YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN ÜÇ-MOD ÇALIŞMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Altan GENCER

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK EĞİTİMİ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AĞUSTOS 2011
ANKARA

Altan GENCER tarafından hazırlanan "YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN ÜÇ-MOD ÇALIŞMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ" adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Güngör BAL ……
Tez Danışmanı, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı

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

Prof. Dr. İlhami ÇOLAK ……
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü

Prof. Dr. Güngör BAL ……
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü

Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT ……
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Anabilim Dalı, F.Ü

Doç. Dr. Ramazan BAYINDIR ……
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü

Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU ……
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, A.İ.B.Ü

Tarih :15/08/2011

Bu tez ile G. Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Doktora derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU ……
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

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

Altan GENCER

YÜRÜYEN DALGA ULTRASONİK MOTORUN ÜÇ-MOD ÇALIŞMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ
(Doktora Tezi)

Altan GENCER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Ağustos 2011

ÖZET

Yürüyen dalga ultrasonik motor son yıllarda endüstriyel uygulamalarda yer almaya başlamıştır. Ultrasonik motorun hızı üç büyüklük ayarlanarak denetlenebilmektedir. Bunlar; fazlara uygulanan gerilimlerin genliği ve frekansı ile fazlar arasındaki faz farkıdır. Bu tezde, ultrasonik motorun hız tepkisinin üç büyüklüğe veya üç-moda göre değişimini incelemek amacıyla mikro denetleyici tabanlı bir sayısal kontrol ve sürücü sistemi tasarlanmış ve kurulmuştur. Sürücü sistem basit yapılı ve küçük boyutlu olmakla birlikte motor hız ve yön komutunun sayısal olarak girilmesine fırsat vermekte ve motorun hız, gerilim ve akım bilgilerini display üzerinden izleme imkanı sağlamaktadır. Motor laboratuarda farklı hız ve yük durumlarında üç-mod çalışmada denenmiştir. Deneyde iki-faz gerilimlerin genlikleri, frekansları ve aralarındaki faz farkları kontrol girişleri olarak kullanılmıştır. Simülasyon ve deneylerden elde edilen sonuçlara göre motorun hız tepkileri analiz edilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ultrasonik motorun; uygulanan gerilimin frekansı ile geniş bir hız aralığında kontrol edilebileceği, uygulanan gerilimlerin genlik ayarının hız aralığı üzerinde dar bir etkiye sahip olduğu ve uygulanan faz gerilimleri arasındaki faz farkının değiştirilmesinin hız aralığında çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Motor hızının frekans ve genlik ayarı ile en düşük seviyeye indirildiği durumda, faz farkı ayarlamasının hızın daha düşük seviyeye

indirilmesinde bir yol olabileceği gözlenmiştir.

Bilim Kodu : **703.3.012**
Anahtar Kelimeler : **Ultrasonik Motor, Hız tepkisi, Üç-mod çalışma**
Sayfa Adedi : **110**
Tez Yöneticisi : **Prof. Dr. Güngör BAL**

INVESTIGATION OF THREE-MOD OPERATION FUTURES OF TRAVELLING WAVE ULTRASONIC MOTOR

(Ph.D. Thesis)

Altan GENCER

GAZİ UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

August 2011

ABSTRACT

Travelling wave ultrasonic motors are recently being used in industrial applications. The speed of the ultrasonic motor can be controlled by adjusting three quantities. These are magnitude and frequency of two-phase voltages and the phase angle between them. In this thesis, in order to investigate the speed response of a travelling wave ultrasonic motor under three-mode (three-quantity) operation, a micro controller based digitally controlled speed driver system was designed and implemented. While the driver system has a simple construction and small size it provides access to enter speed and direction commands digitally as well as tracking the real motor speed, voltage and current on an LCD. The system was tested in a laboratory for different speed and load cases under three-mode operation. In the test, driving frequency and magnitude of phase voltages and phase shift between two phases have been used as the control inputs. The results obtained from simulation and experiments were analyzed and presented with comparisons. It was seen that the speed of the ultrasonic motor can be controlled more widely with the frequency, the amplitude of the phase voltages has less effect on the speed interval and the phase shifting has very small effect on the speed interval. When the frequency and amplitude adjustments reach the lower limitations for the lowest speed the phase angle still offers a way to control the speed.

Science Code : **703.3.012**
Key Words : **Ultrasonic motor, speed response, three-mod operation**
Page Number : **110**
Adviser : **Prof. Dr. Güngör BAL**

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım Prof. Dr. Güngör BAL'a, tez hazırlama süresince desteklerini esirgemeyen Prof. Dr İlhami ÇOLAK ve Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT'a, yine kıymetli tecrübelerinden faydalandığım Doç.Dr. Ramazan BAYINDIR'a, Doç. Dr. Erdal BEKİROĞLU'na, Doç. Dr. Şevki DEMİRBAŞ'a, Doç. Dr. İbrahim SEFA'ya, Yrd. Doç. Dr. Nihat ÖZTÜRK'e, Yrd. Doç. Dr. Necmi ALTIN'a ve Arş. Gör. Dr. Orhan KAPLAN'a, çalışmanın yürütülmesi sırasında katkılarını esirgemeyen Elektrik Eğitimi Bölümü öğretim elemanlarına, hayatının son aylarında olduğunu bile bile akademik çalışmaya katkıda bulunmak için hasta yatağından kalkıp tezimin temellerini atmamda faydası olan rahmetli hocam Dr. Mehmet Altuner'e, çalışmalarım süresince beni sabır ve hoşgörü ile destekleyen eşim ve aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET……...iv

ABSTRACT……vi

TEŞEKKÜR……..……..……..viii

İÇİNDEKİLER……...…….ix

ÇİZELGELERİN LİSTESİ……..xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ……..xii

RESİMLERİN LİSTESİ……xix

SİMGELER VE KISALTMALAR…….xx

1. GİRİŞ 1

2. ULTRASONİK MOTORLAR..... 7

2.1. Yürüyen Dalga Ultrasonik Motorun Yapısı 7

2.2. Ultrasonik Motorun Çalışma Prensibi 10

2.3. Yürüyen Dalga Tip USM Eşdeğer Devresi 12

3. YÜRÜYEN DALGA TİP USM İÇİN SÜRME SİSTEMİ..... 15

3.1. YDUSM'un PIC Mikrodenetleyici Tabanlı Sürme Sistemi 15

3.2. PIC18F452 Miktrodenetleyici 16

3.3. Hız Ölçme..... 20

3.4. DGM Üreteci 21

3.5. XR8038 Fonksiyon Üreteci 22

3.6. Faz Çoklaycıci 23

3.7. Güç Yükselteci 24

Sayfa

4. ÇOK MODLU HIZ KONTROL ÖZELLİKLERİ 26

4.1. Sürücü Frekansının Etkisi 28

4.2. Gerilim Genliğinin Etkisi 30

4.3. Faz Farkının Etkisi 32

5. DENEY SONUÇLARI 36

5.1. Üç Modlu Çalışmada Yüksüz Durumdaki Motor Sonuçları 39

5.1.1. Frekans ile hız değişimi-Motor yüksüz 39

5.1.2 Gerilimin genliği ile hız değişimi-Motor yüksüz 44

5.1.3. Faz farkı ile hız değişimi-Motor yüksüz 48

5.2. Frekansla Hız Değişimi-Farklı Gerilimlerde-Motor yüksüz 52

5.3. Faz Farkı ile Hız Değişimi-Farklı Gerilimlerde-Motor Yüksüz 53

5.4. Üç Modlu Çalışma Yüklü Durumdaki Motor Sonuçları 55

5.4.1. Frekansla hız değişimi-Motor yüklü 55

5.4.2. Gerilim ile hız değişimi-Motor yüklü 57

5.4.3. Gerilimin faz farkı ile hız değişimi-Motor yüklü 58

5.5. Üç Modlu Çalışmada Hız Denetimi 61

5.6. Akım ve Enkoder Kare Dalga Sinyalleri 88

5.7. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi 97

6. SONUÇ VE ÖNERİLER 99

KAYNAKLAR 102

EKLER

EK-1 Yürüyen-dalga tip USM (Shinsei USR60)'un temel özellikeri 108

EK-2 NEPEC-61 Piezoelektrik seramiğin özellikleri 109

ÖZGEÇMİŞ 110

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. USM eşdeğer devresi için kullanılan eşitlikler ve parametreler…….14

Çizelge 5.1. Uygulanan gerilimlerin faz farkı 90^0 sabit tutularak USM hızının sürme frekansı ile değişim verileri……..……..39

Çizelge 5.2. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz ve faz farkı 90^0 olarak sabit tutulduğunda, gerilimin genliği ile rotor hızının değişim verileri..... 44

Çizelge 5.3. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz, gerilimin genliği 140V sabit tutulduğunda sürme gerilimlerinin faz farkı ile rotor hızı değişimi verileri..... 48

Çizelge 5.4. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0 sabit tutularak, frekansı 44,84 kHz ile 40,29 kHz, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimin verileri 52

Çizelge 5.5. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz sabit tutulduğunda, faz farkı 0^0 ile 360^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim verileri 54

Çizelge 5.6. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz sabit tutulduğunda, faz farkı 0^0 ile 360^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim verileri 54

Çizelge 5.7. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, frekansı 42,55 kHz ile 40,65 kHz arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri 55

Çizelge 5.8. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, sürme frekansı 41,32 kHz sabit tutularak, gerilimin genliği 168V kHz ile 182V arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri 57

Çizelge 5.9. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri 58

Çizelge 5.10. Sürme frekansı ile USM çektiği akımın değişim verileri 96

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Ultrasonik motorun iç yapısı 9

Şekil 2.2. Stator halkası ve elektrotların yerleştirilmesi 10

Şekil 2.3. Yürüyen dalga 11

Şekil 2.4. Yürüyen dalga ultrasonik motorun çalışma prensibi 12

Şekil 2.5. Yüklü eşdeğer devre 12

Şekil 3.1. PIC ile kontrol edilen YDUSM sürme devresinin blok diyagramı 15

Şekil 3.2. YDUSM sürme ve hız denetim sisteminin blok diyagramı 16

Şekil 3.3. PIC18F452 için pin yapısı 18

Şekil 3.4. USM'un PIC 18F452 filtre devresi ile hız kontrol devresi 19

Şekil 3.5. PIC mikrodenetleyicinin yazılımının akış diyagramı 20

Şekil 3.6. HEDS-5540 enkoderin blok diyagramı 21

Şekil 3.7. DGM sinyalini DA gerilimine çeviren filtre devresi 22

Şekil 3.8. XR8038 iç yapısı 22

Şekil 3.9. Filtre devresinin çıkış gerilimi ile XR8038 ürettiği frekans arasındaki ilişki 23

Şekil 3.10. Tüm geçiren filtre devresi 23

Şekil 3.11. Faz çoklayıcı 24

Şekil 3.12. YDUSM için iki-faz evirici devresi 25

Şekil 4.1. YDUSM için kontrol blok devresi 26

Şekil 4.2. YDUSM'un hız kontrol devresi 27

Şekil 4.3. YDUSM'un tek faz sürme devresi 28

Şekil 4.4. Yüklü durumda sürme frekansı ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu) 28

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.5. Hıza göre frekansın değişimi (100 d/d) 29

Şekil 4.6. Hıza göre frekansın değişimi (40 d/d) 29

Şekil 4.7. Hıza göre frekansın değişimi (20 d/d) 30

Şekil 4.8. Yüklü durumda gerilimin genliği ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu) 31

Şekil 4.9. Hıza göre uygulanan gerilimlerin genliklerinin değişimi (182V)..... 31

Şekil 4.10. Hıza göre uygulanan gerilimlerin genliklerinin değişimi (140V)..... 32

Şekil 4.11. Yüklü durumda faz farkı ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu) 33

Şekil 4.12. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=30^0$ (20d/d için benzetim sonucu) 33

Şekil 4.13. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=60^0$ (34d/d için benzetim sonucu) 34

Şekil 4.14. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=90^0$ (40d/d için benzetim sonucu) 34

Şekil 4.15. YDUSM iki-faz gerilimleri $\theta=120^0$ (34d/d için benzetim sonucu) 35

Şekil 5.1. YDUSM deney düzeneği 36

Şekil 5.2. Akım okuma kartı 37

Şekil 5.3. (a) Çok modlu eviricinin iki-faz gerilimi (b) D6060 eciricinin iki-faz gerilimi (50d/d)..... 38

Şekil 5.4. (a) Çok modlu eviricinin B-fazı $\pi/2$ açısı kadar ileri (b) D6060 evricinin B-fazı $\pi/2$ açısı kadar ileri (100d/d)..... 38

Şekil 5.5. YDUSM iki-faz gerilimleri (20 d/d için)..... 40

Şekil 5.6. YDUSM iki-faz gerilimleri (40 d/d için)..... 40

Şekil 5.7. YDUSM iki-faz gerilimleri (60 d/d için)..... 42

Şekil 5.8. YDUSM iki-faz gerilimleri (80 d/d için)..... 42

Şekil 5.9. YDUSM iki-faz gerilimleri (90 d/d için)..... 43

Şekil 5.10. YDUSM iki-faz gerilimleri (101 d/d için)..... 43

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.11. Uygulanan gerilimlerin faz farkı 90^0 olarak sabit tutulduğunda sürme frekansı ile rotor hızının değişimi 44

Şekil 5.12. YDUSM iki-faz gerilimleri 182V (76 d/d için) 45

Şekil 5.13. YDUSM iki-faz gerilimleri 168V (70 d/d için) 45

Şekil 5.14. YDUSM iki-faz gerilimleri 154V(65 d/d için) 46

Şekil 5.15. YDUSM iki-faz gerilimleri 140V (63 d/d için) 47

Şekil 5.16. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz ve faz farkı 90^0 sabit tutulduğunda, faz gerilimi ile rotor hızının değişimi 47

Şekil 5.17. YDUSM iki-faz gerilimleri, $\theta=0^0$ (0 d/d için) 49

Şekil 5.18. YDUSM iki-faz gerilimleri, $\theta=30^0$ (10 d/d için) 49

Şekil 5.19. YDUSM iki-faz gerilimleri, $\theta=60^0$ (27d/d için) 50

Şekil 5.20. YDUSM iki-faz gerilimleri, $\theta=90^0$ (36 d/d için) 50

Şekil 5.21. YDUSM iki-faz gerilimleri, $\theta=120^0$ (27d/d için) 51

Şekil 5.22. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz, gerilimin genliği 140V sabit tutulduğunda USM' un hızının sürme gerilimlerinin faz farkı ile değişimi 52

Şekil 5.23. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0 sabit tutulduğunda, frekansı 44,84 kHz ile 40,29 kHz, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim 53

Şekil 5.24. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi 54

Şekil 5.25. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi 55

Şekil 5.26. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, frekansı 42,55 kHz ile 40,65 kHz arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim 56

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.27. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, sürme frekansı 41,32 kHz sabit tutularak, gerilimin genliği 168V ile 182V arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim 58

Şekil 5.28. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim 59

Şekil 5.29. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 180^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim 60

Şekil 5.30. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 180^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim 60

Şekil 5.31. YDUSM'un iki-faz eğrileri (20d/d) 61

Şekil 5.32. YDUSM'un yüksüz durumda hız eğrisi (20d/d) 62

Şekil 5.33. YDUSM'un 0,06Nm yüklü durumda hız eğrisi(20d/d) 62

Şekil 5.34. YDUSM'un iki-faz eğrileri (40d/d) 63

Şekil 5.35. YDUSM'un yüksüz durumda hız eğrisi(40d/d) 64

Şekil 5.36. YDUSM'un 0,085Nm yüklü durumda hız eğrisi(40d/d) 64

Şekil 5.37. YDUSM'un iki-faz eğrileri (60d/d) 65

Şekil 5.38. YDUSM'un yüksüz durumda hız eğrisi(60d/d) 66

Şekil 5.39. YDUSM'un 0,1Nm yüklü durumda hız eğrisi(60d/d) 66

Şekil 5.40. YDUSM'un iki-faz eğrileri (80d/d) 67

Şekil 5.41. YDUSM'un yüksüz durumdaki hız eğrisi(80d/d) 68

Şekil 5.42. YDUSM'un 0,08Nm yüklü durumdaki hız eğrisi(80d/d) 68

Şekil 5.43. YDUSM'un iki-faz eğrileri (100d/d) 69

Şekil 5.44. YDUSM'un kademeli hız eğrisi (30-70-100d/d) 70

Şekil 5.45. Farklı yük durumlarında YDUSM'un hız eğrisi (70d/d) 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.46. Sürekli çalışma durumunda YDUSM'un değişken yük altındaki hız eğrisi (70d/d) 71

Şekil 5.47. YDUSM'un yüksüz durumda kademeli hız eğrileri(25-70d/d) 72

Şekil 5.48. YDUSM'un farklı yük durumlarında kademeli hız eğrisi(25-70d/d) 72

Şekil 5.49. YDUSM'un faz farkı eğrisi (60^0) 73

Şekil 5.50. YDUSM'un faz farkı eğrisi (75^0) 73

Şekil 5.51. YDUSM'un faz farkı eğrisi (90^0) 74

Şekil 5.52. YDUSM'un faz farkı eğrisi (105^0) 74

Şekil 5.53. YDUSM'un faz farkı eğrisi (120^0) 75

Şekil 5.54. YDUSM'un faz farkı değiştirilerek elde edilen hız eğrileri (60^0) 75

Şekil 5.55. YDUSM'un faz farkı değiştirilerek elde edilen hız eğrileri (75^0) 76

Şekil 5.56. YDUSM'un faz farkı değiştirilerek elde edilen hız eğrileri (90^0) 76

Şekil 5.57. YDUSM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (190V) 77

Şekil 5.58. YDUSM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (184V) 77

Şekil 5.59. YDUSM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (155V) 78

Şekil 5.60. YDUSM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (140V) 78

Şekil 5.61. YDUSM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (190V) 79

Şekil 5.62. YDUSM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (184V) 79

Şekil 5.63. YDUSM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (155V) 80

Şekil 5.64. YDUSM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (140V) 80

Şekil 5.65. YDUSM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (60^0) 81

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.66. YDUSM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (75^0) 81

Şekil 5.67. YDUSM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (90^0) 82

Şekil 5.68. YDUSM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (90^0) 82

Şekil 5.69. YDUSM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (75^0) 83

Şekil 5.70. YDUSM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (60^0) 83

Şekil 5.71. YDUSM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (127V) 84

Şekil 5.72. YDUSM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (113V) 84

Şekil 5.73. YDUSM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (106V) 85

Şekil 5.74. YDUSM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (100V) 85

Şekil 5.75. YDUSM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (127V) 86

Şekil 5.76. YDUSM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (113V) 86

Şekil 5.77. YDUSM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (106V) 87

Şekil 5.78. YDUSM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (100)V 87

Şekil 5.79. Enkoder kare dalga sinyali (20 d/d) 89

Şekil 5.80. Akım ve gerilim eğrileri (20 d/d) 89

Şekil 5.81. Enkoder kare dalga sinyali (40d/d) 90

Şekil 5.82. Akım ve gerilim eğrileri (40 d/d) 90

Şekil 5.83. Enkoder kare dalga sinyali (60d/d) 91

Şekil 5.84. Akım ve gerilim eğrileri (60 d/d) 91

Şekil 5.85. Akım ve gerilim eğrileri (80 d/d) 92

Şekil 5.86. Akım ve gerilim eğrileri (100 d/d) 92

Şekil 5.87. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (20d/d için) 94

Şekil **Sayfa**

Şekil 5.88. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (40d/d için)..... 95

Şekil 5.89. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (80d/d için)..... 95

Şekil 5.90. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (100d/d için)..... 96

Şekil 5.91. Sürme frekansı ile YDUSM'un çektiği akımın değişimi..... 97

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 2.1. Yürüyen dalga tip USM 8

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	**Açıklama**
$\boldsymbol{K}$	Yay sabiti
$\boldsymbol{k}$	Kuplaj katsayısı
$\boldsymbol{C}$	Kapasite, F
$\boldsymbol{L}$	Endüktans, H
$\boldsymbol{r_0}$	İç kayıplar, Ω
$\boldsymbol{Y_{11}}$	Young sabiti, N/m^2
$\boldsymbol{Q}$	Kalite faktörü
$\boldsymbol{A}$	Kuvvet faktörü, N/V
$\boldsymbol{T_{st}}$	Tork, Nm
$\boldsymbol{n_{id}}$	Hız, d/d
$\boldsymbol{V}$	Gerilim, V
$\boldsymbol{V_A}$	Motorun *A* fazı gerilimi, V
$\boldsymbol{V_B}$	Motorun *B* fazı gerilimi, V
$\boldsymbol{Y_d}$	Blokaj admitansı, S
$\boldsymbol{Y_m}$	Hareket admitansı, S
$\boldsymbol{I_m}$	Hareket akımı, A
$\boldsymbol{C_m}$	Hareket kapasitansı, F
$\boldsymbol{L_m}$	Hareket endüktansı, H
$\boldsymbol{R_0}$	Ortalama çap,m

Simgeler	Açıklama
D_0	Dış çap,m
D_i	İç çap,m
v	Titreşim hızı, m/s
m	Kütle, kg
h	Kalınlık, m
ξ	Yürüyen dalganın genliği
R_r	Eksenel şekil katsayısı
ω_o	Açısal frekans, rad/s
θ	Konum, rad
$\omega(r,\theta,t)$	Yürüyen dalga
f_r	Rezonans frekansı,kHz
λ	Yürüyen dalga hızı

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

(b)

1. GİRİŞ

Günümüzde ultrasonik motorlar endüstride, robot ve otomotiv uygulamalarında servo sistem olarak özel ilgi çekmektedir [1].

Endüstrideki gelişmelere paralel olarak motorların yüksek hız, yüksek moment, küçük boyut ve uzun ömürlü olmaları istenmektedir. Bu sebeplerden dolayı yeni motor tasarımları geliştirilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca yarı iletken teknolojisinin gelişmesi sonucunda sürme devrelerinin daha ucuza sağlanabilmesi de motor tasarımlarına hız verilmesinde etkili olmaktadır. Yeni olarak geliştirilen ve yapısında piezoelektrik malzemelerin kullanıldığı motorlara ultrasonik motorlar denilmektedir [1, 2].

Ultrasonik motor (USM), sürücü kaynağı olarak ultrasonik bölgedeki mekaniksel titreşimleri kullanan bir hareketlendiricidir. USM, yüksek tutma momenti, düşük hızda yüksek moment üretmesi, sessiz çalışma ve elektromanyetik parazitlerden etkilenmemesi gibi olumlu özelliklere sahiptir [2, 3, 4]. USM'nin momenti, aynı büyüklükteki veya ağırlıktaki klasik elektromanyetik motorlardan 10 kat daha büyüktür. USM bu özelliklerinden dolayı robot, uzay, tıp ve otomotiv uygulamalarında son zamanlarda kullanılmaya başlanmıştır [5, 6].

Bu üstünlüklerine rağmen USM pratik uygulamalar için çözülmesi gereken bazı olumsuzluklara sahiptir. USM yüksek doğrusal olmayan ve karışık kontrol özelliğine sahiptir. Motor parametrelerinin doğru değerleri kolay elde edilemez. Motor parametreleri; besleme gerilimi, yük momenti ve sürücü frekansına bağımlıdırlar. Motor parametreleri, çalışma esnasında sıcaklık artmasından dolayı da zamanla değişirler [2, 6, 7, 8]. Bu olumsuzlukları yok etmek için yeni sürücü ve kontrol sistemleri tasarlanmıştır [9, 10].

Ultrasonik motor, piezoelektrik parçaların ultrasonik titreşim gücü tarafından hareket ettirilen özel bir tip motordur. Ultrasonik motor, elektromanyetik motorlarda olmayan özel performansa ve birçok faydalı özelliğe sahiptir [11, 12]. Araştırmaların

çoğu ultrasonik motorun analitik modeli üzerine yapılmıştır. Analitik model birçok değişken parametreye sahiptir ve bu durum hız modelinin pratik uygulamasının yapılmasını oldukça zorlaştırmaktadır. Düşük hızda, yüksek moment gerektiren uygulamalarda kullanılmaktadır [13, 14].

Hagedorn [15], ultrasonik motorun yapısında bulunun piezoseramik malzemenin yapısı ile ilgilenmişlerdir. Wallaschek [16], stator üzerinde piezoseramiğin yerleştirilmesinde öneme vurgu yapmıştır. Aynı zamanda piezoseramik malzemenin esnekliği artırmanın önemini belirtmişlerdir.

Ultrasonik motor, son yıllarda üretilen ve geliştirilen mikro motorun yeni bir tipidir. Piezoelektirik seramiğin (PZT), mekanik titreşim enerjisi özeliğini kullanır, daha sonra statordaki bu mekanik titreşim enerjisi rotora sürtünme yolu ile iletilir [2, 17, 18]. Klasik elektromanyetik motorlarla karşılaştırıldığında, ultrasonik motor kısa bekleme süresi ve sürekli çalışma zamanı gibi birçok problemleri çözer. Bundan dolayı ultrasonik motor araştırmalarının ilerlemesi ile havacılık ve uzay çalışmalarında uygulanma alanları artmaktadır [6, 12, 19].

Statorda yüksek hızlı titreşim olduğundan dolayı yürüyen dalga oluşmaktadır. Statordaki yürüyen dalga, rotorda dönme hareketini meydana getirir [1, 12, 20, 21].

Ultrasonik motor çok iyi mekaniksel kavrama özelliğine sahiptir [22, 23]. Ultrasonik motorda mekaniksel kavrama, dejenere modun iki dikey moda ayrılması için eşdeğer olarak kullanılabilir [24, 25] ve daha sonra yürüyen dalga üretilir. Klasik eletromanyetik motorların hepsinde mekaniksel kavrama, motorun çalışma prensibi içinde doğrudan yok edilir. Ancak ultrasonik motor, elektriksel yeteneğini ve motor kontrollünü oldukça etkilediğinden bu kavrama özelliği ile doğrudan çalışır [26].

Yaygın olarak kullanılan elektromanyetik motorların bazı dezavantajları vardır. Bu motorların en büyük sorunu boyutları ile ilgilidir. Birçok elektromanyetik motorda kullanılan kalıcı mıknatıs ağırdır ve önemli ölçüde yer kaplamaktadır. Ayrıca düşük hız uygulamaları için dişli sistemi gerekmektedir. Dişli sistemindeki salınımlara, dişli

sisteminden kaynaklanan ek ağırlık ve hacim gibi problemlere sebep olmaktadır. USM'lar esnek yapım ya da biçimlendirme özelliğine sahiptir ve düşük hızda yük döndürebilmesi için dişli sistemine ihtiyaç göstermezler. Bu motorlar, tasarımları ile ilgili yapılacak çalışmalarla özellikle küçük boyutlu hareket sistemlerinde kolaylıkla kullanılabilmektedir [27, 28].

Bal [29], yürüyen dalga ultrasonik motor (YDUSM) için doğru hız kontrol karakteristiklerini elde etmek amacıyla oldukça yüksek etkili bir sürücü sistemi önermiştir. İlk olarak USM'nin eşdeğer devre modelini vermiştir. Daha sonra Shinsei'nin yürüyen dalga tip USR60 USM için dijital kontrol sürücü sistemi geliştirmiştir. TMS320F243 kullanılarak USM için yeni sürücü sistemi tasarlamıştır. Kontrol sinyallerinin hepsi DSP ile kontrol edilmiştir. Bu çalışmada YDUSM' nin geçici yanıt ve bekleme durum performansları elde edilmiştir. Önerilen dijital sürücü ve kontrol sisteminin çıkışları, yük durumlarındaki değişikliklere karşı hızlı ve doğru yanıtlar verdiği deneylerle gösterilmiştir.

Richter [30], yürüyen dalga ultrasonik motorun çalışma prensibi tanımlamıştır. Bu motor, statorun elastik gövdesi üzerinde yürüyen dalga üretmektedir. Stator ve rotor arasındaki sürtünme kuvveti ile rotor döndürülür. Pieozoseramik levhaların üzerindeki yürüyen dalganın hızını hesaplamıştır. Özellikle dalga genişlik modülasyonu (DGM) gibi sinüsoidal sinyallerle motorun beslemesinin mümkün olacağı belirtmiştir. Dalga genişliğinin oranı yüksek harmoniğin bastırılması için seçildiğinde, reaktif giriş gücünü azalttığını ve ultrasonik motorun etkinliğinin arttığını deneyle kanıtlamıştır.

Senjyu [31], besleme gerilimi olarak iki sinüs dalgası kullanan ultrasonik motorun matematiksel modelini önermiştir. Ultrasonik motorun hız kontrolünü, besleme geriliminin frekansı ve faz farkını değiştirerek başarmıştır. Bu çalışmada, hız kontrolü için besleme geriliminin frekansını değiştirmenin en etkili yöntem olduğu belirtilmiştir. Besleme gerilimleri arasındaki faz farkı değişimi, rotorun dönüş yönünü belirlemede de kullanılır. Yüksüz durumda besleme geriliminin frekansı ile

rotor hızındaki değişimi incelemiştir. Aynı zamanda yüklü durumda besleme geriliminin frekansı ile rotor hızındaki değişimi de incelemiştir.

Bekiroğlu [32], standart GSM mobil telefon kullanarak USM'nin uzaktan kontrolünü gerçekleştirmiştir. Digital kontrol sürücü sistemi ultrasonik motoru sürmek için tasarlanmıştır. Daha sonra ses çözücü devre ve mikroişlemci, mobil telefonun çıkışı ve motorun sürücü sistemi arasına eklenmiştir. Bu sistem GSM ve ev telefonları için esnek olarak yapılmıştır. Sistem farklı hız ve yön değişikliği için başarı ile uygulanmıştır.

Huafeng [33], USM' un rotor ve stator arasında karmaşık kayma-sürtünme yapısından dolayı doğrusal olmayan ve zamanla değişen özelliğe sahip olduğuna dikkat çekmiştir. Bunun yanında USM' ların dinamik karakteristikleri doğrusal değildir, motor parametreleri çalışma koşullarındaki farklılıklardan ve sıcaklık yükselmesinden dolayı değişmektedir. Bundan dolayı kontrol performansını düzenlemek için doğrusal olmayan özellikleri dengelemek önemlidir. Bulanık mantık kontrol yöntemi kullanılarak ultrasonik motor için doğru pozisyon kontrolünü tasarlamıştır.

Petit [34], ultrasonik motorun hız kontrolü için frekans tepkisini kullanmıştır. Bu yöntemle motorun değişik yük durumlarındaki hız denetimini gerçekleştirmiştir. Ferrreira [35], ultrasonik motorun hız kontrolünde kullanılan gerilimin frekansı, genliği ve faz farkı yöntemlerini teorik olarak incelemiştir. Hız kontrolü için açık ve kapalı döngülü kontrol sistemi geliştirmiştir.

Bal [36], yürüyen dalga ultrasonik motor için değişken yüke uyarlanan sürücü devresini tasarlamıştır. Motor sürücüsü, ultrasonik motorun mekanik rezonans frekansı kullanılarak iki faz yüksek frekans evirici temeline dayanılarak yapılmıştır. Sisteme, TMS320F243 dijital sinyal işlemci uyarlanmıştır. Geliştirilen sistem, hız kontrol döngüsü ve gerilim rezonans frekansı geri besleme döngüsü olmak üzere iki geri besleme döngüsü içermektedir. Sürücü frekansı motor kontrolü için giriş olarak

kullanılmaktadır. Gerekli sürücü frekansını elde etmek için dalga genişlik modülasyonu kullanılmıştır.

Yoshida [37], ultrasonik motorun performansının, doğrusal olmayan bölgeleri düzenleyerek artırılabileceğini belirtmiştir. Bulanık mantık uygulanarak, ultrasonik motorda doğrusal olmayan bölge problemlerini yok etmek için yeni pozisyon şeması önermiştir. Bulanık mantığın öğrenmesi geri yayılım algoritması kullanılmıştır. Bulanık mantık tarafından doğrusal olmayan bölge ve PI kontrol performansı dengelenmiştir. Önerilen metodun doğruluğu deney sonuçları ile kanıtlanmıştır.

Chung [38], yürüyen dalga ultrasonik motorun hız kontrolü için yeni bir yaklaşımı vermiştir. Standart simülasyon yazılımı kullanılarak, kontrol tasarımı ve pratik model tasarlanmıştır. Bu model, yürüyen dalga ultrasonik motorun kontrol girişleri ile çıkış momenti arasında bağlantı kurmuştur. Gerilimin genliği ve frekansın ayarlanması için dalga genişliği modülasyonu kullanılmıştır. Düşük maliyetli DSP kullanılarak hız kontrol sistemi tasarlamıştır. Deney sonuçları, bu uygulamanın esnekliğini ve etkinliğini göstermiştir.

Bu çalışmalarda Shinsei üretici firması tarafından üretilmiş olan D6060 eviricisi kullanılmıştır. D6060 eviricisi sadece frekansla hız kontrolü yapabilmektedir. Bu nedenle motorun hızına etki eden diğer iki faktör faz farkı ve gerilimin genliğinin etkileri gözlenememektedir. USM'un kararlı çalışma aralığı olara 25 d/d ve 100 d/d olarak tanımlanmıştır. Düşük devirler de (0d/d-25d/d) motor az kararlı ya da çok kararsız olarak tanımlanmıştır.

Ultrasonik motor hız ayarı; fazlara uygulanan gerilimlerin genliği ve frekansı ile fazlar arasındaki faz farkı değiştirilerek yapılabilmektedir. Genellikle USM hız ayarında uygulanan gerilimin frekansı kontrol edilmektedir.

Bu tez çalışmasının amacı, üç mod altında ve her bir büyüklüğün ayrı ayrı veya birlikte denetlenerek oluşturacağı farklı durumlarda USM hızının değişimini incelemektir. Bu amaca yönelik olarak mikro denetleyici tabanlı bir sayısal kontrol

ve sürücü sistemi tasarlanması ve gerçekleştirilmesi hedeflenmiştir. Üç-mod altında ve değişik hız ve yük şartlarında çalışabilecek bir laboratuar deney düzeneğinin kurulması da amaç içinde yer almaktadır.

Bu çalışmada gerçekleştirilen PIC18F452 tabanlı sürücü sistem basit yapılı ve küçük boyutlu olmakla birlikte motor hız ve yön komutunun sayısal olarak girilmesine fırsat vermekte ve motorun hız, gerilim ve akım bilgilerini display üzerinden izleme imkanı sağlamaktadır. Çalışmada Shinsei firmasının ürettiği USR60 YDUSM kullanılmıştır. Motor laboratuarda farklı hız ve yük durumlarında üç-mod çalışmalarda denenmiştir. Deneyde iki-faz gerilimlerin genlikleri, frekansları ve aralarındaki faz farkları kontrol girişleri olarak kullanılmıştır. Simülasyon ve deneylerden elde edilen sonuçlara göre motorun hız tepkileri analiz edilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ultrasonik motorun; uygulanan gerilimin frekansı ile geniş bir hız aralığında kontrol edilebileceği, uygulanan gerilimlerin genlik ayarının hız aralığı üzerinde dar bir etkiye sahip olduğu ve uygulanan faz gerilimleri arasındaki faz farkının değiştirilmesinin hız aralığında çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.

Tez altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölümde, literatürü ve çalışmanın temelini kapsayan bir giriş yapılmıştır. İkinci bölümde, USM'ların temelleri ve eşdeğer devre modeli verilmiştir. Üçüncü bölümde, PIC mikro denetleyicilerin yapıları ve PIC mikrodenetleyiciler ile hız denetimi hakkında genel açıklamalar yapılmıştır. Dördüncü bölümde, çok modlu sistemin özellikleri ve benzetim sonuçları sunulmuştur. Beşinci bölümde, USM sürme sistemi ve deneysel sonuçlar verilmiştir. Son bölümde, çalışmadan elde edilen sonuçlar ile değerlendirmesi sunulmuştur.

2. ULTRASONİK MOTORLAR

Ultrasonik motor, elektromanyetik motorlara alternatif olarak ilk kez 1982'de üretildi. Titreşimlerin yayılma şekline göre, yürüyen dalga ve duran dalga olmak üzere ultrasonik motor iki şekilde sınıflandırılmaktadır. Duran dalga ultrasonik motor, yürüyen dalga ultrasonik motordan daha önce üretilmiştir. Fakat yürüyen dalga ultrasonik motorun üstün özelliklerinden dolayı endüstri uygulamalarında daha çok tercih edilmektedir [38].

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 pizoelektrik davranış gösteren PZT adlı bir madde türetilmiştir. Bu $PbZrO_3$-$PbTiO_3$ karışımı katı bir maddedir. PZT terimi Pb(Zr-Ti)O_3'den türetilen bütün maddeler için PLZT ise (Pb,La)(Zr,Ti)O_3'den türetilen maddeler için kullanılmaktadır [27].

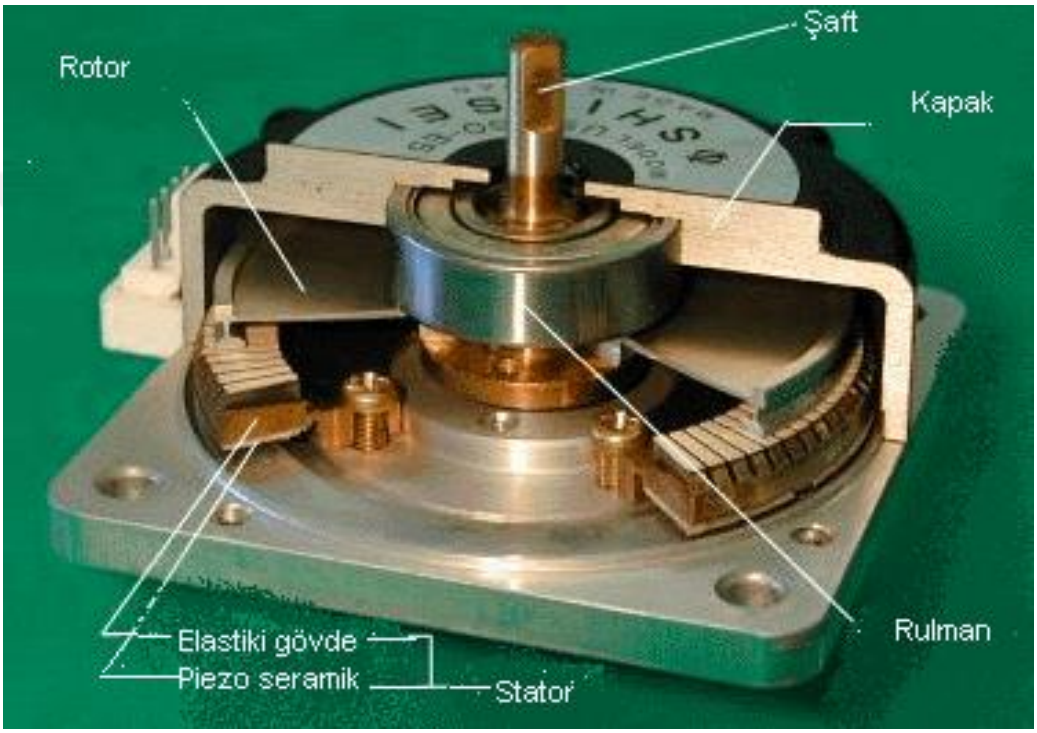
Yürüyen dalga ultrasonik motor piezoelektrik etkisini kullanarak elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. İki sinüsoidal gerilim statorun elastiki gövdesine uygulandığında, statorun yüzeyinde yürüyen dalga meydana gelir. Rotor, statora sıkı baskı diski ile sıkıştırılmıştır. Dönme hareketini, stator ile rotor arasındaki sürtünme kuvveti meydana getirir. Yürüyen dalga ultrasonik motorun yüksek tutma momenti ve düşük hızda yüksek moment üretmesi, klasik elektromanyetik motorlarla karşılaştırıldığında oldukça küçük boyutlu olması ve piezoelektrik etki ile çalışmasından dolayı elektromanyetik parazitinin olmayışı başlıca özelliklerindendir [39].

2.1. Yürüyen Dalga Ultrasonik Motorun Yapısı

Resim 2.1'de bu çalışmada kullanılan Shinsei USR60 YDUSM'un kesit görünüşü verilmiştir. Yürüyen dalga ultrasonik motorun iç yapısı Şekil 2.1'de görülmektedir. YDUSM stator, rotor, baskı diski ve piezoseramik halkadan meydana gelmektedir. A

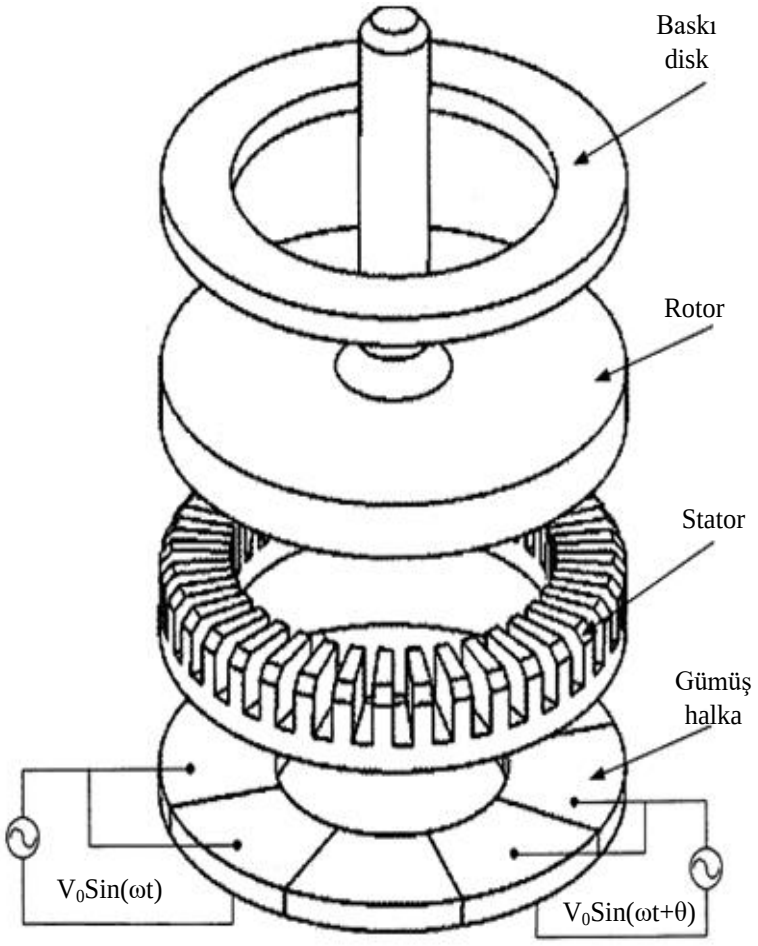
gerilim kaynağı $V_0\sin(\omega t)$ ve B gerilim kaynağı $V_0\sin(\omega t+\theta)$ olmak üzere iki farklı gerilim kaynağı ile beslenmektedir.

Stator ince metalik tabakadan oluşur. Piezoelektrik küçük dilimler şeklinde statorun yüzeyine yapıştırılır. Rotor ise sert diskten yapılır.



Resim 2.1. Yürüyen dalga tip USM

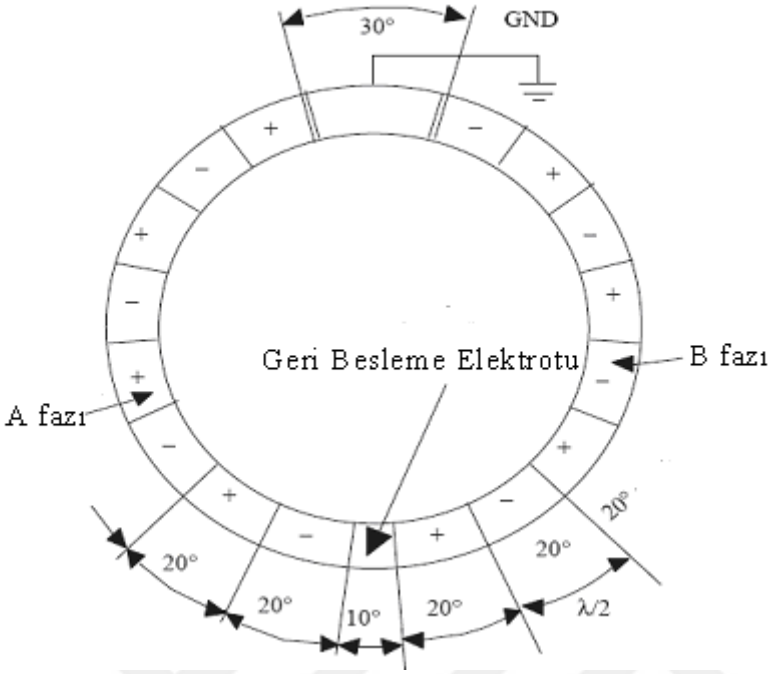
Bu çalışmada USR60 tipi bir yürüyen dalga ultrasonik motor kullanılmıştır. USR60 motorda yüksek mekanik kalite faktörüne sahip NEPEC-61 piezoelektrik seramik kullanılmıştır. Seramik, dokuz adet dalga üretmek için 18 parçaya bölünmüştür. Bu bölümlerden biri şase, biri de geri besleme elemanı olarak kullanılmaktadır. Kalan bölmeler sırayla (+) ve (-) uçlarla kutuplanarak uygulanan gerilimlere göre uzayıp kısalarak stator yüzeyinde alternatif bir hareket dalgası oluşturmakta ve rotorun hareketini sağlamaktadır. Kutuplanmayı sağlamak amacıyla seramiğin hem altına hem üstüne birer ince gümüş tabaka yerleştirilmiştir. Üsteki tabaka piezoelektrik seramik gibi 18 parçaya bölünmüştür. Alttaki gümüş tabaka A ve B fazları, geri besleme ve toprak uçlarının bağlantılarının yapılması için konulmuştur [27].



Şekil 2.1. Ultrasonik motorun iç yapısı

Halka tip motorlarda piezoelektrik için elektrotlar Şekil 2.2.'deki gibi düzenlenir. (+) ve (-) işaretleri seramik elemanların kutuplanma yönlerini gösterirler. (+) ile işaretlenen kısma pozitif gerilim uygulandığında bu kısım uzarken, negatif gerilim ile kısalmaktadır. (-) ile işaretli kısımda ise bu işlemin tersi olmaktadır [27, 42].

Plastik malzemenin sürtünme katmanı, ince alüminyum madeni levhadan meydana gelen uç yayı ile sıkıştırılarak, metalik rotor ve statorun arasına konmuştur. Rotor, yay tarafından esnek kontrol edilen düz dönüşün dışında olan eksen etrafında boştadır. Ultrasonik motor parçaları sert kapak içine montaj edilmiştir [40].



Şekil 2.2. Stator halkası ve elektrotların yerleştirilmesi [27]

2.2. Ultrasonik Motorun Çalışma Prensibi

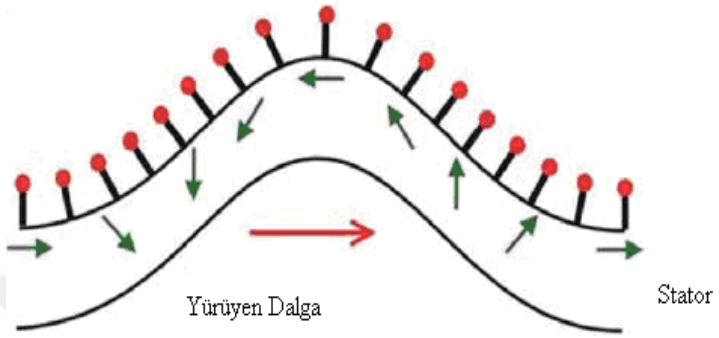
A-fazına, giriş gerilimi olarak $-V_0\sin(\omega t)$ uygulanması; duran dalga üretilmesine ve piezoelektrik etki ile stator halkasının alt ve üst yüzeyi arasında kalınlık yönünden bir farklılığa neden olur. Yalnızca A-fazına ait elektrotlar uyarıldığından, yüzeyin tamamında hızlı bir titreme hareketi üretilir. A-fazının başlangıç noktası $\theta=0$ ve $n=11$ iken duran dalga yaklaşık olarak $W\sin(\omega t)\sin n\nu$ kadar üretilir. Burada W, statorun halkasının tamamının geometrik yapısına ve piezoelektriğin esneklik özelliğine bağlıdır. Benzer şekilde B-fazına,- $V_0\cos(\omega t)$ giriş gerilimi uygulandığında, bekleyen dalga yaklaşık olarak $W\cos(\omega t)\cos n\nu$ kadar üretilir [40].

$$w(v.t) = w_A(v,t) + w_B(v,t) \tag{2.1}$$

$$w(v.t) = W\left[\sin(nv)\sin(\omega t) + \cos(nv)\cos(\omega t)\right]$$

$$w(v.t) = W\cos(\omega t - nv) = W\cos\left[n(\Omega t - v)\right] \tag{2.2}$$

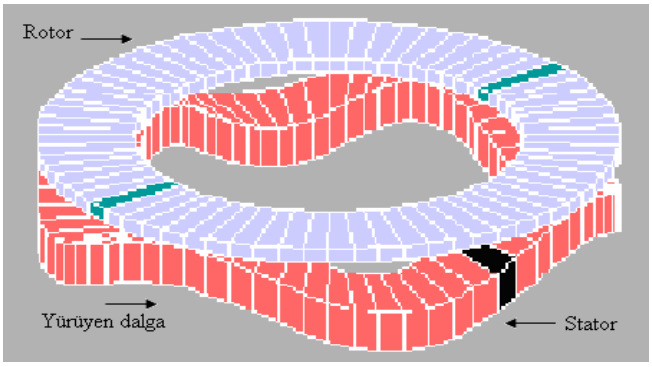
Birleşme ilkesi kullanılarak, bekleyen dalga şeklinin döner dalgaya dönüşmesi sağlanır. Yani yürüyen dalga, 90^0'lik faz farkı olan iki farklı bekleyen dalganın birleşmesi ile meydana gelir [41]. Şekil 2.3'de yürüyen dalga şekli görülmektedir.



Şekil 2.3. Yürüyen dalga

Yürüyen dalga ultrasonik motorun basit bir hareketi Şekil 2.3'de görülmektedir. A gerilim kaynağı $V_0\sin(\omega t)$ ve B gerilim kaynağı $V_0\cos(\omega t)$ olmak üzere iki farklı gerilim kaynağı ile beslenmektedir. V_0 geriliminin genliği, $\omega=2\pi f$ açısal hızı ile orantılıdır. Gerilimlerin uygulanması ile piezoelektrik elementin üzerindeki mekaniksel titreşimler meydana getirir. Titreşimler, statorun sürekli dalgalanmasına neden olur. Yürüyen dalga statorun yüzeyinde meydana gelir. Şekil 2.4'da eliptik hareket, dalganın tepesinde dalgacık olarak da gözlenmektedir. Bunun sonucunda teğetsel hareket meydana gelmektedir. Rotor yüzeyini ve rotora bağlı olan sürücü şaftını ilerleten bu eliptik harekettir [39].

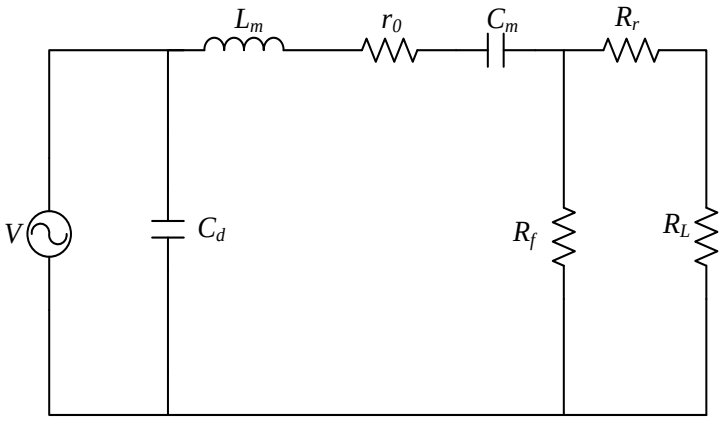
Motorun dönüş yönünü değiştirmek için fazların sırasını değiştirmek yeterlidir. Fazların sırası değiştirildiğinde yürüyen dalganın yönü, dolayısıyla ile de rotorun dönüş yönü değişmektedir [27].



Şekil 2.4. Yürüyen dalga ultrasonik motorun çalışma prensibi [27]

2.3. Yürüyen Dalga Tip USM Eşdeğer Devresi [27]

Bu kısımda, tez çalışmasında kullanılacak USM eşdeğer devresi hakkında bilgi verilecektir. Ultrasonik motorun çalışma koşulları parametre değişimlerinden dolayı oldukça karmaşıktır. USM'un eşdeğer devre teorisinin geliştirilmesinde piezoelektrik malzemenin etkileri ve eşitlikleri dikkate alınmaktadır. Bu tez çalışmasında kullanılacak YDUSM için kabul gören bir eşdeğer devre Şekil 2.5'de verilmiştir. Bu eşdeğer devre yüklü durumları da kapsamaktadır.



Şekil 2.5. Yüklü eşdeğer devre

Yüksüz motor torkunu T_{st}, yüksüz hızı n_{id} ve kuvvet faktörünü A ile temsil etmektedir [3].

$$T_{st} = RA \tag{2.3}$$

$$n_{id} = \frac{1}{RA} I_{st} \tag{2.4}$$

Burada, R ultrasonik motorun yarıçapıdır. V uygulanan gerilim ve I_{st} başlangıç akımı olarak tanımlanırsa,

$$I_{st} = \frac{V}{\sqrt{(\omega L_m - 1/\omega C_m)^2 + r_0^2}} \tag{2.5}$$

$$R = \frac{(D_0 + D_i)}{4} \tag{2.6}$$

D_0 statorun dış çapı, D_i iç çapıdır.

A kuvvet faktörü,

$$A = \sqrt{2}\xi(m-1)A_0 \tag{2.7}$$

Burada, A_0 başlangıç kuvvet faktörüdür.

$$A_0 = bd_{31}Y_{11} \tag{2.8}$$

Çizelge 2.1. USM eşdeğer devresi için kullanılacak eşitlikler ve parametreler

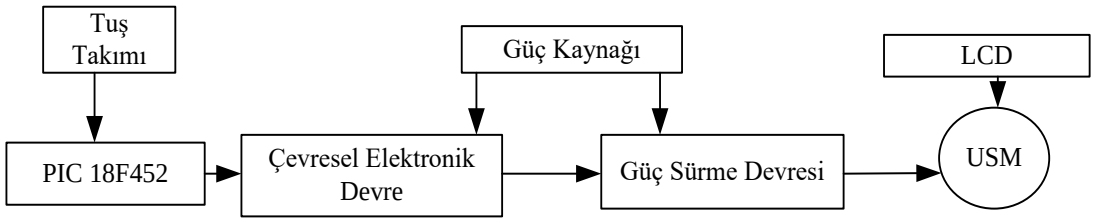
$A = bd_{31}Y_{11}$	$V = 100\text{V}$
$C_m = A^2 / K$	f = 41-43,5kHz
$L_m = m / A^2$	θ = 90^o
$Y_d = j\omega C_d$	k = 9
$Y_m = \frac{1}{(r_0 + j\omega L_m + 1/ j\omega C_m)}$	Y_{11}= 7,6×10^{10} N/m^2
$I_m = V \times Y_m$	d_{31} =-1,32×10^{-10} m/V
$v = I_m / A$	σ^E = 0,31
$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$	Q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

3. YÜRÜYEN DALGA TİP USM İÇİN SÜRME SİSTEMİ

Bu bölümde, ultrasonik motorun üç-mod altında değişik hız ve yüklerde çalıştırılması için gerçekleştirilen miktodenetleyici tabanlı bir sürme sistemi açıklanacaktır.

3.1. USM'un PIC Mikrodenetleyici Tabanlı Sürme Sistemi

USM' un PIC mikrodenetleyici tabanlı hız denetimini gösteren blok diyagram Şekil 3.1'de gösterilmektedir. Bu blok diyagram tuş takımı, PIC18F452 entegresi, çevresel elektronik devre, sürme devresi, güç kaynağı, Shinsei USR60 YDUSM ve LCD'den oluşmaktadır [2, 43].

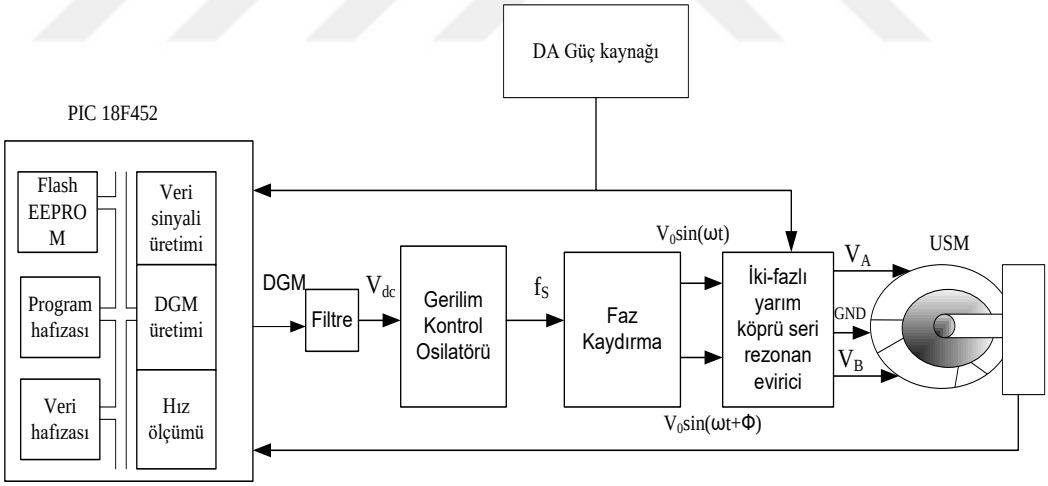


Şekil 3.1. PIC ile kontrol edilen USM sürme devresinin blok diyagramı [2]

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi bir tuş takımından referans hız değeri girilmekte ve yazılan programa göre PIC18F452 uygun DGM sinyali üretmektedir. Üretilen DGM sinyali çevresel elektronik devreden (filtre devresi) geçirilerek DGM sinyalinin ortalamasını veren DA sinyali elde edilmektedir. Elde edilen DA sinyali kullanılarak, güç sürme devresinin çıkışından birbirinden 90^0 faz farklı, yüksek frekanslı, iki AA gerilim elde edilir ve bu iki faz AA gerilim YDUSM'u besleyerek motorun dönmesi sağlanır. Tuş takımından girilen referans hız değeri ve buna bağlı olarak motorun

gerçek hız değeri LCD'de gösterilmektedir. Referans hız değeri değiştirildiğinde PIC18F452 tarafından üretilen DGM sinyalinin görev süresi değişmekte, dolayısıyla DA gerilim değeri değişmekte, bununla birlikte YDUSM'un hızı da değişmektedir. Bunun yanında yazılımla motorun yönünü değiştirmek için PIC tarafından yön sinyalleri üretilmektedir. DA güç kaynağı ise mikrodenetleyici ile devre elemanlarını beslemektedir [2, 43].

Şekil 3.2'deki devreye, USM'un hızını sabit tutmak için sürme frekansını izleyen kontrol devresi eklenmiştir. Motorun dönüşü sırasında gerçek hız ile referans hızın karşılaştırılması sonucu elde edilen hız hatasına bağlı olarak elde edilen hata sinyali, PI denetleyici ve gerilim kontrol osilatörü (GKO) ile ayarlanarak sürme frekansını istenen değere getirmekte ve motor hızını referans hız seviyesinde tutmaktadır [6, 43]. USM sürme devresinin birimleri hakkında ayrıntılar izleyen kısımlarda verilmiştir.



Şekil 3.2. USM sürme ve hız denetim sisteminin blok diyagramı

3.2. PIC 18F452 Mikrodenetleyici

Sürme sisteminde kullanılan PIC 18F452 denetleyicinin genel özellikleri aşağıda verilmiştir [44].

- Yüksek hızlı RISC işlemci
- 75 adet komut
- Tüm komutlar 1 saykıl
- 40 MHz'ye kadar işlemci hızı
- 32Kbyte flash hafıza
- 256 byte EEPROM bellek
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT)
- Watchdog Timer (WDT)
- 10 bit analog/dijital çevirici
- Programlanabilen kod koruma
- Enerji tasarrufu için uyku (SLEEP) modu
- Tamamen statik tasarım
- Devre üzerinde seri programlama
- 5 V'luk kaynak ile çalışma
- Düşük güç harcama
- < 2 mA typical @ 5V, 4 MHz
- 20 mA typical @ 3V, 32 kHz
- < 1 mA typical standby

Şekil 3.3'de PIC18F452'nin pin bağlantıları verilmiştir. Denetleyici toplam 5 porttan meydana gelmektedir. Bunlar A, B, C, D ve E portlarıdır. Bütün portlar dijital giriş/çıkış olarak kullanılabilir [44].

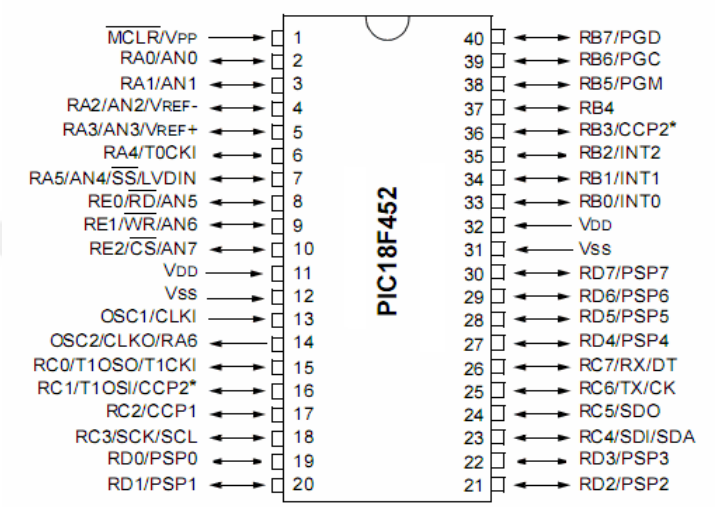
***A portu*:** 6 giriş/çıkışa sahiptir ve dijital giriş çıkış olarak kullanılabilir.

***B portu*:** 8 giriş/çıkışa sahiptir. Bu portun 0, 1, 2, 3, 4 nolu pinleri harici kesme girişi olarak kullanılabilir.

***C portu*:** 8 giriş/çıkışa sahiptir. PWM, capture/compare, SPI ve I^2, bilgisayar ile seri iletişim kurma gibi işlevleri vardır.

***D portu*:** 8 giriş/çıkışa sahiptir. Paralel slave port ile mikroişlemci portu olarak kullanılabilir.

***E portu*:** 3 giriş/çıkışa sahiptir. Analog/dijital çevirici olarak kullanılabilir.

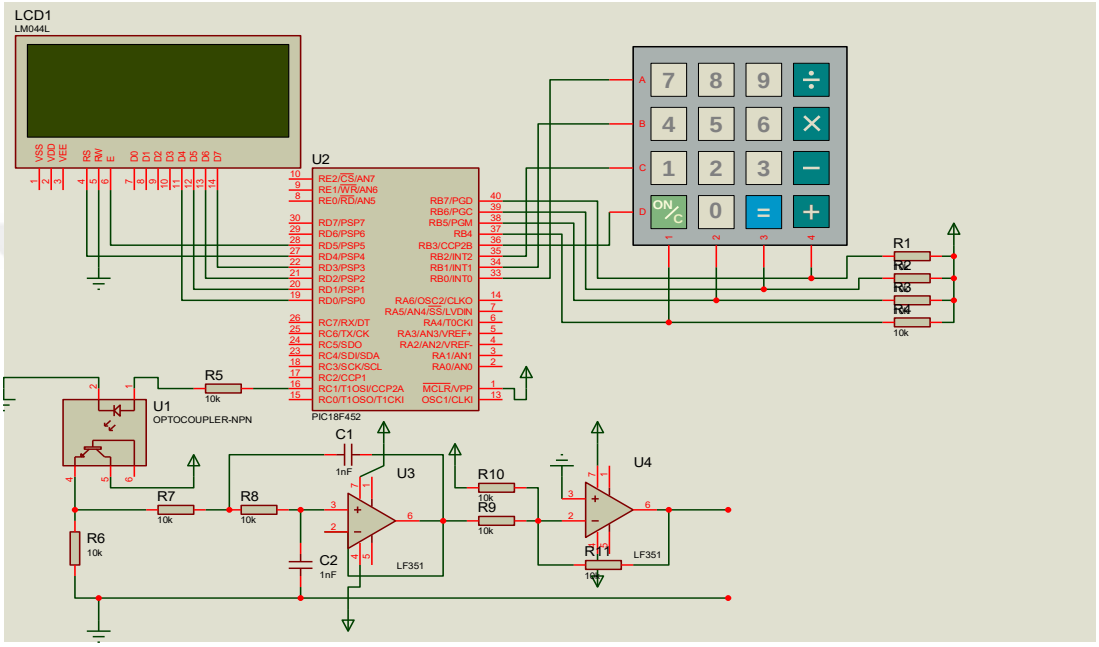


Şekil 3.3. PIC18F452 için pin yapısı [44]

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

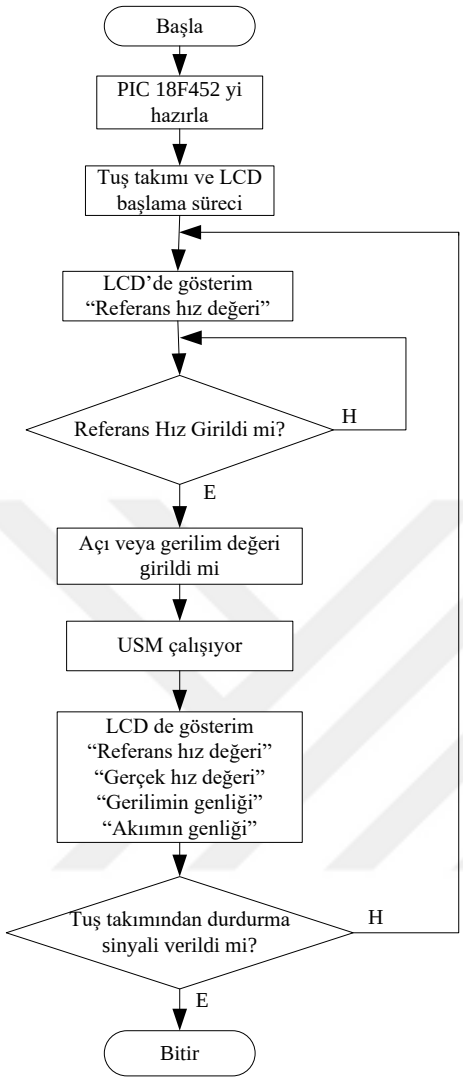
Şekil 3.4'deki kontrol devresi PIC 18F452, LCD, tuş takımı ve sürme için gerekli olan elektronik devreden oluşmaktadır. LCD ekran; mikrodenetleyiciden gelen bilgiler, motor hızı ve gerilim bilgilerini görmek, girilen referans hız ile motor gerçek hızı arasındaki ilişkiyi kıyaslamak için görsel bir ortam sağlamaktadır. USM hız kontrol devresinin girişindeki optokuplor mikrodenetleyicinin bacaklarının zarar görmemesi yani yalıtım için kullanılmıştır. Mikrodenetleyiciden gelen DGM sinyali optokuplorden geçirildikten sonra alçak geçiren filtre devre yardımı ile DA sinyale çevrilmektedir. DA sinyalinin 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 uygulanan gerilimlerin frekansını kontrol etmektedir. DA gerilim değiştikçe motora uygulanan gerilimlerin frekansları da değişmektedir. Motor sürme frekansı değiştirildikçe motor hızı da değişmektedir. Dolayısı ile filtre çıkışındaki DA geriliminin seviyesi değiştirilerek motor hızı da değiştirilebilmektedir [6, 43].



Şekil 3.4. USM'un PIC 18F452 filtre devresi ile hız kontrol devresi

PIC mikrodenetleyiciye yazılan programın akış şeması Şekil 3.5'de gösterilmiştir. İlk olarak PIC 18F452 çalışmak üzere hazırlanır. Tuş takımından referans hız değeri girilir ve LCD'de gösterilir. Enter tuşuna basıldığında, referans hız değeri girilmiş olur ve yön bilgisinin girilmesi beklenir. Yön bilgisi girilmediği sürece USM çalışmaz. Yön sinyali girildikten sonra USM çalışır. USM çalıştıktan sonra tuş takımından girilen referans hız değeri ile USM'un gerçek hız değeri LCD'de gösterilir. Tuş takımından durdurma sinyali gelmediği sürece motor çalışacak ve referans hız ile gerçek hız LCD'de gösterilecektir. Durdurma bilgisi girildiğinde, bütün değerler sıfırlanacak yani başa referans hızının girileceği konuma dönülecektir [6, 43].

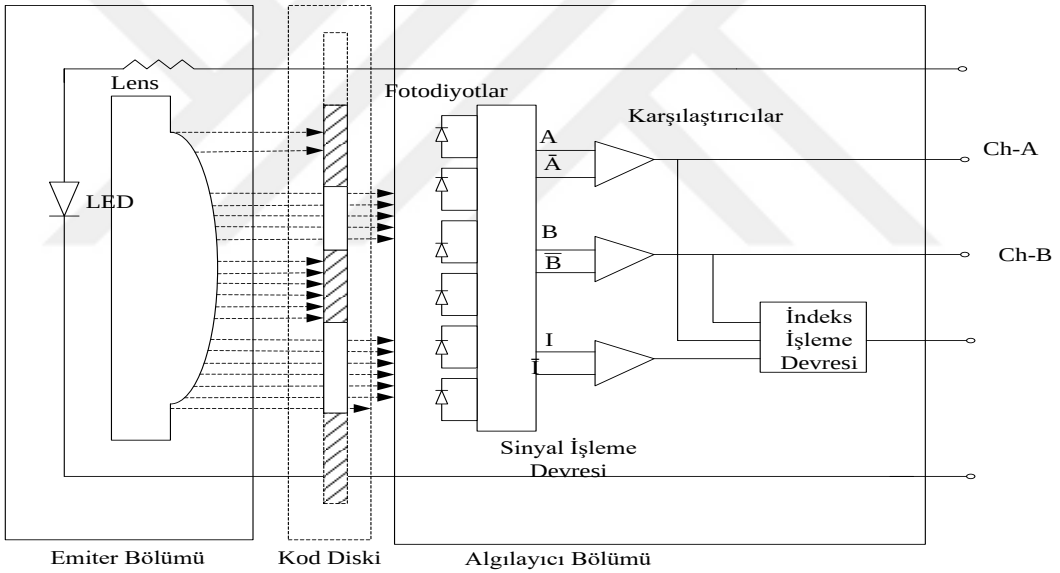


Şekil 3.5. PIC mikrodenetleyicinin yazılımının akış diyagramı

3.3. Hız Ölçme

Bu çalışmada, 500 darbe/devirlik bir HEDS-5540 artımsal encoder [27] kullanılmıştır. Şekil 3.6'daki blok diyagramda gösterildiği 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 içermektir. 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, $\overline{B}$ 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 nedeni ile A- fazı ile B-fazı arasında 90^0 faz farkı meydana gelmektedir. I, $\bar{I}$ karşılaştırıcının çıkışı A ve B kanalları ile birlikte indeks işleme devresine gönderilmektedir. Sonuç olarak I'nın çıkışı diskin bir turluk dönüşü için üretilen bir indeks sinyalidir [6, 27].

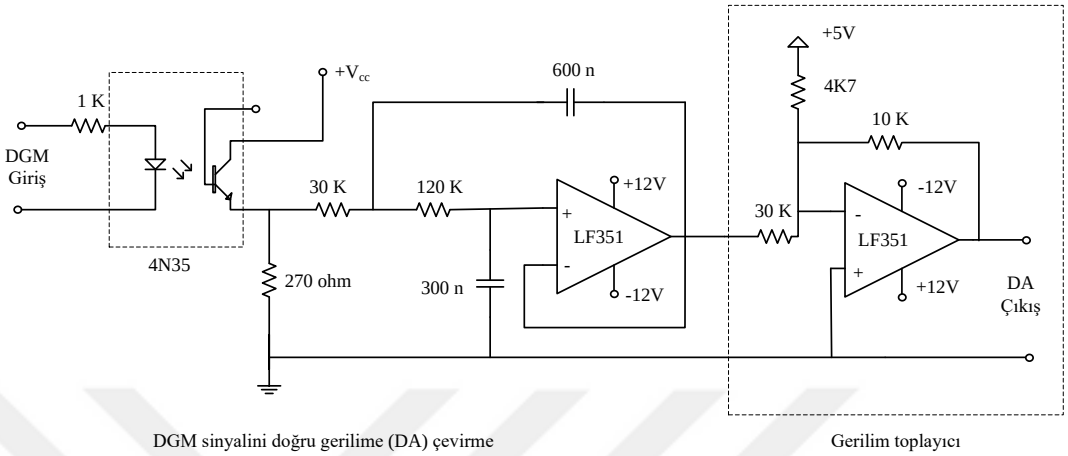


Şekil 3.6. HEDS-5540 enkoderin blok diyagramı [27]

3.4. DGM Üreteci

PIC18F452 tarafından üretilen DGM sinyalini DA gerilimine dönüştürmek için kullanılan elektronik devre Şekil 3.7'de gösterilmiştir. Motor hızının denetimi için gerekli olan DA gerilim, DGM sinyalinin filtre devresinden geçirilmesi ile elde edilmektedir. DGM sinyalinin çalışma oranı (görev süresi) değiştirildiğinde DA gerilim seviyesi de değişmekte, dolayısı ile motora uygulana gerilimlerin frekansı da

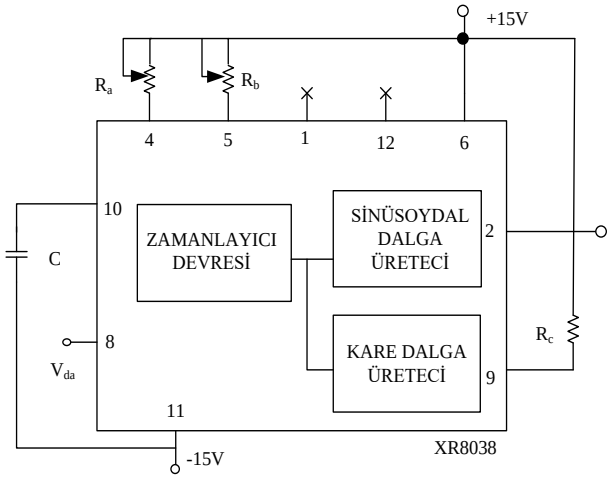
değiştirilmektedir. Böylece motorun istenen hızda dönmesi sağlanmaktadır [6, 27, 43].



Şekil 3.7. DGM sinyalini DA gerilimine çeviren filtre devresi [27]

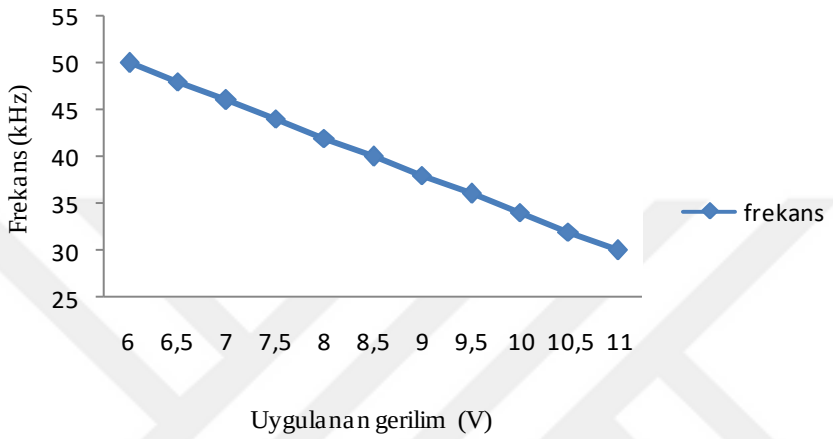
3.5. XR 8038 Fonksiyon Üretici

Şekil 3.8'de görülen XR8038 fonksiyon üretici entegre 0,001Hz-100kHz arasında kare, üçgen ve sinüs dalgası üretebilmektedir. PIC 18F452 ile üretilen DGM sinyali filtre devresinden geçirilerek DA gerilimine dönüştürülmekte ve GKO içerisinde bulunan XR8038 fonksiyon üretecinin 8 nolu ucuna uygulanmaktadır. DA geriliminin değerine bağlı olarak sürme frekansı üretilmektedir [45].



Şekil 3.8. XR8038 iç yapısı

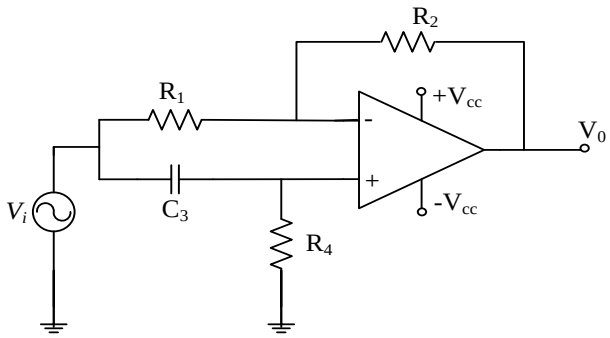
Şekil 3.9'da filtre devresinin çıkış gerilimi ile XR8038 tarafından üretilen sinyalin frekansı arasındaki ilişki verilmiştir. YDUSM' nin sürme frekansı 40 kHz ile 44 kHz arasındadır. Bu nedenle XR 8038'nin bu frekans aralığında sürme frekansı üretmesi için filtre devresinin çıkış geriliminin değeri 8V ile 8,5V arasında değişmelidir [45].



Şekil 3.9. Filtre devresinin çıkış gerilimi ile XR8038 ürettiği frekans arasındaki ilişki

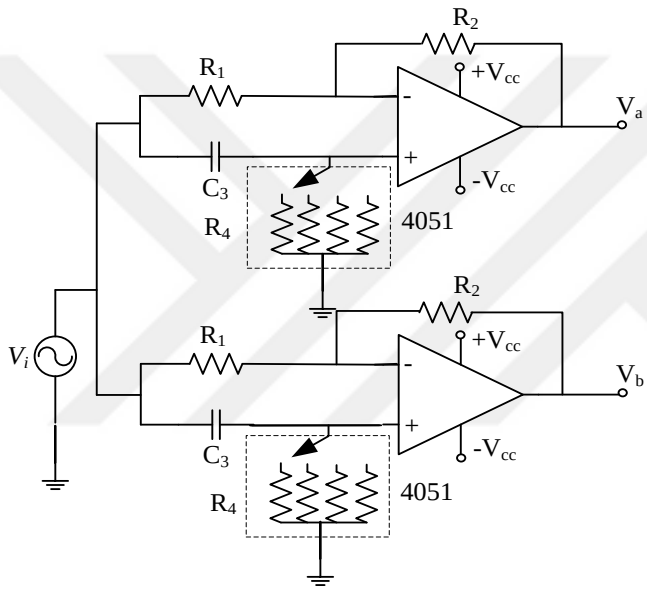
3.6. Faz Çoklayıcı

Şekil 3.10'da tüm geçiren filtre devresi görülmektedir. Çoğu filtrelerden farklı olarak R_1 ve R_2 değerleri eşittir. Bu nedenle giriş geriliminin genliği ile çıkış geriliminin genliğinin birbirine eşit olması sağlanır [46, 47, 48].



Şekil 3.10. Tüm geçiren filtre devresi

Şekil 3.11'deki faz çoklayıcı devrede, giriş sinyaline bağlı olarak R_4 ve C_3 değerleri değiştirilmesi ile birbirinden faz farklı iki faz elde edilir. Giriş sinyalinin frekansına bağlı olarak faz farkının 0^0 ve 180^0 arasında değiştirilmesi sağlanır [46, 47, 48]. Faz çoklayıcı devresinde, PIC 18F452'de gelen dönüş yönü sinyaline bağlı olarak 4051 digital anahtarlama entegresi R_4 devreye ilave eder yada devreden çıkartır. Bu sayede faz çoklayıcının çıkışından birbirinden 90^0 yada -90^0 faz farklı iki faz elde edilir. Aynı zamanda C_3 sabit tutulmaktadır.

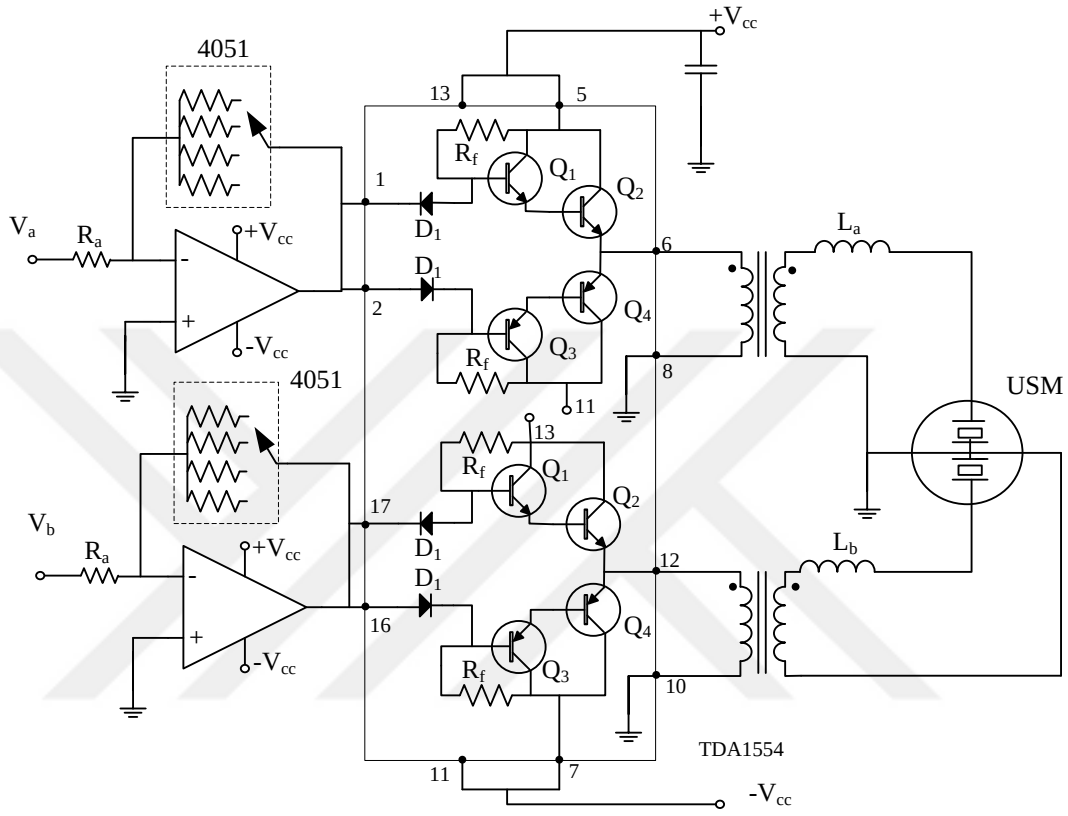


Şekil 3.11. Faz çoklayıcı

3.7. Güç Yükselteci

Gerçek uygulamalarda, mekanik rezonans frekansındaki değişimleri izlemek ve piezoelektrik elemanını titreşim hızını düzenlemek için kontrol stratejisi geliştirilir. Tasarımı yapılan sistemde USM'un LC parazitik rezonans empedansını kullanan yüksek frekanslı rezonans evirici tasarlanmış ve motorun kontrol sistemine entegre edilmiştir. USM'un mekanik titreşim sisteminin rezonans frekansı 39-40kHz arasındaki ultrasonik frekans bölgesindedir. Evirici, USM'u sürmek için bu frekans değerinin üzerinde çalışmalı ve yüksek frekanslı 90^o faz farklı AA gerilimleri sağlamalıdır. Bu çalışmada faz farkı 90^o olarak sabit tutulmuştur. Şekil 3.12'de

USM'un yarım-köprü seri-rezonans yüksek frekanslı iki-faz gerilime sahip transistörlü evirici devresi gösterilmiştir [1].



Şekil 3.12. USM için iki-faz evirici devresi

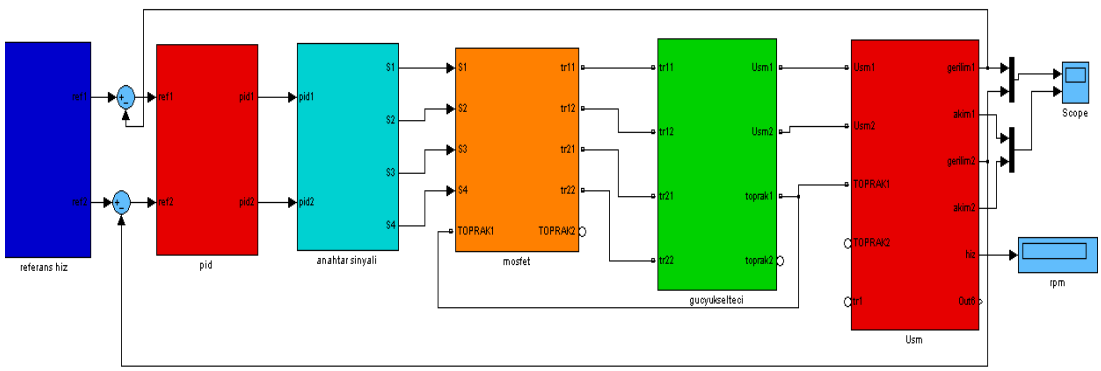
Bu evirici; darbe genişlik modülasyonu (DGM), darbe frekans modülasyonu (DFM) ve hibrit (DGM/DFM) kontrol yöntemlerinin fonksiyonlarını içermektedir. Yüksek frekanslı güç kaynağı ise doğrultucu ile iki-faz yarım-köprü tip seri yüklü rezonans eviriciden oluşturulmuştur. Burada USM, f_m rezonans frekansına sahip kapasitif bir yük olarak gösterilmiştir. L_a ve L_b endüktansları kapasitif yüke eviricinin 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 değer ayarlanır [1, 6, 27, 43].

4. ÜÇ-MOD ÇALIŞMAYA GÖRE BENZETİM SONUÇLARI

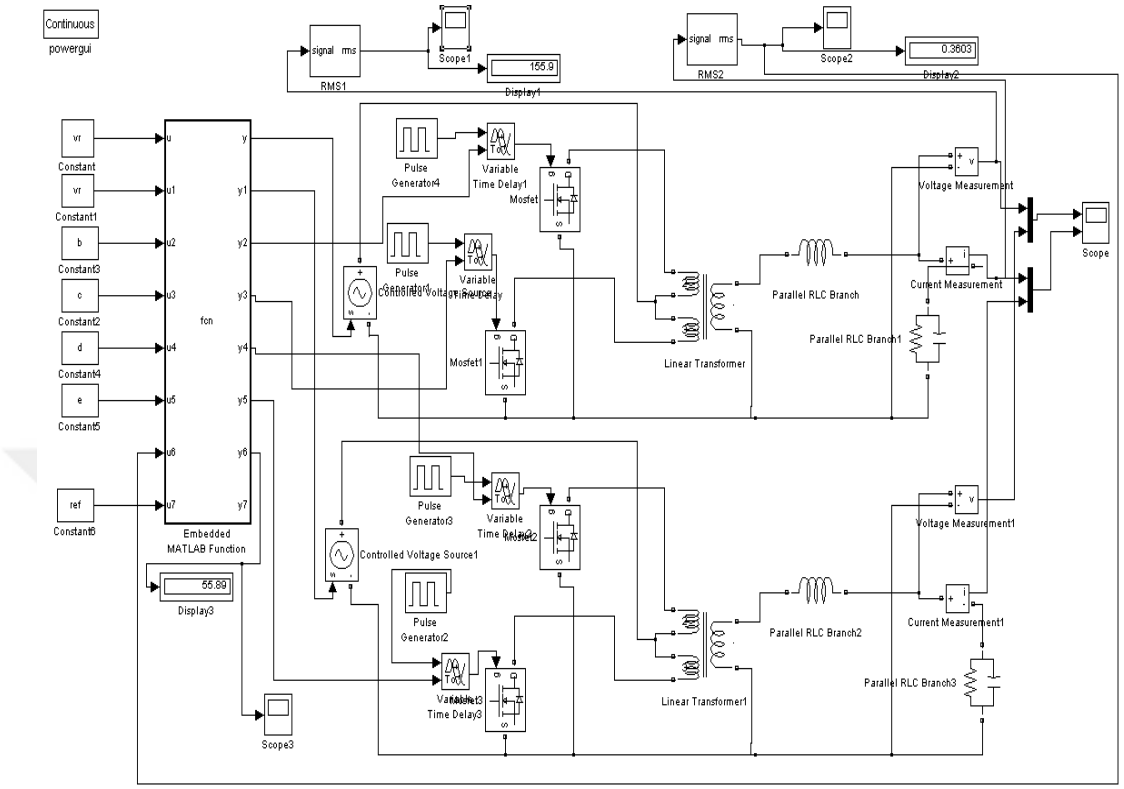
Ultrasonik motor kontrolu amacıyla uygulanan gerilimin genliğinin, frekansının ve iki-faz arasındaki faz farkının herhangi birinin tek başına kullanıldığı yöntem tek-mod olarak adlandırılabilir. Yaygın olarak kullanılan tek-mod yönteminde uygulanan gerilimin frekansı ayarlanmaktadır.

Buna rağmen tek-mod yöntemi, çok modlu hız kontrol sistemlerinin geliştirilmesini sağlayacak büyüklüklerin etkilerini ayrıntılı olarak analiz etmekte kullanılır. İki-mod yönteminde, istenen gücü sağlamak için uygulanan gerilimin genliğini ve sürücü frekansını düzenleyerek, bu iki kontrol büyüklüğünün etkisi birleştirilir. Bu sayede daha etkin uygulamalar yapılır [35].

Şekil 4.1'de, üç-mod çalışmaya göre yürüyen dalga tip USM hız denetimine yönelik benzetimin blok diyagramı verilmiş ve benzetim için MATLAB 7 programı kullanılmıştır. Hız denetimi benzetiminde; sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı kontrol girişleri (büyüklükleri) olarak kullanılmıştır. Tasarlanan sürme sisteminin hız denetiminde etkin sonuçlar verip vermediğini test etmek için Shinsei firmasının üretmiş olduğu, yürüyen dalga tip bir USM olan USR60 motorunun eşdeğer devre parametreleri benzetimde kullanılmıştır. Benzetim için kullanılan MATLAB fonksiyon bloğu şeması Şekil 4.2'de verilmiştir.

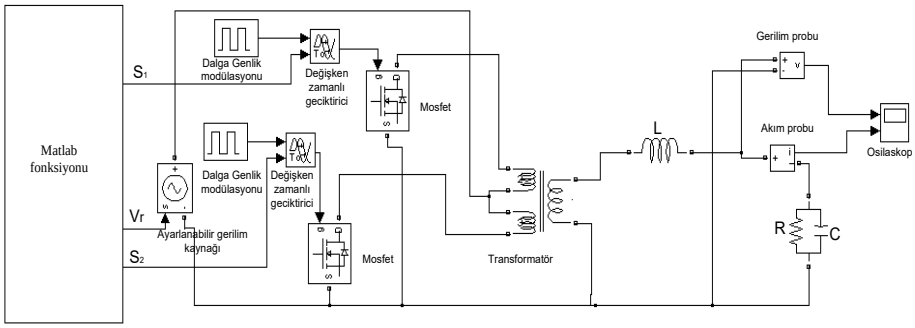


Şekil 4.1. YDUSM için kontrol blok devresi



Şekil 4.2. USM'un hız kontrol devresi

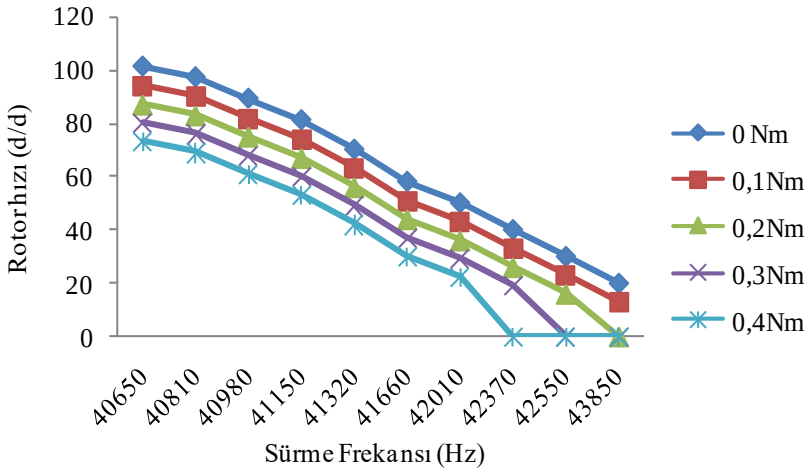
Şekil 4.3'de yürüyen dalga ultrasonik motorun tek faz sürme devresi verilmiştir. MATLAB fonksiyon bloğunda üretilen anahtarlama sinyalleri değişken zamanlı geciktiriciye uygulanımaktadır. Gerilimler arasındaki faz farkı değişken zamanlı geciktiriciler yardımlı ile gerçekleştirilmektedir. Ayarlanabilir gerilim kaynağı ile transformatörün ortak ucuna değişik genliklere sahip DA gerilim uygulanmaktadır. Bu sayede USM'un girişine değişik genliğe sahip yüksek frekanslı AA uygulanabilinmektedir. Frekans değişimi ise darbe genişlik modülasyonun frekansı değiştirilerek gerçekleştirilmektedir. Akım ve gerilim probları yardımıyla USM' un giriş değerlerinin osiloskoptan izlenmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4.3. USM'un tek faz sürme devresi

4.1. Sürücü Frekansının Etkisi

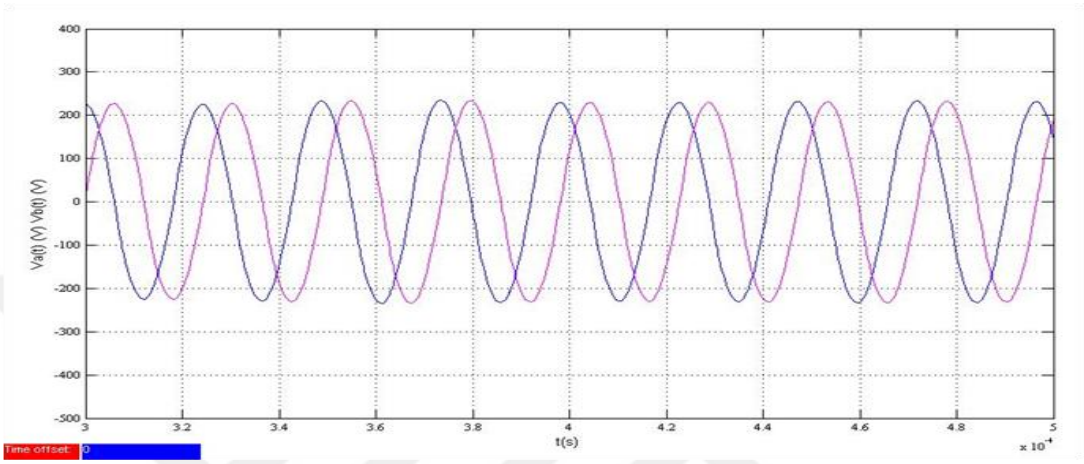
USM'a uygulanan gerilimlerin frekansları ile rotor hızı arasındaki ilişki Şekil 4.4'de verilmiştir. Bu sonuçlar motor farklı yüklerle yüklü ve faz gerilimleri arasındaki açı 90^0 iken alınmıştır. Uygulanan gerilimin frekansı artıkça motor hızının doğru orantılı olarak azaldığı görülmektedir.



Şekil 4.4. Yüklü durumda sürme frekansı ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu)

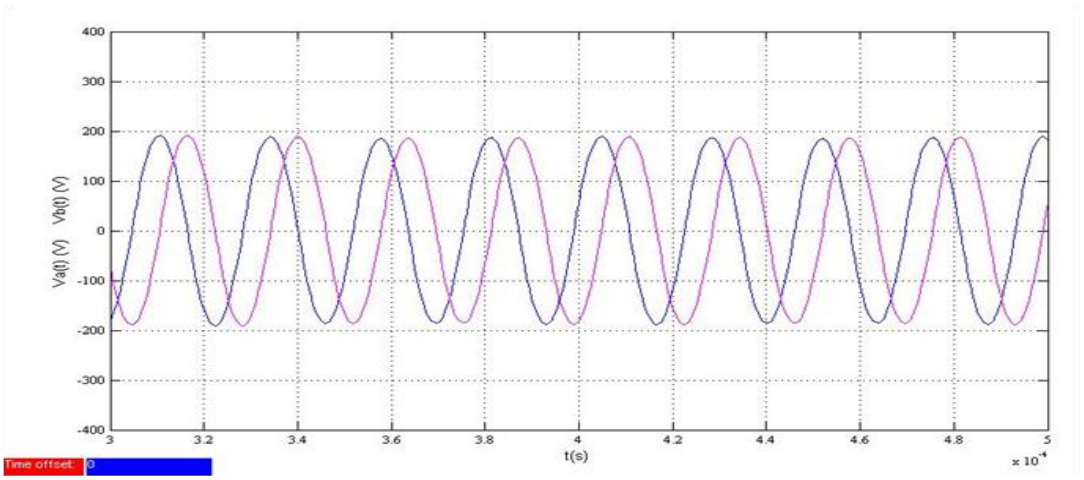
Yapılan bu benzetimde motor hızı 100 d/d ile 15 d/d arasında değiştirilirken, uygulanan gerilimlerin frekansı 40,65 kHz ile 43,85 kHz arasında değiştirilmiştir. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük torku artıkça aynı frekans değerinde motor hızı değeri aşağı doğru kaydığı gözlenmiştir.

Şekil 4.5'de motorun hızı 100d/d ayarlandığında, frekans değeri 40,65 kHz olarak ölçülmüştür. İki faz arasında faz farkı 90^0 ve A-fazı 172 V, B-fazı 172V olarak gözlenmiştir



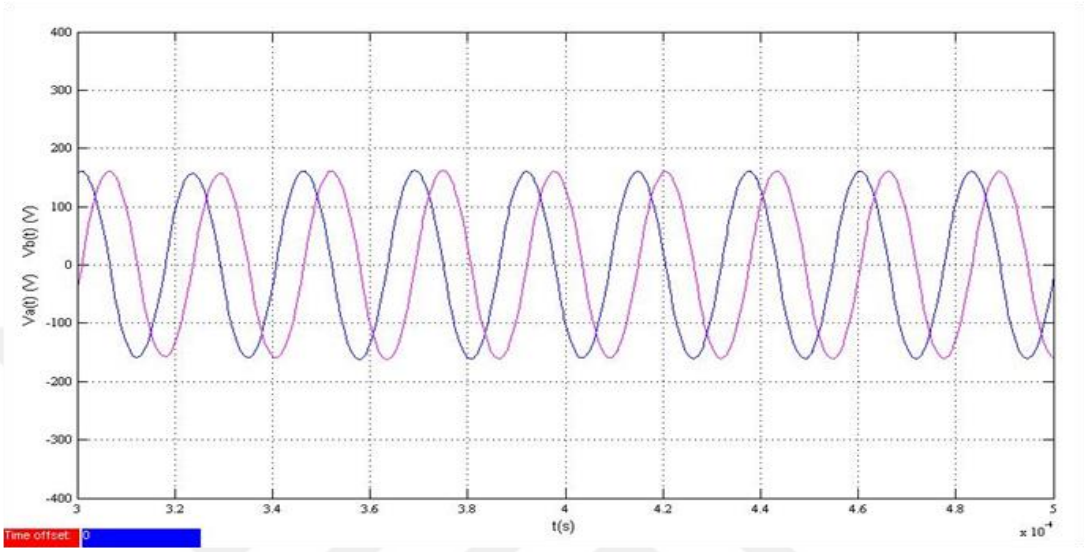
Şekil 4.5. Frekansla hız değişim eğrisi (100 d/d)

Şekil 4.6'da referans hız değeri 40 d/d olduğunda, motor gerilimleri A-fazı 136V, b-fazı 136V ve iki faz gerilimleri arasındaki faz farkı 90^0 olarak gözlenmiştir. Motoru bu referans hız değerinde sürmek için gerekli olan frekansın değeri 42,37 kHz olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.6. Frekansla hız değişim eğrisi (40 d/d)

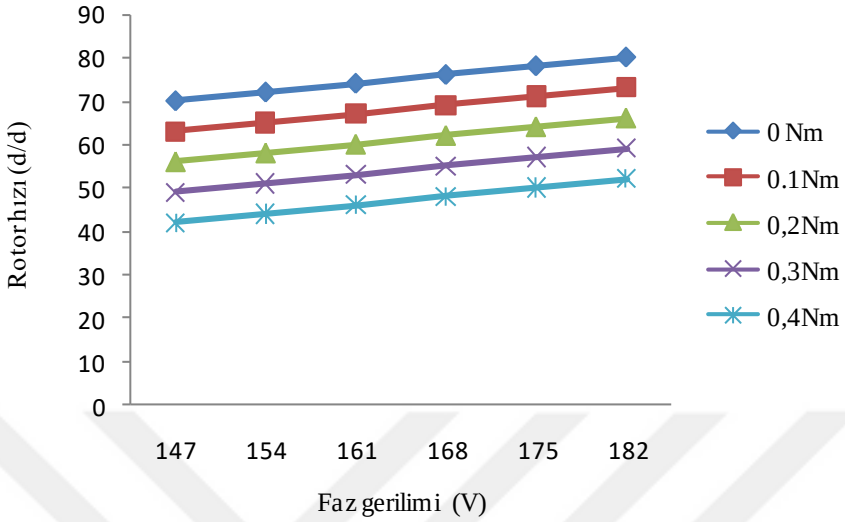
Motorun hızı 20 d/d olduğu durumda Şekil 4.7'de iki faz eğerisi görülmektedir. Bu durumda A-fazı 126V, B-fazı 126V ve iki faz arasındaki faz farkı 90^0'dir.



Şekil 4.7. Frekansla hız değişim eğrisi (20 d/d)

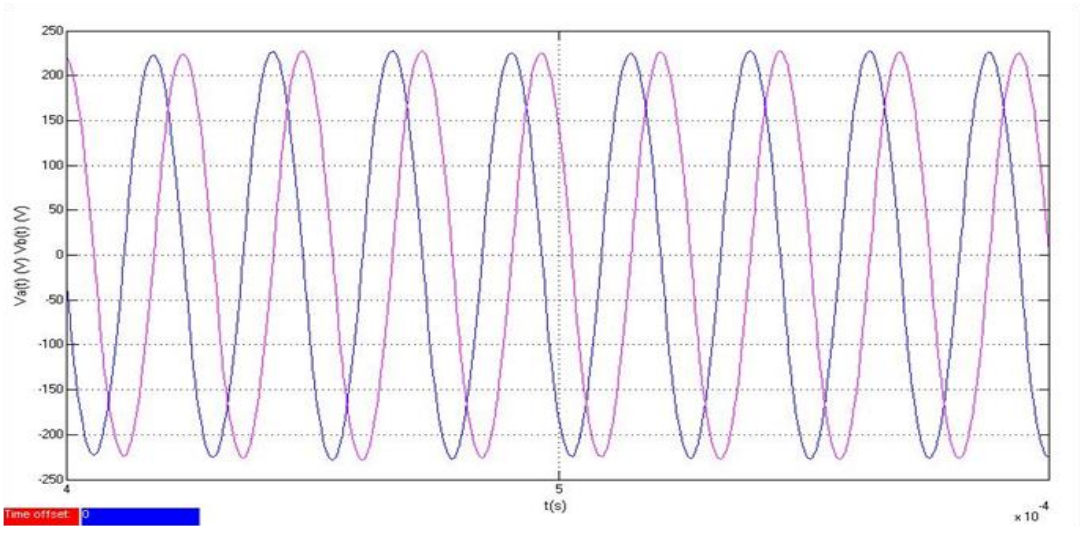
4.2. Gerilim Genliğinin Etkisi

Farklı çalışma koşulları altındaki kontrol uygulamalarında, oranlı gerilim olarak bilinen "uyarıcı faz" USM'un giriş fazlarından birine uygulanır. Diğer faz, kontrol fazı olarak bilinir ve uyartım fazından 90^0 faz farklıdır. USM'a uygulanan gerilimlerin genliği ile rotor hızı arasındaki ilişki Şekil 4.8'de verilmiştir. Rotor hızına etki eden diğer iki faktör faz farkı ve frekans sabit tutulmuştur. Bu benzetim sonuçları motorun farklı yük seviyeleri için alınmıştır. Yapılan bu benzetim çalışmasında rotor hızı 80 d/d ile 70 d/d arasında değiştirilirken, uygulanan gerilimlerin genliği 182V ile 147V arasında değiştirilmiştir. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük torku artıkça aynı frekans değerinde motor hızı değeri aşağı doğru kaydığı gözlenmiştir



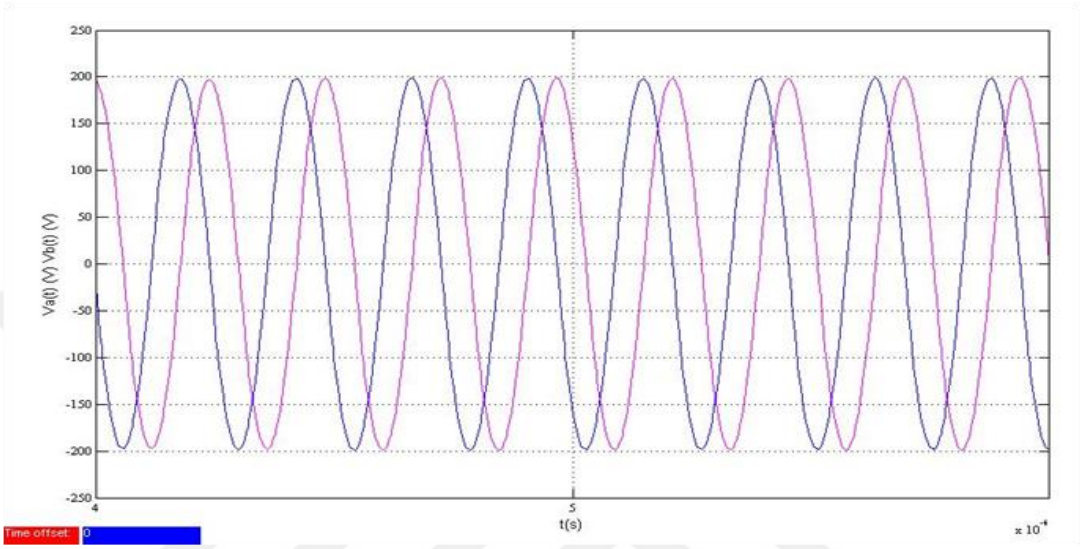
Şekil 4.8. Yüklü durumda gerilimin genliği ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu)

Motorun hızı 80d/d ayarlandığında Şekil 4.9'da verilen eğri elde edilmiştir. Frekans değeri 41,15 kHz ve iki faz arasında faz farkı 90^0 sabit tutularak yapılmıştır. A-fazı 182 V, B-fazı 182V olarak gözlenmiştir.



Şekil 4.9. Uygulanan gerilimlerin genliği ile hız değişim eğrisi (182V)

Motorun hızı 70d/d ayarlandığında Şekil 4.10'da verilen eğri elde edilmiştir. Frekans değeri 41,15 kHz ve iki faz arasında faz farkı 90^0 sabit tutularak yapılmıştır. A-fazı 140V, B-fazı 140V olarak gözlenmiştir.

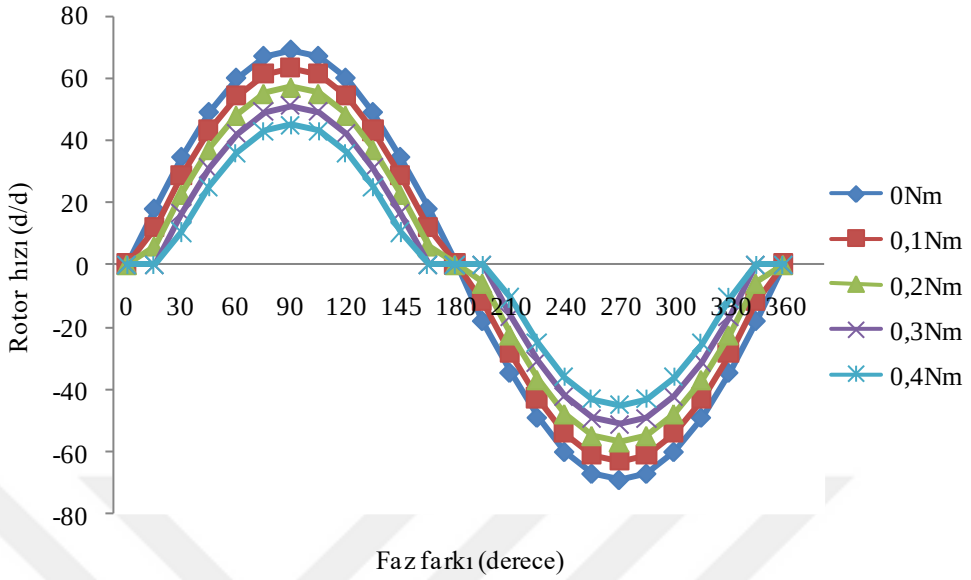


Şekil 4.10. Uygulanan gerilimlerin genliği ile hız değişim eğrisi (140V)

4.3. Faz Farkının Etkisi

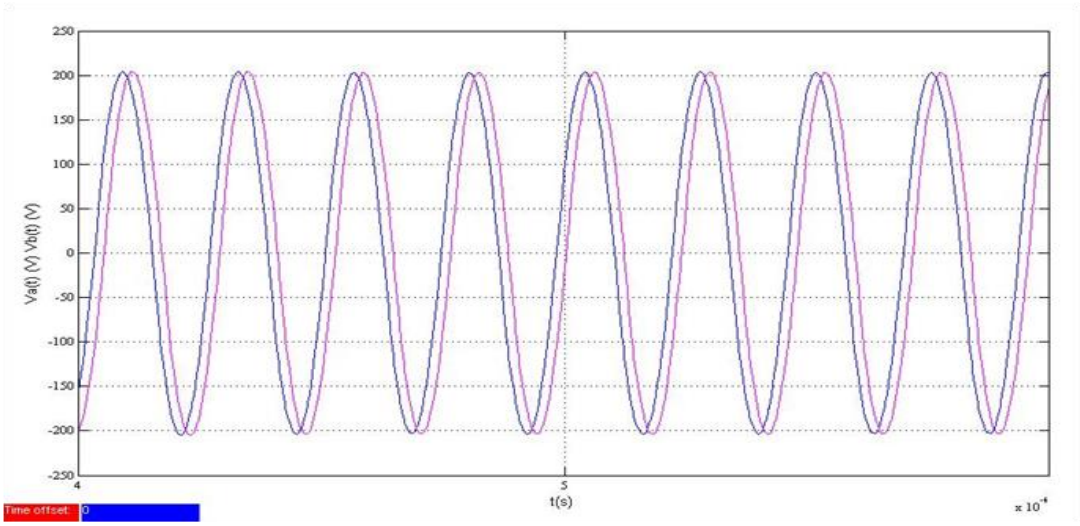
Sürücü sinyalinin faz farkı değiştiğinde elips hareket ve yürüyen dalga hızı da değişir. Faz farkı değişim büyüklüğünün doğrusal kontrol için diğer iki parametreden daha uygun olduğu görülür [35].

Bu benzetimde Şekil 4.11'de görüldüğü gibi faz farkı 0^0 ile 360^0 aralığında değiştirilerek, USM' un hızının 0 d/d ile 40 d/d arasındaki değişimi gözlenmiştir. Bu benzetim sonuçları motorun farklı yük seviyeleri için alınmıştır. Faz farkı sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 4.11'de görüldüğü gibi sinüs eğrisi biçimindedir. Bu çalışma modu, düşük hızlarda daha esnek çalışma aralığı sağlamaktadır. Faz farkını değiştirmek aynı zamanda motorun dönüş yönünü değiştirmek içinde kullanılır. Benzetim sonuçlarında uygulanan yük torku artıkça aynı frekans değerinde rotor hızının aşağı doğru kaydığı gözlenmiştir



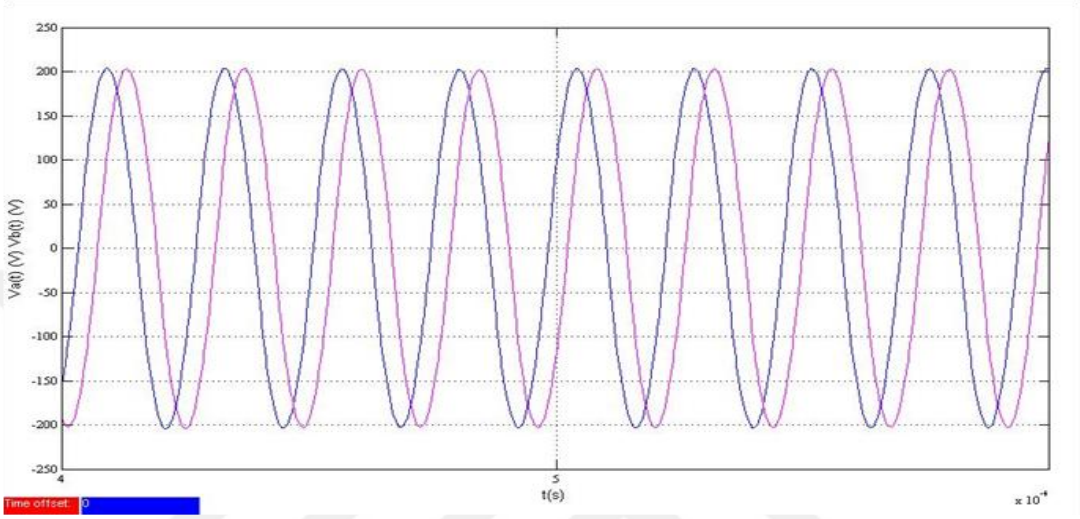
Şekil 4.11. Yüklü durumda faz farkı ile rotor hızının değişimi (benzetim sonucu)

Şekil 4.12'de motorun hızı 20d/d ayarlandığında, İki faz arasında faz farkı 30^0 olarak ölçülmüştür. Frekans değeri 42,85 kHz ve A-fazı 140V, B-fazı 140V olarak gözlenmiştir.



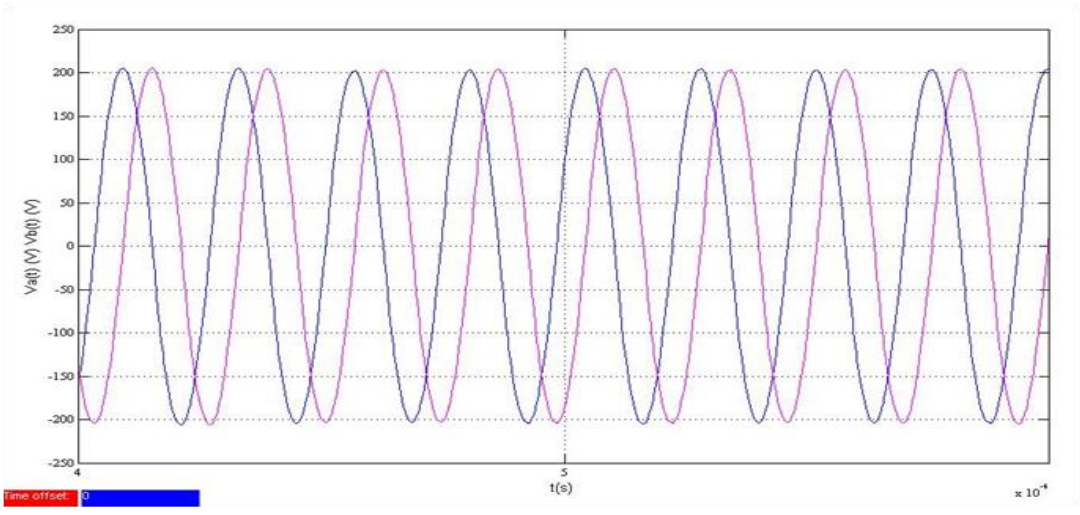
Şekil 4.12. Faz farkı eğrileri (30^0)

Şekil 4.13'de faz farkı olarak 60^0 değeri girildiğinde, beslemeden okunan iki faz gerilimin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 140V olmaktadır. Motorun hızı 34d/d olarak ölçülmüştür.



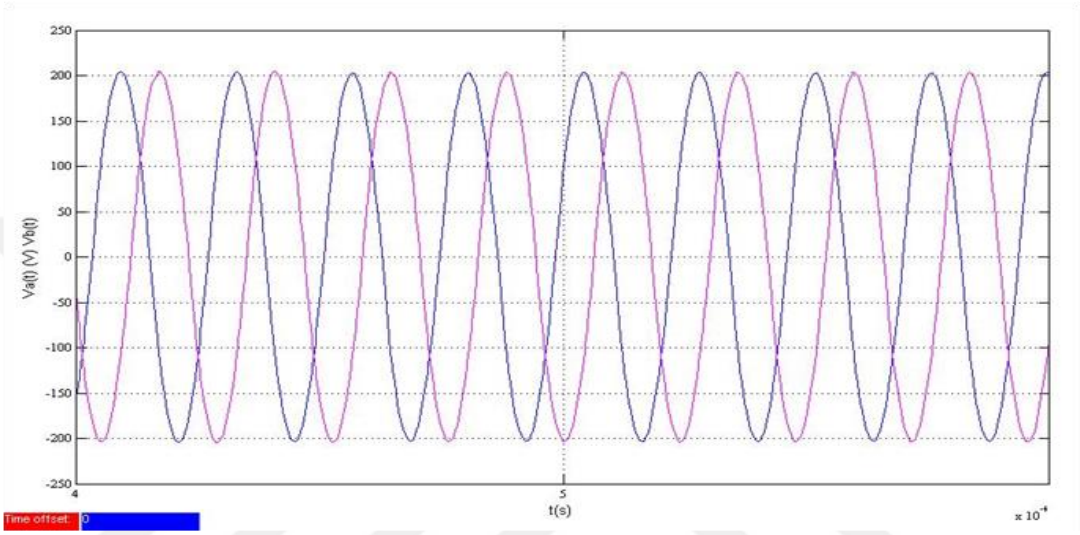
Şekil 4.13. Faz farkı eğrileri (60^0)

Şekil 4.14'de referans hız olarak 40 d/d değeri girildiğinde, faz farkı 90^0 ölçülmüştür. Bu benzetim yapılırken, A-fazı 140V, B-fazı 140V ve uygulanan gerilimlerin frekansı 42,85 kHz olmaktadır.



Şekil 4.14. Faz farkı eğrileri (90^0)

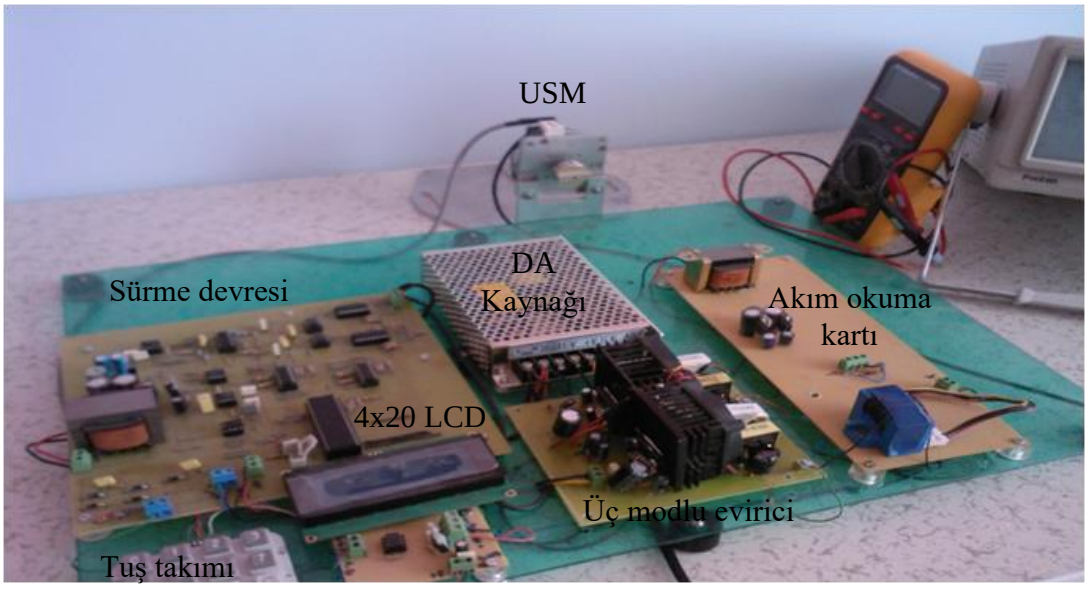
Şekil 4.15'de, faz farkı olarak 120^0 değeri girildiğinde beslemeden okunan iki faz gerilimin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 140V olmaktadır. Motorun hızı 34d/d olarak ölçülmüştür. Faz farkının 90^0 ile 180^0 arasında olduğu değerlerde motorun hızı azalmaktadır.



Şekil 4.15. Faz farkı eğrileri (120^0)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

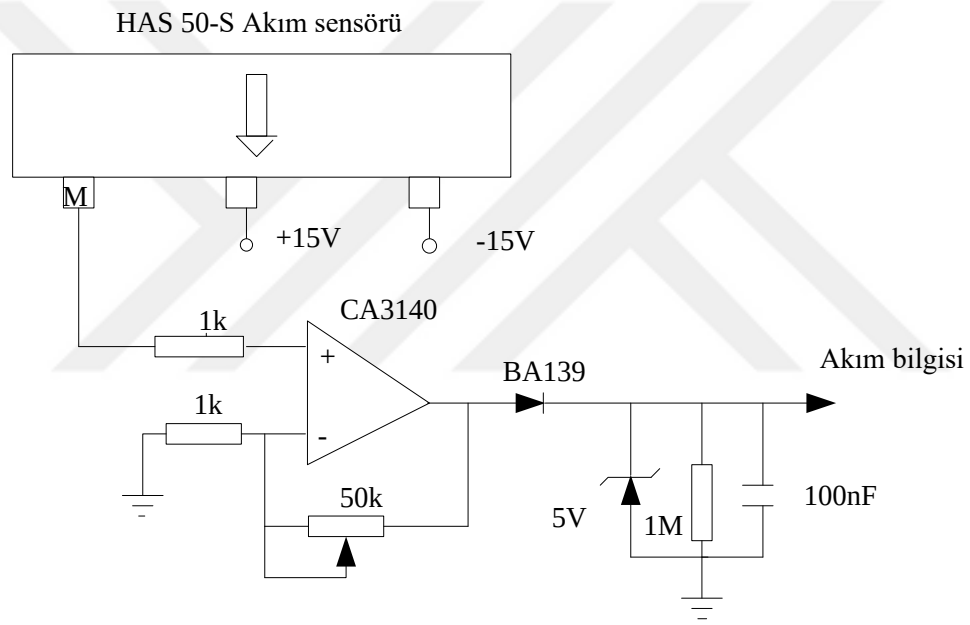
Bu çalışmada motorun hızı, sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı değiştirilerek kontrol edilmiştir. Deney için Şekil 5.1'deki deney düzeneği hazırlanmıştır. Bu deney düzeneğinde, motora uygulanan gerilimlerin genlikleri, frekansları ve aralarındaki faz farkı osiloskop yardımı ile ölçülmektedir. Motorun hız bilgisi hem optik takometre ile hem de motor miline bağlı enkoderden alınan kare dalga sinyalin frekansı hıza dönüştürülerek elde edilmektedir. Yüklü çalışma deneyleri için motorun miline elektromanyetik fren bağlanmıştır. Uygulanan yük, moment sensörü ile algılanmaktadır. USM'un hızı genellikle sürme frekansı değiştirilerek kontrol edilmektedir. Bu deneyde, USM'un hızına etki eden faktörlerden birisi değiştirilirken diğer iki parametre sabit tutularak rotor hızları ölçülmüştür. Böylece, uygulanan gerilimin frekansı, iki faz gerilimlerin genlikleri ile faz farkındaki olası değişmelerin rotor hızı üzerindeki etkileri önlenmiş olmaktadır [27].



Şekil 5.1. USM deney düzeneği

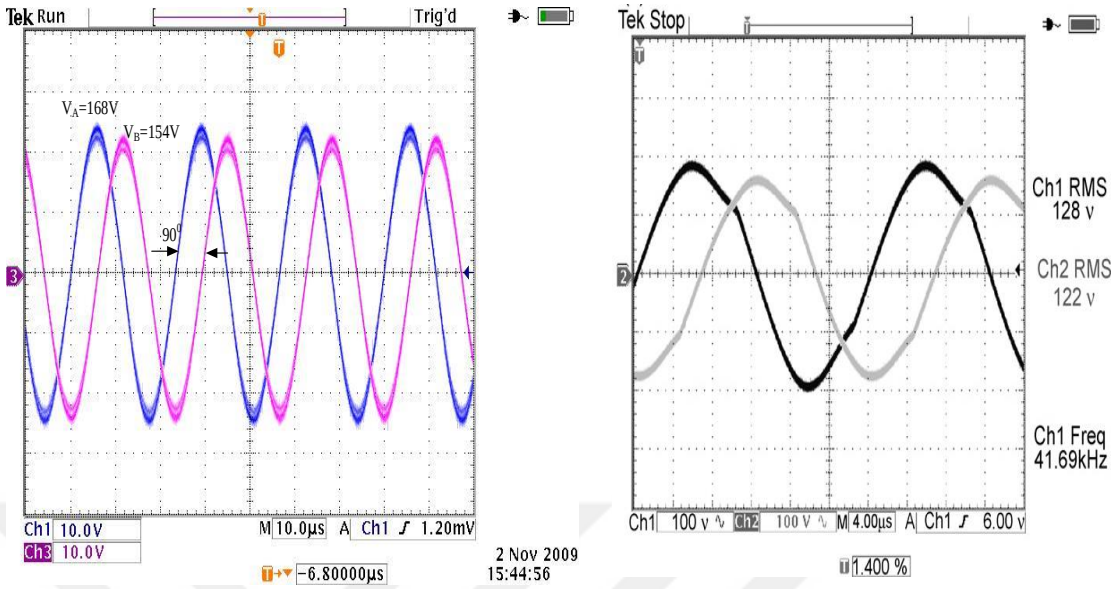
Şekil 5.2'de akım okuma kartı verilmiştir. Akım okuma devresinde LEM firmasının üretmiş olduğu HAS 50-S tipi akım sensörü kullanılmıştır. Akım sensörü 1000/1

dönüştürme oranına sahiptir. Ultrasonik motorun normal çalışma şartlarında çekeceği akım, transformatorun dönüştürme oranına kıyasla çok küçük olacağı için mikrodenetleyiciye gönderilecek olan bilgideki hassasiyet çok zayıf olacaktır. Bu olumsuzluğu ortadan kaldırmak için işlemsel yükselteçli bir evirmeyen yükselteç devresi tasarlanmıştır. Yükselteç çıkışı doğrultma ve filtreleme devresinden geçirildikten sonra mikrodenetleyiciye uygulanmaktadır. Mikrodenetleyicinin RA1 portuna bağlı ADC modül sayesinde ölçülen akım değeri, anolog dijital dönüşümden sonra kullanıcıya LCD modül üzerinden gösterilmiştir [49].



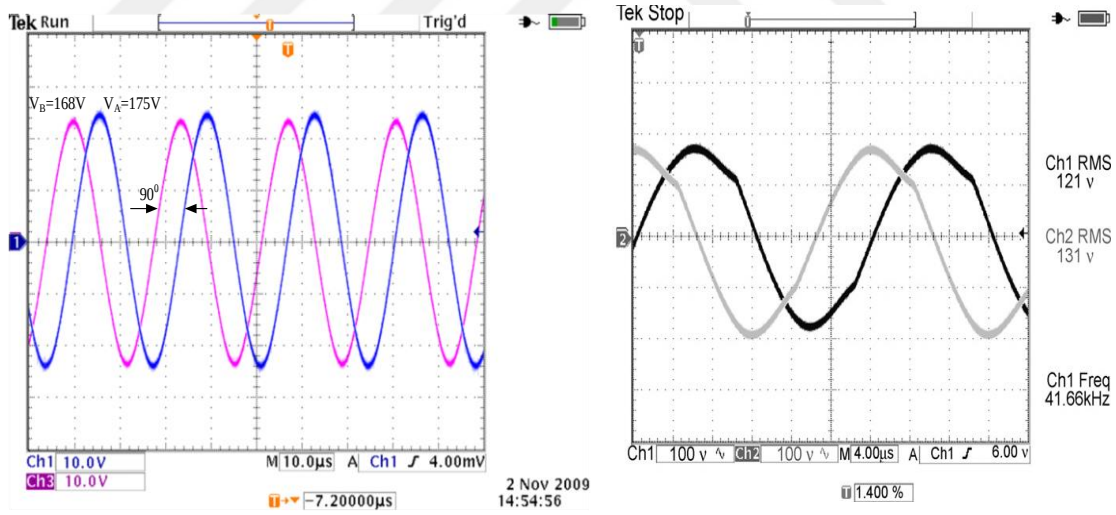
Şekil 5.2. Akım okuma kartı [49]

Şekil 5.3 (a)'da üç modlu eviricinin A-fazı ve B-fazına ait gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Burada inverterin A-fazına ait çıkış gerilimi B-fazının çıkış geriliminden π/2 açısı kadar ileridedir. Şekil 5.3 (b)'de Shinsei firmasının üretmiş olduğu D6060 eviricisinin A-fazı ve B-fazına ait gerilim dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 5.4 (a)'daki gibi B fazı π/2 açısı kadar ileri yapılırsa, motorun dönüş yönü değiştirilmiş olur [6, 27, 47]. Şekil 5.3 (a), Şekil 5.3 (b), Şekil 5.4 (a) ve Şekil 5.4 (b)'den anlaşılacağı üzere üç modlu eviricinin çıkışından elde edilen gerilimlerin şekli daha sünisoidal olduğu gözlemlenmektedir.



(a) (b)

Şekil 5.3. (a) Çok modlu eviricinin iki-faz gerilimi
(b) D6060 eviricinin iki faz gerilimi (50 d/d) [50]



(a) (b)

Şekil 5.4. (a) Çok modlu eviricinin B-fazı π/2 açısı kadar ileri
(b) D6060 eviricinin B-fazı π/2 açısı kadar ileri (100 d/d) [50]

5.1. Üç Modlu Çalışmada Yüksüz Durumdaki Motor Sonuçları

Bu bölümde deney düzeneğinden elde edilen deney sonuçları sunulmuştur. USM'un hızı sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı değiştirilerek kontrol edilmektedir. Bu çalışmada motorun hızı ayrı ayrı üç büyüklük değiştirilerek kontrol edilmiştir.

5.1.1. Frekans ile hız değişimi-Motor yüksüz

Bu deneyde USM'un hızı ile sürme frekansı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için farklı sürme frekanslarında rotor hızları ölçülmüştür. Ayrıca iki faz gerilimlerin genlikleri ve faz farkları (90^0) sabit tutularak, bu büyüklüklerdeki değişimin motor hızına etkileri önlenmiştir.

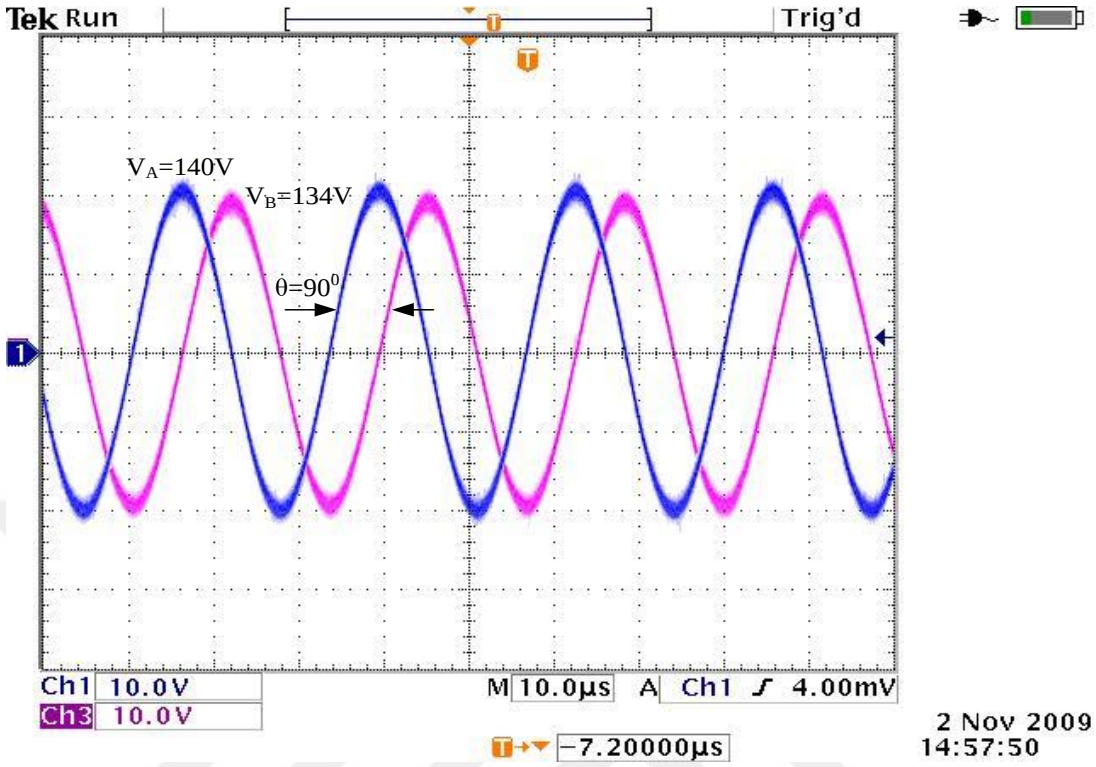
Çizelge 5.1. Uygulanan gerilimin genliği 176V, faz farkı 90^0 sabit tutularak USM hızının sürme frekansı ile değişim verileri

Frekans (kHz)	40,65	40,81	40,98	41,15	41,32	41,66	42,01	42,37	42,55	43,85	44,44	44,84
Hız (d/d)	101	95	90	80	70	60	50	40	30	20	15	10

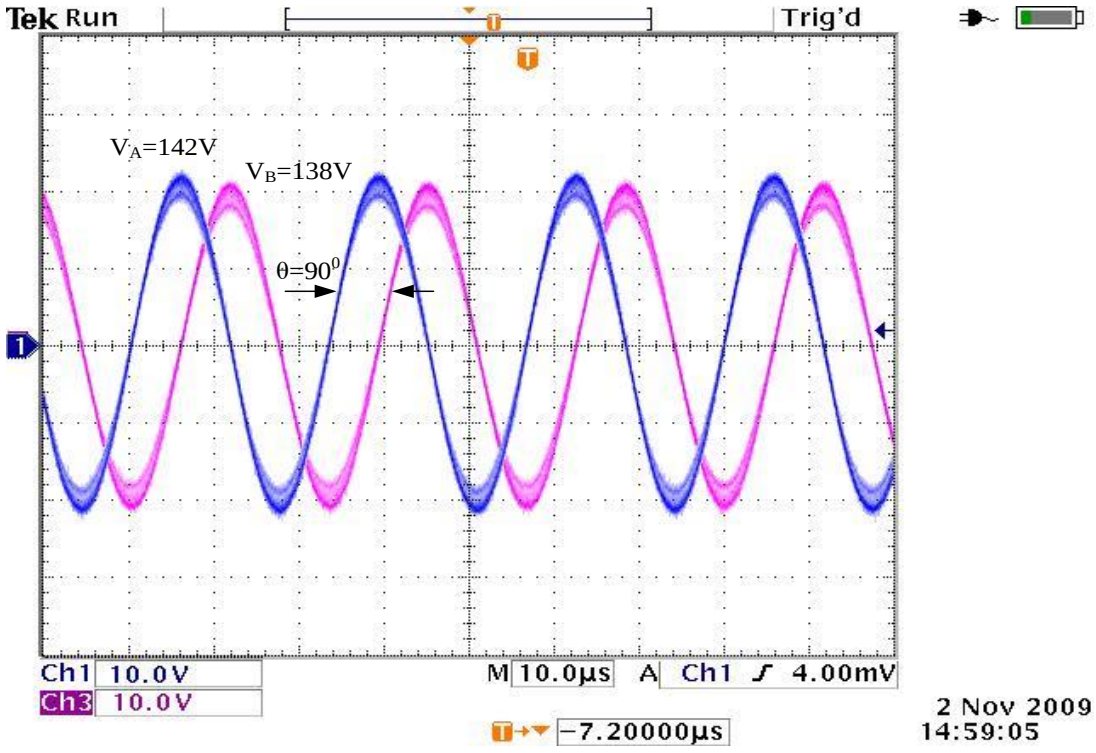
Şekil 5.5'de görüldüğü tuş takımı ile frekans değeri 43.85 kHz'e ayarlandığında rotor hızı tur metre ile 20 d/d olarak ölçülmüştür. A-fazı geriliminin 140V, B-fazı geriliminin 134 V olduğu gözlenmiştir.

Şekil 5.6'da tuş takımı ile frekans değeri 42,01 kHz ayarlandığında ise, rotor hızı tur metre ile 40 d/d olarak ölçülmüştür. A-fazı gerilimi 142 V, B-fazı gerilimi 138V ve iki gerilim arasındaki faz farkı 90^0 olarak gözlenmiştir.

Girilen referans hız değeri 60 d/d olduğunda, motor gerilimleri Şekil 5.7'de görüldüğü gibi A-fazı için 162V, B-fazı için 155V ve iki gerilim değeri arasındaki faz farkı 90^0 olarak gözlenmiştir. Motoru 60 d/d hız değerinde sürmek için gerekli olan frekansın değeri 41,66 kHz olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.5. USM iki-faz gerilimleri (20 d/d için)



Şekil 5.6. USM iki-faz gerilimleri (40 d/d için)

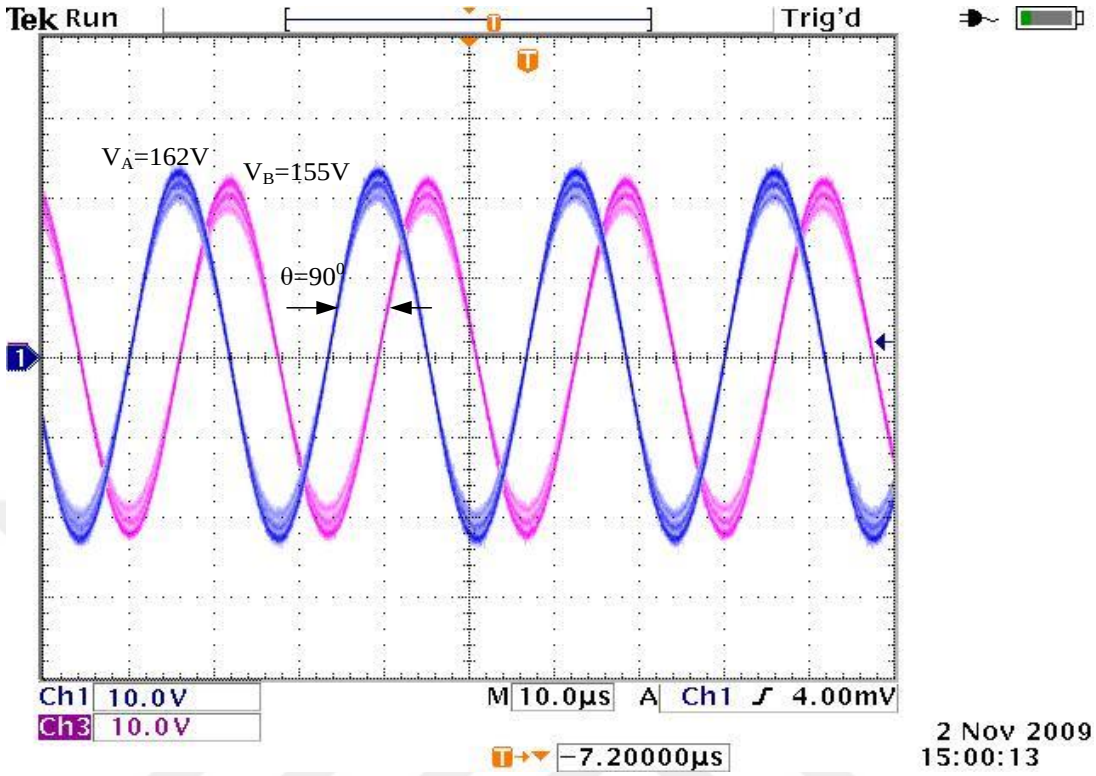
Şekilde 5.8'de görüldüğü gibi (tuş takımı ile frekans değeri 41,15 kHz'e ayarlandığında) rotor hızı tur metre ile 80 d/d olarak ölçülmüştür. A-fazı geriliminin 176V, B-fazı geriliminin 170V olduğu gözlenmiştir

Şekilde 5.9'da görüldüğü gibi (tuş takımı ile frekans değeri 40,98 kHz'e ayarlandığında) rotor hızı tur metre ile 90 d/d olarak ölçülmüştür. A-fazı geriliminin 176V, B-fazı geriliminin 170V olduğu gözlenmiştir

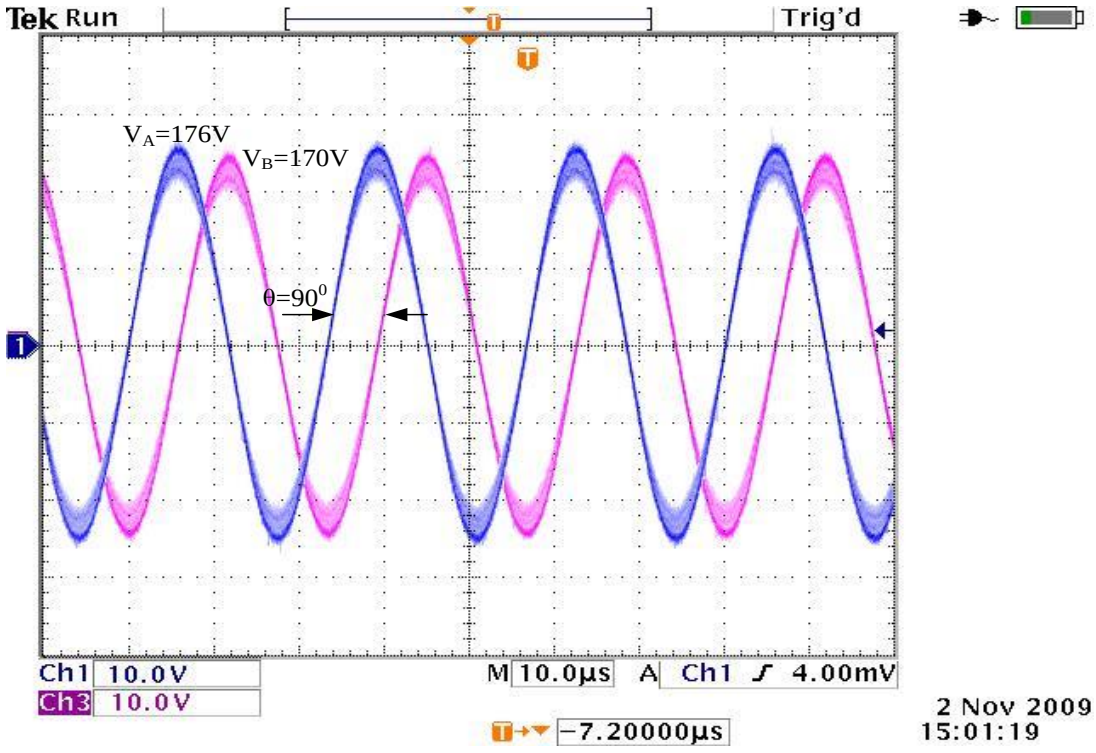
Girilen referans hız değeri 101 d/d olduğunda motor gerilimleri Şekil 5.10'da görüldüğü gibi A-fazı için 185V, B-fazı için 176V ve iki gerilim değeri arasındaki faz farkı 90^0 olarak gözlenmiştir. Motoru 101 d/d hız değerinde sürmek için gerekli olan frekansın değeri 40,65 kHz olarak ölçülmüştür Dikkat edilirse, motoru sürme sinyalinin frekansı azaldıkça hızda artmaktadır. USM'un belirli frekans aralığında sürme frekansı azaldıkça, hızı da sürme frekansı ile ters orantılı olarak artmaktadır.

Bu deneyde Şekil 5.11'de görüldüğü gibi sürme frekansı 44,84 kHz ile 40,65 kHz aralığında değiştirilerek, USM rotor hızının 10d/d ile 101d/d arasındaki değiştiği gözlenmiştir.

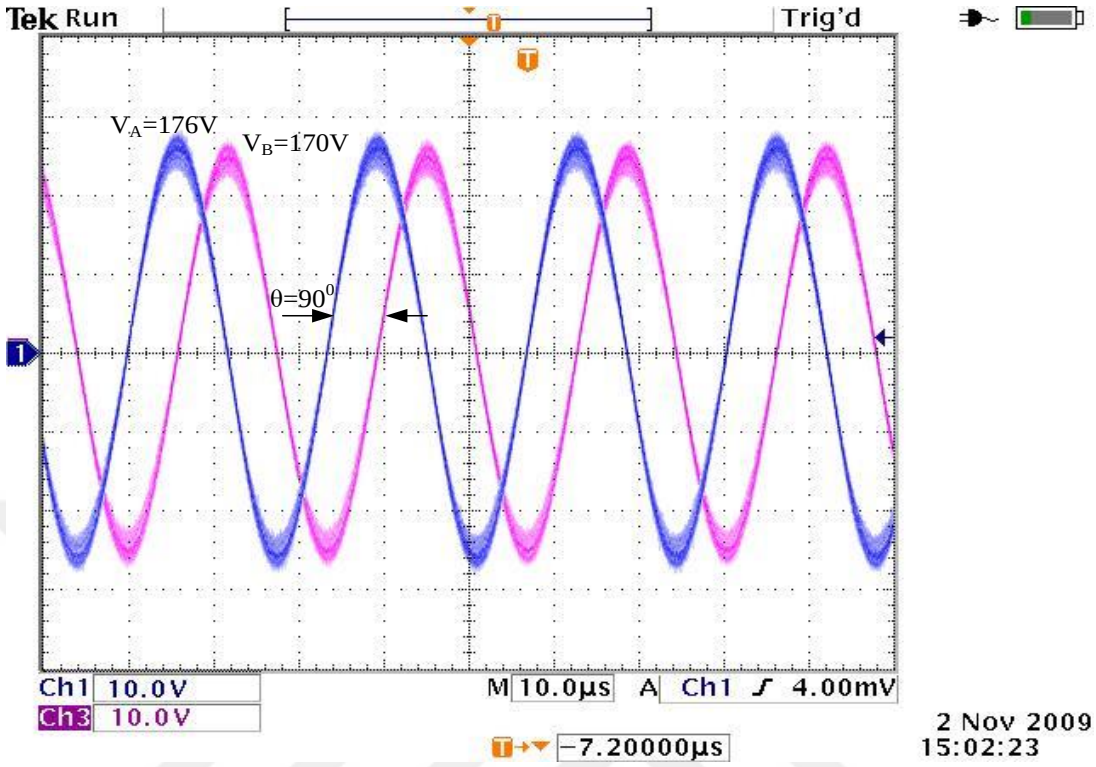
Şekil 5.5, Şekil 5.6, Şekil 5.7, Şekil 5.8, Şekil 5.9 ve Şekil 5.10 karşılaştırıldığında referans hız değeri artıkça ve sürme frekansı azaldıkça, faz gerilimlerindeki bozulmanın arttığı görülmektedir. Bunun nedeni motorun kapasitif özellik taşıması ve mekanik rezonans frekansına yaklaşılmasındandır. Buna ek olarak frekans azaldıkça, faz gerilimlerinin genliklerinde artış gözlenmiştir.



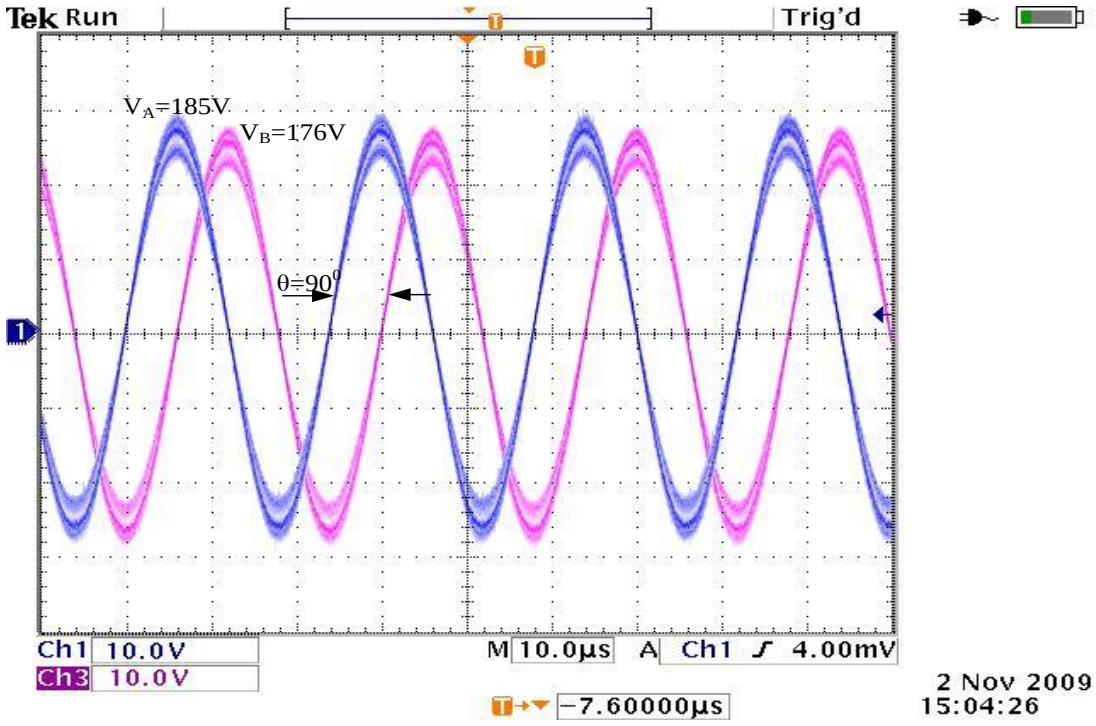
Şekil 5.7. USM iki-faz gerilimleri (60 d/d için)



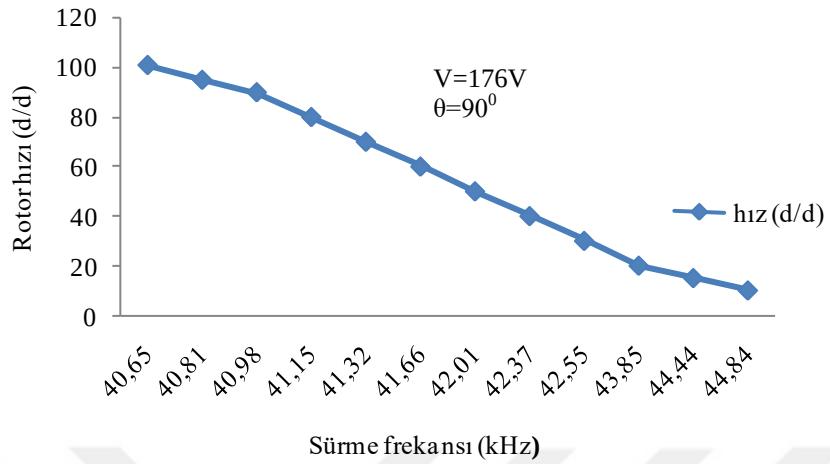
Şekil 5.8. USM iki-faz gerilimleri (80 d/d için)



Şekil 5.9. USM iki-faz gerilimleri (90 d/d için)



Şekil 5.10. USM iki-faz gerilimleri (101 d/d için)



Şekil 5.11. Uygulanan gerilimin genliği 176V ve faz farkı 90^0 olarak sabit tutulduğunda sürme frekansı ile rotor hızının değişimi

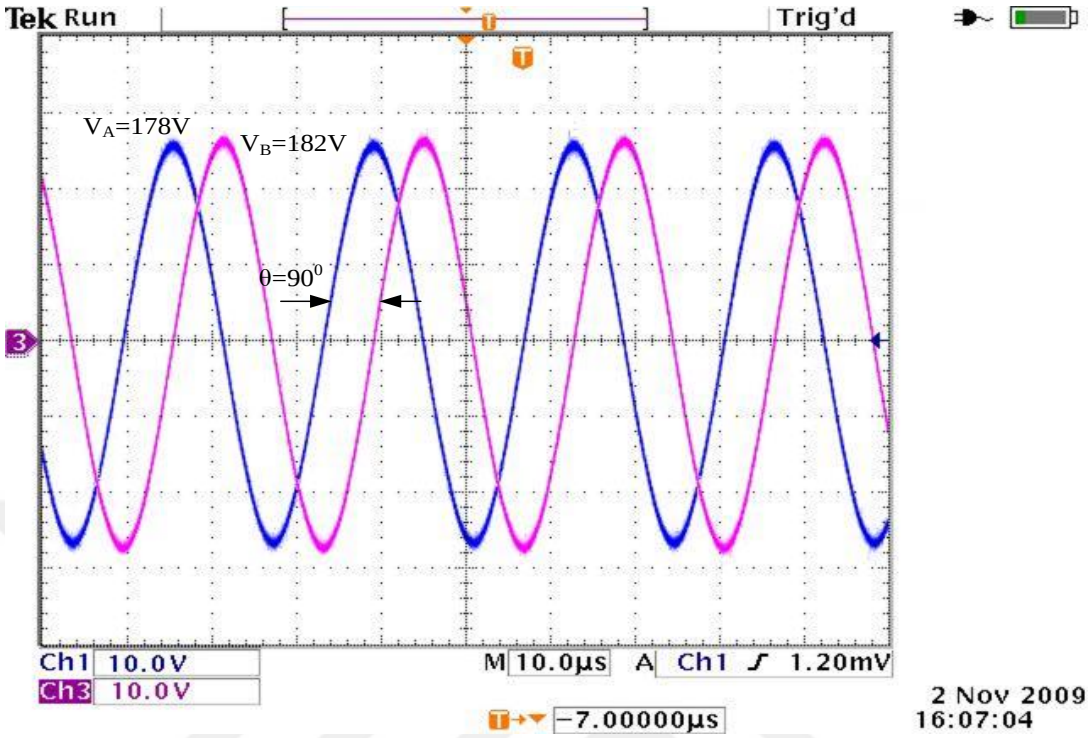
5.1.2 Gerilimin genliği ile hız değişimi-Motor yüksüz

Bu deneyde, USM'un uygulanan gerilimin genliği ile rotor hızı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için farklı gerilim genliklerinde rotor hızı ölçülmüştür. Ayrıca sürme frekansı 41,5 kHz ve faz farkı 90^0 olarak sabit tutularak, bu büyüklüklerin rotor hızına etkileri önlenmiştir.

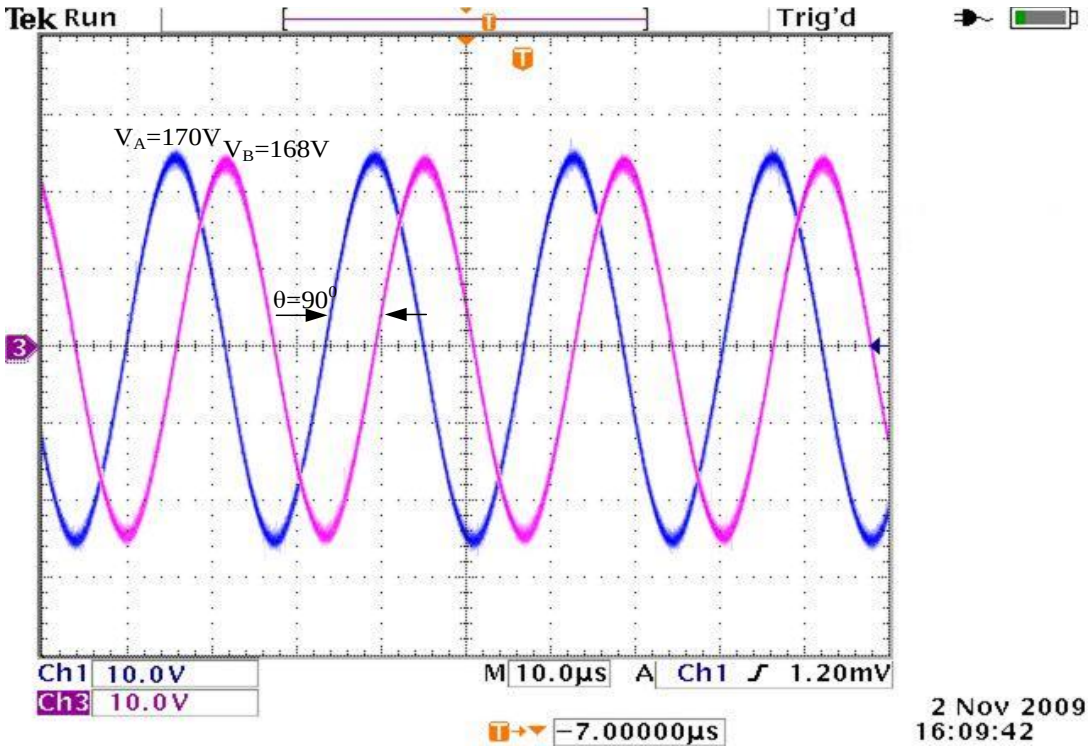
Çizelge 5.2. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz ve faz farkı 90^0 olarak sabit tutulduğunda, gerilimin genliği ile rotor hızının değişim verileri

Hız (d/d)	63	65	68	70	73	76
Gerilim (V)	140	154	161	168	175	182

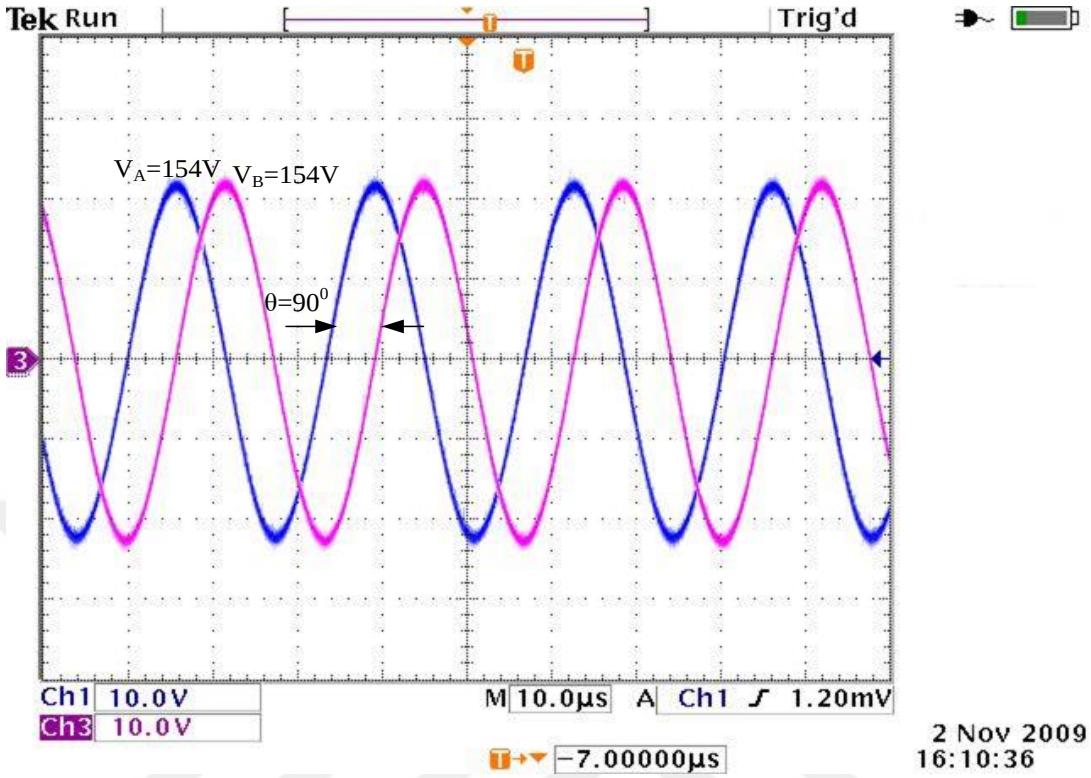
Şekilde 5.12'de görüldüğü üzere (tuş takımı ile gerilim değeri 182 V olarak ayarlandığında) rotor hızı tur metre ile 76 d/d olarak ölçülmüştür. Şekilde 5.13'de görüldüğü üzere tuş takımı ile gerilim değeri 168 V olarak ayarlandığında rotor hızı tur metre ile 70 d/d olarak ölçülmüştür.



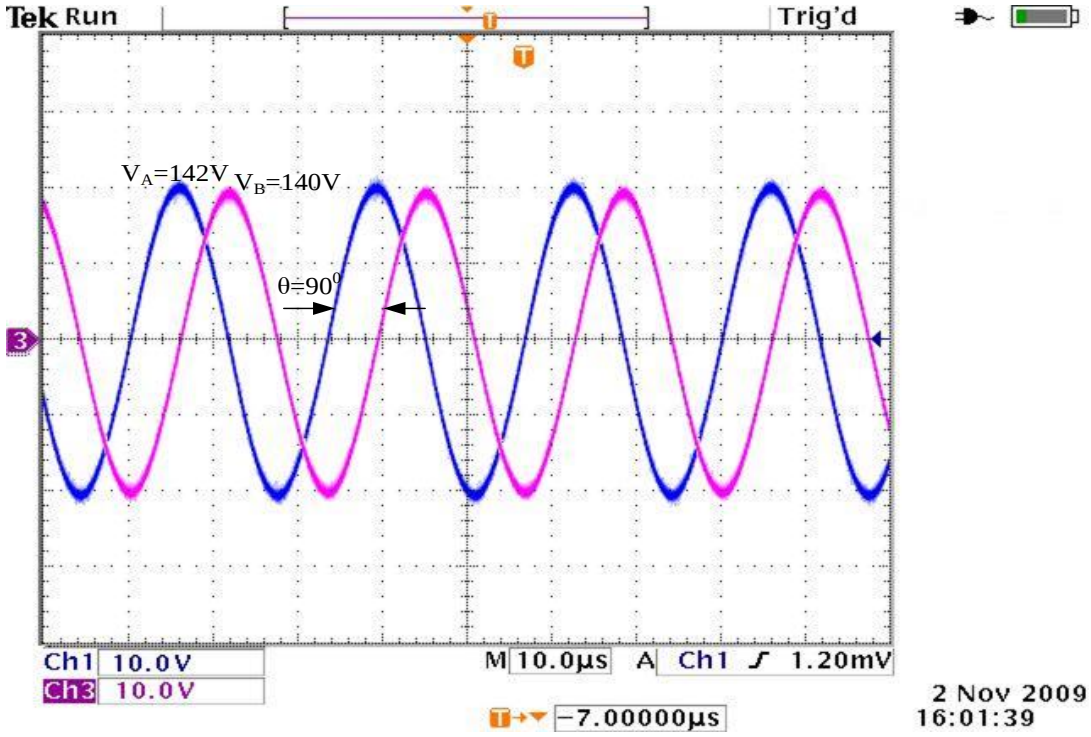
Şekil 5.12. USM iki-faz gerilimleri 182V (76 d/d için)



Şekil 5.13. USM iki-faz gerilimleri 168V (70 d/d için)



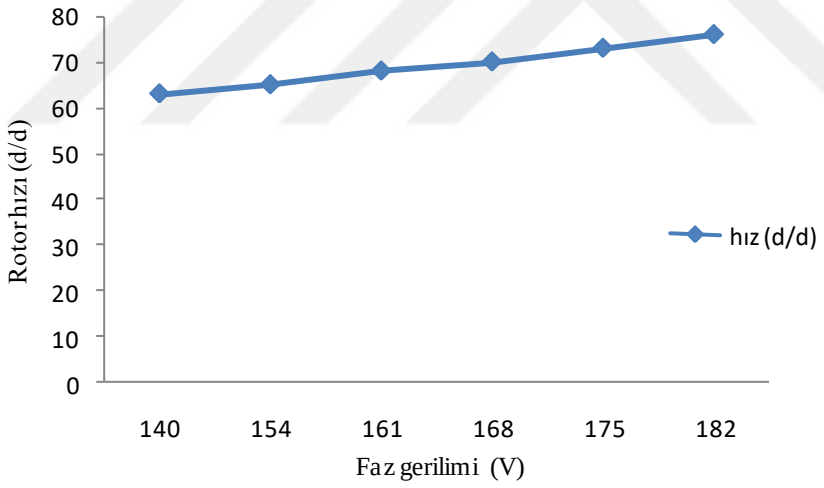
Şekil 5.14. USM iki-faz gerilimleri 154V (65 d/d için)



Şekil 5.15. USM iki-faz gerilimleri 140V (63 d/d için)

Şekilde 5.14'de görüldüğü üzere tuş takımı ile gerilim değeri 154V olarak ayarlandığında rotor hızı tur metre ile 65 d/d olarak ölçülmüştür. Şekilde 5.15'de görüldüğü üzere tuş takımı ile gerilim değeri 140V olarak ayarlandığında rotor hızı tur metre ile 63 d/d olarak ölçülmüştür.

Bu deneyde, Şekil 5.16'da görüldüğü gibi gerilimin genliği 140V ile 182V aralığında değiştirilerek, USM'un hızının 63 d/d ile 76 d/d arasında değiştiği gözlenmiştir. Gerilimin genliğinin 100V altındaki değerlerinde, stator ile rotor arasındaki sürtünme kuvvetini yenebilecek moment üretemediğinden bu bölgede rotor dönmemektedir. Bu nedenle yüksek frekans değerlerinde, gerilim düşük olmasından dolayı bu uygulama alanı kısıtlıdır. Uygulanan gerilim ile rotor hızının doğru orantılı değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.16. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz ve faz farkı 90^0 sabit tutulduğunda, faz gerilimi ile rotor hızının değişimi

5.1.3. Faz farkı ile hız değişimi-Motor yüksüz

Bu deneyde, uygulanan gerilimin faz farkı ile rotor hızı arasındaki ilişkiyi ortaya koymak için farklı faz farkı durumlarında rotor hızları ölçülmüştür. Ayrıca sürme frekansı 42,37 kHz ve gerilimin genliği 140V sabit tutularak, bu büyüklerin rotor hızına etkisi önlenmiştir.

Çizelge 5.3. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz, gerilimin genliği 140V sabit tutulduğunda sürme gerilimlerinin faz farkı ile rotor hızı değişimi verileri

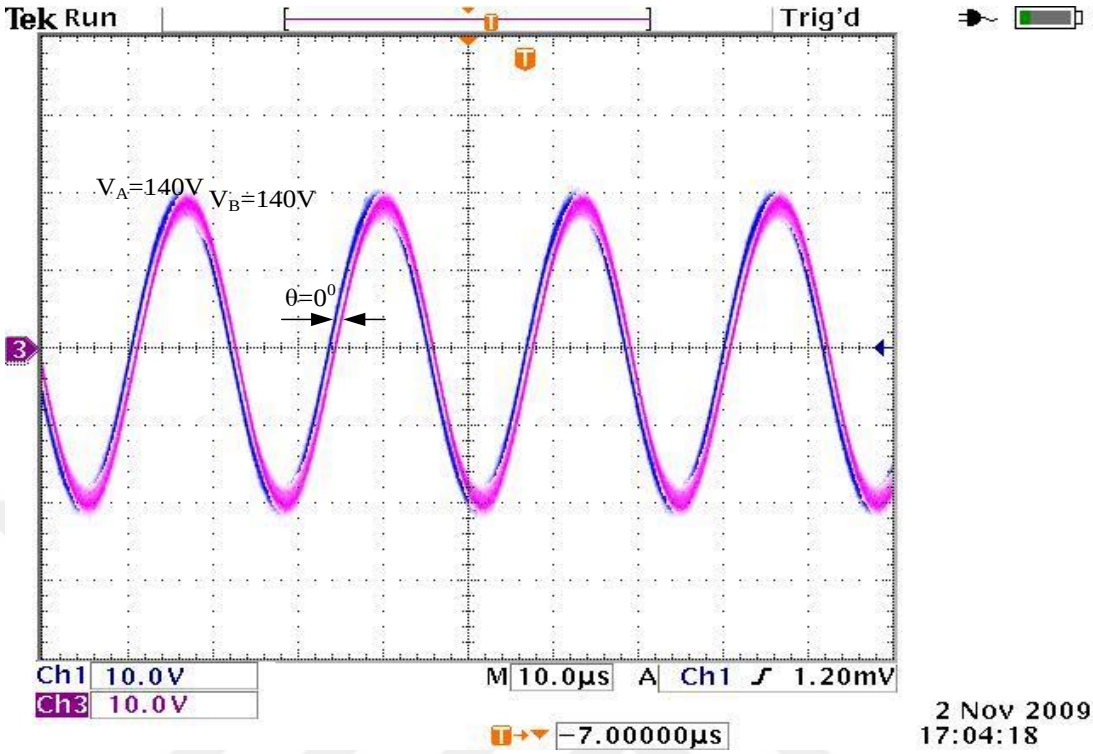
Fazfarkı(^{0})	0	30	45	60	75	90	105	120	135	150	180	210	225
hız(d/d)	0	10	19	27	33	36	33	27	19	10	0	-10	-19

Tuş takımından faz farkı bilgisi 0^0 olarak girildiğinde, motor A-fazı geriliminin 140V ve B-fazı geriliminin 140V olduğu Şekil 5.17'de görülmektedir. Buna ilave olarak motor bu faz farkı değerinde sürtünme kuvvetini yenebilecek moment üretemediğinden dönmemektedir.

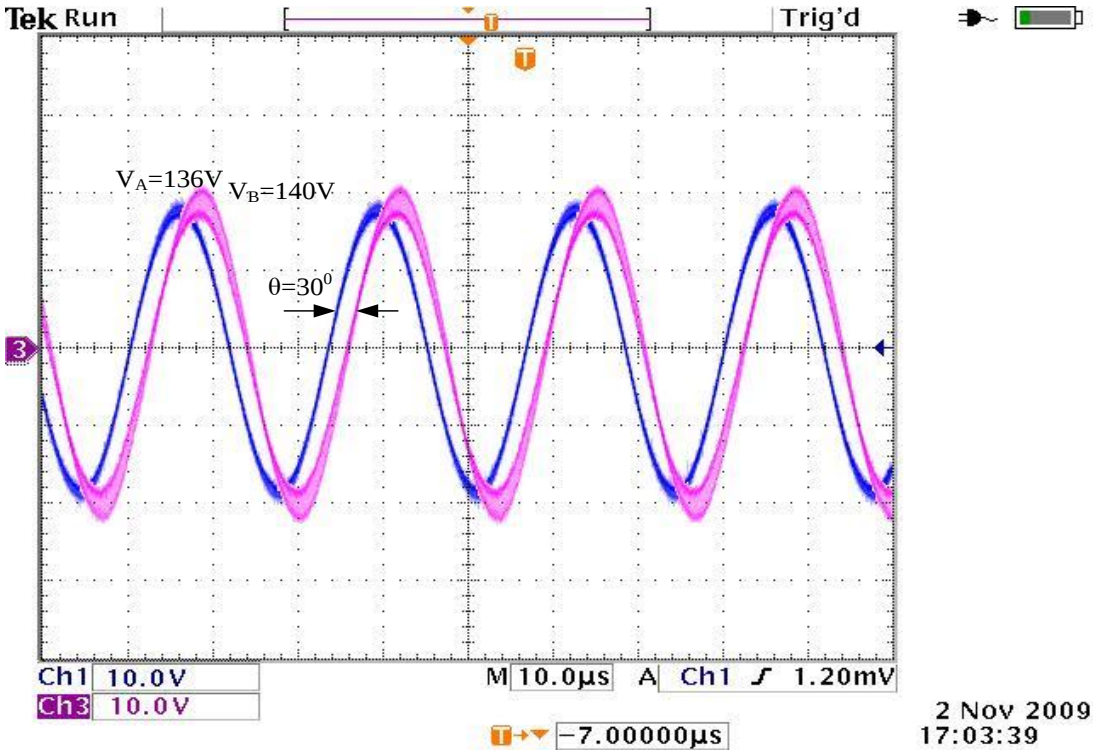
Şekil 5.18'de görüldüğü üzere faz farkı 30^0 olarak girildiğinde, A-fazı geliminin 140V ve B-fazı geriliminin 140V olduğu gözlenmiştir. Aynı zamanda sürtünme kuvvetini yenebilecek moment üretmek için gerekli olan açıyı sağlamakta zorlandığından B-fazında bozulmaya neden olduğu da görülmektedir.

Şekil 5.19'da faz farkı olarak 60^0 değeri girildiğinde, beslemeden okunan iki faz gerilimin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 140V olmaktadır. Motorun hızı 27 d/d olarak ölçülmüştür.

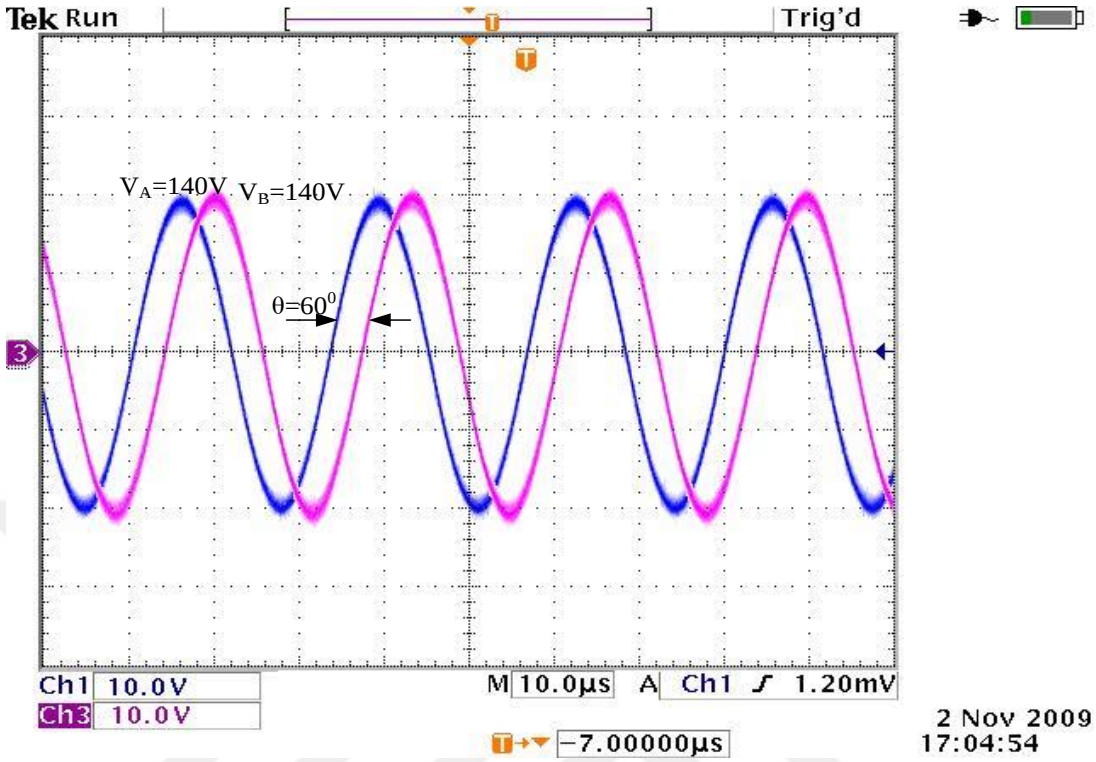
Şekil 5.20'de referans hız olarak 36 d/d değeri girildiğinde, faz farkı 90^0 ile hızın değişimi tur metre ile ölçülmüştür. Hız 36 d/d iken beslemeden okunan iki faz gerilimin değerleri A-fazı için 140V,B-fazı için 136V olmaktadır.



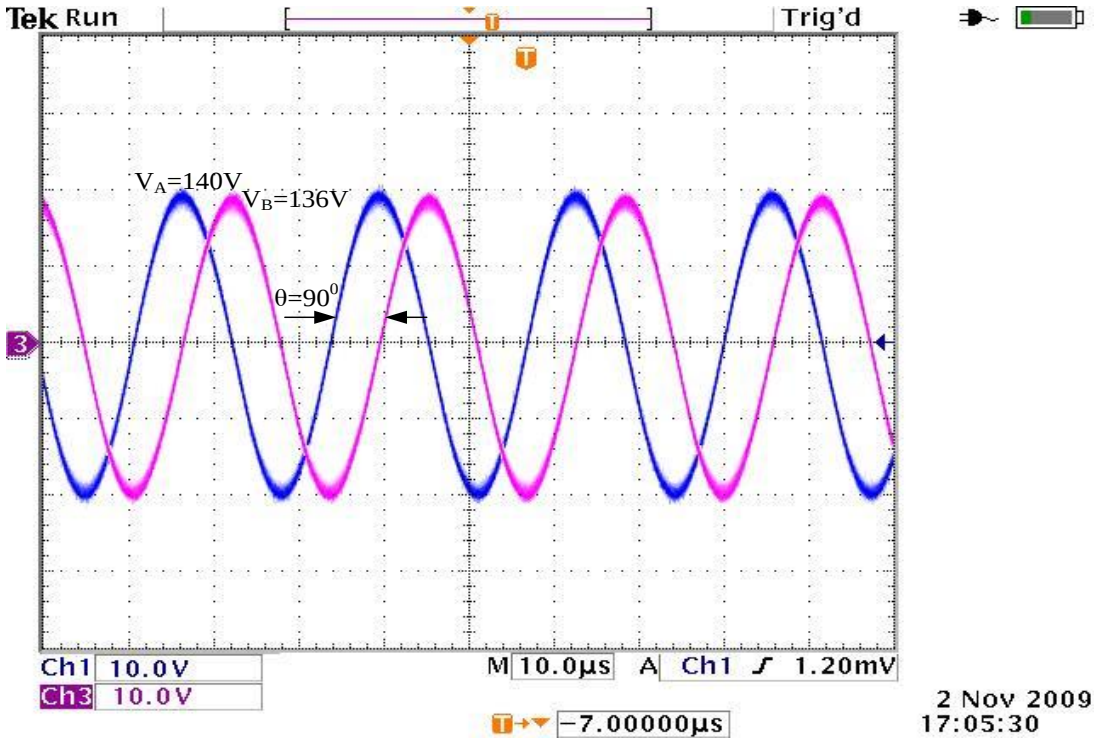
Şekil 5.17. USM iki-faz gerilimleri $\theta=0^0$ (0 d/d için)



Şekil 5.18. USM iki-faz gerilimleri $\theta=30^0$ (10 d/d için)

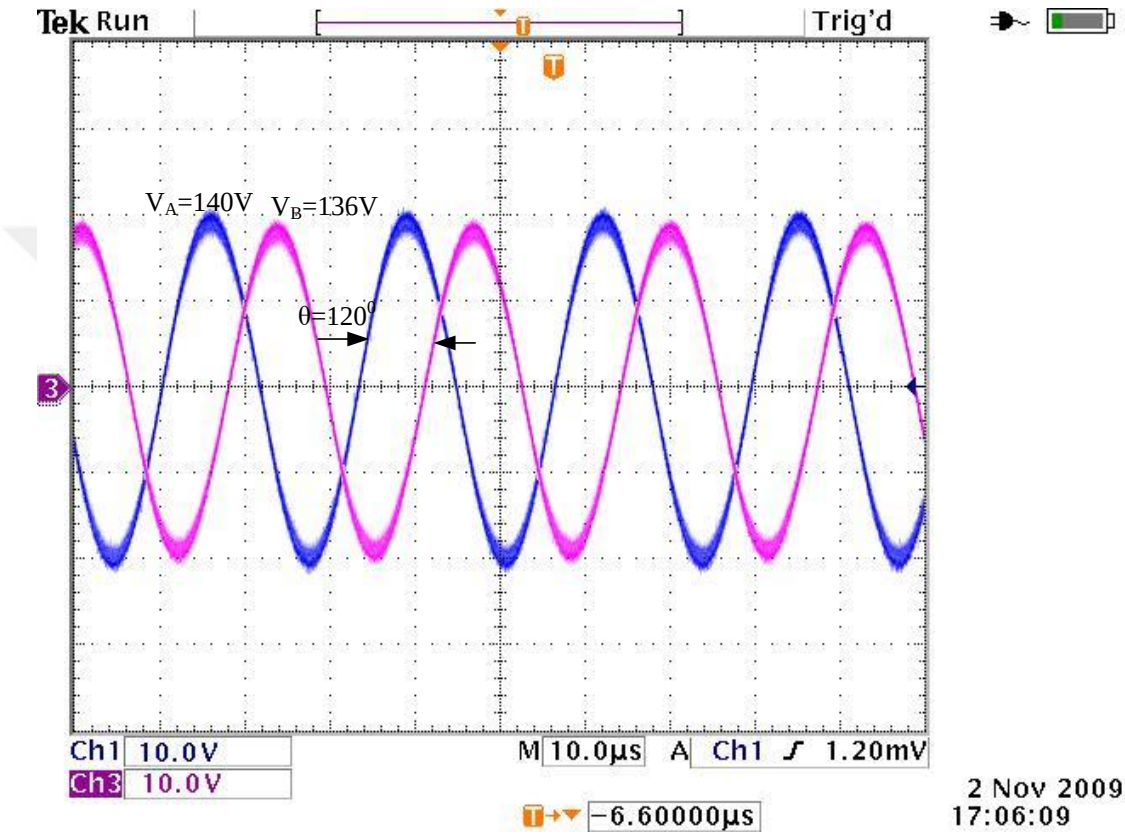


Şekil 5.19. USM iki-faz gerilimleri $\theta=60^0$ (27 d/d için)



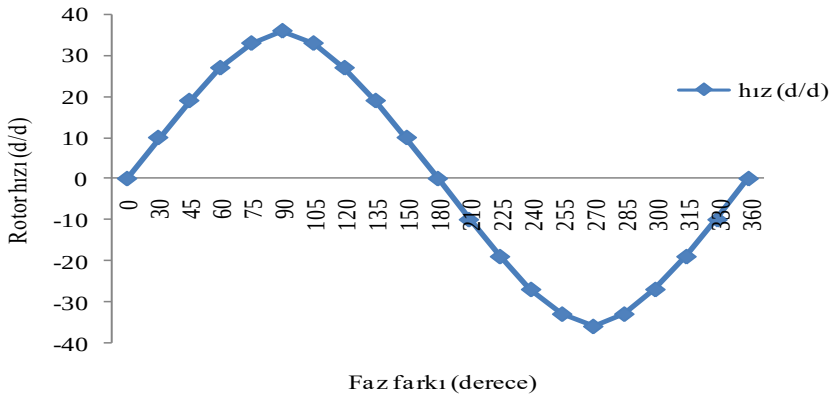
Şekil 5.20. USM iki-faz gerilimleri $\theta=90^0$ (36 d/d için)

Şekil 5.21'de, faz farkı olarak 120^0 değeri girildiğinde beslemeden okunan iki faz gerilimin değerleri A-fazı için 140V, B-fazı için 136V olmaktadır. Motorun hızı 27d/d olarak ölçülmüştür. Faz farkının 90^0 ile 180^0 arasında olduğu değerlerde motorun hızı azalmaktadır.



Şekil 5.21. USM iki-faz gerilimleri $\theta=120^0$ (27 d/d için)

Bu deneyde Şekil 5.22'de görüldüğü gibi faz farkı 0^0 ile 360^0 aralığında değiştirilerek, USM' un hızının 0 d/d ile 36 d/d arasındaki değişimi gözlenmiştir. Faz farkı sonuçlarından elde edilen grafik Şekil 5.22'de görüldüğü gibi sinüs eğrisi biçimindedir. Yüksek hız durumlarında faz farkı 60^0 altındaki değerlerde, stator ile rotor arasındaki sürtünme kuvvetini yenebilecek moment üretemediğinden bu bölgede motor çalışmamaktadır. Bu çalışma modu, düşük hızlarda daha esnek çalışma aralığı sağlamaktadır. Faz farkını değiştirmek aynı zamanda motorun dönüş yönünü değiştirmek içinde kullanılır.



Şekil 5.22. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz, gerilimin genliği 140V sabit tutulduğunda USM' un hızının sürme gerilimlerinin faz farkı ile değişimi

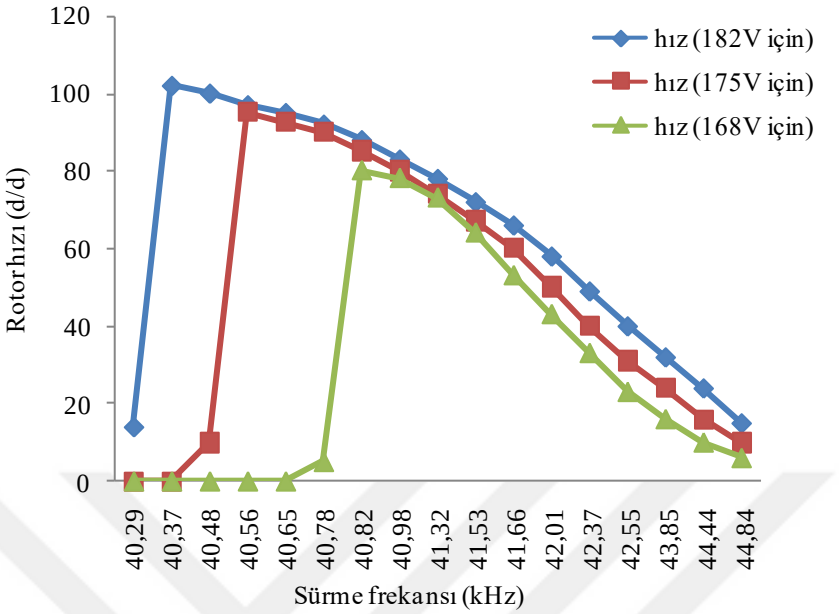
5.2. Frekansla Hız Değişimi-Farklı Gerilimlerde-Motor yüksüz

Bu deneyde, USM'un hızı farklı gerilim değerlerinde sürme frekansı değiştirilerek yapılmıştır. 168V, 175V ve 184V gerilimlerindeki sürme frekansı 40,29 kHz ile 44,84 kHz arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi Çizelge 5.4'de gösterilmiştir.

Çizelge 5.4. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0 sabit tutularak, frekansı 44,84 kHz ile 40,29 kHz, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimin verileri

Gerilim	Frekans (kHz)	40.29	40.37	40.48	40.56	40.65	40.78	40.82	40.98	41.53	41.66	42.37	42.55	44.84
182V	hız(d/d)	14	102	100	97	95	92	88	83	72	66	49	40	15
175V	hız(d/d)	0	0	10	95	92,5	90	85	80	67	60	40	31	10
168V	hız(d/d)	0	0	0	0	0	5	80	78	64	53	33	23	6

Farklı gerilimlerden elde edilen eğrilerde düşük frekanslardaki hız farkı, yüksek frekanslardaki hız farkından daha yüksektir. Gerilimin genliği düştükçe rezonans frekansının değeri yükselmektedir. Buna ek olarak rotor hızının alabileceği en yüksek değerde de azalma görülmektedir. Yüksek frekans değerlerinde, gerilim düşük olmasından dolayı bu uygulama alanı kısıtlıdır. Şekil 5.23'de uygulanan gerilim ile rotor hızının doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir.



Şekil 5.23. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0 sabit tutulduğunda, frekansı 44,84 kHz ile 40,29 kHz, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim

USM' un hızı yük, stator ile rotor arasındaki baskı kuvveti, sıcaklık gibi parametrelerle değişmektedir. Bu parametrelerdeki değişimler göz önüne alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

5.3. Faz Farkı ile Hız Değişimi-Farklı Gerilimlerde-Motor Yüksüz

Bu deneyde USM'un hızı; farklı gerilim değerlerinde, faz farkı değiştirilerek izlenmiştir. Çizelge 5.5'de uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz sabit tutularak, 168V, 175V ve 184V gerilimlerindeki faz farkı 0^0 ile 90^0 arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi göstermektedir. Çizelge 5.6'da uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz sabit tutularak, 168V, 175V ve 184V gerilimlerindeki faz farkı 0^0 ile 90^0 arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi gösterilmektedir

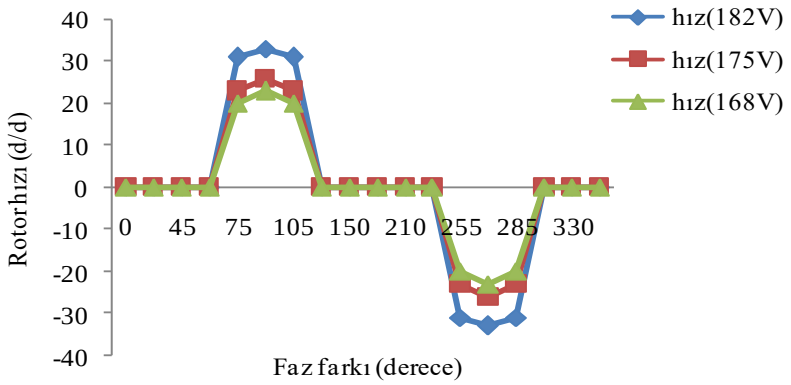
Çizelge 5.5. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz sabit tutulduğunda, faz farkı 0^0 ile 90^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim verileri

Fazfarkı (^{0})	0-30-45-60	75	90	105	120-150-180-210-240	255	270	285	300-330-360
hız(182V)	0	74	78	74	0	-74	-78	-74	0
hız(175V)	0	71	74	71	0	-71	-74	-71	0
hız(168V)	0	69	72,5	69	0	-69	-72,5	-69	0

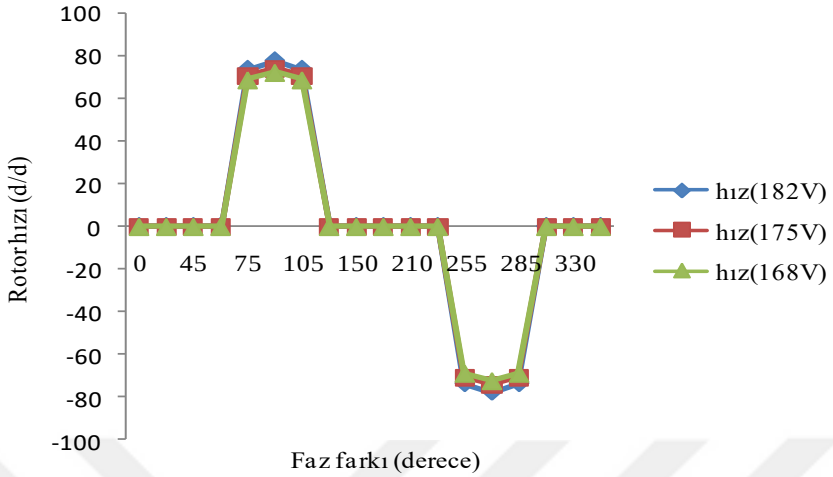
Çizelge 5.6. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz sabit tutulduğunda, faz farkı 0^0 ile 90^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirildiğinde rotor hızındaki değişim verileri

Fazfarkı (^{0})	0-30-45-60	75	90	105	120-150-180-210-240	255	270	285	300-330-360
hız(182V)	0	31	33	31	0	-31	-33	-31	0
hız(175V)	0	23	26	23	0	-23	-26	-23	0
hız(168V)	0	20	23	20	0	-20	-23	-20	0

Farklı gerilimlerden elde edilen eğrilerde düşük frekanslardaki hız farkı, yüksek frekanslardaki hız farkından daha azdır. Buna ek olarak düşük frekans değerlerinde, motor sürtünme momentini yenebilecek moment üretemediğinden bu uygulama alanı kısıtlıdır. Şekil 5.24 ve Şekil 5.25'de uygulanan gerilimin faz farkı ile rotor hızının sinüsoidala benzer bir değişim gösterdiği gözlenmiştir.



Şekil 5.24. Uygulanan gerilimin frekansı 42,37 kHz sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 90^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi



Şekil 5.25. Uygulanan gerilimin frekansı 41,15 kHz sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 90^0, gerilimin genliği 182V ile 168V aralıklarında değiştirilerek rotor hızındaki değişimi

5.4. Üç Modlu Çalışma Yüklü Durumdaki Motor Sonuçları

Bu kısımda motor yüklü iken deneysel sonuçlar sunulmaktadır.

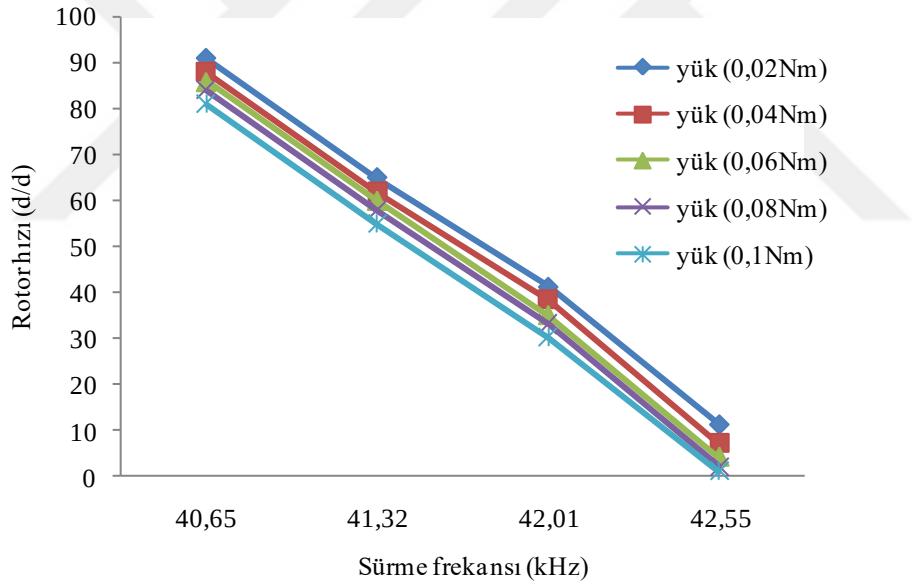
5.4.1. Frekansla hız değişimi-Motor yüklü

Bu deneyde USM'un hızı farklı yük değerleri altında sürme frekansı değiştirilerek yapılmıştır. Çizelge 5.7'de, 0,02Nm, 0,04Nm 0,06Nm 0,08Nm ve 0,1Nm yük durumlarında sürme frekansı 40,65 kHz ile 42,55 kHz arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişim verileri verilmiştir.

Çizelge 5.7. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, frekansı 42,55 kHz ile 40,65 kHz arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri

Yük	Frekans(kHz)	40,65	41,32	42,01	42,55
0,02Nm	hız(d/d)	91	65	41,1	11,12
0,04Nm	hız(d/d)	88	62	38,3	7
0,06Nm	hız(d/d)	86	60	35	4
0,08Nm	hız(d/d)	84	58	33	2
0,1Nm	hız(d/d)	81	55	30	1

Şekil 5.26'da uygulanan gerilimin frekansı ile rotor hızının ters orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. 0,02Nm yük durumunda uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, frekansı 42,55 kHz'de USM' un hızı 91 d/d olarak ölçülmüştür. 0,04Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında motorun hızı 88 d/d olarak ölçülmüştür. 0,06Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında 86 d/d olarak ölçülmüştür. 0,08Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında motorun hızı 84 d/d olarak ölçülmüştür. 0,1Nm yük durumunda ise aynı deney koşulları altında motorun hızı 81 d/d olarak ölçülmüştür. Aynı deney koşulları altında USM'un miline bağlı olan yükün momenti artıkça motor hızının karakteristiğinin aşağı doğru kaydığı gözlenmiştir.



Şekil 5.26. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, frekansı 42,55 kHz ile 40,65 kHz arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim

USM'un hızı; yük, stator ile rotor arasındaki baskı kuvveti, sıcaklık gibi parametrelerle de değişmektedir. Bu parametrelerdeki değişimler göz önüne alınarak deneyler gerçekleştirilmiştir.

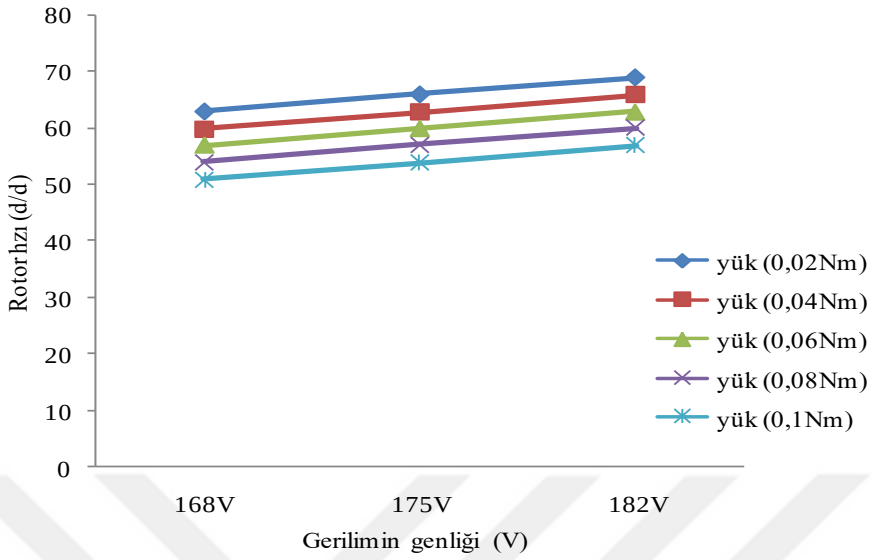
5.4.2. Gerilim ile hız değişimi-Motor yüklü

Bu deneyde, USM'un hızı farklı yük değerleri altında uygulanan gerilimin genliği değiştirilerek yapılmıştır. Çizelge 5.8'de 0,02Nm, 0,04Nm 0,06Nm 0,08Nm ve 0,1Nm yük durumlarında gerilimin genliği 182V ile 168V arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişim verilmiştir.

Çizelge 5.8. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, sürme frekansı 41,32 kHz sabit tutularak, gerilimin genliği 168V kHz ile 182V arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri

Yük	Gerilimin genliği(V)	168V	175V	182V
0,02Nm	hız(d/d)	63	66	69
0,04Nm	hız(d/d)	60	63	66
0,06Nm	hız(d/d)	57	60	63
0,08Nm	hız(d/d)	54	57	60
0,1Nm	hız(d/d)	51	54	57

Şekil 5.27'de uygulanan gerilim ile rotor hızının doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. 0,02Nm yük durumunda uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, gerilimin frekansı 41,32 kHz'de sabit tutularak, gerilim 175V, USM' un hızı 66 d/d olarak ölçülmüştür. 0,04Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında motorun hızı 63 d/d olarak ölçülmüştür. 0,06Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında motor hızı 60 d/d olarak ölçülmüştür. 0,08Nm yük durumunda aynı deney koşulları altında motorun hızı 54 d/d olarak ölçülmüştür. 0,1Nm yük durumunda ise aynı deney koşulları altında motorun hızı 51 d/d olarak ölçülmüştür. Aynı deney koşulları altında USM'un miline bağlı olan yük artıkça motor hız karakteristiğinin aşağı doğru kaydığı bu deney sonuçları ile gözlenmiştir. USM'un 168V' un altındaki gerilim değerlerinde, rotor ile stator arasındaki sürtünme momentini ve yük momentinin toplamını yenebilecek döndürme kuvveti üretemediği gözlenmiştir. Aynı zaman da motor yüklü iken yüksek frekans (düşük devir) durumunda gerilim ile hız değişiminin doğrusal bir çalışma alanı olmadığı bu deneyle belirlenmiştir.



Şekil 5.27. Uygulanan gerilimin faz farkı 90^0, sürme frekansı 41,32 kHz sabit tutularak, gerilimin genliği 168V ile 182V arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim

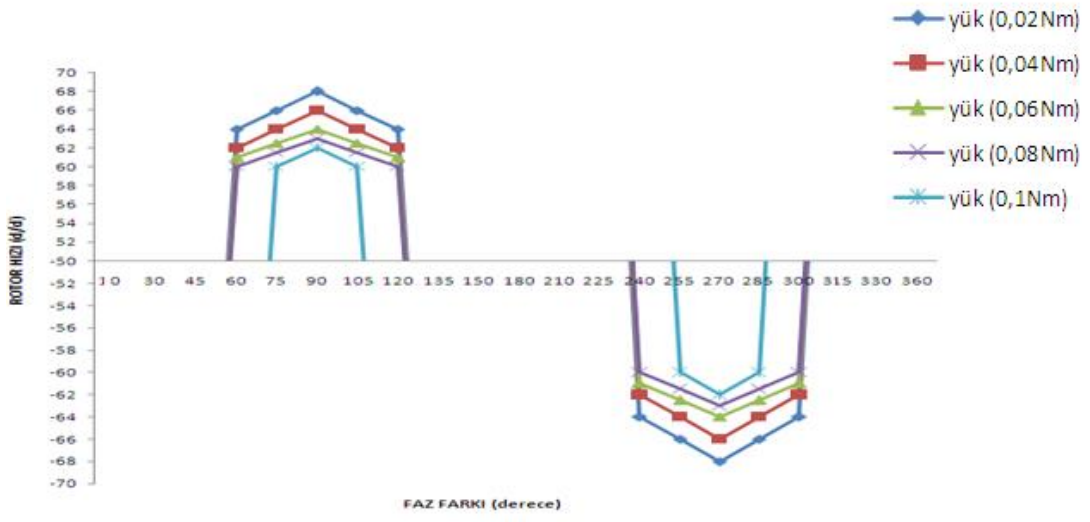
5.4.3. Gerilimin faz farkı ile hız değişimi-Motor yüklü

Bu deneyde, USM'un hızı farklı yük değerleri altında uygulanan gerilimin faz farkı değiştirilerek yapılmıştır. Çizelge 5.8'de 0,02Nm, 0,04Nm 0,06Nm 0,08Nm ve 0,1Nm yük durumlarında gerilimin faz farkı 0^0 ile 90^0 arasında değiştirilerek rotor hızındaki değişim verilmiştir.

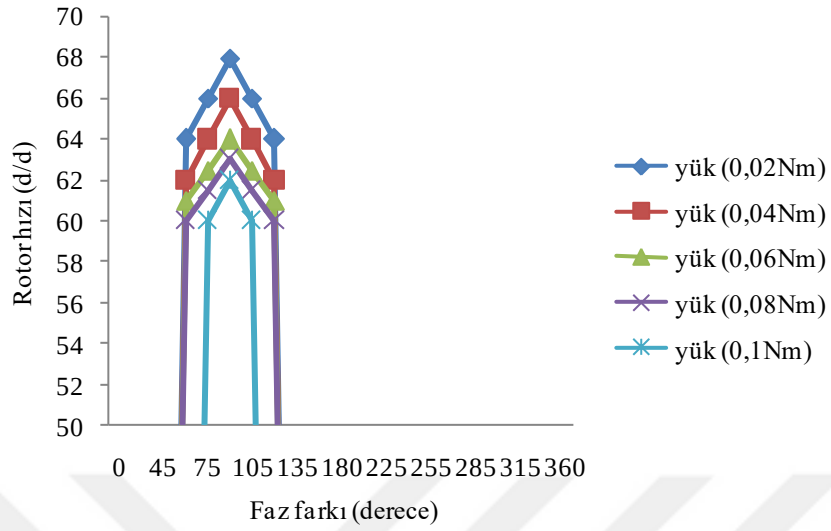
Çizelge 5.9 Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişimin verileri

Yük	Fazfarkı (^{0})	0-30-45	60	75	90	105	120	150-165-180-210-225	240	255	270	285	300	330-360
0,02Nm	hız(d/d)	0	64	66	68	66	64	0	-64	-66	-68	-66	-64	0
0,04Nm	hız(d/d)	0	62	64	66	64	62	0	-62	-64	-66	-64	-62	0
0,06Nm	hız(d/d)	0	61	62,5	64	62,5	61	0	-61	-62,5	-64	-62,5	-61	0
0,08Nm	hız(d/d)	0	60	61,5	63	61,5	60	0	-60	-61,5	-63	-61,5	-60	0
0,1Nm	hız(d/d)	0	0	60	62	60	0	0	0	-60	-62	-60	0	0

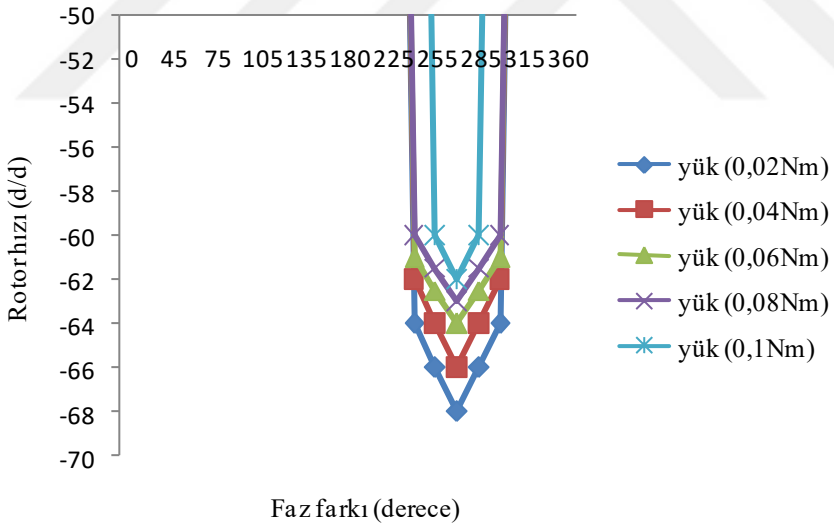
Şekil 5.28, Şekil 5.29 ve Şekil 5.30'da uygulanan gerilimin faz farkı ile rotor hızının doğru orantılı olarak değiştiği gözlenmiştir. 0,02Nm yük durumunda uygulanan gerilimin genliği, gerilimin frekansı 41,32 kHz'de sabit tutularak, gerilimlerin faz farkı 90^0 iken USM'un hızı 68 d/d olarak ölçülmüştür. 0,04Nm yük durumunda, aynı deney koşulları altında, motorun hızı 66 d/d olarak ölçülmüştür. 0,06Nm yük durumunda, aynı deney koşulları altında, motorun hızı 64 d/d olarak ölçülmüştür. 0,08Nm yük durumunda, aynı deney koşulları altında, motorun hızı 63 d/d olarak ölçülmüştür. 0,1Nm yük durumunda ise aynı deney koşulları altında motorun hızı 62 d/d olarak ölçülmüştür. Aynı deney koşulları altında USM'un miline bağlı olan yükün momenti artıkça motor hızının doğrusal olarak azaldığı bu deney sonuçları ile gözlenmiştir. USM'un 0^0 ile 60^0 arasındaki değerlerde, rotor ile stator arasındaki sürtünme momentini ve yük momentinin toplamını yenebilecek döndürme kuvveti üretemediği gözlenmiştir. Aynı zamanda yüklü ve düşük frekans (yüksek devir) durumunda, gerilimlerin faz farkı ile hız değişiminin doğrusal olmadığı bu deneyle belirlenmiştir.



Şekil 5.28. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim



Şekil 5.29. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 0^0 ile 180^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim

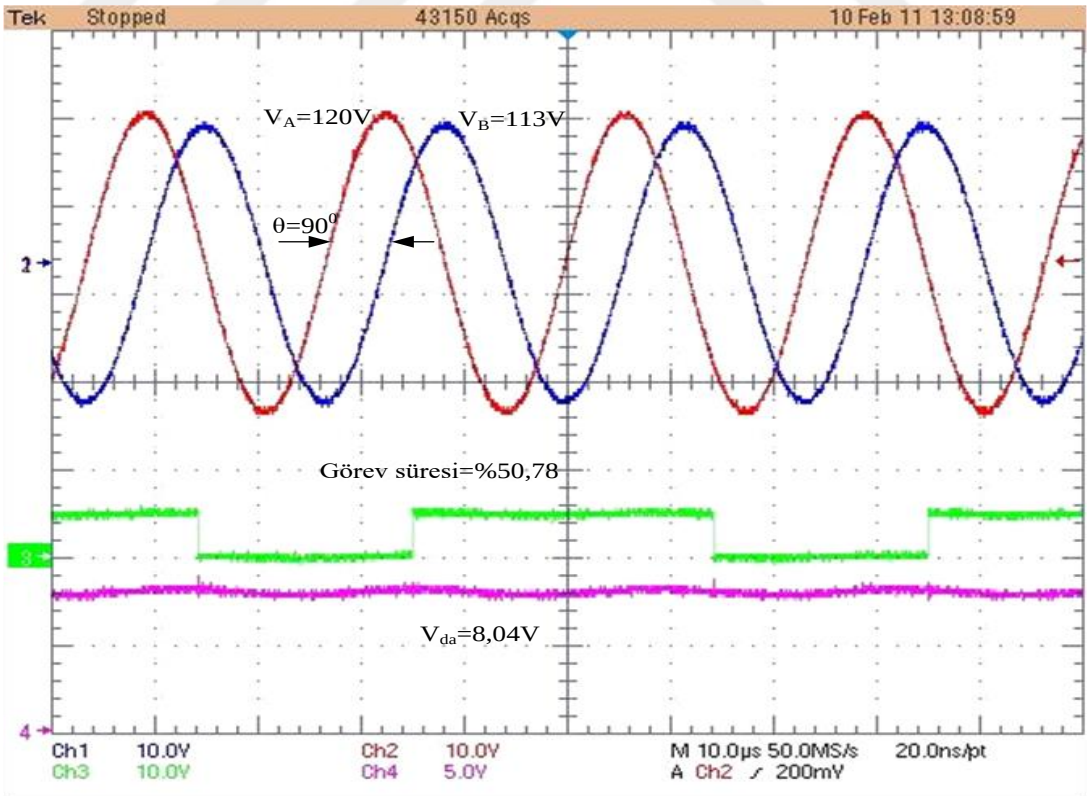


Şekil 5.30. Uygulanan gerilimin sürme frekansı 41,32 kHz, gerilimin genliği 175V sabit tutularak, faz farkı 180^0 ile 360^0 arasındaki değerlerde farklı yük durumlarında rotor hızındaki değişim

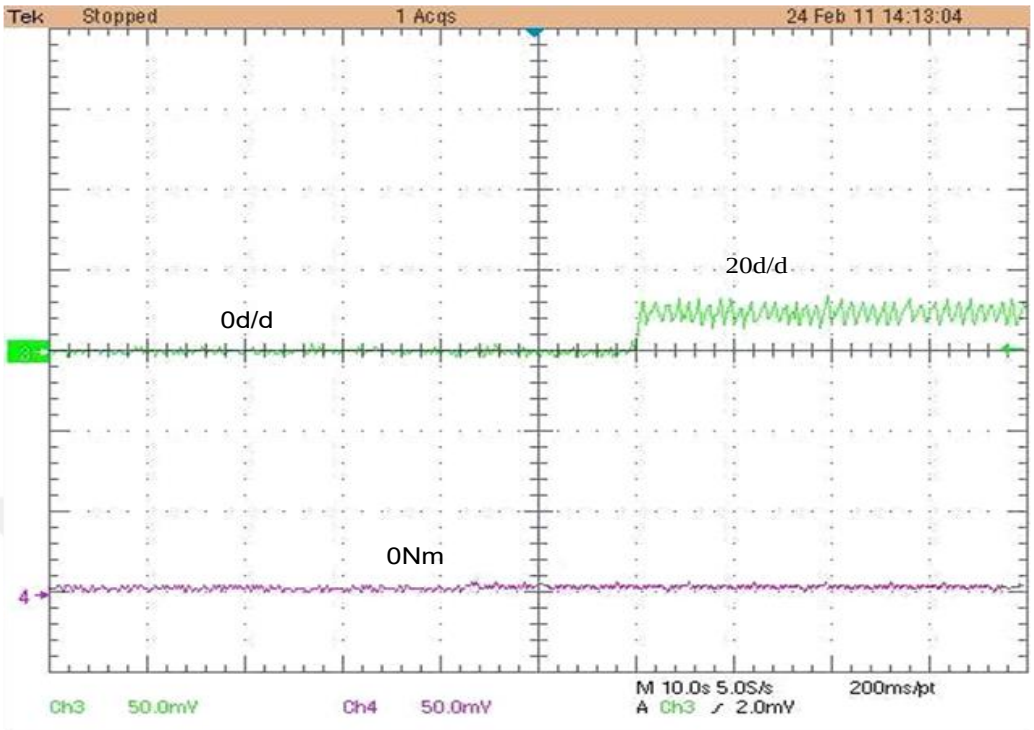
5.5. Üç Modlu Çalışmada Hız Denetimi

Benzetim çalışmalarını doğrulamak amacıyla bu deney çalışmaları yapılmıştır. Şekil 5.1'de verilen deney düzeneği hazırlanmıştır. Rotor hızına etki eden üç faktör dikkat edilerek, deneyler titizlikle yapılmıştır. Uygulanan gerilimlerin frekansı, faz farkı ve genlikleri değiştirilerek hız denetimi yapılabileceği gösterilmiştir. Bu deneyde, hız değişim aralığı en geniş olan frekans yöntemi öncelikli olarak tercih edilmiştir.

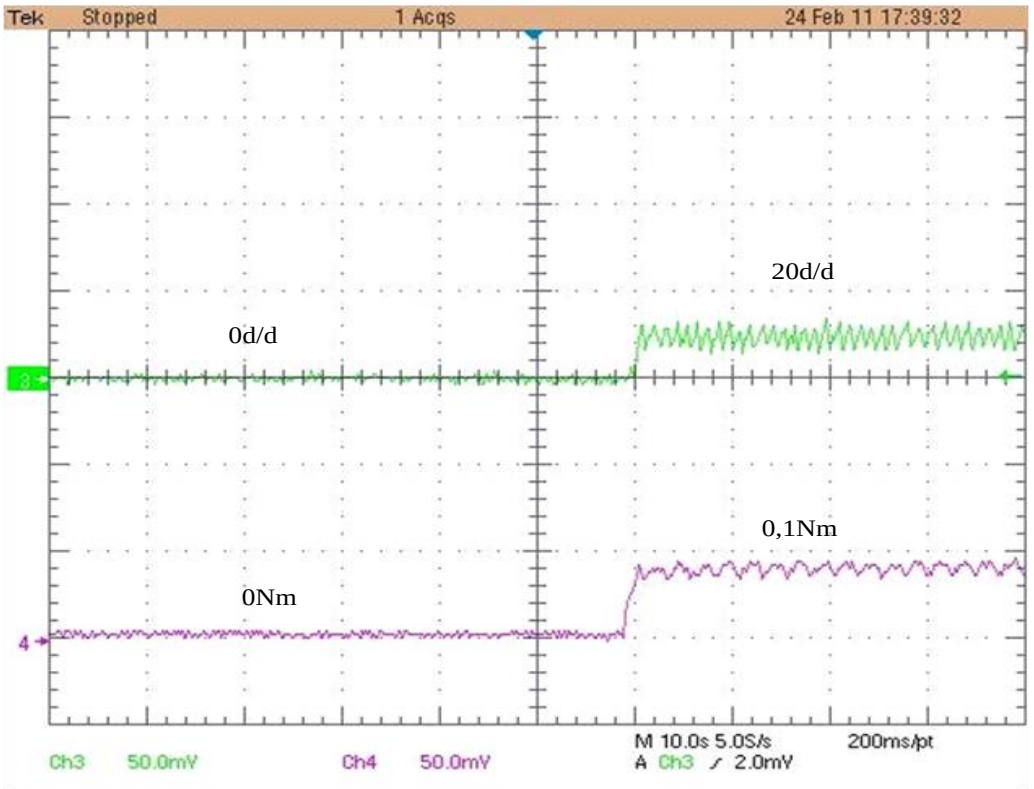
Şekil 5.31'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin 120V ve 113V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,04 volttur. Şekil 5.32 ve Şekil 5.33'de USM'un 20 d/d referans hız değerinde ve farklı yük durumlarındaki hız eğrileri görülmektedir. Hem yüklü hem de yüksüz durumda, USM'un girilen hız değerine en kısa zamanda ulaştığı ve mükemmel bir şekilde referans hız değerini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 5.31. USM'un iki-faz eğrileri (20d/d)

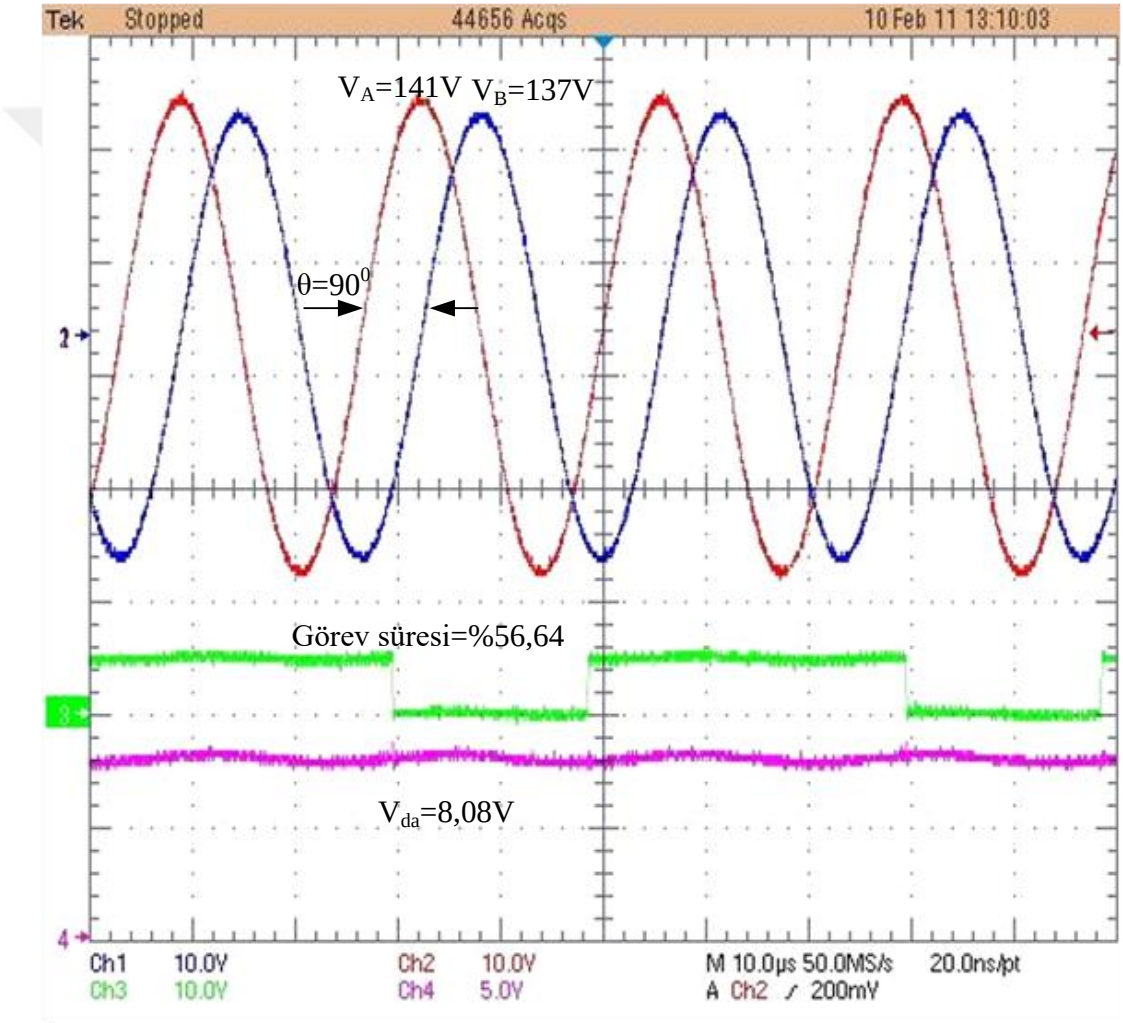


Şekil 5.32. USM'un yüksüz durumda hız eğrisi (20d/d)

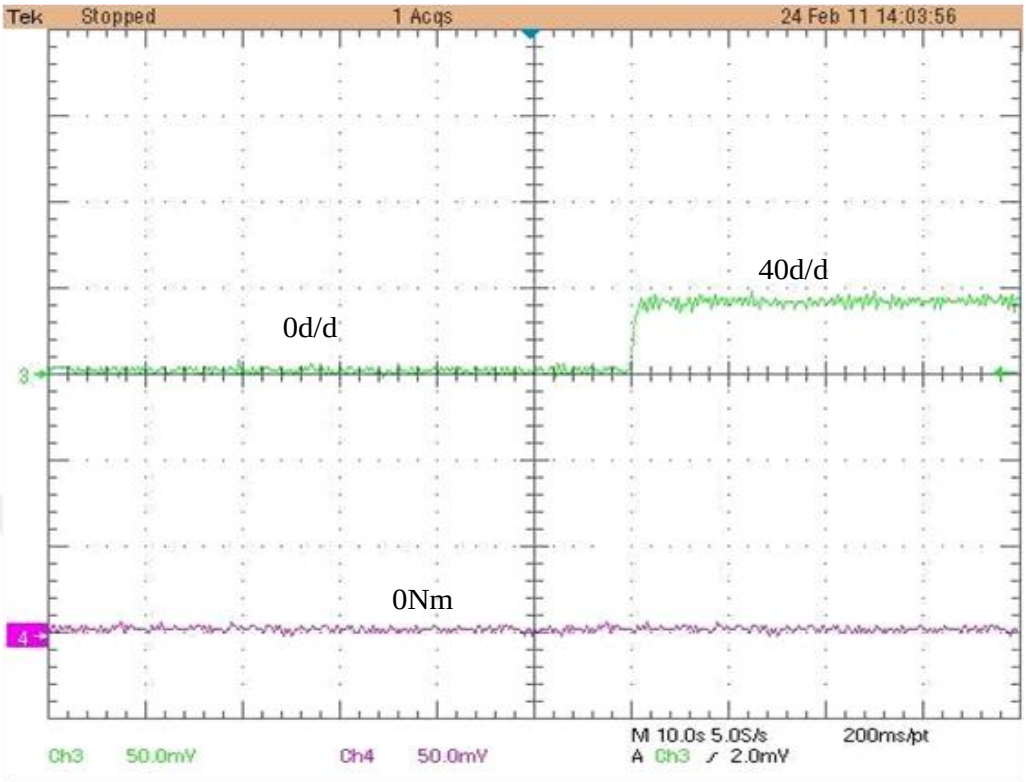


Şekil 5.33. USM'un 0,1Nm yüklü durumda hız eğrisi (20d/d)

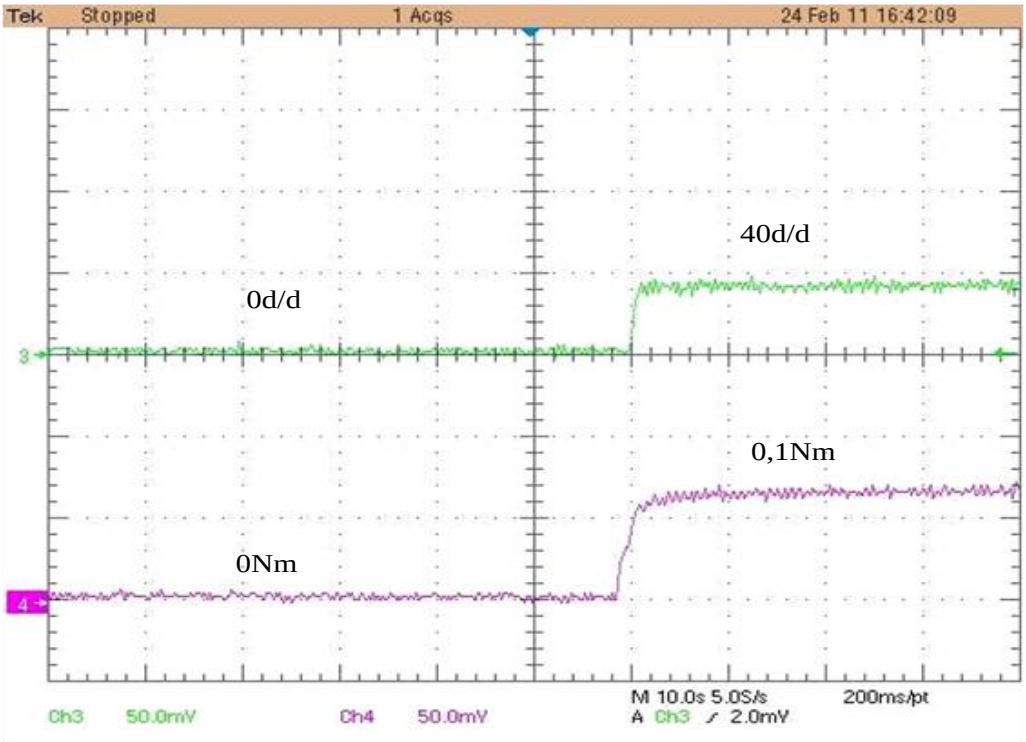
Şekil 5.34'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin 141V ve 137V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur. Şekil 5.35 ve Şekil 5.36'da USM'un 40 d/d referans hız değerinde farklı yük durumlarındaki hız eğrileri görülmektedir. Hem yüklü hem de yüksüz durumda USM'un referans hız değerine en kısa zamanda ulaştığı ve mükemmel bir şekilde referans hız değerini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 5.34. USM'un iki-faz eğrileri (40d/d)

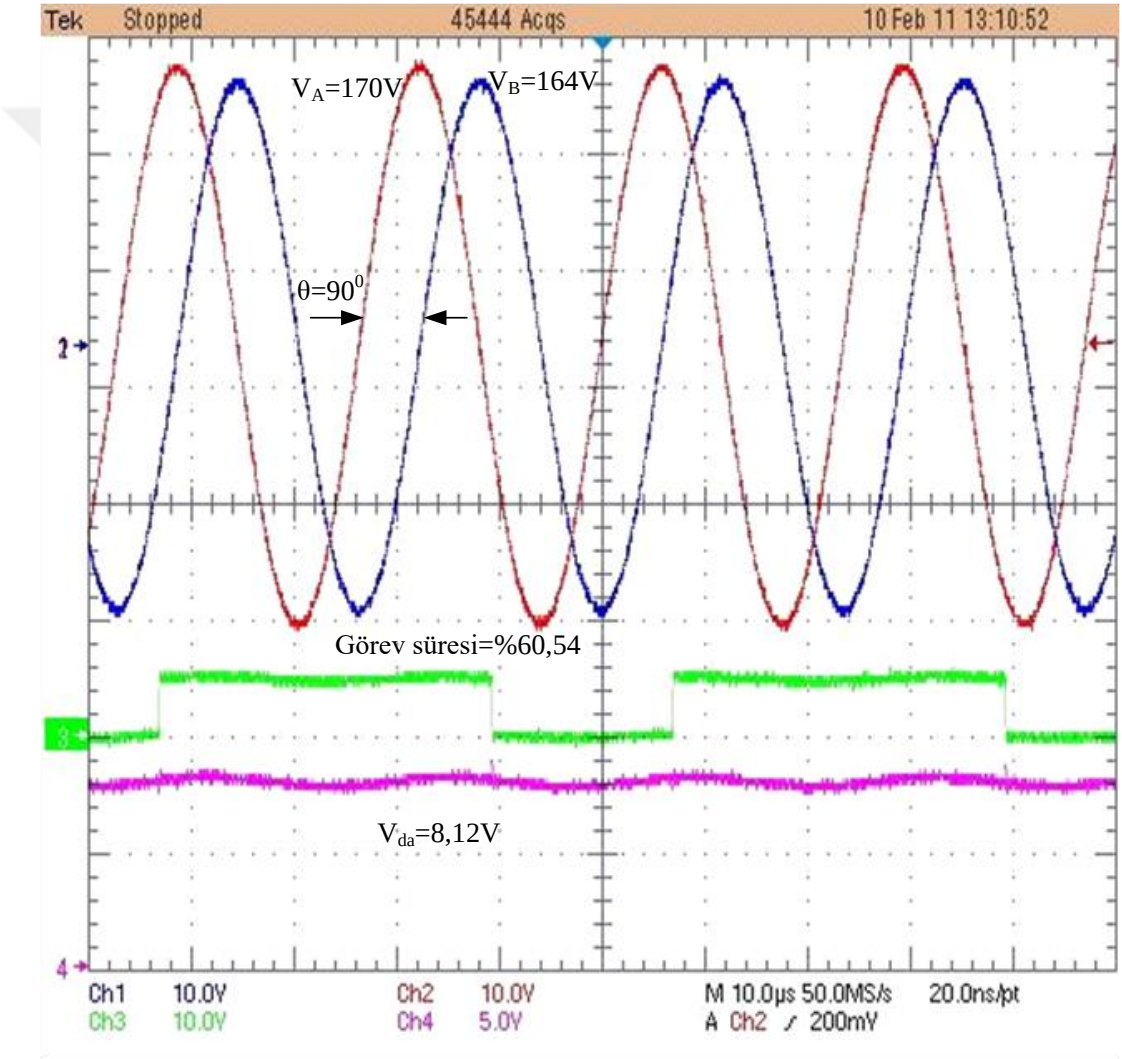


Şekil 5.35. USM'un motor yüksüz durumda hız eğrisi (40d/d)

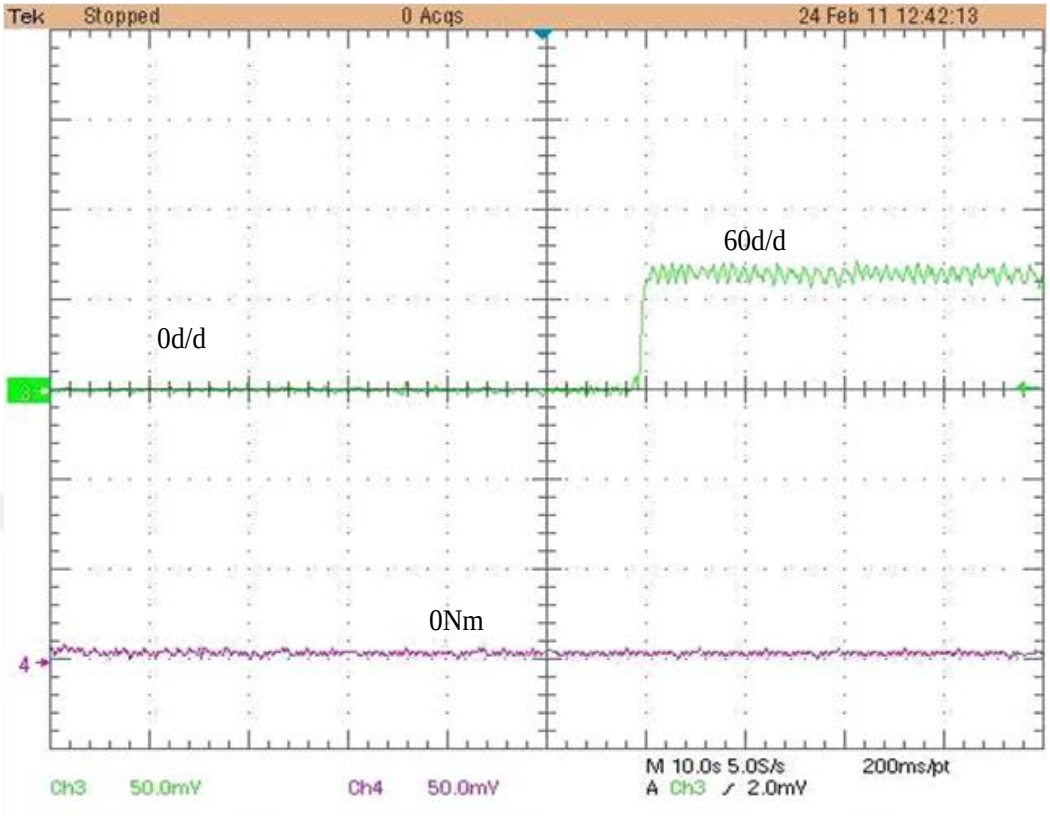


Şekil 5.36. USM'un 0,1Nm yüklü durumda hız eğrisi (40d/d)

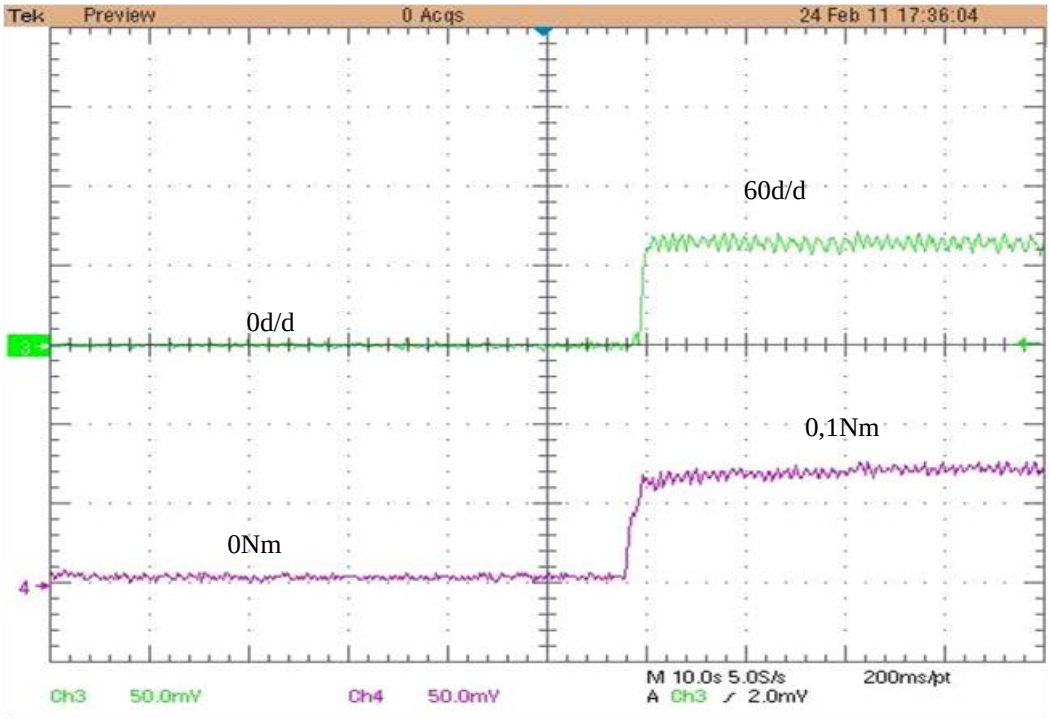
Şekil 5.37'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin 170V ve 164V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %60,54'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,12 volttur. Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'da USM'un 60 d/d referans hız değerinde farklı yük durumlarındaki hız eğrileri görülmektedir. Hem yüklü hem de yüksüz durumda USM'un girilen hız değerine en kısa zamanda ulaştığı ve mükemmel bir şekilde referans hız değerini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 5.37. USM'un iki-faz eğrileri (60d/d)

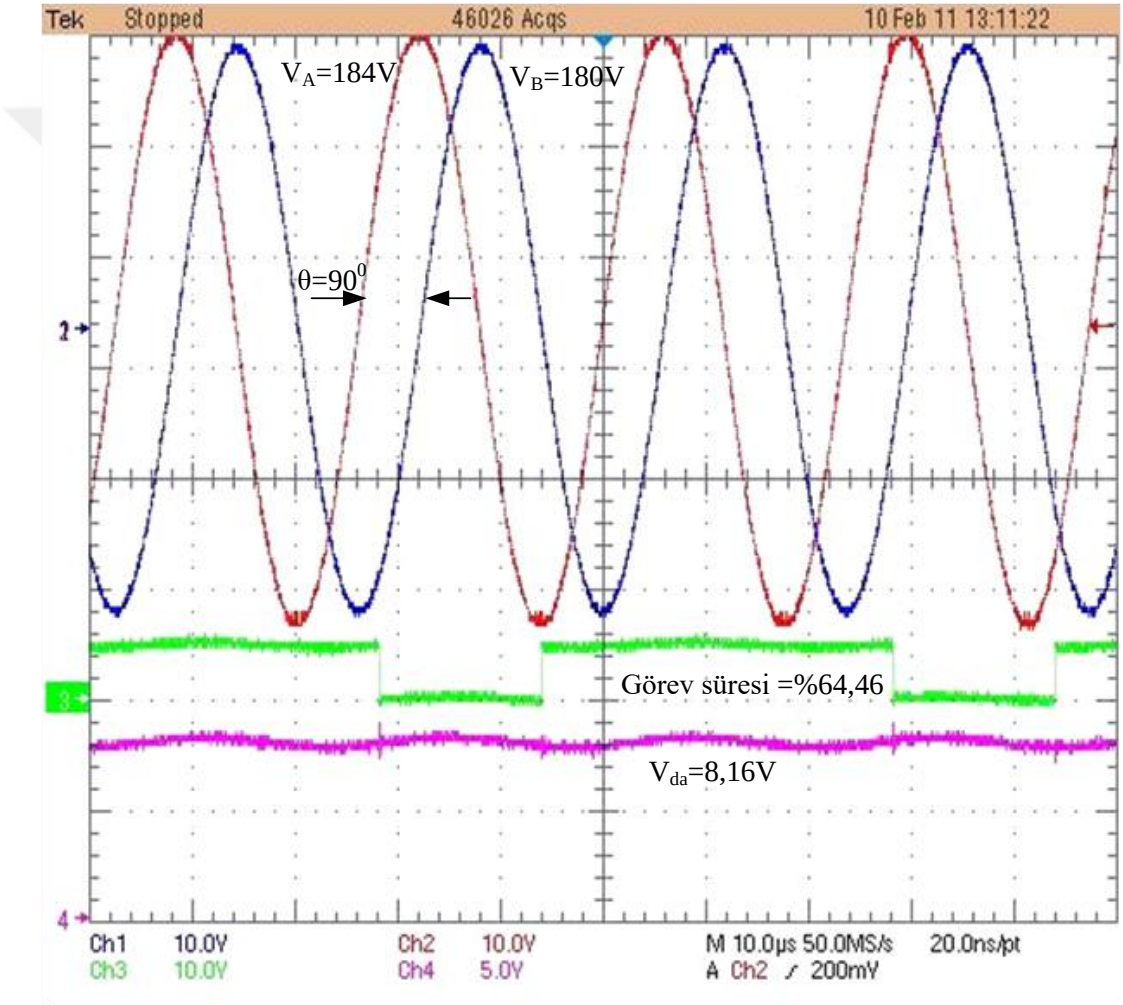


Şekil 5.38. USM'un yüksüz durumda hız eğrisi (60d/d)

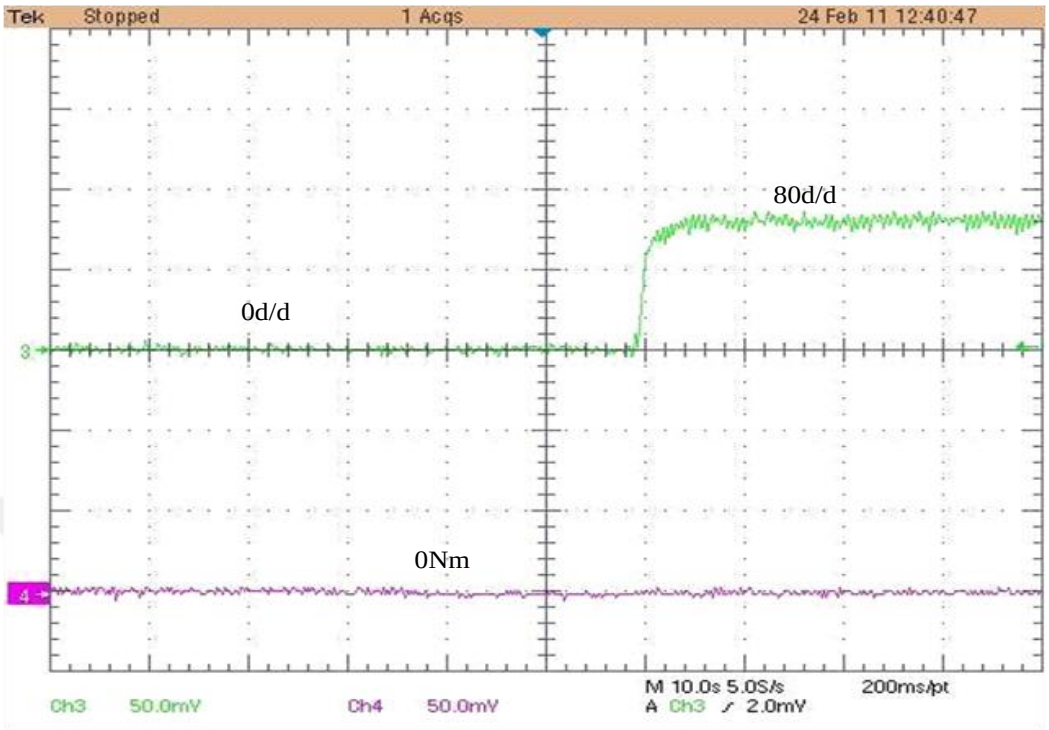


Şekil 5.39. USM'un 0,1Nm yüklü durumda hız eğrisi (60d/d)

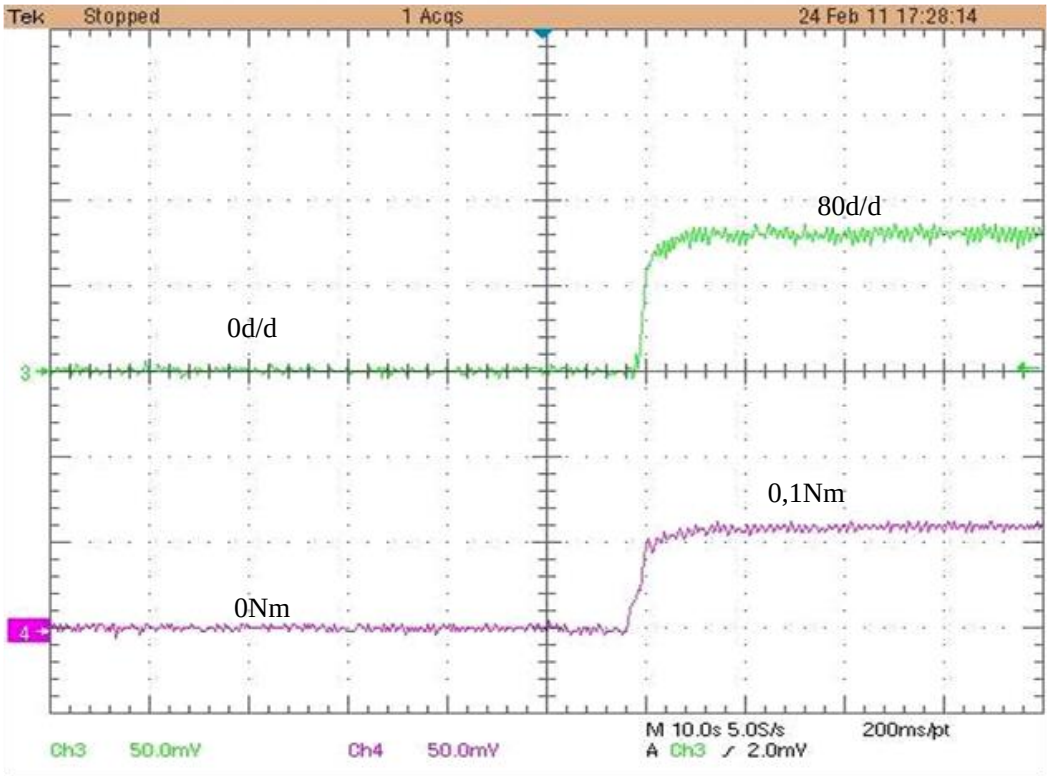
Şekil 5.40'da motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin 184V ve 180V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %64,46'dır. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,16 volttur. Şekil 5.41 ve Şekil 5.42'de USM'un 80 d/d referans hız değerinde iken, farklı yük durumlarındaki hız eğrileri görülmektedir. Hem yüklü hem de yüksüz durumda USM'un girilen hız değerine en kısa zamanda ulaştığı ve mükemmel bir şekilde referans hız değerini takip ettiği görülmektedir.



Şekil 5.40. USM'un iki-faz eğrileri (80d/d)

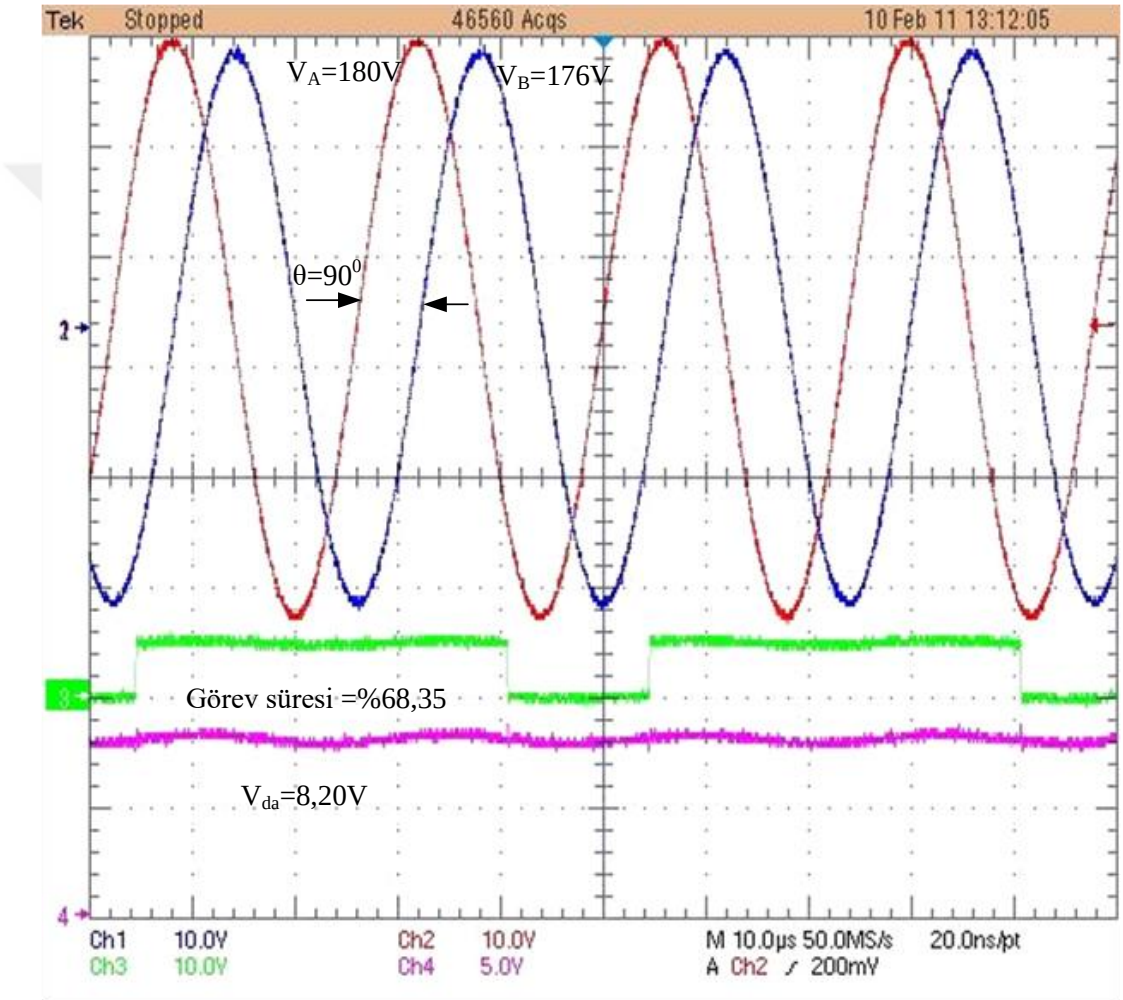


Şekil 5.41. USM'un yüksüz durumdaki hız eğrisi (80d/d)

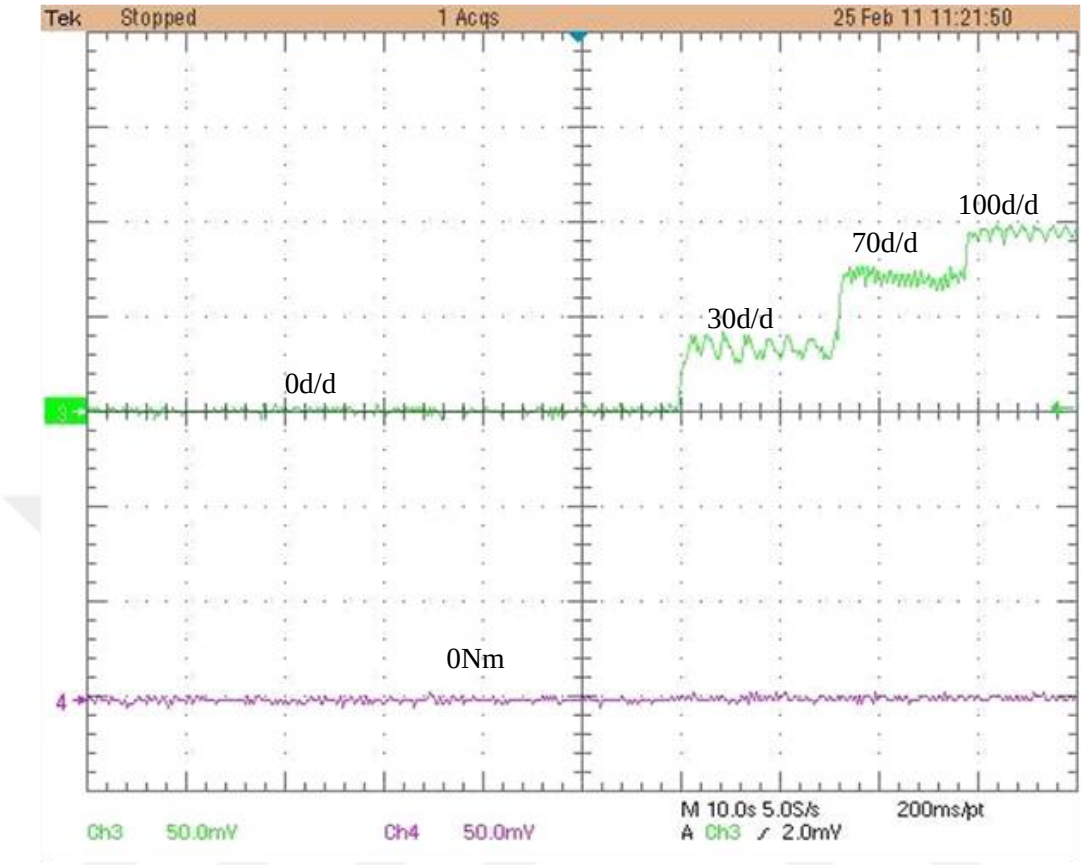


Şekil 5.42. USM'un 0,1Nm yüklü durumdaki hız eğrisi(80d/d)

Şekil 5.43'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin 180V ve 176V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %68,35'tir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,20 volttur. Şekil 5.44'de USM'un kademeli hız eğrisi görülmektedir. Kademeli referans hız değerlerine kısa zamanda ulaşmakta ve düzgün bir şekilde referans hız değerlerini takip ettiği görülmektedir.

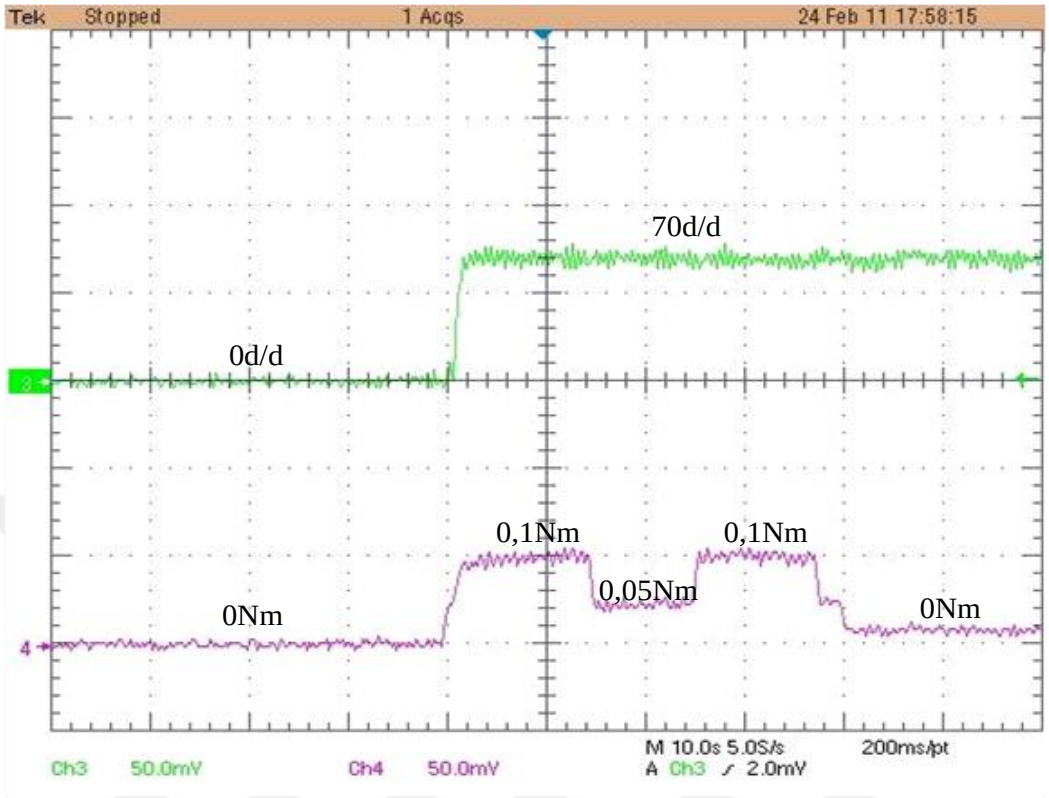


Şekil 5.43. USM'un iki-faz eğrileri (100d/d)

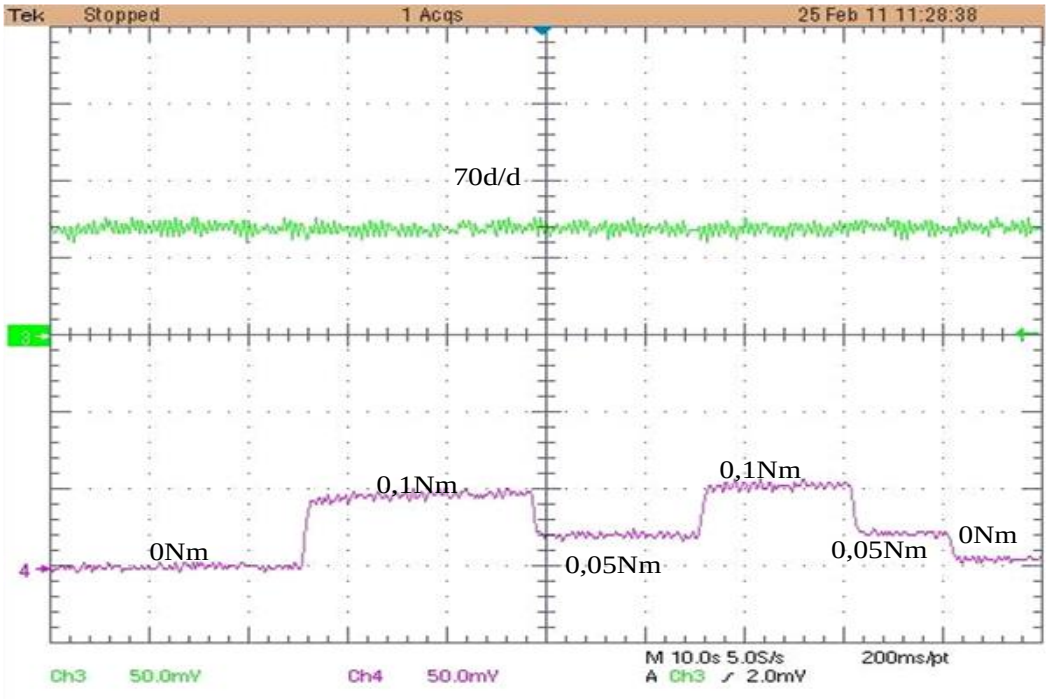


Şekil 5.44. USM'un kademeli hız eğrisi (30-70-100d/d)

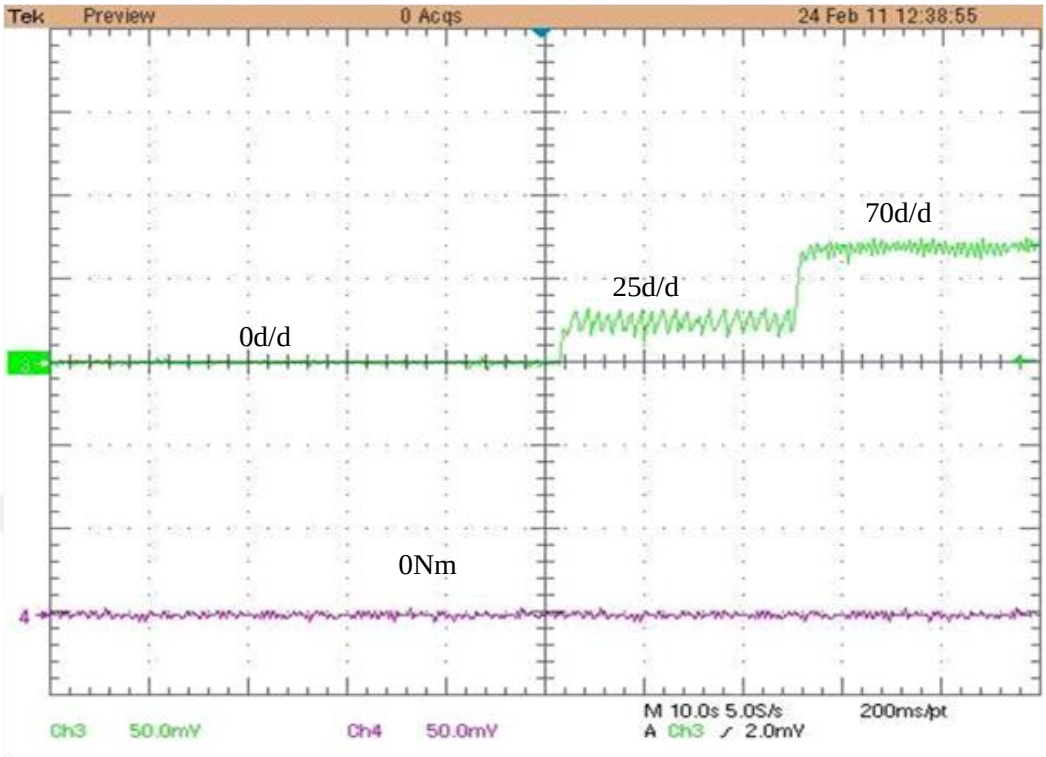
Şekil 5.45 ve Şekil 5.46'da USM'un 70 d/d hız referansında farklı yük koşullarındaki hız tepkisi verilmiştir. Şekil 5.47 ve Şekil 5.48'de USM'un 25-70 d/d kademeli hız referanslarında yüksüz ve yüklü çalışma tepkileri verilmiştir. Şekillerden görüleceği gibi, motor verilen hız referans değerlerini yüksüz ve yüklü durumlarda çok düzgün şekilde takip ettiği görülmektedir.



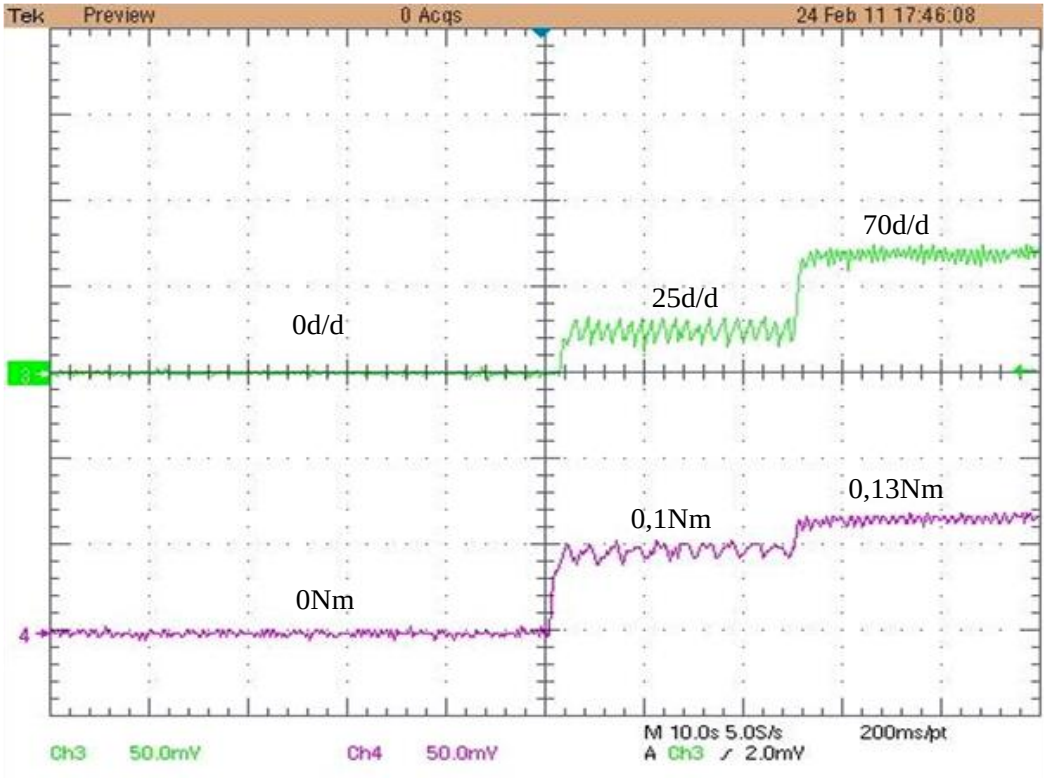
Şekil 5.45. Farklı yük durumlarında USM'un hız eğrisi (70d/d)



Şekil 5.46. Sürekli çalışma durumunda USM'un değişken yük altındaki hız eğrisi (70d/d)

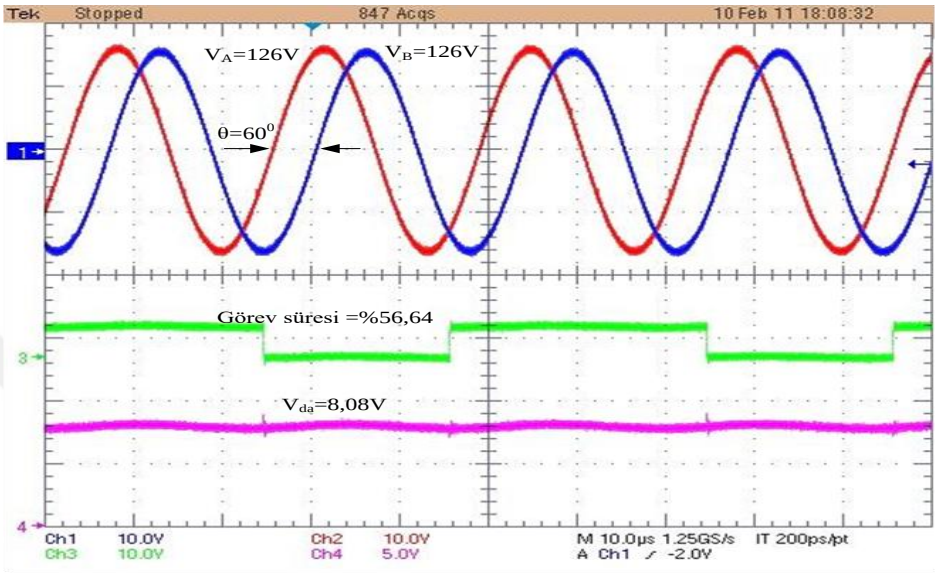


Şekil 5.47. USM'un yüksüz durumda kademeli hız eğrileri (25-70d/d)



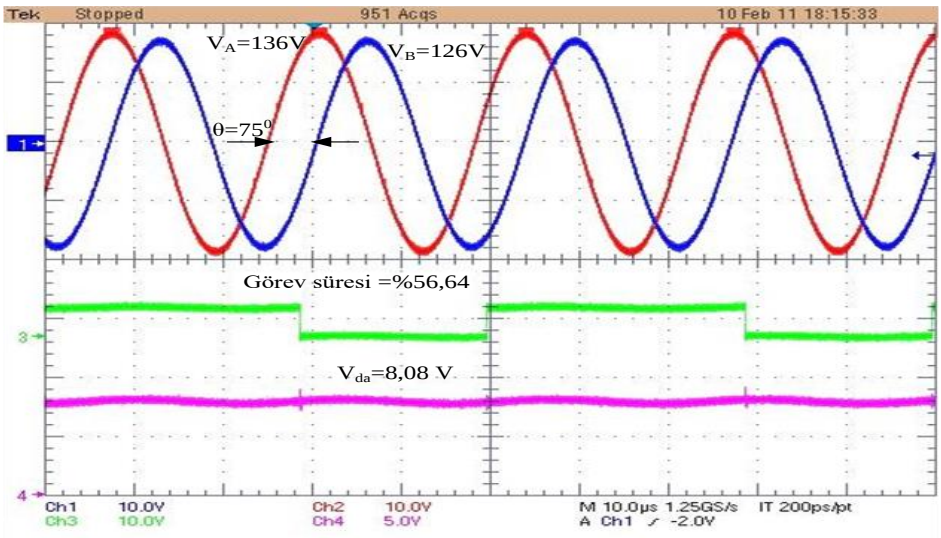
Şekil 5.48. USM'un farklı yük durumlarında kademeli hız eğrisi (25-70d/d)

Şekil 5.49'da motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 126V ve B-faz 126V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 60^0'dir.



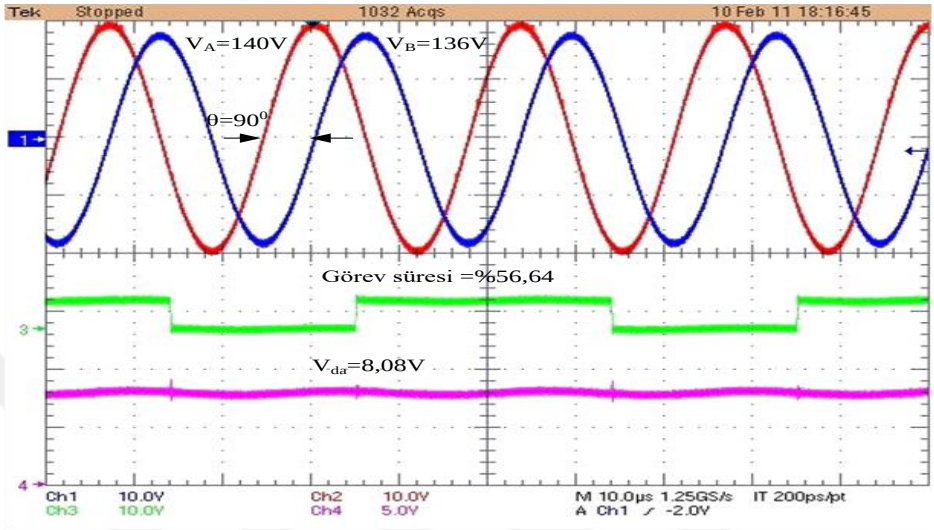
Şekil 5.49. USM'un faz farkı eğrisi (60^0)

Şekil 5.50'de A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 75^0'dir. Motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 136V ve B-faz 126V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur.



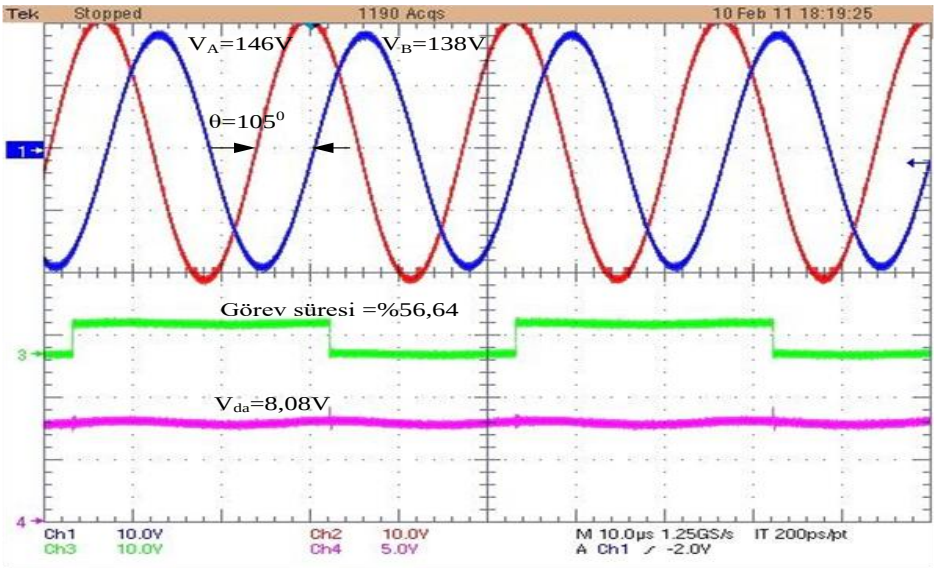
Şekil 5.50. USM'un faz farkı eğrisi (75^0)

Şekil 5.51'de görüldüğü üzere faz farkı 90^0 olarak girildiğinde, A-fazı geliminin 140V ve B-fazı geriliminin 136V olduğu gözlenmiştir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur



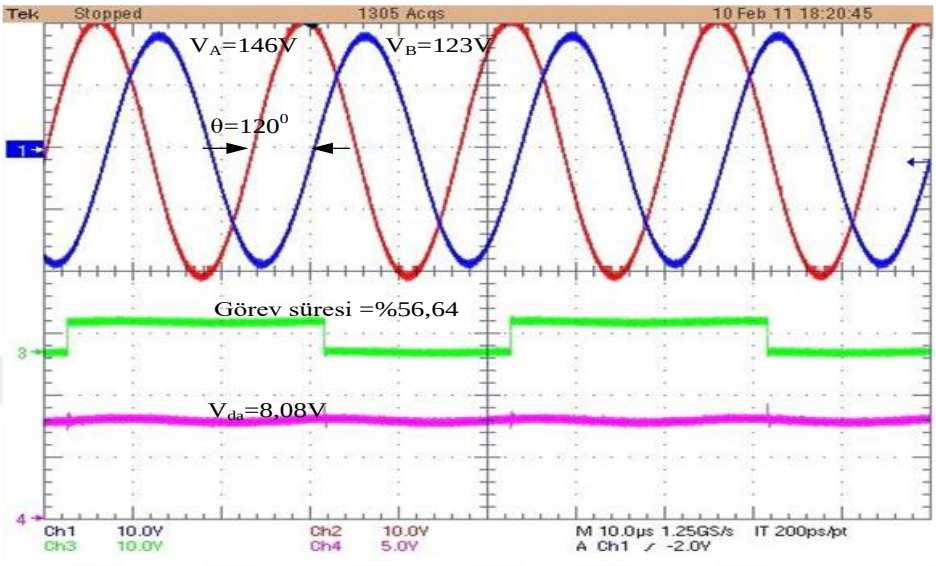
Şekil 5.51. USM'un faz farkı eğrisi (90^0)

Şekil 5.52'de görüldüğü üzere faz farkı 105^0 olarak girildiğinde, A-fazı geliminin 146V ve B-fazı geriliminin 138V olduğu gözlenmiştir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur



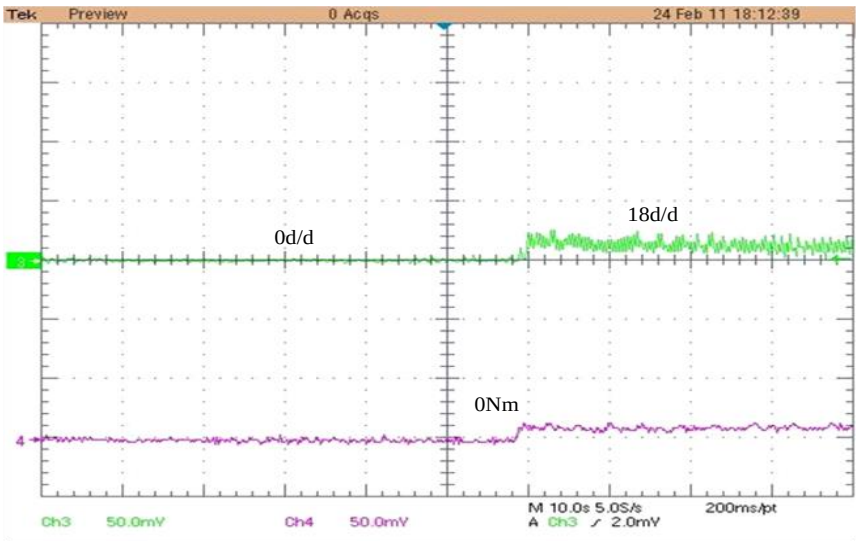
Şekil 5.52. USM'un faz farkı eğrisi (105^0)

Şekil 5.53'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 146V ve B-faz 123V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %56,64'tür. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,08 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 120^0'dir.



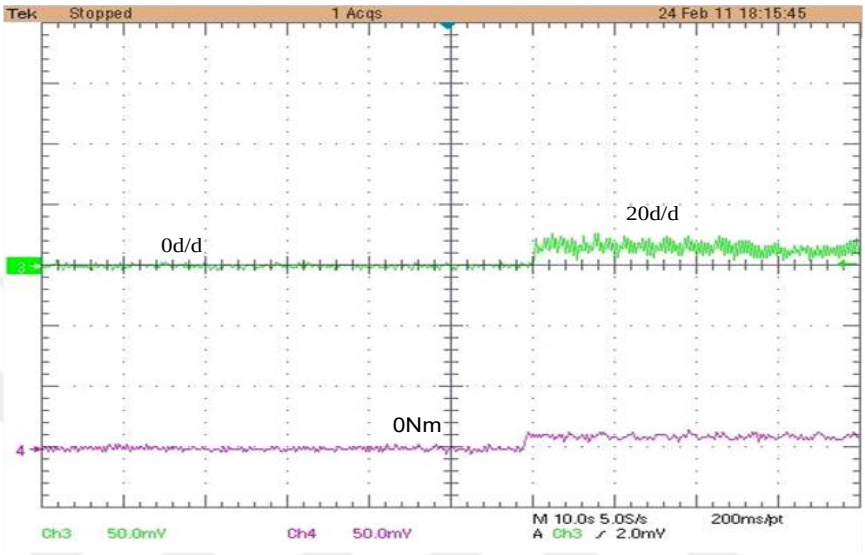
Şekil 5.53. USM'un faz farkı eğrisi (120^0)

Şekil 5.54'de USM'un 18 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 60^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



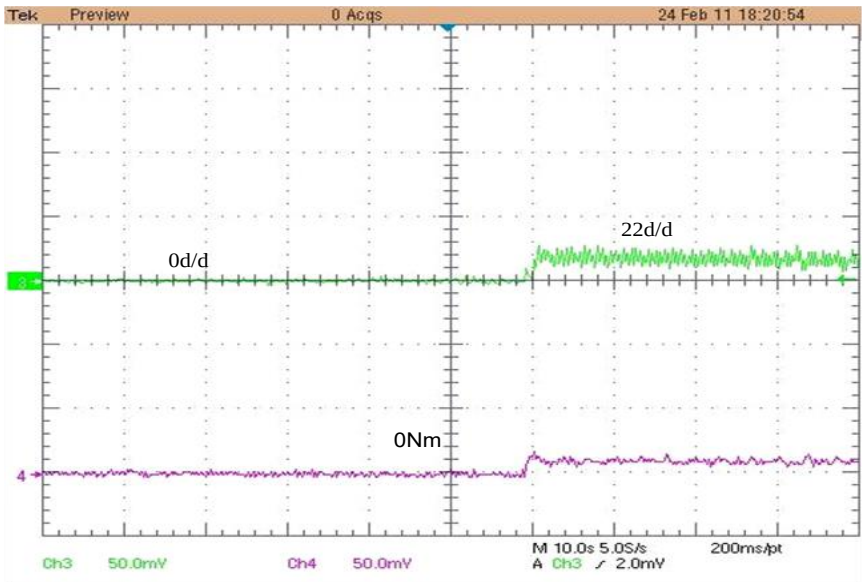
Şekil 5.54. USM'un faz farkı hız eğrisi (60^0)

Şekil 5.55'de USM'un 20 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 75^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



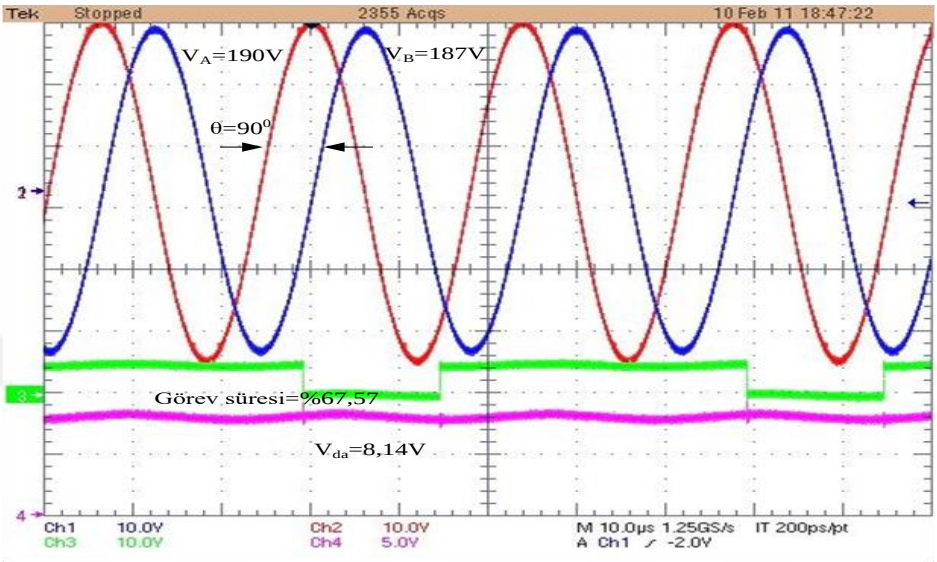
Şekil 5.55. USM'un faz farkı değiştirilerek elde edilen hız eğrileri (75^0)

Şekil 5.56'da USM'un 22 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 90^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



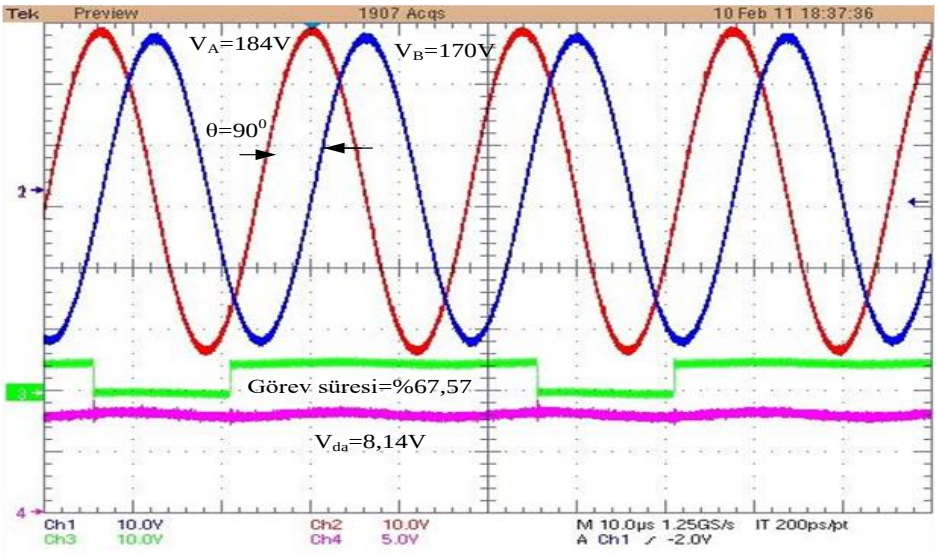
Şekil 5.56. USM'un faz farkı değiştirilerek elde edilen hız eğrileri (90^0)

Şekil 5.57'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 190V ve B-faz 187V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %67,57'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,14 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



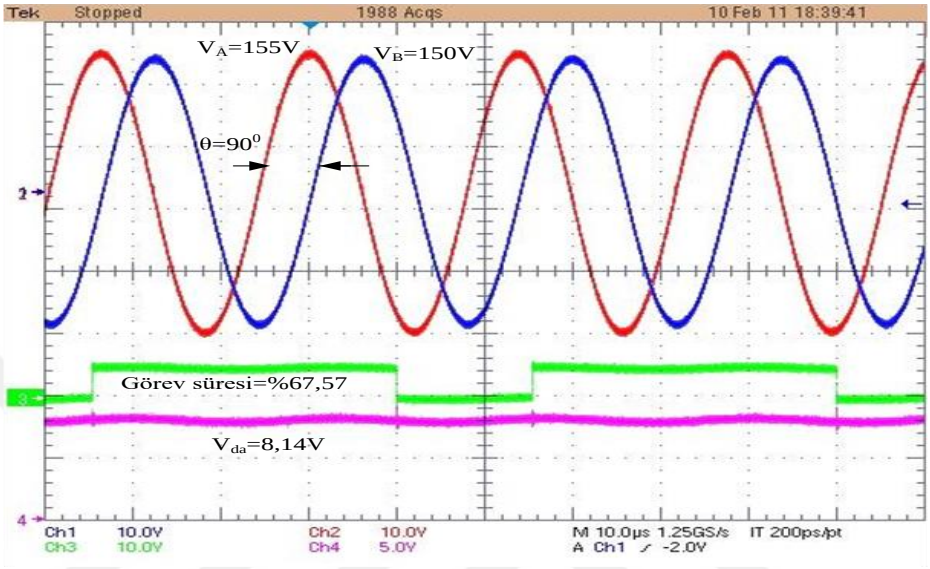
Şekil 5.57. USM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (190V)

Şekil 5.58'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 184V ve B-faz 170V olduğu gözlenmektedir. DGM'nin görev süresi %67,57'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,14 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



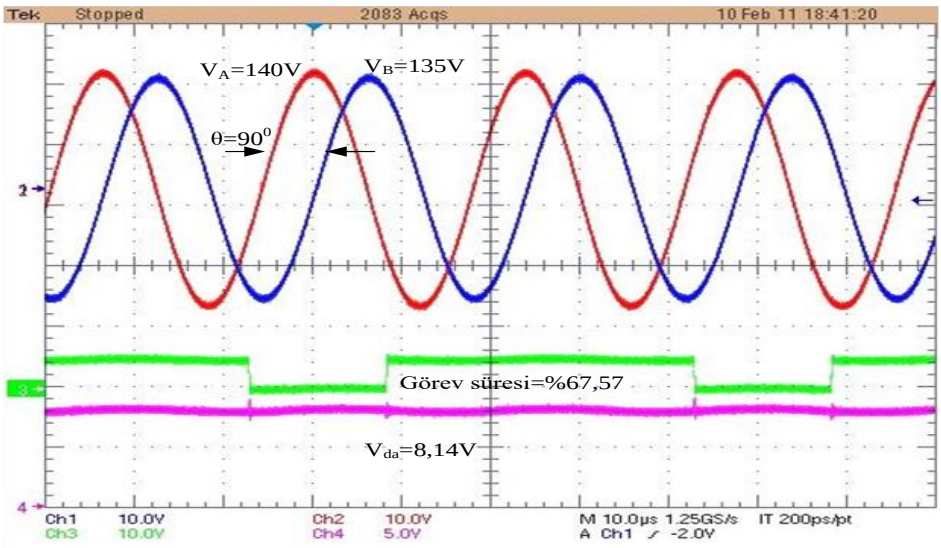
Şekil 5.58. USM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (184V)

Şekil 5.59'da motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 155V ve B-faz 150V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %67,57'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,14 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



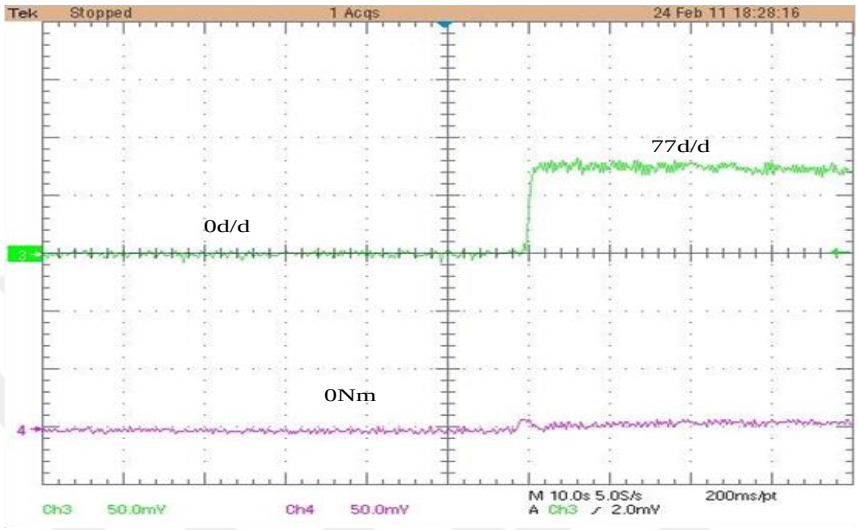
Şekil 5.59. USM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (155V)

Şekil 5.60'da motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 140V ve B-faz 135V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %67,57'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,14 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



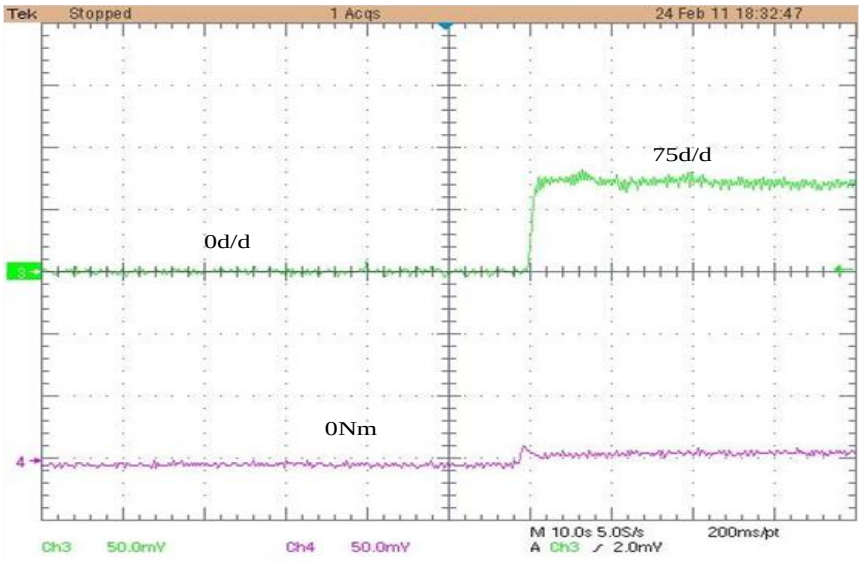
Şekil 5.60. USM'un gerilimin genliği değişimi faz eğrisi (140V)

Şekil 5.61'de USM'un 77 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 190V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



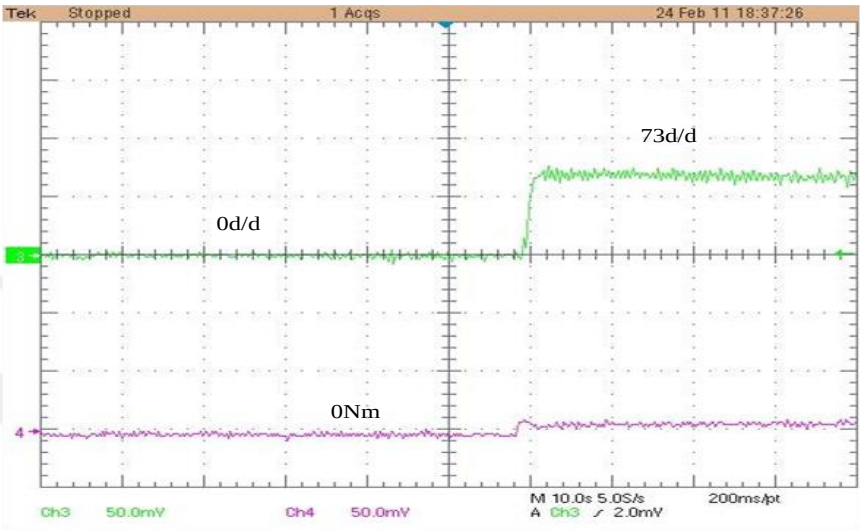
Şekil 5.61. USM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (190V)

Şekil 5.62'de USM'un 75 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 184V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



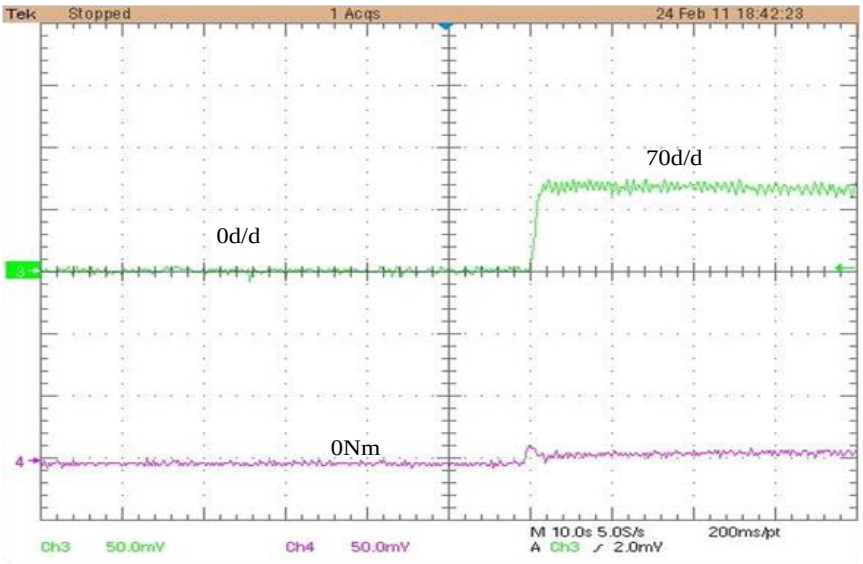
Şekil 5.62. USM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (184V)

Şekil 5.63'de USM'un 73 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 155V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



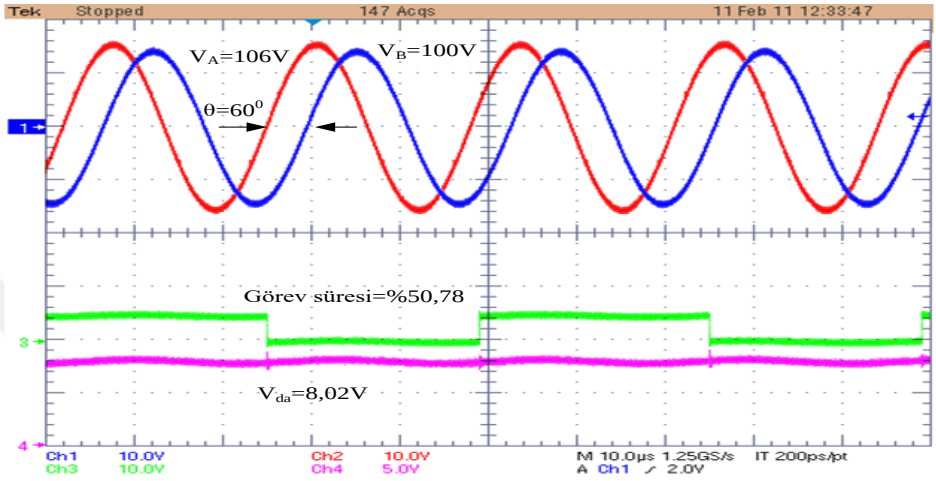
Şekil 5.63. USM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (155V)

Şekil 5.64'de USM'un 70 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 140V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



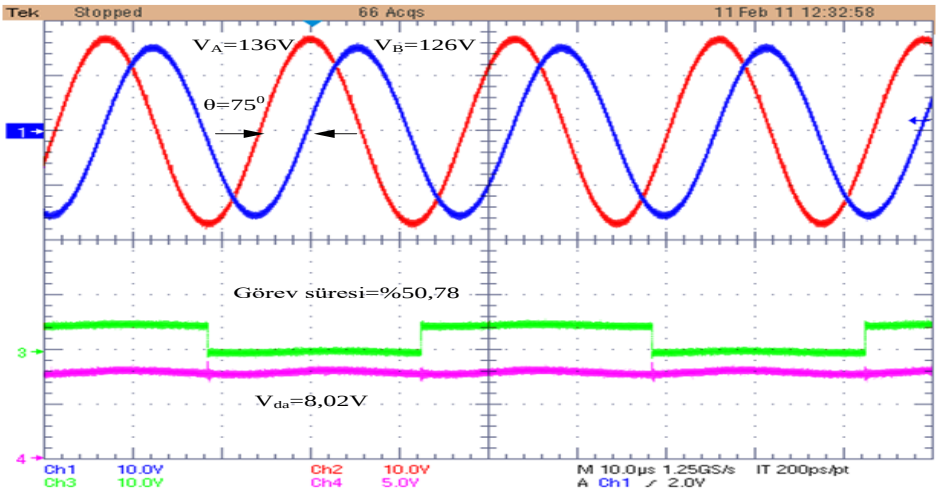
Şekil 5.64. USM'un gerilimin genliği değiştirilerek elde edilen hız eğrisi (140V)

Şekil 5.65'de düşük hızda motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 106V ve B-faz 100V olduğu gözlenmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 60^0'dir.



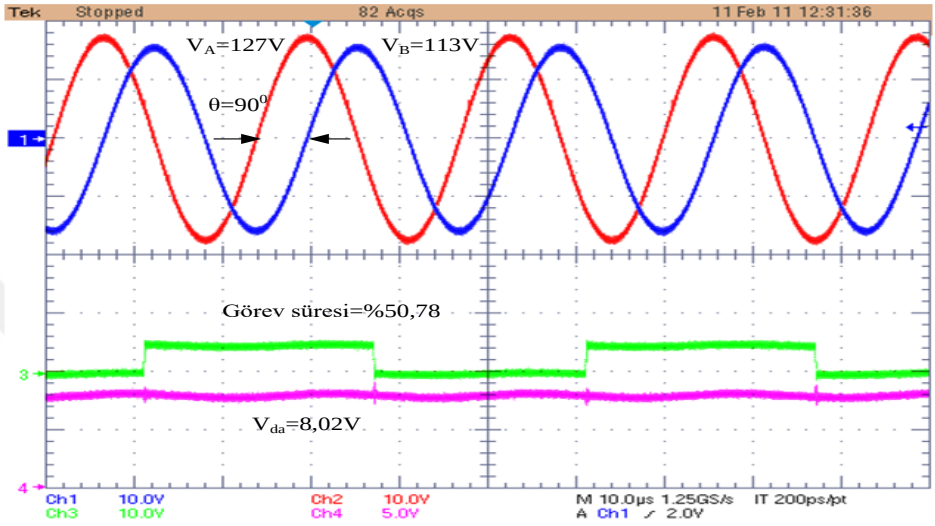
Şekil 5.65. USM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (60^0)

Şekil 5.66'da düşük hızda A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 75^0'dir. Motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 136V ve B-faz 126V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur.



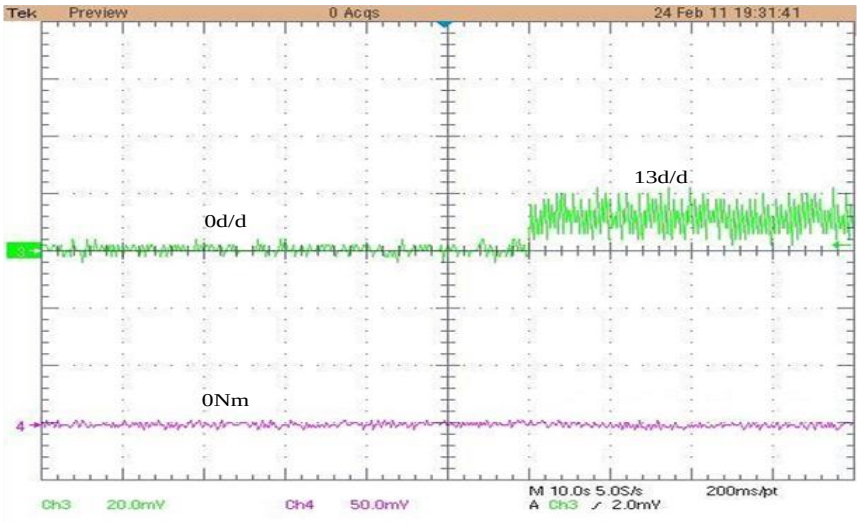
Şekil 5.66. USM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (75^0)

Şekil 5.67'de düşük hızda A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir. Motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 127V ve B-faz 113V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur.



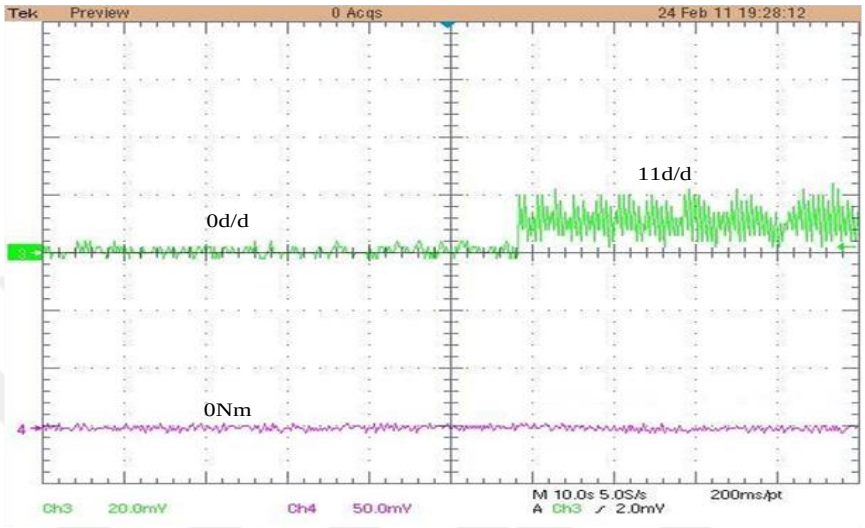
Şekil 5.67. USM'un düşük hızda faz farkı eğrisi (90^0)

Şekil 5.68'de USM'un 13 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 90^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



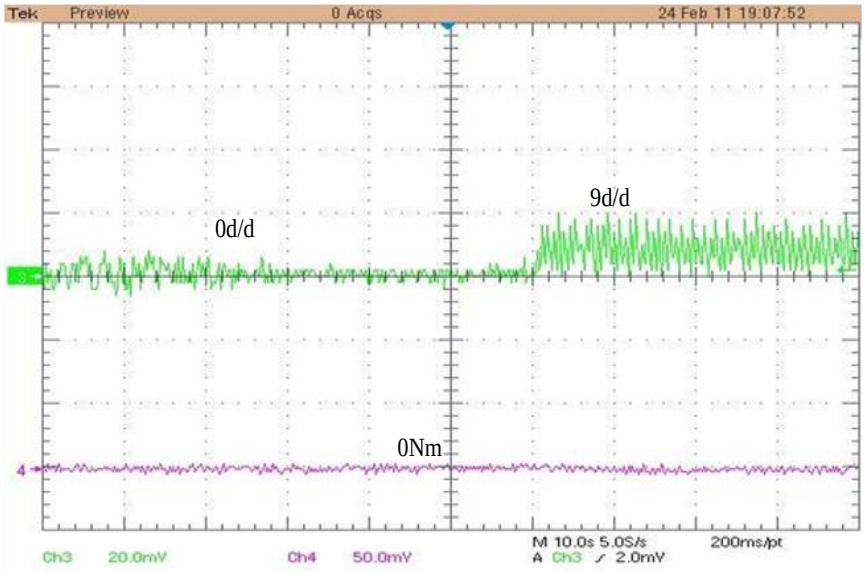
Şekil 5.68. USM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (90^0)

Şekil 5.69'da USM'un 11 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 75^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



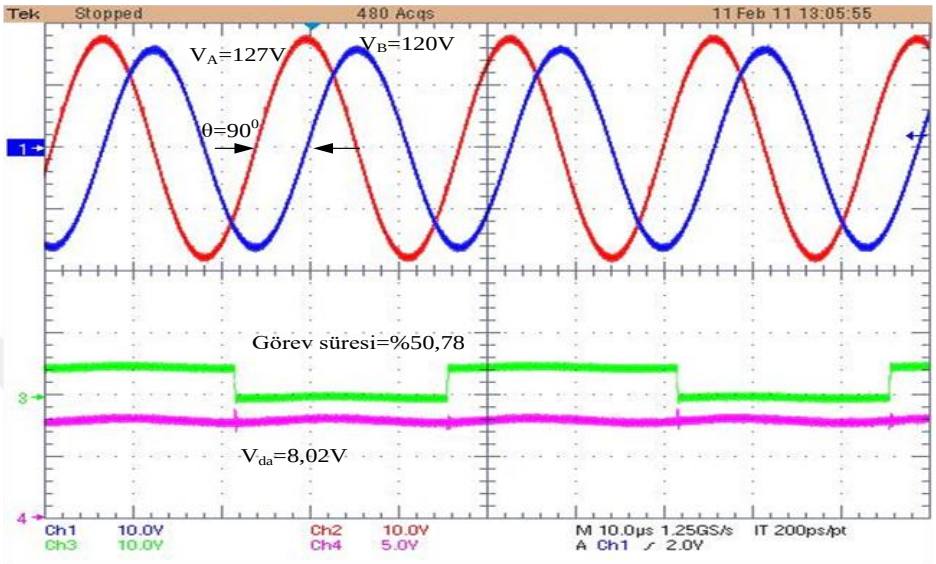
Şekil 5.69. USM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (75^0)

Şekil 5.70'de USM'un 9 d/d referans hız değerinde iken, faz farkı 60^0 iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



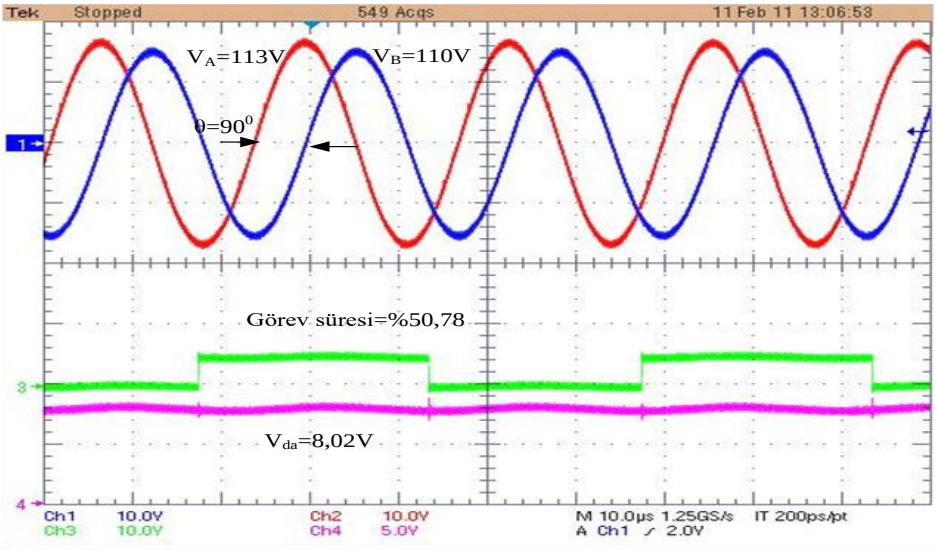
Şekil 5.70. USM'un düşük hızda faz farkı hız eğrisi (60^0)

Şekil 5.71'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 127V ve B-faz 120V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



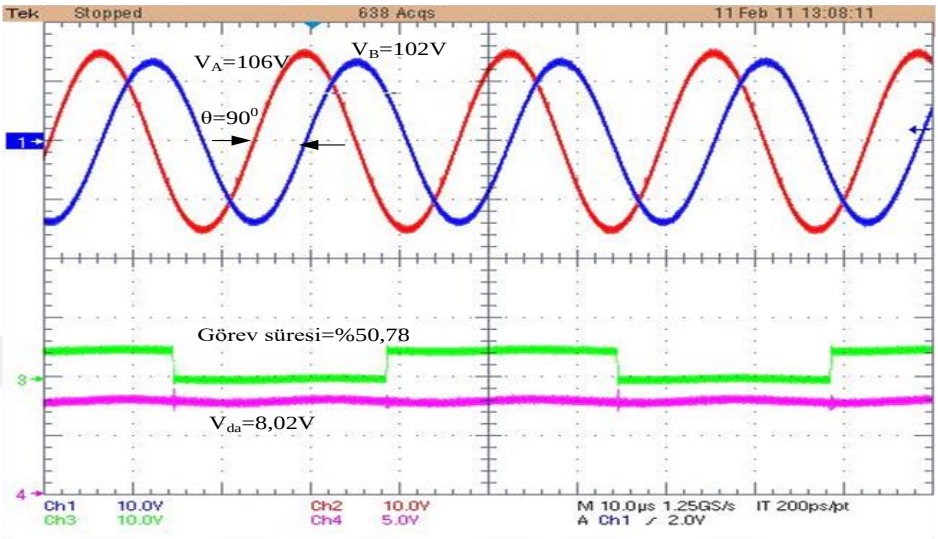
Şekil 5.71. USM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (127V)

Şekil 5.72'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 113V ve B-faz 110V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



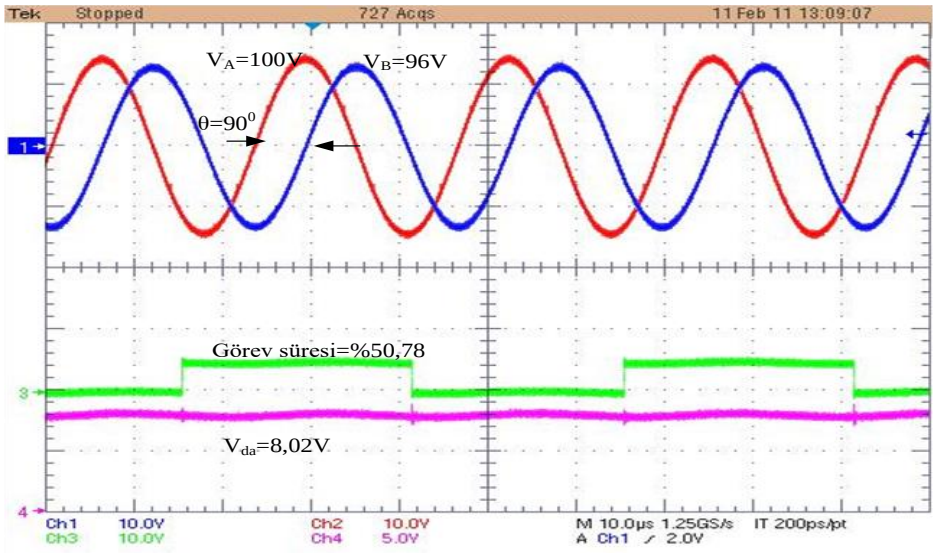
Şekil 5.72. USM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (113V)

Şekil 5.73'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 106V ve B-faz 102V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



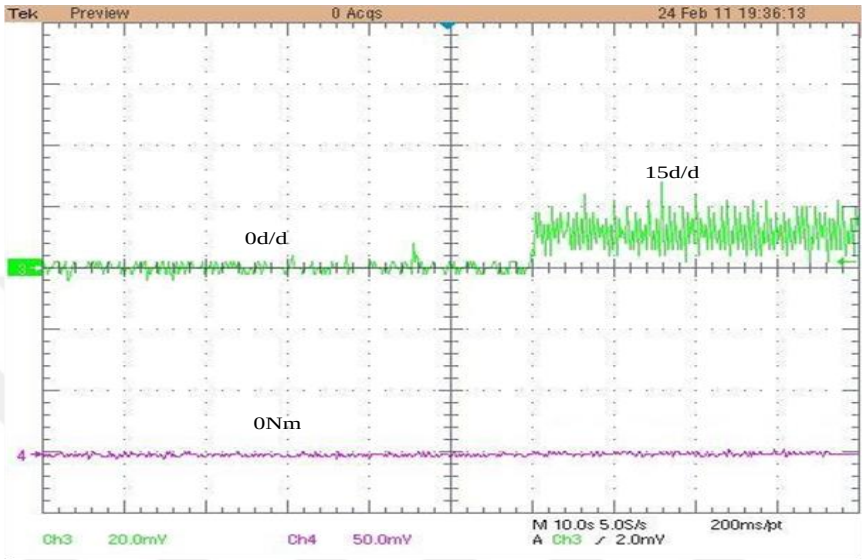
Şekil 5.73. USM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (106V)

Şekil 5.74'de motora uygulanan faz gerilimlerinin genliklerinin A-faz 100V ve B-faz 96V olduğu görülmektedir. DGM'nin görev süresi %50,78'dir. Filtre devresinin çıkış gerilimi ise 8,02 volttur. A-fazı ile B-fazı arasındaki faz farkı 90^0'dir.



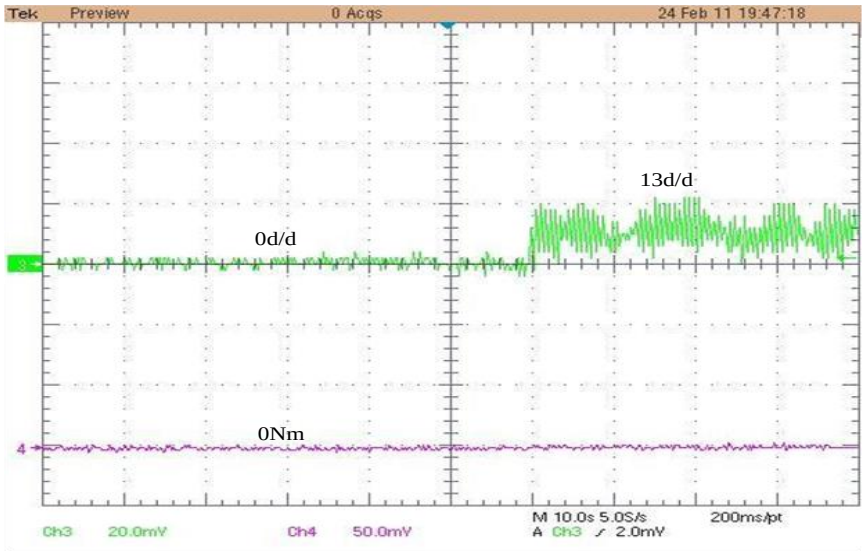
Şekil 5.74. USM'un düşük hızda gerilimin genliği değişim eğrileri (100V)

Şekil 5.75'de USM'un 15 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 127V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



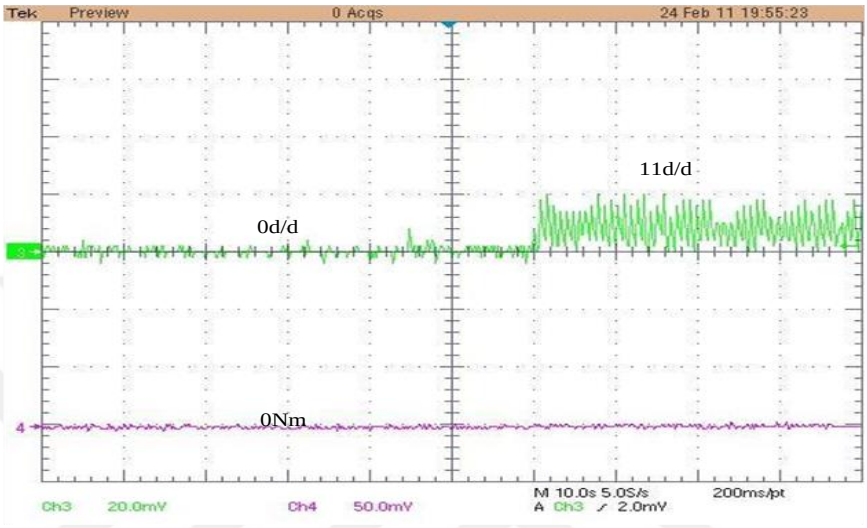
Şekil 5.75. USM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (127V)

Şekil 5.76'da USM'un 13 d/d referans hız değerinde iken, gerilimin genliğinin 113V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



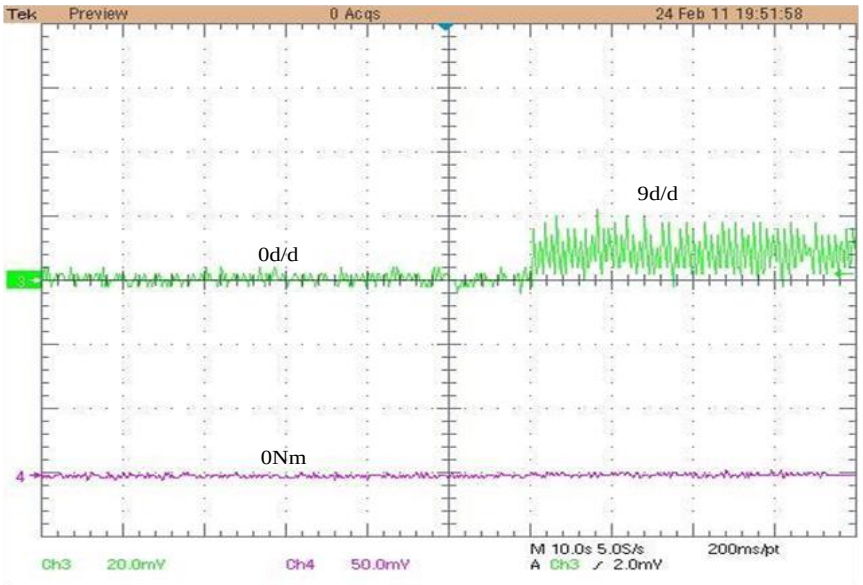
Şekil 5.76. USM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (113V)

Şekil 5.77'de USM'un 11 d/d referans hız değerinde, gerilimin genliği 106V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



Şekil 5.77. USM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (106V)

Şekil 5.78'de USM'un 9 d/d referans hız değerinde, gerilimin genliği 100V iken denetimsiz hız eğrisi görülmektedir. Bu yöntemde hız denetimi yapılmadığından hız değerinde düşme görülmektedir.



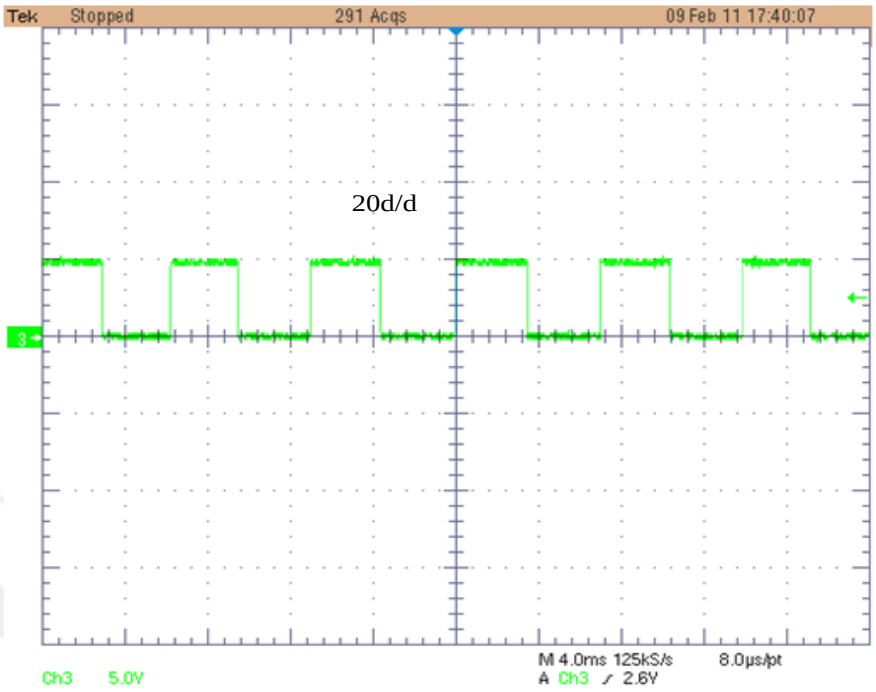
Şekil 5.78. USM'un düşük hızda gerilimin değişim hız eğrisi (100V)

5.6. Akım ve Enkoder Kare Dalga Sinyalleri

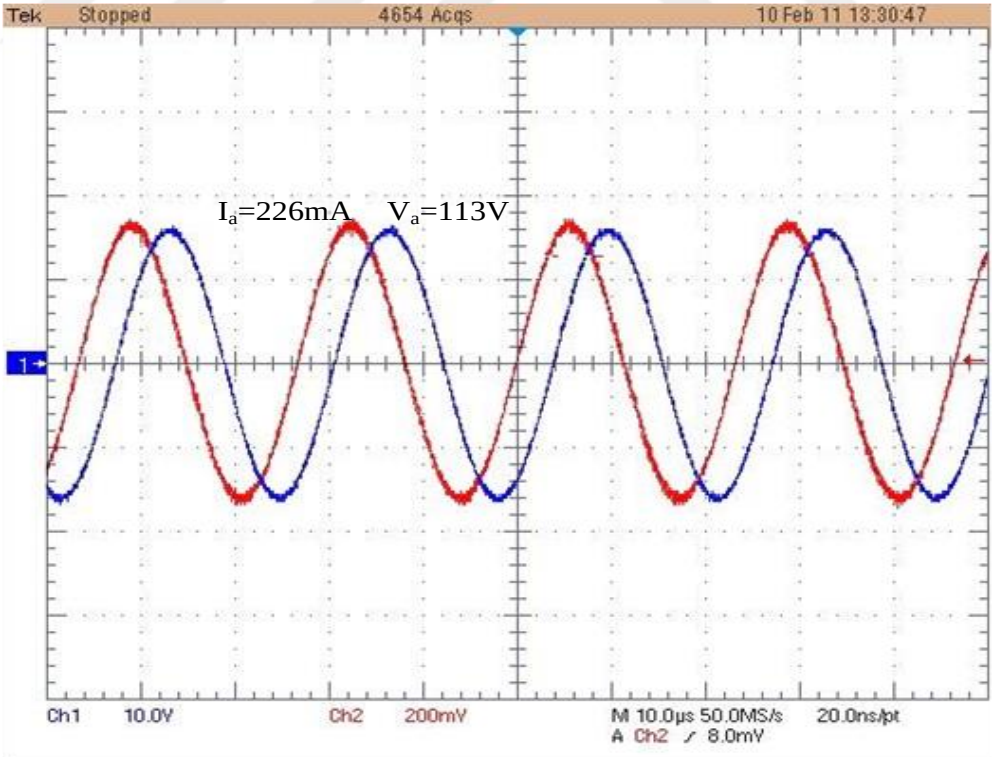
Bu çalışmada motorun geçici hız tepkilerini elde etmek için farklı referans hız durumlarında, motorun gerçek hız tepkileri ölçülmüştür. PIC mikrodenetleyici tarafından üretilen DGM sinyali, filtre devresi yardımıyla DA gerilime dönüştürülmekte ve DA gerilimi seviyesine göre XR8038 tarafından hız için gerekli olan frekans değeri üretilmektedir. Motorun gerçek hızı ise yine PIC 18F452 tarafından motor miline bağlı olan enkoderin kare dalga sinyalinin dalga sayısı saydırılarak ölçülmüş ve takometre ile bu ölçümün doğruluğu ispatlanmıştır.

A-fazı ve B-fazının her biri için, kayıplar ve çıkışlar sinüsoidal olarak değişen miktara sahiptirler. Akım ile gerilim arasındaki faz farkı 90^0'dir. A ve B fazına ait akım denklemleri $I\sin\omega t$ ve $I\cos\omega t$ olarak formüle edilir. USM' un çektiği akımın sürme frekansına bağlı olarak değişmektedir. USM frekans azaldıkça, ters orantılı olarak çektiği akımın arttığı gözlenmiştir. USM'un çektiği akım, akım sensörü HAS50 yardımı ile ölçülmüş ve PIC 18F452'ye okutulmuştur. PIC'de akım bilgisini diplay göndermiştir. Buna ek olarak enkoderden alınan hız bilgisi de ölçülmektedir. Bu çalışmada değişik hız değerleri için kare dalga sinyali, filtre devresinin çıkışındaki DA, A-fazına ait akım ve gerilim osilaskop ile ölçülmüştür.

Referans hız değeri tuş takımından 20 d/d olarak girildiğinde enkoderden alınan kare dalga sinyali Şekil 5.79'da verilmiştir. Şekil 5.80'de USM'un çektiği akım 226mA ve aynı fazın gerilimi 113V olarak ölçülmüştür.

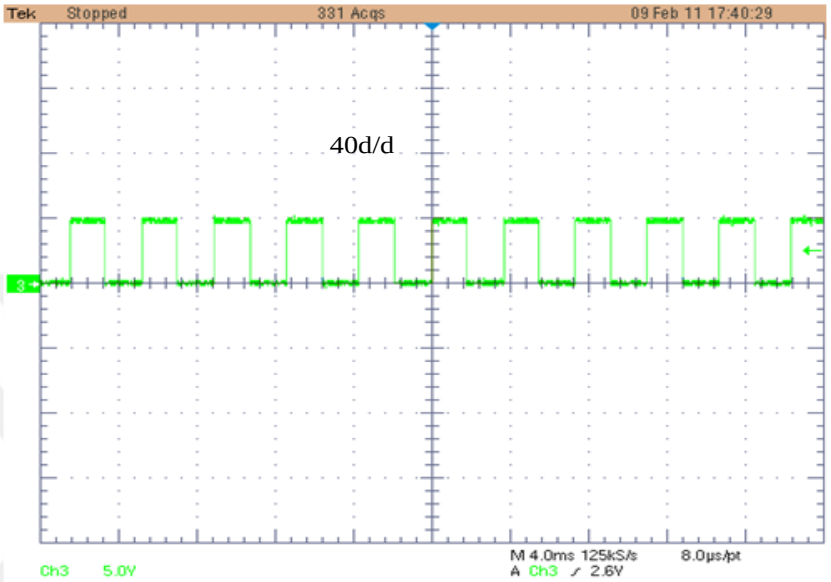


Şekil 5.79. Enkoder kare dalga sinyali (20 d/d)

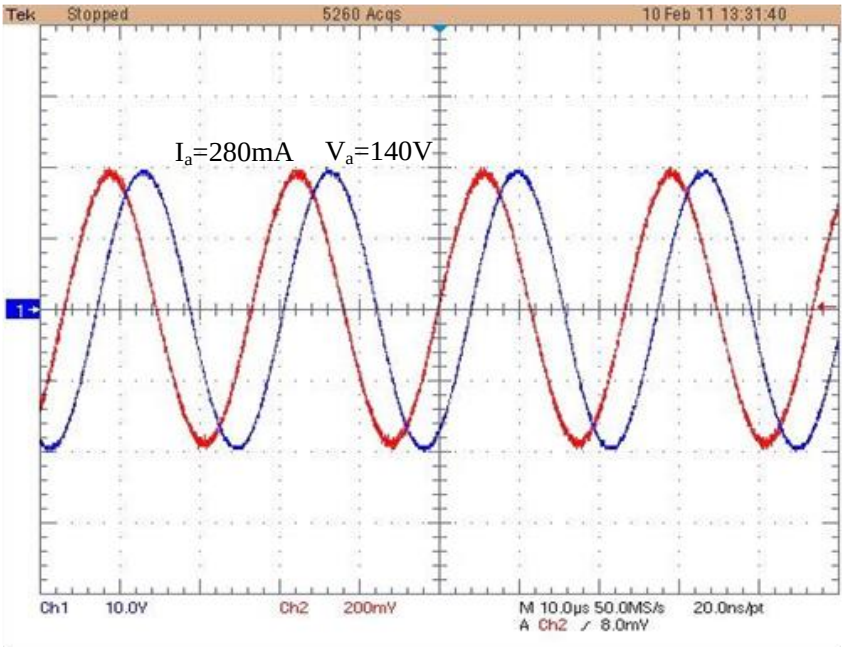


Şekil 5.80. Akım ve gerilim eğrileri (20 d/d)

Referans hız değeri tuş takımından 40 d/d olarak girildiğinde enkoderden alınan kare dalga sinyali Şekil 5.81'de verilmiştir. Şekil 5.82'de USM'un çektiği akım 280mA ve aynı fazın gerilimi 140V olarak ölçülmüştür.

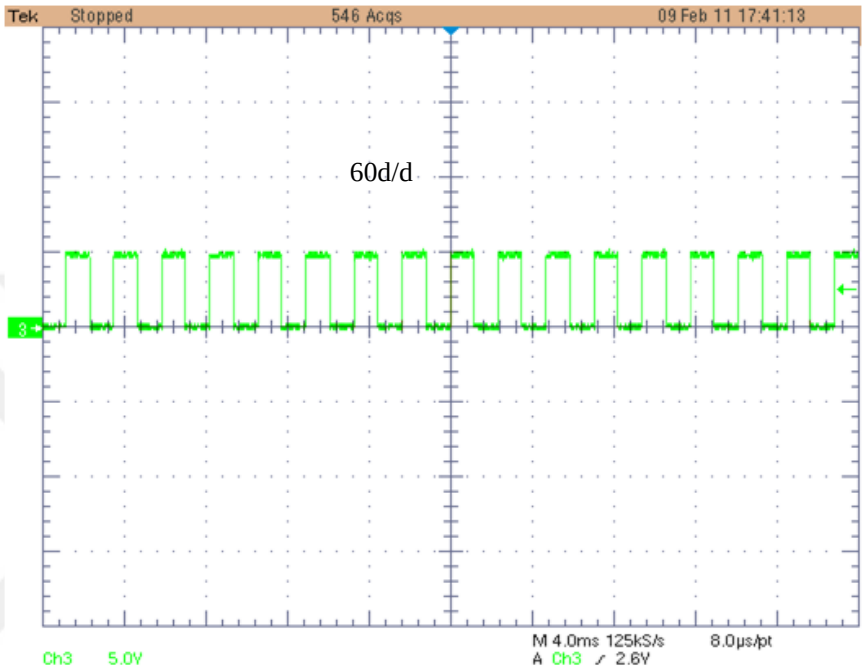


Şekil 5.81. Enkoder kare dalga sinyali (40d/d)

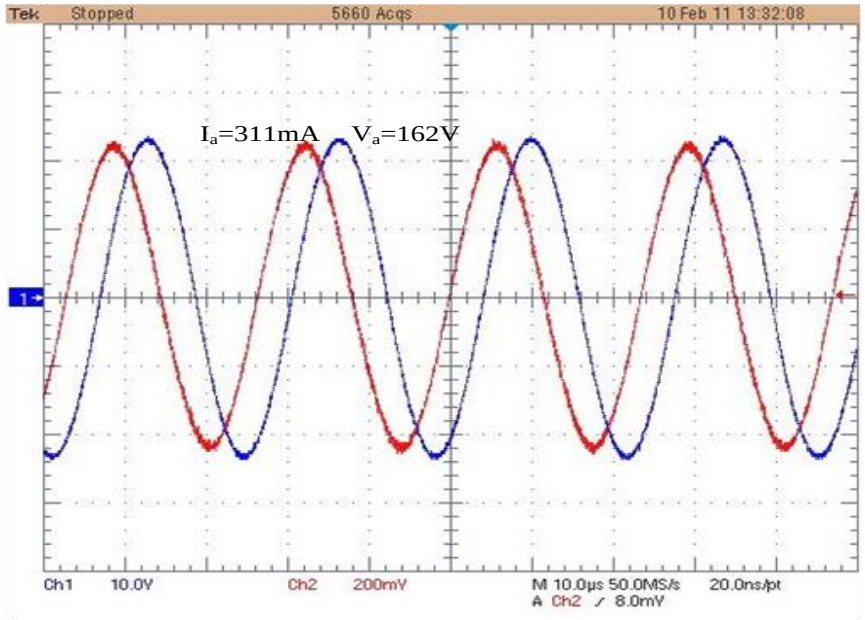


Şekil 5.82. Akım ve gerilim eğrileri (40 d/d)

Referans hız değeri tuş takımından 60 d/d olarak girildiğinde enkoderden alınan kare dalga sinyali Şekil 5.83'de verilmiştir. Şekil 5.84'de USM'un çektiği akım 311mA ve aynı fazın gerilimi 162V olarak ölçülmüştür.

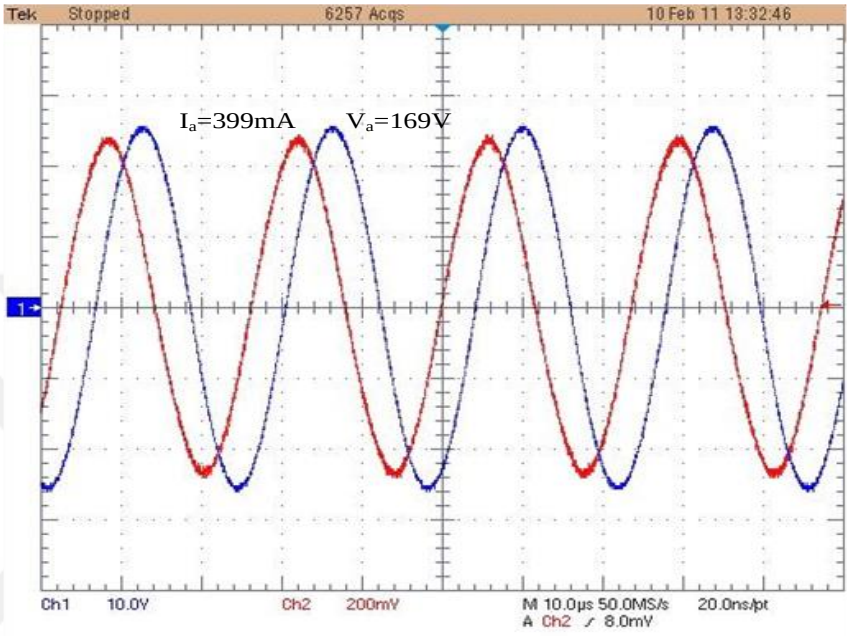


Şekil 5.83. Enkoder kare dalga sinyali (60d/d)

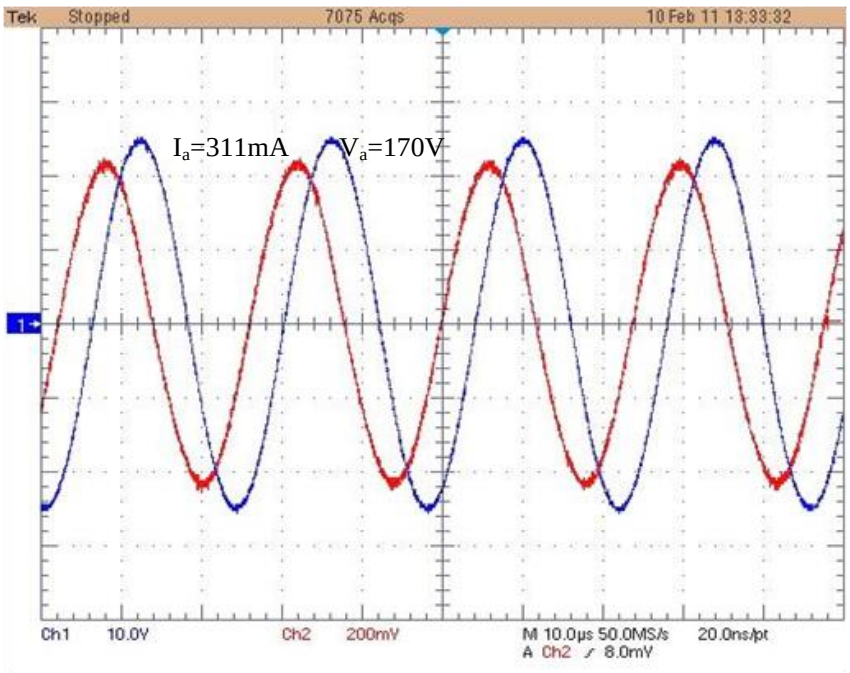


Şekil 5.84. Akım ve gerilim eğrileri (60 d/d)

Şekil 5.85'de USM'un çektiği akım 399mA ve aynı fazın gerilimi 169V olarak ölçülmüştür. Şekil 5.86'da USM'un çektiği akım 311mA ve aynı fazın gerilimi 170V olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.85. Akım ve gerilim eğrileri (80 d/d)



Şekil 5.86. Akım ve gerilim eğrileri (100 d/d)

USM' un hız değeri motora bağlı olan enkoderin kare dalga sinyali ölçülerek aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmıştır [6, 27].

Motor hızı (d/d);

Hız = 60 x kare dalganın frekansı / enkoderin sinyal sayısı (5.1)

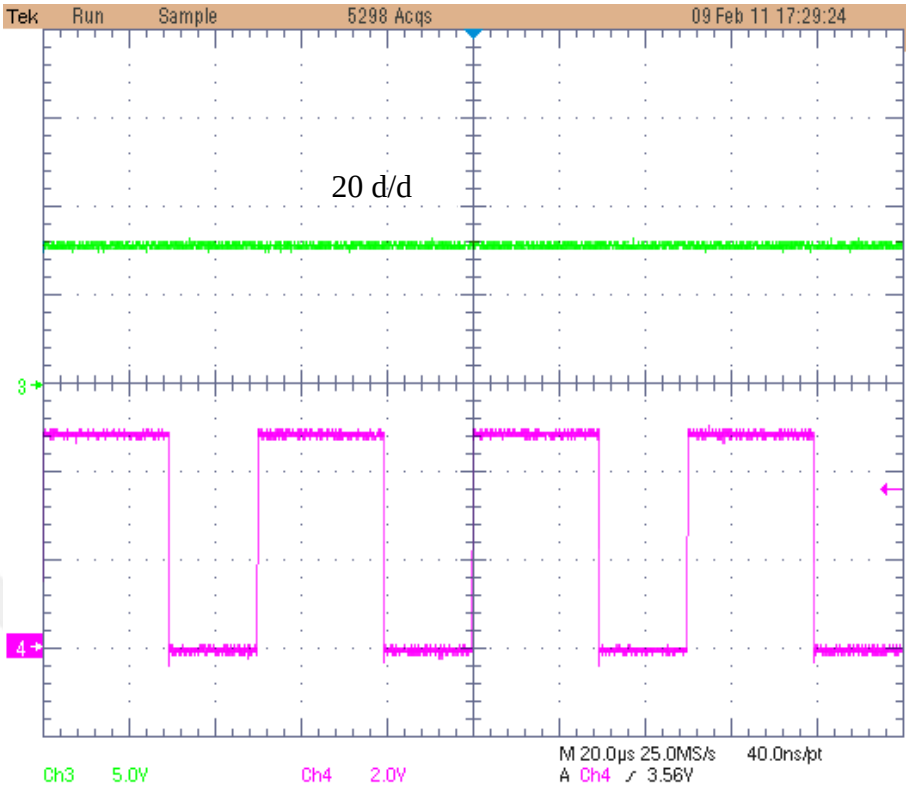
Kullanılan enkoder bir devirde 500 sinyal üretmektedir. Dolayısı ile hızın değerini elde etmek için kare dalganın frekansı ölçülerek 500'e oranlanmaktadır. Elde edilen değer saniyedeki devir sayısıdır. Dakikadaki devir sayısını bulmak için bu eğer 60 ile çarpılmaktadır. Enkoderden elde edilen kare dalga sinyalinin frekansı daha öncede belirtildiği gibi 166.66 Hz olup Eş. 5.1'deki ifadeye göre;

Hız = 60 x 166.66 / 500 =20 d/d

olmaktadır.

Hesaplanan hız değeri ile enkoderin kare dalga sayısı PIC 18F452 saydırılarak ölçülen hız değeri karşılaştırılmış ve hemen hemen birbirine eşit sonuçlar alınmıştır.

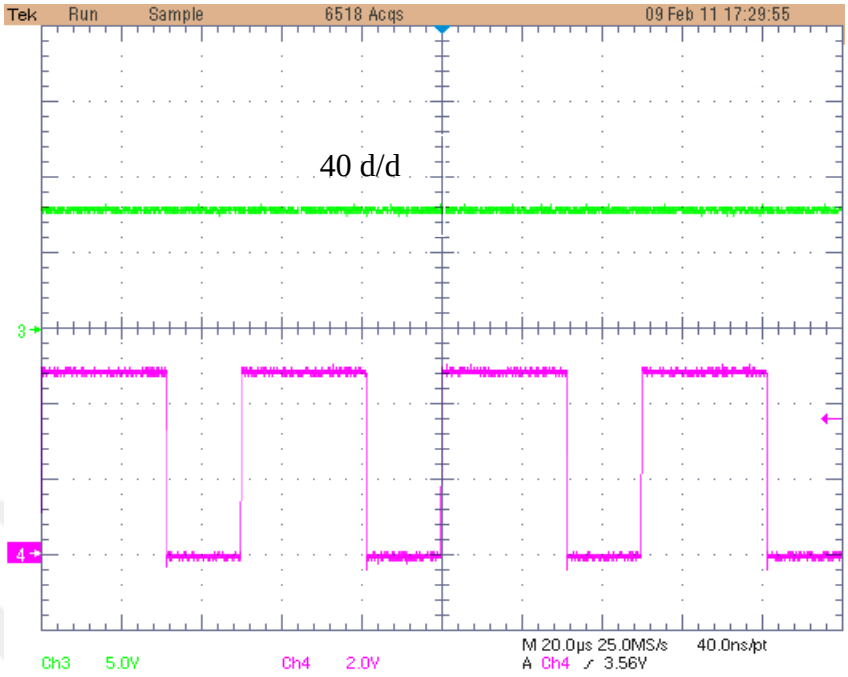
Tuş takımından referans hız değeri olarak 20 d/d girildiğinde, bu hız referansına karşılık gelen mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyali ve bu DGM sinyaline karşılık gelen filtre devresinde çıkış gerilimi Şekil 5.87'de gösterilmiştir. Bu durumda display'deki ölçülen motor hızı 20 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 8,04 V olmaktadır.



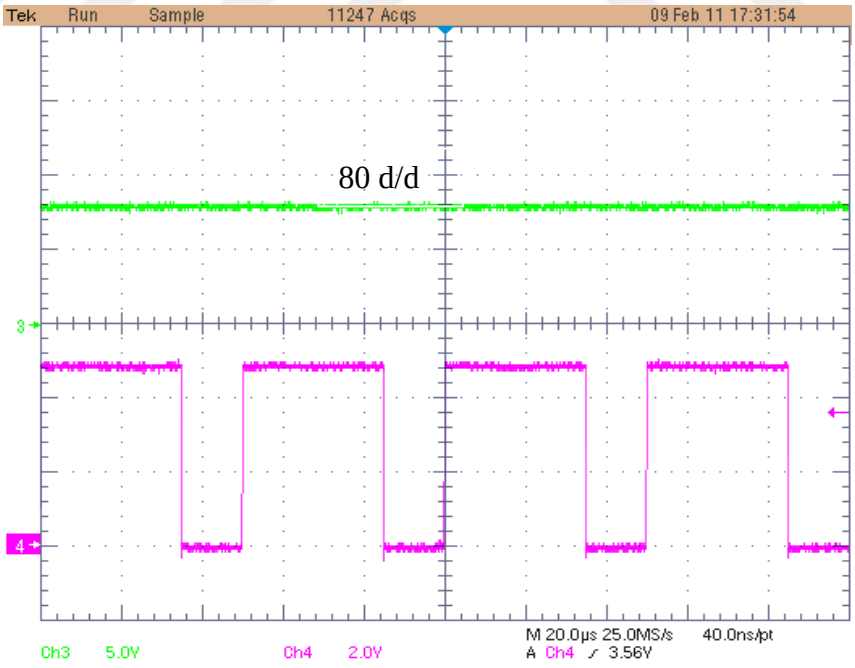
Şekil 5.87. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (20d/d için)

Tuş takımından referans hız değeri olarak 40 d/d girildiğinde, bu hız referansına karşılık gelen mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyali ve bu DGM sinyaline karşılık gelen filtre devresinde çıkış gerilimi Şekil 5.88'de gösterilmiştir. Bu durumda display'deki ölçülen motor hızı 40 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 8,08 V olmaktadır.

Tuş takımından referans hız değeri olarak 80 d/d girildiğinde, bu hız referansına karşılık gelen mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyali ve bu DGM sinyaline karşılık gelen filtre devresinde çıkış gerilimi Şekil 5.89'da gösterilmiştir. Bu durumda display'deki ölçülen motor hızı 80 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 8,16 V olmaktadır.

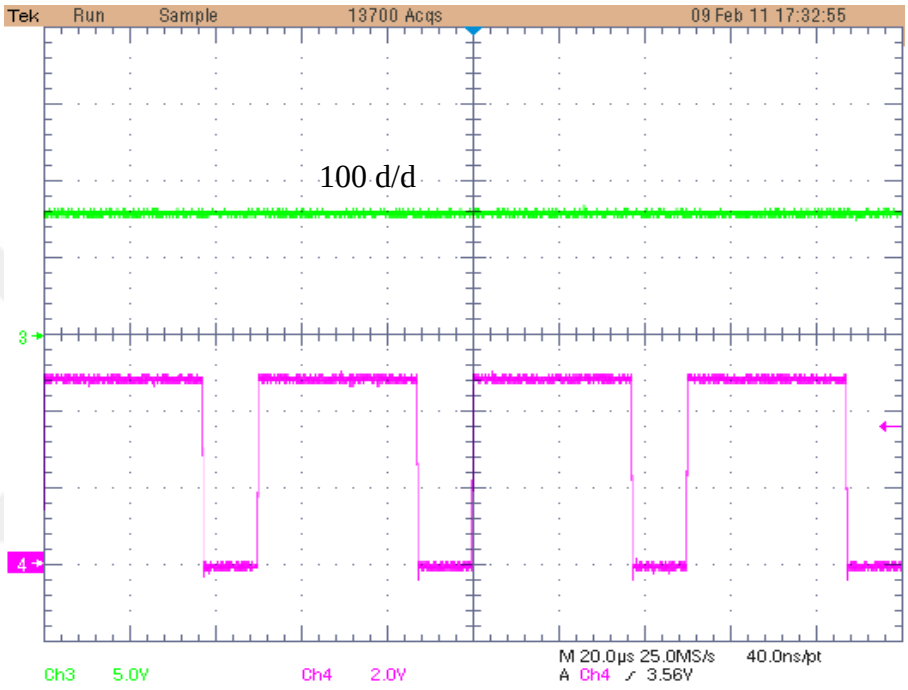


Şekil 5.88. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (40d/d için)



Şekil 5.89. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (80d/d için)

Tuş takımından referans hız değeri olarak 100 d/d girildiğinde, bu hız referansına karşılık gelen mikrodenetleyici çıkışındaki DGM sinyali ve bu DGM sinyaline karşılık gelen filtre devresinde çıkış gerilimi Şekil 5.90'da gösterilmiştir. Bu durumda display'deki ölçülen motor hızı 100 d/d ve filtre çıkış gerilimi yani motora uygulanan DA geriliminin değeri 8,20 V olmaktadır.



Şekil 5.90. PIC 18F452'de üretilen DGM sinyali ve filtre devresinden çıkan DA gerilimin değeri (100d/d için)

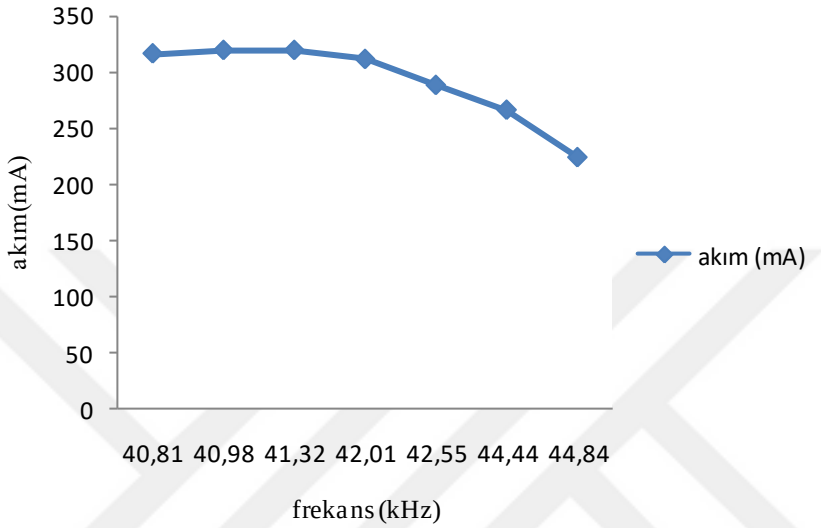
Şekil 5.87, Şekil 5.88, Şekil 5.89 ve Şekil 5.90'dan görüldüğü gibi tuş takımından girilen referans hız değeri artırıldıkça filtre çıkışındaki DA gerilimi artmakta, bununla birlikte motor hızı da artmaktadır.

Çizelge 5.10. Sürme frekansı ile USM' un çektiği akımın değişim verileri

Frekans(kHz)	40,81	40,98	41,32	42,01	42,55	44,44	44,84
Akım (mA)	316	319	319	311	288	266	224

Çizelge 5.10'da USM' un çektiği akımın sürme frekansına bağlı olarak değişim verileri verilmiştir. USM frekans azaldıkça, ters orantılı olarak çektiği akımın arttığı

Şekil 5.91'de görülmektedir. Akım sensörü olarak HAS-50 kullanılmıştır. Akım transformatörünün çıkışından alınan akım bilgisi doğrultularak PIC 18F452 tarafından okutulmuştur ve displaye yazdırılmıştır.



Şekil 5.91. Sürme frekansı ile USM'un çektiği akımın değişimi

5.7. Deneysel Sonuçların Değerlendirilmesi

Bu kısımda, elde edilen deneysel sonuçlar değerlendirilmektedir.

İlk olarak motorun hızı ile sürme frekansı arasındaki ilişkinin elde edilmesi için farklı referans hızlarda motora uygulanan gerilimlerin frekansları ölçülmüştür. Sürme frekansı arttıkça motor hızının tersine azaldığı görülmüştür.

İkinci olarak besleme gerilimi ile motorun hızı arasındaki ilişki elde edilmiştir. USM' un hızına etki eden sürme frekansı ve faz açısı sabit tutulmuştur. Farklı besleme gerilim değerlerinde motorun hız değerleri ölçülmüştür. Gerilimin genliği azaldıkça motorun hızının doğrusal olarak tersine azaldığı tespit edilmiştir.

Daha sonra faz gerilimleri arasındaki faz farkı ile motorun hızı arasındaki ilişki elde edilmiştir. USM' un hızına etki eden diğer iki faktör olan gerilimlerin genlikleri ve

frekansları sabit tutulmuştur. Farklı faz farklarında motorun hız değerleri ölçülmüştür. Faz farkı 90^0 iken hızın maksimum değere ulaştığı gözlenmiştir. 0^0 ile 180^0 arasındaki hız değişimi sinüsoydal özellik göstermiştir. Aynı zamanda faz farkı değiştirilerek motorun dönüş yönününde değiştirilebildiği gözlenmiştir.

USM' un çektiği akım ile sürme frekansı arasındaki ilişki deneysel olarak elde edilmiştir. USM sürme frekansı azaldıkça, ters orantılı olarak çektiği akımın arttığı gözlenmiştir.

USM'un gerçek hız performansı; sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı değişkenleri için ayrı ayrı olarak incelenmiştir. Motorun istenen hız değerine çok hızlı bir şekilde üç hız değişkenin karmasını kullanarak ulaştığı ve salınım olmadan izlediği görülmüştür. Aynı zamanda farklı yük koşulları altında verilen referans hız komutlarını aynı şekilde izlediği görülmüştür.

USM'a 20 d/d ile 100 d/d arasında hız referansları uygulanmış ve bu referanslardaki sürme geriliminin frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı eğrileri ayrı ayrı grafiklerde çizdirilmiştir. Farklı hız komutlarında, USM'un üç hız değişkenini de aynı eğimle izlediği görülmüştür.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, yürüyen dalga ultrasonik motorun hız tepkisini farklı giriş ve çıkış şartlarında incelemek amacıyla benzetim ve deney çalışmaları yapılmıştır. Matlab Simulink programı kullanılarak benzetim çalışmaları tamamlandıktan sonra benzetim sonuçlarını doğrulamak amacıyla yürüyen dalga tip ultrasonik motorun hız denetim işlemi PIC mikrodenetleyici tabanlı sürücü sistem ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deneylerden elde edilen sonuçlara göre motorun hız tepkileri analiz edilmiş ve karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu tez çalışmasında, Shinsei firmasının ürettiği USR60 YDUSM kullanılmıştır. USM hızı; uygulanan gerilimin frekansı, genliği ve iki faz gerilimlerin arasındaki faz farkını değiştirerek ayarlanabilir. Genellikle uygulamalarda frekans kontrolu kullanılmaktadır. Bu çalışmada, USM' un hız denetimi için gerekli olan bu üç büyüklük kullanılarak gerekli benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetimde kullanılan eşdeğer devre (model) stator ile rotorun birleşiminden oluşmaktadır. Bu benzetim modeli stator ve rotor parametrelerinin yanı sıra stator ile rotor arasında sürtünmeden oluşan kayıplar eklenerek oluşturulan tam bir model olarak kabul edilebilir. Yürüyen dalga ultrasonik motor için çok modlu sürme benzetim modeli tasarlanmış ve motorun hızına etki eden büyüklükler olan frekans, gerilim ve faz farkı tepkileri ayrı ayrı elde edilmiştir.

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 sürme devresinde DGM tekniği kullanılmıştır. Motorun yapısından kaynaklanan blokaj kapasitansının etkisini azaltmak ve rezonansı sağlamak amacıyla motorun her fazına birer seri endüktans bağlanmıştır. Motorun hızına etki eden üç büyüklüğü bu modelde ayrı ayrı değiştirebilmek mümkündür. Bu büyüklükler yapılan deneylere bağlı olarak sabit tutulabilmekte veya değiştirilebilmektedir.

Bu çalışmada, motorun hız tepkisini incelemek amacıyla gerçekleştirilen PIC18F452 tabanlı sürücü sistem basit yapılı ve küçük boyutlu olmakla birlikte motor hız ve yön komutunun sayısal olarak girilmesine fırsat vermekte ve motorun hız, gerilim ve akım bilgilerini display üzerinden izleme imkanı sağlamaktadır.

Motorun hız bilgisi, deney düzeneği üzerinde bulunan hız sensörü yardımı ile ölçülmüştür. Aynı zaman da hız bilgisi, hız sensörünün çıkışından gerilim olarak ölçülmüştür. Elde edilen hız bilgisi osiloskop yardımıyla elde edilmiştir. Motor 40,65–44,4kHz frekans aralığında, 168V-184V gerilim aralığında ve $0\text{-}360^0$ faz farkı aralığında üç büyüklükler kendi aralarında değiştirilerek kontrol edilmiştir. Motorun sürme frekansı arttıkça hızının düştüğü görülmüştür. Ayrıca gerilimin genliği arttıkça motorun hızının arttığı görülmüştür. Faz farkı ile hızının değişiminin sinüsoidal bir özellik gösterdiği deneysel olarak elde edilmiştir. Faz farkı aynı zamanda motorun dönüş yönünü değiştirmek içinde kullanılabilmektedir. Motora uygulanan gerilimlerin faz farkı 180^0'nin üzerine çıktığında faz sıraları değiştiği için dönüş yönü de değişmektedir. Bu yöntem kullanılarak motor farklı dönüş yönlerinde çalıştırılmıştır. Sürme frekansı, faz farkı ve gerilim genliği sabit tutularak motorun dönüş yönü değiştirilmiştir. Fakat dönüş yönü değişirken motorun hızın da farklılık gözlenmiştir. Bunun nedeni farklı dönüş yönlerinde faz empedanslarının değişmesidir.

Motorun istenen hız değerine; sürme frekansı, gerilimin genliği ve faz farkı değişkenlerini kullanarak hızlı bir şekilde ulaştığı ve salınım olmadan izlediği görülmüştür. 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.

Motorun farklı yüklerde yüklenebilmesi için bir deney düzeneği hazırlanmıştır. Deney düzeneği üzerinde bulanan hız sensörü ve tork sensörü yardımıyla hız bilgisi ve tork bilgisi osilaskoptan gözlenmiştir. Motorun yüklenmesi için deney

düzeneğinde elektromanyetik fren sistemi kullanılmıştır. Farklı yük koşullarında USM'un hızında dikkate değer bir değişme gözlenmemiştir.

Bu çalışmada, sürme sistemine adapte edilen bir display vasıtasıyla kullanıcıların motorun çalışması esnasında girilen referans hızı, motorun gerçek hızını, motorun çektiği akımı ve motora uygulanan gerilim bilgilerini kolaylıkla izlemesi sağlanmıştır.

Motor devresine bağlanan akım sensöründen elde edilen akım sinyali ile motor hızı arasındaki ilişki ortaya konulmuştur. Bunun için motor farklı hızlarda döndürülmüş ve her bir hız kademesindeki akım değeri kaydedilmiştir. Motorun çektiği akım ile motorun hızı arasında doğrusal bir bağlantı olduğu görülmüştür.

Motor laboratuarda farklı hız ve yük şartlarında üç-mod şartlarında denenmiştir. Deneyde iki-faz gerilimlerin genlikleri, frekansları ve aralarındaki faz farkları kontrol girişleri olarak kullanılmıştır. Simülasyon ve deneylerden elde edilen sonuçlara göre motorun hız tepkilerinin incelenmesi neticesinde; motor hızının uygulanan gerilimin frekansı ile geniş bir hız aralığında kontrol edilebileceği, uygulanan gerilimlerin genlik ayarının hız aralığı üzerinde dar bir etkiye sahip olduğu ve uygulanan faz gerilimleri arasındaki faz farkının değiştirilmesinin hız aralığında çok düşük bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Faz farkı ayarlanarak motor çalışma hız aralığı genişletilebilir.

USM'un üç-mod altında daha geniş hız aralığında çalıştırılabilmesi için üç kontrol büyüklüğünün değerlerinin seçiminde yapay sinir ağları gibi karar verici teknikler uygulanabilir.

USM üç-mod altında çalıştırılırken motorun çekeceği aktif ve reaktif güç değişimlerinin incelenmesi motor verimi hakkında bilgiler verebilir.

KAYNAKLAR

1. Bekiroğlu , E. And Bal, G., "Ultrasonik motorlar II:Sürme ve kontrol devrelerinin incelenmesi", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 14(1):99-115(2000).

2. Bal, G., Bekiroğlu, E., Bayındır, R., Görgün, A., "Yürüyen Dalga Tip Ultrasonik Motor Denetimi ve Bilgisayarla İzlenmesi", ***Politeknik Dergisi***, 9(4), 225-231(2006).

3. Sashida, T., Kenjo, T., "An Introduction to Ultrasonic Motors", ***Oxford University Press***, New York, (1993).

4. Uchino, K., "Piezoelectric ultrasonic motors: Overview", ***Smart Material Structure***, 7:273-285 (1998).

5. Nakamura, K., Ueha,S. "Potential ability of ultrasonic motors: A discussion focused on the friction control mechanism", ***Electronics and Communications in Japan***, Part 2, 81(4): 57-67 (1998).

6. Uzel, H., "PIC Mikrodenetleyici ile Yürüyen dalga ultrasonik motorun hız denetimi", Y.Lisans tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 9-68 (2006).

7. Storck, H., Wallaschek, J."The effect of tangential elasticity of the contact layer stator and rotor in travelling wave ultrasonic motors", ***International Journal of Non-Linear Mechanics*** 38: 143-159 (2003).

8. Lin, F.J., Wai, R.J., Hong, C.M. "LLCC resonant inverter for piezoelectric ultrasonic motor drive", ***IEE Proc.Electr. Power Applications***, 146(5): 479-48 (1999).

9. Senjyu, T., Yokoda, S., Miyazato, H., Uezato, K. "Speed control of ultrasonic motors by adaptive control with simplied mathematical model", ***IEE Proc. Elect. Power Appl.***, 145(3): 180-184 (1998).

10. Petit, L., Rizet, N., Briot, R., Gonnard, P. "Frequency behavior and speed control of piezomotors", ***Sensors and Actuators A***, 80: 45-52 (2000).

11. Ueha, S., Toncikawa, Y., "Ultrasonic Motors Theory and Applications", ***Clarendon Press***, Oxford, (1993).

12. Bal G., Bekiroğlu E., "Ultrasonik motorlar I: Yapılarının ve temel prensiplerinin incelenmesi", ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi***, 13(4): 1119-1128(2000).

13. Nakamura, K., Ishii, T., Kurosawa, M., Ueha, S., "Efficiency improvement of Ultrasonic motor driven with rectangular waveform", Jpn. J. ***Appl. Phys***. 35: 3281–3285 (1996).

14. Xia, C.L., Li, B., Yu, W., Shi, T., "Theoretical and Experimental Study on Rotor Stability of Ultrasonic motor driving fluid directly", ***Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation***,Dalian, China June 21 – 23 (2006).

15. Hagedorn, P., Sattel, T., Speziari, D., Schmidt, J., and Diana, G., "The importance of rotor flexibility in ultrasonic travelling wave motor", ***Smart Mater. Struct.*** 7:352-368(1998).

16. Wallaschek, J., Hemsel, T., Mracek, M., and Vasiljev, P., "A novel approach for high power ultrasonic linear motors", ***IEEE ultrasonic symposium***, 4: 1161-1164 (2004).

17. Kurosawa, M., Takahashi, M., Higuchi. T., "Ultrasonic linear motor using surface acoustic waves", ***IEEE Trans. Ultrason., Freq. Contr***, 43(5): 901-906 (1996).

18. Ming, Y., Peiwen, O., "Performances estimation of a rotary traveling wave ultrasonic motor based on two-dimension analytical model", ***Ultrasonics***, 39: 115-120 (2001).

19. Sun, D., Liu, J. and Ai, X. "Modeling and performance evaluation of travelling-wave piezoelectric ultrasonic motors with analytical method", ***Sens. Actuators A*** 100: 84-93 (2002).

20. Nesbitt, W., Hagood, IV. and Andrew, J., "Modeling of a piezoelectric rotary ultrasonic motor", ***IEEE Trans. Ultrason., Freq. Contr.***, 42(2): 210-224 (1995).

21. Chau, K., Chung, S., and Chan, C., "Neuro-fuzzy speed tracking control of traveling-wave ultrasonic motor drives using direct pulsewidth modulation", ***IEEE Trans. Industry appl.***, 39(4):1061-1069 (2003).

22. Kurosawa, M., Inagaki, H., Higuchi, T., "Investigation of stator transducer for column-shaped ultrasonic motor", ***Elsevier***., 34: 271-274 (1996).

23. Petit, L., Briot, R. and Gonnard, P., "A multi-mode piezomotor using a flextensional coupler", ***Smart Mater. Struct.,*** 8: 167–174(1999).

24. Kurosawa, M. and Ueha,S., "Single phase drive of a circular ultrasonic motor", ***J. Acoust. Soc. Am.*** 90:1723–1728 (1991).

25. Manceau, J.F., Bastien, F., "Production of a quasi-travelling wave in a silicon rectangular plate using a single phase drive", ***IEEE Trans. Ultrason., Freq. Contr***, 42(1):59-65 (1995).

26. Petit, L., Gonnard, P., Gréhant, B., "A piezomotor for the small actuator market", ***Proceedings of the 2000 12th IEEE ISAF***, 42: 33-36 (2000).

27. Bekiroğlu , E., "Yürüyen dalga ultrasonik motor hız ve konum denetiminin bulanık mantık denetleyici kullanılarak geliştirilmesi", Doktora tezi, ***Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü***, 9-115 (2002).

28. Bal G., Bekiroğlu E., "Experimental examinatıon of speed control methods for a travelling wave ultrasonic motor", ***3rd International. Advanced Technologıes Symposium***, August 18-20, (2003).

29. Bal G., "A Digitally Controlled Drive System for Travelling-wave Ultrasonic Motor" ***Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences***, 11(3):155-168 (2003).

30. Richter, A., Pustka, M., Rydlo, P. and Kolar, M., "Ultrsonic piezoceramic motor The computation of travelling-wave velocity on the stator surface and excitation by PWM modulation with higher harmonic suppression", ***Ceramics international***, 30:1857-1861 (2004).

31. Senjyu, T., Nakamura, M., Urasaki, N., and Sekine, H., "Mathematical model of ultrasonic motors for speed control", ***IEEE Trans. Industry appl.***, 43(6): 290-1069 (2003).

32. Bekiroğlu, E. And Daldal, N., "Remote control of an ultrasonic motor by using a GSM mobil phone", ***Sensors and Actuators***, 120:536-542(2005).

33. Huafeng, L., Chungsheng, Z. and Chenglin, G., "Precise position control of ultrasonic motor using fuzzy control", ***IEEE Ultrasonic symposium***, 4:1177-1180 (2004).

34. Petit, L. and Gonnard, P., "Inter-phases mechanical coupling in ultrasonic motors", ***Sensors and Actuators***, 116: 492-500 (2004).

35. Ferreira, A. And Minotti, P., "High-performance load-adaptive speed control for ultrasonic motors", ***Control and Engineering Practice***, 6:1-13(1998).

36. Bal, G. And Bekiroğlu, E., "A Highly Effective Load Adaptive Servo drive System for Speed Control of Travelling-Wave Ultrasonic Motor", ***IEEE Transactions on Power Electronics***, 20(5):1143-1149(2005).

37. Yoshida, T., Senjyu, T., Nakamura, M., Urasaki, N. And Sekine, H. "Position control of Ultrasonic motors using dead-zone compensation with fuzzy neural network", ***Electric Power components and systems***, 34 : 1253-1266(2006).

38. Chen, J.S. And Lin, I.D., "Toward the ımplementation of ana ultrasonic motor servo drive using mechatronics" ***FPGA,***12: 511-524(2002).

39. Chung,S.W., Chau, K.T., "Speed control of travelling-wave Ultrasonic Motors using a practical modeling approach", ***Electric Power components and systems***, vol. 35 , pp. 411-428, 2007

40. Grangi, A., Corigliano, A., Binci, M. and Faure, P., "Finite element modelling of arotating piezoelectric ultrasonic motor", ***Science Direct***, 43(1): 747-755 (2005).

41. Uchino, K., "Piezoelectrıc actuators and ultrasonic motors", ***Kluwer academic publishers***, London,(1997).

42. Bal, G. And Bekiroğlu, E., "Servo speed of travelling – wave ultrasonic motors using digital signal processor",***Sens Actuators***, 109(3):212-9 (2001).

43. Bal, G., Bekiroğlu, E., Bayındır, R., Uzel, H., "Microcontroller based digitally controlled ultrasonic motor drive system", ***Journal of electroceramics***, 20(3-4):265-270(2008).

44. İnternet: PIC Microcontrolor 18F452 datasheet, http://www.datasheet.com

45. İnternet: XR8038 datasheet, http://www.datasheet.com

46. Chen, T. C., Hsien, C. And Tsai, M.C., "A new driver based on dual-mode frequency and phase control for traveling-wave type ultrasonic motor", ***Energy and conversion and management***, 49:2767-2775 (2008).

47. Chen, T. C., Hsien, C., Chen C.J. And Tsai, M.C., "Neuro-fuzzy speed control of traveling-wave type ultrasonic motor drive using frequency and phase modulation", ***ScienceDirect,*** 47:325-338 (2008).

48. Chen, T. C. And Yu, C.H. "Motion control with deadzone estimation and compensation using GRNN for TWUSM drive system", ***Expert Systems with Applications***, (2009).

49. Bayındır, R., Görgün, A., "PIC Tabanlı bir PI Denetleyici ile Sekron motor Kullanılarak bir kompanzatör uygulaması", ***Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Dergisi***, 15(1):87-99(2009).

50. Bekiroğlu, E., "Microcontroller-Based Full Control of Ultrasonic Motor with Frequency and Voltage Adjusting", ***ScienceDirect***, 141:151-159 (2008).

51. Bekiroğlu, E., Bal, G., “Experimental investigation of input–output characteristics of a travelling-wave ultrasonic motor”, ***Journal of electroceramics***, 20(3-4):287-292 (2008).

52. Bekiroğlu, E., Ultrasonic Motors: Their Models, Drives, Controls and Applications, ***Journal of Electroceramics***, 20:277-286 (2008).

EKLER

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

Sürme frekansı	40 kHz
Sürme gerilimi	130 V
Anma momenti	0,4 Nm
Anma çıkış gücü	4 W
Dönüş yönü	CW/CCW
Ağırlık	175 g
Çalışma sıcaklığı	-10/+50 ^{0}C
Tutma momenti	≤ 800 mNm
Rotor ataleti	7,2x10^{-6} kg/m^{2}
Statorun dış çapı	30x10^{-3} m
Statorun iç çapı	23,5x10^{-3} m
Statorun ortalama çapı	26,75x10^{-3} m
Temas yüzeyinin ortalama çapı	26,75x10^{-3} m
Statorun kalınlığı	1,5x10^{-3} m

EK-2 NEPEC-61 Piezoelektrik seramiğin özellikleri

Geçirgenlik	ε_{33}^{T} = 1,24x10^{-8} F/m
Elektromekanik kuplaj katsayısı	k_{31} = 0,33
	k_{31} = 0,67
Young katsayısı	Y_{11} = 7,6x10^{10} N/m^2
	Y_{33} = 6,4x10^{10} N/m^2
Piezoelektrik gerilme sabiti	d_{31} = -1,32x10^{-10} m/V
	d_{33} = 2,96x10^{-10} m/V
Çıkış gerilimi sabiti	g_{31} = -10,6x10^{-3} m/V
	g_{33} = -23,8x10^{-3} m/V
Pozisyon oranı	σ^{E} = 0,31
Mekanik kalite faktörü	Q = 1800
Curie sıcaklığı	T_c = 315 ^{0}C
Yoğunluk	ρ = 6,90x10^{-3} kg/m^3

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı	: GENCER, Altan
Uyruğu	: T.C.
Doğum tarihi ve yeri	: 08.02.1978 Kayseri
Medeni hali	: Evli
Telefon	: 0 (505) 839 62 85
Faks	:
e-mail	: altangencer@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Fırat Üniversitesi /Elektrik Eğitimi Bölümü	2002
Lisans	Fırat Üniversitesi/ Teknik Eğitim Fakültesi /Elektrik Öğretmenliği Bölümü	1999
Lise	Merkez E.M.L./Kayseri	1995

İş Deneyimi

Yıl	**Yer**	**Görev**
11 yıl	Halil İlik E.M.L.	Öğretmen

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Hobiler

Bilgisayar programcılığı, mikrodenetleyiciler, futbol