

**YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN
MİKRODENETLEYİCİ İLE HIZ KONTROLÜ**

Hasan UZEL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**EYLÜL 2006
ANKARA**

Hasan UZEL tarafından hazırlanan YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN MİKRODENETLEYİCİ İLE HIZ KONTROLÜ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Güngör BAL
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Elektrik Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan: : Prof. Dr. İlhami ÇOLAK

Üye : Prof. Dr. Güngör BAL

Üye : Yrd. Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU

Üye : _____

Üye : _____

Tarih : 14/09/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Hasan UZEL

**YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN MİKRODENETLEYİCİ
İLE HIZ KONTROLÜ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Hasan UZEL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Eylül 2006

ÖZET

Bu tezde yürüyen dalga ultrasonik motorun (USM) hız denetiminin PIC mikrodnetleyici ile gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Motoru sürmek için sayısal olarak kontrol edilen bir sürme sistemi geliştirilmiştir. Hız denetiminde kontrol girişi olarak sürme frekansı kullanılmıştır. Hız bilgisi motor miline bağlı 500 darbe/devirlik artımsal enkoder ile elde edilmiştir. Motora bağlı enkoderden elde edilen kare dalda sinyali saydırılarak motor hızının mikrodnetleyici ile ölçülmesi sağlanmıştır. Kontrol sisteminin USM'un hız denetiminde etkin sonuçlar verdiği deneysel olarak gösterilmiştir.

Bilim Kodu : 703
Anahtar Kelimeler : Ultrasonik motor, hız kontrolü, mikrodnetleyici
Sayfa Adedi : 73
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Güngör BAL

**SPEED CONTROL OF TRAVELLING WAVE ULTRASONIC MOTOR
WITH A MICROCONTROLLER**

(M.Sc. Thesis)

Hasan UZEL

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

September 2006

ABSTRACT

The aim of this thesis is to implement, speed control of travelling wave ultrasonic motor (USM) with PIC microcontroller. A digitally controlled drive system was developed in order to drive the motor. Driving frequency was used as a control input in speed control. Speed information was obtained by 500-ppr incremental encoder coupled with the motor shaft. Measurement of motor speed with a microcontroller was provided by cycling square wave signal obtained from encoder coupled with the motor. It has been experimentally shown that control system gave effective results in speed control of USM.

Science Code : 703

Key Words : Ultrasonic motor, speed control, microcontroller

Page Number: 73

Adviser : Prof. Dr. Güngör BAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Prof. Dr. Güngör BAL'a yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım hocam Dr. Ramazan BAYINDIR'a, ayrıca Yrd. Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na ve laboratuvarındaki çalışmalarımda yardımlarını esirgemeyen Arş. Gör. Mehmet DEMİRTAŞ'a ve Arş. Gör. Nihat ÖZTÜRK'e manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan çok değerli arkadaşlarım Alper GÖRGÜN'e, Hüseyin KUNDAKOĞLU'na ve eşime teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ULTRASONİK MOTORLAR	6
2.1. Yapısı ve Temel Prensibi	6
2.1.1. Yürüyen dalga tip ultrasonik motorun (YDUSM) yapısı ve çalışma prensibi	10
2.1.2. USM'nin çalışma karakteristikleri	13
3. YÜRÜYEN DALGA TİP USM EŞDEĞER DEVRE MODELİ	16
3.1. Eşdeğer Devre Elemanları	17
3.1.1. Eşdeğer kapasitans.....	17
3.1.2. Eşdeğer endüktans	18
3.1.3. Temel eşdeğer devre.....	19
3.1.4. Rezonans	21
3.1.5. Motorun tam eşdeğer devresi	22
3.1.6. Yürüyen dalga	25
4. PIC MİKRODENETLEYİCİLER.....	30

Sayfa

4.1. PIC Mikrodenetleyici için Genel Tanımlama	31
5. USM'UN PIC İLE SÜRÜLMESİ	33
5.1. USM'un Temel Sürme Devresi	33
5.2. USM'un PIC Mikrodenetleyici İle Hız Denetimi	34
5.3. Deneysel Sonuçlar	40
5.4. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi	58
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	61
KAYNAKLAR	66
EKLER	70
EK-1 Yürüyen-dalga tip USM (Shinsei USR60)'un temel özellikleri	71
EK-2 NEPEC-61 Piezoelektrik seramiğin özellikleri	72
ÖZGEÇMİŞ	73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Yürüyen-dalga tip USM'un (YDUSM) yapısı	11
Şekil 2.2. Yürüyen-dalga tip USM'un çalışma prensibi.....	13
Şekil 2.3. USM'un statorunda oluşan dalga şekli	13
Şekil 2.4. USM'un hız-frekans eğrisi	14
Şekil 2.5. USM'un zaman-frekans eğrisi	14
Şekil 2.6. USM'daki enerji dönüşümü	15
Şekil 3.1. USM'daki Elektromekanik dönüşüm eşdeğer devresi	16
Şekil 3.2. Piezoelektrik seramik-metal malzemeye AA gerilim uygulanması durumundaki eşdeğer devresi	19
Şekil 3.3. Kayıpları gösteren elemanlar ile birlikte stator eşdeğer devresi	20
Şekil 3.4. USM' un rezonans ve anti-rezonans frekansları	22
Şekil 3.5. Stator ve rotor eşdeğer devresi	23
Şekil 3.6. NEPEC-61 seramikte sıcaklığın blokaj kapasitesine etkisi.....	24
Şekil 3.7. USM' da zamana bağlı sıcaklık ve rezonans frekansı değişimleri.....	24
Şekil 3.8. USM' un tam eşdeğer devresi	25
Şekil 3.9. USM modelinin blok diyagramı.....	28
Şekil 4.1. PIC Mikrodenetleyici 16F877'nin yapısı.....	31
Şekil 5.1. USM için iki-faz inverter devresi.....	33
Şekil 5.2. İki-faz gerilim eğrileri	34
Şekil 5.3. PIC ile kontrol edilen USM sürme devresinin blok diyagramı.....	35
Şekil 5.4. USM sürme ve hız denetim sisteminin blok diyagramı	36
Şekil 5.5. HEDS–5540 enkoderin blok diyagramı	37

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. USM'un PIC 16F877 ile hız kontrol devresi	38
Şekil 5.7. PIC mikrodeneleyicinin yazılımının akış diyagramı.....	39
Şekil 5.8. DGM sinyali DA gerilimine çeviren filtre devresi	40
Şekil 5.9. PIC 16F877 de üretilen DGM sinyali ve buna karşılık motor hızının değişimi (42 d/d)	42
Şekil 5.10. İki-faz gerilimlerinin değişimi (motor hızı 42 d/d)	42
Şekil 5.11. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi (60 d/d).....	43
Şekil 5.12. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi (80 d/d).....	43
Şekil 5.13. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi (90 d/d).....	44
Şekil 5.14. İki-faz gerilimlerinin değişimi (motor hızı 90 d/d)	45
Şekil 5.15. Motor hız eğrisi (100 d/d)	45
Şekil 5.16. İki-faz gerilimlerinin değişimi (motor hızı 100 d/d)	46
Şekil 5.17. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi (130 d/d).....	48
Şekil 5.18. İki-faz gerilimlerinin değişimi (motor hızı 130 d/d)	49
Şekil 5.19. Tuş takımından girilen referans hız ile ölçülen hız değerlerinin değişimi	50
Şekil 5.20. Tuş takımından verilen referans değere karşılık filtre devresinin çıkışındaki DA gerilimi arasındaki ilişki	51
Şekil 5.21. PIC mikrodeneleyici ile ölçülen hızın değişimi	51
Şekil 5.22. USM iki-faz gerilimleri (42 d/d)	53
Şekil 5.23. USM iki-faz gerilimleri (80 d/d)	53
Şekil 5.24. USM iki-faz gerilimleri (90 d/d)	54

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. USM iki-faz gerilimleri (100 d/d)	54
Şekil 5.26. USM iki-faz gerilimleri (130 d/d)	55
Şekil 5.27. Enoder kare dalga sinyali (90 d/d)	56
Şekil 5.28. Geri besleme sinyali (90 d/d – 31 V)	57
Şekil 5.29. Enoder kare dalga sinyali (100 d/d)	57
Şekil 5.30. Geri besleme sinyali (100 d/d – 34,2 V)	58

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. USM eşdeğer devresi için kullanılan eşitlikler ve parametreler	29

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Yürüyen-dalga tip USM (Shinsei USR60).....	10
Resim 5.1. USM deney düzeneğinin fotoğrafı	41
Resim 5.2. Tuş takımından girilen referans hız ile ölçülen gerçek hız değerinin LCD'deki görüntüsü.....	46

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
T	Mekanik baskı sabiti
S	Mekanik gerilme sabiti
E	Elektrik alan sabiti
P	Kutuplanma
d	Mekanik gerilme, m/V
g	Gerilim katsayısı, Vm/N
K	Yay sabiti
k	Kuplaj katsayısı
C	Kapasite, farad
L	Endüktans, Henry
Z	Empedans, ohm
r_0	İç kayıplar, ohm
r_d	Dielektrik kaybı, ohm
Y_{11}	Young sabiti, N/m ²
Q	Kalite faktörü
Q^E	Poisson oranı
A	Kuvvet faktörü, N/V
F	Kuvvet, newton

Simgeler	Açıklama
V	Gerilim, volt
V_A	Motorun A fazı gerilimi, volt
V_B	Motorun B fazı gerilimi, volt
V_S	Geri besleme gerilimi, volt
Y_d	Blokaj admitansı, siemens
Y_m	Hareket admitansı, siemens
I_m	Hareket akımı, amper
C_m	Hareket kapasitansı, farad
L_m	Hareket endüktansı, henry
v	Titreşim hızı, m/s
q	Yük, coulomb
m	Kütle, kg
x	Yer değiştirme, metre
l	Uzunluk, metre
h	Kalınlık, metre
b	Genişlik, metre
ζ	Yürüyen dalga'nın genliği
R_r	Eksenel şekil katsayısı
f	Sürme frekansı, kHz
f_r	Rezonans frekansı, kHz
f_a	Anti- rezonans frekansı, kHz
ω_a	Açısal frekans, rad/s

Simgeler	Açıklama
θ	Konum, rad
e	Hata
ce	Hata değişimi
ω_{ref}	Referans hız, rad/s
θ_{ref}	Referans konum, rad
Δf	Frekanstaki değişim, kHz
$\Delta\theta$	Konum farkı, radyan
ϵ_0	Havanın geçirgenliği, farad/m
K_d	Dielektrik sabiti
A_y	Elektrodun yüzey alanı, m ²
$\omega(r,\theta,t)$	Yürüyen dalga

Kısaltmalar	Açıklama
USM	Ultrasonik motor
YDUSM	Yürüyen dalga tip ultrasonik motor
EM	Elektromanyetik motor
DGM	Darbe genişlik modülasyonu
DFM	Darbe frekans modülasyonu
AA	Alternatif akım
DA	Doğru akım
Sİ	Saat ibresi
SİT	Saat ibresinin tersi

1. GİRİŞ

Bir piezoelektrik seramik parça üzerine uygulanan alternatif gerilim sonucunda elde edilen titreşimi, hareketli parçaya sürtünme kuvvetiyle aktararak çalışan motorlara "piezoelektrik motorlar" veya "ultrasonik motorlar" denir. Buradaki ultrasonik sözcüğü, bu motorların 20 kHz üzerindeki frekanslarda (ultrasonik frekans bölgesinde) alışmasından dolayı kullanılmaktadır [1].

Piezoelektrik etki, basit olarak, üzerine mekanik bir basınç uygulanan bazı kristal ve seramik malzemelerde bir elektriksel yük ya da gerilim oluşması olarak tanımlanabilir. Karşılıklı yüzeyleri arasına bir gerilim uygulandığında aynı tip kristallerde ya da seramiklerde ters piezoelektrik etkiden dolayı şekil değişikliği meydana gelir. Piezoelektrik malzeme alternatif bir gerilime maruz bırakılırsa, malzemenin şekline bağlı olarak farklı biçimlerde titreme meydana gelmektedir [1].

İlk olarak yürüyen dalga ultrasonik motor (YDUSM) Sashida tarafından 1982 yılında geliştirilmiştir [2]. Daha sonra Takano alışmalar yoğunlaştırılmış ve elektrik mekanik güç dönüşümü daha yüksek verimle elde edilmiştir. Bu durumda motor karakteristikleri daha iyidir [3].

Günümüzde endüstrideki gelişmeler elektrik motorlarının geliştirilmesi zorunluluğunu artırmaktadır. Motorların yüksek hız, yüksek moment, düşük ağırlık, düşük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı yeni motor tasarımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca yarı iletken teknolojisinin gelişmesi sonucunda sürme devrelerinin daha ucuza mal edilebilmesi de motor tasarımlarına hız verilmesinde etkili olmaktadır. Yeni olarak geliştirilen ve yapısında piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı motorlardan biri de ultrasonik motorlardır [4].

Yaygın olarak kullanılan elektromanyetik motorların bazı dezavantajları vardır. Bu motorların en büyük sorunları boyutları ile ilgilidir. Birçok elektromanyetik motorda kullanılan sabit mıknatıs ağırdır ve önemli ölçüde yer kaplamaktadır. Ayrıca düşük

hız uygulamaları için dişli sistemi gerektirirler. Dişli sistemleri de salınımlara, dişli sisteminden kaynaklanan ek ağırlık ve hacim gibi problemlere sebep olmaktadır. (USM) Ultrasonik motorlar esnek yapım veya biçimlendirme özelliğine sahiptir ve düşük hızlarda yükü döndürebilmesi için dişli sistemine ihtiyaç göstermezler. Bu motorlar, tasarımları ile ilgili yapılacak çalışmalarla özellikle küçük ölçekli hareket sistemlerinde kolaylıkla kullanılabilir [5].

Ultrasonik motorların (USM); yüksek tutma momenti, düşük hızda yüksek moment üretme, sessiz çalışma, küçük boyut, mükemmel performans ve elektromanyetik parazit üretmeme gibi birçok faydalı özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden dolayı robotik uygulamalar, kameralar, fotoğraf makineleri, inkjet yazıcılar, saatler, radar sistemleri ve uzay uygulamaları gibi birçok uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [5,6].

Yürüyen dalga ultrasonik motorun doğrudan sürülebilme özelliği ve düşürücüye ihtiyaç duyulmaksızın düşük hızlarda yüksek tork üretmesinden dolayı endüstriyel robot uygulamalarında kullanılmaktadır. Ayrıca bu motorların diğer motorlara göre avantajları dikkate alındığında örneğin değişik boyut ve biçimlerde üretilmesi ve tam konum kontrolünün yapılabilmesi bu motorların otomatik odaklama yapan kameraların ve izleme aletleri motorlarında kullanılmaktadır. Bunlar manyetik alanlardan etkilenmedikleri için nükleer manyetik rezonans aletlerinde kullanımı önerilmektedir. Bu motorların çalışma prensibi bir rotor ve bir stator arasındaki sürtünme kuvveti esasına bağlıdır [6].

USM'un çok avantajı olmasının yanında dezavantajları da vardır. USM'un matematiksel modelini oluşturmak oldukça zordur ve çok karmaşıktır. USM'un sürme prensibi yüksek frekanslı sürtünme kuvveti ve mekanik titreşim oluşturma prensibine dayandığından modelin elde edilmesi zorlaşmaktadır. Ayrıca motorun dinamik karakteristikleri lineer değildir. Motorun parametreleri çalışma koşulları değiştikçe ve sıcaklık arttıkça değişmektedir. Bu durum motor yapısında bulunan piezoelektrik malzemenin sıcaklığa bağlı olarak karakteristiğinin değişmesi sonucu ile yorumlanabilir [7]. USM'un farklı çalışma koşullarındaki karakteristiklerini

tahmin etmek zor olması da matematiksel modelinin oluşturulmasını zorlaştırmaktadır. Birçok matematiksel model sunulmasına rağmen motorun tam bir modeli henüz elde edilememiştir [8].

USM'un sürülmesi için yüksek frekanslı titreşim kaynağı ve yarı iletken elemanlardan oluşan sürme devresi gerekmektedir. Piezoelektrik titreştiriciyi sürmek yüksek kapasitanstan dolayı zordur. Bundan dolayı, motorun sürme frekansında rezonansı sağlayacak bir frekans elde etmek için kapasitansa seri veya paralel endüktans bağlanması tercih edilmektedir. Bu şekildeki yaklaşım piezoelektrik başlatıcının sürülmesi ve motorun çalışması için kolaylık sağlar. Ultrasonik motorun uygun bir şekilde sürülmesi için seri-rezonans evirici ve paralel rezonans eviriciler kullanılmaktadır [9].

USM'un temas yüzeyinin modellenmesi sürtünme arabirimindeki enerji transferi prensibinin anlaşılması için faydalıdır. Bu modeller ayrıca yüksüz hız, tutma momenti, moment-hız eğrileri gibi motor karakteristiklerinin önceden hesaplanmasında kullanılmaktadırlar. Motorun aşınma özellikleri ve ömrü de temas mekanizması ile belirlenebilir [10-12].

Chung [13] motorun hız denetiminde darbe genişlik modülasyonu (DGM) yöntemini kullanmıştır. Hız denetimi için DGM sinyalinin çalışma oranı değiştirilerek motora uygulanan gerilimlerin değiştirilmesi sağlanmıştır. DGM ile uygulanan gerilimlerin genliği ayarlanarak motorun hız [14] ve konum [15] denetimi gerçekleştirilmiştir. Senjyu [16], motorun hız denetiminde DGM metodunu kullanmıştır. Bu denetimde verimin maksimum olma durumu dikkate alınmıştır.

Cha [17,18], motorun hız denetimi için bulanık mantık denetleyici kullanmıştır. Denetleyicide faz açısı kontrol çıkışı olarak seçilmiştir. Kinouchi [19], lineer USM için PI ve bulanık mantıktan oluşan bir denetleyici geliştirmiştir. Lin [20], motorun konum denetimi için adaptif bulanık mantık yöntemini kullanmış ve adaptif bulanık mantık denetleyicinin motorun denetiminde çok iyi sonuçlar verdiğini vurgulamıştır. Bulanık denetim kuralların elde edilmesinde motorun dinamik sinyal analizini

kullanmıştır. Senjyu [21], motorun konum denetiminde bulanık mantık kullanmıştır. Bu çalışmada parametre değişimlerine karşılık motorun performansının yüksek olması sağlanmıştır.

USM’u kontrol etmek için genellikle, sürme frekans kontrolü, uygulanan gerilimin kontrolü ve uygulanan gerilimlerin faz farkı kontrolü yöntemleri kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden konum kontrolü için en uygun olanı gerilimlerin faz farkı kontrolüdür. Çünkü faz farkı kontrolü USM’un düzgün bir şekilde dönmesini ve durmasını mümkün kılar. Fakat sadece faz farkı kontrolü ile hızlı ve tam konum kontrolünü başarmak zordur. Bu sebepten dolayı kontrol çıkışları için hem sürme frekansı, hem faz farkı kontrolü kullanılmaktadır. USM’un sürme esasları genel elektromanyetik tip motorlardan farklıdır ve onun matematiksel bir modeli henüz geliştirilememiştir. Motorun hız karakteristikleri sıcaklık artışı ve uygulanan yük torku ile değişir. Tüm bunlardan sonra yüksek performanslı USM’u kontrol etmek genellikle zordur. USM için bulanık mantık denetleyiciler veya PI denetleyicilerde kullanılan bazı kontrol şemaları önerilmektedir. USM’u kontrol etmek için hız karakteristiklerindeki değişiklikleri dikkate almak gerekir. Sabit kazanca sahip PI kontrolörlerle yüksek kontrol performansının devam ettirilmesi zordur. Ayrıca bulanık mantık kontrolörle bu motoru tam bir şekilde kontrol etmek kolay değildir. Çünkü bulanık mantık kontrolü geniş ölçüde tasarımcının düşünme gücüne bağlıdır. Bu olumsuzluklardan dolayı hibrit kontrol kullanmak daha etkilidir. Hibrid kontrol sistemi bir PI kontrolör ve bir adaptif kontrolör içermektedir [22].

Bu çalışmada, USM’un hız kontrolü için yüksek işlem hızına ve performansına sahip PIC 16F877 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu çalışmadaki amaç, motorun yapısından dolayı oluşan hız dalgalanmasını en aza indirmek ve motorun hız bilgisini sürekli olarak takip ederek hız denetimini gerçekleştirmektir.

Çalışmada Shinsei firmasının ürettiği USR60 YDUSM kullanılmıştır. Bu motorlar için yaygın bir sorun olan yükün ve çalışma sıcaklığının motor hızına etkileri dikkate alınarak, üretilen eşdeğer devre modeline uygun hız kontrol devresi geliştirilmiştir [5].

Motorun sürülmesi için sayısal olarak kontrol edilen bir sürme sistemi geliştirilmiştir. Daha sonra motorun hız denetimi için programlanabilen mikrodnetleyici kullanılmıştır. PIC 16F877 sayısal işaret işlemci, sürme sistemine entegre edilerek motorun hızı denetlenmiştir.

Tez 6 bölümden oluşmaktadır. 1. bölümde, literatürü ve çalışmanın temelini kapsayan bir giriş yapılmıştır. 2. bölümde, USM'ların temelleri ve piezoelektrik kavramı ile ilgili bilgiler açıklanmıştır. 3. bölümde, motorun eşdeğer devre modeli ve bu modelin uygunluğun incelenmesi, 4. bölümde, PIC mikrodnetleyicilerin yapıları ve PIC mikrodnetleyici ile hız denetimi, 5. bölümde, USM sürme sistemi, PIC mikrodnetleyicinin programlanarak USM'un hız denetimi ile bu denetimden elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. 6. bölümde, çalışmada elde edilen sonuçlar ve değerlendirmeler sunulmuştur.

2. ULTRASONİK MOTORLAR

2.1. Yapısı ve Çalışma Prensibi

Ultrasonik titreşimler kullanılarak bir piezoelektrik seramik parçada sürtünmeli işletme gücü üreten motora “ ultrasonik motor” denir. Son yıllarda geliştirilmeye başlanan ultrasonik motorların (USM) yüksek tutma momenti, düşük hızda yüksek moment, sessiz çalışma, küçük boyut ve elektromanyetik parazitlerden etkilenmeme gibi önemli özellikleri vardır [4].

Ultrasonik motor, sürme kaynağı olarak ultrasonik seviyedeki mekanik titreşimleri kullanan bir motor çeşididir. İnsan kulağı 50 Hz ile 20 kHz arasındaki ses dalgalarını algılama kabiliyetine sahiptir. Bu frekans aralığına işitilebilir frekans aralığı denmektedir. Ultrasonik dalgalar 20 kHz’ in üzerindeki ses dalgaları veya mekanik titreşimlerdir. Ultrasonik dalgaların kullanımı, titreşim kaynağı olarak piezoelektrik seramiklerin kullanımının doğrudan bir sonucudur. Piezoelektrik seramikler, uygulanan elektrik alanına bağlı olarak genişler veya daralırlar [4,23].

Ultrasonik motorlarda piezoelektrik davranış gösteren PZT veya PLZT adı verilen maddeler kullanılır. Kuartz ve baryum titanit piezoelektrik etkinin gözlendiği bazı maddelerdir. Daha sonra bu maddelerden daha güçlü piezoelektrik davranış gösteren PZT adlı bir madde türetilmiştir. Bu PbZrO_3 - PbTiO_3 karışımı katı bir maddedir. PZT terimi $\text{Pb}(\text{Zr-Ti})\text{O}_3$ den türetilen bütün maddeler için, PLZT ise $(\text{Pb,L a})(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ den türetilen maddeler için kullanılır.

Ultrasonik motorda, genişleme veya daralma şeklinde alternatif dalga üretmek için piezoelektrik seramik elemana 90° faz farklı yüksek frekanslı iki-faz sinüsoidal gerilim uygulanır. Titreşim seramik gövdede veya ona bağlı metal parçada üretilebilir. Osilasyonun genliği (1 μm) oldukça küçük bir değerdir. Daha yüksek bir kazanç elde etmek için ultrasonik sınırlarda seramiğin rezonans etkisinden yararlanılmaktadır. Tek yönlü bir hareket elde etmek için osilasyonlar motor içinde

mekanik olarak düzeltilir. Hareketin her bir saykılının genliği mikrometre seviyesinde olmasına rağmen, daha yüksek hızlar onlarca kHz değerlerindeki yüksek frekanslar ile ifade edilebilir [4].

USM'un sürme prensibi yüksek frekanslı mekanik titreşimlere ve sürtünme kuvvetine dayanır. Bu motorun hem matematik modelinin çıkarılması zordur hem de USM'un kontrol karakteristikleri karmaşık ve oldukça nonlineerdir. Ayrıca motor parametreleri; sürme frekansı, kaynak gerilimi ve yük gibi çalışma koşullarındaki değişimlerinden dolayı zamanla değişmektedir. USM'un hızı; sürme frekansı, uygulanan yüksek frekanslı gerilim ve iki-faz gerilimleri arasındaki faz farkı ile kontrol edilmektedir [10].

Birçok ultrasonik motor çeşidi bulunmasına rağmen yürüyen dalga tip ultrasonik motor en çok tercih edilenidir. Ultrasonik motorlar genellikle X-Y tablalarında, robotlarda, fotoğraf makinalarında ve uzay araçlarında kullanılmaktadır [5].

Ultrasonik motorlar temel özellikleri aşağıda verilmiştir [4].

- Birim ağırlık başına üretilen moment yüksektir. Rotorun ataleti küçük tutulabildiğinden dolayı başlatma ve durdurma sırasındaki kontrol karakteristiği düzgündür.
- USM da düşük hızlarda yüksek moment yüksek verim ile birlikte üretilebilir.
- Hız azaltıcı dişlilerin meydana getirdiği osilasyon hatalarının olmamasından dolayı motor konumunu hassas olarak elde etmek mümkündür.
- Elektrik enerjisi kesildiğinde temas yüzeyleri arasındaki sürtünme kuvvetinden dolayı mevcut konum korunabilir.
- Motor değişik biçimlerde yapılabilir ve küçük boyutlarda tasarlanabilir.
- Doğrusal hareketli (lineer) USM kolaylıkla tasarlanabilir.
- USM'ların sessiz çalışma özelliği vardır.
- USM'da elektromanyetik indüksiyondan dolayı oluşan parazitlerin etkisi yoktur.
- USM'un hızı yük momenti arttıkça azalmaktadır.

- Motoru sürmek için 90° faz farklı yüksek frekanslı iki faz sinüsoidal gerilim kaynağına ihtiyaç vardır.
- Yüksek aşınma direncine sahip piezoelektrik malzemeye ihtiyaç göstermekte olup piezoelektrik malzeme pahalıdır.
- Bu motorda yüksek güç elde etmek zordur.
- Rotor hareketi sürtünme ile elde edildiğinden stator ve rotor malzemelerindeki aşınmalardan dolayı motor ömrü sınırlıdır.

USM'lar temel olarak duran dalga ve yürüyen dalga olarak iki tiptir. Bu çalışmada duran dalga tip USM'a göre daha iyi performansa sahip olmasından dolayı yürüyen dalga tip USM kullanılmıştır.

USM'lar aynı büyüklük veya ağırlıktaki elektromanyetik motorlara (EM) göre 10 ile 100 kat daha fazla çıkış momenti üretmektedirler [24]. USM yeni geliştirilen bir motor çeşidi olmasına rağmen birçok pratik uygulamada kullanılmaya başlanmıştır [25].

Uygulamada kullanıldığı yerlerden bazıları aşağıda verilmektedir.

- Motor adımlama uygulamaları
- Bilgisayar disk sürücüler
- Mikro-konumlama tablaları
- Hava ve sıvı pompaları
- Saatler
- Yarıiletken test cihazları
- Fiber-optik konumlama
- Lineer ölçekli enkoderler
- Radar sistemleri
- Otomotiv uygulamaları
- Robot ve mikro robot
- Uzay uygulamaları

- Fotoğraf makineleri
- Inkjet yazıcılar
- Medikal cihazlarda

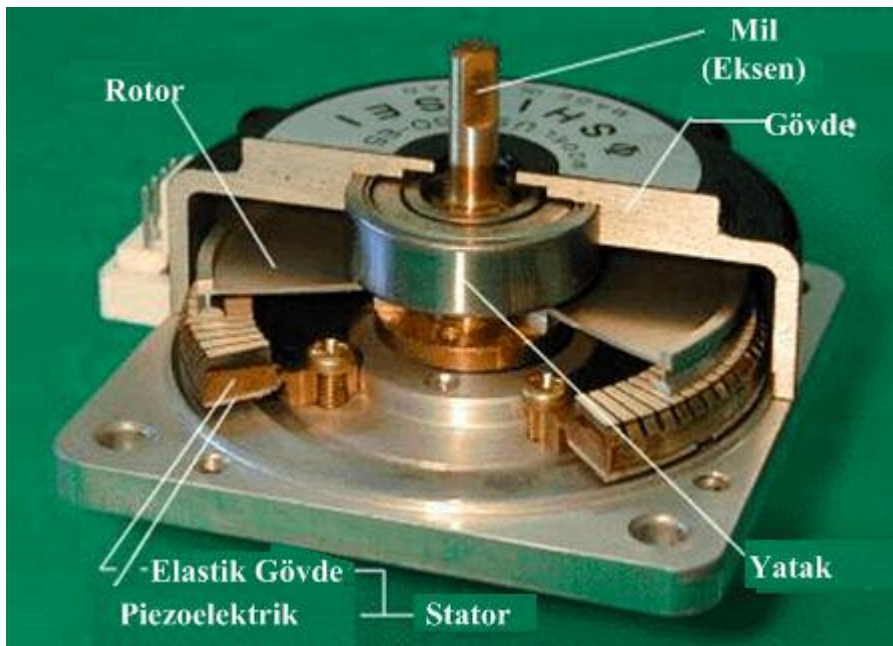
1982 yılında Sashida tarafından geliştirilen motorda kullanılan disk ya da halka şeklindeki piezoelektrik malzemenin yüzeyi, dilimli şekilde metal elektrotla kaplanır. Dilimlenmiş elektrotları bulunan piezoelektrik halka (ya da disk), aralarında 90 derece faz farkı olan iki alternatif sinyalle uyarılır. Bu uyarım sonucunda, yürüyen dalga oluşur. Yürüyen dalga tipindeki bu motorların değişik sürümleri Canon fotoğraf makinesinde otomatik odaklama mekanizmasında kullanılmıştır. Allied Signal firması, yine aynı mekanizmayla çalışan motorları füze ateşleme mekanizmasında (sürtünmeden dolayı uyarılmadığı zaman bulunduğu konumu korumasından dolayı) mekanik anahtar olarak kullanılmıştır. Aynı yöntemle çalışan motor, Seiko firması tarafından 10 mm çapında üretilmiş ve kol saatlerinde sessiz alarm olarak kullanılmıştır [1].

Ultrasonik dalgalardan faydalanan malzemelerdeki motor gövdesinin kontrolü, krank milinin et kalınlığı ölçümü ve sertlik tayini, gövde laser kaynaklarının kontrolü, direnç nokta kaynaklarının kontrolü, valflerdeki sürtünme kaynaklarının kontrolü içyapı hatalarının görüntülenmesi işlemlerinde kullanılması ultrasonik motorun otomotiv sanayisinde de kullanıldığını göstermektedir.

Yüksek tutma momenti, sessiz çalışması, elektromanyetik parazitlerden etkilenmemesi ve sürtünmeden dolayı uyarılmadığı zaman bulunduğu konumu koruması gibi özellikler, bu motorların Avrupa ve Amerikan şirketleri tarafından fark edilmelerini ve endüstriyel, robotik ve uzay teknolojisinde kullanılmaya başlamalarını sağlamıştır [26].

2.1.1. Yürüyen dalga tip Ultrasonik motorun (YDUSM) yapısı ve çalışma prensibi

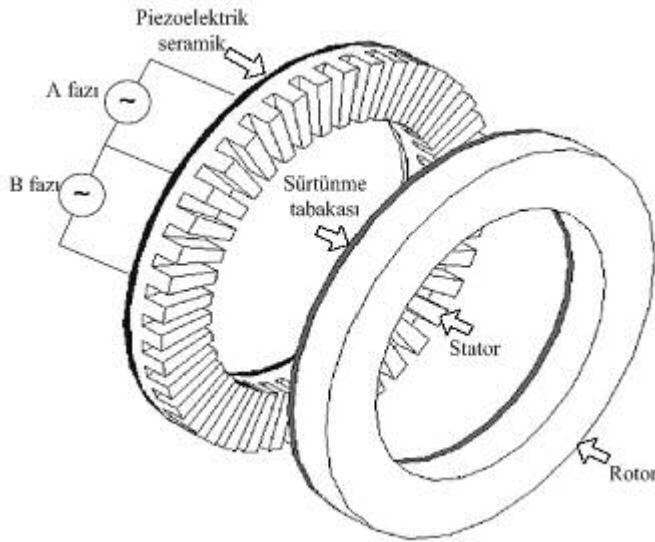
Resim 2.1 de bu çalışmada kullanılan Shinsei USR60 YDUSM'un kesit görünüşü gösterilmiştir. USM temel olarak bir rotor ve bir stator olmak üzere iki elemandan oluşmakta ve klasik elektrik motorlarından farklı olarak yapısında sargı bulunmamaktadır.



Resim 2.1. Yürüyen dalga tip USM

USM da hareket rotor ve stator arasındaki sürtünme ile sağlanır. İki piezoelektrik tabaka aralarında belli bir faz farkı olan iki duran dalga üretir. Bunlar birleştiğinde yürüyen bir dalga oluşur. Pratikte, kayma kayıplarını azaltmak ve sürtünme katsayısını artırmak için stator ve rotor arasına ince bir halka veya ince bir astar tabaka malzeme yerleştirilir. Astar malzeme aşınmayı azaltmaya ve motor ömrünü uzatmaya yardımcı olur. Rotor sadece bir mikrometre veya eliptiksel hareketin her bir saykılında hareket etmesine rağmen bu hareket 20 kHz frekansta 2 cm/s hıza ulaşabilir [4,27].

Ultrasonik dalgalar 20 kHz üzerindeki insan kulağı ile işitilemeyen ses dalgalarıdır. Fakat, ultrasonik motorlar hava yoluyla aktarılan ses dalgalarını kullanmazlar. Bunun yerine, piezoelektrik seramik elemanlar kullanılarak metal halkanın yüzeyinde ultrasonik seviyedeki frekanslarda titreşim üretilir. Motorun dönüş yönünü ters çevirmek için A veya B piezoelektrik elemanlarının birisinin gerilim fazını değiştirmek yeterlidir. Örneğin, B elemanın gerilimi $-C \cos \omega t$ olarak değiştirilebilir. Hız, C genliği değiştirilerek de kontrol edilebilir. Şekil 2.1’de USM’un stator ve rotor elemanları gösterilmiştir [4,9,19].



Şekil 2.1. Yürüyen-dalga tip USM’un (YDUSM) yapısı

Şekil 2.1’deki döner motorda iki metal halka birlikte sıkıştırılır. Birisi yürüyen dalgaları taşır ve diğerini sürer. Önceki halka üzerindeki noktalar, birkaç mikrometre genlikteki eliptiksel yörüngede hareket ederler. Sonraki halka, dalga tepelerinde önceki halkaya temas eder. Bu tarak dişi, halka (veya stator) olarak adlandırılır. Tarak dişinin amacı titreşimleri yükseltmektir. Dişler ayrıca, sürtünme esnasında oluşan tozların dışarı çıkmasını sağlar ve böylece kontak yüzeylerinin tozsuz kalmasını sağlar [4].

Ultrasonik motorda sabit dalgaların yerine yürüyen dalgalar kullanılır. Ayrıca yürüyen dalgalar tek yönlü olmalıdır. Sonsuz uzunlukta düzgün bir metal bar

kullanılırsa, sabitlenen uçlarında dalgalar geri yansıtılır ve sabit dalgalar üretilir. Yürüyen dalgaları üretmek için sonsuz uzunluktaki metal bardaki gibi etkiyi gerçekleştirmede bar uçları bir halka şeklinde bağlanmalıdır. İki veya üç titreşim kaynağını uygun aralıklarda bağlayarak bir yönde hareket eden yürüyen dalgalar üretilebilir [28].

USM’da iki adet piezoelektrik seramik eleman titreştirici olarak kullanılır ve birbirlerinden uygun mesafede yerleştirilirler. Bunlardan A elemanı bir titreşim üretecektir ve bu titreşim;

$$C \sin \omega t \quad (2.1)$$

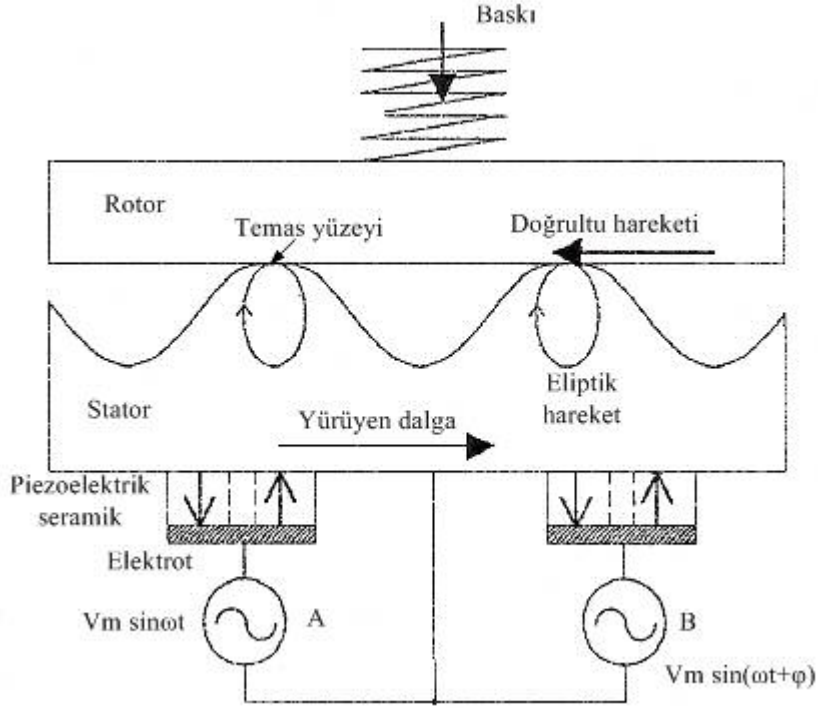
olurken, diğer B elemanının üreteceği titreşim;

$$C \cos \omega t \quad (2.2)$$

olacaktır. Burada; C titreşiminin genliği, ω açısal frekanstır. Bu düzenekte, sağa doğru yayılan bir gezici dalga üretilecektir. Eğer B elemanı;

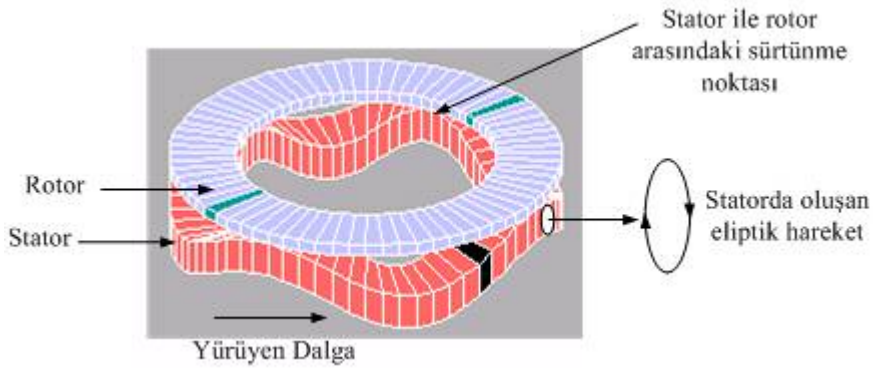
$$-C \cos \omega t \quad (2.3)$$

olarak verilen bir titreşim üretirse yürüyen dalganın yönü ters çevrilecektir. Şekil 2.2’de yürüyen dalga tip bir USM’un çalışma sistemi görülmektedir. Yürüyen dalgayı üreten metal üzerine bir metal veya bir plastik parça yerleştirilir. Bu parça rotor (veya kayıcı) olur. Eğer böyle bir hareket halindeki stator ve sert rotor birbiriyle baskı altında temas halindeyseler, dalga tepelerindeki eliptiksel hareketlerden kaynaklanan kontak yüzeyindeki teğetsel kuvvet tarafından rotor döndürülür [4,5].



Şekil 2.2. Yürüyen-dalga tip USM'un çalışma prensibi

USM'un statoruna 90° faz farklı iki yüksek frekanslı gerilim uygulandığında statorda oluşan yürüyen dalga şekli Şekil 2.3'de gösterilmiştir.



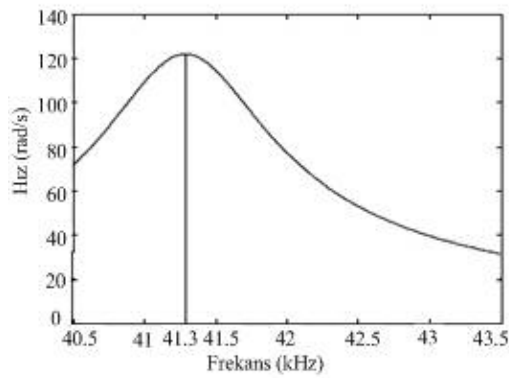
Şekil 2.3. USM'un statorunda oluşan dalga şekli

2.1.2. YDUSM'un çalışma karakteristikleri

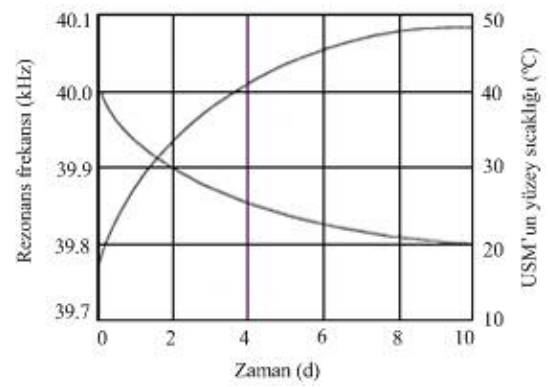
USM'un en büyük dezavantajı çalışma karakteristiklerinin kararlı olmamasıdır. USM ancak uygun bir sürme frekansı bandında çalışmaktadır. Dolayısıyla bu frekansın

altındaki ve üstündeki frekanslarda motor hareketsizdir. Şekil 2.4’de USM’un sürme frekansı ile devir sayısı arasındaki ilişkiyi gösteren karakteristik verilmektedir [4]. Şekilden de görüldüğü gibi USM ancak belirli bir frekans aralığında hareket etmekte ve ancak bu frekans aralığında hız kontrolüne imkan vermektedir.

USM’un diğer önemli karakteristiği hız-zaman karakteristiğidir. Çünkü USM’un yapısındaki elemanlar zamana bağlı ısı değişimi ile birlikte parametrelerini değiştirmektedirler. Bunun sonucu olarak motorun mekanik rezonans frekansı da değişmekte ve hızı azalmaktadır. Şekil 2.5’de zamana bağlı ısı yükselmesi ile değişen rezonans frekans eğrisi gösterilmektedir [9].



Şekil 2.4. USM’un hız-frekans eğrisi



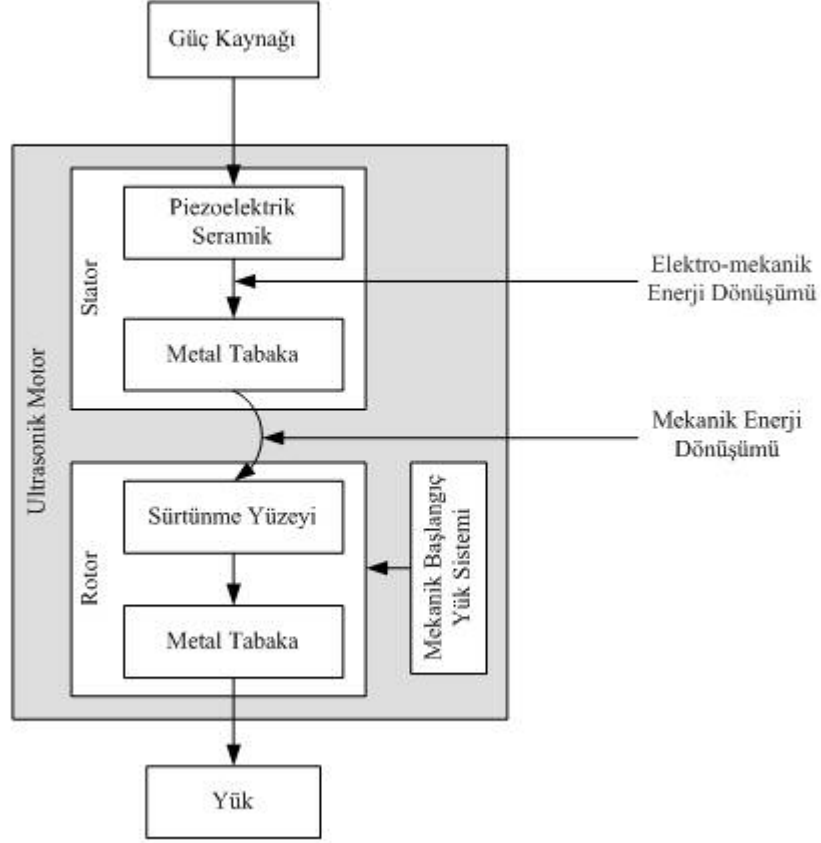
Şekil 2.5. USM’un zaman-frekans eğrisi

Motorun bir diğer karakteristiği de hız dalgalanma karakteristiğidir. Çalışma süresi arttıkça yüzeyde oluşan sıcaklıktan dolayı USM’un mekanik rezonans frekansı değişmekte, dolayısıyla hız da değişmektedir. Diğer bir durum ise motor hızının kararlı olmayıp bir dalgalanmaya sahip olmasıdır. Motorun hız dalgalanması yüzde olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir [5].

$$[(\text{maximum hız} - \text{minumum hız}) / \text{ortalama hız}] \times 100 \quad (2.4)$$

Motor için geliştirilecek sürme ve kontrol devreleri motorun kararlı olmayan karakteristiklerini en iyi duruma getirebilecek şekilde tasarlanmalıdır. Motorun hız dalgalanması ile ilgili problemi çözmek için çalışmalar sürmektedir. Şekil 2.6’da

USM'un enerji dönüşümü gösterilmiştir. USM de enerji dönüşümü ilk olarak elektro-mekanik olmakta daha sonra mekanik enerjiye dönüşmektedir.



Şekil 2.6. USM'daki enerji dönüşümü

3. YÜRÜYEN DALGA TİP USM EŞDEĞER DEVRESİ

Ultrasonik motorun çalışma koşulları parametre değişimlerinden dolayı oldukça karmaşıktır. USM'un eşdeğer devre teorisi geliştirilirken piezoelektrik malzeme etkileri ve eşitlikleri dikkate alınmıştır. Eşdeğer devre geliştirilirken yürüyen-dalgı tip ultrasonik motor temel alınmıştır [5]. Piezoelektrik malzemenin eşdeğer devresi; eşdeğer kapasite, eşdeğer endüktans ve eşdeğer direnç büyüklüklerinden oluşmaktadır [9].

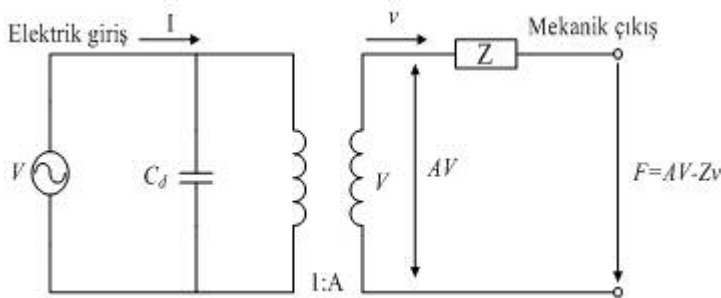
Piezoelektrik seramik kullanılan sistemlerin davranışını belirlemede aşağıdaki eşitlikler önemlidir [5,9].

$$-F = AV - Zv \quad (3.1)$$

$$I = Y_d V + Av \quad (3.2)$$

Burada, F mekanik terminallerdeki kuvveti, A kuvvet faktörünü, v mekanik terminallerdeki hızı, V elektrik terminallerdeki gerilimi, I elektrik terminallerindeki akımı, Z seramik malzemedeki mekanik empedansı ve Y_d blokaj admitansını göstermektedir [5].

Bu eşitlikleri göstermek için seramik elemanın eşdeğer devresi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Elektromekanik dönüşüm eşdeğer devresi

Eş. 3.1’de sağ taraftaki ilk terim seramik gövdede üretilen kuvvet olup uygulanan gerilimin A ile çarpımına eşittir. Eğer dahili mekanik empedans (Z) ile hızın (v) çarpımından oluşan empedanstaki kayıp, bu kuvvetten çıkartılırsa motor tarafından harcanan kuvvet elde edilir [5].

Eş. 3.2’de $Y_d V$ blokaj kapasitesinden geçen akım, $A v$ ise seramik gövdenin deforme olmasını sağlayan akımı temsil etmektedir. Burada kuvvet faktörü (A), seramik gövdeye birim hız verildiği durumda üretilen akım miktarıdır.

3.1. Eşdeğer Devre Elemanları

USM’un çalışma mekanizmasını içeren modeller oldukça komplekstir. Bunun yanında eşdeğer devre modeli motorun statik ve dinamik davranışlarının belirlenmesinde daha basit bir şekilde kullanılmaktadır. Bu kısımda, çalışmada elde edilen modele temel oluşturacak olan eşdeğer devre elemanları belirlenmektedir [5].

Piezoelektrik seramik malzemenin eşdeğer devresi; eşdeğer kapasite, eşdeğer endüktans ve eşdeğer direnç büyüklüklerinden oluşmaktadır. Motor modelinin elde edilebilmesi için bu büyüklüklerin doğru olarak bulunması gerekmektedir. Bu çalışmada eşdeğer devre elemanları aşağıdaki şekilde elde edilerek eşdeğer devre modeline eklenmiştir.

3.1.1. Eşdeğer kapasitans

Piezoelektrik malzemeye, üzerinde hiçbir mekanik yük yok iken, bir DA gerilim uygulandığında, malzeme başlangıçta deformasyona uğrasa da ardından tekrar dengeye gelir. Bu olay sabit bir kuvvet altındaki bir yayın davranışına benzer aşağıdaki gibi ifade

$$F = Kx \quad (3.3)$$

edilir. Burada; F uygulanan kuvvet, x yer değiştirme, K ise yay sabitidir.

Kuvvet faktörü, birim hız uygulandığı durumdaki üretilen akıma eşittir (Eş.3.4) ve ayrıca piezoelektrik malzemede üretilen kuvvet AV ile ifade edilmektedir [5].

$$I = Av \quad (3.4)$$

Zamanla ilgili terimler birleştirilirse ($i = dq / dt$, $v = dx / dt$), kuvvet faktörü; birim yer değiştirme ve üretilen şarj cinsinden yazılabilir. Dolayısı ile;

$$q = Ax \quad (3.5)$$

olur. Bu ifadeler Eş. 3.18'deki yerlerine konursa, aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$AV = K(q / A) \quad (3.6)$$

$$V = qK / A^2 \quad (3.7)$$

Buradan da eşdeğer kapasite,

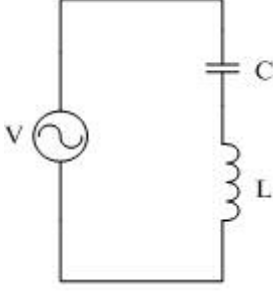
$$C = A^2 / K \quad (3.8)$$

olarak elde edilir. Buradaki yay sabiti K sadece piezoelektrik malzemeye bağlı değildir. Aynı zamanda, bu maddenin metalle kaplandığı durumlarda metalin özelliklerini de dikkate almak gerekir [5].

3.1.2. Eşdeğer endüktans

Piezoelektrik seramiğe AA gerilim uygulandığında seramikte bir titreşim meydana gelecektir. Seramik malzeme metal ile kaplı ise metalde titreşecektir. Dolayısıyla titreşimin büyüklüğü sadece yay sabiti K 'dan değil aynı zamanda seramik-metal bileşimindeki m kütlesinden de etkilenecektir. Bunlar dikkate alınarak piezoelektrik

seramik-metal malzemeye AA gerilim uygulanması durumundaki eşdeğer devre Şekil 3.2'deki gibi elde edilebilir [22,29].



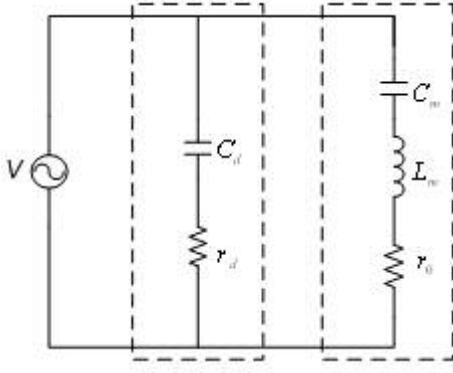
Şekil 3.2. Piezoelektrik seramik metal malzemeye AA gerilim uygulanması durumundaki eşdeğer devresi

3.1.3. Temel eşdeğer devre

Şimdiye kadar piezoelektrik malzemenin modeli üzerinde durulmuştur. USM statorunu modellemek için piezoelektrik malzemenin birleştirildiği metal malzemeyi de dikkate almak gerekir [29]. Bu kısımda Şekil 3.2’de verilen model geliştirilmektedir. Şekil 3.3’de statorun eşdeğer devresi görülmektedir. Yeni devreye C_d , r_d , ve r_0 ile adlandırılan üç eleman eklenmiştir. “blokaj kapasitansı” olarak adlandırılan C_d piezoelektrik elemanın dielektrik özelliğinden kaynaklanan kapasite olup seramik malzemenin sabit tutulduğu, dolayısıyla titreşimin olmadığı, durumda ölçülen kapasite değeridir [5].

Düzgün bir dielektrik malzemeye AA gerilim uygulandığında elektrik akı yoğunluğu (D), elektrik alanına (E) göre fazlıdır. Başka bir deyişle E ile D arasında üretilen histerisizden dolayı bir ısı oluşur. Bu dielektrik kaybı olarak adlandırılır. Bu kayıp, geliştirilen eşdeğer devre modelinde r_d ile temsil edilmektedir. C_d ile r_d nin birleşiminden oluşan empedansa “blokaj empedansı” adı verilmektedir. Piezoelektrik malzemede histerisizden dolayı oluşan kayıplara ek olarak piezoelektrik seramiğin stator malzemesine yapıştırılan yüzeylerinde, statorda ve elektrotlarda kayıplar oluşur. Bu kayıpların tümü eşdeğer devrede r_0 ile gösterilmektedir. Bu dirence “iç

direnç” adı da verilmektedir. C_m piezoelektrik seramik ve bağlı bulunduğu metal malzemenin esnekliğini, L_m ise ağırlığını temsil eden eşdeğer elemanlardır [5].



Şekil 3.3. Kayıpları gösteren elemanlar ile birlikte stator eşdeğer devresi

Blokaj admitansı Y_d ve hareket admitansı Y_m ifadeleri aşağıdaki gibi elde edilir [5].

$$Y_d = 1/r_d + j\omega C_d \quad (3.9)$$

$$Y_m = \frac{1}{r_0 + j\omega L_m + 1/j\omega C_m}$$

$$Y_m = \frac{1}{r_0 + j(\omega L_m - 1/\omega C_m)}$$

$$Y_m = \frac{r_0 - j(\omega L_m - 1/\omega C_m)}{r_0^2 - j^2(\omega L_m - 1/\omega C_m)^2}$$

$$Y_m = \frac{r_0}{r_0^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} + j \frac{1/\omega C_m - \omega L_m}{r_0^2 + (\omega L_m - 1/\omega C_m)^2} \quad (3.10)$$

Bu devrede, $C_m - L_m - r_0$ kolundan geçen akım motorun dönmesini sağlayan akımdır ve

$$I_m = V \times Y_m \quad (3.11)$$

Eşitliği ile elde edilir. Buradan, akım kuvvet faktörüne oranlanarak, seramik yüzeydeki titreşimin hızı bulunur.

$$v = I_m / A \quad (3.12)$$

Hız eşitliğinden de görüldüğü gibi piezoelektrik malzemedeki titreşimin hızı I_m akımına bağlıdır. Dolayısı ile uygulanan gerilimin değerinin değiştirilmesi, I_m değerini dolayısı ile titreşim hızını ve rotor hızını değiştirmektedir. Bu devredeki elektromekanik kuplaj katsayısı (k) aşağıdaki gibi bulunur [5].

$$k = \sqrt{\frac{C_m}{C_d + C_m}} \quad (3.13)$$

3.1.4. Rezonans

Piezoelektrik seramik malzemeye bir gerilim uygulandığında meydana gelen deformasyon oldukça küçüktür. Düşük gerilimle büyük deformasyonlar meydana getirmek için etkili bir yöntem olan rezonans etkisinden faydalanılmaktadır. Bir LC seri devresindeki açısal rezonans frekansı ω_0 ifadesi ile verilir [5].

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (3.14)$$

Bir piezoelektrik-metal birleşiminin rezonans frekansı

$$\omega_0 = \sqrt{K/m} \quad (3.15)$$

ifadesi ile elde edilir. Burada K piezoelektrik-metal birleşiminin yay sabiti, m ise bu birleşimin kütlesidir. Rezonans frekansı f_r aşağıdaki formülle bulunur.

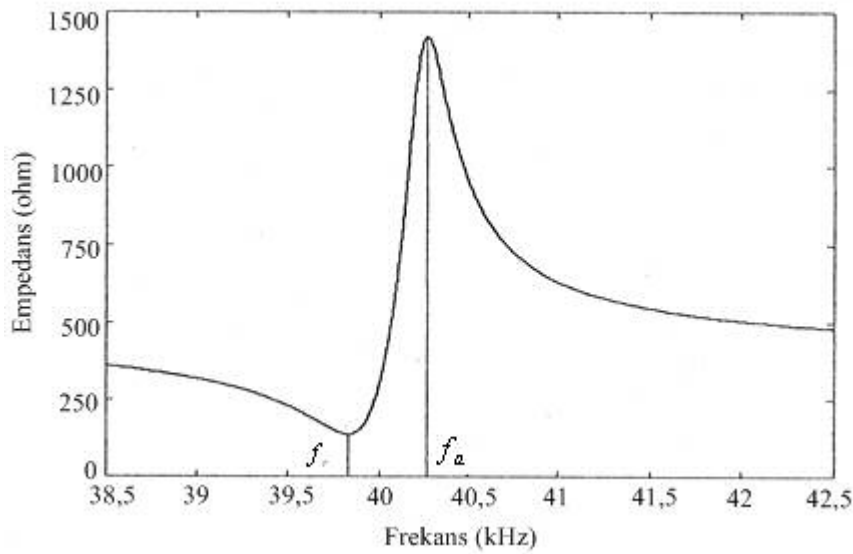
$$f_r = \omega_0 / 2\pi \quad (3.16)$$

Rezonansın keskinliği kalite faktörü olan Q katsayısı ile verilir. Eşdeğer devredeki Q katsayısı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$Q = \frac{\omega_0 m}{r_0} \quad (3.17)$$

Q katsayısı ne kadar büyük olursa, r_0 direnci ve dolayısıyla kayıplar o kadar düşük olmaktadır. USM'larda yüksek kalite faktörüne sahip seramikler kullanılmaktadır [5].

Rezonans frekansında (f_r) eşdeğer devrenin empedansı minimum olmaktadır. Bunun tersi olarak anti-rezonans frekansında (f_a) ise empedans maksimum olmaktadır. Şekil 3.4'de elde edilen eşdeğer devre için rezonans ve anti-rezonans frekansları gösterilmektedir [5].

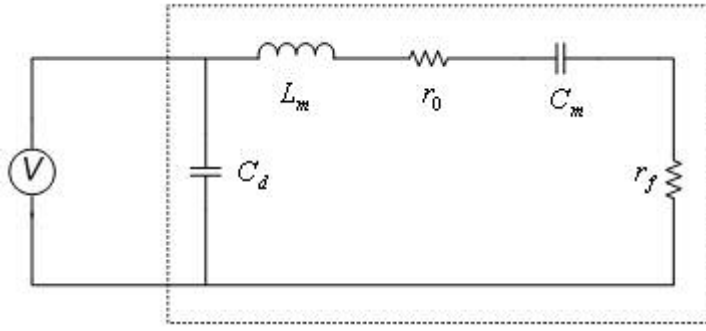


Şekil 3.4. USM'un rezonans ve anti-rezonans frekansları

3.1.5. Motorun tam eşdeğer devresi

Şimdiye kadar elde edilen model motorun sadece statoruna aittir. Normal çalışma koşullarında rotorun da dikkate alınması gerekmektedir. Modele rotor ilave edildiğinde stator ile rotor arasındaki sürtünme, bu sürtünmeden ve kayıplardan dolayı oluşan ısı ve rotor miline bağlanacak yük gibi parametreler önem kazanmaktadır [30,31]. Rotorun eklenmesi durumunda oluşacak eşdeğer devre

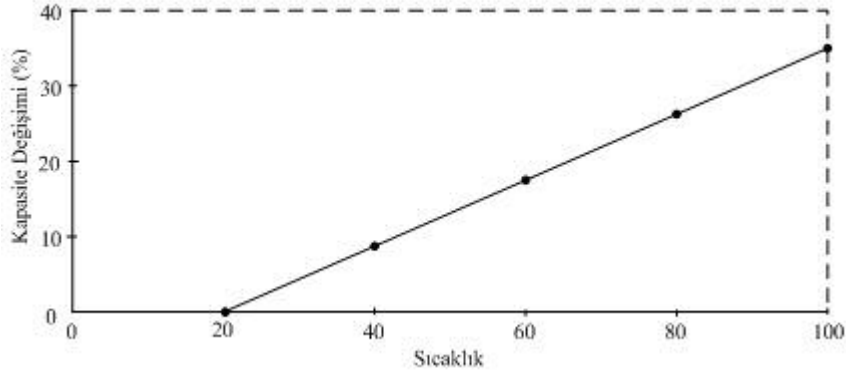
Şekil 3.5'deki gibidir. R_f direnci stator ile rotor arasındaki sürtünme kayıplarını temsil için eklenmiştir [5]. R_d direnci ultrasonik motorun çalıştığı frekans değerinde ihmal edilebilir bir değerde olduğundan, eşdeğer devreden çıkartılmıştır.



Şekil 3.5. Stator ve rotor eşdeğer devresi

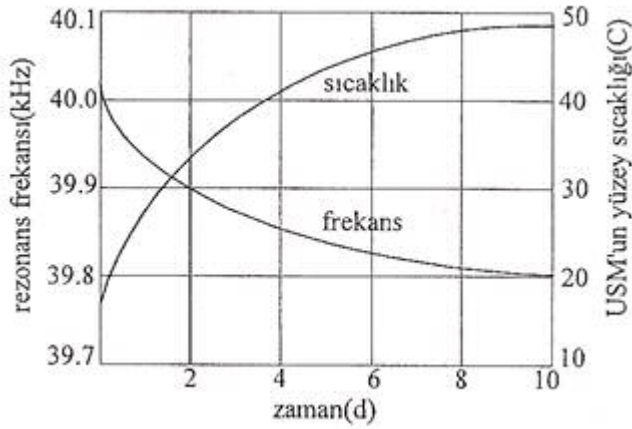
Ayrıca motor çalışması sırasında iç kayıplardan ve sürtünmeden dolayı piezoelektrik malzemede bir ısı artışı meydana gelmektedir. Bu ısı artışı piezoelektrik malzemenin blokaj kapasitesinin artmasına neden olmaktadır. Böylece USM'un mekanik rezonans frekansı azalmaktadır. Bunun anlamı; motor sabit bir frekansla çalıştırılırken meydana gelen ısı yükselmesinden dolayı hızı azalmaktadır. Bu durumun USM'un denetiminde 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 [5].

Şekil 3.6'da NEPEC-61 piezoelektrik seramiğin sıcaklığa bağlı blokaj kapasitesinin yüzde olarak değişimi gösterilmektedir.



Şekil 3.6. NEPEC-61 seramikte sıcaklığın blokaj kapasitesine etkisi

Şekil 3.7’de USM’un zamanla artan sıcaklığa bağlı rezonans frekansı değişimi eğrileri verilmektedir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi USM’un rezonans frekansı zamanla meydana gelen sıcaklık yükselmesine bağlı olarak azalmaktadır [5].



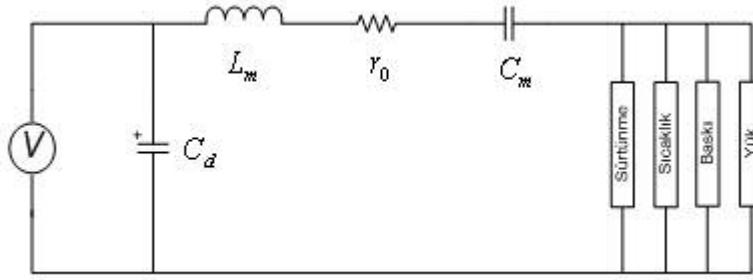
Şekil 3.7. USM’da zamana bağlı sıcaklık ve rezonans frekansı değişimleri

Kapasitedeki değişim (ΔC), zaman (T) ve sıcaklık (t) arasındaki ilişki MATLAB paket programı kullanılarak, eğri uydurma yöntemi ile aşağıdaki gibi elde edilmiştir [5].

$$T = -0,7405t^2 + 8,7286t + 19,09$$

$$\Delta C = 0,5T - 10$$

Stator ile rotor arasındaki baskı kuvveti ve özellikle yük bağlanması motorun performansını etkilemektedir. Geliştirilen modelde motor miline yük uygulanması durumunda hızda meydana gelen değişim eğrileri de elde edilmiştir [5]. Şekil 3.8’de USM’un tam eşdeğer devresi gösterilmektedir.



Şekil 3.8. USM’un tam eşdeğer devresi

3.1.6. Yürüyen Dalga

USM’un statorunda yürüyen dalga oluşturmak için mekanik olarak birbirine dik iki gerilime ihtiyaç vardır. Bu gerilimler A fazı için $\cos(k\theta)$, B fazı için ise $\cos(k\theta)$, ile ifade edilmektedir. Eğer A fazı $\cos(\omega t)$, B fazı $\sin(\omega t)$ ile sürülürse bu gerilimler bağımsız olarak birer duran dalga üretmektedir [5].

$$\cos(\omega t) \cos(k\theta) \quad (3.18)$$

$$\sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (3.19)$$

Bu iki duran dalganın toplamı YDSUM’larda kullanılan yürüyen dalgayı üretmektedir.

$$\varpi = \cos(\omega t) \cos(k\theta) + \sin(\omega t) \sin(k\theta) \quad (3.20)$$

Eş. 3.21 ve Eş.22’deki temel trigonometrik eşitlikler kullanılarak yürüyen dalga Eş. 3.23’deki gibi elde edilir.

$$\cos \alpha \cos \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) \quad (3.21)$$

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \quad (3.22)$$

$$\varpi = \cos(\omega t - k\theta) \quad (3.23)$$

Burada, k stator yüzeyindeki dalga sayısıdır.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.24)$$

Eşitliği ile elde edilmektedir. USR60 YDUSM 9 dalga sayısına sahiptir. λ piezoelektrik malzemenin (+) ve (-) ile kutuplanan bir dalgasının uzunluğunu temsil etmektedir. Yukarıdaki eşitlikten, daire şeklindeki statorun bir dalgasının $360/9=40^\circ$ lık bir yay olduğu görülmektedir [5].

Üretilen dalganın genliği ξ , yürüyen dalganın eksenel şekil katsayısı R_r ile ifade edilirse, Eş. 3.25'deki yürüyen dalganın teğetsel hareket eşitliği aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\varpi(r, \theta, t) = R_r \xi \cos(\omega t - k\theta) \quad (3.25)$$

İki tarafın zamana göre türevi alınırsa, yürüyen dalganın hızı aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{d\varpi}{dt} = \omega R_r \xi \sin(\omega t - k\theta) \quad (3.26)$$

Stator yüzeyindeki titreşim hızı ifadesi

$$v = \omega R_r \xi \quad (3.27)$$

Eş. 3.27’de yerine konulursa, yürüyen dalganın hızı

$$\frac{d\varpi}{dt} = -v \sin(\omega t - k\theta) \quad (3.28)$$

olur. Yukarıdaki eşitlikten görüldüğü gibi sürme frekansının işareti değiştirilirse veya başka bir deyişle fazların sırası değiştirilirse yürüyen dalganın yönü dolayısı ile motorun dönüş yönü değişmektedir.

Stator yüzeyindeki titreşimin hızı kullanılarak motorun hız ifadesi aşağıdaki gibi elde edilmektedir [31].

$$v = \omega R_r \xi = \frac{R_0}{kh} R_0 n_{id} \quad (3.29)$$

Burada; n_{id} motorun ideal hızı, R_0 ise statorun ortalama çapıdır. İdeal hız yük ve baskı kuvveti olmadığı durumdaki elde edilecek hız değeridir. Motorun gerçek hızını bulmak için rotor ile stator arasındaki baskı kuvveti ve yükten dolayı oluşan kayıplar dikkate alınmaktadır. Bu durumda motorun hızı Eş 3.30’daki gibi elde edilir [5].

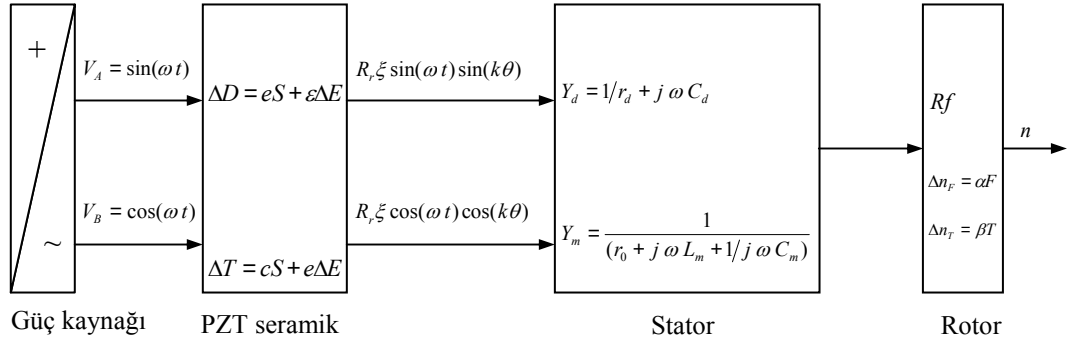
$$n = n_{id} - \Delta n_F - \Delta n_T \quad (3.30)$$

$$\Delta n_F = \alpha F \quad (3.31)$$

$$\Delta n_T = \beta T \quad (3.32)$$

Burada; α kuvvete bağlı olarak hızda meydana gelen azalmanın, β ise yüke bağlı olarak hızdaki azalmanın eğim katsayılarıdır.

Elde edilen model; güç kaynağı, piezoelektrik seramik, stator, rotor, stator ile rotor arasındaki sürtünme mekanizması ve harici yük birimlerini kapsamaktadır. Şekil 3.9’da elde edilen modelin blok diyagramı biçiminde gösterimi verilmiştir [5].



Şekil 3.9. USM modelinin blok diyagramı

USM'un matematiksel modelini oluşturmak için kullanılan eşitlikler ve parametreler Çizelge 3.1'de verilmiştir [5].

Çizelge 3.1. USM eşdeğer devresi için kullanılan eşitlikler ve parametreler

USM için kullanılan eşitlikler	USM için kullanılan parametreler
$A = bd_{31}Y_{11}$	$V = 100 \text{ V}$
$C_m = A^2/K$	$f = 41\text{-}43,5\text{kHz}$
$L_m = m / A^2$	$\theta = 90^\circ$
$Y_d = j\omega C_d$	$k = 9$
$Y_m = \frac{1}{(r_0 + j\omega L_m + 1/j\omega C_m)}$	$Y_{11} = 7,6 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$
$I_m = V \times Y_m$	$d_{31} = -1,32 \times 10^{-10} \text{ m/V}$
$v = I_m / A$	$\sigma^E = 0,31$
$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$	$Q = 1800$
$f_r = \omega_0 / 2\pi$	$R_0 = 26,75 \times 10^{-3} \text{ m}$
$Q = \frac{\omega_0 m}{r_0}$	$h = 1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
$k = \frac{2\pi}{\lambda}$	$b = 60 \times 10^{-3} \text{ m}$
$v = \omega R_r \xi$	$r_0 = 520 \Omega$
$\frac{dw}{dt} = -\omega R_r \xi \sin(\omega t - k\theta)$	$L_m = 97 \text{ mH}$
$n_{id} = \frac{R_0}{kh} R_0 n_{id}$	$C_m = 168 \text{ pF}$
$n = n_{id} - \Delta n_{F-} \Delta n_T$	$C_d = 9 \text{ nF}$
	$\alpha = 2 \times 10^{-2}$
	$\beta = 6,7$
	$Rr = 1/\sqrt{2}$

4. PIC MİKRODENETLEYİCİLER

Merkezi işlem ünitesinin (CPU) kalbi Aritmetic Logic Unit-Aritmetik mantık birimidir (ALU) ve W (Working-Çalışan) adında bir yazmaç içerir. ALU, kullanıcı programına uygun olarak istenen toplama, çıkarma, VE (AND), VEYA (OR) gibi lojik işlemleri yapar ve neticeyi istenen yere aktarır. Bütün aritmetik ve mantık işlemleri W yazmacını kullanırlar. PIC mikrodnetleyici, diğer mikroişlemcilerden, aritmetik ve mantık işlemleri için bir tek ana yazmaca sahip oluşuyla farklılaşır. W yazmacı 8 bit genişliğindedir ve CPU'daki herhangi bir veriyi transfer etmek üzere kullanılır. CPU alanında ayrıca iki katagoriye ayırabileceğimiz Veri Yazmaç dosyaları (Data Register Files) bulunur. Bu veri yazmaç dosyalarından biri, I/O ve denetleme işlemlerinde kullanılırken, diğeri RAM olarak kullanılır. PIC mikrodnetleyicilerde Harward Mimarisi kullanılır. Harward mimarisi mikrodnetleyicilerde veri akış miktarını hızlandırmak ve yazılım güvenliğini arttırmak amacıyla kullanılır. Ayrı hatların kullanımıyla veri ve program belleğinde hızlı bir şekilde erişim sağlanır.



Şekil 4.1. PIC Mikrodenetleyici 16F877'nin yapısı

PIC mikrodenetleyicilerini donanımsal olarak incelerken PIC 16F87X üzerinde durarak bu PIC' i temel alındığında bellek ve bazı küçük farklılıklar dışında bütün PIC'ler için geçerlidir [32,33].

4.1. PIC Mikrodenetleyici için Genel Tanımlama

PIC 16F87X Serisi; yüksek performanslı, CMOS, full-statik, 8 bit mikrodenetleyicidir. Tüm PIC 16/17 mikrodenetleyiciler RISC mimarisini kullanmaktadır. PIC16F87X mikrodenetleyicileri birçok esas özelliklere sahiptir. 14 seviyeli, derin küme ve çoklu iç ve dış kesme kaynaklarına sahiptir. 2 aşamalı komut hattı tüm komutların tek bir saykıl' la (çevrimle) işlenmesini sağlamaktadır. Yalnızca bazı özel komutlar 2 saykıl'da gerçekleştirilir. Bu komutlar dallanma komutlarıdır. PIC16F873/874 microchip'i 192 bayt'lık RAM belleğine, 128 bayt EEPROM

belleğine ve 22/33 (PIC 16F873-22/ PIC 16F874-33) I/O pinine sahiptir. Bunun yanı sıra, zamanlayıcı (timer) ve sayaçda bulunmaktadır.

PIC16F87X ailesi dış elemanları azaltacak spesifik özelliklere sahiptir ve böylece maliyet minimuma inmekte, sistemin güvenilirliği artmakta, enerji sarfıyatı azalmaktadır. Bunun yanı sıra tüm PIC'lerde 4 adet osilatör seçeneği mevcuttur. Bunlarda tek pin li RC osilatör, düşük maliyet çözümünü sağlamakta (4 MHZ) , LP osilatör (Kristal veya seramik rezonatör) enerji sarfıyatını minimize etmekte (asgari akım) (40 KHZ), XT kristal veya seramik rezonatör osilatörü standart hızlı ve HS kristal veya seramik rezonatörlü osilatör çok yüksek hıza sahiptir (20 MHZ).

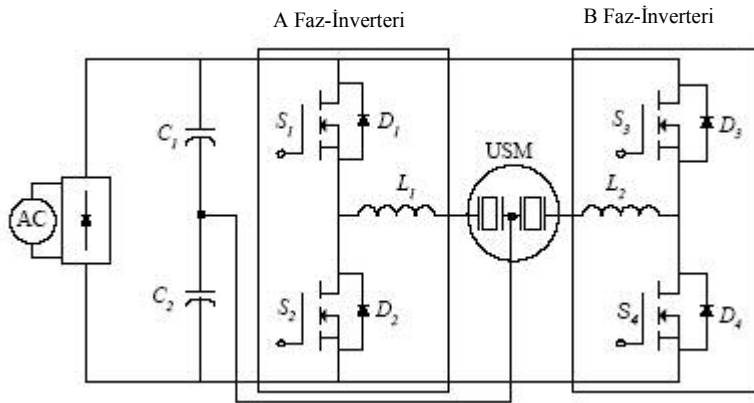
PIC mikrodenetleyicilerin en büyük özelliği uyuma (sleep) moduna sahip olmasıdır. Bu mod ile PIC işlem yapılmadığı durumlarda uyuma moduna geçerek çok düşük akım çeker. Kullanıcı bir kaç iç ve dış kesmelerle PIC' i uyuma modundan çıkarabilmektedir. Yüksek güvenilirlikli Watchdog Timer kendi bünyesindeki chip üstü RC osilatörü ile yazılımı kilitlemeye karşı korumaktadır.

PIC mikrodenetleyicinin program belleği defalarca programlanabilmektedir. Bu özelliği ile aynı mikrodenetleyiciye yüklenen program değiştirilerek farklı yerlerde kullanılabilir. [33].

5. USM'UN PIC İLE SÜRÜLMESİ

5.1. USM'un Temel Sürme Devresi

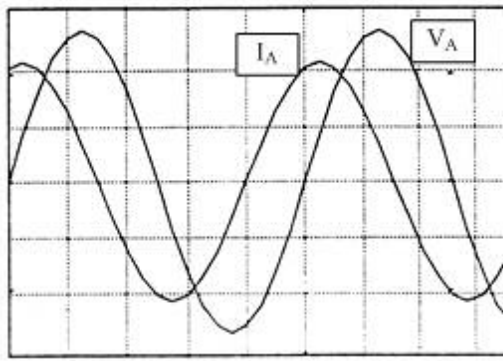
Pratik uygulamalarda, mekanik rezonans frekansındaki değişimleri izlemek ve piezoelektrik elemanın titreşim hızını düzenlemek için kontrol stratejisi geliştirilir. Burada açıklanan devrede USM'un LC parazitik rezonans empedansını kullanan yüksek frekanslı rezonans inverter tasarlanmış ve motorun kontrol sistemine entegre edilmiştir. USM'un mekanik titreşim sisteminin rezonans frekansı $f_m = 39\text{-}40\text{ kHz}$ arasındaki ultrasonik frekans bölgesindedir. İnverter USM'u sürmek için bu frekans değerinin üzerinde çalışmalı ve yüksek frekanslı 90° faz farklı AC gerilimleri sağlamalıdır. Şekil 5.1'de USM'un parazitik çalışma performansını kullanan iki-faz yüksek frekanslı gerilime sahip MOSFET inverter devresi gösterilmiştir. Bu devre geleneksel güç transistörleri kullanılan lineer güç yükselteçleri yerine geliştirilmiştir [34].



Şekil 5.1. USM için iki-faz inverter devresi

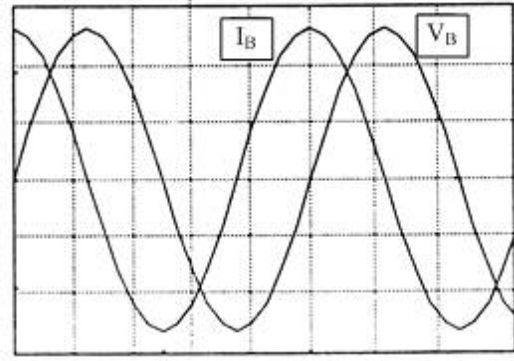
Bu inverter darbe genişlik modülasyonu (DGM), darbe frekans modülasyonu (DFM) ve hibrid (DGM/DFM) kontrol devrelerinin etkin fonksiyonlarını içermektedir. Yüksek frekanslı güç kaynağı doğrultucu ile iki-faz yarım-köprü tip seri yüklü rezonans inverterinden oluşturulmuştur. Burada USM, f_m rezonans frekansına sahip kapasitif bir yük olarak gösterilmiştir. L_1 ve L_2 endüktansları kapasitif yüke inverterin her fazında seri olarak bağlanmıştır. Bu endüktansların amacı USM'un

sönüm kapasitesi C_d yi kompanze etmektir. Motorun sürülmesi sırasında çok yüksek frekanslarda anahtarlama yapıldığından kısa devreyi önlemek amacıyla anahtarlama elemanlarına bağlanacak diyotlar hızlı diyotlar olmalıdır. USM'un çalışma karakteristikleri dikkate alınarak; USM'un sürme frekansı f mekanik rezonans frekansı f_m den daha büyük bir değerde ayarlanır. Bu devreye USM'un hızını sabit tutmak için sürme frekansını izleyen kontrol devresi eklenmiştir. Motorun dönüşü sırasında elde edilen hız hatasına bağlı olarak elde edilen hata sinyali, PI kontrolör ve gerilim kontrol osilatörü (GKO) ile ayarlanarak sürme frekansını sabit bir değerde tutmaktadır. Şekil 5.2 (a)'da, tasarlanan yüksek frekanslı yarım-köprü seri-rezonans inverterde A fazına ait akım ve gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.2 (b)'de ise inverterin iki faz çıkış gerilimlerinin dalga şekilleri görülmektedir. Çıkış gerilimleri aynı tepe değerinde elde edilmiştir. Burada inverterin A fazına ait çıkış gerilimi B fazının çıkış geriliminden $\pi/2$ açısı kadar ileridedir. Eğer B fazı $\pi/2$ açısı kadar ileri yapılırsa motorun dönüş yönü değiştirilir [5].



(a)

Şekil 5.2. (a) A fazına ait akım ve gerilim
(50 V/div , 0.1 A/div , 5 μ s/div)



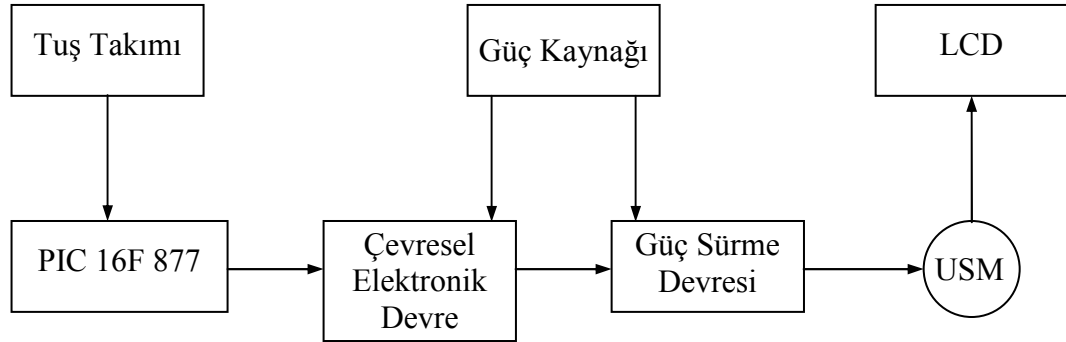
(b)

(b) İnverterin iki-faz gerilimleri
(50 V/div, 5 μ s/div)

5.2. USM'un PIC Mikrodenetleyici ile Hız Denetimi

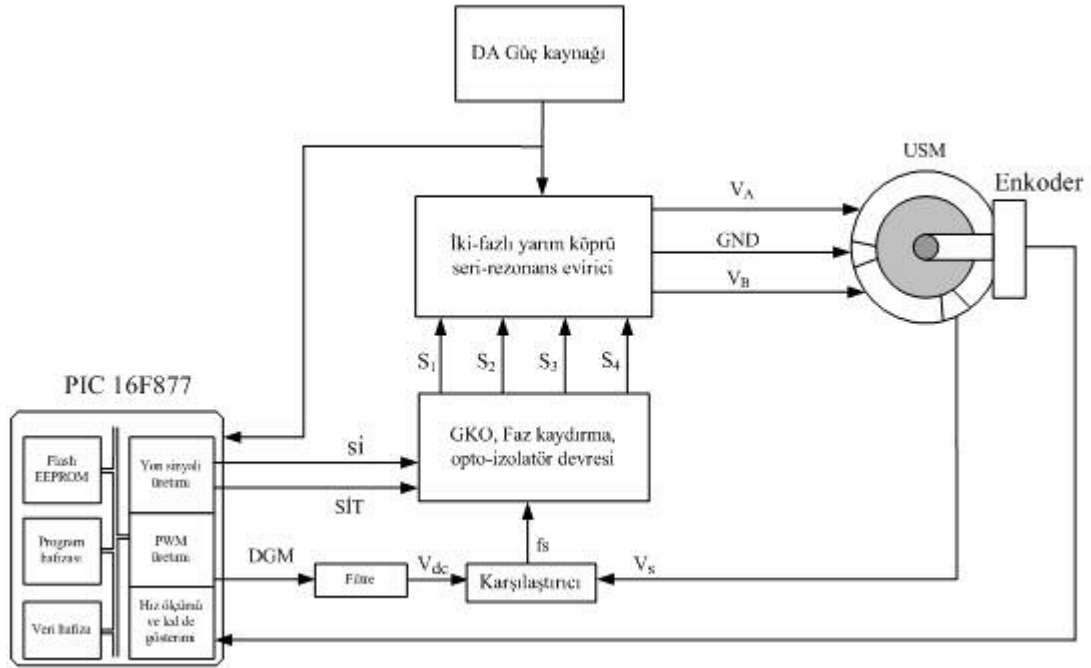
USM'un PIC mikrodenetleyici hız denetimini gösteren blok diyagram Şekil 5.3'de gösterilmektedir. Bu blok diyagram tuş takımı, PIC16F877 entegresi, çevresel

elektronik devre, sürme devresi, güç kaynağı, Shinsei USR60 YDUSM ve LCD'den oluşmaktadır.



Şekil 5.3. PIC ile kontrol edilen USM sürme devresinin blok diyagramı

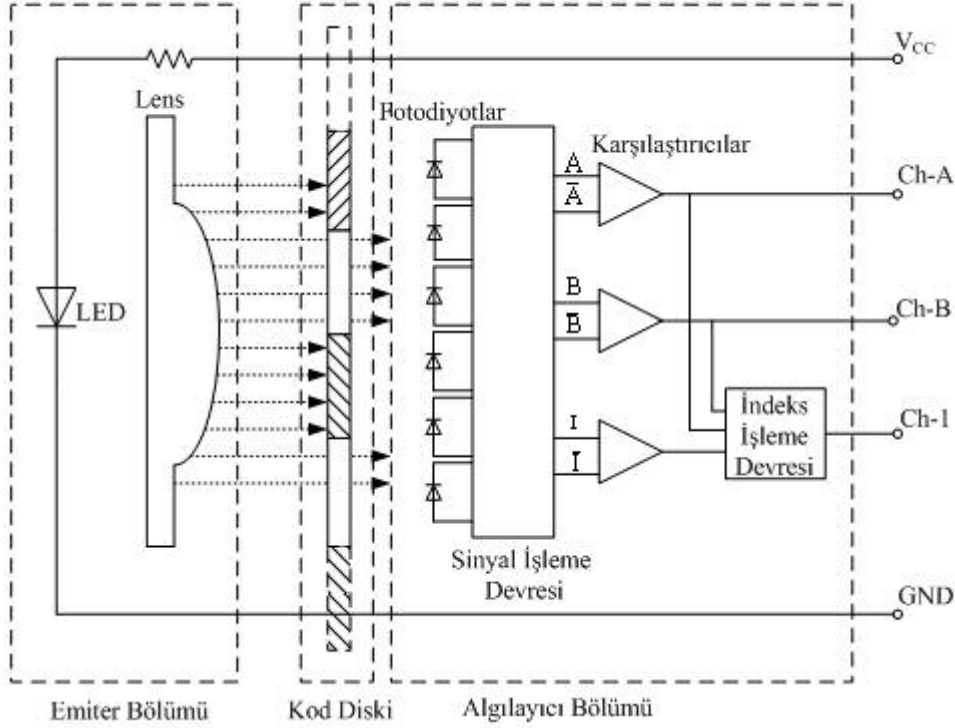
Şekil 5.3'de görüldüğü gibi tuş takımından Referans hız değeri girilmekte ve yazılan programa göre PIC 16F877 uygun DGM sinyalini üretmektedir. Üretilen DGM sinyali çevresel elektronik devreden (filtre devresi) geçirilerek DGM sinyalinin ortalamasını veren DA sinyali elde edilmektedir. Bu elde edilen DA sinyali iki faz inverterli sürücü devresine verilmekte iki faz inverterli sürücü devresinden elde edilen 90° faz farklı yüksek frekanslı iki AC gerilim YDUSM'a verilmekte, motorun dönmesi sağlanmaktadır. Tuş takımından girilen hız değeri ve buna bağlı olarak motorun gerçek hız değeri LCD'de gösterilmektedir. Tuş takımından girilen hız değeri değiştikçe PIC 16F877 tarafından üretilen DGM sinyalinin görev süresi değişmekte dolayısı ile DA gerilim değeri değişmekte bununla birlikte YDUSM'un hızı da değişmektedir. Bunun yanında yazılımla motorun yönünü değiştirmek için PIC tarafından yön sinyalleri üretilmektedir. Güç kaynağı mikrodenetleyici ve devre elemanlarını beslemektedir.



Şekil 5.4. USM sürme ve hız denetim sisteminin blok diyagramı

Bu çalışmada, 500 darbe/devirlik HEDS-5540 artımsal enkoder kullanılmıştır. Şekil 5.5’deki blok diyagramda görüldüğü gibi bu enkoderde ışık kaynağı olarak bir adet LED kullanılmaktadır. Işık LED’ in karşısında konumlanan lens yardımıyla paralel ışın demeti halinde hizalanmaktadır. Emiterin karşısında algılayıcı entegre devresi bulunmaktadır. Bu entegre devre, sayısal dalga şekillerini elde etmek amacıyla foto-detektörler ve sinyal işleme devresi içermektedir. Emiter ile algılayıcı arasında dönen disk, ışın demetinin kod diski üzerinde bulunan boşluk ve kapalı bölgeler tarafından kesilmesine neden olmaktadır. Bu kesilmeleri algılayan foto-diyotlar diskin çapına ve tasarımına bağlı olarak bir çift olarak dizilmektedir. Bu algılayıcılar ayrıca bir algılayıcı çifti üzerinde ışık varken diğer algılayıcının üzeri karanlık olacak şekilde konumlanmıştır. Foto-diyot çıkışları ise A , $\bar{A}$, B , $\bar{B}$, ve I , $\bar{I}$ sinyallerini üretmek amacıyla sinyal işleme devresini beslemektedir. Karşılaştırıcılar bu sinyalleri alarak A ve B kanalları için sonuç çıkışlarını üretmektedir. Bu tümleme faz tekniği nedeniyle A -fazı ile B -fazı arasında 90° faz farkı meydana gelmektedir. I , $\bar{I}$ Karşılaştırıcının çıkışı A ve B kanallarıyla birlikte index işleme

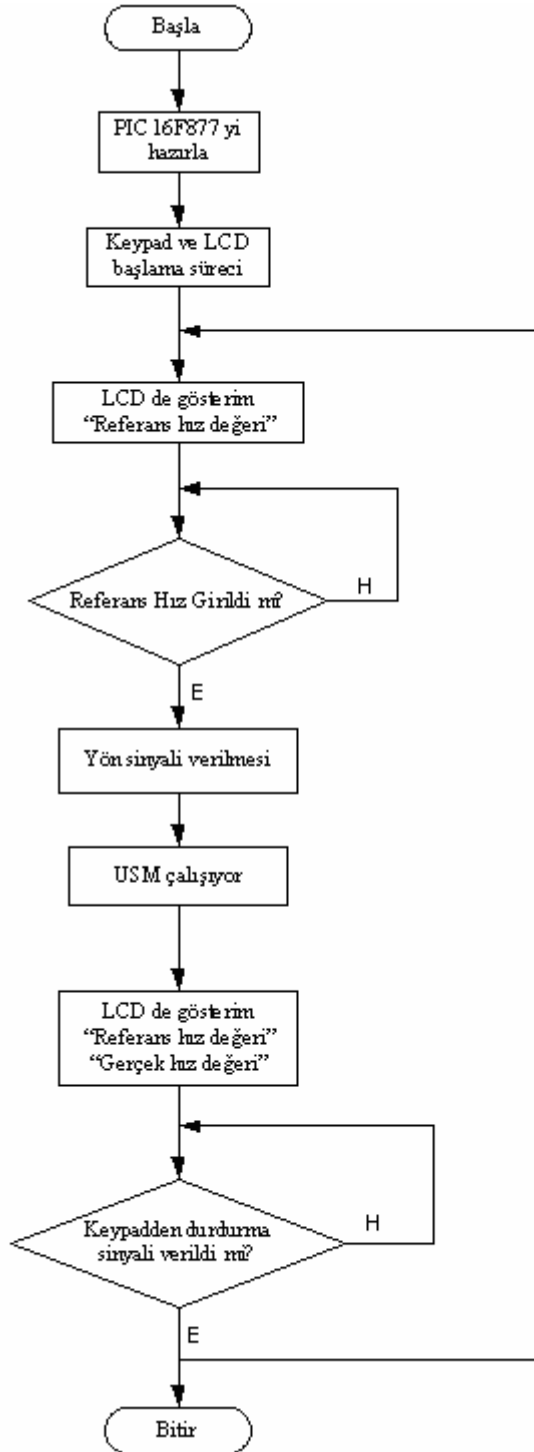
devresine gönderilmektedir. Sonuç olarak kanal I'nın çıkışı diskin bir turluk dönüşü için üretilen bir index sinyalidir [5].



Şekil 5.5. HEDS-5540 enkoderin blok diyagramı

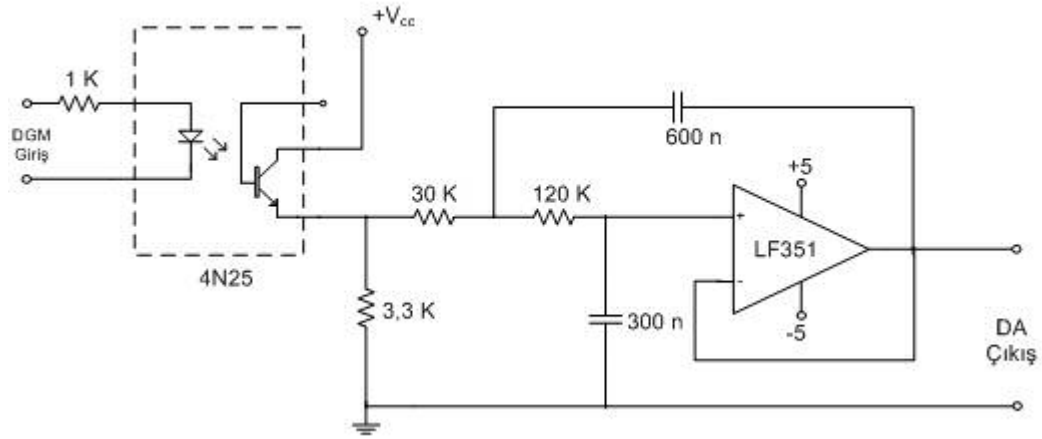
Şekil 5.4'deki blok şemada faz kaydırma devresine kadar olan devre Şekil 5.6'da görülmektedir. Şekil 5.6'daki devre PIC 16F877 devresi, LCD, keypad, ve sürme için gerekli olan elektronik devreden oluşmaktadır. PIC 16F877 devresi kısmında reset devresi mikrodnetleyicinin herhangi bir anda sistemin kilitlenmesi durumunda devreyi sıfırlamak için kullanılmıştır. LCD ekran; mikrodnetleyiciden gelen bilgiler ve motor hız ve gerilim bilgilerini hem görmek, girilen hız ile motor gerçek hızı arasındaki ilişkiyi kıyaslamak için görsel bir ortam sağlamaktadır. USM hız kontrol devresinin girişindeki optokuplor mikrodnetleyicinin bacaklarının zarar görmemesi yani yalıtım için kullanılmıştır. Mikrodnetleyiciden gelen DGM sinyali optokuplordan geçirildikten sonra alçak geçiren filtre devre yardımıyla DA sinyale çevrilmektedir. DA sinyalin genliği DGM sinyalinin çalışma oranına bağlı olarak değişmektedir. DGM sinyalinin çalışma oranı (görev süresi) artırıldığında DA gerilim genliği de artmaktadır. Filtre devresinden elde edilen DA gerilim motora

Durdurma sinyali geldiğinde bütün değerler sıfırlanacak, yani başa referans hızın girileceği konuma gelinecektir.



Şekil 5.7. PIC mikrodnetleyicinin yazılımının akış diyagramı

PIC 16F877 tarafından üretilen DGM sinyalini DA gerilimine dönüştürmek için kullanılan elektronik devre Şekil 5.8’de gösterilmiştir. USM’un hız denetimi için DA gerilim gereklidir. Motor hızının denetimi için gerekli olan DA gerilim, DGM sinyalinin filtre devresinden geçirilmesiyle elde edilmektedir. DGM sinyalinin çalışma oranı (görev süresi) değiştirildiğinde DA gerilim değeri de değişmekte, dolayısı ile motora uygulanan gerilimlerin frekansı da değiştirilmektedir. Bu da motorun istenen hızda dönmesini sağlamaktadır.



Şekil 5.8. DGM sinyalini DA gerilimine çeviren filtre devresi

5.3. Deneysel Sonuçlar

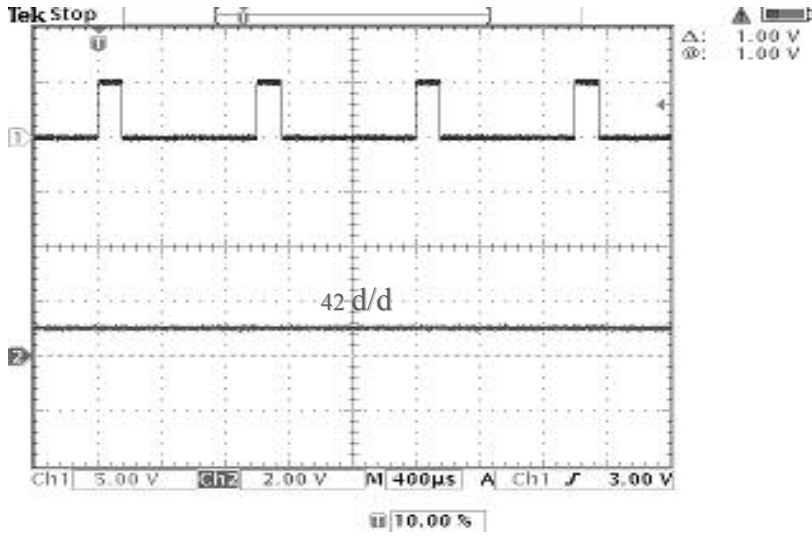
Bu bölümde Resim 5.1’de görülen deney düzeneğinden elde edilen sonuçlar sunulmuştur. USM’un hızı genellikle sürme frekansı değiştirilerek kontrol edilmektedir. Bu çalışmada da motorun hızı sürme frekansı değiştirilerek kontrol edilmiştir.



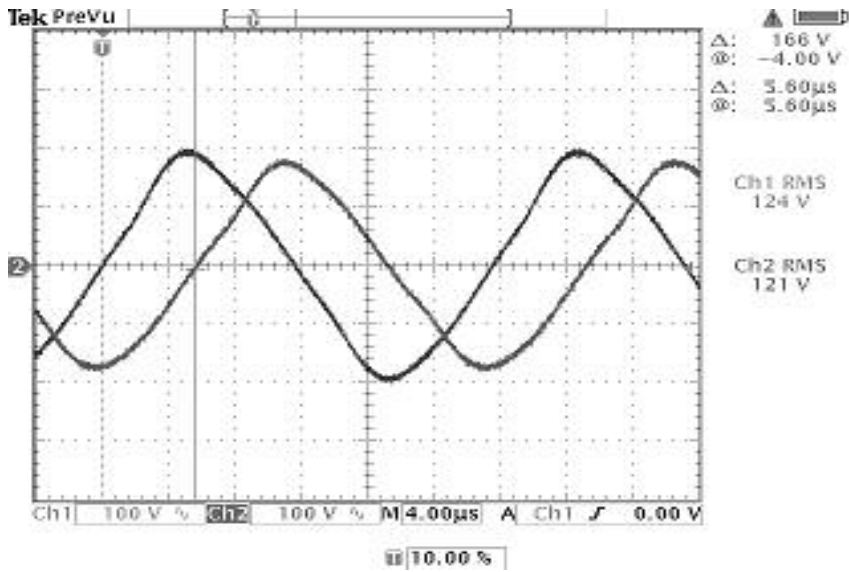
Resim 5.1. USM deney düzeneğinin fotoğrafı

Bu çalışmada USM'un hızı ile sürme frekansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için farklı hız referanslarındaki iki-faz gerilimlerin genlikleri ve sürme frekansı ölçülmüştür. Ayrıca iki-faz gerilimlerin faz farkları 90° sabit tutularak faz farkındaki değişimin motor hızına etkisi önlenmiştir.

Tuş takımından girilen hız değerine göre PIC 16F877 ile üretilen DGM sinyali ve buna karşılık gelen motor hızı sinyali Şekil 5.9'da görülmektedir. Tuş takımından 42 değeri girilmiş ve motordan yaklaşık 42 d/d'lık hız değeri alınmıştır. Bu durumda motora uygulanan DA gerilim değeri 1 volt olmaktadır. Bu referans hızdaki iki-faz gerilimlerin değişimleri Şekil 5.10'da gösterilmektedir. Hız 42 d/d iken geri beslemeden okunan iki-faz gerilimlerinin değeri A fazı için 124 V, B fazı için 121 V olmaktadır.

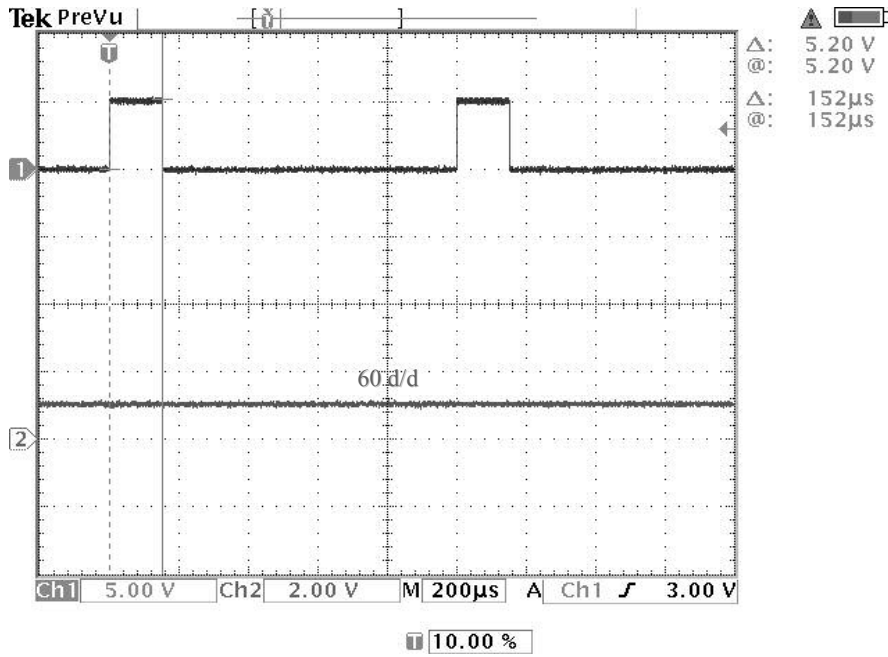


Şekil 5.9. PIC 16F877 de üretilen DGM sinyali ve buna karşılık motor hızının değişimi



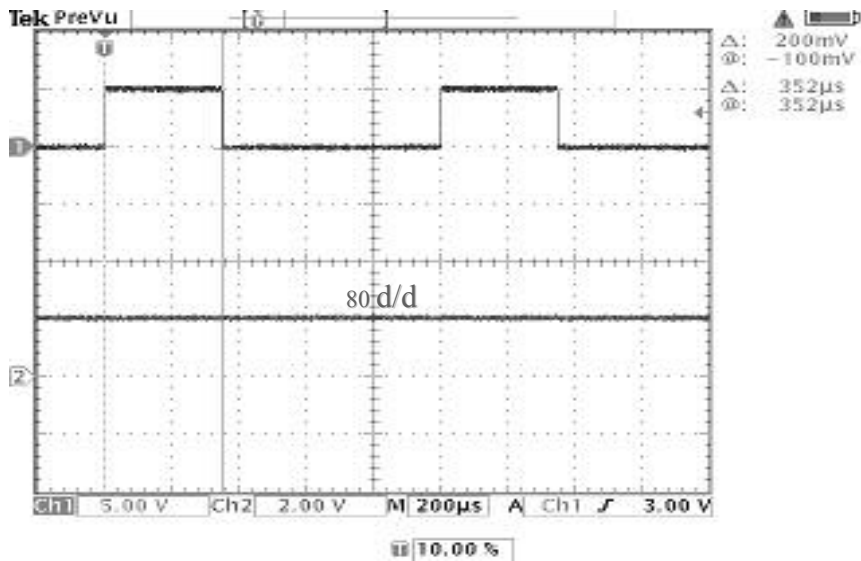
Şekil 5.10. İki-faz gerilimlerinin değişimi (motor hızı 42 d/d)

Tuş takımından referans hız olarak 60 d/d hız değeri girildiğinde mikrodenetleyici tarafından üretilen DGM sinyali ile hızın değişimi Şekil 5.11’de gösterilmektedir. Dikkat edilirse DGM sinyalinin genişliği yani görev süresi artırıldıkça hız da artmaktadır. USM’un belirli frekans aralığında sürme frekansı arttırıldıkça hızı da sürme frekansı ile doğrusal olarak artmaktadır. Bununla birlikte filtre devresinin çıkışındaki DA değeri de artmaktadır.



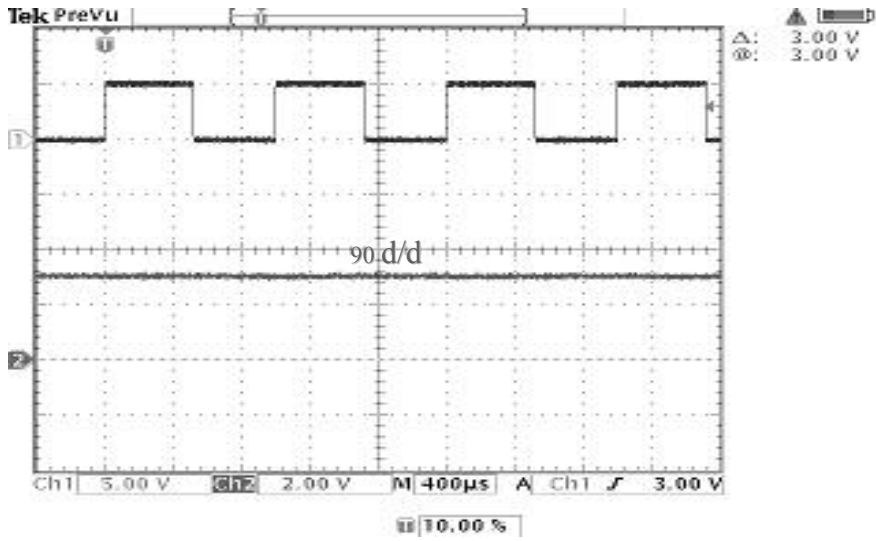
Şekil 5.11. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi

Tuş takımından referans hız değeri olarak 80 d/d değeri girildiğinde elde edilen DGM sinyalinin değişimi ve motor hız değişimi Şekil 5.12’de gösterilmektedir. Motor bu hızda dönerken iki-faz gerilimlerinin değeri A fazı için 120 V, B fazı için 119 V ve sürme frekansının da 41,98 kHz olduğu görülmektedir. Bu durumda filtre devresinin çıkışındaki DA değeri 1,87 V olmaktadır.



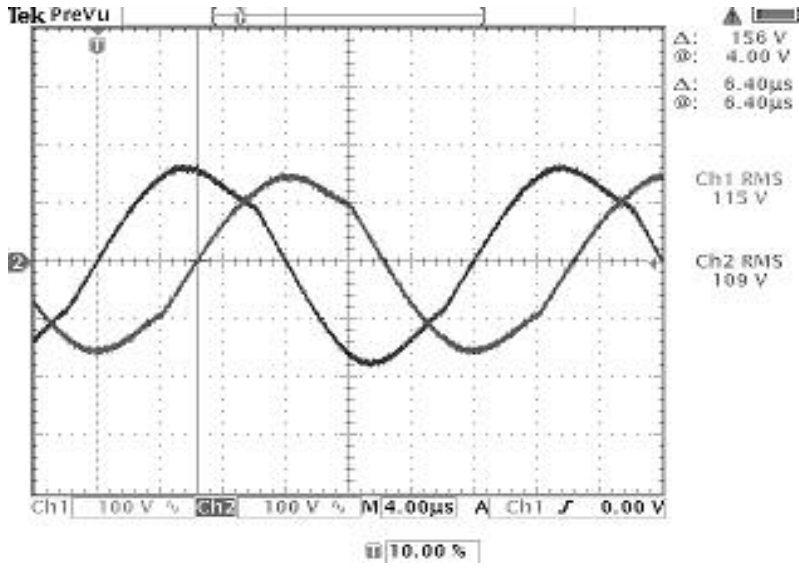
Şekil 5.12. PIC mikrodeneleyici çıkışındaki DGM sinyali ve motor hız değişimi

Tuş takımından referans hız değeri olarak 90 d/d değeri girildiğinde mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyalinin değişimi ve bu DGM sinyaline karşılık gelen motor hız değişimi Şekil 5.13’de gösterilmiştir. Bu durumda LCD’deki ölçülen motor hızı 90 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 2 V olmaktadır.



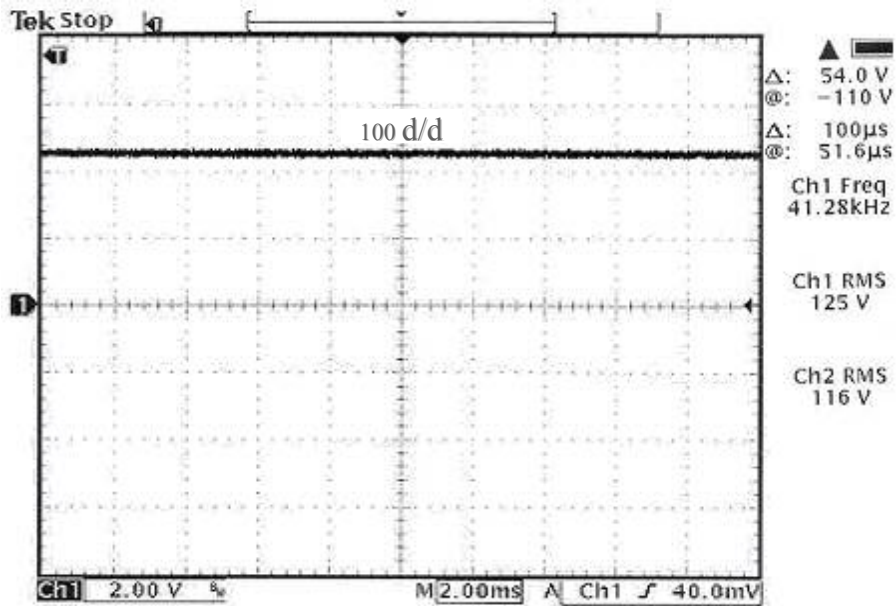
Şekil 5.13. PIC 16F877 çıkışındaki DGM sinyali ve motor hızının değişimi

Motor 90 d/d hızla dönerken iki-faz gerilimlerin değişimi Şekil 5.14’de gösterilmiştir. Motor 90 d/d hızla dönerken iki-faz gerilimlerin değeri A fazı için 115 V ve B fazı için 109 V olmaktadır.

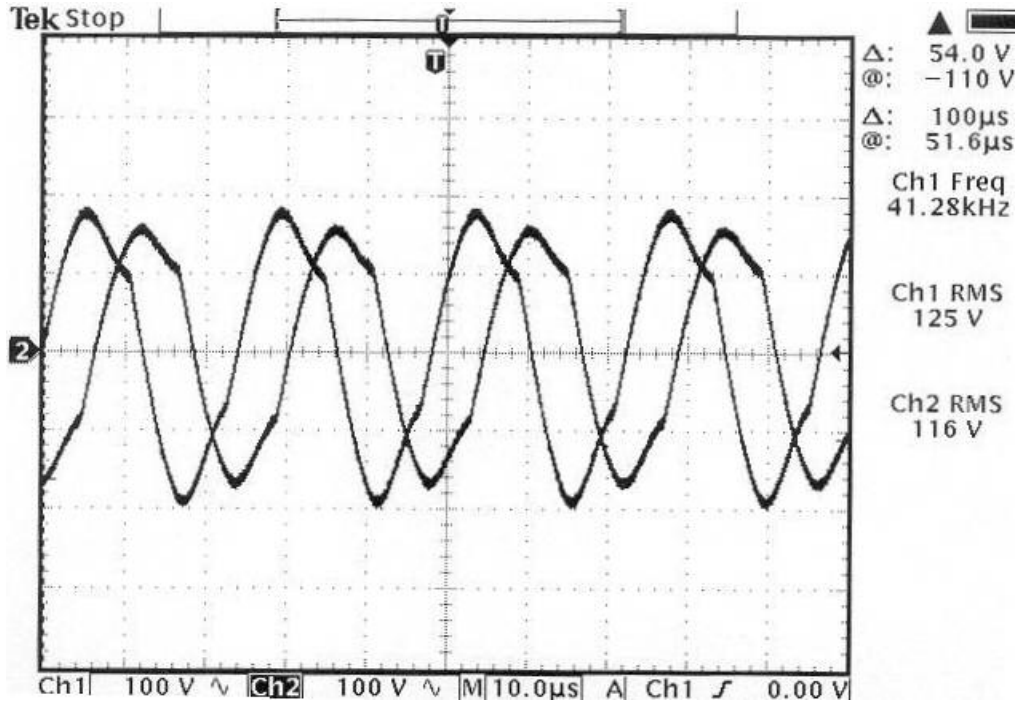


Şekil 5.14. İki-faz gerilimlerin değişimi (motor hızı 90 d/d)

Referans hızın 100 d/d olduğu durumdaki gerilimlerin dalga şekilleri ile motorun bu değerdeki hız eğrisi Şekil 5.15 ve Şekil 5.16’da gösterilmiştir. Motorun bu hızda dönmesi için gerekli olan sürme frekansı 41,28 kHz’dir. Faz gerilimlerinin genlikleri sırasıyla 125 V ve 116 V’tur. Bu hızda enkoderden elde edilen kare dalga sinyalinin frekansı 834 Hz olmaktadır.

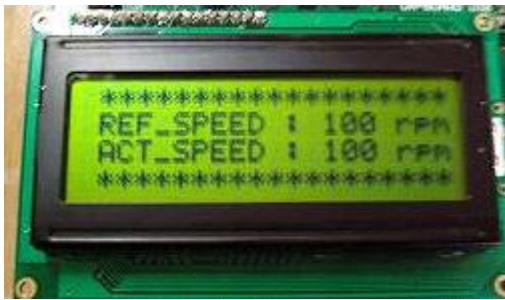


Şekil 5.15. Motor hız eğrisi (100 d/d)



Şekil 5.16. İki-faz gerilimlerin dalga şekilleri (motor hızı 100 d/d)

Şekil 5.15’de görülen hız sinyalinin değeri ile keypad’ten girilen referans değerinin LCD’de görüntüsü Resim 5.2’deki gibidir. Resim 5.2’den de görüldüğü gibi girilen referans hız değeri ile ölçülen hız değeri aynıdır. Bu da gösteriyor ki USM’un PIC mikrodenetleyici ile hız kontrolü oldukça iyi yapılabilmektedir.



Resim 5.2. Tuş takımından girilen referans hız ile ölçülen gerçek hız değerinin LCD’deki görüntüsü

Piezoelektrik malzemelerde, uygulanan mekanik baskıya karşılık elektrik gerilimi üretilmesi mümkündür. Bu çalışmada kullanılan USM’un bir bölmesi geri besleme sensörü olarak kullanılmakta ve piezoelektrik etki prensibiyle gerilim üretmektedir. Bu kısımda motorun hızı ile geri besleme sensöründen elde edilen gerilimin ilişkisi

verilmektedir. Bu ilişkiyi elde etmek için motor değişik hızlarda döndürülmüş ve bu hızlardaki geri besleme gerilimin değeri ve frekansı osiloskopla kaydedilmiştir. Hızın değeri de motora bağlı olan enkoderin kare dalga sinyali ile ölçülmüştür. Her ölçümdeki hız değeri aşağıdaki eşitlikle hesaplanmaktadır.

Saniyedeki motor hızı;

$$\text{Hız} = \text{Kare dalganın frekansı} / \text{Enkoderin sinyal sayısı} \quad (5.1)$$

Dakikadaki motor hızı;

$$\text{Hız} = 60 \times \text{kare dalganın frekansı} / \text{enkoderin sinyal sayısı} \quad (5.2)$$

eşitlikleriyle hesaplanmaktadır.

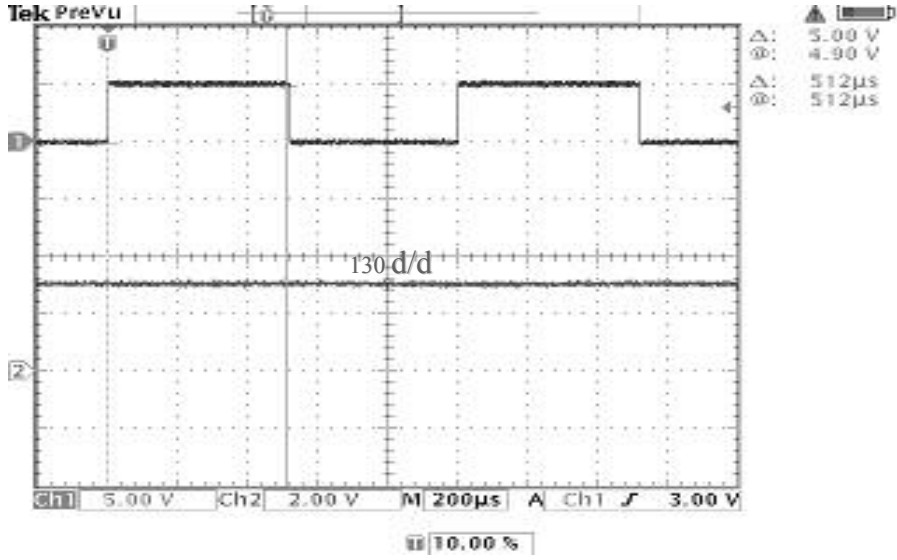
Kullanılan enkoder bir devirde 500 sinyal üretmektedir. Dolayısı ile hızın değerini elde etmek için kare dalganın frekansı ölçülerek 500'e oranlanmaktadır. Elde edilen değer saniyedeki devir sayısıdır. Dakikadaki devir sayısını bulmak için bu değer 60 ile çarpılmaktadır. Enkoderden elde edilen kare dalga sinyalinin frekansı daha öncede belirtildiği gibi 834 Hz olup Eş.5.2'deki ifadeye göre;

$$\text{Hız} = 60 \times 834 / 500 = 100 \text{ d/d} \text{ olmaktadır.}$$

Bu şekildeki ölçüm ile enkoderin kare dalga sayısı PIC 16F877 saydırı olarak ölçülen hız değeri karşılaştırılmış ve hemen hemen birbirine eşit sonuçlar alınmıştır.

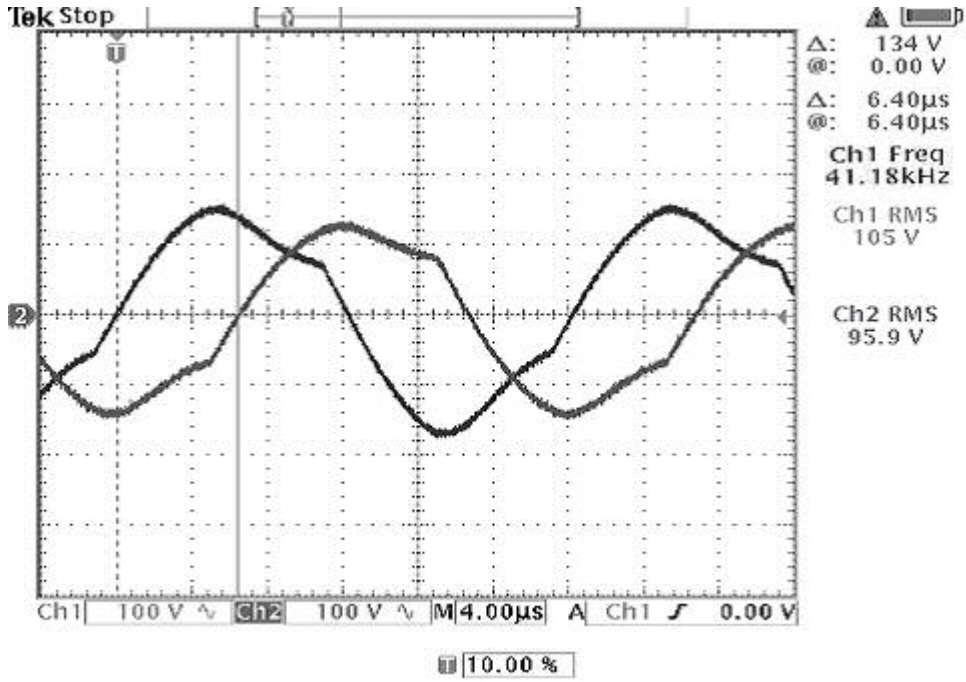
Tuş takımından referans hız değeri olarak 130 d/d değeri verildiğinde mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyalinin değişimi ve bu DGM sinyaline karşılık gelen motor hızının değişimi Şekil 5.17'de gösterilmiştir. Bu durumda LCD'deki ölçülen motor hızı 90 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 3 V olmaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi tuş takımından girilen referans hız değeri artırıldıkça filtre çıkışındaki motora uygulanan gerilim

seviyesini belirleyen DA gerilimi artmakta bununla birlikte motor hızı da artmaktadır.



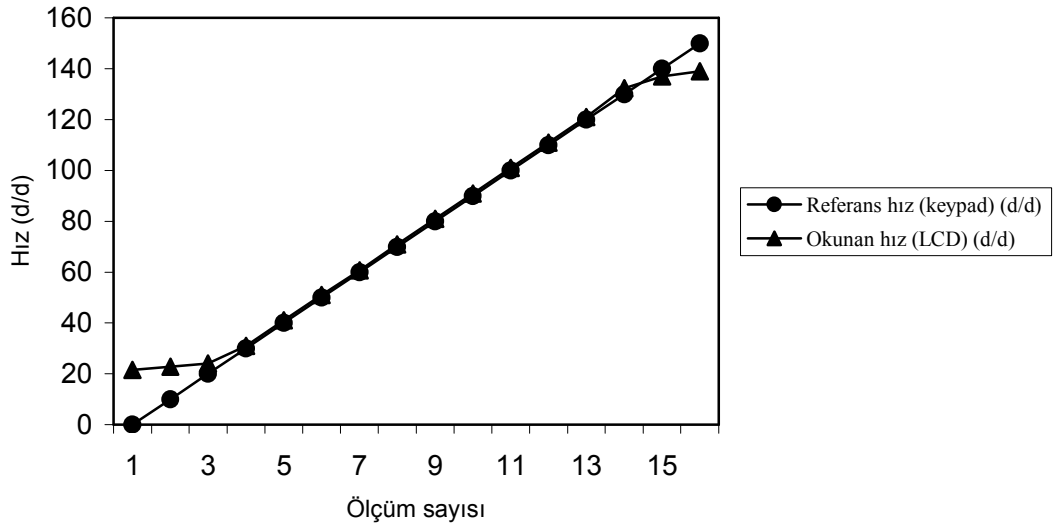
Şekil 5.17. PIC 16F877 çıkışındaki DGM sinyali ve motor hızının değişimi

Tuş takımından 130 d/d referans hız değeri verildiği durumda motorun bu hızda dönerken iki-faz gerilimlerinin değişimleri Şekil 5.18’de gösterilmiştir. Motor 130 d/d hızla dönerken iki-faz gerilimlerinden A fazının geriliminin etkin değeri 105 V ve B fazının gerilimi 95,9 V olmaktadır.



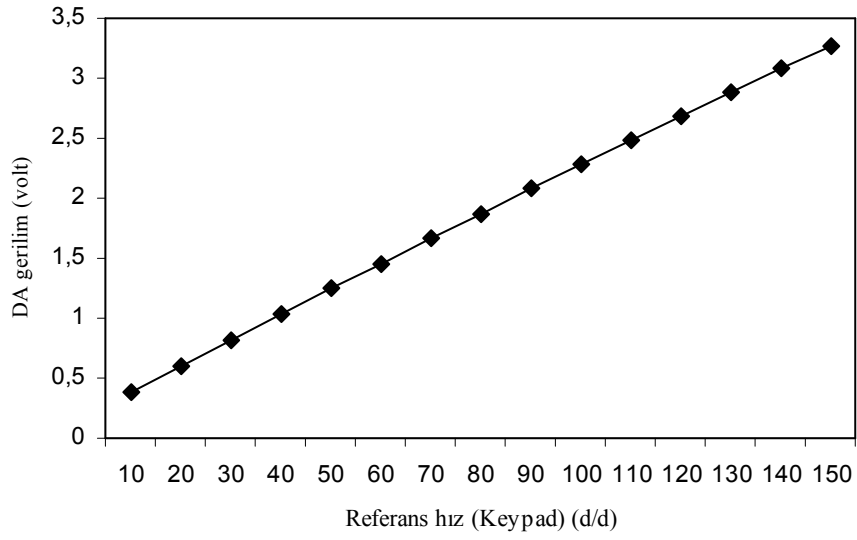
Şekil 5.18. İki-faz gerilimlerin dalga şekilleri (motor hızı 130 d/d)

Tuş takımından girilen referans hız ile ölçülen hız değerlerinin değişimi Şekil 5.19’da gösterilmiştir. Burada tuş takımından verilen referans hız değişimi ile ölçülen motor hız değişimi birbirine çok yakındır ve birbirini çok yakın takip etmektedir. Bu sonuçlar, PIC 16F877 ile USM sürmenin ve hız denetimi yapmanın çok uygun olduğunu göstermektedir. Şekil 5.21 incelendiğinde, motor hızının 30 d/d ile 120 d/d arasında doğrusal olarak değiştiğini ama 0-30 d/d arasındaki ve 120 d/d’den sonraki hızlarda bu doğrusallığını kaybetmektedir. Bu durum sürücü devresinin kataloğunda açıklanan 30 d/d ile 120 d/d arasında kararlı çalışması durumuna uymaktadır.

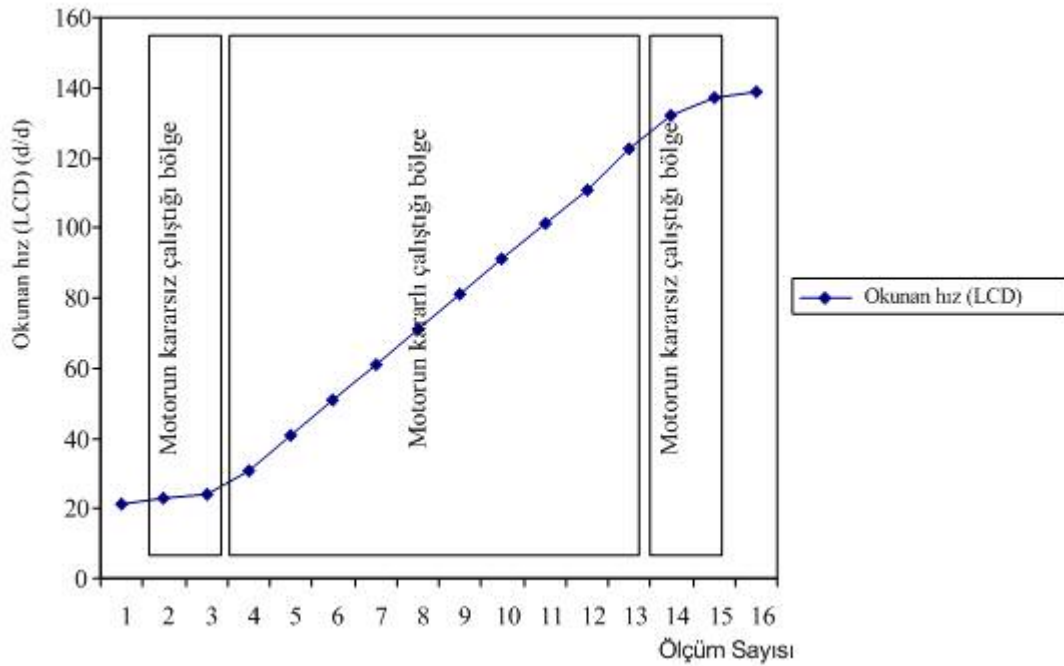


Şekil 5.19. Tuş takımından girilen referans hız ile ölçülen hız değerlerinin değişimi

Tuş takımından verilen referans değere karşılık filtre devresinin çıkışındaki yani motora uygulanan gerilim seviyesini belirleyen DA gerilimi arasındaki ilişki Şekil 5.20’de gösterilmektedir. Dikkat edilirse, verilen referans hız ile motor sürme devresine uygulanan yani kontrol amaçlı DA gerilimi birbiriyle doğrusal değişmektedir. Referans hız değeri artırıldıkça motor sürme devresine uygulanan DA gerilim değeri de referans hız değeriyle doğrusal olarak artmaktadır. Tuş takımından girilen referans hız değerine göre, PIC mikrodeneleyicinin aynı frekansta ama görev süresini ayarlayarak DGM sinyali üretme işlemi mikrodeneleyicinin programlanmasıyla sağlanmıştır. PIC mikrodeneleyiciye yazılan programla, PIC mikrodeneleyicinin tuş takımından verilen referans değeri değiştirildikçe DGM sinyalinin görev süresinin de değişmesi istenmiştir. DGM sinyali filtre devresiyle DA sinyaline dönüştürülmüş ve USM sürme devresindeki inverttere kontrol edici gerilim olarak uygulanmıştır. Kontrol edici DA gerilimi değiştikçe motorun hızı da değişmektedir. Tuş takımından girilen referans hız değeri değiştirilerek kontrol edici DA gerilim değeri DGM sinyali ile doğru orantılı olarak değiştirilmiş ve buna bağlı olarak motor hızının da doğrusal olarak değişmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.20. Tuş takımından verilen referans değere karşılık filtre devresinin çıkışındaki DA gerilimi arasındaki ilişki



Şekil 5.21. PIC mikrodeneleyici ile ölçülen hızın değişimi

Şekillerden de anlaşıldığı gibi USM istenen referans hızlarda dönmektedir. Motorun bu hızlarda dönmesi için sürme frekansının değeri değiştirilmektedir. Sürme frekansı arttıkça, motor hızının azaldığı görülmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi faz

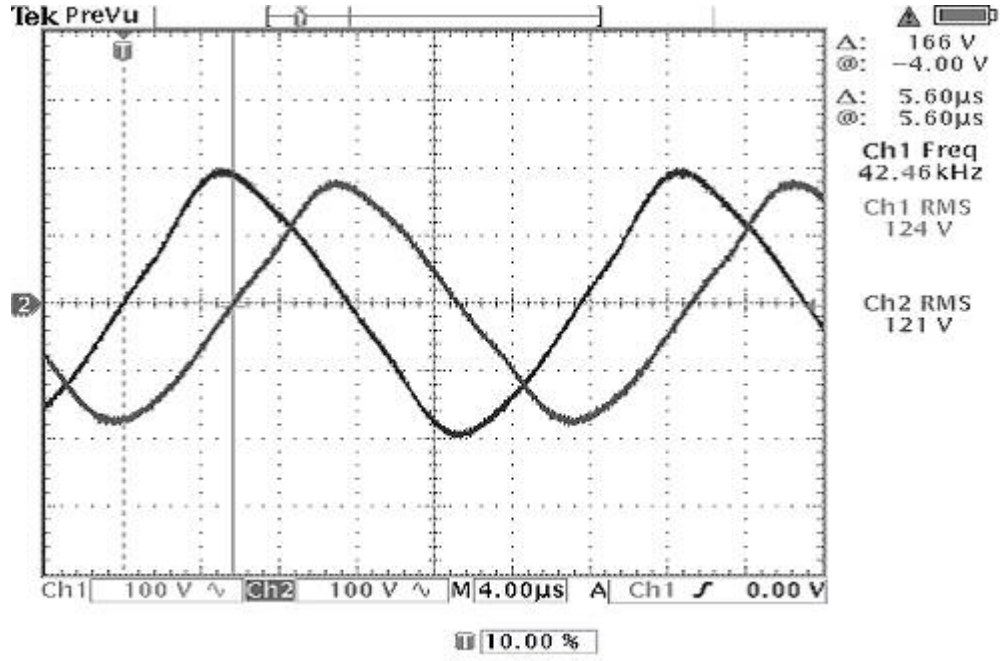
gerilimleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu fark eviricinin çıkışından ve motor yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.21 incelendiğinde, 25 d/d ile 130 d/d arasındaki hızlarda motor hızı doğrusal olarak artmaktadır. Bu durum sürme devresinin bilgi sayfasında verilen açıklamalara uymaktadır.

Şekil 5.10, Şekil 5.14, Şekil 5.16 ve Şekil 5.18 karşılaştırıldığında sürme frekansı azaldıkça faz gerilimlerinde ki bozulmanın arttığı görülmektedir. Bunun nedeni, frekans azaldıkça motorun mekanik rezonans frekansına yaklaşılması ve evirici yükünün kapasitif özellik göstermesidir. Ayrıca sürme frekansı arttıkça, frekanstan dolayı faz gerilimlerinde de küçük bir artış meydana geldiği görülmektedir.

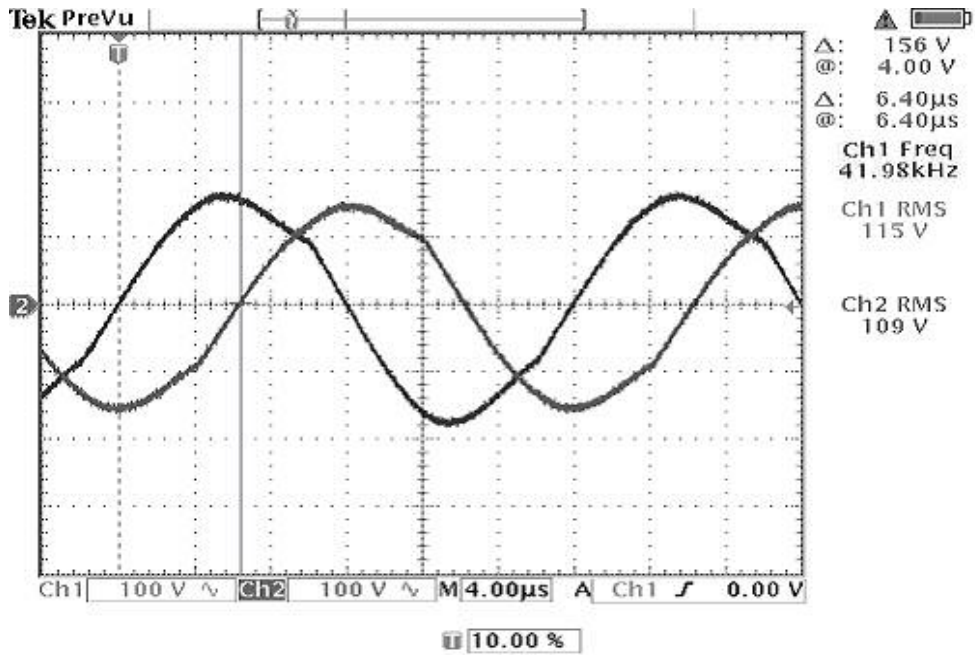
USM'un parametrelerinin tümü çalışma sıcaklığına ve kullanım süresine bağlıdır. Buna ek olarak, USM'un iki-faz yapısı mekanik olarak birbirlerine bağlı olduğundan ve ayrıca her iki faz için elektrikten mekanik enerjiye olan tepki dengesiz olduğundan, rotorun eşdeğer iki-faz yükleri dengesizdir. Bu yükler farklı dönüş yönlerinde, değişik rotor hızlarında, yük momenti değişimlerinde, uygulanan gerilimlerle ve stator ile rotor arasındaki statik baskı kuvvetindeki farklılıklarla birlikte değişirler. İlave olarak, iki-faz blokaj kapasiteleri dengesizdir ve farklı dönüş yönlerinde değerlerini değiştirirler. Bu tanımlamaya göre motorun farklı dönüş yönlerindeki faz gerilimlerinin genlikleri ile sürme frekansları değişmektedir.

Şekil 5.22, Şekil 5.23, Şekil 5.24, Şekil 5.25 ve Şekil 5.26'da farklı dönüş yönlerinde faz gerilimlerinin genlik ve frekanslarının dolayısı ile de rotor hızının nasıl değiştiği verilmiştir. Şekil 5.22'de 42 d/d hız istenmesi durumundaki motorun gerilim eğrileri verilmiştir. Burada motor saat ibresi (ileri) yönünde dönmektedir. A fazının geriliminin 124 V, B fazının geriliminin 121 V ve sürme frekansının 42,40 kHz olduğu görülmektedir. Motorun dönüş yönünü değiştirmek için A fazı ile B fazının yerleri değiştirilmiştir. Yani başka bir deyişle sinüs olarak adlandırılan faz kosinüs, kosinüs olarak adlandırılan faz sinüs olarak değiştirilmiştir. Aynı hızı gereken DGM sinyalinin verilerek motorun dönüş yönü değiştirildiğinde sürme frekansının azaldığı buna bağlı olarak motor hızının da azaldığı görülmüştür. Faz gerilimlerinin genlikleri de değişiklik göstermiştir. Bunun nedeni yukarıda açıklandığı gibi iki-blokaj

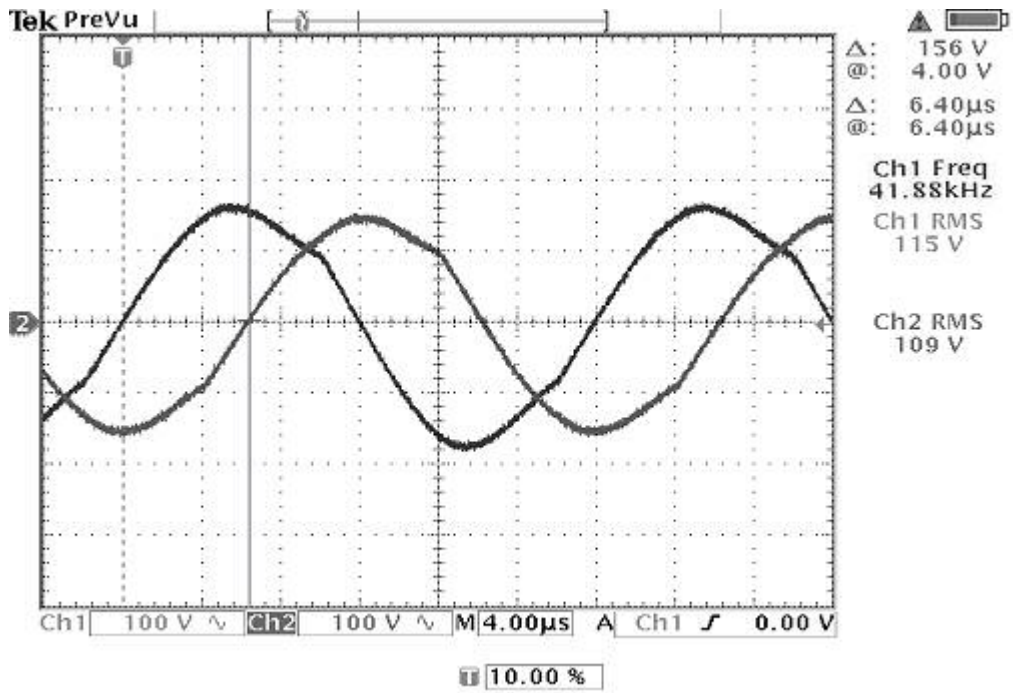
kapasitelerinin dengesiz olması ve farklı dönüş yönlerinde değerlerinin değişmesi, yük momentinin değişmesi, stator rotor arasındaki baskı kuvvetinin değişmesidir.



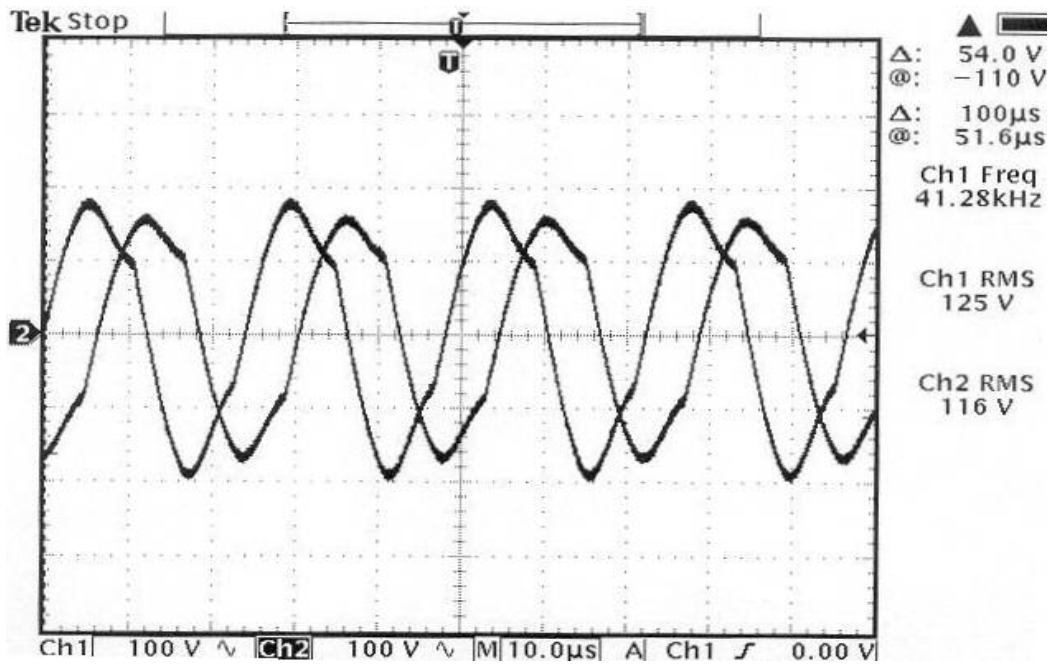
Şekil 5.22. USM iki-faz gerilimleri (42 d/d)



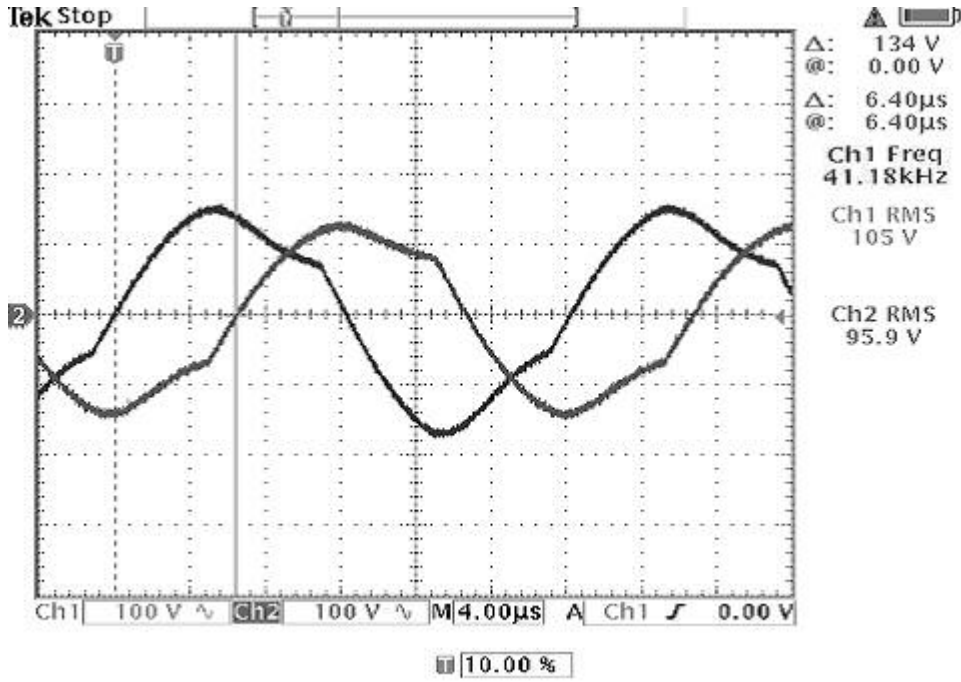
Şekil 5.23. USM iki-faz gerilimleri (80 d/d)



Şekil 5.24. USM iki-faz gerilimleri (90 d/d)



Şekil 5.25. USM iki-faz gerilimleri (100 d/d)



Şekil 5.26. USM iki-faz gerilimleri (130 d/d)

Motorun hızı ile motor üzerinde bulunan geri besleme sensörü olarak adlandırılan birimin ürettiği gerilim arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için 5 farklı hızda değerler alınmış ve değerler eğri olarak yukarıda verilmiştir. Motor hızı arttıkça geri besleme geriliminin değeri de artmaktadır ve geri besleme gerilimi ile motor hızı arasındaki ilişki lineer olmaktadır.

Deney sonuçlarına göre, geri besleme gerilimi ile hız arasındaki ilişki kullanılarak ayrı bir hız sensörü kullanılmadan motor hızını kontrol etmek mümkündür.

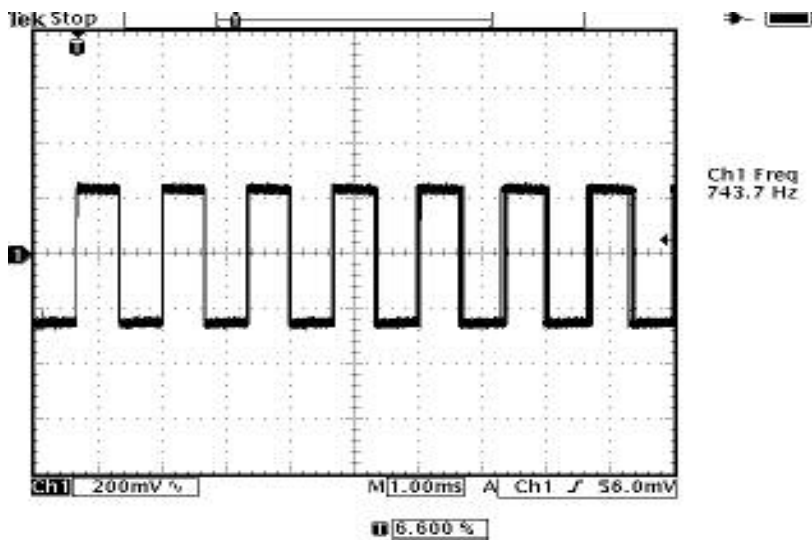
Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir konu da geri besleme sinyalinin frekansıdır. Daha önce de belirtildiği gibi uygulanan gerilimlerin frekansları arttıkça motor hızı azalmaktadır. Bu durum geri besleme sinyali için de aynıdır. Motor düşük devirde dönerken geri besleme sinyalinin frekansı yüksek, yüksek hızlarda dönerken sinyalin frekansı daha düşük olmaktadır.

Yapılan deneylerde motor hızı 139 d/d ile 24,5 d/d arasında değiştirilirken, geri besleme sinyalinin frekansı da 41,24 kHz ile 43,26 kHz arasında değişmiştir.

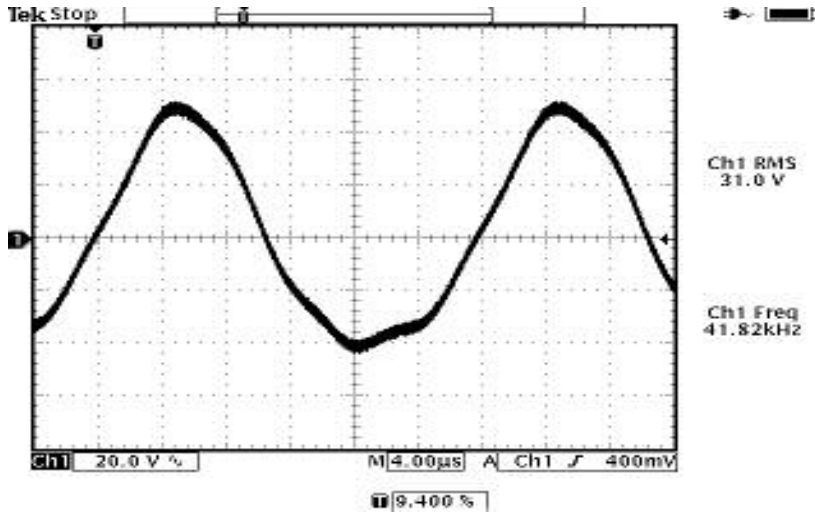
Bu çalışmada motorun geçici hız tepkilerini de elde etmek için farklı referans hız komutları için motorun gerçek hız tepkileri ölçülmüştür. PIC mikrodenetleyici tarafından üretilen DGM sinyali, filtre devresi yardımıyla DA gerilime dönüştürülerek hız referansı üretilmektedir. Motorun gerçek hızı ise yine PIC 16F877 tarafından motor miline bağlı olan enkoderin kare dalga sinyalinin dalga sayısı saydınırlarak ölçülmüş ve takometre ile bu ölçümün doğruluğu ispatlanmıştır.

Şekil 5.15’de motora 100 d/d’lık referans hız komutu uygulanmıştır. Şekil 5.16’da motorun bu referanstaki gerçek hız eğrisi görülmektedir. Motor, verilen hız komutuna bağlı olarak 100 d/d ile dönmektedir.

Piezoelektrik malzemelere ultrasonik düzeyde bir frekanslı gerilim uygulandığında titreşimler meydana gelir. Yani uygulanan elektrik enerjisine karşılık mekanik kuvvet elde edilebilir. Bunun tam tersi olarak mekanik kuvvet uygulayarak mekanik baskının şiddetine bağlı olarak elektrik gerilimi elde etmek mümkündür. Kullanılan USM’un bir bölümü geri besleme sensörü olarak kullanılmakta ve piezoelektrik etki prensibiyle gerilim üretmektedir. Bununla birlikte hız bilgisi de enkoderden ölçülmektedir. Bu çalışmada değişik hızlar için geri besleme sinyali ve enkoder kare dalga sinyali osiloskopta ölçülmüştür.

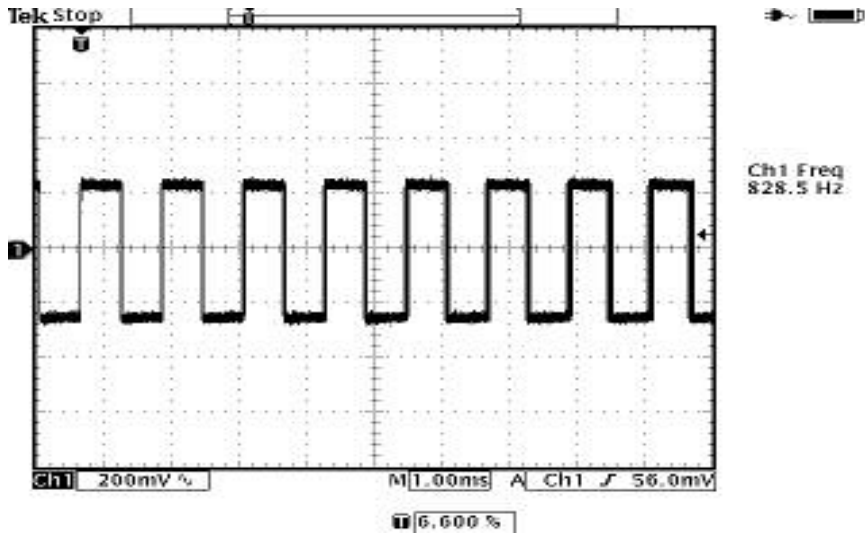


Şekil 5.27. Enkoder kare dalga sinyali (90 d/d)

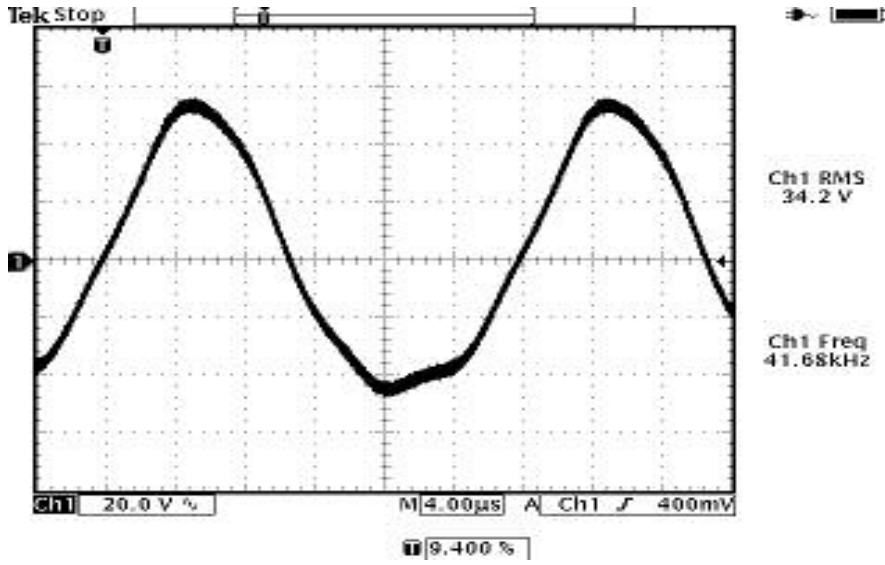


Şekil 5.28. Geri besleme sinyali (90 d/d – 31 V)

Referans hız olarak 90 d/d girildiğinde enkoderden alınan kare dalga sinyali Şekil 5.27’de, geri besleme kısmından elde edilen gerilimin eğrisi Şekil 5.28’de görülmektedir. Enkoder kare dalga sinyalinin frekansına göre hız hesaplaması yapılırsa referans hız değeriyle hemen hemen aynı sonucu verdiği görülür.



Şekil 5.29. Enkoder kare dalga sinyali (100 d/d)



Şekil 5.30. Geri besleme sinyali (100 d/d – 34,2 V)

Referans hız olarak 100 d/d girildiğinde enkoderden alınan kare dalga sinyali Şekil 5.29’da, geri besleme kısmından elde edilen gerilimin eğrisi Şekil 5.30’da görülmektedir. Enkoder kare dalga sinyalinin frekansına göre hız hesaplaması yapılırsa referans hız değeriyle hemen hemen aynı sonucu verdiği görülür.

5.4. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu kısımda, önceki kısımda sunulan hız ile ilgili deney sonuçları değerlendirilmektedir.

İlk olarak motorun hızı ile sürme frekansı arasındaki ilişkinin elde edilmesi için farklı hız referanslarındaki motora uygulanan gerilimlerdeki frekansları ölçülmüştür. Sürme frekansı 41,24 kHz den sonra arttırıldıkça motor hızının azaldığı görülmüştür.

Motor hızı ile stator üzerinde bulunan geri besleme elektrodunun ürettiği gerilim arasındaki ilişki de deneysel olarak elde edilmiştir. Motor hızı ile geri besleme elektrodunun ürettiği gerilimin doğru orantılı olduğu görülmüştür. Geri besleme elektrodunun ürettiği gerilim frekansının hız ile ilişkisi de deneysel olarak elde edilmiştir.

Motora sabit ve değişken hız referansları uygulanması durumundaki gerçek hız performansı incelenmiştir. Değişken hız referansları olarak 2,3,4 ve 5 kademedен oluşan hız referansları kullanılmıştır. Motorun istenen hız referanslarını çok hızlı bir şekilde ve salınım olmadan izlediği görülmüştür. Farklı hız referanslarının farklı dönüş yönleri ile verilmesi durumunda da motorun verilen hız referans komutlarını izlediği görülmüştür.

Motora 80 d/d, 100 d/d ve 130 d/d'lık basamak hız referansları uygulanmış ve bu referanslardaki motor hızları aynı grafik üzerinde çizdirilmiştir. Motorun verilen üç adım hız komutunu da aynı eğilimle izlediği görülmüştür. Motorun başlama ve durma tepkileri de elde edilmiş motorun durma tepkisinin temas yüzeyindeki sürtünmeden dolayı başlama tepkisinden daha hızlı olduğu görülmüştür.

Bu geliştirilen ultrasonik motor hız denetim devresi basit ve uygulanabilirdir. Hız denetim devreleri geliştirirken esas amaç motorun hız sıcaklık karakteristiği, yük durumundaki hız kararlılığı gibi olumsuzluklarını ortadan kaldırmaktır. Geliştirilen hız denetim devresi elde edilen deneysel sonuçlarda da desteklenerek bu olumsuzlukları kaldırmaktadır. Geliştirilen hız denetim devresi hangi durumda olursa olsun istenilen hıza çok kısa zamanda ulaşmaktadır.

Ultrasonik motorların özellikleri sıcaklık ve yük torkuyla birlikte geniş bir aralıkta değişir. Bulanık mantık denetim kurallarını optimize ederek motorların belli olmayan özellikleri ayarlanabilir. İyi bir denetim performansı için PI kontrolörlerin kontrol kazanımlarını ayarlamak zorunludur. Uygulanan yüke ve sıcaklık değişimlerine hassas olan motorların dinamik karakteristiklerindeki dengesizlikler düzeltiler. Böylece ultrasonik motorun hızlı ve tam hız denetimi gerçekleştirilebilir. Burada denetim programı mikrodenetleyicilerin içerisine kurulabilirse ve USB motor sürücülerine yerleştirilebilirse bu motorlar endüstride birçok pratik durumlarda küçük elektromanyetik servo motorların yerini alabilir [35,36].

Burada hız denetimi için yazılan program mikrodenetleyicinin içerisine yerleştirilmiş ve USR motor sürücüsüyle birleştirilerek hız denetiminin çok hızlı hız dalgalılığın azaltılması sağlanmıştır.

Ultrasonik düzeyde bir frekansa sahip gerilim piezoelektrik malzemeye uygulandığında piezoelektrik malzemeyi titreştirir. Yani piezoelektrik malzemeye uygulanan elektrik enerjisine karşılık mekanik kuvvet elde edilebilir. Bunun tersi olarak piezoelektrik malzemeye mekanik kuvvet uygulayarak mekanik baskının şiddetine bağlı olarak piezoelektrik malzemedan elektrik gerilimi elde edilebilir. Burada kullanılan USM'un bir bölümü geri besleme sensörü olarak kullanılmakta ve piezoelektrik etki prensibiyle gerilim üretmektedir. Bununla birlikte hız bilgisi de enkoderden ölçülmektedir. Bu çalışmada değişik hızlar için geri besleme sinyali ve enkoder kare dalga sinyali osiloskopta ölçülmüştür. 90 d/d ve 100 d/d hızları için geri besleme ve enkoder kare dalga sinyalleri deneysel olarak elde edilmiştir.

Geri besleme sinyalinin frekansı aynen sürme frekansı gibi referans hız arttıkça azalmaktadır. Yani geri besleme sinyalinin frekansı sürme frekansını izlemektedir. Motor hızı arttıkça sürme frekansının ve geri besleme sinyalinin frekansının azaldığı deneysel olarak elde edilmiştir. Ayrıca enkoder kare dalga sinyalinin frekansı ele alınarak motor hızı hesaplanmış, takometre ile motor hızı ölçülmüştür. Bu iki sonuç ile tuş takımından girilen referans hız değeri karşılaştırılmıştır. Enkoder kare dalga sinyalinin frekansı yardımıyla hesaplanan hız, takometre ile ölçülen hız ve tuş takımından girilen referans hız değerleri aynı olmaktadır.

Deney sonuçları literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, hız denetiminde elde edilen hız tepkisinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Ayrıca elde edilen hız tepkisi mevcut çalışmalardaki tepkilerden daha hızlıdır. Özellikle basamak yük uygulanması durumunda hızın dalgalanma olmadan hassas bir şekilde istenen değerde sabit tutulması mevcut çalışmalara göre üstünlük taşımaktadır. Bu çalışmada yük koşullarında elde edilen sonuçlar, geliştirilen sürme ve denetim sistemi sayesinde yüksüz durumdaki sonuçlar gibi düzgün olmuştur.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yürüyen dalga tip ultrasonik motorun hız ve konum denetimleri PIC mikrodenetleyici ile gerçekleştirilmiştir.

USM'un kontrol karakteristikleri karmaşıktır ve motor parametreleri lineer değildir. Motor parametreleri zaman, sıcaklık ve yük koşullarının değişmesi ile birlikte farklılık göstermektedir. Motorun tam matematik modelini elde etmek çok zordur. Tasarlanacak sürme ve denetim sisteminin bu sakıncaları ortadan kaldırması gerekmektedir. Bundan dolayı çalışmada denetleyici olarak karmaşık matematik model gerektirmeyen PIC mikrodenetleyici kullanılmıştır.

Elde edilen veriler oluşturulan hız denetim sisteminin YDUSM'lar için elverişli bir model olduğunu göstermiştir. Modelde motorun frekans ve gerilim tepkileri elde edilmiş ve kontrol değişkeni olarak frekansın daha elverişli olduğu görülmüştür. Ayrıca USM'ların çalışma karakteristiklerini etkileyen sıcaklığın etkisi modele eklenmiştir. Sıcaklığın motora etkisi, geri besleme kısmından elde edilen gerilimin frekansı ölçülerek incelenmiştir. Ayrıca motorun rezonans frekansı elde edilmiş ve bu frekansın motor çalışmasındaki önemi ortaya konulmuştur.

Motorun sürme sistemi için yüksek frekanslı iki fazlı kaynağa ihtiyaç vardır. Sürme devresi genellikle iki- fazlı yarım-köprü seri-rezonans eviriciden meydana gelmektedir. Bu çalışmada kullanılan sürme devresi DGM ve DFM etkin özelliklerini kullanmaktadır. Motorun yapısından kaynaklanan blokaj kapasitansının etkisini azaltmak ve rezonansı sağlamak amacıyla motorun her fazına seri endüktans bağlanmıştır. Motora uygulanan iki faz arasında 90° lik faz farkı vardır. 90° lik faz farkı en yüksek hızın elde edildiği açıdır. Fazlar arasındaki açı değiştirilerek motorun hızı değiştirilebilmektedir. Fazlar arasındaki açı bu çalışmada 90° olarak sabit tutulmuş hız denetimi için sürme frekansı değiştirilmiştir.

Motorun sürme frekansının değeri, motor üzerinde bulunan geri besleme sensöründen elde edilen yüksek frekanslı sinüsoidal gerilim ile sabit değerli DA

gerilimin karşılaştırılması sonucu elde edilmiştir. Motorun hızı artırılmak istendiğinde DA gerilimin seviyesi arttırılmış, buna bağlı olarak sürme frekansının değeri azaltılmıştır.

Motorun hız denetiminde; hız hatası ve hız hatasındaki değişim kontrol girişleri, sürme frekansı da kontrol çıkışı olarak seçilmiştir. Hesaplama kolaylık sağlamak amacıyla kontrol girişleri ve çıkış birim sistemine dönüştürülmüştür.

Hız bilgileri motor miline akuple edilmiş olan 500 sinyal / devirlik enkoder yardımıyla algılanmaktadır. Kare dalga enkoder sinyallerinin hem düşen, hem de yükselen kenarları saydırılarak 2000 sinyal / devirlik hassasiyet sağlanmıştır. Hem hız hem de konum denetimlerinde PIC mikrodenetleyicinin istenen sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar eğriler halinde sunulmuştur.

Motorun denetimi için özellikle motor ve hareket sistemlerinde kullanılmak üzere geliştirilmiş olan PIC 16F877 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu denetleyicinin Analog Dijital çeviricisi ve Zamanlayıcıları özellikle kontrol amaçlı olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada da sürme devresine uygulanan sinyaller ile enkoderden elde edilen sinyallerin işlenmesinde Analog Dijital çeviricisi ve Zamanlayıcılarının birimleri kullanılmıştır.

Analog Dijital çeviricisi, DGM devreleri ve kare dalga enkoder sinyal devresini içermektedir. DGM sinyalinin üretilmesinde Genel Amaçlı Zamanlayıcı-0'ın yukarı sayma modu kullanılmıştır. Bu sinyal, işlemcinin CCP1 (RC2) kanalında üretilmiştir. Motorun ön denetimi için genel amaçlı giriş ve çıkış pinleri kullanılmıştır. Motorun hız bilgisi ise kare dalga Zamanlayıcı-1'e enkoder kare dalga sinyalinin yükselen ve düşen kenarı saydırılmış ve denetim algoritmasına aktarılmıştır.

Geliştirilen sürme denetim sistemi ile motorun davranışları deneysel olarak elde edilmiştir. Motorun değişik referanslardaki hız tepkisi incelenmiştir. Motorun her değerdeki hız eğrisi, gerilim olarak hız sensöründe ölçülen hız bilgisinin osiloskopa

aktarılmasıyla elde edilmiştir. Motor 41,20–43,3 kHz frekans aralığında kontrol edilmiştir. Sürme frekansı arttırıldığında motor hızının azaldığı görülmüştür.

Motorun farklı yönlerdeki davranışları da deneysel olarak sunulmuştur. Motorun dönüş yönünün değiştirilmesi için fazların sırası değiştirilmiştir. Motor aynı koşullarda farklı yönlerde dönerken farklı hızlarda dönmektedir. Ayrıca motora uygulanan gerilimlerin genlikleri ve frekansları da değişmektedir. Bunu nedeni motorun farklı dönüş yönlerinde faz empedanslarının farklılık göstermesidir.

Motor hızı ile motor üzerinde geri besleme sensörü olarak da kullanılan bölmenin ürettiği gerilim arasındaki ilişki de ortaya konulmuştur. Bunu için motor farklı hızlarda döndürülmüş ve hızdaki geri besleme gerilimlerinin değeri kaydedilmiştir. Motorun hızı ile geri besleme gerilimi arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmüş, bu ilişki eğrilerle ifade edilmiştir.

Bu çalışmada, motorun hız denetimi çok hassas bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Motor, uygulanan hız referanslarını sürme devresinin bilgi sayfasında açıklanan bilgilere uygun olarak düzgün bir şekilde izlemiştir. Ayrıca değişken referans hızlar uygulanması durumunda da motorun bu referansları çok hassas ve hızlı bir şekilde izlediği deneysel sonuçlarla ortaya konulmuştur. Değişken hız referansının farklı yönler için uygulanması durumunda da motor istenen yöndeki hız referansına kısa sürede ulaşmıştır.

Hız denetiminde elde edilen sonuçlar, USM'un hız denetimi alanında yapılan akademik çalışmalarla karşılaştırıldığında çok önemli sonuçların elde edildiği görülmektedir.

Geliştirilen PIC 16F877 mikrodenetleyici tabanlı hız denetimleri, YDUSM'lar için etkin hassas ve uygulanabiliridir.

Yeni geliştirilen bir motor olduğundan dolayı USM ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde sürmektedir. Bundan sonraki çalışmalar için aşağıda önerilen hususların motorun gelecekteki kullanımı ve performansı için önemli olduğu düşünülmektedir.

Motorun tasarımında yapılacak iyileştirmeler ile motorun performansı geliştirilebilir. Bunun için stator malzemesi, rotor malzemesi ve ikisi arasında kullanılan malzemelerin seçimi önem kazanmaktadır. Piezoelektrik malzemelerin geliştirilmesi ve motor çapının arttırılmasıyla daha yüksek performanslı USM'lar üretilebilir. Bu şekilde hem çekme momenti arttırılabilir hem de motorun ömrü uzatılabilir. Ayrıca daha yüksek güç ve gerilimlerde üretilmesi durumunda motorun kullanım yerleri de artacaktır.

Motorun tam matematik modeli, yapılan çalışmalara rağmen henüz tam olarak elde edilememiştir. Özellikle temas yüzeyinin analizi ve sürtünme kayıplarının tam olarak ifade edilmesi için analitik ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak yeni modeller üretilebilir. Bu modellerde hem elektrik hem de mekanik kısım tam olarak ifade edilmelidir.

Motorun sürme sitemi geliştirilerek daha ekonomik ve etkin devreler tasarlanabilir. Bunun için seri-rezonans eviricinin yanı sıra, paralel-rezonans evirici, push-pull konvertör ve enerji geri beslemeli devreler önerilebilir.

Motorun hız denetimi için PIC 16F877 mikrodenetleyici kullanılmıştır. Bu denetimlerde sürme frekansının yanında kontrol girişi olarak fazlar arasındaki açı ve uygulanan gerilimler de kullanılarak hibrit bir denetim sistemi geliştirilebilir. Bu sayede ultrasonik motorun daha dengeli ve daha kararlı çalışması sağlanmış olacaktır. Bu durumda dış etkenlerden daha az etkilenecektir. Motor yapısında kullanılan malzemeler seçilirken özellikle sıcaklık arttıkça karakteristikleri az değişecek malzeme olmasına dikkat edilmelidir.

1,6 mm çapında ve 4 mm uzunluğunda statora sahip ultrasonik motor üretilebilmektedir. 100 Volt, 240 kHz'de çalışan bu motor 0.2 mNm'lik bir (torque)

döndürme kuvveti üretebilmektedir. Buda gösteriyor ki ultrasonik motorlar çok küçük boyutlarda üretilebilir ve bu özelliğinden dolayı uygulama alanları gittikçe artmaktadır. Buda kontrol sisteminin önemini artırmaktadır.

Ultrasonik motorlar; uzay araçlarının iç kısımlarında yerden tasarruf sağlayan makine ve robot donanımında, ulaşılabilen ve görülemeyen yerlerden veri ve bilgi temininde, boru ve tüp sistemlerinin iç kısmının hasar tespiti ve onarımında kullanılmaktadır. Ayrıca nükleer enerji santralleri, mayın tesbit ve imhası görevleri gibi tehlikeli yerlerde kullanılan mini/mikro-robotların hareket mekanizmalarında, taşınabilir iletişim cihazlarında, saatlerde ve diğer robotik uygulamalarda kullanılmaya uygun olup bu motorların teknolojiye yeni gelişmelerle birlikte kullanım alanları da genişlemektedir. Bunların dışında, özellikle büyük bir avantaj olan mikro düzeydeki boyutları nedeniyle asıl uygulama alanının tıp olacağı düşünülmektedir. Mikro-cerrahide, endoskopi ve laparoskopi gibi tıbbi işlemlerde, kalp ve damar hastalıklarının tedavisinde, zararlı yapıların teşhisinde ve vücuttan çıkarılmasında kullanılabileceğini göstermektedir.

Denetim sisteminde kullanılacak yarıiletken malzemelerin baskıya, sıcaklığa dayanıklı, karakteristiklerinin düzgün ve istenilen özelliklere uygun olarak seçilmesi gerekmektedir. Ayrıca sürme ve kontrol devrelerini oluşturan malzeme sayılarının mümkün olduğu kadar az olmalıdır. Çünkü malzeme sayısı arttıkça kayıpları artırmakta ve verimi azaltmaktadır. Seçilen malzemelerin birbiriyle uyumlu olması ve kararlı çalıştıklarına dikkat edilmelidir. Sürme devresinde kullanılan anahtarlama elemanlarının anahtarlama hızlarının yüksek olması ve açma ve kapama anlarındaki zaman kayıpları çok düşük olmalıdır.

Oluşturulacak sürme ve kontrol devrelerinin motorun karakteristiğinden ve dış etkilere kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldıracak şekilde tasarlanmalıdır. Sürme frekansı ultrasonik motorun rezonans frekansından yüksek seçilmelidir.

KAYNAKLAR

1. Koç, B., “Robotik2 piezo-elektrik ultrasonik motorlar”, *Bilim ve Teknik dergisi eki*, 7: 7 (2003).
2. Hatsuzawa, T., Toyoda, K. and Tanimura, Y., “Speed control characteristics and digital servo system of a circular travelling wave motor”, *Rev. Sci., Instrum*, 57(11): 2886-2890 (1986).
3. Takano, T., Tomikawa, Y., Ogasawara, T. and Hirata, H., “Constructions and characteristics of ultrasonic motors using a piezo-ceramic annular plate”, *Proc. IEEE 1989 ultrasonic symposium*, 2: 735-738 (1989).
4. Bekiroğlu, E., Bal, G., “Ultrasonik motorlar I: Yapılarının ve temel prensiplerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 13 (4): 1119-1128 (2000).
5. Bekiroğlu, E., “Yürüyen dalga ultrasonik motorun hız ve konum denetiminin bulanık mantık denetleyici kullanarak gerçekleştirilmesi”, Doktora tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 9-115 (2002).
6. Ferreira, A. and Minotti, P., “High-performance load-adaptive speed control for ultrasonic motors”, *Control Engineering practice*, 6: 1-13 (1998).
7. Cheng, Y., Lei, F., Xu, W. and Zhong, Y., “Speed Control of Ultrasonic Motors by Auto-Tuning Fuzzy PI Control”, *Proceedings of the 4th World Congress on intelligent Control and Automation*, Shanghai, 10-14 (2002).
8. Bal, G., “A Digital Controlled Drive System for Travelling-wave Ultrasonic Motor”, *Turk. J. Elec. Engin.*, 11(3): 155-168 (2003).
9. Bal, G., Bekiroğlu, E., “Characteristics estimation of travelling wave ultrasonic motors using equivalent circuit model”, *Int. Conf. on Electrical and Electronics Eng. ELECO'2001*, Bursa-Turkey, 62-66 (2001).
10. Sashida, T., Kenjo, T., “An introduction to ultrasonic motors”, *Oxford University Press*, New York, 180-184 (1993).
11. Tomikawa, Y., Ueha, S., “Ultrasonic motors theory and applications”, *Oxford University Press*, New York, 105-120 (1993).

12. Senjyu, T. Uezato, K. and Miyazato, H., "Adjustable speed control of ultrasonic motors by adaptive control", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 10 (5): 532-538 (1995).
13. Chung, S.W., Chau, K.T., "Servo speed control of travelling wave ultrasonic motors using pulse with modulation", *Elektric power components and systems*, 29: 707-722 (2001).
14. Nishibori, K., Okuma, S., Obata, H., Kondo, S., "PWM driving characteristics of robot hand with fingers using vibration-type ultrasonic motors", *IEEE Industrial Electrosonics Conference*, 1355-1360 (1997).
15. Nishibori, K., Okuma, S., Oshima, K., Eryu, Y., Ikegaya, Y., "Position control of robot manipulators with ultrasonic motors using pulse with modulation", *IEEE Industrial Electrosonics Conference*, 1844-1849 (1996).
16. Senjyu, T., Yokoda, S., Uezato, K., "A study on high efficiency drive of ultrasonic motors", *Electric Power Components and Systems*, 29: 179-189 (2001).
17. Cha, I.S. et al., "A study on the design and characteristics of the high frequency resonant inverter for ultrasonic motor drive using fuzzy controller", *IEEE Industrial Electronics, Control and Instrumentation IECON'95*, 1: 680685 (1995).
18. Cha, I.S. et al., "The characteristics of compensation on temperature of ultrasonic motor with robot actuator by fuzzy controller", *IEEE Emerging Technologies and Factory Automation ETFA'96*, 2: 752-758 (1996).
19. Kinouchi, M., et al., "Application of fuzzy PI control to improve the positioning accuracy of a rotary-linear motor driven by two-dimensional ultrasonic actuators", *Microprocessors and Microsystems*, 24: 105-112 (2000).
20. Lin, F. J., "Fuzzy adaptiye model-following pasition control for ultrasonic motor", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 12 (2): 261-268 (1997).
21. Senjyu, T., Kashiwagi, T., Uezato, K., "Position control of ultrasonic motors using MRAC and dead-zone compensation with fuzzy inference", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 17 (2): 265-272 (2002).

22. Bekiroğlu, E., Bal, G., “Ultrasonik motorlar II: Sürme ve kontrol devrelerinin incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14 (1): 99-115 (2000).
23. F. J. Lin and L. C. Kuo, “ Driving circuit for ultrasonic motor servo drive with variable-structure adaptive model-following control ” *IEEE Proc. Electr. Power Applicat.*, 144(2): 199-206 (1997).
24. Nakamura K., Ueha, S., “Potential ability of ultrasonic motors: A discussion focused on the friction control mechanism”, *Electronics and Communications in Japan*, 2, 81 (4): 57-67 (1998).
25. Uchino, K., “Piezoelectric actuators/Ultrasonic motors: Their developments and markets”, *IEEE Int. Symposium on Applications of Ferroelectrics ISAF'94*, 319-324 (1994).
26. Bal, G., E. Bekiroğlu, Ş. Demirbaş and İ. Çolak, “Fuzzy logic based DSP controlled servo position control for ultrasonic motor”, *Energy Conversion and Management*, 45(20): 3139-3153 (2004).
27. Roh, Y., Lee, S., Han, W., “Desing and fabrication of a new taveling wave-type ultrasonic lineer motor”, *Sensors and Actuators A*, 94: 205-210 (2001)
28. Hirata, H., Ueha, S., “Design of a traveling wave type ultrasonic motor”, *IEEE Transactions on Ultrasonic, Ferroelectrics and Frequency Control*, 42 (2): 225-231 (1995).
29. Zharii, O.Y., “An exact mathematical model of travelling wave ultrasonic motor”, *Ultrasonic Symposium*, 545-548 (1994).
30. El Ghoui, N., “Hybrid Modelling of a Travelling Wave Piezoelectric Motor, PhD Thesis”, *Dep. of Control Engineering, Aalborg University*, Denmark, (2000).
31. Bal, G., Bekiroglu, E., “Servo speed of travelling-wave ultrasonic motors using digital signal processor”, *Sens Actuators A*. 2004; 109(3):212-9 (2001).
32. Çolak İ., Bayındır R., “A Novel Dynamic Reactive Power Compensator Based on PIC”, *Electric Power Components & Systems*, 33 (8): 861-876 (2005).
33. İbrahim D., “PIC C Motor kontrol projeleri”, *Bileşim yayınları*, İstanbul, 25-45 (2004).
34. Briot, R., Amadei, M.G., Pelourson, A., Garabedian, C., “Generators for piezoelectric motors”, *Meas. Sel Technology*, 4: 938-946 (1993).

35. Senjyu, T., Yokoda, S. and Uezato, K., “ Speed Control of Ultrasonic Motors Using Fuzzy Neural Network”, *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 8: 135-146 (2000).
36. Chen, J., Lin, I., “Toward the implementation of ultrasonic motor servo drive using FPGA” , *Mechatronics*, 12: 511-524 (2002).

EKLER

EK-1 Yürüyen-dalga tip USM (Shinsei USR60)'un temel özellikleri

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/CWW
Ağırlık	175 g
Çalışma sıcaklığı	-10/+50 C
Tutma momenti	$\leq 800 \text{ mNm}$
Rotor ataleti	$7,2 \times 10^{-6} \text{ kg/m}^2$
Statorun dış çapı	$30 \times 10^{-3} \text{ m}$
Statorun iç çapı	$23,5 \times 10^{-3} \text{ m}$
Statorun ortalama çapı	$26,75 \times 10^{-3} \text{ m}$
Temas yüzeyinin ortalama çapı	$26,75 \times 10^{-3} \text{ m}$
Statorun kalınlığı	$1,5 \times 10^{-3} \text{ m}$

EK-2 NEPEC-61 Piezoelektrik seramiğin özellikleri

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

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : UZEL Hasan
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 04.08.1971 Kulu
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (354) 314 62 50
Faks : -
e-mail : uzelhasan@hotmail.com.

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi	-
Lisans	Ondokuz Mayıs Üniversitesi/ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü	1997
Lise	Kulu Lisesi	1989

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Hobiler

Futbol, Bilgisayar teknolojileri, Basketbol