

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**

**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN REJENERATİF SÜRÜCÜ
TASARIMI VE FARKLI SÜRÜŞ PROFİLLERİNDE TEST
EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAMAZAN DURSUN

DENİZLİ, NİSAN - 2024

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN REJENERATİF SÜRÜCÜ
TASARIMI VE FARKLI SÜRÜŞ PROFİLLERİNDE TEST
EDİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAMAZAN DURSUN

DENİZLİ, NİSAN - 2024

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

RAMAZAN DURSUN

ÖZET

ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN REJENERATİF SÜRÜCÜ TASARIMI VE FARKLI SÜRÜŞ PROFİLLERİNDE TEST EDİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RAMAZAN DURSUN

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. SELAMİ KESLER)
DENİZLİ, NİSAN - 2024

Günümüz şartlarında ulaşım sektörü açısından harcanan enerji sektörü için önemli bir miktara ulaşmış durumdadır. İçten yanmalı motorlar'da (İYM) kullanılan enerji kaynağı genellikle fosil yakıtlardır. Bu yakıtlar çevre kirliliğini arttırmaktadır. Bu araçlarda kullanılan motorların verimliliği elektrikli araçlara (EA) göre daha düşüktür.

Son yıllarda EA'lar İYM'lerle kıyaslandığında enerji verimliliği açısından öne çıkmaktadır. Ancak EA'larda menzil açısından az da olsa dezavantajlı olduğu durumlar ortaya çıkmaktadır. Menzil ise EA'larda kullanılan bataryanın enerji kapasitesine ve yeterli sayıda şarj istasyonunun olmasına bağlıdır. Bundan dolayı enerjinin verimli kullanılması ve enerjinin geri kazanımı menzil ve maliyet açısından önem arz etmektedir. EA'larda, gerek boşta seyirde (rampa inişlerdeki gibi), gerek frenleme ile yavaşlama gerekse durmak için yapılan frenlemede disk balatalarında harcanan mekanik geri kazanılması adına araç tahrik motorunun jeneratör modunda çalışmasını sağlayan güç elektroniği tabanlı sürücülerin tasarımı ve kullanımı zorunludur.

Bu tez çalışmasında, EA'ların laboratuvar modellemesi yapılmış olup hususen rejeneratif çalışma modunu test edebilmek ve geliştirilen rejeneratif model algoritmasını doğrulamak için rejeneratif modlu bir güç elektroniği sürücüsü tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu sayede, EA'larda menzil artışına etki eden faktörler incelenmiştir. Bu test platformunda; hafif EA'larda yaygın olarak kullanılan motorlardan biri olan fırçasız doğru akım motoru (FDAM) tercih edilmiş olup araç sürüş profillerinin testi, rejenerasyon bilgilerinin görselleştirilmesi ve grafik tabanlı incelenebilmesi için bir test devresi tasarlanmış olup çeşitli sürüş profillerinde testler gerçekleştirilerek akım, gerilim, devir değerleri veriseti olarak bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Yapılan çalışmalar sonunda tüm sürüş profillerinde rejeneratif modun EA'larda menzili artırdığı anlaşılmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Elektrikli Araçlar, Fırçasız Doğru Akım, Rejeneratif, FDAM, Motor Sürücü, Araç Sürüş Profilleri.

ABSTRACT

REGENERATIVE DRIVE DESIGN FOR ELECTRIC VEHICLES AND TESTING IN DIFFERENT DRIVING CYCLES

MSC THESIS

RAMAZAN DURSUN

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERING**

(SUPERVISOR: ASSOC. PROF. DR. SELAMİ KESLER)

DENİZLİ, APRIL 2024

In today's conditions, the energy consumed by the transportation sector has reached a significant amount for the sector. The energy source used in internal combustion engines (ICE) is generally fossil fuels. These fuels increase environmental pollution. The efficiency of the engines used in these vehicles is lower than that of electric vehicles (EV).

In recent years, EVs stand out in terms of energy efficiency compared to ICEs. However, there are situations where EVs are at a slight disadvantage in terms of range. The range depends on the energy capacity of the battery used in EVs and the availability of a sufficient number of charging stations. Therefore, efficient use of energy and energy recovery are important in terms of range and cost. In EVs, it is mandatory to design and use power electronics-based drivers that enable the vehicle drive engine to operate in generator mode in order to recover the mechanical energy spent on the disc pads during idling (such as when descending a hill), slowing down through braking, and braking to stop.

In this thesis study, laboratory modeling of EVs was carried out and a regenerative mode power electronic driver design was carried out, especially in order to test the regenerative operating mode and to verify the developed regenerative model algorithm. In this way, the factors affecting the range increase in EVs were examined. In this test platform; Brushless direct current motor (FDAM), one of the motors commonly used in light EVs, was preferred and a test circuit was designed to test vehicle driving profiles, visualize regeneration information and examine it graphically has been transferred to the computer environment. As a result of the studies, it has been understood that the regenerative mode increases the range of EVs in all driving cycles.

KEYWORDS: Electric Vehicles, Motor Driver, Bldcm, Brushless Direct Current Motor, Regenerative, Driving Cycles

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel Bilgiler.....	1
1.2 Literatür Özeti	1
1.3 Tezin Amacı	6
1.4 Meteryal ve Yöntem	6
1.5 Tezin Katkısı	8
2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR	10
2.1 Giriş.....	10
2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar	12
2.2.1 Fırçasız Doğru Akım Motorları	12
2.3.Fırçasız Doğru Akım Motorların Yapısı.....	13
2.3.1 Fırçasız Doğru Akım Motorların Stator Yapısı.....	14
2.3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorların Rotor Yapısı	16
2.3.3 Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Hall Etkili Sensörler.....	17
2.4 Fırçasız Doğru Akım Motorların Çalışma Prensibi	17
2.4.1 Fırçasız Doğru Akım Motorların Sensörlü Kontrolü.....	18
2.5 Fırçasız Doğru Akım Motorların Üstün ve Zayıf Yönleri.....	23
3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN REJENERATİF SÜRÜCÜ DEVRESİ TASARIMI	24
3.1 Doğru Akım Motorunun Yön Kontrol Devresinin Çalışma İlkesi	26
3.2 Üç Fazlı Doğru Akım Motoru Yön Kontrol Devresinin Çalışma İlkesi.....	27
3.2.1 Üç Faz Köprüsünde Kullanılan Anahtarlama Elemanı ve Sürücü Entegresi Özellikleri	28
3.3 Rotor Konum Bilgisi Ve Hall etkili Sensörler	29
3.4 Rejeneratif Mod İçin Üç Faz Doğrultucu Devresi	30
3.5 Boost Konvertör Devresi.....	31
3.5.1 Kullanılan Boost Konvertör Devresinin Özellikleri	32
3.6 Arduino Mega Mikro Denetleyici Ve Genel Özellikleri	33
3.6.1 Rejeneratif Mod İçin Geliştirilen İşlem Sırası.....	34
3.7 Rejeneratif Sürücü Devresinin Genel Yapısı Ve Çalıştırılması	37
4. ARAÇLARDA SÜRÜŞ PROFİLLERİ	39
4.1 Giriş.....	39
4.2 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN TASARLANAN REJENERATİF SÜRÜCÜ DEVRESİNİN FARKLI SÜRÜŞ PROFİLLERİ İÇİN TEST DEVRESİ TASARIMI	40

4.3	SOC (Batarya Şarj Durumu) Tanımı	41
4.4	ACS 712 Akım Sensörü Modülü ve Özellikleri	42
4.5	Gerilim Ölçme Devresi.....	43
4.6	SD Kart Modülü ve Özellikleri	45
4.7	Arduino Nano ve Genel Özellikleri	45
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR.....	46
6.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	65
7.	KAYNAKLAR	67
8.	ÖZGEÇMİŞ	70

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Fırçasız doğru akım motorunun fiziksel yapısı	13
Şekil 2.2: Fırçasız doğru akım motorunun iç yapısı	14
Şekil 2.3: FDAM faz sargılarında indüklenen trapezoidal zıt EMK.....	15
Şekil 2.4: FDAM faz sargılarında indüklenen sinüzoidal zıt EMK	15
Şekil 2.5: Fırçasız doğru akım motorunun rotor yapısı	16
Şekil 2.6: Fırçasız doğru akım motorunun sürücü güç devresi	18
Şekil 2.7: Fırçasız doğru akım motorunun sensörlü çalışması	20
Şekil 2.8: Fırçasız doğru akım motoru sürücü üç faz çıkış.....	22
Şekil 2.9: Ölü zaman değişimi.....	22
Şekil 3.1: Rejeneratif enerji dönüşüm devresi.....	25
Şekil 3.2: DCM'nun yön kontrol devresi.....	26
Şekil 3.3: Üç Faz yön kontrol devresi.....	27
Şekil 3.4: PWM sinyali ile elde edilen Sinüs eğrisi	28
Şekil 3.5: IR2103 uygulama devresi	29
Şekil 3.6: Üç faz köprü devresi	31
Şekil 3.7: Boost konvertör temel devresi.....	31
Şekil 3.8: Boost konvertör modülü	32
Şekil 3.9: Arduino mega ve pin tanımları.....	33
Şekil 3.10: FDAM rejeneratif sürücü algoritması akış şeması.....	35
Şekil 3.11: FDAM rejeneratif sürücü test devresi algoritmasının akış şeması	36
Şekil 3.12: FDAM ARES 3D rejeneratif sürücü PCB tasarımı.....	37
Şekil 3.13: FDAM ARES rejeneratif sürücü PCB çizimi	38
Şekil 3.14: Rejeneratif sürücü PCB uygulama devresi	38
Şekil 4.1: Sürüş profillerinin değişimleri.....	40
Şekil 4.2: Rejeneratif sürücü test devresi blok şeması.....	41
Şekil 4.3: ACS-712 uygulama devresi.....	42
Şekil 4.4: Gerilim uygunlaştırıcı ön devresi.....	43
Şekil 4.5: OP-AMP voltaj takipçi devre şeması.....	44
Şekil 4.6: LM358 OP-AMP iç şeması	44
Şekil 4.7: Micro-SD kart modülü	45
Şekil 4.8: Arduino nano mikrodenetleyici ve pin diyagramı.....	45
Şekil 5.1: Mikrodenetleyici A-B-C fazları PWM çıkış sinyalleri	46
Şekil 5.2: IR2103 A-B-C fazları çıkış sinyalleri	47
Şekil 5.3: IRP064N MOSFET A-B-C fazları çıkış sinyalleri	47
Şekil 5.4: Rejeneratif durumda A-B-C fazlarının sinyalleri	48
Şekil 5.5: Test platformunda kullanılan FDAM.....	49
Şekil 5.6: ECE sürüş profili zamana bağlı soc değerlerinin karşılaştırılması.....	50
Şekil 5.7: ECE zamana bağlı voltaj değerlerinin karşılaştırılması.....	51

Şekil 5.8: ECE zamana bağlı rejeneratif mod için rejenatif akım, motor akımı ve gerilim değişimi.....	53
Şekil 5.9: ECE zamana bağlı rejeneratif mod için rejenatif akım, motor akımı ve gerilim değişimi.....	54
Şekil 5.10: ECE zamana bağlı rejeneratif mod için rejeneratif mod rejeneratif akım, motor akımı ve SoC(%) değişimleri	55
Şekil 5.11: ECE zamana bağlı rejeneratif mod kazanılan güç ve harcanan güç değişimi	56
Şekil 5.12: JAPAN10 zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması	58
Şekil 5.13: JAPAN10 zamana bağlı güç ve toplam enerji	59
Şekil 5.14: NYCC sürüş profili zamana bağlı hız ve SoC değerlerinin karşılaştırılması	60
Şekil 5.15: NYCC zamana bağlı SoC (%), hız ve enerji değerlerinin karşılaştırılması	61
Şekil 5.16: NYCC zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması	63
Şekil 5.17: NYCC zamana bağlı güç ve toplam enerji	64

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: Hall etkili sensörlerin durumuna göre aktif anahtarlama elemanları	22
Tablo 2.2: Hall etkili sensörlerin durumuna göre anahtarlama durumları	22
Tablo 3.1: Rotor pozisyonuna göre hall etkili sensörlerin durumları.	30

SEMBOL LİSTESİ

EA	: Elektrikli araç
ECE	: Avrupa Sürüş Profili
NYCC	: New York Şehir Döngüsü Sürüş Profilli
JAPAN10	: Japon 10 Sürüş Profili
WLTP	: Dünya Çapında Uyumlaştırılmış Hafif Araçlar Test Prosedürü
İYM	: İçten yanmalı motor
BLDC	: Fırçasız Doğru Akım Motoru
EMK	: Elektro motor kuvvet
PWM	: Darbe genişlik modülasyonu
DC	: Doğru akım
AC	: Alternatif akım
PCB	:Baskı devre kartı
DCM	:Fırçalı Doğru Akım Motorlar
FDAM	:Fırçasız Doğru Akım Motorlar
ACIM	:Asenkron Motorlar
SOC	:Batarya Şarj Durumu
PMSM	:Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar
SRM	:Anahtarlama Relüktans Motorlar
S1-S6	:Anahtarlama Elemanı
HA, HB, HC	:Hall etkili sensör çıkışları
t_{dead}	:Ölü Zaman
t_{d_off_max}	: Kapanma durumunda maksimum gecikme süresi
t_{d_on_min}	: Açılma durumunda minimum gecikme süresi
t_{pdd_max}	: Anahtarlama elemanın maksimum yayılma gecikme süresi
t_{pdd_min}	: Anahtarlama elemanın minimum yayılma gecikme süresi
A	: A-Fazı
B	: B-Fazı
C	: C-Fazı
MOSFET	: Metal Oksit Yarı iletken Alan Etkili Transistör
IGBT	: İzole Edilmiş Kapılı, İki Kutuplu Transistör
D	:Diyot
I	:Akım
L	:Endüktans
R	:Direnç-Yük
C	:Kondansatör
V_s	:Kaynak Gerilimi
I_s	:Kaynak Akımı
I_L	:Bobin Akımı
V_L	:Bobin Gerilimi
V_{in}	:Giriş Gerilimi
V_{out}	:Çıkış Gerilimi
GPS	:Küresel Konumlama Sistemi

ÖNSÖZ

Tez süresi boyunca bana desteğini esirgemeyen anlayış ve sabrını eksik etmeyen eşime ve çocuklarıma çok teşekkür ederim. Tez çalışmam ve lisans öğrenimim boyunca desteğini eksik etmeyen bilgi ve tecrübesini paylaşmaktan kaçınmayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Selami KESLER' e sevgi, saygı ve şükranlarımı sunarım. Tez çalışmam boyunca desteğini eksik etmeyen, arkadaşım Dr. Ömer BOYACI 'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TÜMBEK Hocama desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

1.1 Genel Bilgiler

Elektrikli araçlar (EA) 19. yüzyılın 4. çeyreğinde üretimleri gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Kendi zaman diliminde içten yanmalı (İYM) araçlara göre kıyaslandığında kullanım kolaylığı ve konfor yönünden öne çıkmaktadır. Ancak menzil, şarj sorunları ve işten yanmalı motora sahip araçların seri üretime geçmeye başlamasından dolayı Elektrikli Araçlara olan ilgi giderek azalmıştır.

Ancak son yıllarda karbon salınımını azaltmak ve petrol, petrol kaynaklı diğer ürünlere olan bağımlılığı azaltmak için içten yanmalı motorlara sahip araçlara olan ilgi giderek azalırken elektrikli araçlara olan ilgi artmıştır (Chan,2007). Bundan dolayı özellikle son 10 yılda, firmalar EA üzerine çalışmalarını arttırıp hem hibrit hem de tamamen elektrikli araçlar üretmeye başlamışlardır.

Teknolojinin gelişmesiyle EA her ne kadar menzil sorunu kısmen halledilmiş gibi görünse de tam olarak çözülmüş değildir. Şarj istasyonlarının sıklığı açısından değerlendirildiğinde ise sayısının henüz az olmasının yanında şarj süresinin de önemli bir etken olduğu görülmüştür. Bu durumda menzil halen bir problem teşkil etmektedir. EA kullanılan motorlarda, frenleme ve/veya yavaşlama durumunda kayıp olan enerjinin tekrar kazanımı amacıyla rejeneratif sürücü ve bu sürücünün ileri teknik kontrolü menzil açısından önemli bir katkı sağlamaktadır.

1.2 Literatür Özeti

Son yıllarda fosil yakıtların azalmasıyla önemi bir hayli artan EA'ların mevcut enerji kapasiteleriyle alabildikleri yol miktarının sınırının mümkün mertebe uzatabilmek elektrikli araçlar için önem arz etmektedir. EA'ların mevcut enerji kapasiteleriyle alabildikleri yol miktarını artırabilmenin en iyi yollarından biri elektrik motorlarının sürücüsünün rejeneratif olarak tasarlanması olacaktır.

Fırçasız doğru akım motorlarından elde edilen gerilim ve akım sinyalleri kullanılarak sensör kullanımına gerek olmadan rotor konum bilgisinin tespit edilebileceği ifade edilmiştir (Ertuğrul ve Acarnley, 1994).

Elektrikli ve hibrid elektrikli araçların performansını değerlendirmek üzere 2003 yılında gerçekleştirilen bir analizde, indüksiyon motorları, fırçasız doğru akım motorları ve anahtarlamalı relüktans motorları üzerinde detaylı bir inceleme yapılmıştır. Bu araştırmanın sonuçlarına göre, sabit mıknatıslı doğru akım motorunun diğer motor türlerine kıyasla en yüksek torka sahip olduğu rapor edilmiştir (Ehsani ve diğ. 2003).

EA'larda kullanılacak motorların bunlar senkron motorlar, doğru akım motorları, fırçasız doğru akım motorları (BLDC motorlar), asenkron motorlar (ASM), anahtarlamalı relüktans motorlar (ARM) olmak üzere birbirine karşı üstünlükleri araştırıldığında dahili olarak kendi içinde sabit mıknatıs olan motor türlerinin verim ve performans açısından daha uygun olduğu anlaşılmıştır (Chau ve diğ. 2014; Zhu ve Howe 2007; Kim ve diğ. 2002).

Sonlu elemanlar analizi kullanılarak stator içinde sabit mıknatıs bulunan bir makinenin dişli torku (cogging torque) hesaplanmıştır (Zhang, Cheng ve Hua, 2010).

Bilgisayar tabanlı bir ortamda, fırçasız doğru akım motoru üzerinde Matlab® / Simulink® programı kullanılarak Histerisiz Bant Kontrolü ve PWM kontrol yöntemleri arasında moment, hız ve pozisyon açısından bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu karşılaştırmada, her iki yöntemin de avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Bektaş ve Serteller, 2011).

Fırçasız doğru akım motorunun kontrolü amacıyla DsPIC30F4012 mikrodenetleyici kullanılarak fırçasız doğru akım motorunun kontrolü için özgün bir kaynak kodu oluşturulmuş ve bununla birlikte gerekli donanım devresi tasarlanmıştır (Wu ve Tian, 2012).

EA'ların batarya yönetim sistemlerinde Şarj Durumunu en üst düzeye çıkarabilmek çok önem arz etmektedir. Bataryanın doluluk oranı (SoC), doğrudan ölçülemeyen bir değer olduğundan dolayı, çeşitli parametrelerin analizine dayanarak tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu tahmin yöntemleri dört ana kategoriye ayrılır. İlk yöntem, pilin voltajını ve empedansını ölçerek bunları SoC tahmininde kullanır. İkinci yöntem, Coulomb sayaç

yaklaşımı olarak da bilinen elektron sayma yöntemi, şarj ve deşarj akımını hafızaya ekleyip çıkarma metodunu kullanarak SoC'u belirler. Üçüncü yöntem, adapte edilebilir yapay sinir ağlarına dayalı modellemeyi içerir. Son olarak, bu yöntemlerin birleşimi olan hibrit yaklaşımlar, diğer yöntemlere göre daha kesin sonuçlar sunabilir, Chang'ın 2013 yılındaki çalışması bunu destekler şekilde özellikle dikkate alınmıştır. Bu dört yöntemin bir arada kullanımıyla, pilin SoC seviyesi daha doğru bir şekilde tahmin edilerek, elektrikli araçların enerji verimliliği ve performansı artırılmıştır (Chang,2013).

Fırçasız doğru akım motorlarında, 60^0 ile 120^0 arasında değişen Hall sensör pozisyonlarının, motorun yüklü çalışma durumundaki sensör konumlarının Fırçasız Doğru Akım Motoru'nun FDAM parametrelerine olan etkisi üzerine bir araştırma yapılmıştır (Hasanusta ve Serteller, 2015).

EA'larda motorların iç ya da dış rotorlu üretilmeleri açısından değerlendirildiğinde dış rotorlu ve sabit mıknatıslı motorların daha yüksek verimliliğe ulaştığı rapor edilmiştir (Chung ve diğ. 2016).

Biswas ve Ghosh'un çalışmasında, fırçasız doğru akım FDAM motorları için pozisyon sensörlü alan yönlendirmeli vektörel denetim tabanlı bir akı tahmin algoritması geliştirildi. Bu motorlar, ilerleyen yıllarda endüstriyel alanlarda kullanılacak olan kalıcı mıknatıslı senkron makinelerden biridir. Faz sargılarının doğru bir şekilde anahtarlanabilmesi için, rotor konum bilgisinin konum sensörlerinden en iyi ve hızlı şekilde elde edilmesi gerekmektedir.

Biswas ve Ghosh, konum sensörlerinin büyük dezavantajları olduğunu düşünerek, konum sensörleri kullanmak yerine sensörsüz alan yönlendirmeli denetim algoritmalarını kullanmanın gerekliliğini önermişlerdir. Gerçek ve tahmin edilen değerler arasındaki karşılaştırmayı yapmak amacıyla, hız tahmincisi, rotor konum tahmincisi ve akı tahmincisi algoritmalarının performanslarını analiz etmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre önerilen denetim sürüşü performansı, hiçbir rotor konum bilgisi veya hız sensörü olmamasına rağmen, karşılaştırılan konum sensörlü denetim sürüşüne kıyasla değişmeden kalmıştır. Ayrıca, tahmini akı ile gerçek akı arasında bir uyumsuzluk olmadığı ve rotor akısının performansının, rotor konumu ve motor hızı tahmincisi sonuçlarının oldukça memnuniyet verici olduğu tespit edilmiştir (Biswas ve Ghosh, 2017). Bu sonuçlar, fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde kullanılan yöntemlerin performansını değerlendirmek için

önemlidir. Araştırma, Alan yönlendirmeli denetim metodunun daha yumuşak hız tepkisi ve düşük moment dalgalanması sağlaması, motor sistemlerinin daha verimli ve güvenli çalışmasına katkı sağlayabileceği bildirilmiştir.

Nurriartono ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, fırçasız doğru akım motorları için trapezoidal komütasyon yöntemi ile alan yönlendirmeli denetim metodunun performansları karşılaştırıldı. Bu araştırma, bu iki yöntemin deneysel performanslarını değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre Trapezoidal komütasyon yöntemi, alan yönlendirmeli denetim metoduna kıyasla daha duyarlı olmasına rağmen, Alan yönlendirmeli denetim metodu, daha yumuşak bir hız tepkisi sağladığı gözlemlendi. Ayrıca, alan yönlendirmeli denetim metodunun uygulanmasıyla momentteki aşırı artışın ve dalgalanmanın daha az olduğu belirlendi (Nurriartono ve diğerleri, 2019). Bu sonuçlar, fırçasız doğru akım motorlarının kontrolünde kullanılan yöntemlerin performansını değerlendirmek için önemlidir. Araştırma, motor tasarımı ve verimliliği açısından mühendisler için değerli bilgiler sunmaktadır. Alan yönlendirmeli denetim metodunun daha yumuşak hız tepkisi ve düşük moment dalgalanması sağlaması, motor sistemlerinin daha verimli ve güvenli çalışmasına katkı sağlayabileceği belirtilmiştir.

Qi ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen çalışmada, EA'larda yenilikçi bir enerji geri kazanım sistemi üzerine çalışma gerçekleştirmişlerdir. Bu sistemin temel mantığı, helezon yaylar kullanarak frenleme anında sistemde birikmiş kinetik enerjinin depolandıktan sonra tekrar bu enerjinin, EA'ın yeniden hızlanmaya başladığı anda başlangıç torku olarak kullanılması üzerine oluşturulmuştur. Bu yöntem sayesinde normal frenleme esnasında kaybedilen enerjinin bir bölümünün verimli bir şekilde geri alınması sağlanmıştır. Bu sayede sistem genel enerji verimliliğine katkıda bulunmuştur. Geliştirilen elektro-mekanik fren enerjisi geri kazanım sistemi, enerji tasarrufu açısından araç performansını iyileştirirken çevresel etkinin de azaltılması amaçlanmıştır(Qi ve diğ. 2020).

Li ve arkadaşlarının 2020'de yapmış olduğu çalışması, EA'lar için gündelik sürüş dinamiklerini dikkate alan yenilikçi bir tek pedallı sürüş kontrol mekanizmasını incelemiştir. Bu kontrol mekanizması, simülasyonlar ve dinamometre testleriyle validasyon geçirdi; bu testler aracın NEDC ve WLTP döngülerinde rejenerasyon kapasitesini önemli derecede, (%26,12 ve %20,77 oranlarında) yükselttiğini ve araçlar için 63,29 km'ye kadar ve 51,72 km'ye kadar menzil iyileştirmesi sağladığını ortaya çıkarmıştır.

Araştırma, düzgün bir sürüş konforunu korurken enerji tasarrufu ve aracın menzilin artırımının mümkün olduğunu göstermiştir (Li ve diğ. 2020).

Yang ve arkadaşları ise bağımsız motor kontrolüne sahip inovatif bir rejeneratif fren sistemi üzerindeki çalışmada, şehir içi trafik koşullarını simüle eden NYCC sürüş testinde bu sistemle elde edilen enerji geri kazanımlarını standart tekniklerle kıyaslayarak %1,18'lik bir artış tespit etmişlerdir. Bu çalışma, araç tasarımında yapılacak geliştirmeler ve kontrol sistemlerindeki yeniliklerin, elektikli araçların verimliliğini ve enerji geri kazanımını artırabileceğini vurgulamıştır. Bu gelişmeler, gelecekte elektrikli araçların daha çevreci ve uzun mesafe kat edebilir hale gelmesine yardımcı olabileceği bildirilmiştir (Yang ve diğ. 2020).

EA'larda sürtünmeli frenleme tekniği yerine rejeneratif frenlemenin kullanılması %12 oranında menzil açısında avantaj sağladığı gözlenmiştir. EA'larda araç menzilin etkileyen diğer bir faktör bataryanın sıcaklığıdır. Bataryanın belli sıcaklık aralığında tutulması araç menzilin dorudan etkilmektedir. Aynı zamanda iklim koşulları ve araçta klima gibi araca elektriksel olarak yük olabilecek koşullar sürüş menzili açısından olumsuz etkileri olacağı bildirilmiştir. EA'larda rejeneratif geri kazanım sadece frenleme anında değil çeşitli sürüş modlarında incelendiğinde farklı sonuçlar ortaya koymaktadır. Bu sürüş modlardan ECE sürüş profilinin en verimli mod olduğu görülmüştür (Subramaniyam ve diğ. 2021).

FDAM sürücü devrelerinde rejeneratif geri dönüşümün kullanılmasıyla enerjinin %20-%30 'u geri kazanılmakta olup bu durum EA'larda menzil açısından %15'e kadar avantaj sağladığı görülmüştür (Srinivasan ve diğ. 2021).

Li ve ekibinin 2022'de yayımladığı çalışmada, EA'ların yokuş aşağı seyirlerindeki rejeneratif frenleme tekniklerini detaylı bir şekilde ele almıştır. Bu çalışmada, aracın kararlılığına yönelik ihtiyaçları göz önünde bulundurarak, yol eğimi gibi faktörleri hesaba katarak, sabit ve değişken oranlarda fren kuvvetlerinin nasıl uygulanabileceği incelenmiştir. Temel amaç, frenleme sürecinde enerji geri kazanımı ile frenleme performansı arasında denge kurarak, yeni kontrol stratejileri geliştirmektir. Bu çalışma sonucunda geliştirilen en uygun şekle sokma teknikleri, standart yöntemlere göre daha etkin enerji geri kazanımı sağladığı görülmüştür. Örneğin, optimal değişken oranlı frenleme yöntemiyle %3,67'ye ve optimal sabit oranlı yöntemle %3,38'e kadar enerji geri

kazanım artışı elde edildi. Bu bulgular, rejeneratif frenleme sistemlerinin gelişimine katkı sağlayarak, elektrikli araçların verimliliğini artırdığı bilgisi verilmiştir (Li ve diğ. 2022).

Sonuç olarak, her türlü motor kullanımında, rejeneratif güç denetimi, vaz geçilemez bir katkı sağlayacağı bütün çalışmalarda ele alınmıştır. Bu çalışmaların bir araya getirilmesiyle, elektrikli araçların enerji verimliliğini artırmak, menzillerini uzatmak ve performanslarını optimize etmek adına çeşitli motor kontrol stratejileri ve tasarım parametreleri üzerine önemli bilgiler elde edilmiştir. Bu bilgiler, gelecekteki elektrikli araç teknolojisinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir.

1.3 Tezin Amacı

Dünyadaki fosil yakıt kaynaklarının azalmasıyla birlikte EA'lar çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. EA'lar, frenleme sırasında oluşan kinetik enerjinin geri kazanılarak bataryaya depolanması, aracın menzilini ve verimliliğini artırmaktadır. Bu amaçla, elektrik motorlarının rejeneratif sürücü ile sürülmesi ve bu yöntemin hangi şartlar altında kullanılabileceği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, EA'larda rejeneratif sürücünün geliştirilmesi ve test edilmesi tamamlanmıştır. Bu amaçla, rejeneratif sürücü tasarımı ve prototiplemesi gerçekleştirilmiş ve çalıştırılmıştır. Bu adım'dan sonra çeşitli araç sürüş profilleri'nin testlerinin yapılabilmesi adına veri toplama ve analiz sistemi kartının tasarımı ve prototiplemesi gerçekleştirilmiştir. Bu iki prototip'in kordineli çalışmasını sağlayacak algoritma geliştirilerek elde edilen test sonuçları veriseti halinde bilgisayar ortamına aktarılması sağlanmış ve bu verisetlerin'den elde edilen sonuçlar grafik tabanlı olarak incelenmesi sağlanmıştır.

1.4 Materyal ve Yöntem

EA, çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifi olarak giderek daha fazla önem kazanmaktadır. EA, frenleme sırasında oluşan kinetik enerjinin geri kazanılarak bataryaya depolanması, aracın menzilini ve verimliliğini artırmaktadır. Bu amaçla, elektrik

motorlarının rejeneratif yöntem ile sürülmesi ve bu yöntemin hangi şartlar altında kullanılabileceği araştırılmıştır.

Bu çalışmada, EA'da kullanılan fırçasız doğru akım motorlarının FDAM rejeneratif sürüş performansını değerlendirmek için bir deney platformu tasarlanmıştır. Deney platformu, FDAM motor, rejeneratif FDAM motor sürücü kartı, veri toplama ve analiz sisteminden oluşmaktadır.

Deney platformu, FDAM motorun montajlanabileceği bir çerçeve ve bu motorları kontrol etmek amacıyla prototipi gerçekleştirilen rejeneratif bir FDAM motor sürücü kartı ve veri toplama ve analiz sistemi kartını içermektedir. Sürücü kartında kullanılan mikrodenetleyici, FDAM motoru ileri, geri ve hız kontrolünü desteklemektedir. Veri toplama ve analiz sistemi kartında kullanılan mikrodenetleyici, FDAM sürücü modu, rejeneratif sürücü modu, ECE sürüş profili, JAPAN10 ve NYCC sürüş modlarını desteklemektedir. Bu modlar kullanılarak farklı sürüş koşullarında elde edilen rejenerasyon kazanım miktarları sayısal olarak ölçülmüştür.

Deney platformu, tasarımın'da ilk olarak FDAM motorlarının ve PCB kartlarının yerleştirileceği kasa oluşturulmuştur. Oluşturulan bu kasa üzerine motorlar'ın ve kartların montajlanması sağlanmıştır. Montajlanan kartların birbiri ile bağlantısı ve motorlarla ilgili güç bağlantıları gerçekleştirilmiştir. Bu bağlantıların gerçekleştirilmesinden sonra geliştirilen algoritmaya ait yazılımlar ilgili kartın mikrodenetleyici'sine yüklenmesi sağlanmıştır. Gerekli set değerlerinin girişi yapıldıktan sonra test'e başlanmıştır. Test sonuçlarından elde edilen veriseler bilgisayar ortamına aktarılmış ve grafik haline getirilmiştir. Elde edilen grafikler üzerinden değerlendirme yapılmıştır.

Çalışma sonucunda, Yol eğimi, yavaşlama anı ve frenleme durumu gibi faktörlerin de rejenerasyon kazanım miktarı üzerinde ne kadar etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu bilgiler EA'ların rejeneratif sürüş performansını artırmak için önemli bir kaynak oluşturmuştur.

Bu çalışmada, elektrikli araçların EA rejeneratif frenleme performansı değerlendirildi. FDAM ve çeşitli sürüş modları kullanılarak, rejenerasyon kazançları ölçüldü. Yol eğimi, yavaşlama ve frenleme gibi faktörlerin rejenerasyon miktarını önemli ölçüde etkilediği belirlendi. Elde edilen bulgular, elektrikli araçların enerji verimliliğini

artırmak için değerli bilgiler sunarak, rejeneratif sürüş performansının optimize edilmesine katkıda bulunuldu.

1.5 Tezin Katkısı

Dünyadaki fosil yakıt kaynaklarının sınırlı olması, çevre dostu ve sürdürülebilir bir ulaşım alternatifine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Bu bağlamda, EA'lar, çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltma potansiyeli nedeniyle giderek daha fazla önem kazanmaktadır. EA'da, özellikle frenleme sırasında ortaya çıkan kinetik enerjinin geri kazanılması, aracın enerji verimliliğini artırarak sürdürülebilir bir ulaşım modeli sunmaktadır. Bu amaçla, elektrik motorlarıyla birlikte kullanılan rejeneratif sürücü teknolojisinin hangi şartlar altında nasıl performans gösterdiğinin araştırılması büyük bir önem taşımaktadır.

Bu anlamda, elektrikli araçların EA rejeneratif çalışma modunun geliştirilmesine katkı sağlamak amacıyla çeşitli çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Rejeneratif mod, frenleme esnasında ortaya çıkan kinetik enerjinin geri kazanılması amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Bu modda, elektrik motoru, sürücü fren pedalına bastığında jeneratör olarak çalışır ve kinetik enerjiyi elektrik enerjisine dönüştürerek bataryaya depolar. Daha sonra, bu enerji aracın ilerlemesi için tekrar kullanılabilir. Rejeneratif mod çalışması, elektrikli araçların menzilin artırmada ve enerji verimliliğini optimize etmede etkili bir strateji olarak öne çıkmaktadır.

Rejeneratif mod çalışmasını test etmek amacıyla bir laboratuvar modellemesi yapılmıştır. Kurulan test platformu, FDAM, güç elektroniği sürücüsü ve veri toplama ve analiz sistemini içermektedir. Testler, ECE, NYCC ve JAPAN 10 sürüş profilleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu sürüş profilleri, şehir içi ve şehir dışı sürüş koşullarını temsil etmekte ve rejeneratif modun performansını değerlendirmek için uygun bir ortam sağlamaktadır. Yapılan testler neticesinde tüm sürüş profillerinde rejeneratif çalışma modunun kullanımıyla menzilde artış gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, elektrikli araçların günlük kullanımında önemli bir enerji tasarrufu sağlayabileceğini göstermektedir.

EA'larda rejeneratif mod çalışmasını değerlendirerek gelecekteki geliştirmeler için temel bir referans sağlamaktadır. Elde edilen bulgular, rejeneratif modun daha da optimize edilmesi için çeşitli potansiyel geliştirmeleri öne çıkarmaktadır. Bu gelişmeler arasında,

rejeneratif mod çalışması için daha verimli güç elektroniği sürücülerinin geliştirilmesi, optimize edilmiş sürüş algoritmalarının tasarlanması ve daha etkili araç tasarımlarının yapılması yer almaktadır. Bu potansiyel gelişmelerin uygulanmasıyla, elektrikli araçların menzil ve enerji verimliliğinde daha büyük artışlar sağlanabilir, böylece sürdürülebilir bir ulaşım sistemi için daha sağlam temeller oluşturulabilir.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇLAR

2.1 GİRİŞ

Son yıllarda enerji kaynaklarının giderek sınırlı hale gelmesi ve çevre kirliliğinin artmasından dolayı özellikle ulaşım sektöründe önemli rol oynayan içten yanmalı motorlara sahip araçların yerine EA'lar almaya başlamıştır. İYM'ların piyasada sayısının çok fazla olması sera gazlarının artışına dolayısıyla hava kirliliğinin artışına neden olmaktadır (Qiao ve diğ. 2019). EA'ların sayısındaki artış sera gazı salınımının azalmasına ve hava kirliliğinin de düşüşüne katkı sağlayacaktır. Bunun yanında hava kirliliğinin düşüşüyle birlikte toplumların sağlığı üzerinde de olumlu dönütler sağlayacaktır.

EA'ların sağlamış olduğu bu avantajlar insanoğlunun sağlıklı ve çevre dostu bir geleceğin anahtarı olacaktır. EA içten yanmalı motora sahip araçlara göre daha düşük işletme maliyetlerine sahiptir. EA'ların sağlamış olduğu bu avantaj ise uzun vadede ekonomiklik sağlamaktadır. Bu önemli avantajları gözler önüne seren EA'lar temelde bir elektrik motoru ile çalışırlar. Elektrik motorları ise stator ve rotor olmak üzere iki temel yapıdan oluşan elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çeviren makinalardır. Burada bir iletken içinden geçen elektrik akımının içinden geçtiği iletkenin etrafında manyetik alan oluşturması temel prensibine dayanarak elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir.

Statorda bulunan bobinlerin içinden geçen akım statorda döner bir manyetik alan oluştururken oluşan bu döner manyetik alanı da rotor takip etmeye başlar ve dairesel hareket başlamış olur. Dolayısıyla motordan mekanik enerji elde edilmiş olur. EA'larda kullanılan bu motorlar elektrik enerjisini bataryalardan almaktadır. Bataryaların kimyasal enerjiyi elektrik enerjisini çevirirler. Bataryaların üzerinde depolanmış enerji bittiğinde ise tekrar şarj olmaları gerekmektedir. EA'ların menzili ise batarya kapasitesi ve şarj istasyonlarının sıklığı belirlemektedir.

Günümüz şartlarında mevcut teknolojiyle batarya kapasiteleri çok büyük olmamasından dolayı EA'ların hareket halindeyken oluşan kayıpları özellikle frenleme esnasında oluşan kayıpların geri kazanımı büyük öneme sahiptir. Bu enerjinin geri kazanımı işleminde rejeneratif kazanımda denilir (Zhang ve diğ. 2018).

Rejeneratif kazanım sistemi ya da rejeneratif kontrol sistemi EA'ların menzilini arttırır. Bataryanın ömrünü uzatır. Dolayısıyla batarya değişim maliyetlerini azaltır. Zaten çevre dostu olan EA'ların biraz daha çevre dostu olmasını sağlar (Yong Chen ve diğ. 2010). EA'larda klasik frenleme yerine rejeneratif frenlemenin kullanılması büyük oranda tasarruf sağlar (Flinders ve diğ. 1995).

Elektrikli araçların yaygın bilinen üstünlükleri;

- Motor üretim maliyetinin düşüklüğü,
- Daha az ve daha ucuz bakıma ihtiyaç duyması,
- Her devirde istenilen momentin üretilebilmesi,
- Daha yüksek güç yoğunluğuna sahip olması,
- Daha yüksek verimlilik,
- Daha kolay ve daha üstün hız- moment denetimi imkânı,
- Yeşil bir çevreye uygun olması,
- Daha konforlu bir sürüş sağlayabilmesi,
- Daha ekonomik sürüş sağlaması,

Diğer yandan, elektrikli araçların istenmeyen özellikleri de vardır:

- Daha yüksek maliyetli diğer araç bileşenleri,
- Batarya şarj süresinin uzunluęu.
- Batarya ömrünün kısalığı,
- Yetersiz batarya hammaddesi sorunu,
- Belirsiz piyasa koşulları,
- Şarj istasyonu sayısının yetersiz artış oranı,
- Gelecek 10 yılda artacak olan elektrikli araç ve dağıtık şarj istasyonu sayısına bağlı olarak şehirlerde yaşanabilecek sık enerji kesintileri (20 adet 100 kW'lık elektrikli aracın 2500-3000 KVA'lık bir fabrika trafosuna ihtiyaç duyması gibi).

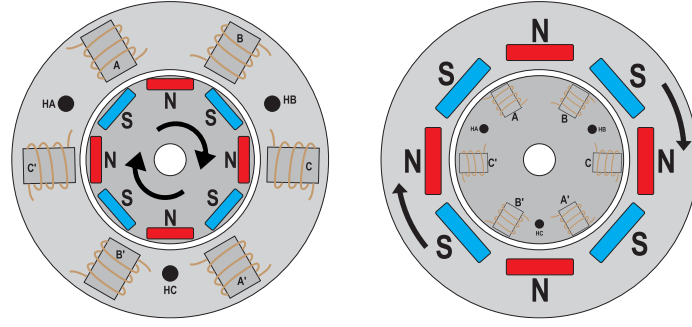
2.2 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar

EA'larda kullanılan motorlar içten yanmalı motorlara (İYM) göre karbon ayak izi bırakmayan enerji yönünden verimli çevre dostu olabilmeleri için tasarlanmışlardır. Elektrik motorları bataryadaki kimyasal olarak depolanmış elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek aracın ileri veya geri yönde hareket etmesini sağlarlar. EA'larda pek çok elektrik motor türü kullanılmaktadır. Bu motorların başlıcaları Fırçalı Doğru Akım Motorlar (DCM ya da DAM), Asenkron Motorlar (IM, ACIM ya da ASM), Sabit Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM ya da SMSM), Fırçasız Doğru Akım Motorlar (FDAM ya da BLDCM) ve Anahtarlamalı Relüktans Motorlar (ARM ya da SRM) olmak üzere toplam beş tanedir. Testi gerçekleştirilen platformda FDAM motor tercih edilmiştir.

2.2.1 Fırçasız Doğru Akım Motorları

FDAM motorları, modern endüstriyel ve ev uygulamalarında giderek daha fazla kullanım alanı bulmaktadır. Diğer fırçalı motorlara kıyasla daha verimli, daha az bakım gerektiren ve daha uzun ömürlü olmalarıyla bilinirler. FDAM motorlar, elektronik kontrol üniteleriyle birlikte çalışarak, daha hassas hız ve tork kontrolü sağlayarak geniş bir uygulama yelpazesi için idealdir.

FDAM motorları, stator ile rotorları aynı hızda olan eşzaman motorlardır. DCM motorlarından en çok ayıran özelliği rotorunda sargı yerine sabit mıknatıslar kullanılmasıdır. Yapısında fırça ve kolektör dilimlerinin yer almaması dolayısıyla mekanik kayıpların olmaması verimliliğini artırır. Fakat anahtarlama işlemi elektronik devre ile gerçekleştirilir. Yapısında sabit mıknatıslarının kullanılması manyetik alan oluşturmak kullanılacak enerji miktarını azaltır. Bütün bunlardan dolayı diğer motorlara göre daha yüksek verimlilikte çalışabilirler. Üretim maliyetlerinin yüksek olması, motorda sabit mıknatısın kullanılmasından dolayı yüksek tork oluşumunun zorlaması sistemin zorlukları arasında yer almaktadır. Şekil 2.1'de FDAM motorunun fiziksel yapısında FDAM motorların hem içten rotorlu hem de dıştan rotorlu olarak yapısı gösterilmiştir. İçten rotorlu FDAM motorlarda rotor, motorun içine yerleştirilmiş ve bu durum kompakt bir yapı sağladığı gibi motorun daha yüksek bir güç yoğunluğuna sahip olmasını yardımcı olur. Dış rotorlu FDAM Motorlarda, rotor statorun dışında yer alır. Bu tip motorlar genellikle yüksek tork gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

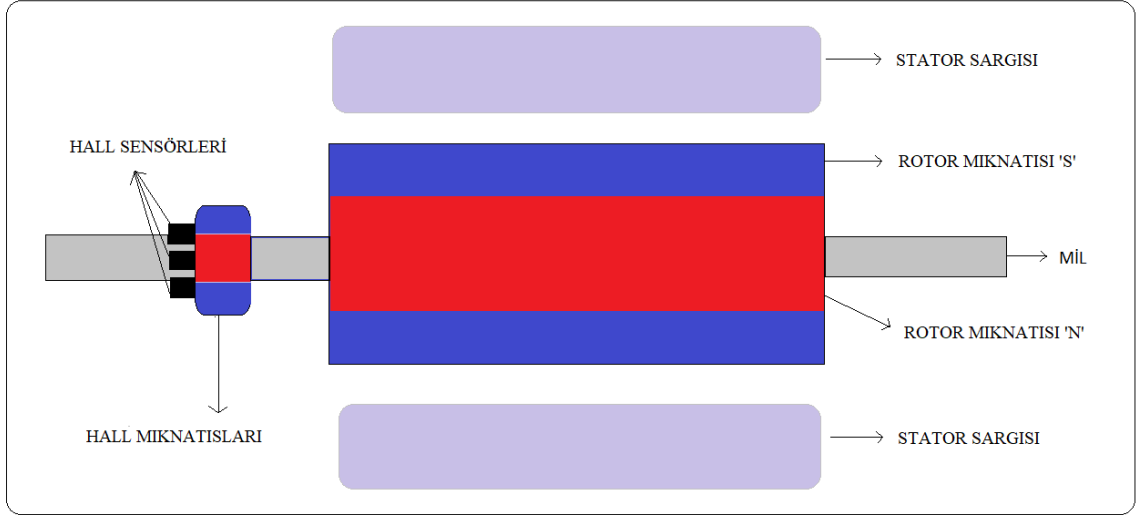


Şekil 2.1:Fırçasız doğru akım motorunun fiziksel yapısı; a) İç rotorlu FDAM b)Dış rotorlu FDAM.

FDAM motorlar temelde bir senkron motor olmasından dolayı statordaki manyetik alan dönüş frekansı ile rotor dönüş frekansı aynıdır. FDAM motorlar faz sayılarına göre tek fazlı, üç fazlı ve çoklu fazlı olarak üretilebilirler. Çok fazlı FDAM motorlar daha yüksek performans veya belirli tork gereksinimlerini karşılamak için üretilmektedir. Uygulamada daha çok üç fazlı FDAM motorlar tercih edilmektedir. FDAM motorları bundan sonraki bölümlerde daha detaylı ele alınmıştır.

2.3 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapısı

FDAM motorları, temelde bir Senkron motordur. Statordaki manyetik alan frekansı ile rotor dönüş frekansı aynıdır (Atan, 2007). Adından da anlaşılacağı üzere fırçasız doğru akım motorlarında fırça ve kolektör dilimleri yoktur. Bu durum motorun verimliliğini artırır. Motorun verimliliğini arttıran diğer bir durum ise rotorda sargı kullanılması yerine sabit mıknatısların kullanılmış olmasıdır. Bu durum Şekil 2.2’de FDAM iç yapısında gösterilmiştir.



Şekil 2.2: Fırçasız doğru akım motorunun iç yapısı.

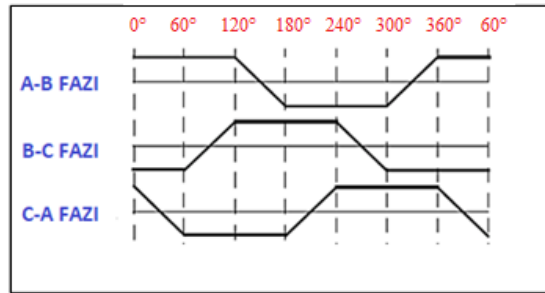
Bu motor tipinde fırça ve kolektör dilimlerinin kullanılmamış olması elektriksel anahtarlama işleminin elektronik olarak yapılacağı anlamına gelir. Elektronik anahtarlama devresi sensörsüz ve sensörlü olmak üzere iki farklı yöntemle sağlanabilir. Her iki yöntemde motorun rotor pozisyonunun tahmin edilmesine dayalı olarak oluşturulan algoritmalar kullanılır. Sensörsüz yöntemde, rotorun pozisyonu genellikle geri besleme algoritmaları kullanılarak tahmin edilir. Bu yöntem, sürücü devrelerindeki karmaşıklığı azaltabilir ve motorun maliyetini düşürebilir. Ancak, sensörsüz sürüş, özellikle düşük hızlarda ve yük altında hassas kontrol gerektiren uygulamalarda daha zor olabilir. Sensörlü (hall sensörleri ile) yöntemde, motorun rotor pozisyonunu belirlemek için hall sensörleri kullanılır. Hall sensörleri, rotorun manyetik alanındaki değişiklikleri algılar ve bu bilgi, stator bobinlerine elektrik akımı uygulamak için kontrol ünitesine iletilir. Sensörlü anahtarlama yöntemi, motorun başlangıçta düşük hızlarda ve yük altında daha kararlı çalışmasını sağlar. Uygulama devresinde hall sensörler kullanılarak sürücü tasarımı gerçekleştirilmiştir.

2.3.1 Fırçasız Doğru Akım Motorların Stator Yapısı

FDAM motorların, stator bobin sargılarının farklı bir şekilde sarılmasına rağmen indüksiyon motorlarıyla benzerlik göstermektedir. Genellikle üç fazlı FDAM motor faz sargıları yıldız bağlanır. Stator bobin bağlantı yapısına ve sürüş biçimine bağlı olarak sargılarında indüklenen zıt EMK dalga biçimi sinüzoidal veya trapezoidal olmaktadır. Bu

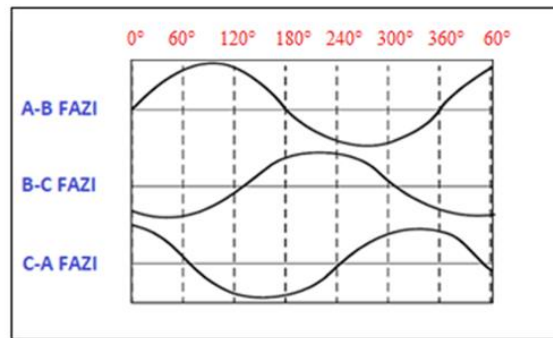
iki sarım şekline göre stator sargılarında iki çeşit zıt EMK oluşturmaktadır. Sarım isimlerinden de anlaşılacağı üzere oluşturdukları zıt EMK dalga şekilleri sinüzoidal ve trapezoidal eğri olarak adlandırılır.

Sinüzoidal olarak sürümü gerçekleştirilen FDAM motor, trapezoidal olarak sürümü gerçekleştirilenden daha iyi, pürüzsüz bir tork çıkışı elde edilir. Şekil 2.3’de FDAM faz sargılarında indüklenen trapezoidal zıt EMK’da trapezoidal zıt EMK’nın formu verilmiştir. Trapezoidal kontrol yöntemi, stator bobinlerine belirli bir sıralama ile sabit voltaj veya sabit akım uygulayarak motoru sürer. Trapezoidal kontrol yöntemi, üretimi basit ve maliyet açısından uygun bir seçenek olmasına rağmen hız ve tork kontrolünde sınırlamalara sahiptir.



Şekil 2.3: FDAM faz sargılarında indüklenen trapezoidal zıt EMK.

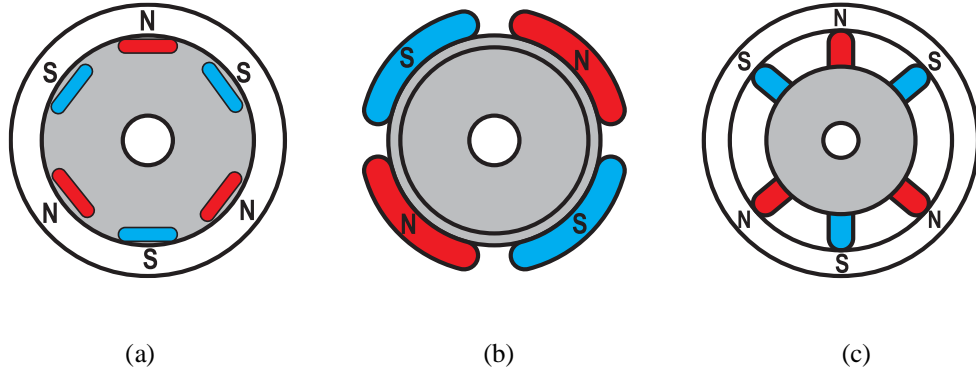
Şekil 2.3’de FDAM faz sargılarında indüklenen sinüzoidal zıt EMK’da sinüzoidal zıt EMK’nın formu verilmiştir. Sinüzoidal kontrol yönteminde, FDAM motoru bir sinüs dalgası şeklinde sürmek için stator bobinlerine sinüzoidal gerilimler uygulanır. Sinüs dalga kontrolü, motorun daha pürüzsüz ve sessiz çalışmasını sağlar ve genellikle daha yüksek performans ve verimlilik sağlar. Ancak, daha karmaşık devre tasarımı gerektirir.



Şekil 2.4: FDAM faz sargılarında indüklenen sinüzoidal zıt EMK.

2.3.2 Fırçasız Doğru Akım Motorların Rotor Yapısı

FDAM motorların rotorunda, bobin sargıların yerine sabit mıknatısların yerleştirildiği ve düzenlendiği temel bileşenlerdir. Bu mıknatıslar motorun statorundaki sargılarda manyetik alan oluşmasıyla birlikte etkilişime girerek dönme hareketini oluşmasını sağlarlar. Rotor üzerindeki sabit mıknatısların yerleşimi, motorun performansını ve verimliliğini doğrudan etkiler. FDAM motorlarda sabit mıknatıslı rotorlar, motorun yüksek verimliliği, düşük güç tüketimi ve uzun ömürlü çalışması için önemli bir faktördür. Bu nedenle, manyetik mıknatısların doğru bir şekilde yerleştirilmesi ve rotorun dengeli bir şekilde tasarlanması, motorun genel performansını ve sağlamlığını belirleyen kritik bir unsurdur. Titreşim ve güç kaybı gibi faktörler de bu yapıya bağlı olarak kontrol edilir. Uygulamada fiziksel olarak üç çeşit yöntemle gerçekleştirilir. Bunlar yüzey mıknatıslı rotor, iç delikli rotor ve döner disk rotor'dur. Şekil 2.5'de fırçasız doğru akım motorun rotor yapısında bahsi geçen bu üç farklı yöntemle ait şekiller görülmektedir.



Şekil 2.5: Fırçasız doğru akım motorunun rotor yapısı; a) İç delikli rotor, b) Yüzey mıknatıslı rotor, c) Döner disk rotor.

Yüzey mıknatıslı rotor yöntemi, en yaygın olan sabit mıknatısların rotorun yüzeyine doğrudan yerleştirilmesiyle oluşturulan tiptir. Rotorun dış yüzeyindeki kalan mıknatıslar, stator sargıları üzerinde bir manyetik alan oluşturur. Manyetik alanın dönmesiyle rotorun dönmesi sağlanır. Yüksek verimlilik ve düşük aşınma üstünlüğüne sahiptir. İç delikli rotorlarda, sabit mıknatıslar rotorun iç kısmına yerleştirilmiştir. Dış yüzeyde boş bir alan vardır. Boş alanda stator kaynaklı elektromanyetik alan oluşur. Oluşan manyetik alan ile birlikte rotor döner. Bu yöntem, daha çok güçlü motorlarda tercih edilir. Döner disk rotorlarda, sabit mıknatıslar bir disk üzerine yerleştirilmiştir. Statorda elde edilen elektromanyetik alan ile bu disk etkileşime girerek rotor dönmeye başlar. Bu rotorlar, genellikle uygulama alanının sınırlı olduğu durumlarda tercih edilebilir.

2.3.3 Fırçasız Doğru Akım Motorlarında Kullanılan Hall etkili Sensörler

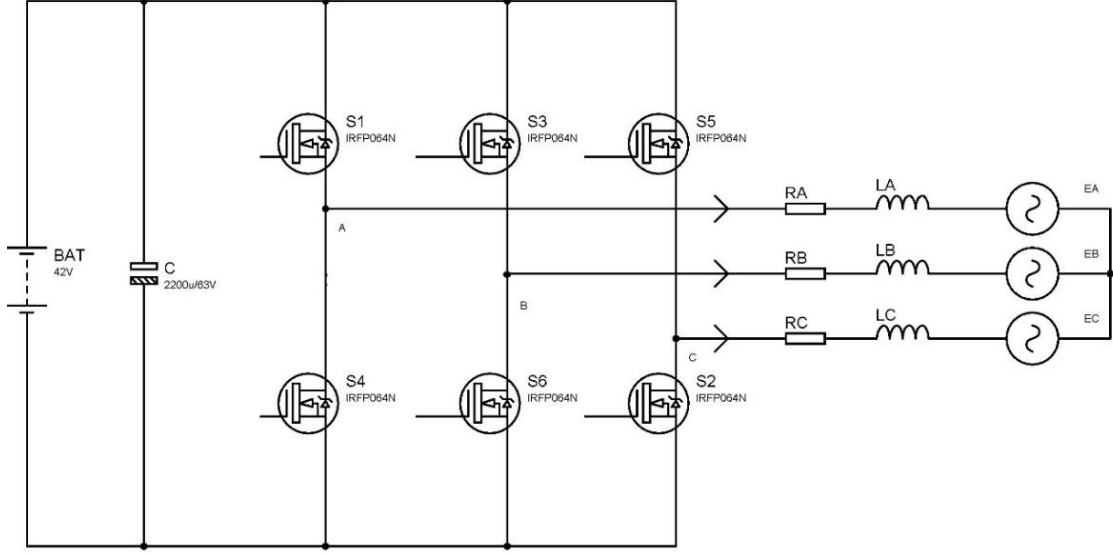
FDAM motorlarda fırça ve kolektör yapısı olmadığı için statorda bulunan sargılar belli bir sırada enerjilenip bir döngü halinde bu işlemin devam etmesi gerekir. Bu yüzden FDAM motorun rotor pozisyonunun bilinmesi gerekmektedir. Rotor pozisyonunun öğrenilebilmek için Hall etkili sensör kullanılır. Hall etkili sensörler statorda bulunan mıknatıslara göre çıkışında lojik 0 veya lojik 1 bilgisini verirler. FDAM motorlardan genellikle üç adet Hall etkili sensörü kullanılır.

Kullanılan bu üç adet hall etkili sensörü sayesinde rotor pozisyonu çok rahatlıkla belirlenebilir. Bunun için bir elektronik devreye dolayısıyla bir mikrodenetleyiciye ihtiyaç duyulur. Mikrodenetleyici hall etkili sensörlerden gelen bilgiye göre statorda bulunan bobinleri uygun sırasıyla enerjiler ve rotor dönüş hareketi elde edilir. Hall etkili sensörleri birbirlerine göre 60° veya 120° aralıklarla montajlanabilirler.

2.4 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Çalışma Prensipleri

Fırçasız doğru akım motorları, doğru akım motorlarından farklı olarak fırça ve kolektör dilimlerinin olmayışıdır. Bu durumda fırça ve kolektör dilimlerinin görevi olan anahtarlama işleminin bir elektronik devre ile yapılması gerekmektedir. Fırçasız doğru akım motorları genellikle 3 fazlı olarak üretilirler. Bundan dolayı stator üzerindeki sargılar 6 adet anahtarlama elemanı ile enerjilenmesi sağlanarak döner manyetik alan elde edilir. Bu döner manyetik alan rotorun takip etmesiyle birlikte rotorun milinden döner hareket dolayısıyla mekanik enerji elde edilir.

Anahtarlama elemanlarından hangi sırada anahtarlanacağına, rotorun konum bilgisini gönderen hall etkili sensörlerden gelen veriye göre karar verilir. Şekil 2.6'da fırçasız doğru akım motorunun sürücü güç devresi incelenecek olursa aynı hatta bulunan anahtarlama elemanlarının aynı anda tetiklenmemesi gerekmektedir, aynı anda tetiklenmesi durumunda ise doğru akım barası kısa devre olacağından hataya neden olacaktır.



Şekil 2.6:Fırçasız doğru akım motorunun sürücü güç devresi.

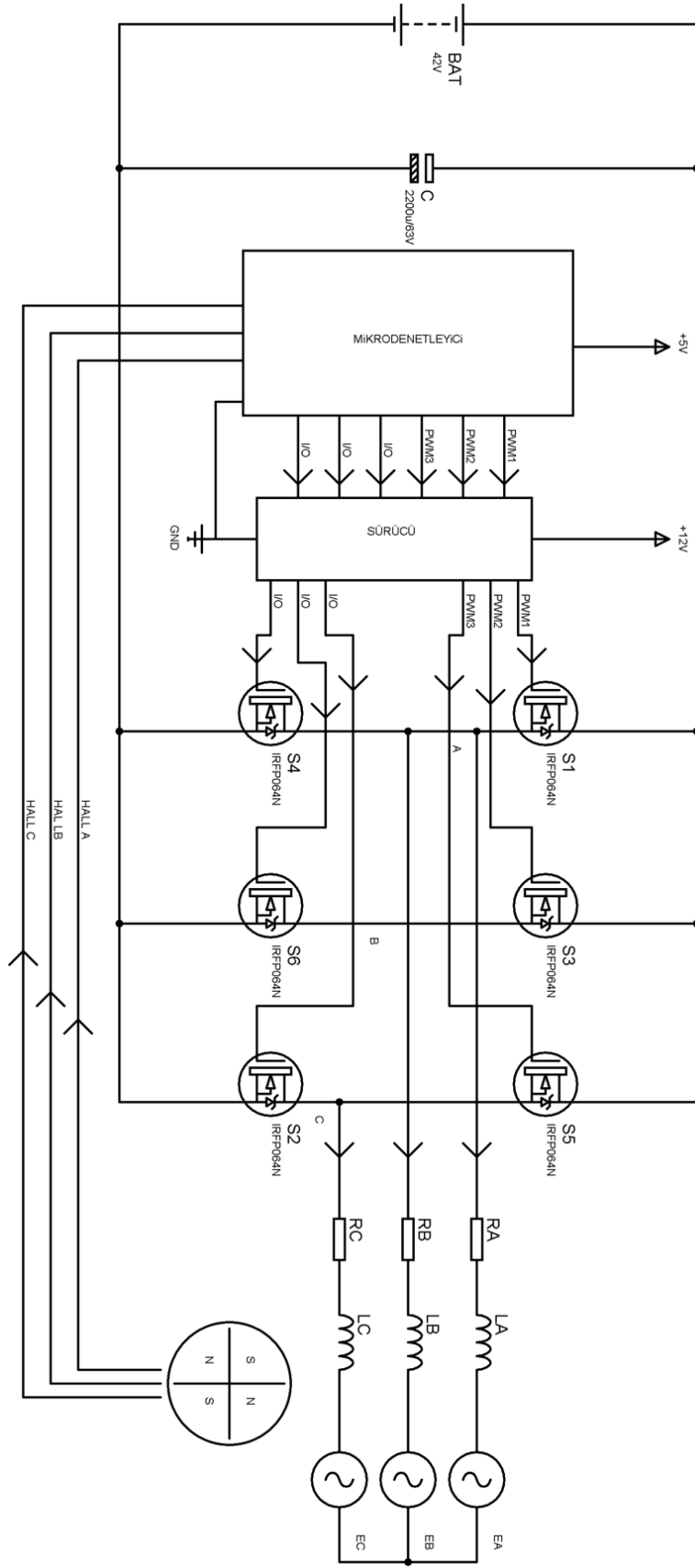
2.4.1 Fırçasız Doğru Akım Motorların Sensörlü Kontrolü

FDAM motorların sensörlü kontrolü, motorun rotor pozisyonunu ve hareketini doğru bir şekilde izlemek için sensörlerin kullanıldığı bir sürüş yöntemidir. Genellikle hall etkili, encoder veya resolver gibi sensörler kullanılarak gerçekleştirilir. Sensörler, rotorun pozisyonunu ve hızını belirlemek için manyetik alan değişikliklerini algılar ve bu bilgiler kontrol birimine iletilir. Kontrol birimi, sensör verilerini analiz eder ve doğru sıralamayla stator bobinlerine uygun gerilim değerlerinin uygulanmasını sağlar. Sensörlü kontrol, FDAM motorunun başlangıçta düşük hızlarda ve yük altında daha kararlı bir şekilde çalışmasını sağlar. Sensörler, rotorun hareketini doğrudan izleyerek motorun dönüş yönünü ve hızını belirler, böylece kontrol birimi anahtarlama elemanlarına doğru sıralamayla anahtarlama sinyali oluşturabilir. Bu durum, motorun daha hassas hız ve tork kontrolünün sağlanmasına imkan verir. Sensörlü kontrolün bir diğer avantajı, motorun başlangıçta veya yük altında durduğunda başlatılmasını kolaylaştırmasıdır. Sensörler, rotorun başlangıç pozisyonunu algılayarak, motorun başlangıç konumuna getirilmesini ve harekete geçirilmesini sağlar. Bu, özellikle motorun yük altında çalıştırılması gerektiğinde önemlidir.

Ancak, sensörlü kontrol yönteminde sensörler, ek maliyet, kurulum karmaşıklığı ve arıza riski gibi ek faktörlerle gelir. Ayrıca, sensörlü kontrol, motorun daha yüksek hızlarda

ve yüksek sıcaklıkta çalışması durumunda sensörlerin doğru şekilde çalışmasını zorlaştırabilir.

FDAM motorlarının kontrolünün rotor konumunun belirlenerek yapılması enerji verimliliği ve bakım maliyetleri açısından en verimli yöntemlerden olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 2.7’de FDAM sensörlü çalışmasında hall etkili sensörler aracılığıyla elde edilen rotor pozisyonuna göre mikrodenetleyici kontrollü devre şeması görülmektedir.



Şekil 2.7: Fırçasız doğru akım motorunun sensörlü çalışması.

FDAM motorlarında anahtarlama sıralaması önemlidir. Rotor pozisyonuna göre hangi anahtarlama elemanının aktif olacağı Şekil 2.7’de fırçasız doğru akım motorunun sensörlü çalışmasına göre Tablo 3.1’de hall etkili sensörlerin durumuna göre aktif anahtarlama elemanları elde edilmiştir.

Tablo 2.1: Hall etkili sensörlerin durumuna göre aktif anahtarlama elemanları.

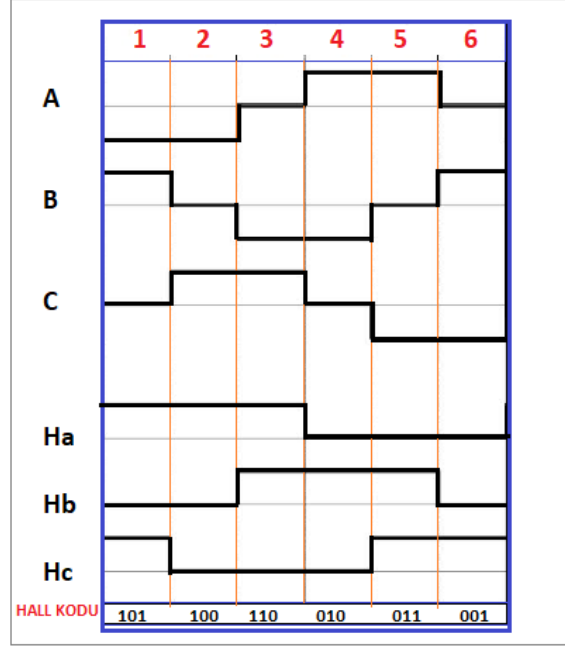
Rotor Pozisyon Aralığı	Anahtarlama Elemanları
15° - 45°	S1 – S6
45° - 75°	S1 – S2
75° - 105°	S3 – S2
105° -135°	S3 – S4
135° -165°	S5 – S4
165° - 195°	S5 – S6

Bu durumda hall etkili sensörlerden gelen bilgiye göre sıralayacak olursak Tablo 2.2’ye göre anahtarların durumları elde edilir.

Tablo 2.2:Hall etkili sensörlerin durumuna göre anahtarların durumları.

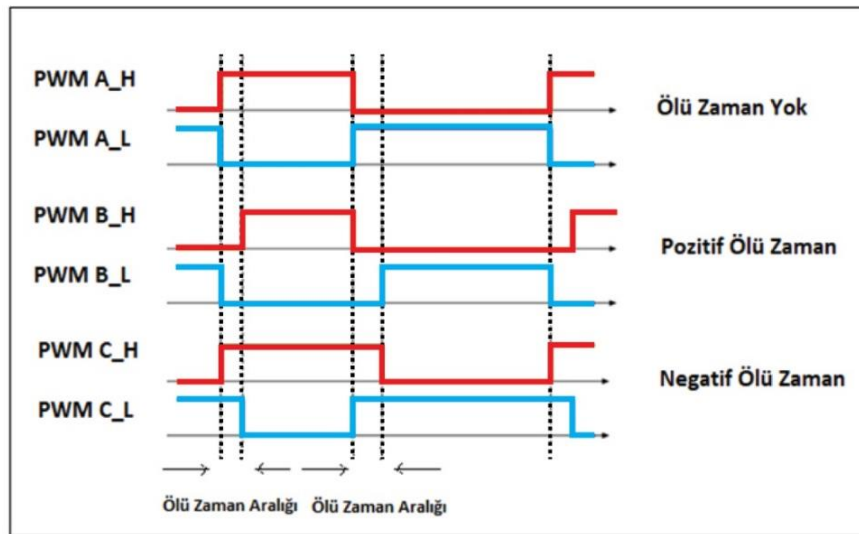
HA	HB	HC	S1	S2	S3	S4	S5	S6
0	0	1	1	0	0	0	0	1
1	0	1	1	1	0	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	1	0	0	0	1	1	0	0
0	1	0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	1	1

Tablo 2.2’de hall etkili sensörlerin durumuna göre anahtarların durumlarından Şekil 2.8’de FDAM motoru’nun sürücü 3 faz çıkışındaki değişim elde edilir.



Şekil 2.8: Fırçasız doğru akım motoru sürücü 3 faz çıkış.

Hall etkili sensörlerden gelen bilgilere göre hangi anahtarların tetikleneceği Tablo 2.8’de Hall etkili sensörlerin durumuna göre anahtarların durumları belirtilmiştir. Belirtilen tabloya göre tetikleme yapılırken dikkat edilmesi gereken hususlardan birisi anahtarlama elemanları ideal olmadığı için kapanma ve açılma süresinde gecikmeler söz konusu olur ve bu gecikmeler anahtarlama elemanlarının aynı anda çalışmasına neden olabilir. Bu durum ölü zaman oluşturularak çözülebilir. Şekil 2.9’da ölü zaman gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Ölü zaman değişimi.

Ölü zaman Denklem (2.1)'deki formülle hesaplanabilir.

$$t_{dead} = [1.2*(t_{pdd_max} + t_{pdd_min}) + (t_{d_off_max} - t_{d_on_min})] \quad (2.1)$$

$t_{d_off_max}$ = Kapanma durumunda maksimum gecikme süresi,

$t_{d_on_min}$ = Açılma durumunda minimum gecikme süresi,

t_{pdd_max} = Anahtarlama elemanın maksimum yayılma gecikme süresi,

t_{pdd_min} = Anahtarlama elemanın minimum yayılma gecikme süresi,

2.5 Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Üstün ve Zayıf Yönleri

FDAM motorların rotorda sabit mıknatısların kullanılması, bobinlerin yerine geçerek kayıpların önlenmesini sağlar ve bu sayede aynı güçteki DC motorlara kıyasla daha küçük boyutlarda üretilmelerine olanak tanır. Ayrıca, AC indüksiyon motorlarında görülen rotor çekirdek kayıplarının olmaması, FDAM motorlarının daha verimli bir performans sergilemesini sağlar. Fırça ve kolektör dilimlerinin bulunmaması, motorun yüksek hızlara ulaşabilme yeteneğini artırır ve bakım maliyetlerini düşürür.

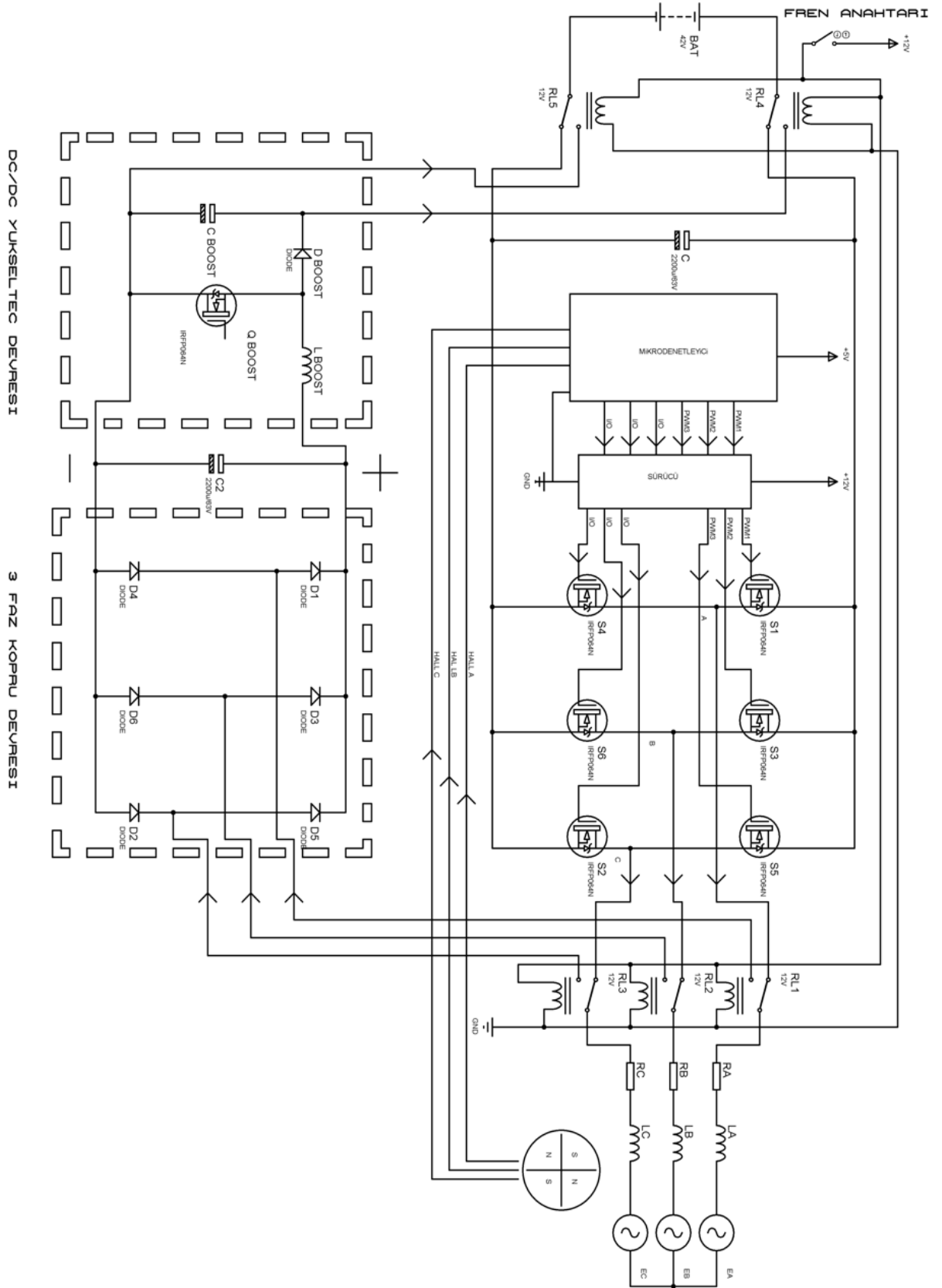
FDAM motorları, AC indüksiyon motorlarına göre daha düşük rotor ataleti sayesinde hızlı tepki verebilme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, kullanılan sürücü elektroniği, motorun hız ve tork değişikliklerinin kolaylıkla yapılmasını sağlar ve bu ayarlamaların harici bir ek maliyet olmadan gerçekleştirilmesine imkan tanır. Bu özellikler, FDAM motorlarını verimlilik, hız, bakım kolaylığı ve maliyet açısından üstün kılmaktadır.

3. FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN REJENERATİF SÜRÜCÜ TASARIMI

FDAM motorların jeneratör olarak çalıştırılması için motorun rotoruna mekanik olarak hareket enerjisi uygulanıp mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmesi sağlanır.

EA'lar için bu durum düşünüldüğünde araç ancak kendi ataleti ile hareket halindeyken veya frenleme anında gerçekleştirilebilir. EA frenleme durumundayken motora sürücü tarafında uygulanan gücün kesilip motorun stator bobin bağlantıları 3 fazlı köprü doğrultma devresine bağlanıp doğrultulan elektrik enerjisini bataryalara aktarılması gerekmektedir.

Şekil 3.1'de rejeneratif enerji dönüşüm devresi'de görünümü verilen devrede, rejeneratif olarak çalışabilecek şekilde bir sürücünün çalışma prensibi gösterilmiştir. Devrede dikkat edilecek olursa köprü diyotlardan sonra bataryaya enerji aktarabilmek için üretilen enerjinin yeterli seviyede olması gerektiği anlaşılmaktadır. Deney setinde kullanılan FDAM'nun jeneratör olarak en üst limit de çalışmış olsa dahi kullanılan bataryanın gerilim seviyesine ulaşamadığından dolayı boost konvertör tercih edilmiştir. Böylelikle bataryanın şarj edilmesi sağlanmıştır.

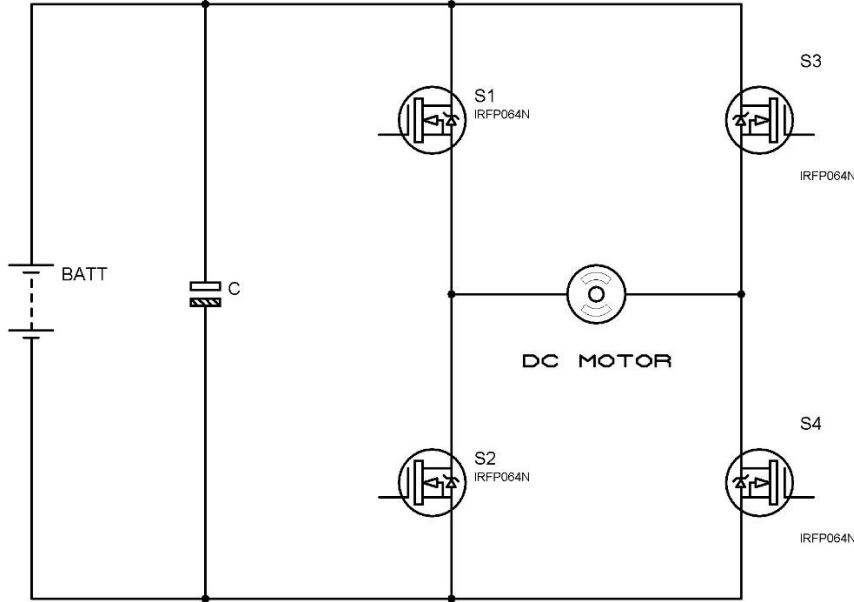


Şekil 3.1: Regeneratif enerji dönüşüm devresi.

3.1 Doğru Akım Motorunun Yön Kontrol Devresinin Çalışma İlkesi

Bir DC motorunun ileri geri dönüş hareketini ve aynı zamanda hız kontrolünü sağlayabilen güç devresi içeriğinde 4 adet mosfet, IGBT vb. anahtarlama elemanı barındıran güç kontrol devreleridir.

Bu tip güç devreleri için, Şekil 3.1'deki rejeneratif enerji dönüşüm devresi incelenecek olursa şekildeki devreye bağlı olan DC motorunun bir yönde dönüş hareketini sağlanabilmesi için S1 ve S4 anahtarlama elemanları tetiklenirken diğer bir yöne dönüş hareketi sağlayabilmek için S2 ve S3 anahtarlama elemanları tetiklenmektedir (Yang. ve diğ. 2009).



Şekil 3.2: DCM'nun yön kontrol devresi.

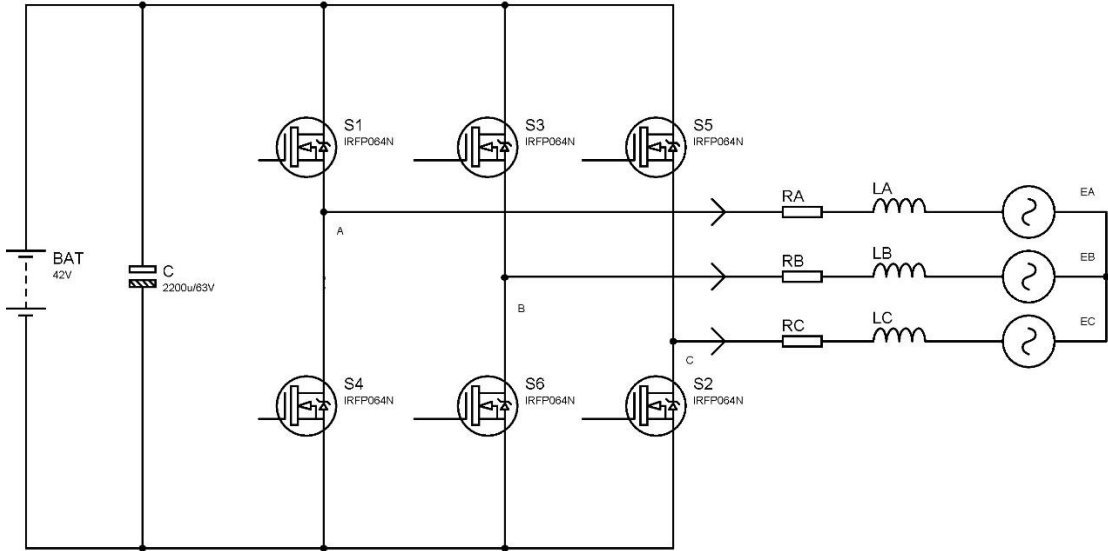
Böylelikle DC motorun yön kontrolü sağlanmış olur dikkat edilecek olursa aynı buradaki anahtarlama elemanları aynı anda tetiklenmemesi gerekmektedir. Aksi takdirde devrede kısa devre oluşacaktır. DC motorun hız kontrolü ise S anahtarlama elemanlarına PWM sinyali uygulanmasıyla sağlanabilir. Bu yöntemde iki farklı durum ortaya çıkar.

Durum 1: Çapraz olarak anahtarlanan ve PWM sinyali uygulanabilen devre elemanlarının her ikisini de PWM uygulanabilir. Bu durum tam köprü olarak adlandırılır.

Durum 2: Çapraz olarak anahtarlanan ve PWM sinyali uygulanabilen devre elemanlarının sadece üst anahtarlama elemanlarının PWM sinyali uygulanırken alt anahtarlama elemanlarına 0 veya 1 sinyali uygulanır ya da sadece alt anahtarlama elemanlarına PWM sinyali uygulanırken üst anahtarlama elemanlarına 0 veya 1 sinyali uygulanır. Bu durum yarım köprü DC motor sürücü devresi olarak adlandırılır.

3.2 Üç Fazlı Doğru Akım Motoru Yön Kontrol Devresinin Çalışma İlkesi

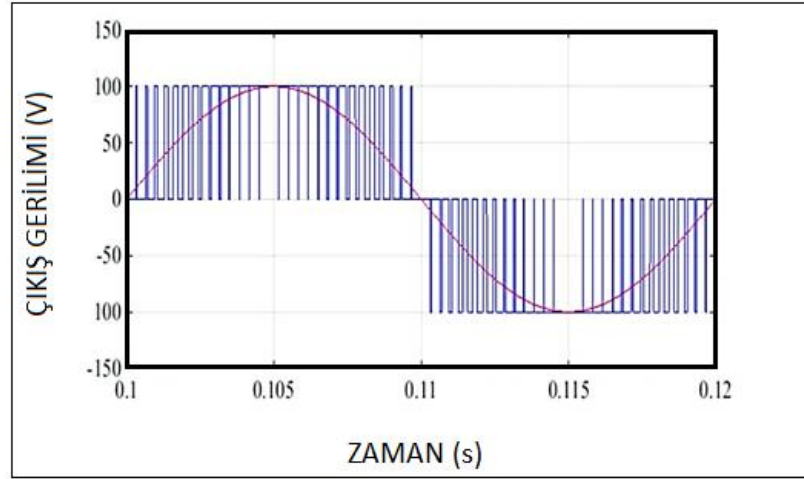
Genellikle DC motorlar için kullanılan yön kontrol devrelerinde motorun üzerinden geçen akım yönü değiştirilerek yön kontrolü ve PWM sinyali uygulanarak hız kontrolü sağlanırken üç fazlı yön kontrol güç devreleri temelde DC/AC dönüştürücü devreleridir. Üç fazlı yön ve hız kontrol devreleri üç fazlı bir motorun çalışmasını ve hızının kontrol edilmesini sağlayabilir. Bu anlamda fırçasız doğru akım motorlarının kontrolü rahatlıkla sağlanabilir.



Şekil 3.3: Üç faz yön kontrol devresi.

Şekil 3.3'deki üç faz yön kontrol devresindeki temel üç faz yön kontrol devresi incelenecek olursa belirtilen güç kontrol devresinde 6 adet anahtarlama elemanı yer almaktadır. Bu anahtarlama elemanları genellikle mosfet, IGBT olarak seçilmektedir. Bu anahtarlama elemanları belirli sırayla biri alt diğeri üst tarafta ancak aynı barada yer alan aynı anda olmaması kaydıyla anahtarlansıyla ve uygun PWM sinyali uygulanması ile çıkışlarında 120 derecelik faz farkına sahip sinüsoidal eğriye çok yakın eğri elde edilebilir.

Bu sinüs eğrisi devreye uygulanan PWM sinyalinin duty-cycle yani görev döngüsü ile yakından ilgilidir bu durum Şekil 3.4’de PWM sinyali ile elde edilen sinüs eğrisinde açıkça görülmektedir.



Şekil 3.4: PWM sinyali ile elde edilen sinüs eğrisi.

3.2.1 Üç faz Köprüsü'nde Kullanılan Anahtarlama Elemanı ve Sürücü Özellikleri

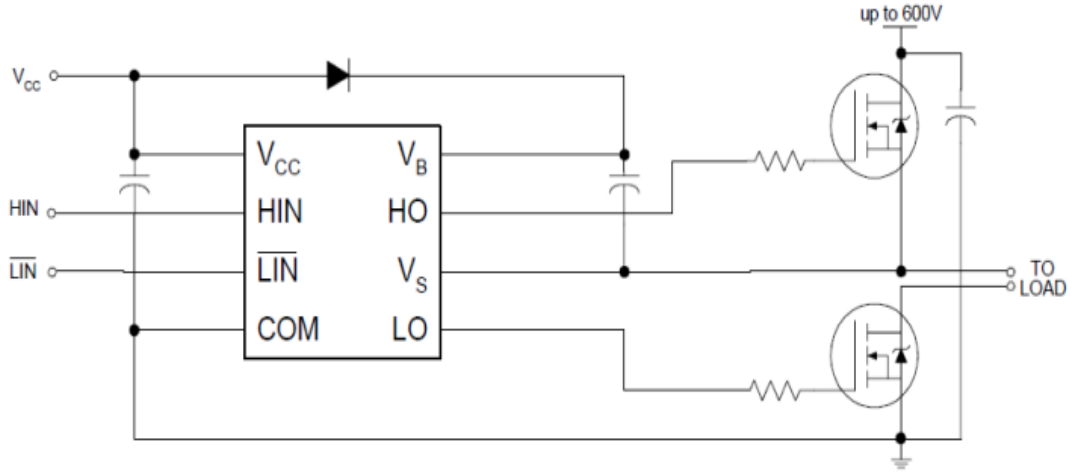
Bu tip köprü devrelerinde genellikle mosfet veya IGBT kullanılır. Burada uygulaması yapılan devrede mosfet tercih edilmiştir yüksek frekans gereken devrelerde mosfet yüksek gerilim ve akım gerektiren devrelerde ise IGBT tercih edilmektedir. Bu uygulama devresinde mosfet olarak IRFP064N kullanılmıştır. Bu mosfet'in bilgi sayfasından elde edilen bilgiler ve özellikler aşağıdaki gibidir.

- TO-247AC kılıfına sahiptir.
- $V_{DSS} = 55V$ 'dur.
- $R_{DS(on)} = 0.008 \Omega$ dur.
- $I_D = 110A$ 'dir.
- $V_{GS} = 10V$ 'dur.
- Hızlı anahtarlama
- $175^\circ C$ işletme sıcaklığına dayanabilir.

Bu tip devrelerde mosfet sürücü entegreleri de kullanılır. Burada IR2103 sürücü entegresi kullanılmıştır. Bu entegrenin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- Maksimum 600 Volt'a kadar dayanım gösterir.
- Gate tetik terminal gerilim aralığı 10-20 V.
- Düşük gerilim uygulaması durumunda kilitlenir.
- 3.3 V ,5 V ve 15 V lojik giriş seviyelerine uygundur.
- Giriş sinyali kesildiğinde çıkışları hemen kapatır.
- Ölü zaman ayarı dahili olarak ayarlanmıştır.

Şekil 3.5'de IR2103'ün uygulama devresinin açık şeması görülmektedir.



Şekil 3.5: IR2103 Uygulama devresi.

3.3 Rotor Konum Bilgisi ve Hall Etkili Sensörler

Fırçasız doğru akım motorlarında fırça ve kolektör kullanılmadığından dolayı anahtarlama işlemi elektronik devrelerle yapılmaktadır. Anahtarlama işleminin doğru sıralamalı gerçekleşebilmesi için motorun rotor konumunun bilinmesi gerekmektedir. Rotor konumunu ise motor içine yerleştirilmiş olan alan etkili olarak çıkış veren hall etkili sensörlerden alınabilir.

Genellikle uygulamada hall sensörler motor içerisinde 120 derecelik veya 60 derecelik aralıklar'la 3 adet olacak şekilde yerleştirilirler hall etkili sensörler çıkışlarında lojik olarak 1 ya da 0 bilgisi üretirler. Bu 1 ya da 0 olma durumu hall etkili sensörünün önünde sabit mıknatis olup olmamasına bağlıdır.

Hall etkili sensörlerden rotor pozisyonunun durumuna göre alınan bilgiler Tablo 3.1’de rotor pozisyonuna hall etkili sensörlerin durumları tablosunda 3 bit olarak elde edilmektedir.

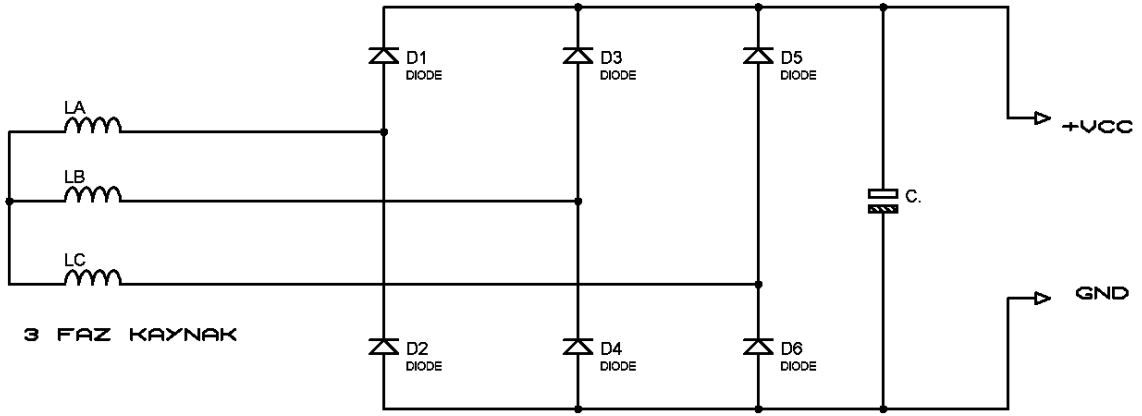
Tablo 3.1: Rotor pozisyonuna göre hall etkili sensörlerin durumları.

Rotor Pozisyon Aralığı	Hall Etkili Sensör Durumu
15° - 45°	001
45° - 75°	101
75° - 105°	100
105° -135°	110
135° -165°	010
165° - 195°	011

Tablo 3.1’de rotor pozisyonuna göre hall etkili sensörlerin durumları tablosunda olduğu gibi algılanan bu lojik bilgiler bir mikrodenetleyici tarafından yorumlanıp çıkışlarına bağlı olan anahtarlama elemanlarının belirlenen sıralamayla tetiklenmesi sağlanarak fırçasız doğru akım motorunun belirlenen yönde sürülmesi sağlanır.

3.4 Rejeneratif Modda Üç Faz Doğrultucu Devresi

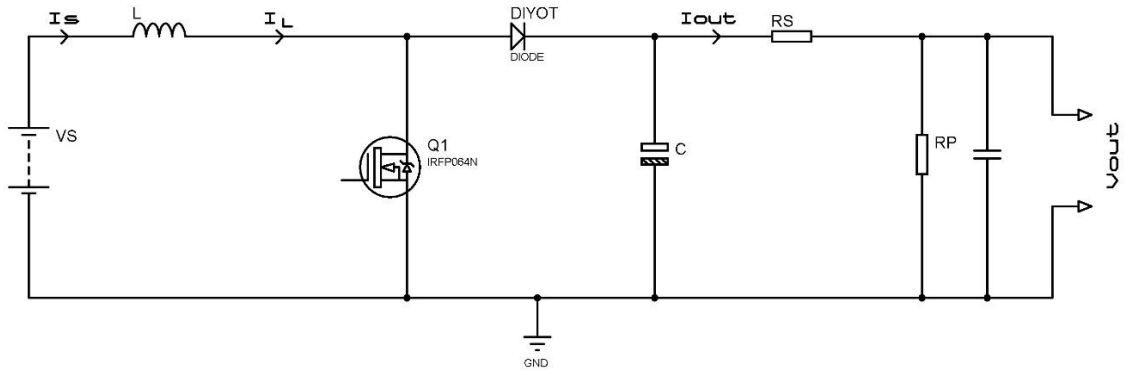
FDAM motorları yapıları itibariyle jeneratör olarak da çalışabilmektedir 3 faz olan FDAM motorları jeneratör olarak çalıştırıldığında terminallerinden 3 Faz çıkış verirler. FDAM motorların jeneratör olarak çalışması durumunda çıkışından elde edilen alternatif akımın doğrultularak bataryayı şarj etmek için kullanılabilir bunun için terminalde üç faz köprü devresi ve kondansatörden oluşan doğrultucu devresi kullanılmalıdır. Üç faz doğrultma uygulama devresinin açık şeması Şekil 3.6’da üç faz köprü devresinde görülmektedir. Test palatformu için tasarlanan devrede bu köprü devresi kullanılmıştır.



Şekil 3.6: Üç faz köprü devresi.

3.5 Boost Konverter Devresi

DC/DC boost konvertör devreleri çıkış gerilim değeri giriş gerilim değerinden yüksek olan ancak akım değerleri düşük olan devrelerdir. Şekil 3.7’de boost konvertör devresi incelenecek olursa devrede bulunan anahtarlama elemanına PWM sinyali uygulanarak devrenin çalışması sağlanır. Anahtarlama elemanı iletimdeyken bobin üzerinde elektrik akımı geçer anahtarlama elemanı yalıtım durumunda bobin üzerinde zıt emk’dan dolayı enerji depolanır. Bu enerji, devredeki diyot üzerinden kondansatörü ve çıkıştaki yük üzerine akışı sağlanır. Çıkış gerilim değeri giriş gerilim değeri üzerine bobin üzerine düşen gerilimin eklenmesine eşittir. Formülü, $V_{out} = V_{in} + V_1$ ’dir. Bu durum anahtarlama elemanını uygulanan PWM frekansı ile doğrudan ilgilidir. Frekans arttıkça çıkıştaki gerilim artar.



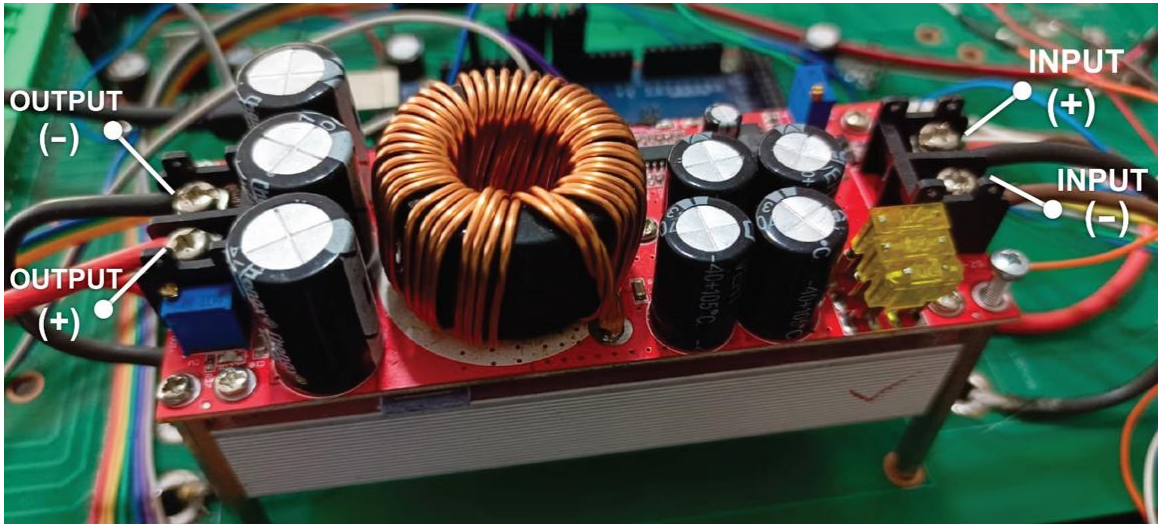
Şekil 3.7: Boost konvertör temel devresi.

3.5.1 Kullanılan Boost Konverter Devresinin Özellikleri

Son yıllarda elektronik cihazlar ve sistemler, farklı gerilim değerlerine sahiptir. Bu farklı gerilim değerlerine karşılamak için kullanılan DC-DC voltaj yükselticiler, önemli bir rol almaktadır. Bu cihazlar arasında özellikle dikkat çekenlerden biri, DC-DC 12V-90V voltaj yükseltici veya yaygın adıyla Boost konvertördür. Uygulama devresinde Şekil 3.8'deki boost konvertör modülü kullanılmıştır.

Boost konvertör, temelde enerji verimliliğini artırmak ve farklı gerilim ihtiyaçlarını karşılamak için tasarlanmış bir elektronik devredir. Genellikle bir mikrodenetleyici veya kontrol devresi tarafından yönetilen bir anahtarlamalı güç dönüştürücüsü olarak işlev görür. Boost konvertör, düşük giriş voltajını (12V gibi) yüksek çıkış voltajına (90V gibi) çıkarmak için bobin ve kondansatör gibi elemanları kullanır.

Teknik olarak bu model, 1800W çıkış gücüne sahiptir ve 40 Amper akım sağlayabilir. Ayrıca, fanlı bir soğutma sistemine sahiptir, bu da yüksek güçte çalışırken stabil bir sıcaklık sağlamaya yardımcı olur. Giriş voltajı 12V, çıkış voltajı ise 90V'dir.



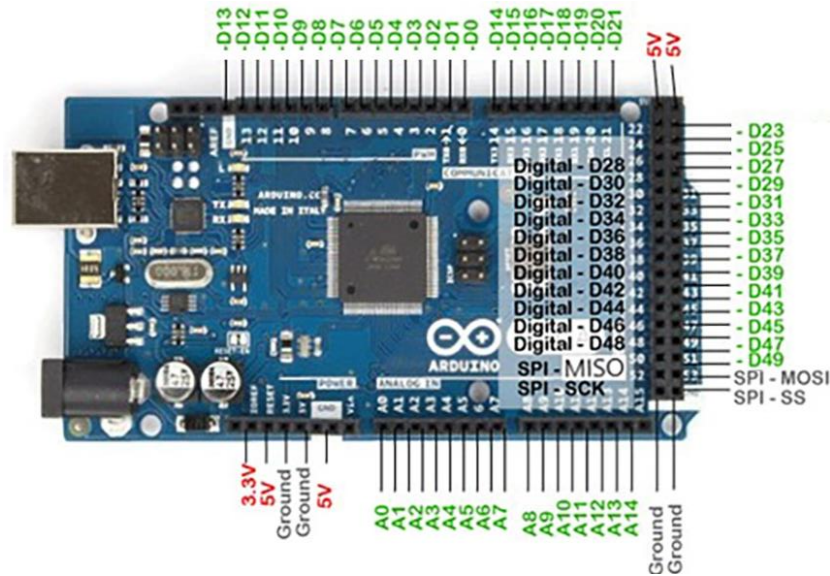
Şekil 3.8: Boost konvertör modülü.

DC-DC gerilim yükselticiler, birçok uygulamada yaygın olarak kullanılır. Özellikle endüstriyel otomasyon, güneş enerjisi sistemleri, elektrikli araç şarj sistemleri ve özel elektronik projelerde tercih edilirler. Boost konverterler, düşük gerilim kaynağı olan bir enerji depolama sisteminden daha yüksek bir gerilime ihtiyaç duyan bir cihaza enerji sağlamak için idealdir.

DC-DC voltaj yükselticiler, modern elektronik uygulamalarda enerji verimliliğini artırmak ve güç gereksinimlerini karşılamak için vazgeçilmez bir rol oynamaktadır. Bu tip cihazlar, enerji dönüşümünde esneklik sağlayarak elektronik sistemlerin daha etkili ve verimli bir şekilde çalışmasına olanak tanır. Bu çalışmada rejenaratif olarak çalışan FDAM motorundan yeterli şarj geriliminin olmaması durumunda girişe uygulanan gerilimi yükseltmek için kullanılmıştır.

3.6 Arduino Mega Mikrodenetleyici ve Özellikleri

Arduino Mega 2560, ATmega2560 mikrodenetleyicisi temel alınarak tasarlanmış bir geliştirme kartıdır. Bu kart, geniş bir kullanıcı kitlesi ve projelerin gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmıştır. Bu kart da özellikle PWM çıkışların oldukça fazla olması FDAM motoru sürücü tasarımı için büyük avantaj sağlamıştır. Şekil 3.9' da arduino mega pin tanımları verilmiştir.



Şekil 3.9: Arduino mega ve pin tanımları.

Arduino Mega, büyük ölçekli ve karmaşık projelerde kullanılmak üzere tasarlandığı için geniş bir kullanım alanına sahiptir. Robotik projeler, otomasyon sistemleri, endüstriyel kontrol uygulamaları ve daha pek çok alanda tercih edilmektedir. Ayrıca, geniş giriş/çıkış pin sayısı, sensörlerin ve modüllerin entegrasyonunu kolaylaştırır, bu da çeşitli projelerin geliştirilmesini mümkün kılar. Arduino Mega, özellikle yüksek sayıda pwm çıkış ve analog giriş portunun olması bir FDAM motoru sürücü devresinde avantajlı hale gelmesini sağlar.

3.6.1 Rejeneratif Mod için Geliştirilen İşlem Sırası

FDAM motorlarının rejeneratif olarak sürülmesini sağlamak için oluşturulan yazılımın işlem basamakları şu şekildedir;

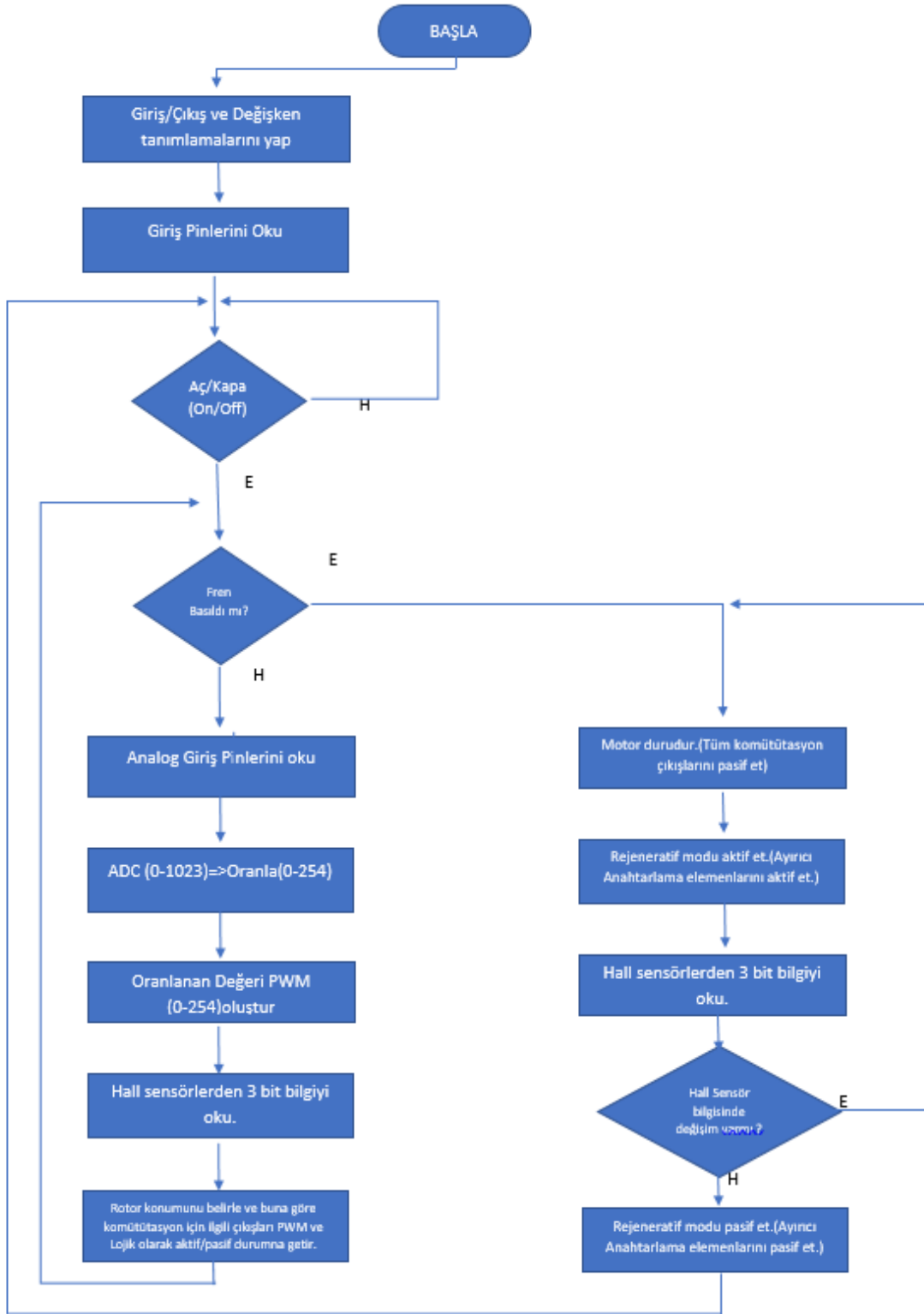
Başlangıç aşamasında, sistem başladığında motor kontrol ünitesi (MCU) veya dijital sürücü devresi başlatılır. Daha sonra, parametre ayarları adımıyla, kullanıcı tarafından belirlenen veya önceden tanımlanan motor parametreleri ve işletim modları (örneğin, hız kontrolü veya konum kontrolü) sisteme yüklenir. Ardından, sensör okuma aşamasında, motorun pozisyonu, hızı veya diğer parametreleri ölçen sensörlerden elde edilen veriler okunur.

Çalışma modu seçimi adımıyla, kullanıcının isteğine veya uygulama gereksinimlerine bağlı olarak, sürücü belirli bir çalışma moduna geçer. Örneğin, hız kontrol modu, konum kontrol modu veya moment kontrol modu gibi. PWM sinyali üretimi aşamasında, PWM (Pulse Width Modulation) sinyali üretilir. Bu sinyal, motorun güç transistörleri üzerinde çalışarak motorun hızını veya torkunu kontrol etmek için kullanılır.

Faz kontrolü ve invertör çalışması adımıyla, PWM sinyali motor sürücüsünün invertör devresine uygulanarak motorun farklı fazlarına uygun şekilde enerji sağlanır. Bu aşama, motorun belirli bir yönde dönmesini veya durmasını sağlar. Son olarak, rejeneratif frenleme (Enerji Geri Kazanımı) adımıyla, motor frenleme sırasında fren pedallarından gelen sinyali kullanarak enerji geri kazanılır. Bu, hız kontrolü sırasında enerjiyi daha etkili bir şekilde kullanmaya ve enerji verimliliğini artırmak için gerekli çıkış birimleri aktif hale getirilir.

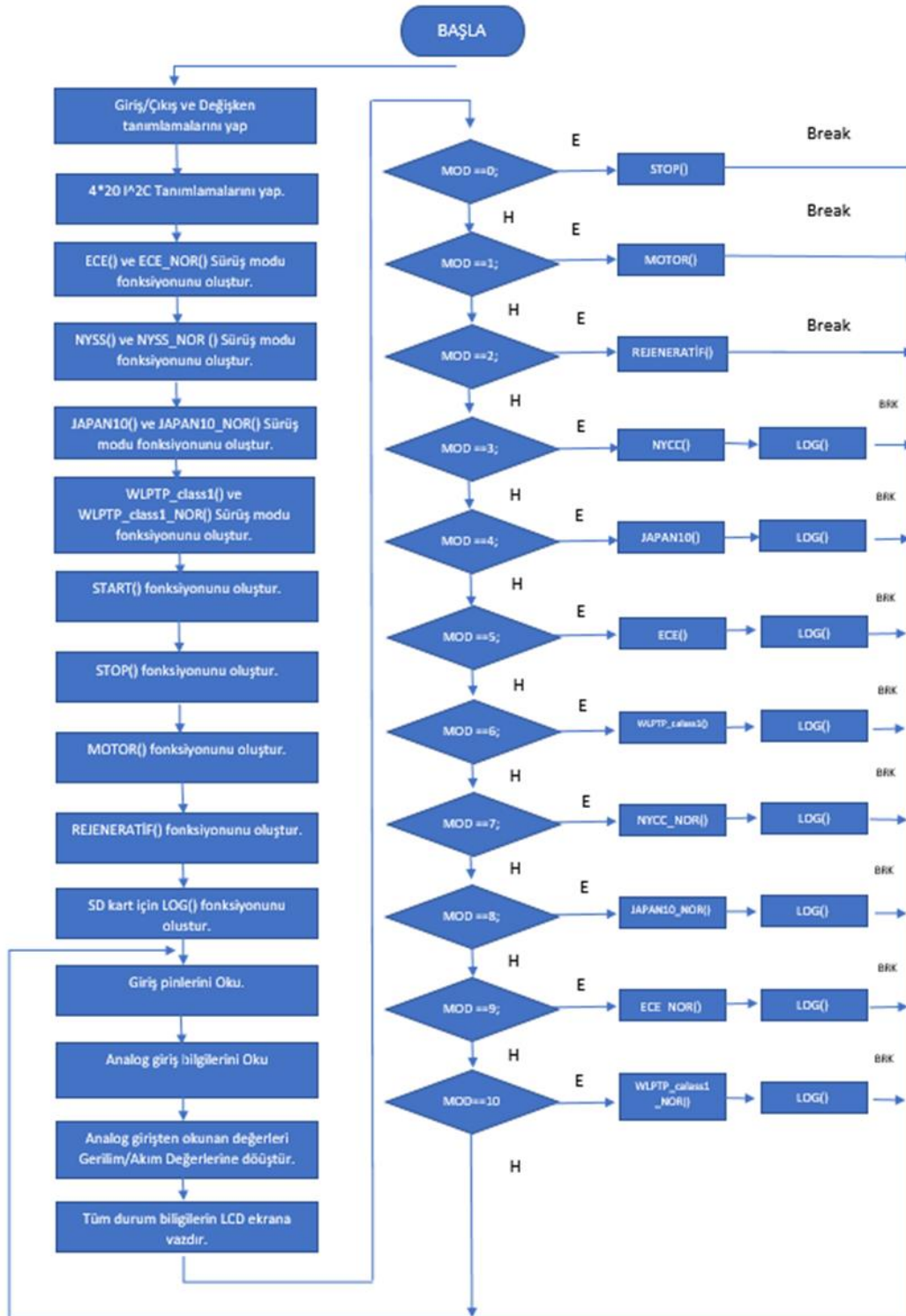
FDAM motorlarının rejeneratif olarak sürülmesini sağlamak için geliştirilen yazılımın işlem basamakları detaylı bir şekilde incelendiğinde, sistemin başlangıç aşamasından başlayarak parametre ayarlarına, sensör okumasına, çalışma modu seçimine, PWM sinyali üretimine, faz kontrolüne ve invertör çalışmasına kadar bir dizi kritik adım olduğu görülmektedir. Son olarak, rejeneratif frenleme aşamasında, motor frenleme sırasında enerji geri kazanımı sağlanarak enerji verimliliğinin artırılması ve sürdürülebilir bir çalışma ortamının oluşturulması hedeflenmektedir. Bu işlem adımları, FDAM motorlarının etkin bir şekilde rejeneratif sürülmesini mümkün kılarak, enerji tasarrufu ve çevresel sürdürülebilirlik açısından önemli katkı sağlar.

Rejeneratif FDAM sürücüsü devresinde mikrodenetleyicide kullanılan yazılım algoritmasının akış şeması Şekil 3.10’da FDAM rejeneratif sürücü algoritması akış şemasında verilmiştir.



Şekil 3.10: FDAM rejeneratif sürücü algoritması akış şeması.

EA'ların belli araç sürüş profillerinde test edilebilmesi için FDAM motor sürücü devresi geliştirilmiş olup bu devrede kullanılan mikrodenetleyici için oluşturulan yazılımın akış şeması Şekil 3.11'de FDAM rejeneratif sürücü test devresi algoritmasının akış şemasında gösterilmiştir.

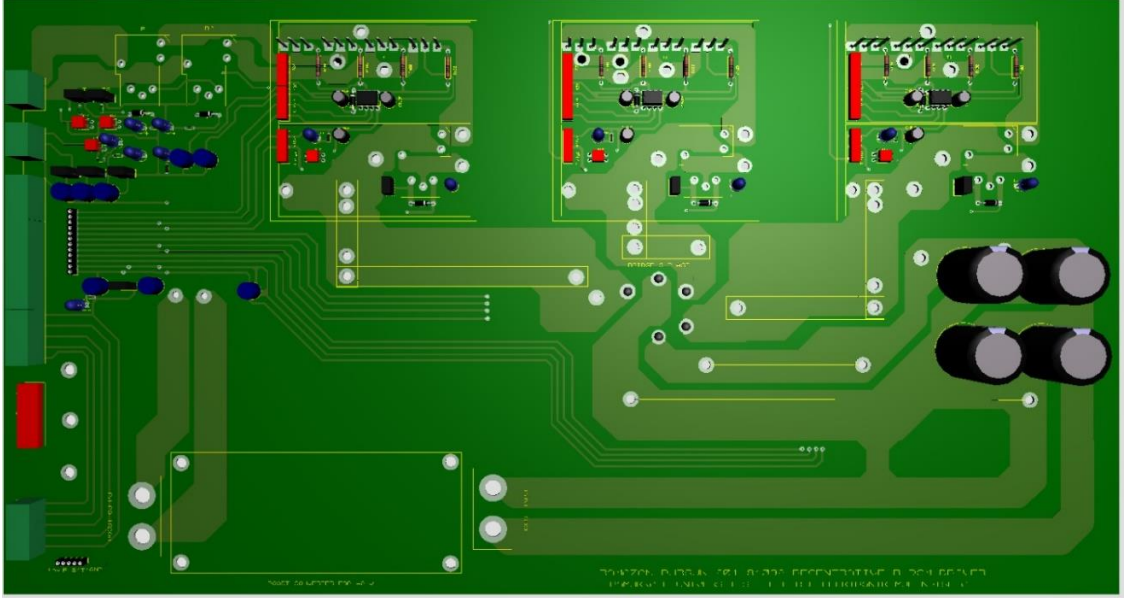


Şekil 3.11: FDAM rejeneratif sürücü test devresi algoritmasının akış şeması.

3.7 Rejeneratif Sürücü Devresinin Genel Yapısı ve Çalıştırılması

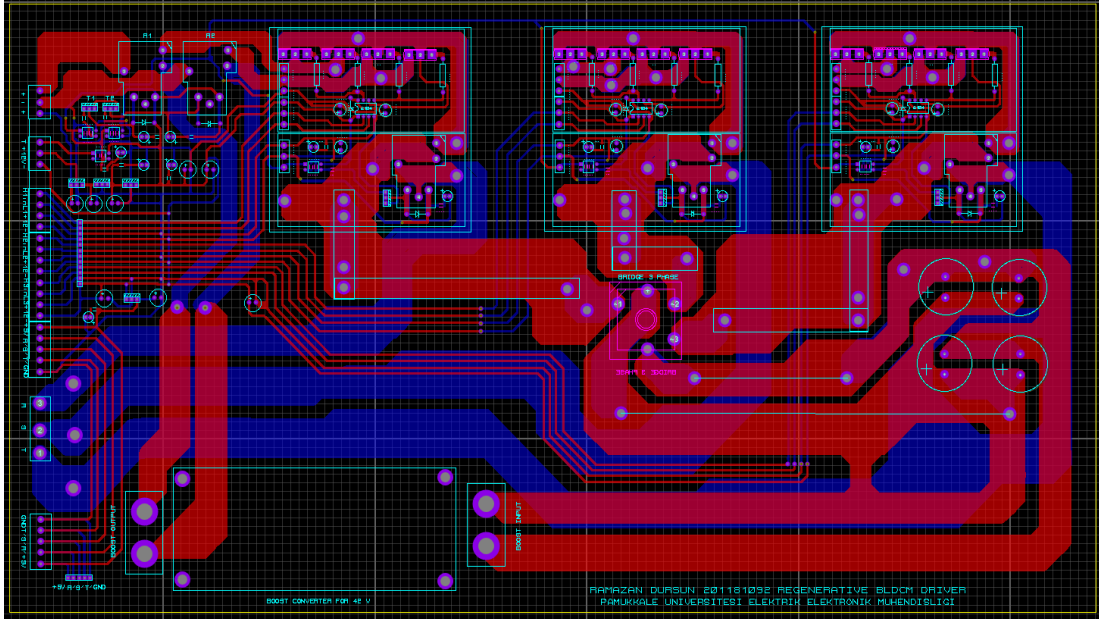
FDAM motorları için rejeneratif çalışma motorun enerji verimliliğini arttırmak için kullanılır. Elektrikli araçlarda frenleme ve/veya yavaşlama esnasında kayıp olan enerjinin tekrar kazanımı için tercih edilir. FDAM motorları çalışmaya başladığı andan itibaren bir enerji tüketir ve kinetik enerjiyi oluşturur motorun durdurulması ile birlikte yani frenleme anında rejeneratif mod devreye girer yani motor jeneratör gibi davranır. Bu esnada elde edilen alternatif akım elektrik enerjisini tekrar geri kazanım için bir doğrultma devresinden sonrasında bir yükseltici devresinden geçirerek mevcut bataryanın şarj olması sağlanır.

Şekil 3.12’de FDAM ARES 3D rejeneratif sürücü tasarımı PCB devresinde devresinin şeması görülmektedir.



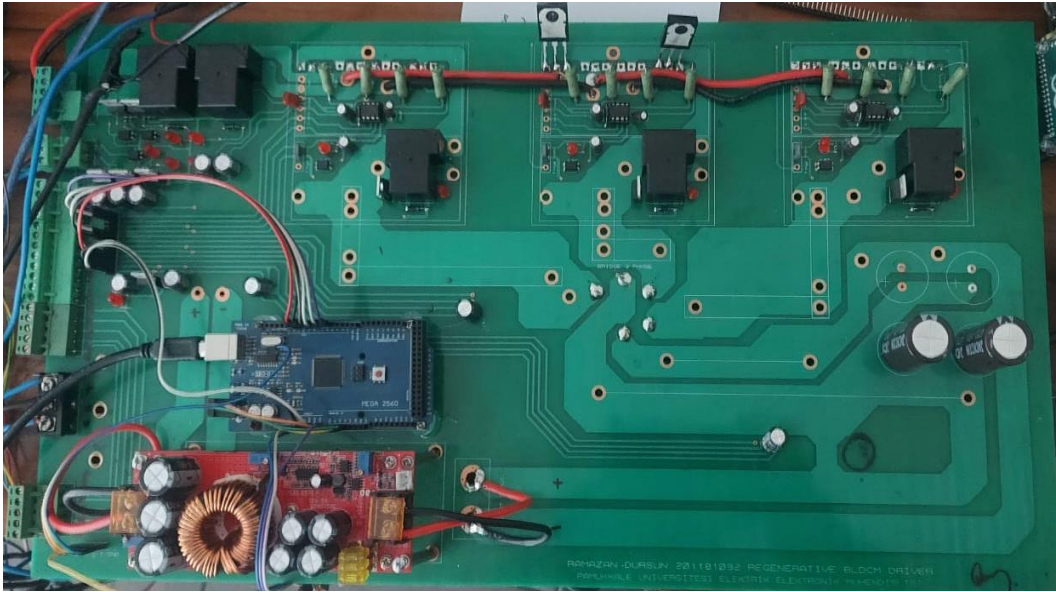
Şekil 3.12: FDAM ARES 3D rejeneratif sürücü PCB tasarımı.

Şekil 3.13’de FDAM ARES rejeneratif sürücü devresinin PCB çizimi görülmektedir.



Şekil 3.13: FDAM ARES rejeneratif sürücü PCB çizimi.

Şekil 3.14’de rejeneratif sürücü uygulama devresinde uygulaması gerçekleştirilen devrenin PCB ve montajlanmış hali görülmektedir.



Şekil 3.14: Rejeneratif sürücü PCB uygulama devresi.

4. ARAÇLARDA SÜRÜŞ PROFİLLERİ

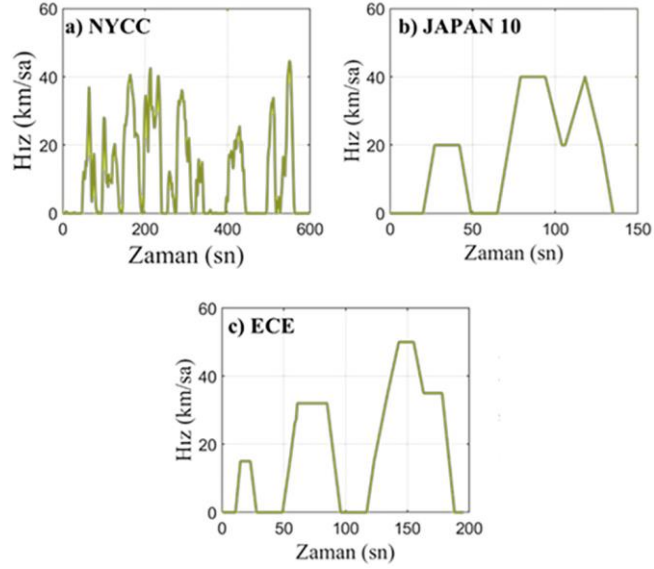
4.1 GİRİŞ

Araç sürüş profilleri, sürücüden sürücüye, bölgeden bölgeye farklılık gösteren araç sürüş teknikleri olarak tanımlanabilirken aynı zamanda aracın performansını, enerji tüketimini, karbon salınım miktarı gibi değerlerin ölçümü amacıyla kullanılan önceden belirlenmiş tekrar eden fonksiyonlar bütünü olarak tanımlanabilir. Sürüş profillerinin farklı kullanım amaçları olsa da Elektrikli araçlar için sürüş profilleri, batarya kullanımını optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. Bu sürüş profillerinin bazıları aşağıda belirtilmiştir.

Sürüş profilleri aslında birer senaryo olup araçlardaki yakıt tüketimi, emisyon değerleri gibi değerleri elde etmek amacıyla geliştirilmiş algoritmalar içeren testlerdir. Bu testler EA'lar içinde kullanılıp batarya durum analizi ve enerji geri kazanımı hakkında bilgi verebilecektir. Rejeneratif sürücünün normal sürücü ile karşılaştırılabilmesi için tüm sürüş profilleri ile test edilmiştir.

ECE, JAPAN10, NYCC ve WLTP Class1 gibi çeşitli sürüş profilleri, araçların gerçek dünya koşullarında nasıl performans göstereceğini ve çevresel etkilerini değerlendirmek için hayati öneme sahip araçlardır. Her bir sürüş profili, belirli sürüş senaryolarını ve koşullarını temsil ederek araçların emisyonlarını ve yakıt tüketimini simüle eder. Örneğin, ECE sürüş profili, şehir içi ve dışı sürüş koşullarını modellerken, JAPAN10 sürüş profili, özellikle Japonya'daki otomotiv sektöründe enerji tüketimi ve emisyonlarını değerlendirmek için tasarlanmıştır. NYCC sürüş profili, şehir içi sürüş koşullarını yansıtırken, yoğun trafik ve düşük hızlarda seyreden dur-kalk trafiğini temsil eder. WLTP Class1 sürüş profili ise, araçların gerçek dünya sürüş koşullarını daha yakından taklit eder, farklı hız aralıklarında, dur-kalk durumlarında ve hızlanma-yavaşlama süreçlerinde araç performansını değerlendirir. Bu çeşitli sürüş profilleri, otomotiv endüstrisinde araçların tasarımı, testi ve regülasyonları için temel birer araç olarak kabul edilir. Testler ECE, JAPAN10 ve NYCC sürüş profillerinde gerçekleştirilmiştir.

ECE sürüş profili, JAPAN10 sürüş profili ve NYCC sürüş profili sürüş profillerine ait değişimler Şekil 4.1'de sürüş profillerinin değişimleri verilmiştir.



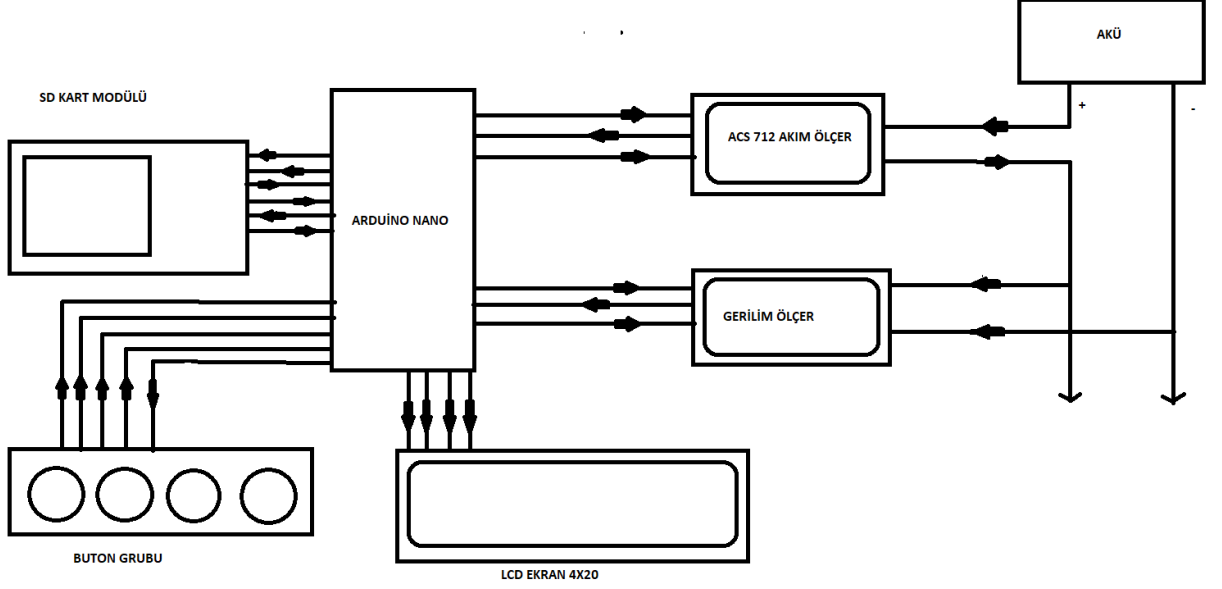
Şekil 4.1: Sürüş profillerinin değişimleri; a) NYCC, b) JAPAN 10, c) ECE (Boyacı,2022).

Tasarımı gerçekleştirilen test platformunda ECE sürüş profili, JAPAN10 sürüş profili ve NYCC sürüş profillerinin testleri gerçekleştirilmiştir.

4.2 FIRÇASIZ DOĞRU AKIM MOTORLARI İÇİN TASARLANAN REJENERATİF SÜRÜCÜ DEVRESİNİN FARKLI SÜRÜŞ PROFİLLERİ İÇİN TEST DEVRESİ TASARIMI

Fırçasız doğru akım motorları için rejeneratif geri kazanım sağlayabilmek amacıyla rejeneratif fırçasız doğru akım motor sürücü kartı tasarlanmış ve enerji geri kazanım sağladığı görülmüştür bu geri kazanımın ne kadar olduğunu belirlemek için bir test devresine ihtiyaç duyulmuştur. Bu test devresinde sağlıklı ölçümler sağlayabilmek için, Batarya üzerindeki gerilim ölçülmelidir. Bataryadan çıkan akım ve bataryaya giren akım ölçüle bilmelidir. Fırçasız doğru akım motorunun devir sayısı ölçülebilmelidir. SoC batarya şarj durumu hesaplanmalıdır. Elde edilen datalar veri seti halinde kayıt edilebilmelidir. Datalar, ekranda görünmelidir.

Şekil 6.1' de rejeneratif sürücü test devresinin blok şeması ölçüm devresinin çalışma mantığı görselleştirilmiştir. Devre blok şemasında akımölçer için ACS712 20 amper akım sensörü gerilimölçer için OPAMP lm358 devresi kayıt için SD kart hafıza kartı modülü HMI insan makine ara yüzü için LCD ekran 2 x 40 ve menüleri kontrol edebilmek için buton grubu kullanılmıştır.



Şekil 4.2: Rejeneratif sürücü test devresi blok şeması.

4.3 (SoC) Batarya Şarj Durumu Tanımı

SoC batarya şarj durumu bataryadaki mevcut kapasiteyi yüzde cinsinden ifade edilmesidir.

- Tam şarj durumunda SoC değeri %100
- Tam Deşarj durumunda ise SoC değeri %0

olarak kabul edilir. (Kesler ve diğ., 2022).

Bu değer bataryadaki enerji kapasitesinin ne kadar olduğunu gösterir. SoC değerinin çeşitli hesaplama yöntemleri olsa da en çok bataryadan zaman içinde çıkan ve zaman içerisinde bataryaya giren akım miktarının integrali ile hesaplanabilir. Denklem (4.1)' de SoC 'nin formülü verilmiştir.

$$SoC(t) = SoC(t_0) + \int_{t_0}^t \frac{I_{in(t)} - I_{out(t)}}{c} (dt) \quad (4.1)$$

Burada;

- SoC(t) = t zamanı için batarya şarj durumunu
- SoC(t₀) = başlangıç için batarya şarj durumunu

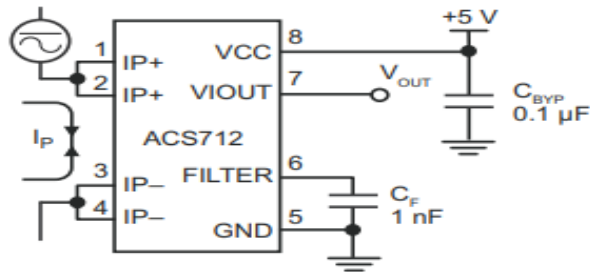
- $I_{in(t)}$:t zamanı için batarya giren akım durumunu
- $I_{in(t)}$:t zamanı için bataryadan çıkan akım durumunu
- C = bataryanın kapasitesini

İfade etmektedir.

4.4 ACS 712 Akım Sensör Modülü ve Özellikleri

ACS712, mikrodenetleyiciler ve diğer elektronik projelerde kullanılan bir akım sensörü entegresidir. Bu entegre, akım ölçümü yapabilen ve özellikle Mikrodenetleyicilere kolayca adapte edilebilmektedir. ACS712, akımı ölçülecek devreye seri bağlanır. Hall etkisi sayesinde devreden geçen akımı çıkışına gerilim olarak aktarabilir. Hall etkisi, içinden akım geçen bir iletkenin etrafında oluşan manyetik alanı ölçülebilmesi durumuna denir. Bu hall etkisini kullanan entegre, bir akımın manyetik alanını algılar ve bu alanın şiddetini gerilim olarak çıkış portunu aktarır.

ACS712'nin farklı modelleri vardır. Bunlar 5A, 20A veya 30A gibi farklı akım aralıklarında çalışabilir. Uygulanan devrede 20A'lık ACS712-20 seçilmiştir. Analog çıkış pininde herhangi bir akım geçişi olmaması durumunda sabit 2.5 volt gerilim sinyali verir. Bu gerilim değeri ölçülen akımın değeri ile doğru orantılı olarak yükselir veya alçalır. İki yönlü veya tek yönlü ölçüm yapabilirler. İki yönlü modeller hem pozitif hem de negatif akımı ölçebilirken, tek yönlü modeller sadece bir yönde akım ölçebilirler. Şekil 4.3' de ACS712 Uygulama devresi görülmektedir.



Şekil 4.3: ACS712 uygulama devresi.

4.5 Gerilim Ölçme Devresi Tasarımı

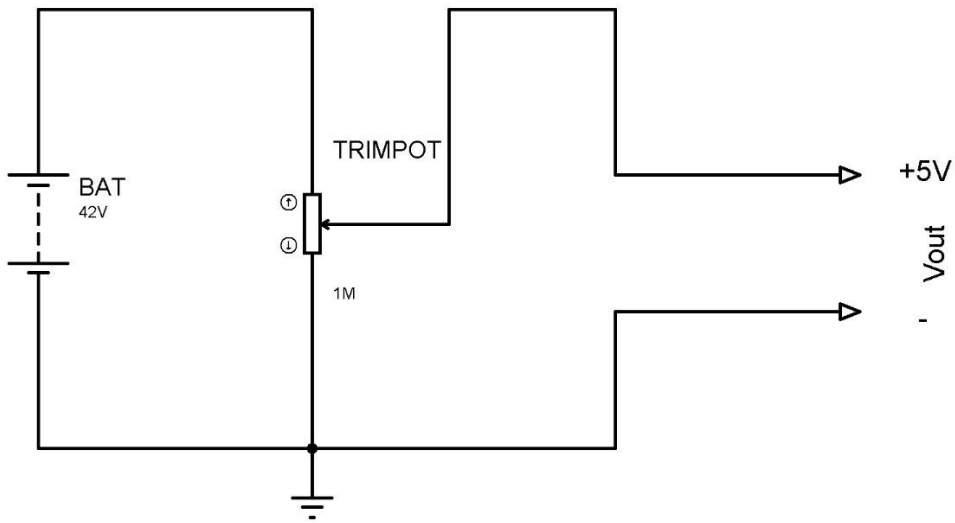
Bir mikrodenetleyici tarafından gerilim değerlerinin ölçülebilmesi için ölçülü mü gerçekleştirilecek güç kaynağının genlik değeri mikrodenetleyicinin besleme voltajından büyük olmaması gerekir. Eğer, genlik değeri mikrodenetleyicinin besleme voltajından büyük ise ölçümü gerçekleştirilecek güç kaynağı ile mikrodenetleyici arasında gerilim uygunlaştırmak için bir tampon devreye ihtiyaç duyulur.

Buradaki uygulama devresinde bir OPAMP devresinin uygulanması, o pompanın giriş empedansının yüksek ve çıkış empedansının düşük olmasından dolayı uygun görülmüştür. Burada güç kaynağındaki maksimum gerilim değeri mikrodenetleyicinin maksimum giriş değerine uygunlaştırılması gerekir.

Buna göre;

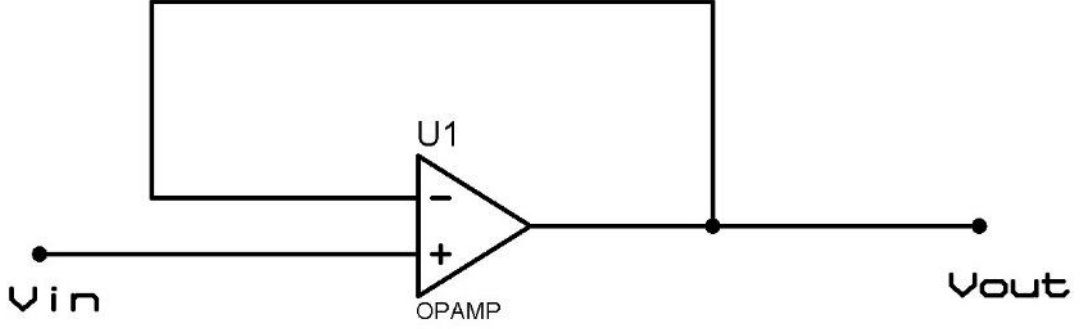
- $V_{bat,max} = 42$ Volt
- $V_{uc,max} = 5$ volt

olması durumunda maksimum batarya gerilim değeri 42 volt olduğunda mikrodenetleyici tarafında maksimum mikrodenetleyici giriş gerilimi 5 volt değerine uygunlaştırılması gerekir Şekil 4.4’de kullanılan gerilim uygunlaştırıcı ön devresi görülmektedir. Bu devrenin çıkış gerilimi giriş gerilimi ile doğru orantılı olarak değişmektedir.



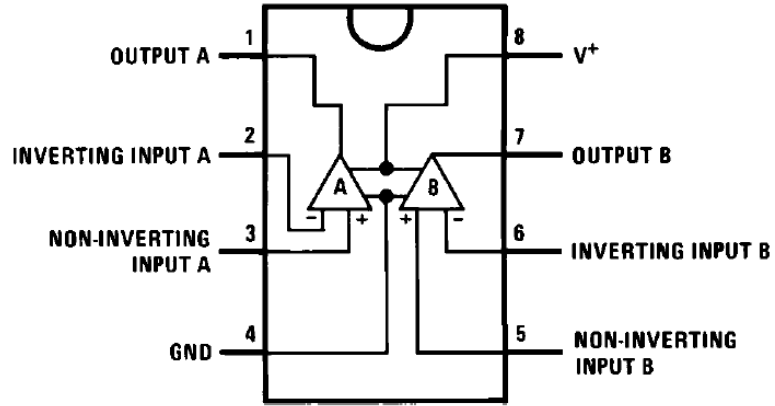
Şekil 4.4: Gerilim uygunlaştırıcı ön devresi.

Ayrıca Şekil 4.4’de gerilim uygunlaştırıcı ön devresinin çıkışına gerilim takipçisi olarak bir opamp devresi kullanılmıştır. Şekil 4.5’de, OP-AMP gerilim takipçi devre şeması görülmektedir.



Şekil 4.5: OP-AMP gerilim takipçi devre şeması.

Uygulama devresinde şekil 4.5'deki OP-AMP gerilim takipçi devresi için lm358 op-amp entegresi kullanılmıştır. Şekil 4.6' de LM 358 op-amp entegresinin iç şeması verilmiştir. Uygulamada 1, 2 ve 3 Nolu pinlerine bağlı olan op-amp kullanılmıştır.



Şekil 4.6: LM358 OP-AMP iç şeması.

LM358, genel amaçlı bir çift operasyonel amplifikatör (opamp) entegresidir. Bu entegre, geniş bir uygulama alanında kullanılabilir ve birçok elektronik devre tasarımında tercih edilmektedir.

4.6 SD Kart Modülü ve Özellikleri

Test devresinde elde edilen akım gerilim gibi veriset'lerini kayıt edebilmek için bir sd kart birimine ihtiyaç duyulmuştur. Şekil 4.7'de mikro-sd kart modülünün görünümü verilmiştir.

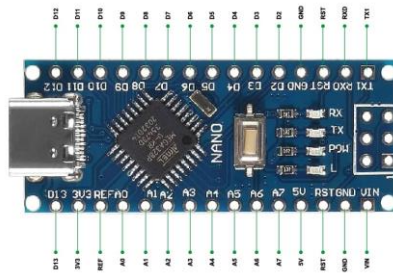


Şekil 4.7: Micro-SD kart modülü.

Tipik olarak 3.3V veya 5V ile çalışabilir. Micro SD kart modülleri genellikle SPI (Serial Peripheral Interface) arayüzünü kullanır. SPI, veri iletimi için kullanılan bir seri haberleşme protokolüdür. SPI haberleşmesinde kullanılan chip select pini, mikrodenetleyiciye bağlanarak kartın seçilip işleme alınmasını sağlar. MicroSD kart modülleri genellikle belirli bir veri aktarım hızına sahiptir.

4.7 Arduino Nano ve Genel Özellikleri

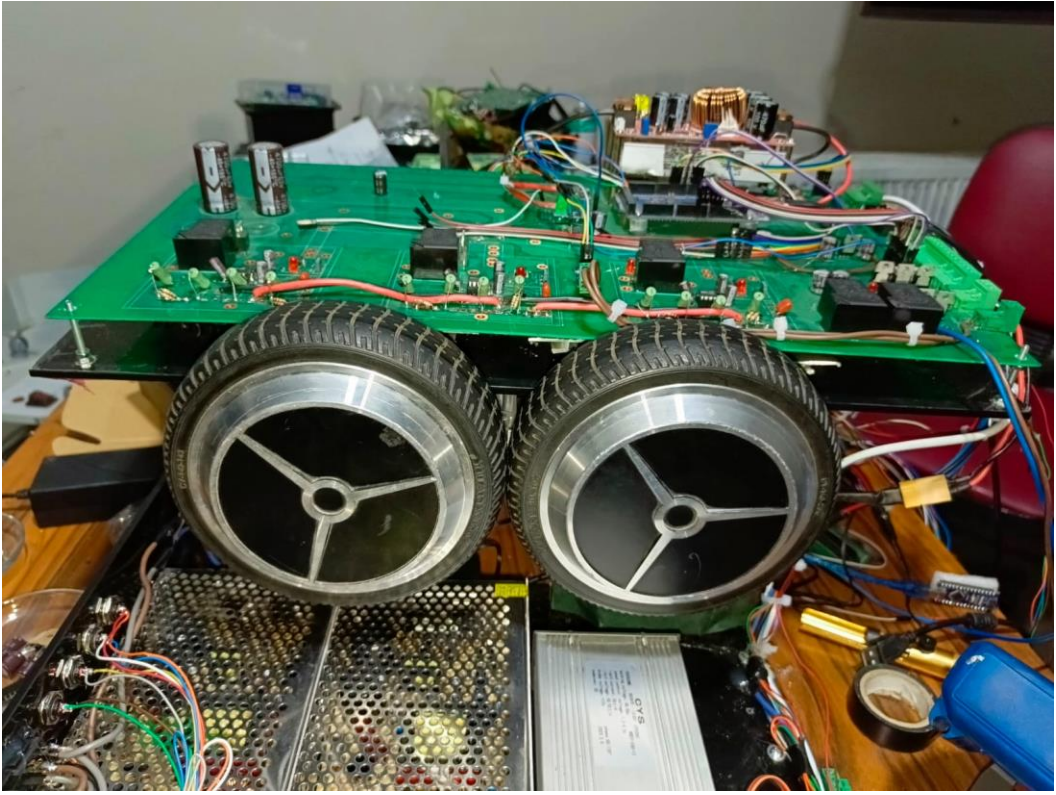
Test palatformu için tasarlanan test kontrol devresinde mikrodenetleyici olarak arduino Nano kullanılmıştır. Arduino Nano, genellikle Atmel (günümüzde Microchip Technology) tarafından üretilen ATmega328P mikrodenetleyiciye sahiptir. Arduino Nano, 5V veya 3.3V ile çalışabilir. Toplamda 14 adet dijital I/O pini, 6 adet PWM çıkışı ve 8 adet analog giriş pini bulunur. 16 MHz saat hızına sahiptir. 32 KB Flash bellek ve geçici veri depolamak için kullanılan SRAM'a sahiptir. ATmega328P'de 2 KB SRAM bulunur.



Şekil 4.8: Arduino nano mikrodenetleyici ve pin diyagramı.

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

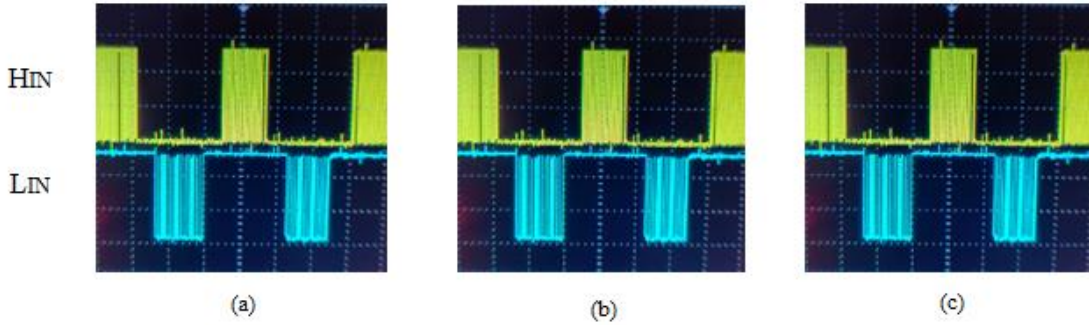
Bu tez çalışmasında EA'larda kullanılan FDAM'lerin laboratuvar modellemesi yapıp rejeneratif mod ve normal mod çalışması test edilmiştir. Şekil 5.1'de test platformu ve kullanılan motorlar verilmiştir. Kullanılan motorlar 350W olup batarya ise 42V 4.4A'dır. Motor sürücüsünde ise 55V, 95A mosfet'ler kullanılmıştır. Şekil 5.1'deki test platformunda iki adet motor kullanılmış olup motorlardan bir tanesi yük olarak, diğeri rejeneratif çalışma modunda sürüş devamını sağlamak için tasarlanmıştır. Sürücüde üç ayrı sürüş profili test edilmiş olup bu üç sürüş profillerinin karşılaştırılmaları yapılmıştır.



Şekil 5.1: Test platformunda kullanılan FDAM.

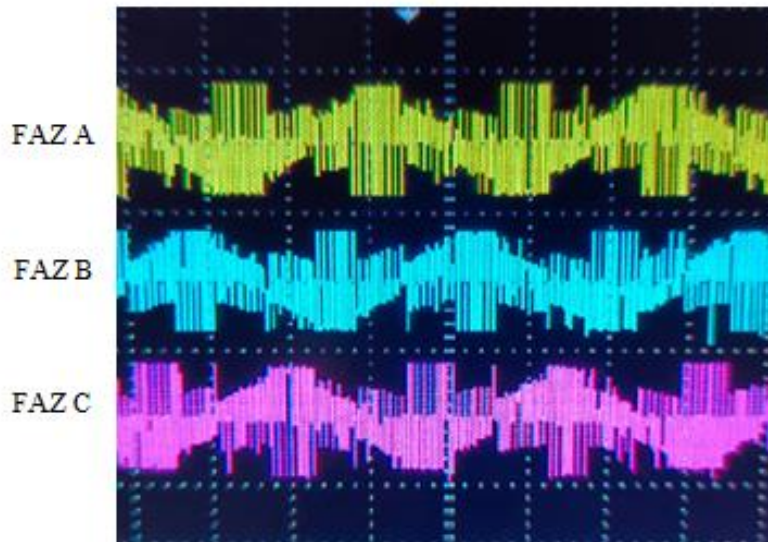
Test platformu için tasarlanmış olan rejeneratif FDAM sürücü kartında kullanılan arduino mega mikrodenetleyicisindeki her bir faz için oluşturulan PWM çıkış sinyali osiloskop ile ölçülmüş olup Şekil 5.2'de PWM çıkış sinyallerinin osiloskop görüntüleri verilmiştir. Her bir faz için mikrodenetleyiciden iki çıkış verilmiş olup üç faz köprü devresi yarım dalga sürücü olarak tasarlanmasından dolayı bu çıkışlardan bir tanesinden PWM uygulanırken diğesine 1 veya 0 uygulanmıştır.

Şekil 5.2'deki Mikrodenetleyici A-B-C fazları PWM çıkış sinyalleri, incelenecek olursa A, B, C fazları için oluşturulan sinyallerin her birinde alt ve üst anahtarlama elemanlarının güç kaynağının pozitif ve negatif kutuplarının kısa devre konumuna gelmemesi için aynı anda anahtarlama yapılmadığı görülmektedir.



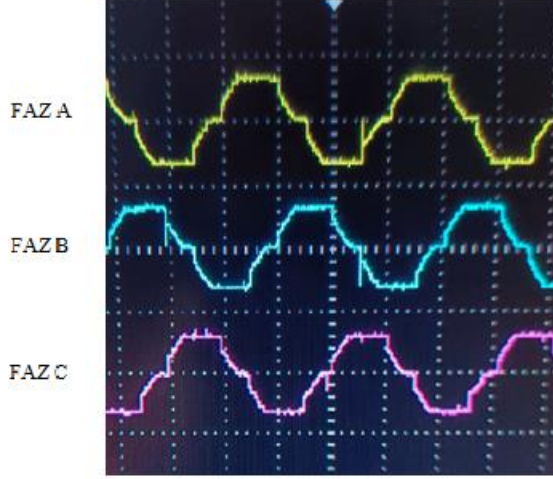
Şekil 5.2: Mikrodenetleyici A-B-C fazları PWM çıkış sinyalleri; a) Faz A, b) Faz B, c) Faz C.

Mikrodenetleyici tarafından üretilen bu üç çift sinyal IR2103 sürücü entegresinin H_{IN} ve L_{IN} girişlerine uygulanmış ve IR2103 sürücü entegresinin çıkışından A, B, C mosfet gate girişlerinde trapezoidal zıt EMK eğrisinin oluşması sağlanmıştır. Anahtarlama elemanı olarak kullanılan mosfet çıkışlarından A, B, C fazları elde edilmiş olur. Şekil 5.3'de Motor durumunda A-B-C fazlarının çıkış sinyalleri verilmiştir. Osiloskop yardımıyla elde edilen sinyaller incelenecek olursa her bir sinyalin trapezoidal zıt EMK olduğu ve Bu sinyallerin birbirleriyle aralarında 120^0 faz farkının olduğu anlaşılmaktadır.



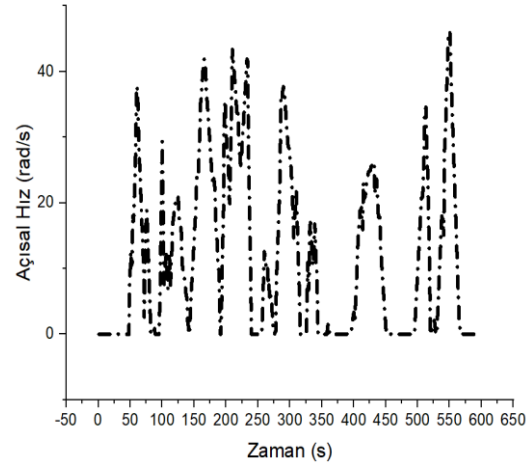
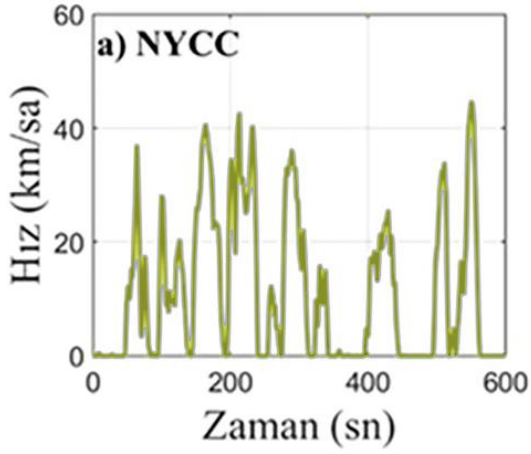
Şekil 5.3: Motor durumunda A-B-C fazlarının çıkış sinyalleri.

Tasarımı gerçekleştirilen rejeneratif FDAM sürücüsünün rejeneratif modda çalıştırılmasıyla FDAM jeneratör olarak çalışmaya başlar ve A, B, C fazlarında üç faz gerilim elde edilir. Şekil 5.4’de elde edilen rejeneratif durumda A-B-C fazlarının sinyalleri verilmiştir. Osiloskop yardımıyla elde edilen sinyaller incelenecek olursa her bir sinyalin sinüsoidal zıt EMK olduğu ve bu sinyallerin birbirleriyle aralarında 120^0 faz farkının olduğu anlaşılmaktadır.

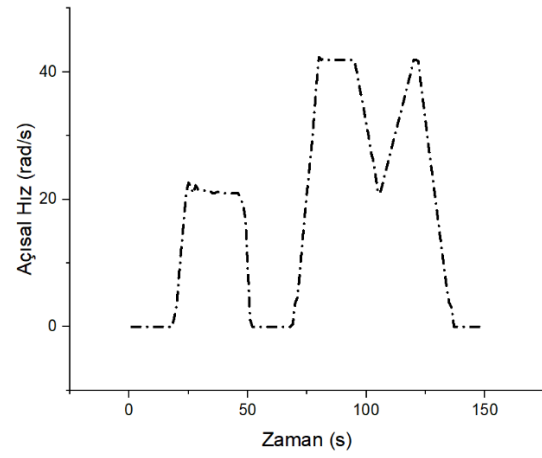
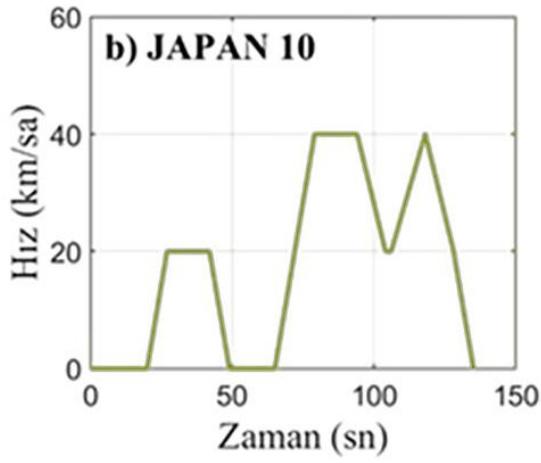


Şekil 5.4: Rejeneratif durumda A-B-C fazlarının sinyalleri.

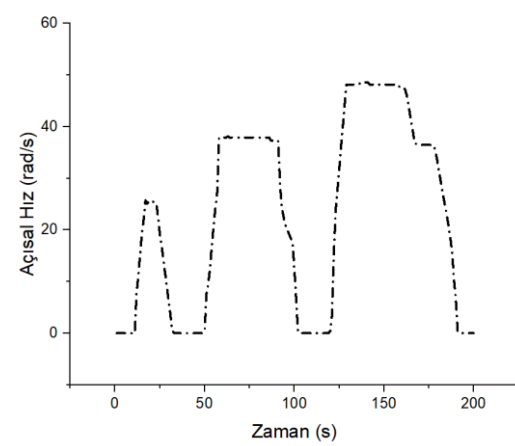
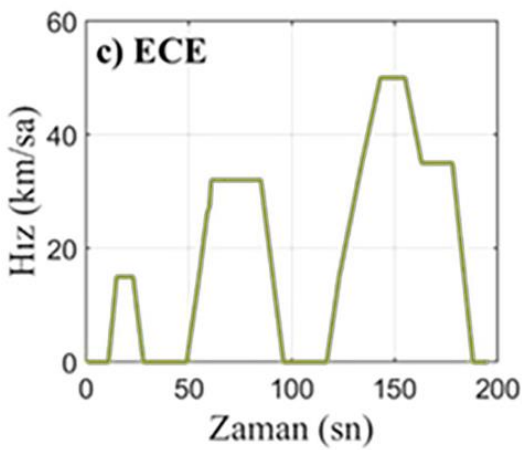
Tasarımı gerçekleştirilen FDAM sürücüsüyle ECE, JAPAN 10 ve NYCC sürüş profillerinin hem rejeneratif hemde normal çalışma modlarında test platformu üzerinde testleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.5’te Sürüş profilleri hız zaman değişimleri ile elde edilen hız zaman değişimlerinin karşılaştırılması sağlanmıştır. Karşılaştırma sonucunda aynı hız zaman değişimlerinin elde edildiği anlaşılmıştır.



(a)



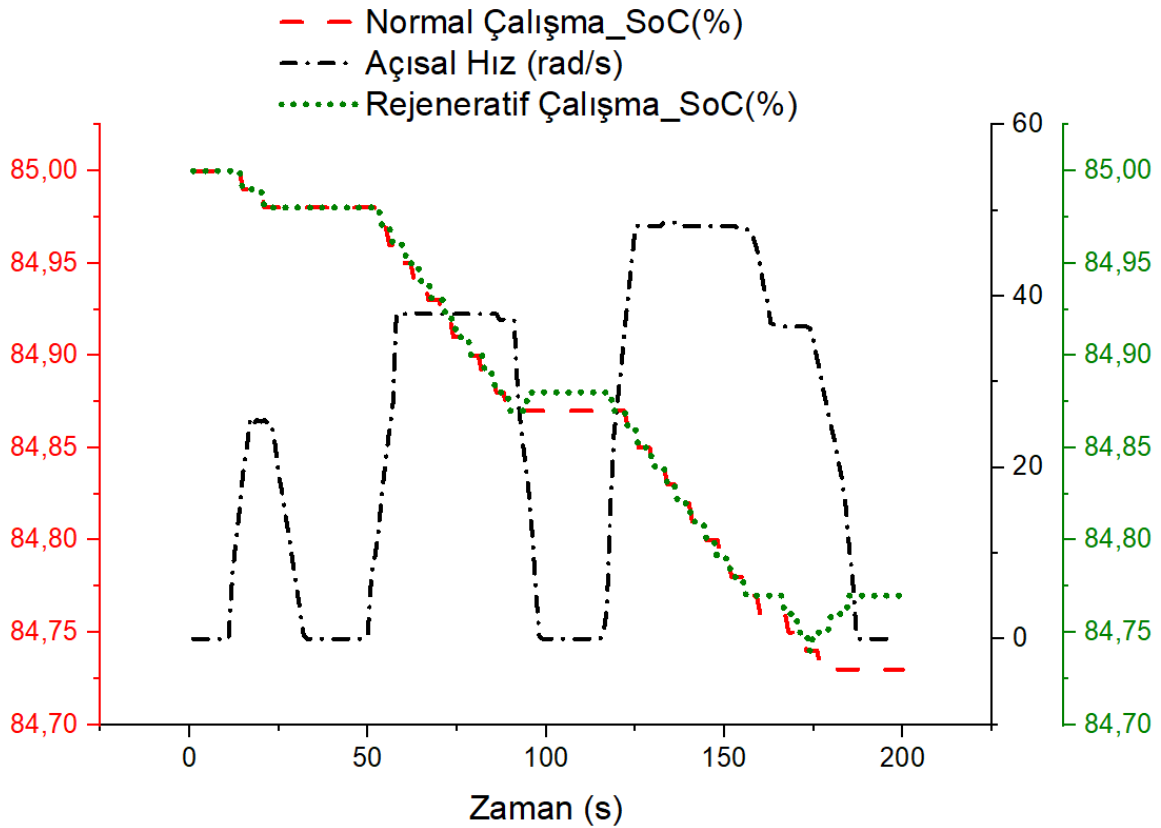
(b)



(c)

Şekil 5.5: Sürüş profilleri zaman hız değişimleri ile elde edilen hız zaman değişimlerinin karşılaştırılması; a) NYCC sürüş profili, b) Japan 10 sürüş profili, c) Ece sürüş profili.

Şekil 5.6'de ECE sürüş profili için zamana bağlı hız, rejeneratif SoC ve normal SoC değerleri karşılaştırılmıştır. Bataryadan enerji harcanması durumunda SoC değeri zaman ilerledikçe azalması gerekmektedir. Şekil 5.6'daki ECE sürüş profili zamana bağlı SoC değerlerinin hız ile birlikte karşılaştırılması incelendiğinde hem rejeneratif hem normal mod için SoC değerinin azaldığı görülmüştür. Her iki mod için yapılan testlerde batarya kapasitesi %85 değerinden başlatılmıştır. Rejeneratif mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.77 ile bitirilmiş olup normal mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.73 ile bitmiştir. Yapılan hesaplamada 200 saniyede batarya kapasitesi yönünden rejeneratif mod normal moda göre % 0.04 avantajlı olduğu görülmüştür. Elde edilen test sonuçlarına göre rejeneratif sürücünün batarya kapasitesinin normal sürücünün batarya kapasitesinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.

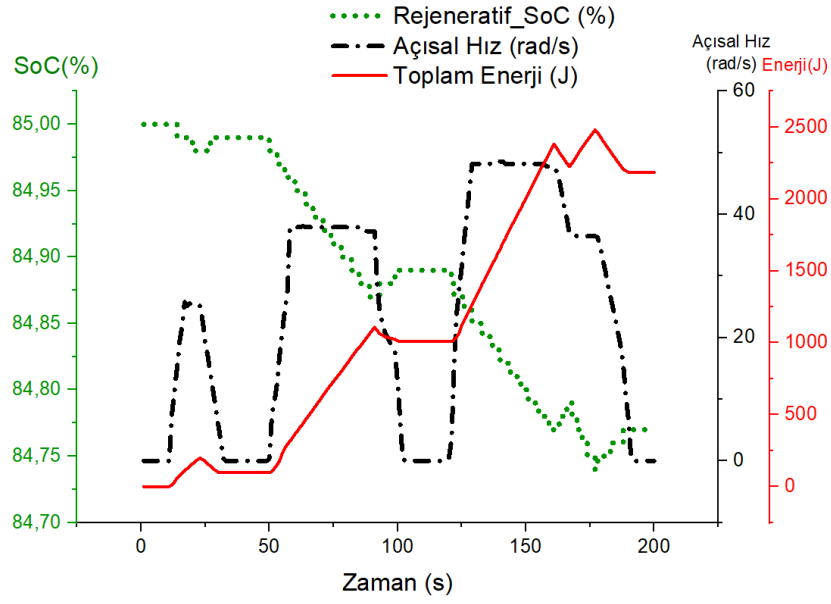


Şekil 5.6: ECE sürüş profili zamana bağlı SoC değerlerinin hız ile birlikte karşılaştırılması.

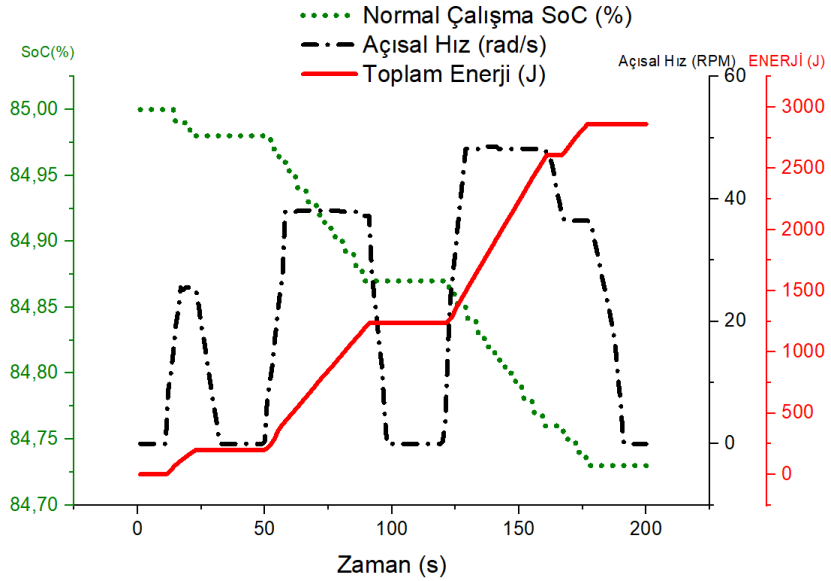
Şekil 5.7'de ECE sürüş profili için zamana bağlı SoC(%), hız ve enerji(J) değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.7 (a) rejeneratif mod değişimini ve Şekil 5.7 (b) normal mod değişimini göstermektedir. Şekil 5.7 (a) Rejeneratif mod ve (b) normal mod karşılıklı incelendiğinde her iki değişimde zaman ilerledikçe SoC (%) değerinin azaldığı ve Enerji(J)

gereksiniminin arttığı görünmektedir. Rejeneratif mod aktifken motorun durma anında SoC(%) değerinin mevcut durumundan artışa geçtiği ve toplam enerji (J) ihtiyacının mevcut durumundan dahada azaldığı görülmektedir. Normal mod çalışmada motorun durma anında SoC(%) değerinin mevcut durumunu koruduğu ve toplam enerji (J) ihtiyacının da mevcut durumunu koruduğu görülmektedir.

Bu durum rejeneratif çalışma modunun, normal çalışma modundan enerji gereksinimi ve batarya doluluk oranları açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.



(a)

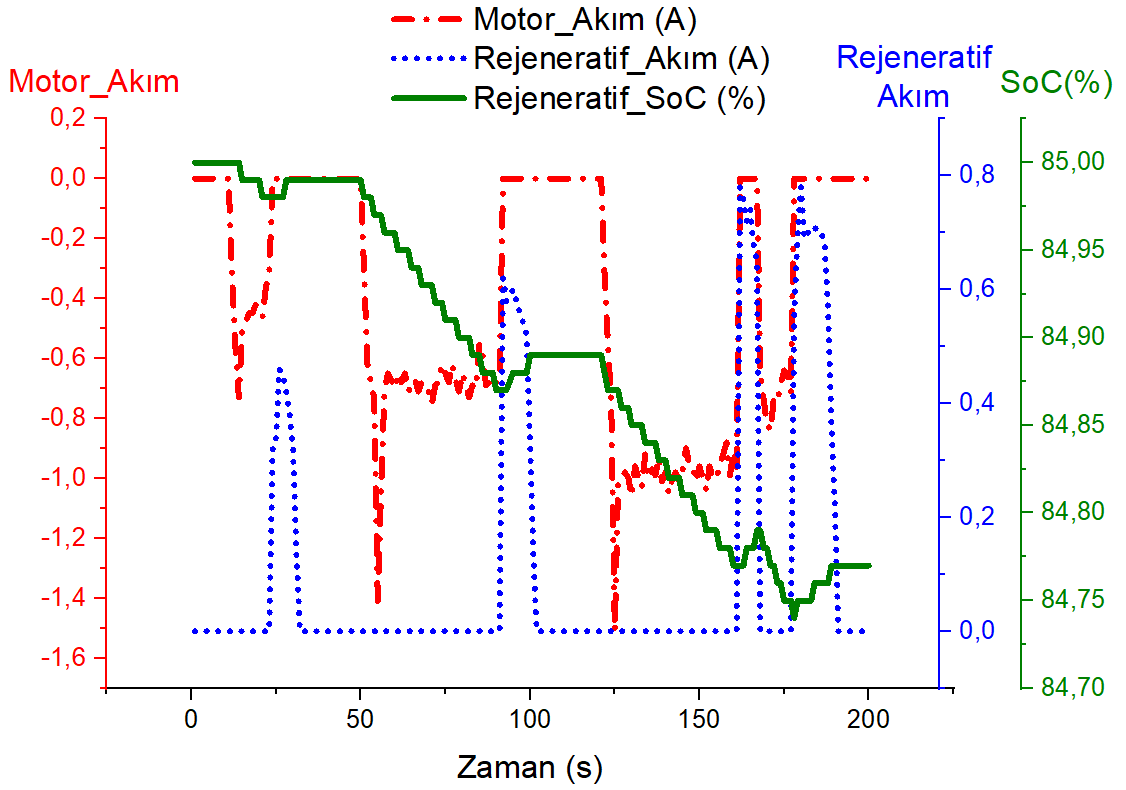


(b)

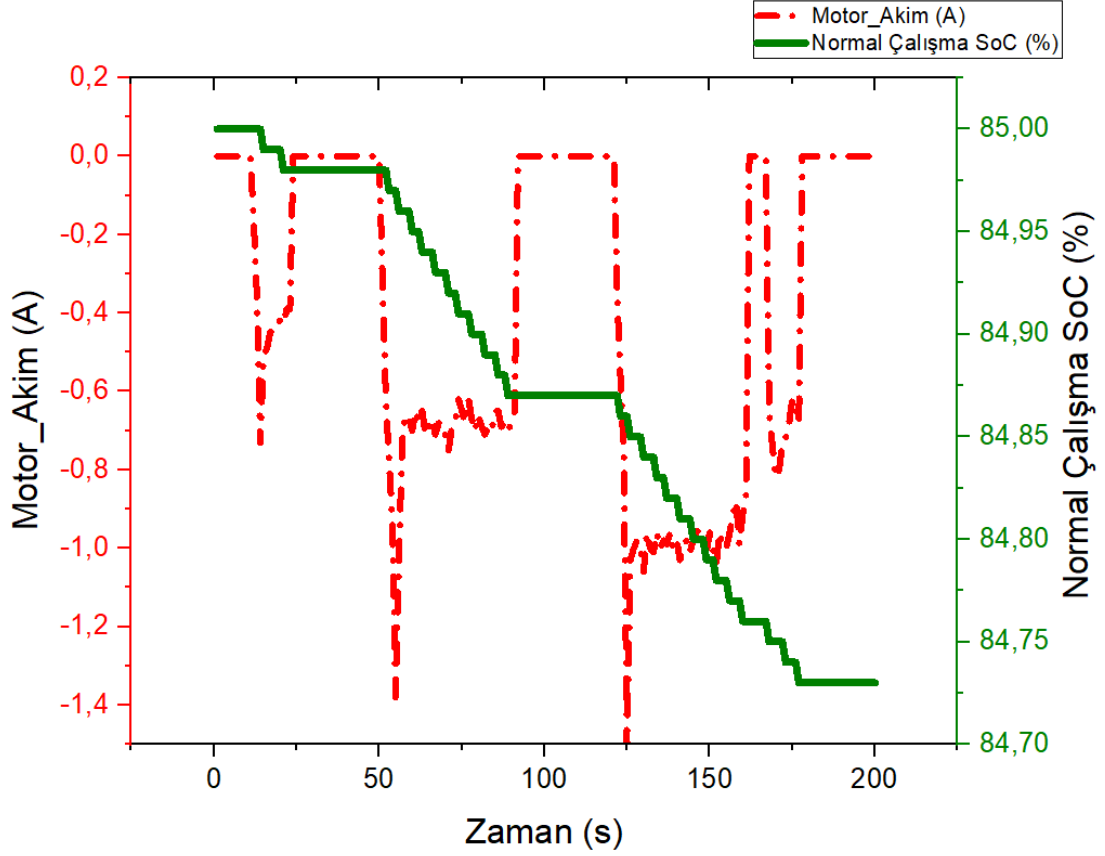
Şekil 5.7: ECE zamana bağlı, hız ve enerji değerlerinin karşılaştırılması; a) Rejeneratif çalışma modu, b) Normal çalışma modu.

Şekil 5.8’de ECE sürüş profili için (a) Zamana bağlı rejeneratif mod rejeneratif akım, motor akımı ile SoC değerleri ve (b) Zamana bağlı normal mod motor akımı ile SoC değerleri görülmektedir.

Şekil 5.8 (a) ‘daki değişimler incelendiğinde rejeneratif akımda yükseliş olduğu anlarda akımın yükseliş’de kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumunu koruduğu ya da artış olduğu gözlenirken rejeneratif modda motor akımındaki yükseliş olduğu anlarda akımın yükseliş’ de kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumunda düşüş olduğu gözlenmiştir. Rejeneratif mod rejeneratif akımında yükseliş olduğu SoC seviyesinde anlık artışlar bataryanın şarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin arttığını göstermektedir. Rejeneratif mod rejeneratif motor akımında yükseliş olduğu ve SoC seviyesinde anlık düşüşler bataryanın deşarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin düştüğünü göstermektedir. Şekil 5.8 (b)‘deki normal çalışma modu için değişimler incelendiğinde SoC değerinin sürekli olarak düştüğü motorun akım çekmesi kesildiğinde mevcut durumunu koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EA’ların rejeneratif çalışma modunda kullanılmasının menzil açısından avantaj sağlayacağını göstermiştir.



(a)



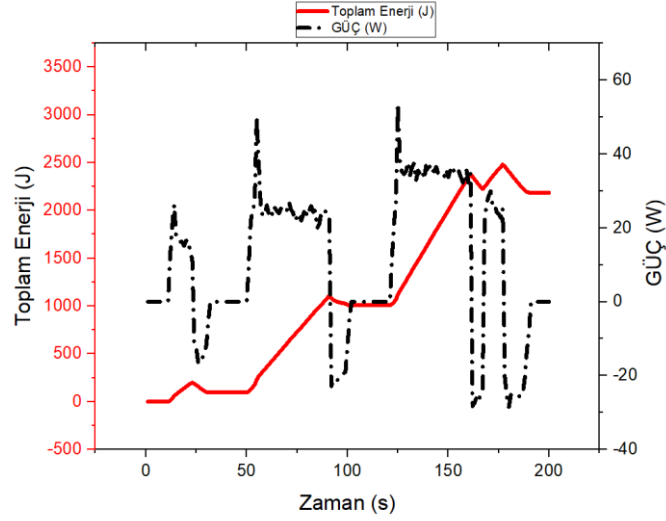
(b)

Şekil 5.8: ECE zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması; (a) Rejeneratif çalışma modu
(b) Normal çalışma modu

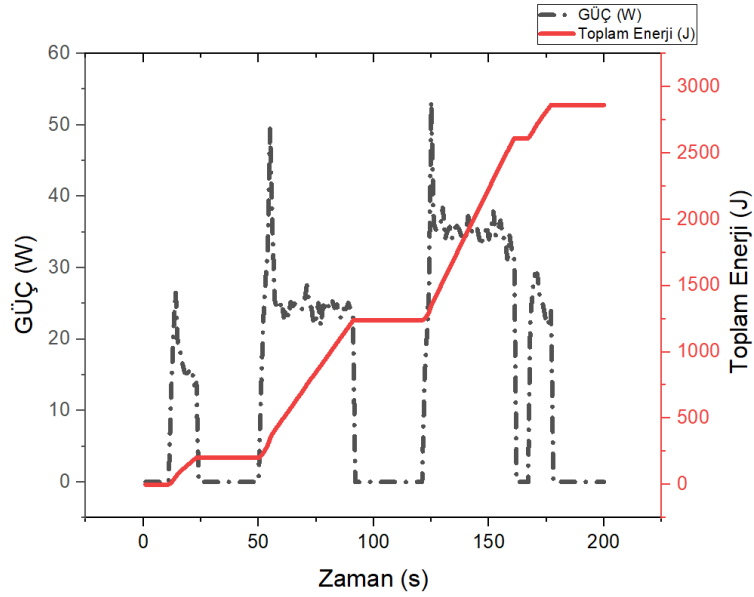
Şekil 5.9’de ECE sürüş profili için zamana bağlı güç ve toplam enerji değerleri (a) rejeneratif mod ve (b) normal mod için karşılaştırılma yapılmıştır. Şekil 5.9 (a)’da rejeneratif mod değişimi incelendiğinde güç değerinin frenleme anında pozitif değerden negatif değere düştüğü gözlenmiştir. Bu durum güç kazanımının sağlandığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin pozitif değerden negatif değere düştüğü anda enerji gereksiniminin azaldığı gözlenmektedir. Şekil 5.9 (b)’de normal mod değişimi incelendiğinde güç değerinin frenleme anında 0 değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum herhangi bir güç kazanımının olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin 0 değerine düştüğü anda enerji gereksiniminin mevcut durumunu koruduğu gözlenmektedir.

Verisetinden elde edilen verilere göre Şekil 5.9 (a) rejeneratif mod için 200 saniyede toplam harcanan enerji 2840.36W ve 200 saniyede kazanılan enerji miktarı 653.39W’dır. Buradan birim zamanda harcanan güç 14.20W/s ve birim zamanda kazanılan güç 3.26W/s elde edilir. Rejeneratif kazanım ise %22.95 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.9

(b) normal mod için 200 saniyede toplam harcanan enerji 2847.90W'dır. Buradan birim zamanda harcanan güç 14.23W/s ve birim zamanda kazanılan güç yoktur. Dolayısıyla rejeneratif kazanım da yoktur.



(a)

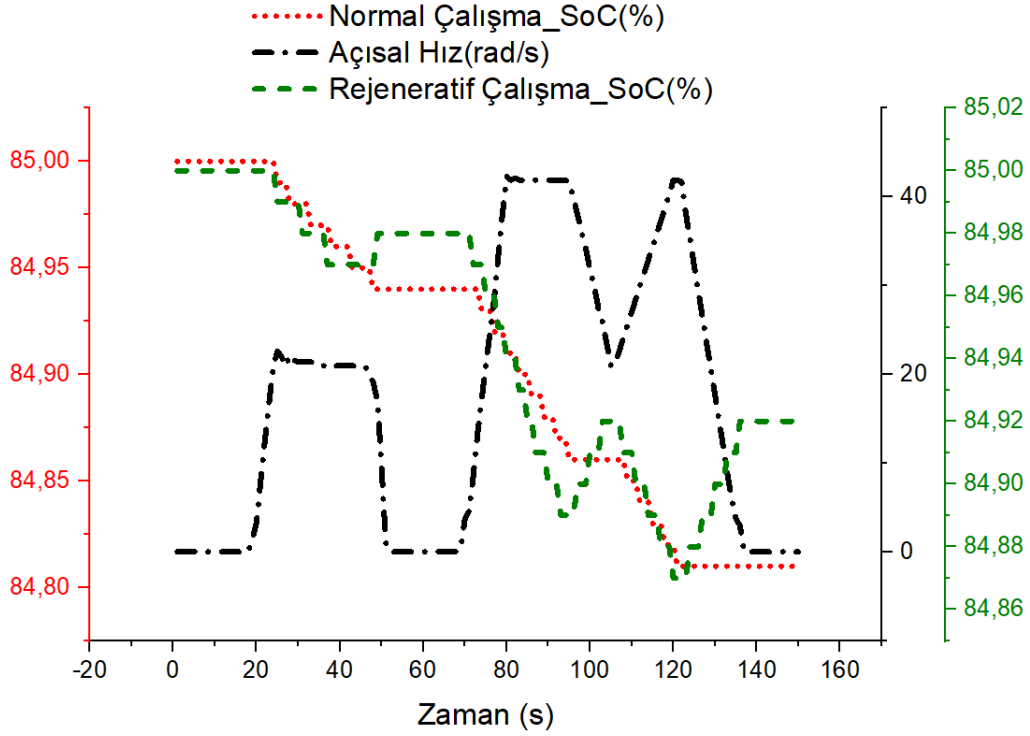


(b)

Şekil 5.9 ECE zamana bağlı güç ve toplam enerji; a)Rejeneratif çalışma modu, b)Normal çalışma modu.

Şekil 5.10'da Japon 10 sürüş profili için zamana bağlı rejeneratif SoC ile normal SoC değerleri karşılaştırılmıştır. Bataryadan enerji harcanması durumunda SoC değeri zaman ilerledikçe azalması gerekmektedir. Şekil 5.10'daki Japon 10 sürüş profili için zamana bağlı rejeneratif SoC ile normal SoC değerleri incelendiğinde hem rejeneratif hem normal mod için SoC değerinin azaldığı görülmüştür. Her iki mod için yapılan test'de

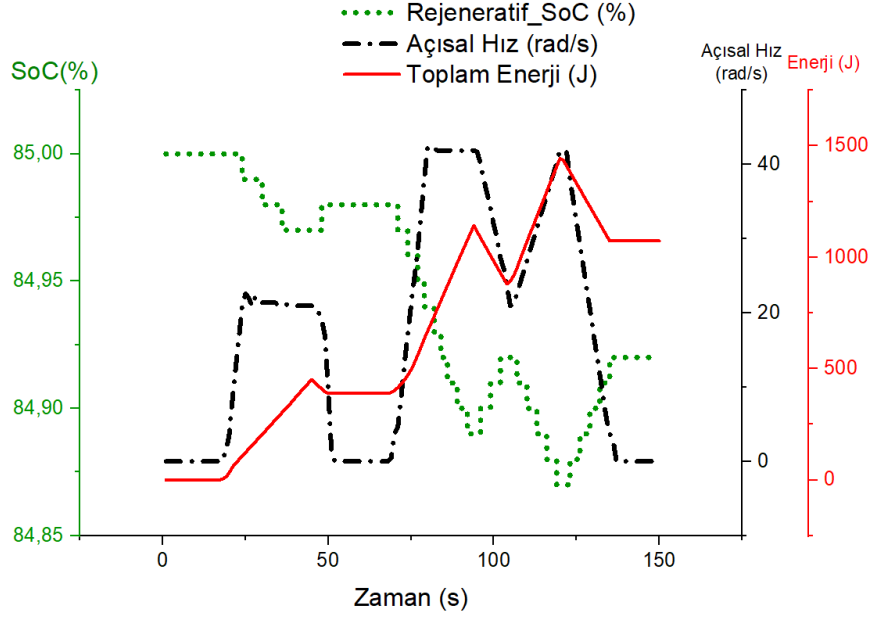
batarya kapasitesi %85 değerinden başlatılmıştır. Rejeneratif mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.92 ile bitirilmiş olup normal mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.81 ile bitmiştir. Yapılan hesaplamada 150 saniyede batarya kapasitesi yönünden rejeneratif mod normal moda göre % 0.11 avantajlı olduğu görülmüştür. Elde edilen test sonuçlarına göre rejeneratif sürücünün batarya kapasitesinin normal sürücünün batarya kapasitesinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.



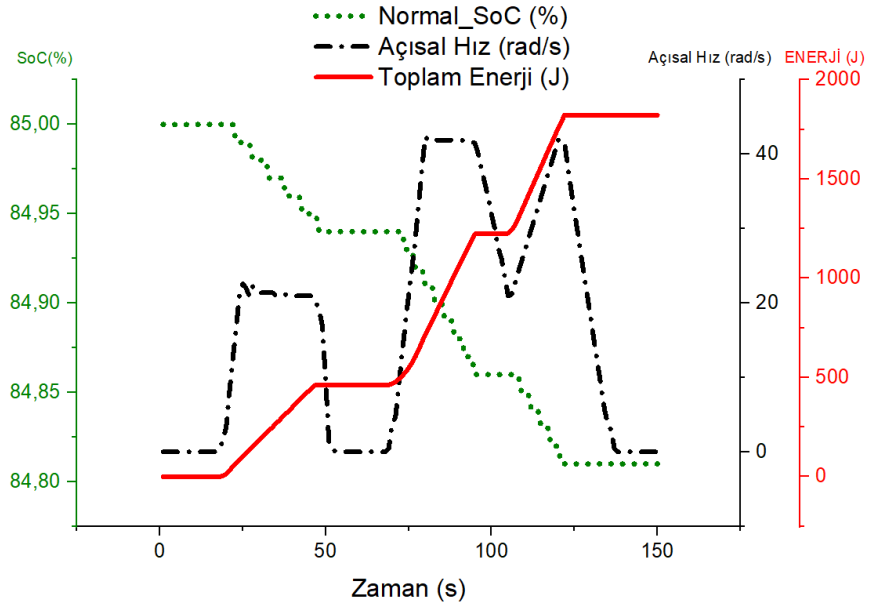
Şekil 5.10: JAPAN10 sürüş profili zamana bağlı SoC değerlerinin hız ile birlikte karşılaştırılması.

Şekil 5.11’de JAPON10 sürüş profili için zamana bağlı SoC(%), hız ve enerji (J) değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.11 (a)’da rejeneratif mod değişimini ve Şekil 5.11 (b)’de normal çalışma modu gösterilmektedir. Şekil 5.11 (a)’da rejeneratif mod ve (b) normal mod karşılıklı incelendiğinde her iki değişimde zaman ilerledikçe SoC (%) değerinin azaldığı ve enerji(J) gereksiniminin arttığı görülmektedir. rejeneratif mod’da motorun durma anında SoC(%) değerinin mevcut durumundan artışa geçtiği ve toplam enerji (J) ihtiyacının mevcut durumundan daha azaldığı görülmektedir. Normal çalışma modunda motorun durma anında SoC(%) değerinin mevcut durumunu koruduğu ve Toplam Enerji (J) ihtiyacının da mevcut durumunu koruduğu görülmektedir.

Bu durum rejeneratif modun, normal moddan enerji gereksinimi ve batarya doluluk oranları açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.



(a)

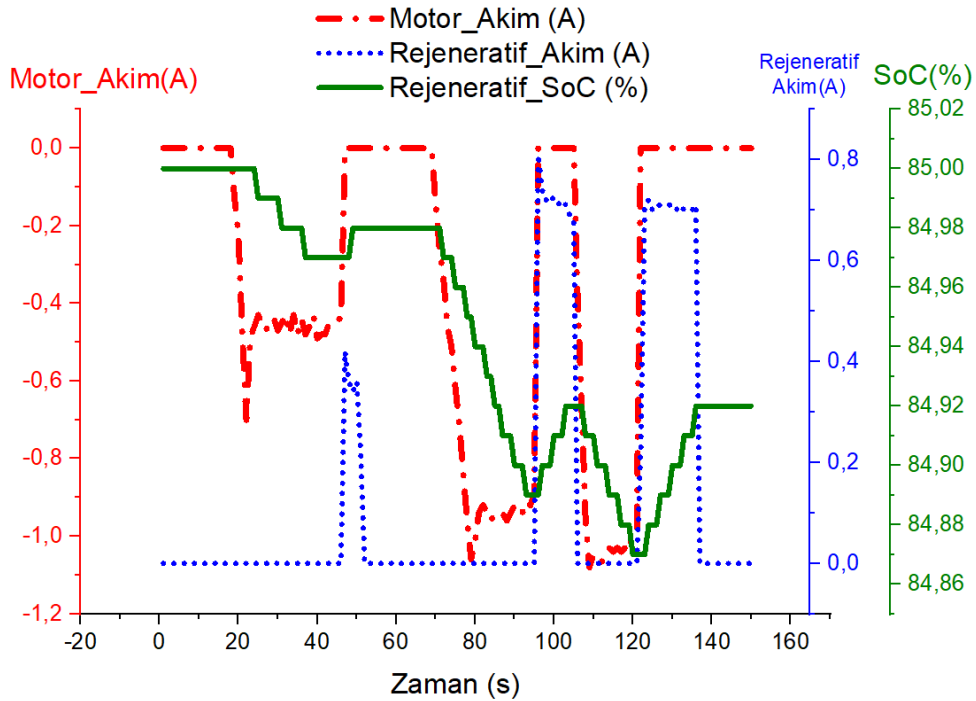


(b)

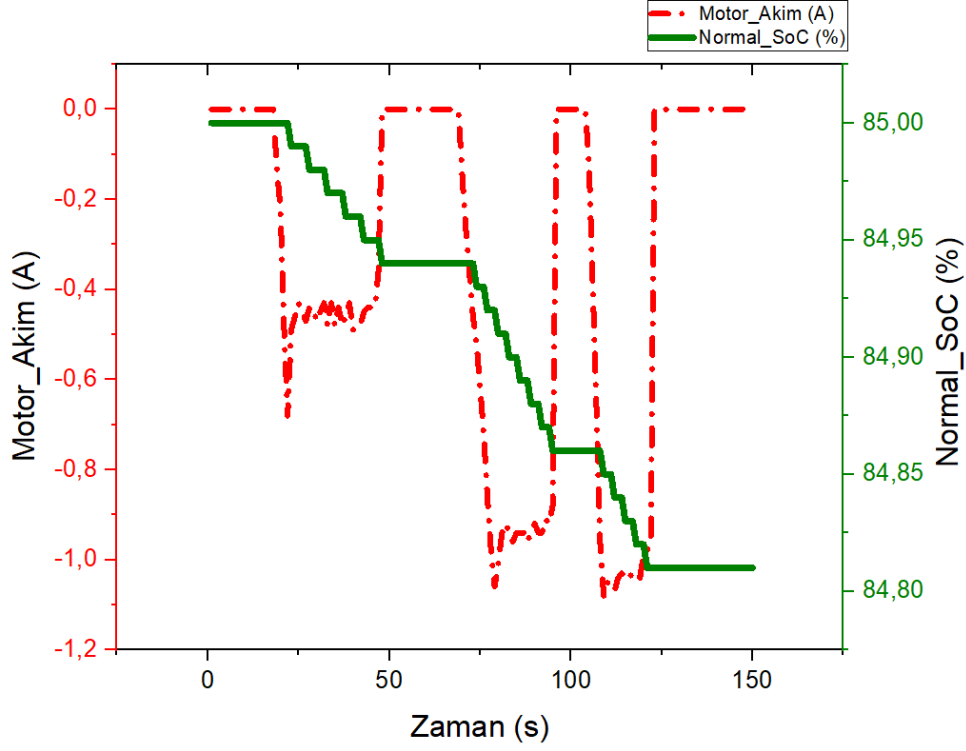
Şekil 5.11: JAPON10 zamana bağlı SoC, hız ve enerji değerlerinin karşılaştırılması; a) Rejeneratif çalışma modu, b) Normal çalışma modu.

Şekil 5.12’de JAPON10 sürüş profili için; (a) Zamana bağlı rejeneratif mod rejeneratif akım, motor akımı ile SoC değerleri ve (b) Zamana bağlı normal mod motor akımı ile SoC değerlerinin değişimleri görülmektedir.

Şekil 5.12 (a)'daki rejeneratif çalışma modu için JAPAN 10 zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması incelendiğinde, rejeneratif akımda yükseliş olduğu anlarda akımın yükseliş'te kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumu koruduğu veya artış olduğu gözlenirken rejeneratif mod'da motor akımındaki yükseliş olduğu anlarda akımın yükseliş'te kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumunda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Rejeneratif mod rejeneratif akımında yükseliş olduğu SoC seviyesindeki anlık artışlar bataryanın şarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin arttığını göstermektedir. Rejeneratif mod rejeneratif motor akımında yükseliş olduğu ve SoC seviyesinde anlık düşüşler bataryanın deşarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin düştüğünü göstermektedir. Şekil 5.12 (b)'deki normal çalışma modu için JAPAN10 zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması incelendiğinde SoC değerinin sürekli olarak düştüğü motorun akım çekmesi kesildiğinde mevcut durumu koruduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, EA'ların rejeneratif çalışma modunda kullanılmasının menzil açısından avantaj sağlayacağını göstermiştir.



(a)



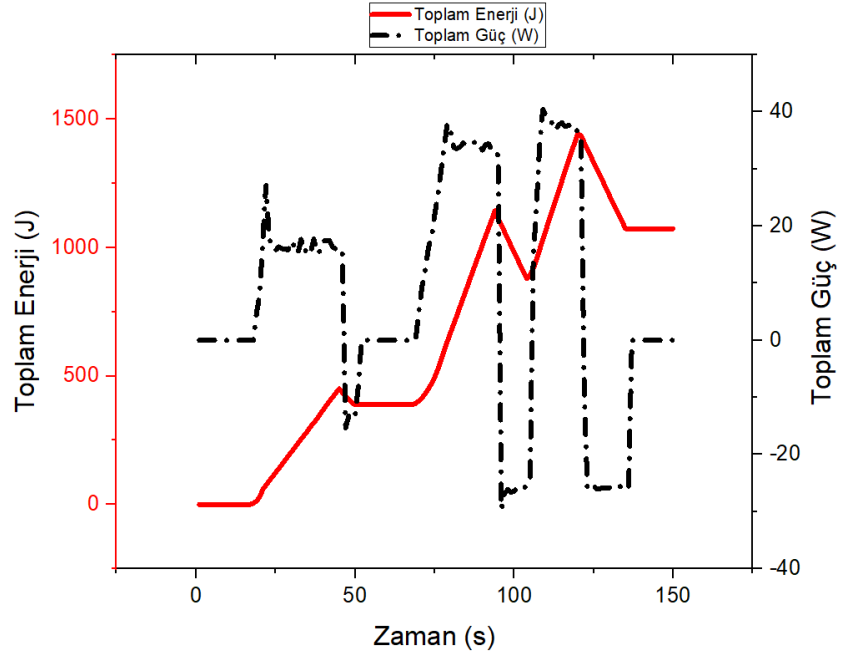
(b)

Şekil 5.12: JAPAN10 zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması; (a), Rejeneratif çalışma modu (b) Normal çalışma modu.

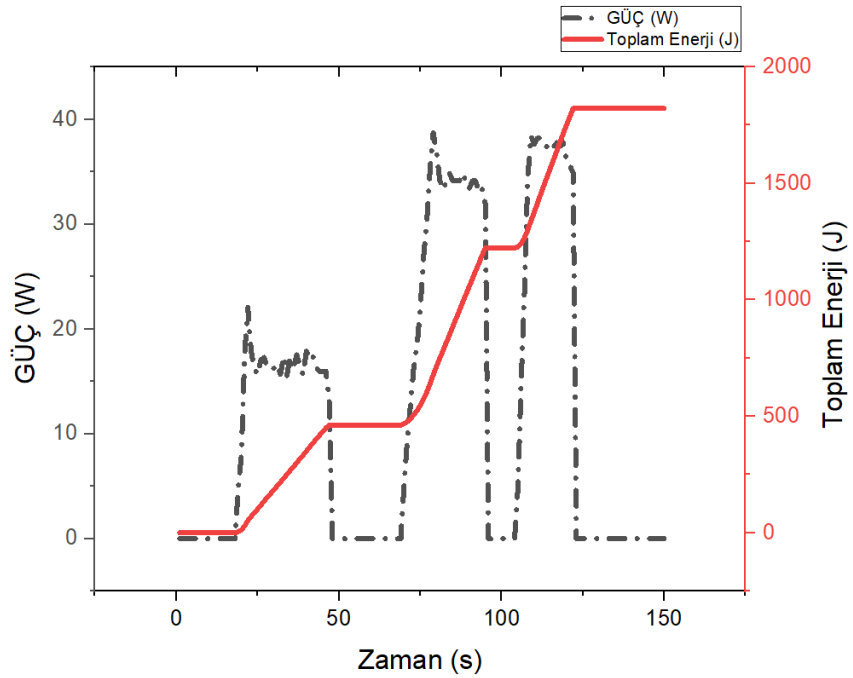
Şekil 5.13'te ECE sürüş profili için zamana bağlı güç ve toplam enerji değerleri a) rejeneratif mod ve b) normal mod için karşılaştırılma yapılmıştır. Şekil 5.13 (a)'da rejeneratif moddaki değişim incelendiğinde güç değerinin frenleme anında pozitif değerden negatif değere düştüğü gözlenmiştir. Bu durum güç kazanımının sağlandığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin pozitif değerden negatif değere düştüğü anda enerji gereksiniminin azaldığı gözlenmektedir. Şekil 5.13 (b)'de normal moddaki değişim incelendiğinde güç değerinin frenleme anında 0 değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum herhangi bir güç kazanımının olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin 0 değerine düştüğü anda enerji gereksiniminin mevcut durumunu koruduğu gözlenmektedir.

Verisetinden elde edilen verilere göre Şekil 5.13 (a)'da rejeneratif mod için 150 saniyede toplam harcanan enerji 1768.67W ve 150 saniyede kazanılan enerji miktarı 695.01W'dır. Buradan birim zamanda harcanan güç 11.79W/s ve birim zamanda kazanılan enerji 4.63W/s elde edilir. Rejeneratif kazanım ise %39.27 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.13 (b)'de normal mod için 150 saniyede toplam harcanan enerji 1822.11W'dır. Buradan

birim zamanda harcanan enerji 12.14W/s ve birim zamanda kazanılan güç yoktur. Dolayısıyla rejeneratif kazanım da yoktur.



(a)

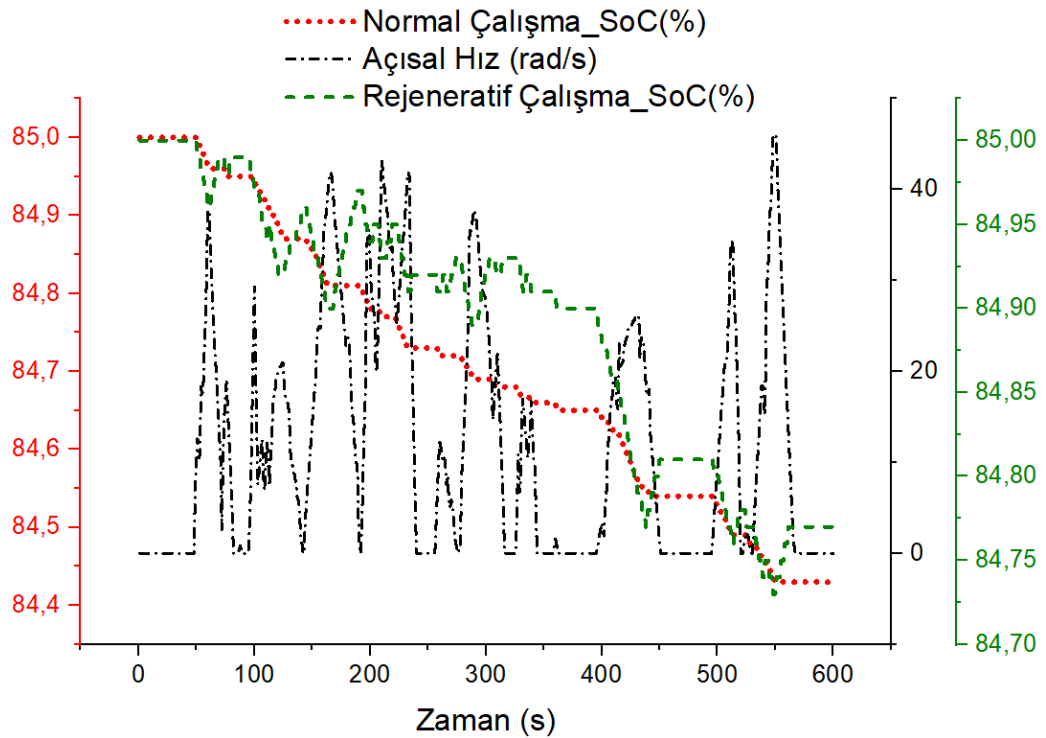


(b)

Şekil 5.13: JAPON10 zamana bağlı güç ve toplam enerji; a)Rejeneratif modu, b)Normal mod.

Şekil 5.14'te NYCC sürüş profili için zamana bağlı rejeneratif çalışma SoC ve normal çalışma SoC değerleri ile hız değerleri karşılaştırılmıştır. Bataryadan enerji

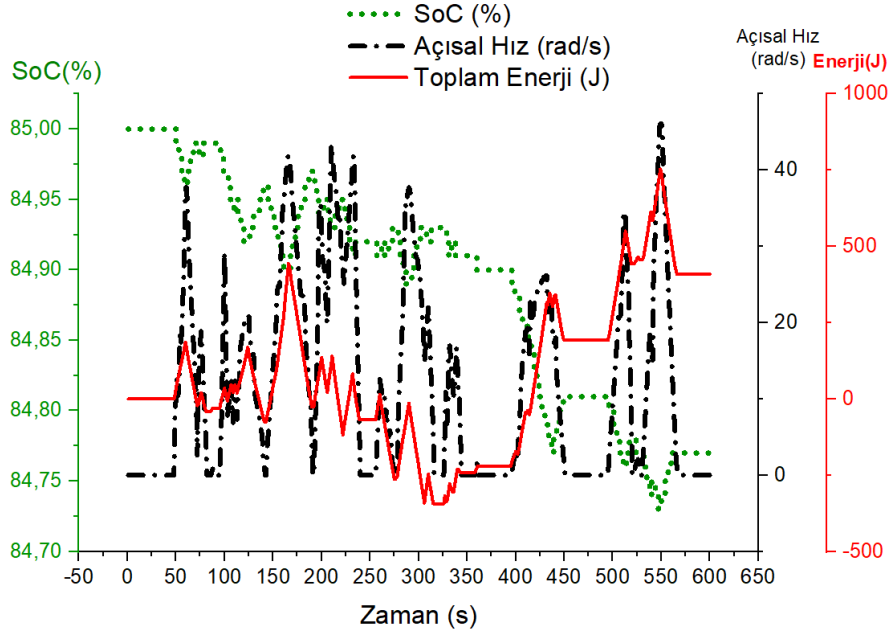
harcanması durumunda SoC değeri zaman ilerledikçe azalması gerekmektedir. Şekil 5.14'teki NYCC sürüş profili zamana bağlı hız ve SoC değerleri incelendiğinde hem rejeneratif hem normal mod için SoC değerinin azaldığı görülmüştür. Her iki mod için yapılan test'de batarya kapasitesi %85 değerinden başlatılmıştır. Rejeneratif mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.77 ile bitirilmiş olup Normal mod için yapılan test %85 den başlatılmış %84.43 ile bitmiştir. Yapılan hesaplamada 600 saniyede batarya kapasitesi yönünden rejeneratif mod normal moda göre % 0.34 avantajlı olduğu görülmüştür. Elde edilen test sonuçlarına göre rejeneratif sürücünün batarya kapasitesinin normal sürücünün batarya kapasitesinden daha yüksek olduğu anlaşılmıştır.



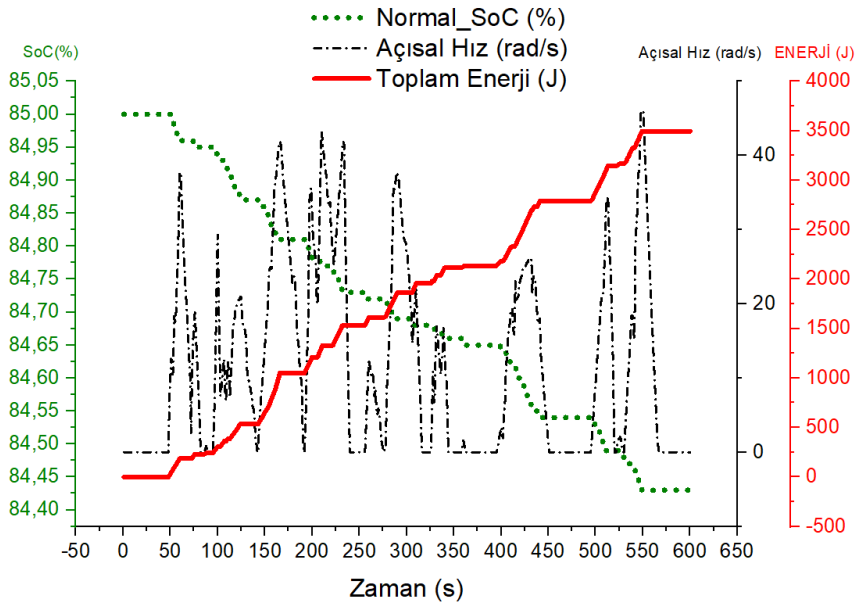
Şekil 5.14: NYCC sürüş profili zamana bağlı hız ve SoC değerlerinin karşılaştırılması.

Şekil 5.15'de NYCC sürüş profili için zamana bağlı SoC(%), hız ve enerji (J) değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 5.15 (a)'da Rejeneratif çalışma modu ve Şekil 5.15 (b)'de normal çalışma modu gösterilmektedir. Şekil 5.15 (a) rejeneratif mod ve (b) normal mod karşılıklı incelendiğinde zaman ilerledikçe SoC (%) değerinin azaldığı ve enerji(J) gereksiniminin arttığı görünmektedir. Rejeneratif modda motorun durma anında SoC(%) değerinin mevcut durumundan artışa geçtiği ve toplam enerji (J) ihtiyacının mevcut durumundan daha azaldığı görülmektedir. Normal mod çalışmada motorun durma anında

SoC(%) değerinin mevcut durumunu koruduğu ve toplam enerji (J) ihtiyacının da mevcut durumunu koruduğu görülmektedir. Bu durum rejeneratif çalışma modunun, normal çalışma modundan enerji gereksinimi ve batarya doluluk oranları açısından avantajlı olduğunu göstermektedir.



(a)

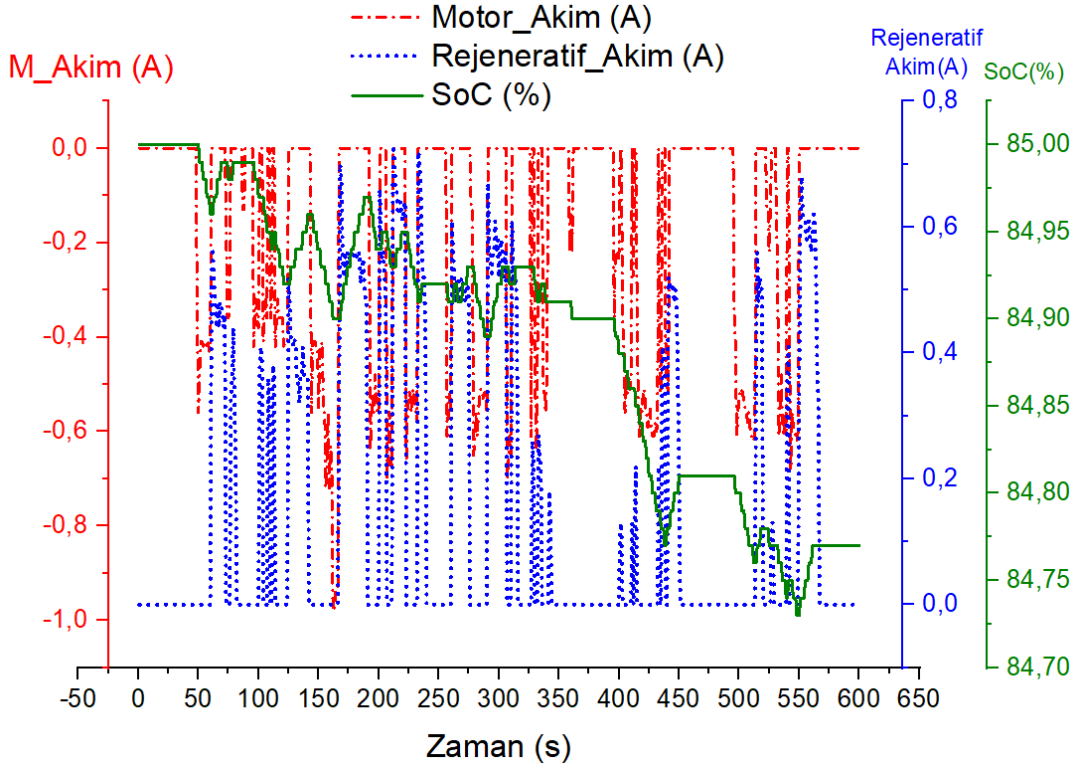


(b)

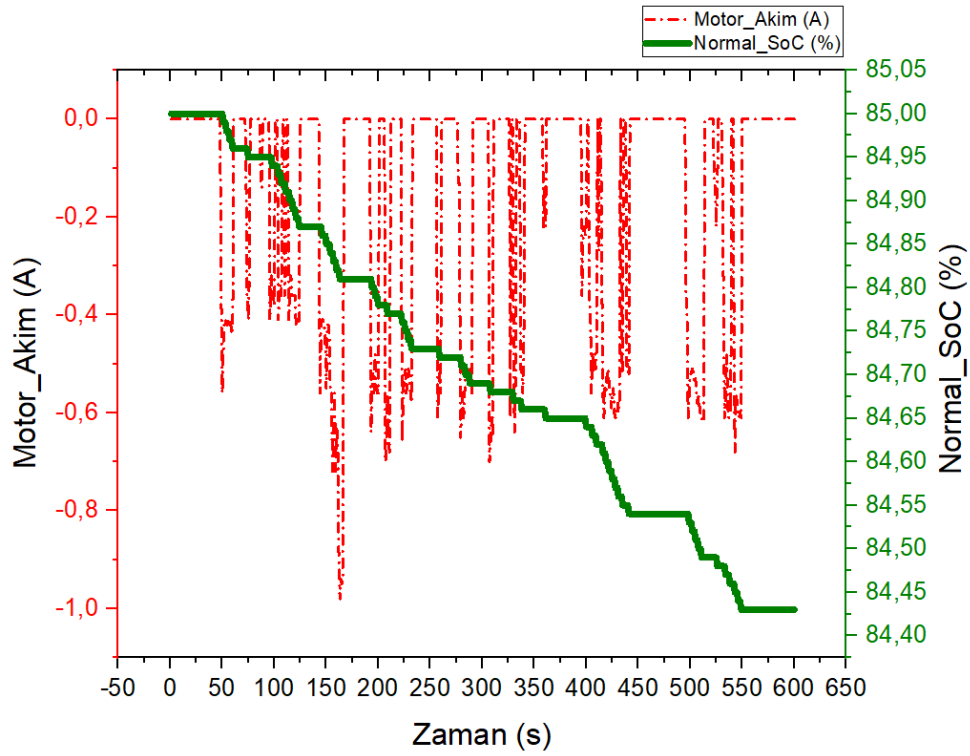
Şekil 5.15:NYCC zamana bağlı SoC (%), hız ve enerji değerlerinin karşılaştırılması; a) Rejeneratif çalışma modu, b) Normal çalışma modu.

Şekil 5.16'de NYCC sürüş profili için; (a) zamana bağlı rejeneratif mod rejeneratif akım, motor akımı ile SoC değerleri ve (b) zamana bağlı normal mod motor akımı ile SoC değerlerinin değişimleri görülmektedir.

Şekil 5.16 (a)'daki rejeneratif çalışma modu incelendiğinde rejeneratif akımda yükseliş olduğu anlarda akımın yukarı yöndeki hareketde kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumunu koruduğu veya artış olduğu gözlenirken rejeneratif çalışma modunda motor akımındaki yükseliş olduğu anlarda akımın yükseliş'te kalma süresine bağlı olarak SoC seviyesinde mevcut durumunda düşüş olduğu gözlemlenmiştir. Rejeneratif mod rejeneratif akımında yükseliş olduğu SoC seviyesinde anlık artışlar bataryanın şarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin arttığını göstermektedir. Rejeneratif mod rejeneratif motor akımında yükseliş olduğu ve SoC seviyesinde anlık düşüşler bataryanın deşarj olarak mevcut andaki duruma göre kapasitesinin düştüğünü göstermektedir. Şekil 5.16 (b)'deki normal çalışma modu incelendiğinde SoC değerinin sürekli olarak düştüğü motorun akım çekmesi kesildiğinde mevcut durumunu koruduğu gözlemlenmiştir.



(a)



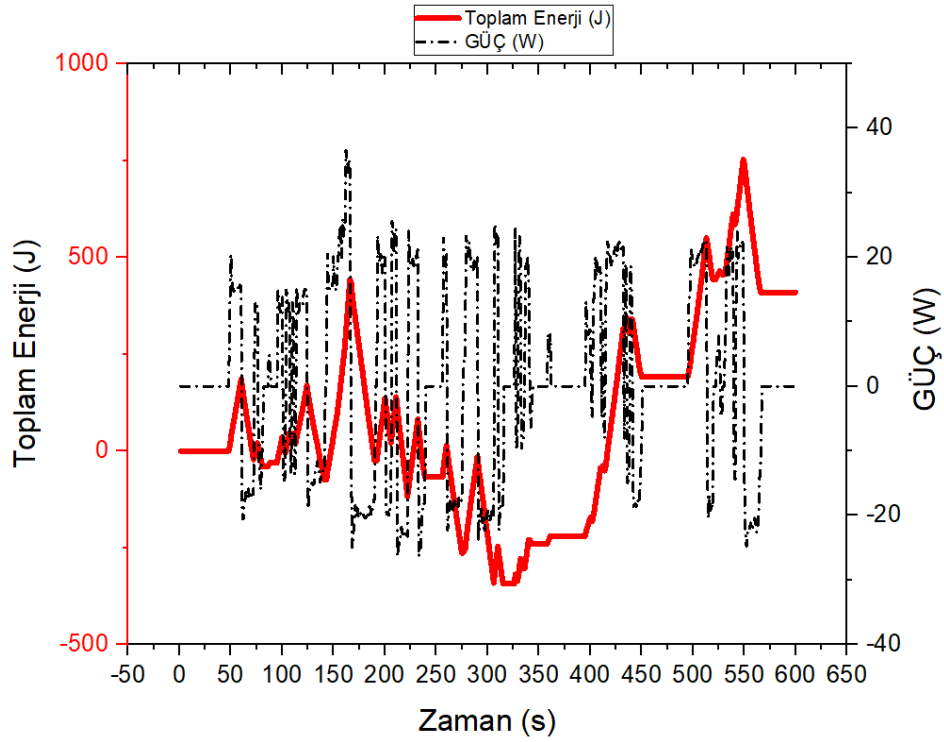
(b)

Şekil 5.16: NYCC zamana bağlı akım ve SoC(%) değerlerinin karşılaştırılması; (a) Rejeneratif çalışma modu (b) Normal çalışma modu.

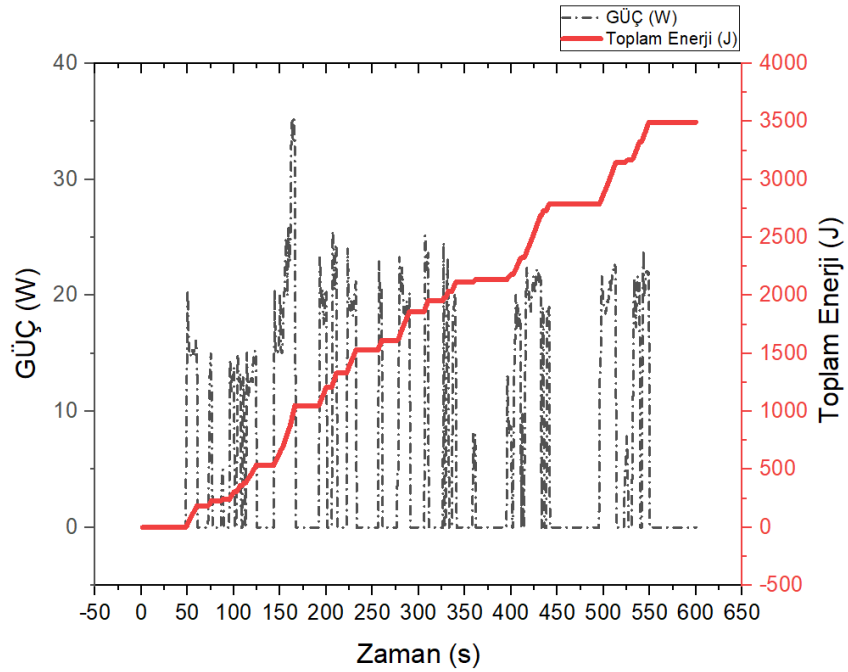
Şekil 5.17’de NYCC sürüş profili için zamana bağlı güç ve toplam enerji değerleri (a) rejeneratif mod ve (b) normal mod için karşılaştırılma yapılmıştır. Şekil 5.17 (a)’da rejeneratif çalışma modu incelendiğinde güç değerinin frenleme anında pozitif değerden negatif değere düştüğü gözlenmiştir. Bu durum güç kazanımının sağlandığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin pozitif değerden negatif değere düştüğü anda enerji gereksiniminin azaldığı gözlenmektedir. Şekil 5.17 (b)’de normal çalışma modu incelendiğinde güç değerinin frenleme anında 0 değerine düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum herhangi bir güç kazanımının olmadığını göstermektedir. Aynı zamanda güç değerinin 0 değerine düştüğü anda enerji gereksiniminin mevcut durumunu koruduğu gözlenmektedir.

Verisetinden elde edilen verilere göre Şekil 5.17 (a)’da rejeneratif mod için 600 saniyede toplam harcanan enerji 3493.92W ve 600 saniyede kazanılan enerji miktarı 3084.43W’dır. Buradan birim zamanda harcanan güç 5.82W/s ve birim zamanda kazanılan enerji 5.14W/s elde edilir. Rejeneratif kazanım ise %88.31 olarak hesaplanmıştır. Şekil 5.17 (b)’de normal mod için 600 saniyede toplam harcanan enerji 3494.48W’dır. Buradan

birim zamanda harcanan güç 5.82 W/s ve birim zamanda kazanılan güç yoktur. Dolayısıyla rejeneratif kazanım da yoktur.



(a)



(b)

Şekil 5.17: NYCC zamana bağlı güç ve toplam enerji; a)Rejeneratif çalışma modu, b)Normal çalışma modu.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Özellikle son yıllarda enerji problemleri ve karbon salınımı elektrikli araçları ön plana çıkarmaktadır. Elektrikli araçlardaki motorların rejeneratif mod'da kullanılması özellikle bu araçlardaki menzil probleminin üstesinden gelinmesine yardımcı olacaktır. Bu test çalışmasında elektrikli araçlar için rejeneratif mod da kullanılması için deney seti tasarlanmıştır. Bu deney setinde 42 voltluk bir batarya kullanmıştır. Bu bataryanın deney seti ile birlikte rejeneratif mod da çalıştırılarak bataryanın sürüş esnasında şarj olması sağlanmıştır. Bu sayede elektrikli araç için gerçek şartlarda, batarya şarjı ve sürüş menzili bakımından rejeneratif etki gözlenmiştir. Yapılan testler ve değerlendirmeler ECE, JAPAN10, NYCC sürüş profilleri için gerçekleştirilmiştir.

Çeşitli sürüş profillerine göre elde edilen test verilerinin değerlendirilmesi sonucunda rejeneratif geri kazanımın batarya kapasitesini ifade eden SoC değerinin normal mod çalışmayla karşılaştırıldığında daha yüksek seviyede kaldığı görülmüştür. Bu durum EA'lar için daha yüksek menzil anlamına gelmektedir.

Ayrıca bu veriler incelendiğinde rejeneratif çalışma modunda güç değişiminin negatif bölgeye geçtiği zaman aralıklarında toplam enerji talebinde azalmaların olduğu, normal çalışma modunda ise böyle bir durumun sözkonusu olmadığı anlaşılmıştır. Bu durum EA'larda rejeneratif çalışma modunun uzun menzile olumlu yönde etkisini göstermektedir.

Rejeneratif kazanımın daha verimli hale getirebilmek için EA'larda GPS'den mevcut konum bilgisi alınıp güzargah tahmini yapıldıktan sonra mevcut yol eğimi, trafik ışıkları, duraklama noktaları gibi durumlar önceden kestirilip rejeneratif kazanıma önceden hazırlık yapılabilir.

Tezin devamında ve önümüze hedef olarak koyacağımız öneriler aşağıdaki gibidir.

- Rejeneratif frenleme için batarya kapasitesi artırılarak enerji geri dönüşümü daha da artırılabilir.
- Makine öğrenme modellerini içeren bir algı öğretme eklenerek rejeneratif enerji dönüşüm daha iyi hale getirilebilir.

- Öğrenme modeline elektrikli araçlar için bir GPS eklenip konum bilgisine göre yol eğim durumu duraklama noktaların tespiti gibi bilgilere ulaşarak daha iyi bir rejeneratif kazanım sağlanabilir.

7. KAYNAKLAR

Atan, Ö., “Fırçasız DA motorunun modellenmesi ve PWM Yöntemiyle Kontrolü”, Yüksek Lisans Tezi, Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Van, (2007).

Bektaş, Y. Fırçasız doğru akım Motoru (Fsdam) Ve sürücü Devresi eğitim Seti Analizi geliştirilmesi Ve Motorun Bilgisayar ortamında İncelenmesi (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi (Turkey)). (2011).

Biswas, B., Bashudeb, G., “A novel flux estimation algorithm based position sensorless field oriented vector controlled permanent magnet brushless DC motor drive”, 2017 3rd International Conference on Electrical Information and Communication Technology. IEEE, (2017).

Boyacı, Ö., “Elektrikli Araçlar İçin Yapay Zeka Tabanlı Rejeneratif Enerji Denetimi”, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (2022).

Chan, C. C., “The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, Proceedings of the IEEE. 95 (4), 704-718, (2007).

Chang, W.Y., “The state of charge estimating methods for battery: a review”, ISRN Applied Mathematics, 2013, 1-7, (2013).

Chau K. T., Li, W., “Overview of electric machines for electric and hybrid vehicles”, International Journal of Vehicle Design, 64 (1), 46-71, (2014).

Chung, S. U., Moon, S. H., Kim, D. J., Kim, J.M., “Development of a 20-pole-24-slot SPMSM with consequent pole rotor for in-wheel direct drive”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 63 (1), 302-309, (2016).

Ehsani, M., Gao, Y., & Gay, S. “ Characterization of electric motor drives for traction applications.” In IECON'03. 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IEEE Cat. No. 03CH37468) (Vol. 1, pp. 891-896). IEEE. (2003, November).

Ertugrul, N., & Acarnley, “ P. A new algorithm for sensorless operation of permanent magnet motors.” IEEE Transactions on Industry applications, 30(1), 126-133. (1994).

Flinders, F., Mathew, R. and Oghanna, W., Drives, Power Electronics and Traction Systems Laboratory Centre for Railway Engineering Central Queensland University, Australia,55-61, (1995).

Hasanusta, K., & Serteller, N. F. O. Fırçasız Doğru Akım Motorlarında (FSDAM) Optimal Hall Sensör Yerinin İncelenmesi ve Motora Etkisi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 15(3), 1-7. (2015).

Kesler, S., Boyacı, Ö. and Tümbek, M., “Elektrikli araçlarda enerji yönetimi ve verimliliğinin analiz edilmesi için bir test sistemi tasarımı”, IV. International Ankara Conference on Scientific Research, 67-70, (2022).

Kim, M. K., Jang, K. Y., Choo, B. H., Lee, J. B., Suh, B. S., Kim, T. H., “A novel IGBT inverter module for low-power drive applications”, IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2, 642-647, (2002)

Li, X., Zhang, X., Wang, Y. “Regenerative braking control strategies with fixed ratio and variable ratio braking forces optimization distribution for electric vehicles during downhill process”, International Journal of Automotive Technology, 23 (3), 667-681. (2022).

Nurriartono, A., et al., “Performance comparison of BLDC motor controllers designed based on trapezoidal commutation and FOC”, AIP Conference Proceedings, AIP Publishing, (2019).

Qi, L., Wu, X., Zeng, X., Feng, Y., Pan, H., Zhang, Z., Yuan, Y., “An electro mechanical braking energy recovery system based on coil springs for energy saving applications in electric vehicles”, Energy, 117472, (2020).

Qiao, Q., Zhao, F., Liu, Z., He, X., & Hao, H. “Life cycle greenhouse gas emissions of Electric Vehicles in China” Combining the vehicle cycle and fuel cycle. *Energy*, 177, 222-233. (2019).

Srinivasan, S., Lakshanasri, N R S., Setty, S M., Dubey, P., Singh, A K., & Senthilmurugan, S. “BLDC Drive for EV Application. ” *Journal of Physics: Conference Series*, 2007(1), 012059-012059. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2007/1/012059>, (2021).

Subramaniyam, K. V., and Subramanian, S. C., “Electrified vehicle wheel slip control using responsiveness of regenerative braking”, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 70 (4), 3208-3217, (2021).

Tian, W. “Design of permanent magnet brushless DC motor control system based on dsPIC30F4012.” *Procedia Engineering*, 29, 4223-4227. (2012).

Yang, M. J., Jhou, H. L., Ma, B. Y., & Shyu, K. K. A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(6), 2203-2212, (2009).

Yang, Y., He, Q., Chen, Y., & Fu, C., “Efficiency optimization and control strategy of regenerative braking system with dual motor”, *Energies*, 13 (3), 711, (2020).

Yoong, M. K., Gan, Y. H., Gan, G. D., Leong, C. K., Phuan, Z. Y., Cheah, B.K., & Chew, K. W. “Studies of regenerative braking in electric vehicle” In 2010 IEEE conference on sustainable utilization and development in engineering and technology (pp. 40-45). IEEE. (2010, November).

Zhang, L., and Cai, X., “Control strategy of regenerative braking system in electric vehicles”, Energy Procedia,152, 496-501, (2018)

Zhu, Z. Q., Howe, D., “Electrical machines and drives for electric, hybrid, and fuel cell vehicles”, Proceedings of the IEEE, 95, 746-765, (2007).