

ULTRASONİK MOTOR İÇİN EŞDEĞER DEVRE MODELİNİN UYGUNLUĞUNUN ARAŞTIRILMASI

Güngör Bal¹

Erdal Bekiroğlu²

¹Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü, Ankara

²Abant İzzet Baysal Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bolu

¹gunbal@gazi.edu.tr

²bekiroglu_e@ibu.edu.tr

Anahtar Kelimeler: Ultrasonik motor, eşdeğer devre modeli, piezoelektrik

ÖZET

Bu çalışmada ultrasonik motor için eşdeğer devre modeli üretilmiş ve uygunluğu araştırılmıştır. Motorun çalışmasını etkileyen sıcaklık, zaman, moment gibi parametreler modele dahil edilmiştir. Motorun deneysel sonuçlarını elde etmek için bir deney düzeneği kurulmuştur. Deney düzeneğinde frekans, gerilim, moment ve hız büyüklükleri ölçülmüştür. Modelden elde edilen benzetim sonuçları ile deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu karşılaştırmalardan üretilen modelin ultrasonik motor için uygun olduğu kanıtlanmıştır.

ABSTRACT

In this study, an equivalent circuit model of an ultrasonic motor has been given and validation of the model has been examined. Temperature, time and torque parameters which affect the operation of the motor have been added to the model. To obtain the experimental results of the motor, an experimental rig has been set up. Frequency, voltage, torque and speed values have been measured from this rig. Simulation results obtained from both the model and experimental results have been compared. The developed model has been found proper from these comparisons.

1. GİRİŞ

Ultrasonik motor (USM) klasik elektromanyetik motorlara göre farklı yapı, çalışma prensibi, kontrol tekniği ve performansa sahiptir. Yapısında bulunan piezoelektrik seramik tarafından üretilen ultrasonik seviyedeki mekanik titreşim sinyallerini kullanarak çalışır. Titreşim elemanı olarak piezoelektrik malzeme kullanıldığından, bu motorlara piezoelektrik motorlar da denilmektedir.

USM'lar esnek yapım veya biçimlendirme özelliğine sahiptir ve düşük hızlarda yükü döndürmek için dışı sistemine ihtiyaç göstermezler. Bu motorlar, tasarımları ile ilgili yapılacak çalışmalarla özellikle küçük ölçekli hareket sistemlerinde kolaylıkla

kullanılabilmektedir. Ayrıca USM'un yüksek tutma momenti, düşük hızda yüksek moment, sessiz çalışma, küçük boyut ve elektromanyetik parazitlerden etkilenmeme gibi önemli özellikleri vardır. Bu özelliklerden dolayı hassas hareket ve yüksek moment istenen birçok pratik uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [1].

Bu avantajlarının yanında USM'un bazı dezavantajları da vardır. Motorun matematik modeli karmaşıktır. Motorun sürme prensibi yüksek frekanslı sürtünme kuvveti ve mekanik titreşimlere dayandığından, modelin elde edilmesi zordur. Birçok çalışmada sunulmasına rağmen, motorun tam modeli henüz elde edilememiştir. Motorun dinamik karakteristikleri lineer değildir ve motor parametreleri çalışma koşullarındaki farklılıklardan ve sıcaklık yükselmesinden dolayı değişmektedir. Bundan dolayı USM'un farklı çalışma koşullarındaki karakteristiklerini tahmin etmek zordur [2,3].

USM'un çalışma karakteristiklerini tahmin etmek için çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Hagedorn and Wallashek [4], USM'un matematik modelini kapsayan makalelerinde, motorun temel çalışma prensiplerini değerlendirmiş ve statorun matematik modelini elde ederek çalışmayı iletmişlerdir. Kullanılan malzemenin doğal frekansını ve dalga sayısını değişken olarak doğru olarak tahmin etmişlerdir. Hagood [5], bu konuda sonraki çalışmalar için çok önemli olan bir model sunmuştur. Bu modelde, motor performansı tasarım parametrelerinin bir fonksiyonu olarak tahmin edilmektedir. Hirata [6], yürüyen dalga USM'un yüklü çalışma karakteristiklerinin hesaplanması için eşdeğer devre modeli geliştirmiştir. Motorun mekanik ve elektriki kısmı eşdeğer devre üzerinde temsil edilerek motorun performansı tahmin edilmektedir. Aoyogi [7], motorun modellenmesi için basitleştirilmiş eşdeğer devre modelini kullanmaktadır. Elghouti [8], motorun eşdeğer devre modelini sunmuştur. Bu model sistemin fiziki büyüklükleri ile elektriki kısmın teorik yaklaşımını kapsamaktadır. Bu modelde özellikle kuplaj katsayısı

ile model kuplaj katsayısı arasındaki fark ortaya konulmuştur. Bal ve Bekiroğlu [9], USM için eşdeğer devre modeli elde etmiştir. Bu modelde motor hızının gerilim ve frekansla değişim eğrileri elde edilmiştir. Ayrıca motorun yüklü çalışma ve sıcaklık değişimindeki karakteristikleri elde edilmiştir.

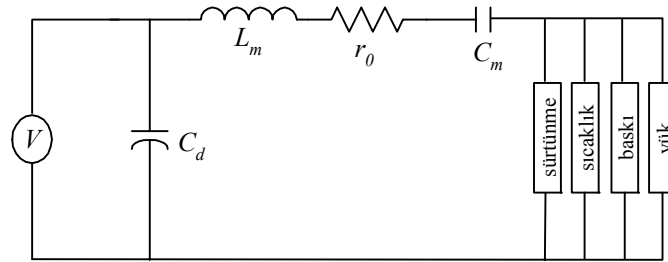
Bu çalışmada, USM için eşdeğer devre modelinin uygunluğu araştırılmıştır. Benzetim C programlama dilinde gerçekleştirilmiş, veriler MATLAB programı kullanılarak çizdirilmiştir. Gerçek sonuçları elde etmek için bir deney düzeneği kurulmuştur. Bu deney düzeneğinde gerilim, frekans, moment ve hız bilgileri ölçülmüştür. Modelin uygunluğu benzetim ve gerçek sonuçlar karşılaştırılarak tartışılmıştır.

2. USM'UN EŞDEĞER DEVRE MODELİ

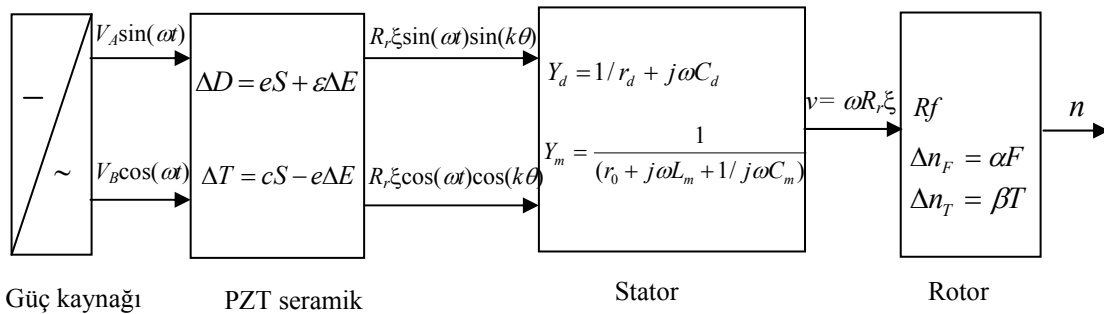
USM'ların pratik çalışma koşullarını kapsayan bir model üretilmesi durumunda, motorun tasarımı ve çalışma karakteristiklerinin tahmini mümkün olmaktadır. Bu bölümde USM'un eşdeğer devre modeli elde edilmiştir. Modelde temel piezoelektrik eşitlikler ile motorda kullanılan piezoelektrik seramik ve stator yapısında kullanılan fosfor-bronz malzemenin çalışma karakteristiklerinden yararlanılmıştır. Eşdeğer devre modeli ile giriş geriliminin genliği ve çalışma frekansı değişimlerinin motor hızına etkisi incelenmiş, ayrıca motorun farklı yüklerdeki davranışına ait karakteristikler verilmiştir. USM'un çalışmasını önemli bir derecede etkileyen sıcaklığın etkisi de modele eklenerek farklı çalışma sıcaklıklarındaki motor performans karakteristikleri elde edilmiştir.

Şekil 1'de USM'un tam eşdeğer devresi gösterilmektedir. Burada blokaj kapasitansı olarak adlandırılan C_d piezoelektrik elemanın dielektrik özelliğinden kaynaklanan kapasitedir. r_d dielektrik kaybı temsil edilmektedir. C_d ile r_d nin meydana getirdiği empedansa blokaj empedansı adı verilmektedir. Piezoelektrik malzemede histerisizden dolayı oluşan kayıplara ek olarak piezoelektrik seramiğin stator malzemesine yapıştırılan yüzeylerinde, stator ve elektrotlarda kayıplar oluşur. Bu kayıpların tümü eşdeğer devrede r_0 ile gösterilmektedir. C_m piezoelektrik seramik ve bağlı bulunduğu metal malzemenin esnekliğini, L_m ise ağırlığını temsil eden eşdeğer elemanlardır.

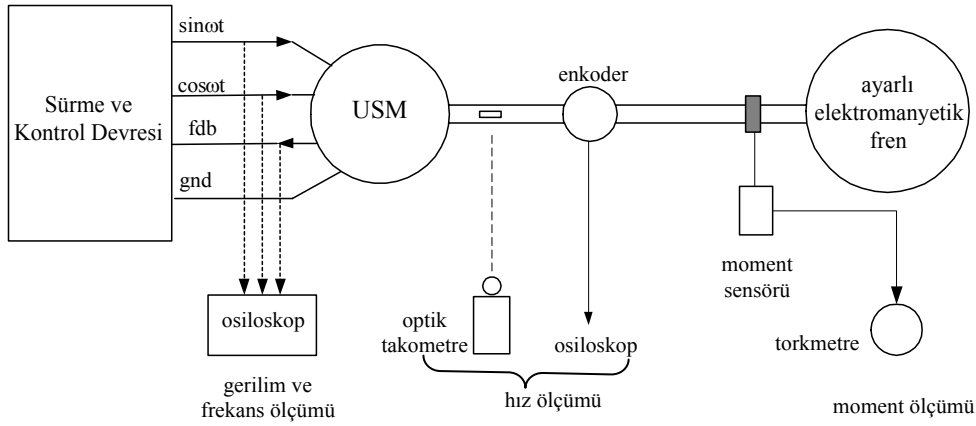
Stator-rotor arasındaki baskı kuvveti ve yük bağlanması motorun performansını etkilemektedir. Geliştirilen modelde motor miline yük uygulanması durumunda hızda meydana gelen değişim eğrileri de elde edilmiştir. Motor çalışması sırasında iç kayıplardan ve sürtünmeden dolayı piezoelektrik malzemede bir ısı artışı meydana gelmektedir. Bu ısı artışı piezoelektrik malzemenin blokaj kapasitesinin artmasına neden olmaktadır. Böylece USM'un mekanik rezonans frekansı azalmaktadır. Bunun anlamı; motor sabit bir frekansla çalıştırılırken meydana gelen ısı yükselmesinden dolayı hızı azalmaktadır. USM'un denetiminde bu durumun dikkate alınması gerekmektedir. Bu çalışmada, eşdeğer devre elde edilirken USR60 USM'da kullanılan NEPEC-61 piezoelektrik seramiğin sıcaklık-rezonans frekansı ve sıcaklık-zaman karakteristiklerinden yararlanılmıştır. Model ile ilgili denklemler ve ayrıntılar Ref. [1] ve [9] da verilmiştir.



Şekil 1. USM'un tam eşdeğer devresi



Şekil 2. USM modelinin blok diyagramı



Şekil 3. USM deney düzeneği

Benzetim aşağıdaki aşamalarda gerçekleştirilmiştir:

- USM'un frekansı değişken alınarak admitans eğrileri elde edilmiştir.
- Uygulanan gerilim sabit tutularak, farklı yükler için hız-frekans ilişkisi elde edilmiştir.
- Gerilim ve sürme frekansı sabit tutularak hız-moment ilişkisi elde edilmiştir.
- Sıcaklık değişken alınarak, sabit gerilimdeki hız-frekans ilişkisi elde edilmiştir.
- Sürme frekansı sabit tutularak hız-zaman ilişkisi elde edilmiştir.
- Sabit sürme frekansında kademeli yük uygulanması durumundaki hız-zaman ilişkisi elde edilmiştir.
- Farklı gerilim uygulanması durumundaki hız-frekans ilişkisi elde edilmiştir.

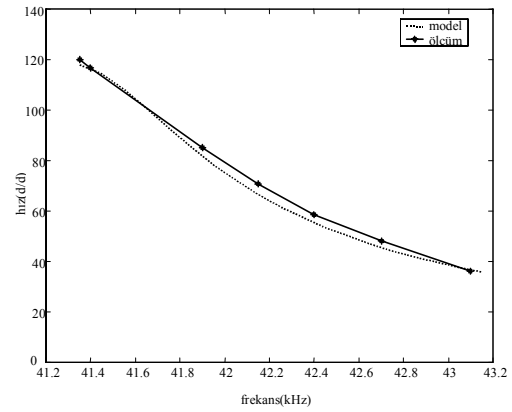
3. MODELİN UYGUNLUĞU

Eşdeğer devre modelinden elde edilen sonuçlar, Şekil 3'deki deney düzeneğinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Deney düzeneğinde motora uygulanan gerilimlerin genlikleri ve frekansları osiloskop yardımı ile ölçülmektedir. Motorun hız bilgisi hem optik takometre ile hem de motor miline bağlı enkoderden alınan kare dalga sinyalin frekansı hıza dönüştürülerek elde edilmektedir. Yüklü çalışma deneyleri için motorun miline elektromanyetik fren bağlanmıştır. Uygulanan yük, moment sensörü ile algılanmakta ve torkmetreye aktarılmaktadır.

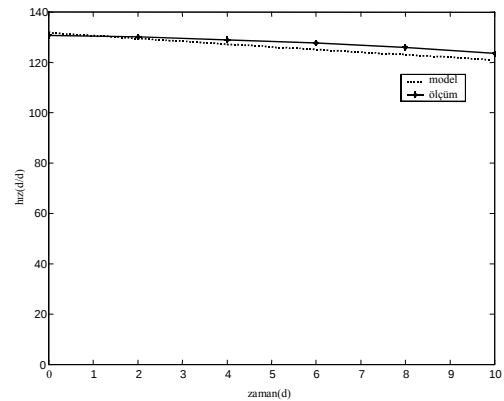
Şekil 4'de USM'un hız-frekans karakteristiğine ait model (benzetim) ve ölçüm sonuçları verilmiştir. Bu sonuçlar motor yüksüz durumda iken alınmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi model sonuçları ile ölçüm sonuçları birbiri ile uyumludur.

Şekil 5'de motorun hız-zaman eğrileri görülmektedir. 41,25 kHz sabit sürme frekansı ile sürülen motorun

hızı 10 dakikalık süreyle izlenmiş ve her 2 dakikada bir ölçülmüştür. Motor hızının 10 dakikalık süre içerisinde 7-8 d/d azaldığı görülmektedir. Burada da benzetim modelinden elde edilen tahmin sonuçları ile deneysel olarak alınan gerçek sonuçlar uyumludur.



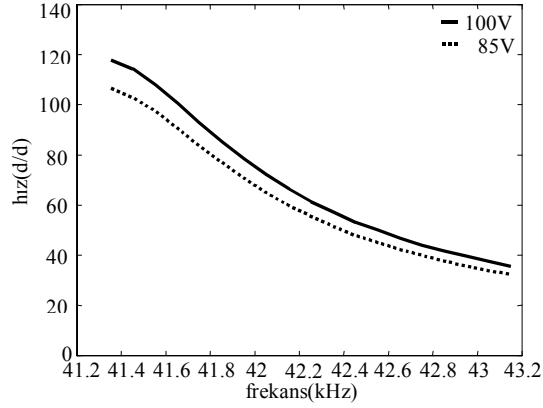
Şekil 4. USM'un hız-frekans eğrileri



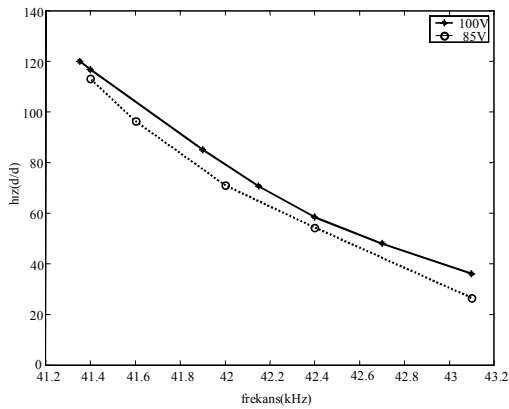
Şekil 5. USM'un hız-zaman eğrileri (f=41,25kHz)

Şekil 6 ve 7'de USM'un farklı sürme gerilimlerindeki hız-frekans eğrileri verilmiştir. Şekil 6 motorun 85V ve 100V gerilimlerindeki eşdeğer devre modelinden

elde edilen hız-frekans eğrilerini göstermektedir. Şekil 7’de ise aynı gerilimlerde motorun gerçek hız-frekans eğrileri verilmiştir. Benzetim sonuçları ile gerçek sonuçlar birbirleriyle uyumlu olmakla beraber, benzetim modelinden elde edilen eğrilerde düşük frekanslardaki hız farkı biraz daha fazladır.

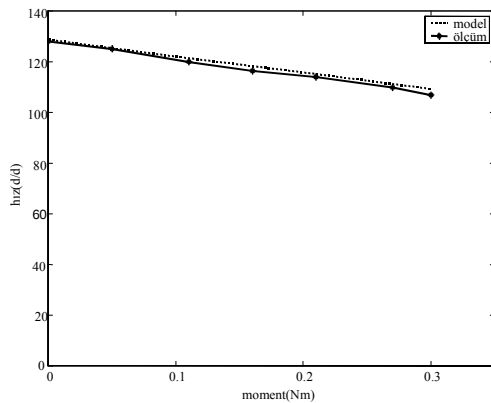


Şekil 6. USM’un hız-frekans eğrileri (model)



Şekil 7. USM’un hız-frekans eğrileri (deney)

Daha önce de belirtildiği gibi motora bir yük uygulandığında motor hızı azalmaktadır. Şekil 8’de motora sıfırdan başlanarak 0,3 Nm’ye kadar yükler uygulanarak motorun hızı ölçülmüştür. Ölçüm sonucunda motorun gerçek hız-moment eğrisinin benzetim sonuçları ile uygunluğu tespit edilmiştir



Şekil 8. USM’un hız-moment eğrisi

USM hızı; uygulanan gerilimlerin değeri değiştirilerek, sürme frekansının değeri değiştirilerek ve fazlar arasındaki açı değiştirilerek denetlenebilmektedir. Fazlar arasındaki açı ile hız denetimine bu çalışmada yer verilmemiştir.

4. SONUÇ

Bu çalışmada USM için eşdeğer devre modeli üretilmiş ve motorun farklı koşullardaki çalışma karakteristikleri elde edilmiştir. Böylece motorun hangi koşullarda nasıl tepki vereceği modelden elde edilen sonuçlarla tahmin edilmiştir. Motorun eşdeğer devre modeli üretilirken üretici firma bilgilerinin yanı sıra temel piezoelektrik eşitlikler kullanılmıştır. Modelde motorun elektro-mekanik enerji dönüşüm devresi üretilmiş ve elektro-mekanik kuplaj katsayısı, kuvvet faktörü ve admitans parametrelerinin bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. İlk olarak statorun ideal modeli elde edilmiş, daha sonra rotor ve aralarındaki sürtünme ve yük koşullarından oluşan kayıplar eklenerek tam model elde edilmiştir. Ayrıca USM’ların çalışma karakteristiklerini etkileyen sıcaklığın etkisi de modele eklenmiştir.

Çalışmada motorun frekans ve gerilim tepkileri elde edilmiştir. Modelden elde edilen değerlerle deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu amaçla motorun hız-frekans, hız-zaman ve hız-moment karakteristikleri incelenmiştir. Sonuç olarak modelden ve deneyde n elde edilen değerlerin uyumlu olduğu ve modelin USM analizi için kullanılabileceği saptanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 100E012 proje numarası ile desteklenmiştir. Desteginden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

1. Bekiroğlu E., 2003, Yürüyen dalga ultrasonik motorun hız ve konum denetiminin bulanık mantık denetleyici kullanarak sayısal işaret işlemci ile gerçekleştirilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
2. Sashida, T., Kenjo, T., 1993, An Introduction to Ultrasonic Motors, Oxford University Press, New York.
3. Tomikawa, Y., Ueha, S., 1993, Ultrasonic Motors Theory and Applications, Oxford University Press, New York.
4. Hagedorn, P., Wallaschek, J., 1992, Travelling wave ultrasonic motors, Part I: Working principle and mathematical modelling of the stator, Journal of Sound and Vibration, 155 (1), 31-46.
5. Hagood, N.W., McFarland, A.J., 1995, Modelling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor, IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control, 42 (2), 210-224.
6. Hirata, H., Ueha, S., 1993, Characteristic estimation of a traveling wave type ultrasonic

- motor, IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 40 (4), 402-406.
7. Aoyagi, M., Tomikawa, Y. and Takano, T., 1996, Simplified equivalent circuit of an ultrasonic motor and its application, Ultrasonics, 34, 275-278.
 8. Elghouti, N., Helbo, J., 2000, Equivalent circuit modelling of a rotary piezoelectric motor, Modelling and Simulation, Pittsburgh, USA.
 9. Bal, G., Bekiroglu, E., 2001, Characteristics estimation of travelling wave ultrasonic motors using equivalent circuit model, Int. Conf. on Electrical and Electronics Eng. ELECO'2001, Bursa-Turkey, 62-66.

EK

USR60 Ultrasonik motor ve NEPEC-61 piezoelektrik malzemenin özellikleri

Shinsei USR60 USM

Sürme frekansı	40 kHz
Sürme gerilimi	110 V
Sürme akımı	53 mA
Anma momenti	0,4 Nm
Anma çıkış gücü	4 W
Dönüş yönü	CW/CCW
Ağırlık	175 g
Çalışma sıcaklığı	-10/+50 °C
Tutma momenti	≤ 800 mNm
Rotor ataleti	$7,2 \times 10^{-6}$ kg/m ²
Statorun dış çapı	30×10^{-3} m
Statorun iç çapı	$23,5 \times 10^{-3}$ m
Statorun ortalama çapı	$26,75 \times 10^{-3}$ m
Temas yüzeyinin ortalama çapı	$26,75 \times 10^{-3}$ m
Statorun kalınlığı	$1,5 \times 10^{-3}$ m

NEPEC-61 Piezoelektrik seramik

Geçirgenlik (F/m)	$\epsilon_{33}^T = 1,24 \times 10^{-8}$
Elektromekanik kuplaj katsayısı	$k_{31} = 0,33$ $k_{33} = 0,67$
Young katsayısı (N/m ²)	$Y_{11} = 7,6 \times 10^{10}$ $Y_{33} = 6,4 \times 10^{10}$
Piezoelektrik gerilme sabiti (m/V)	$d_{31} = -1,32 \times 10^{-10}$ $d_{33} = 2,96 \times 10^{-10}$
Çıkış gerilimi sabiti (m/V)	$g_{31} = -10,6 \times 10^{-3}$ $g_{33} = 23,8 \times 10^{-3}$
Poisson oranı	$\sigma^E = 0,31$
Mekanik kalite faktörü	$Q = 1800$
Curie sıcaklığı (°C)	$T_c = 315$
Yoğunluk (kg/m ³)	$\rho = 6,90 \times 10^3$