



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Melez güç sistemlerinde zaman gecikmesinin kararlılık analizi

Time delay margins computation for stability of hybrid power systems

Yazar(lar) (Author(s)): Halil EROL¹, Saffet AYASUN²

ORCID¹: 0000-0001-6171-0362

ORCID²: 0000-0002-6785-3775

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Erol H., Ayasun S., “Melez güç sistemlerinde zaman gecikmesinin kararlılık analizi”, *Politeknik Dergisi*, 23(4): 1131-1139, (2020).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.593892

Melez Güç Sistemlerinde Zaman Gecikmesinin Kararlılık Analizi

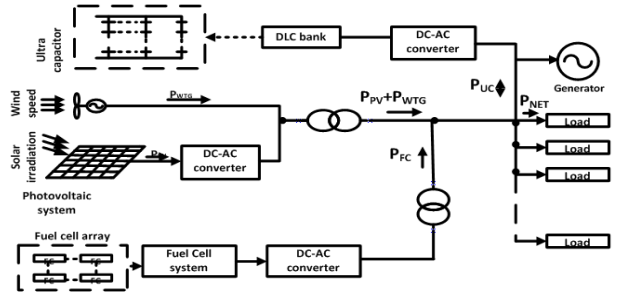
Time Delay Margins Computation for Stability of Hybrid Power Systems

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılık analizi gerçekleştirildi / Delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem is analyzed.
- ❖ Kurgulanan melez güç sisteminin matematiksel modeli ve simülasyonu yapıldı. / Mathematical model and simulation of the proposed hybrid power system is obtained.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Şekilde gösterilen melez güç sisteminin matematiksel modellemesi ve simülasyonu yapılmıştır. Sistem, rüzgar türbini jeneratörü (WTG), fotovoltaik sistem (PV), enerji depolama için ultra-kapasitör (UC) bankası, yakıt hücresi (FC) sistemi ve dizel jeneratör (DG) içermektedir. / Mathematical modeling and simulation of the hybrid power system shown in the figure is realized. The system includes wind turbine generator (WTG), photovoltaic system (PV), ultra-capacitor (UC) bank for energy storage, fuel cell (FC) system and diesel generator (DG).



Amaç (Aim)

Bu çalışmada, genel tasarımı şekilde sunulan melez güç sisteminin kararlılık sınırları PI kontrolör kullanarak belirlenmesi sağlanmıştır. Kontrolör kazançlarının seçiminde oluşan zaman gecikme sınırları belirlenmesi hedeflenmiştir. / In this study, the stability limits of the hybrid power system, whose general design is presented in the way, are determined by using PI controller. It is aimed to determine time delay limits in the selection of controller gains.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Sistemin matematiksel modellemesi gerçekleştirildi. Model çözümünde tam çözüm sağlayan bir yöntem kullanılmıştır. Teorik çözümlerin doğruluğu simülasyon yapılarak doğrulanmıştır.

Özgünlük (Originality)

Yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılık analizi gerçekleştirilmesi. / Delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem is analyzed.

Bulgular (Findings)

Farklı K_P , K_I değerleri için sistem ne kadar zaman gecikmesine müsaade edebilir, sorusu yanıtlanmıştır. Sonuçlar hem tablo şeklinde hem de grafik olarak değişik K_P , K_I değerleri için elde edilmiştir. / For different K_P , K_I values, how long delay, can the system stay in stable region, has been answered. The results were obtained both in tabular form and graphically for different K_P , K_I values.

Sonuç (Conclusion)

Önerilen sistemin farklı K_P , K_I değerleri için, kontrolörün uzaktan kontrolünde olabilecek gecikme sürelerinin sınırları belirlenmiştir. / For the different K_P and K_I values of the proposed system, the limits of the delay times that may be in the remote control of the controller have been determined.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Melez Güç Sistemlerinde Zaman Gecikmesinin Kararlılık Analizi

Araştırma Makalesi / Research Article

Halil EROL^{1*}, Saffet AYASUN²

¹Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Türkiye

²Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 18.07.2019 ; Kabul/Accepted : 06.11.2019)

ÖZ

Yük frekans kontrolü (LFC) de, kontrol sinyallerinin ölçümlerini kontrol merkezinden kontrol ünitesine ve uzak terminal ünitelerinden (RTU) kontrol merkezine iletmek esastır. Bu nedenle, geleneksel iletişim kanallarının kullanılması nedeniyle zaman gecikmeleri kaçınılmaz hale geliyor. LFC sisteminin dinamik performansı bu gecikmelerle azalır. Bu makale, yerel melez enerji üretim sisteminin LFC'sinin gecikmeye bağlı kararlılığını analiz etmektedir. Çalışılan sistem, rüzgar türbini jeneratörü (WTG), fotovoltaik sistem (PV), enerji depolama için ultra-kapasitör (UC) bankası, yakıt hücresi (FC) sistemi ve dizel jeneratör (DG) içerir. Bu çalışmada, böyle bir sistemin modellenmesi ve benzetimi yapılmıştır. Gecikme marjı, LFC sisteminin kararlılık gecikmesinde üst sınırı belirtmektedir. Gecikme marjlarını hesaplamak için analitik bir yöntem kullanılmıştır. Gecikme marjları, oransal- integral (PI) kontrolörün geniş bir aralığı için hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, PI kontrolör parametrelerini, sistemin dinamik performansı ile gecikme marjı arasında dengeli bir seçim yapacak şekilde ayarlamak için kullanılabilir. Önerilen hibrit sistemin kontrolör parametrelerinin kararlılık çerçevesinde hangi aralıklarda seçilebileceği tespit edilerek, tablo ve grafik halinde sunulmuştur. Önerilen sistemin Matlab/Simulink ile benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Simülasyon çalışmaları ile teorik çalışmaların sonuçları uyumluluk göstermiştir. Simülasyon çalışmaları önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Gecikmeye bağlı stabilite, gecikme marjı, elektriksel güç sistem kararlılığı, yük frekans kontrolü.

Time Delay Margins Computation for Stability of Hybrid Power Systems

ABSTRACT

In load frequency control (LFC), it is essential to transmit measurements of control signals from the control center to plant side and remote terminal units (RTU) to control center. Therefore, time delays become inevitable due to the use of conventional communication channels. The dynamic performance of LFC system would be degraded by these delays. This paper is dedicated to the delay-dependent stability of the LFC of hybrid power generation subsystem. The system studied includes wind turbine generator (WTG), photovoltaic system (PV), ultra-capacitor (UC) bank for energy storage, fuel cell (FC) system and diesel generator (DG). Delay margin is stated for the upper bound on the delay for stability of LFC system. An analytical method is used to compute delay margins. Delay margins are calculated for wide range of proportional-integral (PI) controller. Such results could be utilized to tune the PI controllers as to achieve a compromise between the dynamic performance and the delay margin. It has been determined in which intervals, the controller parameters of the proposed hybrid system can be selected while the system is in stable region. The results are presented in tables and graphs. Simulation study of the proposed system with Matlab / Simulink was performed. The results of the simulation studies and the theoretical studies showed compatibility. Simulation studies verify the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Delay-dependent stability, delay margin, electrical power systems stability, load frequency control.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik şebekesinde son yıllarda büyük elektrik şebeke kesintileri yaşanmaktadır. Bu, bazı ülkelerin melez mikro şebekeleri kullanma eğilimini artırmıştır. Dahası, dünyadaki pek çok ülke ve özellikle kırsal bölgeler bağımsız elektrik üretim sistemlerini kullanmaya yönelmektedir. Bağımsız elektrik üretim güç sistemleri hakkında birçok literatür vardır [1]. Akaryakıt fiyat artışları, kirlilik ve çevresel ısınma nedeniyle,

şebekeden bağımsız sistem şeklindeki yenilenebilir enerji üretim tesisleri artmaktadır. Yenilenebilir enerji üretiminde, güneş ve rüzgar enerjisi üretimi en çekici iki yöntemden biridir. Hava koşulları nedeniyle, güneş ve rüzgar kaynaklarının enerji üretimi dalgalanıyor. Bu nedenle, batarya bankası ve FC gibi enerji depolama sistemlerine veya ek üretime genellikle ihtiyaç duyulur. Melez yenilenebilir enerji sistemlerinin modellenmesi ve frekans sapmalarının kontrolü literatürde yoğun olarak araştırılmaktadır [2]. Bunlar arasında izole edilmiş bir yüke bağlı bir melez güç üretim / depolama sisteminin küçük sinyal stabilite analizi yapılmıştır [3, 4]. Azaltılmış boşaltma yükü tekniği uygulanmış izole edilmiş küçük

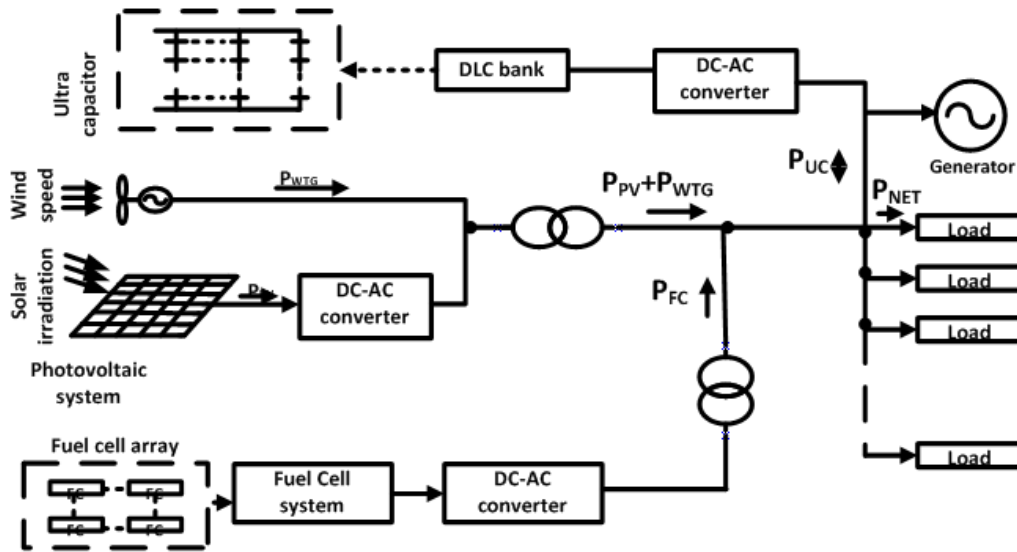
*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : halilerol@osmaniye.edu.tr

hidroelektrik santral için yük frekans kontrolü araştırılmıştır [5]. Birinci dereceden FC Dynamic modeli led/lag olarak incelenmiştir [6]. Deneysel verilere dayanan geçici olaylar, FC sistemlerinin tam olarak nasıl davrandığını göstermek için analiz edildi. Rüzgar türbini jeneratörünün çıkış gücü kontrolü, perde açısı değişimi kullanılarak, [7] ve [8]’de sunulmuştur. Kapalı devre sistemlerinin dinamik performansı, zaman gecikmeleri ile bozulabilir. Bu, bazen sistemin kararsızlığına bile neden olabilir [9]. Son zamanlarda, iletişim gecikmeleri olan LFC şema analizi / sentezi bazı makalelerde ele alınmıştır [10] [11]. Üçüncü parti LFC servisi için ağ gecikmesi modellemesi ve ağ iletişimi gereksinimi araştırılmış ve ayrıca serbest piyasada LFC planı için iletişim gecikmesinin etkileri gösterilmiştir [12]. Ayrıca, geleneksel bir LFC şemasının gecikmeye bağlı stabilite analizi sunulmuştur [13-15]. Zaman gecikmesi etkilerinin üstesinden gelmek için, lineer matris eşitsizliği (LMI) tekniğine dayanarak, merkezi olmayan bir durum geri bildirim denetleyicisi ve tam durum geri bildirim denetleyicisi tasarlanmıştır [9]. Zaman gecikmeleri, çarpanlı belirsizlikler olarak ele alınmaktadır [16] ve H_{∞} teorisine dayanarak, serbest piyasada bir oransal integral tip LFC araştırılmıştır [17]. Dinamik sistemler gecikme marjı hesaplamaları temel olarak iki tip teorik yöntemle yapılır. Birincisi, sistemin karakteristik denkleminin veya kritik özdeğerlerin

kontrolü için analiz edilmiştir. İletişim gecikmesi olan yük frekans kontrolü için doğrusal matris eşitsizliği yöntemi [13] uygulanmıştır. [19] tarafından bildirilen mevcut çalışmalar, frekans bölgesi direkt yöntemlerinin, zaman bölgesi yöntemleri ile karşılaştırdığımızda daha doğru gecikme marjlarına yol açtığını göstermektedir.

Bu makale, sabit iletişim zaman gecikmeleri olan melez yenilenebilir enerji sistemlerinin kararlılık gecikme marjlarını belirlemek için [18] tarafından temsil edilen teorik bir yöntemi uygular. [20] tarafından bildirilen melez LFC sisteminin dinamik modeli, tüm iletişim zaman gecikmeleri dikkate alınarak geliştirilmiştir. Kontrolörün kantitatif etkisinin araştırılması için, oransal integral kontrolör kazançlarının farklı değerleri için gecikme marjları hesaplanmıştır. Son olarak, önerilen yöntemle hesaplanan teorik gecikme marjı sonuç doğruluğunu kanıtlamak amacı ile sonuçlar simülasyonlar kullanılarak doğrulanmıştır.

Makalenin genel ana hatları aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. II. Bölüm’de, sorunun araştırılması ve LFC sisteminin dinamik modelinin formülasyonu gerçekleştirilmiştir. Bölüm III’te, zaman gecikmeleri olan melez LFC şeması altında, güç sistemlerinin kararlılığı için yeterli koşulların türetilmesi yapılmıştır. Kontrolör parametrelerine dayanarak vaka çalışmaları Bölüm IV’te yapılmıştır. Son olarak, sonuçlar ve sonuçlar hakkındaki yorumlar Bölüm V’de yapılmıştır.



Şekil 1. Melez Güç sistemi yapısı.(Configuration of the hybrid power system)

köklerini belirlemeyi amaçlayan frekans alanı yaklaşımlarına dayanır. Bu doğrudan yöntemlerin ortak başlangıç noktası, karakteristik denklemlerin sanal köklerinin belirlenmesidir [18]. Bu yöntemin temel uygulamaları, sabit zaman gecikmelerini analiz etmek için geliştirilmiştir. İkinci yöntem grubu, stabilite gecikme marjlarını belirlemek için LMI tekniğini ve Lyapunov stabilite teorisini uygulayan zaman alanı yaklaşımıdır. [11], gecikmeye bağlı kararlılıkta, sabit ve zamanla değişen gecikmelere sahip yüklerin frekans

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

Şekil 1, analiz edilecek melez enerji üretim / enerji depolama sisteminin konfigürasyonunu göstermektedir. Bazı yazarlar tarafından bu yapılandırma, mikro şebeke bağlantısı olarak bilinir. Bu sistem uzaktan kontrol ediliyorsa, zaman gecikmesi olabilir. Böylece, uzak merkezden gönderilen komutlar zamanında yerine getirilemeye bilir. Bu durum güç sistemini dengesizleştirecektir. Güç sistemini dengesizleştiren zaman

gecikmesi, gecikme marjı olarak bilinir. Bu gecikme marjı, bu makalenin ana odağıdır. Yerel güç sistemi bir PV, bir WTG, bir FC ve bir UC içerir. Analiz edilen AC sistemiyle enerji alışverişinde sadece PV, FC ve UC'nin uygun güç dönüştürücüleri gerektirdiğini gözlemleyin. UC'nin, yerel sistem tarafından üretilen fazla enerjiyi depolayacak kadar kapasitesinin yüksek olduğu varsayılmaktadır.

Güç üretimi (PG)/güç dağıtım sisteminin (PDS) blok şeması, Şekil 2'de gösterilmiştir. Net güç üretimi P_{NET} şu şekilde belirlenir: (a) PV'lerin çıkış gücü (P_{PV}), (b) WTG'lerden (P_{WTG}) çıkış gücünün bir parçası (c) FC'lere bağlı, DC-AC dönüştürücüsünün çıkış gücü (P_{FC}), (d) UC'lerin (P_{UC}) deşiş tokuş gücü ve jeneratörün (P_{GEN}) çıkış gücüne bağlıdır.

Stabilite analizi için, zaman gecikmeli melez LFC sistemi için karakteristik denklemin elde edilmesi ilk adımdır.

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + Q(s)e^{-s\tau} = 0 \quad (1)$$

burada, τ toplam zaman gecikmesini gösterir, $Q(s)$ ve $P(s)$ aşağıda verilen gerçek katsayılı polinomlardır:

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

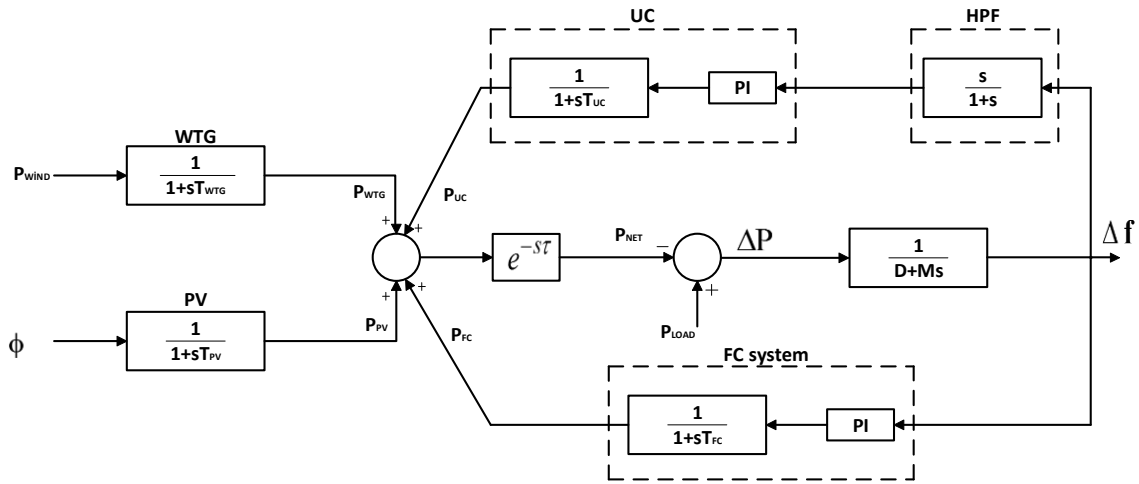
$$Q(s) = q_4 s^4 + q_3 s^3 + q_2 s^2 + q_1 s \quad (3)$$

burada p_i ve q_i ler şöyledir,

$$p_6 = MT_{FC} T_{UC}$$

$$p_5 = MT_{FC} T_{UC} + MT_{FC} + MT_{UC} + DT_{FC} T_{UC}$$

$$p_4 = MT_{FC} + MT_{UC} + M + DT_{FC} T_{UC} + DT_{FC} + DT_{UC}$$



Şekil 2. Melez Güç sistemi blok şeması.(Hybrid power system block diagram for investigation)

Melez LFC şeması geleneksel modeli, kontrol mekanizmasına zaman gecikmesi dâhil edilerek modifiye edilir. Bir kontrol cihazı olarak, modeldeki yük frekansını kontrol etmek için oransal integral kontrol kullanılır. LFC şeması birden fazla gecikmeye sahip olabilir. Örneğin, iletişim hatlarından veya geribildirim bölümünden olabilir. Bu çoklu gecikmeler basitleştirme için bu çalışmada sabit tek gecikme olarak kabul edilmiştir. Bu sadeleştirme dikkate alındığında, Şekil 2'de gösterildiği gibi basit bir model oluşturmak mümkündür. Model, durum değişkenlerinde oluşan tek bir zaman gecikmesinin uygun bir şekilde gösterilmesini sağlar. Önerilen sistemde, uzun vadede DLC bankasının boşalmasını ve şarjını azaltmak için, yüksek geçirgen bir filtre (HPF) de kullanılır. HPF'nin yardımıyla, genel sistem frekans sapması iki bölüme ayrılmıştır. Hızlı yanıt süresine sahip olması nedeniyle, yüksek frekanslı sapmanın telafisi DLC bankaları tarafından bastırılır. FC sistemi düşük frekans sapmasını telafi etmek için kullanılır [18].

(4)

$$p_3 = M + DT_{FC} + DT_{UC} + D$$

$$p_2 = D$$

$$q_4 = K_P T_{FC} + K_P T_{UC}$$

$$q_3 = K_I T_{FC} + 2K_P + K_I T_{UC} + K_P T_{UC}$$

$$q_2 = 2K_I + K_I T_{UC} + K_P q_1 = K_I$$

Karakteristik denklemin (1) kök konumu, zaman gecikmesi olan melez LFC sisteminin kararlılığını hesaplamak için hesaplanmalıdır. Bir sonraki bölüm, üstel terimlerin ortadan kaldırılması kullanılarak kararlılık probleminin gerçekleştirilmesi ve melez LFC sistemi kararlılık analizinin tanımlanmasına ayrılmıştır.

2.1 Zaman gecikmesinde kararlılık analizi

Zaman gecikmesi olan sistemlerin karakteristik denklemi denge noktasında sonsuz boyuttadır. Bu nedenle, sistemin kararlılık haritalarını çıkarmak zordur. Bu, sistemin özdeğerlerinin sonsuz olduğu anlamına gelir. Bununla birlikte, melez LFC sisteminin kararlılık analizi

çin (1) 'de verilen karakteristik denklemin tüm köklerini bulmak gerekli değildir. Sistem karakteristik denkleminin zaman gecikmesine göre nasıl değiştiğini değerlendirmek yeterlidir. Gecikmeden bağımsız sistem için (yani, $\tau = 0$), LFC sisteminin kararlılığı sistemin karakteristik denkleminin denklem (1) ile tanımlanan kök yerlerine dayanır. Bu köklerin τ 'nin fonksiyonu olduğu ve zaman gecikmesi içerdiği açıktır. τ değiştiğinde, bazı köklerin yerleri değişebilir. Karakteristik denklem köklerinin bazı sınırlı zaman gecikmeleri için $s = jw_c$ konumunda (burada c "geçiş frekansı" için kullanılmakta), yani sanal eksen üzerinde olduğunu varsayalım. Karmaşık kökler, karmaşık eşlenik simetrisine sahip olduğundan, $\Delta(-s, \tau) = 0$ denklemi, τ zaman gecikmesinin aynı değeri için $s = jw_c$ 'de aynı kökü içerecektir. Sonuç olarak, problem, $\Delta(-s, \tau) = 0$ ve $\Delta(s, \tau) = 0$ 'in $s = jw_c$ 'de ortak köklere sahip olan τ zaman gecikmesi değerlerinin hesaplanmasına dönüşür. Bu durum aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir,

$$\Delta(s, \tau) = P(s) + e^{-s\tau}Q(s) = 0 \quad (5)$$

$$\Delta(-s, \tau) = P(-s) + e^{s\tau}Q(-s) = 0 \quad (6)$$

Denklem (3) deki üstel ifadeyi yok edebilmek için $s = \pm jw_c$, olarak kullanabiliriz.

$$\Delta(jw_c, \tau) = P(jw_c) + e^{-jw_c\tau}Q(jw_c) = 0 \quad (7)$$

$$\Delta(-jw_c, \tau) = P(-jw_c) + e^{jw_c\tau}Q(-jw_c) = 0 \quad (8)$$

Üstel terimin yok edilmesi yöntemi uygulandığında, karakteristik denklem (7),

$$W(w_c^2) = P(jw_c) * P(-jw_c) - Q(jw_c) * Q(-jw_c) = 0 \quad (9)$$

$P(s)$, $Q(s)$ değerlerini denklem (2) ve (3) deki denklem (5) 'e değiştirerek aşağıdaki yeni polinom elde edilir. Bu polinomda üstel terimler yok edilmiştir.

$$W(w_c^2) = t_{12}w_c^{12} + t_{10}w_c^{10} + t_8w_c^8 + t_6w_c^6 + t_4w_c^4 + t_2w_c^2 \quad (10)$$

buradaki t_i 'ler, aşağıda verildiği gibi p ve q 'nun fonksiyonlarıdır.

$$\begin{aligned} t_{12} &= p_6^2 \\ t_{10} &= -2 * p_4 * p_6 + p_5^2 \\ t_8 &= 2 * p_2 * p_6 - 2 * p_3 * p_5 + p_4^2 - q_4^2 \\ t_6 &= -2 * p_2 * p_4 + 2 * q_2 * q_4 + p_3^2 - q_3^2 \\ t_4 &= p_2^2 + 2 * q_1 * q_3 - q_2^2 \\ t_2 &= -q_1^2 \end{aligned} \quad (11)$$

Kararlılık sorunu, bu yöntem ile etkili bir şekilde, gecikme terimi içermeyen bir düzeye indirgenir. Bunun anlamı, sorunu yalnızca (10) 'daki tek değişkenli bir polinomun köklerini hesaplamaya indirgenmesidir. Denklem (1) 'de üstel terimlerle olan 6. mertebeden karakteristik denklemin, üstel bir terim olmadan denklem

(10) ile gösterilen bir 12. derece polinoma dönüştüğüne dikkat edin. (10) 'un gerçek pozitif kökleri, denklem (1)'in sanal köklerinin büyüklüğü ile eşleşir, $s = \mp jw_c$. Gerçek denklemin pozitif köklerini (10) hesaplamak, denklemlerin (1)'in tamamen sanal köklerinin hesaplanmasından çok daha kolaydır.

Melez LFC sisteminin gecikme bağımlılığı, (10) 'un yeni polinomun pozitif gerçek kökleri tarafından kolayca belirlenebilir. Eğer modifiye karakteristik denklem(10) $\tau \geq 0$ için, (bütün gecikmeler için) gerçek pozitif kök içermemesi durumunda, sistemin gecikmeden bağımsız kararlı olduğu söylenir. Melez LFC sistemi, türetilmiş karakteristik denklem(10), en az bir pozitif gerçek köke sahip olması durumunda, gecikmeye bağlı kararlı olarak bilinir. Bu tür köklerin varlığı, denklem (10) köklerinin sınırlı bir gecikme süresi için $s = \mp jw_c$ 'deki sanal ekseni kestiği anlamına gelir.

Denklem(10) köklerinin sanal ekseni geçtiği gecikme sınırı olarak adlandırılan zaman gecikmesi, [18] yöntemi ile aşağıda hesaplanmıştır.

$$\tau^* = \frac{1}{w_c} * \tan^{-1} \left(\frac{k_9 w_c^9 + k_7 w_c^7 + k_5 w_c^5 + k_3 w_c^3}{k_{10} w_c^{10} + k_8 w_c^8 + k_6 w_c^6 + k_4 w_c^4} \right) \quad (12)$$

burada

$$k_{10} = p_6 * q_4,$$

$$k_8 = -p_4 * q_4 + p_5 * q_3 - p_6 * q_2,$$

$$k_6 = p_2 * q_4 - p_3 * q_3 + p_4 * q_2 - p_5 * q_1$$

$$k_4 = -p_2 * q_2 + p_3 * q_1 \quad (13)$$

Eğer denklem(10)'un pozitif kökleri varsa, o zaman denklem (1)'in kökünün $s = jw_c$ 'deki sanal ekseni geçip geçmediğini, τ 'yu arttırarak doğrulamamız gerekir. Bu, $[ds / d\tau]$ 'nın gerçek kısmının işareti ile kontrol edilebilir. Kritik karakteristik köklerin sanal ekseni sıfır olmayan bir hızla geçmesi durumunda sanal ekseni geçen bazı kökler vardır. Bu kökler şöyle belirlenir,

$$\text{Re} \left[\frac{ds}{d\tau} \right]_{s=jw_c} \neq 0 \quad (14)$$

$$RT|_{s=jw_c} = \text{sgn}[W'(w_c^2)] \quad (15)$$

burada sgn işareti, w_c^2 ye göre denklem(10)'un türevini ifade eder. Denklem (15) in nasıl elde edilebileceği, makale [21] de bulunabilir.

Bu ifade oldukça basit bir kıstas verir. Bu kriterine göre τ , $\tau_1 = \tau^* - \Delta\tau$ 'den, $\tau_2 = \tau^* + \Delta\tau$, ($0 < \Delta\tau \ll 1$) değerine yükseldiğinde, $s = jw_c$ 'deki köklerin geçiş yönü elde edilebilir. Kök $s = jw_c$, sanal ekseni ya kök eğilimi $RT = -1$ olduğunda sabit sol yarım düzleme, ya da kök eğilimi, $RT = +1$ olduğunda kararsız sağ yarım düzleme geçer. Tek gecikmeli durum için denklem(10) polinomu, tüm $\tau \in \mathbb{R}^+$ için sınırlı sayıda gerçek pozitif köke sahip olur. Buna şöyle bir set diyelim,

$$\{w_c\} = \{w_{c1}, w_{c2}, \dots, w_{cp}\} \quad (16)$$

her w_{cm} için, $m = 1, 2, \dots, p$, denklem (12) kullanılarak periyodik olarak aralıklı birçok τ_m^* değeri alabilir.

Bu seti şöyle adlandıralım

$$\{\tau_m^*\} = \{\tau_{m1}^*, \tau_{m2}^*, \dots, \tau_{mp}^*\} \quad m = 1, 2, \dots, p \quad (17) \quad \text{bozulması uygulanmış ve daha sonra } t = 0 \text{ s'de melez}$$

Çizelge 1. Çeşitli K_P ve K_I değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümleme faktörü $M = 0.4$ ve $D = 0.03$ sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of K_P and K_I . The inertia and damping factor of the load are held constant $M=0.4$ and $D=0.03$ respectively.)

τ^* (s)	K_I									
K_P	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0.5	0,849	0,472	0,310	0,222	0,166	0,128	0,101	0,081	0,065	0,052
1	0,646	0,510	0,405	0,329	0,272	0,229	0,195	0,169	0,147	0,129
1.5	0,458	0,413	0,369	0,330	0,294	0,263	0,237	0,214	0,194	0,177
2	0,355	0,335	0,315	0,295	0,276	0,257	0,240	0,224	0,210	0,196
2.5	0,293	0,282	0,271	0,260	0,249	0,238	0,227	0,217	0,207	0,198
3	0,251	0,245	0,238	0,231	0,224	0,217	0,211	0,204	0,197	0,191
3.5	0,221	0,217	0,212	0,208	0,203	0,199	0,194	0,189	0,185	0,180
4	0,198	0,195	0,192	0,189	0,186	0,182	0,179	0,176	0,173	0,170
4.5	0,180	0,178	0,176	0,173	0,171	0,169	0,166	0,164	0,161	0,159
5	0,165	0,164	0,162	0,160	0,158	0,157	0,155	0,153	0,151	0,149

burada $\tau_{m,r+1} - \tau_{m,r} = \frac{2\pi}{w_c}$ bir tekrarlamaya aralığıdır. Gecikme marjı tanımı dikkate alındığında, minimum τ_m^* , $m=1, 2, 3, \dots, p$ sistemin gecikme marjıdır $\tau^* = \min(\tau_m^*)$.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Gecikme marjları melez LFC sisteminde, çizelgelerde gösterildiği gibi değişik durumlar için hesaplanmıştır. Kontrolörün kantitatif etkisinin araştırılması için, PI kontrolör kazancının geniş bir değer aralığı için gecikme marjları elde edilmiştir. Ayrıca, simülasyon çalışmaları kullanılarak gecikme marjı doğruluğunun tespiti gerçekleştirilmiştir. Sistem parametreleri aşağıdaki gibi seçilmiştir; T_{WTG} , WTG sisteminin zaman sabiti: 1.5 sn; T_{PV} , PV sisteminin zaman sabiti: 1.8 sn; T_{FC} , FC sisteminin zaman sabiti: 0.26 sn; T_{UC} , UC sisteminin zaman sabiti: 0,01 sn. Yükün sönümleme faktörü D 'dir ve %3 olarak seçilmiştir. Toplam atalet M , 0.4 pu olarak seçilmiştir [18]. LFC sistemine $\Delta P_d = 0,1$ pu pozitif yük

LFC sisteminin frekans tepkisi elde edilmiştir.

Gecikme marjlarının hesaplanması, çok sayıda PI kontrolör kazancı için denklem(7) kullanılarak yapılır. Bunlar Tablo 1' de gösterilmiştir. Bu tablodan, K_P sabitlenirse τ^* 'nın K_I arttıkça azaldığını görebilirsiniz. Bu, K_I arttığında, daha az karalı bir melez LFC sistemi ile sonuçlandığını göstermektedir. K_P sabitlenirse, K_I 'nın τ^* üzerindeki etkisi, K_I 'nın artması τ^* 'ın azalmasına neden olmaktadır. $0 \leq K_I \leq 1$ ve $0 \leq K_P \leq 1$ aralığında detaylı analiz yapılabilir. Bu aralık için K_P ve K_I değerlerine göre τ^* 'ın davranışı Tablo 2'de gösterilmiştir.

Sonuçlar, sabit bir K_P için, K_I arttıkça τ^* 'nın azaldığını göstermektedir. K_P sabitlenirse, K_I 'nın artması τ^* 'ın azalmasına neden olmaktadır. K_P 'nin τ^* gecikme marjı üzerindeki etkisinin sabit K_I için iki sonucu vardır. İlk eğilim, τ^* gecikme marjının $0 \leq K_P \leq 0.1$ aralığında K_P arttıkça artmasıdır. Ancak $0.1 < K_P$ olduğunda, gecikme marjı K_P artarken azalmaktadır. En uzun gecikme marjı $K_P=0.1$ ve $K_I=0.05$ değerlerinde yakalanmıştır. Bu değer melez sistemin zaman gecikmesinden dolayı kararlı kalacağı en iyi durumu ifade etmektedir.

Çizelge 2. $0 \leq K_I \leq 1$ and $0 \leq K_P \leq 1$, $M=0.4$, $D=0.03$ için gecikme marjı sonuçları. (Delay margin results for $0 \leq K_I \leq 1$ and $0 \leq K_P \leq 1$, $M=0.4$, $D=0.03$)

τ^* (s)	K_I						
K_P	0.05	0.1	0.15	0.2	0.4	0.6	1
0	1.0783	0.6490	0.4616	0.3502	0.1502	0.0739	0.0111
0.05	1.9799	1.1165	0.7773	0.5888	0.2716	0.1555	0.0605
0.1	2.5201	1.4691	1.0338	0.7906	0.3819	0.2319	0.1080
0.2	2.2097	1.6227	1.2546	1.0130	0.5489	0.3595	0.1986
0.4	1.0081	0.9483	0.8865	0.8254	0.6181	0.4755	0.3088
0.6	0.6298	0.6139	0.5974	0.5804	0.5116	0.4470	0.3426
1	0.3732	0.3694	0.3657	0.3618	0.3461	0.3300	0.2977

Çizelge 3. Çeşitli K_P ve K_I değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümleme faktörü $M = 0.8$ ve $D = 0.03$ sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of K_P and K_I . The inertia and damping factor of the load are held constant $M=0.8pu$ and $D=0.03$ respectively)

τ^* (s)	K_I									
	K_P	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
0.5	0.517	0.334	0.233	0.172	0.132	0.104	0.083	0.068	0.056	0.046
1	0.338	0.297	0.259	0.226	0.198	0.174	0.154	0.137	0.123	0.111
1.5	0.246	0.232	0.218	0.205	0.192	0.179	0.167	0.157	0.146	0.137
2	0.196	0.189	0.183	0.176	0.170	0.164	0.157	0.151	0.145	0.139
2.5	0.164	0.160	0.157	0.153	0.150	0.146	0.142	0.139	0.135	0.132
3	0.141	0.139	0.137	0.135	0.133	0.130	0.128	0.126	0.124	0.122
3.5	0.125	0.123	0.122	0.120	0.119	0.117	0.116	0.114	0.113	0.111
4	0.111	0.110	0.109	0.108	0.107	0.106	0.105	0.104	0.103	0.102
4.5	0.101	0.100	0.099	0.098	0.098	0.097	0.096	0.095	0.095	0.094
5	0.092	0.091	0.091	0.090	0.089	0.089	0.088	0.088	0.087	0.087

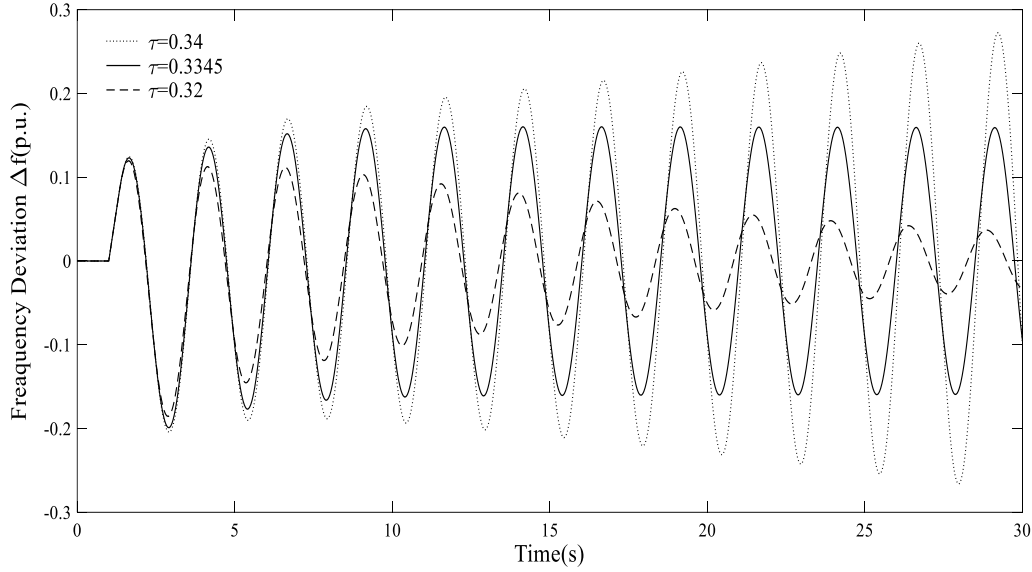
Yükün atalet ve sönümleme faktörünün gecikme marjı üzerindeki etkisi tablo 3 ve tablo 4'te incelenmiştir. Tablolar karşılaştırılırsa, artan atalet M 'nin gecikme marjı τ^* 'i arttırdığı gözlemlenebilir. Sönümleme faktörünün artırılması veya azaltılması gecikme marjı τ^* üzerinde önemli bir etkisi yoktur. Teorik gecikme marjlarının doğrulanması, zaman uzayında yapılan simülasyonlar tarafından gerçekleştirilmiştir. Teorik gecikme marjı sonuçlarının doğrulanması, zaman bölgesi simülasyonları için Matlab / Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. P_I kontrolörü için tipik parametreler, Şekil 3'te aşağıdaki gibi seçilen kazanımlardır: $K_I=1$ $K_P=0.5$. Bu PI kazançları için teorik gecikme marjının Tablo 1'de gösterildiği gibi $\tau^*=0.334s$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3'teki simülasyon sonuçları, melez sistemin, sürekli salınımlar nedeniyle $\tau = 0.3345$ s'de marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Ayrıca, $\tau = 0.32$ s için LFC sistemi azalan salınımlarla kararlıdır. azaltılmasıyla $\tau > 0.335$ s için artan eğilimli salınımlarla kararsızdır. Teorik gecikme marjları, simülasyonla elde edilen değerlerle tamamen aynıdır. Bu, önerilen yöntemin etkin bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Şekil 4'te PI kontrolörünün tipik parametreleri, $K_I=3.5$ $K_P=3$ ve teorik gecikme marjı $\tau^* = 0.128s$ 'dir. Şekil 4'te sunulan simülasyon sonuçları, melez sistemin, sürekli salınımlar nedeniyle $\tau = 0.1294s$ 'lerde marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Ayrıca, $\tau = 0.1285s$ için,

Çizelge 4. Çeşitli K_P ve K_I değerleri için elde edilen gecikme marjı sonuçları. Yükün atalet ve sönümleme faktörü $M = 0.4$ ve $D = 0.1$ sabit tutulmuştur. (Delay margin results obtained for various values of K_P and K_I . The inertia and damping factor of the load are held constant $M=0.4pu$ and $D=0.1$ respectively)

τ^* (s)	K_I									
	K_P	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5
0.5	0,557	0,363	0,256	0,191	0,148	0,118	0,096	0,079	0,066	0,055
1	0,351	0,310	0,272	0,238	0,208	0,184	0,163	0,146	0,131	0,118
1.5	0,253	0,239	0,225	0,212	0,198	0,186	0,174	0,163	0,152	0,143
2	0,200	0,194	0,188	0,181	0,175	0,168	0,162	0,156	0,149	0,144
2.5	0,167	0,164	0,160	0,157	0,153	0,149	0,146	0,142	0,139	0,135
3	0,144	0,142	0,140	0,138	0,135	0,133	0,131	0,129	0,126	0,124
3.5	0,127	0,125	0,124	0,122	0,121	0,120	0,118	0,117	0,115	0,114
4	0,113	0,112	0,111	0,110	0,109	0,108	0,107	0,106	0,105	0,104
4.5	0,102	0,101	0,101	0,100	0,099	0,099	0,098	0,097	0,096	0,096
5	0,093	0,092	0,092	0,091	0,091	0,090	0,090	0,089	0,089	0,088



Şekil 3. $K_I=1$, $K_P=0.5$, iken yük frekansının zamana göre değişimi (Deviation of load frequency versus time delays).

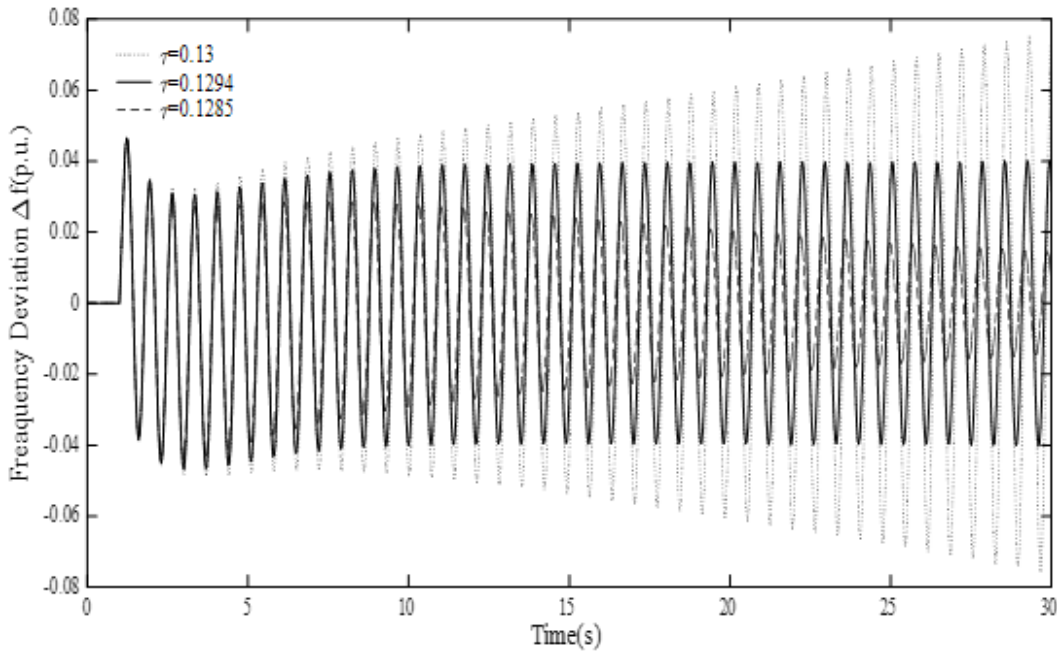
melez LFC sisteminin salınımların azalmasıyla stabil olduğu gözlemlenmiştir. $\tau > 0.1295$ s için ise artan salınımlarla kararsız olduğu gözlemlenmiştir.

Hem Şekil 3 hem de 4'ten anlaşıldığı üzere, önerilen yöntemin melez LFC sisteminin gecikme sınırlarına yüksek doğrulukla yaklaştığı açıktır. Örneğin, tablo 1'de $K_I=3.5$ $K_P=3$ için zaman gecikmesi τ^* , $\tau^*=0.128$ sn. olarak hesaplanır. Şekil 4'te simülasyon sonucu, $\tau^*=0.1294$ sn. için melez LFC sisteminin marjinal olarak stabil olduğunu göstermektedir. Bu sonuç teorik sonuçla uyumludur. Ayrıca, $\tau^*=0,13$ sn. (gecikme marjından daha büyük) için, Şekil 4'te melez sistemin kararsız olduğu ve teorik sonuçla uyumlu olduğu görülmektedir.

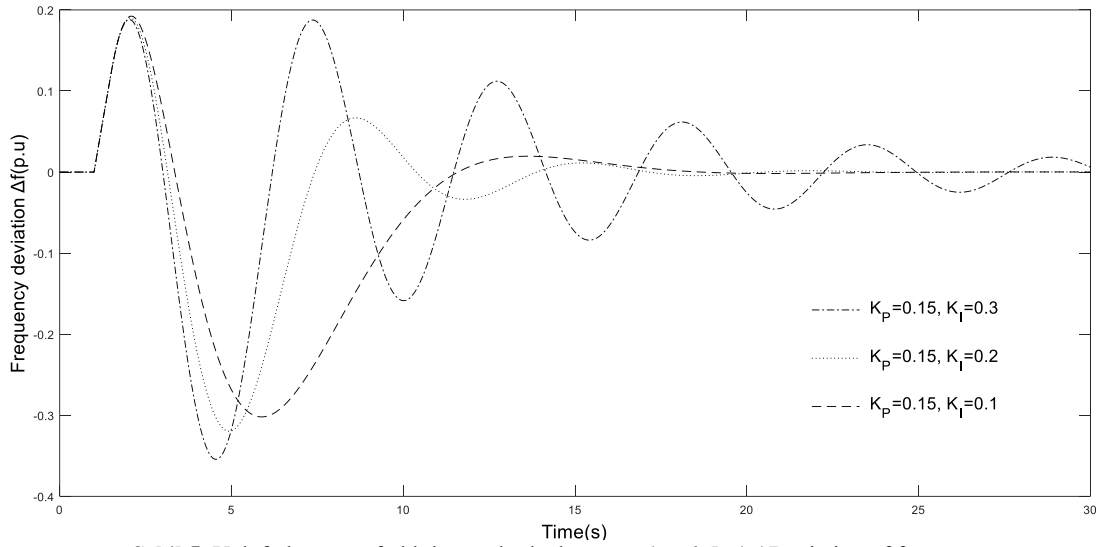
Son olarak, Şekil 5'te, $K_P=0.15$ 'in sabit olarak alınması ve K_I değerlerinin $0.1 < K_I < 0.3$ arasında değişmesiyle, frekans sapması gözlemlenmektedir. K_I değerinin artmasının, salınım sürelerinde artışa neden olduğu gözlemlenmiştir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

İletişim kanallarının zaman gecikmeleri göz önüne alınarak, gecikmeye bağlı melez bir LFC programının kararlılık analizi incelenmiştir. Geleneksel melez LFC yapısı, bir PI-tipi kontrol cihazı ile çalıştırılan zaman gecikmelerine sahip doğrusal bir sistem olarak kabul edilmiştir. Daha sonra gecikme sınırlarını bulmak için gecikmeye bağlı stabilite kriteri kullanılmıştır. Yöntem,



Şekil 4. ($K_I=3.5$, $K_P=3$, $\tau^*=0.1287$) iken yük frekansının zamana göre değişimi (Frequency deviation for different time delays ($K_I=3.5$, $K_P=3$, $\tau^*=0.1287$))



Şekil 5. Yük frekansının farklı kazançlarda davranışı ($\tau = 0.5\text{sn}$). (Deviation of frequency for different controller gains) ($\tau = 0.5\text{sec}$.)

karakteristik denklemin üssel terimlerini, polinomun geçiş frekansı değerlerine karşılık gelen pozitif gerçek kökler verecek şekilde elimine etmektedir. Geçiş frekansı, sistemin kararlılık niteliğinin değiştiği bir frekanstır. Örnek çalışmalar PI kontrolör parametrelerine dayanarak incelenmiştir. Analiz sonuçları, gecikme marjlarını etkileyen ana faktörlerden birinin PI kontrolörünün kazancı olduğunu göstermektedir. Sabit integral kazanç için ilk önce gecikme marjı yukarı doğru eğim yapar ve daha sonra oransal kazanç arttığında azalır. Gecikme marjı, PI kontrolörünün oransal kazancını $0 < K_p \leq 0.1$ aralığında arttırırken, integral kazancı sabit tutulduğunda yükselir. Bununla birlikte, $K_p > 0.1$ ötesinde oransal kazancı arttırmak, zaman gecikmesi marjını azaltmaktadır. Kontrolörün K_p kazançlarındaki küçük bir azalma $K_p \leq 0,1$ gecikme marjı için önemli bir artışa neden olabilir. Genel olarak, önerilen melez sistemin kararlı bir şekilde çalışması için kontrolör parametrelerinin seçimi incelenmiştir. Uygun kontrolör parametre seçimi ile, sistemin daha fazla zaman gecikmesine müsaade edebileceği şekil ve tablolar yardımı ile açıklanmıştır. Gelecekteki çalışmalar için, zaman gecikmelerinin yük frekansı kontrollü melez enerji üretim / depolama sistemindeki stabilite üzerindeki etkileri kazanç ve faz marjları dikkate alınarak araştırılacaktır.

KISALTMALAR(NOMENCLATURE)

PG: güç üretimi
PDS: güç dağıtım sistemi
D: sönümleme katsayısı
HPF: yüksek geçiren filtre
PNET: net güç
DG: dizel jeneratör
PGEN: Jeneratörün çıkış gücü.
FC: yakıt hücresi
DLC: çift katmanlı kapasitör

KFC: yakıt hücresi kazancı
KI: Yerel kontrolörün integral kazancı
KP: yerel denetleyicinin oransal kazancı
PI: oransal integral denetleyici
PV: fotovoltaik
LFC: yük frekans kontrolü
LHP: sol yarım düzlem
M: atalet momenti
MG: mikro şebeke
RHP: sağ yarı düzlem
RT: kök eğilimi
TUC: ultra kapasitörün zaman sabiti
TFC: yakıt hücresinin zaman sabiti
WP: rüzgar enerjisi
 Δf : frekans değişimi
 ΔP : gerçek gücün değişmesi
ESPES: elektroliz sisteminin çıkış gücünün değişmesi
 ΔPFC : yakıt hücresinin çıkış gücünün değişimi
 τ : zaman gecikmesi
 τ^* : Sabit gecikmeler durumunda elde edilen gecikme marjı

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Farid, K., Damir, Novosel. Sustainable Energy Trends, Opportunities, and Challenges. in Power Electronics Integration and Applications in *Distribution Sixth Conference on Innovative Smart Grid Technologies* (ISGT 2015), 2014.
- [2] Wang, G.Z., et al., Stability analysis and dynamic energy management of PV-hybrid storage based DC microgrid.

- Third International Conference on Energy Engineering and Environmental Protection*, 2019. 227.
- [3] Ghadiriyan, S. and M. Rahimi, Mathematical representation, stability analysis and performance improvement of DC microgrid system comprising hybrid wind/battery sources and CPLs, *Iet Generation Transmission & Distribution*, 13(10): 1845-1855, 2019.
- [4] Xie, B., et al., Two-Stage Battery Energy Storage System (BESS) in AC Microgrids with Balanced State-of-Charge and Guaranteed Small-Signal Stability, *Energies*, 11(2): 2018.
- [5] Doolla, S. and T.S. Bhatti, Load Frequency Control of an Isolated Small-Hydro Power Plant With Reduced Dump Load, *IEEE Transactions on Power Systems*, 21(4): 1912-1919, 2006.
- [6] Obara, S.y., Analysis of a fuel cell micro-grid with a small-scale wind turbine generator. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(3): 323-336, 2007.
- [7] Wang, C. and M.H. Nehrir, Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3): 957-967, 2008.
- [8] Tomonobu Senjyu, R.S., Naomitsu Urasaki, Hiroki Higa, Katsumi Uezato, and Toshihisa Funabashi, Output power control of wind turbine generator by pitch angle control using minimum variance control. *Electrical Engineering In Japan*, 154(2): 10 - 17, 2006.
- [9] Yong, H., et al. Output Feedback Stabilization for Discrete-time Systems with A Time-varying Delay in *Chinese Control Conference*, 2007.
- [10] Lou, G.N., et al., Stability Robustness for Secondary Voltage Control in Autonomous Microgrids With Consideration of Communication Delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33(4): 4164-4178, 2018.
- [11] Jiang, L., et al. Delay-dependent stability for load frequency control with constant and time-varying delays, in *IEEE Power & Energy Society General Meeting*. 2009.
- [12] Xiaofeng, Y. and K. Tomsovic, Application of linear matrix inequalities for load frequency control with communication delays. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(3): 1508-1515, 2004.
- [13] S, B.K., Tomsovic ; A, Bose, Communication models for third party load frequency control. *IEEE Trans. Power Syst.*, 19(1): 543-548, 2004.
- [14] Shuai, Z.K., et al., A Maximum Power Loading Factor (MPLF) Control Strategy for Distributed Secondary Frequency Regulation of Islanded Microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34(3): 2275-2291, 2019.
- [15] Nourollah, S. and G.B. Gharehpetian, Coordinated Load Shedding Strategy to Restore Voltage and Frequency of Microgrid to Secure Region, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 10(4): 4360-4368, 2019.
- [16] Bevrani, H. and T. Hiyama, On Load Frequency Regulation With Time Delays: Design and Real-Time Implementation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(1): 292-300, 2009.
- [17] Saberi, H., S. Mehraeen, and B.Y. Wang, Stability Improvement of Microgrids Using a Novel Reduced UPFC Structure via Nonlinear Optimal Control, *Thirty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (Apec 2018)*, 3294-3300, 2019.
- [18] Nayeripour, M., M. Hoseintabar, and T. Niknam, Frequency deviation control by coordination control of FC and double-layer capacitor in an autonomous hybrid renewable energy power generation system, *Renewable Energy*, 36(6): 1741-1746, 2011.