

ZAMAN GECİKMELİ ANALOG BENZETİM-UYARTIM ARAYÜZÜNÜN DC MOTOR KONTROLÜNE UYGULANMASI VE KARARLILIK ANALİZİ

Dilek ÇADIRLI¹

Saffet AYASUN²

¹Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Niğde Üniversitesi, 51100, Niğde

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Niğde Üniversitesi, 51100, Niğde

¹e-posta: dilek_cadirli@hotmail.com

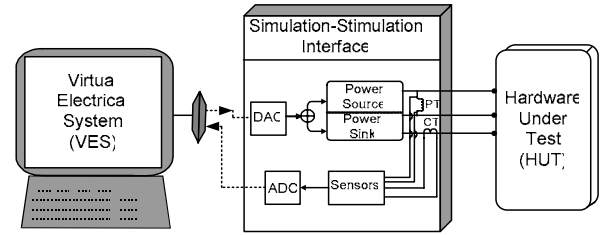
²e-posta: sayasun@nigde.edu.tr

Anahtar sözcükler: Otomasyon ve Kontrol, Sim-Stim Arayüzü, Zaman Gecikmesi, DC Motor Kontrol, Kararlılık

ABSTRACT

This paper presents an application of the Simulation-Stimulation (Sim-Stim) interface for DC motor speed control. Sim-Stim interface integrates hardware with software in order to perform hardware-in-the-loop (HIL) studies for testing and developing new hardware components. In this study, based on some assumptions an analog model of Sim-Stim interface whose only parameter is time delay is developed to analyze the stability. The developed interface model is applied to speed control of DC motor using PI controller and the effect of the time delay on the dynamics of motor speed and closed-loop stability are investigated using MATLAB/Simulink.

tarafından analog sinyale çevrilerek HUT'u besleyen invertöre kontrol sinyali olarak gönderilir. Şekil-1'de verilen sistem; analog HUT, dijital VES ve Sim-Stim ünitesinden oluşan kapalı çevrim hibrid bir dinamik sistemdir.



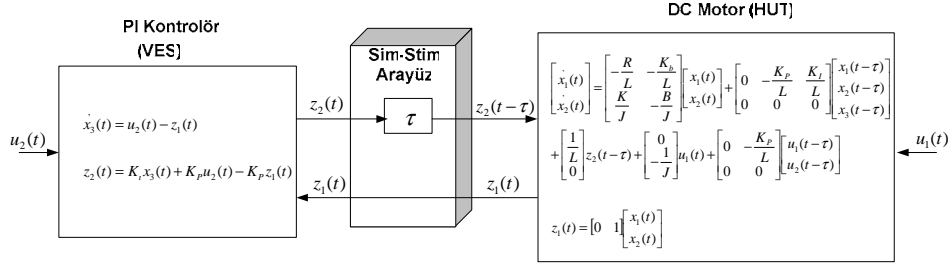
Şekil-1. Sim-Stim arayüzünü gösteren test ünitesi

1. GİRİŞ

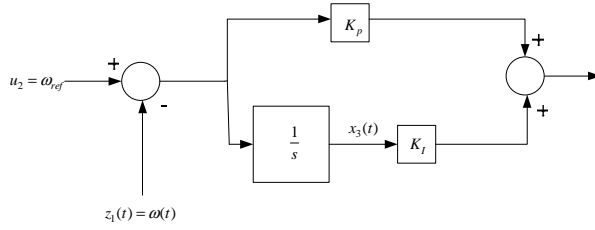
Benzetim-Uyartım (Simulation-Stimulation) arayüzü mevcut elektrik donanımını, değişik çalışma koşulları altında performansını tespit etmek için bilgisayar programına bağlayan bir ünedir. Şekil-1'de gösterildiği üzere Sim-Stim ünitesi, test edilecek motor, jeneratör gibi ekipmanları (Hardware Under Test-HUT); bunların gerçek hayatta bağlı olduğu elektrik dağıtım sisteminin bilgisayar ortamında bulunan modeline (Virtual Electrical System-VES) entgre eden hibrid bir arayüzdür. Sim-Stim arayüzü analog olan HUT sistemini dijital olan VES sistemine bağlayan bir birimdir. Şekil-1'de gösterildiği üzere, Sim-Stim arayüzünde, sensörler, digital-analog çevirici (DAC), analog-digital çevirici (ADC) ve güç kaynağı olarak kullanılan güç elektroniği invertörü bulunmaktadır.

Şekil-1'de verilen test ünitesinin çalışması aşağıdaki biçimde özetlenebilir. HUT sistemine ait akım, gerilim ve güç gibi analog sinyaller ölçülür. Bu değerler, ADC ile dijital sinyallere dönüştürülerek, HUT'un gerçekte bağlı olduğu dağıtım sisteminin bilgisayar modeline (VES) dijital (örneklenmiş) giriş sinyali olarak verilir. VES'de bulunan bilgisayar programı bu giriş sinyallerini modelde kullanarak dijital bir kontrol sinyali oluşturur. Bu sinyal daha sonra DAC

Şekil-1'de verilen dinamik sistem, çevrimde donanım (Hardware-in-the-loop, HIL) sistemi olarak bilinmektedir. Bu tür sistemler, yeni bir donanımı veya sistemi dizayn etmede oldukça etkilidir. HIL sistemlerinde test edilecek donanım, donanımın gerçek hayatta bağlanacağı elektrik sisteminin bilgisayar modeline bağlanmaktadır. HIL yönteminin en önemli avantajı, kritik cihazların farklı çalışma koşullarında test edilebilme imkanını sunmasıdır. HIL yöntemi özellikle; test edilecek cihazların bağlanacağı sistemin gerçek veya daha düşük güç değerinde bir prototipini inşa etmek ve cihazın bilgisayar simülasyonlarında kullanılabilecek bir modelinin geliştirilmesi zorunluluklarını ortadan kaldırmaktadır. Bu nedenle HIL tekniği, yeni cihazların testlerinin, deneysel yöntemlerden daha hızlı ve daha az maliyetli olarak gerçekleştirilmesini sağlamaktadır. Bu avantajlarından dolayı, HIL tekniği, değişik alanlarda kullanılan elektrik cihazlarının dizaynında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu uygulamalardan bazıları şunlardır: Elektrik lokomotif sistemi için dizayn edilen kontrolörlerin test edilmesi [1], hibrid araçlarda kullanılan motor performansının değerlendirilmesi [2], güç elektronik ekipmanlarının kontrolü ve testi [3], güç kalitesi analizi için gerçek-zamanlı bir test ünitesinin geliştirilmesi [4].



Şekil-4. DC motor hız kontrol sistemine ait blok diyagramı



Şekil-5. PI kontrolörlü VES sisteminin blok diyagramı

3. DC MOTOR HIZ KONTROL UYGULAMASI

Bu bölümde, Sim-Stim arayüzü DC motor hız kontrol sistemine uygulanmıştır. Şekil-4'de görüldüğü üzere, parametresi zaman gecikmesi (τ) olan analog Sim-Stim arayüzü, DC motoru (HUT) PI kontrolörden oluşan VES sistemine bağlamaktadır. Şekil-4'de verilen hız kontrol sisteminin Matlab/Simulink modelinin geliştirilebilmesi için her bir sistemin dinamik modellerine ihtiyaç vardır. DC motor dinamiği aşağıda verilen elektro-mekanik diferansiyel denklemlerle tanımlanmaktadır [8].

$$u = e_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + e_b \quad (2)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_l = T_e = Ki_a$$

Burada, $u = e_a$ endüvi devresine uygulanan gerilimi, $e_b = K_b\omega$ ters e.m.k. gerilimini, L endüvi sargı endüktansını, i_a endüvi devresi akımını ve R endüvi sargı direncini temsil etmektedir. Mekanik diferansiyel denklemde ise J ve B motor-yük birleşiminin sırasıyla toplam eşdeğer eylemsizliği ve sönüm katsayısını, T_l yük momentini, K ve K_b sırasıyla moment ve ters e.m.k. gerilim sabitlerini ve ω ise rotor açısal hızını göstermektedir. DC motorun elektro-mekanik dinamiği $x_1 = i_a$ ve $x_2 = \omega$ değişken dönüşümü yapılarak aşağıdaki durum-uzay denklemi ile ifade edilebilir.

$$\dot{x}_1 = -\frac{R}{L}x_1 - \frac{K_b}{L}x_2 + \frac{1}{L}u$$

$$\dot{x}_2 = \frac{K}{J}x_1 - \frac{B}{J}x_2 - \frac{1}{J}T_l \quad (3)$$

Burada, Şekil-4'den de görüleceği üzere endüvi devresine uygulanan $u(t)$ girişi VES sisteminin τ kadar geciktirilmiş çıkış sinyal olmaktadır. Zaman gecikmesini dikkate alarak ve $u_1 = T_l$ değişken dönüşümü yapılarak elde edilen DC motor durum-uzay denklem modeli

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} \\ \frac{K}{J} & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} z_2(t-\tau) + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J} \end{bmatrix} u_1(t) \quad (4)$$

$$z_1(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

biçiminde olmaktadır.

DC motor hız kontrolünde yaygın olarak kullanılan PI kontrolöre ait blok diyagramı Şekil-5'de verilmiş olup transfer fonksiyonu

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (5)$$

Biçimindedir [9]. Burada K_p ve K_I oransal ve integral kazançlarıdır. Denklem (4)'de verilen DC motor modeline benzer biçimde PI kontrolörün durum-uzay denklem modelini aşağıdaki şekilde ifade etmek mümkündür.

$$\dot{x}_3(t) = u_2(t) - z_1(t) \quad (6)$$

$$z_2(t) = K_I x_3(t) + K_p u_2(t) - K_p z_1(t)$$

Burada $u_2 = \omega_{ref}$ referans motor hızıdır.

VES, Sim-Stim arayüzü ve HUT sistemlerinden oluşan ve blok diyagramı Şekil-4'de verilen HIL sistemine ait durum uzay denklemi, Denklem (4) ve (6) birleştirilerek aşağıdaki biçimde elde edilebilir.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_b}{L} & 0 \\ \frac{K}{J} & -\frac{B}{J} & 0 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_p}{L} & \frac{K_I}{L} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t-\tau) \\ x_2(t-\tau) \\ x_3(t-\tau) \end{bmatrix}$$

$$+ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{J} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{K_p}{L} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t-\tau) \\ u_2(t-\tau) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} z_1(t) \\ z_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -K_p & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & K_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix}$$

MATLAB/Simulink [10] paketinin sunduğu elemanlar kullanılarak Şekil-4'de blok diyagramı ve Denklem (7)'de durum-uzay denklem modeli verilen DC motor hız kontrol sisteminin benzetim modeli geliştirilmiş ve zaman gecikmesinin sistem kararlılığına olan etkisi analiz edilmiştir.

4. BENZETİM SONUÇLARI

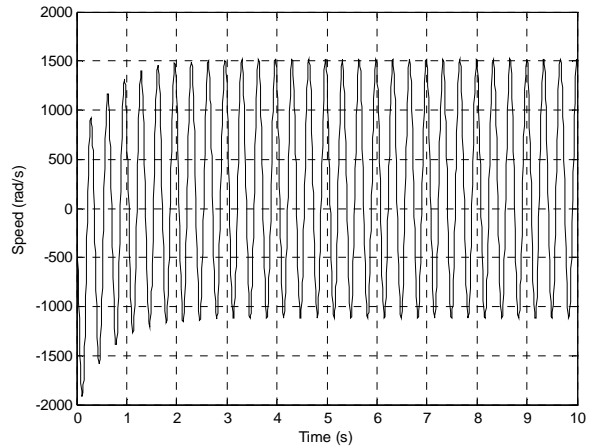
Bu bölümde zaman gecikmesi (τ)'nun kapalı çevrim sistemi kararsız hale getirdiğini gösteren benzetim sonuçları sunulmuştur. İlk olarak sistemde zaman gecikmesi olmadığı varsayılarak (zaman gecikmesiz sistem, $\tau=0$), üç farklı oransal kazanç değeri için ($K_p=0.1, 0.3, 0.5$) sistemin kararlılığını koruyacağı maksimum K_I değerleri benzetim yöntemi ile belirlenmiştir. Tablo-1'den de görüleceği üzere, $K_p=0.1$ için sistemin kararlı olacağı maksimum integral kazanç değeri $K_I=3.5$, $K_p=0.3$ için $K_I=9.0$ ve $K_p=0.5$ için $K_I=15.0$ olmaktadır. Tablo-1'de (*) ile belirtilen K_I değerlerinde zaman gecikmesiz sistem kararsız olmaktadır. Daha sonra, her bir K_p için zaman gecikmesiz sistemin kararlı olduğu K_I değerleri için sistemin kararsız hale gelmeden (sınırdaki kararlı) tolere edebileceği maksimum zaman gecikme değerleri τ^* benzetim yöntemi ile bulunmuştur. Elde edilen bu değerler Tablo-1'de gösterilmiştir. Tablo-1'den görüldüğü üzere; sabit bir K_p değerinde K_I integral kazancı arttıkça sistemin kararlılığını kaybetmeden tolere edebileceği maksimum zaman gecikmesi azalmaktadır. Benzer azalış sabit bir K_I değerinde K_p integral kazancı artarken de gözlemlenmektedir.

Sistemin Tablo-1'de verilen τ^* değerleri için sınırdaki kararlı olduğu motor hızı ω 'nın zamana göre değişimini veren benzetim sonuçlarında daha net olarak görülebilir. Tablo-1'de $K_p=0.3, K_I=0.5$ değerleri için maksimum zaman gecikmesi $\tau^*=0.05253 s$ olarak verilmiştir. Şekil-6'da bu gecikme değeri için motor hızı ω verilmiştir. Görüldüğü üzere motor hızında sönümlenmeyen salınımlar mevcut olup, kapalı çevrim sistem sınırdaki kararlıdır. Zaman gecikmesinde olabilecek küçük bir artış dahi sistemi kararsızlaştıracaktır. $\tau=0.053 s$ için motor hızının değişimi Şekil-7'de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü üzere ihmal edilebilecek bir gecikme artışı motor hızında sürekli artan salınımlara sebep olmaktadır. Benzer biçimde, $\tau^*=0.05253 s$ değerinden daha küçük gecikme değerleri için sistem kararlı olacaktır. Şekil-8'de $\tau=0.052 s$ için kararlı duruma ait benzetim sonucu verilmiştir. Şekil-9'da $K_p=0.3, K_I=0.5$ için zaman gecikmesiz sistemin ($\tau=0$) motor hızı verilmiştir. Görüldüğü üzere, motor hızı kararlı bir tepki göstermekte ve referans hız değerine kısa sürede ulaşmaktadır. Şekil-9, Şekil-6, 7 veya 8 ile karşılaştırıldığında zaman

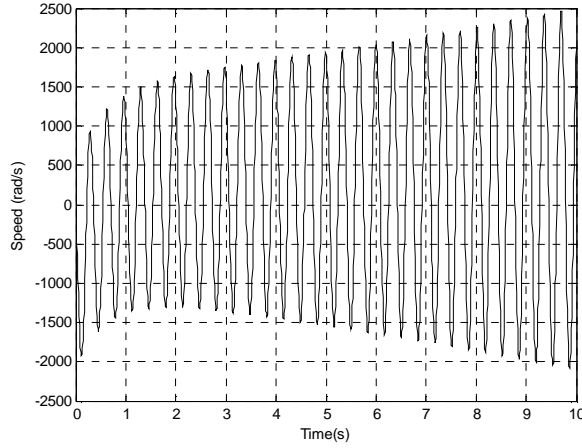
gecikmesinin sistem dinamiğini olumsuz yönde etkilediği açık olarak görülmektedir.

Tablo-1. Sistemin kararsızlığını kaybetmeden tolere edebileceği maksimum zaman gecikmesi

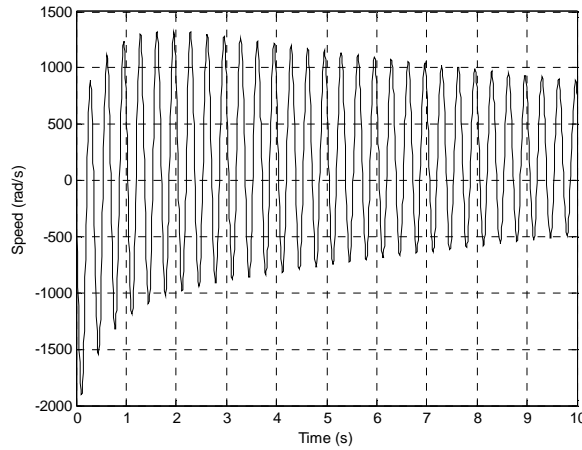
K_I	τ^* (sn)		
	$K_p = 0.1$	$K_p = 0.3$	$K_p = 0.5$
0.1	0.20660	0.05655	0.031770
0.5	0.12000	0.05253	0.030637
1.0	0.06508	0.04726	0.029187
1.5	0.03843	0.04201	0.027712
2.0	0.02316	0.03698	0.026226
2.5	0.01336	0.03230	0.024740
3.0	0.00662	0.02804	0.023265
3.5	0.00169	0.02419	0.021813
4.0	*	0.02075	0.020387
4.5	*	0.01768	0.019000
5.0	*	0.01493	0.017653
5.5	*	0.01247	0.016354
6.0	*	0.01027	0.015104
6.5	*	0.00831	0.013903
7.0	*	0.00654	0.012752
7.5	*	0.00494	0.011650
8.0	*	0.00349	0.010594
8.5	*	0.00217	0.009590
9.0	*	0.00097	0.008630
9.5	*	*	0.007717
10.0	*	*	0.006860
10.5	*	*	0.006038
11.0	*	*	0.005255
11.5	*	*	0.004505
12.0	*	*	0.003793
12.5	*	*	0.003115
13.0	*	*	0.002470
13.5	*	*	0.001855
14.0	*	*	0.001270
14.5	*	*	0.000710
15	*	*	0.000180
15.5	*	*	*



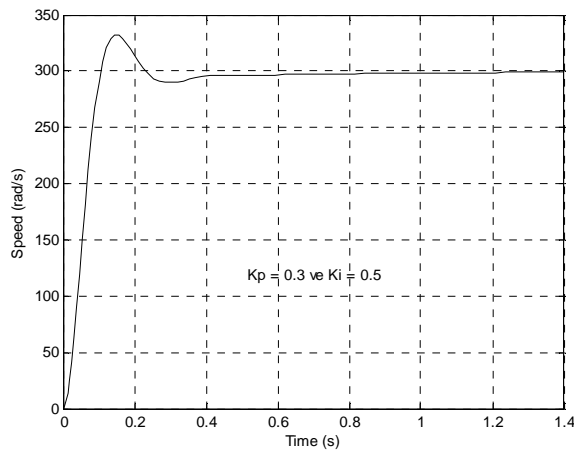
Şekil-6. $K_p=0.3, K_I=0.5, \tau^*=0.05253 s$ değerleri için motor hızı ω (rad/s)



Şekil-7. $K_p = 0.3, K_i = 0.5, \tau = 0.053$ s değerleri için motor hızı ω (rad/s)



Şekil-8. $K_p = 0.3, K_i = 0.5, \tau = 0.052$ s değerleri için motor hızı ω (rad/s)



Şekil-9. $K_p = 0.3, K_i = 0.5, \tau = 0$ s değerleri için motor hızı ω (rad/s)

4. SONUÇ

Bu çalışmada, donanım testi amacı ile tasarlanan ve analog bir sistemi digital bilgisayar ortamına bağlayacak olan Benztim-Uyartım (Sim-Stim) arayüzü sunulmuştur. Geliştirilen zaman gecikmeli analog arayüz modeli DC motor hız kontrolüne uygulanmıştır. Zaman gecikmesinin sistemin kararlılığına olan etkisi Matlab/Simulink programı kullanılarak analiz edilmiştir. PI kontrolörün farklı kazanç değerleri için hız kontrol sisteminin kararsız hale gelmeden (sınırdaki kararlı) tolere edebileceği maksimum zaman gecikme değerleri τ^* benzetim yöntemi ile bulunmuştur. Zaman gecikmesinin motor hızındaki salınımları artırarak kapalı çevrim sistemi kararsız hale getirdiği elde edilen benzetim sonuçları ile gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] P. Terwiesch, T. Keller and E. Scheiben, "Rail vehicle control system integration testing using digital hardware in-the-loop simulation," *IEEE Trans. Control Syst. Technol* vol.7, pp.352-362, 1999.
- [2] C. O. Sung, "Evaluation of motor characteristics for hybrid electric vehicles using hardware-in-the-loop concept," *IEEE Trans. Vehicular Technol.* vol.54, pp.817-824, 2005.
- [3] A. Monti, E. Santi, R. Dougal. and M. Riva, "Rapid prototyping of digital controls for power electronics," *IEEE Trans. Power Electron* vol.18, pp.915-923, 2003.
- [4] Y. Liu, M. Steurer and P. Riberiro, "A novel approach to power quality assessment: Real time hardware-in-the-loop test bed," *IEEE Trans. Power Delivery* vol.20, pp.1200-1201, 2005
- [5] K. J. Astrom and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems: Theory and Design*, 3rd Edition, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1997.
- [6] W. Zhang, M. S. Branicky, and M. Phillips, "Stability of networked-control systems," *IEEE Control System Magazine*, pp.84-99, Feb. 2001.
- [7] S. Ayasun, "Elektrik cihazlarının testi için benzetim-uyartım (simulation-stimulation) arayüzü ve bunun kararlılık analizi," *ELECO'2004*, 8-12 Aralık 2004, Bursa, pp. 47-51.
- [8] M.-Y. Chow and Y. Tipsuwan, "Gain Adaptation of Networked DC Motor Controllers Based on QOS Variations," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no.5, pp. 936-943, 2003.
- [9] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.
- [10] SIMULINK, Model-Based and System-Based Design, Using Simulink, MathWorks Inc., 2000.