

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**HİDROJEN YAKITLI ARAÇLARDA KULLANILAN
FİRÇASIZ DC MOTORUN YARI-Z KAYNAK İNVERTER İLE
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ÖZLÜ

DENİZLİ, NİSAN - 2025

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**HİDROJEN YAKITLI ARAÇLARDA KULLANILAN
FİRÇASIZ DC MOTORUN YARI-Z KAYNAK İNVERTER İLE
KONTROLÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ÖZLÜ

DENİZLİ, NİSAN - 2025

**Bu tez çalışması Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri
Koordinatörlüğü tarafından 2024FEBE015 nolu proje ile desteklenmiştir.**

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.

EREN ÖZLÜ

ÖZET

HİDROJEN YAKITLI ARAÇLARDA KULLANILAN FIRÇASIZ DC MOTORUN YARI-Z KAYNAK İNVERTER İLE KONTROLÜ YÜKSEK LİSANS TEZİ

EREN ÖZLÜ

**PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
OTOMOTİV MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI:DOÇ. DR. ZAFER ORTATEPE)**

DENİZLİ, NİSAN- 2025

Günümüzde fosil yakıtların tükenme riski ve çevresel etkileri nedeniyle alternatif enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Hidrojen yakıt hücreleri, temiz ve verimli bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. Ancak, hidrojen yakıt hücreleri düşük ve değişken çıkış gerilimine sahip olduğundan, bu gerilimin kararlı bir seviyeye yükseltilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, hidrojen yakıt hücresinden elde edilen gerilimin Yarı-Z Kaynak (Quasi-Z Source) İnverter kullanılarak yükseltilmesi ve 500W gücündeki fırçasız DC (BLDC) motorun sürülmesi incelenmiştir.

Motor kontrolü için alan yönlendirmeli kontrol (Field Oriented Control - FOC) yöntemi uygulanarak hassas hız ve akım kontrolü sağlanmıştır. Kontrol stratejisi, motorun dinamik performansını artırarak yüksek verimli bir tahrik sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır. Ayrıca, 48V besleme gerilimine sahip üç fazlı BLDC motorun kontrolü için üç fazlı tam köprü topolojisi kullanılmıştır.

Bu çalışmanın temel amacı, hidrojen yakıt hücreli elektrikli araçlarda kullanılan BLDC motorların daha verimli ve kararlı bir şekilde sürülmesini sağlayan bir güç dönüştürme ve kontrol sistemi geliştirmektir. Yarı-z kaynak inverterin sunduğu avantajlar sayesinde sistemin güvenilirliği ve verimliliği artırılmış, ayrıca motorun değişken yük koşullarında stabil çalışması sağlanmıştır. Bu tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar, yenilenebilir enerji kaynaklarının otomotiv sektörüne entegrasyonuna yönelik önemli bir katkı sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELER: Hidrojen yakıt hücresi, fırçasız DC motor, yarı-z kaynak inverter, elektrikli araçlar

ABSTRACT

CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH QUASI-Z SOURCE INVERTER USED IN HYDROGEN FUELED VEHICLES

MSC THESIS

EREN ÖZLÜ

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

AUTOMOTIVE ENGINEERING

(SUPERVISOR:ASSOC. PROF. DR. ZAFER ORTATEPE)

DENİZLİ, APRIL 2025

With the depletion risk and environmental impact of fossil fuels, research on alternative energy sources has gained momentum. Hydrogen fuel cells have emerged as a clean and efficient energy source. However, since hydrogen fuel cells provide a low and variable output voltage, it is necessary to boost this voltage to a stable level. In this study, the voltage obtained from a hydrogen fuel cell is boosted using a Quasi-Z Source Inverter and used to drive a 500W brushless DC (BLDC) motor.

Field-Oriented Control (FOC) is applied for motor control to achieve precise speed and current regulation. This control strategy aims to enhance the dynamic performance of the motor, ensuring a highly efficient drive system. Additionally, a three-phase full-bridge topology is employed for controlling the 48V powered three-phase BLDC motor.

The primary objective of this study is to develop a power conversion and control system that enables more efficient and stable operation of BLDC motors in hydrogen fuel cell-powered electric vehicles. The advantages of the Quasi-Z Source Inverter improve system reliability and efficiency, ensuring stable motor operation under variable load conditions. The findings of this thesis contribute significantly to the integration of renewable energy sources into the automotive sector.

KEYWORDS: Hydrogen fuel cell, brushless DC motor (BLDC), quasi-z source inverter, electric vehicles

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	vi
SEMBOL LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi	1
1.2 Alternatif Yakıt Türleri	5
1.2.1 Doğal Gaz	5
1.2.2 LPG	5
1.2.3 Sentetik Yakıtlar	6
1.2.4 Biyoyakıtlar	6
1.2.5 Hidrojen	6
1.2.5.1 Hidrojen Üretimi	6
1.2.5.2 Yakıt Hücresi	7
1.3 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri	9
1.3.1 Fırçalı DC Motorlar	10
1.3.2 Fırçasız DC (BLDC) Motorlar.....	10
1.3.3 Asenkron (İndüksiyon) Motorlar	11
1.3.4 Kalıcı mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM)	12
1.3.5 Anahtarlama Relüktans Motoru (SRM - Switched Reluctance Motor)	13
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	16
2.1 Başlıca Yapılan Çalışmalar	16
3. MATERYAL VE METOD	24
3.1 BLDC Motorun Yapısı ve Denklemleri	24
3.2 BLDC Motor Kontrol Yöntemleri.....	25
3.2.1 Trapezoidal Kontrol (120° Komütasyon)	26
3.2.2 Sinüsoidal Kontrol	26
3.2.3 Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control - FOC).....	26
3.2.3.1 $\alpha\beta \rightarrow dq$ Park Dönüşümü.....	28
3.2.3.2 $dq \rightarrow \alpha\beta$ Ters Park Dönüşümü.....	28
3.2.3.3 $\alpha\beta \rightarrow abc$ Ters Clarke Dönüşümü.....	28
3.3 Quasi Z-Kaynak Empedans (qZSI) Devresi ve Çalışma Prensipleri.....	29
3.4 Kontrol Metodu	31
3.4.1 PI Kontrol	32
3.4.2 Dönüşüm İşlemleri.....	33
3.4.3 PWM ve İnverter	33
3.4.4 Motor ve Geri Besleme	33
4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI	34
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	42
5.1 PCB Çizimi, 3D ve gerçek PCB görüntüleri	42
5.2 Deneysel Sonuçlar	47
6. TARTIŞMA VE SONUÇ	50

7. KAYNAKLAR.....	51
8. ÖZGEÇMİŞ.....	55



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Ányos Jedlik'in icat ettiği tarihteki ilk elektrik motoru.....	1
Şekil 1.2: Thomas Davenport'un icat ettiği ilk elektrikli ve motorlu araç.....	2
Şekil 1.3: İlk şarj edilebilir akü.....	2
Şekil 1.4: Dünyadaki ilk elektrikli otomobil.....	3
Şekil 1.5: 1928 üretimli Ford Model T	3
Şekil 1.6: 1973'te üretilen City Car	4
Şekil 1.7: Hidrojen üretimi yöntemleri	7
Şekil 1.8: Yakıt hücresi örneği.....	7
Şekil 1.9: Yakıt Hücresi Çalışma Prensibi.....	8
Şekil 1.10: Basit bir DC motorun yapısı	10
Şekil 1.11: BLDC motorunun yapısı ve çalışma prensibi.....	11
Şekil 1.12: Asenkron motor iç yapısı.....	12
Şekil 1.13: PMSM motoru iç yapısı.....	13
Şekil 1. 14: Anahtarlama relüktans motoru	14
Şekil 3.1: Quasi z-kaynak empedans devresi.....	29
Şekil 3.2: Quasi-z kaynak empedans devre şeması (a) NST durumu (b) ST durumu	30
Şekil 3.3: BLDC motorun FOC temelli kontrol şeması.....	32
Şekil 4.1: Yakıt hücresi ve qZSI tabanlı bir BLDC motor sürücü modeli	35
Şekil 4.2: PWM kontrol bloğu	36
Şekil 4.3: DC hat gerilimi kontrol bloğunun genel yapısı	37
Şekil 4.4: Modülasyon sinyali kontrol bloğunun genel yapısı.....	37
Şekil 4.5: BLDC motor hız (rpm) grafiği.....	38
Şekil 4.6: qZSI'ye ait C_1 ve C_2 kondansatör gerilimleri ve bu gerilimlerin toplamı.....	38
Şekil 4.7: DC bara (V_{PN}) gerilimi	39
Şekil 4.8: BLDC motorun I_d ve I_q akım bileşenleri	39
Şekil 4.9: BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c)	40
Şekil 4.10: Referans hızın 500RPM'den 750RPM'e çıkarılması durumunda BLDC motor hızı ve qZSI'nin toplam kondansatör gerilimi	41
Şekil 4.11: Referans hızın 500RPM'den 750RPM'e çıkarılması durumunda BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c).....	41
Şekil 5.1: BLDC motor sürücüsü 3D görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü	43
Şekil 5.2: BLDC motor sürücüsü PCB görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü... ..	44
Şekil 5.3: qZSI'nin 3D görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü.....	45
Şekil 5.4: qZSI'nin PCB görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü.....	46
Şekil 5.5: qZSI'nin ST anahtarlama durumu	47
Şekil 5.6: qZSI'nin V_{C1} ve V_{C2} kondansatör gerilimleri.....	47
Şekil 5.7: BLDC motor hız (RPM) değişimi	48
Şekil 5.8: BLDC motor faz akımı (i_a)	49
Şekil 5.9: BLDC motor hall sensör çıkışları	49

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1. 1: Araç modelleri ve kullanmış olduğu motorlar.....	15
Tablo 4.1: Simülasyon çalışmasında kullanılan parametreler, semboller ve değerleri.....	34
Tablo 4.2: qZSI topolojisinde kullanılan PI parametreleri.....	34
Tablo 5. 1: Deneysel çalışmada malzemeler ve türleri	42



SEMBOL LİSTESİ

DC	:	Doğru akım
LPG	:	Sıvılaştırılmış petrol gazı
BLDC	:	Fırçasız doğru akım
PMSM	:	Kalıcı mıknatıslı senkron motor
SRM	:	Anahtarlama relüktans motor
AC	:	Alternatif akım
ZSI	:	Z-kaynak inverter
SoC	:	Batarya şarj durumu
PV	:	Fotovoltaik
Trans-ZSI	:	Trafo tabanlı ZSI
qZSI	:	Quasi z-kaynak inverter
MPPT	:	Maksimum güç noktası takibi
qZS-CMI	:	Quasi z-kaynak kaskad çok seviyeli inverter
CMI	:	Kaskad çok seviyeli inverter
GaN	:	Galyum Nitrit
MPC	:	Model öngörülü kontrol
MC	:	Matris dönüştürücü
DMC	:	Doğrudan matris dönüştürücü
IMC	:	Dolaylı matris dönüştürücü
SBI	:	Anahtarlama yükseltici inverter
qSBI	:	Quasi anahtarlama yükseltici inverter
ST	:	Shoot through
NST	:	Non-shoot through
PWM	:	Darbe genişlik modülasyonu
PI	:	Oransal-İntegral kontrol
MMPC	:	Modüle edilmiş model öngörülü kontrol
DTC	:	Doğrudan tork kontrol
SMC	:	Kayan kipli kontrol
SPWM	:	Sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu
EV	:	Elektrikli araç
DSP	:	Dijital sinyal işlemcisi
FOC	:	Alan oryantasyonlu kontrol
D	:	Görev çevrim oranı
B	:	Yükseltme faktörü
V_a, V_b, V_c	:	Faz gerilimleri
i_a, i_b, i_c	:	Faz akımları
e_a, e_b, e_c	:	Geri elektromotor kuvveti
K_e	:	Elektromotor kuvvet sabiti
ω_r	:	Rotor açısal hızı
θ	:	Rotor pozisyonu
T_e	:	Elektromekanik tork
ω_m	:	Mekanik açısal hız
V_{in}	:	Giriş gerilimi
I_{in}	:	Giriş akımı
I_{L1}, I_{L2}	:	Bobin akımları
V_{C1}, V_{C2}	:	Kondansatör gerilimleri
V_{PN}	:	DC hat gerilimi

V_{diode}	:	Diyot gerilimi
I_C, I_{C_2}	:	Kondansatör akımları
I_{PN}	:	DC hat akımı
I_D	:	Diyot akımı
ω_{ref}	:	Referans açısal hız
G_{C_s}	:	PID kontrol transfer fonksiyonu
K_p	:	Oransal kontrol katsayısı
K_I	:	İntegral kontrol katsayısı
K_D	:	Türev kontrol katsayısı
$V_{s_d}^*, V_{s_q}^*$	:	Referans dq gerilimleri
$I_{s_d}^*, I_{s_q}^*$	:	Referans dq akımları

ÖNSÖZ

Bu çalışmayı tamamlamamda emeği geçen, tez aşamasında ve ders aşamasında her zaman bana yol gösteren ve bilmediğim noktalarda sabırla beni dinleyerek değerli bilgilerini paylaşan değerli danışmanım Doç. Dr. Zafer ORTATEPE 'ye en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman arkamda olup çalışma gayretimi artıran sevgili babama, anneme, kardeşime, Muhammed Zakir Çetin ve Halid Sayar'a minnettarım. Onların sürekli desteği ve teşvikleri, bu süreçte motivasyon kaynağım olup her aşamada yanımda oldular. Bu nedenle, onlara teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

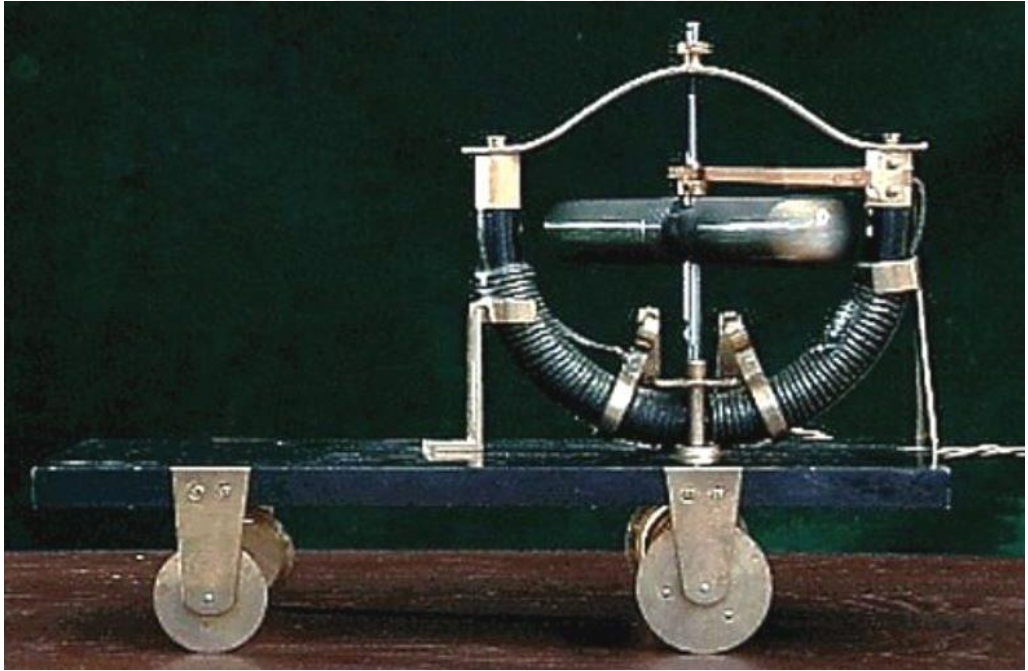
Bu tez, bana inanılmaz bir öğrenme ve gelişme fırsatı sundu. Destek veren herkese gönülden şükranlarımı sunarım.



1. GİRİŞ

1.1 Elektrikli Araçların Tarihçesi

Elektrikli araçların tarihçesi, yaklaşık 200 yıl öncesine, ilk buharlı sistemlerin kullanıldığı dönemlere kadar uzanmaktadır. Elektrikli araçlar, zaman içinde içten yanmalı hibrit ve tamamen elektrikli araçlara evrilmiştir. İlk elektrik motoru, 1828 yılında Macar asıllı mucit Ányos Jedlik tarafından tasarlanmıştır. Bu motor, elektrikli araçların temel yapı taşlarından biri olmuştur, ancak o dönemde bir elektrikli araç henüz yapılmamıştır. Şekil 1.1’de Ányos Jedlik tarafından tasarlanan ilk elektrik motoru verilmiştir.



Şekil 1.1: Ányos Jedlik’in icat ettiği tarihteki ilk elektrik motoru (www.upsbatterycenter.com, 2023)

1835 yılında, Amerikalı demirci Thomas Davenport, doğru akım (direct Current – DC) motoruyla çalışan bir lokomotif tasarlayarak elektrikli araçların gelişiminde önemli bir adım atmıştır. Şekil 1.2’de verilen bu araç, o dönemdeki küçük prototiplere kıyasla önemli bir ilerleme kaydetmiş olup, ilk işlevsel elektrikli araçlardan biri olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1.2: Thomas Davenport'un icat ettiği ilk elektrikli ve motorlu araç (www.carmudi.com.ph, 2019)

Ayrıca, 1832-1839 yılları arasında İskoçya asıllı Robert Anderson, elektrikli bir araç tasarlamıştır. Ancak bu araç, şarj edilebilir bataryalara sahip değildi. Bu dönemde, 1859 yılında Fransız fizikçi Gaston Plante, Şekil 1.3'te verilen ilk şarj edilebilir bataryayı icat etmiştir.



Şekil 1.3: İlk şarj edilebilir akü (www.collection.sciencemuseumgroup.org.uk, 2024)

1884 de o zamana kadar bir ilk yaşanarak İngiltere de doğan Thomas Parker, kapasitesi yüksek olan ve aynı zamanda şarj edilebilir pilleri bulunan şekil 1.4’te gösterilen tarihteki ilk elektrikli otomobili icat etti.



Şekil 1.4: Dünyadaki ilk elektrikli otomobil (www.walkersarewelcome.org.uk, 2022)

1908 yılında Henry Ford’un otomobil piyasasına sürdüğü şekil 1.5’te gösterilen model T, elektrikli araçların yükselmesine darbe vurmuştur. O zamana kadar iyi gelişmeler kat edilmekte iken benzinli bir araba olan model T elektrikli arabaların piyasasını belli bir süre durdurmuştur.



Şekil 1.5: 1928 üretimli Ford Model T (www.history.com 2024)

Benzinli araçların ucuzluğu ve elektrikli araçların pahalılığı nedeniyle 1960'ların sonlarına kadar elektrikli araçlar 40-60 yıl kadar duraksama dönemi geçirmiştir. Bu duraksama döneminden sonra 1971'de NASA Apollo 15-16 ekibince kullanılan Rover isimli aracı kullanmaya başladı. Bu da otomobil şirketleri ve bu alanda çalışanların dikkatlerini çekerek elektrikli araçlara rağbeti arttırdı.

1973'te ilk olarak M. Stanley Whittingham dünya tarihinin ilk şarj edilebilir lityum-iyon pillerini geliştirmiştir. Bu da batarya sistemleri konusunda büyük bir gelişme olmuştur.

Bir yıl sonra Sebring Vanguard adlı firma şekil 1.6'da gösterilen City Car isimli bir elektrikli otomobil üretmiştir. 2700 dolarlık fiyata sahip olan bu araç 6 voltluk pil ile 3,5 HP motor kapasitesine sahip olmuştur. 45-56 km mesafeye sahip olduğu söylenen bu araç bulunduğu dönemde 2000 kadar satış yapılmıştır. Benzinli araçlara göre hız ve gücü az olduğu için insanların çok dikkatini çekememiştir.



Şekil 1.6: 1973'te üretilen City Car (www.autoevolution.com, 2021)

Tesla 2008 yılında Roadster isimli modeliyle tarihe damga vurmuştur. Bu model tek şarj ile 393 km mesafe gidebiliyordu. Tesla bu aracı 2012 senesine kadar üretmiştir. Bu elektrikli otomobiller için büyük bir devrim niteliğinde olmuştur. Gerek hızının diğer araçlara göre yakınlığı gerekse mesafesinin yüksek oluşu elektrikli araçların yeniden doğmasına neden olmuştur.

Günümüzde elektrikli araçlar güç, hız ve menzil konularında ilerleme sağlamıştır. Gerek egzoz emisyonu az olması gerekse şarj altyapısının geliştirilmesinden dolayı birçok otomobil firması elektrikli otomobil üretimine geçiş yapmaktadır.

Günümüzde elektriğin yanı sıra araçlarda kullanılan alternatif yakıt türleri bulunmaktadır. Bu tez kapsamında hidrojen yakıtlı araçlar incelenecek olsa da araçlarda başka yakıt türleri de kullanılmaktadır.

1.2 Alternatif Yakıt Türleri

Alternatif yakıt ile ilgili çalışmalar petrol rezervlerinin azalmasından dolayı ortaya çıkmıştır. Başlıca alternatif yakıt kaynakları doğalgaz, sıvılaştırılmış petrol gazı (liquefied petroleum gas – LPG), sentetik yakıtlar, biyoyakıtlar ve hidrojen olarak sıralanabilir.

1.2.1 Doğal Gaz

Doğalgaz ekseriyetle şehirlerde ve endüstri alanında kullanılmaktadır. Farklı yöntemler ile elde edilebilen doğalgaz, gaz kuyularından veya ham petrolün işlenmesi esnasında elde edilebilmektedir. Gaz ve sıvı halde kullanılabilir.

Doğalgaz benzin ile kıyaslandığında daha güvenli olmak ile benzine göre daha zor alevlenir. Bunun yanı sıra yüksek basınç ile sıkıştırıldığından dolayı arıza durumlarında tehlike içermektedir. Bu nedenle doğal gaz tanklarının son derece dayanıklı malzemelerden yapılması gerekmektedir. Doğalgazın bir diğer dezavantajı ise 1 depo benzinli araca göre yarısı belki de 2/3'ü kadar yol gidebilmesidir. Bu nedenle şehir içinde kullanımı daha çok tercih edilmektedir (bilsenbesergil.blogspot.com 2024).

1.2.2 LPG

Sıvılaştırılmış petrol gazı olarak adlandırılan LPG doğalgaz üretilirken yan madde olarak elde edilmektedir. Emisyon değerleri diğer yakıtlara göre oldukça düşüktür. LPG'nin doğalgaz gibi güvenilir tanklar içinde depolanması

gerekmektedir. Benzine göre tutuşma sıcaklık aralığı daha yüksektir (bilsenbesergil.blogspot.com 2024).

1.2.3 Sentetik Yakıtlar

Sentetik yakıtlar, fosil yakıtların yerini alabilecek alternatif enerji kaynakları arasında önemli bir yere sahiptir. Petrol, kömür ve doğal gaz gibi fosil yakıtlardan bağımsız olarak üretilen bu yakıtlar, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla üretildiğinde karbon nötr olabilir. Sentetik yakıtların en büyük avantajı, mevcut içten yanmalı motorlarla uyumlu olmaları ve sıvı yakıt altyapısını kullanabilmeleridir.

1.2.4 Biyoyakıtlar

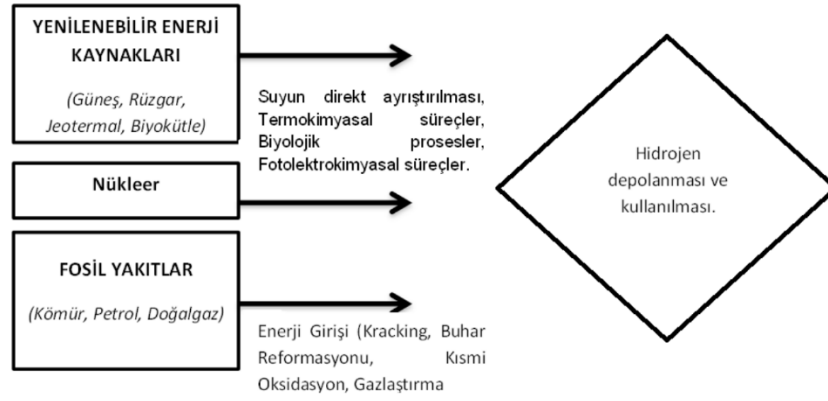
Biyoyakıtlar soya fasulyesinden çıkarılan yağa benzer bitkisel yağlardan veya atılan yemeklerin yağlarından üretilmekte olan sentetik bir yağdır. Konvansiyel dizele çok benzemesine rağmen emisyon değerleri ve sağlık yönünden konvansiyel yakıtlardan daha avantajlıdır. Biyodizel yakıtların araçlarda kullanması halinde motor yakıt sistemlerinde değişikliğe gidilmesi gerekmektedir. Bunun sebebi biyodizelin güçlü bir çözücü olmasıdır ve bu motorda bulunan contalara zarar verebilir. Ayrıca konvansiyel dizele göre daha zor tutuşma oranına sahiptir.

1.2.5 Hidrojen

Hidrojen dünyamızda ve kâinatta en çok bulunan elementtir. “Su yapıcı” manasına gelen hidrojen bir enerji taşıyıcısıdır. Doğada bileşik halinde bulunduğundan ayrıştırılıp hidrojen elde edilmesi gerekmektedir. 1 kg hidrojen 2,8 kg petrolün veya 2,1 kg doğalgazın sahip olduğu enerjiye sahiptir. Doğada çok bulunması ve kütle başına verdiği enerjinin yüksek olması hidrojenin ne kadar önemli bir element olduğunu göstermektedir.

1.2.5.1 Hidrojen Üretimi

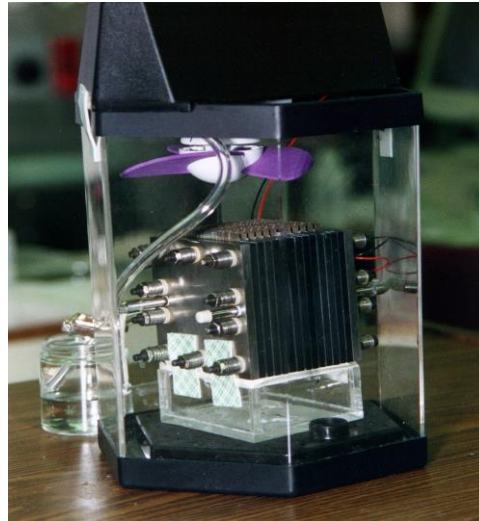
Hidrojen üretimi birkaç farklı yöntemle yapılabilmektedir. Genellikle klasik olarak nükleer veya fosil yakıt bazlı üretilmektedir. Ayrıca yenilenebilir kaynakları ile (rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal ve güneş enerjisi) üretilmektedir (Mutlubaş ve Özdemir 2019). Şekil 1.7’de hidrojenin üretim yöntemleri verilmiştir.



Şekil 1.7: Hidrojen üretimi yöntemleri (Özdemir ve Mutlubaş 2019)

1.2.5.2 Yakıt Hücresi

Yakıt hücresi yakıtın kimyasal enerjisini elektrik enerjisine dönüştürebilen bir modüldür. Yanma olmadığı için sessiz ve temiz elektrokimyasal bir parçadır. Yüksek verimlilik ile çalışabilmelerinin yanı sıra emisyon değerleri yok denecek kadar azdır. Yakıt hücreleri günlük hayatta kullanılan pillerin çalışma prensibine benzemektedir. Pillerden farklı olarak sürekli yakıt takviyesi yapılması gerekmektedir ve bu yakıt hidrojen ile sağlanmaktadır. Emisyon değerlerinin 0 olması da elektrik enerjisinin kazanılmasının yanında sadece dışarıya su buharı atılması anlamına gelmektedir (Çavuşoğlu 2006). Şekil 1.8’de örnek bir yakıt hücresi örneği sunulmuştur.

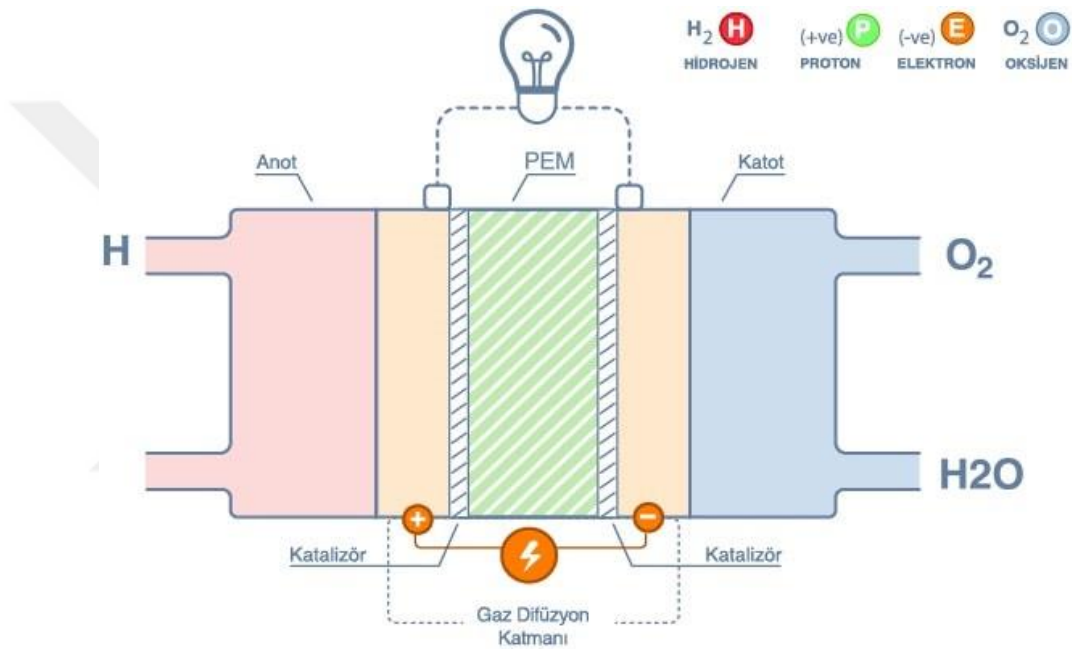


Şekil 1.8: Yakıt hücresi örneği (en.wikipedia.org 2021)

Bir hidrojen yakıt hücresinde hidrojen anottan, oksijen katottan yakıt hücresine girer. Hidrojen yakıt hücresinden geçen elektronlarına ve protonlarına

ayrılmakta olup, ayrılan protonlar, elektrolit membran üzerinden katoda doğru hareket eder. Elektronlar, doğrudan elektrolit içinden geçemediği için harici bir devreden geçerek katoda ulaşır ve bu sırada elektrik akımı oluşturur. Katotta, oksijen ile birleşen protonlar ve elektronlar su (H_2O) ve ısı açığa çıkarır.

Bu süreç, sürekli hidrojen ve oksijen beslenmesi sağlandığında kesintisiz şekilde devam eder. Hidrojen yakıt pilleri, yüksek verimlilikleri ve yalnızca su buharı yaymaları nedeniyle çevre dostu enerji çözümleri arasında önemli bir yere sahiptir. Basit bir yakıt hücresinin çalışma prensibi şekil 1.9'da sunulmuştur.



Şekil 1.9: Yakıt hücresi çalışma prensibi (www.tesisat.org 2018)

Hidrojen yakıt hücresinin başlıca avantajları şunlardır:

Çevre Dostu: Yakıt hücreleri, yalnızca su ve ısı açığa çıkardığından karbon salınımı yapmaz. Fosil yakıtlı sistemlere kıyasla çok daha temizdir.

Yüksek Verimlilik: İçten yanmalı motorlara kıyasla daha yüksek enerji verimliliğine sahiptir. Kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine çevirir.

Sessiz Çalışma: Mekanik parçaları az olduğu için geleneksel motorlara kıyasla çok daha sessiz çalışır.

Geniş Kullanım Alanı: Taşımacılıktan (otomobiller, otobüsler, trenler) enerji üretimine kadar birçok alanda kullanılabilir.

Hızlı Yakıt Doldurma: Bataryalı elektrikli araçlarla karşılaştırıldığında hidrojen tanklarının doldurulması çok daha kısa sürede tamamlanabilir.

Uzun Menzil: Hidrojenin yüksek enerji yoğunluğu sayesinde yakıt hücresi araçlar, bataryalı elektrikli araçlara göre daha uzun menzile sahiptir.

Başlıca dezavantajları ise şu şekilde verilmektedir:

Hidrojen Üretimi Sorunu: Hidrojen doğada saf halde bulunmaz, elektroliz veya fosil yakıtlardan elde edilmesi gerekir. Yeşil hidrojen üretimi henüz yaygın değildir.

Depolama ve Taşıma Zorlukları: Hidrojen gazı düşük yoğunluklu olduğu için yüksek basınç altında sıkıştırılması veya sıvı hale getirilmesi gerekir. Bu, maliyetli ve teknik olarak zordur.

Altyapı Eksikliği: Hidrojen dolum istasyonları henüz yaygın değildir ve bu da yakıt hücresi araçların kullanımını sınırlamaktadır.

Yüksek Maliyet: Yakıt hücreleri ve hidrojen üretim süreçleri hâlâ pahalıdır. Platin gibi pahalı katalizör malzemeleri gerektirebilir.

Enerji Dönüşüm Kaybı: Hidrojen üretimi, depolanması ve taşınması sırasında enerji kayıpları yaşanır. Bu, bataryalı elektrikli sistemlere kıyasla daha az verimli olmasına yol açabilir.

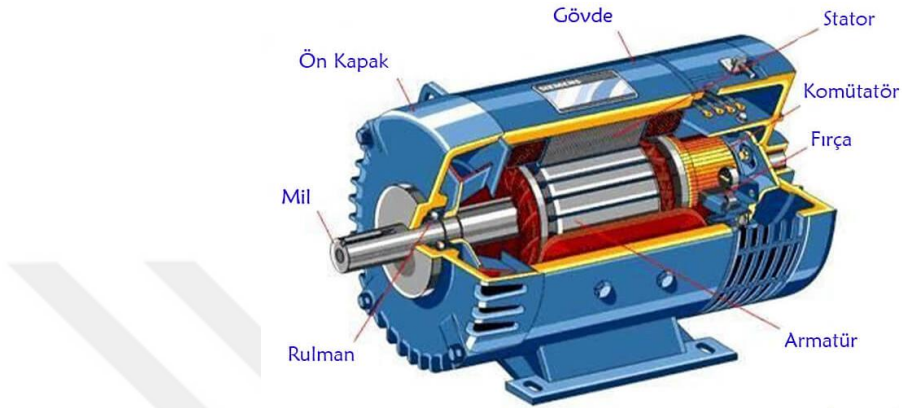
Sonuç olarak, hidrojen yakıt hücreleri temiz ve verimli bir enerji kaynağı olmasına rağmen, altyapı, üretim ve depolama konularındaki zorluklar nedeniyle yaygın kullanımı için hala gelişmeye ihtiyaç duymaktadır.

1.3 Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motor Türleri

Elektrikli araçlarda kullanılan motorlar, aracın performansı, verimliliği ve menzili açısından kritik bir rol oynar. Günümüzde kullanılan başlıca motor türleri şunlardır:

1.3.1 Fırçalı DC Motorlar

Bu motorlar, stator ve rotor arasındaki elektriksel bağlantıyı sağlayan fırçalar ve komütatörler aracılığıyla çalışır. Fırçaların aşınması nedeniyle düzenli bakım gerektirirler ve verimlilikleri nispeten düşüktür. Şekil 1.10’da basit bir DC motorun yapısı gösterilmektedir.



Şekil 1.10: Basit bir DC motorun yapısı (makina.deu.edu.tr 2024)

Çalışma Prensibi:

- Sabit mıknatıs veya elektromıknatıs stator oluşturur.
- Komütatör ve fırçalar sayesinde rotorun manyetik alanı sürekli olarak değişerek dönme hareketi sağlanır.

Avantajları:

- Basit yapısı nedeniyle kolay kontrol edilebilir.
- Yüksek başlangıç torku sağlar.

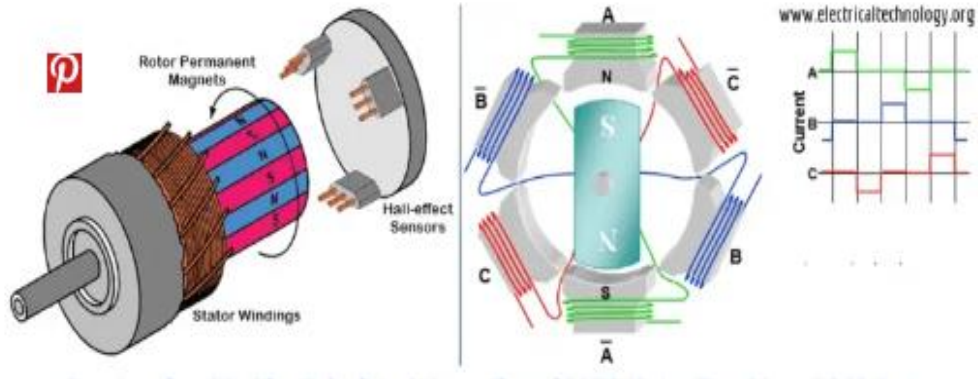
Dezavantajları:

- Fırçaların aşınması nedeniyle bakım gerektirir.
- Düşük verimlilik ve yüksek ısı üretimi söz konusudur.

1.3.2 Fırçasız DC (BLDC) Motorlar

Fırçalı motorların aksine, elektronik komütasyon kullanarak çalışırlar, bu sayede daha yüksek verimlilik ve daha az bakım ihtiyacı sunarlar. Ayrıca, kompakt

yapıları ve yüksek güç yoğunlukları sayesinde modern elektrikli araçlarda tercih edilirler. Şekil 1.11’de fırçasız bir DC motor yapısı verilmektedir.



Şekil 1.11: BLDC motorunun yapısı ve çalışma prensibi (greensky-power.com 2022)

Çalışma Prensibi:

- Manyetik rotor ve sabit stator sargılarından oluşur.
- Elektronik komütasyon ile rotorun manyetik alanı sürekli değiştirilerek dönme hareketi sağlanır.

Avantajları:

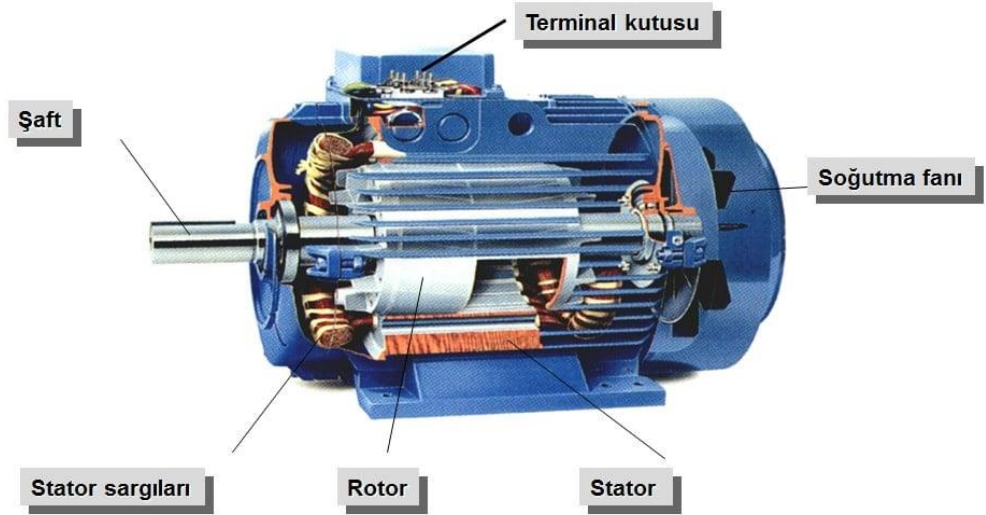
- Yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimi.
- Daha uzun ömürlü ve sessiz çalışma.
- Yüksek güç yoğunluğu sağlar.

Dezavantajları:

- Karmaşık sürücü devresi gerektirir.
- Kontrol algoritmaları daha gelişmiş olmalıdır.

1.3.3 Asenkron (İndüksiyon) Motorlar

Stator sargılarına uygulanan alternatif akım, döner bir manyetik alan oluşturur ve bu alan, rotor üzerinde indüklenen akımlar sayesinde rotorun dönmesini sağlar. Bu motorlar dayanıklı ve güvenilir olmalarına rağmen, başlangıç torkları düşüktür ve verimlilikleri bazı diğer motor tiplerine göre daha düşüktür. Şekil 1.12’de asenkron motor iç yapısı verilmiştir.



Şekil 1.12: Asenkron motor iç yapısı (dargeb.com 2020)

Çalışma Prensibi:

- Stator sargılarına alternatif akım uygulandığında döner manyetik alan oluşur.
- Rotor, bu manyetik alan tarafından indüklenen akımlar sayesinde hareket eder.

Avantajları:

- Dayanıklı ve güvenilir bir yapıya sahiptir.
- Düşük maliyetlidir.
- Yüksek devirlerde verimli çalışır.

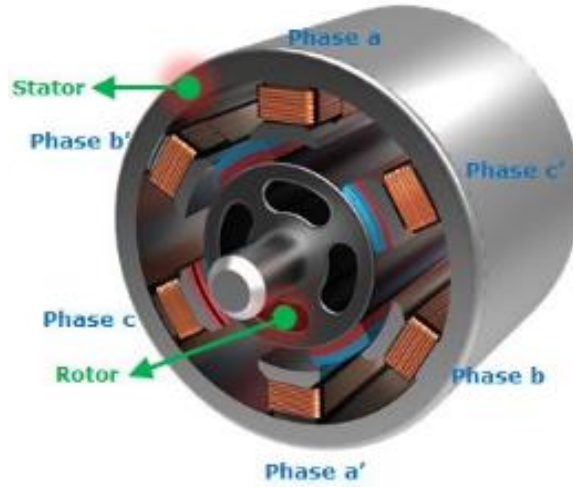
Dezavantajları:

- Başlangıç torku düşüktür.
- Verimliliği BLDC ve kalıcı mıknatıslı senkron motorlara (permanent magnet synchronous motor – PMSM) kıyasla biraz daha düşük olabilir.

1.3.4 Kalıcı Mıknatıslı Senkron Motorlar (PMSM)

Stator sargılarında oluşturulan döner manyetik alan ile rotor üzerindeki kalıcı mıknatıslar senkronize bir şekilde döner. Bu motorlar, yüksek verimlilikleri ve kompakt yapıları sayesinde elektrikli araçlarda yaygın olarak kullanılır. Ancak, nadir

toprak elementlerinden yapılan mıknatısların maliyeti yüksektir. Şekil 1.13'te PMSM iç yapısı görünmektedir.



Şekil 1.13: PMSM motoru iç yapısı (avys.omu.edu.tr 2024)

Çalışma Prensipleri:

- Stator sargılarında döner manyetik alan oluşturulur.
- Rotor, sabit mıknatıslarla oluşturulduğu için senkron olarak döner.

Avantajları:

- Yüksek verimlilik.
- Kompakt yapı ve hafif tasarım.
- Yüksek tork üretimi.

Dezavantajları:

- Sabit mıknatısların üretimi pahalıdır.
- Nadir toprak mıknatıslarına olan bağımlılık nedeniyle maliyet değişkenlik gösterebilir.

1.3.5 Anahtarlama Relüktans Motoru (SRM - Switched Reluctance Motor)

Bu motorlar, stator sargılarının sırasıyla enerjilendirilmesiyle rotorun manyetik çekim kuvvetiyle hareket etmesini sağlar. Basit ve sağlam yapıları

sayesinde düşük maliyetli ve yüksek sıcaklık dayanımına sahip olmalarına rağmen, yüksek akustik gürültü üretirler ve karmaşık kontrol sistemleri gerektirirler. Şekil 1.14'te SRM'nin iç yapısı görülmektedir.



Şekil 1. 14: Anahtarlamalı relüktans motoru

Çalışma Prensibi:

- Manyetik alanın rotor üzerinde oluşturduğu çekim kuvveti ile hareket sağlanır.
- Elektronik kontrol ünitesi ile stator sargıları sırasıyla enerjilendirilir.

Avantajları:

- Basit yapısı nedeniyle düşük maliyetlidir.
- Yüksek sıcaklık dayanımı vardır.
- Mıknatıs kullanmadığı için tedarik zinciri açısından avantajlıdır.

Dezavantajları:

- Yüksek akustik gürültü.
- Karmaşık kontrol gerektirir.

Sonuç olarak, elektrikli araçlarda kullanılan motor türleri, aracın performansı, verimliliği ve maliyeti üzerinde doğrudan etkilidir. Her motor türünün kendine özgü

çalışma prensipleri, avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır. Tablo 1.1’de günümüzde kullanılan bazı araçlar ve üzerinde bulunan motor tipleri verilmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında BLDC motor kullanılacaktır. BLDC motorun tercih edilmesinin başlıca nedenler aşağıda verilmiştir:

- Yüksek verimlilik ile çalışabilmeleri,
- Momentinin yüksek olması ve motor boyutunun küçük oluşu,
- Sessiz çalışmaları, güvenilirliği ve uzun ömürlü oluşu,
- Yüksek devirlerde problemsiz çalışması,

Tablo 1. 1: Araç modelleri ve kullanmış olduğu motorlar (Kaymaz ve Demir 2020)

Üretim Yılı	Araç Model	Motor Tipi	Güç (KW/HP)	Tork (Nm)
2020	NISSAN LEAF	PMSM	110/147	320
2020	JAGUAR I-PACE	PMSM	294/400	696
2020	TESLA MODEL S Performance SR	AM	568/762	980
2020	TESLA MODEL X Performance SR	AM	568/762	990
2018	TESLA MODEL 3 RWD	AM	204/274	350
2020	PORSCHE Mission E(TAYCAN) 4S	AM	320/429	600
2020	CHEVROLET BOLT EV	BLDC	150/201	360
2018	BMW İ8	PMSM	170/228	320
2019	BMW İ3	PMSM	125/167	250
2020	TOYOTA PRIUS	PMSM	53/71	163
2019	HYUNDAI KONA ELECTRIC	PMSM	150/201	395
2019	MERCEDES-BENZ GENERATION EQ	AM	300/402	760
2019	AUDI E-TRON 55 QUATRO	AM	265/356	561
2021	VOLVO XC40 RECHARGE P8	PMSM	300/402	660
2007	HOLDEN ECOMMODORE	SRM	55/73.7	-
-	LUCAS CHLORIDE	SRM	-	-
-	MAZDA BONGO	SHUNT DC	-	-
-	FIAT PANDA ELETTRA	SERİ DC	-	-

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Bu bölümde, literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve önerilen quasi-z-kaynak inverter (qZSI) topolojilerinin avantajları ile dezavantajları ayrıntılı bir şekilde ele alınmıştır.

2.1 Başlıca Yapılan Çalışmalar

(Peng 2003)'te DC-AC, AC-DC, AC-AC ve DC-DC güç dönüşümü gerçekleştiren bilinen ilk empedans güç dönüştürücüsünü ve bu dönüştürücünün kontrol yöntemini sunmuştur. Z-kaynak inverter (ZSI), dönüştürücünün ana devresini güç kaynağına bağlamak için benzersiz bir empedans ağı kullanır ve böylece, geleneksel gerilim kaynağı ve akım kaynağı dönüştürücülerinde kullanılan kondansatör ve indüktör ile elde edilemeyen özellikler sağlamıştır. ZSI, geleneksel gerilim kaynağı ve akım kaynağı dönüştürücülerinin kavramsal ve teorik engellerini aşarak, yeni bir güç dönüşüm konsepti sunmuştur.

(Shen ve diğ. 2004)'de ZSI'ler için iki farklı maksimum sabit yükseltme kontrol yöntemi önerilmektedir. Bu yöntemler, herhangi bir modülasyon indeksinde maksimum gerilim kazancı elde ederken çıkış frekansına bağlı düşük frekanslı dalgalanmalar oluşturmamaktadır. Böylece, z-ağı gereksinimi yalnızca anahtarlama frekansı ile belirlenmekte ve çıkış frekansından bağımsız hale gelmektedir. Gerilim kazancı ile modülasyon indeksi arasındaki ilişki ayrıntılı olarak analiz edilmiş ve simülasyonlar ile deneyler aracılığıyla doğrulanmıştır.

(Holland ve diğ. 2005)'te yakıt hücresinden güç elde etme, motora güç sağlama ve bataryanın şarj durumu (state of charge - SoC) kontrolünü sağlamak için kullanılan bir ZSI kontrol stratejisi sunulmuştur. ZSI, ana invertör devresini yakıt hücresine bağlamak için özel bir empedans ağı kullanmıştır. Bu çalışma, z-kaynak ağındaki bir (veya her iki) kondansatör yerine yüksek voltajlı bir batarya kullanan yeni bir konsept ortaya koymuştur. Bu yeni konseptler, simülasyon ve deneysel sonuçlarla sunulmuştur.

(Huang ve diğ. 2006)'da ZSI tabanlı yeni bir fotovoltaiik (photovoltaic – PV) sunulmuştur. Önerilen sistem, maksimum gücü takip edilerek boost ve invertör işlevlerini tek bir güç aşamasında gerçekleştirerek anahtarlama elemanlarının sayısını minimize etmiştir. ZSI ve altı anahtarlı split-phase invertörün tüm avantajları alınarak entegrasyon sağlanmış ve böylece minimize edilmiş hacim ve maliyetle yüksek güvenilirlikte bir güç koşullandırma sistemi oluşturulmuştur.

(Shen ve diğ. 2006)'da ZSI'ler için sabit yükseltme kontrol yöntemleri önererek maksimum gerilim kazancı sağlarken düşük frekanslı dalgalanmaları önlemektedir. Yöntemler, z-ağı gereksinimini yalnızca anahtarlama frekansına bağlı hale getirmiş ve deneylerle doğrulanmıştır.

(Anderson ve Peng 2008)'te gerçekleştirilen çalışmada, z-kaynak tabanlı yeni invertör topolojileri önerilmiştir. Bu invertörlerin, geleneksel ZSI topolojisine kıyasla daha az pasif bileşenlere sahip olduğu ve giriş akımının iyileştirildiği ifade edilmiştir. Çalışmada, quasi-z topolojilerinin özellikle yenilenebilir enerji sistemleri ve motor kontrol uygulamaları gibi geniş kazanç aralığı gerektiren ve maliyet etkinliğinin önemli olduğu alanlar için uygun olduğu tespit edilmiştir.

(Li ve diğ. 2009)'da geleneksel ZSI'den türetilmiş yeni bir topoloji olan qZSI tanıtılmıştır. qZSI, ZSI'nin tüm avantajlarını koruyarak tek aşamada gerilim düşürme/yükseltme ve güç düzenleme işlevlerini artırılmış güvenilirlikle gerçekleştirebilmektedir. Buna ek olarak, qZSI daha düşük bileşen değerlerine sahip olması ve kaynaktan sabit bir DC akımı çekmesi gibi ek avantajlar sunmaktadır. ZSI için geliştirilmiş tüm yükseltme kontrol yöntemleri qZSI için de uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, qZSI'nin gerilim yükseltme kabiliyeti, kontrol yöntemleri ve PV sistemlerine yönelik tasarım rehberi teorik olarak incelenmiştir. Laboratuvar ortamında bir prototip oluşturulmuş ve önerilen konsept ile teorik analizlerin doğruluğu hem simülasyon hem de deneylerle doğrulanmıştır.

(Gajanayake ve diğ. 2010)'da yeni bir genişletilmiş boost qZSI ailesi önermektedir. Önerilen yeni topolojiler, orijinal ZSI için geliştirilen modülasyon yöntemleri ile aynı şekilde çalıştırılabilir ve aynı sayıda aktif anahtara sahip olup ZSI'nin tek aşamalı doğasını korur. Önerilen topolojiler, kararlı durum analizleriyle incelenmiş ve MATLAB/Simulink simülasyonlarıyla performansları doğrulanmıştır.

Ayrıca, laboratuvar ortamında geliştirilen bir prototip ile deneysel olarak da doğrulanmıştır.

(Qian ve diğ. 2011)'de geleneksel ZSI konsepti, trafo tabanlı z-kaynak inverterlerine (trans-z-source inverter – Trans-ZSI) genişletilmiştir. Önerilen dört adet trans-ZSI'lerde, tüm empedans ağları bir trafodan ve bir kondansatörden oluşmaktadır. Bu yeni ağlar önceden sunulan z-kaynak ağlarının ana özelliklerini korurken, bazı benzersiz avantajlar da sunmaktadır; örneğin, trafolu trans-ZSI'lerde gerilim kazancının artması ve gerilim stresinin azalması, akımla beslenen trans-ZSI'lerde ise motor çalışma aralığının genişlemesi gibi avantajlar, trafonun sarım oranı 1'in üzerine çıktığında gözlemlenmektedir. Gerilimle beslenen ve akımla beslenen trans-ZSI'lerin simülasyon ve deneysel sonuçları, yapılan analizleri doğrulamak için sunulmuştur.

PV enerji üretim sistemleri için PV batarya destekli bir qZSI (Sun ve diğ. 2013)'te önerilmiştir. Maksimum güç noktası takibi (maximum power point tracking - MPPT) algoritması, önerilen kontrol şemasıyla birlikte uygulanarak, PV sistem ile quasi-z invertörün performansı değerlendirilmiştir. Bu sistemde, PV paneli aracılığıyla MPPT algoritması kullanılarak şebekeye aktarılan güç yönetilmiş ve SoC oranının etkin bir şekilde kontrolü sağlanmıştır.

(Li ve diğ. 2013)'te ZSI ve qZSI topolojilerinin PV sistemlerde kullanımına yönelik modelleme ve kontrol yöntemleri ele alınmıştır. Tek kademeli yükseltme ve düşürme yetenekleri sayesinde bu inverterlerin, dağıtık üretim sistemlerinde, özellikle PV ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları için uygun olduğu gösterilmiştir. Küçük işaret analiziyle qZSI'nin dinamik özellikleri incelenmiş, bağımsız ve şebekeye bağlı çalışma modları için kapalı çevrim kontrol stratejileri geliştirilmiştir. Ayrıca, anahtarlama gerilim stresini en aza indirmek amacıyla sabit kapasitör voltajı kontrol yöntemi önerilmiş ve deneysel sonuçlarla doğrulanmıştır.

(Sun ve diğ. 2014)'te PV güç sistemleri için avantaj sunan qZS kaskad çok seviyeli inverter (qZS-CMI) ele alınmıştır. Her PV paneli, bir H-köprü qZSI ile bağlanarak güç üretim modülleri oluşturmuştur. Bu yapı sayesinde dağıtılmış maksimum güç noktası takibi ve tüm modüllerin DC bağlantı gerilimi dengesi sağlanabilir. Ancak, geleneksel CMI yapılarında olduğu gibi, her qZSI modülünde

ikinci harmonik (2ω) gerilim ve akım dalgalanmaları oluşmaktadır. Çalışmada, her bir qZSI modülündeki 2ω gerilim ve akım dalgalanmalarını doğru bir şekilde hesaplayan analitik bir model önerilmiştir. Simülasyon ve 1.5 kW'lık bir prototip üzerinde gerçekleştirilen deneysel sonuçlar, önerilen analitik modelin ve tasarım yönteminin doğruluğunu kanıtlamaktadır.

(Siwakoti ve diğ. 2015)'te elektrik güç dönüşümünde kullanılan DC, AC ve AC-AC sistemler için empedans ağlarını kapsayan geniş bir uygulama yelpazesinde, geleneksel gerilim kaynağı, akım kaynağı ve çeşitli klasik buck-boost, tek yönlü ve çift yönlü dönüştürücü topolojilerinin sınırlamalarını aşmak amacıyla literatürde önerilen çeşitli dönüştürücü topolojileri incelenmiştir. Bu derleme makalesi, araştırmacılar, tasarımcılar ve uygulama mühendisleri için empedans kaynaklı ağlarla güç dönüşümü hakkında bilgi kaynağı ve seçim rehberi sağlamayı amaçlayan ilk çalışmadır.

(Siwakoti ve diğ. 2015)'te empedans kaynaklı ağların elektrik güç dönüşümü uygulamalarında (DC-DC, DC-AC, AC-DC, AC-AC) kullanımı için farklı modülasyon stratejileri ele alınmıştır. Empedans kaynaklı ağ tabanlı güç dönüştürücülerinin kapsamlı bir incelemesi bir önceki makalede ele alınmış ve ana topolojiler uygulama açısından tartışılmıştır. Bu makalede ise araştırmacılar ve uygulama mühendislerine belirli bir güç seviyesi ve istenen dinamik yanıtlar göz önünde bulundurularak, hangi kontrol yönteminin bir uygulama için uygun olduğunu belirlemelerinde faydalı bir rehber olacağı belirtilmiştir.

(Xia ve diğ. 2015)'te qZSI dönüştürücü ile dört anahtarlı üç fazlı BLDC motor kontrolü ve sürücü devresini birleştiren yeni bir topoloji önerilmiştir. MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyon sonuçları, inverterin DC-bar geriliminin hızla nominal değere ulaşabildiğini ve düşük DC bara gerilimi ile hız ve yük aralığının genişletilebildiğini göstermektedir.

(Zhou ve diğ. 2016)'te tek fazlı PV sistemlerde DC giriş ile AC çıkış arasındaki çift frekanslı güç uyumsuzluğu ele alınmıştır. Önerilen yöntem sayesinde giriş voltajındaki çift frekanslı dalgalanma minimize edilerek güvenilir film kapasitörlerin kullanımı mümkün hale getirilmiştir. Ayrıca, geliştirilen yöntemin anahtarlama elemanlarına getirdiği gerilim gerilimi ve güç kaybı üzerindeki etkileri

incelenmiş, 1 kW'lık bir galyum nitrit (gallium nitride – GaN) tabanlı qZSI prototipiyle deneysel doğrulamalar gerçekleştirilmiştir.

(Bayhan ve diğ. 2016)'da üç fazlı dört kollu qZSI topolojisi için model öngörülü kontrol (model predictive control - MPC) yöntemi sunulmaktadır. Bu topoloji, geniş bir gerilim kazanç aralığına sahip olup, yenilenebilir enerji kaynaklarının çıkış geriliminin rüzgar hızı, sıcaklık ve güneş ışınımı gibi çalışma koşullarına bağlı olarak değiştiği sistemler için uygundur. Kontrol yeteneğini artırmak amacıyla, sistemin ayrık zamanlı modelini temel alan bir MPC yöntemi kullanılmıştır. Kontrolör, her faz akımını bağımsız olarak yöneterek sisteme esneklik kazandırmaktadır. Simülasyon ve deneysel çalışmalar, önerilen kontrol stratejisinin dengeli ve dengesiz yük koşullarında ve tek fazlı açık devre arızası durumunda başarılı bir performans sergilediğini doğrulamıştır.

Geleneksel matris dönüştürücüler (matrix converter - MC), doğrudan MC (direct matrix converter - DMC) veya dolaylı MC (indirect matrix converter - IMC) için voltaj kazancı 0.866'nın altındadır. Z-kaynak matris dönüştürücüleri (ZSMC), geleneksel MC'lerin voltaj kazancı sınırlamasını aşarak, düşük anahtar sayısıyla buck ve boost işlemi gerçekleştirir ve böylece, sırt-sırt (back-to-back) dönüştürücülere kıyasla düşük maliyet, yüksek verimlilik ve güvenilirlik sağlar. (Ellabban ve diğ. 2016)'da farklı ZSMC topolojileri, devre analizleri, modülasyon şemaları ve uygulamalarına dair güncel ve kapsamlı bir genel bakış sunulmuştur.

(Nguyen ve Choi 2017)'de tek fazlı switched-boost inverter (SBI) ve z-kaynak inverter için maksimum yükseltme kontrol yöntemi önerilmektedir. Önerilen yöntemde, değişken shoot-through (ST) zaman aralıklarını oluşturmak için düşük frekanslı gerilim, sabit gerilime eklenmiştir. İnverterin AC çıkış kalitesini artırmak amacıyla, tek fazlı SBI devresindeki diyotlardan biri aktif bir güç anahtarı ile değiştirilmiştir. Laboratuvar prototipleri ile tek fazlı qZSI ve qSBI için pals genişlik modülasyonu (pulse width modulation – PWM) kontrol yönteminin etkinliği doğrulanmıştır.

(Mosa ve diğ. 2017)'de üç fazlı qZSI için ek bir kontrol döngüsü olmadan, akım kapalı çevrim kontrolü, DC kondansatör gerilimi kontrolü ve düşük dalgalanmalı giriş akımı elde etme gibi gereksinimleri karşılayan bir prediktif kontrol

stratejisi sunmaktadır. Önerilen kontrolör, qZSI'nin ayrık zamanlı modelini kullanarak devre değişkenlerini tahmin eder ve kontrol değişkenlerini tek bir maliyet fonksiyonunda birleştirir. Önerilen yöntem geleneksel PI denetleyicisiyle karşılaştırılmıştır. Simülasyon ve deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermektedir.

(Mahmoudi ve diğ. 2017)'de ZSI tabanlı PMSM sürücü sistemi için modüle edilmiş model öngörülü kontrol (MMPC) tabanlı bir kontrol sistemi sunulmaktadır. Önerilen yöntem, z-kaynak ağı ve PMSM kontrolü için iki ayrı MMPC döngüsü kullanmaktadır. PMSM kontrolü için ise, motorun ayrıklaştırılmış denklemlerini kullanarak gelecekteki akım vektörlerini tahmin eden, belirli bir maliyet fonksiyonunu minimize eden akım vektörlerini seçen ve örneklem süresi boyunca bu vektörler arasında modülasyon yapan bir MMPC denetleyicisi geliştirilmiştir. Teorik analizlerin doğruluğunu kanıtlamak amacıyla deneysel sonuçlar sunulmuştur.

(Shinde ve diğ. 2018)'de dağıtık mikro ağ ve akıllı şebeke uygulamalarında giderek yaygınlaşan şebeke bağlantılı invertörler ele alınmaktadır. qZSI gibi tek aşamalı çalışma, düşük bileşen değeri, sürekli giriş akımı ve ortak DC hat gibi avantajları, bu dönüştürücünün şebeke bağlantılı uygulamalar için incelenmesine yol açmıştır. Bu makale hem AC hem de DC tarafı kontrolüne sahip bir şebeke bağlantılı qZSI sunmaktadır. Hızlı dinamik yanıt ve azaltılmış harmonikler, simülasyon ve deneysel sonuçlarla gösterilmiştir.

(Derbane ve diğ. 2020)'de qZSI ile beslenen bir endüksiyon motorunun uyarlanmış doğrudan tork kontrol (direct torque control - DTC) yöntemi ile kontrol edilmesi sunulmuştur. DTC için bir anahtarlama tablosu geliştirilmiş ve endüksiyon motorunun manyetik akı ve torkunun bağımsız kontrolü ile DC bara geriliminin artırılması sağlanmıştır. Ayrıca önerilen sistem güç anahtarları sayısını azaltmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen kontrol yönteminin etkinliğini kanıtlamak için sunulmuştur.

(Guo ve diğ. 2020)'de LC filtre entegreli ve qZSI tabanlı dolaylı matris dönüştürücünün (qZS-IMC) bir endüksiyon motoru tahrik sistemine uygulanması ele alınmıştır. Kontrol yöntemi, motor vektör kontrolü, minimum ST görev döngüsü ve maksimum modülasyon indekslerini birleştirmektedir. Simülasyon ve deneysel

sonuçlar, önerilen qZS-IMC'nin motor tahrik sistemini kontrol edebildiğini doğrulamaktadır.

(Bagheri ve diğ. 2020)'de tek fazlı bir qZSI için sabit anahtarlama frekansına sahip çok girişli ve çok çıkışlı bir kayma modu kontrol (Sliding mode control - SMC) yöntemi önerilmektedir. Sistemin matematiksel modeli durum uzayında türetilmiştir. Önerilen kontrol yöntemi, sistemin hem DC hem de AC taraflarını eş zamanlı olarak kontrol edebilme yeteneğine sahiptir. Ayrıca, basit uygulanabilirlik, düşük kazanç gereksinimi, sistem parametrelerine karşı dayanıklılık ve yük voltajında sıfır kalıcı hata gibi çeşitli avantajlar sunmuştur. Önerilen kontrol yönteminin uygulanabilirliği, qZSI'nin doğrusal ve doğrusal olmayan yükleri beslediği deneysel çalışmalarla incelenmiştir.

(Ghahderijani ve Dehkordi 2021)'de ZSI'lerin kalıcı mıknatıslı senkron motor (PMSM) sürücülerinde kullanımı için hızlı ve dayanıklı bir kontrol yöntemi önerilmektedir. Önerilen sistem, motorun hız ve akım kontrolünü iyileştirirken, bozucu etkileri azaltmak için geliştirilmiş bir uzay vektör modülasyon tekniği kullanmaktadır. Laboratuvar testleri, önerilen yöntemin tork dalgalanmasını %25, yerleşme süresini %60 oranında azalttığını ve önceki tekniklere kıyasla %40 daha iyi performans sağladığını göstermektedir.

(Mahalingam ve Ramji 2022)'de BLDC motorların yüksek verimlilik ve düşük bakım gereksinimi gibi avantajlarına rağmen, karmaşık kontrolcü ihtiyacı, tork dalgalanmaları ve yüksek maliyet gibi sınırlayıcı faktörleri ele alınmıştır. Farklı tork dalgalanması azaltma yöntemleri karşılaştırılmış ve Cuk dönüştürücü, basit gerilim modülasyon şeması, şarjlı kapasitör, z-kaynak inverter ve quasi-z-kaynak inverter tabanlı yaklaşımlar incelenmiştir. MATLAB Simulink ortamında gerçekleştirilen simülasyonlarla kontrol stratejilerinin etkinliği değerlendirilmiş ve tüm hız aralığında tork dalgalanmasını en aza indiren yöntemler belirlenmiştir.

(Cao ve diğ. 2022)'de PMSM sistemlerinin rotor pozisyonu ve hızının doğru tahmin edilmesi için flying restart isimli yeni bir yöntem önerilmektedir. Geleneksel kısa devre yöntemleri hız ve pozisyon tahmin doğruluğunu artırırken, tork tepki hızını olumsuz etkileyebilmektedir. Bu makale, quasi-z-kaynak invertör tabanlı ST sıfır vektör kısa devre yöntemi sunarak, motorun normal ve anormal çalışma

aşamalarında DC bağlantı gerilimini optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu yöntem, rotor pozisyonu ve hızının doğru tahmini ile daha hızlı tork yanıtı sağlamak ve önerilen sensörsüz metot sistem performansını iyileştirmektedir.

(Ortatepe ve Özdemir 2023)'te gerçekleştirilen çalışmada, üç fazlı quasi-z topolojisine uygulanmak üzere sinüzoidal darbe genişlik modülasyonu (sinüsoidal pulse width modulation - SPWM) kontrol şeması geliştirilmiş ve topolojideki kondansatör gerilimleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Devre üzerinde gerçekleştirilen deneylerde, geçici, kararlı ve değişken çalışma koşulları incelenmiş ve her bir durumda sistemin performansı değerlendirilmiştir. Yapılan testler, quasi-z topolojisinin bu koşullar altında başarılı sonuçlar verdiğini ortaya koymuştur.

(Chandran ve diğ. 2023)'de BLDC motorlu elektrikli araç uygulamalarına uygun bir DC-DC dönüştürücü seçimi ele alınmıştır. Yüksek çıkış gerilimi ve gücü, düşük harmonik bozulma, düşük dalgalanma ve yüksek verimlilik gibi temel gereksinimler dikkate alınarak çeşitli dönüştürücü topolojileri değerlendirilmiştir. Önerilen dönüştürücünün performansı, tasarım topolojisi, kullanılan bileşenler, kayıp hesaplamaları ve çıkış performansları detaylı analizlerle doğrulanmıştır.

(Krishna P. S. ve diğ. 2023)'de düşük güçlü elektrikli araç (EV) uygulamaları için BLDC motor tabanlı çift yönlü quasi-z-kaynaklı inverterin (BD-qZSI) performansı, modifiye edilmiş ST histerezis akım kontrolü (STHCC) yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Araştırmada, tam sürüş çevriminin hesaplama yükü olmaksızın pratik araç dinamikleri oluşturulmuş ve farklı hız ve tork koşulları altında üç motor sürüş modu ile iki rejeneratif frenleme modu dahil edilmiştir. BLDC motorun kapalı çevrim hız kontrolü, PI denetleyici ile modifiye edilmiş STHCC'nin birleşimiyle MATLAB/Simulink ortamında analiz edilmiştir. Tek kademeli çift yönlü güç transferi ve rejeneratif frenleme performansı incelenmiş, elde edilen sonuçlar önerilen sistemin düşük güçlü EV uygulamaları için geçerliliğini doğrulamıştır.

3. MATERYAL VE METOD

3.1 BLDC Motorun Yapısı ve Denklemleri

Fırçasız doğru akım motorlar, fırçalı doğru akım motorlarına benzer bir çalışma prensibine sahip olsalar da yapılarında mekanik komütatör ve fırça bulunmaz. Bunun yerine, elektronik komütasyon ile çalışırlar ve motorun dönmesini sağlamak için bir kontrol birimi gerektirirler.

BLDC motorlar, yüksek verim, uzun ömür, düşük bakım gereksinimi ve daha iyi tork-hız karakteristiği gibi avantajları nedeniyle birçok endüstriyel ve ticari uygulamada tercih edilir. Yüksek güç yoğunluğu ve düşük kayıplar sayesinde elektrikli araçlar, havacılık, robotik ve otomasyon gibi alanlarda yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca, fırçalı motorlara kıyasla daha düşük gürültü seviyelerine sahiptirler.

BLDC motorlar, stator ve rotor olmak üzere iki ana bileşenden oluşur. Stator üç fazlı sargılardan oluşur ve sabit bir manyetik alan üretir. Rotor ise kalıcı mıknatıslardan oluşur ve stator sargılarında oluşturulan manyetik alanın etkisiyle döner. Rotorun mıknatıs dizilimi radyal veya eksenel olabilir. Hall sensörleri veya diğer pozisyon algılama yöntemleri sayesinde rotorun konumu belirlenerek elektronik komütasyon sağlanır.

3.2.4 BLDC Motorun Matematiksel Modeli

Motorun matematiksel modeli, üç fazlı devre denklemlerine dayanır. BLDC motorun fazlarına uygulanan gerilimler aşağıdaki gibi modellenebilir:

$$V_a = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \quad (3.1)$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (3.2)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \quad (3.3)$$

Burada; V_a , V_b ve V_c faz gerilimlerini, i_a , i_b ve i_c faz akımlarını, L endüktans değerlerini ve e_a , e_b ve e_c ise geri elektromotor kuvvetini (back electromotive force – Back EMF) ifade etmektedir.

BLDC motorun EMF'si sinüsoidal veya trapezoidal olabilir. EMF'nin trapezoidal olması durumunda, faz başına düşen EMF şu şekilde ifade edilir:

$$e_a = K_e \omega_r f(\theta) \quad (3.4)$$

$$e_b = K_e \omega_r f(\theta - 120^\circ) \quad (3.5)$$

$$e_c = K_e \omega_r f(\theta - 240^\circ) \quad (3.6)$$

Burada; K_e EMF sabitini, ω_r rotor açısal hızını, θ rotor pozisyon açısını ve $f(\theta)$ ise faz başına düşen EMF'nin şekil fonksiyonunu ifa etmektedir.

Motorun ürettiği elektromanyetik tork şu şekilde ifade edilir:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_m} \quad (3.7)$$

Burada; ω_m rotorun mekanik açısal hızını temsil eder. Bu matematiksel modeller, BLDC motorun kontrol stratejilerinin geliştirilmesi ve simülasyon ve deneysel çalışmaları için temel teşkil etmektedir.

3.2 BLDC Motor Kontrol Yöntemleri

BLDC motorlarının kontrolü, motorun verimli çalışmasını sağlamak ve yüksek performans elde etmek için çeşitli yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Bu yöntemler, motorun hız, tork ve akım kontrolünü sağlayarak, belirlenen çalışma koşullarına uygun hareket etmesini amaçlar. Bu bölümde, yaygın olarak kullanılan BLDC motor kontrol yöntemleri ele alınacak ve avantaj ile dezavantajları incelenecektir.

3.2.1 Trapezoidal Kontrol (120° Komütasyon)

Trapezoidal kontrol, en yaygın ve basit BLDC motor kontrol yöntemlerinden biridir. Bu yöntemde motorun faz akımları 6 anahtarlama durumu ile kontrol edilir ve her faz sırasıyla ilettime girerek rotoru hareket ettirir.

Bu yöntem faz akımlarının trapezoidal bir dalga formunda uygulanmasını sağlayarak basit ve verimli bir kontrol sunar. Ancak, bu yöntemde tork dalgalanmaları oluşabilir ve hassas hız kontrolü sağlamak zor olabilir.

3.2.2 Sinüsoidal Kontrol

Sinüsoidal kontrol yönteminde, motor fazlarına uygulanan gerilimler sinüs dalga formunda üretilerek motorun daha akıcı ve düzgün bir şekilde dönmesi sağlanır. Bu yöntemin en önemli avantajlarından biri, trapezoidal kontrol yöntemiyle karşılaştırıldığında daha düşük tork dalgalanmasına sahip olmasıdır. Daha pürüzsüz bir tork üretildiği için motor daha sessiz çalışır ve akustik gürültü azalır. Bu durum, hassas ve titreşimsiz hareket gerektiren uygulamalarda sinüsoidal kontrolü daha avantajlı hale getirir.

Bununla birlikte, sinüsoidal kontrol yönteminin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Öncelikle, bu yöntemin uygulanabilmesi için daha karmaşık bir kontrol algoritmasına ihtiyaç duyulur. Faz akımlarının hassas bir şekilde oluşturulması gerektiğinden, kontrol sisteminde daha fazla hesaplama yapılması gerekir. Bu da mikrodenetleyici veya dijital sinyal işlemcisi (digital signal processor - DSP) gibi daha güçlü işlemcilerin kullanılmasını zorunlu kılar. Ayrıca, sinüsoidal kontrol yöntemi bazı çalışma koşullarında trapezoidal yönteme kıyasla daha düşük verimle çalışabilir. Özellikle yüksek hızlarda, akım örnekleme ve işlem sürelerinin artması nedeniyle sistemin performansı sınırlanabilir.

3.2.3 Alan Yönlendirmeli Kontrol (Field Oriented Control - FOC)

Alan yönlendirmeli kontrol (field oriented control - FOC), motorun manyetik alan bileşenlerini hassas bir şekilde kontrol ederek tork ve hız yönetimini optimize eden bir yöntemdir. Bu yöntemde, üç fazlı akım bileşenleri belirli dönüşümler yardımıyla dq eksenine aktarılır ve kontrol işlemi rotor manyetik alanı referans

alınarak gerçekleştirilir. Böylece, motorun manyetik akısı ve torku bağımsız bileşenler olarak ayrılır ve daha hassas bir kontrol sağlanır.

FOC yönteminin en önemli avantajlarından biri, motor tork ve hızının yüksek hassasiyetle kontrol edilebilmesidir. Manyetik akı ve tork bileşenleri ayrı ayrı kontrol edildiği için motorun dinamik performansı iyileşir ve enerji kayıpları azalır. Bu durum, motorun genel verimini artırırken aynı zamanda daha düşük güç tüketimi sağlar. Ayrıca, FOC sayesinde tork dalgalanmaları önemli ölçüde azalır ve motorun daha akıcı bir şekilde dönmesi sağlanır. Bu özellik, özellikle hassas hareket kontrolü gerektiren uygulamalar için büyük bir avantaj sunar.

Ancak FOC yöntemi, bazı dezavantajları da beraberinde getirir. Öncelikle, sistemin çalışması için karmaşık matematiksel dönüşümler gereklidir. Bu dönüşümler:

- a) $abc \rightarrow \alpha\beta$ (Clarke Dönüşümü)
- b) $\alpha\beta \rightarrow dq$ (Park Dönüşümü)
- c) $dq \rightarrow \alpha\beta$ (Ters Park Dönüşümü)
- d) $\alpha\beta \rightarrow abc$ (Ters Clarke Dönüşümü)

Yukarıda verilen ileri düzey matematiksel işlemler, kontrol algoritmasının daha karmaşık olmasına neden olur. Bu da kontrolör üzerinde daha fazla hesaplama gücü ihtiyacı doğurur.

$abc \rightarrow \alpha\beta$ Clarke Dönüşümü

Bu dönüşüm, üç fazlı (abc) sistemdeki akımları, iki fazlı ($\alpha\beta$) sistemine dönüştürerek motorun kontrolünü kolaylaştırır. i_a , i_b ve i_c şeklinde ifade edilen üç fazlı akımlar iki fazlı ($\alpha\beta$) eksen takımına aşağıdaki gibi dönüştürülebilir:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Bu dönüşüm sonucunda üç fazlı sistem, 90° faz farkı olan iki eksenli bir sisteme dönüştürülmüş olur.

3.2.3.1 $\alpha\beta \rightarrow dq$ Park Dönüşümü

Clarke dönüşümü ile elde edilen $\alpha\beta$ bileşenleri, sabit referans çerçevesinde bulunur. Ancak motorun rotor referans çerçevesine göre hareket etmesi gerektiğinden, $\alpha\beta$ eksenini dq eksenine dönüştürülmelidir.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Burada θ referans açısıdır ve genellikle motorlarda rotor manyetik alan açısı olarak kullanılır.

3.2.3.2 $dq \rightarrow \alpha\beta$ Ters Park Dönüşümü

Kontrol işlemi tamamlandıktan sonra, motorun faz akımlarına geri dönüş yapabilmek için ters dönüşüm aşağıdaki gibi gerçekleştirilir:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.2.3.3 $\alpha\beta \rightarrow abc$ Ters Clarke Dönüşümü

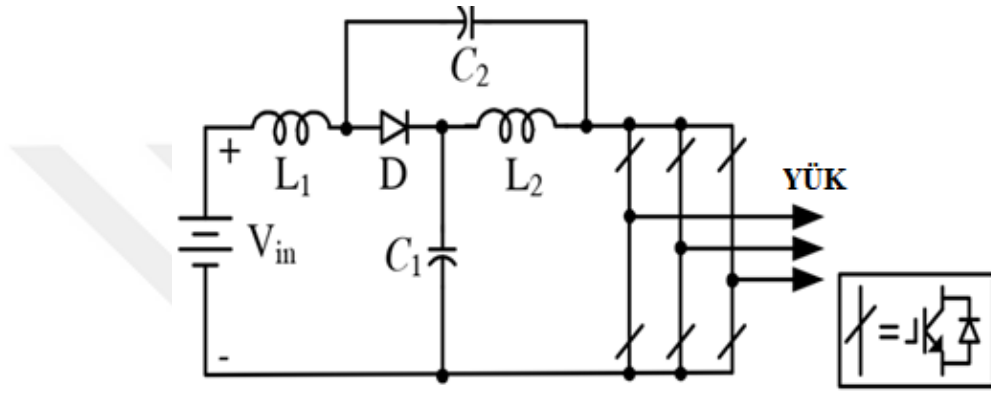
Son olarak, motorun üç fazlı besleme akımlarını elde etmek için ters clarke dönüşümü aşağıdaki gibi uygulanır:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Bu dönüşümle birlikte, kontrol işlemi tamamlanan akımlar tekrar üç fazlı sisteme dönüştürülerek motorun sürülmesi sağlanır.

3.3 Quasi Z-Kaynak Empedans (qZSI) Devresi ve Çalışma Prensibi

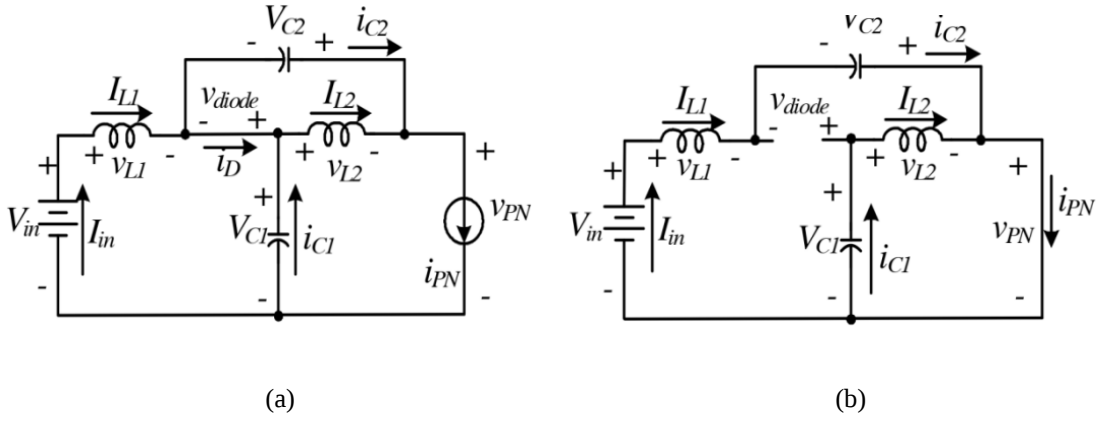
qZSI, ZSI topolojisinin geliştirilmiş bir türevi olup, tek kademede hem yükseltme (boost) hem de düşürme (buck) işlemlerini gerçekleştirebilen bir güç dönüştürücüsüdür. Bu devre, giriş gerilimindeki dalgalanmalara karşı daha iyi bir dayanım sağlamakta ve sürekli giriş akımı özelliği sayesinde özellikle yenilenebilir enerji sistemleri ve motor sürücü uygulamalarında tercih edilmektedir. Şekil 3.1’de quasi-z kaynak empedans devresinin yapısı verilmektedir.



Şekil 3.1: Quasi z-kaynak empedans devresi

Bu topolojinin kısa devre (shoot through - ST) durumu ve kısa devre olmayan (non-shoot through - NST) durumu olmak üzere iki çalışma durumu vardır. ST durumunda, aktif güç modülü içerisindeki anahtarlar kısa devre edilerek empedans ağı içerisinde enerji depolanmasına olanak tanınır. Bu çalışma modunda yüke herhangi bir gerilim aktarımı gerçekleşmez. NST durumunda ise, ST durumunda C_1 ve C_2 kapasitörleri üzerinde biriken toplam gerilim çıkışa iletilir. Bu çift modlu çalışma prensibi, verimli enerji dönüşümünü sağlamakta ve istenilen çok seviyeli çıkış geriliminin üretilmesine katkıda bulunmaktadır. Şekil 3.2’de qZSI topolojisinin ST ve NST çalışma modları gösterilmektedir.

Bu devre de V_{L_1} ve V_{L_2} bobin gerilimlerini, I_{L_1} ve I_{L_2} bobin akımlarını, V_{C_1} ve V_{C_2} kondansatör gerilimlerini, I_{C_1} ve I_{C_2} kondansatör akımlarını, V_{in} ve I_{in} DC kaynak gerilim ve akımlarını, V_{PN} DC hat gerilimini, V_{diode} diyot gerilimini etmektedir.



Şekil 3.2: Quasi-z kaynak empedans devre şeması (a) NST durumu (b) ST durumu

qZS ağının ST durumu sırasında, T_0 zaman aralığında elde edilen denklemleri aşağıdaki gibi ifade edilmektedir:

$$V_{L1} = V_{C2} + V_{in} \quad (3.12)$$

$$V_{L2} = V_{C1} \quad (3.13)$$

$$V_{PN} = 0 \quad (3.14)$$

$$V_{diode} = -(V_{C1} + V_{C2}) \quad (3.15)$$

NST durumu sırasında, T_1 zaman aralığında, denklemler aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$V_{L1} = V_{in} - V_{C1} \quad (3.16)$$

$$V_{L2} = -V_{C2} \quad (3.17)$$

$$V_{PN} = V_{C1} - V_{L2} = V_{C1} + V_{C2} \quad (3.18)$$

$$V_{diode} = 0 \quad (3.19)$$

Kararlı durum sırasında, bir anahtarlama çevrimi boyunca indüktörler üzerindeki ortalama gerilim sıfırdır.

$$T = T_0 + T_1 \quad (3.20)$$

$$V_{L_1} = \frac{T_0(V_{C_2} + V_{in}) + T_1(V_{in} - V_{C_1})}{T} = 0 \quad (3.21)$$

$$V_{L_2} = \frac{T_0(V_{C_1}) + T_1(-V_{C_2})}{T} = 0 \quad (3.22)$$

Bu nedenle, kondansatör voltajları V_{C_1} ve V_{C_2} aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$D = \frac{T_0}{T} \quad (3.23)$$

$$V_{C_1} = \frac{1-D}{1-2D} V_{in} \quad (3.24)$$

$$V_{C_2} = \frac{D}{1-2D} V_{in} \quad (3.25)$$

Maksimum DC bara gerilimi aşağıdaki şekilde tanımlanır:

$$V_{PN} = V_{C_1} + V_{C_2} = \frac{T}{T_1 - T_0} V_{in} = \frac{1}{1-2D} V_{in} = B V_{in} \quad (3.26)$$

$$V_{C_2} = \frac{D}{1-2D} V_{in} \quad (3.27)$$

Burada B yükseltme faktörünü ifade etmektedir. qZSI'nin ortalama giriş akımı, giriş gücünün giriş voltajına bölünmesiyle hesaplanabilir:

$$I_{L_1} = I_{L_2} = I_{in} = \frac{P}{V_{in}} \quad (3.28)$$

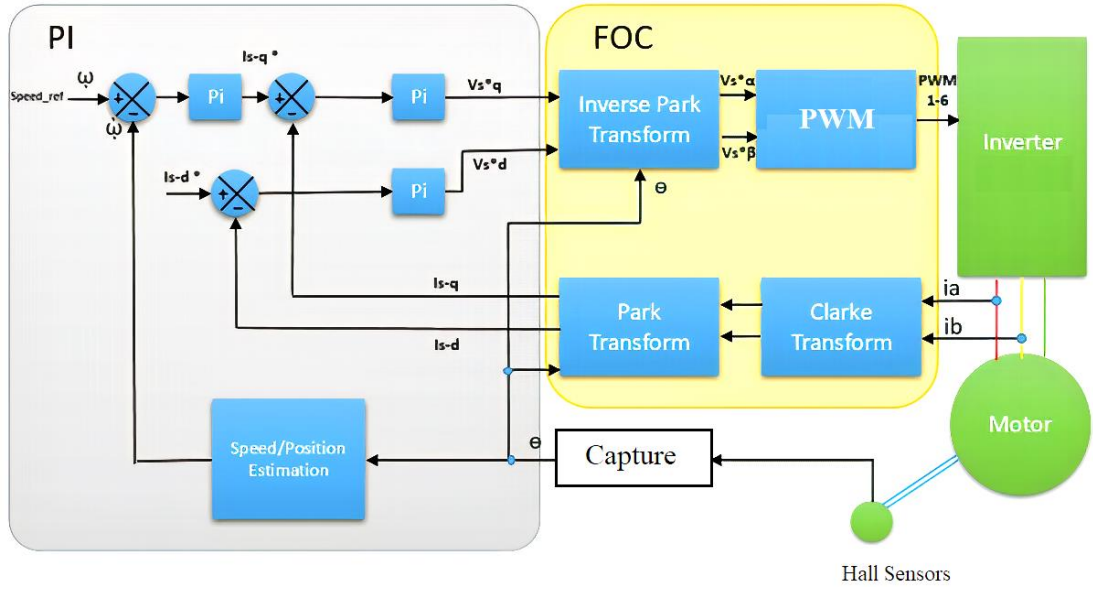
Kirchoff akım yasasını kullanarak kondansatör akımları ve diyot akımı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$I_{C_1} = I_{C_2} = I_{PN} - I_{L_1} \quad (3.29)$$

$$I_D = 2I_{L_1} - I_{PN} \quad (3.30)$$

3.4 Kontrol Metodu

BLDC motor kontrolü için FOC yöntemi yukarıda bahsedilen avantajları nedeniyle tercih edilmiştir. Şekil 3.3'te FOC kontrol süreci temel bileşenleriyle gösterilmiştir. Bu yöntem sırasıyla şu adımları içermektedir:



Şekil 3.3: BLDC motorun FOC temelli kontrol şeması

3.4.1 PI Kontrol

Motorun referans açısal hızı (ω_{ref}) ile mevcut açısal hızı (ω) karşılaştırılarak hata sinyali oluşturulur. Bu hata sinyali, hız kontrolü için bir PI denetleyiciye iletilir ve I_{sq}^* referans akımı elde edilir. Aynı şekilde, I_{sd}^* referans akımı sabit tutulur. Akım döngüsünde de PI denetleyiciler kullanılarak hassas kontrol sağlanır. Bir PID kontrolörün transfer fonksiyonu (G_{cs}) aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$G_{cs} = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (3.31)$$

Dolayısıyla referans akımlar PI kontrol eklendiği takdirde referans akım ve gerilimler aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_{sq}^* = \left(K_{p1} + \frac{K_{I1}}{s} \right) (\omega_{ref} - \omega) \quad (3.32)$$

$$V_{sq}^* = \left(K_{p2} + \frac{K_{I2}}{s} \right) (I_{sq}^* - I_{sq}) \quad (3.33)$$

$$V_{sd}^* = \left(K_{p3} + \frac{K_{I3}}{s} \right) (I_{sd}^* - I_{sd}) \quad (3.34)$$

Burada K_{P_1} ve $K_{I_1}PI_1$ kontrolörünün oransal ve integral kazançlarını, K_{P_2} ve $K_{I_2}PI_2$ kontrolörünün oransal ve integral kazançlarını, K_{P_3} ve $K_{I_3}PI_3$ kontrolörünün oransal ve integral kazançlarını temsil etmektedir.

3.4.2 Dönüşüm İşlemleri

Clarke Dönüşümü: Üç fazlı akımlar (i_a, i_b, i_c) iki eksenli ($\alpha\beta$) akım bileşenlerine dönüştürülür.

Park Dönüşümü: $\alpha\beta$ eksenindeki akım bileşenleri, rotor manyetik alanına göre hizalanmış dq eksenine dönüştürülür.

Ters Park Dönüşümü: dq eksenindeki bileşenler, tekrar $\alpha\beta$ eksenine dönüştürülerek kontrol için gerekli referans sinyalleri oluşturulur.

3.4.3 PWM ve İnverter

Ters Park dönüşümü sonrası elde edilen voltaj referans sinyalleri ($V_{s\alpha}, V_{s\beta}$), pulse width modulation (PWM) yöntemi ile işlenerek inverterde uygulanır. İnverter, motor fazlarına uygulanacak gerilimleri üretir.

3.4.4 Motor ve Geri Besleme

Motor faz akımları ve rotor pozisyon bilgisi, Hall sensörlerinden alınır. Bu bilgiler, FOC algoritmasında referans sinyallerle karşılaştırma yapılarak geri besleme döngüsünü oluşturur. Rotor pozisyonu, hall sensörlerden alınan verilere dayanarak mikrodenetleyicinin capture birimi ile algılanarak hesaplanır ve kontrol döngüsüne entegre edilir.

4. SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

Bu tez çalışması kapsamında önerilen topolojinin teorik altyapılarını doğrulamak için simülasyonu yapılmıştır. Simülasyon, MATLAB/Simulink uygulamasında gerçekleştirilmiştir. Simülasyonda kullanılan semboller, değerler ve parametreler Tablo 4.1’de gösterilmiştir.

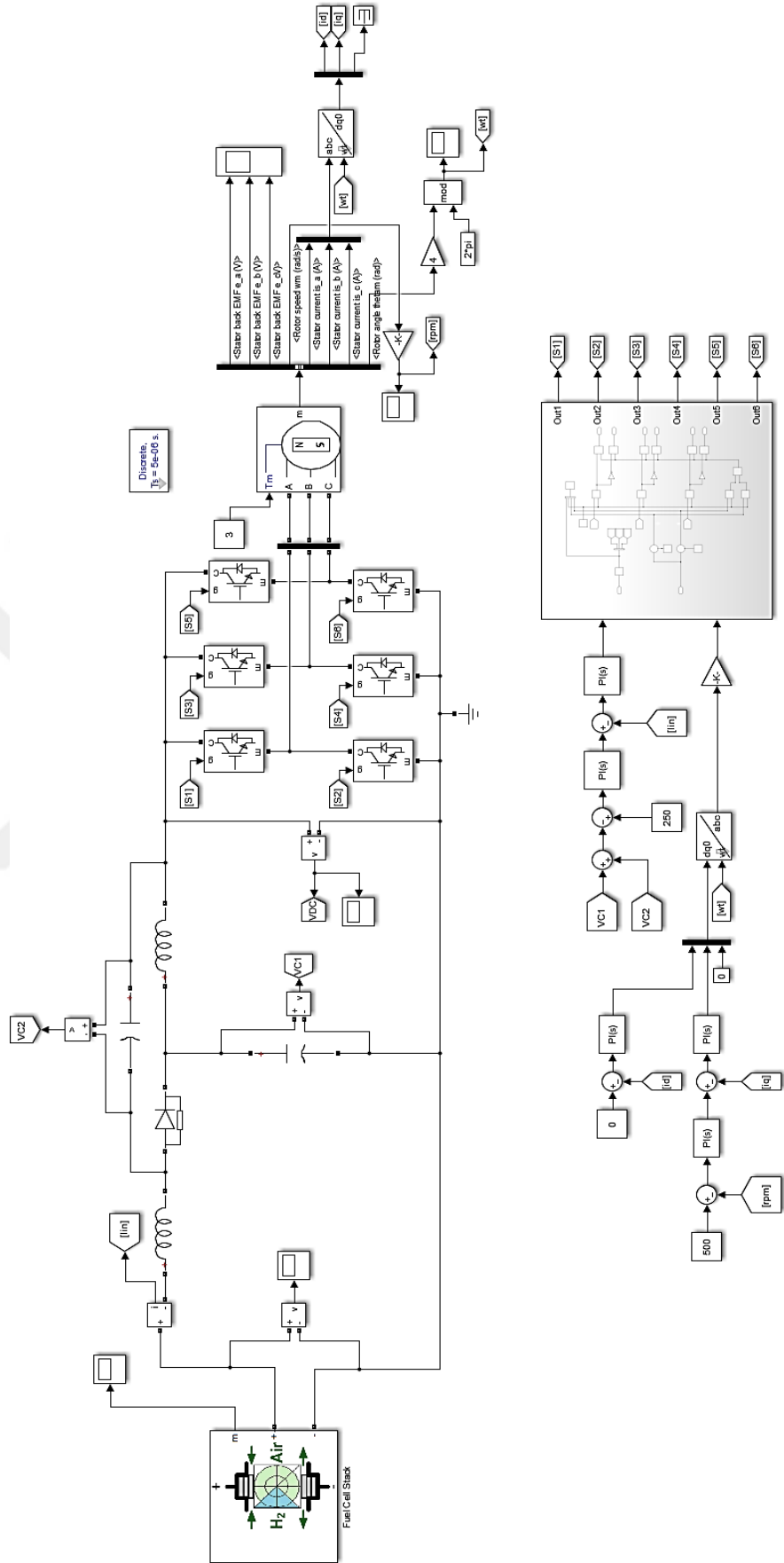
Tablo 4.1: Simülasyon çalışmasında kullanılan parametreler, semboller ve değerleri

Parametre	Sembol	Değer
Giriş gerilimi	V_{in}	20-35 [V _{dc}]
Çıkış yükü	R_L	500 [W]
Anahtarlama frekansı	f_s	10 [kHz]
DC bara gerilimi	V_{PN}	60 [V _{dc}]
qZSI Endüktansları	L_1, L_2	500 [μH]
qZSI Kondansatörleri	C_1, C_2	1000 [μF]

Ayrıca, simülasyonda kullanılan 3 adet PI denetleyici parametresi de Tablo 4.2’de gösterilmiştir. PI_1 kontrolörü referans I_{sq}^* sinyalinin, PI_2 ve PI_3 ise sırasıyla V_{sq}^* ve V_{sd}^* sinyallerinin üretiminden sorumludur. Son olarak, PI_4 ve PI_5 denetleyicileri qZSI’deki ST durumunun görev çevrim oranının 1-D olarak üretilmesinden sorumludur.

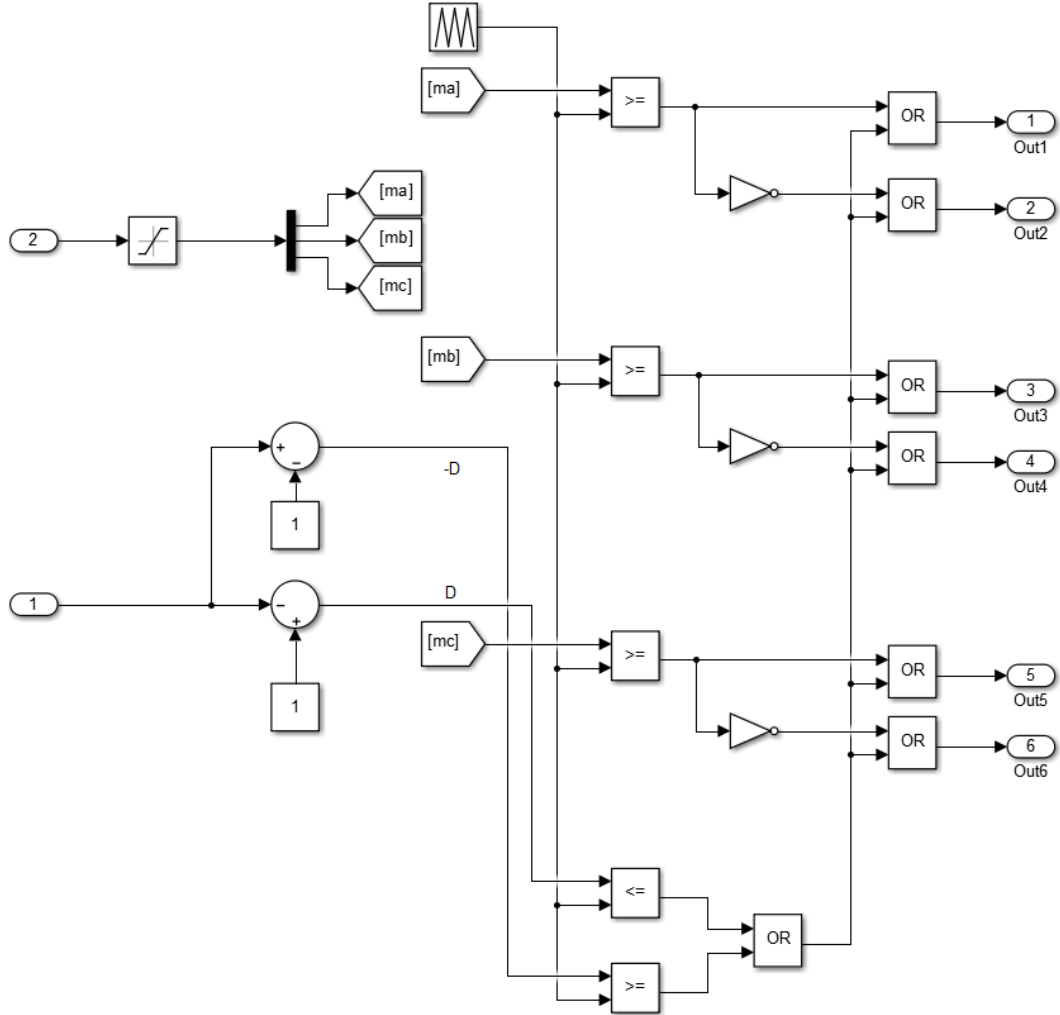
Tablo 4.2: qZSI topolojisinde kullanılan PI parametreleri

Parametre	Sembol	Değer
PI_1	K_{P_1}, K_{I_1}	1, 2
PI_2	K_{P_2}, K_{I_2}	5, 1
PI_3	K_{P_3}, K_{I_3}	5, 1
PI_4	K_{P_4}, K_{I_4}	0.06, 5
PI_5	K_{P_5}, K_{I_5}	1.5, 0.01



Şekil 4.1: Yakıt hücresi ve qZSI tabanlı bir BLDC motor sürücü modeli

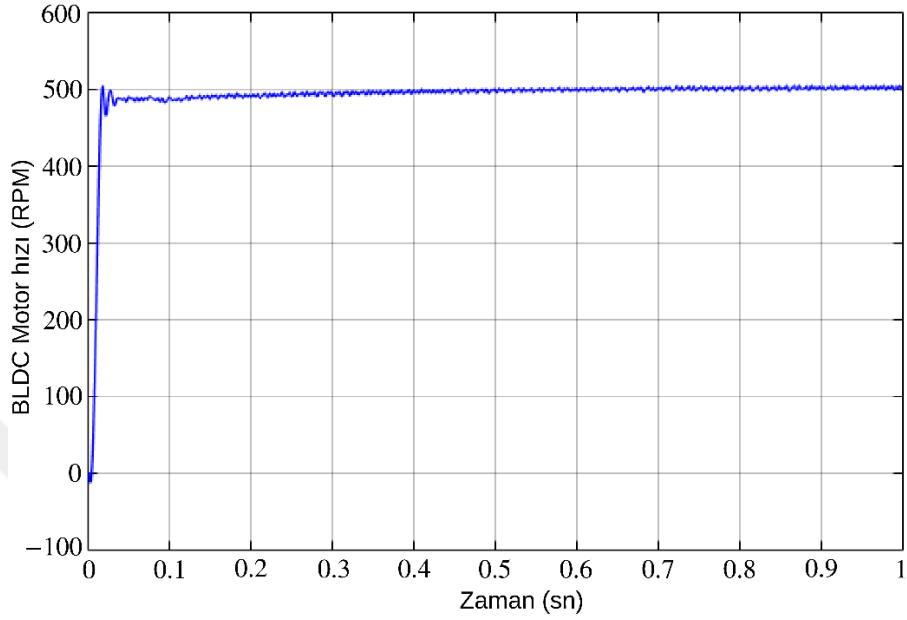
Hidrojen yakıt hücresi ve qZSI tabanlı bir BLDC motor sürücü modelinin MATLAB/Simulink ortamındaki görüntüsü şekil 4.1’de verilmiştir. Hidrojen yakıt pilinden alınan değişken gerilim qZSI aracılığı ile yükseltilerek sabit bir gerilime dönüştürülerek BLDC motor kontrol edilir.



Şekil 4.2: PWM kontrol bloğu

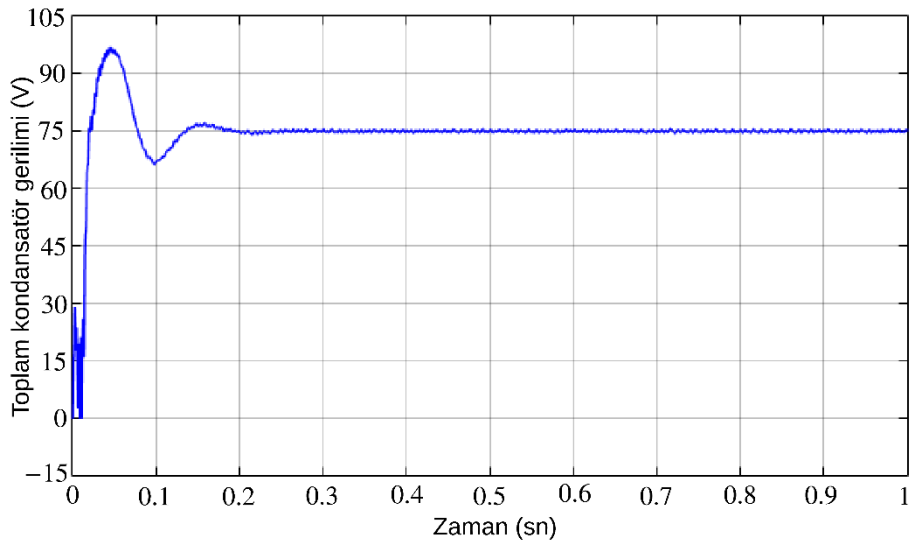
Uygulanan PWM anahtarlama tekniği bloğunun MATLAB/Simulink ortamındaki görüntüsü şekil 4.2’de verilmektedir. Bölüm 3.4’te verilen kontrol şemasına göre üretilen modülasyon sinyalleri PWM bloğuna girer ve burada inverter için PWM sinyalleri üretilir. Bu blokta ST süreleri DC hat gerilimi kontrol bloğundan gelen sinyal ile hesaplanır. DC hat gerilimi kontrol bloğunun genel yapısı şekil 4.3’te verilmektedir. Bu kontrol bloğunda qZSI’ye ait her iki kondansatör ve giriş akımı değerleri ölçülerek PI kontrolörler ile 1-D görev çevrim oranı elde edilir.

PWM kontrol bloğu normal anahtarlama koşullarında anahtarlama işlemini eşlenik olarak yerine getirirken ($S_1, \bar{S}_1, S_2, \bar{S}_2, S_3, \bar{S}_3$); ST durumunda ise aynı kola bağlı anahtarlama elemanlarını kısa devre ederek qZS yapısını çalıştırır ve gerilimi yükseltme işlemini yapar.



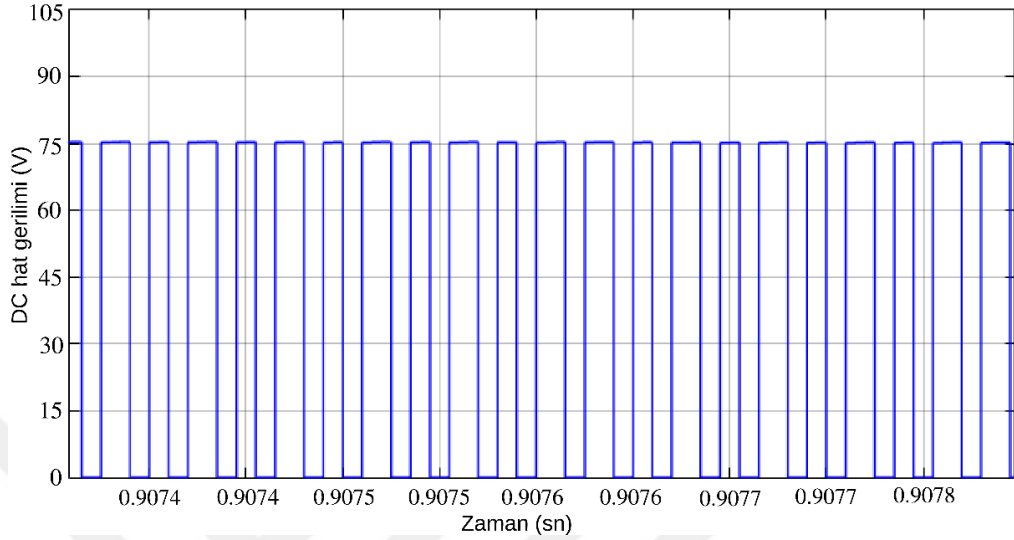
Şekil 4.5: BLDC motor hız (rpm) grafiği

Şekil 4.5'te BLDC motorun simülasyon ortamında hız grafiği verilmektedir. Grafiğe göre BLDC motor referans olarak verilen 500rpm değerini 300ms sürede yakalamış ve daha sonra sürekli olarak referansı takip etmiştir.



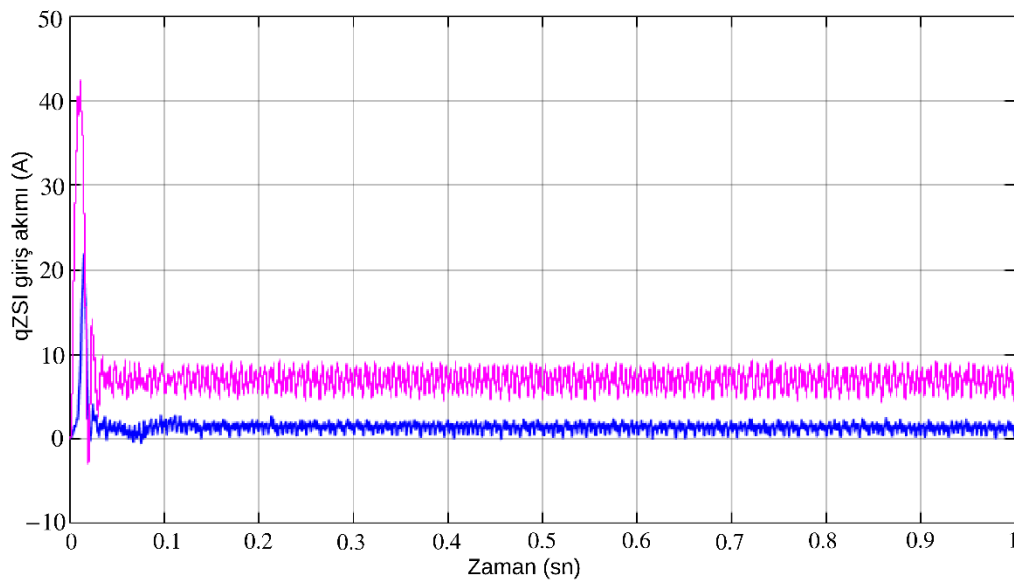
Şekil 4.6: qZSI'ye ait C_1 ve C_2 kondansatör gerilimleri ve bu gerilimlerin toplamı

qZSI'ye ait C_1 ve C_2 kondansatör gerilimlerin toplamı şekil 4.6'da gösterilmektedir. Kondansatörlerin toplam gerilimi ($V_{C_1} + V_{C_2}$) V_{PN} geriliminin maksimum gerilimini ifade etmektedir.



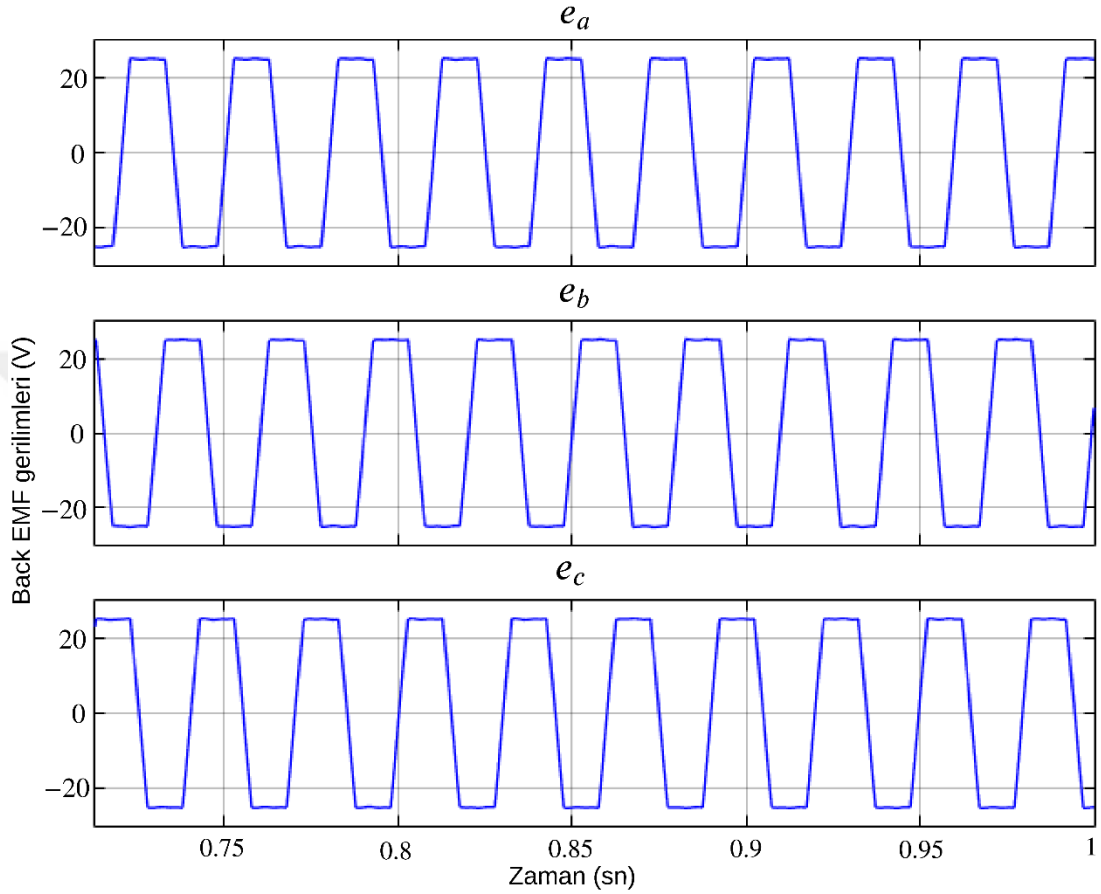
Şekil 4.7: DC bara (V_{PN}) gerilimi

Şekil 4.7'de DC bara gerilimi (V_{PN}) görüntüsü verilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kondansatörlerin toplam gerilimi ($V_{C_1} + V_{C_2}$) V_{PN} geriliminin ulaşabileceği maksimum gerilimi ($\approx 60V$) ifade eder. Ayrıca, şekilden topolojinin ST zaman aralığında çıkış geriliminin sıfır olduğu ve bu aralıkta kondansatörleri şarj ettiği anlaşılmaktadır.



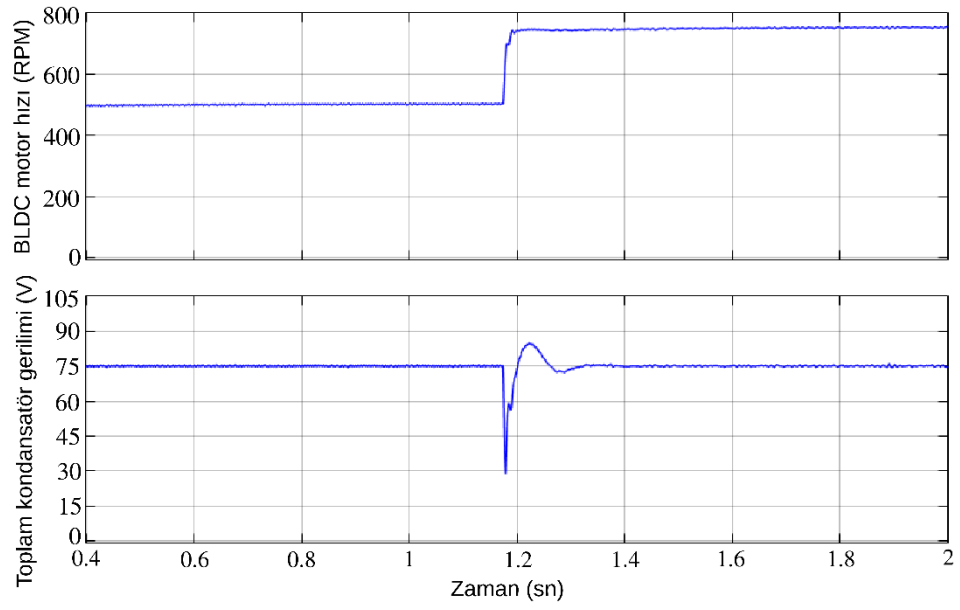
Şekil 4.8: BLDC motorun I_d ve I_q akım bileşenleri

Şekil 4.8’de BLDC motorun I_d ve I_q akım bileşenleri verilmektedir. BLDC motorun I_d akım bileşeni şekil 4.4’te referans olarak 0 değeri verildiği için sıfır olduğu görülmektedir. Bu da kontrol sisteminin verilen referans akım değerlerine ulaşabildiğini kanıtlamaktadır.

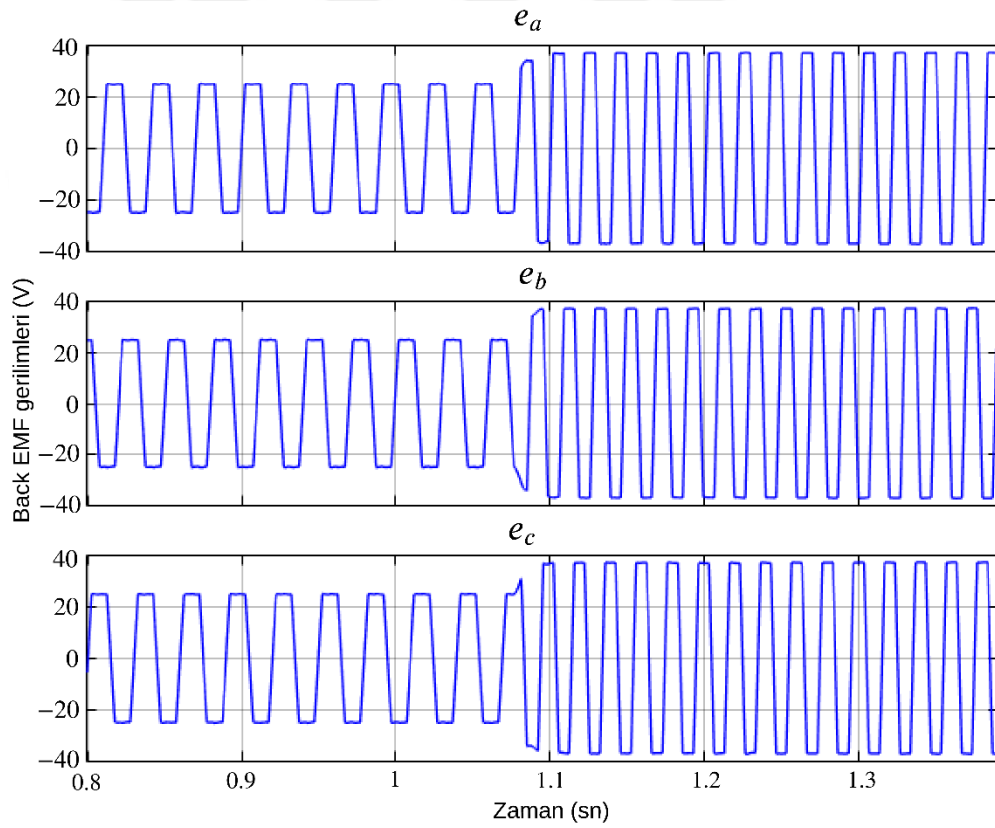


Şekil 4.9: BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c)

Şekil 4.9’da BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c) gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği üzere kontrol sistemi olarak FOC tercih edilmesine rağmen BLDC motorun back EMF grafiği trapezoidal biçimde olmaktadır. Bu da BLDC motorun sargı yapısından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.10 ve şekil 4.11’de referans rotor hızının değiştirilmesi durumunda sistemin nasıl tepki verdiği incelenmektedir. Şekil 4.10’da referans hızın 500RPM’den 750RPM’e çıkarılması durumunda BLDC motor hızı ve qZSI’nin toplam kondansatör gerilimi gösterilmektedir. Şekil 4.11’de referans hızın 500RPM’den 750RPM’e çıkarılması durumunda BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c) verilmektedir. Referans hız değişimine rağmen qZSI toplam kondansatör gerilimi yaklaşık 300ms sonra referansa oturmaktadır.



Şekil 4.10: Referans hızın 500RPM'den 750RPM'e çıkarılması durumunda BLDC motor hızı ve qZSI'nin toplam kondansatör gerilimi



Şekil 4.11: Referans hızın 500RPM'den 750RPM'e çıkarılması durumunda BLDC motorun back EMF değerleri (e_a , e_b , e_c)

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

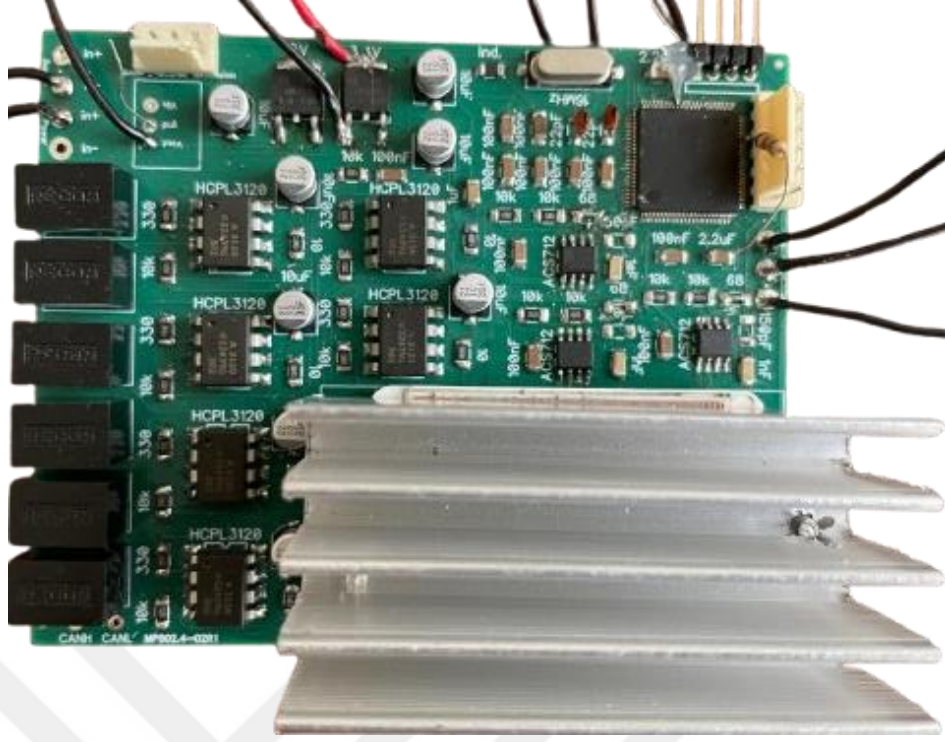
Bu tez çalışması kapsamında önerilen topolojinin teorik altyapılarını doğrulamak için deneysel çalışmalar yapılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan değerler ve parametreler Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

Tablo 5. 1: Deneysel çalışmada malzemeler ve türleri

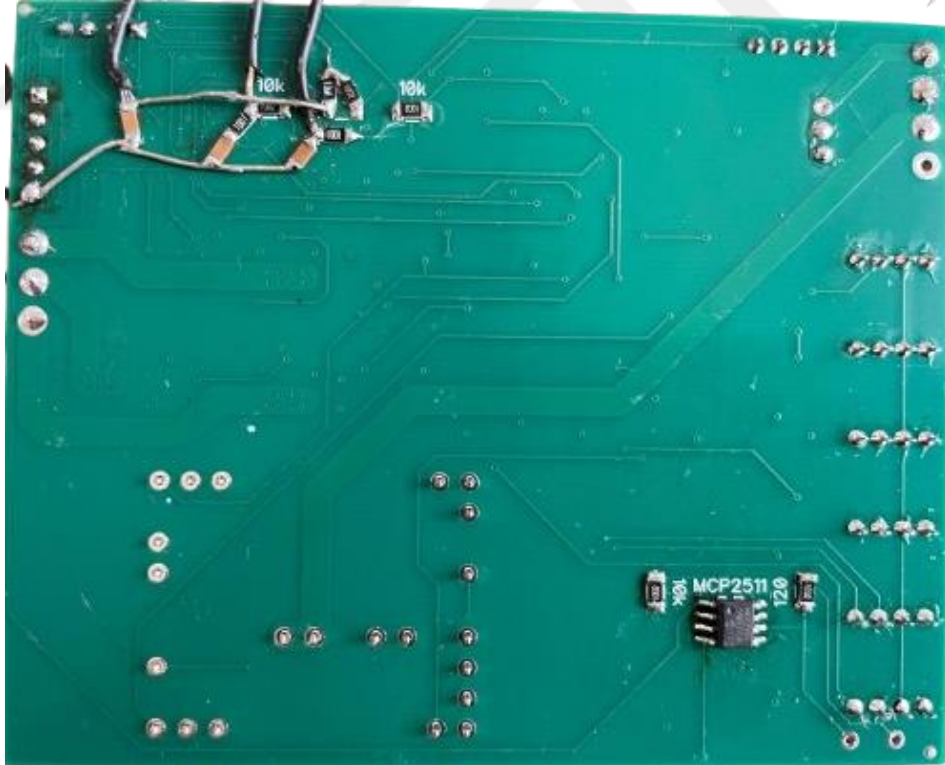
Malzemeler	Türleri
IGBT modül sürücü	HCPL3120
Mikrodenetleyici	STM32F427VGT6
İzoleli gerilim kaynakları	Rekom RI-2415S/P
Akım sensörü	ACS712
3 faz tam köprü IGBT modül	FS30R06W1E3BOMA1
3.3V, 5V gerilim regülatörleri	LM1117-5V ve LM1117-3.3V
BLDC motor gücü	48V, 500W

5.1 PCB Çizimi, 3D ve gerçek PCB görüntüleri

BLDC motor sürücüsü ve qZSI kartlarının tüm bileşenleri PCB kart çizilerek bir araya getirilmiştir. PCB çizimi için Diptrace programı kullanılmıştır. Bu çizim programı Türkçe dil desteği ve otomatik çok katmanlı PCB çizme özelliği sayesinde elektronik devre tasarımı hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında PCB’ler 4 katmanlı çizilmiş olup üst ve alt katmanlar sinyal katmanı olarak kullanılmaktadır. Ara katmanlardan ise birinci ara katman GND ve ikinci ara katman ise Vcc yani besleme katmanı olarak kullanılmıştır. Her bir katman bakır kalınlığı 1 oz seçilmiş olup tüm PCB’lerin ölçüleri 100mm x 100mm olarak çizilmiştir. Çizimi yapılan BLDC motor sürücü PCB kartının ön ve arka yüz 3D görüntüsü şekil 5.1’de verilmektedir. Gerçekleştirilmiş PCB’nin ön ve arka yüz görüntüleri ise şekil 5.2 (a) ve (b)’de sırası ile verilmiştir. Ayrıca, çizimi yapılan qZSI PCB kartının ön ve arka yüz 3D görüntüsü şekil 5.3’te verilmektedir. Gerçekleştirilmiş PCB’nin ön ve arka yüz görüntüleri ise şekil 5.4 (a) ve (b)’de sırası ile verilmiştir.

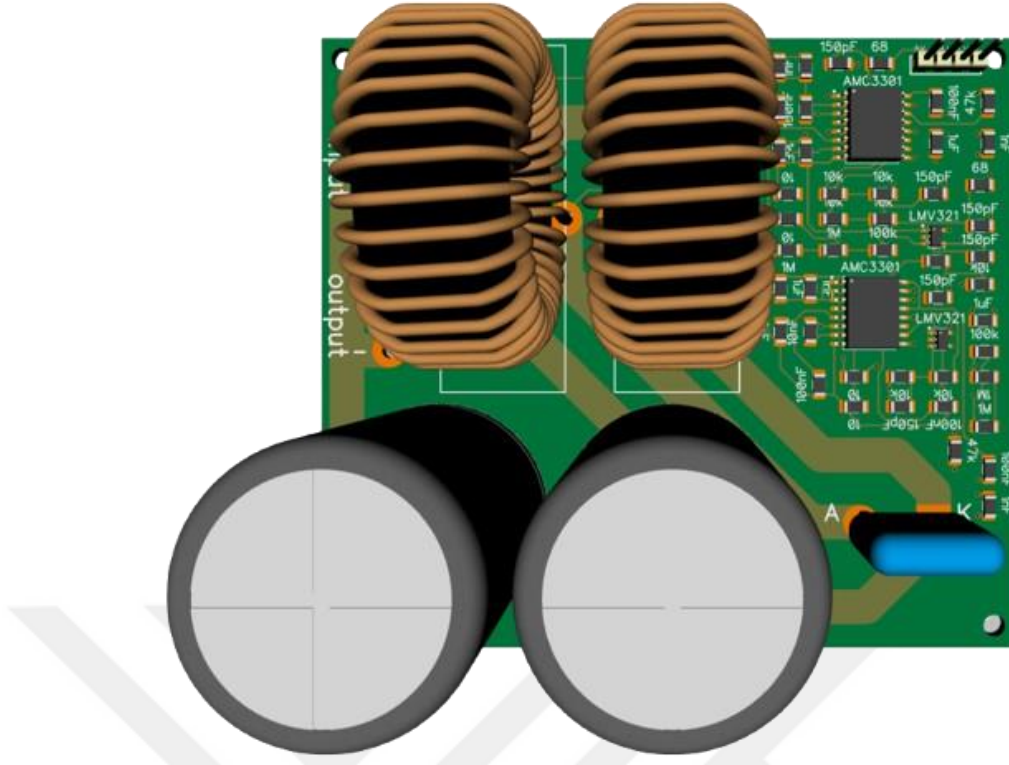


(a)

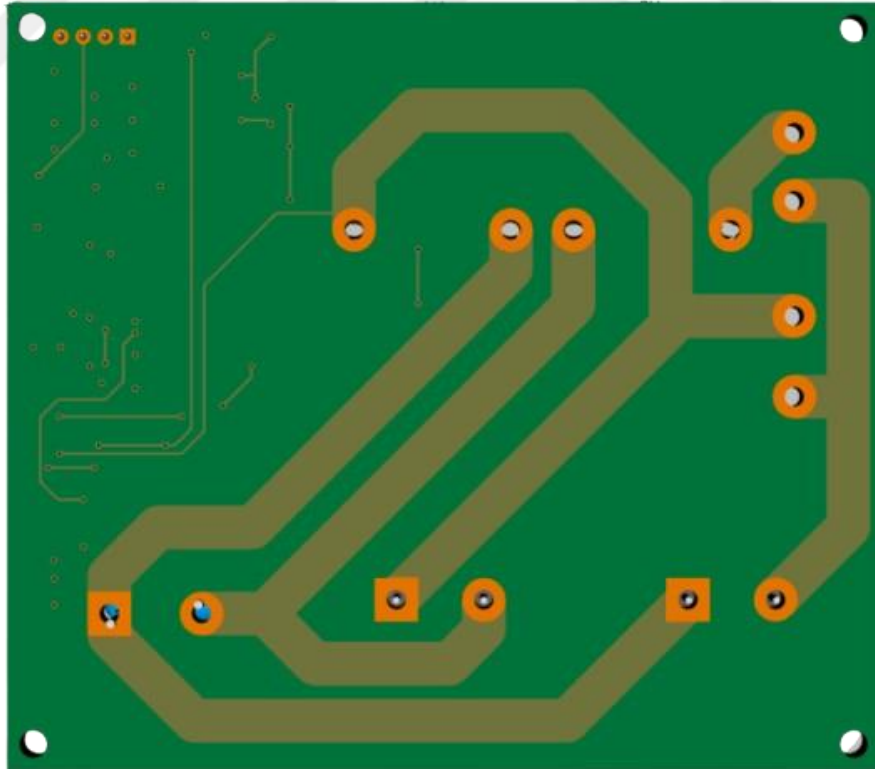


(b)

Şekil 5.2: BLDC motor sürücüsü PCB görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü

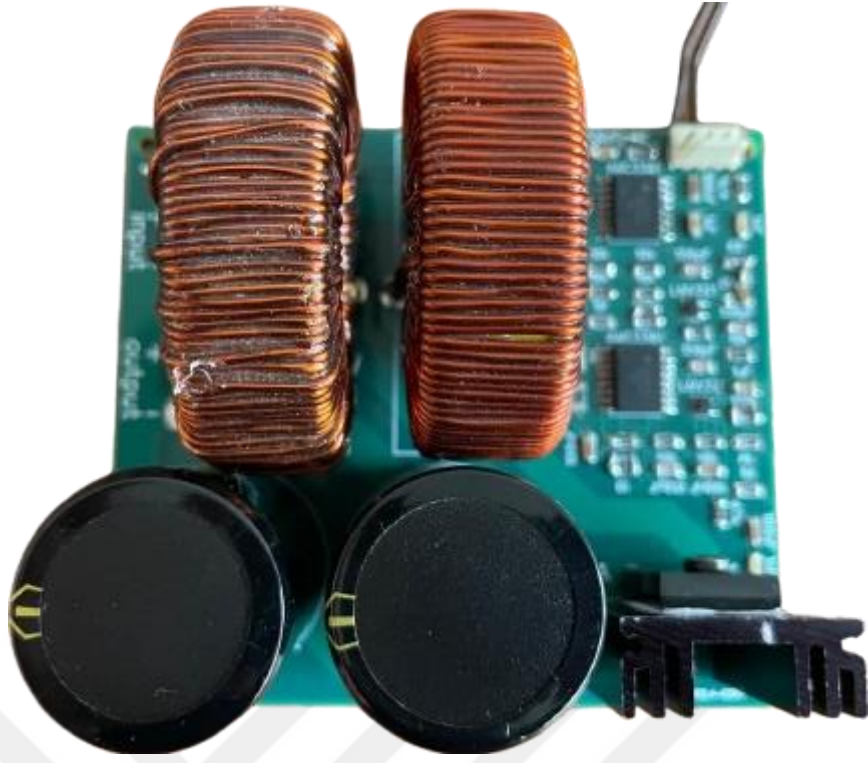


(a)

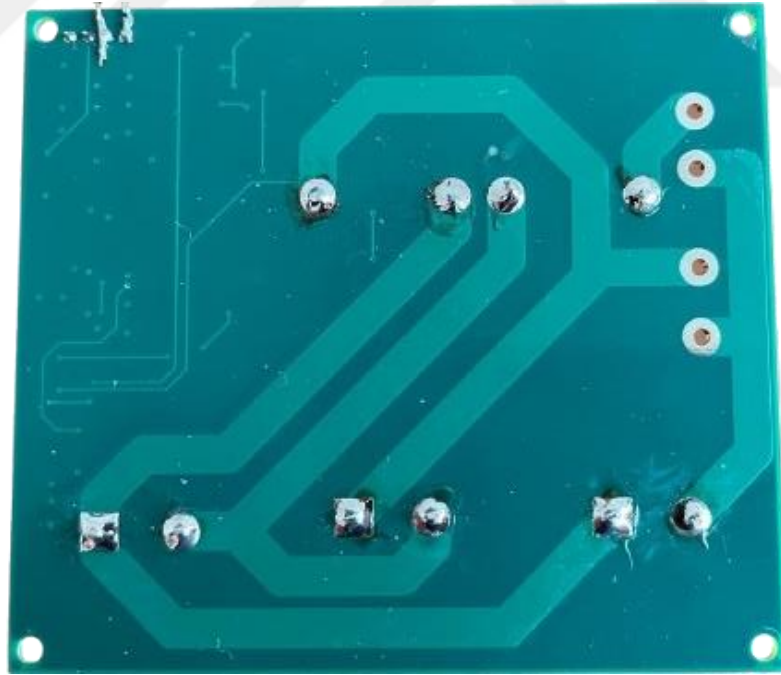


(b)

Şekil 5.3: qZSI'nin 3D görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü



(a)

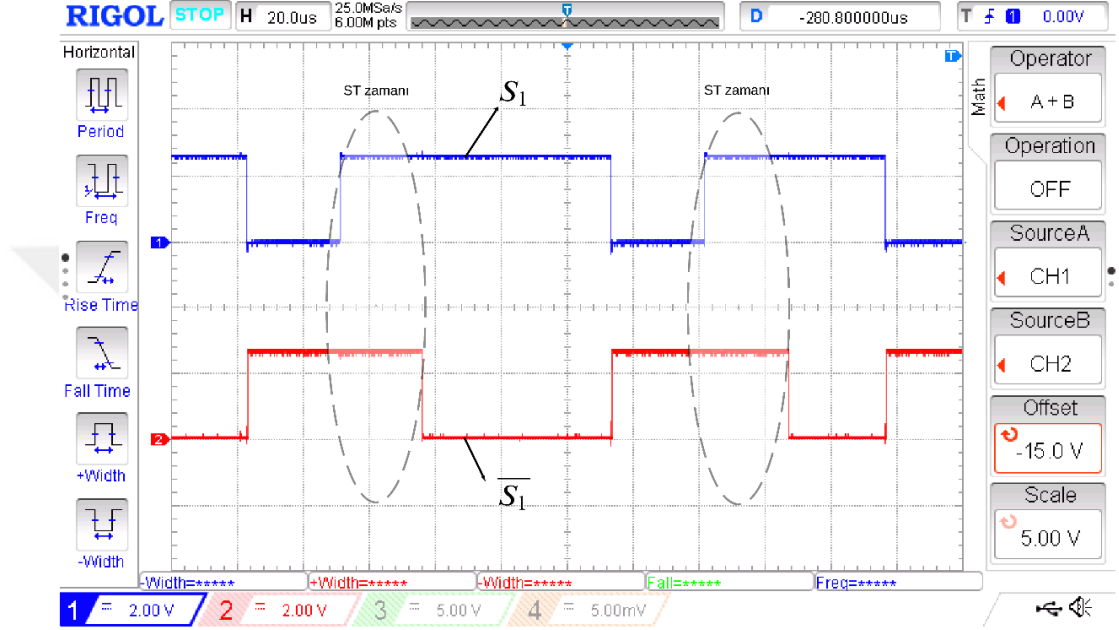


(b)

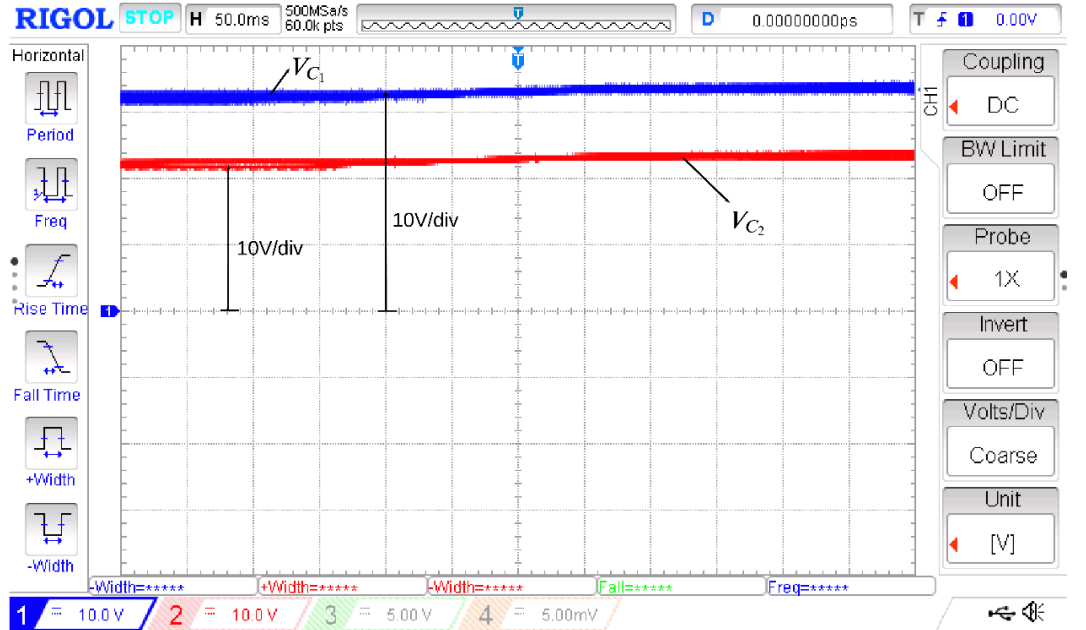
Şekil 5.4: qZSI'nin PCB görüntüsü (a) ön yüzü (b) arka yüzü

5.2 Deneysel Sonuçlar

Şekil 5.5'te qZSI topolojisinin ST anahtarlama durumu gösterilmiştir. Giriş geriliminin yükseltilebilmesi için empedans ağında kondansatörlere ST anahtarlama durumlarında gerilim yüklemesi yapılmaktadır. Bu durumun oluşabilmesi için seri bağlı anahtarların ikisi de Şekil 5.5'te görüldüğü gibi on durumuna geçmelidir.

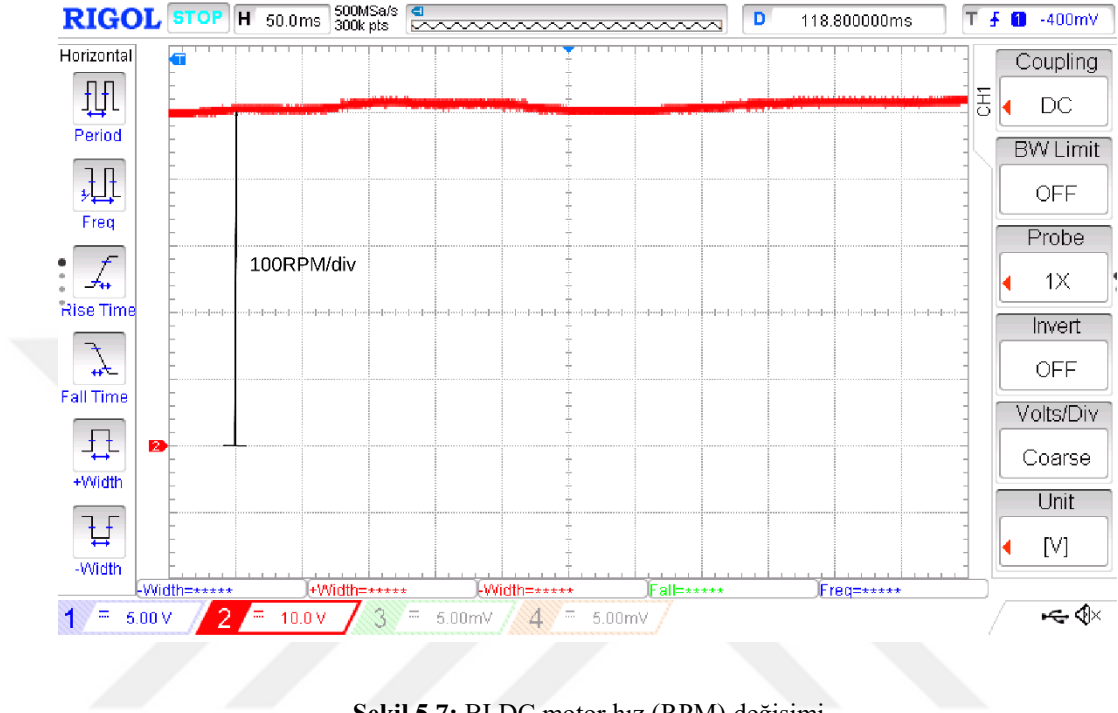


Şekil 5.5: qZSI'nin ST anahtarlama durumu



Şekil 5.6: qZSI'nin V_{C1} ve V_{C2} kondansatör gerilimleri

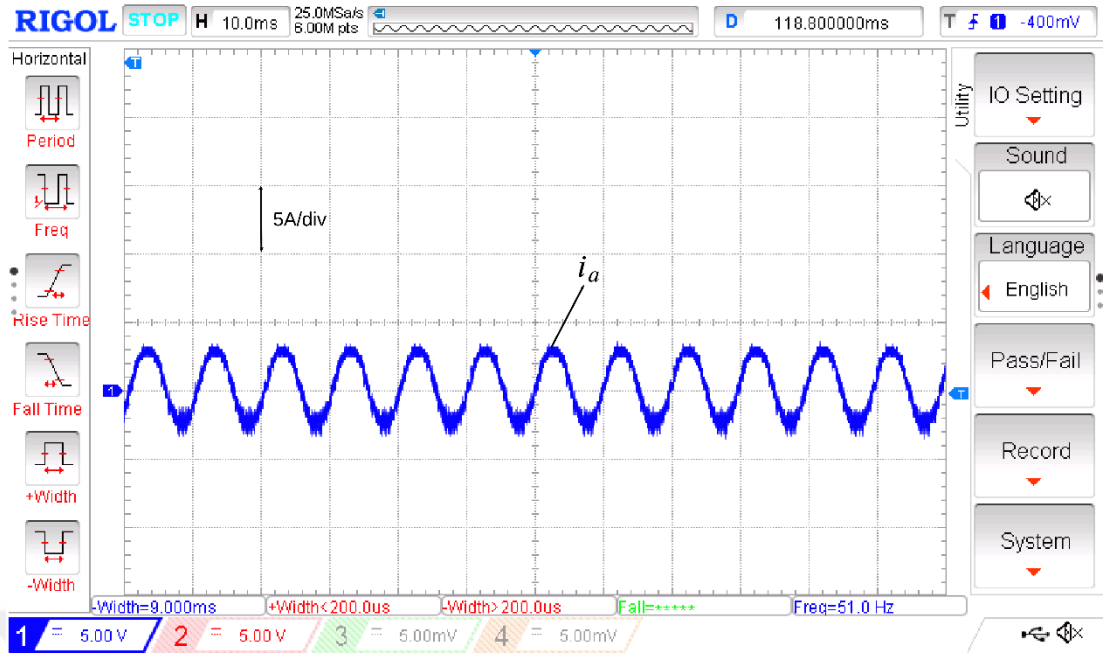
Şekil 5.6’da qZSI’ye ait kondansatörlerin (V_{C_1} , V_{C_2}) gerilimleri verilmiştir. V_{C_1} geriliminin yaklaşık olarak 35V ve V_{C_2} geriliminin ise yaklaşık olarak 25V civarında olduğu gözlemlenmektedir. Bu iki kondansatör geriliminin toplamı V_{PN} geriliminin yaklaşık 60V olmasını sağlamaktadır.



Şekil 5.7: BLDC motor hız (RPM) değişimi

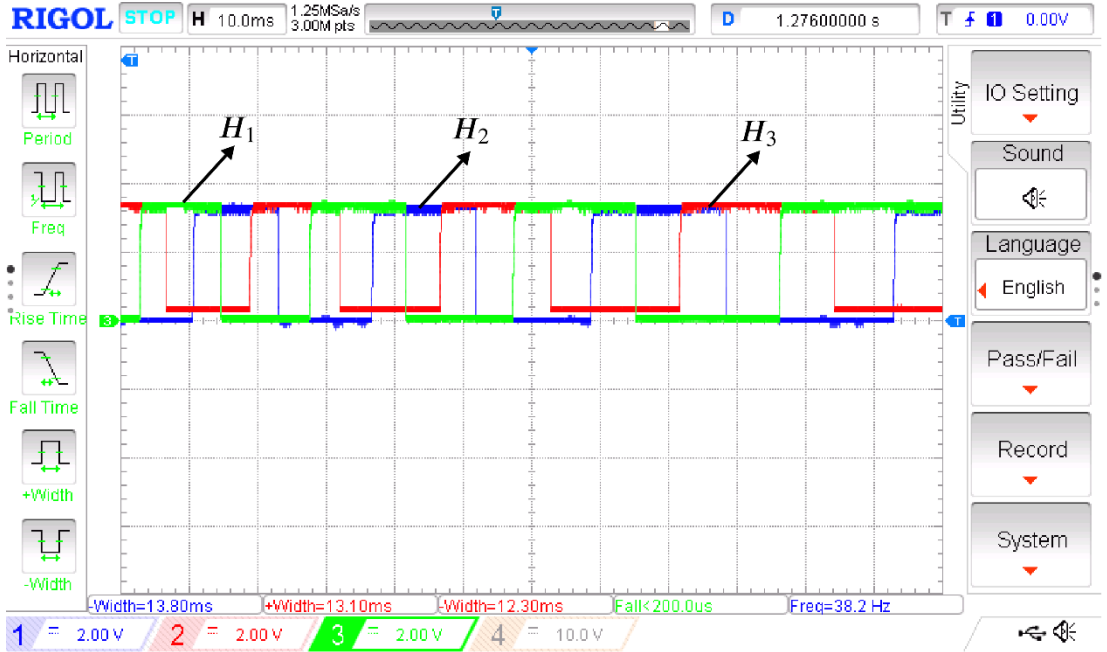
Şekil 5.7’de BLDC motorun hız (RPM) değişimi gösterilmektedir. Hız verisi mikrodnetleyicinin DAC birimi ile osiloskopa aktarılmıştır. BLDC motora referans hız olarak 500RPM girilmiş olup çıkışta yaklaşık 500RPM değeri alındığı görülmektedir. BLDC motorda hız ölçümü hall sensörler aracılığı ile gerçekleştirilmektedir. Hall sensörlerden gelen veri mikrodnetleyicideki dış kesme ile algılanır ve sayaç başlatılır. Daha sonra hall sensörlerden tekrar bilgi geldiğinde sayaç durdurularak aradaki süre ve teker çapına bağlı olarak hız hesaplanır.

Şekil 5.8’de BLDC motorun fazlarına ait akımlardan i_a akımı gösterilmektedir. Şekilden de görüleceği gibi FOC neticesinde motor akımı sinüs formunda elde edilebilmektedir. 300RPM hız değerinde elde edilen akımın RMS değeri yaklaşık olarak 2.5A olarak ölçülmüştür.



Şekil 5.8: BLDC motor faz akımı (i_a)

Şekil 5.9’da BLDC motorun hall sensör çıkışlarının dalga şekilleri verilmektedir. Hall sensörlerden gelen veriler mikrodenetleyicide işlenerek hız bilgisi elde edilmektedir.



Şekil 5.9: BLDC motor hall sensör çıkışları

6. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tez çalışmasında, BLDC motorların kontrolünde field oriented control (FOC) yönteminin uygulanmasını ele almakta ve quasi-z kaynak inverter (qZSI) devresi ile entegrasyonunu incelemiştir. Motor faz akımlarının dq eksenine dönüştürülmesi ve rotor manyetik alanı referans alınarak kontrol edilmesi motorun daha verimli çalışmasına katkı sağlamıştır. Ayrıca, qZSI sayesinde sistemin DC bara geriliminin sabitlenebildiği gözlemlenmiştir. Geleneksel z-kaynak düzeneklerine kıyasla qZSI topolojisi, düşük gerilim stresine sahip olup, daha kompakt ve verimli bir yapı sunmaktadır.

Benzetim ve deneysel çalışmalar, sistemin stabilitesini ve dinamik performansını doğrulamış, FOC yöntemi ile BLDC motorların daha verimli kontrol edilebileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, FOC algoritmasının mikrodenetleyicilerde gerçekleşmesi sırasında yüksek hesaplama gücü gerektirdiği ve sistem maliyetlerini arttırabileceği de unutulmamalıdır. Ancak, gelişen mikrodenetleyici teknolojileri ve optimize edilmiş kontrol algoritmaları ile bu durumun zamanla aşılabileceği öngörülmektedir.

Sonuç olarak, bu çalışma FOC tabanlı BLDC motor kontrolü ile qZSI düzeneklerinin entegrasyonunun verimli bir çözüm sunduğunu ortaya koymuştur. Elde edilen bulgular, gelecekteki çalışmalar için bir temel oluşturmakta olup, geliştirilecek yeni kontrol stratejileri ve donanım özellikleriyle sistem performansının daha da arttırılabileceği düşünülmektedir.

7. KAYNAKLAR

Akkaya, R., and Endiz, M. S., “Yarı Empedans Kaynaklı İnverter Devresinin Performans Analizi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, special issue, 13-16, (2020).

Anderson J. and Peng, F. Z., “A Class of Quasi-Z-Source Inverters”, *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Edmonton, AB, Canada, 2008.

Antony, A. S. M., Ramya, D., and Sangeetha, J., “Speed Control of Brushless DC Motor Using Current Fed Quasi Z-Source Inverter with Regeneration Capability”, *Res. J. App. Sci. Eng. Technol.*, 10, 6, 723-729, (2015).

Bagheri, F., Komurcugil, H., Kukrer, O., Guler, N., and Bayhan, S., “Multi-Input Multi-Output-Based Sliding-Mode Controller for Single-Phase Quasi-Z-Source Inverters”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 67, 8, 6439-6449, (2019).

Bayhan, S., Abu-Rub, H., and Balog, R. S., “Model Predictive Control of Quasi-Z-Source Four-Leg Inverter”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 63, 7, 4506-4516, (2016).

Cao, Y., Xiao, S., and Lin, Z., “A flying restart strategy for position sensorless PMSM driven by quasi-Z-source inverter”, *Energies*, 15, 9, 3469, (2022).

Chandran, P., Chenthilkumar, A., Uthayakumar G., and Babu, H., “Design and implementation of modified SEPIC, ZETA, Cuk, Quasi Z-Source converter for BLDC drive system – A comparative analysis,” *3rd International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies (ICAECT)*, 1-8, (2023).

Çavuşoğlu, A., “Yakıt Pilleri ve Kullanım Alanları”, Yüksek Lisans Tezi, *Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bursa, (2006).

Demir., M. F. and Kaymaz, H., “Elektrikli Otomobiller için Çekiş Motor Tip Seçimi”, *Int. Per. of Recent Tech. in App. Eng.*, 2, 1, 38-39, (2020).

Derbane, A., Tabbache, B., and Ahriche, A., “Direct torque control of an induction motor fed by a Quasi Z-source inverter”, *SN Appl. Sci.*, 2, 434, (2020).

Ellabban, O., Abu-Rub, H., and Bayhan, S., “Z-source matrix converter: An overview”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 31, 11, 7436-7450, (2015).

Gajanayake, C. J., Luo, F. L., Gooi, H. B., So, P. L., and Siow, L. K., “Extended-Boost Z-Source Inverters”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 25, 10, 2642-2652, (2010).

Guo, M., Liu, Y., Ge, B., Liu, S., Li, X., Ferreira, F. J. T. E., and Almeida, A. T., “Analysis of the efficiency of the quasi-Z-source inverter with a flying capacitor”, *IET Power Electronics*, 14, 5, 797-808, (2020).

“Hidrojen Yakıt Hücresi ve Çalışma Prensibi [online]”, (15 August 2024), <https://www.tesisat.org/hidrojen-yakit-hucreleri-ve-calisma-prensibi.html>, (2018).

History.com Editors, “Model T [online]”, (15 August 2024), <https://www.history.com/topics/inventions/model-t>, (2010).

Holland, K., Shen, M., and Peng, F. Z., “Z-source inverter control for traction drive of fuel cell- battery hybrid vehicles”, in *Proc. 40th IAS Annu. Meeting, Conf. Rec. 2005 Industry Appl. Conf.*, Hong Kong, China, (2005).

Ghahderijani, M. M. and Dehkordi, B. M., “Comprehensive Robust and Fast Control of Z -Source-Inverter-Based Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 68, 12, 11783-11793, (2021).

Huang, Y., Shen, M., Peng, F. Z., ve Wang, J., "Z-source inverter for residential photovoltaic systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, 21, 6, 1776-1782, (2006).

Karagülle, H., and Yavuz, Ş., “Doğru Akım Motorları [online]”, (15 August 2024), <https://makina.deu.edu.tr/wp-content/uploads/10DCMotor>, (2021).

Krishna, P. S., Vishnu, S., Dash, A., Koreboina, V. B., and Jayalakshmi, N. S., “Investigation of bidirectional quasi Z-Source inverter for BLDC drive with modified shoot-through hysteresis current control in low power EV applications”, *Energy Storage*, 10, 2, 1-25, (2023).

Li, Y., Anderson, J., Peng, F. Z., and Liu, D., “Quasi-Z-Source Inverter for Photovoltaic Power Generation Systems”, *24th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo.*, (2009).

Li, Y., Jiang, S., Cintron-Rivera, J. G., ve Peng, F. Z., “Modeling and Control of Quasi-Z-Source Inverter for Distributed Generation Applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 60, 4, 1532-1541, (2013).

Mahalingam, K. Ve Ramji, N. K. C., “A comparative analysis of torque ripple reduction techniques for sensor BLDC drive”, *International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS)*, 13 (1), 122-131, 2022.

Mahmoudi, H., Aleenejad, M., and Ahmadi, R., "Modulated Model Predictive Control for a Z-Source-Based Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 65, 10, 8307-8319, (2018).

Mosa, M., Balog, R. S., and Abu-Rub, H., “High-Performance Predictive Control of Quasi-Impedance Source Inverter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, 32, 4, 3251-3262, (2017).

Nyugen, M. K. Ve Choi, Y. O., “Maximum Boost Control Method for Single-Phase Quasi-Switched-Boost and Quasi-Z-Source Inverters”, *Energies*, 10, 4, 1-14, 2017.

“One of the First Rechargeable Batteries, about 1860 [online]”, (24 August 2024), <https://collection.sciencemuseumgroup.org.uk/objects/co36401/one-of-the-first-rechargeable-batteries-about-1860>, (2021).

Ortatepe, Z., and Özdemir, S., “A Control Scheme for a Quasi-Z Source Three-Phase Inverter”, *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation*, 10 2, 206-221, (2023).

Özdemir, Z. Ö. Ve Mutlubaş, H., “Enerji Taşıyıcısı Olarak Hidrojen ve Hidrojen Üretim Yöntemleri”, *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences*, 2, 1, 16-34, (2019).

Peng, F. Z., “Z-source inverter”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 39, 2, 504-510, (2003).

Qian, W., Peng, F. Z., and Cha, H., “Trans-Z-source inverters”, *Int. Power Electron. Conf. - ECCE Asia*, Sapporo, Japan, (2010).

Radu, V., “The American-Built CitiCar Was an EV That Sold by the Thousands in the 1970s [online]”, (05 September 2021), <https://www.autoevolution.com/news/the-american-built-citicar-was-an-ev-that-sold-by-the-thousands-in-the-1970s-169045.html>, (2021).

Richard, “Ányos Jedlik Creates First Automotive Object [online]”, (12 August 2024) <https://www.upsbatterycenter.com/blog/anyos-jedlik-creates-first-automotive-vehicle/>, (2022).

Shen, M., Wang, J., Joseph, A., Peng, F. Z., Tolbert, L. M., and Adams, D. J., "Maximum constant boost control of the Z-source inverter," *39th IEEE Industry Applications Conference*, Seattle, USA, (2004).

Shinde, U., Kottagattu, S., Kadwane, S., and Gawande, S., “Grid-connected quasi-z-source inverter with battery,” *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, 26, 4, 1847-1859, (2018).

Siwakoti, Y. P., Peng, F. Z., Blaabjerg, F., Loh, P. C., ve Town, G. E., “Impedance-Source Networks for Electric Power Conversion Part I: A Topological Review”, *IEEE Trans. Power Electron.*, 30 (2), 699-716, (2015).

Subhani, N. Ve Kannan, R. Ve Mahmud, A. Ve Blaabjerg, F., “Z-source inverter topologies with switched Z-impedance networks: A review”, *IET Power Electronics*, 14, 2, 727-750, (2021).

Sun, D., Ge, B., Bi, D., Ve Peng, F. Z., “Analysis ve control of quasi-Z source inverter with battery for grid-connected PV system” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 46, 234-240, (2013).

Sun, D., Ge, B., Yan, X., ve Bi, D., Zhang, H., Liu, Y., Abu-Rub, H., Ben-Brahim, L., and Peng, D. Z., “Modeling, Impedance Design, and Efficiency Analysis of Quasi-Z Source Module in Cascaded Multilevel Photovoltaic Power System”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 61, 11, 6108-6117, (2014).

Tan, W., “Thomas Davenport and the First Electric Car [online]”, (23 July 2024), <https://www.carmudi.com.ph/journal/thomas-davenport-and-the-first-electric-car/>, (2019).

“What you Want To Know About Electric Motor Basics [online]”, (25 June 2024), <https://greensky-power.com/electric-motor-basics/>, (2022).

Wrighton, N., “Wellington Celebrate Thomas Parker, inventor of the electric car [online]”, (2024), <https://walkersarewelcome.org.uk/2022/09/thomas-parker/>, (2022).

Xia, K., Shen, L., Dong, B., Zeng, Y., and Ge, S. S., “Research of four-switch three-phase BLDC motor control scheme based on quasi Z-source converter”, *18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Pattaya, Thailand, (2015).

“Yakıt Hücresi [online]”, (18 June 2024), https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell, (2021)

Zhou, Y., Li H., and Li, H., “A Single-Phase PV Quasi-Z-Source Inverter With Reduced Capacitance Using Modified Modulation and Double-Frequency Ripple Suppression Control”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31, 3, 2166-2173, 2016,