

PEM Tipi Yakıt Hücresi Sisteminde Kullanılan Kompresör Modelinin Adaptif Denetleyici ile Kontrolü

Yavuz Eren, Levent Uzun, Haluk Görgün, İbrahim Beklan Küçükdemiral, Galip Cansever

Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yıldız Teknik Üniversitesi

veren@yildiz.edu.tr, lucun@yildiz.edu.tr, gorgun@yildiz.edu.tr, beklan@yildiz.edu.tr, cansever@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada araç uygulamaları için avantajlı özellikleri ile öne çıkan proton geçirimli membran (PEM) tipi yakıt hücresi sistemine ait oksijen sağlama biriminde kullanılan kompresör modelinin adaptif kontrolörle kontrolü yapılmıştır. Sistemin lineer olmayan denklemleri çıkartılıp belli bir çalışma noktası için lineerleştirme yapılmıştır. Elde edilen lineer denklemler yardımıyla referans model belirlenip Lyapunov tabanlı model referans adaptif kontrol algoritması uygulanmıştır. Kompresör modelinin PI kontrol ile kontrolü yapıp elde edilen sonuçlar adaptif kontrolörle karşılaştırılıp elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Adaptif kontrol sistemleri kontrol edilen sistemdeki parametre değişimlerine karşı klasik PI kontrole göre daha iyi cevap vermektedirler. Ayrıca kontrol işaretinin gerçekleşmesi için gereken enerji seviyeleri PI kontrole göre daha düşüktür. Bu özellikleri gereği bu tip parametre değişimlerinin sık olduğu sistemlerde modern bir kontrol yöntemi olarak kullanılmaktadırlar.

Abstract

In this paper, the compressor that is used to supply oxygen to proton exchange membrane (PEM) fuel cells, which is the most advantageous fuel cell type for mobile systems, is controlled by adaptive control method. The nonlinear model equations of the compressor system have been driven and linearization has been carried out at around an operating point. Through this linearization the reference model is determined and Lyapunov based model reference adaptive control algorithm has been carried out. To understand the performance of the adaptive controller, PI controller, which is most commonly used controller, has been designed and simulation results have been compared. Adaptive control systems have better response due to parameter changes in the system than classical PI controller. Moreover, the energy level of the control signal is lower than PI controller. Due to those specifications, adaptive control algorithms are used as a modern control method in the systems with parameter changes.

1. Giriş

Bu çalışmada proton geçirimli membran (PEM) tipi yakıt hücresi sistemleri için oksijen sağlama sisteminde kullanılan kompresör modelinin adaptif kontrol ile kontrolü yapıp klasik PI kontrol ile karşılaştırması yapılarak adaptif kontrolörün avantajları gösterilmiştir.

Adaptif kontrol, 1950'lerden itibaren üzerinde çalışılmaya başlanmış bir konudur. Adaptif kontrol teorisinde temel problemlerden genel ve karmaşık problemlerin çözümüne, varlık ve çözülebilirlik sorularından performans ve dayanıklılık konularına doğru ilerlemeler kaydedilmiştir. Adaptif kontrol teorisinin en önemli amacı bilinmeyen parametreler içeren sistemlerin kontrol edilmesidir.

1980'lerin başından itibaren Lyapunov tabanlı adaptif kontrol, kestirim tabanlı adaptif kontrol, doğrudan(direct) adaptif kontrol ve dolaylı(indirect) adaptif kontrol gibi pek çok adaptif yapı kararlılık ve asimptotik referans takibi gibi kriterleri sağlamak için ortaya atılmıştır. Lyapunov tabanlı adaptif kontrol, Lyapunov kararlılık kriterine dayanması ve buna bağlı olarak matematiksel olarak daha kolay ispat edilebilmesi sebebiyle daha tercih edilen bir yöntemdir [1,2,3].

Literatürde Lyapunov tabanlı model referans adaptif kontrol yönteminin kullanıldığı uygulamalar olmasına rağmen Jensen & Kristensen nonlineer regresyon metodu ile modellenen kompresörün kontrolü üzerinde kullanıldığına dair bir çalışma bulunamamıştır. Bu amaçla, çalışmanın ikinci bölümde Lyapunov kararlılık kriterine dayanan model referans adaptif kontrol sisteminin tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 3'de ise model referans adaptif kontrolün uygulandığı PEM tipi yakıt hücresi sisteminde kullanılan kompresör modeli ele alınıp sistemin lineerleştirilmiş hali verilmektedir. Bölüm 4'de kontrol stratejileri anlatılmıştır. Bölüm 5'de ise kontrol stratejileri uyarınca kontrol edilen sistemin cevaplarına ilişkin yorumlar yapılmıştır. Bölüm 6'da ise çalışmanın sonuçları belirtilmiştir.

2. Lyapunov Kararlılık Kriterine Dayanan Model Referans Adaptif Kontrol Sistem Tasarımı

Bu çalışmada kullanılan adaptif kontrol uygulamasında kontrol edilecek sistemin referans modelinin olduğu durumlarda tanımlanan bir Lyapunov fonksiyonun yardımıyla adaptasyon parametrelerinin bulunması ve bu parametrelerin sisteme uygulanarak denetleyicinin parametre farklılıklarına karşı iyi sonuç vermesi amaçlanmıştır.

Kontrol edilen sistem,

$$\frac{dy}{dt} = -ay + bu \quad (1)$$

şeklinde skaler bir sistem olsun. Sistemde 'a' ve 'b' parametreleri bilinmeyen parametrelerdir. Kontrol kuralı,

$$u = ku_c - hy \quad (2)$$

şeklinde olsun [1]. Burada $k=k(y,e,u_c,t)$ ve $h=h(y,e,u_c,t)$ şeklindedir. Model referans sistem ise,

$a_m > 0$ için;

$$\frac{dy_m}{dt} = -a_m y_m + b_m u_c \quad (3)$$

şeklinde olsun. Bu durumda sistem çıkışı ile model çıkışı arasındaki hata işareti,

$$e = y_m - y \quad (4)$$

şeklinde tanımlanırsa hatanın dinamiği,

$$\dot{e} = \dot{y}_m - \dot{y} \quad (5)$$

olur. (1) ve (2) eşitlikleri (5)'de yerine yazılır ve gerekli, düzenlemeler yapılırsa

$$\dot{e} = -a_m e + (a + bh - a_m) y + (b_m - bk) u_c \quad (6)$$

eşitliği elde edilir [2,3]. Mükemmel izleme şartları (6) ifadesinde y ve u_c 'nin katsayılarını sıfıra götüren şartlar olarak kabul edilirse k ve h şeklinde uyarlama kuralı bulunmalıdır. Ancak bu noktada a ve b bilinmediğinden dolayı bu şart uygulanabilir değildir [4]. Bu durumda,

$$\begin{aligned} a + bh - a_m &= \phi \\ b_m - bk &= \psi \end{aligned} \quad (7)$$

şeklinde parametre hataları yazılır. Bu sistem için aday Lyapunov fonksiyonunu,

$$V(e, \phi, \psi) = \frac{1}{2} \left(e^2 + \frac{1}{b\gamma} \underbrace{(a + bh - a_m)^2}_{\phi} + \frac{1}{b\delta} \underbrace{(b_m - bk)^2}_{\psi} \right) \quad (8)$$

şeklinde tanımlayalım. Bu fonksiyonun türevi alınırsa

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -a_m e^2 + e(a + bh - a_m) y + e(b_m - bk) u_c \\ &\quad + \frac{1}{\gamma} (a + bh - a_m) \dot{h} - \frac{1}{\delta} (b_m - bk) \dot{k} \end{aligned} \quad (9)$$

elde edilir.

$$e \underbrace{(a + bh - a_m)}_{\phi} y + \frac{1}{\gamma} \underbrace{(a + bh - a_m)}_{\phi} \dot{h} = 0 \quad (10)$$

$$e \underbrace{(b_m - bk)}_{\psi} u_c - \frac{1}{\delta} \underbrace{(b_m - bk)}_{\psi} \dot{k} = 0$$

eşitliklerinin sağlandığı kabul edilirse h ve k uyarlama kuralı

$$\begin{aligned} \dot{h} &= -\gamma e y(t) \\ \dot{k} &= \delta e u_c(t) \end{aligned} \quad (11)$$

şeklinde elde edilir [4]. (10)'da verilen gerekli tanımlamalar yapıldığında Lyapunov fonksiyonunun türevi

$$\dot{V} = -a_m e^2 \leq 0 \quad (12)$$

olarak elde edilir. Bu durumda hatanın asimptotik olarak sıfıra yakınsaması hakkında bir şey söylenemez. Ancak Lyapunov aday fonksiyonunun radyal olarak sınırsız olması ve $\dot{V} \leq 0$ olduğundan e , ϕ ve ψ sınırlıdır. Bu durumda (14)'deki ifadenin her iki tarafının 0'dan t'ye entegre edilir ve gerekli düzenlemeler yapılırsa

$$\int_0^t a_m e^2(\tau) d\tau < V(x(0)) \quad (13)$$

elde edilir ve bu durumda e , L_2 uzayının bir elemanıdır. Bu kabulde e 'nin sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. y_m sınırlı, e de sınırlı bir işaret olduğundan y işareti de sınırlıdır. Bu durumda (5) eşitliği kullanılarak e 'nin türevinin de sınırlı olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumda Barbalat Lemma aracılığıyla $t \rightarrow \infty$ durumunda hatanın limitinin 0 olduğu yazılabilir. Bu durumda h ve k parametreleri belli bir değere yakınsarlar, yani sınırlı olurlar.

3. PEM Tipi Yakıt Hücresi Sistemleri İçin Kompresör Modeli

H^+ iyonunun geçişine izin veren tip yakıt hücresi olan PEM (Proton Geçirimli) tipi yakıt hücresi sistemi sıcaklık, nem ve basınç dinamiklerinin anlık kontrolünü gerektiren lineer olmayan karakteristiğe sahiptir. Bu sebeple dinamik ve karmaşık bir yapı arz etmektedir. PEM tipi yakıt hücreleri düşük emisyonla sahip olması, düşük çalışma sıcaklığına sahip

olması, çabuk çalışabilmesi ve göreceli olarak uzun ömre sahip olması sebebiyle elektrikli araçlar için kullanımı en uygun olan yakıt hücresi tipidir [5]. PEM tipi yakıt hücresinin araçlarda kullanımı ise yardımcı birimler ile desteklenmesini gerektirmektedir. Bir araç uygulaması için düşünülen PEM tipi yakıt hücresi sisteminde üç önemli alt sistem öngörülmektedir. Bunlar oksijen sağlama sistemi, yakıt sağlama sistemi ve nemlendirme-sıcaklık ayarlama sistemidir [6]. Yakıt hücresi sisteminin araç için istenen hız taleplerine hızlı cevabı vermesi uygun yakıt hücresi tipinin yanında alt sistemlerin hızlı cevabına da bağlıdır. Gerekli hidrojen ve oksijen sağlanan yakıt hücresi sistemi hız değişimlerine oldukça hızlı cevap verebilmektedir. Hidrojenin saf olarak sağlanması ile hidrojen beslemesi hızlı şekilde yapılabilir. Ancak atmosferik kaynaklı oksijen kullanımı, uygun hava akışını sağlayacak kompresörü gerektirmektedir. Uygun akış kontrolü ile amaç, sistemden çekilen akıma paralel oksijen miktarını ayarlayarak, sistemin optimum çalışma noktasında çalışmasını sağlamaktır [7]. Kompresör kullanımı ile sadece istenilen hava akışı sağlanmayıp, basınç artışı ile birlikte, membrandaki reaksiyon oranını da artmaktadır [7,8]. Bu durum sistem güç yoğunluğunun artmasını sağlamaktadır. Kompresör giriş havası atmosferik olduğundan sıcaklık ve basıncı 1 atm ve 298 K'dir. Kompresörden akan hava akımının kütlesi F_{cp} , kompresör haritasındaki değerleri kullanmak yerine, literatürde "Jensen & Kristensen" metodu diye geçen nonlineer eğri uydurmaya dayanan metot ile kompresör dinamiği olan rotor dönüş hızı ω_{cp} kullanılarak bulunmaktadır [8]. Kompresör dinamik davranışı

$$J_{cp} \frac{d\omega_{cp}}{dt} = (\tau_{cm} - \tau_{cp}) \quad (14)$$

şeklinde verilmiştir. (14) eşitliği J_{cp} kompresör ve motorun birleştirilmiş atalet momentleri, τ_{cm} kompresörden istenen tork, τ_{cp} kompresörü sürmek için gerekli tork anlamında kullanılmaktadır. Kompresörden istenen tork statik motor denkleminde

$$\tau_{cm} = \eta_{cm} \frac{k_t}{R_{cm}} (v_{cm} - k_v \omega_{cp}) \quad (15)$$

şeklinde elde edilir. Burada k_b , R_{cm} ve k_v motor sabitleri, η_{cm} ise motor mekanik verimidir. Kompresörü sürmek için gereken tork ise

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{atm}}{\omega_{cp} \eta_{cp}} \left[\left(\frac{p_{cp}}{p_{atm}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] F_{cp} \quad (16)$$

şeklinde hesaplanır. (16) ifadesinde C_p havanın spesifik ısıtma kapasitesi, η_{cp} kompresör verimi, P_{atm} atmosfer basıncı, P_{cp} kompresör çıkış basıncı, γ spesifik hava ısıtma oranını ifade etmektedir. P_{cp} , kompresörün yakıt hücresi katodunu oksijen ile beslediği besleme kanalı parametreleri ile

$$\frac{dp_{cp}}{dt} = \frac{\gamma R_a}{V_{sm}} (F_{cp} T_{cp} - F_{sm} T_{sm}) \quad (17)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Burada, R_a genel gaz sabitini, V_{sm} besleme kanalı hacmini, T_{cp} kompresör çıkışı sıcaklığını, F_{sm} besleme kanalı hava akış miktarını, T_{sm} besleme kanalı sıcaklığını ifade etmektedir. F_{sm} şu şekilde ifade edilmektedir.

$$F_{sm} = k_{sm} (p_{cp} - p_{ca}) \quad (18)$$

Burada, k_{sm} kompresör çıkış kanalı hava akış sabitini p_{ca} ise yakıt hücresi katot basıncını ifade etmektedir. Model tasarımında kompresör ve besleme kanalı sıcaklığı birbirine eşit alınıp lineer model için değeri 333 K olarak alınmıştır. Durum değişkenleri (ω_{cp} , p_{sm}) ve kontrol işareti V_{cp} olarak tanımlanırsa yakıt hücresi için tasarlanan kompresör modelinin durum denklemleri ve çıkış denklemi

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -5,62x_1 - 0,5 \left[\left(\frac{x_2}{101325} \right)^{0,286} - 1 \right] + 3675u \\ \dot{x}_2 &= 0,0286T_{cp}x_1 - 0,0727T_{cp}x_2 + 14733T_{cp} \\ y &= 3,62 \cdot 10^{-6}x_2 - 0,7336 \end{aligned} \quad (19)$$

şeklinde elde edilir. Lineer olmayan yapıya sahip sistem denklemlerinin $x_2=2,045$ noktası etrafında Jacobi yöntemi ile lineerleştirilmesi ile lineer sistem denklemleri

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -5,62 & -8,4793 \cdot 10^{-7} \\ 0,0268T_{cp} & -0,0727T_{cp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3675 \\ 0 \end{bmatrix} u \\ y &= \begin{bmatrix} 0 & 3,62 \cdot 10^{-6} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (20)$$

şeklinde elde edilir.

4. Kontrol Stratejileri

Elde edilen lineer model kullanılarak referans model adaptif kontrol yöntemi sisteme uygulanmıştır. Adaptif kontrol yöntemi uygulanırken ikinci bölümde anlatılan kontrol algoritması uygulanmıştır. Yapılan çalışmada kontrol sinyali olarak kompresör gerilim değeri kullanılmıştır. Referans olarak ise çıkış değeri olan W_{cp} 'ye farklı değerler vererek çıkışın bu referansı takip etmesi amaçlanmıştır.

Sabit katsayılar olan γ ve δ değerleri yardımıyla ve referans sistem olarak kullanılan modelin değerleri kullanılarak kontrol edilecek sistem belli parametrelerin bilinmemesi veya değiştirilmesi durumunda da referans takibi yapacak şekilde kontrol edilmiştir. Bu çalışmada bilinmeyen parametre olarak besleme kanalı açıklığını ifade eden k_{sm} parametresi belirlenmiştir.

Çalışmanın bu noktasında normalize edilmiş adaptasyon kuralından bahsetmekte fayda olacaktır. Lyapunov tabanlı model referans adaptif kontrol yöntemi sonucunda

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \gamma \varphi e \\ \varphi &= (-u_c \quad y)^T \end{aligned} \quad (21)$$

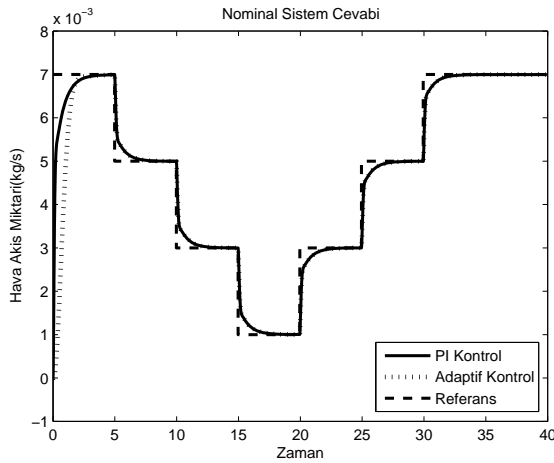
şeklinde adaptasyon kuralı elde edilmiştir. Elde edilen kontrol kuralına normalizasyon uygulanırsa (21) ifadesindeki adaptasyon kuralı

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \frac{\gamma\phi e}{\alpha + \phi^T \phi} \\ \frac{d\theta_1}{dt} &= -\frac{u_c e \gamma}{\alpha + u_c^2} \quad \alpha > 0 \\ \frac{d\theta_2}{dt} &= \frac{y e \gamma}{\alpha + y^2} \end{aligned} \quad (22)$$

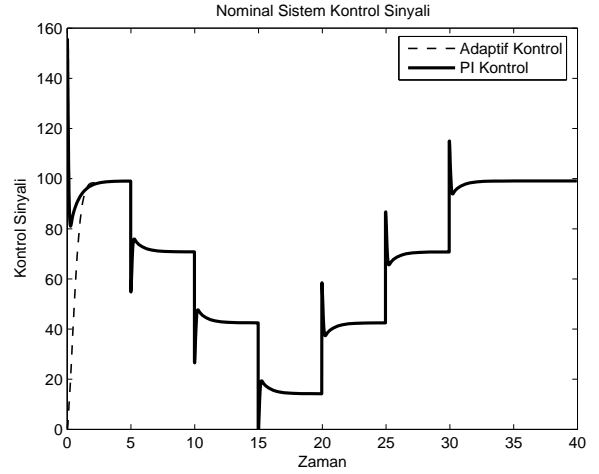
şeklinde elde edilir [4]. Benzetimin ilk kısmında sistemin verilen değerleri ile adaptif kontrolör ve PI kontrolör sisteme uygulanmış ve sonuçlar elde edilmiştir. İkinci kısımda ise k_{sm} katsayısının değeri değiştirilerek modeldeki parametre değişikliklerine karşın kullanılan kontrolörlerin performansları elde edilmiştir. Lyapunov tabanlı model referans adaptif kontrol algoritmasının sisteme uygulanması sonucunda elde edilen grafiklerin daha iyi anlaşılması için katsayıları Ziegler-Nichols yöntemiyle tasarlanan klasik PI denetleyici de aynı sisteme uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

5. Benzetim Sonuçları

Elde edilen benzetim sonuçlarında sistemin nominal değerlerinde Şekil 1'de verilen sistem çıkışı grafiğinde adaptif kontrol ve PI kontrol arasında ilk beş saniye dışında net bir fark görülmemektedir. Ancak, Şekil 2'de verildiği üzere kontrol sinyalini değerinde adaptif kontrolün PI kontrole göre daha küçük kontrol sinyali kullanarak sistemi kontrol ettiği açıkça görülmektedir.

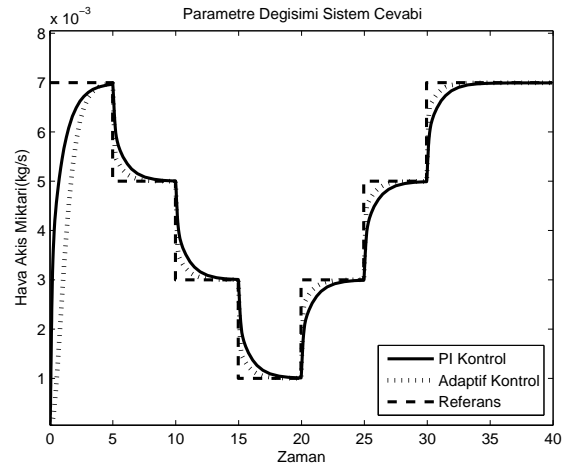


Şekil 1: Nominal Sistem Çıkışı

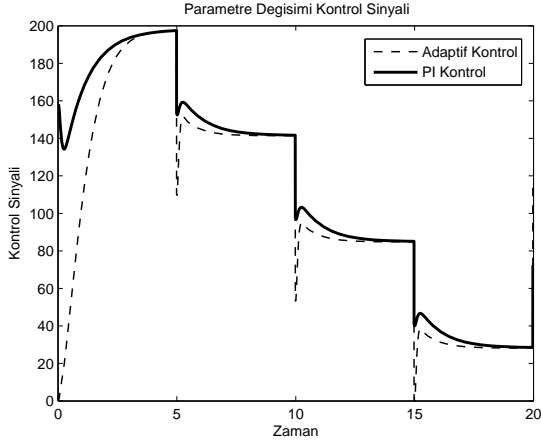


Şekil 2: Nominal Sistem için Kontrol Sinyali

Benzetim sonuçlarının ikinci bölümünde ise k_{sm} parametresinin değişimi sonucunda elde edilen sistem çıkışı ve kontrol sinyali grafikleri verilmiştir. Şekil 3'de sistemdeki bu değişime adaptif kontrolörün daha iyi cevap verdiği anlaşılmaktadır. Şekil 4'de ise uygulanan kontrol sinyalinde de adaptif kontrolün daha avantajlı bir kontrol yapısı olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 3: Parametre Değişimi Sonucunda Elde Edilen Sistem Çıkışı



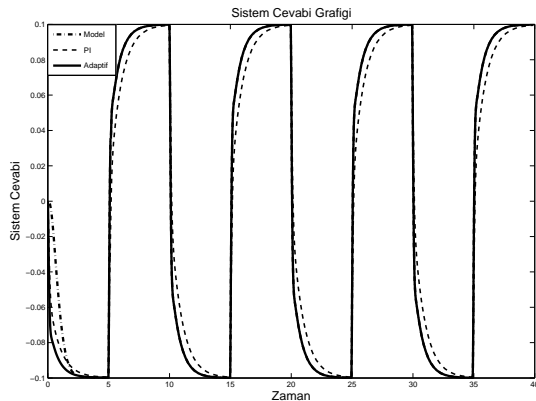
Şekil 4: Parametre Değişimi Sonucunda Uygulanan Kontrol Sinyali

Benzetim sonuçlarının son bölümünde sisteme zengin frekans içeren sürekli uyartım tarzında bir işaret olan kare dalga uygulanarak modelin ve kontrol edilen gerçek sistemin çıkışları karşılaştırılmıştır [9]. Şekil 5’de verildiği üzere adaptif kontrol yöntemi kullanılarak gerçek sistem model sistemle aynı cevabı verecek şekilde tasarlanmıştır ancak PI kontrolör belli bir hata payı ile model sistemin cevabını izleyebilmektedir. Şekil 5’de elde edilen sonuca ek olarak model sistem cevabı ile kontrol edilen sistem cevabı arasındaki hatanın enerjisi bulunabilir. Bu durumda,

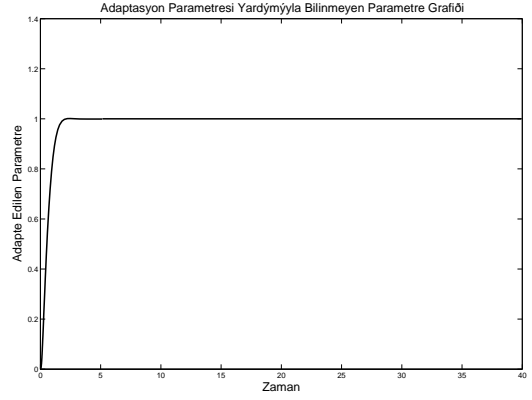
$$\|e\|_2 = \sqrt{e^T e} = 0.3820 \text{ (PI Kontrol)} \quad (23)$$

$$\|e\|_2 = \sqrt{e^T e} = 0.3288 \text{ (Adaptif Kontrol)}$$

değerleri elde edilir. Elde edilen değerler incelendiğinde adaptif kontrol sistemi uygulanarak hatanın enerjisinin azaltıldığı anlaşılmaktadır. Buna ek olarak bilinmeyen parametre olan k_{sm} değerinin Şekil 6’da verildiği üzere model sistemde verilen değere oturmaktadır.



Şekil 5: Kare Dalga Referans ile Elde Edilen Sistem Çıkışları



Şekil 6: Bilinmeyen Parametrenin Değişimi

6. Sonuçlar ve Değerlendirme

Bu çalışmada PEM tipi yakıt hücresi sisteminde hava akışını sağlayan kompresör modelinin kontrolü ele alınmıştır. Yakıt hücresi sisteminin parametre değişimlerine açık olan dinamik yapısı sebebiyle adaptif kontrol yöntemi uygulanmıştır ve elde edilen sonuçlar ışığında bu yöntemin kompresör sistemi için uygun olduğu görülmüştür. İlerleyen çalışmalarda kompresör modelinin lineer olmayan adaptif kontrol metodu ile kontrol edilmesi amaçlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmanın belli kısımları TÜBİTAK tarafından 107M355 nolu proje kapsamında desteklenmektedir.

7. Kaynaklar

- [1] M. Sunwoo, Ka C. Cheok, “Model Reference Adaptive Control for Vehicle Active Suspension Systems”, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 38, No.3, 1991
- [2] Feng G., Lozano R., *Adaptive Control Systems*, Reed Educational and Professional Publishing Ltd., 1999.
- [3] Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P., *Nonlinear and Adaptive Control Design*, John Wiley & Sons, 1995.
- [4] Åström K. J., Wittenmark B., *Adaptive Control*, Reading, Mass. Addison-Wesley, 1995
- [5] Pukrushpan, P., Huei, P., Anna, G.S., “Control-Oriented Modeling and Analysis for Automotive Fuel Cell Systems”, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 14-25, 2004
- [6] Pukrushpan, J.T., Peng, H., Stéfabopoulos, A.G., “Control-oriented modeling and analysis for automotive fuel cell systems”, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 14-25, 2004
- [7] Guzzella, L., Control oriented modeling of fuel-cell based vehicles, NSF Workshop Integr. Modeling Contr. Autom. Syst., 1999, Santa Barbara, CA
- [8] Moral, P., Kalmonovsky, I., “Turbocharger Modeling for Automotive Control Applications”, SAE paper, 1999
- [9] Ioannou K. J., Sun J., *Robust Adaptive Control*, New Jersey, Printice Hall, 1996.