



Kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli sistemler için optimal PI denetleyici tasarımı

Hayriye CENGİZ*

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Dicle Üniversitesi, 21280, Diyarbakır, Türkiye, hayriye.cengiz1@saglik.gov.tr ORCID: 0000-0002-0712-1572, Tel: (412) 228 69 94 (127)

İbrahim KAYA

*Dicle Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır
ikaya@dicle.edu.tr ORCID: 0000-0002-8393-1358, Tel: (412) 241 10 00 (3507)*

Geliş: 15.05.2019, Kabul Tarihi: 10.06.2019

Öz

PID tip denetleyiciler endüstriyel uygulamalarda çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Bu denetleyicilerin ayar parametrelerini belirlemek için literatürde birçok tasarım yaklaşımlarının kullanıldığı görülmektedir. İntegral performans indeksi PID tip denetleyicilerin ayar parametrelerini belirlemede sıklıkla kullanılan yaklaşımlardan biridir. Bu çalışmada, kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçleri denetlemede kullanılacak optimal PI parametrelerini veren analitik denklemlerin türetilmesi verilmiştir. Bu amaçla, kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçleri tanımlayan bir model varsayılmış ve kontrol yapısının hata fonksiyonu üzerinde tekrarlanan optimizasyon işlemleri ile süreç transfer fonksiyonu parametreleri ile PI denetleyici parametreleri arasındaki ilişkiyi veren analitik denklemler $ISTE$, IST^2E ve IST^3E integral performans kriterlerine dayalı olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kararlı Süreçler, Ters Cevaplı Süreçler, Zaman Gecikmesi, PI Controller, İntegral Performans Kriteri

* Yazışmaların yapılacağı yazar:

Giriş

Modern kontrol teknolojisinde yaşanan büyük gelişmelere rağmen PID tip denetleyiciler günümüzde hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu denetleyicilerin yaygın olarak kullanılmasının nedenleri arasında yapılarının bilinmesi ve basit olması, çok farklı süreçler için iyi sonuçlar verebilmesi, ayar parametrelerinin basitçe elde edilebilmeleri sayılabilir. Dolayısıyla, geçtiğimiz 50 yılda araştırmacılar tarafından yoğun ilgi gören bu denetleyiciler için ayar parametrelerini bulmak için birçok ayar yöntemleri geliştirilmiştir.

İntegral performans kriteri ile PID denetleyicilerin ayar parametrelerini belirlemek için iyi bilinen yaklaşımdandır. Literatürde, integral performans kriterini kullanarak PID denetleyicilerin optimum ayar parametrelerini bulan bir çok çalışma bulunmaktadır. Zhuang ve Atherton (1993) açık çevrim kararlı süreçler için birinci derece artı zaman gecikmeli model kullanarak ISE, ISTE ve IST^2E integral performans kriterlerine dayanan optimum PID ayar parametrelerini belirlemişlerdir. Kaya (2001) açık çevrim kararlı birinci derece ve ikinci derece artı zaman gecikmeli transfer fonksiyon modelleri kullanarak Smith öngörücü yapısındaki PID denetleyiciler için basit ayar kurallarını vermiştir. Bu kuralları elde ederken zaman ağırlıklı integral performans kriterlerini (ISTE ve IST^2E) kullanmıştır. Visoli (2001) integratörlü ve açık çevrim kararsız artı zaman gecikmeli süreçler için ISE, ITSE ve ISTE integral performans kriterlerine dayalı PID denetleyiciler için ayar parametrelerini veren bağıntılar belirlemiştir. Ali ve Majhi (2011) integratörlü süreçleri denetlemek için PI/PID denetleyicilerin ayar parametrelerini ISTE, IST^2E ve IST^3E performans kriterlerine dayalı olarak veren analitik denklemler elde etmişlerdir. Kaya (2018b) integratörlü artı zaman gecikmeli süreçleri kontrol etmek için I-PD yapısını kullanmış ve ISTE ve IST^2E integral performans kriterlerini kullanarak denetleyici ayar parametrelerini veren analitik bağıntılar sağlamıştır.

Basamak girişe karşı önce kalıcı durum

değerinin tersi yönde bir cevap veren süreçler ters cevaplı olarak adlandırılırlar. Ters cevaplı süreçler yaygın olarak kimyasal süreçlerde bulunurlar. Transfer fonksiyonunda ters cevaba neden olan pozitif bir sıfırı bulunan süreçlerin denetimine olan ilgi son yıllarda artmıştır. Camacho (1999) ters cevaplı kimyasal süreçlerin denetimi için değişken kontrol yapısını uygulamıştır. Luyben (2000) kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçlerin denetiminde PI denetleyici için yeni bir tasarım yöntemi önermiştir. Önerilen yöntemin kısıtlılığı zaman gecikmesinin 3.2 den küçük olması gerekmesidir. Luyben (2003) integratörlü ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçlerin modellenmesi ve kontrol edilmesi için yeni bir yaklaşım sunmuştur. Chien ve ark. (2003) tarafından kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli ve transfer fonksiyonunda kararlı bir sıfır içeren süreçler için direkt denetleyici sentez metodunu kullanarak PID denetleyicilerin tasarımını önermişlerdir. Jeng ve Lin (2012) kararlı/integratörlü ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçleri kontrol etmek için Smith öngörücü yapısına benzer bir yapı kullanarak ters cevaba neden olan terimleri yok etmeyi önermişlerdir. Kaya ve Cengiz (2017) integratörlü ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçlerin ISTE ve IST^2E integral performans kriterlerine dayalı PI ve PID denetleyiciler için optimum ayarlama kuralları belirlemişlerdir. Kaya (2018a) integratörlü ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçleri kontrol etmek için denetleyicilerin ayar parametrelerini hesaplamada standart formların kullanımı önermiştir.

Bu makalede, kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçlerin denetimini sağlamak üzere ISTE, IST^2E ve IST^3E integral performans kriterlerine dayalı PI denetleyici tasarımına olanak veren optimum analitik bağıntıların türetilmesi verilmektedir. Denetleyici ve süreç model transfer fonksiyonu parametreleri arasındaki ilişkileri elde etmek için hata sinyali ISTE, IST^2E ve IST^3E cinsinden minimize edilmiştir. Bu işlem farklı normalize edilmiş zaman gecikmesi aralığı $0.1 \leq \theta/T \leq 3$ için tekrarlanmıştır. Önerilen tasarım yönteminin

kullanımını benzetim sonuçları ile ortaya konmuştur.

İntegral Performans Kriteri

İntegral performans kriterleri ile PID denetleyicilerin ayar parametrelerinin hesaplanması en iyi bilinen yaklaşımlardan biridir. Örneğin Chen (1993) ve Dorf ve Bishop (1995) yazdıkları ders kitaplarında bu konuya ait bölümler ayırmışlardır.

Doğrusal sistemler için Åström (1970) tarafından önerilen algoritma sayesinde, günümüzde ISE (Integral of Squared Error) veya bunun türevleri kriterler (ISTE, IST²E ve IST³E gibi) kolaylıkla ve hatasız olarak hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, Åström (1970) tarafından önerilen algoritmaya ile optimizasyon işlemleri gerçekleştirilmiştir.

ISE kriterinin zaman alanında hesaplanması

$$J_0 = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (2)$$

ile verilmektedir. Bu integral s-düzleminde

$$J_0 = \frac{1}{2\pi j} \int_0^{\infty} E(s)E(-s) ds \quad (3)$$

ile ifade edilir. Burada $E(s)=B(s)/A(s)$ olarak $A(s)$ ve $B(s)$ polinomları ise,

$$A(s) = a_0s^m + a_1s^{m-1} + \dots + a_{m-1}s + a_m \quad (4)$$

$$B(s) = b_1s^{m-1} + \dots + b_{m-1}s + b_m \quad (5)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Performans indeksi

$$J_n = \int_0^{\infty} \left[t^n e(t) \right]^2 dt \quad (6)$$

ile verilen zaman ağırlıklı hatanın karesinin integrali $L\{tf(t)\} = -dF(s)/ds$ kullanılarak hesaplanabilir. Burada L Laplace dönüşümünü ve $L\{f(t)\} = F(s)$ 'i gösterir. $n=0$ ISE kriterine karşılık gelmekte olup, zaman faktörü içermediğinden tüm hataları eşit bir şekilde değerlendirdiğinden bu kriterle elde edilen

basamak cevapları salınımlı olmaktadır. Bu çalışmada $n=1$, $n=2$ ve $n=3$ 'e karşılık gelen ISTE, IST²E ve IST³E kriterleri kullanılarak kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçler için optimal PI denetleyici kuralları elde edilmiştir.

PI Denetleyici Tasarımı

Kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli sürecin

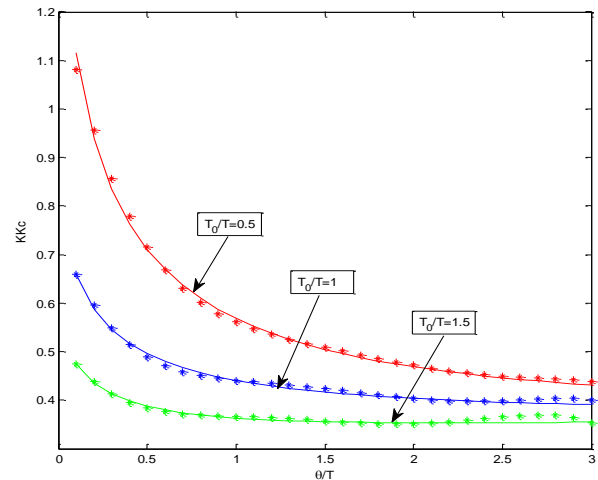
$$G(s) = \frac{K(-T_0s+1)e^{-\theta s}}{(Ts+1)} \quad (7)$$

transfer fonksiyonu ile modellenen transfer fonksiyonu ile modellenebildiği varsayılmıştır. İdeal PI denetleyici transfer fonksiyonu

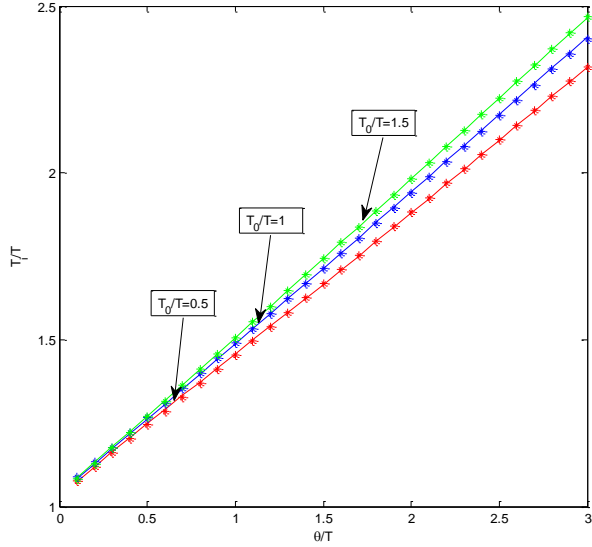
$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (8)$$

ile verilmektedir. Klasik geribesleme kontrol döngüsüne ait hata fonksiyonunda (7) ve (8) nolu denklemler kullanılarak ve ISTE, IST²E ve IST³E integral performans kriterlerine dayanan optimizasyonlar gerçekleştirilerek sabit bir T_0/T değeri için değişen θ/T değerine karşılık gelen KK_c ve T_i/T değerleri elde edilebilir.

Buna göre, ISTE kriteri için sabit bir T_0/T değerinde θ/T 'nin değişen değerlerine karşılık gelen KK_c ve T_i/T grafikleri, sırasıyla, Şekil 1 ve Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. $0.1 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için KK_c değerleri



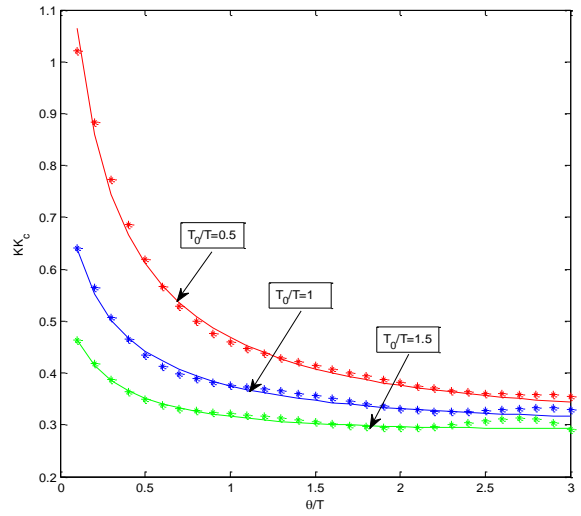
Şekil 2. $0.1 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için T_i/T değerleri

Şekil 1 ve Şekil 2'deki yıldızlar ISTE kriterine göre optimizasyondan elde edilen değerlere karşılık gelmektedir. Bu değerlere eğri uydurma metodu ile aşağıda verilen formüller elde edilmiştir. Bu formüller ile edilen değerler Şekil 1 ve Şekil 2'de düz çizgiler ile verilmektedir.

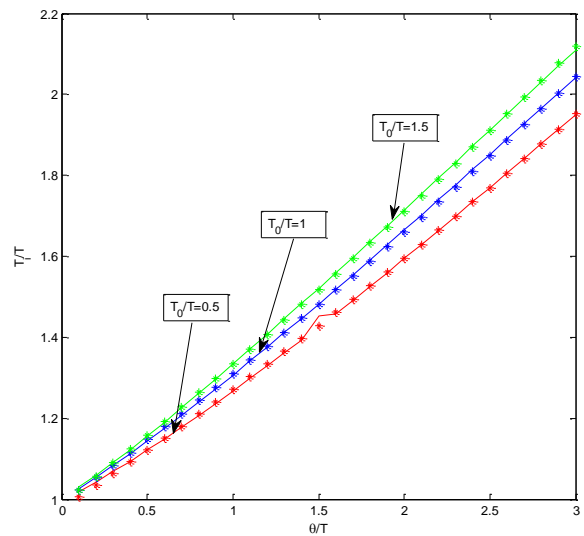
$$\begin{aligned}
 KK_c = & 1.997 - 2.836 \left(\frac{\theta}{T} \right) - 1.8 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 2.433 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 + 2.69 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.5447 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 - 1.093 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \\
 & - 1.675 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \left(\frac{T_0}{T} \right) - 0.7823 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \\
 & + 0.2481 \left(\frac{\theta}{T} \right)^4 + 0.4509 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.3936 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 - 0.02264 \left(\frac{\theta}{T} \right)^5 \\
 & - 0.04224 \left(\frac{\theta}{T} \right)^4 \left(\frac{T_0}{T} \right) - 0.06507 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \frac{T_i}{T} = & 1.01 + 0.3889 \left(\frac{\theta}{T} \right) + 0.07086 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.004438 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 + 0.05028 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (10) \\
 & - 0.03538 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2
 \end{aligned}$$

Benzer şekilde, IST²E kriteri için sabit bir T_0/T değerinde θ/T 'nin değişen değerlerine karşılık gelen KK_c ve T_i/T grafikleri, sırasıyla, Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 3. $0.1 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için KK_c değerleri



Şekil 4. $0.1 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için T_i/T değerleri

IST²E integral performans kriterinin kullanılması ile elde edilen formüller (11) ve (12) nolu denklemlerde verilmiştir.

$$\begin{aligned}
 KK_c = & 1.889 - 3.085 \left(\frac{\theta}{T} \right) - 1.631 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 2.786 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 + 2.723 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.4809 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 - 1.287 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \\
 & - 1.8 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \left(\frac{T_0}{T} \right) - 0.7543 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \\
 & + 0.2967 \left(\frac{\theta}{T} \right)^4 + 0.5049 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.3973 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 - 0.02725 \left(\frac{\theta}{T} \right)^5 - \\
 & 0.04925 \left(\frac{\theta}{T} \right)^4 \left(\frac{T_0}{T} \right) - 0.06726 \left(\frac{\theta}{T} \right)^3 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2 \quad (11)
 \end{aligned}$$

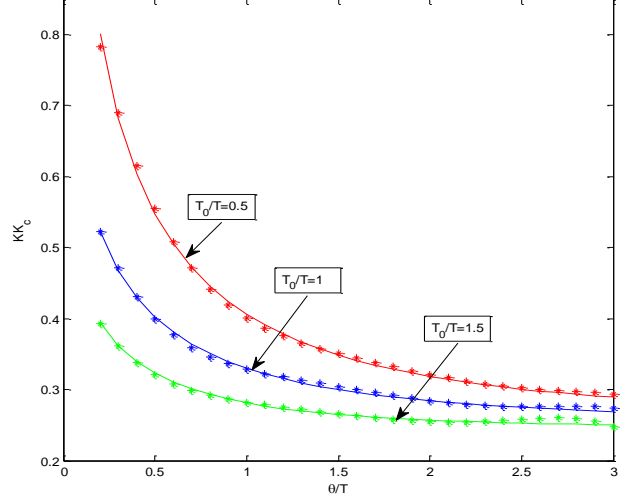
$$\begin{aligned}
 \frac{T_i}{T} = & 0.9498 + 0.2505 \left(\frac{\theta}{T} \right) + 0.07313 \left(\frac{T_0}{T} \right) \\
 & + 0.01593 \left(\frac{\theta}{T} \right)^2 + 0.05206 \left(\frac{\theta}{T} \right) \left(\frac{T_0}{T} \right) \quad (12) \\
 & - 0.03081 \left(\frac{T_0}{T} \right)^2
 \end{aligned}$$

Son olarak, sabit bir T_0/T değerinde θ/T 'nin değişen değerlerine karşılık gelen KK_c ve T_i/T grafikleri, sırasıyla, Şekil 5 ve Şekil 6'da IST³E kriteri için verilmiştir.

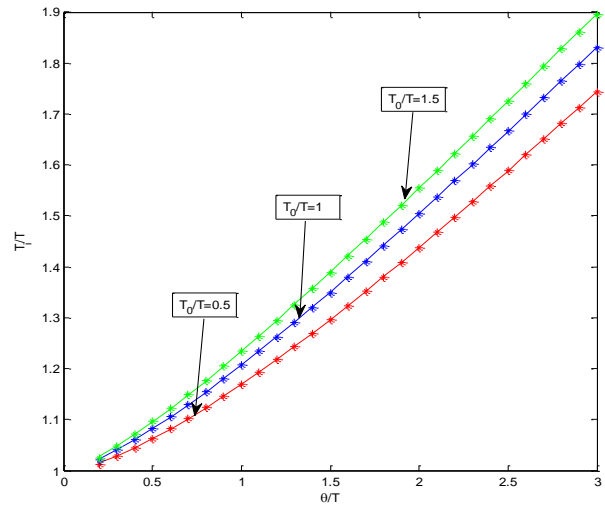
Şekil 5 ve Şekil 6'ya eğri uydurma metotunu uygulanması ile IST³E integral performans kriterine dayalı türetilen formüller (11) ve (12) nolu denklemlerde verilmiştir.

Sonuç olarak, kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli bir süreç (7) nolu denklemdeki transfer fonksiyonu ile modellendiğinde, (9) ve (10) nolu denklemler kullanılarak IST³E kriterine dayalı optimum PI ayar parametreleri, (11) ve

(12) nolu denklemler kullanılarak IST²E kriterine dayalı optimum PI ayar parametreleri ve (13) ve (14) nolu denklemler kullanılarak IST³E kriterine dayalı optimum PI ayar parametreleri hesaplanabilir.



Şekil 5. $0.2 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için KK_c değerleri



Şekil 6. $0.2 \leq \theta/T \leq 3$ aralığı için T_i/T değerleri

Benzetim Sonuçları

Bu bölümde, PI denetleyici için elde edilen optimum analitik denklemlerin kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçlerin denetimindeki kullanımı benzetim sonuçları ile verilecektir. Birinci örnek, IST²E ve IST³E kriterlerinin kullanılması ile tasarlanan PI denetleyicilerin kapalı çevrim performanslarını karşılaştırmaktadır. İkinci örnek ise, farklı

T_0/T ve θ/T oranları için tasarlanan PI denetleyicilerin performansları analiz edilmiştir.

$$\begin{aligned}
KK_c = & 1.574 - 2.375\left(\frac{\theta}{T}\right) - 1.257\left(\frac{T_0}{T}\right) \\
& + 1.994\left(\frac{\theta}{T}\right)^2 + 1.968\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right) \\
& + 0.3553\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 - 0.8682\left(\frac{\theta}{T}\right)^3 \\
& - 1.233\left(\frac{\theta}{T}\right)^2\left(\frac{T_0}{T}\right) - 0.5242\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \\
& + 0.1906\left(\frac{\theta}{T}\right)^4 + 0.3325\left(\frac{\theta}{T}\right)^3\left(\frac{T_0}{T}\right) \\
& + 0.2632\left(\frac{\theta}{T}\right)^2\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 - 0.01681\left(\frac{\theta}{T}\right)^5 - \\
& 0.03148\left(\frac{\theta}{T}\right)^4\left(\frac{T_0}{T}\right) - 0.04307\left(\frac{\theta}{T}\right)^3\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad (13)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{T_i}{T} = & 0.9792 + 0.07932\left(\frac{\theta}{T}\right) + 0.014\left(\frac{T_0}{T}\right) \\
& + 0.07069\left(\frac{\theta}{T}\right)^2 + 0.0999\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right) \\
& - 0.008092\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 - 0.008138\left(\frac{\theta}{T}\right)^3 - \\
& 0.008009\left(\frac{\theta}{T}\right)^2\left(\frac{T_0}{T}\right) - 0.01228\left(\frac{\theta}{T}\right)\left(\frac{T_0}{T}\right)^2 \quad (14)
\end{aligned}$$

Örnek 1: Açık çevrim transfer fonksiyonu $G(s) = (-s+1)e^{-0.5s}/(s+1)$ ile verilen ters cevaplı süreç transfer fonksiyonunu ele alınsın. Bu süreç transfer fonksiyonu için $\theta/T=0.5$ ve $T_0/T=1$ olarak verilmektedir. Bir önceki bölümde ISTE, IST²E ve IST³E integral performans kriterlerine dayanan (9)-(10), (11)-(12) ve (13)-(14) nolu bağıntıların kullanılması ile hesaplanan optimum PI denetleyici ayar parametreleri Tablo 1’de özetlenmiştir.

Tablo 1. Örnek 1 için hesaplanan optimum PI denetleyici ayar parametreleri

Optimizasyon Kriteri	K_c	T_i
ISTE	0.4892	1.2661
IST ² E	0.4350	1.1473
IST ³ E	0.3998	1.0832

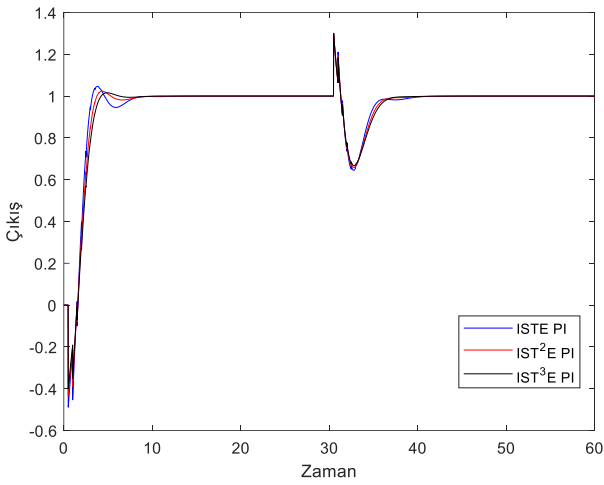
Birim basamak giriş ve $t=15$ saniyede sisteme ilave edilen ve -0.1 büyüklüğündeki bozucu giriş için kapalı çevrim cevapları Şekil 7’de gösterilmiştir. IST³E kriterine dayalı tasarlanan PI denetleyicinin basamak giriş cevabının ISTE ve IST²E kriterlerine dayalı tasarlanan PI denetleyicilerden çok az da olsa daha iyi bir cevap verdiği gözlenmektedir. Tasarlanan ISTE, IST²E ve IST³E kriterlerine dayanan PI denetleyicilerin bozucu girişi bastırmadaki etkilerinin birbirine oldukça yakın oldukları görülmektedir. Süreç model transfer fonksiyonu parametreleri θ , K , T ve T_0 değerlerinin %20 artığının ve %20 azaldığının varsayılmasıyla elde edilen birim basamak referans ve bozucu giriş, sırasıyla, Şekil 8 ve Şekil 9’da gösterilmiştir. Şekil 7 ile karşılaştırıldığında, süreç model transfer fonksiyonu parametrelerindeki artma yönündeki bir değişimin, kapalı çevrim referans takip cevaplarında aşımın artmasına ve bozucu girişi bastırma zamanının hafif artmasına neden olduğu görülmektedir. Süreç model transfer fonksiyonu parametrelerindeki azalma yönündeki bir değişimin ise, kapalı çevrim cevaplarında hem referans girişi takipte hem de bozucu girişi bastırmada çok az bir yavaşlamaya sebep olduğu gözlenmektedir.

ISTE, IST²E ve IST³E integral performans kriterlerine dayalı tasarlanan PI denetleyicilerin kapalı çevrim performans değerleri Tablo 2’de verilmektedir. Tabloda yer alan TV (toplam varyasyon) değeri $TV = \sum_{i=1}^{\infty} |u_{i+1} - u_i|$ ile verilmektedir (Skogestad 2003) ve küçük TV değeri bir sinyalin daha düzgün ve daha az osilasyonlu olduğuna işaret eder (Skogestad 2003). Tablodan, ISE ve IAE değerlerinin tüm tasarımlar için birbirine çok yakın olmasına

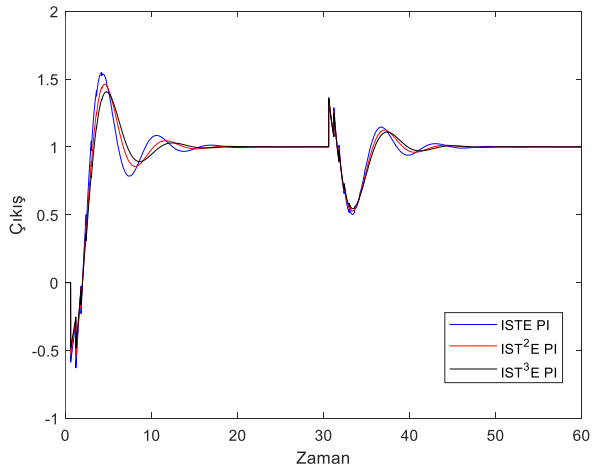
rağmen, en küçük değerlerin ISTE kriterine dayalı olarak tasarlanan PI denetleyici ile elde edilmektedir. En küçük TV değeri ise IST³E kriterine dayalı olarak tasarlanan PI denetleyici ile verilmektedir.

Tablo 2. Örnek 1 için hesaplanan performans değerleri

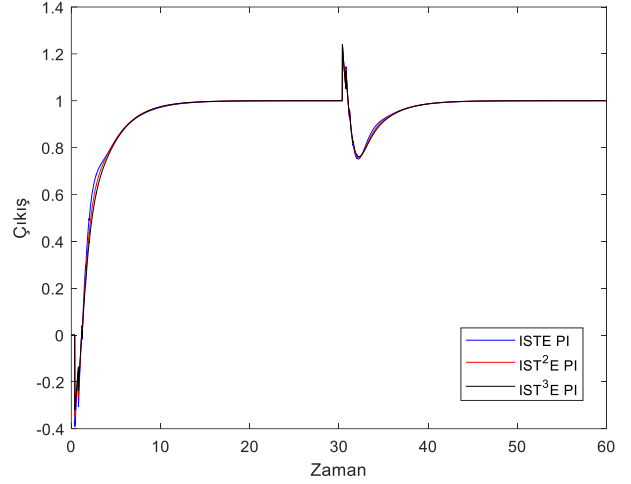
Denetleyici	ISE	IAE	TV
ISTE PI	2.8693	3.6786	0.0038
IST ² E PI	2.8766	3.7036	0.0031
IST ³ E PI	2.8963	3.7855	0.0027



Şekil 7. Önerilen tasarım yöntemleri için birim basamak referans ve bozucu giriş cevapları



Şekil 8. Model parametrelerindeki +%20 değişim için birim basamak referans ve bozucu giriş cevapları



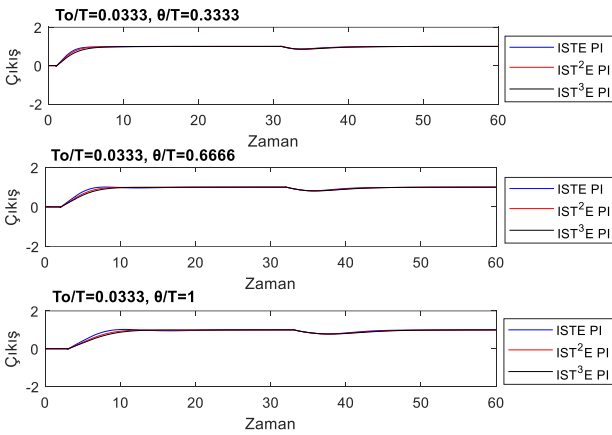
Şekil 9. Model parametrelerindeki -%20 değişim için birim basamak referans ve bozucu giriş cevapları

Örnek 2: Bu örnek farklı θ/T ve T_0/T oranları için önerilen denetleyici tasarım metodları ile elde edilen kapalı çevrim cevaplarındaki değişimi incelemek için verilmiştir. Açık çevrim transfer fonksiyonu $G(s) = (T_0s + 1)e^{-\theta s} / (3s + 1)$ ile verilen süreç transfer fonksiyonu ele alınsın.

$T_0/T = 0.1/3 = 0.0333$, $T_0/T = 0.5/3 = 0.1666$ ve $T_0/T = 1/3 = 0.3333$ değerleri için farklı, $\theta/T = 1/3 = 0.3333$, $\theta/T = 2/3 = 0.6666$ ve $\theta/T = 3/3 = 1$ değerleri kontrol tasarımında elde edilen formüller kullanılarak PI denetleyiciler için ISTE, IST²E ve IST³E kriterlerine dayalı optimum ayar parametreleri hesaplanmıştır. Sabit $T_0/T = 0.1/3 = 0.0333$ için farklı θ/T değerleri için hesaplanan K_c ve T_i değerleri Tablo 3'de gösterilmiştir. PI denetleyici için birim basamak referans giriş ve $t=100$ saniyede sisteme girdiği varsayılan -0.3 büyüklüğündeki bir bozucu için kapalı çevrim cevapları Şekil 11'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi θ/T değeri arttıkça sistemin cevap hızı yavaşlamaktadır.

Tablo 3. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.0333$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için hesaplanan optimum PI ayar parametreleri

θ/T	Optimizasyon Kriteri	K_c	T_i
0.3333	ISTE	1.2490	3.4290
0.3333	IST ² E	1.0962	3.1141
0.3333	IST3E	0.9500	3.0441
0.6666	ISTE	0.8891	3.8240
0.6666	IST ² E	0.7285	3.3823
0.6666	IST3E	0.6418	3.1909
1	ISTE	0.7140	4.2220
1	IST ² E	0.5641	3.6611
1	IST3E	0.4912	3.3737



Şekil 11. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.0333$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için tasarlanan PI denetleyici ile birim basamak referans ve bozucu giriş cevapları

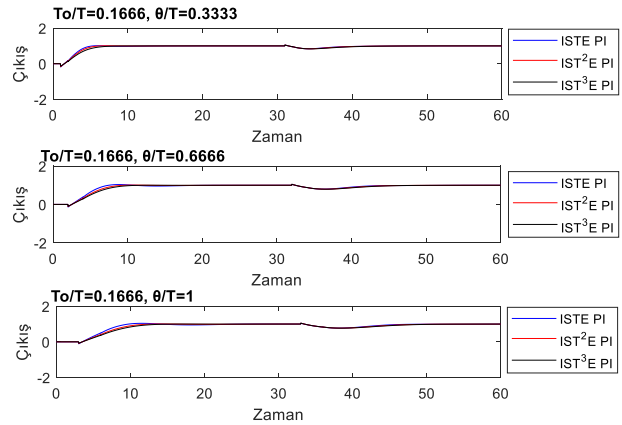
Aynı şekilde $T_0/T = 0.1666$ için farklı θ/T değerleri için hesaplanan ayar parametreleri Tablo 4’te verilmektedir. Bu duruma ait kapalı çevrim cevaplar Şekil 12’de gösterilmiştir. $T_0/T = 0.0333$ de olduğu gibi θ/T değeri arttıkça sistemin cevap hızının yavaşladığı görülmektedir.

Son olarak $T_0/T = 0.3333$ için farklı θ/T değerleri için hesaplanan ayar parametreleri Tablo 5’te özetlenmiştir. Bu duruma ait kapalı çevrim cevaplar Şekil 13’de gösterilmiştir. Daha önceki iki duruma benzer şekilde, θ/T değeri arttıkça sistemin cevap hızının yavaşladığı görülmektedir. Şekil 11, Şekil 12 ve Şekil 13 karşılaştırıldıklarında, aynı θ/T değerlerinde

T_0/T oranı arttıkça sistemin kapalı çevrim cevabının da yavaşladığı gözlenmektedir.

Tablo 4. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.1666$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için hesaplanan optimum PI ayar parametreleri

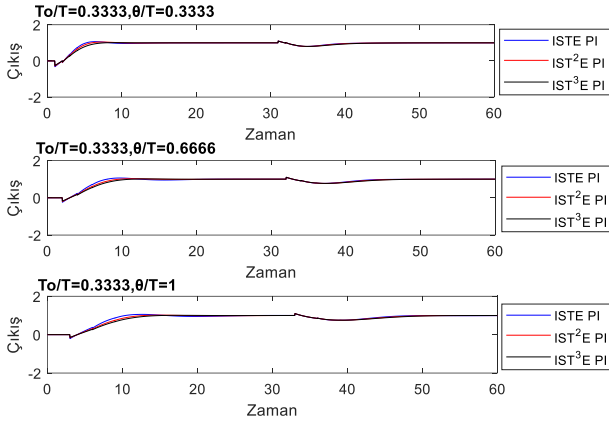
θ/T	Optimizasyon Kriteri	K_c	T_i
0.3333	ISTE	1.1146	3.4612
0.3333	IST ² E	0.9827	3.1478
0.3333	IST3E	0.8587	3.0617
0.6666	ISTE	0.8104	3.8629
0.6666	IST ² E	0.6686	3.4229
0.6666	IST3E	0.5913	3.2204
1	ISTE	0.6662	4.2676
1	IST ² E	0.5319	3.7087
1	IST3E	0.4631	3.4144



Şekil 12. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.1666$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için tasarlanan PI denetleyici ile birim basamak referans ve bozucu giriş cevapları

Tablo 5. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.3333$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için hesaplanan optimum PI ayar parametreleri

θ/T	Optimizasyon Kriteri	K_c	T_i
0.3333	ISTE	0.9628	3.4962
0.3333	IST ² E	0.8544	3.1854
0.3333	IST3E	0.7551	3.0819
0.6666	ISTE	0.7210	3.9063
0.6666	IST ² E	0.6006	3.4692
0.6666	IST3E	0.5337	3.2548
1	ISTE	0.6111	4.3193
1	IST ² E	0.4946	3.7636
1	IST3E	0.4306	3.4623



Şekil 13. Örnek 2 için, sabit $T_0/T = 0.3333$ değerine karşılık farklı θ/T değerleri için tasarlanan PI denetleyici ile birim basamak referans ve bozucu girişi cevapları

Sonuçlar

Endüstriyel uygulamalarda ters cevaplı süreçler ile karşılaşılabilir. Bununla beraber bu tür süreçlerin kontrolü konusunda az sayılabilecek çalışma yapılmıştır. Bu makalede, kararlı ters cevaplı artı zaman gecikmeli süreçleri kontrol etmek için ISTE, IST²E ve IST³E integral performans kriterlerine dayalı optimum PI denetleyici ayar parametrelerini hesaplamaya olanak veren bağıntılar elde edilmiştir. Bu amaçla, süreç transfer fonksiyonu ve denetleyici transfer fonksiyonu parametreleri ile normalize edilmiş zaman gecikmesi ve normalize edilmiş sıfır arasındaki ilişkiyi veren grafikler elde edilmiştir. Bu grafiklere eğri uydurma yaklaşımının uygulanması ile PI denetleyicinin optimum ayar parametrelerinin hesaplanmasına olanak veren analitik bağıntılar türetilmiştir. Elde edilen bağıntıların kullanımı benzetim sonuçları ile gösterilmiştir. Benzetim sonuçlarında görüldüğü gibi IST³E kriterine dayalı tasarlanan PI denetleyicinin basamak giriş cevaplarının ISTE ve IST²E kriterlerine dayalı tasarlanan PI denetleyicilere göre çok az da olsa daha iyi bir cevap verdiği ve θ/T değeri arttıkça sistemin cevap hızının yavaşladığı ayrıca aynı θ/T değerlerinde T_0/T oranı arttıkça sistemin kapalı çevrim cevabının yavaşladığı gösterilmiştir.

Türetilen denklemlerin gürbüzlüklerini test etmek için model parametrelerinde $\pm 20\%$ değişimler varsayılmış ve tasarlanan mevcut PI denetleyicilerin kontrolü altında kapalı çevrim cevaplar elde edilmiştir. Model parametrelerindeki artış, kapalı çevrim referans takip cevaplarında aşımın artmasına ve bozucu girişi yok etme zamanının hafif artmasına neden olmaktadır. Model parametrelerindeki azalış ise, kapalı çevrim cevaplarında hem referans girişi takipte hem de bozucu girişi yok etmede çok az bir yavaşlamaya sebep olmaktadır.

Kaynaklar

- Åström, K. J. (1970) Introduction to Stochastic Control Theory. Academic Press.
- Ali, A. ve Majhi, S. (2011) 'Integral criteria for optimal tuning of PI/PID controllers for integrating processes', *Asian Journal of Control*, 13(2), pp. 328–337.
- Camacho, O., Rojas, R. ve Garcia, W. (1999) 'Variable structure control applied to chemical processes with inverse response', *ISA Transactions*, 38, pp. 55–72
- Chen, C.-T. (1993) Analog and Digital Control System Design: Transfer-function, State-space, and Algebraic Methods. Saunders College.
- Chien, I.-L., Chung, Y.-C., Chen, B.-S., Chuang, C.-Y. (2003) Simple PID controller tuning method for processes with inverse response plus dead time or large overshoot response plus dead time. *Ind. Eng. Chem. Res.* (42), pp. 4461–4477.
- Dorf, R. C., Bishop, R. H. (1995) Modern Control Systems. Addison-Wesley.
- Jeng, J. C., ve Lin, S. W. (2012) 'Robust proportional-integral-derivative controller design for stable/integrating processes with inverse response and time delay', *Ind. Eng. Chem. Res.* 51(6), pp. 2652–2665.
- Kaya, İ. (2001) 'Tuning Smith predictors using simple formulas derived from optimal responses', *Ind. Eng. Chem. Res.*, 40(12), pp. 2654–2659.
- Kaya, İ., ve Cengiz, H. (2017) 'Optimal Tuning of PI/PID Controllers for Integrating Processes with Inverse Response', *International Conference on System Theory, Control and Computing, ICSTCC 2017*, pp. 722–727.
- Kaya, İ. (2018a) 'Controller design for integrating processes with inverse response and dead time based on standard forms', *Electrical Engineering*,

100(3), pp. 2011-2022.

- Luyben, W. L. (2000) 'Tuning proportional-integral controllers for processes with both inverse response and deadtime', *Ind. Eng. Chem. Res.*, 39(4), pp. 973–976.
- Luyben, W. L. (2003) 'Identification and tuning of integrating processes with deadtime and inverse response', *Ind. Eng. Chem. Res.*, 42(13), pp. 3030–3035.
- Shamsuzzoha, M. ve Skogestad, S. (2010) 'The setpoint overshoot method: A simple and fast closed loop approach for PID tuning', *J. Process Control*, 20(10), pp. 1220–1234.
- Skogestad, S. (2003) 'Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning', *J. Process Control*, 13, pp. 291–309.
- Visioli, A. (2001) 'Optimal tuning of PID controllers for integral and unstable processes', *IEE Proceedings Control-Theory and Applications*, 148(2), pp. 180–184.
- Zhuang, M., ve Atherton, D. P. (1993) 'Automatic tuning of optimum PID controllers', *IEE Proceedings-D, Control theory and applications*, 140(3), pp. 216-224.

Optimal PI Controller Design for Controlling Stable Processes with Inverse Response and Dead Time

Extended abstract

PID type controllers are extensively being used in industrial applications. The reasons for the widespread use of these controllers are: 1) their structure well known by engineers 2) they have a simple structure 3) they result in good closed loop results for a wide range of processes that can be encountered in industrial applications. For these reasons, these controllers have been investigated by the researchers for the past 50 years and many tuning methods have been developed.

Integral performance criteria is one of the frequently used approaches to determine the best tuning parameters of PID controllers. In this paper, optimum PI controller tuning formulas are provided control stable processes with inverse response and time delay. For this purpose, transfer function of

$G(s) = K(-T_0s + 1)e^{-\theta s} / (Ts + 1)$ is assumed to model the stable process with inverse response and dead time. Using $\bar{s} = sT$ normalization in both the process and PI controller transfer functions leads to obtaining the error function as a function of KK_c , T_i/T , θ/T and T_0/T . Then repeated optimization was carried out to minimize this error function for different T_0/T values and varying θ/T values for the ISTE, IST^2E and IST^3E integral performance criteria. Obtained results were plotted to give the relationship between process transfer and controller transfer function parameters for a constant value of T_0/T and varying dead time ratio θ/T . Applying the curve fitting approach, analytical expressions allowing to calculate optimum PI controller tuning parameters have been derived.

Simulation results been supplied to see the use of the proposed design method. It has been seen from simulations that PI controller designed based on the IST^3E criterion gives a slightly better response than the PI controllers based on the ISTE and IST^2E criteria. Also, it has been seen that as the θ/T ratio increases, the closed loop response of the system slows down. For a fixed value of and the

θ/T , increasing T_0/T ratio makes the closed loop sluggish as well.

In order to test the robustness of the proposed PI controller design method, $\pm 20\%$ parameter changes in the model parameters were assumed and closed-loop responses were obtained under the control of existing designed PI controllers. A positive change in model parameters results in increased overshoots in the closed loop reference tracking and a slight increase in eliminating the disturbances. On the other hand, a negative change in the model parameters makes the closed loop responses slightly sluggish both for set point tracking and disturbance rejection.

Keywords: Stable processes, Inverse response processes, Time delay, PI controller, Integral performance criteria.