



**İNDÜKSİYON MOTORLARININ BAŞLANGIÇ
TORK SALINIMLARINI SÖNÜMLENDİREN YENİ
BİR SAYISAL DEVRE TASARIMI**

**2024
YÜKSEK LİSANS TEZİ
BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ**

Cengiz AYTEN

**Tez Danışmanları
Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY
Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**İNDÜKSİYON MOTORLARININ BAŞLANGIÇ TORK SALINIMLARINI
SÖNÜMLENDİREN YENİ BİR SAYISAL DEVRE TASARIMI**

Cengiz AYTEN

**Tez Danışmanları
Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY
Prof. Dr. Mehmet AKBABA**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Nisan 2024**

Cengiz AYTEN tarafından hazırlanan “İNDÜKSİYON MOTORLARININ BAŞLANGIÇ TORK SALINIMLARINI SÖNÜMLENDİREN YENİ BİR SAYISAL DEVRE TASARIMI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY

.....

Tez Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

.....

Tez İkinci Danışmanı, Bilgisayar Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/04/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Tuncay SOYLU (SÜ)

ONLINE

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Emrah ÖZKAYNAK (KBÜ)

.....

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Cengiz AYTEN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

İNDÜKSİYON MOTORLARININ BAŞLANGIÇ TORK SALINIMLARINI SÖNÜMLENDİREN YENİ BİR SAYISAL DEVRE TASARIMI

Cengiz AYTEN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanları:

Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

Nisan 2024, 46 sayfa

Özellikle endüstride yaygın şekilde kullanılan üç fazlı asenkron motorların rotor mili ve mile bağlı diğer mekanik parçalarında kalkış esnasında meydana gelen yüksek tork salınımları sebebiyle zamanla hasar meydana geldiği bilinmektedir. Bu hasarların önlenmesi veya azaltılması için literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Ancak mevcut yöntemler karmaşık olduğundan veya yüksek maliyetli olduğundan her yerde kullanılamamaktadır. Bu tezde asenkron motorun kalkış torku, fazlardan biri direkt hattan, diğer iki faz ise tetikleme açılarının zamana bağlı bir algoritmayla kontrollü olarak verilmesi sonucunda yumuşatılmıştır. Gerçekleştirilen çalışma laboratuvar ortamında üç fazlı 1 kW asenkron motorda test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar literatürle kıyaslandığında oldukça iyidir. Ayrıca tasarlanan devre ve yol verme algoritması mevcut yol verme yöntemlerine göre daha basit ve düşük maliyet ile kontrol sağladığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Asenkron motor, Faz kontrolü, Kalkış torku

Bilim Kodu : 92417



ABSTRACT

Master Thesis

A NEW DIGITAL CIRCUIT DESIGN TO DAMPEN THE STARTING TORQUE OSCILLATIONS OF INDUCTION MOTORS

Cengiz AYTEN

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Computer Engineering**

Thesis Advisors:

Assist. Prof. Dr. Ferhat ATASOY

Prof. Dr. Mehmet AKBABA

April 2024, 46 pages

It is known that the rotor shaft and other mechanical parts connected to the shaft of three-phase induction motors, which are widely used in industry, are damaged over time due to high torque oscillations during take-off. There are many studies in the literature to prevent or reduce these damages. However, existing methods cannot be used everywhere due to their complexity or high cost. In this thesis, the starting torque of the induction motor is softened by controlling one of the phases from the direct line and the other two phases by controlling the triggering angles with a time-dependent algorithm. The study was tested in the laboratory on a three-phase 1 kW induction motor. The results obtained are quite good compared to the literature. In addition, the designed circuit and starting algorithm show that it provides simpler and low-cost control compared to existing starting methods.

Keywords: Induction motor, Phase control, Starting torque

Science Code : 92417



TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, Danışmanlarım Prof. Dr. Mehmet AKBABA ve Dr. Öğr. Üyesi Ferhat ATASOY hocalarıma ve aileme, fedakarlıkları ve özverili destekleri için tüm kalbimle teşekkür ederim.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ASENKRON ELEKTRİK MOTORLARI VE BAŞLATMA YÖNTEMLERİ	3
2.1. ASENKRON MOTORLARIN TEMEL BİLEŞENLERİ.....	4
2.1.1. Stator.....	4
2.1.2. Rotor	4
2.1.3. Motor Mili	5
2.1.4. Rulmanlar	5
2.1.5. Hava Soğutma Sistemi.....	5
2.2.STATOR SARGILARI ETRAFINDA MANYETİK ALANIN OLUŞUMU ..	5
2.2.1. Manyetik Kuvvetin Oluşumu	6
2.2.2. Rotor ve Stator Sargılarının İşlevi	7
2.2.3. Asenkron Motorların Hız-Tork Karakteristiği.....	7
2.3. ASENKRON MOTOR ÇALIŞTIRMA YÖNTEMLERİ	8
2.3.1. Direkt Hattan Başlatma.....	8
2.3.2. Yıldız-Üçgen Başlatma.....	9
2.3.3. Rotor Dirençli Başlatma	9

	<u>Sayfa</u>
2.3.4. Frekans Konvertörü ile Başlatma	10
2.3.5. Yumuşak Başlatıcılarla Başlatma	10
 BÖLÜM 3	 12
LİTERATÜR TARAMASI.....	12
 BÖLÜM 4	 19
TORK ÖLÇME SİSTEMLERİ.....	19
TORK ÖLÇÜM METODOLOJİSİ.....	22
4.1. TORK ÖLÇÜM METODOLOJİSİ	27
4.2. DENEYSEL KURULUM.....	28
4.2. TORK ÖLÇÜM SİSTEMİ SONUÇLARI.....	28
 BÖLÜM 5	 29
DEVRE TASARIMI VE DENEYSEL SONUÇLAR	29
5.1. TASARLANAN DEVRE.....	29
5.1.1. Besleme Katı.....	30
5.1.2. Faz Yakalama Katı	30
5.1.3. Mikrodenetleyici İle Kontrol Katı	33
5.1.4. Yol Verme Katı.....	34
5.2. DENEYSEL SONUÇLAR	35
 BÖLÜM 6	 40
SONUÇ	40
KAYNAKLAR	41
ÖZGEÇMİŞ	46

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Sincap kafesli rotorun genel yapısı .	6
Şekil 2.2. Asenkron motorun hız-tork eğrisi .	8
Şekil 4.1. Kullanılan rotary enkoder.	23
Şekil 4.2. A, B ve Z kanallarına ait çıkış pulseleri ve periyot ilişkisi.....	23
Şekil 4.3. Açısal yer değiştirme.	24
Şekil 4.4. Ölçüm düzeneği.	27
Şekil 4.5. Enkoder ile manyetik tozlu fren ve bağlantıları.....	28
Şekil 5.1. Regüle edilmiş +5 V DC gerilim kaynağı.	30
Şekil 5.2. Geçiş tespit devresi.	31
Şekil 5.3. Opamp giriş (sinüs) ve çıkış (kare dalga) sinyalleri	32
Şekil 5.4. Mikrodenetleyici devresi.	34
Şekil 5.5. Yol verme devresi.	35
Şekil 5.6. Yüksüz tork ölçüm karşılaştırması.....	36
Şekil 5.7. Geçici tork titreşimleri (motor yük altındayken)	37

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Asenkron motor başlatma yöntemlerinin karşılaştırması.....	11
Çizelge 5.1. Direkt hatttan sürülen motorun deneysel ölçüm sonuçları.....	38
Çizelge 5.2. Devreden sürülen motorun deneysel ölçüm sonuçları.....	39



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

ns	: Döner manyetik alanın hızı (devir/Saniye)
f	: Şebeke Frekansı (Hertz)
p	: Asenkron Motor Kutup Sayısı
fr	: Rotor Frekansı
S	: Kayma (yüzdelik Oran)
nr	: Rotor Hızı devir/Saniye)
π	: Pi sayısı
θ	: Açısal Yol (radyan)
α	: Açısal İvme
S	: Dairesel yay uzunluğu
R	: çap uzunluğu
ω	: Açısal Hız
$d\omega$	: Açısal hızdaki değişim
dt	: Zamandaki değişim
$d\theta$	: Açısal değişim
τ	: Tork
I	: Eylemsizlik momenti
m	: Kütle
r	: Yarıçap

KISALTMALAR

AC	: Alternatif Akım (İng: Alternative Current)
DOL	: Doğrudan şebekeden besleme (İng: Direc On Line)
IM	: İndüksiyon Motorları (İng: Induction Motors)
VSD	: Değişken Hız Sürücü (İng: Variable Speed Drive)
2-D FEM	: Sonlu Eleman Dizisi hesaplama yöntemi (İng:)
SoS	: Bobinler arası yıldız diagramı (İng: Star of Slots)
PLC	: Programlanabilir Kontrol Ünitesi (İng: Programmable Logic Controller)
PFR	: Faz Hatası Rölesi (İng: Phase Fault Relay)
OBF	: Optimal Başlangıç Frekansı (İng: Optimal Beginning Frequency)
L-C	: Bobin Kondansatör
s	: Saniye
ABC/dqO	: Matris Dönüşüm Metodu
t	: zaman sabitesi
kHz	: Kilo Hertz
PID	: Matematiksel Kontrol Hesaplama Yöntemi
SI	: Uluslar arası ölçü birimi standartı
Mhz	: Mega Hertz
A0	: Ardunio işlemci pin numarası
kW	: Kilo Watt
CMOS	: Yarı iletken metal oksit teknolojisi
V	: Volt
EM	: Elektromanyetik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Asenkron motorlar, endüstriyel ve ticari uygulamalarda yaygın olarak kullanılan elektrik motorlarıdır. Bu motorların en önemli özelliği, döner manyetik alanın hızının, rotor hızından farklı olmasıdır. Asenkron motorlar, sabit devir sayısı gerektiren işler için idealdir ve bu sebepten genellikle ayarlanabilir hız gerektirmeyen uygulamalarda tercih edilir. Bu motorlar, basit yapıları, sağlamlıkları ve düşük bakım gereksinimleri nedeniyle popülerdir. Ayrıca, yüksek başlangıç torku ve verimlilikleriyle de bilinirler.

Asenkron motorlar, enerji sektöründen imalat sanayiine, gıda işleme tesislerinden konveyör sistemlerine kadar geniş bir kullanım alanına sahiptir. Özellikle, sabit hızda çalışması gereken pompalar, fanlar, konveyör bantlar ve basit makinelerde yaygın olarak kullanılır. Bu motorlar, endüstriyel otomasyon ve üretim hatlarında da önemli bir rol oynar.

Asenkron motorların yaygın kullanımı, enerji verimliliği ve operasyonel güvenilirlik açısından önemlidir. Bu motorlar, düşük enerji tüketimi ve uzun ömürlü olmaları sayesinde, enerji maliyetlerini ve karbon ayak izini azaltmada kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, asenkron motorların geniş yük aralığındaki istikrarlı performansı, onları birçok endüstriyel ve ticari uygulama için ideal kılar.

Doğrudan hattan (İng: Direct On-Line, DOL) başlatma yöntemi en ucuz ve en yaygın kullanılan yöntemdir. Üç fazlı asenkron motorlar DOL yöntemi ile tam voltajla başlatıldığında, hızlanma sırasında tam yük torkunu aşan büyük tork darbeleri üretecektir [1–5]. Bu, tahrik edilen ekipman üzerinde şok yüklemeye ve mil, dişli, kaplin vb. mekanik sistem bileşenlerine zarar verebileceğinden, istenmeyen sonuçlar ile karşılaşılmasına neden olabilir. Bu durum ayrıca motorlarda sargı ve yalıtım arızasına ve elektrik şebekelerinde ekstra strese neden olabilecek yüksek ani akım çekilmesine sebep olacaktır. Büyük atalet yükleri ve büyük statik yükler, motorların

yeterince hızlı bir şekilde hızlanmasını engelleyebilir, bu da motorların termal aşırı yükte devreye girecek kadar uzun süre yüksek akım çekmesine neden olabilir. Bazı süreçler tüm bu zararlı etkilere karşı önlem almayı gerektirebilir. Bu nedenle, bu zararlı etkileri önlemek için şunlara ihtiyaç vardır [6]:

- Doğrudan çevrimiçi başlatma sırasında tork titreşimlerini azaltmak
- Kalkış akımlarının genliğini azaltmak
- Hızlanma süresini azaltmak,

Böylece geçici (ani) akım yeterince kısa olacak ve dolayısıyla sargılar ve yalıtım üzerindeki kötü stres azalacaktır.

Bu tezde amaç asenkron motorlara enerji verildiğinde oluşan başlangıç torkunun gerçek hayat koşullarında incelenmesi ve teorik olarak tasarlanmış ve simülasyon ortamında başarıya ulaşmış yöntemin deneysel olarak doğrulanmasını sağlamaktır.

Ayrıca mevcut olanaklarda kalkış torkunu ölçecek bir system bulunmamasından dolayı tork ölçüm sisteminin geliştirilmesi ayrı bir iş paketi olarak ele alınmıştır.

Tezin kalan kısmı aşağıdaki şekilde organize edilmiştir: Tezin ikinci bölümünde asenkron elektrik motorları ve başlatma yöntemleri, üçüncü bölümde motor sürme ile ilgili literatür verilmiştir. Dördüncü bölümde tork ölçme sistemleri ve ilgili literatürle birlikte deneysel düzenekte kullanılmak üzere geliştirilen tork ölçme sistemi sunulmuştur. Beşinci bölümde tasarlanan devre ve deneysel doğrulamayla elde edilen sonuçlar sunulmuş ve altıncı bölümde de tartışma yapılmıştır.

BÖLÜM 2

ASENKRON ELEKTRİK MOTORLARI VE BAŞLATMA YÖNTEMLERİ

Asenkron elektrik motorları (indüksiyon motorları (IM)), dönen manyetik alanın hızı ile rotor hızı arasında bir fark olduğunda çalışan motorlardır. Asenkron motorlar, basit yapıları ve az hareketli parçaları sayesinde oldukça dayanıklıdır. Bu motorlar, zorlu endüstriyel ortamlarda bile uzun süreli ve güvenilir performans sergileyebilir. Asenkron motorlar, üretim maliyeti açısından nispeten ucuzdur. Bakım gereksinimleri düşük olduğundan, işletme maliyetleri de azdır. Modern asenkron motorlar, özellikle nominal hız ve yüke yakın çalıştıklarında enerji verimliliği açısından oldukça iyidir. Enerji tasarrufu, endüstriyel işletmeler için maliyet etkinliği ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemlidir. Bu motorlar, farklı boyut ve güç seviyelerinde mevcuttur, bu da onları çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun kılar. Pompalar, fanlar, konveyör bantları ve birçok makine bu motorları kullanır. Asenkron motorlar, modern kontrol sistemleriyle kolayca entegre edilebilir. Frekans konvertörleri ve diğer elektronik kontrol sistemleri ile birlikte kullanıldığında, hız ve tork kontrolü kolaylaşır. Aşırı yük ve elektriksel zorlanmalara karşı dayanıklıdır. Operatörler için güvenli ve kolay işletme imkanı sunarlar. Elektrik motorları, fosil yakıtlara kıyasla daha çevre dostudur. Karbon ayak izini azaltmada ve enerji verimliliği stratejilerinde önemli bir rol oynarlar. Bu nedenlerle, asenkron motorlar endüstriyel uygulamalarda tercih edilen, güvenilir ve verimli çözümler sunar.

Kullanım amacına göre, tek fazlı veya üç fazlı alternatif akım ile çalışabilir durumda tasarlanabilir. Asenkron motorlar, yapı itibarı ile iki ana bölümden meydana gelir. Bu bölümler stator ve rotor olarak adlandırılır. Stator, motorun gövdeye bağlı sabit kısmıdır. Motor milinin hareket etmesi için gerekli döner manyetik alanın meydana geldiği motor sargıları bu kısımda bulunan oluklu yapının içinde yerleşmiş şekildedir. Rotor, hareketli olan motor milinin bütünleşik olduğu kısımdır. Asenkron motorlar, rotor tipine göre iki çeşit olabilir. Rotor tipleri, sincap kafesli veya rotoru sargılı tip

olabilir [6]. Sincap kafesli asenkron motorların rotorunda sargı bulunmaz. Silisli sac paketlerine açılan oluklara bakır çubukların yerleştirilmesi ve çubukların uç kısımlarının halka biçimli iletkenler ile kısa devre edilmesi sonucu sincap kafesine benzer bir yapıdadır. Statorda meydana gelen döner manyetik alan rotor üzerinde bulunan bu kısa devre çubuklarında akım indüklenmesine ve manyetik alanın oluşması ile motor milinin hareket etmesine neden olur. Rotoru sargılı asenkron motorlarda rotor üzerinde bulunan sargılar, mil üzerinde bulunan iletken halkalara elektriksel olarak bağlıdır. Bu halkalar kısa devre edilerek veya dirençler üzerinden irtibatlandırılarak, sincap kafesli yapıda olduğu gibi rotor üzerinde bulunan sargılarda indüklenen akımın sargılar üzerinden akması sonucu manyetik alan oluşması ve neticesinde motor milinin hareketi sağlanır. Endüstride, olarak sincap kafesli asenkron motorlar, bakım gerektirmediği ve çok sağlam bir yapıda olması nedeni ile yaygın olarak kullanılır.

2.1. ASENKRON MOTORLARIN TEMEL BİLEŞENLERİ

Endüstride ve diğer alanlarda kullanılan çeşitli asenkron motor tipleri aşağıda sıralanan temel bileşenlerden oluşur.

2.1.1. Stator

Motor gövdesini oluşturan ana yapı ve bu yapıya tümleşik olarak konumlanmış sac paketlerin bulunduğu kısma stator denmektedir. Stator içinde yerleştirilmiş silisli sacların bulunduğu iç kısım, döner manyetik alanın oluşturulduğu stator sargılarının bu alanda yerleşik düzen alabilmeleri için oluklu yapıya sahiptir. Bu olukların şekilleri, motor yapısına göre değişkenlik gösterir.

2.1.2. Rotor

Stator içinde motor mili ile tümleşik durumda olan ve motor mili ile beraber dönen kısmın tümüdür. Statorda olduğu şekilde silisli sac paketlerin bir araya getirilerek oluşturulmuş yapıya sahiptir. Döner kısım olan rotor, statorun manyetik alanı tarafından indüklenen akımla dönerek motorun mekanik enerjisini üretir.

2.1.3. Motor Mili

Rotor elemanları ile bütünleşik yapıda olan ve rotor ile eş zamanlı olarak dönen, ısı işlem ile sertleştirilmiş çelik metal kısımdır. Dönme hareketinin oluşturduğu kuvvet, bir kaplin veya diğer tip bağlantı elemanı ile ihtiyaç duyulan uygulama için kullanılabilir.

2.1.4. Rulmanlar

Motor milinin rahat hareket edebilmesi için bilyalı yapıya sahip olan rulmanlar milin her iki tarafına yerleştirilerek, sürtünme, aşınma, ses ve titreşimi en az seviyeye getiren bileşenlerdir.

2.1.5. Hava Soğutma Sistemi

Motor sargılarından geçen ve rotorda indüklenen kısa devre akımlarının, çalışma esnasında oluşturduğu ısı nedeni ile motor elemanlarının sıcaklığı artar. Bu ısının ortamdan uzaklaştırılması ve motor elemanlarının ısınmasını önlemek için motor miline bağlı pervanenin oluşturduğu hava akımı rotor üzerinde açılmış delikler ve stator üzerinde bulunan boşluklardan geçerek motorun soğuması sağlanır.

2.2. STATOR SARGILARI ETRAFINDA MANYETİK ALANIN OLUŞUMU

Şebeke geriliminin stator üzerindeki sargılara uygulanması ile statorda, stator sargıları etrafında döner manyetik alan oluşturmaya başlar. Oluşan bu manyetik alanın dönme hızı, “senkron hız” olarak adlandırılır.

$$n_s = 2 * f / p \quad (2.1)$$

Eşitlik 1.1’de;

n_s : alanın dönme hızı,

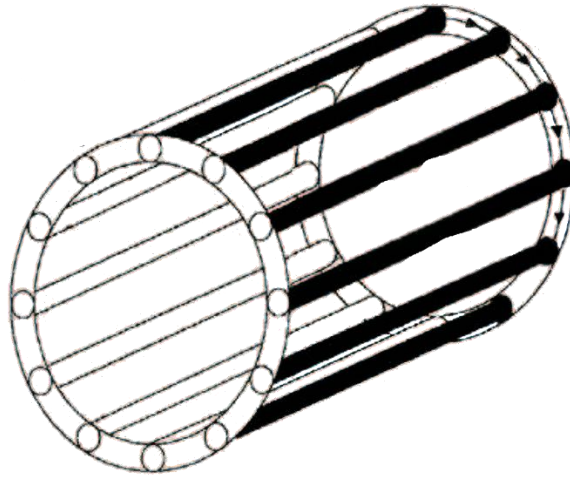
f : şebeke frekansı,

p : kutup sayısı

olacak şekilde 1 saniyedeki devir sayısını ifade eder [7].

Döner manyetik alan, kısa devre çubukları üzerinde gerilim indükler. İndüklenen gerilim, kısa devre çubukları üzerinden akım akmasına neden olur. Kısa devre çubuklarından akan akım stator üzerinde yeni bir manyetik alan oluşturduğundan oluşan manyetik alan gerilim çubuklarına aynı zamanda manyetik kuvvet uygulayacağından rotor, hareketsiz olan stator içinde dönmeye başlar [8].

2.2.1. Manyetik Kuvvetin Oluşumu



Şekil 2.1. Sincap kafesli rotorun genel yapısı [8].

Elde edilen gerilimin genliği döner alanın ve rotorun dönüş hızı ile döner alanın hız farkına bağlıdır. Bu hız farkı rotorun durduğu andaki konumunda iken çektiği yüksek akım anında en üst seviyededir. Bu durumda rotor akımının frekansı 50 Hz'dir. Elektrikli makinenin ilk çalışmaya başladıktan sonra rotor hızlandıkça, döner manyetik alan ile senkron hız arasındaki fark azalır ve bunun sonucunda rotorda endüklenen gerilimin frekansı azalır. Rotor akımının ve endüklenen gerilimin genliği azalır. Rotor hızı statorda meydana gelen döner alanın açısal hızına eşit olduğunda oluşan gerilim, akım ve moment (tork) değerleri sıfır olur. Motor (rotor) hızı senkron açısal hızdan düşük olmalıdır. Oluşan döner manyetik alan hız farkına kayma adı verilir. Kayma Eşitlik 1.2'deki şekilde ifade edilir.

$$S = (ns - nr) / ns \quad (2.2)$$

Burada ns devir/saniye cinsinden hesaplanmaktadır [7].

Rotor akımının frekansı Eşitlik 1.3’de verilmiştir.

$$f_r = S * f \quad (2.3)$$

Nominal çalışma şartları altında kayma, % 1 ile % 5 arasında gerçekleşir [8].

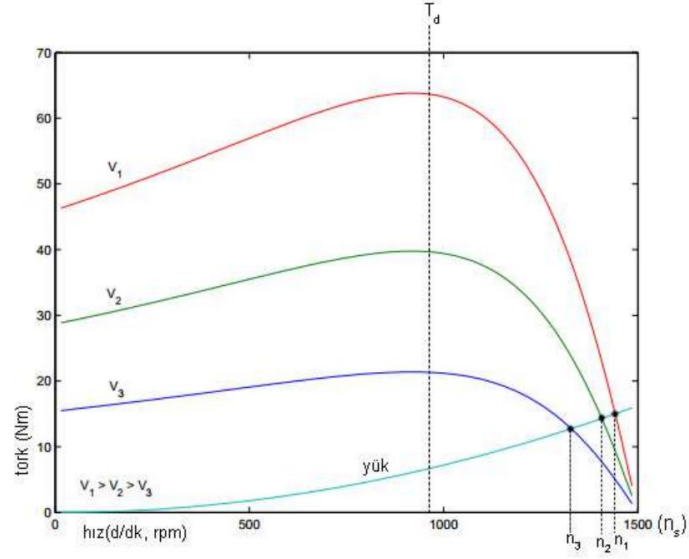
2.2.2. Rotor ve Stator Sargılarının İşlevi

Stator ve rotoru sargılı tip olan motor sargılarının işlevi, ana işlev olarak, elektrik makinasının hareket kabiliyetini sağlamak, akımın yönünü ve şiddetini değiştirerek devir, tork gibi değişkenlerin kontrolünün sağlanması ile motor verimliliğini artırmak için kullanılır.

Rotor sargısı, elektrik motorunun dönen kısmı olan rotorun üzerinde motor mili ile beraber dönen sargılardır. Statorun meydana getirdiği manyetik alanın indüklediği akımın kontrolünü sağlanması ile verimlilik artırılır. Stator sargısı, elektrik motorunda bulunan statorun, sabit kısmın üzerinde bulunan sargılardır. Rotorun dönmesi için gereken döner manyetik alan bu sargılar üzerinde şebeke gerilimine bağlı olarak oluşur.

2.2.3. Asenkron Motorların Hız-Tork Karakteristiği

Asenkron motorların hız-tork karakteristiği, motorun hızının motor torku üzerindeki değişimini gösterir. Motorun en yüksek torkunu, en düşük hızda verdiği nokta, motor verimliliğinin en yüksek olduğu noktadır. Şekil 1.2’deki grafiğin x eksenini motor hızı, y eksenini, motor hızına göre torkdaki değişimi göstermektedir. Bu tür grafikler, motor performansın belirlenmesi ve kullanım şekline göre motor seçimini belirlemek için kullanılır. Asenkron motorların hız tork-grafiği, başlangıç torku yüksek olacak şekilde tasarlanır. Rotor üzerinde bulunan kısa devre çubuklarının direncinin olabildiği kadar yüksek olması, motor torkunu artırır [9,10].



Şekil 2.2. Asenkron motorun hız-tork eğrisi .[9]

Asenkron motorları çalıştırma yöntemleri şu şekilde sıralanabilir [11–14]:

- Direkt hattan başlatma
- Yıldız-Üçgen başlatma
- Rotor dirençli başlatma
- Frekans konvertörü ile başlatma
- Yumuşak başlatıcılarla başlatma

2.3. ASENKRON MOTOR ÇALIŞTIRMA YÖNTEMLERİ

Asenkron motorların çalıştırma yöntemlerinin seçimi, çok yönlü bir değerlendirme gerektirir. Her yöntemin avantajlarını ve sınırlamalarını dikkate alarak, uygulamanın özel gereksinimlerine en uygun çözümü seçmek, hem operasyonel verimlilik hem de maliyet etkinliği açısından önemlidir [15,16].

2.3.1. Direkt Hattan Başlatma

Direkt başlatma, asenkron motorların en basit ve yaygın başlatma yöntemidir. Bu yöntem, motorun doğrudan şebeke gerilimine bağlanmasıyla gerçekleşir. Motor, nominal gerilim ve frekansta çalıştırılarak hızlanır. Direkt başlatmada, motor sargılarına anlık olarak yüksek akım uygulanır. Bu akım, motorun nominal akımının

6 ila 10 katı büyüklüğünde olabilir [16–19]. Ek ekipman gerektirmez, bu nedenle kurulumu ve bakımı kolaydır. Motor, anında tam güçte çalışmaya başlar. Ancak şebeke üzerinde büyük gerilim düşüşlerine ve enerji kalitesi sorunlarına yol açabilir. Ayrıca motor ve bağlı ekipman üzerinde anlık yüksek tork nedeniyle mekanik stres oluşur. Bundan dolayı küçük ve orta büyüklükteki motorlar için uygundur, büyük motorlar için uygun değildir. Direkt başlatma genellikle küçük güç gereksinimine sahip ev aletleri, küçük pompalar ve fanlarda tercih edilir.

2.3.2. Yıldız-Üçgen Başlatma

Yıldız-Üçgen başlatma, özellikle orta ve büyük güç gereksinimi olan asenkron motorlarda kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem, motorun ilk olarak "yıldız" konfigürasyonunda, daha sonra ise "üçgen" konfigürasyonunda çalıştırılmasını içerir. Motor ilk etapta yıldız konfigürasyonunda çalıştırılır. Bu durumda, fazlar arası gerilim, nominal gerilimin $\sqrt{3}$ katı azalır, bu da motorun başlangıç akımını önemli ölçüde düşürür. Motor belirli bir hıza ulaştıktan sonra, üçgen konfigürasyonuna geçirilir. Bu aşamada motor, tam nominal gerilim ve güç ile çalışır. Böylece motorun başlangıç akımı önemli ölçüde düşürülerek şebeke üzerindeki etkiler azaltılır. Bununla birlikte motor ve bağlı ekipmanlar üzerindeki mekanik stres azalır. Dolayısıyla daha verimli bir başlatma süreci sağlar [19]. Ancak yıldız-üçgen geçişi için özel kontroller ve devre elemanları gereklidir. Yıldız konfigürasyonunda motor, düşük tork ile başlar ve bu bazı uygulamalar için yetersiz olabilir. Bu yöntem, orta ve büyük güç gereksinimine sahip motorlar için uygun olup, özellikle sanayi tesislerindeki pompalar, fanlar ve konveyör sistemlerinde tercih edilir.

2.3.3. Rotor Dirençli Başlatma

Rotor dirençli başlatma, özellikle yüksek güç gerektiren asenkron motorlarda kullanılan bir başlatma yöntemidir. Bu yöntem, motora eklenen dış rotor dirençleri aracılığıyla gerçekleştirilir. Motorun rotor devresine seri olarak eklenen dirençler, başlangıç akımını sınırlar ve motorun daha yumuşak bir şekilde hızlanmasını sağlar. Motor hızlandıkça, eklenen dirençler aşamalı olarak azaltılır veya devre dışı bırakılır, bu sayede motor nominal hıza yaklaşır. Bu sayede yüksek başlangıç akımı önemli

ölçüde düşürülmüş olur. Aynı zamanda motorun hızlanma süreci daha kontrollüdür, bu da mekanik stresi azaltır ve başlangıçta yüksek tork üretme kapasitesine sahiptir. Buna karşın ek dirençler ve kontrol sistemleri gerektirir. Ek olarak düzenli bakım ve dirençlerin zamanla değiştirilmesi gerekebilir. Ayrıca dirençler üzerindeki enerji kaybının verimliliği azaltılabileceği dikkate alınması gereken bir diğer durumdur. Bu yöntem, özellikle ağır sanayi uygulamalarında, yüksek tork gerektiren durumlar için idealdir, örneğin, büyük boyutlu pompalar, kırıcılar ve konveyör sistemleri.

2.3.4. Frekans Konvertörü ile Başlatma

Frekans konvertörü ile başlatma, asenkron motorların hızını ve torkunu hassas bir şekilde kontrol etmeyi sağlayan modern bir yöntemdir. Bu yöntem, motorun elektrik frekansını ayarlayarak çalışmasını sağlar. Frekans konvertörü, şebeke geriliminin frekansını değiştirerek motorun hızını ayarlar. Motor, düşük frekanstan başlayarak yavaşça nominal hıza çıkartılır, bu da yavaş ve kontrollü bir başlangıç sağlar. Bu şekilde motor hızı, uygulamanın gerektirdiği şekilde hassas bir şekilde ayarlanabilir. Motor, sadece gereken enerjiyi kullanarak çalışır, bu da enerji verimliliğini artırır. Başlangıç akımı önemli ölçüde azalır, bu da şebeke üzerindeki etkileri ve mekanik stresi azaltır. Buna karşın frekans konvertörleri, diğer başlatma yöntemlerine göre daha pahalıdır. Kurulumu ve bakımı daha karmaşıktır. Elektronik parazit ve girişimler oluşabilir. Frekans konvertörü ile başlatma, hız kontrolünün kritik olduğu uygulamalarda tercih edilir, örneğin hassas işleme makineleri, konveyör bantları ve fanlar.

2.3.5. Yumuşak Başlatıcılarla Başlatma

Yumuşak başlatıcılar, asenkron motorların başlatma sürecini yumuşatarak hem motor hem de şebeke üzerindeki yükü azaltan cihazlardır. Bu cihazlar, motorun başlangıç akımını ve torkunu kontrollü bir şekilde artırır. Yumuşak başlatıcılar, motor sargılarına uygulanan voltajı kademeli olarak artırır ve başlangıçta uygulanan düşük voltaj, motorun başlangıç akımını azaltır. Bu durum motor ve bağlı ekipmanlar üzerindeki mekanik stresin, şebeke üzerindeki voltaj düşüşleri ve akım dalgalanmalarının azaltılmasını sağlar. Böylece motorun ve mekanik parçaların ömrünü uzatır. Ancak

ilave bir cihaz gerektirir, bu da ek maliyet anlamına gelir. Ayrıca bazı uygulamalar için başlangıç torku yetersiz olabilir. Yumuşak başlatıcılar, özellikle şebeke etkilerinin minimize edilmesi gereken durumlarda, orta ve büyük boyutlu motorlarda kullanılır. Tipik uygulamalar arasında büyük fanlar, pompalar ve konveyörler bulunur.

Asenkron motorları çalıştırma yöntemleri Çizelge 2.1’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir [19].

Çizelge 2.1. Asenkron motor başlatma yöntemlerinin karşılaştırması.

Başlatma Yöntemi	Avantajlar	Dezavantajlar	Uygulama Alanları
Direkt Başlatma	•Basit ve düşük maliyet •Hızlı yanıt	•Yüksek başlangıç akımı •Mekanik stres	•Küçük motorlar
Yıldız-Üçgen Başlatma	•Orta ve büyük motorlar için uygun •Daha düşük başlangıç akımı	•Başlangıçta düşük tork •Ek kontrol gereksinimi	•Sanayi tesislerindeki pompalar, fanlar
Rotor Dirençli Başlatma	•Yüksek tork üretimi •Kontrollü hızlanma	•Ek maliyet ve bakım •Enerji kaybı	•Ağır sanayi uygulamaları
Frekans Konvertörü ile Başlatma	•Hassas hız kontrolü •Enerji verimliliği	•Yüksek maliyet •Karmaşık kurulum	•Hassas işleme makineleri
Yumuşak Başlatıcılar	•Mekanik stresin azaltılması •Şebeke etkisinin azaltılması	•Sınırlı tork kapasitesi •Ek maliyet	•Orta ve büyük boyutlu motorlar

BÖLÜM 3

LİTERATÜR TARAMASI

Direkt başlatma yöntemi, en ucuz ve en yaygın kullanılan başlatma yöntemidir. Ancak, üç fazlı asenkron motorlar tam gerilimle direkt başlatıldığında, ivmelenme sırasında yüksek tork dalgalanmaları üretebilir. Bu, tahrik edilen ekipmana şok yüklemesi yapabilir ve şaft, dişli, kaplin gibi mekanik sistem bileşenlerine zarar verebilir. Ayrıca, motorlar yüksek akım çekimi yaparak, sınırlı üretim ve dağıtım kapasitesine sahip güç tesislerine ekstra stres yaratabilir.

Sorunların çözümüne yönelik ilk çözüm denemeleri, azaltılmış gerilimle başlatma ile başlamış ve zamanla daha pürüzsüz başlatma yöntemlerine geçilmiştir [18,20–24]. Asenkron motorların yaygın kullanımı sebebiyle çalışmalar geçmişten günümüze devam etmektedir. Bu kısımda literatürden çeşitli örnekler incelenecektir.

Asenkron motorlarda torkun gerilimin karesi ile, akımın ise gerilim ile doğru orantılı olduğu iyi bilinmektedir. Bu nedenle, azaltılmış voltaj başlatma ile, ani akımda yeterli azalma elde etmek için torkta aşırı azalmaya sebep olacaktır. Böyle bir durumda motorlar, statik veya kısmen statik yükler ve yüksek atalet yükleri gibi yüksek kalkış torku gerektiren yük türlerine karşı yeterli tepkiyi veremez. Bu gibi durumlarda, kafes asenkron motorlardan yaklaşık %70 daha pahalı ve daha az sağlam olan sargılı rotorlu asenkron motorlar kullanılarak sorun çoğunlukla kısmen çözülür. Ayrıca başlangıç torku darbelerinden kaynaklanan zararlı etkileri de gideremez. Öte yandan, yumuşak ve pürüzsüz başlatma yöntemleri, motorların etrafında birçok ekipman ve bileşen içerdiğinden oldukça pahalı kurulumlardır. Tork darbelerini azaltmaya yönelik daha önceki bir çalışmada, motorların tasarım parametreleri üzerinde bir tür optimizasyon işlemi uygulanmış ve yaklaşık %30'luk bir azalma elde edildiği bildirilmiştir [18].

Sukarma ve diğerleri tarafından 2020 yılında yayımlanan çalışmada, üç fazlı IM'lerin başlatılması için doğrudan çevrim (İng: Direct On Line - DOL), yıldız-üçgen ve değişken hız sürücüsü (İng: Variable Speed Drive - VSD) yöntemleri, ortaya çıkan yüksek başlangıç akımı ve bu akımı azaltmak için kullanılan farklı yöntemleri analiz edilerek karşılaştırılmıştır.

Araştırma, motorda yük olmadığı ve yüklü olduğu durumlarda bu üç başlangıç yönteminin akım, voltaj, güç ve toplam harmonik bozulma açısından farklılıklarını incelemiştir. DOL kullanımında, başlangıç akımı normal akımın 4-8 katı olabilirken, Yıldız-Üçgen yönteminde bu değer sadece 1.8 - 2.6 katı arasında değişir. Çalışmanın sonuçlarına göre, üç fazlı bir asenkron motorun dönüşünü ayarlamak yalnızca VSD kullanılarak yapılabilir. DOL, Yıldız-Üçgen ve VSD kullanılarak başlatılan üç fazlı asenkron motorlar arasında, VSD kullanımı en düşük başlangıç akımına sahiptir. VSD kullanılarak, üç fazlı motorun hızlanması daha düzgün hale gelmektedir [19].

Raziee ve diğerleri elektrik makinelerinin verimliliğini artırmak amacıyla endüstri tarafından ilgi gören kombine yıldız-üçgen sargıları ele almaktadır. Bu sargı türünün etkinliğini göstermek için, henüz doğrulanmamış olan farklı yöntemler kullanılmış ve bu yöntemler bazen birbirleriyle çelişmiştir. Çalışmada, kombine yıldız-üçgen sargılar için sargı faktörlerini hesaplamak üzere yeni formüller önerilmiştir ve bu formüllerin doğruluğunu kontrol etmek için 2-D FEM ve belirgin kutuplu senkron bir makine üzerinde deneysel testler sunulmuştur. Ölçümler, kombine sargıların her iki dönüş yönünde de sorunsuz bir şekilde uygulanabileceğini göstermiştir. Çalışma sonuçlarına göre sargı faktörlerini hesaplamak için en kesin ve güvenilir yöntemlerden biri, Bobinler Arası Yıldız (İng: Star of Slots - SoS) diyagramına göre tüm bobin kenarlarına indüklenen voltajları hesaplamaktır. Bu yöntem, istisnasız her türlü sargı için uygulanabilir. Sargı faktörü tanımı, yıldız sargıları için de, delta sargıları için de geçerlidir çünkü bu sargıların hat ve faz voltajları aynıdır [25].

Wiryadinata ve diğerleri sanayi makinelerinde kullanılan üç fazlı asenkron motorların korunması ve başlatılması üzerine odaklanmaktadır. Çalışma, üç fazlı asenkron motorların yüksek başlangıç akımlarını ve düşük başlangıç torkunu azaltmak için uygun bir başlangıç yöntemi olan yıldız-üçgen yöntemini kullanmanın önemini

vurgulamaktadır. Yıldız-üçgen yönteminde yıldızdan üçgene geçiş sırasında bazı sorunlar yaşanabilmektedir, bu da sistemin performansını etkileyebilmektedir. Bu çalışmada, otomasyon alanında kullanılan Programlanabilir Mantık Kontrolörü (İng: Programmable Logic Controller - PLC) gibi kontrol araçlarından yararlanılmaktadır. Çalışmaya göre PLC, sadece rölelerin yerini almakla kalmaz, aynı zamanda birçok ek kontrol fonksiyonu da sunar. Geleneksel röle tabanlı kontrol sistemlerinde, bir röle arızalandığında sistem otomatik olarak durur ve röle tamir edilene kadar çalışmaz. Bu süreç genellikle uzun zaman alır. PLC kullanıldığında ise, sistem programının değiştirilmesiyle sistem kısa sürede yeniden çalıştırılabilir. Çalışmanın sonucuna göre, yıldız-üçgen başlangıç yöntemiyle başlangıç akımı, doğrudan üçgen başlangıç yöntemine göre %47.69 oranında azaltılmıştır. Deneysel sonuçlara göre araştırmada kullanılan üçüncü koruma cihazı olan Faz Hatası Rölesi (PFR), tek faz bozukluğu veya anormal koşullarda etkili bir şekilde çalışmıştır. Mini devre kesici kısa devre durumunda sistemi güç kaynağından otomatik olarak ayırmıştır [26].

Chen ve Bi tarafından 2021 yılında yayımlanan çalışma, üç fazlı asenkron motorların başlatma performansının önemine odaklanmakta ve motor sürücüsünün güvenli akım aralığı içinde mümkün olan en yüksek başlangıç torkunu elde etmek için optimal bir başlangıç frekansı tespit etmeyi amaçlamaktadır [17]. Bu çalışma, geleneksel yöntemlerin neden olduğu sorunları çözmeyi, motor sisteminin başlangıç performansını önemli ölçüde iyileştirmeyi ve motor sürücüsünün akım gereksinimini etkili bir şekilde azaltmayı hedeflemektedir. Araştırmacılar, motorun elektromanyetik (EM) yapısının başlangıç performansı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Stermecki A. ve Lee G. gibi araştırmacılar, stator sargısı, rotor yuvası şekli ve rotor çubuğu şeklinin optimizasyonu üzerine detaylı çalışmalar yaparak motorun başlangıç torkunu EM yapısından nasıl artırabileceklerini tartışmışlardır [27,28]. Chen ve Bi, IM'lerin frekans karakteristiklerinden türetilen bir Optimal Başlangıç Frekansı (OBF) algoritması önermektedir [17]. Teorik analiz ve deneysel sonuçlarla OBF'nin geçerliliğini doğrulamışlardır. Aynı akım için doğrudan ve yumuşak başlatma yöntemlerine kıyasla, OBF ile motorun başlangıç torku en büyük olabilir. Çalışmaya göre bu, IM'nun başlangıç performansını önemli ölçüde iyileştirebilir ve motor sürücüsünün akım fazlalığını etkili bir şekilde azaltabilir. Teorik analiz, OBF algoritmasının stator parametreleriyle ilgili olmadığını, yalnızca rotor parametreleri ve

motorun lineer durumundaki manyetizasyon indüktansı ile ilgili olduğunu gösterdiğini söylemişlerdir. Sonuçlara göre IM'nun parametreleri, motorun dönme durumuna ve kullanılan ölçüm yöntemine bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Sonuç olarak araştırma sonuçları, motorun lineer ve döner durumlarındaki ölçülen parametreler kullanılarak yeterli doğrulukla OBF'nin hesaplanabileceğini de göstermektedir.

Sadoughi ve Sadeghkhanı IM'lerin başlatılması sırasında ortaya çıkan yüksek başlangıç akımını ele almakta ve bu akımı azaltmak için bir yöntem önermektedir [16]. Bu çalışma, IM'lerin başlangıç akımını azaltmak için güç elektroniği tabanlı bir yaklaşım önermektedir. Bu amaçla seri bir gerilim kaynaklı çevirici kullanılmaktadır. Tek döngü kontrolü tekniği, seri gerilim kaynaklı çevirici için anahtarlama sinyalleri oluşturmak üzere kullanılmaktadır. Çalışmaya göre bu yöntem, IM'nin stator akımına göre dinamik bir direnç sunarak başlangıç akımını azaltır ve IM'nin hata atlama kapasitesini artırır. Çalışmada sunulan sonuçlara göre yöntem, doğrudan bağlı IM'ye kıyasla başlangıç akımını yaklaşık 2,5 kat azaltmaktadır. Ayrıca simetrik ve asimetrik hatalar sırasında önerilen kontrolün davranışının incelenmesi, bu koşullarda motor akımının etkili bir şekilde azaltıldığını (doğrudan bağlı IM'ye kıyasla 5 kata kadar) ve bu kontrolün hata atlama kapasitesini doğruladığını bildirmişlerdir.

Bayındır ve Çolak üç fazlı asenkron motorlar için klasik yol verme yöntemlerini PIC 16F84 mikrodenetleyicisi kullanarak gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmada, yıldız-üçgen, seri direnç ve rotoru sargılı asenkron motorlara yol verme yöntemleri ele alınmıştır. Bu yöntemlerde kullanılan kontaktör, zaman rölesi ve kontak sistemi yerine triyaklar kullanılmıştır. Triyakların geyt sinyalleri mikrodenetleyiciden kontrol edilmiştir. Bu sayede, elektromekanik elemanlardan arındırılmış, daha az bakım gerektiren ve güvenilir bir yol verme sistemi geliştirilmiştir [29]. Çalışma bu haliyle asenkron motorlara yol vermede mikrodenetleyici kullanmanın etkinliğini ve avantajlarını ortaya koymaktadır.

Başka bir çalışmada, temel frekansta rezonansa giren, besleme ve motor arasındaki her faza uygun bir dirençle kapatılmış bir seri rezonanslı L-C devresi yerleştirilerek darbeli torkun ilk zirvesinde yaklaşık %60 azalma sağlandığı bildirilmiştir [18].

Zenginobuz ve diğerkleri motorun başlatılması sırasında akım ve tork profillerinin ihtiyaçlara göre özenle şekillendirilmesi gerektiğini vurguluyor. Çalışmada, büyük AC motorların başlatılması için güç yarıiletkenleri kullanan AC motor başlatıcılarının giderek artan bir şekilde elektromanyetik hat başlatıcıları ve geleneksel azaltılmış gerilim başlatıcıları yerine kullanıldığı belirtiliyor. Çalışmaya göre tristör kullanan yumuşak başlatıcılar, motorun gerilimine indirgenmiş gerilim uygulayarak, sınırlı başlangıç akımı ile kontrollü yumuşak başlatma sağlamaktadır. Tristörlü gerilim kontrol cihazındaki tetikleme açısının dinamik bir fonksiyonunu kullanmanın, geçici performansı iyileştirmek için basit ve etkili bir yol olduğu belirtilmektedir. Motorun başlangıçta ve tekrar bağlandığında şafta yansıyan elektromanyetik tork dalgalanmalarının tahrik edilen ekipmanlara şoklara ve mekanik sistem bileşenlerinde, özellikle millerde, kaplinlerde ve dişlilerde uzun vadede yorgunluk nedeniyle hasara yol açabildiği belirtilmektedir. Çalışma, başlangıç ve tekrar bağlama sırasında elektromanyetik tork dalgalanmalarını ortadan kaldırmayı ve başlangıç süresi boyunca hat akımını neredeyse sabit bir değerde tutmayı amaçlayan bazı kontrol stratejilerini önermektedir. Bu stratejilerin büyük asenkron motorlarda ve düşük gerilimli motorlarda küçük değişikliklerle uygulanabildiği sunulmaktadır. Sonuç olarak, çalışma, bir mikrodenetleyici üzerinde uygulanabilir basit kontrol stratejileri kullanarak bir gerilim kontrollü IM yumuşak başlatıcısının performansının optimize edildiğini gösteriyor. Bu stratejiler sayesinde, mevcut başlatma olanaklarından daha iyi yararlanarak, başlangıçta neredeyse mükemmel akım ve tork profilleri elde edilebildiği sunulmuştur [24].

Çadircı ve diğerkleri sundukları çalışmada büyük asenkron motorların direkt çevrim başlatma yöntemiyle başlatılmasını iyileştirmeyi amaçlıyor. Çalışmanın ana odak noktası, orta gerilimli büyük asenkron motorlar için sık sık direkt çevrim başlatma işlemi gerçekleştiren bir tristörlü statik anahtarı tasarlamak ve uygulamaktır. Devre konfigürasyonu, iki besleme hattında seri bağlı tristör dizileri kullanıyor. Asenkron motorun başlangıç akımı ve tork dalgalanmaları, motor fazlarının beslemeye kontrollü ve eşzamansız bir şekilde bağlanmasıyla azaltılıyor. Bu, güç sistemine ve şafta mekanik stresleri azaltıyor. Çalışma, optimum anahtarlama stratejisini belirlemek için ABC/dqO formunda hibrit bir matematiksel model kullanıyor. Elde edilen sonuçlar, bir demir-çelik fabrikasında başarıyla kullanılan düşük gerilimli küçük bir asenkron

makine ve şaft tork ölçüm sistemi içeren bir fiziksel simülatör kullanılarak doğrulanmıştır [30].

Hem [24]'da hem de [30]'de geçici akımı ve geçici tok darbelerini azaltma konusunda bazı iyileştirmeler elde edilmiştir, ancak tork darbeleri hem pozitif hem de negatif tepe noktalarına sahip olarak hala güçlü olarak kalmıştır [18].

Mathew ve diğerleri üç fazlı asenkron motorların başlangıcında oluşan tork dalgalanmalarını azaltmayı amaçlayan yeni bir yöntemi incelemektedir. Çalışma, motorun her fazının beslemeye bağlanma zamanlarının kontrolüne dayanan bir yöntem öneriyor. Bu yöntemin etkinliği, Matlab/Simulink'te geliştirilen üç fazlı asenkron motorun matematiksel modeli kullanılarak gözlemlenmiş ve bir AC voltaj kontrol cihazı kullanılarak donanımsal olarak uygulanmıştır. Kontrol, 89C51 mikrodenetleyici ile sağlanmış ve simülasyon sonuçları donanım üzerinden doğrulanmıştır. Önerilen yöntemin temel avantajı, motorun başlangıç tork dalgalanmalarını etkili bir şekilde azaltmasıdır. Böylece, motorun başlatılması sırasında şebeke üzerindeki yük azaltılır ve motorun mekanik bileşenleri üzerindeki stresler minimuma indirilir. Çalışma, asenkron motorların başlatılması sırasında karşılaşılan zorluklara yenilikçi bir çözüm sunarak, bu alandaki mevcut yöntemlerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır [31]. Ancak yazarlar, motorun iki fazını aynı anda $t = 0$ 'da kaynağa bağlayarak ve üçüncü fazın bağlantısını $t_1 = 0.013333$ s geciktirerek darbeleri torkları ortadan kaldırmayı başarmışlardır. Ancak bu özel zaman gecikmesinin nasıl elde edildiğine dair yayında herhangi bir açıklama bulunmamaktadır. Bu makalenin yazarı aynı gecikmeyi dört farklı motorda denemiş ve tork darbelerinin ortadan kaldırılmadığını fark etmiştir. Bu nedenle, belirtilen zaman gecikmesinin belirli bir motor için deneme yanılma yoluyla elde edildiği ve bu belirli motor parametreleri kombinasyonu için geçerli olduğu görülmektedir [18].

Wang ve diğerleri orta ve yüksek gerilimli asenkron motorlar için yeni bir yumuşak başlatma yöntemi sunmuşlardır. Yöntem, motor başlatma süreçlerinin iyileştirilmesi için autotransformatör voltaj indirgeme, manyetron voltaj regülasyonu ve reaktif güç kompanzasyonunu entegre eden bir sistem önermektedir. Bu sistem, motorun başlatılması sırasında güç şebekesinden çekilen akımı sınırlayarak, hem motorun hem

de şebekenin korunmasını sağlamaktadır. Çalışmada simülasyon ve deneysel değerlendirmeler, doğrudan başlatma ve akım sınırlamalı yumuşak başlatma yöntemleri karşılaştırılmaktadır. Sonuçlar, önerilen yumuşak başlatma metodunun, motorun başlangıç akımını önemli ölçüde azalttığını ve güç faktörünü artırdığını [32]göstermektedir. Yumuşak başlatma sürecinde motorun maksimum akımı, nominal akımın yaklaşık iki katı olurken, güç faktörü 0.9'a yükseliyor. Ayrıca, araştırma, harmonik filtreleme alt sistemini de incelemektedir. Harmonik filtre, harmonik akımı etkili bir şekilde azaltarak, toplam harmonik bozulmayı önemli ölçüde düşürmektedir. Sonuç olarak, bu çalışma, asenkron motorların yumuşak başlatılmasında ve güç kalitesinin iyileştirilmesinde etkili bir yöntem sunmaktadır [31]. Ancak bu çalışmada önerilen tekniğe kıyasla, her durumda tercih edilmeyebilecek çok karmaşık ve pahalı ekipman içermektedir [18].

BÖLÜM 4

TORK ÖLÇME SİSTEMLERİ

Elektrik motorları taşıt endüstrisinde içten yanmalı motorların yerine alternatif olarak çevre dostu bir alternatif olarak, endüstriyel üretimde konveyör, vinç ve üretim makinelerinde, ev aletlerinde buzdolabı, çamaşır makinesi, vantilatör ve süpürgelerde, rüzgar türbinlerinde, uzay araçlarının itki sistemlerinde, tıbbi cihazlarda, akıllı ev otomasyonlarında perde, kapı, pencere kontrolünde, elektrikli araçlarda matkap ve testerelede yaygınca kullanılmaktadır [33]. Özellikle endüstriyel uygulamalarda motor verimliliği ve çıkışının optimize edilmesiyle performans optimizasyonu, güvenli sınırlar içinde çalışması sağlanarak aşırı yüklenmeyi önleme ve hasarı önleme, üretimde kalite ve tutarlılık ve enerji optimizasyonu için motor torku ölçümlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun yanında tıbbi cihazlar, havacılık ve uzay uygulamalarında ise hassas kontrol için tork ölçümleri önem kazanmaktadır.

Tork, bir eksen etrafında bir nesneye uygulanan dönme kuvvetinin ölçüsü olarak tanımlanabilir [34]. Literatüre bakıldığında tork ölçümü için geliştirilmiş çeşitli yöntemler göze çarpmaktadır. Matematiksel simülasyon, dinamometre kullanımı, Strain Gauge yöntemi, akım ve gerilim ölçümü, optik yöntemler, piezoelektrik sensörler ve hall effect sensörler literatürde en yaygın kullanılan yöntemler olarak öne çıkmaktadır [35,36].

Matematiksel simülasyon; fiziksel bileşen ve kurulum gerektirmediğinden maliyet etkin, aşırı koşullar altında güvenli test yapılmasını sağlayan, çok çeşitli senaryo ve koşulları modelleyebilen bir çözümdür [36,37]. Ancak elde edilecek sonuçlar model ve giriş verilerinin doğruluğuna bağlıdır. Bunun yanında beklenmedik gerçek dünya koşulları göz ardı edilir.

Dinamometre motorun miline bağlanarak doğrudan fiziksel ölçüm imkanı sunması, çok çeşitli motor ve makineler için uygulanabilir olması, güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar vermesiyle öne çıkmaktadır ve en yaygın yöntemlerden biridir [38,39]. Ancak ekipman, fiziksel alan, kurulum, düzenli bakım ve kalibrasyon gerektirmesinden dolayı diğer birçok yöntemle göre daha pahalıdır.

Strain Gauge yönteminde motor miline gerinim ölçer bağlanarak motor milindeki gerilme ölçülerek tork hesabı yapılır. Yüksek doğruluk, hassas ölçüm ve küçük boyutlu olmasıyla öne çıkmaktadır [40]. Ancak kolay hasar görebilecek yapıda olması, dikkatli kurulum ve kalibrasyon gerektirmesi, sıcaklık ve nem gibi çevresel faktörlerden etkilenmesi dezavantajdır.

Akım ve gerilim ölçümü yönteminde motorun performans eğrileri ile karşılaştırılarak tork hesaplanır. Bu haliyle uygulanması ve anlaşılması kolay, diğer yöntemlere göre ucuzdur [39]. Ancak Kalibrasyon gerektirmesi ve doğrudan ölçüm yöntemlerine nazaran daha az doğrulukla çalışması her alanda kullanılmasını engellemektedir.

Optik yöntemler fiziksel temas olmadan tork ölçmesi, yüksek hızlı uygulamalar için uygun olması, son derece hassas ölçüm yapılmasına olanak vermesi avantajlı yönleridir. Ancak kurulum ve hesaplamalar daha karmaşık, elektriksel yöntemlere göre pahalı, harici ışık koşullarından etkilenme gibi olumsuz yönleri mevcuttur [41,42].

Piezoelektrik sensörler mekanik gerilim altında elektrik sinyali üretir ve bu sinyaller tork ölçümü için kullanılır. Yüksek frekans cevabı ile dinamik ölçümler için uygundur. Ölçümlerde uzun süreli kararlılık, geniş ölçüm aralığı ve nispeten küçük boyutlu olması avantajlı yönlerini oluşturmaktadır [43]. Ancak maliyet, sıcaklığa ve titreşimlere karşı duyarlılık ve sinyal işleme için özel ve karmaşık elektronik devre gerektirmesi ise kullanımını zorlaştırmaktadır.

Hall effect sensör temassız ölçüm yapması, çevresel koşullara karşı dayanıklı olması ve çeşitli uygulamalarda kullanılabilir olması avantajlı yönlerini ortaya koyarken [44], dikkatli kalibrasyon gerektirmesi, sınırlı ölçüm aralığına sahip olması, manyetik

alanlardan etkilenmesi ve performansının sıcaklıkla değişmesi dezavantajlı yönlerini oluşturmaktadır.

Literatüre bakıldığında mevcut yöntemlerin uygulamaya göre özelleştirildiği uygulamalara rastlanmaktadır. Ashwindran et al. tarafından sunulan çalışmada rüzgar türbinlerinin torkunu ölçmek için Arduino tabanlı bir sistem geliştirilmiştir [45]. Sistem bir fotointerrupter (birincil) ve yük hücresi (ikincil) içeren iki alt sistemden oluşmaktadır. Geliştirilen sistem hem laboratuvar ortamında hem de simülasyon ortamında test edilerek güvenilir sonuçlar verebildiği gösterilmiştir. Çalışma dönen makine torklarının ölçümü için uygun maliyetli bir çözüm olarak önerilmiştir.

Brusamarello et al. sundukları çalışmada otomotiv uygulamaları için alüminyum alaşım jant üzerine monte ettikleri bir sistem geliştirmişlerdir [46]. Geliştirilen sistemde strain gage üzerinden alınan sinyal yükseltilip, filtrelendikten sonra analog-dijital dönüşüm işlemi yapıldıktan sonra ZigBee iletim modülü ile uzak bilgisayara gönderilmiştir. Statik yüklerle kalibre edilen sistemin ilk dinamik testleri düz yol koşullarında gerçekleştirilmiştir.

Bayraktar ve Güldaş insansız hava araçlarında, özellikle quadrotorların itme ve tork kuvvetlerinin ölçülmesi ve optimizasyonu üzerine sundukları çalışmada deneysel ölçümlerine yörünge takibindeki hataların minimize edilmesi için Matlab/Simulink ortamında regresyon analizleri uygulamışlardır [47]. Çalışmanın sonuçlarına göre kübik ve karesel kuvvet denklemleri, yörünge takibinde diğer yöntemlere göre daha iyi sonuçlar vermektedir.

Surkon Makine Ltd şti. tarafından satışı yapılan cihaz şişe kapaklarının açma torkunu ölçmek için geliştirilmiştir [48].

Caruana et al. tarafından sunulan çalışmada içten yanmalı bir motorun krank mili ve bir AC motor arasında kullanılmak üzere bir tork ölçüm sistemi sunulmuştur. Çalışmada tam körü gerinim ölçer ve elektronik kuvvetlendirici kullanılmaktadır. Geliştirilen sistemde veri toplama işlemi 40 kHz'e kadar Arduino kart üzerinden SD karta yazılarak yapılabilmektedir. Sistem deneysel olarak kalibre edilmiş ve 3000

rpm'e kadar mekanik olarak test edilmiş ve veri kaybı yaşanmamıştır [49]. Bu makale içten yanmalı motorlar ve AC motorlar arasındaki torku ölçmek için düşük maliyetli bir sistemin geliştirilebileceğini göstermiştir.

Sutyasadi tarafından sunulan çalışmada endüstriyel robot kolların yüksek maliyetli olmasından dolayı eğitimde kullanılabilecek alüminyum robot kolu kontrolü için Arduino gibi düşük maliyetli bir kontrolcü kullanarak etkili bir kontrol algoritması geliştirilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada hesaplamalı tork kontrolü, PID ve kaskad PID kontrolü kullanılarak robot kolun omuz eklemi kontrol edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre hesaplamalı tork kontrolü PID ve kaskad PID kontrol algoritmalarından daha iyi sonuçlar ortaya koymuştur [50].

Literatürde kullanım alanına ve amacına göre tasarlanmış ölçüm sistemlerine rastlamak mümkündür. Bu çalışmada asenkron elektrik motorlarının kalkış anındaki torku ölçmek amacıyla düşük-maliyetli bir sistem geliştirilmesine odaklanılmıştır.

4.1. TORK ÖLÇÜM METODOLOJİSİ

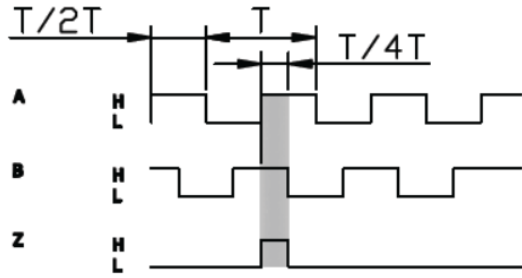
Dolaylı tork ölçüm yöntemleri spesifik durumlara ve mevcut imkanlara göre değişik yollarla gerçekleştirilebilir. Bunlardan biri açısız yer değiştirmenin veya şaftın dönme hızının ölçülmesiyle gerçekleştirilir. Ardından bu bilgi kullanılarak atalet momenti denklemi üzerinden momentin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir.

Sunulan çalışmada hibrit bir yöntem önerilmiştir. Optik sistemlerin dış ışık koşullarından etkilenmesi ve çözünürlüklerinin düşük olması sebebiyle açısız yer değiştirme bilgisi bir rotary enkoder ile ölçülmektedir. Enkoder 1 devirde 1024 pulse üretmektedir. Kullanılan enkoder Şekil 4.1'de verilmiştir.



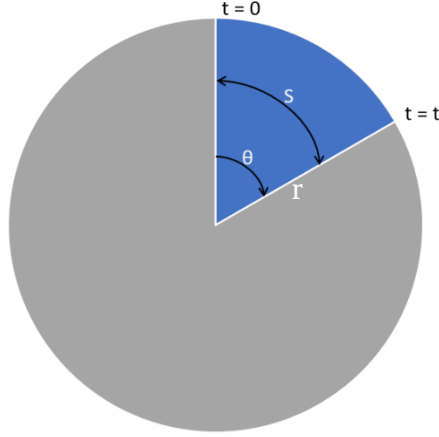
Şekil 4.1. Kullanılan rotary enkoder.

Buna göre iki pulse arasındaki toplam açısal yer değiştirme $360^\circ/1024$ veya $2\pi/1024$ radyan olarak hesaplanmaktadır. Enkoder 3 kanallı bir çıkışa sahiptir ve buna göre A, B ve Z kanallarından gelen pulse sıralaması gerektiğinde motorun dönüş yönü hakkında da bilgi verebilmektedir. Şekil 4.2’de kanalların çıkış bilgisi ve periyot ilişkisi verilmiştir.



Şekil 4.2. A, B ve Z kanallarına ait çıkış pulseleri ve periyot ilişkisi.

Açısal hız, açısal yer değiştirmenin zaman göre değişimi olarak tanımlanmaktadır. ω (omega) açısal hızı göstermek üzere birimi radyan/saniyedir. Elektrik motorunun kalkış veya durma torku hesaplanacağı zaman hız değişkendir. Bu sebeple A veya B kanalından alınan lojik 1 ve lojik 0 çıkışlarına ait süreler motor hızının hesaplanmasına olanak sağlamaktadır. Şekil 4.3’te açısal yer değiştirme ve hız gösterilmektedir. SI birim sisteminde açısal yol birimi radayn alup θ ile gösterilmektedir. 1 radyan bir daire üzerinde yarıçapa eşit yay uzunluğunu gören merkezi açısı olarak tanımlanmaktadır.



Şekil 4.3. Açısal yer değiştirme.

$$1 \text{ devir} = 360^0 = 2 \pi \text{ radyan}$$

$$\theta = \frac{S}{R} \quad (4.1)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.2)$$

Eşitlik 4.1’de;

θ : Açısal yol,

S : Manyetik alanda kayma

R : Çap uzunluğu

Eşitlik 4.2’de;

ω : Açısal hız

$d\theta$:Açısal değişim

dt : Zamandaki değişim.

Açısal hızın sabit olmadığı durumlarda dönme hızının değişimi dairesel hareket yapan cisme etki eden döndürme momentine (tork) bağlıdır. Açısal hızın zamana göre değişimi ise Eşitlik 4.3’de verildiği üzere açısal ivme olarak tanımlanır ve α ile gösterilir.

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt} \quad (4.3)$$

Eşitlik 4.3’de;

α : Açısal ivme

$d\omega$: Açısal hızdaki değişim

dt : Zamandaki değişim

Açısal hız ve tork arasındaki ilişki, Eşitlik 4.4’teki formülle ifade edilir:

$$\tau = I \cdot \alpha \quad (4.4)$$

Eşitlik 4.4’de;

τ : Tork

I : Eylemsizlik momenti

α : Açısal ivme

Burada τ torku, I cismin eylemsizlik momentini, α ise açısal ivmeyi temsil eder. Eylemsizlik momenti bir cismin dönme hareketine karşı olan direncinin ölçüsüdür. Eylemsizlik momenti cismin geometrisine ve dönme eksen konumuna bağlı olarak hesaplanır. Örneğin bir silindir veya diskin eylemsizlik momenti Eşitlik 4.5’deki formüle göre hesaplanır:

$$I = \frac{1}{2}mr^2 \quad (4.5)$$

Eşitlik 4.5’de;

I : Eylemsizlik momenti

m : Kütle

r : Yarı çap

Burada I eylemsizlik momentini, m silindirin kütlesini, r ise yarıçapını ifade eder. Eylemsizlik momenti daha karmaşık geometrilere sahip cisimler için integral kullanılarak hesaplanır.

Arduino Uno’nun 16 Mhz saat hızı dikkate alındığında bir işlem döngüsü yaklaşık olarak 62.5 nano saniyede tamamlandığı sonucuna ulaşılır. Ancak dijital bir girişteki tepki süresinin 3 işlem döngüsünde tamamlandığı düşünülürse yaklaşık 5 kHz

örnekleme frekansı elde edilir. Bu durumda enkoder çıkışındaki her lojik 0 ve lojik 1 pulselerine ait süreler yeterince hızlı tespit edilebilmektedir. Tasarlanan sistemin ölçüm algoritmasına ait pseudo kod aşağıda verilmiştir.

Tanımlamalar:

- 'sample' adında bir sabit, değeri 500
- 'pin' adında bir değişken, değeri A0 (Arduino pin numarası)
- 'highduration' ve 'lowduration' adında iki adet dizi, her biri 'sample' boyutunda
- 'status' adında bir değişken

Başlangıç Ayarları:

- 'pin' giriş olarak ayarlanır.
- status $\leftarrow$ pin durumunu (HIGH veya LOW)

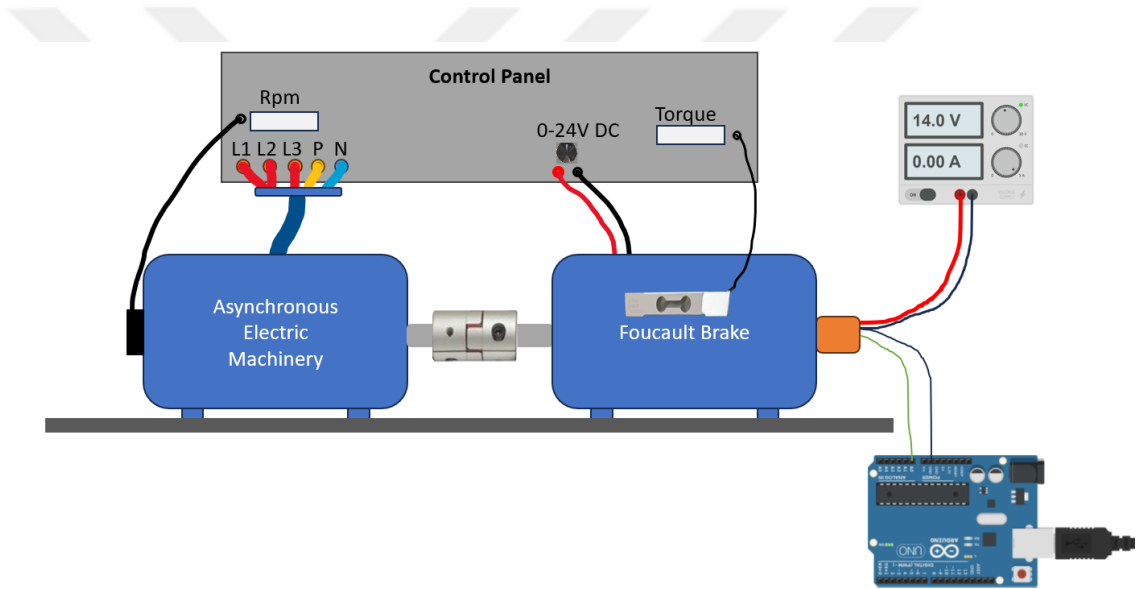
Ana Döngü:

- 1- pin durumunu oku ve status ile karşılaştır
 - a. Eğer eşitse 1. Adıma git
 - b. Değilse devam et
- 2- Pin durumunu oku ve sample sayısı kadar a -c adımlarını tekrarla
 - a. Eğer HIGH ise pin durumu LOW olana kadar zamanlayıcı sayısın
 - i. highduration[i] $\leftarrow$ Geçen süre
 - b. EĞER LOW ise pin durumu HIGH olana kadar zamanlayıcı sayısın
 - i. lowduration[i] $\leftarrow$ Geçen süre
 - c. i sayacını arttır, i < sample ise zamanlayıcıyı sıfırla ve a adımına dön
- 3- highduration ve lowduration dizilerini seri porttan gönder
- 4- bitir

Daha sonra seri porttan alınan sıralı bilgiden bilgisayar ortamında açısal hız, açısal ivme ve sistemin kalıcı durumundan elde edilmiş olan eylemsizlik momenti bilgileri ile dönem torku hesaplanır.

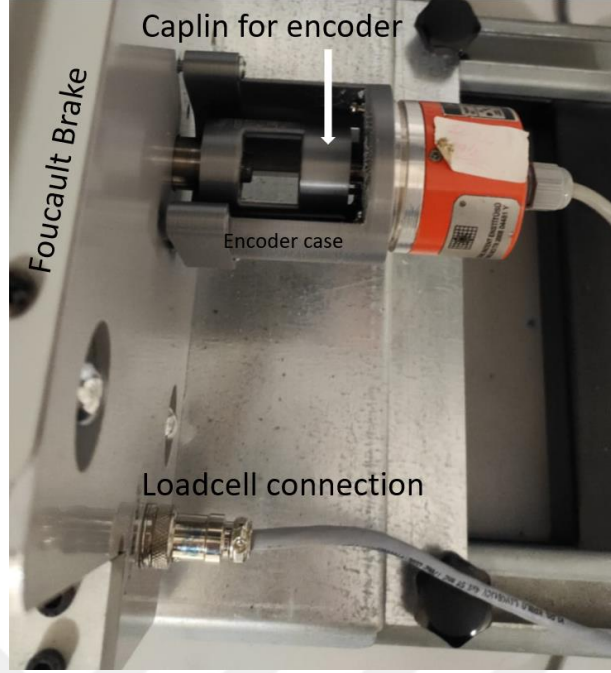
4.2. DENEYSEL KURULUM

Tasarımı yapılan sistemin bağlantı şeması Şekil 4'te verilmiştir. Mevcutta bulunan 1.1 kW asenkron motor hattan sürülerek kaplin bağlantısı üzerinden foucault freni ile yüklendiğinde motorun hızı 4 yapraklı bir enkoder üzerinden optik olarak, oluşan tork ise yük hücresi vasıtasıyla kontrol paneli üzerindeki göstergelerden okunabilmektedir. Ancak kontrol panelindeki ölçüm sistemi kalkış ve durma gibi torkun dinamik ve çok hızlı değiştiği durumlarda yetersiz tepki hızı sebebiyle ilgili ölçümleri gerçekleştirememektedir.



Şekil 4.4. Ölçüm düzeneği.

Mevcut sisteme Şekil 5'te tasarımı gösterilen yatak ve kaplin 3B yazıcıda üretilerek Şekil 4'te turuncu ile gösterilen 1024 pulse/devir enkoder bağlantısı yapılmıştır. Enkoder harici olarak 14 V gerilim ile beslenerek, elde edilen çıkış bir gerilim bölücü ile 0-5V aralığına uygunlaştırılarak Arduino Uno ve Mega kartlarında ayrı ayrı denenmiştir. Sistemin çok hızlı tepki vermesi istenilen durumlarda yapılan ölçümler mikrodenetleyicinin geçici belleğine kaydedilerek gecikmelerden kaynaklanabilecek hata minimize edilmiştir.



Şekil 4.5. Enkoder ile manyetik tozlu fren ve bağlantıları.

Mevcut sistemin eylemsizlik momenti deneysel olarak tespit edilmiştir. Bunun için sırasıyla enkoder üzerinden açısal yol, hız ve ivme hesaplandıktan sonra kalıcı durumdaki tork kontrol paneli üzerindeki değere oranlanarak bulunmuştur.

4.3. TORK ÖLÇÜM SİSTEMİ SONUÇLARI

Tasarlanan ve ilk testleri başarılı bir şekilde yapılan sistem ile döner mekanizmalı sistemlerin transient (start ot stop) torku gürültüsüz ve başarılı bir şekilde ölçülebilecektir. Önerilen yöntemle elektrik motoru performans verileri gürültüsüz ve sayısal olarak maliyet etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Sistemin dezavantajı eylemsizlik momenti bilinmeyen sistemlerden alınacak ölçümlerde kalibrasyon gerektirmesidir.

Literatüre bakıldığında [38], tork ölçüm sistemlerinde hatalı sonuçların alınmasına sebep olan durumlardan bazıları incelenmiştir. Buna göre kalıcı durumda elde edilen sinyallerin analiz edilerek olası hataların tespitine yönelik veri madenciliği ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılması gelecek çalışmalarda ele alınacaktır.

BÖLÜM 5

DEVRE TASARIMI VE DENEYSEL SONUÇLAR

Asenkron motorların yumuşak başlatılması rotor mili ve diğer bağlantı elemanlarının ömrü için hayati önem taşımaktadır. Literatürde tanıtılan yöntemler genellikle karmaşık modellerdir ve esasında yapılan işlem tetiklemenin uygun faz açılarında yapılmasına dayanmaktadır. Kullanılan şebeke frekasının sabit olması sebebiyle uygun açılar belirli zamanlama algoritmalarına göre gerçekleştirildiğinde uygun maliyetli etkin sonuçların elde edilebileceği kanaatine varılmıştır. Bunun için faz açılarını tespit etmenin en kolay yolu olarak sıfır geçişlerinin tespit edilmesi ve sonrasında şebeke frekansı ve zamanlama algoritmasıyla tetiklemenin yapılmasıdır.

Bu çalışmanın konusu olan asenkron motorun dönmeye başladığı ilk anda meydana gelen düzensiz tork salınımlarının, mümkün olan en az düzeye indirilerek asenkron motorun devrini alması için gerekli kontrolü sağlayan devrenin şeklini içermektedir.

İlgili devre, kontrolün sağlanması amacı ile dört kısımda ele alınmıştır. Bu kısımlar, Kontrol ve besleme çıkışlarının üretildiği, kaynak devresi.

Kontrol sinyalinin üretilmesi amacı ile mikrokontrolörün ana referans sinyalini üreten, fazlar arası geçişin, sıfır seviyesine indiği anı yakalayan ve kontrolörün işleyebileceği CMOS seviyesinde sinyal üreten kontrol devresi.

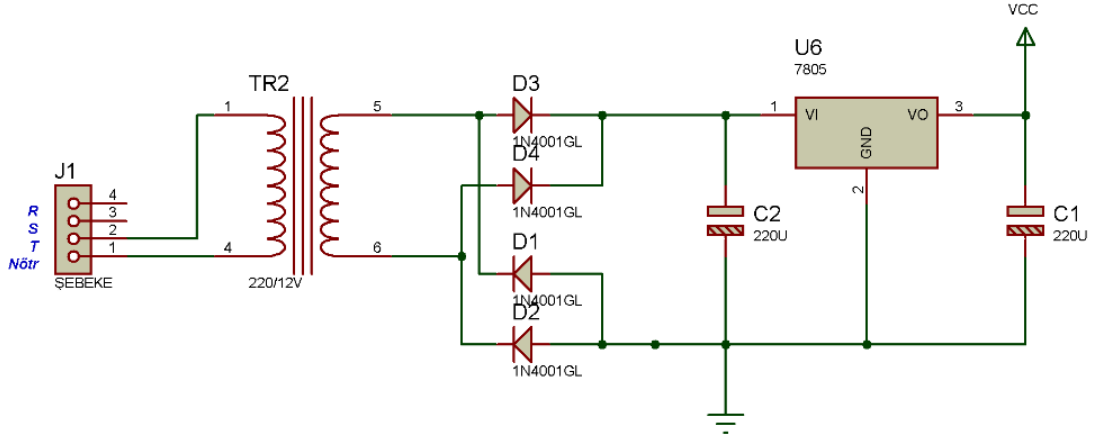
Kontrolör tarafından, sistemin, amaca uygun çalışması için optimize edilmiş sürüş sinyalleri vasıtası ile fazların sargılara iletildiği sürücü devresi.

5.1.TASARLANAN DEVRE

Literatürde zamanlamaya dayalı çeşitli çalışmalar bulunsa da algoritmik bir temele oturtulamamıştır. Algoritmik temele oturtulan çalışma daha sonra patent ve ticari ürün olma süreçlerinden dolayı matematiksel olarak tez metni içinde sunulmayacaktır. Sadece tasarlanan devreye ait şema ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

5.1.1. Besleme Katı

Besleme katına ait devre şeması şekil 5.1. de gösterilmiştir. Şemada görülen 220V / 12V düşürücü tip özelliğe sahip TR1 transformatörü, şebekeye ait T fazı ile nötr arasına bağlanarak TR1 in primer devresinden 12V AC gerilim elde edilmiştir. Elde edilen bu AC gerilim, D1-D4 diyotlarının köprü biçiminde bağlanmış girişine uygulanarak diyotların çıkışından tam dalga doğrultulmuş gerilim elde edilir. C2 kondansatörü, doğrultulmuş dalganın filtrelenerek daha düzgün duruma gelmesini sağlamaktadır. C2 kondansatörünün çıkışından alınan gerilim, U6 regüle entegre devresinin (LM 7805) girişine uygulanarak U6 çıkışında paralel bağlı C1 kondansatöründen sonra tam dalga regüledi 5 V DC gerilim elde edilmiştir.

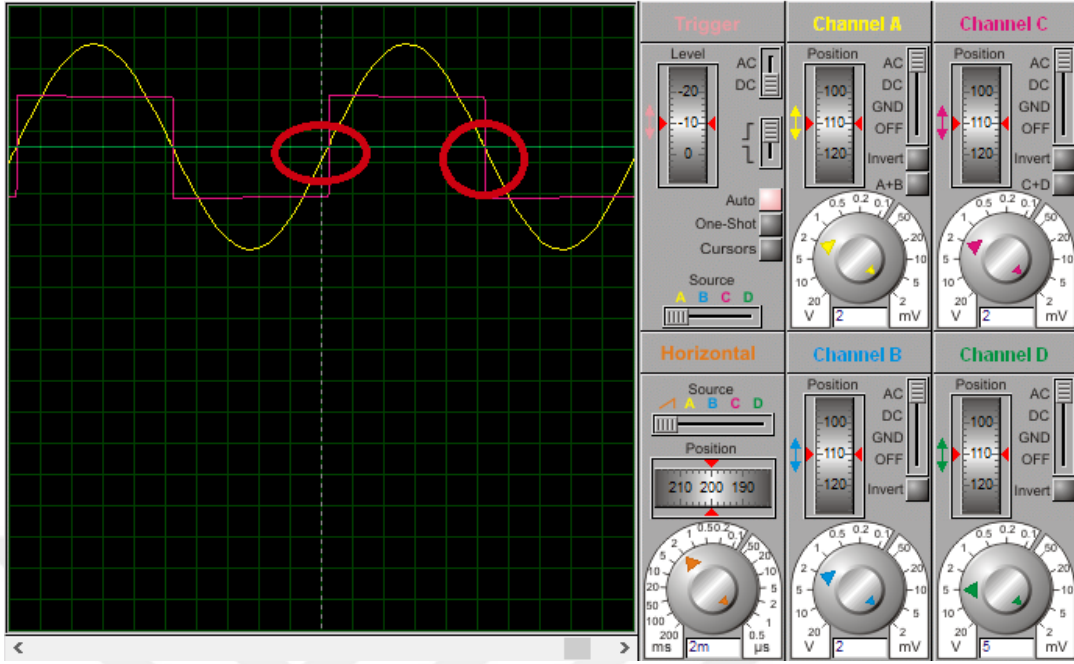


Şekil 5.1. Regüle edilmiş +5 V DC gerilim kaynağı.

5.1.2. Faz Yakalama Katı

Yumuşak başlatmanın sağlanabilmesi için gerekli zamanlamanın mikrokontrol katına iletilmesi için TR1 transformatörünün primer sargısının bir ucu R2 direncine seri olarak, direncin diğer ucu T fazına direk irtibatlandırılmıştır. TR1 in primerine ait diğer uç, şebekeden gelen nötr hattına bağlanarak T fazındaki gerilimin TR1 primer sargısı üzerinden akım akması sağlanmıştır. R2 direnci, primer sargısı üzerinden geçen akımının sınırlanarak sargının, aşırı akım sonucu göreceği muhtemel zararın önlenmesi amacı ile seçilmiştir. TR1 transformatörü, fazın yakalanması esnasında, şebeke geriliminin düşürülmesi ve devreye ait diğer kısımlar ile şebeke arasında izalasyon sağlamaktadır. Şebekenin T fazından gelen sınırlanmış akımın TR1'e ait

31



Şekil 5.3. Opamp giriş (sinüs) ve çıkış (kare dalga) sinyalleri

Şekil 5.3 deki Osilaskop görüntüsünde, TR1 transformatörünün çıkışında bağlı seri gerilim bölücü R11 ve R5 dirençlerinin üzerinde oluşturduğu sinüs dalgası biçimli gerilim, sarı renk ile görülmektedir. Bu gerilimin doğrudan U5, OP-AMP entegresinin evirmeyen girişine bağlanması ve U5 entegre devresi komparatör olarak çalıştırılması neticesinde TR2 transformatörünün ürettiği alternatif gerilimin alternans değişimi esnasında, doğası gereği geçmesi gereken sıfır noktalarında üretilen kare dalga T fazına ait sıfır geçiş noktaları ile eş zamanlıdır.

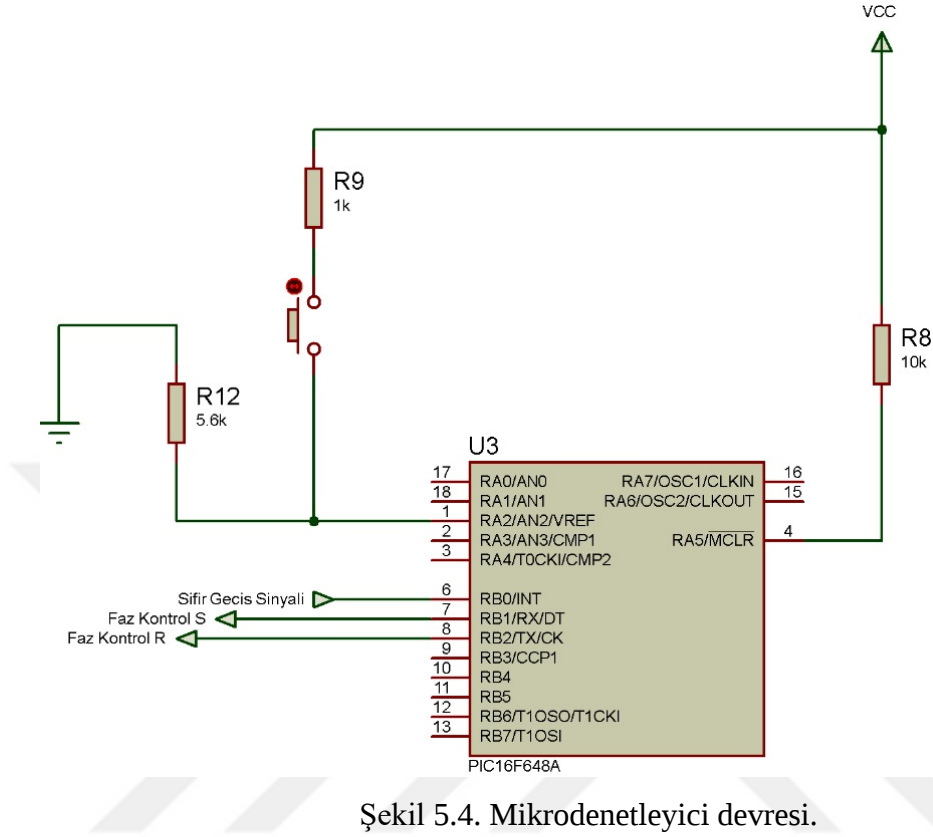
T fazının takibi ve sıfır geçiş noktalarının yakalanması amacı ile oluşturulan yapıda transformatör kullanılması, devre üzerinde bulunan elemanlarda şebekenin oluşturacağı olumsuz durumlar neticesinde şebekenin doğrudan diğer devre elemanlarını bozmasının önüne geçilmesi ve güvenli bir ortam için izalasyon amacı ile kullanılmıştır.

Şekil 5.3. de T fazının sıfır noktalarından geçişi esnasında U5 OP-AMP entegresinin çıkışında beliren kare dalga sinyalinin sıfır geçiş noktalarında kesiştiği görülmektedir.

5.1.3. Mikrodenetleyici ile Kontrol Katı

Faz yakalama katından alınan sinyalin zamanlama algoritmasına göre işlenmesi ve yol verme katının izole şekilde tetiklenmesi için Microchip firması tarafından üretilen 16F648 mikrodenetleyici seçilmiştir. Bu denetleyici seçilirken, denetleyicinin 4 MHZ dahili çalışma frekansı, giriş ve çıkış port sayıları, işlemcinin kolay ve uygun maliyet ile temin edilebilmesi, programlama araçları ve dökümanlarına erişimin kolay olması, harici osilatör veya zamanlama devrelerine ihtiyaç bulunmaması ve mümkün olan en az çevre elemanı ile çalışabilir olması nedeni ile çalışma için yeterli görülmüştür. Sayılan bu özellikler ile çalışması beklenen denetleyicinin devrede kullanılan giriş ve çıkışlarına ait şema, şekil 5.3. de gösterilmiştir. Şekil 5.3. de gösterilen devrede bulunan R8 direnci, mikrodenetleyicinin dökümanlarında belirtildiği çalışma moduna geçebilmesi için “MCLR” ucu ile besleme gerilimi arasına bağlanmıştır. RA2 portu, giriş olarak seçilmiş, buton yardımı ile besleme ucundaki pozitif gerilimin bu porta uygulanması sağlanmıştır. Butona her basışta, motor duruyorsa çalışması için veya tersi olarak, motor çalışıyor ise durması için komut almaktadır. RB0 ucu, faz yakalama devresinden gelen ve fazın sıfır geçişlerinin temsil edildiği sinyalin, mikrodenetleyiciye uygulandığı uç olarak belirlenmiştir. RB1 ucu R fazının, RB2 ucu S fazının, zamanlama algoritması tarafından işlendikten sonra sürücü devresine,

motorun yumuşak başlatılabilmesi için kontrollü olarak verilmesini sağlayan ve çıkış olarak seçilen uçlardır.

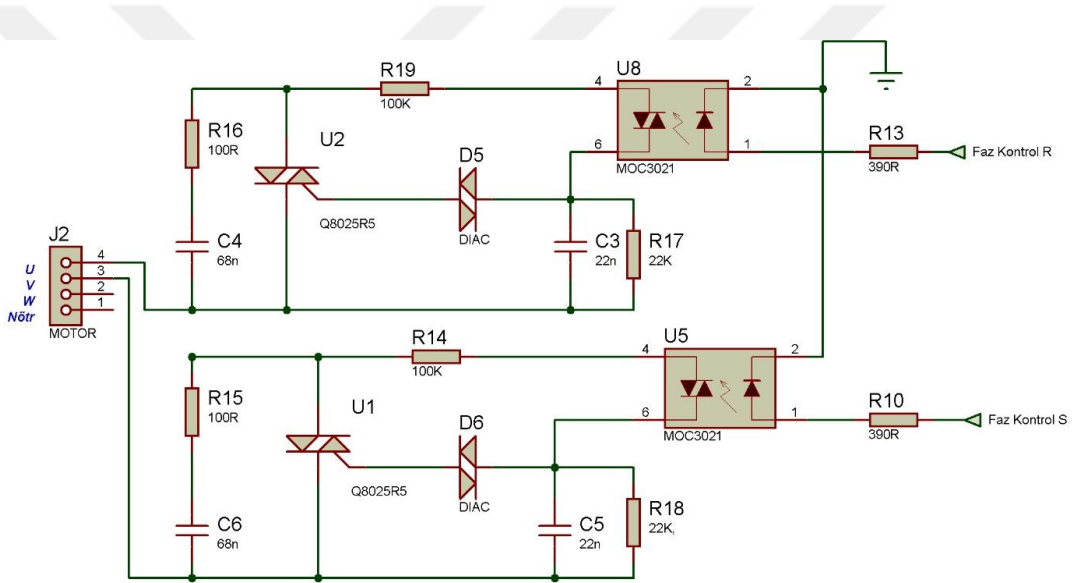


Şekil 5.4. Mikrodenetleyici devresi.

5.1.4. Yol Verme Katı

Asenkron motorun kalkışı esnasında meydana gelen tork dalgalanmalarının en az seviyeye indirebilmek amacı ile yapılan bu çalışmada motor üç fazdan oluşan şebeke geriliminin T fazı, motor sargılarından W sargısına doğrudan bağlıdır. Diğer iki sargı olan U ve V sargıları sırası ile R ve S fazlarından gelen akımın, yarı iletken sürücü devre elemanları üzerinden belli bir algoritma sonucu üretilmiş kontrol sinyalleri tarafından anahtarlanması ile motorun hareketine tork dalgalanmalarının en düşük seviye indirilerek başlatıldığı devredir. Bu devreye ait şema, şekil 5.4. de görülmektedir. Motor sargıları üzerinden akım geçebilmesi için U1 ve U2 triyak elemanlarına ait gate devresinin tetiklenmesi gerekmektedir. İlgili triyak elemanlarının gate devresi üzerinde U1 elemanı için R19, R17 gerilim bölücü dirençleri, U8 optokuplörü, U2 elemanı için R14, R18 gerilim bölücü dirençleri ve U5 optokuplörü bulunmaktadır. Mikrodenetleyici girişinin takip ettiği faz yakalama devresinden gelen faz geçiş sinyallerinin zamanına göre üretilen sürüş komut sinyalleri, R13 ve R10

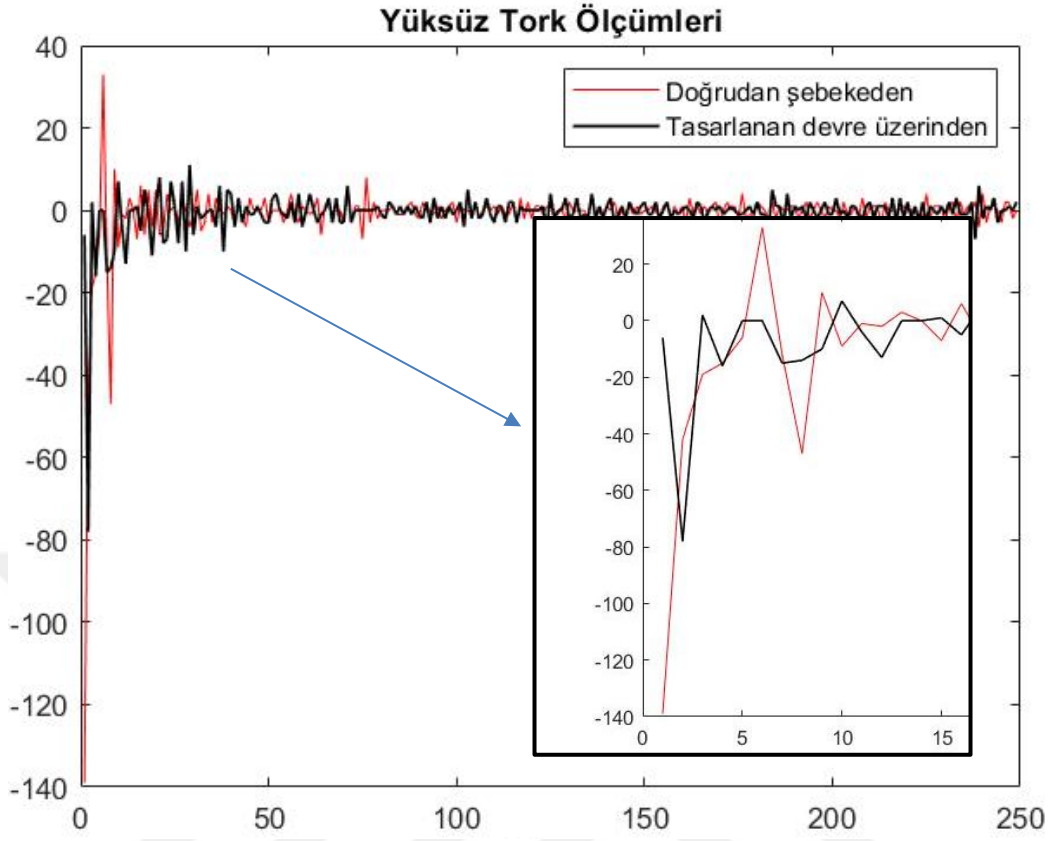
dirençleri üzerinden U5 ve U8 optokuplörlerini ilettime geçirmek amacı ile uygulanır. Optokuplörlerin ilettime geçmesi sonucu gerilim bölücü dirençler üzerinden D5 ve D6 diac'ları ilettime geçerek U1 ve U2 triyak elemanları ve bu elemanlara şebeke gerilimi üzerinden seri bağlı olan U ve V sargıları üzerinden akım akmasını sağlar. R16, C4, R15, C6 elemanları, motor sargılarının gösterdiği indüktif özellik nedeni ile triyak elemanlarının anahtarlama esnasında meydana gelen anlık akım darbelerinin söndürülmesi amacı ile (RC snubber devresi olarak) kullanılmıştır. Bu şekilde tasarlanan sürücü devresinin, stator sargıları üzerinden esnek olarak faz açılara göre akım geçirebilmesi sonucu, başlangıç tork dalgalanmaları en aza indirilmesi sağlanmıştır.



Şekil 5.5. Yol verme devresi.

5.2. DENEYSEL SONUÇLAR

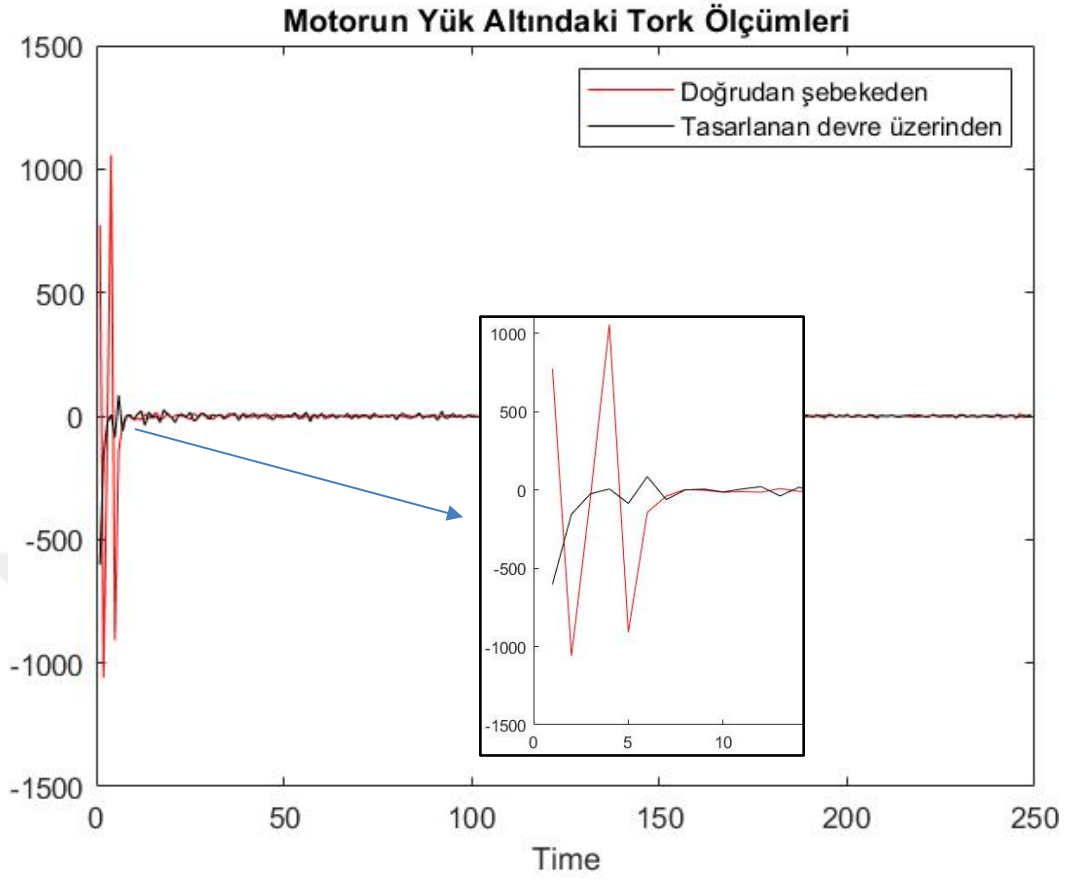
Tasarlanan devrenin deneysel ölçüm sonuçları motor yüksüzken ve yük altındayken ayrı ayrı ölçülmüştür. Bu ölçümlere göre hem yüksüzken hem de yük altındayken motorun kalkış torkundaki ani yükselmeler ve keskin salınımların tasarlanan devre sayesinde yumuşatıldığı tespit edilmiştir. Şekil 5.6'da motorun yüksüz olduğu durumdaki tork grafikleri verilmiştir. Grafiğin düşey ekseni tork, yatay ekseni ise zamanı göstermektedir.



Şekil 5.6. Yüksüz tork ölçüm karşılaştırması

Şekil 5.7’de ise motorun yük altındaki tork grafikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Gerçekleştirilen tasarımın hem yüksüz, hem de yük altındaki tork grafikleri teorik olarak sunulan yöntemin gerçek ortamda da başarıyla ortaya koyulduğunu göstermektedir.

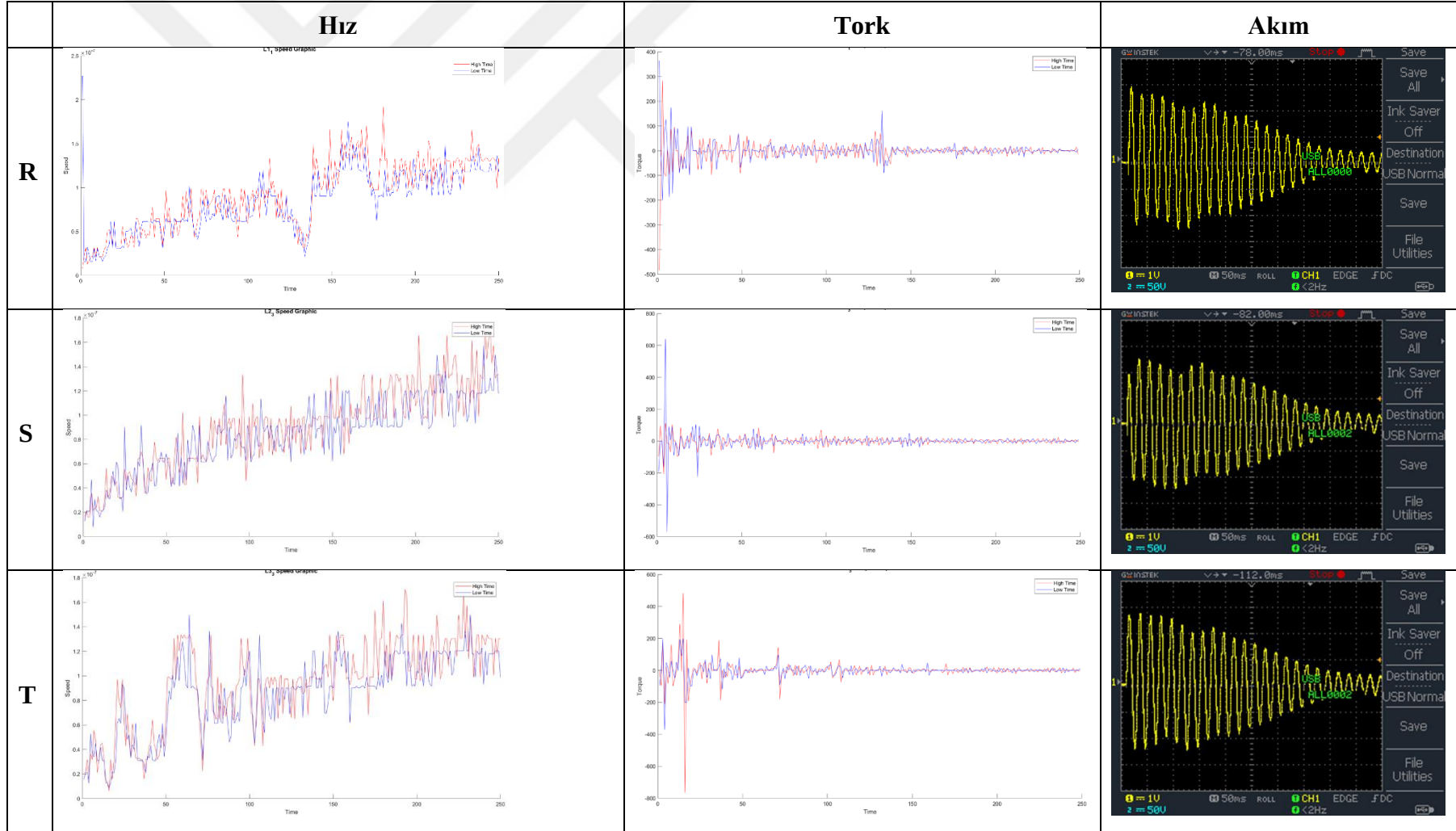


Şekil 5.7. Geçici tork titreşimleri (motor yük altındayken)

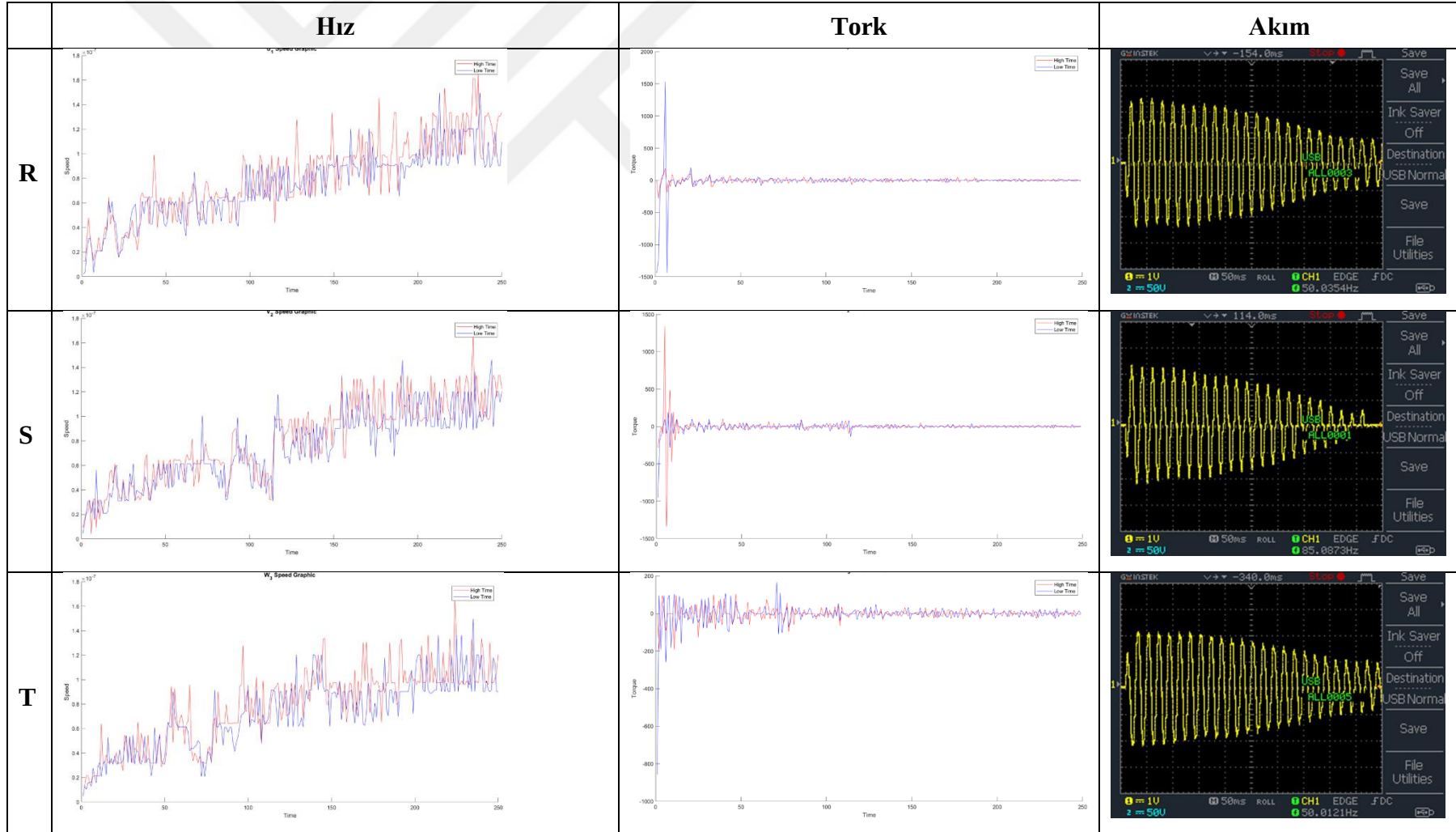
Daha sonra detaylı olarak analizlerin sağlıklı olarak yapılabilmesi için motor miline çelik disk bağlanmıştır. Bu disk motorun ani salınımlarından kaynaklanan hesaplama hatalarını gidermek için kullanılmıştır. Bundan sonraki ölçümlerin tamamı yük altında gerçekleştirilmiştir. Çizelge 5.1’de motor hattan sürüldüğümde her bir fazın ayrı ayrı hız, tork ve akım grafikleri sunulmuştur.

Ölçümlerde hız 1024 pulse / devirlik enkoder ile dijital olarak alınmıştır. Açısız yol/zaman ile hız tespit edilmiş, hızın türevinden de tork grafikleri elde edilmiştir. Grafiklerde görülen HIGH ve LOW ifadeleri enkoderdan alınan sinyallerin durumuna göre elde edilen sonuçları ifade etmektedir.

Çizelge 5.1. Direkt hattan sürülen motorun deneysel ölçüm sonuçları.



Çizelge 5.2. Devreden sürülen motorun deneysel ölçüm sonuçları.



BÖLÜM 6

SONUÇ

Endüstride ve evsel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan üç fazlı ve tek fazlı asenkron motorlarda, özellikle üç fazlı sanayi tipi ve büyük güce sahip olanların, durgun halden tam yol alma durumuna gelene kadar geçen sürede, motor sargılarında anlık akım yükselmeleri ve sonucunda motor milinde ve bu milin kontrol ettiği mekanik sistemlerde ani tork dalgalanmaları meydana geldiği bilinmektedir. İlk kalkış esnasındaki çok küçük bir zaman diliminde meydana gelen bu ani dalgalanmalar, evsel uygulamalarda belirgin olmasada endüstriyel uygulamalarda, motor sargılarının yanması, motor milinin kırılması veya sistemin diğer parçalarında onarımı zaman isteyen ve yüksek maliyetli hasarlar oluşturduğundan bu tip uygulamalar için 2.3’de açıklanan yol verme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu uygulamalar içinde yumuşak yol verme için kullanılan frekans konvertörleri veya motor ve çevresinden karmaşık sensörler ile kapalı devre şeklinde çalışan sistemler oldukça maliyetlidir ve arıza yapması durumunda onarımları da yüksek maliyetlidir.

Bu tezde önerilen yöntemin daha sade ve frekans konvertörlerine göre çok daha düşük maliyetli olarak asenkron motorlardaki kalkış esnasında meydana gelen ani dalgalanmaları kabul edilebilir seviyeye indirdiği deney sonuçlarda ortaya koyulmuştur. İyileştirme özellikle deneysel sonuçların verildiği Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2’deki akım dalgalanmalarının oluşturduğu zarfta belirgin şekilde görülmektedir. Şekil 5.2’deki akım salınımlarının sönümlenen simetrik bir dalga formunda olduğu açıkça gözlemlenirken, Çizelge 5.1’deki akım salınımlarının asimetrik bir şekilde sönümlendiği göze çarpmaktadır.

KAYNAKLAR

1. Badr, M. A., Abdel-Halim, M. A., and Alolah, A. I., "A nonconventional method for fast starting of three phase wound-rotor induction motors", **IEEE Transactions On Energy Conversion**, 11 (4): 701–707 (1996).
2. Wood, W. S., Flynn, F., and Shanmugasundaram, A., "Transient torques in induction motors, due to switching of the supply", **Proceedings Of The Institution Of Electrical Engineers**, 112 (7): 1348 (1965).
3. Abdel-Halim, M. and Al-bahooth, M., "Comparative Study of Electromechanical Starting Transients of Large Cage Induction Motors Using Different Methods of Starting", **Ain Shams Engineering Journal**, 38: (2003).
4. Kocman, S., Orsag, P., and Pecinka, P., "Simulation of start-up behaviour of induction motor with direct online connection", **Advances In Electrical And Electronic Engineering**, 15 (5): 754–762 (2017).
5. Ikeda, M. and Hiyama, T., "Simulation studies of the transients of squirrel-cage induction motors", **IEEE Transactions On Energy Conversion**, 22 (2): 233–239 (2007).
6. Akbaba, M., "A novel simple method for elimination of DOL starting transient torque pulsations of three-phase induction motors", **Engineering Science And Technology, An International Journal**, 24 (1): 145–157 (2021).
7. ÖZÇELİK, M. A. and AYCAN, A., "Investigation on the Rotor Voltage and the Rotor Frequency in Wound Rotor Induction Motor by the Slip Change", **Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 20 (4): 134–142 (2017).
8. Nazarzadeh, J. and Naeini, V., "Magnetic Reluctance Method for Dynamical Modeling of Squirrel Cage Induction Machines", **Electric Machines and Drives, InTech**, 1012–1018 (2011).
9. Aydın, A. B., "ASENKRON MOTORLAR VE SÜRÜCÜLERİ", Lisans, **Kocaeli Üniversitesi**, Kocaeli, (2014).
10. ERBAHAN, O. Z. and ALIŞKAN, İ., "Sincap Kafesli Asenkron Motorların Rotor Çubuk Kırıklarının Akustik Ölçümlerle Tespiti", **Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi**, 7 (3): 935–950 (2019).
11. Nevelsteen, J. and Aragon, H., "Starting of large motors-methods and economics", **IEEE Transactions On Industry Applications**, 25 (6): 1012–1018 (1989).

12. Hamouda, R. M., Alolah, A. I., Badr, M. A., and Abdel-Halim, M. A., "A comparative study on the starting methods of three phase wound-rotor induction motors. I", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 14 (4): 918–922 (1999).
13. Williams, A. J. and Griffith, M. S., "Evaluating the Effects of Motor Starting on Industrial and Commercial Power Systems", *IEEE Transactions On Industry Applications*, IA-14 (4): 292–305 (1978).
14. KAYA, K. and ÜNSAL, A., "Yapay Sinir Ağlarıyla Asenkron Motor Çoklu Arızalarının Tespiti ve Sınıflandırılması", *Politeknik Dergisi*, 25 (4): 1687–1699 (2022).
15. Larabee, J., Pellegrino, B., and Flick, B., "Induction Motor Starting Methods and Issues", .
16. Jalili, K., Malinowski, M., and Bernet, S., "Rotor flux oriented control of a high speed induction motor drive applying a two-level voltage source converter with LC-sine filter", (2005).
17. Chen, H. and Bi, C., "Optimal starting frequency of three-phase induction motor", *IET Electric Power Applications*, 16 (3): 362–369 (2022).
18. Akbaba, M., "A novel simple method for elimination of DOL starting transient torque pulsations of three-phase induction motors", *Engineering Science And Technology, An International Journal*, 24 (1): 145–157 (2021).
19. Sukarma, I. N., Ta, I. K., and Sajayasa, I. M., "Comparison of three phase induction motor start using DOL, Star Delta and VSD Altivar61", (2020).
20. Mestry, S., Kushe, P., Kelkar, S., and Patil, A., "Smooth Starting of Induction Motor During Open Circuit and Short Circuit Condition", (2018).
21. Blaabjerg, F., Pedersen, J. K., Rise, S., Hansen, H.-H., and Trzynadlowski, A. M., "Can soft-starters help save energy?", *IEEE Industry Applications Magazine*, 3 (5): 56–66 (1997).
22. Thanyaphirak, V., Kinnares, V., and Kunakorn, A., "Soft starting control scheme for three-phase induction motor fed by PWM AC chopper", (2014).
23. Riyaz, A., Iqbal, A., Moinoddin, S., Moinahmed, S. K., and Abu-Rub, H., "Comparative performance analysis of Thyristor and IGBT based induction motor soft starters", (2009).
24. Zenginobuz, G., Çadirci, I., Ermiş, M., and Barlak, C., "Soft starting of large induction motors at constant current with minimized starting torque

- pulsations", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 37 (5): 1334–1347 (2001).
25. Raziee, S. M., Misir, O., and Ponick, B., "Combined Star-Delta Winding Analysis", *IEEE Transactions On Energy Conversion*, 33 (1): 384–394 (2018).
 26. Wiryadinata, R., Saputra, N., and Martiningsih, W., "Induction Motor Protection and Starting System Using Programmable Logic Control Based on Star-Delta Method", (2017).
 27. Stermecki, A., Tičar, I., Zagradisnik, I., and Kitak, P., "FEM-based design of an induction motor's part winding to reduce the starting current", *IEEE Transactions On Magnetics*, 42 (4): 1299–1302 (2006).
 28. Lee, G., Min, S., and Hong, J. P., "Optimal shape design of rotor slot in squirrel-cage induction motor considering torque characteristics", *IEEE Transactions On Magnetics*, 49 (5): 2197–2200 (2013).
 29. BAYINDIR, R. and ÇOLAK, İ., "Klasik yol verme metotlarının denetleyici yardımıyla gerçekleştirilmesi", *Fırat Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 17 (1): (2005).
 30. Cadirci, I., Ermig, M., Nalqaci, E., and Rahman, M., "A Solid State Direct On Line Starter For Medium Voltage Induction Motors With Minimized Current and Torque Pulsations", (1999).
 31. S, N. K., Mathew Jos, B., Rafeek Tech Student, M. M., and Professor, A., "An Improved Method for Starting of Induction Motor with Reduced Transient Torque Pulsations", *International Journal Of Advanced Research In Electrical, Electronics And Instrumentation Engineering (An ISO, 3297 (1): (2007).*
 32. Wang, Y., Yin, K., Yuan, Y., and Chen, J., "Current-limiting soft starting method for a high-voltage and high-power motor", *Energies*, 12 (16): (2019).
 33. KELEŞOĞLU, A., KOCAOĞLU, S., YÖNTEM, M., ÇAĞLAR, S., AYDIN, İ. N., BAYIR, E., YILMAZ, C., YENİLMEZ DEMİREL, E., and ÜNVER, Ü., "ELEKTRİK MOTORLARINDA ENERJİ SINIFLARI ARASI TÜKETİM FARKLILIKLARI VE VERİMLİLİK ARTIRICI METOTLAR", *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1 (35): 1–15 (2023).
 34. Xiao, L., Li, J., Qu, R., Lu, Y., Zhang, R., and Li, D., "Cogging torque analysis and minimization of axial flux PM machines with combined rectangle-shaped magnet", *IEEE Transactions On Industry Applications*, 53 (2): 1018–1027 (2017).

35. Skala, B., "THE TORQUE MEASUREMENT BASED ON VARIOUS PRINCIPLES *)", Pilsen, (2004).
36. Makalesi, A. and Işık, H., "Tork Sensöründe Kullanılan Teknolojiler", *European Journal Of Science And Technology Special Issue*, 28: 622–626 (2021).
37. Zhang, T., Li, G., Zhou, R., Wang, Q., and Wang, L., "Torque modeling of reluctance spherical motors using the virtual work method", *International Journal Of Applied Electromagnetics And Mechanics*, 71: 199–219 (2023).
38. Goszczak, J., "Torque measurement issues", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 148 (1): 012041 (2016).
39. Martyr, A. and Plint, M. A., "Dynamometers: The Measurement of Torque, Speed, and Power", (2012).
40. Tarakçı, S., Aldemir, O., Solmaz, T., Işık, E., Kardan, T., Center, R., Anisa, M., and Numbers, O., "External torque sensor design providing wireless and real-time data customized for drivetrain ARTICLE INFO ABSTRACT", .
41. KVASHUK, D. and YASHCHUK, O., "ALGORITHM FOR DETERMINING THE TORQUE OF ELECTRIC MOTORS USING INDIRECT MEASUREMENT METHODS", *Herald Of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 315 (6): 138–146 (2022).
42. Kazakbaev, V., Paramonov, A., Dmitrievskii, V., Prakht, V., and Goman, V., "Indirect Efficiency Measurement Method for Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors", (2022).
43. Liu, J., Yang, L., and Ma, J., "The state-of-art and prospect of contactless torque measurement methods", (2019).
44. Qin, Y., Zhao, Y., Li, Y., Zhao, Y., and Wang, P., "A high performance torque sensor for milling based on a piezoresistive MEMS strain gauge", *Sensors (Switzerland)*, 16 (4): (2016).
45. Ashwindran, S. N., Azizuddin, A. A., and Oumer, A. N., "A Low-Cost Digital Torquemeter Coordinated by Arduino Board", *International Journal Of Integrated Engineering*, 15 (1): 118–130 (2023).
46. Brusamarello, V., Balbinot, A., Carlos Gertz, L., and Cervieri, A., "Dynamic torque measurement for automotive application", (2010).
47. BAYRAKTAR, Ö. and GÜLDAŞ, A., "Quadrotor İtme ve Tork Katsayılarının Optimizasyonu ve Matlab/Simulink ile Simülasyonu", *Politeknik Dergisi*, 23 (4): 1197–1204 (2020).
48. Internet: Sanayi Ltd, S. M., "Bottle Cap Torque Tester", .

49. Caruana, C., Mollicone, P., and Farrugia, M., "Development of a Simple Instantaneous Torque Measurement System on a Rotating Shaft", (2019).
50. Sutyasadi, P., "Control Improvement of Low-Cost Cast Aluminium Robotic Arm Using Arduino Based Computed Torque Control", ***Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer Dan Informatika***, 8 (4): 650 (2022).



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Cengiz AYTEN
Medeni Hali : Evli
Yabancı Dili : İngilizce
Eğitim Durumu (Kurum, Yıl)
Lise : İnönü Lisesi, (1993-1996)
Lisans : Çankaya Üniversitesi Elekt.-Hab. Müh., (2012-2015)
Yüksek Lisans : Karabük Üniversitesi Bilg. Müh. A:B:D., (2019-2024)
Çalıştığı Kurumlar ve Yıl : TRT Genel Müdürlüğü (2020-)