



**UYDULAR İÇİN VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLECEK YÜKSEK HIZLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM
MOTORUNUN GENETİK ALGORİTMA TABANLI AKIM KONTROLÜ**

Reşat ÇELİKEL

**Doktora Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR
TEMMUZ-2016**

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**UYDULAR İÇİN VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNDE
KULLANILABİLECEK YÜKSEK HIZLI FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORUNUN
GENETİK ALGORİTMA TABANLI AKIM KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Reşat ÇELİKEL

(091113201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 23 Mayıs 2016

Tezin Savunulduğu Tarih : 11 Temmuz 2016

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet ÖZDEMİR (F.Ü) 
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Sedat SÜNTER (F.Ü) 
Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT (F.Ü) 
Doç. Dr. Mehmet Timur AYDEMİR (G.Ü) 
Yrd. Doç. Dr. Bilal GÜMÜŞ (D.Ü) 

TEMMUZ-2016

ÖNSÖZ

Çalışmam sırasında yardımlarını ve değerli fikirlerini esirgemeyen, yönlendiren, kıymetli danışman hocam Sayın Yrd.Doç.Dr. Mehmet ÖZDEMİR' e katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Çalışmam süresince değerli vaktini harcayarak bana büyük destek sağlayan arkadaşlarım Sayın Doç.Dr. Ömür AYDOĞMUŞ ve Yrd. Doç. Dr. Erkan DENİZ' e teşekkür ederim.

Çalışmama 114E038 nolu proje ile finansal desteği sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu' na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Çalışmalarım boyunca manevi desteklerini her zaman hissettiğim değerli aileme teşekkür ederim.

Reşat ÇELİKEL
ELAZIĞ-2016

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER.....	III
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ	VII
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XIII
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	6
1.2 Tezin Organizasyonu	7
2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI	9
2.1 Giriş	9
2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı	9
2.3 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Matematiksel Modeli	11
2.4 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Moment İfadesinin Elde Edilmesi	15
2.5 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Kontrolü	17
2.6 Sonuç	21
3. UYDU GÜÇ SİSTEMİ	23
3.1 Uydu Güç Sistemi Kavramı	23
3.2 Uydu Güç Sistemi ve Güneş Panelleri.....	24
3.3 Uydu Güç Sistemi ve Bataryalar	25
3.4 Uydu Yönelim Sistemi	28
3.5 Volanlı Enerji Depolama Birimi.....	29
3.6 Sonuç	33
4. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA BİRİMİ TASARIMI	34
4.1 Gerçek Bir Uydunun Enerji İhtiyacı.....	34
4.2 Rulman Kayıpları.....	35
4.3 Havanın Sürtünmesinden Kaynaklanan Kayıplar	37
4.4 Sistemin Enerji Dengesi	37

4.5	Volanlı Enerji Depolama Biriminin Tasarımı	41
4.6	Sonuç	50
5.	VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN BENZETİMİ.....	51
5.1	Filtre Tasarımı	51
5.2	Evirici, Akım Algılayıcısı, ve FDAM' unun Transfer Fonksiyonları	57
5.3	PID Denetimi	58
5.4	Genetik Algoritmalar	61
5.4.1	Kromozomların Kodlanması	63
5.4.2	Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması	63
5.4.3	Uygunluk Fonksiyonu	64
5.4.4	Seçim	64
5.4.4.1	Rulet Tekerleği Yöntemi ile Seçim	65
5.4.4.2	Turnuva Yöntemi ile Seçim.....	66
5.4.4.3	Elitist Yöntem ile Seçim.....	66
5.4.5	Çaprazlama	66
5.4.6	Mutasyon	67
5.4.7	Matlab ile Optimizasyon.....	68
5.5	Ziegler-Nichols ve Melez GA Yöntemlerinin Karşılaştırılması.....	76
5.6	Benzetim Çalışması ve Sonuçları	79
5.7	Mekanik Sistemin Modeli.....	87
5.8	Sonuç	92
6.	DENEYSEL SONUÇLAR	93
6.1	Giriş	93
6.2	Önerilen Akım Referanslı Yöntem	93
6.3	Deneysel Çalışma	95
6.4	Deneysel Sonuçlar	97
7.	SONUÇLAR.....	108
	KAYNAKLAR.....	110
	EKLER	115
	ÖZGEÇMİŞ	

ÖZET

Uyduların dünya etrafındaki yörüngesi karanlık ve aydınlık bölge olmak üzere iki bölgeden oluşur. Uydu karanlık bölgede iken gerekli olan enerji volanlı enerji depolama birimi tarafından sağlanır. Fırçasız doğru akım motorları hafiflik, yüksek güç yoğunluğu, yüksek verim, yüksek kararlılık ve yüksek hızları nedeniyle volanlı enerji depolama birimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Volanlı enerji depolama birimlerinin mekanik parçalarının fiziksel özelliklerinden dolayı mekanik rezonanslar oluşmaktadır. Volanın hızlanması sırasında oluşan mekanik rezonanslarda fırçasız doğru akım motorunun akımında dalgalanmalar oluşur. Bu akım dalgalanmaları solar panellerin maliyetinin artışına neden olduğundan dolayı engellenmelidir. Bu nedenle motor akımındaki dalgalanmaları ortadan kaldırmak için akım referanslı yöntem tercih edilmektedir.

Bu tez çalışmasında, yüksek hızlı fırçasız doğru akım motoru, değişken frekanslı motor sürücüsü, volan, motor ve volan arasında kaplin, yüksek hızlı bilya ve vakum haznesinden oluşan volanlı enerji depolama sistemi tasarlanmıştır. PI parametreleri akım kontrolünde optimum performans elde etmek için genetik algoritmalar kullanılarak elde edilmiştir. Mekanik rezonans bölgesini kısa zamanda uygun bir akım artışıyla aşmak için etkili bir akım referans yöntemi önerilmiştir. Buna ek olarak volanlı enerji depolama biriminin mekanik modeli kullanılarak mekanik rezonans bölgesi tanımlanmıştır.

Anahtar Kelimeler: FDAM, Genetik Algoritmalar, Volanlı Enerji Depolama, Akım Referans Yöntemi.

SUMMARY

A Genetic Algorithm-Based Current Control of High-Speed Brushless Direct Current Motor can be Used in Flywheel Energy Storage System for Satellites

The satellite orbital path around the earth consists of two regions as dark and bright. The required energy is provided by the mechanical energy storage unit when operating in the dark region. Brushless dc motors (BLDC) are widely used in the FESS due to the low weight, high power density, high efficiency, high reliability, and high speed.

Some mechanical resonances is occurred due to physical features of the mechanical parts of flywheel energy storage unit. Ripples are occurred in the current of the brushless direct current motor during the acceleration of the flywheel occurred in mechanical resonances. These currents ripples should be avoided because they cause the increase of the cost of solar panels. Therefore, current reference method is preferred in order to eliminate the ripple in motor current.

In this thesis, a flywheel energy storage system has been designed consists of a high speed BLDC, a variable frequency motor drive, a flywheel, a coupling between motor and flywheel, a high speed bearing, a vacuum chamber. The PI parameters have been determined by using genetic algorithm to obtain optimum performance for current control. An effective current reference method has been proposed in order to pass the region of the mechanical resonances by adequate current increasing in a short time. In addition, mechanic resonance region has been determined by using mechanical model of flywheel energy storage.

Keywords: BLDC, Genetic Algorithms, Flywheel Energy Storage, Current Reference Method.

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1	Yüksek hızlı volanlı enerji depolama biriminin kontrol blok diyagramı	2
Şekil 1.2	C-dump evirici yapısı	3
Şekil 1.3	Mekanik enerji depolama biriminin prensip şeması	3
Şekil 1.4	Şarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı	3
Şekil 1.5	Deşarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı	4
Şekil 2.1	Elektrik motorları ve çeşitleri	9
Şekil 2.2	Altı adımlı bir evirici ve FDAM	12
Şekil 2.3	FDAM' na ait zıt emk' lar, alan etkili algılayıcıların sinyal durumları ve faz akımları	13
Şekil 2.4	FDAM' nun zıt emk' ları, faz akımları ve üretilen moment	15
Şekil 2.5	Anahtarların altı değişik iletim durumu	18
Şekil 2.6	Histerezis akım kontrollü hız kontrol yöntemi	20
Şekil 2.7	Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) ile hız kontrol yöntemi	21
Şekil 3.1	Uydu güç sistemine ait prensip şeması	23
Şekil 3.2	Güneş ışığı boyunca sistemin karalı çalışma noktaları ve paralel kontrol	24
Şekil 3.3	Gerilim düzenleyicisi gerçekleştirilmiş uydu güç sistemi	25
Şekil 3.4	Bir periyot için batarya şarj-deşarj durumu ve hücre gerilimi	26
Şekil 3.5	NiCd bataryada hafıza etkisi nedeniyle oluşan deşarj eğrisi	27
Şekil 3.6	Uydu yönelim sisteminin temel yapısı	28
Şekil 3.7	Uydu yönelim sisteminde kullanılan bir tepki tekerleği	29
Şekil 3.8	Volanlı enerji depolama birimi ile beraber uydu güç sistemi	30
Şekil 3.9	NASA tarafından geliştirilen mekanik enerji depolama birimi	32
Şekil 4.1	Rüzgar kaybı hesaplanacak volanın şekli	37
Şekil 4.2	Rüzgar gücü ile hızın değişimi	44
Şekil 4.3	Enerji denge noktasının bulunduğu benzetim çalışması	46
Şekil 4.4	Karanlık bölgede uydunun ihtiyacı olan enerji miktarı	46
Şekil 4.5	Karanlık bölgede oluşan enerji kaybı miktarı	47
Şekil 4.6	Karanlık bölgede sistemden talep edilen toplam enerji miktarı	47
Şekil 5.1	LC filtre	51
Şekil 5.2	LC filtresinin bode diyagramı	53

Şekil 5.3	Sönümlleme direnci ile birlikte LC filtre.....	54
Şekil 5.4	Çeşitli sönümlleme dirençleri ile filtresinin bode diyagramı.....	55
Şekil 5.5	Bant durduran filtre ile LC filtre.....	55
Şekil 5.6	Bant durduran filtre ile LC filtrenin bode diyagramı.....	57
Şekil 5.7	PID denetimi.....	59
Şekil 5.8	PID denetimi yapılan sistemin tamamı.....	60
Şekil 5.9	Basit GA akış şeması.....	62
Şekil 5.10	İkili sayı sisteminde bir kromozomun yapısı.....	63
Şekil 5.11	Rulet Tekerleği.....	65
Şekil 5.12	İkili kod sisteminde tek noktadan ve iki noktadan çaprazlama.....	67
Şekil 5.13	İkili kod sisteminde mutasyon işlemi.....	68
Şekil 5.14	Kapalı çevrim sistemde LC filtre için melez GA ve Z-N yöntemlerinin birim basamak cevabı.....	77
Şekil 5.15	Bant durduran LC filtre için melez GA ve Z-N yöntemlerinin birim basamak cevabı.....	78
Şekil 5.16	a)Filtre olmadan motor faz akımı b)LC filtre kullanıldıktan sonra motor faz akımı c)Bant durduran filtre ve LC filtre ile birlikte motor faz akımı ve harmonik spektrumu.....	80
Şekil 5.17	Akım referanslı sürülen volanlı enerji depolama sisteminin benzetimi.....	81
Şekil 5.18	Motorun yük momenti.....	81
Şekil 5.19	Hız kontrollü sistemde motor faz akımının değişimi.....	82
Şekil 5.20	Hız kontrollü sistemde DA kaynak akımının değişimi.....	83
Şekil 5.21	Hız kontrollü sistemde referans hız ve motorun hızının değişimi.....	84
Şekil 5.22	Motorun 1950.s ile 2150.s arasındaki hızı.....	85
Şekil 5.23	Akım referanslı yöntemde motor hızının 1150.s ile 1600.s arasındaki değişimi.....	85
Şekil 5.24	Akım referanslı yöntemde motor hızının 2090.s ile 2120.s arasındaki değişimi.....	86
Şekil 5.25	Z-N ve MGA ile hesaplanan PID parametreleri kullanılan sistemde motor faz akımının değişimi.....	86
Şekil 5.26	Z-N ve MGA ile hesaplanan PID parametreleri kullanılan sistemde kaynak akımının değişimi.....	87
Şekil 5.27	Bir tarafı sabitlenmiş volan ve mekanik modeli.....	88
Şekil 5.28	Uygulamada kullanılan volan ve modeli.....	89

Şekil 5.29	Uygulamada kullanılan sistemin mekanik modeli.....	90
Şekil 5.30	Mildeki açı değişimini veren matlab modeli	91
Şekil 6.1	Önerilen akım referanslı yöntemi akış diyagramı	94
Şekil 6.2	Önerilen akım referanslı yöntem	95
Şekil 6.3	Tasarlanan sistemin görünüşü.....	96
Şekil 6.4	Bir çalışma periyodu boyunca rulman sıcaklığının değişimi	97
Şekil 6.5	Birden fazla çalışma sonunda rulman sıcaklığının ulaştığı en yüksek değer ...	98
Şekil 6.6	Klasik akım referansı ile sürülen sistemin hızı.....	98
Şekil 6.7	Klasik akım referansı ile sürülen motorun akımı	99
Şekil 6.8	Sabit balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde sistemin hızı.....	100
Şekil 6.9	Değişken balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde sistemin hızı.	100
Şekil 6.10	Değişken balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde motorun akımı	101
Şekil 6.11	24000d/dk hızına 1800s’ de ulaşan sistemde deneysel ve benzetim çalışmasında motor hızı	102
Şekil 6.12	24000d/d hızına 1800s’ de ulaşan sistemde deneysel ve benzetim çalışmasında motor akımı	102
Şekil 6.13	Benzetim çalışmasında 20000 d/d hızında motor faz akımı ve harmonik analizi.....	104
Şekil 6.14	20000 d/d hızında motor faz akımı	104
Şekil 6.15	20000 d/d hızında motor faz akımının harmonik analizi.....	105
Şekil 6.16	Benzetim çalışmasında 24000 d/d hızında motor faz akımı ve harmonik analizi.....	105
Şekil 6.17	24000 d/d hızında motor faz akımı.....	106
Şekil 6.18	24000 d/d hızında motor faz akımının harmonik analizi.....	106

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 2.1 FDAM' nun konumuna göre ürettiği sinyaller ve eviricinin anahtarlama durumları.....	17
Tablo 4.1 Sistem parametreleri	45
Tablo 5.1 Ziegler-Nichols Yöntemi ile PID hesaplanması	76
Tablo 5.2 Şekil 5.14 için Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performansı.....	77
Tablo 5.3 Şekil 5.15 için Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performansı.....	79

SEMBOLLER LİSTESİ

V_a, V_b, V_c	: Faz gerilimleri
R_a, R_b, R_c	: Faz dirençleri
L_a, L_b, L_c	: Faz indüktansları
e_a, e_b, e_c	:Faz zıt emk' ları
i_a, i_b, i_c	:Faz akımları
R_s	:İki fazın toplam sargı direnci
L_s	:İki fazın toplam sargı indüktansı
ω_m	:Açısal hız
ψ_p	:Bir fazın kaçak akısı
i_s	:DA hattın akımı
T_e	:Elektriksel moment
T_L	:Yük momenti
J	:Eylemsizlik momenti
B	:Sürtünme katsayısı
M_0	:Hıza bağlı sürtünme momenti
f_0	:Hıza bağlı sürtünme katsayısı
n	:Rulmanın hızı
ν	:Rulman yağının kinematik viskozitesi
d_M	:Rulmanın ortalama çapını
M_1	:Yüke bağlı sürtünme momenti
f_1	:Yüke bağımlı sürtünme katsayısı
F_r	:Volanın ağırlığından dolayı etkiyen kuvvet
F_b	:Volanın balansından kaynaklanan kuvvet
m	:Volanın kütlesi
g	:Yerçekimi ivmesi
m_r	:Artık kütle
e	:Volanın dönme eksenini ile artık kütle merkezi arasındaki mesafe
r_i	:Volanın iç yarıçapı
r_o	:Volanın dış yarıçapı
ρ_a	:Havanın yoğunluğu

μ	:Havanın dinamik viskozitesi
d	:Volanın muhafaza ile arasındaki mesafe
ω_{min}	:Volanın minimum hızı
ω_{max}	:Volanın maksimum hızı
η	:Verim
P_{hava}	:Hava sürtünmesinden kaynaklanan kayıp güç
P_r	:Rulman sürtünmesinden kaynaklanan kayıp güç
E_{net}	:Uydunun ihtiyacı olan enerji miktarı
k_f	:Pürüzsüzlük katsayısı
C_f	:Sürtünme katsayısı
Re	:Reynold katsayısı
T_c	:Evirici zaman sabiti
K_c	:Evirici kazanç katsayısı
T_a	:Akım algılayıcısı zaman sabiti
K_a	:Akım algılayıcısı kazanç katsayısı
C	:Burulma sertliği
J_p	:Polar moment
a	:Milin çapı
l	:Milin boyu
G	:Kayma modülü
D	:Sönümleme katsayısı
J_1	:Volanın eylemsizlik momenti
J_2	:Motorun eylemsizlik momenti
T_1	:Motorun ürettiği moment
T_2	:Volanda oluşan moment
ω_0	:Rezonans açısal hızı
θ	:Burulma açısı
θ_1	:Motor tarafında burulma açısı
θ_2	:Vola tarafında burulma açısı

KISALTMALAR LİSTESİ

AA	:Alternatif akım
DA	:Doğru akım
DAA	:Desen arama algoritması
DGM	:Darbe genişlik modülasyonu
EMK	:Elektromotor kuvvet
FDAM	:Fırçasız doğru akım motoru
FPGA	:Alan programlanabilir kapı dizileri
GA	:Genetik algoritma
GDB	:Güç dağıtım birimi
GPS	:Güneş paneli sürücüsü
IAE	:Hatanın mutlak değerinin integrali
ISE	:Hatanın karesinin integrali
ITAE	: Hatanın mutlak değerinin ve zamanın çarpımının integrali
ITSE	:Hatanın karesi ile zamanın çarpımının integrali
LC	:Endüktans, kapasitans
LCL	:Endüktans, kapasitans, endüktans
MGA	:Melez genetik algoritma
MSE	:Hatanın karesel ortalamasının integrali
NASA	:Amerikan uzay ajansı
NSGA	:Baskınlık kurulmamış sınıflandırma genetik algoritması
PID	:Oransal, integral, türev
RLC	:Direnç, endüktans, kapasitans
THD	:Toplam harmonik bozulma
Z-N	:Ziegler-Nichols

1. GİRİŞ

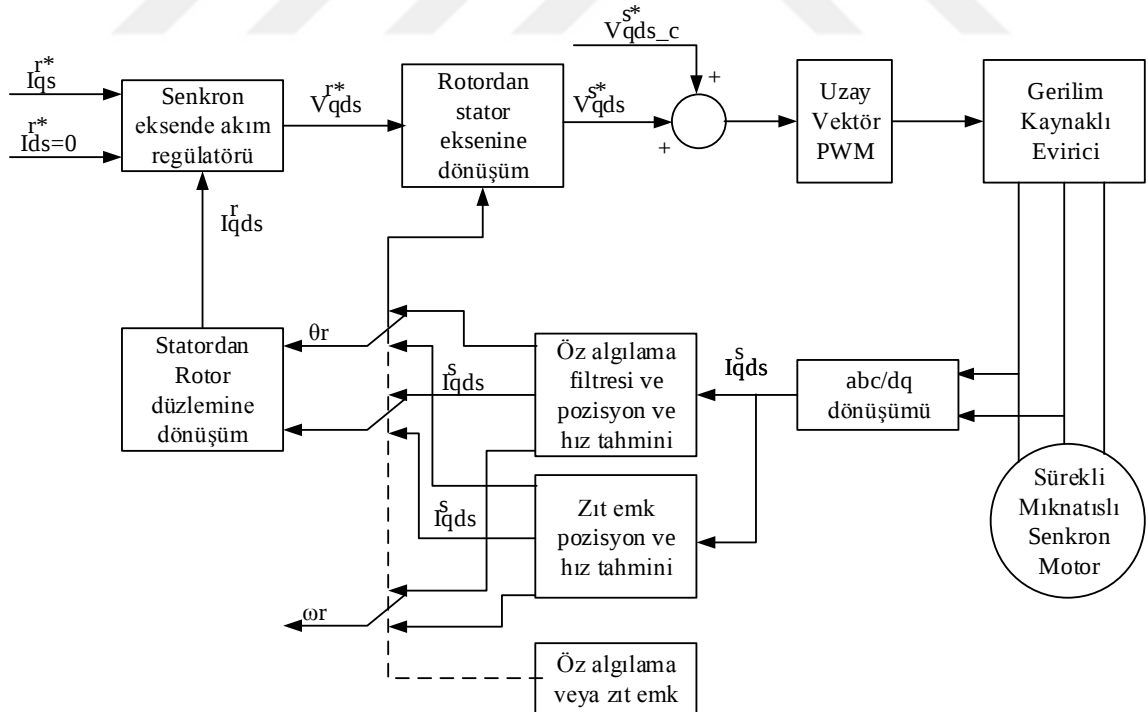
Volanlı enerji depolama birimleri kinetik enerji depolamak amacıyla üretilirler. Teknolojinin gelişimine paralel olarak yüksek hızlı motorların üretilmesi, mekanik imalat tekniklerinin gelişmesi ve mekanik enerji depolama biriminin uydu yönelim sistemleri ile bütünleşik çalışabilmesi nedeniyle yüksek hızlı volanlı enerji depolama biriminin uydu yönelim sistemlerinde kullanılması cazip hale gelmiştir. Uydunun hareketi için momentum üreten volan ile enerji depolama birimi birleştirilerek ağırlık ve kapladığı alan bakımından avantaj sağlanmıştır.

Mekanik enerji depolama fikri elektrokimyasal bataryaların belirlenmiş görevini etkileyen bazı dezavantajlarını iyileştirmek amacıyla ortaya çıkmıştır. Elektrokimyasal bataryalar, dezavantajları bakımından mekanik bataryalar ile karşılaştırıldığında verimleri daha düşüktür, deşarj derinliği küçüktür, kullanım ömürleri azdır ve çevre kirliliği oluştururlar. Yüksek hızlı mekanik enerji depolama birimlerinin üretilmesi, ileri teknoloji ile üretilen malzemeler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Ayrıca en önemli dezavantajı olan mekanik kayıpların sınırlandırılması veya ortadan kaldırılması için manyetik yataklar veya seramik bilyalı rulmanlar kullanılmaktadır [1,2].

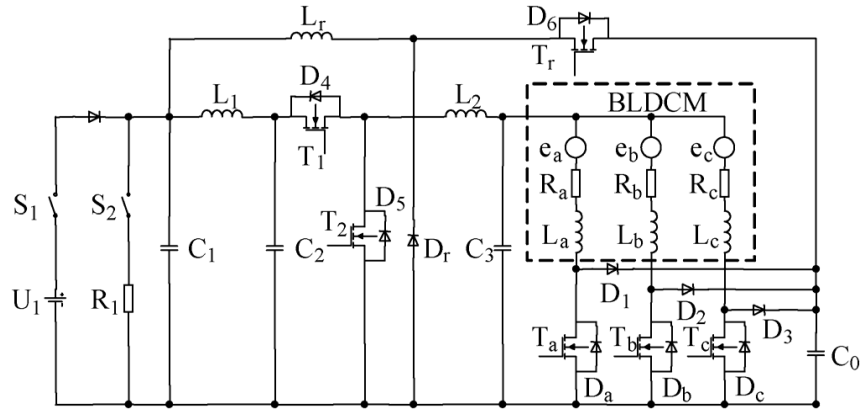
Uyduların yönelim ve enerji depolama birimleri ile ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarda uyduların hareketi için gerekli olan momentum enerjisi elektrokimyasal bataryalar yerine volanlı enerji depolama birimi ile gerçekleştirilmiştir [3]. NASA tarafından bu konuyla ilgili oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Yüksek hızlı sürekli mıknatıslı senkron motorların algılayıcısız hız kontrolü oldukça zordur. Çünkü yüksek hızlarda daha basit algoritmalara gerek duyulur. Bu tip uygulamalarda düşük hızlarda ve yüksek hızlarda çalışırken farklı yöntemler kullanılır. Yüksek hızlı volanlı enerji depolama biriminin kontrol blok diyagramı Şekil 1.1' de gösterilmiştir. Bu mekanik enerji depolama biriminde kullanılan yüksek hızlı sürekli mıknatıslı senkron motorun gerilimi 65 V, hızı 60000 d/d ve gücü 1.5 kW' dır [4].

Uydu yörüngesinde hareket ederken yörünge üzerindeki bir bölgede güneş panelleri karanlıkta kalacak ve güneş ışığından faydalanamayacaktır. Bu anda uydunun enerjisinin kullanılan enerji depolama sistemi ile sağlanması gerekmektedir. Uydu aydınlık bölgede iken, uydunun enerji ihtiyacına göre enerji hesabı yapılmış hız değerine çıkarılincaya kadar sürülmesi olayına şarj durumu denir. Uydu karanlık bölgede iken güneş panelleri ışığı

alamadığında uydunun enerji ihtiyacını sağlamak için motor olarak kullanılan elektrik makinası enerji kesildiği andan itibaren volanın yüksek ataleti nedeniyle dönmesine devam edecek ve bu durumda generatör olarak çalışarak enerji üretecektir. Bu duruma ise deşarj olayı denir. Mekanik enerji depolama biriminin deşarj süresince değişen yük koşullarına göre sabit bir gerilimle uydunun enerjisini sağlaması gerekir. Bu amaçla generatör olarak çalışan elektrik makinası çıkışından elde edilen gerilim çeşitli dönüştürücüler aracılığı ile sabit bir gerilime dönüştürülür. Şarj ve deşarj süresi boyunca her iki yönde enerji akışını sağlayan çeşitli dönüştürücü yapıları mevcuttur. Bu dönüştürücülerin verimlerinin artırılması ve gerilim kontrolünün daha iyi sağlanabilmesi için araştırmalar devam etmektedir. Bunlardan bir tanesi back-to-back dönüştürücü yapısıdır. Şekil 1.2’ de mekanik enerji depolama birimleri için geliştirilmiş, her iki yönde enerji akışını sağlayabilen C-dump evirici yapısı görülmektedir [5-10]. Mekanik enerji depolama biriminin şarj ve deşarj işlevlerini yerine getirebilmesi için kontrolör parametrelerinin en uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bunun için motor ve genaratör çalışma durumları için sistemin transfer fonksiyonlarının oluşturulmalıdır.

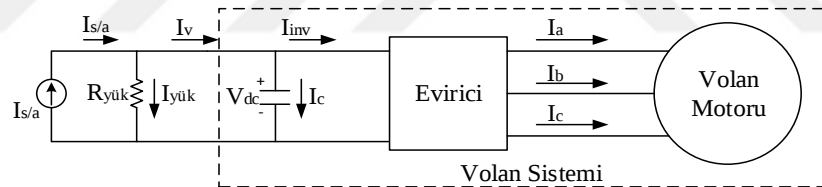


Şekil 1.1 Yüksek hızlı volanlı enerji depolama biriminin kontrol blok diyagramı

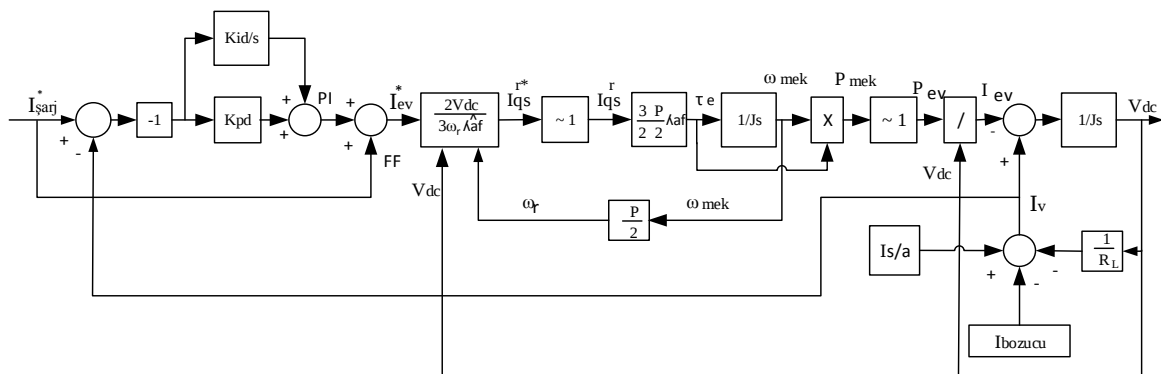


Şekil 1.2 C-dump evirici yapısı

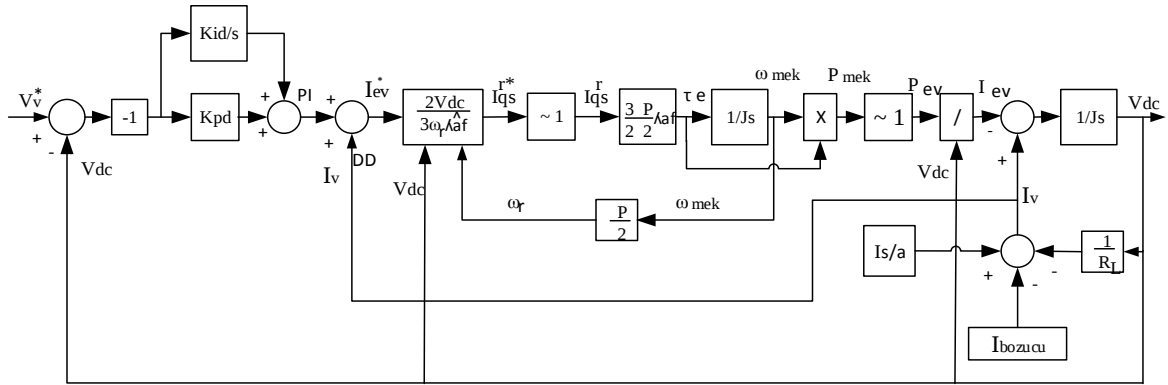
Mekanik enerji depolama birimi için şarj ve deşarj durumlarını içeren bir sistemin blok diyagramı ve benzetim çalışmasının sonuçları [11-13]' de incelenmiştir. Şekil 1.3' te mekanik enerji depolama biriminin prensip şeması görülmektedir. Bu prensip şemasına göre şarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı Şekil 1.4' de ve deşarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı Şekil 1.5' te gösterilmiştir [14].



Şekil 1.3 Mekanik enerji depolama biriminin prensip şeması



Şekil 1.4 Şarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı



Şekil 1.5 Deşarj durumunda çalışan volan motoru için kontrol blok diyagramı

Yüksek hızlı mekanik enerji depolama birimlerinde kullanılan motor sürücülerinin anahtarlama frekansları çok yüksektir. Çünkü motorun AA geriliminin frekansı çok yüksektir. 60000 d/d hızındaki motorun senkron frekansı 1 kHz' dir. Bu motorun sürücüsündeki anahtarlama frekansı 65 kHz' dir. Yüksek frekanslı anahtarlama kaynaklanan dv/dt değişimlerinin azaltılması gerekmektedir. Ayrıca bu motorların indüktansları çok küçüktür ve bu nedenle akımdaki dalgalanmalar oldukça yüksektir ve azaltılması gerekir. Bu motorlarda manyetik rulmanlar ve rotor pozisyonu için eddy akım algılayıcıları kullanılmaktadır ve yüksek anahtarlama frekansından kaynaklanan gürültülerden etkilenmektedirler. Bu gibi nedenlerden dolayı yüksek hızlı motorların sürücülerinde AA filtre kullanılması gerekmektedir. Santiago ve Kenny, yüksek anahtarlama frekansından ve düşük motor indüktansından kaynaklanan olumsuz etkileri azaltmak amacıyla iki seviyeli RLC filtre tasarımı yapılarak, sisteme filtre eklendikten sonra oluşan yeni sistem parametrelerine göre kontrolör parametreleri hesaplanmıştır [15-16].

You ve diğerleri, büyük güçlü yüksek hızlı bir volanlı enerji depolama biriminin boşta çalışma ve yükte çalışma durumları motor ve generatör durumları için incelemiştir [17]. Bu çalışmada rotorun dinamik performansı incelenilerken zıt elektromotor kuvvet tahmini için rotor ve stator sargılarının manyetik analizi yapılmıştır.

Fırçasız doğru akım motorları (FDAM) genellikle küçük güçlerde üretilirler. Bu motorlar yüksek verimlilik, dayanıklılık, yüksek güç/ağırlık oranı, sessiz çalışma ve düşük bakım giderleri gibi birçok avantaja sahiptir. Bu avantajları nedeniyle bilgisayarlarda, otomotiv endüstrisinde, uzay araçlarında ve endüstrinin birçok alanında yoğun olarak kullanılmaktadır [18]. Özellikle enerji maliyetlerinin arttığı günümüzde yüksek verimleri nedeni ile

endüstrideki kullanım yoğunluğu da artmıştır. Teknolojinin gelişimine paralel olarak bu motorların hız ve akım kontrolü ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

FDAM trapezoidal elektromotor kuvvet (emk) yapısına sahiptir ve bu yapıda eviricinin çalışması için rotor pozisyonu altı değişik bölgede incelenir. Pozisyon bilgisinin elde edilebilmesi için genellikle alan etkili algılayıcılar motorun içine yerleştirilir. Bu motorların algılayıcısız kontrolünde genellikle zıt emk yapısından faydalanılır ve zıt emk' nın sıfır geçişleri incelenerek akım dalga şeklinin sıfır geçişleri tahmin edilmektedir [19-23].

Yüksek hızlı FDAM' ları için FPGA tabanlı yeni bir hız ölçüm yöntemi geliştirilmiştir. Bu hız ölçüm yöntemi için alan etkili pozisyon algılayıcılarından gelen bilgi kullanılmıştır. Böylece hız ölçümü için algılayıcısız bir yöntem veya hız algılayıcısına gerek kalmamıştır [24].

Fırçasız doğru akım motorları için birçok sürücü sistemi geliştirilmiştir. Gelişen teknolojiyle beraber yüksek verimli alçaltan-yükselten dönüştürücüye sahip sürücü sistemi, faz genişleme açısı ile yüksek hızda daha yüksek moment üreten sürücü sistemi, dört bölgede çalışabilen sayısal kontrol özelliğine sahip sürücü sistemi ve anahtarlama kayıplarını azaltan kurallı anahtarlama hücreli bir yükselten dönüştürücüye sahip sürücü sistemi gibi yeni sürücü sistemleri geliştirilmiştir [25-28].

FDAM' larının en büyük dezavantajlarından biri yüksek moment dalgalanmalarıdır. Bu moment dalgalanmalarını azaltmak için birçok yöntem geliştirilmiştir. FDAM' nun iki faz iletim anında, yüksek hızlarda ve düşük hızlarda faz akımlarının yön değiştirdiği zamanlarda akım hesaplamaları yapılmış ve bu farklı durumlar için iki faz sargısı veya üç faz sargısı anahtarlara moment dalgalanmaları kontrol edilmiştir [29]. Bunların dışında algılayıcısız doğrudan moment kontrol yöntemi, doğrudan moment kontrol yöntemi, alan yönlendirmeli kontrol yöntemine benzetilen bir moment kontrol yöntemi ve yüksek verimli sistem kayıplarını azaltan bir kontrol yöntemi gerçekleştirilmiştir [30-34].

Genetik algoritmalar (GA) doğadaki evrim sistemine dayalı bir optimizasyon yöntemidir. GA ilk olarak 1975 yılında Holland ve arkadaşları tarafından tanıtılmıştır [35]. Özellikle son yıllarda mühendislik bilimlerinde problemlerin çözümünde oldukça önem kazanmıştır. Endüstriyel problemlerin çözümünde kullanılan kontrolör parametrelerin hesaplanmasında genetik algoritmalar kullanılmaktadır [36].

Doğru akım ve fırçasız doğru akım motorlarının hız kontrolünde GA ile yapılan optimizasyon sonucundaki sistem cevabındaki hatanın klasik yöntemlere göre oldukça düşük olduğu görülmektedir GA' da değeri bilinmeyen değişkenin en uygun değerinin

bulunması istenmektedir. Bunun için algoritma içinde bulunan uygunluk fonksiyonunun en küçük değerin bulunması gerekmektedir. Motorların kontrolünde çok değişkenli uygunluk fonksiyonları veya farklı hata ölçütleri içeren uygunluk fonksiyonlarının kullanımı artmaktadır [37-44]. Bu farklı uygunluk fonksiyonları kullanılarak sistemlerin geçici durum performansları incelenir. Sistemin kontrolör parametreleri geçici durum performanslarının ve sürekli durum hatasının en uygun olduğu duruma göre seçilir.

Son yıllarda GA' lar ile beraber bulanık mantık algoritmaları da kullanılmaktadır. Bu şekilde sistemin geçici durum davranışlarının ve sürekli durum hatasının klasik yöntemlere göre daha optimum hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Ayrıca bulanık mantık kontrol yönteminin genetik algoritma ile beraber kullanılması ile sistemin değişen dış etkilere daha dayanıklı hale getirilmesine çalışılmaktadır [45-47].

Bu çalışmaların dışında genetik algoritma ile optimizasyon yöntemi birçok sistemde kontrolör tasarımında kullanılmaktadır. Mekatronik bir sistemin bir noktadan başka bir noktaya hareketinin sağlanması için gerekli olan en küçük enerji ihtiyacının belirlenmesi için gerçek kodlu genetik algoritma kullanılmıştır [48]. Çift beslemeli bir asenkron generatörü bir rüzgar santraline bağlanarak kontrol parametreleri genetik algoritma ile hesaplanmıştır [49]. Uygunluk fonksiyonu sistem parametrelerine göre çok nesneli olarak tasarlanmıştır. Hidrolik türbinin sistem tasarımı yapılarak sistem regülasyonu gerçekleştirilmiştir. Kontrolör parametreleri NSGA-II ile hesaplanmıştır [50]. Genetik algoritma tabanlı çoklu ajan destekli öğrenme yöntemi geliştirilerek bir güç sisteminin yük-frekans kontrolü sağlanmıştır [51].

1.1 Tezin Amacı

Uzay uygulamalarında kullanılan volanlı enerji depolama sistemlerinde ortaya çıkması muhtemel olan mekanik problemler nedeniyle FDAM' nda oluşan akım dalgalanmalarının, uydu güç sistemine, herhangi bir zarar vermemesi için bir çözüm üretilmesi amaçlanmıştır.

Volanlı enerji depolama sistemlerinin uzay uygulamalarında kullanılması için gerekli olan akım referanslı kontrol yöntem incelenerek, sistemde oluşabilecek mekanik rezonans gibi problemlerde akım değişiminin uydu güç sistemine zarar vermeden, sistemin mekanik rezonans bölgesinden daha kısa bir sürede çıkması için akım referanslı yöntem ile hız kontrollü yöntemin bir araya getirilmesi ile oluşturulan, yeni bir akım referanslı yöntemin kullanılması tezin bir diğer amacıdır.

Bu tez çalışmasında fırçasız doğru akım motorunun akımının kontrolü için gerekli olan akım kontrolör parametrelerinin hesaplanmasının, evirici ve motor arasında kullanılan filtre elemanları nedeniyle geleneksel yöntemler ile gerçekleştirilemeyeceği görülmüş olup, bu motorların düşük indüktansları nedeniyle motor faz akımlarının dalgalanmalarının azaltılması için, genetik algoritmalar kullanılarak kontrolör parametreleri hesaplanmıştır.

Bu tezin amaçlarından biri yüksek hızda çalışan volanlı enerji depolama sisteminde oluşacak olan mekanik rezonans bölgesinin belirlenmesi, sistemin güvenilirliği açısından önemli olduğu için, benzetim çalışması ile gerçek sistemin sonuçlarının karşılaştırılıp benzetim çalışmasının sistem tasarımına yardımcı olması beklenmektedir.

1.2 Tezin Organizasyonu

Bu tez çalışmasında genel itibariyle uydu güç sistemleri ve bu sistemlerde kullanılan volanlı enerji depolama sistemleri anlatılmıştır. Uydularda kullanılan volanlı enerji depolama sistemlerinin sürülmesi için tercih edilen akım referanslı yöntem incelenmiş ve mekanik rezonans gibi bozucu etkilerin daha hızlı bir şekilde geçilmesi için yeni bir akım referanslı yöntem tanıtılmıştır. Bu amaçla bölüm iki de bu sistemlerde kullanılan FDAM' ları tanıtılmıştır. Bu motorların matematiksel modeli oluşturulmuş ve anahtarlama tekniği incelenmiştir.

Üçüncü bölümde uydularda kullanılan güç sistemleri tanıtılmıştır. Ayrıca bu güç sistemlerinde kullanılan elektrokimyasal bataryalar ile mekanik enerji depolama ile çalışan volanlı enerji depolama sistemleri incelenmiştir. Her iki enerji depolama sistemi karşılaştırılarak mekanik enerji depolama sistemlerinin üstünlükleri ortaya konulmuştur.

Dördüncü bölümde volanlı enerji depolama sisteminin tasarlanması için gerekli olan konular işlenmiştir. Bu amaçla sistemde oluşan kayıplar tanıtılmış olup bu kayıpların generatör olarak çalışma sırasında sistemin enerji dengesine olan etkisi anlatılmıştır. Küçük bir uydu için mekanik enerji depolama sisteminin boyutlandırılması gerçekleştirilmiştir.

Beşinci bölümde volanlı enerji depolama sisteminin benzetimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla akım kontrolör parametrelerinin hesaplanması için sistemde kullanılan filtreler de hesaplanarak transfer fonksiyonları oluşturulmuştur. Kontrolör parametrelerinin en uygun şekilde hesaplanması için kullanılacak olan genetik algoritmalar tanıtılmıştır. Genetik algoritma kullanılarak bulunan kontrolör parametreleri, geleneksel yöntemler kullanılarak bulunan kontrolör parametreleri ile akım referanslı ve hız kontrollü benzetim çalışmaları

gerçekleştirilmiştir. Bu benzetim çalışmaları ile akım referanslı kontrol yönteminin geleneksel hız kontrollü yönteme olan üstünlüğü incelenmiştir. Ayrıca genetik algoritma ile elde edilen kontrol parametreleri kullanılarak yapılan benzetim çalışmasının akım dalgalanmalarının azaltılmasında etkili olduğu gözlemlenmiştir.

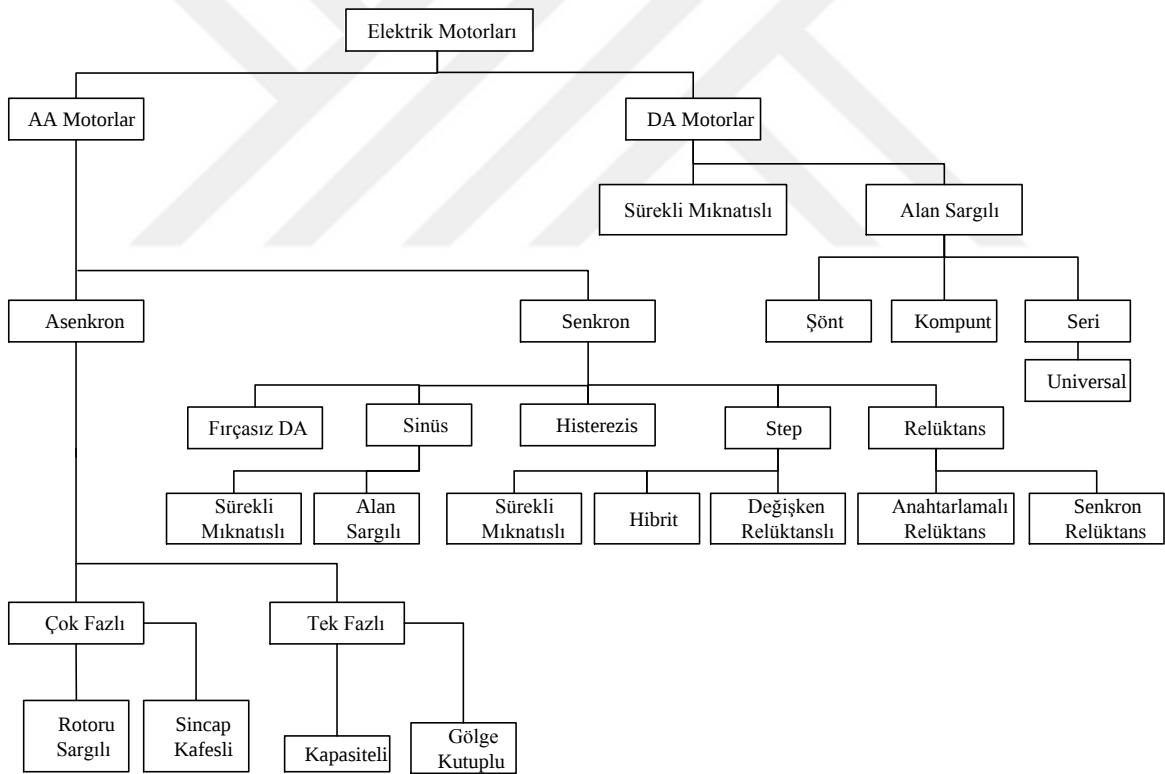
Altıncı bölümde akım referanslı yöntemin kullanıldığı bir volanlı enerji depolama sisteminin tasarımı gerçekleştirilmiştir. Sistemde oluşan mekanik rezonans bölgesinde geleneksel akım referanslı yöntemin ve önerilen akım referanslı yöntemin sistem akımı ve sistemin hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



2. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI

2.1 Giriş

Günümüzde teknolojinin gelişimine paralel olarak tüketicilerin enerji talebi önemli ölçüde artmıştır. Tüketilen enerjinin çok büyük bir kısmı elektrik motorları tarafından harcanmaktadır. Bu nedenle daha verimli elektrik motorları üretme ihtiyacı doğmuştur. FDAM bu çalışmalar neticesinde üretilmiş ve sürekli mıknatıslı senkron motorlar sınıfına dahil olmuş bir elektrik motoru çeşididir. Şekil 2.1’ de günümüze kadar üretilmiş ve halen üretilmekte olan elektrik motorları ve çeşitleri görülmektedir [52].



Şekil 2.1 Elektrik motorları ve çeşitleri

2.2 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı

FDAM’ larının en önemli avantajı doğru akım motorlarının dezavantajı olan fırça ve

kollektör yapısının ortadan kaldırmasıdır. Kolektör fırça yapısı yerine elektronik devre elemanları ile gerçekleştirilen elektronik komütasyon yöntemi kullanılmaktadır. Elektronik komütasyon yöntemi ile beraber geliştirilen kontrol yöntemleri ve sürücü devreler daha verimli sistemler yapılmasının önünü açmıştır. Böylelikle işletme şartlarında daha dayanıklı, arıza yapma oranı düşük, daha verimli motorlar ve sürücüler imal edilmeye başlanmıştır. Günümüzde FDAM' larının yaygın olarak kullanılmasının en önemli nedenlerinden birisi malzeme biliminin gelişimine paralel olarak gelişen mıknatıs teknolojisidir.

Üretilmekte olan sürekli mıknatısların birçok farklı çeşidi bulunmaktadır. Bu mıknatıs çeşitleri alnico, ferrite, samarium-cobalt ve neodinyum-iron-boron (NdFeB) içermektedirler. Mıknatıs çeşitleri arasından fiyatı ucuz olmasından dolayı ferrit en çok kullanılanıdır. Diğer taraftan samarium-cobalt ve neodinyum-iron-boron yüksek performans için önerilir. NdFeB' nin fiyatı samarium-cobalt dan daha ucuz olduğundan dolayı yüksek performans uygulamalarında en çok kullanılan mıknatıslar NdFeB' dir. Çünkü Alnico, yüksek çalışma sıcaklıklarına dayanabilmekle birlikte iyi bir ısıl kararlılığa ve yüksek kalıcı akı yoğunluğuna sahiptir. Dezavantajı ise düşük bir zorlayıcı kuvvete ve dik bir histerisiz eğrisine sahip olmasıdır. Bu nedenlerden ötürü de bu malzeme sürekli mıknatıslı makinelerde kullanılmaya elverişli bir malzeme olarak kabul edilmemektedir.

Baryum ve stronsiyum, sürekli mıknatıs olarak en yaygın kullanılan ferrit malzemelerdir. Bu malzemeler düşük maliyet, ham madde bolluğu ve üretim kolaylığı gibi avantajlara sahiptir. Ayrıca, yüksek çalışma sıcaklığına (400°C) sahiptir. Fakat kalıcı akı yoğunluğu düşüktür ve bu da bu malzemenin kullanıldığı makinenin hacminin ve ağırlığının büyümesine neden olmaktadır.

Samarium-cobalt mıknatıslar; demir, cobalt, nikel ve samarium' dan üretilirler ve samarium dünyada nadiren bulunur. Bu malzemenin avantajları yüksek kalıcı akı yoğunluğu, yüksek enerji yoğunluğuna sahiptir. Çalışma sıcaklığı 300°C' ye kadar çıkabilir ve oldukça iyi bir ısıl kararlılığa sahip olmasıdır. Dezavantajı ise samarium' un nadir bir toprak elementi olması nedeniyle maliyetinin çok yüksek olmasıdır.

NdFeB mıknatıslar; en yüksek enerji yoğunluğuna, en yüksek kalıcı akı yoğunluğuna ve oldukça yüksek zorlayıcı kuvvete sahiptirler. Neodinyum da samarium gibi nadir bir toprak elementidir, fakat çalışma sıcaklıkları düşüktür (150°C) ve kaplanmadığı takdirde paslanmaya elverişlidirler. Bunun yanında ısıl kararlılıkları da samarium-cobalt malzemenin altındadır ve ferrit malzemeyle karşılaştırıldığında daha pahalıdırlar, fakat enerji yoğunluğu

daha yüksek olduğu için makine hacmi ve ağırlığı daha düşüktür. Bu özellikleri nedeniyle neodinyum-demir-bor mıknatıslar yaygın olarak kullanılmaktadırlar [53].

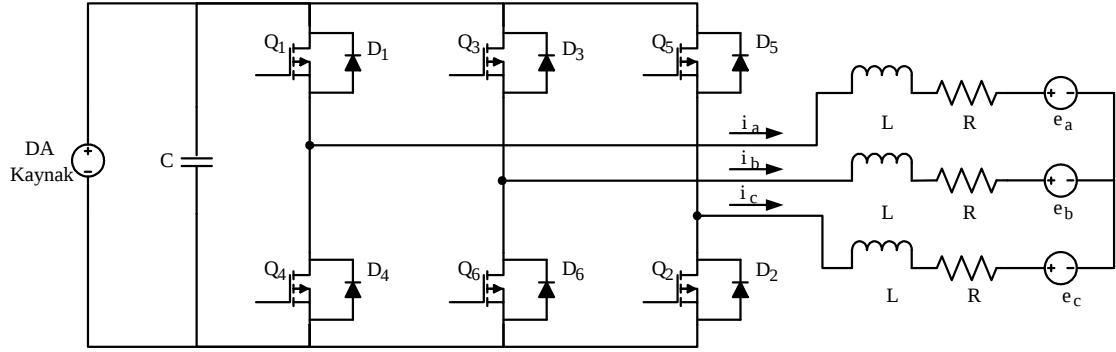
FDAM' ların stator sargılarında klasik indüksiyon motorlarına benzeyen üç faz sargısı bulunmaktadır ve bu sargılar genellikle yıldız olarak bağlanmaktadır. Rotorunda sürekli mıknatıslar bulunmaktadır. Özellikle yüksek hızlarda alan etkili algılayıcılar kullanılarak hız ve akım kontrolü yapılmaktadır. Yüksek hızlarda çalışma özelliği bu motorları uzay uygulamalarında kullanılan moment kontrol jiroskoplarında kullanılabilir hale getirmiştir [54]. Son yıllarda FDAM' ları dayanıklılığı, basit yapısı ve anahtarlama tekniği, yüksek güç yoğunluğu gibi birçok avantajı nedeniyle endüstride oldukça yoğun olarak kullanılmaya başlanmıştır [29]. FDAM' ları endüstride fanlar, su pompaları, elektrikli araçlar, uzay araçları ve ofis donanım araçları gibi birçok alanda kullanılmaktadırlar [25,18].

FDAM' larının sürekli mıknatıslı senkron motorlar ile karşılaştırıldığında en önemli avantajı hız kontrolünün basit konum algılayıcıları ile kolaylıkla yapılabilmesidir. Sürekli mıknatıslı senkron motorlarda ise konum algılayıcıları daha karmaşık yapılı ve yüksek maliyetlidir. Bu önemli avantajının yanında önemli bir dezavantajı vardır. Bu dezavantaj ise motorun üretmiş olduğu momentte dalgalanma meydana gelmektedir. Özellikle yüksek hızlı FDAM' larının düşük olan indüktans değerinden dolayı bu moment dalgalanmaları daha yüksek olmaktadır ve bu önemli bir problemdir [54].

2.3 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Matematiksel Modeli

FDAM' u sürekli mıknatıslı senkron motor sınıfında olup, trapezoidal zıt emk' ya sahiptir. Bu motorlarda akım dalga şekli alan etkili algılayıcılardan gelen bilgi ile belirlenir ve bu bilgi ile aralarında 120° faz farkı olan üç tane akım sinyali üretilir. Klasik doğru akım motorlarında endüvi akımının yön değiştirme işlemi kollektör tarafından sağlanır. FDAM' larına ise akım komütasyonu altı adımlı olarak kontrol edilen evirici yardımı ile gerçekleştirilmektedir. Böylece fırça ve kollektör yapısının dezavantajlarını ortadan kaldıran elektronik anahtarlar ile endüvi akım komütasyonun gerçekleştirildiği fırçasız bir da motoru elde edilmiş olur. Altı adımlı bir evirici ve FDAM Şekil 2.2' de görülmektedir.

Alan etkili algılayıcılar 120° açılı farkı ile üç adet sinyal gönderir. Alan etkili algılayıcılardan gelen bilgiye göre her 60° de motor faz akımlarının yönü belirlenmektedir. Buna göre her an için iki faz sargısı iletimde olacaktır. FDAM' na ait zıt emk' lar, alan etkili algılayıcıların sinyal durumları ve faz akımları Şekil 2.3' de görülmektedir.



Şekil 2.2: Altı adımlı bir evirici ve FDAM

Şekil 2.2’ deki FDAM sürücüsü bazı varsayımlar yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu varsayımlar aşağıdaki gibidir;

- a) Motor doyumunda değildir.
- b) Bütün sargıların dirençleri, öz indüktansları ve ortak indüktansları sabittir ve eşittir.
- c) Güç devresi yarı iletkenleri ve evirici idealdir.
- d) Demir kayıpları ihmal edilmiştir [55].

Bu varsayımlar doğrultusunda oluşturulan FDAM’ unun matematiksel ifadesi Denklem 2.1’ de gösterilmiştir.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_a & 0 & 0 \\ 0 & L_b & 0 \\ 0 & 0 & L_c \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Burada, V_a, V_b, V_c FDAM’ nun faz gerilimleri, R_a, R_b, R_c faz dirençleri, L_a, L_b, L_c faz indüktansları, i_a, i_b, i_c faz akımları ve e_a, e_b, e_c ise faz zıt emk’ larıdır. Buna göre her faz için ayrı ayrı gerilim eşitlikleri Denklem 2.2 ile Denklem 2.4 arasında görüldüğü gibi yazılabilir.

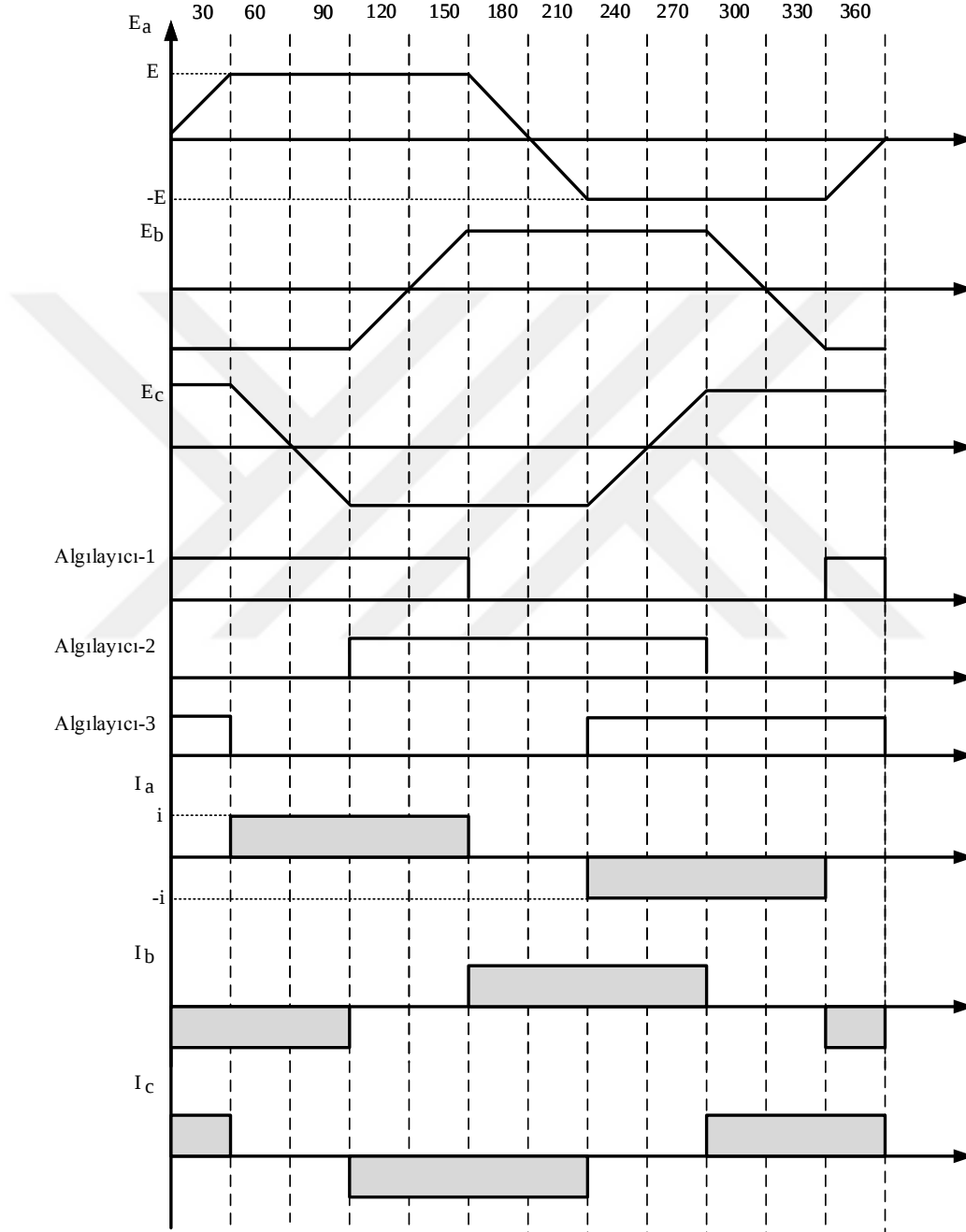
$$V_a = i_a R_a + L_b \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (2.2)$$

$$V_b = i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (2.3)$$

$$V_c = i_c R_c + L_c \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (2.4)$$

Sistemin dengede olduğu düşünülürse faz akımlarının toplamı sıfıra eşit olacaktır.

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (2.5)$$



Şekil 2.3 FDAM' na ait zıt emk' lar, alan etkili algılayıcıların sinyal durumları ve faz akımları

Her an için iki fazın devrede olduğu bilindiğine göre fazlar arası gerilim Denklem 2.6 ile Denklem 2.9 arasında görüldüğü gibi elde edilir.

$$V_{ab} = (i_a R_a + L_b \frac{di_a}{dt} + e_a) - (i_b R_b + L_b \frac{di_b}{dt} + e_b) \quad (2.6)$$

$$V_{ab} = R_{ab}(i_a - i_b) + L_{ab} \frac{d(i_a - i_b)}{dt} + (e_a - e_b) \quad (2.7)$$

$$V_{bc} = R_{bc}(i_b - i_c) + L_{bc} \frac{d(i_b - i_c)}{dt} + (e_b - e_c) \quad (2.8)$$

$$V_{ca} = R_{ca}(i_c - i_a) + L_{ca} \frac{d(i_c - i_a)}{dt} + (e_c - e_a) \quad (2.9)$$

İki faz iletimde olduğundan fazlar arası gerilim DA kaynak gerilimine eşit olacaktır. Ayrıca iki faz akımı aynı anda iletimde iken üçüncü faz akımı sıfır olacaktır [56]. Denklem 2.5' teki eşitlikten faydalanılarak faz akımları ve faz gerilimleri için elde edilen yeni eşitlikler Denklem 2.10 ile Denklem 2.12 arasında görülmektedir.

$$i_a = -i_b = i_s \text{ ve } i_c = 0 \quad (2.10)$$

$$e_a = -e_b \text{ ve } e_a = \psi_p \omega_m \quad (2.11)$$

$$V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = V_{dc} \quad (2.12)$$

Elde edilen faz akımları ve faz gerilimlerine ait olan eşitlikler fazlar arası gerilimlere ait olan eşitlikte yerine yazılırsa her an için iki fazın iletimde olduğu FDAM' nun matematiksel ifadesi elde edilir. Bu durum Denklem 2.13' de görülmektedir.

$$V_{dc} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + k_e \omega_m \quad (2.13)$$

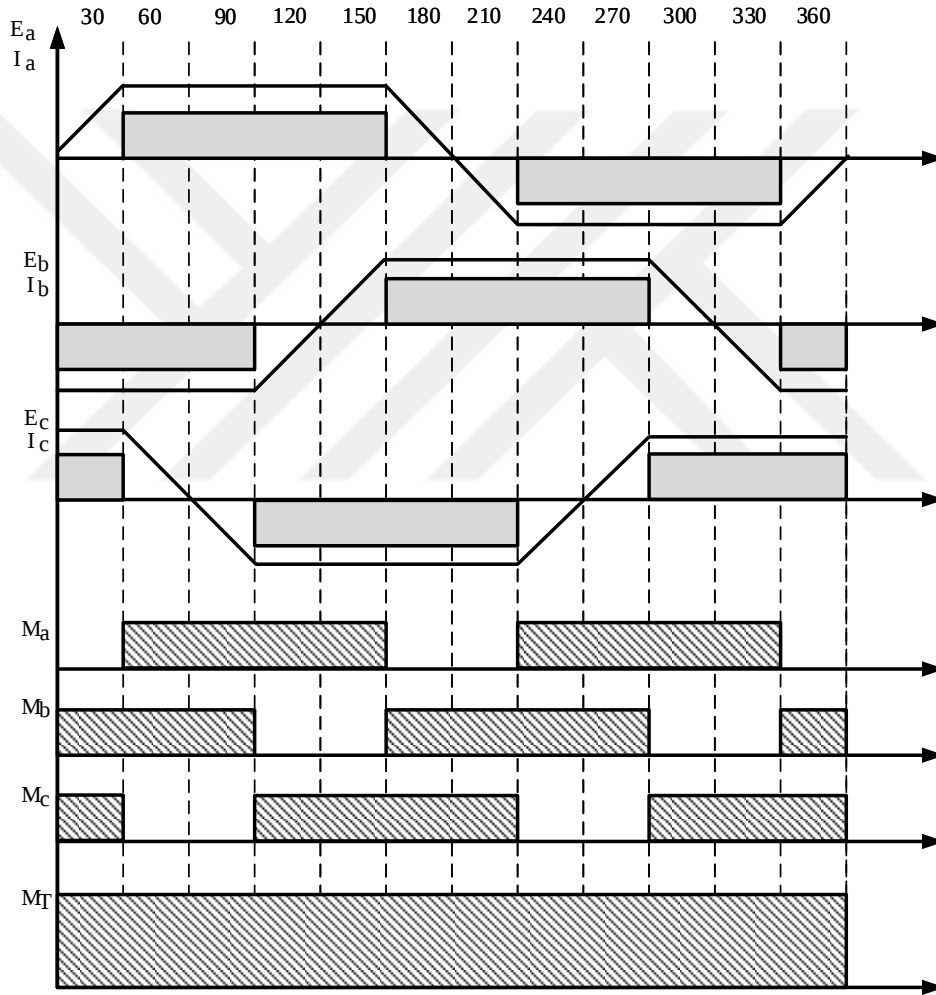
$$k_e = 2\psi_p \quad (2.14)$$

Burada R_s iki fazın toplam sargı direnci, L_s iki fazın toplam sargı indüktansı, ω_m motorun açısal hızı, ψ_p bir fazın kaçak akısı ve i_s da hattının akımı olarak tanımlanır. Denklem 2.13' te görüldüğü gibi elde edilen son denklem klasik doğru akım motorunun denkleminde oldukça benzerdir.

$$V_{dc} = R_s i_s + L_s \frac{di_s}{dt} + E_z \quad (2.15)$$

Buna göre Denklem 2.14’ de zıt emk, Denklem 2.15’ teki gibi ifade edilir ve FDAM’ nun gerilim denklemi son halini alır.

2.4 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Moment İfadesinin Elde Edilmesi



Şekil 2.4 FDAM’ nun zıt emk’ları, faz akımları ve üretilen moment

FDAM’ unda her iki fazın iletimde olduğu anahtarlama yönteminde oluşacak güç denklemi 2.16’ da görüldüğü gibi motorun her fazının zıt emk’ ları ile akımlarının çarpımlarının toplamına eşit olacaktır.

$$P_m = e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c \quad (2.16)$$

Şekil 2.4' de FDAM' nun zıt emk'ları, faz akımları ve üretilen moment görülmektedir. Denklem 2.10 ve Denklem 2.11' den faydalanılarak güç ifadesi Denklem 2.17' deki gibi yazılabilir.

$$P_m = 2\psi_p \omega_m i_s \quad (2.17)$$

Burada $2\psi_p$ Denklem 2.14' de k_e olarak tanımlanmıştı. Buna göre endüvide üretilen güç ifadesi Denklem 2.18' deki gibi elde edilir.

$$P_m = E_z i_s \quad (2.18)$$

Bir elektrik makinasında çıkışta elde edilen moment güç ilişkisi Denklem 2.19' daki gibidir.

$$P_m = T_e \omega_m \quad (2.19)$$

Moment ifadesinde güç ifadesi yerine koyulursa Denklem 2.20 ve Denklem 2.21 elde edilir.

$$2\psi_p \omega_m i_s = T_e \omega_m \quad (2.20)$$

$$T_e = k_t i_s, \quad k_e = k_t = k \quad (2.21)$$

Bir elektrik motorunda üretilen güç motor mekanik kayıplarını, yükün ivmelenmesi için gereken gücü ve yük momentinden kaynaklanan gücü karşılamak zorundadır. Buna göre moment eşitliği Denklem 2.22' deki gibi ifade edilir.

$$T_e = T_L + J \frac{d(\omega_m)}{dt} + B(\omega_m) \quad (2.22)$$

Burada T_e FDAM' unun ürettiği elektriksel momenttir. T_L yük momenti, J milin eylemsizlik momenti ve B ise sürtünme katsayısıdır.

2.5 Fırçasız Doğru Akım Motorunun Kontrolü

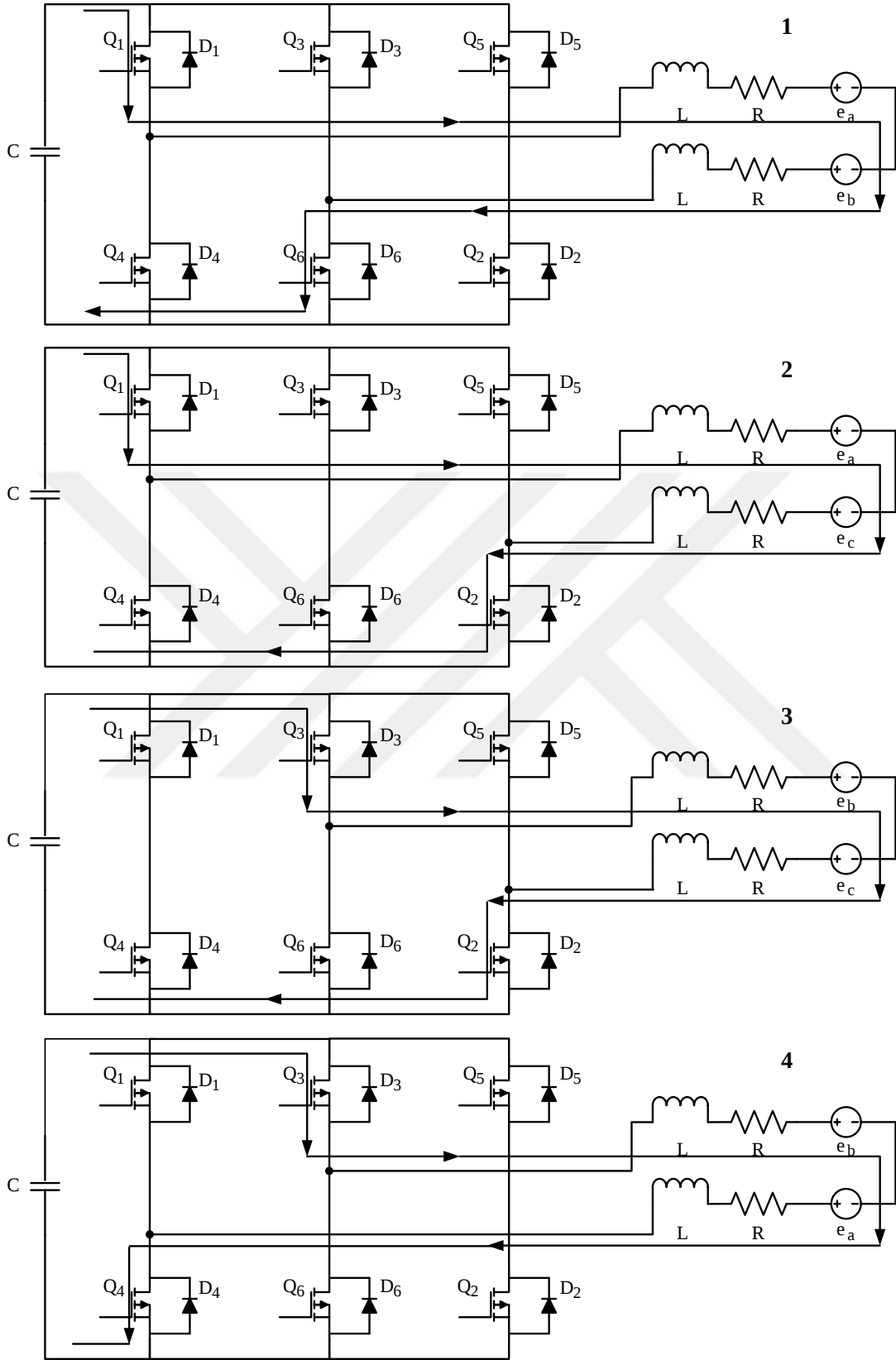
FDAM' lar geri beslemeli olarak çalışırlar. Akım komütasyonunun sağlandığı eviricideki anahtarların anahtarlama zamanlarının tespiti, hız ve konum bilgisi için çeşitli algılayıcılar kullanılmaktadır. Bu algılayıcılar optik kodlayıcılar, alan etkili algılayıcılar ve açılı algılayıcılarıdır. FDAM' larında kullanılan bu algılayıcılar arasında en çok tercih edileni alan etkili algılayıcılarıdır. Alan etkili algılayıcılar basit yapısı, anahtarlama elemanları için dolaylı olarak akım dalga şeklini üretebilmesi ve düşük maliyeti nedeniyle oldukça fazla tercih edilmektedir. Bu avantajlarının dışında düşük çözünürlük, fiziksel olarak motorun içine yerleştirilme zorunluluğu ve sıcaklık gibi dış etkilere etkilenmesi bu algılayıcıların dezavantajlarındandır.

FDAM' nun içerisine konumlandırılmış üç adet alan etkili algılayıcı mevcuttur. Bu alan etkili algılayıcılar rotorun konumuna göre her 60° yeni bir konum bilgisi iletir. Rotorun konumuna göre dışarıya iletilen üç adet konum bilgisi işaretinin arasında 120° faz farkı bulunmaktadır. Alan etkili algılayıcıların FDAM' nun konumuna göre ürettiği sinyaller ve bu sinyallerin durumuna göre eviricinin anahtarlama durumları Tablo 2.1' görülmektedir.

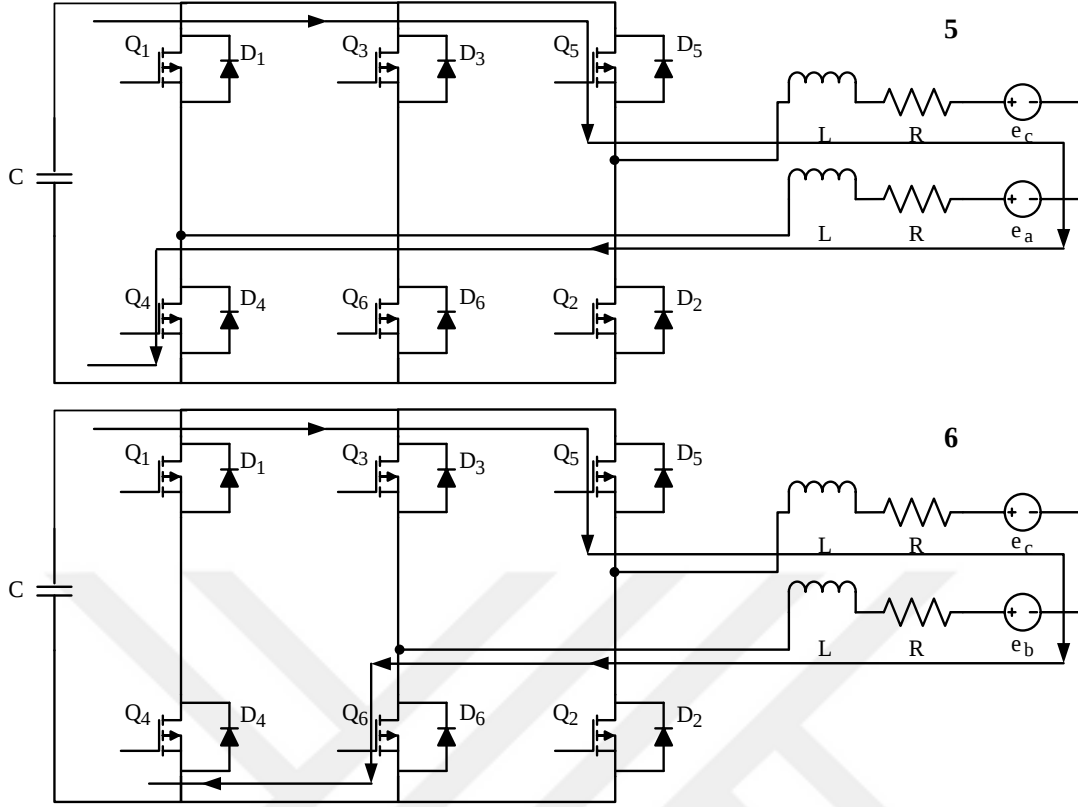
Tablo 2.1 FDAM' nun konumuna göre ürettiği sinyaller ve eviricinin anahtarlama durumları

Alan Alg. A	Alan Alg. B	Alan Alg. C	EMF A	EMF B	EMF C	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	-1	0	1	0	0	0	0	1
1	1	0	1	0	-1	1	1	0	0	0	0
0	1	0	0	1	-1	0	1	1	0	0	0
0	1	1	-1	1	0	0	0	1	1	0	0
0	0	1	-1	0	1	0	0	0	1	1	0
1	0	1	0	-1	1	0	0	0	0	1	1
1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

İki faz iletim modunda çalışan bir FDAM' nun her 60° de yeni bir konum bilgisi ile her periyotta altı defa anahtarlar konum değiştirecektir. Anahtarların bu konum değişimi sonucunda sadece iki faz iletimde kalacaktır.



Şekil 2.5 Anahtarların altı değişik iletim durumu

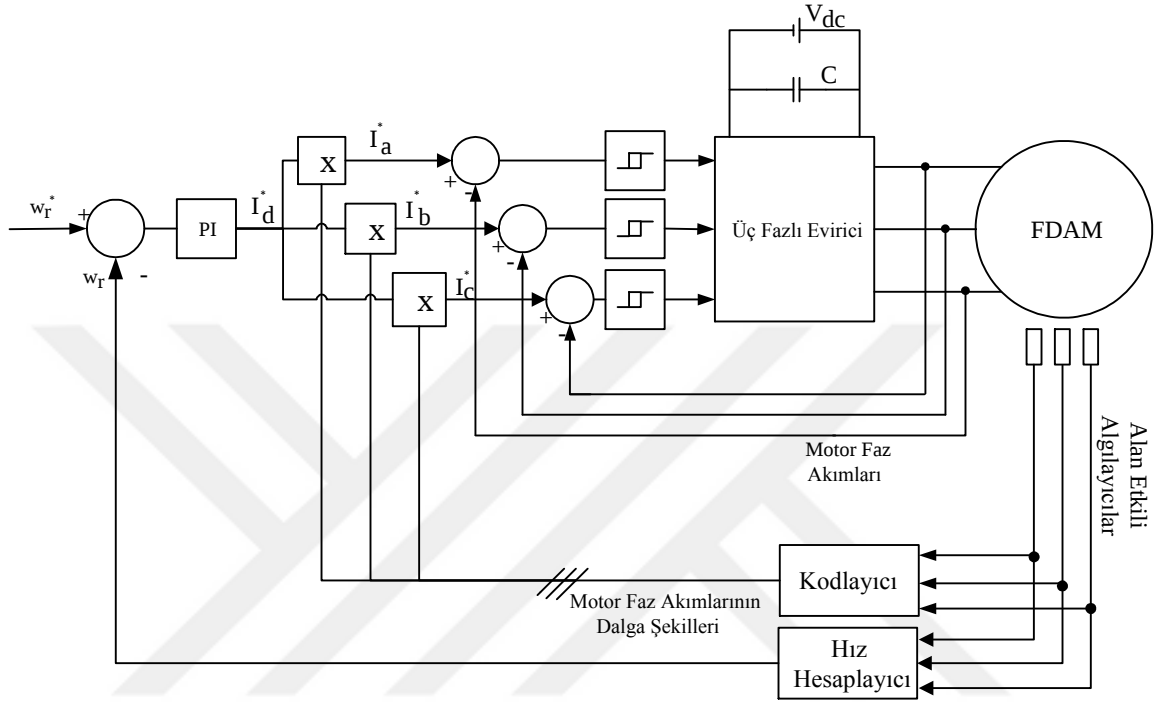


Şekil 2.5 'ün devamı

Şekil 2.5' te anahtarların altı değişik iletim durumu görülmektedir. Dikkat edilecek olunursa bir anahtarlama durumundan diğerine geçişte bir faz sargısı iletimde kalır iken diğer faz sargısı kesime geçer ve onun yerine kesimde olan faz sargısı iletime girer. Böylelikle her an için sadece iki faz sargısı iletimde kalmış olur. Sadece akım komütasyonu sırasında çok kısa bir an üç fazda iletimde kalabilir. Bu durumda ise moment dalgalanmaları meydana gelir. Faz akımlarının yön değiştirme anında oluşan moment dalgalanmalarının azaltılması için birçok çalışma yapılmıştır.

Elektrik motorlarında hız kontrolü, akım kontrolü ile hız ve akımın aynı anda kontrol edildiği yöntemler bulunmaktadır. FDAM' unda en çok tercih edilen yöntem hız ve akımın kontrol edildiği yöntemdir. FDAM' unda motor akımının kontrolü iki şekilde gerçekleştirilir. Birinci yöntem akımın referans akım etrafında oluşturulan bant içerisinde anahtarlama ile elde edilen histerezis akım kontrol yöntemidir. İkinci yöntemde ise bir kontrolör tarafından üretilen referans akım taşıyıcı bir üçgen sinyal ile karşılaştırılarak üretilen darbe genişlik modülasyonu yöntemidir. Her iki yöntemde faz akımlarının her 60° de bir yön değiştirdiği dikkate alınarak referans akım üretilir. Her 60° de yön değiştiren üç fazlı akım dalgasının şekli alan etkili algılayıcılarından elde edilir. Elde edilen akım dalga

şekline göre hangi iki anahtarın devrede olacağı belirlenmektedir. Histerezis bant yönteminde belirli bir anahtarlama frekansı bulunmamaktadır. Bu nedenle anahtarlama kayıpları hesaplanamaz ve elektromanyetik gürültüyü filtre etmek oldukça zordur.



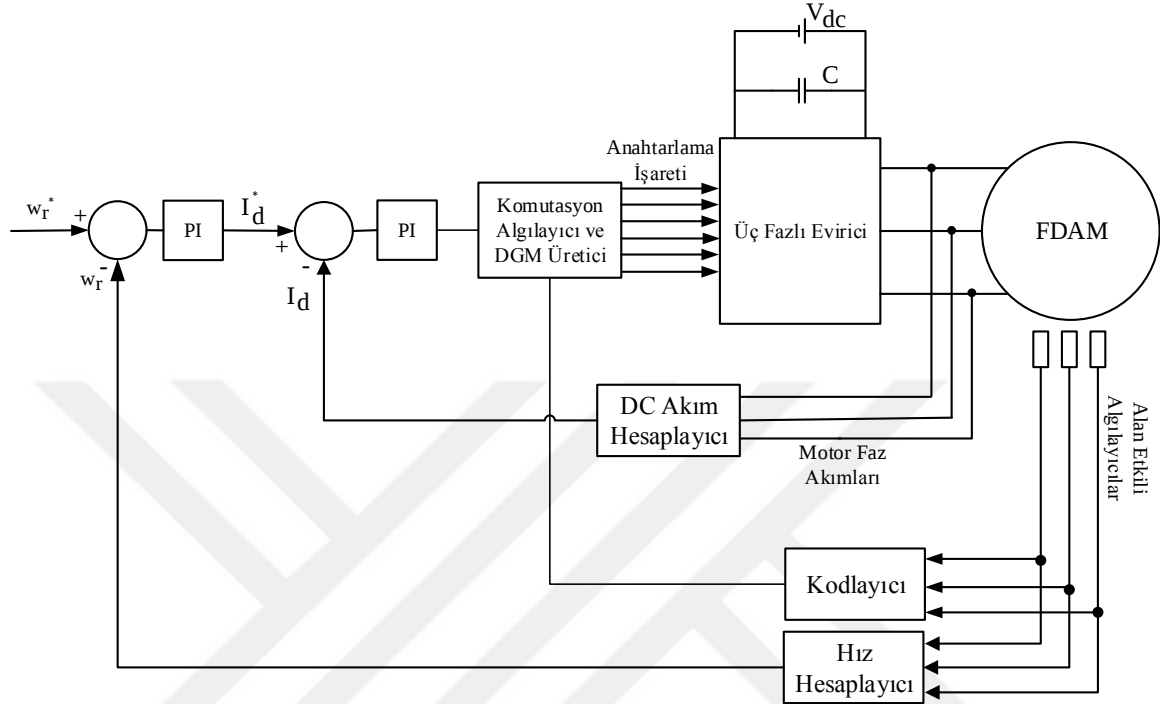
Şekil 2.6 Histerezis akım kontrollü hız kontrol yöntemi

Bu yöntemde en önemli kısım gerçek akımın referans akımdan büyük mü yoksa küçük mü olduğuna bakılmasıdır. Şekil 2.6’ da histerezis akım kontrollü hız kontrol yöntemi görülmektedir.

Darbe genişlik modülasyonu yönteminde anahtarlama frekansı taşıyıcı sinyalin frekansı ile belirlenir. Bu yöntemde elektromanyetik gürültüyü filtrelemek daha kolaydır ve anahtarlama kayıplarını tahmin etmek mümkündür. Şekil 2.7’ de Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) ile hız kontrol yöntemi görülmektedir.

Histerezis akım kontrol yöntemi ve darbe genişlik modülasyonu yöntemi pozisyon algılayıcılarından gelen bilgiler doğrultusunda işlem yaparak çalışan algoritmalara sahiptir. Bu yöntemlerin dışında algılayıcısız kontrol yöntemleri de bulunmaktadır. Algılayıcısız kontrol yöntemlerinin geliştirilmesinin temel nedenleri algılayıcılardan kaynaklanan maliyetin düşürülmesi, alan etkili algılayıcıların yerleşim hatalarından kaynaklanan problemlerin engellenmeye çalışılmasıdır. Bunun için birçok kontrol yöntemi

geliştirilmiştir. Bütün yöntemlerin avantaj ve dezavantajlarını saymak mümkündür. Algılayıcısız kontrol çalışmaları günümüzde yoğun bir şekilde devam etmektedir.



Şekil 2.7 Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) ile hız kontrol yöntemi

2.6 Sonuç

FDAM' ları yüksek verimleri ve klasik doğru akım motorlarında kullanılan fırça-kollektör yapısını dezavantajlarını ortadan kaldıran fiziksel yapısı nedeni ile son yıllarda endüstride kullanımı oldukça artan elektrik motorlarıdır. Basit anahtarlama yapıları ve yüksek hızlarda çalışabilme özelliği ile son yıllarda uzay uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır.

Uzay uygulamalarında kullanılan volanlı enerji depolama birimlerinde yüksek hızlarda çalışabilme kabiliyeti, toplam kütleyi azaltmak için gereklidir. Yüksek hızlarda kullanılan kontrolörlerin basit olması işlemcilerin işlem yapma kapasitelerinin aşılmaması ve sistem güvenilirliği için çok önemlidir. Bu noktada FDAM' larında iki faz iletim modu anahtarlama tekniği ile histerezis ve darbe genişlik modülasyonu kullanılarak diğer elektrik motorlarına göre daha basit algoritmalar ile akım kontrolünün gerçekleştirilebilmesi bu motorların uzay uygulamalarında kullanılmasının yaygınlaşmasına neden olmuştur. İki fazlı anahtarlama

tekniki fırçasız doğru akım motorunun sargılarına uygulandığında elde edilen matematiksel eşitlikler sonucunda, FDAM' nun gerilim ve moment eşitliklerinin doğru akım motorları ile olan benzerliği gösterilmiştir.

Birçok avantajı olmasının rağmen bu motorlarda önemli bir dezavantaj bulunmaktadır. Bu dezavantaj motor faz akımlarının yön değiştirdikleri anda meydana gelen moment dalgalanmalarıdır. Bu moment dalgalanmalarının düzeltilmesi için birçok çalışma yapılmaktadır. Bu çalışmalarda başarılı sonuçlar elde edilmiştir fakat uzay uygulamalarında kullanılabilir hale gelebilmesi için algoritmaların ve hesaplamaların daha basit hale getirilmesi gerekmektedir.



3. UYDU GÜÇ SİSTEMİ

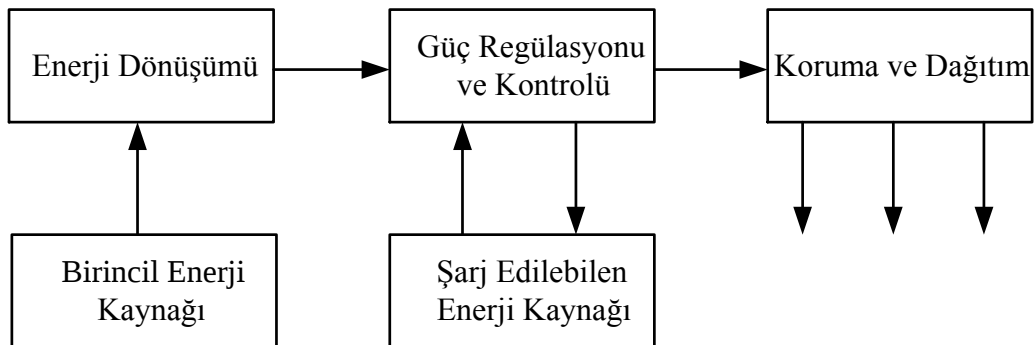
Volanlı mekanik enerji depolama birimi uydu güç sistemlerinde ve uydu yönelim sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılmaktadır. Fakat bu iki sistemin kontrolü tamamen birbirinden bağımsızdır.

3.1 Uydu Güç Sistemi Kavramı

Uyduların enerjisi uzay boşluğunda güneş panellerinden sağlanmaktadır. Uydu yörüngesinde hareketini devam ettirirken yörüngeyi belirli bir kısmında güneş panelleri karanlık bölgede kalır ve uydu için enerji sağlayamaz. Uydu karanlık bölgede iken enerjisi yeniden şarj edilebilen bataryalar ile sağlanır. Güneş panelleri uydu aydınlık bölgeye geçtiği zaman hem uydunun ihtiyacı olan enerjiyi sağlar hem de bataryaları şarj eder.

Uydular dünya etrafındaki turunu yaklaşık bir buçuk saatte tamamlar. Bu sürenin bir saati güneşli bölgede iken yaklaşık yarım saati ise karanlık bölgededir. Aktif olarak kullanılmış olan BILSAT-I uydusu yörüngesini 97,7 dakikada tamamlar ve bunun 32 dakikası karanlık bölgede geçer [57]. Belirlenen bu süreler uydu güç sisteminin tasarımında kullanılacaktır. Sistemin enerji dengesi bu sürelerle bağlıdır.

Uydu güç sistemlerinde kullanılan güneş panelleri güneş enerjisinin seviyesine göre gerilim üretir ve bu üretilen gerilim her zaman sabit değildir. Bu nedenle üretilen bu gerilimi sabit tutmak için gerilim düzenleyici devreler de kullanılmaktadır. Şekil 3.1’ de uydu güç sistemine ait prensip şeması görülmektedir.

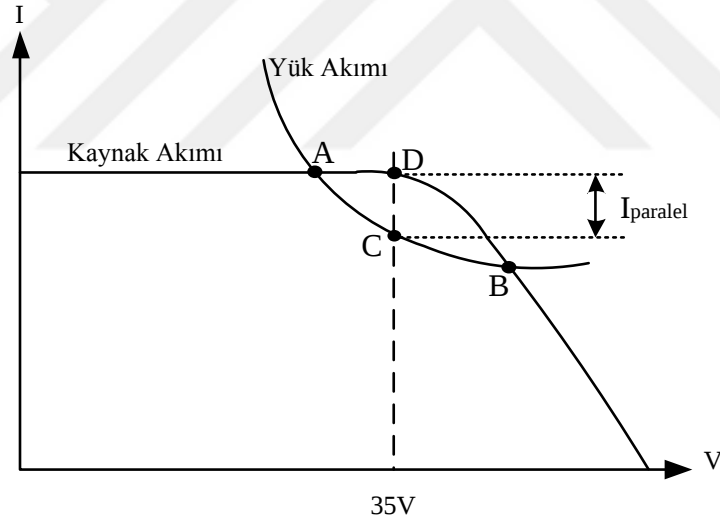


Şekil 3.1 Uydu güç sistemine ait prensip şeması

3.2 Uydu Güç Sistemi ve Güneş Panelleri

Güneş panelleri endüstride enerji sağlamada ve uydu enerji sistemlerinde kullanılmaktadır. Bu panellerin yaklaşık olarak 15-20 yıl civarında ömürleri vardır ve fotovoltaiik hücrelerin istenilen gerilim ve istenilen akım düzeyine göre seri ve paralel bağlanmaları ile üretilirler.

Uydu güç düzenleme sistemi şarj ve deşarj kontrol birimi, şarj ve deşarj için dönüştürücüler, paralel güç harcama birimi ve gerilim hata kontrol biriminden oluşmaktadır. Bunların içerisinde paralel güç harcama birimi her ne kadar gereksiz gibi görünmekte ise de aslında gerekli bir birimdir. Bunu Şekil 3.2’ deki güneş paneli ile sabit bir yük ve bunların I-V karakteristikleri incelenerek açıklanabilir. Güneş panelleri nominal çalışma koşullarında sabit bir akım kaynağı gibi davranır. Nominal koşulların dışına çıkıldığında ise ürettiği akımda düşme meydana gelir.

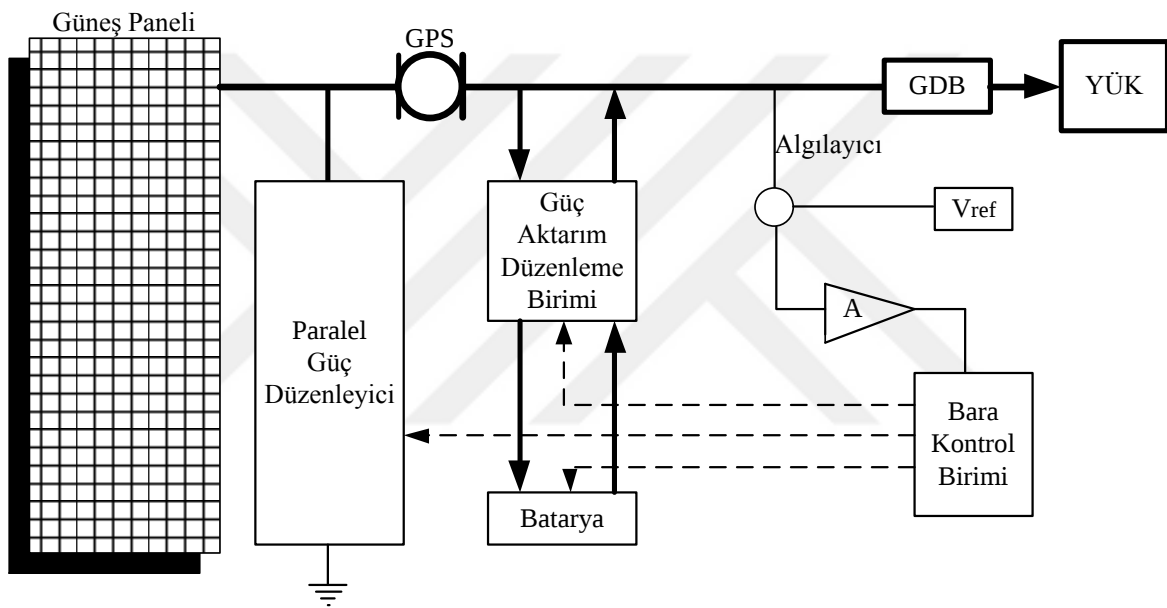


Şekil 3.2 Güneş ışığı boyunca sistemin karalı çalışma noktaları ve paralel kontrol

Grafikte görüldüğü gibi yük akımı ve kaynak akımı eğrileri A ve B noktalarında kesişmiştir. A noktasında sistem kararlı olarak çalışamaz çünkü yük akımı eğrisinin eğimi kaynak akımı eğrisinin eğiminden oldukça düşüktür. B noktasındaki eğimler incelendiğinde ise B noktasının doğal olarak kararlı olduğu görülmektedir. B noktasında sistem paralel kontrol olmadan çalışabilir. Güneş panelinin çıkış gerilimi 35V ise paralel güç kontrol biriminin akımı C ve D noktaları arasında kalan akımı karşılayacaktır. Böylece B noktasında

alışan sistemi C noktasına getirecektir. Böylece ıkış gerilimi sabitlenmiş olacaktır. Eğer paralel g kontrol birimi olamasaydı sistem B noktasında daha düşük bir gte çalışmak zorunda kalır [2].

şekil 3.3' te gerilim düzenleyicisi gerçekleştirilmiş uydu güç sistemi görülmektedir. Bu g sisteminde güneş ışığı geldiğinde ve güneş ışığı olmadığında gerilim regülasyonu bulunmaktadır. Güneş ışığı geldiğinde yani aydınlık bölgede paralel g kontrol birimi ile ve karanlık bölgede iken bara kontrol birimi tarafından yk üzerindeki gerilim sabit tutulmaktadır.



şekil 3.3 Gerilim düzenleyicisi gerçekleştirilmiş uydu güç sistemi

GPS ile gösterilen kısım güneş paneli sürücüsüdür. Güneş paneli aydınlık bölgede iken elektrik motoruna ve diğer sisteme çeşitli yöntemler ile en yüksek gücü aktarmak için kullanılır. GDB ile gösterilen kısımda ise gücün sistemin gerekli birimlerine dağıtılması gerçekleştirilir. Güç aktarım ve düzenleme biriminde Bataryanın şarj ve deşarj durumları için gerekli olan g dönüştürücüleri bulunmaktadır.

3.3 Uydu Güç Sistemi ve Bataryalar

Uydu güç sisteminde bataryalar şarj edilebilen elektrokimyasal hücrelerin istenilen akım ve gerilim değerlerine göre seri veya paralel bağlanmaları ile elde edilirler. Elektrokimyasal

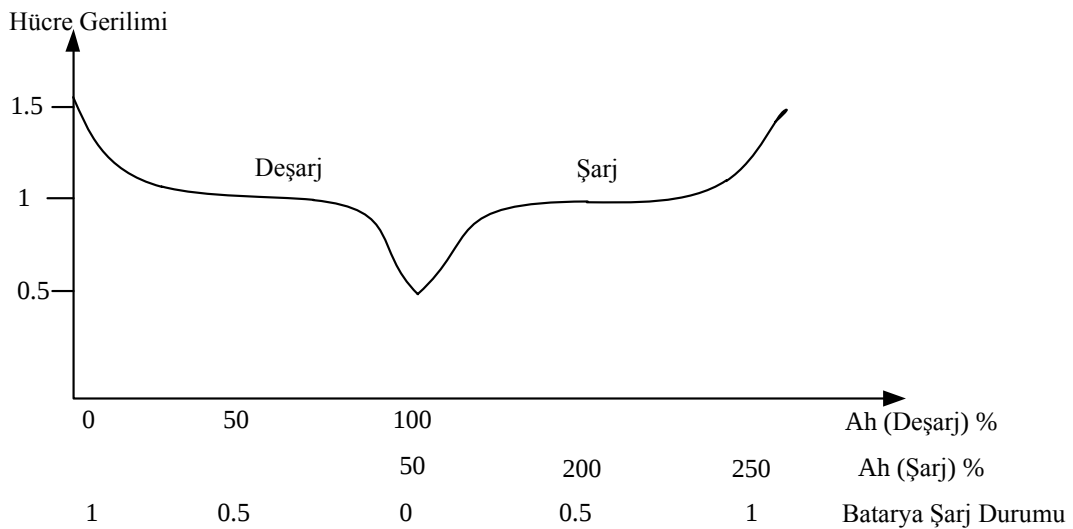
enerji depolayan hücreler düşük gerilim seviyelerinde üretilirler. Bu gerilim değerleri genel olarak tam şarj durumunda 1.5-3.5V arasındadır. Hücrenin kapasitesi fiziksel büyüklüğüne bağlıdır. Hücrenin oda sıcaklığında tam şarj geriliminin 2/3' ne kadar şarj olması anındaki şarj durumu Amper-saat (Ah) olarak tanımlanmıştır. Bataryanın tam şarj durumunda yüke aktaracağı güç ise bu şartlar altında watt-saat (Wh) olarak tanımlanmıştır. Batarya deşarj derinliği ve batarya şarj durumu batarya kullanımını etkileyen iki önemli faktördür.

$$B\dot{S}D = \frac{\text{Bataryada kalan Ah kapasitesi}}{\text{Bataryanın nominal Ah kapasitesi}} \quad (3.1)$$

$$BDD = \frac{\text{Tam dolu bataryanın Ah kapasitesi}}{\text{Bataryanın nominal Ah kapasitesi}} \quad (3.2)$$

$$BDD = 1 - B\dot{S}D \quad (3.3)$$

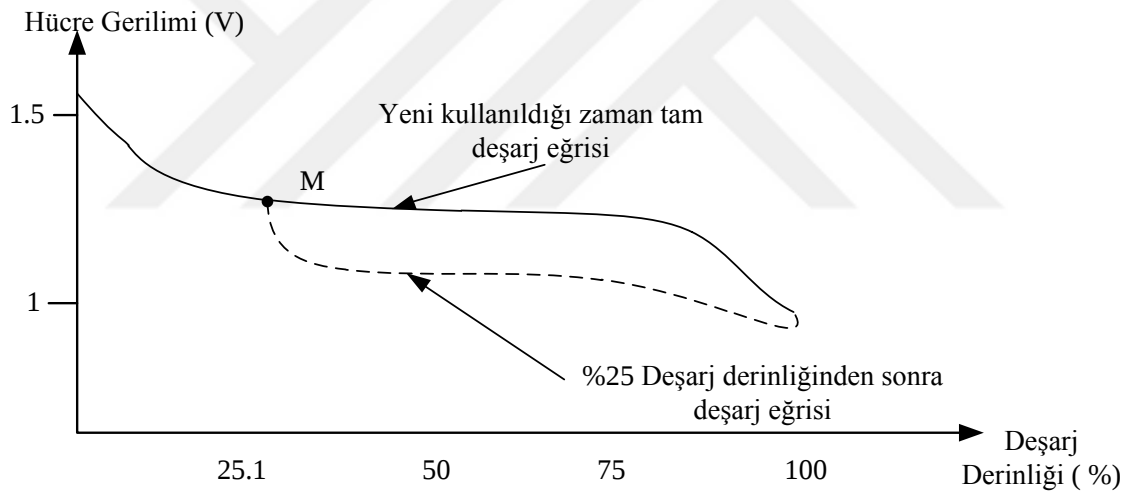
Bataryanın uç gerilimi ilk olarak bataryanın şarj durumuna ve ikinci olarak çalışma sıcaklığına bağlıdır. Bataryanın şarjı pozitif ve negatif plakalar arasında depolanan amper-saat cinsinden ölçülür. Batarya tamamen şarj olmuş ise gerilim en yüksek seviyededir ve tamamen deşarj olmuşsa gerilim en düşük seviyede olacaktır. Normal batarya çalışma koşullarında şarj deşarj durumuna göre bataryanın gerilimi Şekil 3.4' de gösterilmiştir. Batarya bir periyot boyunca önce deşarj olmuş ve daha sonra şarj olmuştur. Periyotun devamında batarya tekrar deşarj olacak ve bu döngü sürekli devam edecektir. Batarya gerilim değişim değerleri Nikel-Cadmium ve Nikel-Hidrojen bataryalar için geçerlidir.



Şekil 3.4 Bir periyot için batarya şarj-deşarj durumu ve hücre gerilimi

Uydu güç sistemlerinde ve endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan batarya çeşitleri Nickel-Cadmium (NiCd), Nikel-Hidrojen (NiH₂) ve Lithium-ion (Li-ion) dur. Bu batarya çeşitleri dışında Lithium-polymer (Li-poly) ve Nickel-metal-hydrid (Ni-MH) bataryalarda birçok uygulamada kullanılmaktadır. Bu bataryalar birim kütle başına depolanabilen enerji miktarı, birim hacimde depolanabilen enerji miktarı ve şarjdeşarj ömrü gibi özellikleri ile kendi aralarında karşılaştırılırlar.

NiCd bataryalar 1980'lerin ortalarına kadar neredeyse bütün uydulara kullanılmaktaydı. Ancak teknolojik gelişmelere paralel olarak, düşük enerji yoğunluğu, sıcaklık hassasiyeti ve kısa şarjdeşarj ömrü nedeniyle yerini daha gelişmiş bataryalara bırakmıştır. Bu bataryaların en önemli dezavantajı ise hafıza etkisidir. Bu etki nedeni ile daha önce yapılan şarjdeşarj sayısı bataryanındeşarj eğrisini değiştirir ve bu istenmeyen bir durumdur. Şekil 3.5' te NiCd bataryada hafıza etkisi nedeniyle oluşandeşarj eğrisi görülmektedir.



Şekil 3.5 NiCd bataryada hafıza etkisi nedeniyle oluşandeşarj eğrisi

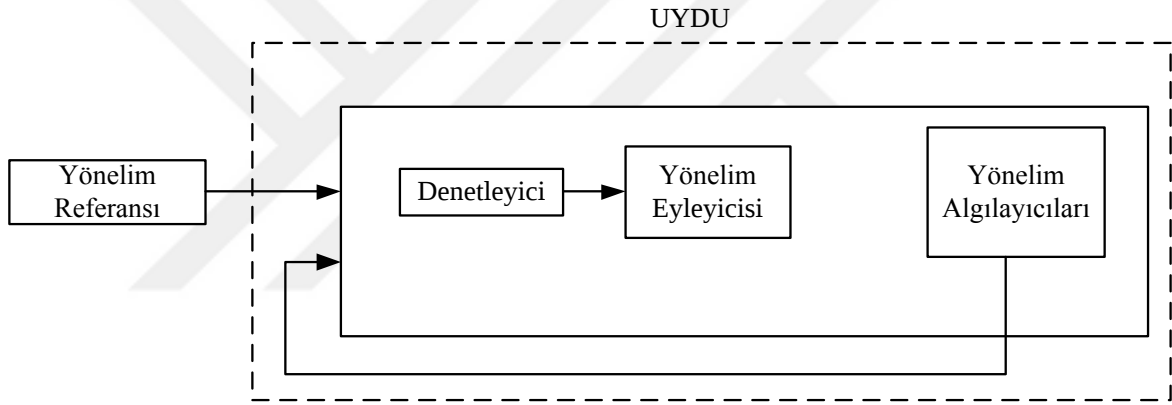
NiH₂ bataryalar son 20 yıl boyunca uydularda oldukça fazla kullanım alanı bulmuştur. Bu bataryalarda aşırı şarj ve aşırıdeşarj durumlarında kötü sonuçlar oluşabilir ayrıca düşük enerji yoğunluğu, taşıma ve güvenlik problemleri ve yüksek şarj kayıpları dezavantajları arasında gösterilebilir.

Li-ion bataryalar son yıllarda geliştirilmiş olup enerji yoğunluğu NiCd bataryalara göre daha yüksektir. Bu bataryalar daha çok dizüstü bilgisayarlar, kameralar ve diğer benzeri donanımlarda kullanılırlar. Yaşam ömürleri kısadır fakat şarj verimleri oldukça yüksektir.

Ayrıca şarj esnasında aşırı şarjdan korumak için her batarya hücresi ayrı koruma elemanlarına ve devrelerine ihtiyaç gösterir. Düşük sıcaklıklarda yüksek direnç değeri göstermesi ise uzay uygulamaları için diğer bir dezavantajdır. Li-ion bataryaların bu dezavantajları nedeni ile yakın zamanda uzay uygulamalarında kullanılması öngörülmemektedir.

3.4 Uydu Yönelim Sistemi

Uydu yönelim sisteminin görevi uydunun dünya üzerinde belirli bir yörüngede döndürmektir. Özellikle gözetleme uydularında bu görev çok önemlidir.

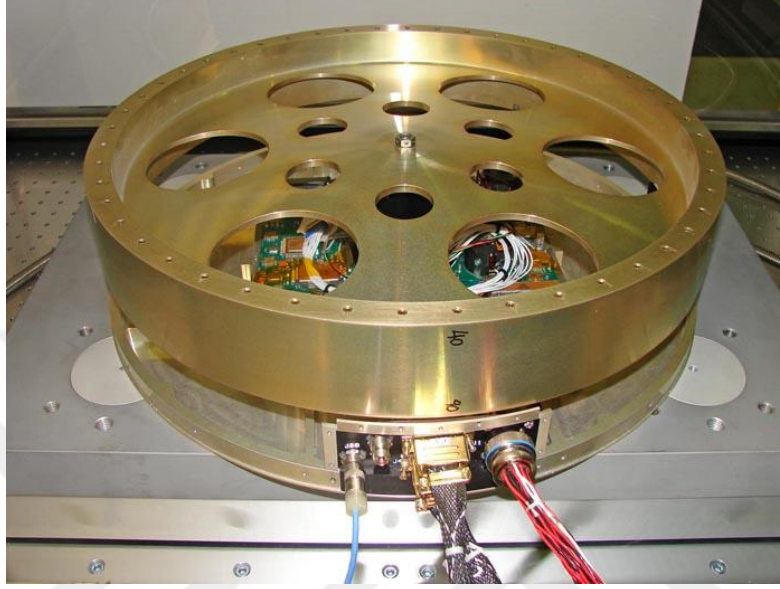


Şekil 3.6 Uydu yönelim sisteminin temel yapısı

Bu görevi yerine getiren uydu yönelim sisteminin temel yapısı Şekil 3.6' da görülmektedir. Yönelim eyleyiciler ise gerekli olan yönelimin sağlanması için gerekli olan momentin üretilmesini sağlamaktadır. En önemli yönelim eyleyicileri manyetik moment çubukları, tepki tekerlekleri ve moment kontrol jiroskoplarıdır.

Moment çubukları, yerin manyetik alanını kullanarak moment üreten donanımlardır. Moment üretme kabiliyetleri yüksek değildir ve kaba yönelimde kullanılmaktadır. Tepki tekerlekleri ve moment kontrol jiroskopları ise sırayla momentum takas ve jiroskobik moment prensiplerine göre çalışan donanımlardır. Hassas yönelimde kullanılan bu donanımlar, momentum depolamak için dönen bir volana sahiptirler.

Tepki tekerlekleri, değişken volan hızına sahip eyleyicilerdir. Yönelim ihtiyacı olduğu durumlarda, volan hızı değiştirilerek momentumunun değişmesi sağlanır. şekil 3.7’ de uydu yönelim sisteminde kullanılan bir tepki tekerleği görölmektedir.



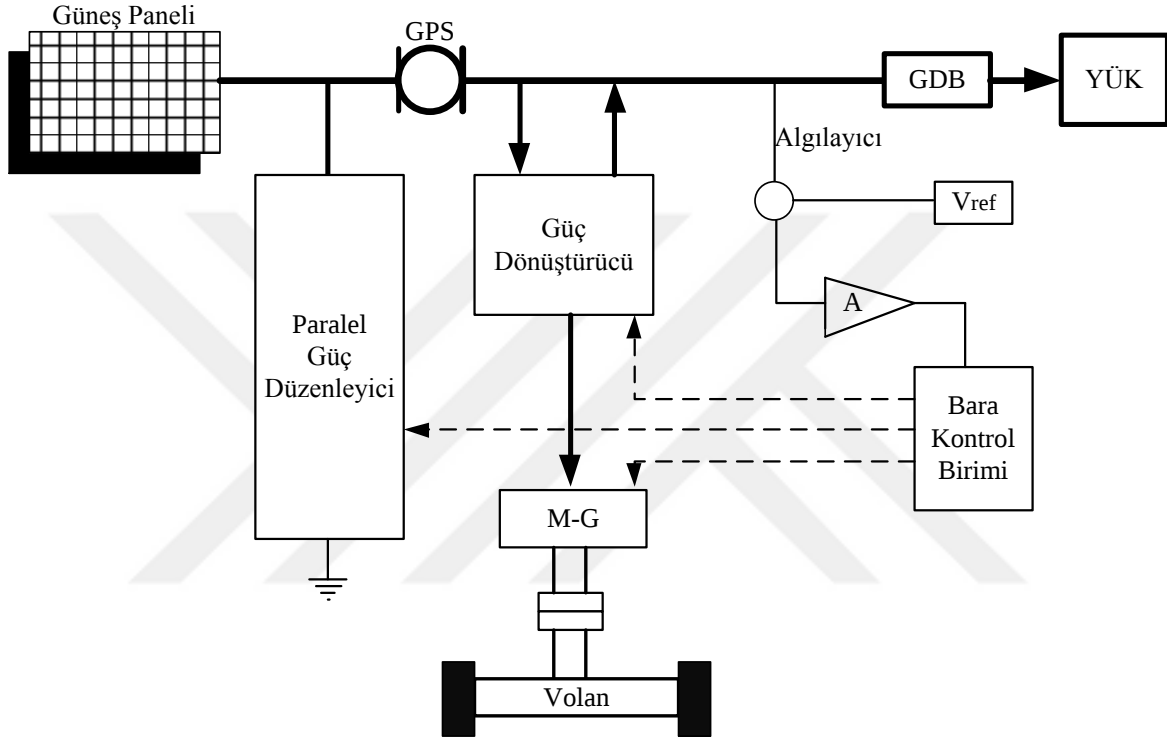
şekil 3.7 Uydu yönelim sisteminde kullanılan bir tepki tekerleği

Moment kontrol jiroskopları ise tepki tekerleklerine göre daha karmaşık ve tork üretme kabiliyeti daha yüksek ekipmanlardır. Ekipman, yönelim ihtiyacına bağlı olarak oluşturduğu jirokobik momenti kullanarak uydu yönelimini sağlamaktadır. Bunun için açısıl momentumun depolandığı volanın, dik olan başka bir eksen (şaft ekseni) döndürölmesi gerekmektedir [58].

3.5 Volanlı Enerji Depolama Birimi

Volanlı enerji depolama birimi birçok avantajından dolayı uydu yönelim sistemlerinde kullanılmaktadır. Volanlı enerji depolama biriminin temel çalışma mantığı yüksek eylemsizlik momentine sahip olan volanın belirlenen bir hızda döndürölerek volan üzerinde kinetik enerji depolanmasına dayanır. Uydu yörölgesinde hareketini devam ettirirken aydınlık bölgede güneş panelleri uydunun enerji ihtiyacını karşılarken aynı zamanda volanın hareketini sağlar. Önceden hesaplanmış hız değerine belirlenen süre sonunda geldiğinde

uyduda artık karanlık bölgeye geçecektir. Karanlık bölgede enerjisi kesilen motor volanın yüksek ataleti ile dönmesine devam etmektedir. Bu durumda makina generatör şeklinde çalışmasına devam ederek uydunun yönelimi ve diğer görevlerini yerine getirebilmesi için gerekli olan gücü üretir ve bu gücü dönüştürücü aracılığı ile uyduya aktarır. Volanlı enerji depolama birimi ile beraber uydu güç sistemi Şekil 3.8’ de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Volanlı enerji depolama birimi ile beraber uydu güç sistemi

Şekil 3.8’ deki güç sistemi incelendiğinde mekanik bataryanın elektrokimyasal bataryanın yerini aldığı görülmektedir. Ayrıca güç kontrol birimi yerine güç dönüştürücü birimi kullanılmıştır. İki yönde güç akışına izin veren güç dönüştürücüleri üzerine oldukça fazla çalışma yapılmıştır. Sistemdeki en önemli kısımlardan biri motor ve generatör modu arasında iki yönde güç akışını sağlayan bu güç dönüştürücü kısmıdır.

Bara kontrol birimi çalışma moduna göre dönüştürücülerin hangi durumda çalışacağını belirlemektedir. Eğer motor modunda çalışacaksa alçaltıcı dönüştürücü, generatör modunda çalışacaksa yükseltici dönüştürücü modunda çalışması sağlanmaktadır. Ayrıca bara gerilimi ölçülerek bara geriliminin sabit kalmasını sağlayan kontrol sistemi de bara kontrol birimi içerisinde bulunmaktadır.

Volanlı enerji depolama sisteminin verimi yaklaşık %85-%90 civarında iken elektrokimyasal bataryaların verimi %70-%75 civarındadır. Sistemin verim açısından önemli bir avantaja sahip olduğu görülmektedir. Volanlı enerji depolama sisteminin deşarj derinliği NiCd bataryalar ile karşılaştırıldığında deşarj derinliğinde iki kattan daha fazla iyileşme sağlanmıştır. Kullanım ömrü açısından incelendiğinde elektrokimyasal bataryalardan çok daha uzun ömürlü oldukları söylenebilir. Ayrıca moment kontrol jiroskobuna entegre olarak çalışabilmesi önemli bir avantajdır. Enerji yoğunluğu oldukça yüksek olduğu için kapladığı alan ve toplam ağırlık bakımından kimyasal bataryalara karşı üstünlük kurmuş durumdadır.

Volanlı enerji depolama biriminin avantajları dışında bazı dezavantajları da mevcuttur. Volanda depolanan enerjinin daha küçük bir kütlede depolanmasını sağlamak amacıyla yüksek hızlarda çalışması istenmektedir. Fakat yüksek hızlarda çalışmak sistemde titreşimlere neden olmaktadır. Moment kontrol jiroskobu bu titreşimlerden etkilenmektedir. Ayrıca yüksek hızlarda sistem güvenilirliğini sağlamak oldukça zordur. Yüksek hızlarda çalışırken sistem üzerinde istenmeyen mekanik rezonanslar meydana gelmektedir. Son yıllarda yapılan çalışmalar doğrultusunda manyetik rulmanların kullanılmasıyla beraber mekanik rezonansların etkileri azaltılmıştır. Moment kontrol jiroskobu ile manyetik rulman kullanılan volanlı enerji depolama biriminin entegre bir şekilde çalışması sonucunda moment kontrol jiroskobunun ve dolayısıyla yönelim sisteminin titreşimlerden etkilenmesinin önüne geçilmiş olunur.

Şekil 3.9' NASA tarafından geliştirilen mekanik enerji depolama birimi görülmektedir. Bu sistemde çalışma hız aralığı 20000-60000 d/d arasındadır. Volan carbon-fiber alaşımdan üretilmiştir. Sürtünme kayıplarını yok etmek için sistemin içi vakumlanmıştır. Çünkü yüksek hızlı mekanik enerji depolama birimlerinde kayıpların en aza indirilebilmesi çok önemlidir. Bu amaçla sistemde mekanik rulmanlar yerine manyetik rulman tercih edilerek rulman sürtünme kayıplarının da azaltılması düşünülmüştür. Fakat manyetik rulmanlarında kontrolü için gerekli olan güç yine bir kayıp güç olarak sistemi etkilemektedir. Bu kayıp gücün azaltılması çalışmaları ise halen devam etmektedir. Yüksek hızlarda çalışırken en önemli konulardan biri malzeme seçimidir. Yüksek hızlarda çalışmaya elverişli, enerji depolama kapasitesi yüksek volan ve mil tasarımı yapılmalıdır.



Şekil 3.9 NASA tarafından geliştirilen mekanik enerji depolama birimi

Mekanik enerji depolama biriminin genel özellikleri ve elektrokimyasal bataryalar ile karşılaştırılması aşağıda yapılmıştır.

- NASA tarafından geliştirilen mekanik bataryanın deşarj derinliği %89 iken aynı görevi yapabilecek bir NiH_2 elektrokimyasal batarya grubunun deşarj derinliği %35 civarındadır.
- Enerji yoğunluğu mekanik enerji depolama sisteminde 27 Wh/kg iken, NiH_2 batarya grubunda 10 Wh/kg dır.
- Kullanım ömrü mekanik enerji depolama sisteminde 15 yıl iken NiH_2 batarya grubunda 5 yıldır.
- Enerji depolama kapasitesi mekanik enerji depolama sisteminde 5.5 kWh iken, NiH_2 batarya grubunda 4.6 kWh' dır.
- Mekanik enerji depolama sisteminin anlık güç değişimi 4.1 kW ve maksimum güç 5.5 kW' dır ve NiH_2 batarya grubu ile aynıdır.

- Mekanik enerji depolama sisteminde döngü verimi %83 iken, NiH₂ batarya grubunda %65 tir.

Bu uygulamada 10⁻⁶ torr basınç altında iki eksenli manyetik rulmanlar kullanılmıştır. Rotor carbon-fiber malzemedен yapılrken mil titanyum malzeme kullanılarak üretilmiştir. Kullanılan elektrik motoru ise 3 kW, 4 kutuplu sürekli mıknatıslı senkron motordur. Mekanik enerji depolama biriminde elektrokimyasal enerji depolama biriminden farklı olarak fazladan birçok eleman kullanılsa dahi enerji yoğunluğu mekanik enerji biriminde çok daha yüksek olduğundan toplam ağırlıkta volanlı enerji depolama birimi elektrokimyasal batarya grubuna göre daha hafif olacaktır.

3.6 Sonuç

Bu bölümde uydu yönelim sisteminde kullanılan güç sistemi tanıtılmıştır. Bu güç sistemi içerisinde kullanılan enerji depolama birimi olan elektrokimyasal bataryalar ile günümüz teknolojisinde kullanılan ve halen gelişimine devam eden volanlı enerji depolama birimini incelenmiştir.

Volanlı enerji depolama biriminin şarj derinliği, kullanım ömrü ve toplam ağırlık gibi birçok yönden elektrokimyasal enerji depolama birimlerine üstünlük sağlamaktadır. Ayrıca moment kontrol jiroskoplarına entegre bir şekilde çalışabilen volanlı enerji depolama biriminde kullanılan malzemeler sistemin yüksek hızda çalışma özelliğine göre seçilmelidir.

Volanlı enerji depolama birimlerinde tasarım hesaplamaları yapılırken sistemdeki kayıplar ve bozucu momentler göz önünde bulundurulmalıdır. Son yıllarda mekanik rulmanların yüksek hızlarda neden olduğu mekanik rezonansların etkilerinin en aza indirilmesi ve rulman kayıplarının daha düşük seviyelere indirilebilmesi için manyetik rulmanlar kullanılmaktadır. Fakat yüksek hızlarda çalışırken oluşabilecek hatalara karşı güvenilirliği sağlamak oldukça zordur.

Elektrokimyasal bataryalara olan üstünlükleri nedeniyle mekanik enerji depolama özelliğine sahip yüksek hızlı volanlı enerji depolama birimleri, uydularda elektrokimyasal bataryaların yerini almıştır.

4. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA BİRİMİ TASARIMI

Volanlı enerji depolama biriminin tasarımı yapılırken dikkat edilecek en önemli konu sistemin tamamının enerji dengesidir. Buna göre deşarj durumunda uydunun enerji ihtiyacını ve sistemdeki kayıpları karşılamalıdır.

Sistemdeki kayıplar volanın havayla olan temasından kaynaklanan rüzgar kayıpları, eğer mekanik rulman kullanılıyorsa rulman sürtünme kayıpları, eğer manyetik rulman kullanılıyorsa manyetik enerji üretmek için gerekli olan enerji kaybı ve güç dönüştürücü kayıpları olarak söylenebilir.

Bu çalışmada mekanik rulman kullanılan bir sistemin tasarımı yapılacaktır. Bu sistemin kayıpları hesaplanacak ve BILSAT-I uydusu referans alınarak gerekli olan enerji dengesi hesaplanacaktır. Bunun için uydunun enerji ihtiyacı yanında sistem kayıplarının da hesaplamaları yapılacaktır.

4.1 Gerçek Bir Uydunun Enerji İhtiyacı

Enerji ihtiyacı hesaplanacak olan uydu BILSAT-I uydusudur. Bu uydu yörüngesini 97.7 dakikada tamamlamaktadır. Karanlık bölgede geçen süre ise 32 dakikadır. Karanlık bölgede geçen süre çok önemlidir çünkü uydunun enerji ihtiyacı bu süreye göre hesaplanacaktır.

BILSAT-I uydusunun ihtiyaç duyduğu güç talebi ile ilgili bilgiler bilinmektedir. Yapılan çalışmada farklı çalışma durumlarında farklı güç gereksinimleri ile ilgili bilgiler verilmiştir. BILSAT-I uydusunun en fazla güç gerektiren çalışma durumu için 31.6206 W ve en fazla kameranın devrede olması halindeki kamera güç gereksinimi ise 14 W dır [57]. Yani en ağır çalışma şartlarında yaklaşık 46 W' lık güç ihtiyacı oluşmaktadır. Uydunun karanlık bölgesinde 32 dakika kaldığı bilindiği için bu bölgede yaklaşık 24.53 Wh' lık bir enerji ihtiyacı görülmektedir.

Uydu üzerinde iki adet moment kontrol jiroskopunun olduğu bilinmektedir. O halde her bir volanın karşılaması gereken enerji miktarı 12.27 Wh olarak hesaplanmaktadır. Kullanılacak olan elektrik makinası Maxon EC-25 fırçasız doğru akım motorudur ve bu motorun maksimum verimi %94 dür. Uydunun ihtiyacı olan enerji ve motorun verimi göz önüne alınırsa uydunun 12.27 Wh olan enerji talebinin karşılanması için makinanın verim

ifadesinden 13.05 Wh enerji üretmesi gerektiği hesaplanmıştır. Yani fırçasız doğru akım makinası generatör olarak çalışırken elektriksel kayıpları yaklaşık 0.78 W' dır. Fakat motor her zaman maksimum verim noktasında çalışmayacaktır. Bu yüzden motorun verimini yaklaşık %92 olarak belirlenirse daha doğru sonuç elde edilecektir. Bu sonuca göre generatör olarak çalışan fırçasız doğru akım makinasının üretmesi gereken enerji miktarı 13.34 Wh olarak hesaplanabilir.

Elektrik makinası generatör olarak çalışırken üretmesi gereken enerji aynı zamanda sistemdeki mekanik kayıpları da karşılamalıdır. Sistemde mekanik rulman kullanıldığı varsayımı ile bu mekanik kayıpların rulman kayıpları ve havanın sürtünmesinden kaynaklanan kayıplar olduğu bilinmektedir.

4.1.1 Rulman Kayıpları

Volanlı enerji depolama biriminde kullanılan rulmanlar yüksek hızlarda çalışmaya elverişli olmalıdır. Son yıllarda düşük sürtünme katsayısına sahip seramik bilyalı veya tamamen seramik bilyalar üretilmiştir. FAG seramik bilyalı rulman üretiminde en önemli üreticilerden biridir. FAG firmasının verileri incelendiğinde rulman kayıplarının hesaplanabileceği görülmektedir [59].

FAG firmasının verileri dikkate alındığında seramik bilyalı rulmanlara etkiyen iki önemli moment olduğu görülmektedir. M_0 Rulman yağının viskoz sürtünmesinden kaynaklanan hıza bağlı sürtünme momentidir. Rulmana ait bu momentin hesaplanması ile ilgili denklemler Denklem 4.1 ile Denklem 4.3 arasında verilmiştir.

$$M_R = M_0 + M_1 \quad (4.1)$$

Rulmanın hızı 2000d/dk' dan büyük veya eşit ise Denklem 4.2 kullanılır.

$$M_0 = f_0(v * n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-10} \quad (4.2)$$

Rulmanın hızı 2000 d/d' dan küçük ise Denklem 4.3 kullanılır.

$$M_0 = f_0 * 160 * d_m^3 10^{-10} \quad (4.3)$$

Burada,

M_0 :Hıza bağılı sürtünme momenti (Nm)

f_0 :Hıza bağılı sürtünme katsayısı

n :Rulmanın hızı (d/d)

v :Rulman yağının kinematik viskozitesi (mm²/s)

d_m :Rulmanın ortalama çapı(mm)' nı gösterir.

M_1 volanın ağırlığından ve balansından kaynaklanan momenttir. Rulmana ait bu momentin hesaplanması ile ilgili denklemler Denklem 4.4 ile Denklem 4.7 arasında verilmiştir.

$$M_1 = f_1 F_T d_m \quad (4.4)$$

$$F_T = F_r + F_b \quad (4.5)$$

$$F_r = m g \quad (4.6)$$

$$F_b = m_r e \omega_m^2 \quad (4.7)$$

Burada,

M_1 :Yüke bağılı sürtünme momenti (Nm)

f_1 :Yüke bağımlı sürtünme katsayısı

ω_m :Volan hızı (rad/s)

F_r :Volanın ağırlığından dolayı etkiyen kuvvet (N)

F_b :Volanın balansından kaynaklanan kuvvet (N)

m :Volanın kütlesi (kg)

g :Yerçekimi ivmesi (m/s²)

m_r :Artık kütle (kg)

e :Volanın dönme eksenini ile artık kütle merkezi arasındaki mesafe (m)' yi gösterir.

Rulman kayıplarından kaynaklanan kayıp güç Denklem 4.10' daki gibi hesaplanabilir.

$$P_0 = \omega_m f_0 (v * n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-10} \quad (4.8)$$

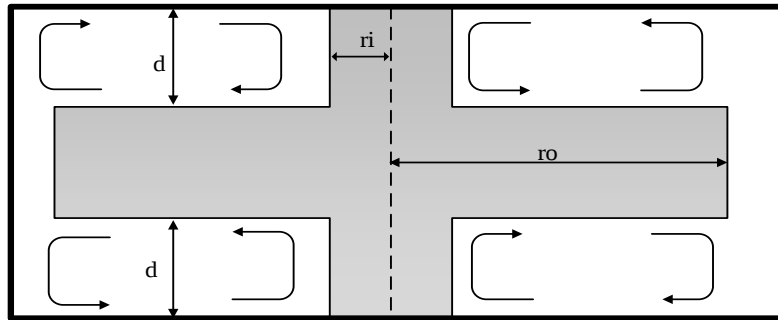
$$P_1 = \omega_m f_1 (F_r + F_b) d_m = \omega_m f_1 d_m (mg + m_r e \omega_m^2) \quad (4.9)$$

$$P_r = P_0 + P_1 = \omega_m f_0 (v * n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-10} + \omega_m f_1 d_m (mg + m_r e \omega_m^2) \quad (4.10)$$

Rulman kayıplarına dikkat edilirse doğrusal değildir. Her kayıp bileşeni hıza bağlı olarak doğrusal olmayan bir şekilde değişmektedir.

4.1.2 Havanın Sürtünmesinde Kaynaklanan Kayıplar

Belirli bir kütleye ve eylemsizliğe sahip volanın dönerken havayla teması sonucunda havanın sürtünmesinden kaynaklanan kayıp güç oluşacaktır. Uzay şartlarında havanın sürtünmesinin olmadığı varsayımıyla hareket edilirse bu kaybın olmadığı düşünülebilir. Fakat yer şartlarında gerekli testlerin yapılabilmesi için uzay ortamına benzer bir ortam oluşturulmalıdır. Uzay şartlarının yeryüzünde iken oluşturulması oldukça zor ve yüksek maliyetli bir işlemdir. Tam anlamıyla uzay şartları oluşturulamazsa yani ortam basıncı yaklaşık sıfır veya daha altında olmazsa kesinlikle havanın sürtünmesinden kaynaklanan kayıp güçler oluşacaktır. Bu amaçla yer testlerinin yapılabilmesi için uzay ortamına mümkün olduğu kadar yaklaşılmaya çalışılacaktır. Bunun için volanlı enerji depolama birimi bir muhafazanın içine yerleştirilerek muhafaza ortamını vakumlanması gerekmektedir. Muhafaza biriminin vakumlanmış ortamının basıncı azda olsa var olabilir. Bu nedenle rüzgar kayıplarının hesaplanması gerekmektedir. Fakat gerçek uygulamada uzay ortamında bu kayıpların sisteme eklenmemesi gerekir. Rüzgar kayıpları hesaplanırken öncelikle volanın şekli ile ilgili gerekli bilgilerin var olması gerekmektedir. Rüzgar kaybı hesaplanacak volan Şekil 4.1’ de görülmektedir.



Şekil 4.1 Rüzgar kaybı hesaplanacak volanın şekli

Bu şekildeki bir volanın kayıp gücü Denklem 4.11 ile hesaplanabilir.

$$P_{hava} = k_f M_{volan} \omega_m \quad (4.11)$$

Burada k_f pürüzsüzlük katsayısıdır ve bazı uygulamalarda 1-2.5 arasında bir değer almaktadır. Volanın şekline göre ve yapılacak malzemenin cinsine göre bu katsayının 1 olarak seçilmesi uygundur. Volan üzerinde oluşan momentin ifadesi Denklem 4.12’ de verilmiştir.

$$M_{volan} = \frac{[(C_f \rho_a \omega_m^2)(r_o^5 - r_i^5)]}{2} \quad (4.12)$$

Denklem 4.12’ de moment ifadesinde görülen C_f sürtünme katsayısını göstermektedir. Sürtünme katsayısı ve Reynold katsayısını belirleyen ifadeler sırasıyla Denklem 4.13 ve Denklem 4.14’ de verilmiştir [60].

$$C_f = \frac{3.7x\left(\frac{d}{r_o}\right)^{0.1}}{\sqrt{Re}} \quad (4.13)$$

$$Re = \frac{\rho_a \omega_m r_o^2}{\mu} \quad (4.14)$$

Burada

r_i :Volanın iç yarıçapı (m)

r_o :Volanın dış yarıçapı (m)

ρ_a :Havanın yoğunluğu (kg/m³)

μ :Havanın dinamik viskozitesi (kg/ms)

d :Volanın muhafaza ile arasındaki mesafe (m)’ dir.

Hesaplanan rüzgar kayıpları sistemin enerji dengesinde önemli bir yer edinmektedir.

4.2 Sistemin Enerji Dengesi

Uydunun ihtiyacı olan enerji miktarı çeşitli fonksiyonları yerine getirebilecek maksimum enerji talebine göre belirlenmiştir. Bunun dışında uydu yönelim sisteminin düzgün

çalışabilmesi için moment değerinin belirli bir değerin altına düşmemesi gerekmektedir.

Uydu işlevini yerine getirirken volanın mekanik yapısından kaynaklanan güç kayıplarının da karşılanması gerekmektedir. Bu amaçla yükün sabit olduğu varsayımı ile volanın hızına bağlı olarak karanlık bölgede üretilmesi gereken enerji toplamı hesaplanmalıdır. Buna göre öncelikle sistemin yönelim kısmının hatasız çalışabilmesi için gerekli olan en küçük açısal momentum değeri 0.4 Nms olarak belirlenmiştir. Bu açısal momentum değeri aslında volan hızını asla sıfır olmayacağını ve her zaman belirli bir değerin üzerinde olması gerektiğini göstermektedir.

Bölüm 2’ de FDAM’ unun üretmiş olduğu momentin eşitliği elde edilmişti. Bu eşitliğin aynı zamanda doğru akım motoruna olan benzerliği gösterilmişti. Daha önce elde edilen FDAM’ unun motor olarak çalışırken ürettiği moment eşitliği Denklem 4.15’ te görülmektedir.

$$T_e = T_L + J \frac{d(\omega_m)}{dt} + B(\omega_m) \quad (4.15)$$

Burada T_e motorda üretilen elektriksel momentin ifadesidir. T_L yük momenti, J milin eylemsizlik momentini gösterir. B ise motora ait sürtünme katsayısıdır. Volanlı uygulamada yük momenti sıfır olacaktır. Bunun yerine sürtünme ve rüzgar kayıplarından oluşan bir moment bileşeni gelecektir. Fakat şimdilik enerji dengesi ifadesi sadece motor ve generatör olarak çalışan bir doğru akım makinası için belirlenecektir. Yük momentinin olmadığı durumda motorda üretilen elektriksel momentin ifadesi Denklem 4.16’ da görülmektedir.

$$T_e = J \frac{d(\omega_m)}{dt} + B(\omega_m) \quad (4.16)$$

Burada motorun üretmiş olduğu elektriksel moment motorun ivmelenme momentini ve sürtünme momentini karşılamak zorundadır. Fırçasız doğru akım makinası generatör olarak çalışmaya başladığında üretilen elektriksel moment yüke aktarılan elektriksel gücü ve sürtünmeden kaynaklanan kayıp gücü karşılayacaktır. O halde generatörde giriş momentini belirleyen etkenler elektriksel yükten çekilen güç ve mekanik sistemin kayıpları olacaktır. Elektrik yük olarak belirlenen moment değeri uydunun çalışması için gerekli olan güç seviyesi ve elektriksel kayıplardan oluşmuştur. Moment eşitliği generatör çalışma durumu için tekrar yazılırsa Denklem 4.17 elde edilir.

$$J \frac{d(\omega_m)}{dt} = T_e + B(\omega_m) \quad (4.17)$$

Elektrik makinasının hızı ve eylemsizlik momenti generatörden elde edilen toplam güce eşit olacaktır. Bir yüke aktarılan enerji yükün harcamış olduğu gücün zamana göre integrali alınarak bulunur. Denklem 4.17' de görülen moment ifadesi açısal hız ile çarpılırsa bütün bileşenlerin ayrı ayrı gücü bulunmuş olur.

$$J \frac{d(\omega_m)}{dt} (\omega_m) = T_e(\omega_m) + B(\omega_m)^2 \quad (4.18)$$

Denklem 4.18 sistemin güç dengesini oluşturmaktadır. Buna göre Denklem 4.19' da görüldüğü gibi bu eşitliğin integrali alındığında, sistemin enerji denklemi elde edilecektir.

$$\int_{t_2}^{t_1} J \frac{d(\omega_m)}{dt} (\omega_m) dt = \int_{t_2}^{t_1} T_e (\omega_m) dt + \int_{t_2}^{t_1} B(\omega_m)^2 dt \quad (4.19)$$

Her bileşen ayrı ayrı incelenirse generatörde üretilen toplam enerji miktarı Denklem 4.21' deki gibi elde edilir.

$$\int_{t_2}^{t_1} J \frac{d(\omega_m)}{dt} (\omega_m) dt = \int_{t_2}^{t_1} J (\omega_m) d(\omega_m) \quad (4.20)$$

$$E_{toplam} = \frac{1}{2} J (\omega_m)^2 \quad (4.21)$$

Denklem 4.19' daki eşitliğin sağ tarafında bulunan iki moment bileşeni yükün harcadığı enerji ve sürtünmeden kaynaklanan kayıp enerjiyi temsil etmektedir. Generatörün hızı minimum ve maksimum hızlar arasında olacağı için bu iki hız arasındaki farkın oluşturduğu enerji miktarı yükte harcanan enerji miktarını ve kayıplardan kaynaklanan enerji miktarını karşılamak zorundadır. Bu durum Denklem 4.22' de görülmektedir.

$$\frac{1}{2} J ((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2) = \int_{t_2}^{t_1} T_e (\omega_m) dt + \int_{t_2}^{t_1} B(\omega_m)^2 dt \quad (4.22)$$

Sistemin verimi çıkışta harcanan elektriksel enerji ile üretilen net mekanik enerjinin oranı ile belirlenir.

$$\eta = \frac{\int_{t_2}^{t_1} T_e(\omega_m) dt}{\frac{1}{2} J ((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2)} \quad (4.23)$$

Denklem 4.23' te volanlı enerji depolama biriminde görev yapan ve generatör olarak çalışan bir elektrik makinasına ait verim ifadesi görülmektedir. Sistemin verimi mekanik kayıpların azaltılması ile artırılabilir. Bunun için mekanik rulman yerine manyetik rulman kullanılabilir. Fakat manyetik rulmanda sıfır enerji tüketimi söz konusu değildir. Manyetik rulmanda oluşan manyetik enerji kaybının da hesaplanması gerekmektedir.

4.3 Volanlı Enerji Depolama Biriminin Tasarımı

Volanlı enerji depolama birimi tasarlanırken sistemin enerji ihtiyacı bilinmelidir. Karanlık bölgede 32 dakika boyunca BILSAT-I uydusunun enerji ihtiyacını karşılaması gerektiği ve iki adet volanlı enerji depolama birimi bulunduğu düşünülürse her birimin 12.27 Wh enerji üretmesi gerektiği hesaplanmıştı. Maxon EC-25 motorunun verimi dikkate alındığında generatör olarak çalışınca bu enerji ihtiyacını karşılayabilmesi için 13.05 Wh enerji üretmesi gerektiği de hesaplanmıştı. Fakat burada sisteme herhangi bir mekanik veya manyetik kaybın olmadığı ve generatörün sadece uydunun enerji ihtiyacını karşılayabilmesi için gerekli olan enerji hesaplanarak bu sonuçlar elde edilmiştir. Yani bu durumda sistemin tamamının veriminin %94 olduğu öngörülmüştür. Fakat gerçek sistemde enerji dengesi ifadesi yazılırken, uydunun ihtiyacı olan enerji dışında ikinci bir bileşen olan sürtünme yani mekanik kayıplar nedeniyle üretilmesi gereken bir enerjinin de var olduğu görülmektedir.

Bir volanlı enerji depolama sistemi tasarlanırken öncelikle generatör çalışmada sistemin ihtiyaç duyduğu enerji miktarı hesaplanmalıdır. Bunun için sistemin fiziksel yapısının netleştirilmesi gerekmektedir. Tasarlanacak bu sistemde volan disk şeklinde olacaktır. Sistemde kullanılacak olan yataklama sistemi mekanik yatak olacak ve kullanılacak rulman tipi ise yüksek hızlı düşük sürtünmeli seramik bilyalı (hibrit) rulman veya tam seramik rulman olacaktır. Sistem rüzgar sürtünmesini azaltmak için vakumlanacaktır. Eğer ortam basıncı azda olsa var olaksa, sistemin enerji ihtiyacı ve verimi hesaplanırken rüzgar ve rulman sürtünme kayıpları da hesaplanmak zorundadır.

İlk olarak volanın eylemsizlik momenti değerinin 0.01 kgm² olduğu varsayılarak işlemlere başlanabilir. Yapılacak hesaplamalar sunucunda eylemsizlik momenti değeri yeterli gelmez ise hesaplamalar yeni bir değer için tekrarlanacaktır. Volanın yarıçapının ise

10 cm olduğu varsayılmıştır. Volanın çapı arttıkça rüzgar kayıpları artacaktır. Sürtünme ve rüzgar kayıpları hariç volanın 32 dakika içinde üretmesi gereken enerji miktarı 13.05 Wh' dır. Volanın üretmesi gereken en küçük açısal momentum değeri 0.4Nms olduğuna göre öncelikle en düşük hız değerinin buna göre hesaplanması gerekmektedir.

$$\omega_{min} > \frac{S_{min}}{J} \quad (4.24)$$

Denklem 4.24' e $S_{min} = 0.4 \text{ Nms}$ ve $J = 0.01 \text{ kgm}^2$ olarak alınırsa volanın en düşük hızı 40 rad/s olarak bulunacaktır. 40 rad/s ise yaklaşık olarak 382 d/d' dır. Fırçasız doğru akım makinası generatör olarak çalışırken üreteceği gerilim seviyesinin çok düşük olmaması gerekmektedir. Eğer gerilim seviyesi çok düşük olursa gerekli gücü sağlamak için akım değerinin çok yükselmesi gerekir ve bu da motora zarar verebilir. Bunu engellemek ve gerilim kararlılığını sağlamak için en düşük hız değeri Maxon EC-25 yüksek hızlı FDAM' u için 1000 rad/s (~9550 d/d) olarak belirlenmiştir.

Volanın eylemsizlik momenti ve yarıçapı bilindiğine göre ağırlığı da hesaplanabilir. Volanın alüminyumdan imal edildiği ve volan milinin ağırlığı ihmal edilirse sadece alüminyum diskin ağırlığı Denklem 4.25' te verilmiştir.

$$J = \frac{1}{2}mr^2 \quad (4.25)$$

Buradan volanın ağırlığı 2 kg olarak bulunur. Enerji dengesi ifadesine göre sistemin verimi yükün harcadığı enerji ile sisteme sağlanan enerjinin oranıdır. Yükte harcanan enerji ile kayıplar nedeniyle harcanan enerji toplamı üretilen enerjiye eşittir. Mekanik rulmanlı sistemlerde rulman kayıplarının yüksek olması nedeniyle ve rüzgar kayıpları da mevcut ise sistemin verimi de düşük olabilir. Sistemin verimi %65 olarak tahmin edilirse sistemin ulaşacağı en yüksek hız değeri hesaplanabilir.

$$\eta = \frac{\int_{t_2}^{t_1} T_e(\omega_m)dt}{\frac{1}{2}J((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2)} = \frac{E_{net}}{E_g} \quad (4.26)$$

Denklem 4.26 da görülen E_{net} uydunun ihtiyacı olan enerjidir ve 13.05 Wh (25056 Joule) dır.

$$\eta \frac{1}{2} J ((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2) = 25056 \text{ Joule} \quad (4.27)$$

$$(0.65) \frac{1}{2} (0.01) (\omega_{max}^2 - 1000^2) = 25056 \text{ Joule}$$

$$\omega_{max} = 2951.19 \text{ rad/s} = 28182 \text{ d/d}$$

Tasarlanan bu sistem için %65 verim ve ihtiyaç duyulan enerji koşullarında hız maksimum 28182 d/d olmaktadır. Eğer hızın biraz daha yüksek olması istenirse volanın eylemsizlik momentinin düşürülmesi ve dolayısıyla kütesinin azaltılması gerekmektedir. Bu hız değeri bu kütledeki bir volanın talep edilen bu enerjiyi daha fazla kayıp olsa da karşılayabileceğinin göstergesidir. Sistemin verimi rüzgar kayıplarının olmaması durumunda çok daha yüksek olacaktır. Gerçek bir sistemde de rüzgar kayıpları olmamaktadır.

Sistemdeki kayıpların ifadesi bir önceki kısımda belirtilmişti. Buna göre enerji dengesi ifadesini bu kayıplar sisteme eklenerek Denklem 4.28' deki gibi tekrar yazılabilir.

$$\frac{1}{2} J ((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2) = \int_{t_2}^{t_1} T_e (\omega_m) dt + \int_{t_2}^{t_1} P_r dt + \int_{t_2}^{t_1} P_{hava} dt \quad (4.28)$$

Rüzgar ve volan kayıplarının enerji dengesindeki ifadeleri Denklem 4.29 ve Denklem 4.30' da gösterilmektedir.

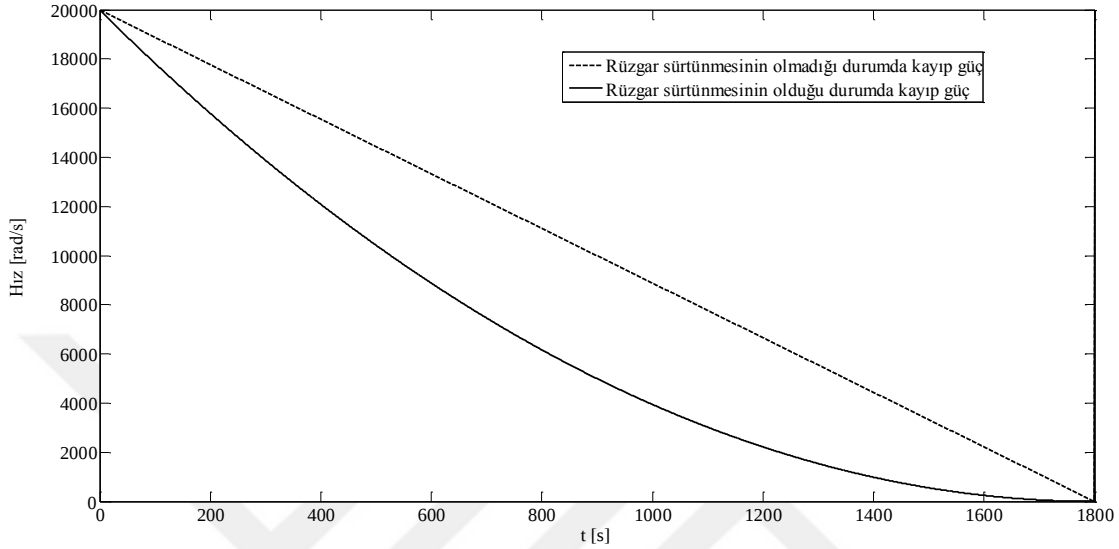
$$\int_{t_2}^{t_1} P_r dt = \int_{t_2}^{t_1} \left[\omega_m f_0 (v * n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-10} + \omega_m f_1 d_m (mg + m_r e \omega_m^2) \right] dt \quad (4.29)$$

$$\int_{t_2}^{t_1} P_{hava} dt = k_f M_{volan} \omega_m = \int_{t_2}^{t_1} \left[k_f \frac{[(C_f \rho_a \omega_m^2)(r_o^5 - r_i^5)]}{2} \omega_m \right] dt \quad (4.30)$$

Burada motor çalışmada hızın doğrusal arttığı düşünülürse yüke aktarılan gücün sabit olması koşulu altında sistemde tüketilen enerjinin hızın değerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Sistemdeki kayıplar hıza bağlı olarak değiştiğinden dolayı sabit bir verimden bahsetmek mümkün değildir.

Generatör olarak çalışırken rüzgar kayıpları var ise, hızdaki değişim doğrusal olmayacaktır. Çünkü rüzgar kayıpları hızın 2.5 uncu kuvveti ile değişmektedir. Balans değeri düşük olan iyi tasarlanmış bir sistemde rüzgar kayıpları hızın değişim eğrisine doğrudan etki etmektedir. Bu nedenle enerji hesabı yapılırken kayıp enerji miktarı hızın doğrusal değişmediği göz önünde bulundurularak hesaplanmalıdır. Böylece doğrusal

değişen hız değeri ile elde edilen kayıp enerji değeri bir katsayı ile çarpılıp gerçek enerji bulunmalıdır. Bu katsayının hesaplanması ile ilgili grafik ve bulunan katsayı aşağıdaki şekilde görülmektedir.



Şekil 4.2. Rüzgar gücü ile hızın değişimi

Şekil 4.2’ de görülen eğrilerin bir tanesi doğrusal diğeri ise rüzgar kuvvetinin baskın olduğu bir sistemin generatör olarak çalışma da iken hızlarının değişimidir. Bu eğrilerin altında kalan alanların oranı 0.571 dir. Bu değer sistemin generatör çalışmasında kayıp enerjinin, doğrusal hız değeri ile hesaplanıp elde edilen enerji değerinden gerçek değer bulunması için çarpılması gereken katsayıdır.

Eğer gerçek bir sistem tasarımı söz konusu ise rüzgar kayıpları sıfır kabul edilir ve balans değeri düşük bir sistemde hızın yaklaşık doğrusal değiştiği kabul edilir. Çünkü sadece rulman kayıpları olacaktır. Rulman yağından kaynaklanan kayıpta enerji değişimi hızın 2/3 kuvvetine bağlıdır. Yükten kaynaklanan kayıpta enerji değişimi hızın karesi ile değişmektedir. Fakat iyi tasarlanmış bir sistemde balans değerinin çok düşük olduğu düşünülürse buradaki kayıp enerji değeri uydunun enerji ihtiyacından kaynaklanan talep edilen enerji yanında düşük kalacağından sistemin hız değişimine olan etkisi ihmal edilecek seviyede olacaktır. Aşağıda sistem parametreleri verilen bir volanlı enerji depolama biriminin BILSAT-I uydusunun daha önce hesaplanan enerji ihtiyacı göz önünde bulundurularak sistem tasarımı yapılacaktır.

Sistem gerçek uzay şartlarında çalışacağı için rüzgar kayıpları sıfır olarak kabul edilir. $J = 0.01 \text{ kgm}^2$ sistemin en düşük hızı 1000 rad/s (~9550 d/dk) olarak daha önce belirlenmişti. Sistemde volanın montajı için iki adet rulman kullanıldığı varsayılmaktadır. Volanın balansından kaynaklanan momenti hesaplamak için $m_r * e$ değerinin bilinmesi gereklidir. Çok iyi tasarlanmış bir sistemde ve çok iyi teknikler kullanılarak imal edilmiş bir volanda bu değer çok düşük olmaktadır. Sistemin bütün parametreleri aşağıdaki tabloda görülmektedir.

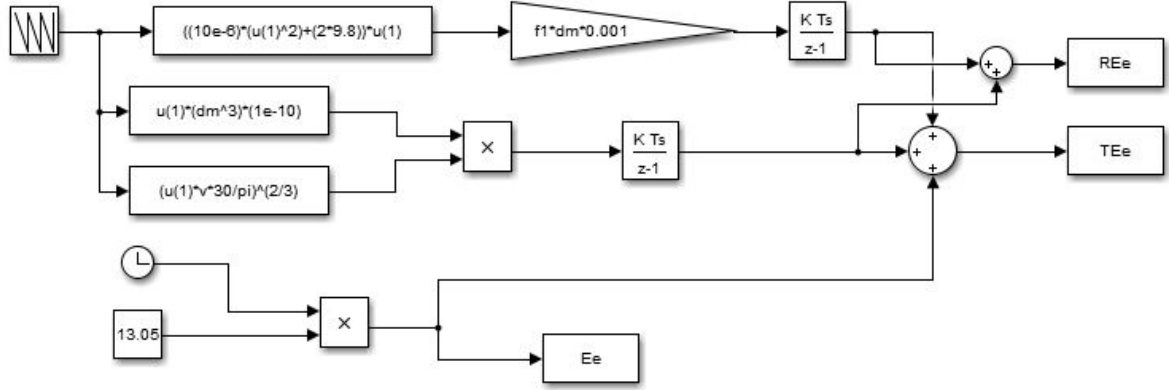
Tablo 4.1 Sistem parametreleri

J	0.01 kgm ²
ω_{min}	1000 rad/s
f_0	1.1
f_1	0.0003
d_m	18 mm
m	2 kg
g	9.8 m/s ²
v	10 mm ² /s
$m_r * e$	10 gmm

Generatör çalışmada, bu sistem parametreleri doğrultusunda rüzgar kayıplarının sıfır olması durumunda sistemin enerji dengesi Denklem 4.31' deki gibi yazılabilir.

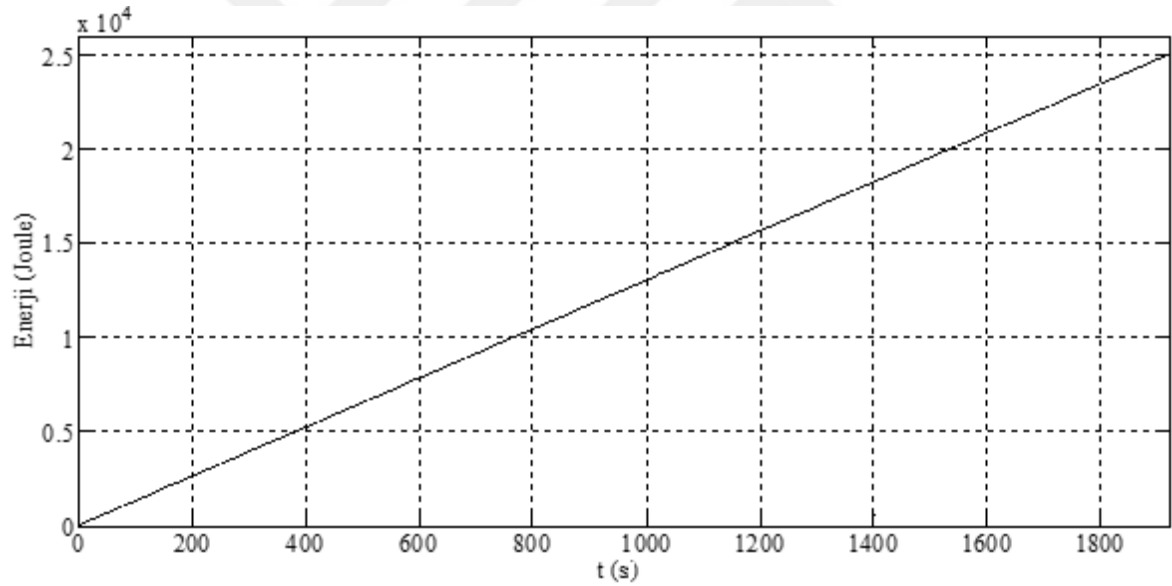
$$\frac{1}{2}J((\omega_{max})^2 - (\omega_{min})^2) = \int_{t_2}^{t_1} T_e \omega_m dt + \int_{t_2}^{t_1} \left[\omega_m f_0 (v * n)^{\frac{2}{3}} d_m^3 10^{-10} + \omega_m f_1 d_m \left(\left(\frac{m}{2} \right) g + m_r e \omega_m^2 \right) \right] dt \quad (4.31)$$

Burada elektriksel olarak üretilen moment değeri zamana bağlı ve doğrusal olarak kabul edilebilir, yani uydunun maksimum ve sabit güç çekerek görevini yürüttüğü varsayılır. Denklem 4.31' deki enerji dengesinde enerjilerin eşit olduğu anda maksimum hız ile kayıp enerji ifadesindeki hız değeri birbirine eşit olmalıdır. Şekil 4.3' te görülen benzetim çalışmasında enerji dengesinin sağlandığı hız değeri tespit edilmiştir.



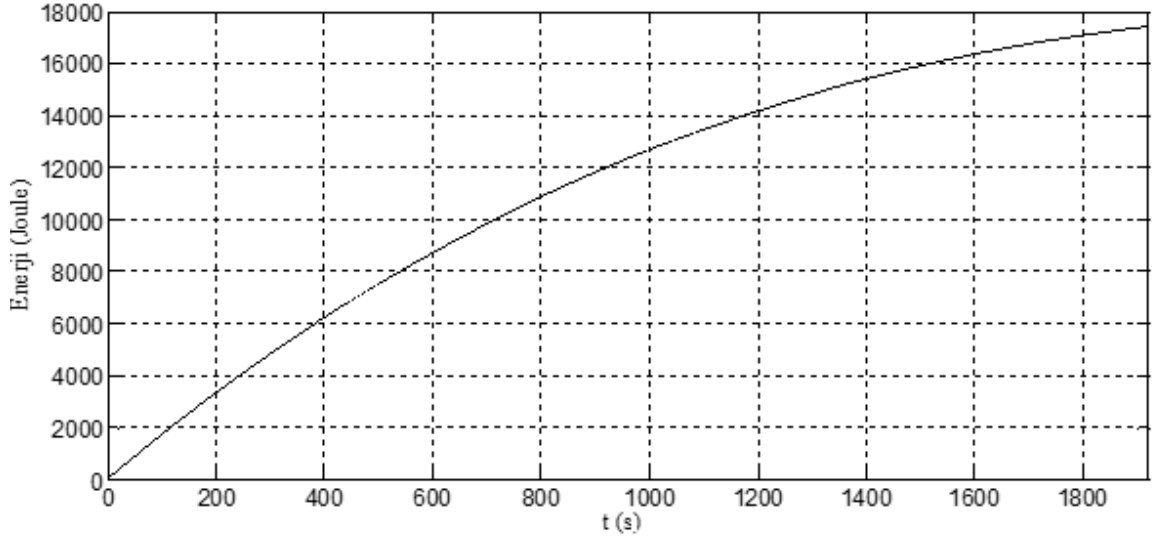
Şekil 4.3 Enerji denge noktasının bulunduğu benzetim çalışması

Burada, karanlık bölgede uydunun 32 dakika boyunca talep ettiği güçten kaynaklanan enerji miktarı 25056 Joule olarak hesaplanabilir ve Şekil 4.4' te gösterilmiştir.



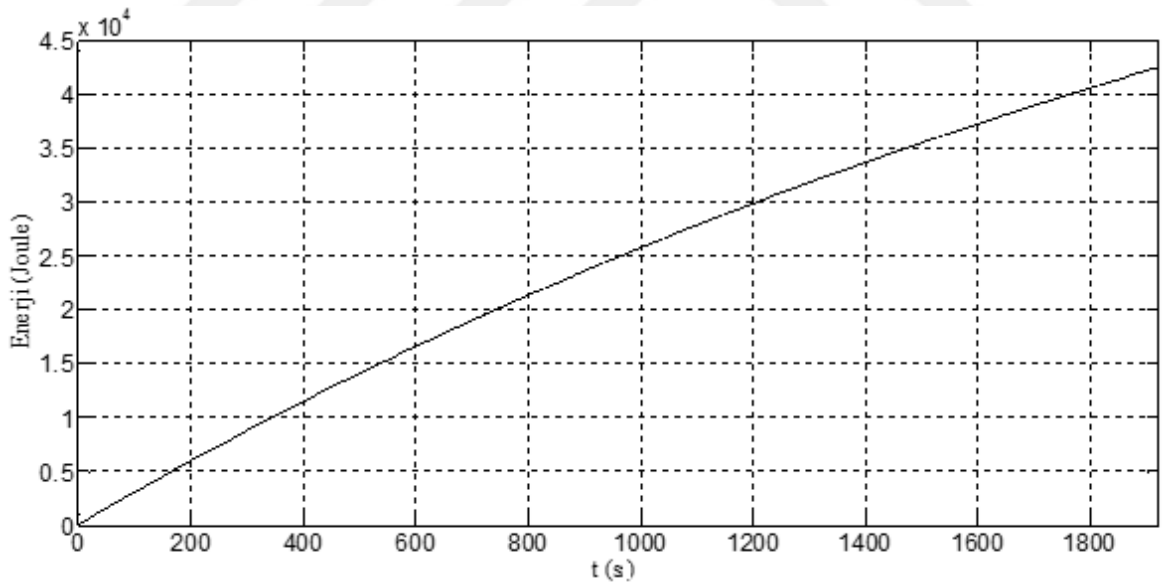
Şekil 4.4 Karanlık bölgede uydunun ihtiyacı olan enerji miktarı

Volanın balansından kaynaklanan rulman enerji kaybı 1318 Joule civarındadır. Rulman yağının viskozitesinden kaynaklanan enerji kaybı yaklaşık 16107 Joule kadardır. Toplam enerji kaybı 17425 Joule olarak Şekil 4.5' te görülmektedir.



Şekil 4.5 Karanlık bölgede oluşan enerji kaybı miktarı

Sistemden talep edilen toplam enerji miktarı 42481 Joule olarak Şekil 4.6’ da görülmektedir. Bu enerji dengesindeki maksimum hız 3081.6 rad/s olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6 Karanlık bölgede sistemden talep edilen toplam enerji miktarı

Enerji dengesi eşitliğinin diğer tarafında bu hız değeri ile üretilen enerji 42481.3 Joule olarak bulunur ve yaklaşık olarak eşitliğin diğer tarafına eşittir. Sistemin verimi Denklem 4.26’ daki gibi hesaplanacak olunursa %59 olarak hesaplanır.

Sistemde kullanılan rulman FAG HCS-71901-P4 yüksek hızlı seramik bilyalı hibrit rulmandır. Bu verim değerinin iyileştirilmesi amacıyla çok yüksek olan rulman viskozite kayıplarının düşürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla iki değişik uygulama yapılabilir. Birincisi tek yataklı rulman sayısını bire düşüren bir sistem tasarımı yapılmalıdır. Bu durumda verim yeni bir hız dengesinde %75 olmaktadır. İkincisi yağsız çalışabilen tam seramik rulman kullanılmalıdır. Bu durumda enerji hesapları tekrar yapılırsa 2521 rad/s’ de enerji dengesine ulaşılmış olur. Sistemde depolanan toplam enerji 26777 Joule’ dur. Rulman kayıpları 1700 Joule civarındadır. Bu değerler ile sistem verimi tekrar hesaplanırsa yaklaşık %93 olmaktadır.

Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi yağsız çalışabilen tam seramik rulmanlar ile verim oldukça yüksek seviyelere çıkarılabilmektedir. Rulman yatağının tek bilyalı olduğu ve tam seramik rulmanın kullanıldığı bir sistemin verimi %97 seviyelerine kadar çıkabilmektedir. Mekanik enerji depolama sisteminin deşarj derinliği oldukça yüksektir. Çift seramik rulman sahip %93 verimli sistemin deşarj derinliği Denklem 4.32’ deki gibi hesaplanabilir.

$$\text{Deşarj Derinliği} = 1 - \frac{\omega_{min}}{\omega_{max}} \quad (4.32)$$

Deşarj derinliği % 60 olarak oluşur. Bu deşarj derinliği düşük bir deşarj derinliğidir. Deşarj derinliğini artırmak için volanın hızını artırmak gerekmektedir. Bunun için volanın eylemsizlik momentini düşürmek gerekir. Sistemin yeni eylemsizlik momenti 0.004 kgm² olarak belirlenerek tekrar işlemler tekrarlanır. Volanın çapı aynı kalırsa volanın kütlesi 0.8 kg olacaktır. Diğer parametrelerin değişmediği kabul edilirse yeni enerji dengesi 3974.25 rad/s hızında gerçekleşir. Rulman kayıpları 4533 Joule ve toplam depolanan enerji 29589 Joule olarak belirlenmiştir. Bu durumda sistemin verimi %84.7 olarak gerçekleşir ve deşarj derinliği %74.8 olarak gerçekleşir.

Eğer sistemin hızı biraz daha artırılırsa deşarj derinliği çok daha iyi seviyelere gelecektir fakat artan hız değerine bağlı olarak sistemin rulman ve rüzgar kayıpları artacak ve dolayısıyla sistemin veriminde düşüş olacaktır. Bu seviyedeki deşarj derinliğini sistemde sürekli sabit kalacaktır. Sabit deşarj derinliği mekanik enerji depolama sistemlerinin önemli bir avantajıdır.

Sistem hızlanırken yük momentinin motorun toplam üretebileceği momenti geçmemesi gerekmektedir. Sistem hızlanırken motorun moment denklemi Denklem 4.15’ te verilmişti. Buna göre motorun üreteceği moment sürünme, rüzgar ve ivmelenme momentlerini

karşılması gerekmektedir. Buna göre sistemin maksimum moment değerleri aşağıda görülmektedir.

$$T_e = T_{ivm} + T_{rzg} + T_{srt}$$

$$T_{ivm} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 12.55 \text{ mNm}$$

$$T_{srt} = 1.75 \text{ mNm}$$

$$T_e = 12.55 + 0 + 1.75 = 14.3 \text{ mNm}$$

Sistemde Maxon EC-25 fırçasız doğru akım motorunun kullanıldığı düşünülürse bu moment değeri motorun maksimum değerini aşmamaktadır. Oluşan en yüksek moment değerinde motorun akımı 2.67 A olacaktır. Böylece gerçek bir sistem için boyutlandırma tamamlanmış olur.

Gerçek ortama yakın bir sistemde rüzgar kayıplarının olması kaçınılmazdır. 0.5mbar ortam basıncında ve 40°C ortam sıcaklığında havanın dinamik viskozitesi $\mu = 1.935 \cdot 10^{-5}$ kg/ms ve havanın yoğunluğu $\rho_a = 0.0005$ kg/m³ olarak belirlenir. Volanın düzgünlük katsayısı $k_f = 1$ olarak alınır. Volanın vakum muhafazasına olan mesafesi $d = 0.05$ m olarak belirlenmiştir. Sistemin diğer parametrelerinin Tablo 4.1' deki gibi olduğu ve değişmediği kabul edilirse sistemin enerji denklemine rüzgar kayıpları da eklenir. Bu durumda enerji dengesinin olduğu hız değeri yaklaşık 4711.5 rad/s olacaktır. Rüzgar kaybı nedeniyle oluşan enerji talebi hesaplanırken deşarj durumunda hızın doğrusal olma özelliği bozulduğu için daha önce hesaplanan düzeltme katsayısı kullanılacaktır. Bu durumda rüzgar kuvveti nedeni ile kaybolan enerji 10241 Joule olarak bulunur. Yeni hız değerinde rulman kayıp enerjisi 7100 J olarak bulunur. Sistemden talep edilen toplam enerji ise 42397 J' dur.

Rüzgar kayıplarının olduğu bu durumda sistemin verimi %59 olarak hesaplanır ve oldukça düşük bir verimdir. Bu nedenle sistemin tamamen vakumlanması gerekliliği görülmektedir. Sistemin deşarj derinliği %78.7 olarak hesaplanır ve ideal bir değerdir. Sistemin hareketini sağlayan motorun akımının hesaplanması için sistemin maksimum hızındaki moment değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

$$T_e = T_{ivm} + T_{srt} + T_{rzg}$$

$$T_{ivm} = J \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = 7.73 \text{ mNm}$$

$$T_{srt} = 2.44 \text{ mNm}$$

$$T_{rzg} = 5.5 \text{ mNm}$$

$$T_e = 7.73 + 2.44 + 5.5 = 15.67 \text{ mNm}$$

Oluşan en yüksek moment değerinde motorun akımı 2.92 A olacaktır. Böylece tam vakumlanmamış bir sistemde oluşabilecek rüzgar kayıpları da hesaplanarak sistemdeki kayıplar ve yük momentlerinin hesabı yapılmıştır. Burada rüzgar kayıpları ortam basıncı ile oldukça fazla değişmektedir. Bu nedenle ortam basıncının 10mbar seviyesinde olması rüzgar kayıplarının çok fazla artmasına sebep olacaktır ve iyi vakumlanmamış bir sistemde rüzgar kayıpları nedeni ile oluşan yük momenti motorun maksimum üretebileceği momentin üzerine çıkarak motorun hızlanmasına engel olacaktır.

4.4 Sonuç

Uydular üzerindeki volanlı enerji depolama birimlerinin karanlık bölgede sağlayacağı enerjinin miktarı çok önemlidir. Bu enerjinin hesaplanması için karanlık bölgede uydunun bütün sistemlerinin çalışması için gerekli olan enerji miktarının bilinmesi gereklidir. Sistem sadece bu enerjiyi karşılayacaksa hesaplama hatası yapılmış olunur. Sistemde rulman ve rüzgar kayıpları da mevcuttur. Karanlık bölgede bu kayıp güçlerinde karşılanması gerekmektedir. Uydunun karanlık bölgede ihtiyacı olan enerji ve bu enerjinin sağlanması için gerekli olan hız değerinin tespiti enerji dengesi ifadesinden elde edilebilir. Buna göre, volanda denge noktasında depolanan enerji miktarı karanlık bölgede harcanacak olan enerji miktarına eşit olmak zorundadır.

Yüksek hızlı seramik bilyalı rulmanlarda kullanılan düşük viskoziteye sahip rulman yağı sistemde önemli miktarda kayıp enerjiye yol açmaktadır. Bu da sistemin verimini düşürmektedir. Bu nedenle sistemde tam seramik rulman kullanarak sistemin verimi artırılmış olur. Çift rulman yataklı volan yerine tek rulman yataklı sistem tercih edilirse rulman kayıpları daha da azaltılabilir. Fakat bu sistem çok iyi bir mekanik tasarım gerektirir.

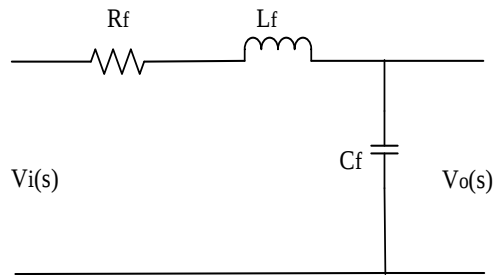
Sistemin deşarj derinliği artırıldıkça volanın eylemsizlik momenti ve dolayısıyla volanın ağırlığı azaltılmaktadır. Fakat ulaşılabilecek en üst hız değerinde rulman kayıplarının tam olarak hesaplanması gerekmektedir. Çünkü rulman kayıplarının aşırı derecede artması sistemin verimini düşürecektir. Bu nedenle deşarj derinliği sistem verimi göz önünde bulundurularak belirlenmelidir. Volan hızlanırken ulaşması gereken hız değerinde oluşacak toplam moment, motorun üretebileceği en yüksek momenti geçmemelidir.

5. VOLANLI ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN BENZETİMİ

Volanlı enerji depolama biriminde en önemli kısımlardan biri motordur. Bu uygulamada Maxon EC-25 yüksek hızlı fırçasız doğru akım motoru kullanılmıştır. Bu motorların düşük indüktansları motor ile evirici arasında filtre kullanılma zorunluluğunu doğurmaktadır. Evirici, filtre, akım algılayıcısı ve motordan oluşan karmaşık yapının akım kontrol parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan analitik yöntemlerin oldukça karmaşık işlemlerini azaltmak ve en uygun sonuca ulaşmak için genetik algoritmalar gibi sezgisel optimizasyon yöntemlerinin kullanılması öngörülmüştür. Bu algoritmaların sistem performansına etkileri incelenmiştir.

5.1 Filtre tasarımı

Yüksek hızlı volanlı enerji depolama sistemlerinde kullanılan elektrik motorlarının çok düşük olan indüktansları motor faz akımlarında dalgalanmalara yol açmaktadır. Akım dalgalanmalarını engellemek için motor ile evirici arasında filtre kullanılması gerekmektedir. Bu filtrelerin L, LC ve LCL gibi çeşitleri bulunmaktadır [61]. Bu filtreler sisteme dahil olduktan sonra sistemin kontrolör parametrelerinin yeniden hesaplanması gerekmektedir. Bu nedenle tasarlanacak olan filtrenin çıkış ile giriş arasındaki transfer fonksiyonunun oluşturulması gerekmektedir. Sisteme dahil olacak L filtrenin değeri çok yüksek olmamalıdır. Eğer uygun bir değer seçilmez ise motorun karakteristik davranışı yüksek L değerinden dolayı bozulacaktır. Diğer bir filtre çeşidi olan LC filtre Şekil 5.1’ de görülmektedir.



Şekil 5.1 LC filtre

Motor faz sargılarına bağlanacak olan LC filtre de önemli olan motorun faz sargılarındaki gerilimin anahtarlama frekansıdır. Bu filtre alçak geçiren filtredir. Eviricinin anahtarlama frekansı bu filtrenin rezonans frekansından en az üç kat büyük olmalıdır. Denklem 5.1' de filtrenin rezonans frekansının hesaplanması görülmektedir.

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (5.1)$$

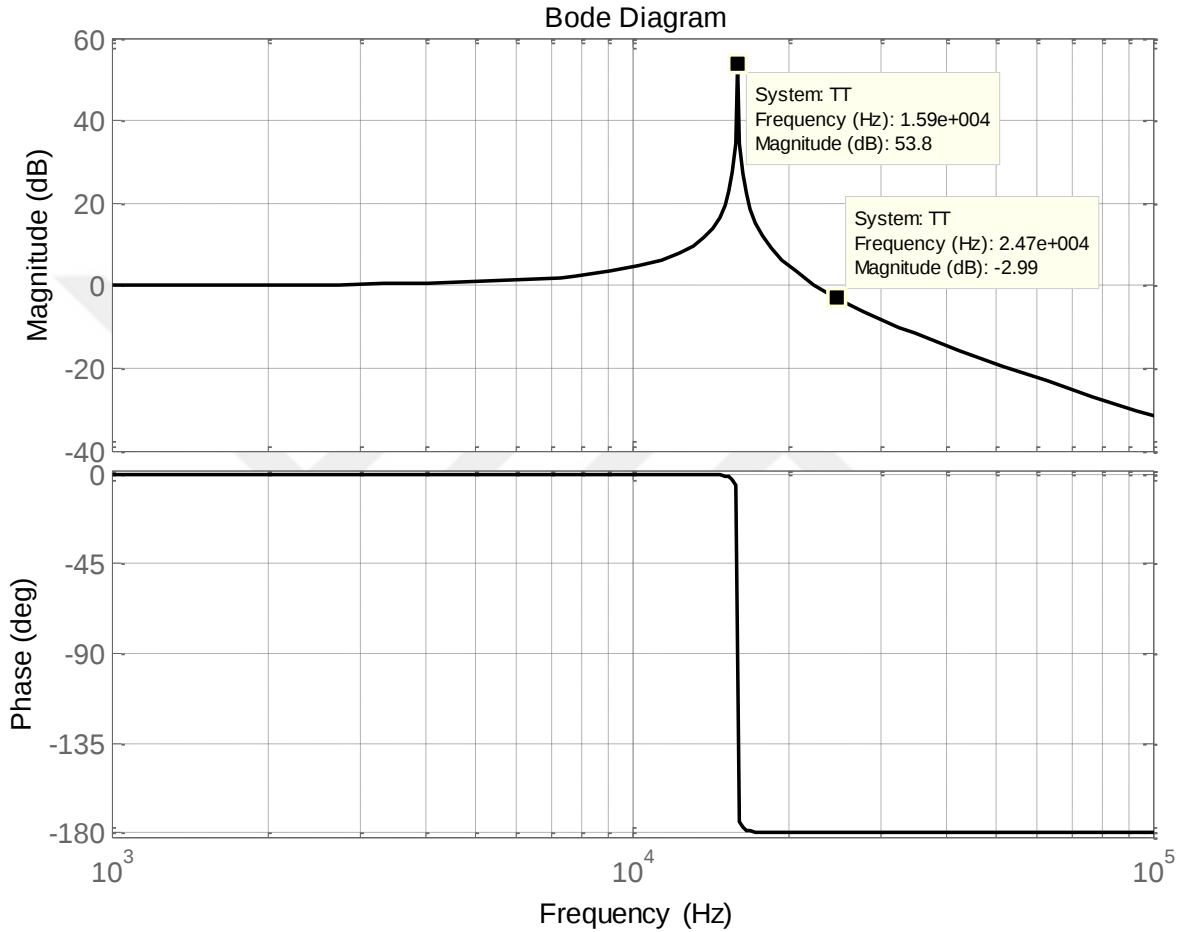
Buna göre eviricinin anahtarlama frekansının bilinmesi gereklidir. Öncelikle yüksek hızlı volanlı enerji depolama sisteminin çalışma hız aralığının tespit edilmesi gereklidir. Bu sistemler genellikle 30000 d/d ile 60000 d/d hızları arasında çalışmaktadır. Bu hız değerleri iki kutuplu bir elektrik makinası için senkron frekans 500 Hz ile 1000 Hz arasında olacaktır. Hem elektrik makinasının yüksek senkron frekansı nedeniyle hem de akım dalgalanmalarının azaltılması gerekliliği nedeni ile yüksek hızlı motorların sürücü devrelerinde anahtarlama frekansı yüksek olmaktadır. Anahtarlama frekansının yüksek olması motor sargılarında yüksek dv/dt değişimlerine neden olmaktadır. Kullanılacak olan LC filtre aynı zamanda yüksek dv/dt değişimlerinin azaltılmasını sağlayacaktır.

Benzetimi yapılacak olan volanlı enerji depolama sisteminin anahtarlama frekansı 50 kHz olarak belirlenmiştir. Seçilen kapasitenin değeri 1 μ F ve seçilen indüktansın değeri 100 μ H' dir. Bu durumda filtrenin köşe frekansı 15.923 kHz olarak bulunur ve anahtarlama frekansının üçte birinden daha küçük bir değerdir. Yüksek hızlı FDAM' larının sargı dirençleri de oldukça küçük değerlidir. Bu nedenle filtrenin sargı direnci motorun karakteristiğini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu nedenle R_f sargı iç direncini gösterecek şekilde filtre devresine eklenmiştir ve değeri yaklaşık 0.02 Ω ' dur. FDAM' unun akım kontrol parametrelerinin hesaplanabilmesi için sisteme dahil olan filtrenin transfer fonksiyonunun bilinmesi gereklidir. Şekil 5.1' deki filtrenin transfer fonksiyonu Denklem 5.2' de görülmektedir.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1} \quad (5.2)$$

Transfer fonksiyonunun davranışının incelenmesi için bode diyagramının çizilmesi gerekmektedir. Şekil 5.2' de LC filtresinin bode diyagramı görülmektedir. Buna göre

yaklaşık 16 kHz olan köşe frekansında genlik büyüklüğü yaklaşık 54 dB olduğu görülmektedir. Köşe frekansındaki bu genlik değerinin 20 dB' in altına düşürülmesi filtrenin performansını artıracaktır ve filtre kayıplarını azaltacaktır. Bunu sağlamak için köşe frekansındaki filtre genlik değerinin sönümlenmesi gerekmektedir.

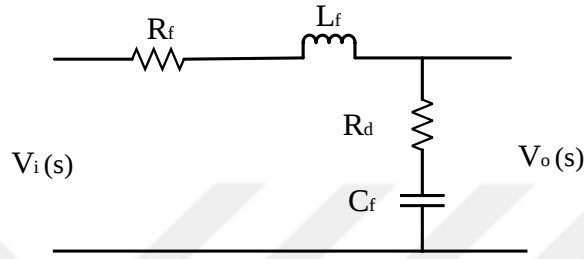


Şekil 5.2 LC filtresinin bode diyagramı

Literatürde sönümlenmenin sağlanması için birçok devre yapısı mevcuttur. Burada gerçekleştirilen filtre devresinde daha az eleman kullanılarak etkili bir filtreleme işlemini gerçekleştirmek için filtre kapasitesine seri bir direnç eklenerek sönümlenme sağlanacaktır. Eklenecek direncin değeri çok önemlidir. Çünkü direnç değeri olması gerektiğinden çok küçük olursa sönümlenme işlemini gerçekleştiremez. Eğer olması gerektiğinden büyük bir değer olursa aşırı sönümlenme işlemi yapmış olur. Bu durumda sistemin çalışmasına engel olur ve eviricinin anahtarlaması ile motorda oluşması beklenen etki gerçekleşemeyecektir. Kritik sönümlenme direnci değeri Denklem 5.3 ile hesaplanabilir.

$$R_d = 2 \sqrt{\frac{L_f}{C_f}} \quad (5.3)$$

Bu ifade ile kritik R_d direncinin değeri 20Ω olarak bulunur. Bu direnç değeri tam sönümlleme yapmak için kullanılır. Fakat bu değer çok kritik bir değerdir. Şekil 5.3' te sönümlleme direnci ile birlikte filtre yapısı görülmektedir.

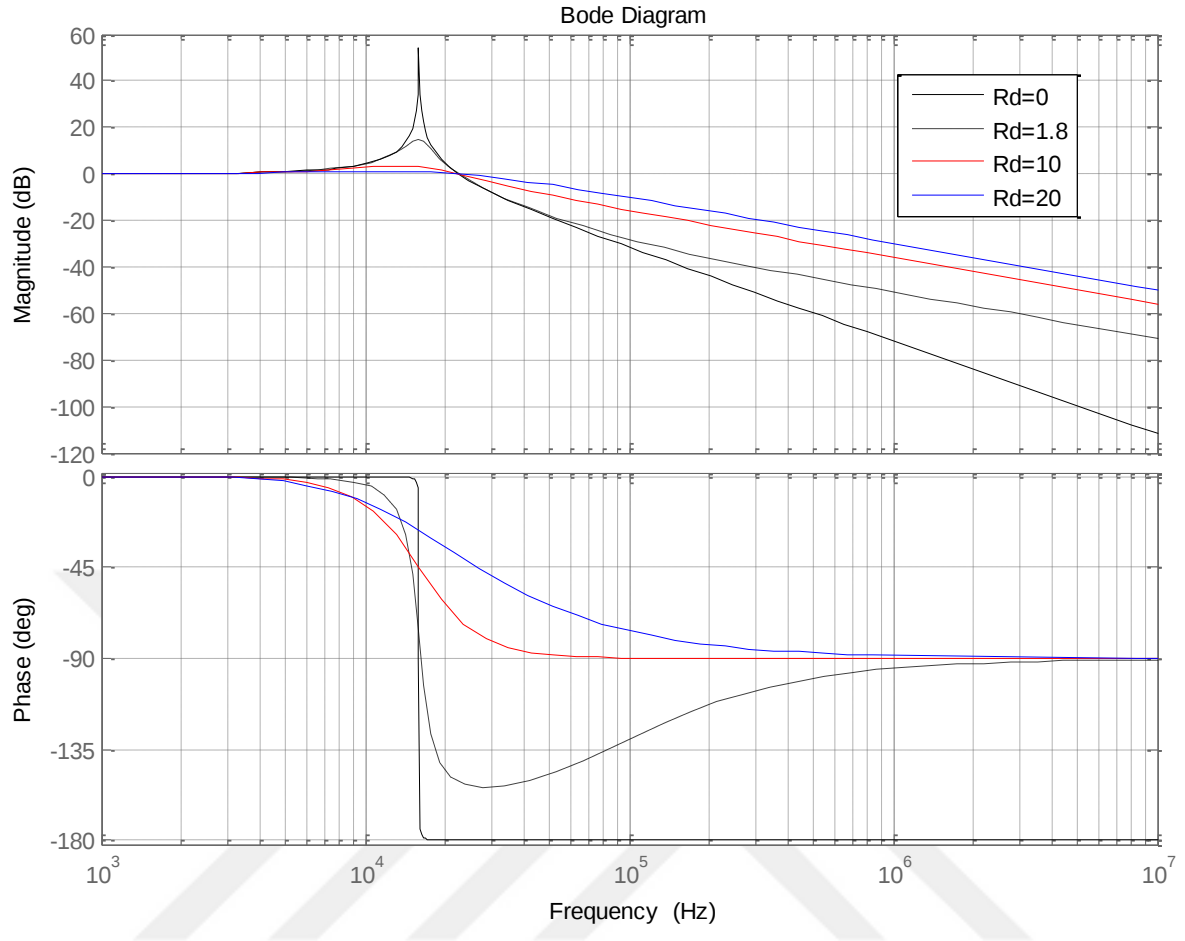


Şekil 5.3 Sönümlleme direnci ile birlikte LC filtre

Denklem 5.4' te sönümlleme direncinin filtreye dahil edildiği transfer fonksiyonu görülmektedir. Şekil 5.4' te çeşitli sönümlleme dirençleri ile filtresinin bode diyagramı görülmektedir. Kritik sönümlleme direnci değerinde sistemin -3 dB' i geçtiği frekans değeri yaklaşık 40 kHz'dir. Tasarımda kullanılacak direnç değerinin bu kritik değerinin altında olması gerekir. Bode diyagramında sistemin -3 dB geçtiği frekans değeri köşe frekansına yakın bir değer olursa daha iyi bir performans elde edilecektir. Şekil 5.4' te sönümlleme direnç değerinin 1.8Ω ile 10Ω arasında olması gerektiği görülmektedir.

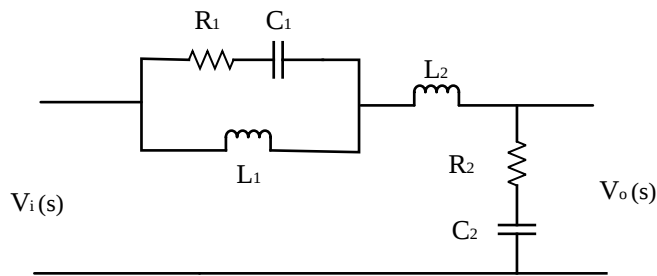
$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{R_d C_f s + 1}{L_f C_f s^2 + (R_d + R_f) C_f s + 1} \quad (5.4)$$

1.8Ω sönümlleme direnci kullanılarak oluşturulan filtrenin köşe frekansındaki genlik değeri 15 dB olarak görülmektedir. 10Ω luk dirençle beraber köşe frekansındaki genlik değeri 3 dB iken 20Ω luk dirençle beraber köşe frekansındaki genlik değeri 1 dB olarak görülmektedir. Her üç direnç değeri de sönümlleme için yeterli olarak görülmektedir.



Şekil 5.4 Çeşitli sönümlenme dirençleri ile LC filtresinin bode diyagramı

Kullanılan LC filtreye ek olarak anahtarlama frekanslarında oluşan harmonikleri yok etmek için paralel rezonanslı bant durduran filtreye eklenebilir. Bu filtre ile akımdaki toplam harmonik bozulma azaltılabilir. Şekil 5.5 'de bant durduran filtre ile LC filtrenin birleşimi ile oluşturulan yeni filtre yapısı görülmektedir.



Şekil 5.5 Bant durduran filtre ile LC filtre

Bant durduran rezonans filtrenin rezonans frekansının, anahtarlama frekansına eşit olacağı şekilde devre elemanlarının seçimi yapılacaktır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan bir tanesi filtre indüktansının değerinin çok yüksek olmaması gerektiğidir. Çünkü motor indüktansı çok düşüktür. Filtre indüktansı olarak 100 μ H seçildiğinde filtre kapasitesi olarak 100 nF seçilir ve yaklaşık anahtarlama frekans bölgesindeki harmonikleri yok eden bant durduran rezonans filtre tasarımı gerçekleştirilmiş olur. Bu filtrede kapasitenin önüne bir sönümlleme direnci eklenmiştir. Bu direnç kritik direnç değeri olan 31,6 Ω ' un altında olmalıdır. Eğer direnç değeri sıfır olursa filtre sadece rezonans frekansı için bant durduran filtre olarak çalışır. Filtrenin amacı da zaten bu görevi yapmaktır. Fakat çok küçük bir sönümlleme direnci eklenerek bant aralığı azda olsa genişletilebilir. Böylece rezonans frekansında filtre görevini yaparken sönümlleme nedeniyle motor akımındaki toplam harmonik bozulmada biraz daha iyileşme sağlanır. Denklem 5.5' te Şekil 5.5' te görülen bant durduran ve LC filtre için transfer fonksiyonu yazılmıştır.

$$\frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{as^4 + bs^3 + cs^2 + ds}{es^5 + fs^4 + gs^3 + hs^2 + ds} \quad (5.5)$$

Burada;

$$a = L_1 R_1 C_1 C_2^2$$

$$b = L_1 R_2 C_1 C_2^2 + L_1 R_1 C_1 C_2^2$$

$$c = R_1 R_2 C_1 C_2^2 + L_1 R_1 C_1 C_2^2$$

$$d = C_2^2$$

$$e = L_1 L_2 C_1 C_2^2$$

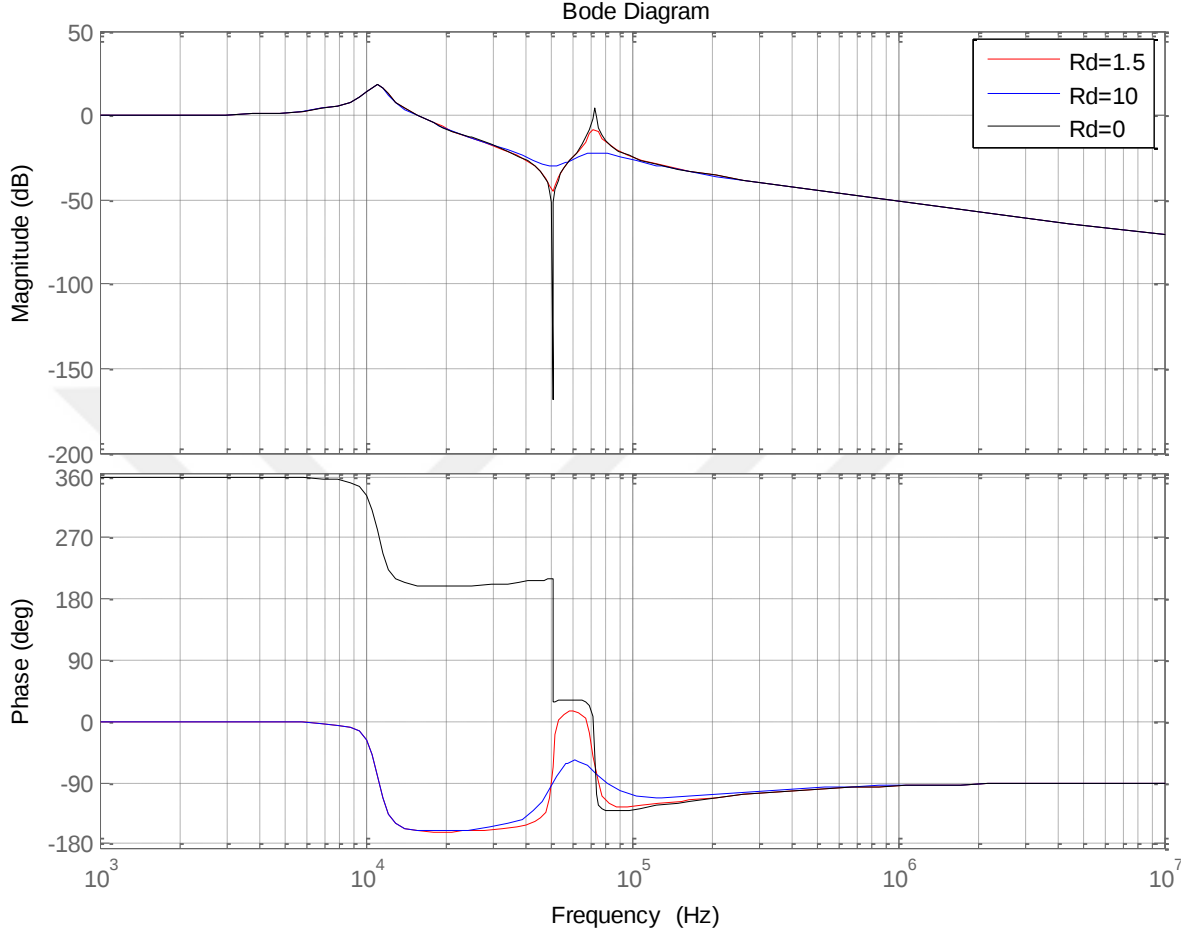
$$f = L_1 R_2 C_1 C_2^2 + L_1 R_1 C_1 C_2^2$$

$$g = R_1 R_2 C_1 C_2^2 + L_2 R_1 C_1 C_2^2 + L_1 C_1 C_2 + L_1 C_2^2 + L_2 C_2^2$$

$$h = R_2 C_2^2 + R_1 C_1 C_2$$

Bu ifadenin bode diyagramı incelenecek olunursa, sönümlleme direnci olmadan 50 kHz frekansında filtrenin -150 dB büyüklüğüne anlık bir şekilde ulaştığı görülmektedir. 1.5 Ω sönümlleme direnci eklendiğinde yaklaşık -45 dB değerine ulaşır. Bu değer üzerine çıkıldıkça sönümlleme artar ve filtrenin gerçek görevini yapması engellenmiş olur. 10 Ω ' luk direnç değerinde sönümlleme oldukça artmıştır ve genlik diyagramında rezonans frekansında

çok az bir genlik değişimi gerçekleşmiştir. Düşük olan bu genlik değişimi filtrenin görevini yapmadığını göstermektedir.



Şekil 5.6 Bant durduran filtre ile LC filtrenin bode diyagramı

Tasarlanan filtrenin LC kısmındaki köşe frekansı değişmemiştir. Her iki filtrede görevini yapabilmektedir. Bu filtreler sisteme eklendikten sonra kontrolör parametrelerinin, filtre transfer fonksiyonlarının sisteme dahil edilerek bulunması gerekmektedir. Çünkü yüksek hızlı FDAM' unun çok düşük olan direnç ve indüktans değerleri filtre parametrelerinin çok altında kalacaktır. Bu nedenle sistemin fiziksel yapısı tamamen değişmiştir.

5.2 Evirici, Akım Algılayıcısı ve FDAM' unun Transfer Fonksiyonları

FDAM' unun gerilim ifadesi Denklem 2.15' de ve moment ifadesi Denklem 2.22' de verilmişti. FDAM' unun akım kontrolünün gerçekleştirilebilmesi için akım/gerilim transfer

fonksiyonu oluşturulmalıdır. Bunun için öncelikle motorun gerilim ve moment denklemlerinin transfer fonksiyonları Denklem 5.6 ve Denklem 5.7’ deki gibi oluşturulmuştur. Denklem 5.6 ve Denklem 5.7’ den faydalanılarak motorun akım/gerilim Denklem 5.8’ deki gibi oluşturulmuştur.

$$V(s) = i_s(s)R_s s + sL_s i_s(s) + K_e \omega_m(s) \quad (5.6)$$

$$K_t i_s(s) = T_L + Js\omega_m(s) + B\omega_m(s) \quad (5.7)$$

$$\frac{i_s(s)}{V(s)} = \frac{Js + B}{L_s Js^2 + (R_s J + L_s B)s + R_s B + K_e K_t} \quad (5.8)$$

Sistemde evirici ve akım algılayıcısı faz gecikmeli belirli bir kazançla sahip transfer fonksiyonu olarak modellenenir. Denklem 5.9 ve Denklem 5.10’ da evirici ve akım algılayıcısının transfer fonksiyonları görülmektedir.

$$T_c(s) = \frac{K_c}{T_c s + 1} \quad (5.9)$$

$$T_a(s) = \frac{K_a}{T_a s + 1} \quad (5.10)$$

Evirici kazancı gerilim ölçme skalasının maksimum 5 V olduğu ve motor maksimum gerilimi olan 36 V gerilim elde etmek DA kaynağının gerilim seviyesinin yaklaşık 45 V olduğu düşünülerek K_c katsayısı 9 V/V olarak alınabilir. Akım algılayıcısının maksimum 10 A/V olarak ölçebildiği varsayılarak ve motor en yüksek akımının 6.72 A olduğu bilindiğinden K_a katsayısı 1 A/V olarak alınabilir. Evirici ve akım algılayıcısının zaman sabiti anahtarlama frekansına eşittir ve 0.02 ms olarak alınır.

5.3 PID Denetimi

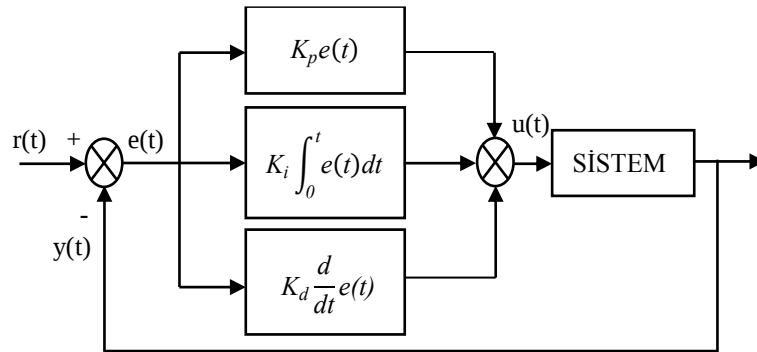
Kontrol edilmek istenen referans büyüklüğün ölçülen büyüklük ile karşılaştırılıp ölçülen hata değerini en küçük seviyeye getirmek için kullanılan sistemler kapalı çevrim sistemlerdir. Bu sistemlerde kullanılan P(oransal), I(integral), D(türev) içeren kontrolörler endüstrinin hemen hemen bütün alanlarında kullanılmaktadır. Basit yapısı, kontroldeki

başarısı ve mikroişlemciler için kolay uygulanabilir olması bu kontrolör yapısının endüstride yoğun olarak kullanılmasının önünü açmıştır.

Kontrol edilecek sistemde sadece P(oransal) kontrolör bulunursa sistem, referans girişi sürekli bir durum hatası ile takip eder. Bu nedenle sisteme I(integral) denetimi eklenerek sürekli durum hatasının sıfır olması sağlanır. İdeal bir sistemde kontrol edilen büyüklüğün referans büyüklüğü hatasız takip etmesi istenilir. PI(oransal-integral) denetimi bir sisteme uygulandığında uygun kontrolör parametreleri ile sistemin sürekli durum hatası sıfır yapılır [62].

Bir sistemde sistemin çalışmasını etkileyen diğer bir önemli etken ise aşma miktarıdır. Sisteme bozucu bir giriş uygulandığında veya sistem referans büyüklüğü yakalamadan önce bir miktar referans büyüklüğün üzerine çıkar ve referans büyüklük etrafında salınım yaptıktan sonra sürekli duruma ulaşır. PI kontrolör parametreleri en uygun şekilde ayarlandığı takdirde bu aşma değeri azaltılabilir hatta yok edilebilir.

Sistemin geçici durum davranışı yani sürekli duruma ulaşma zamanı önemli ise sisteme D(türev) denetiminin eklenmesi gerekir. Böylece PID(oransal-integral-türev) denetimi oluşturularak sistemin sürekli duruma ulaşma zamanı ve bununla beraber aşma değeri de kontrol edilebilir. Şekil 5.7' de en basit şekilde kapalı çevrim PID denetimi yapılan sistem görülmektedir.



Şekil 5.7 PID denetimi

Burada sisteme uygulanan giriş büyüklüğü ile sistemin çıkış büyüklüğü arasındaki fark $e(t)$ hata değeri olarak tanımlanmıştır. Denklem 5.11' de görüldüğü gibi bu hata değeri K_p oransal kazanç değeri ile çarpılıp P denetim oluşturulmuştur.

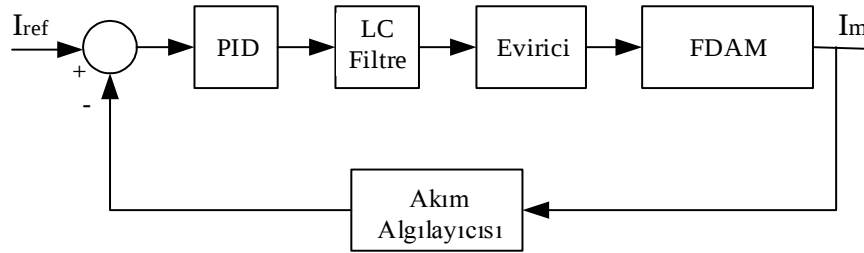
Hata değerinin integrali alınıp K_i integral kazanç değeri ile çarpılması ile I denetimi oluşturulmuştur. Hata değerinin türevi alınıp K_d integral kazanç değeri ile çarpılması ile D denetimi oluşturulmuştur. Bu üç denetim toplanarak PID denetimi oluşturmuş olur.

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) + K_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (5.11)$$

Kontrol edilecek sistemin transfer fonksiyonları daha önce belirlenmişti. K_p , K_i , K_d parametrelerinin bulunabilmesi için PID denetim bloğunun transfer fonksiyonu Denklem 5.12' deki gibi oluşturulmuştur.

$$PID(s) = \frac{s^2 K_d + s K_p + K_i}{s} \quad (5.12)$$

Kontrol edilecek olan geri beslemeli sistem Şekil 5.8' de görülmektedir. Bu sistemde en uygun PID denetim parametrelerinin bulunması önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.8 PID denetimi yapılan sistemin tamamı

Kontrolör parametrelerinin bulunması için birçok yöntem bulunmaktadır. Aşmayı azaltan veya ortadan kaldıran ve sürekli durum hatasını sıfıra yaklaştıran etkili yöntemlerden birisi son yıllarda güncel olarak kullanılmaya başlanan sezgisel algoritmalarıdır. Bu çalışmada sezgisel algoritma yöntemlerinden birisi olan genetik algoritmalar yardımıyla Şekil 5.8' deki karmaşık sistem için en uygun kontrolör parametreleri araştırılacaktır.

5.4 Genetik Algoritmalar

GA fikri ilk olarak J. Holland tarafından ortaya atılmıştır. Holland, arkadaşları ve öğrencileri ile birlikte bu algoritmayı geliştirmiş ve ilk çalışmalarının sonucunda “Adaptation in Natural and Artificial System” isimli kitabını çıkartmıştır [35], [63]. GA’ lar bir problemin en uygun sonucunu bulmak için kullanılan sezgisel metottur. Sezgisel bir metot olduğundan dolayı verilen bir problem için en uygun sonucu bulamayabilir, ancak bilinen metotlarla çözülemeyen ya da çözüm zamanı problem büyüklüğü ile üstel artan problemlerde en uygun değere çok yakın çözümler vermektedir.

GA’ lar değişken sayısı çok fazla ve çok boyutlu fonksiyonlara sahip olan kısıtlı veya kısıtsız optimizasyon problemlerini biyolojik evrim ve doğal seçim ilkeleri ile çözen bir yöntemdir. Doğal seçim ilkesi en iyi bireyin yaşaması diğer bireylerin yaşamlarının son bulması ile açıklanabilir. GA olasılık kurallarına göre çalışır ve problemin tanımlandığı bir uygunluk fonksiyonuna ihtiyaç gösterir aynı zamanda çözüm uzayının belirli bir kısmını taradığı için çözüme çok daha kısa zamanda ulaşır. Çözüm yoğunluğunu aynı anda taradığı için yerel çözümlere takılmaz ve çözümü grup halinde taradığı için birçok çözümden en iyi olanı seçer.

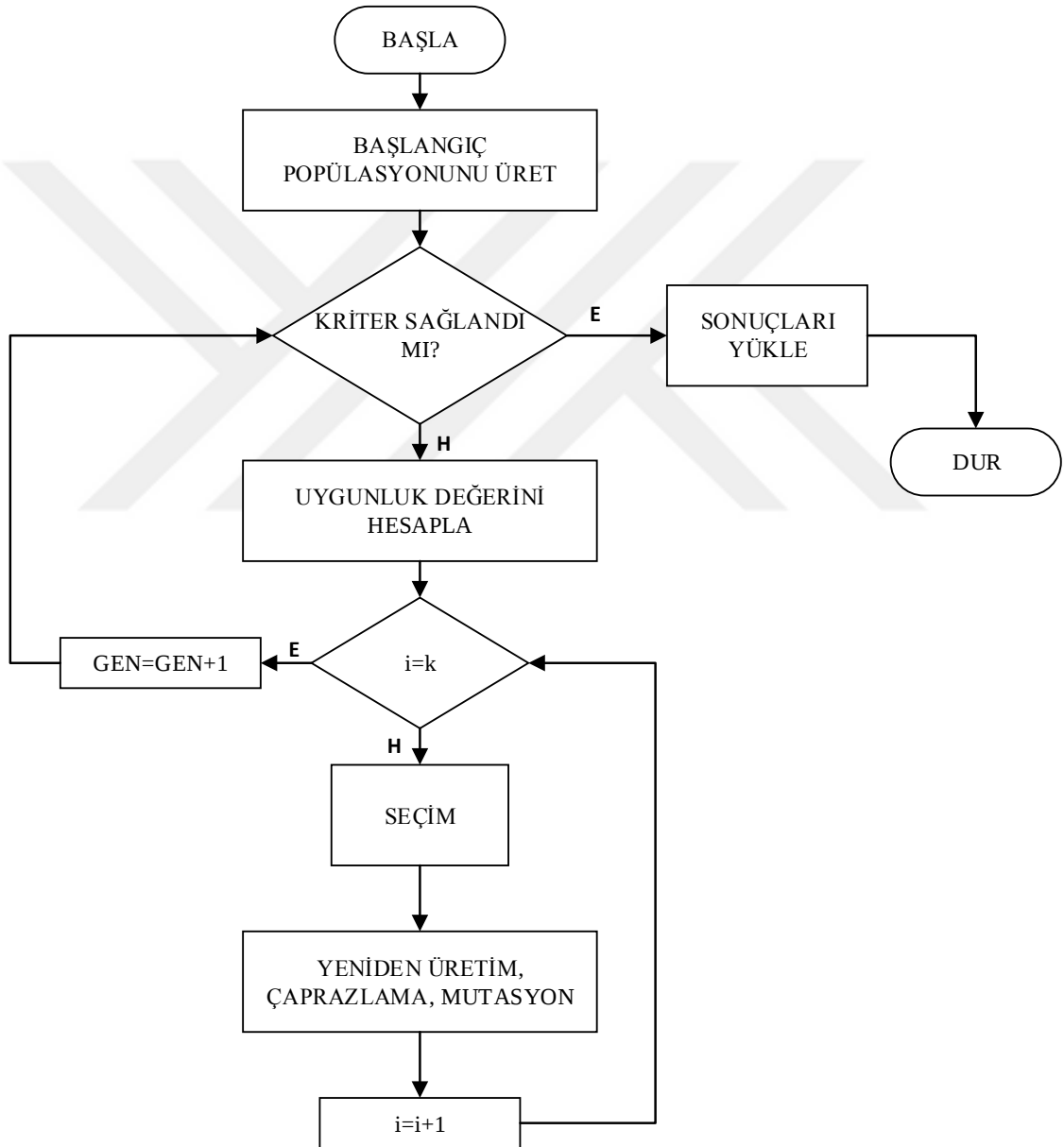
Genetik algoritma mevcut yoğunluktan yeni nesil oluşturmak için her adımda üç temel kural kullanır.

- Seçim kuralı bir sonraki aşamada üretilen yoğunluğa katkıda bulunacak ebeveyn bireylerini seçer.
- Çaprazlama kuralı bir sonraki bireyleri üretmek için iki ebeveyni birleştirir.
- Mutasyon kuralı bir sonraki nesilden rastgele değişim yolu ile bireyler üretir.

Bu algoritma ilk anda araştırma bölgesinde bir başlangıç yoğunluğu (popülasyon) kullanmaktadır. Her defasında başlangıç yoğunluğunun bireysel çözümlerini geliştirir. Her adımda rastgele bireyler seçer ve mevcut uygunluk ebeveyn olarak belirlenir. Ebeveyn yoğunluğu bir sonraki nesili üretmek için kullanılır [64-67]. En son üretilen nesilin en iyi bireyi optimize edilen problemin en iyi çözümü olacaktır. Bu değer her zaman tam optimum değer olmayabilir fakat optimuma en yakın değer olacağı kesindir. En basit şekilde basit GA akış şeması Şekil 5.9’ da görülmektedir.

Popülasyon içerisindeki her birey kromozom adı verilir ve bu kromozomlar genlerden oluşur. Bir gen, bir kromozom oluşturulurken kodlanabilen en küçük bilgiye verilen isimdir. GA problemi en iyi tanımlayan uygunluk veya amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyar. Çözüm

işleminde uygunluk fonksiyonun türevlerini değil kendisini kullanır. Uygunluk fonksiyonun değeri bütün kromozomlar için üretilir. Popülasyon içerisinde birden fazla kromozom olduğu için GA bir grup çözümle uğraşır. Grup çözümün içerisinde her üretimde uygunluk fonksiyonunun değerini sağlamaktan uzak olan kromozomlar elendiği için doğal seçim işlemi gerçekleşmiş olur. GA çözüme bir noktadan değil de birden fazla noktadan başladığı için çözümde yerel optimum değerlere takılma olasılığı düşüktür.

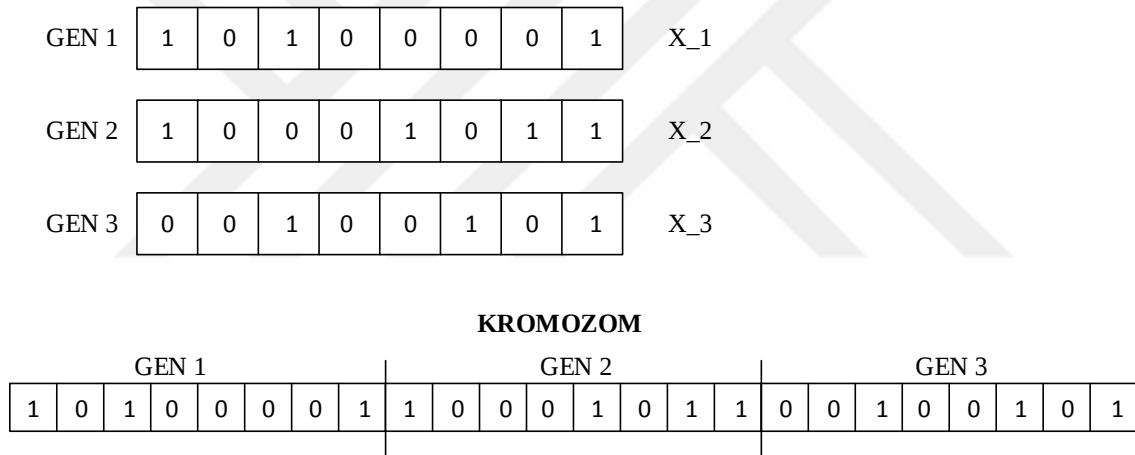


Şekil 5.9 Basit GA akış şeması

5.4.1 Kromozomların Kodlanması

GA' parametrelerin kodlanmış şekiller ile işlemlerini gerçekleştirir. Her bir kromozom, arama uzayında belirli bir çözüme karşılık gelir. Bir kromozomu oluşturan her bir elemana da gen denir. Her bir kromozom için bir uygunluk değeri hesaplanır ve bulunan uygunluk değerleri kromozomların çözüm kalitesini gösterir. Bu nedenle çözüm uzayını en iyi şekilde temsil edebilecek kromozomların kodlama yönteminin seçimi önemlidir.

Uygulamalarda genellikle ikili sayı düzenindeki kodlama yöntemi tercih edilmektedir. İkili kodlama sisteminde her bir parametre ikili sistemdeki sayılardan oluşan bir sayı dizisi şeklinde belirlenmektedir. Her bir dizi ise kromozomların bir genini oluşturmaktadır. Üç adet parametreye sahip 8 bitlik genlerden oluşan bir kromozom Şekil 5.10' da görülmektedir.



Şekil 5.10 İkili sayı sisteminde bir kromozomun yapısı.

İkili sayı sistemi dışında gerçel sayılarla veya gray kod gibi farklı sayı sistemleri ile kodlamada yapılabilir. Problemin türüne göre kodlama yönteminin seçilmesi daha uygun olacaktır. Bazı gerçel sayıların kullanıldığı problemlerin çözümünde ikili kodlama kullanmak uygun olmayabilir.

5.4.2 Başlangıç Popülasyonunun Oluşturulması

GA' da kromozomlar bir araya gelerek bir popülasyonu oluşturur ve problemin çözümü bu popülasyon içerisinde aranır. İlk popülasyon oluşturulmasında GA' nın en önemli özelliği

olan bireyler rastgele seçilir.

Rastgele seçim bazen problemi çözümden uzaklaştırabilir. Bu nedenle eğer daha önceki deneyimlerden elde edilen bir bilgi mevcut ise başlangıç noktasını belirlerken bu bilgiden faydalanılabilir. Başlangıç popülasyonun büyüklüğü önemlidir. Eğer başlangıç popülasyonu yeterince büyük seçilmezse problemin çözümü, çözüm uzayının dışında kalabilir.

5.4.3 Uygunluk Fonksiyonu

GA' da her bir kromozom uygunluk fonksiyonuna tabi tutulur. Elde edilen değer uygunluk değeri olarak tanımlanır. Uygunluk değeri hangi kromozomun bir sonraki nesile geçeceğinin veya hangi kromozomun bir sonraki nesile geçemeyeceğinin göstergesi olacaktır. Bu nedenle her probleme ait bir uygunluk fonksiyonun bulunması gerekir ve GA uygunluk fonksiyonu belirlenemeyen problemlerin çözümünde kullanılamaz. Ayrıca uygunluk fonksiyonun sonucunda sadece doğru-yanlış, sayısal 1 veya sayısal 0 gibi değerler üretiliyorsa kromozomların bir sonraki nesile aktarılmasının anlamı kalmadığı için GA' da bu tip uygunluk fonksiyonları kullanılamaz.

5.4.4 Seçim

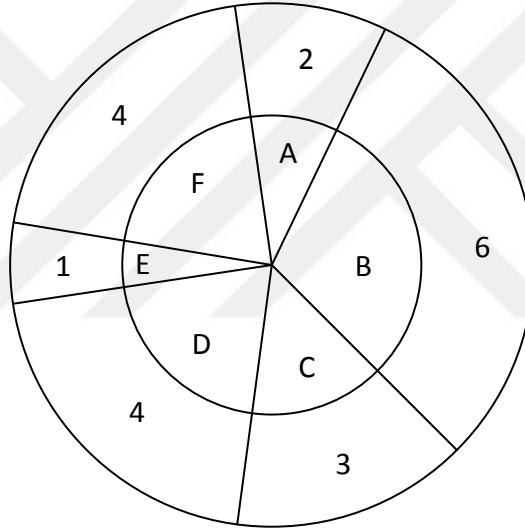
Seçim işlemi üremeye tabi olacak olan kromozomların seçilmesi olarak tanımlanır. Seçim işlemi ile bir sonraki nesile geçecek olan kromozomların uyumlarının yüksek olması sağlanır ve böylece doğal seçim gerçekleştirilir. Seçimde uygulanacak olan seçicilik zayıf olarak gerçekleşirse aramanın etkinliği olumsuz etkilenir. Bu nedenle ebeveyn olacak kromozomların nasıl seçileceği belirlenmelidir.

Bireysel yapılar, bir kuşaktan diğer kuşağa geçerken uygunluk değerlerine göre kopya edilerek çoğaltılırlar. Uygunluğu daha yüksek olan çözümlerin diğerlerine göre daha fazla kopya edilme şansları vardır. Bu yüzden daha kaliteli çözümlerin popülasyon olarak baskın olmaları, yeterli uygunluğu taşımayanların (kalitesiz olanların) ise yavaş yavaş elenmeleri yani ölmeleri seçim ile sağlanır. Seçim işlemi üç farklı yöntemle sağlanır.

5.4.4.1 Rulet Tekerleği Yöntemi ile Seçim

Rulet tekerleği ebeveyn seçme operatörü, iyi bilinen ebeveyn belirleme metotlarından biridir. Seçme operatörü birkaç aşamada çalışır. İlk aşamada her bir kromozomun uygunlukları toplanarak popülasyonun toplam uygunluğu bulunur.

İkinci aşamada her bir kromozom uygunluğunun toplam uygunluğun yüzde kaçını temsil ettiği bulunur. Seçilen her bir ebeveyn için bu prosedür kullanılır. Böylece her biri kromozoma uygunluğu oranında tekerlek üzerinde bir parça verilir. Şekil 5.11’de görülen rulet tekerleği toplam uygunluk değeri olan 20 eşit parçaya ayrılmıştır. Tekerlek üzerinde her kromozom uygunlukları oranında yerleştirilmiştir.



Şekil 5.11 Rulet Tekerleği

Tekrar üremenin gerçekleşmesi için rulet tekerleğinin döndürülmesi gerekir. Bunun için sıfırla toplam uygunluk değeri arasında rastgele bir sayı üretilerek bu sayının tekerleğin hangi parçasına karşılık geldiğine ve dolayısıyla hangi kromozomun seçildiğine bakılır. Bu şekilde tekerlek bir kere dönmüştür ve ilk kromozom belirlenmiştir. Benzer şekilde diğer kromozomların da belirlenmesinden sonra uygunluk değerleri en başarılı olan adaylar eşleştirme havuzu olarak anılan bir havuzda toplanarak, diğer genetik operatörlerin uygulanması için hazırlanırlar.

Şekil 5.11’deki rulet tekerleğinde A, B, C, D, E, F kromozomları temsil etmektedir. Bu kromozomların uygunluk değerleri rulet tekerleği üzerindeki rakamlar ile gösterilmiştir.

Örneğin D kromozomu toplam 20 olan uygunluk değerinde 4 olan uygunluk değerine sahiptir. Şekle göre A'nın 1-2, B'nin 3-8, C'nin 9-11, D'nin 12-15, E'nin 16 ve F'nin 17-20 nolu parçalara sahip olduğu düşünülürse, 6, 1, 5, 12, 10 ve 18 değerlerine sahip rastgele sayıların üretilmesi durumunda seçilen ebeveynler sırayla B, A, B, D, C ve F olacaktır. Kolaylıkla görülebileceği gibi 6 ile en yüksek uygunluk değerine sahip olan B kromozomunun diğerlerine göre seçilme şansı daha fazla olacaktır.

5.4.4.2 Turnuva Yöntemi ile Seçim

Bu yöntemde popülasyon içinde rastgele bireyler (kromozomlar) seçilerek, bu bireylerin yerine yeni bireyler yerleştirilerek veya yeni bireyler yerleştirilmeyerek, bireylerin uygunluk değerleri karşılaştırılır. Uygunluk değeri yüksek olan yeni popülasyona aktarılır ve uygunluk değeri düşük olanlar elenir. Bu işlem popülasyondaki birey sayısı kadar tekrarlanır. Böylece yeni popülasyon üretilmiş olur. Küçük popülasyon kullanılan uygulamalarda rulet tekerleğinden daha iyi sonuç vermektedir.

5.4.4.3 Elitist Yöntem ile Seçim

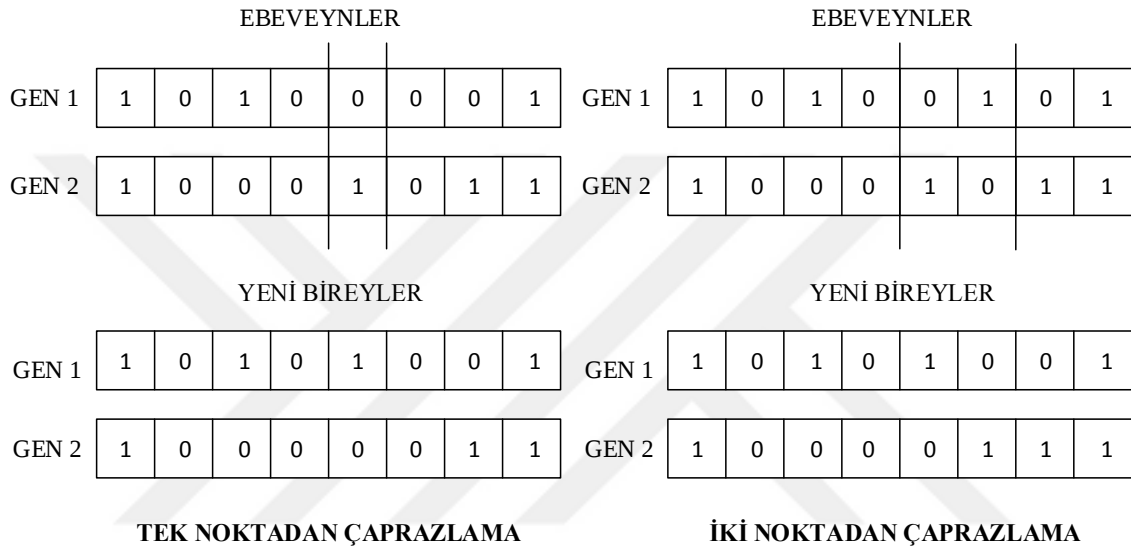
Bu yöntemde popülasyonun uygunluk değeri en yüksek olan bireyleri tutulur diğer bireyler uygun görülen bir seçim yöntemi ile uygunluk değeri yüksek olan bireyler bir sonraki popülasyona aktarılır. Böylece popülasyonun en iyi bireylerin genetik operatörlerin kullanılırken kaybolmasının önüne geçilmektedir. Burada elit birey sayısının sınırlı tutulması gerekir çünkü elit birey sayısı arttıkça popülasyonun çeşitliliği azalmaktadır.

Seçim işlemi problemin çözümü ile ilgili bilgiler verebilir fakat kesin çözüme ulaştırmaz kesin çözüme ulaşmak için bazı operatörlerin uygulanması gerekmektedir. Seçim yoluyla üreme havuzuna alınan bireyler yeni bir popülasyon oluştururlar yeni operatörleri uygularken ebeveyn pozisyonuna geçerler.

5.4.5 Çaprazlama

Birçok uygulama için en önemli operatörlerden bir tanesi çaprazlamadır. Bu operatör rastgele seçilen iki bireyin yine rastgele seçilen bir veya birden fazla noktalarındaki

genlerinin değiştirilmesi ile elde edilen yeni iki tane bireyin en uygun olanını veya her ikisini yeni popülasyona dahil edilmesi olarak tanımlanabilir. Bu operatör değişik kromozom yapılandırmalarının test edilmesine ve hızlı şekilde tekrar yapılmasına olanak sağlar. İkili kodlamalı sisteminde genelde tek noktalı veya iki noktalı çaprazlama kullanılır. Şekil 5.12’ de tek noktadan ve iki noktadan çaprazlanan kromozomlar ve bu çaprazlama sonucunda ortaya çıkan yeni bireyler görülmektedir.



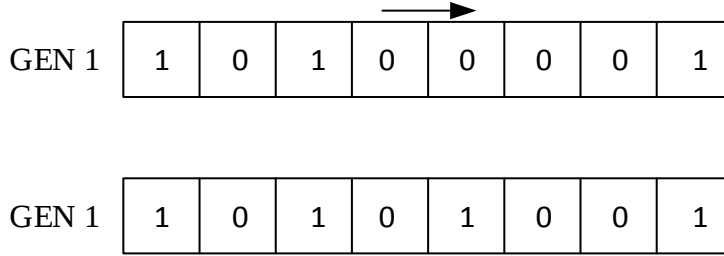
Şekil 5.12 İkili kod sisteminde tek noktadan ve iki noktadan çaprazlama

Gerçek kodlamanın kullanıldığı GA optimizasyon yönteminde yeni bireyler oluşturmak için aritmetik işlemlerden faydalanılır. Örneğin çaprazlamanın yapılacağı genlerden birincisi 9 değerinde ise ikinci gen de 3 değerinde ise bu iki genin çaprazlanması sonucunda oluşan yeni genin değeri bu iki genin aritmetik ortalaması olan 6 değerinde olacaktır.

5.4.6 Mutasyon

GA işlemlerini yaparken belirli bir döngü sayısına ulaştığında popülasyondaki kromozomların çeşitliliği azalır. Bu durumda çözüm uzayı daralmış olur ve mevcut kromozomlara çaprazlama uygulansa dahi yeni oluşan kromozomlarda çeşitliliğin olmadığı görülür. Bu durumda kromozomlardaki genlerin bir veya birkaçında rastgele değişikliğe gidilerek yeni kromozomlar oluşturulur. Örneğin ikili kod sistemini kullanan bir

kromozomun genlerinden herhangi bir tanesi 0 ise 1, 1 ise 0 yapılarak mutasyon işlemi Şekil 5.13’ deki gibi gerçekleştirilmiş olur.



Şekil 5.13 İkili kod sisteminde mutasyon işlemi

Kodlama işlemi gerçel sayılarla yapılmışsa mutasyon işlemi için gaussian mutasyon işlemi kullanılır. Bu işlemde seçilen genin üstüne gaussian dağılımına göre seçilen değer eklenir. Eklenen değer mutasyon oranına göre azaltılıp çoğaltılabilir.

5.4.7 Matlab ile Optimizasyon

Matlab programı optimizasyon amaçlı komutlar oluşturmuştur. Bu optimizasyon kullanım komutları ve algoritmaların özellik seçim komutları bulunmaktadır. Bu çalışmada genetik algoritma komutlarından faydalanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilecektir. Öncelikle bu komutların işlevinin bilinmesi gereklidir. İlk olarak gerçekleştirilecek olan optimizasyon fonksiyonu matlab dosyası içinde tanımlanmalıdır.

`[x fval] = ga(@fitnessfun, nvars)` şeklinde tanımlanan bir GA fonksiyonunda “@fitnessfun” başka bir matlab dosyasında tanımlanan uygunluk fonksiyonudur. “nvars” fonksiyondaki değişken sayısıdır. “x” işleyen GA’ nın değişkenlerinin aldığı en son değer. “fval” x noktasındaki uygunluk fonksiyonun değeridir.

`[x fval] = ga(@fitnessfun, nvars,[ ],[ ],[ ],[ ],[ ],[ ],[ ], options)` komutu ile GA giriş değerleri üzerinde işlem yapılabilir. Örneğin değişkenlerin sınır değerleri bu komutla girilebilir.

`Options = gaoptimset(@ga)` komutu ile programın kendi tanımladığı kullanıcı ayarları dışında GA’ yı kullanan kişinin kendi istediği doğrultuda GA’ nın özelliklerini değiştirilebilmesine olanak sağlanmaktadır. Eğer daha önceden tanımlanmış matlab

içerisindeki ayarlar kullanılmak istenirse bu komutu yazmak yeterli olacaktır. GA ayarları değiştirilmek istenirse her özellik kendi içerisinde ayrı ayrı tanımlanabilir ve tanımlanmayan ayarlar daha önceden tanımlanmış ayarlar şeklinde kullanılmaktadır.

Options = gaoptimset('PopulationSize',100) GA popülasyon büyüklüğü matlab standart ayarları 5 değişkenin altında 50 ve 5 değişkenin üzerinde 100 olarak belirlenir. Bu değerler belirlenirken popülasyonun kodlama türüne dikkat edilmelidir.

Options = gaoptimset(options,'PopulationType', 'doubleVector') popülasyonun kodlama türünün belirlenmesi gerekmektedir. Matlab standart ayarları doubleVector olarak ayarlanmıştır. İstenildiği takdirde ikili kod sistemini de seçilebilir.

Options = gaoptimset(options,'Generations',50) GA' nın kaç döngü olarak üretileceğinin göstergesidir. Bu değer belirlenirken çok fazla veya çok az olmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Çok az olunca sonuca yaklaşılamayabilir. Çok fazla büyük olursa çözüm süresini uzatır ve sonuca yaklaştıkça çözüm uzayını fazla daraltır.

Options=gaoptimset(options,'FitnessLimit', 1e-5) istenildiği takdirde belirlenebilir. Uygunluk fonksiyonunun almış olduğu değere bakarak GA 'yı sonlandırmak için kullanılır. Burada uygunluk fonksiyonunun almış olduğu değer 10^{-5} değerinden daha az olunca GA sonlandırılır.

Options = gaoptimset(options,'PopInitRange', [-999;1001]); bazen bazı uygulamalar sonucunda elde edilmiş değerlerin popülasyonun çözümünün başlangıç uzayını belirlemek çözüm süresini kısaltacaktır. Fakat yanlış belirlenmesi durumunda GA sonuca ulaşamaz çünkü uygunluk fonksiyonunun en uygun değeri çözüm uzayının dışında kalabilir.

Options = gaoptimset(options,'CreationFcn', @gacreationlinearfeasible) bu fonksiyon ile popülasyonun yeniden üretimi için gerekli olan yöntem seçilmektedir. İstenildiği takdirde kullanılabilir veya kullanıcının üretmiş olduğu fonksiyon tipi seçilip dosya olarak girilebilir. Bu fonksiyon kullanılmadığı takdirde matlab standart ayarları olan fonksiyon tipi kullanılmaktadır.

Options = gaoptimset(options,'MigrationDirection', 'both') bu fonksiyon paralel işlem yapan GA' larda tercih edilir. Alt popülasyonlar oluşturulur ve bunlar bir birey gibi çalıştırılır. Bir alt popülasyondaki en iyi birey ile başka bir alt popülasyondaki en kötü bireyin yer değiştirilmesi olayıdır. 'forward' seçildiğinde son iki alt popülasyon arasında göç olayı gerçekleştirilir. 'both' seçildiği takdirde bir önceki ve bir sonraki popülasyon arasında göç olayı gerçekleştirilir.

Options = gaoptimset(options,'FitnessScalingFcn', { @fitscalingrank }) burada seçim fonksiyonu bir sonraki nesilde ebeveynleri seçmek için ölçeklendirilmiş uygunluk değerlerini kullanır. Böylece seçim fonksiyonu yüksek değerliğe sahip ölçekli bireylerin seçim olasılığını artırır. Ölçek değerinin aralığı GA' nın performans değerini etkiler. Eğer ölçek aralığının değişim değeri çok büyük olursa yüksek ölçek değerliği olan bireylerin yeniden üretilmesi çok hızlıca olur, popülasyon gen havuzu çok hızlıca oluşur ve GA' nın çözüm uzayının diğer bölgelerinde araştırmasına engel olunur. Eğer ölçek aralığının değişim değeri çok küçük olursa bütün bireyler yeniden üretimde yaklaşık aynı değerleri aşırırlar ve GA' nın araştırma işlemi çok yavaş olur. Matlab GA toolbox' da standart ayar olarak Rank ölçeklendirme seçilmiştir. Rank ölçeklendirme her bireyin derecesine göre sıralama yapmaktadır.

Options = gaoptimset(options,'SelectionFcn', { @selectionstochunif }) seçim fonksiyonu bir sonraki jenerasyon için uygunluk değeri yüksek olan bireylerin ebeveyn olarak seçilmesini sağlar. Matlab GA toolbox içerisinde tercih edilebilecek stochastic uniform, remainder, uniform, roulette ve tournament gibi seçim fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu seçim fonksiyonları dışında tanımlanan bir seçim fonksiyonu da kullanılabilir.

Options = gaoptimset(options,'CrossoverFcn', @crossovertwopoint) çaprazlama operatörü popülasyon içerisinde rastgele seçilen bireylerden üretilen yeni bireylerin en uygunlarının bir sonraki popülasyona aktarılması için kullanılır. Tek nokta, iki nokta, sezgisel, dağınık ve aritmetik gibi çaprazlama operatörleri tanımlanmakla beraber istenildiği takdirde oluşturulan bir çaprazlama operatörü de kullanılabilir.

Options = gaoptimset(options,'EliteCount', 2) popülasyondaki en uygun bireylerin bir sonraki popülasyona geçerken kaybolmasının önüne geçer. Bu değer popülasyon büyüklüğüne eşit veya daha küçük herhangi pozitif bir tamsayı olabilir.

Options = gaoptimset(options,'CrossoverFraction', 0.8) çaprazlama sonrasında oluşan yeni neslin elit bireyler dışında kalan kısmını belirtir. Standart ayarı 0.8 olmakla beraber 0 ile 1 arasında bir değer olarak belirlenebilir.

Options = gaoptimset(options,'MutationFcn', { @mutationgaussian 0.5 2 }) mutasyon operatörünü kontrol eden bu komut satırında ölçek parametresi birinci nesilde standart sapmayı belirler. Küçültme parametresi nesiller geçtikçe standart sapmadaki küçülmeyi kontrol eder. Burada ölçek parametresi 0.5 ve küçültme parametresi 1 olarak gösterilmiştir ve standart değerleri 1 olarak belirlenmiştir.

Options = gaoptimset(options,'HybridFcn',{ @patternsearch [] }) hibrit fonksiyonlar genetik algoritmanın çalışmasının sonlanmasından sonra çalışmaya başlayan uygunluk fonksiyonun minimum değerini araştıran bir diğer algoritmadır. İstenildiğinde kullanılabilen kısıtlı veya kısıtsız problemlere sahip genetik algoritmalarda kullanılabilecek pattersarch, fminsearch, fmincon ve fminunc fonksiyonları tanımlanmıştır.

Doğrudan arama algortimaları optimizasyon algoritmaların içerisinde önemli bir yer tutmaktadır. Pattern Search Algorithm (Desen Arama Algoritması, DAA) doğrudan arama yöntemlerinden önemli bir tanesidir. DAA sürekli fonksiyonların türevlerini kullanmadan fonksiyonun minimum noktalarını araştırır. Sadece türev bilgisini içermediği gibi dolaylı yoldan türev yaklaşımlarını da kullanmamaktadır. DAA klasik optimizasyon yöntemleri dışında kalan çeşitli optimizasyon sorunlarını çözmek için uygun olan evrimsel bir tekniktir. Basit yapısı, kolay geliştirilmesi ve hesaplama yöntemi olarak çok verimli bir algoritmadır.

DAA her iterasyonda çözüm noktalarını aramak için kullanılan bir vektörler topluluğudur. DAA mevcut olan vektörler üzerinde işlem yaparak ağ olarak tarif edilen bir alan oluşturur ve bu alanın genişliği her adımda yeniden belirlenir. Yine her adımda ağ alanı içerisinde uygunluk fonksiyonu için yeni noktalar belirler. Daha sonra her adımda mevcut örüntü noktalarının vektörleri için uygunluk fonksiyonunun değerlerini hesaplar ve bu değerleri anket haline dönüştürür. Anketleme işlemi tamamlandığında sonraki iterasyona geçilir. DAA sadece ağ noktalarını hesaplar, uygunluk fonksiyonun değerleri ise anket içerisinde tutulur. Eğer algoritma yeni uygunluk fonksiyonu değerleri üretemezse başarısızlık oluşur ve bir sonraki iterasyona geçer. Böylece bütün ağ noktaları için uygunluk fonksiyonu değerleri hesaplanmış olur. Son olarak mevcut noktadaki en küçük uygunluk fonksiyonu değeri ile önceki ağ noktalarındaki uygunluk fonksiyonu değerleri karşılaştırılır ve belirlenmiş ağ noktalarındaki değer mevcut noktadaki değerden küçükse anketleme işlemi başarılı olarak gerçekleşmiş olur.

Genetik algoritmada hybrid (melez) algoritma çalışması seçilen doğrudan araştırma algoritmasına göre belirlenmektedir. Öncelikle GA çalışır ve belirlenen iterasyon sonunda bulunan uygunluk fonksiyonu değeri bir sonraki adımda çalışacak olan doğrudan araştırma algoritması için başlangıç değeri olacaktır. Böylece doğrudan arama yönteminin çözüm uzayı özelleştirilmiş olup çözüme daha kısa sürede ve daha az hatayla ulaşması sağlanmış olur. Ayrıca çözüm uzayının başlangıç noktası genetik algoritma ile belirlendiği için, çözüm uzayının çok büyük olmasından kaynaklanabilecek yerel minimum veya yerel maksimum değerlerinin bir kısmı da elimine edilmiş olur.

Uygunluk fonksiyonu hata kriterleri ile oluşturulmuştur. Melez GA karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan uygunluk fonksiyonunun değerini minimize etmeyi amaçlayan önemli bir optimizasyon yöntemidir. PID parametrelerinin en uygun değerlerini bulmak için Denklem 5.13 ile Denklem 5.17 arasında görülen hatanın mutlak değerinin integrali (IAE), hatanın karesel ortalamasının integrali (MSE), hatanın karesinin integrali (ISE), hatanın mutlak değerinin ve zamanın çarpımının integrali (ITAE) ve hatanın karesi ile zamanın çarpımının integrali (ITSE) hata kriterleri kullanılmaktadır [21].

$$IAE = \int_0^{\tau} |e(t)| dt \quad (5.13)$$

$$MSE = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e(t)^2 dt \quad (5.14)$$

$$ISE = \int_0^{\tau} e(t)^2 dt \quad (5.15)$$

$$ITAE = \int_0^{\tau} t |e(t)| dt \quad (5.16)$$

$$ITSE = \int_0^{\tau} t e(t)^2 dt \quad (5.17)$$

Aşağıdaki program satırları ile melez GA kullanılarak fırçasız doğru akım motorunun akım kontrolü için PID parametreleri hesaplanmıştır.

Melez_GA.m

function [x,fval] = melez_GA

% GA datalarının belirlenmesi.

Generations_Data=30;

PopulationSize_Data=20;

PopInitRange_Data=[-99999;1000001];

EliteCount_Data=10;

CrossoverFraction_Data=0.8;

FitnessLimit_Data=1e-5;

nvars=3;

lb=[0 0 0];

ub=[1500 1 1500];

% GA ayarlamaları

options = gaoptimset;

```

options = gaoptimset(options,'PopulationType', 'doubleVector');
options = gaoptimset(options,'PopulationSize', PopulationSize_Data);
options = gaoptimset(options,'Generations', Generations_Data);
options = gaoptimset(options,'FitnessLimit', FitnessLimit_Data);
options = gaoptimset(options,'HybridFcn', { @patternsearch [] });
options = gaoptimset(options,'PopInitRange', PopInitRange_Data);
options = gaoptimset(options,'CreationFcn', @gacreationlinearfeasible);
options = gaoptimset(options,'MigrationDirection', 'both');
options = gaoptimset(options,'FitnessScalingFcn', { @fitscalingrank });
options = gaoptimset(options,'SelectionFcn', { @selectionstochunif });
options = gaoptimset(options,'CrossoverFraction', CrossoverFraction_Data);
options = gaoptimset(options,'MutationFcn', { @mutationgaussian 0.5 2 });
options = gaoptimset(options,'EliteCount', EliteCount_Data);
options = gaoptimset(options,'PlotFcns', { @gaplotbestf });
options = gaoptimset(options,'CrossoverFcn', @crossovertwopoint);
options = gaoptimset(options,'Display', 'off');
[x,fval] = ...
ga(@bldcmotor,nvars,[],[],[],[],lb,ub,[],options);
%Programın sonu.

```

Burada bldcmotor matlab dosyasının içerisinde motor, filtre, akım algılayıcısı ve PID transfer fonksiyonlarının bulunduğu ve bu fonksiyonların kullanılmasıyla elde edilen uygunluk fonksiyonu bulunmaktadır. Uygunluk fonksiyonu bazı hata kriterleri ile kullanılmaktadır. Bu hata kriterlerinin de program kodları bu dosya içerisinde bulunmaktadır.

bldcmotor.m

```
function fness=bldcmotor(x)
```

%LC filtre parametreleri

Lf=109.1e-6; %Kablo ve filtre induktanslarının toplamı

Rf=0.146; %Kablo ve filtre dirençlerinin toplamı

Cf=1e-6;

Rd=1.8;

%LC filtre transfer fonksiyonu

```
filter=tf([Rd*Cf 1],[Lf*Cf (Rd+Rf)*Cf 1]);
```

%Motor ve diğer sistem parametreleri

```
Ra=0.061;
```

```
La=0.00685;
```

```
J=1.895e-3;
```

```
b=1.87e-7;
```

```
kt=5.36e-3;
```

```
kv=5.36e-3;
```

```
Kc=9;
```

```
Tc=2e-5;
```

```
Ka=1;
```

```
Ta=2e-5;
```

%değişkenlerin belirlenmesi ve diğer transfer fonksiyonları

```
Kd=x(3);
```

```
Kp=x(2);
```

```
Ki=x(1);
```

```
motor=tf([J 0],[La*J Ra*J kt*kv]);
```

```
PID=tf([Kd Kp Ki],[1 0]);
```

```
evirici=tf([0 Kc],[Tc 1]);
```

```
sens=tf([0 Ka],[Ta 1]);
```

```
sys=series(evirici,PID);
```

```
sys1=series(sys,filter);
```

```
motor_plant=series(sys1,motor);
```

%kapalı çevrim transfer fonksiyonu ve sistem performans değerleri

```
close_feedback=feedback(motor_plant,sens);
```

```
sf=stepinfo(close_feedback)
```

```
sys3=zpk(close_feedback)
```

```
dc=dcgain(close_feedback)
```

%Hata kriterlerinin belirlenmesi

```

time=0:0.0001:1;
[y t] = step(close_feedback,time);
plot(time,y);
error=[1-y];

```

```

%Hatanın mutlak değerinin integrali
error_a=abs(error);
error_a=trapz(time,error_a)
fness=error_a
End

```

Eğer program içerisinde bant durduran ve LC filtre kullanılmak istenirse filtrenin transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi belirlenebilir.

```

%bant durduran LC filtre parametreleri
L1=100e-6;
L2=100e-6;
C1=100e-9;
C2=1000e-9;
R1=1.5;
R2=1.8;
a1=tf([L1*R1*C1 L1 0],[L1*C1 C1*R1 1]);
a2=tf([R2*C2 1],[C2 0]);
a3=tf([L2 0],[0 1]);
a4=a1+a2+a3;
filter=a2/a4;

```

Diğer hata kriterleri aşağıdaki şekilde kullanılabilir.

```

%Hatanın karesinin integrali
error_a=(error.^2);
error_a=trapz(time,error_a)

```

```

% hatanın mutlak değerinin ve zamanın çarpımının integrali

```

```

error_a=abs(error);
error_a=error_a'.*time;
error_a=trapz(time,error_a)

```

```

% hatanın karesi ile zamanın çarpımının integrali
error_a=(error.^2);
error_a=error_a'.*time;
error_a=trapz(time,error_a)

```

LC filtre kullanıldığı zaman, LC filtre ile sönümleme direnci kullanıldığı zaman ve bant durduran LC filtre kullanıldığı zaman akım kontrol sisteminin birim basamak cevapları geleneksel yöntem olan Ziegler-Nichols yöntemi ile melez GA yöntemi incelenecektir.

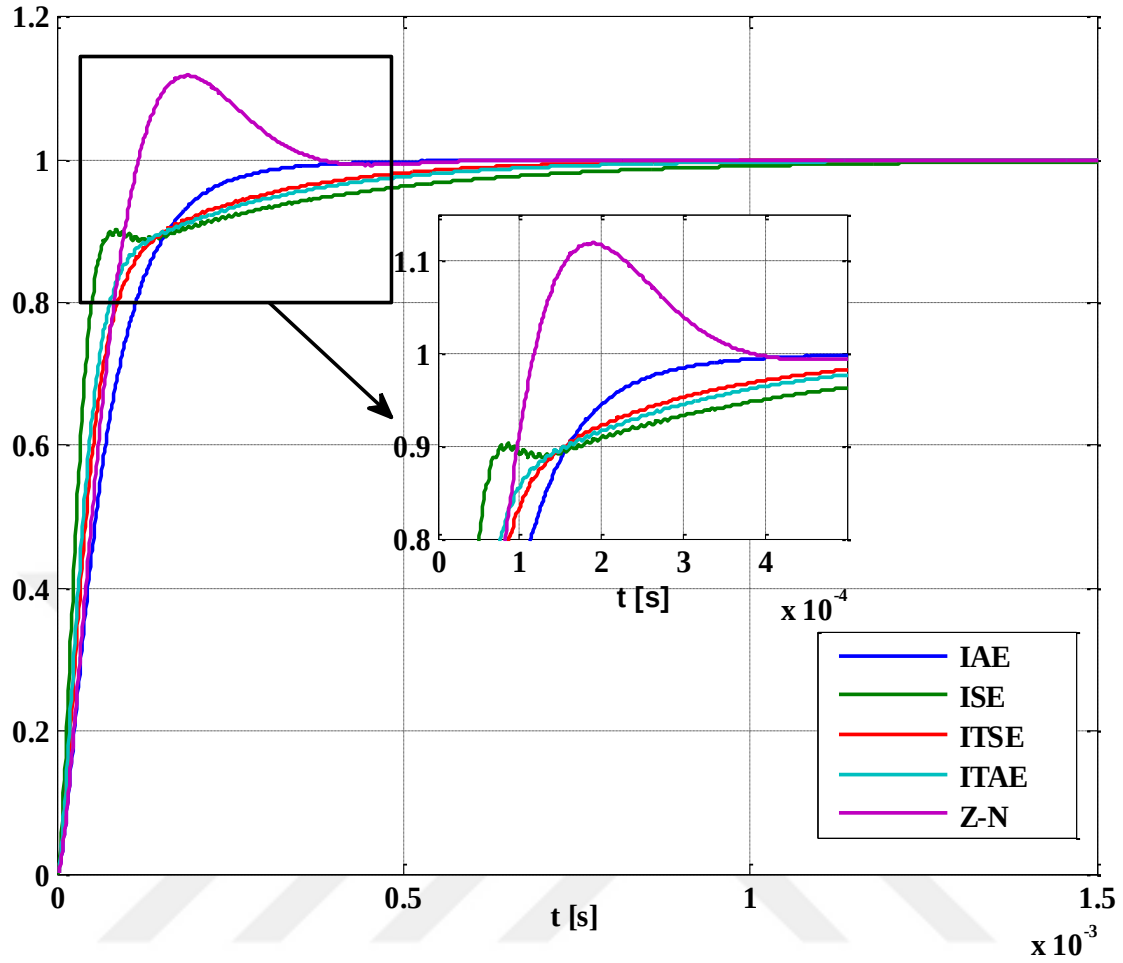
5.5 Ziegler-Nichols ve Melez GA Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Ziegler-Nichols (Z-N) yöntemi bir kapalı çevrim sistemin kontrol parametrelerinin bulunması için kullanılan en eski ve etkili yöntemlerden biridir. Bu yöntem sistemin açık çevrim veya kapalı çevrim transfer fonksiyonlarını inceleyerek PID kontrolörde kullanılan K_p , K_i ve K_d parametrelerini bulur.

Tablo 5.1 Ziegler-Nichols Yöntemi ile PID hesaplanması

Ziegler-Nichols Yöntemi			
Kontrolör Tipi	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	-
PID	$0.6K_u$	$2K_p/T_u$	$K_pT_u/8$

Kapalı çevrim bir sistemde öncelikle K_i ve K_d sıfır kabul edilerek K_p değeri sistem osilasyon noktasına gelene kadar artırılarak en yüksek K_p değeri hesaplanır. Sistem osilasyonda iken osilasyon periyodu ölçülür ve Tablo 5.1 kullanılarak K_i ve K_d değerleri hesaplanır.



Şekil 5.14 Kapalı çevrim sistemde LC filtre için melez GA ve Z-N yöntemlerinin birim basamak cevabı

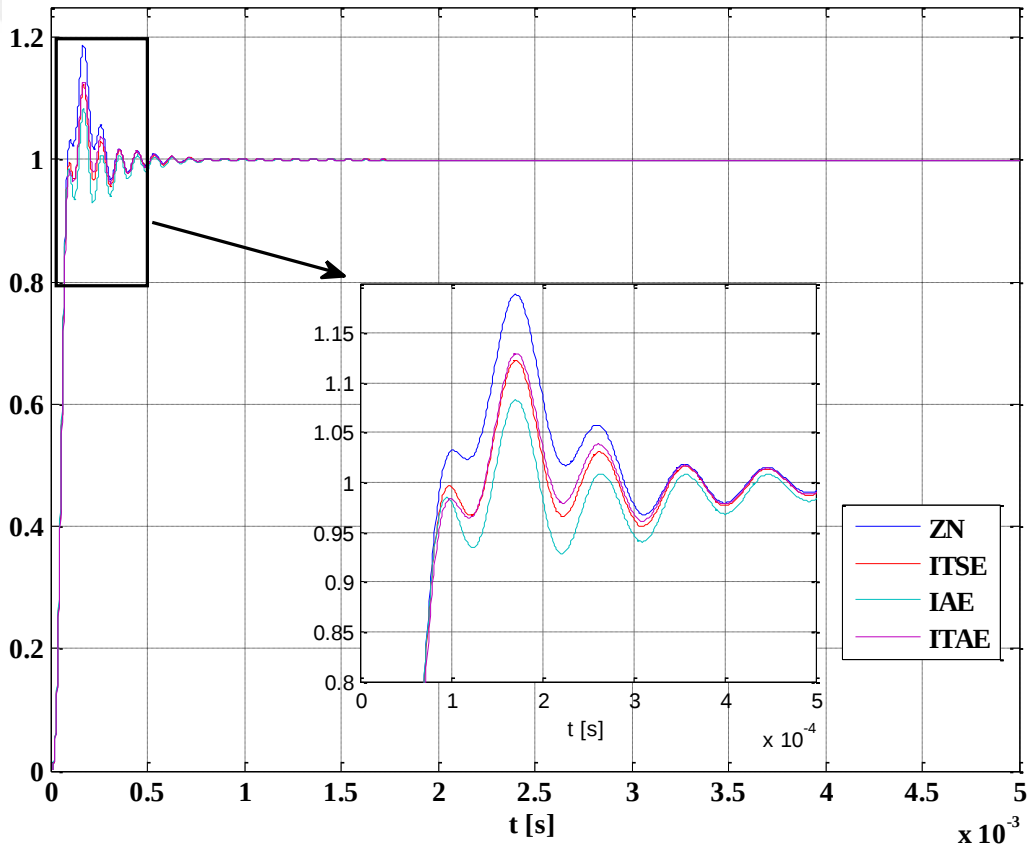
Buna göre Şekil 5.8’ de görülen kapalı çevrim sistemde sadece LC filtre kullanıldığı düşünülürse elde edilen veriler doğrultusunda, çeşitli hata kriterleri kullanılarak melez GA ile elde edilen birim basamak cevabı ile Z-N yöntemi ile elde edilen birim basamak cevabı Şekil 5.14’ de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 Şekil 5.14 için Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performansı

	Yükselme Zamanı (s)	Aşma Zamanı (s)	Oturma Zamanı (s)	Aşma (%)
MelezGA-IAE	1.6×10^{-4}	9.3×10^{-4}	9.3×10^{-4}	0
Z-N	9.8×10^{-5}	1.8×10^{-4}	9.1×10^{-4}	11.9
	Kp	Ki	Kd	
MelezGA-IAE	0.088	750	0	
Z-N	0.08355	1422.23	3.27×10^{-6}	

Birim basamak cevapları incelenecek olunursa Z-N yönteminde %11.9 olarak görülen bir aşma oranı mevcuttur. Bu aşma miktarı akım kontrolöründe motor faz akımında bir miktar aşmaya neden olacaktır. Melez GA yöntem ile kullanılan hata kriterlerinin birim basamak cevapları incelendiğinde en uygun sonucun hatanın mutlak değerinin integrali alınarak elde edilen basamak cevabında olduğu görülmektedir. Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performans değeri Tablo 5.2’ de görülmektedir.

Sistemde bant durduran LC filtre kullanıldığı zaman çeşitli hata kriterleri kullanılarak melez GA ile elde edilen birim basamak cevabı ile Z-N yöntemi ile elde edilen birim basamak cevabı Şekil 5.15’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.15 Bant durduran LC filtre için melez GA ve Z-N yöntemlerinin birim basamak cevabı

Birim basamak cevapları incelenecek olunursa Z-N yönteminde %18.9 olarak görülen bir aşma oranı mevcuttur. Bu aşma miktarı akım kontrolöründe motor faz akımında bir miktar aşmaya neden olacaktır. Melez GA yöntem ile kullanılan hata kriterlerinin birim basamak cevapları incelendiğinde en uygun sonucun hatanın mutlak değerinin integrali alınarak elde edilen basamak cevabında olduğu görülmektedir. Bant durduran LC filtre kullanılan akım

referanslı kontrol sisteminde Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performans değeri Tablo 5.3’ de görülmektedir.

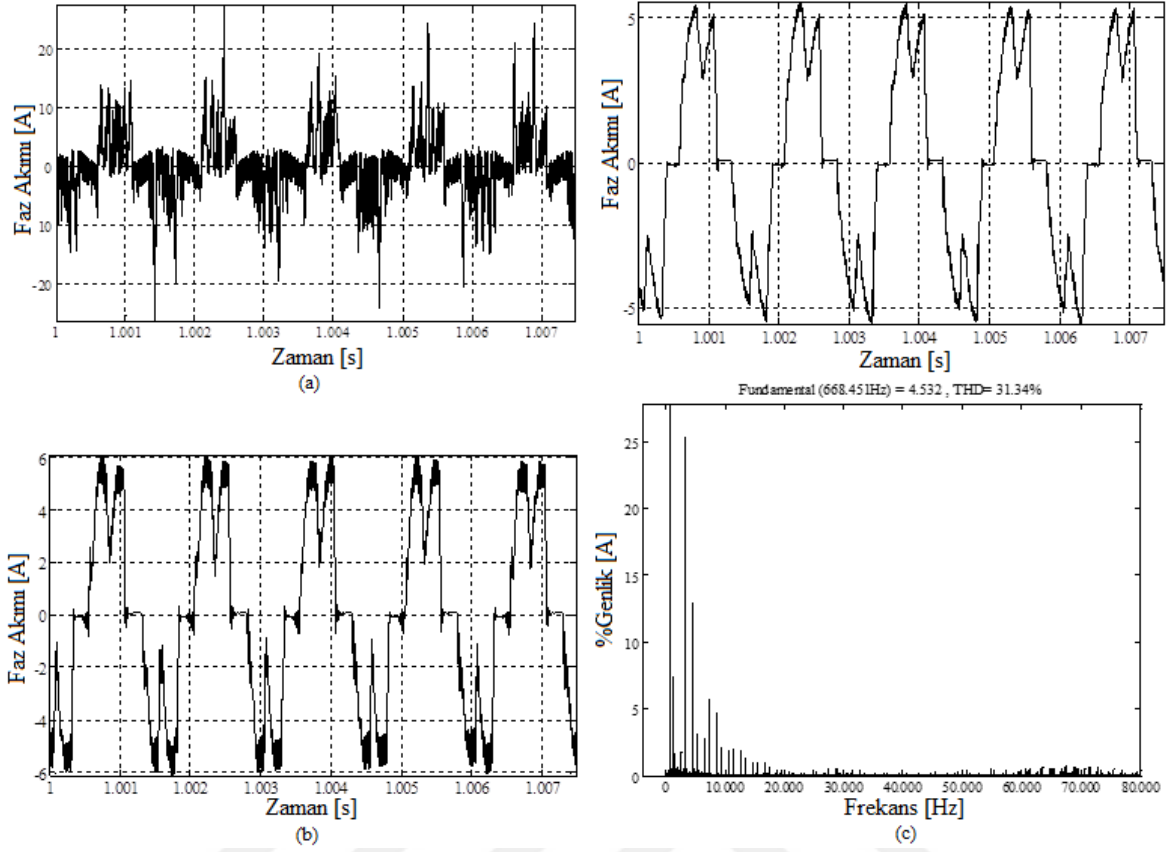
Tablo 5.3 Şekil 5.15 için Z-N ve IAE-melez GA ile elde edilen PID parametreleri ile sistem performansı

	Yükselme Zamanı (s)	Aşma Zamanı (s)	Oturma Zamanı (s)	Aşma (%)
MelezGA-IAE	5.94×10^{-4}	1.71×10^{-4}	8.9×10^{-4}	8.3
Z-N	5.97×10^{-4}	1.71×10^{-4}	8.8×10^{-4}	18.9
	Kp	Ki	Kd	
MelezGA-IAE	0.105	748.297	0	
Z-N	0.099	990	2.4×10^{-6}	

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15’ te görülen birim basamak cevapları genetik algoritma ile elde edilen sonuçların aşma miktarının daha düşük olduğunu göstermektedir. Böylece düşük indüktansa sahip yüksek hızlı FDAM’ unun akım referanslı kontrolü için akım kontrolör parametreleri optimum şekilde hesaplanmıştır.

5.6 Benzetim Çalışması ve Sonuçları

Benzetim çalışması Matlab Simulink/PowerSystemBlock kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Öncelikle belirlenen süre sonunda belirlenen hıza ulaşmak için gerekli akım bilgisini elde etmek için bu süre boyunca doğrusal artan hız referansı elde edilmiştir. Bu hız referansı sistem kayıplarının hesaplanması için kullanılır ve sistem kayıpları kullanılarak artan hız referansına göre sistemin anlık akım ihtiyacı hesaplanmaktadır. FDAM’ unun sürülmesi için altı adımlı anahtarlama tekniği seçilmiştir. Motorun düşük indüktansından dolayı sönümleme LC filtre kullanılmıştır. Kullanılan filtre çeşitlerinin motor akımı üzerindeki etkisi Şekil 5.16’ da görülmektedir. Buna göre 4200 rad/s hızında filtre kullanılmadan motorun bir faz akımı Şekil 5.16(a)’ da görülmektedir. Bu durumda motor faz akımının toplam harmonik bozulması (THD) %141.64 olarak ölçülmüştür. Motor ve evirici arasına Şekil 5.17’ de görüldüğü gibi LC filtre eklendikten sonra motor faz akımı Şekil 5.16(b)’ deki gibi görülmektedir. Motor faz akımının THD’ si büyük bir düşüş göstererek %40.49’ a olmuştur. LC filtre ile beraber bir bant durduran filtre eklendiğinde motor faz akımında anahtarlama frekansında oluşan harmonikler de yok edilerek, Şekil 5.16(c)’ de görüldüğü gibi motor faz akımının THD’ sinin %31.34 olması sağlanmıştır.

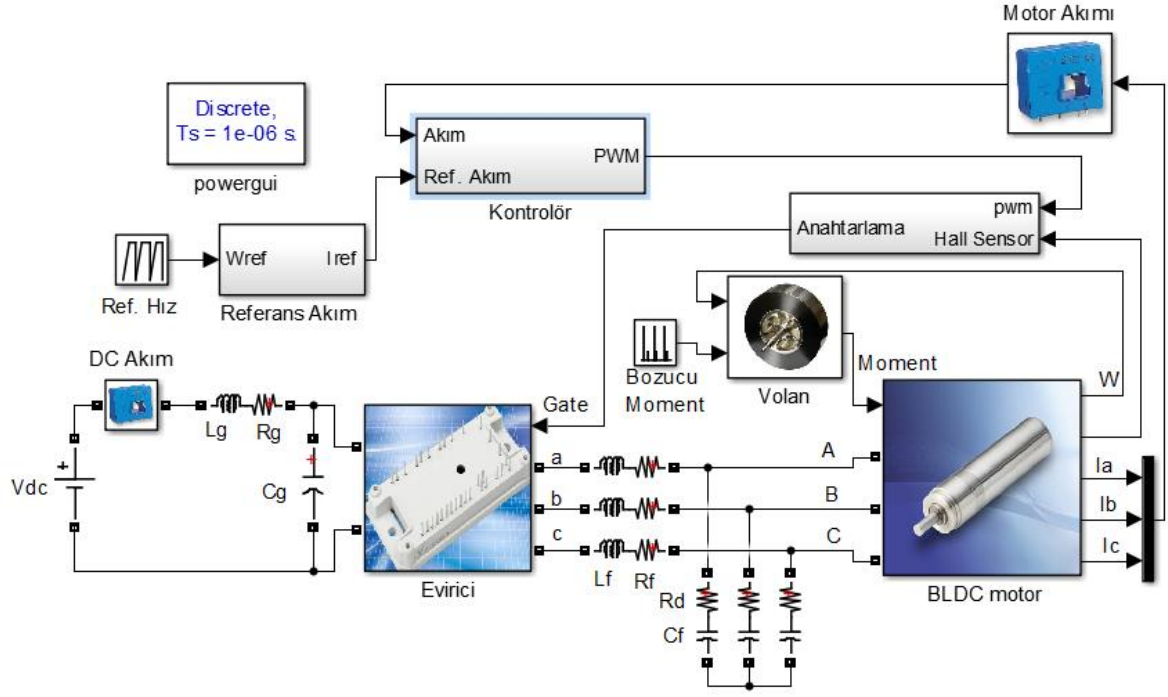


Şekil 5.16 a)Filtre olmadan motor faz akımı b)LC filtre kullanıldıktan sonra motor faz akımı c)Bant durduran filtre ve LC filtre ile birlikte motor faz akımı ve harmonik spektrumu.

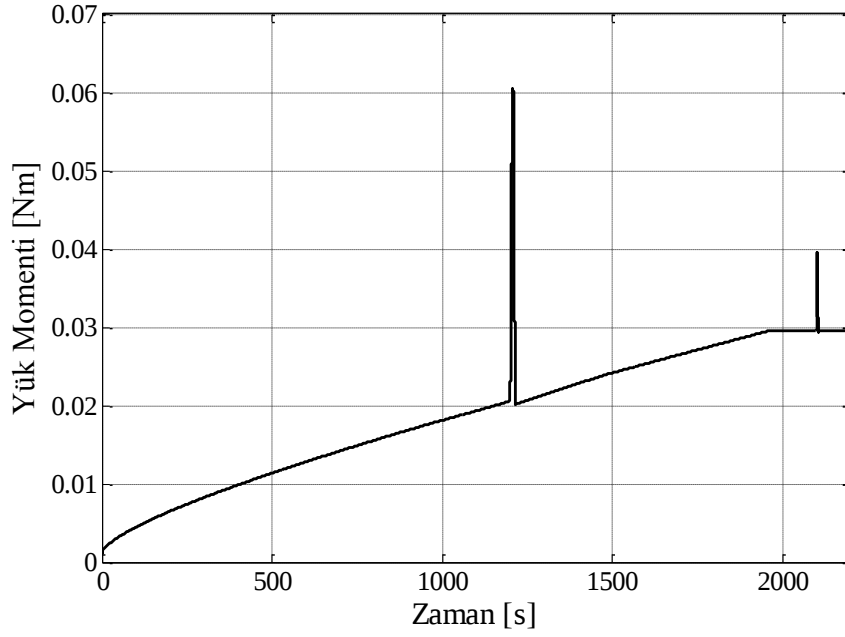
Benzetim çalışmasında volan ile temsil edilen kısımda artan hız referansı ile elde edilen rulman kayıplarından ve diğer kayıplardan oluşan yük momentleri hesaplanarak volana ait yük momenti olarak motora girilmiştir.

Sönümlenmiş LC filtrenin kullanıldığı benzetim çalışması Şekil 5.17’ de görülmektedir. Burada benzetim çalışması, DA kaynak akımındaki değişimin daha net olarak görülmesi amacıyla bir giriş akım filtresi ile desteklenmiştir.

Yüksek anahtarlama frekansı nedeniyle mikrodenetleyicilerin işlem yapma süresi oldukça azalmıştır. Bu nedenle bu motorlarda karmaşık kontrol algoritmaları yerine altı adımli anahtarlama tekniği tercih edilmektedir. Bu teknikte alan etkili algılayıcılardan gelen bilgi doğrultusunda motorun olması gereken akım bilgisi elde edilir ve bu bilgi ile motor akımının yön değiştirmesi için gerekli olan anahtar belirlenir. Akımın değeri ise akım kontrolörünün çıkışından elde edilen bilginin bir taşıyıcı dalga ile karşılaştırılması sonucunda oluşturulan darbe genişlik modülasyonu ile kontrol edilir.



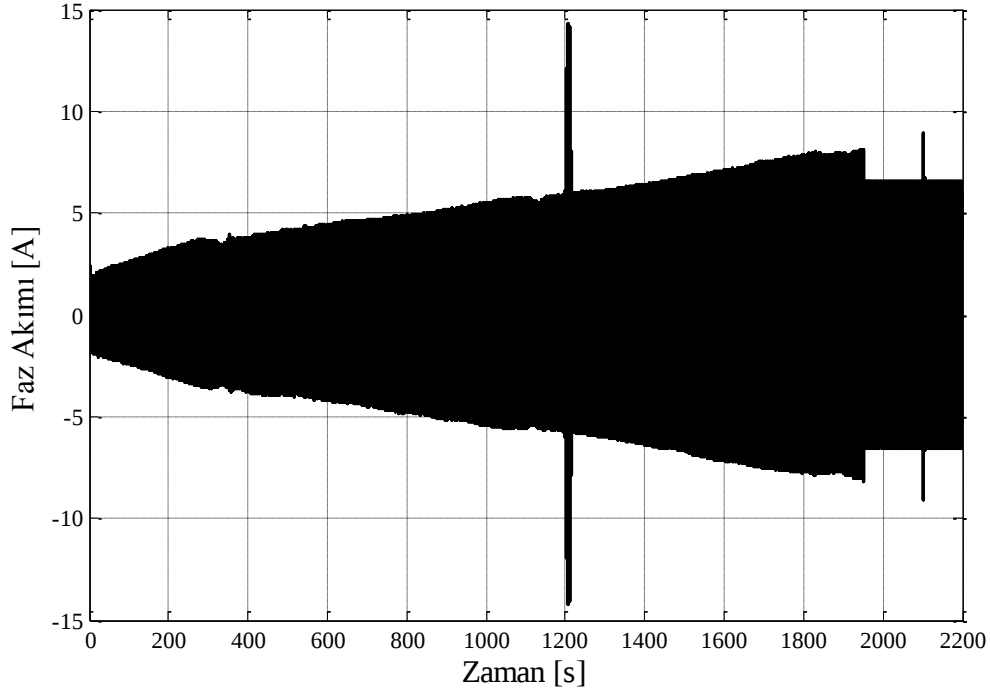
Şekil 5.17 Akım referanslı sürülen volanlı enerji depolama sisteminin benzetimi



Şekil 5.18 Motorun yük momentini

Benzetim çalışmasının örnekleme süresi 1µsn ve eviricinin anahtarlama frekansı 50kHz olarak seçilmiştir. Burada rulman kayıpları hesaplanırken $mg + m_r$ e ω_m^2 ifadesi sabit 20

olarak alınmıştır ancak gerçek uygulamada böyle olmayacaktır. Bu değer hıza bağlı karesel olarak artacaktır.



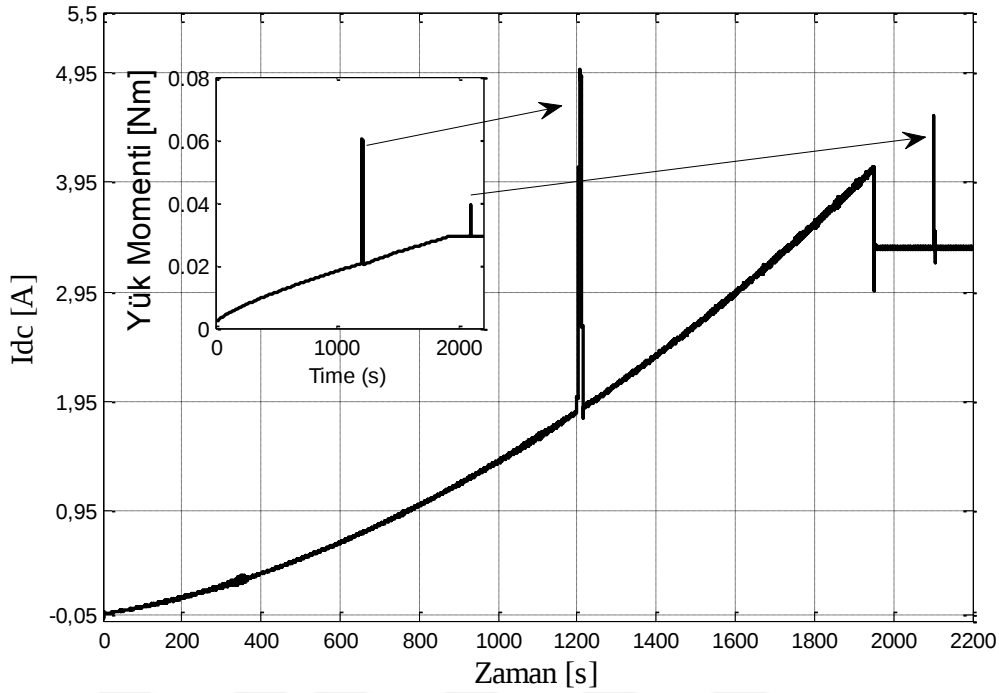
Şekil 5.19 Hız kontrollü sistemde motor faz akımının değişimi

Sisteme ait diğer parametreler aşağıdaki gibi verilmiştir.

$k_f=1$; $\rho_a=0.001 \text{ kg/m}^3$ 1mbar ortam basıncında; $d_m=18 \text{ mm}$; $v=6 \text{ mm}^2/\text{s}$; $f_0=1.3$; $f_1=0.0003$; $m=0.85 \text{ kg}$; $g=9.8 \text{ m/s}^2$; $m_r \cdot e=11.67 \text{ N}$; $r_o=0.1 \text{ m}$; $d=0.05 \text{ m}$; $K_c=9 \text{ V/V}$; $T_c=2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$; $K_a=1 \text{ V/A}$; $T_a=2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$; $R_f=22 \text{ m}\Omega$; $C_f=1 \cdot 10^{-6} \text{ F}$; $R_d=1.8 \text{ }\Omega$; $L_f=100 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ ' dir.

Motorun referans momenti sistem kayıpları kullanılarak hesaplanmıştır. Bunun dışında akım referanslı sürme yönteminin incelenmesi için belirli yerlerde mekanik rezonans veya bunun gibi bozucu etkileri temsil eden bozucu girişler motorun yük momentine eklenmiştir. Bu durumda yük momenti Şekil 5.18' de görülmektedir.

Sistemin 1950 saniyede 0 rad/s den 3142 rad/s hızına ulaşması öngörülmüştür. Bozucu etkiler motora 1200. s ve 2100. s' lerde uygulanmıştır. Bu durumda sistem kayıpları kadar ve belirlenen bölgelerde sistem kayıpları ve bozucu momentin toplamı kadar yük momenti motora uygulanmış olur. Bu durumda hız kontrollü bir sistemde motorun faz akımının değişimi ve DA kaynak akımındaki değişim Şekil 5.19 ve Şekil 5.20' de görülmektedir.

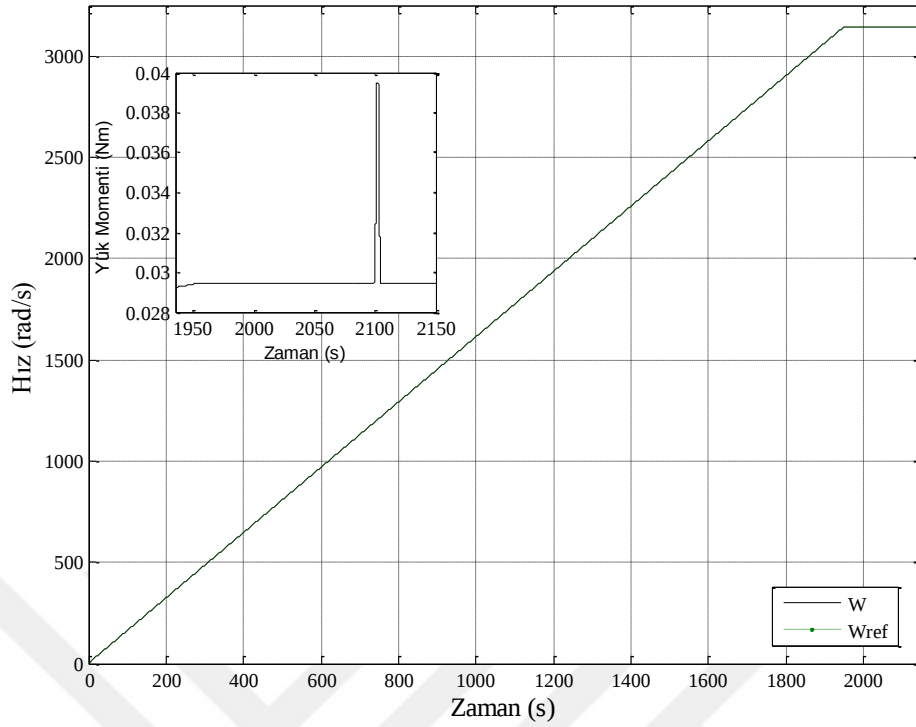


Şekil 5.20 Hız kontrollü sistemde DA kaynak akımının değişimi

Şekillerde de görüldüğü gibi motora bozucu bir yük momentini geldiği zaman motorun faz akımı ve DA kaynak akımında anlık akım artışı görülmektedir. Bu anlık akım artışı uydu güç sistemi için istenmeyen bir durum olmakla beraber akım yükseldiği en büyük değer motorun çekebileceği en yüksek akım ile sınırlandırılmıştır. Fakat dikkat edilecek olunursa motora bozucu etki geldiği zaman motorun hız referansını takip edebilmesi için kontrolör motor akımını sınırlandırılmış en yüksek akıma kadar ani bir şekilde yükseltir. Eğer bu etki olmasaydı motorun çekeceği en yüksek akım 4A civarında olacaktır. Bozucu etki nedeniyle sistem 5 A akımı karşılamak zorunda kalacaktır.

Bozucu etkilerde akım artışını engelleyerek hız referansını takip eden bir kontrol yöntemi akım referanslı kontrol yöntemi olarak tanımlanmıştır. Bozucu girişlerin motora uygulandığı zaman motorun hız değişimi Şekil 5.21’ de görülmektedir. Buna göre motorun hızı referans hızı takip etmektedir.

Özetlenecek olunursa hız kontrollü yöntemde mekanik rezonans gibi bozucu etkiler oluştuğunda motorun akımında ani artışlar olmaktadır fakat motorun hızı referans hızı takip etmektedir. Şekil 5.22’ de motorun maksimum referans hıza ulaştığı anda ve 2100. saniyede oluşan bozucu bir moment durumunda hız kontrolörünün referans hızı yakaladığı görülmektedir.



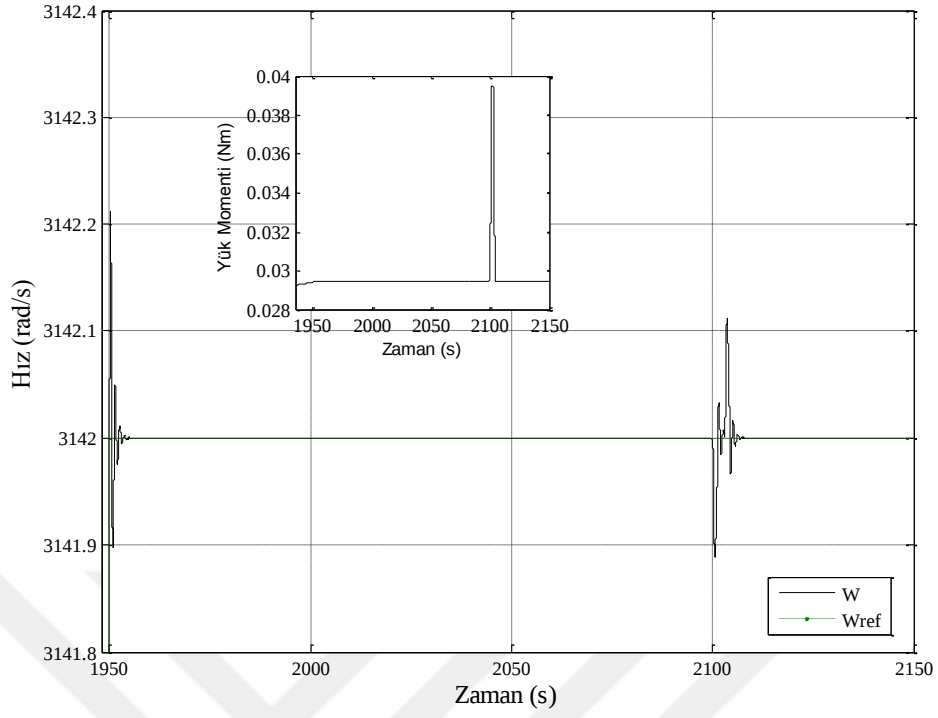
Şekil 5.21 Hız kontrollü sistemde referans hız ve motorun hızının değişimi

Uydu yönelim sistemlerinde kullanılan volanlı enerji depolama sistemlerinde volanın dinamik hız davranışı oldukça yavaş olmaktadır ve bu sistemlerde anlık hız kontrolünün önemi yoktur. Sistemin ulaşması gereken hız değeri daha önce bölümlerde anlatıldığı gibi uydunun güç ihtiyacı göz önünde bulundurularak hesaplanır.

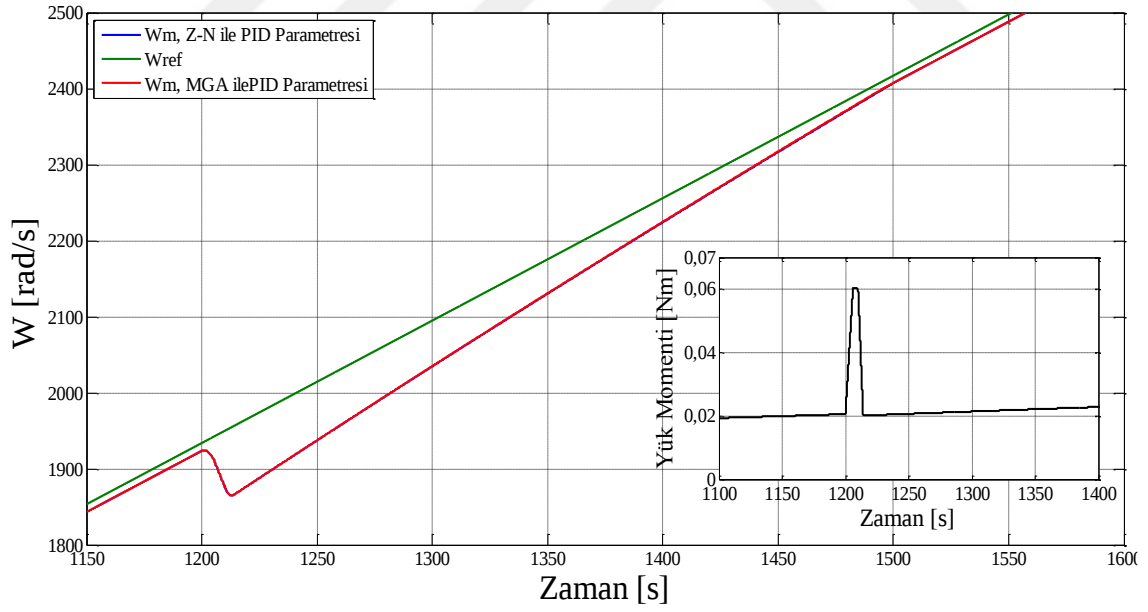
Bu sistemlerde önemli olan volanın belirlenen süre sonunda önceden hesaplanmış hız değerine ulaşmasının sağlanmasıdır. Motorun ivmelenmesi sırasında akım değerinde anlık ve büyük değişikliklerin olması uydu güç sistemi açısından istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle artan hız referansına göre sistem kayıpları hesaplanarak motorun referans hız noktasında üretmesi gereken moment değeri ve dolayısıyla referans hız değerinde oluşması gereken motorun akım değeri hesaplanarak motora akım referansı olarak girilmektedir.

Motor hız bilgisi olamadan artan hız referansına bağlı olarak hesaplanan akım değeri ile motorun ivmelenme momentinden yola çıkılarak hesaplanan ivmelenme akımı, akım referansına eklenerek motor ivmelenmesini sürdürecektir.

Motor en yüksek hız değerine ulaştığında motorun ivmelenmesi için gerekli olan akım değeri sıfır yapılarak sadece güç kayıplarını karşılayacak kadar akım üretilir ve motor sabit hızda dönmesine devam eder.



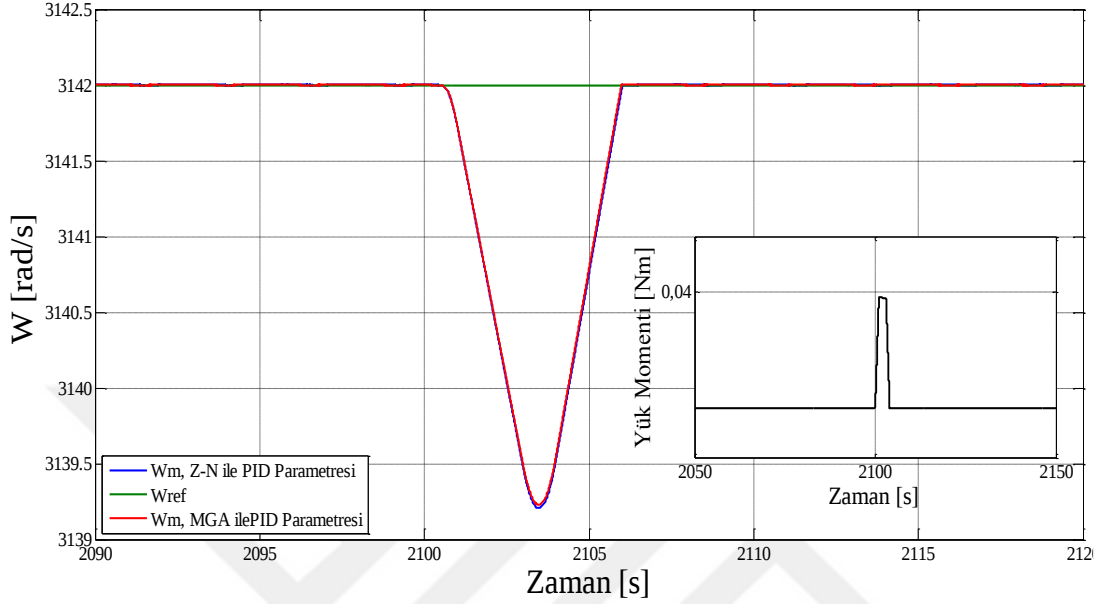
Şekil 5.22 Motorun 1950. saniye ile 2150. saniye arasındaki hızı



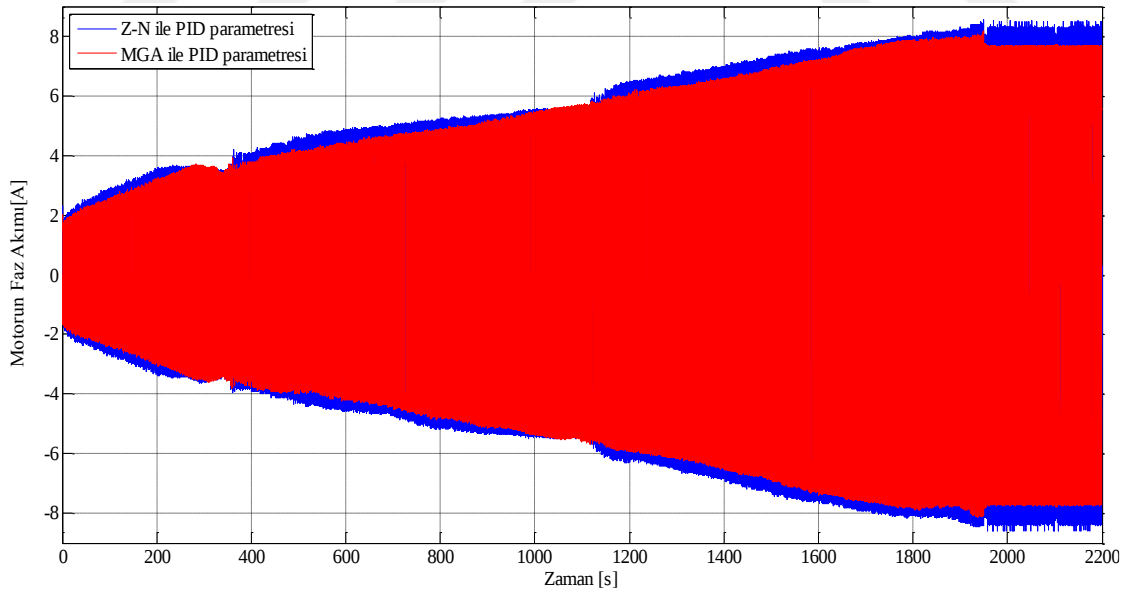
Şekil 5.23 Akım referanslı yöntemde motor hızının 1150. saniye ile 1600. saniye arasındaki değişimi

Şekil 5.23' de görüldüğü gibi 1200. s' de meydana gelen yük momentindeki artış nedeniyle motorun hızında azalma meydana gelmiştir. Motorun hızı referans hızdan uzaklaşmıştır. Artan yük momentini normal yük momentine döndüğünde motor hızı

artmaya başlamaktadır. Çünkü motorun akım referansı artan hız referansına göre üretilmiştir. Motorun hız referansını yakalaması yaklaşık 300 saniye sonra gerçekleşmiştir.



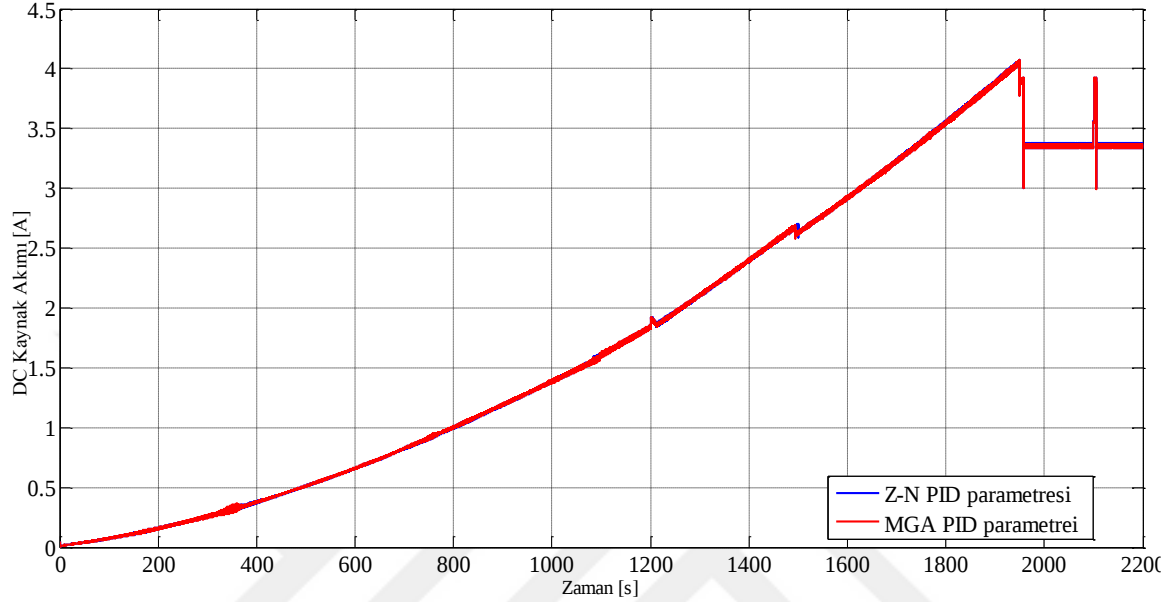
Şekil 5.24 Akım referanslı yöntemde motor hızının 2090. saniye ile 2120. saniye arasındaki değişimi



Şekil 5.25 Z-N ve MGA ile hesaplanan PID parametreleri kullanılan sistemde motor faz akımının değişimi

Volanlı enerji depolama sistemi benzetim çalışması hem Z-N yöntemi ile elde edilen PID parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir hem de melez GA kullanılarak elde edilen kontrolör parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her iki yöntemde elde edilen hız

değerleri arasında önemsenecek kadar bir fark bulunmamaktadır. Şekil 5.24’ te 2100. s’ de yük momentinde meydana gelen artış nedeniyle hızda meydana gelen değişim görülmektedir.



Şekil 5.26 Z-N ve MGA ile hesaplanan PID parametreleri kullanılan sistemde kaynak akımının değişimi

Şekil 5.25’ de akım referanslı yöntemde 1950 saniyede volanın 3142 rad/s hızına ulaşması ve bu hızda yaklaşık 250 saniye kalması süresince motorun bir faz akımı görülmektedir. Benzetim çalışması Z-N yöntemi ile elde edilen kontrolör parametresi ile melez GA ile elde edilen kontrolör parametresi için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuca göre melez GA ile elde edilen kontrolör parametreleri kullanıldığında akımın dalgalanma miktarı akımın tepe değerinde yaklaşık %10 kadar bir azalma gözlemlenmiştir.

Şekil 5.26’ da akım referanslı kontrol yönteminde kaynak akımının hem Z-N yöntemi ile elde edilen PID parametreleri ile hem de melez GA elde edilen PID parametreleri değişimi görülmektedir.

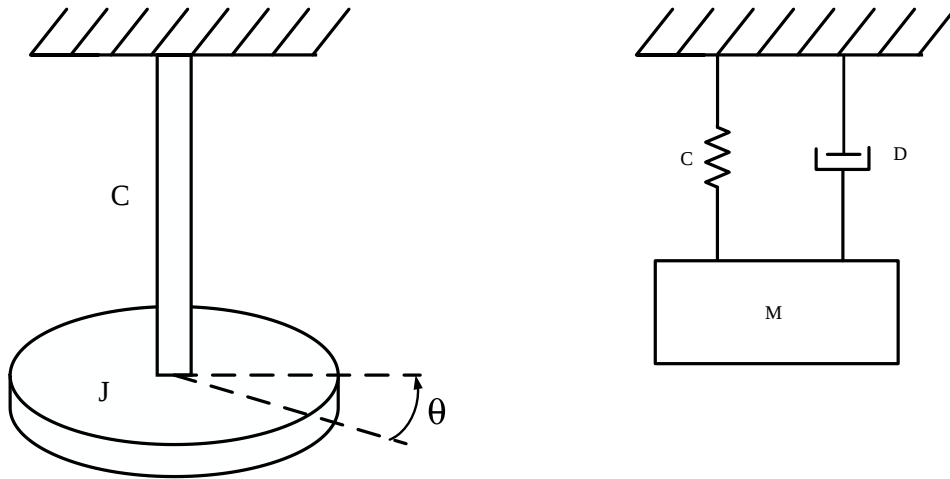
5.7 Mekanik Sistemin Modeli

Kullanılan volanlı enerji depolama sisteminde volan, kaplin, mil, rulman ve motor bulunmaktadır. Burada kullanılan milin asıl görevi motordan aldığı mekanik enerjiyi volana aktarmaktır. Burada dönen bu mekanik elemanlar üzerinde belirli bir doğal frekansta

burulma rezonansı meydana gelmektedir. Burulma rezonansı nedeniyle mil üzerinde burulma momenti oluşmaktadır. İstenmeyen burulma momenti volan milinde büyük miktarda yük momentine neden olmaktadır. Özellikle volanlı sistemlerde veya yüksek hızlarda çalışan turbo jeneratörler gibi sistemlerde bu burulma momentinin milin dayanma momentinden fazla olmamasına dikkat etmek gerekir.

Burulma momenti sistemin mekanik yapısına göre farklı hızlarda meydana gelebilir ve oluştuğu hıza mekanik sistemin doğal frekansı denir. Mekanik sistemin çalışma hız aralığı mümkün olduğu kadar rezonans bölgesinin dışında kalması gerekmektedir. Eğer bu mümkün değilse rezonans bölgesini mümkün olduğu kadar hızlı geçmesi gerekmektedir. Bunun için ise mekanik sistem rezonans bölgesine girdiğinde motorun karşılaması gereken moment değeri, burulma momentinin üzerinde olması gerekmektedir. Bu nedenle motor kontrol yöntemi ile motorun moment değeri motorun akımının artırılması yolu ile artırılarak sistemin rezonans bölgesinden hızlıca çıkması sağlanır. Fakat daha önceki bölümlerde incelendiği gibi uydu güç sisteminde ani akım artışları istenmeyen bir durumdur. Bu nedenle sistemin mekanik rezonans bölgesinden çıkması için gerekli olan akım artışının belirli bir oranda yavaş olarak artmasının sağlanması amacıyla yeni bir akım kontrol yöntemi uygulanmıştır.

Mekanik sistemin bir tarafı sabitlenmiş olan mile bağlı olan volana uygulanan kuvvet olarak düşünüldüğü durum ve mekanik modeli Şekil 5.27’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.27 Bir tarafı sabitlenmiş volan ve mekanik modeli

Bu durumdan milin burulma sertliği Denklem 5.18 ve Denklem 5.19 'daki gibi hesaplanabilir.

$$C = \frac{G J_p}{l} \quad (5.18)$$

$$J_p = \frac{\pi a^4}{32} \quad (5.19)$$

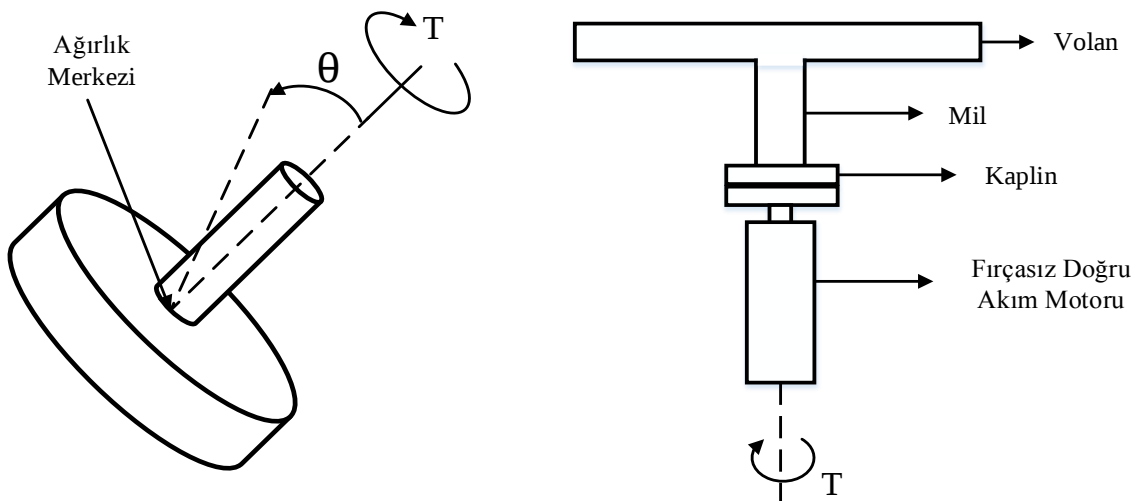
Burada J_p polar moment olarak tanımlanır. a milin çapını, l milin boyunu ve G kayma modölünü göstermektedir. Kayma modölü milin yapıldığı malzemenin cinsine göre değişmektedir. Bu sisteme ait olan moment eşitlikleri ve rezonans momentinin oluştuğu kritik hız değerı Denklem 5.20 ve Denklem 5.22 arasında gösterilmiştir.

$$T(t) = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + C\theta \quad (5.20)$$

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{T(s)} = \frac{1}{Js^2 + Ds + C} \quad (5.21)$$

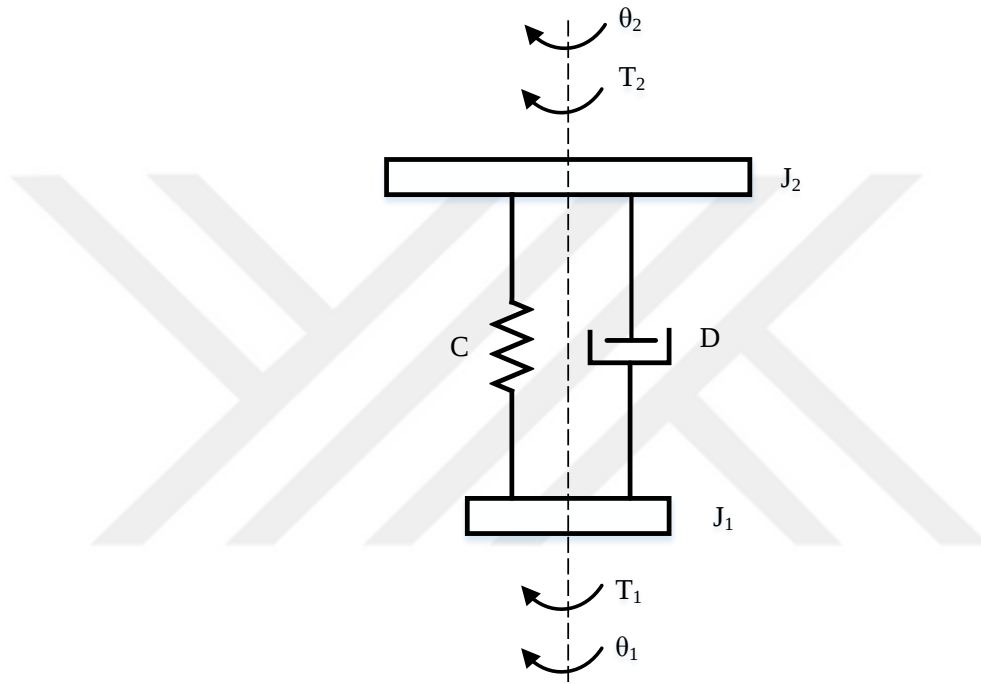
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C}{J}} \quad (5.22)$$

Uygulamada kullanılan sistemin yapısı şekil 5.28' de ve mekanik modeli şekil 5.29' da görölmektedir.



şekil 5.28 Uygulamada kullanılan volan ve modeli

Burada mil ve rotor bir kaplin tarafından birleştirilmiştir. Bu nedenle milin burulma sertliği yaklaşık olarak kaplinin burulma sertliğine eşit olacaktır. Kaplinin burulma sertliği 7000 Nm/rad olarak katalog değerlerinde verilmiştir. Kapline gerçekte uygulanan maksimum burulma momenti kaplinin burulma moment değerinden oldukça düşük olduğundan mekanik sistemde kullanılacak olan burulma sertliği değeri katalog değerinin 1/3 katı kadar olacaktır. Buda yaklaşık olarak 2333 Nm/rad değerine eşit olmaktadır.



Şekil 5.29 Uygulamada kullanılan sistemin mekanik modeli

Sistemin sönümlenme katsayısı düşük sürtünmeli seramik bilyalı rulman kullanıldığı için hesaplamaya değer olmayacak kadar küçük olacaktır. Mekanik kaplinin sönümlenme katsayısı olan D , 0.0018 Nms/rad olarak alınacaktır. Burada J_1 volanın eylemsizlik momentini temsil ederken J_2 fırçasız doğru akım motorunun eylemsizlik momentini temsil etmektedir. Bu nedenle milin her iki ucundaki açı değişimlerinin farkı burulma momentini bulmada yardımcı olacaktır. Denklem 5.23 ve Denklem 5.24 arasında motor ve volan tarafında oluşan moment değerleri görülmektedir. T_1 motorun sisteme uyguladığı moment iken T_2 volanda oluşan moment değeridir. Rezonans bölgesinde bu moment değeri burulma momentine eşit olacaktır.

$$T_1(t) = J_1 \frac{d^2\theta_1}{dt^2} + D \left(\frac{d\theta_1}{dt} - \frac{d\theta_2}{dt} \right) + C(\theta_1 - \theta_2) \quad (5.23)$$

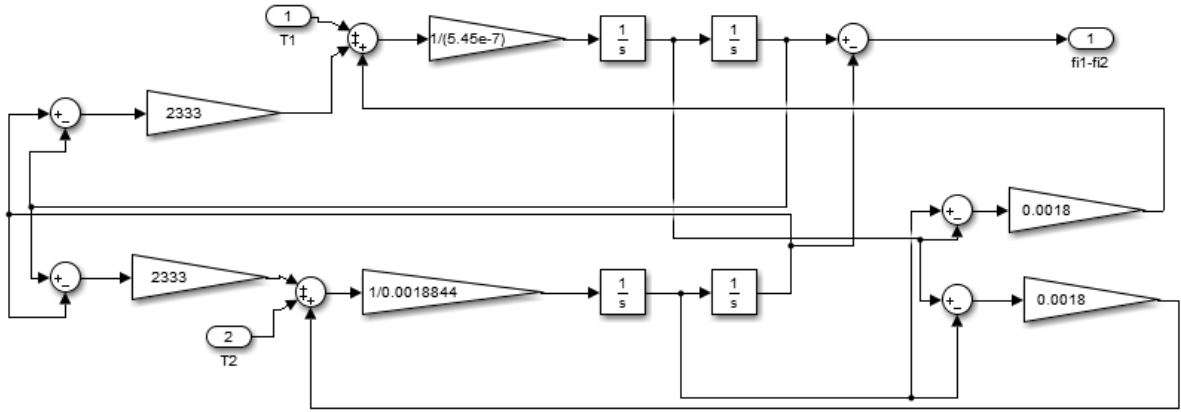
$$T_2(t) = J_2 \frac{d^2\theta_2}{dt^2} + D \left(\frac{d\theta_2}{dt} - \frac{d\theta_1}{dt} \right) + C(\theta_2 - \theta_1) \quad (5.24)$$

Rezonans bölgesinde burulma açısı sinüzoidal karakteristiğe sahip olacaktır. Buna göre burulma açısının değişimi rezonans frekansında salınım yapar ve Denklem 5.25' deki gibi gösterilebilir. Sistem denge noktasında iken burulma momenti ve motorun üretmiş olduğu moment değerleri birbirine eşit olacaktır. Burada sönümleme katsayısı çok küçük olduğundan ihmal edilebilir ve bu durumda gerekli hesaplamalar yapıldığında mekanik sistemde oluşan burulma momenti Denklem 5.26 ve Denklem 5.27' deki gibi hesaplanabilir.

$$\theta(t) = (\theta_1 - \theta_2) = \hat{\theta} \sin \omega_0 t \quad (5.25)$$

$$J_2 \frac{d^2\theta}{dt^2} = J_2 \omega_0^2 \hat{\theta} \sin \omega_0 t \quad (5.26)$$

$$T_R = C(\theta_1 - \theta_2) = J_2 \omega_0^2 (\theta_1 - \theta_2) \quad (5.27)$$



Şekil 5.30 Mildeki açı değişimini veren matlab modeli

Burulma momentinin hesaplanması için gerekli olan milin her iki tarafındaki açı değişimlerini veren ifadelerin matlab benzetimi Şekil 5.30' da görülmektedir. Benzetim çalışmasında burulma momenti motorun uyguladığı momentten fazla olunca burulma momenti sisteme uygulanmaya başlar. Çünkü burulma momentinin değeri motorun üretmiş olduğu momentten daha fazladır. Bu durum burulma momentinin motorun üretmiş olduğu moment değerine eşit olduğu ana kadar devam eder ve bu çalışma bölgesi mekanik rezonans

bölgesi olarak tanımlanır. Motorun üretmiş olduğu moment burulma momentini aştığı anda mekanik sistem rezonans bölgesinden çıkacaktır. Böylece motorun mevcut referans hız değerine göre üretilen akım referans değeri ile motor çalışmasına devam edecektir.

5.8 Sonuç

Volanlı enerji depolama sistemlerinde kullanılan fırçasız doğru akım motorların düşük indüktansından dolayı motor ve evirici arasında filtre kullanılması gerekmektedir. Bu filtreler genellikle alçak geçiren filtre olarak tasarlanmaktadır. Bunun yanında anahtarlama frekanslarındaki harmoniklerin yok edilmesi için bant geçiren filtreler de eklenerek sistem performansı artırılmaktadır. Bu filtreler sisteme eklendikten sonra motorun kontrolü için hesaplanması gerekli olan PI parametreleri filtrenin sisteme dahil edilmesi ile beraber hesaplanmalıdır. Motor, filtre, evirici ve akım algılayıcısından oluşan karmaşık sistemin en uygun kontrolör parametrelerinin hesaplanması için sezgisel algoritmaların kullanılmıştır.

Geleneksel hız kontrollü sistemlerde motor çalışırken mekanik rezonans gibi bir bozucu girişin motora gelmesi durumunda motor akımının bozucu momenti yenmek ve motor hızını takip etmek için ani bir artış sağladığı görülmüştür. Bu akımın en yüksek değeri motorun maksimum akımı ile sınırlandırılmıştır. Akım referanslı yöntemde bozucu giriş geldiğinde motor akımı artmamıştır fakat motor hızında bir azalma meydana gelmiştir. Bozucu giriş ortadan kalktıktan sonra motor tekrar hızlanmaya başlar ve belirlenen süre sonunda motor referans hızını yakalar. Böylece uydu yönelim sistemlerinde bozucu girişler nedeniyle akımın maksimum değerine yükselmesinden kaynaklanan fazla güç talebi engellenmiş olur.

Kontrolör parametreleri Ziegler-Nichols yöntemi ve genetik algoritmalar kullanılarak hesaplanmıştır. Kontrolör parametrelerinin kullanılması ile elde edilen benzetim çalışmasını sonuçları karşılaştırıldığında genetik algoritma ile elde edilen kontrolör parametrelerinin kullanıldığı benzetim çalışmasının akım dalgalanmasının daha küçük olduğu görülmüştür.

Genel sistemin mekanik modeli oluşturularak sistemin mekanik rezonans bölgesi ve sistemde oluşacak burulma momenti değeri hesaplanarak motorun mekanik rezonans bölgesinden çıkması için gerekli olan moment değeri ve motor momentinin yeterli olup olamayacağı gözlemlenebilir.

6. DENEYSEL SONUÇLAR

6.1 Giriş

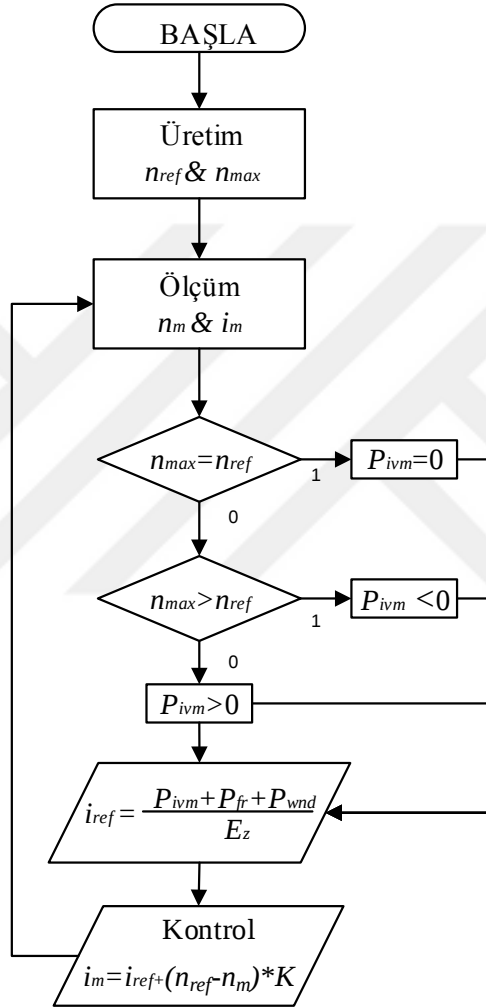
Volanlı enerji depolama sistemlerinde akım referanslı sürme yönteminin önemi ve kontrolör parametrelerinin önemi bir önceki bölümde benzetim çalışması ile gösterilmiştir. Yüksek hızlarda kullanılan malzemelerin özelliğine bağlı olarak mekanik rezonanslar meydana gelmektedir. Özellikle mekanik yataklı sistemlerde oluşan bu rezonanslar akım referanslı yöntem için önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Mekanik sistem içerisinde rezonans bölgesinin veya farklı bozucu girişlerden kaynaklanan nedenlerle oluşabilecek mekanik titreşimlerin mümkün olduğu kadar hızlı geçilmesi istenmektedir. Bunun için hız kontrollü sistemlerde bozucu girişlerde kontrolör motor akımını artırarak motor momentinin bozucu momentin üzerine çıkmasını sağlamaya çalışmaktadır. Fakat uydu yönelim sistemlerinde motorun arzu edilen hızına geldiğinde ulaşacağı akım değerinin üzerinde bir akım değeri ile sürülmesi daha fazla güç ihtiyacına neden olacağından ve ani akım artışlarının sistemin güç dengesini bozma ihtimali olduğundan istenmeyen bir durumdur.

Akım referanslı yöntemin amacı sistemde oluşabilecek mekanik rezonanslar veya ortam parametrelerinin değişiminde akımın ani artışlarını ve motorun maksimum akım çekmesini engellemektedir. Fakat oluşabilecek mekanik rezonans gibi yük değişimlerinin değeri tahmin edilenden daha büyük olursa motor hızlanmasına beklenildiği gibi devam edemeyecek ve sistem bir süre rezonans bölgesinde kalacaktır. Sistem mekanik rezonans bölgesinde ne kadar fazla kalırsa mekanik parçaların ömrü o kadar kısalmaktadır. Bu dezavantajları mümkün olduğu kadar ortadan kaldırmak amacıyla yeni bir akım referanslı yöntem önerilmiştir.

6.2 Önerilen Akım Referanslı Yöntem

Önerilen yeni akım referanslı yöntemde sistemin hızı ölçülerek bir P kontrolör vasıtası ile akım hata miktarı elde edilmiştir. Bu hata miktarı, referans hız ile motor hızının farkındaki değişim ile orantılı olarak değişecektir. Eğer motorun hızı referans hızdan küçük

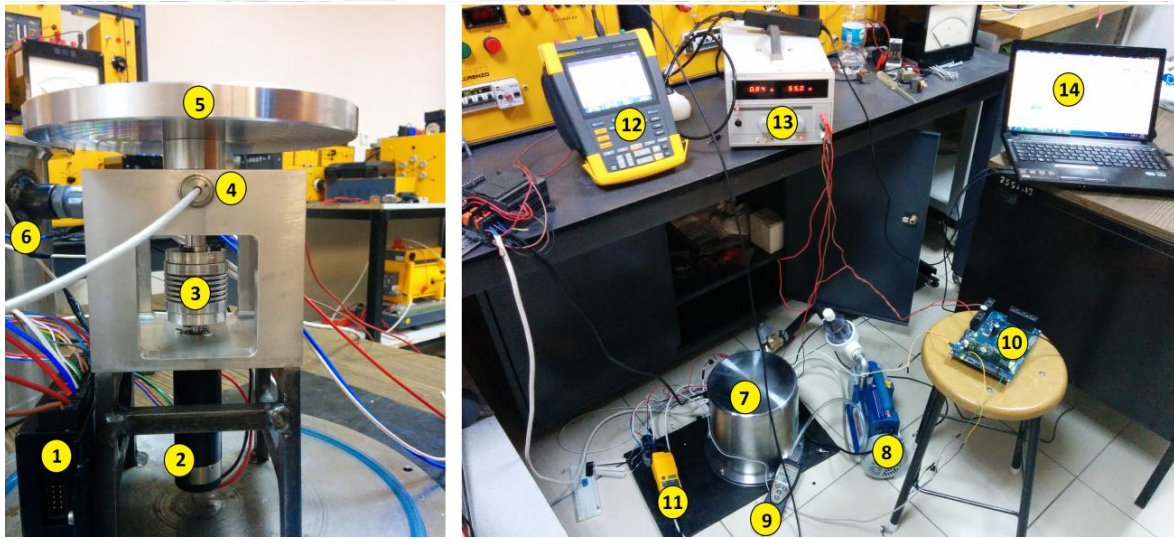
ise motorun akımı artacaktır. Tam tersi durumunda motor hızı referans hızdan büyük ise motor akımı azalacaktır. Bu değişim değeri oldukça yavaş meydana gelecektir. Çünkü hızın sürekli durum hatasını kontrol eden I integral kontrolörü kullanılmamıştır. Sadece akım referanslı yöntemde olduğu gibi artan hız değerine göre motorun üretmesi gereken akım hesaplanmış ve hız hata değerine göre motora hata akımı eklenmiştir.



Şekil 6.1 Önerilen akım referanslı yöntemi akış diyagramı

Böylece sistem herhangi bir bozucu etki meydana geldiğinde belirlenen katsayı doğrultusunda motorun referans akımını artırır veya azaltır. Sistemin bozucu etkiden daha hızlı kurtularak mekanik parçaların zarar görmesini engellenmiş olur. Aynı zamanda ortam değişkenlerinin veya mekanik sürtünme değerlerinin zaman içerisinde daha önceden belirlenen değerlerden farklılaşması sonucunda oluşabilecek referans akım hatası P

Burada 1 numara ile gösterilen ESCON 70/10 motor sürücüsüdür. Sürücünün akım referansı ile çalışma özelliği bulunmaktadır. 2 numara ile gösterilen MAXON EC-25 yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorudur. 4 numara ile gösterilen kısım CSmicro 2W/LT temassız sıcaklık ölçüm algılayıcısının montajının da yapıldığı, volanın yüksek hızlı rulmana montajının yapıldığı ve motorun bağlı olduğu volan yatağıdır. Sıcaklık algılayıcısının bulunduğu yerde yüksek hızlı rulman da bulunmaktadır ve rulman ile sıcaklık algılayıcısının arasında çok az bir boşluk vardır. Ölçüm temassız algılayıcı ile yapıldığı için ölçümün de böyle az bir boşluk bırakılarak yapılması gerekmektedir. 3 numara ile gösterilen kısımda motor ile volanın bağlantısını gerçekleştiren yüksek hızlarda çalışma yeteneğine sahip özel bir kaplin görülmektedir. Bu kaplin yurt dışında imal edilmektedir ve en önemli özelliği kaplinin burulma momentinin oldukça yüksek olmasıdır. Ayrıca imalattan kaynaklanan hataların önüne geçilmesi için balanslama işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.3 Tasarlanan sistemin görünüşü

Sistemde mekanik enerjinin depolanacağı volan şekilde 5 numarada görülmektedir ve sertlik oranı yüksek olan T601 çelikten imal edilmiştir. 6 ve 7 numaralar volan muhafaza biriminin açık ve kapalı durumlarını göstermektedir. Muhafazanın içerisindeki havanın boşaltılması için kullanılan vakum pompası 8 numarada görülmektedir. Ortam basıncını görebilmek için kullanılan TESTO 512 basınçölçer 9 numarada görülmektedir. 10 numarada akım referansını üretmek için kullanılan mikrodenetleyici kartı görülmektedir. 11 de motor

faz akımını ölçen akım ölçme probu görülmektedir. 12 de osiloskop, 13 te doğru akım kaynağı ve 14 te dizüstü bilgisayar görülmektedir.

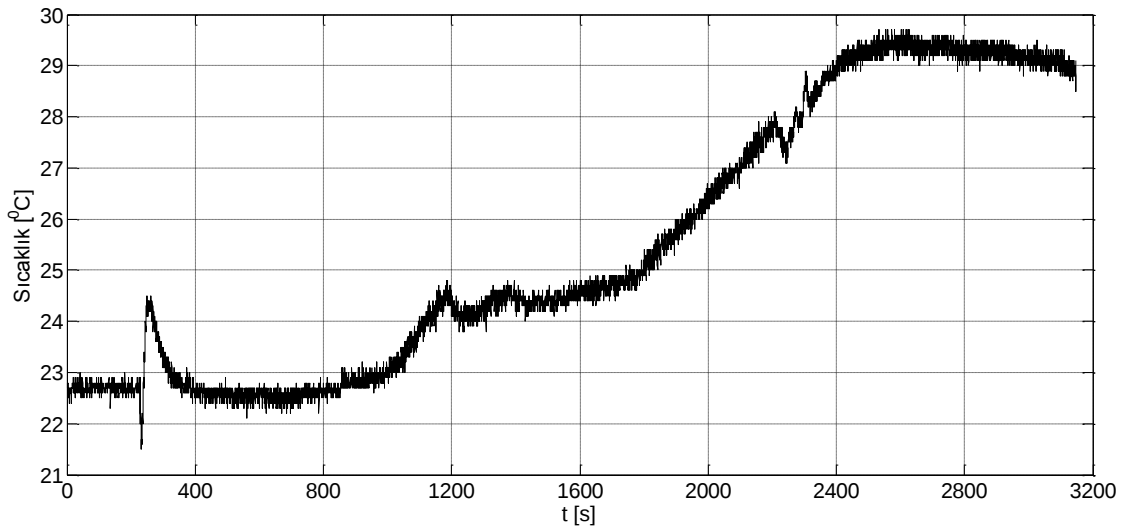
Akım referansının tahmin edilebilmesi için öncelikle sistem parametrelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Tasarlanan sistemin parametreleri aşağıda verilmiştir.

f_0 :1.3;
 f_1 :0.00037;
 v :18 mm²/s;
 d_m :18 mm;
 m :0.670 kg;
 g :9.8 m/s²;
 $m_r * e$:653 gmm;
 r_o :0.075 m;
 J :0.0018844 kgm²;

Rüzgar kaybının hesaplanması için gerekli olan parametreler verilmemiştir. Çünkü muhafaza biriminin hacmi tamamen vakumlanmıştır.

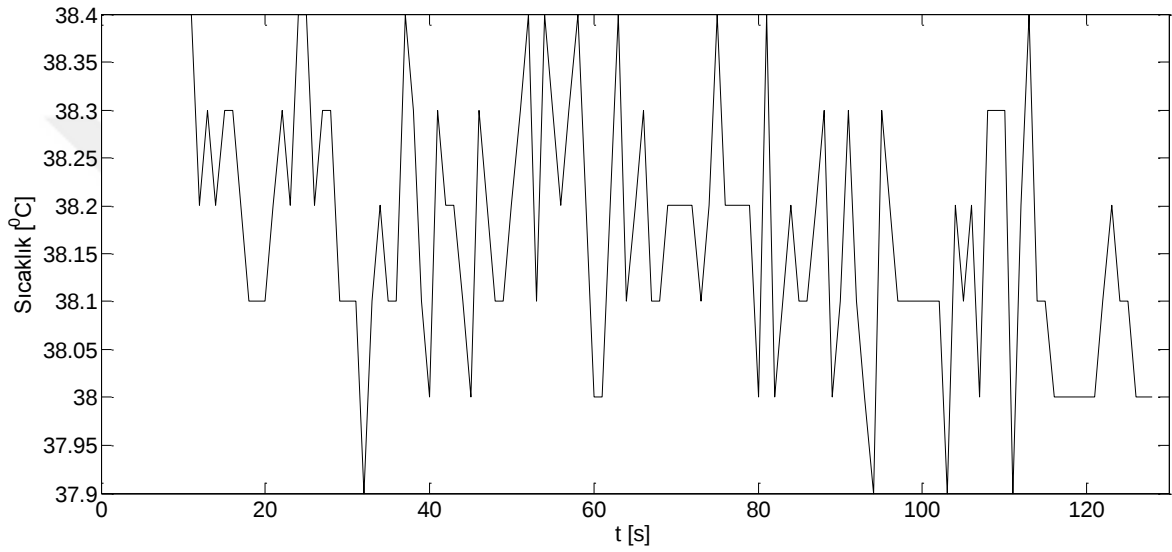
6.4 Deneysel Sonuçlar

Burada sistemin önemli iki değişkeni rulman yağının viskozitesi ve volanın balansıdır. Rulman yağının viskozitesini tahmin edebilmek için çalışma sıcaklığının bilinmesi gereklidir.

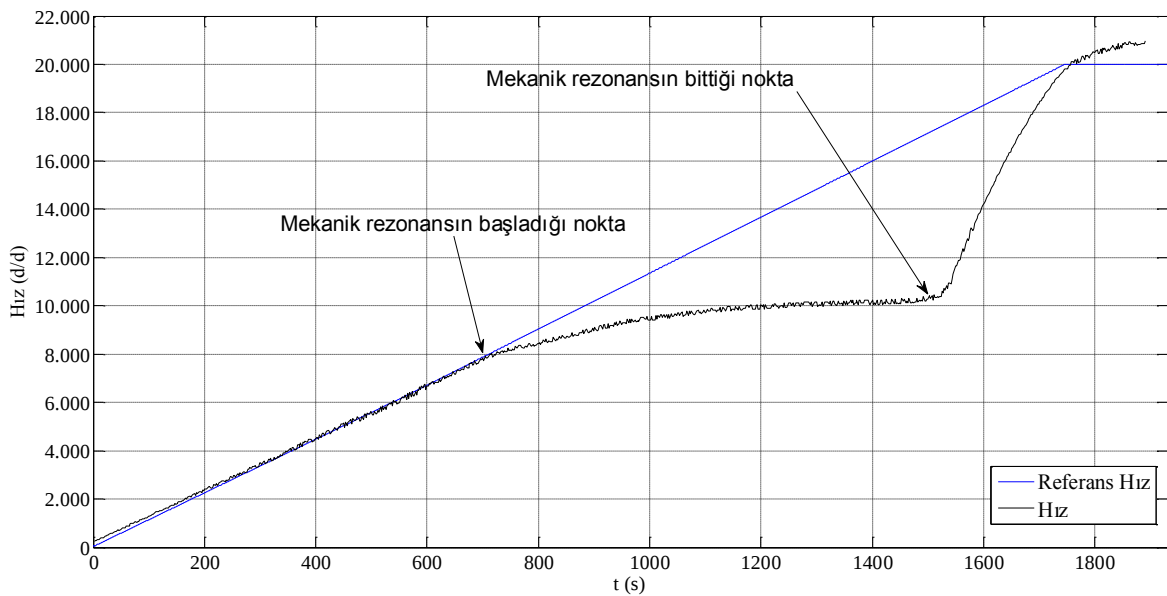


Şekil 6.4 Bir çalışma periyodu boyunca rulman sıcaklığının değişimi

Şekil 6.4’ de bir çalışma periyodu boyunca rulman sıcaklığının değişimi görülmektedir. Şekil 6.5’ de ise birden fazla çalışma sonunda rulman sıcaklığının ulaştığı en yüksek değer görülmektedir. Rulman içerisindeki sıcaklığın dışındaki sıcaklığından yaklaşık 10°C fazla olduğu düşünülürse rulman yağının viskozitesi $18\text{ mm}^2/\text{s}$ olarak hesaplanır. İlk çalışmada yağın viskozitesi hız değerine göre üç kademeli olarak girilmiştir. Sıcaklık sürekli duruma ulaştığında ise rulman yağının viskozitesi $18\text{ mm}^2/\text{s}$ olarak sisteme sürekli bir değer olarak dahil edilmiştir.

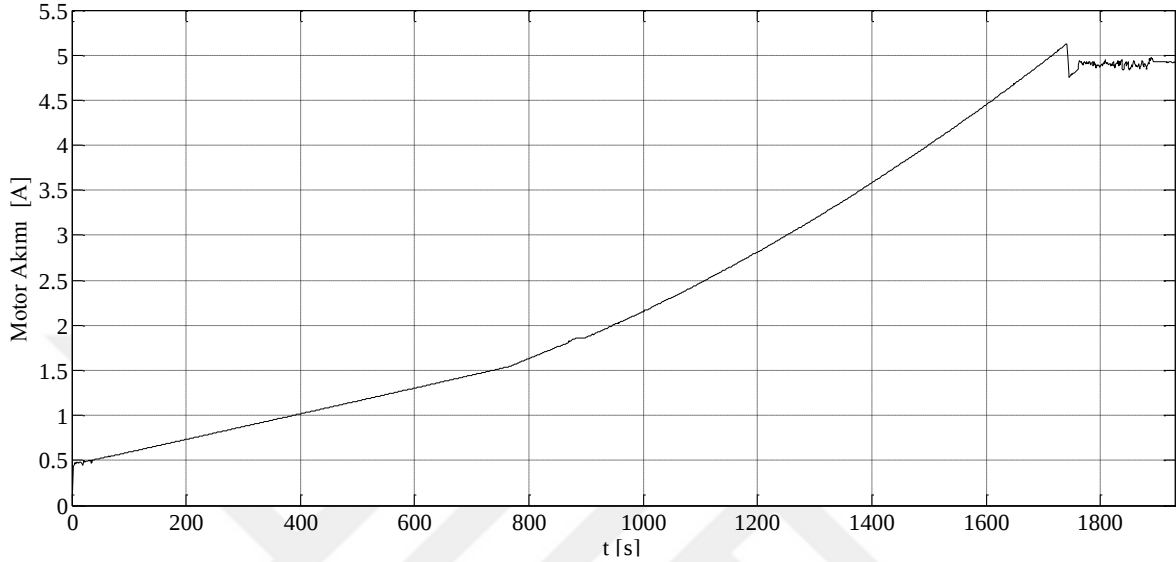


Şekil 6.5 Birden fazla çalışma sonunda rulman sıcaklığının ulaştığı en yüksek değer



Şekil 6.6 Klasik akım referansı ile sürülen sistemin hızı

Volanın balans değeri ilk uygulamalarda sabit olarak alınmıştır ve değer 710 gmm olarak belirlenmiştir. 1750 saniyede sabit balans değerine sahip klasik akım referansı ile sürülen sistemin hızı ve motorun akımı sırasıyla Şekil 6.6 ve Şekil 6.7’ de görülmektedir.

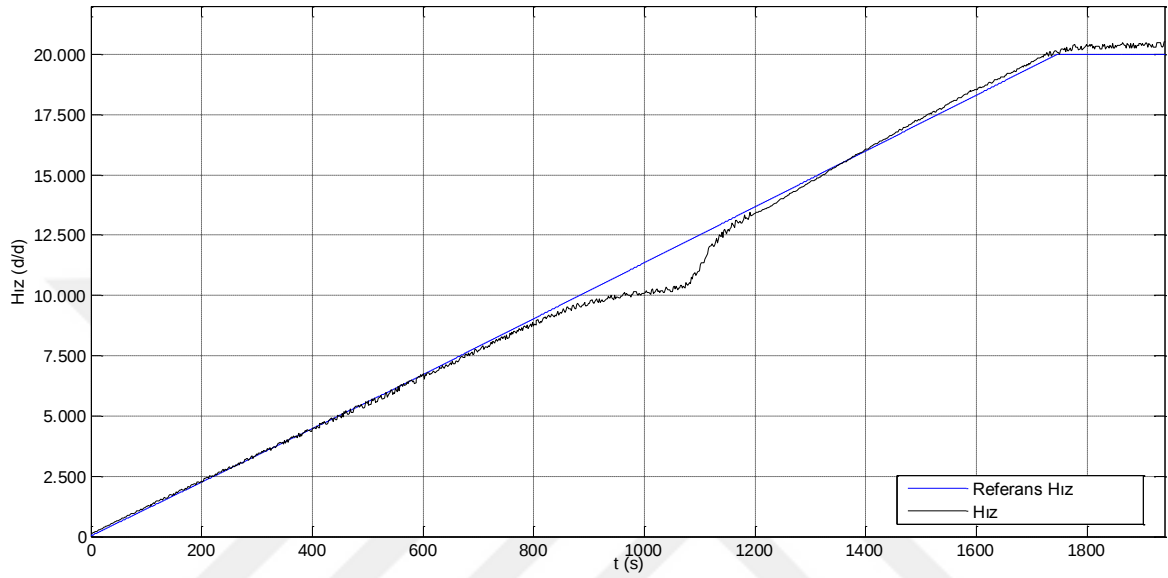


Şekil 6.7 Klasik akım referansı ile sürülen motorun akımı

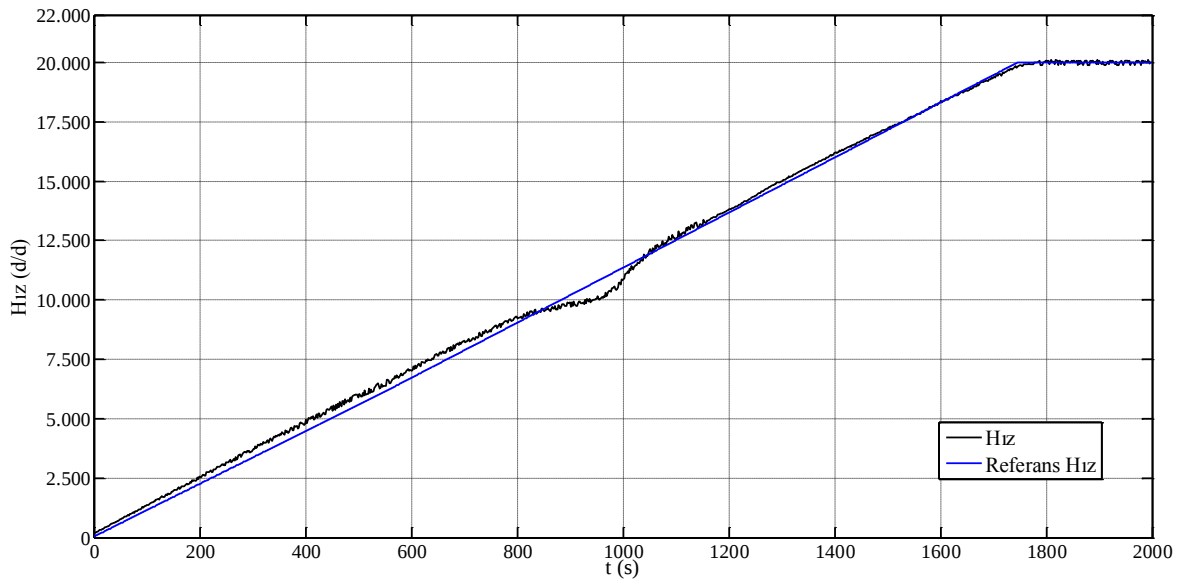
Mekanik rezonans bölgesinde hızın referans hızdan oldukça fazla uzaklaştığı görülmektedir. Motor akımı rezonans bölgesinde herhangi bir artış göstermemiştir. Motorun akım artışı artan hız referansına göre gerçekleşmiştir. Sistem mekanik rezonanstan çıktığında sistem tekrar hızlanmıştır referans hızı yakalamaya çalışmıştır fakat bunu başaramamıştır. Mekanik rezonansın uzun sürmesinin mekanik parçaların kullanım ömrüne olumsuz etkisi olmaktadır. Mekanik rezonans bölgesinde uydunun güç sistemine zarar vermeden daha kısa sürede çıkmak bu nedenle önemlidir.

Şekil 6.8’ de ise 1750 saniyede 20000 d/d hızına ulaşan 710 gmm sabit balans değerine sahip önerilen akım referanslı sürme yönteminin kullanıldığı sistemin hızı görülmektedir. Önerilen akım referanslı kontrol yönteminde mekanik rezonans başladığında oransal hız denetimi aracılığıyla akım referansına bir hata akım bilgisi girilmektedir. Buna göre referans akım artar veya azalır fakat bu değişim yavaş değişen hız değerine göre değişeceğinden akımın artış hızı da çok yavaş olmaktadır. Bu da uydu yönelim sistemini etkilemeyecek düzeydedir. Düşük hızlarda çok iyi sonuç veren sabit balans değerli akım referansı yüksek hızlarda hız arttıkça referans hızdan uzaklaşmıştır. Bunun nedeni sistemin kurulumda tek volan yataklı dik çalışan bir yapı olarak kurulmuş olmasıdır. Bu sistemde öngörülemeyen

önemli bir dezavantaj oluşmuştur. Volan tek yatakla motora bağlıdır ve volan eksenini ile motor eksenini arasında 0.01mm'lik bir fark veya kaplinin sökölüp takılması esnasında kaplinin yapısının bozulmasından kaynaklanabilecek 0.01 mm'lik bir salgı, rulmanın C4 standartlarında olan boşluğu nedeni ile volan üzerinde büyük bir balans oluşmaktadır.



Şekil 6.8 Sabit balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde sistemin hızı



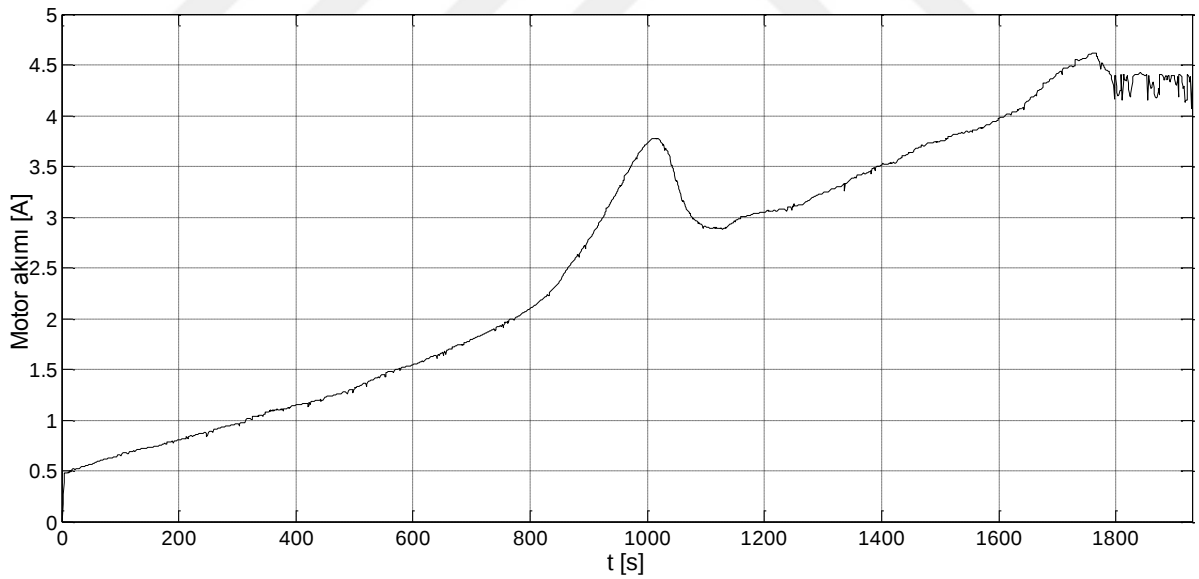
Şekil 6.9 Değişken balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde sistemin hızı

Oluşan bu büyük balans değeri rulmanın çalışma karakteristiği nedeni ile çalışma bölgelerinde farklı etkilere yol açmıştır. Rulmanın düşük hızlarda farklı bir karakteristik sergilemesi nedeni ile balansın düşük hızlarda farklı ve belirli bir hızın üstünde farklı karakteristikler sergilediği belirlenmiştir. Bu nedenle balansın hesaplanması için deneysel yollarla “ $m_r * e = 1117000 * \omega^{-0.9709}$ ” şeklinde elde edilen ifadeden faydalanılmıştır.

Bu yöntemle elde edilen önerilen akım referanslı sürme yönteminin kullanıldığı 1750 saniyede 20000 d/d hızına ulaşan sistemin hızı ve motorun akım grafikleri sırasıyla Şekil 6.9 ve Şekil 6.10’ da görülmektedir.

Sistemin hızının referans hızı takip etmesi ile ilgili performansın artırılması için balans belirleme ifadesi biraz daha geliştirilmiştir ve Şekil 6.11 ile Şekil 6.12’ de hız ve motor akımlarının görüldüğü 1800 saniyede 24000 d/d’ ya ulaşan sistemde “ $m_r * e = (5588000 * \omega^{-1.34}) + 508$ ” ifadesi kullanılmıştır.

Ayrıca önerilen akım referanslı yöntem ile rezonans bölgesinin hesaplanması ve benzetim çalışmasına uygulanması sonucu elde edilen motor akımı ve hızı Şekil 6.11 ve Şekil 6.12’ de görülmektedir.



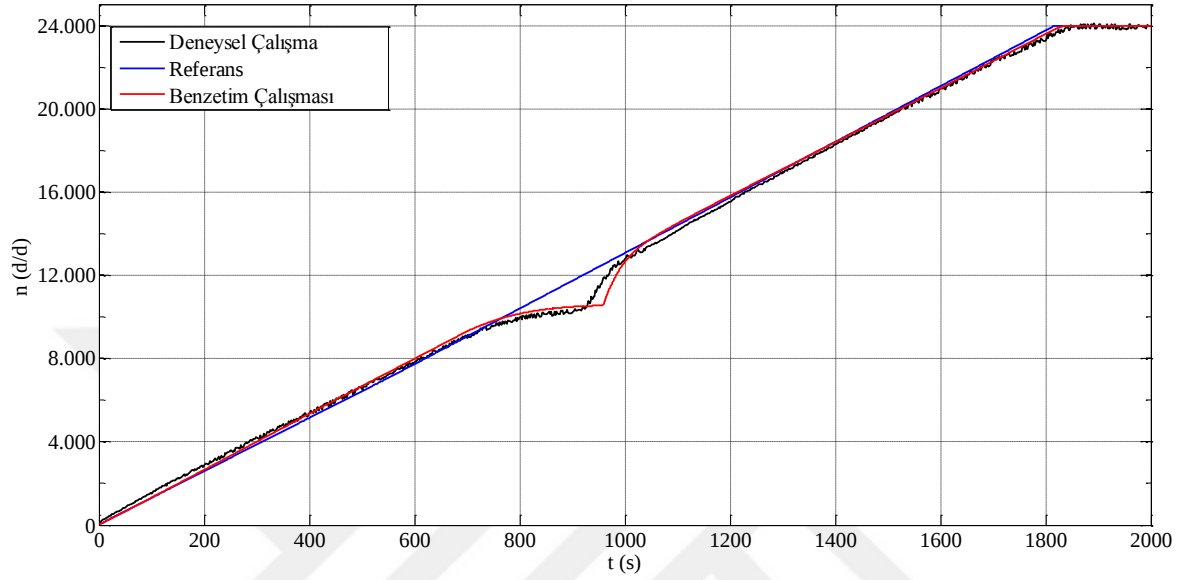
Şekil 6.10 Değişken balans değeri ile önerilen akım referanslı yöntemde motorun akımı

Sistemin 1800 saniyede 24000 d/d değerine ulaşması için gerekli olan ivmelenme momenti, maksimum hızdaki rulman balansından ve ağırlığından kaynaklanan moment ve rulman yağının viskozitesinden kaynaklanan moment değerleri aşağıda görülmektedir.

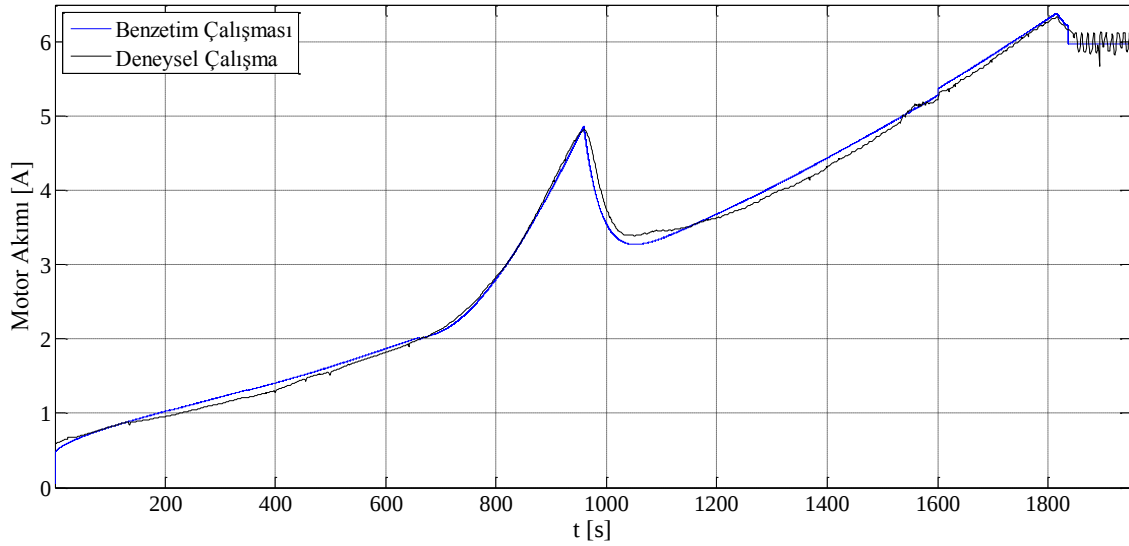
$$M_{ivm}= 0.00263 \text{ Nm}$$

$$M_I=0.0279 \text{ Nm}$$

$$M_0=0.0037 \text{ Nm}$$



Şekil 6.11 24000 d/d hızına 1800 saniyede ulaşan sistemde deneysel ve benzetim çalışmasında motor hızı



Şekil 6.12 24000 d/d hızına 1800 saniyede ulaşan sistemde deneysel ve benzetim çalışmasında motor akımı

Bu hız noktasında oluşan toplam moment 0.03423 Nm dir. Motor katalog değerlerinde ise üretilebilecek en yüksek moment değeri 0.0351 Nm olarak görülmektedir. Motor 24000 d/d hızına ulaştığında ivmelenme için harcanan moment değeri sıfır yapılır. İvmelenme

sırasındaki en yüksek akım 6.39 A iken sürekli durumda bu akım 5.9 A civarındadır. 1500. saniyede hız 19600 d/d iken motor akımı yaklaşık 4.8 A olarak ölçülmüştür. İvmelenme ve sürtünme momentleri hesaplanıp sistem parametrelerinin doğruluğu incelenirse;

“ $m_r * e = (5588000 * w^{-1.34}) + 508$ ” ifadesinden balans değeri 711,6 gmm olarak bulunmuştur.

$$M_{ivm} = 0.00263 \text{ Nm}$$

$$M_I = 0.02 \text{ Nm}$$

$$M_0 = 0.0032 \text{ Nm}$$

Sistem hızlanırken 19600 d/d’ da hesaplanan toplam moment 0.02583 olarak bulunur. Burada motorun moment sabiti 0.00536 olarak katalog değerlerinde verilmiştir. Buna göre hesaplanan akımda 4.82 A olarak bulunur. Yaklaşık olarak ölçülen akımla aynıdır. 600. saniyede hız 7750 d/d iken motor akımı yaklaşık 1.82 A olarak ölçülmüştür. İvmelenme ve sürtünme momentleri hesaplanıp sistem parametrelerinin doğruluğu incelenirse;

“ $m_r * e = (5588000 * w^{-1.34}) + 508$ ” ifadesinden balans değeri 1214 gmm olarak bulunmuştur.

$$M_{ivm} = 0.00263 \text{ Nm}$$

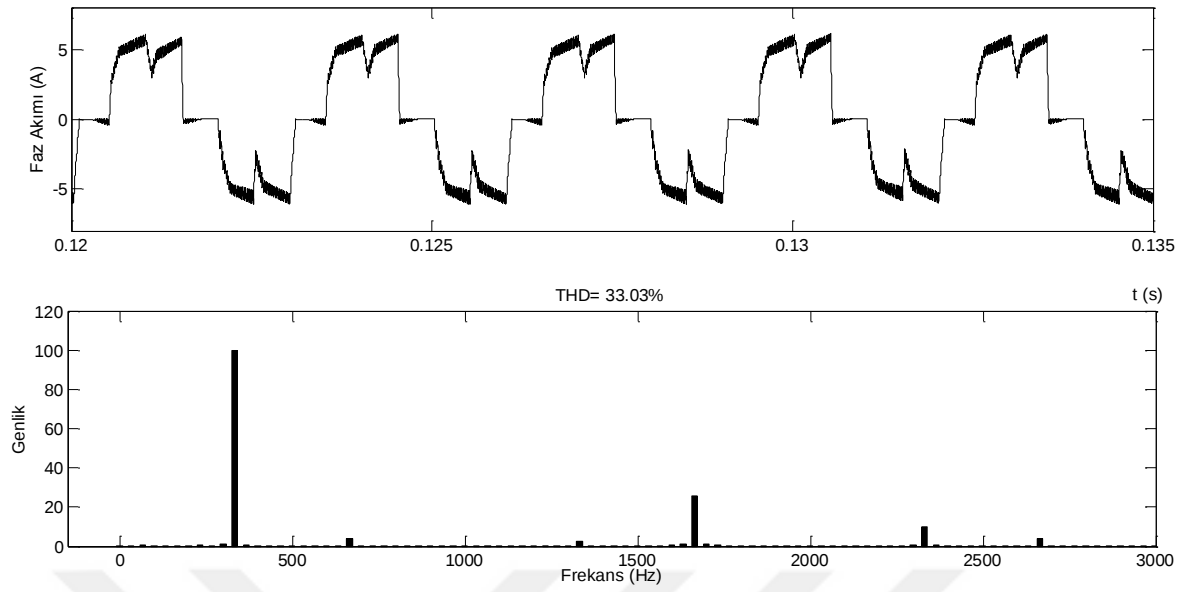
$$M_I = 0.0017 \text{ Nm}$$

$$M_0 = 0.0054 \text{ Nm}$$

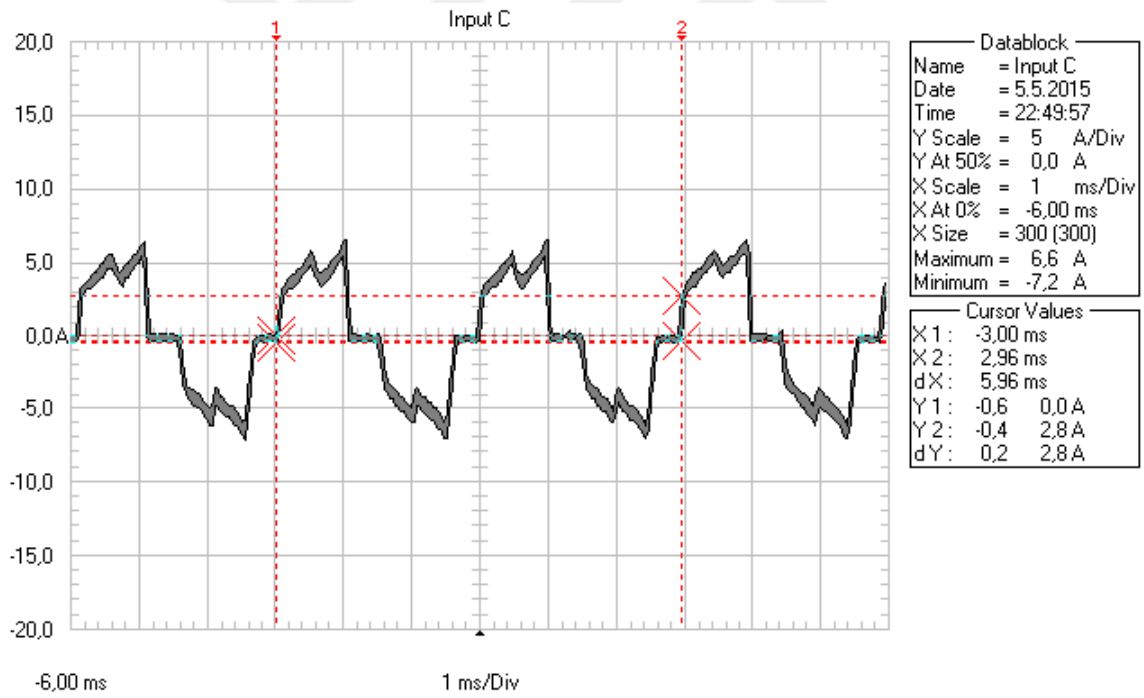
Sistem hızlanırken 7750 d/d’ da hesaplanan toplam moment 0.00973 olarak bulunur. Burada motorun moment sabiti 0.00536 olarak katalog değerlerinde verilmiştir. Buna göre hesaplanan akım 1.815 A olarak bulunmuş olup yaklaşık olarak ölçülen akımla aynıdır. Böylece sistemin tamamen vakumlu ortamda akımını belirleyen iki önemli değişkeni olan rulman yağının viskozitesi sıcaklık ölçümü ile sistemin balans değeri de deneysel olarak bulunan formülle hesaplanarak doğru akım tahmini gerçekleştirilmiştir.

Daha düşük balans değeri olan bir sistem tasarlandığında sistemin çok daha yüksek hızlara çıkacağı görülmektedir. Çünkü maksimum hızda harcanan gücün büyük bir kısmı balanstan doğan moment değerini karşılamak amacıyla harcanmaktadır.

Şekil 6.13’ te 20000 d/d hızında benzetim çalışması sonucunda elde edilen motor faz akımı ve bu faz akımına ait harmonik analizi görülmektedir. Şekil 6.14’ de motor 20000 d/d hızında iken motorun bir faz akımı ve Şekil 6.15’ te bu faz akımına ait harmonik analiz görülmektedir.

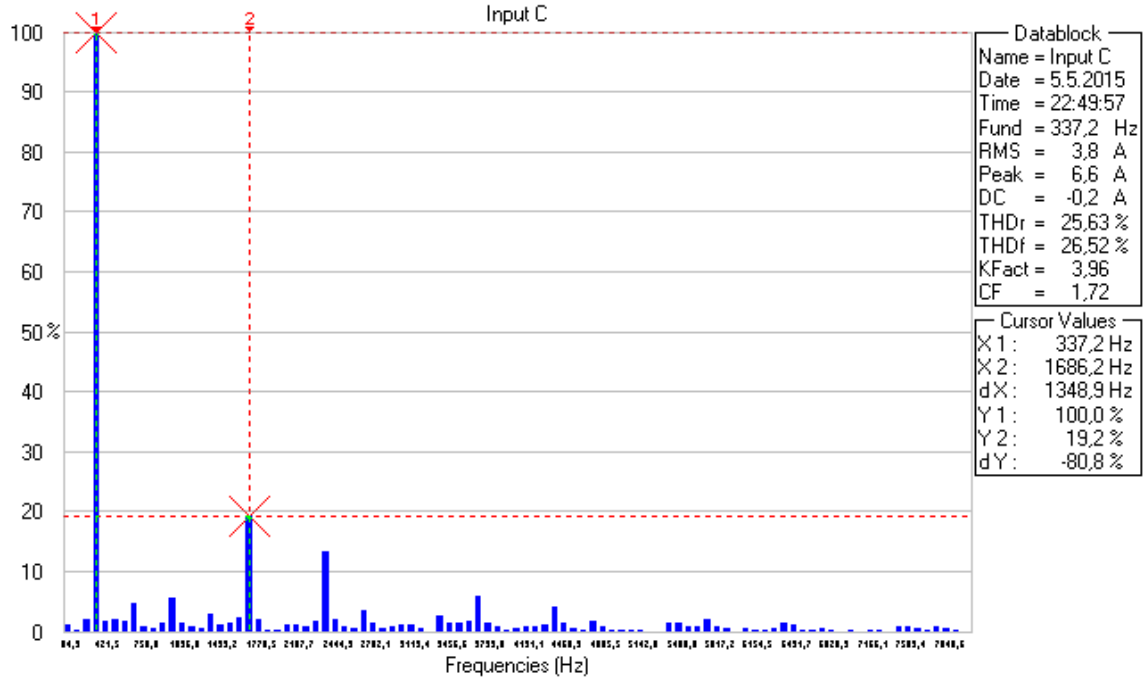


Şekil 6.13 Benzetim çalışmasında 20000 d/d hızında motor faz akımı ve harmonik analizi



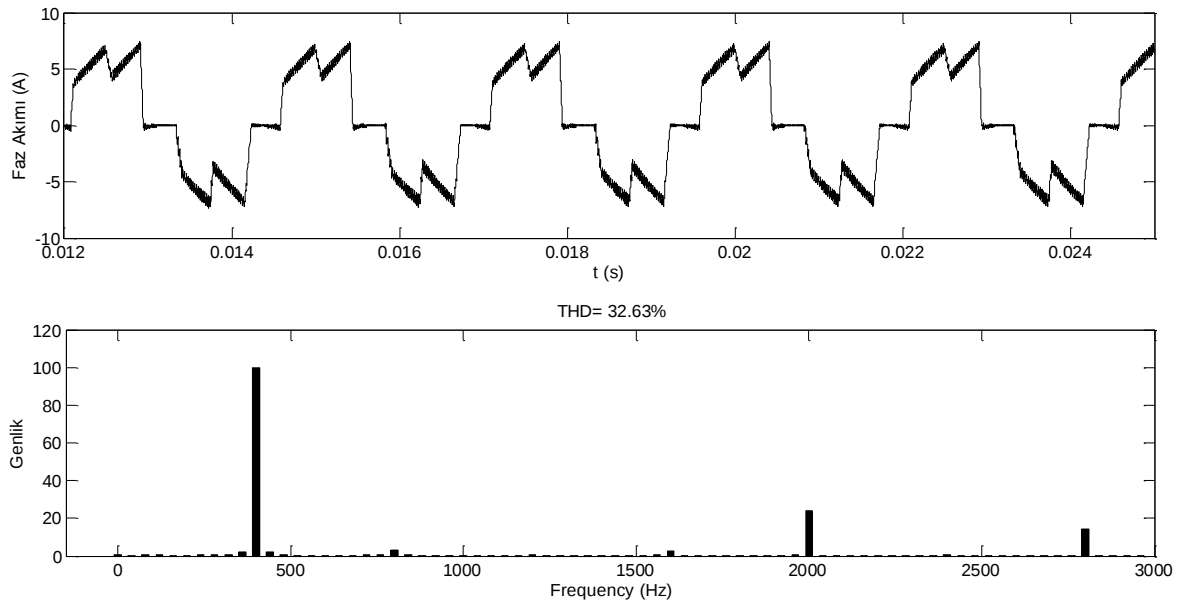
Şekil 6.14 20000 d/d hızında motor faz akımı

Şekil 6.16' da 24000 d/d hızında benzetim çalışması sonucunda elde edilen motor faz akımı ve bu faz akımına ait harmonik analizi görülmektedir.



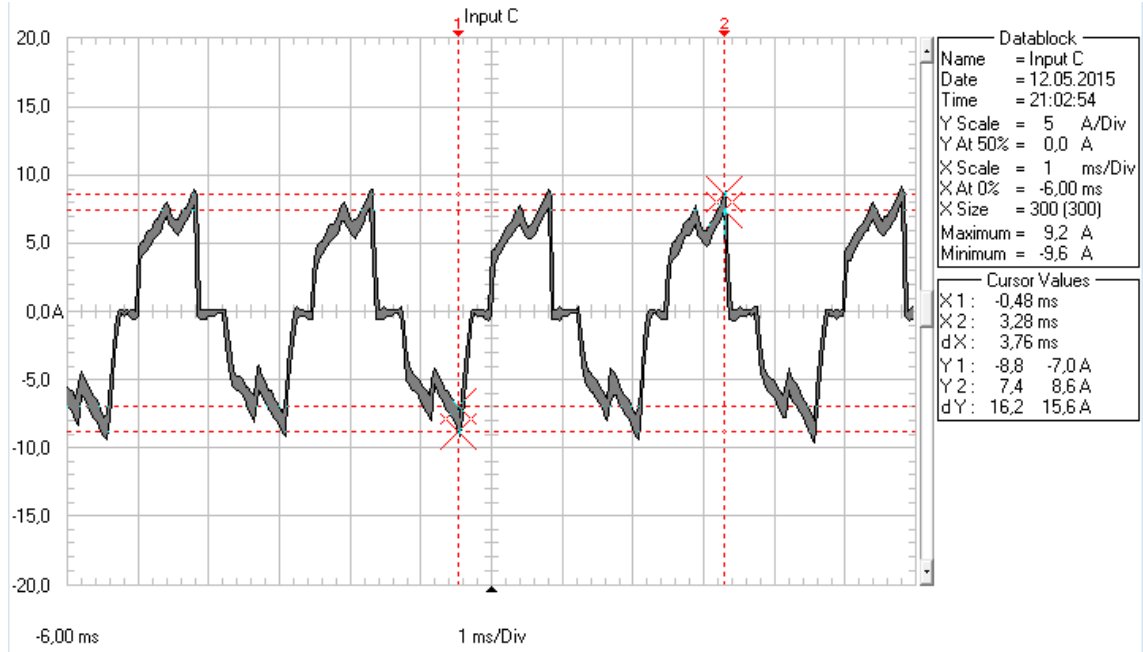
Şekil 6.15 20000 d/d hızında motor faz akımının harmonik analizi

Şekil 6.17’ de motor 24000 d/d hızında iken motorun bir faz akımı ve Şekil 6.18’ de bu faz akımına ait harmonik analiz görülmektedir.

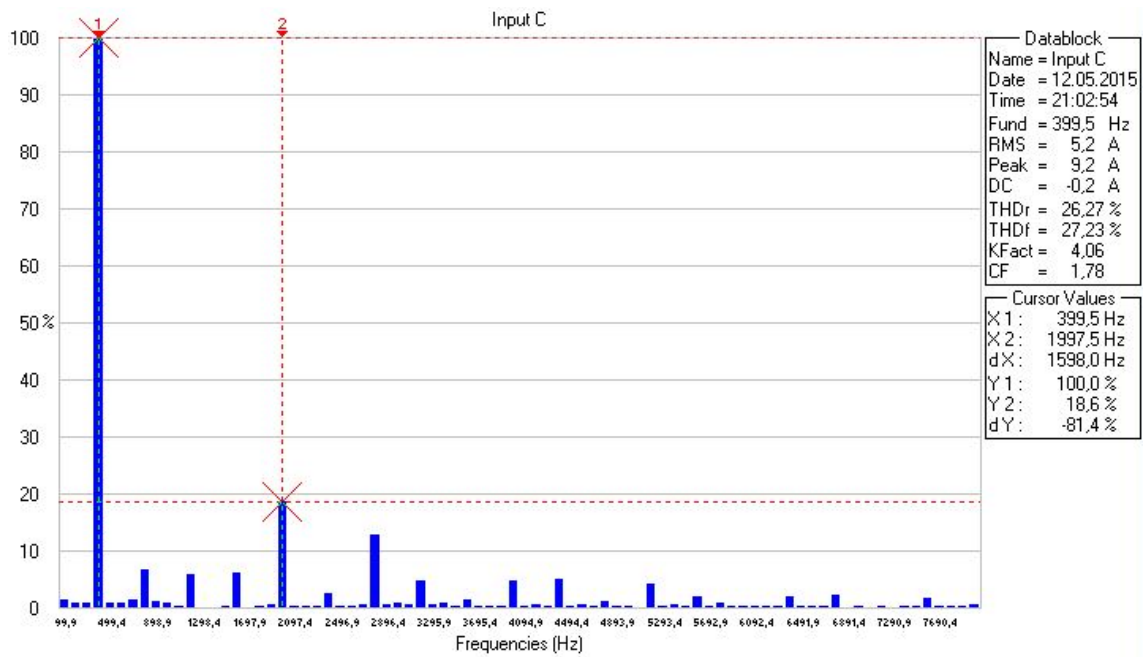


Şekil 6.16 Benzetim çalışmasında 24000 d/d hızında motor faz akımı ve harmonik analizi

Düşük balanslı bir sistemde rulman yağının viskozitesinden kaynaklanan sürtünme kayıpları en az balans kayıpları kadar hatta balans kayıplarından daha önemli bir hale gelmektedir.



Şekil 6.17 24000 d/d hızında motor faz akımı



Şekil 6.18 24000 d/d hızında motor faz akımının harmonik analizi

Önceki çalışmalarda rulman yağının viskozitesi sabit bir değer alınarak belirlenmişti. Bu çalışma ile rulman sıcaklığının sistemin hızı ve rulmanın yüklenme durumuyla doğrudan ilişkili olduğu gösterilmiştir. Bu nedenle sistem kayıpları hesaplanırken rulman sıcaklığı sistemin ulaşacağı en yüksek hız değerine ulaştırılıp birkaç çalışma sonrasında ölçüm yapılarak yağın viskozitesinin hesaplanması gerektiği gösterilmiştir.



7. SONUÇLAR

FDAM' ları basit anahtarlama teknikleri, yüksek verimleri, düşük hacimde yüksek güç üretme kabiliyetleri ve yüksek hızlarda çalışabilme özelliği ile son yıllarda uzay uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek hızlı FDAM' larının gelişimi ile beraber özellikle uydu güç sisteminde önemli avantajları bulunan volanlı enerji depolama sistemlerinin gelişimi önemli ölçüde etkilenmiştir.

Volanlı enerji depolama sistemleri elektrokimyasal bataryalara şarj derinliği, kullanım ömrü ve toplam ağırlık gibi birçok bakımdan üstünlük sağlamış durumdadır. Ayrıca uydu yönelim sistemlerinde moment kontrol jiroskoplarına entegre şekilde çalışabilmesi önemli bir avantaj olmuştur. Uydular dünya yörüngesinde hareketini devam ettirirken yörüngenin bir bölümünde güneşli bölgede kalırken yörüngenin bir diğer bölümünde karanlık bölgede kalmaktadır. Uydu karanlık bölgede iken enerjisi volanlı enerji depolama sisteminden veya elektrokimyasal bataryalar tarafından sağlanmaktadır. Volanlı enerji depolama sistemlerinin tasarımı gerçekleştirilirken mekanik sistemin özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır. Uydu güç sisteminde sistem kayıplarının hesaplanabilmesi gerekmektedir. Çünkü uydunun karanlık bölgede iken üretmesi gereken enerji miktarının içinde mekanik sistemin kayıp enerjiside olmalıdır. Mekanik sistemden kaynaklanan bozucu momentlerden uydu güç sisteminin etkilenmemesi gerekmektedir.

Bu çalışmada yüksek hızlı mekanik enerji depolama sisteminde akım referanslı kontrol yöntemi incelenmiştir. Bu yöntem ile bozucu momentlerden kaynaklanan ani akım artışları engellenmiş olur. Böylece hem uydu güç sisteminin güvenilirliği sağlanmış olur hem de motor ivmelenirken ihtiyaç duyulan güç hesaplanarak güneş panellerinin boyutlarının artmaması sağlanmış olur. Akım referansının hatasız tahmin edilebilmesi için rulman sıcaklığı ölçülmüştür. Sistemin balans değerinden kaynaklanan hataların giderilmesi amacıyla hız değerine bağlı düşük hızda farklı ve yüksek hızda farklı balans değerleri veren bir ifade ile balans değeri sisteme girilmiştir. Yüksek hıza çıktıkça balans değeri yaklaşık sabit olmuştur.

Sistemin mekanik özelliklerinden kaynaklanan mekanik rezonansların olduğu görülmüştür. Sistem tasarımı yapılırken mekanik rezonans bölgesinin bilinmesinin yararlı olacağı düşünülerek sistemin mekanik modeli oluşturulmuştur. Yapılan deneysel çalışma ile mekanik model ile yapılan sistem benzetimi karşılaştırılmıştır. Böylece sistem tasarımı

gerçekleştirilirken mekanik rezonans bölgesinin tespitinin sağlanabileceği ve sistemin tasarlanmasına yardımcı olabileceği gösterilmiştir.

Mekanik rezonans gibi büyük bozucu etkilerden daha kısa sürede kurtulmak amacıyla yeni bir akım referanslı yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntem ile sisteme zarar vermeyecek şekilde motor akımının motor hız değişimine bağlı olarak uzun bir sürede artmasını sağlanmıştır. Böylece ani akım yükselmelerinin önüne geçilmiş olunmuş ve motor rezonans bölgesinden çıkma süresi azaltılarak mekanik sistemin zarar görmemesi sağlanmıştır. Çalışmada motorun 20000 d/d ve 24000 d/d hızlarında motor hızının akım referansı ile sabit tutulması sağlanmıştır. Motor akımının kontrolör parametreleri genetik algoritmalar kullanılarak hesaplanmıştır. Kontrolör parametreleri hesaplanırken, sistem değişkenleri ve düşük indüktanslı motorun LC filtresi sisteme dahil edilmiştir. Kontrolör parametrelerinin hesaplanmasında genetik algoritmalar kullanılarak motor, filtre, akım algılayıcısı ve eviriciden oluşan karmaşık sistemin en uygun kontrolör değerinin hesaplanması sağlanmıştır. Böylece akım dalgalanmasının biraz daha azaltılacağı görülmüştür.

Çalışmada yüksek hızlı rulmanın C4 standartlarındaki boşluğu nedeniyle sistemdeki çok küçük bir eksen kaçıklığının veya kullanılan mekanik parçalardaki çok küçük bir bozulmanın volan üzerinde yüksek bir balans değeri oluşturduğu görülmektedir. Bu etkiden kurtulmak için volanın iki taraftan iki rulman ile montajlanarak tasarlanması gerektiği görülmüştür. Fakat bu sistemde de iki rulmana ait rulman kayıpları oluşacaktır. Yüksek hızlı fırçasız doğru akım motorlarının volanın motor miline direk takılması ile ülkemiz şartlarında üretilebilmesinin mümkün olduğu durumda eksen kaçıklığı ve montaj hatalarının önüne geçilebileceği görülmüştür.

Önerilen akım referanslı kontrol yönteminde hız bilgisinin hatası P kontrolör kullanılarak akım kontrolörü için akım referansı oluşturulmuştur. Bu P kontrolör katsayısının akımın ani yükselmesine engel olacak fakat bütün bozucu etkilere karşı duyarlı olacak şekilde, çevrimiçi olarak yapay sinir ağları veya bulanık mantık algoritmaları kullanılarak hesaplanması üzerine yeni çalışmaların yapılması öngörülmüştür.

Ayrıca filtre kayıpları hesaplanarak, yüksek anahtarlama frekanslarında anahtarlama kayıpları ile karşılaştırılması sonucunda tasarlanan sistemde belirlenen anahtarlama frekansında filtre kullanma veya yüksek anahtarlama frekansı kullanma seçeneklerinin değerlendirilmesi için kayıpların optimizasyonun yapılması üzerine çalışmaların yapılması öngörülmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Aydın, K. and Aydemir, M.T.**, 2013. A control algorithm for a simple flywheel energy storage system to be used in space applications, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **21**, 1328-1339.
- [2] **Aydın, K. and Aydemir, M.T.**, 2016. Sizing design and implementation of a flywheel energy storage system for space applications, *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, **24**, 793-806.
- [3] **Mehedi, I.M., Varatharajoo R., Harun H. and Filipski, M.N.**, 2005. Architecture for Combined Energy and Attitude Control System, *American Journal of Applied Sciences*, 430-435.
- [4] **Kenny, B.H., Kascak, P.E., Jansen, R., Dever, T. and Santiago, W.**, 2004. Control of a High Speed Flywheel System for Energy Storage in Space Applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **41**(4), 1029 – 1038.
- [5] **Toliyat, H.A., Talebi S., McMullen, P., Huynh, C. and Filatov, A.**, 2005. Advanced High-speed Flywheel Energy Storage Systems for Pulsed Power Applications, 2005, *IEEE Electric Ship Technologies Symposium*, 25-27 July, 379 – 386.
- [6] **Zou, J., Liu, K., Hu J., and Li, J.**, 2011. A Modified C-Dump Converter for BLDC Machine Used in a Flywheel Energy Storage System, *IEEE Transactions on Magnetics*, **47** (10), 4175-4178.
- [7] **Lee, S., Lee, S.R., and Jeon, C.H.**, 2006. A New High Efficient Bi-directional DC/DC Converter in the Dual Voltage System, *Journal of Electrical Engineering & Technology*, **1**(3), 343-350.
- [8] **Zhang, J.**, 2008. Bidirectional DC-DC Power Converter Design Optimization, Modeling and Control, *PhD Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [9] **Aydın, K. and Aydemir, M.T.**, 2010. Utilization of the Inverter as a Boost Rectifier for the Voltage Regulation of Mechanical Batteries, *15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, 26-28 April, 1204 – 1208.
- [10] **Kenny, B.H., Kascak, P.E.**, 2002. Sensorless Control of Permanent Magnet Machine for NASA Flywheel Technology Development, *NASA / TM-2002-211726*, Cleveland, Ohio.
- [11] **Talebi, S., Nikbakhtian, B., Chakali, A.N., Toliyat, H.A.**, 2008. Control Design of an Advanced High-Speed FESS for Pulsed Power Applications, *Industrial Electronics, 34th Annual Conference of IEEE*, 10-13 Nov., 3358 – 3363.
- [12] **Vafakhah, B., Masiala, M., Salmon, J. and Knight, A.**, 2008. Emulation of Flywheel Energy Storage Systems With a PMDC Machine, *International Conference on Electrical Machine*, 6-9 Sept., 1-6.
- [13] **Talebi, S., Nikbakhtian, B. and Toliyat, H.A.**, 2007. A Novel Algorithm for Designing the PID Controllers of High-speed Flywheels for Traction Applications, *Vehicle Power and Propulsion Conference*, 9-12 Sept., 574 – 579.
- [14] **Kenny, B.H. and Kascak, P.E.**, 2002. DC Bus Regulation Storage System With a Flywheel Energy, *NASA / TM-2002-211897*, Cleveland, Ohio.
- [15] **Santiago, W.**, 2004, Inverter Output Filter Effect on PWM Motor Drives of a Flywheel Energy Storage System, *NASA/TM—2004-213301*, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio

- [16] **Kenny, B.H., and Santiago, W.,** 2004. Filtering and Control of High Speed Motor Current in a Flywheel Energy Storage System, *NASA/TM—2004-213343*, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio.
- [17] **You, D., Jang, S., Le, J-P and Sung, T-H.,** 2008. Dynamic Performance Estimation of High-Power FESS Using the Operating Torque of a PM Synchronous Motor/Generator, *IEEE Transactions on Magnetics*, **44**(11), 4155-4158.
- [18] **Shao, J.,** 2003. Direct Back EMF Detection Method for Sensorless Brushless DC (BLDC) Motor Drives., *M.S. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.
- [19] **Damodharan, P. and Vasudevan, K.,** 2010. Sensorless Brushless DC Motor Drive Based on the Zero-Crossing Detection of Back Electromotive Force (EMF) From the Line Voltage Differen, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **25**(11), 661-668.
- [20] **Chun, T.W., Tran, Q.V., Lee, H.H., and H.G., Kim,** 2014. Control of BLDC Motor Drive for an Automotive Fuel Pump Using a Hysteresis Comparator, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**(3), 1382-1391.
- [21] **Makiela, D.,** 2011. Sensorless Control of High-Speed PM BLDC Motor, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 27-30 June, 722-727.
- [22] **Wu, Y., Deng, Z., Wang, X., Ling, X. and Cao, X.,** 2010. Position Sensorless Control Based on Coordinate Transformation for Brushless DC Motor Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **25**(9), 2365-2371.
- [23] **Kim, T.H. and Ehsani, M.,** 2004. Sensorless Control of the BLDC Motors From Near-Zero to High Speeds, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **19**(6), 1635-1645.
- [24] **Baszynski, M., and Pirog, S.,** 2014. A Novel Speed Measurement Method for a High-Speed BLDC Motor Based on the Signals From the Rotor Position Sensor, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **10**(1)1, 84-91.
- [25] **Bist, V. and Singh, B.,** 2014. An Adjustable-Speed PFC Bridgeless Buck–Boost Converter-Fed BLDC Motor Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(6), 2665-2677.
- [26] **C. S., Joice, S. R., Paranjothi, and V. J. S.,** 2013. Kumar, Digital Control Strategy for Four Quadrant Operation of Three Phase BLDC Motor With Load Variations, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **9**(2), 974-982.
- [27] **Bist, V. and Singh, B.,** 2014. PFC-Based BLDC Motor Drive Using a Canonical Switching Cell Converter, *IEEE Transactions on Industrial Informatics* , **10**(2), 1207-1215.
- [28] **Saxena S.K. and Saha T.,** 2014. Ultra High Speed Operation of BLDC Motor with Enhanced Motor Dynamics for Space Limited Applications, *Aerospace Conference*, 3-10 March, 1-12.
- [29] **Xia, C., Xiao, Y., Che, W. and Shi, T.,** 2014. Torque Ripple Reduction in Brushless DC Drives Based on Reference Current Optimization Using Integral Variable Structure Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **61**(2), 738-751.
- [30] **Ozturk S.B. and Toliyat, H.A.,** 2008. Sensorless Direct Torque and Indirect Flux Control of Brushless DC Motor with Non-sinusoidal Back-EMF, *Industrial Electronics, 34th Annual Conference of IEEE* , 10-13 Nov., 1373-1378.
- [31] **Ta, C.M.,** 2011. Pseudo-vector Control – An Alternative Approach for Brushless DC Motor Drives, *Electric Machines & Drives Conference*, 15-18 May., 1534-1539.

- [32] **Kumar, G. R., Prasad, K.N.V. and Doss, M. A.N.,** 2012. Improve the Transient Response of Speed and Torque Ripple Minimization of the BLDC Motor by Varies Controllers, *International Conference on Computer Communication and Informatics*, 10-12 Jan., 1-6.
- [33] **Kshirsagar, P. and Krishnan, R.,** 2012. High-Efficiency Current Excitation Strategy for Variable-Speed Nonsinusoidal Back-EMF PMSM Machines, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **48**(6), 1875-1889.
- [34] **Liu, Y., Zhu, Z.Q. and Howe, D.,** 2007. Commutation-Torque-Ripple Minimization in Direct-Torque-Controlled PM Brushless DC Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **43**(4), 1012-10321.
- [35] **Holland, J.H.** 1975. Adaptation in Natural and Artificial Systems, *The University of Michigan Press*. Ann Arbor.
- [36] **Farag, A. and Werner, H.,** 2006. Structure selection and tuning of multi-variable PID controllers for an industrial benchmark problem, *IEE Proceedings Control Theory and Applications*, **153**(3), 262 – 267.
- [37] **Demirtas, M.,** 2011. Off-line tuning of a PI speed controller for a permanent magnet brushless DC motor using DSP, *Energy Conversion and Management*, **52**(1), 264-273.
- [38] **Jan, R.M., Tseng, C.S. and R.J., Liu.,** 2008. Robust PID control design for permanent magnet synchronous motor: A genetic approach, *Electric Power Systems Research*, **78**(7), 1161-1168.
- [39] **Vishal, V., Kumar, V., K.P.S. Rana and Mishra, P.,** 2014. Comparative study of some optimization techniques applied to DC motor control, *IEEE International Advance Computing Conference*, 21-22 Feb., 1342-1347.
- [40] **Anandaraju, M.B., Puttaswamy Dr. P.S. and Rajpurohit, J.S.,** 2011. Genetic Algorithm: An approach to Velocity Control of an Electric DC Motor, *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), (26)1, 37-43.
- [41] **Feyzi, M.R., Shafiei, M. and Bahrami, M., Kouhshahi,** 2011. Position Sensorless Direct Torque Control of Brushless DC Motor Drives Based on Sliding Mode Observer Using NSGA-II Algorithm Optimization, *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference*, 19-17 Feb., 151-156.
- [42] **Jawayon, P. and Srisertpol, J.,** 2013. Speed Estimation Of 3-Phase BLDC Motor Using Genetic Algorithm, *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, **2**(1), 254-263.
- [43] **Dozein, M.G., Gholami, A. and Kalantar, M.,** 2012. Speed Control of DC Motor Using Different Optimization Techniques Based PID Controller, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, **2**(7), 6488-6494.
- [44] **Ali, M.O., Koh, S.P. and Chong, K.H.,** 2011. Design a PID Controller of BLDC Motor by Using Hybrid Genetic-Immune, *Modern Applied Science*, **5**(1), 75-85.
- [45] **Hajebi, P. and AlModarresi, S.M.T.,** 2012. Online Adaptive Fuzzy Logic Controller Using Genetic Algorithm and Neural Network for Networked Control Systems, *ICACT Transactions on Advanced Communications Technology*, **1**(3), 88-98.
- [46] **Juang, C.F., and Lu, C.F.,** 2006. Load-frequency control by hybrid evolutionary fuzzy PI controller, *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, **153**(2), 196-204

- [47] **Uddin, M.N., Abido, M.A. and Rahman, M.A.,** 2005. Real-Time Performance Evaluation of a Genetic-Algorithm-Based Fuzzy Logic Controller for IPM Motor Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, **41**(1), 246-252.
- [48] **Huang, M.S., Hsu, Y.L. and Fung, R.F.,** 2012. Minimum-Energy Point-to-Point Trajectory Planning for a Motor Toggle Servomechanism, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, (17)2, 337-344.
- [49] **Vieira, J.P.A., Nunes, M.V.A., Bezerra, U.H. and do Nascimento, A.C.,** 2009. Designing optimal controllers for doubly fed induction generators using a genetic algorithm, *IET Generation, Transmission & Distribution*, **3**(5), 472-484.
- [50] **Chen, Z., Yuan X., Ji, B., Wang, P. and Tian, H.,** 2014. Design of a fractional order PID controller for hydraulic turbine regulating system using chaotic non-dominated sorting genetic algorithm II, *Energy Conversion and Management*, **84**,390-404.
- [51] **Daneshfar, F. and Bevrani, H.,** 2009. Load–frequency control: a GA-based multi-agent reinforcement learning, *IET Generation, Transmission & Distribution*, **4**(1), 13-26.
- [52] **Hanselman Dr.D.,** Brushless Permanent Magnet Motor Design, 2006. Electrical and Computer Engineering University of Maine Orono USA, *Magna Physics Publishing*, Second Edition.
- [53] **Bose, B.K.,** Modern Power Electronics and AC Drives, 2002. Condra Chair of Excellence in Power Electronics the University of Tennessee, *Prentice Hall PTR*, Knoxville.
- [54] **Fang, J., Li, W. and Li, H.,** 2014. Self-compensation of Commutation Angle Based on DC-link Current for High-speed Brushless DC Motors with Low Inductance, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**(1), 428-439.
- [55] **Park, S.I., Kim, T.S., Ahn, S.C., and Hyun, D.S.,** 2003. An Improved Current Control Method for Torque Improvement of High-Speed BLDC Motor, *Applied Power Electronics Conference and Exposition, Eighteenth Annual IEEE*, vol.1, 9-13 Feb, 294 – 299.
- [56] **Liu, Y., Zhao, J., Xia, M. and Luo, H.,** 2014. Model Reference Adaptive Control-Based Speed Control of Brushless DC motors with Low-Resolution Hall-Effect Sensors, *IEEE Transactions on Power Electronics*, **29**(3), 1514-1522.
- [57] **Orlu, U., Yuksel, G., Gomes, L. and Hall, K.,** 2003. BILSAT-1: Power System Sizing and Design”, *International Conference on Recent Advances in Space Technologies*, 20-22 Nov., 159-164
- [58] **Aydın, K.,** 2010. Uydur Entegre Güç ve Yönelim Kontrol Sistemlerinde Kullanılabilir Bir Volanlı Enerji Depolama Biriminin Tasarımı ve Gerçeklenmesi, *Doktora Tezi*, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [59] http://medias.schaeffler.com/medias/en!hp.tg.cat/tg_hr*ST4_102160011 20 Mayıs 2016
- [60] **Abrahamsson, J., Oliveira, J.G., Santiago, J., Lundin, J. and Bernhoff, H.,** 2012. On the Efficiency of a Two-Power-Level Flywheel-Based All-Electric Driveline, *Energies*, **5**, 2794-2817.
- [61] **Chen, X., Xu, D., Liu, F., and Zhang, J.,** 2007. A Novel Inverter Output Passive Filter for Reducing Both Differential- and Common-Mode dv/dt at the Motor Terminals in PWM Drive Systems, *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, **54**(1), 419-426.

- [62] **Webb J.,Greshock K.**, Industrial Control Electronics, Second Edition,1993. Prentice Hall Inc.405-423
- [63] **Goldberg, D.E.**, 1989. Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, *Addison-Wesley*, USA
- [64] **Kalaivani, L., Subburaj, P., Iruthayarajan, M.W.**, 2013. Speed control of switched reluctance motor with torque ripple reduction using non-dominated sorting genetic algorithm (NSGA-II), *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **53**, 69–77
- [65] **Baran, İ.**, 2014. Doğrusal Ve Doğrusal Olmayan Sistemlerin Yapay Arı Kolonisi Algoritması Kullanılarak Modellenmesi, *Yüksek Lisans Tezi*, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [66] **Dorigo, M., Di C.G., Gambardella L.M.**, 1999. Ant algorithms for discrete optimization, *Artificial Life*, **5** (2), 72-137.
- [67] **Ünal M.**, 2008, PID Kontrolörün Karınca Kolonisi/Genetik Algoritma Tabanlı Optimizasyonu ve Gunt Rt 532 Basınç Prosesinin Kontrolü, *Yüksek Lisans Tezi*, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

EKLER

MAXON EC 25 FDAM



Nominal gerilim	:36 V
Yüksüz hızı	:64100 rpm
Yüksüz akımı	:242 mA
Nominal hızı	:62200 rpm
Nominal moment	:35.1 mNm
Nominal akım	:6.74 A
Tutma momenti	:1580 mNm
Kalkış akımı	:294 A
Maksimum Verim	:94 %
Terminal direnci	:0.122 Ω
Terminal indüktansı	:0.014 mH
Moment sabiti	:5.36 mNm/A
Hız sabiti	:1780 rpm/V
Hız/Moment	:40.6 rpm/mNm
Mekanik zaman sabiti	:2.32 ms
Rotor eylemsizliği	:5.45 gcm ²

ESCON 70/10 Sürücü



Ağırlık	:259 g
Güç	:700W
Bağlanabilen Algılayıcılar	:Tachogen., Artımsal Encoder, hall sensorleri
Çalışma modu	:Hız ve akım limit kontrollü
Çalışma gerilimi	:10-70V
Maksimum çıkış akımı	:30A, 20sn
Sürekli durum akımı	:10A
PWM frekansı	:53.6kHz
Akım kontrolörünün örnekleme zamanı	:53.6kHz
Hız kontrolörünün örnekleme zamanı	:5.36kHz
Maksimum verim	:%98
Maksimum hız	:150000rpm
Girişler	:Dönüş yönü, PWM set değeri, stop, akım limit
değeri, hız rampa değeri, hız limit değeri.	
Çıkışlar	:Akım ve hız bilgileri
Geirlimler	:Encoder ve hall sensorleri için 5V çıkış
Arayüz	:USB 2.0

Basınç Ölçer.



0-200mbar ölçüm aralığı.

LCD ekranlı.

0.1mbar hassasiyetli.

2000mbar aşırı basınca dayanıklı.

60°C ye kadar ortam sıcaklığında çalışabilir.

Maksimum. ve minimum değer hafızalı.

Temassız Sıcaklık Ölçüm Cihazı



Temperature range: -40°C ile 1030°C arasında sıcaklık ölçüm aralığı.

M12x1, 28 mm boyutlarında palanmaz çelik kılıf.

4-20mA analog çıkış.

Alarm çıkışı.

USB program arayüzü

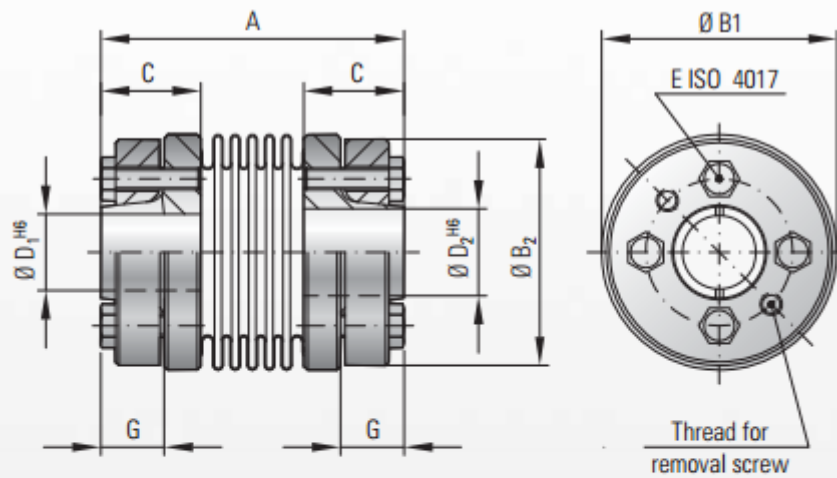
5-30 VDC gerilim aralığı

DRV8301-69M-KIT



- DRV8301 2.3A sink/1.7A source, three phase inverter with integrated buck converter for 1.5A external loads.
- C2000 Piccolo TMS320F28069M MCU controlCARD with Isolated XDS100v2 JTAG Emulation
- CCS Integrated Development Environment (IDE)
- Kit supports 60V and 40A full scale range
- All documentation, software and user's guides available for free through MotorWare at www.ti.com/tool/motorware
- Piccolo Isolated F28069M controlCARD
- USB Cable
- USB Stick with GUI, CCStudio IDE, and Quick Start Guide
- NO wall power supply, provide your own high current supply
- Latest USB contents for the motor kits here.

MKS 45 KAPLIN



Ordering example

MKS/45 / 10 / 8 / XX

Model
Series
Bore Ø D1 H6
Bore Ø D2 H6
Non standard e.g. anodized

Model MKS			Series	
			45	100
Rated torque (Nm)	T_{KN}		4.5	10
Overall length (mm)	A		42	48
Outside diameter (mm)	B_1		32	40
Hub diameter (mm)	B_2		30	38
Fit length (mm)	C		14	16
Inside diameter possible from Ø to Ø H6 (mm)	$D_{1/2}$		6-10	8-14
Standard bore Ø H6 (mm)	$D_{1/2}$		10	12
Fastening screw ISO 4017 (mm)	E		3x M3	4x M3
Tightening torque of the fastening screws (Nm)			1.3	1.3
Distance (mm)	G		8.5	9.5
Moment of inertia (gcm ²)	J_{total}		65	160
Approximate weight (g)			51	75
Torsional stiffness (Nm/rad)	C_T		7000	9050
Axial  ± (mm)	max. values		0.5	0.75
Lateral  ± (mm)			0.1	0.05*
Angular  ± (degree)			0.5	0.5

1 Nm = 8.85 in lbs

ÖZGEÇMİŞ

Reşat ÇELİKEL

Dicle Üniversitesi

Çüngüş Mehmet Adıgüzel Meslek Yüksekokulu

Elektrik Bölümü

Diyarbakır

rcelikel@dicle.edu.tr

1980 yılında Elazığ 'da doğdu.

2002 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Bölümünden mezun oldu.

2002-2004 yılları arasında asenkron motor üreten SEZAL elektrik A.Ş. bünyesinde çalıştı.

2005 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektrik Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisansını tamamladı.

2007 yılında Çüngüş Mehmet Adıgüzel Meslek Yüksekokulu Elektrik Bölümünde Öğretim Görevlisi olarak göreve başladı.