

# Tek Fazlı Kesintisiz Güç Kaynağı İnverterler için PI Denetleyici Parametrelerinin Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile En İyilenmesi

## Optimisation of PI Controller Parameters with Artificial Bee Colony Algorithm for Single-Phase UPS Inverters

*İbrahim Alışkan*

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Bölümü  
Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul

ialiskan@yildiz.edu.tr

### Özetçe

Bu çalışmada tek fazlı kesintisiz güç kaynağı inverterler için geliştirilen ve parametreleri Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması ile en iyilenen Oransal-İntegral (PI) denetleyicilerin performansları farklı yük koşulları altında analiz edilmiştir. İnverterlerin doğrusal olmayan dinamik sistem modeli, klasik tasarım metodları ile denetleyici parametrelerinin ayarlanmasını zorlaştırmaktadır. Belirli bir çalışma noktası ve yakın çevresi için kabul edilebilir performans sergileyen doğrusal sistem modeli kullanılarak geliştirilen denetleyicilerin referans takibi ve Toplam Harmonik Bozunumu (THB) gibi performans indekslerinde yetersiz kalmaları kaçınılmazdır. Yapay arı kolonisi gibi sezgisel algoritmalar inverterin farklı çalışma koşullarına göre olası denetleyici parametrelerinin performanslarını inceler ve en iyi performansı sağlayan denetleyici parametrelerini tespit eder. Maliyet fonksiyonu olarak Toplam Mutlak Hata (IAE) ve Toplam Karesel Hata (ISE) değerlerinin kullanıldığı bu çalışma ile parametreleri ayarlanmış iki farklı PI denetleyicinin performansları analiz edilmiş ve klasik metodla parametre ayarı yapılan bir PI denetleyici de karşılaştırma amacı ile kullanılmıştır. Matlab ortamında yürütülen benzetim çalışmalarının sonuçlarına göre IAE maliyet fonksiyonu kullanılarak geliştirilen denetleyicinin THB performans indeksinde iyileşme sağladığı görülmüştür.

### Abstract

In this study, the control performances of proportional-integral controllers developed for single-phase uninterruptible power supply inverters whose parameters are optimized using the artificial bee colony algorithm are analyzed under different load conditions. The nonlinear dynamic system model of the inverter makes it difficult to tune the controller parameters with classical design methods. It is inevitable that controllers developed using a linear system model which exhibits acceptable performance for a given operating point and the near it are inadequate in performance indices such as reference tracking and total harmonic distortion. Heuristic algorithms such as the artificial bee colony algorithm analyze the performances of possible

controller parameters at different operating points of the inverter and determine the controller parameters that provide the best performance. In this work, total absolute error and total squared error are used as cost functions, and the performances of two different PI controllers with tuned parameters according to those two functions are analyzed. The PI controller, whose parameters were adjusted utilizing the classical method, was used for comparisons. The results of the simulation studies carried out in Matlab environment show that the controller developed using the cost function of integrated absolute error provides improvement in the total harmonic distortion performance index.

### 1. Giriş

Fosil yakıtların sonlu ömürlü oluşu ve yüksek maliyeti yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilgiyi arttırmıştır. İrili ufaklı yüzlerce yenilenebilir enerji kaynağının alternatif akım dağıtım şebekesine entegre olabilmesi için tek fazlı veya üç fazlı inverterler kullanılmaktadır. Dolayısıyla inverterlerin farklı yüklenme durumları karşısında sergileyecekleri davranış hem şebekeye hem de yenilenebilir enerji kaynağını etkileyecektir. Son on yılda yükün inverter davranışına olumsuz etkilerini en aza indirmek için akım ve/veya gerilim geri beslemeli çeşitli denetleyiciler geliştirilmiştir. Bilgi işlem merkezleri ve sağlık cihazları gibi enerji kaynağının sürekli beslemesine ihtiyaç duyan hassas yüklerin beslemesinde kullanılan UPS sistemlerinin bir parçası olan tek fazlı inverterlerin denetimi önemli bir konu olarak akademik ve ticari ürün çalışmalarında ele alınmaktadır.

İnverterin doğrusal olmayan matematiksel modeli Ziegler-Nichols metodu ve frekans cevabı teknikleri (bode diyagramı, köklerin yer eğrisi) gibi klasik metodlarla geliştirilen denetleyicilerin performanslarının yetersiz kalmasına zemin oluşturmaktadır. Bu nedenle köprü tipi inverter devrelerinin averaj modeli kullanılarak doğrusal olmayan denetleyici [1]-[2], kayan kipli denetleyici [3]-[4], geri adımlamalı denetleyici [5] ve model öngörülü denetleyici [6] geliştirilerek performans göstergelerinde iyileşme ve sistem güvenilirliğinde artış hedeflenmiştir. Ölçmeye bağlı hataları en aza indirmek ve sistemin güvenilirliğini arttırmak için son dönemde sensörsüz kontrol sistemlerinin de geliştirildiğini görmek mümkündür [6]-[7]. Yukarıda su-

nulan yaklaşımlar beklentileri karşılama yönünde ilerleme kaydetmiş olsalar da dijital elemanlara ihtiyaç duymaları nedeni ile maliyet artışına neden oldukları gibi analog devre elemanlarına göre arızaya daha kolay uğrayan sistemler haline dönüşmüşlerdir. Temel matematiksel fonksiyonlar üzerine kurulu kayan kipli denetleyiciler analog devreler ile uygulanabilirler de çatırdama probleminin önüne geçebilecek bir yaklaşım ortaya konulamamıştır.

Oransal-İntegral-Türev (PID) denetleyiciler ve türevleri parametreleri uygun şekilde ayarlandığında inverter devrelerinde performans göstergeleri bazında tatmin edici sonuçlar ortaya koyabilmişlerdir [8]-[10]. Averaj model yaklaşımına dayalı olan ve belirli bir çalışma noktası ve etrafı için geçerli olan doğrusal modeli esas alan ve frekans cevabı metodları ile tasarımı tamamlanan denetleyicilerin hedef performans değerlerine tam olarak erişmesi beklenmemelidir. Buna karşılık son on yılda yapay zeka ve sürü algoritmalarının denetleyici parametre ayarlanmasında yaygın olarak kullanıldığını görmek mümkündür [11]-[12]. Söz konusu çalışmalarda denetim performansında belirlenen maliyet/kâr fonksiyonuna ve hibrit yapılanmalara bağlı olarak iyileşmeler sağlanmıştır. Çözüm uzayını belirli kurallar çerçevesinde tarayarak en iyi çözüm noktasını bulmayı hedefleyen sürü zekasına dayalı algoritmaların belirlenen maliyet/kâr fonksiyonundan etkilendiği bilinmektedir. Kolay uygulanabilirlik yönünden optimizasyon algoritmasının parametre sayısının az olması ve lokal minimumlardan kurtulabilme özelliği tercih edilme gerekçeleri arasında gösterilebilir. Bu çalışmada kontrol parametresi az olan ve kaşif arılar sayesinde lokal minimumlardan kurtulabilen YAK algoritması tercih edilmiştir [13]. Tek faz UPS inverterin gerilim geribeslemeli kontrolünde kullanılacak olan PI denetleyicinin  $K_p$  ve  $K_i$  parametrelerinin ayarlanması işleminde IAE ve ISE gibi iki farklı maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Son olarak, Nichols'un ikinci yöntemi kullanılarak geliştirilen PI denetleyici de çalışmaya dahil edilerek YAK algoritması kullanılarak geliştirilen denetleyicilerin performans durumları incelenmiştir.

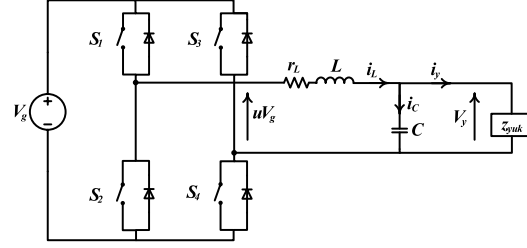
Çalışmanın devamında Bölüm 2 ile tek faz UPS inverterin dinamik sistem modeli sunulmuştur. YAK algoritmasına ilişkin kısa bir açıklama Bölüm 3'te verilmiştir. YAK ve Ziegler-Nichols tekniği ile PI denetleyici parametre ayarlaması çalışmaları Bölüm 4 kapsamına alınmıştır. Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetim çalışmalarının sonuçları Bölüm 5'tedir. Benzetim çalışmalarının sonuçları Bölüm 6 ile değerlendirilmiştir.

## 2. Sistem Modeli

Tek fazlı köprü tipi bir inverter ve LC filtreden oluşan temel tek fazlı UPS inverter devresi Şekil 1 ile sunulmuştur. Sinüs PWM anahtarlama tekniğinin tercih edildiği bu çalışmada unipolar kapı sinyalleri kullanılmıştır. Unipolar kapı sinyallerinin kullanıldığı inverterlerde harmonik bozunumu bipolar kapı sinyallerinin kullanıldığı inverterlere göre 50% daha azdır. Ayrıca unipolar anahtarlama çift katsayılı harmoniklerden kurtulmamızı da sağlayacaktır [4].

Devre anahtarlarının açık-kapalı devre olma durumlarına göre aşağıdaki diferansiyel eşitlikler elde edilir.

$S_1$ - $S_4$  anahtarlarının açık devre ve kapalı devre olma durumlarına göre,



Şekil 1: Tek fazlı kesintisiz güç kaynağı inverter genel devre şeması.

$$L \frac{di_L}{dt} = V_g - i_L r_L - u_C, \quad (1)$$

$$C \frac{du_C}{dt} = i_L - \frac{u_C}{z_{yük}} \quad (2)$$

eşitlikleri elde edilir. Yukarıdaki eşitliklerde;  $V_g$  girişi gerilimi,  $L$  filtre endüktansı,  $C$  filtre kondansatörü,  $r_L$  endüktans parazitik direnci,  $z_{yük}$  yük empedansı,  $i_L$  endüktans akımı,  $u_C$  kondansatör gerilimidir. Endüktans akımı ve kondansatör gerilimi durum değişkenleri olarak seçilir ve sistemin durum-uzayı modeli elde edilir. Ayrıca Şekil 1'e göre  $u_y = u_C$  ifadesinin geçerli olduğu görülmektedir. Yük akımının bozucu işaret olduğu da bilinmektedir. Bu durumda  $u$  doluluk oranı ( $1/V_g$  ile normalize edilmiş kontrol parametresi) olmak üzere sistemin transfer fonksiyonuna aşağıdaki gibi ulaşılır [10],[14].

$$G(s) = \frac{u_y(s)}{u(s)} = \frac{1}{LCs^2 + r_LCs + 1} \quad (3)$$

## 3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Sosyal canlılar olan arıların görev paylaşımı, iletişim ve kaynak arama gibi özellikleri temel alınarak YAK algoritması geliştirilmiştir [13]. Parametre sayısının az olması, kaşif arı özelliği sayesinde lokal minimuma sıkışma sorununu çözebilmesi nedeni ile farklı alanlara dahil edilebilecek çalışmalarda YAK algoritması denetleyici parametrelerinin en iyilenmesinde tercih edilmiştir [11], [15].

Kovanın etrafındaki belirli kaynaklardan kovana bal getiren işçi arılar kovanın belirli alanlarında yapmış oldukları dans gösterisi ile gözcü arılara kendi kaynaklarının durumu hakkında bilgi vermiş olurlar. Kaynağın pozisyonu ve nektar miktarı gözcü arıların kaynak seçiminde etkili olan parametreler arasında yer almaktadır. Kaynak seçip harekete geçen gözcü arılar artık birer işçi arı olmuşlardır. Kaynağın nektar miktarının yeterince bal edinilemeyecek bir değere kadar düşmesi ise kaynağın terk edilmesine neden olur. Kaynağı terk eden işçi arı artık bir kaşif arı olmuştur ve rassal olarak yeni bir kaynak arayışına girer. Arıların bu davranışları YAK algoritmasında matematiksel ifadeler ile temsil edilir. Örneğin işçi arılar için ilk kaynak ataması aşağıdaki eşitlik kullanılarak sağlanır.

$$x_{ij} = x_j^{min} + rand(0, 1)(x_j^{max} - x_j^{min}) \quad (4)$$

eşitlikte  $i = 1, \dots, SN$ ,  $j = 1, \dots, D$ ,  $SN$  kaynak sayısı,  $D$  en iyilenecek parametre sayısıdır. Çözüm uzayı içerisindeki diğer

alternatif kaynakları da değerlendirmeye almak için işçi arılar mevcut kaynağın etrafında yeni kaynak arayışına girerler. Eşitlik 5'te belirtildiği gibi mevcut kaynağın parametrelerinden herhangi birisi değiştirilerek yeni (komşu) kaynak tayin edilir.

$$v_{ij} = x_{ij} + \lambda(x_{ij} - x_{kj}) \quad (5)$$

burada  $i \in SN$ ,  $k \in SN$  ve  $j \in D$  geçerlidir. Yeni kaynağın (çözümün) belirlenen sınır değerleri içerisinde kalması ise (6) ile garanti altına alınır.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (6)$$

Kaynak  $i$ 'nin uygunluk değeri,  $f_i$  maliyet fonksiyonu değeri olmak üzere

$$uygunluk_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i}, & f_i \geq 0 \\ \frac{1}{1+abs(f_i)}, & f_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanır. Eğer herhangi bir kaynak için yapılan komşu kaynak seçimlerinde *limit* değere kadar iyileşme sağlanamazsa ilgili kaynak terk edilir ve bu kaynağın nektarını toplayan arı kaşif arı olur. Kaşif arılar (4) denklemi ile yeni kaynaklarına gönderilirler.

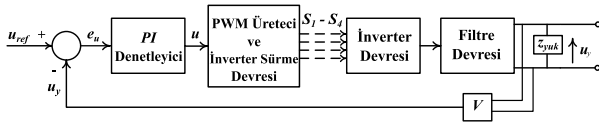
YAK algoritmasının bir diğer önemli konusu da gözcü arıların hangi kaynağın çevresinde yeni bir kaynak arayışına girecekleridir. Seçim kriteri olarak kaynağın uygunluk değerinin çözüm uzayı içerisindeki kaynakların uygunluk değerleri toplamına olan oranı kullanılır. Rulet tekerleği metodu ile kaynak seçimi yapılırken  $p_i$  değeri büyük olan kaynağın seçilme olasılığının yüksek olacağı açıktır.

$$p_i = \frac{uygunluk_i}{\sum_{j=1}^{SN} uygunluk_j} \quad (8)$$

YAK algoritması yukarıda sunulan eşitlikleri ve ilişkileri kullanarak belirli sayıda iterasyon boyunca veya maliyet fonksiyonu için tanımlanan alt sınır değere ulaşıncaya kadar en iyileme çalışmalarına devam eder.

## 4. Denetleyici Tasarımı

Bu bölümde averaj model yaklaşımı kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonu aracılığı ile gerilim kontrollü inverter devresinin PI denetleyicisinin katsayıları ayarlanacaktır. Şekil 2 gerilim kontrollü inverter devresi için geliştirilen kontrol sistemini sunmaktadır. Kontrol genliği ( $u$ ) doğru şekilde ayarlanabilirse değişken yük değerlerine karşı PWM üreticinin uygun doluluk oranı ile inverter devresini sürmesi sağlanabilecektir.



Şekil 2: Kontrol sistemi blok şeması.

Denklem (9)'da görüldüğü gibi PI denetleyicinin integral etkisi sayesinde kapalı çevrim sistemin tipi bir artırılarak belirli

yapıdaki giriş işretleri için sıfır değerli sürekli hal hatası elde edilir. Öte yandan beklentiyi karşılayacak geçici rejim cevap karakteristiğine ulaşmak için  $K_p$  ve  $K_i$  katsayılarının ayarlanması gerekecektir. Bu çalışmada Ziegler-Nichols'un ikinci tekniği ve YAK algoritması kullanılarak denetleyicinin katsayıları belirlenecektir.

$$G_c(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (9)$$

Bölüm 4.1 ve 4.2'de parametreleri Tablo 1'de verilen sistem için denetleyici tasarımı gerçekleştirilecektir.

Tablo 1: Tek fazlı UPS inverter sistem parametreleri.

Sistem Elemanı/Parametresi	Parametre Değeri
$L$	0.6867 mH
$C$	49.404 $\mu$ F
$r_L$	0.076 $\Omega$
$V_{y,nom}$	220 V
$V_g$	320 V
$f_{anahtar}$	12.5 kHz
$S_{nom}$	1 kVA

### 4.1. Ziegler-Nichols Yaklaşımı

Hem deneysel hem de teorik olarak denetleyici katsayısının ayarlanmasına olanak sağlayan Nichols'un ikinci yaklaşımında kapalı çevrimi sürekli salınma yönlendiren oransal kazanç ( $K_{cr}$ ) belirlenir. Sürekli salınımın periyodu  $P_{cr}$  olmak üzere yukarıda verilen sistem parametreleri için PI denetleyici parametreleri Tablo 2'de verilmiştir [16]. Ziegler-Nichols metodu ile elde edilen denetleyicinin parametrelerinde performans iyileştirme için yeniden düzenlenme yapılır. Sensör gürültüsüne karşı köşe frekansı 4 kHz olan alçak geçiren filtrenin de kullanıldığı gerilim geribeslemeli kontrol sisteminde performans iyileştirme için yapılan deneme-yanılma çalışmaları sonucunda  $K_{i,ayar} = 42.63$  elde edilmiştir.

Tablo 2: Nichols'un ikinci metoduna göre elde edilen denetleyici parametreleri.

Sistem Elemanı/Parametresi	Parametre Değeri
$K_{cr}$	17.12
$P_{cr}$	1.16 mS
$K_p$	7.70
$K_i$	$7.97 \times 10^3$
$K_{i,ayar}$	42.63

### 4.2. Yapay Arı Kolonisi Destekli PI Denetleyici Parametre Ayarlaması

Bu bölümde Bölüm 3'te sunulan YAK algoritması kullanılarak Tablo 1'de parametreleri verilen inverter devresi için PI denetleyici parametreleri ayarlanacaktır. Inverter devresi doğrusal ve doğrusal olmayan yükler altında çalıştırılarak YAK algoritmasının çözüm uzayı içerisinde en uygun denetleyici parametrelerine ulaşması hedeflenmiştir. İki farklı maliyet fonksiyonu (IAE ve ISE) kullanılarak maliyet fonksiyonunun YAK

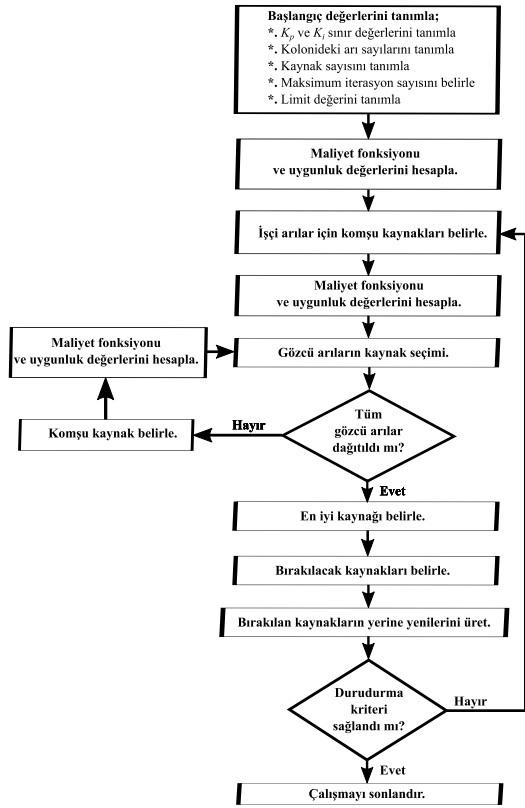
algoritmasının performansı üzerine olan etkisi de incelenmiştir. Herhangi bir örnekleme anındaki hata değeri  $e(kT) = u_{ref}(kT) - u_y(kT)$ ,  $k = 1, \dots, N$  ve  $T$  örnekleme periyodu olmak üzere IAE ve ISE maliyet fonksiyonları aşağıda verilmiştir.

$$IAE = \sum_{k=1}^N e(kT), \quad k = 1, \dots, N \quad (10)$$

$$ISE = \sum_{k=1}^N e^2(kT), \quad k = 1, \dots, N \quad (11)$$

ISE fonksiyonu büyük hatanın etkisini ön plana çıkarır ve geçici rejimde oluşan yüksek genlikli hataları azaltacak şekilde bir denetleyici üretir. Buna karşılık IAE fonksiyonu sürekli rejim ve geçici rejim hatalarını eşit değerlendirmeye alarak uzun soluklu sürekli hal hatalarını azaltacak denetleyici üretir.

Şekil 3'de sunulan YAK algoritması için parametre değerleri Tablo 3'te verilmiştir. Seksen iterasyon adımı için elde edilen maliyet fonksiyonu değişimleri ise Şekil 4 ve Şekil 5 ile paylaşılmıştır.



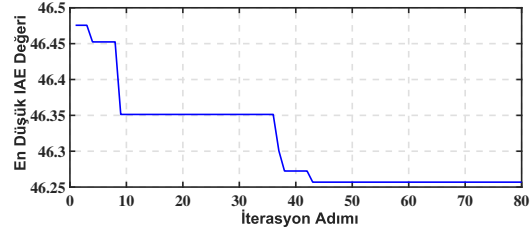
Şekil 3: YAK algoritması kod akış diyagramı.

## 5. Benzetim Çalışmalarının Sonuçları

Bu bölümde parametreleri Tablo 1 ile verilen tek fazlı UPS inverter sisteminin farklı yük koşulları altında davranışlarının görselleştirilmesi için Matlab benzetim çalışmalarından faydalanacaktır. Tasarımları tamamlanan PI denetleyiciler doğrusal ve

Tablo 3: YAK algoritması parametrik değerleri.

YAK Parametresi	Parametre Değeri
İşçi arı sayısı	10
Gözcü arı sayısı	10
İterasyon adımı sayısı	80
Limit	20
En iyilenecek parametre sayısı	2
$[K_{p,min} \quad K_{p,max}]$	[0.1 20]
$[K_{i,min} \quad K_{i,max}]$	[0.5 100]



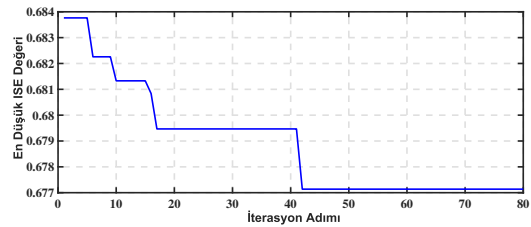
Şekil 4: IAE maliyet fonksiyonu değişimi.

doğrusal olmayan yük durumları altında ayrı ayrı benzetim çalışmalarında kullanılacaktır. Bölüm 4'te tasarımları tamamlanan PI denetleyicilere ait parametreler Tablo 4 ile sunulmuştur.

İlk benzetim çalışması  $1 \mu s$  örnekleme zamanı ile  $0.5 s$  sürecek şekilde Nichols'un ikinci metodu kullanılarak tasarlanan PI denetleyici için yapılmıştır. Şekil 6'da görülen yük gerilimi ve yük akımı işaretlerinden yüklü, yüksüz ve anlık yüklenme durumlarında inverter yük geriliminin sinüs formunu koruduğu görülmüştür. Özellikle  $0.16-0.32 s$  zaman aralığında etkili olan doğrusal olmayan yük durumunda dahi yük geriliminin tepe noktası etrafındaki bozulmalar haricinde sinüs yapısını koruduğu görülmüştür.

Yük geriliminin  $50 Hz$ 'lik sinüs işaretine olan yakınlığı (yük geriliminin kalitesi) harmoniklerin durumları üzerinden değerlendirilebilir. Bunun için yük geriliminde en fazla bozulmanın olduğu  $0.24-0.26 s$  zaman aralığı incelenmiş ve Şekil 7'de yük geriliminin harmonikleri sunulmuştur. Oldukça düşük genlikli harmonik işaretler denetleyicinin başarılı olduğunun ispatı niteliğindedir.

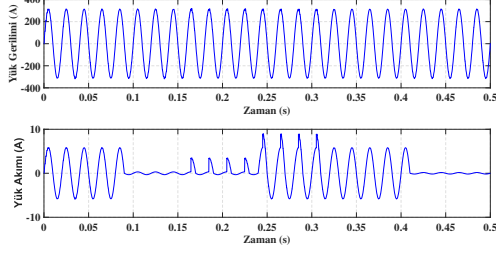
Yukarıda sunulan yük ve benzetim koşulları geçerli olmak üzere davranış incelemesi YAK algoritması ve IAE maliyet fonksiyonu kullanılarak geliştirilen PI denetleyici için de yapılmıştır. İlk olarak Şekil 8 ile yük gerilimi ve yük akımı değişimi



Şekil 5: ISE maliyet fonksiyonu değişimi.

Tablo 4: Geliştirilen PI denetleyicilerin oransal ve integral kat-sayıları.

Parametre Ayarlama Metodu	$K_p$	$K_i$
Nichols'ün ikinci metodu	7.704	42.63
YAK (IAE)	5.3055	17.3605
YAK (ISE)	8.6762	34.1197

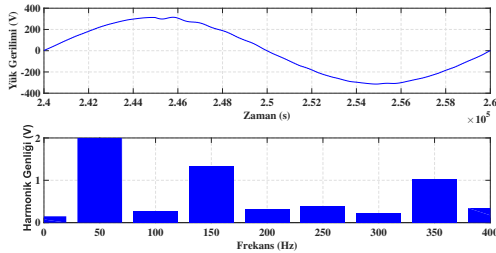


Şekil 6: Nichols'ün ikinci yöntemi ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi yukarıda ve yük akımı aşağıda).

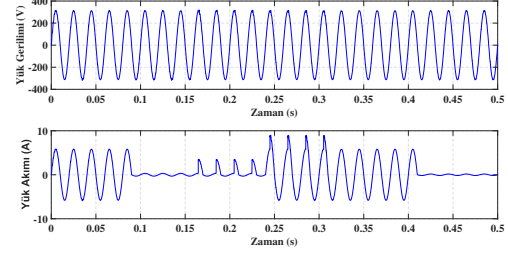
verilmiştir. Doğrusal ve doğrusal olmayan yük durumlarında denetleyicinin yük geriliminin sinüs formunu garanti edebildiği ve anlık yüklenmelerin görüldüğü 0.16-0.32 s zaman aralığında yük gerilimi tepe noktası etrafında düşük genlikte bozulmaların olduğu görülür. Yük geriliminin temel bileşeni ve harmoniklerin genlikleri ise Şekil 9'da görülebilir.

YAK algoritması ve ISE maliyet fonksiyonu kullanılarak parametreleri belirlenen PI denetleyici için de yukarıda sunulan koşullar altında performans incelemesi yapılmıştır. İlk olarak benzetim çalışmalarının sonuçları kullanılarak Şekil 10 ile yük gerilimi ve akımı görselleştirilmiştir. Doğrusal olmayan yük durumunda dahi referans sinüs işaretine olan yakınlığını koruyan yük geriliminin 0.24-0.26 s zaman aralığı örneği üzerinden elde edilen harmonikler Şekil 11'de görülebilir.

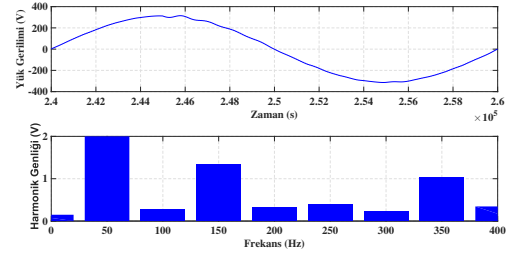
Yük geriliminin 50 Hz'lik referans işarete olan yakınlığı (yük geriliminin kalitesi) (12) denkleminde sunulan THB ifadesi üzerinden değerlendirilir. Üç farklı PI denetleyici için THB değerleri ve tek katsayılı ilk dört harmoniğe ait genlik değerleri Tablo 5'de verilmiştir. Tüm denetleyicilerin oldukça düşük THB değerleri ( $\leq 1\%$ ) elde edebilecekleri doğrusal olmayan



Şekil 7: Nichols'ün ikinci yöntemi ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi örneği yukarıda ve harmonik dağılımı aşağıda).



Şekil 8: YAK algoritması ve IAE maliyet fonksiyonu ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi yukarıda ve yük akımı aşağıda).



Şekil 9: YAK algoritması ve IAE maliyet fonksiyonu ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi örneği yukarıda ve harmonik dağılımı aşağıda).

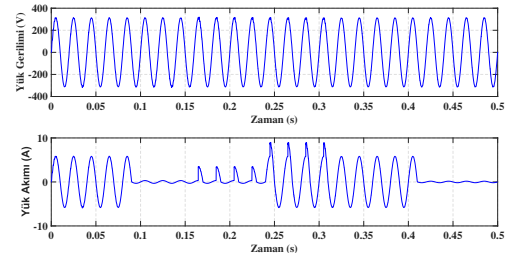
yük durumu için tabloda mevcut veriler ile ispatlanmıştır.

$$THB_u = \frac{1}{U_1} \times \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} U_k^2} \quad (12)$$

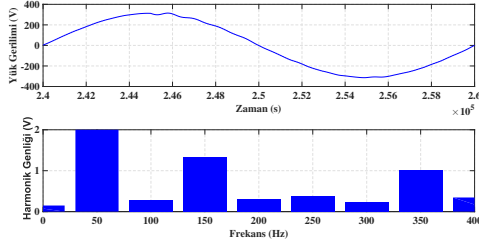
bu eşitlikte  $k$  harmonik derecesi ve  $U_k$  ise  $k$ . harmoniğin genliğidir.

## 6. Sonuçlar ve Tartışma

Bu çalışmada tek fazlı UPS inverterler için Nichols'ün ikinci metodu, YAK algoritması ile IAE ve ISE maliyet fonksiyon-



Şekil 10: YAK algoritması ve ISE maliyet fonksiyonu ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi yukarı ve yük akımı aşağıda).



Şekil 11: YAK algoritması ve ISE maliyet fonksiyonu ile geliştirilen PI denetleyici için sonuçlar (yük gerilimi örneği yukarıda ve harmonik dağılımı aşağıda).

Tablo 5: Yük gerilimi harmonik değerleri.

THB & Harmonik	Ziegler-Nichols	YAK (IAE)	YAK (ISE)
THB (%)	0.88	0.86	0.87
1. harmonik	312.5	312.5	312.6
3. harmonik	1.34	1.33	1.34
5. harmonik	0.39	0.38	0.39
7. harmonik	1.1	1.02	1.01

larının kullanıldığı yöntemler ile üç farklı PI denetleyici geliştirilmiştir. Tablo 4'te sunulan denetleyici parametrelerinin birbirlerine olan yakınlıkları denetleyicilerin performanslarının da yakınlaşması ile sonuçlanmıştır. Şekil 6, 8 ve 10 incelendiğinde yük geriliminin referans işareti her türlü yük altında takip edebildiği görülmüştür. Tablo 5'e bakılırsa her üç denetleyici için de en yüksek harmonik sinyali tepe değerinin 1.34 V ile üçüncü harmoniğe ait olduğu görülür. Temel bileşen tepe değerine ( $\sim 312.5 V$ ) göre oldukça düşük olan üçüncü harmonik tepe değeri denetleyicilerin parametre ayarının başarı ile tamamlandığını da göstermektedir. Nichols'ün ikinci metodu ile geliştirilen denetleyicinin YAK algoritması ile geliştirilen denetleyicilere benzer performans sergilemesi parametre ayarlama sürecinde yapılan  $K_i$  düzenlemesine bağlanabilir. IAE maliyet fonksiyonu THB indeksinde küçük değerli bir iyileşme sağlamıştır. Ancak maliyet fonksiyonunun YAK algoritması üzerindeki etkisini tam anlamıyla görebilmek için iterasyon sayısı artırılmalıdır.

## 7. Kaynakça

[1] H. Komurcigil, A. Ozdemir and I. Sefa, "An Extended Lyapunov-Function-Based Control Strategy for Single-Phase UPS Inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 30, No. 7, pp. 3976-3983, 2015.

[2] E. Cumhuri and E. Zergeroğlu, "Güç Çeviricileri için Adaptif Gürbüz ve Yumuşak Gürbüz Denetleyicilerin Tasarımı," Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Konferansı (TOK'19), Muğla, 2019.

[3] O. Kukrer, H. Komurcigil and A. Doganalp, "A Three-Level Hysteresis Function Approach to the Sliding-Mode Control of Single-Phase UPS Inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 56, No. 9, pp. 3477-3486, 2009.

[4] A. Abrishamifar, A. A. Ahmad and M. Mohamadian, "Fixed Switching Frequency Sliding Mode Control for Single-Phase Unipolar Inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27, No. 5, pp. 2507-2514, 2012.

[5] M. Zadehbagheri, M. J. Kiani, T. Sutikno and R. A. Moghadam, "Design of a New Backstepping Controller for Control of Microgrid Sources Inverter," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 12, No. 4, pp. 4469-4482, 2022.

[6] P. Li, X. Tong, Z. Wang, M. Xu and J. Zhu, "Sensorless Model Predictive Control of Single-Phase Inverter for UPS Applications via Accurate Load Current Estimation," *Sensors*, Vol. 23, No. 7, pp. 1-16, 2023.

[7] J. C. C. You, X. Hou, J. He and X. Zhang, "A Modified Lyapunov-based Control Strategy for a Single-Phase VSI with a Load Estimator," 2019 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, M.D., U.S.A., 2789-2793, 2019.

[8] M. Monfared, S. Golestan, and J. M. Guerrero, "Analysis, Design, and Experimental Verification of A Synchronous Reference Frame Voltage Control for Single-Phase Inverters," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 1, pp. 258-269, 2014.

[9] M. Parvez, M. F. M. Elias, N. A. Rahim, F. Blaabjerg, D. Abbott and S. F. Al-Sarawi, "Comparative Study of Discrete PI and PR Controls for Single-Phase UPS Inverter," *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 45584-45594, 2020.

[10] L. Lin, H. Li, K. Zhu, L. Shi and P. Li, "Analysis and Verification of Compound SRFPI-LADRC Strategy for an Off-Grid Single-Phase Inverter," *International Trans. on Electrical Energy Systems*, Vol. 2022, pp. 1-14, 2022.

[11] K. Rameshkumar and V. Indragandhi, "Real Time Implementation and Analysis of Enhanced Artificial Bee Colony Algorithm Optimized PI Control algorithm for Single Phase Shunt Active Power Filter," *Journal of Electrical Engineering & Technology*, Vol. 15, pp. 1541-1554, 2020.

[12] S. Unsal, I. Aliskan, "Investigation of performance of fuzzy logic controllers optimized with the hybrid genetic-gravitational search algorithm for PMSM speed control," *Automatika*, Vol. 63, No. 2, pp. 313-327, 2022.

[13] D. Karaboga, "An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization," In: Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.

[14] J. Li, Y. Sun, X. Li, S. Xie, J. Lin and M. Su, "Observer-Based Adaptive Control for Single-Phase UPS Inverter Under Nonlinear Load," *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, Vol. 8, No. 2, pp. 2785-2796, 2022.

[15] A. I. Tajudin, M. A. Adika, A. A. A. Samat, S. F. A. Shukor and K. Daud, "Design an Optimal PI Controller Using Artificial Bee Colony Algorithm for Buck Converter," 6th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE 2021), Kedah, Malaysia, 1-7, 2021.

[16] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, PTR Prentice Hall, 2010.