



**DENİZ ARAÇLARI İÇİN İKİ EKSENLİ BİR GÖRÜŞ HATTI
STABİLİZASYON SİSTEMİ TASARIMI**

Melih SARP

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2017

Melih SARP tarafından hazırlanan “DENİZ ARAÇLARI İÇİN İKİ EKSENLİ BİR GÖRÜŞ HATTI STABİLİZASYON SİSTEMİ TASARIMI“ adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Necmi ALTIN

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Başkan : Doç. Dr. Coşku KASNAKOĞLU

Elektrik Elektronik Mühendisliği, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye : Prof. Dr. Güngör BAL

Elektrik Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 21/02/2017

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Hadi GOKÇEN
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Melih SARP

21/02/2017

DENİZ ARAÇLARI İÇİN İKİ EKSENLİ BİR GÖRÜŞ HATTI STABİLİZASYON SİSTEMİ TASARIMI

(Yüksek Lisans Tezi)

Melih SARP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2017

ÖZET

Görüş hattı stabilizasyonuna sahip hareketli platform sistemleri, platform zeminindeki açısal titreşimlerin, platform sistemine bağlanan görüş veya lazer sistemlerinin görüş eksenlerine taşınmasını engelleyerek, durağan bir görüntü elde edilmesini veya durağan bir işaretleme yapılmasını sağlamaktadır. Bu çalışmada, deniz taşıtlarında kullanılabilecek ve düşük frekanslı bozunumlara maruz kalabilecek iki eksen hareketli platform sistemi tasarlanmıştır. Bu sistemlerde hareket sağlayıcı olarak sıklıkla kullanılan doğrudan sürürlü DA tork motoru yerine çıkışına harmonik sürürlü dişli sistemi bağlı olan fırçasız doğru akım motoru ele alınmıştır. Harmonik sürürlü dişli sistemi gerekli stabilizasyon hassasiyetinin elde edilmesi için yeterli olduğundan, yüksek frekanslı bozunumlar altında ihtiyaç duyulan ve yüksek tork ihtiyacından dolayı oldukça büyük hacimli ve ağır olan doğrudan sürürlü DA motorlara gerek kalmamıştır. Bu çalışmada öncelikli olarak hareketli platform sisteminin bağlı olduğu zeminin açısal hareketleri göz önünde bulundurularak açısal hız ve tork ilişkisi elde edilmiştir. Daha sonra yükseliş eksen ve yan eksen etrafındaki hareketlerin birbiri üzerinde oluşturdukları tork bozunumlarından kaynaklanan çapraz bağlaşım etkisi hesaplanmıştır. Sonuç olarak, fırçasız doğru akım motorunun matematiksel modeli ve vektör kontrol yöntemi kullanılarak her bir eksen için stabilizasyon kontrol döngüsü tasarlanmıştır. Tasarlanan sistemin bir bütün olarak MATLAB/Simulink modeli oluşturularak yapılan benzetim çalışmaları ile sistem performansı test edilmiştir. Benzetim sonuçları, harmonik sürürlü dişli sistemine sahip bir stabilizasyonlu platformunun, deniz araçları için görüş hattı stabilizasyonunun sağlanması konusunda başarılı olabileceğini göstermiştir.

Bilim Kodu : 90526

Anahtar Kelimeler : Görüş Hattı Stabilizasyonu, Hareketli Platform, Jiroskop, Stabilizasyon döngüsü

Sayfa Adedi : 73

Danışman : Doç. Dr . Necmi ALTIN

DESIGN OF A TWO AXIS LINE OF SIGHT STABILIZATION SYSTEM FOR VESSELS

(M. Sc. Thesis)

Melih SARP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2017

ABSTRACT

By preventing the angular vibrations of the platform from being carried on to the axes of the attached imaging or laser systems, line of sight stabilization allows both a stable image to be obtained and a stable marker to be created. In this study, a two axis gimbal system that can be used in vessels and can be subjected to low frequency disturbances was designed. Instead of using direct drive DC torque motors which are usually used as an actuator in these kinds of systems, a brushless DC motor with an output connected to a harmonic drive gear was considered. Because a harmonic drive gear system is enough to provide the required stabilization precision, there is no need for large and heavy direct drive DC motors which are necessary under high frequency disturbances. In this paper, first an angular velocity and torque relationship was derived based on the angular motions of the foundation that the motion platform was connected to. Subsequently, the cross coupling effect caused by the torque disturbances that motion in the elevation and azimuth axes create on each other were calculated. Finally, a stabilization loop was designed for each axis using the vector control method and the brushless DC motor's mathematical model. The MATLAB/Simulink model of the resultant system was obtained and performance of designed system was tested through simulation studies. Simulation results show that a stabilized platform which has a harmonic drive gear can be successful in providing line of sight stabilization for vessels.

Science Code : 90526

Key Words : Line of Sight Stabilization, Gimbal System, Gyroscope, Stabilization loop

Page Number : 73

Supervisor : Assoc. Prof. Dr . Necmi ALTIN

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesi sırasında değerli bilgilerini benimle paylaşarak desteğini hiçbir zaman esirgemeyen danışmanım Doç. Dr. Necmi ALTIN'a, yoğun çalışmalarım sırasında sabır gösterdiği ve bana katlandığı için eşim Deniz'e, çalışmalarım süresince ümit ve destek verdikleri için MEKOPTRONİK Ltd. Şti. firmasında çalışan iş arkadaşlarıma ve çalışmalarım sırasında küçük ya da büyük yardımını esirgemeyen herkese teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. STABİLİZASYONLU PLATFORM TEKNOLOJİSİ VE TEMEL PRENSİPLERİ.....	5
2.1. SP Çalışma Prensibi	6
2.2. Jiroskop	10
2.3. Tork Bozunumları.....	13
3. TASARIM KRİTERLERİ	19
3.1. Motor Tercihi	21
3.2. Harmonik Sürürlü Dişli Sistemi.....	21
4. STABİLİZASYONLU PLATFORM KİNEMATİK DENKLEMLERİ	25
4.1. Yükseliş Ekseni Hareket Denklemleri	27
4.2. Yan Eksen Hareket Denklemleri	28
4.3. Hareket Denklemlerinin MATLAB/Simulink Modeli.....	30
5. HAREKET SAĞLAYICI DİNAMİK MODELİ	35
5.1. Fırçasız Doğrusu Akım Motoru Dinamik Modeli	35

Sayfa

5.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru Vektör Kontrolü	39
5.3. Hareket Sağlayıcı Simulink Modeli.....	45
5.3.1. FDAM simulink modeli	45
5.3.2. Fırçasız doğru akım motoru vektör kontrolü	50
5.3.2. Mekanik tork iletiminin simulink modeli	52
6. BENZETİM SONUÇLARI	55
7. SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR	65
EKLER.....	67
EK-1. Zıt EMK fonksiyonlarının MATLAB kaynak kodu.....	68
EK-2. Vektör kontrolünün gerçekleştirilmesi için gereken sektör belirleme işleminin MATLAB kaynak kodu	70
EK-3. Vektör kontrolünde uzay vektörlerinin bir periyod süresince uygulanma işleminin MATLAB kaynak kodu	71
ÖZGEÇMİŞ	73

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Stabilizasyon döngüsü için klasik denetleyici seçimi.....	9
Çizelge 2.2. Jiroskop çeşitleri ve kullanım alanları	11
Çizelge 5.1. α - β Bileşenleri için anahtarlama kombinasyonları	41
Çizelge 5.2. Sektör numarasına göre evirici anahtarlarının iletime geçme zamanları....	43
Çizelge 5.3. FDAM parametreleri.....	44
Çizelge 6.1. Harmonik Sürürlü dişli sistemi ve mekanik şaft parametreleri	55
Çizelge 6.2. Açısal bozunum özellikleri ve görüş hattı sapma açıları	59
Çizelge 6.3. Kinematik bağlaşım etkisi koşulları	60

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Görüş hattı stabilizasyonunun genel şeması.....	5
Şekil 2.2. Platform stabilizasyonu	7
Şekil 2.3. Ayna stabilizasyonu.....	8
Şekil 2.4. Görüş hattı titreşim/tork bozunumu transfer fonksiyonu.....	10
Şekil 2.5. Yaygın jiroskop giriş/çıkış hata tipleri	12
Şekil 2.6. Çalışma başındaki ön gerilim tekrar edilebilirliği ve çalışma sırasında ön gerilim kararlılığı	13
Şekil 2.7. Sürtünme kuvveti grafikleri.....	14
Şekil 3.1. İki eksen SP sistemi	19
Şekil 3.2. Stabilizasyonlu sistemler için tipik kontrol döngüsü.....	20
Şekil 3.3. Harmonik sürürlü dişli seti	22
Şekil 3.4. Harmonik sürürlü dişli seti bileşenleri	22
Şekil 4.1. Açısal hız eksen dönüşümleri	30
Şekil 4.2. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş eksen tork bozunumlarının genel simulink modeli	31
Şekil 4.3. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş eksen tork bozunumlarının alt bileşenleri.....	31
Şekil 4.4. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş eksen tork bozunumlarının alt bileşenlerinin detaylı simulink modelleri	32
Şekil 4.5. k-ekseni etrafındaki atalet değişiminin simulink modeli.....	33
Şekil 5.1. Hareket sağlayıcı sistemi blok şeması	35
Şekil 5.2. FDAM sürücü sistemi modeli.....	36
Şekil 5.3. Birim genliğe sahip zıt EMK gerilimlerinin değişimi	38
Şekil 5.4. Vektör kontrolünün genel şeması	39
Şekil 5.5. Vektör kontrol dönüşümleri.....	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.6. Temel uzay vektörleri	41
Şekil 5.7. Sektör belirleme akış diyagramı	42
Şekil 5.8. Evirici anahtarlarının iletme ve kesime geçme zamanlarının gösterimi.....	43
Şekil 5.9. Vektör kontrol yöntemi ile düşük hız kontrolü.....	44
Şekil 5.10. FDAM vektör kontrolü açısal hız tepkisi	45
Şekil 5.11. Hareket sağlayıcı simulink modeli	45
Şekil 5.12. FDAM simulink modeli.....	46
Şekil 5.13. FDAM elektriksel modeli	47
Şekil 5.14. Zıt EMK simulink modeli.....	47
Şekil 5.15. Stator faz akımının modeli.....	49
Şekil 5.16. Elektromanyetik tork modeli	49
Şekil 5.17. FDAM'ın mekaniksel modeli	50
Şekil 5.18. Stator faz geriliminin modeli	50
Şekil 5.19. FDAM vektör kontrolü simulink modeli.....	51
Şekil 5.20. Ters park dönüşümü ve uzay vektör darbe genişlik modulasyonu(UVDGM) simulink modeli	51
Şekil 5.21. FDAM sürücü sistemi ve mekanik tork aktarımı	52
Şekil 6.1. Yükseliş ekseni ve yan eksen kontrol döngüsü	56
Şekil 6.2. Dört koşul için görüş hattı tepkisi.....	59
Şekil 6.3. Dört koşul için kinematik bağlaşım etkisi	61

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
A	Yükseliş hareket sistemine sabit olan koordinat eksen
B	Yan hareket sistemine sabit olan koordinat eksen
C	Dönüşüm Matrisi
E	Zıt EMK gerilimleri
F	Kuvvet
G	Hareketli platformun temeline sabit olan koordinat eksen
$\vec{H}$	Açısal momentum vektörü
I	Stator faz akımları,
J	Atalet Momenti
$J_{E\varnothing}$	Eşdeğer matris
L	Stator faz özendüktansları
M	Stator fazları arasındaki ortal endüktans
R	Stator faz dirençleri
R_k	Kuvvetin uygulandığı yerin yarı çapı
S	FDAM sürücü devresi güç anahtarları için komut sinyali
$\vec{T}$	Tork vektörü
T_e	Elektromanyetik tork
T_m	Mekanik tork
U_q	Dönen koordinat sisteminde FDAM tork bileşeni
U_d	Dönen koordinat sisteminde FDAM manyetik akı bileşeni
U_α	Sabit koordinat sisteminde FDAM α bileşeni
U_β	Sabit koordinat sisteminde FDAM β bileşeni
V	Stator faz gerilimleri
W	Ağırlık
Q	Birim Zıt EMK fonksiyon üretici
a	FDAM'ın a fazı

Simgeler**Açıklamalar**

b	FDAM'ın b fazı
c	FDAM'ın c fazı
d	A koordinat ekseninin d-ekseni
e	A ve B koordinat ekseninin e-ekseni
g	Yer çekimi ivmesi
i	G koordinat ekseninin i- eksen
j	G koordinat ekseninin j-ekseni
k	G ve B koordinat ekseninin k-ekseni
n	B koordinat ekseninin n-ekseni
r	A koordinat ekseninin r-ekseni
ω	Açısal hız
$\vec{\omega}$	Açısal hız vektörü
δ_m	Manyetik akı bağı
θ_r	Rotor açısal pozisyonu
u	G ve B koordinat eksenleri arasındaki açısal ilişki
ε	B ve A koordinat eksenleri arasındaki açısal ilişki
σ	Sürtünme katsayısı
ε	Sapma miktarı

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AA	Alternatif Akım
DA	Doğru Akım
EMK	Elektromotor Kuvveti
FDAM	Fırçasız Doğru Akım Motoru
PI	Proportional-Integral
PID	Proportional-Integral-Derivative
PII2	Proportional-Integral- Integral
PWM	Pulse Width Modulation
SP	Stabilizasyonlu Platform

1. GİRİŞ

Optik görüntüleme sistemleri (kızılötesi kamera, termal kamera, lazer mesafe bulucu vb.) görüntü işleme, hedef takibi, film endüstrisi ve füze-güdüm sistemleri gibi askeri ya da sivil amaçlı birçok uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır. Böyle sistemlerde hedefin düzgün ve hassas bir şekilde görüntülenebilmesi için optik sistemin görüş hattının çok doğru bir şekilde kontrol edilmesi gerekmektedir. Özellikle hareketli bir zemin üzerine monte edilmiş bir optik sistemin sabit ya da hareketli bir hedefi düzgün bir şekilde takip edebilmesi ciddi bir tasarım problemidir. Bu problemin giderilebilmesi için Görüş Hattı Stabilizasyonu teknolojisi kullanılarak görüş hattının, sistemin bağlı olduğu zeminden gelen titreşim ve bozunumlardan izole edilmesi gerekmektedir. Görüş sistemlerine farklı bozunumlara karşı stabilizasyon kazandırmak için genellikle yan ve yükseliş eksenlerinde açısız hareketi sağlayan iki eksen hareketli platformlar kullanılmaktadır.

Bu sistemlerde karşılaşılan en önemli bozunumlar platformun temelinden gelen hareketlerden, platform dinamiklerinden ve platformun kütle dengesizliğinden kaynaklanır. Bu nedenle söz konusu hareketli platform sisteminin üretimine ve montajına geçmeden önce platform modelinin bütün dinamiklerini yansıtmak ve analitik formda açıklamak gerekir. Sistemin performansı ağırlıklı olarak platform modelinin hassasiyetini bağlıdır.

Çeşitli hareketli platform ve gimbal modelleri ile birlikte görüş hattı stabilizasyonu için kontrol metotları birçok çalışmada farklı yaklaşımlar kullanılarak tartışılmıştır. [1]'de iki eksen gimbal sisteminin kinematik ve geometrik bağlaşımlar ilişkisi elde edilmiş ve hareket denklemi tartışılmıştır. [2]'de yapılan çalışmada karmaşık titreşim ortamlarında çalışan tek eksenli bir gimbal sistemi üzerinde durulmuştur. Titreşimlerin bu gimbal sisteminde dinamik ve statik bozunum torklarını nasıl tetiklediği ve bu bozunumların statik ve dinamik dengenin sağlanarak nasıl giderileceği tartışılmıştır [2]. Yu ve Zhao iki eksenli bir gimbal arayıcı sistemi için dengesizlik momentlerini ölçen özgün bir metot geliştirmiştir [3]. Yonggen Han ve diğerleri ise yaptıkları çalışmada stabilizasyon kontrol döngüsünde sıfır kalıcı durum hatası gereksinimini sağlayabilmek için PII2 kontrol şemasını önermişlerdir. Çalışmalarında, jiroskop ile elde edilen açısız hız bilgisinin geri besleme olarak kullanıldığı klasik kontrol şeması ile kendilerinin önerdiği PII2 kontrol şemasını karşılaştırmışlardır [4]. Ji ve diğerleri, hibrit uyarlanabilir fuzzy PID kontrol edicisini (Adaptive Fuzzy PID Controller, AFPID) önermişlerdir [5]. Ji ve diğerleri hibrit kontrol ile fuzzy kontrolün içerdiği

statik hataların giderilebileceğini ve gerçek zamanlı, yüksek hassasiyete sahip bir stabilizasyon sağlanabileceğini rapor etmişlerdir [5]. Algrain ve Quinn ise açısal bozunumları algılamak için doğrusal ivme ölçerlerin kullanılmasının jiroskoplu sistemlere göre maliyeti 10 kat daha azaltacağını ve ivme ölçerlerin, servo sistemin ivme kontrol modunda çalışmasını sağlayarak daha geniş stabilizasyon bant aralığı elde etme şansı vereceğini ileri sürmüşler ve ivme ölçer tabanlı stabilizasyon sistemi üzerinde durmuşlardır [6]. Yapılan çalışmalara genel olarak bakıldığında, genellikle ya gimbal dinamikleri üzerinde durulmuş ya da kontrol metotları üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ayrıca bu çalışmalarda kullanılan hareket sağlayıcılarda genellikle doğrudan sürürlü DA motorları göz önünde bulundurulmuştur.

Bu çalışmada deniz araçları için kullanılabilecek iki eksen hareketli platform modeli ve görüş hattı stabilizasyonu üzerinde durulmuştur. Deniz araçlarında kullanılan görüş sistemleri için genellikle düşük stabilizasyon hassasiyeti gereksiniminden dolayı, her iki eksen içinde hareket sağlayıcı olarak doğrudan sürürlü DA tork motoru yerine dişli sistemini içeren fırçasız DA motor modeli ele alınmış ve gerekli torkun sağlanması için dişli sistemi olarak harmonik sürürlü dişli sistemi göz önünde bulundurulmuştur. Böylelikle yüksek frekanslı bozunumlar altında ihtiyaç duyulan ve yüksek tork ihtiyacından dolayı büyük hacimli ve ağır olan doğrudan sürürlü DA motorlara olan gereksinimin ortadan kaldırılması düşünülmüştür [7]. Ayrıca doğrudan sürürlü DA motorlarda gerekli yük torkunun doğrudan motor tarafından karşılanması, motor tarafından çekilen akımın da yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu nedenle de yüksek akımla başedebilmek için kullanılması gereken ilave bileşenlerin (motor ve güç anahtarlama elemanlarının soğutulması vs.) maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Doğrudan sürürlü DA motorların en önemli avantajı, yük ile motor arasında dişli gibi bir mekanik aktarım sistemi bulunmadığından dişli boşluğu (backlash) probleminin olmamasıdır. Dişli boşluğu hareket sağlayıcı sistemin bükülme direncini (stiffness) düşürdüğünden hassas pozisyon kontrolünde önemli bir sınırlayıcı etkindir [8]. Fakat harmonik sürürlü dişli sistemi, sıfır dişli boşluğu özelliğine sahip olduğundan hassas pozisyon kontrolü yapılacak uygulamalar için oldukça kullanışlıdır [9]. Dolayısıyla harmonik sürürlü dişli sistemi ile dişli boşluğu sorunu olmadan daha kompakt ve düşük maliyetli bir hareket sağlayıcının tasarlanması mümkün olmaktadır. Doğrudan sürürlü motorlarda bir dişli sistemi olmadığından motor tarafındaki mekanik tork salınımları yük tarafına doğrudan taşınmaktadır [10]. Dolayısıyla harmonik sürürlü dişli sisteminin

kullanılması, yük tarafına iletilen tork salınımlarını oldukça azalttığından önemli bir avantaj sağlamaktadır.

Bu çalışmada, öncelikli olarak hareketli platform sistemi katı gövde şeklinde düşünülerek her bir eksenin hareket denklemi ortaya konulmuş ve platform sisteminin bağlı olduğu zeminin açısal titreşimlerinden kaynaklanan bozunumlara ek olarak her bir eksenin birbiri üzerindeki çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklanan tork bozunumları da ele alınmıştır. Daha sonra ise fırçasız doğru akım motorunun (FDAM) modeli geliştirilmiş ve FDAM'nin hareket kontrolü için vektör kontrol yöntemi stabilizasyon döngüsüne dahil edilmiştir. Tasarlanan sisteme harmonik sürürlü dişli sisteminin de modeli eklenerek tüm sistem bileşenlerini içeren tam bir model elde edilmiştir. Söz konusu iki eksen hareketli platform modeli ve kontrol döngüsü MATLAB/Simulink ortamında geliştirilmiştir. Geliştirilen modelin performansı zeminin açısal titreşimlerinden kaynaklanan bozunumların benzetimi yapılarak test edilmiştir. Yapılan benzetim çalışmaları, dört farklı frekansa sahip zemin titreşimi altında, SP'nin yan ve yükseliş eksenlerindeki stabilizasyon hassasiyeti incelenmiştir. Frekansın artmasıyla birlikte stabilizasyon hassasiyetinin giderek azaldığı görülmüştür. Fakat deniz araçlarının maruz kalabileceği zemin kaynaklı titreşimlerin frekansı göz önünde bulundurulduğunda elde edilen stabilizasyon hassasiyetlerinin harmonik sürürlü dişli sistemine sahip bir sistem için oldukça başarılı olduğu görülmüştür. Ayrıca kinematik bağlaşım etkisi ve bunun beraberinde iki eksen SP'lerde sıklıkla karşılaşılan gimbal kilitlenmesi durumu da ele alınmıştır. Bu doğrultuda yükseliş ekseninin açısı 90° 'ye kadar artırılmış ve stabilizasyon hassasiyetinin kötüleştiği gözlemlenmiştir. Yükseliş ekseninin açısının 90° 'ye ulaşması durumunda ise beklenildiği üzere görüş hattı kontrolü her iki ekseninde de tamamen kaybedilmiş ve yan eksen motorunun dönme eksenini ile görüş hattı ekseninin çakışmasından dolayı gimbal kilitlenmesi gerçekleşmiştir.

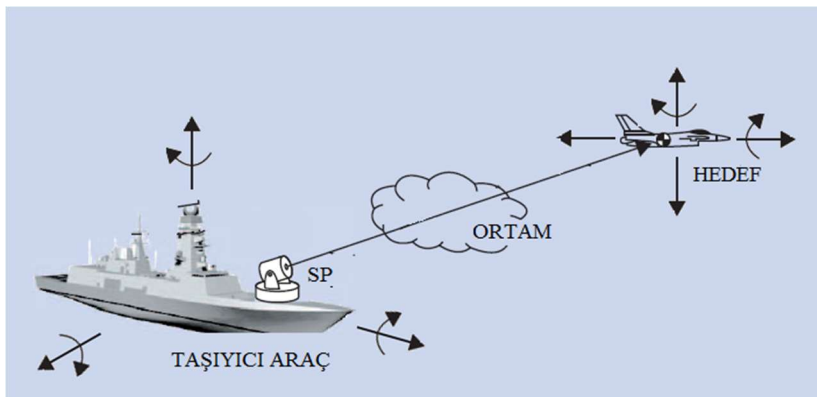
2. STABİLİZASYONLU PLATFORM TEKNOLOJİSİ VE TEMEL PRENSİPLERİ

Stabilizasyonlu platform, üzerinde bulunan faydalı yükün ataletsel olarak yönlendirilebilmesi için tipik gimbal düzeneğine sahip olan bir mekanizmadır. Bazı konfigürasyonlarda optik sensor doğrudan platform üzerine monte edilebilirken, diğer konfigürasyonlarda ise platform ayna gibi optik elemanların kontrolünü sağlar. Uygun tasarlanmış bir stabilizasyonlu platform, kasıtlı ya da kasıtsız manevra ve hareket durumlarında ve ilave bozunumlar altında hassas bir şekilde optik sensör görüş hattının kontrol edilebilmesine imkan sağlar.

Görüş hattının kontrol edilebilmesi, iki önemli gereksinimin sağlanmasını zorunlu kılmaktadır. Görüş hattı, önceden belirlenmiş ya da belli bir senaryoya bağlı olarak belirlenen bir hedef ya da hedef bölgesi yönünde hizalanabilmeli ve seçilen yönde sabit koordinat sisteminde hareketsiz tutulabilmelidir. İlk gereksinim için performans ölçütü takip hatasıyken, ikinci gereksinim için ise ölçüt titreşimdir. Stabilizasyonlu platformun ilk temel amacı, optik görüntüleme sistemleri ile birlikte kullanıldıkları zaman hedef ya da hedef bölgesi ile ilgili iyi kalitede görüntü elde edilmesini sağlamaktır. Başarılı bir görüş hattı kontrolü için Şekil 2.1’de de ifade edildiği gibi,

- Hedef hareketi,
- Taşıyıcı araç hareketi,
- Çalışma ortamı,

olmak üzere üstesinden gelinmesi gereken üç temel zorluk bulunmaktadır.



Şekil 2.1. Görüş hattı stabilazyonunun genel şeması

Hedefin hareket ettiği göz önünde bulundurulursa ve dar bir görüş alanına sahip olan optik sensörün hareketi sabit tutuluyor ya da kontrol edilmiyorsa, hareket eden hedef optik sensörün görüş alanından kolaylıkla çıkabilir. Hedefin doğrusal hareketinin yanında dairesel hareketi de hedef takip hatasına neden olabilecek önemli etkenlerdir. Hedefin dairesel hareketi, hedef görüntüsünün sensörün görüş alanı içerisinde oldukça asimetrik bir şekilde dönüş yapmasına, dolayısıyla izleyicinin hedefi tanıyamamasına ve hedef takibinin başarısız bir şekilde sonuçlanmasına neden olabilir.

SP'yi taşıyan aracın doğrusal hareket yapıyor olması da hatalara neden olabilir. Eğer SP görüş alanındaki değişikliklere uyum sağlayacak şekilde gerekli ayarlamaları yapamıyorsa, taşıyıcı aracın hareket etmesi hedefin görüş hattından çıkmasına neden olacaktır. Eğer SP taşıyıcı araç ile birleşik ise taşıyıcı aracın yunuslama (pitch), sapma (yaw) ve yuvarlanma (roll) eksenlerinde açısal hareket yapması da hedefin görüş hattından sapmasına yol açacaktır. Taşıyıcı araçta herhangi bir nedenle oluşan titreşimler ve küçük genlikte dalgalanmalar da sensör görüntüsünün bozulmasına neden olacaktır.

SP'nin bulunduğu çalışma ortamı da hedef takibini etkileyebilecek önemli etkenlerden birisidir. Hedef takip uygulamalarında SP kontrolü, optik sensör tarafından toplanan hedef konumu bilgisine dayalı olarak sağlanmaktadır. Ağaç, tepe gibi engeller ile birlikte sis, duman ve toz gibi atmosferik koşullar sensörün hedef ile ilgili gerekli bilgileri toplamasını engelleyebilir ve hedef takibinin başarısız sonuçlanmasına neden olabilir.

2.1. SP Çalışma Prensipleri

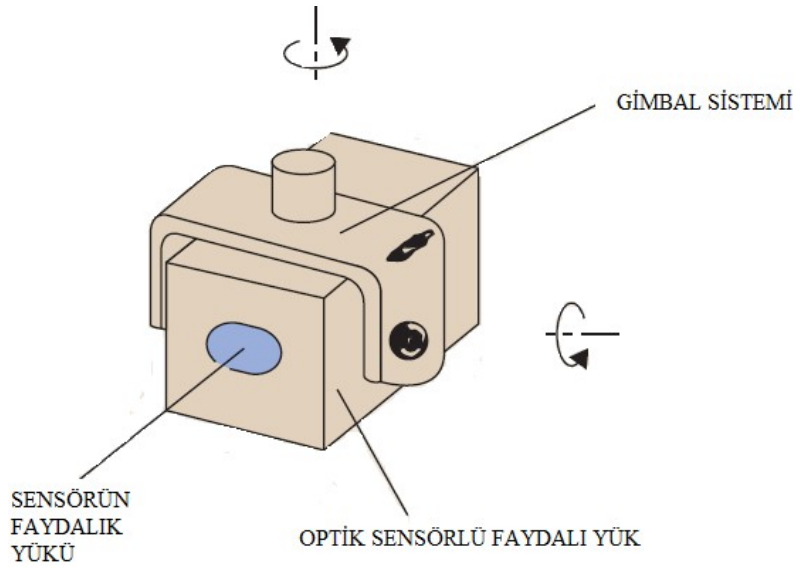
Tipik bir SP, sensörün görüş hattının stabilizasyonunu sağlamak için optik sensör ile taşıyıcı araç arasındaki fiziksel bağlantıyı sağlayan bir elektromekanik düzenekten, bu elektromekanik düzeneği yönlendiren bir kontrol sisteminden ve SP referans sistemine kıyasla hedefin konumunu tespit eden harici bir ekipmandan oluşmaktadır.

Bir SP elektromekanik düzeneği, tipik olarak sensörün ya da sensör bileşenlerinin açısal hareketini sağlayan gimbal sisteminden oluşmaktadır. Görüş hattı stabilizasyonu genellikle iki çeşit stabilizasyon yöntemi ile sağlanır. Bunlar,

- Platform stabilizasyonu,

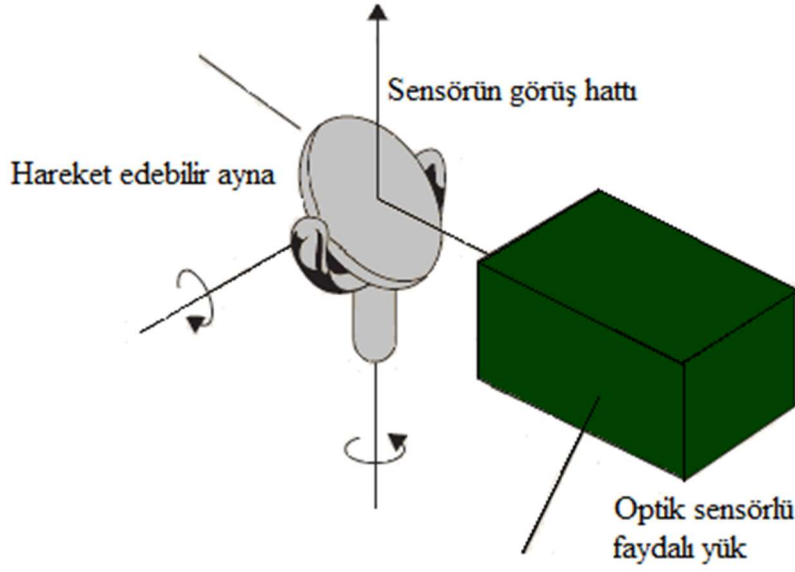
- Ayna stabilizasyonu

şeklindedir. Şekil 2.2’de ifade edildiği gibi platform stabilizasyonunda optik sensöre sahip olan faydalı yük, gimbal düzeneği ile birlikte sensörün görüş hattını taşıyıcı aracın hareketine göre değiştirecek şekilde döner. SP, platform eksenlerine ya doğrudan ya da dişli, kayış ve kemer gibi bazı mekanik aktarım birimleriyle bağlantılı olan bir motor tarafından döndürülebilir. Görüş hattı yönlendirilmesi SP’nin açısal yerdeğişimi ile sağlanır. Taşıyıcı aracın hareket etmesi ya da titreşmesi durumunda, SP ters yönde açısal hareket yaparak görüş hattının sabit koordinat sistemine göre durağan kalmasını sağlar. Dolayısıyla SP’nin hareketi doğrudan görüş hattı yönünü ve görüntü titreşimini etkiler.



Şekil 2.2. Platform stabilizasyonu

Diğer yandan ise ayna stabilizasyonunda, görüş sistemi taşıyıcı araca göre sabit pozisyonda dururken, SP yansıtıcı aynanın hareket kontrolünü sağlayarak görüş hattını yönlendirir. Bu düzeneğe Şekil 2.3’de gösterildiği gibi ayna ve sensör arasındaki geometrik ilişki sensör tarafından algılanan görüntüyü belirlemektedir. Hedefin hareket etmesi durumunda geometrik ilişki hedefi takip edecek şekilde değiştirilir. Aynı şekilde taşıyıcı aracın titreşmesi ya da manevra yapması durumlarında ayna aracın hareketini telafi edecek şekilde kontrol edilmelidir.



Şekil 2.3. Ayna stabilizasyonu

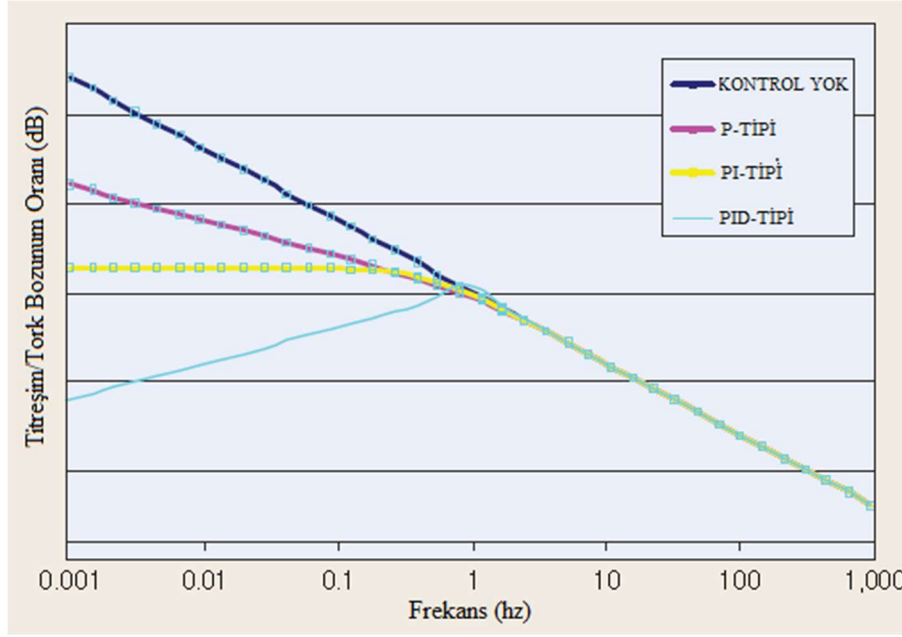
Stabilizasyon döngüsünün temel bileşenleri hareket sağlayıcı, jiroskop ve döngü kompanzatörüdür. Hareket sağlayıcı olarak DA motorlar, AA motorlar, hidrolikler ya da pnömatik hareket sağlayıcılar kullanılabilir. Ayrıca hız jiroskopları, hız integral alıcı jiroskoplar, dinamik ayarlı jiroskoplar, halka lazer jiroskoplar ve fiber optik jiroskoplar olmak üzere çok çeşitli jiroskop çeşitleri bulunmaktadır.

Stabilizasyon döngüsünün tasarımı yapılırken bazı karakteristiklere dikkat edilmesi gerekir. Örneğin, döngü kararlı olmalı ve görüş hattı bozunumlarını telafi edebilmelidir. Ayrıca mekanizma takip komutlarına tepki verilebilmelidir. Stabilizasyon döngüsünde kullanılan klasik kompanzatörler Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Stabilizasyon döngüsü için klasik denetleyici seçimi

Denetleyici Tipi	Tasarım Kolaylığı	Komut Tepkisi	Bozunum Bastırması
P denetleyici	Kolay	Kabul edilebilir	Düşük frekanslı bozunum bastırması diğerlerine göre daha kötü.
PI denetleyici	Daha zor	Kabul edilebilir	P denetleyiciye göre daha iyi
PID denetleyici	En zor	Kabul edilebilir, ama osilasyona eğimli	En iyi düşük frekanslı bozunum bastırma yeteneğine sahip

Stabilizasyon döngüsünün temel amacı görüş hattı bozunumlarını telafi etmek olduğu için bozunum bastırımı SP tasarımlarında oldukça ilgi görür. Şekil 2.4, SP tasarımında sıklıkla kullanılan üç klasik denetleyicinin bozunum bastırma tepkilerini göstermektedir. Denetleyicilerin bant genişliğinden daha yüksek olan frekanslarda bütün denetleyiciler gimbal mekanizmasının doğal karakteristiklerini sergilemektedir. Fakat denetleyicilerin band genişliği içerisinde düşük frekanslarda farklı tepkiler görülmektedir. P denetleyiciler genellikle düşük frekanslı bozunumların bastırımında yeterli olmazlar. Bu nedenle, PI ya da PID denetleyiciler daha yaygın kullanılmaktadır. PID denetleyiciler genellikle düşük frekanslı bozunum bastırması konusunda en iyi tepkiye sahip olsalar da, osilasyona daha eğimlidirler. Ayrıca mekanik rezonanslar gibi bazı pratik hususlar göz önünde bulundurulduğunda PID denetleyici ile kabul edilebilir kararlı bir tasarımın yapılması oldukça zordur.



Şekil 2.4. Görüş hattı titreşim/tork bozunumu transfer fonksiyonu

2.2. Jiroskop

Jiroskop, sabit koordinat sisteminde açısal hızın ölçülebilmesine sağlayan bir ataletsel sensördür ve SP'nin en kritik elemanlarından birisidir. Performansına, hacimine ve maliyetine göre değişik tiplerde jiroskop bulunmaktadır [11]. Jiroskoplar çalışma prensiplerine ve genel kullanım yerlerine göre Çizelge 2.2'deki gibi sınıflandırılabilir [12]. Genel kullanım yeri kategorileri, stratejik (çok yüksek performanslı navigasyon), navigasyonel (orta dereceli doğrulukta navigasyon), taktiksel (düşük doğrulukta navigasyon) ve tüketici (navigasyon gerektirmeyen robot, hubble teleskop vb. uygulamalar) şeklindedir.

SP için muhtemelen en kritik iki jiroskop performans parametresi bant genişliği ve elektriksel gürültüdür [13]. Jiroskop genellikle geri besleme kontrol döngüsünde olduğu için, bantgenişliği ve dinamik tepki karakteristiği bütün kontrol döngüsünün elde edilebilir bant genişliğini doğrudan etkilemektedir. Kontrol döngüsünün bant genişliğinin jiroskop tarafından sınırlandırılmasını engellemek için, jiroskop bant genişliğinin diğer baskın döngü dinamiklerinden daha yüksek olması gerekir. Yüksek hassasiyetli sistemler için jiroskop bant genişliği genellikle birkaç yüz Hertz olmaktadır. Jiroskop gürültüsünün, bu bant genişliğinden yüksek olması durumunda, gürültü doğrudan kontrol sistemine aktarılır. Bu nedenle jiroskop gürültüsü, bütün görüş hattı kontrol sistemi için kabul edilebilir gürültü değerinin bir kısmıyla sınırlandırılmalıdır.

Çizelge 2.2. Jiroskop çeşitleri ve kullanım alanları

Jiroskop Tipi	Stratejik	Navigasyonel	Taktiksel	Tüketici
Tek serbestlik dereceli flotorlu (Single degree of freedom floated)	X			
Çift serbestlik dereceli flotorlu (Two degrees of freedom floated)	X			
Dinamik ayarlı jiroskop (Dynamically tuned gyro)		X		
Elektrostatik jiroskop (Electrostatic gyro)	X	X		
Bilezik lazer jiroskop (Ring laser gyro)		X	X	
Fiber optik jiroskop (Fiber optik gyro)		X		
Yarı küresel rezonatör jiroskop (Hemispherical resonator jiroskop)		X		
Kuartz ayarlı çatal jiroskop (Quartz tuning fork gyro)			X	X
Silikon mikro işlemeli titreşimsel (Silicon micromachined vibrational)			X	X
Nükleer manyetik rezonans jiroskop (Nuclear magnetic resonance gyro)				X

Aşağıda listelenen jiroskop hata çeşitleri giriş/çıkış ilişkisinin bir fonksiyonu olarak Şekil 2.5’de ifade edilmektedir. Bu hatalar küresel konumlama sistemi gibi diğer sensörler kullanılarak tahmin edilebilecek hatalardır.

Öngerilim hatası (Bias error): Jiroskop girişinin sıfır olması durumunda çıkışın sıfırdan farklı olmasıdır.

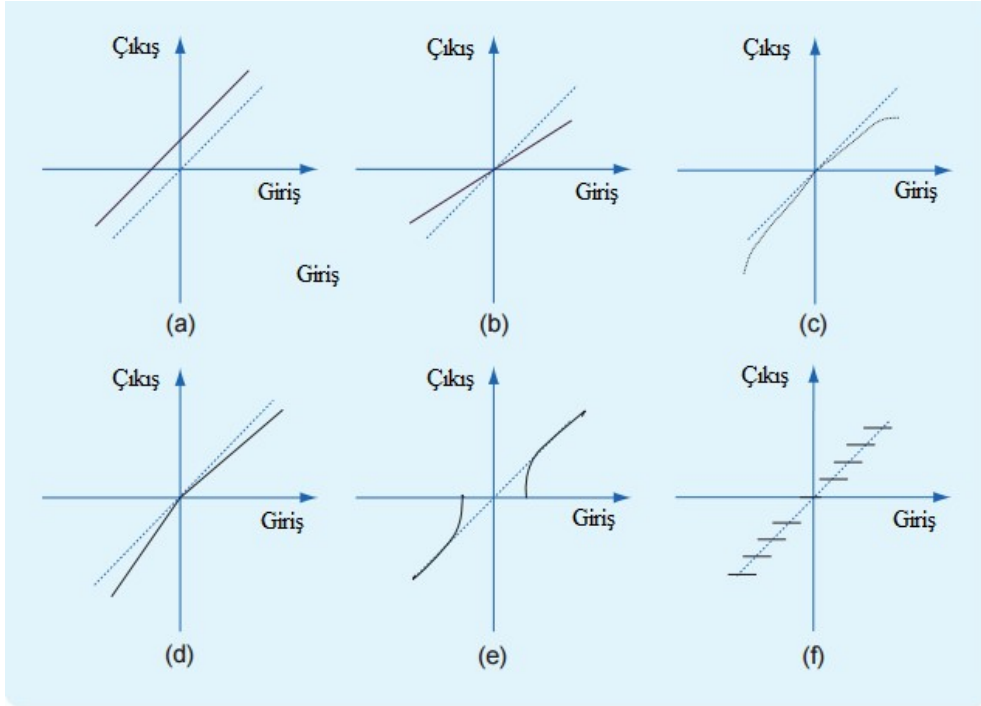
Ölçek çarpanı hatası (scale factor error): Genellikle yıpranma ya da üretim toleransından kaynaklı olarak ortaya çıkan bir hatadır.

Doğrusal olmama hatası (nonlinearity error): Bir seviyeye kadar bütün sensörlerde mevcuttur.

Ölçek çarpanı işaretinin asimetriği (Scale factor sign asymmetry): Push-Pull yükselteçlerin eşleşmemesinden kaynaklanan bir hatadır.

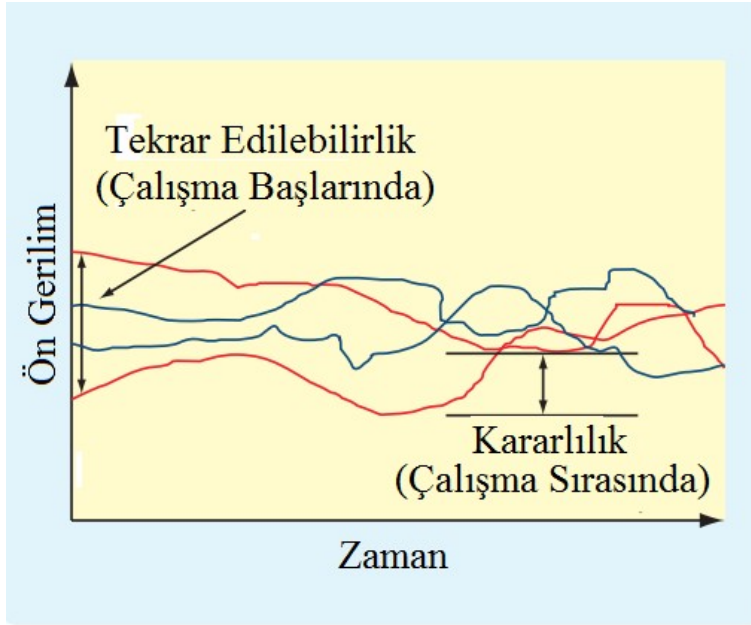
Ölü bölge (deadzone): Genellikle mekaniksel aşınma ve kitlenmeden kaynaklanan bir hatadır (örn. bilezik lazer jiroskopu).

Örnekleme hatası (quantization error): Sayısallaştırılan bütün sistemlerin doğasında bulunan bir hatadır.



Şekil 2.5. Yaygın jiroskop giriş/çıkış hata tipleri, (a) Öngerilim hatası, (b) Ölçek çarpanı hatası, (c) Doğrusal olmama hatası, (d) Ölçek çarpanı işaretinin asimetriği, (e) Ölü bölge, (f) Örnekleme hatası

Jiroskop hata tanımlamaları genellikle jiroskop öngeriliminin ve ölçek çarpanının kararlılığını ve açılış tekrar edilebilirliğini, giriş-eksen hizazıslığını ve g-hassasiyetini içermektedir [12]. Şekil 2.6'da tipik bir jiroskop ön gerilim hatası için çalışma başlarında ki ön gerilim tekrar edilebilirliği ve çalışma sırasında ki ön gerilim kararlılığı görülmektedir. Sıcaklık değişmese de ön gerilim çalışma süresince değişebilir. Çünkü sabit kalan bir hata çeşidi değildir.



Şekil 2.6. Çalışma başındaki ön gerilim tekrar edilebilirliği ve çalışma sırasında ön gerilim kararlılığı

2.3. Tork Bozunumları

SP' için en önemli performans ölçütü tork bozunumlarını reddedilebilme kapasitesidir. Bozunumlar değişik kaynaklardan ortaya çıksalar da net etki eşdeğer tork bozunumu olarak ifade edilebilir. Uygulamada karşılaşılan yaygın tork bozunumları aşağıda özetlenmiştir:

Sürtünme (Friction)

Sürtünme kaynaklarını rulmanlar, motor fırçaları, contalar ve kayar bilezikler oluşturur. Histerezis ve manyetik vuruntular gibi motor etkileri de sıklıkla sürtünme ile aynı muameleyi görür. Sürtünme değerleri üreticilerin verilerinden, ölçülen verilerden veya temel sürtünme mekanizması analizlerinden elde edilebilir. Genel sürtünme torku aşağıdaki gibi modellenebilir[14]:

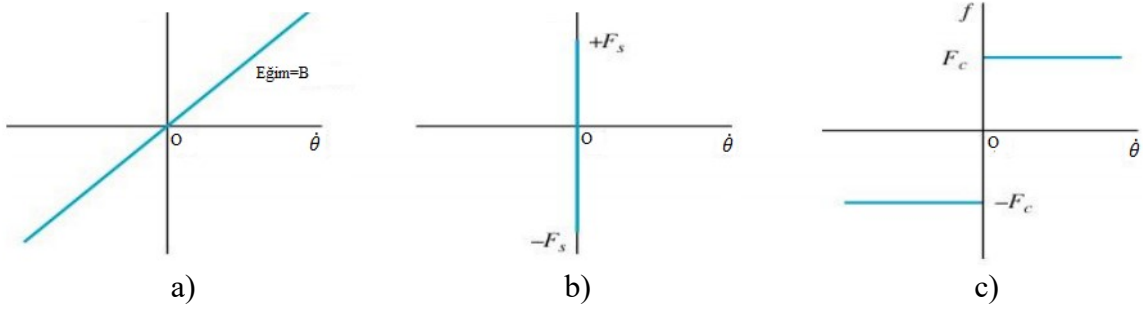
$$T_f = F_f R_k. \quad (2.1)$$

Bu denklemde F_f , sürtünme kuvvetini; R , kuvvetin uygulandığı yerdeki yarı çapı ifade etmektedir. Sürtünme kuvveti için de

$$F_f = \sigma W \quad (2.2)$$

yazılabilir. Bu denklemde ise σ , sürtünme katsayısını; W ise ağırlığı ya da uygulanan kuvveti ifade etmektedir.

Sürtünme kuvveti çoğunlukla hızın bir fonksiyonudur ve genellikle statik sürtünme, coulomb sürtünmesi ve viskoz sürtünme gibi çeşitleri vardır[14]. Şekil 2.7.'da sürtünme çeşitlerinin grafikleri görülmektedir.



Şekil 2.7. Sürtünme kuvveti grafikleri (a) viskoz sürtünmesi, (b) statik sürtünme, (c) coulomb sürtünmesi

Yay torku (Spring)

Yay torku, faydalı yük ve taşıyıcı araç arasındaki elektrik kablolarının esnemesi, gerilmesi veya sıkışması nedeniyle ortaya çıkan bir tork bozunumudur.

Dengesizlik (Imbalance)

Faydalı yükün ağırlık merkezinin platformun dönüş eksenine ile çakışmaması durumunda dengesizlik oluşur. Dengesizlik, görüş hattında titreşimlerin ortaya çıkmasına neden olur[15]. Dengesizliğin doğru bir şekilde değerlendirilmesi bütün eksenlerdeki dinamik ortamın değerlendirilmesini gerektirir. Dengesizlik denetimi, tasarımın konfigürasyon aşamasında başlar ve bütün tasarım boyunca süregelen ağırlık denetimi ile devam eder. Aksi takdirde sistem ağırlığı artmaya devam eder ve montaj ve test aşamalarında dengeleme için daha büyük ağırlıklar gerekir. Dengesizlik aşağıdaki eşitlik ile tahmin edilebilir[15].

$$T = W\epsilon g \quad (2.3)$$

Burada, W dönen ağırlığı; E , dönme ekseninden ağırlık merkezinin sapma miktarını; g ise ivme + yerçekimi vektörünü ifade etmektedir.

Jiroskopik tork

Jiroskopik torklar, eğer gimbal sistemine monteli spin şeklinde dönen bir mekanizma bulunuyorsa gimbal sisteminin dönmesi durumunda ortaya çıkar. Bu torklar her zaman spin şeklindeki dönme eksenine ve gimbal dönme eksenine dik olan ekseninde etki eder. Y eksenindeki dönüş hızı tarafından X eksenindeki jiroskopik torkun tahmin edilebilmesi için aşağıdaki denklem kullanılabilir.

$$T_x = J_z w_z w_y \quad (2.4)$$

Burada, w_z , Z eksenini etrafındaki spin hızını; J_z , Z eksenini etrafındaki ataleti; w_y Y eksenini etrafındaki dönme hızını ifade etmektedir.

Kinematik bağlaşım torku (Kinematic coupling torque)

İki eksenli gimbal sistemlerinde, içerideki gimbal dışarıda ki gimbala göre hareket ettiği zaman görüş hattı, dışarıdaki gimbalın dönüş eksenini ile olan dik açısını kaybetmeye başlar. Bununla birlikte içerideki gimbala monteli olan jiroskopun dışarıdaki gimbalın ataletsel hızını algıladığı eksen, dışarıdaki gimbalın motor eksenini ile olan çakışıklığını kaybeder[16]. Kinematik bağlaşım, bütün eksenleri etkiler ve içerideki gimbal açısının 90° 'ye yaklaşması durumunda gimbal kilitlenmesi gerçekleşir. 90° 'den daha küçük açılarda eğer yeterli motor torku sağlanabilirse gimbal kontrolü sağlanabilir[16]. Ama kinematik bağlaşım stabilizasyon performansını kötüleştirir. Çünkü referans koordinat sisteminde gimbalı ivmelendirmek için olan herhangi bir gereksinim, görüş hattının görünür hareketinde ters yönde etki eden tork bozunumu olarak aynı etkiyi yaratacaktır. Diğer bir deyişle, kontrol kaybının oluşmaması için dışarıdaki gimbal motorundan yeterli torkun elde edilmesi gerekir. Fakat yine de kinematik bağlaşım diğer tork bozunumları gibi devam edecektir ve istenmeyen görüş hattı hareketlerine neden olacaktır.

Açının 90° olması durumunda dışarıdaki gimbal motor eksenini ile görüş hattının dönme eksenini hizalanır ve motor eksenini jiroskop algılama eksenini ile dik konuma gelir. Bu durumda görüş hattı eksenini daha fazla jiroskop tarafından algılanamaz ve gimbal kilitlenmesi gerçekleşir ve düzeltmenin sağlanabilmesi için yeterli tork motor tarafından hiçbir şekilde sağlanamaz

İçerideki gimbal açısının değişmesiyle birlikte değişen kontrol döngüsünün kazancı, sekant kazanç düzeltme yöntemi ile sabit hale getirilebilir[16]. Fakat bu teknik kinematik bağlaşım hatasından kaynaklanan bozunumları gideremez ve gimbal kilitlenmesine engel olamaz. Bazı ileri besleme teknikleri kinematik bağlaşım etkilerini gidermek için kullanılsa da en yaygın çözüm ilave gimballerin eklenmesiyle elde edilir .

Çarpım ataleti momenti bozunumları (Products of inertia disturbances)

Dinamik dengesizlik olarak da nitelendirilen çarpım atalet momenti bozunumları, mekanizmaaki asimetriklikden kaynaklanır. Yani kütleinin simetrik bir şekilde dağılmaması durumunda ortaya çıkar. Her eksenindeki bu tork bozunumları aşağıdaki eşitlik ile tahmin edilebilir:

$$T_z = J_{xy}w_x^2 \quad (2.5)$$

burada J_{xy} , X-Y eksenleri arasındaki çarpım atalet momentini; w_x , X eksenini etrafındaki açısal hızı ifade etmektedir.

Araç Hareketi Etkisi (Vehicle Motion Coupling)

Taşıyıcı aracın manevraları (yunuslama, sapma, yuvarlanma), üzerinde taşıdığı gimbal mekanizmasına yansımakta ve gimbal sistemi, kendi hareketi ile taşıyıcı araç manevrasından yansıyan hareketin toplamı kadar hareket etmektedir. Bu nedenle taşıyıcı araç hareketleri de bir bozunum olarak kabul edilmektedir. Bu tarz manevralarda SP'nin taşıyıcı araca göre yönelimi değiştirilmeli ve gerekli değişimin, araç manevrasının eş değeri tork bozunumlarına çevrilerek hesaplanması gerekir.

Dahili bozunumlar (Internal disturbances)

Eyleyiciler, elektronik donanımlar ve jiroskoplar gibi kontrol döngüsü bileşenlerinde yer alan gürültülerinde bulunduğu dahili gürültüler de, eşdeğer tork bozunumu olarak ifade edilebilirler. Gürültü genellikle tahmin edilemeyen bozunumlar olarak ifade edilir. Ama motor rotorunun, motorun manyetik kutup yüzeyleri ile etkileştiği bölgedeki elektrik motoru vuruntusu da gürültüye dahil edilebilir. Diğer bir dahili gürültü ise fan ya da bir video kamera içerisindeki tarayıcı ayna gibi faydalı yükün içerisindeki hareket eden bileşenlerden kaynaklanan sarsma kuvvetidir.

Yapısal eğilme (Structural flexure)

Yapısal eğilme, bir faydalı yükün ya da gimbal düzeneğinin harici bozunumlardan ya da titreşimlerden kaynaklı olarak bozulması ya da deforme olması durumunda ortaya çıkmaktadır. Yapısal esnekliklerden kaynaklı titreşimler genellikle jiroskop ile ölçülür ve etkisinin azaltılması için kontrol aksiyonu gerçekleştirilir. Fakat gimbal düzeneğinin ya da faydalı yükün parçalarında gerçekleşen yapısal eğilmeler jiroskop ile ölçülemez.

Çevresel bozunumlar

Çevresel bozunumlar doğrudan veya dolaylı olarak etkileşimler sergileyebilirler. Eğer bir SP ya da faydalı yük, aracın aerodinamik rüzgar akışına maruz kalırsa doğrudan gövde titreşimi gerçekleşir. Dolaylı bozunumlar ise sıcaklıktaki değişimleri ve SP üzerinde buz katmanının oluşmasını içermektedir. Sıcaklık değişimleri sürtünme ve gimbal arası bağlaşım gibi diğer bozunumlarda değişiklik oluşturabilir. Buz katmanının oluşması gimbal dengesini değiştirebilir ve titreşim daha da kötüleşebilir.

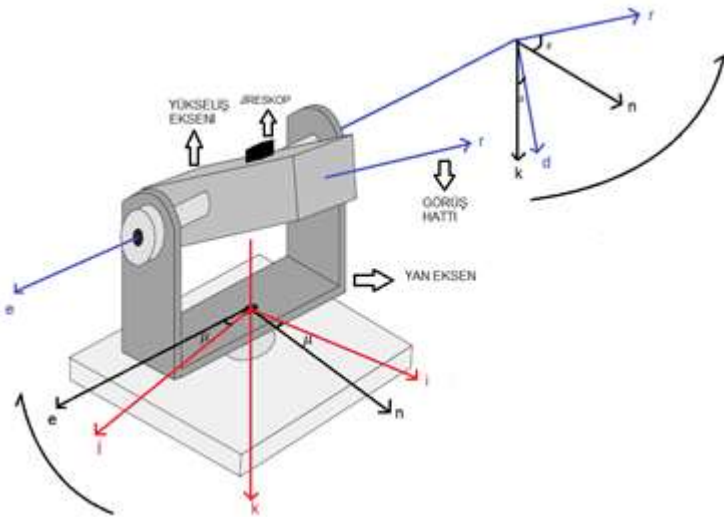
Bu bozunumlardan kaynaklanan görüş hattı hatalarının bastırılması için çeşitli yöntemlere başvurulur:

- (a) Kontrol sistemi, bozunum etkilerini kabul edilebilir seviyeye indirecek şekilde yeterli hassasiyete sahip olabilir,
- (b) Donanım, tork bozunumlarını azaltacak şekilde yeniden şekillendirilebilir,
- (c) Özel bozunumların üstesinden gelebilecek özel teknikler geliştirilebilir.

Başarının garantilenebilmesi için bütün önemli bozunumların karakteristiklerinin (frekans, genlik ve diğerleri) ve bozunumların donanım/kontrol sistemi ile olan etkileşiminin çok doğru bir şekilde anlaşılması gerekmektedir.

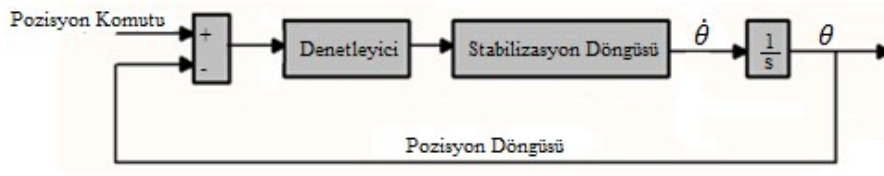
3. TASARIM KRİTERLERİ

İki eksen hareketli platform sistemlerinde stabilizasyon, Şekil 3.1.'de görüldüğü gibi genellikle iç hareket sağlayıcı mekanizmasına monte edilmiş olan görüş sistemi için sağlanır. İç hareket sağlayıcı mekanizmasının hareketini sağlayan sistem, sürtünme ve benzeri tork bozunumlarının hareket merkezine olan etkilerini minimuma indirecek şekilde tasarlanır. Hareketli platform sisteminde dönen bütün elektromekanik aksamaların, doğrusal titreşimlerden kaynaklanan dengesizlik torklarını en aza indirecek şekilde hareket ekseninde dengelenmesi gerekir. Bu amaçla hareketli platform yapısı ve yük birimi dâhil olmak üzere dönen bütün parçaların yapısal dinamikleri ve kütle özellikleri istenilen sonucun elde edilebilmesi için göz önünde bulundurulmalıdır

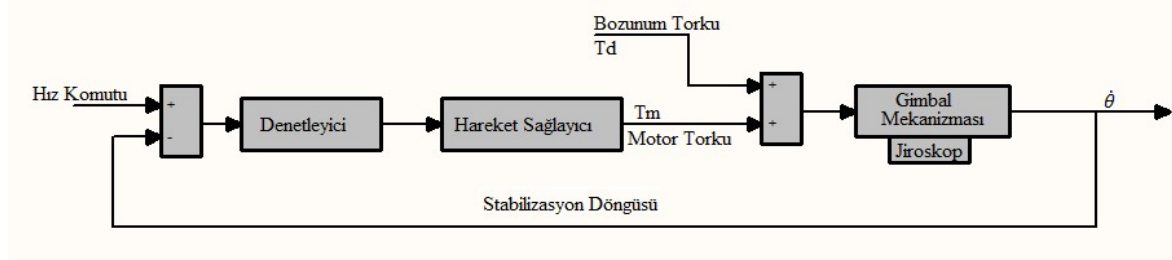


Şekil 3.1. İki eksen SP sistemi

Bir SP sistemi için tipik kontrol yapısı Şekil 3.2.'de görüldüğü gibi genel olarak “Dış İzleme Döngüsü” ve “İç Stabilizasyon Döngüsü” olmak üzere iki aşamadan oluşur. Dış izleme döngüsü görüş hattını hedefi sürekli izleyecek şekilde kontrol ederken, iç stabilizasyon döngüsü ise görüş hattını bozunumlardan izole etmesi için jiroskop tarafından aktif edilir [13]. Stabilizasyon döngüsünde amaç hız komutu ile jiroskoptan elde edilen açısal hız arasındaki hata farkını sıfırlamaya çalışmaktır. Hız komutunun sıfır olması durumunda sistem hareketli platforma uygulanan net torku sıfırlamaya çalışacaktır. Yani, kapalı döngü kontrol sistemi, hareketi sağlayan motorlarda, net bozunum torkları ile eşit büyüklükte ama zıt yönde kontrol torku üretmeye çalışacaktır.



(a)



(b)

Şekil 3.2. Stabilizasyon sistemler için tipik kontrol döngüsü, (a) Dış pozisyon döngüsü, (b) İç stabilizasyon döngüsü

Bu çalışmada göz önünde bulundurululan iki eksen hareketli platform sisteminde, her iki eksen için de kontrol döngüsü temel olarak Şekil 3.2.'de ifade edildiği gibidir. Aynı zamanda iki eksenin kontrol döngüsü, her iki eksenin birbirini üzerinde yarattığı tork bozunumu nedeniyle oluşan çapraz-bağlaşım (cross-coupling) etkisinden dolayı birbirleriyle ilişkilidir. Çapraz-bağlaşım, hareketli platform sisteminin dinamik özelliklerini açıklamaktadır. Çapraz-bağlaşım etkisiyle, zemin hareket etmese bile, platformun yan hareketi yükseliş hareketini etkilerken tam tersi durumda gerçekleşebilir [2]

Bu çalışmada sadece zemin kaynaklı bozunumlar ve eksenlerin birbirini üzerindeki çapraz-bağlaşım etkisi incelendiğinden dolayı,

1. İki eksen SP'nin katı gövde olduğu ve platformun dönme merkezleri ile koordinat eksenlerinin orijininin aynı olduğu,
2. Platformun ağırlık merkezi ile dönme merkezinin aynı olduğu, yani statik dengesizliğin olmadığı,
3. Platformun kütle dağılımının platformun koordinat eksenlerine kıyasla simetrik olduğu, yani dinamik dengesizliğin olmadığı,
4. Diğer harici ve dahili tork bozunumlarının olmadığı

varsayılmıştır.

3.1. Motor Tercihi

Bu çalışmada kompakt yapıda yüksek performanslı bir hareket sağlayıcının tasarlanması hedeflenmiştir. Bu amaçla SP'nin her iki ekseninde de gerekli kontrol torkunun üretilmesi için kullanılan hareket sağlayıcılarda motor olarak FDAM tercih edilmiştir. FDAM'ların kullanımları, gelişmiş verimlilikleri, yüksek güvenilirlikleri, uzun ömürleri, düşük bakım gereksinimleri gibi avantajlarından dolayı giderek artmaktadır. Ayrıca hacimlerine göre sağladıkları tork oranının yüksek olması, FDAM'ları boyut ve ağırlığın kritik etken olduğu uygulamalarda oldukça kullanışlı yapmaktadır [17].

SP'lerde hareketin düzgün olması ve hassas pozisyon kontrolü oldukça önemlidir. FDAM'ların yüksek performanslı kontrolü ile bütün hız aralıklarında SP'nin her iki ekseninde de pürüzsüz dönüş sağlanabilir ve sıfır hız durumunda tam tork kontrolü elde edilebilir. Böyle bir yüksek performanslı kontrolün elde edilebilmesi için vektör kontrol tekniği kullanılmaktadır. Vektör kontrol, stator faz akımlarının sabit referans koordinat sisteminden dönen koordinat sistemindeki tork ve akı üreten akım bileşenlerine dönüştürerek tork ve akının ayrıştırılmış kontrolünü elde etmek için kullanılan tekniktir. Vektör kontrol tekniği aşağıdaki avantajlara sahiptir.

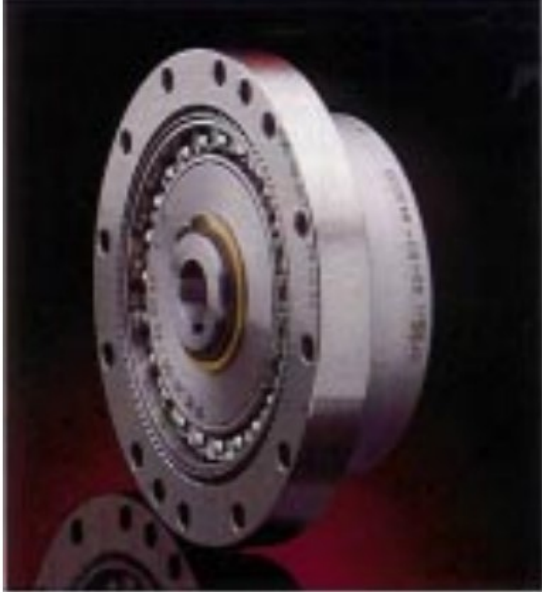
- Düşük devirde tam motor torku kapasitesi,
- Daha iyi dinamik davranış,
- Geniş bir hız aralığında her çalışma noktası için daha yüksek verim,
- Ayrıştırılmış tork ve akı kontrolü,
- Kısa süreli aşırı yük kapasitesi.

3.2. Harmonik Sürürlü Dişli Sistemi

Hareket sağlayıcılarda kullanılan FDAM'lar ile tek başına faydalı yükün görüş hattını kontrol edebilecek büyüklükte torkun üretebilebilmesi mümkün değildir. FDAM tarafından üretilen torkun bir dişli sistemi ile artırılması gerekmektedir. Bu çalışmada Şekil 3.3.'de görülen Harmonik Sürürlü dişli sistemi göz önünde bulundurulmuştur.

Harmonik Sürürlü dişli sistemi sıfır dişli boşluğuna sahip olan çok hassas bir dişli mekanizmasıdır. Yüksek pozisyon doğruluğu ve tekrar edilebilirliği, yüksek tork kapasitesi,

yüksek burulma sertliği ve uygun fiyatlarda ki kompakt tasarımı, Harmonik Sürüşlü dişli sisteminin kompakt yapıda bir hareket sağlayıcının tasarımının hedeflendiği bu çalışmada tercih edilmesini sağlamıştır [18].



Şekil 3.3. Harmonik sürüşlü dişli seti[9]

Harmonik Sürüşlü dişlisi, Şekil 3.4.'de ifade edildiği gibi üç eş merkezli bileşenden oluşmaktadır [9].

- *Circular Spline(CS)*, iç tarafında dişlere sahip olan silindirik bir katı halkadır.
- *Flex Spline(FS)*, açık ucunun dış tarafında dişlere sahip olan silindirik kap şeklinde elastik bir yapıdır. Kapalı tarafı ise flanş bağlantısıyla diğer mekanik elemanlara bağlanır.
- *Wave Generator(WG)*, ince ray bilyalı bir rulmanın içine geçtiği ve yüksek verimlilikte tork dönüşümünü sağlayan eliptik bir yapıdır.



Şekil 3.4. Harmonik sürüşlü dişli seti bileşenleri

Harmonik sürürlü dişli sisteminin çalışması aşama aşama aşağıdaki gibi açıklanabilir:

1. FS, çap olarak çok az bir farkla CS'den daha küçüktür ve diş sayısı iki tane daha azdır. WG'nin eliptik yapısı FS'nin dişlerinin CS'nin dişlerine elipsin ana ekseninin zıt uçlarındaki iki bölgede geçmesini sağlar.
2. WG, hareketine devam ettikçe dişlilerin birbirine geçtiği bölge de elipsin ana eksenini ile birlikte döner.
3. WG'nin her 180° hareketinde FS çıkışı saat yönü tersinde sabit olan CS'YE göre bir diş hareket eder.
4. WG'nin saat yönündeki her tam turunda FS, saat yönü tersinde CS'ye göre bir önceki pozisyonundan iki diş hareket eder.

4. STABİLİZASYONLU PLATFORM KİNEMATİK DENKLEMLERİ

Şekil 3.1.'de göz önünde bulundurulmuş SP sistemine göre üç tane referans koordinat eksen tanımlanmaktadır. Bunlar SP temeline sabit olan G koordinat eksen (i, j, k), yan hareket sistemine sabit olan B koordinat eksen (n, e, k) ve yükseliş hareket sistemine sabit olan A koordinat eksenidir (r,e,d). Referans koordinat eksenleri arasındaki ilişki aşağıda verildiği gibi Euler dönüşüm matrisleri ile sağlanmaktadır [19].

$$C_G^B = \begin{bmatrix} \cos u & \sin u & 0 \\ -\sin u & \cos u & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$C_B^A = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon & 0 & -\sin \varepsilon \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varepsilon & 0 & \cos \varepsilon \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Burada C_G^B G referans koordinat ekseninden B referans koordinat eksenine, C_B^A ise B referans koordinat ekseninden A referans koordinat eksenine dönüşümü sağlayan matrisi ifade etmektedir. G, B ve A referans koordinat eksenlerinde ifade edilen ataletsel açısal hız vektörleri

$$\vec{\omega}_{G/I} = \begin{bmatrix} \omega_{Gi} \\ \omega_{Gj} \\ \omega_{Gk} \end{bmatrix}, \quad \vec{\omega}_{B/I} = \begin{bmatrix} \omega_{Bn} \\ \omega_{Be} \\ \omega_{Bk} \end{bmatrix}, \quad \vec{\omega}_{A/I} = \begin{bmatrix} \omega_{Ar} \\ \omega_{Ae} \\ \omega_{Ad} \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

şeklinde. Burada $\omega_{Gi}, \omega_{Gj}, \omega_{Gk}$ G koordinat ekseninde i, j ve k eksenleri etrafındaki ataletsel açısal hızı, $\omega_{Bn}, \omega_{Be}, \omega_{Bk}$ B koordinat ekseninde n, e ve k eksenleri etrafındaki ataletsel açısal hızı, $\omega_{Ar}, \omega_{Ae}, \omega_{Ad}$ A koordinat ekseninde r, e ve d eksenleri etrafındaki ataletsel açısal hızı göstermektedir. SP'nin yan hareket sistemi ve yükseliş hareket sistemi atalet matrisleri,

$$J_A = \begin{bmatrix} A_r & A_{re} & A_{rd} \\ A_{re} & A_e & A_{de} \\ A_{rd} & A_{de} & A_d \end{bmatrix} \quad (4.4.a)$$

$$J_B = \begin{bmatrix} B_n & B_{ne} & B_{nk} \\ B_{ne} & B_e & B_{ke} \\ B_{nk} & B_{ke} & B_k \end{bmatrix} \quad (4.4.b)$$

olarak gösterilir. Burada A_r, A_e, A_d A koordinat ekseninde r, e ve d eksenleri etrafındaki atalet momentlerini; A_{re}, A_{rd}, A_{de} A koordinat ekseninde çarpım atalet momentlerini; B_n, B_e, B_k B koordinat ekseninde n, e ve k eksenleri etrafındaki atalet momentlerini; B_{nk}, B_{ne}, B_{ke} B koordinat ekseninde çarpım atalet momentlerini ifade etmektedir. Bütün bunlara ek olarak $T_{YÜKSELİŞ}$, A koordinat ekseninde e-ekseni etrafındaki toplam harici torku ifade ederken, T_{YAN} ise B koordinat ekseninde k-ekseni etrafındaki toplam harici torku göstermektedir. Daha öncede bahsedildiği gibi bu çalışmada amaç hareketli platform sisteminin görüş hattı eksenini (r-ekseni) stabilize etmektir. Bu doğrultuda ω_{Ae} ve ω_{Ad} açısal hızlarının sıfıra eşitlenmesi gerekmektedir. ω_{Ae} ve ω_{Ad} açısal hızları, yükseliş eksenine monte edilmiş olan jiroskop ile algılanabilir. Euler açıları birbiri ile ilişkili olan iki referans koordinat eksen arasındaki pozisyonu tanımlamak için kullanılır. Bu durumda G koordinat eksenini ile B koordinat eksenini arasındaki açısal ilişki tek bir u açısı kullanılarak,

$$\omega_{Bn} = \omega_{Gi} \cos u + \omega_{Gj} \sin u \quad (4.5.a)$$

$$\omega_{Be} = -\omega_{Gi} \sin u + \omega_{Gj} \cos u \quad (4.5.b)$$

$$\omega_{Bk} = \omega_{Gk} + \dot{u} \quad (4.5.c)$$

şeklinde elde edilebilir. Benzer şekilde B koordinat eksenini ile A koordinat eksenini arasındaki açısal ilişkisi de tek bir ε açısı kullanılarak,

$$\omega_{Ar} = \omega_{Bn} \cos \varepsilon - \omega_{Bk} \sin \varepsilon \quad (4.6.a)$$

$$\omega_{Ae} = \omega_{Be} + \dot{\varepsilon} \quad (4.6.b)$$

$$\omega_{Ad} = \omega_{Bn} \sin \varepsilon + \omega_{Bk} \cos \varepsilon \quad (4.6.c)$$

şeklinde elde edilebilir.

Yan ve yükseliş hareket sistemi katı gövde olarak göz önünde bulundurulduklarında temel hareket denklemleri doğrudan elde edilebilir. Bu nedenle SP'a uygulanan harici tork

$$\vec{T} = \frac{d}{dt} \vec{H} + \vec{\omega} \times \vec{H}; \quad \vec{H} = J \cdot \vec{\omega} \quad (4.7)$$

şeklinde elde edilir. Bu denklemde J atalet matrisini, $\vec{\omega}$ açısal hız vektörünü, $\vec{H}$ ise açısal momentum vektörünü göstermektedir [20].

4.1. Yükseliş Ekseni Hareket Denklemleri

SP, katı gövde olarak göz önünde bulundurulduğunda yükseliş hareket sistemi için açısal momentum,

$$\vec{H}_A = \vec{J}_A \vec{\omega}_{A/I} = \begin{bmatrix} A_r \omega_{Ar} + A_{re} \omega_{Ae} + A_{rd} \omega_{Ad} \\ A_{re} \omega_{Ar} + A_e \omega_{Ae} + A_{de} \omega_{Ad} \\ A_{rd} \omega_{Ar} + A_{de} \omega_{Ae} + A_d \omega_{Ad} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_r \\ H_e \\ H_d \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

olarak bulunur. Dönen koordinat eksenini için moment denklemi ise,

$$\vec{T} = \frac{d\vec{H}_A}{dt} + \vec{\omega}_A \times \vec{H}_A \quad (4.9)$$

şeklinde ifade edilir. Açısal momentum, moment denklemi içerisinde kullanıldığında A koordinat ekseninde her bir eksen için toplam harici tork,

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} \dot{H}_r + \omega_{Ae} H_d - \omega_{Ad} H_e \\ \dot{H}_e + \omega_{Ad} H_r - \omega_{Ar} H_d \\ \dot{H}_d + \omega_{Ar} H_e - \omega_{Ae} H_r \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

şeklinde hesaplanır. Bu durumda yükseliş eksenini (e-ekseni) için toplam harici tork,

$$T_{YÜKSELİŞ} = \dot{H}_e + \omega_{Ad} H_r - \omega_{Ar} H_d \quad (4.11)$$

denklemi ile hesaplanır. Eş. 4.11,

$$\begin{aligned} A_e \dot{\omega}_{Ae} &= T_{YÜKSELİŞ} + T_{B-YÜKSELİŞ} \\ T_{B-YÜKSELİŞ} &= (A_d - A_r)(\omega_{Ar} \omega_{Ad}) - A_{re}(\dot{\omega}_{Ar} + \omega_{Ae} \omega_{Ad}) \\ &\quad + A_{rd}(\omega_{Ar}^2 - \omega_{Ad}^2) - A_{de}(\dot{\omega}_{Ad} - \omega_{Ae} \omega_{Ar}) \end{aligned} \quad (4.12)$$

şeklinde bir diferansiyel denklem olarak ifade edilebilir. Burada $T_{B-YÜKSELİŞ}$ olarak belirtilen denklemin sağ tarafındaki atalet terimleri, kontrol döngüsüne harici tork bozunumu olarak eklenen istenmeyen bozunumları oluşturmaktadır. Yükseliş hareket sisteminin dinamik dengesizliğe sahip olmadığı varsayıldığından ($A_{re} = A_{rd} = A_{de} = 0$) Eş. 4.12 aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir:

$$A_e \dot{\omega}_{Ae} = T_{YÜKSELİŞ} + (A_d - A_r)(\omega_{Ar} \omega_{Ad}) \quad (4.13)$$

Eş. 4.6.a ve Eş. 4.6.c, Eş. 4.13'de yerine koyulduğunda yükseliş eksenini için harici tork bozunumu elde edilir.

$$T_{B-YÜKSELİŞ} = -(A_d - A_r) \omega_{Ad}^2 \tan(\varepsilon) + \omega_{Bn} \omega_{Ad} (A_d - A_r) \frac{1}{\cos \varepsilon} \quad (4.14)$$

4.2. Yan Eksen Hareket Denklemleri

Bütün SP sistemi için B koordinat ekseninde açısal momentum, yükseliş ve yan hareket sistemlerinin açısal momentumlarının toplamı olarak ifade edilebilir.

$$\vec{H} = \begin{bmatrix} H_n \\ H_e \\ H_k \end{bmatrix} = J_B \vec{\omega}_{B/I} + {}^A_B C^T J_A \vec{\omega}_{A/I} \quad (4.15)$$

B koordinat ekseninde moment denklemi ise,

$$\vec{T} = \frac{d}{dt} \vec{H} + \vec{\omega}_{B/I} \times \vec{H} \quad (4.16)$$

şeklindedir. Yan eksen dönüş hareketi k-ekseni etrafında gerçekleşir. Bu nedenle moment denkleminin k-ekseni için iki bileşeni aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$H_k = B_{nk} \omega_{Bn} + B_{ke} \omega_{Be} + B_k \omega_{Bk} - (A_r \omega_{Ar} + A_{re} \omega_{Ae} + A_{rd} \omega_{Ad}) \sin \varepsilon \\ + (A_{rd} \omega_{Ar} + A_{de} \omega_{Ae} + A_d \omega_{Ad}) \cos \varepsilon \quad (4.17)$$

$$(\vec{\omega}_{B/I} \times \vec{H})_k = \omega_{Bn} (B_{ne} \omega_{Bn} + B_e \omega_{Be} + B_{ke} \omega_{Bk} + A_{re} \omega_{Ar} + A_e \omega_{Ae} + A_{de}) \\ - \omega_{Be} (B_n \omega_{Bn} + B_{ne} \omega_{Be} + B_{nk} \omega_{Bk}) \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned}
& -\omega_{Be} (A_r \omega_{Ar} + A_{re} \omega_{Ae} + A_{rd} \omega_{Ad}) \cos \varepsilon \\
& -\omega_{Be} (A_d \omega_{Ar} + A_{de} \omega_{Ae} + A_d \omega_{Ad}) \sin \varepsilon
\end{aligned}$$

Eş. 4.17 ve Eş. 4.18'e dayalı olarak yan eksen için hareket denklemi aşağıdaki gibi elde edilebilir.

$$J_{E\dot{\Sigma}} \dot{\omega}_{Bk} = T_{YAN} + T_{B-YAN} \quad (4.19)$$

Burada $J_{E\dot{\Sigma}}$ k-ekseni etrafındaki anlık atalet momentini göstermektedir. T_{B-YAN} ise atalet bozunumlarını ifade etmektedir. Bu terimler matematiksel olarak aşağıdaki gibi açıklanabilir.

$$J_{E\dot{\Sigma}} = B_k + A_r \sin^2 \varepsilon + A_d \cos^2 \varepsilon - A_{rd} \sin(2\varepsilon) \quad (4.20)$$

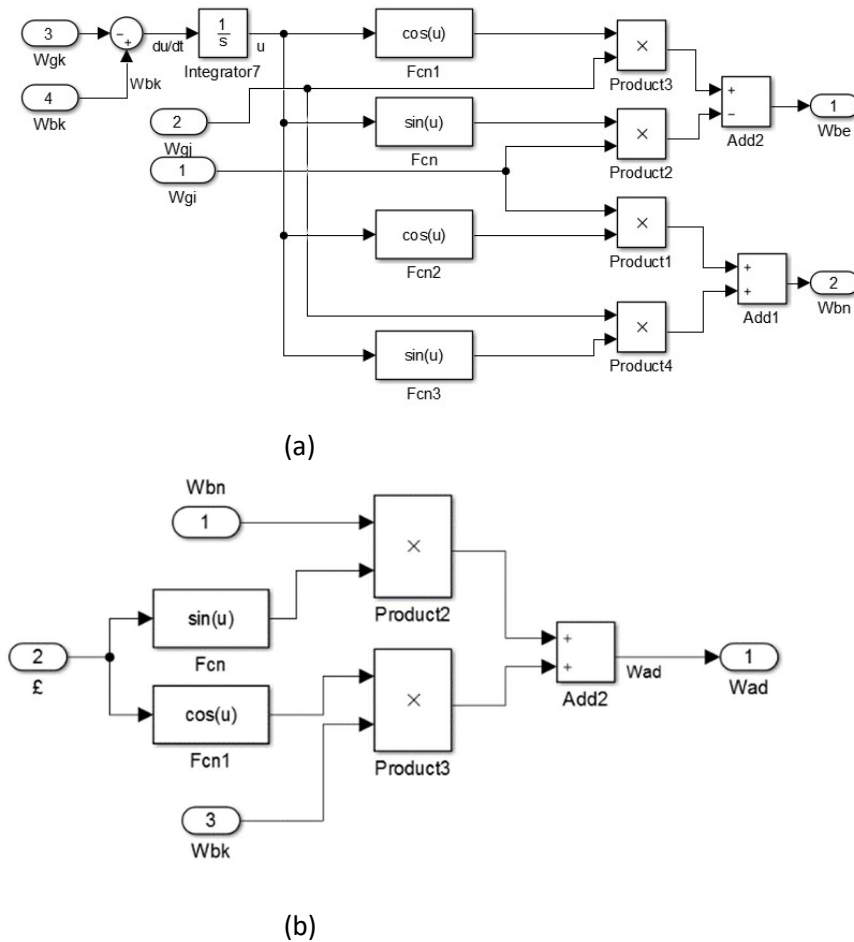
$$\begin{aligned}
T_{B-YAN} = & [B_n + A_r \cos^2 \varepsilon + A_d \sin^2 \varepsilon + A_{rd} \sin 2\varepsilon - (B_e + A_e)] \omega_{Bn} \omega_{Be} \\
& - [B_{nk} + (A_d - A_r) \sin \varepsilon \cos \varepsilon + A_{rd} \cos(2\varepsilon)] (\dot{\omega}_{Bn} - \omega_{Be} \omega_{Bk}) \\
& - [B_{ke} + A_{de} \cos \varepsilon - A_{re} \sin \varepsilon] (\dot{\omega}_{Be} + \omega_{Bn} \omega_{Bk}) \\
& - [B_{ne} + A_{re} \cos \varepsilon + A_{de} \sin \varepsilon] (\omega_{Bn}^2 - \omega_{Be}^2) \\
& + \ddot{\varepsilon} (A_{re} \sin \varepsilon - A_{de} \cos \varepsilon) \\
& + \dot{\varepsilon} [(A_r - A_d) (\omega_{Bn} \cos(2\varepsilon) - \omega_{Bk} \sin(2\varepsilon))] \\
& + \dot{\varepsilon} [2A_{re} (\omega_{Bn} \sin(2\varepsilon) + \omega_{Bk} \cos(2\varepsilon))] \\
& + \dot{\varepsilon} [(A_{de} \sin(\varepsilon) + A_{re} \cos(\varepsilon)) (\omega_{Ae} + \omega_{Be}) - A_e \omega_{Bn}]
\end{aligned} \quad (4.21)$$

Dinamik dengesizliğin olmadığı varsayıldığında (yani $A_{re} = A_{rd} = A_{de} = 0, B_{ne} = B_{nk} = B_{ke} = 0$ ise) Eş. 4.21 aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir.

$$\begin{aligned}
T_{B-YAN} = & [B_n + A_r \cos^2 \varepsilon + A_d \sin^2 \varepsilon - (B_e + A_e)] \omega_{Bn} \omega_{Be} \\
& - [B_{nk} + (A_d - A_r) \sin \varepsilon \cos \varepsilon] (\dot{\omega}_{Bn} - \omega_{Be} \omega_{Bk}) \\
& - B_{ke} (\dot{\omega}_{Be} + \omega_{Bn} \omega_{Bk}) \\
& - B_{ne} (\omega_{Bn}^2 - \omega_{Be}^2) \\
& + \dot{\varepsilon} [(A_r - A_d) (\omega_{Bn} \cos(2\varepsilon) - \omega_{Bk} \sin(2\varepsilon))] - \dot{\varepsilon} A_e \omega_{Bn}
\end{aligned} \quad (4.22)$$

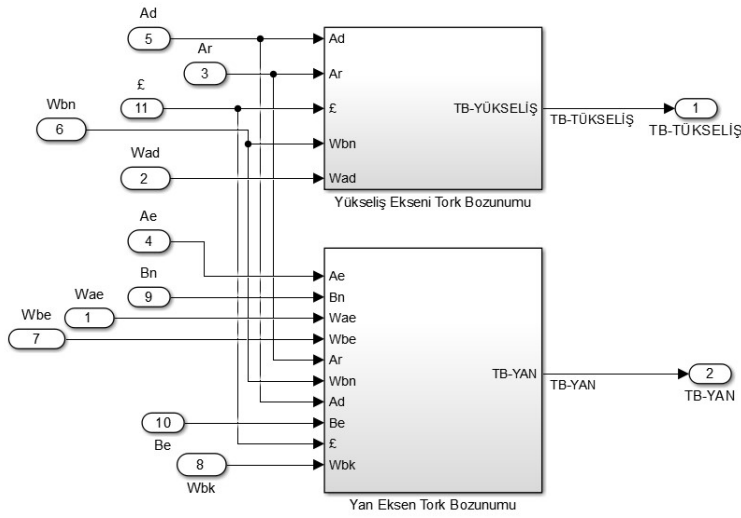
4.3. Hareket Denklemlerinin MATLAB/Simulink Modeli

Hareket denklemlerinin MATLAB/Simulink modellerinin oluşturulabilmesi için Simulink ortamında öncelikli olarak açısal hızlar için gerekli eksen dönüşümlerinin modellenmesi gerekmektedir. Şekil 4.1.a.'da Eş. 4.5.a., Eş. 4.5.b. ve Eş. 4.5.c. kullanılarak ω_{Bn} ve ω_{Be} açısal hızlarının elde edilmesini sağlayan G-B koordinat eksenleri arasındaki açısal hız eksen dönüşümünün Simulink blok diyagramı görülmektedir. Şekil 4.1.b.'de ise Eş. 4.6.c kullanılarak ω_{Ad} açısal hızının elde edilmesini sağlayan B-A koordinat eksenleri arasındaki açısal hız eksen dönüşümünün Simulink blok diyagramı verilmiştir.

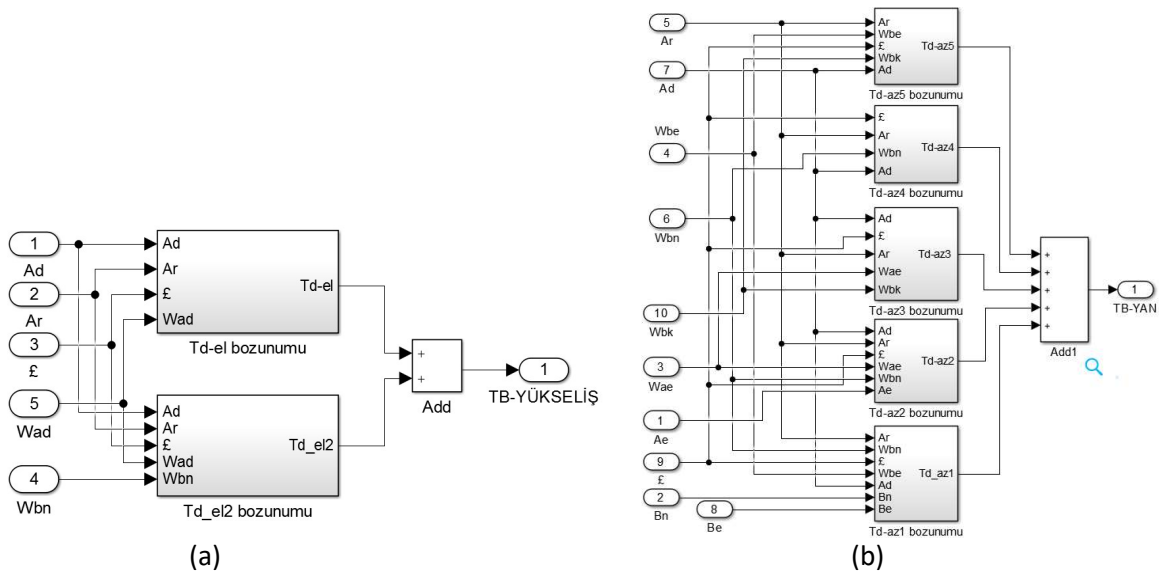


Şekil 4.1. Açısal hız eksen dönüşümleri, (a) G-B Açısal hız eksen dönüşümü, (b) B-A açısal hız eksen dönüşümü

Şekil 4.2'de stabilizasyon döngüsüne dahil olan çapraz-bağlaşım tork bozunumlarının Simulink modeli görülmektedir. Model, yükseliş eksenini tork bozunumu ve yan eksen tork bozunumu olmak üzere iki bloktan oluşmaktadır. Şekil 4.3'de ise çapraz bağlaşım tork bozunumlarının her bir eksen için alt blok diyagramları görülmektedir.

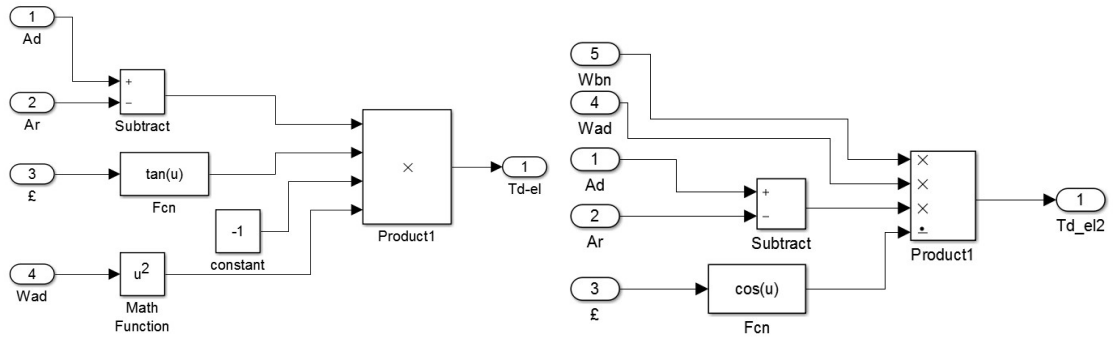


Şekil 4.2. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş eksenli tork bozunumlarının genel simulink modeli

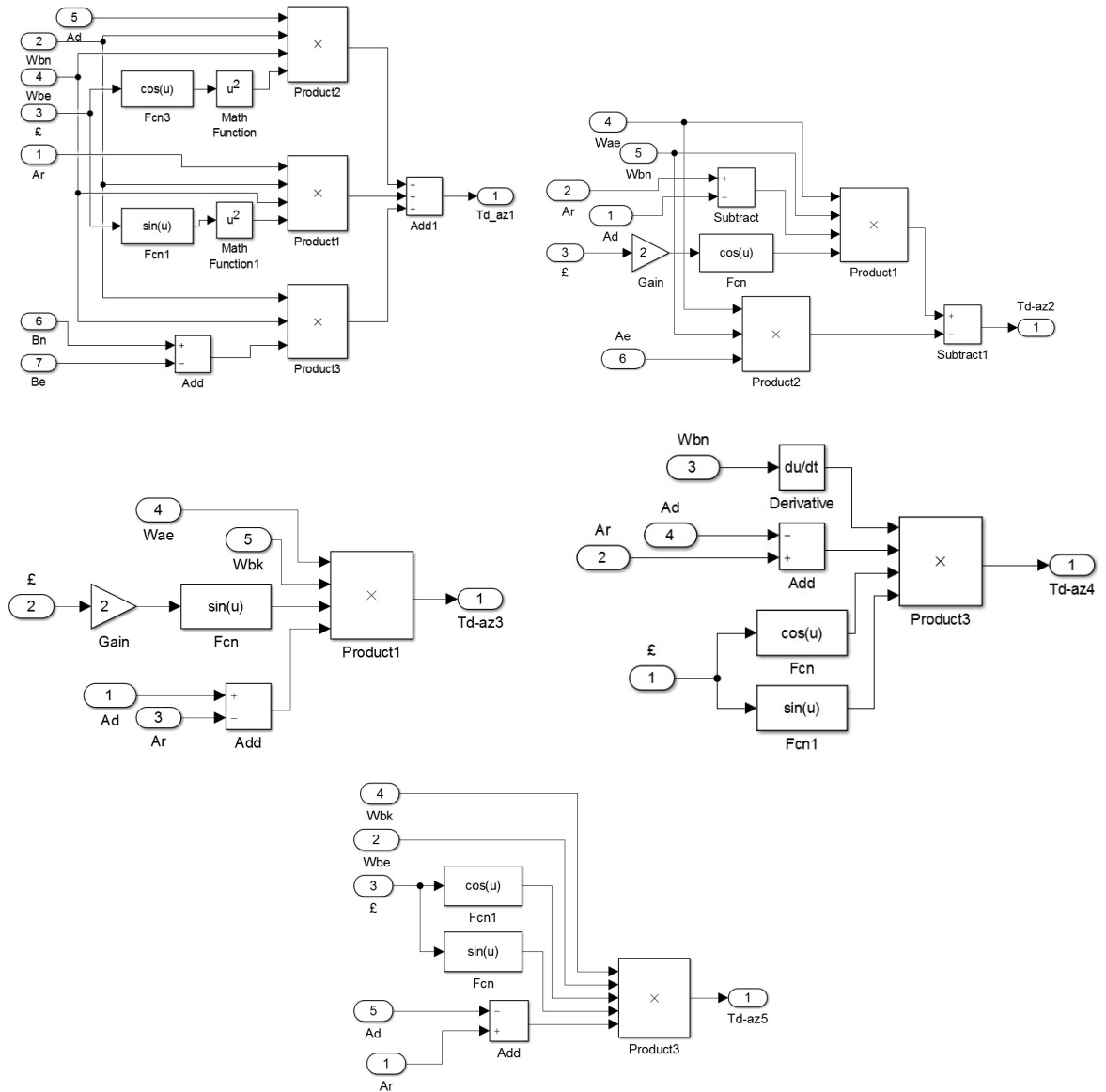


Şekil 4.3. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş eksenli tork bozunumlarının alt bileşenleri(a) Yükseliş eksenli tork bozunumu, (b) Yan eksen tork bozunumu

Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı tork bozunumları yükseliş eksenli için Eş. 4.14, yan eksen için ise Eş. 4.21 kullanılarak modellenmiştir. Şekil 4.3.'de görüldüğü gibi yükseliş eksenli için denklem iki parçaya, yan eksen için ise beş parçaya bölünmüştür. Her bir parçaya ait blok diyagramı Şekil 4.4.'de görülmektedir.



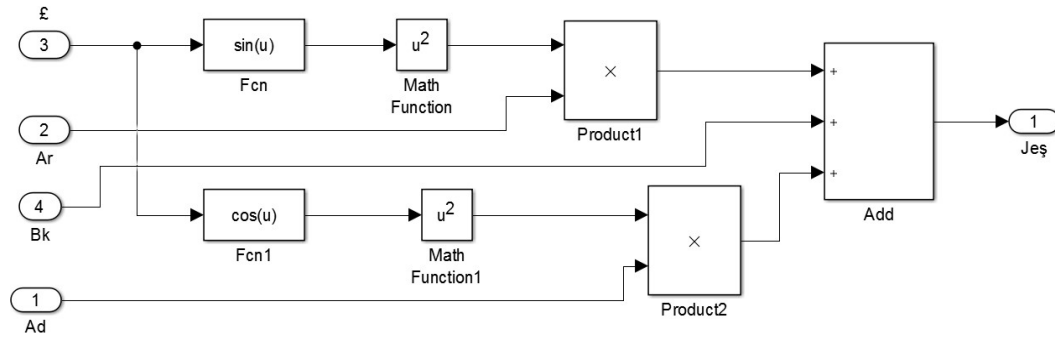
(a)



(b)

Şekil 4.4. Çapraz bağlaşım etkisinden kaynaklı yan ve yükseliş ekseni tork bozunumlarının alt bileşenlerinin detaylı simulink modelleri, (a) Yükseliş ekseni tork bozunumu detaylı modeli, (b) Yan eksen tork bozunumu detaylı modeli

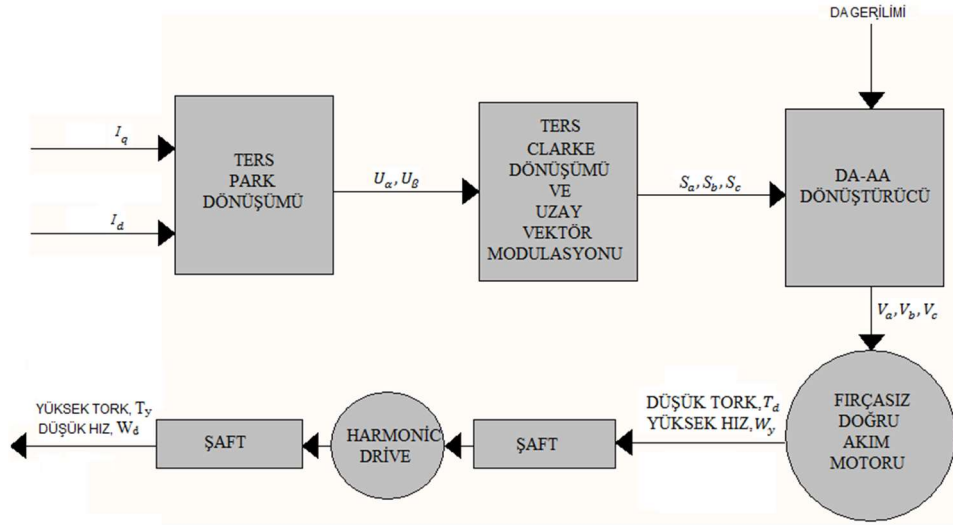
Şekil 4.5’de k-ekseni etrafındaki atalet değişiminin Eş. 4.20’ye göre tasarlanmış Simulink modeli görülmektedir. Modelin çıktısı $J_{E\dot{\theta}}$, Eş. 4.19’dan faydalanılarak ω_{Bk} açısal hızının elde edilmesi için kullanılmaktadır.



Şekil 4.5. k-ekseni etrafındaki atalet değişiminin simulink modeli

5. HAREKET SAĞLAYICI DİNAMİK MODELİ

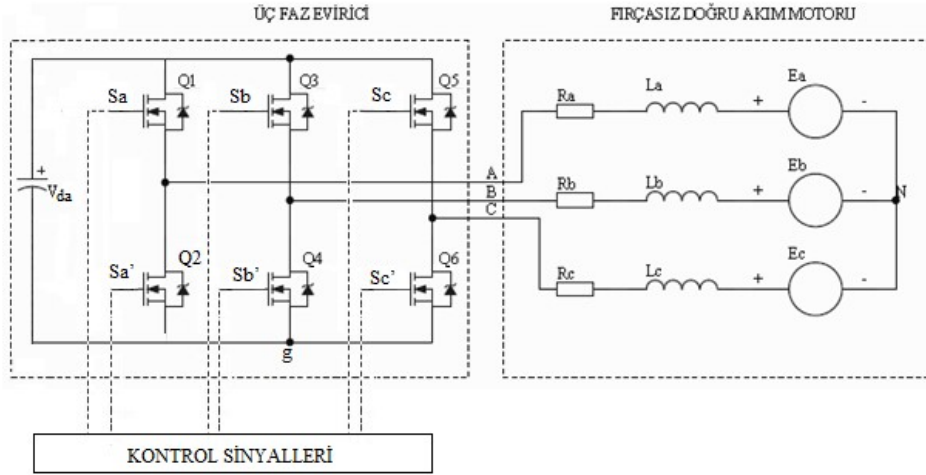
Yan ve yükseliş hareket sistemleri için gerekli kontrol torkunu sağlayan hareket sağlayıcı biriminin dinamik modeli, FDAM ve FDAM'nin vektör kontrolü ile birlikte harmonik sürürlü dişli sistemi, mekanik şaft gibi tork aktarım birimlerinin dinamik modellerini de içermektedir. Hareket sağlayıcı birimin blok diyagramı Şekil 5.1'de görülmektedir.



Şekil 5.1. Hareket sağlayıcı sistemi blok şeması

5.1. Fırçasız Doğru Akım Motoru Dinamik Modeli

FDAM'nin üç faz senkron makine ile benzer biçimde modellenebilir. FDAM'nin komütasyonunu sağlamak için ise DA bara gerilimine sahip, asenkron motor ve sabit mıknatıslı AA motor sürücüleri ile benzer şekilde olan PWM anahtarlama üç fazlı gerilim kaynaklı evirici topolojisi kullanılmıştır. FDAM sürücü sisteminin genel modeli Şekil 5.2'de görülmektedir.



Şekil 5.2. FDAM sürücü sistemi modeli

FDAM, üç faz stator sargılarından ve bir adet sabit mıknatıslı rotordan oluşmaktadır. Faz değişkenleri ile elde edilen gerilim denklemi aşağıdaki gibidir [21].

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

Bu denklemde V_{an}, V_{bn}, V_{cn} , stator faz gerilimlerini; R_a, R_b, R_c , stator faz dirençlerini; L_a, L_b, L_c , stator faz öz-endüktanslarını; I_a, I_b, I_c , stator faz akımlarını; $M_{ab}, M_{ac}, M_{ba}, M_{bc}, M_{ca}, M_{cb}$, stator fazları arasındaki karşılıklı endüktansları; E_a, E_b, E_c ise zıt EMK gerilimlerini göstermektedir.

Basitlik olması açısından,

1. Bütün stator sarımlarının dirençleri eşit, öz-endüktansları ise sabit ve eşit olarak kabul edilebilir,
2. Karşılıklı endüktanslar ihmal edilebilir,
3. Eviricide bulunan yarı iletken güç elemanları ideal kabul edilebilir,
4. Demir kayıpları ihmal edilebilir,
5. Motor simetrik kabul edilebilir ve salient effect ihmal edilebilir.

Yukarıdaki varsayımların altında FDAM'ın matematiksel modeli

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

olarak elde edilir. Çıkış gerilimleri Şekil 5.2.'de görüldüğü üzere evirici anahtarlarını ilettime geçiren komut sinyalleri S_a, S_b, S_c ile kaynak gerilimin nötr (g) noktası ve FDAM'ın sanal nötr (n) noktası göz önünde bulundurularak evirici çıkış gerilimi için aşağıdaki denklemler yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} = V_{da} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned} V_{ag} &= V_{an} + V_{ng} \\ V_{bg} &= V_{bn} + V_{ng} \\ V_{cg} &= V_{cn} + V_{ng} \end{aligned} \quad (5.4)$$

Dengelenmiş bir yük için $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$, dolayısıyla $V_{ng} = \frac{1}{3}(V_{ag} + V_{bg} + V_{cg})$ sonucuna ulaşılır. Bu durumda stator faz gerilimleri

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

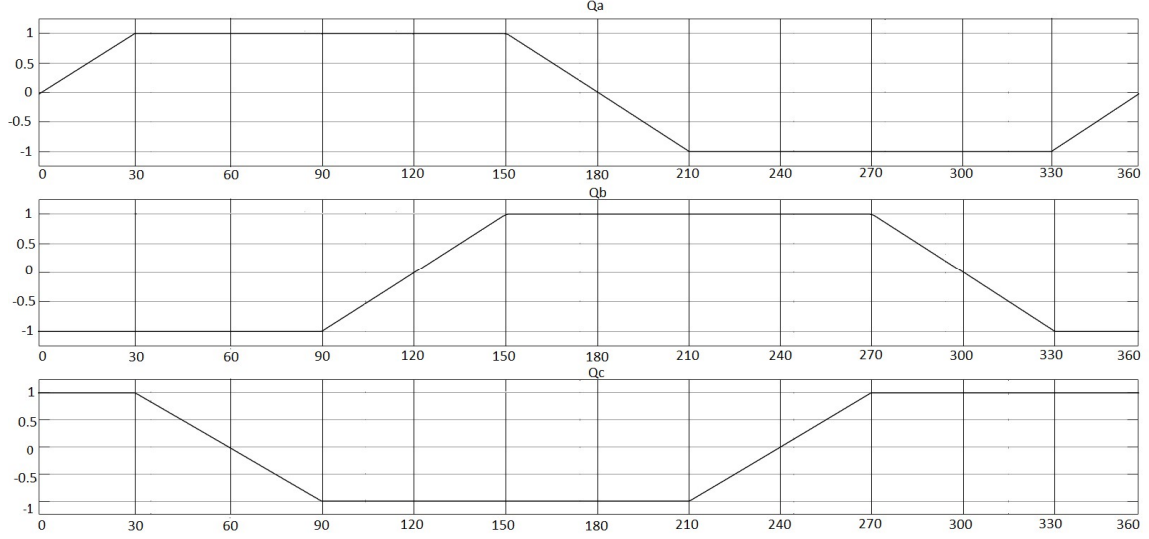
şeklinde elde edilir.

E_a, E_b, E_c zıt EMK'ları için Eş. 5.6 yazılabilir [21].

$$\begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} = \omega_m \delta_m \begin{bmatrix} Q_a(\theta_r) \\ Q_b(\theta_r) \\ Q_c(\theta_r) \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

Bu denklemde ω_m , rotorun açısal hızını (rad/sn); δ_m , akı bağıntı ya da zıt EMK sabitini; θ_r ise rotorun pozisyonunu (rad) göstermektedir. $Q_a(\theta_r)$, $Q_b(\theta_r)$ ve $Q_c(\theta_r)$, FDAM'ın endüklenen trapezoidal EMK'larına karşılık gelen açısal pozisyona (θ_r) bağlı birim

fonksiyon üreteceğini ifade etmektedir. Şekil 5.3.'de görüldüğü gibi $Q_a(\theta_r)$, $Q_b(\theta_r)$ ve $Q_c(\theta_r)$ arasında 120° faz farkı bulunmaktadır.



Şekil 5.3. Birim genliğe sahip zıt EMK gerilimlerinin değişimi

Üretilen elektromanyetik tork Newton'un tanımına göre,

$$T_e = (E_a I_a + E_b I_b + E_c I_c) / \omega_m \quad (5.7)$$

şeklinde ifade edilir. Eş. 5.6, Eş. 5.7 ile birleştirildiğinde

$$T_e = \delta_m Q_a(\theta_r) I_a + \delta_m Q_b(\theta_r) I_b + \delta_m Q_c(\theta_r) I_c \quad (5.8)$$

$$T_e = T_a + T_b + T_c \quad (5.9)$$

sonucuna ulaşılır.

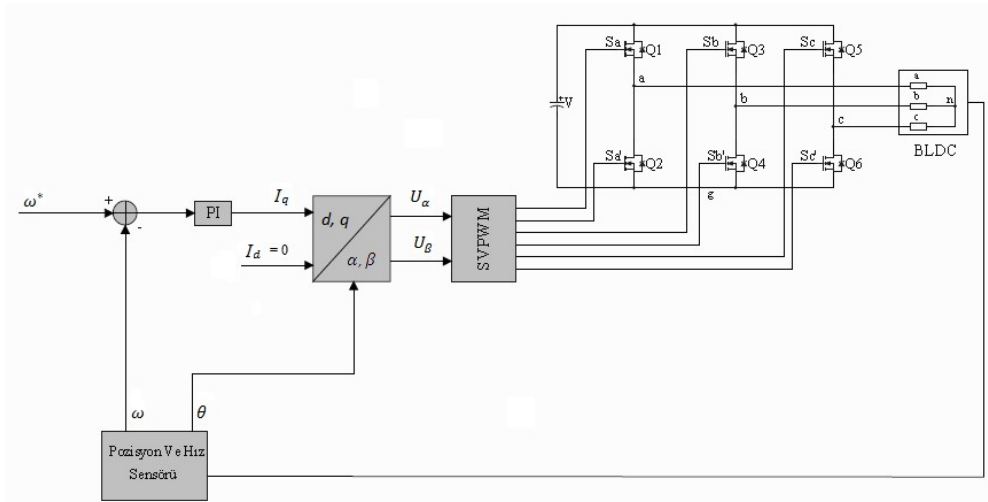
Newton'un ikinci yasasına göre rotorun açısal hareketi,

$$T_e = T_m + J \frac{d\omega_m(t)}{dt} + B \omega_m(t) \quad (5.10)$$

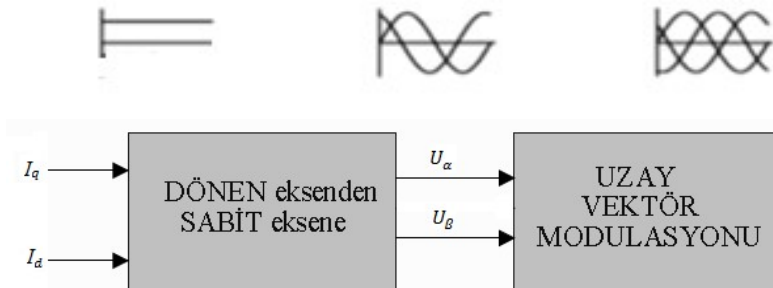
olarak tanımlanır. Burada T_m yük torkunu, J rotor ataletini, B ise sönümlenme katsayısını ifade etmektedir.

5.2. Fırçasız Doğru Akım Motoru Vektör Kontrolü

Vektör kontrolünün temel prensibi stator akımlarını tork ve akı bileşenine ayırarak ayrı ayrı kontrol etmektir. Tork bileşeninin ve manyetik akı bileşeninin elde edilebilmesi için rotorun pozisyonunun bilinmesi gerekir. Tork bileşeni rotorun pozisyonuna dik olan U_q bileşeni, akı bileşeni ise rotorun pozisyonuna paralel olan U_d bileşenidir. Şekil 5.4’de vektör kontrolünü içeren stabilizasyon döngüsünün genel şeması görülmektedir. Rotorun pozisyonu ve hız bilgisi sensörler kullanılarak elde edilir. Okunan hız bilgisi referans hız bilgisinden çıkarılarak elde edilen hız hatası PI denetleyiciye iletilir. PI denetleyicinin çıkışı ise tork bileşeni olarak kullanılır. Motor anma hızına ulaşmadan önce maksimum sabit torkun elde edilebilmesi için akı bileşeni sıfır olarak alınır.



Şekil 5.4. Vektör kontrolünün genel şeması



Şekil 5.5. Vektör kontrol dönüşümleri

Şekil 5.5’de vektör kontrolünde kullanılan dönüşümler görülmektedir. Tork bileşeni, I_q ve akı bileşeni, I_d ters park dönüşümü ile rotora göre sabit olan α - β eksenindeki bileşenlere dönüştürülürler. Ters park dönüşümü,

$$U_s = I_d + I_q j = (U_\alpha + U_\beta j) e^{j\omega t}$$

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \\ U_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & 0 \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_0 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

ile ifade edilir. Bu dönüşüm için rotorun elektriksel açısı pozisyonunun bilinmesi gerekir. α - β eksenindeki bileşenler ise uzay vektör darbe genişlik modülasyonu ile evirici güç anahtarlarını kontrol eden uygun PWM sinyallerine dönüştürülür. PWM sinyallerinin güç anahtarlarını kontrol etmesiyle DA gerilimi, 3 faz AA gerilimine dönüştürülür.

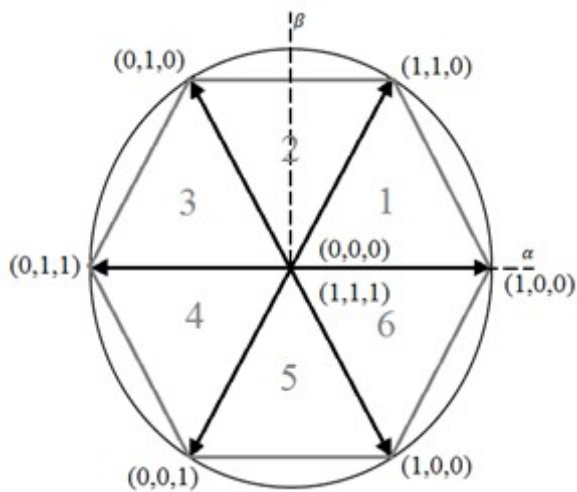
Şekil 5.2’de fırçasız doğru akım motoruna sürekli bir doğru akım kaynağından alternatif gerilim sağlayan ve güç anahtarlarından oluşan evirici devresi görülmektedir. Mantıksal sinyaller $S_a, S'_a, S_b, S'_b, S_c$ ve S'_c , evirici güç anahtarları için komut sinyalleridir. Evirici anahtarları için mümkün olan 8 kombinasyon bulunmaktadır. Faz gerilimlerinden (V_{an}, V_{bn}, V_{cn}) Eş. 5.12’de ifade edilen Clarke dönüşümüne göre elde edilebilecek U_α ve U_β değerleri Çizelge 5.1.’de görülmektedir.

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

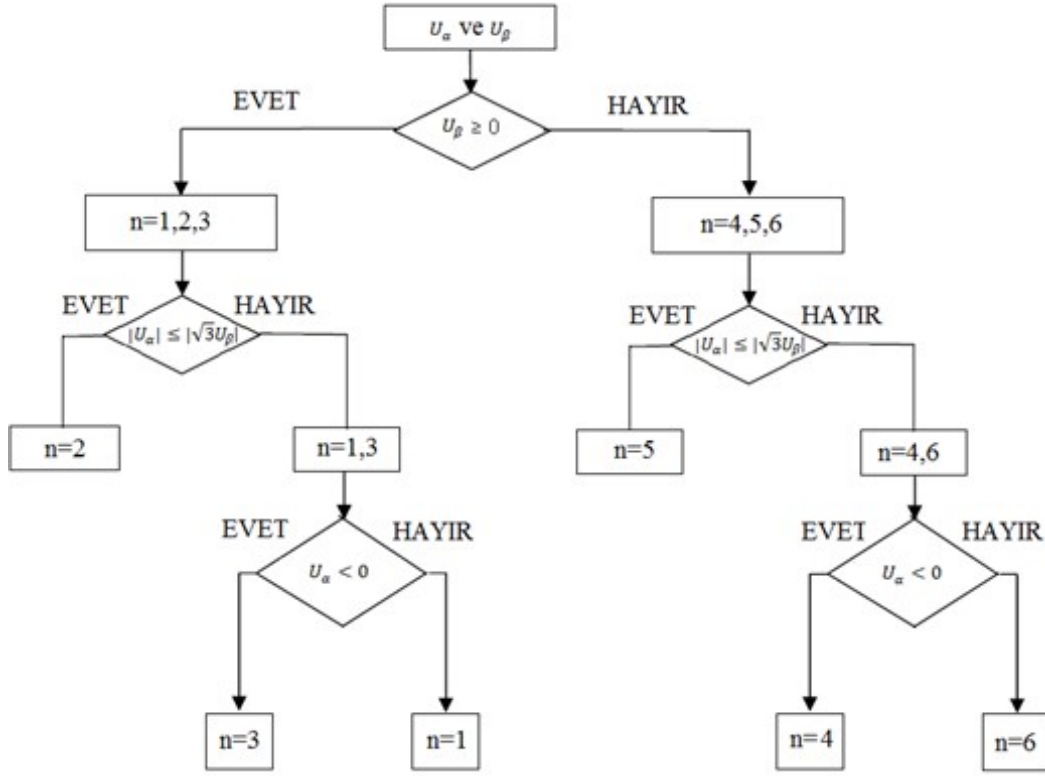
Çizelge 5.1. α - β bileşenleri için anahtarlama kombinasyonları

S_a	S_b	S_c	U_α	U_β
0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2}{3}V$	0
0	1	0	$-\frac{1}{3}V$	$\frac{1}{\sqrt{3}}V$
1	1	0	$\frac{1}{3}V$	$\frac{1}{\sqrt{3}}V$
0	0	1	$-\frac{1}{3}V$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}V$
1	0	1	$\frac{1}{3}V$	$-\frac{1}{\sqrt{3}}V$
0	1	1	$-\frac{2}{3}V$	0
1	1	1	0	0

Evirici anahtarlarının kombinasyonu ile tanımlanan sekiz temel uzay vektörü Şekil 5.6’da görülmektedir. Her iki uzay vektörü arasındaki bölge bir sektörü ifade etmektedir. U_α ve U_β değerlerinin hangi sektörü gösterdiği tespit edilerek evirici anahtarlarını kontrol eden komut sinyallerinin (S_a , S_b , S_c) durumu sürekli olarak güncellenir [22].



Şekil 5.6. Temel uzay vektörleri



Şekil 5.7. Sektör belirleme akış diyagramı

Şekil 5.7’de U_α ve U_β değerleri takip edilerek sektör numarasının tespitini anlatan akış diyagramı görülmektedir. Bu akış diyagramına göre sektör tespiti yapıldıktan sonra uygun sektöre göre evirici anahtarlarının iletimde ve kesimde olma zamanları hesaplanarak stator sarımlarına uygulanacak PWM sinyallerinin çevrim oranı hesaplanır. Bu işlem için öncelikli olarak ilgili sektörü oluşturan uzay vektörlerinin bir periyod içerisinde uygulanma oranları,

$$T_1 = \left[\sin\left(\frac{n\pi}{3}\right) * U_\alpha - \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right) * U_\beta \right] \quad (5.13)$$

$$T_2 = \left[-\sin\left(\frac{(n-1)\pi}{3}\right) * U_\alpha + \cos\left(\frac{(n-1)\pi}{3}\right) * U_\beta \right] \quad (5.14)$$

denklemleri ile hesaplanır. Burada n sektör numarasını ifade etmektedir. Daha sonra ise aşağıdaki denklem kullanılarak evirici anahtarlarının bir PWM periyodu ($2T$) süresince iletime geçme zamanları hesaplanır.

$$T = T_0 + T_1 + T_2$$

$$T_{a_{açık}} = \frac{T - T_1 - T_2}{2} \quad (5.15.a)$$

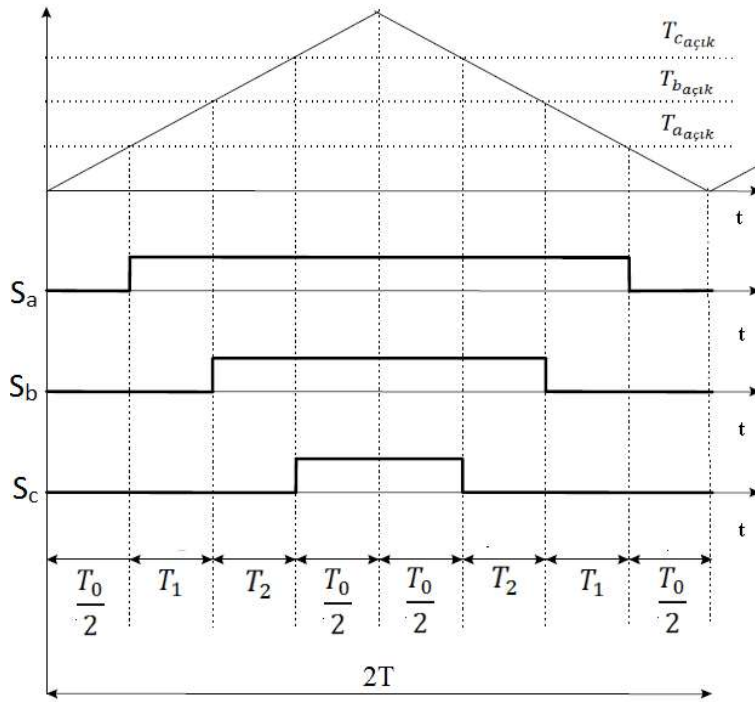
$$T_{b_{açık}} = T_{a_{açık}} + T_1 \quad (5.15.b)$$

$$T_{c_{a\text{çlık}}} = T_{b_{a\text{çlık}}} + T_2 \quad (5.15.c)$$

Çizelge 5.2. Sektör numarasına göre evirici anahtarlarının iletme geçme zamanları

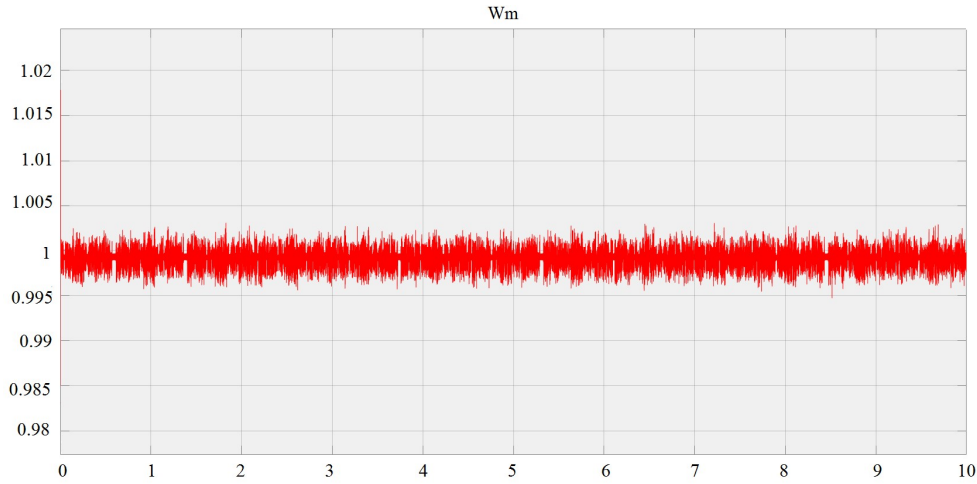
Sektör	1	2	3	4	5	6
S _a	$T_{a_{a\text{çlık}}}$	$T_{b_{a\text{çlık}}}$	$T_{c_{a\text{çlık}}}$	$T_{c_{a\text{çlık}}}$	$T_{b_{a\text{çlık}}}$	$T_{a_{a\text{çlık}}}$
S _b	$T_{b_{a\text{çlık}}}$	$T_{a_{a\text{çlık}}}$	$T_{a_{a\text{çlık}}}$	$T_{b_{a\text{çlık}}}$	$T_{c_{a\text{çlık}}}$	$T_{c_{a\text{çlık}}}$
S _c	$T_{c_{a\text{çlık}}}$	$T_{c_{a\text{çlık}}}$	$T_{b_{a\text{çlık}}}$	$T_{a_{a\text{çlık}}}$	$T_{a_{a\text{çlık}}}$	$T_{b_{a\text{çlık}}}$

Çizelge 5.2’de ilgili sektöre göre evirici anahtarları için atanmış uygun iletim zamanları görülmektedir. Şekil 5.8’de 1. sektör için evirici anahtarlarının iletme ve kesime geçme zamanları grafiksel olarak ifade edilmektedir.



Şekil 5.8. Evirici anahtarlarının iletme ve kesime geçme zamanlarının gösterimi

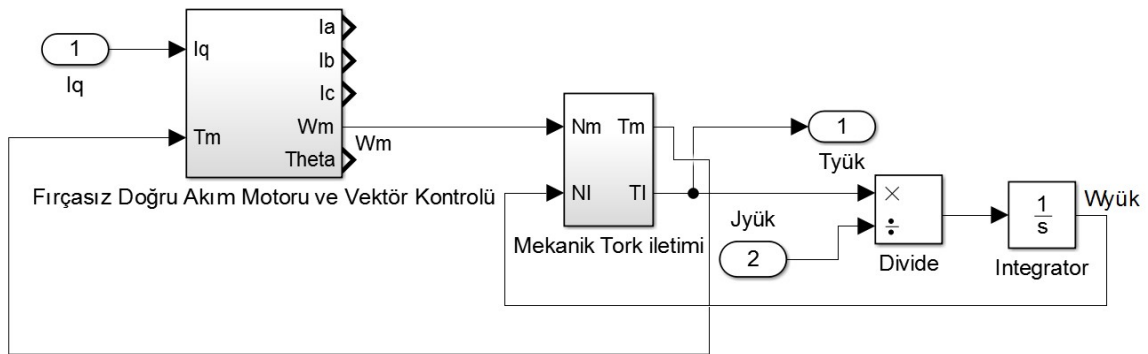
Vektör kontrol yönteminin en önemli avantajı, tork kontrolü ile tork salınımlarının en aza indirilmesini sağlayarak, FDAM’lerin çok düşük hızlarda bile düzgün bir şekilde dönmesini imkan sağlamasıdır [23]. Şekil 5.9’da bu çalışmada geliştirilen FDAM motor modeli ve vektör kontrol algoritması kullanılarak tasarlanmış düşük hız kontrol döngüsünün blok diyagramı görülmektedir. Çizelge 5.3.’de ise kullanılan FDAM’nin parametreleri verilmiştir.



Şekil 5.10. FDAM vektör kontrolü açısal hız tepkisi

5.3. Hareket Sağlayıcı Simulink Modeli

Şekil 5.11.'de hareket sağlayıcının Simulink modeli görülmektedir. Model, FDAM ve vektör kontrol bloğu ile mekanik tork iletim bloğundan oluşmaktadır. Motor tarafından üretilen tork mekanik tork iletim bloğu ile yük birimine aktarılmaktadır.

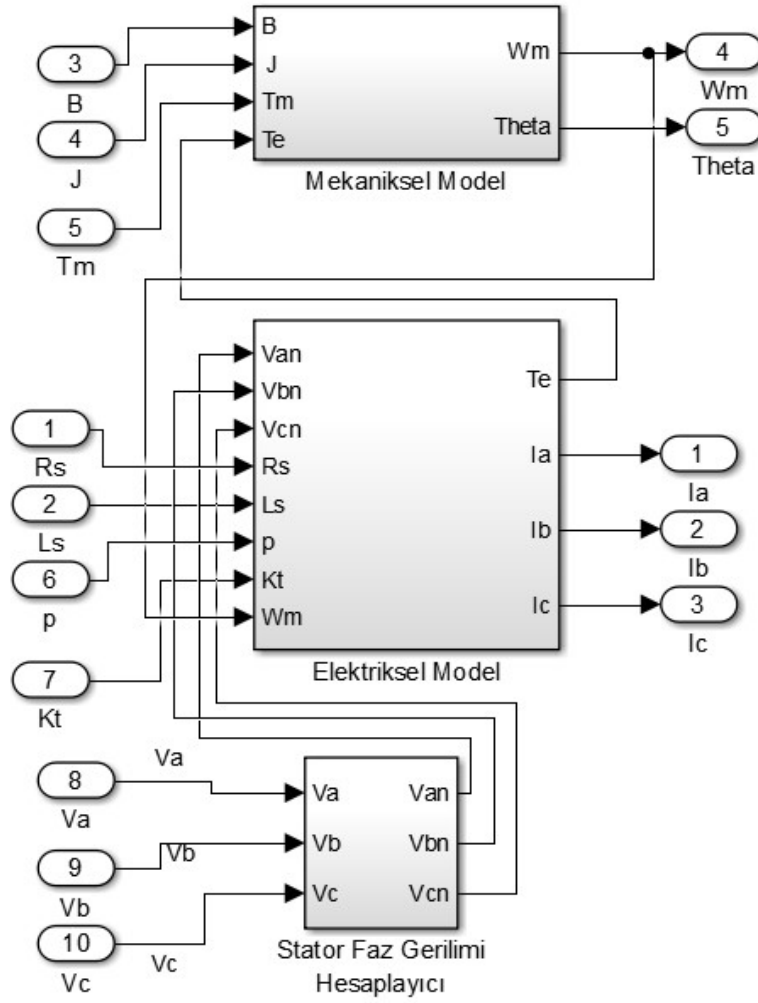


Şekil 5.11. Hareket sağlayıcı simulink modeli

5.3.1. FDAM Simulink Modeli

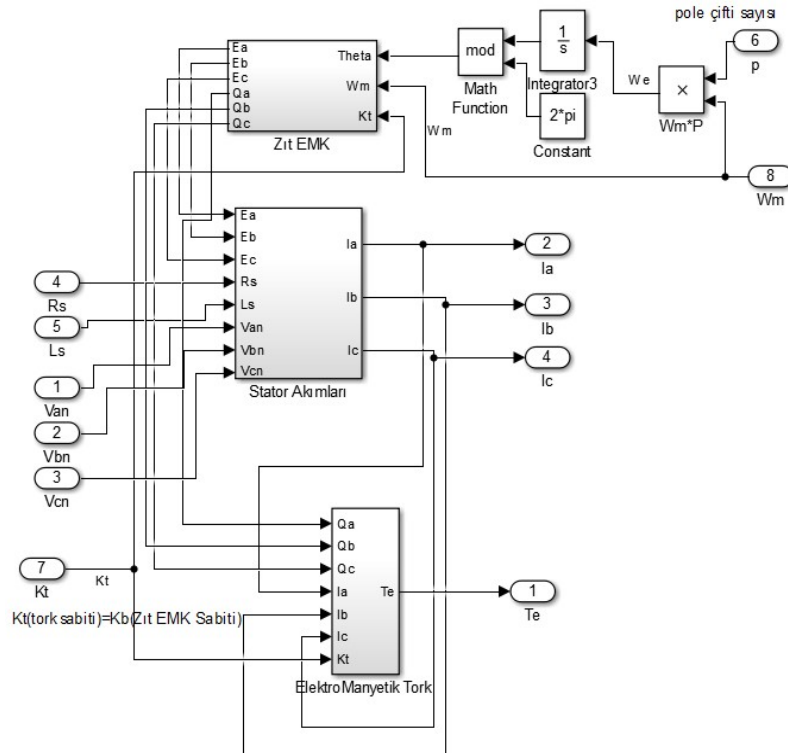
Şekil 5.12 FDAM'nin Simulink modelini göstermektedir. Model üç temel parçadan oluşmaktadır:

- Elektriksel Model
- Mekaniksel Model
- Stator Faz Gerilimi Modeli



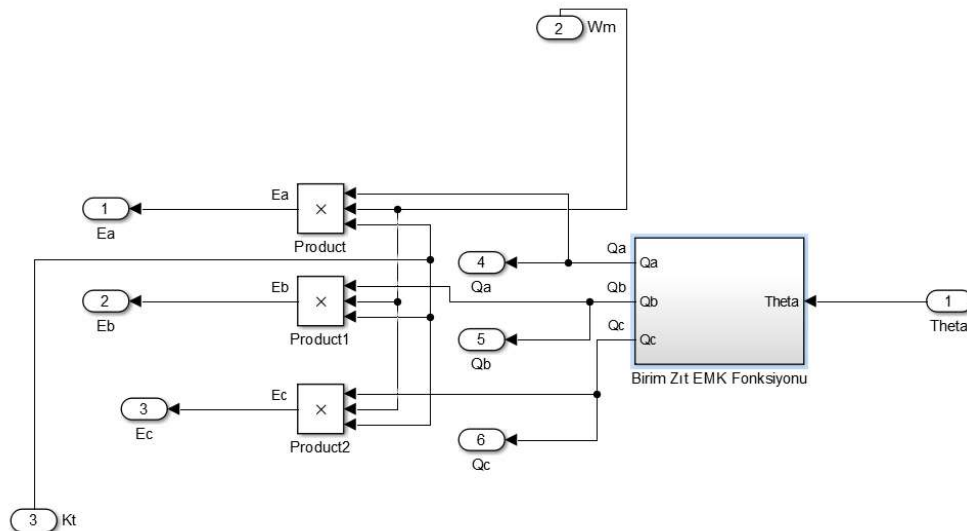
Şekil 5.12. FDAM'nin simulink modeli

Elektriksel modelde stator faz akımları I_a, I_b, I_c , üretilen elektromanyetik tork, T_e ve zıt EMK gerilimleri E_a, E_b, E_c değerlerini hesaplanmaktadır. Şekil 5.13'de elde edilen elektriksel model görülmektedir.



Şekil 5.13. FDAM elektriksel modeli

Zıt EMK gerilimi, Şekil 5.14.'de görüldüğü gibi Eş. 5.6'e göre modellenmiştir.



Şekil 5.14. Zıt EMK simulink modeli

Birim Zıt EMK fonksiyonunun modeli ise;

$$\theta_r \frac{6}{\pi}, \quad 0 \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{6}$$

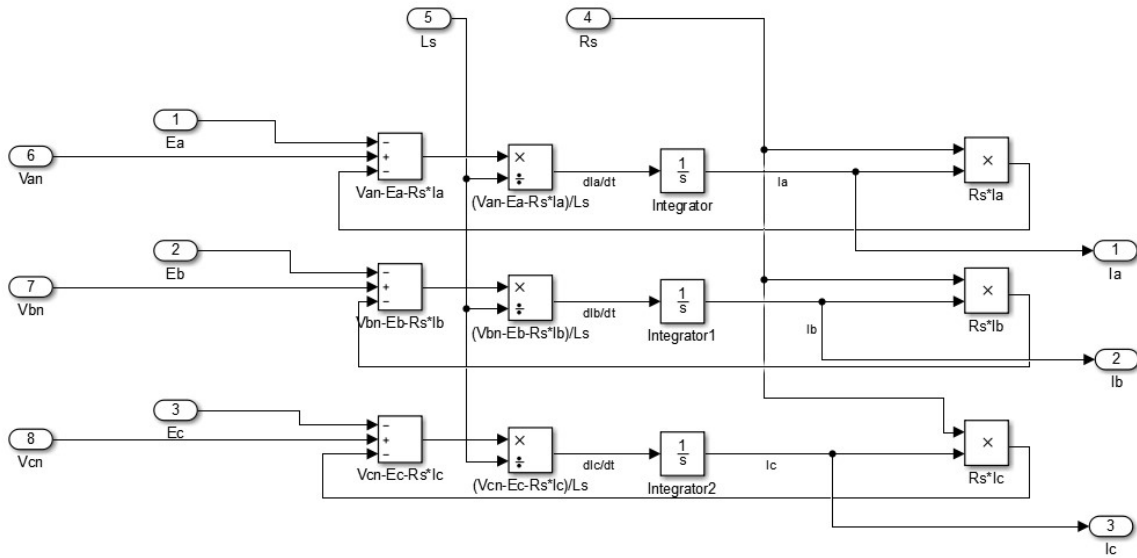
$$Q_a(\theta_r) = \begin{cases} 1, & \frac{\pi}{6} \leq \theta_r \leq \frac{5\pi}{6} \\ (\pi - \theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{5\pi}{6} \leq \theta_r \leq \frac{7\pi}{6} \\ -1, & \frac{7\pi}{6} \leq \theta_r \leq \frac{11\pi}{6} \\ (\pi - 2\theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{11\pi}{6} \leq \theta_r \leq 2\pi \end{cases}$$

$$Q_b(\theta_r) = \begin{cases} -1, & 0 \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{2} \\ (-\frac{2\pi}{3} + \theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{\pi}{2} \leq \theta_r \leq \frac{5\pi}{6} \\ 1, & \frac{5\pi}{6} \leq \theta_r \leq \frac{3\pi}{2} \\ (-\frac{5\pi}{3} + \theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{3\pi}{2} \leq \theta_r \leq \frac{11\pi}{6} \\ -1, & \frac{11\pi}{6} \leq \theta_r \leq 2\pi \end{cases}$$

$$Q_a(\theta_r) = \begin{cases} 1, & 0 \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{6} \\ (\frac{\pi}{3} - \theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{\pi}{6} \leq \theta_r \leq \frac{\pi}{2} \\ -1, & \frac{\pi}{2} \leq \theta_r \leq \frac{7\pi}{2} \\ (-\frac{4\pi}{3} + \theta_r)\frac{6}{\pi}, & \frac{7\pi}{2} \leq \theta_r \leq \frac{3\pi}{2} \\ 1, & \frac{3\pi}{2} \leq \theta_r \leq 2\pi \end{cases}$$

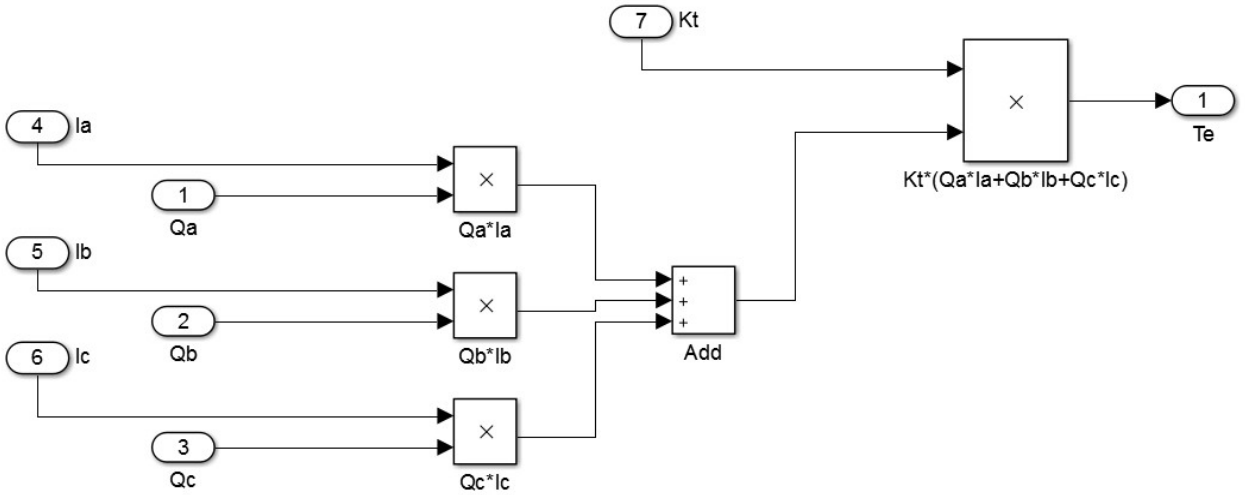
şeklinde MATLAB fonksiyonu olarak gerçekleştirmiştir. MATLAB fonksiyonunun elde edilmesi için geliştirilen MATLAB yazılımı EK 1’de verilmiştir.

Stator faz akımları, Şekil 5.15’de görüldüğü gibi Eş.5.2’ye göre geliştirilen model ile hesaplanmaktadır.



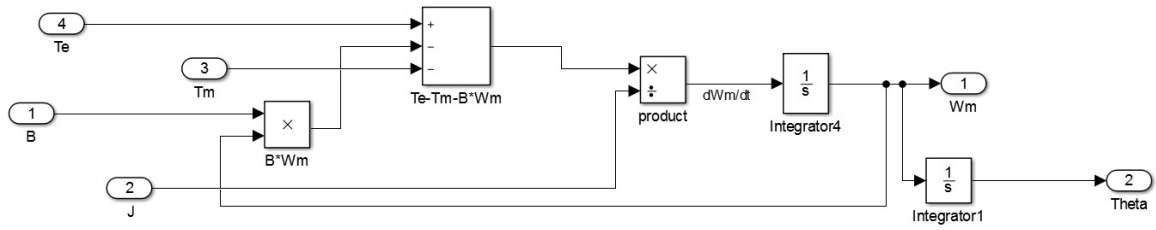
Şekil 5.15. Stator faz akımının modeli

Stator faz akımlarının ve birim zıt EMK fonksiyonunun modellenmesinin ardından Eş. 5.8 kullanılarak Şekil 5.16.'da görüldüğü gibi elektromanyetik tork modeli geliştirilmiştir.



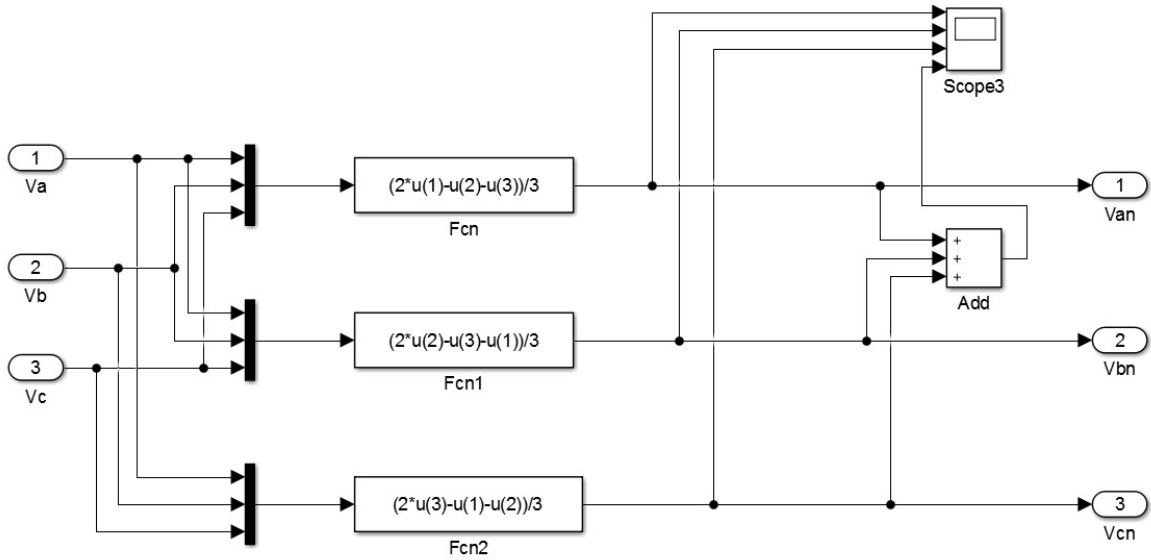
Şekil 5.16. Elektromanyetik tork modeli

Mekaniksel model, Eş 5.10'ye göre geliştirilmiştir. Şekil 5.17'de görüldüğü gibi modelde elektromanyetik tork, T_e ve mekanik yük torku T_m kullanılarak rotorun açısal hızı ve açısal pozisyonu hesaplanmaktadır.



Şekil 5.17. FDAM'ın mekaniksel modeli

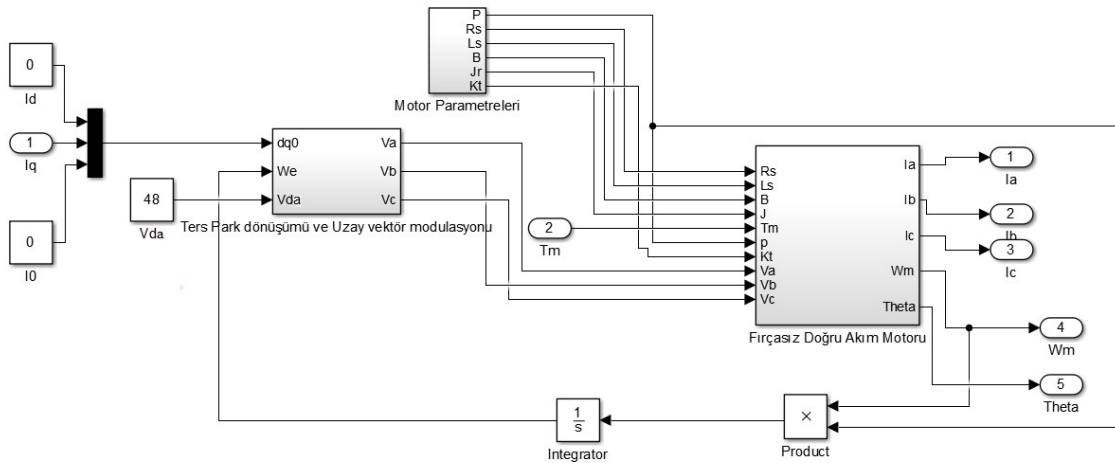
Şekil 5.18.de stator faz gerilimlerinin modeli görülmektedir. Stator faz gerilimleri V_{an} , V_{bn} ve V_{cn} , Eş. 5.5'ye göre hesaplanmaktadır. Şekil 5.18.'de görüldüğü gibi hesaplanan stator faz gerilimleri daha sonra stator faz akımlarının hesaplanması için kullanılmaktadır.



Şekil 5.18. Stator faz geriliminin modeli

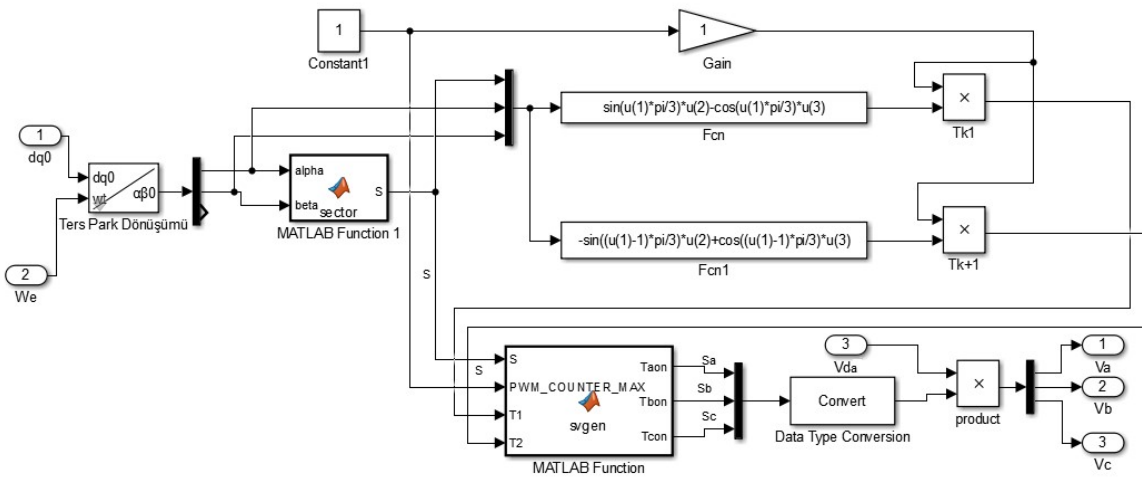
5.3.2. FDAM vektör kontrolü simulink modeli

FDAM vektör kontrolüne ait Simulink modeli Şekil 5.19' da görülmektedir. Bu modelde vektör kontrolünün temel parçası ters park dönüşümü ve uzay vektör modülasyonudur. Tork bileşeni I_q değerine göre FDAM'ın sürülmesi için gerekli sinyaller üretilmektedir.



Şekil 5.19. FDM vektör kontrolü simulink modeli

Ters park dönüşümü ve uzay vektör modülasyonu bloğunun detaylı modeli Şekil 5.20’de görülmektedir. Ters dönüşümü için Simulink-Simscape kütüphanesinin altında yer alan “dq0 to Alpha-Beta-Zero” bloğu kullanılmıştır. Ters park dönüşümü işlemi sonrasında elde edilen *alpha* ve *beta* bileşenleri kullanarak sektör belirleme işleminin gerçekleştirilmesi için EK 2’de verilen Matlab foksionu geliştirilmiştir.



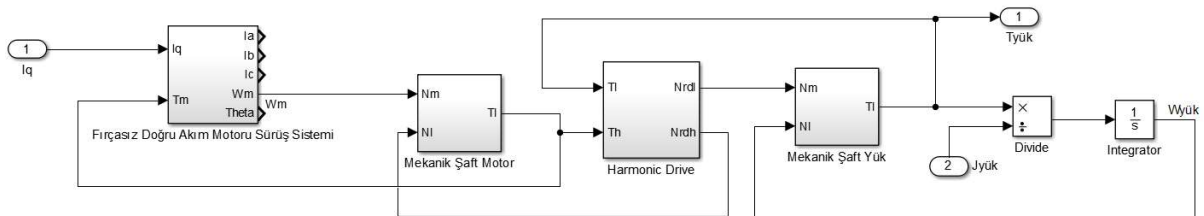
Şekil 5.20. Ters park dönüşümü ve uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) Simulink Modeli

İlgili sektör için uzay vektörlerinin bir periyod süresince uygulanma oranı Eş. 5.13 ve Eş. 5.14 kullanılarak hesaplanmaktadır. Yine bu sürlerin oluşturulması için EK 3’de verilen MATLAB programı kullanılmıştır. Kontrol anahtarlarının durumları ise Eş. 5.15 ve Çizelge 5.2 kullanılarak hesaplanmaktadır.

Mantıksal “1” ve “0” olan kontrol sinyalleri motor gerilimi V_{da} ile çarpılarak motor fazlarına uygulanan V_a , V_b ve V_c gerilimlerini oluşturmaktadırlar. Bu işlemle evirici anahtarlarının ideal olduğu kabul edilmiş ve anahtarlama kayıpları göz önünde bulundurulmamıştır.

5.3.3. Mekanik tork iletiminin simulink modeli

Şekil 5.21’de FDAM sürücü sisteminin mekanik şaftlar ve Harmonik Sürüşlü dişli sistemi ile olan bağlantılarını gösteren Simulink modeli görülmektedir. FDAM’dan elde edilen torkun yük birimi için yeterli seviyeye yükseltilebilmesi amacıyla, harmonik sürüşlü dişli sistemi bir mekanik şaft vasıtasıyla FDAM’nin çıkışına bağlanmıştır. Ayrıca harmonik sürüşlü dişli sistemi tarafından artırılmış olan tork yine mekanik şaft vasıtasıyla yük birimine iletilmektedir. “Mekanik Şaft Motor” bloğu tarafından Harmonik Sürüşlü dişli sistemine iletilen tork aynı zamanda FDAM için yük torku, T_m olarak da değerlendirilmektedir. Harmonik Sürüşlü dişli bloğu tarafından yükseltilecek tork ise “Mekanik Şaft Yük” bloğu tarafından yük birimine aktarılmaktadır. Yük ataleti, $J_{yük}$ ise “Mekanik Şaft Yük” bloğunun yük tarafındaki açısal hızını hesaplamak için kullanılmaktadır ve doğrudan platform üzerine monte edilecek faydalı yükün (görüş sistemi vs.) ilgili eksenindeki ataletini göstermektedir.



Şekil 5.21. FDAM sürücü sistemi ve mekanik tork aktarımı

Bu çalışmada mekanik torkun şaft üzerinden iletiminde şaft sertliğini ve içsel sönümlemeyi hesaba katmak amacıyla “SIMULINK, Electric Drives/Shafts and Speed Reducers” kütüphanesinde bulunan “Mechanical Shaft” modeli kullanılmıştır. Şaft bloğu matematiksel olarak,

$$T_l = K \int (N_m - N_l) dt + B(N_m - N_l) \quad (5.16)$$

denklemini ifade edilmektedir. Burada K şaft sertliğini, B içsel sönümlemeyi, N_m şaftın sürücü tarafındaki açısal hızı, N_l ise şaftın yük tarafındaki açısal hızını göstermektedir. T_l ,

Eş. 5.16’da yük torku olarak kullanılırken, harmonik sürürlü dişlisi için yüksek hız tarafı giriş torkunu ifade etmektedir. Harmonik sürürlü dişli sisteminin benzetimini yapmak için ise yine aynı kütüphanede bulunan “Speed Reducer” modelinden yararlanılmıştır. Harmonik sürürlü dişli bloğu ise matematiksel olarak,

$$J_{rdh}\ddot{\theta}_{rdh} = T_h - \frac{T_l}{\eta i} \quad (5.17)$$

denklemini ile ifade edilmektedir. Bu denklemde J_{rdh} yüksek hız tarafına göre harmonik sürürlü dişli ataletini, $\ddot{\theta}_{rdh}$ harmonik sürürlü dişlisinin yüksek hız tarafındaki ivmesini, T_h harmonik sürürlü dişlisinin yüksek hız tarafında iletilen torku, T_l harmonik sürürlü dişlisi tarafından yüke bağlanan şafta iletilen torku, η harmonik sürürlü dişli verimliliğini ve i ise redüksiyon oranını göstermektedir. Yük tarafındaki şaft bloğu ise yine matematiksel olarak Eş. 5.16 ile ifade edilmektedir.

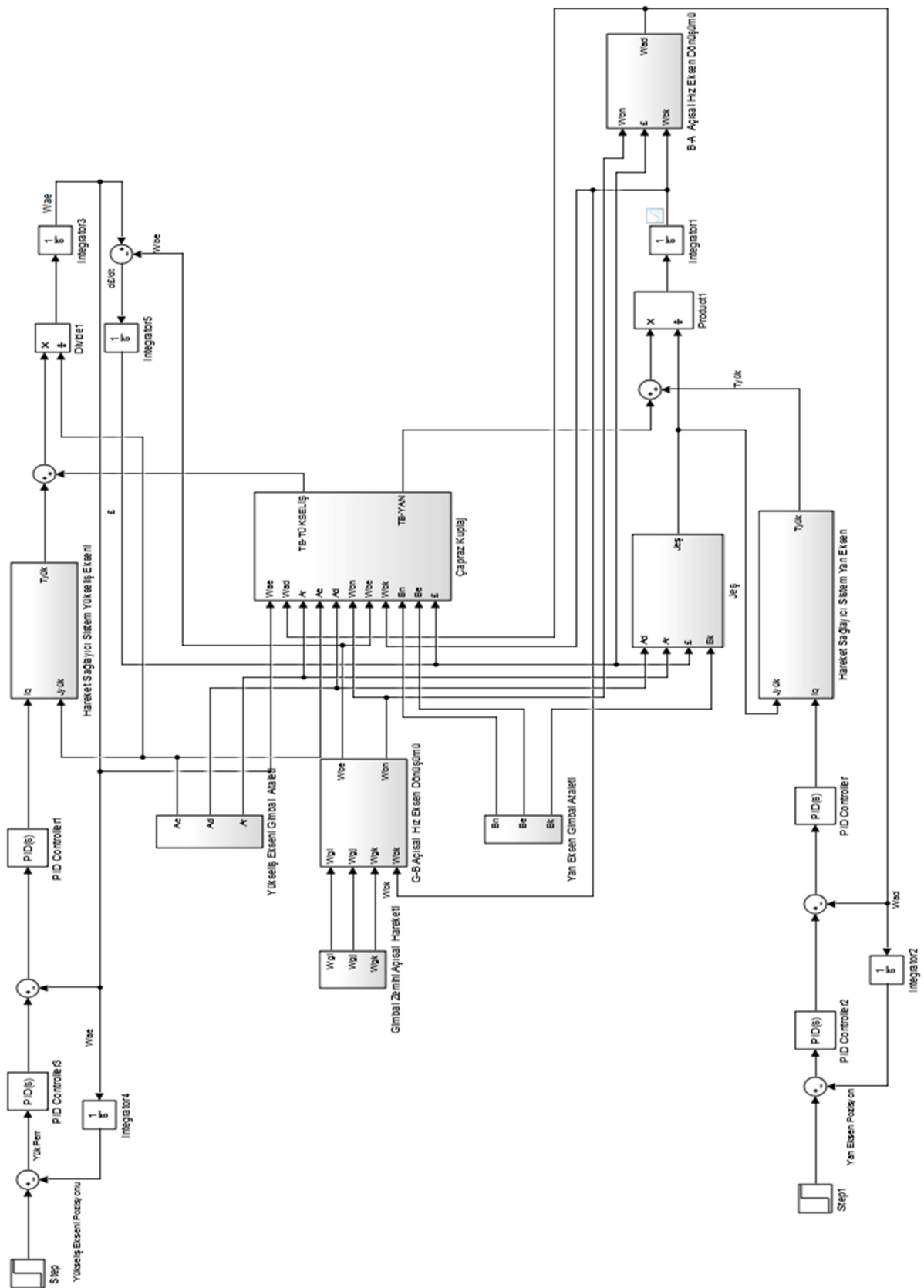
6. BENZETİM SONUÇLARI

Şekil 6.1’de iki eksen SP sisteminin blok diyagramı görülmektedir. Her iki eksen için de kontrol döngüsü, iç stabilizasyon döngüsü ve dış pozisyon döngüsünden oluşmaktadır. Hareket sağlayıcı olarak her iki eksen içinde Şekil 5.21’de gösterilen blok diyagramı kullanılmıştır. Eksenlerin kontrol döngüleri birbirleri ile çapraz bağlaşım etkisi ile ilişkilidirler. Çapraz bağlaşım etkisi için Şekil 4.2.’de gösterilen blok diyagram kullanılmıştır. Stabilizasyon döngülerinde PI denetleyici bulunurken pozisyon döngülerinde P denetleyici bulunmaktadır. Birçok araştırmacı gimbal sistemlerinin kontrolü için çeşitli modern kontrol teknikleri geliştirseler de düşük maliyete sahip olması, kolay uygulanabilmesi ve yüksek performansı nedeniyle klasik P, PI ve PID denetleyiciler hala oldukça yoğun biçimde tercih edilmektedirler.

Harmonik sürürlü dişli sistemi ve mekanik şaft parametreleri ise Çizelge 6.1.’de verilmiştir. FDAM için ise yine Çizelge 5.2.’de yer alan parametreler kullanılmaktadır. Her iki eksen motoru için de aynı parametreler geçerlidir.

Çizelge 6.1. Harmonik sürürlü dişli sistemi ve mekanik şaft parametreleri

Mekanik Şaft Sertliği K ,	17190 N.m
Mekanik Şaft İç Sönümlenme B ,	600 N.m.s
Harmonik Sürürlü Dişli Redüksiyon Oranı, i	100
Harmonik Sürürlü Dişli Verimliliği, η	0.95
Harmonik Sürürlü Dişli Giriş Ataleti, J_{rdh}	0.0005 Kg.m ²



Şekil 6.1. Yükseliş eksenini ve yan eksen kontrol döngüsü

Yan ve yükseliş hareket sistemleri için atalet matrislerinin değerleri aşağıdaki gibidir.

$$J_A = \begin{bmatrix} 0.002 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0009 & 0 \\ 0 & 0 & 0.007 \end{bmatrix}$$

$$J_B = \begin{bmatrix} 0.004 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0005 & 0 \\ 0 & 0 & 0.001 \end{bmatrix}$$

Her iki eksen için de kontrolcü parametreleri,

- Stabilizasyon döngüsü $K_p=1500$,
- Stabilizasyon döngüsü $K_i=100$,
- Pozisyon döngüsü $K_p=100$,

şeklinde ayarlanmıştır. Bu çalışmada hareket sağlayıcı sistem için yük birimi olarak iki eksen hareketli platform sisteminin gövdesi göz önünde bulundurulmuştur. Platform gövdesi ise MATLAB/Simulink’de atalet momentleri ile tanımlanmıştır.

Simulink modelinde hareketli platformun bağlı olduğu zeminden kaynaklanan açısal titreşimlerin, çeşitli frekanslarda benzetimi yapılmış ve sıfır pozisyon komutu altında, yan ve yükseliş eksenlerinde görüş hattındaki açısal sapma gözlemlenmiştir. Ayrıca zeminden gelen titreşimler altında yükseliş ekseninin açısı değiştirilerek kinematik bağlaşım etkileri ve gimbal kilitlenmesi durumu da incelenmiştir.

Söz konusu modelde G koordinat ekseninde uygulanan açısal titreşimler

$$\theta_{i,j,k} = 0.15\sin(2\pi ft) \quad (5.18)$$

şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemde f açısal titreşimlerin frekansını göstermektedir. Daha sonra ise açısal titreşimler

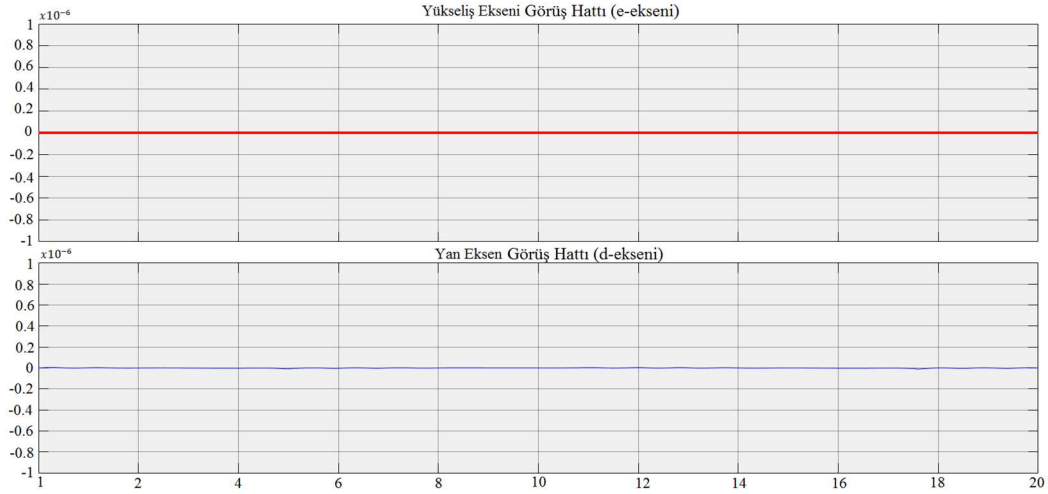
$$\omega_{i,j,k} = \frac{d\theta_{i,j,k}}{dt} \quad (5.19)$$

eşitliği ile açısal hıza çevrilerek hareketli platform modeline uygulanmıştır. Çizelge 6.2’de uygulanan açısal bozunumların frekans değişimleri ve bunun sonucunda her iki ekseninde de oluşan açısal sapmaların değerleri görülmektedir. Bu çalışmada deniz sahasında kullanılan hareketli platformlar ele alındığı için, deniz ya da okyanus üzerinde oluşan ve frekansı 1-2 Hz değerinin çok üstüne çıkmayan rüzgâr kaynaklı dalgalanmaların oluşturduğu bozunumlar dikkate alınmıştır. Dolayısıyla bu çalışmada geliştirilen model, bu frekans aralığını kapsayan bozunumlar altında test edilmiştir. Bununla birlikte Şekil 6.2’de ise Çizelge 6.2’de yer alan dört frekans koşulu için iki ekseninde de görüş hattı tepkisi grafiksel olarak gösterilmektedir. Şekil 6.2’de yer alan grafikler ve Çizelge 6.2’de yer alan görüş hattı sapmaları değerlendirildiğinde zeminden kaynaklanan açısal bozunumların frekansının artması ile birlikte her iki ekseninde de sapma açısının giderek arttığı görülmektedir. Bunun sonucunda zemin hareketlerinden kaynaklı açısal bozunumların görüş hattını nasıl etkilediği anlaşılmaktadır. Görüş hattı stabilizasyonunun kazandırılması gereken hareketli platform uygulamalarında genellikle yüksek tork-atalet oranlarından dolayı doğrudan kontrollü motorlar tercih edilir. Literatürde yapılan çalışmalarda doğrudan kontrollü motor içeren uygulamalarda miliradyan seviyelerinde ki stabilizasyon hassasiyeti genellikle geçerli bir değer olarak kabul edilmiştir [23-26]. Dolayısıyla bu çalışmada elde edilen sonuçlar incelendiğinde, harmonik sürüslü dişli sistemi içeren bir hareketli platform için söz konusu bozunum frekanslarında elde edilen μ rad ve nrad seviyesindeki stabilizasyon hassasiyetleri başarılı bir sonuç elde edildiğini göstermektedir.

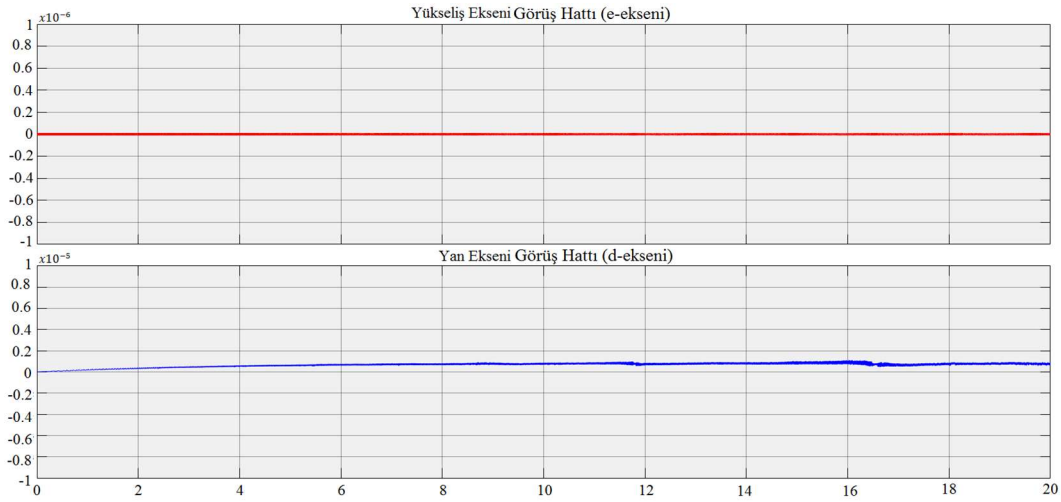
Çizelge 6.3’de ise kinematik bağlaşım etkisinin incelenmesi için oluşturulan 4 koşul görülmektedir. Bu koşullar altında sistemin tepkisi Şekil 6.3’de verilmiştir. Şekil 6.3 incelendiğinde kontrol döngüsü yan eksenin pozisyonunu sıfır derecede korumaya çalışırken yükseliş ekseninin pozisyonunu ise Çizelge 6.3’de verilen konumlarda korumaya çalıştığı görülmektedir. Fakat yükseliş ekseninin açısı 90° ’ye yaklaştıkça kinematik bağlaşım etkisi artmakta ve stabilizasyon hassasiyeti kötüleşmektedir. Şekil 6.3(d) incelendiğinde stabilizasyon hassasiyetinin tamamen ortadan kalktığı ve gimbal kilitlenmesinin gerçekleştiği görülmektedir. Çünkü yan eksen motorunun dönme eksenini, görüş hattı eksenini ile çakışmakta ve jiroskopun algılama eksenini ile ise dik duruma gelmektedir. Bu nedenle yan eksen tarafından gerekli torkun üretilmesi mümkün olmamaktadır.

Çizelge 6.2. Açısal bozunum özellikleri ve görüş hattı sapma açıları

Koşul	Bozunum Genliği (Rad)	Bozunum Frekansı (Hz)	Yan Eksen Görüş Hattı Sapması (Rad)	Yükseliş Eksen Görüş Hattı Sapması (Rad)
1	∓ 0.15	0.5	$\leq 0.02\mu$	$\leq 0.04n$
2	∓ 0.15	2	$\leq 1\mu$	$\leq 0.3n$
3	∓ 0.15	4	$\leq 4\mu$	$\leq 9n$
4	∓ 0.15	8	$\leq 800\mu$	$\leq 5\mu$

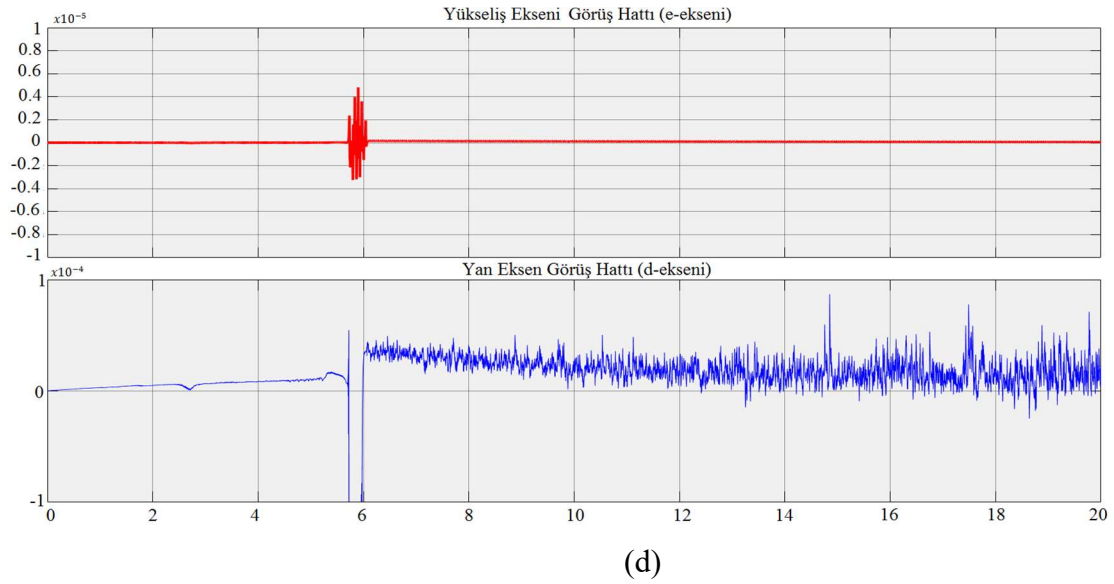
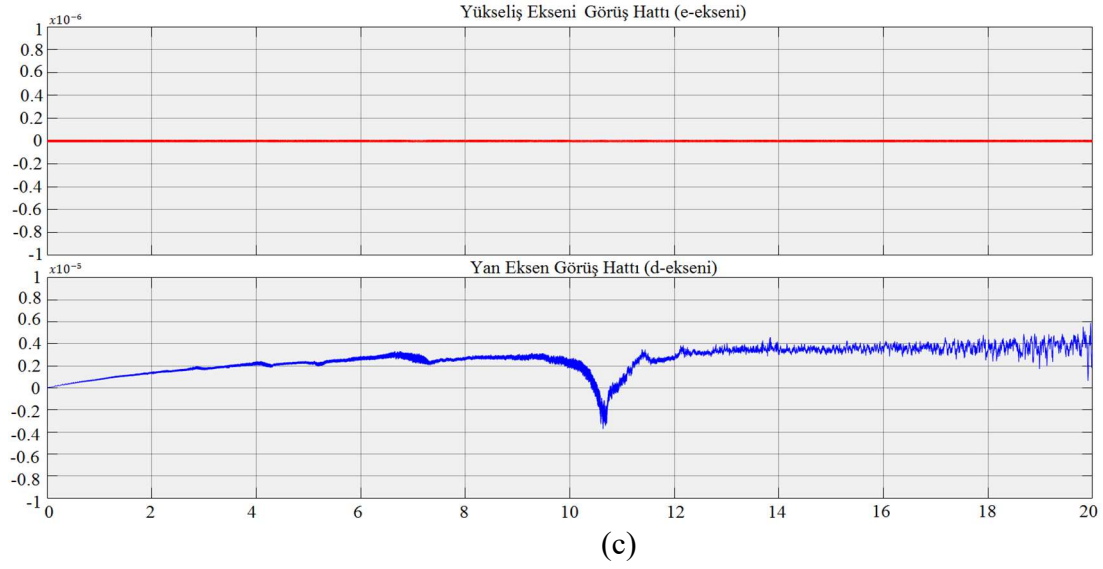


(a)



(b)

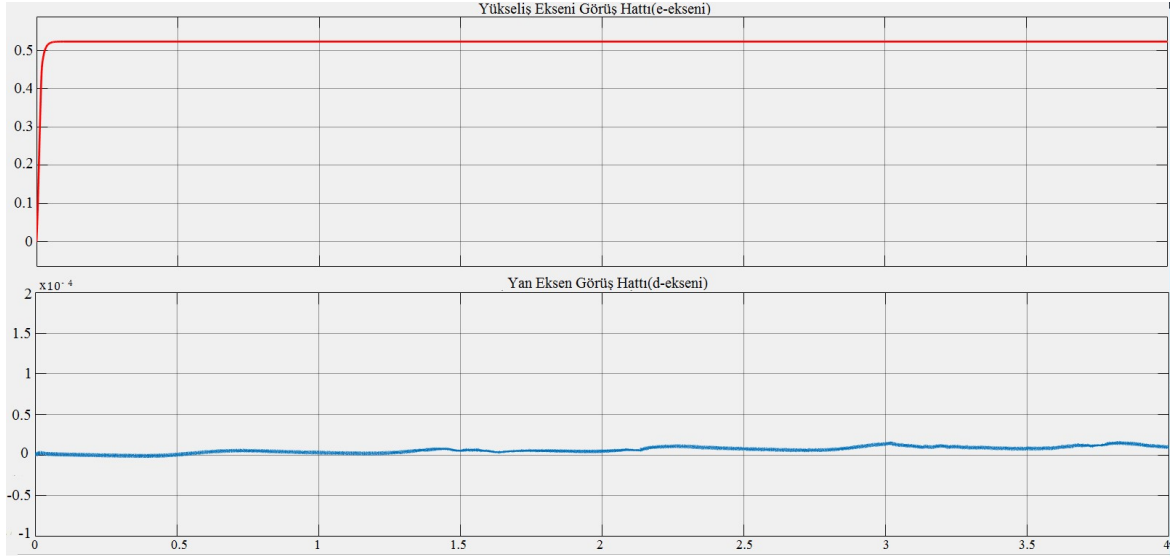
Şekil 6.2. Dört koşul için görüş hattı tepkisi, (a) Koşul 1 için görüş hattı tepkisi, (b) Koşul 2 için görüş hattı tepkisi, (c) Koşul 3 için görüş hattı tepkisi, (d) Koşul 4 için görüş hattı tepkisi



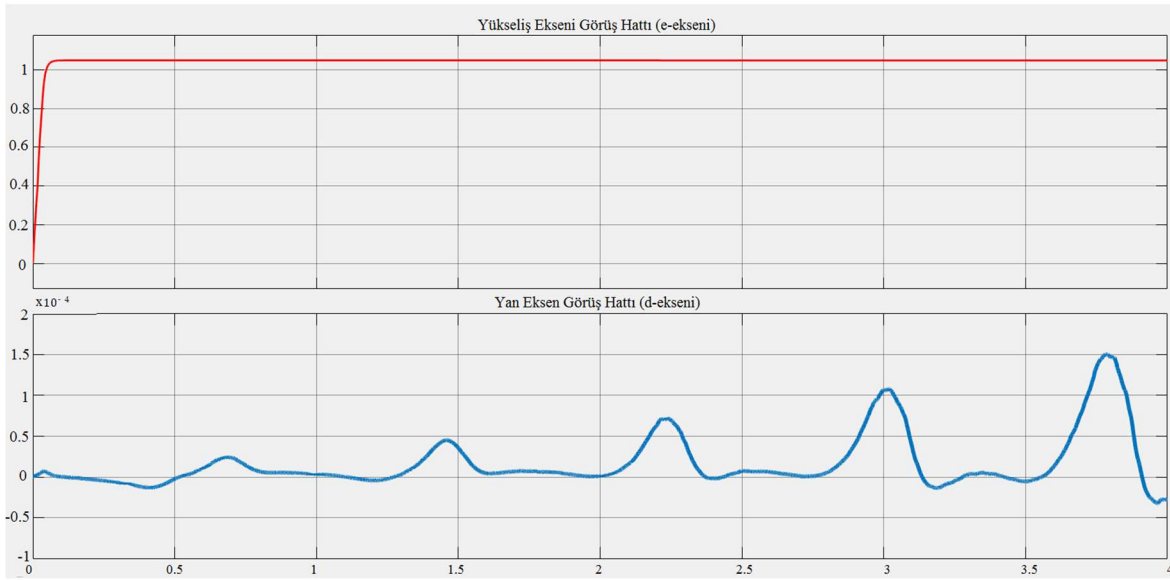
Şekil 6.2. (Devam) Dört koşul için görüş hattı tepkisi, (a) Koşul 1 için görüş hattı tepkisi, (b) Koşul 2 için görüş hattı tepkisi, (c) Koşul 3 için görüş hattı tepkisi, (d) Koşul 4 için görüş hattı tepkisi

Çizelge 6.3. Kinematik bağlaşım etkisi koşulları

Koşul	Yükseliş ekseni açısı (Rad)	Bozunum Frekansı (Hz)
1	$\pi/6$	8
2	$\pi/3$	8
3	$4\pi/9$	8
4	$\pi/2$	8

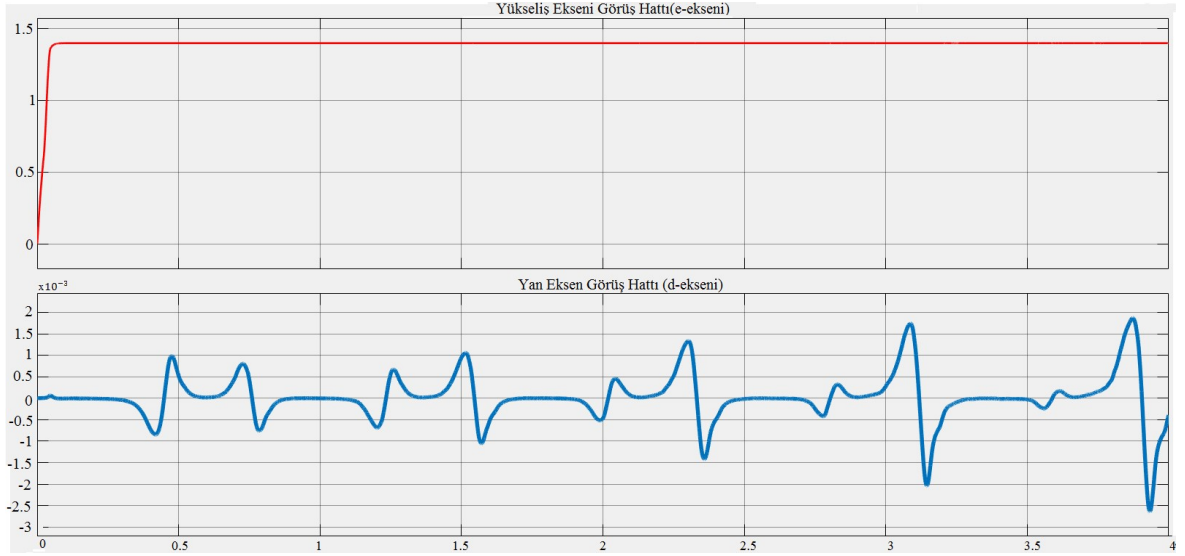


(a)

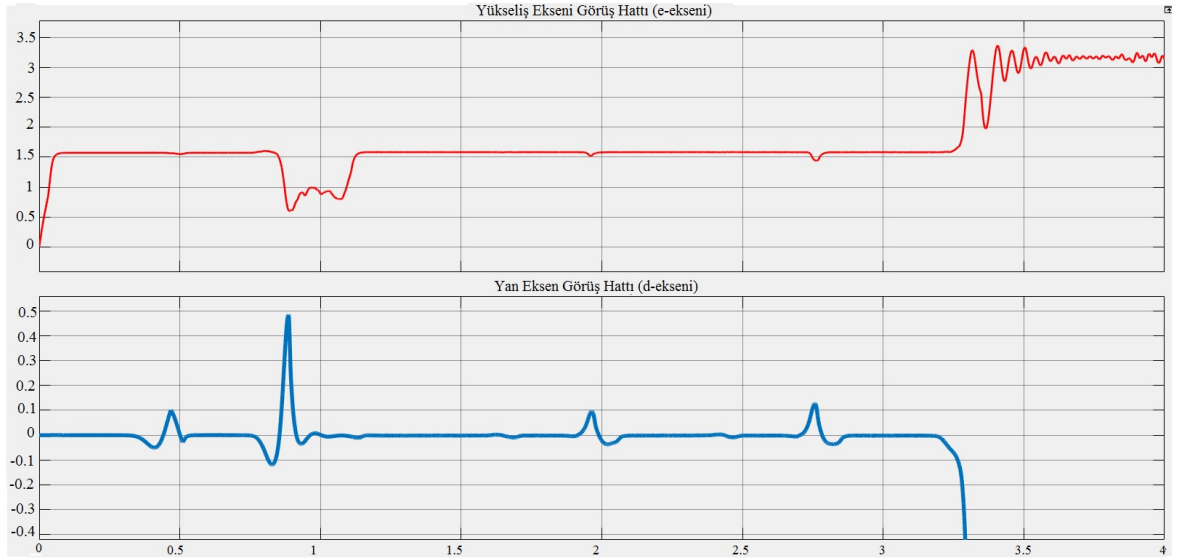


(b)

Şekil 6.3. Dört koşul için kinematik bağlaşım etkisi, (a) Koşul 1 için görüş hattı tepkisi, (b) Koşul 2 için görüş hattı tepkisi, (c) Koşul 3 için görüş hattı tepkisi, (d) Koşul 4 için görüş hattı tepkisi



(c)



(d)

Şekil 6.3. (Devam)Dört koşul için kinematik bağlaşım etkisi, (a) Koşul 1 için görüş hattı tepkisi, (b) Koşul 2 için görüş hattı tepkisi, (c) Koşul 3 için görüş hattı tepkisi, (d) Koşul 4 için görüş hattı tepkisi

7. SONUÇLAR

Bu çalışmada iki eksen hareketli platform modeli geliştirilmiş ve bu platform modeline her iki eksen de görüş hattı stabilizasyonu kazandırmak için, pozisyon ve stabilizasyon döngüsünden oluşan kontrol modeli tasarlanmıştır. Platform modelinde hareket sağlayıcı sistemi, fırçasız doğru akım motorundan ve harmonik sürürlü dişli sisteminden oluşacak şekilde tasarlanmıştır. Fırçasız doğru akım motorunun komütasyonunu sağlamak için ise vektör kontrol yönteminden yararlanılmıştır. Ayrıca Newton'un ikinci yasasından faydalanılarak, hareketli platformun iki eksen için de hareket denklemi çıkarılmış ve çapraz-bağlaşım etkisinden kaynaklanan tork bozunumu da zeminin hareketinden kaynaklanan açılmal bozunumlar ile birlikte stabilizasyon döngüsüne dahil edilmiştir. İki eksen hareketli platform modelinin MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmış ve farklı bozunum frekanslarında her iki eksen de görüş hattı sapmaları incelenmiştir. 0,5 Hz, 2 Hz, 4 Hz ve 8 Hz frekans değerlerindeki bozunumlar için sistem test edilmiş ve oluşan sapma değeri sırasıyla 0,04 nrad, 0,3 nrad, 9 nrad ve 5 μ rad değerlerinin altında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak zemin hareketinden kaynaklanan bozunumların frekanslarının artmasıyla birlikte, görüş hattındaki sapma açısının da giderek arttığı gözlemlenmiştir. Ancak elde edilen değerlerden, uygulamada ve geçmiş çalışmalarda sıklıkla kullanılan doğrudan kontrollü doğru akım motorlarının kullanıldığı sistemlerde miliradyan cinsinden sapma değerlerinin kabul edilebilir değerler olarak görüldüğü göz önüne alındığında tasarlanan sistemin tüm frekans değerleri için yüksek performans gösterdiği görülmüştür. Söz konusu frekans aralığında görüş hattında oluşan bu sapmalar, stabilizasyon döngüsünün gerekli stabilizasyon hassasiyetini sağladığını göstermiştir.

Ayrıca, yükseliş ekseninin pozisyonunun 90° 'ye yaklaşması durumunda stabilizasyon hassasiyetinin nasıl kötüleştiği ve yan eksen motorunun dönme eksenini ile görüş hattı ekseninin çakışması durumunda gimbal kilitletmesinin gerçekleştiği yine yapılan benzetimlerle ifade edilmeye çalışılmıştır.

Sonraki çalışmalarda, harmonik sürürlü dişli sistemi ile birlikte FDAM nun hareket sağlayıcı olarak kullanıldığı ve çapraz bağlaşım etkisi nedeniyle oluşan tork bozunumlarının göz önüne alındığı iki eksen hareketli bir SP sisteminde P, PI denetleyiciler yerine doğrusal olmayan kontrol yöntemleri uygulanarak ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Rue, A. K. (1974). Precision stabilization systems. *IEEE Transactions Aerospace and Electronic Systems*, 10(1), 34-42.
2. Daniel, R. (2008). Mass properties factors in achieving stable imagery from a gimbal mounted camera. *SPIE Airborne Intelligence, Surveillance, Reconnaissance (ISR) Systems and Applications* , 6946(9),67-79.
3. Yu, S. ve Zhao, Y. (2010). A New measurement method for unbalanced moments in a two axes gimballed seeker. *Chinese Journal of Aeronautics*, 23(1), 117-122.
4. Han, Y., Lu, Y. and Qiu, H. (2007). *An improved control scheme of gyro stabilization electro-optical platform*. IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, 346 – 351.
5. Ji, W., Li, Q. and Xu, B. (2006). *Design study of adaptive fuzzy PID controller for LOS stabilized system*, Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, 1, 336-341.
6. Algrain, M. C. and Quinn, J. (1993). *Accelerometer based line-of-sight stabilization approach for pointing and tracking systems*. Second IEEE Conference on Control Applications, 1, 156-163.
7. Kwon, Y.S., Hwang, H.Y. and Choi, Y.S. (2007). *Stabilization loop design on direct drive gimballed platform with low stiffness and heavy inertia*. IEEE International Conference on Control Automation and Systems, 320-325.
8. Kwon, Y.S., Hwang, H.Y., Lee, H.R. and Kim, S.H. (2004). *Rate loop control based on torque compensation in anti-backlash geared servo system*. IEEE American Control Conference, 4, 3327 – 3332.
9. Ueura, K., Slatter, R. (1999). Development of the harmonic drive gear for space applications. *SAO/NASA Astrophysics Data System (ADS)*, 498, 259-264.
10. Matsui, N., Makino, T. and Satoh, H. (2002). Autocompensation of torque ripple of direct drive motor by torque observer. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 29(1), 187 – 194.
11. Titterton, D. and Weston, J. (2004). *Strapdown inertial Navigation technology* (2nd ed). United Kingdom: Michael Faraday House, 59-112.
12. Titterton, D. and Weston, J. (2005). *Strapdown Inertial Navigation Technology*(2nd ed). United Kingdom: Michael Faraday House, 115-148.
13. Masten, M. K. (2008). Inertially stabilized platform for optical imaging systems. *IEEE Control Systems Magazine*, 28, 47-64.

14. Dahl, F.R. (1977). *Measurement of solid friction parameters of ball bearings*. Proc. Of Sixth Annual Symposium on Incremental Motion Gimbal Systems and Devices, University of Illinois.
15. Kim, S.B., Kim, S.H. and Kwak, Y.K. (2010). Robust control for a two-axis gimballed sensor system with multivariable feedback systems. *IET Control Theory & Applications*, 4(4), 539-551.
16. Gerson, G. and Rue, H.K. (1981). *The infrared handbook* (1st ed). Washington: Department of the Navy, 1451-1556.
17. P, A., Syamkumar, U. and Gopinath, A. (2015). *Multiphase motor based electromechanical actuator for engine gimbal control -prospects & challenges*. International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP Energy), 12-17.
18. Schempf, H. and Yoerger, D. R. (1993). Study of Dominant Performance Characteristics in Robot Transmissions. *The American Society of Mechanical Engineers Journal of Mechanical Design*, 115(3), 472-482.
19. Hilkert, J.M. (2008). Inertially Stabilized Platform Technology: Concepts and Principles, *IEEE Control Systems Magazine*, 28, 26-46.
20. Ekstrand, B. (2001). Equation of motion for a two axes gimbal system. *IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems*, 37(3), 1083-1091.
21. Lazor, M. and Stulrajter, M. (2014). *Modified field oriented control for smooth torque operation of a BLDC motor*. Conference on Elektro, 180-185.
22. İnternet: Sensor Field Oriented Control for Brushless DC motors with AT32UC3B0256. *Atmel*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.atmel.com%2FImages%2Fdoc32126.pdf&date=2017-03-16>, Son erişim tarihi: 16.03.2017.
23. İnternet: What is 'Field Oriented Control' and what good is it?. *Copley Controls Corporation*. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.copleycontrols.com%2FMotion%2Fpdf%2FFieldOrientedControl.pdf&date=2017-03-12>, Son erişim tarihi: 12.03.2017.
24. Wang, L., Ling, M., and Wang, D. (2008). Line-of-sight stabilization system based on fractional order control. *Systems and Control in Aerospace and Astronautics*, 1 – 4.
25. Wei, Y., Xu, J. and Ma, H. (2014). *Servo control technique of gyro stabilized platform for gravimeter*. 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2238 – 2241.
26. Amr, A.R., Chengzhi, S., Hany, F.M., Yu, Z.L., and Tongyu, W. (2012). Design a Robust PI Controller for Line of Sight Stabilization System. *International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)*, 2(2), 144-1

EKLER

EK-1. Zıt EMK fonksiyonlarının MATLAB kaynak kodu

$Q_a(\theta_r)$ için,

```
function EA = BackEMFGenerator_Ea(Theta)
    Theta_N = (6*Theta/pi);
    if (Theta >= 0)&&(Theta < pi/6)
        EA = Theta_N;
    elseif (Theta >= pi/6)&&(Theta < 5*pi/6)
        EA = 1;
    elseif (Theta >= 5*pi/6)&&(Theta < 7*pi/6)
        EA = (-Theta_N + 6);
    elseif (Theta >= 7*pi/6)&&(Theta < 11*pi/6)
        EA = -1;
    else
        EA = (Theta_N - 12);
    end
end
```

$Q_b(\theta_r)$ için,

```
function EB = BackEMFGenerator_Eb(Theta)
    Theta_N = (6*Theta/pi);
    if (Theta >= 0)&&(Theta < pi/2)
        EB = -1;
    elseif (Theta >= pi/2)&&(Theta < 5*pi/6)
        EB = Theta_N - 4;

    elseif (Theta >= 5*pi/6)&&(Theta < 9*pi/6)
        EB = 1;
    elseif (Theta >= 9*pi/6)&&(Theta < 11*pi/6)
        EB = -Theta_N + 10;
    else
        EB = -1;
    end
end
```

EK-1. (Devam) Zıt EMK fonksiyonlarının MATLAB kaynak kodu

$Q_c(\theta_r)$ için,

```
function EC = BackEMFGenerator_Ec(Theta)
    Theta_N = (6*Theta/pi);
    if (Theta >= 0) && (Theta < pi/6)
        EC = 1;
    elseif (Theta >= pi/6) && (Theta < pi/2)
        EC = -Theta_N + 2;
    elseif (Theta >= pi/2) && (Theta < 7*pi/6)
        EC = -1;
    elseif (Theta >= 7*pi/6) && (Theta < 9*pi/6)
        EC = Theta_N - 8;
    else
        EC = 1;
    end
end
```

EK-2. Vektör kontrolünün gerçekleştirilmesi için gereken sektör belirleme işleminin MATLAB kaynak kodu

```
function S = sector(alpha, beta)
S=0;
if(beta>=0)
    if(abs(alpha)>abs(beta/sqrt(3)))
        if(alpha>=0)
            S=1;
        else
            S=3;
        end
    else
        S=2;
    end
else
    if(abs(alpha)>abs(beta/sqrt(3)))
        if(alpha>=0)
            S=6;
        else
            S=4;
        end
    else
        S=5;
    end
end
end
```

EK-3. Vektör kontrolünde uzay vektörlerinin bir periyod süresince uygulanma işleminin MATLAB kaynak kodu

```

function [Taon, Tbon, Tcon] = svgen(S,PWM_COUNTER_MAX,T1,T2)

    Taon = 0;
    Tbon = 0;
    Tcon = 0;
if S == 0
    Taon = 0;
    Tbon = 0;
    Tcon = 0;
elseif S == 1
    Taon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Tbon =Taon+T1;
    Tcon = Tbon + T2;
elseif S == 2
    Tbon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Taon =Tbon+T1;
    Tcon = Taon + T2;
elseif S == 3
    Tbon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Tcon =Tbon+T1;
    Taon = Tcon + T2;
elseif S == 4
    Tcon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Tbon =Tcon+T1;
    Taon = Tbon + T2;
elseif S == 5
    Tcon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Taon =Tcon+T1;
    Tbon = Taon + T2;
elseif S == 6
    Taon=(2*PWM_COUNTER_MAX-2*(T1+T2))/4;
    Tcon =Taon+T1;
    Tbon = Tcon + T2;
else
    Taon = 0;
    Tbon = 0;
    Tcon = 0;
end

```

EK-3. (Devam)Vektör kontrolünde uzay vektörlerinin bir periyod süresince uygulanma işleminin MATLAB kaynak kodu

```
Taon=(PWM_COUNTER_MAX-Taon)/PWM_COUNTER_MAX;  
Tbon=(PWM_COUNTER_MAX-Tbon)/PWM_COUNTER_MAX;  
Tcon=(PWM_COUNTER_MAX-Tcon)/PWM_COUNTER_MAX;  
end
```


ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : SARP, Melih
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 15.02.1989, Ankara
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (542) 797 27 74
Faks : 0 (312) 385 22 51
e-mail : mlhsrp@gmail.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Elektrik-Elektronik Mühendisliği	Devam Ediyor
Lisans	Ankara Üniversitesi / Elektrik Elektronik Mühendisliği	2012
Lise	İncirli Anadolu Lisesi	2006

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012-Halen	Mekoptronik Ltd. Şti.	Elektronik Tasarım Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

-

Hobiler

Yüzme, Bowling, Sinema



GAZİ GELECEKTİR..