

YÜRÜYEN DALGA TIPLİ ULTRASONİK MOTORUN MODELLENMESİ

Engin HÜNER¹

Şeref Naci ENGİN²

¹Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Elektronik Müh. Bölümü

²Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Müh. Bölümü

¹e-posta: enhun2001@yahoo.com

²e-posta: nengin@yildiz.edu.tr

Anahtar sözcükler: Yürüyen dalga ultrasonik motor, eşdeğer devre, piezoelektrik malzeme

ÖZET

Günümüzde teknolojinin gelişimi ile birlikte endüstriyel alanda uygulama bulan farklı çalışma prensiplerinde motorlar yapılmıştır. Ortaya konan motorlar sürekli geliştirilmeye çalışılmakta, en az enerji tüketen ve en çok iş yapan motorları üretmek başlıca amaç olmaktadır.

Malzeme bilimindeki gelişmeler motorların performanslarını arttırmış ayrıca yeni tür motorların yapılmasına olanak sağlamıştır. Bunlardan biri de piezo malzemenin kullanıldığı ultrasonik motorlardır.

Bu çalışmada son yıllarda robot, uzay uygulamaları, otomotiv, mürekkep püskürtmeli yazıcılar, mikro konumlama tablaları gibi konularda uygulama sahası bulan piezoelektrik malzemelerden yapılmış *yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun* yapısı, kullanım alanları, diğer motorlara göre üstünlükleri, eşdeğer devresi ve kontrol yöntemleri hakkında yapılmış olan akademik çalışmalardan derlenmiş bilgiler sunularak yürüyen dalga tipli ultrasonik motorların çok geniş bir alanda kullanılabilirliğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

1. GİRİŞ

Ultrasonik motor, tahmin edileceği üzere, ismini çok yüksek frekanslarda çalışmasından dolayı almaktadır. Bu frekans değeri 20kHz'in üzerindedir. Yapısında, aşağıda anlatılacağı gibi, piezoelektrik malzemeler bulundurlar.

Bazı kristal ve seramik malzemenin üzerine kuvvet uygulandığında elektrik geriliminin oluşması olayına *piezoelektrik etki* adı verilir. Bunun tersi de geçerlidir. Yani, piezoelektrik malzemeye elektrik gerilimi uygulanırsa piezoelektrik malzeme titreşimler üretir. Bu titreşimlerden yararlanarak lineer ya da açısız hareket edebilen motorlar üretilmektedir.

Ultrasonik motorların modellenmesi ve bir kontrol uygulaması başlıklı araştırma projemizin literatür taraması kısmından alınan bu çalışmada

ultrasonik motorların genel özelliklerinden, yapılarından, çalışma prensibinden ve temel eşdeğer devrelerinden bahsedilecektir.

2. UTRASONİK MOTORLAR

Ultrasonik motorlar (USM) piezoelektrik temelli mekanik titreşimler üreten cihazlardır. Çok önemli özelliklere sahiptirler. Bunlardan en önemlileri:

- yüksek moment (tork) çıkışı,
- sessiz çalışma,
- elektromagnetik dalgalar üretmeme ve elektromagnetik dalgalardan etkilenmeme,
- yüksek tutma momenti,
- basit yapısı [1, 2].

Ultrasonik motorun momenti elektromagnetik motorlara göre 10 ila 100 kat daha fazladır.

USM'lerin üstünlü özelliklerine karşılık bazı dezavantajları da mevcuttur. USM'nin tam matematik modelini çıkartmak zordur. Kontrol karakteristikleri karmaşık ve nonlineerdir. Motor parametreleri sıcaklıkla ve zamanla değişim gösterir. Bu dezavantajları gidermek amacıyla çeşitli kontrol yöntemleri geliştirilmiştir, [3-5].

USM'ler birçok avantaja sahip olduğundan kendine birçok kullanım alanı bulmuştur. Bunlar:

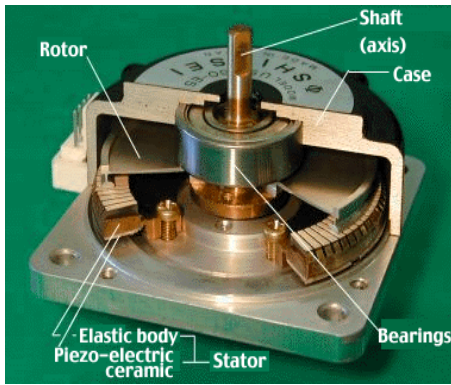
- Otomotiv
- Uzay uygulamaları
- Mürekkep püskürtmeli yazıcılar
- Saatler
- Fotoğraf makineleri
- Bilgisayar disk sürücüler
- Mikro konumlama tablaları
- Hava ve sıvı pompaları
- Lineer ölçekli enkoderler
- Robot ve mikro robot

3. YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN YAPISI VE ÇALIŞMA PRENSİBİ

Ultrasonik motorların geliştirilmiş değişik tipleri vardır. En yaygınlıkla kullanılan tipi yürüyen

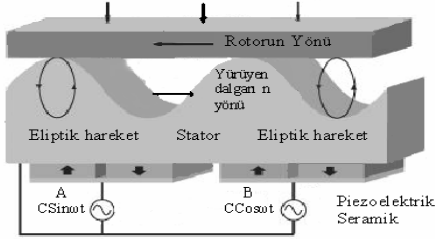
dalga ultrasonik motorlardır (YDUSM). YDUSM'ler, aralarında 90^0 faz farkı bulunan iki yüksek frekanslı gerilimin statora uygulanması ile sürülürler.

Şekil-1'de YDUSM'nin yapısı görülmektedir. YDUSM, klasik motorlarda olduğu gibi, stator ve rotor olmak üzere temel iki parçadan oluşmaktadır. Stator elastik malzeme ve piezoelektrik seramikten oluşur. Rotor disk yayı vasıtasıyla statora karşı preslenmiş bronz malzemeden imal edilir. Statora 90^0 faz farklı iki sinüsoidal dalga uygulandığı zaman statorun yüzeyinde eliptik dalgalar meydana gelir. Bu eliptik dalgalar sayesinde oluşan itme (sürtünme) kuvvetiyle rotor hareket eder [2].



Şekil-1 YDUSM'nin yapısı

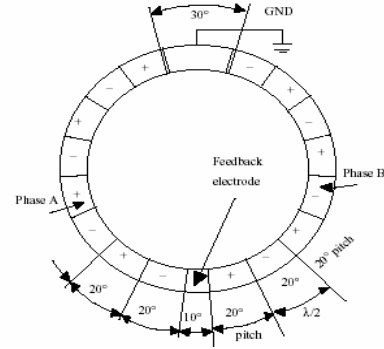
Statorun üzerinde meydana gelen eliptik hareketler, stator yüzeyinde yürüyen dalgaların oluşmasına neden olurlar, Şekil-2. Yürüyen dalgalar sürtünme kuvvetinin etkisiyle rotoru yürüyen dalganın tersi yönünde hareket ettirirler.



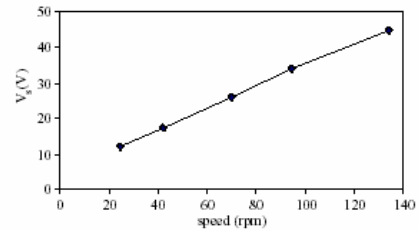
Şekil-2 YDUSM'nin çalışması

Yürüyen dalga elde edebilmek için iki adet mekanik mod gereklidir. Şekil-3'te elektrot-A $\cos(k\theta)$ fazının, elektrot-B $\sin(k\theta)$ fazının oluşumunu sağlar. Uygulanan bu 90^0 faz farklı iki gerilim zamana bağlı olarak yürüyen dalga oluştururlar. Uygulanan bu sinyallerin polaritelerinin değişimi motorun dönüş yönünün değişimini sağlar. Ayrıca Şekil-3'te görüldüğü gibi A ve B bölümleri arasında geri-besleme elektrodu yerleştirilmiştir. Bu elektrot stator yüzeyinde mekanik titreşimler meydana geldiği zaman yüksek frekanslı AC gerilim üretir.

Üretilen gerilimin değişimi Şekil-4'de verilmiştir. Şekil-4'de gösterilen bu ilişki yardımı ile ekstra bir hız sensörü kullanılmadan hız-kontrol uygulamaları rahatlıkla gerçekleştirilebilir.



Şekil-3 Piezoelektrik disk ve elektrot sıralaması

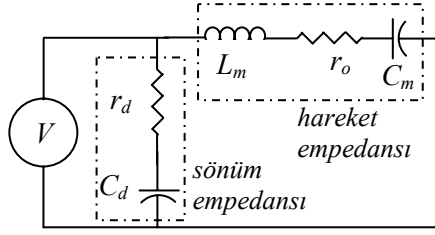


Şekil-4 Dönüş hızı (dv/dk) – Geri-besleme gerilimi (V) ilişkisi

4. YDUSM'nin EŞDEĞER DEVRESİ

Ultrasonik motorda iki adet enerji dönüşümü meydana gelir. Birincisi elektromekanik enerjinin dönüşümü, yani elektrik enerjisinin mekanik enerjiye dönüşümüdür. İkincisi mekanik titreşimlerin sürtünme kuvveti ile lineer veya açısız harekete dönüşmesidir.

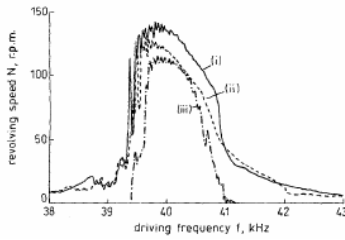
Şekil-5'de ultrasonik motorun bir fazının eşdeğer devresi verilmiştir. Eşdeğer devreyi oluşturan C_d sönüm sığasını (kapasitansını) temsil eder. C_d değeri, piezoelektrik malzemenin dielektrik özellikleri ile ilgilidir. Bu sığa değeri stator, herhangi bir titreşim gelmediği anda ölçülür. USR60 için bu değer $9nF$ 'dir [2]. r_d piezoelektrik seramiğin dielektrik kayıplarını gösterir. Ultrasonik motorun çalışma frekansında r_d ihmal edilebilecek düzeydedir. C_m statorun esnekliğini ifade eder. L_m statorun ağırlığından dolayı meydana gelen etkileri ifade eder. Histerizis etkisiyle metal ve piezoelektrik malzeme arasında meydana gelen mekanik kayıplar r_o ile gösterilir. C_m , L_m ve r_o 'ın oluşturduğu empedansa hareket empedansı denir.



Şekil-5 YDUSM eşdeğer devresi

$C_m = A^2/s$ ve $L_m = m/A^2$ büyüklüğündedir. s statorun yay sabiti, m metal parçalar ve stator seramik malzemenin ağırlığı, A kuvvet faktörüdür. A genellikle malzemelerin özelliği ile belirlenir.

Eşdeğer devrede C_m ve L_m arasında rezonans oluşturularak ultrasonik motor sürülebilir. Şekil-6'da değişik frekanslarda motorun hızı verilmiştir. (i) ve (ii) de uygulanan frekansa bağlı olarak elde edilen hız gösterilmiştir. Motorun çok yüksek değerlerde nonlineerlik içermesi hızında da zamana ve frekansa bağlı olarak ani değişimlere neden olmaktadır. Bu değişimlere motorun ısındaki artışların da büyük etkisi vardır. (iii)'de motora yük torku uyguladığımızda motorun sadece rezonans frekansı etrafındaki değerlerde döndüğünü görürüz [6].



Şekil-6 Sürme frekansı (kHz) – dönüş hızı (dv/dk) grafiği.

Ultrasonik motor için Şekil-5'de verilen eşdeğer devre yardımı ile mekanik rezonans hesabı Denklem 1'de verilmiştir.

$$f_m = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_m \cdot C_m}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{m/s}} \quad (1)$$

Sönüm admitansı Y_d ve hareket admitansı Y_m aşağıdaki ifadelerle gösterilmiştir.

$$Y_d = \frac{1}{r_d + 1/j\omega C_d} \quad (2)$$

$$Y_m = \frac{1}{(r_o + j\omega L_m + 1/j\omega C_m)} \quad (3)$$

$$Y_m = \frac{r_o}{r_o^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} + j \frac{1/\omega C_m - \omega L_m}{r_o^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} \quad (4)$$

$$I_m = V \cdot Y_m \quad (5)$$

Seramik yüzeydeki titreşim hızı

$$v = I_m / A \quad (6)$$

$$\text{Yürüyen dalga} \quad (7)$$

$$\text{Mod-A : } \cos(\omega t) \cos(k\theta) \quad (8)$$

$$\text{Mod-B : } \sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (8)$$

$$\varpi = \cos(\omega t) \cos(k\theta) + \sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (9)$$

$$\varpi = \cos(\omega t - k\theta) \quad (10)$$

k : stator yüzeyindeki dalga sayısı

$$k = 2\pi/\lambda$$

λ : Piezoelektrik malzemenin (+) ve (-) ile kutuplanan bir dalganın uzunluğu

ξ : üretilen dalganın genliği

R_r : yürüyen dalganın ekstenel şekil katsayısı

Yürüyen dalganın hızı

$$\frac{d\varpi}{dt} = -\omega R_r \xi \sin(\omega t - k\theta) \quad (11)$$

$$\frac{d\varpi}{dt} = -v \sin(\omega t - k\theta) \quad (12)$$

Motorun hız ifadesi

$$v = \omega R_r \xi \quad (13)$$

4.1 Eşdeğer devreden devir sayısı ve gerilim arasındaki bağıntının çıkartılması

$$I_m = V \cdot Y_m \quad (14)$$

$$v \cdot A = V \cdot Y_m \quad (15)$$

$$\omega \cdot R_r \cdot \xi \cdot A = V \cdot Y_m \quad (16)$$

$$\omega = \frac{V \cdot Y_m}{R_r \cdot \xi \cdot A} \Rightarrow \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{V \cdot Y_m}{R_r \cdot \xi \cdot A} \quad (17)$$

$$n = \frac{60}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{V}{R_r \cdot \xi \cdot A} \quad (18)$$

$$\left[\frac{r_o}{r_o^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} + j \frac{1/\omega C_m - \omega L_m}{r_o^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} \right]$$

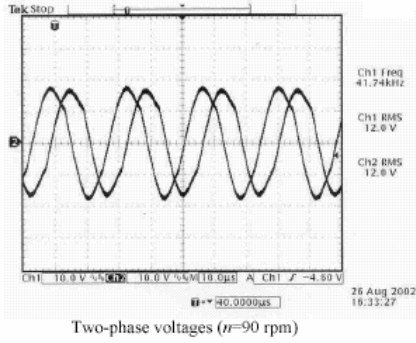
5. ULTRASONİK MOTORUN HIZ KONTROLÜ

Ultrasonik motorun hız kontrolünü yapabilmek için sırasıyla frekansı değiştirmek, gerilimin genliğini değiştirmek ve fazlar arası açığı değiştirmek gerekir. Yapılan çalışmada elde edilen grafiklerle ultrasonik motorun titreşim frekansı ile dönüş hızı arasındaki ilişki aşağıda verilmiştir [7].

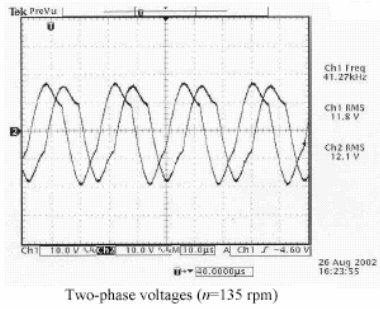
Buna göre, frekansın değişimine bağlı olarak ultrasonik motorun hızının değişimi Şekil-7 ve Şekil-8'de gösterilmektedir. Şekil-7'de sürme frekansı 41.74 kHz ve motorun hızı 90 dv/dk (rpm)'dir. Şekil-8'de sürme frekansı 41.27 kHz ve

motorun hızı 135 dv/dk'dır. Görüldüğü gibi sürme frekansının azalması hızı arttırmaktadır.

Yapılan çalışma frekansı değiştirilerek ultrasonik motorun devir sayısını ayarlamının mümkün olduğunu göstermiştir.



Şekil-7 İki-faz gerilim (Ch-1, Ch-2 12 Vrms, 41.74 kHz, $n = 90$ dv/dk.rpm)



Şekil-8 İki-faz gerilim (Ch-1 11.8Vrms, Ch-2 12.1 Vrms, 41.27 kHz, $n = 135$ dv/dk.rpm)

6. SONUÇ

Hazırlanan bu çalışma ile yürüyen dalga tipli ultrasonik motorun (YDUSM) diğer elektromagnetik motorlara göre avantajlarından ve dezavantajlarından bahsedilip yapısı, çalışması, eşdeğer devresi, ve devir sayısının kontrolü üzerine bilgiler verilmiştir.

Ultrasonik motorlar, boyutlarına göre sağladıkları yüksek moment ve düşük güç tüketimleri ile uzay ve robotik uygulamalarındaki kullanım oranlarını gün geçtikçe arttırmaktadır. Buna karşılık ultrasonik motorun yüksek oranlarda nonlineerlik içermesi kontrolünü zorlaştırmaktadır. Bu nedenle çalışmalar değişik tipte ultrasonik motor üretimi, ultrasonik motorları sürme devreleri ve kontrolü üzerine yoğunlaşmaktadır. Bu AR-GE çalışmaları neticesinde halen yüksek fiyatları nedeniyle fazla pazar payı olmayan bu motorların yakın gelecekte endüstriyel uygulamalarının yaygınlaşması beklenmektedir.

Burada sunulan literatür tarama ve yorumlama çalışmasının devamı olarak yapılacak çalışmada ultrasonik motorun modelleme ve çeşitli kontrol yöntemleri üzerinde simülasyon çalışmaları ve uygulamaları üzerinde durulacaktır.

7. KAYNAKLAR

1. Hirata, H., Ueha, S., 1995, Design of a traveling wave type ultrasonic motor, **IEEE Transaction on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control**, 42 (2), 225-231.
2. Bal, Güngör. 2003, A Digitally controlled drive system for travelling wave ultrasonic motor, **Tübitak** 11(3), 155-168.
3. Senju, T., Yokoda., S., Miyazato, H., Uezato, K., 1998, Speed control of ultrasonic motors by adaptive control with simplified mathematical model, **IEEE Proc. Electr. Power Appl.**, 145 (3), 180-184.
4. Senju, T., Uezato, K. and Miyazato, H., 1995, Adjustable speed control of ultrasonic motors by adaptive control, **IEEE Transactions on Power Electronics**, 10 (5), 532-538.
5. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2003, Servo speed control of travelling wave ultrasonic motor using digital signal processor, **Science Direct Sensors and Actuators**.
6. Lin, F.J., Wai, R.J., Hong, C.M., 1999, LLCC resonant inverter for piezoelectric ultrasonic motor drive, **IEEE Proc. Electr. Power Applications**, 146 (5), 479-485.
7. Bal Güngör, Bekiroğlu Erdal. 2003. Experimental examination of speed control methods for a travelling wave ultrasonic motor. **3. Uluslar arası İleri Teknolojiler Sempozyumu**, 415-423.