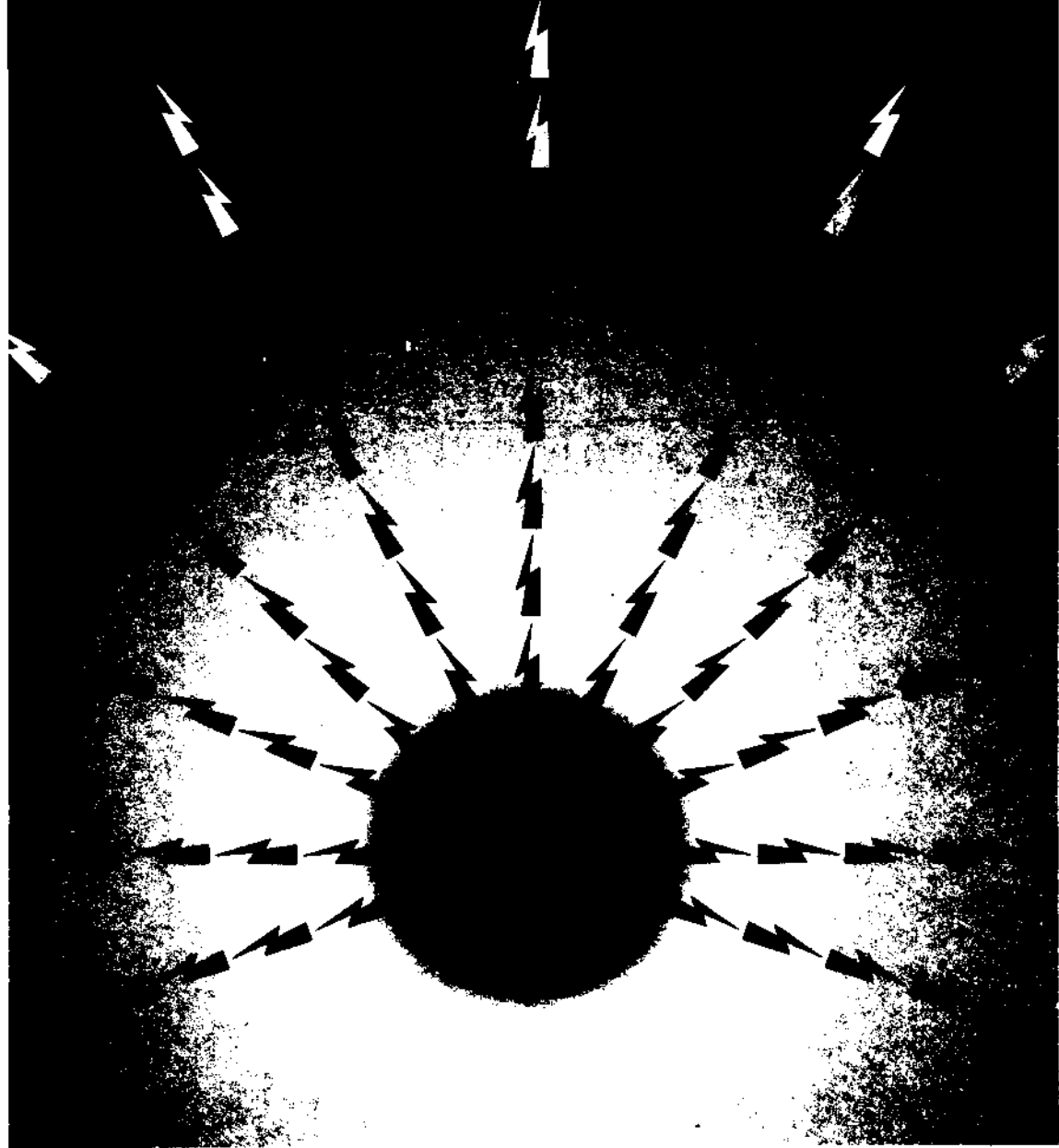


TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

ELEKTRİK - ELEKTRONİK BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ 7. ULUSAL KONGRESİ



TMMOB
ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI
ANKARA ŞUBESİ



ODTÜ
ELEKTRİK -ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



TÜBİTAK

ÖNSÖZ

TBMMO Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresini ve Sergisini Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirmiş olmaktan onur ve sevinç duymaktayız. Üniversite olarak kongreye ikinci kez evsahipliği yapmamız bizi fazlasıyla mutlu etmiştir, ama mutluluğumuz asıl geçen süre içinde Odamızın, meslek yaşamımızın ve Üniversitemizin ne kadar gelişmiş olduğunu gözlemekten kaynaklanmaktadır.

Gerçekten de ilgi alanlarımızın çeşitlenmesi, bu alanlarda belli bir beceriye ulaşılmış olması, eskiden güçlü olduğumuz dallarda da gücümüzün sürmesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendislerimizin ülke genelinde giderek daha fazla söz sahibi olmaları olgusunu yaratmaktadır. Bireysel başarılarımızın kurumlarımızı da ülke ekonomisi ve gelişmesi bakımından güçlendirmekte olduğu açıktır. Nitekim bu sektörlerde faaliyet gösteren kuruluş sayısı hızla artmaktadır. Bu sayısal gelişmenin nitelik bakımından da aynı hızla sürdüğünü görmek sevindiricidir. Kongremiz ve sergimiz bunun en somut kanıtını oluşturmaktadır.

2000'li yılların Türkiye'sinin ihtiyaçlarını yakahyabilmek için daha çok şeyler yapılması gerekmektedir. Endüstri-Eğitim Kurumları ve Meslek Odaları arasındaki iletişim ve karşılıklı etkileşimi güçlendirmek gerekmektedir. Bu geçmişe oranla daha sevindirici bir düzeyde sürüyor da olsa henüz gelişmiş ülkelerdeki başarılı örneklerin uzağındadır. Önümüzdeki yıllarda bu konuda daha fazla çabaya ihtiyaç vardır.

Tüm katılımcılara Kongre ve Sergimize vermiş oldukları güç için teşekkür ediyorum. Sizleri Üniversitemizde görmenin kıvancıyla selamlıyor saygılarımı sunuyorum.

Prof. Dr. Fatik Canatan
Yürütme Kurulu Başkanı

ELEKTRİK-ELEKTRONİK-BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
7. ULUSAL KONGRESİ

YÜRÜTME KURULU

Fatih CANATAN (Başkan, ODTÜ)

M. Mete BULUT (ODTÜ)
Cengiz BEŞİKÇİ (ODTÜ)
Gönül SAYAN (ODTÜ)
Cemil ARIKAN (TÜBİTAK)
M. Hacim KAMOY (ASELSAN)
Hüseyin ARABUL (BARMEK)
Aydın GÜRPINAR (ENERSİS)

M. Asım RASAN (EMO)
Cengiz GÖLTAŞ (EMO)
H. Ali YİĞİT (EMO)
Kubilay ÖZBEK (EMO)
M. Sıtkı Çiğdem (EMO)
Funda BAŞARAN (EMO)
Mustafa ÖZTÜRK (EMO)

EDİTÖRLER

Fatih CANATAN

Mehmet Mete BULUT

MODEL BAZLI HATA TESPİT ve TEŞHİSİ METODUNUN ELEKTRİK MOTORLARINDA DURUM İZLENMESİNE UYGULANMASI

Evren ALBAŞ
Tuğrul DURAKBAŞA
Ahmet DUYAR

ARÇELİK A.Ş. AR-GE MERKEZİ
81719 TUZLA İSTANBUL

ABSTRACT

In this paper a new approach for condition monitoring of the electric motors based on model based fault detection methodology will be presented. The demonstration of the concept is performed on unlvrsal motors under laboratory conditions. The technique is based upon the modelling of the electrical motor by measuring and processing the voltage fed to the system as input signal, and the resulting current together with the rotational speed of the motor obtained form a built in tacho-generator as output signals. The model of the motor obtained at the initial condition of the operation is considered to be representing the "normal" characteristics of the system. Then, measured signals recorded during the later stages of operation is compared with the signals obtained from the model. The comparison is performed based on the residual quantities vvhich gives the difference between the actual measured signals and modelled signals. If the residuals exceeds a predetermined threshold value, "fault" alarm is given. Localization of the fault is achieved according to the changes in the physical parameters of the system vvhich are estimated from the dynamic model.

1. GİRİŞ

Endüstriyel ortamlardaki süreç ve makinaların verimlilik ve güvenilirliğinin artırılmasına yönelik çalışmalar artan rekabet koşulları ile beraber gün geçtikçe daha da önemli bir ihtiyaç haline gelmektedir. Söz konusu ihtiyaç üretim esnasında kalite kontrol, çalışma şartlarında ise hata tanılama ve ön kestirimci bakım amaçları için durum izleme eylemleri ile karşılanabilir. Bu amaçla kullanılan teknikler hata *tespit ve tanılama* yöntem/eri olarak anılırlar.

Endüstrinin ihtiyaçları doğrultusunda kendini yenileyen hata tespit ve tanılama yöntemleri içinde model bazlı hata tespit ve teşhisi dikkat çekici bir gelişme göstermiştir [1,2]. Bu yöntemin temeli, sistemin normal çalışma koşullarındaki özelliklerini yansıtır dinamik modelden ölçülen girdilere karşı alınan çıktılar ile ölçülen çıktılar arasındaki farklılaşmanın izlenmesine dayanır. Eldeki dinamik modelin sistemin tüm özelliklerini yansıttığı kabul edildiğinde, hatasız çalışma şartlarında ölçülen girdiler için modelden alınan ve ölçülen çıktılar, gürültü ve benzeri bozucu etkiler göz önüne alınarak belirlenmiş eşik değerlerden oluşan bir aralıkta, birbirleri ile uyum içinde olmalıdırlar. Bu durumda, eşik değerlerin aşılması sistemde bir hatanın varlığını belirtecektir.

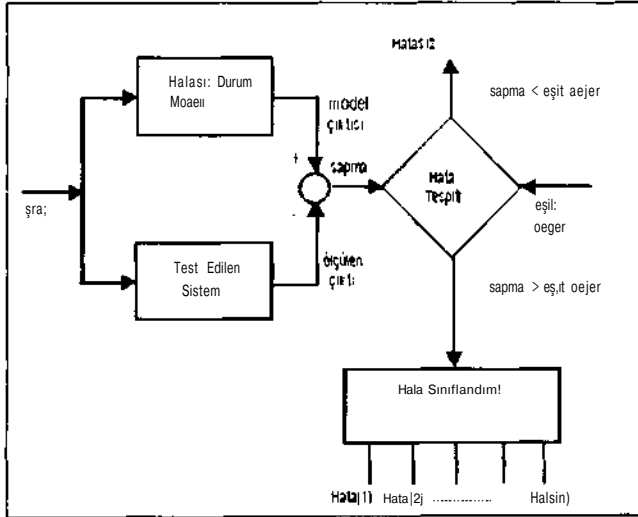
Model çıktıları ile ölçülen çıktılar arasındaki karşılaştırma "artanlar" (*residuals*) üzerinden yapılır. Artanlar, model çıktısı ile ölçülen çıktı arasındaki farkı belirtir büyüklüklerdir. Artanların belirli bir eşik değerinin üzerine çıkması ile hata alarmı verilir. Artanlar üzerinde yapılacak matematiksel dönüştürmeler ile hataların sınıflandırılması da gerçekleştirilir. Şekil 1'de bir model bazlı hata tespiti işleminin şematik görüntüsü verilmiştir.

Daha önce gerçekleştirilen model bazlı hata tespit ve teşhisi uygulamalarının iki önemli eksikliği vardır, ilk eksiklik sistemin özelliklerini gerçek zamanda doğru bir şekilde yansıtan dinamik modelin elde edilmesinin zor olmasıdır. Eğer sistemin modeli yeteri kadar doğru bir biçimde sistemi yansıtmıyor ise artanlar modelleme hatasının etkilerini de içerirler. Modelleme hatasının etkilerini sistemde oluşan hata etkilerinden ayırt etmek güç olduğundan böyle durumlarda yanlış hata alarmı verilmesi ile sonuçlanan durumlar olabilir.

Bir diğer eksiklik ise artanların kullanılması ile hata tespiti için bir veri tabanı yaratılmasıdır. Böyle bir veri tabanının oluşturulması için gerekecek hatalar ve etkileri hakkındaki ön bilgiler çoğu zaman yok ve kestirmesi zor değişkenler olarak ortaya çıkarlar. Bunun için uzun süreli ön çalışmalar ile sistemin izlenmesi ve hata sınıflandırması için gereken istatistik bilgilerin oluşturulması gerekir.

Çalışma kapsamında kullanılan deneysel modelleme tekniğinin model bazlı hata tespit ve teşhisi uygulamalarının ilk eksikliğini ortadan kaldırdığı helikopter motorları ve uzay mekiği ana motoru üzerinde gerçekleştirilen çalışmalar ile kanıtlanmıştır [3]. Veri tabanı oluşturulmasına yönelik güçlük ise hata [4]

değişkenlerinin kestirilmesi ile ortadan kaldırılabilir. Eğer sistemin hatalı durumu, çalışma koşullarını belirleyen dinamik büyüklükler cinsinden modellenir ise farklı hata türleri için dinamik büyüklüklerin farklı davranması ile hataların sınıflandırmasına gidilebilir.



Şekil 1: Model Bazlı Hata Tespit ve Teşhisi

Model bazlı hata tespit ve teşhisi yönteminin uygulamaya yönelik yapısının anlaşılması için sunulan çalışmada elektrik motorları üzerinde durum izleme problemi ele alınmıştır. Öncelikle sistem üzerinde ön analizler yapılarak deney tasarımı ve hata değişkenlerinin tespiti gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneylerden elde edilen veriler üzerinde deneysel modelleme tekniği kullanılarak sistemin ayrık zamanda yükten etkilenmeyen kısmının dinamik modeli kurulmuştur.

Deneysel modeli kurulacak sistemin normal çalışma koşullarının ayrık zamanda doğrusal

$$-y(n+1) = A \cdot y(n) + Bu(n) \quad (1)$$

$$y(n) = Cx(n) \quad (2)$$

denklemleri ile tanımlanabileceği kabul edilsin. Bu denklemlerde x, u ve y sırasıyla nxl durum, p*1 girdi ve q>1 çıktı vektörlerine karşılık gelir. A, B ve C sistemin hatasız çalışma koşulları için bilinen matrisleridir. Süreç ve ölçme kaynaklı gürültüler, modelleme hataları matematiksel basitliğin sağlanması için yukarıdaki denklemlere eklenmemiştir.

Sistemin a-kanonik düzende olduğu kabul edilirse;

$$C = [0; H^{-1}] \quad (3)$$

$$A = A_0 + KHC \quad (4)$$

$$A'' = 0 \quad (5)$$

$$(HC)A' = 0 \quad (6)$$

$$(HC), A', A', = 0, A_0 > 0 \text{ ve } k < ju, - //, \quad (7)$$

denklemleri sağlanmalıdır [5]. Bu denklemlerde K deadbeat kazancına, A₀ 0 ve 1lerden oluşan sol-alt üçgen yapıda bir matrise karşılık gelir. A₀ , izlenebilirlik indexleri |//_i ile belirlenir.

Hata olması durumunda sistemin A, B ve C matrislerinin değiştiği kabul edilmektedir. Hatalı durum için sistemin durum uzayı modeli;

$$x(n+1) = A_r \cdot V(n) + Bu(n) \quad (8)$$

$$y_r(n) = C_r \cdot x(n) \quad (9)$$

şeklini alır.

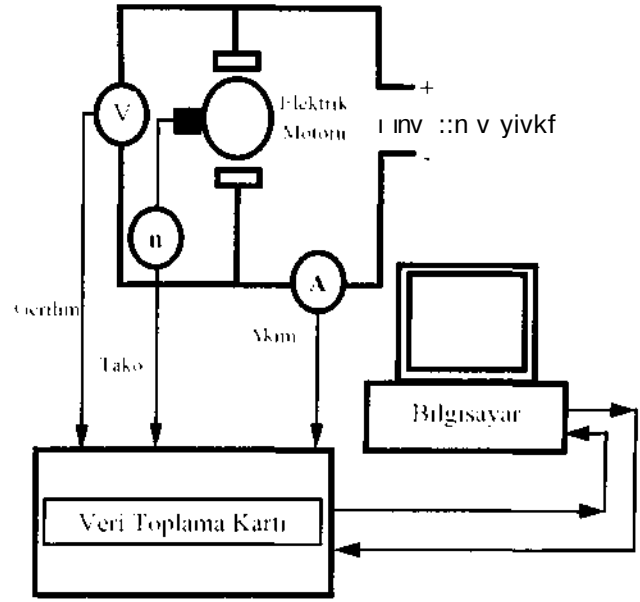
Hata tespiti için kullanılan artanların hesabı hatasız durumdaki çıktı ile hatalı durumdaki çıktının farkı alınarak;

$$r \sim v - v,$$

(10)

eşitliği ile hesaplanır.

Sistemin A, B ve C matrisleri çok-değişkenli sistem tanımlama tekniği kullanılarak deneylerden elde edilen girdi ve çıktı verileri arasındaki ilişkiyi verecek bir modelleme yapılarak elde edilir. Sistemin hatasız durumuna ait değişkenlerinin tespitinde bu matrisler baz alınır. Daha sonra incelemeye alınan sistemin bu baz modelden farklı bir davranış göstermesi durumunda hata alarmı verilir. Hatanın sınıflandırılması için sistemi tarif eden kavramsal modelin fiziksel sabitlerindeki değişimler kullanılır. Bunun için yine deneysel veriler kullanılarak sistemin fiziksel sabitleri analitik modeli sağlayacak yaklaşımlar kullanılarak belirlenir. Analitik modelin ayrık-zaman eşdeğeri çıkartılarak modelin fiziksel sabitleri en küçük kareler yöntemi kullanılarak hesaplanır. Hatasız durum için hesaplanmış fiziksel sabitlerin hatalı durum için hesaplanan değerler ile karşılaştırılması sonucunda hata sınıfı tayin edilir.



Şekil 2: Deney Düzenegi

Tablo 1: Bozuk Rulman için Gözlenen Farklılaşmalar

		Normal Motor	Bozuk Rulmanlı Motor	% değişim
Artanlar	r1 (akım)	0.0473	0.0685	45
	r2 (hız)	0.07	0.114	62
Parametreler	P1	8.726	8.848	1.4
	P2	5.035	5.147	2.2
	P3	4.605	4.655	1.1
	P4	4.552	7.399	38
	P5	7.779	7.589	2.5

Tablo 1 incelendiğinde bozuk rulmanlı motorun normal durumdan farklılaştığı artanlardaki artış ile gözlemlenebilmektedir. Fiziksel parametrelerde de hatayı belirtir yöndeki farklılaşma beş numaralı parametredeki değişim ile kendini ortaya çıkartmaktadır

2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Geliştirilen kavramın sınanması amacıyla laboratuvar koşullarında deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda normal bir motor alınarak teste sokulmuş ve dinamik modeli elde edilmiştir. Daha sonra bu motor üzerinde hata yaratılarak yeni elde edilen çalışma koşulunun ilk çalışma koşuluna göre gösterdiği farklılıklar araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan deney düzenegi Şekil 2'den görülebilir.

Örnek bir hata yaratma durumu olarak bozuk rulman deneyi verilecektir. Bu deneyde normal motorun modeli elde edildikten sonra motor mili üzerindeki sağlam rulman çıkartılarak bozuk bir rulman takılmıştır. Deney sonuçları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1'deki artanlar model çıktısı ile ölçülen çıktılar arasındaki farkların kareleri toplamının model çıktısının kareleri toplamına bölümünün kare kökünün alınması ile hesaplanmaktadır. Yine aynı tabloda yer alan parametreler ise sistemin A, B, C matrislerinde yer alan fiziksel sabitlere karşılık düşmektedir.

3. SONUÇLAR

Çalışma çerçevesinde elde edilen sonuçlar başlangıçtaki durumu modellenmiş bir sistemin karakteristiğinde hataya bağlı olarak meydana gelebilecek değişmelerin model çıktısı ile gerçek çıktı arasındaki farklılaşma ile izlenebileceğini göstermektedir. Sürekli çalışan sistemler üzerine durum izleme amacıyla uygulanabilecek bu yaklaşımın elektrik motorları üzerine uygulanabilirliği tek bir hata çeşiti için gösterilmiştir.

Kaynakça:

1. Willsky, A.S., "A survey of design methods for failure detection in dynamic systems", *Automatica*, Vol. 12, pp. 601-611, 1976.
2. Isermann, R., "Process fault detection based on modeling and estimation methods", *Automatica*, Vol. 20, pp. 387-404, 1984.
3. Duyar, A., Eldem, V., Merrill, W., Guo, T.H., "State space representation of the open loop dynamics of the space shuttle main engine", *ASME journal of dynamic systems, measurement and control*, Vol. 113, pp. 684-690, 1991.
4. Duyar, A., Eldem, V., Merrill, W., Guo, T.H., "Fault detection and diagnosis in propulsion systems: a fault parameter estimation approach", *Journal of Guidance and Control and Dynamics*, Vol. 17, No. 1, January-February, 1994.
5. Eldem, V., Duyar, A., "Parametrization of multivariable systems using output injections; Alpha Canonical Form", *Automatica*, Vol. 29, No. 4, pp. 1127-1131, 1993.

Bir Ters Sarkaç Sisteminin Kurulması ve Sayısal Denetimi

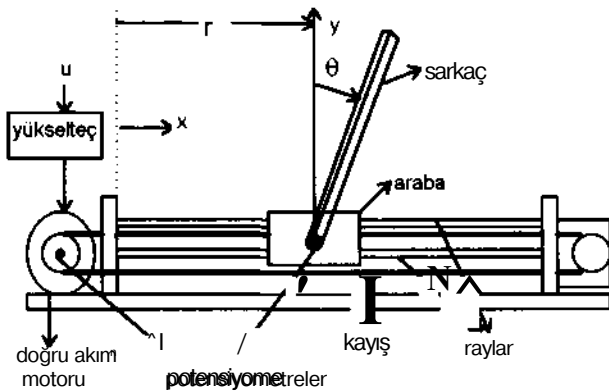
Orhan AKSOY, Dr.Erol KOCAOĞLAN, A.Umut GENÇ
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü
06531-ANKARA

ABSTRACT

In this paper, an inverted pendulum set-up is constructed, modelled and controlled by using a computer. The constructed pendulum consists of a cart moving along a straight line on two rails driven by a permanent magnet d.c. motor and a pendulum hinged to this card at one end. After construction, the system dynamic equations are derived and the unknown parameters are either measured or identified by making certain experiments. Then, the system is linearized around its unstable equilibrium point. Next, the discrete model of the linearized system is obtained, and a reduced-order observer software is developed to obtain two states (cart velocity and angular velocity of the pendulum) of the system from the measured two states, cart position and the angle of the pendulum, and the input to the system. The system is controlled in its unstable equilibrium point via state-feedback law. In the last part, the controller is further enhanced and a different control strategy called swing-up is developed to bring the pendulum from its stable equilibrium position (hanging-down) to the vicinity of its unstable equilibrium position where, then, the actual control law (state-feedback) is applied to keep the pendulum in its upright position.

1. Giriş

Ters sarkaç sistemlerinin denetim sahasında ayrı bir yeri vardır. Bugüne kadar, pek çok farklı denetleme yöntemi başarıyla ters sarkaç sistemlerine uygulanmıştır[1],[2],[4],



ŞEKİL 1: "Sistemin Mekanik Aksamı"

Kurulmuş olan sarkaç sistemi (şekil. 1) bir sabit mıknatıslı doğru akım motorunun doğru bir hatta hareket ettirdiği bir araba ve bir ucundan bu arabaya bağlı bir sarkaçtan oluşmaktadır. Sarkaç, arabaya bağlı olan eklemleri etrafında serbestçe dönebilmektedir. Arabanın yatay eksenindeki (x eksen) konumu ve sarkacın dikey eksenle (y eksen) yaptığı açı hareketli eklemlere yerleştirilmiş potansiyometrelerle ölçülmektedir. Sistemin diğer iki durum değişkeni gözleyid kullanılarak elde edilmiştir. Bu çalışmada denetim stratejisi olarak durum geribeslemesi kullanılmıştır. Bu makalenin son bölümünde, sarkacı kararlı olduğu aşağı sallanmış pozisyonundan kararı olmadığı yukarıdaki denge noktasının yakınına çıkarabilmek için yukarı-sallama denetimi denilen bir denetim yöntemi türetilmiştir.

2. Sistemin normal ve ayırık zamanda modellenmesi

İlk olarak sistemin (şekil.2) matematiksel modeli elde edilmiştir. Sistemin dinamik denklemleri Lagrange formülasyonu[3] kullanılarak aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

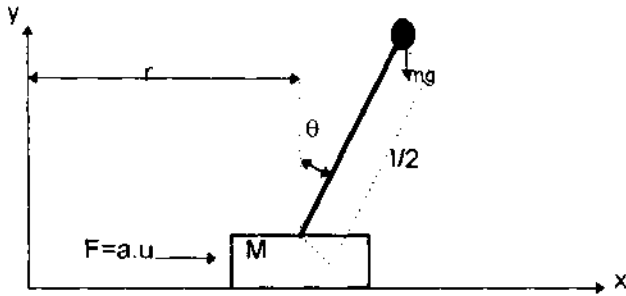
$$M\ddot{r} + m\ddot{r} + m\ddot{\theta} \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + fr = a \cdot u \quad (D)$$

$$\frac{2}{3} ml^2 \ddot{\theta} + ml\ddot{r} \cos\theta - mgl \sin\theta + C\dot{\theta} = 0 \quad (2)$$

burada,

u motora uygulanan gerilimi (V)
a motorun kazanç katsayısını (N/V),
m sarkacın kütlesini (Kg),
M arabanın kütlesini (Kg),
r arabanın konumunu (m),
l sarkacın uzunluğunu (m),
 θ sarkacın dikeyle yaptığı açığı (rad),
g yerçekimi ivmesini (m/s^2),
C sarkaçla araba arasındaki sürtünme katsayısını ($Kg.m^2/s$),
f arabayla ray arasındaki sürtünme katsayısını (Kg/s) temsil etmektedir.

Doğrusal olmayan (1) ve (2) nolu diferansiyel denklemler sistemin dinamiğini tanımlarlar. Bu denklemlerde 'a', T ve C dışındaki bütün parametreler bilinmektedir. Sistemin tam tanımlanabilmesi için bilinmeyen parametrelerin bulunması gerekmektedir.



ŞEKİL :2 "Sistemin Sembolik Modeli"

Bilinmeyen parametrelerin bulunması için bir dizi deney yapılmıştır. Bu deneyler ölçüm hatalarının düşürülmesi için beş kez tekrarlanmıştır. Deney sonuçları ve teorik değerler karşılaştırılmış ve tanımlanan hata fonksiyonunun minimum olduğu noktada bilinmeyen parametreler elde edilmiştir. Sistemin bütün parametrelerinin sayısal değerleri tabloda verilmiştir.

Sistem Parametreleri

Arabanın kütlesi	M	0.595	Kg
Arabayla raylar arasındaki sürtünme katsayısı	f	3.3	Kg/s
Kazanç katsayısı	a	0.54	N/V
Sarkacın kütlesi	m	0.35	Kg
Sarkacın uzunluğu	l	0.375	m
Sarkacın eylemsizlik momenti	J	0.016	Kgm'
Sarkaçla araba arasındaki sürtünme katsayısı	C	0.004	Kgm'Vs

Sistemin dinamik denklemlerini (1)-(2) yukarıdaki sayısal değerlere göre tekrar yazarsak,

$$0.945\ddot{x} + 0.131\ddot{\theta} \cos\theta - 0.131\dot{\theta}^2 \sin\theta + 3.3\dot{x} = 0.54u$$

$$0.016\ddot{\theta} + 0.131f\dot{\theta} \cos\theta - 1.288\dot{\theta} \sin\theta + 0.004\dot{\theta} = 0$$

denklemlerini elde ederiz. Sistemin durum değişkenlerini $x_1=r$, $x_2=\dot{r}$, $x_3=\theta$, $x_4=\dot{\theta}$ olarak tanımlarsak, sistemin durum-uzay denklemlerini aşağıdaki gibi bulunur.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_3$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{I + 0.388\sin^2\theta} \left(-3.732\sin\theta\cos\theta - 4.82\dot{\theta} + 0.0126\dot{\theta}\cos\theta + 0.19\dot{\theta}^2\sin\theta + 0.788u \right)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{0.016} \left(26.92\sin\theta + 9.562r\cos\theta - 0.084\dot{\theta} - u \right) \quad (3)$$

Denetleç tasarımı sistemin orijin etrafında doğrusallaştırılmış modeli kullanılmıştır. Sistemin doğrusallaştırılmış modeli

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (4)$$

biçiminde tanımlanırsa buradaki matrisler

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -3.732 & -4.82 & 0.012 \\ 0 & 26.92 & 9.562 & -0.084 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0.788 \\ -1.56 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

ile verilecektir.

Ters sarkaç sisteminin denetimi bilgisayarla yapılmıştır. Bu yüzden sistemin ayrık-zamanda modeli de elde edilmiştir. Doğrusallaştırılmış sistemin ayrık zamanda modeli aşağıdaki gibi yazılabilir,

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \Phi x(k) + \Gamma u(k) \\ y(k) &= Hx(k) \end{aligned} \quad (5)$$

Örnekleme zaman aralığı 10 milisaniye(ms) olarak alınarak Φ , Γ ve H aşağıdaki gibi elde edilmiştir:

$$\Phi = \begin{bmatrix} 1 & -0.0005 & 0.0098 & 0 \\ 0 & 1.0013 & 0.0005 & 0.01 \\ 0 & -0.1053 & 0.9528 & -0.0005 \\ 0 & 0.2666 & 0.0944 & 1.0005 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.0001 \\ 0.0077 \\ -0.0154 \end{bmatrix}$$

$$H = \begin{bmatrix} 10 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Sistemin ayrık-zamanda bulunan modelinin kutuplarının değerleri şöyledir:

$$[1 \quad 1.0393 \quad 0.9242 \quad 0.9911]$$

Görüldüğü üzere sistem, doğası gereği, kararsızdır.

Modellenen sistemin denetlenebilirliği ve gözlemlenebilirliği analiz edilince, sistemin hem sürekli hem de ayrık zamanda denetlenebilir ve gözlemlenebilir olduğu ortaya çıkmıştır. Bu da sistemin durum geribeslemesi yolu ile denetlenebileceğini göstermektedir.

3. Denetim sisteminin tasarımı ve benzetimi

Yukarıda tam olarak modellenen ters sarkaç

sistemi durum geribeslemesi ile denetlenmiştir. Sistemin iki durum değişkeni, r ve G, doğrudan ölçülmüş ve diğer iki durum değişkeni, r ve G, bir indirgenmiş-dereceli-gözlemci (ikinci dereceden) kullanılarak elde edilmiştir. Kullanılan denetim yöntemi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$u(k) = -Kx(k) \quad (6)$$

burada K kazanç matrisidir. Kullanılan motorun kazanç limiti göz önünde bulundurularak

$$K = [-3.25 \quad -48.42 \quad -16.62 \quad -13.46]$$

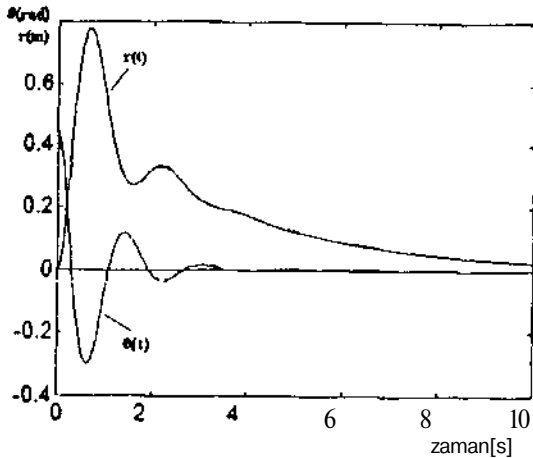
olarak alınmış ve böylece kutuplar

$$[0.9233 \quad 0.9621 \quad 0.9932 + j0.0014 \quad 0.9932 - j0.0014]$$

noktalarına yerleştirilmiştir

Bir sonraki adım olarak indirgenmiş-dereceli-gözlemci ayırık zamanda tasarlanmıştır. Gözlemcinin her iki kutbuda 0.85 noktasına yerleştirilmiştir.

Tasarlanan sistemin benzetişim sonucu şekil.3'de verilmiştir.

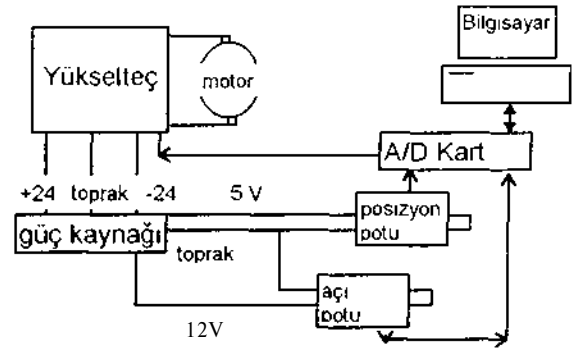


ŞEKİL 3: "Sistemin benzetişimi ($G_0=25^\circ$, $r_0=0$ ve $\theta_0=0$)"

Benzetişim sonuçlarına göre, gürültüsüz bir ortamda, sistem ilk açısı 25° dereceye kadar olan sarkacı dik durumda dengede tutabilmektedir. Sistemde gürültü var ise, anılan ilk açı 20° 'ye düşmektedir. Eğer sonsuz uzunlukta raylara sahip olsaydık, sistemimizin ilk açısı 31° 'ye kadar artırılabilir.

4. Sistemin kurulması

Sistemin kurulmasında (bakınız şekil.5) bir doğru akım motoru, bu motoru süren bir devre, bir bilgisayar .bilgisayarla geri kalan sistem arasında bağlantıyı kuran A/D kart (PCL-711B) kullanılmıştır. A/D kartın örnekleme frekansı 100 Hz olarak ayarlanmıştır.



ŞEKİL 4: "Sistemin Donanımı"

4.1 Açık ölçümündeki gürültünün düşürülmesi

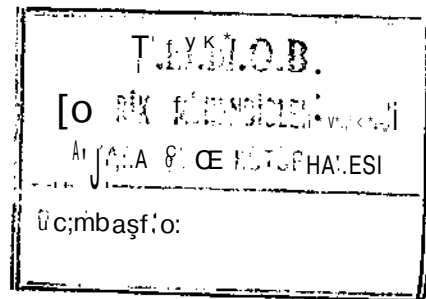
Sarkacın açısı bir potansiyometre üzerinden okunmaktadır ve küçük açı değişimleri küçük voltaj değişikliklerine neden olmaktadır. Bu ise açı ölçümündeki gürültü seviyesini epeyce artırmaktadır. Bu sorunu aşmak için, ayırık zamanda ikinci dereceden bir Chebysev filtresi tasarlanmıştır. Pek çok benzeşimden sonra filtrenin kesme frekansı 190 rad/s olarak bulunmuştur. Filtrenin ayırık zamandaki modeli aşağıdaki gibidir:

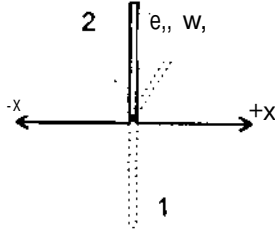
$$G(z) = \frac{0.2172z^2 + 0.253z + 0.2172}{z^2 - 0.5634z + 0.2509} \quad (7)$$

Gürültü seviyesi daha yüksek bir dereceli bir filtre kullanılarak daha da aşağıya çekilebilirdi, ancak filtre derecesindeki her artış sistemin hızını yavaşlatacağından, filtre ikinci dereceden tasarlanmıştır.

5. Yukarı-sallama denetimi

Bu çalışmanın son aşamasında sarkaç kararlı olduğu konumdan (1) kararsız olduğu konuma (2) yukarı-sallama denetimi diye adlandırdığımız bir yöntemle getirilerek, bu noktada yukarıda anılan durum geribeslemesi yöntemi kullanılmıştır (bakınız şekil.5).





ŞEKİL :5 "Sistemin Denge Konumlan"

Yukarı sallama yönteminde esas yapılan sarkacın enerjisinin artırılarak, onun konum 1'den konum 2'ye getirilmesidir[5]. Başlangıçta konum 1'de olan sarkaca -x yönünde bir itme verilmiştir. Sarkaç tekrar konum 1'e dönünceye kadar yeni bir itme uygulanmamıştır. Sarkaç tam konum 1'den geçerken bu sefer +x yönünde bir itme uygulanmıştır. Bu işlem toplam beş kere yapılmıştır. Beşinci itmeden sonra, sarkacın ulaştığı en yüksek açı ve konum 1'den geçerken sahip olduğu açısal hız göz önüne alınarak sarkacın konum 2'ye ulaşması için gerekli olan altıncı (son) itmenin süresi belirlenmiş ve bu itme sarkaca uygulanmıştır.

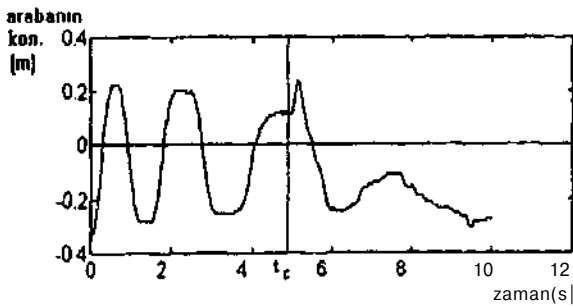
Son itmenin süresinin belirlenebilmesi için pek çok deney yapılmış ve eldeki parametrelere (en yüksek açı ve konum 1'deki hız) bağlı olan uzayımız küçük bölgelere bölünmüştür. Bu yaklaşım parametre uzayının bulanık mantıkla modellenmesi olarak da görülebilir.

Yapılan deneyler bu yöntemin sarkacı denetlenebilir duruma getirmesi için, yaklaşım açısının (θ_y) ve yaklaşım hızının (w_y) aşağıdaki bölgede olması gerektiğini göstermiştir:

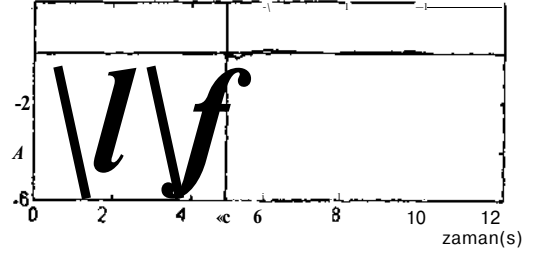
$$\theta_y < 15^\circ$$

$$w_y < 1 \text{ rad/s}$$

Durum geribeslemesi denetim algoritması sarkacın bu bölgeye ulaşmasını beklemekte ve sarkaç bu bölgeye girince çalışmaya başlamaktadır.



ŞEKİL :6.a "Arabanın konumu"



ŞEKİL :6.b "Sarkacın açısı"

Yukarı-sallama denetiminin bir deneyden alınmış verileri şekil.6'da gösterilmiştir. Şekilde t_c anında denetim algoritması (durum geribeslemesi) harekete geçmektedir.

6. Sonuç

Yapılan deneylerde sarkaç karartı olmadığı yukarı denge noktasında (konum 2) başarıyla tutulmuştur. Yukarı-sallama denetiminde ise %80'e varan bir başarı elde edilmiştir. Sistemin denetleyebildiği en yüksek yaklaşma açısı 17.2° 'dir. Sistemin başarısını artırmak için halen yapılmakta olan iyileştirmeler ise şöyledir:

- potansiyometrelerin optik enkoderlerle değiştirilmesi ve böylece gürültü seviyesinin en aza indirilmesi ve hassasiyetin artırılması.
- sistemdeki doğru akım motorunun kazancı daha yüksek bir motorla değiştirilmesi ve böylece sistemin kutuplarının daha kararlı noktalara yerleştirilmesi.

Kaynakça

- 1-Chin, B., Figueroa, F. , Inverted pendulum apparatus to aid teaching of controls and automation, ASEE annual conference proceedings, pp.658-666, 1993.
- 2-Furuta, K., Ochiai, T., Ono, N., Attitude control of a triple inverted pendulum, Int. J. Control, Vol.39, No.6, pp.1351-1365, 1984.
- 3-Koenigsberg, W., D., Frederick, D., K., Joint Automatic Control Conference, p.674,1970.
- 4-McKerrow, Phillip John, Introduction to robotics, Sydney, Addison-Wesley Publishing Co., 1991.
- 5-Strugeon, W., R., Loscutoff, W., V., Joint Automatic Control Conference, p.857, 1972.

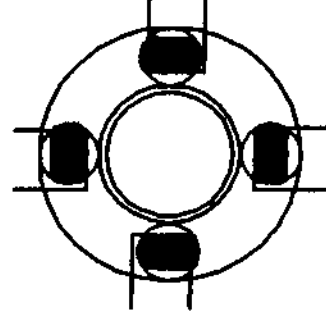
MAGNETİK MİL YATAK SİSTEMLERİNDE ASKIDA TUTMA KONTROLÜ

Doç. Dr. Fuat GÜRLEYEN
I.T.Ü. Elektrik Elektronik Fakültesi,
80626, Ayazağa, İSTANBUL
e-maikGURLEYEN@elk.itu. edu.tr.

Elk. Yük. Müh. Kemal ŞAHİN
I.T.Ü. Elektrik Elektronik Fakültesi,
80626, Ayazağa, İSTANBUL

Elk. Yük. Müh. Ali DORAN
Antakya TürkTelekom Başmüdürlüğü, HATAY

Abstract- Scientists who have studied on transportation vehicle systems are concentrated on electromagnetic ones called as Magnetic Levitation Vehicles. With respect to others, these offer a number of advantages like requiring less maintenance, contactless and frictionless movement and transportation for Repulsive and Attractive Systems. The running essence of Maglev Vehicle is based on holding up the bogie along the rail by controlling electromagnetic forces. Magnetic Levitations have also been applied to rotating and non-rotating objects which are called Active Magnetic Bearing Systems.



Şekil 1. En basit magnetik mil-yatak sisteminin prensip şeması

I. Giriş

Endüstride kullanılan mil-yatak sistemine dayalı makinaların performanslarının iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, magnetik esaslı mil-yatak sistemlerinin geliştirilmesi yönünde ağırlık kazanmıştır. Mekanik mil-yataklardaki bilyaların yerini, magnetik mil-yataklarda elektromagnetler almaktadır. Klasik rulman yataklı sistemlere göre magnetik yataklı sistemler temassız bir yataklama sağladığından, mekanik sürtünme kaybı olmamaktadır. Bu nedenle çok yüksek hızlara erişilebilmekte, mekanik bakım ve onarım gerektirmemektedir.

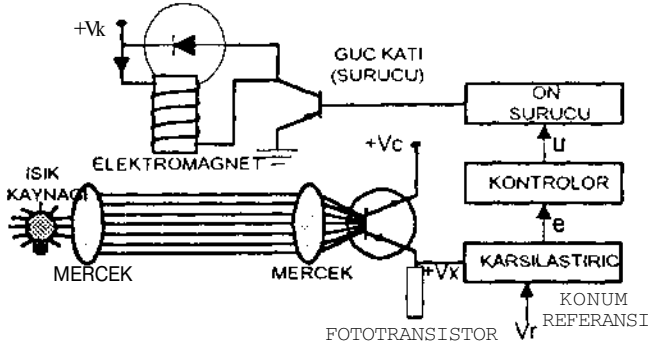
Magnetik yataklı sistemlerde geliştirilen kontrol teknikleri sayesinde de, döner makinaların daha güvenilir ve daha yüksek performanslı bir şekilde çalışmasına imkan sağlanmaktadır. Elektromagnet bobinleri eş sayılı, simetrik kuvvetli bir magnetik alan kuvveti yaratılabilmesi amacıyla ince telli yoğun sarılmışlardır. Yatak statoru çevresince, en az 4 adet bobinin bulunması gerekmektedir. Elektromagnetler, klasik rulmanlardaki bilyaların yaptığı taşıma ve harekete yardımcı olma görevini mekanik sürtünme olmadan sağlamaktadırlar.

Basit bir fikir vermek açısından, en basit bir magnetik mil-yatak sistemine ait tasarımın prensip şeması görülmektedir.

Bu sistemde mekanik temas olmadığından hava sürtünmesi dışında herhangi bir sürtünme kaybı sözkonusu değildir ve daha kolay bir dönme ile daha çabuk bir kalkış sağlanmaktadır. Artan bobin sayısı ile radyal doğrultuda ve her yönde daha düzgün bir magnetik alan yaratılabileceğinden, mili boşlukta ve dengede tutma kontrolü kolaylaşacaktır. Bu bobinler, üzerlerinden geçen akımın oluşturduğu magnetik kuvvetle, yataklanan rotor milini yatak içerisinde dengelenmiş olarak tutarlar. Bobinlerden dikey eksenlerde bulunanları, yerçekimi kuvvetini dengeleyerek milin askıda tutma kontrolünü, yatay eksenlerde bulunanları ise, milin yanıl hareketlerdeki sapmalarını dengede tutma kontrolünü sağlar. Bu amaçla milin yatak içerisindeki konumu, öteki deyişle, dikey ve yatay eksenler boyunca radyal hava aralığı bileşenleri, duyarğalar ile algılanır. Bunlardan milin yatakta denge konumundan sapma hızları ya türev alıcı, ya da gözleyiciler yardımı ile kestirilir. Bu bilgiler kullanılarak, uygun kontrolörler yardımı ile magnetlerin akımları kontrol edilir. Böylece aktif yataklama yapılır. Yerçekimi etkisi hariç tüm eksenlerde yer alan magnetler, simetrik ve birbirleri ile eşdeğerdirler. Bir tek magnet ile gerçekleştirilen askıda dengede tutma kontrolü yöntemi, çoklu magneti içeren askıda dengede tutma kontrolüne ve magnetik mil-yatak sistemlerinin kontrolüne genelleştirilerek uygulanabilir. Zaten böyle bir tasarımın bir amacı da, rulmana tespitlenen rotor milinin manyetik kuvvet etkisi ile askıda tutulmasını sağlamaktır.

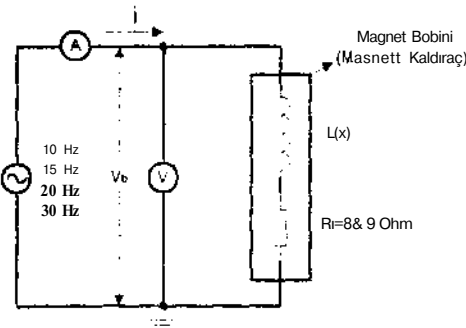
II. Magnetik Yataklarda Askıda Dengele Tutma Kontrolü

"Aktif Magnetik Yataklama" da denilen bu tasarımın bir tek bobininin askıda ve dengede tutma işlevinin incelenmesine yönelik bir çalışma burada sunulmaktadır. Bunun için, I. T. Ü. Proses Kontrol Laboratuvarında kurulu bulunan magnetik askıda taşıma sisteminin bir prototipinden faydalanılmıştır. Aşağıda bu işlevin incelendiği prototipin prensip şeması görülmektedir.



Şekil 2. Magnetik askıda taşıma sistemi prototipi

Sistemin dinamiğini ifade eden giriş, çıkış ve durum değişkenlerini içeren denklemlerin elde edilmesi ile sistemin kontrolüne ilişkin analiz, tasarım ve boyutlandırma kolaylaşır. Dinamik modelin tam anlamı ile belirli olabilmesi için, parametre değerlerinin ya da fonksiyonlarının sistemin çalışma bölgesinin içerisindeki her noktada bilinmesi zorunlu ve gereklidir. Elektromagnetlerin ürettiği kuvvet, üzerlerinden geçen akımların karesi ile doğru, radyal yöndeki hava aralığı boyunun karesi ile ters orantılıdır. Bu kuvvet fonksiyonları, özendüktansların hava aralığına göre değişim fonksiyonları bulunarak belirlenebileceğinden, magnetik askı sistemindeki elektromagnetin endüktans ifadesi belirlenmelidir. Laboratuvarında, bobinin endüktansının hava aralığı mesafesine göre değişim eğrisini çıkarmak için, aşağıdaki deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 3. L(x) değişimini belirlemek için kurulan deney düzeneği

işaret generatöründen faydalanarak 10, 15, 20 ve 30 Hz' lik çalışma frekanslarında bobinin uçları sinüsoidal dalgalar ile beslenir. Bu çalışma düzeneğinde ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak, sistemin endüktans fonksiyonu değişimi belirlenir.

III. Endüktans Fonksiyonunun Belirlenmesi

Seri r, L devresinin frekans domenindeki ifadesi,

$$V = i(r + j\omega L) \quad (1)$$

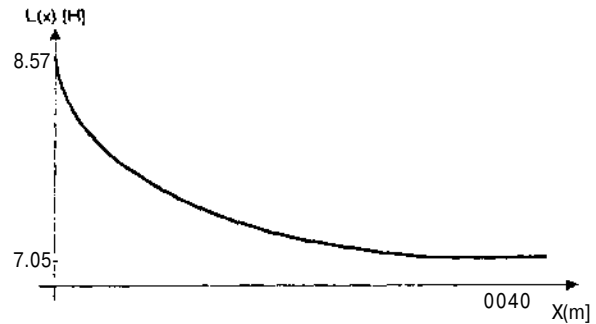
olup, düzenlenirse

$$L = \frac{1}{2\pi f} \sqrt{\left(\frac{V}{i}\right)^2 - r^2} \quad (2)$$

olur. L(X) değişimini belirleyebilmek için, kalınlıkları 2 mm olan 20 adet cam parçasından faydalandı. Anılan çalışma frekanslarında, her 2 mm' de yapılan akım-gerilim ölçümlerinden faydalanılarak (2) deklemleri ile hesaplanan endüktans değerlerinin aritmetik ortalamalarının alınması ile sağlanan değerler tablosu ve L(X) değişimi aşağıdadır.

Tablo 1. L(X) Değişimi

X(m)	L(x) [Henry]	X(m)	L(x) [Henry]
0,0	8,50	0,02	7,28
0,002	8,21	0,022	7,25
0,004	8,00	0,024	7,22
0,006	7,82	0,026	7,20
0,008	7,69	0,028	7,18
0,01	7,58	0,03	7,16
0,012	7,50	0,032	7,15
0,014	7,43	0,034	7,14
0,016	7,36	0,036	7,13
0,018	7,32	0,038	7,12



Şekil 4. Endüktansın hava aralığına göre değişimi

Bu gerçek endüktansı tanımlayan matematik fonksiyon için, çeşitli eğri uydurma yöntemleri kullanılabilir. Buradan faydalanılarak yapılan hesaplamalar neticesinde sağlanan L(x) değişimine en uygun fonksiyon saptanabilir.

Bu çalışmada denenen çeşitli tipteki fonksiyonlar arasında, $a:[m]$ boyutlu bir sabit olmak üzere, magnetik askı sisteminin en az hata ile tanımlandığı

$$L = L_0 + f \sum_{N=1}^{\infty} \frac{1}{x^N} \quad (3)$$

fonksiyonunda karar kılınmıştır. Bu fonksiyonun belirlenmesi için EUREKA Matematik Programı kullanılmıştır. Sistemin matematik modelinin elde edilmesinde ve yapılan hesaplamalarda bu fonksiyonun ilk iki terimi, DC ve 1. Bileşen, kullanılmıştır.

IV. Sistemin Matematik Modeli

Elektromıknatısın endüktansı

$$L(x) = L_0 + \frac{L_1}{1 + \frac{x}{a}} \quad (4)$$

olup, 2. Newton Yasasına göre

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = 2a \left(\frac{L_1}{1 + \frac{x}{a}} \right) \cdot \dot{x} + m \cdot g \quad (5)$$

denklemini matematik modeli ifade eder. Elektromıknatısın elektrik denklemi ise

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial L(x)}{\partial i} \cdot \dot{i} \quad (6)$$

dir. Çalışmada akım ile kontrol yöntemi kullanıldığından, sistemin incelenmesinin (5) denklemi ile yapılması yeterlidir. Sistemin dinamik modelini ifade eden bu denklemin, simülasyon işlemi için, lineerleştirilmesi ve katsayılarının belirlenmesi gerekmektedir.

V. Dinamik Modelin Lineerleştirilmesi

Magnetik askı sistemlerinde askıda tutulan cismin hızı

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (7)$$

olmak üzere, (5) denklemi düzenlendiğinde sistemin dinamik modelinin ifadesi

$$\frac{dv}{dt} = \frac{a \cdot L_1}{2m \cdot (x + a)^2} \cdot v + g \quad (8)$$

olur. Dinamik modelin sabit bir $P_0(i_0, X_0)$ civarında Taylor Serisine açılması ile

$$A \dot{x} = A v \quad (9)$$

$$A v = a \cdot Ax + p \cdot Ai \quad (10)$$

şeklinde lineerleştirilir. Burada

$$a = \frac{a \cdot L_1 \cdot i_0^2}{m \cdot (a + x_0)^3} \quad (11)$$

$$p = -\frac{a \cdot L_1 \cdot i_0}{m \cdot (a + x_0)^2} \quad (12)$$

olup, bu ifadeler (10) denkleminde yerine konursa

$$A \dot{V} = \frac{a \cdot L_1 \cdot i_0^2}{m \cdot (a + x_0)^3} \cdot Ax - \frac{a \cdot L_1 \cdot i_0}{m \cdot (a + x_0)^2} \cdot Ai \quad (13)$$

$$\frac{dAx}{dt} = Av \quad (14)$$

elde edilir. Sistemin kararlılığı için, (14) denkleminin Laplace dönüşümü alınır, transfer fonksiyonu

$$T(s) = \frac{Ax(s)}{Ai(s)} = \frac{3}{s - a} \quad (15)$$

olur. Sistemin kutupları $S_{1,2} = \pm \sqrt{a}$ olup, kutuplardan sağ yarı düzlemde bulunan sistemi kararsız kılar. Bu sistemi kararlı kılmak için, cisim havada ve dengede asılı tutmak için, kapalı çevrim kutuplarının sol yarı düzlemde olmasını sağlayacak bir geri besleme yapısı ve kontrolör tasarlanmalıdır.

VI. Kontrolörün Tasarlanması

Şekil 1' deki sistemin durum denklemleri matrisel biçimde

$$\begin{bmatrix} \dot{Ax} \\ \dot{Av} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{r} \\ a & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ Av \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{A} \end{bmatrix} Ai \quad (16)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada, sistemin sağ yarı düzlemde bulunan kutubunu sol yarı düzleme taşıyacak kontrolör için, akım değişimi

$$Ai = -K_1 \cdot Ax - K_2 \cdot Av \quad (17)$$

şeklinde üretilsin. Kararlılık için, kapalı çevrim karakteristik polinomu

$$A_e(s) = S^2 + 2 \cdot \xi_n \cdot \omega_n \cdot S + \omega_n^2 \quad (18)$$

olmak üzere, $\xi_n > 0$ ve $\omega_n > 0$ sağlanması yeterlidir.

Bu çalışmada $\xi_n = 1$ ve $\omega_n = 2\sqrt{a}$ alınarak, kontrolör katsayıları

$$2 \cdot \omega_n \cdot K_1 = K \cdot p \quad (19)$$

$$-\omega_n^2 + p \cdot K_2 = \omega_n^2 \quad (20)$$

denklemlerinden elde edilmiştir. Bu parametrelerin seçilen çalışma bölgesindeki değerleri için $K_1 = -50$, $K_2 = -1.53$ bulunmuştur. Bu değerler ile sağlanan geri besleme kontrolünde magnetten aktılan akımın ifadesi, seçilen çalışma noktası değerleri referans alınarak,

$$\dot{i} = i_0 + \dot{A}i = i_{ref} + \dot{A}i \quad (21)$$

$$x\dot{i} = x_0 + \Delta x = x_{ref} + \Delta x \quad (22)$$

denklemlerinden

$$\dot{i} = i_{ref} - (K_1 \cdot \Delta x) + K_2 \cdot \Delta v \quad (23)$$

sağlanır. Burada

$$\Delta v = \dot{\Delta x} = \frac{d(x - x_{ref})}{dt} \quad (24)$$

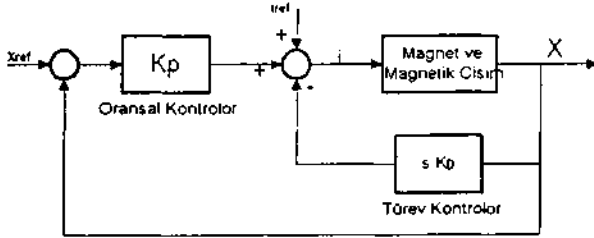
olur. Sapmadaki hız, gerçek hız ile aynı, yani $\dot{x} = \Delta v$ olacağından

$$\dot{i} = i_{ref} + K_1(x_{ref} - x) - K_2 \cdot \dot{x} \quad (25)$$

şeklinde bir i_{ref} kontrol kuralı elde edilir. $K_1 = K_p$, $K_2 = K_d$ olmak üzere, magnetik askıda tutma sistemine uygulanan kontrol akımı

$$i = K_p(x_{ref} - x) - K_d \cdot \dot{x} + i_{ref} \quad (26)$$

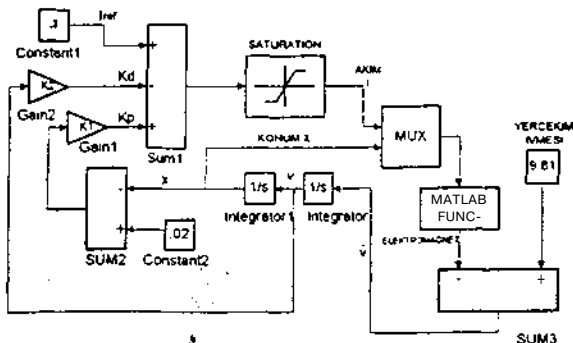
şeklinde ifade edilir. Bu geribesleme kontrol kuralı ve magnetik askıda tutma sistemini tanımlayan (9) ve (10) denklemleri, bir bütün olarak, elde edilen kapalı çevrim kontrol sisteminin dinamik modelini oluşturur. Bu sistemin blok diyagramı Şekil 6' da gösterilmiştir.



Şekil 6. Dinamik Model Kapalı Çevrim Blok Diyagramı

VII. Matematik Modelin Simülasyonu

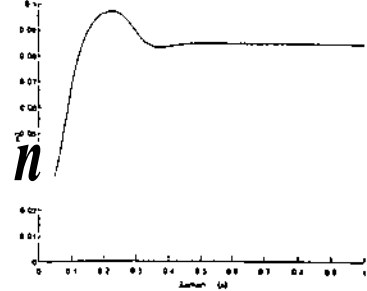
(26) denkleminde geri besleme kuralını sağlayan kontrolör ile birlikte dinamik model gözönüne alınarak sistemin simülasyonu MATLAB Simulink ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonun blok diyagramı aşağıdadır.



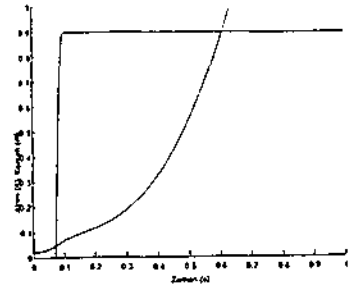
Şekil 7. Simülasyon Blok Diyagramı

VIII. Sonuçlar ve Öneriler

Ferromagnetik cismin kütlesi $m_{top}=0,05$ kg olup $K_D=-1,53$, $K_p=-50$, $X_{ref}=0,075$ m, ve $x_0=0,050$ m değerleri için akım sınırlanarak seçilen, basamak girişe ilişkin çeşitli akım-zaman, konum-zaman değişimleri ile kararlılık analizi yapılmıştır. Elde edilen değişimlere ilişkin grafikler aşağıdadır.



Şekil 8. 1=1 A için Konum Cevabı, KARARLI ÇALIŞMA HALİ



Şekil 9. 1=0,9 A için Akım-Konum Cevabı, KARARSIZ ÇALIŞMA HALİ

Burada kazanç ayar düzeneğinde integral kontrolör katı olmadığından, referans değeri ile cismin oturduğu gerçek değer arasında bir sürekli hal hatası meydana gelmektedir. Bu hata, PID veya Robust PID veya Adaptif PID Kontrolörü ile giderilebilir. Bu çalışma, maglev için yapılacak kontrolör çalışmalarına bir model oluşturur.

Kaynaklar

1. "Magnetik Askılı Taşıma Sisteminin Kontrolü" GÜRLEYEN, Fuat; DORAN, Ali; ŞAHİN, Kemal; Yüksek Lisans Tezi, Temmuz 1996, İ.T.Ü.
2. "Anahtarlama Relüktans Motorların Kontrolü" SARIOĞLU, Kemal; ŞAHİN, Kemal; Yüksek Lisans Tezi, Şubat 1996, İ.T.Ü.
3. "Application of gain scheduled H_{∞} Robust Controllers to a magnetic bearing" MATSUMURA, F., NAMERIKAWA, T., HAGIWARA, K., & FUJITA, M., IEEE T-onCST, V4,N5,Sept 1996
4. "Dynamics of the Electrical Machines" Course Lectures, SARIOĞLU, Kemal, İ.T.Ü.

Not: Yazarlar Elk. Müh. Sn. Muhsin AKYAR' a şekillerin sayfa düzenine yerleştirilmesine katkısından dolayı teşekkür eder.

Çoklu Dinamikli Sistemlerin Kararlılığı Üzerine

Murat DOĞRUEL
Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi
Göztepe, İstanbul, 81040
dogruel@marun.edu.tr
Faks: (90)216-348 0293

ABSTRACT

Stability of Multiple Dynamic Systems (time varying, discrete or continuous time systems with dynamics which are chosen from a given finite set) are considered. Such systems are governed by a finite set of dynamics according to some rule. Some stability definitions and stability measures are provided for general kind of nonlinear multiple dynamic systems. Similar to linear multiple dynamic case many results are obtained and generalized for nonlinear multiple dynamic systems.

1. GİRİŞ

Çoklu dinamikli sistemler (ÇDS) belirli ve sonlu sayıda bir sistem dinamiğinin bir sistemi karmaşık bir sıra dahilinde kontrol etmelerinden doğar. Bilinen zamanla değişen sistem kararlılık teorisini bu sistemler için kullanmak neredeyse mümkün değildir çünkü dinamikler arası geçiş sıralaması ya hiç bilinmez yada çok karmaşıktır. Bu tür sistemlerin uygulamaları kontrol teorisinin birçok dalında karşımıza çıkmaktadır, örnek olarak iletişim gecikmeli doğrusal geribesleme sistemleri [8], sıçramalı sistemler [9], kazanç belirlemeli sistemler [10], değişken yapıli kontrol [6], parametrik belirsiz sistemler [7] ve daha birçokları verilebilir, özellikle yeni gelişen bir alan olan karma durumlu sistemlerde [3,4] her bir ayrık duruma karşılık bir sürekli durum dinamiği mevcuttur. Böylece ayrık durumlar değiştikçe sürekli durumlu kısım belli sayıda dinamiğin karmaşık bir sıralamadaki yönetimi altında olmaktadır. Bu tür sistemlerin kararlılık analizi çok zor bazen de imkansızdır. Çoklu dinamikli sistemler için öngörülen kararlılık analizi metodları bu tür karmaşık sistemlerin analizini kolaylaştırmaktadır.

Eğer ÇDS lerdeki dinamikler doğrusal iseler, yani sistem dinamikleri durum geçiş matrisleri ile veriliyor ise, bu durumda ÇDS analizinde sonlu sayıda matrisin sonsuz uzunluktaki çarpımlarının kararlılığı sorunu karşımıza çıkar. Bu alanda birçok araştırmacı çalışmaya başlamaktadır (örneğin [1,2] ve oradaki referanslara bakınız). Bu çalışmada daha genel olan doğrusal olmayan sistem dinamiklerine sahip ÇDS üzerinde duracağız ve bunlara ilişkin kararlılık tanımlarını ve bazı sonuçları sunacağız.

2. TEK DİNAMİKLİ DURUM

Doğrusal bir ayrık zaman sistemini ele alalım

$$x(k+1) = Ax(k). \quad (1)$$

Burada x n -boyutlu durum vektörünü ve A ise sistem matrisini göstermektedir. Sistem (1) in asimtotik kararlı olmasının gerek ve yeter koşulu A nın spektral yarıçapının 1 den az olmasıdır, yani

$$\rho(A) = \max_i | \lambda_i(A) | < 1. \quad (2)$$

Yukarıda $A_j(A)$ A matrisinin i . özdeğerini göstermektedir. Spektral yarıçapın yukarıdaki tanımı aşağıdaki ile eşdeğerdedir:

$$\rho(A) = \inf \{ p > 0 \mid x(k+1) = A/p x(k) \text{ asimtotik kararlı} \}. \quad (3)$$

Sürekli zamanlı sistemlerde de doğrusal sistem

$$x'(t) = A x(t), \quad (4)$$

ancak A matrisinin özdeğerlerin negatif gerçel değerli olması ile mümkündür, yani

$$\sigma_r(A) = \max \{ \text{Re} \{ \lambda_i(A) \} \} < 0. \quad (5)$$

Burada

$\rho(A) = \inf \{ \alpha \in \mathbb{R} \mid x'(t) = A x(t) - \alpha x(t) \text{ asimtotik kararlı} \}$. (6)

yazılabilir $p(A)$ ve $a(A)$ bize bir tür kararlılık ölçüsü sağlamaktadır. Yani bu değerlere bakarak sistemin kararsızlıktan ne kadar uzak olduğuna karar verebiliriz. Bu ölçüler aslında doğrusal olmayan sistemlere de kolayca uyarlanabilir. Zamanla değişmeyen bir ayrık zaman doğrusal olmayan sistem denklemini göz önüne alalım:

$$x(k+1) = f(x(k)). \quad (7)$$

Burada orijinin ($x=0$) global asimtotik kararlılığı üzerinde duruyoruz. Spektral yarıçap bu durum için direk olarak aşağıdaki şekilde genelleştirilebilir

$$\rho(f) = \inf \{ p > 0 \mid x(k+1) - f(x(k)) / p \text{ asimtotik kararlı} \}. \quad (8)$$

Zamanla değişmeyen sürekli zamalı bir sistem için ise

$$x'(t) = f(x(t)), \quad (9)$$

genelleştirilmiş o değeri aşağıdaki şekilde verilebilir

$$\rho(f) = \inf \{ \alpha \in \mathbb{R} \mid x'(t) = f(x(t)) - \alpha x(t) \text{ asimtotik kararlı} \}. \quad (10)$$

Yukarıda (8.) ve (10.) denklemlerde verilen tanımlar doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler için geçerli olmaktadır. Böylece ayrık zamanlı bir sistem $p < 1$ olduğunda asimtotik kararlı, $p > 1$ olduğunda kararsızdır denebilir. Sürekli durum için ise sistem $a < 0$ olduğunda asimtotik kararlı, $a > 0$ olduğunda kararsız olacaktır. $p=1$ ve $a=0$ durumlarında ise sistem kararlılığı için bu aşamada bir şey söylenemez sistem f dinamiğine göre asimtotik kararlı, kararlı veya kararsız olabilir.

Eğer sürekli durumlu sistem (9) tek ve sürekli bir sistem çözümünü garanti eden Lipschitz koşulunu sağlıyor ise, yani

$$\|f(x_2) - f(x_1)\| \leq k \|x_2 - x_1\|, \quad \forall x_1, x_2 \in \mathbb{R}^n, \quad (14)$$

ise, $\rho(f)$ değeri en çok k olabilecektir.

3. ÇOKLU DİNAMİKLI SİSTEMLER İÇİN KARARLILIK

Aşağıda denklemleri verilen ayrık zaman çoklu dinamikli sistem yapısını ele alalım

$$x(k+1) = f_{m(k)}(x(k)) \quad (20)$$

Burada $x(k) \in \mathbb{R}^n$ ve $m(k) \in \{1, 2, \dots, N\}$ dir. Yani burada $m(k)$ sistem (20) için k anında hangi dinamiğin etkin olduğunu göstermektedir. Böylece

$$f_m: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n \text{ ve } f_m \in F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$$

yazılabilir. Sürekli zamanlı bir ÇDS ise

$$x'(t) = f_{m(t)}(x(t)), \quad (21)$$

şeklinde ve burada yine $x(t) \in \mathbb{R}^n$, $m(t) \in \{1, 2, \dots, N\}$ ve $f_m \in F = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ dir.

Şimdi orijinin ($x=0$) global asimtotik kararlılığını göz önüne alarak ÇDS için aşağıdaki tanımları verelim.

Tanım 1. Eğer sistem (20) $m(k)$ nin tüm olası sıralamaları için asimtotik kararlı ise, dinamik set F e (veya çoklu dinamikli sistem (20) ye) *ayrık zamanda asimtotik kararlıdır* denir.

Tanım 2. Eğer sistem (20) verilen herhangi bir $x(0) \in \mathbb{R}^n$ ilk koşulu için, bir $m(k)$ sıralaması ile asimtotik kararlı hale getirilebiliyor ise, dinamik set F e (veya çoklu dinamikli sistem (20) ye) *ayrık zamanda asimtotik kararlaştırılabilir* denir.

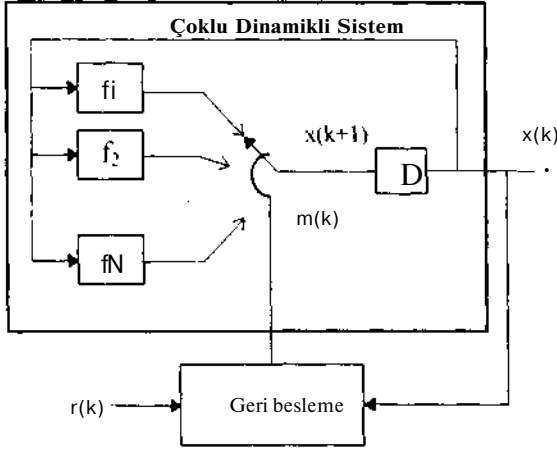
Tanım 3. Eğer sistem (21) $m(t)$ nin tüm olası geçişleri için asimtotik kararlı ise, dinamik set F e (veya çoklu dinamikli sistem (21) e) *sürekli zamanda asimtotik kararlıdır* denir.

Tanım 4. Eğer sistem (21) verilen herhangi bir $x(0) \in \mathbb{R}^n$ ilk koşulu için, bir $m(t)$ sıralaması ile asimtotik kararlı hale getirilebiliyor ise, dinamik set F e (veya çoklu dinamikli sistem (21) e) *sürekli zamanda asimtotik kararlaştırılabilir* denir.

Eğer F sadece tek bir dinamik içeriyor ise buradaki asimtotik kararlılık ve kararlaştırılabilirlik standart tanımlarla aynı olacaktır. Fakat çoklu dinamik mevcut ise asimtotik kararlılık için F deki tüm dinamiklerin asimtotik kararlı olması gerekecektir. Ayrıca bu gerek koşul da yeterli değildir çünkü bilindiği üzere kararlı iki dinamik arasında geçişler olduğunda sonuç sistem kararsız olabilmektedir. Eğer F in asimtotik kararlı olduğunu biliyorsak ancak o zaman her türlü dinamikler arası geçiş için

sistemin asimtotik kararlı kalabileceğini garanti edebiliriz.

Asimtotik kararlılaştırılabilirlik için ise F teki herhangi bir dinamiğin asimtotik kararlı olması yeterlidir. Fakat bu gerekli değildir yani bazı kararsız sistemler arasında geçişler yapılarak sonuç sistem dinamiği verilen her ilk koşul için kararlı hale getirilebilir.



Şekil 1. Ayrık zamanlı çoklu dinamikli sistem geribeslemesi.

Şekil 1 de gösterilen çoklu dinamikli sistem geribeslemesini ele alalım. Bu durumda tanımlar gereği sistemin tüm geribesleme blokları için asimtotik kararlı kalabilmesi ancak F in asimtotik kararlı olması ile mümkündür. Ayrıca sistemi asimtotik kararlı kalabilecek bir geribesleme bloğu ancak F asimtotik kararlılaştırılabilir ise mümkün olacaktır.

Aşağıdaki tanımları göz önüne alalım:

$$F/p = \{f_1/p, f_2/p, \dots, f_N/p\}, \quad (22)$$

$$F - CT x = \{f_1 - a x, f_2 - a x, \dots, f_N - a x\}. \quad (23)$$

önceki bölümde tanımlanan kararlılık ölçülerini çoklu dinamikli sistemlere de genelleştirmek mümkündür.

Tanım 5. Dinamik set F in üst spektral yarıçapı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$\bar{p}(F) = \inf \{p > 0 \mid F/p \text{ ayrık zamanda asimtotik kararlı.}\}$$

Tanım 6. Dinamik set F in alt spektral yarıçapı aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$\underline{p}(F) = \inf \{p > 0 \mid F/p \text{ ayrık zamanda asimtotik kararlılaştırılabilir.}\}$$

Tanım 7. Dinamik set F in üst a değeri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$\bar{a}(F) = \inf \{a > 0 \mid F - a x \text{ sürekli zamanda asimtotik kararlı.}\}$$

Tanım 8. Dinamik set F in alt u değeri aşağıdaki şekilde tanımlanabilir

$$\underline{a}(F) = \inf \{a > 0 \mid F - a x \text{ sürekli zamanda asimtotik kararlılaştırılabilir.}\}$$

Yukarıdaki tanımlardan ÇDS in $\bar{p} < 1$ (ayrık zamanda) ve $\bar{a} < 0$ (sürekli zamanda) olduğunda asimtotik kararlı olduğu görülebilir. $\bar{p} > 1$ veya $\bar{a} > 0$ olduğunda ise bazı dinamik geçişleri için sistem asimtotik kararlı olmayacaktır. $\underline{p} < 1$ (ayrık zamanda) ve $\underline{a} < 0$ (sürekli zamanda) ise ÇDS bazı dinamik geçişleri için asimtotik kararlı olacaktır. $\underline{p} > 1$ veya $\underline{a} > 0$ olduğunda ise sistem tüm dinamik geçişleri için asimtotik kararlı olmayacaktır.

Aşağıdaki özellikler tanımlardan kolayca elde edilebilir:

- 1) $\bar{p}(\{f_i\}) = \underline{p}(\{f_i\}) = P(f_i)$, $\hat{a}(\{f_i\}) = C\bar{I}(\{f_i\}) = a(f_i)$
- 2) $\bar{p}(F) \geq \underline{p}(F)$, $\hat{a}(F) \geq \underline{a}(F)$,
- 3) $\bar{p}(F) \geq \max_i p(f_i)$, $\bar{a}(F) \geq \max_i a(f_i)$,
- 4) $\underline{p}(F) < \min_i |p(f_i)|$, $\underline{a}(F) < \min_i a(f_i)$,
- 5) $F_1 \Rightarrow F_2$ ise $\bar{p}(F_1) \geq \bar{p}(F_2)$, $\bar{a}(F_1) \geq \bar{a}(F_2)$,
- 6) $F_1 \supset F_2$ ise $\underline{p}(F_1) \leq \underline{p}(F_2)$, $\underline{a}(F_1) \leq \underline{a}(F_2)$.

Lyapunov kararlılık teorisi kullanılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilebilir.

Teorem 1. Dinamik set F in ayrık zamanda asimtotik kararlı olmasının yeter bir koşulu, aşağıdaki koşulları sağlayan sistem (20) durumu x in bir skaler, sürekli birinci türevli fonksiyonu olan $V(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ bulunmasıdır,

- i) $V(x)$ pozitif tanımlı,
- ii) $V(x) > V(f_i(x))$, $\forall x \neq 0$, $\forall i \in \{1, 2, \dots, N\}$,
- iii) $V(x) \rightarrow \infty$ oc, $\|x\| \rightarrow \infty$ iken.

Teorem 2. Dinamik set F in ayrık zamanda asimtotik kararlılaştırılabilir olmasının yeter bir koşulu, aşağıdaki koşulları sağlayan sistem (20) durumu x in bir skaler, sürekli birinci türevli fonksiyonu olan $V(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ bulunmasıdır,

- i) $V(x)$ pozitif tanımlı,
- ii) $\forall x \neq 0 \exists l \in \{1, 2, \dots, N\}$ öyle ki $V(x) > V(f_l(x))$,
- iii) $V(x) \rightarrow \infty, \|x\| \rightarrow \infty$ iken.

REFERANSLAR

[1] M. Doğruel ve Ü. özgüner, "Stability of a Set of Matrices: A Control Theoretic Approach," *Proceedings of the 34th Conference on Decision and Control*, (New Orleans, LA), Dec. 1995.

[2] M. Doğruel ve Ümit özgüner, "Stability of a Set of Matrices: An Application to Hybrid Systems," *{Invited Paper} Proceedings of 1995 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, (Monterey, CA), Aug. 1995.

[3] M. Doğruel ve Ü. özgüner, "Stability of Hybrid Systems," *Proceedings of 1994 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, (Columbus, Ohio), Aug. 1994.

[4] M. Doğruel, S. Drakunov ve Ü. özgüner, "Sliding Mode Control in Discrete State and Hybrid Systems," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Mar. 1996.

[5] A. F. Filippov, *Differential Equations with Discontinuous Righthand Sides*, Kluwer Academic Publishers, 1988.

[6] S. V. Drakunov ve V. I. Utkin, "Sliding Mode Control in Dynamical Systems," *Int. J. Control*, v. 55, n. 4, pp. 1029-1037, 1992.

[7] E. W. Karnen ve P. P. Khargonekar, "On the Control of Linear Systems Whose Coefficients are Functions of Parameters," *IEEE Trans. on Automatic Control*, v. 29, n.1, 1984.

[8] R. Krtolica, Ü. özgüner, H. Chan, H. O. Göktaş, J. Winkelman ve M. Liubakka, "Stability of Linear Feedback Systems with Random Communication Delays," *Int. J. Control*, v. 59, n. 4, 1994.

[9] M. Mariton, *Jump Linear Systems in Automatic Control*, (New York: Marcel Dekker), 1990.

[10] J. S. Shamma ve M. Athans, "Guaranteed Properties of Gain Scheduled Control for Linear Parameter-varying Plants," *IFAC Automatica*, v. 27, n. 3, 1991.

ENERJİ ETKİN LAMBA KULLANIMININ ÜLKE EKONOMİSİNE OLASI KATKILARI

Banu TÜBLEK, Dilek Enarun
İTÜ Elektrik- Elektronik Fakültesi, Maslak, İstanbul

Abstract

Energy efficiency is a very crucial and important subject for (the whole world) Beyond the fact of the diminishing of the natural resources for generating energy air pollution during these processes makes the topic important. Many countries take crucial precautions about it. In this paper, the impact of energy efficiency on the countries' economies has been investigated, as energy efficiency on lighting being the main consideration point.

1. Giriş

Dünyamızın kısıtlı olan doğal kaynaklarını en ekonomik biçimde kullanmak ve hava kirliliğinin azaltılması gerekliliği, enerji etkinliğinin önem kazanmasına neden olmuştur. Aydınlatma alanında etkinlik, Kompakt Floresan Lambalar (KFL), ince floresan lambalar, endüksiyon lambaları ve elektronik balastlar gibi enerjiyi daha etkin kullanan aydınlatma araçlarının ortaya çıkması ile artmış, insanların, kuruluşların ve hükümetlerin daha az enerji sarfederek daha yüksek verim isteklerinin sağlanması bir ölçüde mümkün hale gelmiştir. Ancak, enerji etkin ışık kaynakları ve aydınlatma araçlarının pahalı olmaları kullanım alanlarını daraltmaktadır. Kullanım alanlarının genişleyebilmesi için kitlelerin enerji etkinliği bilincine sahip olmaları, devletlerin veya ilgili kuruluşların yasalar, yönetmelikler, sübvansiyonlar ile insanları bu yönde yönlendirmeleri gerekmektedir.

2. Aydınlatma Konusunda Enerji Etkinliğinin Gerekliliği

Özellikle gelişmekte olan ülkelerde aydınlatma, elektrik kullanımının ilk sıralarında yer almaktadır. Aydınlatma, gerekli ışığı sağlayarak insanların üretken olmalarını ve dolayısıyla ülkelerin gelişimini etkiler. Ancak, verimsiz aydınlatmanın yüksek maliyeti ülkelerin gelişmesi için gerekli parayı tüketebilir.

Aydınlatma enerjisinin artan maliyeti, fakir ülkelerde sağlık hizmetleri, iskan ve diğer temel ihtiyaçlar için gerekli paranın bir kısmını tüketir ve gelişmeyi ciddi biçimde etkiler. Ayrıca, ülkelerin nüfusları ve şehirleşme arttıkça aydınlatma gereksinimi de artacaktır. Tek çıkar yol ise enerji ihtiyacını en aza indirmektir.

Dünya Bankasının tahminine göre önümüzdeki on yıl içinde gelişmekte olan ülkelerin enerji sağlamak amacıyla yapmaları gereken yatırım yaklaşık 1 trilyon

ABD Dolarıdır ve bunun önemli bir bölümü aydınlatma içindir.

Yapılan incelemeler gelişmekte olan ülkelerde, aydınlatmada enerji etkinliğini geliştirmek için büyük potansiyel olduğunu, ancak bu işin maliyetinin de yüksek olduğunu göstermişlerdir. Örneğin tüm Brezilya gözönüne alındığında % 48 lik, Tayland' da sadece ticari binalar gözönüne alındığında % 70 lik bir tasarruf potansiyelinin olduğu görülmüştür.

Elektrik enerjisinin pahalı, vatandaşların gelirinin az olduğu bazı ülkelerde hükümetler enerji fiyatında büyük indirimlere gitmektedirler. Ancak, enerjiyi ucuzlatmak, insanları enerji etkin aydınlatmaya yöneltmenin de önünü keser. Gelişmekte olan ülkelerde enerji etkin aydınlatmanın önünü kesen diğer bazı engeller ise şunlardır:

- Enerji etkin aydınlatma ürünleri ve bu konudaki bilgiler çok azdır.
- Gerilimde ve frekansda olan sapsmaların bazı ürünlerin güç faktörlerini ve ışık kalitelerini etkilemesi gibi teknik sorunlar vardır.
- Enerji etkin aydınlatma araçlarının gümrük vergileri çok yüksektir. Bu sorun, o ülkede enerji etkin olmayan araçlar üretiliyorsa daha da önem kazanmaktadır.
- Enerji etkinliğine ilişkin standartlar ve yönetmelikler genelde yoktur.
- Elektrikle ilgili kamu kuruluşları etkin enerji kullanımına çok az ilgi gösterirler ve bunun önemini farkına hala varmamışlardır.
- Kredi fonlarının çoğu enerji etkinliğinin değil, enerji üretiminin üzerinde durur.

Ancak, hükümetler bu engellerin yavaş yavaş farkına varıp, politikalarını ona göre belirlemeye başlamışlardır. Örneğin Pakistan ve Tayland' da gümrük vergileri ciddi şekilde düşürülmüşlerdir. Tayland, Meksika ve Brezilya' daki enerji kamu kuruluşları sokak aydınlatmasında, iş yerlerinde ve konutlardaki enerji etkin aydınlatma programlarına önyak olmaktadır.

Kuzeydoğu Asya Uluslar Birliği (Association of Southeast Asian Nations) ticari binalar için aydınlatmayı kapsayan zorunlu standartlar geliştirmiştir. Dünya Bankası ve diğer kredi veren kuruluşlar etkin enerji kullanımını projelerini desteklemeye başlamışlardır [1].

3. Çeşitli Ülkelerde Yürütülen Aydınlatmada Enerji Etkinliğine Yönelik Programlar

Enerji etkinliği, sadece gelişmekte olan ülkeler için değil, gelişmiş ülkeler için de büyük önem taşımaktadır ve tüm dünyada bu konuda çeşitli

çalışmalar ve programlar yürütülmektedir. Çünkü enerjiyi gereksiz yere tüketirken sadece dünyamızın kısıtlı kaynaklarını gereksiz yere sarfetmekle kalmıyor aynı zamanda zaten kirlenmiş olan atmosferimizi ve dünyamızı da gereksiz yere kirletiyoruz. Aşağıda bunların önüne geçmek için yapılan çalışmalardan örnek olarak birkaçı verilmiştir.

3.1. Amerika Birleşik Devletleri

1990 yılında ABD' de aydınlatma amacıyla 515 TWh elektrik enerjisi tüketilmiştir. Bunun tüketiciye maliyeti 36 milyar Dolardır. Tüketimin azaltılması amacıyla 1992 yılında Enerji Politikası Kanunu adı altında bir yasa çıkarılmıştır. Bu yasa, etkinlik ile ilgili gelişmelerin binalarda, aydınlatma ürünlerinde, motorlarda endüstri ve ticaret alanında kullanılan her türlü malzemede zorunlu olarak uygulanmasını istemektedir. Yasa ayrıca, enerji etkin konut satın alan kişilere özel ödeme olanakları sunulmasını, elektrik ve gazla ilgili kuruluşların enerji etkinliğini aktif şekilde desteklemeleri için, kuruluşların kazançla dayalı teşvikler ile cesaretlendirilmesini, konutlar ve pencereler için etkinliği arttıran sistemleri, çeşitli bilgilendirme programlarını, yeni araştırmaları ve yeni politikaları desteklemektedir.

Yasa, aydınlatma konusuna birkaç açıdan değişmektedir:

- Eyaletler, iki yıl içinde yeni ticari binalar için ulusal enerji standartlarını uygulamaya başlayacaklardır. Güç yoğunlukları (VV/m^2) belirtilen standartlara uygun olacaktır. Standartlar, olacak gelişmeler gözönüne alınarak periyodik olarak güncelleştirileceklerdir.
- Ülkede üretilen veya ithal edilen lambalara ilişkin zorunlu standartlar hemen yürürlüğe gireceklerdir. Bu standartlar hem yeni, hem de mevcut binalara yerleştirilen lambalar için geçerli olacaktır. Akkor telli lamba standartları 40 W veya daha büyük güçlü reflektörlü lambalara uygulanacaktır. Genel hizmet lambaları ve renkli lambalar, trafik lambaları, havacılık lambaları, limanlardaki sinyal lambaları, fotoğrafçılıkla ilgili lambalar, tiyatro aydınlatmasında kullanılan lambalar, farlar ve projektörler gibi bazı özel amaçlı lambalar uygulama dışı bırakılacaktır. Yeni floresan lamba standartları, gücü 28 W in üstünde olan 1200 mm lik çubuk ve 560 - 640 mm arasındaki U-şeklindeki lambalara ve 2400 mm lik tüm hızlı ateşleme yapabilen lambalara ve 52 W m üstündeki tüm anında devreye girebilen lambalara uygulanacaktır. Bazı özel lambalar uygulama dışında tutulmuştur. Bunlar, bitkilerin büyümesi için kullanılan floresan lambalar, düşük ısılarda çalışmak üzere tasarlanmış floresan lambalar, renkli floresan lambalar, UV lambaları ve renk geriverim endeksi 82 veya daha yüksek olan floresan lambalardır.
- Kar amaçlı olmayan kurumlara, üniversitelere, eyalet ve yerel hükümetlere, kamu kuruluşlarına

ve benzeri gruplara para vererek enerji etkinliğini destekleyen 10 tane bölgesel merkez kurulacaktır. Bu merkezler halkın, mühendislerin, tasarımcıların, mimarların teknik yardım ve eğitim alabilecekleri bilgi merkezleri olacaktır.

- 18 ay içinde floresan genel hizmet lambaları, KFL ler ve akkor telli lambalar için etkinlik etiketleri konulacaktır. Ayrıca armatürler ile ilgili çalışmalar da yapılacaktır.
- Akkor telli ve floresan genel hizmet lambaları ve yüksek güçlü deşarj lambaları için yeni standartlar çıkarılacaktır.

Bu tedbirler altında elde edileceği tahmin edilen enerji tasarrufu 49 - 123 TWh/yıl dır. Ayrıca böylece 1990 - 2030 yılları arasında 1.3 - 2.6 milyar ton CO_2 in, 2.3 - 5.4 milyon ton SO_x in ve 2.0 - 5.0 milyon ton NO_x in atmosfere karışması engellenecektir [2].

3.2. Brezilya

Brezilya' da konutlar, yıllık toplam elektrik tüketiminin %20-35 ini harcamakta ve akşamüsü oluşan elektrik enerjisi tepe değer ihtiyacının %35 ini çekmektedirler. Aydınlatma, toplam elektrik enerjisi tüketiminin %17 sini almaktadır. Konut aydınlatmalarında yaklaşık 280 milyon akkor telli lamba kullanılmaktadır. Bütün bunlar gözönüne alındığında aydınlatmada enerji etkinliğini sağlamanın faydaları açıkça görülmektedir. Brezilya' da konutlara yönelik ilk program 1990 yılında Minas Gerais eyaletinde, eyaletin enerji şirketi tarafından başlatılmış, ancak başarılı olamamıştır. Program kapsamında 514 aileye ait 3000 akkor telli lamba 9 ve 13 W lik KFL ler ile değiştirilmiş, ancak kullanıcıların % 60 ı yeni lambalarından memnun kalmamışlardır.

İkinci program 1992 yılında Sao Paulo eyaletinde Sao Paulo Işık ve Güç (SPIG) tarafından uygulanmaya başlanmıştır. Burada 60 ve 100 W lik 400 akkor telli lamba, tüketicilere mali bir külfet getirmeksizin 22 ve 32 W lik elektronik balastlı yuvarlak floresan lambalarla değiştirilmiştir. Bu programda, Brezilya* ır tüketicilerin aydınlatmayı en çok kullandıkları yer olarak belirlenen mutfak aydınlatması hedef olarak seçilmiştir. Mutfak aydınlatmasının kullanım zamanı ayrıca, akşamüstü oluşan enerji tepe değer ihtiyacının da üstüne düşmektedir. Araştırmaya katılan ailelerin yaklaşık % 90 ı yeni aydınlatmalarından memnun kalmışlardır.

Elektrik kuruluşunun lamba değişimine ait tüm parayı ödemesi koşulu ile, 60 W lik akkor telli lamba yerine 22W lik yuvarlak floresan lamba konulması sonucu elde edilen enerji tasarrufunun bedeli 0.06 ABD Doları/kWh, 100 W lik akkor telli lamba yerine 32 W lik lamba konulması sonucu elde edilen enerji tasarrufunun bedeli 0.03 ABD Doları/kWh tir. Elektrik kuruluşu, enerji tepe değer ihtiyacını sağlayan şirkete 0.255 ABD Doları/kWh ödediğinden, bu uygulama elektrik kuruluşları için de caziptir. Elektrik kuruluşu, enerji tepe değer ihtiyacını sağlayan şirkete enerji

tasarrufu için ödediği bedelin yaklaşık dört ila sekiz katını ödemektedir.

SPIG, sistemin tepe değer enerji ihtiyacının azalmasında parasal çıkarlar gördüğünden, programı genişletmeyi düşünmektedir. Program kapsamında katılımcı 50000 tüketiciye kendi hizmet alanında kullanması için indirim kuponu verecektir. Bu indirim ve lamba üreticilerinin sundukları özel fiyatlarla KFL lerin perakende fiyatı % 50 düşecek, bu fiyattan hem tüketiciler, hem de elektrik kuruluşları kazanç sağlayacaklardır [3].

3.3. Guadalupe

Bir Fransız adası olan Guadalupe' un enerjisini Fransız Elektrik İdaresi (FEI) sağlamaktadır. Adadaki elektrik satış fiyatının, elektriğin üretim fiyatının yarısından az olması nedeni ile FEI adadaki enerji tasarrufu olanakları ile yakinen ilgilenmektedir.

Fransız Çevre Koruma ve Enerji Yönetimi Ajansının girişimi ve teknik desteği ile FEI, lamba ithalatçıları ve dağıtıcılarının da işbirliği ile çok büyük bir KFL kampanyası yaptı. Bu kampanyada 44000 katılımcı aileye 358000 KFL satıldı. Müşteriler aldıkları KFLlerin parasını üç ayda bir olmak üzere altı eşit taksitte ödediler. Ödeme miktarı, lambaların günde 4 saat veya daha uzun kullanılması ile oluşan enerji tasarrufundan az olacak şekilde seçildi.

Satılan KFLler ile FEI 3.5 milyon ABD Doları tasarruf sağladı. kWh başına tasarruf edilen tutar FEI'nin bu elektriği üretmek için harcadığı miktarın sekizde biri idi [4].

3.4. Hollanda

Hollanda' da 1990 yılında, 2000 yılına kadar CO₂ in atmosfere karışmasını %20 azaltmak kararı alındı. Konu ile ilgili olarak görev alan kuruluşa göre, enerji tüketiminin azaltılması konusunda en kısa sürede etkisini gösterecek alan, enerji etkin aydınlatma olarak ortaya kondu. Yapılan tahmin, 2000 yılına kadar konutlarda ve ticaret sektöründe enerji etkin aydınlatmaya geçilmesi ile Hollanda' daki enerji ihtiyacının % 2.5 azalacağı idi. Bunun gerçekleşebilmesi için 2000 yılına kadar 860 milyon ABD Doları yatırım yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada görev alan kuruluşlar genellikle iki yöntem uygulamaktadırlar:

1. Doğrudan indirim : Burada indirim satın alma sırasında olmaktadır. Bu indirimlere yardımcı olmak amacıyla ilgili kurum ürünler ve bunlar üzerinde yapılacak indirimleri açıklayan listeler yayınlamaktadır.
2. Performansa dayalı indirim: Burada, kurum müşteriye güç azaltımı ile ilgili, bir katsayıya bağlı. kW başına 10.6 ABD Doları ödemektedir. Örneğin, 40 kW dan 20 kW a düşen güç ihtiyacı için kurum $20 \times 10.6 \times 50 = 10600$ ABD Doları ödeme yapmaktadır [5].

Ayrıca, belediyelere yönelik olarak bilinçlendirme ve eğitim çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmaları şu ana başlıklar altında toplamak mümkündür

- Broşürler ve video kasetleri Bunlar ile halka açık yerlerdeki aydınlatmanın idaresi ve etkinliği konusunda yapılacaklar anlatılmıştır.
- Halka açık yerlerde yapılan aydınlatmalar ile ilgili eğitici kurslar: Bu kurslar, politikacılar idareciler ve teknik ekipler için geliştirilmişlerdir.
- Halka açık yerlerde yapılan aydınlatmalar ile ilgili önlem planı. Bu önlem planı, çeşitli belediyelerin yetkilileri ile halka açık yerlerdeki aydınlatmalardan sorumlu olan kişilerin işbirliği ile geliştirilmiştir ve. konu ile ilgili standartları mevzuatları buralardaki sorumluluk dağılımlarını, aydınlatmanın idaresini, belediyeler arası işbirliğini ve parasal konuları kapsamaktadır [6]

3.5. Meksika

Meksika' da elektrik enerjisi tepe değer ihtiyacının üstüne binen aydınlatma tepe değer ihtiyacını ve atmosfere karışan CO₂ i azaltmak için ILUMEX projesi adı altında bir program 1991 yılında Küresel Çevre Kuruluşunun teklifi ile Federal Elektrik Komisyonu tarafından başlatılmıştır. Proje Meksika ve Dünya Bankasının gözetiminde yürütülmektedir. Proje kapsamında akkor telli lamba yerine KFL kullanımı teşvik edilmektedir. Monterrey ve Guadalupe' da yapılan ön incelemelerin sonuçlarına göre. bu şehirlerde tepe değer yükünden yapılabilecek azami tasarruf 270 MW mertebesindedir. Bunun için 3.5 milyon KFL nin konutlara yerleştirilmesi gerekmektedir [7].

3.6. Nepal

Nepal dünyanın en fakir ülkelerinden bindir. Ekonomisi tarım üzerine kuruludur. Ülkenin endüstrisi, başkent Katmandu çevresinde yoğunlaşır. Nepal' de elektriğin % 10 u termik santrallerde, geri kalanı ise hidroelektrik santrallerde üretilir. Ayrıca Hindistan' dan da bir miktar enerji satın alınmaktadır. Dünya Bankasının tespitlerine göre ülkedeki hidroelektrik potansiyeli yüksektir, ancak bunu kullanmak pahalı ve zaman alıcı bir iştir. Zaten ülkede kullanılan elektrik enerjisi çok azdır. Örneğin, İsveç' in nüfusu Nepal' in nüfusunun yarısı kadar olmasına rağmen İsveç' de tesis edilmiş olan elektrik gücü Nepal' inkinin 100 katından fazladır.

1991 yılında Nepal hükümeti, Dünya Bankası vs Birleşmiş Milletler Gelişme Programının katkılarıyla, akşamüstü ortaya çıkan enerji tepe değeri ihtiyacını azaltmak amacıyla bir program başlatmıştır. Bütçesi 5 milyon ABD Doları olan programda öncelik, enerji etkinliğini bir bütün olarak geliştirip, yerli yakıt kullanımına geçerek, ithal yakıtın Nepal endüstrisindeki yerini azaltmaktır. Amacın yakıt olmasının nedeni ise petrolü, tüm ihracat ve turizmden kazanılanları tüketmesidir.

Nepal' in enerji tepe değer ihtiyacının en büyük sorumluları ticari binalardır. Bu nedenle Katmandu' daki turistik oteller ve bazı büyük alışveriş merkezleri enerji etkin aydınlatma projesinin hedefi olarak belirlenmişlerdir. Yapılan araştırmalar, 4 ve 5 yıldızlı otellerde elektrik tüketiminin % 26 sının, 2 ve 3 yıldızlı otellerde ise % 47 sinin aydınlatma amaçları ile tüketildiğini göstermişlerdir. Alışveriş merkezlerindeki elektrik tüketiminin yaklaşık % 62 si, diğer binalarda ise yaklaşık % 50 si aydınlatma amacıyla tüketilmektedir. Akşam saatlerinde ise bu yüzdeler artmaktadır [8].

3.7. Pakistan

Pakistan¹ in Ulusal Enerji Koruma Merkezi (UEKM), ülkedeki enerji etkinliğinin gelişmesi için en önemli fırsatın aydınlatma olduğunu tespit etmiştir. UEKM nin çabaları, Enerji Sektörü İdaresi Yardım Programının başlıkları ile desteklenmiş, gelişmekte olan ülkelerde enerji alanındaki kuruluşlara eğitim ve teknik bilgi veren Dünya Bankası da bu çabalara katkıda bulunmuştur.

Program, 5 yıl içinde eğitimi enerji etkin aydınlatmanın teknolojilerinin, pratik uygulamalarının tanıtımını ve, denetçilere, ithalatçılara, yerel üreticilere ve aydınlatma tasarımcılarına bu alandaki iş olanaklarını göstermeyi amaçlamaktaydı.

UEKM nin ilk başarısı, enerji etkin malzemelerde çok yüksek olan gümrük vergisini % 100 den % 20 ye düşürmek olmuştur. Ayrıca UEKM, ticari binalarda otomatik aydınlatma kontrollerinin kullanılmasına önayak olmuştur [9].

4. Sonuç

Ülkelerin elektrik enerjisi tüketimlerinin azımsanamıyacak bir kısmını oluşturan aydınlatma enerjisinden enerji etkin aydınlatma araçları kullanımı sayesinde yapılabilecek enerji tasarrufu, ülkelerin kalkınmasına katkıda bulunabilecek boyutlardadır. Aydınlatma, özellikle akşamüstü saatlerinde enerji tepe değerinin çok yükselmesine neden olmakta ve bu saatlerde artı ünitelerin devreye girmeleri gerekmektedir. Enerji etkin aydınlatma, maliyetleri ülke bütçelerine önemli yükler getiren santrai yapımlarının bir kısmının önüne geçmek gibi bir fayda sağlaması yanı sıra, zamanında daha düşük yükler için tasarlanıp yapılmış, daha sonra yükün artması ile gereken şebeke yenilemelerinin de önüne geçebilir. Ayrıca elektrik enerjisini termik santrallerden elde eden ülkelerde hava kirliliğinin azaltılmasına da katkıda bulunur. Dünyanın en zengin ülkelerinden, en fakir ülkelere kadar tüm dünyanın üzerinde durduğu bu konunun ülkemizde de daha ciddiyle ele alınması gerektiği açıktır.

Kaynaklar:

- [1] A Trillion-Dollar Appetite for Electricity, IAEEL newsletter, vol.2, 1 / 93, s 11-12
- [2] Mills E, US Law Helps Tap Large Savings Potential, IAEEL newsletter, vol 2, 1 / 93. s 8-9 ~
- [3] de Martino Jannuzzi G, Brazilian Utilities Households in Focus, IAEEL newsletter vol 3, 1 / 94, s.6-7
- [4] Mills E, A Caribbean Success Story IAEEL newsletter, 2 / 92, s.6
- [5] Holland Turns the Tide, IAEEL newsletter, 1 / 92 s.4-5
- [6] Van Hoek K, Public Lighting can be more energy-efficient, 3rd European Conference on Energy-Efficient Lighting Proceedings, 18-21 Haziran 1995, vol.2, s.19-22
- [7] Mills E, The World Bank Moves Towards Mexican CFL Loan, IAEEL newsletter 1 / 92, s.1-3
- [8] Borg N. Nepal' s Tourists Reduce the Load, IAEEL newsletter vol.4, 1 / 95, s.1-3
- [9] Mills E, Efficient Lighting Shines on Pakistan. IAEEL newsletter, vol.2, 1 / 93, s.10