



T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜNDE KALMAN FİLTRESİ UYGULAMASI

Anıl BULUT

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Tarık Veli MUMCU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

İSTANBUL-2019

Bu çalışma 05.11.2019 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı
Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ



Dr.Öğr.Üyesi Tarık Veli MUMCU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Doç. Dr. Aysel ERSOY YILMAZ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi



Dr.Öğr.Üyesi Selin ÖZÇİRA ÖZKILIÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Elektrik-Elektronik Fakültesi



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa’nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmamda, desteğe ihtiyacım olduğunda yanımda duran başta danışman hocam Sayın Dr.Tarık Veli MUMCU'ya ve bu noktaya gelmem için, fedakarlıktan kaçınmayan ailem ve biricik eşime teşekkür ve sevgilerimi sunarım.

Mayıs 2019

Anıl BULUT

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	iv
ŞEKİL LİSTESİ	vii
ŞEKİL LİSTESİ	viii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ	x
ÖZET	xiii
SUMMARY	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Özeti.....	2
2. GENEL TANIMLAR	4
2.1 Asenkron Motor	4
2.1.1 Asenkron Motor Eşdeğer Devresi.....	6
2.1.2 Asenkron Motor Matematiksel Modellemesi	8
2.1.3 Üç Fazlı Asenkron Motorun Sabit Koordinat Sisteminde Tanımlanması	10
2.2 Elektrik Motor Sürücüleri ve Bölümleri	14
3. ASENKRON MOTOR KONTROL YÖNTEMLERİ.....	20
3.1 Değişken Hız Kontrol Yöntemleri ve Karşılaştırılması	20
3.2 Sayısal Kontrol Yöntemi	22
3.3 Vektör Kontrol Yöntemi	24
3.3.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol.....	24
3.3.2 Doğrudan Moment Kontrol Yöntemi	26

4. DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ.....	27
4.1 Akı ve Moment Kontrolörü	28
4.2 Anahtarlama Tablosu	30
4.3 Stator Akı ve Elektromanyetik Moment Değerlendiricileri	34
5. KALMAN FİLTRESİNİN UYGULANMASI	36
5.1 Kalman Filtresi ve Matematiksel İfadeleri	38
5.2 Genişletilmiş Kalman Filtresi	38
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI VE SONUÇLARI	40
7. SONUÇ VE TARTIŞMA	44
KAYNAKLAR.....	47
GEÇMİŞ.....	51

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1: Asenkron Motor Moment- Hız Karakteristiği.....	5
Şekil 2.2: Asenkron Motor Çalışma Bölgeleri (Ştumberger,2013).....	6
Şekil 2.3: Asenkron Motor Eşdeğer Devresi.....	7
Şekil 2.4: Asenkron Motor Rotor ve Stator Verilerinin Vektörel Gösterimi.....	8
Şekil 2.5: ABC Ekseninde Tanımlanmış Değerlerin $\alpha\beta$ Ekseninde İfade Edilmesi.....	11
Şekil 2.6: Elektrik Sürücüsü Tetikleme ve Güç Kartı.....	15
Şekil 2.7: Elektrik Sürücüsü Genel Görünüm.....	16
Şekil 2.8: Elektrik Sürücüsünün Simulink Gösterimi.....	17
Şekil 2.9: AC Gerilim Doğrultma Devresi Simulink Gösterimi.....	17
Şekil 2.10 : AC Gerilimin Doğrultulması Ekran Görüntüsü.....	18
Şekil 2.11 : SPVM metodu kullanılarak DC'den AC'ye Çevrilmesi.....	18
Şekil 2.12 : SPVM metodu kullanılarak DC/AC Dönüşümünde Tetikleme ve Durumunu Gösteren Ekran Görüntüsü.....	19
Şekil 2.13 : SPVM metodu kullanılarak DC/AC Dönüşümünde Fazlara Ait Gerilimin Ekran Görüntüsü.....	19
Şekil 3.1: Örnek SPWM Yöntemi Kullanılan V/f İle Kontrol Edilen 3 Fazlı Aseknron Motor Simulink Devresi.....	23
Şekil 3.2: Alan Yönlendirmeli Kontrol Genel Gösterimi.....	25
Şekil 3.3 Doğrudan Moment Kontrolü Genel Gösterimi.....	26
Şekil 4.1: Doğrudan Moment Motor Kontrolü Simulink Gösterimi.....	28
Şekil 4.2: Akı Kontrolörü Simulink Gösterimi.....	29

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 4.3: Moment Kontrolörü Simulink Gösterimi.....	30
Şekil 4.4: Anahtarlama Tablosu Gösterimi.....	30
Şekil 4.5: Bölge 1 Bölümünde Bulunan Stator Akı Vektörü ve Kontrol Vektörleri Gösterimi.....	31
Şekil 4.6: V_0 Vektörü Kullanımında Anahtarlama Durumu.....	32
Şekil 4.7: V_1 Vektörü Kullanımında Anahtarlama Durumu.....	32
Şekil 4.8: Uygun Vektör Seçim Bloğu Simulink Gösterimi.....	33
Şekil 4.9: Faz Geriliminin $\alpha\beta$ Eksenine Çevrilmesi.....	34
Şekil 4.10: Faz Akımlarının $\alpha\beta$ Eksenine Çevrilmesi.....	35
Şekil 4.11: Akı, Moment, Açık Hesaplarının Simulink Gösterimi.....	35
Şekil 5.1: Kalman Filtresi Çalışma Mantığı.....	37
Şekil 5.2: Kalman Filtresi Hesaplama Algoritması.....	37
Şekil 5.3: Kalman Filtresi Matematiksel Algoritması.....	38
Şekil 5.4: DMK ve Kalman Kullanılarak Asenkron Motor Kontrolünün Simulinkte Gösterilmesi.....	39
Şekil 6.1: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans ve Gerçekleşmesi, Hız Referans ve Gerçekleşmesi(10kHz).....	40
Şekil 6.2: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları(10 kHz).....	40
Şekil 6.3: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (10 kHz).....	40
Şekil 6.4: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans Gerçekleşmesi(8 kHz).....	41
Şekil 6.5: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları(8 kHz).....	41
Şekil 6.6: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (8 kHz).....	41
Şekil 6.7: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans ve Gerçekleşmesi (6 kHz).....	42
Şekil 6.8: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları (6 kHz).....	42
Şekil 6.9: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (6 kHz).....	42
Şekil 6.10: DMK Kontrol Yöntemi ve Kalman Çıktısı(Yüksüz).....	43
Şekil 6.11: Sensörsüz Asenkron Motor Kontrolü.....	43

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1: Motor Kontrol Yöntemlerinin Birbirleriyle Karşılaştırılması.....	21
Tablo 3.2: Motor Kontrol Yöntemleri ve Kontrol Parametreleri.....	22
Tablo 4.1: Gerilim Vekörlerine Ait Anahtarlama Tablosu.....	30
Tablo 4.2: Uygulanan Gerilim Vektörlerine Göre Anahtarlama Durumları.....	32

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
A	: Sistem Matrisi
B	: Giriş Matrisi
f	: Frekans
I_0	: Boşta Çalışırken Çekilen Akım
I_c	: Stator Akımı
$I_{\alpha\beta}$: Stator Akımının $\alpha\beta$ Eksenindeki Bileşeni
I_{as}	: Stator Akımının a Eksenindeki Bileşeni
I_{bs}	: Stator Akımının b Eksenindeki Bileşeni
I_{cs}	: Stator Akımının c Eksenindeki Bileşeni
I_{ar}	: Rotor Akımının a Eksenindeki Bileşeni
I_{br}	: Rotor Akımının b Eksenindeki Bileşeni
I_{cr}	: Rotor Akımının c Eksenindeki Bileşeni
I_{sc}	: Kısa Devre Çalışma Testinde Çekilen Akım
I_m	: Mıknatıslanma Akımı
K_k	: Kalman Kazancı
L_r	: Rotor Kaçak İndüktansı
L_s	: Stator Kaçak İndüktansı
L_m	: Mıknatıslanma İndüktansı
M_s	: Stator Karşılıklı İndüktansı
M_r	: Rotor Karşılıklı İndüktansı
M_{sr}	: Stator ve Rotor Arasındaki Karşılıklı İndüktans
N_s	: Stator Döner Alan Hızı (rpm)
N_r	: Rotor Döner Alan Hızı (rpm)
p	: Türev Gösterimi
P_k	: Motor Kutup Çifti
P_k	: Tahmin Edilen Durum Hata Kovaryans Matrisi
P_0	: Boşta Çalışma Testinde Çekilen Güç
P_{sc}	: Kısa Devre Çalışma Testinde Çekilen Güç

\mathbf{R}	:Çıkış Gürültüsü Kovaryans Matrisi
\mathbf{R}_c	: Stator Direnci
\mathbf{R}_{eq}	: Toplam Eşdeğer Direnç
s	: Kayma
T_e	: Elektromanyetik Moment
V_1	: Stator Besleme Gerilimi
V_{sc}	: Kısa Devre Gerilimi
$V_{\alpha\beta}$: Stator Geriliminin $\alpha\beta$ Eksenindeki Bileşeni
V_{as}	: Stator Geriliminin a Eksenindeki Bileşeni
V_{bs}	: Stator Geriliminin b Eksenindeki Bileşeni
V_{cs}	: Stator Geriliminin c Eksenindeki Bileşeni
V_{ar}	: Rotor Geriliminin a Eksenindeki Bileşeni
V_{br}	: Rotor Geriliminin b Eksenindeki Bileşeni
V_{cr}	: Rotor Geriliminin c Eksenindeki Bileşeni
V_k	: Ölçüm Gürültüsü
y_k	: Ölçüm Değeri
Z_{eq}	: Toplam Empedans
X_{eq}	: Eşdeğer Toplam Reaktans
x_k^-	: Tahmini öngörülen Değer
x_k	: Tahmini Optimal Değer
φ_s	: Stator Akısı
φ_r	: Rotor Akısı
X_m	: Mıknatıslanma Akımı
Ψ_{as}	: Stator Mıknatıslanma Akısını a Eksenindeki Bileşeni
Ψ_{bs}	: Stator Mıknatıslanma Akısını b Eksenindeki Bileşeni
Ψ_{cs}	: Stator Mıknatıslanma Akısını c Eksenindeki Bileşeni
Ψ_{ar}	: Rotor Mıknatıslanma Akısını a Eksenindeki Bileşeni
Ψ_{br}	: Rotor Mıknatıslanma Akısını b Eksenindeki Bileşeni
Ψ_{cr}	: Rotor Mıknatıslanma Akısını c Eksenindeki Bileşeni
w_k	: Proses Gürültüsü
Q	:Sistem Gürültüsü Kovaryans Matrisi

Kısaltmalar**Açıklama**

DMK : Doğrudan Moment Kontrolü

AYK : Alan Yönlendirmeli Kontrol

PWM : Pulse Width Modulation



ÖZET

DOĞRUDAN MOMENT KONTROLÜNDE KALMAN FİLTRESİ UYGULAMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Anıl BULUT

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Tarık Veli MUMCU

Bu tezde, asenkron motor ve motor kontrol yöntemleri ele alınmıştır. Doğrudan moment kontrolü üzerinde ayrıntılı olarak çalışılmıştır. Bu kontrol yönteminde kullanılan, anahtarlama tablosu, stator akı, elektromanyetik moment değerlendiricileri, akı ve moment kontrolörlerinin çalışma ilkeleri aktarılmıştır. Genişletilmiş kalman filtresi ve matematiksel ifadeleri tanımlanıp, sensör kullanılmadan asenkron motorun tahmini hızı hesaplanmıştır. Asenkron motor, doğrudan moment yöntemi ile kontrol edilmiş ve genişletilmiş kalman filtresi kullanımıyla elde edilen tahmini motor hızı, geri besleme olarak alınmıştır. Böylece motorun, sağlıklı ölçüm alınamayan noktalarda doğru çalışması sağlanmıştır. Simulink kullanılarak, farklı anahtarlama frekanslarında motor akımları, referans hız değerleri, gerçekleşen hız değerleri, toplam harmonik bozulmaya ait çıktılar alınıp, sonuç bölümünde değerlendirilmiştir.

Ekim 2019, 65 sayfa.

Anahtar kelimeler: Doğrudan Moment Kontrol, Genişletilmiş Kalman Filtresi, Asenkron Motor

KALMAN FILTER APPLICATION FOR DIRECT TORQUE CONTROL

SUMMARY

M.Sc. THESIS

Anil BULUT

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Tarık Veli MUMCU

In this thesis, asynchronous motor and motor control methods were discussed. Direct torque control was examined in detail. Used in this method of control, switching table, stator flux, electromagnetic torque estimators, working principles of torque and flux controllers were mentioned. By defining the extended kalman filter and its mathematical expressions, estimated speed of the asynchronous motor was calculated. Asynchronous motor were controlled through the method of direct moment and the estimated motor speed which was obtained through the use of extended kalman filter was taken as feedback. Thus, the proper work of the motor was ensured where healthy measurements can not be taken. Through the use of Simulink, motor currents on different switching frequencies, reference speed values, realized speed values and outputs of total harmonic distortion were evaluated in the conclusion section.

October 2019, 65 pages.

Keywords: Direct Torque Control, Extended Kalman Filter, Asynchronous Motor

1.GİRİŞ

Motorlar, endüstriyel tesislerin ve üretimin en temel yapı taşlarından biridir. İşletmelerde ham maddenin işlenmesinden, paketlenmesine kadar geçen prosesin her adımında yer almaktadırlar. Üretim hatlarında kullanılan motorlar; başta gerekli momentin sağlanması, bakım maliyetleri, kontrol yöntemleri gözönünde bulundurularak en uygun şekilde seçilmektedirler.

Günümüzde bakım maliyetlerinin az olması, güç elektroniğinde yaşanan önemli gelişmeler sonucu hız kontrolünün kolaylaşması, dayanıklılığı sebebiyle asenkron motorlar, DC motorlara göre daha çok tercih edilmektedir. Asenkron motorlar rotor tipi, faz sayısı, verim sınıfı gibi parametrelere göre sınıflandırılabilir.

Kontrol yöntemleri ise kullanılacak prosese göre belirlenebilir. Örneğin düşük hızlarda veya değişken durumlara kısa sürede cevap verilmesi gereken uygulamalarda vektör kontrollü sürücülerin kullanılması daha doğrudur. Bu çalışmada, 3 fazlı sincap kafesli asenkron motor ve kalman filtresi uygulanarak doğrudan moment kontrol yöntemi ele alınacaktır.

1.1 Tezin Amacı

Elektrik motorlarının kontrolü, endüstrinin her alanında büyük önem arz eder. Motorların istenilen şekilde çalışması; verimli, hızlı ve kaliteli üretimi sağlar.

Genellikle, proseslerde motor hızları ayarlanırken alınan geri besleme değerleri motor kontrolü için oldukça önemli bir parametredir. Bazı durumlarda, sensörler aracılığıyla gerekli besleme almak mümkün olmayabilir ya da alınan ölçümler gürültülerden ciddi derece etkilenerek sağlıklı veriler alınamamasına neden olabilir. Ölçülemeyen değerlerin, tahmini değerlerinin bulmak için çeşitli yöntemler kullanılabilir.

Bu tezde motor kontrol yöntemlerinden bahsedilmiş ve doğrudan moment kontrolü üzerinde durulmuştur. Ölçülemeyen noktalarda veya gürültü nedeniyle sağlıklı geri besleme alınamayan durumlar için genişletilmiş kalman filtresi kullanılarak motor çıkış parametreleri iyileştirilmiş ve doğru şekilde kontrol edilebilmesi sağlanmıştır.

1.2 Literatür Özeti

Literatürde, elektrik motoru ve kontrolleri üzerinde oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Kullanılan kontrol yöntemi, motor tipleri ve kontrolörler göz önüne alındığında, motor kontrolü konusu oldukça geniş kapsama sahiptir. Genel olarak kontrol yöntemlerini incelediğimizde, sayısal kontrol ve vektöre dayalı kontrol sistemi ile karşılaşılır. Vektöre dayalı kontrol yöntemlerinin alt kısımlarının incelediğimizde ise alan yönlendirmeli kontrol ve doğrudan moment kontrolü olmak üzere iki farklı yöntemin kullanıldığını görürüz. Alan yönlendirmeli kontrol yöntemi ile doğrudan moment kontrolü yöntemini karşılaştırdığımızda aralarındaki en belirgin farklılıklardan bazıları, doğrudan moment kontrol yönteminin daha sade yapıya sahip olması, gerekliliklere daha hızlı cevap verebilmesi ve makine parametrelerine bağımlılığın daha az olmasıdır[1],[2]. Çalışılan sistemin dinamiğine göre, uygun olan kontrol yöntemi seçilebilir. Örneğin hızlı değişkenlik gösteren dinamik bir sistemin kontrolünde vektöre dayalı yöntemin tercih edilmesi daha doğru olacaktır.

1980'li yılların ortasında, asenkron motorun moment kontrolü ile ilgili yeni yaklaşım I. Takahashi ve T. Noguchi tarafından doğrudan moment kontrolü olarak ve M Depenbrook tarafından ise doğrudan öz kontrol olarak sunulmuştur. Bu yöntem 1985'ten beri bir çok araştırmacı tarafından geliştirildi[3]. Doğrudan moment kontrolünde, en uygun anahtarlama grupları seçilerek doğrudan stator akısı ve elektromanyetik momentin kontrolü mümkündür. Yapılan anahtarlama seçimleri ile moment ve stator akısının hataları belli bir sınırlı alan içinde tutulur[4],[5].

Doğrudan moment kontrolü yönteminin avantajı karmaşık dönüşüm ve hesaplamaların olmamasıdır. Bununla birlikte uygulaması oldukça kolaydır. Çünkü yapısında sadece iki karşılaştırıcı ve akı momentini kontrol etmek üzere anahtarlama tablosu bulunmaktadır[6]. En

büyük dezantajı ise başlangıçtaki moment değerlerinde meydana gelen yüksek dalgalanmalardır[7].

Yüksek dalgalanmaların azaltılması adına son yıllarda oldukça fazla çalışmalar yapıldı. Dalgalanmayı önlemek için kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi yüksek frekanslı anahtarlama yapan sürücülerin kullanılmasıdır. Bu stator akımında bulunan harmonik bileşenlerin azaltılarak, moment dalgalanmasının düşürülmesi hedeflenmiştir. Bunun olumsuz getirisi ise elektriksel olarak güç kayıplarının artması ve sürücünün verimliliğini düşmesidir[8]. Aynı şekilde moment dalgalanmalarını azaltmak için kullanılan bir başka yaklaşım ise uzay vektör modülasyonu tekniğidir[9],[10].

Son yılların en güncel konularından biri de sensörsüz motor kontrolüdür. Genel sistemin güvenilirliğini arttırmak ve maliyetleri düşürmek amacıyla, indüksiyon motorlarının kontrolünde, hız ve akı sensörlerini çıkarılması üzerinde bazı yaklaşımlar önerilmiştir[11]. Bu konuda önerilen çalışmalar ile, nominal hızlarda iyi sonuçlar elde edilirken, düşük hızlarda hala bazı problemler ile karşılaşmaktadır. Yapılan tüm gözleme dayalı teknikler arasında genişletilmiş kalman filtresi; basit, etkili ve sensörsüz motor kontrolü için anlık durumlarının hesaplanması bakımından verimlidir[12].

Genişletilmiş kalman filtresi dinamik durum tahmini yapılmasını sağlayan metodlardan biridir. Dinamik durum analizi algoritması, dinamik durumun hesaplanmasını sağlar. Kalman filtresi indüksiyon motora ait akım, akı ve hız değerlerinin her adımda hesaplar. Bu tahmini değer gürültü etkileri ve modelleme hataları azaltılarak yapılır[13]. Tahmin prosesi süresince genişletilmiş kalman filtresi metodu lineer olmayan dönüşüm ve hesaplamaları Jacobian matrisi kullanarak doğrusallaştırılmasını sağlar[14],[15].

Yapılan çalışmada;

- Asenkron motorunun genel yapısı aktarılmış ve matematiksel modellemesi yapılmıştır.
- Asenkron motor kontrol yöntemleri üzerinde durulmuştur.
- Hız kontrolünü sağlayan sürücüler ve bölümleri ayrı ayrı ele alınmıştır.

- Kontrol yöntemleri, birbirleri ile karşılaştırılarak birbirlerine karşı pozitif ve negatif yönleri üzerinde durulmuştur.
- Doğrudan moment kontrolü ele alınmış ve doğrudan moment kontrol yönteminde kullanılan tüm adımlar tek tek incelenmiştir. Bu kontrol yöntemi ile farklı referanslarda motorun çıkış parametreleri izlenmiştir.
- Durum gözlemleyici kavramı üzerinde durulmuş ve kalman filtresinin, genişletilmiş kalman filtresi mantığı üzerinde çalışılmıştır.
- Kalman filtresine ait matematiksel ifadeler üzerinde durularak, simülasyonda kullanılan motorun hızı kestirilmiştir.
- Doğrudan moment kontrolü ve genişletilmiş kalman filtresi kullanılarak, motorun farklı referans değerlerinde sensörsüz olarak çalışması hedeflenmiştir.
- Doğrudan moment kontrol yöntemi incelenirken, matlab/simulink programı kullanılmıştır.

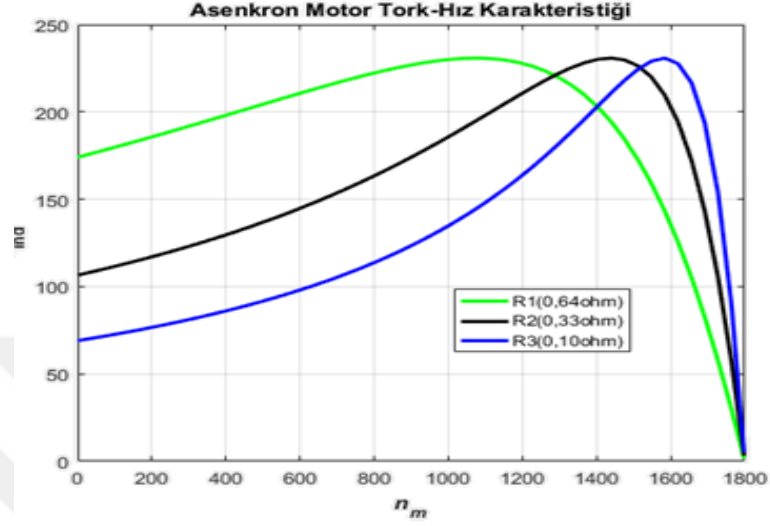
2. GENEL TANIMLAR

2.1 Asenkron Motor

Motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye çeviren elektrik makineleri olarak tanımlanabilir. İndüksiyon motorları, genel olarak dönen transformatörler olarak düşünülebilir. Çünkü indüksiyon motorunun rotorunda meydana gelen akım, transformatörlerde olduğu gibi indüksiyon yöntemi ile üretilir[16]. Asenkron motorlar, özellikle sabit hız gereken uygulamalarda tercih edilirler.

3 fazlı bir asenkron motor, rotor ve stator olarak adlandırılan iki temel kısımdan oluşmaktadır. Stator, motorun duran kısmı olup, manyetik alanın meydana gelmesini sağlayan stator sargılarından oluşmuştur. Rotor ise motorun hareketli kısmıdır ve statora rulmanlar yardımıyla belli mesafede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Asenkron motorlarda rotor iki farklı yapıda olabilir. Sincap kafesli rotorlar başta ve sonra kısa devre edilmiş çubuklardan meydana gelirken; Bilezikli rotorlar, stator da olduğu gibi belli düzende yerleştirilmiş sargılardan oluşur. Bu tip rotorların sargı uçlarına dirençlerle müdahale edilerek hız kontrolü yapılabilir. Bağlanan dirençler ile istenilen hız-moment eğrisini elde etmek mümkündür. Bu tip rotorun

dezavantajı bilezikler nedeniyle oluşacak kayıplardır. Ayrıca mekanik etkenlerden dolayı dayanıklılığı diğer rotor türüne göre daha azdır.



Şekil 2.1: Asenkron Motor Moment- Hız Karakteristiği

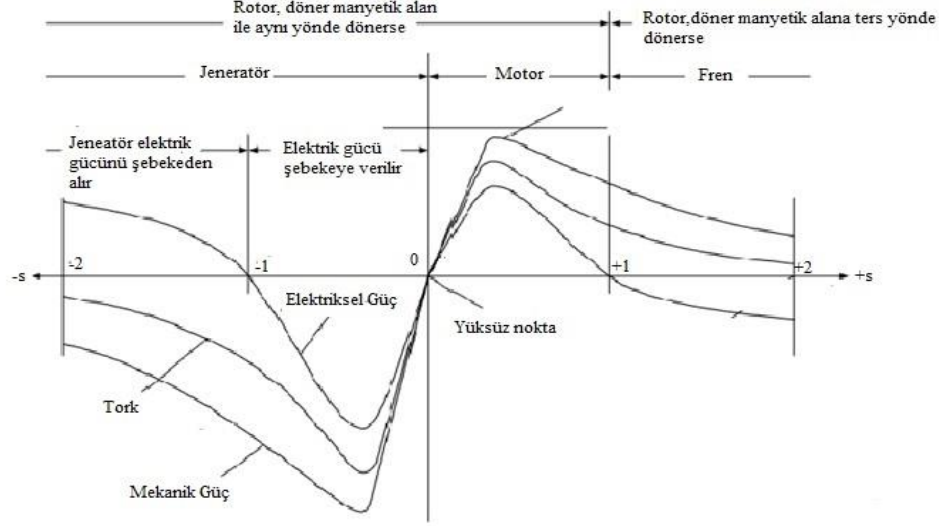
Sincap kafesli asenkron motor, 3 fazlı gerilim ile beslendiğinde, statorunda döner manyetik alan meydana gelir. Döner manyetik alan, uçlarından kısa devre edilmiş rotor çubuklarında akımın oluşmasını sağlar. Bu akım rotorda manyetik alan oluşmasını sağlar. Stator ve rotor döner alanın birbiri ile etkileşmesi sonucu dönme kuvveti oluşur. Kısa devre edilen rotor çubukları direncinden dolayı statordaki manyetik alan ile rotor manyetik alan arasında hız farkı oluşur. Bu fark kayma olarak ifade edilebilir.

$$s(\%) = \frac{N_s - N_r}{N_s} \times 100 \quad (2.1)$$

Burada N_s Stator döner alan hızı rpm , N_r rotor hızı rpm 'dir

Asenkron motora ait moment-kayma eğrisi aşağıdaki gibidir. Bu eğriye göre motorun çalışma analizi yapılabilir. Kayma değerine göre motorun hangi bölgede olduğunu tespit etmek mümkündür. Eğer motorun rotoruna ait hız değeri senkron hıza göre ters ise, kayma > 1

durumu gerçekleşir ve motor fren yapar. Normal şartlarda; $0 < \text{kayma} < 1$ motorun çalışma bölgesidir. Eğer rotor hızı, sekron hızı geçerse motor, jeneratör olarak çalışacaktır.



Şekil 2.2: Asenkron Motor Çalışma Bölgeleri (Štumberger,2013)

2.1.1 Asenkron Eşdeğer Devresi

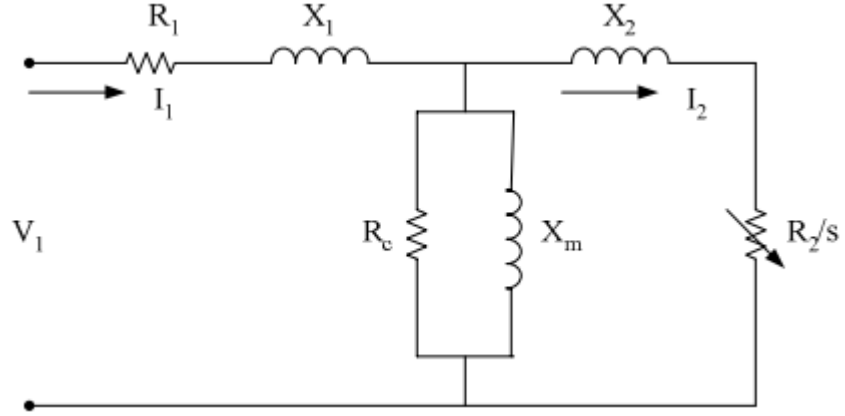
Elektrik motorlarının analiz edilebilmesi ve daha iyi anlaşılır olması için eş değer devreye çevrilmesi oldukça kullanışlı bir yöntemdir. Elektrik makinelerinin eşdeğer devrelerini kullanarak motor akım, güç, moment hesapları yapılabilir. Ayrıca asenkron motor eşdeğer devresi, motorun verimlilik tahmini yapılabilmesini sağlar[17].

Asenkron motorlarda eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasında Yetgin ve Çanakoğlu[18] aşağıdaki yöntemleri kullanmıştır.

Bunlar;

- Motor konstrüksiyon verilerinden hesaplanması
- Kararlı hal motor modeline bağlı olarak hesaplama
- Frekans alanında parametre hesaplanması
- Zaman döneminde parametrelerin hesaplanması
- Gerçek zamanda parametre hesaplanması

Aşağıdaki şekilde asenkron motora ait eşdeğer devre çizimi gösterilmiştir. Devrede gösterilen değerler motor kısa devre ve boşa çalışma deneyleri yapılarak bulunabilir.



Şekil 2.3: Asenkron Motor Eşdeğer Devresi

Sistemin motorun 3 fazlı yıldız bağlı olduğunu varsayarak P_0 boşa çalışma testinde çekilen güç, V_1 stator besleme gerilimi, I_0 boşa çalışırken çekilen akım ise;

Stator direnç değeri;

$$R_c = 3 \times \frac{V_1^2}{P_0} \quad (2.2)$$

Stator akım değeri;

$$I_c = V_1 / R_c \quad (2.3)$$

Mıknatıslanma akımı;

$$I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} \quad (2.4)$$

Mıknatıslanma direnci;

$$X_m = V_1 / I_m \quad (2.5)$$

Sistemin motorun 3 fazlı yıldız bağlı olduğunu varsayarak P_{sc} kısa devre çalışma testinde çekilen güç, V_{sc} kısa devre gerilimi, I_{sc} kısa devre çalışma testinde çekilen akım ise;

Toplam eşdeğer direnç;

$$R_{eq} = (1/3) \times \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} \quad (2.6)$$

Toplam empedans;

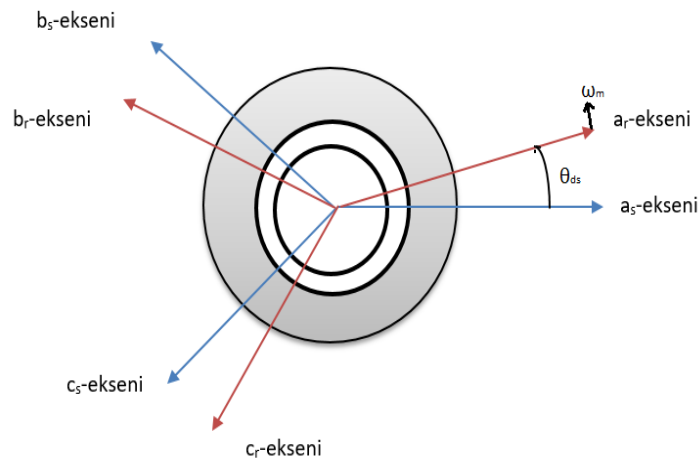
$$Z_{eq} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} \quad (2.7)$$

Eşdeğer Toplam reaktansı

$$X_{eq} = \sqrt{Z_{eq}^2 - R_{eq}^2} \quad (2.8)$$

2.1.2 Asenkron Motorun Matematiksel Modellemesi

3 Fazlı asenkron motor, dengeli gerilimler ile beslendiği takdirde stator ve rotora ait eşitlikler aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.4: Asenkron Motor Rotor ve Stator Verilerinin Vektörel Gösterimi

Stotara ait denklemler;

$$V_{as} = R_s \cdot I_{as} + \frac{d}{dt} \Psi_{as} \quad (2.9)$$

$$V_{bs} = R_s \cdot I_{bs} + \frac{d}{dt} \Psi_{bs} \quad (2.10)$$

$$V_{cs} = R_s \cdot I_{cs} + \frac{d}{dt} \Psi_{cs} \quad (2.11)$$

Rotora ait denklemler;

$$V_{ar} = R_r \cdot I_{ar} + \frac{d}{dt} \Psi_{ar} \quad (2.12)$$

$$V_{br} = R_r \cdot I_{br} + \frac{d}{dt} \Psi_{br} \quad (2.13)$$

$$V_{cr} = R_r \cdot I_{cr} + \frac{d}{dt} \Psi_{cr} \quad (2.14)$$

İlgili denklemler kullanılarak;

$$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs} \ V_{ar} \ V_{br} \ V_{cr}]^T =$$

$$\begin{bmatrix} R_s + pL_s & pM_s & pM_s & pM_{sr} \cos \theta_r & pM_{sr} \cos \theta_1 & pM_{sr} \cos \theta_2 \\ pM_s & R_s + pL_s & pM_s & pM_{sr} \cos \theta_2 & pM_{sr} \cos \theta_r & pM_{sr} \cos \theta_1 \\ pM_s & pM_s & R_s + pL_s & pM_{sr} \cos \theta_1 & pM_{sr} \cos \theta_2 & pM_{sr} \cos \theta_r \\ pM_{sr} \cos \theta_r & pM_{sr} \cos \theta_1 & pM_{sr} \cos \theta_2 & R_r + pL_r & pM_r & pM_r \\ pM_{sr} \cos \theta_2 & pM_{sr} \cos \theta_r & pM_{sr} \cos \theta_1 & pM_r & R_r + pL_r & pM_r \\ pM_{sr} \cos \theta_1 & pM_{sr} \cos \theta_2 & pM_{sr} \cos \theta_r & pM_r & pM_r & R_r + pL_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \\ I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix}$$

$$\theta_1 = \theta_r + 2\pi/3, \quad \theta_2 = \theta_r + 4\pi/3$$

2.1.3 Üç Fazlı Asenkron Motorun Sabit Koordinat Yapısında Tanımlanması ve Dinamik Analizi

Asenkron motorlara ait bir çok modelleme bulunmaktadır. Vektör kontrol yöntemi kullanılacak motorlar için uzay vektör teoremi kullanılarak uygun modelleme oluşturulabilir. 3 fazlı indüksiyon motorlarının gerilim, akım, manyetik akı gibi nicelikleri karmaşık uzay vektörü şeklinde tanımlanabilir. Bu modelleme, anlık olarak değişkenlik gösteren gerilim ve akım değerleri için uygundur. Oluşturulan modelle, motorun performansını kararlı ve geçici hallerde inceleyebilmek, tanımlamak mümkündür.

Kompleks uzay vektörü birbirine dik iki adet eksen olarak tanımlanabilir. Motora ait olan 3 fazlı gerilim, akım, manyetik akı gibi değerler gerekli dönüşümler kullanılarak iki eksene ait olarak tanımlanabilir. Motora ait olan denklemlerin sadeleştirilmesi, kontrolün kolaylaştırılması sağlar.

\dot{I}_{sa} , i_{sb} , i_{sc} motorun statoruna ait 3 fazlı, anlık ve dengeli akımlar olarak kabul edelim. Sistem dengeli olduğundan;

$$\dot{I}_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = 0 \quad (2.15)$$

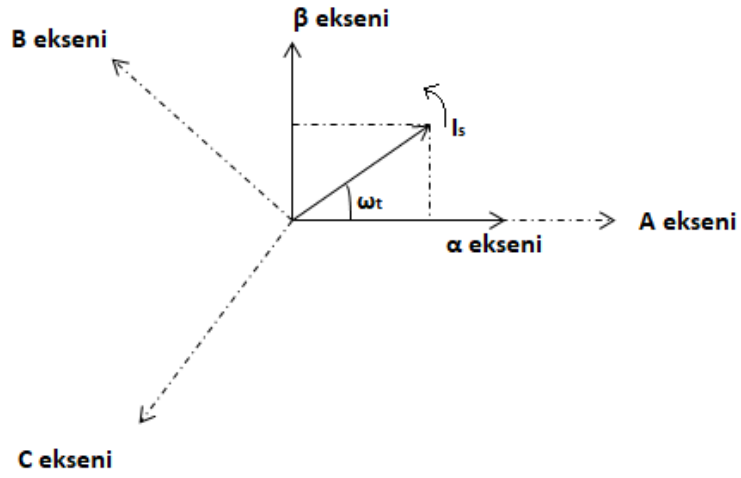
Statora ait akım vektörünü aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\bar{i}_s = K (\dot{I}_{sa} + a \cdot i_{sb} + a^2 i_{sc}) \quad (2.16)$$

Burada K çevirme oranı olarak tanımlanabilir ve $K=2/3$. a uzaya ait operatör olarak açıklanabilir. $a = e^{j2\pi/3}$, $a^2 = e^{j4\pi/3}$

Statora ait akım vektörünün gerçek kısmı, dönüştürme yapılan α ekseni değerini verirken, kompleks kısmı ise β eksenine ait stator akım değerine eşittir.

Asenkron motora ait sistem modellemesinin ve analiz edilebilmesini kolaylaştırılması, anlaşılabilirliğinin artırılması için 3 fazlı sistemden, 2 fazlı sisteme dönüştürülmesi aşağıdaki gibidir. Makine ait eksenler şekilde gösterildiği gibi A, B, C eksenleridir. Bu eksenlerdeki sargılardan geçen akım, stator döner manyetik alanını oluşturur. Bu manyetik alan vektörünün, α ve β eksenlerinde de tanımlamak mümkündür. Bu dönüşüm, Clarke dönüşümü olarak da bilinir. Rotor veya stator eşitlikleri Clarke dönüşümü ile 2 fazlı sisteme dönüştürülebilir.



Şekil 2.5: ABC Ekseninde Tanımlanmış Değerlerin $\alpha\beta$ Ekseninde İfade Edilmesi

$$I_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} M I_{abc} \quad (2.17)$$

$$I_{abc} = \frac{3}{2} M^{-1} I_{\alpha\beta 0} \quad (2.18)$$

$$M^{-1} = \frac{2}{3} M^T \quad (2.19)$$

$$I_{abc} = M^T I_{\alpha\beta 0} \quad (2.20)$$

$$V_{abc} = M^T V_{\alpha\beta 0} \quad (2.21)$$

Dönüşümde Gücün Değişmezliği Yaklaşımına Göre

$$I_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} M I_{abc} \quad (2.22)$$

$$I_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} M^T I_{\alpha\beta 0} \quad (2.23)$$

$$V_{abc} = \sqrt{\frac{2}{3}} M^T V_{\alpha\beta 0} \quad (2.24)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{s\beta} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{r\beta} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Yukarıdaki denklemlerden yararlanarak;

$$C_{11} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \text{ ve } C_{22} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Sonuçta;

$$\begin{bmatrix} V_{sa\beta} \\ V_{ra\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & 0 \\ 0 & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sabc} \\ V_{rabc} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Buna benzer olarak akım değerleri içinde aynı eşitlik uygulanır. Eğer tersine dönüşüm isteniyorsa aşağıdaki eşitlik kullanılarak α, β ekseninden a,b,c eksenine geçilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_{sabc} \\ V_{rabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11}^T & 0 \\ 0 & C_{22}^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sa\beta} \\ V_{ra\beta} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

3 fazlı asenkron motora ait, uzay vektör formundaki eşitlikler aşağıdaki gibidir;

$$\begin{bmatrix} V_{sa} & V_{s\beta} & V_{s0} & V_{ra} & V_{r\beta} & V_{r0} \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} R_s + L_{ss}p & 0 & 0 & pM_1 & -pM_2 & 0 \\ 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & pM_2 & pM_1 & 0 \\ 0 & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & 0 & 0 \\ pM_1 & pM_2 & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & 0 \\ -pM_2 & pM_1 & 0 & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s + L_{ss}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{s\beta} \\ I_{s0} \\ I_{ra} \\ I_{r\beta} \\ I_{r0} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

Burada;

$$M_1 = 3/2 M_{sr} \cos\theta_r, \quad M_2 = 3/2 M_{sr} \sin\theta_r$$

$$L_{ss} = L_{ls} + (3/2) L_{ms}, \quad L_{rr} = (3/2) L_{mr}$$

Rotor eksenini döndüğü için rotor eksenine ait verileri, çevirerek tanımlayalım.

$$\begin{bmatrix} V'_{ra} \\ V'_{r\beta} \\ V'_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r & 0 \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{r\beta} \\ V_{r0} \end{bmatrix}, \quad C_1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_r & -\sin\theta_r & 0 \\ \sin\theta_r & \cos\theta_r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

Tüm akım değerleri için;

$$\begin{bmatrix} I_{s\alpha\beta 0} \\ I'_{r\alpha\beta 0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U & 0 \\ 0 & C_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha\beta 0} \\ I'_{r\alpha\beta 0} \end{bmatrix}, \quad U \text{ 3x3 birim matrisidir.} \quad (2.32)$$

$$\begin{bmatrix} V_{sa} & V_{s\beta} & V_{s0} & V'_{ra} & V'_{r\beta} & V'_{r0} \end{bmatrix}^T =$$

$$\begin{bmatrix} R_s + L_{ss}p & 0 & 0 & (3/2)M_{sr}p & 0 & 0 \\ 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & 0 & (3/2)M_{sr}p & 0 \\ 0 & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & 0 & 0 \\ (3/2)M_{sr}p & (3/2)M_{sr}\omega_r & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 & 0 \\ -(3/2)M_{sr}\omega_r & (3/2)M_{sr}p & 0 & 0 & R_s + L_{ss}p & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s + L_{ss}p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{s\beta} \\ I_{s0} \\ I'_{ra} \\ I'_{r\beta} \\ I'_{r0} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Bu denklemler kullanılarak rotor ve statora ait akım değerleri sabit koordinata göre tanımlanmış olur.

$$V_{sa} = R_s \cdot I_{sa} + \frac{d}{dt} \Psi_{sa} \quad (2.34)$$

$$V_{s\beta} = R_s \cdot I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \Psi_{s\beta} \quad (2.35)$$

$$V_{r\alpha} = 0 = R_r \cdot I_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \Psi_{r\alpha} + \omega \Psi_{r\beta} \quad (2.36)$$

$$V_{r\beta} = 0 = R_r \cdot I_{r\beta} + \frac{d}{dt} \Psi_{r\beta} + \omega \Psi_{r\alpha} \quad (2.37)$$

$$\Psi_{s\alpha} = L_s \cdot I_{s\alpha} + L_m I_{r\alpha} \quad (2.38)$$

$$\Psi_{s\beta} = L_s \cdot I_{s\beta} + L_m I_{r\beta} \quad (2.39)$$

$$\Psi_{r\alpha} = L_r \cdot I_{r\alpha} + L_m I_{s\alpha} \quad (2.40)$$

$$\Psi_{r\beta} = L_r \cdot I_{r\beta} + L_m I_{s\beta} \quad (2.41)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P_p (\Psi_{s\alpha} \cdot I_{s\beta} - \Psi_{s\beta} \cdot I_{s\alpha}) \quad (2.42)$$

$$V_\alpha = \frac{2}{3} \left(V_a - \frac{V_b}{2} - \frac{V_c}{2} \right) \quad (2.43)$$

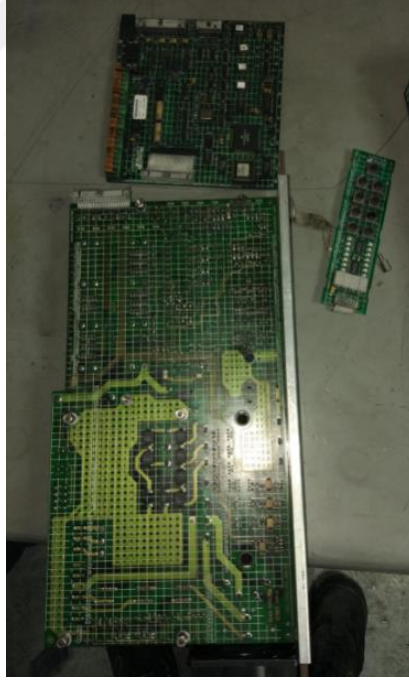
$$V_\beta = \frac{2}{3} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} V_b - \frac{\sqrt{3}}{2} V_c \right) \quad (2.44)$$

2.2 Elektrik Motor Sürücüleri ve Bölümleri

Elektrik motorları, uygulamalarda bir çok sebepten dolayı farklı hızlarda kullanılmak istenebilir. Örneğin; alt yapı tesislerinde çalışan pompa motorlarının performansları ihtiyaca

göre hızlanıp yavaşlatılarak önemli ölçüde enerji tasarrufu yapılması sağlanabilir ya da proses olarak hat hızlarının, konveyörlerin, fanların ayarlanabilir olması gerekebilir. Bu bağlamda elektrik motorlarının farklı hızlarda çalışabilmesini sağlayan, uygun kalkış rampası, akım sınırlaması gibi motorun çalışması ile ilgili parametrelerin ayarlanabildiği cihazlara elektrik motor sürücüleri denir. Şekil 2.6 ve şekil 2.7 de bir elektrik motor sürücüsünün genel gösterimi ve tetikleme, güç kartları gösterilmiştir. Burada motor beslemesi için gerekli enerji güç kartından sağlanırken, IGBT'lerin uygun zamanda açılıp, kapanması tetikleme kartı ile kontrol edilir.

Kullanılan sürücülerin cinsine veya kullanım şekline göre ilave kontrol kartların kullanılması mümkündür. Örneğin sahadan, motor pozisyonu hakkında veri alınması gerekiyorsa, bazı sürücülerde enkoder kartının eklenmesi ve buradan gelen veriye göre sağlıklı kontrolün sağlanması mümkündür.



Şekil 2.6: Elektrik Sürücüsü Tetikleme ve Güç Kartı

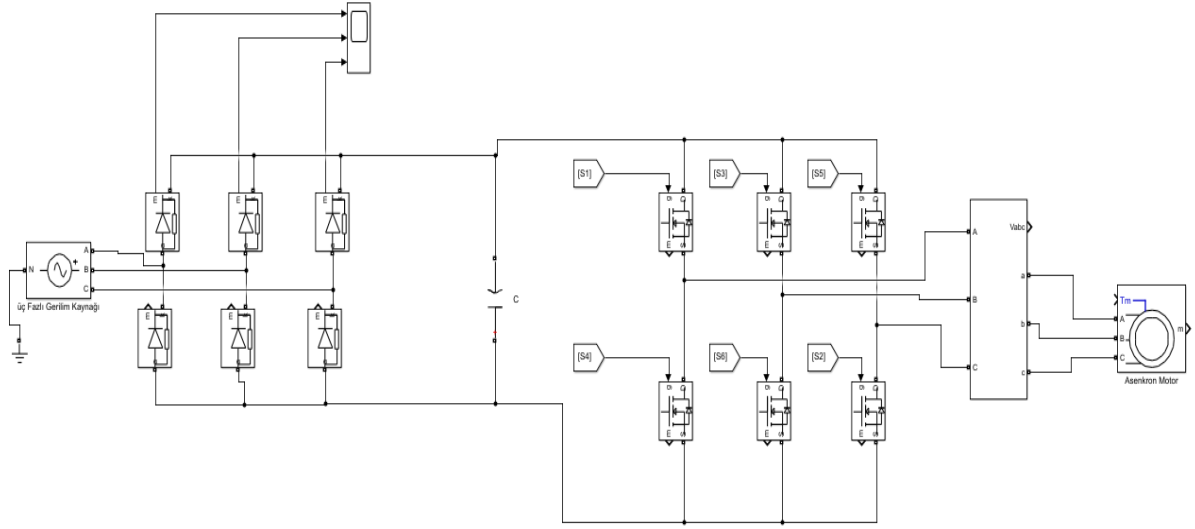


Şekil 2.7: Elektrik Sürücüsü Genel Görünüm

Asenkron motor kontrolünde kullanılan AC sürücülerin temel mantığı şebekeden alınan gerilim doğrultulması ve daha sonra doğrultulan gerilimin istenilen şekilde, yarı iletken elemanlar kullanılarak tüketiciye verilebilmesi üzerine kuruludur. AC motor 3 ana kısımdan oluşur.

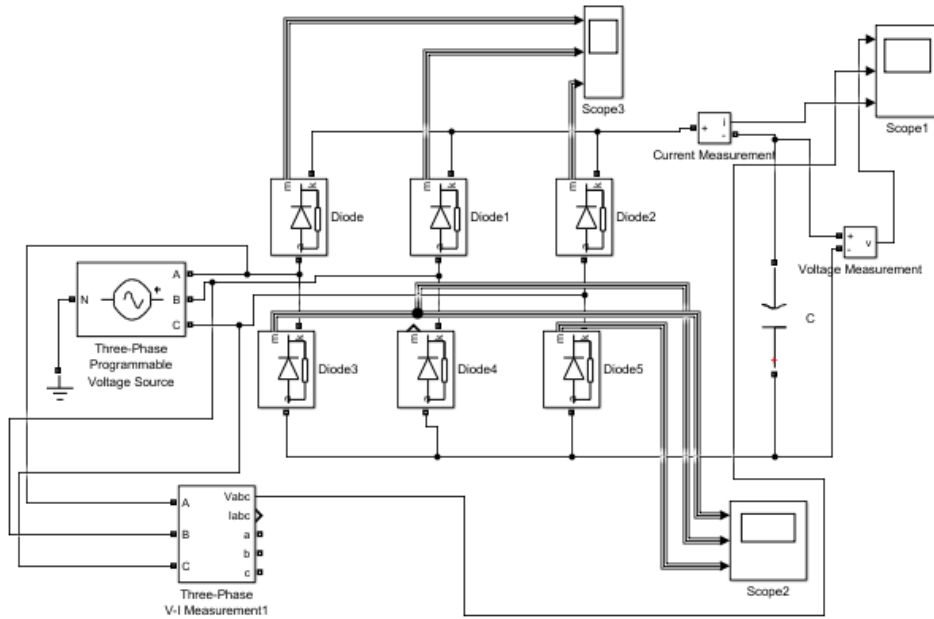
- Doğrultucu Kısmı
- DC bara
- Evirici Kısmı

Şebekeden çekilen gerilim ilk olarak doğrultucu ünitesinden geçerek AC olan gerilim DC'ye dönüştürülür. Genel olarak, AC-DC dönüşümü için diyotlardan meydana gelen tam dalga doğrultucu devresi kullanılır. DC bara, AC-DC dönüşümü sonrası oluşabilecek harmonikleri elemine eden filtreleri bünyesinde bulunur ve evirici kısım için gerekli olan beslemeyi sağlar. Son kısım altı adet, IGBT gibi yarı iletkenlerden meydana gelir. İhtiyaç olan tektiklemelere göre motorun hızını etkileyen frekans parametresi değiştirilebilir. Böylelikle motor hızı değişken olarak ayarlanabilir. Sürücüye ait genel gösterim aşağıdaki gibidir.

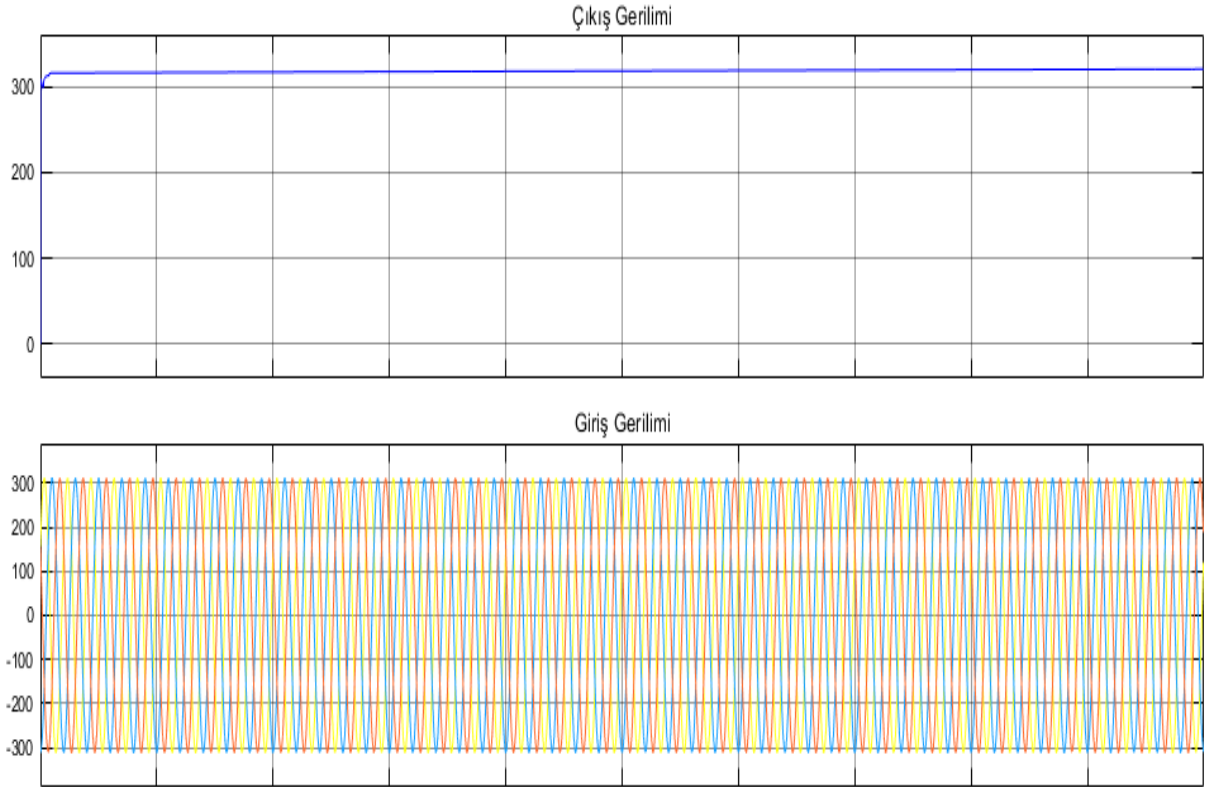


Şekil 2.8: Elektrik Sürücüsünün Simulink Gösterimi

Giriş kısmına verilen 3 fazlı gerilim, doğrultulması ve ilgili ekran görüntüleri;

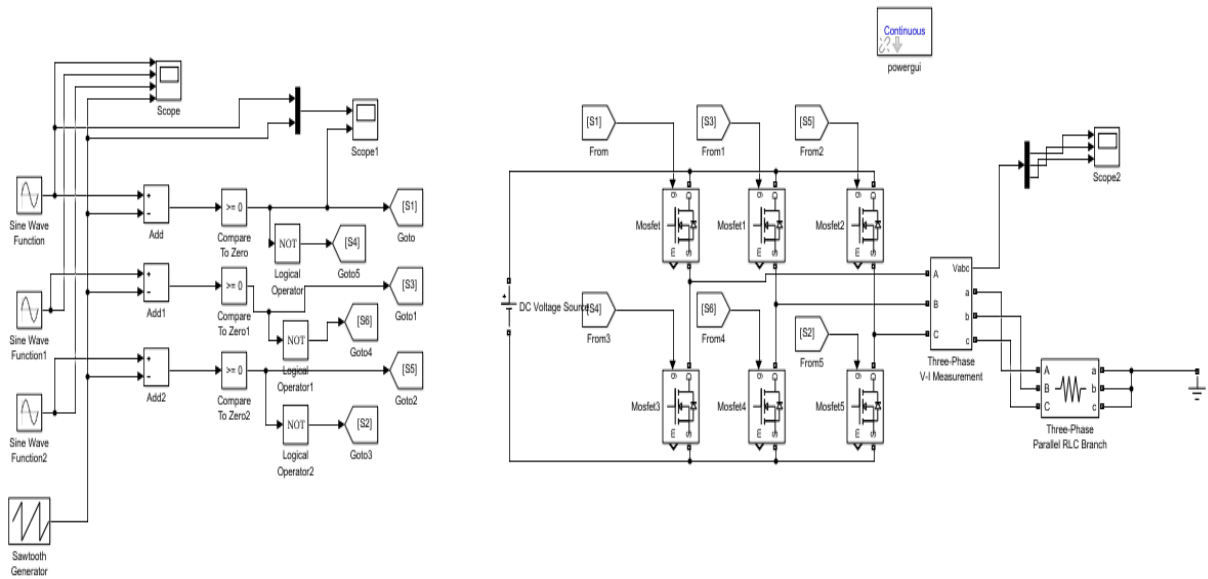


Şekil 2.9: AC Gerilim Doğrultma Devresi Simulink Gösterimi

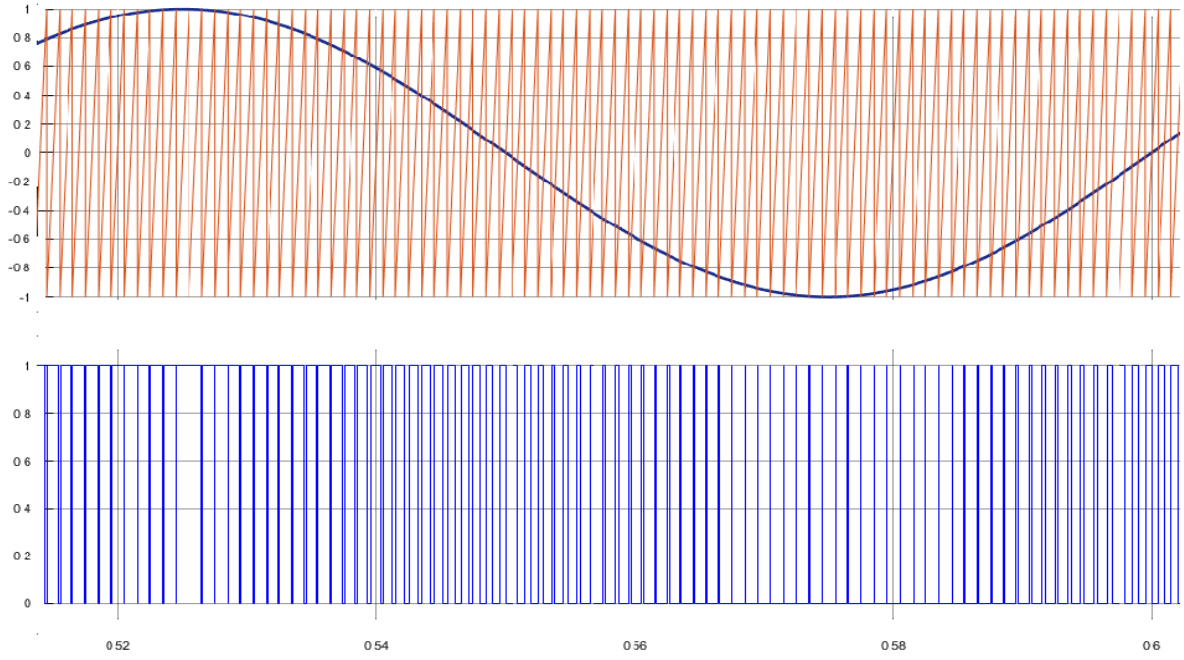


Şekil 2.10 : AC Gerilimin Doğrultulması Ekran Görüntüsü

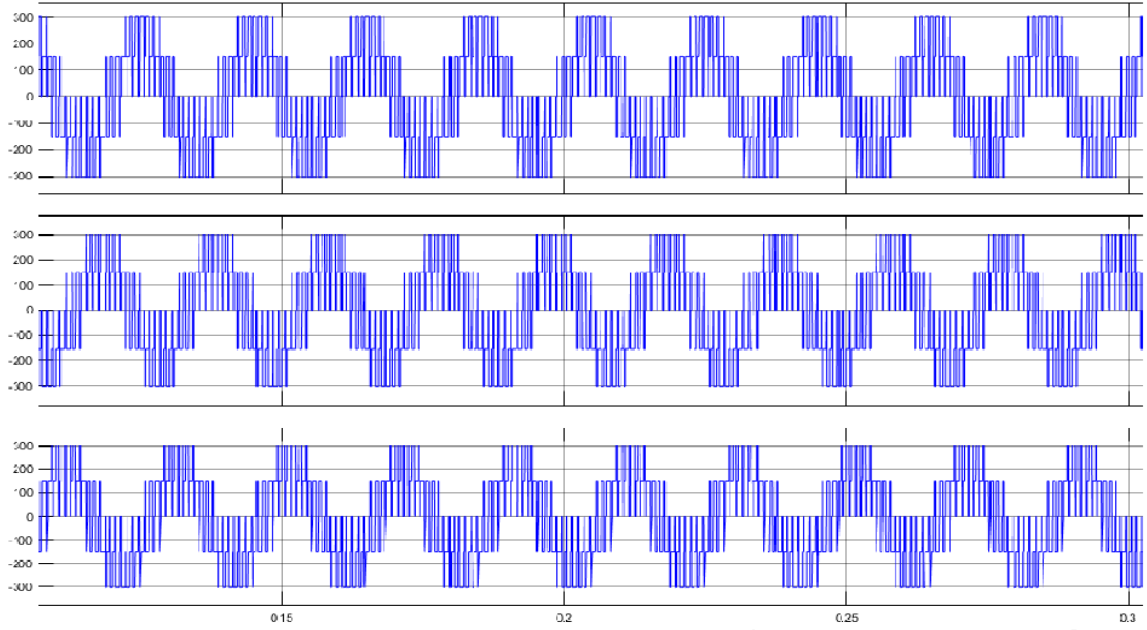
SPVM metodu kullanılarak DC'den AC'ye çevrilmesine ait örnek çizim ve ekran görüntüleri aşağıdaki gibidir.



Şekil 2.11: SPVM metodu kullanılarak DC'den AC'ye Çevrilmesi



Şekil 2.12: SPVM metodu kullanılarak DC/AC Dönüşümünde Tetikleme ve IGBT Açık Kalma Durumunu Gösteren Ekran Görüntüsü



Şekil 2.13 : SPVM metodu kullanılarak DC/AC Dönüşümünde Fazlara Ait Gerilimnin Ekran Görüntüsü

3. ASENKRON MOTOR KONTROL YÖNTEMLERİ

Asenkron motorlarda, senkron hızın değeri iki parametreyle doğrudan ilişkilidir. Bunlardan ilki besleme geriliminin frekansı iken diğeri motordaki kutup çifti sayısıdır.

$$n = \frac{60xf}{p} \quad (3.1)$$

Bu iki parametreden kutup çifti sayısı imalat aşamasında hazırlanmaktadır. Stator yapıları özel yapıda hazırlanmamış motorlarda, hız kontrolünde kutup çift sayısının kullanılması mümkün değildir. Dolayısıyla motor hız kontrolünde frekans ayarı daha çok tercih edilen yöntemdir. Besleme frekansı ile motorun hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır.

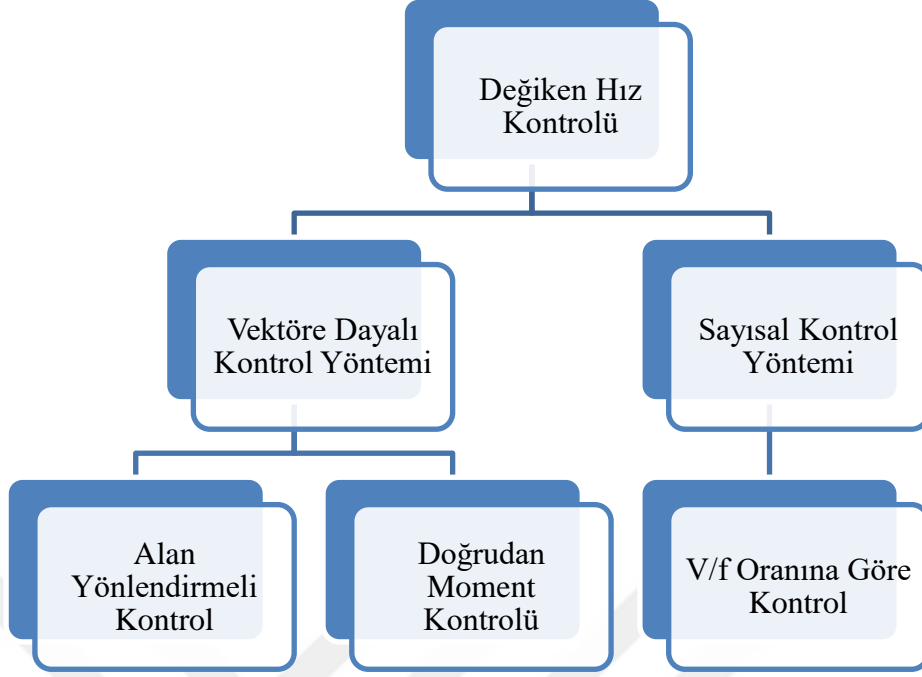
Herhangi bir sistemin kontrolünün en önemli parçası, sistemin modellenmesidir. Djellouli, Moulahoum, Boucherit, Kabach [19] yapmış olduğu çalışmalara göre Eddy akımları saturasyon yüzey etkileri gibi parametreler dolayısıyla indüksiyon motoru basit bir sisteme sahip değildir.

3.1 Değişken Hız kontrol Yöntemleri ve Karşılaştırılması

Asenkron motor kontrolü için bir çok yöntem kullanılmaktadır. Her kontrol yönteminin kendine has avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır.

Wu ve Narimani'nin motor kontrol yöntemleri ile ilgili yapmış olduğu çalışmalara göre motor kontrol yöntemleri incelendiğinde, stator geriliminin, frekansa ile oransal olan V/ f kontrol yöntemi en basitidir. Bu kontrol yöntemi, anma değerlerinde stator manyetik akımını sabit tutmaktadır. Bunun yanında geçici ve dinamik hızlarda motor sağlıklı bir şekilde kontrol edilememektedir. Bundan dolayı V/f kontrol dinamik hız gerektiren uygulamalar için uygun değildir[20].

Genel olarak asenkron motor kontrolü; vektör kontrolü ve sayısal kontrol yöntemi olarak iki ana grupta incelenebilir.



Aşağıda indüksiyon motoru kontrol yöntemleri gösterildiği tabloda, motor kontrol yöntemleri birbirleri ile kıyaslanmıştır.

Tablo 3.1: Motor Kontrol Yöntemlerinin Birbirleriyle Karşılaştırılması

Kontrol Yöntemi	Moment Kontrol	Akı Kontrol	Cevap Hızı	Avantaj	Dezavantaj
DC Sürücü	Direkt	Direkt	Yüksek	Doğruluk yüksek, moment değişimine hızlı cevap verir. Kolay yapıya sahip	Motor bakım maliyetleri yüksek ve doğruluğun iyi olabilmesi için enkoder gerekli
Sayısal Dayalı	Yok	Yok	Düşük	Basit ve enkoder gerekli değil.	Moment değişimlerine hızlı karşılık veremez

Akı Vektör Kontrol	Dolaylı	Direkt	Yüksek	Doğruluk yüksek, moment değişimine hızlı cevap verir. Kolay yapıya sahip	Her zaman enkoder ihtiyacı var
Doğrudan Moment Kontrolü	Direkt	Direkt	Yüksek	Ani moment değişimlerine mükemmel şekilde cevap verir. Enkoder kullanılmayabilir.	Yüksek hız doğruluğu için enkoder kullanılması

Bu kontrol yöntemleri uygulanırken; kullanılan kontrol değişkenleri aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.2: Motor Kontrol Yöntemleri ve Kontrol Parametreleri

Sürücü	Kontrol Parametresi
DC Sürücüler	Armatür akımı(I_a), Alan akımı(I_f)
AC Sürücüler(PWM)	Çıkış gerilimi(V), Çıkış frekansı(f)
Alan Yönlendirmeli Kontrol(FOC)	Rotor flux Akımı(I_d), Moment Akımı(I_q)
Direkt Moment Kontrolü	Motor momenti(T), Motor Manyetik Akısı(Ψ)

3.2 Sayısal Kontrol Yöntemi

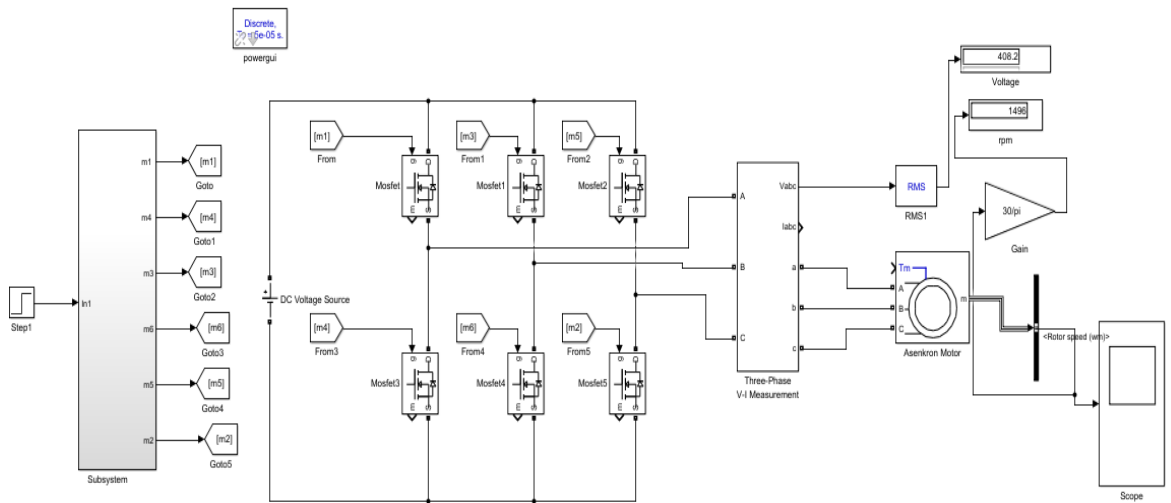
Sayısal kontrolde, motor besleme gerilimi ve frekansı kullanılarak hız kontrolü sağlanır. Sayısal kontrolün ana özelliği, manyetik akı değerinin, anlık olarak değişen gerilim ve uygulanan frekansla anma değerinde kalmasını sağlamasıdır[21]. Sayısal kontrol metodu, iki parametrenin anlık olarak değişimine bağlıdır. Hız, uygulanan frekansa göre artırılabilir veya azaltılabilir. Ancak bu empedansta belli değişimlere neden olur Bu değişim akımın artışı veya

azalışı ile sonuçlanır. Eğer akım küçük ise motor momenti düşer. Eğer frekans düşer veya gerilim yükselirse motor sargıları yanar, saturasyon meydana gelir. Bu problemden sakınmak için frekans ve gerilim aynı anda değiştirilmelidir[22]. Sayısal kontrol kararlı hal dinamiklerinin incelenmesi üzerine yoğunlaşır. Gerilim/frekans oranı sabit tutulmaktadır. Böylece hava boşluğu akısının değişmemesi üzerinde kuruludur. Farklı hızlarda sabit moment elde edilebilir.

Gerim/frekans oranının sabit tutulması stator direnci ve stator kaçak indüktansı üzerine düşen gerilimin değerinin yok denilebilecek kadar küçük olduğu varsayılarak sağlanır. Ancak düşük hız gerektiren uygulamalarda bu, değerler gözardı edilemez. Bu gerilim düşümünün kompanze edilmesi için stator besleme gerilimi artırılır.

Bu kontrol yönteminde baz hız değerine kadar, moment stabildir. Baz hız değerinde, gerilim ve frekans nominal değerlerindedir. Motorun frekansı arttırılmaya devam ederse gerilim nominal değer üzerinde çıkılmayacağından gerilim/frekans oranı sabit tutulamaz ve moment düşmeye başlar.

Bu yöntem, diğer kontrol yöntemleri ile karşılaştırıldığında ucuz ve kolay uygulanabilir. Frekans kontrolü için motorla ilgili çok fazla bilgiye ihtiyaç duyulmaz. Dolayısıyla kullanım alanı oldukça geniştir. Ancak doğrudan, momentin kontrolünün yapılamaması bu kontrol yönteminin olumsuz yanıdır. Motor hız kontrolü, açık çevrim ve kapalı çevrim olarak yapılabilir[23].



Şekil 3.1: Örnek SPWM Yöntemi Kullanılan V/f İle Kontrol Edilen 3 Fazlı Aseknron Motor Simulink Devresi

3.3 Vektör Kontrol Yöntemi

Asenkron motorlarda ilk yüksek performans sağlayan vektör veya alan yönlendirmeli kontrol metodu 1970'lerde F. Blaschke tarafından geliştirilmiştir. Motor faz akımları döner ortogonal d-q eksenine Clarke ve Park metodları kullanılarak çevrilir. Bu alan yönlendirmeli kontrol yöntemi ile asenkron motorlar, doğru akım motorlarına benzer şekilde moment ve akının ayrı olarak akım bileşenlerinin değiştirilmesi aracılığıyla, uygun kontrolü sağlar[24],[25]. Doğru akım veya fırçasız doğru akım motorlarıyla, alternatif akım motorlarını karşılaştırdığımız zaman, doğru akım motorlarının dinamik performansının daha iyi olduğu görülür. Vektör kontrol yöntemiyle, asenkron motorlarda da doğru akım motorlarında olduğu gibi dinamik performansı sağlıklı şekilde kontrol edilebilir. Asenkron motorlar, bu kontrol metodu sayesinde çok çeşitli hız aralıklarında kullanılabilir.

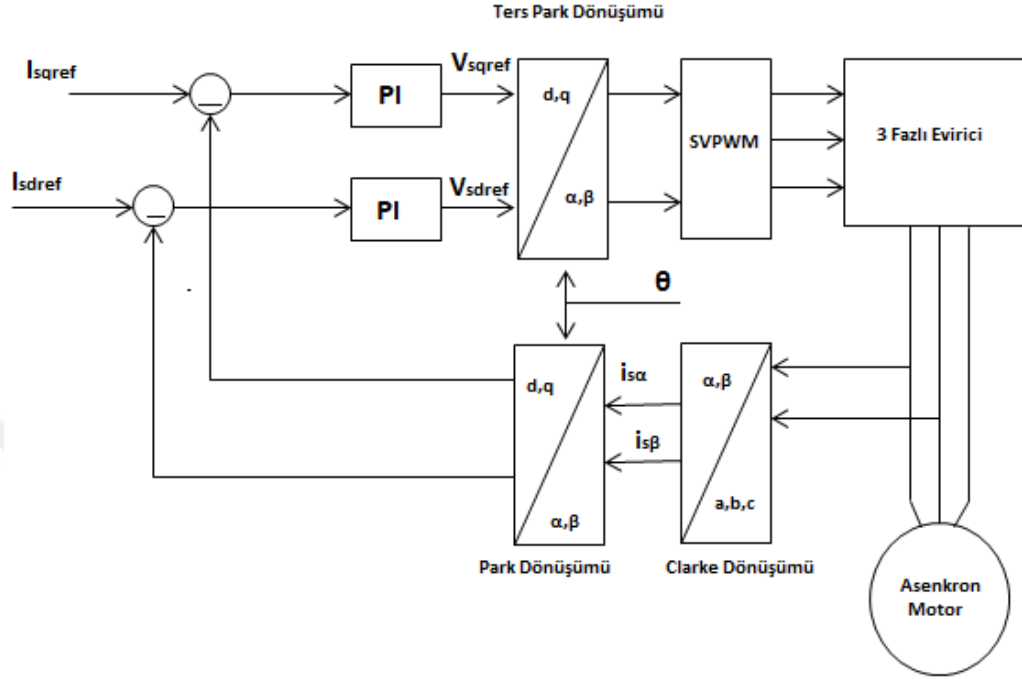
Vektör tanımından yola çıkarak, stator akımının genliği ile birlikte fazını da kontrol ettiği için alan yönlendirme metodu ile yapılan kontrole vektör kontrolü de denir[26]. Vektör kontrol yöntemi, motorların geçici hallerinde de moment kontrolünün sağlanması istenilen uygulamalar için geliştirilmiştir. Bu kontrol yönteminde moment ve akı bileşenleri bağımsız bir şekilde kontrol edilebilir. Moment ve akı birleşenlerinin bağımsız bir şekilde kontrol edilmesi 3 fazlı değerlerin 2 eksenli sistemde tanımlanması ile mümkündür. Bu eksenler d ve q eksenleri olarak adlandırılır. Vektör kontrol yönteminin fırçalı DC motor kontrol yönteminde benzetilmesinin nedeni d eksenindeki akımın fırçalı DC motordaki uyarma akımını, q eksenindeki akımın ise endüvi akımını temsil etmesidir.

Vektör kontrolde kendi içinde Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) ve Doğrudan Moment Kontrol (DMK) olmak üzere iki bölümde incelenebilir.

3.3.1 Alan Yönlendirmeli Kontrol

Vektör kontrol yönteminde, ilk olarak 3 fazlı sinüzoidal stator akımları, Clarke ve Park dönüşümleri kullanılarak, 2 eksenli sistemde tanımlanır. Alan yönlendirmeli kontrolde, koordinat dönüşümleri, elektromanyetik moment kontrolünü rotor akısından ayırır ve bunun sonucunda indüksiyon motoru doğru akım motoru gibi yönetilebilir[27]. Bu eksenlerden, d eksenindeki akım bileşeni ile rotor akısını kontrol etmek mümkündür ve motor verimini ve güç faktörünü ayarlamamıza imkan verir. q eksenini d eksenine dik olarak tanımlanır ve q eksenine ait akım bileşeni motor momentini kontrol edilmesini sağlar. Kontrol edilen

sistemde, anlık olarak prosesin devam etmesi için daha büyük değerlerde moment ihtiyacı oluşursa; q eksenine ait akım bileşenin daha büyük olması sağlanır.



Şekil 3.2: Alan Yönlendirmeli Kontrol Genel Gösterimi

Alan Yönlendirmeli Kontrol (AYK) yönteminde, motorun iki fazına ait akım değeri alınır. Clarke transformasyonu kullanılarak i_a , i_b , i_c değerleri i_α , i_β değerlerine dönüştürülür. Bu iki akım değeri Park transformasyon bloğunun giriş değerleridir. Bu akımlar, Park dönüşümü ile dönen referans çerçevesindeki d,q eksenlerinde tanımlanır. Referans, d ve q değerleri ile karşılaştırılarak optimal kontrol sağlanır. Farklı tip motorlar için de yukarıdaki temel şema geçerlidir. Örneğin PMSM kontrolü hedefleniyorsa, rotor akısı sabit olduğu için d eksenine ait referans değeri "0" olarak alınabilir. Asenkron motor kontrolünde bu değer "0" alınmaz[28].

Vektör kontrol yöntemini için iki adet ana veriye ihtiyaç vardır;

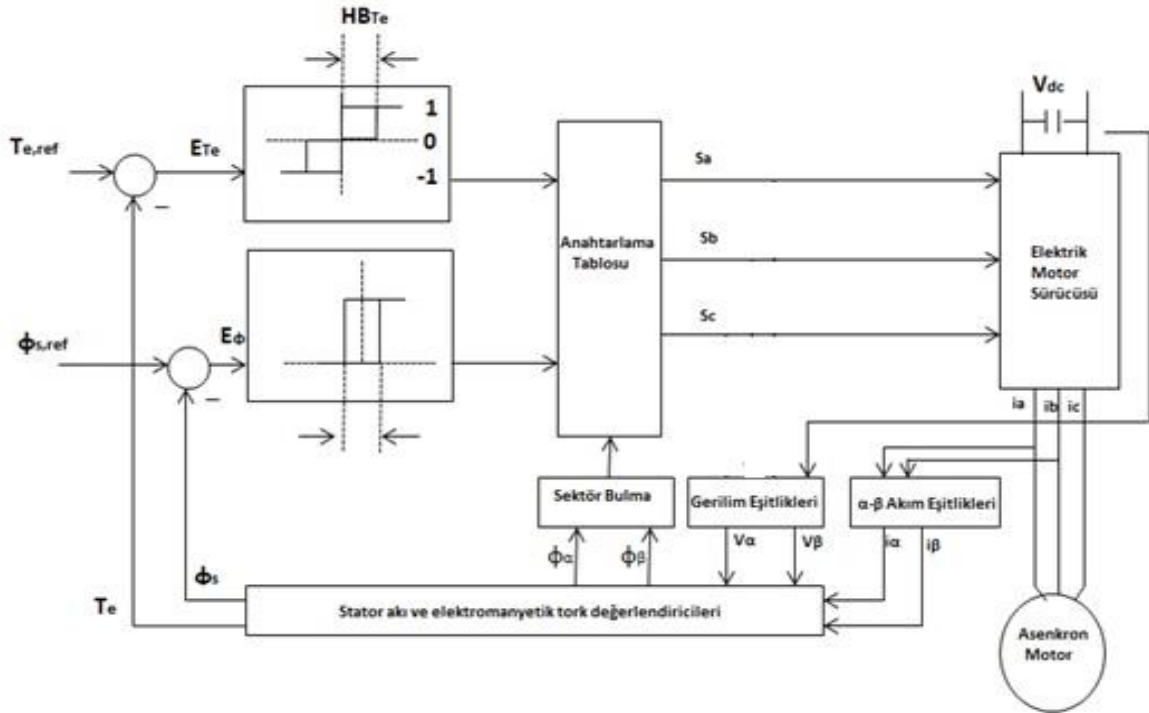
- Sürücü çıkışında, iki faza ait akım değeri
- Rotor akı pozisyonu

Rotor akı pozisyonu, senkron ve asenkron motorlarda farklı olarak bulunur. Senkron motorlarda rotor hız değeri rotor akısının hız değerine eşittir. Rotor akı pozisyonu direk olarak pozisyon sensörü ile ölçülebilir. Asenkron motorlarda rotor hızı, rotor akı hızına eşit değildir. Dolayısıyla rotor hızı belli metotlar kullanılır.

3.3.2 Doğrudan Moment Kontrol Yöntemi

Doğrudan moment kontrolünde, alan yönlendirmeli(uyarlamalı) kontrol yönteminden farklı olarak karmaşık koordinat dönüşümleri bulunmamaktadır. Doğrudan moment kontrolünde temel amaç, uygun stator gerilim vektörlerinin seçimi ile elektromanyetik moment ve stator manyetik alanının doğru şekilde kontrol edilmesidir[29]. Dinamik performansı gözönünde bulundurulursa diğer kontrol yöntemlerinden bir adım önde olacaktır. Parametre değişimlerine karşı hassasiyeti daha azdır. Doğrudan moment kontrolünün bir avantajı da hız ve pozisyon için, enkoder gerekmemesidir. Bu yöntemde sadece akım ve gerilim değerlerinin ölçümü akı, moment ve hız kestirimi için yeterlidir[30].

Sürücü çıkışında ölçülen akım ve sürücünün DC barasındaki gerilim değeri kullanılarak i_α , i_β , V_α , V_β değerleri hesaplanır. Bu değerler kullanılarak olması gereken stator manyetik alanları ve elektromanyetik moment hesaplanır. Olması gereken veriler referans verilerle karşılaştırılarak hata sinyalleri oluşturulur. Hata sinyallerine göre, referans değeri yakalayabilmek adına, vektör anahtarlama tablosundan uygun seçim yapılacaktır, sürücü anahtarlama tablosunun bu yönde yapılması sağlanır. Doğrudan moment kontrolünün genel yapısı aşağıdaki gibidir;



Şekil 3.3 Doğrudan Moment Kontrolü Genel Gösterimi

4. DOĞRUDAN MOMENT KONTROL YÖNTEMİNİN İNCELENMESİ

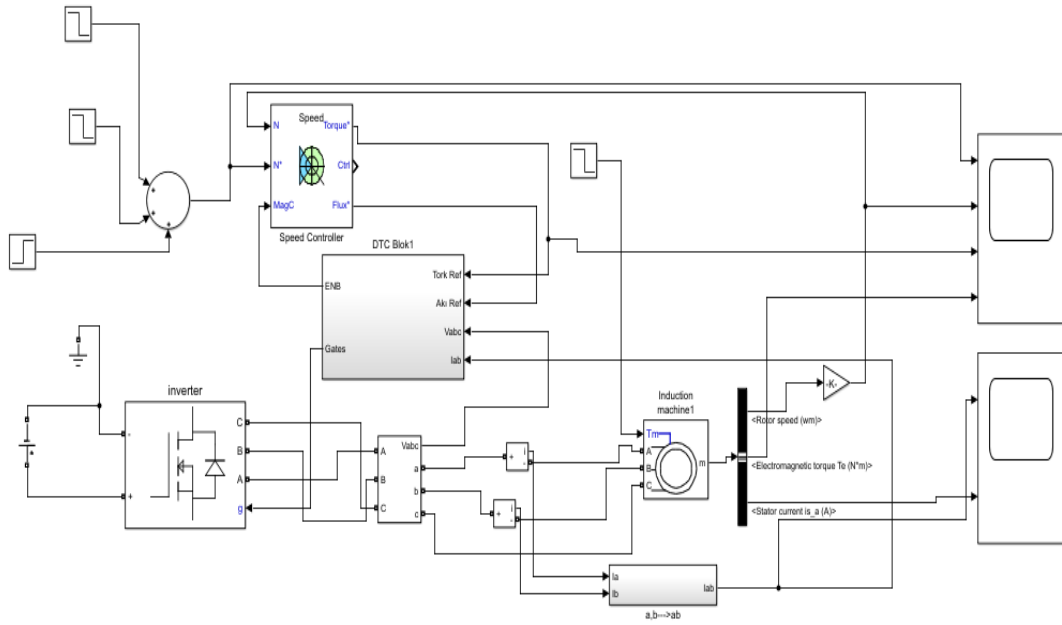
Doğrudan moment kontrolü (DMK), direkt olarak motora ait olan akı ve moment parametrelerini kontrol ederek en uygun kontrol yöntemini sağlar. DMK ilk olarak 1980'li yıllarda Depenbrock, Takahashi ve Noguchi tarafından alan yönlendirmeli kontrol yöntemine alternatif olarak tanıtılmıştır[31].

Bu, anahtarlama tablosundan seçilen uygun vektörler aracılığıyla yapılır. P kutup sayısında bir motor tarafından üretilen moment değeri aşağıdaki şekildedir. Moment değeri stator akısı, rotor akısı ve bu vektörler arasındaki açığa bağlıdır

$$T_e = \frac{3P}{2} \frac{L_m}{L_s L_r} |\Psi_r| |\Psi_s| \sin \theta_{rs} \quad (4.1)$$

Genel olarak Klasik bir DMK'yı incelediğimizde bu metodun, akı ve moment kontrolörü, stator akı ve elektromanyetik moment değerlendiricileri, anahtarlama tablosu, bölge bulma gibi bölümlerden oluştuğu ve gerçek değerlerin hesaplama yöntemiyle elde edilip, referans değerleriyle karşılaştırıldığını gözlemleriz. Gerçek değerlerin hesaplanmasında ise gerilim eşitlikleri (V_α, V_β), akım eşitlikleri (I_α, I_β) kullanılır. Bölge bulma da ise akı verileri ($\varphi_\alpha, \varphi_\beta$) göz önünde bulundurulur.

Son dönemlerde, moment, akı kontrolörü ve anahtarlama tabloları yerine, Fuzzy mantıksal kontrolünün de bir çok uygulamada başarılı şekilde çalıştığı görülmüştür. Sürücüye gönderilen anahtarlama durumları direkt olarak Fuzzy mantıksal kontrol bloğundan çıkar[32].



Şekil 4.1: Doğrudan Moment Motor Kontrolü Simulink Gösterimi

4.1 Akı ve Moment Kontrolörü

Doğrudan moment kontrol kullanılan bir sistemi incelediğimizde, stator akısı ve momente ait referans değerlerinin gerçek değerler ile karşılaştırılıp, hata oranı hesaplanır. Bu hata sinyali aşağıdaki şekilde görülen karşılaştırıcılara gönderilir.

Geleneksel doğrudan moment kontrol, yönteminde moment ve akı hatası her biri ayrı olarak belli bir bant aralığında sınırlandırılmaya çalışılır. Bu bant sınırlarının aralığı, genel olarak $2\Delta\varphi_s$, $2\Delta T_e$ olarak kabul edilir[33]. Akı histerisisini ele aldığımızda, Eğer stator akısı gerektiğinden fazla yükselirse “1”, düşerse “0” çıkışını verir

$$\varphi_s \leq \varphi_s^* - \Delta\varphi_s \text{ ise } b\varphi = 1, \quad (4.2)$$

$$\varphi_s \leq \varphi_s^* + \Delta\varphi_s \text{ ise } b\varphi = 0, \quad (4.3)$$



Şekil 4.2: Akı Kontrolörü Simulink Gösterimi

Moment histeririsisini ele aldığımızda, eğer moment gereğinden fazla yükselirse $b_T = 1$, gereğinden fazla düşük olursa $b_T = -1$, Eğer moment değerinde herhangi bir değişikliğe ihtiyaç yoksa $b_T = 0$ değerini alır[34].

Digitalleştirilmiş çıkış sinyali saat yönünün tersi veya ileri dönme yönüne göre aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

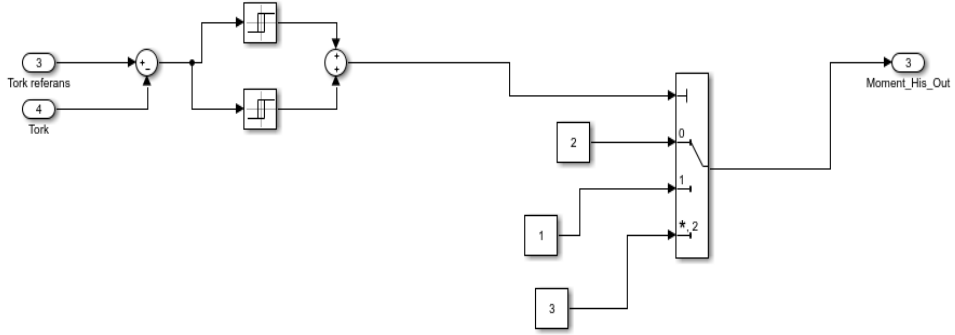
$$T_e - T_e^* \geq \Delta T_e \text{ ise } b_T = 1, \quad (4.4)$$

$$T_e \geq T_e^* \text{ ise } b_T = 0 \quad (4.5)$$

Saat yönünde veya geri dönüşlerde ise;

$$T_e^* - T \leq -\Delta T_e \text{ ise } b_T = -1, \quad (4.6)$$

$$T_e^* \geq T_e \text{ ise } b_T = 0 \quad (4.7)$$

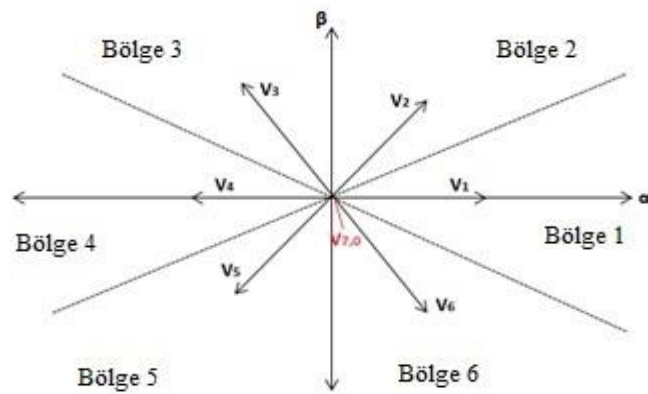


Şekil 4.3: Moment Kontrolörü Simulink Gösterimi

Moment ve akı karşılaştırıcıların sonuçları ile stator akı vektörünün pozisyonu da kullanılarak anahtarlama tablosundan, moment ve akı hatalarını histerisis band aralığında sınırlandırarak uygun gerilim vektörü seçilir

4.2) Anahtarlama Tablosu

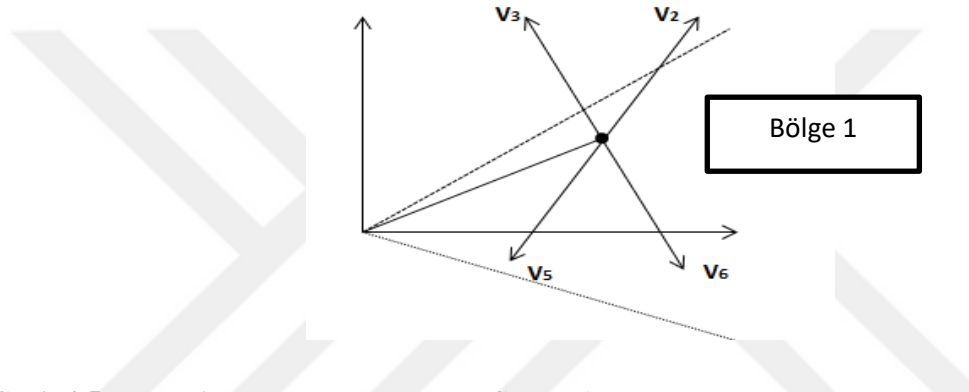
Stator manyetik akısı pozisyonu vektörel olarak, α - β ekseninde gösterimi mümkündür. Manyetik akı pozisyonu altı ayrı alanda incelenebilir.



Şekil 4.4: Anahtarlama Tablosu Gösterimi

Burada amaç, histerisis band aralığında kalabilmek için gerekli olan gerilim vektörleri seçilir. Uygun anahtarlama yapılarak moment ve akı değerleri referans değerine getirilmesi

hedeflenir. Örneğin, şekil 4.5'te verilen stator akı vektörünü ele alırsak; bu vektör -30° ile 30° arasında ise birinci alanda bulunmaktadır. Bu alanda bulunan stator akı vektörü için, V_2 , V_3 , V_5 , V_6 vektörleri kullanılarak uygun kontrol yapılması sağlanabilir. Eğer V_2 vektörü kullanılırsa; akı ve moment değerinin artırılması sağlanacaktır, V_3 vektörünün kullanımı durumunda akı değerinin düşerken, moment değerinin artması beklenir. V_5 uygulandığı takdirde, moment ve akı değerlerinde aynı anda azalma olacaktır. Son olarak V_6 kullanılırsa, akı değerinde artmaya neden olurken, momentin değerinin azaldığı gözlemlenebilir. Bu alanda, moment değerinde kararlılığa neden olacağı için V_1, V_4 vektörleri kullanılmaz [35],[36].



Şekil 4.5: Bölge 1 Bölümünde Bulunan Stator Akı Vektörü ve Kontrol Vektörleri Gösterimi

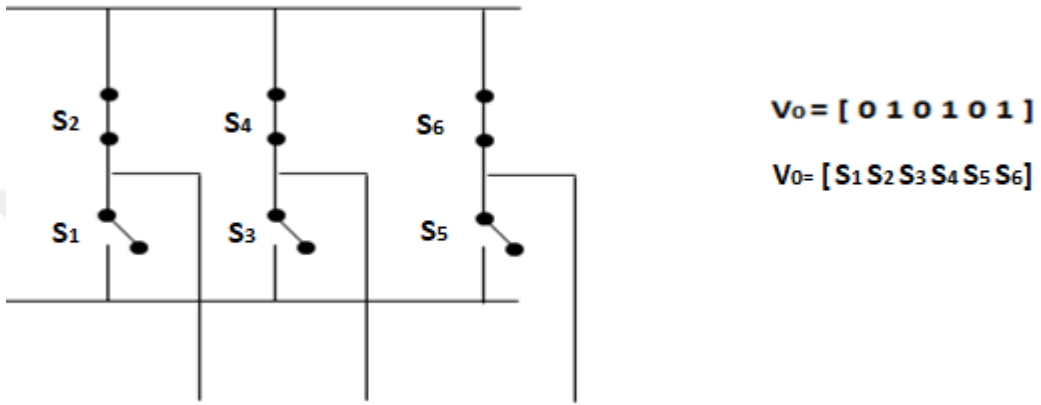
Histerisis karşılaştırmalı çıkışları ve stator akısına ait olan bölge verileri kullanılarak, anahtarlama tablosundan uygun gerilim vektörü seçilir. Gerilim vektörlerine ait anahtarlama tablosu aşağıdaki gibidir.

Tablo 4.1: Gerilim Vektörlerine Ait Anahtarlama Tablosu

Bϕ	bt	S1	S2	S3	S4	S5	S6
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	0	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
0	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	0	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

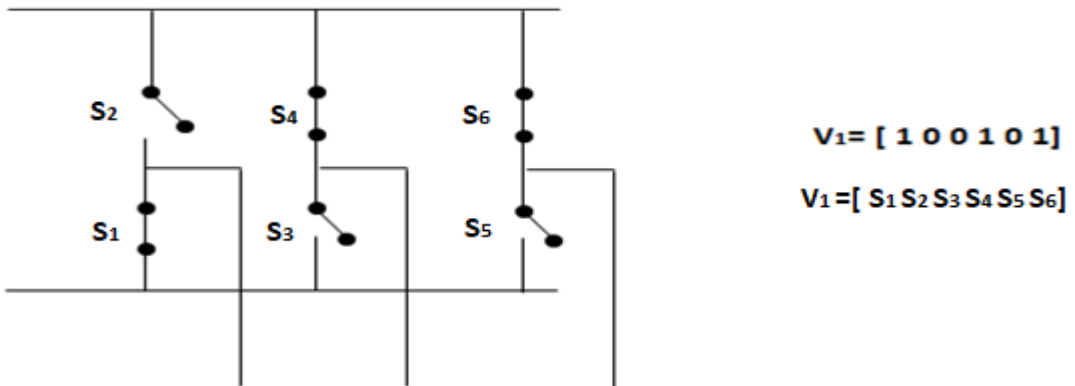
V_1, V_2, \dots, V_7 vektörleri kullanılarak elektrik motor sürücü tetiklemeleri kontrol edilebilir. Örneğin durum 1 ve durum 2' de V_0 ve V_1 vektörleri kullanımı durumunda anahtarlamaların nasıl olması gerektiği gösterilmiştir.

Durum 1 : V_0 vektörü kullanılırsa;



Şekil 4.6: V_0 Vektörü Kullanımında Anahtarlama Durumu

Durum 2: V_1 vektörü kullanılırsa;

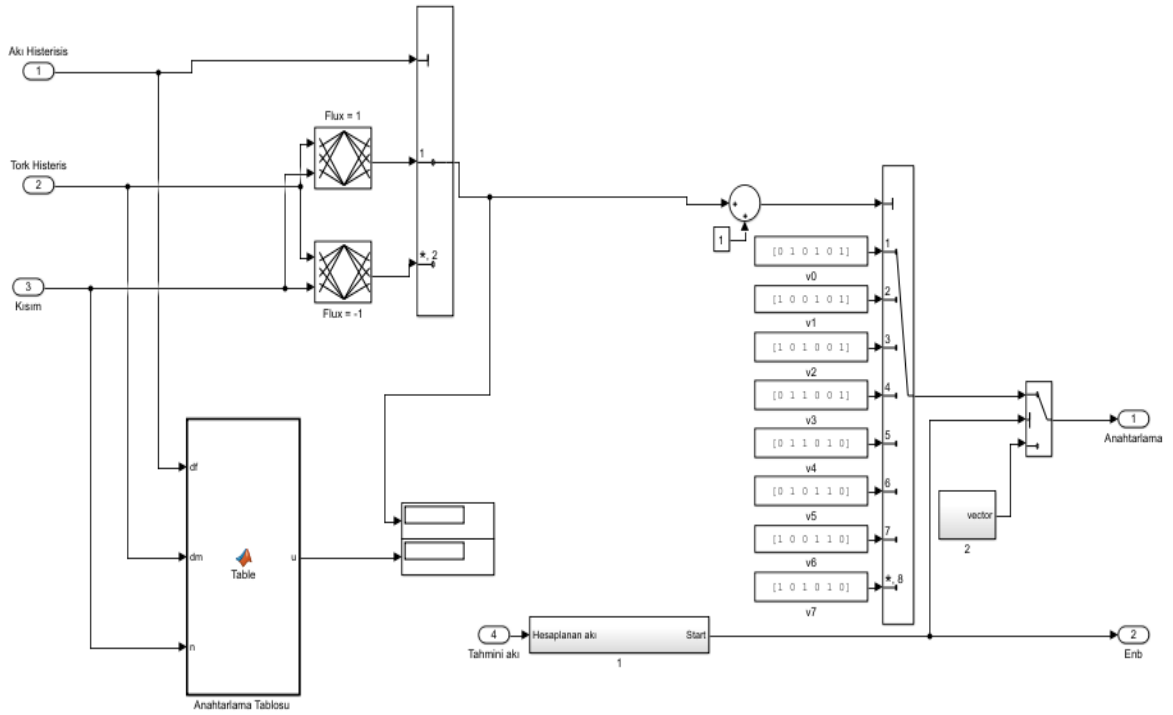


Şekil 4.7: V_1 Vektörü Kullanımında Anahtarlama Durumu

Vektörler ve anahtarların durumunu genel olarak aşağıdaki tablodaki gibi özetleyebiliriz.

Tablo 4.2: Uygulanan Gerilim Vektörlerine Göre Anahtarlama Durumları

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
V ₀	0	1	0	1	0	1
V ₁	1	0	0	1	0	1
V ₂	1	0	1	0	0	1
V ₃	0	1	1	0	0	1
V ₄	0	1	1	0	1	0
V ₅	0	1	0	1	1	0
V ₆	1	0	0	1	1	0
V ₇	1	0	1	0	1	0



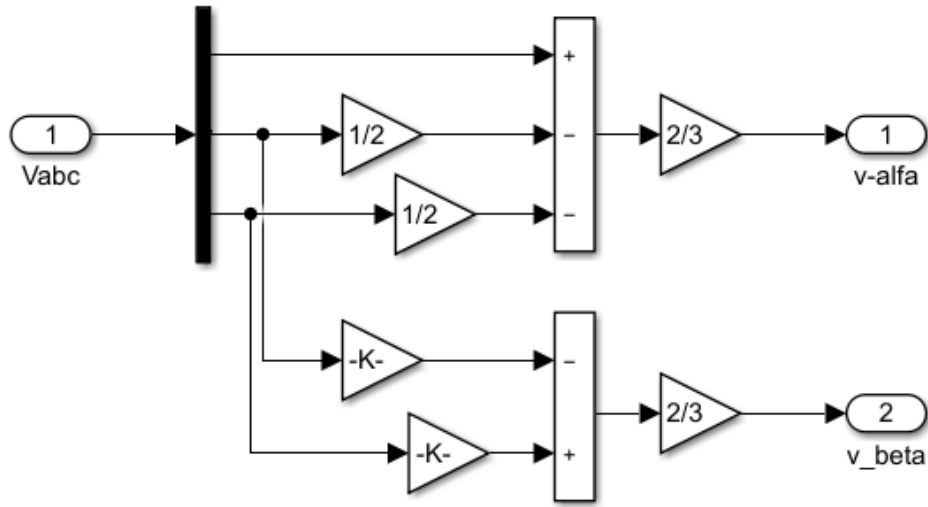
Şekil 4.8: Uygun Vektör Seçim Bloğu Simulink Gösterimi

4.3 Stator Akı ve Elektromanyetik Moment Değerlendiricileri

Klasik doğrudan moment kontrolünde kullanılan stator akı ve elektromanyetik moment değerlendiricileri, akı ve moment bağlantı değerlerinin hesaplanmasında görevlidir. Yukarı daha önce söz edilen denklemler kullanılarak stator akısı ve elektromanyetik moment değerleri bulunur.

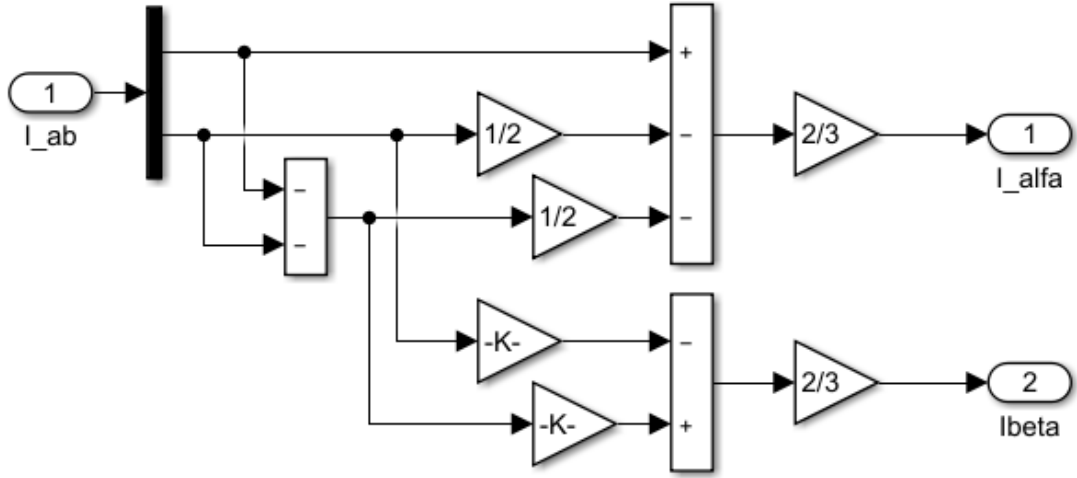
Öncelikle motor beslemesinde kullanılan V_{abc} , gerekli formüller kullanılarak $V_{\alpha\beta}$ şeklinde ifade edilir. Aynı durum stator akı ve elektromanyetik moment hesaplamasında kullanılacak olan akım içinde geçerlidir.

V_{abc} \longrightarrow $V_{\alpha\beta}$ dönüşümü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir



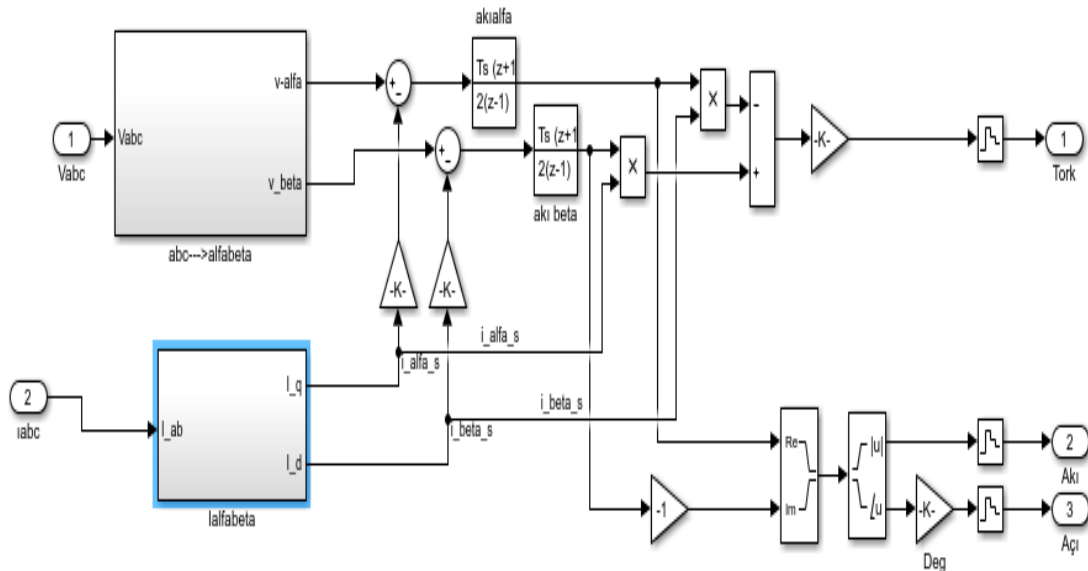
Şekil 4.9: Faz Geriliminin $\alpha\beta$ Eksenine Çevrilmesi

I_{abc} \longrightarrow $I_{\alpha\beta}$ dönüşümü aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Faz Akımlarının $\alpha\beta$ Eksenine Çevrilmesi

Elde edilen yeni akım ve gerilim ifadeleri kullanılarak tahmini olarak moment ve akı değeri hesaplanırken, sürücü anahtarlamasında kullanılan bölge bölümü ile ilgili veriler elde edilir.



Şekil 4.11: Akı, Moment, Açık Hesaplarının Simulink Gösterimi

5. KALMAN FİLTRESİ UYGULANMASI

Endüstride bazı sistem veya motorlarda geri besleme verileri kullanılmayabilir. Bu tarz, geri besleme verileri alınmayan motor sürücülerinin, performansı açısından motor tahmini değerlerinin kesinliği oldukça önemlidir. Kalman ve genişletilmiş kalman filtresi, gürültü içeren sistemlerde en uygun durum tahmini yapılabilmesi açısından oldukça tercih edilen bir yöntemdir[37].

Kalman filtresi, durum uzay modeli ile gösterilen bir dinamik sistemde, modelin önceki bilgileriyle birlikte çıkış bilgilerinden sistemin durumunu tahmin edebilen bir filtredir. Kalman Filtresi, geleneksel tahmin edicilerde olduğu gibi filtreleme özelliğine rağmen, sistemin ölçülemeyen durumlarını tahmin etmek için çok güçlü ve yeteneklidir[38].

Kalman Filtresinin ana mantığı, sistem dinamiğine ait çıktı ile sisteme ait matematiksel modelinin çıktısının birbirine yaklaştırılması üzerine kuruludur. Dinamik bir sistemine ait, durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Durum denklemi;

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (5.1)$$

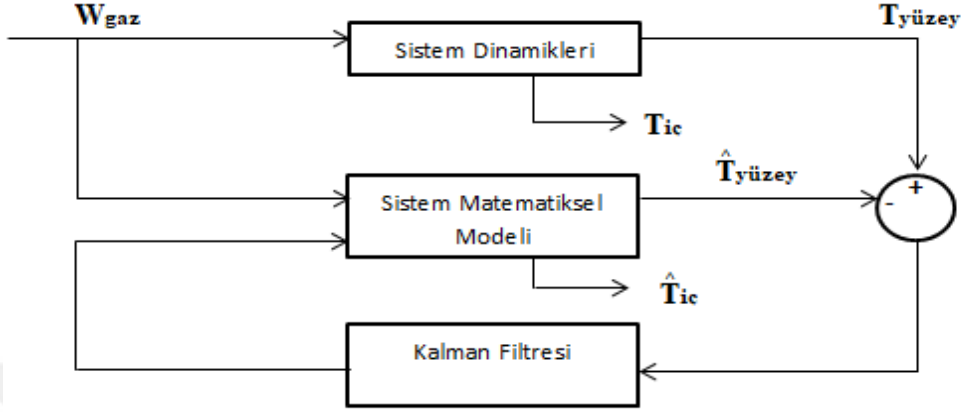
Çıkış denklemi;

$$y_k = C x_k + v_k \quad (5.2)$$

Aşağıda kalman filtresine ait model gösterilmiştir. Burada sanayide kullanılan ve iç sıcaklığının ölçümü mümkün olmayan ergitme fırınıımızın olduğunu düşünelim. Ürünün istenilen sürede eritilmesi, prosesin aksamaması için brülör çalışma kapasiteleri oldukça önem arz eder. Brülör kapasitesinin iç sıcaklık değerine göre gaz servosunu oransal olarak açtırıp-kapattırarak ayarlanılmaya çalışıldığını varsayalım ve iç yüzey ölçülemediği için dış yüzey ölçümü alalım.

Modelde, verilen gaz miktarına göre gerçekleşen bir yüzey ısı ve hesaplanan bir yüzey ısı bulunur. Bunların arasındaki fark alınarak kalman filtresinden geçirilir ve tekrar sistem matematiksel modellemesine iletilir. Burada amaç, ölçülen ve tahmini değer kullanılarak optimal bir sıcaklık değeri elde edilmesidir. Gerçek yüzey değeri ile hesaplanan yüzey değeri

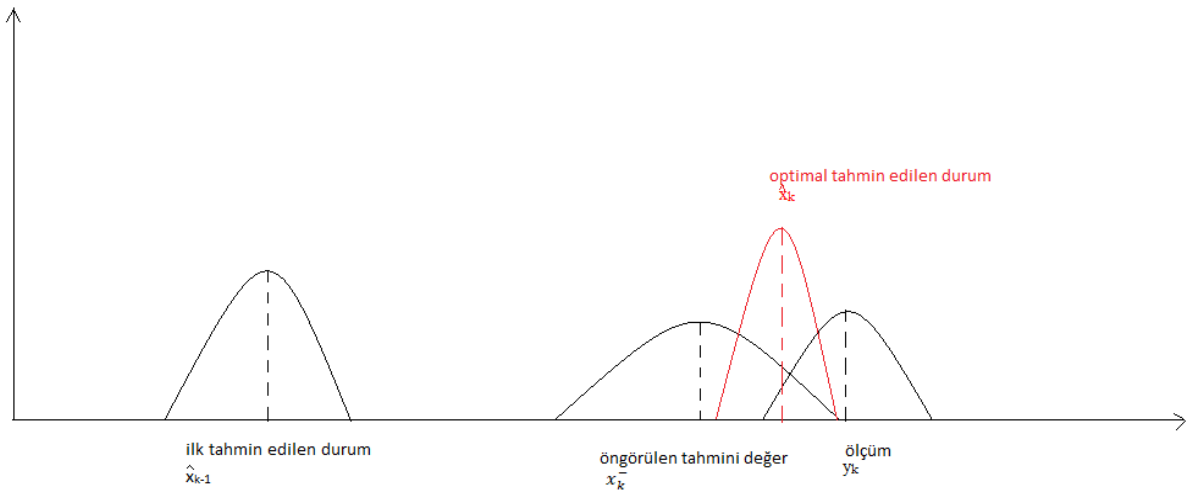
birbirine ne kadar çok yaklaştırılırsa, ölçülemeyen iç sıcaklık değeri ile hesaplanan iç sıcaklık değeri birbirlerine o kadar yakın olur. Böylece iç yüzey sıcaklığı ölçülemese bile doğruluğu yüksek şekilde hesaplanabilir.



Şekil 5.1: Kalman Filtresi Çalışma Mantığı

Kalman filtrelerinde, uygulanan aşağıdaki şekilde inceleyebiliriz.

- İlk durum tahmin değeri kullanılarak, sistem modeli değerleri ve sistem gürültüsü kovaryansı kullanılarak bir sonraki durum değeri hesaplanır.
- Sistem modeli değeri, hesaplanan sonraki durum değeri ve ölçme gürültüsü kovaryans değerleri ile kalman filtresine ait kazanç değeri bulunur.
- Kalman Kazancı, hesaplanan durum değeri, ilk durum değeri, ölçülen veriler kullanılarak optimal durum elde edilir



Şekil 5.2: Kalman Filtresi Hesaplama Algoritması

5.1 Kalman Filtresine Ait Matematiksel İfadeler

Kalman Filtresine ait matematiksel ifadeler aşağıdaki gibidir [39];

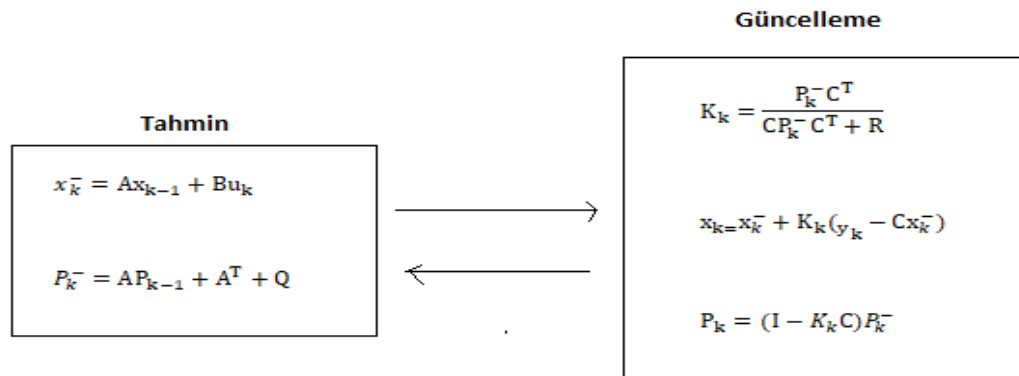
$$\bar{x}_k = Ax_{k-1} + Bu_k \quad (5.3)$$

$$P_k^- = AP_{k-1} + A^T + Q \quad (5.4)$$

$$K_k = \frac{P_k^- C^T}{CP_k^- C^T + R} \quad (5.5)$$

$$x_k = \bar{x}_k + K_k(y_k - C\bar{x}_k) \quad (5.6)$$

$$P_k = (I - K_k C)P_k^- \quad (5.7)$$



Şekil 5.3: Kalman Filtresi Matematiksel Algoritması

5.2. Genişletilmiş Kalman Filtresi

Sensörsüz sürücü uygulamalarında tüm gözlemlere dayalı tekniklerin arasında, genişletilmiş kalman filtresi anlık durum tahmini için en basit ve etkili yöntemlerden biridir[40]. Kalman filtereleri lineer sistemlerde oldukça başarılı sonuçlar verirken, lineer olmayan sistemlerde istenilen kesinlik elde edilemeyebilir. Lineer olmayan sistemlerde, daha doğru sonuçlar

verebilen genişletilmiş kalman filtreleri tercih edilir. Asenkron motor modeli lineer olmadığı için genişletilmiş kalman filtresi kullanılması daha uygundur. Stokastik sürekli zaman, genişletilmiş kalman filtresi yapısına uydurulması için ayrık formda ifade edilmelidir[41].

Doğrusal olmayan sistemlere ait durum ve çıkış denklemleri aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

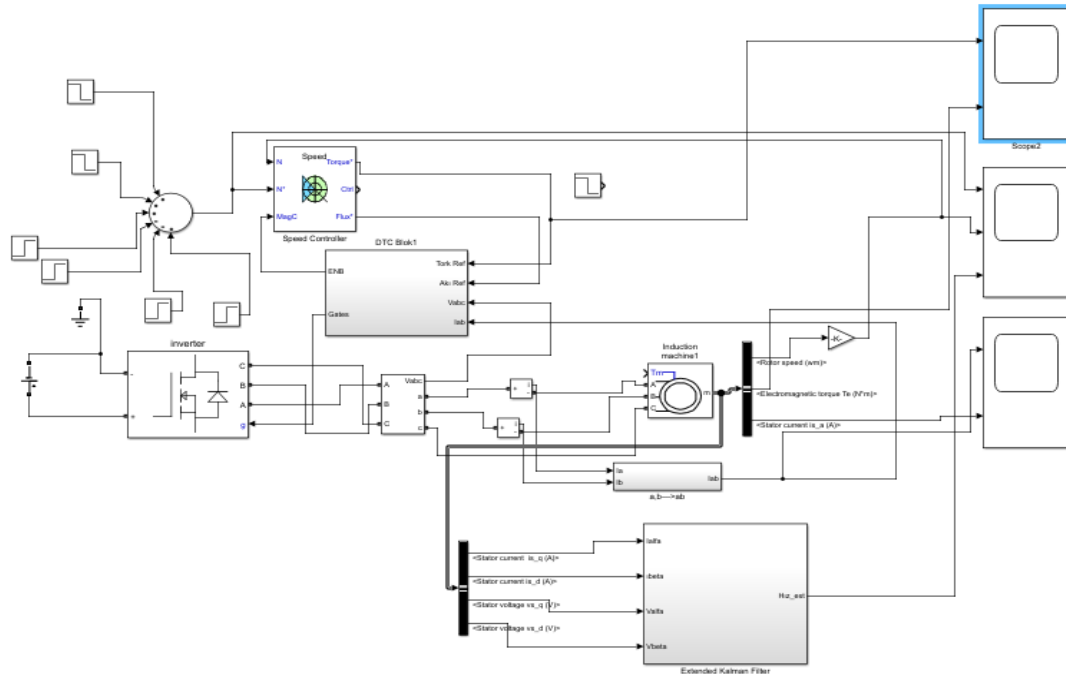
Durum Denklemi;

$$x_k = f(x_{k-1}, u_k) + w_{k-1} \quad (5.8)$$

Çıkış Denklemi;

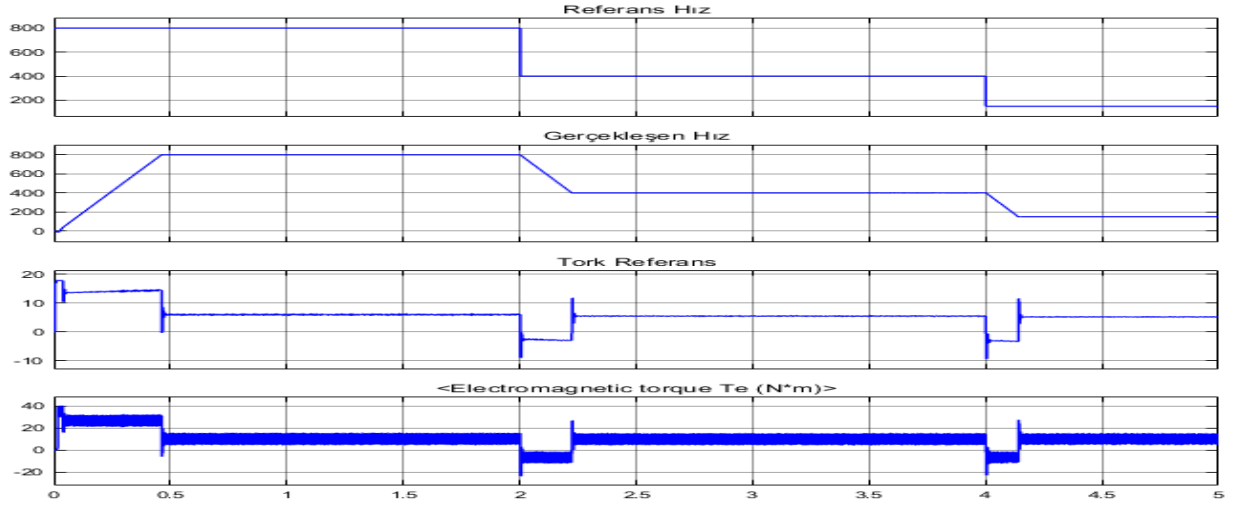
$$y_k = c(x_k, u_k) + v_k \quad (5.9)$$

Genişletilmiş kalman filtresinde, Jacobian kullanılarak sistem lineerleştirilir. Gürültü, ölçüm ve durum kovaryans matrisleri belirlenerek sistem daha önce anlatıldığı şekilde, durumla ilgili optimal kestirim yapılmaya çalışılır.

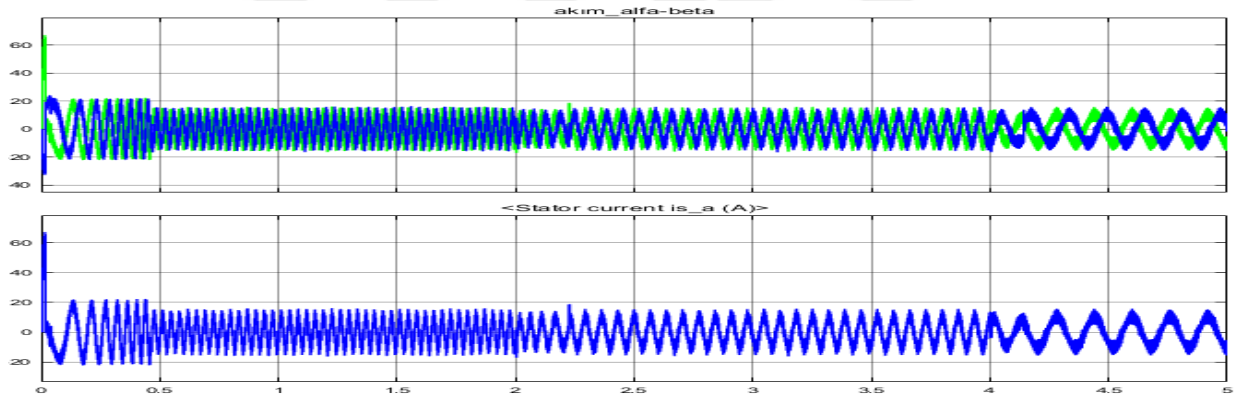


Şekil 5.4: DMK ve Kalman Kullanılarak Asenkron Motor Kontrolünün Simulinkte Gösterilmesi

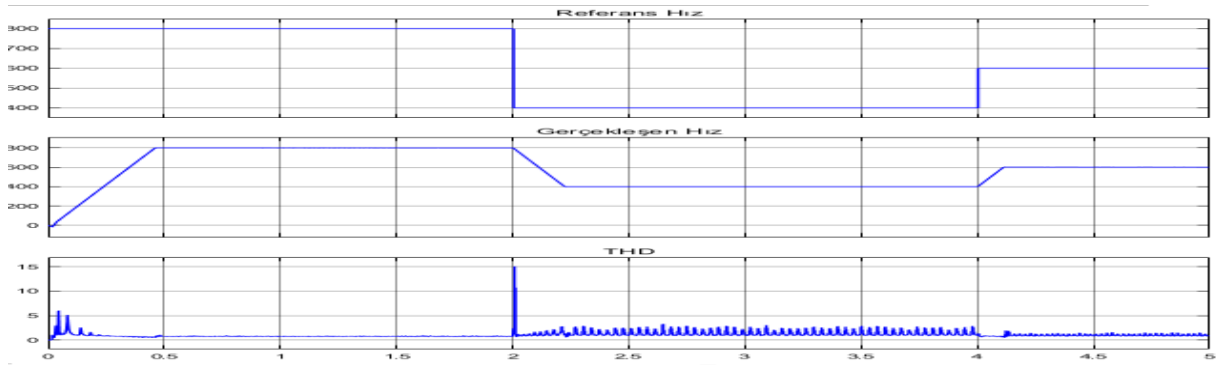
6. BENZETİM ÇALIŞMALARI SONUÇLARI



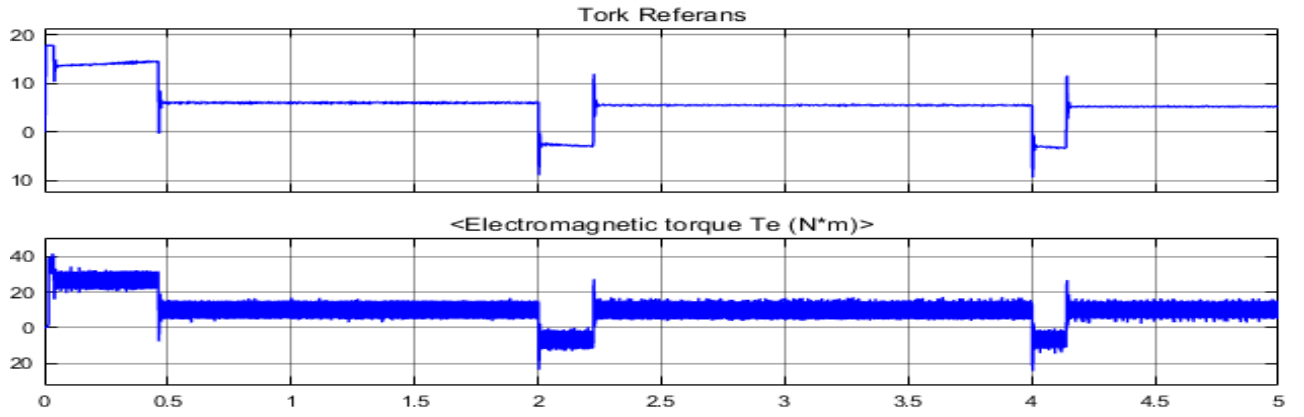
Şekil 6.1: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans ve Gerçekleşmesi, Hız Referans ve Gerçekleşmesi(10kHz)



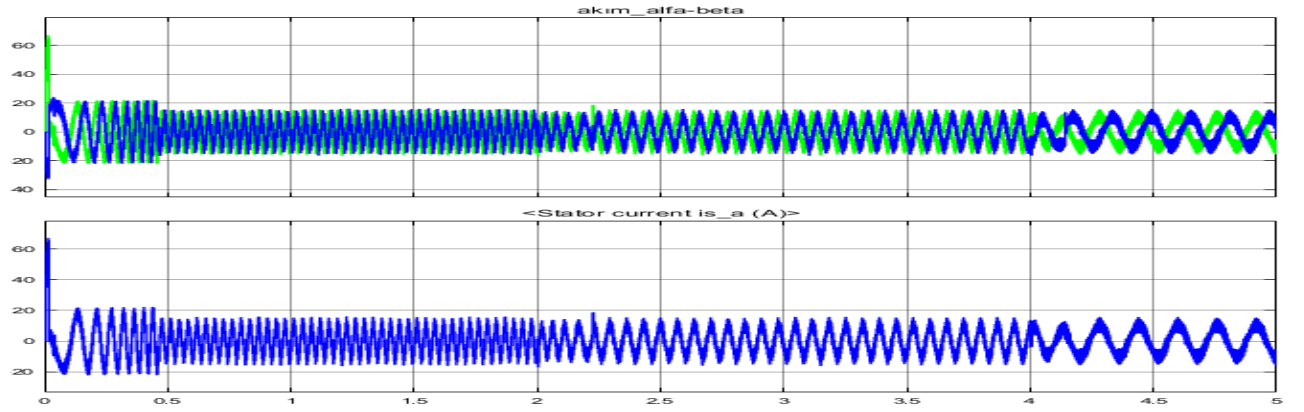
Şekil 6.2: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları(10Khz)



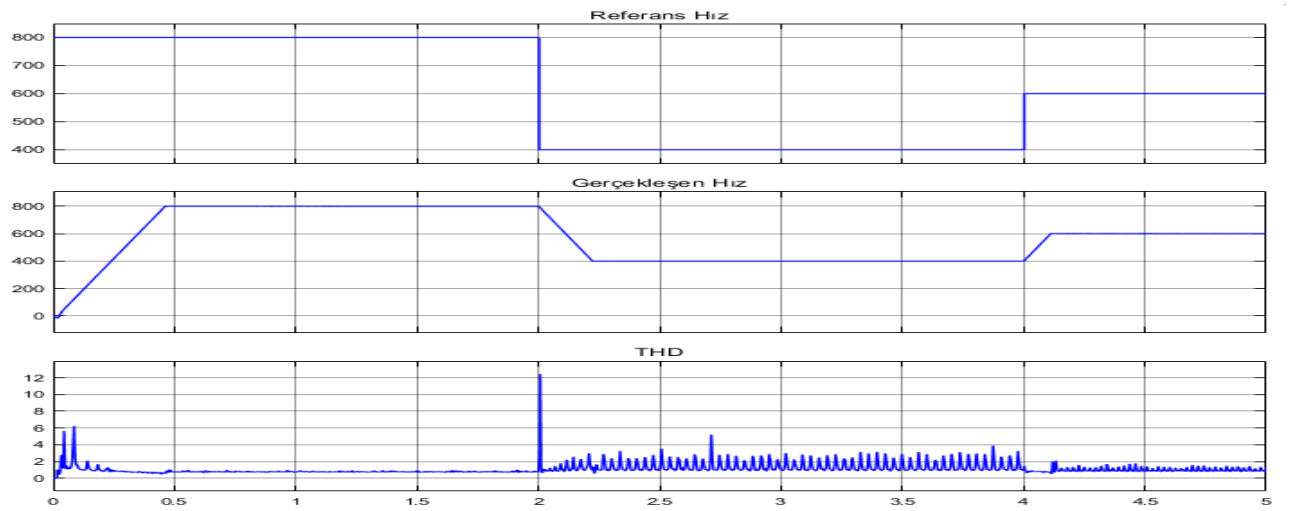
Şekil 6.3: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (10 kHz)



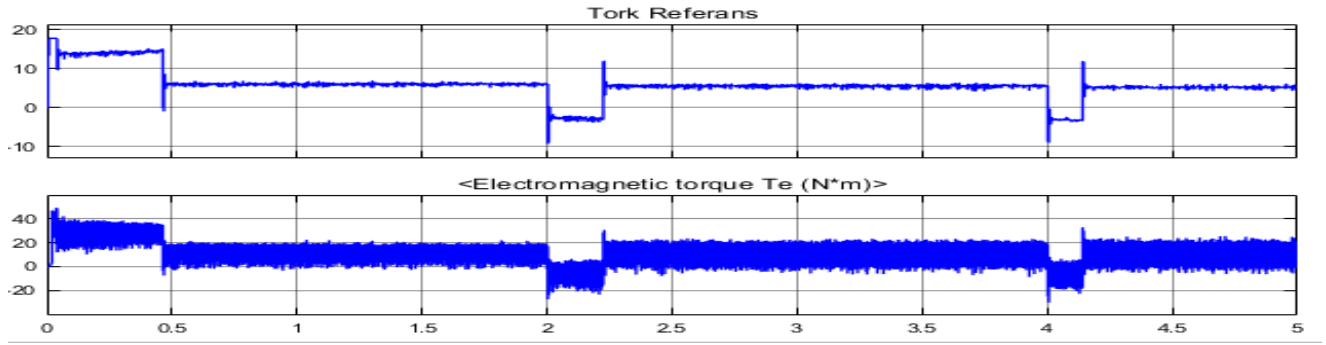
Şekil 6.4: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans Gerçekleşmesi(8 kHz)



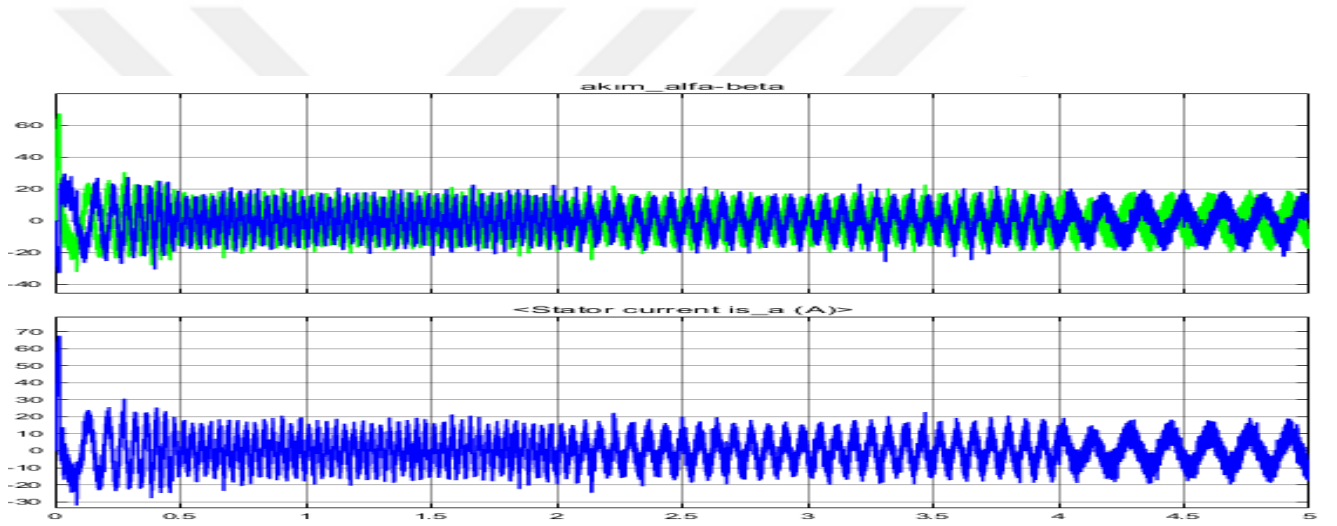
Şekil 6.5: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları(8 kHz)



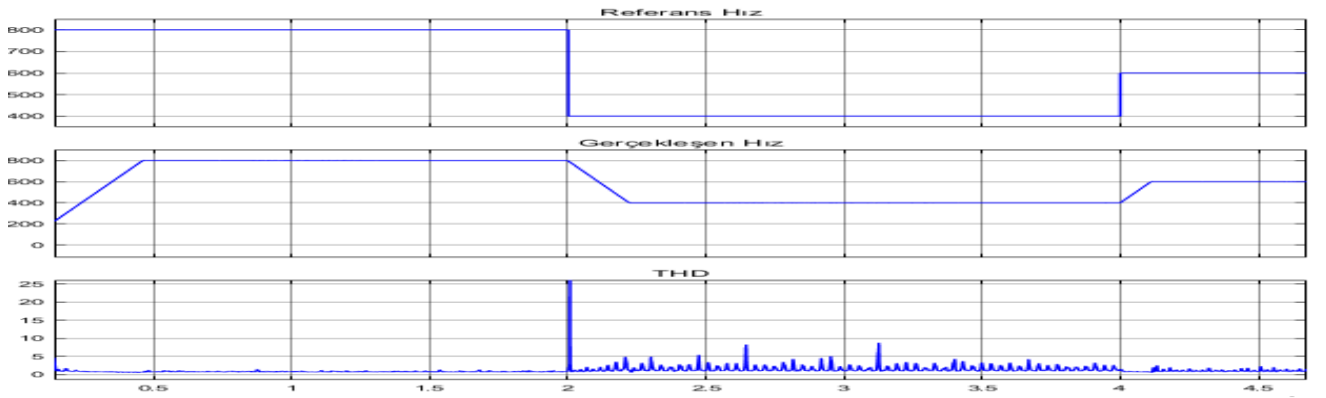
Şekil 6.6: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (8 kHz)



Şekil 6.7: Doğrudan Moment Kontrolü Moment Referans ve Gerçekleşmesi (6 kHz)

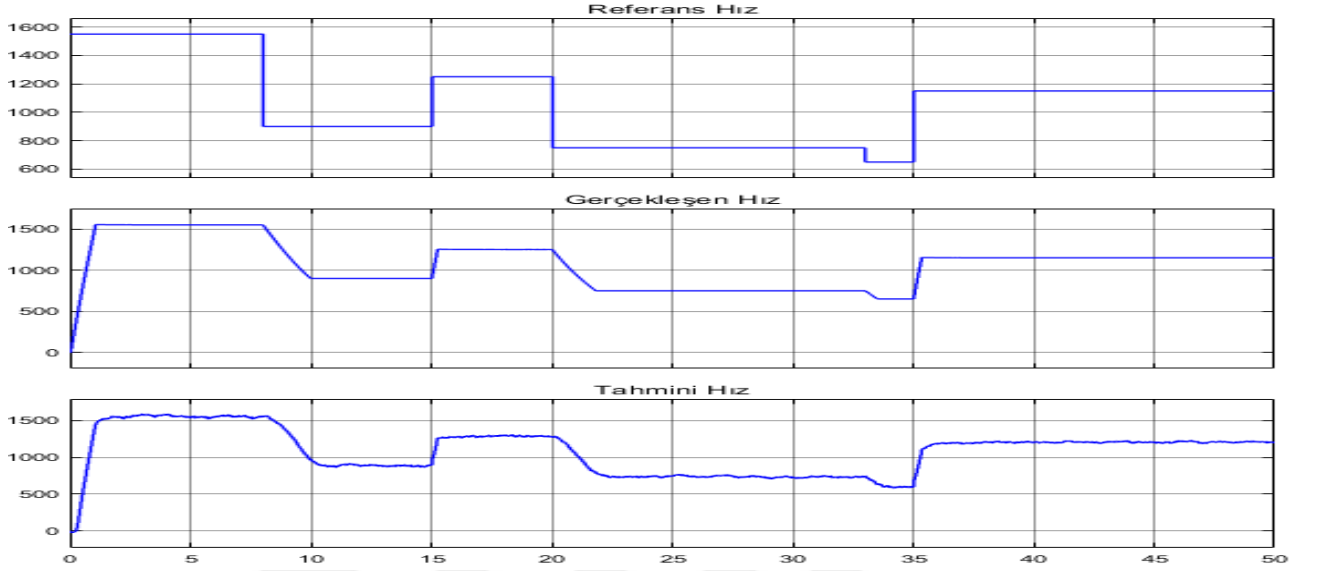


Şekil 6.8: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları(6 kHz)

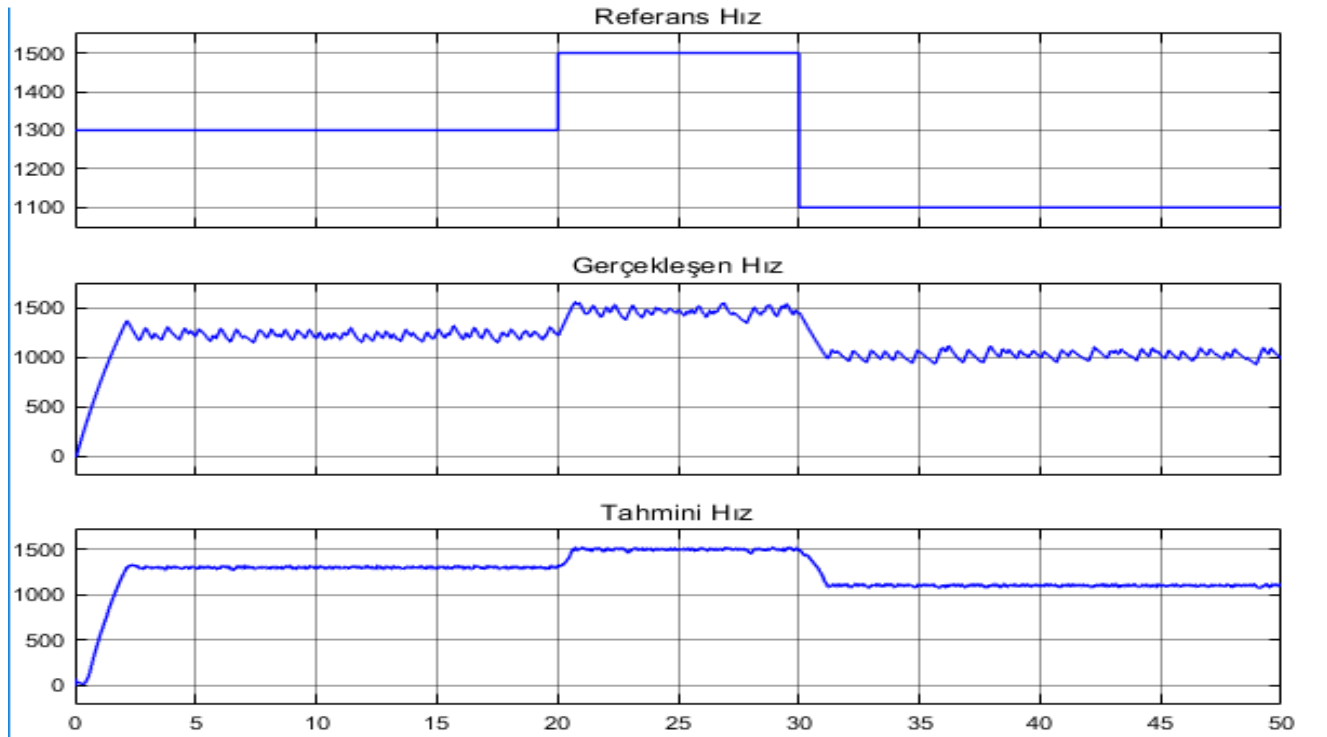


Şekil 6.9: Doğrudan Moment Kontrolü Hat Akımları THD Analizi (6 kHz)

Farklı referans değerlerinde ve yüksüz durumda sistemin davranışları şekil 6.10’ da gösterilmiştir. Ayrıca sensörsüz kontrol yapılmak istendiğinde elde edilen sonuç, şekil 6.11’deki gibidir



Şekil 6.10: DMK Kontrol Yöntemi ve Kalman Çıktısı (Yüksüz)



Şekil 6.11: Sensörsüz Asenkron Motor Kontrolü

7. SONUÇ VE TARTIŞMA

Asenkron motorların istenilen şekilde çalışması; kontrolü, günümüzde kaliteli, düşük maliyetli ve daha verimli ürün üretilebilmesi için önemli bir parametredir. Bunun sağlanması adına çeşitli kontrol yöntemleri uygulanmaktadır.

Yapılan çalışmada , kontrol yöntemleri ayrı ayrı alınarak birbirlerine karşı avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Genel olarak kontrol yöntemleri vektörel ve sayısal kontrol yöntemi olarak ikiye ayrılmaktadır. Dinamik, hızlı cevap gerektiren sistemlerde vektöre dayalı kontrol yöntemi daha sağlıklı olarak çalışmaktadır. Vektöre dayalı kontrol sistemi de kendi içinde, Doğrudan moment kontrolü ve alan yönlendirmeli kontrol olmak üzere alt kırımlara sahiptir. Bu iki kontrol yöntemini incelediğimizde, alan yönlendirmeli kontrol yönteminde Clarke ve Park dönüşümlerinin kullanıldığını ve matematiksel olarak daha fazla işlem yapıldığını görürüz. Doğrudan moment kontrolü daha az matematiksel dönüşümlere sahip olduğu için çevrim süresi daha kısa ve oluşan değişimlere cevap verme süresi, alan yönlendirmeli kontrole göre daha kısadır.

Doğrudan moment kontrolünü kısaca özetlemek gerekirse;

- Motor besleme tarafındaki, 3 fazlı gerlim ve akım değerleri ölçülür
- Ölçülen gerlim ve akım değerleri, daha kolay hesap yapılabilmesi amacıyla Clarke dönüşümü yapılır ve stator sabit koordinat sisteminde tanımlanır
- Clarke dönüşümü sonrası elde edilen değerler, stator elektromanyetik moment değerlendiricisi aracılığıyla mevcut moment, akı ve, akı açısı değerleri hesaplanır
- Mevcut moment, akı değerleri referans değerler ile karşılaştırılarak hata sinyali oluşturulur
- Hata sinyalleri, moment ve akı değerlendiricilerine gönderilir. Bu noktada momentin veya akının artırılması, azaltılması veya olağan şekilde tutulması değerlendirilerek yapılarak, anahtarlama tablosuna sinyal yönderilir
- Anahtarlama tablosu gelen sinyalleri ve akının bulunduğu bölgeyi değerlendirerek, sürücüye uygulaması gereken vektör seçimini gerçekleştirir.
- Sürücüde bulunan anahtarlar, anahtarlama tablosundan gelen veriye göre pozisyon alırlar

Motorun kontrolünde genellikle kapalı çevrim kontrolü tercih edilir. Yani motor hızı dışarıdan alınan geri besleme verilere göre azaltma veya artmaya gidecektir. Bu tarz kontrol sistemlerinde geri besleme bilgisinin doğru gelmesi çok önemlidir. Gürültüden etkilenen, doğru ölçüm alınamayan sistemlerde geri beslemeden gelen bilgiye göre çalışılması olumsuz durumlara yol açabilir.

Geri beslemenin, çeşitli sebeplerden dolayı doğru alınmadığı sistemlerde çıkış değerlerini kalman veya genişletilmiş kalman filtresi kullanılarak kestirilmesi mümkündür. Örneğin motor akımları, gerilimleri ve motor parametreleri kullanılarak, motorun mevcut hızıyla ilgili bir kestirim yapmak mümkündür. Kalman filtresinde başlangıç değerlerini kullanarak varyansı geniş olan tahmini bir değer oluşturulur. Bu değer ve çıkış verileri kullanılarak en uygun durum kestirilir. Bu süreç bir sonraki adım için tekrarı üzerine kuruludur. Kalman filtresi lineer sistemlerde doğru sonuçlar verirken, lineer olmayan sistemlerde genişletilmiş kalman filtresi kullanımı daha doğrudur.

Bu tezde, matlab/simulink devresinde aşağıda parametreleri verilen asenkron motor kullanılmıştır. Asenkron motor kontrolünde, doğrudan moment kontrol yöntemi uygulanması yapılmıştır. Kontrol sinyal frekansları değiştirilerek (10 kHz, 8 kHz, 6 kHz) her durum için motor çıktıları incelenmiştir. Şekil 6.3, şekil 6.6 ve şekil 6.9'da verilen referanslara göre alınan çıktılarda geri besleme olarak motor dönüş hızı bilgisi alınmıştır. Bu grafiklerden hızın verilen referans değerine göre paralel olarak değiştiği gözlemlenmiş ve doğrudan moment kontrolünün uygun şekilde yapıldığı görülmüştür.

Simulasyonda kullanılan motor parametreleri ile, motorun hızı kestirilmeye çalışılmıştır. Şekil 6.10'da referans değerleri bir çok kez değiştirilerek, mevcut motor hızı ve kestirilen motor hızı verileri alınarak karşılaştırılmıştır. Genişletilmiş Kalman Filtresi bloğundan çıkan, kestirilen hız değerinin mevcut değerle oldukça paralel olarak hesaplamaların yapılmış olduğu görülmüştür. Şekil 6.11'de geri besleme olarak motorun hız verisi yerine Genişletilmiş Kalman Filtresinden gelen veriler kullanılmıştır. Böylece geri besleme almanın mümkün olmadığı veya bozucu etmenlerden dolayı sağlıklı geri besleme alınamayan uygulamalarda asenkron motorun, verilen hız referansına göre uygun şekilde hareket etmesi sağlanmıştır.

Farklı kontrol frekanslı simulasyon çıktılarını karşılaştırdığımızda, anahtarlama frekanslarının düşürüldüğünde, stator akımlarına ait olan dalgalarda bozulmalar olduğu görülmüş ve THD değerinde artmalar olduğu görülmüştür. Aynı şekilde düşük frekanslı kontrol sinyallerinde,

hız referansı verilen, hız ayarlama bloğu çıkışıdaki moment referansında dalgalanmaların arttığı görülmektedir. Daha önce yapılan çalışmalarda da frekansa bağlı olarak moment dalgalanmalarının değişiklik görüldüğü gözlemlenmiştir. Yüksek frekanslı sürücüler kullanıldığında, motor çıktıları daha iyi alınmaktadır. Bunun yanında anahtarlama sayısının artması nedeniyle, meydana gelen güç kayıpları artar ve verimliliği düşürebilir.

Motor Parametreleri;

- Stator direnç ve indüktans değeri sırasıyla: 0,816 ohm, 2e-3 henry(H)
- Rotor direnç ve indüktans değeri sırasıyla: 0,435 ohm, 2e-3 henry(H)
- Karşılıklı indüktans değeri (L_m): 69,31e-3 henry(H)
- Kutup çifti sayısı =2

KAYNAKLAR

- [1] Ammar A., Kheldoun A., Metidji B., Talbi B., Ameid T., Azzoug Y., 2018, *An Experimental Assessment of Direct Torque Control and Model Predictive Control Methods for Induction Machine Drive*, International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb(CISTEM), 28-31 Kasım 2018, Algiers, Algeria.
- [2] Okumus H. I., Aktaş M., 2007, *Direct Torque Control of Induction Machine Drives Using Adaptive Hysteresis Band for Constant Switching Frequency*, IEEE International Electric Machines & Drives Conference, 3-5 Mayıs 2007, Antalya, Türkiye, IEEE 1762-1767
- [3] Żelechowski M., 2005, *Space Vector Modulated – Direct Torque Controlled (DTC – SVM) Inverter – Fed Induction Motor Drive*, Ph.D. Thesis,- Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering
- [4] Koratkar P. J., Sabnis A., 2017, *Comparative analysis of different control approaches of direct torque control induction motor drive*, International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 6-7 Temmuz 2017, Kannur, İndia, IEEE 831-835
- [5] IdYoub L., Craciunescu A., 2007, *A comparison of various strategies for direct torque control of induction motors*, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 10-12 Eylül 2007, Bodrum, Türkiye, IEEE
- [6] Reddy M. R. P., Reddy T. B., Brahmaiah B., 2013, *Vector based hysteresis current control scheme for vector controlled induction motor drives*, 15th International Conference on Advanced Computing Technologies (ICTACT), 21-22 Eylül 2013, Rajampet, India, IEEE
- [7] Tang Y, Lin G., 2010, *Direct Torque Control of Induction Motor Based on Self-adaptive PI Controller*, 5th International Conference on Computer Science & Education, 24-27 Ağustos 2010, Hefei, China, IEEE, 1230-1233
- [8] Gao S., Cai Y., 2010, *Torque Ripple Minimization Strategy for Direct Torque Control of Induction Motors*, 2010 Third International Conference on Intelligent Networks and Intelligent Systems, 13-15 Aralık 2010, Bourmerdes, Algeria, IEEE
- [9] Mohamed C., Golea A., Benchouia M. T., 2015, *Implementation of a predictive DTC-SVM of an induction motor*, 2015 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 1-3 Kasım 2010, Shenyang, China, IEEE, 148-151
- [10] Idris N, R., N., Alsofyani I., M., 2016, *Torque ripple reduction and fast torque control in DTC of induction machine using overlapping triangular-based constant frequency torque controller*, IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), 28-29 Kasım 2016, Melaka, Malaysia, IEEE 194-198

- [11] Allaoui S., Chaada K., Laamari Y., Athamena B., 2018, *Induction motor state estimation using tuned Extended Kalman Filter*, 4th International Conference on Electrical Engineering (ICEE), 13-17 Aralık 2015, Boumerdes, Algeria, IEEE
- [12] Duvvuri S. S. S. R., Dangeti L. K., Garapati D. P., Meesala Hepsiba 2018, *State estimation for wound rotor induction motor using discrete-time extended Kalman filter*, International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), 18-20 Ocak 2018, Thrissur, India, IEEE
- [13] Djellouli T., Moulahoum S., Boucherit M., Kabache N., 2011, *Sensorless direct torque control for saturated induction motor using extended Kalman filter*, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, Joint Conference, 8-10 Eylül 2011, İstanbul, Türkiye, IEEE 190-194
- [14] Khazraj H., Silva F., Bak C.L., 2016, *A performance comparison between extended Kalman Filter and unscented Kalman Filter in power system dynamic state estimation*, 2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 6-9 Eylül 2016, Coimbra, Portugal, IEEE
- [15] Jie L., Nie S.F., Meng Q., L., Ren H. P., 2016, *Efficiency optimization of induction motors based on online identification of iron loss equivalent resistance via dual extended Kalman filter*, IEEE Region 10 Conference (TENCON), 22-25 Kasım 2016, Singapore, Singapore, IEEE 3309-3312
- [16] Asif M. J., Shahbaz T., Hassan S. U., Rizvi S. T. H., 2017, *Mathematical Modelling of 3-phase Induction motor to study the Torque vs. Speed Characteristics using MATLAB Simulink*, 19th International Multi-Topic Conference (INMIC) 6 Şubat 2017, Islamabad, Pakistan, IEEE
- [17] Bigdeli M., Azizian D., Rahimpour E., 2016, *Improved Big Bang-Big Crunch Algorithm for Estimating Three-Phase Induction Motors Efficiency*, Journal of Operation and Automation in Power Engineering Vol. 4, No.1, 83-92
- [18] Yetgin, G., Çanakoğlu, İ., 2004, *Farklı Yöntemler Kullanılarak Asenkron Motorun Eşdeğer Parametrelerinin Hesaplanması*, Eleco International Conference On Electrical and Electronics Eng., 8-12 Aralık 2004 Bursa, 1-6
- [19] Djellouli T., Moulahoum S., Boucherit M., Kabache N., 2013, *Speed & Flux estimation by Extended Kalman Filter for Sensorless Direct Torque Control of Saturated Induction Machine*, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics and Electromotion, 8-10 Eylül. 2011, İstanbul, IEEE, 190-194
- [20] Wu B., Narimani M., 2017, *Control of Induction Motor Drives*, 2nd ed., Wiley-IEEE Press, ISBN: 9781119156079
- [21] Karthik D., Chelliah T. R., 2016 *Analysis of scalar and vector control based efficiency-optimized induction motors subjected to inverter and sensor faults*, 2016 International Conference on Advanced Communication Control and Computing Technologies (ICACCCT), 26 Ocak 2016, Ramanathapuram, India, IEEE, 462-466

- [22] Kohlrusz G. Fodor D., 2011, *Comparison of Scalar and Vector Control Strategies Of Induction Motors* , Hungarian Journal Of Industrial Chemistry Veszprem, Vol. 39(2), 265-270
- [23] Vekaria M., Thakar D., Prapajati H., 2017, *Matlab Simulation of Induction Motor Drive using V/f Control Method*, International Journal for Scientific Research & Development, Vol. 5, Issue 01, 1772-1776
- [24] Alsofyani I. M. Lee K. B., 2017, *Modified frequency carriers for improving DTC with constant frequency torque controller of induction machines*, 2017 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON), 30-31 Ekim 2017, Kuala Lumpur, Malezya, IEEE, 128-132
- [25] Jarzebowicz L., 2014, *Error analysis of calculating average d-q current components using regular sampling and Park transformation in FOC drives*, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), 16-18 Ekim 2014, Iasi, Romania, IEEE, 901-905
- [26] Menekşe, O., 2005, *Asenkron Motor Vektör Kontrolü Uygulamaları İçin Genişletilmiş Kalman Filtresi Tabanlı Gözlemleyici Tasarımı*, Yüksek Lisans,- İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü
- [27] Patakor F. A., Sulaiman N., Ibrahim Z., 2010, *Performance of sliding mode control for three phase induction motor*, International Conference on Science and Social Research (CSSR 2010), 5-7 Aralık 2010, Kuala Lumpur, Malezya, IEEE, 554-559
- [28] Texas Instruments Europe, 1998, *Field Orientated Control of 3-Phase AC-Motors* <http://www.ti.com/general/docs/litabsmultiplefilelist.tsp?literatureNumber=bpra073#> [14.09.2019]
- [29] Patra, N., 2013, *Study of Induction Motor Drive With Direct Torque Control Scheme and Indirect Field Oriented Control Scheme Using Space Vector Modulation*, Master Degree, Department Of Electrical Engineering National Institute Of Technology Rourkela
- [30] Khoucha F. , Marouani K., Kheloui A., Benbouzid M., 2006, *A Minimization of Speed Ripple of Sensorless DTC for controlled Induction Motors used in Electric Vehicles*, 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 6-10 Kasım 2006, Paris, France, IEEE, 554-559
- [31] Faraji V., Aghasi M., Khaburi D.A., Kalantar M., 2011, *Direct torque control with improved switching for induction motor drive system fed by indirect matrix converter*, *National Conference on Electrical, Electronics and Computer Engineering* , 2-5 Aralık 2010, Bursa, IEEE, 1339-1344
- [32] Chaiky H., Khafalah M., Saad A., Chikh K., Saadi M., 2012, *Assessment of Direct Torque Control strategies for induction machine*, 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, 10-12 Mayıs 2012, Tangier, Morocco, IEEE
- [33] Dayakar Reddy B., Chandra Sheker V., 2014, *Direct Torque Controlled Four-Quadrant Induction Motor Drive*, The International Journal Of Engineering And Science , IJES, 06-14

- [34] Lakshmi V., Reddy T., Kalavathi M., Reddy V.C., 2011, *Direct torque control algorithm for induction motor drives for the reduction of common mode voltage*, International Conference on Emerging Trends in Electrical and Computer Technology, 23-24 Mart 2011, Nagercoil, IEEE, 283-296
- [35] Kadjoucdj M., Golea N., Rahimpour E., 2007, *Voltages Switching Tables For Direct torque Control Of PMSM Drive*, U.P.B. Sci. Bull., Series C, Vol. 69, No. 3, 23-36
- [36] Lakshmi V.A., Reddy V., Kalavathi., 2011, *Direct Torque Control Algorithm For Induction Motor Drives For The Mitigation Of Common Mode Voltage*, Innovative Systems Design and Engineering, Vol. 2, No. 4, ISSN 2222-1727
- [37] Jafarzadeh S., Lascu C., Fadali M.S., 2011, *State Estimation of Induction Motor Drives Using the Unscented Kalman Filter*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 11, ISSN 1557-9948
- [38] Çayıroğlu, İ., 2012, *Field Kalman Filtresi Programlama*, [http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/Makale_BilgiPaylasim/\(1-2012\)-Kalman_Filtresi_Ve_Bir_Programlama_Ornegi-Ibrahim_CAYIROGLU.pdf](http://www.ibrahimcayiroglu.com/Dokumanlar/Makale_BilgiPaylasim/(1-2012)-Kalman_Filtresi_Ve_Bir_Programlama_Ornegi-Ibrahim_CAYIROGLU.pdf) [14.09.2019]
- [39] Mathworks Videos and Webinars, *Understanding Kalman Filters, Part 4: An Optimal State Estimator Algorithm*, https://www.mathworks.com/videos/understanding-kalman-filters-part-4-optimal-state-estimator-algorithm--1493129749201.html?s_tid=vid_tmpl_test_video_a [22.09.2019]
- [40] Dangeti L. K.; Garapatti D. P., Meesala H., 2018, *State estimation for wound rotor induction motor using discrete-time extended Kalman filter*, 2018 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC), 18-20 Ocak 2018, Thrissur, India, IEEE, ISBN: 978-1-5386-2462-3
- [41] Alsofyani I. M., Idris N. R. N., 2016, *Look-up Table-Based DTC of Induction Machines With Improved Flux Regulation and Extended Kalman Filter State Estimator at Low Speed Operation*, IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. PP, No. 99, pp.1-1, 2016

GEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Anıl Bulut
Doğum Yeri	Tekirdağ
Doğum Tarihi	03.01.1990
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:
Telefon	05544798175
E-Posta Adresi	anil.bulut@hotmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Sakarya Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2013

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Anabilim Dalı Adı
Programı	

Makale ve Bildiriler	