

UZUN ÖLÜ ZAMANLI SİSTEMLER İÇİN SMİTH ÖNGÖRÜCÜSÜ YÖNTEMİ İLE PI-P KONTROLÖR TASARIMI

Tansel YÜCELEN

Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kontrol Mühendisliği Programı
Elektrik-Elektronik Fakültesi
İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

e-posta: yucelent@itu.edu.tr

Anahtar sözcükler: Ölü Zaman, Smith Öngörücüsü, PI-P Kontrolörü

ABSTRACT

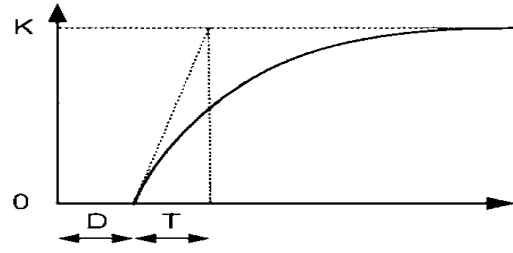
Long dead time control systems have a limited control performance with PID controller. In order to control long dead time systems efficiently, a predictive based control system is essential. The derivative parameter of PID controller can be thought as a predictive part. However, in long dead time systems, a prediction with the aid of derivative calculated sign is not appropriate. The aim of this paper is to point out controlling long dead time system with model based predictive PI-P controller (Proportional-Integral-Plus controller) which have three adjustable parameter. Then, a simulation is created for PI-P controller systems with laboratory education thermal system called PT326 and is observed to be successful.

1. GİRİŞ

Ölü zamanlı kontrol sistemleri üzerine yapılan araştırmalar gün geçtikçe artmakta ve böyle sistemler için tasarlanan kontrolörler gün geçtikçe çeşitlenerek gelişmektedir. Sanayide gerçekleşmiş olan endüstriyel kontrol sistemlerinin hemen hemen tamamı ölü zamanlıdır ve böyle birçok sistem için transfer fonksiyonu (1) bağıntısındaki gibi verilebilir.

$$G_c(s) = \frac{K}{1+sT} \cdot e^{-Ds} \quad (1)$$

Bu denklemde K parametresi kazanç, T parametresi zaman sabiti ve D parametresi ölü zamandır. (1) bağıntısına ilişkin birim basamak cevabı şekil 1 ' de gösterilmiştir.



Şekil-1. $G_c(s)$ ' in Birim Basamak Cevabı.

Değindiği gibi endüstride gerçekleşmiş olan kontrol sistemlerinin tamamına yakınında algılanması gereken cevabın doğrudan ölçülememesi belirli bir zaman gecikmesine sebep olur. Şekil-1.' den de görülebileceği gibi sistemde var olan e^{-Ds} terimi sistemin, belli bir D gecikmesinden sonra cevap vermesini sağlamaktadır. (1) bağıntısı ile verilen $G_c(s)$ sistemi, bir kontrolör ile kontrol edilmek istenirse, sistemde var olan gecikme önemli sorunlar doğurabilir. Böyle bir durumda kontrolör eski verileri değerlendirerek karar verir ve hatalı kontrol işaretleri üretilir [1]. Bu bağlamda gecikme genellikle, elemanların fiziksel olarak ayrı olmalarından kaynaklanır ve çoğunlukla giriş işaretindeki bir değişim ile ölçülen değer arasındaki gecikme olarak ortaya çıkar [3].

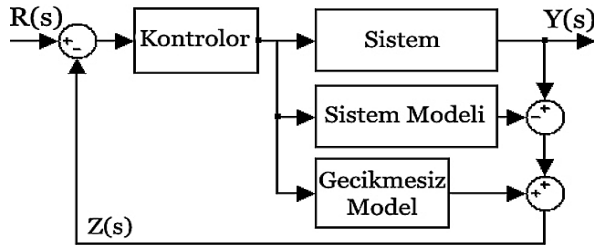
Bu bildiride, uzun ölü zamanlı sistemler için bir öngörüsül PI-P kontrolör tasarımı verilmiştir. PI-P (proportional-integral-plus ya da oransal-integral-artı) kontrolör tasarımı verilmesindeki amaç, uzun ölü zamanlı bir kontrol sistemini kontrol edebilmek için öngörü tabanlı ve hata oranı az olan bir yöntemin gerekli olmasıdır.

Yine bu bildiride, tasarımı verilen PI-P kontrolörü ile PT326 adlı bir termal laboratuvar eğitim sistemi için benzetim modeli oluşturulmuş ve tasarlanan kontrolörün uygulanabilirliği denenmiştir.

2. UZUN ÖLÜ ZAMANLI BİR KONTROL SİSTEMİ İÇİN UYGUN KONTROLÖR SEÇİMİ

Uzun ölü zamana sahip kontrol sistemleri için PID (proportional-integral-derivative ya da oransal-integral-türev) kontrolör ile elde edilen kontrol performansının sınırlı olduğu bilinmektedir [1]. Uzun ölü zamana sahip bir kontrol sistemini iyi bir performans ile kontrol edebilmek için kontrolör öngörü parametresine sahip olmalıdır. Aslında PID kontrolörün türev (D) kısmı öngörü parametresini zaten içermektedir. Ancak, kontrol sistemi uzun bir ölü zamana sahip olduğu zaman kontrolör çıkışındaki, hata işaretinin türevi yardımıyla yapılan öngörü uygun değildir [9]. Ayrıca D kısmı, hatanın değişim hızını kontrol işaretine aktardığı için ani referans değişimlerinde, yüksek frekanslı işaretlerde ve uzun bir ölü zaman süresinden sonra çok kısa yerleşme zamanına sahip sistemlerde; kontrol işaretinin çok büyümesine neden olabilir [8]. Bu sebeplerden ötürü PID kontrolörün D parametresinden ötürü böyle sistemler için pratikte tercih edilen bir yöntem değildir.

Ölü zamanlı ve uzun ölü zamanlı sistemler için kullanılan bir yöntem Smith Öngörücüsü'dür. Smith Öngörücüsü modeli şekil-2' de verilmiştir.



Şekil-2. Smith Öngörücüsü.

Smith Öngörücüsü kontrolör çıkış işaretini sistem modeli ile besleyerek sistem çıkışına aktarır. Çıkışa aktarılan bu işaret, gerçek sistem çıkış işaretinden çıkartılarak, kontrolör çıkış işaretinin gecikmesiz modele uygulanıp çıkışta oluşan işareti ile toplanır (şekil 2). Eğer sistemde herhangi bir modelleme hatası yoksa Z(s) 'in sıfır olacağı aşıkardır ve bu ideal bir durumdur. Ancak, pratikte modelleme hatası yapmadan sistemi modellemek nerdeyse olanaksızdır. Smith öngörücüsü modelleme hatalarına karşı dayanıklı bir yapıya sahiptir. Smith Öngörücüsü, isminden de anlaşılabilir gibi içinde öngörü elemanını barındırır. Bu öngörü, kontrol işareti kontrol edilen sistemin bir modeli yardımıyla toplanarak elde edilir. Uzun ölü zamanlı kontrol sistemleri için, içinde ölü zaman kompanzasyonu olan Smith Öngörücüsü iyi bir yöntemdir [4]

Değinilecek önemli bir nokta, kontrolör seçimidir. Smith Öngörücüsünün bir öngörüye (Türev

parametresi) sahip olmasından ötürü, PI-P tipi bir kontrolör ya da PI tipi bir kontrolör, sistem kontrolörü olarak, Smith Öngörücüsü yapısı içinde kullanılabilir. PI ve PIP kontrolörlere ilişkin diferansiyel yasalar aşağıdaki sırasıyla (2) ve (3) denklemlerinde olduğu gibidir.

$$u(t) = e(t) \cdot K_p + \frac{K_p}{T_i} \int e(t) dt \quad (2)$$

$$-\frac{1}{T_i} \int [u(t) - u(t-D)] dt \quad (3)$$

Yasalardan görülebileceği gibi PI-P kontrolör Smith Öngörücüsü ile kolayca elde edilebilir. Zaten PI-P kontrolör yapısı, iki parametrenin (K_p ve T_i) PI kontrolör parametrelerine dayanılarak belirlenmesi dışında Smith Öngörücüsü ile aynıdır [5]. Ayrıca PI-P kontrolör, D>T olduğunda PI kontrolörden daha üstündür ve daha büyük D değerleri için (uzun ölü zamanlı sistemler) daha az hata yapar [10]. Çok büyük ölü zamanlar için PI-P kontrolörünün toplam mutlak hatası, PI kontrolörünün toplam mutlak hatasının %50 ' si kadardır [1]. Bu sebeple uzun ölü zamanlı sistemler için uygun kontrolör PI-P kontrolördür.

3. PI-P TİPİ BİR KONTROLÖRÜN PARAMETRELERİNİN BELİRLENMESİ

PI-P kontrolörüne ilişkin parametreler (4) bağıntısı ile verilmiştir.

$$F(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} \right) \quad (4)$$

Bu bağıntıda PI-P kontrolörünün parametreleri K_p kazancı ve T_i parametresidir. PI-P kontrolörü, üç tane ayarlanabilir parametreye sahip, model tabanlı bir öngörüsül kontrolördür. Birçok endüstriyel kontrol sistemi için transfer fonksiyonunun (1) bağıntısı ile verileceğine değinmiştik. (1) bağıntısını incelersek sistemin bilinen ya da deneysel olarak bulunmuş parametreleri K ve T'dir. Belirlenmesi gereken parametreler D, K_p ve T_i parametreleridir. Bunlardan K_p ve T_i aşağıdaki verilen bağıntılardan hesaplanabilirler [5].

$$K = K_x / K_p \quad (5)$$

$$T = T_x \cdot T_i \quad (6)$$

Kontrolörün integral etkisinden ötürü sistem sürekli rejim hatasının sıfıra gideceği aşıkardır. K_x ve T_x parametreleri sabitlerdir. Kontrol edilen bir sistemde genellikle tasarım, kritik sönüm için ve hızlı bir yerleşme zamanı için yapılır. Şekil 2 ' de verilen sistemde ideal durumda Z(s)=0 olacağı için sistem

transfer fonksiyonunu kontrolör ve gecikmesiz modele dayanarak yazarsak bulacağımız karakteristik denklem (7) ' de verilmiştir. Bu karakteristik denkleme ($P_c(s)$) ve istenilen karakteristik denkleme ($P_e(s)$) ile gösterilen (8). bağıntı) dayanarak baskın kutup atama yöntemi ile T_x ve K_x sabit katsayıları belirlenebilir.

$$P_c(z) = z^2(T_i \cdot T) + z(T_i + T_i \cdot K \cdot K_p) + (K \cdot K_p) \quad (7)$$

$$P_e(z) = z^2 + 2 \cdot W_n \cdot \xi \cdot z + W_n^2 \quad (8)$$

$$\xi = 1 \text{ (Kritik Sönüm)} \quad (9)$$

$$T_z = 4 / (\xi \cdot W_n) \quad (10)$$

$$T_i \cdot T = 1 \rightarrow T_x = 1 \quad (11)$$

$$K \cdot K_p = W_n^2 = 12 \rightarrow K_x = 1 \rightarrow K = 1 / K_p \quad (12)$$

(9) ve (10). bağıntılarda sistemin $P_e(s)$ polinomu ve sistem cevabına yönelik seçimler yapılmıştır. (11) ve (12). bağıntılarda ise T_x ve K_x değerleri baskın kutup atama yöntemi sonucunda istediğimiz değerler doğrultusunda belirlenmiştir. Bu denklemler sonucunda (13) ve (14) bağıntıları elde edilir.

$$K = 1 / K_p \quad (13)$$

$$T = T_i \quad (14)$$

Bu verilen değerlerden ve kontrol edilecek sistemin modelinden giderek (1) nolu bağıntı), öngörülse kontrolör (15) ve (16) bağıntıları ile ifade edilebilir.

$$u(t) = K_p \left(1 + \frac{1}{dT_i/dt} \right) \left(e(t) - \frac{K(u(t) - u(t-D))}{1 + dT/dt} \right) \quad (15)$$

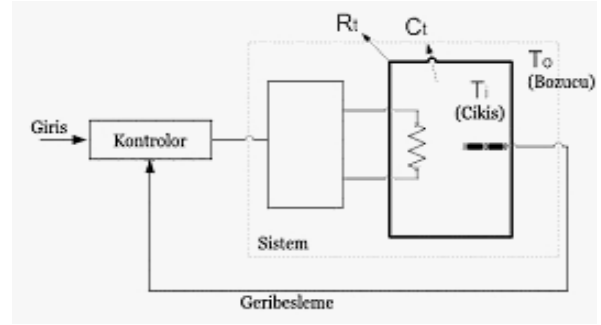
$$u(t) = e(t) \cdot K_p \left(1 + \frac{1}{dT_i/dt} \right) - \frac{K(u(t) - u(t-D))}{1 + dT/dt} \quad (16)$$

Görülebileceği gibi (16) bağıntısı, (15) bağıntısına (13) ve (14) bağıntıları uygulanmasıyla, (15) bağıntısının daha basit bir halidir. Parametre seçimi ile açık çevrim sistemin T zaman sabiti, kapalı çevrimde de aynen korunmuştur [1], [7].

4. PT326 ADLI TERMAL SİSTEMİN MODELLENMESİ VE TERMAL SİSTEMİN PI-P KONTROLÖR İLE BENZETİM MODELİ

PT326 termal sistemi ve kontrolörden oluşan geribeslemeli blok yapı şekil 3 ' de gösterilmiştir. Kontrolörün 2 girişi olmasının nedeni, kontrolör bloğu içerisinde şekil 2 ' de verilen Smith Öngörücüsü yapısını oluşturmaktır ($R(s)$ ve $Y(s)$ kullanılarak, $Z(s)$ kontrolör bloğu içinde oluşturulmaktadır). Bu sistemin modelini oluşturmak için öncelikle sistem

elemanlarını tanımak gerekir. Şekil 3 ' deki giriş, istenen referans sıcaklığıdır; sistem $T_i(t)$ çıkışının bu referans sıcaklığını olabildiğince yakın takip etmesi istenir. $T_o(t)$ çevre sıcaklığıdır, çevre sıcaklığı devamlı sistemi saracağı için bir bozucu olarak değerlendirilebilir. Kontrolör bu bozucu etkisini gidermelidir. Ayrıca C_t termal kapasite, R_t termal direnç elemanlarıdır.



Şekil-3. Termal Sistem Kontrolü.

Isı debisini $[J/s]$ $q(t)$ olarak ve sıcaklığıda $[K]$ $T(t)$ olarak tanımlarsak şekil 3 ' deki sisteme ait diferansiyel denklem bağıntısı aşağıdaki gibi verilebilir,

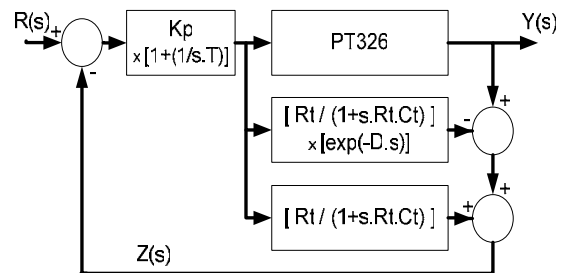
$$q = C_t \frac{d(T_i - T_o)}{dt} + \frac{T_i - T_o}{R_t} \quad (17)$$

fakat bilindiği gibi diferansiyel denklemlerle tasarım yapmak zordur. Bu yüzden (17) nolu denklem aşağıdaki gibi Laplace dönüşümü kullanılarak s- domeninde tanımlanabilir [6].

$$Q(s) = T_i(s) + \left(\frac{1}{R_t} + C_t \cdot s \right) T_o(s) \quad (18)$$

Bu tasarım sonucunda şekil 3 ' deki yapıyı, şekil 4 ' deki gibi zaman gecikmesi ve PI-P kontrolöründe dahil ederek, tam olarak bir blok diyagram ve Smith Öngörücüsü yapısında ifade edebiliriz [8].

Kontrolör tasarlayacağımız sistemin deneysel olarak belirlenen R_t değeri 0.8, C_t değeri 0.75 ve zaman gecikme değeri 1 saniyedir.



Şekil-4. Termal Sistemin Benzetim Modeli.

Bildirinin 3. bölümündeki (13) ve (14) bağıntıları ile PI-P kontrolörü parametreleri,

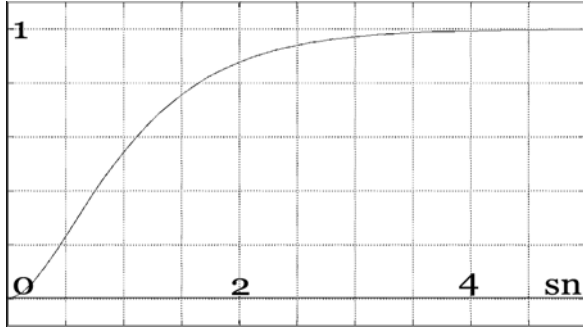
(13) bağıntısından,

$$0.8 = 1/K_p \rightarrow K_p = 1.25, (14) \text{ bağıntısından,}$$

$$0.8 \times 0.75 = 1.T_i \rightarrow T_i = 0.6$$

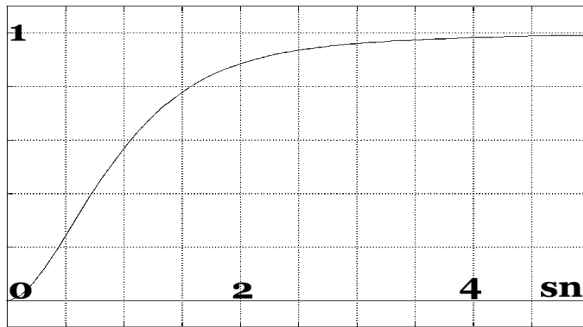
olarak belirlenebilir.

Bu koşullar altında şekil 4 ' teki sistemin birim basamak cevabı 5. şekildeki gibi verilebilir. Şekil 5 ' teki cevap için PT326 adlı sistem ile oluşturulan model ideal kabul edilmiştir. Bu koşulda daha önce de değinildiği gibi $Z(s)=0$ olacaktır. Bu durumda sistem istenilen gibi kritik sönümlü ve sürekli hal hatası yapmamaktadır. Bu koşullarda sistemin yerleşme zamanı yaklaşık 3.77 saniyedir. (10). bağıntıya göre T_s yerleşme zamanı 4 saniyedir ($T_s = 4 \cdot \omega_n$, $\zeta=1$, $\omega_n = 1$). Teorik olarak hesaplanan değerle benzetim modeli değeri birbirlerine yakın olarak bulunmuşlardır.



Şekil-5. Smith Öngörücüsü ile Sistem Birim Basamak Cevabı.

Sistem modelinin ideal olmadığını varsayarsak ve model paydasındaki $s = -1/R_t C_t$ noktasını sistem cevabını olumsuz etkilemesi bakımından daha baskın yapacak şekilde s eksen takımına yaklaştırırsak ($R_t C_t$ değerini 0.6 ' dan 0.8 ' e çekilir) bu durumda K değeri de (R_t) 0.8 ' den 0.9 a çekilirse sistem modeli yeterli derecede değiştirilmiş olur. Bu durumda sistemin birim basamak cevabı şekil 6 ' da verilmiştir.



Şekil-6. Sistemin Bir Takım Hatalar ile Modellenmesi Sonucunda Sistemin Birim Basamak Cevabı.

Şekil 6 ' tan anlaşılacağı gibi model kutbunun sanal eksene yaklaşması sonucu yerleşme süresi artmıştır ($T_s=4.02$ sn). Bu değişim dışında sürekli hal hatası yine sıfır olarak kalmış ve sistem yine kritik sönümlü davranmıştır. Her iki durumda da Smith Öngörücüsü ölü zamanı kompanse etmiştir ve istenilen birim basamak cevabını vermiştir. Sisteme modelleme sırasında değinilen $T_o(s)$ çevre bozucu sıcaklığı etki etmesi durumunda sistem davranışı şekil 7 ' de verilmiştir.



Şekil-7. Sisteme Bozucu Etki Etmesi Durumunda Sistemin Birim Basamak Cevabı.

Şekil 7 ' den görüldüğü gibi sisteme 30. saniyede bozucu çevre sıcaklığı etkimiştir, ancak sistem bozucu sıcaklığı yerleşme zamanı ile eş sürede kompanse ederek yine sürekli hal hatası sıfır olmuştur.

Benzetim modeli sonucunda; PI-P kontrolörü kullanarak kontrol edilen bir termal sistem üzerinde, belirlenen parametreler çerçevesinde (K_p , T_i , D), istenilen koşulların (Sürekli hal hatası, kritik sönüm, iyi yerleşme zamanı) sağlandığı gözlenmiştir.

5. SONUÇ

Bu çalışmada uzun ölü zamanlı sistemler için Smith Öngörücüsü yöntemi ile bir PI-P kontrolör tasarımı verilmiş ve tasarlanan PI-P kontrolör için, istenen koşulları sağlayacak, katsayılar belirlenmiştir. Belirlenen katsayılardan giderek, katsayıların doğruluğu ve sistemin istenilen şekilde çalışması PT326 adlı termal bir sistem için benzetim modeli ile gösterilmiştir. Bu sistem modeli, endüstriyel kontrol sistemlerinde sıkça karşılaşılan bir yapıda olduğu için tercih edilmiştir. Bu model sonucunda sistemin uzun ölü zaman etkisini kompanse ederek giderdiği, sürekli hal hatası yapmadığı, yerleşme süresinin kısa olduğu ve sisteme bir bozucu etkidiği zaman bozucuyu kompanse ettiği gözlenmiştir. Smith Öngörücü yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen PI-P kontrolörünün daha yüksek mertebeden sistemlere kolayca uygulanabileceği gösterilebilir. Ayrıca, önerilen tasarımda aşım ve ölü zaman etkisi bulunmadığı için, tasarım, ideal bir kapalı çevrim sistem birim basamak cevabı özelliğini de taşımaktadır [2].

Yine bu çalışmada kullanılan PI-P kontrolörü, PID kontrolör ile karşılaştırıldığında, sistemin uzun bir ölü

zamana sahip olması durumunda bile, öngörüsöl kontrol gerçekleştirebilme özelliğinde olduğu gösterilebilir. Ayrıca bu öngörü, kontrol işaretinin alçak geçiren bir filtresi olarak gerçeklendiğinden, PID kontrolörün türev kısmında olduğu gibi, yüksek frekanslı bozucular kuvvetlendirilmeden yerine getirilirler.

KAYNAKLAR

- [1] Arıkan, T., ÖLÜ ZAMANLI KONTROL SİSTEMLERİNDE TASARIM YÖNTEMLERİ, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 1997.
- [2] Bateson N. R., CONTROL SYSTEM TECHNOLOGY, Printice Hall, 1996.
- [3] D’Azzo J. J., Houples C. H., LINEAR CONTROL SYSTEM ANALYSIS AND DESIGN, McGraw-Hill Book Company, 1981.
- [4] Friedland B., ADVANCED CONTROL SYSTEM DESIGN, Prentice-Hall International Editions, 2001.
- [5] Hagglund T., A DEAD TIME COMPENSATING THREE TERM CONTROLLER, 9th IFAC/IFORS Symp. On Identification and System Parameter Estimation, Budapest, Hungary, 1991.
- [6] Kuo B., AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS, Prentice-Hall, Inc. A Simon & Schuster Company, 1999.
- [7] Middleton R. H., Goodwin G. C., DIGITAL CONTROL AND ESTIMATION: A UNIFIED APPROACH, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- [8] Nise N., CONTROL SYSTEMS ENGINEERING, Wiley International Edition, 2004.
- [9] Palm W. J., CONTROL SYSTEMS ENGINEERING, John Willey & Sons, 1986.
- [10] Young P. C., Lees M. J., Chotai A., Tych W., Chalabi Z. S., MODELLING AND PI-P CONTROL OF A GLASSHOUSE MICRO-CLIMATE, Pergamon Press, Oxford, 1994.