de her üç yöntemin aynı sanal kökleri ve aynı zaman gecikme değerlerini hesapladığı görülmektedir. Tablo 3'de $K_{PSS} = 0 - 30$ ve $P_L = 0.5 pu$ yük koşulunda her üç yöntemle elde edilen sonuçların detaylı bir kıyaslaması görülmektedir. Tablo 3 incelendiğinde, $K_{PSS} = 0$ değeri haricinde her üç yöntemle aynı zaman gecikmesi sonuçlarının hesaplandığı görülmektedir. $K_{PSS} = 0$ için önerilen yöntem ve frekans tarama yönteminin zaman gecikmesi sonuçlarının aynı olduğu, direkt metot ile hesaplanan gecikme değerinin daha küçük olduğu görülmektedir.

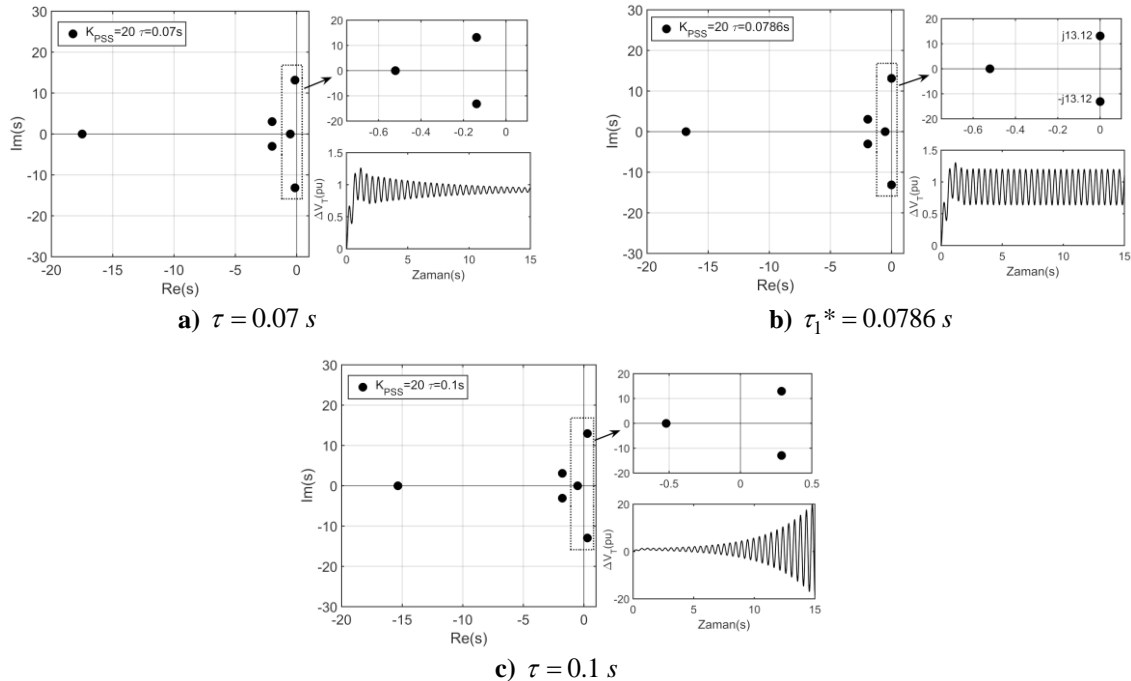
Tablo 2. Rekasius yöntemi, [19]'de ve [21]'de önerilen yöntemlerle hesaplanan sanal eksen kesen kökler ve zaman gecikmesi değerleri

Parametreler	Yöntemler	Hesaplanan Değerler		
ω_c (rad/s)	Rekasius Yöntemi	13.1187	11.0473	2.5140
	[20]'de önerilen yöntem	13.1187	11.0473	2.5140
	[18]'de önerilen yöntem	13.1185	11.0472	2.5141
τ (s)	Rekasius Yöntemi	0.0786	0.3320	0.4958
	[20]'de önerilen yöntem	0.0786	0.3320	0.4958
	[18]'de önerilen yöntem	0.0786	0.3320	0.4958

Tablo 3’de K_{PSS} kazancının değişiminin zaman gecikmesi değerleri üzerindeki etkisini görmek mümkündür. Tablo 3’de τ_1^* zaman gecikmesi değerleri teorik ve pratik anlamda sistemin sınırdaki kararlı olduğu maksimum zaman gecikmesi değeridir. Dikkat edilirse, $K_{PSS} = 0-30$ aralığında artması τ_1^* gecikme değerlerinin sürekli olarak azaldığını göstermektedir. Başka bir anlamda, K_{PSS} kazancının artması sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerlerinin azaldığını ve dolayısıyla, sistemin kararlılık sınırı üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

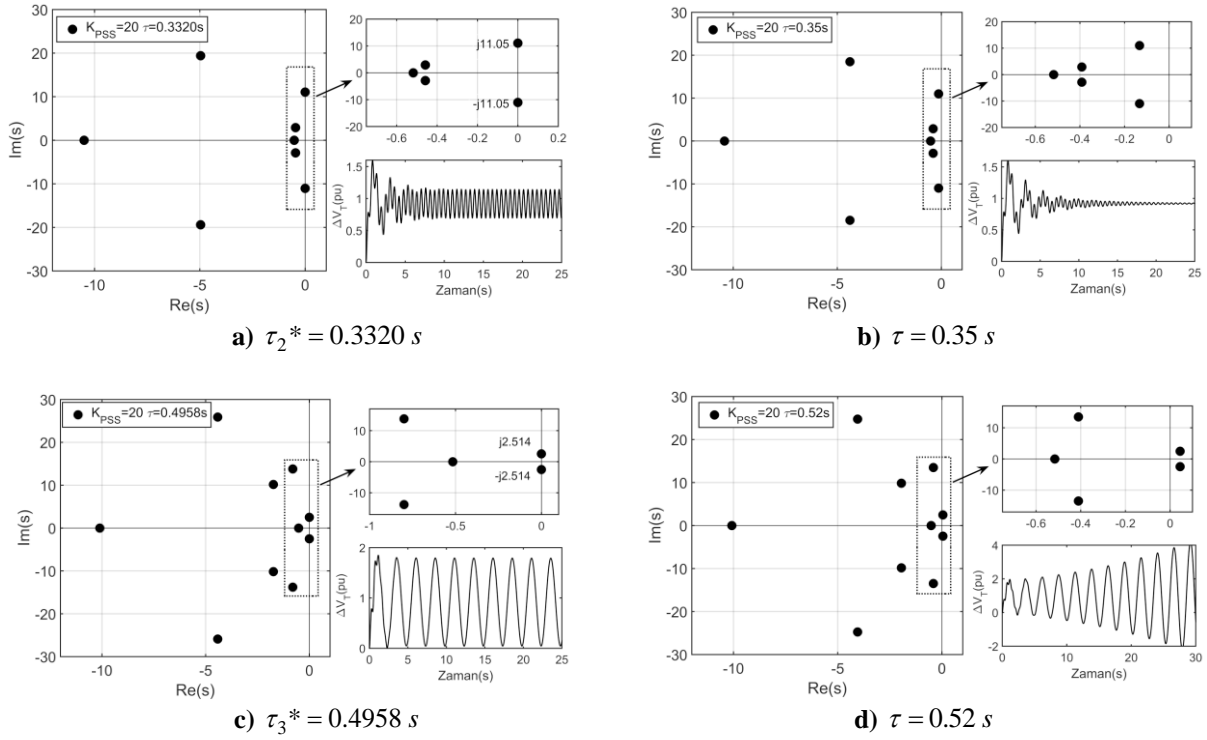
Tablo 3. [19], [21] ve önerilen yöntemle göre maksimum zaman gecikmesi değerleri

K_{PSS}	Yöntemler	τ_1^* (s)	τ_2^* (s)	τ_3^* (s)
0	Rekasius Yöntemi	0.1854	0.4636	0.3984
	[21]’de önerilen yöntem	0.1788	0.4579	0.3678
	[19]’de önerilen yöntem	0.1854	0.4635	0.3984
5	Rekasius Yöntemi	0.1632	0.3774	0.4262
	[21]’de önerilen yöntem	0.1632	0.3774	0.4262
	[19]’de önerilen yöntem	0.1632	0.3774	0.4262
10	Rekasius Yöntemi	0.1289	0.3539	0.4508
	[21]’de önerilen yöntem	0.1289	0.3539	0.4508
	[19]’de önerilen yöntem	0.1289	0.3539	0.4508
15	Rekasius Yöntemi	0.1010	0.3407	0.4738
	[21]’de önerilen yöntem	0.1010	0.3407	0.4738
	[19]’de önerilen yöntem	0.1010	0.3407	0.4738
20	Rekasius Yöntemi	0.0786	0.3320	0.4958
	[21]’de önerilen yöntem	0.0786	0.3320	0.4958
	[19]’de önerilen yöntem	0.0786	0.3320	0.4958
25	Rekasius Yöntemi	0.0600	0.3258	0.5171
	[21]’de önerilen yöntem	0.0600	0.3258	0.5171
	[19]’de önerilen yöntem	0.0600	0.3258	0.5171
30	Rekasius Yöntemi	0.0439	0.3214	0.5378
	[21]’de önerilen yöntem	0.0439	0.3214	0.5378
	[19]’de önerilen yöntem	0.0439	0.3214	0.5378



Şekil 5. $K_{PSS} = 20$ ve $P_L = 0.5 pu$ için kök dağılımları ve benzetim çalışmaları

REKASİUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI



Şekil 6. $K_{PSS} = 20$ ve $P_L = 0.5 pu$ için kök dağılımları ve benzetim çalışmaları

4.2. Benzetim Çalışmaları

Bu çalışmanın bir diğer amacı, GSD'nin farklı kazanç değerleri için elde edilen maksimum zaman gecikmelerinin QPmR algoritması ve benzetim çalışmaları yardımıyla gösterilmesidir. Benzetim çalışmaları, $P_L = 0.5 pu$ ve GSD kazancı $K_{PSS} = 20$ için Tablo 3'de $\tau_1^* = 0.0786 s$, $\tau_2^* = 0.3320 s$ ve $\tau_3^* = 0.4958 s$ olarak hesaplanan gecikme değerleri için yapılmıştır. Şekil 5a, $\tau = 0.07 s$ için jeneratör terminal geriliminin dinamik yanıtını ve uyarma kontrol sistemi karakteristik denkleminin köklerinin dağılımını göstermektedir.

$\tau = 0.07 s < \tau_1^* = 0.0786 s$ değerinde sistemin tüm kökleri sanal eksenin sol yarı bölgesindedir ve benzetim çalışmalarından sistemin kararlı olduğu görülmektedir. Şekil 5b, zaman gecikmesi değeri $\tau_1^* = 0.0786 s$ olduğunda sistemin kompleks eşlenik kökü sanal eksen üzerinde bulunmakta ve sistemin tepkisinde meydana gelen sönümlenmeyen salınımlardan dolayı sistem sınırda kararlı olmaktadır. Ayrıca, teorik sonuç $\omega_{c1} = 13.1187 rad/s$ kökü için 6.Adımda $RT_1 = +1$ 'dir ve buna göre, ω_{c1} kökü sanal eksenini keserek sol yarı düzlemden sağ yarı düzleme geçmektedir. Bunu doğrulamak adına, Şekil 5c'de zaman gecikmesi değeri $\tau = 0.1 s > \tau_1^* = 0.0786 s$ artırıldığında sistemin tepkisinde meydana gelen salınımların giderek büyüdüğü ve sistemin kararsız olduğu görülmektedir. Ayrıca, kök dağılımından sistemin kompleks eşlenik kök çiftinin kompleks düzlemin sağ yarı bölgesinde olduğu görülmektedir.

Zaman gecikmesi $\tau_2^* = 0.3320 s$ değerine artırıldığında, Şekil 6a'dan köklerin dağılımına göre sistemin kompleks eşlenik kökü ($\omega_{c2} = 11.0473$) sanal eksen üzerinde olduğu ve sistemin sınırda kararlı olduğu görülmektedir. Bu kök için 6.Adımda $RT_2 = -1$ olarak hesaplanmıştır. Bunu doğrulamak için, $\tau = 0.35 s > \tau_2^* = 0.3320 s$ değerine artırıldığında Şekil 6b'de kök dağılımından sistemin tüm köklerinin sol yarı bölgede ve benzetim çalışmalarından sistemin kararlı olduğu görülmektedir. Son olarak, Şekil 6c incelendiğinde zaman gecikmesi değeri $\tau_3^* = 0.4958 s$ değerine kadar artırılırsa, kök dağılımı sonucundan görüldüğü gibi kompleks eşlenik kök ($\omega_{c3} = 2.5140 rad/s$) sanal eksen üzerinde olmakta ve sistem sınırda kararlı olmaktadır. Zaman gecikmesinin $\tau = 0.52 s > \tau_3^* = 0.4958 s$ değerine artırılması durumunda ise sistemin kompleks eşlenik kökünün sol yarı düzlemden sağ yarı düzleme geçtiği ve sistemin kararsız olduğu Şekil 6d'den görülmektedir.

5. ÖNERİLER

Bu çalışmada GSD ve AVR içeren zaman gecikmeli uyarma kontrol sisteminin Rekasius yerine koyma yöntemi kullanılarak zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizi yapılmıştır. GSD'in farklı kazanç değerleri için sistemin sınırdaki kararlı olacağı maksimum zaman gecikme değerleri önerilen yöntem ile teorik olarak hesaplanmış ve elde edilen teorik sonuçların doğruluğu QPmR algoritması ve zaman düzleminde gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Önerilen yöntemle elde edilen sonuçlar, [19] ve [21]'de elde edilen sonuçlarla karşılaştırılarak yöntemin güvenilir ve doğru sonuçlar verdiği ispat edilmiştir. Bu çalışmanın bir sonraki aşaması, sistemin Şekil 1b'de verilen OGR çevriminde meydana gelen gerilim ölçüm gecikme bilgisine ek olarak, GSD kontrol çevriminde frekans ölçüm gecikme bilgisi de dikkate alınarak önerilen yöntem yardımıyla sistemin zaman gecikmesine bağlı kararlılık analizinin yapılmasıdır.

KAYNAKLAR

- [1] SAADAT, H., *Power System Analysis* (2nd ed.), McGraw-Hill, New York, USA, 1999.
- [2] KUNDUR, P., *Power System Stability and Control* (1rd ed.), McGraw-Hill, New York, USA, 1994.
- [3] SAUER, P.W., PAI, M.A., *Power System Dynamics and Stability* (1rd ed.), Indian Reprint, Singapore, Asia, 2002.
- [4] NADUVATHUPARAMBIL, B., VALENTI, M.C., FELIACHI, A., "Communication delays in wide area measurement systems", *Proceedings of the 34th Southeastern Symposium on System Theory*, 118-122. Alabama, USA, 2002.
- [5] XIA, X., XIN, Y., XIAO, J., WU, J., HAN, Y., "WAMS applications in Chinese power systems", *IEEE Power and Energy Magazine*, 4, 54-63, 2006.
- [6] PHADKE, A.G., "Synchronized phasor measurements in power systems", *IEEE Computer Applications in Power*, 6, 10-15, 1993.
- [7] WU, H., TSAKALIS, K., HEYDT, G.T., "Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design", *IEEE Transactions on Power System*, 19, 1935-1941, 2004.
- [8] LIU, M., YANG, L., GAN, D., WANG, D., GAO, F., CHEN, Y., "The stability of AGC systems with commensurate delays", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 17, 615-627, 2007.
- [9] 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 System*, 27, 932-941, 2012.
- [10] YAO, W., JIANG, L., WU, Q.H., WEN, J.Y., CHENG, S.J., "Wide-area damping controller of FACTS devices for inter-area oscillations considering communication time delays", *IEEE Transactions on Power System*, 29, 318-329, 2014.
- [11] AYASUN, S., GELEN, A., "Stability analysis of a generator excitation control system with time delays", *Electrical Engineering*, 91, 347-355, 2010.
- [12] AYASUN, S., "Computation of time delay margin for power system small-signal stability", *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 19, 949-968, 2009.
- [13] CHEN, J., GU, G., NETT, C.N., "A new method for computing delay margins for stability of linear delay systems", *System and Control Letters*, 26, 107-117, 1995.
- [14] WALTON, K.E., MARSHALL, J.E., "Direct method for TDS stability analysis", *IEE Proceeding Part D*, 134: 101-107, 1987.
- [15] SÖNMEZ, Ş., AYASUN, S., NWANKPA, C.O., "An exact method for computing delay margin for stability of load frequency control systems with constant communication delays", *IEEE Transactions on Power Systems*, 31, 370-377, 2016.
- [16] REKASIUS, Z.V., "A stability test for systems with delays", *Proceedings of the Joint Automatic Control Conference, TP9-A*. San Francisco, USA, 1980.
- [17] OLGAC, N., SİPAHİ, R., "An exact method for the stability analysis of time-delayed linear time-invariant (LTI) systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 47, 793-797, 2002.
- [18] SİPAHİ, R., DELICE, I., "Advanced Clustering With Frequency Sweeping Methodology for the Stability Analysis of Multiple Time-Delay Systems", *IEEE Transactions on Automatic Control*, 56, 467 - 472, 2011.
- [19] KHALIL, H., PENG, A.S., "An Accurate Method for Delay Margin Computation for Power System Stability", *Energies*, 11, 3466, 2018.
- [20] KHALIL, H., PENG, A.S., "A New Method for Computing the Delay Margin for the Stability of Load Frequency Control Systems", *Energies*, 11, 3460, 2018.

REKASİUS YÖNTEMİ KULLANILARAK ZAMAN GECİKMELİ JENERATÖR UYARMA KONTROL SİSTEMİNİN MAKSİMUM ZAMAN GECİKMESİNİN HESAPLANMASI

- [21] SÖNMEZ, S., AYASUN, S., “Effect of load increase and power system stabilizer on stability delay margin of a generator excitation control system”, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 24, 5183 – 5194, 2016.
- [22] GÜNDÜZ, H., SÖNMEZ, S., AYASUN, S., “Comprehensive gain and phase margins based stability analysis of micro-grid frequency control system with constant communication time delays”, IET Generation, Transmission & Distribution, 11, 719 – 729, 2017.
- [23] SÖNMEZ, Ş., AYASUN, S., EMİNOĞLU, U., “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, 2014.
- [24] MACANA, C.A., MOJICA-NAVA, E., QUIJANO, N., “Time-delay effect on load frequency control for microgrids”, IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), 544-549. Evry, France, 2013.
- [25] GÜNDÜZ, H., AYASUN, S., SÖNMEZ, Ş., “Zaman gecikmeli mikro-şebeke sistemlerin Rekasius yerine koyma yöntemiyle kazanç ve faz payı tabanlı kararlılık analizi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Doi: 10.17341/gazimmfd.416515, 2018.
- [26] YAO, W., JIANG, L., WU, Q.H., WEN, J.Y., CHENG, S.J., “Delay-dependent stability analysis of the power system with a wide-area damping controller embedded”, IEEE Transactions on Power System, 26, 233–240, 2011.
- [27] HE, Y., WANG, Q.G., XIE, L.H., LIN, C., “Further improvement of free-weighting matrices technique for systems with time-varying delay”, IEEE Transactions on Automatic Control, 52, 293–299, 2007.
- [28] WU, M., HE, Y., SHE, J.H., LIU, G.P., “Delay-dependent criterion for robust stability of time-varying delay systems”, Automatica, 40, 1435–1439, 2004.
- [29] XU, S.Y., LAM, J., “On equivalence and efficiency of certain stability criteria for time-delay systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, 52, 95–101, 2007.
- [30] VYHLIDAL, T., ZITEK, P., “Mapping based algorithm for large-scale computation of quasi-polynomial zeros”, IEEE Transactions on Automatic Control, 2054, 171-177, 2009.
- [31] SİMULINK, Model-Based and System-Based Design, *Using Simulink*, Natick, MathWorks, 2000.
- [32] VYHLIDAL, T., OLGAC, N., KUČERA, V., “Delayed resonator with acceleration feedback – Complete stability analysis by spectral methods and vibration absorber design” Journal of Sound and Vibration, 333, 6781– 6795, 2014.
- [33] KAMMER, A.S., OLGAC, N., “Delayed-feedback vibration absorbers to enhance energy harvesting”, Journal of Sound and Vibration, 363, 54–67, 2016
- [34] SHAHGOLIAN, G., FAIZ, J., “The effect of power system stabilizer on small-signal stability in single-machine-infinite-bus”, International Journal of Electrical and Power Engineering, 4, 45-53, 2010.

EK

Denklem (2)’de $P(s)$ ve $Q(s)$ polinomlarının katsayıları:

$$\begin{aligned}
 p_6 &= T_A T'_{d0} T_w M \omega_0 T_2 ; \quad p_5 = T'_{d0} T_w M \omega_0 T_2 + K_3 T_A T_w M \omega_0 T_2 + T_A T'_{d0} M \omega_0 T_2 + T'_{d0} T_w D M \omega_0 T_2 + T_A T'_{d0} T_w M \omega_0 \\
 p_4 &= K_3 T_w M \omega_0 T_2 + T'_{d0} M \omega_0 T_2 + T'_{d0} T_w D \omega_0 T_2 + T'_{d0} T_w M \omega_0 + K_3 T_A M \omega_0 T_2 + K_3 T_A T_w D \omega_0 T_2 + \\
 &\quad K_3 T_A T_w M \omega_0 + T_A T'_{d0} D \omega_0 T_2 + T_A T'_{d0} M \omega_0 + T_A T'_{d0} T_w D \omega_0 + K_1 T_2 T_A T_w T'_{d0} \omega_0^2 \\
 p_3 &= K_3 M \omega_0 T_2 + K_3 T_w T_2 D \omega_0 + K_3 T_w M \omega_0 + T_2 T'_{d0} D \omega_0 + T'_{d0} M \omega_0 + T'_{d0} T_w D \omega_0 + K_3 D T_A T_2 \omega_0 + \\
 &\quad K_3 T_A M \omega_0 + K_3 T_A T_w D \omega_0 + T_A T'_{d0} D \omega_0 + K_1 T_2 T_A T'_{d0} \omega_0^2 + K_1 T_w T_A T'_{d0} \omega_0^2 + K_1 T_2 T_w T'_{d0} \omega_0^2 + \\
 &\quad K_1 K_3 T_2 T_w T_A \omega_0^2 + K_2 K_p K_A T_1 T_w \omega_0 - K_4 K_2 T_2 T_w T_A \omega_0^2 \\
 p_2 &= K_3 T_2 D \omega_0 + K_3 M \omega_0 + K_3 T_w D \omega_0 + T'_{d0} D \omega_0 + K_3 D T_A \omega_0 + K_1 T_A T'_{d0} \omega_0^2 + K_1 T_2 T'_{d0} \omega_0^2 + K_1 K_3 T_2 T_A \omega_0^2 + K_1 T_w T'_{d0} \omega_0^2 \\
 &\quad + K_1 K_3 T_w T_A \omega_0^2 + K_1 K_3 T_2 T_w \omega_0^2 + K_2 K_p K_A T_w \omega_0 - K_4 K_2 T_2 T_A \omega_0^2 - K_4 K_2 T_w T_A \omega_0^2 - K_4 K_2 T_2 T_w \omega_0^2 \\
 p_1 &= K_3 D \omega_0 + K_1 \omega_0^2 T'_{d0} + K_1 \omega_0^2 K_3 T_A + K_1 \omega_0^2 T_2 K_3 + K_1 \omega_0^2 T_w K_3 - K_4 K_2 \omega_0^2 T_A - K_4 K_2 \omega_0^2 T_2 - K_4 K_2 \omega_0^2 T_w \\
 p_0 &= K_1 \omega_0^2 K_3 - K_4 K_2 \omega_0^2 ; \quad q_4 = K_6 K_A M T_2 T_w \omega_0 ; \quad q_3 = K_6 K_A D T_2 T_w \omega_0 + K_6 K_A M T_2 \omega_0 + K_6 K_A T_w M \omega_0 \\
 q_2 &= K_6 K_A M \omega_0 + K_6 K_A D T_2 \omega_0 + K_6 K_A D T_w \omega_0 + K_1 K_6 K_A T_2 T_w \omega_0^2 - K_2 K_5 K_A T_2 T_w \omega_0^2 \\
 q_1 &= K_6 K_A D \omega_0 + K_1 K_6 K_A T_2 \omega_0^2 + K_1 K_6 K_A T_w \omega_0^2 - K_2 K_5 K_A T_2 \omega_0^2 - K_2 K_5 K_A T_w \omega_0^2 \\
 q_0 &= K_1 K_6 K_A \omega_0^2 - K_2 K_5 K_A \omega_0^2
 \end{aligned}$$