

YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN HIZ DENETİMİ İÇİN FREKANS VE FAZ FARKI ESASLI YENİ BİR YAKLAŞIM

Altan GENCER¹

¹*Seyyid Burhaneddin Anadolu Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi, KAYSERİ*
altangencer@gmail.com

(Geliş/Received: 16.01.2013; Kabul/Accepted in Revised Form: 06.02.2013)

ÖZET: Günümüzde teknolojik gelişmelere ve endüstriyel uygulamalara paralel olarak, elektrik motorlarının kalite ve çeşitliliğinin geliştirilmesi konusu önem kazanmıştır. Ultrasonik motorların hız kontrolünde; iki faz gerilimleri arasındaki faz farkı, gerilimin genliği ve sürücü frekansını değiştirme teknikleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, istenilen benzetim frekans ve faz farkı teknikleri kullanılarak MATLAB SIMULINK ile başarılmıştır. Kullanılan eşdeğer devre, stator ve rotor birleştirmesi ile oluşturulmuştur ve üretici firmanın bilgileriyle karşılaştırılarak doğruluğu kontrol edilmiştir. Benzetim modeli stator ve rotor parametreleri ile stator ve rotor arasındaki sürtünme kayıpları eklenerek elde edilmiş tam bir modeldir. Sürücü devresinin bilgisayar ortamında yapılan benzetim sonuçları kontrol sisteminin yürüyen dalga tip ultrasonik motorun hız denetiminde etkin sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

Anahtar Kelimeler: *Yürüyen dalga ultrasonik motor, frekans hız kontrol, faz farkı hız kontrol*

A Novel Approach for Speed Control of Travelling Ultrasonic Motor Based on Frequency and Phase Difference

ABSTRACT: Nowadays, the topic of improving quality and variety of electric motors comes into prominence in parallel industrial applications and technologic developments. Control techniques for driving frequency, voltage amplitude and phase difference between two phases voltages are used in speed control of ultrasonic motors. In this study, simulation study has been achieved with MATLAB SIMULINK by controlling driving frequency and phase difference. Equivalent circuit is formed by combining stator and rotor, and convenience is controlled by comparing with the information of producing company. Simulation model is a complete model which is achieved by adding both stator and rotor parameters, and stator and rotor friction loses. Simulation results showed that the control system provided effective results in speed control of travelling wave ultrasonic motor.

Key Words: *Travelling wave ultrasonic motor, frequency speed control, phase difference speed control*

GİRİŞ (INTRODUCTION)

Günümüzde ultrasonik motorlar endüstride, robot ve otomotiv uygulamalarında servo sistem olarak özel ilgi çekmektedir (Bekiroğlu 2000).

Endüstrideki gelişmelere paralel olarak motorların yüksek hız, yüksek moment, küçük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı yeni motor tasarımları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca yarı iletken teknolojisinin gelişmesi sonucunda sürme devrelerinin daha ucuza sağlanabilmesi de motor

tasarımlarına hız verilmesinde etkili olmaktadır. Yeni olarak geliştirilen ve yapısında piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı motorlara yürüyen dalga ultrasonik motorlar (YDUSM) denilmektedir (Bekiroğlu 2000, Bal 2006).

YDUSM'un sürme prensibi yüksek frekanslı sürtünme kuvveti ve mekanik titreşimlere dayandığından matematiksel modelinin elde edilmesi zordur. Motor parametreleri, besleme gerilimi, yük momentini ve sürücü frekansına bağımlı olmasının yanı sıra çalışma esnasında sıcaklık artmasından dolayı da zamanla değişirler (Sun 2002, Storck 2000). YDUSM'un çalışma karakteristiklerini tahmin etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. YDUSM'un performansını artırmak için, tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olarak yeni bir model tasarlanmıştır. Bu çalışmada, bundan sonraki çalışmalara öncülük edecek bir model elde edilmiştir (Petit 2000). Sonraki çalışmada, YDUSM için eşdeğer devre motor hızının gerilim ve frekansla değişim eğrilerini gösteren model gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu çalışmada motorun yüklü çalışma ve sıcaklık değişimindeki karakteristikleri gözlenebilmektedir (Aoyagi 1996). YDUSM'un temel çalışma prensipleri değerlendirilerek, statorun matematiksel modeli gerçekleştirilmiştir. Bu matematiksel modelde, kullanılan malzemenin doğal frekansı ve dalga sayısı değişken olarak alınmıştır (Senjyu 1998). YDUSM'un yüklü çalışma karakteristiklerinin hesaplanması için eşdeğer devre geliştirilmiştir. Motorun mekanik ve elektriki kısmı eşdeğer devre üzerinde temsil edilerek motorun performansı değerlendirilmiştir (Hagedorn 1992). Sistemin fiziki büyüklükleri ile elektriki kısmın teorik yaklaşımını kapsayan, motorun eşdeğer devre modeli elde edilmiştir. Bu modelde özellikle kuplaj katsayısı ile model kuplaj katsayısı arasındaki fark ortaya konulmuştur (Hirata 1993). Bundan önceki eş değer devre çalışmalarında, YDUSM'un mekaniksel olarak ya da mekaniksel ve elektrikselsel devreler halinde elde edildiğinden karmaşık sistemler oluşturulmuştur. Bu çalışmada mekaniksel kısmını da elektrikselsel devre ye dönüştürerek karmaşıklık ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda motora uygulanan iki faz yüksek

frekanslı AA gerilimlerin de izlenmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, YDUSM için kullanılan eşdeğer model temel alınarak MATLAB Simulinkte benzetimi gerçekleştirilmiştir. YDUSM için kabul gören bir eşdeğer devre kullanılmıştır. Benzetimde faz farkı, frekans ve hız bilgileri ölçülmüştür. Benzetimin sonuçları, tasarlanan bu yürüyen dalga ultrasonik motorun hız denetiminde etkin sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur ve sürme sistemi basit bir kontrol mekanizmasına sahip olmuştur.

YÜRÜYEN DALGA TİP USM EŞDEĞER DEVRESİ (TRAVELLING WAVE TYPE USM EQUIVALENT CIRCUIT)

YDUSM' un çalışma koşulları parametre değişimlerinden dolayı oldukça karmaşıktır. YDUSM'un eşdeğer devresinin geliştirilmesinde piezoelektrik malzemenin etkileri ve eşitlikleri dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YDUSM için kabul gören bir eşdeğer devre Şekil 1'de verilmiştir (Bekiroğlu 2000).

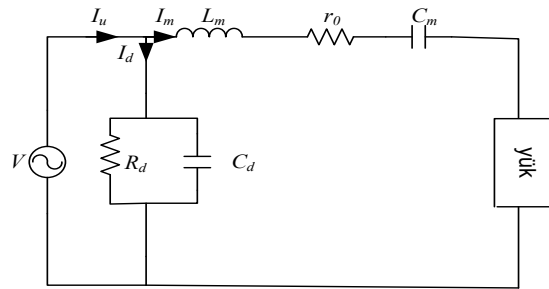
C_d = statoru oluşturan piezoseramik maddenin kapasitansı,

L_m = rotorun statora uyguladığı baskıyı temsil eden indüktansı,

C_m = rotorun statora uyguladığı baskıyı temsil eden kapasitansı,

r_o = stator ile rotor arasında sürtünmeden dolayı oluşan kayıpları temsil eden direnç,

R_f = yükü temsil eden dirençtir.



Şekil 1. YDUSM' un yüklü eşdeğer devresi
(Loaded circuit equivalent of TWUSM)

YDUSM' un tek faz eşitliği Eş. (1)' de verilmiştir.

$$Z = \frac{Z_m x Z_d}{Z_m + Z_d} \quad (1)$$

Burada, Z_d (stator) ve Z_m (rotor) empedanslarını ayrı ayrı Eş. (2) ve Eş. (3)'deki gibi yazabiliriz.

$$Z_m = r_0 + j(X_L + X_C) = r_0 + j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) \quad (2)$$

$$Z_d = \frac{R_d \frac{1}{j\omega C_d}}{R_d + \frac{1}{j\omega C_d}} = \frac{R_d}{1 + j\omega C_d R_d} \quad (3)$$

Eş (2) ve Eş.(3), Eş.(1) yerlerine yazılırsa Eş.(4) elde edilir.

$$Z = \frac{(r_0 + j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}))x(\frac{R_d}{1 + j\omega C_d R_d})}{(r_0 + j(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m})) + (\frac{R_d}{1 + j\omega C_d R_d})}$$

$$Z = \frac{R_d (r_0 \alpha + \beta(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}))}{\Delta} + \frac{jR_d (\alpha(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) - r_0 \beta)}{\Delta} \quad (4)$$

Eş. (4)' de verilmiş olan Δ 'nın denklemi Eş. (5) gibidir.

$$\Delta = \alpha^2 + \beta^2 \quad (5)$$

Eş (5)' deki α 'nın denklemi Eş(6)' de verilmiştir.

$$\alpha = R_d + r_0 - \omega R_d C_d (\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m}) \quad (6)$$

Eş (5)' deki β ' nın denklemi Eş.(7)' de verilmiştir.

$$\beta = \omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} + \omega r_0 R_d C_d \quad (7)$$

Elektriki empedans ve elektromekaniki empedans dönüşümü Eşitlik (8)' deki gibidir.

$$z_m = \frac{Z_m}{\Pi^2} \quad (8)$$

Daha sonra eş değer devredeki elektromekaniksel parametrelerin dönüşümleri Eşitlik (9) da verildiği gibidir[10].

$$R = \frac{r}{\Pi^2}, L = \frac{l}{\Pi^2}, C = \frac{c}{\Pi^2} \quad (9)$$

Eş (10)'da titreşim hızı, sinüzoidal akımın maksimum değerinin, normal kuvvet faktörünün oranına eşittir. Ayrıca, burada normal bir yönde titreşim hızının maksimum v ile gösterilmiştir(Elghouti 2000).

$$v = \frac{I_m}{\Pi} \quad (10)$$

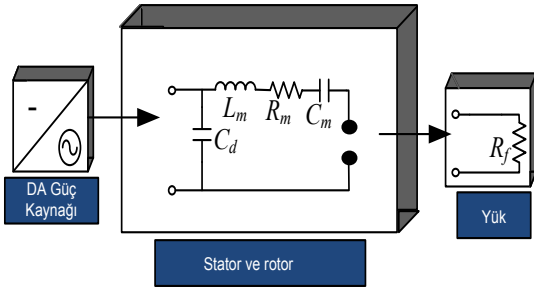
YÜRÜYEN DALGA USM SÜRME DEVRESİ (TRAVELING WAVE TYPE USM DRIVER CIRCUIT)

Yürüyen dalga ultrasonik motorun kontrolü amacıyla uygulanan gerilimin genliğinin, frekansının ve iki-faz arasındaki faz farkının herhangi birinin tek başına kullanıldığı yöntem tek-mod olarak adlandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan tek-mod yönteminde uygulanan gerilimin frekansı ayarlanmaktadır (Gencer 2011).

Tek-mod yöntemi, iki modlu hız kontrol sistemlerinin geliştirilmesini sağlayacak büyüklüklerin etkilerini ayrıntılı olarak analiz etmekte kullanılır. İki-mod yönteminde, istenen gücü sağlamak için uygulanan gerilimin genliğini ve sürücü frekansını düzenleyerek, bu iki kontrol büyüklüğünün etkisi birleştirilebilir. Bu sayede daha etkin uygulamalar yapılabilir (Gencer 2011).

Şekil 2'de, iki-mod çalışmaya göre YDUSM hız denetimine yönelik benzetimin blok diyagramı verilmiş ve benzetim için MATLAB programı kullanılmıştır. Hız denetimi benzetiminde; sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı kontrol girişleri (büyüklükleri) olarak kullanılmıştır. Tasarlanan sürme sisteminin hız denetiminde etkin sonuçlar verip vermediğini test etmek için Shinsei firmasının

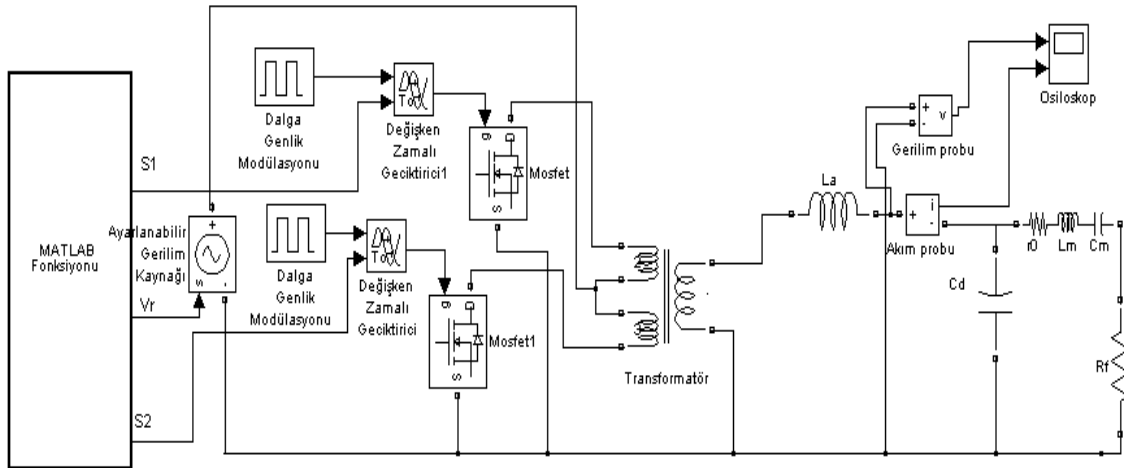
üretmiş olduğu, USR60 motorunun eşdeğer devre parametreleri benzetimde kullanılmıştır.



Şekil 2. YDUSM için kontrol blok devresi (Control block circuit for TWUSM)

Şekil 3'de YDUSM'un tek faz sürme devresi verilmiştir. MATLAB fonksiyon bloğunda üretilen anahtarlama sinyalleri değişken zamanlı

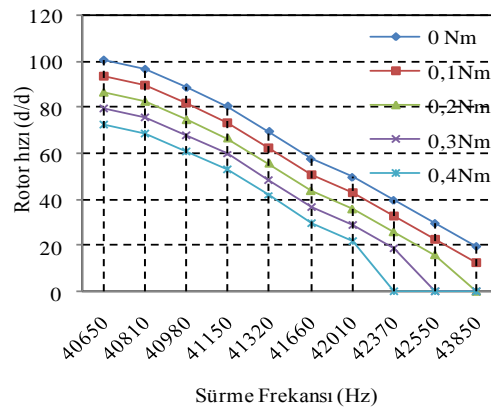
geciktiriciye uygulanmaktadır. Gerilimler arasındaki faz farkı değişken zamanlı geciktiriciler yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Ayarlanabilir gerilim kaynağı ile transformatörün ortak ucuna değişik genliklere sahip doğru gerilim uygulanmaktadır. Bu sayede YDUSM'un girişine değişik genliğe sahip yüksek frekanslı AA uygulanabilmektedir. Frekans değişimi ise dalga genişlik modülasyonun frekansı değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Akım ve gerilim problemleri yardımıyla YDUSM'un giriş değerlerinin osiloskoptan izlenmesi sağlanmaktadır. Şekil 3' de R_f yükü temsil eden dirençtir. Yük momenti (0,4Nm) için R_f direncinin değeri 1024 ohm olmaktadır. Yüksüz durumda R_f direncinin değeri 0 ohm olmaktadır (Gencer 2011).



Şekil 3. YDUSM'un tek faz sürme devresi (Single phase driver circuit of TWUSM)

İKİ-MOD ÇALIŞMAYA GÖRE BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS OF TWO-MOD OPERATION)

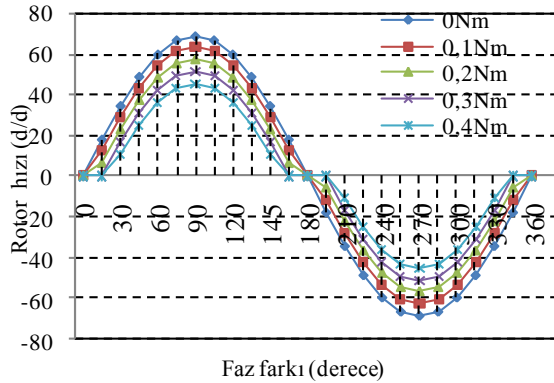
YDUSM'a uygulanan gerilimlerin frekansları ile rotor hızı arasındaki ilişki Şekil 4'de verilmiştir. Bu sonuçlar motor farklı yüklerle yüklü ve faz gerilimleri arasındaki açı 90° iken alınmıştır. Uygulanan gerilimin frekansı arttıkça motor hızının doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 4. Yüklü durumda sürme frekansı ile rotor hızının değişimi (changing rotor speed with driving frequency by loaded situation)

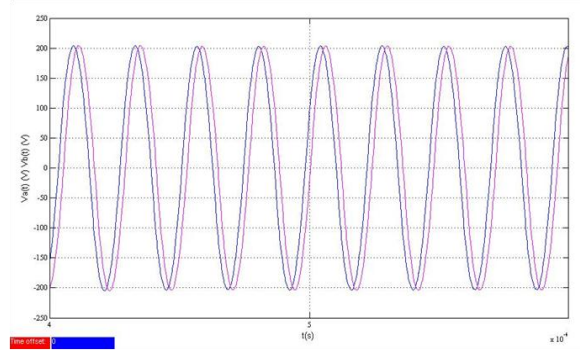
Yapılan bu benzetimde motor hızı 100 d/d ile 15 d/d arasında değiştirilirken, uygulanan gerilimlerin frekansı 40,65 kHz ile 43,85 kHz arasında değiştirilmiştir. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük momenti artıkça aynı frekans değerinde motor hızı değerinin azaldığı gözlenmiştir.

Bu benzetimde Şekil 5’de görüldüğü gibi faz farkı 0° ile 360° aralığında değiştirilerek, YDUSM’ un hızının 0 d/d ile 40 d/d arasındaki değişimi gözlenmiştir. Bu benzetim sonuçları motorun farklı yük seviyeleri için alınmıştır. Faz farkı sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 5’de görüldüğü gibi sinüs eğrisi biçimindedir. Bu çalışma modu, düşük hızlarda daha esnek çalışma aralığı sağlamaktadır. Faz farkını değiştirmek aynı zamanda motorun dönüş yönünü değiştirmek için de kullanılır. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük momenti artıkça aynı frekans değerinde rotor hızının aşağı doğru kaydığı gözlenmiştir.



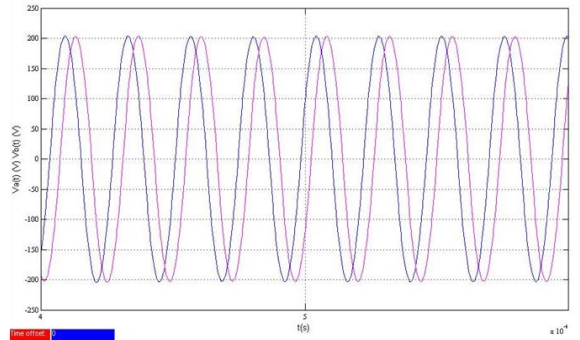
Şekil 5. Yüklü durumda faz farkı ile rotor hızının değişimi (*changing with rotor speed with phase difference by loaded situation*)

Şekil 6’da motorun hızı 20d/d’ya ayarlandığında, iki faz arasında faz farkı 30° olarak ölçülmüştür. Frekans değeri 42,85 kHz ve A-fazının etkin değeri 140V, B-fazının etkin değeri 140V olarak gözlenmiştir.



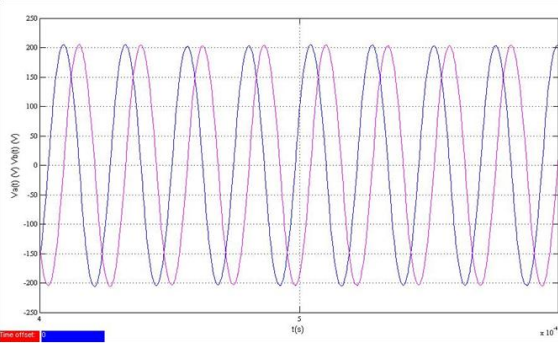
Şekil 6. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=30^\circ$ (20 d/d için benzetim sonucu) (*two phase voltages of TWUSM $\theta=30^\circ$ for 20 rpm*)

Şekil 7’de faz farkı olarak 60° değeri girildiğinde, beslemeden okunan iki faz gerilimin etkin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 140V olmaktadır. Motorun hızı 34d/d olarak ölçülmüştür.



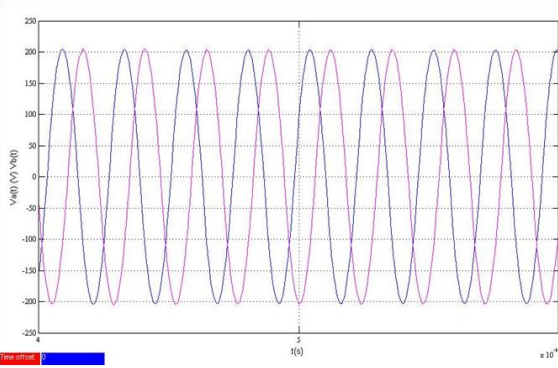
Şekil 7. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=60^\circ$ (34 d/d için benzetim sonucu) (*two phase voltages of TWUSM $\theta=60^\circ$ for 34 rpm*)

Şekil 8’de referans hız olarak 40 d/d değeri girildiğinde, faz farkı 90° ölçülmüştür. Bu benzetim yapılırken, A-fazının etkin değeri 140V, B-fazının etkin değeri 140V ve uygulanan gerilimlerin frekansı 42,85 kHz olmaktadır.



Şekil 8. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=90^\circ$ (40 d/d için benzetim sonucu) (two phase voltages of TWUSM $\theta=90^\circ$ for 40 rpm)

Şekil 9’da, faz farkı olarak 120° değeri girildiğinde beslemeden okunan iki faz gerilimin etkin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 140V olmaktadır. Motorun hızı 34d/d olarak ölçülmüştür. Faz farkının 90° ile 180° arasında olduğu değerlerde motorun hızı azalmaktadır.



Şekil 9. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=120^\circ$ (34d/d için benzetim sonucu) (two phase voltages of TWUSM $\theta=120^\circ$ for 34 rpm)

SONUÇ (RESULT)

YDUSM’ların hız denetiminde; sürme frekansı, gerilimin genliği ve iki faz gerilimlerin arasındaki faz farkını değiştirme yöntemleri kullanılır. Bu çalışmada ise, YDUSM’ un hız denetimi için gerekli olan bu üç büyüklükten sürme frekansı ve faz farkı kullanılarak benzetim gerçekleştirilmiştir. Önerilen sürme devresinde YDUSM’un mekaniksel kısmı da elektriksel devreye dönüştürülerek karmaşıklık ortadan kaldırılmıştır. Aynı zamanda motora uygulanan iki faz yüksek frekanslı AA gerilimlerin de izlenebilme kolaylığı sağlanmıştır. Benzetim çalışmalarında hem sürme frekansı ile hız denetimine hem de faz farkı ile hız denetimine yük uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük momenti arttıkça motor devir sayısının azaldığı iki denetimde de gözlenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Bekiroğlu, E., Bal, G., 2000, “Ultrasonik motorlar II:Sürme ve kontrol devrelerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Cilt 14, No: 1, ss. 99-115.
- Bal, G., Bekiroğlu, E., Bayındır, R., Görgün, A., 2006, “Yürüyen dalga tip ultrasonik motor denetimi ve bilgisayarla izlenmesi”, *Politeknik Dergisi*, Cilt 9, No: 4, ss. 225-231.
- Sun, D., Liu, J., Ai, X., 2002, “Modeling and performance evaluation of travelling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method”, *Sens. Actuators A*, Cilt 100, ss. 84-93.
- Storck, H., Wallaschek, J., 2000 “Experimental investigations on modelling assumptions in the stator rotor contact of travelling-wave ultrasonic motors”, *Journal of Vibroengineering*, Cilt 4.
- Petit, L., Rizet, N., Briot, R., Gonnard, P., 2000, “Frequency behavior and speed control of piezomotors”, *Sensors and Actuators A*, Cilt 80, ss. 45-52.
- Aoyagi, M., Tomikawa, Y., Takano, T., 1996, “Simplified equivalent circuit of an ultrasonic motor and its application”, *Ultrasonics*, Cilt 34, ss. 275-278.
- Senjyu, T., Yokoda, S., Miyazato, H., Uezato, K., 1998, “Speed control of ultrasonic motors by adaptive control with simplified mathematical model”, *IEE Proc. Elect. Power Appl.*, Cilt 145, ss. 180-184.

- Hagedorn, P., Wallaschek, J., 1992, "Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and mathematical modelling of the stator", *Journal of Sound and Vibration*, Cilt 155, ss. 31-46,.
- Hirata, H., Ueha, S., 1993, "Characteristic estimation of a traveling wave type ultrasonic motor", *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, Cilt 40, ss. 402-406,.
- Elghouti, N., Helbo, J., 2000, "Equivalent circuit modelling of a rotary piezoelectric motor, Modelling and Simulation", *Pittsburgh, USA*,.
- Gencer A., 2011, *Yürüyen Dalga Ultrasonik motorun üç-mod çalışma özelliklerinin incelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Ek A

USR60 ultrasonik motorun ve eşdeğer devre parametrelerinin özellikleri:

Shinsei USR60 USM

Sürme frekansı	40-44 kHz
Sürme gerilimi	100-130 Vrms
Anma momenti	0,4 Nm
Anma çıkış gücü	4 W
Dönüş yönü	CW/CCW
Ağırlık	175 g
Çalışma sıcaklığı	-10/+50 °C

Eşdeğer devrenin parametreleri:

$C_d=9\text{nF}$
$r_0=520\Omega$
$L_m=97\text{mH}$
$C_m=168\text{pF}$
$R_f=1024\Omega$

