

Ekstremum Arama Kontrol Algoritması ile Bernstein Polinomları Tabanlı Kompanzator Tasarımı

Bernstein Polynomials-based Compensator Design via Extremum Seeking Control Algorithm

Buse Tacal Ucu¹, Şeref Naci Engin²

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

¹{btacal}@yildiz.edu.tr ²{nengin}@yildiz.edu.tr

Özetçe

Bu çalışmada, yüksek mertebeden sinüzoidal giriş tanımlama fonksiyonları (YMSGTF) yaklaşımı kullanılarak Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımı yapılmıştır. YMSGTF yaklaşımında frekans tabanlı bir maliyet fonksiyonu belirlenerek optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon süreci işletilirken ekstremum arama kontrol algoritması kullanılmıştır. Bu çalışmada önerilen kompanzator, literatürde hâlihazırda Chebyshev polinomları tabanlı bir kompanzator ile kontrol edilen bir sisteme uygulanmıştır. Ele alınan sistemde, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip bir yükselteç ve ona seri bağlı bir alçak geçiren filtre bulunmaktadır. Buradaki yaklaşımla elde edilmek istenen sonuç, yükseltecin doğrusal olmayan karakteristiğini doğrusallaştırmaktır. Elde edilen sonuçlar, hâlihazırda literatürde bulunan Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, frekans cevabı ve doğrusal olmayan satürasyon karakteristiği grafikleri ile gösterilmiştir. Benzetim sonuçları, Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorden daha iyi bir doğrusallaştırma performansı gösterdiğini ortaya koymuştur.

Abstract

In this study, a Bernstein polynomials-based compensator design is carried out using the higher-order sinusoidal input describing functions (HOSIDFs) approach. In the HOSIDF approach, an optimization process is conducted by determining a frequency-based cost function. During the optimization process, an extremum seeking control (ESC) algorithm is utilized. The proposed compensator is applied to a system that is already controlled by a Chebyshev polynomials-based compensator in this study. There is an amplifier with nonlinear characteristics and a low-pass filter connected in series with it in this system. The objective of this approach is to linearize the non-linear characteristic of the amplifier. The obtained results are compared

with the results of a Chebyshev polynomials-based compensator already reported in the literature. The results are presented by means of frequency response and nonlinearity saturation plots. Simulation results demonstrated that the Bernstein polynomials-based compensator exhibits better linearity performance compared to the Chebyshev polynomials-based compensator.

1. Giriş

Tanımlama fonksiyonları, son yıllarda doğrusal olmayan sistemlerin analizi ve doğrusal olmayan sistemler için kontrolör tasarımı konularında sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle frekans tabanlı tanımlama fonksiyonları sistemin analizi ve kontrolör sentezi konularında ele alınan matematiksel araçlar olarak görülmektedirler. Frekans tabanlı sistem analiz tekniklerinden biri olan yüksek mertebeden sinüzoidal giriş tanımlama fonksiyonları (YMSGTF) doğrusal olmayan sistemlerin analizi için kullanılmaktadır. Burada, sisteme sinüzoidal bir giriş uygulandığında sistemin cevabı incelenerek frekans tabanlı YMSGTF ifadeleri hesaplanmaktadır. YMSGTF ifadelerinin genliği ve fazı hesaplanırken hızlı Fourier dönüşümü (FFT) metodu kullanılmaktadır [1]. YMSGTF'lerinin hesaplanması ile ilgili ortaya konulan teoride sistem açık çevrim olarak çalıştırılmaktadır. Daha sonra ise kapalı çevrim doğrusal olmayan bir sistemde YMSGTF ifadelerinin ölçülmesi ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, YMSGTF ifadeleri ölçülmüş ve hesaplamalarda FFT metodu kullanılmıştır [2].

YMSGTF ifadelerinin ölçülmesinin kapalı çevrim sistemlerde iyi performans göstermesi ve bu yaklaşımın kontrolör parametrelerinin hızlı ve yüksek doğrulukta ayarlanmasına olanak tanınması bir sonraki çalışmalarda kontrolör tasarımı yapılırken YMSGTF yaklaşımının kullanılmasına sebep olmuştur. Doğrusal olmayan sistemlerde, özellikle performans sınırlayıcı etkilerden biri olan sürtünmenin etkili olduğu sistemlerde, ileri beslemeli kontrolör tasarımı yapılırken YMSGTF yaklaşımından yararlanılmıştır. YMSGTF yaklaşımı kullanılarak ileri beslemeli kontrolör kazançlarının optimum değeri bulunmuştur. Literatürde YMSGTF tabanlı ileri beslemeli kontrolör tasarımının gerçekleştirildiği çalışmalarda iletimi sağlayan elektron mikros-

kopları, çift gimbal kamera platformu ve elektrikli araç sistemleri ele alınmıştır [3, 4, 5].

Doğrusal olmayan sistemlerde performans sınırlayıcı etkilere bir tanesi de eyleyici doyumunu olarak karşımıza çıkmaktadır. Buradan hareketle, doğrusal olmayan karakteristiğe sahip eyleyici doyumlu sistemlerde ikincil bir kontrolör olarak Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator tasarımı yapılmıştır. YMSGTF yaklaşımı kullanılarak kompanzator tasarımı yapılan sistem, Lur'e tipi olarak ifade edilmektedir. Lur'e tipi sistemlerde, doğrusal ve doğrusal olmayan kısımlar ayrı ayrı bloklarla ifade edilebilmektedir. Bu yaklaşımda, frekans tabanlı ve YMSGTF ifadeleri aracılığıyla belirlenen maliyet fonksiyonu hesaplanmaktadır. Maliyet fonksiyonunun çevrimdışı olarak minimize edilmesi sonucunda Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorün parametreleri elde edilmektedir [6, 7, 8, 9]. Daha sonra yapılan çalışmalarda ise, eyleyici doyumlu sistemlerde YMSGTF yaklaşımı kullanılarak Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımı yapılmıştır [10, 11]. Bu çalışmaların yanı sıra, literatürde YMSGTF yaklaşımı ile yapılan çalışmalardan oluşan bir literatür araştırması bulunmaktadır [12].

Lur'e tipi sistemler için Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator tasarımı gerçekleştirilirken maliyet fonksiyonunun minimize eden değerler çevrimdışı olarak bulunmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalarda ise ekstremum arama kontrol algoritması kullanılarak Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorün parametreleri çevrimiçi olarak güncellenmiştir [13]. Ekstremum arama kontrol algoritması, literatürde yapılan çalışmalarla periyodik çıkışlara sahip doğrusal olmayan sistemler sınıfına genişletilmiştir. Burada minimizasyon işlemi yapılırken türev kestirimi, pertürbasyon periyodu üzerinden ortalama alan filtre yapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir [14].

Bu çalışmada literatürden farklı olarak, [13]'te ele alınan sisteme Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımı yapılmıştır. Tasarımı yapılan kompanzator, ekstremum arama kontrol algoritması kullanılarak elde edilmiştir. Ekstremum arama kontrol algoritmasının parametreleri literatürdeki çalışma ile aynı seçilmiştir ve performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

Çalışmanın ikinci kısmında Bernstein polinomları ve Bernstein polinomları tabanlı kompanzator yapısı hakkında matematiksel ön bilgi verilmiştir. Üçüncü kısımda ekstremum arama kontrol algoritması tabanlı optimizasyon algoritması anlatılmıştır. Dördüncü kısımda yapılan benzetim çalışmaları ve karşılaştırmalı sonuçlar verilmiştir. Son bölümde çalışmanın sonuçları özetlenerek bildiri tamamlanmıştır.

2. Matematiksel Ön Bilgi

Bu bölümde, kompanzator tasarımında kullanılan Bernstein polinomları hakkında kısaca matematiksel bilgiler verilmektedir. Kompanzator tasarımı yapılırken literatürde birçok çalışmada Chebyshev polinomları yapısı kullanılmıştır [6, 8, 9, 13]. Chebyshev polinomları gibi Bernstein polinomları da kompanzator tasarımında kullanılabilir [10, 11]. Bu çalışmada ekstremum arama kontrol algoritması kullanılarak YMSGTF tabanlı optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiş ve Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün parametreleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorün sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bernstein polinomları,

$i = 0, 1, \dots, n$ olmak üzere

$$B_{i,n}(v) = \binom{n}{i} v^i (1-v)^{n-i} \quad (1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. $i < 0$ ya da $i > n$ olması durumunda $B_{i,n} = 0$ kabul edilmektedir. Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımı yapılırken, Bernstein polinomlarının lineer kombinasyonlardan faydalanılmaktadır. Bernstein polinomlarının lineer kombinasyonları,

$$\chi(v) = c_0 B_{0,n} + c_1 B_{1,n} + \dots + c_n B_{n,n} \quad (2)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Bunun yanı sıra, Bernstein polinomları tabanlı kompanzator yapısı ifadesi

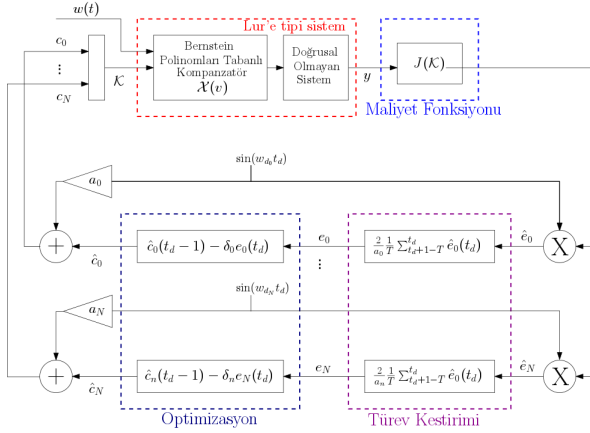
$$\chi(v) = \begin{bmatrix} 1 & v & \dots & v^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{0,0} & 0 & \dots & 0 \\ b_{0,1} & b_{1,1} & \dots & 0 \\ b_{0,2} & b_{1,2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{0,n} & b_{1,n} & \dots & b_{n,n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

olarak da ifade edilebilmektedir. Burada, kompanzatorün giriş sinyali v , v sinyalinin kuvvetlerinin katsayıları $b_{i,j}$ ve ekstremum arama kontrol algoritması kullanılarak elde edilecek kompanzatorün parametreleri ise c_n ile ifade edilmektedir.

3. Ekstremum Arama Kontrol Algoritması Tabanlı Optimizasyon Metodu

Bu bölümde, Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün tasarımı için kullanılan ekstremum arama kontrol algoritması ve YMSGTF tabanlı maliyet fonksiyonunun optimizasyonu detaylandırılmıştır. Şekil 1, çok parametrelilik ekstremum arama kontrol algoritması ile Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımının blok şemasını sunmaktadır. Ekstremum arama kontrol algoritması maliyet fonksiyonunu, türev kestirimi ve optimizasyon olmak üzere üç alt sistemden oluşmaktadır. Her bir alt sistem, ekstremum arama kontrol algoritmasının farklı uygulamalarında kullanılacak şekilde ayrı ayrı tasarlanabilmektedir [15, 16]. Ekstremum arama kontrol algoritması, üç alt sistemin her birinin zaman ölçeğine ayrılmasına dayanmaktadır [17]. Maliyet fonksiyonu statik bir fonksiyondur ve dinamikler kalıcı hale ulaştığında hesaplanmaktadır. Türev kestirimi işlemi, dinamiklerin de sabit duruma ulaşmasını ve maliyet fonksiyonunun değerinin mevcut olması durumunda gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle, türev kestirimi işlemi için hem sistem dinamiği hem de maliyet fonksiyonundan daha yavaş bir zaman ölçeği gerekmektedir. Son olarak, türev bilgisine dayandığı için optimizasyon işlemi en yavaş zaman ölçeği ile gerçekleştirilmektedir.

Ekstremum arama kontrol algoritmasının blok diyagramında belirtilen sırasıyla a_n , modülasyonun sinyalin genliğini, ω_{dn} , her bir çevrim için zorlama frekanslarını ve δ_n ise değişimdeki adım sayısını ifade etmektedir. Burada başarılı bir türev kestirimi ve optimizasyon işlemi sağlamak için, demodülasyon sinyalinin genliği, modülasyon sinyalinin genliğinden önemli ölçüde daha büyük bir genlik olarak seçilmektedir. Bu sebeple, " a_n " parametreleri çok küçük seçilmiştir. Oluşturulan



Şekil 1: Çok parametrelı ekstremum arama kontrol metodu blok şeması [13]

çevrimde, her bir ayarlama döngüsüne farklı zorlama frekansları atanmıştır. Bernstein polinomları tabanlı kompanzator literatürde bulunan sisteme uygulanmıştır ve Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator ile performans sonuçları karşılaştırılmıştır.

Literatürde yapılan çalışmada kullanılan ekstremum arama kontrol algoritmasının parametreleri Tablo 1’de verilmiştir. Burada, zorlama frekansları (ω_{dn} ’ler) ilgili tabloda verildiği gibi seçildiğinde ve referans sinyalinin frekansı 15.625 Hertz olduğu durumda, sistem dinamiği türev kestirimi bloğundan daha hızlı olmaktadır.

Tablo 1: Ekstremum arama kontrol algoritmasının parametreleri [13]

| | |
|---------------|---|
| a_n | 0.001 |
| ω_{dn} | $[\frac{2\pi}{5}, \frac{2\pi}{6}, \frac{2\pi}{7}, \frac{2\pi}{8}, \frac{2\pi}{9}, \frac{2\pi}{10}, \frac{2\pi}{11}, \frac{2\pi}{12}]$ |
| δ_n | 0.075 |

Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün tasarımı yapılırken frekans tabanlı bir maliyet fonksiyonu belirlenmiştir. Frekans tabanlı maliyet fonksiyonu,

$$J = \frac{1}{K} \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq 1}}^K \frac{|\mathcal{Y}(k\omega_0, \mathcal{K})|}{|\mathcal{Y}(\omega_0, \mathcal{K})|} \quad (4)$$

şeklinde belirlenmiştir. Burada, K optimizasyon sürecinde dikkate alınan harmonik sayısını temsil eder, $\mathcal{K} = [c_0 \ c_1 \ \dots \ c_n]$ şeklinde olan ve kompanzator parametrelerinden oluşan vektör ifadesini ve \mathcal{Y} sistem çıkışının FFT metodu ile elde edilen tek taraflı spektrumunu göstermektedir. Frekans tabanlı maliyet fonksiyonun optimizasyon süreci işletilirken YMSGTF yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yaklaşımdaki temel amaç, ele alınan sistemin harmonik cevabının analiz edilmesi ve yapılan bu analiz üzerinden sisteme

yönelik kompanzator tasarımı yapılmasıdır. Burada, doğrusal olmayan bir sisteme sinüzoidal bir sinyal uygulandığında ve çıkış sinyalinin tek taraflı spektrumu elde edildiğinde, giriş sinyalinin tek taraflı spektrumunda elde edilen ana frekans bileşenine ek olarak çıkış sinyallerinin tek taraflı spektrumunda yan frekans bileşenleri ortaya çıkmaktadır. Bunun ana sebebi, sistemde bulunan doğrusal olmayan yapılardır. Tanımlanan ve denklem (4)’te verilen maliyet fonksiyonun optimizasyonu gerçekleştirildiğinde, yan frekans bileşenlerinin etkilerinin azaltılması amaçlanmaktadır.

Maliyet fonksiyonun optimizasyon işlem gerçekleştirilerek tek ve gerçek bir sonuç elde edilebilmesi için performans kriteri belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaç doğrultusunda denklem (3)’te verilen kompanzator ifadesi,

$$\chi(v) = \lambda v + \sum_{i=0, i \geq 2}^n a_i v^i \quad (5)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada, λ kompanzatorün doğrusal besleme kazancını ifade ederken a_i katsayıları ise kompanzatorün doğrusal olmayan kısmının kat sayılarını ifade etmektedir. Buradan hareketle performans kriteri, tasarımı yapılan kompanzatorün doğrusal besleme kazancına eşit olacak şekilde

$$\lambda = -(n-1)c_0 + (n-1)c_1 \quad (6)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada, c_n , n dereceli Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün parametresi olarak ifade edilmektedir [10]. Ekstremum arama kontrol algoritması tabanlı optimizasyon işleminde performans kriteri, önerilen kompanzatorün parametreleri açısından tanımlanmaktadır. Bu nedenle, λ ifadesine bağlı olan kompanzator parametrelerinden biri, ekstremum arama kontrol algoritmasının güncelleme prosedüründen çıkarılan bir gevşek (slack) değişken olarak seçilmektedir. Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorde, gevşek değişken

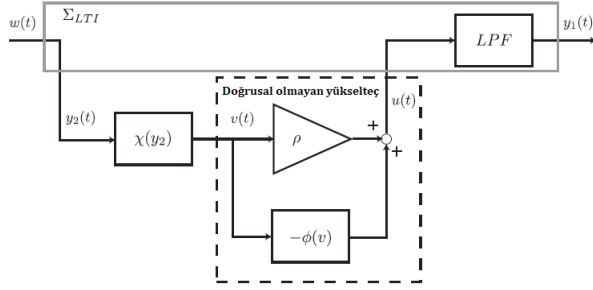
$$c_j = \frac{\alpha + \sum_{m=0, m \neq j}^1 (-1)^{j+1} (n-1) c_m}{(-1)^{j+1} (n-1)} \quad (7)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Buna ek olarak, $\lambda = \alpha$ seçilecek performans kısıtı belirlenebilmektedir. Bernstein polinomları tabanlı kompanzator tasarımı, gevşek değişken c_0 veya c_1 olarak seçilebilmektedir. Benzetim çalışmalarında kompanzatorün ikinci parametresi olan c_1 gevşek değişken olarak seçilmiştir.

4. Benzetim Çalışmaları

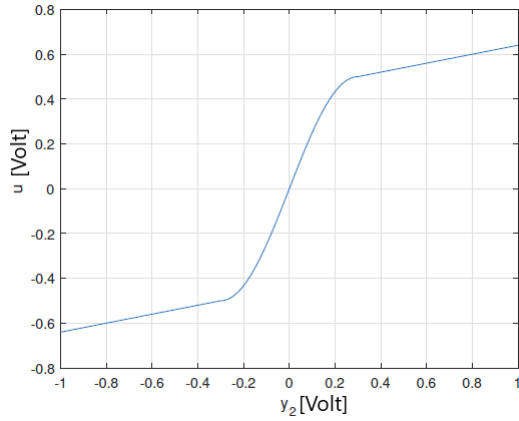
Bir önceki bölümde detaylı olarak açıklanan ekstremum arama kontrol algoritması tabanlı optimizasyon metodunun, literatürde bulunan ve Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatorün uygulanmış olduğu sistem üzerinde benzetim çalışmaları yapılmıştır. Burada ele alınan sistemin blok diyagramı Şekil 2’de verilmiştir.

Ele alınan sistem, birbirine bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan bileşenlerden oluşan Lur’e tipi bir sistem olarak modellenmiştir. YMSGTF tabanlı kompanzator tasarımı kullanılan ve sisteme harici giriş olarak uygulanan sinüzoidal sinyal $\omega(t)$ ile ifade edilirken sistem çıkışı $y_1(t)$ ile ifade edilmektedir. Parametreleri ekstremum arama kontrol algoritması aracılığıyla elde edilen Bernstein polinomları tabanlı kompanzator



Şekil 2: Ele alınan sistemin blok diyagramı [13]

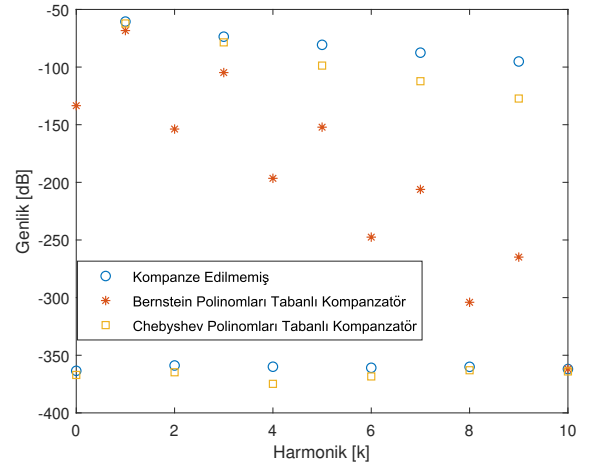
ise $\mathcal{X}(y_2)$ ile ifade edilmektedir. Burada sistem, alçak geçiren filtre (LPF) ve ona seri olarak bağlanmış bir doğrusal olmayan yükselteçten oluşmaktadır. Doğrusal olmayan yükselteç Şekil 3'de verilen şekilde davranış göstermektedir. Burada temel amaç, önerilen kompanzator aracılığıyla yükselteç karakteristiğini doğrusallaştırmaktır.



Şekil 3: Doğrusal olmayan yükselteç karakteristiği [13]

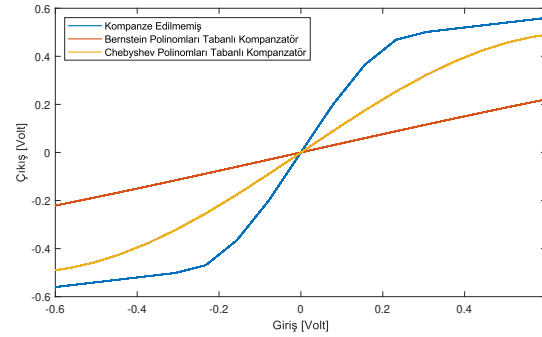
Sistem harmonik cevabı grafikleri Şekil 4'te verilmiştir. Burada her bir işaret farklı bir sistem konfigürasyonunu temsil etmektedir. Yuvarlak mavi işaret kompanse edilmemiş sistemin harmonik cevabını, kare sarı işaret Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator ile kompanse edilmiş sistemin harmonik cevabını ve yıldızlı kırmızı işaret Bernstein polinomları tabanlı kompanzator ile kompanse edilmiş sistemin harmonik cevabını temsil etmektedir. Bu grafikler incelendiğinde, her iki kompanzator yapısının da kompanse edilmemiş duruma kıyasla sistem çıkışındaki harmonik bozulmayı etkili bir şekilde azalttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra, özellikle tek harmonikler için Bernstein polinomları tabanlı kompanzator ile kompanse edilen sistemin harmonik cevabının, Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator ile kompanse edilen sistemin cevabına kıyasla daha düşük bir harmonik bozulma seviyesine ulaştığı gözlemlenmektedir.

Harmonik grafiklere ek olarak, Şekil 5'te kompanse edilmiş sistem cevabının doğrusallaştırma performansını gösteren



Şekil 4: Bernstein ve Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator performans karşılaştırması: harmonik cevap

doğrusal olmayan satürasyon karakteristiği grafiği verilmiştir. Her iki kompanzator yapısı ile kompanse edilmiş sistem cevaplarının, kompanse edilmemiş duruma kıyasla önemli bir doğrusallaştırma performansı sergilediği görülmektedir. Bunun yanı sıra, Bernstein polinomları tabanlı kompanzator, doyumluk bölgesinde daha düz bir profil sağlayabildiği için Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator'den daha iyi bir doğrusallaştırma performansı göstermiştir.



Şekil 5: Bernstein ve Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator performans karşılaştırması: doğrusal olmayan satürasyon karakteristiği

5. Sonuçlar

Bu çalışmada ekstremum arama kontrol algoritması kullanılarak YMSGTF tabanlı optimizasyon süreci işletilmiştir. Optimizasyon işlemi sonucunda Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün katsayıları elde edilmiştir. Önerilen kompanzator yapısı, literatürde hâlihazırda bulunan Chebyshev polinomları tabanlı kompanzator ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, literatürde bulunan doğrusal olmayan karakteristiğe sahip yük-

selteçe bağılı bir alçak geçiren filtre yapısı üzerinde elde edilmiştir. Önerilen kompanzatorün başarımını göstermek için çıkış sinyalinin tek taraflı spektrumu ve doğrusal olmayan satürasyon karakteristiği grafikleri elde edilmiştir. Benzetim sonuçları, Bernstein polinomları tabanlı kompanzatorün Chebyshev polinomları tabanlı kompanzatoründen daha iyi bir şekilde doğrusal olmayan dinamiklerin performans düşürücü etkisini azaltarak sistemin performansını iyileştirdiği ve daha iyi bir doğrusallaştırma performansı gösterdiği ortaya koymuştur. Çalışmanın ilerleyen kısımlarda önerilen kompanzator tasarımı, kapalı çevrim bir sistem yapısı olan açık su kanallarının operasyonel yönetimi için kullanılacaktır.

Teşekkür

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FCD-2022-4735 nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] P. W. J. M. Nuij, O. H. Bosgra ve M. Steinbuch, "Higher-order Sinusoidal Input Describing Functions for the Analysis of Non-linear Systems with Harmonic Responses," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Cilt: 20, s: 1883-1904, 2006.
- [2] P. Nuij, M. Steinbuch ve O. Bosgra, "Measuring the higher order sinusoidal input describing functions of a nonlinear plant operating in feedback," *Control Engineering Practice*, Cilt: 16, s: 101-113, 2008.
- [3] D. Rijlaarsdam, P. Nuij, J. Schoukens ve M. Steinbuch, "Frequency Domain Based Friction Compensation Industrial Application to Transmission Electron Microscopes," *Proceedings of the 2011 American Control Conference*, San Francisco, CA, s: 4093-4098, 2011.
- [4] L. Uzun ve J. Salásek, "HOSIDF-Based Feedforward Friction Compensation in Low-Velocity Motion Control Systems," *Mechatronics*, Cilt: 24, s: 118-127, 2014.
- [5] D. Kaptan, B. Tacal ve L. Uzun, "Feedforward Compensator Design in Traction Motor Drive for Electric Vehicles via Frequency Based System Identification," *2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, Antalya, Turkey, s: 1-6, 2022.
- [6] D. J. Rijlaarsdam, A. C. Setiadi, P. W. J. M. Nuij, J. Schoukens ve M. Steinbuch, "Frequency Domain-Based Nonlinearity Detection and Compensation in Lur'e Systems," *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Cilt: 23, s: 1168-1182, 2013.
- [7] M. A. Öz, B. Erol ve L. Uzun, "HOSIDF-based Chebyshev Structured Compensator Design for Disturbance Attenuation Problem," *6th International Conference on Control Engineering & Information Technology*, Istanbul, Turkey, s: 189-194, 2018.
- [8] B. Tacal ve L. Uzun, "Eyleyici Doyumlu Çift Tank Seviye Kontrol Sistemi için Chebyshev Polinomu Tabanlı Kompanzator Tasarımı," *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Konferansı, (TOK'18)*, Kayseri, Türkiye, s:82-87, 2018.
- [9] M. A. Öz, B. Erol ve L. Uzun, "Two-degree-of-freedom compensator design for disturbance attenuation problem via higher order sinusoidal input describing functions theory," *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, Cilt: 43, No:5, s: 1009-1018, 2021.
- [10] B. Tacal ve L. Uzun, "Bernstein polynomials based compensator design for coupled tank system with saturation nonlinearity," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, Cilt: 236, No:7, s: 1274-1284, 2022.
- [11] B. Tacal, L. Uzun ve Ş.N. Engin "Açık Su Kanal Sistemi için Bernstein Polinomları Tabanlı Kompanzator Tasarımı," *Fırat Üniversitesi Uzay ve Savunma Teknolojileri Dergisi*, Cilt: 1, s: 336-341, 2022.
- [12] D. Rijlaarsdam, P. Nuij, J. Schoukens ve M. Steinbuch, "A Comparative Overview of Frequency Domain Methods for Nonlinear Systems," *Mechatronics*, Vol. 42, pp. 11-24, 2017.
- [13] A. Setiadi, D. Rijlaarsdam, P. Nuij ve M. Steinbuch, "Frequency domain based real-time performance optimization of Lur'e systems," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 42, pp. 58-70, 2014.
- [14] M. Haring, N. van de Wouwb ve D. Netic, "Extremum-seeking control for nonlinear systems with periodic steady-state outputs," *Automatica*, Cilt: 49, s: 58-70, 2013.
- [15] D. DeHaan and M. Guay "Extremum-seeking control of state-constrained nonlinear systems," *Automatica*, Vol.41, pp. 1567-1574, 2005.
- [16] Y. Li, M.A. Rotea, G.T.C. Chiu, L.G. Mongeau and I-S. Paek "Extremum seeking control of a tunable thermoacoustic cooler," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Cilt: 13, s: 527-536, 2005.
- [17] D. Netic, Y. Tan, W. Moase, and C. Manzie "A unifying approach to extremum seeking: adaptive schemes based on estimation of derivatives," *Proceedings of the 49th IEEE Conference on Decision and Control*, s: 4625-4630, 2010.