



**KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN YÜKSEK GÜÇLÜ  
PAN&TILT BİRİMLERİNDE KULLANILMASI VE ALAN  
YÖNLENDİRMELİ METODU İLE KONTROLÜ**

**Abdussamet KARACA**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİSAN 2023**

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdussamet KARACA

14/04/2023

# KALICI MIKNATISLI SENKRON MOTORLARIN YÜKSEK GÜÇLÜ PAN&TILT BİRİMLERİNDE KULLANILMASI VE ALAN YÖNLENDİRMELİ METODU İLE KONTROLÜ

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdussamet KARACA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2023

## ÖZET

Pan-Tilt iki ekseninde hareket sağlayabilen elektromekanik sistemlerdir. Bu birimler savunma, sivil havacılık gibi alanlar başta olmak üzere, elektro optik sistemler, lazer işaretçiler ve antenler için alt sistem olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada yüksek güç ihtiyacı duyan Pan-Tilt birimlerinde kullanılmak üzere Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorun (PMSM) IMC102TF048 kodlu denetleyici kullanılarak ile FOC kontrolü sağlanmıştır. Tasarım temel olarak güç faktörü düzeltme bölümü, motor sürücü bölümü ve mikrodenetleyici bölümü olarak üç ana bölümden oluşmaktadır. Şebeke voltajı ile çalışan ürünler için çekilen reaktif gücü azaltmak ve verimliliği artırmak amacıyla güç faktörü düzeltmeye yönelik yükseltici dönüştürücü devresi kullanılmıştır. Bu aşamada sistemin güç isterlerine göre gerekli bobin ve kapasitör değerleri hesaplanarak uygulanmıştır. Motor sürücü bölümünde her bir ekseninde bulunan motorlar için IPM (Intelligent Power Module) kullanılmıştır. Kontrolcü yardımı ile IPM modülü içerisinde bulunan anahtarlama elemanları için gerekli anahtarlama sinyalleri sağlayabilmekle beraber IPM içerisinde bulunan anahtarlama elemanlarının alt kollarından akım okunarak Alan Yönlendirmeli Kontrolü sağlanmıştır. Son bölümde ise, kullanıcıdan alınan verileri işleyerek gerekli kontrol parametrelerini oluşturan mikrodenetleyici yazılımı gerçekleştirilmiştir. Mikrodenetleyici, kullanıcı arayüzünden verileri alarak iki eksen için hesaplamaları yapmakta ve motor kontrol birimine aktarmaktadır. Yapılan deney çalışması sonucunda diğer kullanılan motor türlerine göre, yüksek güç ve hız gereksinimi duyan Pan-Tilt birimleri için PMSM'ların daha uygun ve uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Bilim Kodu : 90514  
Anahtar Kelimeler : Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motor, Alan Yönlendirmeli Kontrol, Pan-Tilt Sistemleri.  
Sayfa Adedi : 51  
Danışman : Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

USING OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS IN HIGH POWER  
PAN&TILT UNITS AND CONTROL WITH FIELD ORIENTED METHOD

(M. Sc. Thesis)

Abdussamet KARACA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2023

ABSTRACT

Pan-Tilt units are electromechanical systems that can provide movement in two axes. These units are used as a subsystem for electro-optical systems, laser pointers and antennas, especially in areas such as defense and civil aviation. In this study, using “IMC101T-T038”, Field Oriented Control of Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) is provided to be used in Pan-Tilt units which need high power. The design basically consists of three main parts as power factor correction part, motor driver part and microcontroller part. A boost converter circuit is used for power factor correction in order to reduce the reactive power drawn and increase the efficiency for products operating with mains voltage. At this stage, the required inductance and capacitor values were calculated and applied according to the power requirements of the system. IPM (Intelligent Power Module) is used for the motors on each axis in the motor driver section. With the help of the controller, it is possible to provide the necessary switching signals for the switching elements in the IPM module. Field Oriented Control is provided by reading the current from the low side switching elements in the IPM. In the last part, the microcontroller software, which creates the necessary control parameters by processing the data received from the user, has been implemented. The microcontroller takes the data from the user interface and makes the calculations for the two axes and transfers them to the motor control unit. As a result of the experimental study, PMSMs are more suitable and applicable for Pan-Tilt units that require high power and speed compared to other used motor types.

Science Code : 90514

Key Words : Permanent Magnet Synchronous Motor, Field Oriented Control, Pan-Tilt Systems.

Page Number : 51

Supervisor : Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ

## TEŞEKKÜR

Her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim. Bu zorlu süreçte desteklerini esirgemeyen değerli çalışma arkadaşım Makine Mühendisi İbrahim AKSOY teşekkürlerimi sunarım. Bilgilerini benden esirgemedi, tecrübelerini büyük bir zevkle benimle paylaşan sayın Prof. Dr. Mehmet DEMİRTAŞ’a teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

|                                                                                   | Sayfa     |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| ÖZET .....                                                                        | v         |
| ABSTRACT .....                                                                    | vi        |
| TEŞEKKÜR.....                                                                     | vii       |
| İÇİNDEKİLER .....                                                                 | viii      |
| ÇİZELGELER LİSTESİ .....                                                          | x         |
| ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....                                                           | xi        |
| SİMGELER VE KISALTMALAR .....                                                     | xiii      |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                                              | <b>1</b>  |
| 1.1. Pan-Tilt Nedir? .....                                                        | 1         |
| 1.2. Pan-Tilt Sistemleri Kullanım Alanları.....                                   | 3         |
| 1.3. Pan-Tilt Sistemlerinde Kullanılan Motor Türleri.....                         | 4         |
| 1.3.1. Fırçalı doğru akım motor özellikleri .....                                 | 5         |
| 1.3.2. Step motor özellikleri.....                                                | 6         |
| 1.3.3. Fırçasız doğru akım motorları.....                                         | 7         |
| <b>2. SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR.....</b>                                     | <b>11</b> |
| 2.1. PMSM ların Pan-Tilt Sistemlerindeki Motorlar ile Karşılaştırılması .....     | 12        |
| <b>3. PMSM’LARIN KONTROL METOTLARI .....</b>                                      | <b>15</b> |
| 3.1. Skaler (v/f) Kontrolü.....                                                   | 15        |
| 3.2. Doğrudan Tork Kontrol Metodu .....                                           | 16        |
| 3.3. Alan Yönledirmeli Kontrol Metodu.....                                        | 16        |
| <b>4. PAN-TİLT BİRİMLERİ İÇİN PMSM SÜRÜCÜ TASARIMI ve UYGULAMASI .....</b>        | <b>21</b> |
| 4.1. Motor Sürücü Devre Kartı Tasarımı ve Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi .. | 21        |

|                                                                                   | <b>Sayfa</b> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| 4.1.1. Motor özellikleri .....                                                    | 23           |
| 4.2. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi .....                                   | 26           |
| 4.2.1. Sistem parametrelerinin belirlenmesi .....                                 | 26           |
| 4.3. Güç Faktörü Düzelte Devresi .....                                            | 29           |
| 4.3.1. Yükseltici çevirici metodu .....                                           | 30           |
| 4.4. Kontrolcü Devresi Tasarımı.....                                              | 34           |
| 5. YAPILAN DENEY ÇALIŞMASI.....                                                   | 37           |
| 5.1. Sistem Blok Şeması ve Motor Sürücü Devreleri Baskı Devre Kartı Tasarımı .... | 37           |
| 5.2. Motor Sürücü Kartı Devre Sinyalleri.....                                     | 40           |
| 5.2.1. Motor sürücü anahtarlama sinyalleri .....                                  | 40           |
| 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....                                                    | 45           |
| KAYNAKLAR.....                                                                    | 47           |
| ÖZGEÇMİŞ .....                                                                    | 51           |

## ÇİZELGELER LİSTESİ

| Çizelge                                  | Sayfa |
|------------------------------------------|-------|
| Çizelge 4. 1 PMSM Katalog Değerleri..... | 24    |

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

| Şekil                                                                                  | Sayfa |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Şekil 1. 1 Mekanik Pan-Tilt görseli [4].....                                           | 1     |
| Şekil 1. 2 Hidrolik Pan-Tilt görseli [2].....                                          | 2     |
| Şekil 1. 3 Elektromekanik Pan-Tilt görseli [4].....                                    | 3     |
| Şekil 1. 4 Fırçalı doğru akım motoru iç yapısı [12].....                               | 5     |
| Şekil 1. 5 Step motor yapısı gösterimi [14].....                                       | 6     |
| Şekil 1. 6 Üç faz evirici gösterim şekli [17].....                                     | 8     |
| Şekil 1. 7 BLDC motor sensor durumlarına göre fazların enerjilenme sırası [18].....    | 8     |
| Şekil 2. 1 Sabit mıknatısların yerleştirilme şekillerine göre PMSM'ler şekilleri. .... | 12    |
| Şekil 2. 2 Motorlar arasındaki zıt emk karşılaştırması [31].....                       | 13    |
| Şekil 3. 1 DTC yapısı basitleştirmiş şeması.....                                       | 16    |
| Şekil 3. 2 FOC blok diyagram gösterimi .....                                           | 18    |
| Şekil 4. 1 IMC102TF048 şematik devre tasarımı .....                                    | 22    |
| Şekil 4. 2 H07 LW3 IPM in devre tasarımı .....                                         | 23    |
| Şekil 4. 3 Motor hız tork grafiği .....                                                | 25    |
| Şekil 4. 4 Elektriksel hıza göre motor güç tork dalgalanma grafiği .....               | 25    |
| Şekil 4. 5 Motor güç hız grafiği .....                                                 | 26    |
| Şekil 4. 6 Motor stator kutup sayısı hesaplanması.....                                 | 27    |
| Şekil 4. 7 Motor stator sargı direnci hesaplanması .....                               | 27    |
| Şekil 4. 8 Motor Sargıları değişim gösterimi.....                                      | 28    |
| Şekil 4. 9 Ke için bileşenlerin gösterimi .....                                        | 29    |
| Şekil 4. 10 Yükseltici çevirici devre gösterim şeması [41] .....                       | 30    |
| Şekil 4. 11 Güç faktörü düzenleme devre şematığı .....                                 | 33    |
| Şekil 4. 12 Güç girişi filtre tasarımı .....                                           | 33    |
| Şekil 4. 13 PIC18F45K22 işlemci iç yapısı blok şeması [43] .....                       | 34    |

| <b>Şekil</b>                                                                 | <b>Sayfa</b> |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Şekil 4. 13 Kontrolcü tasarımı devre şeması .....                            | 35           |
| Şekil 5. 1 Deney Düzenegi blok şema gösterimi .....                          | 37           |
| Şekil 5. 2 Alt katman devre tasarım gösterimi.....                           | 38           |
| Şekil 5. 3 Üst Katman devre tasarımı gösterimi .....                         | 38           |
| Şekil 5. 4 Üst ve alt katman devre tasarımı gösterimi .....                  | 39           |
| Şekil 5. 5 Deney düzenegi Pan-Tilt görseli .....                             | 39           |
| Şekil 5. 6 H1 ve L1 anahtarlama elemanlarına ait anahtarlama sinyalleri..... | 40           |
| Şekil 5. 7 Yüksüz motor akım hız grafiği .....                               | 41           |
| Şekil 5. 8 Motor Id referans akım zaman grafiği .....                        | 42           |
| Şekil 5. 9 Motor Iq referans akım zaman grafiği .....                        | 42           |
| Şekil 5. 10 Motor tam yük faz akım zaman grafiği .....                       | 43           |
| Şekil 5. 11 Motor akı yüzde grafiği .....                                    | 43           |
| Şekil 5. 12 motor 3000 rpm'deki hız zaman grafiği .....                      | 44           |
| Şekil 5. 13 motor 3000 rpm'deki hız hata grafiği .....                       | 44           |

## SİMGELER VE KISALTMALAR

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

| Simgeler       | Açıklamalar                                   |
|----------------|-----------------------------------------------|
| $A$            | Amper                                         |
| $E_{PK}$       | Zıt emk voltaj değerinin tepe noktası.        |
| $E_U$          | Zıt emk voltaj değeri                         |
| $f_a$          | A fazı akım, voltaj değeri referans gösterimi |
| $f_b$          | B fazı akım, voltaj değeri referans gösterimi |
| $f_c$          | C fazı akım, voltaj değeri referans gösterimi |
| $f_{sw}$       | Anahtarlama frekansı                          |
| $f_\alpha$     | Clarke dönüşümü alfa referans değeri          |
| $f_\beta$      | Clarke dönüşümü beta referans değeri          |
| $H$            | Henry                                         |
| $I_{rms,peak}$ | Bobin rms tepe akım değeri                    |
| $I_{rms}$      | Bobin rms akım değeri,                        |
| $i_a$          | A fazı akım değeri                            |
| $i_b$          | B fazı akım değeri                            |
| $i_c$          | C fazı akım değeri                            |
| $i_{ds}$       | D eksenli stator referans akımı               |
| $i_{sq}$       | Park dönüşümü alfa akım değeri                |
| $i_{s\alpha}$  | Clarke dönüşümü alfa akım değeri              |
| $i_{s\beta}$   | Clarke dönüşümü beta akım değeri              |
| $i_{qs}$       | Q eksenli stator referans akım                |
| $K_e$          | Zıt emk sabiti                                |
| $L$            | bobin indüktans değer                         |
| $L_{ds}$       | D eksenli stator indüktans değeri             |

**Simgeler****Açıklamalar**

|               |                                               |
|---------------|-----------------------------------------------|
| $L_{qs}$      | D eksenli stator indüktans değeri             |
| mH            | mili Henry                                    |
| Nm            | Newton Metre                                  |
| P             | Motor kutup teki sayısı                       |
| $P_{out}$     | Çıkış gücü değeri                             |
| $P_{out,max}$ | Maksimum çıkış gücü                           |
| $T_{elek}$    | Elektriksel turun periyodu                    |
| V             | Volt                                          |
| $V_{ac}$      | Alternatif akım giriş gerilim değeri          |
| $V_{ac}$      | Alternatif akım giriş gerilim değeri          |
| $V_{acLL}$    | Minimum girişim alternatif akım giriş voltaj, |
| $V_{out}$     | Çıkış gerilim voltaj değeri                   |
| Vs/Rad        | Gerilim/ Radyan                               |
| $\omega_e$    | Elektriksel hız                               |
| $\omega_m$    | Mekaniksel hız                                |
| $\eta$        | Verimlilik                                    |
| $\mu F$       | mikro Farad                                   |
| $\Psi_{ds}$   | D eksenli stator manyetik akı değeri          |
| $\Psi_{qs}$   | Q eksenli stator manyetik akı değeri          |

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

|               |                                                    |
|---------------|----------------------------------------------------|
| <b>AC</b>     | Alternative Current                                |
| <b>ADC</b>    | Analog Digital Converter                           |
| <b>ARM</b>    | Acorn RISC Machine                                 |
| <b>BLDC</b>   | Brushless Direct Current                           |
| <b>CCM</b>    | Continuous Current Mode                            |
| <b>DC</b>     | Direct Current                                     |
| <b>DCM</b>    | Discontinuous Current Mode                         |
| <b>DTC</b>    | Direct Torque Control                              |
| <b>EMK</b>    | Elektromotor Kuvvet                                |
| <b>FOC</b>    | Field Oriented Control                             |
| <b>GPIO</b>   | General Purpose Input Output                       |
| <b>Hz</b>     | Hertz                                              |
| <b>ICE</b>    | Internal Combustion Engine                         |
| <b>IGBT</b>   | Insulated-gate Bipolar Transistor                  |
| <b>IPM</b>    | Intelligent Power Module                           |
| <b>MCU</b>    | Microcontroller Unit                               |
| <b>MOSFET</b> | Metal Oxide Semi-conductor Field Effect Transistor |
| <b>PFC</b>    | Power Factor Correction                            |
| <b>PMSM</b>   | Permanent Magnet Synchronous Motor                 |
| <b>PWM</b>    | Pulse Width Modulation                             |
| <b>RPM</b>    | Revolution Per Minute                              |
| <b>SM</b>     | Senkron Motor                                      |
| <b>STM</b>    | ST Mikroelektronis                                 |
| <b>SVPWM</b>  | Space Vector Pulse Width Modulation                |
| <b>V/f</b>    | Volt/frekans                                       |
| <b>V/Hz</b>   | Volt/Hertz                                         |
| <b>VSI</b>    | Voltage Source Inverter                            |

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Pan-Tilt Nedir?

Pan-Tilt sistemleri radar, anten, kamera gibi birbirinden farklı üst birimleri iki eksende yönlendirmek amacıyla kullanılan bir alt birim olan sistemlerdir. Genel olarak, bir Pan-Tilt sistemleri, birincisi Pan (yatay) eksen ve Tilt (dikey) eksen olmak üzere iki dönme ekseninden oluşur. Pan-Tilt sistemleri boyutları üzerinden bulunan yüklerin ağırlığı, boyutları hassasiyet, hız, hareket aralığı, güç gereksinimi gibi parametrelerle birbirinden farklılık göstermektedir. Pantilt sistemleri genel olarak üç ana başlık altında toplanmaktadır bunlar; mekanik, hidrolik ve elektromekanik sistemlerdir. Mekanik Pan-Tilt sistemleri, dişliler yardımı ile insan gücüyle kontrol edilmektedir bu yüzden basit ve ucuz sistemler olmasıyla beraber, hareket aralıkları ve hassasiyetleri sınırlıdır [1]. Şekil 1.1’de bir mekanik Pan-Tilt örneği verilmiştir.



Şekil 1. 1 Mekanik Pan-Tilt görseli [4]

Diğer Pan-Tilt sistemlerinden biri de hidrolik sistemlerdir. Bu sistemler bir hidrolik sıvı yardımı ile sisteme iki eksende hareket kabiliyeti sağlayabilmektedir, fakat maliyet ve karmaşık yapısından dolayı yaygın olarak kullanılması önüne geçmektedir [2]. Şekil 1.2’de bir hidrolik Pan-Tilt sistemi görseli verilmiştir.



Şekil 1. 2 Hidrolik Pan-Tilt görseli [2]

Diğer Pan-Tilt sistemleri ise literatürde ve endüstriyel alanlarda en çok kullanılan elektromekanik Pan-Tilt sistemleridir. Elektromekanik Pan-Tilt sistemleri içerisinde bulunan elektrik motorlar yardımı ile sisteme iki eksenle hareket kabiliyeti kazandırmaktadır. Sistemin faydalı yükü bu motor için tasarlanan kontrolcüler yardımı ile istenilen yön, hız gibi parametreler ayarlanarak kontrolü sağlanmaktadır [3]. Elektromekanik Pan-Tilt sistemleri hareket kabiliyeti, ağırlık ve fiyat gibi özellikleri sayesinde diğer sistemlerden daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu sistemler boyut ve ağırlıklarına göre hem taşınabilir hem de sabit şekilde kullanılabilir. Taşınabilir olan platformlar batarya ile çalışırken sabit platformlar şebeke geliri ile de çalışabilmektedir. Bu çalışmada elektromekanik Pan-Tilt sistemleri üzerinde çalışılacaktır. Şekil 1.3'te elektromekanik bir Pan-Tilt sistemi görseli paylaşılmıştır.



Şekil 1. 3 Elektromekanik Pan-Tilt görseli [4]

## 1.2. Pan-Tilt Sistemleri Kullanım Alanları

Pan-Tilt sistemleri gözetleme, sinematografi, robotik, otomasyon ve radar sistemleri gibi hareket ihtiyacı duyan farklı alanlarda çok sayıda uygulamaya sahiptir. Pan-tilt sistemlerinin en yaygın uygulamalarından biri gözetlemedir. Bankalar, havaalanları gibi güvenli halka açık alanlar, sınır güvenliği gibi askeri alanlarda gözetleme amacıyla kullanılmaktadır. Pan-Tilt sistemleri kameranın hareketinin uzaktan kontrol veya otomatik olarak kontrol edilmesini sağlayarak nesneleri veya kişileri gerçek zamanlı olarak izlemesini sağlar. Bu özellik, izlenen alanın 360 derecelik bir görünümünü sağladığından, potansiyel tehditlerin belirlenmesine ve suçun önlenmesine yardımcı olabileceğinden, güvenlik ve gözetim amaçları için gereklidir [5]. Aynı zamanda iki eksendeki bu hareket kabiliyeti sayesinde nesne takibi, hedef belirleme gibi alanlarda da yaygın olarak kullanılmaktadır. Pan-Tilt sistemleri, robot kollarının ve kafalarının hareketini kontrol etmek için kullanıldıkları robotikte de kullanılır. Pan-Tilt sistemi, robotun kolunu veya kafasını farklı yönlerde hareket ettirerek çeşitli görevleri yerine getirmesini sağlar. Örneğin, endüstriyel otomasyonda Pan-Tilt sistemi, makine ve ekipmanların hareketini kontrol etmek için kullanılır ve hassas hareketler ve görevler gerçekleştirmelerini sağlar [6]. Pan-Tilt sistemleri, uygulamalarını tıp alanlarında da karşımıza çıkmaktadır. Pan-Tilt sistemi, kameranın farklı yönlerde hareket etmesini sağlayarak ameliyat bölgesinin net ve engelsiz bir görüntüsünü sağlar. Bu özellik, cerrahın küçük alanlarda ameliyat yapması gereken operasyonlarında kullanılmaktadır [5].

Literatürde bulunan uygulama alanlarından birisi de Pan-Tilt sistemlerinin anten ve radar sistemlerinde kullanılmasıdır. Radar ve anten sistemleri uçak, gemi ve araç gibi hareketli hedefleri tespit etmek ve izlemek için kullanıldığı radar gözetimidir. Aynı şekilde noktadan noktaya haberleşme veri aktarımı amacıyla da Pan-Tilt sistemleri kullanılmaktadır [7].

Bu uygulama alanlarındaki farklılıklarla Pan-Tilt sistemlerinden beklenen hız, tork, güç tüketimi, hassasiyet, doğruluk, tekrarlanabilirlik hareket açısı gibi sistem parametreleri birbirlerinden farklılıklar göstermektedir. Örneğin bir kamera gözetleme sisteminde açı doğruluğu ön plandayken bir radar uygulamasında tork gereksinimi daha fazla olabilmektedir. Bu gereksinimlerle beraber Pan-Tilt sistemleri birbirinden ayrılmaktadır. Bu gereksinimleri için karşımıza çıkan en büyük farklardan birisi de kullanılan elektrik motor tipleridir. Literatürde farklı türlü motorlar kullanılmıştır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan motor tipi olarak Step Motor, Fırçalı Doğru Akım Motorları (DC) ve Fırçasız Doğru Akım Motorları (BLDC) olarak karşımıza çıkmaktadır. Sonraki üç başlık altında bu motor türleri detaylı olarak incelenerek bu tezin ana amacı olan ve Pan-Tilt sistemlerinde kullanılması hedeflenen Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarla (PMSM) karşılaştırılmasına yer verilmiştir.

### **1.3. Pan-Tilt Sistemlerinde Kullanılan Motor Türleri**

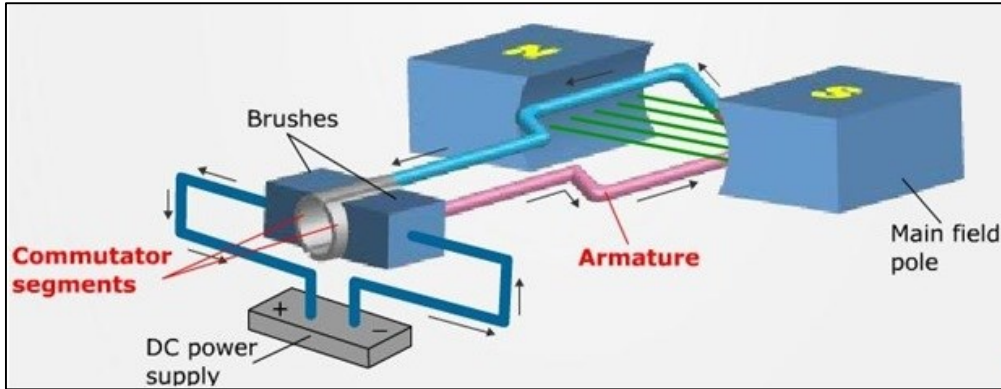
Elektrik motorları sargılarına uygulanan akım ile elektrik enerjisini manyetik enerjiye oluşan bu manyetik enerjisini de hareket enerjisine çeviren elektromekanik yapılardır. Bu akış tam ters şekilde motorsun döner (rotor) kısmına hareket verilirse jeneratör olarak görev yapmaktadır.

Motorlar DC ve AC olarak iki temel başlık altında sınıflandırılmıştır [8]. Pan-Tilt sistemlerinde dairesel dönen motorlar kullanılmaktadır. Kullanılan elektrik motorları sayesinde elektrik enerjisi hareket enerjisine, kullanılan aktarım organı yardımı ile de istenilen tork seviyesi elde edilerek üzerinde bulunan faydalı yükü hareket ettirmektedir. Pan-Tilt birimlerinde kullanılan motor türleri kullanım alanları, kullanılan faydalı yükler, konum doğruluğu, hız gibi isterlere göre birbirinden farklılık göstermektedir.

### 1.3.1. Fırçalı doğru akım motor özellikleri

Fırçalı doğru akım motorlar çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan motor tiplerinden biridir. Fiyat olarak ucuz olmakla beraber herhangi istenilen boyutta temin edilmesi beraber kullanımı da diğer motorlara göre daha kolaydır. Yapı olarak diğer motorlara göre daha basit bir yapıya sahiptir [9]. Herhangi bir evirici veya kontrol devresi olmadan dahi motor fazları arasına yeteri miktarda gerilim uygulandığı takdirde rahatlıkla motorun rotoru hareket edebilmektedir.

Fırçalı DC motorların çalışma prensibi akademik literatürde kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Daha önce bahsedildiği gibi, fırçalanmış DC motorlar bir rotor ve bir statordan oluşur ve rotora elektrik gücü aktarmak için fırçalar ve komütatörler kullanır [10]. Fırçalar, karbon gibi iletken malzemelerden yapılmıştır ve rotor miline bağlı bölümlü bir halka olan komütatör ile temas halinde tutulur. Motora bir voltaj uygulandığında, rotordaki bobinlerden akan bir akım oluşturarak statorun manyetik alanıyla etkileşen ve rotorun dönmesine neden olan bir manyetik alan oluşturur [11]. Şekil 1.4'te fırçalı doğru akım motorunun iç yapısı gösterilmiştir.



Şekil 1. 4 Fırçalı doğru akım motoru iç yapısı [12]

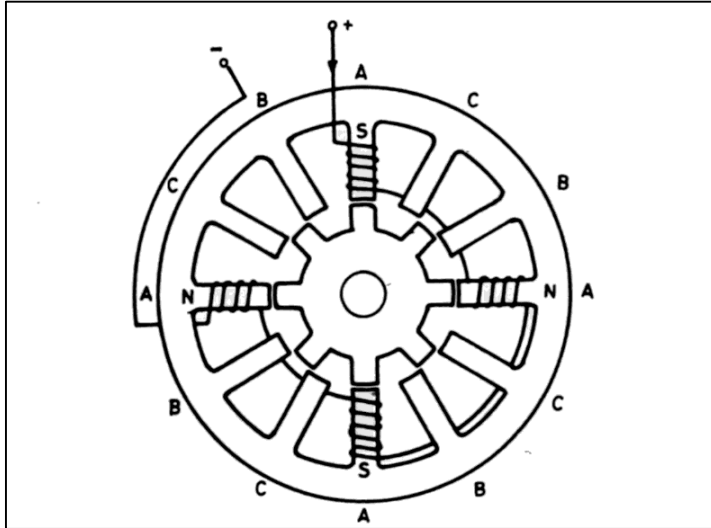
Fırçalı DC motorlar, düşük maliyeti, yüksek verimi ve kontrol kolaylığı nedeniyle Pan-Tilt sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fırçalı bir DC motor, motor sargılarından geçen akımın yönünü değiştiren bir rotor, bir stator ve bir komütatörden oluşur. Motora uygulanan voltajı değiştirerek motorun hızı ve yönü kontrol edilebilir. Bu, fırçalanmış DC motorları, hassas motor ve konum kontrolünün gerekli olduğu Pan-Tilt sistemlerinde

kullanım için ideal hale getirir [13]. Yapısında bulunan fırçaların belirli bir periyodda bakım gereksinimi duymaları en büyük dezavantajlarından biridir.

### 1.3.2. Step motor özellikleri

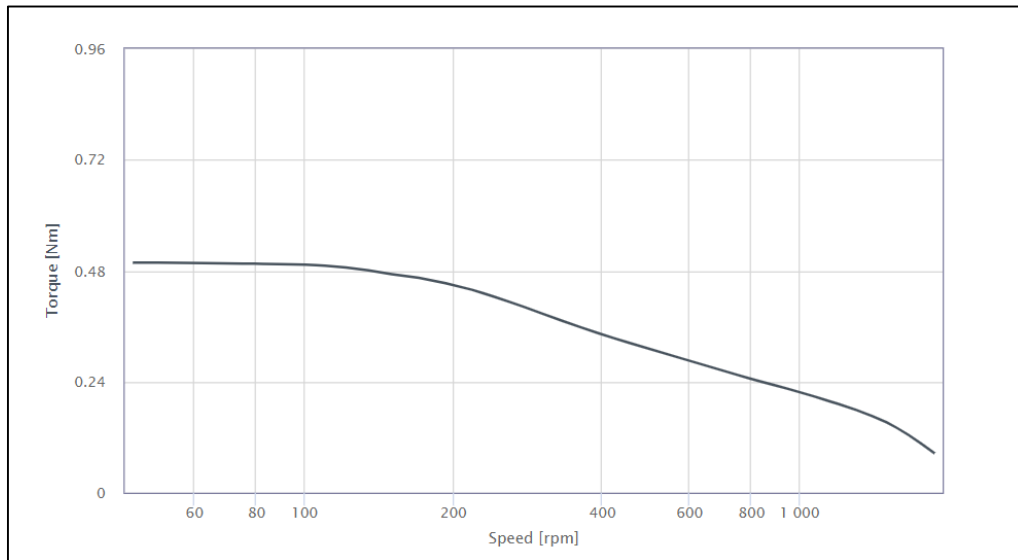
Step motorlar da elektrik enerjisini hareket enerjisine çeviren elektromekanik yapılardır. Hareket, bobinler tarafından sağlanan ve mıknatıslar tarafından algılanan bir manyetik alan kullanılarak elde edilir. Aslında, bobinlerden birine enerji verildiğinde, bir manyetik alan yaratılır ve enerji döngüsel olarak sağlanırsa (giriş darbeleri aracılığıyla), manyetik alan değişir. Yapısı gereği diğer motor tiplerinden farklılık göstermektedir. Adım harekete gerçekleştirerek konum kontrolü kolaylığı sağlamak için tasarlanmıştır [14].

Motor içerisinde bulunan sargıların sırayla uyartılması sonucu motorun rotor kısmı hareket etmektedir. Konum kontrolü yapılırken motor kontrol üniteleri herhangi bir sensor, enkoder gibi birimlere ihtiyaç duymamaktadır. Açık çevirim kontrol ile konum kontrolü sağlanmaktadır. Şekil 1.5'te step motorun iç yapısını gösteren bir yapı örnek olarak verilmiştir. Rotor kısmında bulunan mıknatısların konumlandırılması ile hareket aralığı ayarlanabilmekle beraber, kontrol metotları ile bu hareket aralıkları daha da hassas hale getirilebilmektedir.



Şekil 1. 5 Step motor yapısı gösterimi [14]

Step motorlar, hassas konumlandırmaları ve güç olmadan bir konumu tutabilmeleri nedeniyle Pan-Tilt sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [15]. Aynı zamanda boyut üretici miktarı ve değişik çalışma voltaj aralığına sahip olmaları nedeni ile de yoğun olarak kullanılmasının diğer sebeplerindendir. Step motorun adım kontrolü sayesinde kolaylıkla kontrol edilebilmesi sayesinde yüksek doğruluk ve tekrarlanabilirlik değerlerine sahiptirler. Diğer yandan, Step motorların ana dezavantajları yüksek yükleri yönlendirmedeki tork gereksinimini sağlayamamasıdır. Ek olarak yüksek hızlardaki rezonans ve titreşim problemlerinde diğer dezavantajlarındandır. Şekil 1.6'da Nanotec firmasının SC4118L1804-ENO05K kodlu step motorunun tork-hız grafiği paylaşılmıştır [16]. Şekilde de görüldüğü üzere yüksek hızlardaki tork miktarları düşük hızlardaki tork miktarına oranla daha düşüktür.

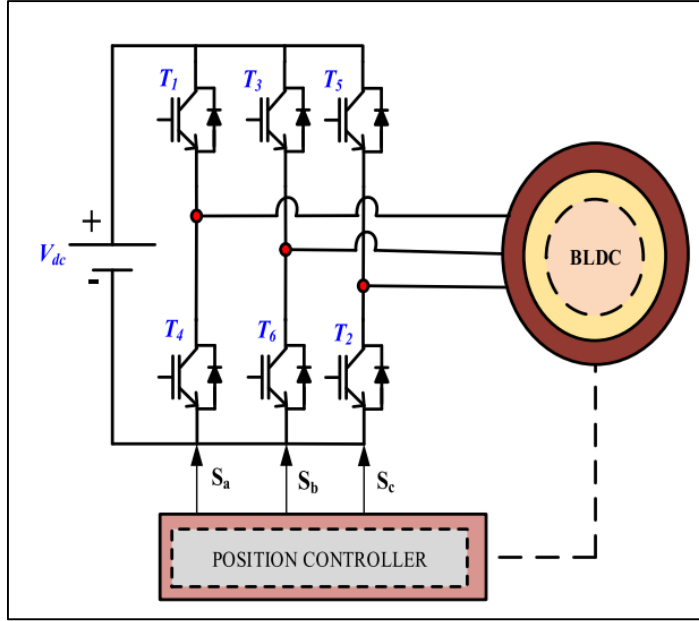


Şekil 1. 6 SC4118L1804-ENO05K kodlu motorun tork-hız grafiği [16]

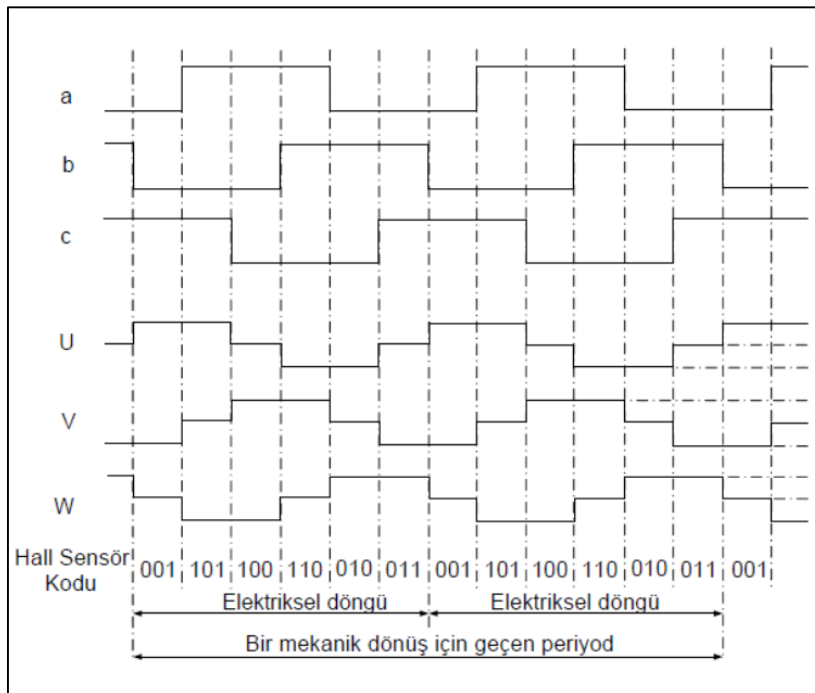
### 1.3.3. Fırçasız doğru akım motorları

Fırçasız doğru akım motorları (BLDC) elektrik enerjisini hareket enerjisine çeviren elektromekanik yapılardır. BLDC motorlar, sabit mıknatıslı bir rotor ve birkaç bobin içeren bir stator ile tasarlanmıştır. Elektronik komütasyon, rotorun konumunu algılayan ve rotoru tahrik eden dönen bir manyetik alan oluşturmak için stator bobinlerindeki akım akışını değiştiren sensörlerin kullanılmasıyla da sağlanırken sensörsüz kontrol metotları da bulunmaktadır. Fırçasız doğru akım motorları daha çok otomotiv endüstrileri, pompalama endüstrileri gibi dinamik uygulamalar için tercih edilir [17]. İçerisinde bulunan birkaç sensör

yardımı ile motorun döner kısmı olan statorun konumu rahatlıkla belirlenmekte olup kontrolü sağlanama bilmektedir [18]. Şekil 1.7’de bir üç faz h köprü evirici devre gösterimi ve Şekil 1.8’de bir fırçasız doğru akım motorunun sensor sıralamalarına göre üç faz h köprü evirici devresi kullanılarak hangi kolun anahtarlaması gerektiği verilmiştir.



Şekil 1. 7 Üç faz evirici gösterim şekli [17]



Şekil 1. 8 BLDC motor sensor durumlarına göre fazların enerjilenme sırası

BLDC motorlar, yüksek tork ve motorun hız ve yönünün hassas kontrolünü sağlama yetenekleri nedeniyle Pan-Tilt sistemlerinde yaygın olarak kullanılır. Stator yapısında bulunan sargılarındaki manyetik alanla ile rotorunda bulunan sabit mıknatısların manyetik alanının kontrolü sayesinde motorun hızının ve yönünün hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlayarak fırçasız DC motorları doğru yön kontrolünün gerekli olduğu Pan-Tilt sistemlerinde kullanım için ideal hale gelmektedir [18].



## 2. SABİT MİKNATISLI SENKRON MOTOR

Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM'ler), yüksek verimlilikleri, kompakt boyutları ve geliştirilmiş performansları nedeniyle son yıllarda yaygın bir popülerlik kazanmıştır. Bu motorlar, statorun manyetik alanıyla etkileşime girerek motorun dönmesine neden olan bir manyetik alan oluşturmak için kalıcı mıknatıslar kullanır. Rotor üzerindeki kalıcı mıknatısların ürettiği manyetik alan, stator sargılarının ürettiği manyetik alanla etkileşime girerek rotorun dönmesine neden olan tork üretir. Stator sargıları, dönen bir manyetik alan oluşturan bir AC voltajı ile beslenir. Dönen manyetik alanın hızı, rotorun hızıyla senkronizedir olması nedeniyle senkron olarak adlandırılmıştır [19].

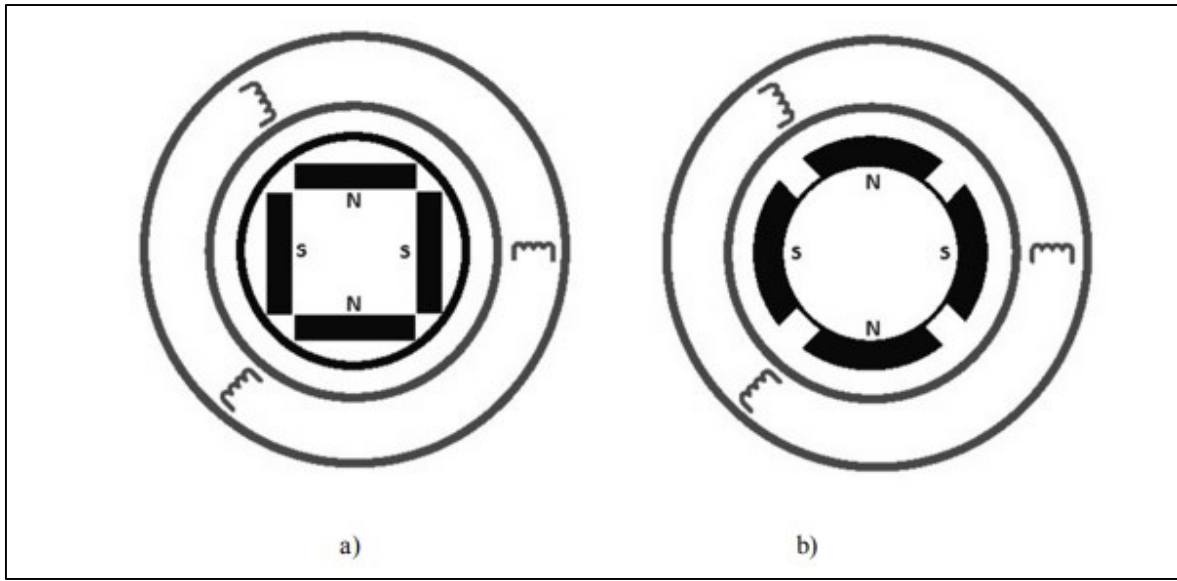
PMSM'lerin diğer motor türlerine göre çeşitli avantajları vardır. Başlıca avantajlarından biri yüksek verimlilikleridir. PMSM'ler, %98'e varan verimliliklere ulaşabilmektedir, ek olarak, PMSM'lerin kompakt boyutu ve yüksek güç yoğunluğuna sahip olması sebebiyle alanın sınırlı olduğu uygulamalar için uygun hale getirir [20]. PMSM'ler ayrıca yüksek hız değerlerinde yüksek tork sahip olması sebebiyle literatürde robotik, elektrikli araçlar gibi başlıklar altında kullanılabilir kılınmaktadır [21].

Kalıcı mıknatıslı senkron motorların çalışma prensibi, senkron hızda elektromotor kuvvet üreten stator üzerindeki dönen manyetik alana bağlıdır. Bu motorların rotorunda kalıcı mıknatıslar bulunur ve sabit bir manyetik akı oluşturur. Stator üç fazlı bir besleme ile uyarıldığında, hava boşlukları arasında dönen bir manyetik alan üretilir. Rotor alan kutupları, dönen manyetik alanı senkron hızda tutar ve rotor sürekli olarak döner. Ayrıca bu manyetik alan tork üretir. Motorun dönmesi sonucunda, Lenz Yasasına göre uygulanan gerilime karşı bir gerilim olan zıt EMK (elektromotor kuvvet) gözlenir. Bu zıt EMK Bobinlerden geçen akımı azaltmaktadır [22].

Vurma torku, PMSM'nin diğer önemli özelliklerinden biridir. Rotorun kalıcı mıknatısları ile stator yuvaları arasındaki etkileşimden kaynaklanmaktadır. Özellikle düşük hızlarda görülmesiyle beraber PMSM ların dezavantajlarından biridir. Pozisyon, manyetik kutup sayısı, statordaki diş sayısı ve hız bu vurma tork karakteristiğini etkiler. Vurma torkunu azaltmak için literatürde bazı teknikler uygulanmaktadır. Mıknatıs kutup arkının veya genişliğinin optimizasyonu kullanılan yöntemlerden birisidir. Ayrıca, stator yığını veya

mıknatısları eğri olmakla beraber vuruntu torkunu azaltmak için kutup başına kesirli yarıklar kullanılır [23-24].

PMSM'ler, sabit mıknatıs kısımlarının döner alan olan rotora yerleştirilme tipine göre iki ana sınıfa ayrılmaktadır. Sabit mıknatısların rotor nüvesinin yüzeyine yerleştirildiği tip olarak yüzey montajlı senkron motor Sabit mıknatısların rotor nüvesinin içine yerleştirildiği içten mıknatıslı motor olarak adlandırılmaktadır. Şekil 2.1'de iki tip motor yapılarının görselleri verilmiştir [25].



Şekil 2. 1 Sabit mıknatısların yerleştirilme şekillerine göre PMSM'ler şekilleri a) İçten mıknatıslı b) Yüzey mıknatıslı [25].

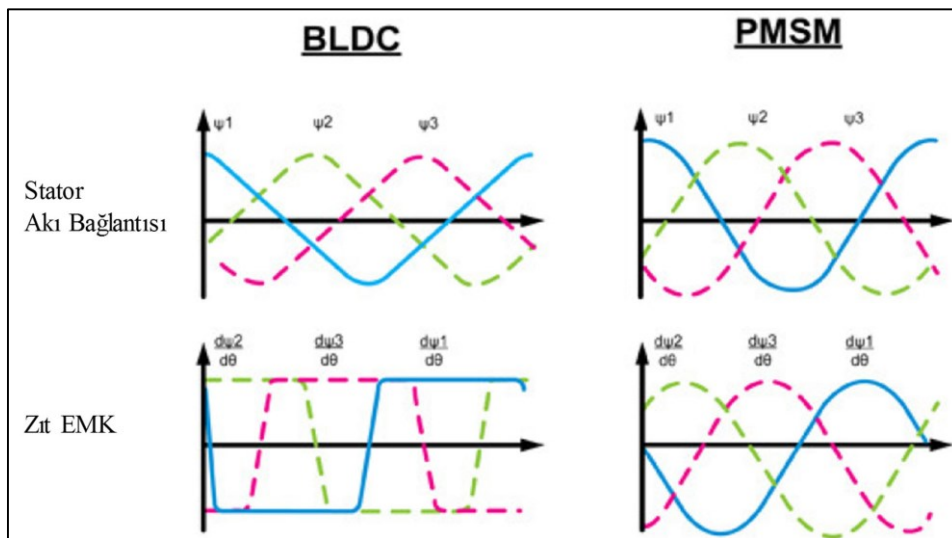
## 2.1. PMSM ların Pan-Tilt Sistemlerindeki Motorlar ile Karşılaştırılması

Fırçalı DC motorlar ile PMSM'lar arasında yapıları, kontrol metodu, birim hacimdeki güç miktarı gibi büyük farklılıklar bulunmaktadır. Fırçalı DC motorlar ile PMSM'lar arasındaki temel farklardan biri yapılarıdır. Fırçalı DC motorlar, elektrik gücünü rotora aktarmak için fırçalar ve komütatörler kullanırken, PMSM'lar rotoru döndürmek için gereken manyetik alanı oluşturmak için kalıcı mıknatıslar kullanır [26-27]. PMSM'lar, fırçalı DC motorlardan daha karmaşık bir tasarıma sahiptir ve daha fazla bileşen içerir, ancak fırçalı DC motorlara göre çeşitli avantajlar da sunarlar. PMSM'lerin en büyük avantajlarından biri daha yüksek verimlilikleridir. Tasarımları nedeniyle PMSM'ler, fırçalı DC motorlardan göre daha verimli olasıyla beraber PMSM'ler ayrıca daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahiptir, bu da ağırlık

veya hacim birimi başına daha fazla güç üretebilecekleri anlamına gelmektedir [27]. Bununla birlikte, PMSM'ler fırçalı DC motorlardan daha pahalıdır ve kontrolleri daha ileri teknoloji gerektirmektedir.

Pan-Tilt sistemlerinde kullanılan diğer bir motor türü olan step motor ve PMSM'nin birbirleri arasında benzerlikleri ve farklılıkları bulunmaktadır. Her iki motor da fırçasızdır yapıya sahip olmakla beraber kontrol edilirken yüksek hassasiyet ve doğruluk sunar. Bununla birlikte, step motorlar hassas konumlandırma gerektiren uygulamalar için ideal bir motor tipi iken yukarıda bahsedilen dezavantajları yüzünden, PMSM ile farklılıklar göstermektedir. PMSM step motorlara göre yüksek güç ve hız içeren uygulamalar için idealdir. Kontrol açısından Step motorların kontrolü daha basittir ve karmaşık kontrol algoritmaları gerektirmez iken, PMSM ise optimum performans elde etmek için daha karmaşık kontrol algoritmaları gerektirir [28].

Sabit mıknatıslı senkron motorlar yapı gereği fırçasız doğru akım motorlarına benzerlik göstermektedir ama fakat aralarında oluşan zıt elektromanyetik kuvvet, kontrol metotları gürültü çalışma gibi farklılıklar içermektedir. Sabit mıknatıslı motorların zıt elektromanyetik kuvvet şekillerinin birebirinden farklı olmasıdır. BLDC motorların zıt emk şekilleri trapeziodal şeklinde oluşurken PMSM motorların zıt emk sinusoidal olarak oluşmaktadır [29]. Zıt emk grafikleri Şekil 2.2'de örnek olarak verilmiştir.



Şekil 2. 2 Motorlar arasındaki zıt emk karşılaştırması [30].

Bununla beraber BLDC ve PMSM arasındaki daha farklı farklılıklar bulunmaktadır. PMSM alternatif akımla beslenirken BLDC motor doğru akımla beslenmektedir. BLDC motorların stator akı komütasyonları 60 derece bir değişirken PMSM de sürekli stator akı değişimi bulunmaktadır. BLDC motorların komütasyonlarında tork dalgalanmaları bulunurken.

PMSM da herhangi bir tork dalgalanması bulunmamaktadır. BLDC motor kontrolünde üç fazlı h köprü eviricisinde en fazla adet kol devreye girerken PMSM kontrolünde üç kol da aynı anda ilettime girebilmektedir. BLDC motorlar sensor komütasyonu ile rahat bir şekilde kontrol edilirken PMSM da sürekli bir komütasyon ihtiyacından dolayı daha zor kontrol edilmektedir. Çalışma gürültüleri de birbirlerinden farklılık göstermektedir. PMSM'ler daha düşük gürültü çalışabilmektedir. BLDC motorlar düşük hızlarda kullanıma daha uygun olmakla beraber diğer taraftan PMSM'ler yüksek hızlar için daha uygundur [31].

Yukarıda bahsedilen farklılar göre iki motor tiplerinin birbirlerine göre avantaj veya dezavantaj içerdiği görülmektedir. Pan-Tilt birimlerinde PMSM'lerin yüksek hız, tork, güç ihtiyacı duyan sistemlerde kullanması daha uygun olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışma PMSM motorlarının yüksek güç, tork ihtiyacı gereken Pan-Tilt sistemlerine uygulanmasını ele almıştır.

### 3. PMSM'LARIN KONTROL METOTLARI

Son zamanlarda PMSM'lerin hız değışkenli uygulamalarda kullanım oranı gittikçe artmaktadır. Bunun nedeni, PMSM'nin yüksek verimlilik, kompaktlık, yüksek tork-atalet oranı, hızlı dinamik yanıt, basit modelleme ve kontrol ve bakım gerektirmeyen çalışma gibi birçok özelliğe sahip olmasıdır. Bu isterle beraber birden fazla kontrol metodu ortaya çıkmıştır. Literatür incelendiğinde en çok kullanılan kontrol metotları olarak Skaler kontrol (V/f), Alan uyarımlı kontrol metodu (FOC) ve doğrudan tork kontrolü (DTC) olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu uygulamalar uygulama çeşitliliği olarak birbirlerinden oldukça farklılık göstermektedir.

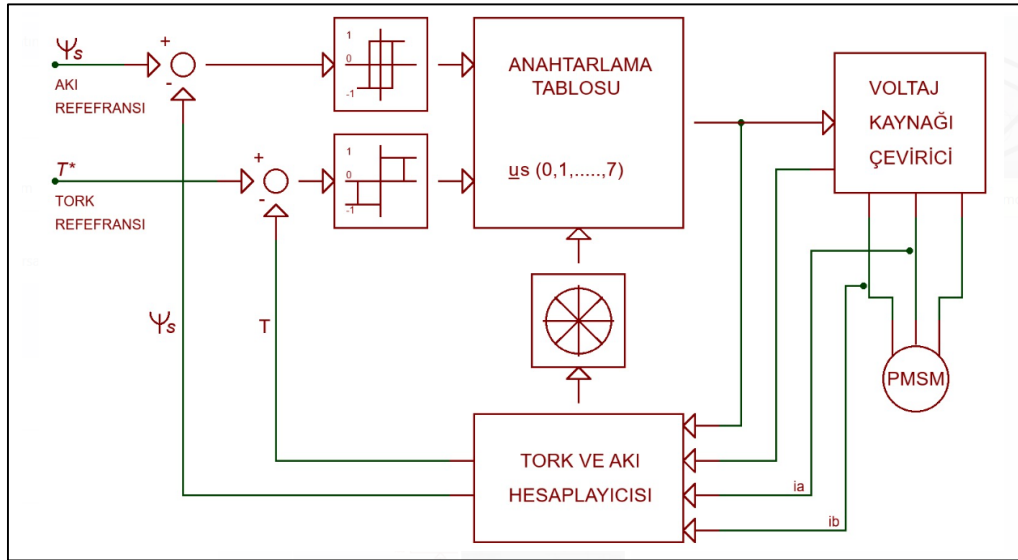
#### 3.1. Skaler (v/f) Kontrolü

Skaler Kontrol yalnızca büyüklükleri kontrol eder. Bir PMSM'yi kontrol etmenin en basit yöntemi, voltaj veya akım ile frekans arasındaki ilişkinin motorun hız aralığı boyunca sabit tutulduğu skaler kontroldür. Motor sürüş frekansı istenilen hıza göre ayarlanarak akım ve gerilim arasındaki oran sabit tutularak kontrol edilir. Herhangi bir rotor konum kontrolü olmadığı için skaler olarak adlandırılmıştır [31]. Bu metotta herhangi bir geri besleme olmadan açık çevrim şeklinde çalışmaktadır. Bu şekilde kontrol edilmesi bu kontrol metodunu çok basit kılmaktadır. Kolay kontrol edilebilme uygun maliyetli gibi avantajlara sahip olmasına rağmen, v/f kontrolünün yüksek performanslı uygulamalarda performansını sınırlayan birkaç dezavantajı vardır. Birincisi, motorun hızı, torku ve akısı üzerinde hassas kontrol sağlamaz, bu da yüksek hızlı ve yüksek torklu uygulamalarda performansını sınırlar. İkincisi, stator akımlarında yüksek harmonik distorsiyon üretir, bu da verimliliğin düşmesine ve gürültünün artmasına sebep olmaktadır [32].

Sonuç olarak, V/F kontrolü, düşük maliyetli uygulamalarda PMSM'leri kontrol etmek için kullanılan basit ve uygun maliyetli bir kontrol tekniğidir. Basitliği, sağlamlığı ve düşük maliyeti gibi birçok avantajı vardır. Bununla birlikte, yüksek performanslı uygulamalarda sınırlı performansı, yüksek harmonik bozulma gibi dezavantajları bulunmaktadır.

### 3.2. Doğrudan Tork Kontrol Metodu

Doğrudan tork kontrol metodunda darbe genişliği modülasyonu (PWM) ve Park dönüşümü kullanılmadığı için kontrol olarak daha kolaydır. Ek olarak motor rotor pozisyon bilgisine de ihtiyaç duymamaktadır. DTC kontrolü, yüksek verimli çalışma sağlar ve doğru ve hızlı tork dinamiği sağlamaktadır [33]. DTC ilkesi, bir kontrol sırasının, makinenin önüne yerleştirilmiş gerilim invertörünün anahtarlarına (anahtarlama durumları) doğrudan belirli bir örnekleme süresi boyunca uygulanmasına dayanır. Anahtarlama durumları daha önceden belirlenmiş bir tabloya göre belirlenmektedir. Temel kontrol yapısı olarak akı yoğunluğunu kontrol etmek üzere tasarlanmıştır [34]. Bu kontrol yöntemi ile torktaki dalgalanmalar düzeltilebilmektedir fakat durağan haldeki bir tork dalgalanmasını herhangi bir ek geri besleme olması için durağan haldeki tork dalgalanmalarını elimine edemeyecektir. Aynı zamanda, hesaplama işlemi büyük ölçüde motorun parametrelerine bağlıdır ve sağlamlığı zayıftır [36]. Şekil 3.1’de DTC kontrol yapısının basitleştirilmiş şeması verilmiştir. Şemada gösterilen akı ve tork hesaplama bölümü sistem için tek bir referans olduğu için oldukça önem DTC için çok kritik önem içermektedir.



Şekil 3. 1 DTC yapısı basitleştirmiş şeması

### 3.3. Alan Yönlendirmeli Kontrol Metodu

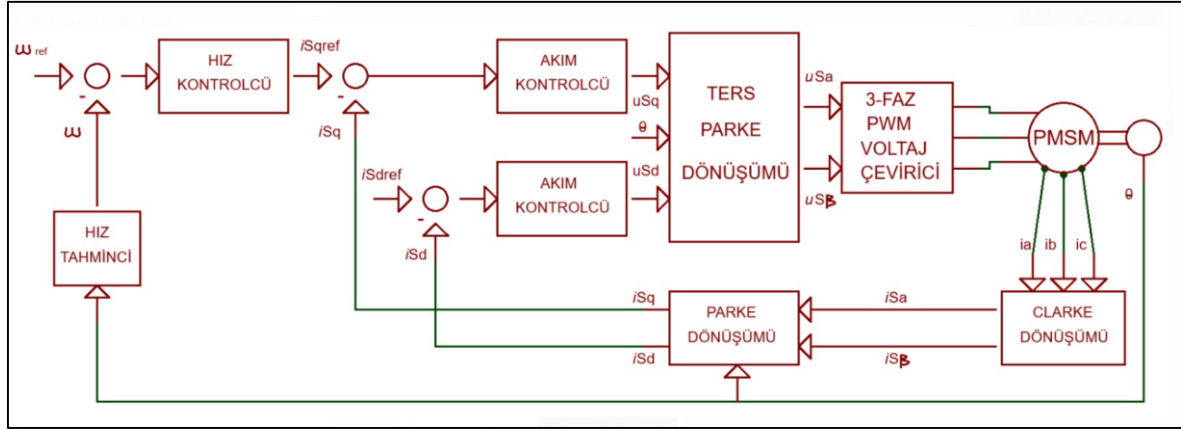
Alan yönlendirmeli kontrol (FOC) literatürde en çok kullanılan kontrol metotlarından biridir. FOC, PMSM'nin tork ve rotor akısını etkili bir şekilde kontrol etmeyi amaçlayan vektör

tabanlı yöntemlerden biridir. Vektör kontrollerin en büyük avantajları bağlı oldukları şebekenin frekansından bağımsız şekilde motorun torku hızı gibi parametreleri maksimum limitlerde çalışmasına olanak sağlamasıdır. Bu özelliklerden dolayı bu çalışmada Pan-Tilt birimleri içerisinde bulunan PMSM için FOC kontrol metodu tercih edilmiştir.

FOC hız hedefine ulaşmak için makinelerin manyetik akı, akım ve voltajının uzay vektörünü kontrol etmek için gerçekleştirilir. Clarke ve Park formülleri kullanılarak motorun stator akımları bir kontrol değişkeni olarak ayarlanır ve stator akımının bu üç fazlı statik referans çerçevesi dönüştürülür ve motor parametreleri d-q koordinat referans çerçevesinde gerçekleştirilir. Koordinat referans çerçevesindeki bulunan parametrelerden biri motorun torkunu belirtirken diğeri de motorun akısını belirlemektedir. Böylece motor parametreleri doğrusal olarak tanımlanabilmektedir. Motora uygulanan, Darbe genişlik modülasyonu (PWM) çıkışı alabilmek için uzay vektörü darbe gelinişik modülasyonu (SVPWM) ye beslenmeden önce rotorun d-q koordinat referans çerçevesinden statorun üç fazlı statik referans çerçevesine dönüştürülür. Motor akısı tabanlı bir FOC metodu daha verim ve kararlı çalışma ortaya çıkarmaktadır. [36].

FOC genel olarak hız ve tork kontrolü için kullanılmaktadır, pozisyon kontrolü için farklı metotlar kullanılmaktadır. Motor rotor konumu algılanmasında sensör kullanılan uygulamalar bulunmakla beraber herhangi bir tahmin yöntemiyle de çalışan kontrol metotları da bulunmaktadır. Bu çalışmada enkoder konum kontrol algoritmasında kullanılacağı için tahmin yöntemini kullanan yapı uygulanmıştır.

Şekil 3.2’de FOC metodunun blok diyagram gösterimi verilmiştir. Şekil 3.2’de görüldüğü üzere Motor faz akımları okunarak sırasıyla  $i_a$ ,  $i_b$ ,  $i_c$  Clarke dönüşümü kullanılarak  $i_{s\alpha}$  ve  $i_{s\beta}$  referans değerlerine çevrilmektedir. Bu akım referans sinyalleri Parke dönüşümün uygulanarak  $i_{sq}$  ve  $i_{sd}$  elde edilmektedir. Bu değerler ayrı ayrı referans sinyallerine tabi tutularak sırasıyla tork ve akı kontrol bloklarında işlenerek değerler gönderilmektedir. Kontrol bloklarından elde edilen değerler ters Parke dönüşümü uygulanarak üç faz evirici bloğu yardımı ile motor aktarılmaktadır.



Şekil 3. 2 FOC blok diyagram gösterimi

d-q senkron referans çerçevesindeki stator gerilimleri ve manyetik akı denklemi aşağıdaki gibidir:  $v_{ds}$  ve  $v_{qs}$  sırasıyla d-q referans çerçevesindeki voltajları göstermektedir. Aynı şekilde  $i_{ds}$  ve  $i_{qs}$  stator akımlarını  $L_{ds}$  ve  $L_{qs}$  d-q çevirimindeki indüktans değerlerini göstermektedir.  $R_s$  ise stator direnç değerini belirlemekle beraber,  $\Psi_{qs}$  ve  $\Psi_{ds}$  statorun manyetik akılarını irtifa etmektedir.  $\omega_r$  Motorun açısal hızını ve  $\Psi_m$  ise motorun rotorundaki sabit mıknatısın akısını temsil etmektedir [38].

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r \Psi_{qs} \quad (3.1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r \Psi_{ds} \quad (3.2)$$

$$\Psi_{ds} = L_{ds} i_{ds} - \Psi_m \quad (3.3)$$

$$\Psi_{qs} = L_{qs} i_{qs} \quad (3.4)$$

Yukarıdaki formüller yardımı ile eş. 3.1 ve 3.3 kobine edilerek d eksenli akımları, eş. 3.2 ile q eksenleri akımları aşağıdaki formüllerle edilebilmektedir.

$$\frac{di_{ds}}{dt} = \frac{R_s}{L_{ds}} i_{ds} + \frac{\omega_r L_{qs}}{L_{ds}} i_{qs} + \frac{1}{L_{ds}} v_{ds} \quad (3.5)$$

$$\frac{di_{qs}}{dt} = \frac{R_s}{L_{qs}} i_{qs} + \frac{\omega_r L_{ds}}{L_{qs}} i_{qs} + \frac{1}{L_{qs}} v_{qs} - \frac{\omega_r \Psi_m}{L_{qs}} \quad (3.6)$$

Gelişmiş tork formülü;

$$\tau_e = \frac{3}{2} \left( \frac{P}{2} \right) (\Psi_{ds} i_{qs} - \Psi_{qs} i_{ds}) \quad (3.7)$$

Mekaniksel tork formülü;

$$\tau_e = \tau_L + B\omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3.8)$$

Motorun hızı eş. 3.8 kullanılarak şu şekilde elde edilmektedir;

$$\omega_m = \int \frac{\tau_e - \tau_L + B\omega_m}{J} = \omega_r \frac{2}{P} \quad (3.9)$$

Burada  $\tau_e$  gelişmiş torku,  $\tau_L$  yük torkunu P motor kutup sayısını,  $\omega_m$  rotor hızını ve  $\omega_r$  elektrik hızı ifade etmektedir. Şekil 3.2’de gösterilen FOC şema diyagramına göre, PMSM’ kapalı döngü ile kontrol edilmektedir. Rotorun sabit mıknatıs kullanılmasından dolayı, akı bağlantısı sabit kalır. Bu çalışma için, PMSM’nin torku q eksenini tarafından kontrol edilir ve stator akımının d eksenini sıfır olarak ayarlanır. Tork ve akı değerlerini elde edebilmek için park dönüşümü uygulanmaktadır. Clarke, Ters Clarke ve Park dönüşüm formülleri aşağıda verilmiştir. Akım ve voltaj dönüşümleri bu formüller kullanılarak elde edilmiştir  $f_a, f_b, f_c$ , burada voltaj, akım ve akıları referans olarak göstermektedir.

Clarke Dönüşümü (a-b-c çerçevesinden  $\alpha - \beta$  çerçevesine);

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{-1}{3} & \frac{-1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Ters Clarke Dönüşümü ( $\alpha - \beta$  çerçevesinden a-b-c çerçevesine);

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Park Dönüşümü ( $\alpha - \beta$ ) çerçevesinden senkron dönüş d-q çerçevesine);

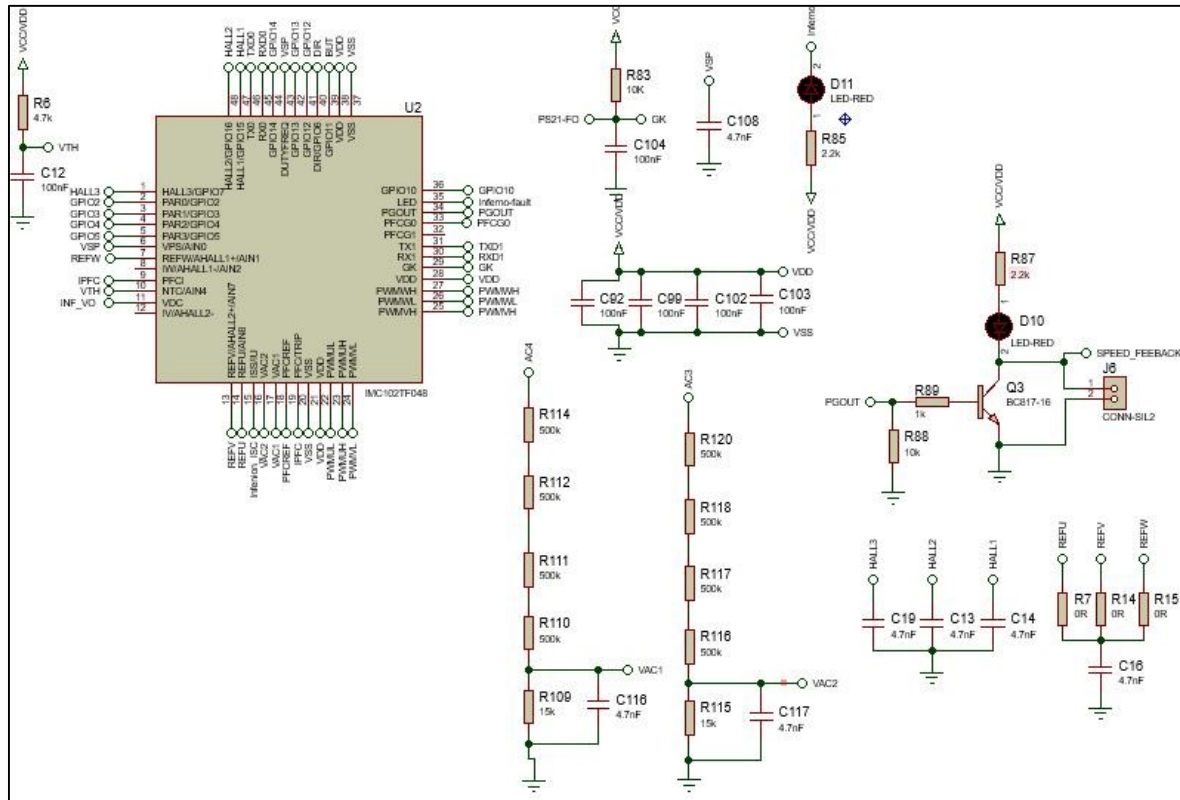
$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_e & -\sin\theta_e \\ \sin\theta_e & \cos\theta_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{ds} \\ f_{qs} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

## 4. PAN-TİLT BİRİMLERİ İÇİN PMSM SÜRÜCÜ TASARIMI ve UYGULAMASI

### 4.1. Motor Sürücü Devre Kartı Tasarımı ve Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

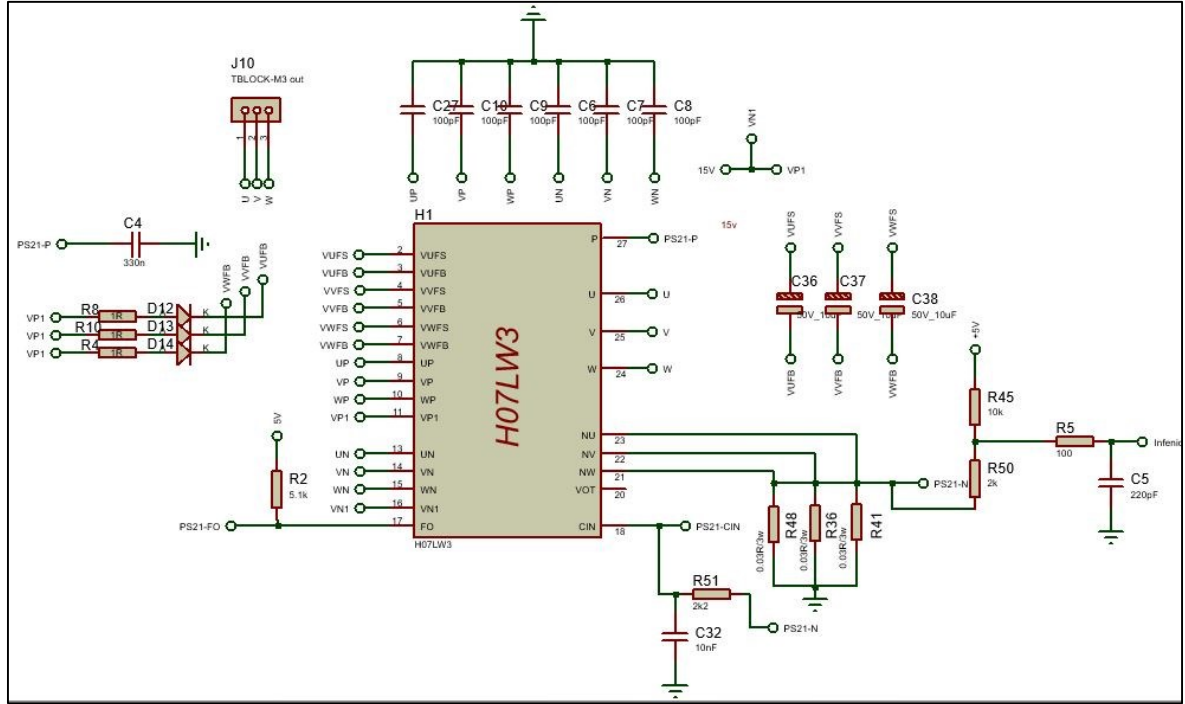
Bu çalışmada ilk bölümde bahsedilen avantajlarından dolayı yüksek güç ve tork gereksinimi duyan uygulamalarda daha uygun olduğu için PMSM kullanılmasına karar verilmiştir. PMSM kontrolü için literatürdeki çalışmalar üçüncü bölümde bahsedilerek FOC kontrol metodu ile kontrol edilmesinin yüksek güç, hız ve tork gereksinimi duyan Pan-Tilt sistemlerine kullanılacak PMSM'ler için tork dalgalanmasını en aza indirmek için kullanılmıştır.

Literatür incelendiğinde FOC kontrol metodu değişik şekilde uygulanmıştır [23,38]. FOC metodu tork dalgalanması, kapalı çevrim kontrol gibi avantajlar içermesi yanında uygulanma açısından diğer kontrol yöntemlerine göre matematiksel olarak daha karmaşık yapıya sahiptir. PAN-TİLT birimlerinde iki adet motor bulunduğu ve diğer çevre birimleri kontrolü göze önüne alındığında bu matematiksel işlemler kontrolcü için daha zorlayıcı hale gelmektedir. Çip geliştirici firmaları bu durum için birbirlerinden farklı çip düzeyinde FOC kontrol entegreleri geliştirmişlerdir. Bu çalışmada kontrolcü üzerindeki işlem yükünü azaltmak adına Infineon firmasının IMC102TF048 kodlu ürünü FOC kontrolü için geliştirilen ürünü kullanılmıştır. Bu kontrolcü boyut, programlanabilir olması, bir denetçi veya giriş çıkış pinleri ile kontrol edebilir olması gibi özellikleri büyük avantajlar sağlamaktadır [24]. Bunun yanında içerisinde gerçek zamanlı olarak motor durumu da takip edilebilmekle beraber motor parametreleri de kolaylıkla ayarlanabilmektedir. Bu mikrodenetleyiciden aldığı parametrelere göre gerekli hesaplamaları yaparak üç faz evirici devre anahtarlama elemanlarının kapı (gate) sürücü elamanları için kontrol sinyallerini oluşturmaktadır. Bunun yanında yüksek voltaj, düşük voltaj yüksek akım, yüksek sıcaklık gibi korumalara sahip olması sebebiyle de oluşabilecek bir hata da sistemi kendiliğinden koruyabilmektedir. Pan-Tilt birimlerinde bu kontrol entegresinden iki adet kullanılarak iki ekseninde bulunan motorların sadece hız ve yön kontrolü yapılmaktadır. Konum kontrolü istenilen uygulamalar için sistem içerisinde kullanılan manyetik enkoder yardımı ile kontrolcü tarafından gerçekleştirilmektedir. Şekil 4.1 de IMC102TF048 devre tasarımı verilmiştir.



Şekil 4. 1 IMC102TF048 şematik devre tasarımı

Şekil 4.1’de verilen kontrolcü sadece gerekli olan anahtarlama sinyallerini oluşturmaktadır. Bu sinyalleri motor fazlarına uygun olarak yükseltilmesi için üç fazlı bir h köprü eviriciye ve evirici içerisinde bulunan anahtarlama elamanları için gerekli sinyalleri oluşturabilecek kapı sürücü devre yapılarına ihtiyaç vardır. 3 fazlı bir h köprü evirici devresinde anahtarlama elemanı olarak MOSFET veya IGBT kullanılabilir. Bu anahtarlama elemanlarını birbirlerinden ayıran en büyük özellikleri çalışma voltaj seviyesi ve anahtarlama frekansıdır. Bu uygulamada hem çalışma voltajı yüksek olduğundan dolayı IGBT anahtarlama elemanı içeren kendi içerisinde kendi kapı sürücü entegresi bulunan bütünleşmiş güç modülü (IPM) kullanılmıştır. IPM’lerin ayırık yapıları güç modülü devrelerine göre avantajları bulunmaktadır. IPM’lerin anahtarlama elemanlarının kapı sürücü devreleri içinde bulunması sebebiyle daha küçük ve kompakt yapıdadırlar. Bu çalışmada MITSUBISHI firmasının H07 LW3 kodlu IPM modülü kullanılmıştır. Bu IPM modülü kendi içerisinde gerekli kapı sürücü entegrelerini bulundurmaktadır. Çalışma voltaj değeri nominal olarak 450V ve akım seviyesi maksimum 15A dir. Şekil 4.2’de IPM in devre tasarımı verilmiştir.



Şekil 4. 2 H07LW3 IPM in devre tasarımı

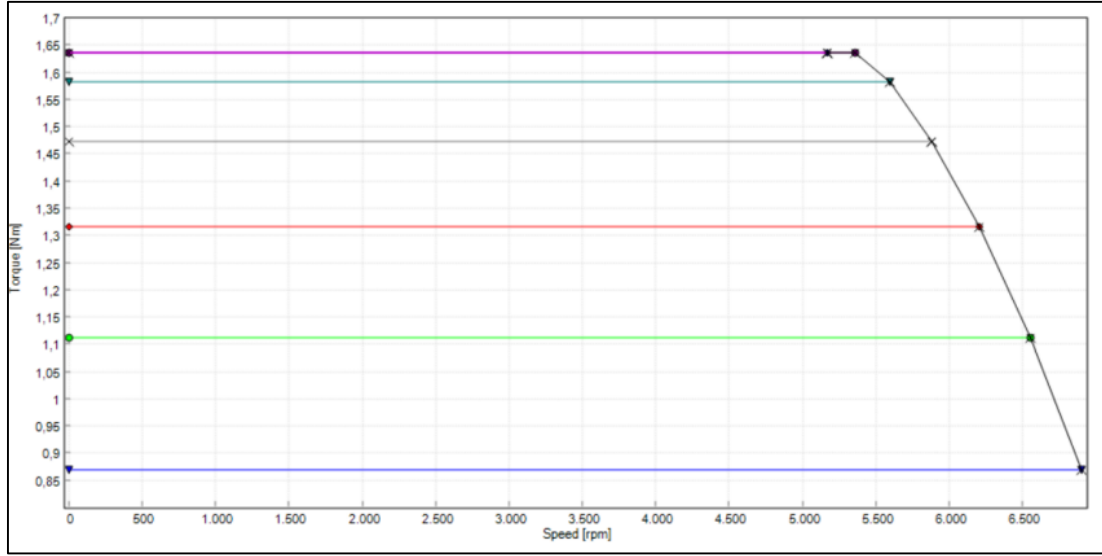
#### 4.1.1. Motor özellikleri

PMSM' lerin özellikleri ve ürün katalog bilgileri sistem için önem arz etmektedir. Bu bilgiler bir sonraki başlık altında anlatılacak olan motor sürücünün motoru düzgün bir şekilde FOC metodunu uygulayabilmesi için gereklidir. Bu çalışmada Pan-Tilt sistemlerinde kullanacak olan motor özellikleri Çizelge 4. 1' de verilmiştir.

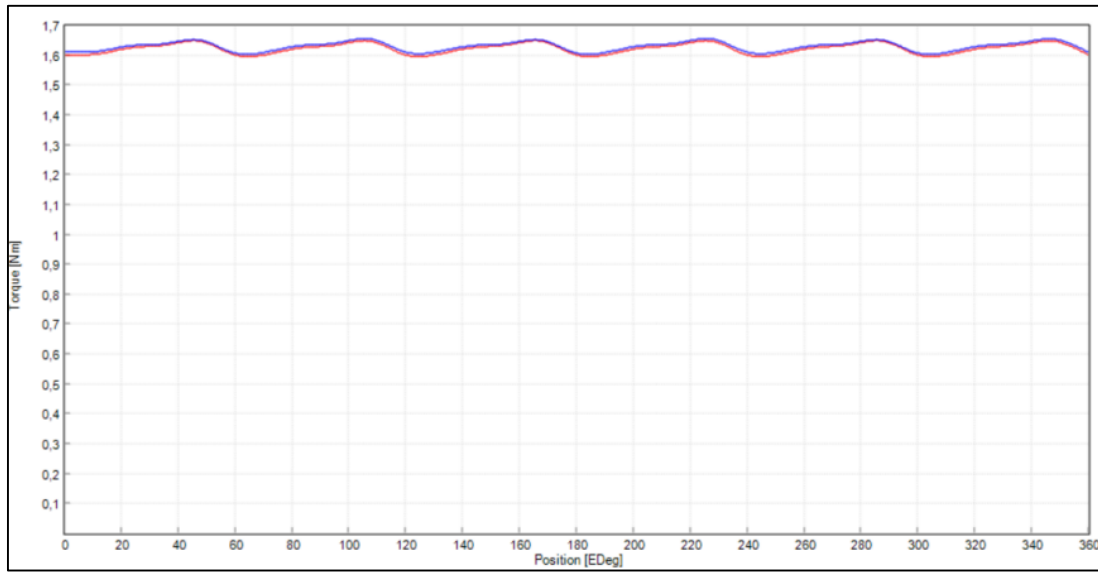
Çizelge 4. 1 PMSM Katalog Değerleri

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| Ortalama Tork           | 1,6281 Nm       |
| Tork Dalgalanması       | 2,82%           |
| Motor Mili Torku        | 1,595 Nm        |
| Sistem Verimliliği      | 92,83%          |
| Zıt EMK Sabiti          | 0,520308 Vs/Rad |
| D Eksen İndüktansı      | 6,34 mH         |
| Q Eksen İndüktansı      | 8,843 mH        |
| DC Ortalama Akım Değeri | 2,902 A         |
| Hat Akımı               | 2,567 A         |

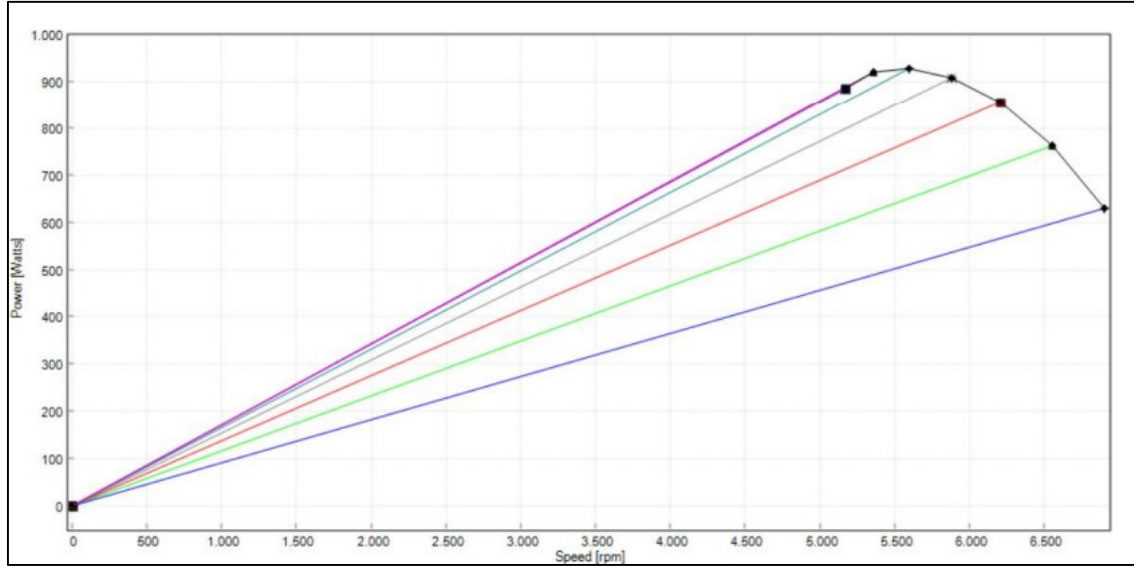
Ek olarak Şekil 4.3'te tork-hız grafiği verilmiştir. Bu grafik incelendiğinde PMSM'lerin anma hızlarına kadar sürekli aynı torku verebildiği görülmektedir. Bu da geniş çalışma hız aralığının sunmaktadır. Ek olarak Şekil 4.4 de elektriksel hıza göre motor milindeki tork dalgalanmasını gösterilmektedir ve son olarak Şekil 4.6 da PMSM'nin güç-hız grafiği paylaşılmıştır. Bu grafikte hızlanmayla beraber motorun daha fazla güç ihtiyacını olduğu gözlenmekle beraber anma hızı geçildikten sonra motor verimliliği gittikçe düştüğü görülmektedir. Bu sebepten dolayı sistem içerisinde maksimum hız koruması sınırı getirilmiştir.



Şekil 4. 3 Motor hız tork grafiği



Şekil 4. 4 Elektriksel hıza göre motor güç tork dalgalanma grafiği



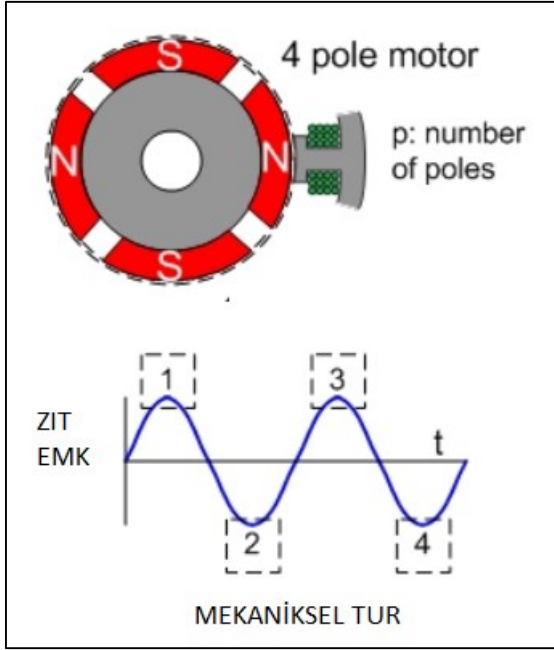
Şekil 4. 5 Motor güç hız grafiği

## 4.2. Sistem Parametrelerinin Belirlenmesi

4.1. başlık altında bahsedilen kontrolcü yardımı ile kontrol sağlanabilmesi için kullanıcı tarafından motorun kutup sayısı, D ve Q eksen indüktans değerleri, motor anma akımı gibi motor özellikleri ve aynı şekilde kullanılan anahtarlama elemanı olan IPM modülünün özellikleri gibi parametrelerin tanımlanması ve hesaplanması gerekmektedir. Ek olarak sistem yüksek voltaj düşük voltaj yüksek sıcaklık gibi koruma parametreleri de ayarlanmıştır.

### 4.2.1. Sistem parametrelerinin belirlenmesi

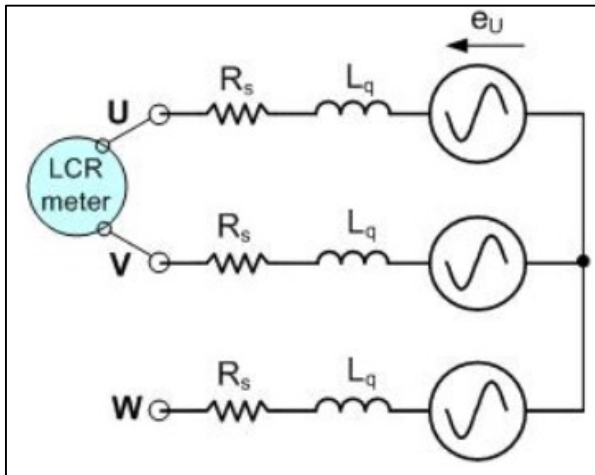
Sistem parametrelerinin belirmesinde ilk olarak motor kutup sayısının belirlemesiyle başlanmıştır. Motor kutup sayısı motor üretici firmadan tedarik edilebilmekle beraber belirli olmayan bir motor için ölçerek öğrenmek mümkündür. Şekil 4.6 da ki grafikte bir motorun kutup sayısının nasıl belirleneceği gösterilmiştir. Durgun bir motorun rotor kısmını döndürerek eş. 4.1 kullanarak hesaplanabilmektedir. Aynı şekilde rotor kısmı döndürülen bir mekaniksel turda motorun sargılarında oluşan zıt emk sinyalinin tepe noktaları sayılarak da hesaplanabilmektedir.



Şekil 4. 6 Motor stator kutup sayısı hesaplanması [39]

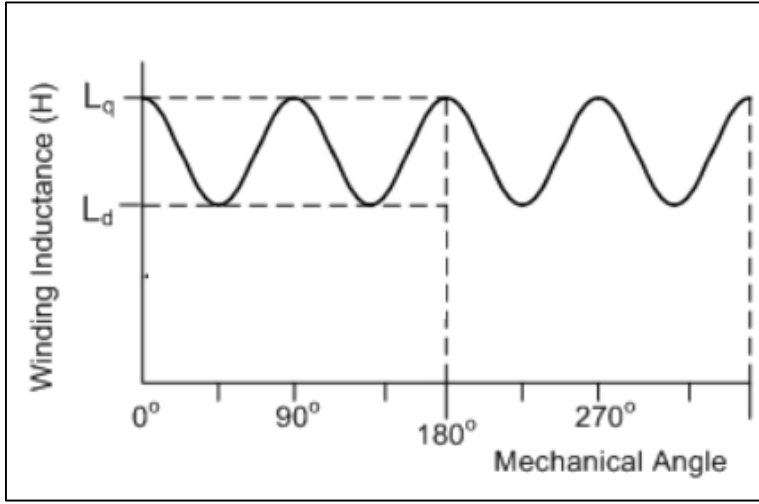
$$\omega_e = \frac{P}{2} \omega_m \quad (4.1)$$

Bir diğer motor parametre olarak motor direncinin hesaplanmasıdır. Bu oldukça basit bir şekilde elde edilebilmektedir. Bir LCR metreyi direnç modunda hareketsiz halde motor sargılarından herhangi ikisine dokundurarak elde edilebilmektedir. Eğer motor sargı direnci düşük ise daha hassas LCR metre ile ölçüm yapılabilmektedir.



Şekil 4. 7 Motor stator sargı direnci hesaplanması [39]

Önemli diğer motor parametrelerinden biri olan  $L_q$  ve  $L_d$  bobin değerlerinin ölçülmesidir. Bu değerler ürün kataloğunda bulunabilmesiyle beraber çoğu üretici bu bilgileri kullanıcı ile paylaşmamaktadır.  $L_q$  indüktans değeri motor tipine göre değişiklik göstermektedir. Eğer motorun döner alanı motor kasasının dışında ise  $L_q$  değeri  $L_d$  indüktans değerine eşit olmaktadır. Eğer Motorun statoru motorun içerisinde ise bu değerler birbirinden farklılık göstermektedir. Motorun statoru bir mekaniksel tur şeklinde hareket ettirildiğinde motor faz sargılarında oluşan indüktans dalgalanmasındaki en düşük değer  $L_d$  değerini en yüksek indüktans değeri  $L_q$  değerini vermektedir. Şekil 4.8 da bir motorun indüktans değerindeki değişim gösterilmiştir. Bu çalışmada çizelge 4.1 de motor  $L_d$  ve  $L_q$  indüktans değerleri verilmiştir.



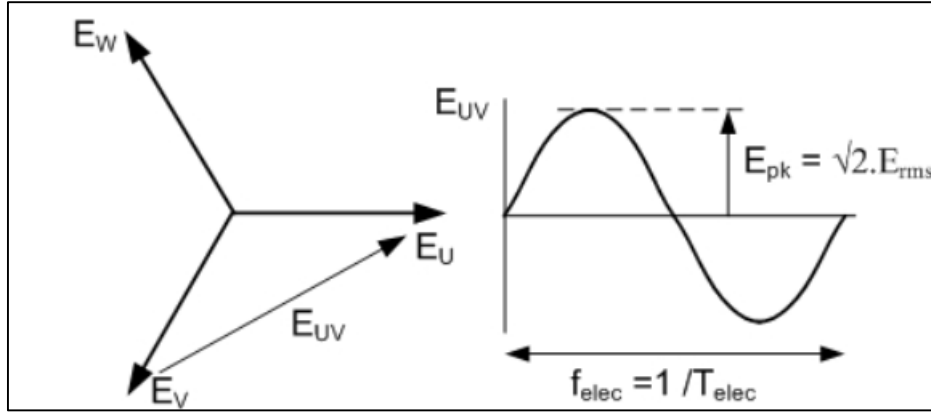
Şekil 4. 8 Motor sargıları değişim gösterimi [39]

Motor için gerekli olan bir parametre zık emk sabiti olan  $K_e$  parametresinin ayarlanmasıdır.  $K_e$  Parametresi ayarlanırken motor mili 1000rpm olacak şekilde döndürülerek motor sinyallerinin osiloskop yardımı ile ölçülerek elde edilen sinisodial sinyalin tepeden tepeye oluşan voltaj değerinin hattan toprağa olan voltaj değerine çevrilerek elde edilen voltaj değerinin 1000'e bölümden çıkan sonuçla elde edilebilmektedir. Ek olarak aşağıda verilen formüller yardımı ile de elde edilebilmektedir.

$$PRM = \frac{120}{P} \frac{1}{T_{elek}} \quad (4.2)$$

$$E_U = \frac{\frac{E_{PK}}{\sqrt{2}}}{\sqrt{3}} = \frac{E_{PK}}{\sqrt{6}} \quad (4.3)$$

$$K_e = \frac{E_U}{RPM} 1000 \quad (4.4)$$



Şekil 4. 9 Ke için bileşenlerin gösterimi [39]

Bu veriler sırasıyla,

RPM, dakikadaki dönüş miktarı,

$E_U$ , zıt emf un voltaj değeri,

$T_{elec}$ , Elektrisel turun periyodu,

$E_{PK}$ , Zıt emk voltaj değerinin tepe noktasıdır.

### 4.3. Güç Faktörü Düzelte Devresi

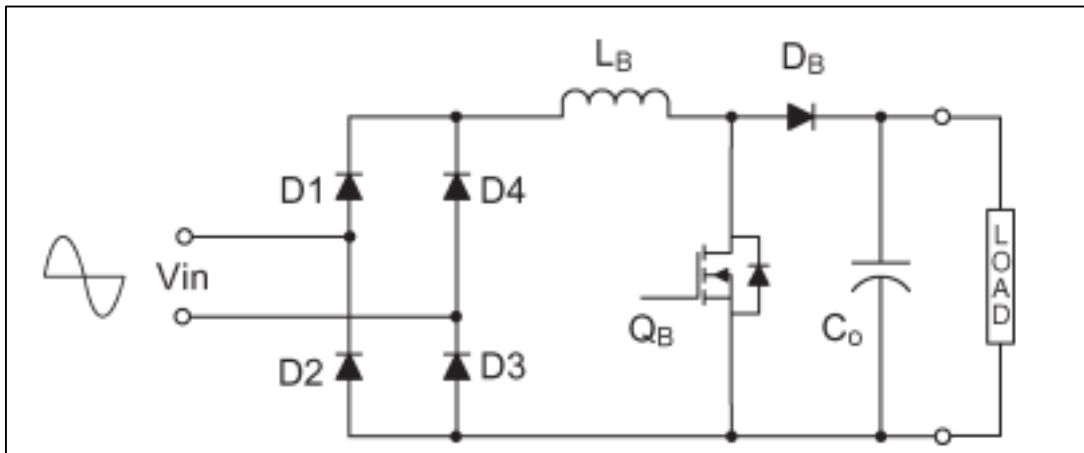
Pan-Tilt sistemleri genel olarak bataryalardan beslenmektedir. Çalışma voltajları genellikle 9 – 72 Volt aralığındadır. Fakat yüksek güç ve hız gerektiren uygulamalarda bu çalışma gerilimi ve batarya ömürleri sistemlerin maksimum isterlerini sınırlamaktadır. Bu uygulamada yüksek güç gereksinimi istenilen Pan-Tilt sistemlerini şebeke voltajı ile çalışabilmektedir. Hem şebeke hattına gürültü ve harmonikler oluşturmamak için hem de verimliliği artırmak adına sistem içerisinde güç faktörü düzeltici (PFC) devre kullanılmıştır.

Güç faktörü bir sistemin güç girişinden çektiği aktif gücün görünür güce olan oranı ile hesaplanmaktadır ve bu oranın bire yakın olması beklenmektedir. Yani çekilen reaktif gücün mümkün olduğunca düşük olması beklenmektedir. PAN-TİLT birimlerinde iki adet motor kullanmasından dolayı çekilen reaktif güç bir hayli fazla olmaktadır.

Literatürde bu çekilen gücü düzenlemek adına güç faktörü devreleri geliştirildiği görülmektedir. Literatür incelendiğinde birbirinden farklı metotlar uygulanmıştır. Bunlar aktif PFC ve pasif PFC olmak üzere iki genel başlık altında sınıflandırılmıştır [41]. Aktif kontrol PFC metotları sürekli kontrol ile güç faktörü düzenlemeye çalışırken pasif PFC herhangi bir kontrol sağlanmamaktadır. Bu çalışmada aktif PFC modellerinden yükseltici çevirici (boost converter) modeli tercih edilmiştir.

#### 4.3.1. Yükseltici çevirici metodu

Yükseltici evirici devreleri iki modda çalışabilmektedir. Bunlar sırasıyla sürekli iletim modu (CCM) ve sürelik olmayan iletim modudur (DCM) [42]. Bu modların birbirleri arasında farklılıklar ve avantajlar bulunmaktadır. Sürekli olmayan iletim modunun en büyük dezavantajı anlık yüksek akım çekmeleridir. PAN-TİLT sistemlerinde döner alanda hat iletiminde kullanılan elektrik aktarım organı olan dönme bileziği (slip ring) açısından çekilen yüksek anlık akımlar problem oluşturabilmekte ve sistemin performansını etkilemektedir. Bu çalışmada sürekli iletim modu tercih edilmiştir. Şekil 4.10'da bir yükseltici çevirici devresinin temel gösterimi bulunmaktadır.



Şekil 4. 10 Yükseltici çevirici devre gösterim şeması [42]

Yükseltici çevirici devrelerde bulunan bobin ve kapasitör seçimleri ve hesaplaması büyük önem taşımaktadır. Kullanılacak malzemelerin hesaplamaları aşağıda bulunan formüllerle kolaylıkla hesaplanabilmektedir [42].

İndüktör değeri için kullanılan olan formül;

$$L = \frac{\eta V_{acLL}^2}{0.36 f_{sw} P_{out,max}} \left( 1 - \frac{\sqrt{2} V_{acLL}}{V_{OUT}} \right) \quad (4.5)$$

Sırasıyla,

$P_{out,max}$  , Maksimum çıkış gücü

$\eta$ , verimlilik

$f_{sw}$ , Anahtarlama frekansı

$V_{acLL}$ , Minimum girişim alternatif akım giriş voltajı

İndüktör rms akım ve en yüksek rms akım değeri için kullanılan formül;

$$I_{rms} = \frac{P_{out}}{\eta V_{ac}} \quad (4.6)$$

$$I_{rms,peak} = \frac{P_{out,max}}{\eta V_{acLL}} \quad (4.7)$$

Sırasıyla,

$I_{rms}$ , bobin rms akım değeri,

$I_{rms,peak}$ , bobin rms tepe akım değeri

$V_{ac}$  , alternatif akım giriş gerilim değeri

Kapasitör değeri için kullanılan formül;

$$C_s > \frac{P_{out}}{\delta V_{pp,max} \omega V_{out}} \quad (4.8)$$

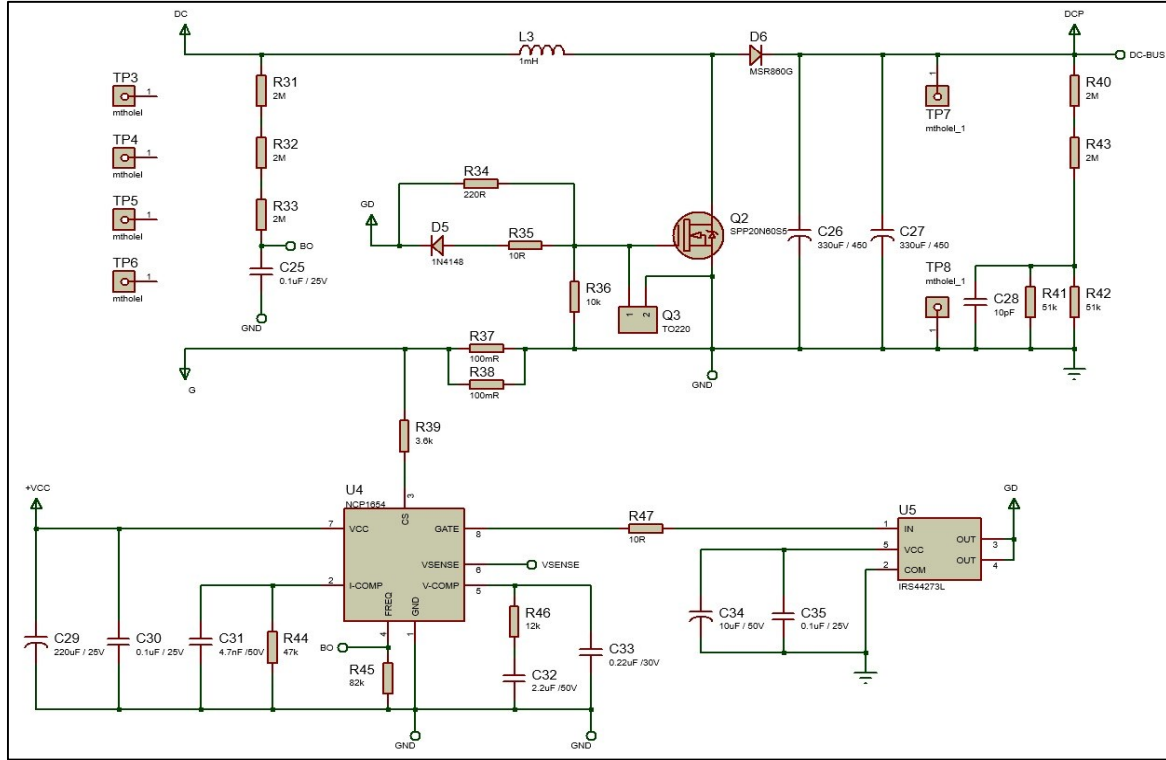
Sırasıyla,

$\delta V_{pp,max}$  , izin verilen maksimum tepe den tepeye voltaj

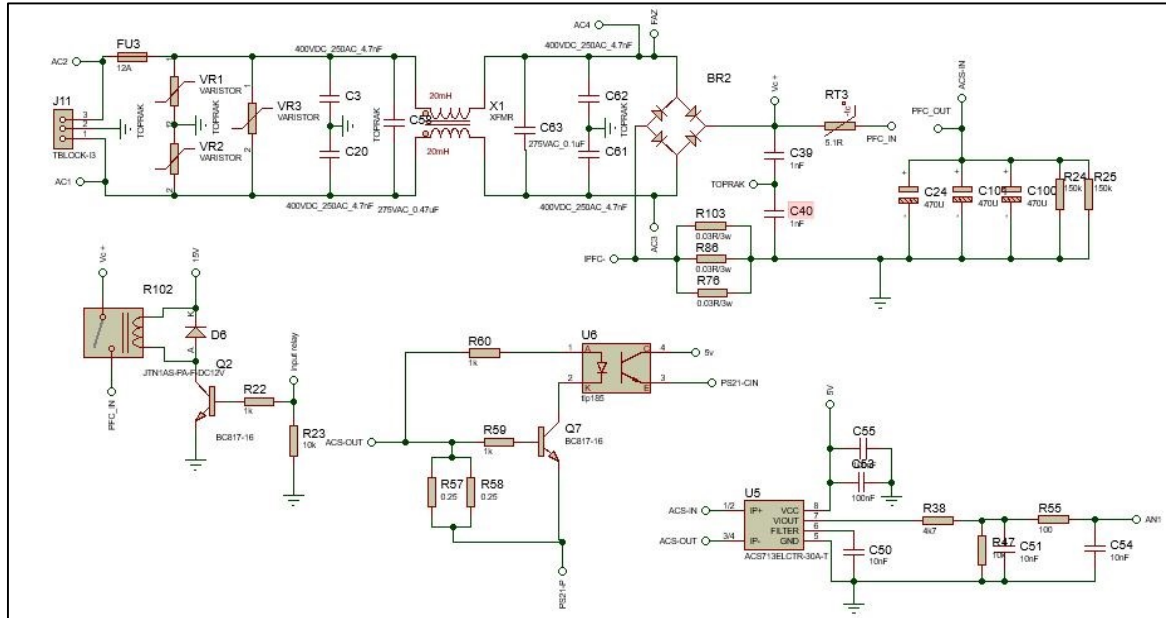
$\omega$ , alternatif akım açısal frekansını

$V_{out}$  , çıkış gerilim değeri dir.

Kapasitör değeri seçilerken kapasitörün yapısında seri iç direnç değeri de önem arz etmektedir. Eğer yüksek seri dirençli kapasitör kullanılırsa kapasitörün ısınmasına ve sistemin düşük verimle çalışmasına sebep olacaktır. Kapasitör için önemli diğer husustan bir tanesi de voltaj seviyesi çalışma voltajının en az iki katı olarak seçilmesidir. Maliyet, uygulanabilirlik ve tasarım açısından kolaylıklar sunduğu için bu uygulamada sürekli iletim modunda çalışan yükseltici çevirici kullanarak güç faktörü doğrulaması metodu kullanılmıştır. Güç faktör düzenleyici kontrolcüsü olarak ONSEMİ firmasının NCP1654 kodlu ürünü seçilmiştir. Yukarıdaki verilen formüller kullanılarak tasarlanan devre elemanlıları değerleri indüktans değeri 1mH ve 660 $\mu$ F olarak bulunmuştur. Yükseltici evirici için SPP20N60S5 kodlu MOSFET kullanılmıştır. Tasarlan yükseltici devre tasarımı şekil 4.11’de verilmiştir. Bu tasarımla beraber giriş voltajında sinüzoidal işaret frekansın kaç olursa olsun çıkış gerilimi 380Volt sabit olarak kalmaktadır. Bu şekilde şebekeden çekilen gücün güç katsayı düzenlenmiştir. Aynı zamanda giriş filtre devre tasarımı Şekil 4.12’de paylaşılmıştır.



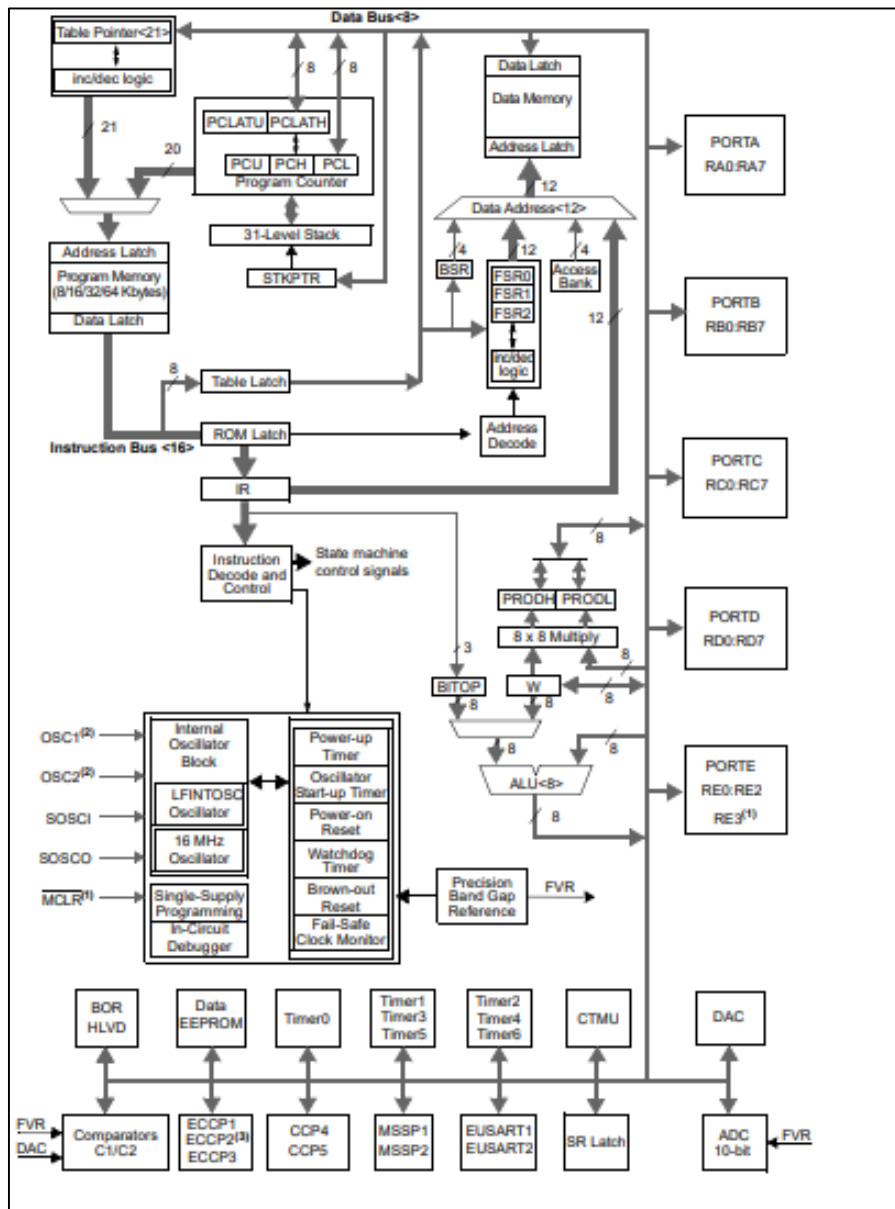
Şekil 4. 11 Güç faktörü düzenleme devre şematığı



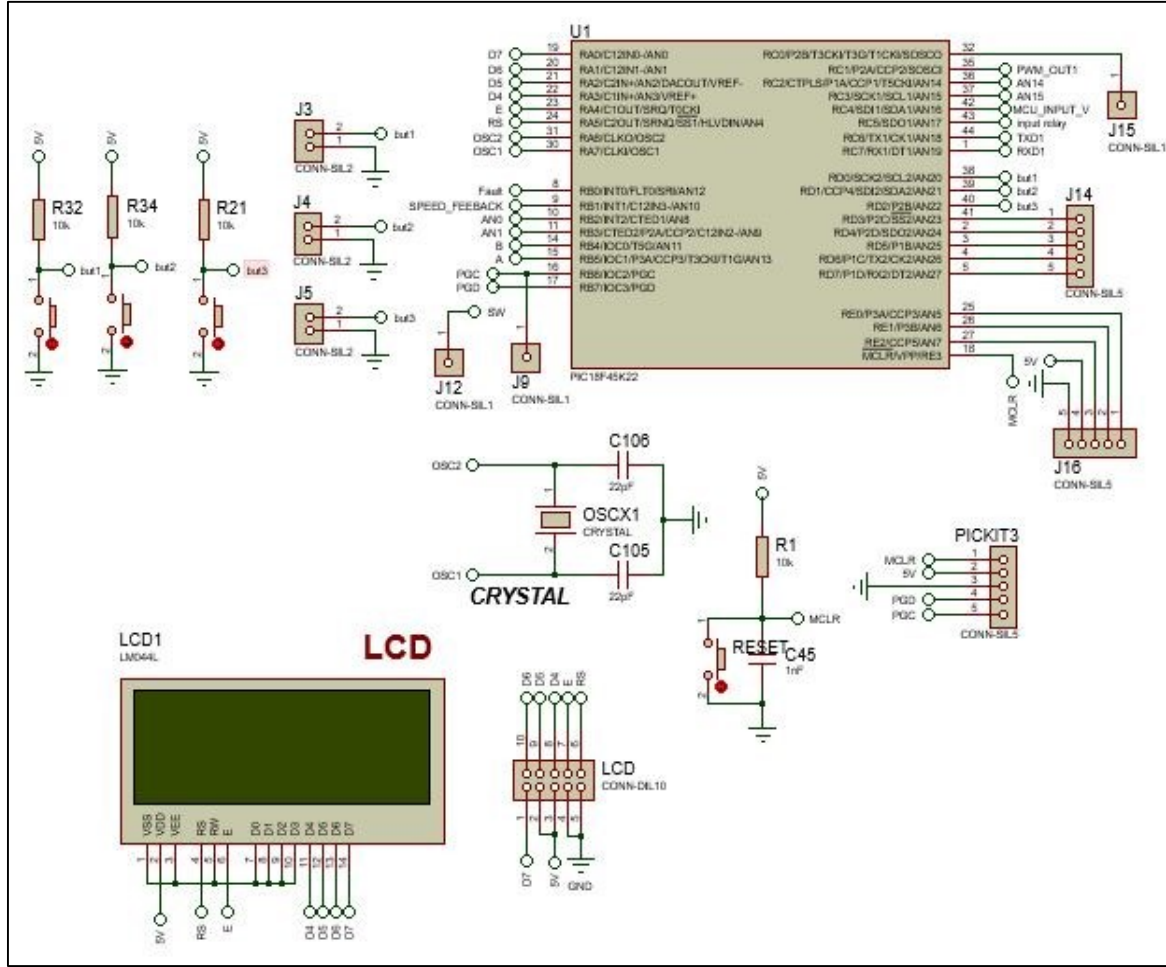
Şekil 4. 12 Güç girişi filtre tasarımı

#### 4.4. Kontrolcü Devresi Tasarımı

Bu kısımda Pan-Tilt birimi içerisinde bulunan motor sürücülerin kontrolü, konum kontrolü gerekli sinyallerin işlenmesi ve üst sistemle haberleşme yapılan kısımdır. Bu kısımda MICROCHIP firmasının PIC18F45K22 kodlu işlemcisi kullanılmıştır. İşlemcinin iç yapısının blok diyagramı Şekil 4.13'te verilmiştir. İçerisinde Pan-Tilt birimini kontrol gerekli tüm özellikleri fazlasıyla içermektedir. Şekil 4.13 de ise kontrolcü devre şematiği gösterimi verilmiştir. Bu şekilde Pant-Tilt biriminin dış dünya ile haberleşmesi için gerekli haberleşme alt yapısının şematik görseli de paylaşılmıştır.



Şekil 4. 13 PIC18F45K22 işlemci içyapısı blok şeması [43]



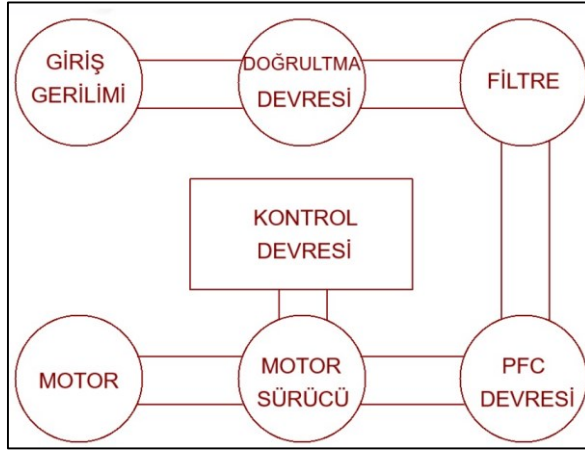
Şekil 4. 14 Kontrolcü tasarımı devre şeması



## 5. YAPILAN DENEY ÇALIŞMASI

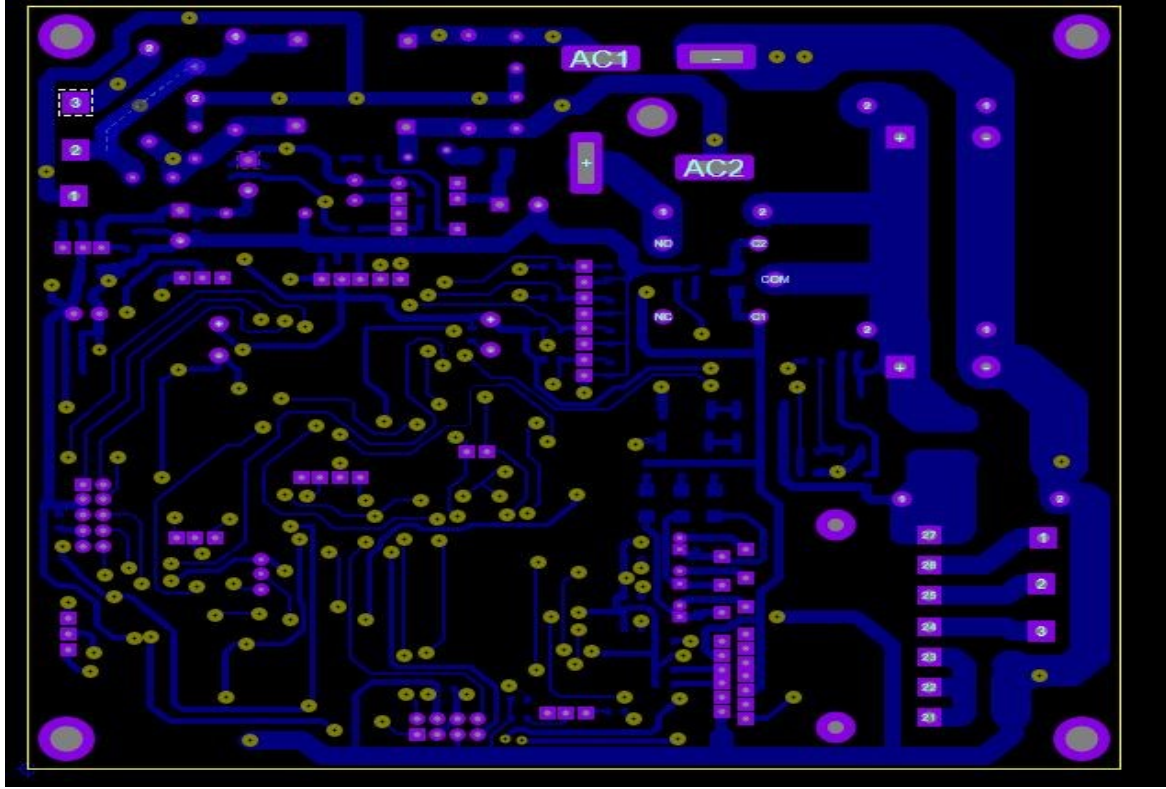
### 5.1. Sistem Blok Şeması ve Motor Sürücü Devreleri Baskı Devre Kartı Tasarımı

Laboratuvar ortamında tasarlanan sistem bileşenlerinin Pan-Tilt biriminin her bir eksenini için blok şema gösterimi Şekil 5.1’de paylaşılmıştır. Deneysel olarak yapılan bu çalışmada sistem şebeke geriliminden beslenmektedir. Bu yüzden sistem içerisinde doğrultma devresi ve güç faktörü devresi gösterilmiştir. Batarya ile çalışan sistemlerde bu bölümler olmayacaktır. Deney test düzeneği Şekil 5.2’de verilmiştir.

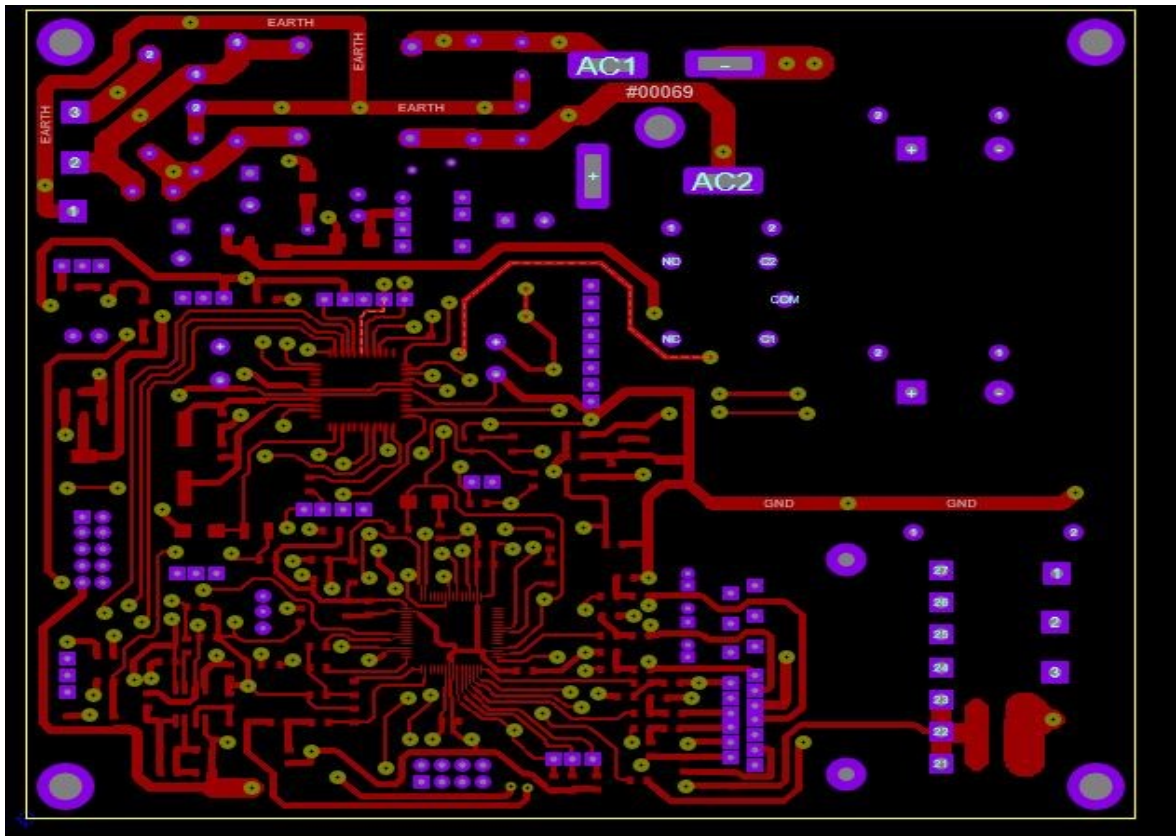


Şekil 5. 1 Deney düzeneği blok şema gösterimi

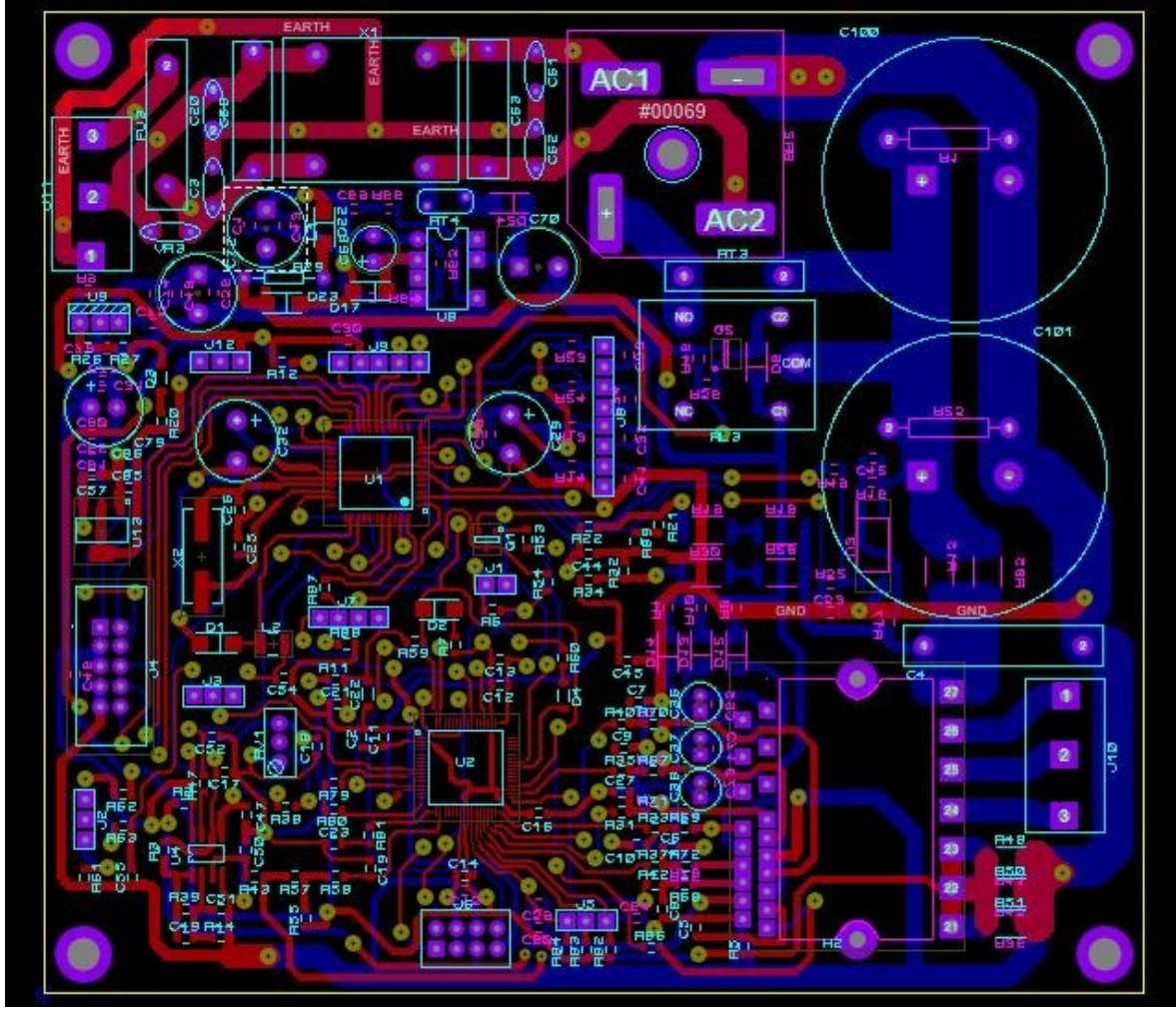
Motor sürücü kartında yüksek frekansı ve yüksek güçlü sinyaller bulunmaktadır. Bu yüzden devre kartı tasarımı büyük bir önem taşımaktadır. Sistem içerisinde yüksek güçlü hatların birbirinden etkilenmemesi adına güç hatları olabildiğince geniş ve birbirinden uzak biçimde çizilmiştir. Aynı şekilde anahtarlama sinyallerinin yolları da sinyal yapısına uygun olarak tasarlanmıştır. Devre kartı tasarımları Şekil 5.2, Şekil 5,3 ve Şekil 5,4’te paylaşılmıştır. Devre kartı tasarımı Proteus programı kullanılarak çift katmanlı olacak halde çizilmiştir.



Şekil 5. 2 Alt katman devre tasarım gösterimi



Şekil 5. 3 Üst katman devre tasarımı gösterimi



Şekil 5. 4 Üst ve alt katman devre tasarımı gösterimi



Şekil 5. 5 Deney düzeneği Pan-Tilt görseli

## 5.2. Motor Sürücü Kartı Devre Sinyalleri

### 5.2.1. Motor sürücü anahtarlama sinyalleri

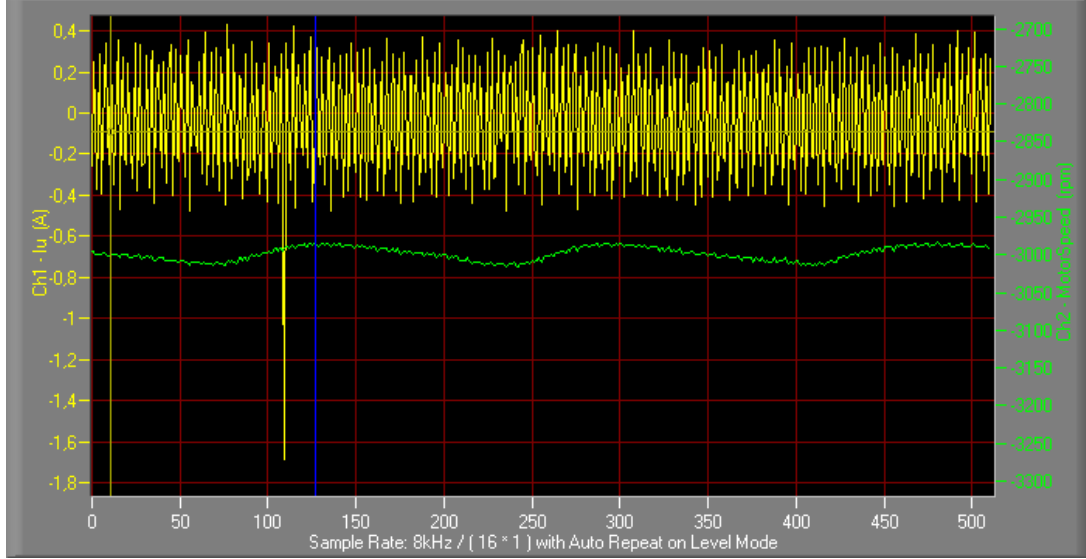
Motor sürücü olarak kullanılan IMC102TF048 entegresine ait 3 fazlı köprü eviricisinin birinci koluna ait H1 ve L1 sinyallerin osiloskop çıktı grafiği Şekil 5.6'te verilmiştir. Anahtarlama sinyali 8 kHz frekansına sahip olmakla beraber motor bir yüksek kenar anahtarı ile alçak kenar anahtarına tamamlayıcı şekilde sinyal oluşturduğu ve pwm sinyalinin sinüzoidal şeklinde verdiği görülmüştür. Bu şekilde anahtarlama ile motor sargılarına sinüzoidal şeklinde bir voltaj uygulanmıştır. Mavi renkli olan sinyal üst kol anahtarına sarı renkli olan sinyal alt kenar anahtarına aittir.



Şekil 5. 6 H1 ve L1 anahtarlama elemanlarına ait anahtarlama sinyalleri

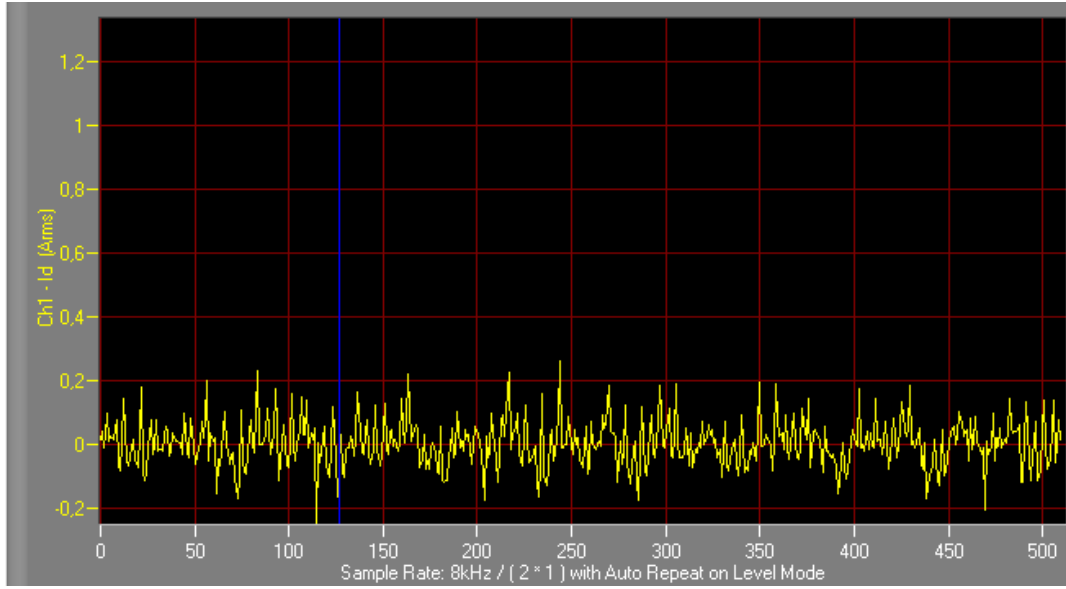
Motor hızı PANTILT birimi için maksimum hızı 3000 rpm olarak belirlenmiştir. Motor 3000 rpm ve yüksüz şekilde akım hız grafiği Şekil 5.6'te verilmiştir. Yüksüz çalışmada motor 400mA akım çektiği görülmüştür. Akım değerlerinde bazı noktalarda sıçramalar görülmüştür. Bu sıçramalar motor sürücü parametrelerinin tam yük altında olacak şekilde ayarlandığından dolayı kontrolcü boşta çalışmada bu sıçramaları dikkate almamaktadır. Grafikte sarı renklin sinyal akım değerini grafiğinin sol tarafında gösterilirken, hız değeri

yeşil renkli olarak çizilerek sağ tarafta belirtilmiştir. Grafiğin yatay eksenini zamanı göstermektedir.

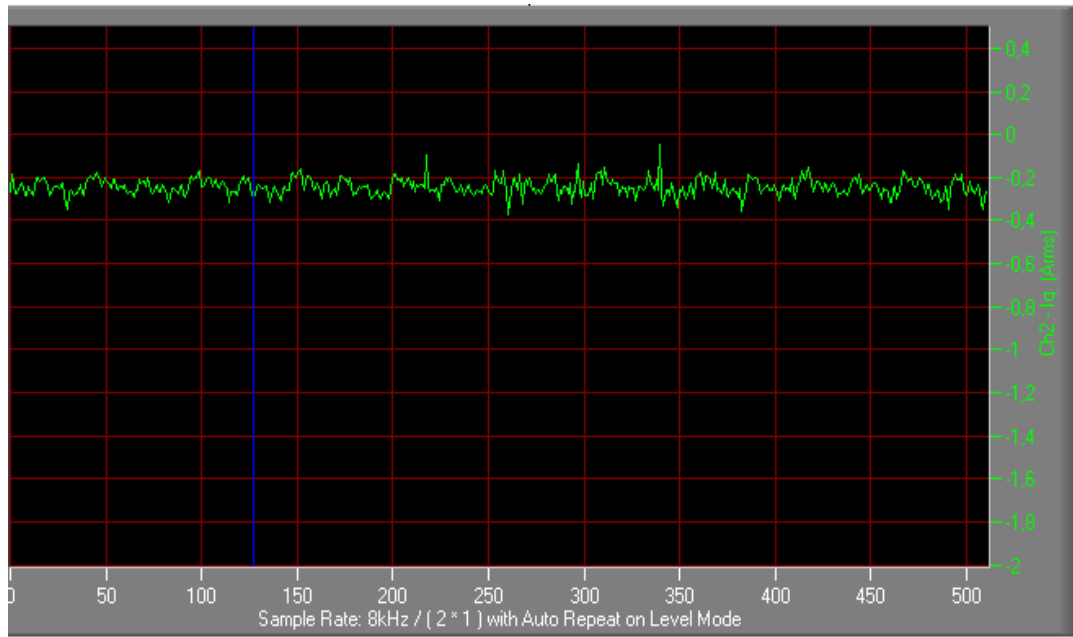


Şekil 5. 7 Yüksüz motor akım hız grafiği

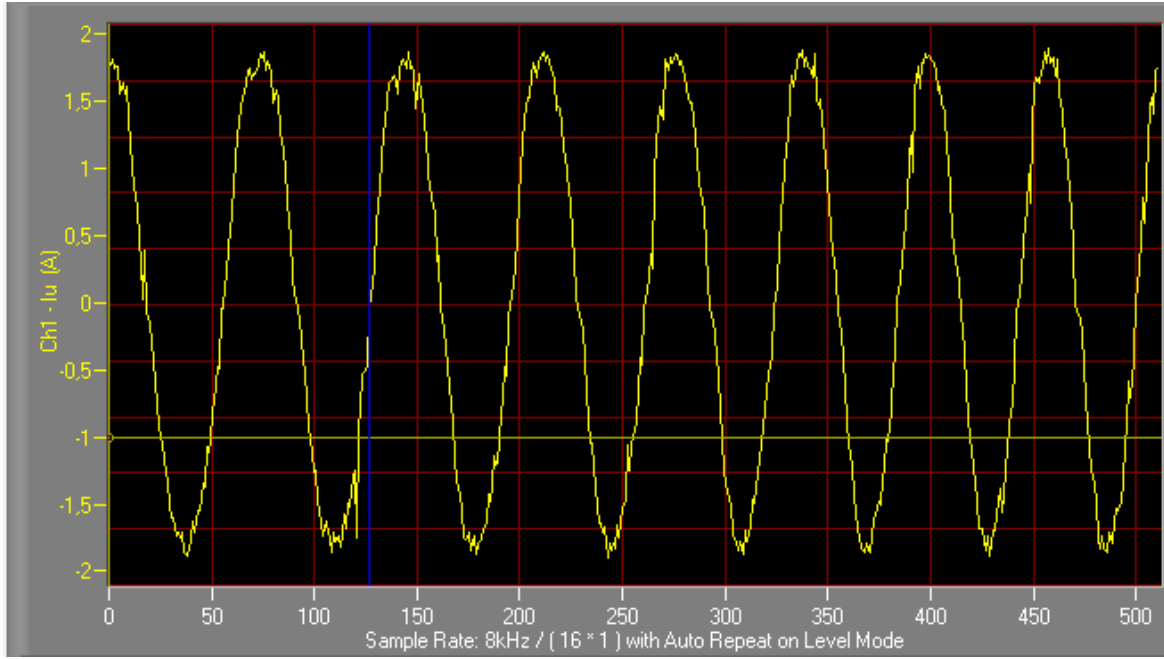
FOC kontrollü için gerekli olan  $I_d$  ve  $I_q$  akım grafikleri sırayla Şekil 5.8 ve 5.9’da verilmiştir. Kontrolcü referans sinyalleri başarılı bir şekilde oluşturarak kontrol işlemi gerçekleştirmiştir. Bu kontrol sinyalleri ile oluşan motor tam yükteki akım sinyalleri Şekil 5.9’da verilmiştir. Akım şekil sinüzoidal şekilde herhangi bir dalgalanma sinüzoidal yapısında bir bozulma görülmemiştir. Ek olarak motorun akı yoğunluğu yüzdesel olarak Şekil 5.10’da verilmiştir. Bu grafikte 3000 rpm de motor akı yoğunluğu %64’e kadar ulaştığı görülmektedir.



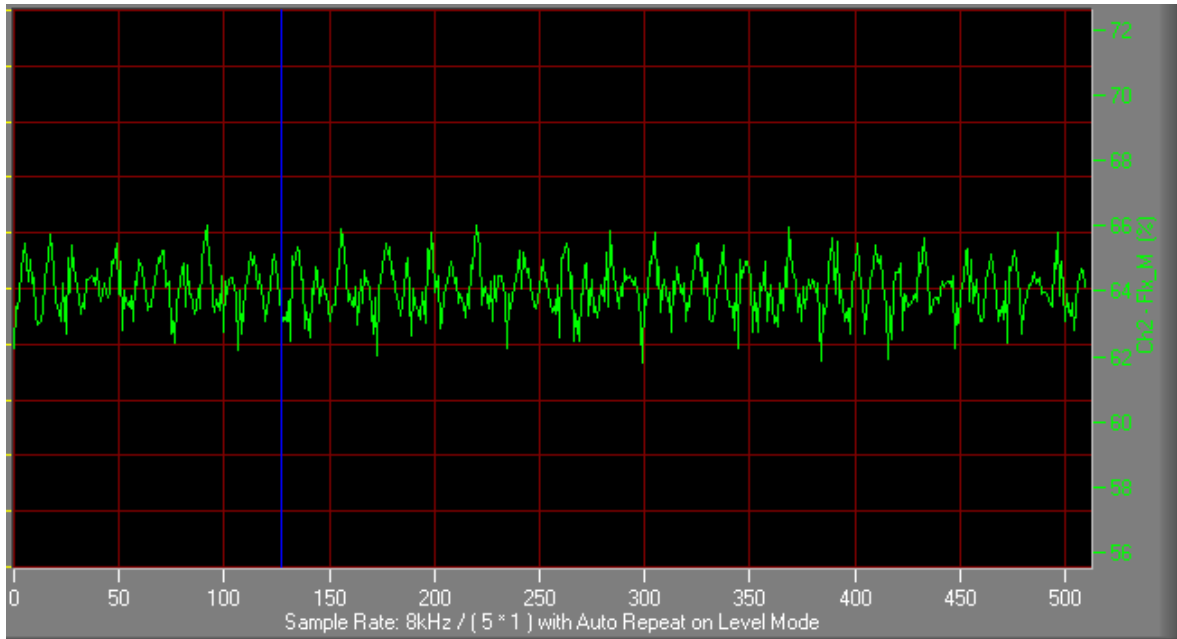
Şekil 5. 8 Motor Id referans akım zaman grafiği



Şekil 5. 9 Motor Iq referans akım zaman grafiği

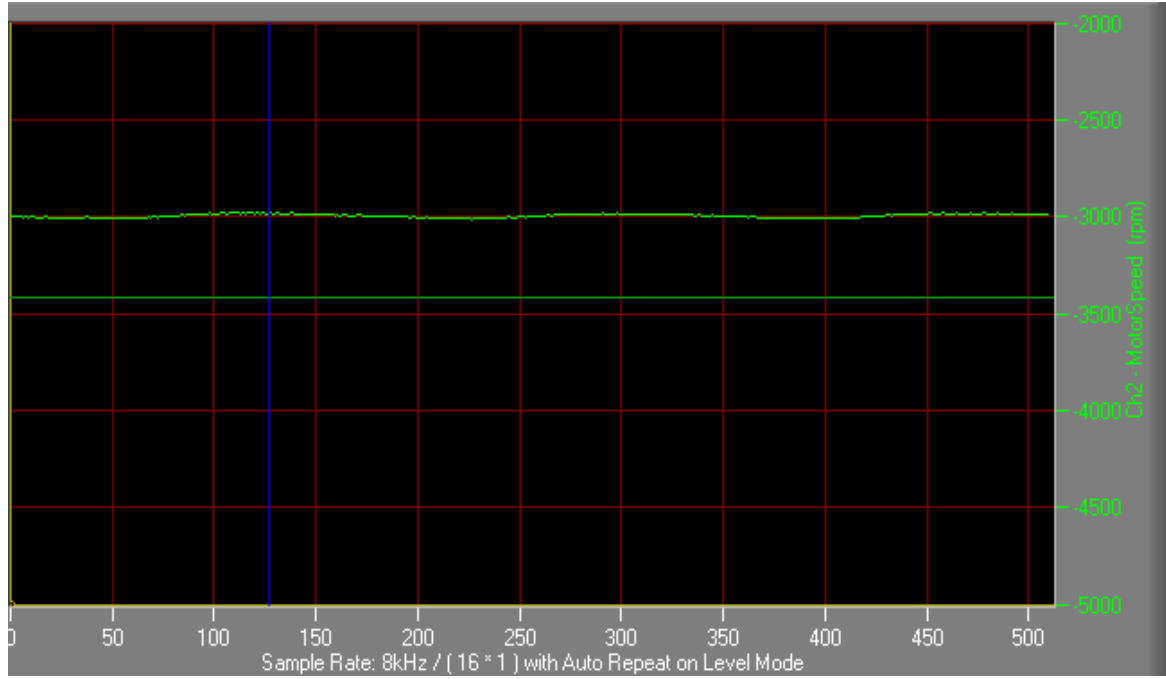


Şekil 5. 10 Motor tam yük faz akım zaman grafiği

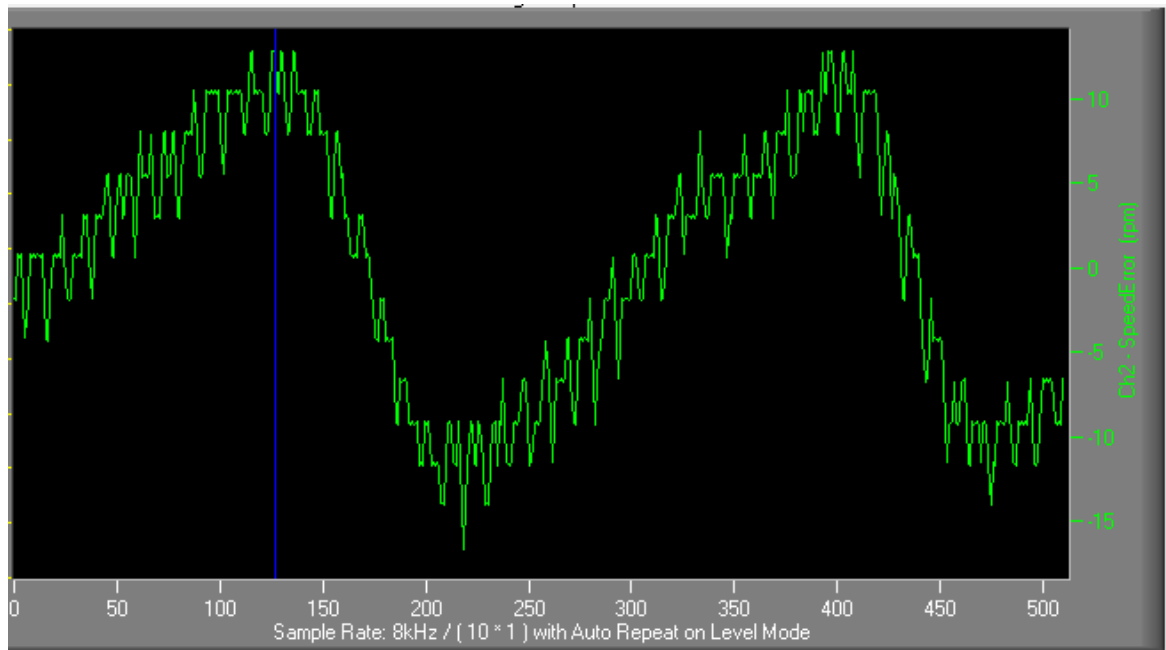


Şekil 5. 11 Motor akı yüzde grafiği

Motor sürüş esnasında motorun 3000 devir/ dakika (rpm) hızında çalışırken hız grafiği Şekil 5.11’de verilmiştir. Motor hızında herhangi bir büyük dalgalanma sıçrama görülmemiştir. Hızdaki dalgalanma grafiği Şekil 5.12’de verilmiştir. Motor hızı 3000 rpm de dönerken maksimum 20 rpm meydana geldiği görülmüştür. Bu dalgalanma sistemin çalışmasında herhangi bir engel teşkil etmemektedir.



Şekil 5. 12 Motorun 3000 rpm'deki hız zaman grafiği



Şekil 5. 13 Motorun 3000 rpm'deki hız hata grafiği

## 6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada yüksek güç gereksinimi olan Pan-Tilt birimlerinde kullanılmak üzere kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) sürücü ve Pant-Tilt birimi kontrolcü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Motor sürüş metotlarından FOC metodunu gereksinimlerini hesaplayabilen ve anahtarlama sinyallerini oluşturan IMC102TF048 entegresi kullanılarak gerekli motor parametreleri, kontrol parametreleri ve anahtarlama frekans, akım limiti gibi ayarlamaları yapılarak sistem içerisine entegre edilmesi hedeflenmiştir. Ek olarak kontrol için gerekli hesaplamaları yapmak ve dış dünya ile haberleşme yapabilmek için STM32F103C8T7 kodlu mikrodenetleyici kullanılmıştır. Şebeke voltajı ile çalışacak olan PAN-TİLT birimleri için PFC devre hesaplaması ve tasarımı gerçekleştirilmiştir. Motor için gerekli üç fazlı h köprü güç anahtarlama elemanlarını ve bu anahtarlama elemanlarını için gerekli güç sinyallerini kendi içerisinde bulunduran IPM kullanılarak PMSM'in iki eksen yönlendirme birimi olan PAN-TİLT sistemleri için adaptasyonu hedeflenmiştir.

Çalışma içeriğinde, savunma sanayisinde, endüstride kullanılan Pant-Tilt sistemlerinden örnekler verilmiştir. PMSM'nin var olan Pant-Tilt birimlerinde kullanılan diğer motor çeşitleriyle aralarındaki farklar, PMSM'nin özellikleri avantajları ve dezavantajlarından bahsedilmiştir. Ek olarak PMSM için literatürdeki yaygın olarak kullanılan kontrol metotlarının açıklamaları, FOC'un matematiksel olarak hesaplanması ve özellikleri diğer kontrol metotlarına göre avantajları ve dezavantajlarına da değinilmiştir. Ek olarak şebeke gerilimi ile çalışabilecek Pan-Tilt birimleri için verimliliği artırmak ve şebekeden çekilen reaktif güç miktarını azaltmak amacıyla PFC metodundan bahsedilmiştir ve bir yükseltici evirici PFC'de kullanılan kritik komponentler için gerekli hesaplamalar ve PFC devre tasarımı gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deney çalışmasında kullanılan şekil 4.2'de paylaşılan PMSM'nin verileri ve grafikleri incelediğinde yüksek hızlarda daha diğer şekil 2.3'te kullanılan step motora göre 1000 rpm hızda yaklaşık 6 kat daha fazla torka sahip olduğu görülmekle beraber daha yüksek hızlara çıktığı zaman dahi tork değerinde herhangi bir azalma görülmemiştir. Bu sayede yüksek hızlarda yüksek güç gereksinimi duyan Pan-Tilt sistemlere gerekli isterleri karşılayabilecek alternatif bir çözüm olduğu görülmüştür. Deney çalışmasında elde edilen

verilere göre PMSM'nin 3000 rpm hızda yaklaşık %0.67 oranında bir hız hata payı ile kararlı bir şekilde çalıştığı görülmüştür ve yük altında tepeden tepeye akım değeri olarak 2 A bir akım ihtiyacı bulunmaktadır. Bu değer üreticiden alınan motor katalog değerleri ile birbirlerini karşılamaktadır.

Endüstride bulunan PMSM'ler boyutları ve çalışma voltajı gibi seçenekleri Pan-Tilt birimlerinde kullanılan diğer motor türlerine göre daha az seçeneğe sahip olması nedeniyle uygulanabilecek Pan-Tilt sistem sayısını limitlemektedir. İleride PMSM teknolojisinin gelişmesi ve değişik PMSM motor seçenekleri birçok Pan-Tilt sistemine entegre edilebilir böylece bu tip motorların kullanım alanları genişletilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Haydar, A., Ahmad, M., and Harun, M. H. (2018) Design and development of a mechanical pan-tilt system, *International Journal of Engineering & Technology*, (7,2.29), 115-118.
2. Jang, H., Park, J. Y., and Lee, B. H. (2019). Development of a hydraulic pan-tilt system for a mobile robot. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, (6,1), 141-149.
3. Yang, Y., Lee, S., Lee, J., and Kim, J. (2018) ,Design and implementation of a low-cost pan-tilt unit for robotics applications, *Journal of Intelligent and Robotic systems*, (90, 1), 43-53
4. İnternet : <https://triyosys.com/tr/products/>
5. Sahin, E., Ozbek, T., ve Yavuz, M. (2016). A Pan-Tilt Camera System For Non-Destructive Testing Of Pipeline Welds. *Journal of Nondestructive Evaluation*, (35,2), 24.
6. Xiao, P., Wang, Luan, Y., Li and L. Wang, T. (2013) Design of a Pan-Tilt System for Substation Inspection Robot. *Applied Mechanics and Materials*(385-386), 712-716
7. Kooistra, L., Hoekman, D. H. (2015). Mapping Soil Moisture And Surface Topography With A Synthetic Aperture Radar On A Pan-Tilt Platform. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 43, 57-68.
8. İnternet : Motor Types and Their Control Summary of key motor types and control <https://www.nxp.com/docs/en/brochure/BBMTRCNTRLART.pdf>
9. Bhattacharya , N. N. and Bhandari, R. M.,( June 2014) Performance Analysis of Brushed DC Motor in Low-Power Applications, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, ( 29-2), 407-415
10. Kirtley Jr., J. L. (2013),Brushed DC Motor Basics, *Massachusetts Institute of Technology*
11. Ebrahimi, H. and Emadi, A.(2008) , A Comparative Study of DC Motor Technologies for Electric Vehicle Applications, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, (3-1), 48
12. İnternet: <https://www.electronicshub.org/dc-motor/>
13. Nguyen, Q. T., Nguyen, T. T., Bui, T. H. (2019), Design And İmplementation Of A Pan-Tilt Mechanism For A Mobile Robot Using Two DC Motors ,*IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)* 1-6.
14. Athani, V .V., Stepper Motors : Fundamentals, Applications And Design, 2005,85-1328

15. Ren, Z., Li, Y., Li, H., & Wang, K. (2019), Design of a High Precision Pan-Tilt System Based on Stepper Motor for Object Tracking, *5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)* 424-429.
16. İnternet: <https://en.nanotec.com/products/1333-sc411811804-eno05k>
17. Mohanraj, D., Aruldavid, R., Verma, R., Sathiyasekar, K., Sathiyasekar, K. and Mihet-Popa, L., (May 13, 2022) A Review of BLDC Motor: State of Art, Advanced Control Techniques, and Applications, *IEEE Access* 10, 54833- 54869
18. Nair, S. S., Nair, M. V., and Chandrasekharan , (2020), R. M., Performance Analysis of BLDC Motor for a Camera Pan-Tilt System Using MATLAB/Simulink, *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, (10,2) ,2065-2072
19. Wang, J. and Li, Y. (2017), Review of Permanent Magnet Synchronous Motors for Electric Vehicles, *Journal of Power Electronics*, ( 17-6), 1546-1561
20. Buja, G., Malesani, L. and P. Tomasin, (2008) , Design of Permanent-Magnet Motors for Electric Vehicles *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (55,6), 2626-2633
21. Bolognani, S., Peretti L., and Tenti P., (2003) Design Criteria for High-Performance Permanent-Magnet Motors, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (50-5), 962-971
22. Synchronous Motor For National Military Applications, Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 17-18
23. Muljadi, E. and Green, J. (2002), Cogging Torque Reduction İn A Permanent Magnet Wind Turbine Generator. *Proc. of the 21st Am. Soc. of Mech. Engineers Wind Energy Symp.*, 1-8
24. Flankl, M., Tüysüz, A. and Kolar, J. W. (2017). Cogging Torque Shape Optimization of an Integrated Generator for Electromechanical Energy Harvesting, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, (64-12), 9806-9814
25. Erken, F, (Ocak, 2014), Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlarda Moment Dalgalanmalarının Azaltılması, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, 7
26. Zhu, J., Chen, J. and Chau K. T., (Nov. 2013) Comparison of PMDC, BLDC and PMSM motors for electric vehicles, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, ( 60, 11), 4983-4992
27. Kusumakar ,K. R. and Silvaa, D. D. (2014), Comparative Study Of İnduction Motor, Synchronous Motor And PMSM İn Variable Speed Application ,*IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, 1-6.
28. Musa, G. G. (2014), Performance Analysis of PMSM Drive for Electric Vehicle Application, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, (3-10), 12762-12766,

29. Sakunthala, S., Kiranmayi, R. and Mandadi, P.N., (2017), A Study on Industrial Motor Drives Comparison and Applications of PMSM and BLDC Motor Drives *International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS 2017)5-Chennai*, 537- 547
30. Hisar, Ç. (Ocak, 2019), *Sabit Miknatıslı Senkron Motorlar İçin Hiz Yörüngesi Denetleyicisi Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 9-27
31. Elrefaie, A. T. B. (2004), A review of techniques for the control of permanent magnet synchronous motors, *IEEE Industry Applications Conference, Seattle, WA, USA*, 1573-1578.
32. Aboudonia, M., Ahmed, M. F. and Massoud, A. M. (2013), Performance Comparison Between Scalar And Vector Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Denver, CO, USA*, . 1878-1884.
33. Lakshmi, M. V. and Reddy V. C. V., (2016) A Review On Direct Torque Control Of Permanent Magnet Synchronous Motor, *IEEE International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT)*, 123-128,
34. Aravindan, R. , Dash ,S. S. and Mishra, S. (2019) Comparative Analysis Of Direct Torque Control Strategies For Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, *IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE)*, pp. 1-6,
35. Bao, G., Qi, W., and He, T. (2020), Direct Torque Control of PMSM with Modified Finite Set Model Predictive Control, *Energies* 2020, 13, 234
36. Nicola, M. and Nicola, C.I., (2019), Sensorless Control for PMSM Using Model Reference Adaptive Control and back-EMF sliding Mode Observer, *2019 International Conference on Electromechanical and Energy System, SIELMEN*
37. Samat, A., Saedin, P., Tajudin, A.I and Adni, (2012), N. The Implementation of Field Oriented Control for PMSM Drive Based on TMS320F2808 DSP Controller, *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering Penang, Malaysia*
38. Internet: IMC100 datasheet [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMC100-DataSheet-v01\\_06-EN.pdf?fileId=5546d46265487f7b016584a0147e7660](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IMC100-DataSheet-v01_06-EN.pdf?fileId=5546d46265487f7b016584a0147e7660)
39. Internet: Step-by-step instructions for setting up and running a motor control system with iMOTION™ 2.0 <https://www.infineon.com/cms/en/product/power/motor-control-ics/imotion-integrated/>
40. Castro, J. A., González, A. S. and Calvo-Rolle, J. L. (Dec. 2012) Power Factor Correction in AC Electrical Drives"IEEE Transactions on Industrial Electronics, (59-12) 4714-4724.

41. Musavi, F., Ebelrle, W. and Dundord, W.G., (2011), A High-Performance Single-Phase Bridgeless Interleaved PFC Converter for Plug-in Hybrid Electric Vehicle Battery Chargers, *IEEE Transactions on Industry Applications* 47(4):1833 – 1843
42. Internet: AN9322, Four Key Steps to Design a Continuous Conduction Mode PFC Stage Using the NCP1654, <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8322-D.PDF>
43. Internet: PIC18F45K22 Datasheet  
<https://www.microchip.com/en-us/product/PIC18F45K22#document-table>



*Gazili olmak ayrıcalıktır*