

Değişken Hızlı Soğutma Sistemleri için Gerçek-Zaman Benzetimci Uygulamaları Applications of Real-Time Simulator for Variable Speed Refrigeration Systems

Savaş Şahin¹, Cüneyt Güzelis², Yalçın İşler³

¹Elektrik-Elektronik Mühendisliği,
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
sahin.savas@yahoo.com

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği,
İzmir Ekonomi Üniversitesi
cuneyt.guzelis@ieu.edu.tr

³Biyomedikal Mühendisliği,
İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi
islerya@yahoo.com

Özet

Bu çalışmada, değişken hızlı bir soğutma sistemi için öykünücü aracılığıyla yapılan gerçek-zaman benzetim uygulamaları açıklanmıştır. Uygulamalı araştırmalar ve eğitim amaçlı kurulan laboratuarlarda maddi ve fiziki nedenlerle gerçek sistemler kısıtlı oranda bulunmaktadır. Bu nedenlerden dolayı, her laboratuarda bulunamayan kompresörü değişken hızlı soğutma sistem yerine kullanılabilir bir öykünücü sunulmuştur. Öykünücüde, bu sistem için belirlenmiş geçiş işlevi fonksiyonları ile gerçek-zaman benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Öykünücü mikrodenetleyici tabanlı denetleyici-tasarım-sınama-yeniden-tasarım platformunda gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında, denetim noktaları olarak kompresör hızı ve elektronik genişleme vanası için belirlenmiş geçiş işlev fonksiyonları kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Gerçek-zaman benzetim çalışmaları, değişken hızlı soğutma sistemi, kontrol laboratuvarı.

Abstract

In this study, emulator based real-time simulation applications for a variable speed refrigeration system are described. Real system setups needed for applied research and engineering educational have implementation limitations because of physical and financial reasons. Due to these reasons, an emulator is used instead of real variable speed refrigeration system. Real-time simulations of the system transfer functions are implemented in the emulator which is the main unit of a microcontroller based controller-design-test-redesign-platform. In these simulations, transfer functions of compressor speed and electronic expansion valve of the refrigeration system are used.

Key Words: Real-time simulations, variable speed refrigeration system, control laboratory.

1. Giriş

Uygulamalı araştırmalar ve mühendislik eğitimi için laboratuvarların gerçek sistemler ve süreçler ile kurulması, arzu edilen alt yapıyı oluşturur. Ancak laboratuvar alt yapısı kurma maliyeti ve fiziki şartlar nedeniyle, laboratuvarlarda gerçek sistemlerin tümünü bulundurmamak mümkün olmayabilir. Diğer yandan, benzetim çalışması hazırlığı yapmadan gerçek sistem üzerinde doğrudan uygulama yapmak sisteme ve/veya kullanıcılara zarar verebileceği gibi ekonomik açıdan da ek bir maliyet getirir. Bu nedenlerle, çalışmalarda gerçek sistemler için gerçek-zaman benzetim çalışmaları tercih edilir [1-3].

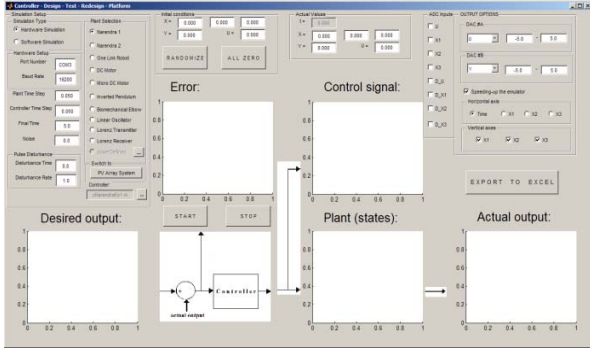
Gerçek-zaman benzetim çalışmaları, denetim sistemlerinde süreç, denetleyici, algılayıcılar ve eyleyicilerin davranışlarını anlamak için kullanılırlar. Bilimsel yazında, süreçlerin modellerini ve süreç için tasarlanacak uygun denetleyiciyi test etmek için kullanılmaktadırlar [1-10]. Gerçek-zaman olmayan benzetim çalışmaları model ve denetleyicinin sınımasında hatalı sonuçlara neden olabilir. Bu nedenle, [9]'da geliştirilen bir gerçek-zaman benzetim çalışması platformu olan Denetleyici-Tasarım-Sınama-Yeniden Tasarım Platformu (DTSYP) benzetimcisi kullanılmıştır [9,10].

Bu çalışmanın amacı, gerçek bir sistem olan Değişken Hızlı Soğutma Sisteminin (DHSS) davranışlarını gerçek-zaman benzetimcisi olan öykünücü ile taklit etmek ve geliştirilen bu DTSYP ile ilgili mühendislik bölüm laboratuvarı için gerçek sistem yerine geçecek veya gerçek uygulama öncesi hazırlık yapacak bir platform tasarlamaktır. Çalışmanın ikinci bölümünde [9,10]'da geliştirilen gerçek-zaman benzetimcisi olan öykünücü ve özellikleri anlatılmaktadır. Üçüncü bölümde, DHSS ve [16]'de bu sistem için belirlenen geçiş işlev fonksiyonları anlatılmaktadır. Dördüncü bölümde, geliştirilen gerçek-zaman benzetimcisi olan DTSYP ve ele alınan DHSS için yapılan benzetim çalışmaları

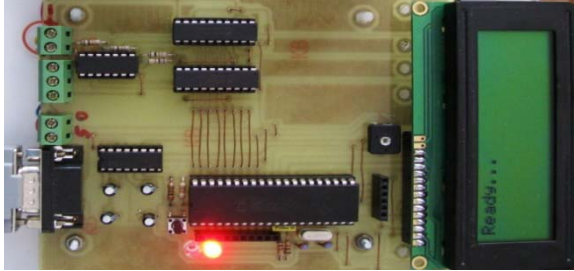
anlatılmaktadır. Son bölümde, sonuçların değerlendirilmesi yer almaktadır.

2. Gerçek-Zaman Benzetimci Platformu

Mikrodenetleyici tabanlı öykünücü olan DTSYP bir elektronik kartla birlikte PC üzerinde kendine özgü geliştirilen GUI'den oluşmuştur [9,10]. Şekil 1'de görülen GUI'nin kolay kullanılabilir olması, kullanıcılar için hazır denektaş süreçler bulunması ve listede olmayan diğer süreçler için de kullanıcı tarafından m-file olarak "pUserDefined" yeni süreçler tanımlanır olması, DTSYP'nin üstünlükleri olarak sayılabilir. Ayrıca denetleyici sınamaları da "cMyController" seçeneği ile yapılabilir. Gerçek-zaman benzetimci de önemli olan zaman adım aralıkları GUI'den süreç ve denetleyici için birbirinden bağımsız ayarlanabilir. DTSYP'nin elektronik kartı üzerinde bulunan analog ve sayısal girişler-çıkışlar aracılığıyla, öykünücüde benzetim çalışması yapılan süreç ve/veya denetleyici sınamaları yapılabilir (Şekil 2). Gürültü ve parametre değişimi gibi süreç ve denetleyicilerin sınanmasında önemli olan uygulamalar DTSYP üzerinde yapılabilir [9,10].



Şekil 1: DTSYP kullanıcı ara yüzü



Şekil 2: Mikrodenetleyici tabanlı öykünücü DTSYP'nin elektronik kartı

Geliştirilen DTSYP platformunda 24 farklı gerçek-zaman benzetim çalışması kipi kullanılabilir [9,10]. Çalışma kipleri üç harfli bir kodlama ile gösterilmiştir. Birinci harf denetleyici, ikinci harf süreci üçüncü harf ise çevre birimlerin nerede koştuğunu gösterir. Çalışmanın PC'de yapıldığını "S", öykünücüde yapıldığını "E" ve gerçek sistem veya sinyal kullanıldığını da "R" harfleri temsil eder. Bunlardan S-E-E, E-E-E ve R-E-E çalışma kipleri ilgili bilimsel yazına katkı yapılan çalışma kiplerini göstermektedir [9,10]. S-S-S, S-E-S, E-S-S, E-E-S, S-S-E, S-E-E, E-S-E ve E-E-E çalışma kipleri PC'de veya öykünücüde benzetim çalışması yapıldığını gösterir ve bu kipteki çalışmalar bilimsel yazında "software-in-the-loop-simulation" olarak tanımlanmıştır [3]. S-R-S, E-

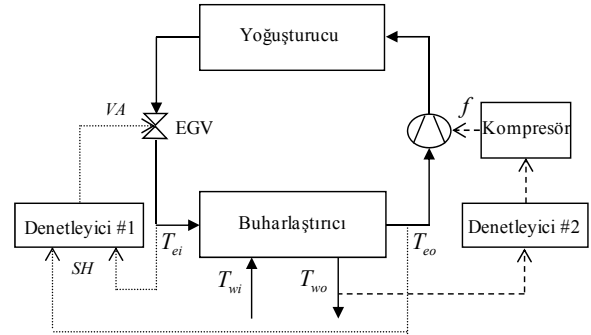
R-S, R-R-S, S-R-E, E-R-E, S-R-R ve E-R-R sürecin gerçek olduğu çalışma kipi ve "prototype" kipi olarak bilinir [3]. R-S-S, R-E-S, R-S-E, R-E-E ve R-R-E denetleyicinin gerçek sistem, sürecin yazılım ortamında olduğu çalışma kipleridir ve bu kipteki çalışmalar bilimsel yazında "hardware-in-the-loop-simulation" olarak tanımlanmaktadır [3-7].

3. DHSS ve Geçiş İşlev Fonksiyonları

Çalışma kapsamında, örnek olarak ele alınan gerçek sistem DHSS kompresörü değişken hızlı yapıya sahiptir ve soğutma kapasitesi ile yük arasındaki dengeyi koruyabilen en yaygın sistemdir. Bu soğutma sistemi Çizelge 1'de verilen özelliklere sahiptir ve Şekil 3'de görüldüğü gibi kompresör, yoğuşturucu, buharlaştırıcı ve genişleme elemanlarından oluşmaktadır.

Çizelge 1: Gerçek DHSS özellikleri

Eleman	Özellikler
Kompresör	Tip: Scroll (R134a soğutucu akışkanlı) Kapasite: 2.8Hp
Yoğuşturucu	Tip: Hava soğutmalı
Buharlaştırıcı	Tip: Su soğutmalı
Genleşme elemanı	Elektronik
Sıcaklık ölçer	Tip: Isıl çift "T" Ölçüm aralığı: -200 ile 350°C Hata : ±%1.5
Güç ölçer	Ölçüm aralığı: 220/600 V, 50/60 Hz Hata : ±%1



Şekil 3: Değişken hızlı soğutma sistemi ve iki denetleme noktası

Soğutma sistemi içinde dolaşan soğutucu akışkan kompresörde yüksek basınç ve sıcaklığa ulaşacak biçimde sıkıştırılır. Kompresörde bulunan sıkıştırma mekanizması scroll olarak kullanılmıştır. Buharlaştırıcıya gönderilen soğutucu akışkan miktarı Elektronik Genleşme Vanası (EGV) ile denetlenmiştir. EGV, sistemden geçen soğutucu akışkanın miktarını üstün-ısı (superheat) sıcaklığına bağlı olarak oransal vana ile denetler. Şekil 2'de görülen üstün-ısı ($SH = T_{eo} - T_{ei}$) ve vana açıklığı (VA) olarak tanımlanır. DHSS'nin diğer denetleme noktası kompresörün çalışma frekansıdır. Sistemde gerçekleşen soğutma miktarı değişimi, sistem içinde dolaşan soğutucu akışkan miktarının değişimine bağlıdır. Bu nedenle, suyun soğutulduğu buharlaştırıcıda kompresör frekansını (f) denetleyerek, gerçek su çıkış sıcaklığı (T_{wo}) arzu edilen su çıkış sıcaklığına eşit yapmayı sağlamaktır. DHSS içinde iki denetleme noktası arasında soğutma kapasitelerine etkileri hakkında karşılaştırma

yapıldığında, kompresör denetiminin sisteme olan etkisi EGV'nin sisteme olan etkisinden daha hızlı olduğu görülmektedir. Her iki denetleme noktası soğutma sisteminde yük ile soğutma kapasitesini eşitleyerek daha verimli sistem elde edilmesini sağlamaktadır. Değişken hızlı soğutma sistemleri için farklı denetleyici mekanizmaları bilimsel yazında; aç-kapa, oransal, oransal-entegral-türev, bulanık mantık ve yapay sinir ağları tabanlı denetleyiciler olarak yer almaktadır [11-15].

[16]'de ele alınan DHSS sistemi modellemesi ile ilgili yaptıkları çalışmalarında, sisteme ait geçiş işlev fonksiyonları birinci dereceden doğrusal dinamik model olarak kullanılmıştır. Bu modelin genel tanımı Denklem 1'de verilmiştir.

$$H(s) = \frac{K}{ts + 1} e^{-Ls} \quad (1)$$

Denklem 1'de sistemin zaman sabiti t , ölü zamanı L ve kazancı da K ile gösterilmektedir. DHSS sistemin birinci dereceden doğrusal dinamik olarak elde edilen EGV ve kompresör için geçiş işlev fonksiyonları $\frac{\Delta SH}{\Delta VA}$ ve $\frac{\Delta T_{wo}}{\Delta f}$ aşağıdaki gibi belirlenmiştir [15].

$$\frac{\Delta SH}{\Delta VA} = \frac{-0.83}{10s + 1} e^{-30s} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta T_{wo}}{\Delta f} = \frac{0.55}{35s + 1} e^{-20s} \quad (3)$$

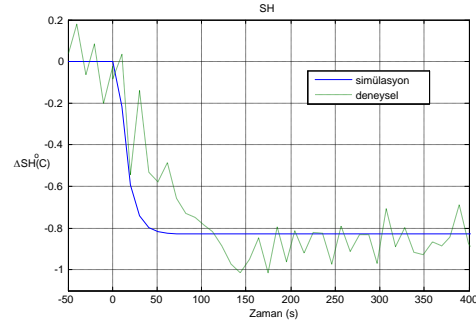
DHSS'nin birinci dereceden doğrusal dinamik olarak elde edilen EGV ve kompresör geçiş işlev fonksiyonları Denklem 2 ve 3 ayrı zaman formunda m-file olarak "pUserDefined" sekmesi ile GUI'ye yüklenmiştir.

4. DTSYP ile DHSS için Gerçek-Zaman Benzetim Çalışmaları

DHSS sistem modelleri için gerçek-zaman benzetim çalışmalarında gerekli olan Denklem 2 ve 3'de verilen geçiş işlev fonksiyonları (m.file) dosyaları sırasıyla "pUserDefined" ile platformun DTSYP ara yüzüne yüklenmiştir [16, 17]. Yüklenen dosyalarla DTSYP ara yüzü kullanılarak gerçek-zaman benzetim çalışmaları öykünücüde yapılmıştır.

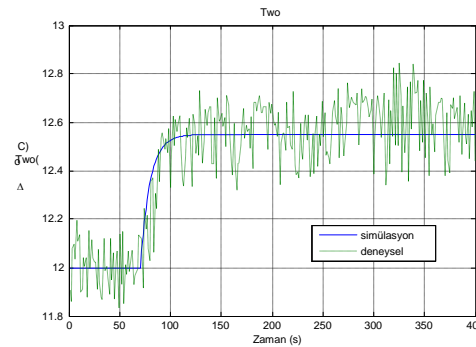
Yapılan benzetim çalışmalarında birim basamak girişine sistemin verdiği cevap eğrisine göre sistem modeli belirlenmiş ve gerçek veri ile arasındaki ilişkiye bakılmıştır. EGV'ye ait geçiş işlevi için giriş basamak işareti VA 'nın %35'den %10'a olacak şekilde yapılarak, SH 'ın değişimi incelenmiştir. SH için gerçek veri ve gerçek-zaman benzetim çalışması sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Denklem 2'de verilen zaman gecikmeli birinci dereceden geçiş işlevi fonksiyonu gerçek-zaman benzetim çalışmasının sonucu sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Gerçek sistem çıkışının gösterildiği kesikli çizgi ile öykünücü çıkışı arasındaki fark

öykünücüde model hatası olarak tanımlanabilir. Hatanın ayrıntılı analizi [16]'da yapılmıştır.



Şekil 4: SH 'ın giriş basamak işareti olan vana açıklığına göre değişimi

Kompresöre ait geçiş işlevi için giriş basamak işareti f 'in değeri 50Hz'den 30Hz'e değiştirilerek, T_{wo} 'nun değişimi incelenmiştir. Gerçek veri ile gerçek-zaman benzetim çalışması sonucu Şekil 5'de verilmiştir. Denklem 3'de verilen zaman gecikmeli birinci dereceden geçiş işlevi fonksiyonu öykünücü sonucu sürekli çizgi ile gösterilmiştir. Gerçek sistem çıkışının gösterildiği kesikli çizgi ile öykünücü çıkışı arasındaki farkın ayrıntılı analizi yazarların önceki çalışmasında yapılmıştır [16].



Şekil 5: T_{wo} 'nun giriş basamak işareti olan kompresör frekansına göre değişimi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, DHSS sisteminin iki denetim noktası olan EGV ve kompresör için belirlenmiş geçiş işlev fonksiyonlarının gerçek-zaman benzetim çalışmaları yapılmıştır. Böylece, DHSS'nin olmadığı laboratuarlarda gerçek sistem yerine öykünücü içeren DTSYP ile taklit etmek mümkün olmuştur. Ayrıca gerçek sistemin olduğu yerlerde sistem üzerinde doğrudan uygulamalar yapmadan önce DTSYP ile gerçek-zaman benzetim çalışmaları yapmak mümkün kılınmıştır.

Mühendislik uygulamalarında gerçek sistemler ve süreçler için alt yapı kurma maliyeti ve fiziki kısıtların olması, bu uygulamalarda gerçek-zaman benzetim çalışmalarının önemini göstermektedir. Gelecek çalışma alanları olarak, DHSS ve benzeri karışık sistemlerin yerine kullanılabilirlik daha karmaşık sistemlerin modellenmesi ve denetleyici tasarlanması ile kontrol ve iklimlendirme üzerine derslerde

gerçek sistem ve öykünücü karşılaştırması için kullanılması planlanmaktadır.

6. Teşekkür

Dr. Orhan Ekren'e bildiri metninin yazımına yaptığı katkılardan dolayı teşekkür ederiz.

7. Kaynaklar

- [1] Maclay, D. "Simulation gets into the loop," *Inst. Elect. Eng. Review*, vol. 43, no. 3, pp. 109-112, 1997.
- [2] Bacic, M. "On hardware-in-the-loop simulation," *Decision and Control, 2005 European Control Conference. CDC-ECC'05. 44th IEEE Conference on*, vol.no., pp.3194-3198, 2005.
- [3] Isermann, R., Schaffnit J. ve Sinsel, S. "Hardware-in-the-loop simulation for the design and testing of engine-control systems," *Control Engineering Practice*, pp.643-653, 1999.
- [4] Facchinetti, A. ve Mauri, M. "Hardware-in-the-Loop Overhead Line Emulator for Active Pantograph Testing," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol.56, no.10, pp.4071-4078, Oct. 2009.
- [5] Steurer, M., Edrington, C., Sloderbeck, M., Ren W. ve Langston, J. "A Megawatt-Scale Power Hardware-in-the-Loop Simulation Setup for Motor Drives" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. PP, 2009, pp.1-1 Digital Object Identifier 10.1109/TIE.2009.2036639.
- [6] Li, H., Steurer, M., Shi, K., Woodruff, S. ve Zhang, D. "Development of a unified design, test, and research platform for wind energy systems based on hardware-in-the-loop real-time simulation," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1144-1151, Jun. 2006.
- [7] Lu B., Wu X., Figueroa H. ve Monti A. "A low-cost real-time hardware-in-the-loop testing approach of power electronics controls," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, pp. 919, Apr. 2007.
- [8] Goodwin G. C., Graebe S. F., Salgado M. E., *Control System Design*, Engelwood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 2001.
- [9] Şahin S., İşler Y., Güzeliş, C. "A Microcontroller Based Test Platform for Controller Design", *IEEE International Symposium on Industrial Electronics ISIE'2010*, Bari / Italy, 4-7 July 2010.
- [10] Şahin S., İşler Y., Güzeliş, C. "A Real Time Simulation Platform for Controller Design, Test and Redesign", 19th chapter in *Real-time Simulation Technologies: Principles, Methodologies, and Applications*, ISBN-13:978-1-4398-4723-7, edited by Popovici, K. and Mosterman, P.J., CRC Press, 2012.
- [11] Aprea, C., Renno, C., "Experimental modeling of variable speed system" *International Journal of Energy Research*, 33, 29-37, 2009.
- [12] Aprea, C., Mastrullo, R., Renno, C., "Experimental analysis of the scroll compressor performances varying its speed", *Applied Thermal Engineering*, 26, 983-992, 2006.
- [13] Aprea, C., Mastrullo, R., Renno, C., "Performance of thermostatic and electronic valves controlling the compressor capacity", *International Journal of Energy Research*, 30, 1313-1322, 2006.
- [14] Lazzarin, R., Noro, M., "Experimental comparison of electronic and thermostatic expansion valves performance in an air conditioning plant", *International Journal of Refrigeration*, 31, 113-118, 2008.
- [15] Ekren, O., Şahin, S., İşler, Y., Optimum Controller for Variable Speed Compressor and Electronic Expansion Valve, *International Journal of Refrigeration*, 33 (6), 1161-1168, 2010.
- [16] Ekren, O., Şahin, S., İşler, Y. "Development and evaluation of transfer functions for a variable speed compressor" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, doi: 10.1177/0954408911414805, 2011.
- [17] Şahin, S., Ekren, O., İşler, Y., Güzeliş, C. "Değişken Hızlı Soğutma Sistemleri İçin Gerçek-Zaman Benzetimcisi Kullanarak Yapay Sinir Ağları Temelli Denetleyici Tasarımı ve Gerçeklenmesi", *Mühendis ve Makine Dergisi*, 51(603), 8-15, 2010.