

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK FAKÜLTESİ

SMSM (Sabit Mıknatıslı Senkron Motor)'in Kontrolü

KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ TASARIMI II

Nail MEMİŞ
Bekir Can KARATOPAK

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet Onat

Haziran 2023

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK FAKÜLTESİ

SMSM (Sabit Mıknatıslı Senkron Motor)'in Kontrolü

KONTROL VE OTOMASYON MÜHENDİSLİĞİ TASARIMI II

Nail Memiş
(040180542)
Bekir Can Karatopak
(040200793)

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ahmet Onat

Haziran 2023

ÖNSÖZ

Lisans eğitimimiz ve projemiz boyunca bizden desteğini esirgemeyen danışmanımız Doç. Dr. Ahmet Onat 'a müteşekkirimiz. Bu yoğun süreçte laboratuvar çalışmalarımızda bize destek olan Ar. Gör. Bora Ayvaz'a teşekkür ederiz.

Hayatımız boyunca bize destek olan ailelerimize sonsuz sevgimizi ve şükranlarımızı sunarız.

Haziran 2023

Nail Memiş - Bekir Can Karatopak
Mühendis - Mühendis

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	vi
KISALTMALAR	viii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÖZET	xvii
SUMMARY	xvii
1. GİRİŞ	2
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Literatür Araştırması	2
1.2.1 SMSM Yapısı ve Özellikleri	2
1.2.2 SMSM Sensörlü Sürüş Algoritmaları	3
1.2.2.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol Algoritması (FOC).....	4
1.2.2.2 6 Adımlı Kontrol Algoritması	5
1.3 Hipotez	6
2. SMMS MATEMATİK MODELİ	7
2.1 Clarke Dönüşümü	9
2.2 Park Dönüşümü	9
2.3 Mekanik Model Denklemleri	11
3. SÜRÜCÜ BİLEŞENLERİ VE ALGORİTMASI	12
3.1 Üç Fazlı Gerilim Kaynağı Evirici.....	12
3.2 Hall Etkisi Sensörü	13
3.3 SMSM Altı-Adımlı Komütasyonu	15
4. HIZ KONTROLÇÜ TASARIMI	19
4.1 Sistem Modelinin Çıkarılması	19
4.2 Hız Çevriminin Ayrık Zamana Geçirilmesi	20
4.3 Kontrolcü Parametrelerinin Hesaplanması	21
5. GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI	23
5.1 Motor Sürücü Kartı ve Özellikleri.....	23
5.2 Motor Kontrol Algoritması Gömülü Yazılım Geliştirmesi	25
5.3 SMSM Mekanik Hız Hesabı	27
5.4 Hız Kontrolcünün Sisteme Uygulanması	29
5.5 Arayüz Tasarımı	30
5.6 Gömülü Sistem Kontrolcü Sonuçları.....	32
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	35
KAYNAKLAR	36
EKLER	39
ÖZGEÇMİŞ	41
ETİK KURALLAR UYUM BEYANI	43

KISALTMALAR

SMSM	: Sabit Mıknatıslı Senkron Motor
DC	: Doğru Akım
AC	: Alternatif Akım
TEMK	: Ters Elektromotor Kuvveti
ZOH	: Sıfırcı Mertebeden Tutucu
DTC	: Doğrudan Moment Kontrolü
FOC	: Alan Yönlendirmeli Kontrol
PWM	: Darbe Genişlik Modülasasyonu
UART	: Evrensel Asenkron Alıcı Verici

SEMBOLLER

R	: Stator Direnç Değeri
$i_{u,v,w}$: Faz Akımları
$i_{d,q}$: d ve q Eksenli Akımları
$i_{\alpha\beta}$: α ve β Eksenli Akımları
$L_{u,v,w}$: Faz İndüktans Değerleri
$L_{d,q}$: d ve q Eksenli İndüktans Değerleri
$E_{u,v,w}$: Faz Ters-EMK Gerilimleri
$v_{u,v,w}$: Faz Gerilimleri
$v_{d,q}$: d ve q Eksenli Gerilimleri
$v_{\alpha\beta}$: α ve β Eksenli Gerilimleri
J	: Eylemsizlik Momenti
B	: Viskoz Sürtünme Katsayısı
K_t	: Tork Katsayısı
w_m	: Rotor Mekanik Hızı
T_s	: Örnekleme Zamanı
w_e	: Rotor Elektriksel Hızı
$\lambda_{u,v,w}^s$: Faz Stator Akı Bağıntısı
$\lambda_{u,v,w}^{PM}$: Manyetik Akı Bağıntısı
T_s	: Elektriksel Tork Bağıntısı
T_L	: Yük Tork Bağıntısı

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : SMSM avantajları ve dezavantajları	3
Çizelge 3.1 : Hall Etkili Sensörler ve Faz gerilimleri.....	18
Çizelge 4.1 : Motor Referans Verileleri	20

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Motor iç yapısı a)Yüzey Mıknatıslı b)İç mıknatıslı	3
Şekil 1.2 : SMSM Kontrol Yöntemleri.....	4
Şekil 1.3 : Alan Yönlendirmeli Kontrol Algoritması.	5
Şekil 1.4 : 6 Adımlı Kontrol Algoritması	5
Şekil 2.1 : SPMSM Yapısı.....	7
Şekil 2.2 : Tek Faz Eşdeğer Devre(u fazı için).....	8
Şekil 2.3 : İki eksen koordinat dönüşümü.	9
Şekil 2.4 : d - q Koordinat Dönüşümü.	10
Şekil 2.5 : d - q eksen eşlenik devre.	10
Şekil 3.1 : Üç Fazlı Evirici Devresi	12
Şekil 3.2 : Üzerinden akım geçen yarıiletken levha	13
Şekil 3.3 : Yarıiletken levha da oluşan Hall gerilimi.	13
Şekil 3.4 : Hall etkisi sensörü iç yapısı.....	14
Şekil 3.5 : Sensör Histerezis Karakteristiği	14
Şekil 3.6 : Sensör dijital çıkış durumları	15
Şekil 3.7 : Hall sensör örnek devresi	15
Şekil 3.8 : 3 Fazlı Eviricide Altı-Adım Komütasyon Durumları.	16
Şekil 3.9 : Trapezoidal Kontrol Faz Gerilimleri.	17
Şekil 3.10 : Motor stator manyetik alanları	17
Şekil 3.11 : Hall sensörlerinin osiloskop görüntüsü	18
Şekil 4.1 : Hız çevrimi blok diyagramı.....	20
Şekil 4.2 : Açık çevrim Bode diyagramı	20
Şekil 4.3 : Örneklem zamanı ile örneklenmiş sistemin kıyaslaması.....	21
Şekil 4.4 : Aşım Yapmayan Sistem Cevabı($K = 0.0018$, Yerleşme Zamanı = 1.74s)	22
Şekil 4.5 : Farklı Kazanç Değerleri İçin Sistemin Step Cevabı.....	22
Şekil 5.1 : IPM Tabanlı motor sürücü kartı	23
Şekil 5.2 : MKV42 İşlemci Ailesinin Blok Diyagramı	24
Şekil 5.3 : IPM Güç modülü iç yapısı ve pinleri	24
Şekil 5.4 : Mikroişlemci ve IPM pinleri ve ara bağlantılar	25
Şekil 5.5 : Algoritma Akış Diyagramı	27
Şekil 5.6 : 0-500 RPM hız cevabı.....	28
Şekil 5.7 : 0-500 RPM hız cevabı karşılaştırılması	29
Şekil 5.8 : Bağlantı portunun seçilmesi	30
Şekil 5.9 : Bound Rate Seçilmesi	30
Şekil 5.10 : UART Durum Makinesi.....	31
Şekil 5.11 : 0-500 RPM Sistem Cevabı.....	32
Şekil 5.12 : Merdiven Referans Sistem Cevabı	33
Şekil 5.13 : Değişken Referans Sistem Cevabı	33

SMSM (SABİT MIKNATISLI SENKRON MOTOR)'UN KONTROLÜ

ÖZET

Bu çalışmada sabit mıknatıslı senkron motorun matematiksel modelinin elde edilmesi , elde edilen matematiksel modelin uygun kontrolör yapılarıyla kontrolü ve gömülü sistemde gerçekleşmesi üzerine çalışılmıştır. SMSM'in motor karakteristileri osiloskop ve multimetre kullanılarak deneysel olarak belirlenmiştir. Matematiksel model çeşitli sadeleştirmeler ile hız kontrolü sağlayacak şekilde çıkarılmıştır. Hız kontrolörü için dijital PI kontrolör kullanılmış PI kontrolör parametreleri yüzde aşım, yerleşme zamanı gibi kriterleri ile MATLAB kullanılarak karakteristik polinom yaklaşımı ile kontrolcü tasarımı yapılmıştır. Uygun örnekleme periyodu Bode yaklaşımı ile belirlenerek sıfırıncı mertebeden tutucu ile ayrık zamanda tasarıma uygulanmıştır. Ayrıca NXP firmasının MKV42 serisi bir mikroişlemci bulunan motor sürücü devresi ile hız kontrolörünün gömülü sisteme uygulanması amaçlanmıştır.

Çalışılan düzenekte başlıca elektrik motoru, sürücü devresi ve sensörler bulunmaktadır. Elektrik motoru olarak kullanılan dört kutup çiftli alternatif akımlı sabit mıknatıslı senkron motor üzerinde güç kaynağı ile çalışmalar yapılarak akım ve gerilim kontrolü sağlanmıştır, elektronik komütasyon için altı adım kontrol algoritması sensörlerden gelen konum yardımıyla uygulanmıştır. Motor sürücü kart üzerinde kullanılan güç elektroniği devresi üzerine araştırmalar yapılmış, Hall etkisi sensörler'den gelen sinyallere ihtiyaç duyulduğu için uygun elektronik devre ile sensörler motora monte edilmiştir. Motor sürücüsündeki mikroişlemcinin Timer, ADC, PWM, GPIO, UART gibi fonksiyonları aktif edilmiştir. Üretilen PWM'ler IPM tabanlı 3 fazlı gerilim kaynağı eviriciyi kontrol etmiş ve evirici tarafından motor fazları enerjilendirilmiştir. Hall sensörler GPIO kullanılarak okunmuştur. UART'tan gelen veriler Python yardımıyla anlık olarak analiz edilmiş, ADC kullanılarak da akım ve Ters-EMK değerleri hesaplanmıştır. Sonrasında sensörlü altı adım komütasyonu için motor simülasyonu yapılmış ve motor sürücü kart üzerinde kapalı çevrimde gerçekleşmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın son kısmında ise UART'tan veriler iki taraflı transfer edilerek arayüz tasarımı gerçekleştirilmiş, motorun verilen hız referansı ile başlatılmasını sağlayarak o andaki hız değerini gösterecek şekilde geliştirilmiştir. Kurulan test düzeneği ile yazılımda kolayca güncellenebilen parametrelerin değişimleri ile hız kontrolörünün davranışlarındaki farklılıkların ortaya koyulabilmesi amaçlanmıştır. Böylece sadece UART bağlantısı yardımıyla motor ve yazılım test sistemi hazırlanmıştır. Son olarak da kurulan deney düzeneğinin resimleri ile beraber elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR(PMSM)

SUMMARY

In this study, the mathematical model of a permanent magnet synchronous motor (PMSM) is derived, and the control of the obtained mathematical model with suitable controller structures and its implementation in an embedded system are investigated. The motor characteristics of the PMSM are experimentally determined using an oscilloscope and a multimeter. The mathematical model is simplified and extracted to enable speed control. A digital PI controller is used for speed control, and the controller design is performed using MATLAB with criteria such as overshoot and settling time. The appropriate sampling period is determined using the Bode approximation, and a discrete-time controller design with a zero-order hold is applied. Additionally, the aim is to apply the motor controller to an embedded system using a microcontroller from NXP's MKV42 series.

The main components in the setup include an electric motor, a driver circuit, and sensors. The four-pole pair AC PMSM is operated with a power supply, enabling current and voltage control. A 6-step control algorithm for electronic commutation is implemented with the help of position information from the sensors. Research is conducted on the power electronics circuit used in the motor driver board, and suitable electronic circuits are mounted on the motor for the Hall effect sensors' signals. The microcontroller in the motor driver activates functions such as Timer, ADC, PWM, GPIO, and UART. The generated PWM signals enter the IPM-based 3-phase voltage source inverter and energize the motor phases through the inverter. Hall sensors are read using GPIO. The received data from UART is analyzed in real-time using Python, and current and back-EMF values are calculated using ADC. Subsequently, a motor simulation is performed for sensor-based six-step commutation, and closed-loop control is implemented on the motor driver board.

In the final part of the study, two-way data transfer is achieved through UART, and an interface design is developed to initiate the motor with a given speed reference and display the current speed value. The aim is to demonstrate the differences in the behavior of the speed controller with the variations in easily updateable parameters in the software using the established test setup. Thus, a motor and software test system is prepared solely through the UART connection. Finally, the obtained results are presented along with images of the experimental setup.

1. GİRİŞ

Bu tezde altı adım kontrol algoritmasının sabit mıknatıslı senkron motora Hall etkili sensörler yardımıyla uygulanması ve uygun hız kontrolcüsü tasarlanarak kapalı çevrim sürülmesi anlatılmaktadır. SMSM sürülmesi için IGBT tabanlı IPM modülü maliyeti düşük NXP markalı işlemciden PWM üretilerek tetiklenmektedir. Uygun frekansla motor kontrol algoritması ana akış dışında çalıştırılmaktadır. Qt tabanlı yazılan arayüz yardımıyla UART haberleşmesi kullanılarak motor test düzeneği kurulmuştur.

Hall etkili sensörlerden gelen verilerle hız hesabı yapılarak tasarlanan PI kontrolcüyle motor hız kontrolü uygulanarak sonuçlar paylaşılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Fırçasız motorların çeşitli avantajları nedeniyle kullanım alanı artmaktadır. Çalışmalarada fırçasız motor olan SMSM kullanılmıştır. Elektirkli scooter gibi çeşitli ürünlerde kullanılan altı adım kontrol algoritmasının uygulanması ve uygun hız kontrolcüsünün uygulanarak gömülü sistemde gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2 Literatür Araştırması

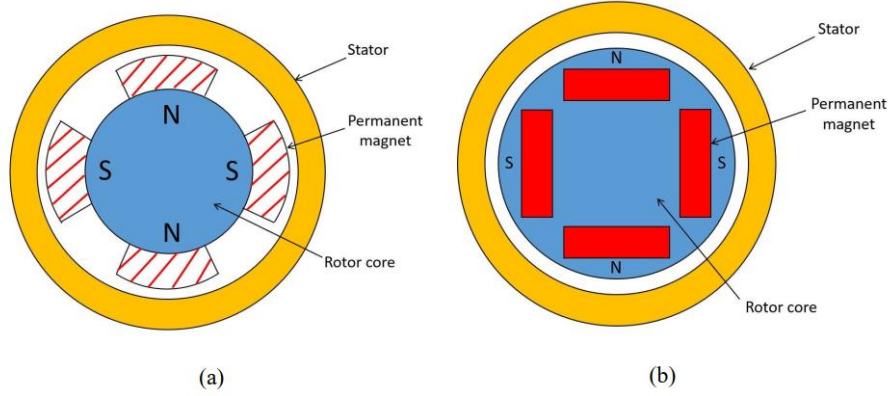
Bir AC makine olan SMSM kontrolü üzerine son yıllarda yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Kullanılan kontrol algoritması “sensörlü sürüş” olarak literatürde geçmektedir. SMSM sensörlü sürüş üzerine makale taramaları yapılmıştır.

1.2.1 SMSM Yapısı ve Özellikleri

Elektrik motorlarını alternatif akım (AC) ve doğru akım (DC) motorları olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. AC motorları da kendi içinde asenkron ve senkron biçimde iki bölüme ayrılabilir. Senkron motorları sabit mıknatıslı ve sargı alanlı olarak yapısal farklılık sebebiyle sınıflandırıp sabit mıknatıslı alternatif akımlı senkron motorları ürettiği ters-EMK sinyaline bakılarak sinüs sabit mıknatıslı senkron motor (SMSM) ve trapezoidal sinyalli fırçasız doğru akım motoru (BLDC) olarak iki tipe ayrılır[1].

SMSM’un rotorunda yer alan mıknatıs yüzey mıknatıs tipli ve iç mıknatıs tipli olarak iki farklı kullanıma sahiptir. Stator sargılarına yerleşimi Şekil 1.1’de gösterilmektedir.

Yüzey mıknatıslı motorlarda alan zayıflatması düşük stator endüktansı nedeniyle zordur. İç mıknatıslı motorda stator endüktansı rotor pozisyonuna bağlıdır. Stator manyetik alanının frekansı motor senkron çalıştığı için rotordaki mıknatısların ürettiği manyetik alan ile aynıdır. Aynı olmaması durumunda torkta dalgalanmalar olmaktadır. Stator ve rotorda manyetik alan arasındaki açı 90 derece yapılarak maksimum tork elde edilebilmektedir ama rotor pozisyonun doğru ölçülmesi önemlidir [2].



Şekil 1.1 Motor iç yapısı a)Yüzey Mıknatıslı b)İç mıknatıslı

SMSM'in avantajları ve dezavantajları Çizelge 1.1'de özetlenmektedir.

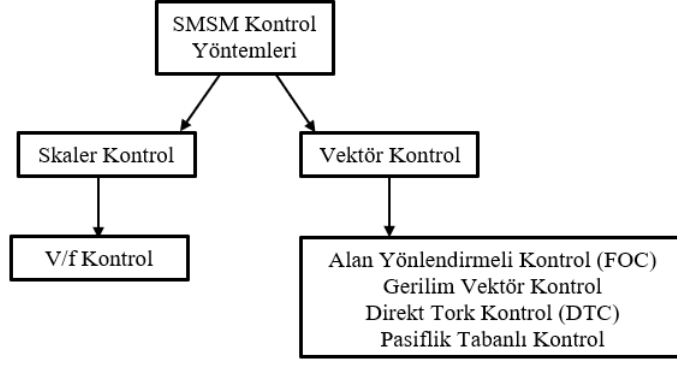
Avantajlar	Dezavantajlar
Basit yapı	Rotor pozisyonu bilinmelidir
Yüksek verim ve moment	Pozisyon sensörleri maliyeti artırır
Fırçasız yapı ve bakım kolaylığı	Güç elektroniği devreleri gereklidir
Küçük hacim	Rotor mıknatısları maliyeti artırır

Çizelge 1.1 SMSM avantajları ve dezavantajları

1.2.2 SMSM Sensörlü Sürüş Algoritmaları

Sorunsuz bir şekilde motor hareketlerini sağlamak için SMSM'in çeşitli kontrol algoritmaları ile sürüşü tercih edilmektedir. En çok kullanılan kontrol yöntemi vektör kontrol yöntemidir. Vektör kontrol kendi içerisinde alan yönlendirmeli kontrol(FOC) ve direkt tork kontrolü(DTC) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır[3]. FOC'de çeşitli matematik dönüşümleri kullanılmaktadır. DTC'de FOC'nin aksine matematik dönüşümleri kullanılmaz ama tork dalgalanması gibi sorunlar mevcuttur[4]. Şekil 1.2'de kontrol yöntemleri skaler ve vektörel olarak iki ana gruba ayrılmıştır.

En çok kullanılan alan yönlendirmeli vektör kontrol ve uygulaması yapılan altı adım kontrol algoritmasından bahsedilecekt.

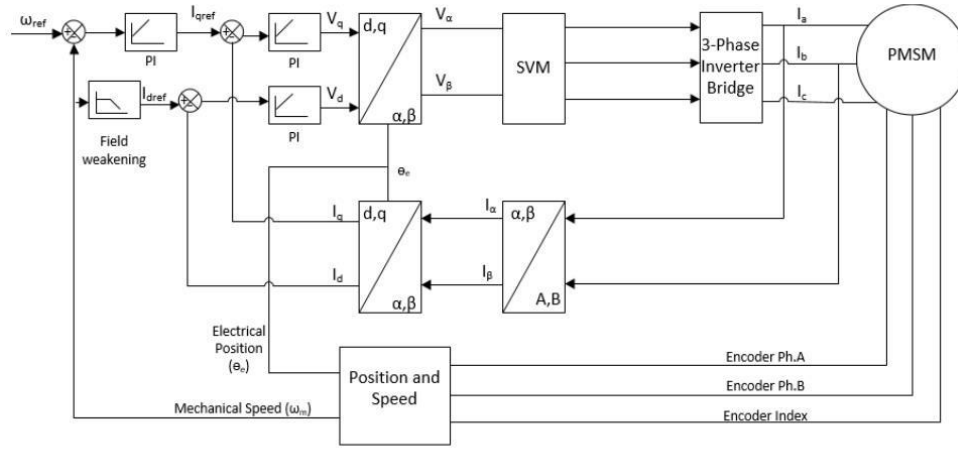


Şekil 1.2 SMSM Kontrol Yöntemleri

1.2.2.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol Algoritması (FOC)

Şekil 1.3’de algoritması verilen FOC yönteminin çeşitli aşamalarını aşağıdaki gibi özetleyebiliriz [5].

1. Motorun a, b, c fazlarından i_c faz akımı, i_a ve i_b fazlarının akımları ölçülerek $i_a + i_b + i_c = 0$ eşitliğiyle hesaplanır.
2. Kontrolün basitleştirilip iki eksenle sağlanabilmesi için 3 faz akımının oluşturduğu 3 eksen (i_a, i_b, i_c) Clarke dönüşümü ile 2 eksene (i_α ve i_β) dönüştürülür.
3. Park dönüşümüyle, iki eksene (i_α ve i_β) dönüştürülen akımlar rotor açısı θ kullanılarak i_d ve i_q akımları elde edilir.
4. i_d akımı rotorun mıknatıslanma akısını, i_q akımı motorun tork çıkışını üretir. i_d ve i_q akımlarını istenen kriterlerde kontrol edebilmek için PI kontrolör kullanılır. Kontrolörlerin girişi referans değer ile ölçülen değer arasındaki fark (hata), çıkışı ise V_d ve V_q gerilimleridir.
5. V_d ve V_q gerilimleri rotor açısı θ kullanılarak Ters Park Dönüşümüyle V_α ve V_β olur.
6. V_α ve V_β gerilimleri 3 faza V_a, V_b ve V_c dönüştürülerek uzay vektör modülasyon algoritması(space vector modulation) ile PWM(Sinyal Genişlik Modülasyonu)’in hesaplanabilmesi için kullanılır.

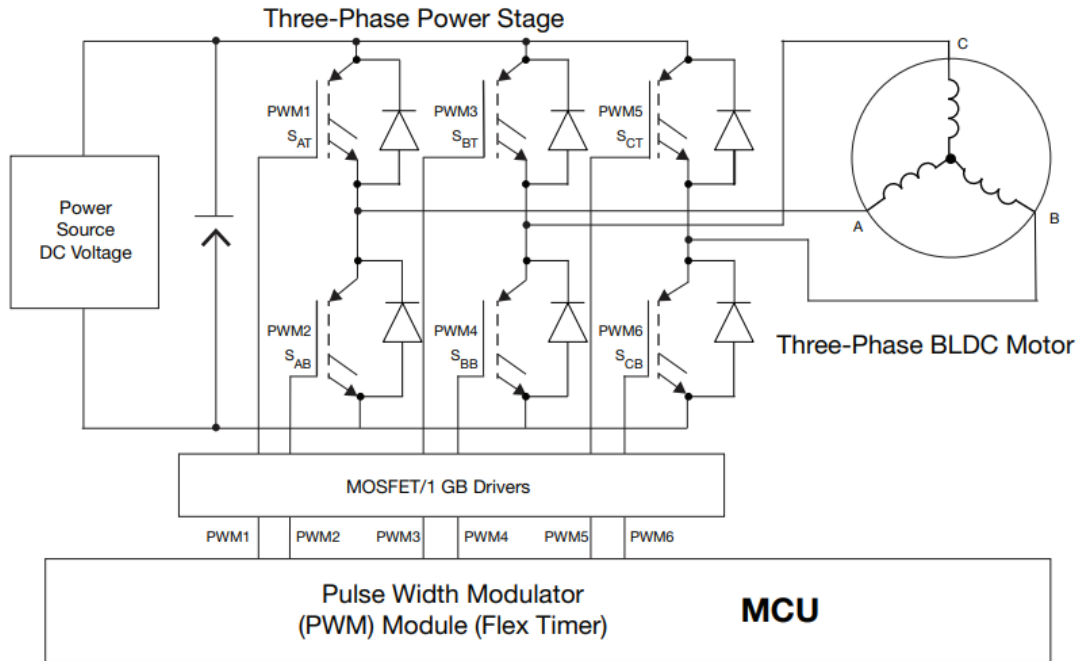


Şekil 1.3 Alan Yönlendirmeli Kontrol Algoritması[6]

1.2.2.2 6 Adımlı Kontrol Algoritması

Altı adım komütasyonu, anahtarlama elemanlarının motor açısına göre aktif edilmesiyle motorun dönmesini sağlayan bir yöntemdir. Her rotorun açılı değişiminde farklı anahtarlama elemanları aktif edilerek uygun PWM sinyali ile dönüş sağlanır [7].

Şekil 1.4’de algoritma gösterilmiştir.



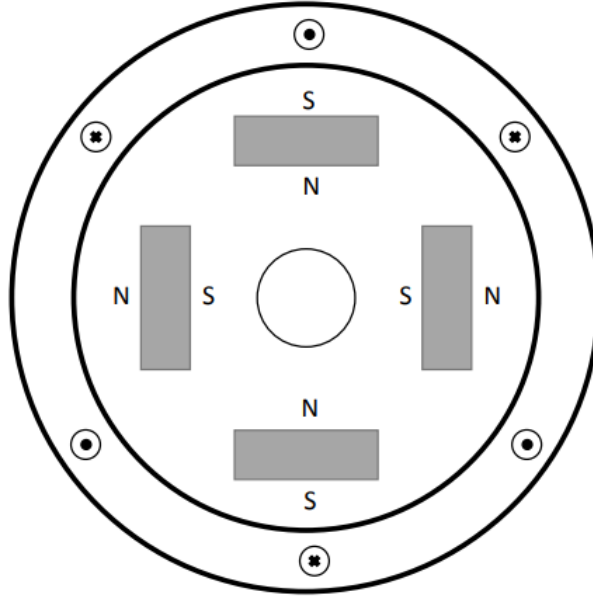
Şekil 1.4 Altı Adım Kontrol Algoritması[8]

1.3 Hipotez

Altı adım kontrol algoritması kullanılarak Hall etkili sensörler yardımıyla sabit mıknatıslı senkron motora uygun hız kontrolcüsü tasarlandığında, kapalı çevrim sürülme sağlanabilir ve motor hızı istenen şekilde kontrol edilebilir.

2. SMMS MATEMATİK MODELİ

Sabit mıknatıslı senkron motorun rotorunda manyetik alan yayan sabit bir mıknatıs bulunur. Üç fazlı sargılar statora akımlar arasında 120 derece faz farkı olacak şekilde yerleştirilmiştir. IPMSM'nin yapısı Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Faraday yasası nedeniyle, değişen manyetik alan gerilimi indükler. Buna bağlı olarak, dönen kalıcı mıknatıs, ters EMK olarak adlandırılan statorda gerilimi indükler.



Şekil 2.1 : SPMSM Yapısı

Sargılardaki bobinler dolayısıyla stator sargılarının direnç ve indüktans değerleri vardır. Aşağıdaki varsayımlarla tek faz için motor matematik modeli çıkarılabilir.

- Stator sargıları sinüzoidal MMF dağılımı üretir. Hava boşlukları içinde uzay harmonikleri ihmal edilmiştir.
- Hava aralığı relüktansı, sinüzoidal bir değişkenin yanı sıra sabit bir bileşene sahiptir
- Üç fazlı sinüzoidal gerilim dengelenmiştir.
- Histerisiz ve girdap akımları ihmal edilmiştir.

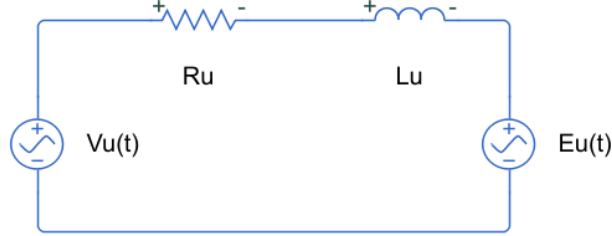
Şekil 2.2'de verilen devreye Faraday kanunları uygulanarak üç faz için aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$v_u(t) = R_u i_u(t) + \frac{L_u di_u(t)}{dt} + E_u(t) \quad (2.1)$$

$$v_v(t) = R_v i_v(t) + \frac{L_v di_v(t)}{dt} + E_v(t) \quad (2.2)$$

$$v_w(t) = R_w i_w(t) + \frac{L_w di_w(t)}{dt} + E_w(t) \quad (2.3)$$

Elde edilen $E(t)$ indüklenen ters EMK'dır.



Şekil 2.2 Tek Faz Eşdeğer Devre(u fazı için)

Her faz için akı denklemleri aşağıda verilmiştir.

$$\lambda_u^s = L_u i_u + \lambda_u^{PM} \quad (2.4)$$

$$\lambda_v^s = L_v i_v + \lambda_v^{PM} \quad (2.5)$$

$$\lambda_w^s = L_w i_w + \lambda_w^{PM} \quad (2.6)$$

(2.1) ve (2.4) denklemi birlikte değerlendirilirse aşağıdaki denklemler elde edilir;

$$v_u(t) = i_u(t) + \frac{\lambda_u^s}{dt} \quad 2.7$$

$$v_v(t) = i_v(t) + \frac{\lambda_v^s}{dt} \quad 2.8$$

$$v_w(t) = i_w(t) + \frac{\lambda_w^s}{dt} \quad 2.9$$

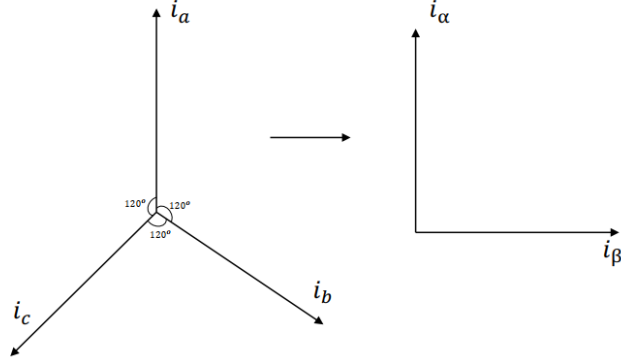
2.7'deki denklem alternatif akımlı makineler için genel bir formdur. Bir AC makine bu modelden türetilir.

$$v_u(t) + v_v(t) + v_w = 0 \quad 2.10$$

$$i_u(t) + i_v(t) + i_w = 0 \quad 2.11$$

2.10 ve 2.11'de gösterildiği gibi fazdaki anlık gerilim ve akım değerlerinin toplamı sıfır yapmaktadır.

2.1 Clarke Dönüşümü



Şekil 2.3 İki eksen koordinat dönüşümü

Clarke dönüşümlü üç faz (u,v,w) değerlerini iki eksenli dik koordinat sistemindeki izdüşümlerine (α , β) dönüştürür. Gerilim dönüşümü için 2.12’de matris formatı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{3}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_u \\ v_v \\ v_w \end{bmatrix} \quad 2.12$$

Elde edilen gerilimlerin referans koordinat sistemi değişmemiştir ayrıca zamana ve hıza bağlı olarak değişmektedirler.

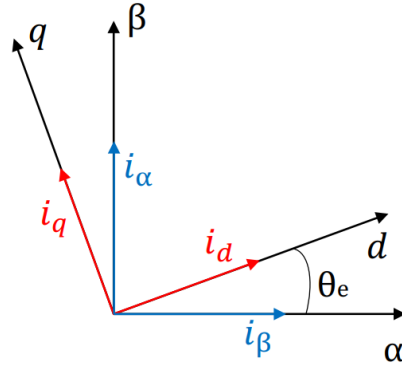
Ters Clarke dönüşümüyle de iki faz dik koordinat (α , β) değerleri tekrar üç faz akım değerlerine (u,v,w) dönüştürülebilir. Dönüşüm sayesinde koordinat referansı ve boyut sayısı değişmez ama eksen sayısı değişmektedir. Akım dönüşümü için 2.13’te matris formatı aşağıda verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad 2.13$$

2.2 Park Dönüşümü

İki faz dik koordinat (α , β) değerleri, yine iki eksenli ama döner koordinat sistemine dönüşümünü hesaplar, dönüşüm referans eksinini de değiştirmiş olur. Şekil 2.4’te

gösterilmiştir. Eksenler rotor akısıyla beraber θ_e açısıyla dönmektedir. Denklemler matris formatında denklem 2.14’te verilmiştir.



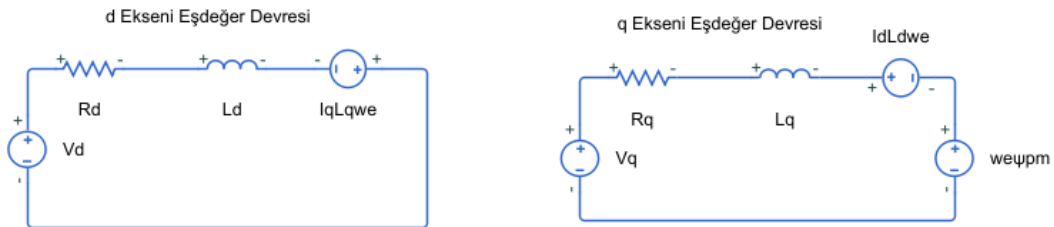
Şekil 2.4 d - q Koordinat Dönüşümü

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_e) & \sin(\vartheta_e) \\ -\sin(\vartheta_e) & \cos(\vartheta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad 2.14$$

Döner eksenlerde (d-q) tanımlanmış akımları ϑ_e açısı bilgisiyle durağan i_α ve i_β akımlarına dönüştürülmektedir. Ters Park dönüşümü denklem 2.15’de matris formatında gösterilmektedir.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta_e) & -\sin(\vartheta_e) \\ \sin(\vartheta_e) & \cos(\vartheta_e) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad 2.15$$

d – q eksenlerinde q eksenini üretilen tork ile d eksenini akı ile ilişkilidir. d-q eksenlerinin eşdeğer devresi şekil 2.5 ‘de verilmiştir. Ayrıca ilgili eşitlikler Denklem 2.16’da matris formatında yazılmıştır.



Şekil 2.5 d - q eksenleri eşlenik devre

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_{PM} \end{bmatrix} \quad 2.16$$

2.3 Mekanik Model Denklemleri

Z_p kutup çifti sayısı olmak üzere Tork denklemi d – q koordinat sisteminde verilebilir.

$$T_e = \frac{3}{2} Z_p [\lambda_{PM} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad 2.17$$

Motor için genel mekanik denklemle 2.18'deki gibi yazılabilir.

$$T_{\text{mech}} = \frac{J \omega_m}{dt} + B \omega_m + T_{\text{load}} \quad 2.18$$

ω_m motor mekanik hızı, J atalet momenti B viskoz sürtünme katsayısı T_{load} yük momenti s domeininde denklem 2.19'daki biçime getirilir.

$$\omega_m = (T_{\text{mech}} - T_{\text{load}}) \frac{1}{J \cdot s + B} \quad 2.19$$

$$\frac{\omega_m}{T_{\text{mech}} - T_{\text{load}}} = \frac{1}{J \cdot s + B} \quad 2.20$$

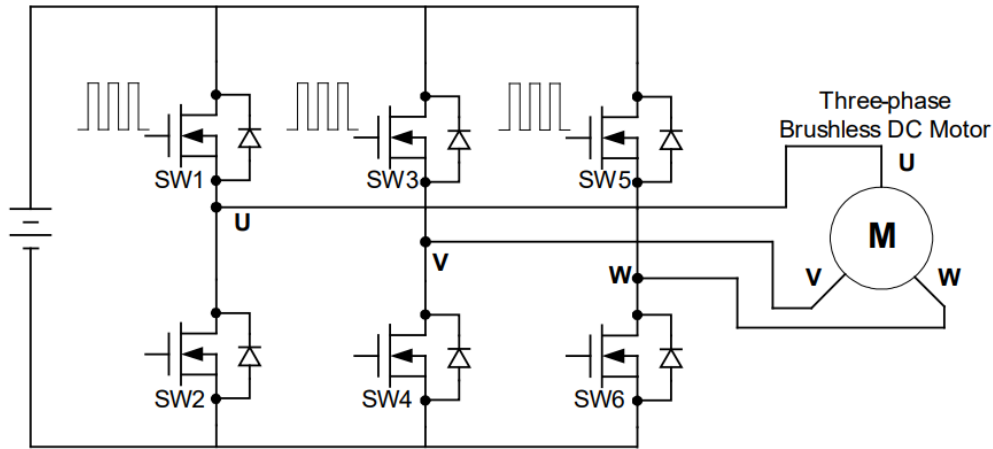
3. SÜRÜCÜ BİLEŞENLERİ VE ALGORİTMASI

Motorun uygun fazlarına PWM sinyali gönderebilmek için kullanılan güç elektroniği devreslerinden bahsedilerek sonrasında motorun senkron hareketini sağlayan sensör verilerinin nasıl elde edildiği üzerine açıklama yapılarak kullanılan motor sürüş algoritması izah edilmiştir.

3.1 Üç Fazlı Gerilim Kaynağı Evirici

3 Fazlı gerilim eviricisi alt taraf-üst taraf şeklinde birbirine bağlanmış her çıkış fazı için 2 tane olmak üzere toplam 6 tane anahtarlama elemanından oluşmaktadır. Anahtarlama elemanı olarak IGBT veya MOSFET kullanılmaktadır. Evirici yapısındaki transistörlerin farklı kombinasyonlarda açılıp kapatılması ile çıkış fazlarında istenilen yönde bir elektron akışı meydana getirilir. Motor stator fazlarındaki akan akımın büyüklüğüne ve yönüne bağlı olarak sargılarda manyetik alan kutupları oluşur. Akım kaynaklı oluşan kutuplar ile rotorda bulunan sabit mıknatısların etkileşimi ile belirli bir yönde elektromanyetik moment (tork) vektörleri oluşur. Moment oluşumu mıknatıslar arasındaki zıt kutupların birbirini çekmesi, benzer kutupların birbirini itmesi mantığına dayanmaktadır [9].

Buna ek olarak, transistörlerin yüksek frekansta değişken görev çevrimine sahip PWM sinyalleri kullanılarak kontrol edilmesi ile çıkış fazında farklı genlikte gerilim ve akım değerleri elde edilmektedir. Bu durum motor üzerinde istenilen tork ve hızın elde edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 3.1 Üç Fazlı Evirici Devresi [10]

3.2 Hall Etkisi Sensörü

Hall etkisi Dr. Edwin Hall tarafından 1879'da doktora adayı iken keşfedilmiştir. Deneyleri, bir ince altın levhaya manyetik alan uygularken aynı zamanda iletken üzerinden elektrik akımı geçirmeyi içeriyordu. Hall, deneyleri sonucunda altın iletkenin hem akıma hem de manyetik alana dik kenarlarında Hall gerilimi olarak bilinen bir gerilimin ortaya çıktığını gözlemlemiştir [11].

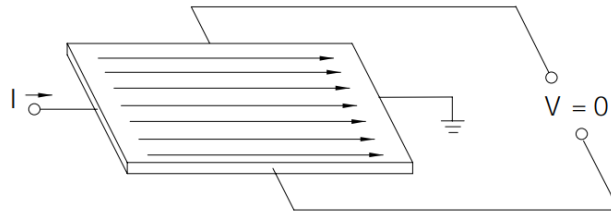
Bu keşif, bir iletkendeki pozitif ve negatif yüklerin manyetik alanın etkisi nedeniyle iletkenin iki karşı bölgesine ayrıldığını kanıtlamıştır. Bu ilişki, günümüzde manyetik alanları, akımı ve diğer miktarları ölçmek için yaygın olarak kullanılan bir cihaz olan Hall etkisi sensörünün geliştirilmesini sağlamıştır.

Şekil 3.3'de üzerinden akım geçen yarıiletken levha gösterilmiştir. Manyetik alan etkisi olmadığı durumda levha uçlarında bir gerilim oluşmamıştır.

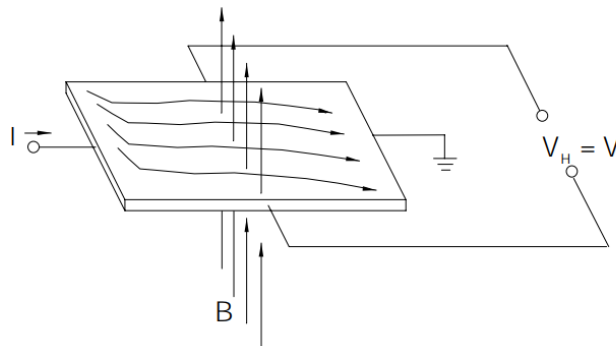
Bu plakadaki akıma dik bir manyetik alan uygulandığında ise Lorentz kuvveti meydana gelir. Bu kuvvet, aşağıdaki denklemde tanımlandığı gibi plaka uçlarında bir Hall gerilimi oluşturur. Oluşan gerilim akım vektörü ile manyetik alan vektörünün çapraz çarpımına eşittir.

$$V_H = I \times B \quad 3.1$$

V_H : Hall gerilimi, I : akım, B : manyetik alan

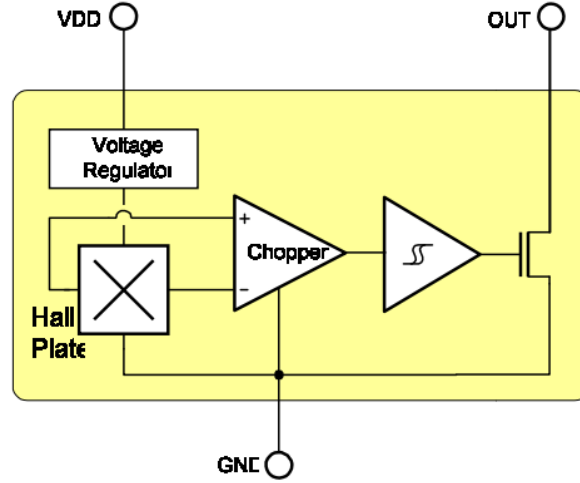


Şekil 3.2 Üzerinden akım geçen yarıiletken levha [11]



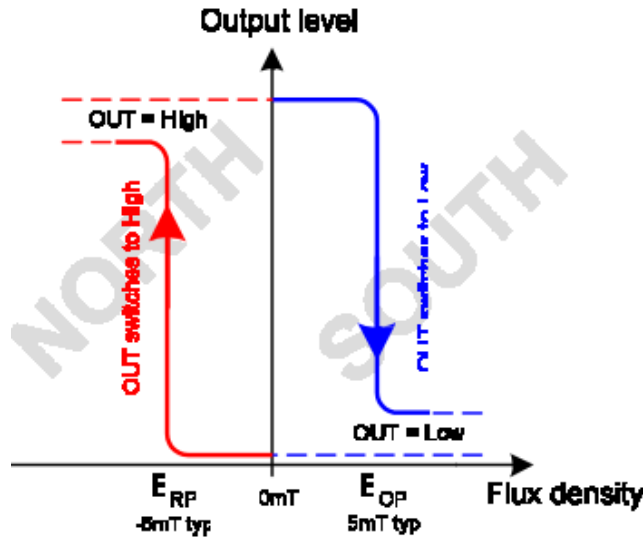
Şekil 3.3 Yarıiletken levha da oluşan Hall gerilimi [11]

Ancak plaka üzerinde oluşan V_H gerilimi genellikle $0-10 \mu V$ seviyelerinde olmaktadır. Bu yüzden hall etkisi sensörlerinde çıkış gerilimini yükseltmek için DC yükseltici kullanılmaktadır. Hall etkisi sensörü, manyetik alanın büyüklüğünü doğru göstermek için sabit akımda çalışmalıdır. Bu yüzden akımı dengelemek ve sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan direnç değişiklikleri telafi etmek için bir voltaj regülatörü kullanılır. Bitirme projesinde kullanılan yukarıdaki yapılara sahip Melexis-US1881 Hall etkisi sensörünün iç yapısı Şekil 3.5’de verilmiştir.



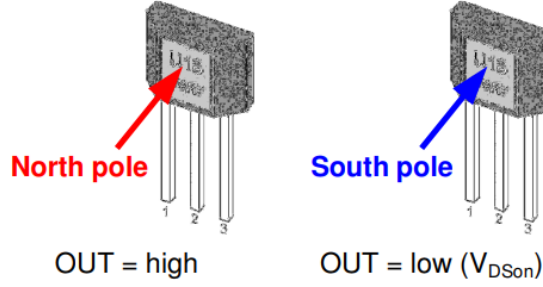
Şekil 3.4 Hall etkisi sensörü iç yapısı [12]

US-1881 sensörü içinde dinamik ofset iptal sistemi, Schmitt tetikleyici ve open-drain çıkış sürücüsü bulunmaktadır. Schmitt tetikleyici yapısı sayesinde sensör sadece dijital 1(ON) ve 0(OFF) çıkışları üretmektedir. Şekil 3.5’te sensörün histerezis karakteristik durumu verilmiştir.



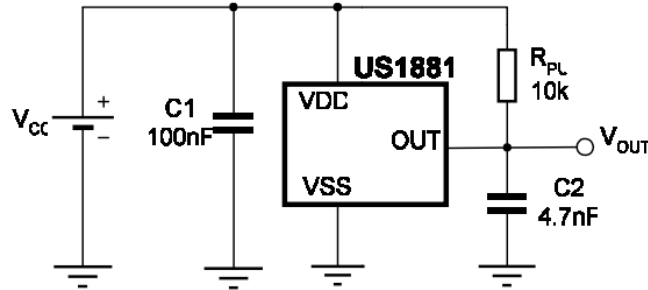
Şekil 3.5 Sensör Histerezis Karakteristiği [12]

Şekil 3.5'te görüldüğü gibi eşik noktaları sensör çıkış değeri için belirleyicidir. Sensör 0 ve 1 durumları için eşik değerleri simetriktr($B_{RP} = |B_{OP}|$). Bunlara ek olarak, eşik değerin ötesinde manyetik alan büyüklüğündeki artışın çıkışa hiçbir etkisi olmaz, çıkış sabit kalır. Aşağıdaki şekilde kullanılan sensörün mıknatıs N ve S kutbuna göre vermesi gereken lojik sensör çıkışları gösterilmiştir.



Şekil 3.6 Sensör dijital çıkış durumları

Motor üzerine yerleştirilen Hall sensörlerden elde edilen sinyallerin sürücü kart tarafından okunabilmesi için uygun elektriksel bağlantıların yapılması gerekmektedir. Bu projede sensör veri sayfasında belirtilen Şekil 3.7'deki örnek devre şeması kurulmuştur. Sensör çıkışı open-drain yapısına sahip olduğu için çıkış bir direnç kullanılarak 3.3 Volt gerilime bağlanmıştır.



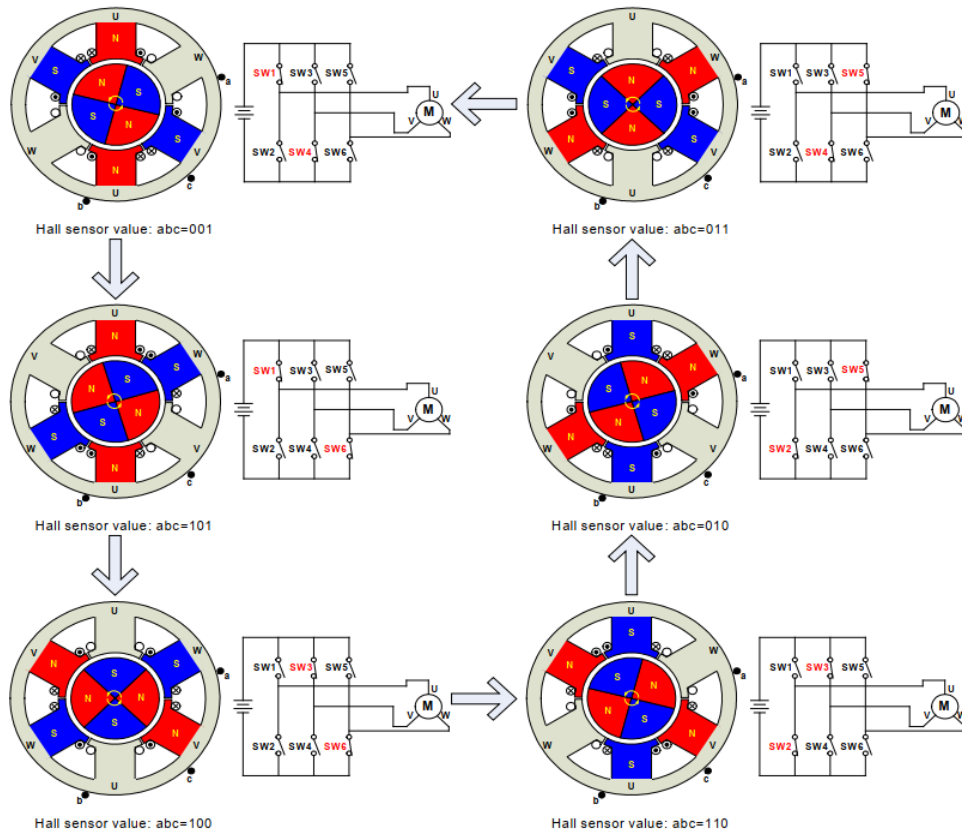
Şekil 3.7 Hall sensör örnek devresi [12]

Bu devreden gelen sensör sinyalleri, sürücü devresinde bulunan alçak geçiren filtreden de geçirilerek oluşabilecek yüksek frekanslı gürültüler süzülerek mikroişlemcinin GPIO pinleri üzerinden okuma yapılmaktadır.

3.3 SMSM Altı-Adımlı Komütasyonu

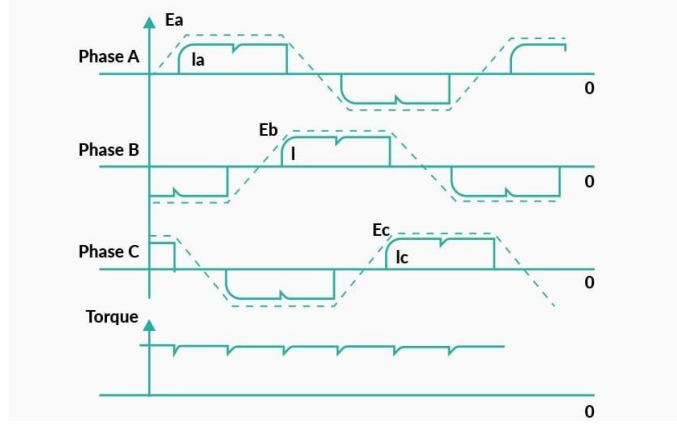
Komütasyon, dönen bir manyetik akı vektörü oluşturarak rotorun dönmesini sağlayacak şekilde motor fazlarına gerilim uygulama işlemidir. BLDC (Fırçasız DC) motorlar için komütasyon altı aşamalı bir işlemdir.

Bitirme Tasarım Projesi kapsamında kullanılan 8 kutuplu SMSM'un kontrolü için altı aşamalı komütasyon yöntemi (trapezoidal kontrol) kullanılmıştır. Altı adımlı komütasyon olarak da adlandırılan trapezoidal komütasyon, herhangi bir zamanda motorun yalnızca iki fazına enerji veren bir komütasyon stratejisidir [13]. Bu komütasyon stratejisi esas olarak ters EMK'nin yamuk olduğu BLDC motorlar için kullanılır. Bu yöntemde bir tam çevrim (bir elektronik devir) 6 komütasyon durumuna sahiptir. Altı komütasyon durumunun tamamı ve sırası Şekil 3.9'daki 3 fazlı evirici devrelerinde verilmiştir.



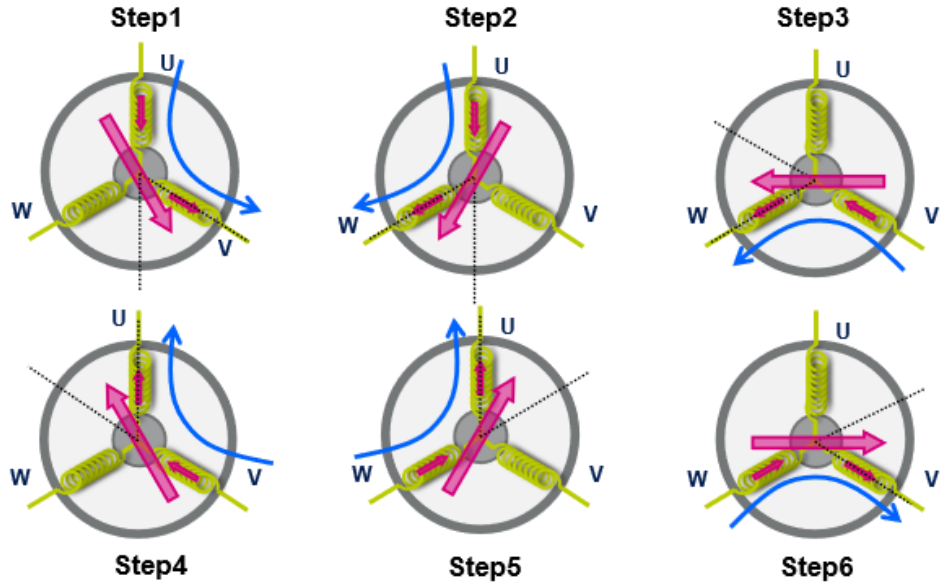
Şekil 3.8 3 Fazlı Eviricide Altı-Adım Komütasyon Durumları

Şekil 3.9'da gösterilen her bir komütasyon durumu sonucu oluşan elektromanyetik vektörler SMSM'un bir sonraki konuma 60° yönlendirir. Bunun sonucunda 6 adım tam bir tur dönüş sağlar ($6 \text{ adım} \times 60^\circ = 360^\circ$). Aşağıdaki şekilde motorun 1 tur elektriksel dönüşündeki faz akımları verilmiştir;



Şekil 3.9 Trapezoidal Kontrol Faz Gerilimleri

Şekil 3.10 altı adımlı komütasyon durumunu zamana dayalı bir sistemde göstermektedir. Şekil 3.11 ise her bir adımda motor fazlarında oluşan manyetik alanları rotasyonel sistemde göstermektedir.



Şekil 3.10 Motor stator manyetik alanları

Bu motor kontrol yönteminin doğru çalışabilmesi için rotorun konumunun doğru bilinmesi gerekir. Komütasyon, rotorun dönüş hızından daha hızlı yapılırsa, rotor mıknatısları stator manyetik alanıyla senkronize olmaz ve rotor dönmek yerine titreşir. Sonuç olarak motorda bir sonraki komutasyonun yapılabilmesi için rotorun konumunun stator ile senkronize olup olmadığını belirleyen bir algılama yöntemi olması gerekir. SMSM'in konumunu algılamak için hall effect, encoder ve potansiyometre gibi sensörler kullanılabilir veya motor fazlarındaki ters EMK gerilim

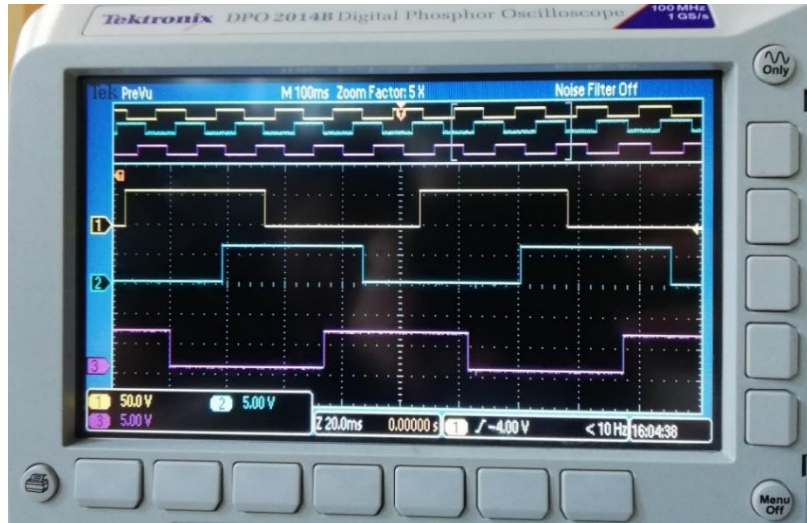
sinyalleri kullanılarak sensörsüz konum tahmini yapılabilmektedir. Bu projede SMSM'un rotor konumunu hesaplamak için Hall effect sensörleri kullanılmıştır.

Altı adımlı sürüş algoritmasının doğru çalışması için mikroişlemciye gelen 3 adet Hall sensör sinyali lojik 1-0 durumlarına göre okunur ve anlık sensör çıktısına göre inverter üzerindeki doğru transistörler açılıp-kapatılarak motor fazları enerjilendirilir. Projede kullanılan Hall sensörlü motorumuz için farklı sensör durumlarında hangi motor fazlarının enerjilendirileceğini belirten Çizelge 3.1 oluşturulmuştur.

<i>Sektör</i>	Sensör Lojik Değerleri			Enerjilendirilecek Motor Fazları		
	<i>Hall A</i>	<i>Hall B</i>	<i>Hall C</i>	<i>Faz A</i>	<i>Faz B</i>	<i>Faz C</i>
<i>1</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	--	<i>+U</i>	<i>-U</i>
<i>2</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>-U</i>	<i>+U</i>	--
<i>3</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>-U</i>	--	<i>+U</i>
<i>4</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>1</i>	--	<i>-U</i>	<i>+U</i>
<i>5</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>+U</i>	<i>-U</i>	--
<i>6</i>	<i>1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>+U</i>	--	<i>-U</i>

Çizelge 3.1 Hall Etkili Sensörler ve Faz gerilimleri

Şekil 3.1’de motorun dönmesi esnasında Hall sensörlerinde gelen lojik sinyallerin osiloskop çıktısı verilmiştir.



Şekil 3.11 Hall sensörlerinin osiloskop görüntüsü

Osiloskopta da görüldüğü gibi Hall sensör sinyalleri arasında 120° faz farkı ve toplamda 60°'lik 6 farklı sensör sinyal kombinasyonu vardır.

4. HIZ KONTROLCÜ TASARIMI

Kontrolcü tasarımı hız çevrimi için uygun transfer fonksiyonunun elde edilmesi, elde edilen sistemin uygun örnekleme frekansı ile ayrık düzleme aktarılması ,aşım ve yerleşme zamanı gibi kriterlerle belirlenen kapalı çevrim karakteristik polinomu ile uygun kazanç değerlerinin hesaplanması son olarak da simülasyon ve gerçek sisteme uygulanması şeklinde ilerlenmiştir.

4.1 Sistem Modelinin Çıkarılması

Kullanılan sensörlü motor sürüş yöntemi gereğince hız kontrolü için kontrolcü tasarımı yapılacaktır. Hız verisi kullanılan hall effect sensörler yardımıyla hesaplanmakta ve kapalı çevrimde kullanılmaktadır.

PMSM motoru doğrusal olmayan sistem olduğu için transfer fonksiyonu çeşitli yaklaşımlarla elde edilecektir.

Bu yaklaşımlar için J ve B değerlerinin motor datasheet verisinden bulunarak elde edilmiştir. Dışarıdan herhangi bir tork uygulanmadığı için $T_L = 0$ alınacaktır.

Hız çevrimi içi matematik modeli Denklem 4.1'deki gibi yazılabilir.

$$T_m - T_L = \frac{Jdw_m}{dt} + Bw_m \quad 4.1$$

T_m makine tarafından üretilen tork, T_L yük torku, J eylemsizlik momenti ve B sürtünme katsayısıdır. Ek bir yük bağlanmadığı için eylemsizlik ve sürtünme katsayıları motor için kabul edilecektir.

$$T_m = \frac{3}{2} Z_p [\lambda_{PM} + (L_d - L_q)i_d]i_q \quad 4.2$$

4.1'deki denklemde Z_p kutup çifti sayısı olmak üzere $K_t = [\lambda_{PM} + (L_d - L_q)i_d]$ tork sabiti olarak alınırsa motor torku 4.3'deki denklemde ifade edilebilir.

$$T_m = K_t i_q \quad 4.3$$

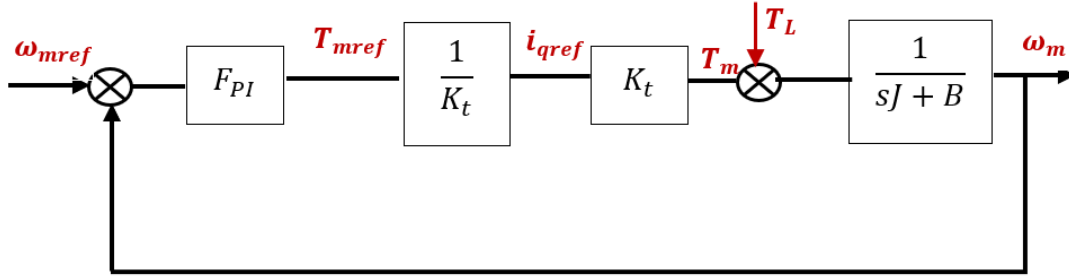
Transfer fonksiyonu G(s) denklem Denklem 4.4'deki gibi kabul edilip motor referans verilerindeki Çizelge 4.1'deki tablodan yararlanarak transfer fonksiyonu denklem 4.5'de elde edilerek kapalı çevrim blok diyagramı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.

$$G(s) = \frac{T_m - T_L}{w_m} = \frac{1}{sJ + B} \quad 4.4$$

$$G(s) = \frac{1}{0.0008s + 0.0001} \quad 4.5$$

Parameters	Unit	Values
stator resistance (R_s)	Ω	2.875
number of pole pairs (n_p)	pairs	4
q -axis inductance (L_q)	H	0.0075
d -axis inductance (L_d)	H	0.0025
rotor PM flux (ψ_r)	Wb	0.175
rotational inertia (J)	$\text{kg}\cdot\text{m}^2$	0.0008
viscous friction coefficient (B)	$\text{Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$	0.0001

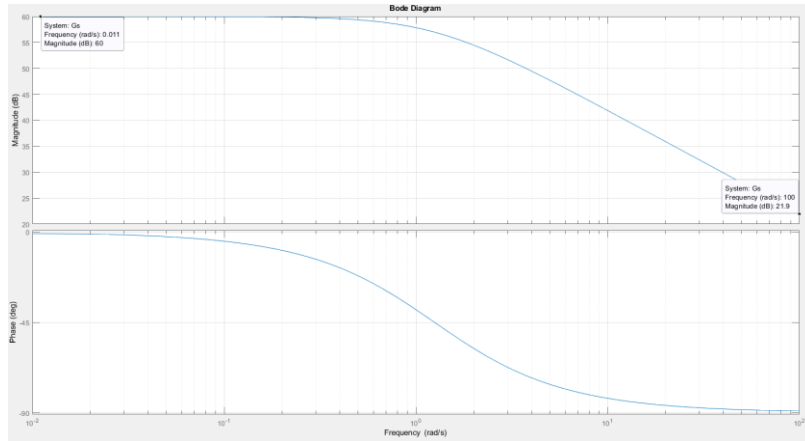
Çizelge 4.1 Motor Referans Verileleri



Şekil 4.1 Hız çevrimi blok diyagramı

4.2 Hız Çevriminin Ayrık Zamana Geçirilmesi

Denklem 4.5'deki sistemin Şekil 4.2'de verilen açık çevrim Bode diyagramı incelenip -40dB zayıfladığı nokta bulunarak örnekleme zamanı hesabı Denklem 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.2 Açık çevrim Bode diyagramı

Şekil 4.2’de verilen Bode diyagramı $\omega_c = 100$ olduğundan $\omega_s \geq 200 \text{ rd/s}$ olmalıdır.

$$T_s \leq \frac{2\pi}{\omega_s} = \frac{2\pi}{200} \cong 0.0314 \quad 4.6$$

Denklem 4.6’da verilen yaklaşım $T_s = 0.01$ seçilerek sıfırıncı mertebeden tutucu (ZOH) ile kontrolör ayrık zamana Denklem 4.10’daki gibi geçilebilir.

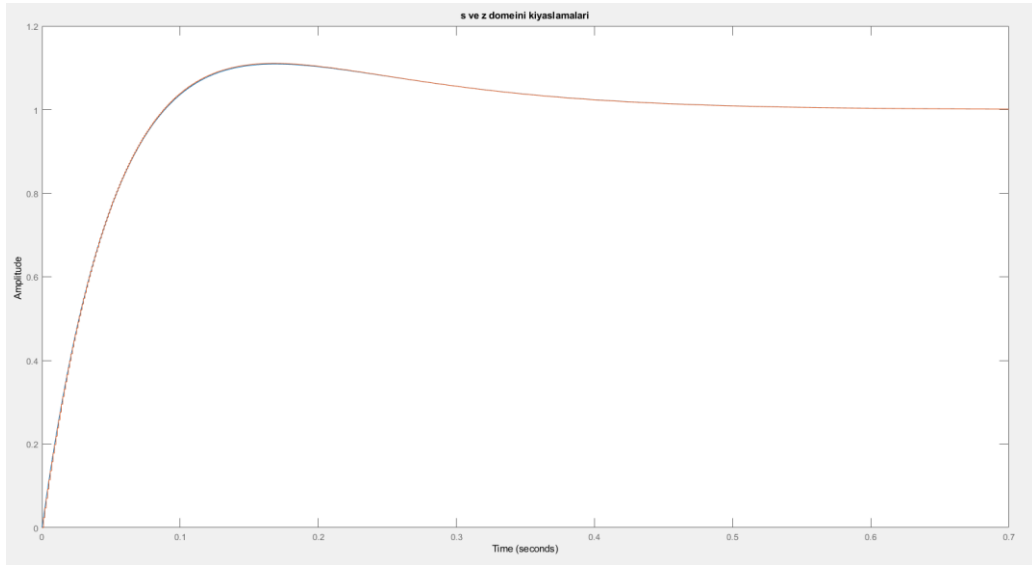
Şekil 4.3’de s düzlemi ve z düzlemindeki transfer fonksiyonları kıyaslanmıştır.

$$G(z) = Z \left\{ G_{ZOH}(s) \frac{1}{0.0008s + 0.001} \right\} \quad 4.7$$

$$G_{ZOH}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{s} \quad 4.8$$

$$G(z) = Z \left\{ \frac{1 - e^{-sT}}{s} \frac{1}{0.0008s + 0.001} \right\} \quad 4.9$$

$$G(z) = \frac{12.49}{z - 0.9988} \quad 4.10$$



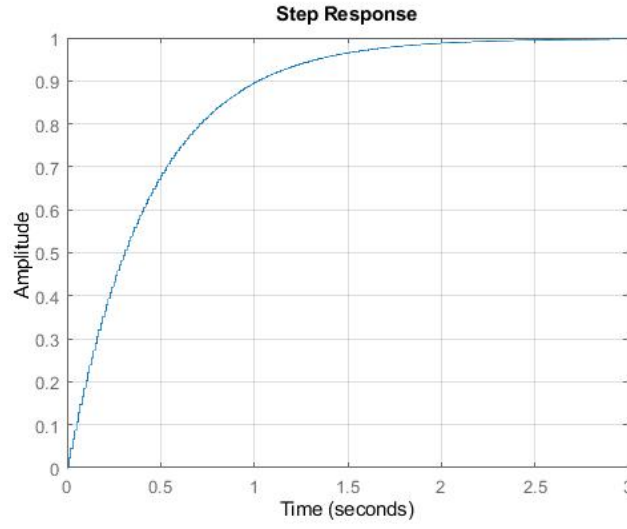
Şekil 4.3 Örneklem zamanı ile örneklenmiş sistemin kıyaslaması

4.3 Kontrolcü Parametrelerinin Hesaplanması

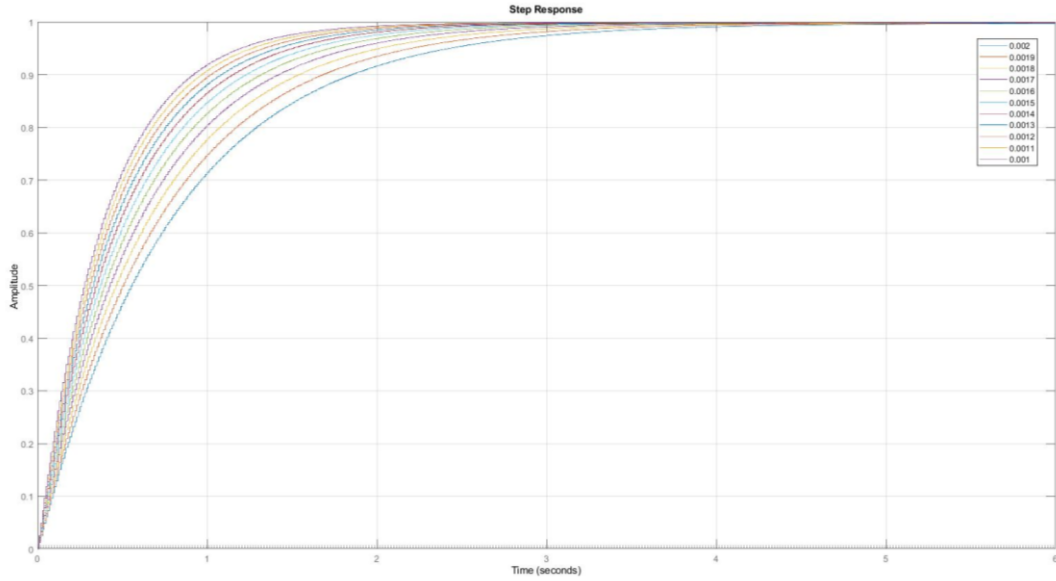
Ayrık zaman PI kontrolcü Denklem 4.11’deki gibi tanımlanabilir. PI kontrolörün sıfırı sistemin kutbu ile eşleştirilerek kutup sıfır götürmesi yapıldı[16]. Uygun kazanç değeri yerleşme zamanı kriteri gözetilerek Şekil 4.4’de verilen aşım yapmayan sistem elde edildi. Farklı kazanç değerleri için sistemin step cevapları Şekil 4.5’de verilmiştir.

$$F_{pI}(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{K(z - p)}{z - 1}$$

4.11



Şekil 4.4 Aşım Yapmayan Sistem Cevabı(K = 0.0018,Yerleşme Zamanı = 1.74s)

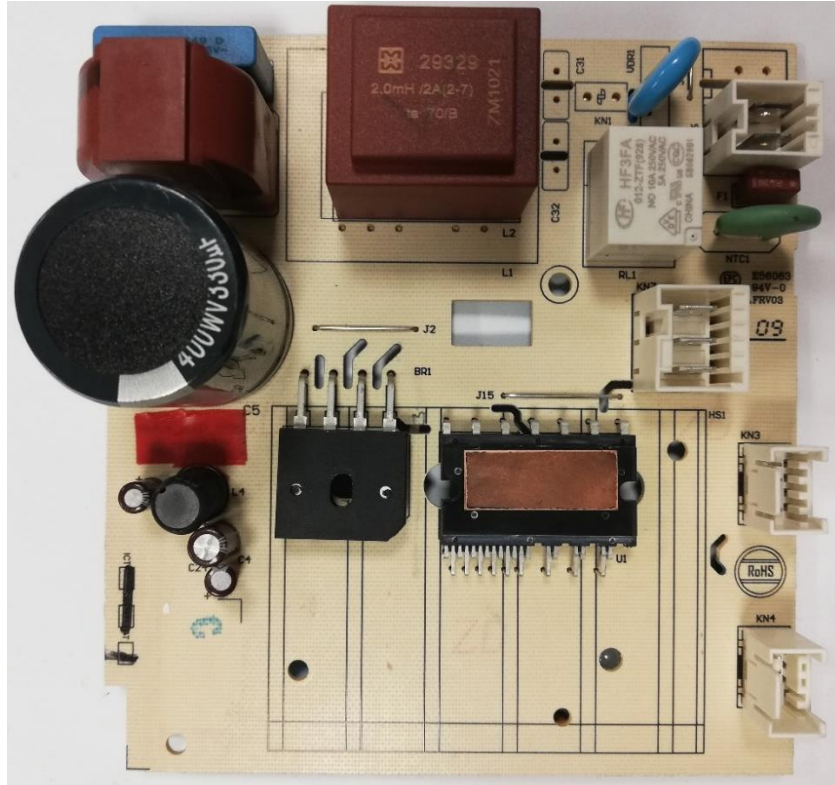


Şekil 4.5 Farklı Kazanç Değerleri İçin Sistemin Step Cevabı

5. GÖMÜLÜ SİSTEM TASARIMI

5.1 Motor Sürücü Kartı ve Özellikleri

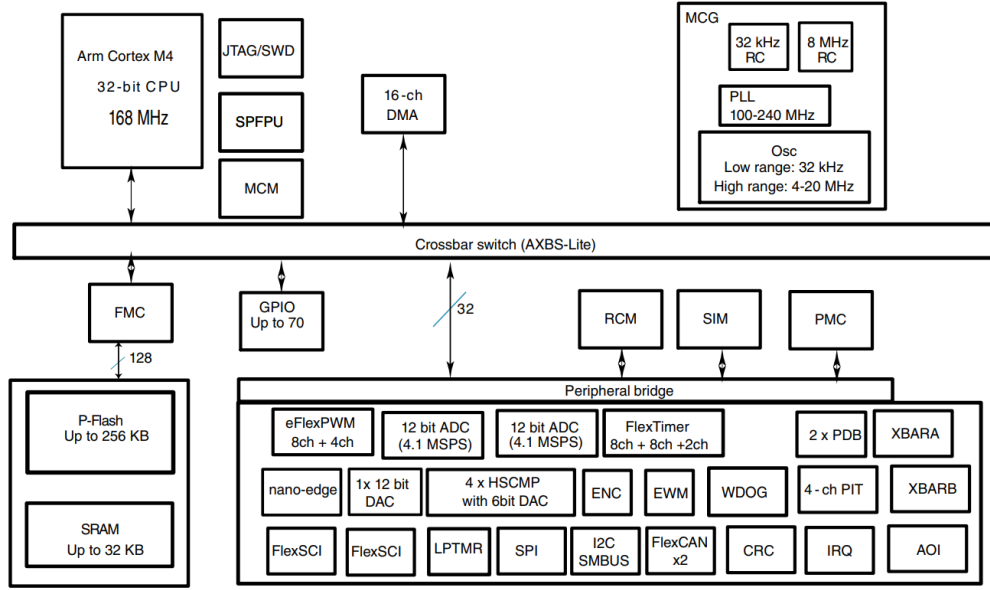
Projemizde SMSM kontrolü için NXP Kinetis-KV4x serisi Cortex-M4 işlemcili motor sürücü kartı kullanılmaktadır. Motor sürücü kart AC 220V/50Hz şebeke gerilimi ile beslenir. AC gerilim köprü diyot ve kapasitörden oluşan doğrultucu yapısı ile DC 311V bara gerilimine dönüştürülerek diğer devre elemanlarına aktarılır. Sürücü kart üzerinde 15V ve 3.3V gerilim ile çalışan elemanların beslemesi için DC-DC Alçaltıcı Dönüştürücüler kullanılarak uygun gerilim seviyeleri elde edilmektedir. Sürücü kartı verilen yüksek gerilim değerlerine sahip olmasına rağmen bu projenin uygulanması esnasında yüksek gerilim kaynaklı tehlikeli durumların oluşmaması için devre kartı maksimum 60V-DC gerilimde kullanılmıştır. Şekil 5.1’de motor sürücü kartının görünümü verilmiştir.



Şekil 5.1 IPM Tabanlı motor sürücü kartı

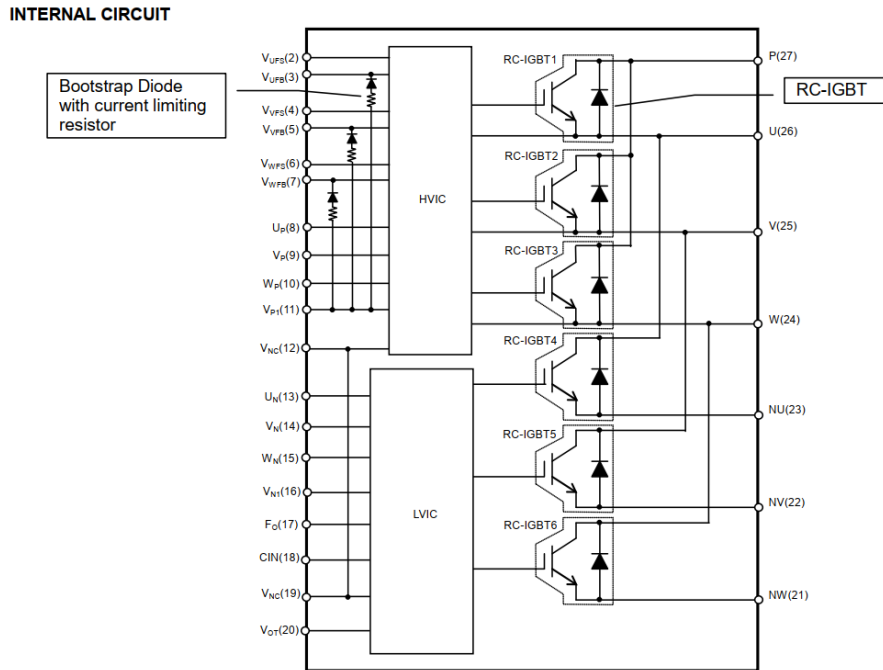
Kullanılan 64 pinli NXP-KV4x serisi mikroişlemci 168 Mhz kullanım frekansı, 128 bit önbellek, 12 bit çözünürlüklü toplam 16 kanal ADC, 2 kanal UART modülü, 16 bit çözünürlükte 12 kanala kadar eFlexPWM, 2 x 8 kanallı ve 1 x 2 kanallı

programlanabilir FlexTimer ve motor kontrolünde kullanılmak üzere farklı özelliklere sahiptir. Şekil 5.2’de işlemcinin blok yapısı verilmiştir.



Şekil 5.2 MKV42 İşlemci Ailesinin Blok Diyagramı [14]

Sürücü kart üzerinde Mitsubishi Electric markalı 3 fazlı düşük güçlü evirici modülü bulunmaktadır. Bu akıllı güç modülü(IPM) çalışma gerilim aralığı DC 400V altıdır ve sürekli 15A akım geçirebilmektedir. Anahtarlama elemanı olarak 6 adet RC-IGBT kullanılmaktadır [15]. Entegrenin çalışması için gerekli besleme gerilimi ise DC 15V olmaktadır. Şekil 5.3’de akıllı güç modülünün iç yapısı ve pinleri verilmiştir.



Şekil 5.3 IPM Güç modülü iç yapısı ve pinleri [15]

- UART birimi kullanılarak motor sürücü kart ile ana bilgisayar arası motor verilerinin alış-verişi yapılmıştır.

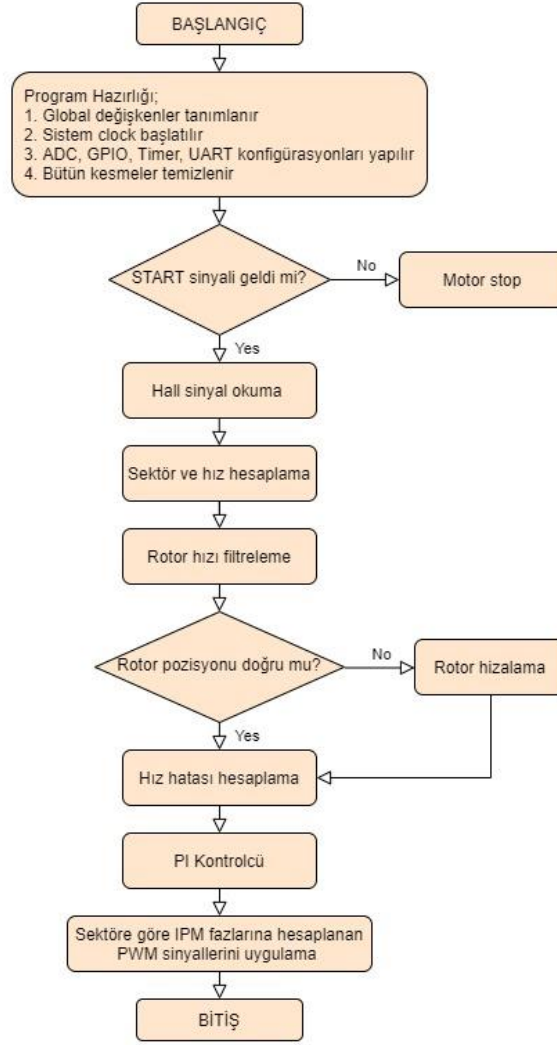
Motor kontrol algoritması Timer kesmesi tabanlı yazılmıştır. Gerekli işlemler Timer ile ayarlanabilen belirli bir periyot aralığında tekrarlı şekilde yapılmaktadır. Timer kesme frekansı 5 kHz olarak ayarlanmış, "Timer_IRQ_Handler()" tutucu fonksiyonu içinde daha düşük hızlı işlemler için de 1 kHz frekanslı ayrı bir döngü yürütülmüştür. Algoritmada genel olarak GPIO Hall sensör sinyali okuma 5kHz, UART veri alış-verişi 1 kHz ve PI hız kontrolcüsü 100 Hz frekans seviyesinde kesme tutucu fonksiyonu içinde çalışmaktadır.

Öncelikle UART hattı üzerinden motorun dönmesi istenilen referans RPM hız değeri ve start-stop sinyalleri alınır. Stop sinyali gelmesi durumunda algoritma çalıştırılmaz ve start sinyali gelene kadar beklenir. Start sinyali alındığında GPIO üzerinden Hall sensör sinyalleri okunmaya başlanır ve bu sinyaller üzerinden hem komütasyon sektörü hem de motor hız verisi elde edilir. Elde edilen hız verisi bir filtre yapısına dahil edilerek çıkışta daha dengeli bir hız elde edilir.

Motor harekete başlatılmadan önce rotorun herhangi bir faza hizalanması gerekmektedir. Hizalama işlemi motorun ilk hızı almasında önemli bir rol oynar. Hizalama işlemi için motorun seçilen bir fazına enerji verilir. Hizalama işlemi tamamlandığında bir bayrak çıkartılır ve kapalı çevrim hız kontrolünün başlatılabileceği anlaşılır.

PI hız kontrol fonksiyonu her 10 ms örnekleme zamanında işlem yapar. Öncelikle hata hesabı yapılır ve kontrolcü çıkışı o andaki ve bir örnekleme zamanı önceki hata durumunu kullanarak kontrolcü çıkışını günceller.

Son adım olarak PI kontrolcünün hesapladığı PWM duty cycle değerleri Hall sensör sinyallerinden hesaplanan sektör değerine uygun IPM transistör pinlerine PWM sinyali olarak iletilir. Evirici bu sinyallere göre istenilen motor fazlarını enerjilendirerek motorun dönüşü sağlar. Program akış algoritması Şekil 5.5'de verilmiştir.



Şekil 5.5 Algoritma Akış Diyagramı

5.3 SMSM Mekanik Hız Hesabı

Hall sensör sinyalleri mikroişlemci GPIO portları üzerinden polling okuma metodu ile motor sürme algoritmasına dahil edilmiştir. Altı adım komütasyon için okunan Hall sensör sinyallerine göre sektörler arasında geçiş yapılmıştır. Projedeki hız kestirim adımları aşağıda açıklanmıştır;

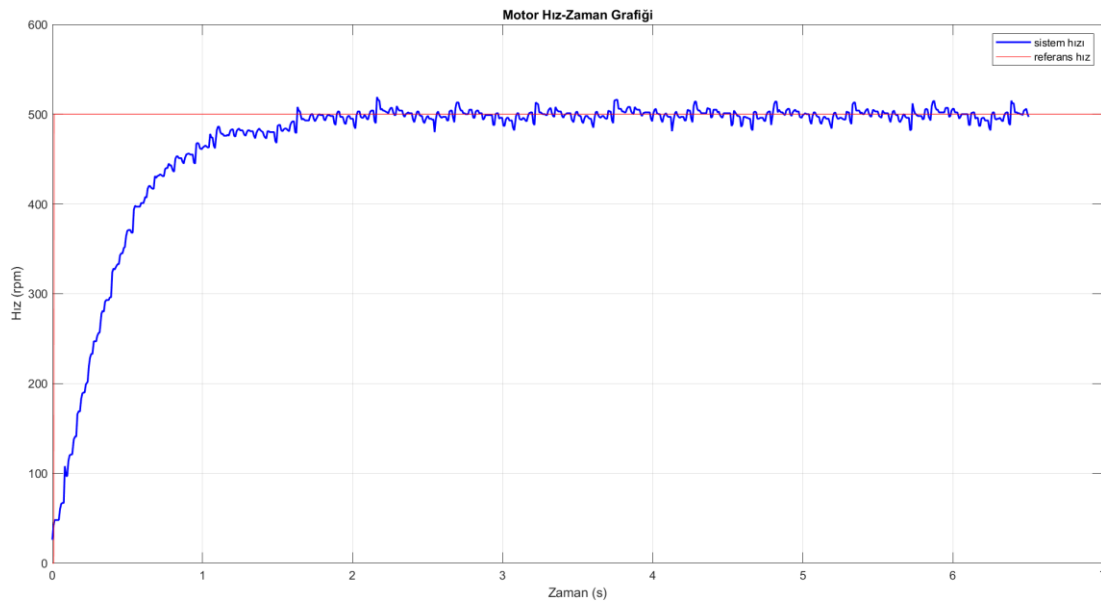
- Mikroişlemciye gelen Hall sensör sinyallerinin lojik 1 ve 0 bölgelerinde geçen süreler Flex Timer birimi kullanılarak elde edilmiştir.
- Bu süreler kullanılarak gelen sinyalin frekansı hesaplanmıştır.
- Frekans değerinden RPM değerine dönüşüm yapılmıştır.
- Elde edilen elektriksel RPM değeri, motorun bir mekanik turunda oluşan Hall sinyallerinin periyot değerine bölünerek mekanik RPM değeri elde edilmiştir.

Projede kullanılan motor 4 kutup çiftine sahiptir. Rotorun bir tur atması sonucunda 4 periyotlu kare dalga Hall sinyali üretilir. Bu durumda motorun kalkış anındaki hızı düşük olduğundan zaman tabanında hız hesaplama çözünürlüğü de düşük olmaktadır. Bu soruna çözüm olarak algoritmada sensör sinyalinin hem lojik-0 hem de lojik-1 olduğu kısımlarda hesaplama yapılarak çözünürlük artırılmaya çalışılmıştır.

Bunlara ek olarak hesaplanan mekanik hız verilerinin sensör verisinden dolayı gürültülü olduğu görülmüştür. Hesaplanan hızdaki osilasyonu önlemek için “moving average” filtre yapısı uygulanmıştır. Bu basit filtre yapısı ile sensör verisinden kaynaklı anlık tepe değerlerin etkisi azaltılmış, hesaplanan hız değeri düzgünleştirilmiş ve gürültü azaltılmıştır.

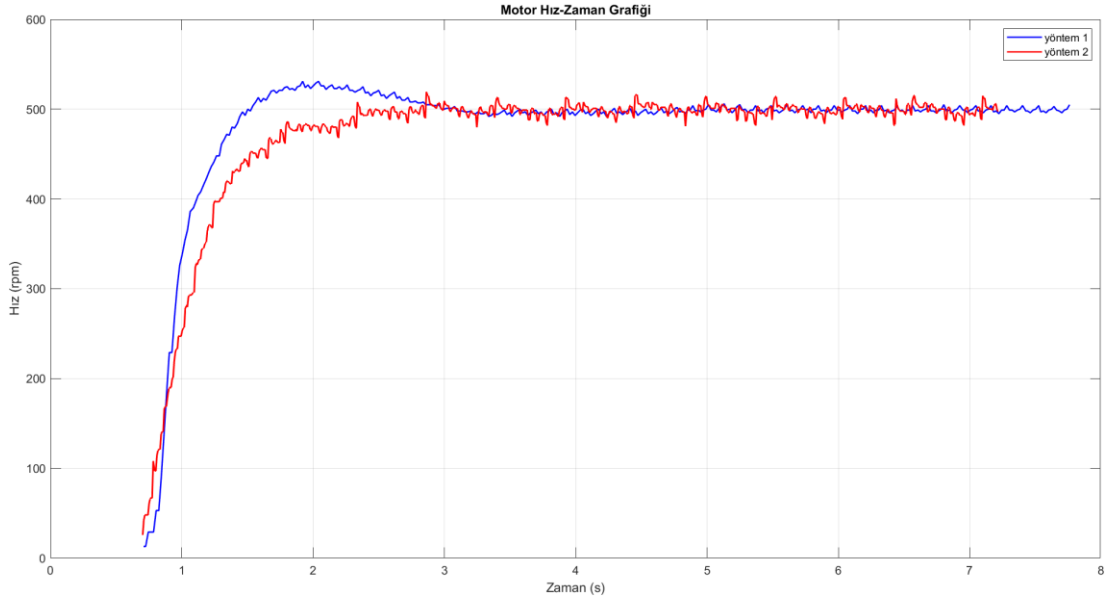
Filtre algoritmasında buffer boyutu 6 elemanlı tutulmuştur. Öncelikle, 6 ölçümlük bir filtreleme yapıldığı için, ilk 6 ölçümün ortalamasını alınır. Her yeni ölçüm alındığında, en eski ölçüm çıkarılır ve yeni ölçüm ortalama hesaplamasına dahil edilir. Böylece sürekli olarak güncellenen bir ortalama hız değeri elde edilir.

Bu yönteme ek olarak hız hesaplama işleminin çözünürlüğünü artırmak için motorun komütasyon sektör geçişleri kullanılmıştır. Komütasyon sektörünün değişmesi durumunda bir sayaç başlatılarak iki sektör değeri arasındaki sayaç değeri üzerinden hız hesaplaması gömülü sisteme uygulanmıştır. Bu yöntemle motorun bir mekanik dönüşünde toplam 24 örnekte hız değeri hesaplanır. Şekil 5.6’da sektör geçişleri ile hız hesaplama yöntemi kullanılarak elde edilen motor hızı verilmiştir.



Şekil 5.6 0-500 RPM Hız cevabı

Aşağıdaki şekilde de iki hız hesaplama yöntemi aynı grafikte gösterilmiştir. Burada ikinci yöntemin sistem çıkışında daha fazla osilasyona neden olduğu görülmektedir.



Şekil 5.7 0-500 RPM Hız cevabı karşılaştırılması

5.4 Hız Kontrolcünün Sisteme Uygulanması

PI hız kontrolcü K_p oransal kazanç ve K_i integral kazancından oluşmaktadır. Kontrolcünü s ve z düzleminde karşılığı denklem 5.1 ve 5.2’de verilmektedir.

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad 5.1$$

$$F_{PI}(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(k_p + k_i)z - k_p}{z - 1} \quad 5.2$$

Buradan fark denklemleri kullanılarak kontrolcü çıkışı 5.3-6 denklemlerinden elde edilmektedir.

$$(z - 1)U(z) = [(K_p + K_i)z + K_p]E(z) \quad 5.3$$

$$zU(z) - U(z) = (K_p + K_i)zE(z) + K_pE(z) \quad 5.4$$

$$U(z) - z^{-1}U(z) = (K_p + K_i)E(z) + z^{-1}K_pE(z) \quad 5.5$$

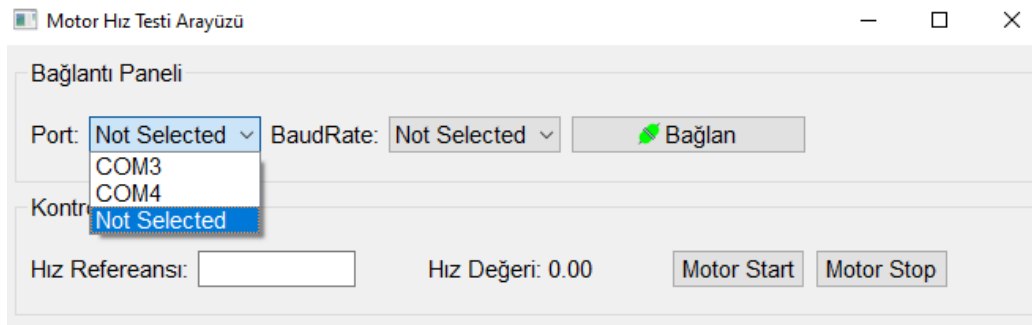
$$u(k) = u(k - 1) + (K_p + K_i)e(k) + K_p e(k - 1) \quad 5.6$$

Ayrık zamanlı PI kontrolcü gömülü sistemde uygulanırken integral sarması meydana gelmektedir. İntegral sarması, sistem çıkışındaki aşım değerinin artmasına neden olmaktadır. Bu sorun sisteme Clamping yöntemi uygulanarak çözülmüştür. Bu yöntem

ile kontrolcü çıkışı maksimum görev çevrim değerine ulaştığında integral teriminin toplaması durdurulur böylece integral sarması önlenir.

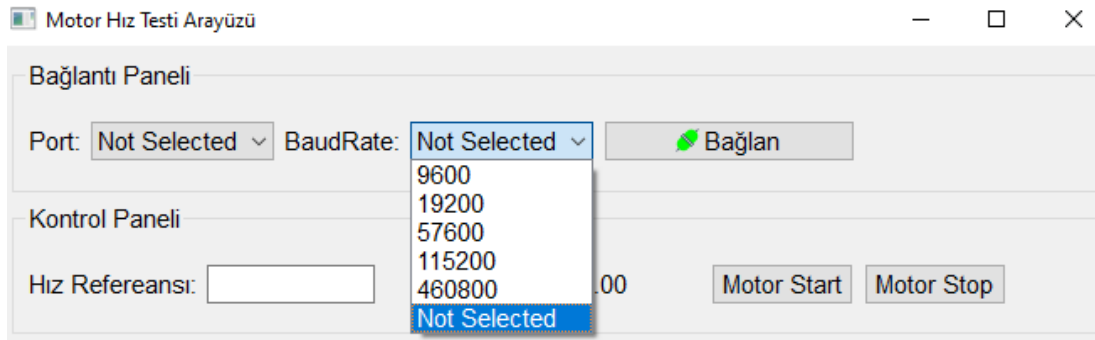
5.5 Arayüz Tasarımı

Qt Designer kullanılarak arayüz tasarımı yapılmış, UART ile gömülü sistem RX – TX haberleşme bağlantısı kurularak iki taraflı veri aktarımı gerçekleştirilmiştir. Öncelikle UART kablosu PC'ye takıldıktan sonra Şekil 5.8'deki gibi uygun port seçilmelidir.



Şekil 5.8 Bağlantı portunun seçilmesi

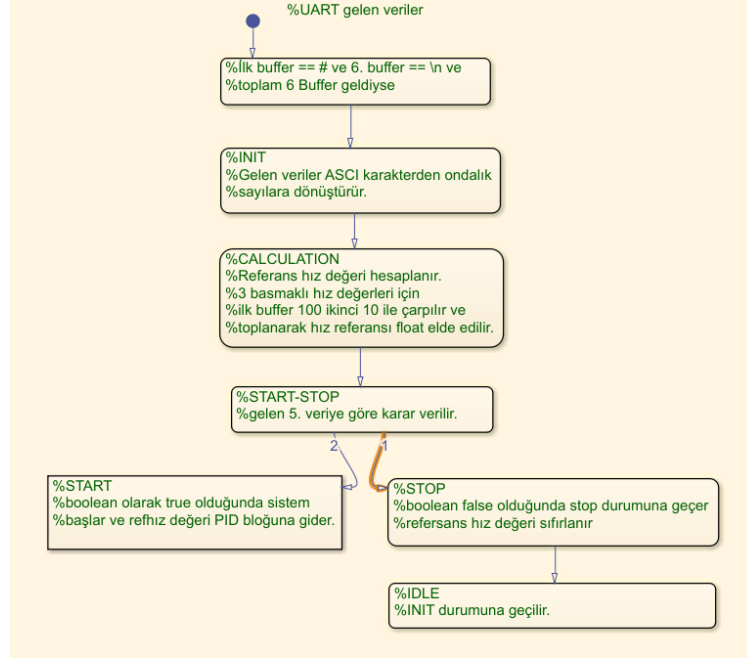
Sonrasında Şekil 5.9'da verildiği gibi verinin ne kadar hızda aktarıldığı seçildikten sonra bağlan denilmesi gereklidir. İstenilen hız referans değeri girildikten sonra “Motor Start” butonu ile haberleşme başlatılmaktadır. Gömülü sistem tarafına gönderilen veriler istenildiği gibi gelirse motor hareketi hız referansı ile başlarken motorun hız değeri anlık olarak rpm cinsinden arayüzde gösterilmektedir.



Şekil 5.9 Baud Rate Seçilmesi

Arayüzden gelen veriler “#” özel karakteri ile başlamakta, daha sonrasında her bir byte ile referans hız değeri gönderilmekte ve “\n” karakteriyle sonlanmaktadır. En son 6. byte olarak “\n” 6 byte verinin geldiği ve eksik verinin olmadığı için eklenmiştir.

İlk önce “#” özel karakterinin geldiği “\n” karakteriyle bittiği ve 6 byte veri gelip gelmediği kontrol edilmiştir. Daha sonra Şekil 5.10’da tasarlanan durum makinesi çalışmıştır.



Şekil 5.10 UART Durum Makinesi

“INIT” durumunda ASCII olarak gelen veri nedeniyle 48 çıkarılarak yeni veriler oluşturulup bunlar kullanılmıştır.

“CALCULATION” durumunda ise 3 haneli olarak tasarlanan gönderme sisteminde ilk byte 100 , ikinci byte 10 ve son byte 1 ile çarpılır ve referans hız değeri float sayıya çevrilerek kontrolcünün referans girişine uygulanır.

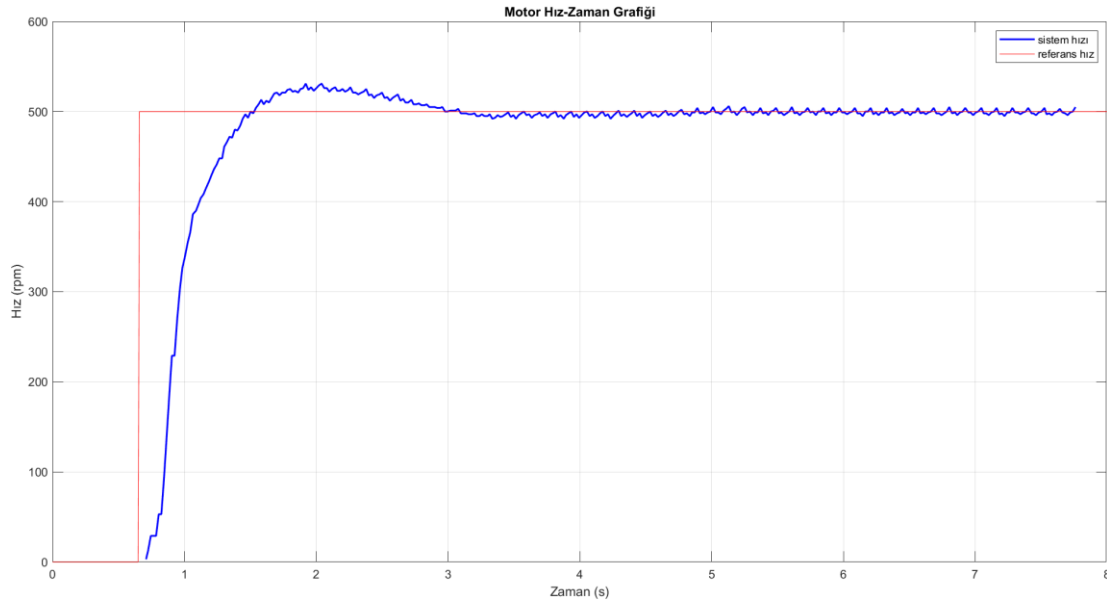
“START_STOP” durumunda 5. byte olarak gönderilen veriyle motorun start-stop durumları tanımlanmıştır. 0 gelirse stop, 1 gelirse start durumuna geçilir. Start durumunda verilen hız referansı ile sistem çalışmaya başlamaktadır. Ek olarak arayüz tarafında benzer bir algoritma kullanılmıştır.

Arayüzden gelen veriler “#” özel karakteri ile başlamakta, daha sonrasında her bir byte ile referans hız değeri gönderilmekte ve “\n” karakteriyle sonlanmaktadır. En son 6. byte olarak “\n” 6 byte verinin geldiği ve eksik verinin olmadığı teyit için eklenmiştir.

5.6 Gömülü Sistem Kontrolcü Sonuçları

Bu bölümde SMSM'in matematiksel modeli kullanılarak tasarlanan PI kontrolcünün gömülü sistem üzerinde uygulanması sonucu elde edilen sistem ıktıları verilmiştir. Aşağıda verilen grafiklerde motor üzerindeki kontrolcü denemeleri 60 Volt gerilim ve maksimum 2 Amper sınır koşullarında yapılmıştır. Aşağıdaki test verileri motora herhangi bir dış mekanik yük verilmediğı durumlarda içindir.

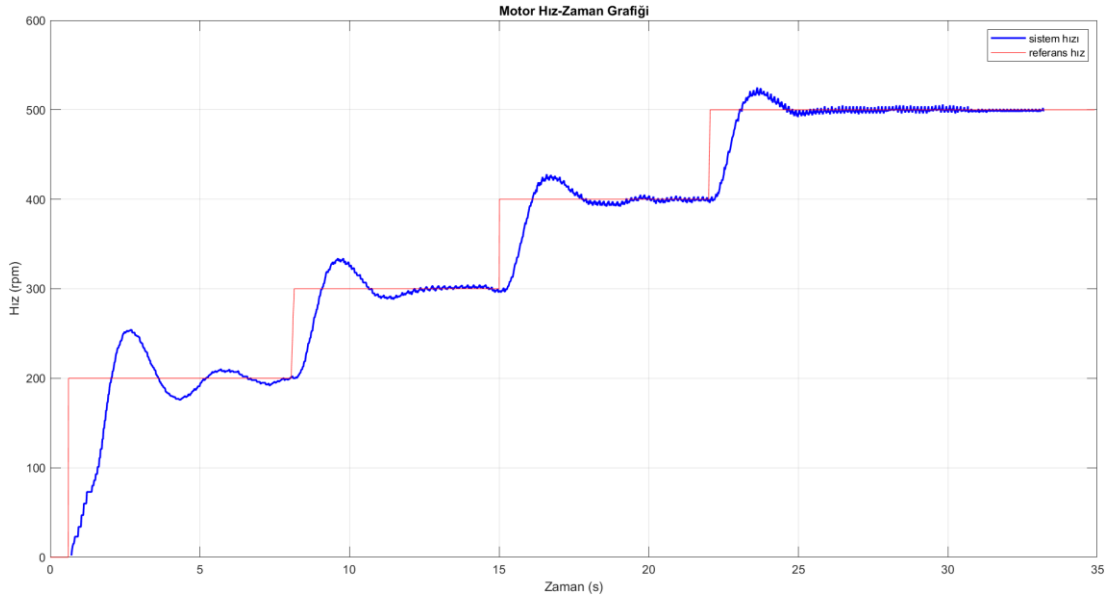
Öncelikle motor transfer fonksiyonu kullanılarak elde edilen kontrolcü parametreleri gerçek sistem üzerinde denenmiş, geçici ve kalıcı bölgede performansına bakılmıştır. Teorik olarak elde edilen kontrolcü parametrelerinin uygulanmış ve sisteme uygun kazanç değeri kullanılarak sisteme 0-500 RPM basamak işareti uygulanmıştır. Elde edilen sistem çıkışı şekil 5.11'de verilmiştir.



şekil 5.11 0-500 RPM Sistem Cevabı

Sistem cevabına bakıldığında 2.23 saniye oturma zamanına ve %6 aşım değerine sahip olduğu görülmektedir. Sistem integral parametresi sayesinde kalıcı durumda referans hıza oturmuştur. Gerçek sistem kontrolcü performansı teorik hesaplarla benzer çıkmıştır.

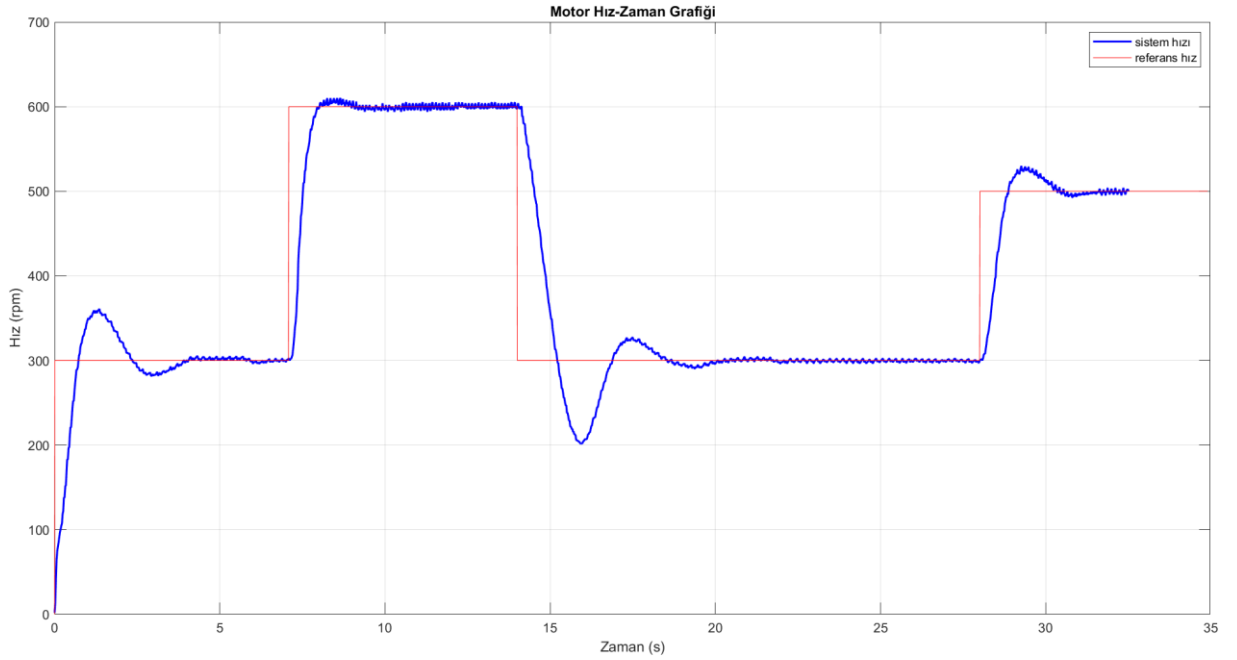
Sonrasında sistemin farklı referans hızlar altında performansını görmek için sırayla 200-300-400 ve 500 RPM merdiven referans işareti uygulanmıştır. Elde edilen sistem çıkışı şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.12 Merdiven Referans Sistem Cevabı

Sistem cevabına bakıldığında başlangıç referans değerinde aşımın %25 seviyesinde olduğu ve devam eden referans seviyelerinde giderek azaldığı görülmüştür. Bu durumun nedeni referans hız artırıldığında motorun 60 Volt seviyesindeki hız limitine yaklaşması olarak tahmin edilmiştir.

Diğer bir denemede ise başlangıçta artan ve sonrasında azalan türde bir referans işareti sisteme uygulandığında elde edilen sonuç Şekil 5.13’de verilmiştir;



Şekil 5.13 Değişken Referans Sistem Cevabı

Şekilde görüldüğü gibi motor öncelikle 300 RPM sonrasında 600 RPM seviyesine çıkartılmış, sonrasında 300 RPM hıza düşürülmüştür. Buradaki 300 RPM'lik referans değişimi sistemin ters aşımını artırmıştır.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada fırçasız bir motor türü olan SMSM'in elektrikli scooter gibi araçlarda kullanılan altı adım sürüş algoritmasıyla Hall sensörler kullanılarak gerçekleştirilmesi ve uygun kontrolcü tasarımı yapılarak hız kontrolcü uygulanması amaçlanmıştır. Sistem modelinin çeşitli varsayımlar ile elde edilmesi nedeniyle sistemin gürbüz şekilde kontrol edilmesi pek mümkün olmamıştır ama tork ihtiyacının belirli olduğu durumlar için yeterli performans göstermektedir. Ek olarak ürün haline getirilirken akım kontrolü ihtiyacı da olacaktır. Yapılan geliştirmeler sırasında kesintisiz güç kaynağı kullanıldığı için sınırlamalar donanım haricinde uygulanmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] **Adnanes, A. K.**, (1991), "Torque Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE, in Proc. PESC, 695-701.
- [2] **Akin, Bilal. ve Bhardwaj, M.** (t.y.). Sensorless Field Oriented Control of 3- Phase Permanent Magnet Synchronous Motors Using 2833x, *Texas Instruments, Inc.*
- [3] **S. Sakunthala, R. Kiranmayi and P. N. Mandadi**, "A Review on Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Using Different Control Techniques," 2018 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS), Chennai, 2018, pp. 97-102, doi: 10.1109/ICPECTS.2018.8521574.
- [4] **F. Korkmaz, İ. Topaloğlu, M. F. Çakir and R. Gürbüz**, "Comparative performance evaluation of FOC and DTC controlled PMSM drives," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, 2013, pp. 705-708, doi: 10.1109/PowerEng.2013.6635696.
- [5] **Zambada, J. ve Deb, D.** (2010). Sensorless Field Oriented Control of a PMSM, Microchip Technology Inc.
- [6] **Microchip Technology** (2018), Sensored (Encoder-Based) Field Oriented Control of a Three Phase Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Microchip Technology Inc.
- [7] **Carolus Andrews, Manny Soltero, Mekre Mesganaw** (2019) Brushless DC Motor Commutation Using Hall-Effect Sensors, Texas Instruments.
- [8] **Y. L. Karnavas, A. S. Topalidis, and M. Drakaki**, "Development and Implementation of a low cost μ C-based brushless DC motor sensorless controller: a practical analysis of hardware and software aspects," Electronics, vol. 8, no. 1, p.1456, Nov. 2019, doi:10.3390/electronics81
- [9] **Johansson, M.** (2017). Evaluation of sensor solutions & motor speed control methods for bldcm/pmsm in aerospace applications.
- [10] **Jian, Z., & Yangwei, Y.** (2014). Brushless DC Motor Fundamental Application Node. *MPS Module*.
- [11] *Hall effect sensing and application*. URL: <http://sensing.honeywell.com/honeywell-sensing-sensors-magnetoresistive-hall-effect-applications-005715-2-en.pdf>
- [12] URL: <https://media.melexis.com/-/media/files/documents/datasheets/us1881-datasheet-melexis.pdf>
- [13] **L.N. Elevich**, 3-Phase BLDC Motor Control with Hall Sensors Using 56800/E Digital Signal Controllers ,Freescale Semiconductor Application Note, AN1916, Rev. 2.0, 11/2005, (2005).

- [14] (2019) . KV4x Data Sheet, **Technical Data**, NXP Semiconductor, USA
- [15] *Mitsubishi Electric SLIMDIP-L*, URL:
https://www.mitsubishielectric.com/semiconductors/content/product/powermodule/dipipm/slimdip/slimdip-1_e.pdf
- [16] **Lee Seok-Beom**, “Closed-loop estimation of permanent magnet synchronous motor parameters by PI controller gain tuning”, IEEE Trans Energy Convers 2006; 21(4) :863–70.

EKLER

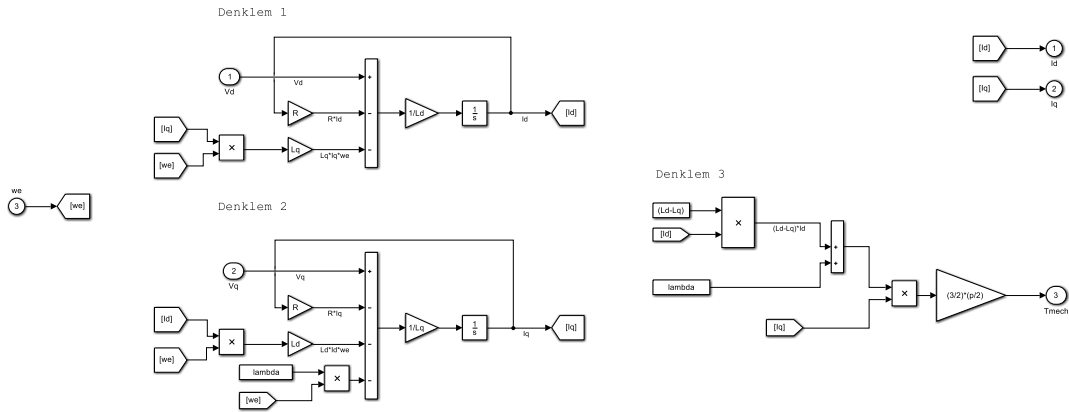
EK A.1: PMSM Elektriksel Modeli-Simulink

EK A.2: PMSM Mekanik Modeli-Simulink

EK A.3: Gömülü Sistem Hall Sensör Hız Hesaplama ve Filtre

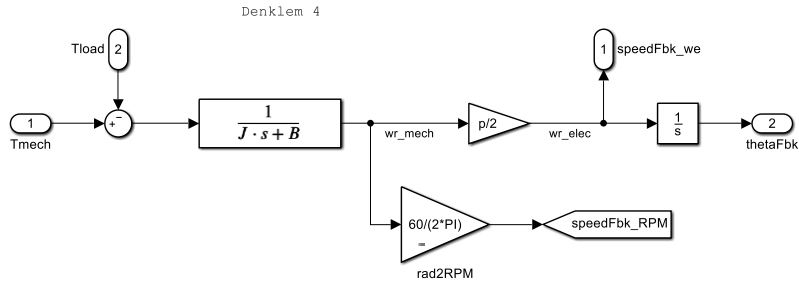
EK A.4: Gömülü Sistem Ayırık Zaman PID Kontrolcü Fonksiyonu

EK A.1



Şekil A.1 : Motor Elektriksel Modeli-Simulink

EK A.2



Şekil A.2 : Motor Mekanik Modeli-Simulink

EK A.3

```
if (HallA_Status_fl == 1){ // HallA high sinyal rpm hesaplama

    HallA_high_cnt++;

    if (HallA_low_cnt >= 10){
        //clock interrupt freq: 10000 Hz
        HallAFreq = (10000)/(HallA_low_cnt);
        HallA_rpm = HallAFreq * 60; //frequency to RPM transform
        HallA_mech_rpm = HallA_rpm / 8;
        HallA_low_cnt = 0;
        Hall_speed_calc_cnt++;
    }
    else{
        HallA_low_cnt = 0;
    }
}
else{ // HallA low sinyal rpm hesaplama

    HallA_low_cnt++;

    if (HallA_high_cnt >= 10)
        // clock interrupt freq: 10000 Hz
        HallAFreq = (10000) / (HallA_high_cnt);
        HallA_rpm = HallAFreq * 60; // frequency to RPM transform
        HallA_mech_rpm = HallA_rpm / 8;
        HallA_high_cnt = 0;
        Hall_speed_calc_cnt++;
    }
    else{
        HallA_high_cnt = 0;
    }
}

//Hız Moving Average Filtre Yapısı
if(Hall_speed_calc_cnt != Hall_speed_calc_cnt_old){

    // en eski değer toplamdan çıkartıldı
    filter_sum -= filter_buffer[index];
    // giriş değeri buffer'ın ilgili indexine atandı
    filter_buffer[index] = HallA_mech_rpm;
    // giriş değeri diğer değerlerle toplandı
    filter_sum += filter_buffer[index];
    // index güncellendi
    index = (index + 1) % buffer_size;
    // çıkış değeri ortalama alınarak döndürüldü
    filter_output = filter_sum / buffer_size;
    HallA_mech_rpm = filter_output;

    Hall_speed_calc_cnt_old = Hall_speed_calc_cnt;
}
```

EK A.4

```
float PID_Output_Calculation(){  
  
if (pid_calculator_count >= pid_time)  
{  
    PID_struct.MeasuredSpeed_rpm = Hall_mech_rpm;  
    //Sensörden okunan mekanik hız değeri(rpm)  
  
    PID_struct.error = PID_struct.DesiredSpeed_rpm -  
PID_struct.MeasuredSpeed_rpm;  
    PID_struct.integral = PID_struct.integralPrev + (pid_time *  
(PID_struct.error + PID_struct.lastError) / 2);  
    PID_struct.derivative = (PID_struct.error - PID_struct.lastError) /  
pid_time;  
    PID_struct.output = (PID_struct.error * PID_struct.values.kp) +  
(PID_struct.derivative * PID_struct.values.kd) + (PID_struct.integral *  
PID_struct.values.ki);  
  
    if (PID_struct.output > duty_cycle_max)  
    {  
        PID_struct.output = duty_cycle_max;  
        //integral hesabı üzerinde clamping anti-windup uygulaması  
        PID_struct.integral = PID_struct.integralPrev;  
    }  
    else if (PID_struct.output < 0)  
    {  
        PID_struct.output = 0;  
        PID_struct.integral = PID_struct.integralPrev;  
    }  
    PID_struct.lastError = PID_struct.error;  
    PID_struct.integralPrev = PID_struct.integral;  
    pid_calculator_count = 0;  
    return PID_struct.output;  
}  
else  
{  
    return PID_struct.output;  
}  
}
```


ÖZGEÇMİŞ-1



Ad-Soyad : Bekir Can Karatopak
Doğum Tarihi ve Yeri : Adana / 05.06.2000
E-posta : karatopak.bekir@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 06.2022-03.2023 yılları arasında Arçelik A.Ş.'de Proje Asistanı olarak çalıştım.
- 04.2023 tarihinden itibaren Altınay Savunma şirketinde Aday Mühendis olarak çalışmaktayım.

ÖZGEÇMİŞ-2



Ad-Soyad : Nail Memiş
Doğum Tarihi ve Yeri : Giresun / 10.04.2000
E-posta : memisnail@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2023, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 01.2023-Halen TUSAŞ Motor Sanayi A.Ş.'de Aday Mühendis olarak çalışmakta.
- 06.2022-07-2022 TAAC Havacılık Teknolojileri'nde Gömülü Yazılım Geliştirme üzerine yaz stajı yaptı.
- 10.2020-06.2022 İTÜ RAKE'de Elektronik Ekip Üyesi olarak çalıştı.
- 05.2019-04.2022 İTÜ Robot Olimpiyatları Teknik Ekip Koordinatörü olarak çalıştı.
- 06.2021-08.2021 Baykar Savunma'da servo motorlar üzerine yaz stajı yaptı.



**IEEE Etik Kuralları
IEEE Code of Ethics**

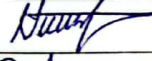

IEEE üyeleri olarak bizler bütün dünya üzerinde teknolojilerimizin hayat standartlarını etkilemesindeki önemin farkındayız. Mesleğimize karşı şahsi sorumluluğumuzu kabul ederek, hizmet ettiğimiz toplumlara ve üyelerine en yüksek etik ve mesleki davranışta bulunmayı söz verdiğimizizi ve aşağıdaki etik kuralları kabul ettiğimizi ifade ederiz.

1. Kamu güvenliği, sağlığı ve refahı ile uyumlu kararlar vermenin sorumluluğunu kabul etmek ve kamu veya çevreyi tehdit edebilecek faktörleri derhal açıklamak;
2. Mümkün olabilecek çıkar çatışması, ister gerçekten var olması isterse sadece algı olması, durumlarından kaçınmak. Çıkar çatışması olması durumunda, etkilenen taraflara durumu bildirmek;
3. Mevcut verilere dayalı tahminlerde ve fikir beyan etmelerde gerçekçi ve dürüst olmak;
4. Her türlü rüşveti reddetmek;
5. Mütenasip uygulamalarını ve muhtemel sonuçlarını gözeterek teknoloji anlayışını geliştirmek;
6. Teknik yeterliliklerimizi sürdürmek ve geliştirmek, yeterli eğitim veya tecrübe olması veya işin zorluk sınırları ifade edilmesi durumunda ancak başkaları için teknolojik sorumlulukları üstlenmek;
7. Teknik bir çalışma hakkında yansız bir eleştiri için uğraşmak, eleştiriye kabul etmek ve eleştiriye yapmak; hatları kabul etmek ve düzeltmek; diğer katkı sunanların emeklerini ifade etmek;
8. Bütün kişilere adilane davranmak; ırk, din, cinsiyet, yaş, milliyet, cinsi tercih, cinsiyet kimliği, veya cinsiyet ifadesi üzerinden ayrımcılık yapma durumuna girişmemek;
9. Yanlış veya kötü amaçlı eylemler sonucu kimsenin yaralanması, mülklerinin zarar görmesi, itibarlarının veya istihdamlarının zedelenmesi durumlarının oluşmasından kaçınmak;
10. Meslektaşlara ve yardımcı personele mesleki gelişimlerinde yardımcı olmak ve onları desteklemek.

**IEEE Yönetim Kurulu tarafından Ağustos 1990'da
onaylanmıştır.**

ETİK KURALLAR UYUM BEYANI

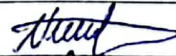

Aşağıda belirtilen mühendisliğin temel ilkelerini biliyor ve kabul ediyorum.

Nail	MEMİŞ	07.06.2023	
Bekir Can	KARATOPAK	07.06.2023	

Mühendisler; mühendislik mesleğinin doğruluğunu, onurunu ve değerini insanlığın refahının artması için kendi bilgi ve becerilerini kullanarak, dürüst ve tarafsız olarak halka, kendi işverenlerine ve müşterilerine sadakatle hizmet ederek, mühendislik mesleğinin yeteneğini ve prestijini artırmaya çabalayarak, kendi disiplinlerinin mesleki ve teknik birliğini destekleyerek yüceltir ve geliştirirler.

- Mühendisler, mesleki görevlerini yerine getirirken toplumun güvenliğini, sağlığını ve rahatını en önde tutacaktır.
- Mühendisler, sadece yetkili oldukları alanlarda hizmet vereceklerdir.
- Mühendisler, sadece objektif ve gerçekçi raporlar düzenleyeceklerdir.
- Mühendisler, mesleki konularda işveren veya müşteri için güvenilir vekil veya yardımcı olarak davranacaklar ve çıkar çatışmalarından kaçınacaklardır.
- Mühendisler mesleki itibarlarını hizmetlerinin gereğine göre tesis edecekler ve diğer meslektaşlarıyla haksız rekabete girmeyeceklerdir.
- Mühendisler, meslek doğruluğunu, onurunu ve değerini yüceltmek ve geliştirmek için çalışacaklardır.
- Mühendisler, mesleki gelişmelerini kendi kariyerleriyle devam ettirecekler ve kendi kontrolleri altındaki mühendislerin mesleki gelişmeleri için olanaklar sağlayacaklardır.

Bu raporda herhangi bir kaynaktan alıntı yapılmış kısımlar %15'den az, ve paragraf halinde birebir alıntı sayısının ise sıfır olduğunu beyan ediyorum.

Nail	MEMİŞ	07.06.2023	
Bekir Can	KARATOPAK	07.06.2023	

STANDARTLAR VE KISITLAR : Raporda aşağıda istenenler doldurularak eklenecektir.

Bitirme Projesinin hazırlanmasında Standartlar ve Kısıtlarla ilgili olarak, aşağıdaki soruları cevaplayınız.

1. Projenizin tasarım boyutu nedir? Açıklayınız.

Var olan motor sürüşün lisans eğitimi boyunca öğrenilen teorik bilgilerin uygulama olarak yapılması olarak özetleyebiliriz.

2. Projenizde çözüm ürettiğiniz mühendislik problemini ve çözümünüzü kısaca açıklayınız?

Motor yapısı basitleştikçe, kontrol ve yazılım konusu daha önem kazanmaktadır. AC motorun basit bir sürüş yöntemiyle güç elektroniği elemanları kullanıp kontrolcü uygulanarak sürülmesidir.

3. Lisans eğitiminiz süresince almış olduğunuz derslerde edindiğiniz hangi bilgi ve becerileri kullandınız?

En temelde Servo motorlar dersinde aldığımız SMSM içeriği motor yapısı üzerinde bilgi birikimimizi oluşturdu. Güç elektroniği dersinde anahtarlama elemanları ve çevirici motor sürücü devresini daha kolay anlamamızı sağladı. Mikrokontrolör dersi işlemci sistem kütüphanelerini kullanma konusunda, bilgisayar kontrollü sistemler ve kontrol sistem tasarımı dersleri de kontrolör tasarlamamıza ve tasarlanan kontrolörün uygun örnekleme zamanı ile sisteme uygulanmamızda faydalı oldu.

4. Projenizi gerçekleştirirken kullandığınız modern araçlar/yazılımlar/programlar vb. nelerdir? Hangi amaçlarla kullandığınızı kısaca açıklayınız.

MATLAB-Simulink: Motor sürüşünün simulasyon ile kontrolcü tasarım yapılmasını daha iyi anlaşılmasını ve gömülü sisteme uygulanmasını kolaylaştırdı.

NXP-MCU: 168Mhz Cortex-M4 işlemci ile motor sürüşü için gerekli kriterlerimiz karşılamıştır.

MCUXpresso: NXP işlemcinin ayarlamalarının yapılması ve kod yazılması için kullanılmıştır.

Jlink: NXP işlemcinin debug yapılabilmesi için kullanılmıştır.

Osiloskop Cihazı: Ters EMK kuvvetini, akım ve gerilimleri anlık takip etmek için kullanılmıştır.

Multimetre: Motor ölçümleri yapılmasında kullanılmıştır.

5. Ders dışında çeşitli disiplinleri içeren sertifikanız var mı? (Örneğin CUDA, Udemy, Coursera gibi online platformlarda bilgi sahibi olmak)

Hayır.

6. Kullandığınız veya dikkate aldığınız mühendislik standartları/normları nelerdir?

7. Kullandığınız veya dikkate aldığınız gerçekçi kısıtlar nelerdir?

a)Ekonomi

Maliyeti düşük hızlı ve kolay çözümler sunmak. Fırçalı motora göre daha düşük maliyet ve sensörsüz sürüş opsiyonu.

b) Çevre sorunları

Enerji verimliliğini artırır.

c) Sürdürülebilirlik

Yeni mıknatıs ve anahtarlama elemanları ile gelişen verimlilik

d) Üretilirlik

Basit sürücü devresi ve komütasyon için fırça ihtiyacı olmaması

e) Güvenlik

Hem motor sürücüsünde donanımsal hem de yazılımsal güvenlik algoritmaları

Proje Ekibi (Yürütücüsü/Lideri): Nail MEMİŞ-Bekir Can KARATOPAK

Proje Konusu: PMSM'in Kontrolü

Bu proje Assoc. Prof. Dr. Ahmet Onat tarafından onaylanmıştır.

Not: Gerek görülmesi halinde bu sayfa istenilen maddeler için genişletilebilir.

Ahmet Onat
05 Haziran 2023